



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

Technical Physics

技术物理

(修订版)

怀国桢 王文瑾 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

技术物理

(修订版)

怀国桢 王文谨 主编
怀国桢 王文谨 高兴茹 编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书编写中注意根据高职高专教育特点,贯彻素质教育,体现“以应用为目的,以必需、够用为度”的教学原则。在修订中突出了教学适用性,从教学实际出发,精选教学内容、确定教学要求。全书共7章,内容分别为空间、时间和运动,能量、动量和角动量,内能和熵,振动和波,光的干涉、衍射和偏振,电磁场与电磁波,量子。

本书可作为高职高专院校物理课程的教材,也可供相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

技术物理 / 怀国桢, 王文瑾主编. —2版(修订本). —北京: 高等教育出版社, 2009.3
ISBN 978-7-04-025773-1

I. 技... II. ①怀... ②王... III. 物理学—高等学校—教材 IV.O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 012589 号

策划编辑	周先海	责任编辑	李 茜	封面设计	张 楠	责任绘图	杜晓丹
版式设计	马敬茹	责任校对	姜国萍	责任印制	陈伟光		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 13.75
字 数 310 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2001 年 6 月第 1 版
2009 年 3 月第 2 版
印 次 2009 年 3 月第 1 次印刷
定 价 17.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25773-00

修订版前言

本书于2001年6月初版,蒙广大师生厚爱,认为本教材简明扼要,内容取舍合适、难易适中、篇幅适当,应用性强并具有现代气息,有较强的教学适用性,出版后三个月即第二次印刷,后又多次重印。

近年来,随着高等教育大众化及教育教学改革的进一步深化,对基础课提出了新的要求,中学课程改革也要求在内容衔接上有所调整,经过几年的教学实践,又积累了新的经验。所以决定修订重版,列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这次修订,基本上保持原书的总体格局,力图更好地增强原有特色,突出教学适用性强的特点,确保从内容篇幅和深度广度上更好地符合学生实际。修订中,重写了第一章,对第二至第五章进行了必要的增删修改,对第六、第七章进行一定篇幅的调整、改写,补充了若干例题、习题。对附录也进行了大幅度改编。将更多的内容调整为用楷体小字排印,以突出主干内容,增加教学灵活性。为便于学生复习,每章后增设小结。一些稍难的习题用*号标出,供提高之需。

参加本书初版编写的有北京联合大学王文谨(第一章)、高兴茹(第七章)、东华大学怀国桢(绪论、第二至第六章,全书定稿)。此次再版修订由怀国桢承担。

编者谨对关心、支持、帮助过本书编写的单位、领导和专家致以衷心的感谢。

感谢高等教育出版社和东华大学对编写工作的指导、支持和帮助。

本书由上海医疗器械高等专科学校李维俭副教授、承德石油高等专科学校李仁芮副教授审定,他们对本次修订提出了许多中肯的意见;在修订过程中,东华大学吴晶副教授参与了多次交流讨论,给予了热情的帮助。

感谢使用本教材的教师和学生对本教材的鞭策和促进。感谢我的妻子包钟灵数十年如一日对我工作的无私支持和关切。

限于编者水平,本书难免存在不当、不足之处,恳请使用本教材的师生批评指正。

怀国桢
2008年12月

第一版前言

本书是教育部高职高专规划教材,是根据教育部最新制定的《高职高专教育物理课程教学基本要求》编写的。

根据高职高专教学特点,在编写过程中我们注意了以下几点:

1. 以“三教统筹”为原则,使教材满足高等职业教育、高等专科教育和成人高等教育(专科层次)物理教学的需要。
2. 体现“以应用为目的,以必需、够用为度”的教学原则。
3. 在高中阶段物理知识的基础上进行教学。高中阶段已涉及的内容,本书一般不作重复,直接在其基础上引入新内容。
4. 注意理论知识的应用性,不刻意追求物理学科的完整体系。
5. 在实际应用背景下展开教学讨论,并对现代技术的物理基础作适当介绍。
6. 加强教学内容的现代化,对近代物理知识及应用作适当介绍。
7. 注意素质教育。物理既是高职、高专和成人高等教育学生学习后续课程的基础,也是素质教育的重要方面。教材应体现对学生科学思想、科学方法和科学精神的培养。
8. 本书部分内容超出基本要求,但在教材内容现代化、扩大学生知识面等方面有一定意义,用小字排印,供教师选用或学生自学。

