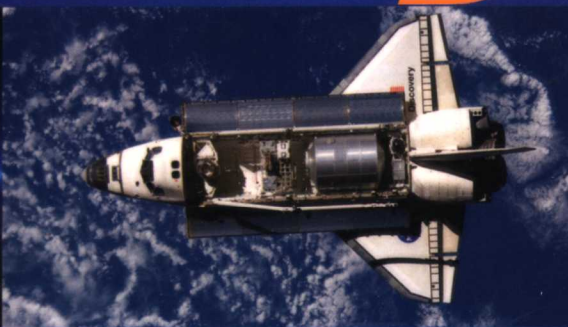


大学物理学

(上册)

Physics



■ 毛骏健 顾 牡 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

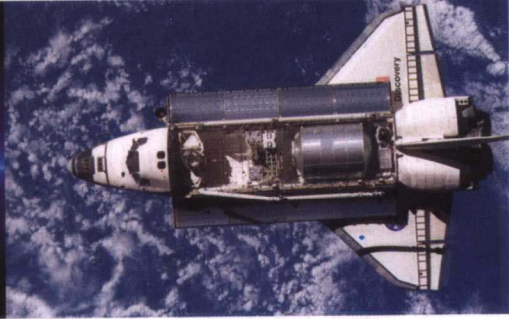
内容简介

本书是普通高等院校物理专业及相关专业的一门基础课程。本书以物理学的基本概念、基本规律和基本方法为主线，以物理学的发展史和物理学在科学技术中的应用为副线，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的一门基础课程教材，也可供从事物理工作的工程技术人员参考。

大学物理学

(上册)

Physics



毛骏健 顾 牡 主编
宋志怀 吴天刚 编

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是“高等教育百门精品课程教材”项目的成果,该项目整体已被列入新闻出版总署“十五”重点规划,本书也是同济大学国家工科基础物理课程教学基地建设的一项重要成果。本书的思路清晰、表述精练,继承了国内教材的传统特色;同时在教材体例、写作风格、图片和插图设计等方面又充分借鉴了国外优秀物理教材的特点;理论与实际结合紧密,重物理思想和物理图像,内容通俗易懂且不乏趣味。

为满足教育部最新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》,本书在传统教学体系的基础上对内容有所扩充。全书分上、下两册,上册包括力学、振动与波动以及电磁学,其中在力学中增加了流体力学;下册包括热学、光学和近代物理学,其中在光学中增加了几何光学,在近代物理学中增加了广义相对论和粒子物理简介。

本书可作为普通高等学校理科、工科和医科等各专业大学物理课程教材或参考书,也可供社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册 / 毛骏健,顾牡主编. —北京:
高等教育出版社, 2006.1
ISBN 7-04-017779-X

I. 大… II. ①毛…②顾… III. 物理学—高等学校—
教材 IV. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第144593号

策划编辑 陶 铮 封面设计 王凌波
责任编辑 陶 铮 版式设计 王凌波
责任绘图 宗晓梅 责任校对 康晓燕
责任印制 朱学忠

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 100011
总 机 010—58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京佳信达艺术印刷有限公司

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.landrace.com>
<http://www.landrace.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 850 × 1168 1/16
印 张 20.5
字 数 620 000
版 次 2006年1月第1版
印 次 2006年1月第1次印刷
定 价 35.00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 17779—00

序言

随着近年来教学改革的不深入,人们对大学基础物理课程教学已经形成了两条基本共识:(1)大学物理课程不仅仅只是理工科学生进一步学习专业知识的铺垫,而且更是树立学生科学的世界观,增强学生分析和解决问题能力,培养学生的探索精神和创新意识的一门素质教育课程;(2)教学中应突出以学生为本的指导思想。这两条基本共识也正是我们编写这本《大学物理学》的宗旨。

本书是同济大学国家工科基础物理课程教学基地在最近几年对大学物理课程教学进行研究和改革中所取得的一项成果,是根据教育部最新制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》编写而成的。在编写过程中,作者结合多年来的教学实践经验和所形成的教育理念,注意到当前中学物理课程教改的动向和高校教学情况的变化,借鉴国内外教材改革的成果,博采众长,力求使本教材更具人性化,不仅使教师便于讲授,更有助于学生的自学和阅读。

教材特色

1 借鉴国外教材的特点,本书采用彩色印刷,注重版面设计,图文并茂,给人以赏心悦目的感觉,使读者在阅读时产生一种友好和亲切感。正因为运用了彩色印刷,许多物理现象都可以以图片的形式在书中醒目地显示出来。例如,在介绍反射光的偏振性时,书中出现了两张照片,其中一张是在照相机上添加了偏振镜而拍到的,其效果是滤去了被摄透明物体的表面反射光,效果明显;而另一张照片则因没有采用偏振技术,其拍摄效果与前者完全不同。通过这两幅彩色照片的对比,读者会对偏振现象产生深刻的印象,从而加深对光的偏振概念的理解。除了图片以外,一般彩色插图不仅美观,而且比过去的黑白插图更具表现力。例如:对于一些比较复杂的插图,如果采用单一色线,会感到比较凌乱;而采用不同颜色的彩色线条会使插图表达得更为清晰可辨,有助于读者的理解。

