DAXUE WULI XUEXI ZHIDAO

大学物理学习指导

庞兆芳　主编

天津大学出版社

大学物理学习指导

主编　庞兆芳

天 津 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书是编者参阅国家教委物理课程指导委员会制定的《工科大学物理教学基本要求》、总结大学物理课程的多年教学经验编写而成的。书中每一章都包括基本概念及规律、基本要求、解题指导、小结和习题5个部分。全书共17章，在总结物理学概念、规律、方法的基础上分清主次，突出重点，解释一些容易混淆的问题，并精选了200多道有代表性的例题，以帮助学生掌握基础知识，培养分析问题、解决问题的能力。

本书是紧密配合大学物理课程的通用参考书，对预习和复习大学物理课程起着指导作用。因此，对广大工科大学生、理科大学非物理专业学生、职工大学和电视大学学生、自学读者以及从事大学物理课程教学的教师都有参考价值。

(津)新登字012号

大学物理学习指导

庞兆芳 主编

*

天津大学出版社出版
(天津大学内)
天津市南开大学印刷厂印制
新华书店天津发行所发行

*

开本:850×1168毫米 1/32 印张:13.75 字数:356千字
1994年5月第一版 1994年5月第一次印刷
印数:1—8000
ISBN 7-5618-0612-4
O·64 定价:10.60元

编写说明

物理学作为一门基础理论科学，其重要性随着科学技术的发展而日益明显。许多边缘学科都是以物理规律为基础而发展起来的，理工科学生只有打好物理学基础，才有可能在专业课学习及科研新领域开拓中获得较高的成就。为了使广大学生学好物理学，我们编写了这本指导书。本书是在天津大学几个班级经两届学生试用的讲义基础上修改而成的。

编写本书的目的是，有助于学生深入理解课程内容，理清思路，启发思考；不仅能掌握物理学的宏观结构，而且通过解题方法和解题技巧来了解物理学中的每个细节及其奥妙。本书的编写特点是：(1)对基本概念及规律部分的内容提纲挈领，举其大要；(2)教学内容的基本要求明确，便于预习新课、温习旧课和考试复习；(3)解题指导部分通过200多道有代表性的例题，使读者加深对概念和规律的理解，培养举一反三解决实际问题的能力；(4)每章的小结包括概念、规律的深化和教学经验的总结等内容；(5)配有200多道习题；书末附有习题答案，可供读者自我练习。

本书由庞兆芳任主编。参加编写工作的有庞兆芳（第一至七章）、贾洛武（第八、九章）、曹文斗（第十至十二章）、张立升（第十三、十四章）、李增智（第十五章）、霍炳海（第十六、十七章）。全书由庞兆芳进行统稿和修改，由林家逖教授审阅。

在本书的编写中，编者除了总结多年的教学经验外，还参考了若干现有的教材和参考书，在许多方面得到启发与教益，在此不再

一一指明，特致谢意。

由于水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编　者

1993.08.22 于天津大学物理系

目　录

第一章　质点运动学……………………………………………………（1）
第二章　质点动力学 ………………………………………………（23）
第三章　能量　动量　角动量　守恒定律 …………………（45）
第四章　刚体的定轴转动 …………………………………………（83）
第五章　狭义相对论基础………………………………………（110）
第六章　气体分子运动论………………………………………（141）
第七章　热力学基础……………………………………………（168）
第八章　真空中的静电场………………………………………（196）
第九章　静电场中的导体和电介质……………………………（220）
第十章　电流与磁场……………………………………………（238）
第十一章　物质的磁性质和磁介质中的磁场………………（261）
第十二章　电磁场的普遍规律…………………………………（271）
第十三章　振动学基础…………………………………………（298）
第十四章　简谐波………………………………………………（329）
第十五章　光的波动性…………………………………………（357）
第十六章　光的量子性…………………………………………（387）
第十七章　原子的量子理论……………………………………（402）
习题答案…………………………………………………………（417）

第一章　质点运动学

一、基本概念及规律

1. 参照系、坐标系、质点

参照系:用以描述物体运动所选用的另一个物体叫参照系。

坐标系:在参照系上建立标明数量的坐标轴叫坐标系。

质点:在一定条件下,可以略去物体的形状和大小,且把物体质量集中在质心的物体可当作一个质点。

2. 位置矢量(矢径)、运动方程、位移矢量

位置矢量:用以确定质点位置的矢量。

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}$$

运动方程:位置矢量随时间的变化关系式即运动方程。

$$\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}$$

位移矢量:质点在一段时间 Δt 内位置的改变。

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}(t)$$

3. 瞬时速度(简称速度)和瞬时加速度(简称加速度)

