



第一章

抛体运动

运动是普遍的，也是多样的。仔细观察生活和生产中的各种运动，我们会发现除了直线运动，更为普遍的是曲线运动。如投出去的铅球、纸飞机等在空中所做的都是曲线运动。在生活中我们都有这样的经验：投篮时不能把球直接对准球篮，而是要斜向上投出，才能使球落入球篮。这些常见物体运动的背后，有着怎样的运动规律呢？

在物理学中，常常将复杂问题转化为简单问题进行研究。对于曲线运动，我们可以利用运动合成与分解的方法，将其转化为直线运动进行研究。

这一章我们将学习曲线运动的特征和物体做曲线运动的条件，通过实验探究平抛运动的规律，学会运用运动合成与分解的方法分析生活和生产中的抛体运动。

第一节

曲线运动



在必修第一册的学习中，我们探究的物体运动轨迹以直线为主，而在生产和生活中，不少物体的运动轨迹却是弯曲的。能否借鉴研究直线运动规律的方法来探究这一类运动的规律？

认识曲线运动

运输货物时，货物沿着弯曲的传送带前进；坐过山车时，会经历一个又一个的急转弯；骑自行车时，我们常常需要转弯，如图 1-1-1 所示。



图 1-1-1 生产和生活中的曲线运动

通过观察可以发现，这些物体的运动轨迹都是曲线，我们将这类运动称为**曲线运动** (curvilinear motion)。

生产和生活中的运动，都可根据其运动轨迹的特点，归入直线运动或曲线运动加以研究。

物体做曲线运动的速度方向

做直线运动时，物体的速度方向始终在其运动轨迹的直线方向上。那么，物体做曲线运动时的速度方向有什么规律呢？

观察与思考

如图 1-1-2 所示, 将塑料板切割成 6 块, 放置在水平平铺的白纸上, 组成弯曲的凹槽轨道. 把蘸有墨水的小球从入口 O 处滚入轨道, 让小球沿着轨道运动. 当小球从出口 C 处离开轨道时, 会在白纸上留下印迹, 记录小球经过出口 C 时的运动方向. 逐段拆去轨道, 将出口分别改为 B 和 A , 用同样的方法记录小球经过出口 B 和 A 时的运动方向.

思考小球在经过 A 、 B 、 C 三个出口时的运动方向与曲线轨道的形状有什么关系.

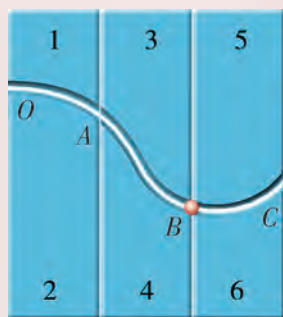


图 1-1-2 实验装置示意图

在上述实验中, 小球离开轨道出口后, 在白纸上留下的印迹呈一条直线, 并且与曲线轨道相切. 这说明小球在曲线轨道出口处的运动方向沿着该点的切线方向.

从理论上分析, 如图 1-1-3 所示, 若质点沿曲线从点 A 运动到点 B , 过 A 、 B 两点作直线, 这条直线称为曲线的割线. 根据位移和速度的知识, 质点在点 A 和点 B 之间的位移和平均速度的方向, 都是从点 A 指向点 B . 设想点 B 逐渐向点 A 移动, 割线 AB 不断变化, 当点 B 非常接近点 A 时, 割线 AB 就与过点 A 的切线重合, 点 A 的速度方向与点 A 的切线方向一致. 这种运用“以直代曲”逐步逼近的方法, 在研究许多物理概念时经常用到.

实验和理论分析表明, 在曲线运动中, 质点在某一位置的速度方向与曲线在这一点切线方向一致.

如图 1-1-4 所示, 由于曲线上各点的切线方向不同, 所以曲线运动的速度方向时刻都在改变. 速度是矢量, 既有大小, 又有方向. 只要速度的方向发生变化, 速度矢量就发生变化, 即具有加速度. 所以曲线运动是一种变速运动.

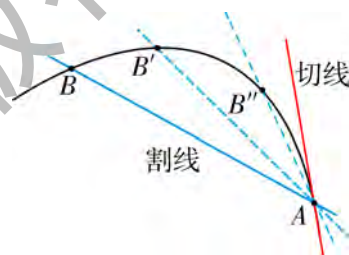


图 1-1-3 曲线的割线与切线

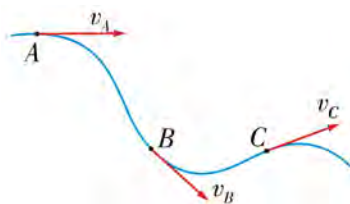


图 1-1-4 物体做曲线运动在各点的速度方向

物体做曲线运动的条件

物体需要满足什么条件才会做曲线运动呢? 从前面的分析可知, 物体做曲线运动时具有加速度, 根据牛顿第二定律, 此时物体所受合外力不为零. 下面从物体的运动轨迹与物体所受合外力的关系来探究物体做曲线运动需要满足的条件.



实验与探究

如图 1-1-5 所示, 让钢珠蘸上墨水, 使其在水平纸面上滚动并做直线运动. 探究磁铁要在什么方向上吸引钢珠, 钢珠才会偏离原来的运动方向做曲线运动.

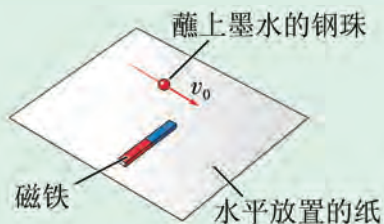


图 1-1-5 实验示意图

上述实验探究发现, 当钢珠受到磁铁的吸引力与钢珠的运动方向不在同一条直线上时, 钢珠将偏离原来的运动方向做曲线运动.

实验表明, 当物体所受合外力的方向与它的速度方向不在同一直线上时, 物体做曲线运动.



讨论与交流

1. 如图 1-1-6 所示是乒乓球的频闪照片, 分析乒乓球为什么会做曲线运动, 画出分析示意图.

2. 观察生活中还有哪些做曲线运动的例子, 分析该例子中的物体为什么做曲线运动.

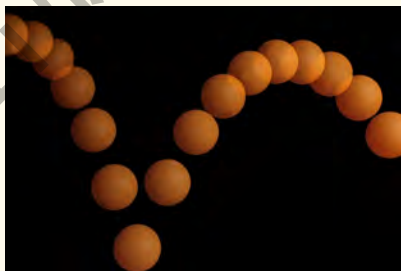


图 1-1-6 乒乓球运动频闪照片

资料活页

航展飞行表演中的曲线运动

中国国际航空航天博览会简称“中国(珠海)航展”或“珠海航展”, 是世界五大最具国际影响力的航展之一, 每两年在广东省珠海市举办一届. 近年来, 珠海航展发展为集专业展览与大众科普于一体的活动, 吸引了来自世界各地的观众参与.

