


大学物理


主 编 吴春雷 李 聪 尹永琦

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

大学物理

主 编 吴春雷 李 聪 尹永琦
副主编 马建峰 张喜斌

贵州师范学院内部使用

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式以及相互作用规律的科学,是自然科学的基础。大学物理课程以物理学基础为主要内容,所包含的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素质的重要组成部分。本书依照教育部高等学校物理学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。

本书适合普通高等学校理工科各专业的学生学习使用,也可作为教师或相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/吴春雷,李聪,尹永琦主编.—哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2019.6
ISBN 978-7-5661-2326-8

I. ①大… II. ①吴… ②李… ③尹… III. ①物理学
-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第111248号

选题策划 刘凯元
责任编辑 于险波 马毓聪
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街145号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 13.75
字 数 360千字
版 次 2019年6月第1版
印 次 2019年6月第1次印刷
定 价 42.00元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

贵州师范学院内部使用

前 言

物理学是自然科学中最重要的基本学科之一。物理学研究宇宙间存在的各种物质的基本形式与它们的性质、运动和转化,以及内部结构,从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律。物理学的各分支学科是按物质的不同存在形式和不同运动形式来划分的。经典力学研究宏观物体的低速机械运动的现象和规律。宏观是相对于分子、原子等微观粒子而言的,低速是相对于光速而言的。光学研究光的性质及其和物质的各种相互作用。热学研究热的产生和传导,研究物质处于热状态下的性质和这些性质是如何随着热状态的变化而变化的。经典电磁学研究宏观电磁现象和客观物体的电磁性质。对于高速运动现象的研究建立了狭义相对论,对于原子内部运动状态的研究,诞生了量子力学。相对论和量子力学是近代物理学的两大支柱,物理学以此为基础得到了迅速发展,建成了宏伟的物理学大厦。

物理学是一门应用广泛的基础学科。化学、生物学、地质学、医学等都需要物理学的知识。近几十年来物理学与其他学科结合产生了许多边缘学科,如生物物理学、天体物理学、地球物理学、海洋物理学、化学物理学等。同时物理学与技术又有着密切的联系。在物理学的发展过程中,不仅建立了系统完整的知识体系,而且逐渐形成了一整套研究物理学的科学思想和科学方法。如常规方法——观察、实验、逻辑思维(分析、综合、归纳、演绎、类比、理想化方法)、数学方法等,非常规方法——直觉、猜想、灵感等。其中基本的研究方法是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,从而建立物理规律,形成物理理论,再回到实践中去,经过新的实验事实的检验,不断地修改,使物理理论更好地反映客观实际的规律性。

物理学是一门重要的基础理论课,学生通过学习,能掌握物理学中的基础概念和基本规律,以及研究问题的科学方法,同时在科学实验能力、计算能力和抽象思维能力等方面会受到严格的训练,分析问题和解决问题的能力得到较大幅度的提高,为其他专业课的学习奠定良好的物理基础。

牡丹江师范学院的吴春雷编写了本书第3章第2节、第4章、第8章、第9章和第10章,并负责全书的统稿工作(约16万字);牡丹江师范学院的李聪编写了本书第2章、第3章第3节和第6章(约6.5万字);哈尔滨师范大学的尹永琦编写了本书第5章和第7章(约6.5万字);牡丹江师范学院的马建峰编写了本书第1章(约3.5万字);牡丹江市教育科学研究院中学一级教师张喜斌编写了本书第3章的其他内容(约3.5万字)。

编者

2019年3月

目 录

第 1 章 质点力学	1
1.1 质点运动的描述	1
1.2 几种典型的质点运动	6
1.3 牛顿运动定律及其应用	9
1.4 功 功率	11
1.5 势能	13
1.6 能量守恒定律	15
1.7 动量和动量定理	17
1.8 物体系的动量定理 动量守恒定律	19
习题	20
第 2 章 刚体力学	23
2.1 刚体的平动和转动	23
2.2 转动动能 转动惯量	27
2.3 力矩 刚体定轴转动定律	29
2.4 角动量 角动量守恒定律	31
2.4 力矩的功 刚体定轴转动中的动能定理	32
习题	33
第 3 章 机械振动 机械波	36
3.1 简谐振动	36
3.2 简谐振动的合成	43
3.3 机械波的产生和传播	46
3.4 平面简谐波的波动方程及其物理意义	48
3.5 波的能量 能流密度	52
3.6 波的叠加原理 波的干涉 驻波	54
习题	59
第 4 章 波动光学	61
4.1 相干光	61
4.2 杨氏双缝干涉实验 劳埃德镜实验	63
4.3 光程 薄膜干涉	66
4.4 劈尖 牛顿环	71
4.5 光的衍射	74
4.6 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	79