2 在写作风格上,有别于传统教材,本书语言朴实流畅,通俗易懂。尤其是在各章节的开头,常以一个有趣的物理现象、生活常识或一小段科学发展史为引子,逐渐过渡到具体的知识内容。由此可以引发读者的兴趣和好奇心,

催动着读者以强烈的求知欲去阅读各章节的具体内容。例如：在力学中以车辆的超速和超载容易引发交通事故这一众所周知的事实，引入动量的概念；在热学中用高速行驶中的车辆容易发生爆胎来引入气体的状态参量以及各状态量之间的关系；在波动光学的一开始，介绍了牛顿和惠更斯关于光的本性之争的一段历史，进而引申到光具有波动性；从人们在生活中常见的油膜上的彩色条纹或美丽的孔雀羽毛为例，引导读者去拷问薄膜干涉的原理。

3 突出物理学知识与科学技术相结合，与生活实际相结合，与自然现象相结合，是本书的一个重要特点。在这方面，我们汲取了许多国外教材有益的经验。知识点与实际的结合不仅体现在正文中，而且较多地出现在例题和习题中。我们的目的是要让读者在学完物理学后产生一种自信和满足，豁然感到自己对周围的物质世界有了新的认识，有了更广泛而深入的了解；对许许多多生活中的或是自然界的现象都可以说出其所以然；对现代科学领域中的许多高新技术也不会感到惊讶和不可理解，恍然洞悉其核心问题原来都可以从物理学中找到答案，从而使读者感到学习物理学对自己是有益的。我们希望以此能引发读者的兴趣，在今后的工作实践中能够以所学的物理学知识为基础，进一步深造，并有所创新和发明。

4 对读者而言，学会科学的思维和方法比获取物理学知识本身更为重要。因此在本书的编写过程中我们十分注意选材，发掘那些对学生的科学思维和方法有启迪的典型内容，尽可能地提供一些科学伟人对某一问题的思想方法的素材以及把物理学方法论中所涉及到的一些基本原理：简单性原理、守恒原理、对应原理、互补原理等介绍给学生。例如：牛顿的万有引力定律是如何发现的？爱因斯坦在建立了狭义相对论以后为什么又提出了广义相对论？又例如：在论述经典力学与狭义相对论的关系时，引入对应原理，让学生知道辩证发展观在科学中的体现；在论述早期量子论时引入互补原理，让学生了解微观客体波动性与粒子性的辩证统一等等。而这些素材的引入并不是以开窗口、安接口的形式出现，而是有机地把它们融合在正文之中。这样做的好处是，一方面可以使读者对科学家的思维方式有所了解，对物理学的方法论有所认识；另一方面在阅读中会产生一些兴奋点，提高读者的兴趣。

5 在整个编写过程中，编者始终贯彻一条基本的指导思想，即大学物理学是一门非物理专业的公共基础课程，应当强调物理思想和物理图像，不应把侧重点放在过于复杂的推导和解题技巧上。凡是能够用物理图像说清楚的，就尽量不用较复杂的数学推证。例如，在处理狭义相对论运动学问题时，我们更强调的是相对论时空的物理图像。“长度收缩”和“时间延缓”这两个相对论效应都是从相对论的两条基本原理出发得到的，而非从洛伦兹变换关系式计算得到。而在处理广义相对论内容时，我们重墨渲染等效原理，因为这条原理很能反映物理学思想，而不涉及复杂的数学。

6 本书按照教育部最新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》,同时借鉴国外大学物理教材的基本内容,在基本内容和知识点上较之传统大学物理教材有所增加。新增了几何光学、流体力学、广义相对论、核物理和粒子物理等一些内容,其中的几何光学是作为“基本要求”中的A类内容,必须纳入在新教材中;至于基本要求中的诸多B类内容,本书作了选择性的吸纳。选择的理由如下:

增加流体力学这部分内容不仅有助于完善物理模型,更是考虑到流体力学知识在现代科学技术领域中,尤其是在医学、体育运动学等领域应用甚广。目前,许多医学院与综合性大学合并,基础物理教学对长学制医药类专业的学生和普通理工科非物理类专业学生的要求是相当的。医药类专业的学生需要流体力学的知识,一般理工科非物理类专业学生也需要掌握这些知识。

至于在本书中增加了广义相对论、核物理和粒子物理这些内容,我们并不是从实用主义考虑,而更多的是从对读者进行素质培养方面去考虑。广义相对论涉及到的是物质的宇观领域,而粒子物理涉及到的是物质的微观领域。这些内容可以让学生更全面地认识自己周围的物质世界以及物质的构成,而不是仅仅局限于所能看到的宏观世界,这是作为一名当代大学生应该了解的。更何况在这些内容中包含着丰富的物理学思想和科学的思维方法,能对学生产生许多积极的影响。当然,我们在处理这部分内容时,充分考虑到学生的数学基础和理解能力,避免出现复杂的数学运算,更多地强调物理图像和物理学思想,从文字处理上尽可能写得通俗易懂,以使所有的学生都可以看懂。