本书由林中忬、怀国桢制定编写框架并组织编写工作。参加本书编写的人员有:北京联合大学王文瑾(第一章),东华大学怀国桢(前言,绪论,第二至第六章),北京联合大学高兴茹(第七章),并由怀国桢负责全书的统稿。在编写过程中吸收了高工专物理课程教学委员会“面向21世纪高工专物理课程教学内容体系改革”的研究成果。上海交通大学胡盘新教授、北京联合大学林中忬教授对本书的初稿提出了许多中肯意见。

本书在编写过程中,得到了高等教育出版社、北京联合大学和东华大学的大力支持,编者谨对关心、支持、帮助过本书编写的单位、领导和专家致以衷心的感谢。

限于编者的水平,本书难免有不当甚至错误之处,恳请使用本教材的同志批评指正。

编者

2001年1月

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序,保护读者的合法权益,避免读者误用盗版书造成不良后果,我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话:(010)58581897/58581896/58581879

传 真:(010)82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址:北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编:100120

购书请拨打电话:(010)58581118



目 录

绪论	1	4.1 简谐振动	68
第一章 空间、时间和运动	3	4.2 振动的能量	71
1.1 质点运动的描述:位置矢量 位移 速度 加速度 运动函数	3	4.3 振动的合成与分解	77
1.2 相对论时空观:同时的相对性 长度收缩 时间延缓	8	4.4 波	80
1.3 全球定位系统	11	4.5 平面简谐波	83
小结	12	4.6 波的能量	85
练习题	14	4.7 声波	87
第二章 能量、动量和角动量	15	小结	89
2.1 变力的功	15	练习题	91
2.2 势能	17	第五章 光的干涉、衍射和偏振	96
2.3 能量转化和守恒定律	19	5.1 波的叠加	96
2.4 质能关系	21	5.2 光的干涉及其应用	100
2.5 动量守恒定律	22	5.3 光的衍射	106
2.6 角动量守恒定律	26	5.4 光栅衍射 晶体对 X 射线的 衍射	113
2.7 刚体	28	5.5 偏振光	117
2.8 对称性与守恒定律	29	5.6 信息光学 全息术 光纤通信	121
2.9 空间技术	31	小结	127
小结	36	练习题	129
练习题	38	第六章 电磁场与电磁波	136
第三章 内能和熵	42	6.1 电荷的电场	136
3.1 系统 状态与过程	42	6.2 电流的磁场	139
3.2 内能	46	6.3 磁场变化激发电场	141
3.3 热力学第一定律	47	6.4 电场变化激发磁场	144
3.4 热力学第一定律的应用	49	6.5 电磁波	145
3.5 热力学第二定律	55	6.6 红外辐射与红外技术	150
3.6 熵	56	小结	156
3.7 能源技术	58	练习题	158
小结	62	第七章 量子	160
练习题	63	7.1 微观粒子的波粒二象性	160
第四章 振动和波	68	7.2 波函数 薛定谔方程	166
		7.3 隧道效应 纳米技术	168

7.4 氢原子的量子理论	173	附录 A 矢量代数基本知识	191
7.5 激光	177	附录 B 一元微积分基本知识	194
7.6 固体的能带结构	181	附录 C 物理量单位	200
小结	186	附录 D 常用物理常量	206
练习题	188	附录 E 部分练习题答案	207

绪 论

物理学是自然科学的基础,是研究宇宙间物质存在的各种主要基本形式、它们的性质、运动和转化以及内部结构、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。正如理查德·费曼所说,“物理学是最基本的,包罗万象的一门学科。”

作为近代科学的带头学科,从牛顿 1687 年发表《自然哲学的数学原理》起,物理学家们经过二百多年的努力,到 19 世纪末已成功地建立了力学、热力学和统计物理学与电磁学(包括光学)。这是一个庞大的、完整的理论体系。今天人们把这套理论称为经典物理学,它十分准确地给出宏观世界低速运动的规律,几乎能解释当时已经发现的所有现象。

然而,物理学并未停止其发展的步伐,在 20 世纪初,又出现了伟大的革命性突破。量子理论和相对论的诞生使物理学深入到微观和高速领域,作为近代物理学的两大支柱,为 20 世纪物理学的发展廓清了道路,打下了坚实的基础,也为人类社会的发展作出了巨大的贡献。量子理论和相对论的惊人之处还在于它们并不是对经典理论的简单否定,而是在更高的层次上包含了原先的理论。我们的世界本质上是量子论和相对论的,经典理论是量子理论和相对论在宏观和低速条件下的近似。整个物理学完整而又和谐。