速度:质点位置矢量对时间的变化率。

$$\boldsymbol{v}^{*}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$$

加速度:质点速度对时间的变化率。

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$$

---

* $\boldsymbol{v}$ 即英文 v 的黑体,下同。

4. 匀加速直线运动

位置　$x=x_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2$

速度　$v=v_0+at$

5. 抛体运动　(Y 轴向上为正)

位置　$x=v_0\cos\theta\cdot t$　　$y=v_0\sin\theta\cdot t-\frac{1}{2}gt^2$

速度　$v_x=v_0\cos\theta$　　$v_y=v_0\sin\theta-gt$

加速度　$a_x=0$　　$a_y=-g$

6. 圆周运动的加速度

总加速度　$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_n+\boldsymbol{a}_t$

法向加速度　$a_n=\frac{v^2}{R}=R\omega^2$

方向沿半径指向圆心。

切向加速度　$a_t=\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$

方向沿轨道切线，式中 v 是速率($v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$)。

7. 一般曲线运动加速度的两种表示法

笛卡儿坐标：

加速度的矢量式　$\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}$

加速度的大小　$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2}$

式中，a_x、a_y 分别表示 X、Y 方向的加速度。

自然坐标：

加速度的矢量式　$\boldsymbol{a}=a_n\boldsymbol{n}_0+a_t\boldsymbol{t}_0$

加速度的大小　$a=\sqrt{a_n^2+a_t^2}$

式中，法向加速度 $a_n=v^2/\rho$，ρ 为曲率半径；切向加速度 $a_t=\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$，方向沿轨道切线；速率 $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$；$\boldsymbol{n}_0$ 是法线方向的单位矢量，$\boldsymbol{t}_0$ 是切线方向的单位矢量。

8. 相对运动

如图 1—1 所示：

位置矢量变换　$\boldsymbol{r}_{po}=\boldsymbol{r}_{po'}+\boldsymbol{r}_{oo'}$

速度变换　$\boldsymbol{v}_{po}=\boldsymbol{v}_{po'}+\boldsymbol{v}_{oo'}$

加速度变换　$\boldsymbol{a}_{po}=\boldsymbol{a}_{po'}+\boldsymbol{a}_{oo'}$

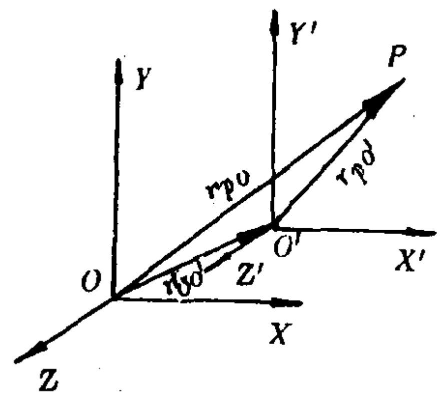

图 1—1

式中，$\boldsymbol{r}_{po}$、$\boldsymbol{v}_{po}$、$\boldsymbol{a}_{po}$分别表示质点 P 相对于 O 系的位置矢量、速度矢量、加速度矢量；$\boldsymbol{r}_{po'}$、$\boldsymbol{v}_{po'}$、$\boldsymbol{a}_{po'}$分别表示质点 P 相对于 O'系的位置矢量、速度矢量、加速度矢量；$\boldsymbol{r}_{oo'}$、$\boldsymbol{v}_{oo'}$、$\boldsymbol{a}_{oo'}$分别表示 O' 系的原点相对于 O 系原点的位置矢量、速度矢量、加速度矢量。

9. 运动的叠加原理

一种运动可以看成几种各自独立进行的运动叠加而成。这个结论亦叫运动的独立性原理。

二、基本要求

(1)理解质点模型和参照系的概念。

(2)掌握位移、速度、加速度的概念和计算。

(3)掌握位置矢量、运动方程和轨道方程的概念及有关运算。

(4)明确位移和路径的区别；明确速度与平均速度、平均速率，加速度与平均加速度的关系。

(5)掌握总加速度 $\boldsymbol{a}=a_n\boldsymbol{n}_0+a_t\boldsymbol{t}_0$ 和 $\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{i}$ 两个公式的特点和应用。