如图 1-1-7 所示是航展飞行表演中的几个精彩镜头. 飞机喷出的烟雾将飞机做曲线运动的轨迹显现出来, 充分展示了飞行员精湛的飞行技术. 飞行员通过调整升降舵和副翼等方式, 改变飞机受到的动力、重力和空气作用力的合力方向, 使合力与飞机速度方向形成夹角, 从而使飞机做曲线运动.



图 1-1-7 航展中飞行表演的精彩镜头

练习

1. 关于曲线运动，下列说法是否正确？为什么？

- (1) 曲线运动一定是变速运动.
- (2) 物体做曲线运动时，加速度一定不为零，但可以为恒量.
- (3) 物体做曲线运动时，不可能受恒力的作用.
- (4) 物体做曲线运动时，加速度方向与速度方向可能在同一直线上.

2. 跳水运动是一项优美的水上运动. 中国跳水队在国际跳水竞赛中屡创佳绩，被誉为跳水“梦之队”. 一名老师用计算机软件对一个运动员采用向前翻腾动作跳水的视频进行处理后，画出了该运动员在空中完成动作时头部的二维运动轨迹，如图 1-1-8 所示. 在图中画出运动员头部在 A、B、C、D 各点的速度方向.

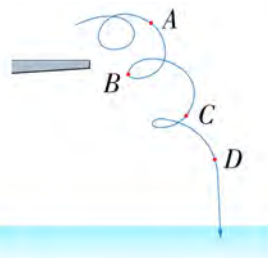


图 1-1-8

3. 在足球场上罚任意球时，高水平运动员踢出的足球在飞行中绕过“人墙”，飞向球门，使守门员难以扑救. 如图 1-1-9 所示是某次射门时足球的运动轨迹. 在图中画出足球在点 A 的速度方向和所受合外力的大致方向.



图 1-1-9

第二节 运动的合成与分解



曲线运动相对直线运动而言较为复杂，而把复杂问题转化为简单问题，是物理学中处理问题常用的研究思想。那么，如何把曲线运动转化为简单的直线运动进行研究呢？运动的合成与分解是解决这一问题的基本方法。

运动的分析

我们前面已经学过，根据作用效果的等效性，可以对力进行合成与分解。类比这一方法，我们也可以根据运动效果对运动进行分析。

如图 1-2-1 所示，用小锤击打弹性金属片，使球沿水平方向飞出。球从抛出点 A 沿曲线路径运动到落地点 D 。从运动的效果来看，这一过程可以分解为两个同时进行的分运动，一个是在水平方向上从点 A 到点 B 的直线运动，另一个是在竖直方向上从点 A 到点 C 的直线运动。实际发生的运动可以看成上述两个分运动合成的结果。

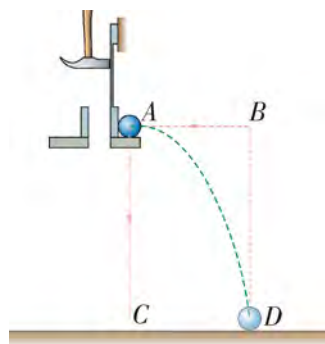


图 1-2-1 小球运动的分析

分运动之间是否相互影响呢？在上述实验中，小球从抛出点飞出后，在竖直方向上只受到重力的作用，因此可以确定小球在竖直方向做自由落体运动。为了探究运动的独立性，我们尝试增加一个做自由落体运动的小球作为参照，比较水平方向运动的变化是否影响竖直方向的运动。

观察与思考

如图 1-2-2 所示，用小锤击打弹性金属片，使球 1 沿水平方向飞出，完全相同的球 2 被同时松开做自由落体运动。比较两球是否同时落地。

改变小锤击打金属片的作用力大小，使球 1 沿水平方向飞出初速度的大小发生变化。重复上述实验，以球 2 为参照，比较球 1 和球 2 是否还是同时落地。

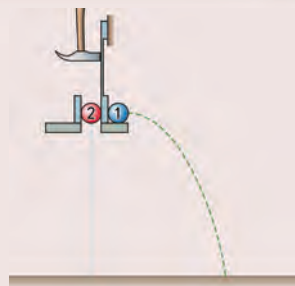


图 1-2-2 实验示意图

通过上述实验发现，虽然两球的运动轨迹不同，但无论球 1 水平飞出的初速度多大，两球几乎总是同时落地。这表明球 1 在竖直方向上的分运动是自由落体运动，且不会受到水平方向分运动的影响，球 1 在竖直和水平两个方向上的分运动具有独立性。

位移和速度的合成与分解

位移是描述运动的重要物理量。类比力的合成与分解的方法，位移是否可以合成与分解？下面通过实验进行探究。



实验与探究

如图 1-2-3 所示，在一张白纸上，让铅笔笔尖靠着直尺，沿直尺边沿横向移动，同时向前平推直尺，使其沿纵向移动。把直尺向前推一段距离之后，铅笔会画出一条不规则的曲线。

连接这段曲线的首尾，便得到笔尖走过的位移。再画出笔尖的横向位移和纵向位移。重复做几次实验，看看上述三个位移之间存在怎样的关系。

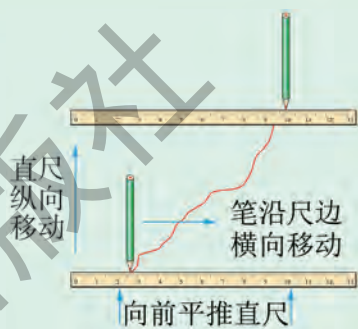


图 1-2-3 实验示意图

在上述探究实验中，笔尖走过的位移正是由笔尖的横向位移和纵向位移构成的平行四边形的对角线。

研究表明，和力的合成与分解类似，位移的合成与分解同样遵循平行四边形法则，如图 1-2-4 所示。由位移、时间和速度的关系可知，速度的合成与分解也同样遵循平行四边形法则，如图 1-2-5 所示。

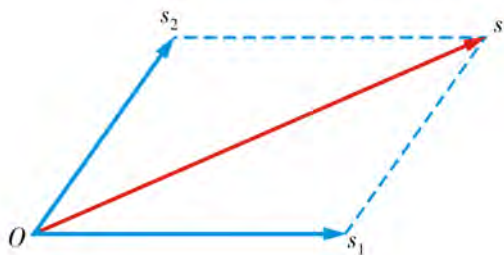


图 1-2-4 位移的合成与分解

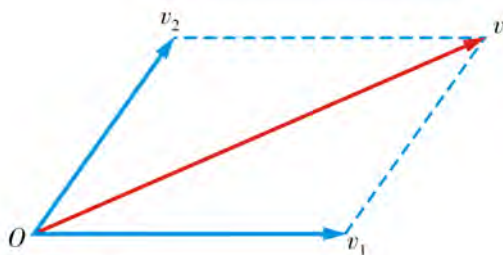


图 1-2-5 速度的合成与分解

我们可以应用运动合成与分解的方法，通过位移和速度的合成与分解，把复杂运动转化为简单运动进行研究。

小船过河模型是运动合成与分解的典型应用. 随着时代的发展, 现代化的渡轮替代了靠人工撑桨的传统摆渡小船, 但小船过河模型依然具有指导意义, 其中蕴含的物理建模与分类讨论的思想, 对于解决各类问题都具有借鉴价值.

