

wuli  
jingsai

物理  
竞赛

集训精编

舒幼生 编著 宓子宏 审

jixun  
jingbian

上海辞书出版社

舒幼生 编著 宓子宏 审

WULI JINGSAI

物理竞赛  
集训精编

J I X U N  
J I N G B I A N

上海辞书出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

物理竞赛集训精编/舒幼生编著;宓子宏审校. —上海:上海辞书出版社, 2001.6

ISBN 7-5326-0787-9

I.物... II.①舒...②宓... III.物理课-中学-竞赛题-解题 IV.G634.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 028498 号

责任编辑 邱家豹

封面设计 江小铎

## 物理竞赛集训精编

上海辞书出版社出版

(上海陕西北路 457 号 邮政编码 200040)

上海辞书出版社发行所发行

商务印书馆 上海印刷股份有限公司印刷

开本 787×1092 1/32 印张 16.5 插页 1 字数 385 000

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 9 月第 2 次印刷

印数 5 101—8 200

ISBN 7-5326-0787-9/O·36

定价: 25 元

# 序

物理竞赛对于激发优秀学生学习物理的兴趣和积极性,开发他们的智力,提高他们的能力、独创精神和科学素质等都起着不小的作用.因此物理竞赛受到教育界的关注和中学老师及优秀学生较为普遍的欢迎.1984年以来,全国每年举行物理竞赛,1986年开始,我国每年选派代表队参加国际物理奥林匹克竞赛,并且取得优异成绩。

北京大学舒幼生教授多次担任国际物理奥林匹克竞赛中国代表队领队和教练,在培养优秀学生提高学习兴趣,改进学习方法,发现具有突出才能的青少年等方面具有丰富的经验.2000年,舒幼生教授被邀请到上海市物理业余学校授课,对上海优秀学生进行短期集训,受到学生普遍的欢迎。

为了更好地配合物理竞赛集训,上海辞书出版社出版了由舒幼生教授编写的《物理竞赛集训精编》一书,为学习物理的爱好者提供了一本优秀的课外读物。

此书根据全国中学生物理竞赛委员会公布的物理竞赛大纲,按学科顺序、主要内容分为力学、热学、电学和光学四篇共十三章.每章开始作者居高临下概括基本物理内容,然后通过典型和新颖的例题,侧重阐明解题方法和技巧,培养参赛学生掌握较扎实的物理基础知识,具有较广泛的知识面和较强的分析物理问题的能力,之后配有适量的练习题,在书末附有练习题参考答案。

我们感谢作者为参加竞赛的中学生提供了一本很有参考价

---

值的课外辅导书,该书对于各省市物理业余学校也是一本很合适的参考书。

宓子宏

2001年5月

# 目 录

<b>第一篇 力学</b> .....	1
第一章 质点运动学.....	1
第二章 牛顿定律 .....	34
第三章 能量、动量和质心.....	68
第四章 角动量和天体运动.....	166
第五章 振动与波.....	218
<b>第二篇 热学</b> .....	261
第六章 分子动理论和理想气体.....	261
第七章 热力学第一定律.....	289
<b>第三篇 电学</b> .....	309
第八章 静电场.....	309
第九章 磁场.....	366
第十章 电磁感应.....	394
第十一章 直流电源、电阻、电容网络.....	423
<b>第四篇 光学</b> .....	461
第十二章 几何光学.....	461
第十三章 光的干涉.....	488
<b>参考答案</b> .....	501

# 第一篇 力 学

## 第一章 质点运动学

### 一、直线和平面曲线运动

运动学只是客观地描述物体的运动,它并不考虑物体运动状态改变的原因.物体各部位运动情况相同时,可以将物体处理为一个点,称为质点.物体各部位运动情况若不相同,但考察的运动范围远大于物体线度,又可将物体近似处理为一个质点.最后,如果物体各部位运动情况不同,而且考察的物体运动范围也非远大于物体线度,则可将物体分割为一系列足够小的部位,每一个小部位可处理为点状小物体,又成质点.至此可以理解,运动学的基本内容是质点运动学.

