大学物理

第一册

王锡祉
杨松林 主编

DAXUEWULI

大连理工大学出版

大学物理

第一册

大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书可作理工科大学非物理系各专业的大学物理课程的教材或教学参考书。参考学时范围为130—140学时。

全书分三册，第一册包括力学和热学，第二册为电磁学，第三册包括振动和波动、波动光学、近代物理。近代物理中增加了自选内容，可由教师自行选定。

大 学 物 理

Daxue Wuli

第 一 册

工锡社 杨松林 主编

大连理工大学出版社出版发行 大连船舶生产服务公司
(大连市甘井子区凌水河) 印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：8 1/4 字数：180千字
1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷
印数 0001—6000

责任编辑：海川 责任校对：于明珍
封面设计：羊 戈

ISBN 7-5611-0054-X/O·9 定价：1.41元

前　　言

这套教材开始编写于1981年，基本依据是1980年工科物理编委会在哈尔滨制定的物理课教学大纲和1981年在广州制定的对大纲的补充说明。当时的指导思想是：内容上力求少而精，避免不必要的重复；编写上力求简明扼要，适当压缩经典物理、增加近代物理的内容。本书经过本校和兄弟院校的多次试用，在采纳了各方面提供的宝贵意见的基础上，进行了适当的修改。1987年公布的《大学物理课程教学基本要求》是本书最后修订的依据。

本书曾承：武汉测绘学院和武汉化工学院试用两届、哈工大和营口大学亦各有一个大班试用。沈霖生先生（武测）和唐炳华先生（哈工大）曾按篇章写出了试用意见，还广泛调查分析了学生使用本书后的意见。认为本书注意了基础、层次清楚、便于复习掌握，教学效果好。

另外，华金龙先生（同济）、陈肯先生（浙大）和黄祝明先生（武化），先后提出了宝贵意见。洪晶先生也给予关怀与支持。

本书可供工科各专业作为教材或教学参考书。也可供函大和夜大的本科生学习参考。

本书一、二、三册陆续出版。

一册的内容为力学、气体分子运动论和热力学基础，主要由王锡祉执笔，徐庚武和刘泽文编写了部分章节。

二册的内容为电磁学，主要由杨松林执笔，王永前和王培義协助编写了部分章节。

三册的内容为振动、波动、波动光学、量子力学和近代物理选讲，参加编写者有陈印椿、潘莉、曲延文、何乃宽、胡殿才和林淦胜等。

限于编者水平，缺点和错误难免，恳请读者批评指正。

编者

目　录

第一章　质点运动学……………………………（1）
§1—1　质点的运动方程……………………………（1）
§1—2　位移、速度、加速度…………………………（8）
§1—3　切向加速度、法向加速度……………………（17）
§1—4　相对运动……………………………………（21）
思考题一　……………………………………（27）
习题一　………………………………………（29）
第二章　质点和质点系动力学…………………（34）
§2—1　牛顿运动定律………………………………（34）
§2—2　动量原理……………………………………（43）
§2—3　功、动能定理………………………………（50）
§2—4　质心运动定理………………………………（59）
§2—5　动量守恒定律………………………………（65）
§2—6　系统的势能…………………………………（67）
§2—7　功能原理……………………………………（72）
§2—8　机械能守恒定律、能量守恒定律……………（74）
思考题二　……………………………………（81）
习题二　………………………………………（82）
第三章　刚体的定轴转动………………………（96）
§3—1　刚体的平动和绕定轴转动……………………（96）

§3—2　力矩、力矩的功………………………（102）
§3—3　转动动能、转动惯量…………………（104）
§3—4　转动定律……………………………（109）
§3—5　动量矩原理、动量矩守恒定律………（114）
§3—6　进动现象…………………………（118）
思考题三　………………………………（121）
习题三　…………………………………（121）
第四章　狭义相对论…………………………（125）
§4—1　从经典物理到相对论………………（125）
§4—2　狭义相对论的时空观………………（134）
§4—3　相对论力学…………………………（142）
思考题四　………………………………（150）
习题四　…………………………………（150）
第五章　气体分子运动论概要………………（152）
§5—1　研究对象和研究方法………………（152）
§5—2　统计规律的基本概念………………（153）
§5—3　平衡过程、理想气体状态方程………（156）
§5—4　分子运动论的基本概念……………（160）
§5—5　气体压力的微观实质………………（163）
§5—6　气体温度的微观解释………………（166）
§5—7　能量按自由度均分原理、理想气体内能………………………………（168）
§5—8　气体分子的速率分布规律…………（172）
§5—9　分子的平均碰撞次数和平均自由程…（179）
§5—10　真实气体、范德瓦尔斯方程………（183）
*§5—11　气体中的迁移现象………………（187）

