大学物理学习指导书

俞继远　等编

华南工业大学出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教委颁发的大学物理课程的教学基本要求而组织编写的，全书共十九章。

书中对各章所涉及的基本概念和基本规律都作了系统地概括阐述，对各章可能遇到的物理问题都进行了合理的分类和提供解题的思路，每章还附有大量典型例题的示范解答。本书内容紧凑，自成体系，有助于读者深入理解和掌握所学的基本内容，提高解题技巧和思维能力。

本书可供高等工科院校（本科或专科）、函大、电大、职大等各类有关专业学生学习大学物理时参考。

大学物理学习指导书

俞继远 等编
责任编辑：周兴武
插图责任编辑：刘楷英
*
中南工业大学出版社出版发行
中南工业大学出版社印刷厂印装
湖 南 省 新 华 书 店 经 销
*
开本：787×1092 1/32 印张：8.75 字数：204 千字 插页：1
1989年 1月第 1 版 1989年 1月第 1 次印刷
印数：0001—8000
*
ISBN 7-81020-201-4/O·031
定价：1.75元

前　　言

《大学物理学习指导书》是根据国家教委颁布试行的高等工业学校物理课程教学基本要求并结合我们长期在教学实践过程中所积累的经验而组织编写的一本学习参考书，其目的是帮助高等工业学校学生以及其它类型学生在学习大学物理过程中加深对基本概念、基本规律的理解，提高分析问题和解决问题的能力。

为了帮助学生系统地理解教学内容和掌握重点，在每一章中都明确地提出本章中所涉及的重要的基本概念和基本规律。针对学生在学习过程中普遍遇到的困难是不善于运用物理知识来分析和解答物理问题，我们对每一章所出现的问题都进行了基本题型分类，并在此基础上引出相应的基本解题方法。本书以较多的篇幅精选了各种不同题型的典型示例，通过示范解答将有助于学生理解概念，巩固知识，掌握物理思路和提高灵活运用理论解决物理问题的能力。对一些例题还给出多种解题方法，藉以开阔学生思路，掌握多种解题技能。

本书第一、二、十七章由刘永安编写；第三章由何志江编写；第四、五章由张孔嘉编写；第六、七章由周碧玉编写；第八章由代先涯编写；第九章由马松杰编写；第十章由姚珍全编写；第十一、十三、十八、十九章由俞继远编写；第十二章由祁筑宁、彭中汉编写；第十四、十五、十六章由严万宗编写。全书由俞继远同志主审和统编。

由于本书编写时间仓促，加上我们水平有限，缺点和错误在所难免，希望读者在使用时给予批评和指正。

编　者

一九八八年九月于中南工业大学

目　　录

第一篇　力学的物理基础

在物质的各种运动形式中，最简单而又最基本的运动是与物体位置变化有关的运动，即机械运动。力学就是以机械运动的规律和其应用为研究对象的学科，它也是研究物理学其它领域的基础。本篇只讨论质点运动学、质点动力学和刚体绕定轴转动中的一些最基本规律。

第一章　质点运动学

当物体的形状和大小在所研究的问题里可以忽略时，物体就可以抽象地看成为质点。本章只研究质点位置随时间变化的关系，而不涉及引起位置变化的起因。主要讨论的问题有位移、速度、加速度等重要概念和几种典型运动。

一、基本概念

1. 参照系与坐标系

为描述物体的运动而选取的标准物叫做参照系。为了定量地确定物体相对参照系的位置还需要在参照系上选取固定坐标系。力学中常用的是直角坐标系。根据需要也可选取其它坐标系，例如极坐标系，自然坐标系等。

2. 位移

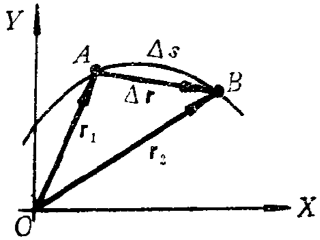

图1-1

质点由A点位移到B点，由A指向B的有向线段 **AB** 叫做位移。常用矢径增量$\Delta\mathbf{r}$表示，位移与矢径的关系为：

$$\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1,$$

见图1-1。

质点实际经过的曲线$\widehat{AB}=\Delta S$称为路径（标量）。可见路径与位移是两个不同的概念。一般情况下，二者大小不等，即$|\Delta\mathbf{r}|\neq\Delta S$；但在极限情况下，即$\Delta t\to 0$时，$|d\mathbf{r}|=dS$。