质点的运动轨道可以是直线、平面曲线或空间曲线,竞赛中涉及的多是前两种轨道的运动.

直线运动分为匀速运动、匀加速运动和变加速运动三类.

匀速直线运动中质点速度为恒定矢量,这种最简单的运动可与弹性碰撞联合构成匀速折线段运动.

匀加速直线运动中的加速度为恒定矢量,运动量构成的主要公式有

$$\begin{aligned}v(t) &= v_0 + at, \\x(t) &= x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2,\end{aligned}$$

$$v^2(x) - v_0^2 = 2ax.$$

其中各量的含义已较为熟知,不再复述.

变加速直线运动中的加速度是个随时间变化的矢量,一个典型的例子是简谐振动,振动中质点的位置、速度、加速度随时间变化的关系为

$$\begin{aligned}x &= A\cos(\omega t + \phi), \\v &= -\omega A\sin(\omega t + \phi), \\a &= -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi).\end{aligned}$$

式中  $A$  为振幅、 $\omega$  为角频率、 $\phi$  为初相位.

平面曲线运动中最常见的是斜抛运动和圆周运动.

斜抛运动中在起抛点和初速度  $v_0$  所确定的竖直平面内,以起抛点为坐标原点建立水平  $x$  轴和竖直向上的  $y$  轴.质点在  $x$  轴方向作匀速直线运动,有

$$\begin{aligned}v_x &= v_0\cos\phi, \\x &= (v_0\cos\phi)t.\end{aligned}$$

其中抛射角  $\phi$  是  $v_0$  与  $x$  轴的夹角.质点在  $y$  轴方向作匀加速直线运动,有

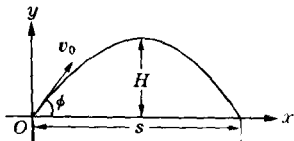
$$\begin{aligned}v_y &= v_0\sin\phi - gt, \\y &= (v_0\sin\phi)t - \frac{1}{2}gt^2.\end{aligned}$$

联立  $x-t$  和  $y-t$  关系式,消去  $t$ ,得轨道方程

$$y = -\frac{g}{2v_0^2\cos^2\phi}x^2 + (\operatorname{tg}\phi)x.$$

这是一条抛物线,如图所示.图中  $H$  是射高, $s$  是水平射程,分别为

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





$$s = \frac{v_0^2 \sin 2\phi}{g}.$$

圆周运动中一个重要的运动学量是角速度  $\omega$ , 定义为质点与圆心连线在单位时间内转过的角量, 即

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}.$$

速度  $v$  与  $\omega$  的关系为

$$v = \omega R,$$

其中  $R$  是圆半径. 质点作圆周运动时, 每个位置上都有一个指向圆心的加速度, 称为向心加速度, 它的大小是

$$a_{\text{心}} = \omega^2 R = \frac{v^2}{R}.$$

$\omega$  为常量对应匀速圆周运动,  $\omega$  为变量对应变速圆周运动. 此时文中的“速”一般可理解为角速度. 为描述变速圆周运动, 引入角加速度  $\beta$ , 定义为

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

匀速圆周运动对应  $\beta=0$ . 变速圆周运动中, 质点速度大小  $v$  随  $\omega$  而变, 因此还有一个沿着切线方向的切向加速度  $a_{\text{切}}$ , 它与  $\beta$  的关系为

$$a_{\text{切}} = \beta R.$$

$\beta$  是常量的变速圆周运动称为匀加速圆周运动, 与匀加速直线运动相似, 有

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t,$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2.$$

还有其他类型的平面曲线运动, 例如行星围绕太阳作椭圆运动, 车轮在平直路面上纯滚动时车轮边缘的每一点都在作滚

轮线运动. 这些运动在后面的内容中涉及时, 再作具体讨论.

