大学物理学习指导

宗馥英　李仁英　编

华南理工大学出版社

大学物理学习指导

宗馥英　李仁英　编

华南理工大学出版社
·广州·

图书在版编目（CIP）数据

大学物理学习指导/宗馥英，李仁英编．—广州：华南理工大学出版社，1996.8

ISBN 7-5623-0972-8

Ⅰ．大…

Ⅱ．①宗…②李…

Ⅲ．物理-高等学校-教学参考资料

Ⅳ．O4

华南理工大学出版社出版发行

（广州五山　邮码 510640）

责任编辑　潘宜玲

各地新华书店经销

华南理工大学印刷厂印装

1999年4月第1版第3次印刷

开本:850×1168　1/32　印张:12.75　字数:320千

印数:6001～9000册

定价:19.50元

前　言

《大学物理》是工科大学中一门重要的基础理论课，教学对象一般是入学不久的一年级大学生。从高中到大学在学习上是一个转折，不但知识的深度和广度比中学有很大提高，所学知识容量也比中学大大增加。为了使学生学得更主动，帮助学生克服学习上的困难，我们根据《重点高等学校工科大学物理课程教学改革指南》的精神及《工科大学物理课程基本要求》，并结合工科院校的实际情况，编写了《大学物理学习指导》一书，此书可与《大学物理》教材配套使用。

本书每章分两部分。第一部分为“内容提要”：概括每一章的主要内容，总结基本概念和基本规律。第二部分为“学习指导与示例”：紧扣教学基本要求，选取有适当深度、足够的广度和一定难度的例题。通过各类题型的分析、求解，让学生掌握解题方法、解题技巧，开阔解题思路，提高分析问题和解决问题的能力；使学生较好地掌握、运用基础知识，深化知识，拓宽知识应用领域。此外，每篇末附有自我测试题，书末附有参考答案，供读者自我检查，力图对学生的学习起到积极辅导作用，对主讲教师起到方便教学作用。

本书在编写过程中得到了华南理工大学物理教研组老师的支持和帮助；许仁名教授审阅了全书，并提出了修改意见，谨表致谢！

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有不妥之处，望读者批评指正。

编　　者

目　录

第一篇　力　学

第二篇　机械振动与机械波

第三篇　波动光学

第四篇　分子物理学和热力学基础

第五篇 电 磁 学

第六篇 近代物理基础

第一篇　力　学

第一章　质点运动学

内 容 提 要

一、描写运动的四个物理量

位置矢量：描述质点在空间的位置。

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

位移：描述质点位置的改变。

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

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

速度：描述质点位置变动的快慢和方向。

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$$

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

加速度：描述质点速度变化。

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

注意：上述四个物理量具有矢量性、瞬时性和相对性。

二、圆周运动的速度、加速度

表 1-1

线　　量	角　　量	角量与线量关系
线速度：$v=\frac{ds}{dt}$		$s=R\theta$
切向加速度：$a_\tau=\frac{dv}{dt}$ 方向：与 $\boldsymbol{v}$ 同向为正， 与 $\boldsymbol{v}$ 反向为负	角速度 $\omega=\frac{d\theta}{dt}$	$v=R\omega$
法向加速度：$a_n=v^2/R$ 方向：指向圆心	角加速度	$a_\tau=R\beta$
总加速度：$a=\sqrt{a_n^2+a_\tau^2}$ 方向：$\theta=\mathrm{tg}^{-1}\frac{a_n}{a_\tau}$ （θ 为 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 的夹角）	$\beta=\frac{d\omega}{dt}=\frac{d^2\theta}{dt^2}$	$a_n=R\omega^2$

三、两个不同参照系之间的速度、加速度变换关系

$$\boldsymbol{v}_{绝对}=\boldsymbol{v}_{相对}+\boldsymbol{v}_{牵连}$$
$$\boldsymbol{a}_{绝对}=\boldsymbol{a}_{相对}+\boldsymbol{a}_{牵连}$$

学习指导与示例

一、已知运动方程求 $\Delta\boldsymbol{r}$ 及通过求导求 $\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{a}$，并判断物体作何种运动

例 1　一质点在平面运动，已知其运动方程为 $x=at^2$，$y=bt^2$，

求该质点的位置矢量 $\boldsymbol{r}$、轨道方程，并判断该质点作何种运动。

解 ①位置矢量

$$\boldsymbol{r} = at^2\boldsymbol{i} + bt^2\boldsymbol{j}$$

②由 $x=at^2$，$y=bt^2$ 联立消去 t 得轨迹方程为：

$$y = \frac{b}{a}x$$

可见质点运动轨迹为直线，其斜率为 b/a。

③根据加速度定义知：

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} = 2a\boldsymbol{i} + 2b\boldsymbol{j}$$