7 在大学物理课程改革中,曾有不少专家提出要压缩经典、加强近代。但在实际操作中遇到了一些困难,如何使近代物理普物化是解决问题的关键。编者们在多年的教学建设和改革中,在这方面有了一些粗浅的体会和经验。在本书中适当对经典物理学部分进行了压缩,同时又适当加强了近代物理学的比重,并在近代物理学内容的叙述上力求做到通俗,生动,突出物理学图像。使读者在阅读这部分内容时能够产生一些新鲜感。

教学与学习资料

为了便于教师和学生使用这部教材,本书将配以丰富的教学和学习辅助资料。

1 提供教师所用的精美、适用的电子教案,其内容覆盖本书的全部知识点。

2 提供教学用资源光盘,配合电子教案使用。教师可以按自己的授课特点,对电子教案进行修改和充实。在资源光盘中,教师可以选择合适的教学演示录像、教学动画、教学图片以及其它一些教学资料;也可以在光盘中找到一定量的例题、习题和测验题。我们不求素材资源之多,但求教学素材的精致和

实用性。

3 在教学用资源光盘中增设了“宇宙学简介”的内容,介绍宇宙天体的形成。原本想把这部分内容放在书中作介绍,但考虑到书的篇幅而未能如愿。如果教师或学生对这些内容感兴趣,可以在资源光盘中获取。

4 出版与主教材配套的辅导书,给出主教材中每一章的知识要点和习题的分析与解答,以方便读者自学或参考。

5 本书配备了一套学生用活页作业,按章节内容分为若干个单元。每单元一份,每份活页作业包含选择题、填空题和计算题。教师每完成一个单元的教学内容,发一份作业。学生不用抄题目,习题直接做在活页纸上。每次作业交一份,教师也无需每次携带厚厚一叠作业本。这样既方便了学生写作业,也方便了教师。

致谢

参加本书编写工作的有:宋志怀、吴天刚、鲍鸿吉、刘钟毅、毛骏健和顾牡,由毛骏健和顾牡负责统稿和定稿。在本书的编写期间,得到了严导淦先生的悉心指导和帮助。本书由严导淦和徐绪笃两位先生进行审稿。我们为两位长者在审稿过程中一丝不苟、认真负责的工作作风所折服,并对他们表示衷心的感谢。

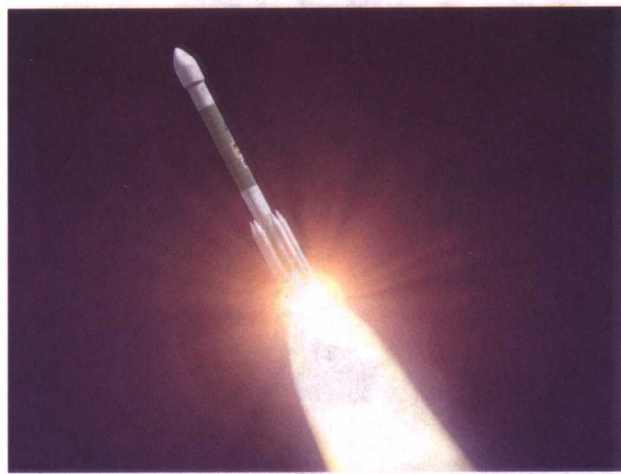
本书作为同济大学“十五”规划教材,得到了同济大学教材、学术著作出版基金委员会的资助。在此向同济大学对本书的编写支持表示感谢。

限于编者的学术水平,书中难免存在不妥之处,望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将在今后的再版中加以纠正,使我们的教材在使用中不断完善。

编者

2005年8月于同济大学

目录



第1章 质点运动学

1-1 质点、参考系、坐标系	2
1-1-1 质点	2
1-1-2 参考系和坐标系	2
1-2 描述质点运动的物理量	3
1-2-1 位置矢量与运动方程	3
1-2-2 位移与路程	4
1-2-3 速度	5
1-2-4 加速度	6
1-2-5 自然坐标系下的速度和加速度	10
1-2-6 圆周运动及其角量描述	11
1-3 相对运动	14