4.7	光栅衍射	82
4.8	光的偏振现象 马吕斯定律	84
	习题	88
第5章	热学	91
5.1	气体状态参量 平衡态 理想气体状态方程	91
5.2	气体分子动理论	92
5.3	气体宏观状态参量的微观表示	94
5.4	气体分子速率分布规律	97
5.5	自由度 能量均分定理 理想气体的内能	100
5.6	准静态过程 热力学第一定律	102
5.7	热力学第一定律的应用	105
5.8	热机和制冷机 卡诺循环	109
5.9	热力学第二定律	112
	习题	115
第6章	真空中的静电场	119
6.1	电荷 库仑定律	119
6.2	电场 电场强度	122
6.3	电场线 电场强度通量	126
6.4	高斯定理及其应用	129
6.5	静电场的环路定理	134
6.6	电势	136
6.7	等势面	140
	习题	141
第7章	静电场中的导体和电介质	145
7.1	静电场中的导体	145
7.2	电容 电容器	148
7.3	电场的能量	152
	习题	155
第8章	电流与磁场	157
8.1	电流 电流密度 电动势	157
8.2	磁场 磁感应强度	159
8.3	磁通量 磁场的高斯定理	162
8.4	毕奥 - 萨伐尔定律及其应用	164
8.5	安培环路定理	167
	习题	173
第9章	磁场对电流的作用	177
9.1	磁场对运动电荷的作用力	177
9.2	带电粒子在电场和磁场中的运动	179

9.3	磁场对载流导线的作用力	182
9.4	磁场对载流线圈的作用	185
	习题	188
第 10 章	电磁场的普遍规律	194
10.1	电磁感应定律	194
10.2	动生电动势 感生电动势	197
10.3	自感	202
10.4	互感	204
	习题	206

第1章 质点力学

力学是研究机械运动规律及其应用的科学。一个物体相对另一个物体,或者一个物体的某些部分相对于其他部分的位置的变化,称为机械运动。力学在各种自然科学中发展最早。17世纪形成了以牛顿定律为基础的经典力学,其理论体系在19世纪上半叶即告完成,成为物理学其他分支研究的基石和起点,并广泛应用于生产实际之中,成为工程技术的重要基础。

任何物体都有一定的大小和形状,当物体运动时,其各点的位置变化一般来说是各不相同的。因此,要精确描述某一实际物体的运动不是一件简单的事情。但在某些实际问题中,如果物体各点的运动状态完全相同,或者物体本身的形状和大小可以忽略不计,那么就可以把物体看作一个具有质量而没有形状和大小的点,这种理想的模型称为质点。物理学中常用理想模型方法来处理实际问题。这种方法可以突出研究对象的主要性质,忽略次要因素,从而抓住问题的本质。质点就是一个理想模型。一个物体能否看作质点要视具体问题的性质而定。例如,研究一辆汽车行驶的快慢和路程时,汽车作为一个整体,各点的运动是相同的,所以可以把汽车看作一个质点;但是在研究空气阻力对汽车运动的影响时,就不能忽略汽车自身的形状和大小,此时就不能把汽车看作质点。

1.1 质点运动的描述

1.1.1 参考系与坐标系

1. 参考系

要考察一个物体是否运动和怎样运动,必须选择另一个物体作为参考,这个被选为参考的物体称为参考系。

不同的参考系对同一物体运动情况的描述是不同的。如在做匀速直线运动的火车上研究一物体的自由下落时,如果以运动着的火车为参考系,那么该物体是竖直下落的;如果以车站为参考系,那么该物体的运动轨迹是向下的抛物线。这就是说,运动的描述是相对的。因此,在阐述物体运动规律时,必须指明选用的是什么参考系。

