GAOZHONG WULI BIJI JINGXUAN

梁 正 编著

高中物理笔记精选

下 册

大象出版社

高中物理笔记精选

下册

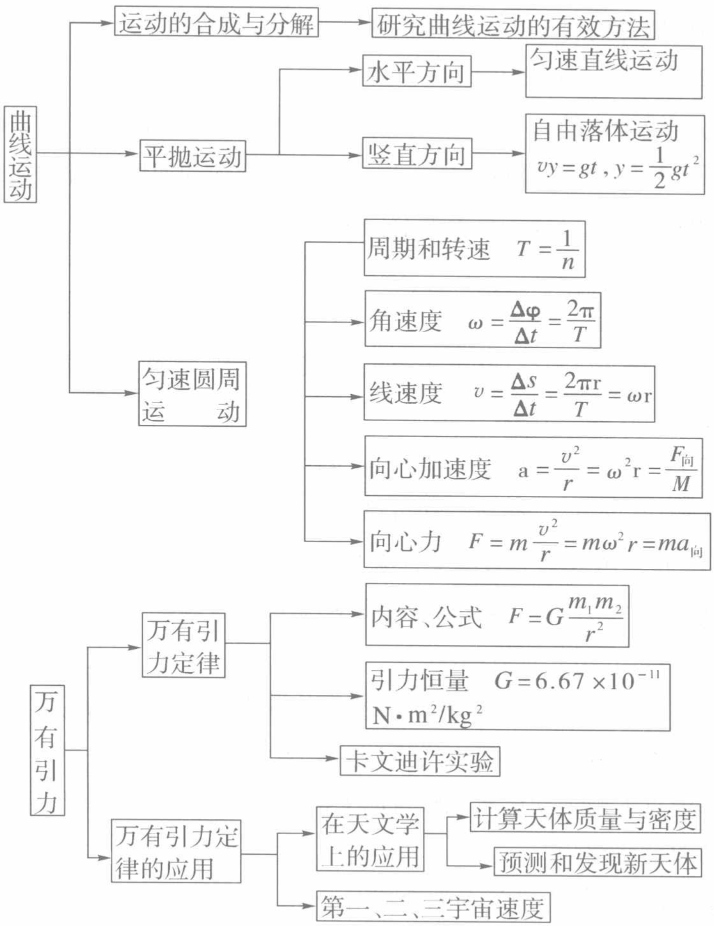
梁　正　编著

大象出版社

目　　录

第四单元　曲线运动　万有引力

一　知识梳理



1. 曲线运动

做曲线运动的物体其运动轨迹是一条曲线，它在某一点的速度方向就是曲线在那一点的切线方向. 做曲线运动的物体速度是变化的，因此，曲线运动是变速运动.

(1) 曲线运动的条件

物体所受的合外力与物体的速度不在一条直线上.

(2) 曲线运动的图象：

与直线运动的 $s-t(v-t)$ 图象不同，曲线运动的图象是平面直角坐标系中物体的运动轨迹，各点切线方向是物体的速度方向. 做曲线运动的物体在同一点最多只可能有两个速度.

2. 运动的合成与分解

运动的合成与分解就是矢量的合成与分解，涉及了位移、速度、加速度和力的合成与分解.

两个互相垂直方向上的直线运动合成后可能是直线运动，也可能是曲线运动；反过来，曲线运动可以分解为两个方向上的直线运动.

(1) 同一条直线上的运动合成与分解

同一直线上的两个运动合成或分解时，可以规定一个正方向，然后用正、负号来表示矢量方向.

①初速不为零的匀变速直线运动可看成速度为 v_0 的匀速直线运动和初速度为零的匀加速直线运动的合运动.

②竖直上抛运动可看成竖直向上的匀速运动和竖直向下的自由落体运动的合运动.

(2) 不同直线上的运动的合成与分解

不同直线上运动的合成与分解符合平行四边形法则.

