

高等院校教材工科类

大学物理学

徐 秋 戴志鹏 主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高等院校工科类教

大学物理学

徐 秋 戴志鹏 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学 / 徐秋, 戴志鹏编著. —北京: 国防工业出版社, 2004.2(2007.4重印)

ISBN 7-118-04302-2

I. 大... II. 徐... III. 物理学-高等学校-教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 17717 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20.7 字数 529 千字

2007 年 4 月第 1 版第 5 次印刷 印数 16001—20000 册 定价 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

主 编 徐 秋 戴志鹏

主 审 杨国琛 徐国忠

副 主 编 苏雪梅 李晓会 张兰霞 张念一

编 者 (按姓氏笔划排序)

孔令宜 刘俊红 刘树新 李文慧

李晓会 苏雪梅 张兰霞 张连珠

张念一 郝爱民 郭少英 徐 秋

韩宝亮 戴志鹏

责任校对 (按姓氏笔划排序)

李晓会 张兰霞 韩宝亮 戴志鹏

内 容 提 要

本教材按国家教委物理教学指导委员会《高等学校工科物理课程教学基本要求》组织编写。努力体现消减重复、注重衔接,压缩经典,加强现代应用的精神,有效地克服了工科教材理科化和内容陈旧的弊病。加强了对工科学生物理技术应用的早期渗入,突出了技术性、应用性、职业性、师范性。

本教材适用范围是高等技术院校工科类本科生、高等职业技术师范院校工科类本科生。略作删减可供工程专科、高等师范非物理专业等使用。也可作为成人教育类物理教材和理科物理教学参考书。

目 录

前 言	(1)
绪 论	(1)
第一章 质点运动学	(3)
§ 1-1 参照系和坐标系 时刻和时间	(3)
§ 1-2 描述质点运动的物理量	(3)
§ 1-3 质点运动学的基本问题	(8)
§ 1-4 相对运动	(10)
本章小结	(11)
习 题	(11)
第二章 质点动力学与守恒定律	(13)
§ 2-1 牛顿运动定律	(13)
§ 2-2 非惯性参照系 惯性力	(18)
§ 2-3 变力的功 动能定理	(19)
§ 2-4 保守力的功 势能	(21)
§ 2-5 功能原理 机械能守恒定律	(23)
§ 2-6 冲量 动量 动量定理	(25)
§ 2-7 动量守恒定律	(27)
§ 2-8 对称性和守恒定律	(28)
§ 2-9 质点力学定律的综合应用	(28)
本章小结	(31)
习 题	(31)
第三章 刚体力学 高速运动物体的质量与能量	(33)
§ 3-1 刚体的定轴转动	(33)
§ 3-2 转动动能 转动惯量 飞轮	(34)
§ 3-3 力矩的功 转动定律	(36)
§ 3-4 角动量 角动量守恒定律	(37)
§ 3-5 高速运动物体的质量与能量	(38)
本章小结	(40)
习 题	(40)
第四章 流体力学	(42)
§ 4-1 流体运动的描述	(42)
§ 4-2 伯努利方程	(44)
§ 4-3 伯努利方程的应用	(45)
§ 4-4 流体的反作用	(48)
§ 4-5 粘滞流体的运动规律	(49)

