

高等学校教材



基础物理学 (上册)

JICHU WULI XUE

第二版

● 过祥龙 董慎行 晏世雷 编著

图书在版编目(CIP)数据

基础物理学/过祥龙,董慎行,晏世雷编著. —2版.
苏州:苏州大学出版社,2003.8
ISBN 7-81090-145-1

I. 基… II. ①过…②董…③晏… III. 物理学
—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 060711 号

基础物理学(第二版)(上、下册)

过祥龙 董慎行 晏世雷 编著

责任编辑 陈兴昌

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路 200 号 邮编:215021)

丹阳市兴华印刷厂印装

(地址:丹阳市胡桥镇 邮编:212313)

开本 787×1092 1/16 印张 40.5 (共两册) 字数 1011 千

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—7000

ISBN 7-81090-145-1/O · 10(课) 定价: 50.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-67258802

第二版前言

我们的《基础物理学》第一版出版以来,被多所院校用作普通物理课程的教材。根据使用过此书的师生以及其他读者的反映,参照近年来普通物理教学的发展趋势,我们在保持原有体系和风格的基础上,重新编写了第二版。它主要作了以下的补充和修改:

充实、拓宽、加深了一些内容。电学部分增写了压电效应、量子霍尔效应、同步辐射、电磁场动量、光压等;光学部分增写了光学信息处理、克尔效应、旋光、液晶等;热学部分增写了玻耳兹曼分布、节流、低温技术、熵与信息等;近代物理部分增写了温室效应、斯特恩—盖拉赫实验、半导体激光、自由电子激光、非线性光学、核磁共振成像,并且充实了激光、超导内容。

为保证系统的完整性,在力学中增加了质点系的功能定理和动能定理,以及质心和质心定理。热学部分的体系作了较大变动,按照分子动理论、热力学第一定律、热力学第二定律来展开,这无疑将使教学重点突出,并节省课时。

第二版还对原书的思考题、习题进行了增删,使之更贴近学生实际。为了便于读者查阅,第二版增加了中英文索引。全书有“*”号部分供教学选用。

本书第二版列入苏州大学精品教材建设项目,得到了苏州大学各方面的大力支持。编写过程中,得到了扬州大学凌帆教授的帮助;南京大学卢德馨教授和复旦大学蒋平教授审阅了本书的第一版;北京大学陆果教授无私提供了有关资料;许多使用过本书第一版教材的兄弟院校及时反馈了许多有价值的建议。苏州大学物理科学与技术学院的老师们结合第一版教材的教学实践,与编者进行了许多有益的交流,对于同志们热情帮助和指导,我们表示衷心感谢。

蒙苏州大学物理科学与技术学院沈永昭教授主审了全书,并为本书撰写了绪论和光学信息处理一节;张橙华老师为本书编写了国际单位制以及物理常量,并对本书与物理学前沿的结合方面做了许多有益的工作。对此,我们深致谢意。

尽管编者在第二版的编写过程中做了很大努力,力图使本书能体现编写的指导思想 and 创新精神,但书中的缺点、错误仍在所难免,敬请同行和读者继续批评指正。

编 者

2003年4月

第一版前言

大学理、工科非物理专业开设的基础物理课程的主要目的在于对学生进行科学素质教育和科学思维方法的培养, 课程内容是每个理工科大学生必备的知识. 但是, 目前的教学内容存在不少问题, 如与中学物理的教学内容重复, 经典内容过多而近代物理和非线性物理等内容没有得到适当的反映等, 这与当前的科学技术发展是极不相称的. 为此, 我们在 1993 年就开始着手准备编写这本教材. 在编写过程中结合了多年非物理专业的基础物理教学实践, 并广泛参考国内外优秀同类教材, 力图博采众长. 本教材内容主要有以下几个方面的特点:

1. 注重物理基本概念和基本规律的阐述, 尽量避免繁琐的数学推导, 数学知识定位在微积分初步. 考虑到当前中学物理教学水平的提高, 本教材将和中学物理拉开距离, 去掉与中学物理内容重复的部分.

2. 力求体系和结构的合理性, 教材内容覆盖物理学的各个分支, 物理学发展前沿及许多新课题也在教材中得到反映. 全书分上、下两册.

