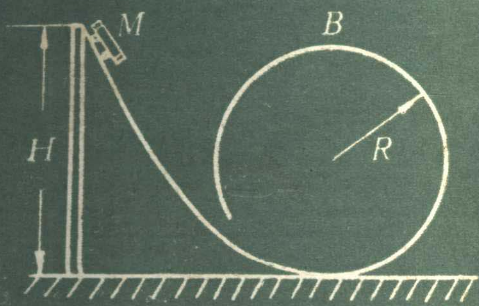
普通物理学

力学



山东科学技术出版社

普通物理学

力　　学

《力学》编写组

山东科学技术出版社

一九八七年·济南

责任编辑　孟爱平

普通物理学

力学

《力学》编写组

●

山东科学技术出版社出版

山东省新华书店发行

山东安丘一中印刷厂印刷

●

787×1092毫米32开本　11.5印张　240千字

1987年2月第1版　1987年2月第1次印刷

印数：1—1600

ISBN 7—5331—0014—X

O·1

统一书号13195·169　定价2.15元

前　　言

本书是根据教育部1982年审订的师专物理专业《力学》教学大纲的基本要求编写的。全书分八章：质点运动学、质点动力学、动量和机械能、刚体力学、固体的弹性、振动、波动和声、流体力学。所需教学时数约70小时，可作为师专和教育学院物理系的教材，也可供中学物理教师参考。

本书力图体现师专和教育学院的特点，注意精选内容，降低推度，适当拓宽知识面，同时还注意避免和中学物理不必要的重复。文中带"*"号的，属不作要求的内容。编者根据多年讲授力学课的实践经验和体会，力求加强基本概念和规律的阐述，深人分析教学的重点和难点，注意指出容易混淆的概念，着重于培养学生分析和解决问题的实际能力。

本书力求具有简而明的特色，以便留有较多的时间供任课教师发挥自己的教学风格和培养学生的自学能力。为满足不同程度读者的要求，我们还将编写与本书配套的学习指导书。

参加本书编写工作的有毛德明、刘树坤、陶湘、全亚太、田永秀、任中华、周美兴，兰承榕和楚安夫负责全书的统稿工作，本书承蒙全国理科教材编委苑之方教授认真审阅，并提出了许多宝贵意见，在此谨致感谢。由于编者水平所限，不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

山东省师专、教育学院物理教材编写组

1986年10月

目　录

第一章　质点运动学…………………………………………（1）
§1·1　参照系 ……………………………………………（1）
§1·2　质点运动状态的描述 ……………………………（3）
§1·3　直线运动 …………………………………………（14）
§1·4　平面曲线运动 ……………………………………（23）
思考题………………………………………………………（34）
习题一………………………………………………………（35）
第二章　质点动力学…………………………………………（39）
§2·1　牛顿运动定律 ……………………………………（39）
§2·2　力学单位制和量纲 ………………………………（43）
§2·3　力学中常见的几种力 ……………………………（46）
§2·4　牛顿运动定律的应用 ……………………………（52）
§2·5　惯性系 ……………………………………………（63）
§2·6　非惯性系 …………………………………………（65）
§2·7　经典力学的局限性 ………………………………（68）
思考题………………………………………………………（69）
习题二………………………………………………………（70）
第三章　动量和机械能………………………………………（77）
§3·1　动量定理 …………………………………………（77）
§3·2　动量守恒定律 ……………………………………（84）
§3·3　功和功率 …………………………………………（90）

§ 3·4　动能定理……………………………（96）
§ 3·5　势能…………………………………（101）
§ 3·6　功能原理和机械能守恒定律…………（106）
§ 3·7　碰撞…………………………………（110）
思考题……………………………………（118）
习题三……………………………………（120）
第四章　刚体力学……………………………（125）
§ 4·1　刚体运动学…………………………（125）
§ 4·2　质心和质心运动定理………………（131）
§ 4·3　刚体绕定轴转动的转动定理………（141）
§ 4·4　刚体绕定轴转动的动能定理………（156）
§ 4·5　角动量定理　角动量守恒定律……（160）
§ 4·6　圆柱体的滚动　滚动摩擦…………（169）
思考题……………………………………（176）
习题四……………………………………（178）
第五章　固体的弹性…………………………（186）
思考题……………………………………（195）
习题五……………………………………（196）
第六章　振动…………………………………（198）
§ 6·1　简谐振动及其动力学方程…………（198）
§ 6·2　描述简谐振动特征的物理量………（202）
§ 6·3　简谐振动的矢量图示法……………（206）
§ 6·4　复摆、单摆和扭摆…………………（210）
§ 6·5　简谐振动的能量……………………（216）
§ 6·6　简谐振动的合成……………………（218）
§ 6·7　阻尼振动……………………………（231）

