普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

习题解答

力学、热学分册

第二版

题解编写组 编著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

主编 钟锡华 陈.

大学物理通用教程

习题解答

（第二版）

力学、热学分册

题解编写组 编著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大学物理通用教程·习题解答. 力学、热学分册/题解编写组编著.
—2版. —北京: 北京大学出版社, 2016.10
ISBN 978-7-301-27613-6

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①题… Ⅲ. ①力学—高等学校—题解 ②热学—高等学校—题解 Ⅳ. ①O4-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 236993 号

书　　名	大学物理通用教程·习题解答(第二版) (力学、热学分册) DAXUE WULI TONGYONG JIAOCHENG · XITI JIEDA
著作责任者	题解编写组　编著
责 任 编 辑	瞿　定　顾卫宇
标 准 书 号	ISBN 978-7-301-27613-6
出 版 发 行	北京大学出版社
地　　址	北京市海淀区成府路 205 号　100871
网　　址	http://www.pup.cn
电 子 信 箱	zpup@pup.cn
新 浪 微 博	@北京大学出版社
电　　话	邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021
印 刷 者	北京大学印刷厂
经 销 者	新华书店
	890 毫米×1240 毫米　A5　12 印张　350 千字 2005 年 3 月第 1 版 2016 年 10 月第 2 版　2016 年 10 月第 1 次印刷
印　　数	1—3000 册
定　　价	32.00 元

前　　言

本书对《大学物理通用教程》中《力学》《热学》教材所含全部习题，均一一作了解答。计有：《力学》179 道题解；《热学》136 道题解。

另外，本书吸收了《大学物理通用教程》第一版配套教材《习题指导》中的部分内容，以“扩充题”的方式接续在每章题解之后，这部分习题不在原教材中，体现的教学要求也与原教材有所不同。

本书不少地方加入了说明、评论及需要注意的概念环节，每章之后还有总结归纳。愿本书在分析和解决基础物理学中的实际问题时，能成为读者的一个好助手。

钟锡华　陈熙谋

于北京大学物理学院

2015 年 11 月 8 日

目　录

力　学

1 质点运动学

1.1 已知质点位矢随时间变化的函数形式为

$$\boldsymbol{r} = R(\boldsymbol{e}_i \cos\omega t + \boldsymbol{e}_j \sin\omega t),$$

其中 ω 为常量. 求(1) 质点的轨道;(2) 速度和速率.

解 (1) 根据题目已知条件,质点运动方程的直角坐标分量式为

$$x(t) = R\cos\omega t,$$

$$y(t) = R\sin\omega t,$$

将以上两式平方后两端相加,得

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

这是直角坐标系中圆曲线的标准形式,表明质点运动的轨道是半径为 R 的圆.

(2) 根据定义,质点速度分量为

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -R\omega\sin\omega t,$$

$$v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R\omega\cos\omega t,$$

则质点速度为

$$\boldsymbol{v} = -R\omega(\boldsymbol{e}_i \sin\omega t - \boldsymbol{e}_j \cos\omega t),$$

速率为

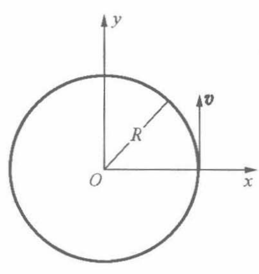
$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = R\omega.$$

当 $t=0$ 时,

$$x(0) = R, \quad y(0) = 0,$$

$$v_x(0) = 0, \quad v_y(0) = R\omega.$$

表明质点沿逆时针方向运动.



题 1.1

综上可知,质点以半径 R 沿逆时针方向作匀速率圆周运动——匀速左旋运动,如图

所示.

说明 将运动方程消去时间参量 t 可以得到轨道方程,从而判知轨道类型.将运动方程对时间求导可以得到速度,而速度是反映质点运动快慢和运动方向的物理量.这样,通过动静结合的综合分析,则可全面把握质点运动情况及特征.