**例 1** 光滑水平面上两根固定的刚性细杆  $OM$ 、 $ON$  成  $15^\circ$  夹角交于  $O$  点, 小球如图 1 所示在  $OM$  杆内侧与  $O$  相距  $l=20\text{cm}$  的  $P$  处, 以与  $MO$  成

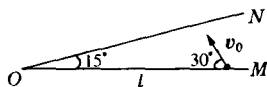


图 1

$30^\circ$  角方向的初速  $v_0$  朝着  $ON$  杆运动, 初速大小为  $v_0=10\text{cm/s}$ . 试问小球能否回到  $P$  处? 若能, 问需经多长时间回到  $P$  处?

**解** 小球与两根刚性细杆相继发生弹性碰撞, 碰后速率不变, 小球作匀速折线段运动. 碰撞前后小球运动方向的变化相当于平面镜上光的入射方向到反射方向的变化, 即可类比为镜面反射. 镜面反射后的光线行进可等效处理为虚像空间中光线沿原入射方向的直线行进. 据此, 小球在  $ON$ 、 $OM$  杆之间的运动可等效为图 2 所示的  $P-P'-P$  直线段匀速往返运动, 小球又将回到  $P$  处.

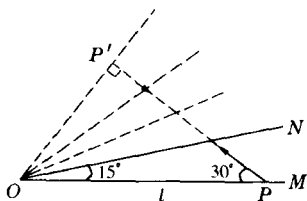


图 2

由图示几何关系可得

$$\overline{PP'} = l \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} l,$$

所经时间为

$$t = \frac{2 \overline{PP'}}{v_0} = \frac{\sqrt{3}}{v_0} l.$$

数值计算得

$$t = 2\sqrt{3} = 3.464\text{s}.$$

**例 2** 平面上两直线夹角为  $\theta$  (取  $\theta < 90^\circ$ ), 若它们各以垂直于自身的匀速度  $v_1$  和  $v_2$  在该平面上作如图 1 所示的横向运动, 试求交点相对于纸平面的速率及交点相对于每一直线的速率.

**解** 参阅图 2, 设  $t$  时刻两直线(记为  $l_1$  与  $l_2$ )的交点为

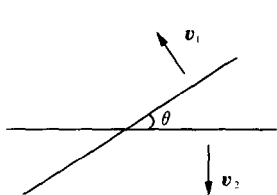


图 1

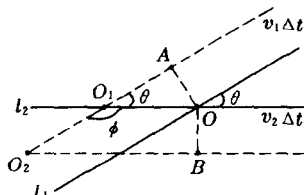


图 2

$O$ , 经  $\Delta t$  时间间隔, 直线  $l_1$  移动  $v_1\Delta t$  间距, 两直线交点从  $O$  移动到  $O_1$  位置, 有

$$\overline{OO_1} = \frac{v_1\Delta t}{\sin\theta}.$$

在此时间间隔内直线  $l_2$  移动  $v_2\Delta t$  间距, 这又使两直线交点从  $O_1$  移动到  $O_2$  位置, 有

$$\overline{O_1O_2} = \frac{v_2\Delta t}{\sin\theta}.$$

总效果是交点从  $O$  移动到  $O_2$ , 有

$$\overline{OO_2}^2 = \overline{OO_1}^2 + \overline{O_1O_2}^2 - 2\overline{OO_1}\overline{O_1O_2}\cos\phi,$$

如图所示,  $\phi$  与  $\theta$  互补, 即有

$$\cos\phi = -\cos\theta,$$

于是可算得

$$\overline{OO_2}^2 = (v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos\theta)\left(\frac{\Delta t}{\sin\theta}\right)^2.$$

因此交点相对于纸平面的运动速率为

$$v_0 = \frac{\overline{OO_2}}{\Delta t} = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2\cos\theta}}{\sin\theta}.$$

