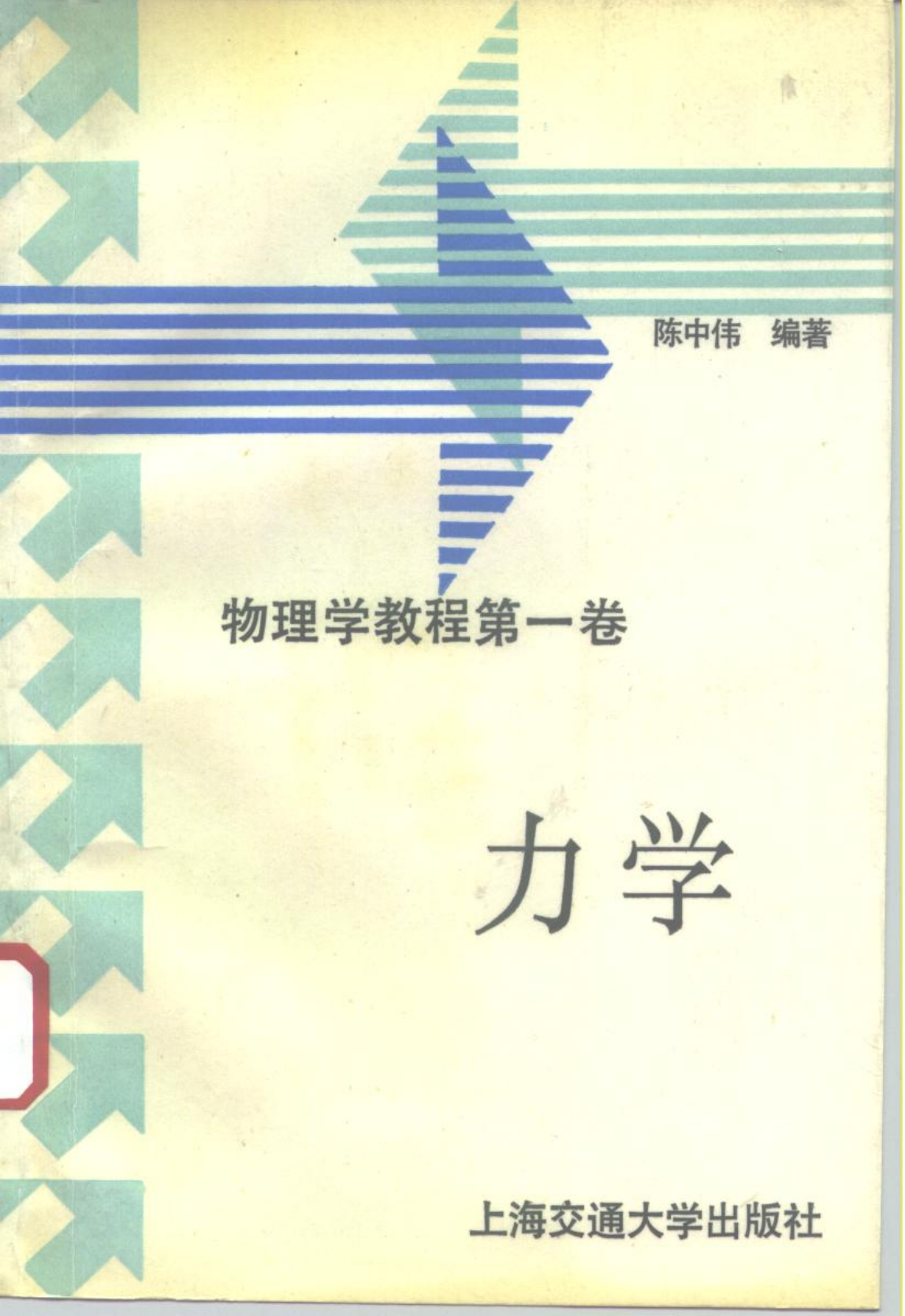




陈中伟 编著

物理学教程第一卷

力学

上海交通大学出版社

力 学

物理学教程 第一卷

陈中伟 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

《物理学教程》是上海交通大学普通物理教研室编写的一套革新教材。全书分为力学、热学、电磁学、光学和量子物理基础四卷。

力学为本教材第一卷,内容包括质点运动学、质点动力学、质点系动力学、刚体力学基础、狭义相对论基础、机械振动和机械波等六章。

本书可作为对物理课程有较高要求的(非物理专业)理工科大学的物理学教学用书,也可作为一般高等院校的教学参考书,并可供中学物理教师参考。

(沪)新登字 205 号

力 学 物理学教程第一卷

出版: 上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 · 200030)

字数: 253000

发行: 新华书店上海发行所

版次: 1993 年 8 月 第 1 版

印刷: 常熟印刷二厂

印次: 1993 年 9 月 第 1 次

开本: 850×1168 (毫米) 1/32

印数: 1—3400

印张: 9.5

科目: 298—308

ISBN 7-313-01221-7/O · 3

定 价: 5.70 元

前 言

《物理学教程》是上海交通大学用于对本课程有较高要求的低年级(同时学微积分)学生的一套革新教材。全书分为力学、热学、电磁学、光学和量子物理基础四卷。

本书的目标是：通过教学过程充分调动学生学习物理的潜力和兴趣，打下较深厚扎实的理论基础，以满足对本课程有较高要求的院系和专业的教学需要。同时，注意培养学生的能力、正确的学习方法、科学思维的方法等。

本书的编写特点是：