1.2 已知质点位矢随时间变化的函数形式为

$$\boldsymbol{r} = 4t^2\boldsymbol{e}_i + (3+2t)\boldsymbol{e}_j.$$

求(1) 质点的轨道;(2) 从 $t=0$ 到 $t=1$ 的位移;(3) $t=0$ 和 $t=1$ 两时刻的速度.

解 (1) 由质点位矢的函数 $\boldsymbol{r}=4t^2\boldsymbol{e}_i+(3+2t)\boldsymbol{e}_j$ 可知,其分量式为

$$\begin{cases} x(t) = 4t^2, \\ y(t) = 3+2t, \end{cases}$$

消去时间参量 t,可得质点的轨道方程为

$$x = (y-3)^2.$$

(2) 从 $t=0$ 到 $t=1$ 质点的位移为

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(1) - \boldsymbol{r}(0) = (4\boldsymbol{e}_i + 5\boldsymbol{e}_j) - 3\boldsymbol{e}_j = 4\boldsymbol{e}_i + 2\boldsymbol{e}_j.$$

(3) 根据定义,质点速度为

$$\boldsymbol{v}(t) = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}(t)}{\mathrm{d}t} = 8t\boldsymbol{e}_i + 2\boldsymbol{e}_j.$$

根据上式,$t=0$ 和 $t=1$ 两时刻质点的速度分别为

$$\boldsymbol{v}(0) = 2\boldsymbol{e}_j, \quad \boldsymbol{v}(1) = 8\boldsymbol{e}_i + 2\boldsymbol{e}_j.$$

1.3 站台上一观察者,在火车开动时站在第一节车厢的最前端,第一节车厢在 $\Delta t_1=4.0\ \mathrm{s}$ 内从他身旁驶过.设火车作匀加速直线运动,问第 n 节车厢从他身旁驶过所需的时间间隔 Δt_n 为多少?令 $n=7$,求 Δt_7.

解 火车开动时观察者站在第一节车厢的最前端,即火车初速 $v_0=0$.设火车的加速度为 a,每节车厢长为 l,第 n 节和第 $(n-1)$ 节车厢驶过观察者的时间分别为 t_n 和 t_{n-1}.根据匀变速运动公式,则有

$$nl = \frac{1}{2}at_n^2, \tag{①}$$

$$(n-1)l=\frac{1}{2}at_{n-1}^{2}, \quad ②$$

由①②两式可得待求的时间间隔 Δt_n 为

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} = (\sqrt{n}-\sqrt{n-1})\sqrt{\frac{2l}{a}}. \quad ③$$

题目已知第一节车厢在 $\Delta t_1 = 4\ \mathrm{s}$ 内通过观察者,故有

$$l=\frac{1}{2}a(\Delta t_1)^2,$$

即

$$\sqrt{\frac{2l}{a}} = \Delta t_1 = 4\ \mathrm{s}. \quad ④$$

将④式代入③式,得

$$\Delta t_n = 4(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})\mathrm{s}.$$

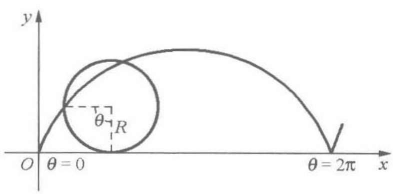
当 $n=7$ 时,

$$\Delta t_7 = 4(\sqrt{7}-\sqrt{6})\mathrm{s} \approx 0.8\ \mathrm{s}.$$

1.4　半径为 R 的轮子沿 $y=0$ 的直线作无滑动滚动时,轮边缘一质点的轨迹为旋轮线(见图),其方程为

$$\begin{cases} x = R(\theta - \sin\theta), \\ y = R(1-\cos\theta). \end{cases}$$

求该质点的速度;若设 $\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t=\omega$ 为常量,找出速度为 0 的点.