3. 平抛运动

(1)特点:初速水平方向,受到恒力 $G = mg$ 的作用,恒力与初速度方向垂直.

(2)规律:设小球自 O 点出发,以初速 v_0 做平抛运动,经时间 t 到达 P 点时速度为 v,位移为 s.

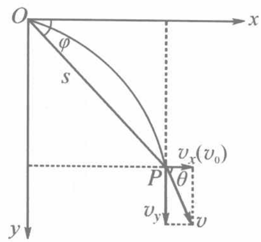


图 4－1

水平分速度　$v_x = v_0$

竖直分速度　$v_y = gt$

合速度　$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

$= \sqrt{v_0^2 + g^2t^2}$

夹角 $\theta = \arctan\dfrac{v_y}{v_x} = \arctan\dfrac{gt}{v_0}$

水平分位移　$x = v_0t$

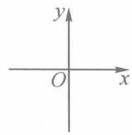
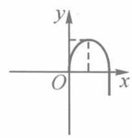
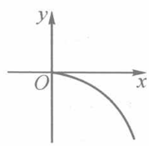
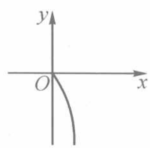
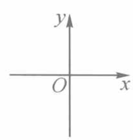
竖直分位移　$y = \dfrac{1}{2}gt^2$

合位移　$s = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{{v_0}^2t^2 + \dfrac{1}{4}g^2t^4}$

夹角　$\varphi = \arctan\dfrac{y}{x} = \arctan\dfrac{gt}{2v_0} \propto t$

平抛运动中任何 Δt 时间内速度改变量 Δv 大小相等且方向竖直向下.

4. 抛体运动规律

名称	抛射角	运动方程	轨迹	速度
竖直上抛	$\theta=\frac{\pi}{2}$	$\begin{cases}x=0\\y=v_0t-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}$		$v_x=0$ $v_y=v_0-gt$
斜上抛	$\frac{\pi}{2}>\theta>0$	$\begin{cases}x=v_0\cos\theta\cdot t\\y=v_0\sin\theta t-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}$		$v_x=v_0\cos\theta$ $v_y=v_0\sin\theta-gt$
平抛	$\theta=0$	$\begin{cases}x=v_0t\\y=-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}$		$v_x=v_0$ $v_y=-gt$
斜下抛	$0>\theta>-\frac{\pi}{2}$	$\begin{cases}x=v_0\cos\theta\cdot t\\y=v_0\sin\theta t-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}$		$v_x=v_0\cos\theta$ $v_y=v_0\sin\theta-gt$
竖直下抛	$\theta=-\frac{\pi}{2}$	$\begin{cases}x=0\\y=-v_0t-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}$		$v_x=0$ $v_y=-v_0-gt$

5. 匀速圆周运动

(1)描述匀速圆周运动的物理量

周期(T):质点完成一次圆周运动所用时间 $T=\dfrac{2\pi R}{v}$

单位:秒(s).

频率(f):1s 完成的运动次数　$f=\dfrac{1}{T}$,单位:赫兹(Hz).

线速度(v):就是瞬时速度.通过的弧长与所用时间之比值.

单位:米/秒(m/s),$v=\dfrac{2\pi R}{T}$,方向为切线方向.

角速度(ω):描述转动快慢的物理量,做匀速圆周运动的物体与圆心连线所扫过的角度与所用时间之比,$\omega=\dfrac{2\pi}{T}=\dfrac{v}{R}$,单位:rad/s,因此,匀速圆周运动的角速度为一恒量.

向心加速度($a_{向}$):描述速度方向改变快慢的物理量.方向始终指向圆心.

$a_{向}=\dfrac{v^2}{R}=\omega^2 R=v\omega$　　(适用于一切圆周运动)

$a_{向}=\dfrac{4\pi^2 R}{T^2}=4\pi^2 f^2 R$　　(只适用于匀速圆周运动).