例题: 小船摆渡曾是人们过河的主要方式. 设河的宽度为 d , 河水匀速流动, 流速为 v_1 , 小船在静水中的运动速度为 v_2 , 且 $v_2 > v_1$.

(1) 要使小船渡河的时间最短, 小船应如何渡河? 最短时间是多少? 到达对岸时小船的航程是多少?

(2) 要使小船渡河的航程最短, 小船应如何渡河? 渡河所用的时间是多少? 最短的航程是多少?

分析: 小船渡河所做的运动可以看成两个分运动的合成: 一个是小船自身的运动, 另一个是随河水流动的运动. 根据运动的独立性原理, 小船渡河的时间不会因水流速度的变化而改变, 而只与小船在静水中的速度有关. 绘制小船速度的合成示意图, 再根据需求选择小船合适的运动方向, 从而求得小船渡河所用时间和航程.

解: (1) 要使小船渡河的时间最短, 小船在静水中的速度应全部用于过河, 因此船头的方向应垂直于对岸. 小船速度的合成如图 1-2-6 所示, 则

$$\text{最短渡河时间 } t_{\min} = \frac{d}{v_2},$$

$$\text{小船的速度 } v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}.$$

故到达对岸时小船的航程

$$s = vt_{\min} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \frac{d}{v_2}.$$

(2) 要使小船渡河的航程最短, 小船的合速度方向应垂直于对岸, 即船头需向上游转过一定的角度. 因为 $v_2 > v_1$, 小船速度的合成如图 1-2-7 所示, 则

$$\text{小船的速度 } v' = \sqrt{v_2^2 - v_1^2}.$$

最短的航程即为河的宽度 d ,

故渡河所用的时间

$$t' = \frac{d}{v'} = \frac{d}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}.$$

船头方向与对岸的夹角可通过 $\cos\theta = \frac{v_1}{v_2}$ 求得.

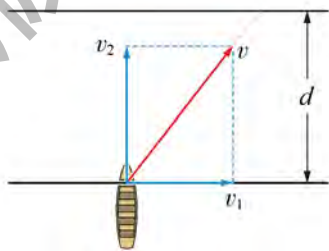


图 1-2-6 船头垂直于对岸

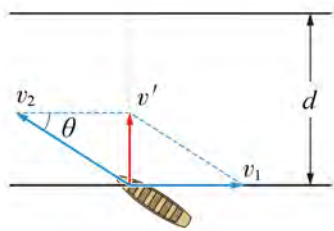


图 1-2-7 小船的速度方向垂直于对岸



练习

1. 小明骑自行车上学，在一段平直的公路上以 4 m/s 的速度向正东方向行驶。天气预报报道当时刮的是正北风，风速也是 4 m/s 。求小明感觉到的风速的方向和大小。

2. 我国少数民族运动会上，设有跑马射箭项目（如图 1-2-8 所示）。运动员需骑马在直线跑道上奔驰，弯弓放箭，射击侧方的固定靶标。若运动员骑马以速度 v_1 沿直线跑道奔驰，运动员静止时射出的弓箭的速度为 v_2 ，直线跑道到固定靶标的最短距离为 d ，要想在最短的时间内射中目标，运动员放箭处到靶标的距离应该为多少？

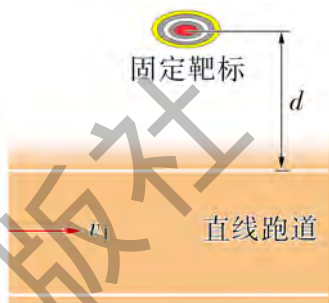


图 1-2-8

3. 如图 1-2-9 (a) 所示，在一端封闭、长约 1 m 的玻璃管内注满清水，水中放一个红蜡做成的小圆柱体并塞紧管口。如图 1-2-9 (b) 所示，将玻璃管倒置，将看到除了开始的一小段位移，蜡块会沿玻璃管以近似恒定的速度上升。如图 1-2-9 (c) 所示，在蜡块上升的同时将玻璃管水平向右匀速移动。

(1) 以地面为参考系，在该过程中蜡块做什么运动？为什么？

(2) 设计实验方案，测量在玻璃管水平向右匀速移动过程中蜡块的速度大小。

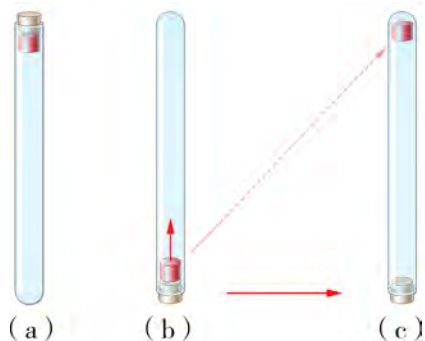


图 1-2-9

第三节

平抛运动

如图1-3-1所示,沿水平方向扔出一块橡皮,或者将一个小球从水平桌面以一定的初速度推离边沿,可以看到它们做曲线运动的轨迹是相似的.本节将探讨这一类常见曲线运动的规律.

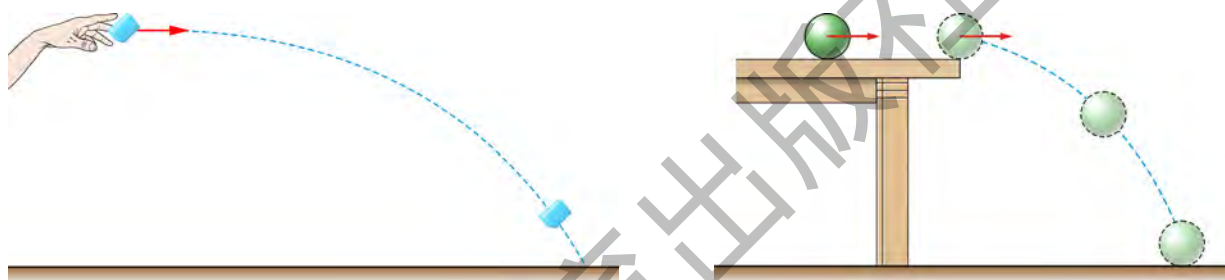


图 1-3-1 物体沿水平方向抛出

探究平抛运动

将物体以一定的初速度沿水平方向抛出,仅在重力作用下物体所做的运动称为**平抛运动**.与自由落体运动相似,平抛运动同样是一个忽略了空气阻力的理想化模型.这体现了物理学解决问题时抓住主要因素、忽略次要因素的研究思想.

从平抛运动的定义可知,在本章第二节图1-2-2的探究实验中,球1被弹性金属片水平击出后所做的运动正是平抛运动.根据运动合成与分解的方法,如图1-3-2所示,球1所做的平抛运动,可以分解为竖直和水平两个方向的分运动进行研究.球1与球2同时落地,表明在竖直方向上球1的分运动是自由落体运动.球1在水平方向上并没有受到力的作用,根据牛顿第一定律,球1在水平方向上的分运动是匀速直线运动.由此,我们可以初步得到平抛运动的特点.下面通过实验对平抛运动的特点做进一步探究.