§ 6·8 受迫振动……………………………………（236）
思考题 ……………………………………………（243）
习题六 ……………………………………………（246）
第七章 波动和声 ……………………………（251）
§ 7·1 机械波……………………………………（251）
§ 7·2 平面简谐波方程…………………………（253）
§ 7·3 波的能量 能流密度……………………（264）
§ 7·4 波的迭加 波的干涉……………………（268）
§ 7·5 声波………………………………………（278）
§ 7·6 超声波和次声波…………………………（286）
§ 7·7 多普勒效应………………………………（288）
思考题 ……………………………………………（291）
习题七 ……………………………………………（293）
第八章 流体力学 ……………………………（298）
§ 8·1 流体力学的基本概念……………………（298）
§ 8·2 流体静力学………………………………（301）
§ 8·3 连续性方程………………………………（307）
§ 8·4 伯努利方程及其应用……………………（310）
§ 8·5 动量原理在流体中的应用………………（316）
§ 8·6 流体的粘滞性……………………………（320）
§ 8·7 粘滞性流体的伯努利方程………………（324）
§ 8·8 运动物体在粘滞流体中所受的阻力……（326）
思考题 ……………………………………………（329）
习题八 ……………………………………………（331）
附录 Ⅰ．习题答案 ……………………………（335）
Ⅱ．数学知识 ……………………………………（347）

第一章　质点运动学

自然界由运动的物质组成。物质的运动形式很多，其中最简单、最基本的一种运动形式就是机械运动。在日常生产和生活中，经常看到一个物体相对于另一个物体的位置在随时间发生变化。例如，火车的行驶；天体运动；机器的运转等，这种运动称为机械运动。力学就是研究机械运动的客观规律及其应用的科学。

运动学是力学的一个重要组成部分。运动学的任务在于研究物体空间位置随时间变化的规律，而不涉及物体相互作用和运动之间的关系。在运动学中，质点运动学又是基础。本章首先就质点的一般运动来讲解位置矢量、运动学方程、位移、瞬时速度和瞬时加速度等重要的基本概念；然后，运用上述基本概念，进一步讨论直线运动和曲线运动。

§1·1　参　照　系

一、参照系和坐标系

自然界中的一切物体都在运动。大至太阳系、银河系，小至分子、原子、基本粒子，都无时无刻不在运动。所以，物体的运动是普遍的、绝对的。

虽然运动具有绝对性，但对物体运动的描述却具有相对性。例如，房屋，桥梁相对于地面是静止的，但相对于太阳

却是运动的；火车行驶时，乘客相对于车厢可以是静止的，但相对于地面却是运动的。为了确切地描述物体的运动，就必须选择其它物体作为标准，然后，观察所研究的物体相对于这个标准物体的运动规律。**研究物体运动时，被选作标准的物体（或彼此不作相对运动的物体群），称为参照系。**同一物体选择不同的参照系，描述的结果（轨迹，速度等）一般并不相同。可见，参照系的选择对描述物体运动具有重要意义。选择哪个物体作为参照系，主要取决于问题的性质、人们的需要和研究的方便。在今后的叙述中，若不特别指明，就是以地球为参照系。

为了定量地描述物体相对于一定参照系的运动，还需要在参照系上建立一种坐标系。通常采用直角坐标系，有时也选用极坐标系或其它坐标系。利用这些坐标系，就可以定量地表示物体的位置了。因为坐标系与参照系牢固地连接在一起，它亦同时起参照系的作用，坐标系实质上是参照系的数学抽象。所以，往往只需标明坐标系而无需指出参照系。

二、空间和时间的测量标准

物体的运动不能离开时间和空间（可归结为长度），因此，必须首先研究物理学中时间和长度的计量问题。

为了生活、生产和科学研究的需要，人们曾经制定了一系列测量时间和长度的标准。为适应科学文化交流的需要，国际上制定了国际单位制，国际单位制中规定测量长度和时间的单位分别是米（m）和秒（s）。

1983年10月，第十七届国际计量大会规定：1m是光在真空中于1/299792458s内光程的长度。即真空中的光速值为 $c=299\ 792\ 458\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。

1967年第十三次国际计量大会规定：1 s等于铯－133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。