2. 坐标系

要想定量描述物体(质点)的运动规律,还需要在参考系上建立适当的坐标系。在坐标系中,物体的位置由坐标定量地确定。常用的坐标系有直角坐标系、极坐标系、球坐标系

等。具体描述物体的运动规律时,可根据具体情况选择坐标系形式。选择不同的坐标系,只是描述物体运动所用的参数不同而已,对物体的运动性质及规律并无影响。坐标系选择得恰当,可以简化计算。由于坐标系是固定于参考系上的,因此坐标系实质是参考系的数学抽象,指明了坐标系也就指明了参考系。

1.1.2 位置矢量 运动方程

1. 位置矢量

如图 1-1 所示,质点 P 在直角坐标系中的位置可以由原点 O 指向 P 点的有向线段 \mathbf{r} 来表示,矢量 \mathbf{r} 叫作位置矢量,简称位矢。在直角坐标系中, \mathbf{r} 可由坐标 x, y, z 表示,于是位置矢量 \mathbf{r} 可写成

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1-1)$$

式中, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 Ox 轴、 Oy 轴、 Oz 轴的单位矢量。位置矢量的大小为

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

位置矢量 \mathbf{r} 的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{x}{|\mathbf{r}|}$$

$$\cos \beta = \frac{y}{|\mathbf{r}|}$$

$$\cos \gamma = \frac{z}{|\mathbf{r}|}$$

式中, α, β, γ 分别为 \mathbf{r} 与 Ox 轴、 Oy 轴和 Oz 轴之间的夹角。

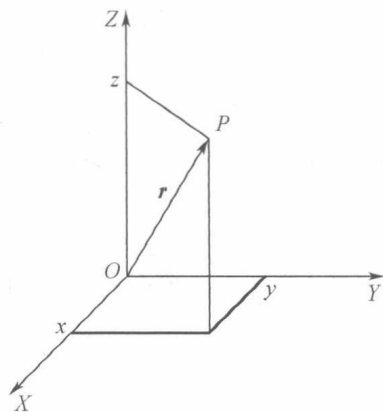


图 1-1 位置矢量

2. 运动方程

质点运动时,它的位置矢量 \mathbf{r} 是随时间 t 而变化的,所以 \mathbf{r} 是 t 的函数。表示 \mathbf{r} 随时间 t 变化的关系式称为运动方程,可以写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-2)$$

在直角坐标系中,运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

知道了质点的运动方程,就能够确定质点的整个运动情况。因此,力学的主要任务之一就是找出各种具体运动所遵循的运动方程。

质点在空间中所经历的路径称为轨迹,由式(1-3)消去 t 后即可得轨迹方程。

如果质点在 xOy 平面上运动,则运动方程式(1-3)可简化为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (1-4)$$

从两式中消去参数 t 得轨迹方程

$$y = y(x) \quad (1-5)$$

例如,某质点运动方程为 $x = R\cos \omega t, y = R\sin \omega t$, 将其中的 t 消去后得轨迹方程 $x^2 + y^2 = R^2$, 即质点的运动轨迹为一圆周。

1.1.3 位移与路程

如图 1-2 所示,质点在空间中沿曲线从 A 点运动到 B 点,在时刻 t ,质点位于 A 点,其位置矢量为 \mathbf{r}_A ,经过时间 Δt 后,质点位于 B 点,其位置矢量为 \mathbf{r}_B 。在时间 Δt 内,质点的位置变化可用从 A 点到 B 点的有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 来表示,称为质点在 Δt 时间内的位移。

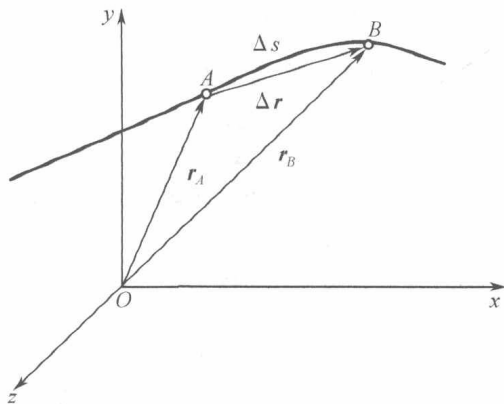


图 1-2 质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和路程 Δs

位移是矢量,从图 1-2 中可以看出位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与位置矢量 $\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B$ 的关系为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-6a)$$