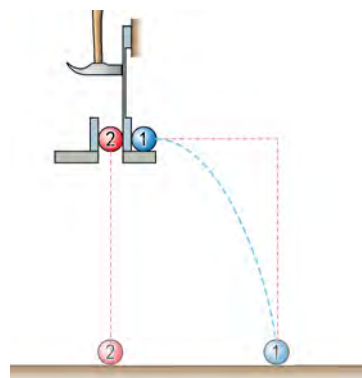


图 1-3-2 分析示意图



如图 1-3-3 所示, 在一块竖直放置的平板上固定着两个相同的弧形轨道 A 和 B , 用于发射钢球. 两弧形轨道出口处水平, 其上分别安装了一个电磁铁 C 和 D . 在轨道 A 出口处有一个碰撞开关 S , 可控制电磁铁 E 电源的通断.

从轨道 A 射出的钢球做平抛运动, 从轨道 B 射出的钢球做匀速直线运动, 从电磁铁 E 处释放的钢球做自由落体运动.

1. 研究平抛运动水平方向分运动的特点

(1) 使电磁铁 C 和 D 分别相对各自轨道出口水平线处于相同高度. 把两个钢球分别吸在电磁铁 C 、 D 上. 切断电源, 使两个钢球以相同的初速度同时水平射出.

(2) 改变电磁铁 C 、 D 与各自轨道出口水平线的相对高度, 并确保高度相等.

(3) 多次重复以上步骤. 观察实验现象, 并分析平抛运动水平方向分运动的特点.

2. 研究平抛运动竖直方向分运动的特点

(1) 把两个钢球分别吸在电磁铁 C 、 E 上, 并确保电磁铁 E 上的钢球与轨道 A 出口处于同一高度. 释放轨道 A 的钢球. 钢球在水平出口处碰撞开关 S , 切断电磁铁 E 的电源, 使钢球从电磁铁 E 处释放.

(2) 改变电磁铁 E 的位置, 让其从 N 向 M 移动.

(3) 多次重复以上步骤. 观察实验现象, 并分析平抛运动竖直方向分运动的特点.

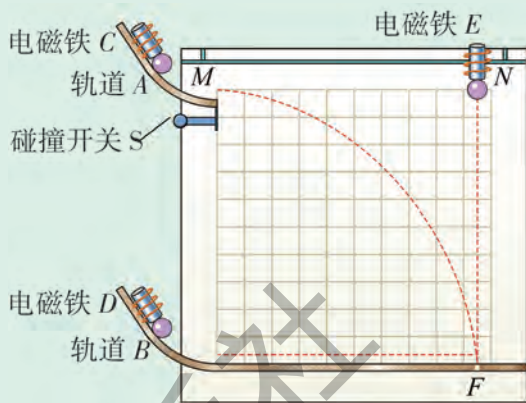


图 1-3-3 平抛运动实验器

在上述探究实验中, 当电磁铁 C 、 D 上的钢球同时释放时, 两个钢球分别做平抛运动和匀速直线运动, 并最终发生碰撞. 这表明做平抛运动的钢球在水平方向上的分运动是匀速直线运动. 当同时释放电磁铁 C 、 E 上的钢球时, 两个钢球分别做平抛运动和自由落体运动, 并最终同样发生碰撞. 这表明做平抛运动的钢球在竖直方向上的分运动是自由落体运动.

研究表明, 平抛运动在水平方向的分运动是匀速直线运动, 在竖直方向的分运动是自由落体运动. 运用运动合成与分解的方法, 我们可以把比较复杂的平抛运动分解为两个简单的直线运动来进行研究.

我们也可以利用频闪照相的方法, 每隔相等时间曝光一次, 在同一张照片上记录做平抛运动的物体在不同时刻的位置, 以更精确地研究平抛运动的特点.



讨论与交流

如图 1-3-4 所示是两个小球分别做平抛运动和自由落体运动的频闪照片。

(1) 如何利用这张频闪照片, 证明平抛运动竖直方向的分运动是自由落体运动?

(2) 如何利用这张频闪照片, 证明平抛运动水平方向的分运动是匀速直线运动?

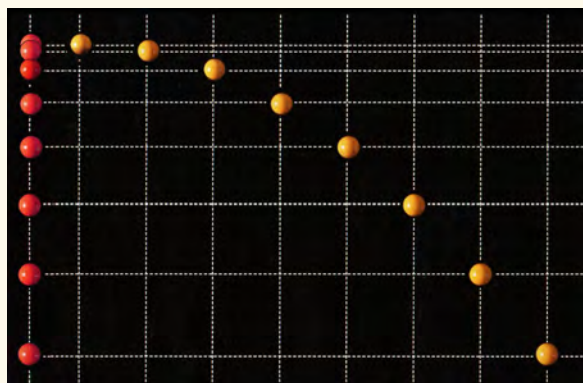


图 1-3-4 平抛运动与自由落体运动的频闪照片

平抛运动的规律

建立如图 1-3-5 所示的直角坐标系. 以抛出点为坐标原点 O , 以水平方向为 x 轴, 正方向与初速度 v_0 的方向相同; 以竖直方向为 y 轴, 正方向竖直向下. 则物体在任一时刻 t 的位置坐标公式为

$$x = v_0 t \quad (1.3.1)$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (1.3.2)$$

根据这两个公式求出任一时刻物体的坐标, 用平滑曲线把它们连接起来, 就得到平抛运动的轨迹. 这个轨迹是一条抛物线, 如图 1-3-5 所示.

物体以初速度 v_0 做平抛运动, 经时间 t 到达点 A . 如图 1-3-6 所示, 物体在点 A 的速度方向沿点 A 的切线方向, 其水平分速度 v_x 和竖直分速度 v_y 分别为

$$v_x = v_0 \quad (1.3.3)$$

$$v_y = g t \quad (1.3.4)$$

此时物体在点 A 速度的大小 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, 方向可以用合速度 v 的方向与 x 轴的夹角 θ 表示, 即 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$.

式 (1.3.1) 至式 (1.3.4) 描述了物体做平抛运动的规律. 下面通过例题体会上述规律的应用.