20 世纪中叶之后,物理学向着更新的深度和广度进军。在微观领域,向组成物质的更小基元挺进,建立了粒子物理的标准模型。目前所有的观测都证实存在着三族基本粒子(夸克、轻子和规范玻色子)。2000 年 7 月费米国家实验室从 600 多万个记录中探测到的 ν_τ 子是这一模型的最新成就。与此同时,现在人们对宇宙的昨天、今天和明天也有了清晰的认识,建立了宇宙标准模型。这个模型认为,宇宙起源于 150 亿至 200 亿年前的一次大爆炸。1965 年,贝尔实验室的彭齐亚斯等人观察到了那次大爆炸遗留至今的残迹——著名的 3 K 微波背景辐射,证实了大爆炸模型。根据这个模型,在爆炸后的 10^{-2} s,宇宙由质子、电子、光子等粒子组成,温度高达 10^{11} K。过了几十万年,宇宙温度降到 3 000 K,出现了原子,它们组成的气体在引力作用下形成气团,凝聚成星系。50 亿年前出现了太阳,我们的地球则形成于 47 亿年前。今天,人类对自然界的认识尺度小到 10^{-19} m 的粒子,大到 10^{26} m 的宇宙,并已经有了深刻而基本正确的理解。在这一小和一大之间还有着相当丰富的层次,显示出多样性和复杂性,涉及大量粒子的复杂体系,出现了一些新的规律,例如非线性和混沌。即使在经典范围内也出现了许多新的现象,这种复杂性还与生命现象有着密切的联系,复杂性问题和微观问题、宇宙问题一起构成当代物理学的三大前沿。

进入 21 世纪,物理学又一次面临新的突破。相对论和量子理论的协调发展,使物理学基本理论更臻完备,从而能统一地描述物质基本结构和基本相互作用。建立起完善的宇宙学,从微观、宏观及宇观多个角度阐述宇宙的起源、演化和归宿。多粒子物理学和复杂系统物理学的研究,使物理学在横向进一步伸展。高温超导的研究和应用,可控热核反应的研究及聚变能的实际利用,将很大程度上解决困扰当今人类的能源问题。原子、分子的控制与操作,给

材料科学和化学开辟了空前广阔的前景,人类能够根据自己的意愿和需要来设计、制造出各种人工智能材料.物理学与生物学、化学、材料科学、信息科学、生命科学、空间科技等相结合,以前所未有的速度、规模和层次形成一系列新兴学科.由此进一步推进高科技发展,进而对人类社会的方方面面产生深刻的影响.物理学将与新世纪一起更加繁荣.

物理学与技术尤其是工程技术有着密切的关系,它是几乎所有工程技术的基础.各种机械、动力、工艺加工过程都离不开物理学原理.技术的进步又支持物理学向更深更广的领域推进.蒸汽机的使用推动了力学和热学的发展,而后者的成果又促进了热机的不断完善,深化了第一次技术革命.电磁学的研究,直接导致发电机、电动机的产生,出现了无线电通信.人类社会开始了以电气化为标志的第二次技术革命.相对论和量子理论不仅是物理学的革命,也是人类文明新突破的开始.李政道说:“从1925年以后,几乎所有的20世纪的物质文明都是从这两个物理基础科学发展衍生的.”譬如,我们每个人都能感受到计算机网络对社会生活带来的巨大影响,这种影响还将随着时间的推移愈益深刻和广泛,而网络的物质支撑,作为信息载体的激光、传输信号的光导纤维和处理信息的计算机(其主要构件是半导体器件)无一不是当代物理学的成果,其中激光和半导体晶体管还都是诺贝尔物理学奖项.

有人说今天的物理学决不仅是少数物理学家关门埋头研究的专门学问,而是生气勃勃地向一切科学技术,甚至经济管理部门渗透的一种力量.的确,物理学是人类文化的精彩篇章,是现代文明生活中不可缺少的基础知识,更是学习一切工程技术的基础.提高大学生的科学素质,是高等教育的一项重要任务.物理学的基本观点是人们自然观、宇宙观的重要组成部分.物理学的发展集中地体现了科学精神、科学态度.物理学方法是十分典型的科学方法.许多物理学语言已成为工程技术的工作语言.一切有志于提高科学素养和文化层次的人都有必要学习、了解物理学.