式(1-6a)表明,位移等于质点的末时刻位置矢量 \mathbf{r}_B 与初始时刻位置矢量 \mathbf{r}_A 的矢量差。在直角坐标系中,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 可表示为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \quad (1-6b)$$

从 A 点到 B 点质点运动的实际路径是曲线线段 Δs 的长度,称为 Δt 时间内这个质点的路程。位移和路程是两个截然不同的物理概念,位移是矢量,而路程是标量,一般情况下,二者的大小并不相等。例如,一个人沿圆形轨道走一圈,路程为 $2\pi R$,但位移为零。

1.1.4 速度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量,同时也是描述质点运动状态的一个参量。如图 1-2 所示,在 Δt 时间内质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,称 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比为质点在 Δt 时间内的平均速度,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速度是矢量,它的方向与位移的方向相同,其大小等于在相应时间 Δt 内,单位时间的位移。

平均速度仅是对质点运动状态的粗略描写,它只表示一段时间内位移的平均变化情况

况。显然,时间间隔 Δt 取得越小,其平均速度越接近运动的实际情况。因此,可以令 Δt 趋于零,取平均速度 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限值作为质点在某一时刻或某一位置运动状态的精确描述,这就是质点的瞬时速度,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知,速度的方向就是 Δt 趋于零时, $\Delta \mathbf{r}$ 的方向,也就是质点运动轨道在 A 点的切线方向,并指向质点的运动方向。

速度的大小称为速率,用 v 表示,即

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

若用 Δs 表示 Δt 时间内质点沿轨道所经历的路程, Δs 与 Δt 的比值称为平均速率,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-10)$$

平均速率与速度的大小一般不相等,只有当 Δt 趋于零时, Δs 趋于 $|\Delta \mathbf{r}|$, 平均速率与速度的大小才相等。

在直角坐标系 $Oxyz$ 中,瞬时速度的矢量式为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-11)$$

即瞬时速度矢量的投影等于位置坐标对时间的一阶导数。

在国际单位制中,速度的单位是 m/s 。

1.1.5 加速度

加速度是描述质点速度变化快慢程度的物理量。

如图 1-3 所示,质点做曲线运动。 t 时刻,质点位于 A 点,速度为 \mathbf{v}_1 ; $(t + \Delta t)$ 时刻,质点位于 B 点,速度为 \mathbf{v}_2 。则在 Δt 时间内,质点的速度增量为 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$ 。

质点的速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 与其所经历的时间 Δt 的比,称为这段时间内质点的平均加速度,用 $\bar{\mathbf{a}}$ 来表示,即

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\Delta t} \quad (1-12)$$

平均加速度是一个矢量,其方向与速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向相同,其大小为 $\bar{a} = \left| \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \right|$,但它只表示在时间 Δt 内速度的平均变化率,为了精确地描述质点速度的变化,需要引入瞬时加速度的概念。

当 Δt 趋近于零时,质点在这段时间内的平均加速度的极限值,称为质点在某一时刻或某一位置的瞬时加速度,简称加速度。其数学形式为

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-13)$$

可见,加速度等于速度对时间的一阶导数,或位置矢量对时间的二阶导数。

将速度矢量和位置矢量在直角坐标系中的表达式代入式(1-13),可以得到加速度在

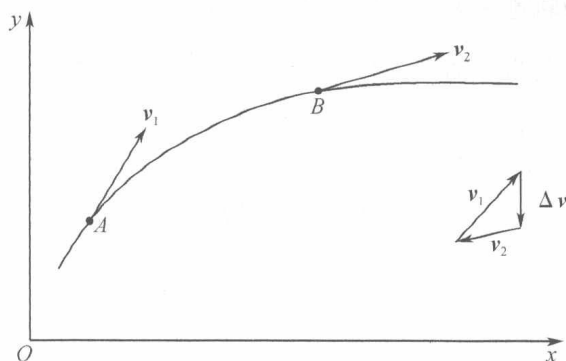


图 1-3 曲线运动的加速度

直角坐标系中的矢量式,即

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt} \mathbf{k} = \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \mathbf{k} \quad (1-14)$$

加速度的大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

加速度的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{a}$$

$$\cos \beta = \frac{a_y}{a}$$

$$\cos \gamma = \frac{a_z}{a}$$

在国际单位制中,加速度的单位是 m/s^2 。

加速度 \mathbf{a} 既反映了速度方向的变化,又反映了速度大小的变化。

【例 1-1】 已知某质点的运动方程为 $\mathbf{r} = 5t\mathbf{i} + 15t^2\mathbf{j} - 10\mathbf{k}$ (单位为 m)。