(6)理解运动的相对性、瞬时性、矢量性。

(7)了解一般曲线运动的法向加速度为 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}$

式中，v 是质点的速度；ρ 是曲率半径。ρ 的表示式为

$$\rho=\left|\frac{(1+y_x'^2)^{3/2}}{y_x''}\right|$$

式中，$y=y(x)$是轨道方程。

三、解题指导

例题 1－1 一质点在半径 $R=1\text{m}$ 的圆周上按顺时针方向运动，开始时位置在 A 点，如图 1－2 所示。质点运动的路程与时间的关系为

$$S=\pi t^2+\pi t$$

(S 的单位为 m，t 的单位为 s)。试求：

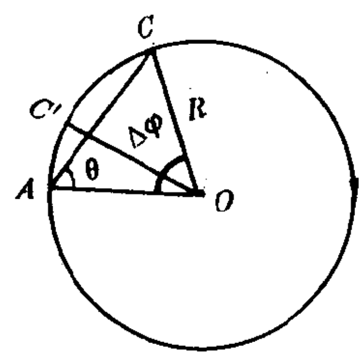

图 1－2

(1)质点从 A 点出发，绕圆运行一周所经历的路程、位移、平均速度、平均速率各为多少？

(2)质点在第 1s 与 1.1s 间、第 1s 与 1.0001s 间的平均速度、平均速率各为多少？

(3)质点在第 1s 时的速度、速率、加速度各为多少？

解 (1)质点绕行一周所经历的路程

$$S=2\pi R=2\times3.14\times1=6.28\ \text{m}$$

质点从 A 点出发又回到 A 点时，其位移为零。

为了求出平均速度、平均速率，先计算绕行一周($S=2\pi R$)所需的时间 t。由

$$2\pi R=\pi(t^2+t)$$

即 $\qquad t^2+t-2=0$

解得 $\qquad t_1=1\text{s}$

$$t_2=-2\text{s}$$

负值不合题意，舍去。故绕行一周质点运动的平均速率

$$\bar{v}=\frac{2\pi R}{t_1}$$

$$=\frac{2\times 3.14\times 1}{1}=6.28\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

质点在一周内的平均速度为零。

(2)在 t 到 $t+\Delta t$ 时间间隔内，质点所经过的路程

$$\Delta S=[(t+\Delta t)^2+(t+\Delta t)-t^2-t]\pi$$

$$=[(2t+1)\Delta t+\Delta t^2]\pi$$

故在 $\Delta t_1=1.1-1.0=0.1\mathrm{s}$ 时间间隔内，质点所经过的路程

$$\Delta S_1=[(2\times 1+1)\times 0.1+0.1^2]\pi$$

$$=0.31\pi=0.97\ \mathrm{m}$$

位移的大小

$$\overline{AC}=2R\sin\frac{\Delta\varphi}{2}=2R\sin(\frac{\Delta S_1}{2R})$$

$$=2\times 1\times\sin(\frac{0.31\pi}{2})=0.94\ \mathrm{m}$$

位移的方向沿 AC，即与 AO 的夹角

$$\theta=\frac{1}{2}(\pi-\Delta\varphi)=0.35\pi$$

故质点在 Δt_1 时间间隔内的平均速率

$$\bar{v}_1=\frac{\Delta S_1}{\Delta t_1}=\frac{0.97}{0.1}=9.7\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

平均速度的大小

$$\overline{V}_1=\frac{\overline{AC}}{\Delta t_1}=\frac{0.94}{0.1}=9.4\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

平均速度的方向沿 AC，即与 AO 的夹角为 0.35π。

同理，在 $\Delta t_2=1.0001-1.0000=0.0001\mathrm{s}$ 时间间隔内，质点所经过的路程

$$\Delta S_2=0.00094\ \mathrm{m}$$

位移大小

$$\overline{AC'} = 0.00094\ \text{m}$$

位移的方向沿 AC'，即与 AO 夹角

$$\theta' \approx \frac{\pi}{2}$$

质点的平均速率

$$\bar{v}_2 \approx 9.4\quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

平均速度的大小

$$\overline{V}_2 \approx 9.4\quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