本章小结	(52)
习 题	(52)
第五章 气体动理学理论	(54)
§ 5-1 理想气体的压强公式和温度公式	(54)
§ 5-2 气体分子的速率分布	(56)
§ 5-3 能量按自由度均分定理	(61)
§ 5-4 真实气体	(63)
本章小结	(66)
习 题	(67)
第六章 热量的传递	(69)
§ 6-1 热量 热流量	(69)
§ 6-2 热阻	(71)
本章小结	(73)
习 题	(73)
第七章 热力学基础	(75)
§ 7-1 热力学第一定律	(75)
§ 7-2 热力学第一定律对理想气体的应用	(76)
§ 7-3 热机循环	(81)
§ 7-4 致冷循环	(84)
§ 7-5 热力学第二定律	(86)
§ 7-6 熵 熵增加原理	(88)
§ 7-7 热力学第二定律的统计意义	(93)
本章小结	(94)
习 题	(95)
第八章 静电场	(98)
§ 8-1 电场强度	(98)
§ 8-2 静电场的高斯定理	(101)
§ 8-3 静电场的环流定理 电势	(106)
§ 8-4 电势与场强的关系	(109)
本章小结	(110)
习 题	(111)
第九章 静电场中的导体和电介质	(113)
§ 9-1 静电场中的导体	(113)
§ 9-2 电容和电容器	(115)
§ 9-3 静电场中的电介质	(117)
§ 9-4 电介质中的高斯定理	(119)
§ 9-5 电场的能量	(122)
§ 9-6 静电的应用	(125)
本章小结	(126)
习 题	(127)

第十章 稳恒电流	(129)
§ 10-1 电流 电流密度	(129)
§ 10-2 欧姆定律	(132)
§ 10-3 电源 电动势	(134)
§ 10-4 闭合电路的欧姆定律	(135)
本章小结	(137)
习 题	(137)
第十一章 稳恒磁场	(139)
§ 11-1 磁场 磁感应强度	(139)
§ 11-2 毕奥-萨伐尔定律	(142)
§ 11-3 磁场的高斯定理	(143)
§ 11-4 安培环路定律	(144)
§ 11-5 安培力—载流导线在磁场中所受的力	(146)
§ 11-6 磁场对载流线圈的作用	(147)
§ 11-7 带电粒子在磁场中的运动	(148)
§ 11-8 霍尔效应 磁流体发电 磁约束	(149)
本章小结	(151)
习 题	(152)
第十二章 磁介质	(154)
§ 12-1 磁介质 磁化强度	(154)
§ 12-2 磁场强度 有介质存在时的安培环路定律	(155)
§ 12-3 铁磁质的磁化及其应用	(157)
§ 12-4 超导体的磁效应	(160)
本章小结	(161)
习 题	(161)
第十三章 电磁感应 电磁场	(163)
§ 13-1 电磁感应的基本规律	(163)
§ 13-2 动生电动势和感生电动势	(164)
§ 13-3 涡电流	(165)
§ 13-4 自感与互感	(166)
§ 13-5 磁场的能量	(168)
§ 13-6 位移电流 麦克斯韦方程组	(170)
本章小结	(173)
习 题	(174)
第十四章 振动学基础	(175)
§ 14-1 谐振动	(175)
§ 14-2 谐振动的特征量	(178)
§ 14-3 旋转矢量法	(182)
§ 14-4 谐振动的能量	(184)
§ 14-5 谐振动的合成	(185)

§ 14-6 电磁振荡	(188)
本章小结	(190)
习 题	(191)
第十五章 波动学基础	(193)
§ 15-1 机械波的产生和传播	(193)
§ 15-2 平面简谐波	(195)
§ 15-3 波的干涉 驻波和弦乐器	(198)
§ 15-4 波的能量 能流密度	(200)
§ 15-5 声波 超声波 次声波	(201)
§ 15-6 回声与混响	(202)
§ 15-7 电磁波	(203)
§ 15-8 多普勒效应	(204)
本章小结	(206)
习 题	(207)
第十六章 光的干涉	(209)
§ 16-1 光程和光程差	(209)
§ 16-2 洛埃镜 半波损失	(211)
§ 16-3 薄膜干涉	(213)
§ 16-4 劈尖 牛顿环	(215)
§ 16-5 迈克尔逊干涉仪	(218)
本章小结	(219)
习 题	(220)
第十七章 光的衍射	(222)
§ 17-1 光的衍射现象	(222)
§ 17-2 单缝衍射	(224)
§ 17-3 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(228)
§ 17-4 光栅衍射	(231)
§ 17-5 伦琴射线衍射	(235)
本章小结	(237)
习 题	(238)
第十八章 光的偏振及其应用	(240)
§ 18-1 自然光和偏振光	(240)
§ 18-2 反射光和折射光的偏振	(241)
§ 18-3 双折射现象 尼科耳棱镜 偏振片	(242)
§ 18-4 马吕斯定律	(244)
§ 18-5 旋光现象与测糖计	(244)
§ 18-6 人为双折射及其应用	(245)
本章小结	(247)
习 题	(247)
第十九章 量子物理简介	(248)