从图 2 还可看出, 原交点在  $l_1$  上的位置从  $O$  移动到  $A$ , 原交点在  $l_2$  上的位置从  $O$  移动到  $B$ , 而新交点位置  $O_2$  为  $l_1$ 、 $l_2$  共同所有. 因此, 交点相对于  $l_1$  是从  $A$  移动到  $O_2$ , 相对于  $l_1$  的运

动速率便为

$$\begin{aligned} v'_1 &= \frac{\overline{AO_1} + \overline{O_1O_2}}{\Delta t} = \frac{v_1 \Delta t \operatorname{ctg} \theta + \frac{v_2 \Delta t}{\sin \theta}}{\Delta t} \\ &= \frac{v_1 \cos \theta + v_2}{\sin \theta}. \end{aligned}$$

交点相对于  $l_2$  是从  $B$  移动到  $O_2$ , 相对于  $l_2$  的运动速率便为

$$\begin{aligned} v'_2 &= \frac{\overline{OO_1} + \overline{O_1O_2} \cos \theta}{\Delta t} = \frac{\frac{v_1 \Delta t}{\sin \theta} + \frac{v_2 \Delta t}{\sin \theta} \cos \theta}{\Delta t} \\ &= \frac{v_1 + v_2 \cos \theta}{\sin \theta}. \end{aligned}$$

**例 3** 精密测量中, 一种测量重力加速度  $g$  的方法是在真空容器中竖直向上抛出一物体, 测出物体抛出后两次经过水平位置  $A$  的时间间隔为  $T_A$ , 两次经过水平位置  $B$  的时间间隔为  $T_B$ . 已知  $B$  在  $A$  的上方  $h$  处, 试求重力加速度  $g$ .

**解** 以起抛点为坐标原点, 建立竖直向上的  $y$  轴. 由已知条件  $y_B > y_A$ , 得  $T_A > T_B$ . 对  $A$  点有

$$y_A = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2,$$

即

$$g t^2 - 2v_0 t + 2y_A = 0.$$

式中  $v_0$  为上抛初速度. 过  $A$  点两时刻分别为

$$t_1 = \frac{2v_0 - \sqrt{4v_0^2 - 8gy_A}}{2g},$$

$$t_2 = \frac{2v_0 + \sqrt{4v_0^2 - 8gy_A}}{2g}.$$

便有

$$T_A = t_2 - t_1 = \frac{1}{g} \sqrt{4v_0^2 - 8gy_A},$$

或 
$$T_A^2 = \frac{1}{g^2}(4v_0^2 - 8gy_A).$$

对  $B$  点,相应地有

$$T_B^2 = \frac{1}{g^2}(4v_0^2 - 8gy_B).$$

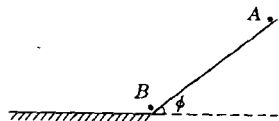
与上式相减,得

$$T_A^2 - T_B^2 = \frac{8h}{g},$$

即有

$$g = \frac{8h}{T_A^2 - T_B^2}.$$

**例 4** 如图所示,在倾角为  $\phi$  的光滑斜面顶端有一质点  $A$  自静止开始自由下滑,与此同时在斜面底部有一质点  $B$  自静止开始以匀加速度  $a$  背离斜面在光滑的水平面上运动. 设  $A$  下滑到斜面底部能沿着光滑的小弯曲部分平稳地朝  $B$  追去,试求为使  $A$  不能追上  $B$ ,  $a$  的取值范围.



**解** 显然  $a$  越小  $A$  越能追上  $B$ ,  $a$  大到某临界值时  $A$  恰能追上  $B$ , 超过此值  $A$  便不能追上  $B$ . 先求  $a$  的这一临界值.

设  $A$  到斜面底部的速度为  $v_A$ , 所经时间便为

$$t_1 = \frac{v_A}{g \sin \phi}.$$

而后由于  $A$  匀速、 $B$  匀加速, 因此  $A$  恰好能追上  $B$  的条件是:

(1) 在路程方面能追上  $B$ , 即又经  $t_2$  时间后有

$$v_A t_2 = \frac{1}{2} a (t_1 + t_2)^2.$$

(2)  $A$  追上  $B$  时,  $B$  的速度恰好已达  $v_A$ , 即有

$$v_A = a(t_1 + t_2).$$

两式相除, 便得

$$t_2 = t_1.$$

于是有

$$v_A = a(t_1 + t_2) = 2at_1.$$

将  $t_1 = \frac{v_A}{g \sin \phi}$  代入后, 即得  $a$  的临界值为

$$a = \frac{1}{2} g \sin \phi.$$

综合前面所述, 可知为使  $A$  不能追上  $B$ ,  $a$  的取值范围为

$$a > \frac{1}{2} g \sin \phi.$$

**例 5** 一位足球运动员想在球门正前方 50m 处将球踢进球门, 踢出的足球具有的初速率为 25m/s, 为防止守门员将球接住, 他选择进球位置在正前方球门水平横梁下方 80cm 之内区域. 若横梁高度为 3.44m, 试问他应在什么倾角范围内将球踢出?

**解** 球的斜抛轨道方程为

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \phi} x^2 + (\operatorname{tg} \phi)x.$$

今取  $x=50\text{m}$ ,  $v_0=25\text{m/s}$ ,  $\phi$  便为所求倾角. 据题意, 要求

$$2.64\text{m} < y < 3.44\text{m}.$$

代入轨道方程, 有

$$2.64 < 50\operatorname{tg} \phi - 19.6(\operatorname{tg}^2 \phi + 1) < 3.44,$$

即

$$\begin{cases} \operatorname{tg}^2 \phi - 2.55\operatorname{tg} \phi + 1.13 < 0, \\ \operatorname{tg}^2 \phi - 2.55\operatorname{tg} \phi + 1.18 > 0. \end{cases}$$

由此可解得  $\phi$  可取范围为

$$29.7^\circ < \phi < 31.2^\circ,$$

或

$$62.9^\circ < \phi < 63.2^\circ.$$

**例 6** 在地面上同一地点以相同初始速率, 在同一竖直平

面内将两小球以不同抛射角抛出. 若两小球水平射程相同, 试证:

(1) 两小球抛射方向与  $45^\circ$  方向所夹的角相等;

(2) 它们在空中飞行时间的乘积与水平射程之比为一常量.

证 将初速率记为  $v_0$ , 抛射角记为  $\phi$ , 水平射程记为  $s$ , 飞行时间记为  $t$ , 则有

$$s = \frac{v_0^2 \sin 2\phi}{g}.$$

$$t = \frac{2v_0 \sin \phi}{g}.$$

(1) 两小球的抛射角分别记为  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ , 因  $s$ 、 $v_0$  相同, 有

$$\sin 2\phi_1 = \sin 2\phi_2,$$

其中  $\phi_1 = \phi_2$  的解不合题意, 另一解为

$$2\phi_1 = \pi - 2\phi_2,$$

即有

$$\phi_1 + \phi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

若  $\phi_1 < \frac{\pi}{4}$ , 则  $\phi_2 > \frac{\pi}{4}$ , 故有

$$\phi_2 - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4} - \phi_1,$$

即两小球抛射方向与  $45^\circ$  方向所夹的角相等.

(2) 飞行时间  $t_1$ 、 $t_2$  的乘积为

$$\begin{aligned} t_1 t_2 &= \frac{2v_0 \sin \phi_1}{g} \times \frac{2v_0 \sin \phi_2}{g} \\ &= \frac{4v_0^2 \sin \phi_1 \cos \phi_1}{g^2} = \frac{2v_0^2 \sin 2\phi_1}{g^2} = \frac{2s}{g}, \end{aligned}$$

即有

$$\frac{t_1 t_2}{s} = \frac{2}{g} \text{ (常量).}$$

例 7 小球在某竖直平面的  $O$  点斜向上方抛出, 抛射角为  $\phi$ , 速度大小为  $v_0$ . 在该竖直平面内作  $OM$  射线与小球抛出时的初速度方向垂直, 如图 1 所示. 试问, 小球到达  $OM$  射线时的速度  $v$  为多大?