3. 精编例题和习题. 选编例题和习题的主导思想是有利于扩展学生的视野; 有利于培养学生学习物理的能力. 作为一种尝试, 本教材编入了一定数量的用计算机演示或数值计算的习题.

4. 本教材的讲授时数在 120 学时 ~ 160 学时之间, 适用于理工科非物理专业的基础物理课程的教学. 教材内容和习题都有不同层次的编排, 便于师生在此基础上进行取舍, 因而也可以作为 90 学时左右课程的学校使用.

在本书的编写过程中得到了苏州大学物理科学与技术学院领导和教师的大力支持, 并提出许多宝贵意见; 苏州大学出版社对本书的出版作了大力支持和有益的指导, 在此表示衷心感谢.

本书中难免有疏漏和错误之处, 竭诚欢迎广大教师和读者指正.

编 者

1999 年 1 月

目 录

绪 论

第1篇 力 学

第1章 质点运动学

1.1 参照系 坐标系 质点	(4)
1.2 质点运动的描述	(5)
1.3 直线运动	(8)
1.4 圆周运动和抛体运动	(11)
1.5 相对运动	(16)
内容提要	(17)
习 题	(18)

第2章 质点动力学

2.1 惯性定律 惯性系	(22)
2.2 质量 动量 动量守恒定律	(23)
2.3 牛顿第二定律和牛顿第三定律	(25)
2.4 冲量 动量定理	(27)
2.5 力学单位制 量纲	(31)
2.6 动力学方程的数值求解	(32)
内容提要	(35)
习 题	(36)

第3章 机械能守恒

3.1 功 功率	(39)
3.2 动能 质点动能定理	(41)
3.3 势能 保守力	(43)
3.4 机械能守恒定律	(46)
3.5 碰 撞	(48)
内容提要	(51)
习 题	(51)

第4章 刚体的定轴转动

4.1 刚体的运动	(54)
4.2 质心 质心运动定理	(55)
4.3 刚体的角动量 转动惯量	(56)
4.4 刚体的转动定理	(61)
4.5 刚体的角动量定理和角动量守恒定律	(63)
4.6 刚体的动能定理	(65)
内容提要	(69)

习 题	(69)
-----	------

第5章 流体力学

5.1 流体静力学	(73)
5.2 流体的流动	(76)
5.3 伯努利方程	(77)
5.4 粘滞流体	(79)
内容提要	(81)
习 题	(81)

第6章 振 动

6.1 简谐运动的运动学	(84)
6.2 简谐运动的动力学	(88)
6.3 简谐运动的能量	(93)
6.4 同方向简谐运动的合成	(94)
6.5 相互垂直的简谐运动的合成	(97)
6.6 阻尼振动	(100)
6.7 受迫振动 共振	(102)
内容提要	(104)
习 题	(105)

第7章 波 动

7.1 机械波的产生和传播	(109)
7.2 平面简谐波方程	(113)
7.3 波的能量和能流密度	(117)
7.4 惠更斯原理与波的传播	(120)
7.5 波的叠加原理 波的干涉和驻波	(121)
7.6 多普勒效应	(125)
内容提要	(129)
习 题	(130)

第8章 狭义相对论基础

8.1 经典力学的相对性原理和时空观	(133)
8.2 狭义相对论基本假设 洛伦兹变换	(135)
8.3 狭义相对论的时空观	(138)
8.4 相对论动力学	(141)
内容提要	(145)
习 题	(146)

第2篇 电磁学

第9章 静电场

9.1 电 荷	(148)
9.2 库仑定律	(149)
9.3 电场 电场强度	(151)
9.4 高斯定理	(155)
9.5 静电场的环路定理 电势	(160)
内容提要	(165)
习 题	(166)

第10章 静电场中的导体和电介质

10.1 静电场中的导体	(171)
10.2 电容和电容器	(176)
10.3 静电场中的电介质	(180)
10.4 电场能量	(187)
内容提要	(189)
习 题	(190)