第2章 动力学基本定律

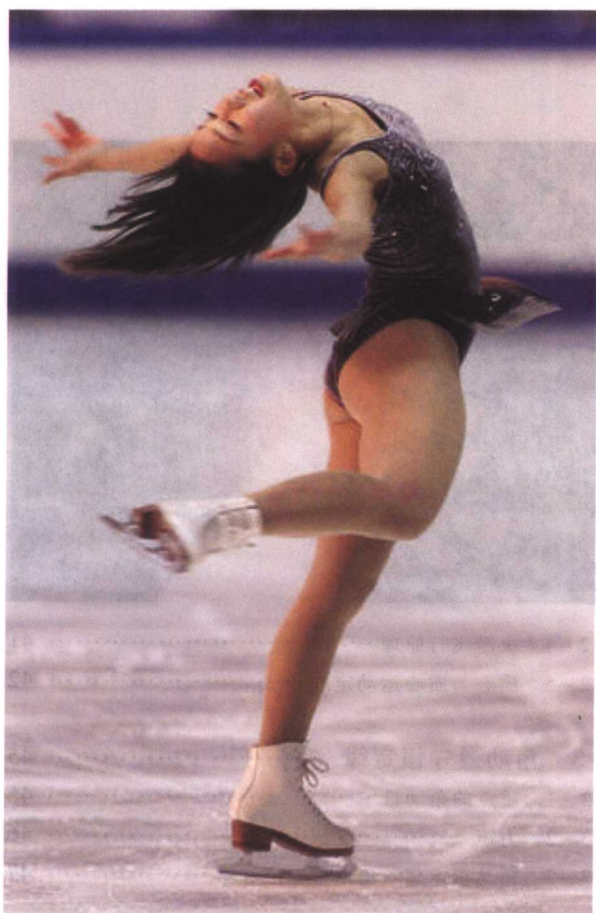
2-1 牛顿定律	22
2-1-1 牛顿定律	22
2-1-2 力学中常见的几种力	24
2-1-3 牛顿定律的应用	28
2-1-4 惯性系与非惯性系	31
2-2 动量守恒定律	33
2-2-1 动量	33
2-2-2 动量定理	34
2-2-3 动量守恒定律	38

★2-2-4 火箭飞行原理	41
★2-2-5 质心与质心运动定理	42
2-3 角动量守恒定律	45
2-3-1 质点的角动量	45
2-3-2 力矩	46
2-3-3 角动量定理 角动量守恒定律	47
2-4 能量守恒定律	50
2-4-1 功和功率	51
2-4-2 动能和动能定理	53
2-4-3 保守力与非保守力 势能	56
2-4-4 机械能守恒定律	58
2-4-5 碰撞	59
★2-5 守恒定律和对称性	64
2-5-1 对称性与对称操作	64
2-5-2 守恒定律和对称性	66
2-5-3 守恒定律与对称性在物理学中的地位和作用	69

第3章 刚体和流体

3-1 刚体及其运动规律	78
3-1-1 刚体的运动	78
3-1-2 刚体对定轴的角动量	79
3-1-3 刚体对定轴的角动量定理和转动定律	83
3-1-4 刚体对定轴的角动量守恒定律	85
3-1-5 力矩的功	88

3-1-6 刚体的定轴转动动能和动能定理 88



★3-2 流体力学简介 91
 3-2-1 静止流体内的压强 91
 3-2-2 理想流体的连续性方程和伯努利方程 95
 3-2-3 理想流体定常流动的伯努利方程 98

第4章 振动和波动

4-1 简谐运动 110
 4-1-1 简谐运动的基本特征 110
 4-1-2 描述简谐运动的物理量 111
 4-1-3 简谐运动的旋转矢量表示法 114
 4-1-4 简谐运动的能量 118
 4-2 振动的合成和分解 120
 4-2-1 振动的合成 120
 4-2-2 振动的分解 126
 4-3 阻尼振动、受迫振动和共振 127
 4-3-1 阻尼振动 127

4-3-2 受迫振动和共振 128

★4-4 非线性振动 混沌 130
 4-4-1 非线性振动 130
 4-4-2 混沌 133
 4-5 机械波的产生和传播 134
 4-5-1 机械波的产生条件 135
 4-5-2 波动过程的描述 136
 4-6 平面简谐波 138
 4-6-1 平面简谐波的波动表达式 139
 ★4-6-2 波动方程 142
 4-6-3 波的能量 143
 4-7 声波、超声波和次声波 146
 4-7-1 声波 146
 ★4-7-2 超声和次声 148
 4-8 波的干涉和波的衍射 150
 4-8-1 波的叠加原理 150
 4-8-2 波的干涉 151
 4-8-3 驻波和半波损失 153
 4-8-4 惠更斯原理 波的衍射现象 157
 4-8-5 波的反射与折射 159
 4-9 多普勒效应和超波速运动 160
 4-9-1 多普勒效应 160
 ★4-9-2 船波与马赫锥 162