向心力($F_{向}$):提供质点向心加速度所需的外力.

(2)要点与注意事项

①向心力不是力学中第四种性质力,它是以作用效果来命名的.

②圆周运动中,运动物体有“离心现象”,但没有“离心力”.

③向心力 $F=m\dfrac{v^2}{r}=m\omega^2 r$ 和向心加速度 $a=\dfrac{v^2}{r}=\omega^2 r$ 的公式虽是从匀速圆周运动得出,却也适用于变速圆周运动.

④不要忽略匀速圆周运动的周期性所带来的答案的多样性.

⑤不要以为凡做圆周运动的物体所受合外力都指向圆心，只有做匀速圆周运动的物体其所受合外力才指向圆心.

⑥若任意形状的物体距离较近时，则要将它们各自分割成许多小块，直至可看成质点为止，然后逐个应用万有引力定律计算，最后作矢量合成.

⑦如果物体与圆心间有联系物，则要注意联系物是直棒还是绳子，因为绳子只能把物体拉向圆心，不能把物体向外推. 而直棒则能拉又能推.

6. 非匀速圆周运动

（1）处理方法

将做非匀速圆周运动的质点所受力沿运动方向和与运动方向垂直方向分解，在运动方向上分力（切向力）只改变线速度大小；与运动垂直方向上的分力（法向力）改变速度方向，提供向心力.

（2）竖直平面内的圆周运动

①轻绳一端固定，另一端系一小球，球的质量为 m，绳长为 L，绳上张力为 F.

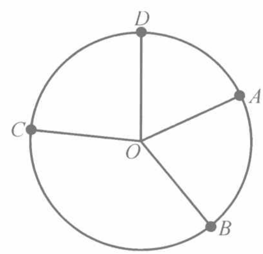


图 4－2

在 A 点：$F_A+(mg)_{OA}=F_{向}$

在 B 点：$F_B-(mg)_{OB}=F_{向}$

在 C 点：$F_C=F_{向}$

在 D 点：$F_D+mg=F_{向}$

小球能到达最高点的条件为 $T_D \geqslant 0$，即 $F_{向}\geqslant mg$

即 $m\dfrac{v_0^{\ 2}}{L}\geqslant mg \Rightarrow v_D\geqslant\sqrt{gL}$. 因此，小球要想冲上最高点必须得在最低点具备一定大的速度，否则小球会在圆周上某一点（这一点一定在

水平直径以上)绳子的拉力为零时脱离圆周轨道.

②物体在圆管的环形轨道里(或在轻杆端固定)做竖直面内的圆周运动,因为物体可受到圆管侧面对它的作用力(或轻杆的拉力与支持力),所以物体在圆周上任意一点速度均可为零.

③物体在竖直的圆球外壁运动到最高点时,可知 $mg = mv_0^2/R$ 和 $v_0 = \sqrt{gR}$.

当 $v > v_0$,物体将做平抛运动;

当 $v < v_0$,物体沿圆周轨道下滑,到某一位置时斜下抛离轨道.

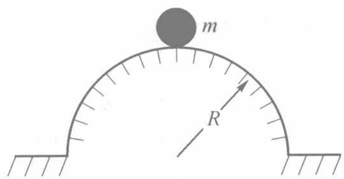


图 4－3

7. 万有引力定律

公式 $F = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$中,万有引力恒量 $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$,任意两个有质量的物体之间都存在万有引力作用. 但当两物体间的距离远大于其几何尺寸时才可应用公式,也就是说,只有当作质点的物体才能应用;对于均匀球体,总是将球体质量集中到球心来处理.

8. 人造地球卫星

人造地球卫星的绕行速度 v、角速度 ω、周期 T 与半径 r 的关系是: $v = \omega r = \dfrac{2\pi r}{T}$.

由万有引力定律推得: $\dfrac{GMm}{r^2} = m\dfrac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\dfrac{GM}{r}}$.