§1·2 质点运动状态的描述

一、质点

在一般情况下，宏观物体作机械运动时，物体上各点的位置变化是不同的，其运动状态是非常复杂的。但在某些实际问题中，**如果物体的形状和大小可以忽略不计，就可以把物体看作一个具有质量的点，这样的理想化模型称为质点。**

一般说来，如果所研究的问题，不涉及物体本身的转动或物体各部分的相对运动，只研究它的平动部分，就往往可以把运动物体视为质点。例如：汽车行驶，其内部机械部分运动是十分复杂的。如果研究汽车在多少时间内跑出多么远，我们关心的是汽车的整体运动，而不是汽车个别零件的运动，汽车的形状和大小可以忽略不计，因此可以把它当作质点来处理。但在研究空气阻力对汽车运动的影响时，汽车的形状和大小就不能忽略，因此就不能把它看作质点了。

质点是力学中一个十分重要的理想模型。在许多实际问题中，如天体的运动、单摆的摆动等力学问题，都可以把实际物体抽象成质点。另一方面，当我们研究比较复杂的物体运动时，虽然不能把整个物体看成质点，但在处理方法上，可以把它们看成是由许多质点组成的，掌握了质点动运的规律，就能用数学方法推导出复杂物体的运动规律了。为了突出与所研究的问题有关的主要因素，忽略一些影响很小的次

要因素，抓住本质，解决问题，从而建立理想模型，这种研究问题的方法，在物理学中是经常运用的。

本书前三章所述的物体，均系可视为质点的物体，应一律称为质点。但考虑到读者的习惯，有时仍然把它们称为物体。

二、质点的位置矢量和运动学方程

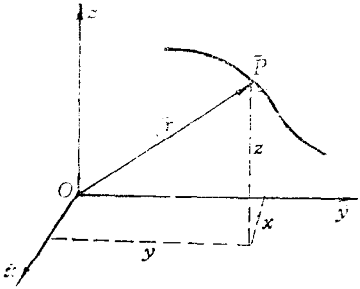


图 1—1

为了定量地描述质点的位置，通常采用直角坐标系，如图 1—1 所示。**由坐标系原点引向质点所在位置的矢量，称为质点的位置矢量，简称为位矢或矢径**。通常记作$\mathbf{r}$

$$\mathbf{r}=\mathbf{OP} \qquad (1\cdot2\cdot1)$$

矢径的端点就是质点的位置。位矢在直角坐标系中的正交分解形式为：

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

式中，$\mathbf{i}$、$\mathbf{j}$、$\mathbf{k}$分别为沿x、y、z轴的单位矢量，x、y、z为质点的位置坐标。

如果质点是运动的，则其位置坐标将随时间变化。即位置矢量$\mathbf{r}$为时间t的函数

$$\begin{aligned}\mathbf{r}&=\mathbf{r}(t)\\&=x(t)\mathbf{i}+y(t)\mathbf{j}+z(t)\mathbf{k}\end{aligned} \qquad (1\cdot2\cdot2)$$

上式称作质点的运动学方程。它给出任一时刻质点的位置。如果知道质点的运动学方程，就可以确定它的全部运动状

态。

由上面的分析可知，位置矢量不仅有大小，而且有方向。运动质点在不同时刻，其位置矢量不同。也就是说，位置矢量是描述质点在某时刻的位置，它具有瞬时性。选取不同的坐标系，同一个质点相对不同坐标系原点的位置矢量，一般是不同的，它具有相对性。

若已知$\mathbf{r}(t)$，则可求出$x(t)$、$y(t)$、$z(t)$，反之亦然。因此称标量函数

$$x = x(t) \quad y = y(t) \quad z = z(t) \qquad (1 \cdot 2 \cdot 3)$$

为质点运动学方程的投影形式。

质点运动时，描出的曲线称为质点运动的轨迹或轨道。质点运动时，其位置矢量的矢端就在空间画出一条曲线，称为位置矢量的矢端曲线。显然，它正是质点的运动轨迹。（1·2·3）式就是以t为参数的质点的轨迹方程。

当质点在xy平面内运动时，运动学方程可简化为

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \qquad (1 \cdot 2 \cdot 4)$$