平均速度的方向沿 AC'，即与 AO 的夹角近似为 90°。

(3)速度的大小

$$V = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} = (2t + 1)\pi$$

当 $t=1\text{s}$ 时，$V_1=(2\times1+1)\pi=9.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$方向沿该点切线方向。

速率

$$v_1 = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} = 9.4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

切线加速度　$a_t=\dfrac{\mathrm{d}^2S}{\mathrm{d}t^2}=2\pi=6.28\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

法向加速度　$a_n=\dfrac{v_1^2}{\mathrm{R}}\approx88.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

总加速度　$a=(a_t^2+a_n^2)^{\frac{1}{2}}\approx8.9\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向与 AO 的夹角

$$\theta_0 = \arccos\frac{a_n}{a} \approx 3.84°\text{(图中未画出)}$$

小结

(1)路程、平均速率、速率是标量。

(2)位移、平均速度、速度、加速度是矢量。

(3)平均速率、平均速度的大小与所取时间间隔有很大关系。当时间间隔很小时，它们的数值相近。在极限情形下，二者数值相等。

例题1－2　已知质点沿双曲线 $xy=1$　运动。某瞬时，质点位于 $x_1=1.20$ m处。0.36s 后处于 $x_2=1.40$m，如图1－3所示。求质点在轨道上“1”及“2”处的矢径及平均速度。

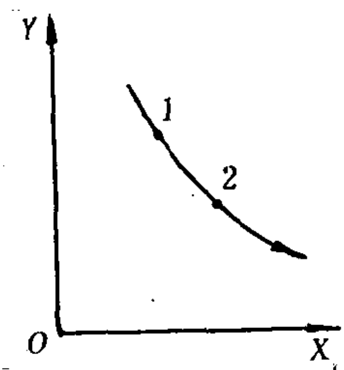

图1－3

解　根据 x_1、x_2 的数值，通过轨道方程算出

$$y_1=\frac{1}{1.20}=0.833\ \text{m}\qquad y_2=\frac{1}{1.40}=0.714\ \text{m}$$

则矢径　$\boldsymbol{r}_1=1.20\boldsymbol{i}+0.833\boldsymbol{j}$ m　$\boldsymbol{r}_2=1.40\boldsymbol{i}+0.714\boldsymbol{j}$ m

从已知条件计算得

$$\Delta x=x_2-x_1=0.20\ \text{m}\quad \Delta y=y_2-y_1=-0.119\ \text{m}$$

根据位移和平均速度定义，

由　$\Delta\boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}$

得

$$\boldsymbol{v}_{平}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i}+\frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j}$$

上式中代入 Δx、Δy 和 Δt 的数值，得平均速度和平均速度的数值分别为

$$\boldsymbol{v}_{平}=0.556\boldsymbol{i}-0.331\boldsymbol{j}\quad \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$v_{平}=\left[\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2+\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}=0.647\quad \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

设 θ 表示平均速度方向与 X 轴夹角。$\text{tg}\theta=-0.595$，即 $\boldsymbol{v}_{平}$沿自 X 轴顺时针转 30.7°的方向。

本题只要抓住矢径、位移、平均速度和平均速度的数值四个公式，问题就迎刃而解(矢径　$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}$，位移　$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1=\Delta x\boldsymbol{i}+$

$\Delta y\boldsymbol{j}$，平均速度 $\boldsymbol{v}_{平}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$，平均速度数值

$$v_{平}=\left[\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2+\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}。$$

例题 1－3 一个质点沿 x 轴按下列规律运动：$x=(t^3-3t^2-9t+5)\mathrm{m}$。试问：在哪些时间间隔内这质点沿正 x 方向运动？在哪些时间间隔内沿负 x 方向运动？在哪些时间间隔内运动是加速的？在哪些时间间隔内运动是减速的？画出 x 对 t、v 对 t 和 a 对 t 的曲线。