既简明扼要，又严谨准确，有相当的深度和广度。这是由培养高质量人才目标和受我国工科物理总学时数的制约所决定的。

全书分基本内容、自学材料和选读材料三个主要层次。基本内容集中、精练，是本书的主干。它配合了恰当数量的，经精选的例题，保证了对基本概念和理论的理解，并拓宽了知识面，从而能获得较多的应用知识。例题后附有讨论，对学生融汇贯通理论知识很有帮助，其中还包含许多新知识的扩展点，使勤奋的学生能获得许多有益的新材料。基本内容部分具有普遍的适用性（能适应不同的教学要求）。在基本内容后，附有较多的自学材料。（目录及正文中标有“*”部分）教师指导学生自学有利于培养学生的自学能力、学以致用，也可用来替代一部分传统的习题。选读材料为拓宽教学的广度和加深内容的深度提供了丰富的新材料，可供选择使用，它又能用作学生课外的阅读资料。选读材料与自学材料相比较，前者属提高的要求，后者属较基本的要求。在编写选读材料时，注意了与前面内容的衔接。

在教材组织与阐述上，力求科学性和可接受性的统一、物理图象清晰、有较强的科学逻辑性以及教学中难点的深入浅出。理论证

明和阐述论证都优选或创造了最佳的方法，以求保证教材的可用性。

全书适当提高了课程的起点，力求避免出现与中学物理无提高的重复，或仅仅添加了高等数学作为工具。同时适当调整了教学体系，使学生从基本内容读到自学材料，回答课外的问题，做习题，加之阅读选读材料，引导学生把书从薄读到厚；再从例题的讨论归纳到各章小结，又引导把书从厚读到薄。对于把本书用作教学用书或一般教学参考书的大学生，它都提供了一个良好的学习方法的入门。

本书编写中注意到学生刚接触微积分，所以在把高等数学作为工具应用时，采用谨慎的态度。为了保证理论的精确、科学，我们回避使用各种数学工具；同时又结合物理概念逐步引进使用，以求数学和物理教学互相推动，使学生应用数学的能力、用数学讨论物理过程的能力能明显地提高。