题　1.4

解　根据定义,质点速度分量分别为

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = R\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} - \cos\theta\cdot\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right) = R\omega(1-\cos\theta),$$

$$v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R\sin\theta\cdot\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = R\omega\sin\theta.$$

速度为 0,即两个速度分量为 0,

$$v_x = R\omega(1-\cos\theta) = 0,$$

即
$$1-\cos\theta = 0,$$

得
$$\theta = 2n\pi,\quad n = 0,1,2,\cdots.$$

$$v_y = R\omega\sin\theta = 0,$$

得
$$\theta = n\pi,\quad n = 0,1,2,\cdots.$$

同时满足速度为零的解为

$$\theta = 2n\pi,\quad n = 0,1,2,\cdots.$$

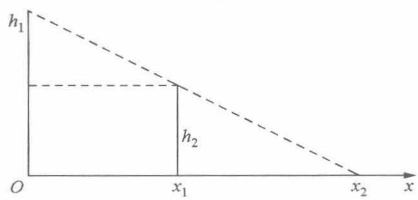
将 $\theta=2n\pi$ 代入质点轨迹方程,即可确定其速度为零的点:

$$\begin{cases} x = 2n\pi R, & n = 0,1,2,\cdots, \\ y = 0. \end{cases}$$

1.5 路灯距地面的高度为 h_1,一身高为 h_2 的人在路灯下以匀速 v_1 沿直线行走.试证明人影的顶端作匀速运动,并求其速度 v_2.

解 如图所示,人与路灯的距离为 x_1,人影顶端与路灯的距离为 x_2.根据图中几何关系,则有

$$\frac{x_2}{h_1} = \frac{x_1}{h_1-h_2},$$



题 1.5

即
$$x_2 = \frac{h_1}{h_1-h_2}x_1.$$

根据定义,人影顶端速度为

$$v_2 = \frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}t} = \frac{h_1}{h_1-h_2}\cdot\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} = \frac{h_1}{h_1-h_2}v_1.$$

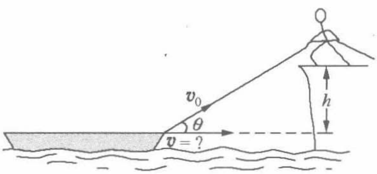
结果表明,人影顶端作匀速运动.

1.6 如图(a)所示,一人站在河岸上(岸高 h),手握绳之一端,绳的另端系一小船.那人站着不动,以手收绳.设收绳速率 v_0 恒定,求当绳与水面的夹角为 θ 时,船向岸靠拢的速度 v.

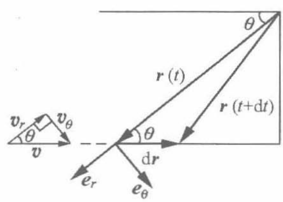
解 *方法一*:如图(b)所示,以收绳人之手处为极点 O,水平向左为极轴建立一平面极坐标系.在该坐标系中,船的位置矢量为

$$\boldsymbol{r}(t) = r\boldsymbol{e}_r.$$

根据定义,船的速度为



(a)



(b)

题　1.6

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_r+r\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_\theta=\boldsymbol{v}_r+\boldsymbol{v}_\theta.$$

根据上式,在图(b)中作出速度矢量图.题中给定的收绳速率 v_0 就是径向速度 $\boldsymbol{v}_r$ 的大小，即

$$v_0=\left|\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right|=|\boldsymbol{v}_r|,$$

而船的速度方向沿水面指向岸边,故其大小为

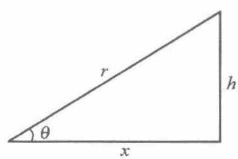
$$v=\frac{v_0}{\cos\theta}.$$

方法二：如图(c)所示,任一时刻 t，绳长为 r，船与岸边距离为 x. 岸高 h 是约束条件，h 与 r,x 的关系为

$$r^2-x^2=h^2.$$

将上式对时间求导,可得

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{x}{r}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},$$



(c)

图　1.6

式中 $\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=v_0$ 为收绳速率，$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v$ 是船的速率，$\frac{x}{r}=\cos\theta$，故有

$$v=\frac{v_0}{\cos\theta}.$$

说明　本题方法一从定义出发,通过对微小过程分析得到结论,概念性强,论述严谨,图像清晰.求解过程清楚地表明,船速 $\boldsymbol{v}$ 为总速度,径向速度 $\boldsymbol{v}_r$ 和横向速度 $\boldsymbol{v}_\theta$ 是 $\boldsymbol{v}$ 的两个正交分量,而 v_0 是 $\boldsymbol{v}_r$ 的大小.所以本题实际是已知速度分量求总速度.