(1) 确定 $t = 1\text{ s}$ 和 $t = 2\text{ s}$ 时质点的位置。

(2) 求出质点的轨迹方程。

解 (1) 质点的运动方程表示的是质点位置矢量与时间的函数关系,因此分别将 $t = 1\text{ s}$ 和 $t = 2\text{ s}$ 代入运动方程便可求出相应时刻质点的位置矢量,即

$$\mathbf{r}|_{t=1} = 5\mathbf{i} + 15\mathbf{j} - 10\mathbf{k}$$

$$\mathbf{r}|_{t=2} = 10\mathbf{i} + 60\mathbf{j} - 10\mathbf{k}$$

质点的位置还可表示为坐标形式,即

$$x_1 = 5, y_1 = 15, z_1 = -10$$

$$x_2 = 10, y_2 = 60, z_2 = -10$$

(2) 质点运动方程的标量形式为

$$x = 5t, y = 15t^2, z = -10$$

$z = -10$ 表明质点在垂直于 z 轴的一个平面上运动,因此由前两项消去时间参数 t 得

$$y = \frac{3}{5}x^2$$

此结果表明:质点的轨迹为 $z = -10 \text{ m}$ 平面上的一条抛物线。

【例 1-2】 已知质点的运动方程为 $x = v_0 t, y = \frac{1}{2} g t^2$, 求它在 t 时刻的速度和加速度。

解 由 $\boldsymbol{v} = v_x \boldsymbol{i} + v_y \boldsymbol{j} = \frac{dx}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt} \boldsymbol{j}$ 得

$$\boldsymbol{v} = v_0 \boldsymbol{i} + g t \boldsymbol{j}$$

速度的大小为

$$v = \sqrt{v_0^2 + (g t)^2}$$

速度的方向为

$$\tan \theta = \frac{g t}{v_0}$$

式中, θ 为 \boldsymbol{v} 与 x 轴正方向的夹角。

由

$$\boldsymbol{a} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} = \frac{dv_x}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt} \boldsymbol{j}$$

得

$$\boldsymbol{a} = g \boldsymbol{j}$$

加速度的大小是 g , 方向沿 y 轴正方向。

1.2 几种典型的质点运动

1.2.1 直线运动

对于一定的参考系, 当质点运动的轨迹是一条直线时, 称为直线运动。直线运动又称一维运动, 它是最常见、最简单的运动类型。

在直线运动中, 质点的位移、速度和加速度都在同一直线上, 可以选取仅含 x 轴的一维坐标系, 且使 x 轴与质点的运动轨道重合, 仍用 \boldsymbol{i} 表示沿 x 轴正方向的单位矢量, 则质点的位置矢量为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x \boldsymbol{i}$$

因为 \boldsymbol{i} 为矢量, 当质点运动时, 其位置矢量总是与位置坐标 x 一一对应, 所以质点做直线运动的运动方程为

$$x = x(t)$$

其瞬时速度和瞬时加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

1. 匀速直线运动

质点做匀速直线运动时,它的速度不变,加速度为零,由 $v = \frac{dx}{dt}$ 得

$$dx = v dt$$

两边积分得

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t v dt$$

式中, x_0 和 t_0 一般由初始条件决定,如果起始时刻 $t_0 = 0$,同时质点的位置在坐标原点,即 $x_0 = 0$,则上式可写成

$$x = vt \quad (1-15)$$

式(1-15)就是匀速直线运动的运动方程。

2. 匀变速直线运动

质点做匀变速直线运动时,它的加速度为一恒量,由 $a = \frac{dv}{dt}$ 得

$$dv = a dt$$

对上式两边积分得

$$\int_{v_0}^v dv = \int_{t_0}^t a dt$$

$$v = v_0 + a(t - t_0)$$

式中, v_0 为质点在 $t = t_0$ 时刻对应的速度,当 $t_0 = 0$ 时,质点的初速度为 v_0 。于是上式可表示成

$$v = v_0 + at \quad (1-16)$$

式(1-16)就是质点做匀变速直线运动时速度随时间变化的规律。

根据 $v = \frac{dx}{dt}$,由式(1-16)得

$$dx = (v_0 + at) dt$$

对上式两边积分,如果 $t_0 = 0$ 时 $x = 0$,则得

$$\int_0^x dx = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (1-17)$$

式(1-17)就是匀变速直线运动中质点的运动方程。由此可以看出,若已知质点的运动方程,通过求微分可以求得质点的速度和加速度;反之,若已知质点的加速度以及初始条件,通过求积分可求得其速度和运动方程。