第11章 直流电路

11.1 恒定电流	(195)
11.2 欧姆定律 电阻	(197)
11.3 电流做的功	(201)
11.4 电动势	(202)
11.5 基尔霍夫定律	(204)
内容提要	(207)
习 题	(207)

第12章 恒定磁场

12.1 磁感应强度	(212)
12.2 带电粒子在磁场中的运动	(215)
12.3 磁场对电流的作用	(221)
12.4 电流的磁场	(225)
12.5 磁场的高斯定理	(231)
12.6 磁场的安培环路定理	(233)
内容提要	(236)
习 题	(237)

第13章 电磁感应

13.1 电磁感应定律	(245)
*13.2 涡电流	(247)

目录

13.3	动生电动势和感生电动势·····	(249)
13.4	互感和自感·····	(252)
13.5	磁场能量·····	(256)
13.6	暂态过程·····	(258)
	内容提要·····	(262)
	习 题·····	(263)
第 14 章 物质的磁性		
14.1	磁介质的磁化·····	(268)
14.2	磁场强度·····	(273)
14.3	铁磁性·····	(276)
	内容提要·····	(279)
	习 题·····	(279)
第 15 章 交变电流		
15.1	交变电流概述·····	(281)
15.2	交流电路中的基本元件·····	(282)
15.3	交流电路的矢量图解法·····	(284)
15.4	谐振电路·····	(288)
15.5	交变电流的功率·····	(291)
	内容提要·····	(292)
	习 题·····	(293)
第 16 章 麦克斯韦方程组和电磁波		
16.1	位移电流·····	(295)
16.2	麦克斯韦方程组·····	(298)
16.3	电磁波·····	(298)
16.4	电磁波谱·····	(304)
	内容提要·····	(306)
	习 题·····	(307)
附录 微积分初步与矢量		
1	函数、导数与微分·····	(308)
2	积 分·····	(310)
3	矢 量·····	(311)
习题参考答案·····		(314)
索引·····		(321)

绪 论

► 1. 物理学的研究对象

物理学是研究物质最基本运动形态(机械运动、电磁运动、热运动、原子、原子核和粒子运动)的规律和物质基本结构的科学。

物理学的研究范围非常广阔。从空间尺度看,大至宇宙间的星球,最大的数量级约为 10^{27} m,小至组成原子的微观粒子,最小的数量级约为 10^{-15} m,共跨越了约 43 个数量级。从时间尺度看,宇宙、地球的年龄约为 10^{18} s 的数量级,而不稳定的微观粒子,寿命最短的仅为 10^{-25} s 的数量级,共跨越了约 43 个数量级。除了上述这些实物物质以外,还有另一种形式的物质——场,如引力场和电磁场。关于场的性质和基本规律,也是物理学的研究对象。

物理学所研究的这些最基本运动形态,又各有其特有的规律,因而与其相应的物理学又分成几个部分,如力学、电磁学、热学、光学、原子物理等。这些最基本运动形态既在本质上有区别,又是互相联系的,在一定条件下会互相转化,而且它们在转化过程中遵循着一定的规律。

物理学发展到今天,可以分为三个主要时期,即古代物理学时期、经典物理学时期和现代物理学时期。古代物理学时期是物理学的萌芽时期,物理学还没有从哲学中分化出来,人们对物理世界的认识,基本上处于对现象的笼统描述、经验的简单总结和思辨性的猜测水平。在经典物理学时期,系统的观察实验和严密的数学演绎等研究方法已被引进物理学中,导致了牛顿力学体系、麦克斯韦电磁场理论和能量转化与守恒定律的建立,使经典物理学体系臻于完善。19 世纪末,物理学的一系列重大发现,使经典物理学体系遇到了“危机”,于是引起了现代物理学革命。相对论和量子力学的建立,使经典物理学的危机得以克服,从而完成了从经典物理学到现代物理学的转变,从根本上改变了人们的物理世界图景。当今物理学的研究有两个尖端,一个是天体物理,在最大的尺度上追寻宇宙的演化和起源;另一个是粒子物理,在最小的尺度上探索物质更深层次的结构,奇妙的二者竟衔接在了一起。