即 $$a_x = 2a,\quad a_y = 2b$$

∴ 质点作匀变速直线运动。

例 2 在离船的高度为 h 的岸边，绞车以恒定的速率 v_0 收绳，使船靠岸，如图 1-1 所示。求当船头与岸的水平距离为 x 时，船的速度与加速度。

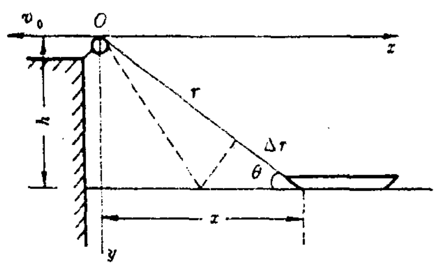

图 1-1

解 方法一：由图可知船的位矢为：

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + h\boldsymbol{j}$$

其中 $$x = \sqrt{r^2 - h^2}$$

由速度定义有

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} = v_x\boldsymbol{i}$$

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\sqrt{r^2 - h^2} = \frac{r}{\sqrt{r^2 - h^2}}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$$

因绳子变短，故$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=-v_0$，代入上式有

$$v_x=-\frac{r}{\sqrt{r^2-h^2}}v_0=-\frac{\sqrt{x^2+h^2}}{x}v_0$$

$$\therefore \qquad \boldsymbol{v}=-\frac{\sqrt{x^2+h^2}}{x}v_0\boldsymbol{i}$$

其中负号表示$\boldsymbol{v}$的方向与正x方向相反。可见，船速不是恒定的，且大于收绳速度v_0。

根据加速度定义：

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=-v_0\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\sqrt{x^2+h^2}}{x}\right)$$

$$=v_0\frac{h^2}{x^2\sqrt{x^2+h^2}}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{-v_0^2h^2}{x^3}$$

$$a_y=0$$

$$\therefore \qquad \boldsymbol{a}=-\frac{v_0^2h^2}{x^3}\boldsymbol{i}$$

负号表示$\boldsymbol{a}$的方向与x正向相反。由于v与a同向，所以船是加速靠岸的。

解法二：因为

$$\frac{|\Delta r|}{|\Delta x|}=\cos\theta$$

则有

$$|\Delta x|=\frac{|\Delta r|}{\cos\theta}$$

$$\frac{|\mathrm{d}x|}{\mathrm{d}t}=\frac{\frac{|\mathrm{d}r|}{\mathrm{d}t}}{\cos\theta}$$

即

$$|v_x|=\frac{|v_0|}{\cos\theta}$$

$$\because \qquad \cos\theta=\frac{x}{\sqrt{x^2+h^2}}$$

考虑到 v_x 的方向

$$\therefore \qquad v_x = -\frac{v_0\sqrt{x^2+h^2}}{x}$$

$$v_y = 0$$

a 的解法同上。

例 3 一质点在 xOy 平面内运动。已知其运动方程：$x=3t+5$，$y=\frac{1}{2}t^2+3t-4$（式中 x、y 单位为 m，t 单位为 s），求：

（1）质点位置矢量表达式。

（2）$t=1\text{s}$ 和 $t=2\text{s}$ 时的位置矢量。计算这一秒内质点的位移。

（3）计算 $t=4\text{s}$ 时刻质点的速度大小及方向。

（4）计算 $t=4\text{s}$ 时刻质点的加速度大小及方向。

解　（1）由题设可写出质点位置矢量表达式：

$$\boldsymbol{r} = (3t+5)\boldsymbol{i} + \left(\frac{1}{2}t^2 + 3t - 4\right)\boldsymbol{j}$$

（2）当 $t=1\text{s}$ 时，位置矢量 $\boldsymbol{r}_1 = 8\boldsymbol{i} - 0.5\boldsymbol{j}$

当 $t=2\text{s}$ 时，位置矢量 $\boldsymbol{r}_2 = 11\boldsymbol{i} + 4\boldsymbol{j}$

位移矢量：　$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = 3\boldsymbol{i} + 4.5\boldsymbol{j}$

∴　位移：　$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 5.4(\text{m})$

方向：　$\theta = \text{tg}^{-1}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{tg}^{-1}\frac{4.5}{3}$

（3）速度分量：　$v_x = \frac{\text{d}x}{\text{d}t} = 3(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$

$$v_y = \frac{\text{d}y}{\text{d}t} = (t+3)(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

$t=4\text{s}$ 时：　$v_x = 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$，　$v_y = 7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 7.6(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

方向：　$\theta = \text{tg}^{-1}\frac{v_y}{v_x} = \text{tg}^{-1}\frac{7}{3}$

(4) 加速度分量：$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=0$，　$a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=1(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2})$