学习物理学要着重弄清物理概念和规律的物理图像和物理意义,要着眼于应用.本书根据高职高专学生的特点,注重在技术应用的背景上展开物理基本概念和基本规律的讨论.

第一章 空间、时间和运动

物体的位置变化称为机械运动,简称运动.它是最基本、最简单的物质运动形式.运动学研究物体运动的描述.本章重点讨论质点运动的描述.

描述运动就要涉及时间和空间这两个基本概念.对它们似乎是人人理解和不言而喻的.经典理论正是以这种理解为出发点的.而进一步深入思考就引发了时空认识上的革命.相对论建立了全新的、更为科学的时空理论.本章对此作一初步介绍.

1.1 质点运动的描述:位置矢量 位移 速度 加速度 运动函数

1. 质点 在许多问题中,物体的大小、形状在讨论时不起作用或作用甚小,以致可以忽略.这时可以把物体当作只有质量的点,我们把它称为**质点**.一物体能否看作质点,取决于具体的研究场景,而与其本身大小无关.在研究炮弹的射高、射程时,可以将它作质点处理;而在研究炮弹飞行中的旋转时,就不能将它看作质点.

质点是一种**理想模型**.理想模型方法的本质是突出主要因素,忽略次要因素.这样,既简化了问题,又使其结论具有普遍性,是物理学的基本方法.

2. 参考系 坐标系 为了描述物体的机械运动,必须选择一个物体或几个彼此间保持相对静止的物体群作为参考,研究物体相对于它们如何运动.被选作参考的物体称为**参考系**.同一物体的运动,在不同参考系中的描述是不同的.这就是运动描述的相对性.在描述运动时必须指明是相对什么参考系而言的.通常都以地球或地球表面(某个静止物体)为参考系.本书为了行文简洁,在以地球或地球表面(某个静止物体)为参考系时,就不再指明了.

参考系的选择以达到运动描述最简单、最方便为目标.结果越简洁,它所显示的规律性就越强.人们希望获得的物理规律简洁、明了,如果得到的物理定律非常复杂,我们就不会觉得已经深入了解了自然规律.爱因斯坦相信,宇宙中有一种最终的简单性和美.

为了定量地描述物体相对参考系位置的变化,就要在参考系上建立一个适当的**坐标系**.采用不同的坐标系,运动描述的方式和规律表现形式就不同.但运动的性质不因坐标系的选而变化.最常用的是直角坐标系.

3. 位置矢量 位移 在直角坐标系中,用坐标 (x, y, z) 来确定质点的位置.也可以用由原点指向质点的矢量 $\boldsymbol{r}$ 来描述质点的位置. $\boldsymbol{r}$ 称为**位置矢量**,简称**位矢**.质点就位于 $\boldsymbol{r}$ 的终端. $\boldsymbol{r}$ 与 (x, y, z) 具有一一对应关系.如图 1.1 中,质点处于 $x-y$ 平面内(本书只讨论这类情况,下同)位于 (x, y) 坐标处的质点其位置矢量为 $\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{r}$ 的大小

$$|\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1.1)$$

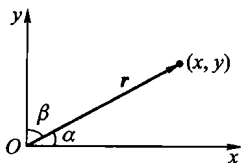


图 1.1 位置矢量

方向用 r 与 x 轴或 y 轴的夹角 α, β 来表示:

$$\cos \alpha = \frac{x}{r} \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad (1.2)$$

位置矢量在直角坐标系中的解析式,更明确地显示 r 与 x, y 间的一一对应关系:

$$r = xi + yj, \quad (1.2a)$$

i, j 分别为 x, y 两坐标轴上的单位矢量.

质点运动时,其位置随时间变化, r 为时间 t 的函数, $r = r(t)$, 它描述了质点运动的规律. 称为质点的运动函数, 也称为质点的运动学方程.

位移是描述质点位置变化的物理量. 一段时间内质点的位移用连接始点至终点, 由始点指向终点的矢量来表示.

图 1.2 所示, 质点沿某一路径运动, 初始时刻在 (x_1, y_1) 处 A 点, 位置矢量为 r_1 , 经过一段时间后到达 (x_2, y_2) 处 B 点, 位置矢量为 r_2 . 这段时间内的位移为 AB 记为 Δr , 其大小

$$|\Delta r| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2},$$

式中 $\Delta x = x_2 - x_1, \Delta y = y_2 - y_1$.