► 2. 物理学和其他自然科学

由于物理学所研究的物质最基本的运动形态,它普遍地存在于物质的一切复杂运动形态(如化学的过程、生物的过程等)之中,因此了解物质最基本运动形态的规律,是认识物质

复杂运动的起点和基础。同时物理学的基本规律和基本研究方法以及根据物理学原理设计制造的各种仪器,已广泛地应用于自然科学的各学科之中,推动着各学科的发展,因此可以说物理学是一切自然科学的基础或支柱。

由于物理规律的基本性和普遍性,致使物理学和其他自然科学越来越密切的结合和渗透,从而形成了不少分支学科和交叉学科,如气象物理学、地球物理学、天体物理和宇宙学、物理化学、量子化学、生物物理学、量子生物学、计算物理、量子电子学等。

► 3. 物理学和技术

科学是认识自然,是解决理论问题,而技术则是改造自然,是解决实际问题。物理学上的新发现,往往是新技术的发展基础,可以将物理学的研究成果开发出各种应用,乃至掀起了一次次产业革命的浪潮。

18世纪60年代力学和热学的发展,使机器和热机得到改进和推广,引起了第一次产业革命,促进了手工生产向机械化大生产转变,并使陆上和海上较大规模的长途运输成为可能。19世纪后半叶,在法拉第电磁感应定律基础上发展起来的电力开发和利用,使人类进入了电的时代。其后在麦克斯韦创立电磁波理论的基础上,导致无线电的发明,无线电通信得以实现。进入20世纪,由于相对论和量子力学方面的研究成果,使人类的认识从宏观世界深入到微观世界,从而获得了原子能。在受激辐射理论的指导下,又开发了激光技术。在固体理论研究成果的基础上制造出晶体管,由晶体管发展到集成电路,再由集成电路发展到今天的大规模集成电路,导致信息技术和自动化技术发生巨大的变化。当今对科学、技术乃至社会生活各个方面影响巨大的电子计算机,其硬件部分也是以物理学的成果为基础的,并为又一次产业革命的到来,提供了物质基础。

► 4. 如何学习物理学

如前所述,物理学的基本原理渗透于自然科学的所有领域,应用于许多生产技术部门,它是自然科学的主导学科和工程技术的重要基础。非物理专业理工科大学学生学习物理课程既是学习后继课程的需要,也是提高科学素养的需要。同学们今后在自己的专业天地里进行创造性劳动的时候,会体会到这门课程的重要作用的。

要学好物理学,一是要想学,即有学好的愿望;二是要会学,即要了解物理学科的特点和研究方法,并有正确的学习方法。

物理学是以实验为基础的科学,观察和实验是物理学研究的基本方法,是获得感性材料、探索物理规律的基本手段,也是检验物理理论真理性的唯一标准。丁肇中教授在领取诺贝尔物理学奖时的演讲中,一开始就强调实验的重要性,并希望“我的获奖,将唤起发展中国家的学生们对实验的兴趣”。

物理学是由一些基本概念、基本规律和理论组成的体系严密的科学。对观察和实验得来的感性材料进行分析、综合、归纳、演绎,把物理本质抽象出来,形成物理概念,建立物理定律,再进行逻辑推理(包括运用数学方法),得到一系列的定理和结论,从而组成严密的理论体系。

物理学来源于实践,还要回到实践中去,即运用物理学的基本理论去解释自然界、日常生活和生产中的物理现象,解决有关的实际问题,进而丰富和深化基本理论。

古人云：“学起于思，思源于疑”。在学习物理学的过程中，要勤于思考、多多质疑。对每一章或每一部分，要思考这里有哪些新概念，其物理含义是什么？这里有哪个基本规律，它成立的条件和适用的范围是什么？由这个规律可以得出哪些推论和结论？有哪些重要的应用？等等。在学习过程中，还要学会归纳和总结，对每一章或每一部分要梳理出主要讲了哪几个问题？这些问题之间内在的联系是什么？这样就不会只见树木不见森林，教材也就由厚变薄了。在做实验时要多多动手，仔细观察、思考和解释出现的各种现象，再考虑有没有其他方法可以达到同样的目的。

