

大学手册系列

# 大学物理手册

主编 胡盘新

上海交通大学出版社

00011575

04-62

16

# 大学物理手册

主 编 胡盘新  
参编人员 张馥宝  
汤毓骏  
宋开欣



上海交通大学出版社



C0487573

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理手册/胡盘新主编. - 上海:  
上海交通大学出版社, 1999

(大学手册系列)

ISBN 7-313-02188-7

I. 大… II. 胡… III. 物理学 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)  
第 23478 号

## 大学物理手册

主编 胡盘新

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本: 820×680(mm) 1/32 印张: 19.75 字数: 388 千字

版次: 1999 年 7 月 第 1 版

印次: 1999 年 7 月 第 1 次

ISBN 7-313-02188-7/O·148

**定价: 24.00 元**

---

本书任何部分文字及图片, 如未获得本社书面同意,  
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。  
(本书如有缺页、破损或装订错误, 请寄回本社更换。)

# 前 言

物理学是重要的基础学科。随着科学技术的发展,物理学日益广泛地深入到多种技术部门和学科领域,显示出它的巨大作用。在实际生活、学习工作中,许多读者经常需要查阅某些物理概念的确切含义、物理规律的正确表述,以及一些常用物理量的数据和单位等。为了满足广大读者的需要,我们编写了这本《大学物理手册》。

本手册的出版旨在为具有大学文化水平的读者提供一本工具书。因此,以当代大学物理课程为主要内容,按照物理学的通常分类,分为力学、振动和波动、热学、电磁学、光学和近代物理等七篇 23 章。除以上传统的基本内容外,还增加了现代物理学的知识、热点和前沿,如介绍了黑洞、熵、信息熵、磁单极子、傅里叶光学、非线性光学、扫描隧道显微镜、超导电性等等。

本手册在介绍基本概念和基本规律后尽量联系实际,即结合其在工程技术上的实际应用。在附录中,还列举了 100 余张常用数据表,便于读者查阅有关物理数据等资料,本手册在第一

篇中还列出了常用物理量的符号和单位(中华人民共和国国家标准)以及各种常用的单位制。

本手册编写时力求做到内容全面、概念清楚、文字简练、条理分明,以便于查阅。

本手册不仅适用于大学生和研究生、科技工作人员学习和工作中参考,也可供大、中学校物理教师查阅。

本手册由胡盘新主编,参加编写人员有张霞宝、汤毓骏、宋开欣等。限于编者的水平,不妥和错误之处敬请批评指正。

编 者

1999年2月

于上海交通大学

# 目 录

第一篇 物理量和单位 .....	(1)
第一章 物理量单位制 .....	(1)
一、国际单位制 .....	(1)
1. 国际单位制的基本单位 .....	(1)
2. 国际单位制的辅助单位 .....	(3)
3. 国际单位制中具有专门名称的导出 单位 .....	(4)
4. 国际单位制的十进倍数和分数单位 的词冠 .....	(5)
5. 有关国际组织认可的一些非国际单 位制单位 .....	(5)
二、力学量的非国际单位制 .....	(10)
1. 厘米·克·秒制 .....	(11)
2. 米·千克·秒制 .....	(11)
3. 工程单位制 .....	(11)
三、电磁学量的非国际单位制 .....	(11)
1. 厘米·克·秒绝对静电单位制 .....	(12)
2. 厘米·克·秒绝对电磁单位制 .....	(12)
3. 高斯单位制 .....	(13)
4. 有理化米·千克·秒·安培单位制 .....	(13)
5. 国际电学单位制 .....	(14)
四、英制单位 .....	(15)
五、我国的市制单位 .....	(19)

# 目 录

第一篇 物理量和单位 .....	(1)
第一章 物理量单位制 .....	(1)
一、国际单位制 .....	(1)
1. 国际单位制的基本单位 .....	(1)
2. 国际单位制的辅助单位 .....	(3)
3. 国际单位制中具有专门名称的导出 单位 .....	(4)
4. 国际单位制的十进倍数和分数单位 的词冠 .....	(5)
5. 有关国际组织认可的一些非国际单 位制单位 .....	(5)
二、力学量的非国际单位制 .....	(10)
1. 厘米·克·秒制 .....	(11)
2. 米·千克·秒制 .....	(11)
3. 工程单位制 .....	(11)
三、电磁学量的非国际单位制 .....	(11)
1. 厘米·克·秒绝对静电单位制 .....	(12)
2. 厘米·克·秒绝对电磁单位制 .....	(12)
3. 高斯单位制 .....	(13)
4. 有理化米·千克·秒·安培单位制 .....	(13)
5. 国际电学单位制 .....	(14)
四、英制单位 .....	(15)
五、我国的市制单位 .....	(19)

3. 径向加速度和横向加速度 .....	(61)
四、直线运动 .....	(61)
1. 匀速直线运动 .....	(61)
2. 匀变速直线运动 .....	(61)
3. 变加速直线运动 .....	(62)
五、一般曲线运动 .....	(62)
六、抛体运动 .....	(63)
1. 平抛运动 .....	(63)
2. 斜抛运动 .....	(64)
3. 安全抛物线 .....	(65)
七、圆周运动 .....	(65)
1. 角量 .....	(66)
2. 角量与线量的关系 .....	(67)
3. 圆周运动的运动学方程 .....	(68)
八、相对运动 .....	(68)
<b>第四章 质点动力学</b> .....	(69)
一、牛顿运动定律 .....	(69)
1. 牛顿第一定律 .....	(69)
2. 牛顿第二定律 .....	(69)
3. 牛顿第三定律 .....	(70)
4. 附注 .....	(70)
二、力 .....	(70)
1. 力学中常见的几种力 .....	(70)
2. 自然界中的基本相互作用 .....	(74)
三、质量 .....	(75)
1. 惯性质量和引力质量 .....	(75)
2. 高速运动物体的质量 .....	(75)
四、惯性力 .....	(76)



1. 惯性系和非惯性系 .....	(76)
2. 非惯性系中的力学规律 .....	(76)
3. 平动非惯性系中的惯性力 .....	(76)
4. 惯性离心力 .....	(76)
5. 科里奥利力 .....	(77)
五、伽利略相对性原理 .....	(77)
1. 伽利略相对性原理的表述 .....	(77)
2. 伽利略坐标变换 .....	(78)
3. 速度变换 .....	(79)
4. 加速度变换 .....	(79)
六、动量守恒定律 .....	(80)
1. 动量和冲量 .....	(80)
2. 动量定理 .....	(81)
3. 动量守恒定律 .....	(81)
七、机械能守恒定律 .....	(82)
1. 功 .....	(82)
2. 功率 .....	(83)
3. 动能 .....	(83)
4. 势能 .....	(84)
5. 动能定理 .....	(85)
6. 系统的功能原理 .....	(86)
7. 机械能守恒定律 .....	(86)
8. 能量守恒定律 .....	(86)
八、角动量守恒定律 .....	(86)
1. 质点的角动量 .....	(86)
2. 力矩 .....	(88)
3. 角动量定理 .....	(88)
4. 角动量守恒定律 .....	(89)

九、碰撞 .....	(89)
1. 弹性碰撞 .....	(90)
2. 完全非弹性碰撞 .....	(91)
3. 非弹性碰撞 .....	(91)
十、变质量问题 .....	(91)
1. 密舍尔斯基方程 .....	(92)
2. 火箭运动 .....	(92)
十一、万有引力 .....	(93)
1. 开普勒定律 .....	(93)
2. 万有引力定律 .....	(94)
3. 引力场 .....	(94)
4. 宇宙速度 .....	(95)
5. 质点在有心力场中的运动 .....	(96)
<b>第五章 刚体力学</b> .....	<b>(98)</b>
一、刚体的基本运动 .....	(98)
1. 刚体 .....	(98)
2. 平动 .....	(98)
3. 转动 .....	(98)
二、刚体的平动 .....	(98)
1. 质心 .....	(99)
2. 刚体平动的动力学方程 .....	(99)
三、刚体的定轴转动 .....	(100)
1. 力矩 .....	(100)
2. 定轴转动定律 .....	(101)
3. 转动惯量 .....	(101)
四、刚体定轴转动的角动 量守恒定律 .....	(104)
1. 刚体绕定轴的角动量 .....	(104)

2. 刚体定轴转动的角动量定理	(105)
3. 刚体定轴转动的角动量守恒定律	(106)
五、刚体定轴转动的动能定理	(106)
1. 力矩的功	(106)
2. 刚体定轴转动的动能定理	(106)
3. 刚体的重力势能	(107)
六、刚体定轴转动和质点直线运动的比较	(107)
七、刚体的平面平行运动	(108)
八、刚体的定点运动	(109)
1. 定点转动	(109)
2. 进动	(109)
第六章 连续介质力学	(111)
一、固体的弹性	(111)
1. 弹性体中的应力和应变	(111)
2. 直杆的拉伸或压缩	(111)
3. 剪切形变	(112)
4. 体形变	(113)
二、流体静力学	(113)
1. 静止流体中的压强	(113)
2. 帕斯卡原理	(114)
3. 阿基米德原理	(114)
三、理想流体的流动	(114)
1. 理想流体	(114)
2. 定常流动	(114)
3. 流量	(114)
4. 连续性原理	(115)
5. 伯努利方程	(115)

四、粘性流体的流动 .....	(116)
1. 流体的粘性 .....	(116)
2. 粘性流体的伯努利方程 .....	(116)
3. 泊肃叶定律 .....	(117)
4. 斯托克斯粘滞公式 .....	(117)
5. 层流和湍流 .....	(117)
<b>第三篇 振动和波动 .....</b>	<b>(119)</b>
<b>第七章 振动 .....</b>	<b>(119)</b>
一、简谐振动 .....	(119)
1. 振动 .....	(119)
2. 简谐振动 .....	(119)
3. 简谐振动的特征参量 .....	(120)
4. 简谐振动的能量 .....	(122)
二、阻尼振动 .....	(123)
1. 阻尼振动的运动方程 .....	(123)
2. 阻尼振动的三种运动方式 .....	(123)
3. 品质因数 .....	(125)
三、受迫振动 .....	(125)
1. 受迫振动的运动方程 .....	(125)
2. 稳定状态的振动 .....	(126)
3. 共振 .....	(126)
四、同方向简谐振动的合成 .....	(127)
1. 同方向、同频率简谐振动的合成 .....	(127)
2. 同方向、不同频率简谐振 动的合成 .....	(128)
3. 拍 .....	(128)
五、相互垂直简谐振动的合成 .....	(129)

1. 两个同频率垂直方向简谐振动的合成 .....	(129)
2. 两个不同频率方向垂直的简谐振动的合成 .....	(131)
六、振动的分解 .....	(132)
1. 周期性振动的频谱分析 .....	(133)
2. 非周期性振动的频谱分析 .....	(135)
七、电磁振荡 .....	(135)
1. 无阻尼自由振荡 .....	(136)
2. 阻尼振荡 .....	(137)
3. 受迫振荡 .....	(138)
八、力电类比 .....	(139)
第八章 波动 .....	(141)
一、简谐波 .....	(141)
1. 波的类型 .....	(141)
2. 描述简谐波的物理量 .....	(142)
3. 波速 .....	(143)
4. 平面简谐波的表式 .....	(144)
5. 球面简谐波的表式 .....	(145)
6. 波的能量 .....	(146)
二、波动方程 .....	(147)
三、波的一些传播规律 .....	(148)
1. 波的反射 .....	(148)
2. 波的折射 .....	(148)
3. 波的散射 .....	(149)
4. 波的衍射 .....	(149)
5. 波的频散、群速度 .....	(149)
6. 波的衰减 .....	(151)

四、波的叠加 .....	(151)
1. 波的叠加原理 .....	(151)
2. 波的干涉 .....	(151)
3. 驻波 .....	(153)
五、多普勒效应 .....	(155)
1. 机械波的多普勒效应 .....	(155)
2. 电磁波的多普勒效应 .....	(157)
3. 冲击波 .....	(158)
六、声波 .....	(159)
1. 声速 .....	(159)
2. 声压 .....	(160)
3. 声强、声强级 .....	(160)
4. 声波反射和折射的强度 .....	(161)
5. 乐音 .....	(162)
6. 噪声 .....	(164)
7. 超声波和次声波 .....	(165)
七、电磁波 .....	(166)
1. 电磁波的波动方程 .....	(166)
2. 电磁波的性质 .....	(166)
3. 电磁波的能量 .....	(167)
4. 电磁波的动量 .....	(168)
5. 电磁波的辐射 .....	(168)
6. 电磁波的反射和折射 .....	(169)
7. 电磁波谱 .....	(170)
<b>第四篇 热学</b> .....	<b>(173)</b>
<b>第九章 热力学</b> .....	<b>(173)</b>
一、物态方程 .....	(173)

1. 平衡态 .....	(173)
2. 状态参量 .....	(173)
3. 气体的状态方程 .....	(174)
4. 各向同性固体和液体的状态方程 .....	(175)
二、热力学定律 .....	(175)
1. 热力学第零定律 .....	(175)
2. 热力学第一定律 .....	(176)
3. 热力学第二定律 .....	(176)
4. 热力学第三定律 .....	(177)
三、热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用 .....	(177)
1. 准静态过程 .....	(177)
2. 功 .....	(177)
3. 摩尔热容 .....	(178)
4. 热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用 .....	(179)
5. 理想气体准静态过程公式 .....	(181)
四、循环过程 .....	(182)
1. 正循环和逆循环 .....	(182)
2. 热机和制冷机 .....	(182)
3. 卡诺循环、卡诺定理 .....	(184)
4. 几种典型的循环过程 .....	(186)
五、熵 .....	(190)
1. 可逆过程和不可逆过程 .....	(190)
2. 熵的意义 .....	(190)
3. 熵的计算 .....	(191)
4. 熵增原理 .....	(192)
5. 玻尔兹曼熵公式 .....	(193)

6. 熵和信息 .....	(193)
<b>第十章 分子动理论</b> .....	(194)
一、气体分子热运动和统计规律 .....	(194)
1. 分子运动的基本概念 .....	(194)
2. 气体分子热运动的图景和特征 .....	(195)
3. 理想气体的压强公式 .....	(195)
4. 温度的微观意义 .....	(196)
5. 理想气体的内能 .....	(196)
6. 平均自由程 .....	(199)
二、统计规律的基本概念 .....	(199)
1. 分布函数 .....	(200)
2. 统计平均值 .....	(201)
3. 涨落 .....	(201)
4. 热力学概率 .....	(202)
三、麦克斯韦速度分布律和速率 分布律 .....	(203)
1. 麦克斯韦速度分布律 .....	(203)
2. 麦克斯韦速率分布律 .....	(204)
3. 分子速率的三种统计平均值 .....	(204)
四、玻尔兹曼分布律 .....	(206)
1. 玻尔兹曼密度分布律 .....	(206)
2. 等温气压公式 .....	(206)
3. 麦克斯韦-玻尔兹曼能量分布律 .....	(206)
五、玻色-爱因斯坦分布和费米-狄拉克 分布 .....	(207)
1. 玻色子和费米子 .....	(207)
2. 玻色-爱因斯坦分布律和费米-狄拉克 分布律 .....	(207)



六、	输运过程	(208)
1.	粘滞现象	(208)
2.	热传导现象	(209)
3.	扩散现象	(209)
4.	输运过程的微观解释	(210)
七、	液体的表面性质	(210)
1.	表面张力	(211)
2.	弯曲液面的附加压强	(211)
3.	润湿现象	(212)
4.	毛细现象	(213)
八、	相变	(214)
1.	物态和相	(214)
2.	相变	(214)
3.	气、液、固之间的相变	(215)

## 第五篇 电磁学 (217)

### 第十一章 静电场 (217)

一、	电相互作用	(217)
1.	电荷	(217)
2.	库仑定律	(218)
3.	静电力的叠加原理	(218)
二、	电场强度、电位移	(219)
1.	电场	(219)
2.	电场强度	(219)
3.	场强的叠加原理	(220)
4.	几种典型电荷分布的场强	(220)
5.	电位移	(224)
三、	电势	(225)

1. 电势能 .....	(225)
2. 电势 .....	(225)
3. 电势叠加原理 .....	(227)
4. 几种典型电荷分布的电势 .....	(227)
5. 电场强度与电势的关系 .....	(228)
四、静电场的基本规律 .....	(229)
1. 静电场的高斯定理 .....	(229)
2. 静电场的环路定律 .....	(230)
五、静电场中的导体 .....	(231)
1. 静电场中导体的基本性质 .....	(231)
2. 导体的面电荷与场强的关系 .....	(231)
3. 导体壳空腔内的电场和电荷分布 .....	(232)
六、静电场中的电介质 .....	(233)
1. 电介质的极化 .....	(233)
2. 电极化强度 .....	(235)
3. 几种特殊电介质 .....	(237)
七、电容 .....	(238)
1. 孤立导体的电容 .....	(238)
2. 电容器的电容 .....	(238)
3. 几种典型电容器的电容 .....	(239)
4. 电容器的串联和并联 .....	(240)
5. 电容器的性能参数 .....	(240)
6. 电容器的能量 .....	(240)
7. 电容器的充电和放电过程 .....	(240)
八、静电场的能量 .....	(242)
1. 点电荷系的相互作用能 .....	(242)
2. 电荷连续分布的带电体的自能 .....	(243)
3. 带电体系的静电能 .....	(243)

4. 电场能量 .....	(243)
5. 几种典型带电体的静电能 .....	(244)
<b>第十二章 恒定磁场</b> .....	(245)
<b>一、磁感应强度、磁场强度</b> .....	(245)
1. 磁场 .....	(245)
2. 磁感应强度 .....	(245)
3. 毕奥-萨伐尔定律 .....	(246)
4. 运动电荷的磁场 .....	(247)
5. 几种典型的电流分布的磁感 应强度 .....	(247)
6. 磁场强度 .....	(251)
7. 磁场能量 .....	(252)
<b>二、恒定磁场的基本规律</b> .....	(252)
1. 磁场的高斯定理 .....	(252)
2. 磁单极子 .....	(252)
3. 安培环路定理 .....	(253)
<b>三、磁场对载流导线的作用</b> .....	(254)
1. 安培定律 .....	(254)
2. 磁场对平面载流线圈的作用 .....	(255)
3. 平行无限长载流直导线间的相互作 用力 .....	(256)
4. 电流强度单位“安培”的定义 .....	(256)
5. 磁力的功 .....	(256)
<b>四、磁场对运动电荷的作用</b> .....	(256)
1. 洛伦兹力 .....	(257)
2. 带电粒子在均匀磁场中的运动 .....	(257)
3. 带电粒子在非均匀磁场中的运动 .....	(258)
4. 霍耳效应 .....	(259)

五、磁介质 .....	(261)
1. 磁介质的分类 .....	(261)
2. 顺磁质和抗磁质的磁化 .....	(261)
3. 磁化强度 .....	(262)
4. 铁磁质 .....	(264)
第十三章 电磁感应和电磁场 .....	(268)
一、电磁感应定律 .....	(268)
1. 电磁感应现象 .....	(268)
2. 法拉第电磁感应定律 .....	(268)
3. 楞次定律 .....	(269)
二、动生电动势 .....	(269)
1. 运动导线内的感应电动势 .....	(270)
2. 转动线圈内的感应电动势 .....	(270)
三、自感和互感 .....	(270)
1. 自感电动势 .....	(270)
2. 自感电路中电流的增长和衰减 .....	(271)
3. 自感磁能 .....	(273)
4. 互感电动势 .....	(273)
5. 互感系数 .....	(274)
6. 串联线圈的自感系数 .....	(274)
7. 互感磁能 .....	(275)
四、涡电流、趋肤效应 .....	(275)
1. 涡电流 .....	(275)
2. 趋肤效应 .....	(276)
五、感生电场和位移电流 .....	(277)
1. 感生电场 .....	(277)
2. 位移电流 .....	(278)
3. 麦克斯韦方程组 .....	(280)

第十四章 电路	(283)
一、欧姆定律	(283)
1. 电流强度和电流密度	(283)
2. 电阻	(285)
3. 电动势	(286)
4. 欧姆定律	(286)
二、基尔霍夫定律	(288)
三、关于电路计算的几个定理	(289)
1. 等效电压源定理	(289)
2. 等效电流源定理	(291)
3. 叠加定理	(292)
4. Y $\Delta$ 电路的等效代换	(292)
四、交流电及简单交流电路	(293)
1. 交流电	(293)
2. 交流电路中的基本元件	(294)
3. 简单交流电路	(295)
五、电功率	(298)
1. 直流电的功率	(298)
2. 焦耳定律	(299)
3. 交流电的功率	(299)
六、温差电现象	(301)
1. 泽贝克效应	(301)
2. 佩尔捷效应	(301)
3. 汤姆孙效应	(302)
第六篇 光学	(303)
第十五章 几何光学	(303)
一、几何光学基本定律	(303)

1. 光线的传播规律 .....	(303)
2. 全反射 .....	(304)
3. 棱镜与色散 .....	(304)
4. 光路可逆原理 .....	(306)
二、费马原理 .....	(306)
1. 光程 .....	(306)
2. 费马原理表达式 .....	(306)
3. 物像之间的等光程性 .....	(307)
三、光学系统的近轴成像 .....	(307)
1. 光在单个球面上的折射和反射 .....	(307)
2. 薄透镜 .....	(310)
四、像差 .....	(312)
1. 球面像差 .....	(312)
2. 彗形像差 .....	(312)
3. 像散 .....	(313)
4. 像场弯曲 .....	(313)
5. 畸变 .....	(313)
6. 色像差 .....	(314)
五、光度学 .....	(315)
1. 辐射能通量和光通量 .....	(315)
2. 发光强度和亮度 .....	(316)
3. 照度 .....	(318)
六、色度学 .....	(319)
1. 颜色视觉 .....	(319)
2. 光源的颜色和物体的颜色 .....	(321)
<b>第十六章 波动光学</b> .....	<b>(323)</b>
一、光波的叠加 .....	(323)
1. 光波的叠加原理 .....	(323)

2. 光的相干叠加和非相干叠加	(323)
3. 光的相干条件	(324)
4. 获得相干光的方法	(324)
二、杨氏双缝干涉	(325)
1. 干涉明暗条纹的位置	(325)
2. 双缝干涉的光强分布	(326)
三、薄膜干涉	(327)
1. 等倾干涉条纹	(327)
2. 等厚干涉条纹	(328)
3. 增透膜和高反射膜	(331)
四、迈克尔孙干涉仪	(333)
五、光的衍射	(334)
1. 光的衍射现象	(334)
2. 衍射现象的分类	(334)
3. 惠更斯-菲涅耳原理	(334)
六、单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	(335)
1. 单缝衍射的明暗条件	(335)
2. 单缝衍射的光强分布	(336)
3. 圆孔的夫琅禾费衍射	(337)
七、光栅衍射	(337)
1. 透射光栅的衍射	(337)
2. X射线在晶体上的衍射	(339)
八、光学仪器的分辨本领	(340)
1. 成像仪器的像分辨本领	(340)
2. 分光仪器的色分辨本领	(342)
九、自然光和偏振光	(342)
1. 光的偏振态	(342)
2. 马吕斯定律	(345)

十、获得偏振光的方法 .....	(345)
1. 由反射获得线偏振光 .....	(345)
2. 由折射获得线偏振光 .....	(346)
3. 由晶体的双折射获得线偏振光 .....	(347)
4. 椭圆偏振光和圆偏振光的获得 .....	(350)
十一、偏振光的干涉、人为双折射 .....	(352)
1. 偏振光的干涉 .....	(352)
2. 人为双折射 .....	(352)
3. 旋光现象 .....	(355)
第十七章 现代光学 .....	(358)
一、傅里叶光学 .....	(358)
1. 傅里叶光学和信息论 .....	(358)
2. 空间频率 .....	(359)
3. 阿贝成像原理和空间滤波 .....	(359)
二、全息照相 .....	(360)
1. 全息照相的特点 .....	(360)
2. 全息照相的记录和再现 .....	(360)
3. 全息照相的应用 .....	(362)
三、非线性光学 .....	(362)
1. 非线性光学现象 .....	(362)
2. 光学倍频 .....	(363)
3. 光学混频 .....	(364)
4. 自聚焦 .....	(364)
第七篇 近代物理 .....	(365)
第十八章 相对论 .....	(365)
一、狭义相对论的基本假设 .....	(365)
1. 相对性原理 .....	(365)



2. 光速不变原理 .....	(365)
二、狭义相对论的时空观 .....	(365)
1. 洛伦兹变换式 .....	(365)
2. 爱因斯坦速度变换式 .....	(367)
3. 同时的相对性 .....	(368)
4. 长度收缩效应 .....	(368)
5. 时间延缓效应 .....	(369)
6. 双生子佯谬 .....	(371)
三、狭义相对论动力学 .....	(372)
1. 相对论质量 .....	(372)
2. 狭义相对论动力学方程 .....	(372)
3. 相对论的动能 .....	(372)
4. 质能关系 .....	(373)
5. 相对论能量和动量关系 .....	(373)
四、狭义相对论和电磁场 .....	(373)
1. 电荷的相对论不变性 .....	(373)
2. 电磁场量的相对论变换关系 .....	(374)
五、广义相对论 .....	(374)
1. 广义相对论的基本原理 .....	(374)
2. 广义相对论效应及实验验证 .....	(374)
<b>第十九章 早期量子理论</b> .....	<b>(376)</b>
一、普朗克的能量子假设 .....	(376)
1. 热辐射的基本概念 .....	(376)
2. 基尔霍夫定律和黑体 .....	(377)
3. 黑体辐射的基本定律 .....	(377)
4. 普朗克的能量子假设 .....	(378)
二、爱因斯坦的光子理论 .....	(379)
1. 光电效应的实验规律 .....	(379)

2. 爱因斯坦的光子理论 .....	(379)
3. 光子 .....	(380)
4. 康普顿效应 .....	(380)
三、玻尔的量子假设 .....	(381)
1. 定态假设 .....	(381)
2. 频率条件 .....	(382)
3. 角动量量子化条件 .....	(382)
<b>第二十章 量子力学</b> .....	<b>(383)</b>
一、德布罗意物质波假设、微观粒子的波粒二象性 .....	(383)
二、不确定关系 .....	(384)
三、波函数及其统计解释 .....	(384)
1. 波函数 .....	(384)
2. 波函数的统计解释 .....	(385)
3. 统计解释对波函数的要求 .....	(385)
四、薛定谔方程 .....	(386)
1. 含时薛定谔方程 .....	(386)
2. 定态薛定谔方程 .....	(386)
五、一维定态问题 .....	(387)
1. 无限深方势阱 .....	(387)
2. 线性谐振子 .....	(389)
3. 势垒穿透、隧道效应 .....	(390)
<b>第二十一章 原子和分子物理</b> .....	<b>(393)</b>
一、玻尔氢原子理论 .....	(393)
1. 氢原子光谱的实验规律 .....	(393)
2. 玻尔的氢原子理论 .....	(394)
3. 氢原子的轨道半径和能量 .....	(394)
4. 玻尔理论的缺陷 .....	(396)

二、量子力学中的氢原子问题	(397)
1. 量子化条件和量子数	(397)
2. 氢原子中电子的概率分布	(398)
三、电子的自旋	(399)
四、多电子原子	(400)
1. 四个量子数	(400)
2. 原子的电子壳层结构	(401)
3. 电子在壳层上的分布	(401)
五、分子光谱和分子能级	(402)
1. 分子光谱	(403)
2. 分子能级	(403)
六、X 射线	(404)
1. X 射线发射谱	(404)
2. 莫塞莱定律	(404)
3. 标识谱的产生	(405)
七、激光	(405)
1. 受激吸收、自发辐射和受激辐射	(405)
2. 产生激光的基本条件	(406)
3. 激光器	(408)
4. 激光的特性和应用	(409)
<b>第二十二章 固体物理</b>	(411)
一、晶体结构	(411)
1. 晶体的特征	(411)
2. 晶体空间点阵	(411)
3. 晶面与密勒指数	(412)
4. 晶系	(412)
二、晶格振动、晶体的热容量	(413)
1. 晶格振动	(413)

2. 格波 .....	(414)
3. 声子 .....	(414)
4. 晶体的热容量 .....	(414)
三、固体的能带理论 .....	(416)
1. 电子共有化 .....	(416)
2. 能带的形成 .....	(416)
3. 满带、导带和禁带 .....	(417)
4. 导体、半导体和绝缘体的能 带结构 .....	(419)
四、半导体 .....	(420)
1. 本征半导体 .....	(420)
2. 杂质半导体 .....	(421)
3. p-n 结 .....	(422)
五、超导体 .....	(423)
1. 超导电现象 .....	(423)
2. 超导体的主要特性 .....	(424)
3. 超导电性的 BCS 理论 .....	(426)
4. 超导电性的应用 .....	(426)
<b>第二十三章 原子核物理和粒子物理</b> .....	(427)
一、原子核的基本性质 .....	(427)
1. 原子核的组成 .....	(427)
2. 原子核的电荷 .....	(427)
3. 原子核的质量 .....	(427)
4. 原子核的大小 .....	(428)
5. 核力 .....	(428)
二、原子核的结合能、裂变和聚变 .....	(429)
1. 原子核的结合能 .....	(429)
2. 重核的裂变 .....	(430)

3. 轻核的聚变 .....	(431)
三、原子核的放射性衰变 .....	(433)
1. 放射性衰变现象 .....	(433)
2. 放射性衰变定律 .....	(434)
3. 放射性强度的单位 .....	(435)
四、粒子物理 .....	(436)
1. 粒子的分类 .....	(436)
2. 粒子间的相互作用 .....	(441)
3. 粒子的守恒定律 .....	(443)
4. 强子结构的夸克模型 .....	(443)
附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表 .....	(446)
附录 B 常用物理公式 .....	(463)
附录 C 常用物理量数据表 .....	(491)
I 力学 .....	(491)
表 I .1 一些事物的空间尺度 .....	(491)
表 I .2 一些事物的时间尺度 .....	(492)
表 I .3 一些事物的速度 .....	(492)
表 I .4 一些物体的转速 .....	(493)
表 I .5 一些物体的加速度 .....	(494)
表 I .6 一些城市的重力加速度 .....	(495)
表 I .7 不同高度、不同纬度的重力加 速度 .....	(495)
表 I .8 一些物体的质量 .....	(496)
表 I .9 一些力的量级 .....	(497)
表 I .10 滑动摩擦的摩擦系数 .....	(497)
表 I .11 物体之间或车辆在道路上的 滚动摩擦系数 .....	(498)
表 I .12 一些功率的量级 .....	(499)

表 I .13	一些物体动能的量级 .....	(500)
表 I .14	能量的大小举例 .....	(500)
表 I .15	几种材料的恢复系数 .....	(501)
表 I .16	一些物体的角动量的量级 ...	(501)
表 I .17	一些事物的压强 .....	(502)
表 I .18	某些金属的弹性限度和最大 弹性伸长 .....	(503)
表 I .19	常用材料的极限强度 .....	(504)
II 声学 .....		(505)
表 II .1	某些振动或作周期运动系统 的周期 .....	(505)
表 II .2	某些声音(或波)的频率 .....	(506)
表 II .3	声音的传播速度 .....	(507)
表 II .4	声音的声强级及其响度 .....	(509)
表 II .5	音阶 .....	(510)
表 II .6	某些材料的吸声系数 .....	(510)
表 II .7	一些介质的声阻抗 .....	(512)
III 热学 .....		(512)
表 III .1	某些物体的温度 .....	(512)
表 III .2	国际实用温标定义固定点 .....	(513)
表 III .3	气体和蒸汽分子的基本 常数 .....	(514)
表 III .4	气体的密度 .....	(515)
表 III .5	液体的密度 .....	(517)
表 III .6	固体的密度 .....	(519)
表 III .7	固体的膨胀系数 .....	(522)
表 III .8	液体的体胀系数 .....	(523)
表 III .9	气体的体胀系数和压	

	强系数	(523)
表 III.10	气体压强跟体积的关系	(524)
表 III.11	液体的压缩率	(524)
表 III.12	液态物质的表面张力系数	(525)
表 III.13	固体的比热	(526)
表 III.14	液体的比热	(527)
表 III.15	水、冰和水银在不同温度下的 比热	(528)
表 III.16	气体的定压比热和定体 比热	(528)
表 III.17	物质的熔点	(529)
表 III.18	物质的熔解热	(531)
表 III.19	物质的沸点	(532)
表 III.20	物质的汽化热	(533)
表 III.21	水的汽化热和温度的关系	(534)
表 III.22	不同温度下饱和水汽的压强 和密度	(535)
表 III.23	不同温度下一些液体的饱和 汽压	(537)
表 III.24	物质的临界温度和临界 压强	(538)
表 III.25	空气的相对湿度	(539)
表 III.26	常用燃料的燃烧值	(540)
表 III.27	物质的导热系数	(541)
表 III.28	物质的粘性系数	(543)
表 III.29	气体的扩散系数	(543)
表 III.30	固体的扩散系数	(544)
表 III.31	一些物质的三相点	(545)

表Ⅲ.32	能量转换效率	(546)
IV	电磁学	(546)
表Ⅳ.1	静电的摩擦次序	(546)
表Ⅳ.2	有关雷电的一些参考数据	(547)
表Ⅳ.3	电介质的相对电容率	(548)
表Ⅳ.4	电介质的绝缘强度	(549)
表Ⅳ.5	导体的电阻率	(550)
表Ⅳ.6	绝缘体的电阻率	(551)
表Ⅳ.7	某些金属的电阻温度系数	(552)
表Ⅳ.8	温差电动势	(553)
表Ⅳ.9	温差电系数	(554)
表Ⅳ.10	一些金属的逸出功	(555)
表Ⅳ.11	锗、硅的一些性质	(555)
表Ⅳ.12	锗和硅中的杂质的电离能	(556)
表Ⅳ.13	等离子体举例	(558)
表Ⅳ.14	超导元素的临界温度和临界 磁场	(559)
表Ⅳ.15	超导合金和化合物临界温 度和临界磁场	(559)
表Ⅳ.16	高温超导体的临界温度	(560)
表Ⅳ.17	某些磁场的磁感应强度	(561)
表Ⅳ.18	顺磁质和抗磁质的 相对磁导率	(562)
表Ⅳ.19	一些软磁材料的性质	(563)
表Ⅳ.20	一些硬磁材料的性质	(564)
表Ⅳ.21	非铁磁金属的霍尔系数	(565)
V	光学	(565)
表Ⅴ.1	气体和液体的折射率	(565)



表 V.2	常用晶体及光学玻璃的 折射率.....	(566)
表 V.3	某些单轴双折射晶体的 折射率.....	(566)
表 V.4	最强的一些夫琅禾费谱线.....	(567)
表 V.5	某些元素的标识谱线.....	(568)
表 V.6	某些液体的克尔常量.....	(570)
表 V.7	某些旋光物质的费尔德 常量.....	(570)
表 V.8	固体的旋光率.....	(570)
表 V.9	液体的比旋光率.....	(571)
表 V.10	关于照度的一些数据.....	(572)
表 V.11	一些实际光源的亮度.....	(572)
表 V.12	星等表.....	(573)
表 V.13	一些恒星发光颜色与温度.....	(573)
表 V.14	视见函数表.....	(573)
表 V.15	几种金属材料的红限.....	(574)
VI	原子和原子核物理.....	(574)
表 VI.1	某些原子的半径和质量.....	(574)
表 VI.2	原子内电子的分布.....	(577)
表 VI.3	常用的放射性同位素.....	(580)
表 VI.4	某些核转变的反应能量.....	(581)
VII	天文方面的有关资料.....	(582)
表 VII.1	地球、太阳和月球的资料.....	(582)
表 VII.2	太阳系大行星的轨道和物理 要素.....	(584)
附录 D	基本物理常数.....	(585)
28	参考书目.....	(596)

# 第一篇 物理量和单位

---

## 第一章 物理量单位制

### 一、国际单位制

国际单位制是1960年第11届国际计量大会通过的,其国际代号为SI。根据1954年国际度量衡会议的决定,自1978年1月1日起实行国际单位制。我国国务院于1977年5月27日颁布的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》第三条规定:“我国的基本计量制度是米制(即“公制”),逐步采用国际单位制”。

国际单位制是在国际公制和米千克秒制基础上发展起来的。在国际单位制中,规定了7个基本单位和2个辅助单位,其他单位均由这些基本单位和辅助单位导出。

#### 1. 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
长度	米	m	“米是光在真空中 $1/299\,792\,458s$ 的时间间隔内所经路程的长度”。(第 17 届国际计量大会, 1983 年)
质量	千克 (公斤)	kg	“千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量”。(第 1 和第 3 届国际计量大会, 1889 年, 1901 年)
时间	秒	s	“秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间”。(第 13 届国际计量大会, 1967 年, 决议 1)
电流	安培	A	“在真空中, 截面积可忽略的两根相距 $1m$ 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时, 若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}N$ , 则每根导线中的电流为 $1A$ ”。(国际计量委员会, 1946 年, 决议 2; 1948 年第 9 届国际计量大会批准)
热力学温度	开尔文	K	“热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ ”。(第 13 届国际计量大会, 1967 年, 决议 4)

(续表)

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
物质的量	摩尔	mol	“(1)摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。(2)在使用摩尔时,基本单元应予指明,可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或是这些粒子的特定组合”。(国际计量委员会 1969 年提出,1971 年第 14 届国际计量大会通过,决议 3)
发光强度	坎德拉	cd	“坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}$ Hz 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $(1/683) \text{W/sr}$ ”。(第 16 届国际计量大会,1979 年决议 3)

## 2. 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
平面角	弧度	rad	“弧度是一个圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等”。(国际标准化组织建议书 R31 第 1 部分,1965 年 12 月第二版)
立体角	球面度	sr	“球面度是一个立体角,其顶点位于球心,而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积”

## 3. 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位表示的表示式	其他表示式
频率	赫[兹]	Hz	$s^{-1}$	
力, 重力	牛[顿]	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N/m^2$
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$N \cdot m$
功率, 辐射[射能]通量	瓦[特]	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	$J/s$
电荷[量]	库[仑]	C	$s \cdot A$	
电位, 电压, 电动势, (电势)	伏[特]	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	$W/A$
电容	法[拉]	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	$C/V$
电阻	欧[姆]	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	$V/A$
电导	西[门子]	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	$A/V$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$V \cdot s$
磁通[量]密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	$Wb/m^2$
电感	亨[利]	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	$Wb/A$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	K	
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$	
光照度	勒[克斯]	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$	$lm/m^2$

(续表)

量	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位表示的表示式	其他表示式
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	$s^{-1}$	
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$	J/kg

## 4. 国际单位制的十进倍数和分数单位的词冠

所表示的因数	名称	词冠符号	所表示的因数	名称	词冠符号
$10^{18}$	exa(艾)	E	$10^{-1}$	déci(分)	d
$10^{15}$	peta(拍)	P	$10^{-2}$	centi(厘)	c
$10^{12}$	téra(太)	T	$10^{-3}$	milli(毫)	m
$10^9$	giga(吉)	G	$10^{-6}$	micro(微)	$\mu$
$10^6$	méga(兆)	M	$10^{-9}$	nano(纳)	n
$10^3$	kilo(千)	k	$10^{-12}$	pico(皮)	p
$10^2$	hecto(百)	h	$10^{-15}$	femto(飞)	f
$10^1$	déca(十)	da	$10^{-18}$	atto(阿)	a

注： $10^4$ 称为万， $10^8$ 称为亿， $10^{12}$ 称为万亿，这类数词的使用不受词冠名称的影响，但不应与词冠混淆。

5. 有关国际组织认可的一些非国际单位制单位  
本部分列出的是得到国际计量委员会(CIPM)、国际计量局(BIPM)和国际标准化组织(ISO)承认的一些非国际单位制单位。

(1) 由于使用十分广泛而重要，可与国际单位制并用的单位(BIPM)。

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时间	分	min	$1\text{min} = 60\text{s}$
	[小]时	h	$1\text{h} = 60\text{min} = 3600\text{s}$
	天(日)	d	$1\text{d} = 24\text{h} = 86400\text{s}$
平面角	度	°	$1^\circ = (\pi/180)\text{rad}$
	[角]分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800)\text{rad}$
	[角]秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000)\text{rad}$
体积、容积	升	L, (l)	$1\text{L} = 1\text{dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$
质量	吨	t	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$

注:1. 平面角单位度、分、秒的符号,在组合单位中应采用(°),(′),(″)的形式。例如,不用°/s 而用(°)/s。

2. 升的两个符号属同等地位,可任意选用。

(2) 用于专门领域的与国际单位制并用的单位 (ISO)

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
能	电子伏	eV	1 电子伏是一个电子在真空中通过 1 伏特的电位差所获得的动能 $1\text{eV} \approx 1.60217733 \times 10^{-19}\text{J}$
原子质量	原子质量单位	u	1(统一的)原子质量单位等于 1 个 <sup>12</sup> C 核素原子质量的 1/12 $1\text{u} \approx 1.6605402 \times 10^{-27}\text{kg}$

(续表)

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
长度	天文单位	A	$1A = 149597870 \times 10^3 m$ (天文常数系统, 1984年)
	秒差距	pc	1秒差距是1天文单位所张的角度为1角秒的距离 $1pc = 206264.806A = 308567756 \times 10^8 m$
气体压强	巴	bar	$1bar = 10^5 Pa$

注:天文单位无国际符号,英文名称缩写为AU,法文名称缩写为UA,国际天文联合会(IAU)规定的符号为A。

### (3) 暂时与国际单位制并用的单位(BIPM)

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 单位表示的值
长度	海里		1海里 = 1852m
	埃	Å	$1\text{Å} = 0.1nm = 10^{-10}m$
速度	节		1节 = 1海里/时 = $(1852/3600)m/s$
面积	公亩	a	$1a = 1dam^2 = 10^2m^2$
	公顷	ha	$1ha = 1hm^2 = 10^4m^2$
	靶恩	b	$1b = 100fm^2 = 10^{-28}m^2$
流体压强	巴	bar	$1bar = 0.1MPa = 10^5Pa$
加速度	伽	Gal	$1Gal = 1cm/s^2 = 10^{-2}m/s^2$
放射性活度	居里	Ci	$1Ci = 3.7 \times 10^{10}Bq$
照射量	伦琴	R	$1R = 2.58 \times 10^{-4}C/kg$
吸收剂量	拉德	rad	$1rad = 1cGy = 10^{-2}Gy$
剂量当量	雷姆	rem	$1rem = 1cSv = 10^{-2}Sv$

注:拉德是吸收剂量的专用单位,当“拉德”这个词可能与弧度的符号发生混淆时,应用rd作为拉德的符号。



## (4) 一些其他可以使用的单位(ISO)

量的名称	单位 名称 符号		用 SI 单位表示的值及说明
平面角	角	g, gon	$1g = 1gon = \frac{\pi}{200} \text{rad}$ , $1g \approx 0.9^\circ$
旋转速度	转每分	r/min	$1r/\text{min} = \frac{1}{60} \text{s}^{-1}$ (中文符号为转/分)
压力	标准大气压	atm	$1\text{atm} = 101325\text{Pa}$
线密度	特[克斯]	tex	$1\text{tex} = 1g/\text{km} = 10^{-6}\text{kg}/\text{m}$ (用于纺织业)
功率	伏安	V·A	$1V \cdot A = 1W$ (中文符号为伏·安, 电工技术中用于视在功率)
	乏	var	$1\text{var} = 1W$ (电工技术中用于无功功率)
级差	分贝	dB	无量纲量, 是用常用对数表示的级差单位
	奈培	Np	无量纲量, 是用自然对数表示的级差单位。 $1\text{Np} = \frac{20}{\ln 10} \text{dB}$
频率间隔	倍频程		无量纲量。用倍频程表示的频率间隔为 $\log_2(f_2/f_1)$ , $(f_2 \geq f_1)$
响度级	方		无量纲量(详见本表注)
响度	宋		无量纲量(详见本表注)
[动力] 粘度	泊	P	$1\text{cP} = 1\text{mPa} \cdot \text{s} = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ (不得与 SI 单位并用)

(续表)

量的名称	单位		用 SI 单位表示的值及说明
	名称	符号	
运动粘度	斯[托克斯]	St	$1\text{cSt} = 1\text{mm}^2/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (不得与 SI 单位并用)
长度	光年	l. y.	$1\text{l. y.} = 9.46053 \times 10^{15}\text{m}$ (用于天文学,不得与 SI 单位并用)
	费密		$1\text{费密} = 1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$ (用于高能物理,不得与 SI 单位并用)
时间	年	a	1 回归年约为
	回归年	$a_{\text{reg}}$	$365.24220\text{d} = 31556926\text{s}$ (不得与 SI 单位并用)

注:①关于单位伏安(V·A)和乏(var),国际电工委员会(IEC)也有同样规定。我国国家标准 GB3102.5-86 指出,这两个单位“暂可继续使用”。

②方是一个声音根据人耳判断与其等响的 1000Hz 纯音的声压级为 1dB 的响度级。

③频率为 1000Hz,声压级为正常听定员听阈上 40dB 的一个纯音所产生的响度为 1 宋。

④1 光年是电磁波在自由空间 1 年内传播的距离。此单位无国际符号,“l. y.”是名称 light year 的缩写。

(5) 具有专门名称的厘米·克·秒制(CGS)单位(BIPM)

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 单位表示的值
能、功	尔格	erg	$1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}$
力、重力	达因	dyn	$1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$
动力粘度	泊	P	$1\text{P} = 1\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$
运动粘度	斯托克斯	St	$1\text{St} = 1\text{cm}^2/\text{s} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$
磁通密度	高斯	Gs, G	1Gs 相当于 $10^{-4}\text{T}$
磁场强度	奥斯特	Oe	1Oe 相当于 $(1000/4\pi)\text{A}/\text{m}$
磁通量	麦克斯韦	Mx	1Mx 相当于 $10^{-8}\text{Wb}$
电流	毕奥	Bi	1Bi 相当于 10A
磁通势	吉伯	Gb	$1\text{Gb} = 1\text{Oe} \cdot \text{cm}$ , 相当于 $\frac{10}{4\pi}\text{A}$
光亮度	熙提	sb	$1\text{sb} = 1\text{cd}/\text{cm}^2 = 10^4\text{cd}/\text{m}^2$
光照度	辐透	ph	$1\text{ph} = 10^4\text{lx}$

注:在力学中 CGS 制以厘米、克和秒三个单位作为基本单位。而在电磁学中,根据这三个基本单位也导出了电磁学的一些单位,这就导致形成了几个不同的单位制,例如:静电 CGS 制、电磁 CGS 制以及高斯 CGS 制,在这些单位制中,其量制和对应的方程式常常与 SI 单位制中的不同。

## 二、力学量的非国际单位制

在采用国际单位制以前,常用的力学单位制有绝对单位制和重力单位制两类。常用的绝对单位制又有两种:厘米·克·秒制和米·千克·秒制。

### 1. 厘米·克·秒制(代号为 CGS 制)

在厘米·克·秒中,先规定质量的单位为克,以厘米(cm)、克(g)和秒(s)3个单位为基本单位,然后根据牛顿运动方程确定力的单位,其单位称为达因(dyn)。在 1dyn 的力作用下,使 1g 的物体得到  $1\text{cm/s}^2$  的加速度。

### 2. 米·千克·秒制(代号为 MKS 制)

在米·千克·秒制中,先规定质量的单位为千克,以米(m)、千克(kg)和秒(s)3个单位为基本单位,然后根据牛顿运动方程确定力的单位,其单位称为牛顿(N)。在 1N 的力作用下,使 1kg 的物体得到  $1\text{m/s}^2$  的加速度。

### 3. 工程单位制

在重力单位制中,先规定力的单位,然后根据牛顿运动方程确定质量单位。工程单位制是常用的重力单位制的一种,在工程单位制中,力的单位是千克力(也称公斤力),千克力的代号为 kgf。1 千克力相当于在纬度  $45^\circ$  的海平面上千克原器所受的重力,后来又经国际度量衡委员会规定:

$$1\text{kgf} = 9.80665\text{N}.$$

质量的单位是这样规定的:一物体在 1kgf 的力作用下,得到  $1\text{m/s}^2$  的加速度,这一物体的质量为 1 质量工程单位,代号为  $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ ,这样

$$1 \text{ 质量工程单位} = 9.81\text{kg} = 9.81 \times 10^3\text{g}.$$

## 三、电磁学量的非国际单位制

电磁学量有多种单位制,物理学和工程学科文献上常采用不同的单位制,它们之间的关系比较复杂

杂。电磁学中主要的单位制有以下几种:

1. 厘米·克·秒绝对静电单位制(简称静电单位制,代号为 CGSE 制或 esu)

在静电单位制中,基本量为长度、质量和时间。基本单位为厘米、克和秒。它通过真空中的库仑定律  $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$  并令  $k = 1$  来确定电量的单位,这样确定的电量单位叫做静电制电量单位,又称静库。1 静库 =  $\frac{1}{3 \times 10^9}$  C。在静电单位制中,所有电磁学量的单位一般没有特别的名称,都用静电制或 CGSE 表示。由此可知,真空的电容率(介电常数)  $\epsilon_0$  为无量纲的纯数,其数值为 1;真空的磁导率  $\mu_0 = \frac{1}{c^2}$  静电制磁导率单位,  $c$  为真空中的光速,量纲为  $L \cdot T^{-1}$ 。

2. 厘米·克·秒绝对电磁单位制(简称电磁单位制,代号为 CGSM 或 emu)

在电磁单位制中,基本量和基本单位与静电单位制的一样,但它通过真空中两根无限长平行载流导线的相互作用力  $F = k \frac{I_1 I_2}{a}$  来确定电流的单位。这样确定的电流单位叫做电磁制电流单位,又称磁安。1 磁安 = 10A =  $3 \times 10^{10}$  静电制电流单位。1 电磁制电量单位 =  $3 \times 10^{10}$  静电制电量单位。在电磁单位制中,电磁学量的单位一般也没有特别的名称,都用电磁制或 CGSM 表示。只有几个单位有特别的名称:磁感应强度的单位为高斯(Gs 或 G),磁通量的单位为麦克斯韦(Mx),磁场强度的单位为奥斯特(Os)。在电磁单位制中,真空的磁导率  $\mu_0$  为无量

纲的纯数,其数值为 1;真空的电容率  $\epsilon_0 = \frac{1}{(3 \times 10^{10})^2}$  电磁制电容率单位,量纲为  $L^{-2}T^2$ 。

### 3. 高斯单位制

在高斯单位制中,所有电学量都用静电单位制单位,而所有磁学量都用电磁单位制单位,它是一种混合的单位制。因而在此单位制中,真空的电容率和磁导率都等于 1。采用高斯单位制时,反映纯粹电现象的公式与它们在静电单位制中形式相同,反映纯粹磁现象的公式与它们在电磁单位制中形式相同。在同时含有电学量的磁学量的公式都会出现常数  $c$ (真空中的光速)。

### 4. 有理化米·千克·秒·安培单位制(又称 MKSA 有理制)

此单位制的电磁学部分以长度、质量、时间和电流为基本量,基本单位分别为米、千克、秒和安培。单位制之称为“有理化”,就是消除  $4\pi$  因子出现在不应出现的地方,期望在球面对称的问题中会出现  $4\pi$ ,在圆对称或圆柱对称中会出现  $2\pi$ ,而在成直角形问题中则不出现  $\pi$  这因子。因而在真空中的库仑定律的形式变为  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2}$ ,由此推导出来的常用公式中都不出现因子  $4\pi$ 。所以国际单位制中也采纳了 MKSA 有理制。在此单位制中,真空的电容率  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。电磁学量在国际单位制和高斯单位制之间的换算关系见附表 1.1。

表 1.1 电磁学量在国际单位制和高斯单位制之间的换算关系

$$(c = 2.99792458 \times 10^{10} \approx 3 \times 10^{10})$$

物理量名称	单位换算关系
电量	$1 \text{ 库} = \frac{c}{10} \text{ 静库} = 3.0 \times 10^9 \text{ 静库}$
电流	$1 \text{ 安} = \frac{c}{10} \text{ CGSE} = 3.0 \times 10^9 \text{ CGSE}$
电场强度	$1 \text{ 伏/米} = \frac{10^9}{c} \text{ CGSE} = \frac{1}{3} \times 10^{-4} \text{ CGSE}$
电位移	$1 \text{ 库/米}^2 = \frac{4\pi c}{10^5} \text{ CGSE} = 12\pi \times 10^5 \text{ CGSE}$
电势	$1 \text{ 伏} = \frac{10^8}{c} \text{ 静伏} = \frac{1}{3} \times 10^{-2} \text{ 静伏}$
电容	$1 \text{ 法} = \frac{c^2}{10^9} \text{ 厘米} = 9 \times 10^{11} \text{ 厘米}$
电阻	$1 \text{ 欧} = \frac{10^9}{c^2} \text{ CGSE} = \frac{1}{9} \times 10^{-11} \text{ CGSE}$
磁感应强度	$1 \text{ 特} = 10^4 \text{ 高斯}$
磁场强度	$1 \text{ 安/米} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ 奥斯特}$
磁通量	$1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 麦克斯韦}$
电感	$1 \text{ 亨} = 10^9 \text{ CGSM}$

### 5. 国际电学单位制

此单位制现已不再使用,原国际电学单位制的主要单位有:

国际欧姆:当电流不变、温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时,长  $106.300\text{cm}$ 、横截面均匀、质量为  $14.4521\text{g}$  水银柱所具有的电阻。

国际安培:在硝酸银水溶液中每秒能电解出  $0.0011800\text{g}$  纯银所需要的不变的电流。

国际伏特:在电阻为 1 国际欧姆的导体上产生 1 国际安培电流时的电压或电动势,由特别的标准电池来确定。

#### 四、英制单位

英制单位名目繁多,进制混乱,换算复杂。曾广泛为英、美等国使用。我国从 1959 年推行米制以来,一直严格限制英制单位的使用。

	进率	换算
长度	1 英里(mi) = 1760 码 = 5280 英尺	1 英里 = 1.6093 千米 (公里) = 3.2187 市里
	1 码(yd) = 3 英尺	1 英尺 = 0.3048 米 0.9144 市尺
	1 英尺(ft) = 12 英寸	1 英寸 = 2.540 厘米 0.762 市寸
	1 英海里 (UK nautical mile) = 6080 英尺	1 英海里 = 1.8532 千米 (公里) = 3.7064 市里
	1 美海里 (US nautical mile) = 6086 英尺	1 美海里 = 1.8550 千米 (公里) = 3.7100 市里
	1 国际海里 (Int nautical mile) = 6076.115 英尺	1 国际海里 = 1.8520 千米 = 3.7040 市里



(续表)

容积 (干量)	进率	1 蒲式耳(bu) = 4 配克 = 32 夸脱(英升) 1 配克(pk) = 8 夸脱 1 夸脱(qt) = 2 品脱(pt)
	换算	1 英蒲式耳 = 1.2844 英尺 <sup>3</sup> = 36.368 公升(市升) 1 美蒲式耳 = 1.2445 英尺 <sup>3</sup> = 35.238 公升(市升) 1 英夸脱 = 69.355 英寸 <sup>3</sup> = 1.1365 公升(市升) 1 美夸脱 = 67.201 英寸 <sup>3</sup> = 1.1012 公升(市升)
容积 (液量)	进率	1 加仑(gal) = 4 夸脱(英升) 1 夸脱(qt) = 2 品脱 1 品脱(pt) = 4 及尔(gi)
	换算	1 英加仑 = 277.420 英寸 <sup>3</sup> = 4.5461 公升(市升) 1 美加仑 = 230.944 英寸 <sup>3</sup> = 3.7854 公升(市升) 1 英夸脱(英升) = 69.355 英寸 <sup>3</sup> = 1.1365 公升(市升) 1 美液夸脱(美液升) = 57.747 英寸 <sup>3</sup> = 0.9463 公升(市升)
	附注	①英制夸脱、品脱下液量相同,美制夸脱、品脱下液量不同 ②1 英制石油桶 = 36 英加仑 = 163.6596 公升(市升) 1 美制石油桶 = 42 美加仑 = 158.987 公升(市升) 1 英制石油桶 = 1.02939 美制石油桶 国际上也有每桶石油按质量 137 千克(公斤)来计算的

(续表)

地积 及 面积	1 平方英里(sq·mi) = 640 英亩(a)	1 英里 <sup>2</sup> = 2.5900 公里 <sup>2</sup> = 10.3600 市里 <sup>2</sup>
	1 英亩 = 4840 码 <sup>2</sup> = 43560 英尺 <sup>2</sup>	1 英亩 = 40.4687 公顷 = 6.0702 市亩 = 4047 米 <sup>2</sup>
	1 平方码(sq·yd.) = 9 英尺 <sup>2</sup>	1 码 <sup>2</sup> = 0.8361 米 <sup>2</sup>
	1 平方英尺(sq·ft.) = 144 英寸 <sup>2</sup>	1 英尺 <sup>2</sup> = 0.0929 米 <sup>2</sup> = 929.0304 厘米 <sup>2</sup>
质量 (常衡)	进率	1 英吨(长吨, Long ton) = 20 英担 = 2240 吨 1 美吨(短吨, Short ton) = 20 美担 = 2000 磅 1 英担(长担, Long cwt) = 112 磅 1 美担(短担, Short cwt) = 100 磅 1 磅(lb) = 16 盎司 = 256 打兰 = 7000 克冷 1 盎司(oz) = 16 打兰 = 437.5 克冷 1 打兰(dr) = 27.34375 克冷(gr)
	换算	英制 1 吨(长吨) = 1.0160 公吨 = 20.3209 市担 美制 1 吨(短吨) = 0.9072 公吨 = 18.1437 市担 1 磅(英美相同) = 0.4536 千克(公斤) = 0.9072 市斤 1 盎司(英美相同) = 28.3495 克 = 0.5670 市两

(续表)

质量 (金衡)	进率	1 磅(lb. t.) = 12 盎司 = 240 本尼威特 = 5760 克冷 1 盎司(oz. t.) = 20 本尼威特 = 480 克冷 1 本尼威特(Pwt) = 24 克冷(gr)
	换算	1 磅 = 0.3732 千克(公斤) = 0.7464 市斤 1 盎司 = 31.1035 克 = 0.6221 市两 1 本尼威特 = 1.5552 克 1 克冷 = 64.7989 毫克
质量 (药衡)	进率	1 磅(lb. ap.) = 12 盎司 = 96 打兰 = 5760 克冷 1 盎司(oz. ap.) = 8 打兰 = 480 克冷 1 打兰(dr. ap.) = 60 克冷(gr)
	换算	1 磅 = 0.3732 千克(公斤) = 0.7464 市斤 1 盎司 = 31.1035 克 = 0.6221 市两 1 打兰 = 3.8879 克 1 克冷 = 64.7989 毫克

1 磅(金药衡) = 0.82285714 磅(常衡), 1 盎司(金药衡) = 1.0971428 盎司(常衡)  
1 磅(常衡) = 1.2152777 磅(金药衡), 1 盎司(常衡) = 0.91145833 盎司(金药衡)

其他还有力的单位,在绝对单位制中叫做磅达(poundal),1 磅达 = 0.1383N;在工程单位制中叫做磅(力),1 磅(力) = 4.448N,相应的质量单位叫做斯勒格(slug),1 斯勒格 = 14.59kg。功和能的单位叫做英尺·磅(力),1 英尺·磅(力) = 1.356J。热量的单位叫做英热单位(BTU),1 英热单位 = 252 卡 = 1055J。

## 五、我国的市制单位

我国的市制单位以及没有列入“国家选定的非国际单位制单位”的非国际单位制单位,都是非法定计量单位,这些单位均应废除。

### 1. 我国市制常用计量单位

类别	单位名称	进 率	换 算
长度	毫		
	厘	1 厘 = 10 毫	1 市厘 = $1/3$ 毫米 = $1/3000$ 米
	[市]分	1 [市]分 = 10 厘	1 市分 = $1/3$ 厘米 = $1/300$ 米
	寸	1 寸 = 10 分	1 市寸 = $1/3$ 分米 = $1/30$ 米 = 1.312 英寸
	尺	1 尺 = 10 寸	1 市尺 = $1/3$ 米 = 1.0936 英尺
	丈	1 丈 = 10 尺	1 市丈 = $10/3$ 米
质量 (重量 单位)	引	1 引 = 10 丈	1 市引 = $100/3$ 米
	1 [市]里	1 [市]里 = 15 引	1 市里 = 500 米 = 0.3107 英里
	丝		
	毫	1 毫 = 10 丝	
	厘	1 厘 = 10 毫	
[市]分	1 [市]分 = 10 厘		
钱	1 钱 = 10 分	1 市钱 = 5 克 = 0.005 千克(公斤)	
两	1 两 = 10 钱	1 市两 = 50 克 = 0.05 千克(公斤) = 1.7637 盎司(英美常衡)	

(续表)

类别	单位名称	进 率	换 算
质量 (重量 单位)	斤*	1 斤 = 10 两	1 市斤 = 500 克 = 0.5 千克(公斤) = 1.1023 磅(英美常衡)
	[市]担	1 [市]担 = 100 斤	1 市担 = 50 千克(公斤) = 0.9842 英担
容量	勺		
	合	1 合 = 10 勺	1 市合 = 1 分升
	升	1 升 = 10 合	1 市升 = 1 升 = 0.2200 英加仑 = 0.2642 美加仑
	斗	1 斗 = 10 升	1 市斗 = 1 十升
	斛	1 斛 = 5 斗	1 市斛 = 5 十升
石	1 石 = 2 斛	1 市石 = 1 百升	
面积	平方毫		
	平方厘	1 厘 <sup>2</sup> = 100 毫 <sup>2</sup>	
	平方分	1 分 <sup>2</sup> = 100 厘 <sup>2</sup>	
	平方寸	1 寸 <sup>2</sup> = 100 分 <sup>2</sup>	1 市寸 <sup>2</sup> = 11.11 厘米 <sup>2</sup> = $11.11 \times 10^{-4}$ 米 <sup>2</sup>
	平方尺	1 尺 <sup>2</sup> = 100 寸 <sup>2</sup>	1 市尺 <sup>2</sup> = 11.11 分米 <sup>2</sup> = $11.11 \times 10^{-2}$ 米 <sup>2</sup> = 1.1960 英尺 <sup>2</sup>
	平方丈	1 丈 <sup>2</sup> = 100 尺 <sup>2</sup>	1 市丈 <sup>2</sup> = 11.11 米 <sup>2</sup>
	平方引	1 引 <sup>2</sup> = 100 丈 <sup>2</sup>	1 市引 <sup>2</sup> = $11.11 \times 10^2$ 米 <sup>2</sup>
	平方[市]里	1 [市]厘 <sup>2</sup> = 22500 丈 <sup>2</sup>	1 市里 <sup>2</sup> = $25 \times 10^4$ 米 <sup>2</sup> = 0.0965 英里 <sup>2</sup>

(续表)

类别	单位名称	进 率	换 算
地积	[市]厘		1[市]厘 = 6.6 米 <sup>2</sup>
	[市]分	1[市]分 = 10 [市]厘	1[市]分 = 66.6 米 <sup>2</sup>
	亩	1 亩 = 10 分 = 60 丈 <sup>2</sup>	1 市亩 = 666.6 米 <sup>2</sup> = 0.1647 英亩
	顷	1 顷 = 100 亩	1 市顷 = 66666.6 米 <sup>2</sup> = 16.47 英亩
	平方[市]里	1[市]里 <sup>2</sup> = 3.75 顷	1 市里 <sup>2</sup> = 25 × 10 <sup>4</sup> 米 <sup>2</sup> = 0.0965 英里 <sup>2</sup>

\* 市制原定 16 两为 1 斤,因折算麻烦,已改成 10 两为 1 斤,并保持斤的量值不变。

## 2. 国家选定的非国际单位制单位

量	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1 min = 60 s
	[小]时	h	1 h = 60 min = 3600 s
	天,(日)	d	1 d = 24 h = 86400 s
[平面]角	[角]秒	( <sup>o</sup> )	1 <sup>o</sup> = (π/648000) rad
	[角]分	( <sup>'</sup> )	1 <sup>'</sup> = 60 <sup>o</sup> = (π/10800) rad
	度	( <sup>o</sup> )	1 <sup>o</sup> = 60 <sup>'</sup> = (π/180) rad
旋转速度	转每分	r/min	1 r/min = (1/60) s <sup>-1</sup>
长度	海里	n mile	1 n mile = 1852 m (只用于航程)
速度	节	kn	1 kn = 1 n mile/h (1852/3600) m/s (只用于航行)
质量	吨	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1 u ≈ 1.6605402 × 10 <sup>-27</sup> kg

(续表)

量	单位名称	单位符号	换算关系和说明
体积, 容积	升	L, (l)	1L = 1dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
能	电子伏特	eV	1eV ≈ 1.60217733 × 10 <sup>-19</sup> J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1tex = 10 <sup>-6</sup> kg/m

## 第二章 常用物理量 的符号和单位

下面将科学技术领域分为11类,列出了每一类中比较常用的名称、符号及运用的法定计量单位。

### 一、空间和时间的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
[平面] 角	$\alpha, \beta,$ $\gamma, \theta,$ $\varphi,$ 等	弧度	弧度	rad	L	$1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{rad}$
		度	度 <sup>①</sup>	(°)		$1' = 1^\circ/60$
		[角]分	分	(')		$1'' = 1'/60$
		[角]秒	秒	('')		
长度	$l,$ (L)	米	米	m	L	in mile = 1852 m, 只用于航程
宽度	$b$	海里	海里	n mile		
高度	$h$					
厚度	$\delta,$ ( $d, t$ )					
半径	$r, R$					
直径	$d, D$					
程长, 距离	$s$					
面积	A, (S)	平方米	米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>	



(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
体积, 容积	$V$	立方米 升	米 <sup>3</sup> 升	m <sup>3</sup> L, (l)	L <sup>3</sup>	1L = 1dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
时间	$t$	秒	秒	s	T	1min = 60s
		分	分	min		1h = 60min = 3600s
		[小]时	时	h		1d = 24h = 86400s
		天(日)	天(日)	d		
角速度	$\omega$	弧度 每秒	弧度/ 秒 <sup>②</sup>	rad/ s	T <sup>-1</sup>	也可用(°)/s, (′)/s, (″)/s
角加速度	$\alpha$	弧度 每 二次方秒	弧度/秒 <sup>2</sup>	rad/ s <sup>2</sup>	T <sup>-2</sup>	也可用(°)/s <sup>2</sup> , (′)/s <sup>2</sup> , (″)/s <sup>2</sup>
速度	$u, v$	米每秒	米/秒	m/s	LT <sup>-1</sup>	1km/h = $\frac{1}{3.6}$ m/s
	$w, c$	千米每 小]时 节	千米/时 节	km/ h kn		1kn = 1n mile/h = 0.514m/s, 只用于航行
加速度	$a$	米每 二次 方秒	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	LT <sup>-2</sup>	$g_0 = 9.80665$ m/s <sup>2</sup>
重力 加速度 自由 落体 加速度	$g$					

注: ①度(°)应优先使用十进制小数, 其符号标于数字之后, 例如: 15.27°。

②两个以上单位相除所构成的组合单位, 其中文符号

除表列形式之外,还可表示为分子与分母的负指数幂相乘的形式;乘号采用居中圆点。如弧度/秒,弧度·秒<sup>-1</sup>均为弧度每秒的中文符号。

这样的组合单位,其符号除表列形式之外,也可表示为分子与分母的负指数幂相乘的形式;乘号可采用居中圆点,也可不加任何表示相乘的符号。如 rad/s, rad·s<sup>-1</sup>, 或 rads<sup>-1</sup>均为“弧度每秒”的符号。

## 二、周期及有关现象的量 and 单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
周期	$T$	秒	秒	s	T	
频率	$f, (\nu)$	赫[兹]	赫	Hz	T <sup>-1</sup>	1s <sup>-1</sup> = 1Hz
旋转速度 (转速), 旋转频率	$n$	每秒 转每分	秒 <sup>-1</sup> 转/分	s <sup>-1</sup> r/ min	T <sup>-1</sup>	1r/min = $\frac{1}{60}$ s <sup>-1</sup> 通常用于转速
角频率,	$\omega$	弧度 每秒	弧度/秒	rad/ s	T <sup>-1</sup>	
圆频率		每秒	秒 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>		
波长	$\lambda$	米	米	m	L	
波数	$\sigma$	每米	米 <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	L <sup>-1</sup>	$\sigma = \frac{1}{\lambda}$
圆波数, 角波数	$k$	弧度 每米	弧度/米	rad/ m		$k = 2\pi\sigma$ rad/m 通常用于圆波数
振幅级差, 场级差	$L_F$	分贝	分贝	dB		$L_F = 20 \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right)$ dB, $F_1, F_2$ 为振幅

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
功率级差	$L_P$	分贝	分贝	dB		$L_P = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$ dB, $P_1, P_2$ 为功率
阻尼系数	$\delta$	每秒	秒 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>		
		分贝每秒	分贝/秒	dB/s		

注:①分子为1的组合单位,其中文符号和符号一般不用分式而用分母的负指数幂的形式。如“每秒”的中文符号和符号分别为秒<sup>-1</sup>和s<sup>-1</sup>,一般不用1/秒和1/s。

### 三、力学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
质量	$m$	千克 (公斤)	千克	kg	M	1t = 10 <sup>3</sup> kg  1u ≈ 1.6605402 × 10 <sup>-27</sup> kg
		吨	吨	t		
		原子质量单位	原子质量单位	u		
密度	$\rho$	千克每立方米	千克/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	L <sup>-3</sup> M	$\rho = m/V$  1t/m <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>  1kg/L = 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
		吨每立方米	吨/米 <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>		
		千克每升	千克/升	kg/L		

(续表)

## 第二章 常用物理量的符号和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
线密度	$\rho_l$	千克每米 特 [克斯]	千克/米 特	kg/m tex	$L^{-1}M$	$\rho_l = m/l$ $1\text{tex} = 1\text{g}/\text{km} = 10^{-6}\text{kg}/\text{m}$ , 用于纺织业
面密度	$\rho_A$ ( $\rho_s$ )	千克每平方米	千克/米 <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	$L^{-2}M$	$\rho_A = m/A$ , A 为面积
动量	$p$	千克·米每秒	千克·米/秒	kg·m/s	$LMT^{-1}$	
动量矩, 角动量	$L$	千克·二次方米每秒	千克·米 <sup>2</sup> /秒	kg·m <sup>2</sup> /s	$L^2MT^{-1}$	
冲量	$I$	牛顿秒	牛·秒	N·s	$LMT^{-1}$	
冲量矩	$L$	牛顿·米秒	牛·米·秒	N·m·s	$L^2MT^{-1}$	
转动惯量	$I$ , ( $J$ )	千克·二次方米	千克·米 <sup>2</sup>	kg·m <sup>2</sup>	$L^2M$	
力 重力	$F, f$ $W$ , ( $P$ , $G$ )	牛[顿]	牛	N	$LMT^{-2}$	
引力常数	$G$	牛[顿]·二次方米 每二次方千克	牛·米 <sup>2</sup> / 千克 <sup>2</sup>	N·m <sup>2</sup> / kg <sup>2</sup>		$G = (6.67259 \pm 0.00085) \times 10^{-11}$ N·m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup>
力矩 转矩, 力偶矩	$M$ $T$	牛[顿]·米	牛·米	N·m	$L^2MT^{-2}$	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
压力,压强	$p$	帕 [斯卡]	帕	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$	1Pa = 1N/m <sup>2</sup>
正应力,切应力,(剪应力)	$\sigma$ $\tau$					
标准大气压 <sup>②</sup>	$p_0$	帕 [斯卡]	帕	Pa		$p_0 = 101325Pa$
[动力]粘度	$\eta$ , ( $\mu$ )	帕·斯 [斯卡]秒	帕·秒	Pa·s	$L^{-1}MT^{-1}$	
运动粘度	$\nu$	二次方 米每秒	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	$L^2T^{-1}$	
表面张力	$\gamma, \sigma$	牛[顿] 每米	牛/米	N/m	$MT^{-2}$	1N/m = 1J/m <sup>2</sup>
功	$W$ , (A)	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	1J = 1N·m
能[量]	$E$ , (W)	电子伏	电子伏	eV		1eV ≈ 1.6021773 × 10 <sup>-19</sup> J ISO
势能,位能	$E_p$ , (V)					
动能	$E_k$ , (T)				$L^2MT^{-2}$	还有势能符号 $\Phi$ , 动能符号 K
功率	$P$	瓦[特]	瓦	W	$L^2MT^{-3}$	1W = 1J/s
质量流量	$q_m$	千克 每秒	千克/秒	kg/s	$MT^{-1}$	$q_m = m/t$ , $t$ 为时间
体积流量	$q_v$	立方 米每秒	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s	$L^3T^{-1}$	$q_v = V/t$

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
弹性模量 (杨氏模量)	$E$	帕斯卡	帕	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$	
伸长系数	$a$	平方米 每牛顿	米 <sup>2</sup> /牛	$m^2/N$	$LM^{-1}T^2$	

注:①两个以上单位相乘所构成的组合单位,其符号除表列形式外,也可不加任何表示相乘的符号。如  $N \cdot m$ ,  $Nm$  均为“牛顿米”的符号。

②不同意使用单位“标准大气压(atm)”,并不意味着不同意以  $101\ 325Pa$  作为参考压力。这里列出标准大气压,是把它作为一个物理常数( $P_0$ ),而不是作为单位(atm)。

#### 四、热学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
热力学温度	$T$ ①	开 [尔文]	开	K	①	
摄氏温度	$t, \theta$	摄氏度	℃	℃	②	
线膨胀系数	$\alpha_l$	每开 [尔文]	开 <sup>-1</sup>	$K^{-1}$	① <sup>-1</sup>	K 可用℃代替
体膨胀系数	$\alpha_v$					
热, 热量	$Q$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	
热流量	$\Phi$	瓦[特]	瓦	W	$L^2MT^{-3}$	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
热导率, (导热系数)	$\lambda, \kappa$	瓦[特] 每米开 [尔文]	瓦/(米· 开)	W/ (m· K)	$LMT^{-3}$ $\text{①}^{-1}$	
摩尔 质量	$M$	千克 每摩尔	千克/摩	kg/ mol	$MN^{-1}$	
摩尔 体积	$V_m$	立方米 每摩尔	米 <sup>3</sup> /摩	m <sup>3</sup> / mol	$L^3N^{-1}$	
传热 系数	$h, \alpha$	瓦[特] 每平 方米开	瓦/(米 <sup>2</sup> · 开)	W/ (m <sup>2</sup> · K)	$MT^{-3}$ $\text{①}^{-1}$	K 可用℃ 代 替
[总]传热 系数	$k, K$	[尔文]				
热容	$C$	焦[耳] 每开 [尔文]	焦/(开)	J/K	$L^2MT^{-2}$ $\text{①}^{-1}$	K 可用℃ 代 替
比热容	$c$	焦[耳] 每千 克开 [尔文]	焦/(千 克·开)	J/ (kg· K)	$L^2T^{-2}$ $\text{①}^{-1}$	$c = C/m$
定压 比热容	$c_p$					K 可用℃ 代 替
定容 比热容	$c_v$					
熵	$S$	焦[耳] 每开 [尔文]	焦/开	J/K	$L^2MT^{-2}$ $\text{①}^{-1}$	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
比焓	$s$	焦[耳] 每千 克开 [尔文]	焦/(千 克·开)	J/ (kg· K)	$L^2T^{-2}$ ①	
内能 焓	$U,$ ( $E$ ) $H,$ ( $I$ )	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	$H = U + pV$ $A = U - TS$
比内能 比焓	$u,$ ( $e$ ) $h,$ ( $i$ )	焦[耳] 每千克	焦/千克	J/kg	$L^2T^{-2}$	
溶解热 汽化热	$L_f$ $L_v$	焦[耳] 每千克	焦/千克	J/kg	$L^2T^{-2}$	
燃料的 燃烧值	$q$	焦[耳] 每千克	焦/千克	J/kg	$L^2T^{-2}$	

## 五、电学和磁学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
电流	$I$	安[培]	安	A	$I$	$i$ 表示交流电 流瞬时值
电荷[量]	$Q$	库[仑]  安[培] [小]时	库  安·时	C  A·h	Tl	1C = 1A·s 1A·h = 3600C 电荷 量符号也可 用 $q$
电荷[体 密度	$\rho,$ ( $\rho$ )	库仑每 立方米	库/米 <sup>3</sup>	C/m <sup>3</sup>	$L^{-3}TI$	



(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
电荷面密度	$\sigma$	库仑每平方米	库/米 <sup>2</sup>	C/m <sup>2</sup>	L <sup>-2</sup> TI	
电荷线密度	$\lambda$	库仑每米	库/米	C/m	L <sup>-1</sup> TI	
电场强度	$E, (K)$	伏[特]每米	伏/米	V/m	LMT <sup>-3</sup> I <sup>-1</sup>	1V/m = 1N/C
电位, (电势)	$V, \phi$	伏[特]	伏	V	L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-1</sup>	1V = 1W/A
电位差, (电势差), 电压	$U$				L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-1</sup>	$u$ 表示交流电位差瞬时值
电动势	$E$				L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-1</sup>	IEC 还有电位差备用符号 $V$
电通[量]密度, 电位移	$D$	库仑每平方米	库/米 <sup>2</sup>	C/m <sup>2</sup>	L <sup>-2</sup> TI	
电通[量], 电位移通量	$\Phi_e$	库[仑]	库	C	TI	$\Phi_e = D \cdot A$ , $A$ 为面积
电容	$C$	法[拉] 微法 皮[可]法[拉]	法 微法 皮法	F $\mu F$ pF	L <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>2</sup> I <sup>2</sup>	1F = 1C/V 1 $\mu F$ = 10 <sup>-6</sup> F 1pF = 10 <sup>-12</sup> F
介电常数 (电容率) 真空介电常数, (真空电容率)	$\epsilon, \epsilon_0, \epsilon_0$	法[拉]每米	法/米	F/m	L <sup>3</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>2</sup> I <sup>2</sup>	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$
相对介电常数, (相对电容率)	$\epsilon_r, \epsilon_r$	无单位			无量纲	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
电极化率	$\chi, \chi_e$				无量纲	$\chi = \epsilon_r - 1$
电极化强度	$P$	库仑/每平方米	库/米 <sup>2</sup>	C/m <sup>2</sup>	L <sup>-2</sup> TI	IEC 还有量的备用符号 $D_r$
电偶极矩	$p, (p_e)$	库仑·米	库·米	C·m	LT <sup>2</sup> I	
电流密度	$j, (S, \delta)$	安培/每平方米	安/米 <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>	L <sup>-2</sup> I	
电流线密度	$A/m$	安培/每米	安/米	A/m	L <sup>-1</sup> I	
磁场强度	$H$	安培/每米	安/米	A/m	L <sup>-1</sup> I	
磁位差, (磁势差)	$U_m$	安培	安	A	1	IEI 还有量的符号 U 和备用符号 V
磁通[量]密度, 磁感应强度	$B$	特斯拉	特	T	MT <sup>-2</sup> I <sup>-1</sup>	1T = 1Wb/m <sup>2</sup>
磁通[量]	$\Phi$	韦伯	韦	Wb	L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup> I	1Wb = 1V·s
磁矢位, (磁矢势)	$A$	韦伯/每米	韦/米	Wb/m		
自感	$L$	亨利	亨	H	L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup> I <sup>-2</sup>	1H = 1Wb/A = 1V·s/A
互感	$M, L_{12}$				L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup> I <sup>-2</sup>	
磁导率	$\mu$	亨利/每米	亨/米	H/m	LM <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> I <sup>-2</sup>	$1\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
真空磁导率	$\mu_0$				LM <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> I <sup>-2</sup>	H/m

(续表)

物理量 名称	符号	单 位			量纲式	备 注
		名称	中文符号	符号		
相对 磁导率	$\mu_r$				无量纲	$\mu_r = \mu / \mu_0$
磁化率	$\kappa$ ( $\chi_m$ , $\chi$ )				无量纲	$\kappa = \mu_r - 1$
[面] 磁矩	$m$	安[培] 平方米	安·米 <sup>2</sup>	$A \cdot m^2$	$L^2 I$	
磁化 强度	$M$ , $H_1$	安[培] 每米	安/米	$A/m$	$L^{-1} I$	$M = B / \mu_0 - H$
磁极 化强度	$J$ , $B_1$	特 [斯拉]	特	T		$J = B - \mu_0 H$
电磁 能密度	$w$	焦[耳] 每 立方米	焦/米 <sup>3</sup>	$J/m^3$	$L^{-1} M L^{-2}$	
坡印 亭矢量	$S$	瓦[特] 每 平方米	瓦/米 <sup>2</sup>	$W/m^2$		$S = H \times E$
电磁波 在真空 中的传 播速度	$c$ , $c_0$	米每秒	米/秒	m/s		$c = 299792458$ m/s
[直流] 电阻	$R$	欧[姆]	欧	$\Omega$	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	$1\Omega = 1V/A$
[直流] 电导	$G$	西 [门子]	西	S	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	$G = 1/R$ $1S = 1\Omega^{-1}$
电阻率	$\rho$	欧 [姆]米	欧·米	$\Omega \cdot m$	$L^3 M T^{-3} I^{-2}$	
电导率	$\gamma$ , $\sigma, \kappa$	西[门子] 每米	西/米	$S/m$	$L^{-3} M^{-1} T^3 I^2$	$\gamma = 1/\rho$ $\kappa$ 用于电化 学

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
磁阻	$R_m$	每亨[利]	亨 <sup>-1</sup>	$H^{-1}$		ISO 和 IEC 还有量的符号 $R$
磁导	$\Lambda, (P)$	亨[利]	亨	H		$\Lambda^{-1}/R_m$
阻抗(复数阻抗)	$Z$	欧[姆]	欧	$\Omega$	$L^2 M^{-3} I^{-2}$	
阻抗模(阻抗)	$ Z $					
电抗	$X$					
[交流]电阻	$R$					
导纳(复数导纳)	$Y$	西[门子]	西	S		
导纳模(导纳)	$ Y $					
电纳	$B$					
[交流]电导	$G$					
电功率	$P$	瓦[特]	瓦	W	$L^2 M T^{-3}$	电工技术中,有功功率单位瓦特(W);视在功率单位伏安(V·A);无功功率单位乏(var)
电能[量]	$W$	焦[耳] 千瓦[特] 小[时]	焦千 瓦·时	J kWh		$1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 J$

## 六、光及有关电磁辐射的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
频率	$f, \nu$	赫[兹]	赫	Hz	$T^{-1}$	$1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$
圆频率, 角频率	$\omega$	每秒弧度	秒 <sup>-1</sup> 弧度/秒	$\text{s}^{-1}$ rad/s	$T^{-1}$	$\omega = 2\pi f$
波长	$\lambda$	米	米	m	L	
波数, 波率	$\sigma$	每米	米 <sup>-1</sup>	$\text{m}^{-1}$	$L^{-1}$	$\sigma = 1/\lambda$
圆波数, 圆波率	$\kappa$	每厘米	厘米 <sup>-1</sup>	$\text{cm}^{-1}$		$k = 2\pi\sigma$
光在真 空中的 传播速度	$c, c_0$	米每秒	米/秒	m/s		即电磁波 在真空中的 传播速度
辐[射]能	$Q, W, (U, Q_e)$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	
辐[射]能密度	$w, (u)$	焦耳每 立方米	焦/米 <sup>3</sup>	$\text{J}/\text{m}^3$	$L^{-1}MT^{-2}$	
辐[射]功 率, 辐[射] 能]通量	$P, \Phi, (\Phi_e)$	瓦[特]	瓦	W	$L^2MT^{-3}$	
辐[射]强度	$I, (I_e)$	瓦[特]每 球面度	瓦/球 面度	W/ sr		
辐[射]亮度, 辐射度	$L, (L_e)$	瓦[特]每球 面度 平方米	瓦/(球面 度·米 <sup>2</sup> )	W/ (sr· $\text{m}^2$ )		

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
辐射出 [射]度	$M, (M_e)$	瓦[特]每 平方米	瓦/米 <sup>2</sup>	W/ m <sup>2</sup>	MT <sup>-3</sup>	
辐[射] 照度	$E, (E_e)$	瓦[特]每 平方米	瓦/米 <sup>2</sup>	W/ m <sup>2</sup>	MT <sup>-3</sup>	
斯特藩- 玻耳兹 曼常数	$\sigma$	瓦[特] 每平 方米四 次方开 [尔文]	瓦/(米 <sup>2</sup> · 开 <sup>4</sup> )	W/ (m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )		$\sigma = (\pi^2/60) \cdot k^4/h^3c^2$
第一辐 射常数	$c_1$	瓦[特] 平方米	瓦·米 <sup>2</sup>	W· m <sup>2</sup>		$c_1 = 2\pi hc^2$
第二辐 射常数	$c_2$	米开 [尔文]	米·开	m·K		$c_2 = hc/k$
发光 强度	$I, (I_v)$	坎 [德拉]	坎	cd	J	
光通量	$\Phi, (\Phi_v)$	流[明]	流	lm	J	1lm = 1cd·sr
光量	$Q, (Q_v)$	流明秒	流·秒	lm· s	JT	1lm·h = 3600lm·s
		流[明] [小]时	流·时	lm· h		
[光] 亮度	$L, (L_v)$	坎[德 拉]每 平方米	坎/米 <sup>2</sup>	cd/ m <sup>2</sup>	L <sup>-2</sup> J	
光出 射度	$M, (M_v)$	流明每 平方米	流/米 <sup>2</sup>	lm/ m <sup>2</sup>		
[光] 照度	$E, (E_v)$	勒 [克斯]	勒	lx	L <sup>-2</sup> J	1lx = 1lm/m <sup>2</sup>

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
曝光量	$H$	勒[克 斯]秒	勒·秒	$\text{lx}\cdot\text{s}$	$\text{L}^{-2}\text{T}^3$	$1\text{lx}\cdot\text{h}=3600\text{lx}\cdot\text{s}$
		勒[克 斯] [小,时]	勒·时	$\text{lx}\cdot\text{h}$		
光视效能	$K$	流[明] 每瓦特	流/瓦	$\text{lm}/\text{W}$	$\text{L}^{-2}\text{M}^{-1}\text{T}^3$	$K = \Phi_v/\Phi_e$
折射率	$n$				无量纲	

## 七、声学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
周期	$T$	秒	秒	$\text{s}$	$\text{T}$	
频率	$f$ ( $\nu$ )	赫[兹]	赫	$\text{Hz}$	$\text{T}^{-1}$	$1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$
角频率, 圆频率	$\omega$	每秒	秒 <sup>-1</sup>	$\text{s}^{-1}$	$\text{T}^{-1}$	$\omega=2\pi f$
波长	$\lambda$	米	米	$\text{m}$	$\text{L}$	
圆波数	$k$	每米	米 <sup>-1</sup>	$\text{m}^{-1}$	$\text{L}^{-1}$	$k=2\pi/\lambda$
密度	$\rho$	千克每 立方米	千克 米 <sup>3</sup>	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\text{L}^{-3}\text{M}$	
静压[力]	$P_0$ , $P_s$	帕 斯卡]	帕	$\text{Pa}$	$\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$	
声压	$P$					
质点 位移 [振动] 位移	$\xi$ , ( $x$ )  $d$	米	米	$\text{m}$	$\text{L}$	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
质点速度	$u$	米每秒	米/秒	m/s	$LT^{-1}$	
[振动]速度	$v$					
质点加速度	$a$	米每二次方秒	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	$LT^{-2}$	
[振动]加速度	$z$					
体积速度	$U$	立方米每秒	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s	$L^3T^{-1}$	$U = Su$ , $S$ 为面积
声速	$c$	米每秒	米/秒	m/s		
声能密度	$D, w$	焦耳每立方米	焦/米 <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>	$L^{-1}MT^{-2}$	
声[源]功率	$W, P$	瓦[特]	瓦	W	$L^2MT^{-3}$	
声能通量	$\Phi$					
声强[度]	$I$	瓦特每平方米	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	$MT^{-3}$	
声压级	$L_p, (L)$	分贝	分贝	dB		$L_p = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{dB}$
声强级	$L_I$					$L_I = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{dB}$
声功率级	$L_w$					$L_w = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) \text{dB}$
阻尼系数	$\delta$	每秒	秒 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>		
时间常数 弛豫时间	$\tau$	秒	秒	s		$\tau = 1/\delta$



(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
损耗系数	$\delta$				无量纲	$\delta + \gamma + \tau = 1$
反射系数	$\gamma$					$\alpha = \delta + \tau$
透射系数	$\tau$					
吸声系数	$\alpha$					
混响时间	$T, (T_{60})$	秒	秒	s	T	
隔声量, 传声损失	R	分贝	分贝	dB		
吸声量	A	平方米	米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>	

注: 当声学量与其他科学技术领域中的同符号量同时出现, 且易于混淆时, 则给声学量加下标“a”以示区别。

### 八、物理化学和分子物理学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
元素的相对原子质量	$A_r$					
物质的相对分子质量	$M_r$					
分子或其他基本单元数	N				无量纲	
物质的量	$n, (v)$	摩[尔]	摩	mol	N	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
阿伏加德 罗常数	$L, N_A$	每摩 [尔]	摩 <sup>-1</sup>	mol <sup>-1</sup>		
摩尔质量	$M$	千克每 摩[尔]	千克/摩	kg/ mol	$MN^{-1}$	$M = m/n$
摩尔体积	$V_m$	立方米 每摩尔 升每 摩[尔]	米 <sup>3</sup> /摩  升/摩	m <sup>3</sup> / mol  L/ mol	$L^3N^{-1}$	$V_m = V/n$ 1L/mol = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /mol
摩尔内能	$U_m, (E_m)$	焦[耳]每 摩[尔]	焦/摩	J/mol	$L^2MT^{-2}N^{-1}$	$U_m = U/n$
摩尔热容	$C_m$	焦[耳] 每摩 [尔]开 尔文	焦/(摩· 开)	J/(mol· K)	$L^2MT^{-2}N^{-1}\Theta^{-1}$	$C_m = C/n$
定压摩尔 热容	$C_{p,m}$					$C_{p,m} = C_p/n$
定容摩尔 热容	$C_{v,m}$					$C_{v,m} = C_v/n$
摩尔熵	$S_m$	焦[耳] 每摩 [尔]开 尔文	焦/(摩· 开)	J/(mol· K)		$S_m = S/n$
分子(或 粒子)数 密度	$n$	每立 方米	米 <sup>-3</sup>	m <sup>-3</sup>	$L^{-3}$	$n = N/V$
物质 B 的 分子浓度	$C_B$					

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
密度(质量密度)	$\rho$	千克每立方米	千克/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	L <sup>-3</sup> M	1kg/L = 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
物质B的质量浓度	$\rho_B$	千克每升	千克/升	kg/L		
物质B的浓度, 物质B的物质的量浓度	$c_B$	摩尔每立方米	摩/米 <sup>3</sup>	mol/m <sup>3</sup>	L <sup>-3</sup> N	1mol/L = 10 <sup>3</sup> mol/m <sup>3</sup> , 化学中也表示为[B]
物质B的质量摩尔浓度	$b_B, m_B$	摩[尔]每千克	摩/千克	mol/kg	M <sup>-1</sup> N	
物质B的分压力	$p_B$	帕[斯卡]	帕	Pa	L <sup>-1</sup> MT <sup>-2</sup>	
标准大气压	$p_0$	帕[斯卡]	帕	Pa		
渗透压[力]	$\Pi$	帕[斯卡]	帕	Pa	L <sup>-1</sup> MT <sup>-2</sup>	
摩尔气体常数	$R$	焦[耳]每摩尔开尔文	焦/(摩·开)	J/(mol·K)		
玻耳兹曼常数	$k$	焦[耳]每开尔文	焦/开	J/K		$k = R/N_A$
平均自由程	$l, \lambda$	米	米	m	L	
扩散系数	$D$	平方米每秒	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	
热扩散系数	$D_r$					

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
法拉第常数	$F$	库仑每摩[尔]	库/摩	C/mol		$F = N_A e$
化学反应速率	$\xi, J$	摩[尔]每秒	摩/秒	mol/s		

## 九、原子物理学和核物理学的量和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
质子数, 原子序数	$Z$				无量纲	
中子数 核子数, 质量数	$N$ $A$					$A = Z + N$
[核素 X 的]原子质量	$m_a,$ $m(X)$	千克	千克	kg		$1u \approx 1.6605402 \times 10^{-27} \text{kg}$
原子质量常数	$m(Z,$ $A)$ $m_a$	原子质量单位	原子质量单位	u		$m_u = m(^{12}\text{C}) / 12 = 1u$
$(^1\text{H} \text{ 的原子质量 } m(^1\text{H}) = (1.6735340 \pm 0.0000010) \times 10^{-27} \text{kg} = (1.007825050 + 0.000000012)u$						
电子[静止]质量	$m_e$	千克	千克	kg		
质子[静止]质量	$m_p$	原子质量单位	原子质量单位	u		
中子[静止]质量	$m_n$					

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
元电荷	$e$	库[仑]	库	C		
普朗克常数	$h$	焦 [耳]秒	焦·秒	J·s		$h - h/2\pi$
玻尔半径	$a_0$	米	米	m		$a_0 = 4\pi\epsilon_0 h^2 / me^2$
里德伯常数	$R_\infty$	每米	米 <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>		$R_\infty = \frac{1}{2} m_e c^2 / h$

(里德伯常数  $R_\infty = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 a_0 h c} = (10973731.534 \pm 0.013) \text{m}^{-1}$ )

哈特里能量	$E_h$	焦[耳]	焦	J	$\text{L}^2\text{MT}^{-2}$	$E_h = 2R_\infty hc$
-------	-------	------	---	---	----------------------------	----------------------

(哈特里能量  $E_h = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0} = (4.3597482 \pm 0.0000026) \times 10^{-18} \text{J}$ )

粒子或原子核的磁矩	$\mu$	安培 次方米	安·米 <sup>2</sup>	$\text{Am}^2$	$\text{IL}^2$	$\mu_B = eh/2m_e$
玻尔磁子	$\mu_B$					$\mu_N = eh/2m_p$
核磁子	$\mu_N$					$-(m_e/m_p)\mu_B$

(核磁子  $\mu_N = (5.0507866 \pm 0.0000017) \times 10^{-27} \text{A} \cdot \text{m}^2$ )

原子进动角频率, (原子进动圆频率)	$\omega_L$	每秒弧度	秒 <sup>-1</sup> 弧度 秒	s <sup>-1</sup> rad s	$\text{T}^{-1}$	$\omega_L = \frac{e}{2m_e} B,$ $B$ 为磁通密度
-----------------------	------------	------	----------------------------	-----------------------------	-----------------	---------------------------------------------

核四极矩	$Q$	二次方米	米 <sup>2</sup>	$\text{m}^2$	$\text{L}^2$	
------	-----	------	----------------	--------------	--------------	--

核半径	$R$	米 飞[母托]米	米 飞米	m fm	L	$R = r_0 A^{1/3}, A$ 为核子数, $r_0 \approx (1.1 \sim 1.5) \text{fm}$ , $1 \text{fm} = 10^{-15} \text{m}$ , 此量常用 fm 表示
-----	-----	-------------	---------	---------	---	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(续表)

## 第二章 常用物理量的符号和单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
轨道角动量子数	$l_i,$ $L$				无量纲	有下标 $i$ , 指粒子 $i$ 的; 无下标指整个系统的。 $M$ 加下标 $LS, J$ 等, 指相应角动量的磁量子数, 粒子物理中常用 $P$ 表示粒子的宇称 $F = J + I$
自旋角动量子数	$S_i,$ $S$					
总角动量子数	$J_i,$ $J$					
核自旋量子数	$I$					
核的宇称	$\pi$					
超精细结构量子数	$F$					
主量子数	$n$					
磁量子数	$m_l,$ $M$					
精细结构常数	$\alpha$				无量纲	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$

(精细结构常数  $\alpha = \frac{1}{2} \mu_0 c e^2 / \hbar = (7.29735308 \pm 0.00000033) \times 10^{-3} 1/a = 137.0359895 \pm 0.0000061$ )

[经典] 电子半径	$r_e$	米	米	m	$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = \frac{1}{\pi 2\alpha c}$
康普顿波长	$\lambda_c$	米	米	m	$\lambda_c = 2\pi\hbar/mc$

(对于质子  $\lambda_{c,p} = (1.32141002 \pm 0.00000012) \times 10^{-15} \text{m}$ )

(对于中子  $\lambda_{c,n} = (1.31959110 \pm 0.00000012) \times 10^{-15} \text{m}$ )

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
质量过剩	$\Delta$	千克	千克	kg	M	常用 u 表示
质量亏损	$B$	原子质量单位	原子质量单位	u		
核的结合能	$E_B$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	1eV $\approx$ 1.6021773 $\times 10^{-19}$ J 常用 eV 表示
		电子伏	电子伏	eV		

十、核反应和电离辐射的量 and 单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
反应能	$Q$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	常用 eV 表示
辐射能	$E_R$	电子伏	电子伏	eV		
共振能	$E_r, E_{res}$					
截面	$\sigma$	平方米 平方飞米 [靶]厘米	米 <sup>2</sup> 飞米 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> fm <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>	1m <sup>2</sup> = 10 <sup>30</sup> fm <sup>2</sup>
比结合能	$\epsilon$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	$\epsilon = E_B/A$ , A 为核子数 常用 eV 表示
		电子伏	电子伏	eV		
平均寿命	$\tau$	秒 分 [小]时 天(日)	秒 分 时 天(日)	s min h d	T	也可用年 (a) 1a $\approx$ 365.24220d = 31556926s

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
能级宽度	$\Gamma$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	$\Gamma = h/\tau$ 常用 eV 表示
		电子伏	电子伏	eV		
[放射性]活度	A	贝可 [勒尔]	贝可	Bq		$1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$ $\lambda = 1/\tau$
衰变常数	$\lambda$	每秒	秒 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>		
半衰期	$T_{1/2}$	秒	秒	s	T	$T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$ $\lambda = \tau \ln 2$ 单位也可用 年(a)
		分 [小]时 天(日)	分 时 天(日)	min h d		
粒子注量	$\Phi$	每平方 米	米 <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup>	L <sup>-2</sup>	
能注量	$\Psi$	焦耳每 平方米	焦/米 <sup>2</sup>	$\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$	MT <sup>-2</sup>	
质量衰减系数	$\mu/\rho,$ $\mu_m$	平方米 每千克	米 <sup>2</sup> /千克	$\frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$	L <sup>2</sup> M <sup>-1</sup>	
半厚度	$d_{1/2}$	米	米	m	L	
总质量阻止本领	$S/\rho,$ ( $S_m$ )	焦耳每 平方米 每千克 电子伏 平方米 每千克	焦·米 <sup>2</sup> 千克 电子伏· 米 <sup>2</sup> /千克	$\frac{\text{J}\cdot\text{m}^2}{\text{kg}}$ eV· m <sup>2</sup> / kg		
形成每对离子平均损失的能量	W	焦[耳] 电子伏	焦 电子伏	J eV	L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup>	
复合系数	$\alpha$	立方 米每秒	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>	



(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
粒子数 密度	$n$	每立 方米	米 <sup>3</sup>	$m^3$	$L^{-3}$	
离子数 密度, 离 子密度	$n^+, n^-$					
扩散系 数, 粒 子数密 度的扩 散系 数	$D, D_n$	平方 米每 秒	米 <sup>2</sup> /秒	$m^2/s$	$L^2T^{-1}$	
慢化密 度	$q$	每秒 立方 米	秒 <sup>-1</sup> 米 <sup>3</sup>	$s^{-1}m^3$	$L^3T^{-1}$	
平均自 由程	$l, \lambda$	米	米	$m$	$L$	
[放射 性]活 度	$A$	贝可 [勒尔]	贝可	$Bq$		$1Bq = 1s^{-1}$
吸收剂 量	$D$	戈[瑞]	戈	$Gy$		$1Gy = 1J/kg$
剂量当 量	$H$	希 [沃特]	希	$Sv$		$1Sv = 1J/kg$
比释动 能	$K$	戈[瑞]	戈	$Gy$		
照射量	$X$	库[仑] 每千 克	库/千 克	$Ckg^{-1}$		

### 十一、固体物理的量 and 单位

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
点阵基矢[量]	$a_1, a_2, a_3$	米	米	m		$R = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3,$
晶格基矢[量]	$a, b, c$					$n_1, n_2, n_3$ 均为整数
点阵矢[量], 晶格矢[量]	$R, R_0, T$					
倒易点阵基矢[量], 倒格子基矢[量]	$b_1, b_2, b_3$ $a^*, b^*, c^*$	每米	米 <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	L <sup>-1</sup>	$G = l_1 b_1 + l_2 b_2 + l_3 b_3,$  $l_1, l_2, l_3$ 均为整数
倒易点阵矢[量], 倒格子矢[量]	$G$					
点阵平面间距; 晶面间距	$d$	米	米	m	L	
布拉格角	$\theta$	弧度度	弧度度	rad (°)		$2d \sin \theta = n \lambda,$ $\lambda$ 为波长, $n$ 为整数
伯格矢量	$b$	米	米	m	L	
粒子位置[量]矢[量]	$r, R$	米	米	m	L	电子位矢用 $r$ , 离子位矢用 $R$

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
离子平衡位置 矢[量]	$R_0$					
离子位移 矢[量]	$U$					$U = R - R_0$
[圆]波 数	$k, q$	每米	米 <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	L <sup>-1</sup>	$k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为波长
德拜 [圆]频率	$\omega_D$	每秒	秒 <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	T <sup>-1</sup>	
德拜温 度	$\Theta_D$	开 尔文]	开	K	$\Theta$	
声子平 均自由 程	$l_{ph},$ $\Lambda$	米	米	m	L	
电子平 均自由 程	$l, l_0$					
态密度	$\rho,$ $N_E$	每焦耳 立方米 每电 子伏 立方米	焦 <sup>-1</sup> · 米 <sup>-3</sup> 电子伏 <sup>-1</sup> · 米 <sup>-3</sup>	J <sup>-1</sup> · m <sup>-3</sup> eV <sup>-1</sup> · m <sup>-3</sup>		
剩余电 阻率	$\rho_R$	欧 姆]米	欧·米	$\Omega \cdot m$		
洛仑兹 系数	$L$	二次方 伏特每 二次方 开尔文]	伏 <sup>2</sup> /开 <sup>2</sup>	V <sup>2</sup> / K <sup>2</sup>		
霍耳系 数	$A_H,$ $R_H$	立方米 每库仑]	米 <sup>3</sup> /库	m <sup>3</sup> / C		

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
物质 $a$ 与 $b$ 之间的温 差 电动势	$E_{ab}$	伏[特]	伏	V		
物质 $a$ 和 $b$ 的塞 贝克系数	$S_{ab},$ $\epsilon_a$	伏特每 开尔文	伏/开	V/K		
物质 $a$ 和 $b$ 的珀 耳系数	$H_{ab}$	伏[特]	伏	V		
汤姆孙 系数	$\mu, \tau$	伏特每 开尔文	伏/开	V/K		
功函数	$\Phi, W$	焦[耳] 电子伏	焦 电子伏	J eV	$L^2MT^{-2}$	
里查孙 常数	A	安[培] 每平 方米二 次方开 尔文	安/(米 <sup>2</sup> · 开 <sup>2</sup> )	A/ (m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )		
费密能量	$E_F,$ $\epsilon_F$	焦[耳]	焦	J	$L^2MT^{-2}$	
禁带宽度	$E_g$	电子伏	电子伏	eV		
施主电 离能	$E_d$					
受主电 离能	$E_a$					
费密温 度	$T_F$	开 尔文	开	K	⑧	

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注	
名称	符号	名称	中文符号	符号			
电子浓度, 电子数 密度	$n, n_n$ $n_p$	每立 方米	米 <sup>-3</sup>	m <sup>-3</sup>	L <sup>-3</sup>	F标 N, P 分 别表示 N型、 P型半导体 $n_i^2 = np$	
空穴浓度, 空穴数 密度	$p, p_p$ $p_n$						
本征载 流子浓 度, 本征 载流子 数密度	$n_i$						
施主浓度, 施主数 密度	$N_D, n_{D+}$						
受主浓度, 受主数 密度	$N_A, n_{A-}$						
有效质 量	$m_n^*$ , $m_p^*$	千克	千克	kg	M		F标 n, p 分 别表示半导 体中的电子 和空穴
弛豫时间 载流子 寿命	$\tau$ $\tau_n, \tau_p$	秒	秒	s	T		
扩散长 度	$L, l_n, l_p$	米	米	m	L		
交换积分	$J$	焦[耳] 电子伏	焦 电子伏	J eV	L <sup>2</sup> M T <sup>-2</sup>		
居里温 度	$T_C$	开 尔文]	开	K	⊙		

(续表)

物理量		单 位			量纲式	备 注
名称	符号	名称	中文符号	符号		
奈耳温度	$T_N$					
超导体 转变温度	$T_0$					
热力学 超导临界 [磁]场 强[度] 下临界 [磁]场 强[度] 上临界 [磁]场 强[度]	$H_c$  $H_{c1}$  $H_{c2}$	安[培] 每米	安/米	A/m	$I L^{-1}$	
超导体 能隙参数	$\Delta$	焦[耳] 电子伏	焦 电子伏	J eV	$\frac{L^2 M}{T^2}$	
伦敦穿 透深度	$\lambda_L$	米	米	m	L	
相干长度	$\xi$					
磁通量子	$\Phi_0$	韦[伯]	韦	Wb		$\Phi_0 = h/2e$

(磁通量子  $\Phi_0 = (2.06783461 \pm 0.00000061) \times 10^{-15} \text{Wb}$ )

## 第二篇 力学

### 第三章 质点运动学

#### 一、质点、参考系和坐标系

##### 1. 质点

具有质量而其线度在所处理的问题中可以忽略的物体,称为质点。质点是实际物体抽象化的力学模型。

物体作平动时,内部各点的运动状况都相同,故可把它看成一个质点。

##### 2. 参考系

由于物体运动的相对性,描述一个物体的机械运动时,被选作参考的物体或物体组,称为参考系。

同一物体的同一运动,对于不同的参考系,其描述是不同的。一般说来,研究运动学问题时,只要描述方便,参考系可任意选取。

##### 3. 坐标系

定量地表示一个物体在各时刻相对于参考系的

位置,必须选取坐标系。常用的坐标系有笛卡儿直角坐标系、平面极坐标系和球坐标系等。

## 二、速度

### 1. 位矢

质点在空间的位置可以用选定坐标系中的位置坐标 $(x, y, z)$ 来表示,也可以用由坐标原点到质点所在位置的矢量 $r$ 来表示(图 3.1), $r$ 称为质点的位矢。位矢在直角坐标系中表示为

$$r = xi + yj + zk,$$

式中 $i, j, k$ 分别表示 $x, y, z$ 三个坐标轴正方向的单位矢量。

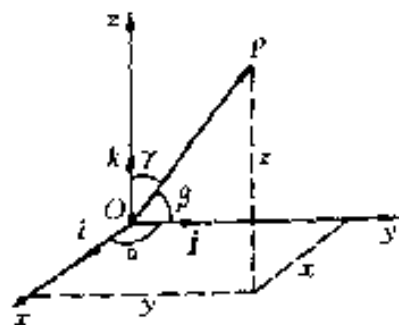


图 3.1

位矢 $r$ 的大小为

$$|r| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

其方向可用方向余弦来表示

$$\cos\alpha = \frac{z}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r}, \cos\gamma = \frac{x}{r}.$$

质点运动时,其位矢是时间的函数,即

$$r = r(t),$$

称为质点的运动学方程。



位矢端点所描绘的轨道,就是质点运动的**轨迹**。

## 2. 位移

设  $t$  时刻,质点的位矢为  $r_1$ ,经  $\Delta t$  时间后,位矢为  $r_2$ (图 3.2),则  $\Delta r = r_2 - r_1$  称为质点在  $\Delta t$  时间内的**位移**。它是描述质点在  $\Delta t$  时间内空间位置变化的物理量。

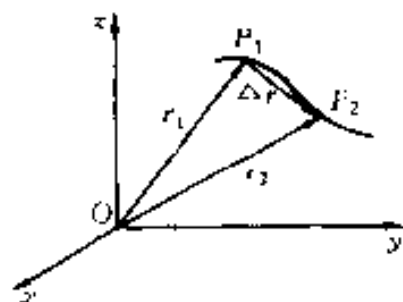


图 3.2

在直角坐标系中,位移表示为

$$\Delta r = \Delta x i + \Delta y j + \Delta z k。$$

路程与位移不同。路程是标量,它是质点运动所经过的路径曲线的长度。

## 3. 速度

速度是描述物体运动快慢与方向的物理量。设在  $\Delta t$  时间内的位移为  $\Delta r$ ,则这段时间内的平均速度  $\bar{v}$  为

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}。$$

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $\frac{\Delta r}{\Delta t}$  的极限即为  $t$  时刻的**瞬时速度**,简称**速度**,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}。$$

56 瞬时速度等于质点的位矢  $r$  对时间的一阶导数,它

的方向即运动轨迹在该点的切线方向(如图 3.3)。

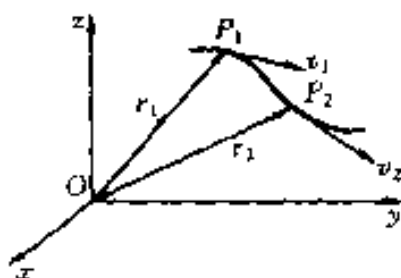


图 3.3

速度的大小称为速率。若在  $\Delta t$  时间内质点沿轨道所经过的路程为  $\Delta s$ , 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 位移的大小  $|\Delta r|$  与路程  $\Delta s$  趋于相同, 因而速率  $v$  为

$$v = |\boldsymbol{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}。$$

它是一个正值的量。

### (1) 速度的直角坐标分量

在直角坐标系中, 速度可表示为

$$\boldsymbol{v} = v_x \boldsymbol{i} + v_y \boldsymbol{j} + v_z \boldsymbol{k},$$

其中速度的直角坐标分量为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}。$$

在直角坐标系中, 速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2},$$

$v$  与坐标轴间的夹角由下式决定

$$\cos(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{i}) = \frac{v_x}{v}, \cos(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{j}) = \frac{v_y}{v}, \cos(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{k}) = \frac{v_z}{v}。$$

### (2) 径向速度和横向速度

在平面极坐标中, 速度可写成

$$\boldsymbol{v} = v_r \boldsymbol{e}_r + v_\theta \boldsymbol{e}_\theta,$$

$e_r$  与  $e_\theta$  分别为径向单位矢量和横向(即与径向垂直指向  $\theta$  角增加的方向)单位矢量(图 3.4), 速度分量为

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \dot{r}, v_\theta = r \frac{d\theta}{dt} = r\omega.$$

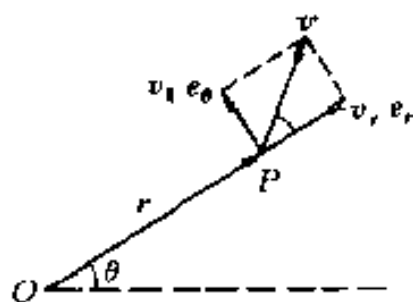


图 3.4

于是  $v_r e_r$  称为径向速度;  $v_\theta e_\theta$  称为横向速度,  $\omega$  为质点对原点的角速度。

在平面极坐标系中, 速度的大小为

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} = \sqrt{\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(r \frac{d\theta}{dt}\right)^2},$$

方向为

$$\tan(v, e_r) = \frac{v_\theta}{v_r} = \frac{\left(r \frac{d\theta}{dt}\right)}{\left(\frac{dr}{dt}\right)}.$$

### 三、加速度

#### 1. 平均加速度和瞬时加速度

加速度是描述物体运动速度变化的物理量, 有平均加速度和瞬时加速度(简称加速度)之分, 平均加速度定义为单位时间内速度的增量, 即

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

瞬时加速度为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2}.$$

即质点在某时刻的瞬时加速度等于该时刻质点速度矢量对时间一阶导数,也就是位矢对时间的二阶导数。

在直角坐标系中,加速度可表示为

$$\boldsymbol{a} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k},$$

其中加速度的直角坐标分量为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2},$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2},$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}.$$

在直角坐标系中,加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{d^2 z}{dt^2}},$$

方向可由

$$\cos(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{i}) = \frac{a_x}{a},$$

$$\cos(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{j}) = \frac{a_y}{a},$$

$$\cos(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{k}) = \frac{a_z}{a}$$