思考题五 …………………………………………… (198)
习题五 ………………………………………………… (201)
第六章 热力学基础……………………………………… (203)
§6—1 热力学第一定律……………………………… (203)
§6—2 热力学第一定律对等值过程的应用… (206)
§6—3 绝热过程………………………………………… (214)
§6—4 循环过程、卡诺循环……………………… (219)
§6—5 热力学第二定律……………………………… (227)
§6—6 卡诺定理………………………………………… (230)
§6—7 热力学第二定律的统计意义…………… (234)
§6—8 热力学第二定律的数学表达式——熵增加原理………………………………………… (235)
思考题六 …………………………………………… (241)
习题六 ………………………………………………… (244)
习题答案 …………………………………………… (250)

第一章　质点运动学

力学研究的对象是机械运动，亦即研究物体位置随时间变化所遵循的客观规律。

力学包括运动学和动力学。运动学研究物体位置随时间变化的描述问题，而不追究运动状态变化的原因。动力学研究机械运动的内在规律，即在怎样的条件下发生怎 样 的 运动。

如果物体的大小和形状在所探讨的问题中不起作用或不起显著作用时，就可把物体抽象为质点来处理。所谓描述质点运动就是描述：在任何时刻，该质点在什么位置，从而知道质点的运动轨道以及运动状态如何变化等。

运动的描述具有相对性，选用不同的参照系来描述一个质点的某一运动，其结果是不同的。描述质点运动时，必须明确指出所选定的参照系。

为了定量地描述物体的机械运动，还需要在参照系上选一个固定的坐标系。常用的是直角坐标系，有时也选用极坐标系或自然坐标系。

§1—1　质点的运动方程

一、什么是质点的运动方程？

质点的运动方程是描述质点在运动过程中的空间位置坐

标随着时间变化的数学表达式。

例1. 质点在X轴上作匀速直线运动的运动方程是：

$$x = vt \tag{1—1}$$

式中v是恒量，若v为已知，则上式给出了质点在任何时刻的相应位置。

例2. 质点作垂直上抛运动时的运动方程是

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \tag{1—2}$$

式中v_0为初速度、g为重力加速度。当v_0和g给定，则上式给出了质点在任何时刻的相应位置。

上面是直线运动的两个特例。对于一般直线运动，不论是匀速的还是变速的，都可选取与运动轨道重合的坐标轴，用一个运动方程就可对运动作出全面描述。因此，直线运动属于**一维运动**。

当质点作平面曲线运动时，可在该平面上选用$O—XY$坐标系，并用一对参量方程来描述。因此平面曲线运动称为**二维运动**。当质点作空间的曲线运动时，就要选用$O—XYZ$坐标系，并用三个参量方程来描述，因此空间曲线运动称为**三维运动**。

例3. 以x轴上的A点为起点，质点绕原点O作半径为R的匀速率圆周运动（图1—1），其运动方程组为：

$$\left.\begin{aligned} x &= R\cos\omega t \\ y &= R\sin\omega t \end{aligned}\right\} \tag{1—3}$$

式中R为圆轨道半径，ω为角速度，是恒量。

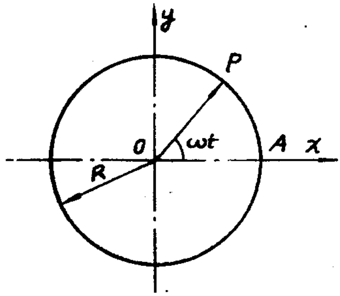


图1—1

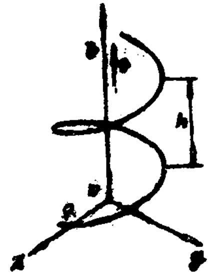


图1—2

例4. 把一个电子以初速度v_0斜向射入匀强磁场 $\boldsymbol{B}$ 中，它将作柱形等螺距的螺线运动（图1—2），其运动方程组为：

$$\left.\begin{aligned} x &= R\cos\omega t \\ y &= R\sin\omega t \\ z &= \frac{h}{2\pi}\omega t \end{aligned}\right\} \quad (1\text{—}4)$$

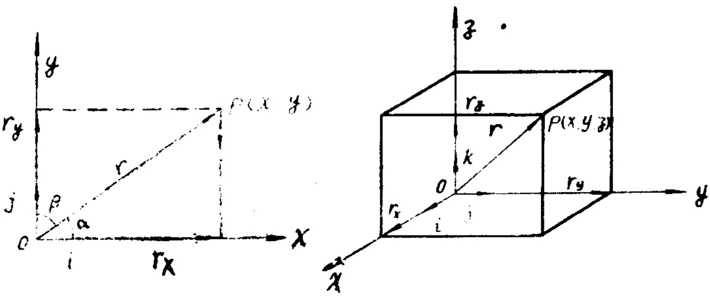
式中R、ω、h是恒量，它们的数值决定于v_0、磁感强度 $\boldsymbol{B}$的大小和方向。

