



普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学 基础教程

(上册)

■ 张小兵 宋 峰 吴 雪 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学基础教程

(上册)

张小兵 宋峰 吴雪 编

高等教育出版社

内容提要

本书考虑到近年来中学的课程改革,在内容上做到衔接和匹配,并强调大学物理与中学物理的不同。本教材起点较低,涵盖面广,内容精炼,重点突出。教材中尽量减少繁琐的数学公式推导,但是对于重点概念、定理和典型例题则有详细阐述、证明、解题思路、分析和讨论,使学生更好地运用所学的物理概念、物理规律,并形成清晰的物理图像。教材注重理论联系实际,讲述了很多实际应用的例子。针对近年来大学物理的教研动态,以及各学科对于量子力学等知识的要求,本书还特别加强了近代物理学方面的内容。

本书分上下册。上册内容包括:质点力学、刚体及质点系统的运动规律、机械振动和机械波、狭义相对论、热力学基础和热平衡态的统计规律等。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业本科物理教材,也可供其他学科和专业的教师和学生及社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学基础教程.上册/张小兵,宋峰,吴雪编.
—北京:高等教育出版社,2008.6
ISBN 978-7-04-023609-5

I. 大… II. ①张…②宋…③吴… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 039415 号

策划编辑 郭亚嫒 责任编辑 张海雁 封面设计 王凌波 责任绘图 尹文军
版式设计 王艳红 责任校对 朱惠芳 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 北京印刷一厂

开 本 787×960 1/16
印 张 16.75
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 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 19.60 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 23609-00

序

物理学深邃的思想、强烈的逻辑思维,对学生的发展起到了积极的促进作用。许多科学家认为他们的成功深深得益于他们雄厚的数学物理基础。物理学在培养学生的创新能力、提高学生的科学素养方面的作用是毋庸置疑的。尤其在科技高度发达的今天,作为培养学生逻辑思维能力、传授物理基础知识的大学物理肩负着重任。目前我国的大学物理教学改革进行得如火如荼,在这种新形势下编著一本好的教材,使学生能够领略到物理思想、物理方法,是非常必要的。

我认为一本好的大学物理教材应该涵盖尽可能多的物理知识,尤其是在保持教材的经典性的同时多一些近代物理知识;不能晦涩难懂;更重要的是,能够让学生通过物理的学习,领悟物理思想、物理方法,若干年后,也许物理知识本身被淡忘了,但是物理思维和物理方法则会让学生受益终身。

在当今西方发达国家的大学物理教材中,有三部经典著作最具有典型性和借鉴意义:第一本是获得诺贝尔物理学奖的理论物理大师费曼编写的《费曼物理讲义》,概念清晰、见解透彻。这部讲义对广大物理工作者和教师,深富启迪和教益,在物理学界有着广泛而深远的影响。费曼自己也深以为傲,认为他为世人留下的就是这三卷《费曼物理讲义》。从这个意义上来说,这个教材是成功的。但这本讲义,思想过于深刻,使得刚入大学的学生难以掌握,因而不适宜作为实际施教的教科书。第二部则是哈立德的《物理学》,以其通俗易懂而独具特色,受到广泛欢迎。另外一部是《伯克利物理教程》,其难度介于前二者之间。

编著本教材的南开大学的几位青年教师博士毕业后就从事大学物理教学工作,有多年的科研教学经历;在国外的留学经历使他们对国外教材的风格有了深刻的印象,在编写中也进行了有益的尝试。教材力图做到不仅传授物理知识,更要传授物理的思维,让学生能够学到分析问题、解决问题的能力。

作者在编写过程中,考虑到目前高考改革,不同地区的同学的物理基础不一样,起点相对较低,但是跨度较大,遵循从简单到复杂,从经典到现代的原则,循序渐进;充分注意到大学物理和中学物理的区别,力图转变同学在中学物理学习时养成的一些方法和观念,培养哲学观点;虽然是面向理科学生的教材,但是注意在介绍一些概念和理论后,给出一些实际应用的例子,以加深对物理基础知识的理解;对于非物理专业的学生,以后可能不再有单独的量子力学等近代物理课程,但是了解近代物理的发展历程、掌握近代物理知识是一个大学生应该做到