第5章 静电场

5-1 电荷 库仑定律 170
 5-1-1 电荷 170

5-1-2 库仑定律 171

5-2 电场 电场强度 172

5-2-1 电场 172

5-2-2 电场强度 173

5-2-3 电场强度的计算 174

5-3 高斯定理及应用 178

5-3-1 电场线 178

5-3-2 E 通量 179

5-3-3 高斯定理 180

5-3-4 高斯定理的应用 181



5-4 静电场的环路定理 电势 184

5-4-1 静电场的环路定理 185

5-4-2 电势能 186

5-4-3 电势和电势差 187

5-4-4 电势的计算 188

5-5 等势面 电势梯度 190

5-5-1 等势面 190

5-5-2 电场强度与电势梯度的关系 191

第6章 静电场中的导体和电介质

6-1 导体的静电平衡性质 198

6-1-1 导体的静电平衡条件 198

6-1-2 静电平衡时导体上的电荷分布 199

6-1-3 空腔导体 200

6-1-4 静电屏蔽 201

6-2 静电场中的电介质 203

6-2-1 电介质的极化 204

6-2-2 极化强度 205

6-2-3 有介质时的高斯定理 206



6-3 电容和电容器 209

6-3-1 孤立导体的电容 209

6-3-2 电容器 209

6-3-3 电容器的联接 212

6-4 静电场的能量 214

6-4-1 点电荷系的电能 214

6-4-2 电容器的能量 215

6-4-3 电场的能量 216



第7章 恒定磁场

7-1 恒定电流 电动势 224

7-1-1 恒定电流和恒定电场 224

7-1-2 电流密度 224

7-1-3 电源和电动势 225

7-2 磁场 磁感应强度	227
7-2-1 磁的基本现象	227
7-2-2 磁场和磁感应强度	228
7-2-3 磁感应线	229
7-3 毕奥-萨伐尔定律	230
7-3-1 毕奥-萨伐尔定律	230
7-3-2 毕奥-萨伐尔定律的应用	231
7-3-3 运动电荷的磁场	236
7-4 磁场中的高斯定理	237
7-4-1 B 通量	237
7-4-2 磁场中的高斯定理	238
7-5 安培环路定理	238
7-5-1 安培环路定理	238
7-5-2 安培环路定理的应用	240
7-6 磁场对运动电荷的作用	243
7-6-1 带电粒子在磁场中的运动	243
7-6-2 电磁场控制带电粒子运动的实例	245
7-7 磁场对载流导线的作用	248
7-7-1 载流导线在磁场中受的力	249
7-7-2 载流线圈在磁场中所受的磁力矩	252
7-8 磁介质	254
7-8-1 物质的磁性	254
7-8-2 磁化强度与磁化电流	256
7-8-3 磁介质中的磁场 磁场强度	258
7-8-4 铁磁质	260

第8章 变化的电磁场

8-1 电磁感应定律	270
8-1-1 法拉第电磁感应定律	270
8-1-2 楞次定律	272
8-2 动生电动势 感生电动势	274
8-2-1 动生电动势	274

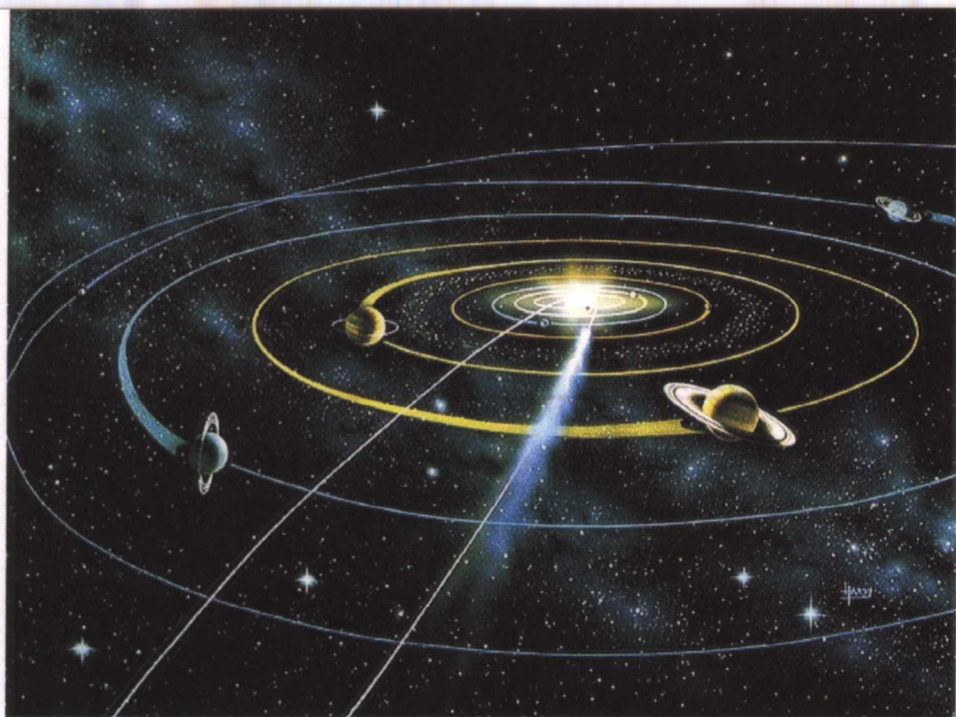
8-2-2 感生电动势和感生电场	276
8-2-3 涡电流	279
8-3 自感和互感	280
8-3-1 自感	280
8-3-2 互感	283



8-4 磁场的能量	285
8-4-1 自感磁能	285
8-4-2 磁场的能量	285
8-5 位移电流	287
8-5-1 位移电流	287
8-5-2 全电流安培环路定律	288
8-6 麦克斯韦方程组 电磁波	290
8-6-1 麦克斯韦方程组	290
8-6-2 电磁振荡	291
8-6-3 电磁波	293
8-6-4 电磁波谱	296

附录

矢量运算	303
习题答案	311



行星绕太阳的运转是一种机械运动

第 1 章

质点运动学

世

界是物质的. 一切物质都在永恒不息地运动着, 这便是运动的绝对性. 日月经天, 江河行地, 风雨雷电, 变幻的大气……自然界中万象纷呈, 索本求源, 皆归因于物质运动的不同形态与规律. 法国科学家笛卡儿 (R. Descartes, 1596—1650) 曾说过: “给我物质和运动, 我就能创造宇宙.”