在直角坐标系中位移的表述为

$$\Delta\mathbf{r}=(x_2-x_1)\mathbf{i}+(y_2-y_1)\mathbf{j}+(z_2-z_1)\mathbf{K}$$

3. 速度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量。

（1） 平均速度 $\overline{\mathbf{V}}=\frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t}$，矢量，其方向与$\Delta\mathbf{r}$方向一致，

（2） 平均速率 $\overline{V}=\frac{\Delta S}{\Delta t}$，标量。

（3） 瞬时速度 $\mathbf{V}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}$，矢量，方向沿轨道上质点所在点的切线方向。

（4） 瞬时速率 $v=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{ds}{dt}$，标量。

对于曲线运动

$\because\ |\Delta \mathbf{r}|\neq\Delta s\quad\therefore\ |\overline{\mathbf{v}}|\neq\overline{v}$

$\because\ |d\mathbf{r}|=ds\quad\therefore\ |\mathbf{v}|=v$

由此可见，平均速率与平均速度的大小一般不相等，但瞬时速率与瞬时速度的大小一致。

在直角坐标系中，瞬时速度（简称速度）的表述为

$$\mathbf{V}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}=v_x\mathbf{i}+v_y\mathbf{j}+v_z\mathbf{k}$$

式中：$v_x=\frac{dx}{dt}$； $v_y=\frac{dy}{dt}$， $v_z=\frac{dz}{dt}$

4．加速度

加速度是描述质点运动状态变化快慢的物理量。

（1） 平均加速度 $\overline{\mathbf{a}}=\frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}$

（2） 瞬时加速度 $\mathbf{a}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{v}}{dt}$

在直角坐标系中，加速度的表述为

$$\mathbf{a}=\frac{d\mathbf{v}}{dt}=a_x\mathbf{i}+a_y\mathbf{j}+a_z\mathbf{k}$$

式中：$a_x=\frac{dv_x}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}$； $a_y=\frac{dv_y}{dt}=\frac{d^2y}{dt^2}$；

$$a_z=\frac{dv_z}{dt}=\frac{d^2z}{dt^2}$$

在平面曲线运动中，常将加速度沿曲线的切向与法向分解，在这种自然坐标中，加速度可表述为

$$\mathbf{a}=a_n\mathbf{n}_0+a_\tau\boldsymbol{\tau}_0$$

式中 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}$，$a_\tau=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$。$\rho$为曲线在该点处的曲率半径。$\mathbf{n}_0$、$\boldsymbol{\tau}_0$分别表示沿该点的法向和切向方向的单位矢量。

二、基本规律

1. 运动叠加原理

实践证明，任何一个运动都可以看成由几个各自独立进行的运动叠加而成。这个重要结论叫运动叠加原理。

2. 运动方程和轨道方程

（1）运动方程　反映质点位置矢量$\mathbf{r}$随时间t的变化关系式称为质点的运动方程。

运动方程的矢量形式为$\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$，其分量形式为

$$x=x(t),\ y=y(t),\ z=z(t)$$

（2）轨道方程　从运动方程的分量式中消去t，则得质点运动的轨道方程，其一般式可表示为

$$f(x,\ y,\ z)=0$$

按质点的运动轨道可将运动分为直线运动与曲线运动。直线运动是一维运动，其运动方程则为$x=x(t)$；曲线运动又可分为平面曲线运动和一般曲线运动。平面曲线运动是二维运动，其运动方程为$x=x(t)$，$y=y(t)$。常见的平面曲线运动有圆周运动，抛物线运动等。一般曲线运动是三维运动。