§ 19-1	黑体辐射 普朗克量子论	(248)
§ 19-2	光电效应	(250)
§ 19-3	康普顿效应	(253)
§ 19-4	氢原子光谱的规律	(255)
§ 19-5	氢原子的玻尔理论	(258)
§ 19-6	弗兰克-赫兹实验与原子能级	(261)
§ 19-7	德布罗意波	(264)
§ 19-8	不确定关系	(265)
§ 19-9	波函数 定态薛定谔方程	(267)
本章小结		(269)
习 题		(270)
第二十章 热辐射及其应用		(271)
§ 20-1	黑体辐射的实验规律	(271)
§ 20-2	两种辐射测温 宇宙背景温度	(273)
§ 20-3	红外辐射的应用	(275)
本章小结		(277)
习 题		(278)
第二十一章 激光及其应用		(279)
§ 21-1	激光的形成及其特性	(279)
§ 21-2	常用激光器简介	(284)
§ 21-3	激光的应用	(287)
本章小结		(290)
习 题		(291)
第二十二章 非电量测量与传感器		(292)
§ 22-1	非电量测量与传感器原理	(292)
§ 22-2	电阻式传感器	(293)
§ 22-3	电容式、电感式、压电式传感器	(296)
§ 22-4	光电式传感器	(298)
§ 22-5	频率式传感器	(299)
§ 22-6	用途广泛的光纤传感器	(300)
§ 22-7	霍尔转速传感器	(304)
§ 22-8	生物传感器简介	(305)
本章小结		(306)
习 题		(306)
附录一 矢量及其运算		(307)
附录二 我国法定计量单位和国际单位制		(309)
附录三 常用基本物理常量表		(312)
习题参考答案		(314)

绪 论

物理学是研究物质的最基本的、最普遍的运动形式以及各种运动形式的相互转化的自然科学。这些最普遍的运动形式包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等。物理学所研究的这些运动,普遍地存在于其它高级的、复杂的物质运动形式之中。例如,一切天体或地球上的一切物体,不论它们的化学组成如何,也不论它们是生物还是非生物,都服从物理学中的万有引力定律;又例如,一切过程,无论其是否具有化学性质或生物学性质等,都服从物理学中的能量守恒定律。因此,研究高级的、更加复杂的运动形态,以及研究一切现代科学技术都离不开物理学的知识。

物理学不仅是其它一切自然科学的基础,而且也是过去与当代工程技术的重大支柱。今天,现代化的生产和人们的生活已经无法离开物理学。物理学的发展始终与工程技术的实践有着密切地联系。近400年来,工业生产与物理学同步发展。生产技术的需要推动物理学进步;反过来,物理学又推动生产技术的革新,促进社会生产力的提高,改进人类社会的物质条件。在17、18世纪,牛顿力学和热力学的发展,有力地推动了蒸气机的研制和机械工业的发展,引起了第一次工业革命,极大地改变了工业的面貌。到了19世纪,在法拉第、麦克斯韦电磁理论的推动下,人们成功地制造了电机、电器和电讯设备,引起了工业电气化,使人类进入了应用电能的时代,这是第二次工业革命。20世纪以来,由于狭义相对论和量子力学的建立,人们对原子、原子核结构的认识日益深入,实现了原子核能和人工放射同位素的利用,促成了半导体、激光等新技术的发明,使人类进入了原子能、电子计算机、自动化、半导体、激光、空间科学等新技术的时代。现代物理学在开发新能源、新材料以及新工艺过程、检测方法等方面,都提供了丰富的实验材料和理论根据,大大地发展了生产力。已有的物理理论是人类的宝贵财富,它的巨大潜力值得人们继续开发,物理学在实践中的新发现和理论上的新突破,都必将给社会带来极大的收益。