的,因此本书增加了很多近代物理的知识。

本教材主要内容多年来试用于南开大学非物理类学生的大学物理教学,取得了良好的效果,在此期间根据教学情况又不断调整更新。被列为教育部“十五”规划教材后,又数易其稿,力求精益求精,是一本好的教材。我很高兴为此书做序,希望这本教材能够在物理教学中起到积极的作用。

母国光
2006年10月
于南开大学

前 言

大学物理学是面向非物理类专业本科生的一门必修课程,它不仅对于大学生掌握一些物理学知识和物理规律具有不可替代的作用,更重要的是,通过该课程能使学生初探一下物理学的“美景”——体味到物质世界是复杂的、多层次的,但又是可以把握的,欣赏和学习到若干物理学特有的分析问题和解决问题的方法,并了解到物理学的发展现状。事实上,若干年后,学生可能忘记了具体的物理公式,但是在物理课程中学到的科学认知态度和培养的逻辑推理能力、分析问题解决问题的能力可能让他们受益终身。

正是基于上述考虑,本书在选材和编写过程中力求把握以下几点:

首先,注意与物理类专业普通物理学教材的区别,突出对物理概念和基本理论的介绍,使其内容简明扼要,适应非物理类学生的实际情况。例如,将许多在历史上有重要意义但并非理论主干的物理问题作为基础理论的应用,以例题、习题及思考题的形式给出,从而给予学生发现问题和解决问题的空间,引导学生自觉将教科书从“薄”读到“厚”。

其次,考虑到本教材主要面对大一新生,生源不同,基础各异,因此我们适当降低了起点,注意与中学物理的衔接。另一方面,我们在编写中还特别注重引领学生超越中学已学过的相关内容。例如,在力学部分,我们对公式和定理推导较多,也较为详尽,目的是便于学生尽快熟悉微积分和矢量代数等数学工具,为后续学习打好基础;在电磁学和光学部分,我们则在强调理论性和逻辑性的基础上,对一些与实际紧密相关的物理问题和仪器设备(如交流发电机、加速器、干涉仪等)给予了适当介绍。

再次,本教材虽然是针对理科学生编写的,在撰写时尽量注意到逻辑性、完整性,利用数学工具和物理知识来分析、推导,但是这些知识不是枯燥的、独立的,我们也注意到和实际应用联系起来,加了不少实际的例子,这样将更能引起学生的兴趣。

最后,针对现代物理学在科学技术中的重要地位,我们增加了相当多的近代物理的内容。在这方面我们既注意适应学生知识体系的实际情况,做到教材通俗易懂,又要注意做到开阔学生眼界,增强他们对于未知领域的兴趣。对狭义相对论和量子物理部分,我们在保证可读性的同时,力争讲清楚、讲透基本原理,这对于学生树立正确的现代物理概念是有帮助的。而对广义相对论、固体物理、激

光、原子核物理及高能物理等内容,我们则有选择地、科普式地介绍其核心内容,以避免因繁杂的数学推导带来的“食而不化”。

考虑到不同专业的需求和不同层次学生的情况,本书内容较多。在讲授和学习时可以有所取舍。书中的小字可以直接讲授或阅读结论,楷体字可以作为补充阅读内容。

当然,在编写过程中,我们还是常常为如何做到循序渐进与取材丰富之间的平衡,如何摆放经典与现代物理学在教材中的位置等问题所困惑,能否达到上述目标更需学生和实践的检验。