知识的增长必然孕育着新问题的产生，为此我们特别鼓励同学们在学习中开展相互讨论，既可以活跃思维，创造浓厚的学术氛围，又可以使我们对于物理问题的理解更加全面和深化。

学习物理，习题是必须做的，但不是学习物理的全部。做习题应该在基本掌握概念和规律的基础上作为运用基本理论的一个环节去进行。解题的每一步都要考虑是根据什么理由？解题的结果是否有意义？还能否从其他角度来解此题？这样每做一题就都会有所得益。

当您生活于实验室和图书馆的宁静之中时，首先应问问自己：我为自己的学习做了些什么？当您逐渐长进时再问问自己：我为自己的祖国做了些什么？总有一天，您可以因自己已经用某种方式对人类的进步和幸福作出了贡献而感到巨大的幸福。

——巴斯德(Louis Pasteur, 1822~1895, 法国生物学家)

第1篇 力学

第1章 质点运动学

- 1.1 参照系 坐标系 质点
- 1.2 质点运动的描述
- 1.3 直线运动
- 1.4 圆周运动和抛体运动
- 1.5 相对运动

1.1 参照系 坐标系 质点

► 1.1.1 参照系和坐标系

自然界中的一切物体都在运动,因此要描述一个物体的运动,必须选择另一物体作为参照物.例如,要观察轮船在大海中的航行,可以选择海岸、灯塔甚至恒星作为参照物.这种研究物体运动时被选作参照物的物体,称**参照系**.同一物体的运动,由于参照系不同,对其运动的描述就不同.例如,人造地球卫星的运动,以地球为参照系,其运动轨道是圆或椭圆.如果以太阳为参照系,卫星的运动轨道是图示的形状复杂的曲线(图 1-1).这种在不同参照系中对同一物体运动的不同描述,称为**运动描述的相对性**.由于运动的相对性,当我们描述一个物体的运动时,必须指明是相对于哪个参照系.

为了定量地描述物体相对于参照系的运动,需要在参照系上建立适当的坐标系.所谓坐标系就是固定在参照物上的一组坐标轴和用来确定物体位置的一组坐标.常用的坐标系有直角坐标系和极坐标系.

► 1.1.2 质点

任何物体都有一定的大小和形状.当物体作转动或物体有形变时,物体的大小和形状对

运动的影响是重要的.但在有些问题中,这种影响可以忽略,可以把物体当作质点来处理,即只有质量而没有大小和形状的点.例如,当研究地球的公转时就可以把它当作质点,而当研究地球的自转时就必须考虑它的大小和形状.一个物体是否可以看成质点,应根据具体问题而定.

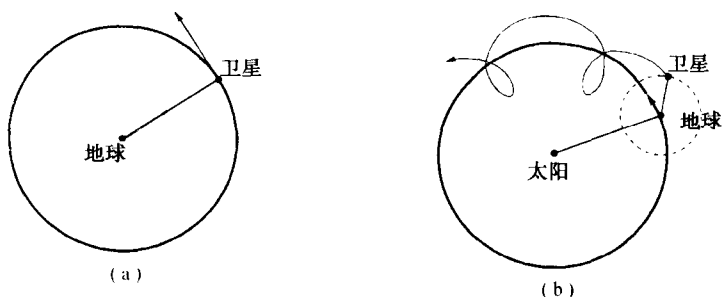


图 1-1 不同参照系中的卫星轨道

1.2 质点运动的描述

► 1.2.1 位置矢量 位移

在所建立的直角坐标系中,运动质点 P 在某时刻所在的位置,可以用三个坐标 x, y, z 来确定,或者用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 来表示.有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 称为质点的位置矢量(位矢),又称为矢径,常用 r 表示,如图 1-2 所示.在直角坐标系中矢径 r 可以表示成

$$r = xi + yj + zk,$$

其中 i, j, k 是坐标轴 x, y, z 三个方向的单位矢量.

在运动过程中,质点的位置矢量 r 随时间而变,是时间 t 的函数,即

$$r = r(t). \quad (1.2-1)$$

r 的三个分量 x, y, z 也是时间 t 的函数,即

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t). \quad (1.2-2)$$

(1.2-1)式或者(1.2-2)式称为质点的运动方程.如果知道了运动方程,质点的运动就完全确定了.根据具体问题的条件,求解质点的运动方程是力学的基本任务之一.