在校、系、教研室领导的支持下，自 1987 年起，本书以讲义的形式在上海交通大学的几个大班连续试用。顾希知、黄开泰、高景、徐志和、程红波、裔式廷、楼永庆、邓惠明、乐志强、顾志霞、张永涛、周毅等同志都曾参加教材试用，为本书积累了经验，提供了很好的意见，在此表示谢意。在本书编写、试用到出版的过程中，上海交通大学物理教研室的同仁，特别是胡盘新教授、孔令达教授、严燕来副教授给予了热情的帮助、鼓励，谨表示感谢。朱泳春教授从确定编写大纲到审阅稿子，做了很多工作，提供了很有价值的意见，向他表示感谢。此外，对为本书做了许多工作的顾伟、陈红蓓、尤英等同志表示谢意。

由于编者能力有限，书中一定会有不少缺点或错误，欢迎批评指正。

陈中伟

1992 年于上海交通大学

目 录

第一章 质点运动学	1
§ 1.1 运动质点位置的确定	1
§ 1.2 位移和速度	5
§ 1.3 加速度	10
§ 1.4 平面极坐标系中的速度和加速度	19
§ 1.5 相对运动	24
小结	32
思考题	34
习题	36
第二章 质点动力学	40
§ 2.1 牛顿运动定律	40
§ 2.2 非惯性系中的力学定律	54
§ 2.3 质点动力学基本方程的三种积分变形	60
选读材料 1. 粘滞性阻力作用下的平抛运动	71
选读材料 2. 小环沿着旋转着的光滑细杆的“离心”运动 (惯性系中求解)	75
选读材料 3. 地球自转所产生的影响	76
小结	79
思考题	81
习题	83
第三章 质点系动力学	90
§ 3.1 质点系的动量定理 动量守恒定律	90
§ 3.2 质心 质心的运动定律	96
* § 3.3 火箭的运动	100
§ 3.4 质点系的动能定理	103

§ 3.5	保守力和势能	106
§ 3.6	功能原理 机械能守恒定律	112
* § 3.7	碰撞	120
§ 3.8	质点系的角动量原理 角动量守恒定律	126
选读材料 4.	用质心参照系研究碰撞	127
选读材料 5.	质心运动的动能	132
选读材料 6.	对质心的角动量原理	133
选读材料 7.	两体问题	134
选读材料 8.	质点在有心力场中的运动	136
小结		140
思考题		142
习题		143
第四章	刚体力学基础	151
§ 4.1	刚体运动的自由度	151
§ 4.2	刚体定轴转动的动力学规律	153
§ 4.3	转动惯量 惯量主轴	163
* § 4.4	定轴转动的动力学规律的应用	170
§ 4.5	刚体的平面运动	177
§ 4.6	回转仪	181
选读材料 9.	动不平衡的转子	184
选读材料 10.	非对心碰撞	185
小结		187
思考题		188
习题		190
第五章	狭义相对论基础	197
§ 5.1	力学的相对性原理 伽利略坐标变换式	197
§ 5.2	狭义相对论基本原理	200
§ 5.3	相对论中的时间和空间	204
§ 5.4	洛伦兹变换	210
§ 5.5	相对论的速度变换	214

§ 5.6	相对论的动量和质量	218
§ 5.7	动量和质量的变换	221
§ 5.8	相对论的能量	222
§ 5.9	不变量	225
小结		227
思考题		229
习题		229
第六章	机械振动和机械波	233
§ 6.1	简谐振动的叠加	233
§ 6.2	阻尼自由振动与受迫振动	241
§ 6.3	机械波的产生和传播	249
§ 6.4	平面波的方程	252
§ 6.5	波的能量 能流密度	260
§ 6.6	波的叠加和干涉 驻波	266
§ 6.7	惠更斯原理及其应用	272
§ 6.8	多普勒效应	276
选读材料11.	电磁波的多普勒效应	279
选读材料12.	冲击波的产生	281
小结		282
思考题		284
习题		286
习题答案		291

第一章 质点运动学

宇宙间的一切物质都永恒地运动着、变化着。物质的运动形式是多种多样的。物体之间或者同一物体的各部分之间相对位置的变化,称为机械运动,它是最简单、最基本的运动形式。力学的研究对象就是机械运动的客观规律及其应用。