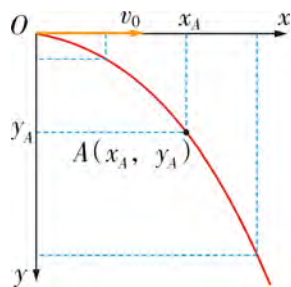


图 1-3-5 平抛运动的轨迹

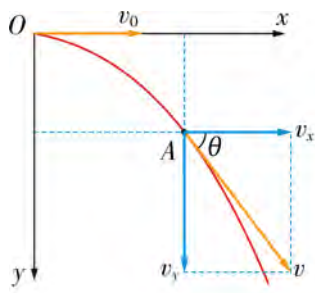


图 1-3-6 平抛运动速度的分解

例题：当灾害发生时，有时会利用无人机运送救灾物资。如图 1-3-7 所示，一架无人机正准备向受灾人员空投急救用品。急救用品的底面离水面高度 $h = 19.6 \text{ m}$ 。无人机以 $v = 10 \text{ m/s}$ 的速度水平匀速飞行。若空气阻力忽略不计，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。



图 1-3-7 无人机投放救灾物资

(1) 为了使投下的急救用品落在指定地点，无人机应该在离指定地点水平距离多远的地方进行投放？

(2) 投放的急救用品落到水面上时，速度的大小是多少？

分析：急救用品离开无人机时具有与无人机相同的水平速度，且只受重力作用。因此急救用品做平抛运动，在水平方向上做匀速直线运动，在竖直方向上做自由落体运动，并且两个分运动经历时间相同。末速度为两个分速度的矢量和。

解：(1) 急救用品做平抛运动，在竖直方向上做自由落体运动，有

$$h = \frac{1}{2}gt^2,$$

$$\text{得 } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

急救用品在水平方向上做匀速直线运动，在时间 t 内的水平位移

$$x = v_x t = v \sqrt{\frac{2h}{g}} = 10 \times \sqrt{\frac{2 \times 19.6}{9.8}} \text{ m} = 20 \text{ m}.$$

即无人机应在离指定地点水平距离 20 m 处投放急救用品。

(2) 设急救用品落到水面上时竖直方向速度的大小为 v_y ，根据匀变速直线运动速度与位移的关系，有

$$v_y^2 = 2gh,$$

急救用品落到水面上时，速度的大小

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_x^2 + 2gh} = \sqrt{10^2 + 2 \times 9.8 \times 19.6} \text{ m/s} = 22 \text{ m/s}.$$



实践与拓展

我们可以设法描绘出物体做平抛运动的轨迹，然后通过轨迹分析平抛运动的特点。

如图 1-3-8 所示，把坐标纸和复写纸叠放在一起压入竖直平板纸夹内，使接球槽上升到合适高度。把钢球吸在固定的电磁铁上，释放钢球，钢球沿着导轨凹槽滚下并被水平抛出。钢球最终落在接球槽上，通过复写纸在坐标纸上记录落点位置。将接球槽逐次下降，重复上述操作，即可得到钢球的一系列运动点迹。

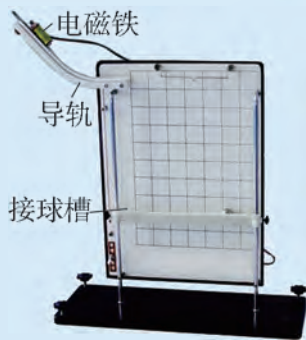


图 1-3-8 平抛运动实验器

用平滑的曲线将各点连接起来，就得到钢球做平抛运动的轨迹。

做一做并思考以下问题：

- (1) 如何保证钢球抛出后的运动是平抛运动？
- (2) 利用所绘制的钢球运动轨迹，如何计算钢球被抛出时的初速度？
- (3) 利用平抛运动的轨迹，还能进行哪些研究？

抛体运动研究发展历程

抛体运动作为生活和军事上常见的现象，自古以来就是自然哲学探索者们研究的主题。

1. 亚里士多德对抛体运动的研究

古希腊学者亚里士多德把运动分为自然运动和强迫运动，如重物下落与星辰运动是自然运动，抛体等需要外力推动的运动是强迫运动。那么，使物体离开推动者后仍能运动的外力是什么？亚里士多德认为，物体向前运动排开空气，在物体后面造成一个虚空；周围的空气立即填补这个虚空，对物体形成一个向前的推力。物体后面的空气给予推动，前面的空气给予阻碍，在二者共同作用下，抛体的运动既是连续的又是有限的。

2. 中世纪前后对抛体运动的研究

公元6世纪，有学者提出质疑：若与物体直接接触的空气能使物体产生和维持运动，那么只要激发石头后面的空气，石头就可以运动了，这显然是不可能的。他以一个无形的力取代了空气的推动，并认为投掷者抛掷物体时，把无形的力注入物体中，且物体离开投掷者后，这种力仍然存在。

公元14世纪，一位学者发展出“冲力说”，把冲力设想为一个由推动者传给物体的动力。同样形状和大小铁与木头以同样的初速度抛出，铁因更稠密能储存更多的冲力，所以能对抗空气阻力，保持更长时间的运动，从而飞得更远。

3. 伽利略对抛体运动的研究

伽利略在前人研究的基础上，对抛体运动理论进行完善，他认为需要把运动和物体本身的属性分离开来，抛体运动应当是一种合成运动。他在著作《关于两门新科学的对话》中谈道：“设想任意一个质点沿水平面无摩擦地运动……如果这个平面是有限的，该质点就将穿过平面的边界，在它原先所做的匀速的、永恒的运动外，由于自身的重量而获得一个向下运动的倾向，产生的运动是一种水平匀速运动和另一种竖直加速运动的合成。”如图1-3-9所示，

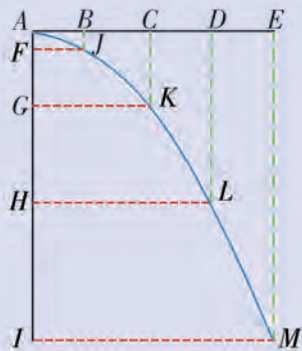


图1-3-9 平抛运动
轨迹分析

他还利用几何工具证明了抛体运动的轨迹是一条抛物线。

以亚里士多德对强迫运动的讨论作为起点，后续学者虽然对前人的抛体运动理论持有反对意见，但都跳不出为运动找动力的观念。伽利略提出的新观念“所要研究的不是运动为什么发生，而是运动怎样发生”，将抛体运动的研究引向了正确的方向。自然科学正是在这样一种继承与批判中向前发展。伽利略所运用的思想实验与数学方法相结合的研究方法影响至今，值得我们在学习中借鉴。



练习

1. 如图 1-3-10 所示，某人射箭时，若将箭瞄准靶心沿水平方向射出，弓箭能射中靶心吗？为什么？

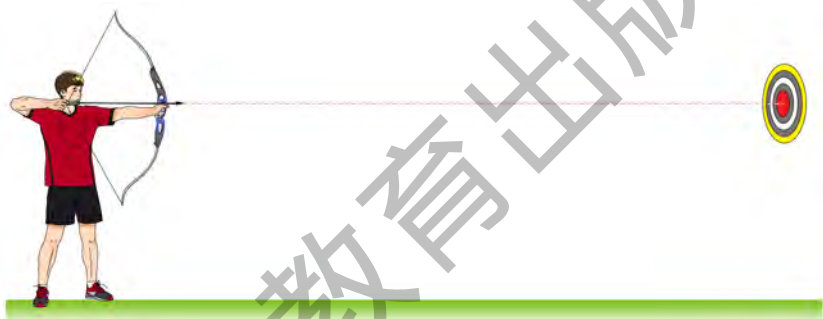


图 1-3-10

2. 如图 1-3-11 所示是小球做平抛运动的频闪照片的一部分。照片中只拍了小球运动过程中的前四个位置，根据平抛运动的规律，在图中画出小球被拍下的第五个位置。
3. 如图 1-3-12 所示，一名运动员欲骑车越过宽度 $d = 2\text{ m}$ 的壕沟 AB ，现已知两沟沿的高度差 $h = 0.4\text{ m}$ 。求车速至少多大才能安全越过壕沟。（ $g = 10\text{ m/s}^2$ ）