1.7 试从哈勃定律计算星系距离或退行速度.

(1) 已知室女星系团中央附近的 M87 星系的退行速度为 1180 km/s,求它离我们多远.

(2) 后发星系团距离为 113 Mpc,求其退行速度.

(3) 类星射电源 OQ172 有巨大红移.如果红移是由多普勒效应引起的(参见原书第 9 章),则它的退行速度为 $0.91c$,c 是光速.该射电源离我们多远?(哈勃常数 $H_0=67\ \text{km/(s}\cdot\text{Mpc)}$)

解 (1) 已知 M87 星系的退行速度 $v_r=1180\ \text{km/s}$,根据哈勃定律,它与我们的距离为

$$r=\frac{v_r}{H_0}=\frac{1180\ \text{km/s}}{67\ \text{km/(s}\cdot\text{Mpc)}}=17.6\ \text{Mpc}.$$

(2) 已知后发星系团距离 $r=113\ \text{Mpc}$,应用哈勃定律,其退行速度为

$$v_r=H_0r=67\ \text{km/(s}\cdot\text{Mpc)}\times 113\ \text{Mpc}=7571\ \text{km/s}.$$

(3) 已知类星射电源 OQ172 的退行速度 $v_r=0.91c$,应用哈勃定律,该射电源与我们的距离为

$$\begin{aligned}r&=\frac{v_r}{H_0}=\frac{0.91c}{67\times(10^{12}\ \text{a})^{-1}}=\frac{0.91}{67}\times(c\times10^{12}\ \text{a})\\&=136\times10^{8}\ \text{l.y.}=136\ \text{亿 l.y.},\end{aligned}$$

式中 a 为年的符号,l.y. 为光年($1\ \text{l.y.}=c\cdot(1\ \text{a})=9.460\,730\times10^{15}\ \text{m}$).

1.8 一杂技演员能把 5 个球一个接一个地上抛到高 3.0 m 处,使这 5 个球都保持在空中运动.(1) 试确定相继两次抛球的时间间隔.(2) 试求当一个球即将落到手上时,另外几个球的高度,设球在手中停留时间可忽略.

解 (1) 设第一个球自抛出至落回到杂技演员手上所用的时间为 t,相继两次均匀抛球的时间间隔为 Δt,由于有 5 个球保持在空中运动,故有

$$\Delta t=t/5. \tag{①}$$

球从最高点 $h=3\ \text{m}$ 处落回到杂技演员手中所用的时间为 $t/2$,故有

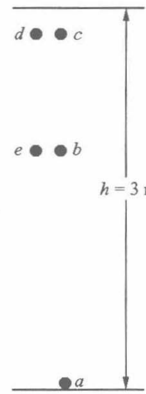
$$h = \frac{1}{2} g \left(\frac{t}{2} \right)^2. \qquad ②$$

联立求解①②两式，可得

$$\Delta t = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{2h}{g}} = 0.31\ \mathrm{s}. \qquad ③$$

(2) 小球抛出时的初速 v_0 与落回抛出点时的速度大小相等，即

$$v_0 = g\,\frac{t}{2}. \qquad ④$$



题 1.8

见图，当第一个球 a 即将落到杂技演员手上时，另外 4 个球 b,c,d 和 e 尚在空中，各球运动的时间为

$$t_n = n\Delta t, \quad n = 4,3,2,1. \qquad ⑤$$

高度为

$$h_n = v_0 t_n - \frac{1}{2} g t_n^2. \qquad ⑥$$

将①—⑤式代入⑥式，得到

$$h_n = n(5-n)\frac{4}{25}h, \quad n = 4,3,2,1.$$

式中

$$n(5-n) = \begin{cases} 4, & 当\ n = 4,1\ 时, \\ 6, & 当\ n = 3,2\ 时. \end{cases}$$