确定。

在质点作曲线运动时,加速度的方向总是指向轨迹曲线凹的一侧,一般情况下,与同一时刻速度的

■ 方向是不同的(图 3.5)。

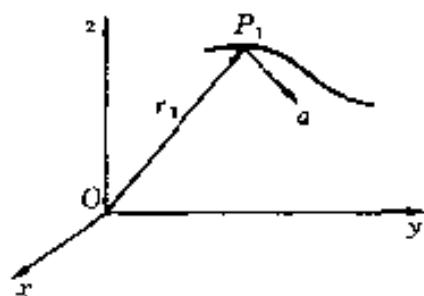


图 3.5

## 2. 切向加速度和法向加速度

在质点运动轨迹已知的情况下,顺着已知轨迹建立的坐标系,通常称为自然坐标系。

在自然坐标系中,加速度可表示为

$$a = a_{\tau}\tau + a_n n,$$

$\tau$  和  $n$  分别表示切向单位矢量和法向(即沿该处轨道切线的垂直方向、指向轨道凹的一侧)单位矢量,且

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}, a_n = \frac{v^2}{\rho},$$

其中  $\rho$  是该处轨道的曲率半径。于是  $a_{\tau}\tau$  称为切向加速度,  $a_n n$  称为法向加速度。在圆周运动中,法向加速度又称为向心加速度。切向加速度反映速度大小的变化,法向加速度反映速度方向的变化。

在自然坐标系中,加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_{\tau}^2 + a_n^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2},$$

方向为

$$\tan(a, \tau) = \frac{a_n}{a_{\tau}} v$$

### 3. 径向加速度和横向加速度

在平面极坐标系中,加速度可表示为

$$\mathbf{a} = a_r \mathbf{e}_r + a_\theta \mathbf{e}_\theta,$$

其中

$$a_r = \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2, a_\theta = r \frac{d^2 \theta}{dt^2} - 2 \left( \frac{dr}{dt} \right) \left( \frac{d\theta}{dt} \right).$$

$a_r \mathbf{e}_r$  称为径向加速度,  $a_\theta \mathbf{e}_\theta$  称为横向加速度。

在平面极坐标系中,加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_\theta^2} = \sqrt{\left( \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right)^2 + \left( r \frac{d^2 \theta}{dt^2} - 2 \left( \frac{dr}{dt} \right) \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \right)^2},$$

方向为

$$\tan(\mathbf{a}, \mathbf{e}_r) = \frac{a_\theta}{a_r}.$$

## 四、直线运动

### 1. 匀速直线运动

若质点沿  $x$  方向作匀速直线运动,速度为  $v$ ,在  $t=0$  时,质点坐标为  $x_0$ ,经  $t$  秒后,质点的坐标为

$$x = x_0 + vt,$$

质点在时间  $t$  内的位移为

$$s = x - x_0 = vt.$$

### 2. 匀变速直线运动

若质点沿  $x$  方向作匀变速直线运动,设  $t=0$  时,质点的坐标为  $x_0$ ,初速为  $v_0$ ,加速度为  $a$ ,则在  $t$  时刻质点的速度和坐标分别为

$$v = v_0 + at,$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2。$$

质点在时间  $t$  内的位移为

$$s = x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2。$$

在  $v$  和  $x$  两式中消去  $t$  得

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) = 2as。$$

### 3. 变加速直线运动

若质点沿  $x$  方向作变加速度直线运动, 加速度是时间的函数, 则  $t$  时刻质点的速度和坐标分别为

$$v = v_0 + \int_0^t a dt,$$

$$x = x_0 + \int_0^t v dt。$$

## 五、一般曲线运动

在  $t$  时刻质点的速度和位矢分别为

$$v = v_0 + \int_0^t a dt,$$

$$r = r_0 + \int_0^t v dt。$$

上述表达式在直角坐标系中, 对应在  $t$  时刻的速度和坐标分别为

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt,$$

$$v_y = v_{0y} + \int_0^t a_y dt,$$

$$v_z = v_{0z} + \int_0^t a_z dt;$$

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt,$$

$$y = y_0 + \int_0^t v_y dt,$$

$$z = z_0 + \int_0^t v_z dt.$$

## 六、抛体运动

### 1. 平抛运动

质点以初速  $v_0$  沿水平方向抛出后, 仅受重力作用的运动, 称为平抛运动。

取坐标系如图 3.6, 在  $t$  时刻, 质点的速度在坐

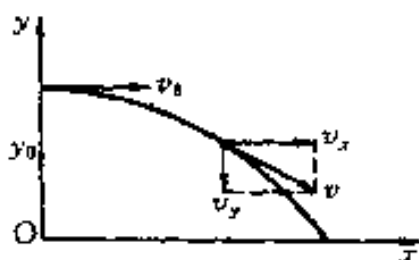


图 3.6

标系中的两个分量为

$$v_x = v_0, v_y = -gt,$$

则在  $t$  时刻速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (-gt)^2},$$

方向为

$$\tan(v, i) = \frac{v_y}{v_x}.$$

$t$  时刻质点的坐标为

$$x = v_0 t, y = y_0 - gt^2.$$

轨迹方程为



$$y = \frac{g}{2v_0^2}x^2 + y_{00}$$

## 2. 斜抛运动

质点以初速  $v_0$  与水平方向夹角为  $\theta_0$  抛出后, 仅受重力作用的运动, 称为斜抛运动(图 3.7)。斜抛运动是水平方向的匀速直线运动和铅直方向的匀变速直线运动的合运动。

初速度  $v_0$  在坐标系中的两个分量分别为

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0, \quad v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$$

$t$  时刻质点速度  $v$  的两个分量为

$$v_x = v_0 \cos \theta_0, \quad v_y = v_0 \sin \theta_0 - gt,$$

$t$  时刻质点速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 - 2v_0 g \sin \theta_0 t + g^2 t^2},$$

方向为

$$\tan(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{i}) = \frac{v_y}{v_x}$$

$t$  时刻质点的坐标  $(x, y)$  为

$$x = v_0 \cos \theta_0 t, \quad y = v_0 \sin \theta_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

质点运动的轨道方程为

$$y = \tan \theta_0 x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta_0} x^2,$$

这种轨道是一抛物线, 如图 3.7 所示。

质点达到最高点的所需的时间是

$$T = \frac{v_0 \sin \theta_0}{g}$$

质点达到的最大高度是

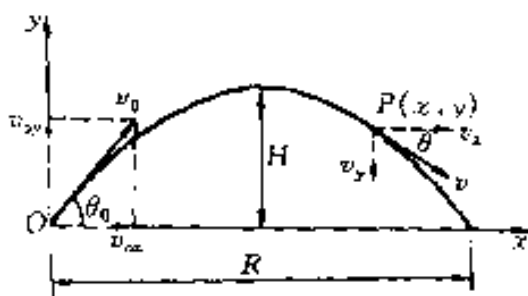


图 3.7

$$H = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{2g}$$

质点在水平方向达到的最大距离,即射程是

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}$$

当抛射角  $\theta_0 = 45^\circ$  时,射程最大,称为最大射程  $R_{\max}$ ,即

$$R_{\max} = \frac{v_0^2}{g}$$

### 3. 安全抛物线

作斜抛运动的质点,在一定的初速( $v_0$ )条件下,改变抛射角,则在抛射点周围的空间内,存在一个区域,在该区域内的一切飞行物体都有被质点击中的可能,而在该区域之外则是安全的,这个安全区是以抛物线

$$y = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{g}{2v_0^2}x^2$$

对  $y$  轴的旋转抛物面为边界的。这抛物线称为安全抛物线,如图 3.8 中虚线所示。

## 七、圆周运动

设质点在平面  $xOy$  内绕原点  $O$  作半径为  $R$  的

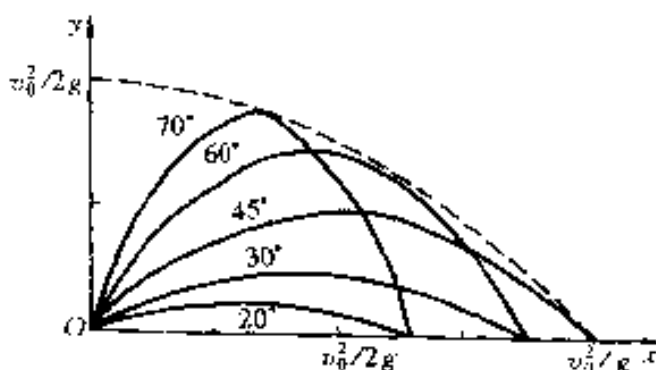


图 3.8

圆周运动(图 3.9),在描述圆周运动时,除了用线量关系外,还用角量关系来描述。

### 1. 角量

#### (1) 角坐标

在某时刻  $t$ , 质点位于  $P_1$  点, 由于其位矢  $r$  的长度恒定不变, 故只需用位矢  $r$  与  $x$  轴的夹角  $\theta$  确定质点在圆周上的位置,  $\theta$  角称为对  $O$  点的角坐标。通常规定从极轴(图中为  $x$  轴)沿逆时针方向量得的  $\theta$  角为正, 反之为负。因而角坐标  $\theta$  是一个代数量。

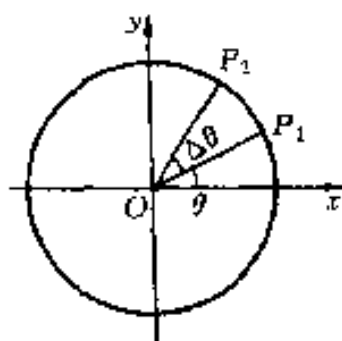


图 3.9

#### (2) 角位移

在  $t$  到  $t + \Delta t$  时间内, 位矢转过  $\Delta\theta$  角, 质点到

达  $P_2$  点,角坐标为  $\theta + \Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  称为质点在  $\Delta t$  时间内的角位移。角位移的单位是 rad(弧度)。

角位移也是代数量,它的正负决定于  $\Delta t$  时间内质点角坐标变化的方向与  $\theta$  正方向相同还是相反。两者同向时为正;反向为负。

### (3) 角速度

当时间  $\Delta t \rightarrow 0$  时,角位移  $\Delta\theta$  与时间  $\Delta t$  之比的极限,称为质点在  $t$  时刻的瞬时角速度,简称角速度,即

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

角速度的单位是 rad/s。

### (4) 角加速度

设质点在时刻  $t$  的角速度为  $\omega$ ,在时刻  $t + \Delta t$ ,角速度为  $\omega'$ ,在  $\Delta t$  时间内,角速度的增量为  $\Delta\omega = \omega' - \omega$ 。当时间  $\Delta t \rightarrow 0$  时,角速度增量  $\Delta\omega$  与时间  $\Delta t$  之比的极限,称为质点在时刻  $t$  的瞬时角加速度,简称角加速度,即

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

角加速度的单位 rad/s<sup>2</sup>。

## 2. 角量与线量的关系

$$\Delta s = R\Delta\theta,$$

式中  $\Delta s$  就是质点在  $\Delta t$  时间内自然坐标的增量。

$$v = R\omega,$$

$$a_r = \frac{dv}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = Ra,$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2.$$

### 3. 圆周运动的运动学方程

#### (1) 匀速圆周运动

$$\theta = \theta_0 + \omega t。$$

#### (2) 匀变速圆周运动

$$\omega = \omega_0 + \alpha t，$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2，$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha(\theta - \theta_0)。$$

## 八、相对运动

设物体 A 和物体 B 相对于某一参考系的速度分别为  $v_A$  和  $v_B$ ，则物体 B 相对于物体 A 的速度为

$$v_{BA} = v_B - v_A。$$

(关于相对运动问题，详见第四章“伽利略相对性原理”。)

## 第四章 质点动力学

### 一、牛顿运动定律

#### 1. 牛顿第一定律

任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态，直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止。

物体保持它的原有运动状态不变的性质称为物体的**惯性**。因此，牛顿第一定律又称**惯性定律**。惯性定律首先是由伽利略(G. Galilei)发现的，所以牛顿第一定律也称为伽利略惯性定律。

#### 2. 牛顿第二定律

物体的动量对时间的变化率同该物体所受的合外力成正比，并与合外力的方向相同，即

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt},$$

式中  $p = mv$  为物体的**动量**。

在经典力学中，质量  $m$  是不随时间改变的，牛顿第二定律可写成

$$F = m \frac{dv}{dt} = ma,$$

即物体运动的加速度同作用在该物体上的合外力成正比，而同物体的质量成反比，合外力和加速度的方向相同。

实际应用时,常用它的分量式。在直角坐标系中为

$$F_x = ma_x = m \frac{dv_x}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2},$$

$$F_y = ma_y = m \frac{dv_y}{dt} = m \frac{d^2y}{dt^2},$$

$$F_z = ma_z = m \frac{dv_z}{dt} = m \frac{d^2z}{dt^2};$$

对于平面曲线运动,常用切向和法向分量式,即

$$F_\tau = ma_\tau = m \frac{dv}{dt}, F_n = ma_n = m \frac{v^2}{\rho}。$$

### 3. 牛顿第三定律

两物体相互作用时,作用力和反作用力大小相等,方向相反,在同一直线上。用公式表示,则有

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}。$$

### 4. 附注

牛顿运动定律并非对所有参考系都成立,它们只在惯性参考系中成立。参看本章(四)“惯性力”。

牛顿运动定律所指的物体是质点。

## 二、力

力是物体之间的相互作用,它能使物体的运动状态发生变化或使物体发生形变。

力是矢量,有大小和方向,力对物体的作用效果还与其作用点的位置有关。力的大小、方向和作用点称为力的三要素。

力的单位是 N(牛顿)。质量为 1kg 的物体产生  $1\text{m/s}^2$  的加速度所需的力,即为 1N。

### 1. 力学中常见的几种力

#### (1) 万有引力

宇宙间,任何两个物体(大到天体星系,小到微观粒子)之间都存在相互吸引的力,这种力称为万有引力。

① 万有引力定律:设有两质点,其质量为  $m_1$  和  $m_2$ ,相隔距离为  $r$ ,它们之间的万有引力  $F$  与两个质点的质量乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,方向沿着两质点的连线,即

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}。$$

这就是万有引力定律。如以质点 1 为原点,质点 1 作用于质点 2 的万有引力的矢量表示式为

$$F_{21} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} r^0,$$

式中  $r^0$  为质点 1 指向质点 2 的单位矢量。负号表示  $F_{21}$  的方向与  $r^0$  的方向相反(图 4.1)。比例常数  $G$  称为引力常量,国际推荐的数值为

$$G = 6.6725985 \times 10^{-11} \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2。$$

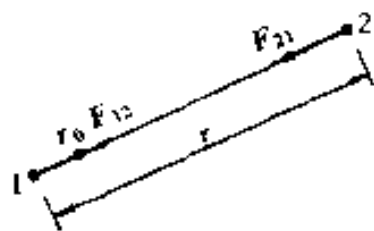


图 4.1

② 重力:习惯上常把地球对其表面附近尺寸不大的物体的万有引力称为该物体的**重力**,其大小也就是物体的**重量**。质量为  $m$  的物体,其重量为

$$P = G \frac{mM}{R^2} = mg,$$



式中  $M$  为地球的质量,  $R$  为地球的半径,  
 $g = G \frac{M}{R^2} \approx 9.8 \text{m/s}^2$  称为重力加速度。

由于地球自转的影响,物体还受到惯性力。因此,实际测得的重量是万有引力和惯性力构成的有效重力的大小,称为视重。同一物体的有效重力在地球表面上不同地方略有差异,纬度越低的地方,有效重力越小。在两极处最大,在赤道上最小。在地面上纬度为  $\varphi$  处物体的视重为

$$P \approx \frac{GMm}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi = \frac{GMm}{R^2} \left( 1 - \frac{1}{289} \cos^2 \varphi \right) - P_0 \left( 1 - \frac{1}{289} \cos^2 \varphi \right)。$$

其中,  $P_0$  为物体的重量。

实际上地球并不是一个理想的球体,稍呈扁平(两极半径为 6357m,赤道半径为 6378m),因此,在地面上纬度为  $\varphi$  处物体的视重的更准确结果是

$$P \approx P_0 \left( 1 - \frac{1}{191} \cos^2 \varphi \right)。$$

此外,物体的视重还与物体离地面的高度  $h$  有关。由于高度对重力的修正比纬度的修正大得多,考虑高度修正时,不再考虑纬度的差异。对于离地面高度为  $h$  的物体的重量为

$$P = G \frac{Mm}{(R+h)^2} \approx G \frac{Mm}{R^2} \left( 1 - \frac{h}{R} \right)。$$

## (2) 弹力

物体因形变而产生的恢复力,称为弹(性)力。

弹力的表现形式有很多种,如压力、支撑力、张力、拉力、推力以及弹簧的弹力等。

一些弹性物体(如弹簧等)在形变不超过一定的限度时,其弹性力遵从胡克(Hooke)定律

$$f = -kx,$$

式中  $k$  称为弹性体的劲度系数(曾称倔强系数),  $x$  为偏离平衡位置的位移,负号表示力和位移的方向相反。其矢量表示式为

$$\boldsymbol{f} = -kxi$$

式中  $i$  为  $x$  方向的单位矢量。

弹力的本质是分子之间的电磁相互作用。

### (3) 摩擦力

两个相互接触的物体在沿接触面相对运动时或有相对运动趋势时,在接触面之间产生一对阻止相对运动的力,称为摩擦力。摩擦力可分为静摩擦力和滑动摩擦力。

① 静摩擦力:相互接触的两个物体在外力作用下,虽有运动趋势,但并不产生相对运动,这时的摩擦力称为静摩擦力。

静摩擦力的大小随外力的增大而增大。当外力达到某一数值时,物体将开始滑动,这时的静摩擦力称为最大静摩擦力  $f_{s\max}$ 。所以,静摩擦力大小的变化范围是  $0 \leq f_s \leq f_{s\max}$ 。最大静摩擦力的大小与接触面间的正压力  $N$  成正比,即

$$f_{s\max} = \mu_s N,$$

式中  $\mu_s$  称为静摩擦系数,它与相互接触物体的材料和表面状况(粗糙程度,干湿程度等)有关。

② 滑动摩擦力:两相互接触的物体,当物体间有相对运动时,两接触面间的摩擦力称为滑动摩擦力。滑动摩擦力  $f_k$  也和正压力成正比,即

$$f_k = \mu_k N,$$

式中  $\mu_k$  称为**滑动摩擦系数**, 也与接触物体的材料和表面状况有关, 而且还和物体的相对速度有关。在大多数情况下, 它随速度的增大而减小。当相对速度不太大时,  $\mu_k$  可近似看作常数。

对于给定的一对接触面,  $\mu_k$  略小于  $\mu_s$ 。

除了固体与固体之间的摩擦力外, 当固体在流体(液体、气体等)中运动时, 或流体内部的各部分之间存在相对运动时, 它们之间也存在另一种摩擦力, 即粘性阻力。物体作滚动时还有滚动摩擦力等。

有关摩擦力的本质, 直到今天还不十分清楚, 但可以肯定, 它与物质分子间的电磁相互作用有关。

## 2. 自然界中的基本相互作用

近代科学研究证明, 在自然界中, 形形色色的不同种类的力, 都可归结为四种基本相互作用, 如表 4.1 所示。

表 4.1 四种基本相互作用

类型	相互作用的物体	强度	作用距离	宏观表现
引力相互作用	一切微粒和物体	$10^{-38}$	长	有
弱相互作用	大多数微粒	$10^{-13}$	短( $\sim 10^{-18}\text{m}$ )	无
电磁相互作用	带电微粒或物体	$10^{-2}$	长	有
强相互作用	核子、介子等	1	短( $\sim 10^{-15}\text{m}$ )	无

研究这四种相互作用之间的联系, 20 世纪 60 年代温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)等提出了电磁相

相互作用和弱相互作用统一起来的观点,称为弱电统一理论。该理论在 80 年代初得到实验证实。在弱电统一成功的基础上,人们又进一步提出弱电强的统一理论,很快又建立了超对称理论,企图把引力也统一起来,但至今尚未得到有实际意义的结果。

### 三、质量

#### 1. 惯性质量和引力质量

**惯性质量**是物体惯性大小的量度。

**引力质量**是物体引力性质的量度。

引力质量和惯性质量同时存在,并且总是成比例的。实验证明,对于在实验室里测试的物体,惯性质量和引力质量成比例的精度已达  $10^{-12}$ 。因此可以视为相等。爱因斯坦(A. Einstein)在他的广义相对论中提出的等效原理,就是以惯性质量和引力质量相等这一前提为依据的。因此,一切与广义相对论有关的观察和实验的精确结果都可以看成是这两种质量相等的证明。所以,惯性质量和引力质量是表征物体内在性质同一物理量——质量的不同表现。

#### 2. 高速运动物体的质量

狭义相对论指出:对于高速(速度  $v$  接近于光速  $c$ )运动的物体,其质量随速度而变化,即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

式中  $m_0$  为物体静止时的质量,称为静质量。

当  $v \ll c$  时,有  $m \approx m_0$ ,即低速运动物体的质量是不变的。

## 四、惯性力

### 1. 惯性系和非惯性系

牛顿第一定律成立的参考系称为**惯性系**。实验表明,地球是相对较好的惯性系。一切相对于惯性系作匀速直线运动的参考系都是惯性系。

牛顿运动三定律只在惯性系中成立。

彼此作变速运动的参考系称为**非惯性系**。在非惯性系中,牛顿运动定律是不成立的。

### 2. 非惯性系中的力学规律

在非惯性系中应用牛顿运动定律时,除了相互作用所引起的力以外,还需附加一个由于非惯性系而引起的力——**惯性力**,则牛顿运动定律表述为

$$F + F_{\text{惯}} = ma',$$

式中  $a'$  为物体相对于非惯性系的加速度。

### 3. 平动非惯性系中的惯性力

在平动非惯性系中质点的惯性力为

$$F_{\text{惯}} = -ma_0,$$

式中  $a_0$  为非惯性系相对于惯性系的加速度,负号表示  $F_{\text{惯}}$  的方向与  $a_0$  的方向相反。

### 4. 惯性离心力

在匀速转动的非惯性系中的静止质点所受的惯性力为

$$F_{\text{惯}} = -ma_n = -mR\omega^2,$$

式中  $R$  为质点到转轴的垂直距离,  $\omega$  为转动参考系的角速度,式中负号表示  $F_{\text{惯}}$  沿向心加速度的反方向。因为在此非惯性系中,  $F_{\text{惯}}$  与向心加速度的方向相反,故称为**惯性离心力**。惯性离心力与离心力

的概念不同,离心力是在惯性系中观察时向心力的反作用力,并不作用在作圆周运动的物体上;而惯性离心力是作用在该物体上的。

### 5. 科里奥利力

如果物体相对于匀速转动参考系作相对运动,这时还受到另一种惯性力,称为科里奥利(Coriolis)力,其矢量式为

$$F_c = 2mv \times \omega,$$

式中  $v$  物体相对于转动参考系的速度,  $\omega$  为转动参考系的角速度矢量,其方向规定为沿转轴的方向,指向由右螺旋法则确定(图 4.2(a))。

在北半球河流右岸被冲刷得比较严重,双轨铁路的右轨磨损较多,以及赤道附近东北贸易风(信风)(图 4.2(b))和北半球上旋风(图 4.2(c)),都是受科里奥利力的影响形成的。

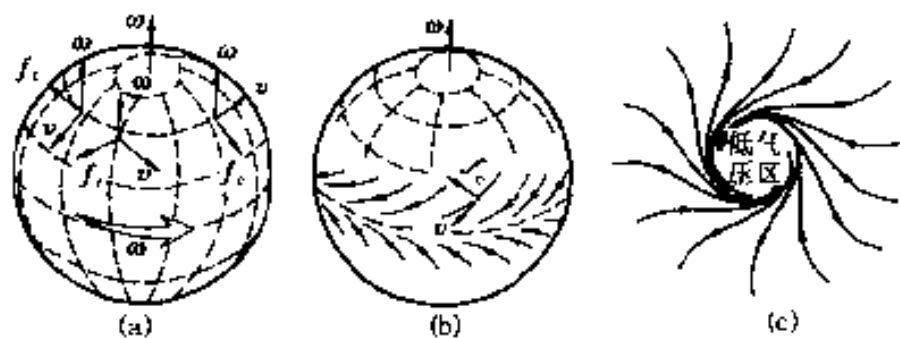


图 4.2

## 五、伽利略相对性原理

### 1. 伽利略相对性原理的表述

一切彼此作匀速直线运动的惯性系,对于描述机械运动的力学规律来说完全等价的。或者说,不

可能在惯性系内进行任何力学实验来确定该系统是在静止状态还是在作匀速直线运动。这个原理叫做力学的相对性原理或伽利略相对性原理。

## 2. 伽利略坐标变换

设有两个惯性系  $S$  和  $S'$ , 对应的坐标轴互相平行,  $S'$  系相对于  $S$  系沿  $x$  方向以速度  $V$  作匀速直线运动(图 4.3)。取两坐标原点相重合的时刻为时间的零点, 则两参考系的时空坐标变换关系为

$$\begin{cases} x' = x - Vt, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = t; \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} x = x' + Vt', \\ y = y', \\ z = z', \\ t = t'. \end{cases}$$

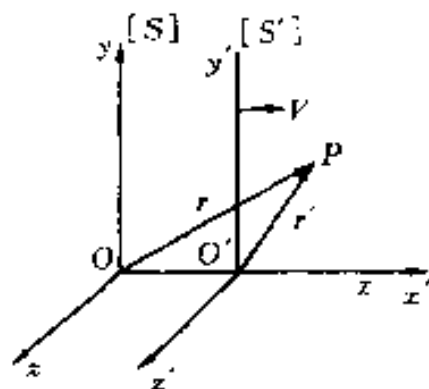


图 4.3

以上变换式叫做伽利略坐标变换式。如用矢量式表示则为

$$\begin{cases} \mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{V}t, \\ t' = t; \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{V}t, \\ t = t'. \end{cases}$$

伽利略坐标变换反映了牛顿的绝对时空观, 即时间是绝对的, 与空间无关, 与参考系无关。空间间隔与参考系无关, 是绝对不变的。

### 3. 速度变换

设在某时刻  $t$ , 质点相对于  $S$  系的速度为  $v$ , 相对于  $S'$  系的速度为  $v'$ , 根据伽利略坐标变换式可得速度变换式为:

$$\begin{cases} v_x' = v_x - V, & (v_x = v_x' + V) \\ v_y' = v_y, & \text{或} \begin{cases} v_y = v_y' \\ v_z = v_z' \end{cases} \\ v_z' = v_z; \end{cases}$$

其矢量为

$$v' = v - V; \text{或 } v = v' + V。$$

习惯上把质点相对于运动参考系( $S'$ 系)的速度  $v'$  叫做相对速度, 相对于静止参考系( $S$ 系)的速度  $v$  叫做绝对速度, 运动参考系( $S'$ 系)相对于静止参考系( $S$ 系)的速度  $V$  叫做牵连速度。上式就是经典力学的速度变换定理(图 4.4)。

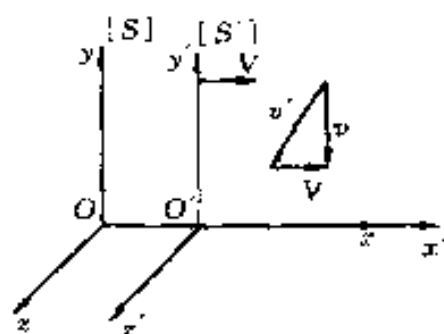


图 4.4

为了便于记忆, 常把质点  $A$  相对于  $S$  系的速度写成  $v_{AS}$ , 相对于  $S'$  的速度写成  $v_{AS'}$ , 而把  $S'$  系相对于  $S$  系的速度写成  $v_{S'S}$ , 于是(注意脚标的程序)

$$v_{AS} = v_{AS'} + v_{S'S}。$$

### 4. 加速度变换

设  $S'$  系相对于  $S$  系作匀加速直线运动, 加速度



为  $a_0$ , 沿  $x$  轴方向。设在某时刻  $t$ , 质点相对于  $S$  系的加速度为  $a$ , 相对于  $S'$  系的加速度为  $a'$ , 则加速度的变换为

$$a' = a - a_0, \text{ 或 } a = a' + a_0.$$

如果  $S'$  系相对于  $S$  系作匀速直线运动, 则  $a_0 = 0$ , 于是

$$a' = a.$$

它表明质点的加速度对于惯性系是不变量。

在经典力学中, 对于不同的惯性系, 质量  $m$  和力  $F$  也是不变量, 所以牛顿第二定律有相同的形式。在伽利略变换下, 动量守恒定律以及其他动力学规律的形式也保持不变。所以, 力学规律对一切惯性系都是等价的。

## 六、动量守恒定律

### 1. 动量和冲量

质量为  $m$  的物体以速度  $v$  运动时, 其动量  $p$  为

$$p = mv.$$

动量是矢量, 它的方向和速度  $v$  的方向相同。动量可作为物体做机械运动的量度。

当物体以高速(速度  $v$  接近于光速  $c$ ) 运动时, 其动量为

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

式中  $m_0$  为物体的静质量。

作用在物体上的力和力的作用时间的乘积称为在这段时间内作用在物体上的冲量。恒力的冲量为

$$I = F\Delta t = F(t_2 - t_1),$$

变力的冲量为

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt,$$

冲量也是矢量。如果  $F$  是个大小和方向都变的变力,冲量的方向和大小要由这段时间内所有微分冲量  $Fdt$  的矢量和来决定。只有当  $F$  的方向恒定不变时,冲量的方向才和  $F$  同方向。

动量和冲量具有相同的量纲。但在国际单位制中,动量的单位为  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$ ,而冲量的单位为  $\text{N}\cdot\text{s}$ 。

### 2. 动量定理

某段时间内作用在质点的合外力的冲量,等于该时间质点动量的增量,即

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = p_2 - p_1 = mv_2 - mv_1,$$

这就是质点**动量定理**的积分形式。

质点动量定理的微分形式为

$$F dt = dp = d(mv),$$

即作用在质点上合外力的元冲量等于质点动量的微分。

动量定理实质上是牛顿第二定律的另一种表述形式,阐述力对时间累积效应的物理规律。

### 3. 动量守恒定律

若系统(质点系)不受外力或所受外力而合力为零,则系统的总动量保持不变。这就是质点系的**动量守恒定律**:

$$\sum m_i v_i = \text{常矢量}, (\text{当 } \sum F = 0 \text{ 时}).$$

动量守恒定律的表达式是一个矢量式。在实际问题中,如果系统所受的合外力不为零,但外力在某一方

向(例如  $x$  方向)的分量之代数和为零,尽管系统的总动量不守恒,但系统的动量在该方向的分量却是守恒的,即

$$\sum m_i v_{ix} = \text{常量}, (\text{当 } \sum F_x = 0 \text{ 时}).$$

动量守恒定律是物理学中最基本的普遍定律之一,在相对论中和微观粒子范畴中仍然成立。

## 七、机械能守恒定律

### 1. 功

功是量度能量转换与传递的物理量。功的大小等于质点受到的力和它的位移的标积,即

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F \cos\theta ds,$$

式中  $\theta$  为  $\mathbf{F}$  与  $d\mathbf{r}$  之间的夹角。

若质点在变力的作用下,从  $a$  点沿曲线路径运动到  $b$  点,则变力  $\mathbf{F}$  在这过程中所作的功为

$$A = \int_a^b dA = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}.$$

功是标量,功的单位是 J(焦耳)。

#### (1) 重力的功

质点在地面上方不太高的范围内,从高度  $h_1$  经任意路径到达高度  $h_2$  的过程中,重力所作的功为

$$A = mgh_1 - mgh_2.$$

#### (2) 弹力的功

劲度常数为  $k$  的弹簧,在弹性限度内,使质量为  $m$  的质点从离平衡位置  $x_1$  处到达位置  $x_2$  处,弹力所作的功为

$$A = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2.$$

### (3) 万有引力的功

一质点  $m_1$  受另一质点  $m_2$  的引力作用, 从离  $m_2$  的距离  $r_1$  处经任意路径移至  $r_2$  处, 引力对  $m_1$  所作的功为

$$A = - \left( G \frac{m_1 m_2}{r_1} - G \frac{m_1 m_2}{r_2} \right)。$$

### (4) 保守力

重力、弹力、万有引力所作的功都与运动的路径无关, 只与始末的位置有关, 这种力称为保守力。保守力的特点可表示为

$$\oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = 0,$$

即质点所受的保守力, 经任意路径回到原处时, 做功为零。

摩擦力和阻力等则是非保守力。

## 2. 功率

力在单位时间内所作的功, 称为功率, 即

$$P = \frac{dA}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}。$$

功率的单位是 W(瓦)。常用的单位还有马力(HP), 并规定  $1\text{HP} = 735\text{W}$ 。平时常把功率和时间的单位相结合作为功的单位, 例如  $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦小时),  $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^4 \text{J}$ 。

## 3. 动能

质点由于运动而具有的能量, 称为动能。质量为  $m$  速度为  $v$  的质点的动能为

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2。$$

当质点的运动速度接近真空中光速  $c$  时, 质点的质量将随速度而变化, 此时它的动能由相对论给出为

$$E_K = mc^2 - m_0c^2,$$

式中  $m_0$  为质点的静质量,  $m$  为质点的运动质量。

#### 4. 势能

物质系统中,各物体之间或物体内部各部分之间存在保守力的相互作用,与相对位置有关的能量称为**势能**。

势能是属于系统的,不为单个物体所具有。

##### (1) 重力势能

地球与地面附近物体之间因引力相互作用而具有的势能,称为**重力势能**。如以地球表面的重力势能为零,则质量为  $m$  的物体离地面高为  $h$  处的重力势能为

$$E_P = mgh。$$

##### (2) 弹性势能

物体形变时,由于各部分之间存在弹力的相互作用而具有的势能,称为**弹性势能**。在弹性限度内,如以弹簧的自然长度为零势能点,则弹簧的弹性势能为

$$E_P = \frac{1}{2}kx^2,$$

式中  $k$  为弹簧的劲度常量,  $x$  是弹簧被拉伸或压缩的距离。

##### (3) 引力势能

物质系统的各物体之间,由于万有引力作用而具有的势能。若以无限远处为零势能点,则**引力势能**为

$$E_P = -\frac{GmM}{r},$$

式中  $m$  和  $M$  分别为两物体的质量,  $r$  为物体  $m$  距  $M$  的距离。

对于物体和地球来说,物体离地心  $r$  处的引力势能为

$$E_P = -\frac{GmM_E}{r},$$

式中  $M_E$  是地球的质量。

#### (4) 保守力与势能之间的关系

如势能  $E_P$  是位置坐标  $(x, y, z)$  的函数,则保守力  $F$  在三个坐标轴上的分量分别为

$$F_x = -\frac{\partial E_P}{\partial x}, F_y = -\frac{\partial E_P}{\partial y}, F_z = -\frac{\partial E_P}{\partial z},$$

即保守力沿某坐标轴的分量等于势能对此坐标的导数的负值。于是

$$\begin{aligned} F &= F_x i + F_y j + F_z k = -\frac{\partial E_P}{\partial x} i - \frac{\partial E_P}{\partial y} j - \frac{\partial E_P}{\partial z} k = \\ &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k\right) E_P = -\nabla E_P, \end{aligned}$$

式中  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$  称为梯度算子,  $\nabla E_P$  称为势能函数的梯度,势能梯度  $\nabla E_P$  是一个矢量,它的方向沿着势能变化最大的方位并指向势能增加的方向。据此,保守力等于势能梯度的负值。

#### 5. 动能定理

合外力对质点所作的功等于质点动能的增量,即

$$A = \int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = E_{K2} - E_{K1} = \Delta E_K,$$

式中  $E_{K1}$  和  $E_{K2}$  分别表示质点的初动能和末动能。这就是质点的动能定理。

对于系统来说,质点除了受外力外,还要受到质点间相互作用的内力。因此,系统的外力和内力作

功的总和等于该系统动能的增量,即

$$A_{\text{外}} + A_{\text{内}} = E_{K2} - E_{K1} = \Delta E_K,$$

这就是系统的动能定理。

### 6. 系统的功能原理

系统所受合外力作的功与系统内非保守内力作的功之总和,等于系统总机械能的增量,即

$$A_{\text{外}} + A_{\text{非内}} = \Delta E_P + \Delta E_K = \Delta E。$$

这个结论叫做系统的功能原理。

### 7. 机械能守恒定律

如果一个系统只有保守内力做功,其他内力和一切外力都不做功,或者它们的总功为零,则系统内各物体的动能和势能可以互相转换,但机械能的总量保持不变。这个结论叫做机械能守恒定律。

### 8. 能量守恒定律

能量是物质运动的一种量度。自然界的一切物质都具有能量,对应于物质的各种运动形式,能量具有不同的形式,它既不能产生,也不能消灭,它们只能从一种形式转换为另一种形式。

一个孤立系统经历任何变化时,系统内各种形式的能量可以互相转换,或从一个物体传递给另一个物体,但它们的总和是一个常量。这就是能量守恒定律。

能量守恒定律是自然界中具有最大普适性的定律之一。

## 八、角动量守恒定律

### 1. 质点的角动量

在某时刻,设一质量为  $m$  的质点相对于给定参

考点  $O$  的位矢为  $r$ , 速度为  $v$  (图 4.5), 则质点的位矢  $r$  与其动量  $p = mv$  的矢积, 称为质点对定点  $O$  的角动量, 即

$$L = r \times p = r \times mv。$$

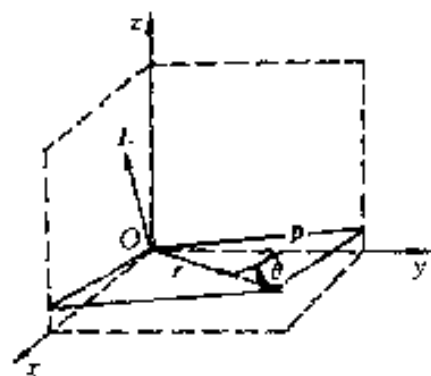


图 4.5

角动量  $L$  是一个矢量。按矢积定义,  $L$  的方向垂直于位矢  $r$  与动量  $mv$  所构成的平面, 并按右手螺旋法则确定其指向,  $L$  的大小为

$$L = mvr \sin \theta,$$

$\theta$  为  $r$  与  $mv$  之间小于  $180^\circ$  的夹角。角动量也可看作动量对给定点的矩, 所以也把角动量叫做动量矩。角动量一般随所选的参考点位置的不同而异。角动量的单位是  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ 。

质点对于定点  $O$  的角动量  $L$  在通过  $O$  点的任一轴线上的投影, 称为质点对轴的角动量。例如, 对于过  $O$  点的三个坐标轴的角动量分别为

$$L_x = L \cos \alpha, L_y = L \cos \beta, L_z = L \cos \gamma。$$

质点对轴的角动量是标量。

质点系对定点的角动量, 等于各质点对定点角动量的矢量和。同样, 它对于过定点的轴线的角动量, 则为质点系对定点的角动量在轴线上的投影, 也



■ 是标量。

## 2. 力矩

设力  $F$  的作用点为  $P$ ,  $P$  点相对于空间一点  $O$  (参考点) 的位矢为  $r$  (图 4.6), 则位矢  $r$  与力  $F$  的矢积  $M$  定义为力  $F$  对  $O$  点的力矩, 即

$$M = r \times F。$$

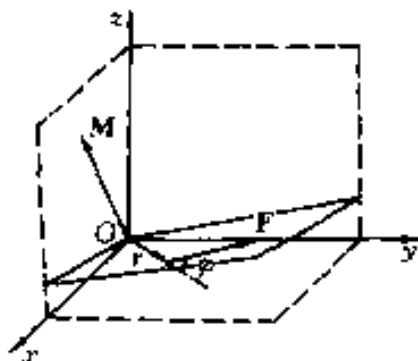


图 4.6

亦即, 力对点的力矩是矢量。按矢积定义, 力矩矢量  $M$  的大小为

$$M = Fr \sin \varphi,$$

式中  $\varphi$  为  $r$  与  $F$  之间小于  $180^\circ$  的夹角; 力矩  $M$  垂直于  $r$  与  $F$  所组成的平面, 其方向由右手螺旋法则确定。

力  $F$  对某轴线的力矩的大小, 就等于力对轴线上任一点的力矩在该轴线上的投影。例如, 图中力  $F$  对于  $Z$  轴的力矩  $M_z$ , 就等于力  $F$  对  $O$  点的力矩在  $z$  轴上的投影, 即

$$M_z = M \cos \gamma,$$

或中  $\gamma$  为力矩  $M$  与  $z$  轴之间的夹角。力对轴线的力矩是标量, 只有正负的区别。

## 3. 角动量定理

质点或质点系对某固定参考点(或某固定轴)转

动时,其所受的合外力对参考点(或对轴线)的冲量矩,等于它的角动量增量,即

$$Mdt = dL,$$

或

$$\int_{t_1}^{t_2} Mdt = L_2 - L_1 = \Delta L。$$

式中  $Mdt$  和  $\int_{t_1}^{t_2} Mdt$  称为合外力对点(或对轴)的冲量矩。冲量矩也是矢量。冲量矩的单位为  $N \cdot m \cdot s$ 。上式称为角动量定理。

角动量定理也可写成

$$M = \frac{dL}{dt},$$

即质点或质点系对某参考点(或对某轴)的角动量的变化率等于它所受的合外力对同一参考点(或轴)的力矩。

#### 4. 角动量守恒定律

如果作用在质点或质点系上的外力对某给定点(或对某轴)的力矩为零,则质点或质点系对该给定点(或轴)的角动量在运动过程中保持不变,即当  $M=0$  时,

$$L = \text{常矢量}。$$

这就是角动量守恒定律。

### 九、碰撞

运动物体相遇,在极短的时间内,通过相互作用,运动状态发生急剧变化的过程,称为碰撞。对于微观粒子,由于相互作用,在没有达到接触就改变了

运动方向,这种过程也称为碰撞,又称为散射。

若碰撞物体相对运动的速度方向在一直线上,则称为对心碰撞,或称正碰撞;不在一直线上的碰撞称为斜碰撞。

按碰撞前后系统的总动能是否守恒,可将碰撞分为弹性碰撞、非弹性碰撞和完全非弹性碰撞三类。

设质量为  $m_1$  和  $m_2$  的两小球作对心碰撞,碰撞前的速度分别为  $v_{10}$  和  $v_{20}$ ,碰撞后的速度为  $v_1$  和  $v_2$ (图 4.7)。

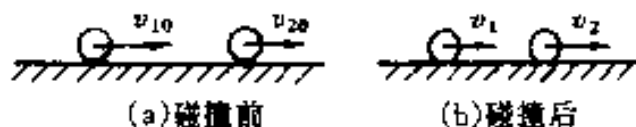


图 4.7

### 1. 弹性碰撞

在弹性碰撞中,两球的总动能不变,碰撞后的速度为

$$v_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_{10} + 2m_2v_{20}}{m_1 + m_2};$$

$$v_2 = \frac{2m_1v_{10} + (m_2 - m_1)v_{20}}{m_1 + m_2}。$$

① 设两球的质量相等,即  $m_1 = m_2$ ,则

$$v_1 = v_{20}, v_2 = v_{10},$$

即两球经过碰撞将交换彼此的速度。

② 设质量  $m_2$  的物体在碰撞前静止不动,且  $m_2 \gg m_1$ ,则

$$v_1 \approx -v_{10}, v_2 \approx 0,$$

90 即质量极大并且静止的物体,经碰撞后,几乎仍静止

不动,而质量极小的物体,在碰撞前后的速度方向相反,大小几乎不变。

### 2. 完全非弹性碰撞

在完全非弹性碰撞中,碰撞后两球的速度相同,即

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 v_{10} + m_2 v_{20}}{m_1 + m_2}。$$

### 3. 非弹性碰撞

在非弹性碰撞中,两球相碰变形而不能恢复原状,一部分机械能将转变为其他形式的能量。

牛顿总结实验结果提出碰撞定律:碰撞后两球的分离速度( $v_2 - v_1$ )与碰撞前两球的接近速度( $v_{10} - v_{20}$ )成正比,比值由两球的质料决定,即

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}}。$$

通常称  $e$  为恢复系数。 $e=1$  就是弹性碰撞; $e=0$  就是完全非弹性碰撞,对于非弹性碰撞, $0 < e < 1$ 。于是,两球作非弹性碰撞后的速度为

$$v_1 = v_{10} - m_2 \frac{(1+e)(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2};$$

$$v_2 = v_{20} + m_1 \frac{(1+e)(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2}。$$

在非弹性碰撞中损失的机械能为

$$\Delta E_K = \frac{1}{2}(1 - e^2) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_{10} - v_{20})^2。$$

## 十、变质量问题

火箭在飞行中,不断向后喷出燃气,火箭的质量在不断减小。雨滴在过饱和水气中降落时,水气不

断凝结到雨滴上,雨滴的质量在不断增大。这些事例都属于变质量问题。

### 1. 密舍尔斯基方程

设时刻  $t$  时主体的质量为  $m$ , 速度为  $v$ 。在  $dt$  时间内, 有质量  $dm$  的流动物以相对于主体的速度  $u$  加到主体上, 在  $t + dt$  时刻, 速度变为  $(v + dv)$  (图 4.8), 则主体的运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = F + u \frac{dm}{dt},$$

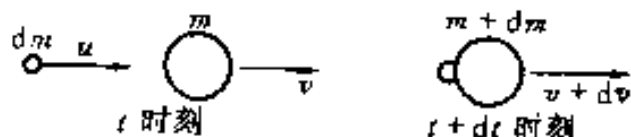


图 4.8

式中  $F$  为主体所受的外力。上式称为密舍尔斯基方程。

### 2. 火箭运动

#### (1) 火箭推力

火箭箭体受到的推力为

$$F = u \frac{dm}{dt},$$

式中  $u$  为喷气速度,  $\frac{dm}{dt}$  为喷气的流量。

#### (2) 火箭的运动方程

设火箭箭体的质量为  $M$ , 受到的外力(重力和空气阻力等)为  $F$ , 则箭体的运动方程为

$$F = M \frac{dv}{dt} + u \frac{dM}{dt}.$$

#### (3) 火箭的速度

1) 在重力场中竖直飞行时, 设开始喷气时, 火

箭的初速为零。火箭箭体在任一时刻的速度为

$$v = u \ln \frac{M_0}{M} - gt,$$

式中  $M_0$  为火箭壳体连同携带的燃料与助燃剂的总质量,  $M$  为  $t$  时刻的总质量。

2) 在不受外力的情况下, 到燃料烧尽时火箭的质量为  $M_f$ , 火箭能够达到的速度为

$$v = u \ln \frac{M_0}{M_f},$$

即火箭所能达到的最大速度决定于喷气速度  $u$  和火箭的质量比  $M_0/M_f$ 。目前由化学燃料所能达到的最高  $u$  值约为  $2500\text{m/s}$ ,  $M_0/M_f \approx 10$ 。

3) 多级火箭 设  $N_1, N_2, \dots$  为各级火箭的质量比, 则火箭最终可达到的速度为

$$v = u \ln(N_1 N_2 N_3 \dots).$$

## 十一、万有引力

### 1. 开普勒(J. Kepler)定律

#### (1) 第一定律(轨道定律)

所有行星都沿各自的椭圆轨道运行, 太阳位于这些椭圆的一个焦点上。

#### (2) 第二定律(面积定律)

太阳到行星的位矢在相等的时间内扫过相等的面积。实质上这就是角动量守恒定律。

#### (3) 第三定律(周期定律)

任一行星绕太阳公转周期  $T$  的平方与它离太阳的平均距离  $R$  (或椭圆轨道的长半径) 的立方成正比, 即

$$\frac{K^3}{T^2} = K,$$

式中  $K$  称为开普勒常数。

## 2. 万有引力定律

任何两质点间都存在相互作用的吸引力,力的方向沿两质点的连线,力的大小  $F$  与两质点的质量乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比,即

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

式中  $G$  为引力常量。国际推荐的数值为

$$G = 6.6725985 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2.$$

万有引力定律是自然界最重要的定律之一。

## 3. 引力场

从场的观点来看万有引力,认为万有引力是通过引力场来传递的。现代的引力理论(广义相对论)认为,引力场由时空中存在的物质所决定。

### (1) 引力场强

试探质点在引力场中任一点所受的力  $f$  与其质量成正比,比值  $f/m_0$  是反映引力场本身在某点的性质,把它定义为该点的引力场强度,简称引力场强,用  $g$  来表示:

$$g = \frac{f}{m_0}.$$

引力场强具有加速度的量纲。

① 质点的引力场强:在质量为  $m$  的质点的引力场中,距离质点  $r$  处的引力场强为

$$g = -\frac{Gm}{r^2} r^0,$$

$r^0$  为场点距质点位矢的单位矢量。

② 均匀球体的引力场强: 设球体的半径为  $R$ , 质量为  $M$ , 密度为  $\rho$ , 距离球心  $r$  处的引力场强:

$$g = \frac{4\pi G\rho}{3} r \quad (\text{球内});$$

$$g = \frac{4\pi G\rho R^2}{3r^2} = \frac{GM}{r^2} \quad (\text{球外})。$$

## (2) 引力势

由于万有引力也是保守力, 所以也可以引进引力势能和引力势。如以无限远处为零势能点, 则引力场中某点的引力势等于单位质量的质点所具有的引力势能, 也等于在引力场中经任意路径从该点移到无限远处万有引力所作的功,

$$U_p = \int_p^\infty g \cos\theta dl = \int_p^\infty \mathbf{g} \cdot d\mathbf{l}。$$

对于均匀球体在距离球心  $r$  处的引力势为

$$U = -\frac{GM}{r} \quad (\text{球外}),$$

$$U = \frac{2\pi G\rho}{3} r^2 + C \quad (\text{球内})。$$

式中  $c$  为与  $r$  无关的常量, 代表球心相对于  $\infty$  的引力势。

## 4. 宇宙速度

### (1) 第一宇宙速度(环绕速度)

物体从地面发射后, 能绕以地球为圆心的圆周运动所需的最小发射速度, 称为第一宇宙速度, 也称环绕速度, 其值为

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_E}{R_E}} = 7.9 \text{ km/s},$$

式中  $M_E$  和  $R_E$  分别为地球的质量和半径,  $M_E =$  95



■  $6.0 \times 10^{24} \text{kg}$ ,  $R_E = 6.4 \times 10^3 \text{m}$ 。

### (2) 第二宇宙速度(逃逸速度)

使人造天体脱离地球引力的作用范围飞向太阳,并以太阳为圆心作圆轨道运动所需的最小发射速度,称为**第二宇宙速度**,又称**逃逸速度**,其值为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}} = 11.2 \text{km/s}。$$

### (3) 第三宇宙速度

使人造天体脱离太阳系飞向星际空间所需的最小发射速度,称为**第三宇宙速度**,其值为

$$v_3 = 16.7 \text{km/s}。$$

### (4) 黑洞

如果某天体的逃逸速度等于光速,按狭义相对论,一切物体的速度不能超过光速,因此,任何物体都逃脱不掉。光子也要受到引力的作用,在这样的天体上就连光也不能发射出来。这种奇怪的天体就是广义相对论预言的黑洞。

当  $v_{\text{逃}} = c$  时,天体的半径需要达到如下值:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} ,$$

式中  $R_s$  称为天体的引力半径,也称黑洞的**史瓦西**(K. Schwarzschild)半径。例如质量等于太阳那样大的星体,半径必须小于 3km 时才能成为黑洞。

### 5. 质点在有心力场中的运动

质点在运动过程中所受的力的方向始终指向或背向一个给定点,这样的力称为**有心力**。这个给定点称为**力心**。在大多数情况下,有心力的大小仅与质点对力心的距离有关。万有引力就是有心力。

由于有心力对力心的力矩为零,所以质点在有心力作用下,质点对力心的角动量守恒。又由于有心力是保守力,所以在有心力场中运动的质点的机械能也守恒。

根据质点在有心场中的总机械能数值,可以确定其运动的轨道类型。设总能量  $E = E_K + E_P$ , 则

$E < 0$ , 轨道为椭圆, 特殊情况下为圆形;

$E = 0$ , 轨道为抛物线;

$E > 0$ , 轨道为双曲线的一支。参看图 4.9。

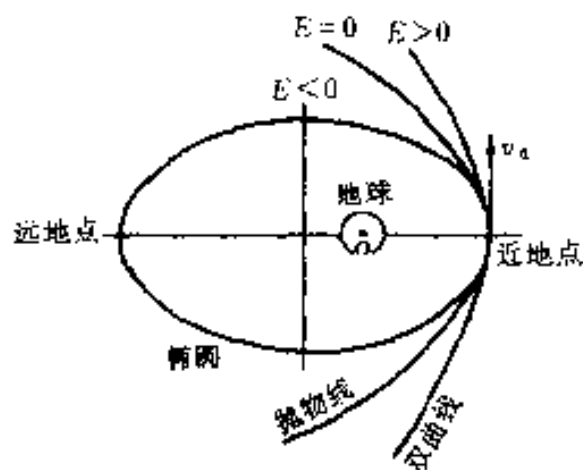


图 4.9

## 第五章 刚体力学

### 一、刚体的基本运动

#### 1. 刚体

物体内任意两点间的距离在外力作用下始终保持不变,从而使其大小与形状都保持不变的物体,称为**刚体**。刚体也是物体的一种理想模型。

#### 2. 平动

刚体运动时,连接刚体中任意两点的直线始终保持它的方位不变。这种运动称为刚体的**平动**或**平移**。

#### 3. 转动

刚体运动时,如果刚体内各点都绕同一直线作圆周运动,这种运动称为刚体的**转动**;这一直线称为**转轴**。如果转轴相对于所取的参考系是固定不动的,就称为**定轴转动**。如果转轴上一点静止于参考系,而转动的方位在变动,这种转动称为**定点转动**。

刚体的一般运动,可以看作由平动和转动所合成。

### 二、刚体的平动

刚体平动时,体内各点在任意一段时间内的位移以及任一时刻的速度和加速度都分别相等,即刚体平动时各点的运动情况相同。所以,刚体的平动

常用刚体的质心运动来替代。

### 1. 质心

质心是与质点系的质量分布有关的一个代表点,它的位置在平均意义上代表着质点分布的中心。

对于有许多质点组成的系统,如用  $m_i$  和  $r_i$  表示系统中第  $i$  个质点的质量和位矢,用  $r_c$  表示质心的位矢,即

$$r_c = \frac{\sum m_i r_i}{M},$$

式中  $M = \sum m_i$  为质点系的总质量。质心位置的坐标为

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{M}, y_c = \frac{\sum m_i y_i}{M}, z_c = \frac{\sum m_i z_i}{M}。$$

对于质量连续分布的物体,质心的位矢为

$$r_c = \int \frac{r dm}{M}。$$

其坐标为

$$x_c = \frac{\int x dm}{M}, y_c = \frac{\int y dm}{M}, z_c = \frac{\int z dm}{M}。$$

物体的质心和重心是两个不同的概念。重心是地球对物体各部分引力的合力(即重力)的作用点。当物体远离地球而不受重力作用,重心这个概念就失去意义,但质心却依然存在。对于地球上体积不太大的物体,重心和质心的位置是重合的。

### 2. 刚体平动的动力学方程

质点系所受外力的矢量和等于系统总质量和质心加速度的乘积,即

$$\sum_i \mathbf{F}_i = m\mathbf{a}_c$$

这就是质心运动定理。质心运动定理表明,质心的运动就像把质点系的质量和外力都集中于质心上的一个质点的运动一样。

刚体的平动也遵从质心运动定理。

### 三、刚体的定轴转动

#### 1. 力矩

在定轴转动中,因平行于转轴的外力对刚体绕轴转动不起作用,所以必须把方向任意的外力  $F$  分成两个分量(图 5.1),只有与转轴垂直的分力才能使刚体转动。这个分力的力矩为

$$M_z = F_{\perp} r \sin\varphi = F_{\perp} d,$$

它是力  $F$  对转轴  $Oz$  的力矩,式中  $\varphi$  是  $F_{\perp}$  与位矢  $r$  之间的夹角,  $d = r \sin\varphi$  是轴  $Oz$  到力  $F_{\perp}$  的作用线的垂直距离,通常叫做力臂。

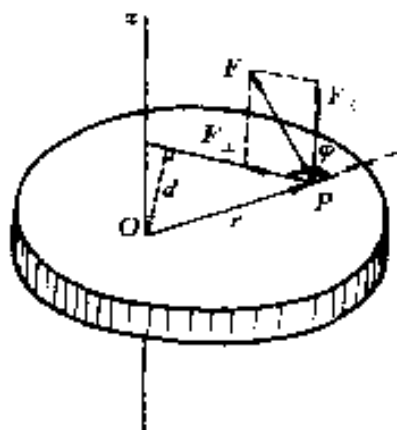


图 5.1

在定轴转动中,如果有几个外力同时作用在刚体上,它们的总力矩的量值等于这几个力的力矩的

代数和。力矩的正负号由右手螺旋法则规定,在力矩使刚体转动的转向与右手螺旋转向一致时,螺旋前进的方向如果沿转轴  $Oz$ ,它就被定为力矩的正方向。

### 2. 定轴转动定律

刚体在总外力矩  $M_z$  的作用下,所获得的角加速度  $\alpha$  与总外力矩的大小成正比。并与转动惯量成反比,即

$$M_z = I\alpha = I \frac{d\omega}{dt}。$$

这个关系叫做刚体的**定轴转动定律**。

刚体的定轴转动定律也可改写成

$$M_z = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{dL_z}{dt}，$$

即刚体所受到的对某给定轴的总外力矩等于刚体对该轴的角动量的变化率。这样的关系式运用范围更为广泛,不仅运用于刚体,也运用于转动惯量可变的非刚体。

### 3. 转动惯量

#### (1) 转动惯量的定义

刚体对转轴的**转动惯量**等于刚体上各质元的质量与各自到转轴的距离的平方的乘积之和,即

$$I = \sum r_i^2 \Delta m_i。$$

刚体的质量可认为是连续分布的,所以,上式可写成积分形式

$$I = \int r^2 dm，$$




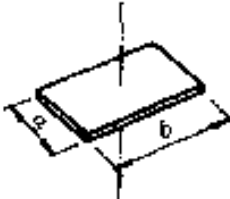
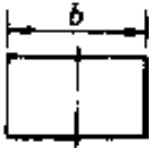
式中  $r$  是质元到转轴的距离。转动惯量的单位是  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

刚体的转动惯量是刚体转动中惯性大小的量度,它的地位相当于质点运动中的质量。

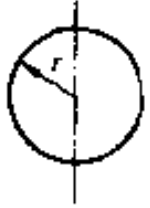
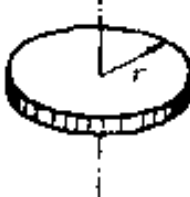

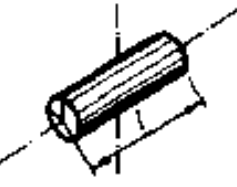
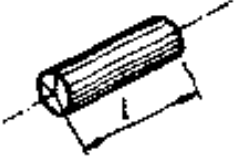


一个物体的转动惯量主要决定于:

- ①刚体的总质量;
- ②质量的分布;
- ③给定轴的位置。

(2) 几种简单形状刚体的转动惯量

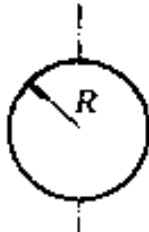
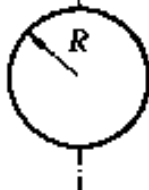
刚体名称	转轴位置	转动惯量	图形
薄壁圆环	沿直径	$I = \frac{1}{2} mr^2$ ( $r$ 为半径)	
细棒	过中心且和棒垂直	$I = \frac{1}{12} ml^2$ ( $l$ 为棒长)	
细棒	过端点且和棒垂直	$I = \frac{1}{3} ml^2$ ( $l$ 为棒长)	
矩形平板	过中心且和板面垂直	$I = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$ ( $a$ 为长, $b$ 为宽)	
矩形薄板	沿中心线(和板面平行)	$I = \frac{1}{12} mb^2$ ( $b$ 为宽)	

(续表)

刚体名称	转轴位置	转动惯量	图形
实心圆薄板	沿直径	$I = \frac{1}{4} mr^2$ ( $r$ 为半径)	
实心圆盘	过圆心且和盘面垂直	$I = \frac{1}{2} mr^2$ ( $r$ 为半径)	
实心圆盘	过边上任一点且和盘面垂直	$I = \frac{3}{2} mr^2$ ( $r$ 为半径)	
实心圆柱体	过中心且和几何轴垂直	$I = \frac{1}{4} mr^2 + \frac{1}{12} ml^2$ ( $r$ 为半径, $l$ 为柱长)	
实心圆柱体	过圆心沿几何轴	$I = \frac{1}{2} mr^2$ ( $r$ 为半径)	
空心圆柱体	过圆心沿几何轴	$I = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2)$ ( $r_1$ 为内半径, $r_2$ 为外半径)	
薄壁圆筒	过圆心沿几何轴	$I = mr^2$ ( $r$ 为半径)	



(续表)

刚体名称	转轴位置	转动惯量	图形
实心圆球	沿直径	$I = \frac{2}{5} mR^2$ ( $R$ 为球半径)	
球壳	沿直径	$I = \frac{2}{3} mR^2$ ( $R$ 为球半径)	

### (3) 平行轴定理

刚体对任一轴的转动惯量等于刚体对通过质心并与该轴平行的轴的转动惯量  $I_c$  加上刚体质量与两轴间距离  $d$  的二次方的乘积, 即

$$I = I_c + md^2。$$

这常叫做平行轴定理。

### (4) 刚体薄板的垂直轴定理

设薄板对垂直于板面  $z$  轴的转动惯量为  $I_z$ , 薄板对板面内互相正交的  $x$  轴和  $y$  轴的转动惯量分别为  $I_x$  和  $I_y$ , 则

$$I_z = I_x + I_y。$$

这常叫做垂直轴定理。

## 四、刚体定轴转动的角动量守恒定律

### 1. 刚体绕定轴的角动量

刚体对某给定点的角动量等于各个质点角动量

的矢量和,总角动量  $L$  的方向并不和角速度  $\omega$  的方向相一致(角速度  $\omega$  的方向是这样规定的:使右手螺旋转动的方向和刚体转动的方向相一致,则螺旋前进的方向就规定为角速度矢量的正方向)。

在定轴转动中,刚体绕定轴的角动量只是  $L$  对某固定轴(设  $Oz$  轴)的分量,其值为

$$L_z = I_z \omega。$$

$I_z$  为刚体对  $Oz$  轴的转轴惯量。

## 2. 刚体定轴转动的角动量定理

角动量定理的微分形式就是用角动量陈述的定轴转动定理:

$$M_z = \frac{d}{dt}(I_z \omega)。$$

当物体不是刚体,它对给定轴的转动惯量可以随时改变时,只要任一瞬时它可看作是绕定轴以角速度  $\omega$  转动的,则上式仍然成立。

对于物体系统,如果它们对同一转轴的角动量分别为  $I_{z1}\omega_1, I_{z2}\omega_2, \dots$ , 则系统对该轴的总角动量为  $L_z = \sum_i I_{zi}\omega_i, (i = 1, 2, \dots)$ 。对于这样的系统也可以有

$$M_z = \frac{dL_z}{dt} = \frac{d}{dt}(I_{zi}\omega_i)。$$

刚体对转轴的角动量定理也可用积分形式表示。如果在外力矩作用下,在  $t_1$  到  $t_2$  的一段时间内,物体对固定转轴的角动量由  $L_{z1} = (I_z \omega)_1$  变为  $L_{z2} = (I_z \omega)_2$ , 则

$$\int_{t_1}^{t_2} M_z dt = (I_z \omega)_2 - (I_z \omega)_1,$$

式中  $\int_{t_1}^{t_2} M_z dt$  叫做这段时间对轴的力矩的冲量, 或称冲量矩。上式表明: 定轴转动的刚体对轴的角动量增量等于外力对该轴的力矩的冲量。这就是对给定轴的角动量定理的积分形式。

### 3. 刚体定轴转动的角动量守恒定律

当外力对给定轴的总力矩为零时, 物体对该轴的角动量将保持不变, 即

$$\text{当 } M_z = 0 \text{ 时, } L_z = I_z \omega = \text{常量。}$$

这叫做对固定轴的角动量守恒定律。

如果转动过程中物体的转动惯量保持不变, 则物体以恒定的角速度转动; 如果物体的转动惯量发生改变, 则物体的角速度也随之改变, 但两者的积保持恒定。

当定轴转动系统由多个物体组成时, 同样可得定轴转动物体系统的角动量守恒定律, 即

$$\text{当 } M_z = 0 \text{ 时, } L_z = \sum I_{\sigma} \omega_i = \text{常量。}$$

## 五、刚体定轴转动的动能定理

### 1. 力矩的功

力对刚体所作的功可用力矩与刚体角位移乘积的积分来表示, 叫做力矩的功。即

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_z d\theta。$$

### 2. 刚体定轴转动的动能定理

合外力矩对刚体所作的功等于刚体动能的增量, 即

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_z d\theta = \frac{1}{2} I_z \omega_2^2 - \frac{1}{2} I_z \omega_1^2。$$

式中  $\frac{1}{2} I_z \omega^2 = E_K$  定义为刚体的转动动能。上式称为刚体定轴转动的动能定理。

### 3. 刚体的重力势能

一个不太大的刚体的重力势能与它的质量集中在质心时所具有的势能一样,即

$$E_P = mgh_c。$$

## 六、刚体定轴转动和质点直线运动的比较

刚体定轴转动和质点直线运动(刚体的平动)的物理量及一些基本规律的对照,见表 5-1。

表 5-1

质点的直线运动 (刚体的平动)	刚体的定轴转动
速度 $v = \frac{dx}{dt}$	角速度 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$
加速度 $a = \frac{dv}{dt}$	角加速度 $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$
匀速直线运动 $x = x_0 + vt$	匀角速转动 $\theta = \theta_0 + \omega t$
匀变速直线运动 $v = v_0 + at$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$	匀变速转动 $\omega = \omega_0 + \alpha t$ $\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ $\omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha(\theta - \theta_0)$
力 $F$ , 质量 $m$ 牛顿第二定律 $F = ma$	力矩 $M_z$ , 转动惯量 $I_z$ 转动定律 $M_z = I_z \alpha$

(续表)

质点的直线运动 (刚体的平动)	刚体的定轴转动
动量 $mv$ , 冲量 $Ft$ (恒力)	角动量 $I_x\omega$ , 冲量矩 $M_x t$ (恒力矩)
动量定理 $Ft = mv_2 - mv_1$ (恒力)	角动量定理 $M_x t = I_x\omega_2 - I_x\omega_1$ (恒力矩)
动量守恒定律 当 $F=0$ 时, $\sum m_i v_i =$ 常矢量	角动量守恒定律 当 $M_x = 0$ 时, $\sum I_i \omega_i =$ 常量
平动动能 $\frac{1}{2} mv^2$ , 恒力的功 $Fs$ , 动能定理: $Fs = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2$ (恒力)	转动动能 $\frac{1}{2} I\omega^2$ , 恒力矩的功 $M\theta$ 动能定理: $M\theta = \frac{1}{2} I\omega_2^2 - \frac{1}{2} I\omega_1^2$ (恒力矩)
重力势能 $mgh$	重力势能 $mgh_c$
机械能守恒定律 只有保守力做功时 $E_K + E_P =$ 恒量	机械能守恒定律 只有保守力做功时 $E_K + E_P =$ 恒量

## 七、刚体的平面平行运动

刚体运动时,如果刚体上各点都平行于某一固定平面,这样的运动称为刚体的平面平行运动。例如沿直线轨道滚动的车轮,曲柄连杆机构的连杆等的运动都是平面平行运动。

刚体的平面平行运动,可以看作刚体质心的平动和通过质心的轴转动两种运动的叠加。因此,处理刚体的平面平行需要 3 个独立的运动方程,即

$$\sum F_x = ma_{cx},$$

$$\sum F_y = ma_{cy},$$

$$\sum M_c = I_c \alpha,$$

式中  $\sum F_x$  与  $\sum F_y$  是刚体在  $x$  轴和  $y$  轴方向所受的合外力,  $m$  是刚体的质量,  $a_{cx}$  与  $a_{cy}$  是质心沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的加速度。  $\sum M_c$ ,  $I_c$  和  $\alpha$  分别是刚体所受到的合力矩、转动惯量和角加速度, 它们都是对通过质心并垂直于平面的转轴而言的。

## 八、刚体的定点运动

### 1. 定点转动

刚体转动时, 刚体上某一点始终保持不动, 这种运动称为刚体对该点作定点转动。如陀螺绕顶点着地作定点的转动。

### 2. 进动

高速旋转的陀螺虽受重力矩的作用, 但并不倾倒, 而陀螺在绕本身对称轴线转动的同时, 其自转轴还绕竖直轴回转(图 5.2), 自转轴绕竖直轴的这种转动称为进动, 陀螺在外力矩作用下产生自转的现象称为回转效应。

陀螺的进动角速度  $\Omega$  为

$$\Omega = \frac{mgr_c}{I_c \omega},$$

式中  $m$  为陀螺的质量,  $I_c$  为陀螺绕其对称轴旋转的转动惯量,  $\omega$  为自转角速度,  $r_c$  为陀螺的质心距定点的距离。

在枪膛或炮弹里都有螺旋形的来复线, 其作用是使枪弹或炮弹出膛后绕着自身的对称轴迅速旋转。这样一来, 空气阻力产生的力矩就会使枪弹或

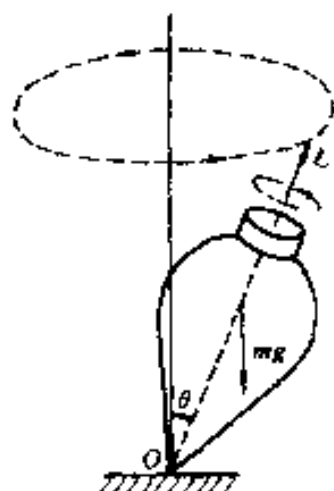


图 5.2

炮弹绕着前进的方向进动,使轴线始终不大偏离前进方向(图 5.3)。回转效应还用于定向、导航的陀螺罗盘(磁罗盘)等。

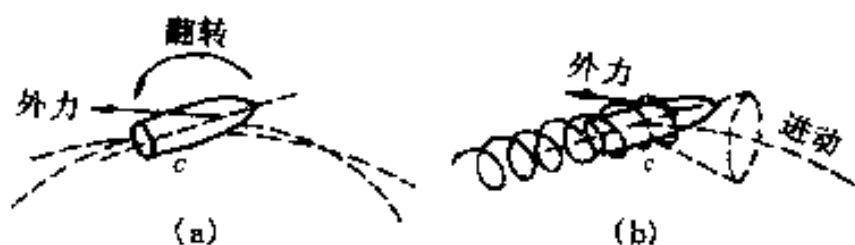


图 5.3

## 第六章 连续介质力学

### 一、固体的弹性

#### 1. 弹性体中的应力和应变

在外力作用下所发生的形状和体积的变化,在外力撤消后能够消失的物体,称为**弹性体**。弹性体也是一个理想的模型。

物体受外力而产生形变,其内部会出现因形变而产生的内力。应力是物体中各部分之间单位面积上的相互作用的内力,即

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta S} = \frac{df}{dS}。$$

一截面上的应力一般不与此截面垂直,通常把法向分量  $\tau_{\perp}$  称为**正应力**(压力或张力);切向分量  $\tau_{//}$  称为**剪应力**或**切应力**。应力的单位为 Pa,即  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

物体受外力作用时发生形变,其体积、长度和形状的变化与其原有值之比,称为**应变**。

#### 2. 直杆的拉伸或压缩

在直杆两端加上与杆平行的力  $f$  拉伸或压缩时,杆为长度将由  $l_0$  变为  $l$ ,则其应变为:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}，$$



若杆的截面积为  $S$ , 则其应力为  $\tau = f/S$ 。在弹性限度内, 即当应力不大时, 应力的大小与应变成正比, 即

$$\tau = F\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l_0},$$

式中的比例系数  $E$  称为弹性模量或杨氏模量。它与应力有相同的单位。

直杆在被拉伸或压缩时, 还将产生横向形变。设直杆的横向线度原为  $b_0$ , 则其横向应变为  $\varepsilon_t = \frac{b - b_0}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0}$ 。

一般横向应变  $\varepsilon_t$  比纵向应变  $\varepsilon$  在绝对值上小 3 倍~4 倍, 两者绝对值之比称为泊松 (S. D. Poisson) 比, 用  $\mu$  表示, 即

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \right|。$$

### 3. 剪切形变

将物体下端固定, 在面积为  $S$  的上端面加一水平的切向力  $f_t$ , 上端面将移动一距离  $\Delta b$ , 如图 6.1。这种形变称为剪切形变。剪应变可以用  $\Delta b/a$  或用剪切角  $\gamma$  来表示, 在形变很小时, 有

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{\Delta b}{a}。$$

在弹性限度内, 剪应力的大小与剪应变成正比关系, 即

$$\tau_{//} = \frac{f_t}{S} = G \frac{\Delta b}{a} = G\gamma,$$

112 式中比例系数  $G$  称为剪切模量或切变模量。

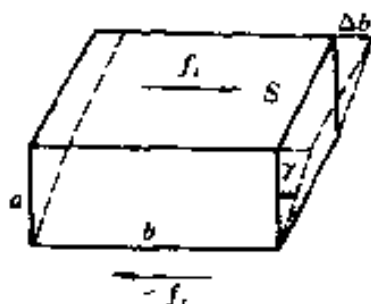


图 6.1

#### 4. 体形变

物体受到正应力(在流体中为压强)时,其体应变为

$$\epsilon_V = \frac{\Delta V}{V}。$$

在弹性限度下,正应力的大小  $\tau_{\perp}$  与体应变  $\epsilon_V$  成正比,即

$$\tau_{\perp} = K\epsilon_V = K \frac{\Delta V}{V},$$

式中比例系数  $K$  称为体积模量或压缩模量,其倒数  $k = \frac{1}{K}$  称为压缩率。

## 二、流体静力学

“流体”是液体和气体的统称。流体中的应力称为压强。

### 1. 静止流体中的压强

① 流体中的压强与面元的取向无关,即压强是各向同性的。这结论对流动的流体也成立。

② 静止流体中等高地方的压强相等。

③ 高度差为  $h$  的两点间压强差为  $\rho gh$ 。

## 2. 帕斯卡(B. Pascal)原理

作用在密闭容器中流体上的压强等值地传到流体各处和器壁上。

## 3. 阿基米德(Archimedes)原理

物体在流体中所受的浮力等于该物体排开同体积流体的重量。

# 三、理想流体的流动

## 1. 理想流体

绝对不可压缩,且完全没有粘性的流体叫做理想流体。在一些实际问题中,可压缩性和粘性只是影响运动的次要因素,只有流动性才是决定运动的主要因素,因此可以近似地采用理想流体模型。

## 2. 定常流动

在有流体的空间里每一点 $(x, y, z)$ 上有一流速矢量 $v$ ,它们构成了一个流速场。

为了直观地描述流体的运动情况,在流速场中画出许多曲线,曲线上每一点的切线方向和流速的方向一致,这种曲线称为流线。在流体内作一微小的闭合曲线,通过其上各点的流线所围成的细管,称为流管。流线不会相交,流管内、外的流体都不会穿越管壁。

一般说来,流速场的空间分布是随时间而变化的,即 $v = v(x, y, z, t)$ 。在一定的条件下,流速场的空间分布不随时间改变,即 $v = v(x, y, z)$ ,这种情况称为流体的定常流动。

## 3. 流量

在流速场中,任取一个曲面,单位时间内通过该

曲面的流体体积和质量,分别称为流体的**体积流量**和**质量流量**,分别用  $q_V$  和  $q_m$  表示,

$$q_V = \iint v \cdot dS;$$

$$q_m = \iint \rho v \cdot dS。$$

式中  $\rho$  为流体的密度。

#### 4. 连续性原理

定常流动时,沿任意流管的横截面上

$$\rho v dS = \text{常量。}$$

若流体是不可压缩的,即  $\rho = \text{常量}$ ,则

$$v dS = \text{常量。}$$

以上两方程称为流体的**连续性方程**,它实质上体现了流体在流动中的质量守恒。

#### 5. 伯努利方程

在作定常流动的流体中,沿同一流线的每单位体积流体的动能、势能以及该处的压强之和是一个常量,即

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{常量。}$$

这就是伯努利(D. Bernoulli)方程,它实质上是能量守恒定律在理想流体定常流动中的表现,它是流体动力学的基本规律,实际的应用甚广。

在工程上伯努利方程常写成

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h = \text{常量,}$$

上式左端三项依次称为**压力头**、**速度头**和**高度头**。

#### 四、粘性流体的流动

##### 1. 流体的粘性

当两层非理想流体有相对运动时,会产生切向力。流动快的一层给慢的一层以拉力  $f$ , 而流动慢的一层给快的一层以阻力  $f$ , 这一对力称为粘力或内摩擦力。流体的这种性质称为粘性。

两层流体之间粘力的大小  $f$  正比于速度梯度  $\frac{dv}{dz}$  和面积  $\Delta S$  (选坐标轴  $z$  垂直于流速方向), 则有

$$f = \eta \left( \frac{dv}{dz} \right)_{z_0} \Delta S,$$

这就是粘性定律。式中比例系数  $\eta$  称为流体的粘度。粘度的单位为  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  或  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。

##### 2. 粘性流体的伯努利方程

粘性流体作定常流动时, 必须考虑到由内摩擦引起的能量损耗, 这时, 伯努利方程中应加上一个修正项  $w$ , 即

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + w。$$

当流体在粗细均匀的水平管中流动时,  $v_1 = v_2$ ,  $h_1 = h_2$ , 但  $p_1 - p_2 = w$ 。因此, 即使在水平管中也需有一定的压强差, 才能使粘性流体作定常流动。当水在截面相同的明渠中流动时, 由于各处的压强都等于大气压强, 即  $p_1 = p_2$ ,  $v_1 = v_2$ , 而  $h_1 - h_2 = \frac{w}{\rho g}$ 。因此, 渠道必须有一定的高度差, 才能使

116 水在其中作定常流动。

### 3. 泊肃叶定律

当粘性流体在半径为  $R$  的圆管中作定常流动, 流速  $v$  随半径  $r$  的变化规律是

$$v = \frac{1}{4\eta l}(p_1 - p_2)(R^2 - r^2),$$

圆管中流体的总体积流量为

$$q_V = \frac{1}{8\eta l}\pi R^4(p_1 - p_2),$$

式中  $l$  为管的长度,  $(p_1 - p_2)$  为这一长度上的压强差,  $\eta$  为流体的粘度。

这就是泊肃叶(Poiseuille)定律。

### 4. 斯托克斯粘滞公式

物体在粘性流体中运动时, 会受到两种阻力。一种是粘性阻力, 这是由于物体表面附着一层流体, 造成表面附近的流体有一定的速度梯度, 因而流层之间有粘力而引起的阻力。另一种是压差阻力, 这是由于流体流经物体时, 粘力造成运动状态的变化, 例如形成旋涡等, 使物体前后压力有所不同而引起的阻力。

当物体的运动速度很小时, 这时受到的阻力基本上是粘性阻力。在粘性流体中以速率  $v$  运动的半径为  $r$  的小球所受的粘性阻力为

$$f = 6\pi\eta r v.$$

这就是斯托克斯(G. G. Stokes)粘滞公式。

### 5. 层流和湍流

当流体的流速不是很大时, 各流层彼此不相混合而只作相对滑动的情况, 流体的这种运动称为层流。

当压强差逐渐增大而使流速不断增大时, 层流终

将破坏。这时流体作不规则的运动,在垂直于管轴的方向上将产生分速度,流体的这种运动称为湍流。

由层流变为湍流,不仅取决于流速  $v$ ,还取决于流体的密度  $\rho$  和粘度  $\eta$  以及物体的特征长度  $l$  (例如管道的直径  $d$  或处在流体中球体的直径等)。雷诺 (O. Reynolds) 提出了一个量纲为 1 的数作为决定层流向湍流转变的判据,即

$$Re = \frac{1}{\eta} \rho v l$$

称为流体的**雷诺数**。从层流向湍流过渡的雷诺数叫做**临界雷诺数**,用  $Re^c$  表示。当  $Re < Re^c$  时为层流,而当  $Re > Re^c$  时为湍流。例如,在光滑的金属圆筒中,  $Re^c = 2000 \sim 2300$ 。图 6.2 表示在不同雷诺数下流体绕过圆柱体的流动。

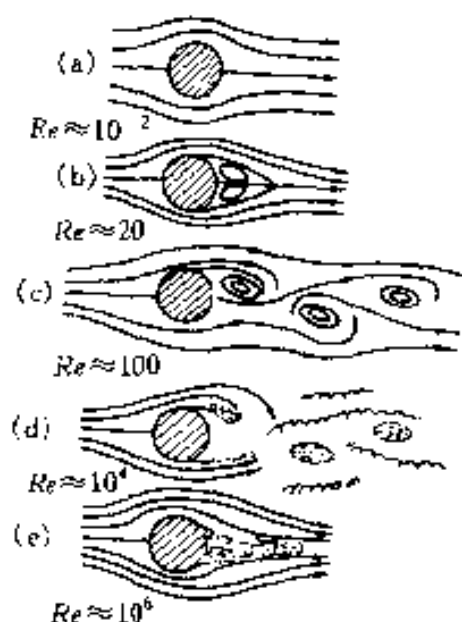


图 6.2

# 第三篇 振动和波动

## 第七章 振动

### 一、简谐振动

#### 1. 振动

物体在其稳定平衡位置附近所作的往复的周期性运动,称为**机械振动**。对于电量、电压、电流、电场强度和磁感应强度等物理量,当它们围绕一定的平衡值作周期性的变化时,也可称为该物理量在振动。

最简单、最基本的振动形式是简谐振动。任何复杂的振动都可以看作是一系列不同频率、不同振幅的简谐振动的叠加。

#### 2. 简谐振动

若描述运动的变量  $x(t)$  (如物体离平衡位置的位移或角位移、电流或电压等) 满足运动方程:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0,$$

其解可表示为



$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)。$$

这种用时间  $t$  的正弦或余弦函数描述的运动,称为简谐振动。式中各量的意义参见下节。

若物体所受的合力与位移成正比,方向相反,即

$$f = -kx,$$

式中  $k$  为比例常数,则该物体作简谐振动。这种只在线性回复力作用下的振动,称为自由振动。

### 3. 简谐振动的特征参量

#### (1) 振幅 $A$

振动物体在平衡位置两侧离平衡位置的最大距离,称为振幅。振幅的大小由初始状态(即计时开始时的初位置和初速度)决定,与振动系统的机械能  $E$  的平方根成正比。

#### (2) 角频率 $\omega$ 和周期 $T$

振动物体完成一次振动所需的时间,称为振动周期。物体在 1 秒内的振动次数,称为频率,常用  $\nu$  (或  $f$ ) 表示。频率是周期的倒数,即

$$\nu = \frac{1}{T}。$$

振动物体在  $2\pi$  秒内的振动次数,称为角频率(又称圆频率)。角频率与周期或频率的关系为

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T。$$

角频率的单位为  $S^{-1}$ (弧度/秒)。

每个振动都有自己的固有的角频率(或周期和频率),决定于系统本身的特性,不随外界条件而变化。例如:

弹簧振子:  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$

式中  $m$  为振子的质量,  $k$  为弹簧的劲度常数。

小振幅的单摆:  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$   
 式中  $l$  为摆长,  $g$  为当地的重力加速度。

小振幅的复摆:  $\omega = \sqrt{\frac{mgl}{I}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}},$   
 式中  $m$  为摆的质量,  $l$  为摆的质心到转轴的距离,  $I$  为摆对固定转轴的转动惯量。

### (3) 相位 $\varphi$

相位代表简谐振动在一个周期内所处的运动状态, 即简谐振动表式中的  $\omega t + \varphi_0 = \varphi$ 。其中  $\varphi_0$  为  $t=0$  时刻的相位, 称为初相位, 简称初相。初相的数值决定于计时开始时的初始状态。一般尽可能选择这样的计时零点, 使初相  $\varphi_0 = 0$ , 这样可将简谐振动表达式简化。

在比较两个或两个以上的简谐振动时, 相位差是很重要的概念。例如两个质点沿同一直线以不同的振幅 ( $A_1$  和  $A_2$ )、频率 ( $\omega_1$  和  $\omega_2$ ) 和初相 ( $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$ ) 在作简谐振动, 其相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 t + \varphi_{20}) - (\omega_1 t + \varphi_{10}) = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_{20} - \varphi_{10})。$$

如两简谐振动的频率相同, 其相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10}。$$

即在同频率的简谐振动情况下, 两振动的相位差就是它们的初相差。

当  $\Delta\varphi$  为零或  $2\pi$  的整数倍时, 称这两简谐振动同相; 当  $\Delta\varphi$  为  $\pi$  或  $\pi$  的奇数倍时, 称这两简谐振动反相。若  $0 < \Delta\varphi < \pi$ , 就称为  $\varphi_2$  超前于  $\varphi_1$ ; 若  $-\pi <$

$\Delta\varphi < 0$ , 就称为  $\varphi_2$  落后于  $\varphi_1$ 。相位差  $\Delta\varphi$  反映了两简谐振动的步调关系, 具有重要的物理意义。

#### (4) 简谐振动的矢量图示法

作匀速转动的矢量  $A$ , 其长度等于振幅  $A$ , 角速度等于角频率  $\omega$  (图 7.1), 设在  $t=0$  时, 振幅矢量  $A$  与  $x$  轴间的夹角为  $\varphi_0$ , 等于简谐振动的初相, 经过时间  $t$ , 振幅矢量  $A$  与  $x$  轴间的夹角为  $(\omega t + \varphi_0)$ , 等于简谐振动在该时刻的相位。这时矢量末端在  $x$  轴上的投影点  $P$  正是作简谐振动。在矢量  $A$  的转动过程中,  $M$  点作匀速圆周运动, 通常把这个圆称为参考圆。

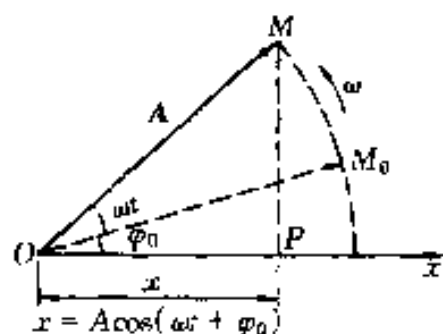


图 7.1

#### 4. 简谐振动的能量

物体作简谐振动时, 其动能为

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0);$$

势能为

$$E_P = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0).$$

总能量为

$$E = E_K + E_P = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2,$$

即物体作简谐振动过程中,机械能守恒。总机械能与振幅的平方成正比。

## 二、阻尼振动

### 1. 阻尼振动的运动方程

物体在振动过程中,由于受到阻力的作用,造成能量损失而使振幅随时间逐渐减小,这种振动称为阻尼振动,或称减幅振动。

设振动系统所受的阻力  $f_r$  与速度  $v$  成正比,其方向与速度方向相反,即

$$f_r = -\gamma v = -\gamma \frac{dx}{dt},$$

式中  $\gamma$  称为阻力系数。这时振动物体的运动方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt},$$

或写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0,$$

式中  $\beta = \frac{\gamma}{2m}$  称为阻尼因子,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  为振动系统的固有频率。

### 2. 阻尼振动的三种运动方式

阻尼振动可分为三种运动方式(图 7.2):

#### (1) 弱阻尼振动或欠阻尼振动

当阻尼较小时,即当  $\beta^2 < \omega_0^2$  时,这时运动方程的解为

$$x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

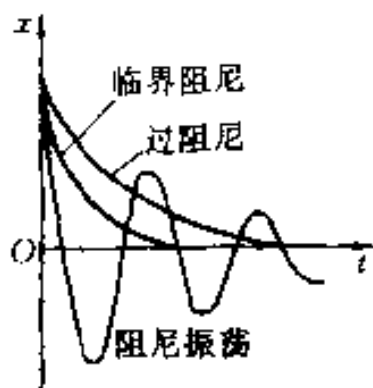


图 7.2

式中  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ 。即振动系统的运动不再是简谐振动,而是作往复的周期性运动,振幅  $Ae^{-\beta t}$  是随时间衰减的。振动系统从平衡位置出发,经一次完全振动所经历的时间,称为阻尼振动的“周期” $T$ ,其值为

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} > T_0$$

$\beta$  越大,阻尼振动的振幅衰减越快,“周期”也越长。

### (2) 过阻尼运动

当阻尼较大时,即当  $\beta^2 > \omega_0^2$  时,这时运动方程的解为

$$x = c_1 e^{-(\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t} + c_2 e^{-(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t}$$

这种过阻尼运动没有周期性的振动,经过相当长的时间物体才能到达平衡位置。

### (3) 临界阻尼运动

当  $\beta^2 = \omega_0^2$  时,这时运动方程的解为

$$x = (c_1 + c_2 t) e^{-\beta t}$$

124 物体刚能不作周期性振动,但能很快回到平衡位置。

在精密天平及各类指针式测量仪表中,广泛采用临界阻尼系统。

### 3. 品质因数

对于弱阻尼的振动系统,为了表示系统衰减的快慢,也可用能量减少的快慢来衡量。设振动系统在某一时刻储存的能量为  $E$ ,此后一个周期内损失的能量为  $|\Delta E|$ ,以一周期内相对能量损失的倒数的  $2\pi$  倍,称为振动系统的品质因数,用  $Q$  表示,有时简称为  $Q$  值,即

$$Q = 2\pi \frac{E}{|\Delta E|} = \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\omega}{2\beta} \approx \frac{\omega_0}{2\beta}$$

$Q$  值是量纲为 1 的纯数,由振动系统的性质决定。 $Q$  值是衡量振动系统的重要参数。 $Q$  值越大,系统在一周期内相对能量损失就越少,就越接近于简谐振动。通常的机械振动系统,例如扬声器等, $Q$  值从  $10^0 \sim 10^2$  左右;一般电子线路,其典型值从几十到几百。石英晶体的  $Q$  值均为  $10^5$ ;对于某些激光器, $Q$  值可高达  $10^{14}$ 。

## 三、受迫振动

### 1. 受迫振动的运动方程

如振动系统除了受回复力和阻力外,还受到周期性驱动力作用。驱动力对系统不断地做功,向系统提供能量,使系统维持作等幅振动。这种振动系统在外界驱动力作用下的振动,叫做受迫振动。

如驱动力按余弦或正弦规律变化,设为  $F = F_0 \cos \omega_d t$ ,其中  $\omega_d$  为驱动力的角频率,则受迫振动的运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega_d t,$$

或

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega_d t,$$

式中  $\beta = \frac{\gamma}{2m}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ , 其物理意义如同“阻尼振动”。方程的解为

$$x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) + A_d \cos(\omega_d t + \varphi_d),$$

其中第一项就是前述的阻尼振动, 当  $t > \frac{5}{\beta}$  时其振幅已衰减到起始振幅的 0.7%。因此, 经过稍长一段时间以后, 可以认为已经衰减掉了, 只留下定态解  $A_d \cos(\omega_d t + \varphi_d)$ 。

### 2. 稳定状态的振动

受迫振动达到稳定状态时, 振动系统的运动表达式为

$$x = A_d \cos(\omega_d t + \varphi_d),$$

即振动系统以驱动力的频率作等幅振动, 其中振幅  $A_d$  和相位  $\varphi_d$  分别为

$$A_d = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_d^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 \omega_d^2}};$$

$$\varphi_d = \operatorname{arctg} \frac{-2\beta\omega_d}{\omega_d^2 - \omega_0^2}.$$

### 3. 共振

受迫振动的定态振幅  $A_d$  的大小, 与驱动力的

角频率  $\omega_d$  有关。当  $\omega_d \ll \omega_0$  时,  $A_d \approx F_0/k$  与  $\beta$  无关; 当  $\omega_d \gg \omega_0$  时,  $A_d \approx 0$ , 也与  $\beta$  无关, 然而当  $\omega_d = \omega_r$  时, 振幅  $A_d$  达到极大值:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

在受迫振动中位移振幅出现极大值的现象, 称为位移共振, 简称共振。 $\omega_r$  称为共振角频率。在弱阻尼情况下,  $\omega_r \approx \omega_0$ 。因此通常说, 驱动力的频率等于系统的固有频率时, 便发生共振。

#### 四、同方向简谐振动的合成

##### 1. 同方向、同频率简谐振动的合成

设一质点同时参与了两个同方向、同频率的简谐振动, 即

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{10}),$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_{20}).$$

该质点的合运动为

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{10}) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_{20}) = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

即合运动仍为沿同方向的简谐振动, 其频率与原来两简谐振动的频率相同, 而振幅和初相分别为

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})},$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{A_1 \sin \varphi_{10} + A_2 \sin \varphi_{20}}{A_1 \cos \varphi_{10} + A_2 \cos \varphi_{20}}.$$

① 当  $\varphi_{20} - \varphi_{10} = 2k\pi$  时, ( $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ), 两振动同相,  $A = A_1 + A_2$ , 合振幅最大, 即两振动



相互加强。

② 当  $\varphi_{20} - \varphi_{10} = (2k + 1)\pi$  时, ( $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ), 两振动反相,  $A = |A_2 - A_1|$ , 合振幅最小。两振动相互减弱。如果  $A_1 = A_2$ , 则  $A = 0$ , 合振动为零。

③ 在一般情况下,  $|A_2 - A_1| < A < A_1 + A_2$ 。

### 2. 同方向、不同频率简谐振动的合成

设一质点同时参与了两个同方向、不同频率(设为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ) 的简谐振动。如两振动的振幅和初相都相同, 则这两个简谐振动可写成

$$\begin{aligned} x_1 &= A \cos \omega_1 t, \\ x_2 &= A \cos \omega_2 t. \end{aligned}$$

其合运动为

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 = A \cos \omega_1 t + A \cos \omega_2 t = \\ &2A \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2}. \end{aligned}$$

即合运动不再是简谐振动, 而是比较复杂的周期性运动。

如果  $\omega_1 \ll \omega_2$ , 则有

$$x = A + A \cos \omega_2 t,$$

合运动是围绕  $x = A$  的新的平衡位置以角频率  $\omega_2$  作简谐振动。 $\omega_2 \ll \omega_1$  时, 情形类似。

### 3. 拍

如果两个分振动的角频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$  都很大, 而两者相差却很小, 即  $|\omega_2 - \omega_1| \ll \omega_1 + \omega_2$ 。这时两振动的合运动可以近似地看成是振幅按照

$$2A \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \left\{ \text{缓慢变化的角频率为} \right.$$

$\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}$  的“准简谐振动”。

频率都较大但两者相差很小的两个同方向的简谐振动,合成时所产生的这种合振幅时而加强时而减弱的现象(图 7.3),称为拍。拍的周期和拍频分别为

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1},$$

$$\nu_b = \nu_2 - \nu_1。$$

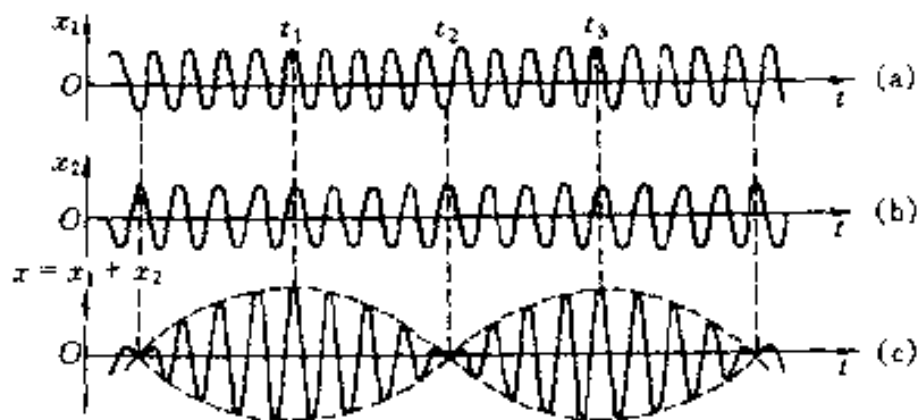


图 7.3

### 五、相互垂直简谐振动的合成

#### 1. 两个同频率垂直方向简谐振动的合成

设一质点同时参与了两个振动方向相互垂直的同频率简谐振动,即

$$x = A_x \cos(\omega t + \varphi_{0x}),$$

$$y = A_y \cos(\omega t + \varphi_{0y}).$$

合成运动的轨迹方程为

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} - \frac{2xy}{A_x A_y} \cos(\varphi_{0y} - \varphi_{0x}) = \sin^2(\varphi_{0y} - \varphi_{0x})$$

这是一个椭圆方程,具体形状由相位差  $\Delta\varphi = \varphi_{0y} - \varphi_{0x}$  决定(图 7.4)。

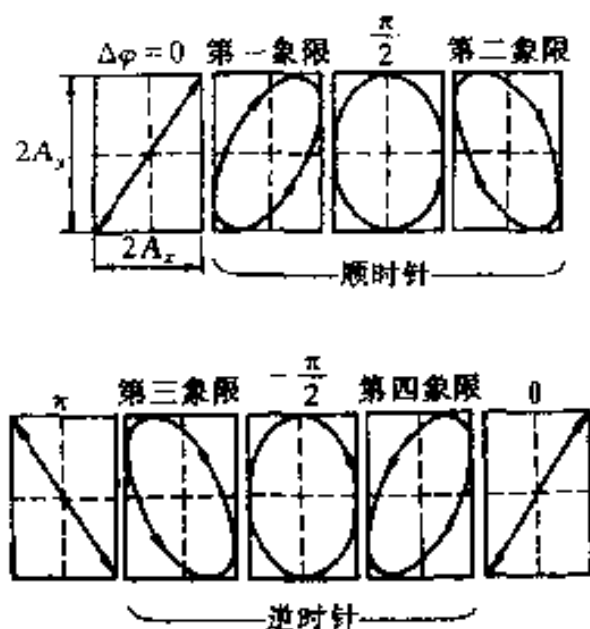


图 7.4

①  $\Delta\varphi = 0$  时,两振动的相位相同,  $\varphi_y = \varphi_x = \varphi$ , 质点的轨道方程为

$$\frac{y}{x} = \frac{A_y}{A_x}$$

即质点的轨道是通过坐标原点的一条直线,斜率为  $A_y/A_x$ ,质点在这条直线上运动的表达式为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \cos(\omega t + \varphi),$$

即合运动也是简谐振动,频率等于原来的振动频率,

振幅等于  $\sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ ,沿直线  $\frac{y}{x} = \frac{A_y}{A_x}$  振动。

②  $\Delta\varphi = \pi$  时,即相位相反。那么,质点在另一

直线  $\frac{y}{x} = \frac{A_y}{A_x}$  上作简谐振动。其振幅与频率与上述结果相同。

③  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$  时,轨道方程为

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} = 1,$$

即质点运动的轨道是以坐标轴为主轴的正椭圆。质点在椭圆上作顺时针旋转。 $\Delta\varphi = \frac{3\pi}{2}$  时,质点沿正椭圆作逆时针向旋转。

④ 在一般情形下,合运动的轨道是一些不同的斜椭圆,这些椭圆被局限在平行于  $x, y$  轴的边长分别为  $2A_x$  和  $2A_y$  的矩形范围内,它们的长短轴、方位及质点的运动方向完全决定于相位差的数值。

## 2. 两个不同频率方向垂直的简谐振动的合成

两个相互垂直的简谐振动,由于具有不同频率,其相位差将随时间而变化,因而合成运动的轨道往往是不稳定的。

① 如果两分振动的频率相差较小,则合运动的轨道将不断地按图 7.4 所示的顺序由直线逐渐变成椭圆,又由椭圆变为直线,并重复地变化下去。

② 如果两分振动的频率具有简单的整数比,则合运动具有稳定的闭合的轨迹,这些轨迹图形称为李萨如(Lissajous)图形,如图 7.5 所示。

③ 如果两分振动的频率之比是无理数时,合成运动将永远不重复已走过的路径,它的轨迹将逐渐密布在边长为  $2A_x$  和  $2A_y$  的矩形面积内。这种非周期运动叫做准周期运动(图 7.6)。

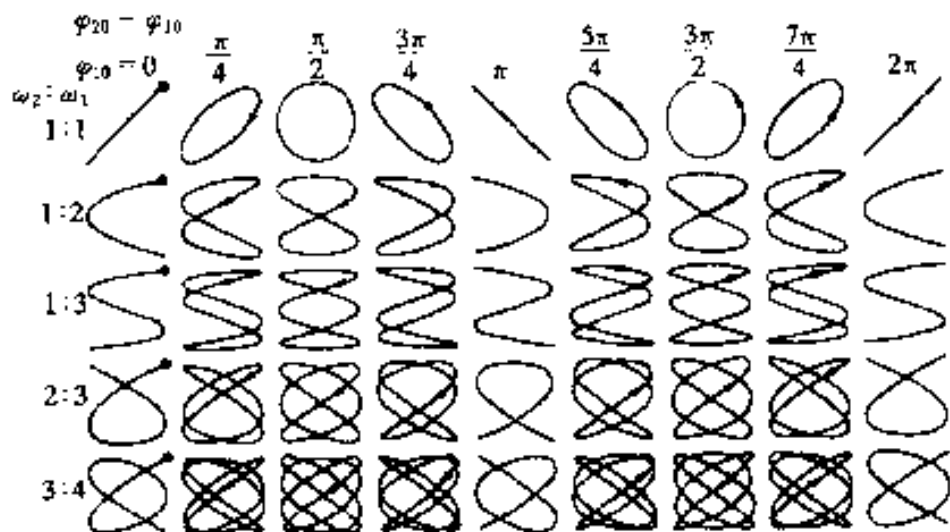


图 7.5

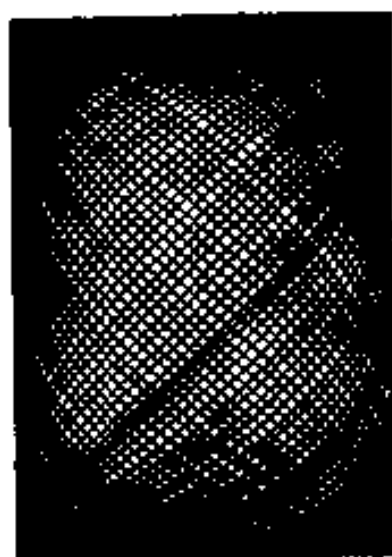


图 7.6

## 六、振动的分解

任意一个复杂的振动都可以分解为一系列不同频率的简谐振动,这种分解的方法依据是傅里叶级数和

傅里叶积分理论,故将这种方法称为傅里叶分析。

### 1. 周期性振动的频谱分析

设一周期性振动  $x = f(t)$ , 周期为  $T$ , 即函数  $f(t)$  满足

$$f(t + T) = f(t).$$

根据傅里叶定理, 这个周期性函数可以表示为许多正弦函数和余弦函数之和, 它们的频率都是  $\nu$  的整数倍, 即周期函数  $f(t)$  可以展开成傅里叶级数:

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos 2\pi n \nu t + B_n \sin 2\pi n \nu t) = \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n' \cos(2\pi n \nu t + \varphi_{0n}), \\ &\quad (n = 1, 2, \dots). \end{aligned}$$

其中傅里叶系数  $A_0, A_n, B_n$  分别为

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt, \\ A_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos 2\pi n \nu t dt, \\ B_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin 2\pi n \nu t dt. \end{aligned}$$

各分振动的振幅  $A_n'$  和初相  $\varphi_{0n}$  的数值可由  $A_n$  和  $B_n$  得到:

$$\begin{aligned} A_n' &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2}, \\ \varphi_{0n} &= \arctan \frac{A_n}{B_n}. \end{aligned}$$

利用傅里叶级数, 任一周期性振动都可以分解成几个甚至无穷多个简谐振动, 它们的频率为原周期性振动频率的整数倍。  $n = 1$  的简谐振动频率与

原振动频率相同,称为基频振动;  $n = 2, 3, \dots$  诸简谐振动分别称为二次、三次……谐频振动。工程技术中常见振动的傅里叶展开式见附表。

表 7.1 工程技术中常见振动的傅里叶展开式

	$x(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\omega t}{2n+1}$
	$x(t) = \frac{A}{\pi} + \frac{A}{2} \sin \omega t - \frac{2A}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos 2n\omega t}{(2n)^2 - 1}$
	$x(t) = \frac{A}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin n\omega t$
	$x(t) = \frac{A}{2} - \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\omega t}{n}$
	$x(t) = \frac{2A}{\pi} - \frac{4A}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos 2n\omega t}{(2n)^2 - 1}$
	$x(t) = \frac{A}{2} - \frac{4A}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n+1)\omega t}{(2n+1)^2}$

如果以分振动的频率为横坐标,以相应的振幅为纵坐标所作的图解,称为频谱。如图 7.7 所示。周期性振动具有离散谱。不同乐器奏出的同一音调的音色各不相同,就是由于各种乐器所包含的谐频振动的振幅不同所致。图 7.8 表示小提琴和钢琴同奏基频为 440Hz(A 调)的振动曲线和相应的频谱。

### 2. 非周期性振动的频谱分析

对于非周期性振动,例如单个脉冲、阻尼振动等,根据傅里叶变换,也可以分解成频率连续分布的简谐振动,相应的频谱则密集成连续谱(图 7.9)。

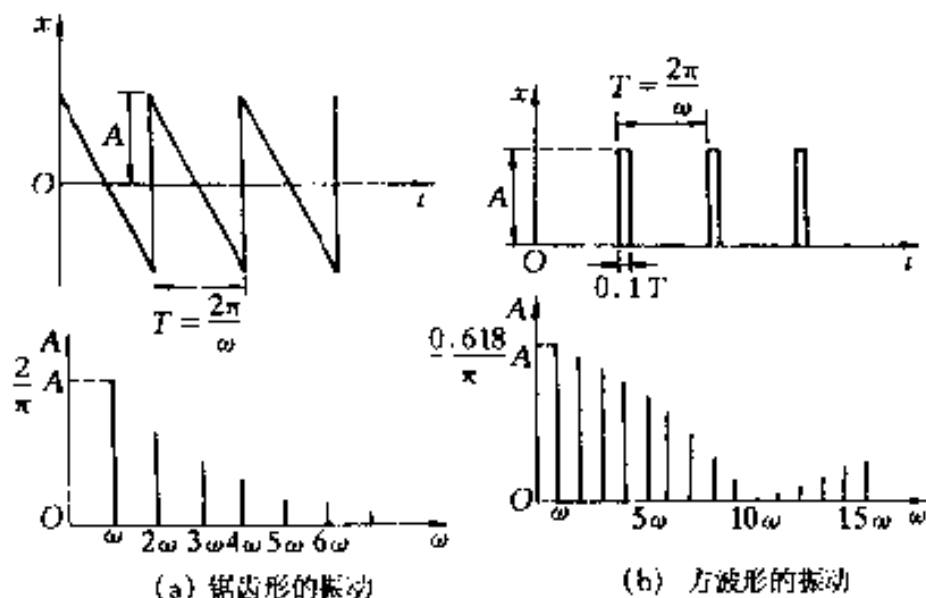


图 7.7

## 七、电磁振荡

电路中电荷量和电流的周期性变化,称为电磁振荡。电磁振荡可与机械振动作类比的运动形式。产生电磁振荡的电路,称为振荡电路。



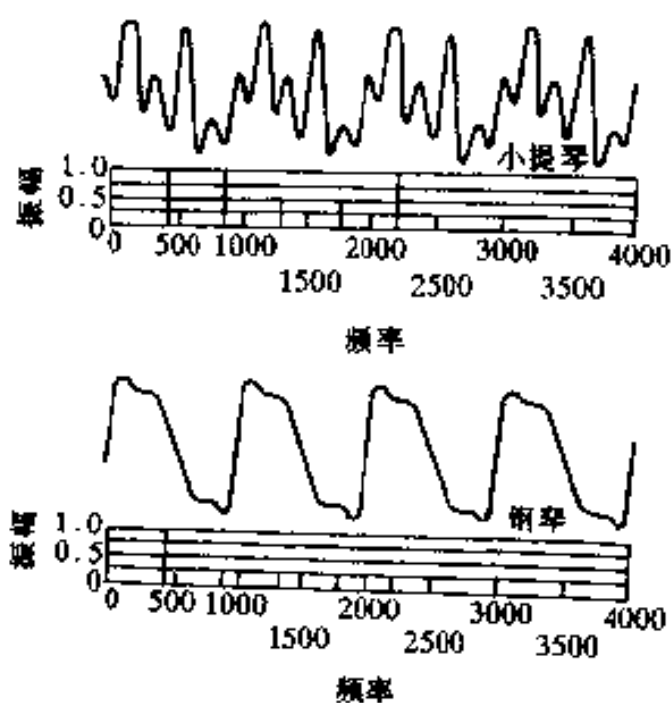


图 7.8

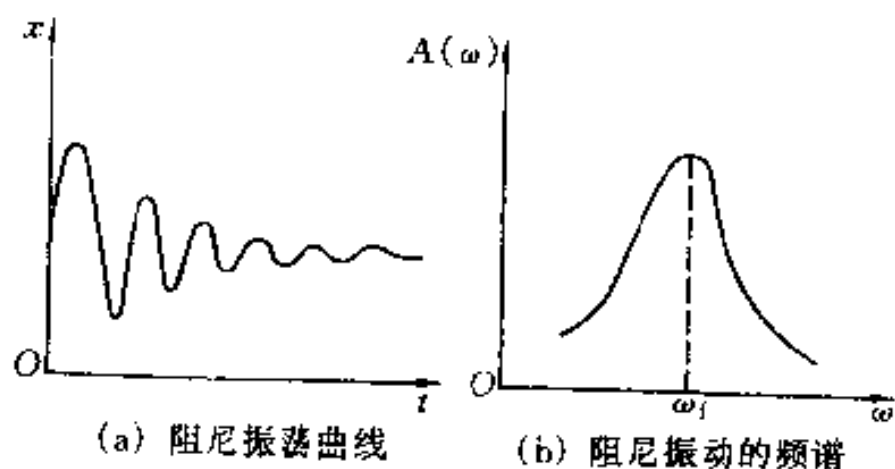


图 7.9

### 1. 无阻尼自由振荡

最简单的振荡电路是一个由电容器和自感线圈串联而成的  $LC$  振荡电路, 电路中的电阻可忽略不计(图 7.10)。电磁振荡中, 电荷量和电流的最大值

保持不变。这种振荡称为无阻尼自由振荡。

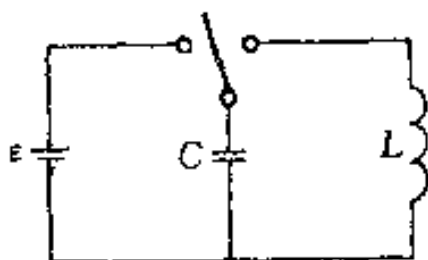


图 7.10

在无阻尼的情况下,电荷的运动方程为

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -\frac{1}{LC}q = -\omega_0^2 q。$$

因而

$$\begin{aligned} q &= Q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \\ i &= \frac{dq}{dt} = -\omega_0 Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= I_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)。 \end{aligned}$$

即在无阻尼自由振荡过程中,电容器极板上的电荷和电路中电流都按正弦或余弦谐函数作周期性变化。电量的相位比电流落后 $\frac{\pi}{2}$ 。振荡的频率和周期为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad T = 2\pi \sqrt{LC}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}。$$

总能量为

$$W = W_e + W_m = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{C}。$$

即总的电磁能量保持不变。不难看出,电场能相当于势能,磁场能相当于动能。

## 2. 阻尼振荡

任何电路中都有电阻。因此,实际振荡电路是 137

LCR 电路。在 LCR 电路中,能量不仅以电场能和磁场能的形式相互转换,还要转变为焦耳热。所以,在振荡过程中,电量和电流的振幅都要随时间按指数规律逐渐减小,如同机械阻尼振动一样。

### 3. 受迫振荡

在 LCR 电路中,接入电动势为作正弦或余弦变化的电源,如  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ , 电源不断地供给能量,可使电流振幅保持不变。这种在外加周期性电动势持续作用下产生的振荡,称为受迫振荡。

受迫振荡的微分方程为

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon_0 \sin \omega t,$$

或

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t。$$

受迫振荡开始时,情况很复杂,但经历一定时间后,就达到稳定状态。在稳定状态下,上式的解为

$$i = I_0 \sin(\omega t - \varphi_0)。$$

式中

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{Z} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}},$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}。$$

在交流电路中,  $L\omega$  称为感抗,  $\frac{1}{C\omega}$  称为容抗,

$(L\omega - \frac{1}{C\omega})$  称为电抗,  $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$  称为阻抗, 各量都和电阻有相同的单位。

当电路满足条件  $L\omega = \frac{1}{C\omega}$  时, 电流将有最大的振幅。电流振幅达到最大值的现象, 称为电共振。共振频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0$$

即当外加电动势的频率等于电路自由振荡的固有频率时发生电共振。

### 八、力电类比

电磁振荡和机械振动的规律非常相似, 运用力电类比就可以把电磁振荡和机械振动对应起来。由于电学和电子仪器的发展, 在工程上, 常常把复杂的机械振动问题化成交变电路问题, 然后通过计算或实验测定, 找出它们的解。现把机械振动和电磁振荡对应的物理量列表如下。

力学量(机械振动)	电学量(电磁振荡)
回复力 $f$	电压 $V$
质量 $m$	电感 $L$
回复力常量 $k$	电容倒数 $1/C$
位移 $x$	电量 $q$
速度 $v$	电流 $i$