该式说明人造地球卫星距地球越远,其线速度越小,进而角速度也越小,周期变大.

地球同步卫星的周期与地球自转周期相同,且轨道平面只能在赤道平面上,与地球相对静止.

若离地面高度为 h,则

$$\frac{GMm}{(R+h)^2}=m\cdot\frac{4\pi^2(R+h)}{T^2}$$

$$\Rightarrow h=\sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}-R\approx3.6\times10^4\text{km}.$$

9. 三个宇宙速度

(1)第一宇宙速度(环绕速度)

第一宇宙速度 $v_1=7.9\text{km/s}$,是使卫星绕地球表面运转的最小地面发射速度. 也是最大的环绕速度. 卫星离地球越远,其环绕速度越小,但发射速度越大.

(2)第二宇宙速度(脱离速度)

第二宇宙速度 $v_2=11.2\text{km/s}$,是使卫星挣脱地球引力束缚的最小地面发射速度.

(3)第三宇宙速度(逃逸速度)

第三宇宙速度 $v_3=16.7\text{km/s}$,是使卫星挣脱太阳引力束缚的最小地面发射速度.

二　解题规律、技巧与思想方法

1. 建立平面直角坐标系,用抛物线模型处理平抛运动问题.

例 1:如图 4－4 所示,从高为 H 的 A 处平抛一物体,其水平位移为 $2s$,在 A 点正上方距地高 $2H$ 处的 B 点,按同方向平抛另一物体,其水平射程为 s. 两物体在空中的运行轨道在同一竖直平面内,且都从同一 M 屏的顶端擦过,求 M 屏的高度 h.

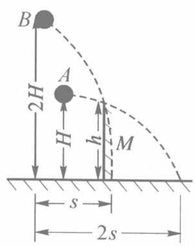


图 4－4

解:建立如图4-5所示的直角坐标系,设A、B两球平抛的初速分别为v_A、v_B,有$v_A=\frac{2s}{t_A}=\frac{2s}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}$

$$v_B=\frac{s}{t_B}=\frac{s}{\sqrt{\frac{4H}{g}}}$$

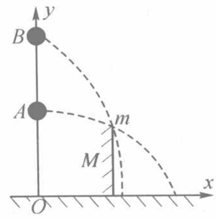


图4-5

$$对球A\begin{cases}x=v_At\\ y=H-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}\Rightarrow y=H-\frac{1}{2}g\cdot\frac{x^2}{{v_A}^2}\cdots\cdots①$$

$$对球B\begin{cases}x=v_B\cdot t\\ y=2H-\frac{1}{2}gt^2\end{cases}\Rightarrow y=2H-\frac{1}{2}g\cdot\frac{x^2}{{v_B}^2}\cdots\cdots②$$

联立①、②,得$x^2=\frac{2v_B^2v_A^2}{g({v_A}^2-v_B^2)\cdot H}$,代入①式,有

$y=\left(1-\frac{v_B^2}{v_A^2-v_B^2}\right)H$,将$v_A=\frac{2s}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}$和$v_B=\frac{s}{\sqrt{\frac{4H}{g}}}$代入上式,有$y=\frac{6}{7}H$,即为屏$M$的高度.

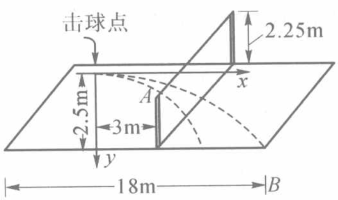


图4-6

例2:如图4-6所示,排球场总长18m,网高2.25m,设对方飞来一球,刚好在3m线正上方被我方队员击回.假设被击回时的速度是水平的,则可认为排球被击回后做平抛运动.若击球高度$h=2.5$m,球击回时既不能触

网，又不能出底线，求球被击回的水平速度的范围.