应该指出,本书是在南开大学多年使用的教材《物理学》(马根源、王松立、金庆华编著,1993年第一版,南开大学出版社)和《大学物理学》(上册:张小兵、杨宝胜、郭儒编著,下册:金庆华、郭儒编著,2003年第一版,南开大学出版社)的基础上重新改写完成的,也融合了南开大学基础物理教研室几代教师的努力。同时,我们参考了国内外很多大学物理教材,汲取了其中的很多精华。其中主要有《大学物理学》(张三慧等编著,1999年第二版,清华大学出版社)、《基础物理学》(陆果编著,1997年第一版,高等教育出版社)和《物理学》(马文蔚等编著,1993年第一版,高等教育出版社)等等(恕在此没有一一列出)。在此谨向诸位专家表示谢意。由于编者的水平有限,知识面不够全面,再加之时间比较仓促,书中定有很多不妥之处,希望专家和读者批评指正。

本书上册是力学和热学,由张小兵编写初稿,吴雪完成后期工作;下册是电磁学、光学和量子物理基础,由宋峰编写。全书由宋峰、吴雪统稿。南开大学金庆华教授在写作过程中给予了具体明确的指导和帮助,南开大学母国光院士在百忙之中为本书写序,北京交通大学侯延冰教授等审阅了全书并提出了宝贵的意见和建议,还有不少老师和学生给予了帮助,在此一并致谢。

编者

2007年6月

目 录

第一部分 力 学

第一章 力学的内容和研究方法	3
§ 1.1 力学的研究内容	3
§ 1.2 力学中的数学描述方法	4
§ 1.3 力学中的基本物理量	6
习题	8
第二章 质点力学	9
§ 2.1 质点运动的矢量描述	9
§ 2.2 质点运动的坐标描述(I)	13
§ 2.3 质点运动的坐标描述(II)	18
§ 2.4 运动描述的相对性	26
§ 2.5 牛顿运动定律	29
§ 2.6 非惯性参考系	36
习题	40
第三章 质点系统的运动规律	45
§ 3.1 牛顿动力学:从质点到质点系统	45
§ 3.2 动量、动量定理及动量守恒	51
§ 3.3 动能 势能及机械能守恒	59
§ 3.4 角动量、角动量定理及角动量守恒	71
§ 3.5 质心参考系	79
§ 3.6 运动的一般性质	84
习题	86
第四章 刚体的运动规律	90
§ 4.1 刚体的平动和定轴转动	90
§ 4.2 刚体对定轴的转动惯量	92
§ 4.3 刚体定轴转动定律	97

§ 4.4	刚体定轴转动的动能定理	100
§ 4.5	刚体的平面平行运动	104
	习题	109
第五章	狭义相对论	113
§ 5.1	狭义相对论的基本假设	113
§ 5.2	相对论运动学	115
§ 5.3	狭义相对论的时空观	121
§ 5.4	相对论动力学	126
§ 5.5	广义相对论简介	132
	习题	133
第六章	机械振动和机械波	135
§ 6.1	简谐振动	135
§ 6.2	阻尼振动、受迫振动及共振现象	143
§ 6.3	简谐振动的合成	146
§ 6.4	机械波的形成和一般描述	153
§ 6.5	平面简谐波	157
§ 6.6	波的干涉现象	165
§ 6.7	多普勒效应	173
	习题	176

第二部分 热 学

第七章	热学基础	187
§ 7.1	热学的研究对象和研究方法	187
§ 7.2	热力学系统及其状态描述	188
§ 7.3	一个简单的热力学系统:理想气体	190
	习题	194
第八章	热力学第一和第二定律	196
§ 8.1	热力学第一定律	196
§ 8.2	热力学第一定律对理想气体的应用	199
§ 8.3	热力学第二定律	210
§ 8.4	卡诺定理及其意义	213
§ 8.5	热力学第二定律的熵表述 熵增原理	215
§ 8.6	热力学第二定律的应用	219

习题	222
第九章 热平衡态的统计规律	225
§ 9.1 统计分布规律的基本概念	225
§ 9.2 麦克斯韦速度分布律	228
§ 9.3 麦克斯韦分布律对理想气体的应用	232
§ 9.4 玻耳兹曼能量分布律	237
§ 9.5 输运过程的微观解释	239
§ 9.6 熵的统计意义	243
习题	247
附录一	250
附录二	252
附录三	254