1.2.2 抛体运动

质点的运动轨迹在一个平面内的曲线运动,称为平面曲线运动,抛体运动和圆周运动就是常见的平面曲线运动。

在地球表面附近,将物体以一定的初速度沿某方向抛出,物体所做的运动称为抛体运

动,此物体称为抛体。在忽略空气阻力的情况下,投出的铅球、射出的枪弹,以及飞机投下的炸弹所做的运动都是抛体运动。

如果抛体以初速度 v_0 沿斜上方被抛出,则称抛体做斜上抛运动。在研究它的运动时,通常采用直角坐标系,选取直角坐标系 xOy ,原点 O 在投射处, y 轴竖直向上, x 轴与 y 轴垂直,且在 y 轴和抛射初速度 v_0 决定的平面内。在与此平面垂直的方向上,质点既无初速度又无加速度,故在此方向上速度分量始终为零,所以抛体运动为平面运动。

如果忽略空气阻力,抛体在运动中只受重力作用,则抛体的加速度在 x 轴和 y 轴上的分量应为

$$\begin{aligned} a_x &= 0 \\ a_y &= -g \end{aligned}$$

其速度在 x 轴和 y 轴上的分量为

$$\begin{cases} v_x = v_0 \cos \theta \\ v_y = v_0 \sin \theta - gt \end{cases} \quad (1-18)$$

可见,抛体运动可以看作水平方向初速度为 $v_0 \cos \theta$ 的匀速直线运动和竖直方向初速度为 $v_0 \sin \theta$ 的匀变速直线运动的合运动。其运动方程为

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \theta \cdot t \\ y = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (1-19)$$

消去参数,则得到抛体的轨迹方程

$$y = x \tan \theta - \frac{1}{2} \frac{gx^2}{v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (1-20)$$

由式(1-20)可知,抛体的轨迹是抛物线。

显然,在忽略空气阻力的情况下,抛体的加速度恒为重力加速度,故抛体做匀加速曲线运动。

上面的讨论没有考虑空气阻力的影响,所得的结论只有在阻力极小时才基本符合实际。在实际情况下,空气阻力等因素对抛体的运动有影响,抛体的轨迹不是抛物线,而是所谓的“弹道曲线”。

1.2.3 圆周运动

质点运动的轨迹是圆周的运动称为圆周运动。钟表指针上各点的运动、机器飞轮上各部分的运动等都是圆周运动。圆周运动是一种重要的曲线运动,它是讨论一般曲线运动的基础。当质点做一般的曲线运动时,虽然它的运动轨迹可以是各种形状,但是根据数学知识,过曲线上任意一点都能作一个曲率圆与曲线相切,相切点附近的一小段可以认为是曲率圆的一部分。因此,一般的曲线运动可以看成由一系列半径不同的圆周运动组合而成。

速率不变的圆周运动称为匀速圆周运动。质点做匀速圆周运动时,虽然其速度的大小不变,但速度的方向在不断改变,所以匀速圆周运动是一种变速运动。当质点以速率 v 做半径为 r 的匀速圆周运动时,它的加速度大小为 $a = \frac{v^2}{r}$,方向沿轨道半径指向圆心,称为向心加速度。它反映了速度方向的变化状况。

匀速圆周运动是圆周运动的一种特殊情况。一般情况下,质点做圆周运动时,其速度的大小和方向都在变,即做变速圆周运动,这种情况下,它的加速度 \boldsymbol{a} 不再指向圆心,而是与速度 \boldsymbol{v} 成一夹角,如图 1-4 所示。这时质点的加速度矢量可以按其运动轨道的法线方向和切线方向分解。