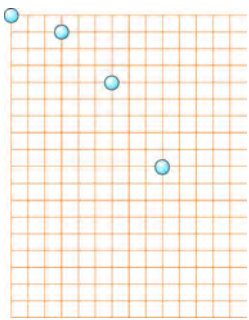


图 1-3-11

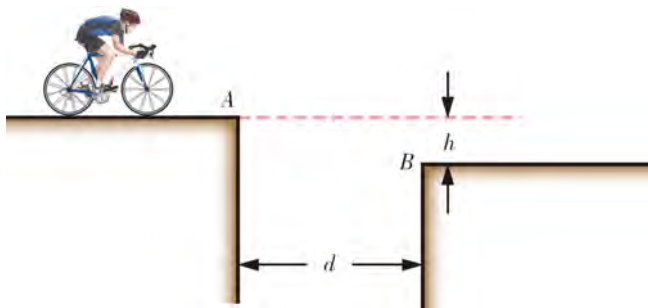


图 1-3-12

第四节 生活和生产中的抛体运动

将物体以一定的初速度向空中抛出，仅在重力作用下物体所做的运动称为**抛体运动** (projectile motion)。根据初速度方向是竖直向上、竖直向下、水平或与水平方向成一定的夹角，抛体运动可分为竖直上抛、竖直下抛、平抛和斜抛。它们在生活和生产中都有着广泛的应用。

喷泉

公园、广场等场所常常能见到喷泉，其中有的喷泉形成高高的水柱，有的喷泉形成多姿的弧线，令人赏心悦目。那么，喷泉形成这些形态可能与什么因素有关呢？

试建立物理模型对柱形喷泉进行分析。如图 1-4-1 所示，喷泉水柱由无数的水珠构成。如果忽略水珠在运动过程中受到的空气阻力，则水珠仅受重力作用，可将柱形喷泉中水珠的运动视为竖直上抛运动。

设喷泉水柱高度为 h ，水珠初速度大小为 v_0 ，重力加速度为 g 。取竖直向上为正方向，以水珠从喷出至到达最高点为研究过程。根据匀变速直线运动速度与位移的关系，有

$$v_t^2 - v_0^2 = 2(-g)h$$

水珠到达最高点时 $v_t = 0$ ，由此得出水柱高度

$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

从上式可知，对于柱形喷泉，它的高度主要由喷头的出水速度决定。



图 1-4-1 柱形喷泉



讨论与交流

1. 设计方案，估算柱形喷泉的水从喷出到落回喷出处所经历的时间。
2. 对于弧形喷泉（如图 1-4-2 所示），应如何建构物理模型进行研究？



图 1-4-2 弧形喷泉

传送带输送

传送带广泛应用于食品加工、冶金工业、矿石开采、货物运输和电子生产等各行各业,具有输送能力强、结构简单且易于维护、便于程序化控制等优点.在自动化生产中,常常需要利用传送带将物品较准确地抛落到相应的位置,因此需要应用抛体运动的相关知识.

例题:如图1-4-3所示是食品加工厂生产和包装饺子的一道工序,水平传送带的速度可调节.为了保证饺子能够落在水平传送带下方的槽内,请设计方案,估算水平传送带的运转速度范围.

分析:若空气阻力忽略不计,饺子离开水平传送带后做平抛运动,可根据平抛运动的公式,求出初速度的表达式,再测量相应的数值,根据该表达式进行估算,由此设计合理的生产方案.

解:选取饺子为研究对象,忽略空气阻力,饺子离开水平传送带后将做平抛运动.

设水平传送带的运转速度为 v_0 ,即饺子做平抛运动的初速度为 v_0 ,设抛出点距离落点的高度为 h ,饺子到达落点前的水平位移为 x ,则

在竖直方向上,有 $h = \frac{1}{2}gt^2$,

在水平方向上,有 $x = v_0t$.

由以上两式,可得 $v_0 = x\sqrt{\frac{g}{2h}}$.

根据上式,设计方案如下:

第一步:分别测量从水平传送带抛出点边缘到下方接盘最外侧和最内侧的水平距离 x_{\max} 和 x_{\min} .

第二步:测量水平传送带抛出点距离接盘底部的高度 h .

第三步:将 x_{\max} 、 x_{\min} 和 h 代入式子 $v_0 = x\sqrt{\frac{g}{2h}}$,可求得合适的传送带运转速度范围为

$$x_{\min}\sqrt{\frac{g}{2h}} < v_0 < x_{\max}\sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

在实际生产中,物品离开传送带时的运动方式更多是斜抛运动,如图1-4-4所示.同学们可以尝试建构物理模型进行相应的分析,设计出更好的输送方案.



图1-4-3 饺子离开传送带后做平抛运动



图1-4-4 传送带输送玉米粒

跳远

跳远是国际田径竞赛中的重要项目，能锻炼身体、增强体质。那么，跳远的距离与什么因素有关呢？

如图 1-4-5 所示，把人体视作质点，人从起跳到落地，在忽略空气阻力的情况下，只受重力的作用，人体做斜抛运动。

借鉴探究平抛运动时运动合成与分解的方法，可以将斜抛运动分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的竖直上抛运动。初速度的分解如图 1-4-6 所示。应用运动合成与分解的方法可以描绘出跳远时的运动轨迹，如图 1-4-7 所示。



图 1-4-5 跳远

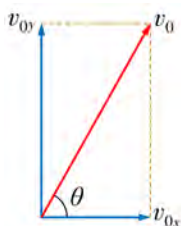


图 1-4-6 向上斜抛运动的速度分解

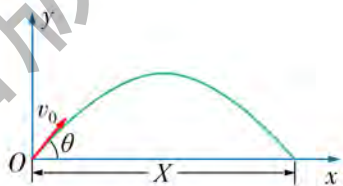


图 1-4-7 人跳远时的运动轨迹



讨论与交流

组建探究学习小组，通过实地跳远实验，探究影响跳远距离的因素。

(1) 尽量保持起跳速度方向与地面的夹角 θ 不变，通过以不同的速度助跑，改变起跳初速度的大小 v_0 ($v_1 < v_2 < v_3$)，并将三次从起跳到落地的运动轨迹绘制在图上，如图 1-4-8 所示，从中可以发现什么规律？



图 1-4-8 不同起跳速度的跳远轨迹

(2) 尽量保持起跳初速度的大小 v_0 不变，改变起跳速度方向与地面的夹角 θ ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$)，并将三次从起跳到落地的运动轨迹绘制在图上，如图 1-4-9 所示，从中可以发现什么规律？