第一部分 力学

第一章 力学的内容和研究方法

力学最早起源于对自然现象的观察以及生产劳动经验的总结。古希腊的阿基米德对杠杆平衡、物体重心位置、物体在水中受到浮力等问题作了系统的研究,初步奠定了静力学的基础;伽利略在实验研究和理论分析的基础上,最早阐明了自由落体运动的规律,并且提出了加速度的概念。牛顿在继承和发展前人研究成果的基础上,于1687年出版了《自然哲学的数学原理》,其中提出的物体运动的三大定律,标志着力学的创建。

此后,拉格朗日、欧拉等人建立的分析力学使力学体系更加完备,其应用领域更加广阔,力学也逐渐脱离物理学成为一门独立的应用科学。

本章的目的是使读者建立起对牛顿力学的整体印象,以便有针对性地学习下面各章的内容。

§ 1.1 力学的研究内容

日常生活中,我们经常体验到物体在运动。宏观物体相对于其他物体位置的变动,或物体各部分之间相对位置的变动,称为机械运动(mechanical motion)。力学就是研究物体机械运动的学科,内容主要包括以下几个方面:

(1) 研究如何描述物体的运动,称为运动学(kinematics)。

(2) 研究物体为什么运动,探讨物体运动和物体间相互作用的联系及规律,称为动力学(dynamics)。

(3) 研究物体在相互作用下的平衡问题,称为静力学,它也可视为动力学的一部分。

(4) 研究一个物体的运动,首先要明确它是相对哪个物体发生了位置的变动。只有选定了后者,讨论物体的运动才有意义。这种被选作参考的单个物体或彼此不做相对运动的物体群,称为参考系。相对不同的参考系,同一物体的运动学描述和动力学规律是否相同?有何联系?这些问题是力学中的一个重要课题。

(5) 运动总是在一定空间里进行的,运动过程也经历了一段时间,因此对时间和空间的认识(称为时空观)是力学中不可回避的一个课题。

物体具有一定的大小和形状,物体各部分的运动往往又各不相同,因此物体

的机械运动一般来说是复杂的。对于具有一定形状和大小的物体,在不同的运动过程中要抽象为不同的物理模型,并进一步分析和处理它的运动状况。

在物体的形状和大小可以忽略的情况下,可以将它视为一个具有一定质量的几何点,称之为质点(*particle*)。这样,在一定条件下,若实际物体可用质点这一物理模型来代替,则它的运动可按质点的运动加以描述,其动力学规律可由质点动力学给出(详见第二章)。

质点是通过抽象而形成的物理模型,能否把物体视为质点必须依问题的性质而定。例如考虑地球绕太阳的公转时,由于地球半径(约 6.37×10^6 m)相对地球和太阳的距离(约 1.49×10^{11} m)可看作是很小的量,此时可把地球视为质点。但若考虑地球附近物体(如地球卫星)的运动情况或地球的自转问题,由于地球本身的大小、形状不可忽略,此时就不能把地球当作质点处理了。

当所研究的物体不能视为质点时,原则上我们可以把物体细分为很多部分,并使得每一部分都足够小,可视为质点,这样就可以把整个物体视为由许多质点组成的一个质点系统。在质点力学的基础上进一步研究质点系统的运动规律是力学的中心内容(详见第三章)。

若物体中各部分(可视为若干质点)之间的相对位置保持不变,则物体可用刚体这一物理模型描写。刚体是在物体的形状和大小不可忽略,但其形状和大小的改变可以忽略的情况下,对足够坚硬的物体进行抽象而得到的另外一种物理模型。将质点系统运动规律应用于刚体的具体讨论详见第四章。