图 1-4 中,沿轨道半径指向圆心的加速度分量称为法向加速度(又称向心加速度),它描述了速度方向随时间的变化状况,其大小为

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (1-21)$$

沿轨道切线方向的加速度分量称为切向加速度,它描述了速度大小随时间的变化状况,可以证明其值为

$$a_t = \frac{dv}{dt} \quad (1-22)$$

总结以上结论,质点做变速圆周运动时,它的加速度可分解为法向加速度和切向加速度,即

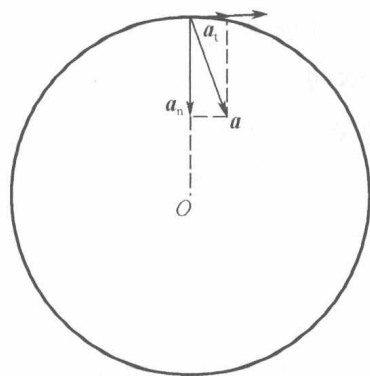
$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_n + \boldsymbol{a}_t \quad (1-23)$$

如图 1-4 所示,法向加速度与切向加速度互相垂直,总加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \quad (1-24)$$

总加速度的方向通常用他和速度方向夹角的正切表示,即

$$\tan \alpha = \frac{a_n}{a_t} \quad (1-25) \quad \text{图 1-4 变速圆周运动的加速度}$$



前面曾提到,一般的曲线运动可以看成由一系列半径不同的圆周运动组合而成,所以圆周运动加速度的计算公式也适用于一般的曲线运动,只是式(1-21)中的 r 应理解为质点在曲线某处的曲率半径 ρ , \boldsymbol{a}_n 的方向指向该处的曲率中心。

1.3 牛顿运动定律及其应用

牛顿在分析概括了伽利略等人大量实验工作的基础上,对物体间的相互作用及其对物体运动状态的影响进行了广泛的观察、实验和理论探索,建立了牛顿运动定律。牛顿运动定律不但是质点动力学的核心内容,而且是经典力学的理论基础。因此,本节将重点阐述牛顿运动定律的意义及运用牛顿定律分析问题和解决问题的基本方法。

牛顿运动定律由牛顿在 1687 年于《自然哲学的数学原理》一书中总结提出。

1.3.1 牛顿第一定律

牛顿第一定律的内容是:任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态,直到其他物体

的作用迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一定律给出了两个重要的物理概念——惯性和力。

按照牛顿第一定律,任何物体都具有保持其运动状态不变的性质,这一性质叫作惯性,惯性是物体的固有属性,故牛顿第一定律又称惯性定律。牛顿第一定律也给了力一个科学的定义,指出物体所受的力是外界对物体所施加的一种作用,力是物体运动状态改变的原因。

1.3.2 牛顿第二定律

牛顿第二定律的内容是:物体受到外力作用时,物体所获得的加速度的大小与外力的大小成正比,并与物体的质量成反比;加速度的方向与合外力的方向相同。即

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1-26)$$

牛顿第二定律的意义在于:对力的作用效果作了定量的说明。对质点而言,力是产生加速度的原因,而且 $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 说明的是力的瞬时作用规律。此外,牛顿第二定律还定量地量度了惯性的大小,物体的质量是物体惯性大小的量度。

在直角坐标系 $Oxyz$ 中,牛顿第二定律的投影式为

$$\begin{cases} F_x = ma_x \\ F_y = ma_y \\ F_z = ma_z \end{cases} \quad (1-27)$$

在国际单位制中,加速度的单位是 m/s^2 ,质量的单位是 kg ,力的单位是 N 。

1.3.3 牛顿第三定律

牛顿第三定律的内容是:两个物体间的作用力和反作用力大小相等、方向相反,作用在同一条直线上。即

$$\mathbf{F} = -\mathbf{F}' \quad (1-28)$$

牛顿第三定律指明了物体间相互作用力的定量关系,侧重说明了物体间相互联系和相互制约的关系。

观察和实验均可说明,不管相互作用的物体是静止的还是运动的,牛顿第三定律总是成立。

1.3.4 牛顿运动定律的应用

应用牛顿运动定律解决的质点力学问题通常有两类:一是已知质点所受的力,求该质点的运动情况;二是已知质点的运动情况,求该质点的受力情况。其求解力学问题的主要步骤如下。

- (1) 确定研究对象。
- (2) 分析受力情况,并画出示力图。
- (3) 分析研究对象的运动状态。