质点作圆周运动时，常用极坐标表示。在极坐标中用角位移、角速度、角加速度和角运动方程来描述质点的圆周运动。质点作圆周运动时，许多概念、规律与质点的直线运动相对

应。下面列表，以资对照。

表1-1

直线运动	圆周运动	线量与角量的关系
位移 $\Delta x = x - x_0$	角位移 $\Delta\theta = \theta - \theta_0$	$\Delta s = R\Delta\theta$
速度 $v = \dfrac{dx}{dt}$	角速度 $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$	$v = R\omega$
加速度 $a = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$	角加速度 $\beta = \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{d^2\theta}{dt^2}$	$a_\tau = R\beta$ $a_n = R\omega^2$
直线运动方程 $x = x(t)$	角运动方程 $\theta = \theta(t)$	
匀速直线运动 $x = x_0 + vt$	匀速圆周运动 $\theta = \theta_0 + \omega t$	
匀变速直线运动	匀变速圆周运动	
$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \beta t$	
$x = x_0 + v_0 t + \dfrac{1}{2}at^2$	$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \dfrac{1}{2}\beta t^2$	
$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$	$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta(\theta - \theta_0)$	
$\bar{v} = \dfrac{v_0 + v}{2}$	$\bar{\omega} = \dfrac{\omega_0 + \omega}{2}$	

3. 相对运动

由于运动的描述是相对一定参照系的，所以参照系选择不同，则其位置矢量、速度和加速度也不相同，在对不同参照系进行变换时，其间关系如下

（1）位置矢量的变换式 $\mathbf{r}_{A对B} = \mathbf{r}_{A对C} + \mathbf{r}_{C对B}$

（2）速度变换式 $\mathbf{v}_{A对B} = \mathbf{v}_{A对C} + \mathbf{v}_{C对B}$

（3）加速度变换式 $\mathbf{a}_{A对B} = \mathbf{a}_{A对C} + \mathbf{a}_{C对B}$

三、题型与解题基本方法

运动学中遇到的问题一般可分为两大类。一类是已知运动

方程求位移、速度和加速度，另一类是已知加速度求速度和运动方程。

运动学中第一类问题应采用对运动方程求微商的方法处理。第二类问题则利用已知的初始条件用积分法处理。当问题涉及到相对运动时，则利用速度、加速度变换公式进行计算。因为位移、速度和加速度都是矢量，处理时的基本方法为正交分解合成法。具体地说是将矢量先在一定的坐标系中进行正交分解，这样可将矢量运算化为二维或三维的代数运算，最后再将它们合成。

四、典型示例

例1-1　如图1-2，质点沿半径$R=0.1$米的圆作圆周运动，自A点经B、C到达D点所需时间为1秒。求1秒内（1）位移和路程；（2）平均速度和平均速率。

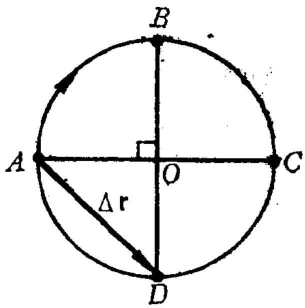

图1-2

解　（1）位移大小：

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{2}R = 0.14\text{米}$$

方向：自A点指向D点。

路程：$\Delta s = \frac{3}{4} \times 2\pi R = 0.47$米

（2）平均速度大小：$|\overline{\mathbf{v}}| = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = 0.14$米/秒

方向：自A点指向D点。

平均速率：$\overline{v}=\dfrac{\Delta s}{\Delta t}=0.47$米/秒

可见，位移与路程，平均速度与平均速率是对应的两个不同概念，在一般情况下，其数值也不相等。

例1-2 一个物体具有恒定的速率，但仍有变化的速度是否可能？一个物体具有恒定的速度，但仍具有变化的速率，是否可能？一个物体具有恒定的加速度，但其速度方向时刻改变，是否可能？

解 第一种情况是可能的。因为速度是矢量，既有大小又有方向，其中一个发生变化，速度也就发生变化。作匀速圆周运动的质点具有恒定的速率，速度却时刻在改变就是一例。第二种情况是不可能的，速度恒定就表示速度的大小和方向均不变化，因而就不可能有变化的速率。第三种情况是可能的。加速度方向取决于速度增量的方向，它与速度方向有本质区别。尽管质点的瞬时速度方向时刻在变化，如能在任意相等的时间内保持其速度增量$\Delta \mathbf{v}$相等，则它的瞬时加速度必为恒矢量。在物体平抛与斜抛运动中，质点的速度逐点变化而加速度则是恒定的。