大学物理学是工科各专业的一门必修基础课。大学物理教学是实现培养目标的重要环节,可使学生获得系统的、能长期起作用的物理基本概念和基本规律,初步掌握物理学最基本的研究方法;可使学生的科学思维和实验技能得到初步训练,为学习专业知识及近代科学技术打下必要的基础;能够培养学生的科学研究方法,分析和解决问题的能力;能使学生了解近代物理知识,学习物理学在工程技术上的新型实用技术,对开拓思路,激励探索精神具有重要作用。

为学好物理学,应注意以下学习方法。

首先,要准确掌握物理概念。物理概念是反映物理现象和过程本质属性的思维形式。物理理论体系是以物理概念为基本要素的,物理学中的定理、定律、原理、公式无一不是反映有关物理概念之间相互联系和数量上依存关系的。而且,概念是思维的起点和依据,只有有了明确的概念,才能进行正确的判断和推理,才有智力的开发和提高的可能。因此,在学习时一定要十分重视对物理概念的理解和掌握,努力建立起清晰的物理图象。

其次,要切实理解和掌握物理学中的基本规律。物理规律是物理现象、过程在一定条件下发生、发展和变化的必然趋势及其本质联系的反映。它是物理学的精华所在,而且物理学的思想方法及研究方法又集中体现在物理规律的发现和建立之中。因此,我们要努力掌握物理规律

(尤其是定理和定律)深刻理解其内涵和外延,并能熟练地运用物理规律分析和解决物理问题。

第三,要注意物理学的科学思想及研究方法的学习。物理学的科学思想(如实验观点、统计观点、守恒观点等)及研究方法本身就是富有活力的科学。领悟了研究物理学的科学方法,不仅能真正学好物理学,而且移植到其它学科亦有十分重要的意义。在学习中,应重视物理实验,善于观察和分析物理现象,学会抽象思维和理想化方法,不断提高分析问题和解决问题的能力。

第四,要注意物理原理和技术在现代工程技术中的应用,力争能作到举一反三,灵活自如。

第五,应注重物理量、单位和有效数字的运用。物理量和物理公式是物理学描述物质结构、相互作用和运动规律时使用的专门语言。每一个物理量都被赋予严格、准确的含义。国际单位制(SI)中定义了七个基本单位和两个辅助单位,在此基础上由公式导出了一系列导出单位。

物理学中的数据也不同于数学中的数。数据中的位数(即有效数字的位数——参看物理实验教材)表征这个物理数据的测量精度。读者在验算题目时应该注意,必须按有效数字的计算方法确定最终结果的位数,不允许在计算过程中随意增添或减少有效数字的位数。

大学物理学课程的学习,是工科学生夯实基础的关键,是终生受益的教育环节,望读者珍惜学习机会,为物理学与工程技术的发展贡献力量。

第一章 质点运动学

运动学所研究的是物体位置随时间变化的规律,但不涉及变化发生的原因。

本章讨论运动学中最简单,最基本的情况——质点运动学。首先认识描述运动的相对性,然后讨论描述质点运动的物理量,着重说明它们的矢量性、瞬时性以及相对性,最后在此基础上讨论质点运动学的两类基本问题。

§ 1-1 参照系和坐标系 时刻和时间

一、参照系和坐标系

宇宙中的一切物体,大到天体,小到分子和原子都处于永恒的运动中。运动是绝对的,静止是相对的。因此要研究某物体的运动,必须选择另一个物体作为参照物。被选作参照的物体,称为参照系。参照系的选择,视问题的方便而定。例如,在研究地面物体的运动时,通常选地球或相对于地球静止的物体作参照系。同一物体在不同参照系中运动状态不同。