质点在运动过程中,在空间所经历的路径称为轨道.从(1.2-2)式中消去时间 t ,就可以得到质点的轨道方程,所以(1.2-2)式也称为轨道的参数方程.

例 1-1 一质点的运动方程为 $r = a \cos \pi t i + b \sin \pi t j$. 求质点的轨道方程.

解 由(1.2-2)式知,质点运动方程的分量形式为

$$x = a \cos \pi t, \quad y = b \sin \pi t.$$

在这两式中消去 t , 得轨道方程

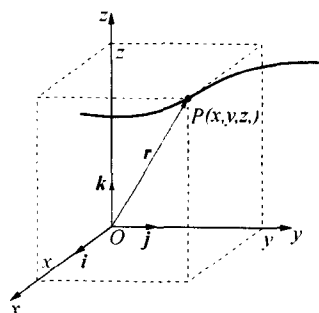


图 1-2 直角坐标系

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

故质点的轨道是一个以 a 与 b 为长、短半轴的椭圆.

设质点沿某轨道运动,在时刻 t ,质点的位置在轨道的 A 处,在时刻 $t + \Delta t$,它在轨道的 B 处(图 1-3).质点在 A, B 两处的位置矢量分别为 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}'$.在时间间隔 Δt 内,质点位置发生了变化,质点位置的变化可以用有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示.从图 1-3 可以看出,有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 就是矢径 $\mathbf{r}$ 的增量 $\Delta \mathbf{r}$,即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}. \quad (1.2-3)$$

$\Delta \mathbf{r}$ 称为运动质点在时间间隔 Δt 内的位移.位移也是个矢量,其方向表明了 B 点相对于 A 点的方位,位移的数值 $|\Delta \mathbf{r}|$ 表明了 B 点与 A 点之间的直线距离.在 Δt 时间内质点沿轨道(图 1-3 所示的曲线)从 A 点运动到 B 点,它经过的路径长度,即这一段曲线长度称为路程,用 Δs 表示.

注意路程 Δs 和位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是两个完全不同的概念,路程是标量,位移是矢量, Δs 和 $|\Delta \mathbf{r}|$ 并不相等,只有在时间 Δt 趋近于零时,才可以把 Δs 和 $|\Delta \mathbf{r}|$ 看做相等.

在国际单位制中,位置矢量、位移和路程的常用单位是米(m).

► 1.2.2 速度

如果运动质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,那么 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 之比称为质点在 Δt 内的平均速度,

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}. \quad (1.2-4)$$

平均速度只能粗略地反映在 Δt 这段时间内质点位置矢量的平均变化率.要精确地反映质点在某时刻的运动,必须把时间间隔 Δt 取得很小, Δt 越小,平均速度对运动的描述越精确.当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的平均速度所趋向的极限称为质点在某一时刻 t 的瞬时速度,简称速度,

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (1.2-5)$$

由图 1-4 可以看出,当质点沿着某轨道从 A 向 B 运动时,位移以及平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 沿割线的方向.当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,割线趋向于轨道曲线在 A 处的切线.因此,质点的速度方向沿着轨道上质点所在位置的切线方向.

在直角坐标系中,瞬时速度可表示为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}. \quad (1.2-6)$$

其中速度的三个分量分别是

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (1.2-7)$$

瞬时速度的大小称瞬时速率,简称速率,用字母 v 表示,其数值为

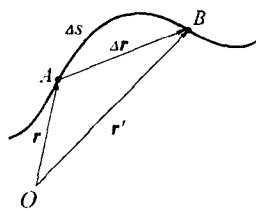


图 1-3 位移矢量

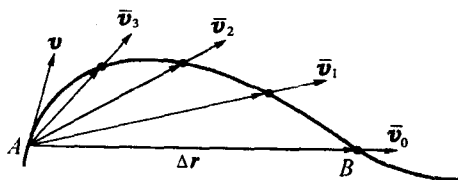


图 1-4 质点速度的方向

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (1.2-8)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 可以认为与路程 Δs 相等,因此,瞬时速率也等于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时路程 Δs 与时间间隔 Δt 之比,

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}. \quad (1.2-9)$$

在国际单位制中,速度、速率的常用单位是米/秒(m/s).