解：以球被击回点作为原点建立坐标系，设球以初速 v_1 被击回时，球刚好触网，则在坐标系中 $A(3,0.25)$ 满足平抛运动的坐标方程 $y=\frac{g}{2v_1^2}x^2$，故 $v_1=\sqrt{\frac{g}{2y}x^2}=\sqrt{\frac{10\times3^2}{2\times0.25}}\text{m/s}\approx13.4\text{m/s}$.

又设球以初速 v_2 被击回时，球刚好压线，则坐标系中 $B(12,2.5)$.

满足方程 $y=\frac{g}{2v_2^2}x^2$，故 $v_2=\sqrt{\frac{g}{2y}x^2}=\sqrt{\frac{10\times12^2}{2\times2.5}}\text{m/s}\approx17\text{m/s}$.

所以球被击回的速度范围为　$13.4\text{m/s}<v\leqslant17\text{m/s}$.

例 3：如图 4－7 所示，A、B 两球用 6m 长的细线相连，两球相隔 0.8s 先后从同一高度以 $v_0=4.5\text{m/s}$ 的初速平抛，则 A、B 间的细线刚被拉直时，两球速度大小各为多少？

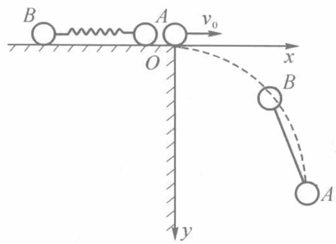


图 4－7

解：以台面边缘点为原点建立如图 4－7 所示的平面直角坐标系，将A、B间细绳被拉直转化为A、B两点间距离为6m，易求得$v_A=4.92\text{m/s}$，$v_B=10.97\text{m/s}$.

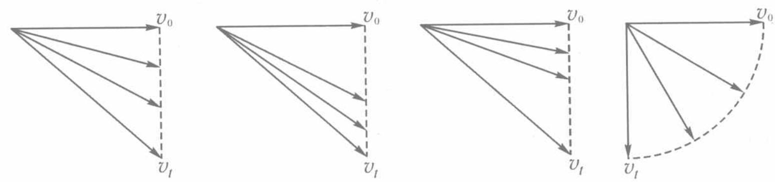
2. 平抛运动是匀变速运动，加速度大小、方向恒定，速度改变量 $\Delta v=\vec{v_2}-\vec{v_1}$，是矢量相减，而非简单的代数相减，因为平抛运动速度的水平分量不变，改变的只是竖直方向的速度，所以 Δv 的方向竖直向下，大小为 $\Delta v=\vec{v_2}-\vec{v_1}=\vec{v_{2y}}+\vec{v_{2x}}-(\vec{v_{1y}}+\vec{v_{1x}})=\vec{v_{2y}}-\vec{v_{1y}}=g\Delta t$.

例 1：已知平抛运动的物体在飞行过程中先后经过 A、B 两点的时间内速度改变量为 Δv，A、B 两点间竖直距离为 Δy，求物体从抛出点到 B 点共经历了多长时间？

解:有公式:$\Delta v = g \cdot \Delta t$. ∴ 从 A 点到 B 点用时 $\Delta t = \dfrac{\Delta v}{g}$. A、B 间竖直方向平均速度为$\dfrac{\Delta y}{\Delta t}$,即为运动在 A、B 中间时刻的竖直分速度,从抛出点到此中间时刻的时间为$\dfrac{\Delta y}{g\Delta t}$,而从抛出点到 B 点的时间为$\dfrac{\Delta y}{g\Delta t} = \dfrac{\Delta t}{2}$,即为$\dfrac{\Delta y}{\Delta v} + \dfrac{\Delta v}{2g}$

例 2:人站在楼上水平抛出的一个小球离手时速度为 v_0,忽略空气阻力,下列各图中能正确地表示在相等时间内速度矢量的变化情况的是哪一个图?

解:答案为 A.