根据矢量加减法, 在图上可以看出

$$\Delta r = r_2 - r_1. \quad (1.3)$$

用解析式表示位移

$$\Delta r = (\Delta x)i + (\Delta y)j. \quad (1.3a)$$

路程是在一段时间内质点所经过的轨迹的长度. 它是标量. 一般情况下, 路程不等于位移的大小, 这在曲线运动中很明显. 即使在直线运动中, 也只有在单向运动的情况下两者才相等.

在国际单位制中, 位置矢量、位移和路程的单位都是 m (米).

4. 速度 速度是描述质点位置变化快慢和方向的物理量, 是描述质点运动状态的一个重要参量. 质点位移 Δr 与完成这段位移所需要的时间 Δt 之比称为质点在该时间段内的平均速度. 记作

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

为了精确描述质点在某一时刻(或某一位置)运动快慢和方向, 我们取 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的平均速度的极限, 称为质点在该时刻的瞬时速度, 简称速度:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}. \quad (1.4)$$

用 v_x, v_y 表示 v 在 x, y 轴上的投影, 则瞬时速度的大小

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (1.4a)$$

其方向, 沿着轨迹的切线方向, 可以用它与两个坐标轴的夹角来表示, 如与 x 轴的夹角为

$$\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_x}. \quad (1.4b)$$

用解析式, 以式(1.2a)代入式(1.4). 由于单位矢量 i, j 不随时间改变,

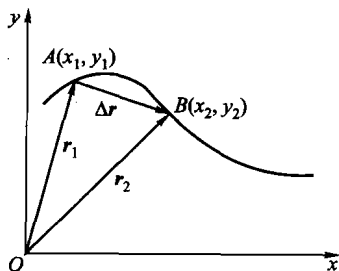


图 1.2 位移和路程

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v} &= \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{d}{dt}(xi + yj) = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j \\ &= v_x i + v_y j.\end{aligned}\quad (1.4c)$$

在日常生活中,用路程与时间的比值定义平均速率.在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速率的极限定义为瞬时速率,简称速率.瞬时速度的大小等于瞬时速率,但平均速度的大小一般不等于平均速率.

5. 加速度 加速度 $\boldsymbol{a}$ 是描述速度变化快慢的物理量.由于速度是矢量,其变化包含大小和方向两个方面的变化.所以加速度也是矢量.定义为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2}.\quad (1.5)$$

用 a_x, a_y 表示加速度在 x, y 轴上的投影,则加速度的大小

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2},\quad (1.5a)$$

$\boldsymbol{a}$ 的方向用其与 x 轴或 y 轴的夹角 α, β 表示.如 $\boldsymbol{a}$ 与 x 轴的夹角 $\alpha = \arctan \frac{a_y}{a_x}$.

用矢量解析式表示加速度,将式(1.4c)代入式(1.5)

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a} &= \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}i + \frac{dv_y}{dt}j = \frac{d^2 x}{dt^2}i + \frac{d^2 y}{dt^2}j \\ &= a_x i + a_y j.\end{aligned}$$

当 $\boldsymbol{a} = \mathbf{0}$ 时,速度没有变化,说明质点运动的快慢与方向均保持不变,为匀速运动.当 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_0 = \text{常矢量}$,加速度保持不变,但质点仍可作曲线运动.如在地面抛出一物,它在运动过程中加速度始终为重力加速度,但却沿抛物线运动.只有在 $\boldsymbol{a}$ 与初速度 $\boldsymbol{v}_0$ 方向一致时,才作匀加速直线运动.

6. 圆周运动加速度 质点作匀速圆周运动时,虽然速度的大小不变,图 1.3 中 $v_A = v_B = v$,但运动方向时刻都在变化.可见匀速圆周运动是一种变速运动,存在加速度,其大小 $a = |\boldsymbol{a}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t}$.图中,将 $\boldsymbol{v}_A$ 平移至 B 处,不难看出

$$\begin{aligned}\frac{|\boldsymbol{v}_B|}{R} &= \frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{v}, \\ |\Delta \boldsymbol{v}| &= v \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{R}, \\ \frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t} &= \frac{v}{R} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t},\end{aligned}$$

则

$$a = |\boldsymbol{a}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t} = \frac{v}{R} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}.$$

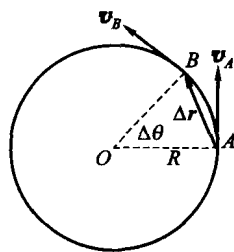


图 1.3 圆周运动的速度变化

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \boldsymbol{v}$ 与 $\boldsymbol{v}_A, \boldsymbol{v}_B$ 垂直,即沿着半径,指向圆心.所以称为向心加速度,也称为法向加速度,记作

$$a_n = \frac{v^2}{R}.\quad (1.6)$$

由于法向加速度的方向时刻改变,因而匀速圆周运动甚至也不是匀加速运动.