为了定量地描述物体的位置及其变化,必须在参照系上建立适当的坐标系。一般最常用的是直角坐标系。

二、时刻和时间间隔

在生活中,“时间”一词通常有两种含义:第一种指某一瞬时,如“飞机起飞的时间是9点30分”;第二种指某一段时间,如“一场足球赛的时间为90分钟”。在物理学中为了明确区分这两种含义,使用时刻和时间间隔。时刻是指与运动物体每一位置相对应的那一瞬间。时间间隔是指从某一起始时刻到终止时刻所经历的时间。

§ 1-2 描述质点运动的物理量

一、质点 位置矢量 运动方程

研究物体的某一运动,当它的大小和形状可以忽略,或当物体作平动时,就把物体当作是一个有一定质量的点,这样的点通常叫质点。

为了描述质点的运动,首先要有描述质点位置的数学方法。图1-1中,从坐标原点 O 画一个指向 P 点的有向线段 OP ,此有向线段的长度指出 P 点到原点的距离,其箭头指出 P 点所在的方向。可以用来确定质点所在位置的矢量,称为位置矢量,简称位矢,又称径矢,记作 $\mathbf{r}$ 。如图1-1所示。

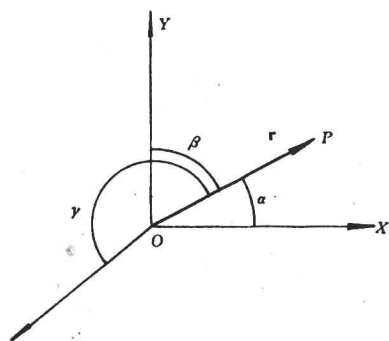


图1-1 位置矢量

设位矢 $\mathbf{r}$ 端点 P 在直角坐标系的坐标分别为 x, y 和 z 。于是位矢 $\mathbf{r}$ 就可写成

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

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为坐标轴 OX, OY 和 OZ 的正方向的单位矢量。

位矢 $\mathbf{r}$ 的大小

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

位矢 $\mathbf{r}$ 的方向由三个方向余弦确定。

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

α, β, γ 分别是 $\mathbf{r}$ 与 OX, OY, OZ 轴正方向的夹角。

如果图 1-1 中的质点 P 运动, 那么, 它的位矢 $\mathbf{r}$ 将随时间变化, 即位矢 $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-4a)$$

上式称为质点的运动方程(矢量式)。显然, 这时质点的坐标 x, y, z 也是时间 t 的函数

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-4b)$$

该式称为质点的运动方程(分量式)。

质点运动时在空间连续占据的各点所连成的曲线称为质点运动的轨道。将式(1-4b)中的参数 t 消去, 可得轨道方程, 即:

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

例 已知质点在一平面上运动, 它的运动方程为 $x = 4\cos \frac{\pi}{3}t, y = 3\sin \frac{\pi}{3}t$ 。式中长度以米计, 时间以秒计。试求质点的位矢表示式和运动的轨道方程。

解 质点的位矢 $\mathbf{r} = 4\cos \frac{\pi}{3}t\mathbf{i} + 3\sin \frac{\pi}{3}t\mathbf{j}$

将质点运动方程中参数 t 消去得

$$\frac{x^2}{4^2} + \frac{y^2}{3^2} = 1$$

这就是质点的轨道方程。运动轨道是一椭圆。实际上, 质点的运动方程也可以看作是以 t 为参数的轨道方程。

二、位移

如质点从位置 A 沿一平面曲线移动到位置 B , 如图 1-2 所示。建立一平面直角坐标系。用从 A 指向 B 的矢量 $\Delta\mathbf{r}$ 表示在这段时间内的位移。