(A)　(B)　(C)　(D)

图 4 − 8

例 3:做平抛运动的物体,在落地前最后一秒内,其速度方向由跟竖直方向成 60°变为跟竖直方向成 45°,求物体抛出时的速度和下落的高度.

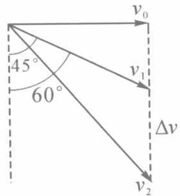


图 4 − 9

解:作出示意图,如图 4 − 9 所示,最后 1s 内速度的变化为 $\Delta v = gt = 10\text{m/s}$,由几何关系得,$v_0\cot45° - v_0\cot60° = \Delta v \Rightarrow v_0 = 23.2\text{m/s}$,物体在竖直方向自由下落,设下落高度为 h,则 $h = \dfrac{{v_2}^2 y}{2g} = \dfrac{(v_0 \cdot \cot45°)^2}{2g} = 2.74\text{m}$.

3. 外界约束下的平抛运动

(1)斜面约束下的平抛运动

例:如图 4-10 所示,斜面上有 P、R、S、T 四点,且 $\overline{PR}=\overline{RS}=\overline{ST}$,从 P 点正上方 O 点以速度 v 水平抛出一物体,物体落于 R 点,若从 O 点以 $2v$ 的水平速度抛出该物体,则物体应落于斜面上的(不计空气阻力)____.

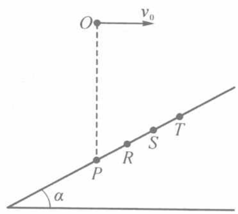


图 4-10

(A)R 与 S 间某点　(B)S 点

(C)S 与 T 间某点　(D)T 点

解:设 $\overline{PR}\cos\alpha=\overline{RS}\cos\alpha=\overline{ST}\cos\alpha=x_0$,则物体两次落到斜面上时的水平位移分别是 l_1、l_2,有 $l_1=v_0t_1$,$l_2=2v_0\cdot t_2$,明显第二次下落的时间 $t_2<t_1$,则 $l_2<2l_1$,即 $l_2<2x_0$,又因为第二次平抛的初速大于第一次平抛的初速,落点肯定在 R 点之上,又有 $l_2<2x_0$.

∴ 落点应在 R 与 S 间某点. 故选 A.

(2)台阶约束下的平抛运动

解此类题常用数学方法,建立平面直角坐标系,将平抛运动模拟为抛物线,将每级台阶边缘连成一条直线,再求交点;也可用假设法,即先假设落到某一台阶上,求出下落时间,算出水平位移;再与实际对照.

例 1:如图 4-11 所示,小球自楼梯顶的平台上以水平速度 $v_0=1.5\text{m/s}$ 做平抛运动,所有台阶高度与宽度都是 0.2m,则小球首先撞在哪一级阶梯上?

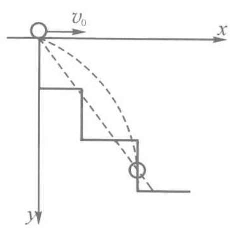


图 4-11

解:如图 4-11 所示,将各台阶端点连成一条直线,则该直线

与水平面夹角为45°，以小球抛出点为原点建立如图所示的直角坐标系，列出小球在水平、竖直方向上的运动方程：

$$\left.\begin{aligned}&\text{水平方向}:x=v_0t\\&\text{竖直方向}:y=\frac{1}{2}gt^2\end{aligned}\right\}\Rightarrow\text{消去}\ t\ \text{可得},y=\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0}\right)^2,\text{又直线方程式为}$$

$y=x$，代入上式有 $y=\frac{1}{2}g\left(\frac{y}{v_0}\right)^2\Rightarrow y=\frac{2v_0^2}{g}$，将 $v_0=1.5\text{m/s}$，$g=10\text{m/s}^2$ 代入得，$y=\frac{2\times1.5^2}{10}\text{m}=0.45\text{m}$，所以 $n=\frac{y}{h}=\frac{0.45}{0.2}=2.25$. 可见，小球首先撞击在楼梯顶端以下第三级阶梯上.