(续表)

力学量(机械振动)	电学量(电磁振荡)
阻力系数 $\gamma$	电阻 $R$
驱动力 $F$	电动势 $\mathcal{E}$
动能 $E_K = \frac{1}{2}mv^2$	磁场能 $W_m = \frac{1}{2}Li^2$
弹性势能 $E_P = \frac{1}{2}kx^2$	电场能 $W_e = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$

## 第八章 波动

### 一、简谐波

#### 1. 波的类型

波动是振动状态的传播。广义地说,偏离平衡状态的某种随时间变化的扰动在空间的传播都称为波动。

波动按其性质来划分,有机械波和电磁波两类。机械波是机械振动在弹性介质中的传播;电磁波是交变电磁场在空间的传播。电磁波的传播不需要任何介质。

波动按其振动方向和传播方向的关系,可分为横波和纵波。横波的传播方向垂直于振动方向,如抖动绳子上的波、电磁波等是横波(图 8.1(a))。纵波的传播方向平行于振动方向,如气体和液体里的声波是纵波(图 8.1(b))。纵波又称疏密波。水面波看起来像横波,实际上它是纵、横振动合成的椭圆运动的混合波(图 8.1(c))。

波动按其波面(某一时刻振动相位相同的各点所组成的面)形状可分为平面波、球面波和柱面波。

若波源作简谐振动,且波所到之处,介质中各质点均作同频率、同振幅的简谐振动,这样的波称为简谐波。简谐波是最简单的也是最基本的波型。任何

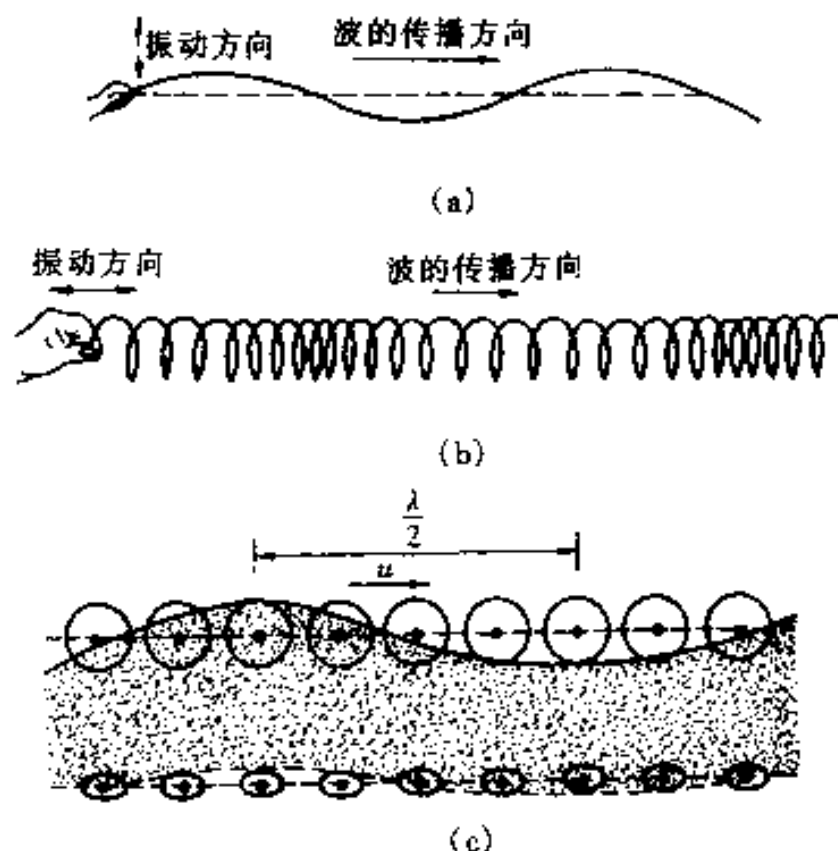


图 8.1

复杂的波都可以看成是由许多不同频率的简谐波叠加而成的。

## 2. 描述简谐波的物理量

简谐振动具有时间周期性,用周期  $T$ 、频率  $\nu$  和角频率来描述。波是振动在空间的传播,因此简谐波不仅具有时间周期性,还具有空间周期性,常用波长  $\lambda$  来描述空间周期性。

波长表示在一个周期内振动状态传播的距离。也就是在同一波线上两个相邻的、相位差为  $2\pi$  的质点之间的距离。

波前进一个波长的距离所需的时间叫做波的周期。单位时间内,波前进距离中完整波的数目叫做

波的频率。波的周期和波的频率分别等于波源的振动周期和振动频率。

振动状态的传播速度叫做波速。波速  $u$  等于单位时间内振动状态的传播距离。由于振动状态由相位决定,所以波速就是波的相位的传播速度,称为相速。

波长、波速与频率之间的关系为

$$u = \lambda / T = \omega \lambda,$$

表示波的时间周期性和空间周期性之间的联系。

在波的传播方向单位长度内所含的波长数,称为波数,也即波长的倒数。通常把在  $2\pi$  长度内所含的波长数称为角波数,也简称为波数,用  $k$  来表示:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

### 3. 波速

在弹性介质中,波速决定于介质的密度和弹性模量。

在固态介质中,既能传播横波又能传播纵波,波速分别为

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (\text{横波}),$$

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (\text{纵波}),$$

式中  $G$  和  $E$  分别为介质的切变模量和杨氏模量,  $\rho$  是介质的密度。纵波在无限大各向同性均匀固态介质中传播时,上式是近似的,但在固态细棒中沿棒的长度方向传播时才是准确的。

在液体和气体中只能传播纵波,波速为



$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho}}, \quad (\text{纵波}).$$

式中  $B$  为介质的体变弹性模量。

液体的表面可出现由重力和表面张力所引起的表面波,传播速度决定于重力加速度和表面张力系数,普遍式为

$$u = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi T}{\rho\lambda}\right) \text{th} \frac{2\pi h}{\lambda}},$$

式中  $h$  是液体的深度,  $\lambda$  是波长,  $T$  是表面张力系数,  $\rho$  是液体的密度,  $g$  是重力加速度,  $\text{th}$  是双曲正切函数。若不考虑表面张力,对于水深  $h \ll \lambda$  的浅水波,波速为

$$u_{\text{浅水}} = \sqrt{gh}.$$

对于深水波,波速为

$$u_{\text{深水}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}.$$

紧张的柔软绳索和弦线上横波的波速为

$$u = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

式中  $F$  为绳索或弦线中的张力,  $\mu$  为其单位长度的质量。

#### 4. 平面简谐波的表式

一平面简谐波沿  $x$  轴的正向传播,波速为  $u$ 。设原点的振动表式为

$$\xi_0 = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

则波动表式为

$$\xi = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right],$$

式中  $\xi$  称为波函数, 代表波源作振动的任意物理量 (如位移、电场强度、磁场强度等)。波动表式表明, 波从原点传播到距原点为  $x$  的任一点  $P$  需要时间  $\frac{x}{u}$ , 那么, 在时刻  $t$ ,  $P$  点的振动就是原点在  $(t - \frac{x}{u})$  时刻的振动。也就是说,  $P$  点的振动相位比原点的相位落后  $\frac{\omega x}{u}$ 。

平面简谐波的表式还可写成多种形式, 如:

$$\xi = A \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right],$$

$$\xi = A \cos\left[2\pi\left(\nu t - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right],$$

$$\xi = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0).$$

如果波动沿  $x$  轴负方向传播, 由于  $P$  点的振动相位超前于原点  $\frac{\omega x}{u}$ , 故将沿  $x$  轴正方向传播的波动表式中的负号改为正号即是, 如

$$\xi = A \cos\left[\omega\left(t + \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right].$$

### 5. 球面简谐波的表式

由于球面波的波面是球面, 所以在波传播过程中, 在单位时间内通过任一球面的能量相等, 这样, 振幅  $A$  与离开波源的距离  $r$  成反比。球面简谐波的表式为

$$\xi = \frac{A_0 r_0}{r} \cos\left[\omega\left(t - \frac{r}{u}\right) + \varphi_0\right],$$

式中  $A_0$  为离开波源  $r_0$  处的振幅。

## 6. 波的能量

波在传播时,介质中各质元  $dm$  都在各自平衡位置附近振动,因而具有动能。同时介质要产生形变,因而具有弹性势能。波的能量就是指介质中各质元的动能和势能之和。

设介质的密度为  $\rho$ ,质元的体积为  $dV$ ,则  $dm = \rho dV$ 。质元的振动动能为

$$dE_K = \frac{1}{2} (dm) v^2 = \frac{1}{2} (\rho dV) A^2 \omega^2 \sin^2 \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right];$$

质元的弹性势能为

$$dE_P = \frac{1}{2} (\rho dV) A^2 \omega^2 \sin^2 \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right]。$$

上两式表示,介质中质元的动能和势能都随时间作周期性变化,而且是同相的,且大小总是相等的。

质元的总能量为

$$dE = dE_K + dE_P = (\rho dV) A^2 \omega^2 \sin^2 \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right]。$$

质元的总能量随时间作周期性变化。这表明,在波动中,每个质元都在不断地从前面的质元吸收能量,与此同时,又不断地向后面的质元放出能量,即将能量不断传播出去。因此,波是能量传播的一种形式。

在波传播的介质中,为了描述介质中各处能量的分布情况,可用单位体积中波的能量,即能量密度  $w$  来表示:

$$w = \frac{dE}{dV} = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right]。$$

146 在介质中某点处的能量密度也随时间作周期性变

化。而在一个周期内的平均能量密度为

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T w dt = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2.$$

上式是从平面简谐波得出的,但波的平均能量密度与振幅的平方和频率的平方成正比的结论对任何平面波都是适用的。

单位时间内通过垂直于波的传播方向单位面积的平均能量(一个周期内的平均值),称为波的强度,用  $I$  来表示:

$$I = \bar{w}u = \frac{1}{2} \rho u \omega^2 A^2,$$

即波的强度与振幅的平方成正比,这一结论不仅对简谐波适用,而且具有普遍意义。波的强度的单位是  $W/m^2$ 。

## 二、波动方程

沿  $x$  轴方向以波速  $u$  传播的平面波的波动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

该波动方程不限于平面简谐波,它适用于一切平面波。任意物质运动,只要它的运动规律符合上式,就可以肯定它是以速度  $u$  传播的波动过程。这是波动的特征式。

在三维空间中传播的一切波动过程,只要介质是均匀的和各向同性的,而且无衰减,也无频散,都适合方程:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

这是以速度  $u$  为传播速度的行波方程。

在球面波的情况下,波动方程为

$$\frac{\partial^2(r\xi)}{\partial r^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2(r\xi)}{\partial t^2},$$

式中  $r$  为球的半径。

### 三、波的一些传播规律

#### 1. 波的反射

波动从一种介质传到另一种介质时,在两种介质的分界面上,传播方向要发生变化,产生反射和折射现象。

当入射波在两种介质的分界面上发生反射时,反射线、入射线和分界面的法线均在同一平面内,且反射角等于入射角。这称为波的反射定律。

当波从波疏介质射向波密介质时(介质的疏密一般用波的密度  $\rho$  和其中的波速  $u$  的乘积  $Z = \rho u$  来表示,称为波阻抗),即  $Z_1 < Z_2$ ,在界面上反射波的位移和入射波的位移始终保持大小相等,方向相反。也就是说,在界面上反射波振动相位与入射波振动相位始终反相。这种反射称为半波反射(图 8.2(a))。

当波从波密介质射向波疏介质时,即波阻抗  $Z_1 > Z_2$ ,在界面上反射波的位移和入射波的位移始终保持大小相等和方向相同。这种反射称为全波反射(图 8.2(b))。

#### 2. 波的折射

当入射波从一种介质透入另一介质发生折射时,折射线、入射线和分界面的法线均在同一平面

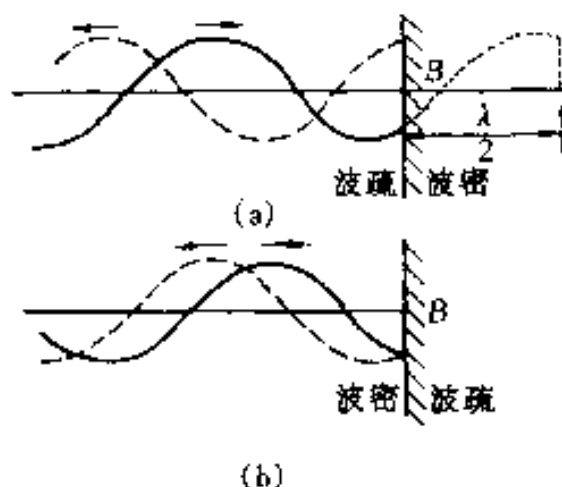


图 8.2

内,入射角*i*的正弦和折射角*r*的正弦之比等于波在第一和第二介质中的波速之比,即

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{u_1}{u_2} = n_{21},$$

比值  $n_{21}$  称为第二介质对于第一介质的**相对折射率**。

### 3. 波的散射

在颗粒状结构的介质中或介质中存在杂物粒子时,波动遇到这些粒子后,将使其成为新的波源而向四周发射波动,这一现象称为**波的散射**。散射体的尺寸越小和数目越少,则散射影响也越小。

### 4. 波的衍射

波在传播过程中遇到障碍物或障碍物中的孔隙时,其传播方向会绕过障碍物或孔隙的边缘发生偏折,在障碍物或孔隙边缘的背后展衍,这种现象称为**波的衍射**(旧称绕射)。障碍物或孔隙相对波长越小,衍射效应越显著。

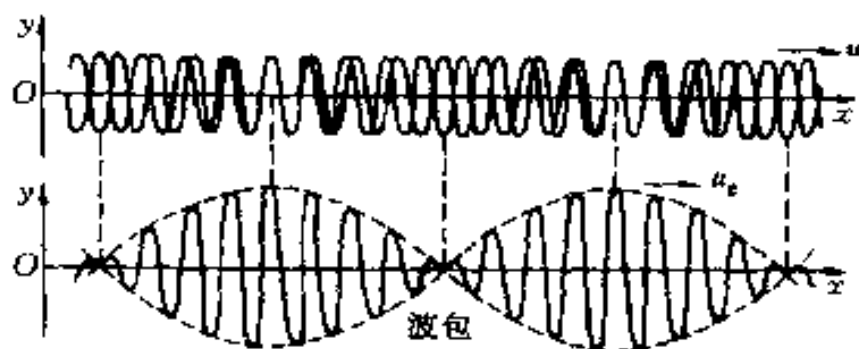
### 5. 波的频散、群速度

在通常的介质中,简谐波的相速度是个常数。

但在某些介质中,不同频率(或波长)的波有不同的相速度。这种现象称为波的色散(或频散)。波的色散是由介质的特性所决定的,因此常把介质分为色散介质和非色散介质。

单一频率的波,叫做单色波,它的传播速度是它的相速度。真正单色波的波列必须是无限长的,而实际上都是有限的。有限长的波列相当于许多单色波的叠加。由这样一群单色波组成的波列叫做波包(图 8.3)。当波群在色散介质中传播时,这时组成波群的各分波的传播速度(相速)均不同,因此整个波包在向前传播的同时,形状逐渐改变。波包中振幅最大的地方叫做波包中心,波包中心前进的速度叫做群速度,用  $u_g$  表示,

$$u_g = \frac{d\omega}{dk}。$$



上图表示频率稍有不同的两列波 下图表示上面两列波的合成合成波的振幅(虚线)随时间作周期性地变化

图 8.3

群速度和相速度的关系为

$$u_g = u + k \frac{du}{dk} = u - \lambda \frac{du}{d\lambda}。$$

群速度是波包的能量传播速度,也是波包所携带的

信息的传播速度。

#### 6. 波的衰减

波在传播过程中,介质总是要吸收波的一部分能量,转换成其他形式的能量(例如介质的内能),因此波的强度或振幅都将逐渐减小。这种现象称为波的衰减,或波的吸收。

设在  $x = 0$  处波的强度为  $I_0$ ,经  $x$  距离后衰减为  $I$ ,其衰变规律为

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

式中  $\alpha$  是一个与介质性质及波的频率有关的量,称为介质的吸收系数。

### 四、波的叠加

#### 1. 波的叠加原理

几列波在传播过程中在某一区域相遇后,仍保持各自的原有特性(频率、波长、振动方向等)继续沿原来的传播方向前进,各波的传播情况与未相遇一样,这称为波传播的独立性。

在相遇区域内,任一点处的振动为各波单独存在时所引起的振动的合振动。这一规律称为波的叠加原理。

#### 2. 波的干涉

两列频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差恒定的波,称为相干波。

两相干波叠加后,在交叠处有些地方波动加强,有些地方波动减弱,在空间形成一种稳定分布的现象,称为波的干涉现象。

设两列相干波在同一介质中传播而相遇,在交



叠区某点  $P$  离两波源的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 振幅分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 则两波在  $P$  点分别单独引起的振动为

$$\xi_1 = A_1 \cos(2\pi\nu t - 2\pi \frac{r_1}{\lambda} + \varphi_{10}),$$

$$\xi_2 = A_2 \cos(2\pi\nu t - 2\pi \frac{r_2}{\lambda} + \varphi_{20}).$$

根据同方向同频率振动的合成,  $P$  点的运动仍为简谐振动, 振动表式为

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

式中  $A$  为合振幅, 由下式决定:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi,$$

合成波的强度为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi,$$

两式中的  $\Delta\varphi$  为两波在  $P$  点处的相位差

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}.$$

当相位差满足

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = 2k\pi, (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

的地方, 振幅和强度最大, 为

$$A_{\max} = A_1 + A_2, \quad I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2},$$

即相位差为  $\pi$  的偶数倍的那些地方, 振动始终加强, 称为干涉相长。

当相位差满足

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} =$$

$$(2k + 1)\pi, (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

的地方, 振幅和强度最小, 为

$$A_{\min} = |A_1 - A_2|,$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2},$$

即相位差为  $\pi$  的奇数倍的那些地方, 振动始终减弱, 称为干涉相消。

### 3. 驻波

#### (1) 驻波的形成和特点

驻波是由振幅相同、传播方向相反的两列相干波叠加而成, 这是一种特殊的干涉现象。

设一列波沿  $x$  轴的正方向传播, 另一列沿  $x$  轴的负方向传播, 选取共同的坐标原点和计时起点, 它们的波函数分别为

$$\xi_1 = A \cos 2\pi \left( \nu t - \frac{x}{\lambda} \right),$$

$$\xi_2 = A \cos 2\pi \left( \nu t + \frac{x}{\lambda} \right).$$

按叠加原理, 合成的驻波的波函数为

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = \left( 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \cos \omega t.$$

上式说明, 在形成驻波时, 波线上各质元都以同一频率作简谐振动, 但不同质元的振幅随其位置  $x$  作周期性变化(图 8.4)。

对于

$$x = k \frac{\lambda}{2}, (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

的各点, 振幅最大, 等于  $2A$ , 这些点称为驻波的波腹。对于

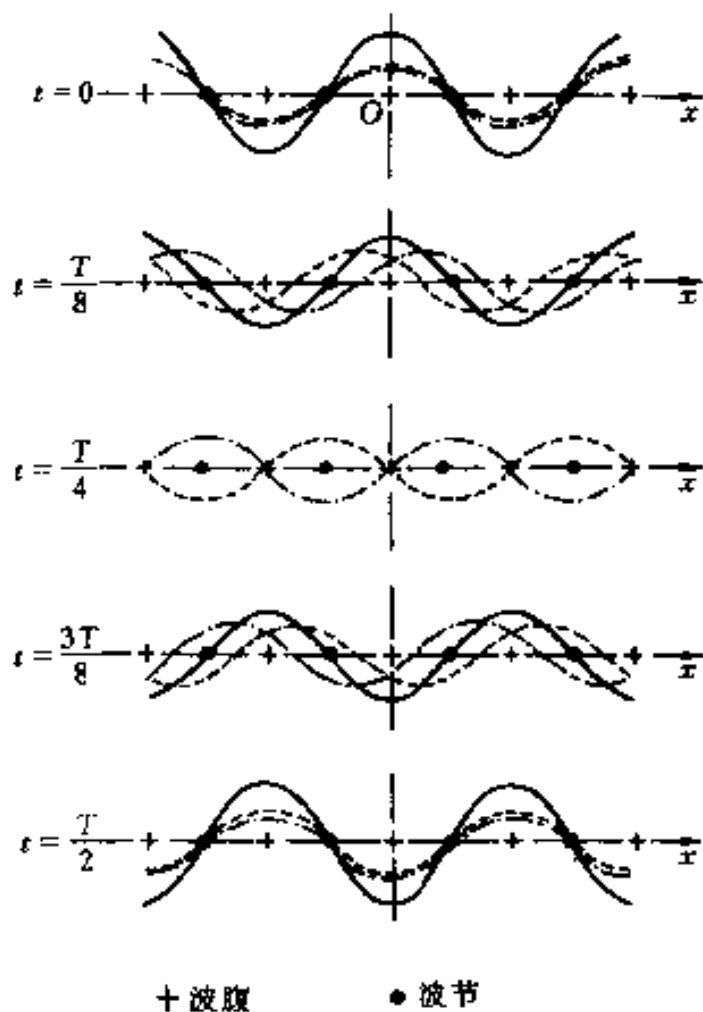


图 8.4

$$x = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

的各点,振幅为零,称为驻波的波节。

相邻两波腹之间或相邻两波节之间的距离均为  $\frac{\lambda}{2}$ , 而相邻波节和波腹之间的距离为  $\lambda/4$ 。

如把相邻两波节之间的各点叫做一段。那么,在驻波中同一段中的各点振动相位相同,而相邻的两段中的各点振动相位相反。因此,同一段中各点沿相同方向同时到达各自振动位移的最大值,又沿

相同方向同时通过平衡位置。而波节两侧各点同时沿相反方向到达振动位移的正、负最大值,又沿相反方向同时到达平衡位置。由此可见,对于驻波来说,每一时刻都有一定的波形,这些波形的空间位置不像通常的行波那样沿波线移动,而是以节点为标志驻定不动的,各质元位移的大小和方向随时间作周期性的变化。

### (2) 相位跃变

波从一种介质进入另一种介质时,一部分被反射,一部分透射。这时,反射波振幅不等于入射波振幅,反射波与入射波叠加后既包含有驻波也有行波。对驻波来说,当波从波疏介质射向波密介质时,则反射处形成波节,反射波振动与入射波振动反相,即反射波与入射波有 $\pi$ 的相位突变。因为相距半波长的两点相位差为 $\pi$ ,所以这个 $\pi$ 的相位突变一般形象地称为“半波损失”。如果波从波密介质射向波疏介质时,则反射处形成波腹,反射波振动与入射波振动同相,这时,反射波没有半波损失。

## 五、多普勒效应

由于波源或观测者的运动,造成观测频率与波源频率不同的现象,称为多普勒效应,这是多普勒(C. J. Doppler)于1842年发现的。

### 1. 机械波的多普勒效应

对于机械波来说,所谓波源或观测者的运动或静止,都是相对于波在其中传播的介质而言的。在弹性波以速度 $u$ 通过某种介质时,速度由介质的性质决定,而与波源及观测者的运动无关。

为简单起见,设波源或观测者的运动都发生在它们之间的联线上,波源的频率为  $\nu$ 。

① 波源静止,观测者以速度  $v_R$  相对于介质运动。当观测者迎向波源运动时,测得的频率为

$$\nu' = \frac{u + v_R}{u} \nu,$$

其结果是实际观测频率高于波源频率。

当观测者背离波源运动时,测得的频率为

$$\nu' = \frac{u - v_R}{u} \nu,$$

其结果是实际观测频率低于波源频率。

② 观测者静止,波源以速度  $v_S$  相对于介质运动。当波源向着观测者运动时,测得的频率为

$$\nu' = \frac{u}{u - v_S} \nu。$$

当波源离开观测者时,其频率为

$$\nu' = \frac{u}{u + v_S} \nu。$$

因此,当列车迎着我们开来时,汽笛音调升高,反之,当列车离开我们而去时,汽笛音调降低。

③ 波源和观测者同时运动。当波源和观测者相向运动时,

$$\nu' = \frac{u + v_R}{u - v_S} \nu。$$

当波源和观测者背向运动时,

$$\nu' = \frac{u - v_R}{u + v_S} \nu。$$

④ 如果波源或观测者是沿着它们的垂直方向

运动,则没有多普勒效应发生。如果波源和观测者的运动方向是任意的,那么只要将速度在连线上的分量代入以上公式即可。不过随着两者的运动,在不同时刻  $v_S$  和  $v_R$  的分量也不同,这种情况下测得的频率将随着时间而变化。

## 2. 电磁波的多普勒效应

因为电磁波的传播不依赖于弹性介质,所以波源和观测者之间的相对速度决定了测得的频率。根据相对性原理和光速不变原理,如果波源和观测者以速度  $v$  沿二者的联系相互趋近,测得的频率为

$$\nu' = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \nu,$$

式中  $c$  为真空中的光速。当波源与观测者相互远离时,  $v$  取负值。前者接收到的频率比波源频率高,称为紫移;后者接收到的频率比波源频率低,称为红移。

电磁波还存在横向多普勒效应,即当波源和观察者的相对速度  $v_r$  垂直于它们的连线时,测得的频率为

$$\nu' = \sqrt{1 - \frac{v_r^2}{c^2}} \nu_0$$

如果波源和观测者之间的相对速度  $v_r$  与它们之间的连线成  $\theta$  角,则测得的频率为

$$\nu' = \frac{\sqrt{1 - v_r^2/c^2}}{1 - \left(\frac{v_r}{c}\right) \cos\theta} \nu_0$$

多普勒效应除了可用于测定星球相对于地球的运动速度外,还可用于追踪人造地球卫星等运动物

体。利用声波的多普勒效应可以测定流体的流动、振动体的振动和潜艇的速度,还可以用来报警和监测车速。在医药上,利用超声波的多普勒效应可以对心脏跳动情况进行诊断。

### 3. 冲击波

当波源的运动速度  $v_S$  大于波在介质中的传播速度  $u$  时,波源将位于波前的前方。如图 8.5 所示,在时间  $t$  内,波源从  $S'$  点移动到了  $S$  点,而波源在  $t = 0$  时所发出的波,却只从点  $S'$  传播到了距离它为  $ut$  远的球面波前处。在整个  $t$  时间内,波源在前进时发出的波的前面的切面是一个圆锥面,其轴是波源运动所沿的直线,其张角  $\theta$  取决于:

$$\sin\theta = \frac{u}{v_S}$$

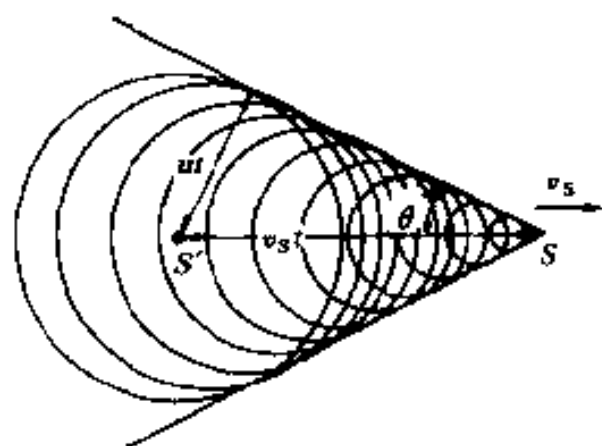


图 8.5

通常,把该圆锥面称为马赫锥,比值  $\frac{v_S}{u}$  称为马赫数。这种以波源为顶点的圆锥形波前的波,称为冲击波。飞机、子弹等以超音速飞行时,都会在空气中激起冲击波。当船只的航行速度超过水波的传播速

度时,在水面上激起以船头为顶点的 V 形波,通常称为舷波。

在透明介质里穿行的带电粒子速度超过介质里的光速时,也会辐射锥形电磁波,称为切伦科夫(П. А. Черенков)辐射。利用这一原理制成的测定高能粒子探测器,已广泛应用于高能物理学。

## 六、声波

在弹性介质中传播的振动,频率在 20Hz ~ 20000Hz 之间,能引起人的听觉的,称为可闻声波,简称声波。频率高于 20000Hz 的称为超声波;频率低于 20Hz 的称为次声波。通常广义的声波是上述三者的总称。

### 1. 声速

在液体和气体中传播的声速为

$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho}},$$

式中  $B$  为介质的体变弹性模量,  $\rho$  为介质的密度。

对于理想气体,声速为

$$u = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

式中  $M$  是气体的摩尔质量,  $\gamma$  是气体的比热容比,  $p$  是气体的压强,  $T$  是热力学温度,  $R$  是摩尔气体常量。例如空气的  $\gamma = 1.40$ , 在标准状态下的声速为 331m/s。在空气中,声速随温度  $t$  (°C) 变化的近似公式为

$$u = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.16}} \approx$$



$$331.45 + 0.61t_0$$

在固体中传播的声波,除了--般的纵波外,还有横波,声速为

$$u_{\text{纵}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}};$$

$$u_{\text{横}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

式中  $E$  和  $G$  分别为固体介质的杨氏模量和切变模量,  $\mu$  为固体介质的泊松比(杆在长度方向(纵向)伸长时,横向就要缩小。横向缩短应变对纵向伸长应变之比)。

### 2. 声压

介质中有声波传播时的压强  $p'$  与没有声波时的静压强  $p_0$  之间的差值,称为声压,  $\Delta p = p' - p_0$  就是声压,常用  $p$  来表示。由于声波是纵波,在稀疏区域,声压是负值;在稠密区域,声压是正值。

用声压表示的波动表式为

$$p_m = -\rho u \omega A \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right] = \\ -p_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right],$$

式中  $p_m = \rho u \omega A$  称为声压振幅。声波既可看作位移波,也可以看作声压波,声压波比位移波在相位上落后  $\frac{\pi}{2}$ 。因此,在位移最大处,声压为零;在位移为零处,声压最大。

### 3. 声强、声强级

声强就是单位时间内通过垂直于声波传播方向

的单位面积的声波能量。对于简谐声波,声强  $I$  为

$$I = \frac{1}{2} \rho u \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho u},$$

频率越高,越容易获得较大的声压和声强。声强的单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

引起听觉的声波,不仅有频率范围,而且有声强范围。对于每个给定的可闻频率,声强都有上下两个极限,低于下限的声强不能引起听觉,能引起听觉的最低声强称为听觉阈。高于上限的声强也不能引起听觉,而只能引起痛觉,这一声强的上限值称为痛觉阈。在  $1000\text{Hz}$  时,一般正常人听觉的最高声强为  $1\text{W}/\text{m}^2$ ,最低声强为  $10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ 。通常把这一最低声强作为声强的标准,用  $I_0$  表示。由于声强的数量级相差悬殊,所以常用对数标度作为声强级(以  $I_L$  表示)来量度,即

$$I_L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}.$$

声强级原为无量纲的纯数,但仍给以单位,单位为  $\text{dB}$ (分贝)。例如,平常交谈的声强级为  $50\text{dB}$ ,闹市的声强级为  $70\text{dB} \sim 80\text{dB}$  等。

#### 4. 声波反射和折射的强度

声波垂直入射到两种介质的交界面上,将出现反射波和透射波。反射波强度与入射波波强度之比,称为(强度)反射系数,以  $R$  表示;透射波强度与入射波强度之比,称为(强度)透射系数,以  $T$  表示。它们是

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2,$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

式中  $Z = \rho u$  为介质的波阻抗。例如：空气-水， $T = 0.1\%$ ，空气-钢， $T = 0.004\%$ ；水-钢， $T = 12\%$ 。由此可知，要使超声波透入钢质工件，不能从空气直接射向工件，必须将表面适当加工并且涂油，以保持良好的“声接触”。

### 5. 乐音

在可闻声波中，又分为乐音和噪声。凡是其振动波形是周期性的、在频谱上是分列的、听起来比较和谐悦耳的叫做乐音。

#### (1) 音调、响度、音色

描述乐音的物理量，除了频率、振幅、相位、频谱等客观量外，还有音调、响度和音色等主观量。

音调与频率有关，也与声压及波形有关。音调与频率之间没有一一对应关系。对恒定强度的纯音来说，频率增大时，音调变高；但对恒定频率的纯音来说，声强增大时，音调却偏低。

音调的高低常排列成音阶。例如，自然音阶中的音调与频率之间的关系如下：

C,	D,	E,	F,	G,	A,	B,	C
1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	$\dot{1}$
256,	288,	320,	$341\frac{1}{3}$ ,	384,	$426\frac{2}{3}$ ,	480,	512(Hz)

此外还有  $c', d', e', f', g', a', b'$  的小字一组等(正对着钢琴匙孔的中间的一组音定为小写字一组)。过去把  $C = 256\text{Hz}$  作为标准音调，又称为物理音调，现在已不多用。

而把  $a' = 440\text{ Hz}$  定为国际标准音调。

**响度**是人耳感觉到的声音强弱,主要决定于声振动的振幅和声压。响度随声强的增加而增加,但两者没有简单的线性关系。例如,对于低音,在同样的声强条件下,听起来响度较低,而在  $3000\text{ Hz}$  附近,同样的响度,声强最小,即这个地方听觉最灵敏。

**音色**(也称音品)是指由声波的音调所产生的听觉品质,它决定于频谱中基频和谐频的数目、长短、相对强度等。而且也与听者距声源的距离以及与听者的年龄、职业等都有关系。因此音色更是一种主观感觉。

## (2) 弦线的振动

在一根两端固定并张紧的弦上,如果拨动弦线激起横向振动,则经两端反射后就会形成两列反向行进的波,叠加后形成驻波(图 8.6)。由于弦的两端固定,必须是波节,因而其波长与弦长必须满足关系:

$$l = n \frac{\lambda_n}{2}, (n = 1, 2, 3 \dots)$$

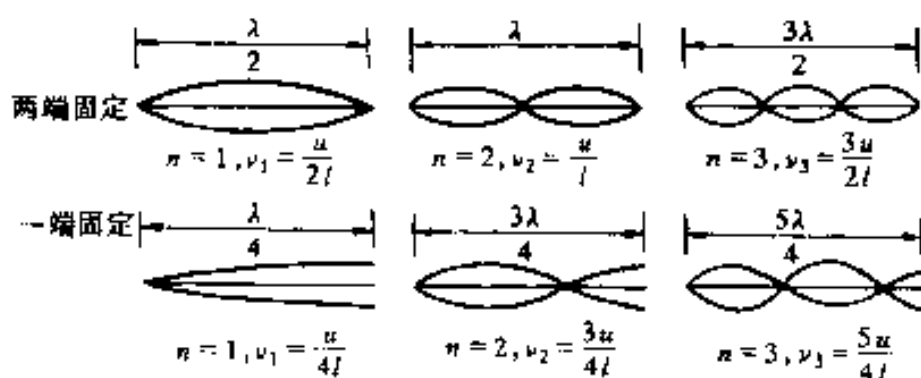


图 8.6

驻波的波长及频率分别为

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}, \nu_n = n \frac{u}{2l}, (n = 1, 2, 3, \dots),$$

式中  $u$  为弦线上横波的传播速度。

在弦线振动时,有一系列驻波同时形成,除了发出频率为  $\nu_1$  的基音(或称基频)外,还发出频率为基音整数倍的谐音(也称泛音或谐频),因此弦的振动频谱是线状谱。

### (3) 气柱的振动

如果管的两端都是开口的,管内气流的振动将产生驻波,管的两端都是位移波腹。因此驻波的频率为

$$\nu_n = n \frac{u}{2l}, (n = 1, 2, 3, \dots),$$

$u$  是空气柱中纵波的波速。

如果管的一端为开口的,另一端为闭管。管的闭端是个位移波节,开口处是个位移波腹。因此驻波的频率为

$$\nu_n = n \frac{u}{4l}, (n = 1, 2, 3, \dots)。$$

开管风琴管和闭管风琴管的振动模式如图 8.7 所示。

## 6. 噪声

噪声是多种频率、不同强度的声音,无规律地组合在一起,听起来有嘈杂感的声音。有时也泛指所有对正常工作环境有干扰、不需要的声音。

按噪声的声波特性(如振幅、相位等)随时间的变化规律,可分为有规噪声和无规噪声。各种机械和气流产生的噪声属有规噪声,而交通噪声或热扰动等产生的噪声则为无规噪声。

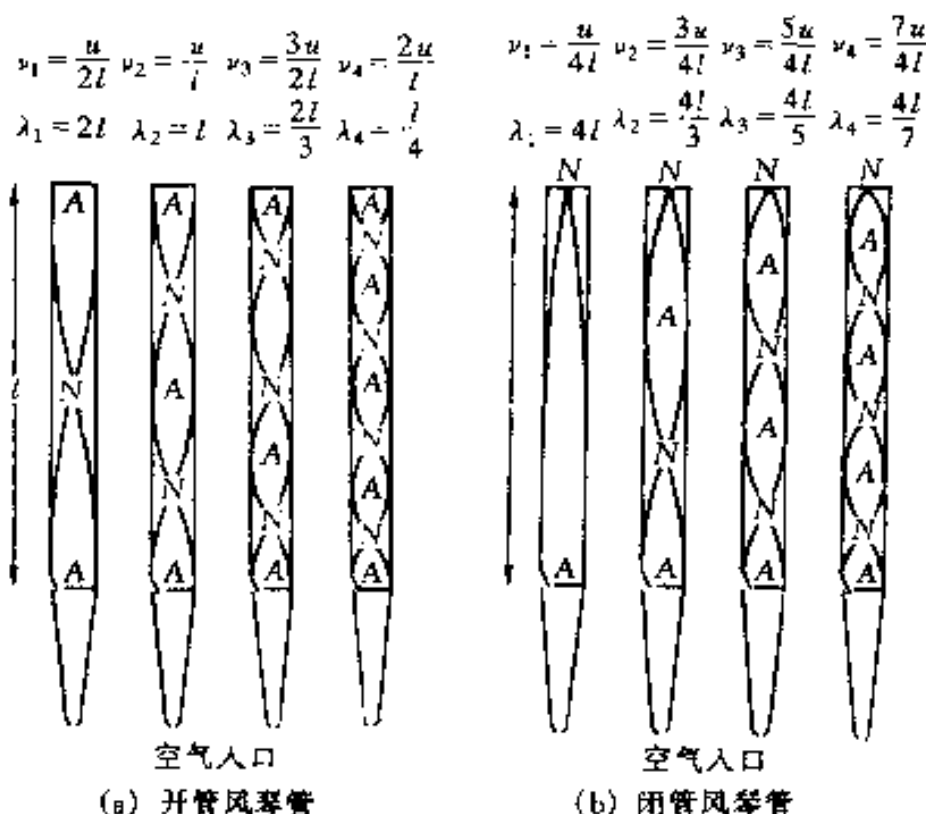


图 8.7

噪声会污染环境、危害人的身心健康。对于工业噪声所允许的评价标准,大多数国家(包括我国)定为 90dB(A)。噪声的控制主要从声源、传声途径和接收者三个方面加以控制。

### 7. 超声波和次声波

频率高于 20000Hz 的声波,称为超声波。超声波的主要特性有:1° 定向性很好,射线能定向传播。2° 穿透本领大,在流体和固体中传播时,衰减很小。3° 当超声波在介质中传播时,超声波与介质相互作用,产生一些特殊的超声效应,有机械作用、热学作用、空化作用、化学作用和生物作用等。

频率低于 20Hz 的声波,称为次声波。如台风、

地震、火山爆发、超音速飞机的起飞和降落、核爆炸等都伴随着次声波。次声波的传播速度和声波相同。大气对次声波的吸收是很小的,所以次声波是大气中的优秀“通讯员”。次声波对人体的危害,往往比可闻声频的噪声更大。

## 七、电磁波

### 1. 电磁波的波动方程

变化的电场在其周围产生变化的磁场,这变化的磁场又在较远的空间产生变化的电场,变化的电场与变化的磁场相互激发、交替产生,并以有限的速度由近及远向四周传播。这种变化电磁场在空间的传播称为电磁波。

沿  $x$  方向传播的平面电磁波的波动方程为

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= \epsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}.\end{aligned}$$

式中  $\epsilon$ 、 $\mu$  为介质的电容率和磁导率。波动的表式为

$$E = E_0 \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right],$$

$$E = H_0 \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right].$$

式中  $E_0$  和  $H_0$  为电场强度和磁场强度的振幅,  $\omega$  为电磁波的角频率。

### 2. 电磁波的性质

① 电磁波的电矢量  $E$  和磁矢量  $H$  相互垂直,且均与传播方向垂直,说明电磁波是横波(图 8.8)。

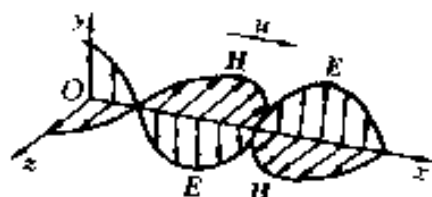


图 8.8

② 沿给定方向传播的电磁波,  $E$  和  $H$  分别在各自的平面内振动, 这种特性称为电磁波的偏振性。

③ 在空间任何地点、任何时刻,  $E$  和  $H$  都在作周期性的变化, 而且是同相位的。  $E$  和  $H$  在量值上的关系为

$$\frac{E}{H} = \frac{E_0}{H_0} = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\epsilon}}。$$

④ 电磁波的传播速度为

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}。$$

电磁波在真空中的速度  $u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ , 等于真空中的光速  $c$ 。

### 3. 电磁波的能量

单位时间内通过垂直于传播方向的单位面积的电磁能称为电磁波的能流密度或辐射强度, 用符号  $S$  表示,

$$S = wu = \frac{u}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2) = EH。$$

能流密度实际上是一个沿传播方向的矢量, 故

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}。$$

电磁波的能量密度矢量  $S$  也称坡印亭 (J. H. Poynt-



ing) 矢量。

#### 4. 电磁波的动量

电磁波的能量可以认为是以一定的密度  $w$  分布在空间的, 因此单位体积中电磁场的质量为  $\frac{w}{c^2}$ 。电磁波具有质量而且以一定的速度传播, 所以电磁波也具有动量。真空中单位体积电磁波的动量, 即动量体密度为

$$\left(\frac{w}{c^2}\right)c = \frac{w}{c}。$$

当电磁波投射到物体表面上时, 或被物体吸收, 或被物体反射, 或两者兼有, 这时电磁波的动量将发生变化, 并对该物体施以力的作用, 称为辐射压力。物体单位面积所受到的辐射压力称为辐射压强, 或称光压。

#### 5. 电磁波的辐射

加速运动的电荷能够辐射电磁波。产生电磁辐射的最简单的系统是具有交变电矩的电偶极子, 称为振荡偶极子。原子分子中带电粒子的运动可视为振荡偶极子, 发射无线电波的天线也可看成由许多振荡偶极子组成。

设振荡偶极子的电矩为

$$p = p_0 \cos \omega t,$$

在远离偶极子 ( $r \gg \lambda$ ) 的辐射场空间任一点在时刻  $t$  的  $E, H$  的量值为

$$E = E_\theta = \frac{\omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 u^2 r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{u} \right),$$

$$H = H_\varphi = \frac{\omega^2 p_0 \sin \theta}{4\pi u r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{c} \right)。$$

式中  $\theta$  为位矢  $r$  与偶极子轴线之间的夹角。磁场  $H$  沿球面上纬线方向, 电场  $E$  沿经线方向(图 8.9)。

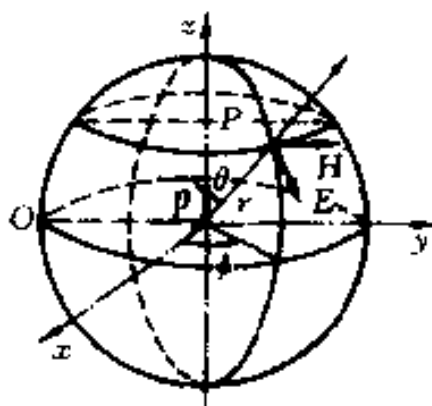


图 8.9

振荡偶极子的平均辐射强度(一个周期内时间平均值)

$$\bar{S} = \frac{\mu p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2 u} \circ$$

平均辐射功率

$$\bar{P} = \frac{\mu p_0^2 \omega^4}{12\pi u} \circ$$

振荡偶极子的平均辐射强度  $\bar{S}$  与频率的四次方成正比, 与距离的平方成反比, 还与  $\sin^2 \theta$  (称为方向因子) 成正比, 即沿偶极子的轴向, 辐射强度为零; 而与轴垂直方向上为最大。

### 6. 电磁波的反射和折射

设有平面电磁波从一介质(折射率为  $n_1$ ) 以入射角  $i$  射向另一介质(折射率为  $n_2$ ), 在界面上将发生反射和透射现象, 折射角为  $r$ 。将入射电磁波的电矢量  $E_1$  分解为垂直于入射面的分矢量  $E_{1\perp}$  和平

行于入射角的分矢量  $E_{1//}$ 。反射波和折射波的电矢量  $E'_1$  和  $E_2$  也分解为平行于人射面的分矢量  $E'_{1//}$ ,  $E_{2//}$  和垂直于人射面的分矢量  $E'_{1\perp}$ ,  $E_{2\perp}$ 。图 8.10 中所画的各分矢量方向分别表示各量所取的正方向。反射波和折射波与入射波各分矢量之间的关系为

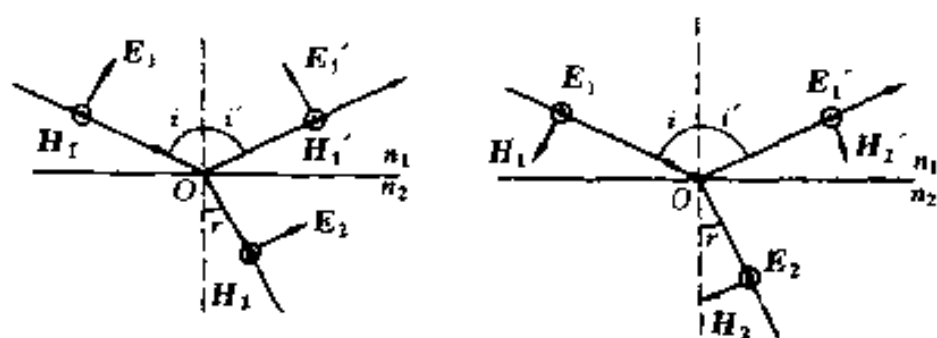
$$\left(\frac{E'_1}{E_1}\right)_{\perp} = \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos r}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)},$$

$$\left(\frac{E_2}{E_1}\right)_{\perp} = \frac{2n_1 \cos i}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} = \frac{2\cos i \sin r}{\sin(i+r)},$$

$$\left(\frac{E'_1}{E_1}\right)_{//} = \frac{n_2 \cos i - n_1 \cos r}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} = \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)},$$

$$\left(\frac{E_2}{E_1}\right)_{//} = \frac{2n_1 \cos i}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} = \frac{2\cos i \sin r}{\sin(i+r)\sin(i-r)}.$$

以上四式称为菲涅耳(A. J. Fresnel)反射折射公式。



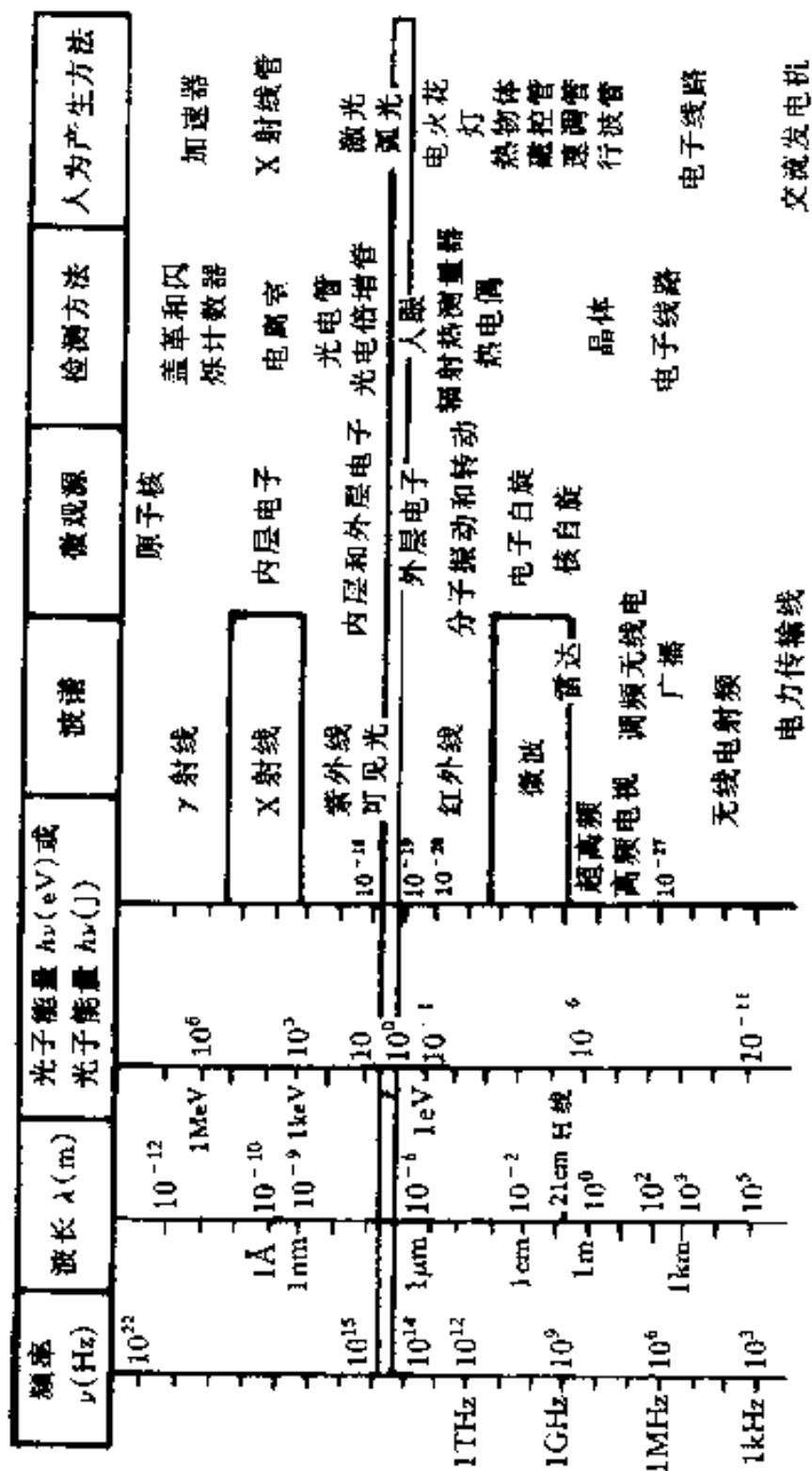
(a)  $E$  平行于入射面的情况

(b)  $E$  垂直于入射面的情况

图 8.10

## 7. 电磁波谱

各种无线电波的范围和用途见下表。



名称	长波	中波	中短波	短波	米波	微波		
						分米波	厘米波	毫米波
波长	30000m ~ 3000m	3000m ~ 200m	200m ~ 50m	50m ~ 10m	10m ~ 1m	10cm ~ 1cm	1cm ~ 0.1cm	
频率	10kHz ~ 100kHz	100kHz ~ 1500kHz	1.5MHz ~ 6MHz	6MHz ~ 30MHz	30MHz ~ 300MHz	300MHz ~ 3000MHz	3000MHz ~ 30000MHz	30000MHz ~ 300000MHz
主要用途	越洋长距 离通讯和 导航	无线电广 播	电报通讯	无线电广 播、电报 通讯	调频无线 电广播、电 视广播、无 线电导航	电视、雷达、无线电导航及其他专 门用途		

# 第四篇 热 学

## 第九章 热力学

### 一、物态方程

#### 1. 平衡态

在热学中,把所研究的由大量的微观粒子组成的宏观物体,称为热力学系统,简称系统或体系。

若系统与外界没有物质交换,也没有能量交换(即孤立系统),系统内部也不发生化学反应或核反应过程,经过足够长时间后,系统的各种宏观性质达到稳定,不随时间而变化。系统的这种状态称为平衡态。

#### 2. 状态参量

当系统处于平衡态时,其宏观状态可以用几个独立的宏观量来描述,这几个独立的宏观量称为系统的状态参量。例如,一定量纯气体处于平衡态时,可用压强  $p$ 、体积  $V$  和温度  $T$  中的任意两个作为状态参量。

复杂的热力学系统的状态描述还需要增加其他的参量。例如化学系统要增加化学参量,电磁系统要增加电磁参量。

### 3. 气体的状态方程

#### (1) 理想气体的状态方程

理想气体的状态方程为

$$pV = \nu RT,$$

或

$$p = nkT,$$

式中  $p$ ,  $V$  和  $T$  分别是气体的压强、体积和热力学温度,  $\nu$  是气体的摩尔数,  $n$  是单位体积内的分子数,称为气体的分子数密度。 $R = 8.314510\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,称为摩尔气体常量,简称气体常量。 $k = \frac{R}{N_A} =$

$1.380658 \times 10^{-23}\text{J}/\text{K}$ ,称为玻尔兹曼(L. Boltzman)常量, $N_A = 6.0221367 \times 10^{23}/\text{mol}$ 称为阿伏伽德罗常量。

#### (2) 实际气体的状态方程

实际气体的状态方程有很多种,其中一类是对气体的结构作了一些简化假设后推导出来的,如范德瓦耳斯(van der Waals)方程:

$$\left(p + \nu^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT,$$

式中  $a$  和  $b$  是由实验测定的常量。

另一类是形式上比较复杂,然而准确度较高的经验公式,如用级数表示的卡末林·昂内斯(Kamerlingh-Onnes)方程:

$$pV_m = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots;$$

或

$$pV_m = A + \frac{B'}{V} + \frac{C'}{V^2} + \frac{D'}{V^3} + \dots,$$

式中  $V_m$  是气体的摩尔体积,  $A, B, C, D, \dots$  或  $A', B', C', D', \dots$  都是温度的函数, 并与实际气体的性质有关, 通常称为第一、第二、第三、第四、…位力系数, 可由实验测定。

#### 4. 各向同性固体和液体的状态方程

对于简单系统, 可用体积  $V$  和压强  $p$  来描述它们的平衡态。所以, 简单系统的状态方程的一般形式为

$$f(p, V, T) = 0,$$

其具体形式视不同的物质而异。当  $p, V, T$  三个变量之间存在函数关系时, 其偏导数之间必定存在如下关系:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = -1。$$

## 二、热力学定律

### 1. 热力学第零定律

在与外界影响隔绝的条件下, 如果处于确定状态下的物体  $C$  分别与物体  $A, B$  达到热平衡, 则物体  $A$  和  $B$  也是相互热平衡的。这个有关温度最基本的实验事实, 称为热平衡定律或热力学第零定律 (此定律是 20 世纪 30 年代由否勒 (R. H. Fowler) 提出的, 远在热力学第一、第二定律提出 80 年之后。为了想说明在逻辑上它应该在那两条定律之前, 故名之为“第零定律”)。



## 2. 热力学第一定律

系统从外界吸收的热量,一部分使系统的内能增加,其余部分使系统对外作功。热力学第一定律的数学表式为

$$Q = (E_2 - E_1) + A;$$

或

$$dQ = dE + dA。$$

系统吸热, $Q$  为正值;系统放热, $Q$  为负值。系统对外作功, $A$  为正值;外界对系统作功, $A$  为负值。

热力学第一定律也可表述为:第一类永动机是不可能制造成功的。所谓第一类永动机就是外界不需要供给它能量而能永远对外作功的机器。

热力学第一定律实质上是包含热量交换在内的能量守恒定律。

## 3. 热力学第二定律

(1) 热力学第二定律的克劳修斯(R. J. E. Clausius)表述

不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。

(2) 热力学第二定律的开尔文(W. Thomson, Lord Kelvin)表述

不可能从单一热源吸取热量,使之完全变为有用的功而不产生其他影响。

热力学第二定律的开尔文表述又可表述为:第二类永动机是不可能制造成功的。所谓第二类永动机是指从单一热源吸热作功的机器。

热力学第二定律指明了热功转换过程具有一定的方向性。

### (3) 热力学第二定律的数学表述

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}, (\text{任意过程}),$$

或

$$dS \geq \frac{dQ}{T},$$

式中  $S$  表示熵,“ $>$ ”对应不可逆过程,“ $=$ ”对应可逆过程。就是把熵增原理作为热力学第二定律的数学表述。

#### 4. 热力学第三定律

物体的温度降到绝对零度是不可能的。

### 三、热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用

#### 1. 准静态过程

当系统与外界交换能量时,系统的状态就要发生变化。系统状态随时间的变化,称为热力学过程。

实际过程进行时,任一时刻,系统的状态会偏离平衡态。如果过程中的任一时刻,系统都无限接近于平衡态,这样的过程称为准静态过程。

准静态过程是一种理想化过程,须进行得无限缓慢。当实际过程进行的时间比驰豫时间(从平衡态被某一干扰破坏到建立新的平衡态所需的时间)大得多时,可近似视为准静态过程。

#### 2. 功

在无摩擦的准静态过程中,流体的体积变化为  $dV$ ,则系统对外所作功的元功为

$$dA = p dV,$$

式中  $p$  为流体的压强。当系统膨胀时,  $dV > 0$ , 177

$dA > 0$ , 系统对外作正功; 当系统被压缩时,  $dV < 0, dA < 0$ , 外界对系统作正功。

若系统经历一有限的准静态过程, 体积由  $V_1$  变为  $V_2$ , 系统对外界所作的功为

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV。$$

在热力学中, 做功有多种形式, 除机械功外, 还有电磁功、表面张力的功等。在一般情况下称为广义功, 准静态过程中的元功可写成

$$dA = YdX,$$

式中  $Y$  称为广义力, 如单位长度的表面张力、电动势、电场强度和磁场强度等,  $dX$  称为广义位移, 与上述参量对应的有面积、电荷、电位移和磁感应强度等。

### 3. 摩尔热容

热容量就是热力学系统在一定条件下温度升高(或降低)1K 时吸收(或放出)的热量。严格地说, 热容量  $C$  是随温度变化的, 所以

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T}。$$

通常把 1mol 物质的热容称为摩尔热容。

同一种物质在不同过程中, 有不同的摩尔热容。最常用的摩尔定体热容  $C_V$  和摩尔定压热容  $C_p$ 。

对于理想气体

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad C_p = \frac{i+2}{2}R,$$

$$C_p - C_V = R,$$

178 式中  $i$  为气体分子的自由度, 单原子分子  $i = 3$ , 双

原子分子(不考虑振动)  $i = 5$ , 多原子分子(不考虑振动)  $i = 7$ 。

摩尔定压热容  $C_p$  与摩尔定体热容  $C_v$  之比, 用  $\gamma$  表示, 叫做比热容比, 即

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}。$$

对于单原子气体  $\gamma = \frac{5}{3} = 1.67$ ; 双原子气体  $\gamma = \frac{7}{5} = 1.40$ ; 多原子气体  $\gamma = \frac{8}{6} = 1.33$ 。

#### 4. 热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用

##### (1) 等体过程

等体过程中, 气体对外不作功, 即  $A = 0$ 。系统吸收的热量全部转变为内能的增量:

$$Q_v = \Delta E = \nu C_v \Delta T = \nu \frac{i}{2} R \Delta T。$$

##### (2) 等压过程

等压过程中, 气体对外做功为

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) = p \Delta V = \nu R \Delta T。$$

理想气体的内能仅仅为温度的函数, 所以, 不论经历什么过程, 只要温度变化  $\Delta T$ , 其内能的增量均为

$$\Delta E = \nu \frac{i}{2} R \Delta T = \nu C_v \Delta T。$$

在等压过程中, 气体吸收的热量

$$Q_p = \nu C_p \Delta T,$$

其中一部分转变为内能的增量  $\Delta E = \nu C_v \Delta T$ , 另一部分转变为对外做功  $A = p \Delta V = \nu R \Delta T$ 。

3

热力学第一定律

### (3) 等温过程

在等温过程中,气体的温度不变,所以内能也恒定不变,  $\Delta E = 0$ 。气体吸收的热量全部转变为对外做功,即

$$Q_T = A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}。$$

### (4) 绝热过程

绝热准静态过程中,气体与外界无热量交换,即  $dQ = 0$ ,  $Q = 0$ 。在绝热膨胀过程中,气体内能的减少,全部转变为对外做功。绝热压缩过程中,外界对气体所作的功,全部转变为内能的增量,即

$$A = -\Delta E = -\nu C_V \Delta T。$$

理想气体绝热准静态过程中,  $p$ ,  $V$ ,  $T$  之间的关系为

$$pV^\gamma = \text{常量},$$

$$V^{\gamma-1}T = \text{常量},$$

$$p^{\gamma-1}T^\gamma = \text{常量}。$$

这三个方程称为理想气体的绝热过程方程。

### (5) 多方过程

气体中实际进行的往往既非等温,也非绝热,而是介于两者之间的过程。实用中常用多方过程来描述:

$$pV^n = \text{常量},$$

式中  $n$  为一常数,称为多方指数。其他状态参量之间的关系为

$$TV^{n-1} = \text{常量}, \quad p^{n-1}T^{-n} = \text{常量}。$$

满足上述公式的过程称为多方过程。

多方过程概括了以上四种过程:  $n = 1$  的多方

过程为等温过程,  $n = \gamma$  的多方过程为绝热过程;  
 $n = 0$  就是等压过程;  $n = \infty$  就是等体过程。

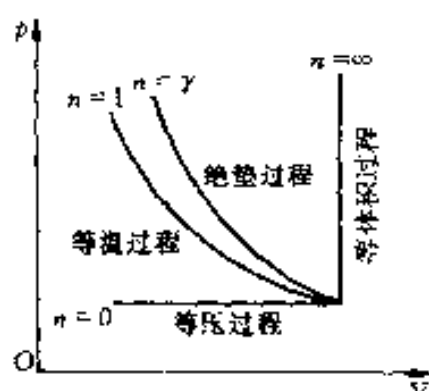


图 9.1

在多方过程中气体对外做功为

$$A = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] =$$

$$-\frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = -\frac{\nu R}{n-1} (T_1 - T_2)。$$

多方过程的摩尔热容为

$$C = \frac{n-\gamma}{n-1} C_V = \frac{(n-\gamma)R}{(n-1)(\gamma-1)}。$$

### 5. 理想气体准静态过程公式

表 9-1 理想气体准静态过程公式

状态方程  $pV = \nu RT$

过程	过程方程	对外做功 A	吸收热量 Q	内能变化 $\Delta U$	热容量
等体	$V = \text{常量}$	0	$C_V(T_2 - T_1)$	$C_V(T_2 - T_1)$	$C_V$
等压	$p = \text{常量}$	$p(V_2 - V_1)$	$C_p(T_2 - T_1)$	$C_V(T_2 - T_1)$	$C_p = C_V + \nu R$
等温	$pV = \text{常量}$	$\nu RT \ln(V_2/V_1)$	$\nu RT \ln(V_2/V_1)$	0	$\infty$

(续表)

过程	过程方程	对外作功 A	吸收热量 Q	内能变化 $\Delta U$	热容量
绝热	$pV^\gamma = \text{常量}$ $TV^\gamma = \text{常量}$ $\frac{p^{\gamma-1}}{T^\gamma} = \text{常量}$	$\frac{1}{\gamma-1}(p_1V_1 - p_2V_2) = -C_V(T_2 - T_1)$	0	$C_V(T_2 - T_1)$	0
多方	$pV^n = \text{常量}$ $TV^n = \text{常量}$ $\frac{p^{n-1}}{T^n} = \text{常量}$	$\frac{1}{n-1}(p_1V_1 - p_2V_2) - \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$	$C_n(T_2 - T_1)$	$C_V(T_2 - T_1)$	$C_n = \frac{\gamma - n}{1 - n} C_V$

#### 四、循环过程

##### 1. 正循环和逆循环

如果一系统由某个状态出发, 经过任意一系列过程, 最后回到原来的状态, 这样的过程称为循环过程, 简称循环。系统经历一个循环后, 其内能不变。

在  $p-V$  图上, 准静态循环过程是一条闭合曲线。如果循环沿顺时针方向进行, 称为正循环。在正循环中, 系统膨胀时对外界所作的功, 大于被压缩时外界对系统所作的功。在整个正循环中, 系统对外界净作正功。

如果循环沿逆时针方向进行, 称为逆循环。在逆循环中, 系统膨胀时对外界所作的功, 小于被压缩时外界对系统所作的功。在整个过程中, 外界对系统净作正功。

##### 2. 热机和制冷机

###### (1) 热机

热机是利用工作物质的正循环,不断地把热量转变为功的机器。在正循环中,工作物质,从高温热源吸收热量  $Q_1$ ,向低温热源放出热量  $|Q_2|$  (放热,  $Q_2$  为负),同时对外作净功  $A$  (图 9.2)。由热力学第一定律知,  $A = Q_1 - |Q_2|$ 。

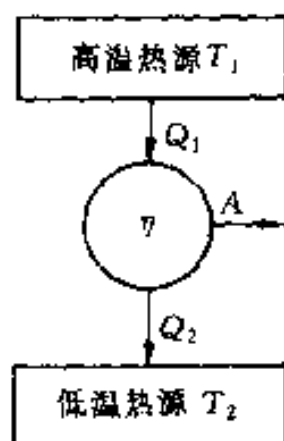


图 9.2

工作物质在一个循环中对外界所作的净功  $A$  与从高温热源吸收的热量之比,称为热机效率,用符号  $\eta$  表示:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

### (2) 致冷机

致冷机是利用工作物质的逆循环,外界对工作物质做功,不断地从低温热源吸取热量,传递给高温热源的机器。在一个逆循环中,外界对工作物质做功为  $|A|$ ,从低温热源吸收的热量为  $Q_2$ ,向高温热源放出热量为  $|Q_1| = |A| + Q_2$  (图 9.3)。

由于工作物质从低温热源吸收热量  $Q_2$ ,是以外界对工作物质做功  $|A|$  为代价的,因此,致冷机的性



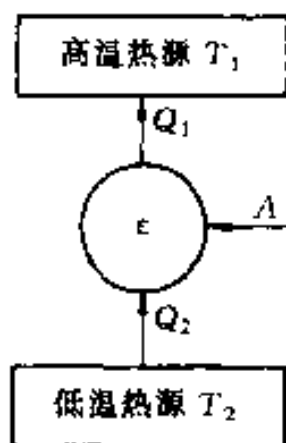


图 9.3

能用比值  $\frac{Q_2}{|A|}$  来衡量, 并称为致冷系数, 用符号  $\epsilon$  表示:

$$\epsilon = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| + Q_2}.$$

$\epsilon$  越大, 致冷机的性能越好。

### 3. 卡诺循环、卡诺定理

#### (1) 卡诺循环

为了从理论上研究热机的效率, 卡诺(N. L. S. Carnot)提出一种理想的循环, 并证明它具有最高的效率。

卡诺循环是由两个等温过程和两个绝热过程组成。理想气体的卡诺循环如图 9.4 所示。气体经历一个正循环, 在等温膨胀过程中, 从高温热源(温度为  $T_1$ )吸收热量  $Q_1$ , 在等温压缩过程中, 向低温热源放出热量  $|Q_2|$ , 卡诺循环的效率为

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

184 即理想气体准静态正卡诺循环的效率由高、低温热

源的温度决定。 $T_1$  越高,  $T_2$  越低。则效率越高。

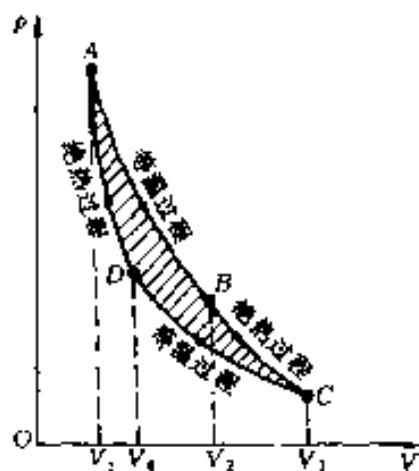


图 9.4

对于逆卡诺循环, 气体从低温热源吸收热量  $Q_2$ , 外界对气体做功  $|A|$ , 理想气体准静态逆卡诺循环的致冷系数为

$$\epsilon = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}。$$

在一般情况下, 制冷系统的高温热源就是大气,  $T_1$  是室温, 希望达到的制冷温度  $T_2$  越低, 则制冷系数越小。

### (2) 卡诺定理

① 在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切可逆热机, 其效率  $\eta$  都相等, 与工作物质无关。

② 在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切不可逆热机, 其效率  $\eta'$  都小于可逆热机的效率  $\eta$ 。

以上结论是卡诺在 1824 年提出来的, 称为卡诺定理。

卡诺定理为提高热机效率指出了方向:

- ① 尽量接近可逆循环;
- ② 提高高温热源温度  $T_1$ , 降低低温热源温度  $T_2$ 。

#### 4. 几种典型的循环过程

##### (1) 奥托(N. A. Otto)循环

奥托循环是四冲程汽油机的工作循环。奥托循环如图 9.5 所示, 分为四个过程进行。

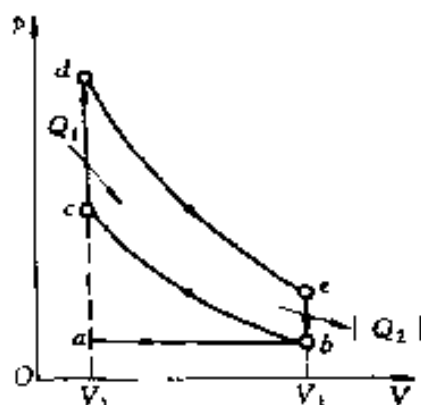


图 9.5

- ① 吸入燃料过程  $ab$  这是个等压过程。
- ② 压缩过程  $bc$  可看作一绝热过程。
- ③ 爆炸、做功过程 爆炸时间短促, 这近似一等体过程( $cd$ ), 爆炸后做功过程可看作一绝热过程( $de$ )。
- ④ 排气过程 开放排气口, 使气体压强突然降为大气压, 这过程近似于一个等体过程( $eb$ ), 排出废气, 这是个等压过程( $ba$ )。

气体在循环的等体过程  $cd$  中吸热  $Q_1$ , 而在等体过程  $eb$  中放热  $|Q_2|$ , 理想气体奥托循环的效率为

$$\eta = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad \circ$$

$r = V_1/V_2$  称为压缩比。奥托循环的效率只由压缩比  $r$  决定,  $r$  越大, 效率越高。汽油内燃机的压缩比不能大于 7, 因此  $\eta = 55\%$ , 实际上汽油机的效率只有 25% 左右。

### (2) 狄塞尔(N. Diesel)循环

狄塞尔循环是四冲程柴油机工作循环。柴油机和汽油机的主要区别是气体燃料的燃烧不是用电火花引燃的方式, 而是靠绝热压缩时温度达到气体燃料的燃点以上而燃烧爆炸。

狄塞尔循环如图 9.6 所示。  $ab$  是吸气过程,  $bc$  是绝热压缩过程(压缩冲程),  $cd$  是等压燃烧过程,  $de$  是绝热膨胀做功过程,  $eb$  是等体放热过程,  $ba$  是排气过程(其中  $cde$  是做功冲程, 亦即爆炸冲程,  $eba$  是排气冲程)。

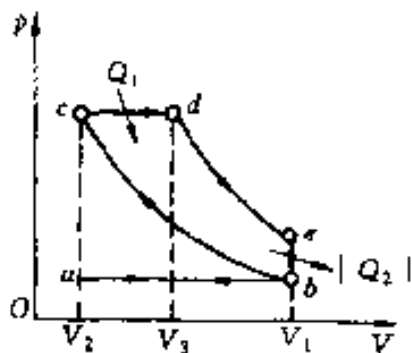


图 9.6

在等压过程  $cd$  中吸收热量  $Q_1$ , 在等体过程  $eb$  中放出热量  $|Q_2|$ 。理想气体狄塞尔循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\gamma - 1}{\gamma \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right)},$$

引入压缩比  $r = \frac{V_1}{V_2}$ , 定压膨胀比  $\rho = \frac{V_3}{V_2}$ ,

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{\rho^\gamma - 1}{\rho - 1}.$$

柴油内燃机的压缩比  $r$  越大, 效率越高。虽然柴油机没有爆震问题, 但  $r$  也不宜太大, 否则必须采用很大的机件才能承受压缩终了时的压强, 从而使机器很笨重, 所以压缩比通常限制在 12~20。

### (3) 逆向斯特令(A. Stirling)循环

逆向斯特令循环是回热式制冷机的工作循环。如图 9.7 所示。气体由状态  $V_1, T_1$  等温压缩到状态  $V_2, T_1$ , 然后等体降温到  $V_2, T_2$ , 再等温膨胀到状态  $V_1, T_2$ , 最后等体升温到状态  $V_1, T_1$ 。

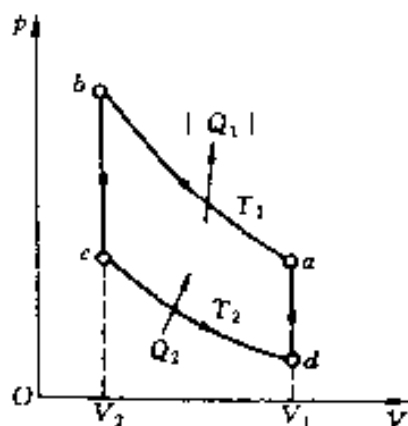


图 9.7

在整个循环中, 等温压缩过程  $ab$  放出热量  $|Q_1|$ , 等温膨胀过程  $cd$  吸收热量  $Q_2$  而在两等体过

程中,系统与外界的热量交换相抵消。

循环的致冷系数

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}。$$

(4) 蒸发制冷循环

蒸发制冷循环是蒸气压缩制冷机(如家用电冰箱)的工作循环。目前大多采用氟里昂 12( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ )作为制冷剂(工作物质),其沸点为 $-29.8^\circ\text{C}$ ,汽化热为 $165\text{kJ/kg}$ 。现在,人们正在逐步采用无氟的工作物质取代氟里昂,以保护地球大气层上面的臭氧层。

如图 9.8 所示,干燥的氟里昂蒸气进入压缩机中,经绝热压缩( $ab$ )成为高温( $-46^\circ\text{C}$ )高压的过热蒸气。由于管道的散热,过热蒸气的温度和压强都稍有下降( $bc$ )。过热蒸气经过冷凝器后,通过水冷或空气冷却散热(放出热量 $|Q_1|$ ),冷凝成为常温( $-37^\circ\text{C}$ )高压的液体( $cd$ )。通过过滤器吸去水分和杂质后流入毛细管中。毛细管出口处作为节流阀,使高压液体减压变成为低温低压液体( $de$ )。进入冷却室中的蒸发器时,液态的氟里昂在低压条件下迅速汽化( $ea$ ),并从待冷却物体或冷库中吸取大量的汽化热,使得冷却室的温度下降到 $-10^\circ\text{C}$ 以下。

为使室内降温,必须将制冷机所排出的热量排到室外,这样工作的制冷机并附加上风扇及通风循环系统,称为空气调节器。在这种情况下,蒸发器放置在室内,而冷凝器向着室外大气。如果反过来把冷凝器放置在室内,而把蒸发器放置在室外,这样的装置可以向室内供热,称为热泵。利用热泵取暖,要比用电炉等电热器取暖效率要高得多。

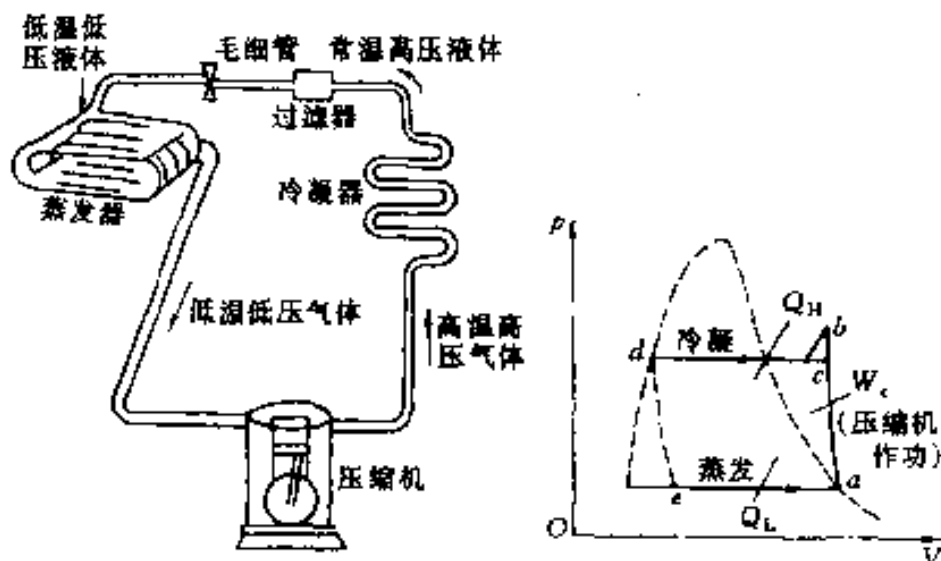


图 9.8

## 五、熵

### 1. 可逆过程和不可逆过程

一个系统由某一状态出发,经过某一过程达到另一状态,如果存在另一过程能使系统回到原来的状态,同时消除了系统对外界引起的一切影响,则原来的过程称为可逆过程,如果用任何方法都不可能使系统和外界完全复原,则原来的过程称为不可逆过程。

可逆过程是一种理想过程。无摩擦的准静态过程是可逆过程。一切自发的热力学过程都是不可逆过程。

### 2. 熵的意义

熵是热力学系统的一个重要的态函数。熵的变化指明了自发过程进行的方向,并可给出孤立系统达到平衡的必要条件。

在可逆微变化过程中,熵的变化  $dS$  等于系统从热源吸收的热量  $dQ$  与热源的热力学温度  $T$  之

比,也称热温比,即

$$dS = \frac{dQ}{T} \text{ (可逆)}。$$

若系统从初态  $A$  经可逆过程到达末状态  $B$ , 则

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T} \text{ (可逆)},$$

积分  $\int \frac{dQ}{T}$  的值与状态  $A, B$  之间的过程无关, 完全由初态  $A$  和终态  $B$  决定, 所以熵是状态的函数。这是克劳修斯于 1865 年首先提出的。熵的单位为  $J/K$ 。

对于不可逆过程, 有

$$dS > \frac{dQ}{T} \text{ (不可逆)},$$

$$S_B - S_A > \int_A^B \frac{dQ}{T} \text{ (不可逆)}。$$

即在不可逆微变化过程中, 热温比小于熵的变化。同样, 从初态  $A$  到终态  $B$ , 经历不可逆过程, 则积分  $\int_A^B \frac{dQ}{T}$  小于  $A, B$  之间熵差。

### 3. 熵的计算

#### (1) 理想气体的熵

① 绝热可逆过程: 因  $dQ=0$ , 故

$$S_B - S_A = 0。$$

② 等体可逆过程:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ_V}{T} = \int_{T_A}^{T_B} \frac{\nu C_V dT}{T} = \nu C_V \ln \frac{T_B}{T_A}。$$

③ 等压可逆过程:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ_p}{T} = \int_{T_A}^{T_B} \frac{\nu C_p dT}{T} = \nu C_p \ln \frac{T_B}{T_A}。$$



④ 等温可逆过程：

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ_T}{T} = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}。$$

(2) 相变的熵

可逆相变是指在等温、等压和相平衡条件下的相变过程，例如，水在 373.15K 和  $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$  条件下汽化。这类相变过程都是在保持温度不变的情况下吸收一定的潜热。所以熵的变化为

$$\Delta S = \frac{Q}{T}，$$

式中  $T$  为相变温度， $Q$  为相变热。

4. 熵增原理

通常将与外界既无物质变换，也无能量交换的系统，称为孤立系统。孤立系统必然是绝热的。因此，由  $dS = \frac{dQ}{T}$  (可逆过程) 知，孤立系统进行可逆过程，系统的熵不变。因孤立系统与外界无任何相互作用，故若孤立系统远离平衡态，则就会产生自发过程，向平衡态过渡。只有在无限接近平衡态时，才有可能发生进行得无限缓慢的可逆过程。所以孤立系统的可逆过程，实际上意味着系统无限接近平衡态。

对于孤立系统，有

$$\Delta S \geq 0，$$

式中“ $>$ ”对应自发过程，“ $=$ ”对应平衡态。上式表明，孤立系统的自发过程总是向着熵增大的方向进行，当熵达到最大时，孤立系统达到平衡。这一规律称为熵增原理。

熵增原理说明，在孤立系统中， $\Delta S < 0$  的过程

是不可能发生的。 $\Delta S > 0$  的过程能自发进行,当熵达到最大,  $\Delta S = 0$ , 自发过程停止,孤立系统达到平衡态。因此,可以根据孤立系统熵的变化,来判断系统中过程进行的方向和所能达到的限度。

### 5. 玻尔兹曼熵公式

玻尔兹曼首先建立了熵与系统微观性质的联系,提出了熵的统计表达式为

$$S = k \ln W,$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常量,  $W$  代表某一宏观态所对应的微观态的数目(或称热力学概率)。因此,可以把熵看作是系统状态无序程度相联系的量。系统无序程度越高,即系统越“混乱”,其对应的微观态数目越多,熵就越大;反之系统越有序,熵就越小。

### 6. 熵和信息

信息作为科学概念,首先由香农(C. E. Shannon)于1948年提出的。信息是事件的有序性或确定性的量度。信息越多,就能消除事件的不确定性,即事件的无序性或不确定性越小。由于熵是无序性或不确定性的量度,因此,信息是熵的对立面。

香农将熵的概念同信息论联系起来,他认为熵是概率分布  $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$  的函数,定义熵为

$$S(P) = -C \sum_{k=1}^N P_k \ln P_k$$

$P_k$  是事件出现第  $k$  种情况的概率,  $C$  是大于零的实数。可见,在信息论中,信息量越大,体系的不确定度越小,熵就越小,信息量越小,体系的不确定度越大,熵就越大。信息量就是负熵。信息量的单位称为比特(bit)。

## 第十章 分子动理论

### 一、气体分子热运动和统计规律

#### 1. 分子运动的基本概念

① 固体、液体和气体等物质是由大量分子或原子组成。

② 物体的分子在永不停息地作无序运动。

③ 分子间存在相互作用力。当分子间距离小于  $10^{-10}\text{m}$  时,分子力为斥力;大于  $10^{-10}\text{m}$  时,则表现为引力。当分子间距离大于  $10^{-9}\text{m}$  时,分子力就可以忽略不计了(图 10.1)。

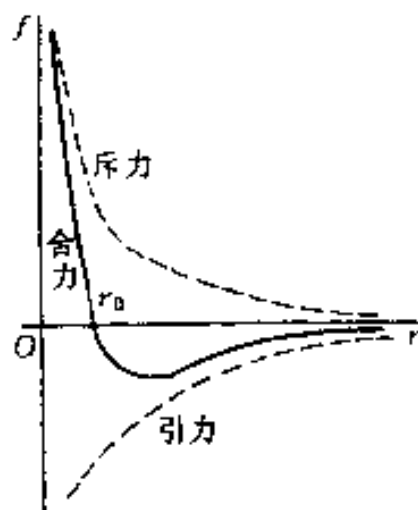


图 10.1

## 2. 气体分子热运动的图景和特征

在标准状态下,气体分子间的距离大约是分子本身线度( $10^{-10}\text{m}$ )的10倍。分子间的相互作用力,除了在热运动过程中相互碰撞的那个瞬间以外,是极其微小的。在连续两次碰撞之间分子自由运动的路程平均约为 $10^{-7}\text{m}$ ,而分子热运动的平均速率却很大,例如,室温下空气分子的平均速率,约为 $400\text{m/s}$ 。因此,平均地说,大约经过 $10^{-10}\text{s}$ ,分子间才碰撞一次,也就是说,在 $1\text{s}$ 内一个分子将遭受 $10^{10}$ 次碰撞。分子相互碰撞的瞬间约为 $10^{-13}\text{s}$ ,远小于分子自由运动所经历的平均时间。

在大量分子热运动中,每个分子的运动状态和经历(状态变化的历程)都各不相同,带有很大的偶然性,因而是无规的。但对大量分子的集体来看,运动却表现出确定的规律性,这就是所谓统计规律性。

## 3. 理想气体的压强公式

从分子运动的观点来看,气体对器壁的压力是大量气体分子对器壁不断碰撞的平均集体效果。个别分子的运动是无序的,对器壁的碰撞是偶然的,给予器壁的冲力是断续的、变化不定的。但对大量分子整体来说,每一时刻都有许多分子与器壁相碰,这样就表现一个恒定的、持续的平均作用力。分子数越多,运动速度越大,压力也越大。

理想气体的压强公式为

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \epsilon_t,$$

式中  $m$  为气体分子的质量,  $n$  为分子数密度(单位体积内的分子数),  $\bar{v}^2$  为分子速率的平方平均值,  $\epsilon_t =$

$\frac{1}{2} m\bar{v}^2$  为气体分子的平均平动动能。

#### 4. 温度的微观意义

从分子运动的观点来看, 温度标志着物体内部大量分子无规热运动的剧烈程度, 温度是大量分子平均平动动能的量度。温度  $T$  与分子平均平动动能的关系为

$$\bar{\epsilon}_t = \frac{1}{2} m\bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT,$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常量。任何理想气体, 在同一温度下, 它们的分子平均平动动能都是相同的。

#### 5. 理想气体的内能

##### (1) 分子的自由度

确定物体的空间位置所必需的独立坐标数目, 称为该物体的自由度。

由于气体分子本身具有一定的大小和比较复杂的内部结构, 分子除平动外, 还会有转动和分子内原子的振动。因此, 在讨论分子热运动能量时, 应考虑分子各种运动形式的能量。

单原子分子, 可以看作一质点, 有 3 个自由度, 均属平动自由度。双原子分子是由一根化学键联结起来的, 线状分子有 6 个自由度, 3 个平动自由度, 2 个转动自由度, 1 个振动自由度。多原子分子的自由度数目, 要根据其结构的情形而定。一般地讲, 如果一个分子由  $n$  个原子组成, 则它最多有  $3n$  个自由度, 其中 3 个是平动自由度, 3 个是转动自由度, 其余  $3n - 6$  个是振动自由度。但分子的运动受到某种限制时, 其自由度的数目就会减少。

### (2) 能量按自由度均分定理

在热平衡状态下,物质(气体、液体和固体)分子的每个自由度都具有相同的平均动能,在温度  $T$  下,其数值为  $\frac{1}{2}kT$ 。这称为能量按自由度均分定理。

如果某种气体的分子有  $t$  个平动自由度,  $r$  个转动自由度,  $s$  个振动自由度,则分子的平均总动能为

$$\epsilon_k = \frac{1}{2}(t + r + s)kT。$$

分子振动时除动能外还有势能。在振幅不大的情况下,假定分子作简谐振动,这时分子振动平均势能等于平均动能。所以在分子运动的总能量中还应具有势能  $\frac{s}{2}kT$ ,即分子的平均总能量为

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2}(t + r + 2s)kT。$$

通常,在计算气体分子平均能量时,往往不考虑分子内原子的振动。这样,分子只有平动和转动的自由度,常以  $i$  表示两者之和,因此,分子的平均能量为

$$\bar{\epsilon} = \frac{i}{2}kT。$$

这样,单原子分子的平均能量为  $\frac{3}{2}kT$ ,双原子分子为  $\frac{5}{2}kT$ ,多原子分子为  $\frac{6}{2}kT$ 。

### (3) 理想气体的内能

物质(气体、液体和固体)内部分子热运动动能、分子间的相互作用能以及分子、原子和原子核内的

能量,总称为内能。

气体的内能就是所有分子热运动的动能和分子间相互作用势能之总和。

理想气体分子间的势能忽略不计,它的内能只是分子各种运动形式的动能之和。 $\nu$ mol 理想气体的内能为

$$E = \nu \frac{i}{2} RT_0$$

一定量的理想气体的内能仅决定于气体的热力学温度。所以理想气体的内能是温度的单位函数,而与压强和体积无关。

#### (4) 气体的摩尔热容量

1mol 的气体在体积恒定的条件下,温度升高 1K 所吸收的热量,称为定体摩尔热容,用  $C_V$  表示,由于等体过程中,气体对外不作功,吸收的热量全部转变为内能的增量,所以

$$C_V = \frac{dQ_V}{dT} = \frac{dE}{dT} = \frac{i}{2} R_0$$

1mol 的气体在压强恒定的条件下,温度升高 1K 所吸收的热量,称为定压摩尔热容,用  $C_p$  表示。根据热力学第一定律得

$$C_p = \frac{dQ_p}{dT} = \frac{dE}{dT} + p \frac{dV}{dT} = \frac{i+2}{2} R_0$$

#### (5) 固体的热容量

在固体中,原子、离子或分子排列成晶体点阵,它们没有平动和转动自由度,只有振动自由度。每个粒子有相互垂直的 3 个振动自由度,因而每个粒子的平均热运动能量(动能和势能之和)为  $3kT_0$ 。

1mol 的固体的内能为

$$E = N_A 3kT = 3RT,$$

从而摩尔热容为

$$C = 3R。$$

这结论早由实验得到,称为杜隆(Dulong)-珀替(Petit)定律。

### 6. 平均自由程

每个分子在单位时间内与其他分子碰撞的平均次数,称为分子的平均碰撞频率,用符号  $\bar{Z}$  表示,

$$\bar{Z} = \sqrt{2}\pi d^2 n \bar{v},$$

式中  $d$  为分子的有效直径(即分子间斥力开始起显著作用时两分子质心间的平均距离),  $\bar{v}$  为分子的平均速率,  $n$  为分子数密度。有时把围绕某个分子作一横截面  $\sigma = \pi d^2$ , 称为碰撞截面。如果另一分子的质心通过这个分子的面积  $\sigma$ , 后者就会遭到碰撞。

一个分子在两次碰撞之间所走过的直线路程,称为自由程。一个分子的自由程,时长时短,具有偶然性。但是,大量分子自由程的统计平均值,却具有确定的值,称为分子的平均自由程,用  $\bar{\lambda}$  表示:

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}。$$

对于理想气体,  $p = nkT$ , 故  $\bar{\lambda}$  可写为

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}。$$

当理想气体的温度一定时,分子的平均自由程  $\bar{\lambda}$  与气体的压强成反比。

## 二、统计规律的基本概念



### 1. 分布函数

凡是不能预测而又多次出现的事件,称为偶然事件或随机事件。如果多次观察同样的事件,还可以从大量个别不规则的偶然事件中,得出一定的规律,这就是统计分布规律。

统计规律性的研究可利用“概率”的概念。在一定条件下,当一类偶然事件的总数  $N$  趋向无限大时,其中出现某种特定情况的数目  $n$  与总数  $N$  之比,称为该特定情况的概率,即

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}。$$

如一系统处于某一状态( $i$ )的概率是  $\Delta P_i$ ,则考虑一切可能有的状态的概率的总和为

$$\sum_i \Delta P_i = \sum_i \frac{N_i}{N} = 1。$$

这个关系称为归一化条件。

当系统状态是连续变化的,就不能指出某一点  $x_i$  的概率,只能是处于范围  $x_i \rightarrow x_i + dx_i$  内的概率,所以

$$dP(x) = \frac{dN}{N} = f(x)dx,$$

或 
$$f(x) = \frac{dP}{dx} = \frac{1}{N} \frac{dN(x)}{dx},$$

式中  $f(x)$  称为状态在  $x$  方向的分布函数。就是状态在  $x$  附近  $dx$  区间的概率  $dP$  正比于区间的大小  $dx$ ,分布函数  $f(x)$  代表状态在  $x$  附近单位区间的概率,或者说,  $f(x)$  是状态在  $x$  处的概率密度,对于连续变化状态,归一化条件可写成

$$\int f(x)dx = 1。$$

## 2. 统计平均值

研究统计规律,常根据大量偶然事件的各种结果求其统计平均值。例如,要测定系统的某一物理量  $M$  的数值,由于系统的状态在改变, $M$  是状态的函数,所以  $M$  的测定也是各次不一样。所以  $M$  的平均值为

$$\bar{M} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M_A N_A + M_B N_B + \dots}{N} =$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (M_A P_A + M_B P_B + \dots) = \sum_i M_i P_i,$$

式中  $N_A$  是出现  $M_A$  的次数,而  $\frac{N_A}{N}$  就是  $M_A$  出现的概率。

对于状态连续变化的系统,各种量的平均值为

$$\bar{M} = \int M f(x) dx。$$

## 3. 涨落

当对所研究系统的某一宏观物理量进行测量时,每次测得的实际数值相对于它的统计平均值有很小的偏差,即实际数值在平均值附近飘忽不定地变化着。这现象叫做涨落。涨落现象与统计规律是不可分割的,这正反映了必然性与偶然性之间相互依存的辩证关系。

通常用偏差的平方平均值来量度涨落,即

$$(\Delta M)^2 = \overline{(M_i - \bar{M})^2} =$$

$$\sum_i (M_i - \bar{M})^2 P_i = \bar{M}^2 - (\bar{M})^2。$$

#### 4. 热力学概率

在平衡态下,系统的宏观量(状态参量,如压强、温度、体积、总粒子数和能量等)具有确定值,由一组宏观量所决定的系统状态,称为系统的宏观态。

当系统的宏观态完全确定后,系统中各粒子的运动状态仍然是不确定的,而且是在不断地变化着的。换言之,相应于同一宏观态,系统可以有大量的各种的微观运动状态,其中每一种运动状态称为系统的一个微观态。

任何一个宏观态都包含大量的微观态,宏观态出现的概率正比于其中微观态的数目。因此,把某一宏观态包含的微观态数目称为该宏观态的热力学概率。

设有  $a, b, c, d$  四个分子在绝热容器内,容器被隔板分成容积相等的  $A, B$  两室。起初,4个分子全部在  $A$  室、 $B$  室真空。若抽去隔板,4个分子分布情况如表 10.1。

表 10.1

宏观态		微观态		热力学概率 $W$
A 室	B 室	A 室	B 室	
4	0	$abcd$	0	1
3	1	$abc$ $bcd$ $cda$ $dab$	$d$ $a$ $b$ $c$	4

(续表)

宏观态		微观态		热力学概率 $W$
A室	B室	A室	B室	
2	2	$ab$ $bc$ $cd$ $da$ $ac$ $bd$	$cd$ $da$ $ub$ $bc$ $db$ $ac$	6
1	3	$a$ $b$ $c$ $d$	$bcd$ $cda$ $dab$ $abc$	4
0	4	0	$abcd$	1

如果系统所有微观态出现机会是均等的话,那么,包含微观态数目多的宏观态出现的概率最大。也就是,系统处于平衡态时其热力学概率最大。

在孤立系统中发生的一切实际过程,都是从概率小的宏观态向概率大的宏观态进行的。

### 三、麦克斯韦速度分布律和速率分布律

#### 1. 麦克斯韦速度分布律

在速度空间内点 $(v_x, v_y, v_z)$ 处取一边长分别为 $(dv_x, dv_y, dv_z)$ 的立方体元。设气体中分子总数为 $N$ ,此体元内包含的分子代表点的个数为 $dN(v_x, v_y, v_z)$ ,则分子代表点出现在此体积元的概率为 $\frac{dN}{N}$ 。 $dN$ 正比于体元的体积 $dv_x, dv_y, dv_z$ ,即

$$\frac{dN(v_x, v_y, v_z)}{N} = f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z,$$

式中  $f(v_x, v_y, v_z)$  代表速度空间单位体元内的概率, 即概率密度, 也就是气体分子的速度分布函数。

热平衡态下的麦克斯韦速度分布函数为

$$f(\boldsymbol{v}) = f(v_x, v_y, v_z) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m\boldsymbol{v}^2}{2kT}}.$$

速度分量的麦克斯韦分布函数为

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-mv_x^2/2kT},$$

$$f(v_y) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-mv_y^2/2kT},$$

$$f(v_z) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-mv_z^2/2kT},$$

式中  $T$  为气体的温度,  $m$  为分子的质量,  $k$  为玻尔兹曼常量。

## 2. 麦克斯韦速率分布律

$$F(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} v^2,$$

因子  $4\pi v^2$  为速度空间中半径为  $v$  的球壳面积, 分子速率处在  $v \rightarrow v + dv$  区间内的概率就是分子速度处在以  $v$  和  $v + dv$  为内外半径的球壳内的概率, 所以

$$F(v) = 4\pi v^2 f(\boldsymbol{v}).$$

## 3. 分子速率的三种统计平均值

### (1) 算术平均速率

大量分子速率的算术平均值, 称为算术平均速率, 简称平均速率, 用符号  $\bar{v}$  表示。

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} vF(v)dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{\text{mol}}}}$$

式中  $R$  为摩尔气体常量,  $M_{\text{mol}}$  为气体的摩尔质量。

### (2) 方均根速率

分子速率平方的平均值开平方, 称为方均根速率, 用符号  $\sqrt{\bar{v}^2}$  表示:

$$\bar{v}^2 = \int_0^{\infty} v^2 F(v) dv,$$

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\int_0^{\infty} v^2 F(v) dv} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{mol}}}}$$

### (3) 最概然速率

速率分布函数  $F(v)$  的极大值所对应的速率, 称为最概然速率, 用  $v_p$  表示。

$$\text{由} \quad \left. \frac{dF(v)}{dv} \right|_{v_p} = 0,$$

$$\text{得} \quad v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M_{\text{mol}}}}$$

最概然速率的物理意义是: 在一定温度下, 若将速率分成许多相等的速率间隔, 分布在包含  $v_p$  在内的速率间隔中的分子数最多。也就是说, 分布在  $v_p$  附近单位速率间隔中的分子数的比率最大。

同一种气体分子的三种速率,  $v_p : \bar{v} : \sqrt{\bar{v}^2} = 1.41 : 1.60 : 1.73$ 。它们都是气体温度的函数。这三种速率对于不同的问题有着各自的应用。例如, 在讨论速率分布时, 就需用到最概然速率; 在计算分子运动的平均距离时, 要用到算术平均速率; 在计算分子的平均平动动能时, 则要用到方均根速率。

## 四、玻尔兹曼分布律

### 1. 玻尔兹曼密度分布律

热平衡状态下分子数在任意外场中的分布为

$$n(\boldsymbol{r}) = n_0 e^{-U(\boldsymbol{r})/kT},$$

这就是玻尔兹曼密度分布律。式中  $U(\boldsymbol{r})$  为粒子在任意保守力场中的势能,  $n_0$  为势能零点处的分子数密度。

在重力场中, 势能为  $U = mgh$ , 因而, 重力场中气体分子数按高度的分布为

$$n(h) = n_0 e^{-mgh/kT},$$

式中  $n_0$  为高度  $h = 0$  处气体的分子数密度。在重力场中气体的分子数密度  $n(h)$  随高度  $h$  的增加按指数而减小。质量大的分子, 重力的作用越显著,  $n$  的减小越迅速。

### 2. 等温气压公式

利用  $p = nkT$  得

$$p(h) = p_0 e^{-mgh/kT} = p_0 e^{-M_{\text{mol}}gh/RT},$$

式中  $p_0$  表示在  $h = 0$  处的压强,  $M_{\text{mol}}$  为气体的摩尔质量。上式称为等温气压公式。

在实际中, 等温气压公式常反过来写成

$$h = \frac{RT}{M_{\text{mol}}g} \ln \frac{p_0}{p}.$$

因此, 测定大气压强变化, 可以估算所处的高度。

### 3. 麦克斯韦-玻尔兹曼能量分布律

结合麦克斯韦速度分布律和玻尔兹曼密度分布律, 得到分子在速度空间和位形空间(合起来称为相空间)中的分布:

$$f_{\text{MB}} = (r, v) = n(r)f(v) = n_0 \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\epsilon/kT},$$

式中  $\epsilon = \epsilon_K + \epsilon_P$  为分子的总能量,  $\epsilon_K$  为分子的动能, 既包括分子的平动动能, 也包括分子的转动动能和振动动能,  $\epsilon_P$  为分子的势能, 即包括外场势能, 也包括分子内原子之间的相互作用势能。  $f_{\text{MB}}(r, v)$  称为麦克斯韦-玻尔兹曼能量分布律, 简称 MB 分布。式中的指数项  $e^{-\epsilon/kT}$  称为玻尔兹曼因子。

## 五、玻色-爱因斯坦分布和费米-狄拉克分布

### 1. 玻色子和费米子

在微观世界中, 微观粒子的能量取值是离散的, 即所谓有能级。所有同类粒子是绝对不可分辨的, 即所谓微观粒子的全同性。粒子的全同性决定了量子统计法只有两种。按这两种统计法可把所有微观粒子分成两大类: 一类叫做玻色子, 如光子,  $\pi$  介子等。它们的自旋量子数为整数(包括零在内); 另一类叫做费米子, 如电子、质子、中子等, 它们的自旋量子数为半整数。费米子在量子态上的分布服从泡利不相容原理。

### 2. 玻色-爱因斯坦分布律和费米-狄拉克分布律

由玻色子组成的系统, 在热平衡态时, 分布于能级  $\epsilon_i$  上的粒子数为

$$N_i = \frac{g_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} - 1}。$$

这称为玻色(S. Bose)-爱因斯坦分布, 简称 BE 分布。

由费米子组成的系统, 在热平衡态时, 分布于能级  $\epsilon_i$  上的粒子数为



$$N_i = \frac{g_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} + 1}$$

这称为费米(E. Fermi)-狄拉克(P. A. M. Dirac)分布, 简称FD分布。

两式中  $\mu$  为化学势,  $g_i$  称为简并度, 即每个量子态由一组量子数表征, 一个能级可以有 1 个或  $g$  ( $g > 1$ ) 个量子态, 就是说能级是简并的。

## 六、输运过程

当热力学系统对于平衡态稍有偏离时, 分子间的碰撞就会使之趋向平衡态, 这样的过程叫做输运过程或输运现象。如粘滞现象、热传导现象和扩散现象等。

### 1. 粘滞现象

当流体各层的流速不同时, 通过任一平行于流速的截面, 相邻两部分流体将互施平行于该截面的作用力, 使流动慢的流层加速, 流动快的流层减速, 这就是粘滞现象。

设流体在  $z = z_0$  平面附近相距  $\Delta z$  的两平面上的切向流速分别为  $u$  和  $u + \Delta u$ , 则

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta z} = \frac{du}{dz}$$

称为速度梯度。两层流体之间的粘性力  $f$  正比于速度梯度和面元面积  $\Delta S$ , 即

$$f = \eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z_0} \Delta S$$

此式称为牛顿粘性定律, 式中比例系数  $\eta$  称为流体的粘性系数, 其单位为 Pa·s (帕·秒)。液体的粘性

系数随温度的升高而减小,气体则反之,大体上按正比于 $\sqrt{T}$ 的规律增大。

### 2. 热传导现象

当物体内部各处温度不均匀时,就有热量从高温处传递到低温处,这就是热传导现象。

单位时间内通过  $z = z_0$  面的热量(即热通量或热流  $H$ )为

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z_0} \Delta S,$$

式中  $\left( \frac{dT}{dz} \right)_{z_0}$  表示  $\Delta S$  所在处的温度梯度,负号表示热量沿温度下降的方向输运,即逆温度梯度的方向,比例系数  $\kappa$  称为热导率,单位为  $W/(m \cdot K)$ 。此式叫做傅里叶热传导定律。

### 3. 扩散现象

在物质内部,当密度不均匀时,分子将从密度大的地方移向密度小的地方,这现象叫做扩散,这里只考虑一物质仅向自己本身的扩散,或者通过另一种物质(气体、液体或固体)的扩散,而后者物质的分子数基本是固定的。

单位时间内通过  $z = z_0$  面  $\Delta S$  的质量  $\frac{\Delta M}{\Delta t}$  (即质量通量或质量流  $J$ )为

$$J = \frac{\Delta M}{\Delta t} = -D \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_{z_0} \Delta S,$$

式中  $\left( \frac{d\rho}{dz} \right)_{z_0}$  表示  $\Delta S$  所在处的密度梯度,负号表示质量沿密度下降的方向输运,即逆密度梯度方向,比

例系数  $D$  称为扩散系数, 单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ , 此式叫做菲克(Fick)扩散定律。

#### 4. 输运过程的微观解释

如果气体内各部分的物理性质原来是不均匀的(例如密度、流速或温度等的不相同), 则由于气体分子不断地相互碰撞和相干掺和, 分子之间将交换质量、定向运动动量和热运动能量, 分子速度的大小和方向也不断地改变, 最后气体内各部分的物理性质将趋向均匀、气体状态将趋向平衡。这就是气体的输运过程。

在气体动理论中, 粘度、热导率和扩散系数为

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda},$$

$$\kappa = \frac{1}{3} \frac{C_V}{M_{\text{mol}}} \rho \bar{v} \bar{\lambda},$$

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}.$$

因为  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{\text{mol}}}}$ , 平均自由程  $\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$ , 所以扩散系数  $D$  与  $T^{3/2}$  成正比, 而与压强  $p$  成反比。这说明, 温度越高, 气体压强越低, 扩散进行得越快。在温度一定时,  $\eta, \kappa$  应与压强无关。这一结论在压强不太低时, 已为实验所证实。但在很低压强下, 当分子运动的平均自由程受到容器线度的限制, 这时  $\eta$  与  $\kappa$  就变得与压强有关, 随压强的减小而减小。保温瓶(杜瓦瓶)的两层玻璃中间抽成真空, 就是使热导率充分降低, 以保证瓶的隔热作用。

## 1. 表面张力

液体表面上想象一直线,直线两旁的液膜之间存在着相互作用的拉力,力的方向沿表面的切线方向并与直线垂直,液体表面上出现的这种张力,称为**表面张力**。表面张力具有使表面收缩的趋势。

表面张力的大小与直线段的长度  $l$  成正比,即

$$f = \alpha l,$$

式中  $\alpha$  称为**液体表面张力系数**,它表示单位长度直线两旁液面的拉力,它的单位为  $\text{N/m}$ 。不同的液体具有不同的表面张力系数,对于一定的液体,表面张力系数随温度的上升而减小。液体的表面张力系数的大小还与杂质有关。例如肥皂能使水的表面张力系数由  $73 \times 10^{-3} \text{N/m}$  减为  $40 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。能使表面张力系数减小的物质称为**表面活性物质**。冶炼金属时,加入表面活性物质,使结晶加快。

## 2. 弯曲液面的附加压强

由于表面张力的存在,在弯曲液面内外将会出现压强差,这个压强差就称为**附加压强**。

对于球状液面的附加压强为

$$p_e - p_i = \pm \frac{2\alpha}{R},$$

式中  $\alpha$  为液体的表面张力系数,  $R$  为球状液面的曲率半径,  $p_i$  和  $p_e$  分别为液面内外的压强,“+”号对应于凸球状液面,“-”号对应于凹球状液面。

对于任意弯曲液面,可在弯曲液面上任取一点  $O$ ,通过该点作两个互相垂直的正截面  $A_1B_1$  和  $A_2B_2$ ,曲率半径各为  $R_1$  和  $R_2$ (图 10.2),则该点附近液面的附加压强为

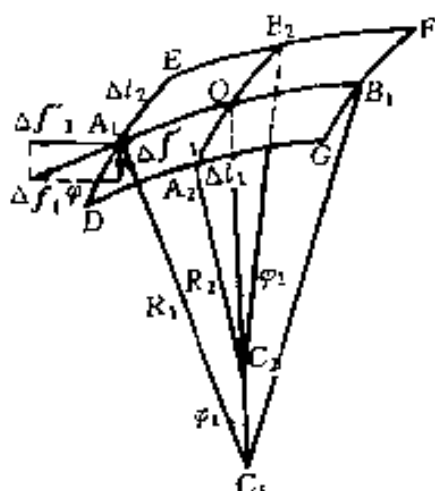


图 10.2

$$p_e - p_i = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

这称为拉普拉斯(Laplace)公式。

### 3. 润湿现象

当液体与固体接触时,液体表面和固体表面的切线通过液体内部所成的夹角,称为**接触角**。

当接触角  $\theta < \frac{\pi}{2}$  时,这种现象称为液体润湿情

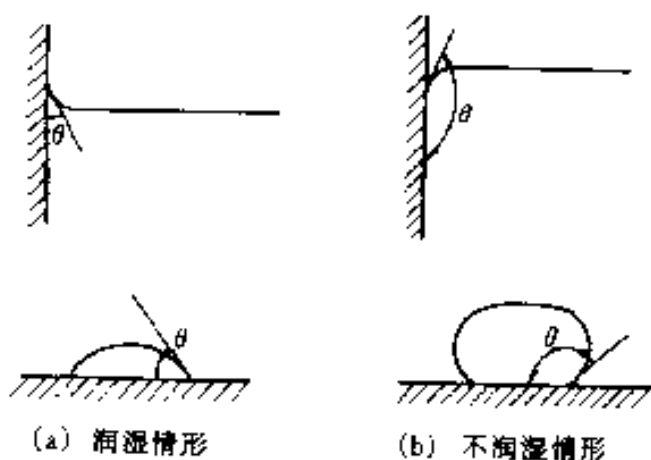


图 10.3

形。当  $\theta > \frac{\pi}{2}$  时,称为不润湿现象(图 10.3)。

润湿现象和分子力有关。液体内分子间的作用力叫做内聚力。当液体与固体接触时,液体分子与固体分子间的作用力叫做附着力。若附着力大于内聚力则为润湿,若内聚力大于附着力则为不润湿。

在圆柱状管子里,不能润湿固体的液体表面呈凸状,能润湿固体的液体表面呈凹状。这些弯曲的液面,称为弯月面。

#### 4. 毛细现象

当把内径很小的管子(称为毛细管)插入液体时,由于润湿(或不润湿)现象使液面发生弯曲,从而使液面内外产生附加压强差,管内的液面就会上升或下降,使管子内外的液面出现高度差。如果液体能润湿管壁,则管内液面高于管外。如果液体不能润湿管壁,则管内液面低于管外(图 10.4)。这种现象称为毛细现象。管内外液面的高度差为

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g r},$$

式中  $\alpha$  为液体的表面张力系数,  $\theta$  为液体与管壁的

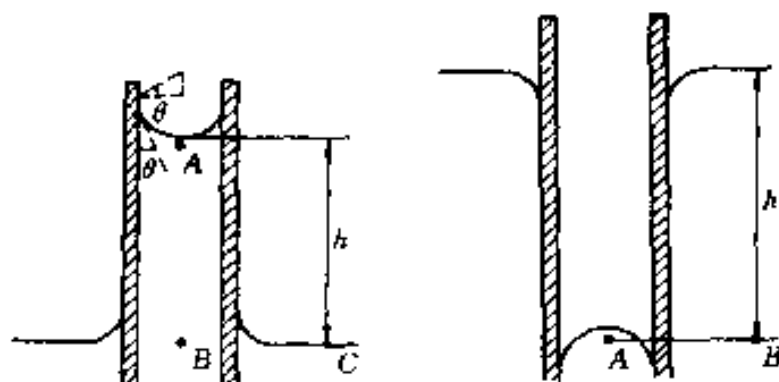


图 10.4

接触角,  $\rho$  为液体的密度,  $r$  为毛细管的半径。

## 八、相变

### 1. 物态和相

物质是由原子和分子等大量微观粒子组成的。在一定的温度和压强下形成具有某种稳定结构的聚集态,称为物态。一般将物质分为气、液、固三态。现在认识到,物质还有晶态、非晶态、液晶态、等离子态、超导态、超固态、中子态等等。

在化学热力学中,常将均匀的同一种物质称为相。物态和相没有严格不同的含意,但一般倾向于用物态作为大的区分,以相作小的区分。例如固态的冰分为7个相,固态铁分为4个相。当然,气、液、固三态也可称三相,即不同的物态就是不同的相,而同一物态又可以包含多种相。

### 2. 相变

物质的不同相之间的相互转变,称为相变。相变可分为两类:一级相变和二级相变。

#### (1) 一级相变

在发生相变时,体积发生变化,并伴随热量的吸收或释放,这类相变称为一级相变。例如冰和水之间的转变等。

#### (2) 二级相变

在发生相变时,体积不变,也不伴随热量的吸收和释放,而只是热容量,热膨胀系数和等温压缩系数等物理量发生变化,这类相变称为二级相变。如正常导体与超导体之间的转变、合金的有序态与无序态之间的转变等。

### 3. 气、液、固之间的相变

#### (1) 气液相变

物质由液相转变为气相的过程,称为汽化,其相反的过程称为凝结或称液化。汽化有蒸发和沸腾两种形式。蒸发是发生在液体表面的汽化过程,蒸发可以在任何温度下进行。沸腾是在一定外界压强下,在某一特定温度时,在液体表面和内部同时发生的汽化过程。液体在沸腾时,温度保持不变。液体所受外部压强增大时,沸点升高;反之,沸点降低。

液体汽化时需要吸收热量,使单位质量的液体转化为同温度的蒸气所需的热量,叫做该物质的汽化热。这就是汽化时的相变潜热。汽化热一般随着温度的升高而减小。气体凝结成液体时要放出热量,单位质量蒸气凝结时放出的热量,叫做凝结热,数值上等于同温度的汽化热。