要把物体间的相互作用与物体的运动状态的变化联系起来,首先要对物体的机械运动(简称运动)进行描述。本章对质点的运动进行描述,研究它在不同时刻的位置、运动的位移、速度、加速度等物理量随时间变化的关系,但不涉及引起运动变化的原因。这部分力学称为质点运动学。

§ 1.1 运动质点位置的确定

一、参照系

宇宙间任何物体都在运动,绝对静止的物体是找不到的。例如在地面上不动的物体看来是静止的,但它们随着地球参与绕地轴的自转以及绕太阳的公转运动;太阳相对于银河系中心也在作旋转运动,而银河系又在总星系中旋转……因此,要描述一个物体的运动,总得选择另一个物体或几个相互间保持静止的物体组作为参考,然后研究这个物体相对这些物体是如何运动的。被选作参考的物体或物体组称为参照系。

在运动学中,参照系的选择可以是任意的,主要看问题的性质和研究的方便。但是在以后的动力学讨论中,将会看到必须把参照系区分为两大类:惯性系和非惯性系。

同一物体的运动,由于所采用的参照系不同,对它的运动描述

就会不同。例如：从地面上看来铅直下落的重物，在行驶的车厢中观察是作曲线运动；车床上切削工件时，车刀的刀尖相对床身作直线运动，而在工件上留下刀尖作螺旋线运动的径迹；风洞中静止的机翼或叶片的模型，相对于高速的气流来说是在高速运动的，于是可以测得有关高速运动下的各种数据。因此，运动的描述具有相对性。研究某一物体的运动，必须首先明确指明参照系。

二、质点

任何物体都具有某种形状和大小。一般地说，物体运动时，物体内部各点的位置变化是各不相同的。因此，要精确描述一般物体的运动，并不是一件简单的事，这里涉及物体的变形和转动。如果运动过程中物体既无变形又无转动，即刚体作平动运动，那么物体上各点的位置变化都相同，任何一点的运动都能代表整体的运动。这样就可以不考虑物体的形状和大小，将物体抽象为一个具有与物体相同质量的点（点物体），称为质点。在实际问题中，如果能忽略物体的变形和转动运动，即物体的形状、大小并非主要因素，而仅是次要因素时，就可以将物体抽象简化为质点。例如，研究地球绕太阳运动时，由于公转和自转，地球上各点相对太阳运动是各不相同的。但是由于地球的平均半径（约 $6.4 \times 10^3 \text{km}$ ）比地球与太阳之间的距离（约为 $1.50 \times 10^8 \text{km}$ ）小得多，地球上各点相对太阳的运动可视为相同。这样，研究地球公转时，可把地球看作一个质点。一个物体是否可以当作质点对待，应根据问题的性质来决定，不能单凭物体的大小来决定。齿轮即使很小，由于它的转动运动是主要的因素，因此不可忽略齿轮的形状大小，不能把它抽象简化为质点。

质点是物体的一个理想的模型。为了便于抓住本质解决问题，在科学分析的基础上突出事物的主要矛盾，而将一些次要因素忽略，建立各种物体的理想模型。这是一种重要的科学分析方法，学习中要注意学会这种方法。

研究质点运动是研究一般物体运动的基础。因为可以把整个

物体看作由无数个质点所组成,分析这些质点的运动,就可能了解整个物体的运动。

三、坐标系

为了定量表示某时刻质点的位置,需要在参照系上选取适当的坐标系。最常用的是直角坐标系,即在参照系上选择某一固定点作为坐标原点 O ,通过 O 点作三条互相垂直的坐标轴(x 轴、 y 轴、 z 轴)。根据需要也可选用其他坐标系。例如球面坐标系、圆柱坐标系以及(平面)极坐标系。坐标系是参照系的数学抽象,一旦建立了坐标系,参照系也就自然确立了。建立了坐标系,质点的位置可用一组坐标来表示。如空间某一点 P 的位置在直角坐标系中表示为