图 1-4-9 不同起跳角度的跳远轨迹

讨论除了上述因素，还有哪些因素影响跳远的距离。

我们在建构物理模型来分析问题时，需要注意物理模型的适用条件。例如，斜抛运动是一个理想化模型，它的适用条件是只受重力的作用而忽略其他阻力。因此，上述对跳远运动的分析忽略了空气阻力的影响。若空气阻力不可忽略，则需要建构新的物理模型进行分析。



实践与拓展

通过网络检索、实地走访等途径，搜集一个生活或生产中抛体运动的例子（如农田喷雾灌溉或园林绿化喷淋，如图 1-4-10 所示）和相关的技术参数，应用抛体运动的知识对其设计进行分析和评价，并尝试提出相应的改进建议。



图 1-4-10 喷雾灌溉

弹道曲线

在实际情况下，物体做抛体运动时总会受到空气阻力的影响。空气阻力的大小除了与抛体本身的形状和空气的密度有关，还与抛体的速率有关。一般来说，物体的速率低于 200 m/s 时，可认为空气阻力与物体速率的平方成正比；当速率达到 $400 \sim 600 \text{ m/s}$ 时，空气阻力与速率的三次方成正比；在速率很大的情况下，阻力与速率的高次方成正比。例如，某型号加农炮所发射炮弹的初速度很大，在不计空气阻力时，其理想射程能达到 46 km ；而实际上由于空气阻力的影响，其射程却只有 13 km 左右。

图 1-4-11 中的虚线是在没有空气的理想空间中炮弹飞行的轨迹；实线是以相同的初速度和抛射角射出的炮弹在空气中飞行的轨迹，这种曲线叫作弹道曲线。由于空气阻力的影响，弹道曲线的升弧和降弧不再对称，升弧长而平伸，降弧短而弯曲。

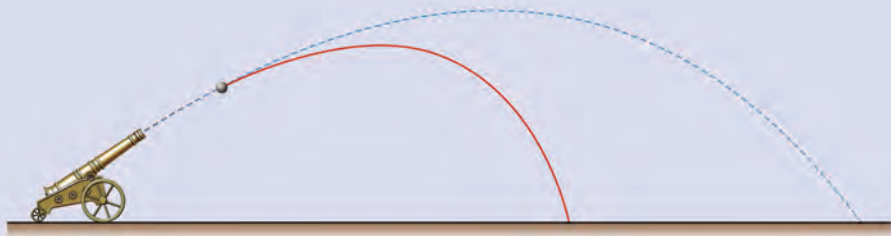


图 1-4-11 弹道曲线

弹道曲线规律只是弹道学最基础的知识. 弹道学的研究对象包括发射装药的点火、燃烧和高温高压气体对发射体的作用, 弹丸或其他发射体在空中的运动, 发射体对目标的作用等. 随着科学技术的发展, 弹道学的研究为民用工程领域提供了理论方法和应用技术.



练习

1. 纵跳测试仪是用来测试体能的一种仪器. 人用力从垫板上竖直跳起, 回落到垫板上, 此时仪器上会显示跳起的最大高度. 如果某人测量纵跳高度时, 仪器示数为 50 cm, 那么这个人的起跳初速度为多大? 他在空中的时间有多长?

2. 交通事故发生时, 车上的部分物品会因碰撞而脱离车体, 位于车上不同高度的物品散落到地面上的位置是不同的, 据此可求出碰撞瞬间汽车的速度. 如图 1-4-12 所示, 散落物品 A、B 分别从距地面高 H 和 h 的位置水平抛落, A、B 落地时相距为 L , 重力加速度为 g . 求碰撞瞬间汽车的行驶速度 v .

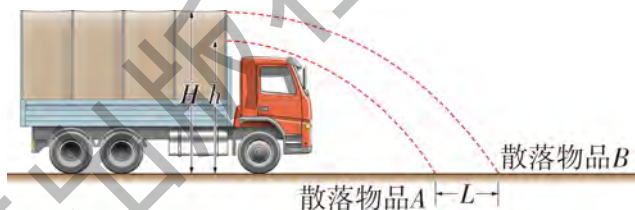


图 1-4-12

3. 飞镖是常见的一种娱乐活动. 如图 1-4-13 所示, 靶盘竖直放置, A、O 两点等高且相距 4 m. 将飞镖从点 A 沿 AO 方向掷出, 经 0.2 s 落在靶心正下方的点 B. 不计空气阻力, 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$. 求:

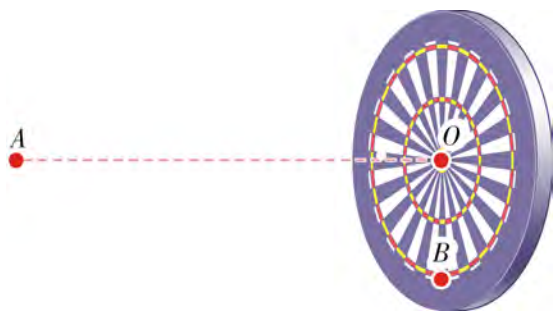


图 1-4-13

- (1) 飞镖从点 A 抛出时的速度.
- (2) 飞镖落点 B 与靶心 O 的距离.

(3) 如果要想让飞镖命中靶心 O, 根据本题所给的条件, 应如何调整投掷飞镖的方法?

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 抛体运动和曲线运动的区别与联系是什么？
2. 本章学习了哪些与曲线运动相关的物理模型？
3. 生活和生产中与曲线运动相关的应用例子有哪些？分析这些例子一般采用的思路是什么？
4. 除了本章探究平抛运动特点的实验方案，还有其他探究方案吗？试设计实验方案并开展实验探究。

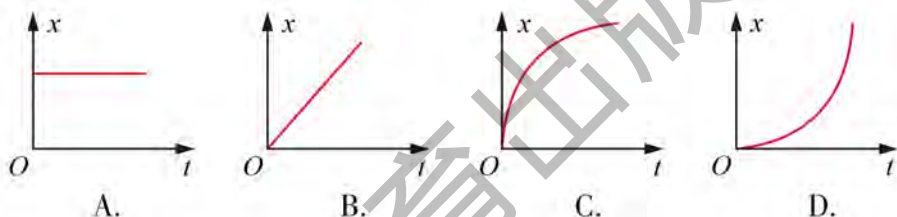
习题一

- 做曲线运动的物体，其物理量一定变化的是 ()。

A. 速率 B. 速度 C. 加速度 D. 合力
- 某质点做曲线运动，下列说法正确的是 ()。

A. 该质点可能不受力 B. 该质点可能处于平衡状态

C. 该质点的加速度一定不为零 D. 该质点的加速度可能为零
- 下列图像中，能正确描述平抛运动的水平位移与时间关系的是 ()。



4. “套圈圈”是许多人喜爱的一种游戏。如图 1-1 所示，小孩和大人站在同一竖直线上的不同高度先后水平抛出小圆环，且小圆环都恰好套中前方同一个物体。假设小圆环的运动可视为平抛运动，则 ()。