例1-3 已知质点的运动方程为$x=4.5t^2-2t^3$，式中x以米计，t以秒计。试求（1）质点作什么运动；（2）第二秒内的位移和平均速度；（3）第二秒内的路程；（4）$t=2$秒时的速度；（5）第二秒初的加速度。

解 （1）由运动方程得知，质点位置只有x坐标，质点作一维的直线运动。其运动学量可由运动方程计算得出

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=9t-6t^2,\qquad a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=9-12t$$

当 $t=0$时，$x=0$，$v=0$，a与t有关。所以质点是沿X轴作初速为零的变加速直线运动。

（2） 质点在第二秒内的位移与平均速度为

$$\Delta x = x(t_2) - x(t_1) = (4.5\times 2^3 - 2\times 2^3)$$
$$- (4.5\times 1^3 - 2\times 1^3) = -0.5\text{米}$$

$$\overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-0.5}{2-1} = -0.5\text{米/秒}$$

式中负号表示位移与平均速度均沿X轴负方向。

（3）第二秒内的路程。 由上面计算的速度可知，质点开始沿X正方向运动，但在某时刻速度开始反向并沿X轴负方向运动，计算这一反向时刻：令$v=0$，即$9t-9t^2=0$，可解得 $t_1=0$，$t_2=1.5$秒。可见在第二秒内速度反向，为此第二秒内通过的路程为

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 = (3.375-2.5) + (3.375-2)$$
$$= 2.25\text{米}$$

为了清楚起见，图1-3有助于对上述计算的理解。

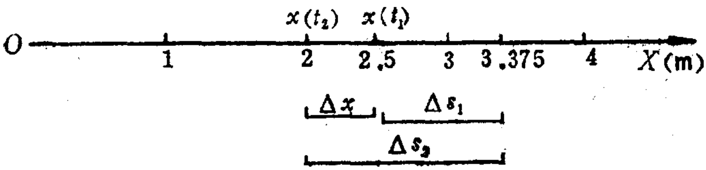

图1-3

（4） $t=2$秒时的速度

$$v = 9t - 6t^2 = 9\times 2 - 6\times 2^2 = -6\text{米/秒}$$

负号表示质点沿X轴反向运动。

（5）第二秒初（即第一秒末）的加速度

$$a=9-12t=-3\text{米/秒}^2$$

负号表示质点的加速度方向与X轴反向。

例1-4 已知质点的运动方程为$x=3t$，$y=t^2$，式中t以秒计，x、y以米计。试求：（1）质点作什么运动；（2）第二秒内的位移与平均速度；（3）$t=2$秒时的速度和加速度；（4）$t=2$秒时的切向加速度与法向加速度的大小及该点的曲率半径。

解 (1)由原方程消去t得轨道方程$y=\dfrac{1}{9}x^2$。当$t=0$时，$x=y=0$。可见质点从坐标原点出发沿抛物线作变速运动，见图1-4。

(2) 第二秒内的位移与平均速度

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r}&=(x_2-x_1)\mathbf{i}+(y_2-y_1)\mathbf{j}\\&=(6-3)\mathbf{i}+(4-1)\mathbf{j}\\&=3\mathbf{i}+3\mathbf{j}\end{aligned}$$

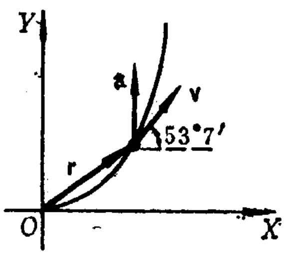

图1-4

位移的大小为

$$\begin{aligned}|\Delta \mathbf{r}|&=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2}\\&=\sqrt{3^2+3^2}=4.23\text{米}\end{aligned}$$

位移的方向与X轴所成的角度为$\alpha=\operatorname{tg}^{-1}\dfrac{\Delta y}{\Delta x}=\operatorname{tg}^{-1}1=45°$

$$\overline{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\mathbf{j} = 3\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$$