设质点在 A 的位矢为 $\mathbf{r}_A$, 在 B 的位矢为 $\mathbf{r}_B$, 据矢量合成有

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-5a)$$

在直角坐标系中, 位移

$$\Delta\mathbf{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} \quad (1-5b)$$

Δx 和 Δy 是同一时间质点坐标的增量。

位移的大小

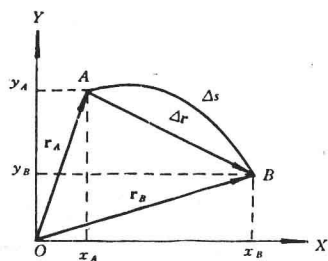


图 1-2 质点的位移 $\Delta\mathbf{r}$ 和路程 Δs

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (1-6)$$

方向可用位移与 x 轴的夹角 α 表示

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-7)$$

显然,上述有关位移的讨论很容易推广到三维情形。

三、速度

设在时间 Δt 内,质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ 。将比值 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 称为质点在 Δt 时间内的平均速度,记作 $\bar{\mathbf{v}}$

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

平均速度是矢量,它的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

若在 Δt 时间内,质点经历的路程是 Δs ,则比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 称为质点在这段时间内的平均速率,记作 $\bar{v}$

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-9)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,比值 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限 $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 和比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 的极限 $\frac{ds}{dt}$,分别称为瞬时速度和瞬时速率,简称速度和速率。即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-10)$$

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-11)$$

速度是描述运动质点在某一瞬时位置变化率的物理量。(1-10)式表明:速度 $\mathbf{v}$ 与 $d\mathbf{r}$ 同方向,即沿轨道的切线指向质点前进的方向。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时

$$|d\mathbf{r}| = ds, \quad \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \frac{ds}{dt}$$

即在任一时刻,质点速度的大小与速率相等。

综上所述:质点运动时,其速度的大小与速率相等,方向沿轨道切线指向质点前进方向。

当质点在一个平面上运动时,速度矢量在平面直角坐标系中表示为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \quad (1-12)$$

由式(1-10)

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} \quad (1-13)$$

比较式(1-12)和式(1-13)有

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} \\ v_y &= \frac{dy}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

速度 $\mathbf{v}$ 的大小

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-15)$$

速度 $\mathbf{v}$ 的方向可用 $\mathbf{v}$ 与 OX 轴正向的夹角 α 表示。

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-16)$$

在国际单位制中,速度的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

四、加速度

如图 1-3,质点作曲线运动。 t 时刻,质点位于 A 点,速度为 $\mathbf{v}_A$;在 $t + \Delta t$ 时刻,质点位于 B 点,速度为 $\mathbf{v}_B$ 。在 Δt 时间内质点速度的变化量 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$ 。称比值 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 为质点在这段时间内的平均加速度,用符号 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-17)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,比值 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 的极限 $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$,称为质点在 t 时刻的瞬时加速度,简称加速度,用符号 $\mathbf{a}$ 表示

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-18a)$$

将式(1-10)代入上式得:

$$\mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-18b)$$

将式(1-12)和式(1-13)代入式(1-18a)和式(1-18b),即得平面直角坐标系中加速度表示式

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} \quad (1-19)$$

用符号 a_x 和 a_y 表示 x 轴和 y 轴方向的加速度分量,则

$$\left. \begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

加速度 $\mathbf{a}$ 的大小

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1-21)$$

加速度 $\mathbf{a}$ 的方向可用 $\mathbf{a}$ 与 x 轴正向夹角 α 表示

$$\tan \alpha = \frac{a_y}{a_x} \quad (1-22)$$

在国际单位制中,加速度的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

例 距地面的 200km 的高度处,有一层由带正电的离子和带负电的电子组成的电离层。当无线电波通过电离层时,带电粒子会受到振荡电场的作用力。设电场 $\mathbf{E} = E_0 \sin \omega t$ (ω 是振荡频率, E_0 是恒矢量)。使质量为 m ,电荷为 $-e$,初始状态是静止的一个电子产生加速度 $\mathbf{a} = -\frac{e}{m} E_0 \sin \omega t$,求此电子的运动方程。