此外,对于必须考虑物体形状改变的情况,要引进弹性体这一物理模型,相关的讨论详见第六章。

§ 1.2 力学中的数学描述方法

对于大家熟知的运动,如匀速直线运动、匀加速直线运动以及匀速圆周运动,运动过程中总有某些物理量保持不变,它们的运动描述是简单的。但是,一般来讲物体的运动方向及物理量的大小都在发生改变,各个物理量之间一般也不再存在简单的关系。即使如此,在很小的空间和时间间隔内,许多物理量之间仍存在线性关系,如何通过这种“微观”尺度上各物理量之间的关系进行时间和空间上的累积,进而得到它们之间的宏观关系,这就需要采用微积分的方法。因此对物体及其运动的描述首先要考虑运动的瞬时性,应采用以时间、空间作为变量的矢量函数进行描述。

另一方面,在运动中物体的运动方向是在不断改变的,力学中的物理量往往不仅具有大小,而且具有方向。数学上,把既有大小又有方向的量称为矢量(*vector*)。利用矢量这一工具,图 1-1 中质点的位置可以表示为从参考原点到

质点所在位置 P 点的有向线段。它被称为位置矢量,简称位矢 (position vector), 记为 r 。

如图 1-1 所示,位置矢量(位矢)的大小即线段的长度,记为 $r = |r|$,位矢的方向由 P 点相对于 O 点的空间方位给出。若将位矢改写为

$$r = r e_r \quad (1.1)$$

其中 $e_r = r/r$ 是一个大小为 1 的矢量,称之为单位矢量 (unit vector),它集中反映了质点的方向。

质点在运动时,它的位矢是随时间改变的。为反映质点的运动,我们考虑以 t 为变量的矢量函数

$$r = r(t) \quad (1.2)$$

(1.2)式称为质点的运动方程。

对于以后学习中遇到的这种既有大小、又有方向的物理量,我们都要使用矢量这一工具加以描述。值得注意的是,矢量的基本运算和通常意义的“数”(称为标量) (scalar) 的运算法则完全不同。例如,两个矢量的加(减)法应由平行四边形(三角形)法则给出,两个矢量的乘(除)法更为复杂,常用的矢量乘法有标量积(或称点乘) (inner product)、矢量积(或称叉乘) (cross product) 等。关于矢量运算的具体内容可参阅高等数学教材。

为了描述质点的位置,我们还可以参考原点 O 点为坐标原点,在参考系上建立一个坐标系 (coordinate system)。例如,在图 1-2 所示的直角坐标系中, P 点就可以用一组标量 (x, y, z) 来表示, (x, y, z) 称为位矢的坐标。一般来说,如果一个物理量可用一组标量来描述,该物理量即为矢量,相应的这样一组标量称为其坐标。相应地,在直角坐标系 (rectangular coordinates) 中,质点的运动方程 (1.2) 式可以写为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1.3)$$

上式称为(1.2)式的直角坐标形式。

基于形如(1.2)或(1.3)式的运动方程,我们将在后续章节中采用微积分、矢量计算等数学工具进一步描述物理概念和规律(参见表 1-1)。读者尽早掌握这些数学工具,对于整个大学物理学的学习都是必要的。

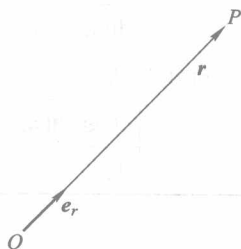


图 1-1

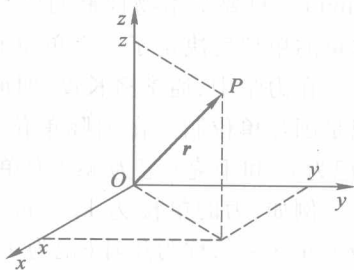


图 1-2

表 1-1

章 名	物 理 概 念	数 学 内 容
二、运动学	位移、速度、加速度	矢量加(减)法、矢量微积分、坐标系及矢量的坐标表示
	角速度	矢量的叉乘(矢量积)
	相对运动	坐标变换
三、动力学	力	矢量加(减)法
	力矩、角动量	矢量的叉乘(矢量积)
	功	矢量的点乘(标量积)、线积分