$$P(x, y, z)。$$

这里坐标 x, y, z 是代数量,可有正、负值之分,并且有单位,在国际单位制[SI]中,其单位是米(m)。

在直角坐标系中,平面上某一点 P 的位置表示为

$$P(x, y)。$$

如用极坐标系,可表示为

$$P(r, \theta)。$$

四、位置矢量

质点 P 在坐标系中的位置也可用有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 来表示, $r = \overrightarrow{OP}$ 称为 P 点的位置矢量,或矢径,如图1-1所示。由 P 点的坐标 x, y, z ,可决定矢径 r 的量值:

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}。 \quad (1-1a)$$

矢径的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \cos \beta = \frac{y}{r}, \cos \gamma = \frac{z}{r}, \quad (1-1b)$$

式中

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1。$$

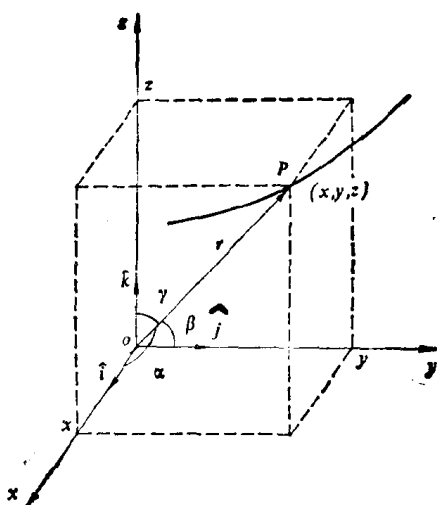


图 1-1

所以,三个方向余弦中只有两个是独立的。反之,已知矢径 r , 即已知 $r, \cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$, 则 P 点的直角坐标可表示为

$$x = r \cos\alpha, y = r \cos\beta, z = r \cos\gamma. \quad (1-2)$$

在平面上,矢径 r 的量值、方向由 P 点的极坐标 (r, θ) 表示。它与直角坐标 (x, y) 的变换关系是

$$x = r \cos\theta, \quad y = r \sin\theta; \quad (1-3a)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \arctg \frac{y}{x}. \quad (1-3b)$$

位置矢量 r 像其他矢量一样,可用它的三个分量(沿坐标轴的三个投影)来表示。 r 的三个分量 r_x, r_y, r_z 就是 x, y, z 。若以 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 表示沿 x, y, z 轴(正方向)的单位矢量(单位矢量的量值等于 1,无量纲、单位,它是数学概念中的矢量),则位置矢量可表示为

$$\begin{aligned} r &= r_x \hat{i} + r_y \hat{j} + r_z \hat{k} \\ &= x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}. \end{aligned} \quad (1-4)$$

§ 1.2 位移和速度

一、运动学方程

质点的机械运动是质点的空间位置随时间而变化的过程，这时质点的坐标如 x, y, z 或矢径 r 都是时间 t 的函数，用数学式表示为

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t); \end{cases} \quad (1-5)$$

或

$$r = r(t). \quad (1-6)$$

上述方程给出任一时刻质点的空间位置，表示质点的运动规律，称为质点的运动学方程。运动学方程是质点运动过程直接的记录，它包含了质点运动的各种信息，对它作出分析，就可以确定质点的运动状态、以及运动状态是怎样改变的。例如，质点的运动学方程为

$$\begin{cases} x = at, \\ y = bt - ct^2, \end{cases}$$

式中 a, b, c 都是常量。表示质点在 xy 平面 ($z=0$) 内运动，运动的径迹(轨道)方程为

$$y = \frac{b}{a}x - \frac{c}{a^2}x^2.$$

质点作平面曲线运动，从数学上看轨道曲线是抛物线。若 x 轴沿水平方向、 y 轴铅直向上， $2c = g$ (重力加速度)，则它表示抛体运动。

其实，质点的运动学方程就是质点轨道方程的参数形式，其参数就是时间 t 。

二、位移

设曲线 $\widehat{AB}$ 是质点轨道的一部分, 如图 1-2 所示。时刻 t 质点通过 A 点, 在后一时刻 $t + \Delta t$ 质点通过 B 点。 A 、 B 两点的位置分别用矢径 $\mathbf{r}_A$ 和 $\mathbf{r}_B$ 表示。在时间 Δt 内, 质点的位置变化可用有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示, 称为质点的位移 $\mathbf{d}$, 即