物质的气、液两相能平衡共存在一个边缘状态,在这个状态中,液体的密度与其饱和蒸气的密度相同,因而气、液两相的分界面消失。这种状态称为临界状态。临界状态只能在一定的压强和温度下实现。临界状态的压强、温度和体积分别称为临界压强、临界温度和临界体积。

#### (2) 固液相变

物质由固相转变为液相的过程,称为熔解。其相反的过程叫做凝固或结晶。

晶体在一定压强和一定温度下开始熔解。在熔解过程中要吸收热量。单位质量的晶体在熔解时所吸收的热量叫做熔解热。晶体熔解时所对应的温度,叫做熔点。非晶体在熔解过程中,随温度的升高



而逐渐软化,最后完全变为液体,没有确定的熔点。

晶体物质凝固时的温度称为凝固点。单位质量的物质凝固时所释放的热量称为凝固热。

### (3) 固气相变

物质由固相直接转变为气相的过程,称为升华。其相反的过程称为凝华。升华过程只发生在固体表面。单位质量的固态物质升华时所吸收的热量,叫做升华热。它等于单位质量的同种物质在相同条件下的溶解热与汽化热之和。由于物质在升华时要吸收大量热量,所以可用来致冷。例如,干冰(固态 $\text{CO}_2$ )就是一种致冷剂。

### (4) 三相点

任何物质的气、液、固三相共存的状态,在 $p$ - $T$ 图上,这状态正好是汽化曲线、溶解曲线和升华曲线的交点,所以称为三相点。三相点是对应于一个确定不变的压强和温度。例如,水的三相点为 $273.16\text{K}$ ,该温度是国际温标中最基本的固定参考点。

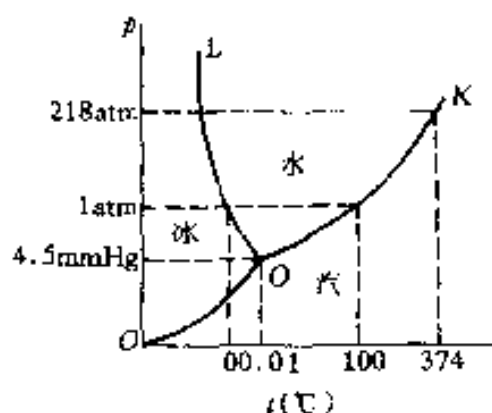


图 10.5

# 第五篇 电磁学

## 第十一章 静电场

### 一、电相互作用

#### 1. 电荷

##### (1) 电荷守恒定律

电荷是物质的固有属性之一,它有正电荷和负电荷两种,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。

物体的带电过程是物体经摩擦、加热、感应或辐照等使物体失去或得到电子而呈现带电状态。

在一个与外界没有电荷交换的系统内,正负电荷的代数和在任何物理过程中保持不变。这就是电荷守恒定律。它是物理学中的基本定律之一。

##### (2) 电荷的量子性

物体所带的电荷量不可能取任意数值,而只能取某一基元电荷量的整数倍,这种性质称为电荷的量子化。这个电荷量就是电子所带电荷量的绝对值  $e$ ,其国际推荐值为

$$e = 1.602177733 \times 10^{-19} \text{C}。$$

其中 C(库仑)是电量的单位。

1964年,盖尔曼(M. Gell-Mann)等人提出夸克带有分数电荷,它们的电荷量为  $\pm \frac{1}{3}e$  和  $\pm \frac{2}{3}e$ 。但迄今尚未发现处于自由状态的夸克。

## 2. 库仑定律

真空中两个静止点电荷之间的作用力与它们所带电量  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比,与它们之间的距离  $r_{12}$ (或  $r_{21}$ )平方成反比。作用力的方向在它们的连线上,其数学表式为

$$\boldsymbol{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \boldsymbol{r}_{12}^0, \quad \text{或} \quad \boldsymbol{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \boldsymbol{r}_{12}^0,$$

式中  $\boldsymbol{F}_{12}$  表示  $q_2$  对  $q_1$  的作用力,  $\boldsymbol{r}_{12}^0$  表示由  $q_2$  指向  $q_1$  径矢的单位矢量,  $k$  为比例系数,在国际单位制中

$k = 8.9875 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , 式中  $\epsilon_0$  称为真空电容率,也称真空介电常量,其国际推荐值为

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)。$$

## 3. 静电力的叠加原理

当空间有两个以上点电荷(如  $q_1, q_2, \dots, q_n$ )时,作用在某一点电荷(如  $q_i$ )上的总静电力  $\boldsymbol{F}_i$ ,等于其他点电荷单独存在时对该电荷上的静电力  $\boldsymbol{F}_{ij}$  的矢量和,即

$$\boldsymbol{F}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \boldsymbol{F}_{ij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \boldsymbol{r}_{ij}^0。$$

218 这便是静电力的叠加原理。

## 二、电场强度、电位移

### 1. 电场

电荷之间的相互作用是通过“场”传递的,即任何电荷都在其周围空间激发电场,电荷之间的相互作用是其中一个电荷所激发的电场对另一个电荷的作用。电场对处于其中的电荷的作用力称为**电场力**。相对于观测者静止的电荷在其周围空间所激发的电场,称为**静电场**。

电场是电磁场的一种特殊存在方式,是物质的一种形态。电磁场也具有能量、动量、质量等物质的基本属性。

### 2. 电场强度

**电场强度**(简称**场强**)是从力的角度描写电场各处强弱及方向的物理量,电场强度的定义式为

$$E = \frac{F}{q_0}。$$

即电场强度  $E$  的大小等于单位正电荷(试探电荷)在场中该点处所受电场力的大小,方向为该正电荷所受电场力的方向。电场强度的单位为  $N/C$ (牛顿/库仑)或  $V/m$ (伏特/米)。电场强度是空间坐标的一个矢量函数。

在点电荷  $q$  所产生的电场中,各点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} r^0。$$

式中  $r^0$  表示沿  $r$  方向的径向单位矢量。若  $q$  为正电荷,则  $E$  沿  $r$  方向;  $q$  为负电荷,则  $E$  与  $r$  方向相

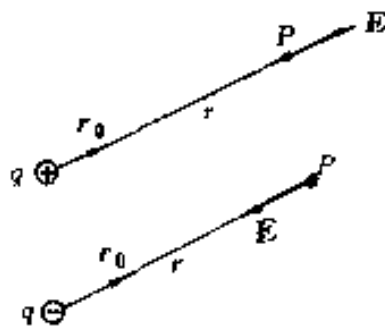


图 11.1

反(图 11.1)。

### 3. 场强的叠加原理

如果在同一空间中,有不同的场源所产生的电场的场强为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 那么该空间任一点的总场强  $E$  就等于不同场源单独存在时在该点的场强的矢量和, 即

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n。$$

这便是场强的叠加原理。

#### (1) 点电荷系的场强

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} r_i^0,$$

式中  $r_i$  为电荷  $q_i$  到场中某点的径矢的大小,  $r_i^0$  为其单位矢量。

#### (2) 电荷连续分布的带电体的场强

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0,$$

式中  $r$  为电荷元  $dq$  到场中某点的径矢的大小,  $r^0$  为其单位矢量。

### 4. 几种典型电荷分布的场强

#### (1) 电偶极子的场强

电偶极子是由两个大小相等、符号相反的点电荷  $+q$  和  $-q$  组成的电荷系,从负电荷到正电荷的径矢  $l$  称为电偶极子的臂,电量  $q$  和臂  $l$  的乘积  $ql = p$  称为电偶极矩,简称电矩。

① 电偶极子臂的延长线上的场强

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{x^3}$$

场强  $E$  的方向和电偶极矩  $p$  的方向一致(图 11.2 (a))。

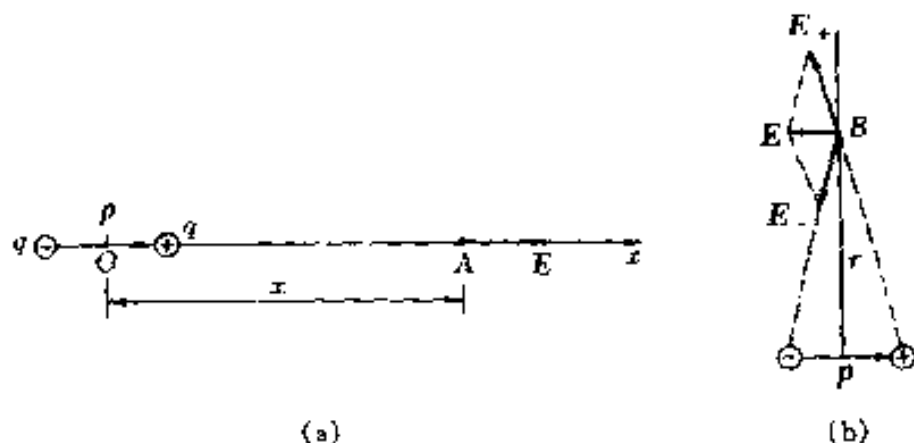


图 11.2

② 电偶极子中垂面上的场强

$$E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

场强  $E$  的方向与电偶极矩  $p$  的方向相反(图 11.2 (b))。

(2) 均匀带电圆环轴线上的场强

设圆环半径为  $R$ , 电荷量为  $Q$ , 在圆环轴线上与环心相距为  $x$  处的场强(图 11.3)为

$$E = \frac{Qx}{4\pi\epsilon_0(x^2 + R^2)^{3/2}} i,$$

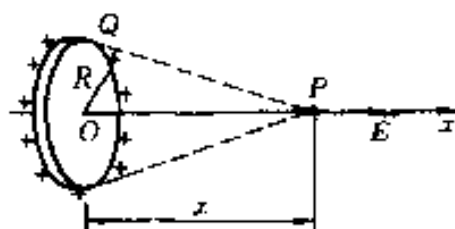


图 11.3

式中  $i$  为  $x$  轴上的单位矢量。

(3) 均匀带电圆盘轴线上的场强

设圆盘半径为  $R$ , 电荷面密度为  $\sigma$ , 在圆盘轴线上与盘心相距为  $x$  的场强(图 11.4)为

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right] i_0$$

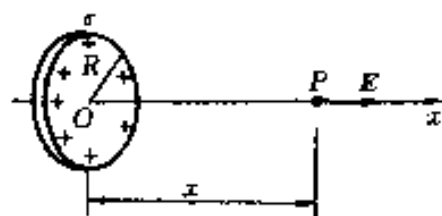


图 11.4

(4) 均匀带电球面的场强

设球的半径为  $R$ , 电荷量为  $Q$ (图 11.5), 其场强为

球内:  $E = 0;$

球外:  $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0_n$

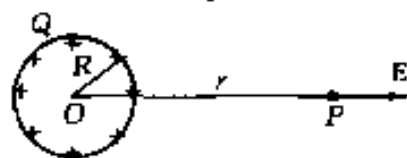


图 11.5

(5) 均匀带电球体的场强

设球的半径为  $R$ , 电荷量为  $Q$  (图 11.6), 其场强为

$$\text{球内: } E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^3} r;$$

$$\text{球外: } E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r^0。$$

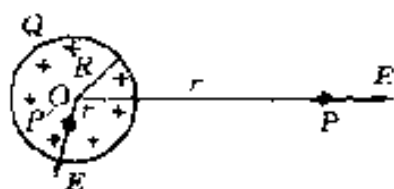


图 11.6

(6) 均匀带电的无限长圆柱形导体的场强

设圆柱体的半径为  $R$  (图 11.7), 线密度为  $\lambda$  (设带正电), 其场强为

$$\text{柱内: } E = 0;$$

$$\text{柱外: } E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} r^0。$$

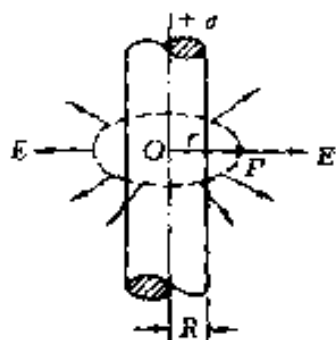


图 11.7

(7) 无限大均匀带电平面薄板的场强

设电荷面密度为  $\sigma$ , 在无限大平面两侧在场强为



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} e_n,$$

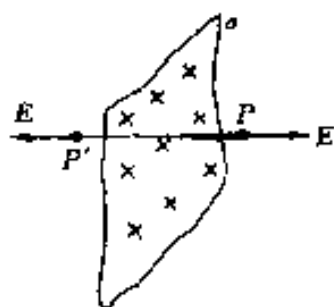


图 11.8

式中  $e_n$  为带电平面两侧的法线单位矢量(图11.8)。

(8) 一对带等量异号电荷的无限大平行平面薄板场强

设电荷面密度为  $\sigma$ , 在两薄板外部场强为零,  $E_{\text{外}} = 0$ , 在薄板之间, 场强的大小为

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

方向从带正电板指向带负电板(图11.9)。

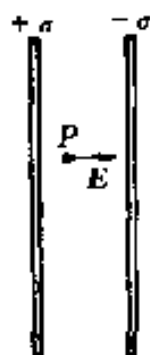


图 11.9

### 5. 电位移

电位移是描写电介质中电场中的一个辅助量。电介质中的电场不仅与场源电荷有关, 还和电介质的极化电荷有关, 电位移(矢量)  $D$  定义为

$$D = \epsilon_0 E + P,$$

式中  $P$  为电极化强度。电位移的单位为  $C/m^2$ 。

对于各向同性的线性电介质

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon E,$$

224 式中  $\epsilon_r$  为介质的相对电容率,  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  为介质电容

率。电场中各点的  $D$  和  $E$  方向相同。

对于各向异性介质,如石英晶体等, $D$  与  $E$  的方向一般并不相同, $D = \epsilon E$  的关系式就失去意义,但关系式  $D = \epsilon_0 E + P$  仍然适用。 $D$  与  $E$  的关系为

$$D_x = \epsilon_{xx}E_x + \epsilon_{xy}E_y + \epsilon_{xz}E_z,$$

$$D_y = \epsilon_{yx}E_x + \epsilon_{yy}E_y + \epsilon_{yz}E_z,$$

$$D_z = \epsilon_{zx}E_x + \epsilon_{zy}E_y + \epsilon_{zz}E_z。$$

在这种情况下, $\epsilon$  就成为具有 9 个分量的张量。

### 三、电势

#### 1. 电势能

电荷在电场中要受电场力的作用,电荷在电场中移动时,电场力要对电荷做功。电场力的功只与电荷移动路径的起点和终点的位置有关,而与路径无关,因而电场力是保守力。

电场力对电荷做功,使电荷在电场中相应位置的电势能发生变化,即

$$A_{12} = \int_1^2 qE \cdot dl = W_1 - W_2 = -\Delta W。$$

式  $A_{12}$  表示电荷在电场中从位置 1 移到位置 2 电场力所作的功, $\Delta W$  表示电势能的增量。

若电场力对电荷作正功,则  $W_1 - W_2 > 0$ ,电势能减小;若电场力对电荷作负功,即电荷反抗电场力作功,则  $W_1 - W_2 < 0$ ,电势能增加。

#### 2. 电势

##### (1) 电势的定义

电势是从做功的角度来描述静电场特性的物理量,静电场中某一点的电势等于单位正电荷在该点

所具有的电势能,即

$$V_P = \frac{W_P}{q}。$$

由于静电势能只具有相对的意义,因而确定电荷在电场中某一点电势能的大小,必须选定一个作为参考的电势能零点。这样,静电场中某点的电势数值上等于单位正电荷在该点经任意路径到电势零点过程中电场力所作的功,即

$$V_P = \int_P^{\text{电势零点}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。$$

### (2) 电势零点的选取

关于电势零点的选取可视问题的性质而定,若源电荷为有限大小,一般习惯规定无限远处电势为零。这样,正电荷产生的电场中各点的电势总为正的,负电荷产生的电场中各点的电势总为负的。电势的单位是伏特。

点电荷  $q$  的电场中任一点的电势(以无限远为零电势点)为

$$V = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}。$$

对于无限扩展的源电荷,(如无限长带电圆柱等)不能将电势零点选在无限远处,只能选择在有限区域内的任一点。在很多实际问题中,常常取地球的电势为零,其他带电体的电势都是相对地球而言的。

### (3) 电势差

在静电场中,任意两点  $A$  和  $B$  的电势差,通常也叫电压,用公式表示为

$$U_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}。$$

也就是说,静电场中  $A, B$  两点的电势差,等于单位正电荷在电场中从  $A$  点经过任意路径到达  $B$  点时电场力所作的功。

#### (4) 用电势差表示电场力的功

当任一电荷  $q_0$  在电场中从  $A$  点移到  $B$  点时,电场力所作的功也可用电势差表示,即

$$A_{AB} = q_0(V_A - V_B)。$$

### 3. 电势叠加原理

由于电势是标量,所以电荷系统的电场中某点的电势,是各个电荷单独存在时的电场在该点电势的代数和,即

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i。$$

#### ① 点电荷系的电势:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i}，$$

式中  $r_i$  为电荷  $q_i$  到场中某点的径矢的大小。

#### ② 电荷连续分布的带电体的电势:

$$V = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r}，$$

式中  $r$  为电荷元  $dq$  到场中某点的径矢的大小。

### 4. 几种典型电荷分布的电势

#### ① 电偶极子电场中任一点的电势:

$$V = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}，$$

式中  $r$  为电偶极子中心到电场中任一点的径矢。

② 均匀带电球面电场中的电势: 设带电球面的半径为  $R$ , 总电荷量为  $Q$ , 电场中任一点离球心的距离为  $r$ 。

$$\text{球内: } V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R};$$

$$\text{球外: } V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

③ 均匀带电导体球和导体球壳电场中的电势: 设导体球的半径为  $R_1$ , 带有总电荷量  $Q_1$ , 导体球壳的内外半径为  $R_2$  和  $R_3$ , 带有总电荷量  $Q_2$ 。

$$\text{导体球内: } V = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} - \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_3};$$

$$\text{导体球壳: } V = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_3} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_3}.$$

④ 一对带等量异号电荷的无限大平行平面薄板之间的电势差: 设电荷面密度为  $\sigma$ , 两板间的距离为  $d$ , 则

$$V_+ - V_- = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}.$$

### 5. 电场强度与电势的关系

电场强度  $E$  与电势  $V$  都是描述同一电场中各点的特性的, 它们之间有如下的关系:

$$\text{积分关系: } V_p = \int_p^\infty \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l};$$

$$\text{微分关系: } \mathbf{E} = -\nabla V = -\text{grad } V,$$

$$\text{或 } \mathbf{E} = -\frac{\partial V}{\partial n} \mathbf{n}_0,$$

式中  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$  称为梯度算子,  $\nabla V$  和

$\text{grad } V$  称为电势梯度, 它是一个矢量, 它沿着等势面

的法向单位矢量  $n_0$  方向,大小等于  $\frac{\partial V}{\partial n}$ 。上式表示,静电场中各点的场强等于该点电势梯度的负值,也就是说,静电场中各点场强的大小等于该点电势空间变化率的最大值。方向是平行于使空间变化率为最大的方向指向电势降落的一侧。

在直角坐标系中,场强的分量与电势梯度的关系为

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}。$$

于是

$$\begin{aligned} E &= E_x i + E_y j + E_z k = \\ &= -\left(\frac{\partial V}{\partial x} i + \frac{\partial V}{\partial y} j + \frac{\partial V}{\partial z} k\right)。 \end{aligned}$$

总之,只要知道  $E$  和  $U$  中之一的分布,就可以利用上述的关系式求出另一个分布。一般而言,由于电势是标量,它的计算往往比场强简单,因此在很多情况下可以先直接算出电势的分布,然后利用其梯度来求出场强的分布。只有在带电体具有一定对称性的情况下,才能较方便地先求出场强的分布,然后用场强的积分来计算电势的分布。

#### 四、静电场的基本规律

##### 1. 静电场的高斯定理

① 真空中静电场的高斯定理:

$$\oiint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}。$$

在静电场中通过任意闭合曲面  $S$  的电通量 ( $E$ ) 229

通量)等于该曲面内电荷量代数和除以  $\epsilon_0$ 。在有介质存在时,这里的场强应为场源电荷以及电介质的极化电荷的合场强,闭合面内的电荷也应包括电介质的极化电荷。

② 有介质时静电场的高斯定理:

$$\oiint_{(S)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum q_0$$

静电场中任意闭合曲面  $S$  的电位移通量( $\mathbf{D}$  通量)等于该曲面所包围的自由电荷的代数和。

③ 高斯定理的微分形式:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_0}{\epsilon_0}, \quad \text{或} \quad \text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho_0}{\epsilon_0},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_0, \quad \text{或} \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho_0,$$

式中  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}$  为梯度算子,  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  和  $\nabla \cdot \mathbf{D}$  称为  $\mathbf{E}$  的散度和  $\mathbf{D}$  的散度。上式表示,在真空的电场中,某点的电场强度  $\mathbf{E}$  的散度等于该点处自由电荷体密度的  $1/\epsilon_0$ ;或在有介质的电场中,某点的电位移  $\mathbf{D}$  的散度等于该点处的自由电荷体密度。

若电场中某区域内  $\rho=0$ (或  $\rho_0=0$ ),则  $\nabla \cdot \mathbf{E}=0$ , (或  $\nabla \cdot \mathbf{D}=0$ ), 称此区域内的电场是无源的;反之,若  $\rho \neq 0$ (或  $\rho_0 \neq 0$ ),则  $\nabla \cdot \mathbf{E} \neq 0$ (或  $\nabla \cdot \mathbf{D} \neq 0$ ), 称此区域内的电场是有源的。

高斯定理并不指明具体源电荷所产生电场的具体分布,而是以数学形式描述了电场同源电荷间的普遍关系,指明静电场是有源场。

## 2. 静电场的环路定律

静电场中场强沿任意闭合环路的线积分恒等于

零,即

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0。$$

这说明静电场是保守场,在有电介质存在时,式中的  $\mathbf{E}$  应为场源自由电荷和介质的极化电荷产生的电场的总和。

静电场的环路定律的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \text{或} \quad \text{curl} \mathbf{E} = 0, \quad \text{rot} \mathbf{E} = 0,$$

式中  $\nabla \times \mathbf{E}$ ,  $\text{curl} \mathbf{E}$ ,  $\text{rot} \mathbf{E}$  称为  $\mathbf{E}$  的旋度。旋度处处为零的场称为无旋场,否则就称为有旋场。

综合静电场的高斯定理和环路定律可知,静电场是有源无旋场。

## 五、静电场中的导体

### 1. 静电场中导体的基本性质

把一个不带电的导体放在静电场中,在最初短暂的时间内(约  $10^{-14}\text{s}$  数量级),导体内会有电场存在,驱使电子作定向运动,从而使导体上的电荷重新分布,最后达到静电平衡。导体的静电平衡条件是:导体内场强处处为零。

从静电平衡条件出发,可以得出以下几点结论:

- ① 导体是个等势体,导体表面是个等势面。
- ② 在导体外,靠近其表面的场强处处与表面垂直。
- ③ 在带电导体上,电荷只分布在导体的表面上,导体内部处处没有未被抵消的净电荷。

### 2. 导体的面电荷与场强的关系

导体表面附近的场强在数值上等于该处电荷面



密度  $\sigma$  的  $1/\epsilon_0$ , 方向为外法线方向。当  $\sigma$  为正时, 方向垂直向外;  $\sigma$  为负时, 垂直指向导体, 即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} n_0,$$

式中  $n_0$  表示导体的单位外法线矢量。

导体表面各处的电荷分布与导体的曲率有关, 凸出而尖锐的地方, 曲率较大, 电荷面密度较大; 平坦的地方, 曲率较小, 电荷面密度较小; 凹陷的地方, 曲率为负, 电荷面密度更小。

在导体尖端附近电场特别强, 会发生尖端放电。高压输电线附近会产生电晕, 浪费电能, 因而高压输电线表面应做得极为光滑, 其半径也不能过小。场离子显微镜(简称 FIM)所利用的正是金属尖端产生的强电场。样品制成针尖形状, 在针尖和荧光屏之间加上高电压, 样品附近极强的电场使吸附在其表面上的氩原子发生电离, 撞击荧光膜而引起荧光, 从而获得样品表面的原子图像。

### 3. 导体壳空腔内的电场和电荷分布

当导体壳的腔内没有带电体时, 在静电平衡状态下, 导体壳的内表面上处处没有电荷, 电荷只能分布在外表面上, 而且, 空腔内没有电场, 或者说, 空腔内的电势处处相等(图 11.10)。

当导体壳的腔内有其他带电体时, 在静电平衡状态下, 导体壳的内表面上所带的电荷与腔内电荷的代数和为零, 腔内的电场由带电体及壳的内表面上的电荷决定。

导体壳(不论接地与否)内部电场不受壳外电荷的影响, 接地导体壳外部电场不受壳内电荷的影响,

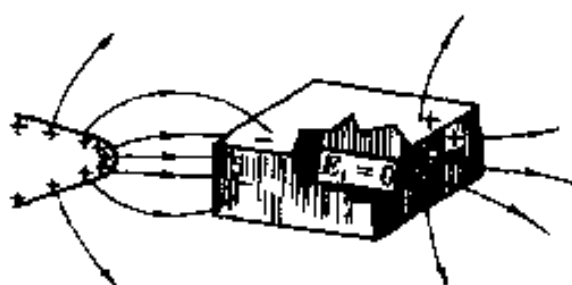


图 11.10

这种现象称为**静电屏蔽**(图 11.11)。为了使精密的电磁测量仪器不受外界电场的干扰,通常在仪器外面加上金属外壳或金属网作成的外罩加以屏蔽。又如,为使高压设备不影响其他仪器工作,可把它的金属外壳接地。

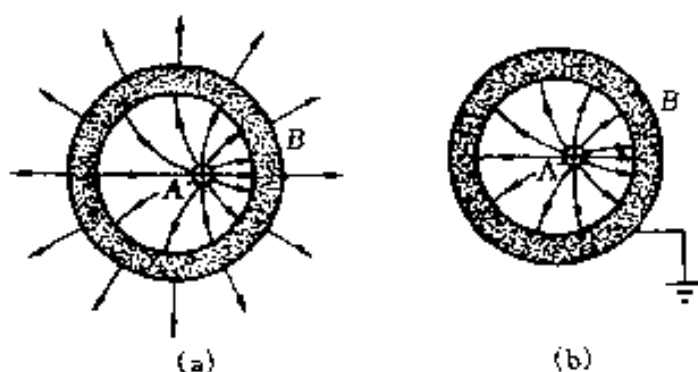


图 11.11

## 六、静电场中的电介质

### 1. 电介质的极化

电介质是指在通常条件下导电性极差的物质。

电介质在外电场中,其表面出现正负电荷层的现象,称为电介质的极化,这种电荷称为极化电荷或束缚电荷。

#### (1) 有极分子和无极分子

按照分子的内部电结构,可以把电介质分子分为两类:有一类分子,如  $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  等,在没有外电场时,分子的正负电荷的重心不重合,即这种分子具有固有的电矩,称为有极分子,另一类分子,如  $\text{He}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  等,在没有外电场时,分子的正负重心重合,即这种分子没有固有的电矩,称为无极分子。

### (2) 位移极化和取向极化

当无极分子电介质放在静电场中时,在电场力的作用下,分子的正负重心将发生相对位移,形成电偶极子,电偶极子在介质内部沿外电场方向的有序排列,使介质在和外电场垂直的两表面层出现正、负极化电荷,这种极化称为位移极化(图 11.12)。

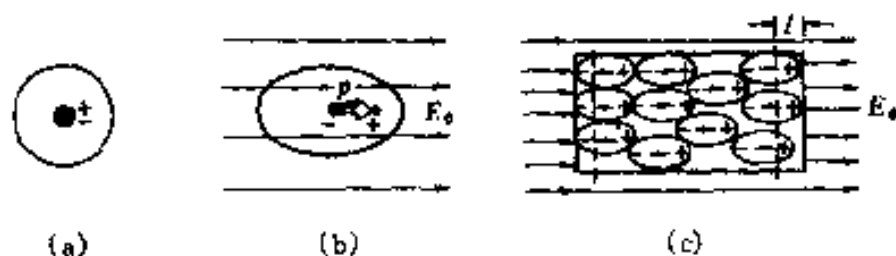


图 11.12

当有极分子电介质放在静电场中时,分子的固有电偶极矩在外电场的力偶作用下,力图使其转到与外电场一致的方向。然而,由于分子的热运动,取向的程度决定于外电场的强弱和温度,这种极化称为取向极化(图 11.13)。

### (3) 电介质的击穿

电介质的极化程度随外电场的增强而增大,在很强的电场中,有些价电子离开原来的位置,从而产

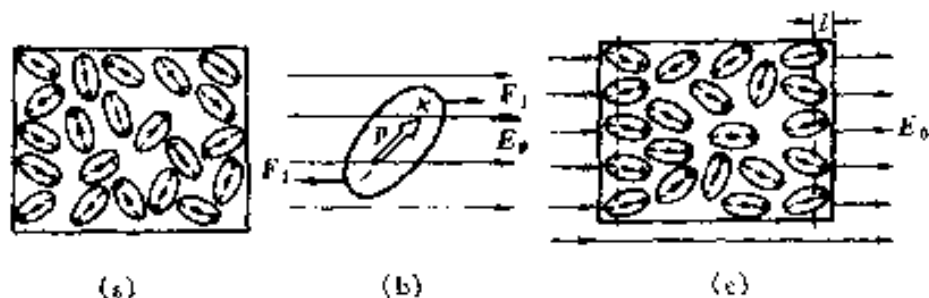


图 11.13

生电流,使电介质的绝缘性能遭到破坏,这称为电介质的击穿。一种电介质材料所能承受的最大场强,称为这种电介质的击穿场强或介电强度。

#### (4) 微波加热

在高频电场的作用下,电介质中分子不断地交替发生位移极化,使电偶极矩反复变化,互相摩擦,把电场给予的能量转化为热能。

### 2. 电极化强度

#### (1) 电极化强度的定义

当电介质处于极化状态时,介质中任一体积元中各个分子电偶极矩  $p_i$  的矢量和不会完全相互抵消,定义电极化强度  $\mathbf{P}$  为单位体积内分子电偶极矩的矢量和,来描述电介质的极化情况,即

$$\mathbf{P} = \frac{\sum \mathbf{p}_i}{\Delta V}。$$

如果在电介质中各处的电极化强度  $\mathbf{P}$  的大小和方向都相同,则称这样的极化为均匀极化。

#### (2) 电极化强度和极化电荷

在电介质表面上,极化电荷面密度为

$$\sigma_e = P \cos\theta = \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}_0。$$

式中  $n_0$  为表面外法线方向上的单位矢量,  $\theta$  为  $\mathbf{P}$  与  $n_0$  之间的夹角。

在电介质内部, 有

$$\oiint \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} = - \sum q',$$

它表明通过任意闭合曲面的极化强度  $\mathbf{P}$  的通量, 等于该闭合曲面内的极化电荷量的总值。

### (3) 电极化强度和场强的关系

在各向同性线性电介质内任一点的极化强度  $\mathbf{P}$  与该点的场强  $\mathbf{E}$  (该场强是指外加电场  $\mathbf{E}_0$  和极化电荷所产生的附加电场  $\mathbf{E}'$  的总场强, 即  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$ ) 的关系为

$$\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E},$$

式中  $\chi_e$  称为电介质的电极化率, 它表征电介质材料的性质, 与场强  $\mathbf{E}$  无关。

介质的电极化率  $\chi_e$  和相对电容率  $\epsilon_r$  同是描述电介质特性的物理量, 其关系为

$$\epsilon_r = 1 + \chi_{ec}$$

对于线性各向异性介质,  $\mathbf{P}$  与  $\mathbf{E}$  的关系为

$$P_x = \epsilon_0 (\chi_{xx} E_x + \chi_{xy} E_y + \chi_{xz} E_z),$$

$$P_y = \epsilon_0 (\chi_{yx} E_x + \chi_{yy} E_y + \chi_{yz} E_z),$$

$$P_z = \epsilon_0 (\chi_{zx} E_x + \chi_{zy} E_y + \chi_{zz} E_z),$$

即  $\chi$  需要有 9 个量来描述, 称为电极化率张量。

对于非线性各向同性介质,  $\mathbf{P}$  与  $\mathbf{E}$  的关系将出现  $E$  的高次项, 即

$$\mathbf{P} = \alpha \mathbf{E} + \beta \mathbf{E}^2 + \gamma \mathbf{E}^3 - \dots$$

式中  $\alpha = \epsilon_0 \chi_e$ ,  $\beta$  和  $\gamma \dots$  分别是二阶、三阶等非线性电极化率, 它们都是张量。

### 3. 几种特殊电介质

#### (1) 铁电体

如酒石酸钾钠、钛酸钡等, 它们的  $P$  与  $E$  之间的关系是非线性的, 并具有和铁磁体的磁滞效应类似的电滞效应(如图 11.14)。铁电体可用来制作容量大、体积小的电容器, 二进制的信息存储器件、热敏电阻器、激光技术中的倍频、混频器件等。

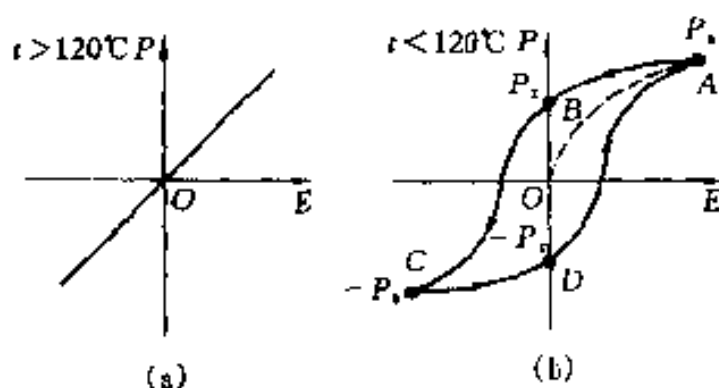


图 11.14

#### (2) 压电体

如石英、铁电晶体等在外力作用下发生形变时, 它们的电极化强度会发生变化, 从而在某些相对应的表面上将产生异号的极化电荷, 这种现象称为压电效应。利用这些晶体可以制成频率稳定的振荡器、电声换能器、传感器。

压电体还有一种压电效应的逆效应, 就是在电场的作用下产生应变。当电场反向时, 应变正负也反号。逆压电效应可用于超声波发生器、电话耳机等。

#### (3) 永电体(或称驻电体)

如石蜡和铁电晶体等, 它们的电极化强度并不

随外电场的撤除而消失,与永磁体的性质有些类似。水电体也用于传声器、耳机、扬声器、送话器、加速度计等。

#### (4) 热电体

如硫酸锂和铁电晶体等,它们的电极化强度随温度变化而释放表面吸附的部分电荷。热电体可用于红外探测器、夜视仪、热电激光量热计等。

### 七、电容

#### 1. 孤立导体的电容

附近没有其他导体和带电体的孤立导体,它所带的电量  $Q$  与它的电势  $V$  成正比,即

$$\frac{q}{V} = C,$$

式中比例系数  $C$  称为孤立导体的电容,它与导体的形状和尺寸有关,而与  $Q$  及  $V$  无关。电容反映了导体储存电荷和电能的能力。电容的单位是 F(法拉)。在实际中常用  $\mu\text{F}$  和  $\text{pF}$ 。

#### 2. 电容器的电容

两个任意形状的带有等量异号电荷的导体组就是一个电容器。

按极板的形状可分为平行板电容器、球形电容器、柱形电容器等。

按其电容是否可变来分,有可变电容器、半可变或微调电容器等。

按极板间使用的电介质分,有真空电容器,云母电容器、纸质电容器、陶瓷电容器、电解电容器等。

电容器的电容等于一个极板上的电量与两极板

间电势差的比值,即

$$C = \frac{Q}{V_A - V_B} = \frac{Q}{U_{AB}}。$$

电容器的电容与两极板的形状、尺寸、相对位置及其间的介质有关,而与  $Q$  和  $U_{AB}$  无关。

### 3. 几种典型电容器的电容

#### (1) 孤立导体球

设球半径为  $R$ , 其周围介质的相对电容率为  $\epsilon_r$ , 电容为

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R。$$

#### (2) 平行板电容器

设极板面积为  $S$ , 两极板内表面间的距离为  $d$ ,  $d \ll \sqrt{S}$ , 板间介质的相对电容率为  $\epsilon_r$ , 电容为

$$C = \frac{\epsilon_r\epsilon_0 S}{d}。$$

#### (3) 球形电容器

设内、外球壳的半径为  $R_1$  和  $R_2$ , 其间介质的相对电容率为  $\epsilon_r$ , 电容为

$$C = \frac{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}。$$

#### (4) 柱形电容器

设内、外圆柱的半径为  $R_1$  和  $R_2$ , 长为  $L$ , 其间介质的相对电容率为  $\epsilon_r$ , 电容为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L}{\ln \frac{R_2}{R_1}}。$$

#### (5) 二平行细直棒间的电容

设细棒的半径为  $a$ , 长为  $L$ , 两棒中心间的距离



为  $D, a \ll D$ , 周围介质的相对电容率为  $\epsilon_r$ , 电容为

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r L}{\ln \frac{D}{a}}。$$

#### 4. 电容器的串联和并联

##### (1) 电容器并联

电容器并联时,加在各电容器上的电压是相同的,电量与电容成正比地分配在各个电容器上,并联电容器系统的总电容为

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n。$$

##### (2) 电容器串联

电容器串联时,每一个电容器都带有相同的电量,电压与电容成反比地分配在各个电容器上,串联电容器系统的总电容的倒数为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}。$$

#### 5. 电容器的性能参数

电容是电容器的主要性能参数之一。此外还有耐压(或称工作电压)、损耗和频率响应等,它们分别取决于所充电介质的击穿场强、介质损耗和对频率的响应。

#### 6. 电容器的能量

电容器的电容为  $C$ ,所带的电量为  $Q$ ,两板间的电势差为  $U_{AB}$ ,则该电容器所储存的能量为

$$W_e = \frac{1}{2} QU_{AB} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU_{AB}^2。$$

#### 7. 电容器的充电和放电过程

当电容器通过电阻充放电时,电容器极板上的

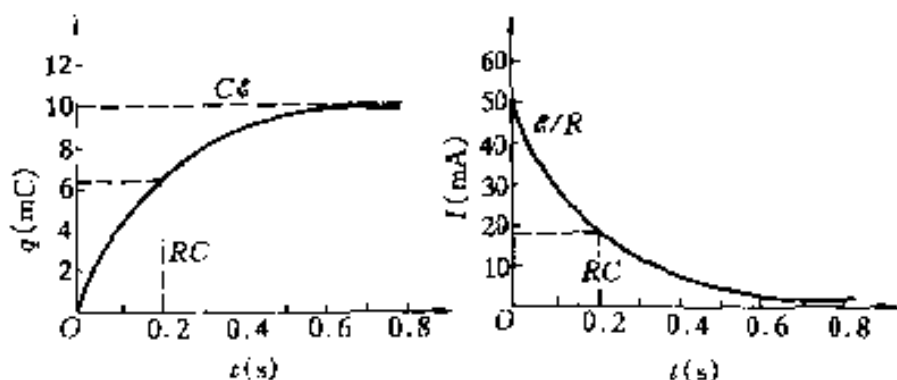
电荷量和电路中的电流不会瞬间突变,而要经过一个短暂的过程才能达到稳定值,这个过程称为 RC 电路的暂态过程。

电容器在充电过程中,极板上电荷量和电路中电流的变化规律(图 11.15(a))为

$$q = C\varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = q_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}),$$

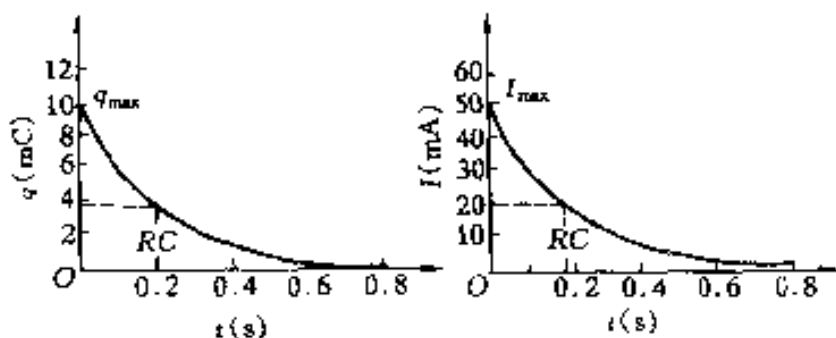
$$i = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

在放电过程中,电荷量和电流的变化规律(图 11.15(b))为



(a) 充电过程

(此图取  $R = 2000\Omega$ ,  $C = 100\mu\text{F}$ ,  $\varepsilon = 100\text{V}$  画出)



(b) 放电过程

(此图取  $R = 2000\Omega$ ,  $C = 100\mu\text{F}$ ,  $q_{\text{max}} = 10\text{mC}$  画出)

图 11.15

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

$$i = \frac{q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

在  $RC$  电路中, 不管充电还是放电过程, 电容器极板上电荷量的增长或衰减, 电路中电流的增长或衰减都是按指数规律变化的, 充电过程或放电过程进行的快慢取决于乘积  $RC$ , 它叫做  $RC$  电路的时间常量。例如, 在充电过程中, 当  $t = \tau$  时,  $q = 0.63C\varepsilon = 0.63q_0$ , 即电荷量达到稳定值的 63%。在理论上, 当  $t = \infty$  时,  $q$  才能达到稳定值, 但是实际上, 当  $t = 3\tau$  时,  $q = 0.95q_0$ ; 当  $t = 5\tau$  时,  $q = 0.993q_0$ 。所以可以认为经过  $(3 \sim 5)\tau$  时间后电容器充电的电荷量已达到最大值。同样, 在放电过程中, 当  $t = 3\tau$  时,  $q = 0.05q_0$ ; 当  $t = 5\tau$  时,  $q = 0.007q_0$ , 故认为经过  $(3 \sim 5)\tau$  时间后, 电容器放电已经结束。

## 八、静电场的能量

### 1. 点电荷系的相互作用能

#### (1) 两个点电荷之间的相互作用能

$$W_{互} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}} = -\frac{1}{2}(q_1 V_1 + q_2 V_2),$$

式中  $V_1$  为  $q_2$  在  $q_1$  处所激发电场的电势,  $V_2$  为  $q_1$  在  $q_2$  处所激发电场的电势。

#### (2) $n$ 个点电荷之间的相互作用能

$$W_{互} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i,$$

式中  $V_i$  为除了第  $i$  个点电荷外所有其他点电荷在  $i$  点电荷处产生的总电势。

## 2. 电荷连续分布的带电体的自能

$$W_{\text{自}} = \frac{1}{2} \int V dq,$$

式中  $V$  原来应指除了  $dq$  外其他电荷元在  $dq$  处产生的总电势, 但  $dq$  在本身所在处的电势为一无限小量, 故式中的  $V$  可用包含  $dq$  在内的整个带电体在  $dq$  处产生的总电势来代替。

## 3. 带电体系的静电能

$$W_e = \frac{1}{2} \int V dq,$$

式中  $V$  为整个带电体系在  $dq$  处产生的总电势。注意, 由上式算出的能量应既包括各带电体本身的自能, 又包括带电体间的相互作用能。

如带电体系全由带电导体组成, 则

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_i Q_i V_i,$$

式中  $Q_i$  为导体  $i$  上所带的电量,  $V_i$  为导体  $i$  的电势。

## 4. 电场能量

电场中的静电能密度为

$$w_e = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E},$$

总静电能

$$W_e = \iiint w_e dV = \iiint \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} dV,$$

其中的积分遍及存在的空间。

在真空中,  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ , 故  $w_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ , 它纯粹是指电场的能量。在各向同性的线性介质中,  $\mathbf{D} =$  243

$\epsilon_r \epsilon_0 E$ , 则  $w_e = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2$ , 它还包含了电介质的极化能。

5. 几种典型带电体的静电能

① 均匀带电导体球面 其静电能为

$$W_e = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}。$$

② 均匀带电球体 其静电能为

$$W_e = \frac{3Q^2}{20\pi\epsilon_0 R}。$$

③ 在无限大均匀介质中的带电导体球面 其静电能为

$$W_e = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R}。$$

## 第十二章 恒定磁场

### 一、磁感应强度、磁场强度

#### 1. 磁场

磁铁、电流和运动电荷,不论是同类之间还是彼此间都存在磁力的相互作用,一切磁力都起源于电荷的运动,磁力是通过磁场传递的。就是说,运动电荷(包括电流或磁铁)在其周围空间激发磁场,磁场再作用于运动电荷(或电流和磁铁)。

磁场也是电磁场的一种特殊存在方式,是物质的一种形态。

#### 2. 磁感应强度

定义:

磁感应强度是描述磁场各处强弱和方向的物理量。用矢量  $\mathbf{B}$  表示,它的定义有三种方法:

1) 用磁场对运动电荷的作用来描述磁场。在磁场中的每一点都有一个特征方向,当试探电荷  $q_0$  沿着这个方向运动时不受力,这个特征方向定义为  $\mathbf{B}$  的方向。在磁场中的每一点,当试探电荷  $q_0$  的运动速度与  $\mathbf{B}$  垂直时,它所受的力最大为  $F_{\text{max}}$ ,则定义  $\mathbf{B}$  的大小为

$$B = \frac{F_{\text{max}}}{q_0 v}$$

2) 用电流元在磁场中的受力来描述磁场。把试探电流元  $Idl$  放在磁场中某点处, 它所受的力与试探电流元的取向有关, 在某个特殊方向上受力为零, 而与它垂直的方向, 受力最大为  $F_{\max}$ , 定义  $B$  的大小为

$$B = \frac{F_{\max}}{Idl}。$$

3) 利用小电流线圈所受力矩来描述磁场, 将通电的试探线圈放在磁场中某点处, 它可以自由转动, 则定义线圈在平衡时的正法线方向(电流方向与法线方向的关系由右螺旋法则决定)为  $B$  的方向。 $B$  的大小定义为

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}。$$

式中  $M_{\max}$  为线圈受到的最大力矩,  $I$  和  $S$  为试探线圈中的电流及其面积。

磁感应强度的单位为 T(特斯拉)。在高斯单位制中用 Gs(高斯)。 $1T = 10^4Gs。$

### 3. 毕奥·萨伐尔(Biot-Savart)定律

把任意形状的载流导体划分成许多电流元, 整个载流导体所产生的磁场, 就是这些电流元所产生的磁场的叠加。

载流导线的任一电流元  $Idl$  在真空中任意一点  $P$  处所产生的磁感应强度  $dB$ (图 12.1) 可表示为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r^0}{r^2}。$$

其中  $r$  是电流元  $Idl$  到场点  $P$  的径矢,  $r^0$  为其单位矢量。 $dB$  的方向垂直于  $Idl$  与  $r$  所决定的平面, 指

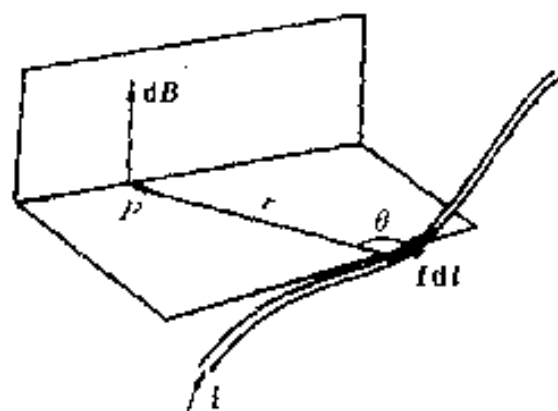


图 12.1

向从  $Idl$  经小于  $180^\circ$  角转向  $r$  时右螺旋前进的方向。 $dB$  的大小为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\theta}{r^2},$$

$\theta$  为  $Idl$  与  $r$  之间小于  $180^\circ$  的夹角。 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  T·m/A, 称为真空磁导率。

利用叠加原理,可求出任意形状的载流导线所产生的磁感应强度,即

$$\mathbf{B} = \int_L d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L \frac{Idl \times \mathbf{r}_0}{r^2}.$$

上式是矢量积分,一般应分别计算其各个分量的积分。

#### 4. 运动电荷的磁场

以速度  $v$  运动的电荷在空间某点  $P$  处所激发的磁感应强度(图 12.2)为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times \mathbf{r}_0}{r^2},$$

$q$  为运动电荷的电量。

#### 5. 几种典型的电流分布的磁感应强度

##### (1) 无限长载流直导线的磁场



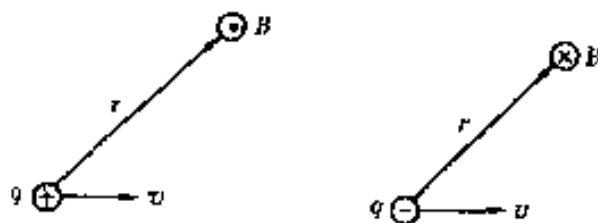


图 12.2

直导线中通有电流  $I$ , 在与直导线垂直距离为  $a$  处的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

方向由右手螺旋法则决定, 拇指表示电流的流向, 四指表示磁场的指向(图 12.3)。

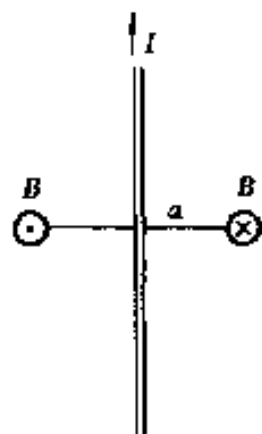


图 12.3

(2) 载流圆线圈轴线上的磁场

设圆线圈的半径为  $R$ , 电流为  $I$ , 离圆心距离  $d$  处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{IS}{(R^2 + d^2)^{3/2}}$$

式中  $S = \pi R^2$  为圆线圈的面积。圆线圈轴线上各点的磁感应强度都沿轴线方向, 与电流方向组成右手螺旋关系。四指表示电流流向, 拇指就是磁场的指向(图 12.4)。

如线圈有  $N$  匝, 则磁场加强  $N$  倍。

载流圆线圈在圆心处的磁场为

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

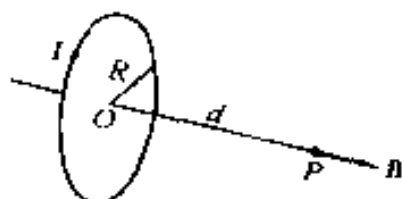


图 12.4

### (3) 载流直螺线管的磁场

直螺线管是指均匀密绕在直圆柱面上的螺旋形线圈(图 12.5)。设螺线管的半径为  $R$ , 长度为  $L$ ,  $R \ll L$ , 单位长度内线圈的匝数为  $n$ , 通有电流  $I$ 。

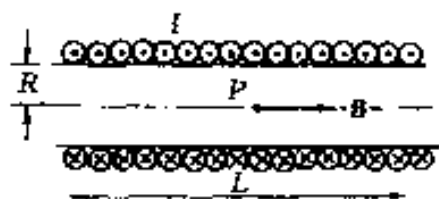


图 12.5

螺线管外部:  $B = 0$ ;

螺线管内部:  $B = \mu_0 nI$ ;

螺线管的端点:  $B = \frac{1}{2} \mu_0 nI$ 。

磁感应强度的方向沿着螺线管的轴线, 其指向可按右手螺旋定则确定。四指表示电流的流向, 拇指就是磁场的指向。

### (4) 载流螺绕环的磁场

绕在环形管上的螺旋形线圈叫做螺绕环。若环上的线圈绕得很紧密, 则磁场几乎全部集中在螺绕环内, 环外磁场接近于零。设螺绕环的内半径为  $R_1$ , 外半径为  $R_2$ , 共有  $N$  匝线圈, 通有电流  $I$ 。环内距环心为  $r$  处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

如螺绕环很细,即截面积很小,环内各点的磁感应强度的大小近似相等,

$$B = \mu_0 nI,$$

$n$  表示环上单位长度内的线圈匝数。 $B$  的方向与电流流向成右手螺旋关系(图 12.6)。

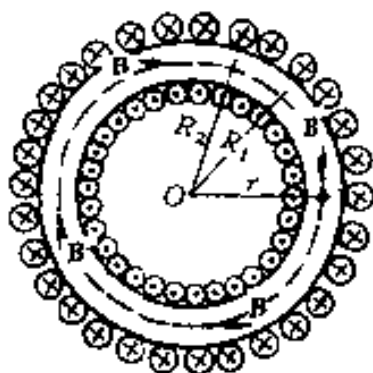


图 12.6

内外小圈数相同

内圈 $\odot$ ;外圈 $\otimes$

(5) 均匀载流无限长圆柱导体的磁场

设圆柱导体半径为  $R$ , 通过电流

为  $I$ , 距轴线  $r$  处的磁感应强度为

$$\text{圆柱体外部}(r > R): B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r};$$

$$\text{圆柱体内部}(r < R): B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r.$$

$B$  的方向如图 12.7 所示。

(6) 亥姆霍兹(Helmholtz)线圈

亥姆霍兹线圈是由一对相同半径

的共轴平行放置的圆线圈组成(图

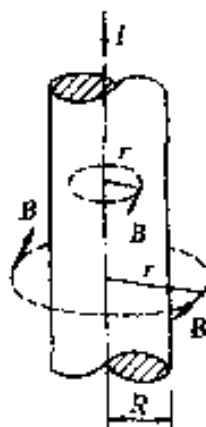


图 12.7

12.8), 当它们之间的距离等于它们的半径时, 在两

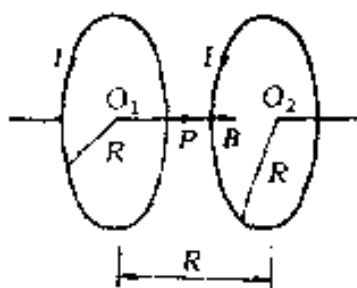


图 12.8

线圈间轴线上中点附近的磁场最为均匀。在实验室中可用它产生不太强的比较均匀的磁场。

设两线圈的半径为 \$R\$, 各有 \$N\$ 匝, 每匝中的电流均为 \$I\$, 且流向相同。在两线圈间轴线上中点的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5\sqrt{5}R} = 0.716 \frac{\mu_0 NI}{R}。$$

在两线圈圆心处的磁感应强度的大小为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \left( 1 + \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) = 0.677 \frac{\mu_0 NI}{R}。$$

### 6. 磁场强度

磁场强度是描写磁介质中磁场的辅助量。磁介质中的磁场不仅与场源电流有关, 还和磁介质的磁化电流有关。磁场强度 \$H\$ 定义为

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M,$$

式中 \$M\$ 为磁化强度, 磁场强度的单位为 \$A/m\$, 在高斯单位制中为 \$Oe\$ (奥斯特),

$$1A/m = 4\pi \times 10^{-3} Oe。$$

对于各向同性磁介质

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H},$$

式中  $\mu_r$  为介质的相对磁导率,  $\mu = \mu_r \mu_0$  为介质的磁导率。磁场中各点的  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  方向相同。

### 7. 磁场能量

与电场类似, 磁场也具有能量, 磁场中某点的磁能密度为

$$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H},$$

在体积  $V$  中的总磁能为

$$w_m = \iiint w_m dV = \frac{1}{2} \iiint \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV。$$

## 二、恒定磁场的基本规律

### 1. 磁场的高斯定理

在磁场中, 通过任意闭合曲面的总磁通量恒等于零, 即

$$\oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0。$$

在有磁介质存在时, 式中的  $\mathbf{B}$  应为传导电流产生的磁场  $\mathbf{B}_0$  以及介质磁化电流产生的附加磁场  $\mathbf{B}'$  的总和,  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$ 。

磁场的高斯定理的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

即  $\mathbf{B}$  的散度等于零, 它表明磁场是一个无源场。

### 2. 磁单极子

磁场是一个无源场, 即磁场不是由与自由电荷相对应的自由磁荷产生的, 而是由运动电荷产生的。

通常, 人们把磁荷称为磁单极子。1931年狄拉克

(P. A. M. Dirac) 从理论上指出, 已有的量子理论允许存在磁单极子, 磁单极子的磁荷  $q_m$  与任意一个粒子的电荷  $q$  之间满足以下关系式:

$$\frac{q_m q}{hc} = \frac{n}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

如果在实验中找到了磁单极子, 磁场的高斯定理以至整个电磁理论就要作重大的修改。因此, 寻找磁单极子的实验研究有着重要的理论意义。

### 3. 安培环路定理

#### (1) 真空中的安培环路定理

在真空的恒定磁场中, 磁感应强度  $\mathbf{B}$  沿任一闭合环路的线积分, 等于穿过该环路的所有传导电流代数之和的  $\mu_0$  倍, 即

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I$$

在有介质存在时, 上式中的  $\mathbf{B}$  应是传导电流所激发的磁场和磁介质磁化后磁化电流的附加磁场的总和(矢量和), 闭合曲线中的电流应是传导电流和磁化电流的代数和。

#### (2) 有介质时安培环路定理

在有介质的恒定磁场中, 磁场强度  $\mathbf{H}$  沿任一闭合环路的线积分, 等于穿过该环路的所有传导电流的代数和, 即

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

#### (3) 安培环路的微分形式

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}_0 \quad \text{或} \quad \text{curl} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}_0;$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_0 \quad \text{或} \quad \text{curl} \mathbf{H} = \mathbf{j}_0$$

即在真空磁场中的某点处,磁感应强度  $B$  的旋度等于该点处传导电流的电流密度的  $\mu_0$  倍,或在有介质的磁场中的某点处,磁场强度  $H$  的旋度等于该点处传导电流的电流密度。

安培环路定理指明恒定磁场是有旋场。结合高斯定理可知,恒定磁场是无源有旋场。

### 三、磁场对载流导线的作用

#### 1. 安培定律

电流元  $I dl$  在磁场中任一点处所受的作用力  $dF$ (图 12.9)为

$$dF = I dl \times B,$$

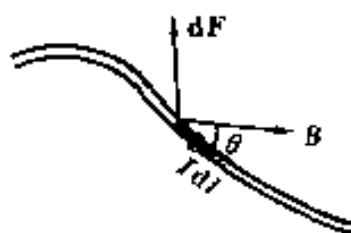


图 12.9

其中  $B$  为场点处的磁感应强度。通常把这作用力称为**磁力**或**安培力**。上式就是安培定律或称安培力公式。

对于任意形状的载流导线在外磁场中所受的安培力,等于它的各电流元所受安培力的矢量和,即

$$F = \int_{(L)} dF = \int_{(L)} I dl \times B.$$

长为  $l$  的载流直导线在匀强磁场  $B$  中所受安培力的大小为

$$F = BIl \sin \theta,$$

其中  $\theta$  为电流指向与  $B$  之间的夹角。方向由  $Idl \times B$  确定。

## 2. 磁场对平面载流线圈的作用

如果一个线圈的各个部分都处在一个平面上, 则称它为平面线圈。

在匀强磁场中, 平面载流线圈所受的安培力的合力为零(各电流元都受到力, 使整个线圈受到张力或压力), 仅受到磁力矩的作用(图 12.10)。如果线圈的面积为  $S$ , 共有  $N$  匝, 其中电流为  $I$ , 则线圈在磁场中所受的磁力矩为

$$M = NISn \times B = p_m \times B,$$

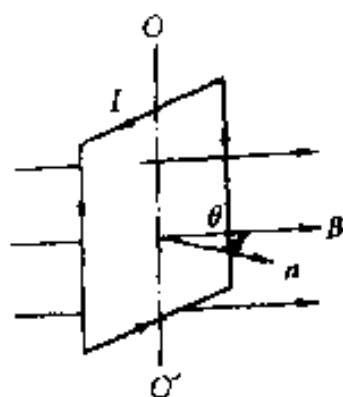


图 12.10

式中  $n$  为线圈的法向单位矢量, 它是以右手四指代表电流方向, 拇指所指的方向就是  $n$  的方向;  $p_m = NISn$  称为线圈的磁矩。线圈在磁力矩作用下发生转动, 而且, 磁力矩总是力图使线圈的磁矩  $p_m$  转到和外磁场  $B$  一致的方向。磁场对载流线圈作用磁力矩的规律是电动机、动圈式电磁仪表的基本理论依据。

如果载流线圈处在非均匀磁场中, 则线圈除了受到磁力矩作用外, 还受到安培力合力的作用, 线圈



除转动外还向磁场强的地方运动。

### 3. 平行无限长载流直导线间的相互作用力

若两导线间的垂直距离为  $a$ , 导线中的电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 导线 1 在导线 2 所产生的磁场中受到安培力。反之, 导线 2 在导线 1 上所产生的磁场中受到安培力, 其大小相等, 方向相反。单位长度所受到的作用力的大小为

$$f = \frac{dF_{21}}{dl_2} = \frac{dF_{12}}{dl_1} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a}。$$

其方向为: 当两导线中的电流沿同方向时, 相互作用力为吸力; 反方向时为斥力。

### 4. 电流强度单位“安培”的定义

根据两载流导线间相互作用力的关系式规定了电流强度的单位“安培”的定义如下: 在真空中相距 1m 的两无限长而圆截面极小的平行直导线中载有相等的电流时, 若在每米导线上的相互作用力正好等于  $2 \times 10^{-7} \text{N}$ , 则导线中的电流定为 1A。

由这一规定, 真空的磁导率  $\mu_0$  为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}。$$

式中 H 为自感的单位, 叫做亨利。

### 5. 磁力的功

载流导线在磁场中运动时磁力所作的功, 载流线圈在磁场内转动时磁力矩所作的功都等于

$$A = I \Delta \Phi_m,$$

式中  $\Delta \Phi_m$  表示通过回路面积或线圈的磁通量的增量。

### 1. 洛伦兹力

电荷量为  $q$  的带电粒子在磁场中以速度  $v$  运动时所受的磁力为

$$F = qv \times B,$$

称为洛伦兹力。

在普遍情况下,当一个带电粒子在既有电场又有磁场的区域里运动时,作用在该粒子上的电磁力为

$$F = q(E + v \times B).$$

此式被称为洛伦兹力公式,是电磁学的基本公式之一。

### 2. 带电粒子在均匀磁场中的运动

设有一均匀磁场,磁感应强度为  $B$ , 一电荷量为  $q$ 、质量为  $m$  的带电粒子以初速  $v_0$  进入磁场中运动。

① 如果  $v_0 \parallel B$ , 磁场对带电粒子的作用力为零,粒子仍以  $v_0$  作匀速直线运动。

② 如果  $v_0 \perp B$ , 这时粒子在垂直于  $B$  的平面内作匀速圆周运动(图 12.11), 圆轨道的半径为

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

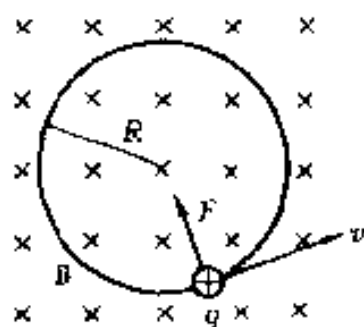


图 12.11

■ 带电粒子环绕一周所需的时间(即周期)为

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

这一周期与带电粒子的运动速率及轨道半径无关。

③ 如果  $v_0$  与  $B$  有夹角  $\theta$ , 带电粒子一方面在垂直于  $B$  的平面内作匀速圆周运动, 另一方面将沿  $B$  的方向作匀速直线运动, 合运动的轨迹是一条螺旋线(图 12.12)。其半径为

$$R = \frac{mv_0 \sin\theta}{qB} = \frac{mv_{0\perp}}{qB},$$

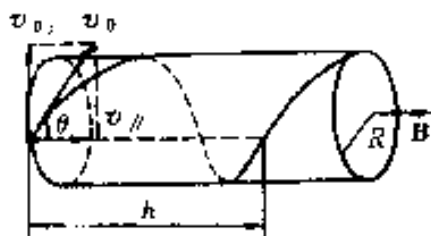


图 12.12

螺距为

$$h = \frac{2\pi mv_0 \cos\theta}{qB} = \frac{2\pi mv_{0\parallel}}{qB}.$$

由于带电粒子每回旋一周所前进的距离  $h$  与  $v_{0\perp}$  无关, 所以当从磁场中某点发射出一束很窄的带电粒子流时, 若它们的速率  $v_0$  很相近, 且与  $B$  的夹角  $\theta$  都很小, 各个粒子的螺距  $h$  也近似相等, 这样各个粒子经过距离  $h$  后又会重新会聚在一起, 这就是磁聚焦。

### 3. 带电粒子在非均匀磁场中的运动

带电粒子在非均匀磁场中作螺旋运动时, 其螺旋线的半径与磁感应强度成反比。因此, 当带电粒

子向磁场较强方向运动时,螺旋线的半径将随磁感应强度的增加而不断地减小,同时粒子还受到一指向磁场较弱方向的分力,阻止带电粒子向磁场较强的方向运动。这样有可能使粒子沿磁场方向的速度逐渐到零,从而掉向反转运动。这如同光线射到镜面反射一样,一般把带电粒子从强磁场区域被“反射”回来的这种现象,称为**磁镜效应**(图 12.13)。一个通电线圈的**非均匀磁场**就是一个最简单的磁镜。

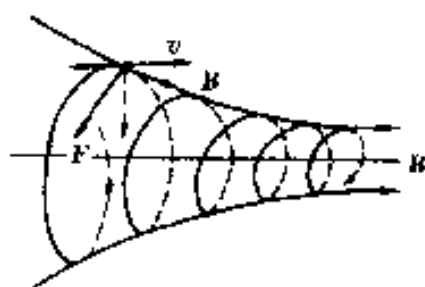


图 12.13

如果两磁镜平行放置,使两镜之间形成两端强中间弱的磁场,带电粒子将局限在此范围内往返运动,这就是**磁约束**。这种装置称为**磁塞**(图 12.14)。在受控热核反应装置中,一般都采用磁约束的方法把等离子体约束在一定的范围内。



图 12.14

#### 4. 霍尔效应

1879年霍尔(E. C. Hall)曾先观察到,把一载流 259

导体薄片放在磁场中时,如果磁场方向垂直于薄片平面,则在薄片的上、下两侧面之间会出现微弱的电势差,这一现象称为**霍尔效应**。这电势差称为**霍尔电势差**。

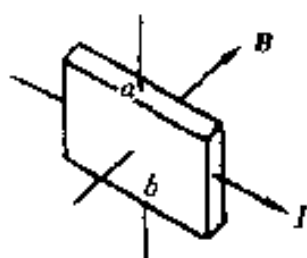


图 12.15

霍尔电势差的大小与电流  $I$  及磁感应强度  $B$  成正比,而与薄片沿  $B$  方向的厚度  $d$  成反比,即

$$U = V_a - V_b = R_H \frac{IB}{d},$$

式中  $R_H$  是一常量,称为**霍尔系数**,它与导体的材料有关,还与导体内载流子有关,

$$R_H = \frac{1}{nq},$$

即霍尔系数  $R_H$  与载流子的浓度有关。

半导体的霍尔系数比金属导体大得多,而且,半导体内载流子的浓度受杂质、温度及其他因素的影响很大,因此霍尔效应为研究半导体载流子浓度的变化提供了重要方法。霍尔系数的正负取决于载流子电荷的正负,因而根据霍尔系数的正负号可以判断半导体的导电类型。

利用半导体制成的霍尔元件,广泛应用于测量磁场、电流、功率中,并可用来转换和放大电信号等。目前还正在利用等离子体的霍尔效应研制磁流体发电。

## 五、磁介质

### 1. 磁介质的分类

磁介质是指放在磁场中经磁化后能反过来影响原来磁场的物质。设真空中原来磁场的磁感应强度为  $B_0$ ，放入磁介质后，磁介质因磁化而产生附加磁场，其磁感应强度为  $B'$ ，磁介质中的磁感应强度  $B = B_0 + B'$ ， $\frac{B}{B_0} = \mu_r$  称为磁介质的相对磁导率。磁介质可分为三类：

#### (1) 顺磁质

$\mu_r > 1$ ，但非常接近 1，即  $B$  稍大于  $B_0$ ， $B'$  与  $B_0$  同方向，如铬、锰、铂、氮等。

#### (2) 抗磁质

$\mu_r < 1$ ，但非常接近 1，即  $B$  略小于  $B_0$ ， $B'$  与  $B_0$  方向相反，如铍、铜、硫、氢等。

#### (3) 铁磁质

$\mu_r \gg 1$ ，即  $B \gg B_0$ ，如铁、镍、钴、钆等。

### 2. 顺磁质和抗磁质的磁化

#### (1) 分子电流和分子磁矩

按物质分子的电结构理论，物质内部原子，分子中的每个电子都参与两种运动：一是轨道运动，具有一定的轨道磁矩；另一是电子本身的自旋，相应地也有自旋磁矩。一个分子中所有电子的各种磁矩的总和构成这个分子的磁矩，称为分子固有磁矩  $p_m$ 。这个分子磁矩可以看成是由一个等效的圆电流产生的，这电流称为分子电流。

当磁介质放到外磁场  $B_0$  中，外磁场  $B_0$  将使分

子固有磁矩发生变化,对每个分子产生一个与外磁场方向相反的附加分子磁矩  $\Delta p_m$ 。结果产生一个与  $B_0$  方向相反的附加磁场  $B'$ 。

### (2) 抗磁质的磁化

抗磁质分子的固有磁矩  $p_m = 0$ ,加上外磁场  $B_0$ 后,外磁场引起的附加分子磁矩是抗磁质磁化的唯一原因。抗磁质产生的附加磁场  $B'$ 与  $B_0$ 方向相反。

### (3) 顺磁质的磁化

顺磁质分子固有磁矩  $p_m \neq 0$ 。加上磁场后,也要产生附加分子磁矩,但  $\Delta p_m \ll p_m$ ,可忽略不计。分子固有磁矩受到外磁场磁力矩的作用,使各分子磁矩克服热运动而转向外磁场方向,因而附加磁场  $B'$ 与  $B_0$ 方向相同。

## 3. 磁化强度

### (1) 磁化强度的定义

当磁介质处于磁化状态时,介质中单位体积内分子固有磁矩的矢量和定义为顺磁质的磁化强度,单位体积内分子附加磁矩的矢量和定义为抗磁质的磁化强度,即

$$M = \frac{\sum p_m}{\Delta V} \quad (\text{顺磁质});$$

$$M = \frac{\sum \Delta p_m}{\Delta V} \quad (\text{抗磁质})。$$

磁化强度  $M$  是描述磁介质磁化程度的物理量。如果在磁介质中各点的  $M$  相同,就称磁介质被均匀磁化。 $M$  的单位是  $A/m$ 。

### (2) 磁化强度和磁化电流

在外磁场中,磁化了的磁介质会激发附加磁场,这附加磁场起源于分子电流,其宏观表现为介质表面形成了磁化电流,对于顺磁质,面磁化电流和场源传导电流的方向相同(图 12.16);对抗磁质,两者方向相反。磁化强度和磁化电流的关系为

$$\mathbf{M} \times \mathbf{n}^0 = \mathbf{i}',$$

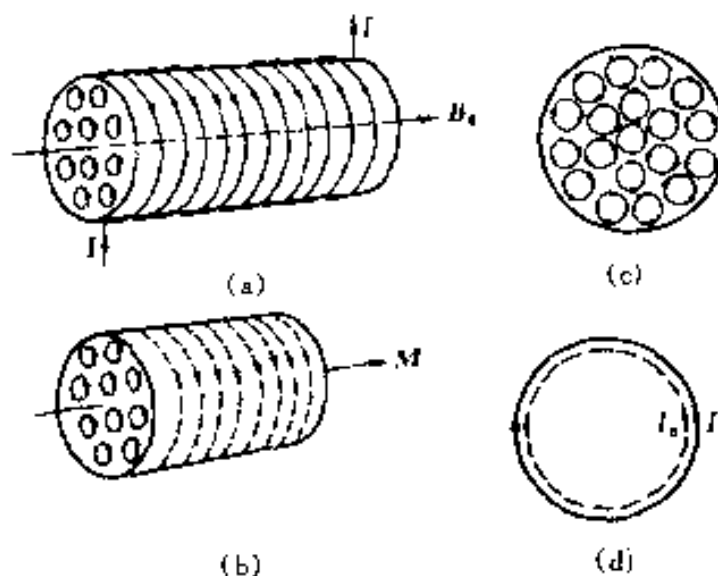


图 12.16

$i'$  为单位长度上磁化电流,即面磁化电流密度, $n^0$  为磁介质表面处的法线方向的单位矢量。

一般情况下有

$$\oint \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} = \sum I',$$

即磁化强度  $\mathbf{M}$  沿任意闭合环路  $L$  的线积分,等于穿过以积分环路  $L$  为周界的任意曲面的磁化电流的代数和。

### (3) 磁化强度和磁场的关系

对于各向同性的磁介质,介质中任一点的磁化



强度  $M$  和磁场强度  $H$  成正比,即

$$M = \chi_m H,$$

$\chi_m$  称为磁介质的磁化率,只与磁介质的性质有关。对于顺磁质,  $\chi_m > 0$ , 对于抗磁质,  $\chi_m < 0$ 。磁化率与磁导率之间的关系为

$$\mu_r = 1 + \chi_m.$$

#### 4. 铁磁质

##### (1) 铁磁质的主要特征

① 铁磁质被磁化后能产生非常强的附加磁场,因而使铁磁质中的  $B$  远大于外磁场  $B_0$ , 且  $\mu_r$  值可达几百,甚至几千以上。

② 它们的磁化强度和磁场强度不是简单的正比关系,它们的磁导率以及磁化率不是常量,与磁场强度成复杂的函数关系。

③ 磁化强度随外磁场而变,它的变化落后于外磁场的变化,而且在外磁场撤去后,铁磁质仍保留部分磁性。

④ 铁磁质都有一定的临界温度,称为居里点。在此温度以上铁磁质失去铁磁性而变为顺磁性。如铁的居里点是 1040K、镍是 631K,钴是 1388K。

##### (2) 铁磁质的磁化曲线

假定在磁化场为零时铁磁质处于未磁化的状态,当  $H$  逐渐增加时,  $B$  (或  $M$ ) 先是缓慢地增加(图 12.17 中  $OA$  段),经过一段急剧增加的过程( $AB$  段)之后,又逐渐缓慢下来( $BC$  段),最后当  $H$  很大时,  $B$  (或  $M$ ) 逐渐趋向饱和( $CS$  段)。从未磁化到饱和磁化的这段磁化曲线  $OS$  叫做铁磁质的起始磁化

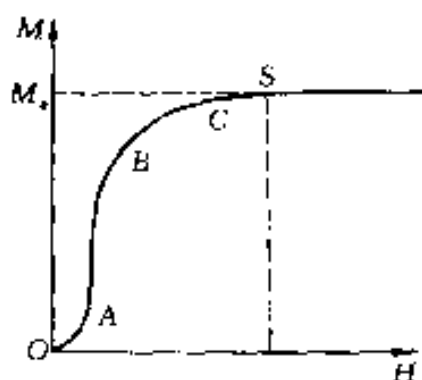


图 12.17

曲线, 饱和值  $B_s$  (和  $M_s$ ) 称为饱和磁感应强度和饱和磁化强度。

相应地, 当  $H$  由零开始增加时,  $\mu$  由起始值  $\mu_i$  开始增加, 在达到最大值  $\mu_m$  后急剧减小,  $\mu_i$  称为起始磁导率,  $\mu_m$  称为最大磁导率 (图 12.18)。

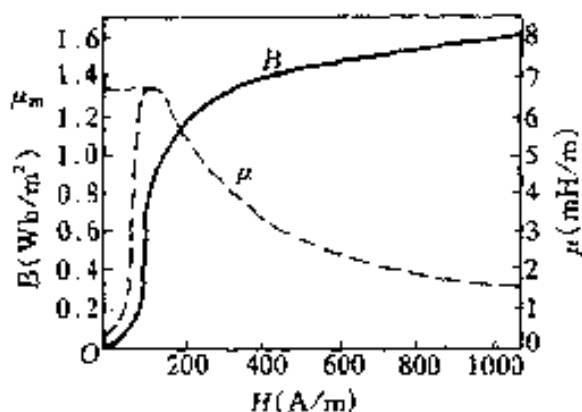


图 12.18

在  $B$  达到其饱和值  $B_s$  之后, 若使  $H$  逐渐减小到零, 则  $B$  并不随之减小到零, 而是保留有一定的值  $B_r$ , 该剩余值称为剩余磁感应强度。为使  $B$  减小到零, 必须加反向磁场  $H_c$ , 通常把  $H_c$  称为矫顽力。当反向磁场继续增大时,  $B$  又将达到其反向饱和值

( $S'$ 点)。此后,若使反向磁场的值逐渐减小到零,随之又沿正方向增加,铁磁质的磁化状态将沿  $S'R'C'S$  回到正向饱和状态  $S$ , 形成一闭合曲线,称为磁滞回线。铁磁质在交变磁场作用下反复磁化时,由于磁滞效应而造成能量损耗,称为磁滞损耗。磁滞回线的面积越大,磁滞损耗也越大。

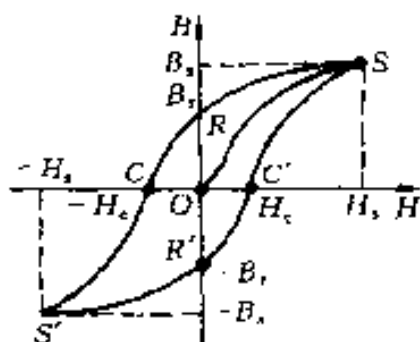


图 12.19

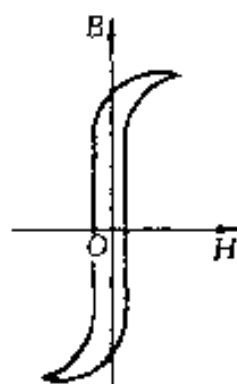


图 12.20

### (3) 软磁材料和硬磁材料

① 软磁材料:如纯铁、硅钢、坡莫合金等。软磁材料的矫顽力很小,  $H_c < 10^2 \text{ A/m}$ , 即磁滞回线狭长(图 12.20), 磁滞损耗小。因此,软磁材料可用作变压器、电磁铁和电机中的铁芯。

为了减小材料的涡流损耗,在高频和微波的应用中,常采用电阻率较高的铁氧体,它们是由几种氧化物的粉末混合压制成型后再烧结成的。如锰锌铁氧体、镍锌铁氧体等。

② 硬磁材料:如碳钢、铝镍钴合金等。硬磁材料的矫顽力很大(图 12.21),  $H_c$  约为  $10^4 \text{ A/m} \sim 10^6 \text{ A/m}$ , 硬磁材料的剩余磁感应强

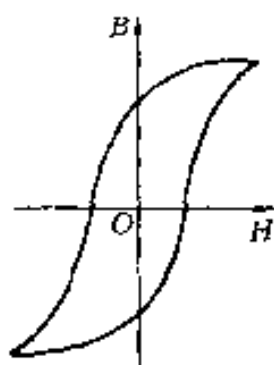


图 12.21

度  $B_r$  很大, 适合于制成永磁体。电表、扬声器和录音机等都用永磁体。

此外, 还有磁滞回线接近于矩形的矩磁材料(图 12.22), 它总处在  $B_s$  或  $-B_s$  两种状态之一, 可用作“记忆”元件, 具有较强的磁致伸缩效应的压磁材料, 可用作超声波发生器等。目前广泛采用的矩磁材料是锰-镁和锂-镁铁氧体。

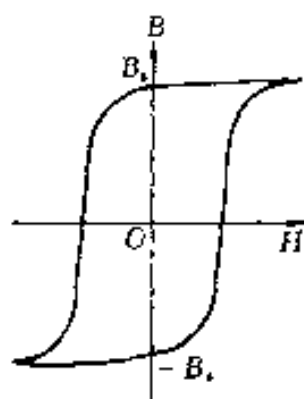


图 12.22

#### (4) 铁磁质的磁化机理

铁磁质的磁性主要来源于电子的自旋磁矩。在没有外磁场时, 铁磁质中电子的自旋磁矩可以在小范围内自发地排列起来, 形成一个个小的自发磁化区, 称为磁畴。磁畴的大小约为  $10^{-12} \text{m}^3 \sim 10^{-8} \text{m}^3$ , 包含有  $10^{17} \sim 10^{21}$  个原子。

在未磁化的铁磁质中, 由于热运动, 各磁畴的磁化方向不同, 因而在宏观上不显示磁性。当铁磁质受到外磁场作用时, 一部分磁畴体积扩大, 其自发磁化方向将作为一个整体在不同程度上转向外磁场方向, 当所有磁畴都沿外磁场方向排列时, 铁磁质的磁化就达到了饱和。

## 第十三章 电磁感应和电磁场

### 一、电磁感应定律

#### 1. 电磁感应现象

当穿过一个闭合导体回路所包围的面积内的磁通量发生变化时,在此回路中就会产生感应电流。这种现象称为电磁感应现象。

#### 2. 法拉第电磁感应定律

任一闭合回路内的感应电动势与回路所包围面积的磁通量对时间的变化率成正比,即

$$\epsilon_i = - \frac{d\Phi_m}{dt},$$

式中的负号反映了感应电动势的方向。上式就是法拉第(M. Faraday)电磁感应定律。

由上式确定感应电动势方向的方法是:先规定回路绕行正方向,再用右手螺旋法则确定此回路所包围面积的法线正方向;然后确定通过回路面积磁通量的正负,凡穿过回路面积的  $B$  的方向与正法线方向相同者为正,相反者为负;最后再考虑  $\Phi_m$  的变化,确定  $\frac{d\Phi_m}{dt}$  的正负。如果  $\frac{d\Phi_m}{dt} > 0$ ,由上式得  $\epsilon_i < 0$ ,这时感应电动势  $\epsilon_i$  的方向与所规定的回路正绕行方向相反。反之,若  $\frac{d\Phi_m}{dt} < 0$ ,则  $\epsilon_i > 0$ ,感应电动

势  $\varepsilon_i$  的方向与所规定的回路绕行正方向一致(图 13.1)。

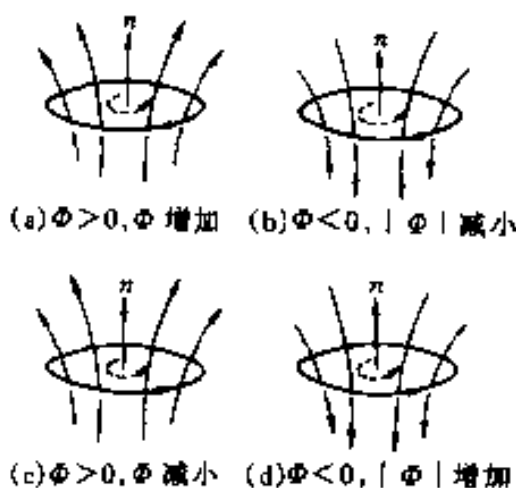


图 13.1

如果回路是由  $N$  匝线圈串联而成,若每匝中穿过的磁通量相同,那么整个回路中的感应电动势为

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d(N\Phi_m)}{dt} = -\frac{d\Psi_m}{dt},$$

式中  $\Psi_m = N\Phi_m$ ,称为磁通匝链数,简称磁链。

### 3. 楞次定律

1833年,楞次(H. F. E. Lenz)提出了判断感应电流方向的法则,称为楞次定律。这就是:闭合回路中感应电流的方向,总是使感应电流所产生的通过回路面积的磁通量,去补偿或者反抗引起感应电流的磁通量的变化。也可以表述为:感应电流的效果,总是反抗引起感应电流的原因。

## 二、动生电动势

导体或导体回路在恒定磁场中运动所产生的感应电动势,常称为动生电动势。

### 1. 运动导线内的感应电动势

一段长为  $l$  的导线在均匀磁场  $\mathbf{B}$  中以速度  $\mathbf{v}$  运动时, 感应电动势为

$$\epsilon_i = Blv \sin \theta,$$

式中  $\theta$  为导线的运动速度  $\mathbf{v}$  和磁感应强度  $\mathbf{B}$  之间的夹角。

一般任意形状的导线  $ab$ , 在恒定的非均匀磁场中作任意运动时, 导线  $ab$  上的动生电动势为

$$\epsilon_i = \int_a^b (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l},$$

这里线元矢量  $d\mathbf{l}$  的方向是任意选定的, 当  $d\mathbf{l}$  与  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  间呈锐角时,  $\epsilon_i$  为正, 表示  $\epsilon_i$  顺着  $d\mathbf{l}$  方向; 呈钝角时,  $\epsilon_i$  为负, 表示  $\epsilon_i$  与  $d\mathbf{l}$  方向相反。

### 2. 转动线圈内的感应电动势

设一线圈形状不变, 面积为  $S$ , 共有  $N$  匝, 在均匀磁场  $\mathbf{B}$  中绕固定轴转动, 转轴和磁感应强度  $\mathbf{B}$  的方向垂直。如线圈旋转的角速度为  $\omega$ , 并取线圈平面的法线刚好处在水平位置时作为计时的零点, 则任一时刻线圈中的感应电动势为

$$\epsilon_i = NBS\omega \sin \omega t = \epsilon_0 \sin \omega t,$$

式中  $\epsilon_0 = NBS\omega$ , 是线圈中的最大感应电动势。这就是交流发电机的基本原理。

## 三、自感和互感

### 1. 自感电动势

当一个线圈中的电流发生变化时, 它所激发的磁场穿过该线圈自身的磁通量也随之发生变化, 从而在这线圈中也会产生感应电动势, 这种现象称为

自感现象；这样产生的感应电动势，称为自感电动势。

设线圈中通有电流  $I$ ，在线圈的形状和大小保持不变而且周围没有铁磁质的情况下，穿过线圈自身的磁链  $\Psi_m$  与电流  $I$  成正比，即

$$\Psi_m = LI。$$

当电流  $I$  发生变化时，线圈中的自感电动势为

$$\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}，$$

式中比例系数  $L$  称为线圈的自感系数，简称自感。式中的负号表明：当电流增加时，自感电动势与原来电流的流向相反；当电流减小时，自感电动势与原来电流的流向相同。

自感系数的数值由回路的几何形状，大小以及周围介质的磁导率决定。自感系数的单位是 H(亨利)， $1\text{H} = 1\text{Wb}/\text{A} = 1\text{V}\cdot\text{s}/\text{A}$ 。例如一个长度为  $l$ ，截面积为  $S$ 、总匝数为  $N$  的密绕长直线圈，其中充满相对磁导率为  $\mu_r$  的磁介质，这线圈的自感系数为

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l}。$$

## 2. 自感电路中电流的增长和衰减

一个自感与一个电阻所组成的  $LR$  电路，与直流电源接通及断开后，由于自感的作用，使电路中的电流不会瞬间突变，而是要经历一个短暂的过程才能达到稳定值，这个过程称为  $RL$  电路的暂态过程。

$RL$  电路接通电源后电路中电流的增长规律为

$$i = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)；$$



■ 当  $I_2$  发生变化时,在线圈 1 中产生的感应电动势为

$$\epsilon_{12} = - \frac{d\Psi_{12}}{dt} = - M_{12} \frac{dI_2}{dt}。$$

以上各式中的比例系数  $M_{21}$  和  $M_{12}$ ,称为互感系数,简称互感。这两个比例系数是相等的,一般用  $M$  表示,即

$$M_{21} = M_{12} = M。$$

互感系数的单位也是 H(亨利)。

### 5. 互感系数

当线圈周围没有铁磁质时,互感系数  $M$  由线圈的几何形状、大小、匝数、相对位置以及它们周围所存在的磁介质的磁导率等决定。例如两个同轴的螺线管,同绕在一介质棒上,长度均为  $l$ ,截面积均为  $S$ ,线圈 1 有  $N_1$  匝,线圈 2 有  $N_2$  匝,介质的相对磁导率为  $\mu_r$ ,则两线圈的互感系数为

$$M = \mu_0 \mu_r \frac{N_1 N_2 S}{l}。$$

在互感现象中,每一个线圈都有自感系数,两线圈的互感系数和自感系数的关系有

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}。$$

其中  $k$  称为耦合系数,且  $0 \leq k \leq 1$ 。 $k$  的数值取决于两线圈的相对位置。

### 6. 串联线圈的自感系数

将自感系数分别为  $L_1$  和  $L_2$  的两个线圈串联起来,可以看成是一个有一定总自感系数为  $L$  的线圈。总自感系数不仅与  $L_1$  和  $L_2$  有关,还与这两个线圈的互感系数  $M$  以及串联方式有关。两个线圈顺接时(图 13.3(a)),总自感为

上,当  $t=3\tau$  时,  $i=0.95I_0$ ;  $t=5\tau$  时,  $i=0.993I_0$ 。所以可以认为经过  $(3\sim 5)\tau$  时间后, 电流已达到稳定值了。同样, 当  $t=3\tau$  时, 电流已衰减到初始值的 5%, 当  $t=5\tau$  时, 已衰减到初始值的 0.7%, 故经过  $(3\sim 5)\tau$  时间后, 就可以认为电流已衰减到零。

### 3. 自感磁能

自感为  $L$  的线圈, 通有电流  $I$ 。线圈中的电流由零增大到恒定值  $I$  过程中, 由于自感的作用, 电源要反抗自感电动势做功, 转化成为储存在线圈中的能量, 称为自感能量, 用  $W_L$  或  $W_m$  表示, 其值为

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2。$$

### 4. 互感电动势

两个相邻的线圈, 当一个线圈中的电流发生变化时, 将在它周围空间产生变化的磁场, 从而使另一个线圈中产生感应电动势, 这种现象称为互感现象。这种电动势称为互感电动势。

设线圈 1 中的电流为  $I_1$ , 在空间各点产生磁场, 穿过线圈 2 的磁链为  $\Psi_{21}$ 。若线圈的形状、大小和相对位置均保持不变, 周围又没有铁磁质,  $\Psi_{21}$  正比于  $I_1$ , 即

$$\Psi_{21} = M_{21} I_1。$$

当  $I_1$  发生变化时, 在线圈 2 中产生的感应电动势为

$$\epsilon_{21} = - \frac{d\Psi_{21}}{dt} = - M_{21} \frac{dI_1}{dt}。$$

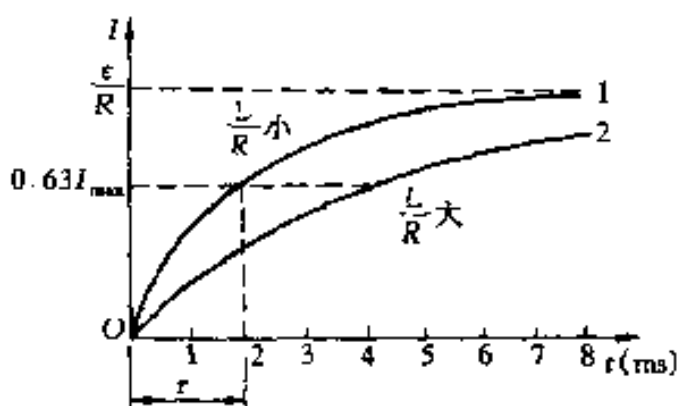
同理, 设线圈 2 中的电流  $I_2$ , 穿过线圈 1 的磁链为  $\Psi_{12}$ , 则有

$$\Psi_{12} = M_{12} I_2。$$

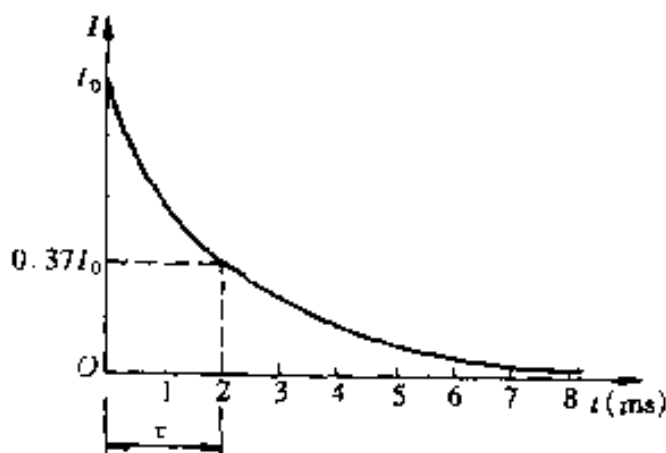
■ 断开电源后电路中电流的衰减规律为

$$i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

由此可见,在  $LR$  电路中,电流的增长和衰减都是按指数规律变化的,电流不能发生突变,它总滞后一段时间才达到稳定值,滞后的时间可由  $\tau = \frac{L}{R}$  标志,  $\tau$  称为  $LR$  电路的时间常量。在理论上,只有经过无限长的时间,电流才能达到稳定值(图 13.2)。但实际



(a) 电流的增长



(b) 电流的衰减

$$L = L_1 + L_2 + 2M;$$

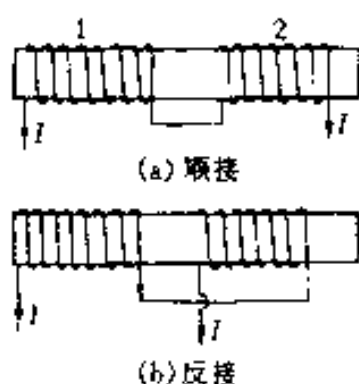


图 13.3

两个线圈反接时(图 13.3(b)),总自感为

$$L = L_1 + L_2 - 2M。$$

### 7. 互感磁能

两个互感系数为  $M$  的线圈,其中分别有电流  $I_1$  和  $I_2$ 。在建立电流的过程中,电源除了供给线圈中产生焦耳热的能量和反抗自感电动势做功外,还要反抗互感电动势做功,这部分额外的功,也转化为磁能的形式储存起来,称为互感磁能,用  $W_M$  或  $W_m$  表示,即

$$W_M = MI_1I_2。$$

这样,两个相邻的载流线圈的总磁能为

$$\begin{aligned} W_m = W_{L1} + W_{L2} + W_M = \\ \frac{1}{2}L_1I_1^2 + \frac{1}{2}L_2I_2^2 + MI_1I_2。 \end{aligned}$$

## 四、涡电流、趋肤效应

### 1. 涡电流

大块导体处在变化磁场中,或者相对于磁场运 275

动,在导体内部会产生感应电流,这感应电流的流线呈闭合涡旋状,故称为**涡电流**或**涡流**。

如交变磁场(交变电流)的频率为 $\nu$ ,则涡电流 $i_{\text{涡}} \propto \nu$ ,涡电流产生的焦耳热 $Q \propto \nu^2$ 。由于大块金属的电阻很小,如果交变电流频率很高,则释放大量的焦耳热,可用于冶炼金属,这就是高频感应炉的原理。

此外,金属板在局部磁场中运动时,穿过金属板的磁通量发生变化,板内引起了涡电流。载有涡电流的金属板在磁场中受到安培力的作用,力的方向与板的运动方向相反,因而阻碍了板的运动。这种现象称为**电磁阻尼**。电磁仪表中的指针摆动能够迅速稳定下来,电气列车的电磁制动,都是根据电磁阻尼的原理。

导体中发生涡流,就要消耗能量,例如在电机和变压器中的铁芯,为了减少涡流损耗,常把用绝缘的电阻率较高的硅钢片叠合起来代替整块铁芯。在高频变压器中,还常采用绝缘粉末状的铁芯。

## 2. 趋肤效应

在直流电路中,均匀导线横截面上的电流密度是均匀分布的。但是,在交流电路中,随着频率的提高,导线横截面上的电流分布越来越向导线表面集中(图 13.4),这种现象称为**趋肤效应**。趋肤效应使导线的有效截面积减小,

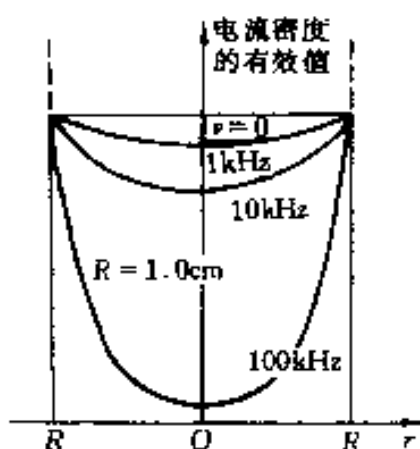


图 13.4

从而使其等效电阻增大。

令  $d$  表示从导体表面算起的深度, 电流密度  $j$  随深度  $d$  的增加而指数衰减, 即

$$j = j_0 e^{-d/d_s},$$

其中  $d_s$  称为趋肤深度, 表示  $j$  减少到表面值  $j_0$  的  $1/e$  的深度。趋肤深度由下式决定

$$d_s = \sqrt{\frac{L}{\omega \mu_r \mu_0 \gamma}} = \frac{503}{\sqrt{2 \mu_r \gamma}},$$

式中  $\nu = \omega/2\pi$  是交流电的频率,  $\mu_r$  是导体的相对磁导率,  $\gamma$  是导体的电导率。

粗略地说, 在趋肤效应不太显著的情况下, 产生趋肤效应的原因是导体自身感应的涡电流。严格地说, 趋肤效应本质上是衰减电磁波向导体内传播所引起的。

## 五、感生电场和位移电流

麦克斯韦(J. C. Maxwell)系统地总结了从库仑、安培和法拉第等人的电磁学说的全部成就, 并在此基础上提出了感生电流和位移电流两个假说, 他指出: 变化的磁场可以产生电场, 变化的电场也可以产生磁场。麦克斯韦揭示了电场和磁场的内在联系, 把电场和磁场统一为电磁场, 并归纳出了电磁场的基本方程——麦克斯韦方程组, 建立了完整的电磁场理论体系。

### 1. 感生电场

当导体回路不动, 而磁通量的变化完全由磁场的变化引起的, 导体回路中也将产生感应电动势。这种由磁场变化引起的感应电动势, 称为感生电动

势。

为了解释感生电动势产生的机制。麦克斯韦提出了假设:变化的磁场在其周围激发了一种新的电场,这种电场称为感生电场。由于感生电场的电场线是闭合的,通常把感生电场又称为有旋电场。用  $E_i$  表示感生电场的场强。

根据电动势的定义:电动势  $\epsilon$  等于单位正电荷沿闭合回路绕行一周非静电力所作的功,即  $\epsilon = \oint E_k \cdot dl$ ,  $E_k$  为非静性场强,得动生电动势为

$$\epsilon_i = \oint E_i \cdot dl,$$

而法拉第电磁感应定律有

$$\epsilon_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} = - \frac{d}{dt} \iint_{(S)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S},$$

结合两者得

$$\oint_{(L)} \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{(S)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}.$$

这就是电磁感应的普遍(积分)形式,它是麦克斯韦方程组的基本方程之一。

麦克斯韦的这个假说已被近代的科学实验所证实。例如,电子感应加速器的基本原理就是用变化的磁场所激发的电场来加速电子的。

## 2. 位移电流

在电容器的充、放电电路中,传导电流不能通过电容器,因而电容器的存在破坏了电路中传导电流的连续性。同时,以同一个闭合回路为边线的不同曲面应用安培环路定理所得的结果也不同。

为了解决上述电流的不连续问题,并在上述场合下使得适用于闭合传导电流的安培环路定理也能成立,麦克斯韦提出了位移电流的概念:变化的电场也是一种电流,并令

$$j_d = \frac{dD}{dt},$$

$$I_d = S \frac{dD}{dt} = \frac{d\Psi_e}{dt}.$$

$j_d$  和  $I_d$  分别为位移电流密度和位移电流。上述定义说明,电场中某点的位移电流密度  $j_d$  等于该点电位移  $D$  的时间变化率;通过电场中某截面的位移电流等于通过该截面电位移通量  $\Psi_e$  的时间变化率。

当电场增强时,  $\frac{dD}{dt}$  的方向和  $D$  的方向一致,位移电流密度  $j_d$  的方向以及位移电流  $I$  的流向与  $D$  的方向相同;反之,当电场减小时,  $j_d$  的方向和  $I$  的流向与  $D$  的方向相反。

传导电流  $I_c$  和位移电流  $I_d$  合在一起称为全电流,  $I = I_c + I_d$ 。在电容器极板中没有电荷运动的传导电流,但板间存在有变化的电场的位移电流,保持了电流的连续性。

在引进了位移电流的概念之后,麦克斯韦把安培环路定理推广到非恒定情况,用全电流代替传导电流,得到

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum (I_0 + I_d) = \iint_{(S)} \mathbf{j}_c \cdot d\mathbf{S} + \iint \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S},$$

式中  $j_c$  为传导电流密度。上式是安培环路定理的普遍(积分)形式,也就是麦克斯韦的位移电流假设。

麦克斯韦的位移电流假设的实质在于,它说明



了位移电流与传导电流都是激发磁场的源泉,其核心是变化的电场可以激发磁场。

### 3. 麦克斯韦方程组

#### (1) 积分形式

##### ① 电场的性质:

$$\oiint_{(S)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum q = \iiint_{(V)} \rho dV。$$

在任何电场中,通过任意封闭曲面的电位移通量等于该封闭面内自由电荷量的代数和。

##### ② 磁场的性质:

$$\oiint_{(S)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0。$$

在任何磁场中,通过任意封闭曲面的磁通量总是等于零。

##### ③ 变化电场和磁场的联系:

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_c + I_d = \iint_{(S)} \mathbf{j}_c \cdot d\mathbf{S} + \iint_{(S)} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}。$$

在任何磁场中,磁场强度沿任意闭合曲线的线积分等于通过以该闭合曲线为边线的任意曲面的全电流。

##### ④ 变化磁场和电场的联系:

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_m}{dt} = \iint_{(S)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}。$$

在任何电场中,电场强度沿任意闭合曲线的线积分等于通过该曲线所包围面积的磁通量的时间变化率的负值。

#### (2) 微分形式

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho;$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0;$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t};$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

### (3) 介质性质方程

在有介质时,上述麦克斯韦方程组,尚不完备,还需补充描述介质性质的方程。对于各向同性介质有

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E};$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H};$$

$$\mathbf{j}_c = \gamma \mathbf{E}.$$

这里  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  和  $\gamma$  分别是相对电容率、相对磁导率和电导率。

### (4) 电磁场的边界条件

在求解麦克斯韦方程组时,只有在电磁场的边界条件已知的情况下,才能唯一地确定方程的解。

① 电介质界面上的边界条件:如考虑两介质分界面上没有自由电荷,边界条件有

$$D_{2n} = D_{1n};$$

$$E_{2t} = E_{1t}.$$

即在界面两侧电位移的法向分量是连续的,电场强度的切向分量是连续的。

② 磁介质界面上的边界条件:如考虑两介质分界面上没有传导电流,边界条件有

$$B_{2n} = B_{1n};$$

$$H_{2t} = H_{1t}.$$

即在界面两侧磁感应强度的法向分量是连续的,磁

■ 场强度的切向分量是连续的。

③ 导体界面上的边界条件:传导电流密度法向分量的边界条件为

$$(j_{c2})_n - (j_{c1})_n = \cdot \frac{\partial \gamma_{c0}}{\partial t}。$$

在恒定条件下,则有

$$(j_{c2})_n = (j_{c1})_n,$$

即传导电流密度的法向分量是连续的。

## 第十四章 电路

### 一、欧姆定律

#### 1. 电流强度和电流密度

##### (1) 电流强度

导体内电荷的定向运动,形成了电流。由于历史的原因,人们把正电荷定向运动的方向规定为电流的方向。单位时间内通过导体任一截面的电量规定为电流的大小,称为**电流强度**,简称为**电流**,用  $I$  表示,即

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

如果电流的大小和方向不随时间改变,则称为**恒定电流**或**直流**。如果电流强度随时间而变化,则  $t$  时刻的**瞬时电流**用小写字母  $i$  表示,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

电流强度的单位为 A(安培)。

##### (2) 电流密度

为了描述电流在导体截面上分布的情况,设想在导体中某点取一个与电流方向垂直的截面元  $dS_{\perp}$ ,通过该面元的电流为  $dI$ ,则通过该点单位垂直截面的电流强度定义为**电流密度**的大小,用  $j$  表

示,即

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad \text{或} \quad dI = j dS_{\perp}。$$

电流密度的单位为  $A/m^2$ 。如果截面元矢量  $dS$  的法线  $n$  与电流方向成  $\theta$  角,则有

$$dI = j dS_{\perp} = j dS \cos\theta = j \cdot dS。$$

电流密度  $j$  是一个矢量,该矢量在导体中各点的方向代表该点的电流方向。于是,通过导体中任一有限截面  $S$  的电流为

$$I = \iint_{(S)} j \cdot dS = \iint_{(S)} j \cos\theta dS。$$

### (3) 电流的连续性方程和恒定条件

设想在导体内任取一闭合面,规定其外法线方向为正方向。根据电荷守恒定律,单位时间内流出  $S$  面的电量  $\oiint j \cdot dS$  应等于该闭合面内电量的减少  $-\frac{dq}{dt}$ ,即

$$\oiint_{(S)} j \cdot dS = -\frac{dq}{dt}。$$

这就是电流的连续性方程。电流的连续性方程的微分形式为

$$\nabla \cdot j = -\frac{\partial \rho}{\partial t}，$$

式中  $\rho$  为体电荷密度。

对于恒定电流,导体内任一点的电流密度是确定的,即  $j$  的大小和方向不随时间而变化,这就要求电荷的分布也不随时间变化。因此,在恒定电流情况下,任意闭合曲面  $S$  内的电量不随时间变化,即

$\frac{dq}{dt} = 0$ , 于是

$$\oint_{(S)} j \cdot dS = 0,$$

这就是恒定电流的条件。

## 2. 电阻

导体电阻的大小与导体的材料和几何形状有关。对于粗细均匀长为  $l$ 、横截面为  $S$  的导体电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S}。$$

式中  $\rho$  称为电阻率, 与导体的材料和温度有关, 其单位为  $\Omega \cdot m$ ; 电阻率的倒数称为电导率, 用  $\gamma$  表示, 即

$$\gamma = \frac{1}{\rho},$$

电导率的单位为  $S/m$  (西门子/米); 电阻的单位为  $\Omega$  (欧姆)。

不同材料有不同的电阻率, 且各种材料的电阻率都是随温度而变化的。纯金属电阻率随温度的变化遵从马西森 (Matthiessen) 定则, 即

$$\rho = \rho_1(T) + \rho_r,$$

式中  $\rho_1(T)$  是由晶格格点热运动所引起的理想电阻率, 与温度有关; 而  $\rho_r$  是由杂质和缺陷所引起的剩余电阻率, 与温度无关。在很低的温度下, 近似地有  $\rho \approx \rho_r$ 。当温度不太低且变化范围不大时, 近似地有

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

式中  $\rho_0$  表示  $0^\circ C$  时的电阻率,  $\alpha$  称为电阻的温度系数。

有些合金, 例如锰铜合金等, 可以粗略地看成是具有杂质的金属, 其电阻率  $\rho \approx \rho_r$ , 近似与温度无关, 即电

阻温度系数很小,因此常川锰铜线绕制电阻器等。

### 3. 电动势

#### (1) 电源的电动势

要在导体内形成恒定电流,导体两端的电势差必须保持不变。这就需要提供非静电力的装置,这种装置称为电源。电源把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时,非静电力所作的功定义为电源的电动势,即

$$\varepsilon = \frac{A_{非}}{q} = \int_{-}^{+} \mathbf{E}_K \cdot d\mathbf{l},$$

式中  $\mathbf{E}_K$  为非静电力的等效电场。在某些情况下,非静电力存在于整个电路中,所以电动势也可写成

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E}_K \cdot d\mathbf{l}。$$

电动势  $\varepsilon$  是标量,但为电路计算上的方便,常将从负极到正极的方向规定为电动势的方向。

#### (2) 电源的端电压

电源的端电压是指电源正极与负极两端的电势差。

$$\text{放电时: } U = V_{+} - V_{-} = \varepsilon - Ir;$$

$$\text{充电时: } U = V_{+} - V_{-} = \varepsilon + Ir,$$

式中  $r$  为电源的内电阻。当电源处于放电状态时,电源的端电压小于电源的电动势;电源处于充电状态时,电源的端电压大于电源的电动势。当  $I=0$ (电路断开时)或  $r=0$ ,则电源的端电压等于电源的电动势。

### 4. 欧姆定律

#### (1) 一段导体的欧姆定律

在恒定条件下,通过一段导体的电流  $I$  与导体两端的电压  $U$  成正比,即

$$I = \frac{U}{R}, \quad \text{或} \quad U = IR,$$

式中  $R$  为该段导体的电阻。这就是欧姆 (G. S. Ohm) 定律。电阻的倒数称为电导,用  $G$  表示:

$$G = \frac{1}{R}。$$

电导的单位为 S (西门子)。

### (2) 闭合电路的欧姆定律

闭合电路中的电流  $I$  为

$$I = \frac{\sum \epsilon}{\sum R},$$

式中  $\sum \epsilon$  为闭合电路中所有电动势的代数和,  $\sum R$  为电路中的总电阻(包含电源的内电阻)。

### (3) 一段含源电路的欧姆定律

如果一段电路中包含有几个电源,而且在此段电路中各部分的电流也不相同,这时,这段电路初末两端的电势差  $V_0 - V_i$  为

$$V_0 - V_i = \sum IR - \sum \epsilon,$$

式中  $\sum IR$  为这段电路中所有电阻(包括电源的内电阻)上的电势降之和,  $\sum \epsilon$  为这段电路中所有电源电动势的代数和。式中右边两项选取正负号的规则如下:

① 如果通过电阻中的电流的流向与所取的初末方向相同,该电阻上的电势降为正,反之为负。



② 如果电动势的指向与所取的初末方向相同, 该电动势为正, 相反的为负。

例如, 如图 14.1 所示的电路,  $A, B$  两端的电势差为

$$V_A - V_B = (I_1 R_1 + I_1 r_1 - I_2 R_2 - I_2 r_2 - I r_3) - (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3)$$

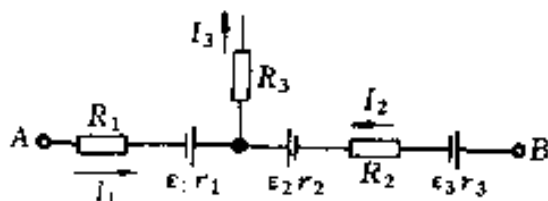


图 14.1

#### (4) 欧姆定律的微分形式

欧姆定律的微分形式为

$$j = \gamma E。$$

它给出了电流密度和电场强度之间逐点的对应关系。欧姆定律微分形式不仅适用于金属, 对电解液也适用。

在电场很强时, 例如在金属中  $E > (10^3 \sim 10^4)$  V/m 时,  $I$  与  $U$  或  $j$  与  $E$  之间呈非线性关系, 欧姆定律不再成立。对于低压下的电离气体以及晶体管和电子管等器件, 其伏安特性曲线(即  $I-U$  曲线)不再是一条通过原点的直线, 这时的所谓电阻  $R = U/I$  已不是常量, 而是与  $U$  和  $I$  有关的变量, 欧姆定律也已不再成立。

## 二、基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)定律

一个复杂电路可以是多个电源和多个电阻的复

杂联接,任意一条由电源和电阻串联的电路叫做支路;几条支路构成的通路叫做回路;三条或更多支路的汇集点叫做节点。

### (1) 基尔霍夫第一定律

汇流于每一节点的总电流必为零,即

$$\sum_i I_i = 0。$$

通常规定流向节点的电流为正,流出节点的电流为负。对于具有  $n$  个节点的完整电路,可以列出  $(n - 1)$  个彼此独立的节点电流方程。

### (2) 基尔霍夫第二定律

沿任一闭合回路中,所有电源电动势的代数和等于回路中电阻上电势降的代数和,即

$$\sum \epsilon = \sum IR,$$

电动势及电势降的正负规定如下:首先选定回路的绕行方向,当电动势的指向与绕行方向一致时,电动势取正值,反之取负值;当电流的流向与绕行方向一致时,该电阻上的电势降取正值,反之取负值。选取回路时,必须有一条支路是其他回路中未选取的。

对于一个具有  $n$  个节点和  $p$  条支路的电路,总共有  $(p - n + 1)$  个独立回路,可列出  $(p - n + 1)$  个独立的回路电压方程。每条支路上的电流方向可以任意假定,解方程的结果如为负值,即说明电流实际的方向与假定的相反。

## 三、关于电路计算的几个定理

### 1. 等效电压源定理

“网络”是泛指电路或电路的一部分的术语。若 289

网络中含有电源,则称为有源网络。仅有两条导线与其他网络相联的网络,称为两端网络。

两端有源网络可等效于一个电压源,该电压源的电动势  $\epsilon_e$  等于网络的开路端电压,内阻等于从网络两端看除去电源层(设想将电动势短路)网络的电阻。这就是等效电压源定理或称戴维南(Thevenin)定理。