► 1.2.3 加速度

一般来说,运动质点的速度的大小和方向都随时间而变化.设在时刻 t 和时刻 $t + \Delta t$,质点的位置在 A 和 B ,速度分别为 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{v}'$ (图 1-5).在 Δt 期间,质点速度的变化是 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}' - \mathbf{v}$, $\Delta \mathbf{v}$ 与 Δt 之比称运动质点在 Δt 时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$,即

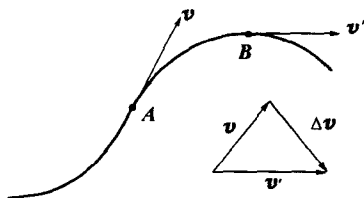


图 1-5 曲线运动中的速度增量

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}. \quad (1.2-10)$$

平均加速度只反映 Δt 时间内质点速度的平均变化率.当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均加速度的极限称为质点在时刻 t 的瞬时加速度,简称加速度,即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}, \quad (1.2-11)$$

即加速度等于速度对时间的一阶导数,或矢径对时间的二阶导数.在直角坐标系中,加速度可表示为

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}. \quad (1.2-12)$$

其中加速度的三个分量分别为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}, \quad (1.2-13)$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1.2-14)$$

在国际单位制中,加速度的常用单位是米/秒²(m/s²).

例 1-2 一质点在 xOy 平面内运动,其运动方程为 $x = R \cos \omega t$ 和 $y = R \sin \omega t$. 其中 R 和 ω 为正的常量.试讨论它的运动轨道、速度以及加速度.

解 显然从 $x = R \cos \omega t$ 和 $y = R \sin \omega t$, 消去 t 得到轨道方程

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

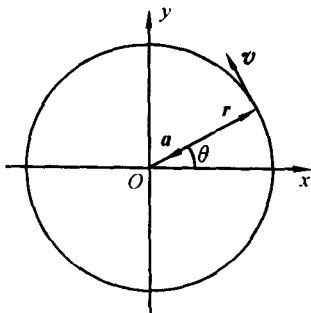
这表明质点做圆心在原点、半径为 R 的圆周运动.质点的位置矢量 $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = R \cos \omega t \mathbf{i} + R \sin \omega t \mathbf{j}$.

位矢的大小 $|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2} = R$. 设位矢与 x 轴夹角为 θ ,

$$\tan \theta = \frac{y}{x} = \frac{R \sin \omega t}{R \cos \omega t} = \tan \omega t,$$

因此

$$\theta = \omega t.$$



例 1-2 图

质点的速度沿 x 轴和 y 轴的分量分别为

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -R\omega \sin \omega t, \quad v_y = \frac{dy}{dt} = R\omega \cos \omega t.$$

速率为 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = R\omega$, 这表明质点做匀速圆周运动. 至于 v 的方向, 我们可以按如下计算来求,

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{v} = xv_x + yv_y = R\cos\omega t(-R\omega\sin\omega t) + R\sin\omega t(R\omega\cos\omega t) = 0.$$

这说明在任何时刻, 速度总与位矢垂直, 它沿圆的切线方向. 质点的加速度沿 x 、 y 轴的分量为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -R\omega^2 \cos \omega t, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = -R\omega^2 \sin \omega t.$$

此加速度的大小 $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = R\omega^2$. 注意到 $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} = -\omega^2 (R\cos\omega t \mathbf{i} + R\sin\omega t \mathbf{j}) = -\omega^2 \mathbf{r}$. 这表明加速度的方向总是和位矢方向相反, 指向圆心, 这就是向心加速度.

应当指出, 本题的 x 和 y 方向是两个简谐运动, 这两个简谐运动的合成是一个匀速圆周运动, 它有一个向心加速度 $\omega^2 R$.