$$\mathbf{d} = \overrightarrow{AB}。$$

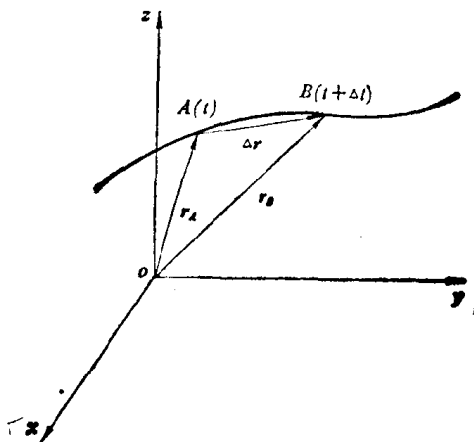


图 1-2

因为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_A &= \mathbf{r}(t), \mathbf{r}_B = \mathbf{r}(t + \Delta t), \\ \Delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A。 \end{aligned}$$

所以

$$\mathbf{d} = \Delta \mathbf{r}, \quad (1-7)$$

即位移(矢量)等于位置矢量的增量。

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量, 它有量值和方向。位移的量值记作 $|\Delta \mathbf{r}|$, 与标量路程一般不等, 位移的量值是割线 AB 的长度, 而路程是质点沿曲线通过的弧长 $\widehat{AB}$ 。只有在 Δt 趋近于零时, 方可把 $|\Delta \mathbf{r}|$ 和路程 Δs 看作相等。在直线运动中, 也只有朝单一方向运动的情形下, 位移的量值才等于路程; 如果出现往复运动的情形, 位移的量值必小于路程。

位移是矢量,因为它不但是具有大小和方向的量,而且还遵从矢量共同的合成法则,即平行四边形法则。图 1-3 表示先、后两个位移的合成,图 1-4 表示同时发生的两个位移的合成,它们的合位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和分位移 $\Delta \mathbf{r}_1$ 、 $\Delta \mathbf{r}_2$ 之间都遵从平行四边形合成法则。

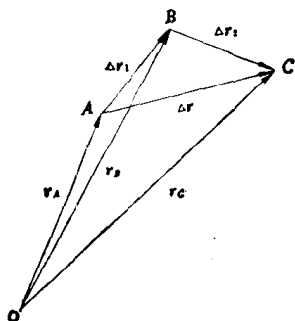


图 1-3

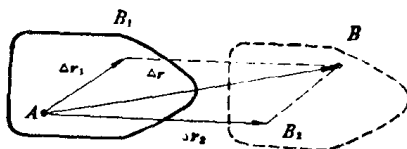


图 1-4

三、速度

在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内,质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,则 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值,称为在时间 Δt 内质点的平均速度,即

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同,其大小等于在相应的时间 Δt 内单位时间的位移量值。

用平均速度描述物体的运动是粗略的,要精确地知道某一时刻 t (或通过某一位置) 质点的运动状态,应使 Δt 尽量减小而趋近于零,用平均速度 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 所趋近的极限值,即瞬时速度 $\mathbf{v}$ 来描述。

瞬时速度(简称速度)的定义为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-9)$$

即瞬时速度等于时间 Δt 趋近零时平均速度的极限值,或矢径对时间的一阶导数。

那么,这个极限是否存在呢? 它的意义又何在? 又怎样计算

呢?