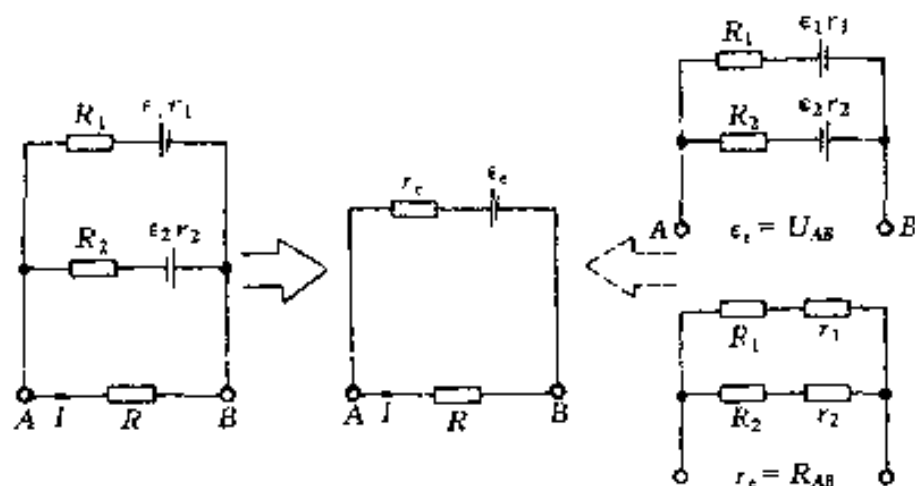


图 14.2

如图 14.2 所示的两端有源网络,由电动势和内电阻分别为  $\epsilon_1, r_1$  和  $\epsilon_2, r_2$  的电源及电阻  $R_1$  和  $R_2$  构成。该网络可以等效于中间图示的电压源,其电动势  $\epsilon_e$  和内电阻  $r_e$  为

$$\epsilon_e = U_{AB} = \frac{(R_2 + r_2)\epsilon_1 - (R_1 + r_1)\epsilon_2}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2};$$

$$r_e = R_{AB} = \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2}.$$

由此可求得通过负载  $R$  的电流为

$$I = \frac{\epsilon_e}{R + r_e} =$$

$$\frac{(R_2 + r_2)\epsilon_1 - (R_1 + r_1)\epsilon_2}{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2) + R(R_1 + r_1 + R_2 + r_2)}$$

### 2. 等效电流源定理

设想有一种理想的电源, 不管外电阻如何变化, 这电源总是提供不变的电流  $I_0$ , 这种理想的电源叫做电流源。

两端有源网络可等效于一个电流源, 该电流源的  $I_0$  等于网络两端短路时流经两端的电流, 其内阻  $r_0$  等于网络两端看除去电源后网络的电阻。这就是等效电源定理或称诺尔顿(Norton)定理。

如图 14.3 所示的两端有源网络, 等效电流源的电流  $I_0$  为

$$I_0 = I_{01} - I_{02} = \frac{\epsilon_1}{R_1 + r_1} - \frac{\epsilon_2}{R_2 + r_2};$$

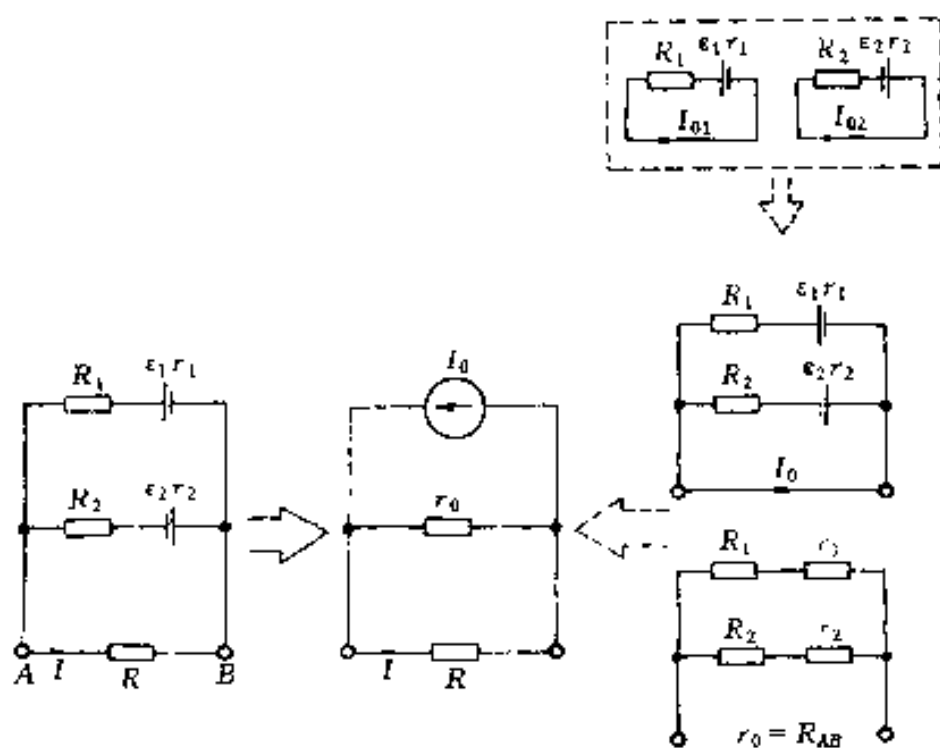


图 14.3

内阻为

$$r_0 = R_{AB} = \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2}$$

由此可求得通过负载  $R$  的电流为

$$I = \frac{r_0}{R + r_0} I_0 = \frac{(R_2 + r_2)\epsilon_1 - (R_1 + r_1)\epsilon_2}{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2) + R(R_1 + r_1 + R_2 + r_2)}$$

### 3. 叠加定理

若电路中有多个电源存在, 则通过电路中任一  
支路的电流, 等于各个电动势单独存在时通过该支  
路的电流的代数和, 这就是**叠加原理**。

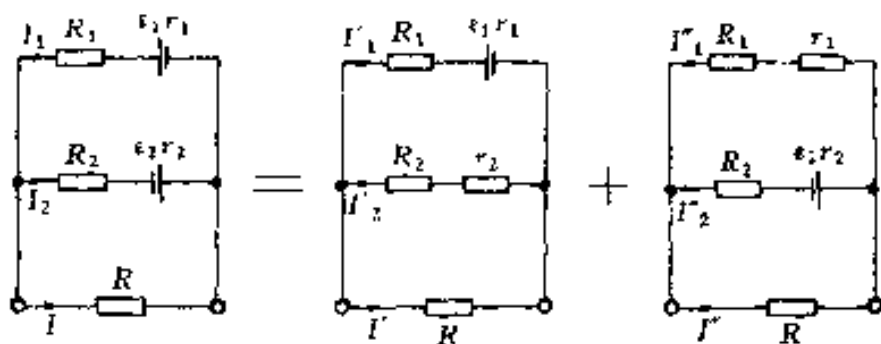


图 14.4

如图 14.4 所示的电路中, 由叠加原理得各支路  
中的电流为

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 + I''_1, \\ I_2 &= I'_2 + I''_2, \\ I &= I' + I'' \end{aligned}$$

### 4. Y- $\Delta$ 电路的等效代换

从 Y 形联接等效变换为  $\Delta$  形联接(图 14.5

292 (b)), 各电阻间的变换关系为

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3},$$

$$R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1},$$

$$R_{31} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}.$$

从  $\Delta$  形联接变换为 Y 形联接(图 14.5(a)), 各电阻间的变换关系为

$$R_1 = \frac{R_{31} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}},$$

$$R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}},$$

$$R_3 = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

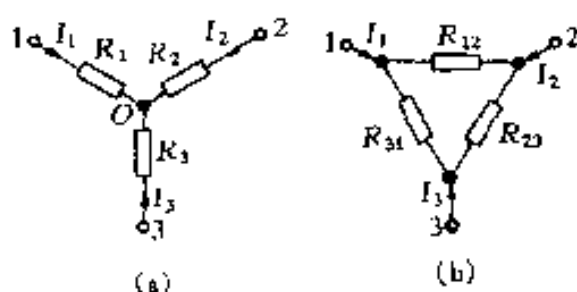


图 14.5

等效代换时,要求电路中其余各部分的电压和电流保持不变,即要求图 14.5 中三个端点间的电势  $U_1, U_2, U_3$  以及流过的电流  $I_1, I_2, I_3$  都不变。

#### 四、交流电及简单交流电路

##### 1. 交流电

大小和方向都随时间作周期性变化的电流,称

为交流电。各种交流电中,最简单和最基本的是简谐交流电。简谐交流电动势  $e(t)$ 、电压  $u(t)$  和电流  $i(t)$  可表示为

$$\begin{aligned} e(t) &= \varepsilon_0 \cos(\omega t + \varphi_e), \\ u(t) &= U_0 \cos(\omega t + \varphi_u), \\ i(t) &= I_0 \cos(\omega t + \varphi_i). \end{aligned}$$

交流电的大小通常用其有效值来表示,它在数值上等于其峰值(幅值)的  $1/\sqrt{2}$ 。所以描述交流电需要三个特征量:频率、有效值和相位。

## 2. 交流电路中的基本元件

在交流电路中,描述一个元件上的电压  $u(t)$  与电流  $i(t)$  之间的关系,需要有两个量:一个是二者峰值之比(也就是有效值之比),称为该元件的阻抗,用  $Z$  表示,

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U}{I};$$

另一个是二者相位之差

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i.$$

### (1) 电阻

电阻元件的阻抗  $Z_R$  和相位差  $\varphi_R$  分别为

$$Z_R = R, \quad \varphi_R = 0,$$

即电阻元件的电压和电流是同相位的。

### (2) 电感

当电感元件中有交变电流通过时,在线圈内部将产生自感电动势。在电感元件的内阻可以忽略的情况下,电感元件的阻抗(称为感抗)和相位差分别为

$$Z_L = \omega L, \quad \varphi_L = \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{2},$$

即电压相位超前电流  $\frac{\pi}{2}$ 。

### (3) 电容

电容元件的阻抗(称为容抗)和相位差分别为

$$Z_C = \frac{1}{\omega C}, \quad \varphi_C = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}.$$

即电压相位落后电流  $\pi/2$ 。

## 3. 简单交流电路

### (1) $RL$ 串联电路

在串联电路中,各元件上电流的瞬时值  $i$  是相同的,电路两端总电压的瞬时值等于各元件上分电压的瞬时值之和,即  $u = u_R + u_L$ ,电感元件上的电压相位超前电流  $\pi/2$ 。因此, $RL$  串联电路的阻抗和相位差分别为

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}.$$

矢量图见图 14.6。

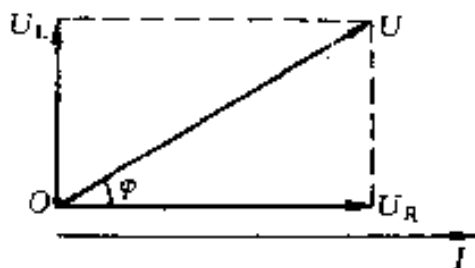


图 14.6

### (2) $RC$ 串联电路

与  $RL$  串联电路类似,只是电容元件上的电压相位落后电流  $\frac{\pi}{2}$ 。因此, $RC$  串联电路的阻抗和相



位差分别为

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\varphi = \arctan \frac{1}{\omega CR}$$

矢量图见图 14.7。

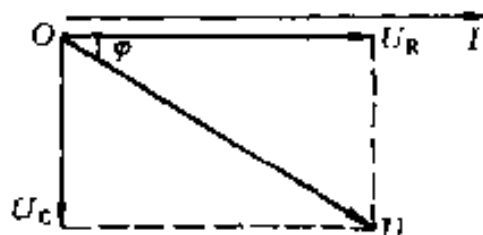


图 14.7

### (3) RL 并联电路

在并联电路中,各元件上电压的瞬时  $u$  是相同的,总电流的瞬时值是通过各元件的电流瞬时值之和。电感元件中电流相位落后电压  $\frac{\pi}{2}$ 。因此,RL 并联电路的阻抗和相位差分别为

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}},$$

$$\varphi = \arctan \frac{R}{\omega L}$$

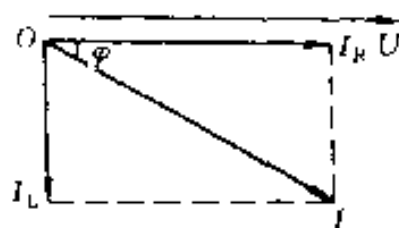


图 14.8

矢量图见图 14.8。

(4) RC 并联电路

与 RC 并联电路类似,容感中的电流相位超前电压  $\frac{\pi}{2}$ 。因此,RC 并联电路的阻抗和相位差分别为

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2}};$$

$$\varphi = -\arctan(\omega RC)。$$

矢量图见图 14.9。

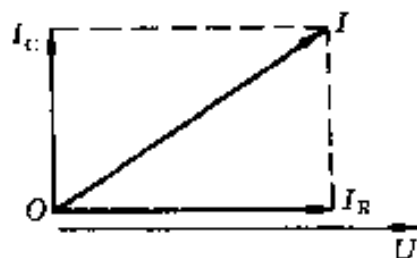
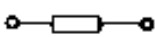
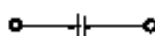
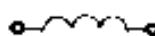


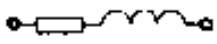

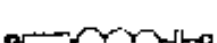
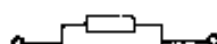
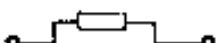


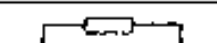
图 14.9

(5) 几种典型电路的阻抗及电压与电流的相位差见表 14.1。

表 14.1 几种常见电路的阻抗及电压与电流的位相差

电 路	复 阻 抗	阻 抗	位 相 差 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$
	$R$	$R$	$0$
	$\frac{1}{\omega C}$	$\frac{1}{\omega C}$	$-\frac{\pi}{2}$
	$\omega L$	$\omega L$	$+\frac{\pi}{2}$

(续表)

电 路	复 阻 抗	阻 抗	位 相 差 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$
	$R + j\omega L$	$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$	$\tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$
	$R - j \frac{1}{\omega C}$	$\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\tan^{-1} \left(-\frac{1}{\omega RC}\right)$
	$R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$
	$\frac{j\omega L R}{R + j\omega L}$	$\frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan^{-1} \frac{R}{\omega L}$
	$\frac{R}{1 + j\omega CR}$	$\frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$	$\tan^{-1} (-\omega CR)$
	$\frac{R - j\omega L}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega CR}$	$\sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}}$	$\tan^{-1} \frac{\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2)}{R}$
	$\frac{j\omega C(1 - \omega CR^2)}{\omega CR - j(1 - \omega^2 LC)}$	$\omega \sqrt{\frac{1 + (\omega CR)^2}{(\omega CR)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}}$	$\tan^{-1} \frac{(\omega CR)^2 + (1 - \omega^2 LC)}{R}$
	$\frac{j\omega L R}{R(1 - \omega^2 LC) + j\omega L}$	$\frac{j\omega L R}{\sqrt{R^2(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega L)^2}}$	$\tan^{-1} \frac{R(1 - \omega^2 LC)}{\omega L}$

## 五、电功率

### 1. 直流电的功率

电流通过一段电路时,电场力对电荷做功,单位时间内电场力作的功,称为电功率,用  $P$  表示。它等于电路两端的电压  $V$  和通过电路的电流  $I$  的乘积,即

$$P = IV_0$$

电功率的单位为 W。在电工工程中,常用 kW 作为电功率的单位,用 kW·h(千瓦·小时,俗称度)作为功的单位。

如果一段电路只包含电阻,则电功率为

$$P = I^2 R = V^2 / R。$$

## 2. 焦耳定律

电流通过导体放出的热量与电流  $I$  的二次方、导体的电阻  $R$  和电流通过的时间  $t$  成正比,即

$$Q = I^2 R t。$$

这是由焦耳(J. P. Joule)做实验发现的,称为焦耳定律,也称焦耳-楞次定律。式中热量  $Q$  用 J 为单位。

将单位体积的热功率称为热功率密度,用  $w$  表示,则焦耳定律可写成

$$w = \frac{j^2}{\gamma} = \gamma E^2,$$

称为焦耳定律的微分形式。式中  $\gamma$  为导体的电导率, $j$  为电流密度, $E$  为电场强度。

## 3. 交流电的功率

### (1) 瞬时功率

交流电在某一元件或组合电路中瞬时消耗的功率,称为交流电的瞬时功率。它随时间变化,等于瞬时电压和电流的乘积,即

$$P(t) = u(t)i(t)。$$

### (2) 平均功率

交流电在一个周期内所完成的功率的平均值,称为平均功率。它是电路所有部分在单位时间内释放出的各种形式能量的总和,平均功率也称有功功率,在数值上等于

$$P = UI \cos \varphi,$$

即等于电压、电流的有效值与功率因数  $\cos \varphi$  的乘积。

对于纯电阻元件： $\varphi = 0, \bar{P}_R = UI = I^2 R$ ；

对于纯电感元件： $\varphi = \frac{\pi}{2}, \bar{P}_L = 0$ ；

对于纯电容元件： $\varphi = -\frac{\pi}{2}, \bar{P}_C = 0$ 。

因此，在交流电路中，纯电感和纯电容的有功功率都为零，它们都不消耗能量，只是不断地与电源交换能量。实际电路中对功率有贡献的不仅是欧姆电阻，电容器和电感线圈中的介质损耗也相当于具有等效的有功电阻。

### (3) 功率因数

鉴于  $\cos \varphi$  对平均功率的重要性，通常称它为功率因数。

功率因数的大小对电路中电能的使用有很大影响。当交流供电设备的额定容量一定时， $\cos \varphi$  大，有功功率就大； $\cos \varphi$  小，有功功率就小。当电源电压  $U$  及用电设备的功率  $P$  一定时， $\cos \varphi$  越小，电流就越大，输电线中电能的损失就越大。

为了提高功率因数，对于电感性电路，常常用并联电容器的方法。

### (4) 视在功率或表现功率

电器设备或电力系统的额定电压和额定电流的乘积，称为视在功率，即

$$S = UI$$

它表示电器设备（发电机、变压器等）容量的一种功率，也称表现功率。它的单位常用 VA（伏安）或

kVA(千伏安),以区别于有功功率的单位 W 与 kW。

## 六、温差电现象

### 1. 泽贝克效应

将两种不同金属 A 和 B 接成闭合回路,并在两个接头处保持不同的温度  $T_1$  和  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ),则在回路中有电流通过,也就是在回路中产生了电动势。这一现象称为泽贝克(T. J. Seebeck)效应。这种电动势称为温差电动势。

当温度变化范围不大时,温差电动势  $\epsilon_{AB}$  与温度差( $T_1 - T_2$ )的关系近似地表示为

$$\epsilon_{AB} = a(T_1 - T_2) + b(T_1 - T_2)^2,$$

式中  $a$  和  $b$  是与两种金属性质有关的常量。金属的温差电效应较小,温差电动势率约为  $10\mu\text{V}/\text{K}$ ;而半导体中常为  $10^2\mu\text{V}/\text{K} - 10^3\mu\text{V}/\text{K}$ 。因此,金属中的泽贝克效应主要用于温差电偶,用作温度计;而半导体可用于温差发电。

### 2. 佩尔捷效应

佩尔捷(J. C. A. Peltier)效应是泽贝克效应的逆效应,当电流通过两种不同金属的连接处时,在连接处会出现与电流流向有关的放热和吸热的现象。

在单位时间内,接头处单位面积吸收的热量  $\frac{dQ}{dt}$  与通过接头处的电流密度成正比,

$$\frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB}j,$$

式中  $\Pi_{AB}$  称为电流由 A 到 B 的佩尔捷常量,与接头处材料的性质及温度有关,  $\Pi_{BA} = -\Pi_{AB}$ 。佩尔捷效

■ 应可用于致冷。

### 3. 汤姆孙效应

当电流通过有温度梯度的导体时,导体中除放出焦耳热外,还将另外放出或吸收热量。这一现象称为汤姆孙(W. Thomson)效应。当电流顺着温度下降方向通过导体时,导体中的电能转换为汤姆孙热而放出;当电流逆着温度下降的方向通过导体时,导体将吸收汤姆孙热而转换为电能。

当两种不同金属连接成一闭合回路时,上述三种效应可同时存在。

# 第六篇 光 学

## 第十五章 几何光学

### 一、几何光学基本定律

#### 1. 光线的传播规律

##### (1) 光的直线传播定律

光在均匀介质中沿直线传播。

##### (2) 光的独立传播定律

两束光在传播途径中相遇时互不干扰,仍按各自的途径继续传播;而当两束光汇聚于同一点时,在该点上的光能量是简单相加。

##### (3) 反射定律和折射定律

光传到两种不同介质的界面时,一部分反射,另一部分折射。反射光线和折射光线的传播方向分别由反射定律和折射定律决定。

① 反射定律:反射线在入射线和界面法线所决定的平面内;反射线和入射线分居在法线的两侧;反射角等于入射角。



② 折射定律:折射线在入射线和界面法线所决定的平面内;折射线和入射线分居在法线的两侧;入射角的正弦与折射角的正弦之比,与入射角无关,是一个与介质和光的波长有关的常数,即

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad \text{或} \quad n_1 \sin i = n_2 \sin r。$$

比例常数  $n_{21}$  称为第二种媒质相对于第一种媒质的折射率。

### 2. 全反射

当光从光密介质射向光疏介质时,折射角总大于入射角,当入射角增大到某一数值

$$i_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

时,折射角等于  $90^\circ$ 。当入射角大于  $i_c$  时,折射线消失,光全部反射回原介质。这现象称为全反射。 $i_c$  称为全反射临界角。

根据波动理论,全反射时,仍有光波进入第二介质,它沿两介质的分界面传播,其振幅随离开分界面的距离按指数衰减。一般来说,进入第二介质的深度约为一个波长,人们把这样的波称为衰逝波。进入第二介质的光波的瞬时能流不为 0,而平均能流为 0。因而,全反射时,入射波的能量不是在严格的分界面上全部反射的,而是穿透到第二介质内一定深度后逐渐全部反射的。

### 3. 棱镜与色散

#### (1) 棱镜的偏向角

入射线与出射线间的夹角称为偏向角。

光通过棱镜的偏向角为

$$\delta = i_1 + i_2 - \alpha,$$

式中  $\alpha$  为棱镜的顶角,  $i_1$  与  $i_2$  分别为入射角与出射角(图 15.1)。

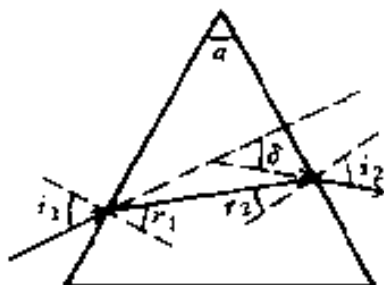


图 15.1

对于给定的顶角  $\alpha$ , 偏向角  $\delta$  随入射角  $i_1$  而变, 在某一  $i_1$  时, 偏向角有最小值  $\delta_{\min}$ , 称为**最小偏向角**。产生最小偏向角的充要条件是

$$i_1 = i_2 \quad \text{或} \quad r_1 = r_2,$$

在此情况下, 棱镜的折射率

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}.$$

在顶角  $\alpha$  已知的条件下, 通过最小偏向角的测量, 可以算出棱镜的折射率。

## (2) 棱镜的色散

当一束白光或非单色光射入棱镜时, 由于折射率不同, 不同波长的光具有不同的偏向角, 从而出射线方向不同, 通常棱镜的折射率  $n$  是随波长  $\lambda$  的减小而增加的, 所以可见光中紫光偏折最大, 红光偏折最小(图 15.2)。利用棱镜的色散可以分析光谱。

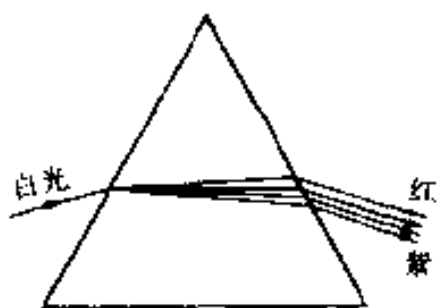


图 15.2

#### 4. 光路可逆原理

对于光在两种介质的分界面上的反射和折射,如果光线逆着原来反射线的方向或折射线方向射到界面时,它就可以逆着原来入射线的方向反射或折射,即当光线的方向反转时,光将循原路径逆向传播,这称为光路可逆原理。

### 二、费马原理

#### 1. 光程

光程是一个折合量,即把光在介质中传播的路程折合为在传播时间相同的条件下光在真空中传播的路程。在数值上,光程等于光在介质中传播的几何路程  $l$  与该介质折射率  $n$  的乘积,即

$$L = nl_0$$

当一束光连续经过几种介质时,光程为

$$L = \sum_i n_i l_i$$

#### 2. 费马原理表达式

光从空间的一点到另一点是沿着光程为极值的路径传播。这是费马(P. de Fermat)于1657年首先提出的,称为费马原理,或称光程最短定律。其表达

式为

$$\int_A^B n dl = \text{极值} \quad \text{或} \quad \delta \int_A^B n dl = 0,$$

即光线在实际路径上光程的变分为零。

直线是两点间最短的线,如果光线在同一介质中从 A 点传播到 B 点,那么光线的直线传播定律是费马原理的简单推论。反射定律和折射定律同样也可由费马原理导出。

### 3. 物像之间的等光程性

薄透镜在近轴条件下,轴上物点到像点各光线的光程相等。

## 三、光学系统的近轴成像

### 1. 光在单个球面上的折射和反射

#### (1) 球面反射的高斯物像公式

设反射球面的曲率半径为  $R$ ,  $S$  和  $S'$  分别为从球面顶点量起的物距和像距(图 15.3),球面反射的物像公式为

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R}.$$

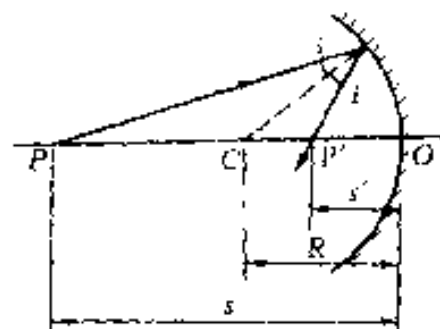


图 15.3

反射球面的物像两方焦点重合,焦距为

$$f' = f = \frac{R}{2}。$$

## (2) 球面折射的高斯物像公式

球面折射的高斯物像公式为

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R},$$

式中  $n$  和  $n'$  分别是入射线和折射线介质的折射率 (图 15.4)。折射球面物方焦距 (也称前焦距或第一焦距)  $f$  和像方焦距 (也称后焦距或第二焦距)  $f'$  分别为

$$f = -\frac{n}{n' - n}R, \quad f' = \frac{n'}{n' - n}R。$$

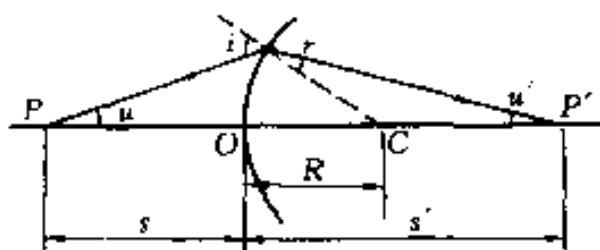


图 15.4

物方焦点和像方焦点在球面两侧,且有

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n},$$

故折射球面的物、像两方焦点对球面顶点是不对称的。

## (3) 正负号规则

应用上述公式时,应注意正负号的规定 (读者注意:不同参考书规定的符号不尽相同)。

① 沿主轴的线段:以入射光线进行方向为正方向,各线段从球面顶点量起,其方向与入射光线相同

的,取为正;方向相反的,取为负。

② 垂直主轴的线段:在主轴之上的为正,在主轴以下的为负。

③ 角度:一般量度锐角时,从主轴或法线转向光线,顺时针向的夹角为正,逆时针向的夹角为负。

#### (4) 牛顿物像公式

若物方和像方的焦距  $f$  和  $f'$  仍从球面顶点量起,而物距  $x$  和像距  $x'$  分别从相应一方的焦点量起,正负号规则不变,则高斯物像公式变为牛顿物像公式为

$$xx' = ff'.$$

#### (5) 放大率

① 横向放大率:像高  $y'$  与物高  $y$  之比称为横向放大率,也称垂轴放大率。有

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{ns'}{ns}, \quad (\text{高斯公式});$$

$$\beta = -\frac{x'}{f} = \frac{f}{x}, \quad (\text{牛顿公式}),$$

按正负号规则代入数据。对于折射球面,在实物的情况下, $\beta$  为正,表示成正立虚像; $\beta$  为负,表示成倒立实像。在虚物的情况下, $\beta$  为正,表示成正立实像; $\beta$  为负,表示成倒立虚像。

② 纵向放大率:当物沿主轴移动距离  $ds$  (或  $dx$ ) 时,像沿主轴移动距离  $ds'$  (或  $dx'$ ), 则定义  $\frac{ds'}{ds}$  或  $\frac{dx'}{dx}$  为纵向放大率或轴向放大率。有

$$\alpha = \frac{ds'}{ds} = \frac{ns'^2}{n's^2}, \quad (\text{高斯公式});$$

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}, \quad (\text{牛顿公式}).$$

③ 角放大率: 设轴上物点发出的近轴光线的倾角(与主轴夹角)为  $u$ , 折射线线的倾角为  $u'$ , 则定义  $\gamma = \frac{u'}{u}$  为角放大率。有

$$\gamma = \frac{s'}{s}, \quad (\text{高斯公式});$$

$$\gamma = \frac{f}{x'} = -\frac{x}{f}, \quad (\text{牛顿公式}).$$

## 2. 薄透镜

### (1) 透镜焦距公式

设透镜材料的折射率为  $n$ , 透镜前、后(物方和像方)介质的折射率为  $n_1$  和  $n_2$ , 透镜前、后两球面的曲率半径为  $r_1$  和  $r_2$ , 薄透镜物、像方的焦距为

$$f = \frac{n}{\frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_2}}, \quad f' = \frac{n_2}{\frac{n - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n}{r_2}}.$$

如物、像两方为空气,  $n_1 = n_2 \approx 1$ , 则

$$f = f' = \frac{1}{(n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}.$$

此透镜焦距公式常称为磨镜者公式。

### (2) 薄透镜的物像公式

#### ① 高斯物像公式:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f},$$

式中  $s$  为物距, 实物的物距为正, 虚物为负;  $s'$  为像距, 实像的像距为正, 虚像为负;  $f$  为焦距, 凸透镜的

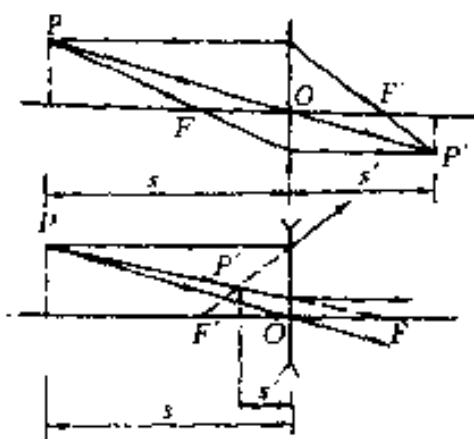


图 15.5

焦距为正,凹透镜为负。

② 牛顿物象公式:

$$xx' = ff',$$

式中  $x$  为从物方焦点  $F$  起算的物距,  $x'$  为从像方焦点  $F'$  起算的像距,并规定当物点在  $F$  之左,则  $x$  为正;在  $F$  之右,  $x$  为负,当像点在  $F'$  之左,则  $x'$  为负,在  $F'$  之右,  $x'$  为正。

(3) 薄透镜的放大率

① 横向放大率:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}, \quad (\text{高斯公式});$$

$$\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}, \quad (\text{牛顿公式}).$$

② 纵向放大率:

$$\alpha = \left(\frac{s'}{s}\right)^2, \quad (\text{高斯公式});$$

$$\alpha = -\frac{x'}{x}, \quad (\text{牛顿公式}).$$

(4) 薄透镜的光焦度

薄透镜的光焦度定义为像方焦距的倒数。密接



复合透镜的光焦度是组成它的透镜光焦度之和。

光焦度的单位是屈光度 (diopter, 符号为  $D$ )。应注意,通常眼镜的度数是屈光度的 100 倍。例如,200 度的眼镜,光焦度为  $2D$ ,其焦距为  $50.0\text{cm}$ 。

#### 四、像差

像差是光学系统所成的像与原物的面貌存在偏差的现象。像差可分为单色像差和色像差两大类。单色像差有球面像差、彗形像差、像散、像场弯曲和畸变五种;色像差又分轴向(纵向)和横向两种。

##### 1. 球面像差

当透镜或球面镜的孔径较大时,从光轴上一物点发出的光束,经透镜或球面镜反射或折射后不再交于一点,呈现弥散的光斑(图 15.6),这现象称为球面像差,简称球差。

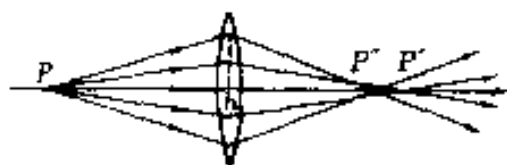


图 15.6

适当调配单个薄透镜球面的曲率,或选择适当的透镜组合,或有时为了特殊需要也可采用非球面透镜,可以消除球面像差。

##### 2. 彗形像差

不在光轴上的物点发出的宽光束,经光学系统反射或折射所成的像,在像平面上不成点像,而形成一锥状弥散斑(图 15.7),因其形状像彗星,故称这现象为彗形像差,又简称彗差。

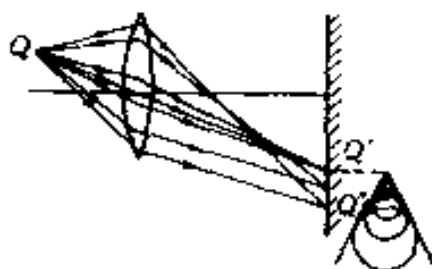


图 15.7

对给定物距,可用适当调配镜面曲率方法消除单个透镜的彗差,也可改变光阑(限制光束的孔)位置或用胶合透镜来消除彗差。

### 3. 像散

远离主轴上一点发出的窄光束,经光学系统反射或折射后不能聚焦于一点,而汇聚于两条远近不同且互相垂直的焦线上,这现象称为像散。

像散现象则需通过复杂的透镜组来消除。

### 4. 像场弯曲

垂直于主轴的物平面上的所有点经光学系统后所成的清晰的像不是一个平面,而是一个曲面(图 15.8),这现象称为像场弯曲,又简称场曲。

像场弯曲可通过选配透镜两表面的曲率,或在透镜前适当位置放一光阑来矫正。

### 5. 畸变

物上的直线经光学系统成像后变为弯曲的现象(图 15.9),称为畸变。

畸变是由光学系统的放大率随光束和光轴间所成的角度改变而造成的。如图 15.9(a)是放在物平面内的方格,若远光轴区域的放大率比光轴附近大,在像平面内会出现如图(b)的情景,这现象称为枕形

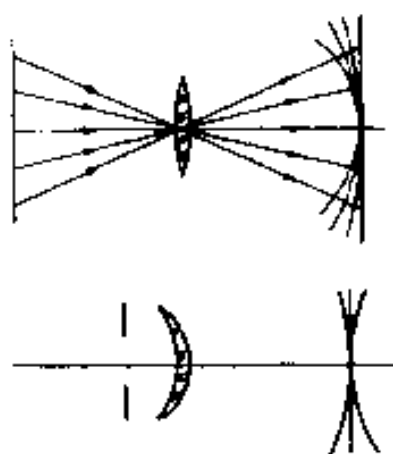


图 15.8

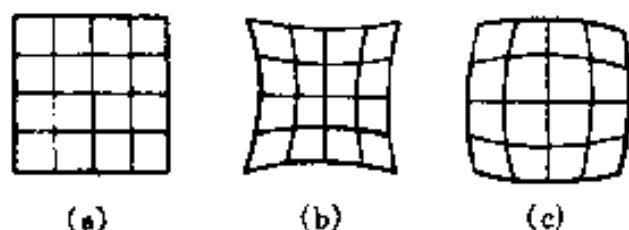


图 15.9

**畸变(也称正畸变)**;反之,若远光轴区域的放大率比光轴附近小,在像平面内就会出现如图(c)的情景,这现象称为**桶形畸变(也称负畸变)**。

在对称透镜中心放置一光阑,就可以使两种相反的畸变互相抵消。

### 6. 色像差

复色光经光学系统折射后所成的像的边缘呈彩色模糊的现象,称为**色像差**,简称**色差**。

同一透镜对不同色光的折射率不同,焦距也不同,而像的位置与大小又决定于焦距,所以从物点发出的不同色光不能成像于一点。例如,图 15.10 (a), $P$  为复色光在透镜光轴上的一物点,由近轴光

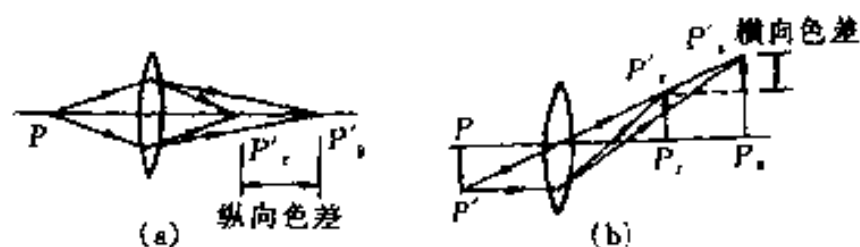


图 15.10

束所成的像因色散而会聚在轴上不同位置,红光成像于  $P'_R$ ,紫光成像于  $P'_V$ , $P'_R$  与  $P'_V$  之间的距离称为纵向色差(即位置色差)。透镜的焦距又因入射光波长的改变而引起横向放大率随波长发生改变,使垂直于轴的物  $PP'$  因不同色光经透镜所造成的红色像和蓝色像不仅位置不同,且大小  $P'_R P'_R$  和  $P'_V P'_V$  也不相等。如图(b)所示。此两像的高度差称为横向色差(即放大色差)。

一般利用不同玻璃材料制成的薄凹、凸透镜组合来消除色差。

## 五、光度学

### 1. 辐射能通量和光通量

#### (1) 辐射能通量

光度学是研究可见光能量计量的学科。而研究各种波长辐射能的计量的学科则称为辐射(量)度学,光度学是辐射度学的一部分。辐射能通量是辐射度学中的最基本量。单位时间内光源发出或通过一定截面接收的辐射能,称为辐射能通量,也称辐射功率。

#### (2) 视见函数

具有相同辐射能通量的不同波长的辐射,在视

觉上引起的明亮程度并不相同,即不同波长的光对人眼的敏感度不同、波长为 555nm 左右的黄绿光对人眼最为敏感。某一波长的光为 555nm 波长的光产生同样亮暗感觉所需辐射能通量之比,即

$$V(\lambda) = \frac{\Psi_{555}}{\Psi_{\lambda}},$$

称为视见函数。视见函数表见附录 C 表 V-14。

### (3) 光通量

光通量表示光源表面的客观辐射能通量对人眼引起的视觉强度,它等于单位时间内某一波段( $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ )的辐射能通量与该波段的视见函数的乘积,即

$$d\Phi_{\lambda} = V(\lambda)d\Psi_{\lambda},$$

光通量的单位为流明(lumen),简称“流”,符号为 lm。流明定义为发射波长为 555nm 光的单色光源,当其辐射能通量为 1W 时,则其光通量等于 683lm。两者关系为

$$1\text{W} = 683\text{lm} \quad \text{或} \quad 1\text{lm} = 0.00146\text{W}。$$

流明与瓦特之间的换算关系随光的波长不同而变化。对于其他任何波长的单色光,则有

$$1\text{W} = 683 \times V(\lambda)\text{lm}。$$

光源的发光效率定义为每瓦电功率所能产生的光通量数。

## 2. 发光强度和亮度

### (1) 发光强度

发光强度是描述光源在一定方向范围内发出的可见光辐射强弱的物理量,它等于光源沿某一方向上单位立体角内发出的光通量,即

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

发光强度的单位为坎德拉(candels),简称“坎”,符号为cd,它是国际单位制的七个基本单位之一(参见第一章)。

### (2) 亮度

亮度表示发光面发光强弱的物理量,它等于发光面  $dS$  在某一方向  $r$  的发光强度  $I$  除以发光面在该方向的投影面积(称为表观面积)(图 15.11),即

$$B = \frac{dI}{dS \cos\theta} = \frac{d\Phi}{dS \cos\theta}$$

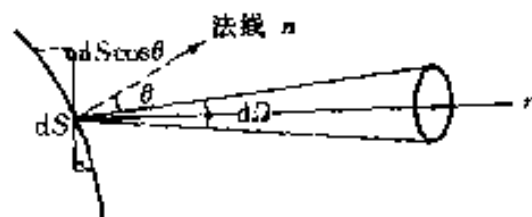


图 15.11

上式表明,发光表面在某方向上的亮度等于该方向上单位投影面积在单位立体角内发出的光通量。

亮度的单位为  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,此外还有  $\text{lm}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  或  $\text{lm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

### (3) 余弦发射体和定向发射体

如果一扩展光源的发光强度  $dI \propto \cos\theta$ ,从而其亮度  $B$  与方向无关,即从各方向来看,面积元都是一样亮的,这类发射体称为余弦发射体,或朗伯(J. H. Lambert)发射体。

另一类发射体,它们发出的光束集中在一定的立体角内,即亮度有一定的方向性,这类发射体称为定向发射体。激光器发出的光束通常是截面积很小

而高度平行,从而用不大的辐射功率可获得极大的辐射亮度。例如 10mW 的氦氖激光器,光束截面为  $1\text{mm}^2$ ,光束发散角为  $2'$ 。由此算得辐射亮度  $B \simeq 10^{10}\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ,而太阳的辐射亮度  $B \simeq 3 \times 10^6\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ,亦即 10mW 功率的激光器的辐射亮度比太阳大几千倍。

### 3. 照度

照度是受照面被照明程度的物理量,它可用光入射在单位面积上的光通量来量度(图 15.12),即照度为

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

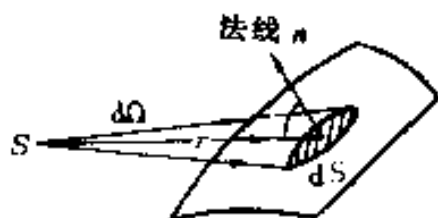


图 15.12

对点光源:

$$E = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \cos\theta}{r^2},$$

即照度反比于光源到受照面距离  $r$  的平方,而正比于光束轴线方向  $r$  与受照面法线  $n$  间夹角的余弦。上式称为照度平方反比定律,它是光度学测量的基本公式。

照度的单位为勒克斯(lux),符号为 lx,或辐透(phot),符号为 ph。

$$1\text{lx} = \frac{1\text{lm}}{1\text{m}^2}, \quad 1\text{ph} = \frac{1\text{lm}}{1\text{cm}^2};$$

$$1lx = 10^{-4}ph_s$$

如果把照度公式中的光通量换成辐射能通量,即可得辐射照度,其单位为  $W/m^2$  或  $W/cm^2$ 。

## 六、色度学

### 1. 颜色视觉

#### (1) 颜色的产生

颜色来源于光,色觉是人的视觉器官对光作用在大脑中的一种反映,有光才有色,光一旦消失,色彩也随之消失。

人眼之所以能感觉到物体的颜色,因为人眼视网膜里包含着对色彩产生不同感觉的神经细胞,其中有受到波长为  $400nm \sim 500nm$  的光刺激后产生蓝色感觉的细胞,受到波长为  $500nm \sim 600nm$  的光刺激后产生绿色感觉的细胞,受到波长为  $600nm \sim 700nm$  的光刺激后产生红色感觉的细胞。人眼能感知和辨认的每一种颜色都能用红、绿、蓝三种颜色调配出来。在光度学中,将红( $700nm$ )、绿( $546nm$ )和蓝( $436nm$ )称为三原色。

#### (2) 颜色的三要素

人的视觉器官对光的颜色的感觉可分为非彩色和彩色两类。非彩色是指由白色、黑色和各种深浅不同的灰色所组成的系列,称为黑白系列。当物体表面对可见光谱中所有波长的反射率都为 100% 时,该物体为纯白色;当反射率为零时为纯黑色;介于两者之间的是不同程度的灰色。

彩色是指除了白、黑和灰以外的各种颜色,鉴别色彩的标准有色调、明度和饱和度三个特征。



① 色调:色调是区分各种色彩的标志。在可见光谱中,不同波长的光射到视觉感受体上表现为各种色调。具体地讲,色调也就是各种不同颜色的名称,如红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等。

② 明度:明度是指人眼对物体的明暗所产生的感觉。同一颜色,由于其明度不同,看上去就有深浅的区别。不同的颜色,在相同的照度下,因反射率不同而具有不同的明度。

③ 饱和度:饱和度也称彩度,它是指彩色的纯洁程度。可见光谱中的各种单色光是饱和度最大的彩色。饱和度也表征色彩的鲜艳程度。色彩越鲜艳,饱和度越大。颜色的饱和度决定于物体的反射或透射的特性。

### (3) 颜色的混合

将两种以上颜色混合后,可以得到一种新的颜色,颜色的混合,具有以下规律:

① 若两种颜色按适当的比例混合后,能得到一种非彩色(白色或灰色),则这两种颜色称为互补色。如红与青、绿与品红、黄与蓝等都是互补色。

② 任何两种非互补色的颜色相混合后,将得到一种中间色。其色调决定于两种颜色的相对比例。如红色与绿色混合后产生黄色。红色多、绿色少,产生橙色。

③ 两种相同的颜色各自与另外两种相同的颜色相加混合后,颜色仍相同。例如,颜色 A 与 B 相同,颜色 C 与 D 相同,则 A 和 C 混合后得到的颜色与 B 和 D 混合后得到的颜色是相同的。这称为颜色的替代律。

④ 混合色的总亮度等于组成混合色的各种色光亮度的总和。

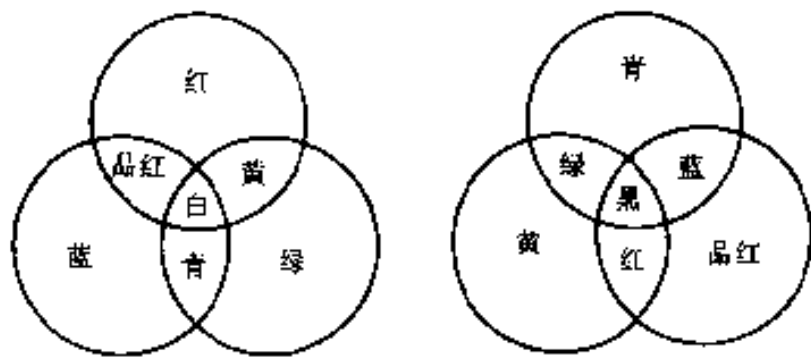
上面所给出的颜色的光学混合规律,是对色光的混合而言,这种混合是一种相加的混合,也称为加色混合法。

应该指出,色光的混合与颜料的混合完全不同,颜料的混合是由于不同波长的光线在所混合的颜料中被吸收而引起的。这种混合是相减混合,也称减色混合法。

彩色颜料对光的选择性反射,是颜色的相减过程。例如红色的颜料是吸收了白光中大量的蓝色和绿色,只反射红色,也就是从入射光中减去了蓝色和绿色。

颜料的原色也是不同的,在减色法混合中的三原色为加色法三原色的补色,即青、品红和黄。

加色法和减色法的颜色的混合如图 15.13 所示。



(a) 按加色法的彩色合成 (b) 按减色法的彩色合成

图 15.13 颜色的混合

## 2. 光源的颜色和物体的颜色

### (1) 光源的颜色

光源的颜色是光源的表观颜色,是人眼直接观察光源时所看到的颜色。在照明应用领域里,常用**颜色温度**(简称**色温**)来定量描述。一个光源的颜色温度是指这个光源所发出的光的颜色与某一温度下黑体所发出的颜色相同,则黑体的这个温度就是光源的颜色温度。

## (2) 物体的颜色

物体的颜色是物体在光源照明下所呈现的颜色。物体的颜色除了与其本身的反射特性有关外,还与光源的光谱成分有关。由于光源的光谱特性不同,引起同一物体在不同光源照明下呈现不同颜色的特性称为光源的**显色性**。一般公认中午的日光是理想的标准光源,其显色指数规定为 100,其他光源的显色指数均小于 100。

光源的显色性直接影响到人眼所观察到的物体的颜色,在纺织、印染、印刷、彩色摄影、彩色电视、建筑装饰等方面都有着重要意义。

光源的颜色或物体的色彩与人的生理作用和心理作用有关。生理作用主要是指视觉的疲劳程度,心理作用是颜色给人们以冷、暖的感觉,故有暖色和冷色之分。

## 第十六章 波动光学

### 一、光波的叠加

#### 1. 光波的叠加原理

几列波在传播过程中在某一区域相遇,在相遇区域内,任一点处的振动为各波单独存在所引起的振动的合振动。对于光波,其合成光波的光矢量  $E$  等于各分光波的光矢量  $E_1, E_2, \dots$  的矢量和,即

$$E = E_1 + E_2 + \dots$$

这一规律称为光波的叠加原理。

对于在介质中传播的强光(例如电场强度高达  $10^{12} \text{V/m}$  的激光),将出现一些“非线性效应”,光波叠加原理就不再适用(参看第十七章)。

#### 2. 光的相干叠加和非相干叠加

当两束光波相遇时,在光波重叠区,某些点合成光强大于分光强之和,在另一些点,合成光强小于分光强之和。合成光波的光强在空间形成有规律的强弱相间的稳定分布。光波的这种叠加称相干叠加。能产生相干叠加的两束光称为相干光。相干叠加必须满足的条件称为相干条件。

如果两束光不满足相干叠加条件,则在光波的重叠区,合成光强等于分光强之和,没有干涉现象产生。此时两光束的叠加称为非相干叠加。

设有两列光波  $E_1$  和  $E_2$ , 在  $P$  处相遇, 则合成光矢量为

$$E = E_1 + E_2,$$

从而得

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2.$$

由于光强正比  $E^2$  对时间的平均值, 故有

$$I = I_1 + I_2 + 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle,$$

式中  $I_1, I_2$  为两光源独立在  $P$  处产生的光强。对于平面波, 且在传播过程中无能量损耗,  $I_1$  和  $I_2$  也就是光源的光强。式中第三项  $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle$  称为相干项, 它决定两光波叠加的性质。符号  $\langle \rangle$  表示对时间求平均。

若  $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0$ , 则为非相干叠加,  $I = I_1 + I_2$ 。

若  $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle \neq 0$ , 则为相干叠加。

### 3. 光的相干条件

两束光产生干涉的条件有

- ① 频率相同。
- ② 相位差恒定。
- ③ 光矢量振动方向平行。

(振幅相等或接近是得到干涉条纹清晰度的补充条件。)

因为当两光矢量互相垂直, 或两光波频率不相等, 或两光波的相位差不恒定, 这三种情况存在时, 干涉项  $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0$ 。

### 4. 获得相干光的方法

一般光源发出的光波是由光源中各个分子或原

子发出的波列组成的,这些波列之间没有固定的相位联系。因此两个独立光源的光波,即使是频率相同、振动方向平行,但它们的相位差不可能保持恒定,因而不满足相干条件。同一光源的两个不同部分发出的光也不满足相干条件。因此,只有从同一光源的同一部分发出的光,通过某些装置进行分束后,才能获得符合相干条件的相干光。

获得相干光的方法可分成两类:

(1) 分波面法

将点光源的波前分割为两部分,使之分别通过两个光具组,经衍射、反射或折射后交叠起来,在一定区域内产生干涉区域。如杨氏实验等。

(2) 分振幅法

当一束光投射到两种透明介质的分界面上时,光能一部分反射,一部分透射,通过不同光程再叠加,这方法叫作分振幅法。如薄膜干涉实验等。

## 二、杨氏双缝干涉

### 1. 干涉明暗条纹的位置

设相干光源  $S_1$  与  $S_2$  之间的距离为  $d$ (图 16.1),

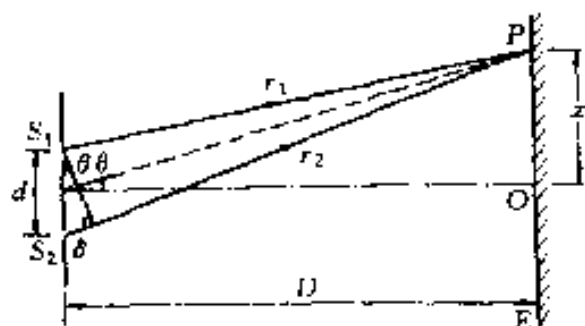


图 16.1

从  $S_1$  与  $S_2$  发出的光, 到达屏上任一点  $P$  的光程差为

$$\delta = r_2 - r_1 = \frac{xd}{D},$$

当  $\delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$ , ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 或  $x = \pm 2k \frac{D\lambda}{2d}$  时,  $P$  点的光强最大, 形成明条纹。

当  $\delta = \pm (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$ , ( $k=1, 2, \dots$ ) 或  $x = \pm (2k - 1) \frac{D\lambda}{2d}$  时,  $P$  点的光强最小, 形成暗条纹。

相邻明条纹或相邻暗条纹之间距  $\Delta x$  为

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{d}.$$

对于一定波长  $\lambda$  的单色光, 相邻条纹间距相等。

## 2. 双缝干涉的光强分布

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi,$$

式中相位差

$$\Delta \varphi = \varphi_{10} - \varphi_{20} - \frac{2\pi(r_1 - r_2)}{\lambda}.$$

$\varphi_{10} - \varphi_{20}$  为两光波的初相差。因  $S_1$  与  $S_2$  相对于  $S$  对称, 可认为  $\varphi_{20} = \varphi_{10}$ , 又因  $r_1$  与  $r_2$  极为接近, 可

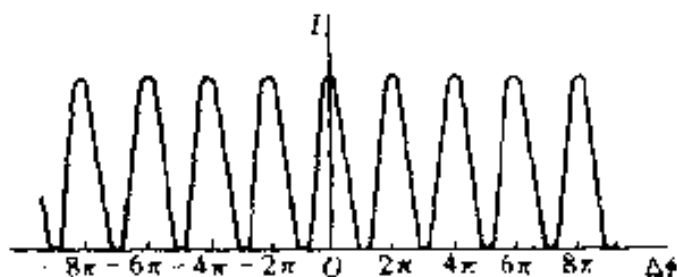


图 16.2

认为在  $P$  点有  $I_1 = I_2 = I_0$ ,

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi d \sin\theta}{\lambda} \right).$$

干涉现象的光强分布如图 16.2 所示。

### 三、薄膜干涉

在阳光的照射下,肥皂膜、水面上的油膜、许多昆虫(如蜻蜓、蝉、甲虫等)的翅膀、车床上切削下来的钢铁碎屑,都呈现彩色的花纹,这是薄膜上产生的干涉现象引进的。这种干涉现象称为薄膜干涉。

#### 1. 等倾干涉条纹

设厚度为  $d$ 、折射率为  $n$  的均匀平面薄膜,置于上、下方折射率为  $n_1$  和  $n_2$  的环境中(图 16.3),从扩展光源上任意一点  $S$  发出的光,以入射角  $i$  射到薄膜上,经薄膜上下两表面反射后,得到相互平行两相干光,经透镜汇聚于其焦平面上的  $P$  点,两相干光的光程差为

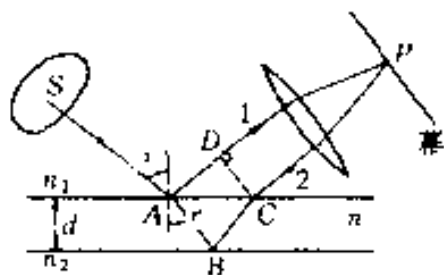


图 16.3

$$\delta = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta',$$

式中  $\delta'$  等于  $\frac{\lambda}{2}$  或 0, 由光束在薄膜上、下表面反射时有无附加的光程差决定。当满足  $n_1 > n > n_2$  或  $n_1 < n < n_2$  时,不存在附加光程差;当满足  $n_1 > n < n_2$  或  $n_1 < n > n_2$  时,要考虑附加的光程差  $\frac{\lambda}{2}$ 。

对于厚度均匀的薄膜,凡以相同的入射角  $i$  (或



倾角)的入射光有相同的光程差,它们将构成同一条干涉条纹,因此此类干涉条纹称为等倾干涉条纹。

决定薄膜等倾干涉条纹位置的关系为  
明纹:

$$2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = k\lambda, (k=1,2,3\cdots);$$

暗纹:

$$2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda, (k=0,1,2,\cdots).$$

观察等倾干涉条纹的实验装置如图 16.4 所示。

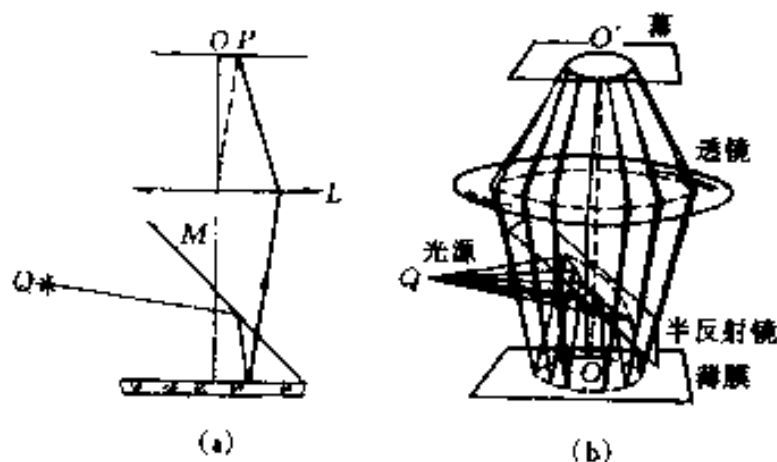


图 16.4

在屏幕上所看到的是以  $O'$  点为中心的同心圆,圆心处的干涉级  $k$  最高,越向外的圆环纹干涉级越低。中央环纹的间距较大,环纹较稀疏,越向外,环纹的间距越小,环纹较密集。

## 2. 等厚干涉条纹

### (1) 劈形膜

如果薄膜的厚度不均匀而呈劈尖状,例如两平面玻璃片的一端夹一薄纸片所形成空气膜就是劈形膜(图 16.5(a))。膜的两个表面间有一极小的夹角

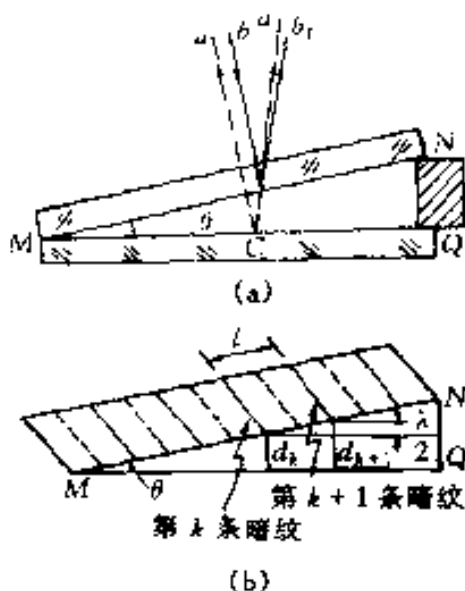


图 16.5

$\theta$ 。当平行光垂直入射到劈形膜上时,设入射点处膜的厚度为  $d$ ,则在劈尖上下表面反射的两束光之间的光程差为

$$\delta = 2nd + \delta'。$$

干涉明纹和暗纹的条件为

明纹:

$$2nd + \delta' = k\lambda, (k = 1, 2, 3, \dots);$$

暗纹:

$$2nd + \delta' = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, (k = 0, 1, 2, \dots)。$$

干涉条纹为平行于劈尖棱边的直线条纹(图 16.5(b))。每一明、暗条纹都与一定的  $k$  值相联系,也就是每一明、暗都对应相同厚度的膜,这种干涉条纹称为等厚干涉条纹。任何两相邻明纹或暗纹之间的距离为

$$l = \frac{\lambda}{2n\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$

■ 即等厚干涉条纹是等间距的。

如果已知入射光的波长,就可以测出微小的角度。利用这个原理,工程技术上常用来测定细线的直径或薄片的厚度。在制造半导体元件时,用化学方法把硅片上的二氧化硅薄膜一部分腐蚀掉,使它成为劈尖形状,用已知波长的单色光垂直照射二氧化硅的劈尖上,在显微镜里测定干涉条纹的间距,就可精确地测量出二氧化硅薄膜的厚度。利用等厚干涉条纹,还可用来检查工件的平整度,根据干涉条纹的形状判知零件表面的起伏情况。

### (2) 牛顿环

在一块平玻璃片上放一曲率半径很大的平凸透镜,两者之间形成一个圆盆形的空气薄层(图16.6)。用平行光束垂直地射向透镜时,可以观察到以接触

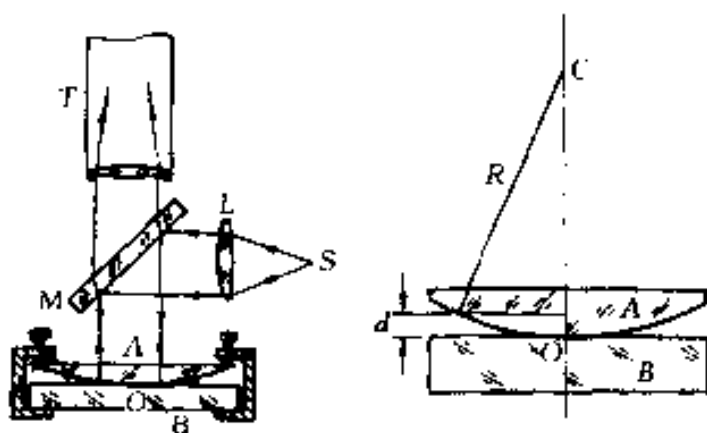


图 16.6

点O为中心的同心圆环,这种干涉条纹也是等厚干涉条纹,称为牛顿环。这些环不是等间距的,而是内层环疏,外层环密。

明环:

$$r = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2}}, (k=1,2,3,\dots);$$

暗环:

$$r = \sqrt{kR\lambda}, (k=0,1,2,\dots)。$$

式中  $R$  为平凸透镜的曲率半径。在实验中,可以利用牛顿环来测量透镜的曲率半径;在生产上,牛顿环常用来检验透镜的质量。

### 3. 增透膜的高反射膜

#### (1) 增透膜

在比较复杂的光学系统中,光的能量因反射而损失较多。为了减少损失,常在镜面上镀上一层厚度均匀的透明薄膜(常用的如氟化镁  $\text{MgF}_2$ , 它的折射率  $n =$

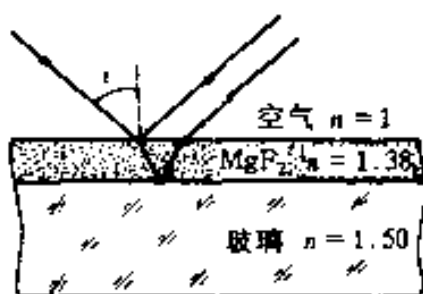


图 16.7

1.38, 介于玻璃与空气之间), 利用薄膜的干涉使反射光减到最小, 这样的薄膜称为增透膜(图 16.7)。

设膜的厚度为  $d$ , 光垂直入射时, 反射光干涉相消的条件为

$$\delta = 2nd = (2k+1) \frac{\lambda}{2}, (k=0,1,2,\dots),$$

即膜的厚度

$$d = (2k+1) \frac{\lambda}{4n}。$$

在镀膜工艺中, 常把  $nd$  称为薄膜的**光学厚度**。镀膜时控制膜的厚度, 使膜的光学厚度等于入射光波

长的  $1/4$ 。

单层增透膜只能使某一特定波长的光尽量减小反射,而对相近波长的其他反射光也有不同程度的减弱。对于照相机镜头上的镀膜,常把控制波长选在人眼最敏感的波长  $\lambda = 550\text{nm}$  处(约绿黄色),在白光下观察,黄绿色反射最弱,红光蓝光相对强一些,因此呈现蓝紫色。

### (2) 高反射膜(或增反膜)

有些光学器件需要提高反射率,例如氦氖激光器中谐振腔的反射镜,要求对波长  $\lambda = 632.8\text{nm}$  的单色光的反射率达 99% 以上。这可在玻璃上镀上一层高折射率(例如,硫化锌、 $\text{ZnS}$ , 折射率  $n = 2.40$ )、光学厚度等于  $\lambda/4$  的薄膜,使薄膜上下表面的两反射光干涉加强,这就使反射光增强了。这样的薄膜就是增反膜或高反射膜。

单层薄膜不能使透射光完全相消,反射率达 30% 左右。为了进一步提高反射率,可采用多层膜(图 16.8)。通常在玻璃表面交替镀上高折射率的硫化锌  $\text{ZnS}$  膜和低折射率的氟化镁  $\text{MgF}_2$  膜,每层光学厚度均为  $\lambda/4$ 。一般镀到 7 层、9 层,有的多达 15 层、17 层。由于这些介质膜对光的吸收很少,所以比镀银、镀铝的反射镜有更佳的效果。

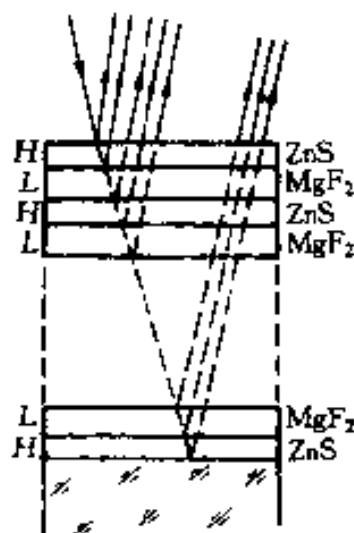


图 16.8

利用类似的方法,采用多层镀膜使某一特定波长的

单色光能透过,这就制成了干涉滤光片。

#### 四、迈克尔孙干涉仪

干涉仪是近代精密仪器之一,在科学技术方面有着广泛的应用。干涉仪有各种型式,迈克尔孙(A. A. Michelson)干涉仪是一种比较典型的干涉仪,它是很多近代干涉仪的原型。

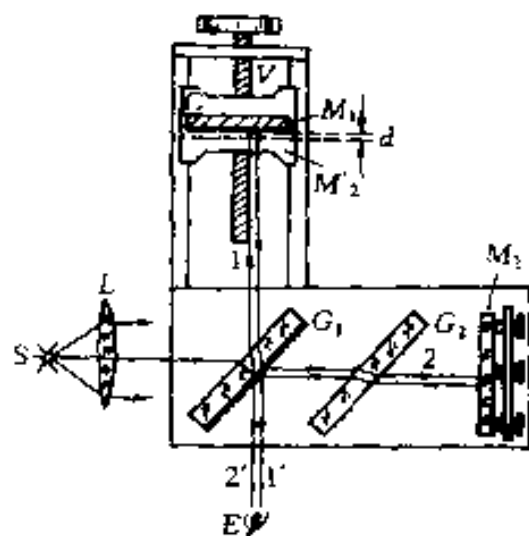


图 16.9

迈克尔孙干涉仪的构造如图 16.9 所示。 $M_1$  与  $M_2$  是两片精密磨光的平面反射镜,其中  $M_2$  是固定的, $M_1$  用螺旋控制可以前后移动。 $G_1$  和  $G_2$  是两块材料相同、厚度均匀且相等的平行玻璃片,在  $G_1$  的一个表面上镀有半透明的薄银层,使照射在  $G_1$  上的光强一半反射,一半透射。 $G_1$  和  $G_2$  两玻璃片与  $M_1$  和  $M_2$  倾斜  $45^\circ$ ,平面镜  $M_2$  经  $G_2$  薄银层形成的虚像为  $M'_2$ ,在  $M_1$  的附近,入射光在  $G_1$  上分光后,经  $M_1$  和  $M_2$  反射,在  $E$  处观察到干涉条纹。

当  $M_1 \perp M_2$  (即  $M'_2 // M_1$ ), 产生等倾干涉的同心环。

当  $M_1$  与  $M_2$  并不严格垂直, 则  $M'_2$  与  $M_1$  形成一空气劈, 产生等厚干涉条纹。

如果在视场中, 数出明条纹移动的数目  $N$ , 就可以得出平面镜  $M_1$  平移的距离

$$d = N \cdot \frac{\lambda}{2}。$$

由于光波波长的数量级是  $10^{-7}m$ , 因此用迈克尔孙干涉仪测定的长度, 精度是很高的。

## 五、光的衍射

### 1. 光的衍射现象

当光波通过线度可与波长相比拟的小孔、狭缝、小圆屏、毛发、细针等障碍时, 光的传播偏离原方向而进入几何影区, 还出现明暗相间的条纹, 即光强重新分布, 这种现象称为光的衍射。

### 2. 衍射现象的分类

衍射系统一般由光源、衍射屏和接收屏组成。按它们相互间距离的大小, 通常将衍射分为两类:

1) 菲涅耳(A. J. Fresnel)衍射 衍射屏与光源或接收屏的距离为有限远时的衍射。

2) 夫琅禾费(J. Von Fraunhofer)衍射 衍射屏与光源和接收屏的距离都是无穷远时的衍射。或者说, 照射到衍射屏上的入射光和离开衍射屏的衍射光都是平行光的衍射。

### 3. 惠更斯-菲涅耳原理

波在传播过程中, 从同一波阵面上各点发出的子

波,经传播而在空间某点相遇时,产生相干叠加。这个发展了的惠更斯原理,称为惠更斯-菲涅耳原理。

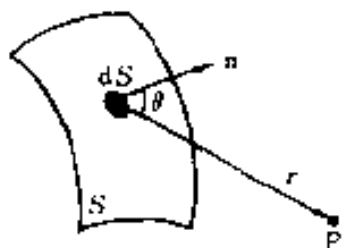


图 16.10

波阵面上面元  $dS$  (图 16.10) 发出的子波在前方某点  $P$  所引起的光振动可表示为

$$dE_P = C \frac{a(S)K(\theta)}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right) dS,$$

式中  $C$  为比例常数,  $K(\theta)$  是随  $\theta$  角增大而缓慢减小的函数,称为倾斜因子,  $\theta$  为衍射角。当  $\theta=0$  时,  $K(\theta)=1$ ;  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$  时,  $K(\theta)=0$ , 表示子波不能向后传播,  $r$  为子波到  $P$  点的距离,  $a(S)$  为波面上单位面积的振幅。  $P$  点的合振动为

$$E_P = \int_S \frac{Ca(S)K(\theta)}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right) dS。$$

这称为菲涅耳衍射积分公式。

## 六、单缝和圆孔的夫琅禾费衍射

### 1. 单缝衍射的明暗条件

设狭缝的宽度为  $a$ , 在平行单色光垂直照射下, 通过狭缝的光发生衍射, 衍射角  $\theta$  相同的平行光束经透镜汇聚在透镜焦平面上同一点  $P$ 。决定单缝夫琅禾费衍射条纹的明暗条件为

暗纹中心:

$$a \sin \theta = 2k \frac{\lambda}{2}, (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots);$$



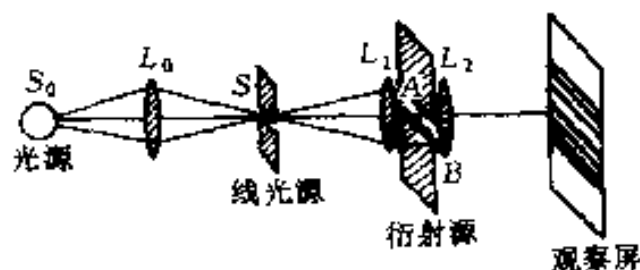


图 16.11

明纹中心:

$$a \sin \theta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

在两个第一级 ( $k = \pm 1$ ) 暗纹之间的区域, 即  $-\lambda > a \sin \theta > -\lambda$  的范围内, 称为中央明纹。中央明纹的宽度常以中央明纹中心与第一级暗纹所对应的衍射角  $\Delta \theta_0$  表示, 称为中央明纹的半角宽度, 于是

$$\Delta \theta_0 = \theta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{a} \approx \frac{\lambda}{a}$$

## 2. 单缝衍射的光强分布

单缝衍射的光强分布如下:

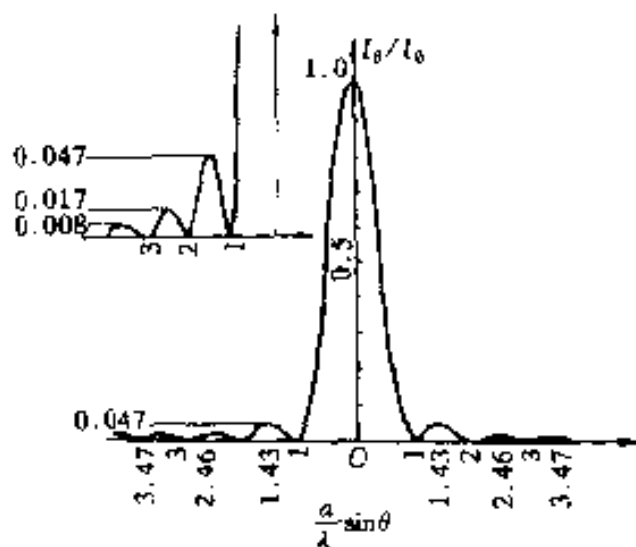


图 16.12

$$I_{\theta} = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2,$$

$$u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda},$$

式中  $I_0$  为中央明纹中心处的光强。通常把衍射场中的相对光强  $\frac{I_{\theta}}{I_0} = \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$  称为单缝衍射因子, 它随  $\sin \theta$  的变化如图 16.12 所示。

### 3. 圆孔的夫琅禾费衍射

当平行单色光垂直照射到圆孔上, 光通过圆孔后被透镜汇聚, 在接收屏上将看到中央是一个较亮的圆斑, 外围着一组同心的暗环和亮环。这个由第一暗环所包围的中央亮斑, 集中了衍射光能量的 83%, 称为爱里 (G. B. Airy) 斑, 它的中心就是几何光学像点。爱里斑的角半径  $\Delta \theta_0$  就是第一暗环所对应的衍射角  $\theta_1$ , 即

$$\Delta \theta_0 = \theta_1 \approx \sin \theta_1 = 0.61 \frac{\lambda}{R} = 1.22 \frac{\lambda}{D},$$

$R$  和  $D$  是圆孔的半径和直径。若会聚透镜的焦距为  $f$ , 则爱里斑的半径为

$$r_0 = f \Delta \theta_0 = 1.22 \frac{\lambda f}{D}.$$

爱里斑的大小与光学仪器的孔径  $D$  成反比。要使成像清晰, 要求爱里斑尽可能小, 就必须增大光学仪器的孔径。

## 七、光栅衍射

### 1. 透射光栅的衍射

由大量等宽等间距的平行狭缝构成的光学器

件,称为光栅。例如,在玻璃片上刻上大量平行等间距的刻痕,刻痕为不透光部分,两刻痕之间为透光部分,这就构成一种透射光栅。如在镀有金属层的表面上刻一系列等间距的平行槽纹,两刻痕间的金属面可以反射光,这就构成一种反射光栅。此外,晶体内部周期性排列的原子或分子,还构成了天然的三维光栅。

设透射光栅的缝宽为  $a$ , 缝间不透光部分的宽度为  $b$ , 则  $(a + b) = d$  称为光栅常数。平行单色光垂直入射到光栅, 透过光栅每个缝的衍射光经过透镜汇聚(图 16.13), 在屏上可以看到在黑暗的背景上呈现一系列分得很开的细窄亮线, 称为光栅光谱。

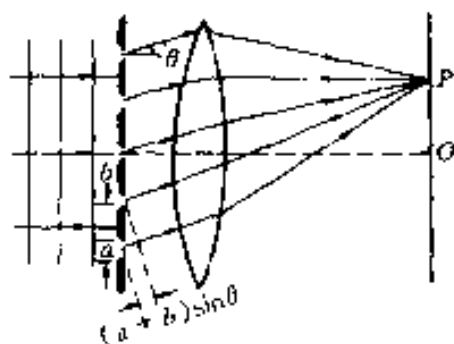


图 16.13

在光栅衍射图样中,亮纹的位置取决于

$$(a + b)\sin\theta = k\lambda, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

这就是所谓光栅方程。

利用光栅衍射,可以测定光谱线的波长和相对强度,也可以确定物质的成分及其含量,这种分析方法叫做光谱分析。光栅光谱与棱镜光谱有重要区别,光栅光谱一般有许多级,每级是一套光谱,而棱镜光谱只有一套。此外,对于不同波长的光谱线,在  $\theta$  角

不很大的情况下,在光栅光谱中的位置正比于波长,故光栅光谱又称匀排光谱,而棱镜光谱则为非匀排光谱。

## 2. X射线在晶体上的衍射

1912年劳厄(M. Von Laue)把天然晶体当作空间光栅,X射线投射到晶体薄片上,在晶体后的照相底片上显现出在入射线几何点的四周对称分布一些斑点,称为劳厄斑。劳厄斑的出现正是x射线通过晶体晶格发生衍射的结果。

布拉格父子(W. H. Bragg 和 W. L. Bragg)对X射线在晶体上的衍射,提出了一个简明的解释。当X射线照射到晶体上时,组成晶体的每个原子都可看作一个子波源,向各个方向发出衍射线。晶体中各晶面上满足镜式反射的衍射线相干叠加,衍射光强最大,在照相底片上形成亮斑。

如晶面间距为 $d$ ,X射线以掠射角 $\theta$ (为了测量方便,以入射线与晶体表面的夹角来表示)入射到晶面上时(图16.14),衍射线满足相干加强的条件为

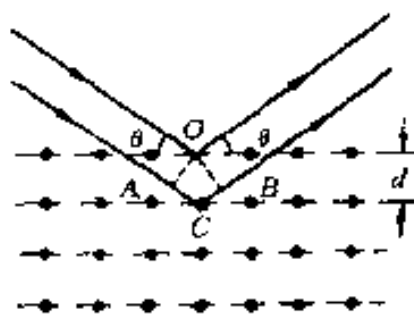


图 16.14

$$2d \sin \theta = k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

上式称为布拉格公式,或晶体衍射的布拉格条件。

晶体对X射线的衍射已得到广泛应用,例如X

射线的光谱分析和 X 射线的晶体结构分析等。

与 X 射线的衍射相类似,电子、中子等粒子的射线也有衍射现象,也可用布拉格的晶体衍射方法。中子衍射在晶体结构分析上具有极大的应用价值。

## 八、光学仪器的分辨本领

光学仪器形成的图像的清晰程度要受光的衍射现象所限制,因此,光学仪器的分辨能力有一个最高的极限。光学仪器的分辨本领(又称分辨率)分为成像仪器的像分辨本领和分光仪器的色分辨本领两类。

### 1. 成像仪器的像分辨本领

#### (1) 瑞利(Rayleigh)判据

光学成像仪器的物镜都有圆形光阑,都会产生圆孔衍射,这就使它们所成的像不再是由理想的几何光学像点组成,而是由一系列爱里斑组成,这必然影响像的清晰度。瑞利判据规定,当一个爱里斑的中心刚好落在另一个爱里斑的边缘(即第一级暗环)上时,这两个爱里斑刚巧能够被分辨。

#### (2) 人眼的分辨本领

人眼瞳孔的直径  $D_e$  可在  $2\text{mm} \sim 8\text{mm}$  范围内调节。人眼的最小分辨角为

$$\delta\theta_e \approx 1.22 \frac{\lambda}{D_e}$$

如  $D_e = 2\text{mm}$ , 光波长  $\lambda = 550\text{nm}$  估算,人眼的最小分辨角  $\delta\theta_e = 1^\circ$ , 即正常人能分辨明视距离  $25\text{cm}$  处相隔  $0.075\text{mm}$  的两条刻线,或者说,能分辨  $10\text{m}$  远处相隔  $3\text{mm}$  的两条刻线。

(3) 望远镜的分辨本领  
望远镜的最小分辨角为

$$\delta\theta_m \approx 1.22 \frac{\lambda}{D},$$

式中  $D$  为光瞳(物镜)的直径。望远镜的分辨本领

$$R = \frac{1}{\delta\theta_m} = \frac{1}{1.22} \frac{D}{\lambda}.$$

提高望远镜的分辨本领的途径是增大物镜的直径。为了减小波长在传输过程受大气扰动的影响,因此尽可能地将大型天文望远镜设在高山顶上。

(4) 显微镜的分辨本领

显微镜的观察对象是细小近物,所以通常以最小分辨距离  $\Delta y$  来标志它的分辨本领(图 16.15)。

$$\Delta y = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin u},$$

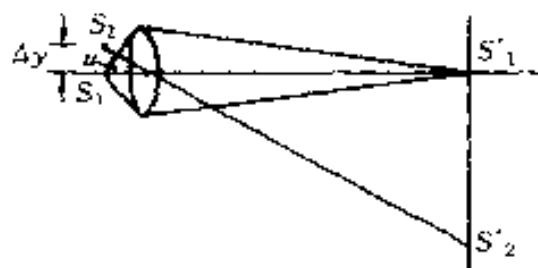


图 16.15

式中  $n$  为物方的折射率,  $u$  为孔径对物点的半张角,称为物光束的孔径角,乘积  $n \sin u$  常称为**物镜数值孔径**,用符号  $N.A.$  表示,其数值标在显微镜的镜头上。

要提高显微镜的最小分辨距离,就要增大物镜的数值孔径,减小使用的光波的波长。油浸物镜就是在载物片与物镜之间滴上一滴油,就可使数值孔

径增大到 1.5, 这时分辨最小距离可达  $0.4\lambda$ 。这是光的波动性为显微镜定下的极限。因此, 提高显微镜的分辨本领的唯一办法是减小波长, 例如用紫外线照明等。利用波长只有  $10^{-3}\text{nm}$  的电子显微镜, 最小分辨距离可达  $10^{-1}\text{nm}$ , 放大率可达几万倍乃至几百万倍。

## 2. 分光仪器的色分辨本领

色分辨本领是指把波长靠近的两条谱线分辨清楚的本领。通常把恰能分辨的两条谱线的平均波长  $\lambda$  与这两条谱线的波长差  $\delta\lambda$  之比, 定义为分光仪器的色分辨本领, 即

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}.$$

对于光栅, 根据瑞利判据, 色分辨本领为

$$R = kN,$$

即光栅的色分辨本领  $R$  与光栅的狭缝总数  $N$  以及光谱级次  $k$  成正比, 而与光栅常数无关。

## 九、自然光和偏振光

### 1. 光的偏振态

光波是电磁波, 电磁波对物质的作用(例如光电、光化学和光生理作用等)主要是电场, 所以电场矢量又称光矢量。由于电磁波是横波, 所以光波中光矢量的振动方向总是和光的传播方向垂直。但是在垂直于光传播方向的平面内, 光矢量可能有各种不同的振动状态, 这种振动状态通常称为偏振态。光的偏振态一般分为 5 种: 线偏振光、自然光、部分偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光。

(1) 线偏振光

光矢量只沿一个方向振动时,这种光称为线偏振光,又称为平面偏振光。线偏振光的表示方法如图 16.16 所示。

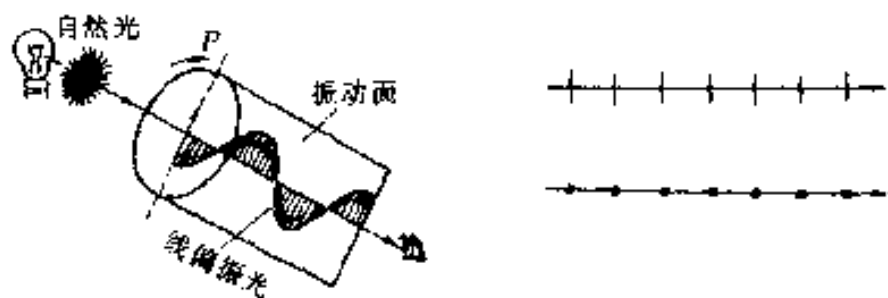


图 16.16

(2) 自然光

光是由光源中大量原子或分子发出的。普通光源中各个分子或原子发出的光的波列不仅初位相互不相关,而且光振动的方向也彼此互不相关,它们是随机分布的,在垂直于光传播方向的平面内,沿各个方向都有振动的光矢量。统计平均说来,光矢量具有轴对称、均匀分布、各方向光振动的振幅相同的特点,这种光称为自然光。自然光一般用两个互相垂直的光振动来表示,如图 16.17。应该注意,这两个互相垂直的光振动之间无固定的相位关系。

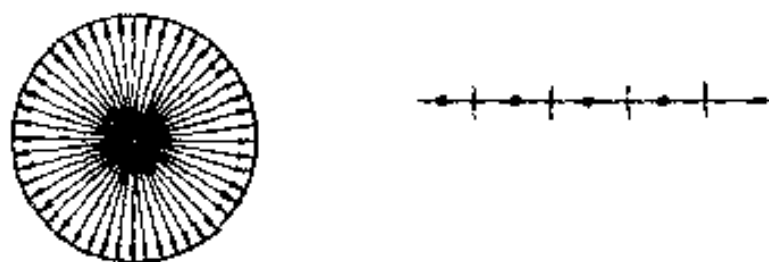


图 16.17



### (3) 部分偏振光

这是介于线偏振光与自然光之间的一种偏振光,在垂直于光的传播方向的平面内,各方向的光振动都有,但它们的振幅不相等,如图 16.18 所示。

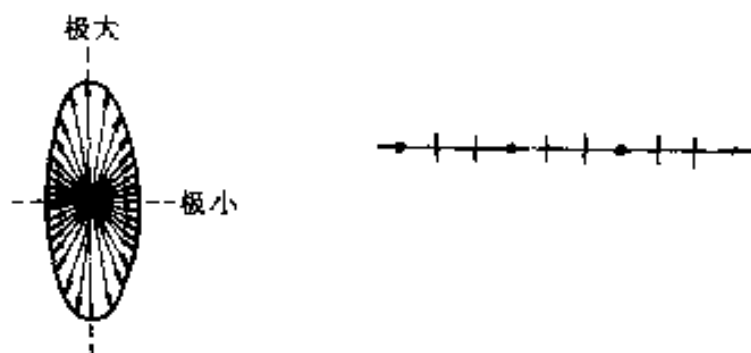


图 16.18

### (4) 椭圆偏振光和圆偏振光

这两种光的特点是:光传播时,光矢量绕着传播方向旋转(左旋或右旋),其旋转角速度对应于光的角频率。如果迎着光的传播方向看去,光矢量端点的轨迹是一个圆,这种光称为圆偏振光(图 16.19)。如果光矢量端点的轨迹是一个椭圆,这种光称为椭

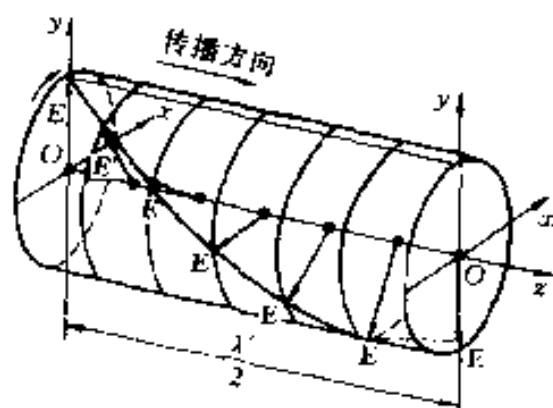


图 16.19

圆偏振光。

## 2. 马吕斯定律

当自然光垂直入射于起偏器时, 透过的光将成为线偏振光。由于自然光中光矢量的对称均匀, 所以将起偏器绕光的传播方向慢慢转动时, 光强不随转动而变化。再使起偏器形成的线偏振光入射于检偏器, 这时, 如果将检偏器绕光的传播方向慢慢转动, 光强将发生变化, 看到由亮逐渐变暗, 再由暗变亮, 旋转一周将出现两次最强, 两次消光。

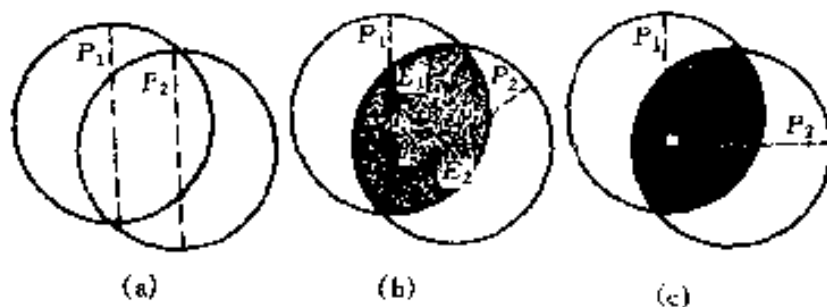


图 16.20

如入射线偏振光的光强为  $I_1$ , 当入射的线偏光的光矢量振动方向与检偏器的偏振化方向成  $\theta$  角时, 则透过检偏器后的光强  $I_2$  为

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta.$$

此式称为马吕斯(E. L. Malus)定律。

## 十、获得偏振光的方法

### 1. 由反射获得线偏振光

布儒斯特(D. Brewster)于 1812 年发现, 当自然光入射到两种介质的分界面上, 反射光和折射光都是部分偏振光, 其偏振化程度随入射角而变化, 当入

射角等于某一特定角度时,在反射光中只有垂直于入射面的振动,而平行于入射面的振动变为零,这时的反射光为完全偏振光。这个特定的人射角称为起偏振角,又称布儒斯特角,以 $i_B$ 表示,其值为

$$i_B = \arctan \frac{n_2}{n_1}$$

上式称为布儒斯特定律。当自然光由空气入射到玻璃板( $n_2=1.50$ )时, $i_B=56.3^\circ$ 。反之,由玻璃射向空气时, $i_B'=33.7^\circ$ 。

## 2. 由折射获得线偏振光

当自然光以布儒斯特角入射时,反射光中只有垂直于入射面的光振动,入射光中平行于入射面的光振动全部被折射,折射光为部分偏振光。如果把许多玻璃片相互平行地叠在一起,构成一玻璃片堆。

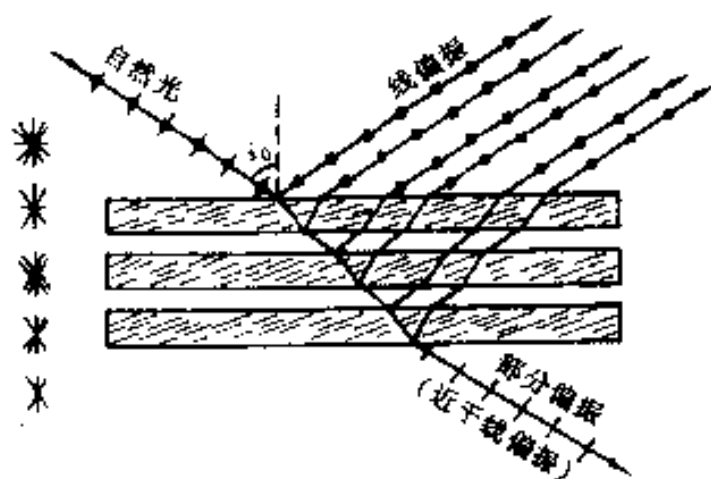


图 16.21

图 16.22

自然光以布儒斯特角入射玻璃片堆时,光在各层玻璃面上反射和折射,经多次反射除去了垂直于入射面的光振动,使最后透射出来几乎完全为平行于入射面的光振动,即成为线偏振光(图 16.22)。

### 3. 由晶体的双折射获得线偏振光

#### (1) 晶体的双折射

一束光射到某些晶体,如方解石、石英等,在晶体内分成两束折射光,这现象称为双折射。

在单轴晶体中的两折射光束,有一束遵守折射定律,这束光称为寻常光,简称 **o 光**;另一束不遵守折射定律(即折射光线不一定在入射面内,而且对不同的入射角,入射角的正弦与折射角正弦之比不是恒量),这束光称为非常光,简称 **e 光**(图 16.23)。

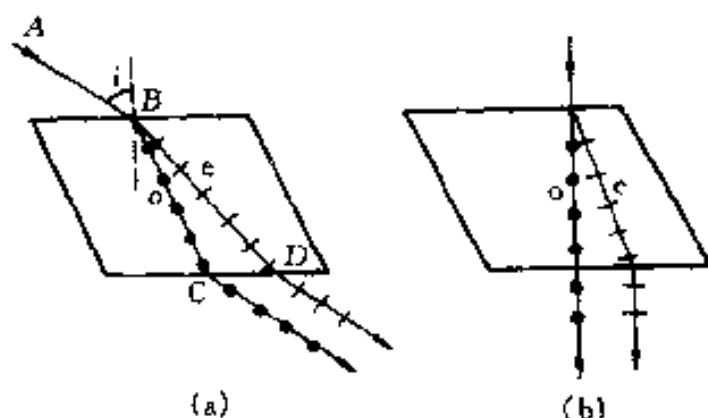


图 16.23

**o 光**和 **e 光**都是线偏振光,**o 光**的振动方向垂直于它对应的主平面(晶体的光轴和光线所组成的平面),**e 光**的振动方向平行于它所对应的主平面。在大多数情况下,这两个主平面之间的夹角很小,因而 **o 光**和 **e 光**的振动方向可以认为是互相垂直的。

**o 光**在晶体中的传播速率  $v_0$  各方向相同,所以

晶体对 o 光的折射率  $n_o = \frac{c}{v_o}$  是由晶体材料决定的常数。e 光在晶体中各方向的传播方向不同,通常把真空中的光速  $c$  与 e 光沿垂直于光轴方向(光轴是晶体中不产生双折射的方向,o 光和 e 光不再分开)传播速率  $v_e$  之比,定义为 e 光的主折射率,即  $n_e = \frac{c}{v_e}$ ,  $n_o$  和  $n_e$  是晶体的两个主要参量,  $n_e > n_o$  的晶体称为正晶体;  $n_e < n_o$  的晶体称为负晶体。

## (2) 晶体偏振器件

① 偏振片:偏振片是在透明的基片上蒸镀一层某种晶粒(如碘酸碘奎宁或硫酸奎宁碱),这些晶粒对某一方向的光矢量有强烈的吸收,而对相对垂直方向的光矢量吸收很少,从而使入射的自然光变成线偏振光。晶体的这种有选择性吸收的性能,称为二向色性(图 16.24)。

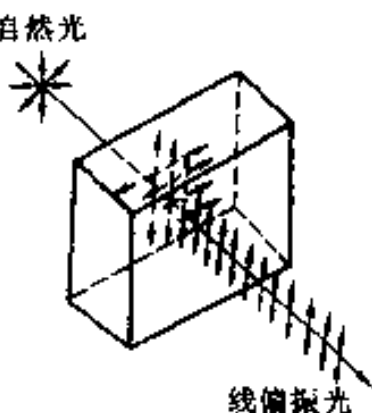


图 16.24

现在常使用的一种偏振片是用聚乙烯醇薄膜经碘溶液浸泡,然后沿一定方向拉伸并烘干制成,这种偏振片称为 H 偏振片。还有一种 K 偏振片,它是将聚乙烯醇薄膜放在高温炉中,通以氯化氢,除去聚乙烯醇分子中的一些水分子,再单向拉伸而成。

② 尼科耳棱镜:尼科耳(Nicol)棱镜是将两块根据特殊要求加工的方解石棱镜用特种树胶粘合成一

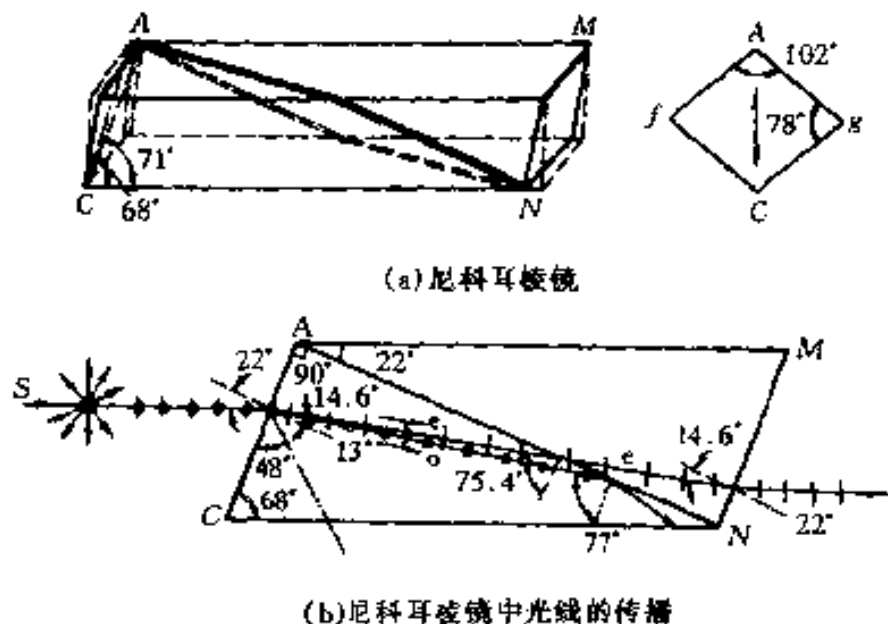


图 16.25

个斜方柱形棱镜(图 16.25)。自然光射入第一棱镜,分成 $o$ 光和 $e$ 光。由于所选用的树胶的折射率( $n = 1.55$ )介于方解石对 $o$ 光的折射率( $n_o = 1.658$ )和 $e$ 光的主折射率( $n_e = 1.486$ )之间, $o$ 光射到树胶层时,发生全反射,由涂黑的侧面吸收,而 $e$ 光透过树胶层并穿过第二棱镜射出。这样,用尼科耳棱镜便可获得偏振光。

③ 其他偏振棱镜:除尼科耳棱镜外,还有格兰(Glan)棱镜,它是尼科耳棱镜的改进型,将一块方解石加工成直角长方体,再切成两个楔块,然后粘合起来,这样得到的出射光与人射光在一直线上(图 16.26(a))。

渥拉斯特(Wollaston)棱镜和洛匈(Rochon)棱镜都是由光轴垂直的两块方解石直角棱镜粘合而成,如图 16.26(b)和图 16.26(c)所示。利用这两种棱

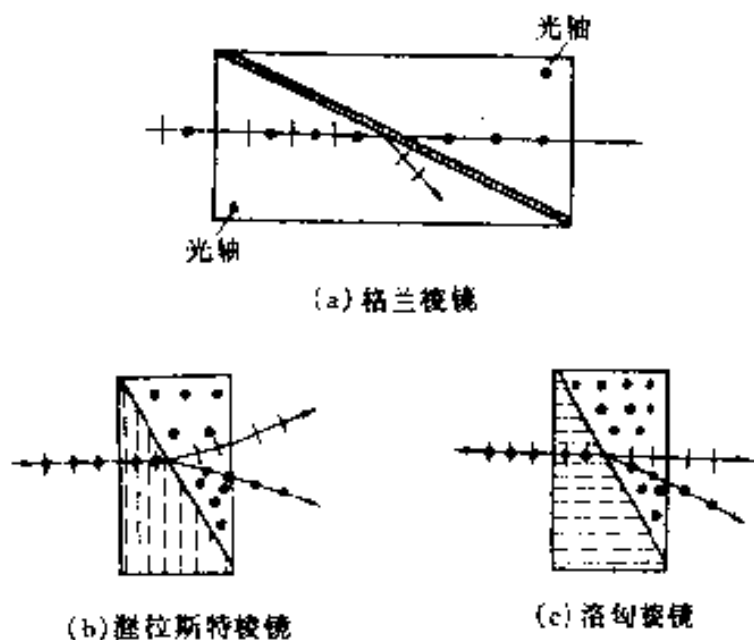


图 16.26

镜可获得分得很开的线偏振光。它们是很好的偏振光分束元件。

#### 4. 椭圆偏振光和圆偏振光的获得

##### (1) 椭圆偏振光和圆偏振光

线偏振光垂直入射于双折射晶片, 晶片的光轴平行于晶面, 如入射线偏振光的振动方向与晶片光轴之间的夹角为  $\alpha$ , 如图 16.27 所示, 则偏振光射入

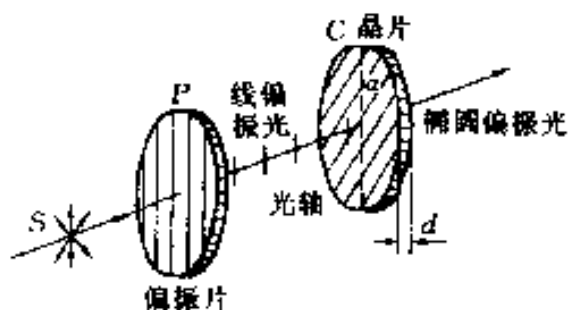


图 16.27

晶片后,将分成振动互相垂直的  $o$  光和  $e$  光,但振幅不同。这两光束沿同一方向传播,具有不同的速率,因此两光束透过晶片后,两者间有一定的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e)d,$$

式中  $d$  为晶片的厚度,  $n_o$  和  $n_e$  分别为晶片对  $o$  光与  $e$  光的主折射率,  $\lambda_0$  为入射单色光在真空中的波长。如果晶片的厚度使  $\Delta\varphi \neq k\pi$ , 那么透过晶片的这两束光振动方向相互垂直而相位差一定,叠加后就形成椭圆偏振光(椭圆主轴与光轴夹一角度)。

适当选择晶片的厚度使相位差为  $\frac{\pi}{2}$  时,则通过晶片后的光为正椭圆偏振光。如果再使晶片的光轴与线偏振光光振动间的夹角  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ , 使  $o$  光与  $e$  光的振幅相同,则通过晶片后的光将为圆偏振光。

## (2) 波片

线偏振光通过光轴平行于表面的晶片,当晶片的厚度  $d$  使  $o$  光和  $e$  光的相位差满足  $\Delta\varphi = 2k\pi$ ,  $d = \frac{k\lambda_0}{(n_o - n_e)}$  或  $(k = 1, 2, \dots)$  时,称为波长片,也称全波片。线偏振光通过全波片后,仍为线偏振光,且振动方向不变。

当晶片的厚度  $d$  使  $o$  光和  $e$  光的相位差为  $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi$ ,  $d = \frac{2k + 1}{(n_o - n_e)} \frac{\lambda_0}{2}$  或  $(k = 0, 1, 2, \dots)$  时,称为二分之一波片,也称半波片或  $\frac{\lambda}{2}$  片。线偏振光通过  $\frac{\lambda}{2}$  片后,仍是线偏振光,但振动方向转过



■  $2\alpha$ ,  $\alpha$  为入射光的振动方向与晶片光轴的夹角。

当晶片的厚度  $d$  使  $o$  光和  $e$  光的相位差为

$$\Delta\varphi = (2k + 1) \frac{\pi}{2} \text{ 或 } d = \frac{2k + 1}{(n_o - n_e)} \frac{\lambda_0}{4} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

时,称为四分之一波片,或  $\frac{\lambda}{4}$  片。线偏振光通过

$\frac{\lambda}{4}$  片后,出射光是以光轴为主轴的椭圆偏振光。

由于波片能使  $o$  光和  $e$  光通过晶片后相位滞后,故又称相位推迟片。

## 十一、偏振光的干涉、人为双折射

### 1. 偏振光的干涉

线偏振光通过波片后,分解为  $o$  光和  $e$  光,它们具有相同的振动频率,以恒定的相位差在同一方向上传播,如果在晶片后再放一偏振片,将它们的振动方向引到同一方向上来,就能满足相干条件,从而实现偏振光的干涉。

当波片的厚度均匀时,若用单色光源,则转动晶片或偏振片,都会使屏幕上的光强发生变化;若用白色光源,则转动时会使屏幕上的颜色发生变化。

当波片厚度不均匀时,若用单色光源,则屏幕上会出现干涉图样;若用白色光源,则屏幕上会出现彩色图样。这种偏振光干涉时出现彩色的现象,称为色偏振。利用色偏振现象,可以精确地鉴别矿石的种类。偏光显微镜就是根据偏振光干涉原理制成的。

### 2. 人为双折射

#### (1) 光弹性效应

塑料、玻璃、环氧树脂等非晶体物质,当它们受到机械应力作用时,会变成光学上的各向异性而表现出双折射性质,这种现象称为光弹性效应。在这种应力作用下的透明介质,  $(n_o - n_e)$  与应力  $p$  的分布有关,即

$$n_o - n_e = kp,$$

式中  $k$  称为应力光学系数。

如果把待分析的机械零件用这种透明材料制成模型,放在正交的偏振片之间,在屏幕上可以看到干涉条纹。应力越集中,干涉条纹越细密。光弹性效应是研究物体内部应力分布的极好实验方法。

## (2) 电光效应

在外加电场的作用下,也可以使某些各向同性的透明非晶体或液体变为各向异性,从而使光产生双折射,这种现象称为电光效应(图 16.28)。

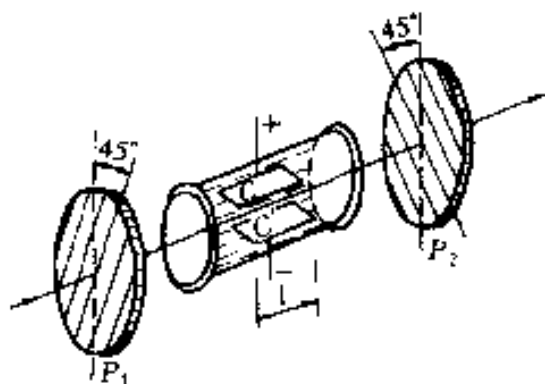


图 16.28

① 克尔效应:克尔(J. Kerr)在 1875 年发现的,在外加强电场的作用下,有些液体(例如硝基苯  $C_6H_5NO_2$ )的折射率之差  $(n_o - n_e)$  与  $E^2$  和光在真空中的波长  $\lambda_0$  成正比,  $o$  光和  $e$  光通过厚度为  $l$  的

液体后所产生的附加光程差为

$$\delta = (n_o - n_e)l = k l E^2 \lambda_o,$$

式中  $k$  称为该物质的克尔常量。利用克尔效应可以作成弛豫时间极短 ( $\sim 10^{-9}$ s) 的断续器或调制器, 如高速光闸和电光调制器等, 目前已广泛应用于高速摄影、电影、电视和激光通信等许多领域。

② 泡克尔斯效应: 1893年, 泡克尔斯(F. C. A. Pockels)发现某些晶体在电场的作用下由单轴晶体变成双轴晶体, 沿原来光轴方向产生双折射效应。晶体折射率的变化( $n_o - n_e$ )与电场强度成线性关系, 所以也称线性电光效应。近代常用的电光晶体有磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )晶体, 简称 KDP 晶体, 磷酸二氢铵( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )晶体, 简称 ADP 晶体, 此外还有砷化镓(GeAs)和铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )晶体等。

利用泡克尔斯效应可用于超高速快门、激光器的 Q 开关, 也被用到数据处理和显示技术等电光系统中。

③ 磁致双折射效应: 在强磁场的作用下, 某些非晶体也能产生双折射现象, 即磁致双折射效应。其中主要有两种, 发生于蒸汽中的称为佛克脱(W. Voigt)效应; 发生于液体中的称为科顿-穆顿(Cotton-Mouton)效应。后者比前者强得多。在磁场的作用下, 对 o 光和 e 光的折射率之差( $n_o - n_e$ )与磁场强度大小的二次方成正比, 即

$$n_o - n_e = C \lambda_o^2 H^2,$$

式中  $C$  为常量, 称为科顿-穆顿常量。利用这些效应可以得到物质中能级结构的信息, 还能用于微弱磁性变化的研究。

### 3. 旋光现象

#### (1) 晶体和溶液的旋光性

阿喇果(D. F. J. Arago)在 1811 年发现,线偏振光通过某些透明物质时,它的振动面以光的传播方向为轴线旋转一定的角度,这种现象称为旋光现象(图 16.29)。某些物质具有能使线偏振光振动面发生旋转的性质,称为旋光性。这些具有旋光性的物质,称为旋光性物质。石英晶体,氯酸钠( $\text{NaClO}_3$ )和溴酸钠( $\text{NaBrO}_3$ )晶体等以及松节油,糖溶液和酒石酸溶液等都是旋光性较强的物质。

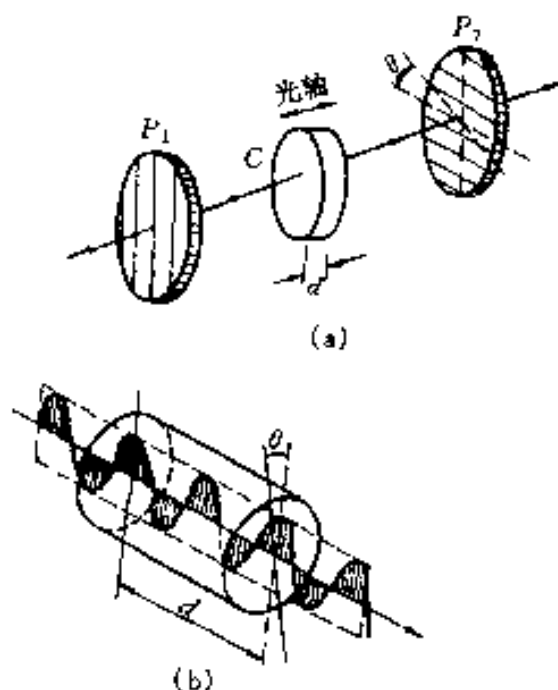


图 16.29

当光通过晶体时,线偏振光的振动面转过的角度  $\theta$  与晶体的厚度  $l$  成正比,即

$$\theta = \alpha l,$$

式中  $\alpha$  称为晶体的旋光率,它与物质的性质及波长

有关。

当光通过旋光溶液时,线偏振动的振动而转过的角度与溶液的长度  $l$  和溶液的浓度  $C$  成正比,即

$$\theta = \alpha'Cl,$$

式中  $\alpha'$  称为该溶液的比旋光率。溶液的旋光性在制糖、制药和化工等方面很有用。例如根据糖溶液的旋光性而设计的糖量计可以测定糖溶液的浓度。

旋光物质使光的振动面旋转有左旋和右旋之分。迎面观察通过旋光物质的光,振动面按顺时针方向旋转的称为右旋,按逆时针方向旋转的为左旋。石英晶体具有左旋和右旋两种变体。许多有机物质和一些生物物质也具有左右两种旋光异构体。例如,天然的氯霉素是左旋的,人工合成的氯霉素是左右旋各半的混合物,故称“合霉素”,而其中只有左旋成分有疗效。驱虫药四咪唑也是左右旋混合物,其中有效的也是左旋成分。自然界和人体中的葡萄糖是右旋的,而不同的氨基酸和 DNA 等也有左右旋的不同。这些都是目前生物学研究的课题。

## (2) 磁致旋光

线偏振光通过某些物质(如玻璃、二硫化碳、汽油等)时,如果沿光的传播方向加上磁场,光通过这些物质后振动面转过了一角度,这现象由法拉第(Faraday)于 1846 年发现的,称为法拉第磁致旋转效应。

对于给定的样品,振动面的转角与样品的长度  $l$  和磁感应强度  $B$  成正比,

$$\theta = VIB,$$

比例系数  $V$  叫做费尔德(Verdet)常量,一般物质的

费尔德常量都很小。

当线偏振光通过旋光物质时,如果光沿磁场方向传播,振动面右旋;当光束沿反方向传播,迎着传播方向看,振动面将向左旋。所以,如果光束由于反射一来一去两次通过磁光物质,振光面总共转过  $2\theta$  的角度。利用这一特点,可在激光技术中用来制成“光隔离器”,就是只允许光从一个方向通过而不能从反方向通过的“光闸门”。

## 第十七章 现代光学

本世纪中叶,光学领域中发生了三件大事:1948年全息术的诞生;1955年“光学传递函数”概念的提出;1960年激光的诞生,使光学在理论方法和实际应用上都有重大的突破和进展,形成了“现代光学”。现代光学有两个重要分支,一支是信息光学,又称傅里叶光学;另一支是强光光学,又称非线性光学。

### 一、傅里叶光学

#### 1. 傅里叶光学和信息论

傅里叶光学是把通信理论特别是其中的傅里叶分析方法应用于光学而形成 一个分支。光学信息系统和电学信息系统有许多相同之处,它们都是收集信息和传递信息。从信息论角度来说,关心的是信息在系统中传递过程,对一个光学系统来说,物和像的关系也可以根据衍射理论由系统中光场的传播来确定,因此光学系统可以看成 一个通信通道。这样,通信理论中的线性系统理论可以用来描述大部分光学系统。当物体用非相干光照射时,在系统像平面上强度分布与物体上强度分布成线性(正比)关系。用来描述电学系统的脉冲响应概念,也可以用来描述光学系统,即可用光学系统对点光源的响应(点光

源的像)来描述系统的性质。

## 2. 空间频率

在信息论中,还常用频率响应概念,即输入各种不同频率的信号,观察系统相应的输出,从频率响应曲线可以了解系统对各种频率的传递情况。在光学系统中,同样可以引入频率响应的概念,所不同的是瞬时频率响应由空间频率响应所代替。定义空间函数的周期  $d$  的倒数  $\nu = \frac{1}{d}$  为空间频率。例如光栅,  $d$  就是光栅常数。任何一个复杂的图像可以看成是不同方位、不同空间频率的无数个光栅的组合。如果以复杂图像(物)作为衍射屏,用单色平行光照射,在接收屏上得到按照物的空间频率分开的衍射图样,接收屏上不同位置的衍射图样对应衍射屏一定的空间频率。同时,衍射图样的光强分布与衍射屏各方位上不同空间频率成分的含量成正比。这样,以复杂图像作为衍射屏进行夫琅禾费衍射,就在接收屏上实现了对复杂图像的光信息的傅里叶变换。