例2：如图4－12所示，两层台阶高度分别为1.25m和1.95m，第一层台阶宽1.5m，第二层台阶宽2m，现以 $v_0=4\text{m/s}$ 的初速从台阶顶层水平抛出一只小球. 取 $g=10\text{m/s}^2$，问：小球落在何处？

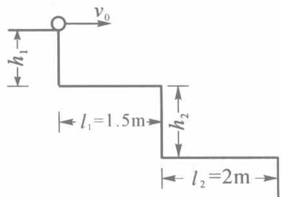


图4－12

解：小球抛出后做平抛运动，假定它落在第一个台阶上，下落时间为 $t_1=\sqrt{\frac{2h_1}{g}}=0.5\text{s}$，在这段时间内小球水平位移为 $s_1=v_0t_1=2m>l_1$，由此可见小球将越离第一层台阶而再下落，下落高度为 $H=h_1+h_2=3.2\text{m}$，运动时间为 $t_2=\sqrt{\frac{2H}{g}}=0.8\text{s}$，在此时间内物体水平位移为 $s_2=v_0t_2=3.2\text{m}$. 因此物体落在第二个台阶上离左侧壁为 $d=s_2-l_1=1.7\text{m}$ 处.

例3：如图4－13所示，一小球以水平速度 v 从楼梯顶端飞出，欲打

在楼梯顶端以下第四级台阶上,其中每级台阶高度、宽度都是 0.4m,则 v 的取值范围是____.

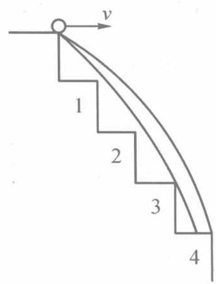


图 4－13

(A) $\sqrt{6}\text{m/s} < v \leq 2\sqrt{2}\text{m/s}$

(B) $2\sqrt{2}\text{m/s} < v \leq 3.5\text{m/s}$

(C) $\sqrt{2}\text{m/s} < v \leq \sqrt{6}\text{m/s}$

(D) $\sqrt{6}\text{m/s} < v \leq 3.5\text{m/s}$

解:欲打在第四阶上,则运动路线应在图中短曲线与长曲线之间,则有 $v_{min}v_{max}$,以 v_{min} 抛出的小球轨迹如图短线,有 $t_1 = \sqrt{\frac{3\times0.4\times2}{g}} = \sqrt{0.12s} = \frac{1}{5}\sqrt{6}\text{s}$,以 v_{max} 抛出的小球轨迹长线,有 $t_2 = \sqrt{\frac{4\times0.4x^2}{g}} = \frac{2}{5}\sqrt{2}s$. 水平位移有 $x_1 = 3x, 0.4 = 1.2\text{m}$, $x_2 = 4\times0.4 = 1.6\text{m}$. $\therefore v_{min} = \frac{x_1}{t_1} = \sqrt{6}\text{m/s}$, $v_{max} = \frac{x_2}{t_2} = 2\sqrt{2}\text{m/s}$,有 $v_{min} < v \leq v_{max}$,∴ A 项正确.

(3)竖直墙壁约束下的平抛运动

解此类题时可充分发挥空间想象能力,将平抛运动的一部分进行对折,翻转.

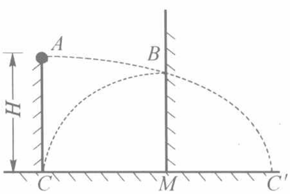


图 4－14

例 1:如图 4－14 所示,在房间内靠近左墙的 A 点,沿水平方向抛出一个小球,小球与右墙 B 点碰撞(碰撞时无机械能损失)后落在左墙角 C 处. 已知 A 与 C 高度差为 H,则 B 点与 C 点高度差为多少?

解:将 BC 段运动以右墙为轴翻折为 BC',也就是说若无右墙约束阻