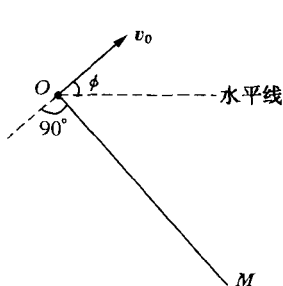


图 1

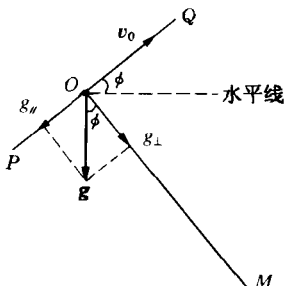


图 2

解 过  $O$  点作  $PQ$  直线与  $OM$  射线垂直, 将重力加速度  $g$  按图 2 所示分解为

$$g_{//} = g \sin \phi, g_{\perp} = g \cos \phi.$$

小球在  $PQ$  方向上作初速度为  $v_0$ 、负方向加速度为  $g_{//}$  的匀加速直线运动, 到达  $OM$  射线所需时间为

$$t = 2 \frac{v_0}{g_{//}} = \frac{2v_0}{g \sin \phi}.$$

此时小球沿  $PQ$  方向的速度为

$$v_{//} = -v_0.$$

又因小球在  $OM$  方向上作初速为 0、加速度为  $g_{\perp}$  的匀加速直线运动, 经  $t$  时间速度达到

$$v_{\perp} = g_{\perp} t = \frac{2v_0 \cos \phi}{\sin \phi},$$

故小球在到达  $OM$  射线时的速度大小为

$$v = \sqrt{v_{//}^2 + v_{\perp}^2} = \sqrt{1 + 4 \operatorname{ctg}^2 \phi} v_0.$$



例 8 图 1 中的  $AC$ 、 $BD$  两细杆以匀角速度  $\omega$  分别绕相距为  $l$  的两固定轴在同一竖直平面上转动,转动方向已在图中示出.小环  $M$  套在两杆上, $t=0$  时图中  $\alpha=\beta=60^\circ$ ,试求  $M$  未落地前的运动速度大小和加速度大小.

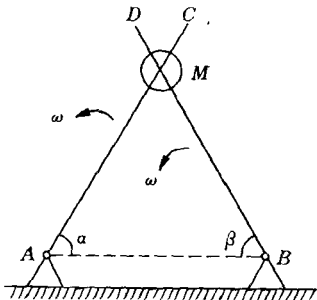


图 1

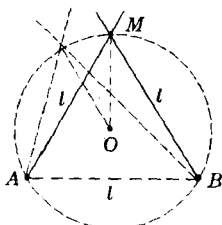


图 2

解 开始时  $\triangle AMB$  为等边三角形,它的外接圆如图 2 中虚线所示,圆心为  $O$ ,半径

$$R = \overline{OM} = \frac{\sqrt{3}}{3}l.$$

两杆旋转过程中, $A$  增加的角量恰好等于  $B$  减少的角量,而  $\angle AMB$  则始终保持为  $60^\circ$ ,因此不难理解  $M$  点既不能偏向圆内也不能偏向圆外,即  $M$  只能在原来的圆周上. $M$  转过的圆心角对应的圆弧应为  $A$  增加的圆周角对应的圆弧,所以  $M$  点绕  $O$  旋转的角速度应为  $AM$  杆转动角速度  $\omega$  的两倍,即  $M$  以  $2\omega$  角速度绕  $O$  作匀速圆周运动,任意  $t$  时刻速度大小恒为

$$v = R(2\omega) = \frac{2\sqrt{3}}{3}\omega l,$$

加速度(向心加速度)大小恒为

$$a = (2\omega)^2 R = \frac{4\sqrt{3}}{3}\omega^2 l.$$