## 3. 阿贝成像原理和空间滤波

阿贝(E. Abbe)在研究提高显微镜的分辨本领时,于1874年提出了相干成像的新原理。现在看来,他为现代变换光学中空间滤波和信息处理奠定了基础。阿贝将物体看为由一系列不同空间频率的光栅组成,成像过程分两步完成。第一步是入射光经物平面发生夫琅禾费衍射,在透镜后焦面上形成一系列衍射斑点。第二步,各衍射斑点发出的球面次波在像平面上相干叠加,像就是干涉场。这就是阿贝成像原理。这样,成像过程就是先通过衍射分



频,再通过干涉合频,即由两次傅里叶变换来完成的。

阿贝成像原理的重要意义,在于指出了在透镜后焦面上存在物的频谱。如果在频谱中挡去或加入一部分,则所得的像将缺少或增加某些细节,或变形。这种在频谱面上改变频谱而改造像的方法称为空间滤波。

空间滤波已广泛应用光学信息处理,如改变图像的反差,消除图像中的“噪声”,对黑白图像进行假彩色编码等。

## 二、全息照相

### 1. 全息照相的特点

普通照相底片所记录的仅是物体各点的光强(振幅),彩色照相底片还记录了光的波长信息;而全息照相记录的是光的全部信息(波长、振幅和相位)。

普通照相得到的只是二维平面图像,而全息照相可以再现物体逼真的立体图像。

如果将普通照相撕去一部分,所记录的图像也就不完整了;而全息片破碎了,只需一小块碎片,仍能再现完整的图像。

### 2. 全息照相的记录和再现

全息照相的成像分两步进行。第一步是全息记录(图 17.1)。激光器输出的光通过分光镜分成两束,一束经反射镜和扩束镜投射到物体上,然后经物体反射或透射后再射到感光底片,称为物光。另一束经反射镜和扩束镜后直接投射到感光底片上,称为参考光。物光和参考光相互叠加,在感光片上形

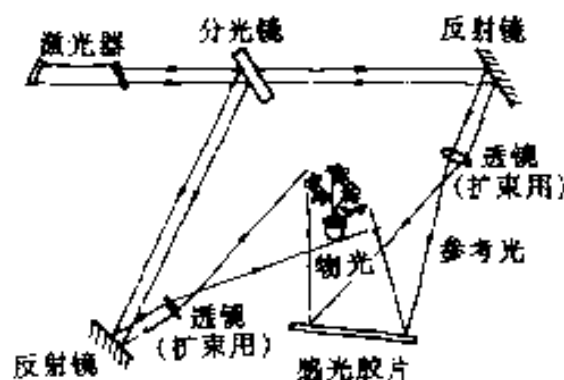


图 17.1

成干涉条纹。经显影、定影后,就得到全息照片,称为全息图。这种全息图是通过干涉方法记录了物光波前上各点的全部光信息。

全息照相的第二步是波前再现(图 17.2)。用一束同参考光的波长和传播方向相同的光束照射全息照片,这光束叫做再现光。这样在原先拍摄时放置物体的方向上就能看到一幅非常逼真的立体的原物形象(虚像)。和虚像对全息图对称的位置还有一个实像。实际上,波前再现是衍射过程。这两个像相当于光栅所产生的+1级和-1级两个衍射波所形成的像。

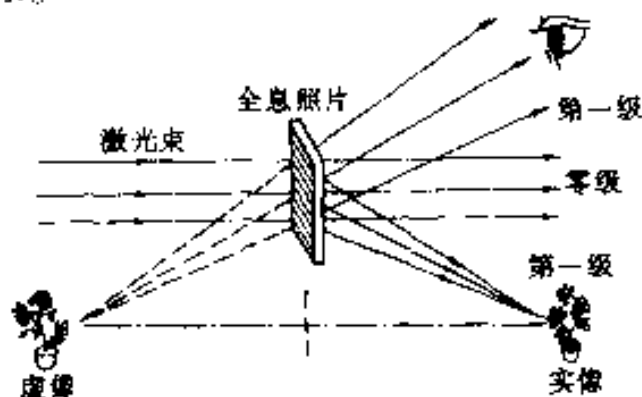


图 17.2

全息照相记录下来的是物光和参考光之间相位差的分布,如用无线电技术的术语来说,全息图的记录过程是通过物光波对参考光的调制完成的,再现过程实为解调过程。

### 3. 全息照相的应用

#### (1) 全息显微摄影与全息显示

利用全息照相可以进行显微放大,可放大几千倍到上万亿倍。由于全息照相再现物体逼真形象,立体感强,成为立体电影和立体电视的发展方向。模压全息显示技术的发展,已被应用在防伪商标、保密标记、艺术和装饰等方面。

#### (2) 全息干涉计量

这是全息照相技术目前应用最广泛的领域之一。在无损探测、微应力应变测量、振动分析等多方面得到应用。

#### (3) 全息光学元件

利用干涉方法制作薄片型的光学元件,主要有:全息透镜、全息光栅、全息滤光片、全息扫描器等。

#### (4) 全息信息存储

把文字、图片或资料制成透光片作为物,再制成全息图。再现的实像可供直读。

## 三、非线性光学

### 1. 非线性光学现象

光与物质相互作用时,介质将产生极化。在各向同性的介质中,极化强度  $\mathbf{P}$  与电场强度  $\mathbf{E}$  的方向相同,它们数值之间的普遍关系为

$$\mathbf{P} = \alpha\mathbf{E} + \beta\mathbf{E}^2 + \gamma\mathbf{E}^3 + \dots$$

式中  $\alpha$  是通常的极化率,  $\beta$  和  $\gamma$  分别是二阶和三阶极化系数, 它们都是与电场强度无关的常量, 由介质的性质决定。

普通光源发出的光的电场强度(约  $10^3 \text{V/m} \sim 10^4 \text{V/m}$ )要比原子内部的平均电场强度(约  $3 \times 10^{16} \text{V/m}$ )小几个数量级, 这时光场在介质中产生的极化强度与外界电场强度成正比, 即  $P = \alpha E = \chi \epsilon_0 E$ , 这就是通常的线性光学。但强激光的电场强度约为  $10^{10} \text{V/m}$ , 这时式中的非线性项就不能忽略, 由此会产生各种非线性光学现象。

非线性现象一般可分成两大类: 一类是强光与被动介质(在强光作用下, 介质的特征频率并不明显起作用)相互作用的非线性光学现象, 如光学整流、光学倍频、光学混频和光自聚焦等; 另一类是强光与激活介质(在强光作用下, 介质的特征频率影响与之相互作用的光波)相互作用的非线性光学现象, 如受激拉曼散射和受激布里渊散射等。

## 2. 光学倍频

以角频率为  $\omega$  的强激光入射到非线性介质上, 设此光波的电场强度为  $E = E_0 \cos \omega t$ , 则介质响应的极化强度(略去  $E^3$  以上各项)为

$$P = \alpha E_0 \cos \omega t + \beta E_0^2 \cos^2 \omega t = \alpha E_0 \cos \omega t + \frac{1}{2} \beta E_0^2 + \frac{1}{2} \beta E_0^2 \cos 2\omega t。$$

极化强度  $P$  中除有频率为  $\omega$  的基频外, 还有频率为  $2\omega$  的倍频项和直流项。直流项表示从一个交变电场得到一个恒定电场, 称为**光学整流**。辐射频率为入射光频率两倍的倍频光的现象, 称为**光学倍频**。

例如,使用KDP晶体,由 $1.06\mu\text{m}$ 的基频激光转变为 $0.53\mu\text{m}$ 的倍频光,转换效率已达到80%。此外,在方解石晶体中,已经观察到了三倍频谐波。

### 3. 光学混频

如入射光包含两种频率,沿同一方向同时入射到非线性介质上,即 $E = E_1 + E_2 = E_{10} \cos \omega_1 t + E_{20} \cos \omega_2 t$ 。这时极化强度 $P$ 中,除了基频项、直流项和倍频项外,还有和频( $\omega_1 + \omega_2$ )项以及差频( $\omega_1 - \omega_2$ )项,它们将辐射相应的波,这种现象称为光学混频。光学混频原理已用于制作光学参量放大器和光学参量振荡器等。

### 4. 自聚焦

强激光入射到某些非线性介质(如二硫化碳、甲苯等)上,折射率不再是常数,而是随着光的功率密度而增大。一般在激光束的中央部分光的功率密度比外围大,当它通过非线性介质时会使其中央部分的折射率比边缘的大,从而使介质具有凸透镜的汇聚作用。这样,光束的直径就要缩小,其结果是使中央部分光的功率密度变得更大,这又使光束进一步收缩,最后形成一根极细的亮丝,就是光的自聚焦现象。例如,一功率为1MW、截面积直径约2mm激光束,在红宝石中经自聚焦后,直径缩到小于0.1mm,这时功率密度提高了约3倍。

# 第七篇 近代物理

## 第十八章 相对论

### 一、狭义相对论的基本假设

#### 1. 相对性原理(或爱因斯坦狭义相对性原理)

在所有惯性系中,一切物理定律都具有相同的数学表达形式,也就是说,所有惯性系对于描述物理定律都是等价的。

#### 2. 光速不变原理

在所有惯性系中,真空中光沿各个方向传播的速率都相等,与光源和观察者的运动状态无关。作为基本物理常量,真空中的光速的 1986 年推荐值为

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}。$$

### 二、狭义相对论的时空观

#### 1. 洛伦兹变换式

设有两个惯性系  $S$  和  $S'$ ,对应的坐标轴互相平行, $S'$ 系相对  $S$ 系以速度  $V$ 沿  $x$ 轴的正方向作匀速

■ 直线运动(图 18.1)。取两坐标原点相重合的时刻

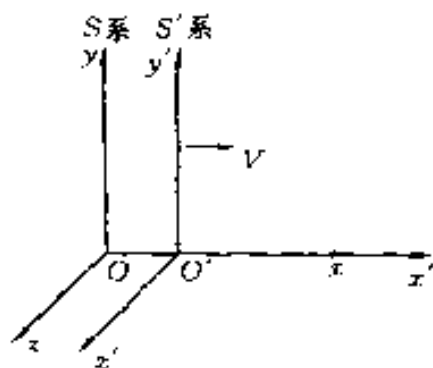


图 18.1

为时间的零点。若某事件在  $S$  系中是在  $t$  时刻发生在  $(x, y, z)$  处, 而同一事件在  $S'$  系中是  $t'$  时刻发生在  $(x', y', z')$  处, 则同一事件的时空坐标  $(x, y, z, t)$  与  $(x', y', z', t')$  之间的变换关系为

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

这就是洛伦兹(坐标)变换式, 它的逆变换式为

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t = \frac{t' + Vx'/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

为简便起见,在相对论中常采用符号  $\beta$  和  $\gamma$ ,它们是

$$\beta = V/c, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

当  $V \ll c$  时,  $\beta \rightarrow 0$ , 洛伦兹变换式将变成伽利略变换式:

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

因此,经典的伽利略变换式是洛伦兹变换式在低速情况下的近似。

## 2. 爱因斯坦速度变换式

如果质点在  $S$  系中以速度  $v$  ( $v_x, v_y, v_z$ ) 运动, 在  $S'$  系中, 速度为  $v'$  ( $v'_x, v'_y, v'_z$ ), 它们之间的变换关系为

$$\begin{aligned} v'_x &= \frac{dx'}{dt'} = \frac{v_x - V}{1 - v v_x / c^2}, \\ v'_y &= \frac{dy'}{dt'} = \frac{v_y \sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - V v_x / c^2}, \\ v'_z &= \frac{dz'}{dt'} = \frac{v_z \sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - V v_x / c^2}, \end{aligned}$$

它的逆变换为

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{v'_x + V}{1 + V v'_x / c^2}, \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{v'_y \sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 + V v'_x / c^2}, \\ v_z &= \frac{dz}{dt} = \frac{v'_z \sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 + V v'_x / c^2}. \end{aligned}$$

这就是狭义相对论的速度变换关系, 称为爱因斯坦



速度变换。

当  $V \ll c, v_x \ll c$  时, 爱因斯坦速度变换可简化为

$$v'_x = v_x - V, \quad v'_y = v_y, \quad v'_z = v_z.$$

这就是伽利略速度变换。

### 3. 同时的相对性

若在  $S$  系中有两个事件同时发生在两个不同的地点, 它们的时空坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1, t)$  和  $(x'_1, y'_1, z'_1, t)$ 。按洛伦兹变换, 在  $S'$  系中, 这两个事件发生在不同的时刻, 分别为

$$t'_1 = \frac{t_1 - Vx_1/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

$$t'_2 = \frac{t_2 - Vx_2/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

两事件的时间间隔为

$$t'_2 - t'_1 = -\frac{V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}(x_2 - x_1).$$

这说明  $S$  系中不同地点发生的两个“同时”事件, 在  $K'$  系中是“不同时”的, 这就是“同时”的相对性。只有当两个事件发生在同一地点时, 即当  $(x_2 - x_1) = 0$  时, “同时”才有绝对意义。

### 4. 长度收缩效应

设有一刚性杆沿  $x$  轴静止放置在  $S$  系中, 两个端点的空间坐标分别为  $x_1$  和  $x_2$ , 则杆在  $S$  系中的长度为

$$l_0 = x_2 - x_1.$$

368 通常把杆在与杆相对静止的参考系中的长度称为固

有长度或静长,用符号  $l_0$  表示。

在  $S'$  系中测得杆的长度为

$$l' = x'_2 - x'_1 = l_0 \sqrt{1 - V^2/c^2} < l_0。$$

(必须注意,杆相对  $S'$  系在运动,测量杆的长度必须在  $S'$  系中的同一时刻  $t'$  记下杆两端的空间坐标  $x'_1$  和  $x'_2$ )。

如果杆在  $S'$  系中沿  $x'$  轴静止的,那么杆在  $S'$  系中的长度为固有长度  $l_0$ ,杆在  $S$  系中的长度为

$$l = x_2 - x_1 = l_0 \sqrt{1 - V^2/c^2} < l_0,$$

即,在相对杆运动的惯性系中,杆沿运动方向的长度必小于其固有长度。这一相对论效应称为长度收缩效应,或称为动尺缩短。

必须指出,长度收缩的形象是人们观测物体上各点对观察者参考系同一时刻的位置构成的形象,而不是物体产生的视觉形象。我们看到的(或照相机拍摄的)形象,是由物体上各点发出后“同时到达”眼睛(或照相机)的光线所组成的,而这些光线并不是同时自物体发出的。因此,高速运动物体的视觉图像并非单纯是在运动方向上的收缩。

5. 时间延缓效应(又称时间膨胀或动钟变慢效应)

设在  $S$  系中的同一地点先后发生两个事件,其时空坐标分别为  $(x, y, z, t_1)$  和  $(x, y, z, t_2)$ ,在  $S$  系中,这两个事件之间的时间间隔为

$$\tau_0 = t_2 - t_1。$$

人们常把某一惯性系中同一地点先后发生的两个事件之间的时间间隔称为固有时间或原时,用符号  $\tau_0$

表示。

在  $S'$  系中测得这两个事件的发生时刻为

$$t'_1 = \frac{t_1 - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

$$t'_2 = \frac{t_2 - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

这两个事件的时间间隔为

$$\tau' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} =$$

$$\frac{\tau_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} > \tau_0,$$

如果在  $S'$  系中同一地点发生两个事件,那么在  $S'$  系中测得这两个事件之间的时间间隔为原时  $\tau_0$ , 在  $S$  系中测得这两个事件之间的时间间隔为

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} > \tau_0,$$

即,若在某惯性系中,两个事件发生在同一地点,测得这两个事件的时间间隔为原时  $\tau_0$ ,在其他惯性系中,这两个事件发生在不同地点,测得这两个事件的时间间隔大于原时。这一相对论效应又称为时间膨胀效应或动钟变慢效应。

在日常生活中,相对论效应是完全可以忽略的,但在运动速度接近光速时就变得重要了。 $\gamma$  值的大小体现了相对论效应的显著程度, $\gamma$  称为速度因数,表 18.1 给出了  $\gamma$  及其倒数的数值随速度  $v$  的变化。到 1992 年,在实验室中已达到的最快的电子速度是

表 18.1  $\gamma$  和  $\frac{1}{\gamma}$  的数值

$\frac{V}{c}$	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$	$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - V^2/c^2}$
0	1	1
0.01	1.00005	0.9999
0.1	1.0050	0.9950
0.3	1.0483	0.9539
0.5	1.1547	0.8660
0.7	1.4003	0.7141
0.9	2.2942	0.4359
0.99	7.0888	0.1411
0.999	22.366	0.04471
0.9999	70.712	0.01414
0.99999	223.607	0.004472
0.9999999994	28867.513	0.00003464

### 6. 双生子佯谬

设甲和乙是一对孪生兄弟,甲留在地球上,乙乘上高速飞船到远方宇宙空间去旅行一次返回地球,根据时间收缩效应,在甲看来,乘飞船旅行回来的乙比甲自己年轻;而在乙看来,留在地球上的甲比乙自己年轻。那么究竟谁年轻呢?这就是历史上曾使人困惑的“双生子佯谬”问题。

地球与飞船这两个参考系是不同的,地球是惯性系,飞船虽然在相对地球匀速飞行时也是惯性系,但在起飞、转弯、调头、降落等过程中,必有加速度,已不再是惯性系,这就超出了狭义相对论的理论范围,不能套用洛伦兹变换,而需要用广义相对论去讨

论。广义相对论指出：在非惯性系中时间流逝得较慢，一切自然过程，包括人的生命过程，都进行得较慢。因此，太空旅行回来的乙比留在地球上的甲年轻。

### 三、狭义相对论动力学

#### 1. 相对论质量

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

式中  $m_0$  是物体静止时的质量，称为**静止质量**， $m$  是物体以速度  $v$  运动时的质量。上式称为**质速关系**，它揭示物质与运动的不可分割性。

#### 2. 狭义相对论动力学方程

狭义相对论中，质点的动量为

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

狭义相对论的动力学方程为

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

当  $v \ll c$  时，上式变成  $F \approx m_0 \frac{dv}{dt} = m_0 a$ ，即牛顿第二定律。

#### 3. 相对论的动能

$$E_K = mc^2 - m_0 c^2 = (m - m_0)c^2.$$

它表明质点的动能等于因运动而增加的质量  $\Delta m = (m - m_0)$  与光速平方的乘积。

当  $v \ll c$  时，将上式按泰勒级数展开，

$$E_n = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) =$$

$$m_0 c^2 \left[ \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \frac{3v^4}{8c^4} + \dots \right) - 1 \right],$$

忽略高次项,即得经典力学中的动能公式  $E_K = \frac{1}{2} m v^2$ 。

#### 4. 质能关系

$$E_0 = m_0 c^2,$$

$$E = m c^2,$$

式中  $m_0 c^2$  是物体静止时所具有的能量,称为物体的**静止能量**,用符号  $E_0$  表示。 $m c^2$  是物体运动时所具有的能量。上面两式称为质能关系。

质能关系揭示了质量和能量这两个物质基本属性之间的内在联系,即一定的质量相应地有一定的能量。质量与能量是统一的,是同时消长,同时守恒的。

质能关系是核能利用的理论基础,核反应(重核裂变和轻核聚变)中,会出现质量亏损(即反应后的静止质量小于反应前的静止质量),使静止能量转化为动能而释放出来,这就是核能(俗称原子能)。

#### 5. 相对论能量和动量关系

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2.$$

### 四、狭义相对论和电磁场

#### 1. 电荷的相对论不变性

在不同的惯性系中,同一带电粒子的电量不变,电荷的这一特性称为电荷的相对论不变性。

## 2. 电磁场量的相对论变换关系

$$E'_x = E_x, \quad B'_x = B_x,$$

$$E'_y = \frac{E_y - VB_z/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad B'_y = \frac{B_y + VE_z/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

$$E'_z = \frac{E_z + VB_y/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad B'_z = \frac{B_z - VE_y/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

若把沿着参考系运动方向的分量记作  $E_{//}$  和  $B_{//}$ , 垂直运动的方向的分量记作  $E_{\perp}$  和  $B_{\perp}$ , 则电磁场的变换公式可简捷地表示为

$$E'_{//} = E_{//}, \quad B'_{//} = B_{//},$$

$$E'_{\perp} = \frac{E_{\perp} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}_{\perp}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad B'_{\perp} = \frac{B_{\perp} - \mathbf{V} \times \mathbf{E}_{\perp}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

它们的逆变换略。

## 五、广义相对论

### 1. 广义相对论的基本原理

#### (1) 等效原理

引力和非惯性系中的惯性力等效, 也就是引力场和加速度的作用是等价的。

#### (2) 广义相对性原理

一切物理定律在所有参考系(无论是惯性的或非惯性的)中都具有相同的形式, 所有的参考系都是等价的。

### 2. 广义相对论效应及实验验证

#### (1) 光线的引力偏转

在广义相对论中, 光线经过引力场时, 将会由于空间弯曲而偏向引力中心。爱因斯坦曾预言, 如果

星光擦过太阳边缘到达地球,则太阳引力场所造成的星光偏转角为  $1.75''$ ,这个预言于 1919 年日全食时被证实。

### (2) 引力红移

根据等效原理可以推出,处于引力场中的时钟频率或原子辐射的频率要受到引力势的影响而减小,这就是引力红移。直到 20 世纪 60 年代得到了满意的结果。

### (3) 行星近日点的进动

天文学家观测发现,行星的椭圆轨道并不是严格闭合的,它们的近日点有进动。牛顿力学曾对水星近日点的进动进行计算,理论值与实际观测值每世纪差了  $43.11''$ 。爱因斯坦按时空弯曲对平方反比律加以修正,计算结果与观测结果十分吻合。

### (4) 雷达回波延迟

从地球上用雷达向某星球发射电磁波,再接收反射回波。如果使电磁波掠过太阳表面附近,则往返一次所需的时间要比远离太阳往返一次所需的时间长一些。这一现象称为雷达回波延迟。1971 年测量了金星的雷达回波延迟,理论计算值与实验值偏离不到 2%。



## 第十九章 早期量子理论

### 一、普朗克的能量子假设

#### 1. 热辐射的基本概念

一切物体的分子都包含有带电粒子,因此分子的热运动将导致物体向外不断地发射电磁波,这种辐射因与温度有关,故称为热辐射。无论高温物体还是低温物体都有热辐射。

定量描写热辐射规律的物理量有辐射出射度、吸收比和出射比。

#### (1) 辐射出射度

在单位时间内从物体表面单位面积上所辐射出来的各种波长电磁波能量的总和,称为该物体的辐射出射度,简称辐射度。它是辐射物体的绝对温度  $T$  的函数,用  $M(T)$  表示。

在单位时间内从物体表面单位面积上所辐射出来的波长在  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的电磁波能量  $dM(T)$ ,与波长间隔成正比,那么  $dM(T)$  与  $d\lambda$  的比值称为单色辐出度,用  $M_\lambda(T)$  表示,即

$$M_\lambda(T) = \frac{dM(T)}{d\lambda}。$$

物体的辐出度与单色辐出度的关系为

$$M(T) = \int dM(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda。$$

## (2) 吸收比和反射比

物体在温度  $T$  时,吸收和反射波长在  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的电磁波能量与相应波长的入射波能量之比,称为该物体的单色吸收比和单色反射比,分别用  $\alpha(\lambda, T)$  和  $r(\lambda, T)$  表示。对于不透明的物体,有

$$\alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1。$$

## 2. 基尔霍夫定律和黑体

基尔霍夫应用热力学理论得到,对每一个物体来说,单色辐出度与吸收比的比值,是一个与物体性质无关而只与温度和辐射波长有关的普适函数,处于热平衡的物体有

$$\frac{M_{1\lambda}(T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_{2\lambda}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \cdots = M_{0\lambda}(T),$$

这就是基尔霍夫定律。若一个物体是良好的吸收体,则它必定也是一个良好的辐射体。

如果一个物体在任何温度下,对任何波长的入射辐射能的吸收比都等于 1,即  $\alpha(\lambda, T) = 1$ ,则称它为**绝对黑体**,简称**黑体**。

## 3. 黑体辐射的基本定律

(1) 斯特藩(J. Stefan)-玻耳兹曼(L. Boltzmann)定律

黑体的辐出度与黑体温度的四次方成正比,即

$$M_0(T) = \sigma T^4,$$

其中比例常量  $\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,称为**斯特藩常量**。

(2) 维恩(W. Wein)位移定律

黑体辐射光谱中辐射最强的波长  $\lambda_m$  与黑体温度成反比,即

$$\lambda_{\pi} T = b,$$

其中常量  $b = 2.897756 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

#### 4. 普朗克的量子假设

在一定的温度下,黑体的单色辐出度  $M_{0\lambda}(T)$  按波长分布的实验曲线如图 19.1 所示。如何从理

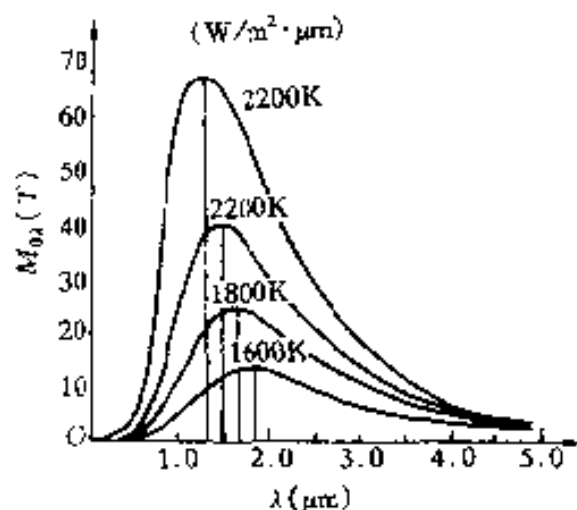


图 19.1

论上导出  $M_{0\lambda}(T)$  的数学表达式,19 世纪末许多物理学家根据经典物理学理论导出的公式都与实验结果不相符合。1900 年,普朗克(M. Planck)综合他人的公式,提出了一个与实验结果符合得很好的公式,即

$$M_{0\lambda}(T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1},$$

式中  $c$  是光速,  $k$  是玻尔兹曼常量,  $h$  是一个新引入的常量,后来称为普朗克常量,  $h$  是一个普适量,其国际推荐值为

$$h = 6.6260755(40) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}.$$

普朗克对上式作理论解释时,必须作如下的假

设:频率为  $\nu$  的谐振子,其能量取值为  $\epsilon_0 = h\nu$  的整数倍,  $\epsilon_0 = h\nu$  称为能量子。这个假设称为普朗克能量子假设。

普朗克假设是对经典物理学的重大突破,宣告了量子物理学的诞生,普朗克因此成为量子理论的奠基人,荣获 1918 年诺贝尔物理学奖。

## 二、爱因斯坦的光子理论

### 1. 光电效应的实验规律

金属及其化合物在电磁辐射的照射下发射电子的现象,称为光电效应。其所发射的电子称为光电子,所形成的电流称为光电流。

光电效应的实验规律如下:

- ① 饱和光电流强度与入射光强成正比。
- ② 光电子的最大初动能随入射光的频率增加而增加,与入射光强无关。
- ③ 对于每一种金属,只有当入射光频率  $\nu$  大于一定频率  $\nu_0$  时,才会产生光电效应,频率  $\nu_0$  称为该金属的遏止频率,或称红限。
- ④ 光电效应是瞬时发生的。

### 2. 爱因斯坦的光子理论

光电效应的实验规律是光的波动理论无法解释的。1905 年爱因斯坦(A. Einstein)提出:光在空间传播时,一束光是一群以光速  $c$  运动的粒子流,这些粒子称为光量子,现称为光子。每一光子的能量为  $\epsilon = h\nu$ ,  $\nu$  是光的频率,  $h$  为普朗克常量。

按照光子理论,光电效应可解释如下:当金属中一个自由电子从入射光中吸收一个光子后,就获得

能量  $h\nu$ , 如果  $h\nu$  大于电子从金属表面逸出时所需的逸出功  $A$ , 这个电子就可以从金属中逸出, 根据能量守恒定律, 有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A,$$

式中  $\frac{1}{2}mv_m^2$  是光电子的最大初动能。上式称为爱因斯坦光电效应方程。

### 3. 光子

光子不仅具有能量, 而且具有质量和动量等一般粒子共有的特性。光子的质量

$$m_\varphi = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}。$$

由  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$  和光子的运动速度  $c$  可知, 光子的静质量

$$m_{\varphi 0} = 0,$$

光子的动量

$$p = m_\varphi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}。$$

光子的能量和动量两关系式把光的微粒性和波动性联系起来, 动量和能量是描述粒子性的, 而频率和波长是描述波动性的。光的这种双重性质称为光的波粒二象性。

### 4. 康普顿效应

1923年康普顿(A. C. Compton)发现: 单色 X 射线照射石墨等物质, 被物质散射后的射线有两种波长, 其中一种波长比入射线长, 且波长的改变量与入射线波长无关, 而随散射角的增大而增大。这种波

长改变的散射称为康普顿散射或康普顿效应。我国物理学家吴有训曾在这方面做过很多工作。

按照经典电磁波理论,不能说明康普顿效应。按照光的量子理论,入射光子与散射物质的自由电子发生弹性碰撞,在碰撞过程中,电子吸收入射光子能量后,发射一个波长较长的光子,电子获得一定的动量和能量反冲。应用弹性碰撞过程中遵守的能量守恒定律和动量守恒定律,计算得到波长改变的公式为

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

式中  $m_0$  为电子的静止质量,  $\theta$  为光子的散射角,  $\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 0.0024 \text{ nm}$ , 称为电子的康普顿波长。

康普顿效应理论和实验完全一致,充分证明了光子理论的正确性,又首次证明了微观粒子相互作用过程也遵循动量守恒定律和能量守恒定律。

### 三、玻尔的量子假设

经典物理学在原子的行星结构和原子光谱的谱线规律问题上遇到重大的困难,玻尔(N. Bohr)以普朗克能量子化和爱因斯坦光子概念为基础,提出了原子的玻尔假设。

#### 1. 定态假设

原子系统只能处在一系列不连续的能量状态,在这些状态下,虽然电子绕核作加速运动,但并不辐射电磁波,这些状态称为原子系统的稳定状态,简称

定态。相应的能量分别为  $E_1, E_2, E_3, \dots$  ( $E_1 < E_2 < E_3 < \dots$ )。

### 2. 频率条件

当原子从一个能量为  $E_n$  的定态跃迁到另一能量为  $E_k$  的定态时,就要发射或吸收一个频率为  $\nu_{kn}$  的光子

$$\nu_{kn} = \frac{|E_n - E_k|}{h},$$

当  $E_n > E_k$  时发射光子,  $E_n < E_k$  时吸收光子。

### 3. 角动量量子化条件

在电子绕核作圆周运动中,其稳定状态必须满足电子的角动量  $L$  等于  $\frac{h}{2\pi}$  的整数倍的条件,即

$$L = n \frac{h}{2\pi}, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

或  $L = n\hbar, (n = 1, 2, 3, \dots)$

式中  $n$  为正整数,称为量子数,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  称为约化普朗克常量,其值等于  $1.0545887 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。

玻尔理论对氢原子光谱的解释获得了很大的成功,同时玻尔关于定态的概念和光谱线频率的假设,在原子结构和分子结构的现代理论中,仍然是有用的概念。玻尔的创造性工作对量子力学的建立有着深远的影响。

## 第二十章 量子力学

### 一、德布罗意物质波假设、微观粒子的波粒二象性

1924年,德布罗意(L. V. de Broglie)假设:不仅光具有波粒二象性,一切实物粒子(如电子、质子、中子、原子、分子等)也都有波粒二象性。与一定能量  $E$  和动量  $p$  的实物粒子相联系的波的频率和波长分别为

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = \frac{m_0c^2}{h\sqrt{1-v^2/c^2}};$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0v}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}。$$

上面两式称为**德布罗意关系式**。这种和实物粒子相联系的波称为**德布罗意波**或**物质波**。

微观粒子具有波粒二象性的假说,在1927年由戴维孙(C. J. Davisson)和革末(L. H. Germer)以及汤姆孙(G. P. Thomson)分别用实验证实。

微观粒子的波动性在现代科学技术上已得到广泛应用,电子显微镜即为一例。中子衍射技术已成为研究固体微观结构的最有效的方法之一。



## 二、不确定关系

在经典力学中,运动物体在任何时刻都有确定的位置、动量、能量和角动量等。微观粒子具有明显的波动性。1927年,海森堡(W. Heisenberg)指出微观粒子在位置与动量之间存在着相互制约关系,两者不确定量之间关系为

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2},$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2},$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}。$$

上式称为海森堡坐标和动量的不确定关系(旧称测不准关系)。它的物理意义是:微观粒子不可能同时具有确定的位置和动量,粒子某方向的位置坐标不确定量  $\Delta x$  越小,则同一方向动量分量的不确定量  $\Delta p_x$  就越大,反之亦然。

如果微观粒子处于某一状态的时间为  $\Delta t$ ,则其能量必有一个不确定量  $\Delta E$ ,两者之间的关系为

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}。$$

上式称为能量和时间的不确定关系。利用这个关系式可以解释原子各激发态的能级宽度  $\Delta E$  和它在该激发态的平均寿命之间的关系。

## 三、波函数及其统计解释

### 1. 波函数

考虑到微观粒子具有波动性,薛定谔

(E. Schrödinger)首先提出用物质波波函数描述微观粒子的运动状态。一个沿  $x$  轴正方向运动, 能量为  $E$ 、动量为  $p$  的自由粒子, 对应的平面物质波的波函数为

$$\Psi(x, t) = \Psi_0 e^{i\frac{h}{\lambda}(Et - px)},$$

物质波的频率和波长同粒子的能量和动量之间的关系为  $E = h\nu$ ,  $p = \frac{h}{\lambda}$ 。对于在空间的平面物质波的波函数为

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \Psi_0 e^{i\frac{h}{\lambda}(Et - \mathbf{p} \cdot \mathbf{r})}.$$

## 2. 波函数的统计解释

物质波波函数是复数, 它本身并不代表任何可观测的物理量。1926年, 玻恩(M. Born)提出了物质波波函数的统计解释。他指出: 实物粒子的物质波是一种概率波,  $t$  时刻粒子在空间  $\mathbf{r}$  处附近的体积元  $dV$  中出现的概率  $dW$  与该处波函数的平方成正比, 可写成

$$dW = |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 dV = \Psi(\mathbf{r}, t)\Psi^*(\mathbf{r}, t)dV,$$

式中  $\Psi^*(\mathbf{r}, t)$  是波函数  $\Psi(\mathbf{r}, t)$  的共轭复数。由上式可知, 波函数绝对值平方  $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2$  代表  $t$  时刻粒子在空间  $\mathbf{r}$  处的单位体积中出现的概率, 称为概率密度。

## 3. 统计解释对波函数的要求

由于在空间任一点粒子出现的概率应该是唯一的和有限的, 空间各点概率分布应该是连续变化的, 因此波函数必须单值、有限、连续。

又因为粒子必定要在空间的某点出现,因此粒子在空间各点出现的概率总和等于 1,即

$$\iiint_{(V)} |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 dx dy dz = 1。$$

上式称为波函数的归一化条件。

#### 四、薛定谔方程

##### 1. 含时薛定谔方程(简称薛定谔方程)

质量为  $m$  的粒子在外力场中运动时,其势能是空间坐标和时间的函数,即  $U(\mathbf{r}, t)$ ,薛定谔方程为

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - U(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}。$$

如果采用拉普拉斯算符  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ,上式可写为

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, t) + U(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}。$$

有时也用哈密顿算符  $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U$ ,这样,薛定谔方程可简写为

$$\hat{H}\Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}。$$

在解薛定谔方程中,总能量  $E$  具有某些特定值时才有解,这些  $E$  值叫做能量的本征值,而相应的波函数则称为本征解或本征函数。

##### 2. 定态薛定谔方程

如果粒子在稳定力场中运动,此时势能函数  $U$  与

时间无关而只是坐标的函数,即  $U(\mathbf{r})$ ,这时处于定态,粒子的定态波函数可用分离变量法写成坐标函数  $\Psi(\mathbf{r})$  与时间函数  $f(t)$  的乘积,而  $f(t) = e^{\frac{i}{\hbar}Et}$ ,于是

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \Psi(\mathbf{r})e^{-\frac{i}{\hbar}Et}。$$

这样  $\Psi(\mathbf{r})$  所满足的薛定谔方程为

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi(\mathbf{r}) = 0。$$

这就是定态薛定谔方程,也称不含时间的薛定谔方程。

## 五、一维定态问题

### 1. 无限深方势阱

若粒子在保守力场的作用下被限制在一定范围内运动,例如,电子在金属中的运动,质子在原子核中的运动等,它们的势能曲线的形状与陷阱相似,故称为势阱。无限深势阱是理想的势阱模型。

设一维无限深势阱的势能分布如下:

$$U(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < a \quad (\text{阱内}), \\ \infty, & x \leq 0, x \geq a \quad (\text{阱外}), \end{cases}$$

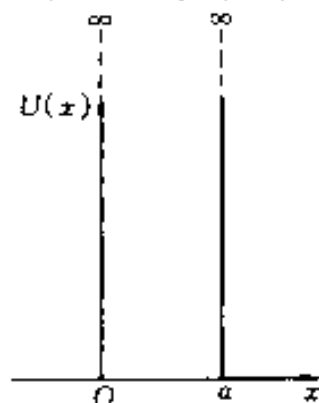


图 20.1

其势能曲线如图 20.1 所示。

按经典理论,处于无限深势阱中的粒子,其能量可取任意的有限值,粒子在宽度为  $a$  的势阱内各处的概率是相等的。但从量子力学来看,求解定态薛定谔方程得到以下结论:

① 粒子的能量不能连续地取任意值,只能取分立值(图 20.2),

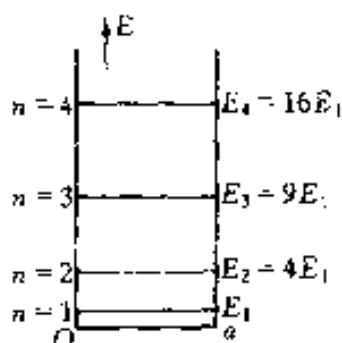


图 20.2

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

这就是说能量是量子化的。整数  $n$  称为粒子能量的量子数。

② 根据计算得波函数:

$$\Psi_i(x, t) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} x e^{-\frac{i}{\hbar} E_n t} \quad (\text{阱内}),$$

$$\Psi_e(x, t) = 0 \quad (\text{阱外}).$$

由式知  $n=0, \Psi_i(x, t) = 0$ , 说明不存在这种状态, 所以  $n$  最小取 1, 因而粒子的最小能量不等于零。

③ 势阱中粒子的波函数  $\Psi(x)$  和粒子的概率密度  $|\Psi(x)|^2$  的分布曲线如图 20.3 所示。从图中可以看出, 粒子出现的概率是不均匀的。按经典

理论,粒子在势阱中不受力,在阱壁间作匀速直线运动,所以粒子出现的概率处处一样。

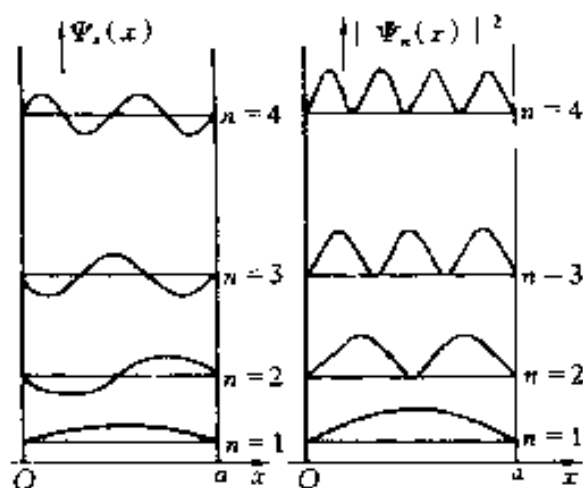


图 20.3

## 2. 线性谐振子

如果在一维空间中运动粒子的势能为

$$U = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 x^2,$$

其中  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  是一常量,则这种体系称为线性谐振子。在量子力学中,谐振子是一个十分重要的物理模型。如分子的振动、固体晶格振动等,都可以近似

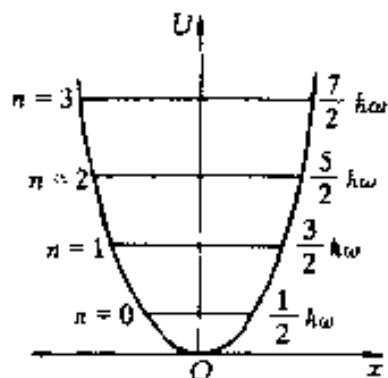


图 20.4

地看成是谐振子系统。

按经典力学,谐振子将以一定的频率围绕平衡位置作简谐振动,其振幅为  $A = \sqrt{\frac{2E}{k}}$ , 其中能量  $E$  可取任意的、连续变化的数值。但在量子力学中,谐振子的能量有一定的限制,即

$$E = E_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

即谐振子的能量只能取分立值,其能级是均匀分布的,两相邻能级间的间隔均为  $\hbar \omega$ , 而谐振子的基态能量(零点能)并不为零,而是  $\frac{1}{2} \hbar \omega$ , 这说明,即使在绝对零度,原子并不静止,仍有零点振动。

### 3. 势垒穿透、隧道效应

若粒子在力场中沿  $x$  方向运动,其势能分布如下:

$$U(x) = \begin{cases} U_0, & 0 \leq x \leq a, \\ 0, & x < 0, x > a. \end{cases}$$

这种势能分布称为一维方势垒(图 20.5)。

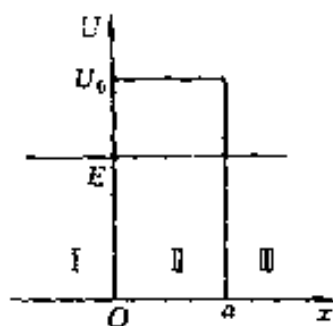


图 20.5

在经典力学中,只有能量  $E$  大于  $U_0$  的粒子才

能超过势垒运动到  $x > a$  的区域; 能量  $E$  小于  $U_0$  的粒子运动到势垒左边缘  $x = 0$  处就会被反射回去, 不能穿过势垒。但从量子力学的观点来看, 考虑到粒子的波动性, 无论粒子能量  $E$  是大于  $U_0$  还是小于  $U_0$ , 都有一定的概率穿透势垒, 也有一定的概率被反射。能量为  $E$  的粒子能穿透比能量更高的势垒的现象, 称为隧道效应。

1982年, 宾尼(G. Binnig)和罗雷尔(H. Rohrer)等人利用电子的隧道效应, 研制成功了扫描隧道显微镜(简称STM)。

金属的表面处存在着势垒, 阻止电子向外逸出, 但由于隧道效应, 仍有部分电子穿过势垒到达金属外表面, 并形成一层电子云。如将原子线度的极细的探针和被研究样品的表面作为两个电极, 当样品与针尖的距离非常接近时, 它们的电子云就可能重叠。若在样品和探针之间加上微小的电压, 即形成隧道电流。如果设法控制隧道电流保持恒定, 当针尖在样品上扫描时, 探针在垂直于样品方向上的高低变化, 反映出样品的表面情况(图 20.6)。利用

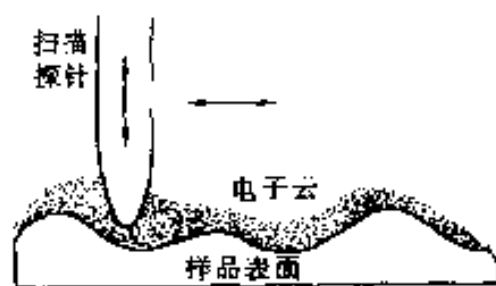


图 20.6



STM,其分辨率可达 $10^{-2}$ nm量级。扫描隧道显微镜的出现,使人类第一次能够实时地观测单个原子在物质表面上的排列状态以及与表面电子行为有关的性质,在表面科学、材料科学和生命科学等领域的研究中有着重大的意义和广阔的应用前景。

## 第二十一章 原子和分子物理

### 一、玻尔氢原子理论

#### 1. 氢原子光谱的实验规律

① 氢原子光谱是彼此分立的线状光谱, 每一条谱线具有确定的波长(或频率)。

② 每一条光谱线的波数  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$  都可以表示为两项之差, 即

$$\tilde{\nu} = T(k) - T(n) = R_H \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

式中  $k$  和  $n$  均为正整数, 且  $n > k$ ,  $R_H$  称为氢光谱的里德伯常量, 近代测量值为  $R_H = 1.0973731 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ;  $T(k) = \frac{R_H}{k^2}$ ,  $T(n) = \frac{R_H}{n^2}$  称为氢的光谱项。上式称为里德伯-里兹并合原则。

③ 当整数  $k$  取一定值时,  $n$  取大于  $k$  的各整数所对应的各条谱线构成一谱线系, 每一谱线系都有一个线系极限(对应于  $n \rightarrow \infty$  的情况)。

$k = 1, n = 2, 3, \dots$  莱曼(T. Lyman)系 (1914年), 紫外区;

$k = 2, n = 3, 4, \dots$  巴耳末(J. J. Balmer)系 (1885年), 可见光区;

$k = 3, n = 4, 5, \dots$  帕邢(F. Paschen)系 (1908)

年), 红外区;

$k = 4, n = 5, 6, \dots$  布拉开(F. Brackett)系 (1922年), 红外区;

$k = 5, n = 6, 7, \dots$  普丰德(H. A. Pfund)系 (1924年), 红外区;

$k = 6, n = 7, 8, \dots$  哈弗莱(C. S. Humphreys)系 (1953年), 红外区。

## 2. 玻尔的氢原子理论

① 原子系统只能处在一系列不连续的能量状态, 在这些状态中, 虽然电子绕核作加速运动, 但并不辐射电磁波, 这些状态称为原子系统的**稳定状态**, 简称**定态**。

② 当原子从一个能量为  $E_n$  的定态跃迁到另一能量为  $E_k$  的定态时, 就要发射或吸收一个频率为  $\nu_{kn}$  的光子,

$$\nu_{kn} = \frac{|E_n - E_k|}{h},$$

上式称为**玻尔频率公式**。

③ 在电子绕核作圆周运动时, 其角动量  $L$  必须满足  $\frac{h}{2\pi}$  的整数倍的条件, 即

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = nh, (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中  $h = h/2\pi$ , 称为**约化普朗克常量**,  $n$  称为**量子数**。上式称为**角动量量子化条件**。

## 3. 氢原子的轨道半径和能量

根据牛顿运动定律和玻尔假设, 可得原子处于第  $n$  个定态时电子的轨道半径(图 21.1)为

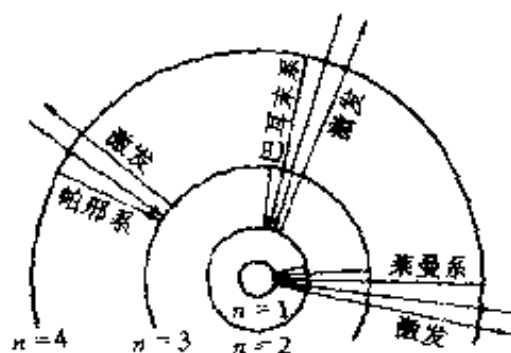


图 21.1

$$r_n = n^2 \left( \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right), (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中  $m$  和  $e$  是电子的质量和电量,  $\epsilon_0$  为真空的介电常量。以  $n=1$  代入得

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}。$$

这是氢原子中电子的最小轨道半径,称为玻尔半径。

氢原子能量应等于电子的动能和势能之和,即

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = - \frac{1}{n^2} \left( \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right), (n = 1, 2, 3, \dots)$$

原子系统的能量是不连续的,这称为能量量子化。这种量子化的能量值称为能级(图 21.2)。以  $n=1$  代入得

$$E_1 = - \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{eV}。$$

这是氢原子的最低能级,也称基态能级。

根据玻尔理论,可得氢原子光谱的波数公式为

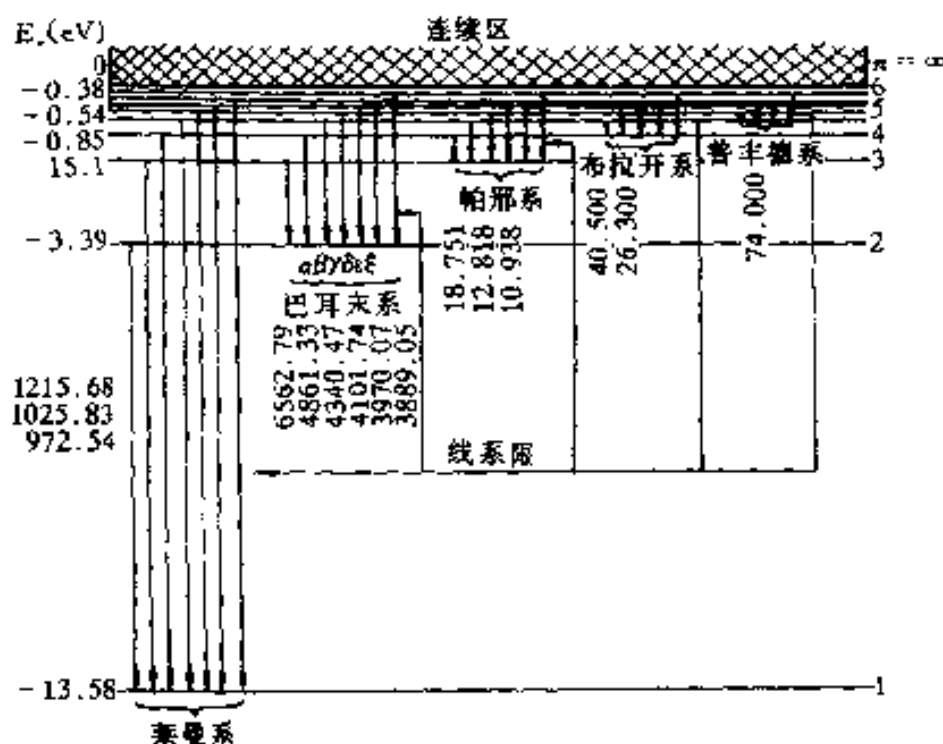


图 21.2

$$\bar{\nu}_{nk} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

又可得里德伯常量的理论值为

$$R_{H(\text{理论})} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1.0973731 \times 10^7 \text{m}^{-1}.$$

理论值和实验值符合得很好。

#### 4. 玻尔理论的缺陷

玻尔理论本身仍是以经典理论为基础的,而所引进的定态假设又是和经典理论相抵触的。量子化条件的引进也没有适当的理论解释。实际上,玻尔理论是经典理论加上量子条件的混合物,没有一个完整的理论体系。

## 二、量子力学中的氢原子问题

### 1. 量子化条件和量子数

在氢原子中,电子的势能函数为

$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

式中  $r$  为电子离原子核的距离。将  $U(r)$  代入薛定谔方程,采用球极坐标,在一般情况下,波函数  $\psi$  既是  $r$  的函数,又是  $\theta$  和  $\varphi$  的函数,可写成

$$\Psi(r, \theta, \varphi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi),$$

其中  $R(r)$ ,  $\Theta(\theta)$ ,  $\Phi(\varphi)$  分别是  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  的函数。在求解方程时,很自然地得到氢原子的一些量子化特性。

#### (1) 能量量子化和主量子数

氢原子的能量必须满足量子化条件

$$E_n = -\left(\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}\right) \frac{1}{n^2},$$

式中  $n=1, 2, 3, \dots$ , 称为**主量子数**。

#### (2) 轨道角动量量子化和角量子数

电子绕核运动的角动量必须满足量子化条件

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi},$$

式中  $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$  称为**角量子数**或**副量子数**。

#### (3) 轨道角动量空间量子化和磁量子数

电子绕核运动的角动量  $L$  的方向在空间的取向不能连续地改变,而只能取一些特定的方向,即角动量  $L$  在外磁场方向的投影必须满足量子化条件:

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi},$$

式中  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ , 称为磁量子数。

综上所述, 氢原子中的稳定状态是用一组量子数  $n, l, m$  来描述的。

## 2. 氢原子中电子的概率分布

在量子力学中, 没有轨道的概念, 取而代之的是空间概率分布的概念。在氢原子中, 电子的波函数,  $\psi(r, \theta, \varphi)$  对应于每一组量子数  $(n, l, m_l)$ , 有一确定的波函数描述一个确定的状态, 即

$$\psi_{n,l,m_l} = R_{nl}(r) \Theta_{l,m_l}(\theta) \Phi_{m_l}(\varphi)。$$

在空间体积元  $dV = r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$  内, 电子出现的概率为

$$|\psi|^2 dV = |R|^2 |\Theta|^2 |\Phi|^2 r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi,$$

其中  $|R_{nl}(r)|^2 r^2 dr$  表示电子在  $r$  和  $r + dr$  之间的

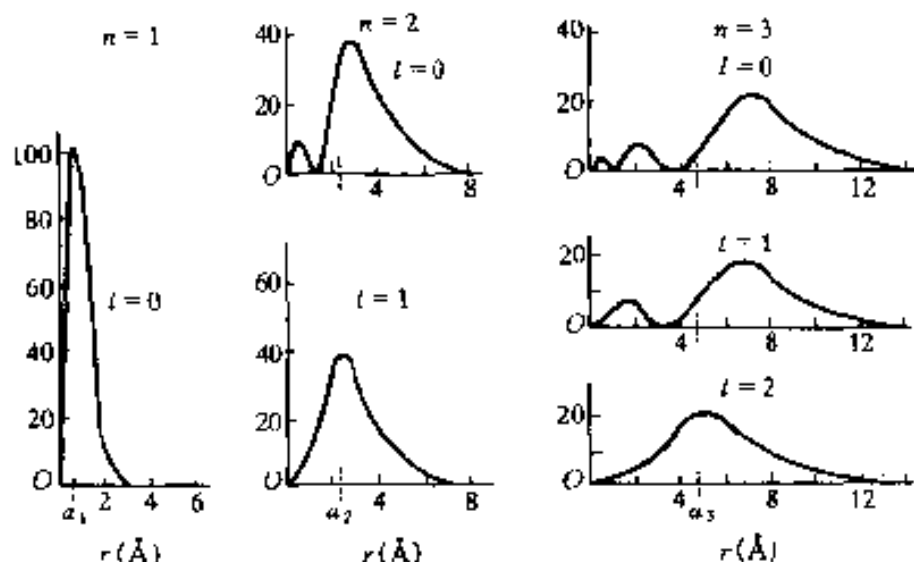


图 21.3

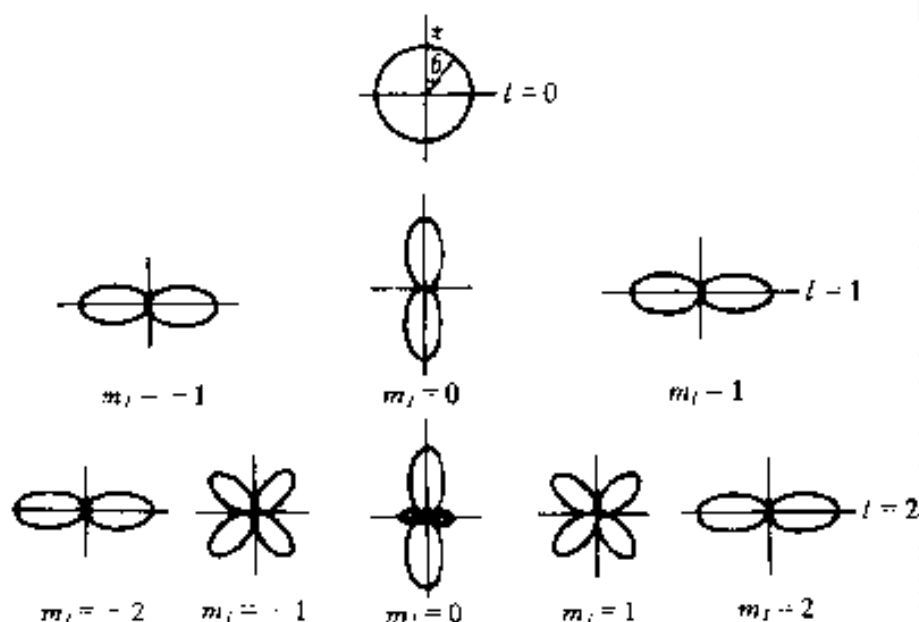


图 21.4

概率,称为径向概率分布;  $|\Theta_{l,m_l}(\theta)|^2 \sin\theta d\theta$  表示电子出现在  $\theta$  和  $\theta + d\theta$  之间的概率,称为角向概率分布,图 21.3 和图 21.4 分别表示氢原子中电子径向概率分布和角向概率分布。

为了形象地表示电子的空间分布,通常将概率大的区域用浓影,将概率小的区域用淡影表示出来,称为**电子云图**。所谓电子云,并不表示电子真的像一团云雾罩在原子核周围,而只是概率分布的一种形象化描述而已。

### 三、电子的自旋

1925年,乌伦贝克(G. E. Uhlenbeck)和古兹密特(S. A. Goudsmit)提出了电子自旋的假设。他们认为电子除轨道运动外,还存在着自旋运动。电子的



■ 自旋角动量为

$$S = \sqrt{s(s+1)} \frac{h}{2\pi}, \quad s = \frac{1}{2},$$

而在外磁场方向上的分量为

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi}, \quad m_s = \pm \frac{1}{2},$$

式中  $s$  称为自旋量子数,  $m_s$  称为自旋磁量子数。

引入了电子自旋的概念,使碱金属原子光谱的双线(如钠黄光的 589.0nm 和 589.6nm)以及原子光谱线在磁场中分裂成偶数条的反常塞曼效应等现象得到了很好的解释。

#### 四、多电子原子

##### 1. 四个量子数

在多电子原子中,电子的运动除受到原子核势场的引力作用外,还受到其他电子的排斥作用,情况是很复杂的。但原子中的单个电子态仍可由四个量子数加以描写。

① 主量子数  $n$ :  $n = 1, 2, 3, \dots$ , 它决定原子中电子的能量。

② 角量子数(或副量子数)  $l$ :  $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ , 它决定电子轨道角动量。一般说来,处于同一主量子数  $n$  而不同角量子数  $l$  的状态中的电子,其能量稍有不同。

③ 磁量子数  $m_l$ :  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ , 它决定轨道角动量在外磁场方向上的分量。

④ 自旋量子数  $m_s$ :  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ , 它决定电子自旋角动量在外磁场方向上的分量。

## 2. 原子的电子壳层结构

原子中的电子按不同的量子状态分布在各个壳层中。壳层的划分由主量子数  $n$  决定。主量子数  $n$  与壳层名称的对应关系为:

主量子数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	...
壳层名称	K	L	M	N	O	P	Q	...

在每一个壳层中,具有相同角量子数  $l$  的电子组成支壳层,角量子数  $l$  与支壳层的名称的对应关系为

角量子数 $l$	0	1	2	3	4	5	6	...
支壳层名称	s	p	d	f	g	h	i	...

由量子数  $n$  和  $l$  确定的支壳层,用并排写出的  $n$  的数值和代表  $l$  值的字母来表示,例如  $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, \dots$  等。

## 3. 电子在壳层上的分布

基态原子的核外电子排布服从以下原则。

### (1) 泡利不相容原理

在一个原子中不可能有两个或两个以上的电子处于完全相同的量。也就是说,一个原子中任何两个电子都不可能具有一组完全相同的量子数  $(n, l, m_l, m_s)$ 。

根据泡利不相容原理,可以算出各壳层上最多可容纳的电子数为

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(l+1) = 2n^2。$$

表 21.1 列出了原子内各壳层和支壳层上最多可容纳的电子数。

表 21.1 原子中电子按壳层排布表

$n$	$l$	0	1	2	3	4	5	6	$Z_n$
		s	p	d	f	g	h	i	
1.	K	2							2
2.	L	2	6						8
3.	M	2	6	10					18
4.	N	2	6	10	14				32
5.	O	2	6	10	14	18			50
6.	P	2	6	10	14	18	22		72
7.	Q	2	6	10	14	18	22	26	98

### (2) 能量最小原理

在基态时原子中的电子的排布应使原子的能量最低,因此,能级越低也就是离核越近的壳层首先被电子填满,其余电子依次向未被占据的最低能级填充,直至所有  $Z$  个核外电子分别填入可能占据的最低能级为止。

由于能量还和角量子数  $l$  有关,所以有些情况下, $n$  较小的壳层尚未填满时,下一个壳层上就开始有电子填入了。对于原子的外层电子,能级高低可以用  $(n + 0.7l)$  值的大小来比较,其值越大,能级越高,例如 3d 能级比 4s 能级高。因此钾的第 19 个电子不是填入 3d 态,而是填入 4s 态。

化学元素周期表中元素的排列,可以用原子内各个电子壳层中所容纳的电子数来理解。

## 五、分子光谱和分子能级

### 1. 分子光谱

分子光谱是十分复杂的,光谱中往往存在由许多密集谱线组成的一个个光谱带,若干个光谱带又归并成一个光谱带系,因此称为带状光谱。形成带状是分子光谱的特点。往往在一个光谱带的一端谱线特别密集,构成明显的边界称为谱带头,带的另一端密集程度逐渐减小而没有明显边界。分子光谱的波长分布从远红外、近红外,一直到可见光和紫外光交织在一起。

### 2. 分子能级

分子由原子组成,所以分子中既有电子运动也有各原子核之间的相对运动——振动,以及整个分子绕质心的转动。因此分子中的电子运动形成电子能级,与原子核振动状态相对应的有振动能,与分子转动状态相对应的又有转动能。振动和转动能也属分立的能级。这样,分子的总能量为这三部分能量之和。

分子中电子能级之间的能级差一般在  $1 \sim 20\text{eV}$ ,由电子能级跃迁而产生的光谱位于紫外及可见光部分;振动能级的间隔一般在  $0.05 \sim 1\text{eV}$  之间,振动能级之间因跃迁而产生的光谱在近远红外区;转动能级的间隔比前两者小得多,一般小于  $0.005\text{eV}$ ,转动能级之间因跃迁而产生的光谱在远红外区。实际上观察到的分子光谱非常复杂。因为分子的这儿种运动状态都是互相联系的。当分子的振动状态发生变化时,转动状态常常也发生变化,所以振动能级之间的跃迁所产生的光谱由于有转动能级的跃迁而形成一个个光谱带,这是一组很密集的光

谱线。在电子能级之间跃迁时还包含不同振动能级的跃迁,因而会产生很多光谱带,形成一个光谱带系。

## 六、X射线

### 1. X射线发射谱

X射线是1895年伦琴(W. K. Röntgen)首先发现的。开始时不知其本质,故称为X射线。它能使照相底片感光,使气体电离,有很强的穿透能力。它和电子、放射性并称为19世纪末的三大发现。现已知X射线是波长小于1nm的电磁辐射。

X射线的发射谱包含两部分,连续谱及叠加其上的线光谱。连续谱是高速电子轰击靶时由于骤然减速而发出的电磁辐射,故连续谱也称轫致辐射。连续谱与靶的材料无关,但有一极限短波波长 $\lambda_0$ ,短波限由加速电压 $V$ 确定

$$\lambda_0 = \frac{ch}{eV} = \frac{1239.81}{V} \text{ nm},$$

式中 $c$ 为光速, $h$ 为普朗克常量, $V$ 用伏(V)为单位。

线状谱与靶的材料有关。每一元素有一套一定波长的射线谱,故又称标识谱。各元素的标识谱有相似的结构,清楚地分为几个线系,波长最短称为K线系,其他还有波长较K系长的L线系,M线系等。每个线系由若干条谱线组成。

### 2. 莫塞莱定律

莫塞莱(H. G. J. Moseley)发现,各线系有相似结构,给定线的波数与元素的原子序数有关,例如

$$K_{\alpha} \text{ 线: } \bar{\nu} = R(Z-1)^2 \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right],$$

$$L_{\beta} \text{ 线: } \bar{\nu} = R(Z-7.4)^2 \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right],$$

式中  $R$  为里德伯常量。

### 3. 标识谱的产生

标识谱中各线是靶原子中内层电子跃迁时发射的,亦即若轰击电子的能量足够大,可使靶原子中的某内层电子电离,于是稍外层的电子(在选择定则许可的条件下),即可向空态跃迁并发射相应的 X 射线。标识谱中 K 线系是最内层( $n=1$ )以外各层电子跃迁最内层空态发出的,  $K_{\alpha}$  线是  $n=2$  跃迁到  $n=1$  时所发射的,  $K_{\beta}$  线是  $n=3$  跃迁到  $n=1$  时所发射的。L 线系是第二层( $n=2$ )以外各层电子跃迁到第二层空态时发射的,此外还有 M 线系等。

## 七、激光

激光是基于受激发射放大原理而产生的一种相干光辐射,激光的英文名为“laser”就是“light amplification by stimulated emission”第一个字母组成。

### 1. 受激吸收、自发辐射和受激辐射

#### (1) 受激吸收

处于低能态  $E_1$  的原子,受到频率为  $\nu$  的光照射时,若满足  $h\nu = E_2 - E_1$ , 原子就有可能吸收光子向高能态  $E_2$  跃迁,这种过程称为受激吸收,或称原子的光激发,如图 21.5(a)所示。

#### (2) 自发辐射

处于高能态的原子是不稳定的,在没有外界的

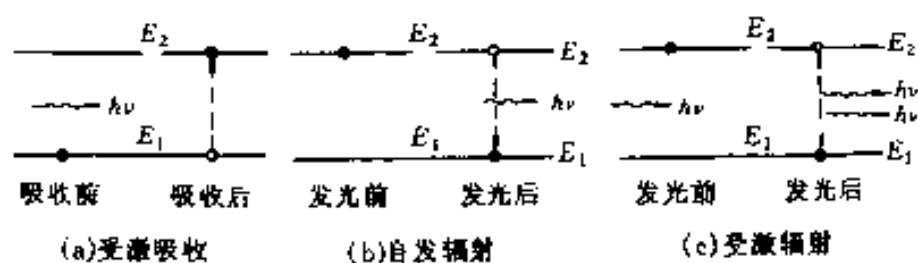


图 21.5

作用下,激发态 $E_2$ 的原子会自发地向低能态 $E_1$ 跃迁,并发射出一个光子,其能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ ,这称为自发辐射,如图 21.5(b)所示。普通光源的发光就属于自发辐射,各原子自发辐射的光子,虽有相同的频率,但初相位、偏振态和传播方向等各不相同,所以是不相干的。

### (3) 受激辐射

处于高能态的原子,如果在自发辐射以前,受到能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的外来光子的诱发作用,就有可能从高能态 $E_2$ 跃迁到 $E_1$ ,同时发射一个与外来光子频率、相位、偏振态和传播方向都相同的光子,这一过程称为受激辐射,如图 21.5(c)所示。

在受激辐射中,一个入射光子作用的结果会得到两个状态全同的光子,如果这两个光子再引起其他原子产生受激辐射,这样两个又变成 4 个……,这就实现了光放大。

## 2. 产生激光的基本条件

一是要有能实现粒子数反转的激活介质,这是前提条件;二是要有满足阈值条件的谐振腔。

### (1) 粒子数反转

在光和原子系统相互作用时,总是同时存在受

激吸收、自发辐射和受激辐射三种过程。要产生光放大,受激辐射必须胜过自激吸收而占优势,但在常温的平衡态下,按玻尔兹曼分布,处于高能态的原子数远远小于低能态的原子数,在这正常分布下,不可能产生光放大。为了实现光放大,必须使处于高能态的原子数大于低能态的原子数,这种反常的分布称为**粒子数反转**。

要实现粒子数反转,首先要有能实现粒子数反转的物质,称为**激活介质**。这种物质必须具有适当的能级结构(三能级系统和四能级系统等,如图 21.6);其次还要求有能量输入系统,使激活介质有尽可能多的原子吸收能量后跃迁到高能态。这种过程通常称为**抽运**、**激励**或**光泵**等。抽运的方法一般用光、气体放电、化学或核能激励。

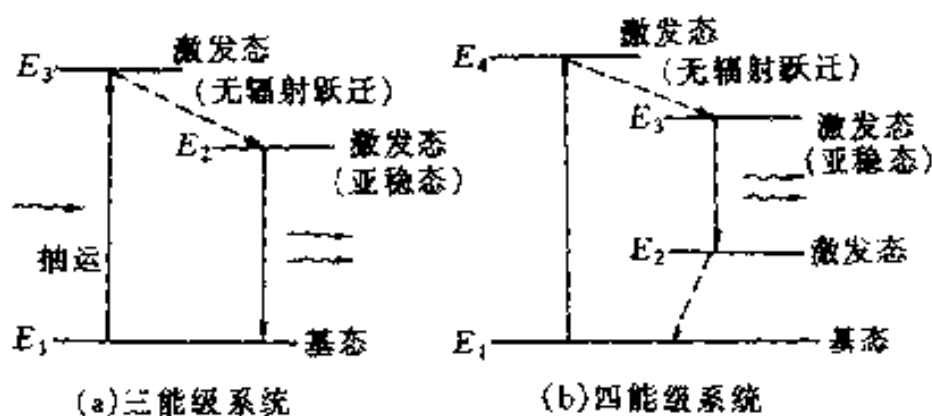


图 21.6

## (2) 光学谐振腔

光学谐振腔是在激活介质两端放置一对互相平行的反射镜,其中一个是全反射镜,另一个是部分反射镜。它的作用是使偏离谐振腔轴线方向运动的光子逸出腔外,只有沿轴线方向的光子,在腔内来回反



射,产生连锁式的光放大,这样从部分反射镜输出的是很强的沿轴向传播的激光(图 21.7)。

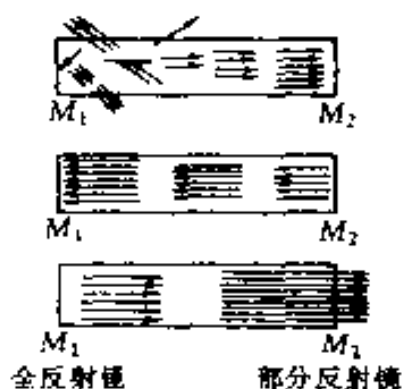


图 21.7

在谐振腔中除了产生光放大作用(或称为增益)外,还存在介质对光的吸收、散射和反射镜的吸收、透射等所造成的损耗。只有当光在谐振腔中来回一次所得到的增益大于损耗时,才能实现光放大,这就是产生激光所必须满足的**阈值条件**。为了实现阈值条件,要求选用增益系数大而损耗小的激活介质,要有合适的长度,并选用反射系数较高的反射镜等等。

### 3. 激光器

任何激光器都是由激励能源、工作物质和谐振腔等组成,如图 21.8 所示。激光器的种类很多,按工作物质分有气体、液体、固体、半导体和自由电子

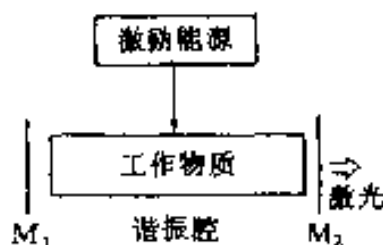


图 21.8

激光器等;按激励方式分有光泵式、电激励式、化学和核泵浦激光器等;按光的输出方式分有连续、脉冲、调 Q、稳频、可调谐激光器等。此外,还可以按输出波段分为远红外直到 X 射线激光器等。现在,激光器的最大连续功率输出达  $10^6\text{W}$ ,最大脉冲功率输出达  $10^{14}\text{W}$ 。表 21.2 列出了常用激光器的主要性能。

表 21.2 常用的激光器

名称	工作物质	典型波长 (nm)	性能
红宝石	掺 $\text{Cr}^{3+}$ 红宝石	694.3	脉冲,大功率
YAG	掺 $\text{Nd}^{3+}$ 钇铝石榴石	1064	连续,中小功率
铍玻璃	掺 $\text{Nd}^{3+}$ 玻璃	1059	大功率
氦氖	He, Ne	632.8, 1150, 3390	连续,小功率
氩离子	$\text{Ar}^+$	488.0, 514.5	连续,大功率
二氧化碳	$\text{CO}_2$	1060	脉冲,连续,大功率
氮分子	$\text{N}_2$	337.1	脉冲
氦镉	He, Cd	441.6, 325.0	连续,中功率
氦锌	He, Zn	747.9, 589.4	
氦硒	He, Se	522.8, 497.6	
染料	染料液体	590~640 等	连续可调谐,小功率
半导体	$\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ 等	800~900	可调谐,小功率

#### 4. 激光的特性和应用

##### (1) 方向性好

激光束的发散角很小,一般为  $10^{-5}\text{sr}$ ~ $10^{-8}\text{sr}$ ,比普通探照灯窄 100 多万倍。若将激光射向几千米外,光束直径仅扩展几厘米,可用于定位、导向、测距等。

##### (2) 单色性好

氦氖激光器发射的 632.8nm 激光的谱线宽度只有  $10^{-9}\text{nm}$ ,而单色性最好的氪灯( $^{86}\text{Kr}$ )的谱线宽

■ 度为  $4.7 \times 10^{-3} \text{ nm}$ , 可作为计量工作的标准光源。

(3) 高亮度

太阳表面的亮度约为  $10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$  数量级, 而目前大功率激光器的输出亮度可高达  $10^{10} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr}) \sim 10^{17} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$  的数量级。可用于打孔、切割、焊接、表面氧化、区域熔化等工业加工; 也可制成激光手术刀作外科手术。

(4) 相干性好

可进行有关的光学实验及科学研究。

## 第二十二章 固体物理

### 一、晶体结构

#### 1. 晶体的特征

固体可分为晶体和非晶体两大类,晶体具有高度对称的有规律的几何外形;晶体的一些物理性质(如弹性模量、硬度、热膨胀系数、导热性、电阻率、电极化强度、电位移矢量、磁化率、折射率等)是各向异性的;晶体还具有一定的熔点。本章所说的固体都是指晶体。

#### 2. 晶体空间点阵

从微观结构看,单晶体的分子、原子或离子在空间呈现有规则的周期性排列,形成空间点阵,称为晶格。整个晶体的结构,可以看作是由格点沿空间三个不同方向各按一定周期性的平移面构成的(图 22.1)。

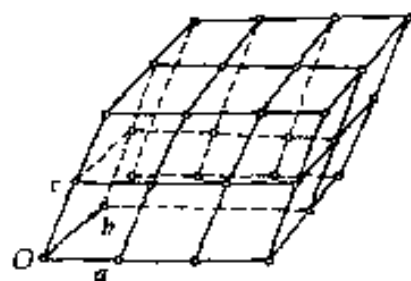


图 22.1

由于晶格的周期性,可以取一个格点,边长等于该方向上的周期的平行六面体作为复杂单元,这样的重复单元称为**晶胞**。 $a, b, c$  代表重复单元的三个棱边之长与取向的矢量,称为**平移矢量**或**基矢**。

### 3. 晶面与密勒指数

将格点沿各个方向划分可构成许多平行且等距离的平面,称为**晶面**。

为了描述晶面的方位,一般用密勒指数( $h, k, l$ )来标记。选取一组平移矢量  $a, b, c$  为坐标轴,设有一晶面与  $a, b, c$  轴交于  $M_1, M_2$  和  $M_3$  三点,截距分别为

$$OM_1 = h'a, \quad OM_2 = k'b, \quad OM_3 = l'c,$$

密勒使用  $h', k', l'$  的倒数的互质整数比  $h, k, l$  来表示晶面,即

$$\frac{1}{h'} : \frac{1}{k'} : \frac{1}{l'} = h : k : l,$$

$h, k, l$  用圆括号表示,称为晶面的**密勒指数**。如图 22.2 所示的晶面为(2,3,6)面。

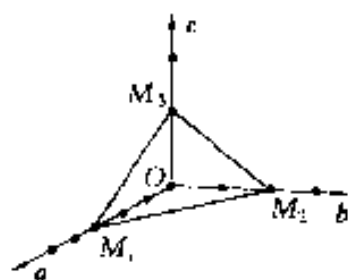


图 22.2

### 4. 晶系

晶格的晶胞可以用其平行六面体的三边之长  $a, b, c$  及交角  $\alpha, \beta, \gamma$  来表示。根据边长及其交角

的不同,晶格的晶胞可以有七种不同的形状,形成七个晶系,即:三斜晶系、单斜晶系、正交晶系、三角晶系、四方晶系、六角晶系、立方晶系。这七个晶系的特征及其对称性见表 22.1。

表 22.1

晶系	晶胞特征	主要对称性
三斜	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	无对称轴 无对称面
单斜	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta > 90^\circ$	具有一个二重对称轴或 一个对称面
正交	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	具有三个互相垂直的二 重对称轴或两个互相垂 直的对 称面
三角	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	具有一个三重对称轴
四方	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	具有一个四重对称轴
六角	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	具有一个六重对称轴
立方	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	具有四个三重对称轴

## 二、晶格振动、晶体的热容量

### 1. 晶格振动

晶体内的粒子总是围绕其平衡位置作不停地振动,称此振动称为晶格振动。

在通常温度下,晶格振动对于晶体的物理性质产生很重要的影响。例如,固体中的电导率、比热、

热膨胀、热传导以及红外吸收、介质的电击穿等都与晶格振动直接有关。

## 2. 格波

晶格振动是指晶体中诸原子(离子)在集体地振动,由于晶体内原子间有相互作用,因而各原子的振动之间存在固定的相位关系,因而各晶格原子在平衡位置附近振动时,将以前进波的形式在晶体中传播,这种波称为格波。

对由  $N$  个原胞、每个原胞含有  $n$  个原子组成的晶格的晶格振动,每个原胞有  $3n$  支格波。其中 3 支频率较低,描述不同原胞之间的相对运动,称为声学波。其余  $3(n-1)$  支是频率较高,描述同一原胞内各原子之间的相对运动,称为光学波。

## 3. 声子

晶格振动(格波)的能量是量子化的,角频率为  $\omega$  的格波的能量变化只能取  $h\omega$  的整数倍,格波能量的量子称为声子。

声子只是一种“准粒子”,它是随着晶格振动而存在的,并不是电子、原子那样的客观实体。

引入声子概念,不仅生动地反映了晶格振动能量的量子化,而且在分析与晶格振动有关的问题时也带来很大的方便。例如,我们可以把光子、中子和电子被晶格振动散射的问题,当作它们与声子的相互碰撞来处理。超导电 BCS 理论中的库珀电子对就是考虑电子和声子的相互作用而把两个电子耦合在一起的。

## 4. 晶体的热容量

### (1) 杜隆-珀替定律

早在1819年,杜隆(P. L. Dulong)和珀替(A. T. Petit)就已发现,除少数例外(如碳),各种固体(指晶体)的摩尔热容都很接近  $6\text{cal}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  (即等于  $3R$ ,  $R$  为摩尔气体常量)。这一结果后来用经典统计理论能作出相当满意的解释。按经典理论,可以认为固体中的粒子(原子或离子)都各在一定平衡位置附近作无规则的振动,而且粒子间相互影响较小。按能量均分定理,一个粒子沿一个方向振动的平均能量为  $kT$ , 3个相互垂直方向振动的平均能量为  $3kT$ , 1摩尔固体的内能为  $E = N_A \cdot 3kT = 3RT$ , 这样可得固体的摩尔热容为  $3R$ 。

这个定律在高温时与实验结果符合得很好,但在低温时与实验不符。

### (2) 爱因斯坦模型

1907年,爱因斯坦应用普朗克量子论的观点,提出固体热容的原子振动的简单模型。他认为晶体中每个粒子的振动是独立的,所有粒子均以同一特征频率  $\nu$  振动,由此得出固体的摩尔热容为

$$C = 3R \left( \frac{\Theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\Theta_E/T}}{(e^{\Theta_E/T} - 1)^2},$$

式中  $\Theta_E = \frac{h\nu}{k}$  称为爱因斯坦温度。

当  $T \gg \Theta_E$  时得  $C \approx 3R$ , 即杜隆-珀替定律。当  $T \ll \Theta_E$  时,  $C \propto 3R \left( \frac{\Theta_E}{T} \right)^2 e^{-\Theta_E/T}$ , 随着  $T \rightarrow 0$ ,  $C$  按指数降为零,同实验结果大致相符,但在低温下降得快了些。

### (3) 德拜模型

1912年,德拜(P. J. W. Debye)在爱因斯坦模型



的基础上,认为晶体中的粒子是相互作用的,晶格振动的频率不是单一的而是具有一定的频谱,从0到某一个最大频率 $\nu_m$ 。德拜还认为,热容量的主要来源是低频的声学波,而光学波的振动可以忽略,由此得摩尔热容为

$$C = 9R \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{e^x x^4}{(e^x - 1)^2} dx,$$

式中 $x = h\nu/kT$ ,  $\Theta_D = \frac{h\nu_m}{k}$ 称为德拜温度。

在 $T \gg \Theta_D$ 时得出 $C = 3R$ ,就是经典的结果;当 $T \ll \Theta_D$ 时,可得

$$C \approx \frac{12}{5} R \pi^4 \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3。$$

在极低温度下, $C$ 和温度 $T^3$ 成比例,称为德拜 $T^3$ 定律。这个结果与实验符合得很好,温度越低,符合得越好。

### 三、固体的能带理论

#### 1. 电子共有化

晶体中的原子(离子或分子)在空间周期性地排列,电子的势能曲线与晶体点阵呈现出相同的周期性,形成一势垒,原子的外层电子能穿透势垒而进入到其他的原子中,不再局域于该原子核附近,完全可以在晶体内自由运动。由于晶体中原子的周期性排列而使价电子不再为单个原子所有的现象称为电子共有化。

#### 2. 能带的形成

如果把 $N$ 个孤立原子互相靠拢而形成晶体,它

们的价电子被共有化,相邻原子的、处于各能级的电子的电子云有不同程度的重叠,根据量子力学计算,每个原子的能级都将分裂成  $N$  个新能级,这  $N$  个新能级在一定的能量范围内(一般不超过  $10^2\text{eV}$  的数量级)很接近原有的能级。由于实际晶体中原子数目  $N$  甚大,这  $N$  个新能级之间的能量差极小(小于  $10^{-17}\text{eV}$ ),宛如一个连续分布的能量带,故称为能带。图 22.3 表示原子能级  $1s, 2s, 2p, 3s, \dots$  分裂成相应能带的情况。通常采用与原子能级相同的符号来表示能带。

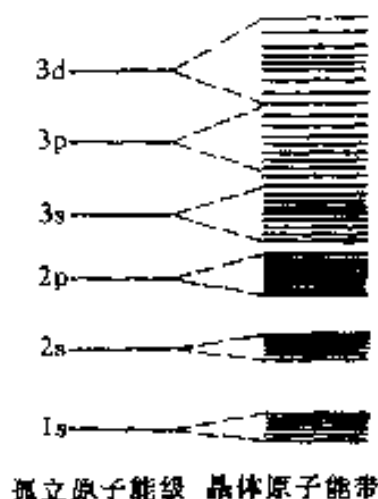


图 22.3

### 3. 满带、导带和禁带

能带中的能级数决定于组成晶体的原子数  $N$ , 每个能带中能容纳的电子数可以由泡利不相容原理确定,例如  $1s, 2s$  等  $s$  能带最多只能容纳  $2N$  个电子; $2p, 3p$  等  $p$  能带可容纳  $6N$  个电子; $d$  能带可容纳  $10N$  个电子等。

晶体中的电子在能带中各个能级的填充方式,仍然服从泡利不相容原理和能量最小原理,由能量

■ 较低的能级依次到达较高的能级,每个能级可以填入自旋相反的两个电子。根据能带中电子填充方式可分为满带、导带、禁带、价带、空带等(图 22.4)。

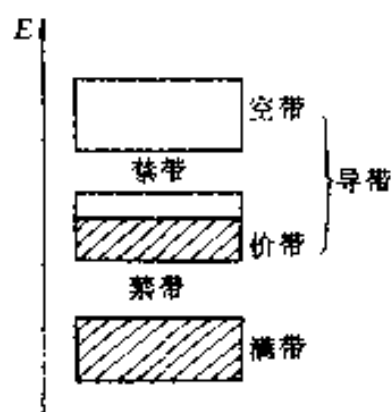


图 22.4

(1) 满带

如果一个能带中的每个能级都被电子填满,这样的能带称为**满带**。当晶体加上外电场时,满带中的电子不起导电作用。

(2) 导带

未被电子填满的能带,在电场的作用下,由于电子的运动,能产生电流,这样的能带称为**导带**。

(3) 价带

由价电子能级分裂而成的能带,称为**价带**,价带可能被填满成为满带,也可能未被填满,未被填满的能带也是导带。

(4) 空带

如果一个能带在未被激发的正常情况下没有电子填入,这样的能带称为**空带**。

(5) 禁带

在两个相邻能带之间,可以有一个不存在电子

稳定能态的能量区域,这个区域称为禁带。

#### 4. 导体、半导体和绝缘体的能带结构

##### (1) 绝缘体

有些晶体,它的价带都被价电子所填满,形成满带,此满带与它上面最近的空带(即激发能带)间的禁带宽度  $\Delta E_g$  较大(约  $3\text{eV} \sim 6\text{eV}$ )(图 22.5(a))。在一般外电场作用下,或者当晶体受到热或光激发时,只会有极少量的电子从满带跃迁到空带上去,从而使这类晶体具有极微弱的导电性。如果外电场很强,致使填满的价带中有大量电子跃过禁带而到达空带,这时绝缘体变成了导体,这种现象就是“击穿”。

##### (2) 半导体

半导体的能带结构与绝缘体的能带结构很相

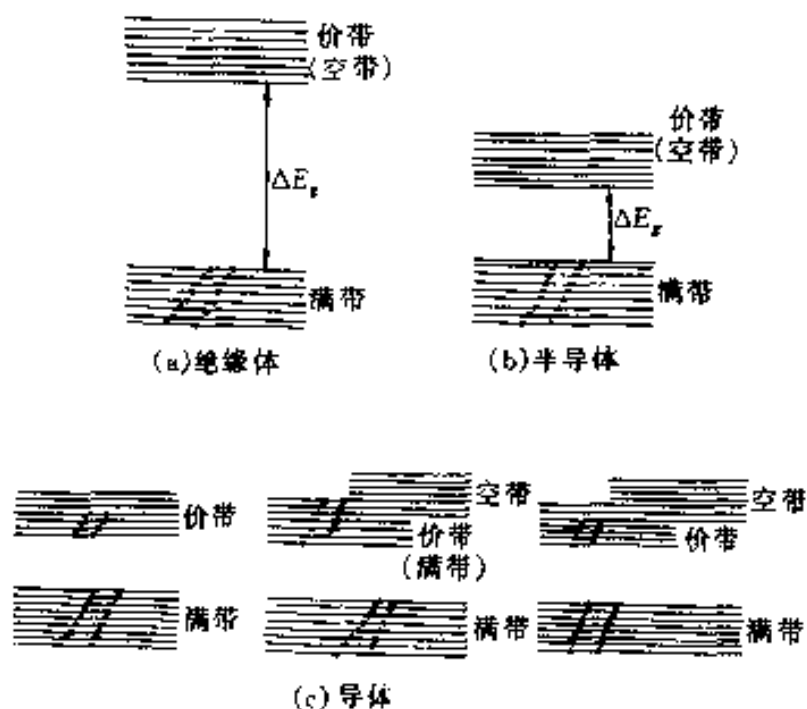


图 22.5

似,只是被填满的价带与它相邻的空带(激发带)之间的禁带宽度  $\Delta E_g$  比绝缘体小得多,约  $0.1\text{eV} \sim 1.5\text{eV}$ (图 22.5(b))。因此,用不大的能量就可以将满带中的电子激发到空带中去。这些进入空带的电子,在外电场的作用下,就可向空带中较高能级跃迁而形成电流,即半导体的**电子导电性**。此外,由于部分电子跃迁到空带,而在被填满的价带顶部附近留下若干空的能级,通常称为**空穴**。在外电场的作用下,原填满的价带中的电子就会填补这些空穴,而在较低能级上又留下新的空穴,空穴的不断转移,犹如带正电的粒子逆着电场方向转移,同样形成电流,这称为半导体的**空穴导电性**。

### (3) 导体

金属导体的能带结构有三种形式(图 22.5(c)):

① 价带中只有填入部分电子,在外电场作用下,电子很容易在该能带中从低能级跃迁到高能级,从而形成电流,如 Li 等。

② 价带虽已被电子填满,但此满带与另一相邻的空带相连或部分重叠,实际上也形成一个未满的能带。如 Mg, Be, Zr 等二价金属。

③ 有些金属的价带本来就未被电子填满,而这个价带又与它相邻的空带重叠。如 Na, K, Cu, Al, Ag 等。

## 四、半导体

### 1. 本征半导体

没有杂质和缺陷的纯净半导体,它的导电机理

属于电子和空穴的混合导电,这种半导体称为本征半导体。

## 2. 杂质半导体

### (1) n型半导体

在纯净的四价元素半导体(如硅 Si、锗 Ge)中掺入少量的五价元素(如砷、磷等)原子,五价原子替代四价硅原子的位置,构成与硅相同的四电子结构,多出的一个价电子在杂质离子的电场范围内运动。其能级处于禁带中,且接近导带(图 22.6(a)),故很容易被激发到导带中去,向导带提供一个自由电子。在这种半导体中杂质原子尽管为数不多,但在常温下,导带中自由电子的浓度要比同温度下纯净半导体的增大好几倍,从而显著地提高了半导体的导电性能。这种杂质半导体称为**电子型半导体**或**n型半导体**。

### (2) p型半导体

在纯净的四价元素半导体中,掺入少量三价元素(如硼 B、镓 Ga)的原子,这些三价原子替代四价原子的位置,尚缺少一个电子,这相当于一个空穴,相应于这个空穴的杂质能级也处于禁带中,且接近满带(图 22.6(b)),故满带中的电子很易被激发到

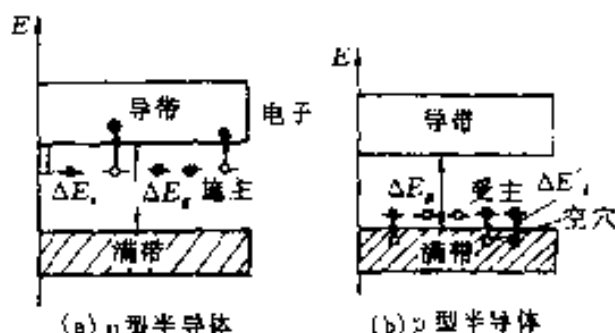


图 22.6

杂质能级,同时在满带中留下空穴。这种掺杂,也能使半导体满带中的空穴浓度比纯净半导体的增大好几倍,增加了半导体的导电性能。这种杂质半导体称为空穴型半导体或 p 型半导体。

### 3. p-n 结

在一块本征半导体晶片上,利用掺杂工艺,使一部分成为 p 型半导体,另一部分为 n 型半导体。由于 p 区的空穴浓度大于 n 区的空穴浓度,而 n 区的电子浓度大于 p 区的电子浓度。因此, n 区的电子便向 p 区扩散, p 区的空穴则向 n 区扩散。结果在交界处两侧就有电荷积累,形成一电偶极层,称为 p-n 结,也称阻挡层(图 22.7)。

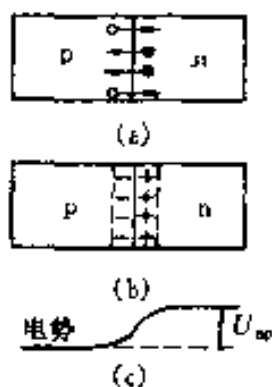


图 22.7

p-n 结的阻挡层具有单向导电作用。把电源的正极与 p 区连接, 负极与 n 区连接, n 区的电子和 p 区的空穴能通过阻挡层, 不断向对方扩散, 形成正向电流(图 22.8 (a))。反之, 如果把正极与 n 区连接, 负极与 p 区连接, p 区的空穴和 n 区的电子就愈加难以通过阻挡

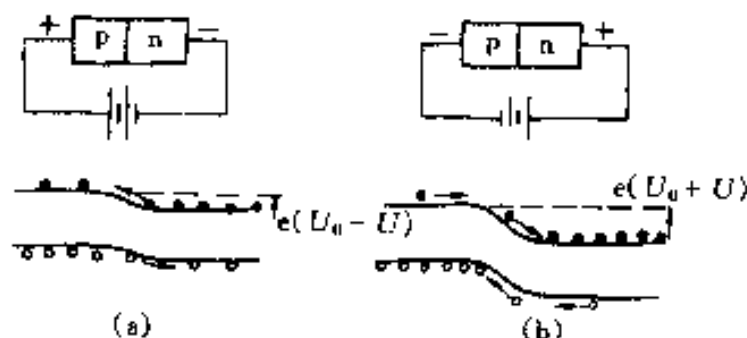


图 22.8

层,尽管由于热运动也会有 p 区的少数电子和 n 区的少数空穴通过阻挡层,所形成的反向电流是极其微弱的(图 22.8(b))。

由于 p-n 结的单向导电作用,可以制成半导体二极管,用于整流和检波。如果在半导体的两个 p 区之间夹入一个窄的 n 区,或者在两个 n 区之间夹入一个窄的 p 区,就可分别制成 pnp 或 npn 的半导体三极管,用来放大信号。

## 五、超导体

### 1. 超导电现象

1908年,昂内斯(H. Kammerlingh-Onnes)成功地液化了氦,从而得到一个新的低温区(4.2K以下)。1911年他发现,水银冷却到4.2K附近时,电阻突然降到零(图22.9),这种现象称为超导电性,具有超导电性的材料称为超导体。超导体电阻降为零的温度称为转变温度或临界温度。

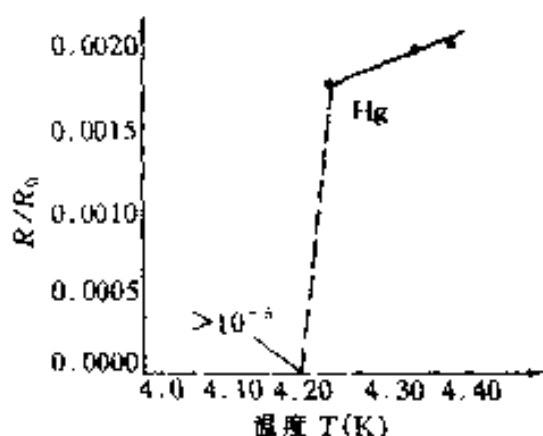


图 22.9

1986年研制成高温超导材料,例如 Ba-La-Ca-O 系列,临界温度达 35K,其他还有 Y-Ba-Ca-O 系列。



1987年中国科学院物理研究所赵忠贤等制成临界温度为 92.8K 的高温超导材料。

对于高温氧化物超导体,其转变温度范围较宽,可达 10K 多,沿用IH的转变温度定义已不够完善,因此把降温过程中电阻随温度变化开始明显偏离直线处的温度称为**起始转变温度**,用  $T_c$  表示。把电阻从起始转变下降到一半时对应的温度称为**超导转变的中点温度**,用  $T_m$  表示。通常在测试工作中一般将中点温度定义为转变温度。把电阻刚刚完全降到零的温度称为**完全转变温度**或**零电阻温度**,用  $T_0$  表示,把电阻下降到 90% 及 10% 所对应的温度范围称为**转变宽度**,记作  $\Delta T$  (图 22.10)。

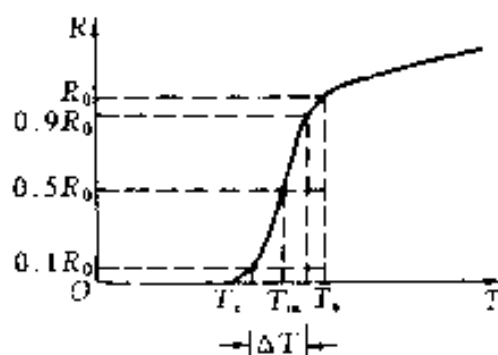


图 22.10

## 2. 超导体的主要特性

- ① 零电阻。
- ② 完全抗磁性。

1933年,迈斯纳(W. F. Meissner)等发现,当超导体达到临界温度以下( $T \leq T_c$ )而处于超导态时,不论超导体中原先有无磁场存在,其内部的磁场强度  $H$  总是等于零,即处于超导态的超导体已成为一

种完全抗磁体,它会把磁场完全排出体外,这种性质称为**完全抗磁性**,又称为**迈斯纳效应**。

零电阻和完全抗磁性是超导体的两个最基本的特性。

③ **临界磁场、临界电流**。处于超导态的超导体,在一定的外加磁场作用下,会恢复到正常状态,这个破坏超导态的最小磁场,称为**临界磁场**,以  $H_c$  表示。临界磁场与材料种类和温度有关:

$$H_c = H_{c0} \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right],$$

式中  $H_{c0}$  表示  $T = 0\text{K}$  时的临界磁场。大多数纯金属超导体的磁场与温度关系如图 22.11(a)。在  $H > H_c$  时,它由超导态直接转变为正常态。这种超导体称为**第 I 类超导体**。有一些超导体有两个临界磁场(图 22.11(b)),在  $H < H_{c1}$  时为纯粹超导态,或称迈斯纳态,在  $H_{c1} < H < H_{c2}$  时,它是处于超导态和正常态的混合态。只有在  $H \geq H_{c2}$  时才完全转变为

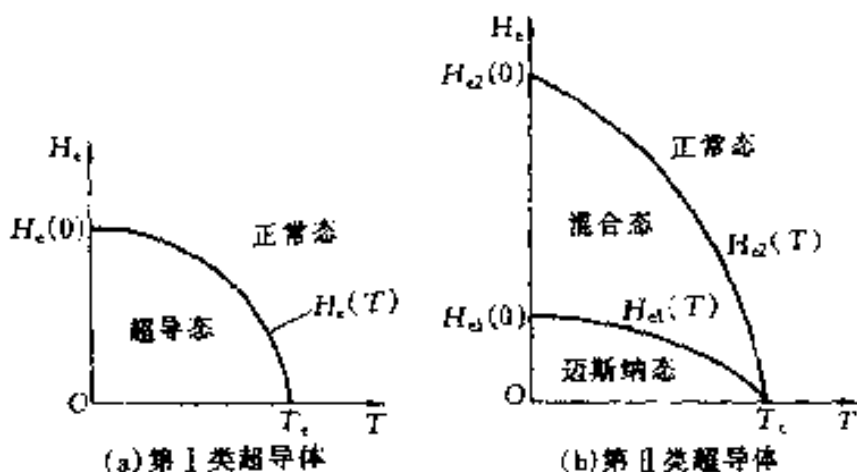


图 22.11

正常态,这些超导体称为第Ⅱ类超导体,如铌、钒、铟和它的一些合金和化合物材料。

当超导体通有一定数值的电流  $I_c$  时,超导体将由超导态变为正常态,电阻将重新出现,  $I_c$  称为临界电流。

#### ④ 同位素效应,

同位素质量数越大,转变温度越低,即

$$T_c \propto M^{-1/2},$$

这称为同位素效应。

### 3. 超导电性的 BCS 理论

1957年巴丁(J. Bardeen)、库珀(L. V. Cooper)和施里弗(J. R. Schreiffer)提出一个超导电性的量子理论,简称BCS理论,比较满意地解释超导电性的微观机理,共同获得1972年诺贝尔物理学奖。两个电子通过声子交换能量而束缚在一起形成一个电子对,称为库珀对。当温度  $T < T_c$  时,超导体内存在大量的库珀对。在外电场作用下,所有这些库珀对都获得相同的动量,朝同一方向运动,不会受到晶格的任何阻碍,形成几乎没有电阻的超导电流。当温度  $T > T_c$  时,热运动使库珀对分散为正常电子,超导态转变为正常态。

### 4. 超导电性的应用

利用超导体零电阻的性质,在电力工业中用超导电缆可实现无损耗输电,超导电机可突破常规发电机的极限容量;用超导线圈制成的超导磁体不仅体积小、重量轻,而且损耗小、所需的励磁功率小,可获得强磁场。

利用超导体的抗磁性,可制造磁悬浮列车等。

## 第二十三章 原子核物理 和粒子物理

### 一、原子核的基本性质

#### 1. 原子核的组成

原子核是由一定数目的质子和中子组成的一个复杂系统。质子和中子统称为核子。

#### 2. 原子核的电荷

原子核带有正电荷,其电量  $q$  等于电子电量绝对值  $e$  的整数倍,亦即  $q = Ze$ ,整数  $Z$  称这元素原子核的电荷数,也就是这化学元素的原子序数。 $Z$  也是原子核中的质子数。

#### 3. 原子核的质量

在原子核物理中,通常用“原子质量单位”作为质量单位。按国际上的新规定,取地球上最丰富的碳同位素  ${}^12_6\text{C}$  原子处于基态时的静止质量的  $1/12$  作为一个“原子质量单位”,用符号  $u$  表示。计算得

$$1u = 1.660566 \times 10^{-27} \text{kg}。$$

原子核的质量采用“原子质量单位”表示时,各种原子核的质量都接近于整数,此整数称为原子核的质量数,以  $A$  表示。

中子的质量  $m_n$  和质子的质量  $m_p$  分别为

$$m_n = 1.008665u, m_p = 1.007276u,$$

两者都近似地等于 1 个“原子质量单位”，所以原子核的质量数  $A$  就等于  $Z$  个质子和  $(A - Z)$  个中子的总质量数。

电荷数  $Z$  和质量  $A$  是标志原子核特征的物理量，常用  ${}^A_ZX$  来标记不同的原子核， $X$  代表某一元素，如  ${}^4_2\text{He}$ ， ${}^{16}_8\text{O}$  等。电子、质子等粒子虽然不是原子核，也常用这样的标记方法，如电子用  ${}^0_{-1}\text{e}$  表示，质子用  ${}^1_1\text{p}$  表示，中子用  ${}^1_0\text{n}$  表示等。

#### 4. 原子核的大小

原子核的体积正比于质量数  $A$ ，倘若原子核可看作球形，则原子核的半径

$$R = R_0 A^{1/3},$$

式中  $R_0$  为比例系数，实验测得  $R_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{m}$ 。

例如， ${}^{12}_6\text{C}$  的  $R \approx 2.7 \times 10^{-15} \text{m}$ ， ${}^{238}_{92}\text{U}$  的  $R \approx 7.4 \times 10^{-15} \text{m}$ 。

原子核的核物质密度约为  $2.3 \times 10^{17} \text{kg/m}^3$ 。这个数值是极其巨大的，像一个乒乓球大小的核物质，其质量为  $2 \times 10^{12} \text{kg}$ ，其重量约为 20 亿吨，这与宇宙中的“中子星”的密度相当。

#### 5. 核力

在原子核中，将质子和中子紧紧束缚在一起的是—种强相互作用力，称为核力。关于核力的详细性质尚不清楚，目前只根据实验肯定下面几个性质。

① 质子与质子、中子与中子或质子与中子之间都有核力相互作用，而且任意两个核子之间的核力大致相等。

② 核力是一种短程力，在大于  $10^{-15} \text{m}$  的距离时，核力远比库仑力小，在小于  $10^{-15} \text{m}$  的距离时，

核力比库仑力增加得更加迅猛,这时核力起主要作用。

③ 核力具有“饱和”的性质,亦即,一个核子仅和它紧邻的核子有核力相互作用,而不能同核内的所有核子都有相互作用。

④ 在核子之间的作用范围  $10^{-15}\text{m}$  内,如核子之间的距离较大,核力表现为吸力,而当核子间的距离小到  $0.4 \times 10^{-15}\text{m}$  时,核力就由吸力变为强大的斥力。

关于核力的本质,目前认为是一种交换力,如同电磁力是通过光子的交换来实现一样,核力是通过介子的交换来实现的。

## 二、原子核的结合能、裂变和聚变

### 1. 原子核的结合能

原子核是由质子和中子组成,质量数为  $A$ 、电荷数为  $Z$  的原子核的质量应为

$$Zm_p + (A - Z)m_n,$$

但从实验测定的原子核质量  $m$  总是小于上式给定的值,此差额为

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m,$$

称为**原子核质量亏损**。根据相对论中有关物质的质量与能量之间的联系,质量改变  $\Delta m$ ,伴随着能量改变  $\Delta E = \Delta mc^2$ ,由质子和中子组成原子核时所放出的能量,称为**原子核的结合能**。反之,要使原子核再分解为单个的质子和中子,外界必须给予和结合能等值的能量。结合能表示原子核的稳定程度,结合能越大,核也越稳定。不同原子核的比结合能(每个

核子的平均结合能)如图 23.1 所示。

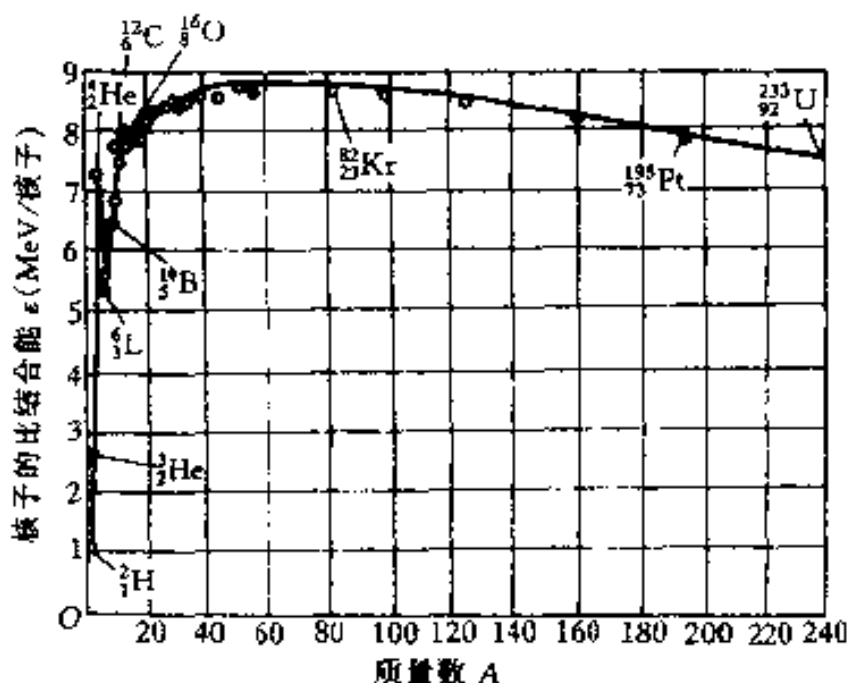
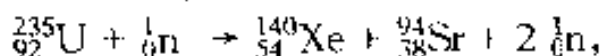


图 23.1

## 2. 重核的裂变

用中子轰击重原子核时分裂成两个或多个中等质量的核,同时放出大量能量,这种反应称为**裂变**。裂变后的产物称为**裂变碎片**。例如,用慢中子(能量在 1eV 以下)轰击  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,有



${}^{235}_{92}\text{U}$  裂变后形成的“碎片对”有许多种,质量数从 72 到 158 可有 34 种元素及 200 多种原子核,概率最大的碎片对在质量数 95 和 135 附近,而质量数近乎相等的碎片对发生的概率极小。

除铀核  ${}^{235}_{92}\text{U}$  能够发生裂变外,其他比锡重的元素,如钍(Th)、镤(Pa)等也都能产生裂变。1946 年我国物理学家钱三强、何泽慧夫妇发现铀核还有三

分裂或四分裂的现象,并且放出更多的能量,但其概率却比两分裂小得多。

每一个铀核分裂时大约放出 200MeV 的能量,它们的分配大致如下:

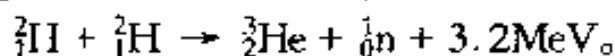
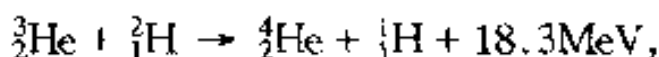
裂变碎片的动能	170MeV
中子的动能	5MeV
$\beta^-$ 射线和 $\gamma$ 射线的能量	15MeV
$\beta$ 衰变产生的中微子的能量	10MeV

这些能量最后绝大部分转变为热能。

如果铀核裂变时放出的中子被别的铀核所吸收,又引起新的裂变,形成一发散的链式反应,这就是在原子弹中发生的情况。如果在受控条件下维持稳定的链式反应,这就是核反应堆中发生的情况。

### 3. 轻核的聚变

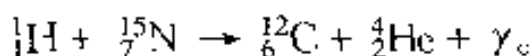
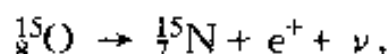
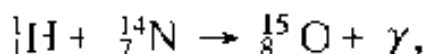
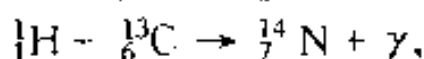
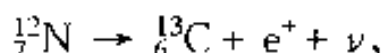
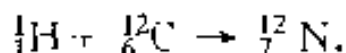
在轻原子核中,如  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^9_4\text{Be}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$  等原子核的核子平均结合能比一般轻原子核大得多,所以轻原子核结合成上述几种原子核时,也可以放出大量的能量,这种反应称为轻核聚变。例如



要使轻原子核发生聚变反应,必须克服原子核之间的库仑排斥作用,因此需要提供能量,就得把反应物质加热到极高温,这种通过加热而引起的聚变反应称为热核反应。

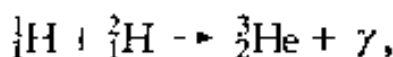
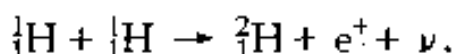
聚变反应是太阳和其他星球能量的来源,最重要的聚变过程之一是碳氢循环,这个循环的结果是把 4 个质子结合成一个氮核,其一系列反应为





经过一个循环后,碳和氮并不有所增减,它们只起一种中间作用。在这过程中释放出来的能量约为 26.7MeV,即每消耗 1kg 的  ${}^1_1\text{H}$  核,约释放能量  $6.6 \times 10^{14}\text{J}$ 。在太阳中,一个碳原子通过这个循环所需的时间约为  $6 \times 10^6$  年。

星球中的另一个核聚变反应是质子-质子循环,这个循环的一系列核反应为



反应的结果也是将 4 个质子结合成一个氦核,放出的能量仍然是 26.7MeV,在太阳中,质子-质子循环的周期约为  $3 \times 10^9$  年。

天体物理学家认为,在太阳和类似结构的星体中,质子-质子循环比碳氮循环占优势,但在比较年轻的星体中,碳氮循环更重要。在温度高得多的较老星体中,还可能发生其他类型的聚变反应。据估计,在太阳中发生聚变的速率为每秒有  $5.64 \times 10^{11}\text{kg}$  的氢聚变为氦,与此相应,释放  $3.7 \times 10^{26}\text{W}$  的功率,其中大约只有  $1.8 \times 10^{14}\text{W}$  主要以电磁辐射的形式投射在地球上。

### 三、原子核的放射性衰变

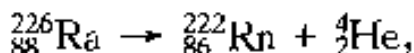
#### 1. 放射性衰变现象

原子序数很高的重元素,(如铀、钍及镭等)的原子核会自发地放射射线而转变为另一种元素的原子核,这现象称为放射性衰变。

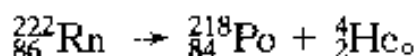
原子核的放射性衰变模式主要是  $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变和  $\gamma$  衰变( $\gamma$  跃迁)。

#### (1) $\alpha$ 衰变

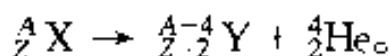
$\alpha$  衰变是原子核自发放射出  $\alpha$  粒子,即氦核  ${}^4_2\text{He}$ 。例如,镭核  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  的  $\alpha$  衰变过程如下:



氡核  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  也具有  $\alpha$  放射性,即



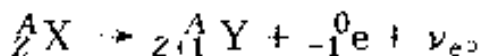
$\alpha$  衰变一般表示为



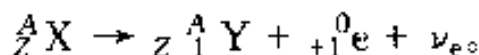
#### (2) $\beta$ 衰变

$\beta$  衰变是核电荷改变而核子数不变的核衰变,主要包括  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和电子俘获。

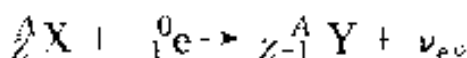
$\beta^-$  衰变是原子核放出高速电子和反中微子  $\bar{\nu}_e$ ,即



$\beta^+$  衰变是原子核放出正电子,同时伴随有中微子  $\nu_e$ ,即



电子俘获是与  $\beta$  衰变相反的过程,即原子核俘获了与它最接近的内层电子,使核内的一个质子转变为中子,同时放出一个中微子。



由于K壳层的电子最靠近原子核,所以K电子俘获最易发生。

### (3) $\gamma$ 衰变

当原子核发生 $\alpha$ 、 $\beta$ 衰变时,往往衰变到子核的激发态,它要向低激发态或基态跃迁,同时放出 $\gamma$ 光子。例如,医学上治疗肿瘤常用的放射源 ${}^{60}\text{Co}$ ,以 $\beta^-$ 衰变到 ${}^{60}\text{Ni}$ 的2.50MeV激发态。 ${}^{60}\text{Ni}$ 激发态的寿命较短,它放出能量分别为1.17MeV和1.33MeV两种 $\gamma$ 射线而跃迁到基态(图23.2)。

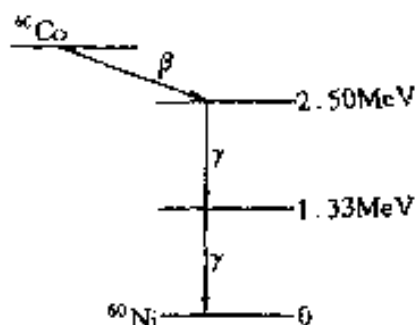


图 23.2

## 2. 放射性衰变定律

设 $t=0$ 时原子核的数目为 $N_0$ , $t$ 时刻的原子核数为

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

如图23.3所示,式中 $\lambda$ 称为衰变常量。通常以单位时间发生核衰变的次数来表示放射性强弱,称为放射性活度,以 $A$ 表示。这样

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

式中 $A_0$ 表示 $t=0$ 时的放射性活度, $A_0 = \lambda N_0$ 。

放射性活度减弱为原来的一半时所经历的时间

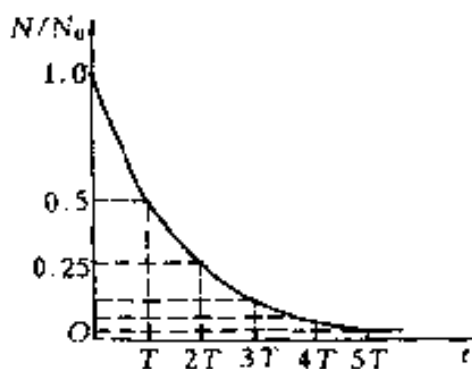


图 23.3

间,称为放射性元素的**半衰期**,用 $T_{1/2}$ 表示,

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}。$$

各种放射性同位素的半衰期的长短相差很大,例如铀的半衰期  $^{235}\text{U}$  为  $7.13 \times 10^8 \text{a}$ ,  $^{238}\text{U}$  为  $4.51 \times 10^9 \text{a}$ ; 磷  $^{32}\text{P}$  为 14.3d; 钾  $^{42}\text{K}$  为 12.4h; 氦  $^6\text{He}$  为 0.8s 等。

对于某种放射性同位素,其中有些原子核早衰变,有的晚衰变,寿命不一样,所以常用**平均寿命**  $\tau$  来表征衰变的快慢,它指的是在衰变前存在的时间的平均值为

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 1.44 T_{1/2}，$$

半衰期长的放射性同位素,它的原子核平均寿命也长。

### 3. 放射性强度的单位

当某一物质每秒有  $3.7 \times 10^{10}$  次核衰变时,其放射性强度为 1 居里(Ci),即

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{s}^{-1}。$$

放射性强度的另一种单位是 Bq(贝克勒尔),就是单位时间衰变 1 个原子核,即

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}。$$

放射性强度与放射性对物质产生的效应既有联系,又有区别。常见的伦琴、拉德等单位则是放射性物质产生的射线对其他物质的效应大小的单位,它不仅取决于放射性本身的强弱,还决定于放出射线的特性,以及接受射线的材料的性质。

1R(伦琴) = 使 1kg 空气中产生  $2.58 \times 10^{-4}\text{C}$  的电荷量的辐射量;

1rad(拉德) = 1kg 受照射物质吸收  $10^{-2}\text{J}$  的辐射能量;

1Gr(戈瑞) = 1kg 受照射物质吸收 1J 的辐射能量。

#### 四、粒子物理

##### 1. 粒子的分类

基本粒子通常是指组成物质的不能再分割的最基本单元。随着物理学的进展,人们对基本粒子的概念也在不断变化。中子发现以后,人们认为构成原子的质子、中子和电子是基本粒子。在此以后又陆续发现了大量粒子,而且研究表明基本粒子并不基本,其内部还包含构成粒子。因此,基本粒子是指比原子核更深层次的粒子,故把基本粒子改称为粒子。

迄今发现的粒子已超过 400 种,其中只有光子、电子、中微子和质子等少数几种粒子是很稳定的,其余的都是不稳定的。寿命极短(约  $10^{-23}\text{s}$ )的粒子通常称为共振粒子。

根据粒子的性质,通常将它们分为四大类(参见表 23.1):

表 23.1 (部分)“基本”粒子表

类别	粒子符号	质量 $m$ (MeV)	电荷 $Q$	自旋 宇称 $J^P$	同位旋		重子数			轻子数			奇异数 $S$	charm 数 $C$	寿命 $\tau$ (s)	主要衰变方式	反粒子
					$I$	$I_3$	$B$	$L_c$	$L_\mu$	$L_\tau$	$L_e$	$L_\mu$					
光子	$\gamma$	$0 (< 6 \times 10^{-22})$	0	$1^-$	0	0, 1	0	0	0	0	0	0	0	0	稳定		$\gamma$
中微子	$\nu_e$	$0 (< 1 \times 10^{-5})$	0	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	稳定		$\bar{\nu}_e$
	$\nu_\mu$	$0 (< 0.52)$	0	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	稳定		$\bar{\nu}_\mu$
	$\nu_\tau$	$0 (< 0.52)$	0	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	稳定		$\bar{\nu}_\tau$
轻子	$e$	0.511	-1	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	稳定		$e^+$
	$\mu^-$	105.66	-1	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	$2.2 \times 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$	$\mu^+$
子	$\tau^-$	1784.2	-1	$1/2$			0	0	0	0	0	0	0	0	$3.2 \times 10^{-13}$	$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu$ $\tau^- \rightarrow e^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_e$	$\tau^+$
	$\pi^-$	139.6	$\pm 1$	$0^-$	1		0	0	0	0	0	0	0	0	$2.6 \times 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$\pi^+$
介子	$\pi^0$	135.0	0	$0^-$			0	0	0	0	0	0	0	0	$0.83 \times 10^{-16}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	$\pi^0$
	$\eta$	548.6			0		0	0	0	0	0	0	0	0	$2 \times 10^{-19}$	$\eta \rightarrow 3\pi^0$ $\eta \rightarrow \gamma + \gamma$ $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	$\eta$

(续表)

类别	粒子	符号	质量 $m$ (MeV)	电荷 $Q$	自旋 宇称 $J^P$	同位旋		重子数 $B$	轻子数			奇异数 $S$	衰变数 $C$	寿命 $\tau$ (s)	主要衰变方式	反粒子
						$I$	$I_3$		$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$					
介子	K 介子	$K^+$	493.7	+1	0	1/2	0	0	0	0	0	-1	0	$1.24 \times 10^{-8}$		$K^-$
		$K^0$	497.7	0	0-	1/2	0	0	0	0	0	+1	0	$0.89 \times 10^{-10}$ $5.18 \times 10^{-8}$	$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	$\bar{K}^0$
子	D 介子	$D^+$	1869.4	+1	0-	1/2	0	0	0	0	0	0	+1	$9.1 \times 10^{-13}$	$D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^-$	$D^-$
		$D^0$	1864.7	0	0-	1/2	0	0	0	0	0	0	+1	$4.8 \times 10^{-13}$	$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^0$	$\bar{D}^0$
重	核子	$p$	938.3	+1	1/2-	1/2	+1/2	+1	0	0	0	0	0	稳定 ( $> 10^{30}$ 年)		$\bar{p}$
		$n$	939.6	0	1/2+	1/2	-1/2	+1	0	0	0	0	0	917	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{n}$
子	$\Delta$ 超子	$\Delta^0$	1115.6	0	1/2+	0	0	+1	0	0	0	-1	0	$2.6 \times 10^{-10}$	$\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$ $\Delta^0 \rightarrow n + \pi^0$	$\bar{\Delta}^0$
		$\Sigma^+$	1189.4	+1	1/2+		+1	+1	0	0	0	-1	0	$0.8 \times 10^{-10}$	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$	$\bar{\Sigma}^+$
		$\Sigma^0$	1192.5	0	1/2+	1	0	+1	0	0	0	-1	0	$5.8 \times 10^{-10}$	$\Sigma^0 \rightarrow \Delta^0, \gamma$	$\bar{\Sigma}^0$
	$\Sigma^-$	1197.3	-1	1/2+		-1	+1	0	0	0	-1	0	$1.48 \times 10^{-10}$	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	$\bar{\Sigma}^-$	

(续表)

类别	粒子	符号	质量 $m$ (MeV)	电荷 $Q$	自旋 宇称 $J^P$	同位旋		重子 数 $B$	轻子数			奇异数 $S$	charm 数 $C$	寿命 $\tau$ (s)	主要衰变方式	反粒子
						$I$	$I_3$		$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$					
重子	$\Xi^0$	$\Xi^0$	1314.9	0	$1/2^+$	$1/2$	+1/2	+1	0	0	0	-2	0	$2.9 \times 10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + p^0$	$\Xi^0$
	$\Xi^-$	$\Xi^-$	1321.3	-1	$1/2^+$	$1/2$	-1/2	+1	0	0	0	-2	0	$1.64 \times 10^{-10}$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$	$\Xi^+$
重子	$\Omega^-$	$\Omega^-$	1672.5	-1	$3/2^-$	0	0	+1	0	0	0	-3	0	$0.82 \times 10^{-10}$	$\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + K^-$ $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + p^0$ $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$	$\Omega^+$
	$\Lambda_c^+$	$\Lambda_c^+$	2282.2	+1	$1/2^+$	0	0	+1	0	0	0	0	1	$1.1 \times 10^{-13}$	$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+$	$\Lambda_c^-$



(1) 光子

静止质量为 0, 自旋量子数为 1, 是玻色子。

(2) 轻子

包括电子  $e^-$ 、 $\mu^-$  子、 $\tau^-$  子、中微子 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) 和它们的反粒子, 它们的自旋量子数都为  $1/2$ , 属费米子。 $\mu^-$  子和  $\tau^-$  子除质量比电子大外, 其他性质几乎完全相同, 故两者俗称重电子和超重电子。中微子不带电, 习惯上认为其静止质量为零, 但最近的探索表明并不为零, 只是很小而已。至今尚未发现轻子具有内部结构。

(3) 介子

包括  $\pi$  介子 ( $\pi^+, \pi^-, \pi^0$ );  $\eta$  介子 ( $\eta^0$ ); K 介子 ( $K^+, K^-, K^0$ ), D 介子等, 其自旋量子数为 0, 其他还有  $\rho$  介子、 $\omega$  介子等, 其自旋量子数为 1, 所以介子是玻色子。一般说来, 介子的静止质量介于电子和质子之间, 1974 年, 美籍华裔物理学家丁肇中等发现  $J/\Psi$  粒子也是一种介子, 它的静止质量很大, 为质子的 3 倍多, 寿命比通常的共振态粒子的寿命长约  $10^4$  倍。这个新粒子的发现导致一种新夸克的引入, 推动了强子结构理论的发展。

(4) 重子

包括核子(质子和中子)、和  $\Lambda$  超子 ( $\Lambda^0$ )、 $\Sigma$  超子 ( $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ ),  $\Xi$  超子 ( $\Xi^-, \Xi^0$ ) 和  $\Omega$  超子。这些超子的静止质量都大于质子质量, 自旋量子数除  $\Omega$  超子为  $3/2$  外, 其他都是  $1/2$ , 重子是费米子。

由于介子和重子参与强相互作用, 故又统称为强子。目前发现的粒子大多是强子。实验表明, 强子也有内部结构。夸克模型是当前比较成功的强子

结构模型。

人们还把 K 介子和各种超子统称为奇异粒子，因为它们具有一些奇异的性质：① 一个超子总是和一个或几个 K 介子同时产生，从未观察到单个超子或单个 K 介子产生的事例；② 产生过程极快（数量级为  $10^{-23}$  s），即产生过程是在强相互作用下进行的，而衰变过程却很慢，寿命较长（约为  $10^{-8} \sim 10^{-16}$  s）。奇异粒子常以非零奇异数为标志。

### 2. 粒子间的相互作用

粒子的产生和转变是通过粒子间的相互作用进行的。自然界中物质之间的相互作用可归结为万有引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用四种。见表 23.2。

表 23.2 四种基本相互作用

类 型	相对强度	作用距离 (m)	作用时间 (s)	相互作用的物体	传递粒子
强相互作用	1	$< 10^{-15}$	$10^{-23}$	强子	$\pi$ 介子
电磁相互作用	$\sim 10^{-2}$	$\infty$	$10^{-20}$   $10^{-16}$	带电粒子	光子
弱相互作用	$\sim 10^{-15}$	$< 10^{-17}$	$10^{-8}$	强子、轻子	中间玻色子 ( $W^{\pm}, Z^0$ )
引力相互作用	$\sim 10^{-39}$	$\infty$		一切物体	引力子(?)