物质和运动是不可分割的两个概念, 运动是物质存在的形式. 物质的运动形式多种多样, 这里所指的“运动”是个广义的概念, 它包括宇宙间所发生的一切变化和过程. 各种不同的物质运动形式既服从普遍的规律, 又具有自身独特的规律. 在物质的各种运动形式中, 最普遍而又最基本的一种运动形式是一个物体相对于另一个物体的空间位置 (或者一个物体的某一部分相对于其另一部分的位置) 随时间而发生变化的运动, 这种运动形式称为**机械运动** (mechanical motion), 例如行星绕恒星的运转、地球的自转、河水的流动、车辆的行驶等等, 都是机械运动.

研究物体机械运动及其规律的学科称为**力学** (mechanics). 一般可以把力学分为运动学、静力学和动力学三部分. 静力学在工程中应用较多. 在一些工程类力学书中有详细的介绍, 本书不作讨论. 我们仅就运动学和动力学问题作一般介绍. 运动学的任务就是描述物体在空间的位置随时间变化的规律, 而并不涉及运动变化的原因. 客观物体的多样性和物体运动形式的复杂性, 给描述物体的运动带来不少困难. 因此在一定的条件下, 建立一些理想的物理模型可使主要规律凸显, 也可使处理问题得以简化. 本章将首先介绍力学中一个最简单的物理模型——质点, 引入描述质点运动的相应物理量, 继而阐述描述运动的相对性.

1-1 质点、参考系、坐标系

1-1-1 质点

自然界的一切客观物体都有一定的大小和形状. 一般, 当物体作机械运动时, 其运动状况是十分复杂的. 例如地球绕太阳的运动, 地球除了绕太阳公转以外, 地球本身还有自转; 地球上的各个不同部分在运动过程中具有不同的轨道, 且任何一个瞬间不同部分的运动快慢以及这种快慢的变化也都是不同的. 这样, 就给我们在描述地球的运动时带来了困难. 但是, 如果我们只是研究地球绕太阳的公转, 而不去关心地球的自转. 那么, 由于地球到太阳的距离远大于地球本身的大小(约 10^4 倍), 地球上的各点相对于太阳的运动可以认为是近似相同的, 因此可以用一个具有地球质量的点来代表整个地球, 于是地球绕太阳的运动便可简化为这个点绕太阳的转动. 一般情况下, 在描述物体的运动时, 如果物体的形状和大小对所研究的问题影响不大而可以忽略, 或者物体上各部分具有相同的运动规律, 那么就可以把物体当作是一个具有一定质量的几何点, 这样的几何点称为**质点**(particle).

在物理学中处理一些较为复杂的问题时, 为了突出要研究的主题, 且使问题的处理简单起见, 我们往往根据所研究问题的性质, 去寻找事物的主要矛盾, 忽略一些次要因素, 建立一个理想化的**模型**(model)来代替实际的研究对象, 从而使问题大大地简化, 这是一种常用的科学研究方法. 质点是描述物体机械运动的最简单的物理模型. 值得注意的是: 在实际问题中, 一个物体能否被抽象为质点, 关键不在于物体的大小, 而在于所研究问题的性质. 例如: 地球的半径约为 6370 km , 而地球到太阳的距离约为 $1.5 \times 10^8\text{ km}$, 因此在讨论地球绕太阳的公转时, 可以将地球抽象为一个质点, 如图1-1所示; 而原子的尺寸约为 10^{-10} m 的数量级, 即使借助电子显微镜也无法看清其真面目, 但是当我们研究原子的某些运动时(比如自旋运动), 却不能够把它当作质点来看待.

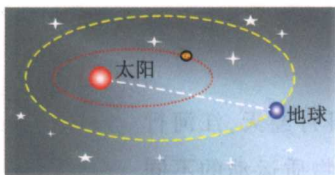


图1-1 地球的半径约为 6370 km , 而地球到太阳的距离约为 $1.5 \times 10^8\text{ km}$, 因此在讨论地球绕太阳的公转时, 可以将地球抽象为一个质点



图1-2 在不同的参考系下, 对同一物体运动的描述是不同的. 伫立在站台上的人看来, 火车在前进; 而静坐在车厢里的乘客看来, 火车没有运动

1-1-2 参考系和坐标系

宇宙中任何物体都处于永恒不息的运动之中, 绝对静止的物体是没有的, 运动的绝对性已被科学发展史所证实而成为今天人们的科学常识. 运动虽然具有绝对性, 但对一个物体运动的描述却具有相对性. 同一个物体相对于不同的观察者来说, 具有不同的运动状况. 例如, 当一列火车通过某站台时, 伫立在站台上的人看来, 火车在前行; 而静坐在车厢里的乘客看来, 火车相对于他并没有运动, 而站台却在向后退去, 如图1-2所示. 因此描述一个物体的运动, 首先要

指明运动是相对哪个参考物体而言的. 这个被选定的参考物体称为**参考系**(reference system).

在运动学中,对参考系的选择完全是任意的,这取决于问题的性质和研究的方便. 例如,研究地面上物体的运动,通常选取地面或地面上静止的物体作为参考系,而在研究行星绕太阳的运动时,可以取太阳作为参考系.