质点作变速圆周运动时,速度的大小也在变化.除了法向加速度,还有沿切线方向的切向加速度 a_t . 可以证明

$$a_t = \frac{dv}{dt}. \quad (1.6a)$$

它描述速度大小变化的快慢. 总加速度

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_n + \mathbf{a}_t, \quad (1.6b)$$

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}. \quad (1.6c)$$

例 1.1 运动学方程包含的信息 已知质点在 Oxy 平面内作曲线运动,其运动学方程为

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

求质点运动的轨迹、速度及加速度.

解: 运动学方程两边平方相加,利用 $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$ 可得

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

质点的轨迹为一长短半轴分别为 a, b 的椭圆(图 1.4). 质点的速度

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -a\omega \sin \omega t,$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = b\omega \cos \omega t.$$

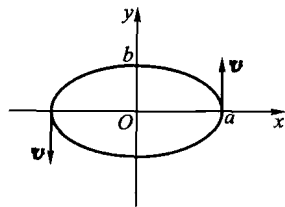


图 1.4 例 1.1 图

当 $t=0$ 时, $y=0, x=a, v_y=b\omega > 0$. 可判断质点沿椭圆逆时针绕行. 质点的加速度

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -a\omega^2 \cos \omega t,$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -b\omega^2 \sin \omega t.$$

由运动学方程可求得质点运动的轨迹和速度、加速度. 当 $t=0$ 时, $x_0=a, y_0=0$, 经过一定时间后 $x=x_0, y=y_0$, 回到原处. 其最小值称为周期 T , 代入运动学方程

$$x = a \cos \omega T = a,$$

$$\omega T = 2\pi,$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

运动学方程包含着质点运动的丰富信息. 可以说,知道了运动学方程也就掌握了质点运动.

例 1.2 质点的直线运动 已知质点沿 Oy 轴作直线运动,其运动方程为 $y = 4.5t^2 - 2t^3$ (y 以 m 为单位, t 以 s 为单位). 求质点运动的情况.

解: (1) 通过运动学方程求质点在任一时刻的速度、加速度:

$$v = \frac{dy}{dt} = 9t - 6t^2, \quad a = \frac{dv}{dt} = 9 - 12t.$$

可见质点作变加速直线运动.

(2) 质点运动的详细情况 分别令 v 大于 0、小于 0 和等于 0, 可得 t 的范围:

$$v = 9t - 6t^2 \begin{cases} > 0, & 0 < t < 1.5 \text{ s} \\ = 0, & t = 1.5 \text{ s} \\ < 0, & t > 1.5 \text{ s} \end{cases}$$

同样可得

$$a = 9 - 12t \begin{cases} > 0, & 0 < t < 0.75 \text{ s} \\ = 0, & t = 0.75 \text{ s} \\ < 0, & t > 0.75 \text{ s} \end{cases}$$

将二者综合,可以看出质点运动的情况:

(1) 当 $t < 1.5 \text{ s}$ 时, $v > 0$, 质点沿 y 轴正方向向上运动; 在 $t < 0.75 \text{ s}$ 阶段, $a > 0$, 质点加速上升.

(2) 在 $0.75 \sim 1.5 \text{ s}$ 阶段, 虽然 v 仍大于零, 但 $a < 0$, 即质点沿 y 轴正向减速上升, 到 $t = 1.5 \text{ s}$ 时, $v = 0$.

(3) 当 $t > 1.5 \text{ s}$ 时, $v < 0$, $a < 0$, 质点沿 y 轴负向加速运动.

如果已知质点的速度和加速度, 也可求出运动方程, 此时需要用微分的逆运算——积分. 运算过程如下.

在匀速直线运动中, v 为一常量, 由 $\frac{dx}{dt} = v$, 可得 $dx = vdt$, 取 $t = 0$ 时刻质点的位置为 x_0 , 由积分 $\int_{x_0}^x dx = \int_0^t vdt = v \int_0^t dt$ 可得

$$x - x_0 = vt \text{ 或 } x = x_0 + vt,$$

即由速度得运动学方程.