#### (1) 万有引力相互作用

由于万有引力相互作用远小于其他三种相互作用，因此在粒子物理学中通常不予考虑。

#### (2) 电磁相互作用

在粒子物理学中，不仅带电粒子之间有电磁相

互作用,而且一切有光子参与的粒子相互作用过程也都有电磁相互作用。

### (3) 强相互作用

最早研究的强相互作用是核子间的核力,它是使核子结合成原子核的作用力。强相互作用只存在于重子和介子之间,只有强子参与强相互作用,光子、轻子都不参与强相互作用。

### (4) 弱相互作用

有两种弱相互作用,一种是有轻子(电子、中微子、 $\mu$ 子以及它们的反粒子)参与的反应,如 $\beta$ 衰变、 $\mu$ 子的衰变以及 $\pi$ 介子的衰变等;另一种是K介子和 $\Lambda$ 超子的衰变。这两种弱相互作用的强度和相互作用时间都相同。

由此,根据参与相互作用的性质,可以将粒子分为三类,其中强子参与所有四种相互作用;轻子参与引力、电磁和弱相互作用;光子只参与引力和电磁相互作用。

1967年,格拉肖(S. Glashow)、温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)提出电弱统一理论,把电磁相互作用和弱相互作用看作是一种相互作用,在某一相互作用过程中,如果交换的是光子,就是电磁作用过程;交换的是 $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ 粒子,就是弱相互作用。1983年,鲁比亚(C. Rubbia)在高能质子-反质子对撞实验中发现了这三种粒子,给电弱统一理论以极大的支持。电弱统一理论的成功,促使一些物理学家试图建立一个把强、电、弱三种相互作用统一的大统一理论,目前这项工作尚处于探索阶段。

### 3. 粒子的守恒定律

在粒子的相互作用和转化过程中,也必须遵守一些守恒定律。除了能量、动量、角动量以及电荷的守恒定律在粒子作用和变化过程中被严格遵守外,在粒子物理学中还有一系列新的守恒定律,如重子数、轻子数、奇异数、同位旋守恒定律等等。但是这些守恒定律,在三种相互作用中并非都遵守,例如,在弱相互作用中,是不遵守同位旋守恒定律和宇称守恒定律的。表 23.3 列出了三种相互作用和所遵守的守恒定律。

表 23.3 三种相互作用遵守的守恒定律

相 互 作 用	守 恒 量													
	能量	动量	角动量	电荷	电子、轻子数 $L_e$	$\mu$ 子、轻子数 $L_\mu$	重子数 $B$	同位旋 $I$	同位旋分量 $I_z$	奇异数 $S$	宇称 $P$	电荷共轭 $C$	时间反演 $T$	联合交换
强	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
电磁	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
弱	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	✓

### 4. 强子结构的夸克模型

#### (1) 夸克的种类

1964年盖尔曼(M. Gell-Mann)和兹韦克(G. Zweig)提出了强子由夸克组成的模型。几乎同时,我国物理学家也提出了类似的层子模型(这是根据物质有无限可分的层次的思想定名的)。起初以为有三种夸克,分别为上夸克(u)、下夸克(d)和奇夸克

(s), 三种夸克都有相应的反夸克, 即  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$  和  $\bar{s}$ 。以后又发现三种夸克, 即粲夸克(c), 底夸克(b)和顶夸克(t), 每种夸克也都有其反夸克。各种夸克的主要特性见表 23.4。

表 23.4 夸克的基本性质

夸克	质量 (GeV)	电荷 (e)	自旋 (h)	同位旋	重子数	奇异数
u(上)	0.004	2/3	1/2	1/2	1/3	0
d(下)	0.008	-1/3	1/2	1/2	1/3	0
s(奇)	0.15	-1/3	1/2	0	1/3	-1
c(粲)	1.5	2/3	1/2	0	1/3	0
b(底)	4.7	-1/3	1/2	0	1/3	0
t(顶)	174	2/3	1/2	0	1/3	0

### (2) 强子的构成

所有重子均由 3 个夸克组成, 所有介子均由 1 个夸克和 1 个反夸克构成。例如质子 p 是由 (uud) 构成, 中子 n 是由 (udd) 构成,  $\pi^+$  介子是由 (u $\bar{d}$ ) 构成,  $\pi^-$  介子是由 (d $\bar{u}$ ) 构成,  $\pi^0$  介子是由 (u $\bar{u}$  或 d $\bar{d}$ ) 构成等。表 23.5 列出了介子和重子构成的夸克谱。

表 23.5 一些强子的夸克谱

介子	重子
$\pi^+ = (u\bar{d})_{\uparrow\downarrow}$	$p = (uud)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$\pi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})_{\uparrow\downarrow}$	$n = (udd)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$\pi^- = (d\bar{u})_{\uparrow\downarrow}$	$\Sigma^+ = (uus)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$

(续表)

介子	重子
$K^+ = (u\bar{s})_{\uparrow\downarrow}$	$\Sigma^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(uds + sdu)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$K^- = (s\bar{u})_{\uparrow\downarrow}$	$\Sigma^- = (dds)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$K^0 = (d\bar{s})_{\uparrow\downarrow}$	$\Xi^0 = (uss)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$\bar{K}^0 = (s\bar{d})_{\uparrow\downarrow}$	$\Xi^- = (dss)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$
$\eta^0 = \frac{1}{\sqrt{6}}(uu + dd - 2ss)_{\uparrow\uparrow}$	$\Lambda^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(sdu - sud)_{\uparrow\uparrow\downarrow}$

表中每个强子夸克谱括号外的小箭头表示夸克自旋之间相互关系。

### (3) 夸克的色

有些共振态重子是由 3 个完全相同的夸克组成。例如  $\Delta^+ = (uuu)_{\uparrow\uparrow\uparrow}$ ,  $\Delta^- = (ddd)_{\uparrow\uparrow\uparrow}$ ,  $\Omega^- = (sss)_{\uparrow\uparrow\uparrow}$ 。这 3 个夸克种类相同,而且自旋必须相互平行并沿同一取向,这显然违背泡利不相容原理。为了解决这一矛盾,人们认为夸克还存一种内在性质,说夸克带有“色荷”。色荷是一个与电荷类比的观念,每种夸克有 3 种色荷,即红、绿、蓝三色(不同研究者可用不同的颜色标记)。这样 3 个夸克自旋平行就不再违背泡利不相容原理。人们还把上面不同类的 6 种夸克称为夸克有 6“味”,这样夸克就有 6“味”3“色”了,如果再加上反粒子,就一共有 36 种夸克。

## 附录 A

## 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1901	W. K. 伦琴 (Wilhelm Konrad Röntgen)	德国	发现 X 射线
1902	H. A. 洛伦兹 (Hendrik Antoon Lorentz)  P. 塞曼 (Pieter Zeeman)	荷兰  荷兰	提出光谱线在磁场中分裂的现象的理论 发现在外磁场作用下光谱线分裂的现象
1903	A. H. 贝克勒尔 (Antoine-Henri Becquerel) P. 居里 (Pierre Curie) M. 居里 (Marie Skłodowska-Curie) (女)	法国  法国  法籍 波兰人	发现天然放射性现象  对 A. H. 贝克勒尔发现的辐射现象的研究
1904	J. W. 瑞利 (John William Strutt Rayleigh)	英国	对气体密度的研究和发现氦气, 并确定其性质和在元素周期表中的位置
1905	P. 勒纳 (Philipp Eduard Anton Lenard)	德国	对阴极射线的研究

(续表)

附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1906	J. J. 汤姆孙 (Joseph John Thomson)	英国	对气体导电的理论与实验研究, 测出电子的荷质比
1907	A. A. 迈克尔孙 (Albert Abraham Michelson)	美籍 德国人	创制精密光学仪器迈克尔孙干涉仪, 并用它进行光谱学和计量学方面的研究
1908	G. 李普曼 (Gabriel Lippman)	法国	创造了以光的干涉为基础的彩色照相法
1909	G. 马可尼 (Guglielmo Marconi)	意大利	发明无线电报及其对发展无线电通信的贡献
	C. F. 布劳恩 (Carl Ferdinand Braun)	德国	
1910	J. D. 范德瓦耳斯 (Johannes Diderik van der Waals)	荷兰	对气体和液体状态方程的研究
1911	W. 维恩 (Wilhelm Wien)	德国	发现有关热辐射的定律
1912	N. G. 达伦 (Nils Gustaf Dalén)	瑞典	发明灯塔与浮标照明用的自动调节器
1913	H. 开默林-昂内斯 (Heike Kamerlingh-Onnes)	荷兰	研究低温下物质的性质, 制成液态氮并测量了它的温度



(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1914	M. V. 劳厄 (Max Theodor Felix von Laue)	德国	发现 X 射线在晶体上的衍射
1915	W. H. 布喇格 (William Henry Bragg)	英国	用 X 射线研究晶体结构
	W. L. 布喇格 (William Lawrence Bragg)	英国	
1916	(未发奖)		
1917	C. G. 巴克拉 (Charles Glover Barkla)	英国	对元素标识伦琴射线的发现
1918	M. 普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck)	德国	发现能量子, 提出能量量子化的假设, 解释了电磁辐射的经验定律
1919	J. 斯塔克 (Johannes Stark)	德国	发现极隧射线的多普勒效应和光谱线在电场中分裂的效应
1920	C. E. 纪尧姆 (Charles Edouard Guillaume)	瑞士	发现镍铍合金的反常现象及其在精密物理学方面的贡献
1921	A. 爱因斯坦 (Albert Einstein)	瑞士、 美籍 德国人	对理论物理方面的贡献, 特别是发现光电效应定律

(续表)			
年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1922	N. 玻尔 (Niels Hendrik David Bohr)	丹麦	研究原子结构和原子辐射, 创立了行星式原子的量子理论
1923	R. A. 密立根 (Robert Andrews Millikan)	美国	在基本电荷和光电效应方面的研究成果
1924	K. M. G. 西格班 (Karl Manne George Siegbahn)	瑞典	发现和研究 X 射线光谱学
1925	J. 弗兰克 (James Franck)	德国	发现电子与原子碰撞的规律
	G. L. 赫兹 (Gustav Ludwig Hertz)	德国	
1926	J. B. 佩兰 (Jean Baptiste Perrin)	法国	在物质结构不连续性方面的研究, 特别是发现沉积平衡的工作
1927	A. H. 康普顿 (Arthur Holly Compton)	美国	发现 X 射线被物质中的电子散射后其波长有所增长的现象(康普顿效应)
	C. T. R. 威尔孙 (Charles Thomson Rees Wilson)	英国	发明威尔孙云雾室, 用蒸汽凝结法使带电粒子的径迹变为可见

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1928	O. W. 里查孙 (Owen Willans Richardson)	英国	在热离子方面的工作,特别是发现里查孙定律(确定热电子发射的饱和电流密度与阴极表面温度的关系)
1929	L. V. 德布罗意 (Louis Victor de Broglie)	法国	提出电子的波动性
1930	C. V. 喇曼 (Chandrasekhara Venkata Raman)	印度	研究光的散射并发现喇曼效应
1931	(未发奖)		
1932	W. K. 海森伯 (Werner Karl Heisenberg)	德国	创立矩阵形式的量子力学和发现氢的同素异形体
1933	E. 薛定谔 (Erwin Schrödinger)	奥地利	发现量子理论的新的有效形式,创立波动力学
	P. A. M. 狄拉克 (Paul Adrien Maurice Dirac)	英国	发现量子理论的新的有效形式,提出相对论量子力学并预言正电子的存在
1934	(未发奖)		
1935	J. 查德威克 (James Chadwick)	英国	发现中子

(续表)

## 附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1936	V. F. 赫斯 (Victor Francis Hess)	奥地利	发现宇宙射线
	C. D. 安德森 (Carl David Anderson)	美国	发现正电子
1937	C. J. 戴维孙 (Clinton Joseph Davisson)	美国	发现电子在晶体上的衍射现象
	G. P. 汤姆孙 (George Paget Thomson)	英国	
1938	E. 费米 (Enrico Fermi)	美籍意大利人	发现慢中子轰击所引起的人工放射性
1939	E. O. 劳伦斯 (Ernest Orlando Lawrence)	美国	发明与发展了回旋加速器以及利用它所取得的成果,特别是有关人工放射性元素的研究
1940	(未发奖)		
1941	(未发奖)		
1942	(未发奖)		
1943	O. 斯特恩 (Otto Stern)	美籍德国人	发展分子束的方法和发现质子磁矩
1944	I. I. 拉比 (Isidor Isaac Rabi)	美籍奥地利人	应用共振方法测定了原子核的磁矩和光谱的超精细结构
1945	W. 泡利 (Wolfgang Pauli)	美籍奥地利人	发现泡利不相容原理

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1946	P. W. 布里奇曼 (Percy Williams Bridgman)	美国	发明超高压装置以及利用它在高压物理领域中的许多发现
1947	E. V. 阿普顿 (Edward Victor Appleton)	英国	对高层大气物理性质的研究,特别是发现电离层中的上反射层(阿普顿层)
1948	P. M. S. 布莱克特 (Patrick Maynard Stuart Blackett)	英国	改进了威尔逊云雾室,并用以在核物理和宇宙线物理方面作出一系列重要发现
1949	汤川秀树 (Hideki Yukawa)	日本	在核力理论研究的基础上预言介子的存在
1950	C. F. 鲍威尔 (Cecil Frank Powell)	英国	研制出核过程的照相乳胶记录法和用它发现 $\pi$ 介子
1951	J. D. 考克饶夫 (John Douglas Cockcroft) E. T. S. 瓦尔顿 (Ernest Thomas Sinton Walton)	英国 英国	用人工加速粒子使原子核嬗变
1952	F. 布洛赫 (Felix Bloch) E. M. 珀塞耳 (Edward Mills Purcell)	美籍 瑞士人 美国	发现核磁共振

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1953	F. 泽尔尼克 (Frits Zernike)	荷兰	发现相衬方法并发明相差显微镜
1954	M. 玻恩 (Max Born)	英籍 德国人	对量子力学的研究,特别是对波函数的统计解释 研究出符合法分析宇宙辐射及由此导致许多发现
	W. W. G. 博特 (Walther Wilhelm Georg Franz Bothe)	德国	
1955	W. E. 兰姆 (Willis Eugene Lamb)	美国	发现氢原子能级的兰姆移位
	P. 库什 (Polykarp Kusch)	美籍 德国人	电子磁矩的精密测定
1956	W. 肖克莱 (William Bradford Shockley)	美国	对半导体的研究,发现晶体管效应
	J. 巴丁 (John Bardeen)	美国	
	W. H. 布里顿 (Walter Houser Brattain)	美国	
1957	杨振宁 (Zhen-ning Yang) 李政道 (Zheng-dao Lee)	美籍 中国人 美籍 中国人	提出弱相互作用下宇宙守恒定律不成立的假设,从而导致基本粒子方面的一些重大发现
1958	Л. А. 切伦科夫 (Левен Алексеевич Черенков)	前苏联	发现和解释切伦科夫效应
	И. М. 夫兰克 (Илья Михайлович Франк)	前苏联	

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
	И. Е. 塔姆 (Игорь Евгеньевич Тамм)	前苏联	
1959	E. G. 塞格雷 (Emilio Gino Segre)	美籍意大利人	发现反质子
	O. 张伯伦 (Owen Chamberlain)	美国	
1960	D. A. 格拉泽 (Donald Arthur Glaser)	美国	发明观察带电粒子径迹的气泡室
1961	R. 霍夫斯塔特 (Robert Hofstadter)	美国	电子在原子核上散射的基本研究和发现核子结构 研究 $\gamma$ 量子的共振吸收和散射, 并发现穆斯堡尔效应
	R. L. 穆斯堡尔 (Rudolf Ludwig Mössbauer)	德国	
1962	Л. Д. 朗道 (Лев Давыдович Ландау)	前苏联	对凝聚态介质理论, 特别是液氦理论方面的开创性研究
1963	E. P. 维格纳 (Eugene Paul Wigner)	美籍匈牙利人	对原子核和基本粒子理论的贡献, 尤其是发现和应用了基本的对称性原理 对原子核壳层结构的发现
	M. G. 迈尔 (Maria Goeppert Mayer) (女)	美籍德国人	
	J. H. D. 延森 (Johannes Hans David Jensen)	德国	

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1964	C. H. 汤斯 (Charles Hard Townes) H. Г. 巴索夫 (Николай Геннадиевич Басов) A. M. 普罗霍罗夫 (Александр Михайлович Прохоров)	美国 前苏联 前苏联	由于量子电子学方面的基础研究, 导致新型振荡器和放大器(微波激射器和激光器)的创制
1965	R. P. 费因曼 (Richard Phillips Feynman) J. S. 施温格 (J. S. Schwinger) S 朝水振一郎 (Sin-itiro Tomonaga)	美国 美国 日本	对粒子物理有深远意义的量子电动力学的基础研究
1966	A. 卡斯特勒 (Alfred Kastler)	法国	发现和发展了研究原子中赫兹共振的光学方法
1967	H. A. 贝特 (Hans Albrecht Bethe)	美籍 德国人	核反应理论方面的贡献, 特别是由于发现了作为恒星能源的热核反应循环
1968	L. W. 阿耳瓦雷茨 (Luis Walter Alvarez)	美国	对粒子物理学方面的贡献。由于发现了大量共振态和对共振态的研究工作



(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1969	M. 盖耳-曼 (Murray Gell-Mann)	美国	在基本粒子分类及其相互作用方面的贡献和发现, 提出“夸克”假设
1970	H. 阿尔文 (Hannes Alfvén)	瑞典	在磁流体动力学方面的基本研究和发现其在等离子体物理方面的应用
	L. E. F. 奈耳 (Louis Eugène Felix Neel)	法国	反铁磁性和铁氧体磁性的基本研究及其应用
1971	D. 伽柏 (Dennis Gabor)	英籍匈牙利人	全息照相术的发明与发展
1972	J. 巴丁 (John Bardeen)	美国	建立了超导电性微观理论(通称BCS理论)
	L. N. 库珀 (Leon Neil Cooper)	美国	
	J. R. 施里弗 (John Robert Schrieffer)		
1973	B. D. 约瑟夫森 (Brian David Josephson)	英国	在理论上预言了一种新型隧道效应(即约瑟夫森效应)和一系列与此有关的效应
	江崎玲於奈 (Leo Esaki)	日本	在实验上发现半导体中的隧道效应

(续表)

附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
	I. 加埃沃 (Ivar Giaever)	美籍 挪威人	在实验上发现超导体中的隧道效应
1974	M. 赖尔 (Martin Ryle)	英国	在射电天文学方面的开创性工作,特别是发展了孔径综合技术
	A. 休伊什 (Antony Hewish)		在射电天文学方面的开创性研究,发现脉冲星
1975	A. 玻尔 (Asge Niels Bohr)	丹麦	发现原子核集体运动与粒子运动之间的联系,并在此基础上发展了核结构的理论
	B. R. 莫特森 (Ben Roy Mottelson)	丹麦籍 美国人	对原子核内部结构的研究工作
	L. J. 雷恩沃特 (Leo James Rainwater)	美国	
1976	丁肇中 (Chao-Chung Ting)	美籍 中国人	各自独立地发现 $J/\psi$ 粒子
	B. 里希特 (Burton Richter)	美国	
1977	P. W. 安德森 (Philip Warren Anderson)	美国	对磁性和无序系统的电子结构方面的基础理论研究
	N. F. 莫脱 (Nevill Francis Mott)	英国	

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
	J. H. 范弗莱克 (John Hasbrouck Van Vleck)	美国	
1978	A. A. 彭齐亚斯 (Arno Allan Penzias) R. W. 威耳孙 (Robert Woodrow Wilson) П. Л. 卡皮察 (Петр Леонидович Капица)	美籍 德国人 美国 前苏联	共同发现宇宙微波背景辐射  在低温物理学领域的发明与发现
1979	S. 温伯特 (Steven Weinberg)  A. 萨拉姆 (Abdus Salam)  S. L. 格拉肖 (Sheldon Lee Glashow)	美国  巴基斯坦  美国	提出并建立了基本粒子之间弱相互作用与电磁相互作用的统一理论, 特别是预言弱中性流的存在
1980	V. L. 非奇 (Val Logsdon Fitch)  J. W. 克洛宁 (James Watson Cronin)	美国  美国	发现在中性K介子衰变中CP不变性被破坏
1981	A. L. 肖洛 (Arthur Leonard Schawlow) N. 布洛姆伯根 (Nicolaas Bloembergen)	美国  美籍 荷兰人	在发展激光光谱学方面的贡献

(续表)

附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
	K. M. B. 西格班 (Kai Manne Börje Siegbahn)	瑞典	在发展电子能谱学方面的贡献
1982	K. G. 威耳逊 (Kenneth Geddes Wilson)	美国	创立相变临界现象的理论
1983	W. A. 福勒 (William Alfred Fowler)	美国	由于在核起源有关核反应的实验与理论方面的研究, 从而对宇宙中元素合成机理作出贡献
	S. 钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar)	美籍 印度人	对恒星结构及其演化理论作出贡献
1984	C. 鲁比亚 (Carlo Rubbia)	意大利	发现 $W^{\pm}$ 粒子及 $Z^0$ 粒子及对为此而建造的大型设备所作的贡献
	S. 范德米尔 (Simon van der Meer)	荷兰	发明随机冷却方案聚焦单·反单了束, 能使 PP 对撞
1985	K. V. 克利青 (Klaus von Klitzing)	德国	发现量子霍尔效应
1986	E. 鲁斯卡 (Ernst Ruska)	德国	设计并研制出世界上第一台电子显微镜
	G. 宾尼希 (Gerd Binnig)	德国	研制出扫描式隧道效应显微镜
	H. 罗雷尔 (Heinrich Rohrer)	瑞士	

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1987	K. A. 弥勒 (Karl Alex Müller)	瑞士	最先成功地发现了高温超导材料
	J. G. 柏诺兹 (Johannes Georg Bednorz)	德国	
1988	L. M. 莱德曼 (Leon Max Lederman)	美国	用加速器所产生的中微子束作实验证实存在两种中微子
	M. 施瓦茨 (Melvin Schwartz)	美国	
	J. 斯坦伯格 (Jack Steinberger)	美国	
1989	N. F. 拉姆齐 (Norman Foster Ramsey)	美国	设计出两种以振荡磁场刺激原子来探测原子能谱的技术发明了捕获和观察单个原子和电子的方法
	W. 泡利 (Wolfgang Pauli)	美国	
	H. G. 杜密尔特 (Hans G. Duhmelt)	美国	
1990	J. 弗里德曼 (Jerome Friedman)	美国	以在电子-核子深度非弹性散射实验方面的开创性工作,首次证实了质子和中子中夸克的存在
	H. 肯达尔 (Henry Kendall)	美国	
	R. 泰勒 (Richard Taylor)	加拿大	

(续表)

附录 A 诺贝尔物理学奖获得者一览表

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1991	P. G. 德热纳 (Pierre Gilles de Gennes)	法国	在超导、液晶、聚合物及其界面等材料科学方面的重要发现,其一系列理论预言都为实验所证实
1992	G. 夏帕克 (Georges Charpak)	法籍 波兰人	发明和发展了粒子探测器,使探测物质内部的技术取得突破性进展,1976、1984年的诺贝尔物理奖获得者均使用其发明成果发现了粲夸克和中间玻色子
1993	J. H. 泰勒 (Joseph Hooten Taylor)	美国	发现脉冲双星,为有关引力的研究提供了引力波的探测
	R. A. 赫尔斯 (Russell Alan Hulse)	美国	
1994	C. 沙尔 (Clifford Shull)	美国	在凝聚态物质的研究中发展了中子散射技术,观察到原子的排列
	B. 布罗克豪泽 (Bertram Brockhouse)	加拿大	处于中子散射技术开发前沿,揭示了原子的运动规律

(续表)

年份	获奖人	国籍	获奖研究成果
1995	M. L. 佩尔 (Martin L. Pel)	美国	证实了第三种轻子—— $\tau$ 轻子的存在, 促进人们对亚原子世界的了解, 并有助于建立所谓粒子物理标准模型 发现了中微子
	F. 莱因斯 (Frederick Reines)	美国	
1996	D. M. 李 (David M. Lee)	美国	发现了氦的同位素 $^3\text{He}$ 在极低温度条件下具有超流动性
	D. D. 奥谢罗夫 (Douglas D. Osheroff)	美国	
	R. C. 理查森 (Robert C. Richardson)	美国	
1997	朱棣文 (Steven Chu)	美籍 中国人	发明用激光冷却和捕获原子的方法
	C. C. 塔努吉 (Claude Cohen-Tannoudji)	法国	
	W. D. 菲利普斯 (William D. Phillips)	美国	
1998	H. L. 斯托尔默 (Horst L. Störmer)	德国	揭示了电子在强磁场状态下形成新的量子流体
	崔琦 (Daniel C. Tsui)	美籍 中国人	
	R. B. 劳克林 (Robert B. Laughlin)	美国	

## 常用物理公式

## 一、力 学

1. 平均速度  $\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$   
 $\left( v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, v_z = \frac{\Delta z}{\Delta t} \right) *$
- 瞬时速度  $v = \frac{dr}{dt}$
- 速率  $v = \frac{ds}{dt}$
2. 径向速度  $v_r = \frac{dr}{dt} e_r$
- 横向速度  $v_\theta = r \frac{d\theta}{dt} e_\theta$
3. 平均加速度  $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$
- 瞬时加速度  $a = \frac{dv}{dt}$
4. 切向加速度  $a_\tau = \frac{dv}{dt} \tau$
- 法向加速度  $a_n = \frac{v^2}{\rho} n$

\* 其他矢量公式的直角坐标分量式不再列出。



5. 径向加速度  $a_r = \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] e_r$   
 横向加速度  $a_\theta = \left[ r \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2 \left( \frac{dr}{dt} \right) \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \right] e_\theta$
6. 匀速直线运动  $x = x_0 + vt$
7. 匀变速直线运动  $v_t = v_0 + at$   
 $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$   
 $v_t^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$
8. 一般曲线运动  $v_t = v_0 + \int_{t_0}^t a dt$   
 $r_t = r_0 + \int_{t_0}^t v dt$
9. 角速度  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$   
 角加速度  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$   
 角量和线量关系  $v = R\omega$   
 $a_t = R\alpha$   
 $a_n = R\omega^2$
10. 匀速圆周运动  $\theta_t = \theta_0 + \omega t$
11. 匀变速圆周运动  $\omega_t = \omega_0 + \alpha t$   
 $\theta_t = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$   
 $\omega_t^2 = \omega_0^2 + 2\alpha(\theta_t - \theta_0)$
12. 相对运动  $v_{AB} = v_{AC} - v_{BC}$

13. 伽利略坐标变换  $x' = x - vt$   
 $y' = y$   
 $z' = z$   
 $t' = t$
14. 洛伦兹变换  $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$   
 $y' = y$   
 $z' = z$   
 $t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
15. 牛顿第二定律  $\sum \mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}$   
 $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$  ( $m$  为恒量)
16. 非惯性系中的力学规律  
 平动非惯性系中的惯性力  $\mathbf{F}_{\text{惯}} = -m\mathbf{a}_0$   
 匀速转动非惯性系中静止质点的惯性力(惯性离心力)  $\mathbf{F}_{\text{惯}} = -mR\omega^2 \mathbf{r}^0$   
 匀速转动非惯性系中运动质点的惯性力(科里奥利力)  $\mathbf{F}_c = 2m\mathbf{v}' \times \boldsymbol{\omega}$
17. 动量  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$

	冲量	$I = \int F dt$
18.	动量原理	$\int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1$
19.	动量守恒定律	$\sum m_i v_i = \text{常矢量}, (\sum F_i = 0)$
20.	功	$A = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int F \cos\theta ds$
	重力的功	$A = mgh_1 - mgh_2$
	弹力的功	$A = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2$
	引力的功	$A = - \left( G \frac{m_1 m_2}{r_1} - G \frac{m_1 m_2}{r_2} \right)$
	力矩的功	$A = \int M d\theta$
21.	功率	$P = \frac{dA}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v},$ (平动)
		$P = I\omega,$ (转动)
22.	平动物体动能	$E_K = \frac{1}{2} mv^2$
	转动物体动能	$E_K = \frac{1}{2} I\omega^2$
23.	重力势能	$E_p = mgh$
	弹性势能	$E_p = \frac{1}{2} kx^2$
	引力势能	$E_p = -G \frac{m_1 m_2}{r}$
24.	动能定理	$A_{\text{外}} = E_K - E_{K0}$
25.	功能原理	$A_{\text{外}} + A_{\text{非保}} = (E_K + E_p) - (E_{K0} + E_{p0})$
466 26.	机械能守恒定律	$E_K + E_p = \text{常量}, (A_{\text{外}} = 0, A_{\text{非保}} = 0)$

27. 质心坐标

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{m}, \quad x_c = \frac{\int x dm}{m}$$

$$y_c = \frac{\sum m_i y_i}{m}, \quad y_c = \frac{\int y dm}{m}$$

$$z_c = \frac{\sum m_i z_i}{m}, \quad z_c = \frac{\int z dm}{m}$$

28. 质心运动定理

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}_c$$

29. 刚体的转动惯量

$$I = \int r^2 dm$$

平行轴定理

$$I = I_c + md^2$$

垂直轴定理

$$I_z = I_x + I_y$$

30. 定轴转动定律

$$M_z = I_z \alpha$$

31. 刚体的角动量

$$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega} \text{ (对称轴情形)}$$

$$L_z = I_z \omega \text{ (定轴转动)}$$

32. 角动量定理

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M} dt = \mathbf{L}_2 - \mathbf{L}_1$$

$$\int_{t_1}^{t_2} M_z dt = L_{z2} - L_{z1} \text{ (定轴转动)}$$

33. 角动量守恒定律

$$L_{z2} = L_{z1} \text{ (当 } M_z = 0 \text{ 时)}$$

34. 定轴转动的动能定理

$$A = \frac{1}{2} I_z \omega_2^2 - \frac{1}{2} I_z \omega_1^2$$

35. 陀螺进动角速度

$$\Omega = \frac{M}{2\omega} = \frac{mgr_c}{I\omega}$$

36. 变质量系统

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_{\text{外}} + (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \frac{dm}{dt}$$

37. 火箭运动速度  $v_1 = v_0 + u \ln \frac{M_0}{M_1}$
37. 开普勒定律  $\frac{a^3}{T^2} = \text{开普勒常量 } K$   
 $K = \frac{GM}{4\pi^2}$  ( $M$  为主星质量)
38. 万有引力定律  $F = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \mathbf{r}_{12}$   
 $G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
39. 物体的视重  $P_f = P_0 \left( 1 - \frac{1}{191} \cos^2 \varphi \right)$
40. 引力场强  $\mathbf{g} = -\frac{Gm}{r^3} \mathbf{r}$
- 引力势  $V = -\frac{Gm}{r} + C$
41. 应力  $\tau = \frac{dF}{dS}$
42. 胡克定律  $\tau = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$   
 $F = k \Delta l$
43. 弹性模量(杨氏模量)  $E = \frac{F/S}{\Delta l/l}$
- 剪切模量(切变模量)  $G = \frac{F/S}{\varphi}$
- 体积模量(压缩模量)  $K = \frac{P}{\Delta V/V}$
44. 流体的体积流量  $Q_v = \int \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$
- 流体的质量流量  $Q_m = \int \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$

45. 流体的连续性原理  $\rho v dS = \text{常量}$   
 $v dS = \text{常量}$  (不可压缩流体)
46. 伯努利方程  $p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{常量}$
47. 流体的粘性定律  $f = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S$
48. 粘性流体的伯努利方程  $p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 + w$
49. 泊肃叶定律  $Q_V = \frac{1}{8\eta l} \pi R^4 (p_1 - p_2)$
50. 斯托克斯粘滞公式  $f = 6\pi\eta r v$
51. 雷诺数  $R_e = \frac{1}{\eta} \rho v l$

## 二、振动和波动

1. 简谐振动运动方程  $\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$   
 $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$   
 $x = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$   
 $x = A e^{i\omega_0 t} + B e^{-i\omega_0 t}$
2. 振动周期、频率、角频率  $\nu = \frac{1}{T}$   
 $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$
3. 弹簧振子振动周期  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

单摆振动周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{2^2} \sin^2 \frac{\theta_m}{2} + \frac{1}{2^2} \frac{3^2}{4^2} \sin^4 \frac{\theta_m}{2} + \dots \right)$$

复摆振动周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}}$$

扭摆振动周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}$$

4. 谐振动的能量

$$E_K = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$E_P = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$E = E_K + E_P = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 = \frac{1}{2} kA^2$$

5. 阻尼振动运动方程

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

阻尼振动

$$x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

( $\beta^2 < \omega_0^2$ )

过阻尼运动

$$x = c_1 e^{-(\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t} + c_2 e^{-(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})t}$$

( $\beta^2 > \omega_0^2$ )

临界阻尼运动

$$x = (c_1 + c_2 t) e^{-\beta t}$$

( $\beta^2 = \omega_0^2$ )

6. 受迫振动运动方程

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f \cos \omega_d t$$

定态振动  $x = A \cos(\omega_d t + \varphi_d)$

定态位移振幅  $A = \frac{f}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_d^2)^2 + 4\beta^2 \omega_d^2}}$

定态位移相位  $\varphi_d = \arctan \frac{-2\beta\omega_d}{\omega_0^2 - \omega_d^2}$

定态速度振幅  $V = \frac{\omega f}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_d^2)^2 + 4\beta^2 \omega_d^2}}$

定态速度相位  $\varphi_v = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{-2\beta\omega_d}{\omega_0^2 - \omega_d^2}$

7. 位移共振  $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$

$A_{\text{极大}} = \frac{f}{2\beta \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$

速度共振  $\omega_r = \omega_0$

$V_{\text{极大}} = \frac{f}{2\beta}$

8. 同方向同频率简谐振动的合成  $x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega t + \varphi_0)$

$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})}$

$\tan \varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{10} + A_2 \sin \varphi_{20}}{A_1 \cos \varphi_{10} + A_2 \cos \varphi_{20}}$

9. 同方向不同频率简谐振动的合成  $x = 2A \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \cos \frac{(\omega_2 + \omega_1)t}{2}$

拍频  $\nu_{\text{拍}} = \nu_2 - \nu_1$

10. 垂直方向同频率简谐振动的合成  $\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} - \frac{2xy}{A_x A_y} \cos(\varphi_y - \varphi_x) =$

轨迹方程  $\sin^2(\varphi_y - \varphi_x)$



11. 振动的分解

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \phi_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n}$$

12. 波动方程

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

平面波波动方程

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

球面波波动方程

$$\frac{\partial^2 (r\xi)}{\partial r^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 (r\xi)}{\partial t^2}$$

13. 平面简谐波的表式

$$\xi(x, t) = A \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right]$$

$$\xi(x, t) = A \cos \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right]$$

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t + kx + \varphi_0)$$

14. 球面简谐波的表式

$$\xi(r, t) =$$

$$\frac{A_0 r_0}{r} \cos \left[ \omega \left( t - \frac{r}{u} \right) + \varphi_0 \right]$$

15. 波速(相速)

$$u = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

固体中的波速

$$u = \sqrt{\frac{\bar{G}}{\rho}} \quad (\text{横波})$$

$$u = \sqrt{\frac{\bar{E}}{\rho}} \quad (\text{纵波})$$

流体中的波速

$$u = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{纵波})$$

拉紧绳子上的横波

$$u = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

理想气体中的声速

$$u = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\rho}}$$

液体中的表面波

$$u = \left[ \left( \frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \right) \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \right]^{1/2}$$

$$u = \left( \frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \right)^{1/2} \quad (h \gg \lambda)$$

$$u = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (\text{重力波})$$

$$u = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \quad (\text{毛细波})$$

16. 群速

$$u_g = \frac{d\omega}{dk}$$

$$u_g = u_p + k \frac{du_p}{dk}$$

17. 简谐波的能量密度

$$w = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{u} \right)$$

平均能量密度

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2$$

18. 波的平均能流

$$\bar{\rho} = \bar{w}uS$$

- 平均能流密度 (波的强度)
- $$I = \frac{\bar{P}}{S} = \bar{w}u = \frac{1}{2} \rho \Lambda^2 \omega^2 u$$
19. 多普勒效应 (机械波)
- $$\nu_R = \frac{u + v_R}{u} \nu_S$$
- 多普勒效应 (电磁波)
- $$\nu_R = \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} \nu_S$$
20. 冲击波 马赫锥半顶角
- $$\alpha = \arcsin \frac{u}{v_S}$$
- 马赫数
- $$M = \frac{v_S}{u}$$
21. 声压表示的声波表式
- $$p = p_m \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right] = p_m \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 - \frac{\pi}{2} \right]$$
- $$p_m = \rho u \omega A$$
- 声强
- $$I = \frac{1}{2} \rho u A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho u}$$
- 声强级
- $$I_L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$
22. 声强反射系数
- $$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2,$$
- $Z = \rho u$ , (介质的特性阻抗)
- 声强透射系数
- $$T = \frac{4Z_0 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$
23. 弦的振动
- $$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3 \cdots)$$
- $$\nu_n = n \frac{u}{2L} \quad (n = 1, 2, 3 \cdots)$$

24. 气柱的振动(开管)  $\nu_n = n \frac{u}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$

(闭管)  $\nu_n = n \frac{u}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$

25. 无阻尼自由振荡  $\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega^2 q = 0,$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

阻尼振荡

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

受迫振荡

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \varepsilon_0 \cos \omega t$$

$$i = I_0 \cos(\omega t + \varphi'_0)$$

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

电共振

$$\omega_{\text{共}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

26. 电磁波波动方程  $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

$$\sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H$$

27. 坡印廷矢量  
电磁波的动量

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$\mathbf{g} = \frac{1}{c^2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \frac{\mathbf{S}}{c^2}$$

### 三、热 学

1. 理想气体物态方程

$$pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT = \nu RT,$$

$$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$p = nkT, k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

真实气体物态方程

$$\left( p + \nu^2 \frac{a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT$$

$$pV = \nu RT (1 + Bp + Cp^2 + \dots)$$

$$pV = \nu RT$$

$$\left( 1 + B \left( \frac{\nu}{V} \right) + C \left( \frac{\nu}{V} \right)^2 + \dots \right)$$

2. 热力学第一定律

$$dQ = dE + dA$$

$$Q = (E_2 - E_1) + A$$

3. 气体做功

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

等压过程

$$A = p(V_2 - V_1)$$

等温过程

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

绝热过程

$$A = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1}$$

$$\frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right]$$

4. 理想气体的定压摩尔热容

$$C_p = \frac{(dQ)_p}{\nu dT}, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R$$

理想气体的定体摩尔热容	$C_v = \frac{(dQ)_v}{\nu dT}, C_v = \frac{i}{2}R$
迈耶公式	$C_p - C_v = R$
比热容比	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
5. 理想气体的内能	$E = \nu \frac{i}{2}RT = \nu C_v T$
6. 绝热过程方程	$pV^\gamma = \text{常量}$ $V^{\gamma-1}T = \text{常量}$ $p^{\gamma-1}/T = \text{常量}$
7. 多方过程方程	$pV^n = \text{常量}$
热容量	$C_n = C_v \left( \frac{n-\gamma}{n-1} \right)$
做功	$A = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{n-1} =$ $\frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} - 1 \right] =$ $\frac{\nu R}{M(n-1)} (T_2 - T_1)$
8. 循环过程	$Q_1 -  Q_2  = A$
正循环的效率	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 -  Q_2 }{Q_1}$
逆循环的致冷系数	$\epsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{ Q_1  - Q_2}$
9. 卡诺循环效率	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$
卡诺循环致冷系数	$\epsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

10. 熵

理想气体的熵

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{1}^{2} \frac{dQ}{T} \quad (\text{可逆})$$

$$\Delta S(T, V) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V}{T} dT +$$

$$\frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\Delta S(T, p) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT -$$

$$\frac{m}{M} R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

11. 概率

$$W_A = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}$$

$$W_A = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t_A}{t}$$

概率函数

$$f(x) = \frac{dW}{dx}$$

12. 统计平均值

$$\bar{M} = \int M f(x) dx$$

13. 理想气体的压强公式

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_K$$

气体分子动理论的能量公式

$$\bar{\epsilon}_K = \frac{3}{2} kT$$

理想气体的内能

$$E = \frac{m}{M} \frac{1}{2} (t + r + 2s) RT$$

14. 气体分子速率分布函数

$$f(v) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv}$$

麦克斯韦速率分布律

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv$$

- |               |                                                                                                                  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 麦克斯韦速度分布律     | $\frac{dN}{N} = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}} dv_x dv_y dv_z$ |
| 15. 玻尔兹曼能量分布律 | $dN = n_0 \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-(E_K + E_P)/kT} dv_x dv_y dv_z dx dy dz$                    |
| 重力场中粒子按高度分布律  | $n = n_0 e^{-mgh/kT}$                                                                                            |
| 等温气压公式        | $p = p_0 e^{-mgh/kT}$                                                                                            |
| 16. 分子的平均碰撞频率 | $\bar{Z} = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n$                                                                           |
| 分子的平均自由程      | $\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}$                                   |
| 17. 粘性定律      | $f = \eta \frac{du}{dz} \Delta S$<br>$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda}$                             |
| 18. 热传导定律     | $\frac{dQ}{dt} = -\kappa \frac{dT}{dz} \Delta S$<br>$\kappa = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda} C_V$        |
| 19. 扩散定律      | $\frac{dM}{dt} = -D \frac{d\rho}{dz} \Delta S$<br>$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}$                        |
| 20. 表面张力      | $f = \alpha L$                                                                                                   |
| 21. 球形液面内外压强差 | $p = \frac{2\alpha}{R}$                                                                                          |



- 球形液泡内外压强差  $p = \frac{4\alpha}{R}$
- 任意弯曲液面附加压强  $p = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$
22. 毛细管中液面上升或下降高度  $h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g r}$
23. 固体的热容量  $C = 3R$

#### 四、电磁学

##### 1. 库仑定律

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21},$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2),$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

##### 2. 电场强度

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$$

点电荷的场强

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \mathbf{r}$$

点电荷系的场强

$$\mathbf{E} = \sum \mathbf{E}_i = \sum \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i^0$$

电偶极子的场强  
轴线的延线上

$$\mathbf{E}_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_c}{x^3}$$

中垂线上

$$\mathbf{E}_y = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_c}{y^3}$$

任意一点

$$\mathbf{E} = \frac{p_c}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + y^2)^2} \sqrt{4x^2 + y^2} -$$

$$\frac{p_c}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{3\cos^2\theta + 1}$$

- |    |                    |                                                                                                                                                                                         |
|----|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. | 无限大均匀带电平板的场强       | $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$                                                                                                                                                        |
|    | 两无限大均匀带异号电荷平板间的场强  | $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$                                                                                                                                                         |
| 4. | 均匀带电球面的场强          | $E_{\text{内}} = 0$<br>$E_{\text{外}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$                                                                                                           |
| 5. | 电势差                | $U_{ab} = V_a - V_b = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$                                                                                                                            |
|    | 电势                 | $V_p = \int_p^\infty \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$                                                                                                                                      |
|    | 点电荷的电势             | $V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$                                                                                                                                                        |
|    | 点电荷系的电势            | $V = \sum \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}$                                                                                                                                               |
| 6. | 均匀带电球面的电势          | $V_{\text{内}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$<br>$V_{\text{外}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$                                                                                              |
| 7. | 两无限大均匀带异号电荷平行板的电势差 | $U_{ab} = Ed$                                                                                                                                                                           |
| 8. | 场强与电势的关系           | $\mathbf{E} = -\text{grad } V$<br>$\left( E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \right.$<br>$\left. E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \right)$ |
| 9. | 电容器的电容             | $C = \frac{Q}{V_a - V_b}$                                                                                                                                                               |

- |     |           |                                                                                                                                                             |
|-----|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 平板电容器     | $C = \frac{\epsilon S}{d}$                                                                                                                                  |
|     | 球形电容器     | $C = 4\pi\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$                                                                                                                |
|     | 圆柱形电容器    | $C = 2\pi\epsilon \frac{L}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$                                                                                                            |
| 10  | 电容器的串联    | $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$                                                                                                       |
|     | 电容器的并联    | $C = C_1 + C_2 + \dots$                                                                                                                                     |
| 11  | 电容器贮存的能量  | $W = \frac{1}{2} CV^2 =$<br>$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} =$<br>$\frac{1}{2} QV$                                                                               |
|     | 电场的能量密度   | $w_e = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} =$<br>$\frac{1}{2} \epsilon E^2$                                                                             |
| 12. | 电场中的高斯定理  | $\oint_{(S)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum q_0$                                                                                                       |
| 13. | 毕奥-萨伐尔定律  | $d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2}$<br>$\left( \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A} \right)$ |
|     | 运动电荷的磁场   | $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 q (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0)}{4\pi r^2}$                                                                                    |
| 14. | 无限长直导线的磁场 | $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$                                                                                                                                |

- |                   |                                                                        |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 圆线圈轴线上的<br>磁场     | $B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$                            |
| 圆线圈圆心处的<br>磁场     | $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$                                               |
| 长直螺线管内部<br>的磁场    | $B = \mu_0 nI$                                                         |
| 螺绕环内部的磁<br>场      | $B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$                                          |
| 圆柱导体的磁场           | $B_{内} = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$                                   |
|                   | $B_{外} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$                                       |
| 15. 磁场的能量密度       | $w_m = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$                        |
| 16. 安培环路定理        | $\oint_{(L)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$                    |
| 17. 洛仑兹力公式        | $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$                         |
| 安培定律              | $d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$                        |
| 磁场对载流线圈<br>的作用    | $\mathbf{M} = \mathbf{p}_m \times \mathbf{B}$                          |
| 18. 磁力的功          | $A = I \Delta \Phi_m$                                                  |
| 19. 电磁感应定律        | $\epsilon = - \frac{d\Psi_m}{dt}$                                      |
| 运动导线内的感<br>应电动势   | $\epsilon = \int_a^b (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}$ |
| 转动平面线圈内<br>的感应电动势 | $\epsilon = NBS \omega \sin \omega t$                                  |
| 20. 自感电动势         | $\epsilon = -L \frac{di}{dt}$                                          |

长直螺线管的自感系数

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S$$

互感电动势

$$\epsilon_{12} = -M \frac{di_2}{dt}$$

$$\epsilon_{21} = -M \frac{di_1}{dt}$$

共轴螺线管的互感系数

$$M = \mu \frac{N_1 N_2}{l} S$$

线圈的耦合

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}$$

自感线圈的磁能

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

互感线圈的磁能

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 +$$

$$\frac{1}{2} L_2 I_2^2 + MI_1 I_2$$

21. 麦克斯韦方程组

$$\oint_{(S)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q_0$$

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} =$$

$$\int_{(S)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} =$$

$$I_0 + \int_{(S)} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

22 欧姆定律

$$I = \frac{U}{R}$$

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$$

23. 焦耳定律  $I = \frac{\sum \epsilon}{\sum R}$   
 $Q = I^2 R t$   
 $\omega = \gamma E^2$
24. 基尔霍夫定律  $\sum I = 0$   
 $\sum \epsilon = \sum IR$
25. 交流电的有效值  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$
26. 纯电阻交流电路  $u = U_m \sin \omega t$   
 $i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$
- 纯电感交流电路  $u = U_m \sin \omega t$   
 $i = \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$
- 纯电容交流电路  $u = U_m \sin \omega t$   
 $i = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$
27. 交流电路的功率 有功功率  $P = UI \cos \varphi$   
 视在功率  $S = UI$   
 功率因数  $\cos \varphi =$   

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

## 五、光 学

1. 折射定律  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$

- 全反射临界角  $i_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$
- 三棱镜的最小偏向角  $n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$
2. 球面镜成像公式  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}$
- 透镜成像公式  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$
- 牛顿薄透镜公式  $xx' = ff'$
3. 双缝干涉明暗条件
- $\delta = \frac{xd}{D} = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$   
 ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) 明纹
- $\delta = \frac{xd}{D} = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$   
 ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) 暗纹
- 双缝干涉条纹间距  $\Delta x = \frac{\lambda}{d} D$
4. 劈形膜干涉条纹间距  $l = \frac{\lambda}{2n\theta}$
5. 单缝夫琅禾费衍射条件
- $a \sin \theta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$   
 ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) 明纹
- $a \sin \theta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$   
 ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) 暗纹
- 圆孔夫琅禾费衍射爱里斑半径  $r_0 = 1.22 \frac{\lambda f}{D}$

6. 光学仪器的分辨本领
- 人眼  $\delta\theta_e \approx 1.22 \frac{\lambda}{D_e}$
- 望远镜  $\delta\theta_m \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$
- 显微镜  $\Delta y = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$
7. 衍射光栅公式
- $(a + b) \sin \theta = k\lambda$   
( $k = 0, 1, 2, \dots$ )
- 光栅的色分辨本领  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$
- X 射线衍射  $2d \sin \theta = k\lambda$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ )
8. 马吕斯定律  $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$
- 布儒斯特定律  $\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$

## 六、近代物理

1. 洛伦兹变换式
- $$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$
- $$y' = y,$$
- $$z' = z,$$
- $$t' = \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
- 速度变换式
- $$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - Vv_x/c^2}$$
- $$v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - Vv_x/c^2}$$
- $$v'_z = \frac{v_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - Vv_x/c^2}$$



2. 长度收缩  $l' = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$
- 时间延缓  $\tau' = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
3. 相对论质量  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
- 相对论动能  $E_C = mc^2 - m_0c^2$
- 相对论质能关系  $E = mc^2$
- 狭义相对论动力学方程  $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$
4. 电磁场量相对论变换
- $E'_x = E_x,$
- $E'_y = \frac{E_y - VB_z}{\sqrt{1 - \beta^2}},$
- $E'_z = \frac{E_z + VB_y}{\sqrt{1 - \beta^2}},$
- $B'_x = B_x,$
- $B'_y = \frac{B_y - VE_z/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}},$
- $B'_z = \frac{B_z - VE_y/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
5. 热辐射的基尔霍夫定律  $\frac{M_{1\lambda}(T)}{e_1(\lambda, T)} = \frac{M_{2\lambda}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = M_{0\lambda}(T)$
- 斯特藩-玻耳兹曼定律  $M_0(T) = \sigma T^4$

- 维恩定律  $\lambda_m T = b$
6. 爱因斯坦光电效应方程  $h\nu = \frac{1}{2} m v_m^2 + A$
- 康普顿波长改变  $\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$
7. 氢原子能级  $E_n = -\frac{m c^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$
- 类氢原子能级  $E_n = -\frac{m Z^2 e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$   
 $(n=1, 2, 3, \dots)$
- 跃迁频率条件  $\nu_{kn} = \frac{|E_n - E_k|}{h}$
8. 德布罗意关系  $E = h\nu$   
 $p = \frac{h}{\lambda} n$
- 电子的德布罗意波长  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2me} \sqrt{U}}$
- 德布罗意波  $\Psi = \Psi_0 e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)}$
9. 不确定关系  $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$   
 $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
10. 薛定谔方程  $\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + U(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$

- 定态薛定谔方程  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2}$   
 $(E - U)\psi = 0$
11. 原子核的结合能  $E_B = [Zm_p + (A - Z)m_n - m]c^2$
12. 放射性衰变定律  $N = N_0 e^{-\lambda t}$   
 $A = A_0 e^{-\lambda t}$
- 放射性元素的半衰期  $T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

## 附录 C

## 常用物理量数据表

## I 力学

表 I.1 一些事物的空间尺度(m)

普朗克长度(空间尺度极限)	$10^{-35}$
原子核的线度	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
基态氢原子的半径	$5.3 \times 10^{-11}$
原子的线度	$10^{-10}$
病毒的线度	$\sim 1.2 \times 10^{-8}$
可见光的波长	$4 \sim 7.5 \times 10^{-7}$
人类红血球细胞直径	$7.5 \times 10^{-6}$
一般纸张厚度	$\sim 1 \times 10^{-4}$
尘埃	$10^{-3}$
普通人的高度(平均)	$\sim 1.7$
鲸鱼长度(最大的动物)	$10^1$
红杉树高度(最大的植物)	$10^2$
珠穆朗玛峰高度(最高的山)	$8.84 \times 10^3$
马里亚纳海沟(最深的海)	$1.1022 \times 10^4$
地球半径	$6.37 \times 10^6$
日地距离(1天文单位 AU)	$1.5 \times 10^{11}$
太阳系半径	$10^{13}$
1光年的长度	$9.46 \times 10^{15}$
银河系半径	$10^{21}$
哈勃半径(已观测到的宇宙范围)	$10^{26}$

表 1.2 一些事物的时间尺度(s)

普朗克时间(时间尺度极限)	$10^{-43}$
$\alpha$ 粒子的寿命	$10^{-25}$
可见光辐射的周期	$\sim 2 \times 10^{-15}$
超快速摄影的曝光时间	$\sim 1 \times 10^{-4}$
一般声波周期	$10^{-3}$
市电周期(50Hz)	$2 \times 10^{-2}$
钟摆的周期	$10^0$
人的心脏跳动周期	0.9
百米赛跑世界纪录	10
自由中子的寿命	$9 \times 10^2$
地球自转的周期(一天)	$8.64 \times 10^4$
月球公转的周期(一月)	$2.6 \times 10^6$
地球公转的周期(一年)	$3.2 \times 10^7$
一般人的寿命(平均)	$2.2 \times 10^9$
人类文明史(最早文字记录)	$1.6 \times 10^{11}$
古人类出现至今	$10^{14}$
地球年龄	$1.4 \times 10^{17}$
宇宙年龄	$\sim 4 \times 10^{17}$
质子的寿命	$10^{39}$

表 1.3 一些事物的速度(m/s)

真空中光速 c	$2.99792458 \times 10^8$
实验室中已达到的最快的电子速度	$0.9999999994c$
基态氢原子中电子绕核的速度	$2.2 \times 10^6$
太阳绕银河中心运动的速度	$2.0 \times 10^5$
地球绕太阳运动的速度	$3.0 \times 10^4$
第二宇宙速度	$1.1 \times 10^4$
第一宇宙速度	$7.8 \times 10^3$

(续表)

喷气式飞机的速度	$3 \sim 9 \times 10^2$
子弹出膛时的速度	$\sim 7 \times 10^2$
地球的自转速度(赤道)	$4.6 \times 10^2$
空气分子热运动的平均速度(室温)	$4.5 \times 10^2$
空气中的声速	$3.3 \times 10^2$
民航喷气客机	$2.7 \times 10^2$
人跑步的速度(最快)	12
人的步行速度	1.3
蜗牛爬行的速度	$\sim 10^{-3}$
冰河移动速度	$\sim 10^{-6}$
头发生长速度	$3 \times 10^{-9}$
大陆漂移速度	$\sim 10^{-9}$

表 1.4 一些物体的转速(转/分)

密纹唱片(除 $33 \frac{1}{3}$ 转/分外,还有 $16 \frac{2}{3}$ 转/分、45 转/分,但很少)	$33 \frac{1}{3}$
粗纹唱片	78
直升飞机的负载螺旋桨	120 ~ 300
轮船螺旋桨(约)	180
柴油机(低速)	小于 250
柴油机(中速)	250 ~ 1000
柴油机(高速)	大于 1000
汽车轮子的转速(约)	300 ~ 1200
水轮机	$\sim 500$
直升飞机的舵螺旋桨	1200 ~ 2400
2.2 千瓦汽油机(单缸四冲程)	1500
大客车发动机	2000 ~ 2800

(续表)

载重汽车发动机	2000 ~ 4000
三相异步电动机(二极同步转速)	3000
小轿车发动机	4400 ~ 5200
摩托车发动机	4600 ~ 5500
炮弹从炮膛射出时	12000
超速离心机(转速可达 1300 转/秒)	78000
手枪子弹出膛时(转速可达 3600 转/秒)	216000
外科高速切骨刀	$10^5$
高速牙钻微型轴承	$4 \times 10^5$
加速器中质子转速(数量级 $10^6$ 转/秒)	(约) $10^8$
氢原子中电子绕核旋转的转速 ( $6.6 \times 10^{15}$ 转/秒)	$4 \times 10^{17}$

表 1.5 一些物体的加速度( $m/s^2$ )

基态氢原子中电子加速度	$9.1 \times 10^{22}$
直线加速器中质子的加速度	$\sim 3 \times 10^{15}$
物体在高速离心机中的加速度	$3 \times 10^6$
子弹在枪膛中的加速度	$\sim 5 \times 10^5$
火箭升空时的加速度	$\sim 10^2$
使人晕厥的加速度	$\sim 70$
地球表面的重力加速度	9.8
月球表面的重力加速度	1.7
地球绕太阳公转的加速度	$6 \times 10^{-3}$
太阳绕银河系中心公转的加速度	$\sim 3 \times 10^{-6}$

表 I.6 一些城市的重力加速度( $m/s^2$ )

地点	纬度	重力加速度	附注
新加坡	北纬 $1^{\circ}17'$	9.7807	
马尼拉	北纬 $14^{\circ}35'$	9.7836	
南宁	北纬 $22^{\circ}43'$	9.7876	
广州	北纬 $23^{\circ}06'$	9.7883	
福州	北纬 $28^{\circ}02'$	9.7916	
杭州	北纬 $30^{\circ}16'$	9.7930	
汉口	北纬 $30^{\circ}33'$	9.7936	
上海	北纬 $31^{\circ}12'$	9.7948	
东京	北纬 $35^{\circ}42'$	9.7980	海拔 18m
华盛顿	北纬 $38^{\circ}53'$	9.8011	
北京	北纬 $39^{\circ}56'$	9.8012	
罗马	北纬 $41^{\circ}54'$	9.8035	海拔 59m
巴黎	北纬 $48^{\circ}50'$	9.8094	海拔 61m
格林威治	北纬 $51^{\circ}29'$	9.81188	
伦敦	北纬 $51^{\circ}31'$	9.81199	海拔 30m
柏林	北纬 $52^{\circ}31'$	9.8128	海拔 30m
莫斯科	北纬 $55^{\circ}45'$	9.8156	海拔 139m
好望角	南纬 $33^{\circ}56'$	9.7963	海拔 11m
爪哇	南纬 $6^{\circ}$	9.7820	

 表 I.7 不同高度、不同纬度的重力加速度( $m/s^2$ )

海拔 (km)	纬度									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	重力加速度									
0	9.780	9.782	9.786	9.793	9.802	9.811	9.819	9.826	9.831	9.832
2	9.774	9.776	9.780	9.787	9.796	9.804	9.813	9.821	9.824	9.826
4	9.768	9.770	9.774	9.781	9.789	9.798	9.807	9.814	9.818	9.820



(续表)

海拔 (m)	纬度									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	重力加速度									
6	9.762	9.763	9.768	9.775	9.783	9.792	9.801	9.808	9.812	9.814
8	9.756	9.757	9.762	9.768	9.777	9.786	9.794	9.801	9.806	9.807
10	9.749	9.751	9.755	9.762	9.771	9.780	9.788	9.795	9.811	9.811
12	9.743	9.745	9.749	9.756	9.765	9.774	9.782	9.789	9.794	9.795
14	9.737	9.739	9.743	9.750	9.758	9.768	9.776	9.783	9.787	9.789
16	9.731	9.732	9.737	9.744	9.752	9.761	9.770	9.777	9.781	9.783
18	9.725	9.726	9.731	9.738	9.746	9.755	9.764	9.771	9.775	9.777
20	9.719	9.720	9.725	9.732	9.740	9.749	9.757	9.764	9.769	9.770

表 I .8 一些物体的质量(kg)

电子	$9.1 \times 10^{-31}$
质子	$1.7 \times 10^{-27}$
铁原子	$9.5 \times 10^{-26}$
氨基酸分子	$10^{-25}$
红血球细胞	$9 \times 10^{-14}$
尘埃	$5 \times 10^{-10}$
雨滴	$2 \times 10^{-6}$
蚂蚁	$10^{-4}$
人体(平均)	70
大象	$4 \times 10^3$
海洋中的水	$10^7$
月球	$7.4 \times 10^{22}$
地球	$6.0 \times 10^{24}$
太阳	$2.0 \times 10^{30}$
银河系	$4 \times 10^{41}$
宇宙(现在观测到的)	$\sim 10^{53}$

表 I.9 一些力的量级(N)

太阳对地球的引力	$3.5 \times 10^{22}$
地球对月亮的引力	$2.0 \times 10^{20}$
洲际火箭的推力	$\sim 3.3 \times 10^7$
大拖轮的拉力	$\sim 10^6$
喷气式客机推力	$\sim 7 \times 10^5$
火车头的拉力	$\sim 10^5$
汽车减速时的制动力	$\sim 10^4$
原子核内质子间的相互作用力	$\sim 10^4$
汽车加速时推力	$7 \times 10^3$
地球对成年人的引力	$7 \times 10^2$
地球对硬分币的引力	$5 \times 10^{-2}$
氢原子中核与电子间的相互作用力	$8 \times 10^{-8}$

表 I.10 滑动摩擦的摩擦系数\*

摩擦物体	滑动摩擦系数	摩擦物体	滑动摩擦系数
钢和冰	0.02	皮带和木头	0.4
木头和冰	0.035	木和木(纤维互相垂直)	0.2
黄铜和铸铁	0.16	木和木(顺着纤维)	0.4
钢和钢	0.17	玻璃和玻璃	0.4
钢和铸铁	0.17	苧麻绳和铁	0.25
铁和铸铁、铁和青铜	0.18	苧麻绳和木(磨光)	0.33
铁和黄铜	0.2	苧麻绳和木(粗糙)	0.50
青铜和青铜	0.2	聚四氟乙烯(塑料王)和钢	0.1-0.2
青铜和铸铁	0.22	聚丙烯塑料和钢	0.33
铁和铁	0.3	韧性聚苯乙烯和钢	0.5
钢和硬地	0.2~0.4	气垫导轨	0.001
皮带和铸铁	0.28		(数量级)

\* 滑动摩擦系数的大小和压强、速度等也有关系,大体说滑动摩擦系数随压强的增大而增大,随速度的增大而减小(但都不成算术比例)。以上列示的是一般情况下的摩擦系数,现在再把某些物体在压强较大时的摩擦系数列示如下,以供参考。

压强 (千克力/厘米 <sup>2</sup> )	软钢在软钢上	铸铁在软钢上	钢在铸铁上	黄铜在铸铁上
8.79	0.140	0.174	0.166	0.157
15.75	0.271	0.292	0.333	0.219
26.22	0.350	0.351	0.351	0.206
36.77	0.409	0.366	0.357	0.223
44.58	表面损伤	0.367	0.367	0.235
47.25		0.376	0.403	0.233
52.12		表面损伤	表面损伤	0.232
57.65				0.273

表 J.11 物体之间或车辆在道路上的滚动摩擦系数\*

摩擦物体		滚动摩擦系数
一般物体	淬火钢——淬火钢	0.001
	软钢——软钢	0.005
	铸铁——铸铁	0.005
	木材——钢	0.03~0.04
	木材——木材	0.05~0.08
车辆在道路上	火车在铁轨上	0.003~0.005
	有轨电车	0.006~0.008
	胶轮车在高级柏油路上	0.01~0.018
	胶轮车在一般柏油路上	0.018~0.022
	胶轮车在一般公路或石路上	0.02~0.03
	胶轮车在一般的土路上	0.025~0.035
	胶轮车在雨后的土路上	0.05~0.15

(续表)

摩擦物体		滚动摩擦系数	
车辆在道路上	胶轮车在沙土路上	0.15~0.30	
	铁轮车在高级道路上	0.015	
	铁轮车在石路上	0.03~0.05	
	铁轮车在土路上	0.08~0.16	
拖拉机在不同地面上	地面	轮胎式 拖拉机	履带式 拖拉机
	泥地	0.05~0.15	0.05~0.07
	荒地	0.10~0.12	0.065
	有植物残根的土地	0.14~0.16	0.08
	熟地	0.18~0.20	0.07~0.09

\* 车辆在道路上的滚动摩擦系数也叫做牵引系数

表 1.12 一些功率的量级(W)

太阳辐射	$3.9 \times 10^{26}$
地球所受的太阳辐射	$1.7 \times 10^{17}$
洲际火箭的推进	$2 \times 10^{13}$
大发电站	$\sim 10^9$
喷气客机的发动机	$2.1 \times 10^8$
汽车发动机	$1.5 \times 10^5$
大功率无线电发射台	$1 \times 10^5$
地球表面每平方米接收的太阳辐射	$1.4 \times 10^3$
运动员的输出功率	$2 \times 10^2$
人的平均输出功率	$1 \times 10^2$
原子发射光子	$\sim 10^{-10}$

表 I .13 一些物体动能的量级(J)

地球绕日运动	$2.6 \times 10^{33}$
地球自转	$2.1 \times 10^{29}$
万吨轮航行	$9 \times 10^9$
喷气式客机	$\sim 10^9$
汽车	$5 \times 10^5$
子弹	$4 \times 10^3$
人步行	$6 \times 10^4$
宇宙线中的高能粒子	$5 \times 10^4$
雨滴	$4 \times 10^{-5}$
大加速器中加速后的质子	$1.6 \times 10^{-7}$
U <sup>235</sup> 原子核的裂变碎片	$2.6 \times 10^{-11}$
核中质子	$3 \times 10^{-12}$
氢原子中的电子	$2.2 \times 10^{-18}$
室温下空气分子平均动能	$6.2 \times 10^{-21}$

表 I .14 能量的大小举例(J)

太阳中的核燃料	$1 \times 10^{45}$
超新星爆发	$1 \times 10^{44}$
地球上可利用的石油燃料	$2 \times 10^{23}$
火山爆发	$6 \times 10^{18}$
1kg 物质与反物质湮灭	$9 \times 10^{16}$
核反应堆中的核燃料	$1 \times 10^{16}$
1 千万吨级氢弹爆炸	$4.2 \times 10^{15}$
1kg 铀的裂变	$8.2 \times 10^{13}$
一次中等闪电	$1 \times 10^9$
人一天从食物摄取的能量	$1.3 \times 10^7$
1kg TNT 炸药爆炸	$4.6 \times 10^6$
人在跑步时的动能	$4 \times 10^3$

(续表)

一次引体向上消耗的能量	$3 \times 10^2$
一个铀原子核的裂变	$3.2 \times 10^{-11}$
电子-正电子对湮灭	$1.6 \times 10^{-13}$
氢原子电离能	$2.2 \times 10^{-18}$
原子内电子能级跃迁能	$\sim 10^{-19}$
分子振动能级跃迁能	$\sim 10^{-20}$
分子转动能级跃迁能	$\sim 10^{-21}$

表 I.15 几种材料的恢复系数

材料	$e$ 值
玻璃与玻璃	0.93
铝与铝	0.20
铁与铅	0.12
钢与软木	0.55

 表 I.16 一些物体的角动量的量级( $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ )

太阳系所有行星的轨道运动	$3.2 \times 10^{43}$
地球的公转	$2.7 \times 10^{40}$
地球的自转	$5.8 \times 10^{33}$
直升飞机螺旋桨	$\sim 5 \times 10^4$
汽车车轮	$\sim 1$
玩具陀螺	$\sim 10^{-1}$
$33 \frac{1}{3}$ 唱片	$6 \times 10^{-3}$
步枪子弹的自转	$2 \times 10^{-3}$
电子绕核运动	$1.05 \times 10^{-34}$
电子自旋	$0.53 \times 10^{-34}$

表 I.17 一些事物的压强

事物	压强(单位:Pa)
一万米高空( $-50^{\circ}\text{C}$ )	$0.264 \times 10^5$
8500米高山上( $-40^{\circ}\text{C}$ )	$0.331 \times 10^5$
履带拖拉机对地面压强(约)	$0.3 \times 10^5$
坦克对地面压强(约)	$(0.4 \sim 0.5) \times 10^5$
标准大气压(760mmHg)	$1.01325 \times 10^5$
风扇,鼓风机	$(1.1 \sim 3) \times 10^5$
炊事用高压锅:安全塞熔化时	$(1.2 \sim 1.3) \times 10^5$
爆炸时(大于)	$3.92 \times 10^5$
风镐工作时(小于)	$6 \times 10^5$
防爆灯玻璃罩能耐受最大压强	$9.8 \times 10^5$
载重汽车轮胎内压强(小于)	$10 \times 10^5$
汽水瓶内压强	$10 \times 10^5$
一般无缝钢管能耐受	$20 \times 10^5$
高温高压蒸汽锅炉:400 $^{\circ}\text{C}$ 时	$30 \times 10^5$
450 $^{\circ}\text{C}$ 时	$40 \times 10^5$
510 $^{\circ}\text{C}$ 时	$101 \times 10^5$
无缝钢管能耐受	$(80 \sim 800) \times 10^5$
小汽车发动机汽缸内	$100 \times 10^5$
水力采煤机工作压强	$120 \times 10^5$
高压储气钢瓶	$150 \times 10^5$
水的临界压强	$221.4 \times 10^5$
合成氨等用高压容器	$(300 \sim 325) \times 10^5$
高压聚乙烯生产过程的操作压力	$(2800 \sim 3000) \times 10^5$
气体压缩机(可达)	$5000 \times 10^5$
石墨转化为金刚石(高温下加压)	$4 \times 10^9 \sim 10^{10}$

(续表)

事物	压强(单位:Pa)	
目前实验室已获得的静压强	$2 \times 10^{11}$	
地球中心压强(大于)	$3.64 \times 10^{11}$	
原子弹爆炸	$10^{14}$	
太阳中心压强	$10^{16}$	
热核反应(可达)	$10^{16} \sim 10^{17}$	
铁路轨道的有关压强	车轮与钢轨间	$(7000 \sim 9000) \times 10^5$
	钢轨与轨枕间	$20 \times 10^5$
	轨枕与道床间	$(1.5 \sim 3) \times 10^5$
	道床与路基间	$(0.8 \sim 1) \times 10^5$

表 I.18 某些金属的弹性限度和最大弹性伸长\*

金属	弹性限度 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	杨氏模量 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	最大可能弹性伸长
铅	0.25	1700	0.00015
锡	0.34	3000	0.00011
铜(软的)	3	10000	0.00030
铁(软的)	5	19000	0.00026
铝	5	7000	0.00071
碳钢	33	20000	0.00165
铝钢	60	22000	0.00273

\* 材料在外力作用下发生形变,若外力除去后形变全部消失,材料能自动恢复原状,这个极限应力(即能满足上述条件的最大应力)的值叫做弹性限度。上表中弹性限度和杨氏模量的数值乘  $9.8 \times 10^6$  得国际制单位  $\text{N}/\text{cm}^2$  的数值。

最大可能伸长是弹性限度内的最大伸长跟原长度的比值,即最大可能弹性伸长 =  $\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) M = \frac{\text{弹性限度}}{\text{杨氏模量}}$ 。这比值是纯数,无单位。



表 I .19 常用材料的极限强度\*

材料	极限强度(kgf/mm <sup>2</sup> )		
	拉伸	压缩	
铅	1.3~2.2	—	
锡	2.5~3.5	—	
铸铁	10~22	37~88	
铝	11	—	
金	14~21	—	
镁	21	—	
铂	21~35	—	
黄铜	22	8	
铜	24	42	
钨	27	—	
银	28~31	—	
镍	28~60	—	
铁(软的)	35	—	
钢(含 0.14% 的碳)	50	40	
工具钢(含 0.96% 的碳)	95	67	
云杉	顺纹 (含水量 15%)	6.5	3.5
	横纹	—	0.4
松木	顺纹 (含水量 15%)	8.0	4.0
	横纹	—	0.5
橡木	顺纹 (含水量 15%)	9.5	5.0
	横纹	—	1.5
砖	0.2	0.6	
混凝土	0.05~0.2	0.5~5	
沙岩	0.2	4~15	
石灰石	—	5~15	
花岗石	0.3	12~26	

(续表)

材料	极限强度 (kgf/mm <sup>2</sup> )			
	拉伸	压缩		
电木	2~3	8~10		
玻璃	2.5	—		
赛璐珞	5~7	—		
橡胶	5	5		
冰 (平均值)	在快速 载重下	0℃	—	0.05~0.10
		-12℃到-15℃	—	0.15~0.48
	在慢速 载重下	0℃	0.1	0.10~0.20
		-12℃到-15℃	—	0.57~0.70

\* 极限强度也叫做极限应力,是使材料破坏所需要的最小应力。极限强度的单位在国际单位制中是 N/m<sup>2</sup>,但工程技术上常用 kgf/mm<sup>2</sup> 或 kgf/cm<sup>2</sup>。上表数值乘 9.8 × 10<sup>6</sup> 得国际制单位 N/m<sup>2</sup> 的数值。

## II 声学

表 II.1 某些振动或作周期运动系统的周期

系统	周期(s)
银河系的自转	$7.8 \times 10^{14}$ ( $2.5 \times 10^8$ 年)
地球的公转	$3.2 \times 10^7$ (1 年)
月球的自转或公转	$2.4 \times 10^5$ (27.3 天)
太阳的自转	$2.2 \times 10^6$ (25.4 天)
地球的自转	$8.6 \times 10^4$ (1 天)
脉冲星(中子星)的脉冲辐射	0.03 - 4.3
心脏跳动	~1
交流电(50 周)	$2 \times 10^{-2}$
中频声振动	$10^{-3}$
超声振动	$10^{-4}$
中频电磁振动	$10^{-6}$

(续表)

系统	周期(s)
分子转动	$10^{-12}$
原子振动	$10^{-15}$
核振动	$10^{-21}$

表 11.2 某些声音(或波)的频率

声音(或波)	频率(Hz)
人类的肺部机能	0.03~0.25
人类心音波	1~2
老鼠可以听到的低频率	16 以下
次声波	16 以下
一般人能够听到的声音的频率	16~20000
一般人能够发出的声音的频率	64~1300
对一般人敏感的频率	1000~3000
对一般人最敏感的频率	2000
汽笛所发出的低音	几十
钢琴上的最低音	27.5
鼓或大提琴	100~200
蜜蜂采饱蜜后飞行时翅膀的频率	220
蜜蜂卸下蜜后飞行时翅膀的频率	440
C 调 1(dou)的频率	256
钢琴上的最高音	4096
长笛或哨子	5000~8000
蚊虫叫声	几千
超声波	20000 以上
狗可听到的高频率	38000
现代技术已得到的高频超声波	$10^9$

表 II.3 声音的传播速度

a. 气体和液体中的声速

在空气中 (1 atm)		在气体和蒸汽中 (0℃时)		在液体中 (常温时)	
温度 (℃)	声速 (m/s)	媒质	声速 (m/s)	媒质	声速 (m/s)
-150	217	溴蒸汽	135	乙醚	1030
-30	313	乙醚蒸汽	181	酒精	1275
-20	319	水银蒸汽(300℃)	187	水	1450
-10	325	二氧化碳蒸汽	195	海水	1510
0	330	氯气	206		
10	338	酒精蒸汽	231		
15	340	二氧化碳	260		
20	344	氮气	308		
30	349	氧气	316		
50	360	一氧化碳	337		
100	386	氯气	338		
300	478	水蒸气	400		
500	553	照明用煤气	500		
700	622	氦气	971		
1000	700	氢气	1262		

b. 固体中的声速 (m/s)

固体	纵波速度 (无限媒质中)	横波速度 (无限媒质)	棒内纵波速度
铝	6420	3040	5000
铍	12890	8880	12870
黄铜	4700	2110	3480
铜	5010	2270	3750
硬铝	6320	3130	5150

(续表)

固体	纵波速度 (无限媒质中)	横波速度 (无限媒质)	棒内纵波速度
金	3240	1200	2030
电解铁	5950	3240	5120
铅	1960	690	1210
镁	5770	3050	4940
镍	6040	3000	4900
莫涅耳合金	5350	2720	4400
铂	3260	1730	2800
银	3650	1610	2680
不锈钢	5790	3100	5000
锡	3320	1670	2730
钨	5410	2640	4320
铉铅	4210	2440	3850
熔融石英	5968	3764	5760
硼硅酸玻璃	5640	3280	5170
重硼钾铅玻璃	3980	2380	3720
丙烯酸树脂	2680	1100	1840
尼龙	2620	1070	1800
聚乙烯	1950	540	920
聚苯乙烯	2350	1120	2240

表 II.4 声音的声强级及其响度  
一些声音的声强级、声强和感觉到的响度

声源	声强级 (dB)	声强 ( $W/m^2$ )	响度
听觉阈 (闻阈)	0	$1 \times 10^{-12}$	极轻
隔音房间 细语	10	$1 \times 10^{-11}$	
树叶微动	20	$1 \times 10^{-10}$	
交谈 (轻) 住宅 (静) 办公室 (静) 礼堂 (静)	30	$1 \times 10^{-9}$	轻
无线电收音机 (轻) 交谈 (平均) 办公室 (平均) 住宅 (闹时)	40	$1 \times 10^{-8}$	正常
工厂 (平均)	50	$1 \times 10^{-7}$	
无线电收音机 (平均) 市声 (平均) 办公室 (闹时)	60	$1 \times 10^{-6}$	
警笛 卡车 工厂 (闹时) 市声 (较响)	70	$1 \times 10^{-5}$	响
锅炉工 铆钉锤 雷, 炮	80	$1 \times 10^{-4}$	极响
市声 (较响)	90	$1 \times 10^{-3}$	
锅炉工	100	$1 \times 10^{-2}$	
铆钉锤 雷, 炮	110	$1 \times 10^{-1}$	震耳
痛觉阈	120	1	

表 II.5 音阶\*

## a. 纯音律\*\*

音律符号和名称	C 1 do	D 2 re	E 3 mi	F 4 fa	G <sup>1</sup> 5 sol	A 6 la	B 7 si	C <sub>1</sub> 8 do <sub>1</sub>	
汉语拼音的名称	do <sub>1</sub>	re <sub>1</sub>	mi <sub>1</sub>	fa <sub>1</sub>	sol <sub>1</sub>	la <sub>1</sub>	si <sub>1</sub>	do <sub>1</sub>	
频率(Hz)	256	288	320	341 $\frac{1}{3}$	384	426 $\frac{2}{3}$	480	512	
相对频率	最小整数	24	27	30	32	36	40	45	48
	分数	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
音程	$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

## b. 十二音律\*\*\*

音律符号	c	c <sup>#</sup>	d	d <sup>#</sup>	e	f
频率(Hz)	261.7	277.2	293.7	311.2	329.7	349.2
音律符号	f <sup>#</sup>	g	g <sup>#</sup>	a	a <sup>#</sup>	b
频率(Hz)	370.0	392.0	415.3	440.0	466.2	493.9

\* 音阶就是一组顺次的纯音,其中第一个纯音跟末一个纯音之间的音程等于1个8音度。

\*\* 纯音律是音阶中的纯音频率之比等于顺次的不大的整数比,纯音律主要用于无伴奏合唱。

\*\*\* 十二音律又称十二平均律,后一个音的频率是前一个音的 $\sqrt[12]{2} = 1.05946$ 倍,以 $a = 440.0\text{Hz}$ 作为标准音调,十二音律主要用于键盘乐器、乐器合奏、带“品”的乐器等。

表 II.6 某些材料的吸声系数\*

材料名称	在下列频率的吸声系数(频率单位:Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
大理石、花岗石和其他磨光石料	0.01	—	0.01	—	0.015	—
抹灰的光滑砖墙	0.0130	0.0150	0.0200	0.0280	0.04	0.05

(续表)

材料名称	在下列频率的吸声系数(频率单位:Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
木抹灰的砖墙	0.024	0.025	0.032	0.041	0.049	0.07
木架板条光面抹灰	0.024	0.027	0.030	0.037	0.036	0.034
木架板条毛面抹灰	0.025	0.045	0.060	0.085	0.043	0.058
单料玻璃	0.03	—	0.027	—	0.02	—
嵌木地板	0.05	0.03	0.06	0.09	0.10	0.22
木制墙板(贴在墙上)	0.05	0.06	0.06	0.1	0.1	0.1
松木板壁	0.10	0.11	0.10	0.08	0.082	0.11
布(500g/m <sup>2</sup> ,贴墙悬挂)	0.04	0.07	0.13	0.22	0.33	0.35
丝绒(650g/m <sup>2</sup> ,贴墙悬挂)	0.05	0.12	0.35	0.45	0.38	0.36
丝绒(650g/m <sup>2</sup> ,离墙1cm)	0.06	0.27	0.44	0.50	0.40	0.35
地毯(铺在地板上)	0.11	0.13	0.28	0.45	0.29	0.29
毛毡(厚2.5cm)	0.18	0.36	0.71	0.79	0.82	0.85
压制木棉(厚3.5cm)	0.08	0.17	0.4	0.66	0.60	0.58
纤维吸声板(厚2.5cm,400kg/m <sup>2</sup> )	0.12	0.19	0.35	0.48	0.72	0.55
蔗板(厚1.1cm)	0.16	—	0.24	—	0.23	—
稻草垫(厚3cm)	0.3	—	0.63	—	0.90	—
穿孔纸料吸声板(用碎木纤维制成,厚2cm,170kg/m <sup>2</sup> )	0.31	0.33	0.47	0.53	0.59	0.64
玻璃棉(厚9cm)	0.32	0.40	0.51	0.60	0.65	0.60
敞开的窗户	1.00					

\* 吸声系数是某种材料所吸收的声能对传到的声能的比。



表 II.7 一些介质的声阻抗

介质	温度 (°C)	声速 $u$ (m/s)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	声阻抗 $Z = \rho u$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)
空气	0	331	1.293	428
空气	20	343	1.205	413
二氧化碳	0	259	1.977	512
水蒸汽	0	401	$4.85 \times 10^{-3}$	1.9
甘油	20	1920	$1.26 \times 10^3$	$2.42 \times 10^6$
石油	15	1330	$0.7 \times 10^3$	$0.931 \times 10^6$
水	17	1430	$0.999 \times 10^3$	$1.43 \times 10^6$
铜		3580	$8.93 \times 10^3$	$3.20 \times 10^7$
镍		4760	$8.90 \times 10^3$	$4.24 \times 10^7$
钢		5000	$7.90 \times 10^3$	$3.95 \times 10^7$
石英		5440	$2.65 \times 10^3$	$1.44 \times 10^7$
玻璃(重火石)		3490	$6.03 \times 10^3$	$21.1 \times 10^7$

## II 热学

表 II.1 某些物体的温度(K)

宇宙起始温度	$10^{23}$
最热的恒星内部温度	$10^9$
氢弹爆心温度	$10^8$
实验室获得的最高温度(等离子体)	$6 \times 10^7$
太阳中心温度	$1.5 \times 10^7$
太阳表面温度	$6 \times 10^3$
地球中心温度	$4 \times 10^3$
碳的熔点*	3500
钨的熔点*	3370
氢氧焰(普通)	2900
铁的熔点*	1800

(续表)

铅的熔点*	600
水的沸点*	373
人体温度	310
地球表面温度(平均)	287
冰的熔点*	273
液态氮的沸点*	77
液化氢的沸点*	20
液化氮的沸点*	4.2
实验室获得的最低温度	$5 \times 10^{-8}$

\* 在标准大气压下。

表 B.2 国际实用温标定义固定点

平衡状态	国际实用温标指定值	
	$T_{\text{fix}}(\text{K})$	$t_{\text{fix}}(^{\circ}\text{C})$
平衡氢三相点	13.81	-259.34
平衡氢在 25/76 标准大气压下的沸点	17.042	-256.108
平衡氢沸点	20.28	-252.87
氮沸点	27.102	-248.048
氧三相点	54.361	-218.789
氮三相点	83.798	-189.352
氧凝固点	90.188	-182.962
水三相点	273.15	0.01
水沸点	373.15	100
锡凝固点	505.078	231.9681
锌凝固点	692.73	419.58
银凝固点	1235.08	961.93
金凝固点	1337.58	1064.43

表 III.3 气体和蒸汽分子的基本常数

气体或蒸汽名称	分子式	分子量	分子质量 ( $10^{-27}$ kg)	分子直径 ( $10^{-10}$ m)	在 0°C 和标准大气压下		
					分子平均速度 (m/s)	平均自由程 ( $10^{-10}$ m)	每个分子每秒平均碰撞次数
氢	H <sub>2</sub>	2.0158	3.35	2.3	1692.0	1123	$15.1 \times 10^9$
氦	He	4.0026	6.65	1.9	1304.0	1798	$6.9 \times 10^9$
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.043	26.64		600.6	493	
氨	NH <sub>3</sub>	17.030	28.28		582.7	441	
水蒸气	H <sub>2</sub> O	18.015	29.92	2.6	566.5	404	$14.1 \times 10^9$
氩(20°C)	Ar	20.179	33.51		555.2	1238	$4.48 \times 10^9$
一氧化碳	CO	28.010	46.51	3.2	454.5	584	$7.8 \times 10^9$
氮	N <sub>2</sub>	28.013	46.52	3.1	454.3	599	$7.55 \times 10^9$
一氧化氮	NO	30.006	49.83	2.9	439.0	570	
氧	O <sub>2</sub>	31.9988	53.14	2.9	425.1	647	$6.55 \times 10^9$
甲醇蒸汽	CH <sub>3</sub> OH	32.042	53.21		424.9	327	
氯化氢(20°C)	HCl	36.461	60.55		412.6	426	$9.69 \times 10^9$
氩	Ar	39.948	66.34	2.8	381.0	635	$6.02 \times 10^9$
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	73.08	3.2	362.5	397	$9.05 \times 10^9$
乙醇蒸汽	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	46.069	76.50		354.4	215	

(续表)

气体或蒸汽名称	分子式	分子量	分子质量 ( $10^{-27}$ kg)	分子直径 ( $10^{-10}$ m)	在 0°C 和标准大气压下		
					分子平均速度 (m/s)	平均自由程 ( $10^{-10}$ m)	每个分子每秒平均碰撞次数
醋酸蒸汽	$\text{CH}_3\text{COOH}$	60.052	99.72		310.4	152	
乙醚蒸汽	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	74.122	123.09	4.2	279.4	152	
二硫化碳蒸汽	$\text{CS}_2$	76.13	126.42		275.6	201	
苯蒸汽	$\text{C}_6\text{H}_6$	78.113	129.71	4.1	272.2	138	
氙(20°C)	Kr	83.80	139.16		272.6	472	$5.78 \times 10^9$
氙(20°C)	Xe	131.30	218.04		217.7	345	$6.31 \times 10^9$
四氯化碳蒸汽	$\text{CCl}_4$	153.82	255.43		193.9	206	
汞蒸汽	Hg	200.59	333.10		170.0	217	
空气			47.98	3.1	446.9	608	

 表 II.4 气体的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

名称	气态时的密度 (0°C 和标准大气压下)	液态时的密度		固态时的密度	
		°C	密度	°C	密度
氢	0.00009	-252.8	0.0708	-260	0.0763
氮	0.00018	-268.9	0.126	-273	0.19
氧	0.00090			-245	1.204

(续表)

名称	气态时的密度 (0℃和标准 大气压下)	液态时的密度		固态时的密度	
		℃	密度	℃	密度
氮	0.00125	-195.8	0.805	-273	1.14
氧	0.00143	-183	1.14	-273	1.568
氟	0.001696	-187	1.11	-273	1.5
氯	0.00178	-185.7	1.402	-233	1.65
臭氧 (O <sub>3</sub> )	0.00214	-183	1.71		
氩	0.00321	-34.1	1.557	-273	2.2
氪	0.00374	-153	2.155	-273	3.4
氙	0.00589	-109	3.06	-140	2.7
氡	0.00973	-62	4.4		

气体名称	密度 (0℃和标准 大气压下)	气体名称	密度 (0℃和标准 大气压下)
煤气	0.00060	氯化氢	0.00164
甲烷(沼气)	0.000717	丙烯	0.00192
氨	0.000771	二氧化碳	0.00198
乙炔	0.00117	一氧化二氮	0.00198
一氧化碳	0.00125	丙烷	0.00201
乙烯	0.00126	氦	0.00234
空气	0.00129	二氧化硫	0.00293
一氧化氮	0.00134	溴化氢	0.00350
乙烷	0.00136	一氧化二氯	0.00389
硫化氢	0.00154	碘化氢	0.00566

\* 表中数值乘 1000 得国际制单位千克/米<sup>3</sup> 的数值。

表 II.5 液体的密度

a. 一般液体的密度(常温下,单位  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

物 质	密 度	物 质	密 度
汽油	0.70	海水	1.03
乙醚	0.71	(个别:1.01--1.05)	
石油	0.75--1	牛奶	1.03
松香水(白醇)	0.78	醋酸	1.05
丙酮	0.79	人血	1.054
乙醇(酒精)	0.79	盐酸	1.19
甲醇(木精)	0.80	(含 37%--38% 氯化氢)	
煤油	0.81	无水甘油	1.26
柴油	0.85	二硫化碳	1.26
甲苯	0.87	蜂蜜	1.4--1.45
氨水(含氨 35%)	0.88	硝酸(69%)	1.42
矿油(润滑油)	0.9--0.93	硝酸(91%)	1.50
植物油	0.9--0.93	氯仿(三氯甲烷)	1.50
橄榄油	0.92	麦芽糖	1.54
鱼肝油	0.945	硫酸(96%--98%)	1.84
蓖麻油	0.97	溴	3.12
纯水(4℃)	1.00	水银(汞)	13.6

## b. 水的密度和温度的关系

$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
-13	0.99729	50	0.9881
-10	0.99794	60	0.9832
-7	0.99872	70	0.9778
-4	0.99938	80	0.9718
0	0.99987	90	0.9653
4	1.00000	100	0.9584
7	0.99993	150	0.9172
10	0.99973	200	0.8649
20	0.9982	250	0.7988
30	0.9957	300	0.7127
40	0.9922	350	0.5750

## c. 水银的密度和温度的关系

$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
-38.87	13.692	100	13.352
-30	13.670	120	13.304
-20	13.645	140	13.256
-10	13.620	160	13.208
0	13.595	180	13.160
10	13.570	200	13.113

(续表)

$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
20	13.546	220	13.065
30	13.522	240	13.018
40	13.497	260	12.970
50	13.473	280	12.922
60	13.448	300	12.875
70	13.424	320	12.827
80	13.400	340	12.779
90	13.376	357.1	12.737

表 II.6 固体的密度

 a. 单质的密度(常温下,单位  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

物 质	密度	物 质	密度	物 质	密度
锂	0.534	碘	4.94	钴	8.71
钾	0.87	铈	5.0	镍	8.8
钠	0.97	铂	5.3	钛	8.8
铷	1.53	锗	5.46	铜	8.93
铯	1.55	金属砷	5.73	钨	9.01
铍	1.74	锡(灰色)	5.75	铪	9.3
石磷	1.83	钒	5.87	铨	9.7
铍	1.85	镓	5.93	铋	9.78
铯	1.87	钨	6.15	银	10.49
黄色砷	2.0	碲	6.25	钽	11.00
硫	2.07	铋	6.44	铅	11.34
红磷	2.20	镉	6.48	铊	11.86



(续表)

物 质	密度	物 质	密度	物 质	密度
碳(石墨)	2.25	铈	6.62	钷	12.10
硅	2.42	铈	6.90	钷	12.16
硼	2.53	镱	7.0	铈	12.44
镱	2.60	铈	7.0	铈	13.3
黑磷	2.69	铈	7.1	汞(-38.8°C)	14.193
铝	2.70	铈	7.14	铈	16.6
钷	3.02	铈	7.28	铈	18.7
钷	3.5	铈	7.3	金	19.3
碳(金刚石)	3.52	锡(白色)	7.30	铈	19.3
铈	3.8	铈	7.7~	铈	20.53
溴(27°C)	4.2	铈	7.8	铈	21.37
铈	4.5	铁	7.8	铈	22.42
黑色砷	4.7	铈	8.3	铈	22.5
铈	4.77	铈	8.4		
铈	4.82	铈	8.5		
		铈	8.65		

 b. 一般固态物质的密度(常温下,单位  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

物 质	密度	物 质	密度
聚氯乙烯	0.022~	混凝土	1.8~2.4
泡沫塑料	0.033	石墨	1.9~2.3
人造海绵	0.035~0.065	潮湿砂	2.0
软木	0.22~0.26	食盐	2.1~2.2
一般木材	0.4~0.9	瓷	2.1~2.5
书写用纸	0.7~1.2	石膏	2.3
油松	0.83~0.85	花岗岩	2.4~2.8

(续表)

物 质	密 度	物 质	密 度
石蜡	0.87~0.93	玻璃(一般)	2.5~2.7
冰(0℃及以下)	0.88~0.92	玛瑙	2.5~2.8
生橡胶	0.96	大理石	2.5~2.8
干土	1.0~2.0	云母	2.6~3.2
松香	1.07	石英	2.6~2.7
沥青	1.1~1.5	高锰酸钾	2.7
软橡胶	1.1	水泥	2.7~3.0
萘	1.17	火石玻璃	2.9~5.9
有机玻璃	1.18	翡翠	3.3~3.5
米*	1.3	金刚石	3.4~3.6
胶木(电木)	1.3~1.4	硫酸铜	3.6
赛璐珞	1.4	金刚砂	4.0
砖	1.4~2.2	溴化银	6.47
干砂	1.5	生铁	7.0
淀粉	1.5	铁、钢(一般)	7.8
粘土	1.5~2.6	不锈钢	8.4
石棉	1.5~2.8	高速钢	8.7
蔗糖	1.588	黄铜(铜锌合金)	8.5~8.8
明矾	1.76	青铜(铜锡合金)	8.8~8.9
硬橡胶	1.25~1.8	白矮星	大于 30000
象牙	1.8~1.9		

\* 如米、煤、矿石等颗粒状或块状物质,有时把单位容积(即包括颗粒间或块和块之间的空隙)的物质的重量叫做该物质的容重或堆比重。一般地说堆比重大约是同一物质实物比重(不包括空隙)的60%左右。但同一物质的堆比重因碎块大小、间隙等的不同在数值上并不一致,以下摘录一些物质的实物比重和堆比重,以供参考比较:

物 质	米 烟煤	无烟煤	生石灰	磁铁矿
实物比重(g/cm <sup>3</sup> )	1.3	1.2~1.5	1.4~1.8	3.3
堆比重(g/cm <sup>3</sup> )	0.75~0.78	约 0.8	0.7~1.0	1.7~2.0

表 III.7 固体的膨胀系数

物 质	线胀系数 (度 <sup>-1</sup> )	物 质	线胀系数 (度 <sup>-1</sup> )
熔凝石英	$4 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-7}$	镍	$1.28 \times 10^{-5}$
金刚石	$1.3 \times 10^{-6}$	铋	$1.34 \times 10^{-5}$
殷钢	$1.5 \times 10^{-6}$	水泥	$1.4 \times 10^{-5}$
石膏	$2.5 \times 10^{-6}$	金	$1.42 \times 10^{-5}$
硅	$2.5 \times 10^{-6}$	康铜	$1.52 \times 10^{-5}$
瓷	$3 \times 10^{-6}$	铜	$1.7 \times 10^{-5}$
铈	$3.5 \times 10^{-6}$	青铜	$1.75 \times 10^{-5}$
钼	$5.2 \times 10^{-6}$	黄铜	$1.9 \times 10^{-5}$
木(顺纤维方向)	(约) $6 \times 10^{-6}$	银	$1.97 \times 10^{-5}$
铌	$6.5 \times 10^{-6}$	铝	$2.38 \times 10^{-5}$
石墨	$8 \times 10^{-6}$	镁	$2.59 \times 10^{-5}$
铈	$8.4 \times 10^{-6}$	锡	$2.67 \times 10^{-5}$
铂	$9 \times 10^{-6}$	镉	$2.86 \times 10^{-5}$
玻璃	$4 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$	锌	$2.86 \times 10^{-5}$
水晶(结晶的)	$1.0 \times 10^{-5}$	铅	$2.92 \times 10^{-5}$
钢	$1.1 \times 10^{-5}$	木(垂直于纤维方向)	(约) $5 \times 10^{-5}$

(续表)

物 质	线胀系数 (度 <sup>-1</sup> )	物 质	线胀系数 (度 <sup>-1</sup> )
铁	$1.2 \times 10^{-5}$	硬橡胶	(约) $7 \times 10^{-5}$
大理石	(约) $1.2 \times 10^{-5}$	钠	$7.2 \times 10^{-5}$
钴	$1.27 \times 10^{-5}$	钾	$8.3 \times 10^{-5}$

 固体的体胀系数  $\approx$  该固体的线胀系数  $\times 3$ 。

表Ⅱ.8 液体的体胀系数

液 体	体胀系数 (度 <sup>-1</sup> )	液 体	体胀系数 (度 <sup>-1</sup> )
水银	$1.82 \times 10^{-4}$	煤油	$1.0 \times 10^{-3}$
水(20℃左右)	$2.1 \times 10^{-4}$	酒精	$1.1 \times 10^{-3}$
橄榄油	$5.0 \times 10^{-4}$	溴	$1.11 \times 10^{-3}$
甘油	$5.0 \times 10^{-4}$	二硫化碳	$1.22 \times 10^{-3}$
硫酸	$5.6 \times 10^{-4}$	苯	$1.24 \times 10^{-3}$
松节油	$6.7 \times 10^{-4}$	乙醚	$1.66 \times 10^{-3}$

表Ⅱ.9 气体的体胀系数和压强系数(0℃ 1atm)

气 体	体胀系数(度 <sup>-1</sup> )	压强系数(度 <sup>-1</sup> )
氢	$3.658 \times 10^{-3}$	$3.660 \times 10^{-3}$
氦	$3.660 \times 10^{-3}$	$3.661 \times 10^{-3}$
氮	$3.673 \times 10^{-3}$	$3.674 \times 10^{-3}$
空气	$3.676 \times 10^{-3}$	$3.675 \times 10^{-3}$
二氧化碳	$3.741 \times 10^{-3}$	$3.726 \times 10^{-3}$

(续表)

气 体	体胀系数(度 <sup>-1</sup> )	压强系数(度 <sup>-1</sup> )
氧	$3.67 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-3}$
氮	$3.80 \times 10^{-3}$	$3.80 \times 10^{-3}$
二氧化硫	$3.85 \times 10^{-3}$	
氦		$3.661 \times 10^{-3}$
氩		$3.671 \times 10^{-3}$
氯		$3.833 \times 10^{-3}$
各种气体 (近似值)	$\frac{1}{273}$	$\frac{1}{273}$

表Ⅷ.10 气体压强跟体积的关系

压强(atm)	$pV$ 值(0℃时)			
	氧	氮	氩	空气
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0003			0.9998
100	1.0690	0.9941	0.9265	0.9730
200	1.1380	1.0483	0.9140	1.0100
500	1.3565	1.3900	1.1560	1.3400
1000	1.7200	2.0685	1.7355	1.9920

表Ⅷ.11 液体的压缩率<sup>\*</sup>(压缩系数)

液 体	压缩率(atm <sup>-1</sup> )	液 体	压缩率(atm <sup>-1</sup> )
水银	$3.9 \times 10^{-6}$	火油	$7.7 \times 10^{-5}$
甘油	$2.5 \times 10^{-5}$	松节油	$7.9 \times 10^{-5}$
水	$4.6 \times 10^{-5}$	硫化碳	$8.9 \times 10^{-5}$
蓖麻子油	$4.7 \times 10^{-5}$	酒精	$1.10 \times 10^{-4}$
橄榄油	$6.3 \times 10^{-5}$	醚	$1.83 \times 10^{-4}$

\* 液体的压缩率表示每增加一个大气压时,液体所减

小的体积跟原体积的比。压缩率的数值跟温度、压强也有关系,本表列示的是在常温和不很高的压强下的压缩率。

表 III.12 液态物质的表面张力  
系数(单位  $10^{-3}\text{N/m}$ )

物质	温度(°C)	表面张力系数	物质	温度(°C)	表面张力系数
氮	-269	0.12	过氧化氢	18.5	76.1
氢	-253	2.1	氯化钾	800	95.8
氮	-188	7.2	氯化钠	803	113.8
一氧化碳	-188	8.74	硫酸钠	900	194.8
液态空气	-190.5	12.2	钠	103	206.4
氧	-188	14.5	铈	750	368
乙醚	20	17	铅	336	442
酒精	20	22	水银	20	470
甲醇	20	23.02	锌	477	753
丙酮	16.8	23.25	铝	700	840
煤油	20	24	银	995	923
醋酸	20	27.63	铁	1267	936
甲苯	17.5	28.52	铜	1140	1120
二硫化碳	25	29.8	金	1200	1120
石蜡	54	30.56	铂	2000	1819
氯	-60	31.2	锡	600	525
二氧化硫	-25	32.6	锡	964	514
硫酐	17.5	33.1	苯	10	30.19
硫	445	38.97	苯	20	28.88
肥皂溶液	20	40	苯	30	27.58
氨	-29	41.2	水	0	75.64
溴	20	41.5	水	20	72.75
硝基苯	13.6	42.75	水	40	69.56