§ 1.3 力学中的基本物理量

(一) 基本量与导出量 单位 量纲

物理规律是在观察和实验的基础上,对物理量(physical quantity)之间的关系给出的表述。因此,我们可以选定某些物理量作为基本物理量(fundamental quantity),其他物理量则可利用物理规律导出,称为导出物理量。基本物理量最终必须落实在测量上,测量给出的公认的标准就可以作为该物理量的单位(unit)。只要基本物理量的单位给定,导出量的单位随之可以给出,因此一组基本量的单位就决定了一个单位制。

在力学中,通常将长度、时间和质量选取为基本物理量。力学中常用的单位制是国际单位制。在国际单位制中,长度、时间和质量分别以米(记为 m)、秒(记为 s)和千克(记为 kg)为单位。这样,力学中其他物理量的单位就可以确定。例如,力的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,称为牛顿(记为 N);能量或功的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,称为焦耳(记为 J);频率的单位为 s^{-1} ,称为赫兹(记为 Hz),等等。

只有给出单位,物理量才能得以定量说明。显然,只有单位相同的量才能加以比较,才能进行加减计算。例如,1 吨和 1 秒相加是没有任何意义的,而 1 吨和 1 斤也不能直接相加(只有统一为同一单位后才能进行比较)。这里,前者不同于后者,前者不能相加的原因在于“吨”和“秒”反映的是不同的物理量的单位。在推导物理公式时,我们更在意前一种不可相加性。即使未选定单位制,我们总可以通过引入量纲(dimension)的概念对物理量之间的关系进行定性分析。在力学中,若分别将长度、时间和质量简记为 L、T 和 M,则任一力学量 Q 可写为 L、T、M 的幂次乘积的表达式,称为 Q 的量纲式,记作 $\dim Q$ 。例如对速度 v 和力 F 有 $\dim v = \text{LT}^{-1}$, $\dim F = \text{MLT}^{-2}$ 。若 Q 和 Q' 量纲不同,则这两个量不是同一

种物理量,不可能进行加减运算。只有量纲相同的物理量才有可能进行加减运算,这一简单的性质常用以检验所推导出的物理公式的正误。例如,表达式 $F = v$ 显然是错误的,原因是等式两边的量纲不同。

(二) 牛顿力学的适用范围

长度、时间及质量三个基本量反映的都是物质运动的基本性质,所有物质,大如地球、太阳、银河系、宇宙,小如分子、原子、原子核、亚核粒子都处于不断的运动中。300 多年的物理学发展表明,不同物质的长度、时间及质量在数量级上可能相差甚远,物质世界具有一定的层次。

长度反映的是物质在空间中的大小或尺度,表 1-2 给出了一些典型的物质对象长度的数量级。物理上,一般把大小在人的身長尺度上下几个数量级范围的、我们可以直接感知的物质对象称为宏观系统。小尺度的一端,如原子尺度及以下的物质对象称为微观系统,而大尺度的一端,如太阳系尺度以上的物质对象称为宇观系统。此外,尺度约为 10^{-7} m 的物质对象,是呈现微观特征的准宏观系统,称为介观系统。类似地,不同层次物质的时间尺度和质量大小也呈现数量级上明显的差别。

表 1-2

单位:m

可观察到宇宙的半径	约 1×10^{26}
银河系之间的距离	约 2×10^{22}
银河系的直径	7.6×10^{20}
地球到最近的恒星(半人马座比邻星)的距离	4.0×10^{16}
光在一年内走的距离(1 光年)	0.95×10^{16}
地球到太阳的距离	1.5×10^{11}
地球的半径	6.4×10^6
珠穆朗玛峰的高度	8.9×10^3
人的身高	约 1.7
无线电广播电磁波长	约 3×10^2
说话声波波长	约 4×10^{-1}
人的红血球直径	7.5×10^{-6}
可见光波波长	约 6×10^{-7}
质子半径	1×10^{-15}
电子半径	$< 1 \times 10^{-18}$
夸克半径	1×10^{-20}