这表明，b 球和 e 球在同一高度，

$$h_{b,e} = 4 \times \frac{4h}{25} = 1.92\ \mathrm{m},$$

c 球和 d 球在同一高度，

$$h_{c,d} = 6 \times \frac{4h}{25} = 2.88\ \mathrm{m}.$$

1.9 设 α 为由炮位所在处观看靶子的仰角，β 为炮弹的发射角. 试证明：若炮弹命中靶点恰为弹道的最高点，则有 $\tan\beta = 2\tan\alpha$.

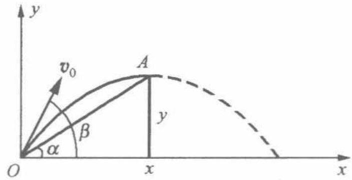
证 如图所示，v_0 为炮弹出膛速度，β 为发射角. 炮弹在弹道最高点命中靶子，其竖直方向速度为零，即

$$v_y = v_0 \sin\beta - gt = 0. \qquad ①$$

炮弹在水平和竖直方向的运动方程分别为

$$x = v_0 t \cos\beta, \qquad ②$$

$$y = v_0 t \sin\beta - \frac{1}{2} g t^2. \qquad ③$$



题　1.9

将①式分别代入②和③式，可得

$$x = \frac{v_0^2}{g} \sin\beta \cdot \cos\beta,$$

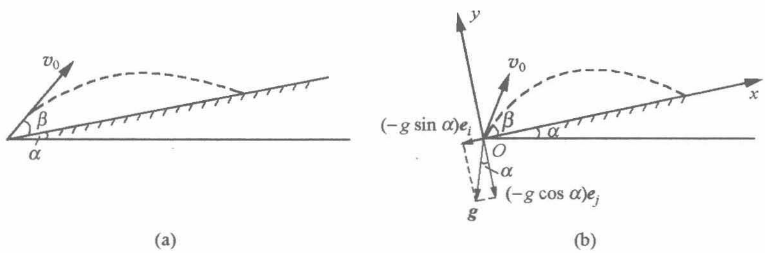
$$y = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2\beta.$$

参看题图，由炮位所在处观看靶子的仰角 α 的正切值为

$$\tan\alpha = \frac{y}{x} = \frac{v_0^2/2g \cdot \sin^2\beta}{v_0^2/g \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} = \frac{1}{2}\tan\beta,$$

即　　　　$\tan\beta = 2\tan\alpha.$

1.10　如图(a)所示，大炮向小山上开火，此山的山坡与地平线的夹角为 α，试求发射角 β 为多大时炮弹沿山坡射得最远.