$t=4\mathrm{s}$ 时：　　$a=1\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$

方向：沿 y 轴正向。

例 4　(1) 对于作匀速圆周运动的质点，试用直角坐标和单位矢量 $\boldsymbol{i}$ 和 $\boldsymbol{j}$ 表示其位置矢量 $\boldsymbol{r}$。

(2) 由位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 导出速度 $\boldsymbol{v}$ 与加速度 $\boldsymbol{a}$ 的矢量表达式。

(3) 试证明加速度指向轨道圆周的中心。

解　(1) 由图 1-2 可知：

$$x=r\cos\omega t,\quad y=r\sin\omega t$$

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

$$=r\cos\omega t\boldsymbol{i}+r\sin\omega t\boldsymbol{j}$$

(2) $$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-r\omega\sin\omega t$$

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

$$\boldsymbol{v}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}$$

$$=-r\omega\sin\omega t\boldsymbol{i}+r\omega\cos\omega t\boldsymbol{j}$$

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=-r\omega^2\cos\omega t$$

$$a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=-r\omega^2\sin\omega t$$

$$\boldsymbol{a}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}$$

$$=-r\omega^2\cos\omega t\boldsymbol{i}+r\omega^2\sin\omega t\boldsymbol{j}$$

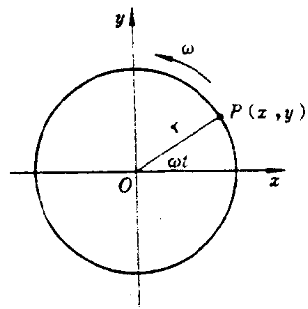

图 1-2

(3)　$$\boldsymbol{a}=-\omega^2(r\cos\omega t\boldsymbol{i}+r\sin\omega t\boldsymbol{j})=-\omega^2\boldsymbol{r}$$

可见，$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 方向相反，即 $\boldsymbol{a}$ 指向轨道圆周中心。

例 5　一质点沿半径为 0.1m 的圆作圆周运动，其角位置 θ 随时间 t 的变化关系为 $\theta=2+4t^3$ (rad)，求：

(1) $t=2\mathrm{s}$ 时质点的法向加速度和切向加速度。

（2）当 θ 角多大时，质点的法向加速度与切向加速度相等？

解　（1）已知：　$\theta=2+4t^3$

则
$$\omega=\frac{d\theta}{dt}=12t^2$$
$$\beta=\frac{d\omega}{dt}=24t$$

法向加速度

$$a_n=R\omega^2=0.1(12t^2)^2=14.4t^4$$

切向加速度

$$a_\tau=R\beta=0.1(24t)=2.4t$$

当 $t=2s$ 时

$$a_n=230.4m\cdot s^{-2},\quad a_\tau=4.8m\cdot s^{-2}$$

（2）
$$a_n=a_\tau$$

即
$$14.4t^4=2.4t$$

∴
$$t^3=\frac{2.4}{14.4}$$

则
$$\theta=2+4t^3=2+4\times\frac{2.4}{14.4}=2.67(\text{rad})$$

例 6　一质点沿半径为 R 的圆周运动，其运动路程 s 随时间变化的规律为 $s=2+1.5t^2$（m）。若 $t=1s$ 时，总加速度为 $a=3\sqrt{2}\,m\cdot s^{-2}$，求其轨道半径 R 为多少？

解
$$v=\frac{ds}{dt}=3t$$

切向加速度

$$a_\tau=\frac{dv}{dt}=3(m\cdot s^{-2})$$

法向加速度

$$a_n=\frac{v^2}{R}=\frac{(3t)^2}{R}$$

当 $t=1\text{s}$ 时，　　$a_\tau=3\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$，　$a_n=\dfrac{9}{R}$

又　　$a^2=a_n^2+a_\tau^2$

即　　$(3\sqrt{2})^2=\left(\dfrac{9}{R}\right)^2+3^2$

∴　　$R^2=\dfrac{81}{18-9}=9$

即轨道半径　　$R=3\ (\text{m})$

二、已知加速度及初始条件，用积分法求 v 及运动方程

例 7　一质点沿 x 方向运动，其加速度随位置的变化关系为 $a=3+2x$。如在 $x_0=0$ 处 $v_0=4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$，求在 $x=2\text{m}$ 处质点速度的大小。

解　　$a=3+2x$

即　　$\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=3+2x$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=3+2x$$

分离变量　　$v\mathrm{d}v=(3+2x)\mathrm{d}x$

两边积分　　$\displaystyle\int_{v_0}^{v}v\mathrm{d}v=\int_{x_0}^{x}(3+2x)\mathrm{d}x$

得　　$\dfrac{1}{2}v^2-\dfrac{1}{2}v_0^2=3(x-x_0)+(x^2-x_0^2)$

$$\frac{1}{2}v^2-\frac{1}{2}\times4^2=3(2-0)+(2^2-0)$$

∴　　$v=\sqrt{36}=6(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$

例 8　已知质点沿 x 轴运动，它的加速度与速度成正比，其方向与运动方向相反，初始坐标为 x_0，初速度为 v_0。试求：质点的速度表达式、位移表达式及运动方程。