解 质点在任一时刻的速度

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=3t^2-6t-9$$

$$=3(t+1)(t-3)\quad \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

质点在任一时刻的加速度

$$a=6t-6=6(t-1)\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

根据已给公式可画出 x 对 t、v 对 t 和 a 对 t 的曲线，如图 1－4 所示。分析讨论如下：

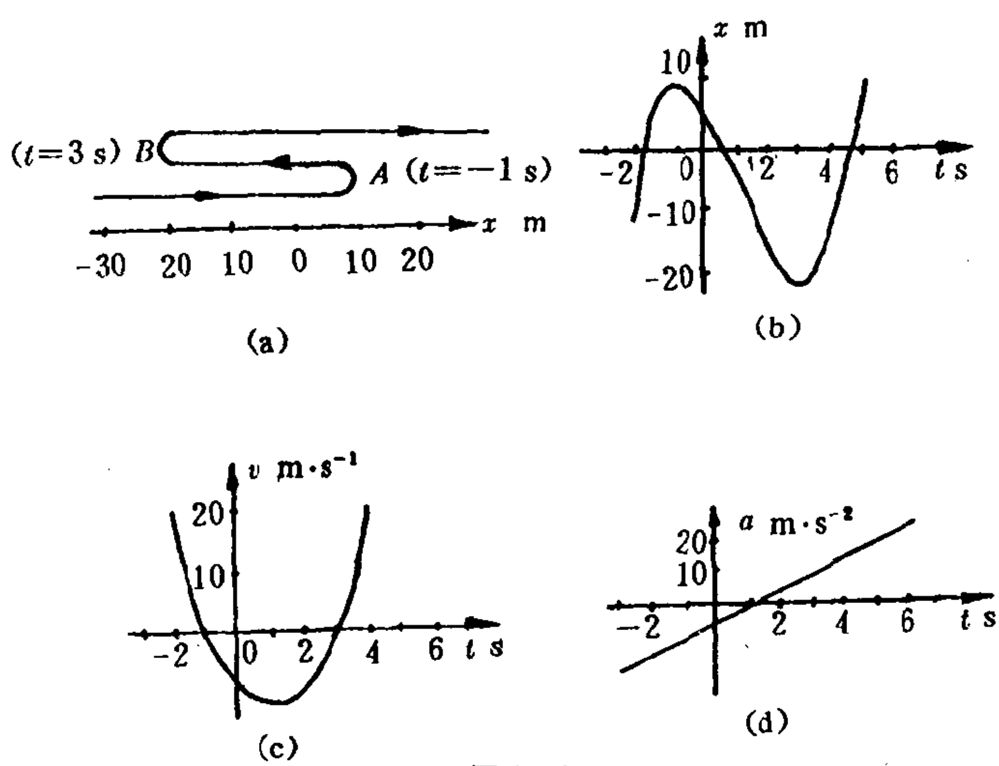

图 1－4

对于 $t<-1s$ 时，速度为正，运动沿 x 轴正方向。在 $t=-1s$，$x=10m$ 时，速度为零。

对于 $-1s<t<3s$ 时，速度为负，运动反向，质点沿 x 轴负方向运动。$t=3s$ 时，$x=-22m$，速度又等于零。

对于 $t>3s$ 时，速度再次为正，运动又反向，质点沿 x 轴正方向运动。图 1－4(a)中示出质点的行踪；A 和 B 表示速度等于零的转折点。

观察 v 对 t 和 a 对 t 的曲线，可以看出：

当 $t<-1s$ 时，运动是减速的(v 的数值减小，即 v 和 a 的符号相反)。

当 $-1s<t<1s$ 时，运动是加速的。

当 $1s<t<3s$ 时，运动又是减速的。

当 $t>3s$ 时，运动是加速的。

在这个例题中，虽然根据 $x(t)$、$v(t)$、$a(t)$ 的函数式可求出任何一个时刻质点的位置、速度、加速度，但如果用 $x-t$、$v-t$、$a-t$ 的图示法则可更直观、更清晰地揭示运动的特征。

例题 1－4 已知质点的运动方程 $\boldsymbol{r}=2t\boldsymbol{i}+(2-t^2)\boldsymbol{j}$ m，求：

(1)质点运动方程的分量式及轨道方程；

(2)质点运动的速度 $\boldsymbol{v}$；

(3)质点运动的加速度 $\boldsymbol{a}$($\boldsymbol{a}$ 可用直角坐标和自然坐标两种方法来表示)；

(4)画出轨道图形(如图 1－5 所示)。

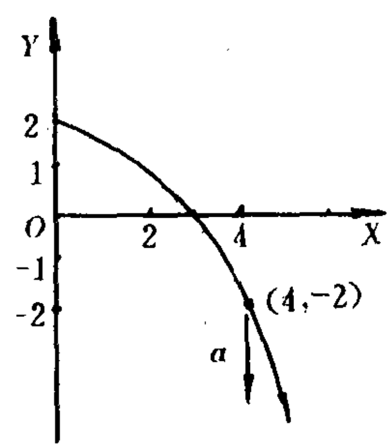

图 1－5

解 (1)运动方程分量式为

$$x=2t \qquad y=2-t^2$$

轨道方程为抛物线

$$y=2-(\frac{x}{2})^2=\frac{8-x^2}{4}=2-\frac{x^2}{4}$$

(2)速度在 X、Y 轴向的分量

$$v_x = 2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}} \quad v_y = -2t\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