消去参数t，可得

$$y = y(x) \qquad (1 \cdot 2 \cdot 5)$$

这就是质点的轨迹方程。

【例1】一质点的运动学方程为

$$\mathbf{r} = a\cos t\,\mathbf{i} + b\sin t\,\mathbf{j}$$

求以形式$f(x, y) = 0$写出的轨迹方程。

解 由运动学方程可知

$$x = a\cos t$$

$$y = b\sin t$$

消去参数t，得

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-1=0$$

可知其轨迹为椭圆。

三、位移和路程

如图1—2所示，质点沿其轨道运动。$\mathbf{r}(t)$和$\mathbf{r}(t+\Delta t)$分别表示质点在时刻t和$t+\Delta t$的位置矢量。为了描写质点位置变动的大小和方向，我们把**自质点的初位置引向Δt时间后末位置的矢量称为质点在这段时间内的位移**，记作$\Delta\mathbf{r}$。

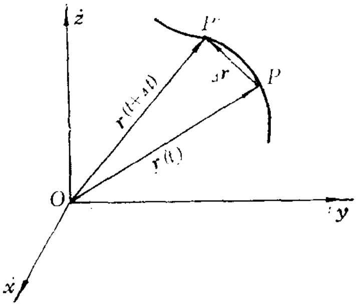


图1—2

$$\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}(t+\Delta t)-\mathbf{r}(t) \qquad (1\cdot2\cdot6)$$

即位移是位置矢量的增量。$\Delta\mathbf{r}$的大小就是P、P'两点间的距离，其方向由P指向P'。

位移是矢量，既有大小，也有方向。位移表示质点在一段时间内位置变动的总效果。在一般情况下、并不表示质点沿其轨道运动时所经路径的长度。在一段时间内，质点在其轨迹上经过的路径的总长度叫做路程。例如，在图1—2中，质点在Δt时间内所经过的路程是曲线PP'的长度ΔS。显然$\Delta S\neq|\Delta\mathbf{r}|$。只有当质点作直线直进运动时，位移的大小才等于路程。路程是正的标量。在同一时间间隔内，路径和位移的大小并不一定相等。

位置矢量、位移在量值上都表示长度，在国际单位制中，都用米作单位。米的国际符号是m，常用的单位还有厘米（cm）、千米（km）等。

四、速度矢量和加速度矢量

1．速度矢量

质点在Δt时间内，由P点运动到P'点，其位移为$\Delta \mathbf{r}$，则比值$\Delta \mathbf{r}/\Delta t$反映了质点在$\Delta t$时间内位置变动的快慢和方向，其方向沿$\Delta \mathbf{r}$的方向，叫做质点在$\Delta t$时间内的平均速度，记作$\overline{\mathbf{v}}$。即

$$\overline{\mathbf{v}}=\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}=\frac{\mathbf{r}(t+\Delta t)-\mathbf{r}(t)}{\Delta t} \qquad (1\cdot2\cdot7)$$

一般说来，平均速度（包括大小和方向）不仅随t而变，而且随Δt而变。所以，在计算平均速度时，必须首先指明是哪一段时间内或哪一段位移上的平均速度。

平均速度仅是对质点运动状态的粗略描写，它只表示在一段时间内，质点位置变动的方向和快慢的平均效果，而不能描述质点运动的细微运动情况及质点在某时刻或某位置的真实运动状态。显然，观察的时间Δt越短，其平均速度越接近运动的实际情况。因此，可以把$\Delta t\to 0$时$\dfrac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$的极限作为时刻$t$质点运动方向和快慢的确切描述，这就是质点在$t$时刻的瞬时速度。即

$$\mathbf{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\mathbf{r}(t+\Delta t)-\mathbf{r}(t)}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{r}}{dt} \qquad (1\cdot2\cdot8)$$

也就是说，**质点的瞬时速度，等于当时间间隔趋近于0时，平均速度的极限值，或瞬时速度等于位置矢量对时间的一阶导数。**

由图1—2可知，当$\Delta t\to 0$时，P'点将无限趋近于P

点，位移$\Delta \mathbf{r}$的方向就无限趋近于质点轨迹在P'点的切线方向。因此，瞬时速度的方向是沿质点所在处的轨迹的切线方向，并指向质点前进的方向；其大小

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\left|\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}\right|=\left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right| \qquad (1\cdot 2\cdot 9)$$

反映质点在该时刻运动的快慢，称为瞬时速率。

如图1—2所示，当$\Delta t\to 0$时，$\Delta s\to ds$，而$|d\mathbf{r}|=ds$，故

$$\text{瞬时速率}\ v=\left|\frac{dr}{dt}\right|=\frac{dS}{dt}$$

由此可知，**瞬时速率是质点的路程对时间的一阶导数**。若令$\boldsymbol{\tau}$表示沿曲线的切线方向的单位矢量，则瞬时速度又可写为

$$\mathbf{v}=v\boldsymbol{\tau}=\frac{dS}{dt}\boldsymbol{\tau} \qquad (1\cdot 2\cdot 10)$$