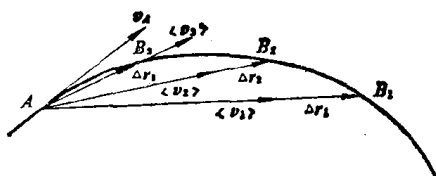


图 1-5

首先, 速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向应是 Δt 趋近于零时位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向。如图 1-5 所示, 位移 $\Delta \boldsymbol{r} = \overrightarrow{AB}$ 沿着割线 AB 的方向, 当 Δt 逐渐趋于零时,

B 点逐渐趋近于 A 点, 相应地割线逐渐趋近 A 点的切线。所以, 当 Δt 趋于零时, 平均速度 $\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 存在极限方向, 即沿着轨道上质点所在点的切线, 并指向前进的方向。 $\boldsymbol{v}$ 的量值应是 Δt 趋近于零时量值 $\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$ 的极限, 注意在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta \boldsymbol{r}| \rightarrow 0$, 位移 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 的量值与弧长 Δs 趋于相等。所以

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt},$$

即当 Δt 趋于零时, 平均速度的量值趋近于平均速率 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 的极限值——瞬时速率(简称速率):

$$v = |\boldsymbol{v}| = \frac{ds}{dt}.$$

因此, 平均速度确实存在着时间趋近于零时的极限, 这个极限即速度, 它的意义是: 表示质点瞬时运动的方向和快慢。当质点运动的轨道已知时, 质点的位置坐标只有一个变量是独立变化的。如果用沿着轨道、从某一固定点量到质点所在位置的弧长 s 作为确定质点位置的独立变量, 那么, 质点沿着已知轨道的运动学方程转化为

$$s = s(t).$$

这样, 质点的速度

$$\boldsymbol{v} = \frac{ds}{dt} \hat{\tau}, \quad (1-10)$$

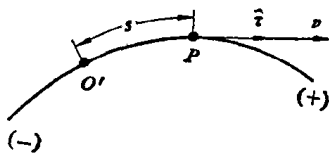


图 1-6

式中 τ 表示 $s(t)$ 处, 沿着轨道切线正方向的单位矢量。

当质点在 xy 平面上运动, 运动学方程用

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t) \end{cases}$$

给出时, 注意到位移 $\Delta \mathbf{r}$ 在坐标轴 x 、 y 方向的投影分别为(参看图1-7)

$$(\Delta \mathbf{r})_x = \Delta x, (\Delta \mathbf{r})_y = \Delta y。$$

所以, 速度 $\mathbf{v}$ 在坐标轴 x 、 y 方向的投影:

$$\begin{aligned} v_x = (\mathbf{v})_x &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\Delta \mathbf{r})_x}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}, \end{aligned}$$

$$v_y = (\mathbf{v})_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\Delta \mathbf{r})_y}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{dy}{dt},$$

即

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= v_x \hat{i} + v_y \hat{j} \\ &= \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j}。 \end{aligned} \quad (1-11a)$$

又因为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d}{dt}(x\hat{i} + y\hat{j})。 \quad (1-11b)$$

比较(1-11a)和(1-11b)式后可见, 在直角坐标系中, 因单位矢量 $\hat{i}$ 、 $\hat{j}$ 都是不变的恒矢量。所以(1-11a)式可以看作直接把 $\mathbf{r} = x\hat{i} + y\hat{j}$ 对 t 求导而得, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \frac{d}{dt}(x\hat{i} + y\hat{j}) \\ &= \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j}。 \end{aligned}$$

直角坐标系中, 这一矢量函数的求导法则, 具有更加普遍的意义。

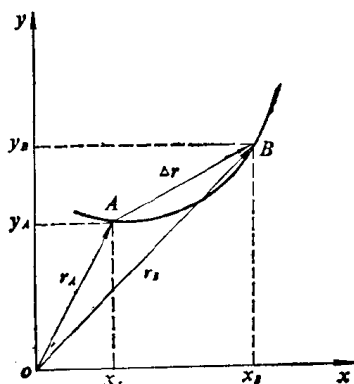


图 1-7