(续表)

物质	温度(°C)	表面张力系数	物质	温度(°C)	表面张力系数
苯胺	20	42.9	水	60	66.18
鸡蛋白	15~20	52.69	水	80	62.61
硫酸 (98.5%)	20	55.1	水	100	58.85
甘油	20	63.4	水	374	0

表Ⅱ.13 固体的比热

物 质	比热 (J/kg·K)	物 质	比热 (J/kg·K)
铅(18°C)	$0.130 \times 10^3$	硅	$0.712 \times 10^3$
铅(100°C)	$0.134 \times 10^3$	硫	$0.712 \times 10^3 \sim$ $0.754 \times 10^3$
铋	$0.126 \times 10^3$	石英	$0.754 \times 10^3$
金	$0.130 \times 10^3$	钾	$0.796 \times 10^3$
铂(18°C)	$0.134 \times 10^3$	水泥	$0.796 \times 10^3$
钨	$0.142 \times 10^3$	砖	$0.796 \times 10^3 \sim$ $1.01 \times 10^3$
石棉	$0.210 \times 10^3$	木炭	$0.838 \times 10^3$
银	$0.230 \times 10^3$	干泥土	$0.838 \times 10^3$
锡	$0.235 \times 10^3$	花岗石	$0.838 \times 10^3$
铜	$0.272 \times 10^3$	大理石	$0.880 \times 10^3$
锌(18°C)	$0.385 \times 10^3$	氯化钠 (食盐)	$0.880 \times 10^3$
锌(100°C)	$0.398 \times 10^3$	混凝土	$0.880 \times 10^3$
铜	$0.390 \times 10^3$	铝(18°C)	$0.880 \times 10^3$
黄铜	$0.394 \times 10^3$	铝(100°C)	$0.922 \times 10^3$
钢(18°C)	$0.461 \times 10^3$	岩盐	$0.922 \times 10^3$
钢(100°C)	$0.503 \times 10^3$	砂	$0.964 \times 10^3$

(续表)

物 质	比热 (J/kg·K)	物 质	比热 (J/kg·K)
铁(18℃)	$0.461 \times 10^3$	镁	$1.05 \times 10^3$
铁(100℃)	$0.503 \times 10^3$	钠	$1.26 \times 10^3$
镍(18℃)	$0.461 \times 10^3$	硬橡胶	$1.42 \times 10^3$
镍(100℃)	$0.503 \times 10^3$	铍	$1.76 \times 10^3$
金刚石	$0.503 \times 10^3$	软木	$2.05 \times 10^3$
锰	$0.503 \times 10^3$	冰	$2.10 \times 10^3$
玻璃	$0.629 \times 10^3$ — $0.838 \times 10^3$	木头	$2.39 \times 10^3$
石墨(10℃)	$0.470 \times 10^3$ <sup>11</sup>	石蜡	$3.23 \times 10^3$

表 II.14 液体的比热

物 质	比热 (J/kg·K)	物 质	比热 (J/kg·K)
水银	$1.38 \times 10^3$	橄榄油	$1.97 \times 10^3$
二硫化碳	$1.01 \times 10^3$	煤油	$2.14 \times 10^3$
硫酸	$1.42 \times 10^3$	乙醚	$2.35 \times 10^3$
硝基苯	$1.55 \times 10^3$	酒精	$2.43 \times 10^3$
松节油	$1.76 \times 10^3$	甘油	$2.43 \times 10^3$
苯	$1.76 \times 10^3$	醋酸	$2.64 \times 10^3$
蓖麻油	$1.80 \times 10^3$	水	$4.19 \times 10^3$
苯胺	$1.93 \times 10^3$		



表Ⅱ.15 水、冰和水银在不同温度下的比热

水		冰		水银	
温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	比热 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	比热 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	比热 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
0	$4.2290 \times 10^3$	0	$2.6020 \times 10^3$	0	$0.1398 \times 10^3$
10	$4.1980 \times 10^3$	-20	$1.9400 \times 10^3$	20	$0.1394 \times 10^3$
14.5- 15.5	$4.1900 \times 10^3$	-40	$1.8185 \times 10^3$	40	$0.1389 \times 10^3$
20	$4.1850 \times 10^3$	-60	$1.6802 \times 10^3$	60	$0.1385 \times 10^3$
30	$4.1795 \times 10^3$	-80	$1.5420 \times 10^3$	80	$0.1380 \times 10^3$
40	$4.1787 \times 10^3$	-100	$1.3911 \times 10^3$	100	$0.1376 \times 10^3$
50	$4.1808 \times 10^3$	-150	$1.0266 \times 10^3$	140	$0.1368 \times 10^3$
60	$4.1355 \times 10^3$	-200	$0.6536 \times 10^3$	180	$0.1360 \times 10^3$
70	$4.1900 \times 10^3$	-250	$0.1508 \times 10^3$	220	$0.1352 \times 10^3$
80	$4.1971 \times 10^3$			240	$0.1348 \times 10^3$
90	$4.2051 \times 10^3$				
100	$4.2139 \times 10^3$				

表Ⅱ.16 气体的定压比热和定体比热

气体(在常温下)	定压比热 $C_p$ ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	定体比热 $C_v$ ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
氯	$0.520 \times 10^3$	-
氮	$0.532 \times 10^3$	$3.226 \times 10^3$
氯化氢(22 $^{\circ}\text{C}$ : -214 $^{\circ}\text{C}$ )	$0.796 \times 10^3$	$0.545 \times 10^3$
二氧化碳	$0.838 \times 10^3$	$0.629 \times 10^3$
氧	$0.922 \times 10^3$	$0.670 \times 10^3$
空气	$1.006 \times 10^3$	$0.712 \times 10^3$
氟	$1.048 \times 10^3$	$0.629 \times 10^3$
氩	$1.048 \times 10^3$	$0.754 \times 10^3$

(续表)

气体(在常温下)	定压比热 $C_p$ (J/kg·K)	定体比热 $C_v$ (J/kg·K)
一氧化碳	$1.048 \times 10^3$	$0.754 \times 10^3$
乙醚蒸气(25°C ~ 111°C)	$1.802 \times 10^3$	$1.676 \times 10^3$
酒精蒸气(108°C ~ 220°C)	$1.886 \times 10^3$	$1.676 \times 10^3$
水蒸气(100°C ~ 300°C)	$2.011 \times 10^3$	$1.508 \times 10^3$
氮	$2.137 \times 10^3$	$1.634 \times 10^3$
氧	$5.238 \times 10^3$	$3.143 \times 10^3$
氢	$14.288 \times 10^3$	$10.140 \times 10^3$

表 II.17 物质的熔点(1atm)

物质	熔点 (°C)	物质	熔点 (°C)	物质	熔点 (°C)
氮	-272.2	冰	0	钙	850
氧	-259	苯	5.48	青铜	900
臭氧	-251.4	铯	28	锆	958
氟	-248.6	铷	38.5	镉	960
氧	-218.8	海波	40 ~ 50	银	962
氟	-218	磷	44.2	黄铜	1000
氮	-210	石蜡	54	金	1064
一氧化碳	-200	钾	63	铜	1084
氙	-189.4	萘	80	铂	1150
一氧化氮	-163.6	钠	97.7	白铸铁	1200
氮	-157	硫	112.8	锰	1250
乙醚	117	碘	113	铍	1285
酒精	-114	橡胶	125	钢	1300 ~ 1400
氯化氢	-112	铜	156.6	铀	1420
二硫化碳	112	锂	186	镍	1455
氫	-111.5	硒	220	钴	1494

(续表)

物质	熔点 (°C)	物质	熔点 (°C)	物质	熔点 (°C)
一氧化氮	-102.4	锡	232	纯铁	1525
氯	-101	铋	271.3	钨	1554
甲醇	-97.1	镉	321	熔凝石英(约)	1600
甲苯	-94.5	铅	327	铂	1769
氯化氢	-88	锌	419.5	铈	1800
氨	-77.7	碲	450	铊	1963
氟	-71	铈	630.5	铀	2447
水银	-39	镁	651	钨	2450
甘油	-20	铝	660	铌	2600
松节油	-10	钡	704	钨	2700
苯胺	6.24	氯化钾	768	钼	3030
溴	5.7	铯	770	钨	3387
海水	-2.5	氯化钠	800	碳	3500

[附] 某些聚合物的玻璃化转变温度和熔点

聚合物	玻璃化转 变温度(°C)	熔点 (°C)	聚合物	玻璃化转 变温度(°C)	熔点 (°C)
聚乙烯:			聚氟乙烯	-20	200
低密度	-120 ~ -125	105 ~ 125	聚氯乙烯	87	212
高密度	120 ~ 125	105 ~ 137	聚碳酸酯	150	220
聚丙烯-1	-25	126 ~ 135	聚三氟 氯乙烯	45	220
聚甲基 丙烯酸 甲酯	105	160 ~ 200	尼龙-6	50	225

(续表)

聚合物	玻璃化转变温度(℃)	熔点(℃)	聚合物	玻璃化转变温度(℃)	熔点(℃)
聚丙烯	-18 ~ -20	170 ~ 176	尼龙-610	40	227
聚甲醛	-85	180 ~ 200	尼龙-66	50	265
聚偏氯乙烯	-17 ~ -19	190 ~ 198	聚四氟乙烯	126	327

表直.18 物质的溶解热(1atm, 单位: J/kg)

物质	溶解热	物质	溶解热	物质	溶解热
氮	$3.476 \times 10^3$	氢	$58.66 \times 10^3$	萘	$150.84 \times 10^3$
汞	$11.73 \times 10^3$	铀	$62.85 \times 10^3$	铈	$163.41 \times 10^3$
氧	$13.83 \times 10^3$	碘	$62.85 \times 10^3$	钡	$163.41 \times 10^3$
氟	$15.08 \times 10^3$	钾	$62.85 \times 10^3$	铜	$175.98 \times 10^3$
铯	$15.92 \times 10^3$	金	$67.04 \times 10^3$	二氧化碳	$189.81 \times 10^3$
氙	$16.76 \times 10^3$	溴	$67.04 \times 10^3$	钨	$192.74 \times 10^3$
氩	$17.60 \times 10^3$	甲醇	$68.72 \times 10^3$	醋酸	$195.59 \times 10^3$
氪	$19.70 \times 10^3$	镉	$79.61 \times 10^3$	甘油	$199.03 \times 10^3$
黄磷	$20.95 \times 10^3$	镓	$79.61 \times 10^3$	铊	$209.5 \times 10^3$
氮	$25.56 \times 10^3$	苯胺	$87.78 \times 10^3$	铍	$272.35 \times 10^3$
铷	$25.98 \times 10^3$	砷(金属)	$92.18 \times 10^3$	铀	$272.35 \times 10^3$
铅	$26.40 \times 10^3$	氯	$96.37 \times 10^3$	钴	$272.35 \times 10^3$
氙	$28.07 \times 10^3$	灰铸铁	$96.37 \times 10^3$	铁	$276.54 \times 10^3$
硒	$28.07 \times 10^3$	乙醚	$98.63 \times 10^3$	钨	$289.11 \times 10^3$

(续表)

物质	熔解热	物质	熔解热	物质	熔解热
铜	$28.49 \times 10^3$	银	$104.75 \times 10^3$	铬	$318.44 \times 10^3$
二氧化碳	$33.52 \times 10^3$	铍	$104.75 \times 10^3$	钙	$331.01 \times 10^3$
硝酸	$39.97 \times 10^3$	铈	$104.75 \times 10^3$	冰	$335.2 \times 10^3$
硫酸	$43.37 \times 10^3$	乙醇	$107.93 \times 10^3$	氢	$340.65 \times 10^3$
氟	$41.90 \times 10^3$	铀	$108.94 \times 10^3$	铝	$387.16 \times 10^3$
硫(单斜)	$43.16 \times 10^3$	铂	$113.13 \times 10^3$	氯化钠	$515.37 \times 10^3$
硫(正交)	$50.28 \times 10^3$	钠	$115.23 \times 10^3$	锂	$666.21 \times 10^3$
钡	$50.28 \times 10^3$	锌	$117.32 \times 10^3$	铍	$1160.63 \times 10^3$
铋	$54.47 \times 10^3$	苯	$126.71 \times 10^3$	硅	$1655.05 \times 10^3$
锡	$56.98 \times 10^3$	白铸铁	$138.27 \times 10^3$	铁	$3016.8 \times 10^3$
锡(白色)	$58.66 \times 10^3$	石蜡	$146.65 \times 10^3$		

表Ⅲ.19 物质的沸点(1atm)

物质	沸点(°C)	物质	沸点(°C)	物质	沸点(°C)
氢	-268.9	乙醇	78	氯化钾	1416
氦	-252.87	苯	80.2	氯化钠	1440
氟	-246.05	水	100	钙	1440
氮	-196	甲苯	110.3	钡	1540
空气	-193	醋酸	118.3	铋	1560
二氧化碳	-190	松节油	160	铈	1635
氟	-188.2	碘	183	铈	1755
氩	185.8	苯胺	184.3	铝	1800
氧	-183	萘	218	锰	1900

(续表)

物质	沸点 (℃)	物质	沸点 (℃)	物质	沸点 (℃)
甲烷	-161.5	磷	280.5	银	1955
氟	-152.9	甘油	290	铬	2200
一氧化氮	-150.6	石蜡	300	锡	2275
臭氧	-112	亚麻仁油	316	铜	2360
氙	-108	水银	357	熔凝石英	2400
一氧化氮	-89.5	硬脂酸	370	铁	2450
氯化氢	-85	硫	444.6	金	2500
溴化氢	-68.7	铯	670	硅	2600
二氧化碳	-78.5	硒	685	钴	2900
氧	-61.8	铷	700	镍	2900
硫化氢	-60.7	钾	760	铍	2970
氯	-34	钠	880	钽	>3000
氨	-33	锌	907	钨	3500
二氧化硫	-10.1	镁	1107	金刚石	4200
乙醚	35	镭	1140	铂	4300
二硫化碳	46.25	铯	1336	铀	4400
溴	59	铷	1370	钨	5900
甲醇	64.7	铯	1390		

表 B.20 物质的汽化热(在 1atm 下沸腾时,单位:J/kg)

物质	汽化热	物质	汽化热	物质	汽化热
氟	$25.1 \times 10^3$	液态 二氧化硫	$398.1 \times 10^3$	水	$2258.4 \times 10^3$
氧	$75.4 \times 10^3$	醋	$406.4 \times 10^3$	银	$2329.6 \times 10^3$
氮	$86.3 \times 10^3$	苯胺	$435.8 \times 10^3$	锡	$2400.9 \times 10^3$
氙	$96.4 \times 10^3$	氢	$452.5 \times 10^3$	铂	$2405.1 \times 10^3$
氟	$113.1 \times 10^3$	硝酸	$481.9 \times 10^3$	钙	$3825.5 \times 10^3$

(续表)

物质	汽化热	物质	汽化热	物质	汽化热
氫	$199.2 \times 10^3$	硫酸	$511.2 \times 10^3$	钨	$4005.6 \times 10^3$
氟	$169.7 \times 10^3$	铈	$515.4 \times 10^3$	锰	$4211.0 \times 10^3$
碘	$171.8 \times 10^3$	红磷	$540.5 \times 10^3$	钠	$4265.4 \times 10^3$
溴	$188.6 \times 10^3$	碲	$653.6 \times 10^3$	铯	$4504.3 \times 10^3$
氮	$199.4 \times 10^3$	铊	$796.1 \times 10^3$	铜	$4801.7 \times 10^3$
氧化碳	$211.6 \times 10^3$	铅	$850.6 \times 10^3$	镁	$5997.8 \times 10^3$
氧	$213.7 \times 10^3$	酒精	$854.8 \times 10^3$	钼	$5606.2 \times 10^3$
二氧化碳	$230.4 \times 10^3$	铷	$884.1 \times 10^3$	铈	$5606.2 \times 10^3$
水	$299.1 \times 10^3$	铕	$892.5 \times 10^3$	镱	$5866.0 \times 10^3$
氯	$299.1 \times 10^3$	铋	$926.0 \times 10^3$	铁	$6301.8 \times 10^3$
煤油	$314.3 \times 10^3$	钡	$1093.6 \times 10^3$	钴	$6456.8 \times 10^3$
硫	$339.4 \times 10^3$	甲醇	$1102.0 \times 10^3$	锗	$6867.4 \times 10^3$
乙醚	$352 \times 10^3$	铊	$1265.4 \times 10^3$	铝	$10093.7 \times 10^3$
硫化碳	$352 \times 10^3$	液态氮	$1337.4 \times 10^3$	硅	$10831.2 \times 10^3$
醋酸	$399.7 \times 10^3$	铈	$1609.0 \times 10^3$	锂	$19441.6 \times 10^3$
苯	$393.9 \times 10^3$	金	$1738.9 \times 10^3$	铍	$24781.8 \times 10^3$
硒	$393.9 \times 10^3$	锌	$1755.6 \times 10^3$	金刚石	$49890.3 \times 10^3$
钾	$398.1 \times 10^3$	钾	$2023.8 \times 10^3$		

表 21 水的汽化热和温度的关系

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	汽化热(J/kg)
0	$2493.1 \times 10^3$
50	$2379.9 \times 10^3$
100	$2258.4 \times 10^3$
150	$2120.1 \times 10^3$
200	$1960.9 \times 10^3$
250	$1709.5 \times 10^3$

(续表)

温度(°C)	汽化热(J/kg)
300	$1382.7 \times 10^3$
370	$414.8 \times 10^3$
374	0

表 III.22 不同温度下饱和水汽的压强和密度

温度 (°C)	压强 (mmHg)	水汽密度 (g/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	压强 (mmHg)	水汽密度 (g/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	压强 (atm)
-30	0.28	0.33	12	10.52	10.7	100	1.0000
-29	0.31	0.37	13	11.23	11.4	101	1.0362
-28	0.35	0.41	14	11.99	12.1	102	1.0735
-27	0.38	0.46	15	12.79	12.8	103	1.1120
-26	0.43	0.51	16	13.63	13.6	104	1.1514
-25	0.47	0.55	17	14.53	14.5	105	1.1922
-24	0.52	0.60	18	15.48	15.4	106	1.2341
-23	0.58	0.66	19	16.48	16.3	107	1.2771
-22	0.64	0.73	20	17.54	17.3	108	1.3216
-21	0.70	0.80	21	18.65	18.3	109	1.3670
-20	0.77	0.88	22	19.83	19.4	110	1.414
-19	0.85	0.96	23	21.07	20.6	120	1.989
-18	0.94	1.05	24	22.38	21.8	130	2.666
-17	1.03	1.15	25	23.76	23.0	140	3.567
-16	1.13	1.27	26	25.21	24.4	150	4.668
-15	1.24	1.38	27	26.74	25.8	160	6.100
-14	1.36	1.51	28	28.35	27.2	170	7.817
-13	1.49	1.65	29	30.04	28.7	180	9.895
-12	1.63	1.80	30	31.82	30.3	190	12.386
-11	1.78	1.96	31	33.70	32.1	200	15.341



(续表)

温度 (°C)	压强 (mmHg)	水汽密度 (g/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	压强 (mmHg)	水汽密度 (g/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	压强 (atm)
-10	1.95	2.14	32	35.66	33.9	210	18.823
-9	2.13	2.33	33	37.73	35.7	220	22.889
-8	2.32	2.54	34	39.90	37.6	230	27.603
-7	2.53	2.76	35	42.18	39.6	240	33.027
-6	2.76	2.99	36	44.56	41.8	250	39.234
-5	3.01	3.24	37	47.07	44.0	260	46.300
-4	3.28	3.51	38	49.69	46.3	270	54.291
-3	3.57	3.81	39	52.44	48.7	280	63.295
-2	3.88	4.13	40	55.32	51.2	290	73.42
-1	4.22	4.47	45	71.88	65.4	300	84.78
0	4.58	4.84	50	92.51	83.0	310	97.40
1	4.93	5.22	55	118.04	104.3	320	111.43
2	5.29	5.60	60	149.38	130	330	126.99
3	5.69	5.98	65	187.54	161	340	144.20
4	6.10	6.40	70	233.71	198	350	163.16
5	6.54	6.84	75	289.13	242	360	184.07
6	7.01	7.3	80	355.12	293	370	207.49
7	7.51	7.8	85	433.62	354	374	218.5
8	8.05	8.3	90	525.76	424		
9	8.61	8.8	95	633.90	505		
10	9.21	9.4	100	760.00	598		
11	9.84	10.0					

表 II.23 不同温度下一些液体的饱和汽压 (mmHg)

温度(°C)	乙醚	二硫化碳	酒精	水	水银
-20	66	47	3.3	0.8	-
0	185	127	12	4.6	0.0004
20	440	298	44	17.5	0.0018
35	760	-	-	-	-
40	921	618	134	55	0.008
46.25	-	760	-	-	-
60	1734	1170	350	149	0.025
78	-	-	760	-	-
80	2976	2060	813	355	0.09
100	4855	3380	1698	760	0.28
120	7513	5220	3232	1489	0.76
140	11051	7650	5666	2711	1.89
160	15778	10960	9366	4636	4.30
180	21775	17100	14763	7521	8.91
200		23810	22164	11661	17.29
250				29818	74.38
300				64433	246.80
350				124002	672.69
356					750.43
357					764.08
400					1574.1
标准大气压下的 沸点(°C)	35	46.25	78	100	356.95
临界温度(°C)	194	273	243	374	1477
临界压强(atm)	35	76	63	218.5	-

表Ⅲ.24 物质的临界温度和临界压强

物质	临界温度(°C)	临界压强(atm)
氦	-267.9	2.25
氢	-240	12.8
氟	-228	26
氮	-147	33.5
空气	-140.7	37.2
二氧化碳	-139	35
氩	-122.4	48
氧	-118.8	50
甲烷	-83	46
氖	-62.5	54
乙烯	-9.7	51
臭氧	-5	92.3
氙	16.6	58.2
三氧化碳	31	73
乙烷	32.1	48.8
乙炔	35.9	61.6
氯化氢	51.5	82
硫化氢	100	89
氨	132	112
氯	144	76
二氧化硫	157	78
乙醚	194	35
甲醇	240	78.5
乙醇	243	63
二硫化碳	273	76
苯	288.5	47.7
水	374	218.5
萘	468.2	39.2
水银	1477	

表Ⅱ.25 空气的相对湿度

干泡 温度 计读数 ( $^{\circ}\text{C}$ )	干泡温度计与湿泡温度计的温度差( $\Delta t$ )										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	相对湿度(%)										
0	100	81	63	45	28	11					
1	100	83	65	48	32	16					
2	100	84	68	51	35	20					
3	100	84	69	54	39	24	10				
4	100	85	70	56	42	28	14				
5	100	86	72	58	45	32	19	6			
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
7	100	87	74	61	49	37	26	14			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	33	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30

(续表)

干泡 温度 计读数 ( $^{\circ}\text{C}$ )	干泡温度计与湿泡温度计的温度差( $\Delta t$ )										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	相对湿度(%)										
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
32	100	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41
34	100	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
36	100	94	87	81	75	70	64	59	54	50	45
38	100	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47
40	100	94	88	82	77	72	67	62	57	53	48

表Ⅱ.26 常用燃料的燃烧值

燃 料	燃烧值( $\text{J/kg}$ )
干木柴	$12.6 \times 10^6$
焦炭	$29.8 \times 10^6$
酒精	$30.2 \times 10^6$
木炭(完全燃烧成 $\text{CO}_2$ )	$33.5 \times 10^6$
木炭(不完全燃烧成 $\text{CO}$ )	$10.5 \times 10^6$
煤气	$41.9 \times 10^6$
高炉煤气	$3.7 \times 10^6$
发生炉煤气	$5.0 \times 10^6$
水煤气	$1.1 \times 10^7$

(续表)

燃 料	燃烧值(J/kg)
泸州天然气	$36.1 \times 10^6$
专用燃料油	$41.3 \times 10^6$
柴油	$42.7 \times 10^6$
石油	$44.0 \times 10^6$
煤油	$46.1 \times 10^6$
汽油	$46.1 \times 10^6$
氢气	$142.5 \times 10^6$
泥煤	$13.8 \times 10^6$
褐煤	$16.8 \times 10^6$
烟煤	$29.3 \times 10^6$
无烟煤	$33.5 \times 10^6$
硝棉火药	$3.8 \times 10^6$
硝棉(干)	$4.6 \times 10^6$
硝化甘油火药	$5.1 \times 10^6$
硝化甘油	$6.3 \times 10^6$

标准燃料  $29.3 \times 10^6$  (J/kg)表Ⅱ.27 物质的导热系数<sup>\*</sup> (热传导系数)

物质	温度 (℃)	导热系数 (W/m·K)	物质	温度 (℃)	导热系数 (W/m·K)
二氧化碳	0	0.0142	玻璃		0.838
氯	0	0.0163	混凝土		0.838
一氧化碳	0	0.0210	瓷	20	1.04
空气	0	0.0239	耐火砖		1.05
氮	0	0.0243	熔凝石英	0	1.38
氧	0	0.0247	冰	0	2.31

(续表)

物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	导热系数 ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	导热系数 ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )
氮	0	0.0461	岩盐	20	3.69
氮	0	0.143	石英晶体 (垂直于晶轴)	0	7.25
氢	0	0.170	石英晶体 (平行于晶轴)	0	13.6
二硫化碳	0	0.142	康铜(40%镍)	18	22.6
乙醚	15	0.135	铅	0	35.2
甲苯	0	0.146	钢(1.5%碳)	18	50.3
煤油	13	0.149	软铁(0.5%碳)	18	54.5
乙醇	12	0.177	镍	18	58.7
甲醇	12	0.207	青铜	18	58.7
醋酸	12	0.197	(9%锌,6%锡)		
硫酸(60%)	32	0.440	锡	18	65.8
盐酸(25%)	32	0.0482	铂	0	70.0
水	20	0.0599	黄铜(30%锌)	18	108.9
汞	0	10.4	镁	0	157.5
石棉		0.0419	钨	17	196.9
毡		0.0419	铝	20	201.1
软木	30	0.0503	金	18	295.4
木材		0.126~ 0.419	铜	0	385.5
绝缘砖		0.147	银	18	421.5
云母	50	0.503			
红砖		0.629			

\* 本表所示的导热系数,凡温度与表中所示的温度相差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 时,基本上都可适用。

表 II.28 物质的粘性系数( $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{S}$ )

气体	温度( $^{\circ}\text{C}$ )	粘性系数	液体	温度( $^{\circ}\text{C}$ )	粘性系数
空气	20	1.82	水	0	1.79
	671	4		20	1.01
水蒸气	0	0.9		50	0.55
	100	1.27		100	0.28
$\text{CO}_2$	20	1.47	水银	0	1.69
	302	2.7		20	1.55
氢	20	0.89	酒精	0	1.84
	251	1.3		20	1.20
氮	20	1.96	轻机油	15	11.3
$\text{CH}_4$	20	1.10	重机油	15	66

表 II.29 气体的扩散系数( $10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ )

扩散气体	第二气体	扩散系数	扩散气体	第二气体	扩散系数
二硫化碳	空气	0.99	氢	二氧化碳	5.38
二氧化碳	空气	1.42		一氧化碳	6.49
	二氧化碳	0.97		空气( $17^{\circ}\text{C}$ )	6.61
氧	空气	1.78		氧	6.77
	氧	1.81		氢	12.8
碳酸气	一氧化碳	1.31	氩	氩	1.57
	氧	1.40	氮	氮	4.52
	空气	1.42	水蒸气	空气	2.03
	氢	5.44			



表 30 固体的扩散系数

下表给出了扩散系数用  $D = D_0 \exp[-U/RT]$  表示时的  $D_0$  和  $U$  值。 $R$  为气体常数,  $T$  为热力学温度, 试样为单晶

扩散原子	固体	温度 [°C]	$D_0 [10^{-4} \text{m}^2/\text{s}]$	$U [\text{kcal/mol}]$
Ag	Ag	644~955	0.67	45.2
Al	Al	450~650	1.71	34.0
	Cu	433~652	0.647	32.27
Au	Ag	699~1007	0.072	40.2
	Au	850~1050	0.107	42.26
Cd	Cd	110~283	0.14	19.3
Cu	Cu	698~1061	0.78	50.5
	Ge	653~1015	0.397	44.76
Ge	Cd	750~950	$1.75 \times 10^0$	102.0
	Fe	775~930	0.13	24.8
	Ge	766~928	7.8	68.5
	In	600~920	$2.9 \times 10^{-4}$	39.9
	Sb	720~900	0.22	50.2
	Te	770~900	2.0	56.0
	Tl	800~930	1700	78.4
In ⊥ c	In	44~144	3.7	18.7
In // c	In	44~144	2.7	10.0
K	K	-52~61	0.16	9.36
Mg ⊥ c	Mg	467~635	1.5	32.5
Mg // c	Mg	467~635	1.6	32.2
Nb	Nb	878~2395	1.1	96.0
Pb	Au	190~320	$8.7 \times 10^{-3}$	10.0
	Pb	150~320	0.887	25.52

(续表)

扩散原子	固体	温度[°C]	$D_0[10^{-4}\text{m}^2/\text{s}]$	$U[\text{kcal/mol}]$
Si	Au	700~1300	$2.75 \times 10^{-3}$	47.0
	Fe	1000~1200	$6.2 \times 10^{-3}$	20.0
	P	1100~1250		
	Sb	1190~1398	12.9	91.7
	Si	1225~1440	1800	110.0
Sn c	Sn	160~226	10.7	25.1
Sn//c	Sn	160~226	7.7	25.6
Ta	Ta	1250~2200	1.24	98.7
Te c	Te	300~400	$3.91 \times 10^4$	46.7
Te//c	Te	300~400	130	35.5
V	V	880~1360	0.36	73.65
	V	1360~1830	214.0	94.14
Zn c	Cu	338~415	2.0	29.92
Zn//c	Cu	338~415	2.22	29.53

表Ⅱ.31 一些物质的三相点

物质	温度(K)	压强 (mmHg)	物质	温度 (K)	压强 (mmHg)
氢(H <sub>2</sub> )	2.186	38.3	氧	54.36	1.14
氦	13.84	52.8	氮	195.40	45.57
氖	18.63	128	二氧化碳	216.55	3880
氟	24.57	324	二氧化硫	197.68	1.256
氯	63.18	94	水	273.16	4.581

表 III.32 能量转换效率(%)

转换 从	为	机械能	重力势能	电能	辐射(光)	化学能	热能
机械能		-		99 (发电机)			100 (摩擦)
重力势能	(水力透平机)	86	-	85 (水电站)			
电能	(电动机)	93	80 (抽水机)	-	40 (气体激光器)	72 (电池)	100 (线圈)
辐射(光)			-	12 (太阳能电池)	-	0.6 (光合作用)	100 (太阳炉)
化学能	(动物肌肉)	-30	-	91 (干电池)	15 (化学激光器)	-	88 (蒸汽锅炉)
热能	(蒸汽透平机)	17		7 (热电偶)	3 (白炽灯)		

#### IV 电磁学

表 IV.1 静电的摩擦次序\*

根据: 西耳斯比	根据:金斯	根据:莱密开	根据:赫西 和蒙哥马利
1 石棉	1 猫皮	1 玻璃	1 羊毛
2 玻璃	2 玻璃	2 人毛	2 尼龙
3 云母	3 象牙	3 尼龙丝	3 粘胶丝
4 羊毛	4 绢	4 尼龙聚合物	4 木棉
5 猫皮	5 水晶	5 羊毛	5 绢
6 铅	6 手	6 绢	6 醋酸盐
7 绢	7 木材	7 粘胶人造丝	7 丙烯树脂
8 铅	8 硫	8 木棉	8 聚乙烯醇
9 纸	9 法兰绒	9 纸	9 达奈耳

(续表)

根据: 西耳斯比	根据:金斯	根据:莱密开	根据:赫西 和蒙哥马利
10 木棉	10 木棉	10 苧麻	(Dincl, 一种 合成纤维)
11 封口用蜡	11 虫胶	11 钢	10 涤纶
12 硬橡胶	12 弹性橡胶	12 硬橡胶	11 聚乙烯
13 黄铜	13 树脂	13 醋酸盐人 造丝	12 聚四氟乙 烯
14 硫	14 硬橡胶	14 合成橡胶	
15 白金	15 金属	15 奥纶 (聚丙烯腈的 一种)	
16 生橡胶	16 棉火药	16 聚乙烯	

\* (1) 各表中的任何两种物体相互摩擦时,号次在前面的带正电,号次在后面的带负电;两物号次相隔越多,效果就越好。

(2) 如用金属物进行摩擦时,金属和实验者的手必须有良好的绝缘。

(3) 因物体表面情况等的不同,实验结果有时略有出入;表中次序仅供参考。

表 IV.2 有关雷电的一些参考数据

地球上平均每年发生雷电次数	$16 \times 10^6$ 次
每次放电时间	几万分之一~0.13s
平均每次放电时间	0.03s
雷雨云的厚度(约)	$(2 \sim 5) \times 10^3$ m
雷雨云的底离地面高度	几百 m~几 km
闪电中的电流强度	$(2 \sim 20) \times 10^4$ A

(续表)

闪电中的电压	几万 V—十亿 V
每次闪电消耗电能	60kWh~ $3 \times 10^6$ kWh
线状闪电时火花的长度	几 m~几十 km
球状闪电时火花的直径	10cm~20cm (大的有 10m, 但很少)
落地雷占雷电的次数	约十分之一

表 IV.3 电介质的相对电容率

物质	$\epsilon_r$	物质	$\epsilon_r$
真空(0℃)	1	硫(16℃)	4.2
氢(0℃)	1.000074	乙醚(20℃)	4.335
氦(0℃)	1.00026	玻璃(25℃)	5~10
氧(0℃)	1.00051	碳(金刚石)	5.5~16.5
氮(0℃)	1.00056	瓷	6~7
氩(0℃)	1.00058	胶木(27℃)	5.5
空气(20℃, 1atm)	1.00059	氯化钠(食盐)	6.2
气态汞(400℃)	1.00074	醋酸(20℃)	6.4
二氧化碳(0℃)	1.00098	花岗岩	7~9
气态硫化氢(0℃)	1.004	大理石	8.3
水蒸气 (140℃~150℃)	1.00785	液态氨(14℃)	16.2
石蜡	2~2.3	乙醇(20℃)	25.7
橡胶	2~3	甲醇(20℃)	33.7
煤油	2~4	甘油(20℃)	45.8
木头	2~8	水(25℃)	78
变压器油	2.2~2.5	钛酸钡	1000~10000
苯(20℃)	2.283	聚四氟 乙烯(室温)	2.0~2.1

(续表)

物质	$\epsilon_r$	物质	$\epsilon_r$
纸	2.5	聚乙烯(室温)	2.2~2.4
琥珀	2.8	硬质氯 乙烯(室温)	2.3~3.1
冰(-5℃)	2.8	聚苯乙烯(室温)	2.5~2.7
虫胶	3~4	聚氯乙烯(室温)	3.1~3.5
溴(23℃)	3.2	环氧树脂(室温)	3.3~4.0
赛璐珞	3.3	石英玻璃(室温)	3.5~4.0
油漆	3.5	尼龙(室温)	4.0~4.7
云母(25℃)	3~8	白云母(室温)	6.0~8.0
硬橡胶	4	氧化铝 陶瓷(室温)	8.0~11.0
黄磷(20℃)	4.1		

表 N.4 电介质的绝缘强度

物质	绝缘强度 (V/mm)	物质	绝缘强度 (V/mm)
干木材	800	赛璐珞	14000~23000
沥青	1000~2000	樟脑	16000
空气	3000	树脂	16000~23000
棉,丝	3000~5000	石蜡	16000~30000
大理石	4000~6500	硬橡胶	20000~38000
玄武岩	4000~7000	石英玻璃	20000~40000
瓷器	4000~25000	聚苯乙烯	25000
玻璃	5000~13000	油漆(湿)	25000
纸	5000~14000	矿物油	25000~57000
钛酸钡	5000~30000	绝缘清漆 (凡立水)	27000~40000

(续表)

物质	绝缘强度 (V/mm)	物质	绝缘强度 (V/mm)
熔凝石英	8000	蜡纸	30000--40000
橡胶	10000--20000	聚乙烯	50000
电木	10000--30000	聚四氟乙烯	60000
蜂蜡	10000--30000	琥珀	90000
硼硅酸玻璃	10000--50000	油漆(干)	100000
绝缘布	10000--50000	云母	160000
中国桐油	12000	真空	$\infty$

表 IV.5 导体的电阻率

金属	电阻率* ( $\Omega \cdot m$ )		金属	电阻率* ( $\Omega \cdot m$ )	
	0℃	18℃		0℃	18℃
银	$0.0147 \times 10^{-6}$	$0.0158 \times 10^{-6}$	铂	$0.098 \times 10^{-6}$	$0.105 \times 10^{-6}$
铜	$0.0156 \times 10^{-6}$	$0.0168 \times 10^{-6}$	钨	$0.102 \times 10^{-6}$	$0.1075 \times 10^{-6}$
金	$0.0206 \times 10^{-6}$	$0.0221 \times 10^{-6}$	锡	$0.110 \times 10^{-6}$	$0.113 \times 10^{-6}$
铝	$0.0242 \times 10^{-6}$	$0.0272 \times 10^{-6}$	铀	$0.116 \times 10^{-6}$	$0.126 \times 10^{-6}$
铬	$0.026 \times 10^{-6}$		钨	$0.116 \times 10^{-6}$	$0.145 \times 10^{-6}$
镁	$0.032 \times 10^{-6}$	$0.043 \times 10^{-6}$	钼	$0.138 \times 10^{-6}$	$0.147 \times 10^{-6}$
钙	$0.040 \times 10^{-6}$	$0.045 \times 10^{-6}$	铊	$0.159 \times 10^{-6}$	$0.175 \times 10^{-6}$
钠	$0.043 \times 10^{-6}$	$0.046 \times 10^{-6}$	铋	$0.182 \times 10^{-6}$	$0.208 \times 10^{-6}$
铈	$0.0438 \times 10^{-6}$	$0.0472 \times 10^{-6}$	铅	$0.195 \times 10^{-6}$	$0.207 \times 10^{-6}$
铈	$0.0465 \times 10^{-6}$	$0.050 \times 10^{-6}$	铋	$0.296 \times 10^{-6}$	$0.320 \times 10^{-6}$
铈	$0.0485 \times 10^{-6}$	$0.053 \times 10^{-6}$	铋	$0.303 \times 10^{-6}$	$0.324 \times 10^{-6}$
铈	$0.0489 \times 10^{-6}$	$0.0532 \times 10^{-6}$	铋	$0.352 \times 10^{-6}$	$0.376 \times 10^{-6}$
铈	$0.055 \times 10^{-6}$	$0.0595 \times 10^{-6}$	铋	$0.363 \times 10^{-6}$	$0.398 \times 10^{-6}$
铈	$0.055 \times 10^{-6}$	$0.063 \times 10^{-6}$	铋	$0.408 \times 10^{-6}$	$0.439 \times 10^{-6}$
铈	$0.061 \times 10^{-6}$	$0.069 \times 10^{-6}$	铋	$0.410 \times 10^{-6}$	$0.450 \times 10^{-6}$
铈	$0.062 \times 10^{-6}$	$0.068 \times 10^{-6}$			

(续表)

金属	电阻率* ( $\Omega \cdot m$ )		金属	电阻率* ( $\Omega \cdot m$ )	
	0°C	18°C		0°C	18°C
镍	$0.066 \times 10^{-6}$	$0.075 \times 10^{-6}$	钨	$0.575 \times 10^{-6}$	
镉	$0.067 \times 10^{-6}$	$0.075 \times 10^{-6}$	钼	$0.576 \times 10^{-6}$	$0.598 \times 10^{-6}$
铟	$0.0835 \times 10^{-6}$	$0.091 \times 10^{-6}$	钴	$0.635 \times 10^{-6}$	$0.668 \times 10^{-6}$
铯	$0.085 \times 10^{-6}$	$0.091 \times 10^{-6}$	铈	$0.726 \times 10^{-6}$	$0.740 \times 10^{-6}$
铊	$0.089 \times 10^{-6}$	$0.0945 \times 10^{-6}$	铪	$0.820 \times 10^{-6}$	$0.890 \times 10^{-6}$
铁	$0.086 \times 10^{-6}$	$0.099 \times 10^{-6}$	汞	$0.937 \times 10^{-6}$	$0.954 \times 10^{-6}$
			铋	$1.090 \times 10^{-6}$	$1.180 \times 10^{-6}$
合金及碳的电阻率	黄铜(铜 66% + 锌 34%)				$0.065 \times 10^{-6}$
	锰铜(铜 84% + 锰 12% + 镍 4%)				$0.48 \times 10^{-6}$
	康铜(铜 54% + 镍 46%)				$0.50 \times 10^{-6}$
	镍铬合金(镍 60% + 铬 15% + 铁 25%)				$1.10 \times 10^{-6}$
	铁铬铝合金(铁 60% + 铬 30% + 铝 5%)				$1.40 \times 10^{-6}$
	铂镍铁合金				$1.60 \times 10^{-6}$
	碳				$35 \times 10^{-6}$
	弧光灯中的碳棒(0°C 时)				$40-60 \times 10^{-6}$

\* 四种常用金属在 20°C 时的电阻率是: 银 0.016、铜 0.017、铝 0.027、铁 0.096 ( $\Omega \cdot m^2/m$ )

表 IV.6 绝缘体的电阻率(常温下)

物质	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	物质	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )
石棉	$1 \times 10^9$	垂直于晶轴	$1 \times 10^{14}$
象牙	$2 \times 10^6$	丙烯酸树脂	$10^{12} \times 10^{15}$
聚氯乙烯	$2.5 \times 10^6$	天然橡胶	$10^{12} \sim 10^{15}$
大理石	$10^7 \sim 10^9$	金刚石	$5 \times 10^{12}$
绝缘纸	$10^7 \sim 10^{10}$	硫酸铜	$6.7 \times 10^{13}$
赛璐珞	$10^8 \sim 10^{10}$	火漆	$8 \times 10^{13}$



(续表)

物质	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	物质	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )
玻璃纤维	$10^8 \sim 10^{11}$	沥青	$10^{-3} \sim 10^{15}$
干燥木材	$10^8 \sim 10^{12}$	硬橡胶	$10^{13} \sim 10^{16}$
凡士林	$10^9 \sim 10^{13}$	绝缘用矿物	$10^{13} \sim 10^{17}$
聚脂树脂	$10^{10} \sim 10^{13}$	油	$10^{14} \sim 10^{17}$
氯乙烯	$10^{10} \sim 10^{14}$	石蜡	$10^{14} \sim 10^{17}$
玻璃	$10^{10} \sim 10^{14}$	琥珀	$5 \times 10^{14}$
氯化橡胶	$10^{11} \sim 10^{13}$	松香	$5 \times 10^{14}$
蜂蜡	$10^{11} \sim 10^{13}$	硫	$10^{14} \sim 10^{15}$
人造蜡(氯苯)	$10^{11} \sim 10^{14}$	环氧树脂	$10^{14} \sim 10^{15}$
云母	$10^{11} \sim 10^{15}$	聚四氟乙烯	$10^{14} \sim 10^{17}$
硬质陶瓷	$10^{12} \sim 10^{13}$	聚苯乙烯	$10^{15} \sim 10^{17}$
绝缘漆	$10^{12} \sim 10^{13}$	聚乙烯	$> 1 \times 10^{16}$
二氧化硅		熔凝石英	$75 \times 10^{16}$
平行于晶轴	$1 \times 10^{12}$		

表 IV.7 某些金属的电阻温度系数

物 质	温度系数 (度 <sup>-1</sup> )	物质	温度系数 (度 <sup>-1</sup> )
锰铜(铜 84%、锰 12%、镍 4%)	0.00001	铝	0.0039
康铜(铜 54%、镍 46%)	0.00004	锌	0.0039
铁铬铝合金 (铁 60%、铬 30%、铝 5%)	0.00004	铂	0.0039
镍铬合金(镍 60%、铬 15%、铁 25%)	0.00016	镁	0.004
汞	0.00088	铋	0.004
		铅	0.004
		锡	0.0042
		钨	0.0045
		钢	0.005

(续表)

物 质	温度系数 (度 <sup>-1</sup> )	物 质	温度系数 (度 <sup>-1</sup> )
黄铜	0.0020	铁	0.005
钼	0.0031	镍	0.006
钨	0.0033		
钽	0.0033		
金	0.0034		
银	0.0038		
铜	0.0038		
铜(商用软铜)	0.0039	碳	-0.0005

表 N.8 温差电动势

温度差 $t - t_0$ ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ )	温差电动势(毫伏)			
	钨-铁	铂-铂铑 合金(10%铑)	铁-康铜	铜-康铜
0	0	0	0	0
100	0.35	0.64	5.27	4.28
200	1.05	1.44	10.78	9.29
300	2.06	2.32	16.33	14.86
400	3.31	3.25	21.85	20.87
500	4.75	4.22	27.39	
800		7.33	43.30	
1000	9.5	9.57		
1250	12.3	12.54		
1500	15.9	15.53		
1700		17.89		
1750	19.1			
2000	23.7			

表 IV.9 温差电系数

金 属	$a \times 10^{-6} \text{V/度}$	$b \times 10^{-8} \text{V/度}$	温度范围
铋	-43.688	-46.47	-200~100
康铜(60%Cu 40%Ni)	-38.105	-8.88	0~400
铜	2.76	1.22	0~100
金	2.90	0.68	-200~125
铁(软)	16.65	-2.966	-230~100
锰铜(84%Cu, 12%Mn, 4%Ni)	1.366	0.083	0~100
汞	-8.8103	-3.333	0~200
铂	5.892	4.334	0~100
镍	-19.067	-3.022	0~200
银	2.50	1.15	0~100
铟	1.594	3.41	0~100
铂铱合金			
85% Pt ~ 15% Ir	14.086	1.06	0~1200
90% Pt ~ 10% Ir	13.208	0.75	
铂铑合金			
85% Pt ~ 15% Rh	6.69	1.07	0~1700
90% Pt ~ 10% Rh	7.013	0.64	(相对于铂)

表中  $a, b$  是相对铂的温差电系数,任意两金属的温差电系数,则为上表两金属的系数差,即  $a_{AB} = a_A - a_B; b_{AB} = b_A - b_B$ .

表 IV.10 一些金属的逸出功(eV)

金属	逸出功	金属	逸出功
Ag	4.56~4.73	Mg	(<3.4)
Al	2.5~3.6	Mo	3.22
Au	4.73~4.82	Na	1.90~2.46
Bi	4.0~4.4	Ni	5.01
C	4.7	Pb	3.5~4.1
Ca	2.7	Pd	4.96
Cd	4.0	Pt	6.30
Co(六角晶系)	4.25	Rb	1.8~2.2
Cs	1.9	Rh	4.57
Cu	4.1~4.5	Sn	4.21~4.50
Fe	4.72	Ta	4.05
Ge	4.3	Th	3.3~3.6
Hg	4.53	W	4.58
K	1.76~2.25	Zn	3.32~3.57
Li	2.1~2.9		

表 IV.11 锗、硅的一些性质

	锗	硅
原子序数	32	14
原子量	72.60	28.08
原子数密度( $m^{-3}$ )	$4.42 \times 10^{28}$	$4.99 \times 10^{28}$
晶体结构	金刚石型	金刚石型
晶格常数(nm)	0.566	0.357
最近原子距离(nm)	0.244	0.235
熔点( $^{\circ}C$ )	958	1420
介电常数	16	11.6

(续表)

	锗	硅
密度( $\text{kg}/\text{m}^3, 20^\circ\text{C}$ )	$5.32 \times 10^3$	$2.33 \times 10^3$
热导率( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	$0.63 \times 10^2$	$0.84 \times 10^2$
比热( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	$0.31 \times 10^3$	$0.76 \times 10^3$
禁带宽度( $\text{eV}, 300\text{K}$ )	0.66	1.08
电子迁移率( $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}, 300\text{K}$ )	0.39	0.12
空穴迁移率( $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}, 300\text{K}$ )	0.19	0.05
电子扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}, 300\text{K}$ )	$0.96 \times 10^{-3}$	$0.38 \times 10^{-3}$
空穴扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}, 300\text{K}$ )	$0.45 \times 10^{-3}$	$0.13 \times 10^{-3}$
电子平均寿命( $\mu\text{s}$ )	100~1000	50~500
空穴平均寿命( $\mu\text{s}$ )	100~1000	50~500
电子扩散长度( $\text{cm}$ )	0.1~0.3	0.04~0.1
空穴扩散长度( $\text{cm}$ )	0.07~0.2	0.02~0.06
本征载流子浓度( $\text{m}^{-3}, 300\text{K}$ )	$2.5 \times 10^{19}$	$1.4 \times 10^{16}$
本征电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}, 300\text{K}$ )	47	$2.3 \times 10^5$

表 IV.12 锗和硅中的杂质的电离能

a. 在锗中杂质的电离能

杂质元素	杂质类型	电离能* (eV)	
		$E_c - E_i$	$E_i - E_v$
B	受主		0.0104
Al	受主		0.0102
Ga	受主		0.01
In	受主		0.0112
P	施主	0.0120	
As	施主	0.0127	
Sb	施主	0.0096	

(续表)

杂质元素	杂质类型	电离能* (eV)	
		$E_c - E_i$	$E_i - E_v$
Li	施主	0.0093	
Zn	受主		0.029
Cu	受主	0.26	0.04
	受主		
Au	施主		0.05
	受主		0.06
Co	受主	0.20	
	受主		0.25
Ni	受主	0.30	
	受主		0.22
Fe	受主	0.30	
	受主		0.34
Pt	受主	0.27	
	受主		0.04
Mn	受主	0.20	
	受主		0.16
Cd	受主	0.35	
	受主		0.05

\*  $E_c - E_i$  表示导带底与杂质能级的能级差 $E_i - E_v$  表示杂质能级与价带顶的能级差。

## b. 在硅中杂质的电离能

杂质元素	杂质类型	电离能(eV)	
		$E_c - E_i$	$E_i - E_v$
B	受主		0.045
Al	受主		0.057

(续表)

杂质元素	杂质类型	电离能(eV)	
		$E_c - E_i$	$E_i - E_v$
Ca	受主		0.065
In	受主		0.16
P	施主	0.044	
As	施主	0.049	
Sb	施主	0.039	
Bi	施主	0.069	
Li	施主	0.033	
Au	施主		0.39
	受主	0.3	
Zn	受主		0.09

表 N.13 等离子体举例

等离子体	等离子体温度(K)	离子密度( $m^{-3}$ )
太阳 中心	$2 \times 10^7$	$\sim 10^{26}$
表面	$5 \times 10^8$	$\sim 10^6$
日冕	$\sim 10^6$	$\sim 10^5$
聚变实验	$\sim 10^8$	$\sim 10^{14}$
原子弹火球	$\sim 10^7$	$\sim 10^{20}$
太阳风	$\sim 10^5$	5
雷电	$3 \times 10^4$	$\sim 10^{18}$
荧光灯(氖管)	$2 \times 10^4$	$\sim 10^9$
电离层	$2 \times 10^3$	$\sim 10^5$
火焰	$2 \times 10^3$	$\sim 10^8$

表 N.14 超导元素的临界温度和  
临界磁场

元素	$T_c$ (K)	$H_c(0)$ (Oe)*	元素	$T_c$ (K)	$H_c(0)$ (Oe)
Rh	0.0002		Al	1.174	99
W	0.012		$\alpha$ -Th	1.37	162
Re	0.026		Pa	1.4	
Ir	0.14	19	Re	1.7	193
$\alpha$ -Hf	0.165		Tl	2.39	171
$\alpha$ -Ti	0.49	56	In	3.416	293
Ru	0.49	66	$\beta$ -Sn	3.72	309
Cd	0.515	30	$\alpha$ -Hg	4.15	412
Os	0.65	65	Ta	4.48	830
$\alpha$ -U	0.68		V	5.3	1020
$\alpha$ -Zr	0.73	47	$\beta$ -La	5.98	1600
Zn	0.844	52	Pb	7.201	803
Mo	0.92	98	Tc	8.22	1410
Ga	1.1	59	Nb	9.26	1950

\* 1Oe 相当于  $\frac{1000}{4\pi}$  A/m

 表 N.15 超导合金和化合物临界  
温度和 0K 时的临界磁场

物质	$T_c$ (K)	$H_{c2}$ (kOe)	物质	$T_c$ (K)	$H_{c2}$ (kOe)
Mo-33Re	10.8	$\approx 28$	Pb-In	3.39-7.26	
Mo-50Re	12.6	27	Pb-40Tl	$\approx 5.8$	6
Nb-15Hf	9.85		NbN	17	140
Nb-25Ti	9.8	73	NbC	9	
Nb-35Ti	10.02		TaC	10.2	
Nb-60Ti	9.3	115(4.2K)	MoC	14	
Nb-60 Ti-4Ta	9.9	124(4.2K)	V <sub>3</sub> Si	17.0	



(续表)

物质	$T_c$ (K)	$H_{c2}$ (kOe)	物质	$T_c$ (K)	$H_{c2}$ (kOe)
Nb-70 Ti-5Ta	9.8	128	$V_3Ga$	16.8	240
Nb-25Zr	11	91	$Nb_3Al$	18.8	300
Nb-75Zr	10.8	>87	$Nb_3Sn$	18.1	245
Pb-35Bi	8.7	$\approx 26$	$Nb_3(Al_{0.75}$ $Ge_{0.25})$	21.0	420
Pb-50Bi	8.4	$\approx 30$	$Nb_3Ge$	23.2	

表 IV.16 高温超导体的临界温度

物质	简称	$T_c$ (K)	说明
$La_{2-x}M_xCuO_4$	214-T	40	M = Sr, Ba, Ca
$Nd_{2-y}M_yCuO_4$	214-T'	30	M = Ce, Pr, Th
$(Nd, Ce, Sr)_2CuO_4$	214-T''	35	
$RBa_2Cu_3O_7$	123	90	R = Y, La, Sm, Eu, Gd, Dy, ...
$YBa_2Cu_4O_8$	124	80	
$Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$	247	60	
$(Ba, Nd)_2(Nd, Ce)_2Cu_3O_8$	-	50	
$Pb_2YSrCu_3O_8$	-	50	
$Bi_2Sr_2CuO_6$	Bi-2201	9	} Bi 系超导体
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	Bi-2222	85	
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{11}$	Bi-2223	105	
$Tl_2Ba_2CuO_6$	Tl-2201	80	} Tl 系超导体
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	Tl-2212	110	
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Tl-2223	125	
$TlBa_2CuO_5$	Tl-1201	40	} 单层 TlO 的 Tl 系超导体
$TlBa_2CaCu_2O_7$	Tl-1212	90	
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$	Tl-1223	105	
$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	Tl-1234	105	

(续表)

物质	简称	$T_c$ (K)	说明
$La_{2-x}M_xCaCu_2O_6$	2126	60	} BCS 超导体
$Ca_{1-x}Sr_xCuO_2$		>80	
TiO		2.3	
$LiTi_2O_4$	--	13.7	
$Ba_xPb_{1-x}BiO_3$	BPB	13	
$Ba_xK_{1-x}BiO_3$	BKB	30	

表 IV.17 某些磁场的磁感应强度 (单位: T)

在原子核表面的磁场	$\sim 10^{12}$
中子星内磁场	$\sim 10^{10}$
脉冲星表面磁场	$10^6$
目前人工获得的最大磁场	$7 \times 10^4$
回旋加速器的磁场	$> 1$
普通永久磁铁的磁场	0.4~0.8
普通金属线圈的磁场	$10^{-4}$
地球表面的磁场	$5 \times 10^{-5}$
地磁场的水平分量(在磁赤道处)	$(3 \sim 4) \times 10^{-5}$
地磁场的垂直分量(在南、北磁极处)	$(6 \sim 7) \times 10^{-5}$
地磁异常地区可达	$(1 \sim 2) \times 10^{-4}$
无线电波的磁场	$10^{-9}$
在星际空间	$10^{-10}$
人体磁场*: 肺磁(人体最强的磁信号)	$10^{-9}$
心磁	$10^{-11}$
脑磁(人体最弱的磁信号)	$10^{-13}$
肌肉收缩时产生的动态磁场	$10^{-11}$
石棉矿工、翻砂工等肺内 $Fe_3O_4$ 磁性物质产生的剩余磁场可达	$3 \times 10^{-9}$ 以上
人体长时间照射的安全剂量	约 0.02
目前能测量的最小磁场	$10^{-15}$

\* 人体磁场因与很多因素有关,目前尚在研究中。

表 N.18 顺磁质和抗磁质的相对磁导率

磁介质	相对磁导率 $\mu_r = 1 + \chi_m$
顺磁质 ( $\mu_r > 1$ )	
空气	$1 + 30.4 \times 10^{-5}$
氧	$1 + 133 \times 10^{-5}$
氧 (-190℃ 液态)	$1 + 327 \times 10^{-5}$
锰	$1 + 12.4 \times 10^{-5}$
铬	$1 + 4.5 \times 10^{-5}$
铝	$1 + 0.82 \times 10^{-5}$
抗磁质 ( $\mu_r < 1$ )	
铋	$1 - 1.9 \times 10^{-5}$
铜	$1 - 0.11 \times 10^{-5}$
汞	$1 - 2.9 \times 10^{-5}$
银	$1 - 0.25 \times 10^{-5}$
氦	$1 - 2.47 \times 10^{-5}$
铅	$1 - 1.8 \times 10^{-5}$

注：在室温(20℃)和1个大气压条件下。

表 IV.19 一些软磁材料的性质

材料或专用名称	成分 (重量百分比%) (余为铁)	热处理温度 (°C)	磁导率		矫顽力 $H_c$ (奥)	饱和磁感 $B_s$ (高斯)	磁滞损耗 $P_h$ (每耳/米 <sup>2</sup> /周)	磁滞损耗居里温度 $T_h$ (°C)	电阻率 $\rho$ (微欧·厘米)	剩余磁感 $B_r$ (高斯)
			初始 $\mu_r$	最大 $\mu_{max}$						
高纯铁	0.05 杂质	1480(H <sub>2</sub> )880	10000	200000	0.05	21500	30.0	770	10	
工业纯铁	0.2 杂质	950	250	9000	0.6~1.3	21600	400.0	770	10	7700
变压器 SB, M-15	4.00 Si	720, SRA	1500	7000	0.25	19500	400	730	45~69	5000
取向立方晶结构	3.00 Si	T, 720, SRA	7500	55000	0.10	20100	70	740	45~52	9500
取向立方晶结构	3.00 Si	T, 900, SRA	500	116000	0.06	20100		740	45~52	12200
低铝铁 (3.5%)	3.5 Al	1100		19000	0.3	19000		750	47	
16% Al-Fe	16.0 Al	1000	3900	110000	0.015	5000	6.2	450	15.5	4000
45 坡莫合金	45 Ni	1050	2500	25000	0.10	16000	120	400	45	8000
50-50 Ni-Fe(取向)	50 Ni	1050, CR, H <sub>2</sub>	3000	100000	0.10	16000	20	500	45	14000
78 坡莫合金	78.5 Ni	1050, 600, Q	8000	100000	0.05	10800	58	600	16	6000
超坡莫合金	79 Ni, 5 Mn	1300, H <sub>2</sub> C	100000	1000000	0.002	7900	0.8	400	60	5000
27% Co-Fe	27 Co, 1 Cr	900, C	650	10000	0.7	24200	200		23~24	13000
铁钴钒合金材料	49 Co, 2 V	850, MFA		60000	0.3	24000	200	980	36	21500
45-25 坡莫铁	45 Ni, 25 Co	1000, 400	400	2000	1.2	15500	250	715	19	
Mn-Zn 铁氧体	Mn-zZn Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		1500	2500	0.2	3400	10	130	$2 \times 10^6$	
Ni-Zn 铁氧体	-		2500	5000	0.1	3200	14	140	约 $10^{11}$	

\* H<sub>2</sub> = 氢气, Q = 在油或水中淬火; CR = 冷轧; C = 控制冷却制度; T = 1200°C 或 1200°C 以上相变退火; MFA = 磁滞退火(通过居里点使磁畴取向); SRA = 消除应力的退火。

表 N.20 一些硬磁材料的性质

材料或专用名称	成分 (重量百分比) (剩余为铁)	矫顽力 $H_c$ (奥斯特)	剩余磁感 $B_r$ (高斯)	磁能积 $(BH)_{max}$ (高斯· 奥斯特)
1% 碳钢	1C, 0.50Mn	51	9000	0.18
5% 钨钢	5W, 0.7C	70	10500	0.33
3 $\frac{1}{2}$ % 铬钢	3.5Cr, 1C, 0.5Mn	66	9500	0.29
9% 钴钢	9Co, 0.9C, 1.25W, 5Cr	122	7800	0.41
40% 钴钢	40Co, 0.7C, 5W, 4.25Cr	242	10000	1.03
铝镍钴 1	12Al, 22.5Ni, 5Co	540	6600	1.40
铝镍钴 2	10Al, 18Ni, 13Co, 6Cu	650	7000	1.70
铝镍钴 3	12Al, 26Ni, 3Cu	560	6400	1.35
铝镍钴 5	8Al, 15Ni, 24Co, 3Cu	720	12000	5.0
铝镍钴 5DG	8Al, 14.5Ni, 24Co, 3Cu	700	13100	6.5
铝镍钴 6	8Al, 16Ni, 24Co, 3Cu, 1Ti	760	10500	3.65
铝镍钴 8	7Al, 15Ni, 35Co, 4Cu, 5Ti	1600	10400	5.50
铁钴钼合金	12Co, 17Mo	250	10500	1.1
铜镍铁永磁合金	60Cu, 20Ni	590	5400	1.85
铜镍钴永磁合金	50Cu, 21Ni, 29Co	710	3400	0.85
维卡钒钴铁磁性合金	52Co, 13V	450	10000	3.0

(续表)

材料或专用名称	成分 (重量百分比) (剩余为铁)	矫顽力 $H_c$ (奥斯特)	剩余磁感 $B_r$ (高斯)	磁能积 $(BH)_{max}$ (高斯· 奥斯特)
Pt-Co(铂钴 铁永磁合金 II)	76.7Pt, 23.3Co	4600	6480	9.4
英多克斯钕 磁铁, 钕铁 磁性陶瓷磁 体	$\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	1700	3800	3.0

表 IV.21 非铁磁金属的霍耳系数 (单位  $\times 10^{-10} \text{m}^3/\text{c}$ )

物质	$R_H$	物质	$R_H$	物质	$R_H$	物质	$R_H$
Ag	-0.84	Cs	-7.8	Mg	-0.94	Pt	-0.24
Al	-0.30	Cu	-0.55	Mn	-0.93	Sn	-0.04
Au	-0.72	In	-0.07	Mo	+1.26	Ta	+1.01
Be	+2.44	K	-4.2	Na	-2.5	W	+1.18
Cd	+0.60	Li	-1.7	Pb	+0.09	Zn	+0.33

## V 光学

表 V.1 气体和液体的折射率

物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	折射率	物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	折射率
空气	0	1.0002919	水	20	1.3330
氢	0	1.000232	甲醇	20	1.3290
氧	0	1.000271	乙醚	20	1.3538
氮	0	1.000067	丙酮	20	1.3593
氩	0	1.000281	乙醇	20	1.3618
二氧化硫	0	1.000686	松节油	20	1.4721

(续表)

物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	折射率	物质	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	折射率
一氧化碳	0	1.000334	四氯化碳	20	1.4607
二氧化碳	0	1.000451	甘油	20	1.4730
水蒸气	0	1.000255	橄榄油	0	1.4763
氨水	16.5	1.325	苯	20	1.5012
加拿大树胶	20	1.530	二硫化碳	20	1.6276

表 V.2 常用晶体及光学玻璃的折射率

物质	折射率	物质	折射率
熔凝玻璃 $\text{SiO}_2$	1.45843	重冕玻璃 ZK8	1.61400
氯化钠 $\text{NaCl}$	1.54427	钡冕玻璃 BaK2	1.53988
氯化钾 $\text{KCl}$	1.49044	火石玻璃 F1	1.60328
萤石 $\text{CaF}_2$	1.43381	钡火石玻璃 BaF8	1.62590
冕牌玻璃 K6	1.51110	重火石玻璃 ZF1	1.64752
K8	1.51590	ZF5	1.73977
K9	1.51630	ZF6	1.75496
重冕玻璃 ZK6	1.61263		

 表 V.3 某些单轴双折射晶体的折射率 ( $\lambda = 598.3\text{nm}$ )

晶体	$n_o$	$n_r$	$n_e - n_o$
方解石	1.6584	1.4864	-0.1720
电气石	1.669	1.638	-0.031
白云石	1.6811	1.500	-0.181
菱铁矿	1.875	1.635	0.240
硝酸钠	1.5854	1.3369	-0.2485
石英	1.5443	1.5534	+0.0089
冰	1.309	1.313	+0.004

(续表)

晶体	$n_o$	$n_e$	$n_e - n_o$
金红石( $\text{TiO}_2$ )	2.616	2.993	+0.287
磷酸二氢钾(KDP)	1.5095	1.4684	-0.0411
磷酸二氢铵(ADP)	1.5242	1.4787	-0.0455
硫化钙	2.506	2.529	+0.023

光波的波长范围和频率范围

光谱区域	波长范围(真空中)	频率范围(Hz)
远红外	$100\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$	$3 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{13}$
中红外	$10\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$	$3 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{14}$
近红外	$2\mu\text{m} \sim 760\text{nm}$	$1.5 \times 10^{14} \sim 3.9 \times 10^{14}$
红光	$760\text{nm} \sim 622\text{nm}$	$3.9 \times 10^{14} \sim 4.7 \times 10^{14}$
橙光	$622\text{nm} \sim 597\text{nm}$	$4.7 \times 10^{14} \sim 5.0 \times 10^{14}$
黄光	$597\text{nm} \sim 577\text{nm}$	$5.0 \times 10^{14} \sim 5.5 \times 10^{14}$
绿光	$577\text{nm} \sim 492\text{nm}$	$5.5 \times 10^{14} \sim 6.3 \times 10^{14}$
青光	$492\text{nm} \sim 450\text{nm}$	$6.3 \times 10^{14} \sim 6.7 \times 10^{14}$
蓝光	$450\text{nm} \sim 435\text{nm}$	$6.7 \times 10^{14} \sim 6.9 \times 10^{14}$
紫光	$435\text{nm} \sim 390\text{nm}$	$6.9 \times 10^{14} \sim 7.7 \times 10^{14}$
紫外	$390\text{nm} \sim 5\text{nm}$	$7.7 \times 10^{14} \sim 6.0 \times 10^{16}$

表 V.4 最强的一些夫琅禾费谱线

标记	波长(nm)	来源		光谱色区
		元素符号	元素名称	
A	* 759.4~762.1	O	氧	} 红
B	* 686.7~688.4	O	氧	
C	656.2816	H	氢	
a	* 627.6~727.8	O	氧	} 橙、黄
D <sub>1</sub>	589.5923	Na	钠	



(续表)

标记	波长 (nm)	来源		光谱色区
		元素符号	元素名称	
$D_2$	588.9953	Na	钠	橙、黄
$D_3$	587.5618	He	氦	
$E_2$	526.9541	Fe	铁	绿
$b_1$	518.3618	Mg	镁	
$b_2$	517.2699	Mg	镁	
$b_3$	516.8901	Fe	铁	
$b_4$	516.7491	Fe	铁	
$b_4$	516.7343	Mg	镁	
$c$	495.7609	Fe	铁	
$F$	486.1327	H	氢	蓝
$d$	466.8140	Fe	铁	
$e$	438.3547	Fe	铁	紫
$f$	434.0465	H	氢	
$G$	430.7906	Fe	铁	
$G$	430.7741	Ca	钙	
$g$	422.6728	Ca	钙	
$h$	410.1735	H	氢	暗紫
$H$	396.8468	Ca	钙	
$K$	393.3666	Ca	钙	

\*是吸收带。

表 V.5 某些元素的标识谱线

波长 (nm)	元素		光谱色区	波长 (nm)	元素		光谱色区
	符号	名称			符号	名称	
794.76	Rb	铷	暗红	486.13	H	氢	蓝
780.03				483.21	Sr	锶	

(续表)

## 附录 C 常用物理量数据表

波长 (nm)	元素		光谱 色区	波长 (nm)	元素		光谱 色区	
	符号	名称			符号	名称		
769.90	K	钾	} 红	482.59	Ra	镭	} 蓝	
766.49				481.05	Zn	镉		
670.79	Li	锂		479.99	Cd	镉		
656.28	H	氢		471.01	Zr	锆		
643.85	Cd	镉		460.73	Sr	锶		
624.90	La	镧		459.32	Cs	铯		
610.36	Li	锂		455.54				
601.66	Mn	锰		451.13	In	铟		
589.59	Na	钠		} 橙	447.15	He		氦
589.00					445.48	Ca		钙
587.56	He	氦	437.92		V	钒		
579.07	Hg	汞	434.05		H	氢		
577.77	Ba	钡	430.21		W	钨		
576.96	Hg	汞	425.43		Cr	铬		
553.55	Ba	钡	422.67		Ca	钙		
550.65	Mo	钼	421.56		Rb	铷		
546.54	Ag	银	420.19					
546.07	Hg	汞	417.21		Ga	镓		
535.05	Tl	铊	410.18	In	铟			
530.10	Pt	铂	410.17	H	氢			
526.95	Fe	铁	407.77	Sr	锶			
522.76	Pt	铂	405.89	Nb	铌			
518.36	Mg	镁	} 黄绿	405.78	Pb	铅		
517.27				404.66	Hg	汞		
515.32	Cu	铜		404.72	K	钾		
510.55				404.41				
508.58	Cd	镉		403.08	Mn	锰		
498.17	Ti	钛		396.15	Al	铝		
490.01	Y	钇		365.02	Hg	汞		

表 V.6 某些液体的克尔常量  $k$  ( $\lambda = 589.3\text{nm}, 20^\circ\text{C}$ )

物质	克尔常量( $\text{m}^3/\text{V}^2$ )
苯 $\text{C}_6\text{H}_6$	$0.67 \times 10^{-14}$
二硫化碳 $\text{CS}_2$	$3.56 \times 10^{-14}$
氯仿 $\text{CHCl}_3$	$-3.50 \times 10^{-14}$
水 $\text{H}_2\text{O}$	$5.10 \times 10^{-14}$
硝基甲苯 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$	$1.37 \times 10^{-12}$
硝基苯 $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	$2.44 \times 10^{-12}$

 表 V.7 某些旋光物质的费尔德常量  $V$  ( $\lambda = 589.3\text{nm}$ )

物质	温度( $^\circ\text{C}$ )	费尔德常量( $^\circ/(\text{m}\cdot\text{T})$ )
乙醇	25	$1.85 \times 10^2$
乙醚	15	$1.85 \times 10^2$
水	20	$2.18 \times 10^2$
磷冕玻璃	18	$2.68 \times 10^2$
水晶(垂直光轴)	20	$2.77 \times 10^2$
轻火石玻璃	18	$5.28 \times 10^2$
食盐	16	$5.98 \times 10^2$
二硫化碳	20	$7.05 \times 10^2$
磷	33	$22.10 \times 10^2$

 表 V.8 固体的旋光率  $\alpha$  (单位  $^\circ/\text{mm}$ )

物质	波长(nm)	旋光率 $\alpha$	物质	波长(nm)	旋光率 $\alpha$
石英	3676	0.34	石英	430.7	42.604
	1342	3.89		404.7	48.945
	794.76	11.589		382.0	55.625
	760.4	12.668		344.1	70.587
	728.1	13.924		257.1	143.266
	670.8	16.535		175.0	453.5
	656.2	17.318	珠砂( $\text{HgS}$ )	589.0	32.5

(续表)

物质	波长(nm)	旋光率 $\alpha$	物质	波长(nm)	旋光率 $\alpha$
	589.0	21.749	次硫酸铅	589.0	5.5
	546.1	25.538	氯化钠	589.0	3.13
	486.1	32.773	溴化钠	589.0	2.8

表 V.9 液体的比旋光率  $[\alpha]^*$  ( $\lambda = 589.3\text{nm}$ ,  $20^\circ\text{C}$ )

溶质	液剂	比旋光率与浓度的关系 [ $(^\circ)/\text{dm} \cdot (\text{g}/\text{cm}^3)$ ]
葡萄糖(右旋)	水	+105.2 (溶解后 5.5 分钟), +52.5 (溶解后 6 小时), $c^{**} = 9.1$
葡萄糖(右旋)	水	+52.5 + 0.0188d + 0.000517d <sup>2</sup> (达到平衡后), $d^{***} = 1 \sim 18$
葡萄糖(左旋)	水	-94.4 (溶解后 7 分钟), -51.4 (溶解后 7 小时), $d = 4$
果糖	水	-104 (溶解后 6 分钟), -90 (溶 解后 33 分钟), $c = 10$
果糖	水	-91.9 - 0.11d (达到平衡后), $d = 2 \sim 31$
蔗糖	水	+66.462 - 0.00870c - 0.000235c <sup>3</sup> , $c = 0 \sim 65$
麦芽糖	水	+138.48 - 0.01837d, $d = 5 \sim 35$
山道年	酒精	-161.0, $c = 1.78$
樟脑	酒精	+54.4 - 0.135d, $d = 45 \sim 91$
酒石酸	水	+14.83 - 0.141d, $d = 4.7 \sim 18$ , +14.849 - 0.144d, $d = 18 \sim 36$
酒石酸钾	水	+27.62 + 0.1064d - 0.00108d <sup>2</sup> , $d = 9 \sim 55$
酒石酸钾钠	水	+29.73 - 0.0078c

\* 比旋光率  $[\alpha]$  为钠 D 线通过长 1dm,  $20^\circ\text{C}$  的溶液单位浓度时的旋转角度  $[\alpha] > 0$  右旋,  $[\alpha] < 0$  左旋。

\*\* c 为溶液的浓度, 每  $100\text{cm}^3$  溶液中溶质的克数。

\*\*\* d 为溶液的浓度, 每  $100\text{g}$  溶液中溶质的克数。

表 V.10 关于照度的一些数据

各种工作的标准照度(lx)	
细小精致的工作(修理钟表,雕刻制版,暗色织物的编织,细线纺织,制图等)	100
使用有危险性的小的带刃工具(削刀,钻,旋刀等)的工作	100
在工作台上作细小精确的工作,用缝纫机缝纫,书写工作	75
阅读,观看各种仪表所示的读数,纺织	50
更衣室	25
走廊	10
楼梯	8
庭院,通路	2
一些典型情况下的照度(lx)	
中午直接在太阳光下的照度(中纬地区)	100000
电影摄制场摄制电影时	10000
阴天室外的照度	1000
白天的室内(光亮室内离窗不太远)	100
电影院的银幕上	20~80
来自满月的照度	0.2
没有月亮的夜间来自星空的照度	0.0003

表 V.11 一些实际光源的亮度 (单位熙提)

在地球大气层外看太阳	190000
在地面看太阳	150000
超高压球形水银灯	120000
钨丝白炽灯	500~1500
乙炔灯	8
煤油灯焰	1.5
距太阳为 75° 角的明朗天空	0.15
阳光照明的雪面	3

(续表)

满月表面	0.25
无月的夜空	$10^{-8}$
与人眼最小灵敏域对应的物体	$10^{-10}$

表 V.12 星等表

星	星等	照度(lx)
太阳	-26.73	$1.3 \times 10^5$
点光源(1坎德拉位于1米处)	-13.9	1
满月	-12.5	$2.67 \times 10^{-1}$
金星(最亮时)	-4.3	$1.39 \times 10^{-4}$
天狼星	-1.42	$9.8 \times 10^{-6}$
零等星	0	$2.65 \times 10^{-6}$
一等星	1	$1.05 \times 10^{-6}$
六等星	6	$1.05 \times 10^{-8}$

表 V.13 一些恒星发光颜色与温度

星型	颜色	星体表面温度(K)	星名
O	兰	40000~25000	
B	兰白	25000~12000	参宿七
A	白	11500~7700	天狼、织女
F	黄白	7600~6100	南河三
G	黄	6000~5000	太阳
K	红	4900~3700	毕宿五
M	红	3600~2600	参宿四

表 V.14 视见函数表

$\lambda(\text{\AA})$	$K_\lambda$	$\lambda(\text{\AA})$	$K_\lambda$	$\lambda(\text{\AA})$	$K_\lambda$
4000	0.0004	5300	0.862	6500	0.107
4100	0.0012	5400	0.954	6600	0.061

(续表)

$\lambda(\text{\AA})$	$K_{\lambda}$	$\lambda(\text{\AA})$	$K_{\lambda}$	$\lambda(\text{\AA})$	$K_{\lambda}$
4200	0.0040	5500	0.995	6700	0.032
4300	0.0116	5550	1.000	6800	0.017
4400	0.023	5604	0.995	6900	0.0082
4500	0.038	5700	0.952	7000	0.0041
4600	0.060	5800	0.870	7100	0.0021
4700	0.091	5900	0.750	7200	0.00105
4800	0.139	6000	0.631	7300	0.00055
4900	0.208	6100	0.503	7400	0.00025
5000	0.323	6200	0.381	7500	0.00012
5100	0.503	6300	0.265	7600	0.00006
5200	0.710	6400	0.175		

表 V.15 几种金属材料的红限

金属	红限(nm)	金属	红限(nm)
铯	652	汞	273.5
钾	550	钨	270
钠	540	金	265
铷	500	铁	262
锌	372	银	260
钪	305	铂	196

## VI 原子和原子核物理

表 VI.1 某些原子的半径和质量

原子序	元素符号	元素名称	原子半径 ( $\text{\AA}$ )	1977年国 际原子量	原子质量 ( $10^{-27}\text{kg}$ )
1	H	氢		1.0079	1.6737
3	Li	锂	1.56	6.941	11.526
4	Be	铍	1.05	9.0122	14.966

(续表)

原子序	元素符号	元素名称	原子半径* (Å)	1977年国 际原子量	原子质量 ( $10^{-27}$ kg)
6	C	碳	0.77	12.011	19.945
7	N	氮	0.71	14.007	23.260
8	O	氧	0.60	15.999	26.568
11	Na	钠	1.86	22.990	38.177
12	Mg	镁	1.62	24.305	40.361
13	Al	铝	1.43	26.982	44.806
14	Si	硅	1.13	28.086	46.640
16	S	硫	1.04	32.06	53.24
17	Cl	氯	1.07	35.453	58.873
18	Ar	氩	1.92	39.948	66.338
19	K	钾	2.23	39.098	64.926
20	Ca	钙	1.96	40.08	66.56
21	Sc	钪	1.51	44.956	74.654
22	Ti	钛	1.49	47.90	79.54
23	V	钒	1.32	50.942	84.594
24	Cr	铬	1.25	51.996	84.345
25	Mn	锰	1.29	54.938	91.230
26	Fe	铁	1.26	55.847	92.740
27	Co	钴	1.26	58.933	97.864
28	Ni	镍	1.24	58.70	97.48
29	Cu	铜	1.27	63.546	105.52
30	Zn	锌	1.33	65.38	108.57
31	Ga	镓	1.33	69.72	115.78
32	Ge	锗	1.22	72.59	120.54
33	As	砷	1.16	74.922	124.42
34	Se	硒	1.13	78.96	131.12
35	Br	溴	1.19	79.904	132.69
37	Rb	铷	2.36	85.468	141.93
40	Zr	锆	1.62	91.22	151.48
41	Nb	铌	1.43	92.906	154.28



(续表)

原子序	元素符号	元素名称	原子半径* (Å)	1977年国 际原子量	原子质量 ( $10^{-27}$ kg)
42	Mo	钼	1.36	95.94	159.32
44	Ru	钌	1.30	101.07	167.84
45	Rh	铑	1.34	102.91	170.89
46	Pd	钯	1.37	106.4	176.7
47	Ag	银	1.44	107.87	179.13
48	Cd	镉	1.49	112.41	186.67
49	In	铟	1.45	114.82	190.67
50	Sn	锡	1.40	118.69	179.10
51	Sb	锑	1.34	121.75	202.18
52	Te	碲	1.33	127.60	211.89
53	I	碘	1.36	126.90	210.73
55	Cs	铯	2.55	132.91	220.71
58	Ce	铈	1.83	140.12	232.68
72	Hf	铪	1.66	178.49	296.40
73	Ta	钽	1.42	180.95	300.49
74	W	钨	1.37	183.85	305.30
76	Os	锇	1.33	190.2	315.8
77	Ir	铱	1.35	192.22	319.20
78	Pt	铂	1.38	195.09	323.97
79	Au	金	1.44	196.97	327.09
80	Hg	汞	1.49	200.59	333.10
81	Tl	铊	1.99	204.37	339.38
82	Pb	铅	1.74	207.2	344.1
83	Bi	铋	1.46	208.98	347.03
88	Ra	镭		226.03	375.35
90	Th	钍	1.82	232.04	385.33
92	U	铀		238.03	395.27

\* 原子半径根据哥尔斯密(Goldschmit)的测定,并假定原子是小球体。原子量根据1977年国际原子量,原子质量是按1原子质量单位( $u$ )= $1.6606 \times 10^{-27}$ kg计算。

表 VI.2 原子内电子的分布

周期	原子序	元素名称	元素符号	各壳层上的电子数							
				K	L	M	N	O	P	Q	
I	1	氢	H	1							
	2	氦	He	2							
II	3	锂	Li	2	1						
	4	铍	Be	2	2						
	5	硼	B	2	3						
	6	碳	C	2	4						
	7	氮	N	2	5						
	8	氧	O	2	6						
	9	氟	F	2	7						
	10	氖	Ne	2	8						
	III	11	钠	Na	2	8	1				
		12	镁	Mg	2	8	2				
13		铝	Al	2	8	3					
14		硅	Si	2	8	4					
15		磷	P	2	8	5					
16		硫	S	2	8	6					
17		氯	Cl	2	8	7					
18		氩	Ar	2	8	8					
IV	19	钾	K	2	8	8	1				
	20	钙	Ca	2	8	8	2				
	21	钪	Sc	2	8	9	2				
	22	钛	Ti	2	8	10	2				
	23	钒	V	2	8	11	2				
	24	铬	Cr	2	8	13	1				
	25	锰	Mn	2	8	13	2				
	26	铁	Fe	2	8	14	2				
	27	钴	Co	2	8	15	2				
	28	镍	Ni	2	8	16	2				
	29	铜	Cu	2	8	18	1				
	30	锌	Zn	2	8	18	2				

(续表)

周期	原子序	元素名称	元素符号	各壳层上的电子数						
				K	L	M	N	O	P	Q
IV	31	镓	Ga	2	8	18	3			
	32	锗	Ge	2	8	18	4			
	33	砷	As	2	8	18	5			
	34	硒	Se	2	8	18	6			
	35	溴	Br	2	8	18	7			
	36	氪	Kr	2	8	18	8			
V	37	铷	Rb	2	8	18	8	1		
	38	锶	Sr	2	8	18	8	2		
	39	钇	Y	2	8	18	9	2		
	40	锆	Zr	2	8	18	10	2		
	41	铌	Nb	2	8	18	12	1		
	42	钼	Mo	2	8	18	13	1		
	43	锝	Tc	2	8	18	13	2		
	44	钌	Ru	2	8	18	15	1		
	45	铑	Rh	2	8	18	16	1		
	46	钯	Pd	2	8	18	18			
	47	银	Ag	2	8	18	18	1		
	48	镉	Cd	2	8	18	18	2		
	49	铟	In	2	8	18	18	3		
	50	锡	Sn	2	8	18	18	4		
	51	锑	Sb	2	8	18	18	5		
	52	碲	Te	2	8	18	18	6		
	53	碘	I	2	8	18	18	7		
	54	氙	Xe	2	8	18	18	8		
VI	55	铯	Cs	2	8	18	18	8	1	
	56	钡	Ba	2	8	18	18	8	2	
	57	镧	La	2	8	18	18	9	2	
	58	铈	Ce	2	8	18	20	8	2	
	59	镨	Pr	2	8	18	21	8	2	
	60	钕	Nd	2	8	18	22	8	2	

(续表)

周期	原子序	元素名称	元素符号	各壳层上的电子数						
				K	L	M	N	O	P	Q
VI	61	铈	Pr	2	8	18	23	8	2	
	62	钐	Sm	2	8	18	24	8	2	
	63	铈	Eu	2	8	18	25	8	2	
	64	钆	Gd	2	8	18	25	9	2	
	65	铽	Tb	2	8	18	27	8	2	
	66	镝	Dy	2	8	18	28	8	2	
	67	铈	Ho	2	8	18	29	8	2	
	68	铒	Er	2	8	18	30	8	2	
	69	铥	Tm	2	8	18	31	8	2	
	70	镱	Yb	2	8	18	32	8	2	
	71	镱	Lu	2	8	18	32	9	2	
	72	铪	Hf	2	8	18	32	10	2	
	73	钽	Ta	2	8	18	32	11	2	
	74	钨	W	2	8	18	32	12	2	
	75	铼	Re	2	8	18	32	13	2	
	76	锇	Os	2	8	18	32	14	2	
	77	铱	Ir	2	8	18	32	15	2	
	78	铂	Pt	2	8	18	32	17	1	
79	金	Au	2	8	18	32	18	1		
80	汞	Hg	2	8	18	32	18	2		
81	铊	Tl	2	8	18	32	18	3		
82	铅	Pb	2	8	18	32	18	4		
83	铋	Bi	2	8	18	32	18	5		
84	钋	Po	2	8	18	32	18	6		
85	砹	At	2	8	18	32	18	7		
86	氡	Rn	2	8	18	32	18	8		
VII	87	钫	Fr	2	8	18	32	18	8	1
	88	镭	Ra	2	8	18	32	18	8	2
	89	锕	Ac	2	8	18	32	18	9	2
	90	钍	Th	2	8	18	32	18	10	2

(续表)

周期	原子序	元素名称	元素符号	各壳层上的电子数						
				K	L	M	N	O	P	Q
VII	91	镤	Pa	2	8	18	32	20	9	2
	92	铀	U	2	8	18	32	21	9	2
	93	镎	Np	2	8	18	32	23	8	2
	94	钚	Pu	2	8	18	32	24	8	2
	95	镅	Am	2	8	18	32	25	8	2
	96	锔	Cm	2	8	18	32	25	9	2
	97	锿	Bk	2	8	18	32	27	8	2
	98	镄	Cf	2	8	18	32	28	8	2
	99	镱	Es	2	8	18	32	29	8	2
	100	镻	Fm	2	8	18	32	30	8	2
	101	铈	Md	2	8	18	32	31	8	2
	102	镨	No	2	8	18	32	32	8	2
	103	铈	Lr	2	8	18	32	32	9	2
	104	铈	Rf							
	105	铈	Db							
	106	铈	Sg							
	107	铈	Bh							
	108	铈	Hs							
	109	铈	Mt							

表 VI.3 常用的放射性同位素

同位素	符号	放射形式	放射能量(MeV)			半衰期*	常用的制备方法**
			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
氢-3	$^3\text{H}$	$\beta$ 射线		0.0185		12.4年	$^6\text{Li}(n, \alpha)$
碳-14	$^{14}\text{C}$	$\beta$ 射线		0.155		5700年	$^{14}\text{N}(n, p)$
磷-32	$^{32}\text{P}$	$\beta$ 射线		1.7		14.3天	$^{32}\text{S}(n, p)$
钾-42	$^{42}\text{K}$	$\beta, \gamma$ 射线		3.58	1.5	12.4小时	$^{41}\text{K}(n, \gamma)$
钴-60	$^{60}\text{Co}$	$\beta, \gamma$ 射线		0.32	1.33, 1.17	5.27年	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$
铀-235	$^{235}\text{U}$	$\alpha$ 射线	4.39			$7.13 \times 10^8$ 年	天然放射性元素
铀-238	$^{238}\text{U}$	$\alpha$ 射线	4.18			$4.49 \times 10^9$ 年	天然放射性元素
钚-239	$^{239}\text{Pu}$	$\alpha$ 射线	5.15			24.4年	铀原子堆生产

\* 某种放射性元素蜕变一半所需要的时间,叫做这种元素的半衰期;如铀

235 的半衰期是  $7.13 \times 10^8$  年, 是表示 1 克铀经过  $7.13 \times 10^8$  年就剩半克铀, 再过  $7.13 \times 10^8$  年就只剩四分之一克铀, 其他依此类推。

\* n 表示中子, p 是质子,  $\gamma$  为  $\gamma$  射线,  $\alpha$  是氦核。

表 V.4 某些核转变的反应能量

反应能量的值  $\Delta E$  以质量单位的千分之一表示; 换算为 MeV 时, 须乘以 0.931

核反应	$\Delta E$ 的计算值	$\Delta E$ 的观察值
${}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^2_1\text{H}$	2.4	2.4
${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	4.3	4.3
${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	4.0	3.8
${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$	23.7	23.7
${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$	5.4	5.3
${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$	5.0	4.9
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$	18.3	18.4
${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_1\text{H}$	0.5	0.5
${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^6_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$	2.0	2.2
${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$	7.4	7.7
${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_4\text{Be} + {}^1_1\text{H}$	4.8	4.8
${}^9_4\text{Be} + \gamma \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$	-1.9	-1.7
${}^{10}_5\text{B} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H}$	9.8	9.8
${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$	9.1	9.1
${}^{11}_5\text{B} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$	8.6	8.8
${}^{12}_6\text{C} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$	3.0	2.9
${}^{14}_7\text{N} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H}$	9.2	9.2

(续表)

核反应	$\Delta E$ 的计算值	$\Delta E$ 的观察值
${}^1_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$	0.6	0.6
${}^1_7\text{N} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	14.2	14.2
${}^{16}_8\text{O} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He}$	3.2	3.4

## VI 天文方面的有关资料

表 VI.1 地球、太阳和月球的资料

项目	地球	太阳	月球
平均半径	$(a^2b)^{\frac{1}{3}} = 6371.03\text{km}$	$69597\text{km} = 109\text{T}$	$1738\text{km} = 0.273\text{T}$
赤道半径	$a = 6378.164\text{km}$		
极半径	$b = 6356.779\text{km}$		
扁率	$\frac{a-b}{a} = \frac{1}{298}$ 0.00335		
表面积	$5.101 \times 10^{14}\text{m}^2$	$6.087 \times 10^{18}\text{m}^2$ $\approx 12000\text{T}$	$3.8 \times 10^{13}\text{m}^2 = \frac{1}{13}\text{T}$
体积	$1.083 \times 10^{21}\text{m}^3$	$1.412 \times 10^{27}\text{m}^3$ $\approx 1300000\text{T}$	$2.200 \times 10^{19}\text{m}^3 = \frac{1}{50}\text{T}$
质量	$5.976 \times 10^{24}\text{kg}$	$1.989 \times 10^{30}\text{kg} \approx 333000\text{T}$	$7.350 \times 10^{22}\text{kg} = \frac{1}{81}\text{T}$
平均密度	$5.518\text{g/cm}^3$	$1.409\text{g/cm}^3 = 0.26\text{T}$	$3.341\text{g/cm}^3 = 0.6\text{T}$
表面重力加速度	标准值 $9.80665\text{m/s}^2$ , 纬度 $45^\circ$ 处 $9.80612\text{m/s}^2$	$273.98\text{m/s}^2 = 27.9\text{T}$	$1.622\text{m/s}^2 = 0.16\text{T}$
表面逃逸速度	$11.19\text{km/s}$	$617.7\text{km/s}$	$2.38\text{km/s}$
自转角速度	$7.292 \times 10^{-5}\text{rad/s}$	$2.865 \times 10^{-6}\text{rad/s}$ (在太阳表面纬度 $16^\circ$ 处)	$2.463 \times 10^{-6}\text{rad/s}$
自转线速度 (赤道上)	$465\text{m/s}$	$2000\text{m/s} = 4.3\text{T}$	$4.63\text{m/s} = \frac{1}{100}\text{T}$
自转周期	23小时 56分 4.1秒	(约) $25.2\text{H} = 25.3\text{T}$	$27.3\text{H} = 27.4\text{T}$
地球与太阳平均距离	$1.496 \times 10^{11}\text{m}$		

(续表)

项目	地球	太阳	月球
地球绕太阳公转平均速度	29.79km/s		
回归年	365日5时48分46秒		
月球与地球平均距离			384400km
月球绕地球转动的平均速度			1000km/s
太阳表面有效温度		5770K (约6000K)	

\* T表示相当于地球同一种量的倍数(近似值)。



表 W.2 太阳系大行星的轨道和物理要素

行星名称	与太阳平均距离		绕太阳公转		轨道偏心率	轨道平面与黄道面夹角	自转周期 ( $\frac{\text{天}}{\text{天}}$ )	球体平均半径		球体质量 (以地球为单位)	平均密度 ( $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ )	表面平均重力加速度 ( $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ )	逃逸速度 ( $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ )	卫星数
	百万千米 (Gm)	以地球与太阳的距离为单位	恒星周期 (回山年)	速率 ( $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ )				(km)	以地球为单位					
水星	57.9	0.38710	0.24085 (87.969 日)	47.89	0.20563	7°00'15"	59 日	2420	0.38	0.6560 (0.554)	5.4	3.63	4.2	0
金星	108.1	0.72333	0.61521 (224.701 日)	35.03	0.00679	3°23'40"	244.3 日 (逆转)	64173	0.95	0.88 (0.815)	5.2	8.60	10.3	0
地球	149.5	1.00000	1.00004 (365.256 日)	29.79	0.01672	0°0'0"	23 时 56 分 4 秒	6371	1.00	1.000 (1.000)	5.518	9.8	11.2	1
火星	277.8	1.52369	1.88089	24.13	0.09338	1°51'00"	24 时 37 分 23 秒	3332	0.52	0.149 (0.1075)	3.95	3.74	5.0	2
木星	777.8	5.20280	11.86223	13.06	0.048945	1°18'17"	9 时 50 分 (9 时 56 分)	69860	10.96	1316 (517.83)	1.34	25.9	61	16
土星	1426.1	9.53884	29.4577	9.64	0.05465	2°29'22"	10 时 14 分 (10 时 38 分)	57630	9.04	755 (95.147)	0.70	11.3	37	17
天王星	2869.1	19.19098	84.0139	6.81	0.04724	0°46'23"	10 时 49 分	23700	3.72	52 (14.54)	1.58	10.4	22	5
海王星	4495.7	30.07067	164.793	5.43	0.00858	1°46'22"	15 时 48 分	21500	3.37	44 (17.23)	2.30	14.0	25	2
冥王星	5908.0	39.51777	244.7	4.74	0.250	17°10'00"	6 时 9 分	2900	0.46	0.1 (0.17)				1

## 基本物理常数

国际科学协会科学技术数据委员会(CODATA)  
1986年推荐值

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
一般常数				
普通常数				
真空中光速	$c$	299 792 458	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	(精确)
真空磁导率	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ 12.566 370 614...	$\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$ $10^{-7} \text{N}\cdot\text{A}^{-2}$	(精确)
真空介电常数, $1/\mu_0 c^2$	$\epsilon_0$	8.854 187 817...	$10^{-12} \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	(精确)
牛顿引力常数	$G$	6.672 59(85)	$10^{-11} \text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$	128
普朗克常数	$h$	6.626 075 5(40)	$10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$	0.60
以电子伏为 单位, $h/ e $		4.135 669 2(12)	$10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$	0.30
$h/2\pi$	$\hbar$	1.054 572 66(63)	$10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$	0.60
以电子伏为 单位, $\hbar/ e $		6.582 122 0(20)	$10^{-16} \text{eV}\cdot\text{s}$	0.30
普朗克质量, $(\hbar c/G)^{1/2} =$ $(\hbar G/c^3)^{1/2}$	$m_p$	2.176 71(14)	$10^{-8} \text{kg}$	64
普朗克长 度, $\hbar/m_p c$	$l_p$	1.616 05(10)	$10^{-35} \text{m}$	64

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
普朗克时间, $t_p = (hG/c^5)^{1/2}$	$t_p$	5.390 56(34)	$10^{-44}\text{s}$	64
电磁常数				
基本电荷	$e$ $e/h$	1.602 177 33(49)	$10^{-19}\text{C}$	0.30
		2.417 988 36(72)	$10^{14}\text{A}\cdot\text{J}^{-1}$	0.30
磁通量子, $h/2e$	$\Phi_0$	2.067 834 61(61)	$10^{-15}\text{Wb}$	0.30
约瑟夫森频率-电压比	$2e/h$	4.835 976 7(14)	$10^{14}\text{Hz}\cdot\text{V}^{-1}$	0.30
量子霍尔电导, $2\alpha/\mu_0 c$	$e^2/h$	3.874 046 14(17)	$10^{-5}\text{A}\cdot\text{V}^{-1}$	0.045
量子霍尔电阻, $h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	$R_H$	25 812. 805 6(12)	$\Omega$	0.045
玻尔磁子, $e\hbar/2m_e$	$\mu_B$	9.274 015 4(31)	$10^{-24}\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	0.34
以电子伏为 单位, $\mu_B/e$		5.788 382 63(52)	$10^{-5}\text{eV}\cdot\text{T}^{-1}$	0.089
以赫为单 位, $\mu_B/h$		1.399 624 18(42)	$10^{10}\text{Hz}\cdot\text{T}^{-1}$	0.30
以波数为 单位, $\mu_B/hc$		46.686 437(14)	$\text{m}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$	0.30
以开为单 位, $\mu_B/k$		0.671 709 9(57)	$\text{K}\cdot\text{T}^{-1}$	8.5
核磁子, $e\hbar/2m_p$	$\mu_N$	5.050 786 6(17)	$10^{-27}\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	0.34

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
以电子伏为 单位, $\mu_N/ e $		3.152 451 66(28)	$10^{-8} \text{eV} \cdot \text{T}^{-1}$	0.089
以赫为单 位, $\mu_N/h$		7.622 591 4(23)	$\text{MHz} \cdot \text{T}^{-1}$	0.30
以波数为 单位, $\mu_N/hc$		2.542 622 81(77)	$10^2 \text{m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$	0.30
以开为单 位, $\mu_N/k$		3.658 246(31)	$10^4 \text{K} \cdot \text{T}^{-1}$	8.5
原子常数				
精细结构常 数, $\frac{1}{2} \mu_0 \alpha^2 / h$	$\alpha$	7.297 353 08(33)	$10^{-3}$	0.045
精细结构常 数的倒数	$\alpha^{-1}$	137.035 989 5(61)		0.045
里德伯常数, $\frac{1}{2} m_e \alpha^2 / h$	$R_\infty$	10 973 731.534(13)	$\text{m}^{-1}$	0.0012
以赫为单 位, $R_\infty c$		3.289 841 949 9(39)	$10^{15} \text{Hz}$	0.0012
以焦耳为 单位, $R_\infty hc$		2.179 874 1(13)	$10^{-18} \text{J}$	0.60
以电子伏 为单, $R_\infty hc/ e $		13.605 698 1(40)	eV	0.30
玻尔半径, $a_0/4\pi R_\infty$	$a_0$	0.529 177 249(24)	$10^{10} \text{m}$	0.045

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
哈特里能量, $e^2/r\pi\epsilon_0c_0 =$ $2R_\infty hc$	$E_h$	4.359 748 2(26)	$10^{-18}\text{J}$	0.60
以电子伏为 单位, $E_h/ e $		27.211 396 1(81)	eV	0.30
环流量子	$h/2m_e$	3.636 948 07(33)	$10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$	0.089
	$h/m_e$	7.273 896 14(65)	$10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$	0.089
电子常数				
电子质量	$m_e$	9.109 389 7(54)	$10^{-31}\text{kg}$	0.59
		5.485 799 03(13)	$10^{-4}\text{u}$	0.023
以电子伏 为单 位, $m_e c^2/ e $		0.510 999 06(15)	MeV	0.30
电子- $\mu$ 子 质量比	$m_e/m_\mu$	4.836 332 18(71)	$10^{-3}$	0.15
电子-质子 质量比	$m_e/m_p$	5.446 170 13(11)	$10^{-4}$	0.020
电子-氦核 质量比	$m_e/m_d$	2.724 437 07(6)	$10^{-4}$	0.020
电子- $\alpha$ 粒子 质量比	$m_e/m_\alpha$	1.370 933 54(3)	$10^{-4}$	0.021
电子荷质比	$ e /m_e$	1.758 819 62 (53)	$10^{11}\text{C}\cdot$ $\text{kg}^{-1}$	0.30
电子摩尔质 量	$M(e), M_e$	5.485 799 03(13)	$10^{-7}\text{kg}\cdot$ $\text{mol}^{-1}$	0.023
康普顿波 长, $h/m_e c$	$\lambda_c$	2.426 310 58(22)	$10^{-12}\text{m}$	0.089

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
$\lambda_c/2\pi =$ $\alpha\alpha_0 - \alpha^2/$ $4\pi R_\infty$	$\lambda_E$	3.861 593 23(35)	$10^{-13}\text{m}$	0.089
经典电子半 径, $\alpha^2\alpha_0$	$r_e$	2.817 940 92(38)	$10^{-15}\text{m}$	0.13
汤姆孙截 面, $(8\pi/3)$ $r_e^2$	$\sigma_e$	0.665 246 16(18)	$10^{-28}\text{m}^2$	0.27
电子磁矩	$\mu_e$	928. 477 01(31)	$\frac{10^{-26}\text{J}}{\text{T}}$	0.34
以玻尔磁 子为单位	$\mu_e/\mu_B$	1.001 159 653 193 (10)		$1 \times 10^{-5}$
以核磁子 为单位	$\mu_e/\mu_N$	1 838.282 000(37)		0.020
电子反常磁 矩, $\mu_e/\mu_B - 1$	$a_e$	1.159 653 193(10)	$10^{-3}$	0.0086
电子 $g$ 因 子, $2(1+a_e)$	$g_e$	2.002 319 304 386 (20)		$1 \times 10^{-5}$
电子- $\mu$ 子 磁矩比	$\mu_e/\mu_\mu$	206. 766 967(30)		0.15
电子-质 子 磁矩比	$\mu_e/\mu_p$	658.210 688 1(66)	0.010	
$\mu$ 子常数				
$\mu$ 子质量	$m_\mu$	1.883 532 7(11) 0.113 428 913(17)	$10^{-28}\text{kg}$ $u$	0.61 0.15
以电子伏 为 单 位, $m_\mu c^2/ e $		105.658 389(34)	MeV	0.32

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
$\mu$ 子-电子质量比	$m_\mu/m_e$	206.768 262(30)		0.15
$\mu$ 子摩尔质量	$M(\mu), M_\mu$	1.134 289 13(17)	$10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.15
$\mu$ 子磁矩	$\mu_\mu$	4.490 451 4(15)	$10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	0.33
以玻尔磁子为单位	$\mu_\mu/\mu_B$	4.841 970 97(71)	$10^{-3}$	0.15
以核磁子为单位	$\mu_\mu/\mu_N$	8.890 598 1(13)		0.15
$\mu$ 子反常磁矩, $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu) - 1$	$a_\mu$	1.165 923 0(84)	$10^{-3}$	7.2
$\mu$ 子 $g$ 因子, $2(1+a_\mu)$	$g_\mu$	2.002 331 846(17)		0.0084
$\mu$ 子-质子磁矩比	$\mu_\mu/\mu_p$	3.183 345 47(47)		0.15
质子常数				
质子质量	$m_p$	1.672 623 1(10) 1.007 276 470(12)	$10^{-27} \text{ kg}$ $\text{u}$	0.59 0.012
以电子伏为单位, $m_p c^2/e$		938.272 31(28)	MeV	0.30
质子-电子质量比	$m_p/m_e$	1 836.152 701(37)		0.020
质子- $\mu$ 子质量比	$m_p/m_\mu$	8.880 244 4(13)		0.15
质子荷质比	$ e /m_p$	9.578 830 9(29)	$10^7 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.30

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
质子摩尔质量	$M(p), M_p$	1.007 276 470(12)	$10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.012
质子康普顿 波长, $h/m_p c$	$\lambda_{c,p}$	1.321 410 02(12)	$10^{-15} \text{ m}$	0.089
	$\lambda_{c,p}/2\pi$	2.103 089 37(19)	$10^{-16} \text{ m}$	0.089
质子磁矩	$\mu_p$	1.410 607 61(47)	$10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	0.34
以玻尔磁子 为单位	$\mu_p/\mu_B$	1.521 032 202(15)	$10^{-3}$	0.010
以核磁子 为单位	$\mu_p/\mu_N$	2.792 847 386(63)		0.023
纯水中质子的 抗磁屏蔽修正(球、 25℃)	$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}$	25.689(15)		$10^{-6}$
$1 - \mu'_p/\mu_p$				
屏蔽的质子 磁矩 ( $\text{H}_2\text{O}$ , 球、 25℃)	$\mu'_p$	1.410 571 38(47)	$10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	0.34
以玻尔磁子 为单位	$\mu'_p/\mu_B$	1.520 993 129(17)	$10^{-3}$	0.011
以核磁子 为单位	$\mu'_p/\mu_N$	2.792 775 642(64)		0.023
质子旋磁比	$\gamma_p$	26 752. 212 8(81)	$10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$	0.30
	$\gamma_p/2\pi$	42.577 469(13)	$\text{MHz} \cdot \text{T}^{-1}$	0.30



(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
未修正的 ( $\text{H}_2\text{O}$ , 球, 25°C)	$\gamma_p$ $\gamma_p/2\pi$	26 751.525 5(81)	$10^4 \text{s}^{-1}$	0.30
		42 576 375(13)	$\text{T}^{-1}$	0.30
			$\text{MHz}$	
中子常数				
中子质量	$m_n$	1.574 928 6(10)	$10^{-27} \text{kg}$	0.59
		1.008 664 904(14)	$u$	0.014
以电子伏 为单位, $m_n c^2 /  e $		939.565 63(28)	$\text{MeV}$	0.30
中子-电子 质量比	$m_n/m_e$	1 838.683 662(40)		0.022
中子-质子 质量比	$m_n/m_p$	1.001 378 404(9)		0.009
中子摩尔质 量	$M(n),$ $M_n$	1.008 664 904(14)	$10^{-3} \text{kg} \cdot$ $\text{mol}^{-1}$	0.014
中子康普顿 波长, $h/m_n c$	$\lambda_{C,n}$	1.319 591 10(12)	$10^{-5} \text{m}$	0.089
$\lambda_{C,n}/2\pi$	$h_{C,n}$	2.100 194 45(19)	$10^{-16} \text{m}$	0.089
中子磁矩*	$\mu_n$	0.966 237 07(40)	$10^{-26} \text{J} \cdot$ $\text{T}^{-1}$	0.41
以玻尔磁 子为单位	$\mu_n/\mu_B$	1.041 875 63(25)	$10^{-3}$	0.24
以核磁子 为单位	$\mu_n/\mu_N$	1.913 042 75(45)		0.24
中子-电子 磁矩比	$\mu_n/\mu_e$	1.040 668 82(25)	$10^{-3}$	0.24
中子-质 子磁矩比	$\mu_n/\mu_p$	0.684 979 34(16)		0.24

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
氘核常数				
氘核质量	$m_d$	3.343 586 0(20) 2.013 553 214(24)	$10^{-27}$ kg u	0.59 0.012
以电子伏为 单位, $m_d c^2 /$ $(e)$		1 875.613 39(57)	MeV	0.30
氘核-电子 质量比	$m_d / m_e$	3 670.483 014(75)		0.020
氘核-质子 质量比	$m_d / m_p$	1.999 007 496(6)		0.003
氘核摩尔质 量	$M(d),$ $M_d$	2.013 553 214(24)	$10^{-3}$ kg · mol <sup>-1</sup>	0.012
氘核磁矩*	$\mu_d$	0.433 073 75(15)	$10^{-26}$ J · T <sup>-1</sup>	0.34
以玻尔磁 子为单位	$\mu_d / \mu_B$	0.466 975 447 9(91)	$10^{-3}$	0.019
以核磁子 为单位	$\mu_d / \mu_N$	0.857 438 230(24)		0.028
氘核-电子 磁矩比	$\mu_d / \mu_e$	0.466 434 546 0(91)	$10^{-3}$	0.019
氘核-质子 磁矩比	$\mu_d / \mu_p$	0.307 012 203 5(51)		0.017
物理化学常数				
阿伏伽德罗 常数	$N_A, L$	6.022 136 7(36)	$10^{23}$ mol <sup>-1</sup>	0.59

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
原子质量常数, $m_u^{-1}$ $\frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	$m_u$	1.660 540 2(10)	$10^{-27}\text{kg}$	0.59
以电子伏为单 位, $m_u c^2/\{e\}$		931.494 32(28)	MeV	0.30
法拉第常数	$F$	96 485.309(29)	$\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$	0.30
摩尔普朗克 常数	$N_A h$ $H_A/hc$	3.990 313 23(36) 0.119 626 58(11)	$10^{-10}\text{J}\cdot\text{s}\cdot\text{mol}^{-1}$ $\text{J}\cdot\text{m}\cdot\text{mol}^{-1}$	0.089 0.089
气体常数	$R$	8.314 510(70)	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	8.4
玻耳兹曼常 数, $R/N_A$	$k$	1.380 658(12)	$10^{-23}\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$	8.5
以电子伏 为单单位, $k/\{e\}$		8.617 385(73)	$10^{-5}\text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$	8.4
以赫为单 位, $k/h$		2.083 674(18)	$10^{10}\text{Hz}\cdot\text{K}^{-1}$	8.4
以波数为 单单位, $k/hc$		69.503 87(59)	$\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	8.4
摩尔体 积(理想 体), $RT/p$				
T=273.15K; $p=101325\text{Pa}$	$V_m$	22.414 10(19)	$\text{l}\cdot\text{mol}^{-1}$	8.4

(续表)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 (ppm)
T=273.15K; p=100kPa	$V_m$	22.711 08(19)	$l \cdot \text{mol}^{-1}$	8.4
洛喜密脱常 数, $N_A/V_m$	$n_0$	2.686 773(23)	$10^{25} \text{m}^{-3}$	8.5
萨枯尔-特 武洛德常数 (绝对熵常 数)** $\frac{5}{2} + \ln$ $[(2\pi m_p kT_1 /$ $h^2)^{3/2} kT_1 /$ $p_0]$				
$T_1 = 1\text{K}, p_0$ $= 100\text{kPa}$ $p_0 = 101325\text{Pa}$	$S_0/R$	-1.151 693(21) -1.164 856(21)		18 18
斯忒藩-玻 耳兹曼常 数, $(\pi^2/60)$ $k^4/h^3 c^2$	$\sigma$	5.670 51(19)	$10^{-8} \text{W} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	34
第一辐射常 数, $2\pi hc^2$	$c_1$	3.741 774 9(22)	$10^{-16} \text{W} \cdot$ $\text{m}^2$	0.60
第二辐射常 数, $hc/k$	$c_2$	0.014 387 69(12)	$\text{m} \cdot \text{K}$	8.4
维恩位移定 律常数, $b$ $\lambda_{\text{max}} T = c_2 /$ 4.965 114 23	$b$	2.897 756(24)	$10^{-3} \text{m} \cdot$ $\text{K}$	8.4

注: 本表根据最小二乘法平差得出, 括号内的数字是给定值最后几位数的一个标准偏差的不确定度。

\* 本表所列的是中子磁矩的标量大小。中子磁偶极矩的方向与质子相反, 它相应于与自旋负电荷分布相关的偶极矩。矢量和  $\mu_d = \mu_p + \mu_n$  是近似满足的。

\*\* 相对原子量为  $A_r$  的理想单原子气体的熵, 可表示为  $S = S_0 + \frac{3}{2} R \ln A_r - R \ln(p/p_0) - \frac{5}{2} R \ln(T/T_0)$ 。

## 参考书目

- [1] 《量和单位》—中华人民共和国国家标准, 中国标准出版社(1994)
- [2] 《物理学名词》全国自然科学名词审定委员会科学出版社(1996)
- [3] 《中国大百科全书——物理学》 中国大百科全书出版社(1987)
- [4] 《普通物理学(第五版)》 程守洙、江之永主编, 胡盘新等修订 高等教育出版社(1998)
- [5] 《新概念物理教程——力学》 赵凯华、罗蔚茵编著 高等教育出版社(1995)
- [6] 《新概念物理教程——热学》 赵凯华、罗蔚茵编著 高等教育出版社(1998)
- [7] 《电磁学》 赵凯华、陈熙谋编 人民教育出版社(1978)
- [8] 《光学》 赵凯华、钟锡华编 北京大学出版社(1984)
- [9] 《原子物理学》(第二版) 杨福家著 高等教育出版社(1990)
- [10] 《中学教学全书——物理卷》 张瑞琨主编 上海教育出版社(1996)
- [11] 《物理学手册》 巴钦斯基等 商务印书馆(1956)
- [12] 《物理学常用数表》(第二版) 饭田修一等科学出版社(1987)