在匀变速直线运动中, a 为常量, 由 $\frac{dv}{dt} = a$ 可得 $dv = adt$, 设 $t = 0$ 时质点速度为 v_0 , 由积分 $\int_{v_0}^v dv = a \int_0^t dt$ 可得

$$v - v_0 = at \text{ 或 } v = v_0 + at,$$

此式即为速度与时间的关系式. 将式中 v 用 $\frac{dx}{dt}$ 代替, 等式两边同时乘以 dt , 再积分, 即 $\int_{x_0}^x dx \cdot \frac{dt}{dt} = \int_0^t (v_0 + at) dt$ 可得

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \text{ 或 } x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2,$$

此式即匀变速直线运动中的运动学方程. 将 $x - x_0$ 用 s 代换, 就是路程与时间关系式 $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$, 将 s 式与 v 式联立, 则可得到速度与路程的关系式 $v^2 - v_0^2 = 2as$.

x, v, a 与 t 关系可以用 $x - t$ 图、 $v - t$ 图及 $a - t$ 图表示. 由 $v = \frac{dx}{dt}$, $a = \frac{dv}{dt}$ 可知, $x - t$ 图、 $v - t$ 图上的切线斜率等于速度、加速度.

由 $x - x_0 = \int_0^t vdt$ 可知, $v - t$ 图中 $v - t$ 图线及 $t = 0, t = t$ 所围面积在数值上等于 $0 \sim t$ 时间内质点的位移.

例 1.3 抛体运动 一物体与水平面成 θ 角抛出. 已知物体在最高点时, 速度为 8 m/s , 落地点距抛出点为 20 m , 求物体上升的最大高度.

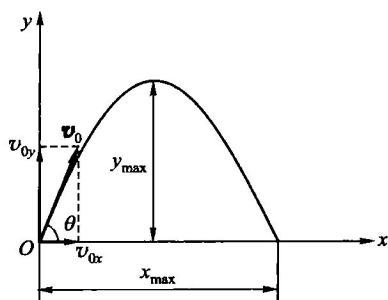


图 1.5 抛体运动

解:将物体视为质点.物体作斜上抛运动,可分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀变速直线运动(竖直上抛).

选抛出点为原点,建立坐标系如图 1.5 所示.在水平方向

$$x = v_{0x}t,$$

竖直方向

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2, \quad v_y = v_{0y} - gt.$$

在最高点时 $v_{y_{\max}} = 0$, 只有水平速度分量 $v_{0x} = 8 \text{ m/s}$,

设物体上升到最高点的时间为 t' , 则有 $y_{\max} = v_{0y}t' - \frac{1}{2}gt'^2$, 及 $v_{y_{\max}} = v_{0y} - gt'$, 考虑到 $x_{\max} = v_{0x}(2t')$, 可解出

$$y_{\max} = \frac{gx_{\max}^2}{8v_{0x}^2} = \frac{9.8 \times 20^2}{8 \times 8^2} \text{ m} = 7.7 \text{ m}.$$

1.2 相对论时空观:同时的相对性 长度收缩 时间延缓

1. 光速不变原理 运动描述的相对性告诉我们,在不同参考系中,对同一物体的运动描述是不同的.例如,火车在笔直的铁道上,相对地面以 v_1 速度运行,车厢里以速度 v_2 沿火车运动方向相对车厢向前运动的物体,在地面上的人看来其速度为 $v = v_1 + v_2$. 这几乎是不争的事实.然而当人们考察光的运动时却发现一个不可思议的现象,光速与参考系无关.确切地说是,在任何惯性参考系①中测得的光在真空中的速度是一个恒量,而与光源速度无关.人们将这一事实称为**光速不变原理**.它是爱因斯坦赖以建立狭义相对论的两条基本原理之一.以此为出发点,可以导出与通常感受完全不同的时空观念.

狭义相对论的另一基本原理是**相对性原理**,即一切物理规律在任何惯性参考系中都是相同的.