解 由题设可知： $a=-kv$

即 $$\frac{dv}{dt}=-kv$$

分离变量 $$\frac{dv}{v}=-k\,dt$$

两边积分 $$\int_{v_0}^{v}\frac{dv}{v}=-k\int_0^t dt$$

得 $$\ln\frac{v}{v_0}=-kt$$

故速度表达式为：

$$v=v_0e^{-kt}$$

又 $$\frac{dx}{dt}=v_0e^{-kt}$$

分离变量 $$dx=v_0e^{-kt}dt$$

两边积分 $$\int_{x_0}^{x}dx=\int_0^t v_0e^{-kt}dt$$

得位移表达式为：

$$x-x_0=\frac{v_0}{k}(1-e^{-kt})$$

故运动方程为：

$$x=x_0+\frac{v_0}{k}(1-e^{-kt})$$

例 9 在有阻尼的媒质中，从静止开始下落的物体，其运动方程为 $dv/dt=A-Bv$，其中 A、B 为常数。

（1）试求下落物体的起始加速度。

（2）试求下落物体加速度为零时的速度。

（3）试证下落物体任一瞬时速度为：

$$v=(A/B)(1-e^{-Bt})$$

解 （1） $a=dv/dt=A-Bv$

因为物体从静止开始下落，即 $t=0$ 时，$v=0$，故起始加速度 $a_0=A$。

（2） $\because$ $a=A-Bv$

$\therefore$ $a=0$ 时，$A-Bv=0$

$v=A/B$

（3） $\because$ $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=A-Bv$

令 $u=A-Bv$

则 $\mathrm{d}u/\mathrm{d}t=\mathrm{d}(A-Bv)/\mathrm{d}t=-B\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$

于是方程 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=A-Bv$ 变为 $-(1/B)\mathrm{d}u/\mathrm{d}t=u$

$$\int\frac{\mathrm{d}u}{u}=-B\int\mathrm{d}t$$

$$\ln u=-Bt+C$$

而 $t=0$ 时， $v=0$， $u=A$

$\therefore$ $C=\ln A$

故 $\ln u=-Bt+\ln A$

$$\mathrm{e}^{\ln u}=\mathrm{e}^{-Bt+\ln A}=\mathrm{e}^{-Bt}\mathrm{e}^{\ln A}$$

$$u=A\mathrm{e}^{-Bt}$$

又 $u=A-Bv$

$\therefore$ $A-Bv=A\mathrm{e}^{-Bt}$

$$v=(A/B)(1-\mathrm{e}^{-Bt})$$

例 10 一质量沿半径为 R 的圆周运动，在 $t=0$ 时经过 P 点，此后它的速率按 $v=A+Bt$ 变化（A、B 为已知常量）。求质点沿圆周运动一周再经过 P 点时的切向加速度及法向加速度。

解 已知： $v=A+Bt$

$\therefore$ 切向加速度 $a_\tau=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=B$

又 $v=\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$

$$\mathrm{d}x=v\mathrm{d}t=(A+Bt)\mathrm{d}t$$

两边积分

$$\int_0^{2\pi R} \mathrm{d}x = \int_0^T (A + Bt)\mathrm{d}t$$

得 $$2\pi R = AT + \frac{B}{2}T^2$$

∴ $$T = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B\pi R}}{B}$$

质点沿圆周运动一周再经过 P 点时

$$\begin{aligned} v &= A + BT \\ &= A + B\left(\frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\pi R}}{B}\right) \\ &= \sqrt{A^2 + 4B\pi R} \end{aligned}$$

法向加速度

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{A^2}{R} + 4\pi B$$

切向加速度

$$a_\tau = B$$

三、相对运动

例 11 东北风（指由东北向西南吹的风）与子午线（即南北向）成 $\alpha = 30°$ 角，速率为 $v_1 = 30\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$。在风中飞行的飞机，若要能在 1h 内达正北 200km 处。问：飞机取什么方向飞行？速率等于多少？

解 已知风对地速度，即牵连速度 $v_1 = 30\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$，飞机对地的速度，即绝对速度为 $v_2 = 200\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$，用 v_3 表示飞机对风的速度，即相对速度。由图 1-3 知，可用余弦定理求 v_3。

$$\begin{aligned} v_3 &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos 150°} \\ &= \sqrt{30^2 + 200^2 - 2 \times 30 \times 200 \times \frac{\sqrt{3}}{2}} \end{aligned}$$