速度数值为 $v=(v_x^2+v_y^2)^{\frac{1}{2}}=(4+4t^2)^{\frac{1}{2}}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

速度与 X 轴的夹角为

$$\theta_0 = \mathrm{arctg}\left|\frac{v_y}{v_x}\right|$$

(3)加速度在 XY 轴向的分量为

$$a_x = 0 \qquad a_y = -2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

加速度的数值为

$$a = (a_x^2 + a_y^2)^{\frac{1}{2}} = 2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

加速度与 X 轴的夹角

$$\theta = \mathrm{arctg}\left|\frac{a_y}{a_x}\right|$$

加速度在自然坐标 n、t 的分量为 a_n、a_t。法向加速度可用 $a_n=v^2/\rho$ 来表示。式中 ρ 为曲率半径，根据数学公式

$$\rho = \left|\frac{(1+y_x'^2)^{3/2}}{y_x''}\right|$$

通过计算，可得

$$a_n = \frac{2}{(1+t^2)^{\frac{1}{2}}}$$

切向加速度可用 $a_t=\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 来表示。通过计算可得

$$a_t = \frac{2t}{(1+t^2)^{\frac{1}{2}}}$$

加速度的数值

$$a = (a_n^2 + a_t^2)^{\frac{1}{2}} = 2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

加速度与切线方向的夹角

$$\theta' = \operatorname{arctg}\left|\frac{a_n}{a_t}\right|$$

小结

(1)若运动方程的矢量式已给，则运动方程的分量式可直接写出，由运动方程的分量式可计算任何时刻质点的位置、矢径(本题没有计算这部分，请读者自行考虑)、速度和加速度。在分量式中消掉 t，即可得轨道方程。由此可见，运动方程已给，则质点运动的一切信息都可知道。

(2)加速度可用直角坐标和自然坐标(曲线上某点相互垂直的法线和切线方向)两种方法表示。但加速度与所取坐标无关，并可表示为 $\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}=a_n\boldsymbol{n}_0+a_t\boldsymbol{t}_0$

$\boldsymbol{n}_0$、$\boldsymbol{t}_0$ 是法向、切向的单位矢量，加速度的数值为

$$a = (a_x^2 + a_y^2)^{\frac{1}{2}} = (a_n^2 + a_t^2)^{\frac{1}{2}}$$

(3)特别注意，在求速度和加速度的数值时必须先写出其矢量式然后再计算其数值。即先计算它们的分量 v_x、v_y、a_x、a_y 或 a_t、a_n，然后计算它们的数值。

例题 1－5 质量为 m 的质点，作斜抛运动时受阻力 $\boldsymbol{f}_r=-K'\boldsymbol{v}=-(mK)\boldsymbol{v}$(为了计算方便，使阻力系数 $K'=mK$，其中 m 是质点的质量，K 为另一个常数)及重力 $\boldsymbol{P}=m\boldsymbol{g}$ 的作用。设 $t=0$ 时，$x_0=0$、$v_{0x}=v_0\cos\theta$，$y_0=0$、$v_{0y}=v_0\sin\theta$，求质点的运动方程。

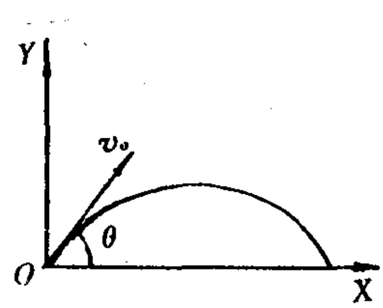

图 1－6

解 由合力 $\boldsymbol{F}=\boldsymbol{f}_r+\boldsymbol{P}$ 方程分解成 X、Y 方向力的方程为

$$ma_x = -mKv_x$$
$$ma_y = -mKv_y - mg$$

上两式消去 m 得