参考系选定以后,为了能够定量地描述物体的位置及其随时间的改变,还必须在参考系上建立一个适当的**坐标系**(coordinate system). 把坐标系的原点和轴线固定在参考系上,运动物体的位置就可由它在坐标系中的坐标表明. 在具体问题中,如果指明了坐标系,就意味着已经选定了参考系,或者说,坐标系也就是参考系作定量描述时的替身. 我们可以根据具体问题的需要,选定合适的坐标系. 常用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、极坐标系和球坐标系等.

1-2 描述质点运动的物理量

我们可以设想一幅运动场景:一个不明飞行物突然进入了雷达监控区域. 为了全面掌握它的运动状况,我们必须获知它在每一时刻的空间位置、运动快慢和方向以及运动快慢的变化程度. 这样,也就能够全面掌握该不明飞行物的整个运动状况. 以下我们将就描述质点运动的这三个方面引入相应的物理量.

1-2-1 位置矢量与运动方程

每年的夏末秋初,我国沿海城市的居民常会在气象预报的广播中听到热带风暴的消息. 例如,一则热带风暴警报是这样说的:“今年第5号热带风暴,今天凌晨在上海东南大约1200 km的洋面上生成”. 这则消息给了我们有关风暴的两个信息:(1)以上海为参考点的东南方向;(2)距离上海1200 km. 根据这两个信息,我们就可以知道热带风暴在凌晨时刻所在的位置. 由此看来,在选定了坐标系以后,可以以坐标系的原点 O 作为参考点,画一条有向线段来表示运动质点在空间的位置. 这条有向线段称为**位置矢量**(position vector),简称**位矢**,用 \boldsymbol{r} 表示^①.

图1-3给出了运动质点(飞机)在某一时刻的位矢 \boldsymbol{r} ,在直角坐标系 $Oxyz$ 中,其矢量式可表示为

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

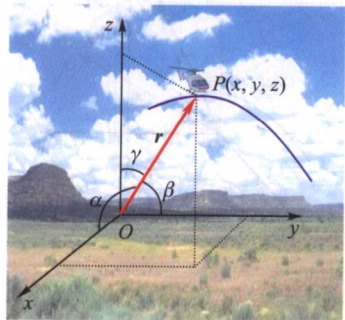


图1-3 飞机的位置矢量 \boldsymbol{r}

① 在印刷品中,矢量都用黑体字母表示;在书写中,一般写成 \vec{r} .

其中的 i, j, k 分别是沿坐标轴 x, y, z 正方向的单位矢量, 式中的 xi, yj, zk 分别是位矢 r 在三个坐标轴方向的分矢量. 位矢的大小为

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

位矢的方向由下式确定:

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

式中的 α, β, γ 分别是位矢 r 与 x 轴、 y 轴、 z 轴之间的夹角.

质点在运动时, 其位矢 r 随时间 t 变化, r 是时间 t 的函数, 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

上式称为质点的**运动方程**(equation of motion).

质点在运动中, 其位置坐标是时间 t 的函数, 因此运动方程也可以用时间 t 作为参数, 表示成分量式, 即

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

在上述分量形式中消去时间参数 t , 就可以得到运动质点的**轨道方程**.

1-2-2 位移与路程

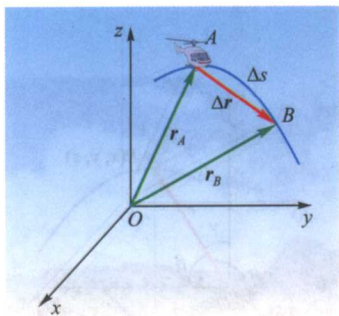


图 1-4 Δr 称为飞机由位置 A 到位置 B 的位移矢量

要了解质点的运动, 不仅要知道它的位置, 还要知道它的位置的变化情况. 设飞机(可视为质点)沿图 1-4 所示的曲线运动, 在 t 时刻, 飞机位于 A 点, 其位矢为 r_A ; 经过 Δt 时间后, 飞机到达 B 点, 其位矢为 r_B . 在此过程中, 飞机的位置变化量可用从 A 点指向 B 点的矢量 Δr 表示. Δr 称为飞机由位置 A 到位置 B 的**位移矢量**, 简称**位移**(displacement vector). 从图 1-4 中可以看出

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

在直角坐标系 $Oxyz$ 中, 位移 Δr 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \end{aligned}$$

式中, $\Delta x = x_B - x_A$, $\Delta y = y_B - y_A$, $\Delta z = z_B - z_A$. 位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-7)$$

飞机在 Δt 时间内, 沿其飞行轨道上所经过的曲线长度称为**路程**(path), 如图 1-4 中的曲线 AB 的长度, 记作 Δs . 值得注意, 位移和路程是两个不同的概

念,位移是矢量,它的大小 $|\Delta r|$ 为 A 、 B 两点的直线距离,路程则是标量,它是 A 、 B 两点之间的弧长 Δs .在一般情况下, $|\Delta r| \leq \Delta s$,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,有 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta r|$,即 $ds = |dr|$.