1.3 直线运动

► 1.3.1 直线运动的运动方程

当质点运动的轨道是一条直线时, 质点的运动称直线运动. 取 x 轴与轨道重合, 质点在任意时刻的位置由坐标 x 表示. 做直线运动的质点的位置 x 是时间 t 的函数,

$$x = x(t). \quad (1.3-1)$$

这就是质点直线运动的运动方程. 以 x 为纵轴, t 为横轴, 可以画出运动方程曲线, 称坐标时间曲线, 简称 $x-t$ 图 (图 1-6).

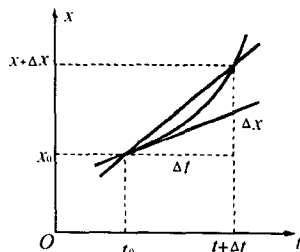


图 1-6 直线运动的位移时间曲线

► 1.3.2 直线运动中的速度

设质点在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的位置分别是 x 和 $x + \Delta x$, 质点在 t 到 $t + \Delta t$ 之间的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (1.3-2)$$

在 $x-t$ 图上, $\bar{v}$ 的量值就是相应两坐标点之间的割线的斜率 (图 1-6). 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速度 $\bar{v}$ 的极限就是质点在时刻 t 的瞬时速率, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}. \quad (1.3-3)$$

在 $x-t$ 图上, v 的量值就是在 t 时刻曲线切线的斜率 (图 1-6). $v > 0$ 表示质点向 x 轴正方向运动; $v < 0$ 表示质点沿 x 轴负方向运动.

如果速度 v 也是时间 t 的函数, 即 $v=v(t)$, 则以 v 为纵轴, t 为横轴, 可以画出速度时间曲线, 简称 $v-t$ 图(图 1-7).

如果质点的速度 $v=v(t)$ 已知, 相应地可以求得质点的运动方程. 为此把(1.3-3)式改写为 $dx=vdt$, 积分得

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

式中 x_0 是 x 在 $t=t_0$ 时的值. 由于 $\int_{x_0}^x dx = x - x_0$, 所以

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t v dt. \quad (1.3-4)$$

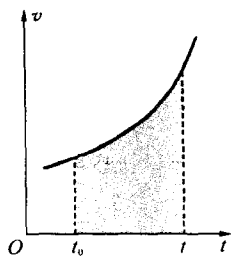


图 1-7 直线运动的速度时间曲线

根据积分定义, $\int_{t_0}^t v dt$ 就是 $v-t$ 图中 t_0 与 t 时刻间的曲线与 t 轴所围的面积, 也就是在此时间间隔内质点的位移 $x - x_0$ (图 1-7).

► 1.3.3 直线运动中的加速度

质点做直线运动的加速度是

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (1.3-5)$$

a 的量值就是 $v-t$ 曲线在某时刻切线的斜率. 如果质点运动的加速度 $a=a(t)$ 已知, 可以用积分方法求得质点的速度. 改写(1.3-5)式为 $dv=a dt$, 积分得

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

式中 v_0 是质点在 t_0 时刻的速度. 由于 $\int_{v_0}^v dv = v - v_0$, 所以

$$v = v_0 + \int_{t_0}^t a dt. \quad (1.3-6)$$

► 1.3.4 匀加速直线运动

匀加速直线运动中, 质点的加速度是个常数, $v-t$ 曲线是一条斜率为 a 的直线(图 1-8). 如果 $t=0$ 时, 质点速率为 v_0 , 质点在时刻 t 的速率为

$$v = v_0 + at. \quad (1.3-7)$$

假定 $t=0$ 时, $x=x_0$, 则

$$x = x_0 + \int_0^t (v_0 + at) dt.$$

由于 $\int_0^t v_0 dt = v_0 t$, $\int_0^t at dt = \frac{1}{2} at^2$, 所以

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \quad (1.3-8)$$

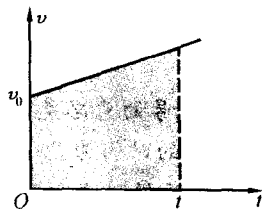


图 1-8 匀加速直线运动的速度时间曲线

这就是匀加速直线运动的运动方程. 图 1-8 中阴影部分的面积即为 $0 \rightarrow t$ 时间间隔内质点的位移 $x - x_0$.