二、运动方程的矢量描述

在物理学中，很多物理量具有矢量性质，如位移、速度、加速度、力、动量、电场强度、磁感应强度等等。对于一个矢量的描述，除了要表明量值的大小和单位外，还要说明方向。为了表达简明、确切和运算方便，关于一些具有矢量性质的物理量的定义、几种矢量间关系式的推导、表达以及运算等，我们都采用矢量方法。

我们从一个点的位置用矢量表示开始，介绍当质点运动时，如何用矢量来描述其运动方程。

在直角坐标系中，点P的位置可以用坐标来确定，也可以用从原点O到点P的有向线段$\boldsymbol{OP}$来确定。$\boldsymbol{OP}$称为位置矢量或矢径，常用$\boldsymbol{r}$表示。上述两种表示法是有联系的。这种联系，从图1—3（a）和（b）可以看得很清楚。



（a）二维平面　　（b）三维空间

图1—3　位置矢量与位置坐标的关系

图1—3(a) 中，点P的位置用$\boldsymbol{OP}$或$\boldsymbol{r}$表示。矢量$\boldsymbol{r}$可以分解为$\boldsymbol{r}_x$和$\boldsymbol{r}_y$两个分矢量。换句话说$\boldsymbol{r}$是$\boldsymbol{r}_x$和$\boldsymbol{r}_y$的合矢量。即

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_x+\boldsymbol{r}_y \tag{1—5}$$

显然两个分矢量的大小和坐标x、y有一一对应的关系，即：

$$\pm|\boldsymbol{r}_x|=x, \quad \pm|\boldsymbol{r}_y|=y \tag{1—6}$$

所以式（1—5）可以改写为

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j} \tag{1—7}$$

式中$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$分别为沿X轴和Y轴正方向的单位矢量。位置矢量的

大小由关系式

$$r=|\boldsymbol{r}|=\sqrt{x^2+y^2} \tag{1—8}$$

来确定，位置矢量的方向余弦是：

$$\cos\alpha=\frac{x}{r}、\cos\beta=\frac{y}{r} \tag{1—9}$$

同样的道理，对于三维空间，如图1—3（b）中P点的位置矢量可表示为

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}\times y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1—10}$$

式中$\boldsymbol{k}$为沿Z轴方向的单位矢量。位置矢量的大小为

$$r=|\boldsymbol{r}|=\sqrt{x^2+y^2+z^2} \tag{1—11}$$

其方向余弦为

$$\cos\alpha=\frac{x}{r}、\cos\beta=\frac{y}{r}、\cos\gamma=\frac{z}{r} \tag{1—12}$$

因为质点的机械运动是质点的空间位置随时间而变化的过程。所以，质点的坐标x、y、z或位置矢量$\boldsymbol{r}$都应该是时间t的函数。即

$$\left.\begin{array}{l} x=x(t)\quad y=y(t)\quad z=z(t) \\ \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \end{array}\right\} \tag{1—13}$$

因此，式（1—10）$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}$就具有双重含义：第一，若式中$x$、$y$、$z$为某一时刻的位置坐标，此式表示该时刻、该点的位置矢量；第二，若式中x、y、z为时间t的函数，此式就表示用矢量描述的质点运动方程。

弄清楚了用坐标法和用位置矢量法来确定空间一点的位

置之间的联系，弄清楚了位置矢量和运动方程的矢量描述之间的关系，那么一个用坐标法描述的运动方程，很容易转换成用矢量来描述，反过来也一样。例如前面举的四个运动方程（1—1）—（1—4）式可改用矢量描述如下表：

表 1—1

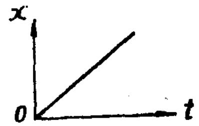
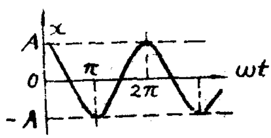
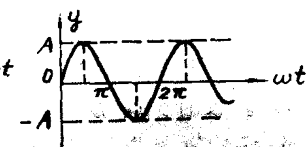
运动方程		附注
坐标法描述	矢量描述	
$x = vt$	$\boldsymbol{r} = (vt)\boldsymbol{i}$	匀速直线运动 $y = 0$ $z = 0$
$y = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$	$\boldsymbol{r} = \left(v_0 t - \frac{1}{2}gt^2\right)\boldsymbol{j}$	垂直上抛运动 $x = 0$ $z = 0$
$x = R\cos\omega t$ $y = R\sin\omega t$	$\boldsymbol{r} = R\cos\omega t\boldsymbol{i} + R\sin\omega t\boldsymbol{j}$	匀速圆周运动 $z = 0$
$x = R\cos\omega t$ $y = R\sin\omega t$ $z = \frac{h}{2\pi}\omega t$	$\boldsymbol{r} = R\cos\omega t\boldsymbol{i} + R\sin\omega t\boldsymbol{j} + \frac{h}{2\pi}\omega t\boldsymbol{k}$	圆柱螺线运动