2. 同时的相对性 如图 1.6,设一列火车相对站台以速度 v 向右行驶.当车厢首尾两点 A_1 、 B_1 与停在站台上的另一节车厢首尾 A_2 、 B_2 两点重合时,在此两点发出一个闪光(光脉冲).停在站台上车厢里的

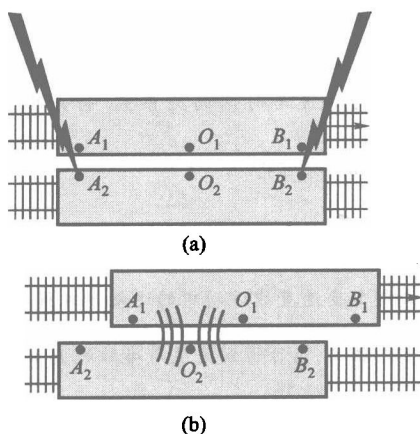


图 1.6 “同时”的相对性

① 惯性参考系是用牛顿第一定律定义的一种参考系.在这种参考系中观察,一个不受力作用的物体将保持静止或匀速直线运动状态不变.相对一个惯性参考系作匀速直线运动的参考系都是惯性参考系.事实证明,太阳系是一个很好的惯性参考系.地球是一个较好的近似惯性参考系.

人看到这两个光脉冲同时到达 A_2 、 B_2 间的中点 O_2 , 于是他认为这两个光脉冲是同时发出的. 这里的“同时”是对停在站台上车厢里的人来说, 或者说是在地面参考系中对两事件的描述. 为什么行文如此烦琐, 难道在其他参考系就不同时了吗? 果真如此. 在行驶着的车厢中的人看来, 由于光速与参考系无关, 光脉冲也以同样的速度相对此车厢传播. 由于车厢向右行驶, B_1 处发出的光脉冲先到达 A_1 、 B_1 间的中点 O_1 , A_1 发出的光脉冲则要稍后才到达. 于是在行驶着的车厢参考系描述, B_1 发出光脉冲在前, A_1 发出光脉冲在后. 不难理解, 在一列向左行驶的车厢中看来则正好相反. 可见“同时”这个概念, 因参考系而异. 这就是**同时的相对性**.

3. 长度收缩 测量一个相对静止的物体长度, 只要用尺读出两端的坐标, 取其差就行了. 但要测量一个运动着的物体的长度就不怎么简单了. 那么让它停下来测量不就行了吗? 不行, 这样测得的长度还是相对观察者静止时的长度. 为了测量相对观察者运动的物体长度, 只有同时记下物体两端的坐标. 由于“同时”是相对的, 不同参考系中记下物体两端坐标差就不同, 所以在不同参考系中测得物体长度是不同的.

设有两个惯性系 S 和 S' . S' 系相对 S 系以速度 v 沿 x 轴运动. 在 S' 系中沿 x' 轴方向放一把尺, 在 S' 系中测得其长度为 l_0 . 在 S 系中测量其长度为 l , 如上所述 $l \neq l_0$, 可以证明

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (1.7)$$

式中 c 为光在真空中传播速度. $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于 $l < l_0$, 因此相对观察者运动的物体长度缩短了. l_0 即相对静止时的物体长度称为**原长**. 长度收缩是相对的, 图 1-7 中 S' 系中的人测量放至 S 系中的物体长度也缩短了. 这种缩短与物质结构无关, 不同于热胀冷缩等物理变化, 而是时空观的结论. 需要指出, 长度缩短仅发生在运动方向. 上述 y 方向物体的尺度不变.

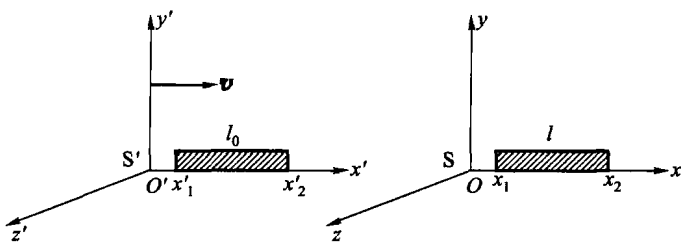


图 1.7 不同惯性系中长度的量度

4. 时间延缓 相对论指出, 两个事件所经历的时间间隔在不同的惯性系中量度的结果不相同. 如图 1.8 所示, 火箭 (S' 系) 以速度 v 相对地面 (S 系) 运动. 火箭内在与运动垂直的方向上放置一光源与一镜子, 它们之间相距 b . 光源发出一光脉冲经镜子反射回来. 往返时间间隔在火箭上看来是

$$\Delta t_0 = \frac{2b}{c},$$

在地面观察者看来, 由于火箭在飞行, 光线走的是锯齿形的路径. 光脉冲来回一次的时间

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{b^2 + (v\Delta t)^2},$$

解出 Δt ,