题　1.10

解　如图(b)选取坐标系. 沿山坡方向为 x 轴，垂直山坡方向为 y 轴. 在该坐标系下，

$$g_x = -g\sin\alpha, \quad g_y = -g\cos\alpha,$$

所以炮弹的运动方程为

$$x = v_0 t\cos\beta - \frac{1}{2} g \sin\alpha \cdot t^2, \qquad ①$$

$$y = v_0 t\sin\beta - \frac{1}{2} g \cos\alpha \cdot t^2. \qquad ②$$

炮弹落地而击中山坡上的目标,则有落地处 $y=0$,即

$$v_0 t \sin\beta - \frac{1}{2} g \cos\alpha \cdot t^2 = 0,$$

解此方程得

$$t = \frac{2v_0 \sin\beta}{g \cos\alpha}. \qquad ③$$

将③式代入①式并运算,

$$\begin{aligned}
x &= v_0 \frac{2v_0 \sin\beta}{g \cos\alpha} \cdot \cos\beta - \frac{1}{2} g \sin\alpha \cdot \frac{4v_0^2 \sin^2\beta}{g^2 \cos^2\alpha} \\
&= \frac{v_0^2}{g}\left(\frac{2\sin\beta \cdot \cos\beta}{\cos\alpha} - \frac{2\sin\alpha \cdot \sin^2\beta}{\cos^2\alpha}\right) \\
&= \frac{v_0^2}{g\cos^2\alpha}(2\sin\beta \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha - 2\sin^2\beta \cdot \sin\alpha) \\
&= \frac{v_0^2}{g\cos^2\alpha}[\sin 2\beta \cdot \cos\alpha - (1-\cos 2\beta) \cdot \sin\alpha] \\
&= \frac{v_0^2}{g\cos^2\alpha}[(\sin 2\beta \cdot \cos\alpha - \cos 2\beta \cdot \sin\alpha) - \sin\alpha] \\
&= \frac{v_0^2}{g\cos^2\alpha}[\sin(2\beta+\alpha) - \sin\alpha].
\end{aligned}$$

上式就是炮弹沿山坡的射程. 射程最大,则要求 $\sin(2\beta+\alpha)=1$,即 $2\beta+\alpha=\frac{\pi}{2}$,所以

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2}.$$

也可以用求极值的方法求出 β 值,即令$\frac{dx}{d\beta}=0$,

$$\frac{d}{d\beta}\left(\frac{v_0^2}{g\cos\alpha} \cdot \sin 2\beta - \frac{2v_0^2 \sin\alpha}{g\cos^2\alpha} \cdot \sin^2\beta\right) = 0,$$

得
$$\frac{v_0^2}{g\cos\alpha} \cdot 2\cos 2\beta - \frac{2v_0^2 \sin\alpha}{g\cos^2\alpha} \cdot 2\sin\beta \cdot \cos\beta = 0,$$

即
$$\frac{2v_0^2}{g\cos\alpha}\left(\cos 2\beta - \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \cdot \sin 2\beta\right) = 0,$$

式中 $2v_0^2/g\cos\alpha \neq 0$,故而

$$\cos 2\beta - \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \cdot \sin 2\beta = 0,$$

即
$$\cot 2\beta = \tan\alpha, \quad 2\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha,$$

所以
$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2}.$$

说明 本题也可以选取水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴进行计算，但与本题选用的坐标系相比较，运算过程较繁. 这表明，应以解题简洁、方便为原则选用适当的坐标系.

题中的极值法则是一种提示：大学物理的初学者，应自觉地、有意识地将高等数学的知识运用到物理学习中来.

1.11 一弹性球竖直落在一斜面上，下落高度 $h=20$ cm，斜面对水平的倾角 $\theta=30°$，问它第二次碰到斜面的位置距原来的下落点多远（假设小球碰斜面前后速度数值相等，碰撞时入射角等于反射角）？

解 小球下落高度 h 与斜面弹性碰撞前后速度大小为

$$v = \sqrt{2gh}. \qquad ①$$

在如图所示坐标系中，小球反弹并再次与斜面碰撞所满足的运动方程为

$$x = vt\sin\theta + \frac{1}{2}g\sin\theta \cdot t^2, \qquad ②$$

$$0 = vt\cos\theta - \frac{1}{2}g\cos\theta \cdot t^2. \qquad ③$$

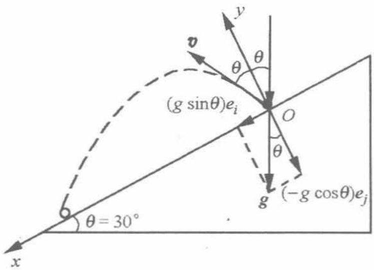
由③式解得小球第二次与斜面碰撞所需时间 t 为

$$t = 2v/g. \qquad ④$$

将①④式代入②式，即可得小球第二次与斜面碰撞处与原来下落点的距离为

$$x = 8h\sin\theta.$$

将 $h=20$ cm，$\theta=30°$，代入上式，最后得到



题 1.11