1-2-3 速度

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量.设质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内,完成了位移 Δr .为了表征质点在这段时间内运动的快慢和方向,我们把质点发生的位移 Δr 与所经历的时间 Δt 之比,定义为质点在这段时间内的平均速度 \bar{v} (average velocity),即

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

平均速度是一个矢量,其方向与位移 Δr 的方向相同.平均速度的大小等于质点在 Δt 时间内位置矢量的平均变化率,显然它只能粗略地反映 Δt 时间内质点位置变化的快慢和方向.

为了解质点每时每刻或者说每一瞬时的速度,我们将时间间隔 Δt 取得很小,从图1-4可知,在点 A 附近,时间间隔 Δt 取得越小,质点的平均速度就越接近于 t 时刻它在 A 点的速度.当时间间隔 Δt 趋近于零时,质点平均速度的极限称为瞬时速度(instantaneous velocity),简称速度,用 v 表示,可写作

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

上式表明,质点在 t 时刻的瞬时速度等于其位置矢量 r 对时间 t 的一阶导数,这个导数称为矢量导数,它仍是一个矢量.所以速度是矢量,其大小为 $|v| = \left| \frac{dr}{dt} \right| = \left| \frac{dr}{dt} \right|$;其方向是当 Δt 趋近于零时平均速度或位移 Δr 的极限方向.由图1-5可以看出,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, B 点无限趋近于 A 点,此时位移的方向趋近于曲线在 A 点的切线方向.这样,质点沿曲线运动时,在某一点的运动方向可用该点的速度方向表征,而该点的速度方向即为该点处曲线的切线,并指向质点运动前进的一方.

同样地,我们把 Δt 时间内飞机所经过的路程 Δs 与时间间隔 Δt 之比值定义为 Δt 时间内质点的平均速率(average speed).用 \bar{v} 表示,即

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

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速率的极限值即为质点在 t 时刻的瞬时速率 v ,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-11)$$

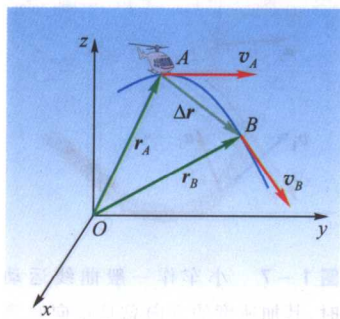


图1-5 飞机在运动曲线上某点的速度方向就是沿着曲线在该点的切线,并指向质点运动前进的方向

显然,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$, 因此有 $v = |\mathbf{v}|$. 这表明速率就等于速度的大小, 它反映了质点运动的快慢程度.

在直角坐标系 $Oxyz$ 中, 速度矢量可表示为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} \quad (1-12)$$

速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1-13)$$

速度的方向与确定位矢的方向相同, 可由其方向余弦表示.

1-2-4 加速度

加速度是反映质点的速度矢量随时间变化的物理量. 设质点在 Δt 时间内, 沿图 1-6 所示的某一轨道由 A 点运动至 B 点, 速度由 \mathbf{v}_A 变为 \mathbf{v}_B , 速度的增量为 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$. 在 Δt 时间内, 质点的平均加速度 (average acceleration) 定义为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-14)$$

平均加速度只能粗略地反映 Δt 时间内质点速度的变化情况. 如同讨论速度时的情况相仿, 当我们把时间间隔取得足够小时 ($\Delta t \rightarrow 0$), 取平均加速度的极限, 即为瞬时加速度 (instantaneous acceleration), 简称加速度, 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-15)$$

加速度等于速度 \mathbf{v} 对时间 t 的一阶导数, 或位置矢量 \mathbf{r} 对时间 t 的二阶导数, 加速度仍是一个矢量. 其方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向. 质点作一般曲线运动时, 加速度的方向总是指向轨道曲线凹的一侧, 如图 1-7 所示.

在直角坐标系 $Oxyz$ 中, 加速度可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \\ &= \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt} \mathbf{k} \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-16)$$

则加速度大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{\left(\frac{d^2 x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 z}{dt^2}\right)^2} \quad (1-17)$$

加速度 \mathbf{a} 的方向可用其方向余弦表示.

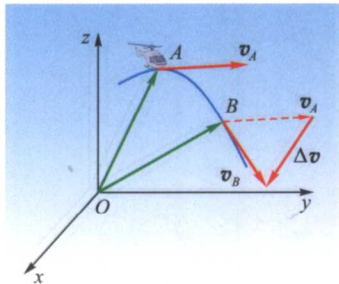


图 1-6 平均加速度的方向为速度增量 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$ 的方向

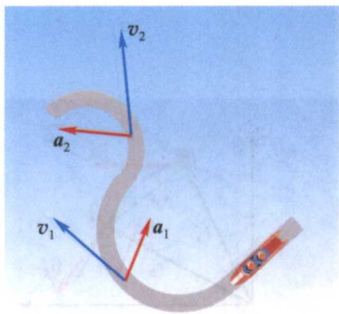


图 1-7 小车作一般曲线运动时, 其加速度的方向总是指向轨道曲线凹的一侧