解 由 $\mathbf{a} = -\frac{e}{m} E_0 \sin \omega t$ 可知电子的加速度 $\mathbf{a}$ 是大小、方向随时间作周期性变化的矢量,但 $\mathbf{a}$ 的方向沿 E_0 所在的直线上。又因电子初始状态是静止的,故可判断此电子作直线运动。

选坐标 OX 轴沿 E_0 方向,以电子静止在初始位置为坐标原点,并以此作为计时起点($t = 0$),故初始条件为 $t = 0, x = 0, v_0 = 0$ 。

$$\text{由已知条件知 } a = a_x = -\frac{eE_0}{m} \sin \omega t$$

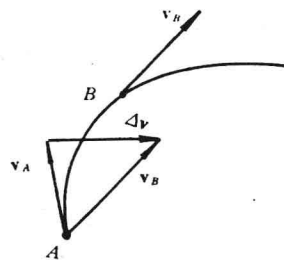


图 1-3 速度的增量 $\Delta \mathbf{v}$

令 $a_0 = -\frac{eE_0}{m}$ 则 $a = a_x = a_0 \sin \omega t$

因为 $\frac{dv}{dt} = a$ 所以

$$v = \int_0^t a dt = \int_0^t (a_0 \sin \omega t) dt = -\frac{a_0}{\omega} (\cos \omega t - 1)$$

又因 $v = \frac{dx}{dt}$ 所以

$$x = \int_0^t v dt = \int_0^t -\frac{a_0}{\omega} (\cos \omega t - 1) dt = -\frac{a_0}{\omega^2} \sin \omega t + \frac{a_0}{\omega} t$$

此即电子的运动方程。结果的第一项相应于电场振动而产生的振荡项。但是，电子除此之外，还有沿 x 负向的匀速运动，我们叫它漂移运动。

五、切向加速度和法向加速度

加速度矢量除可以按直角坐标系分解外，还可以按自然坐标系分解，即按质点运动轨道的法线方向和切线方向分解。

下面以圆周运动为例，说明曲线运动的切向加速度和法向加速度。如图 1-4 所示。质点在圆轨道上运动到 A 点，在 A 点沿圆的切线指向速度方向作一坐标轴 AT ，称为切向坐标轴；再沿半径方向指向圆心作坐标轴 AN ，称为法向坐标轴。圆周上每一点都有自己的切向坐标轴和法向坐标轴。

对于作匀速圆周运动的质点，由于速度方向的变化，其加速度的大小等于 $\frac{v^2}{R}$ ，方向指向圆心，即沿法向坐标轴，称为向心加速度，又称法向加速度，用符号 a_n 表示。其大小

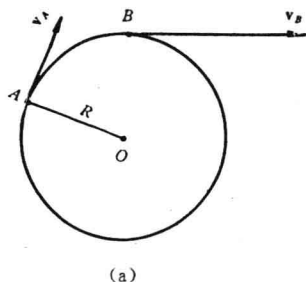
$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (1-23)$$

如果质点作变速圆周运动，这时，不但有改变速度方向的加速度，还有改变速度大小的加速度。如图 1-5(a) 所示，设质点沿圆周运动，在 t 时刻质点运动到 A 点，速度为 v_A ，经 Δt 时间运动到 B 点，速度为 v_B 。在 Δt 时间内速度的增量 $\Delta v = v_B - v_A$ ，按加速度定义

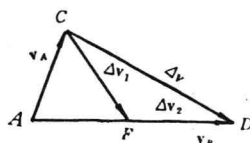
$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_B - v_A}{\Delta t}$$

下面具体讨论加速度的大小和方向。

将 v_A 和 v_B 平行移动，使二矢量的始点皆移至 A 点，如图 1-5(b)。



(a)



(b)

图 1-5 变速圆周运动