三、质点运动用图线描述

一个质点的运动过程，还可以选用其它的坐标系和不同的方法来建立不同形式的运动方程，这里不作一一介绍。但是人们还经常采用另一种重要方法—图线法来描述质点的运动。这可以从直接实测数据，也可以从运动方程来绘制质点的位置—时刻图线。用图线描述运动的特点是能直观地反映

出运动的某些主要特征。下表列出了前面列举的四个运动方程（1—1）—（1—4）式所对应的位置一时刻图线。

表 1—2

运动方程	位置一时刻图线
$x=vt$	 （x－t 图线）
$y=v_0t-\frac{1}{2}gt^2$	 （y－t 图线）
$x=R\cos\omega t$ $y=R\sin\omega t$	 （x－t 图线）  （y－t 图线）
$x=R\cos\omega t$ $y=R\sin\omega t$ $z=\frac{h}{2\pi}\omega t$	（x—t图线） （y—t图线）}同上图  （z－t 图线）

§1—2　位移、速度、加速度

本节作总结性的概述，把位移、速度和加速度与运动方程联系起来，阐明处理质点运动学问题的一些基本方法。

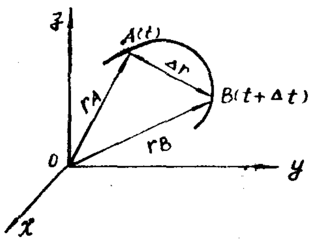


图1—4　曲线运动中的位移

一、位移

我们从研究一个质点从点A到点B的一段运动开始（图1—4）。设时刻t，质点位于点A，时刻$t+\Delta t$，质点位于点B。A和B的位置分别用位置矢量$\boldsymbol{r}_A$和$\boldsymbol{r}_B$表示。联结AB，则矢量$\boldsymbol{AB}$表示在Δt时间内质点位置的变化，称为质点在Δt时间内的位移矢量，简称位移，用$\Delta\boldsymbol{r}$表示。即

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A=(x_B-x_A)\boldsymbol{i}+(y_B-y_A)\boldsymbol{j}+(z_B-z_A)\boldsymbol{k} \tag{1—14}$$

所以，位移是一定时间内位置变化的量度，它不仅有大小（长度），而且有方向，大小和方向都决定于始末二位置，与过程的细节是无关的。图1—5表明，位移和路程是两个不同的概念。当始末位置A和B一定，位移是唯一确定的，但是从A

到B可经过不同的路径，有不同的路程。

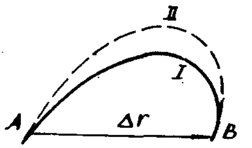


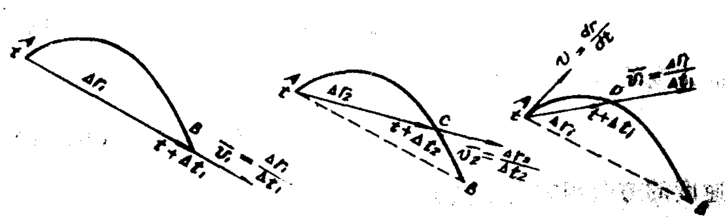
图1—5　A Ⅰ B和A Ⅱ B路径（路程）不同，但位移相同

二、速度

速度是位移对时间的变化率（包括快慢与方向）的量度。我们用

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1—15}$$

来定义平均速度。平均速度是矢量，它的大小由$\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$决定，它的方向与$\Delta \boldsymbol{r}$的方向一致如图 1—6（$a$）所示。但是平均速度只是描述在$\Delta t$时间内位移与$\Delta t$的比值。从图1—6和式1—15都可以看出：平均速度大小和方向都随所取时间间隔Δt的值而变化。如果使Δt逐次减小，那么终点逐次移近起点A。当$\Delta t \to 0$时，两点趋向于重合，$\Delta \boldsymbol{r}$的方向趋向于A点的



（a）位移和平均速度（b）平均速度随Δt而变化（c）$\Delta t \to 0$，平均速度→瞬时速度

图1—6　点A处的平均速度和瞬时速度