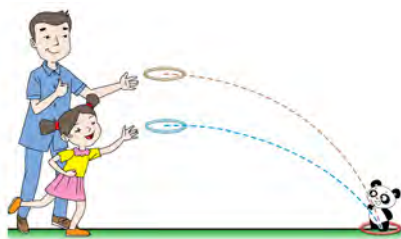


图 1-1

- 小孩抛出的圆环初速度较小
- 两人抛出的圆环初速度大小相等
- 小孩抛出的圆环运动时间较短
- 大人抛出的圆环运动时间较短

5. 如图 1-2 所示，某同学对着墙壁练习打乒乓球。若球与墙壁上的点 A 碰撞后沿水平方向弹离，恰好垂直拍面落在球拍的点 B 上。已知球拍与水平线的夹角 $\theta = 60^\circ$ ， A 、 B 两点间的高度差 $h = 1 \text{ m}$ 。忽略空气阻力，重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，则球刚要落到球拍上时，速度的大小为 ()。

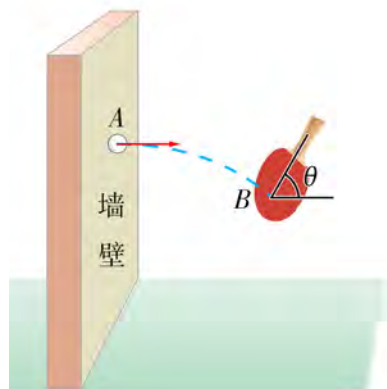


图 1-2

- $4\sqrt{5} \text{ m/s}$
- $2\sqrt{5} \text{ m/s}$
- $\frac{4}{3}\sqrt{15} \text{ m/s}$
- $2\sqrt{15} \text{ m/s}$

6. 物体以 25 m/s 的初速度做竖直上抛运动, 经过 _____ s 到达最高点, 它在第三秒内的位移为 _____ m . ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

7. 炮管斜向上倾斜, 与水平线的夹角为 60° , 炮弹从炮口射出时, 速度的大小为 1000 m/s , 此时炮弹水平方向的速度大小为 _____ m/s .

8. 课外实验小组的同学为了测定教学楼的高度, 他们确保实验区域无人员进出后, 在楼顶上水平抛出一小球. 测出小球从抛出到落地的时间为 2 s , 小球抛出的水平距离为 20 m . 忽略空气阻力, 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 教学楼的高度为 _____ m , 小球抛出时的初速度为 _____ m/s .

9. 如图 1-3 所示, 一块橡皮用细线悬挂于点 O , 现用一支铅笔贴着细线的左侧水平向右以速度 v 匀速移动, 运动过程中保持铅笔的高度不变, 悬挂橡皮的那段细线始终保持竖直. 在铅笔未碰到橡皮前, 橡皮在水平方向上做 _____ 运动, 在竖直方向上做 _____ 运动.

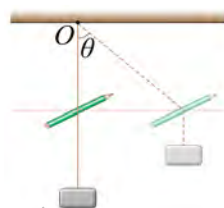


图 1-3

10. 某同学在做“探究物体的平抛运动”实验时, 让小球多次从斜槽上滚下, 并被水平抛出, 在坐标纸上依次记下小球的位置如图 1-4 所示 (点 O 为小球的抛出点).

(1) 在图中描出小球的运动轨迹.

(2) 图中某一点的位置有明显的偏离, 其产生的原因可能是小球从斜槽上滚下时的初始位置比其他几次偏 _____ (选填“高”或“低”).

(3) 该同学从图 1-4 中测得的三组数据如表 1-1 所示, 则小球做平抛运动的初速度 $v_0 =$ _____ m/s . ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

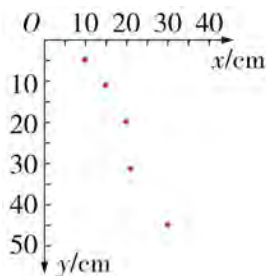


图 1-4

表 1-1

数据组	1	2	3
x/cm	10	20	30
y/cm	5	20	45

11. 摩托车飞越表演是一项惊险刺激的活动. 假设在一次飞越河流的表演中, 摩托车以 60 km/h 的速度离开平台, 成功落到对面的平台上, 测得两岸平台高度差为 5 m , 如图 1-5 所示. 若飞越过程中不计空气阻力, 摩托车可以看成质点, 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$. 求:



图 1-5

(1) 摩托车在空中的时长.

(2) 河流的最大宽度.

(3) 摩托车落地瞬间的速度.

12. 国家射击队在进行某项模拟训练时使用的装置如图 1-6 所示. 受训运动员处于高 $H = 20 \text{ m}$ 的塔顶, 在距塔水平距离为 l 的地面上有一个电子抛靶装置, 圆形靶以速度 v_2 被装置竖直向上抛出. 当靶被抛出的同时, 运动员立即用枪射击, 子弹初速度 $v_1 = 100 \text{ m/s}$. 若子弹沿水平方向射出, 不计人的反应时间、抛靶装置的高度及子弹在枪膛中的运动时间, 忽略空气阻力, 且靶可以看成质点. ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

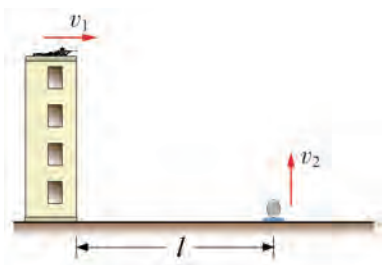


图 1-6

- (1) 当 l 如何取值时, 无论 v_2 为何值, 靶都不能被击中?
- (2) 若 $l = 100 \text{ m}$, $v_2 = 20 \text{ m/s}$, 试通过计算说明靶能否被击中.

13. 近年来, 我国各地都有组织游泳横渡江河的活动以倡导环保意识和体育精神. 在一次横渡珠江的游泳活动中 (如图 1-7 所示), 一名游泳爱好者以一定速率向对岸游去. 建构物理模型, 分析他到达对岸所耗时间受什么因素影响.



图 1-7

14. 根据平抛运动的原理设计实验方案, 测量弹射器弹丸的射出速度. 提供的实验器材有弹射器 (含弹丸, 如图 1-8 所示)、铁架台 (带夹具)、米尺.

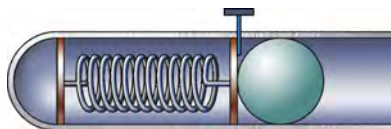


图 1-8

- (1) 画出实验示意图.
- (2) 在安装弹射器时, 应注意什么?
- (3) 实验中需要测量的物理量有哪些? 在示意图中用字母标出.
- (4) 求弹丸的射出速度表达式.

15. 在农田旁离地一定高度架有一水管, 如图 1-9 所示. 只用一把卷尺如何估算出水口在单位时间内流出的水量 (假设水从出水口沿水平方向均匀流出)? 结合平抛运动的知识, 设计测量方案, 并说明需测量的物理量.



图 1-9