为叙述方便，今后将瞬时速度和瞬时速率简称为速度和速率。其单位由长度和时间的单位决定。在国际单位制中，其单位是$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。常用的单位还有$\mathrm{cm\cdot s^{-1}}$、$\mathrm{km\cdot h^{-1}}$。

由上面的讨论可知，用矢量表示质点运动的速度，形式简洁、物理意义明确。但在计算具体问题时，一般多采用速度矢量在直角坐标系中的投影式进行计算。由质点的运动学方程

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

可知 $$\mathbf{v}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}=\frac{d}{dt}(x\mathbf{i}+y\mathbf{j}+z\mathbf{k})$$

$$=\frac{dx}{dt}\mathbf{i}+\frac{dy}{dt}\mathbf{j}+\frac{dz}{dt}\mathbf{k}$$

$$=v_x\mathbf{i}+v_y\mathbf{j}+v_z\mathbf{k} \tag{1·2·11}$$

对比后可得

$$v_x=\frac{dx}{dt} \qquad v_y=\frac{dy}{dt} \qquad v_z=\frac{dz}{dt} \tag{1·2·12}$$

即瞬时速度矢量的投影等于位置坐标对时间的一阶导数。

瞬时速度的大小和方向余弦分别为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}=\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy}{dt}\right)^2+\left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

$$\cos\alpha=\frac{v_x}{v} \qquad \cos\beta=\frac{v_y}{v} \qquad \cos\gamma=\frac{v_z}{v} \tag{1·2·13}$$

【例2】 某质点的运动学方程为

$$\mathbf{r}=3t\mathbf{i}+2t^2\mathbf{j}$$

（单位m，s），求$t=1$s时质点的速度矢量。

解 由$\mathbf{v}=\frac{dx}{dt}\mathbf{i}+\frac{dy}{dt}\mathbf{j}$可得

$$\mathbf{v}=3\mathbf{i}+4t\mathbf{j}$$

当$t=1$ s时 $\mathbf{v}=3\mathbf{i}+4\mathbf{j}$

$$v=\sqrt{3^2+4^2}=5(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

$$\cos\alpha=\frac{v_x}{v}=\frac{3}{5}=0.60 \qquad \alpha=53^\circ4'$$

$$\cos\beta=\frac{v_x}{v}=\frac{4}{5}=0.80 \qquad \beta=36^\circ56'$$

2．加速度矢量

当质点运动时，瞬时速度的大小和方向都可能随着时间变化。用什么物理量来反映这种变化呢？加速度就是描述速度的大小和方向随时间变化的物理量。

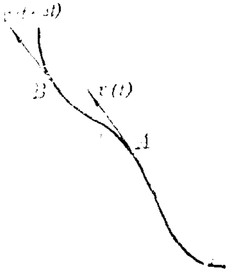


图 1 — 3

如图 1 — 3 所示，设质点在t时刻的速度为$\mathbf{v}(t)$，在$t+\Delta t$时刻的速度为$\mathbf{v}(t+\Delta t)$，其速度增量$\Delta\mathbf{v}=\mathbf{v}(t+\Delta t)-\mathbf{v}(t)$与发生这一增量所用时间$\Delta t$之比$\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$称为这段时间内的平均加速度，用$\bar{\mathbf{a}}$表示。即

$$\bar{\mathbf{a}}=\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \qquad (1 \cdot 2 \cdot 14)$$

平均加速度粗略地反映了Δt时间内速度的变化情况，其方向沿速度增量的方向。显然，Δt越短，平均加速度越能精确地描写某一时刻速度的变化。当$\Delta t\to 0$时，$\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$的极限值，就能描写质点在$t$时刻速度的变化。这个极限值叫做瞬时加速度，用$\mathbf{a}$表示。即

$$\mathbf{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{v}}{dt} \qquad (1 \cdot 2 \cdot 15)$$

瞬时加速度简称加速度。由上式可知，加速度等于速度矢量对时间的一阶导数。又因为$\mathbf{v}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}$，所以

$$\mathbf{a}=\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \qquad (1 \cdot 2 \cdot 16)$$

即加速度等于位置矢量对时间的二阶导数。

加速度的单位由速度和时间的单位决定。在国际单位制中，其单位为$m \cdot s^{-2}$，常用的单位还有$cm \cdot s^{-2}$等。

实际计算中，经常采用加速度在直角坐标系中的正交分