同法可求得平均速度的大小为 $|\overline{\mathbf{v}}| = 4.23$米/秒，方向与 X 轴成45°。

（3） $t = 2$秒时的速度和加速度

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} = 3\mathbf{i} + 2t\mathbf{j}$$

$$= 3\mathbf{i} + 2 \times 2\mathbf{j} = 3\mathbf{i} + 4\mathbf{j}$$

即第二秒时的速度大小 $|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$米/秒

速度方向与X轴所成角度$\alpha = \mathrm{tg}^{-1}\dfrac{v_y}{v_x} = \mathrm{tg}^{-1}\dfrac{4}{3} = 53°7'$

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 2\mathbf{j}$$

显然，加速度是一常矢量，大小等于2米/秒^2，方向沿Y轴。

（4） $t = 2$秒时的a_n，a_τ，ρ

由于 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{9 + 4t^2}$

所以 $a_\tau = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{4t}{\sqrt{9 + 4t^2}}$

当 $t = 2$秒时，$a_\tau = 1.6$米/秒^2

$$a_n = \sqrt{a^2 - a_\tau^2} = \sqrt{2^2 - 1.6^2} = 1.2\text{米/秒}^2$$

该点的曲率半径$\rho = \dfrac{v^2}{a_n} = \dfrac{5^2}{1.2} = 20.8$米

a_n、a_τ亦可参考图1-4中$\mathbf{v}$、$\mathbf{a}$方向求出，即

$$a_\tau = a\cos(90° - 53°7') = 1.6\text{米/秒}^2$$

$$a_n = a\,\mathrm{Sin}(90-53°7') = 1.2\text{米/秒}^2$$

例1-5 湖中一小船，岸边有人用绳子跨过离水面高h处的滑轮拉船，当人以恒速v^0收绳时，试求船的速度和加速度。

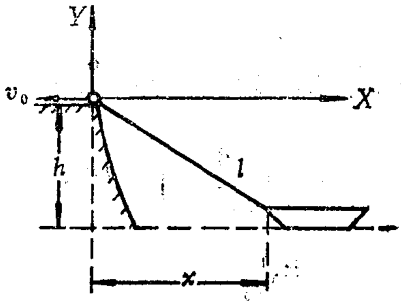

图1-5

解 由题意知小船沿水面作一维运动，故选取坐标如图1-5所示，欲求船的速度和加速度，必先求出运动方程。

设$t=0$时，滑轮到小船的绳长为l_0，在任意时刻t，绳长$l=l_0-v_0t$，所以小船位置的x坐标为

$$x=\sqrt{l^2-h^2}=\sqrt{(l_0-v_0t)^2-h^2}$$

由此可得小船的速度和加速度分别为

$$v=\frac{dx}{dt}=-\frac{v_0\sqrt{x^2+h^2}}{x}$$

$$a=\frac{dv}{dt}=-v_0^2\frac{h^2}{x^3}$$

式中负号表示v与a方向沿X轴负方向。由计算可知，小船沿X轴负方向作变加速直线运动向岸边靠拢。

例1-6 列车沿一水平直线运动，刹车后列车的加速度$a=-kv$，k为正常数。刹车时的初速度为v_0。求列车的速度和刹车后列车最多能行进多远。

解 本题是已知加速度求速度和位移，应采用积分方法处

理。

由于 $a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv$

对上式进行分离变量得 $\frac{\mathrm{d}v}{v}=-k\mathrm{d}t$

两边积分 $\int_{v_0}^{v}\frac{\mathrm{d}v}{v}=\int_0^t-k\mathrm{d}t$， 得

$$\ln\frac{v}{v_0}=-kt$$

所以 $v=v_0\mathrm{e}^{-kt}$

由于 $v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$

则 $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v_0\mathrm{e}^{-kt}$

$$\mathrm{d}x=v_0\mathrm{e}^{-kt}\mathrm{d}t$$

两边积分 $\int_0^x\mathrm{d}x=\int_0^t v_0\mathrm{e}^{-kt}\mathrm{d}t$，得

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

所以，当 $t\to\infty$，列车能行进的最大距离为

$$X_{max}=\frac{v_0}{k}$$

例1-7 一质点沿半径为R的圆周按运动方程$s=v_0t-\frac{1}{2}bt^2$