

十三

“十五”规划教材 DAXUE WULI

第二版 (下)

大学物理

黄仙山 主编



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

学校“十三五”规划教材

大学物理 (第二版) (下)

主 编 黄仙山

副主编 何贤美 夏金德 韩玉峰

参 编 (按姓氏笔画排序)

丁成祥 马建军 王 东

王 斌 刘 畅 刘 剑

刘厚通 吴建光 邹 勇

唐绪兵 莫绪涛 巢梨花

冀月霞

主 审 曹天守



合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下/黄仙山主编. —2 版. —合肥:合肥工业大学出版社, 2017. 7
ISBN 978-7-5650-3493-0

I. ①大… II. ①黄… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 189571 号

大学物理(第二版)(下)

黄仙山 主编

责任编辑 汤礼广

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2014 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号		2017 年 7 月第 2 版
邮 编	230009	印 次	2017 年 7 月第 3 次印刷
电 话	理工编辑部:0551-62903087	开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
	市场营销部:0551-62903198	印 张	14 字 数 260 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	安徽昶颀包装印务有限责任公司
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-3493-0

定价: 30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

本书中物理量的名称、符号和单位

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
长度	L, S	米	m	
面积	S	平方米	m^2	
体积	V	立方米	m^3	1L(升) = 10^{-3}m^3
时间	t	秒	s	
位移	$s, \Delta r$	米	m	
速度	v, u	米每秒	m/s	
加速度	a	米每二次方秒	m/s^2	
角位移	θ	弧度	rad	
角速度	ω	弧度每秒	rad/s	
角加速度	β	弧度每二次方秒	rad/s^2	
质量	m	千克	kg	
力	F	牛顿	N	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
重力	G	牛顿	N	
功	W, A	焦耳	J	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
能量	E, W	焦耳	J	
动能	E_k	焦耳	J	
势能	E_p	焦耳	J	
功率	P	瓦特	W	$1\text{W} = 1\text{J/s}$
摩擦因数	μ			
动量	p	千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$	
冲量	I	牛顿秒	$\text{N} \cdot \text{s}$	
力矩	M	牛顿米	$\text{N} \cdot \text{m}$	
转动惯量	J, I	千克二次方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	
角动量(动量矩)	L	千克二次方米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	
压强	p	帕斯卡	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
热力学温度	T	开尔文	K	
摄氏温度	t	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	$t = T - 273.15$
摩尔质量	M	千克每摩尔	kg/mol	
分子质量	m_0	千克	kg	
分子有效直径	d	米	m	
分子平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m	
分子平均碰撞频率	$\bar{Z}$	次每秒	1/s	
分子数密度	n	每立方米	1/m ³	
热量	Q	焦耳	J	
比热容	c	焦耳每千克开尔文	J/(kg · K)	
质量热容	C	焦耳每开尔文	J/K	
定容摩尔热容	$C_{V,m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)	
定压摩尔热容	$C_{p,m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)	
比热容比	γ			
黏度	η	帕秒	Pa · s	
热导率	k	瓦每米开尔文	W/(m · K)	
扩散系数	D	二次方米每秒	m ² /s	
熵	S	焦耳每开尔文	J/K	
电流	I	安培	A	
电荷量	Q, q	库仑	C	
电荷线密度	λ	库仑每米	C/m	
电荷面密度	σ	库仑每平方米	C/m ²	
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	C/m ³	
电场强度	E	伏特每米	V/m, N/C	1V/m=1N/C
电势	U	伏特	V	
电势差、电压	U	伏特	V	
电容率	ϵ	法拉每米	F/m	
真空电容率	ϵ_0	法拉每米	F/m	

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
相对电容率	ϵ_r			
电偶极矩	p, p_e	库仑米	$C \cdot m$	
电极化强度	P	库仑每平方米	C/m^2	
电极化率	χ_e			
电位移	D	库仑每平方米	C/m^2	
电位移通量	Ψ	库仑	C	
电容	C	法拉	F	$1F=1C/V$
电流密度	j	安培每平方米	A/m^2	
电动势	ϵ	伏特	V	
电阻	R	欧姆	Ω	$1\Omega=1V/A$
电导	G	西门子	S	$1S=1A/V$
电阻率	ρ	欧姆米	$\Omega \cdot m$	
电导率	γ	西门子每米	S/m	
磁感应强度	B	特斯拉	T	$1T=1Wb/m^2$
磁导率	μ	亨利每米	H/m	
真空磁导率	μ_0	亨利每米	H/m	
相对磁导率	μ_r			
磁通量	Φ	韦伯	Wb	$1Wb=1V \cdot s$
磁化强度	M	安培每米	A/m	
磁化率	χ_m			
磁场强度	H	安培每米	A/m	
线圈的磁矩	P_m	安培平方米	$A \cdot m^2$	
自感	L	亨利	H	$1H=1Wb/A$
互感	M	亨利	H	
电场能量	W_e	焦耳	J	
磁场能量	W_m	焦耳	J	
磁能密度	w_m	焦耳每立方米	J/m^3	

序

大学物理是工程技术人员的理论基石。它渗透在自然科学的一切领域,应用于生产技术的方方面面,是自然科学和工程技术的重要基础,也是大学生在四年大学学习中接触的唯一一门涉及各个自然学科并与高新技术相联系的课程。大学物理课程的教学旨在培养学生科学的思维方式和提出问题、分析问题、解决问题的能力,它能开阔学生的思路,激发学生勇于探索和创新的精神,提高学生科学的素养。那些踏入社会后,干出了一番事业的人,也许在工作过程中并没有直接应用过物理学知识,但他们的成功绝对离不开科学的思维方式和提出问题、分析问题、解决问题的能力以及探索和创新的精神。

爱因斯坦说过:“发展独立思考和独立判断的一般能力,应当始终放在第一位,而不应当把专业知识放在第一位。”他还说:“想象力比知识更重要,因为知识是有限的,而想象力概括着世界上的一切,推动着社会进步,并且是知识进化的源泉。”因此,学好大学物理,不仅对大学生在学校学好其他专业有着十分重要的作用,而且对他们毕业后的工作和将来进一步学习新理论、新知识、新技术也有深刻的影响。

英国哲学家培根说过:“知识是一种快乐,而好奇心则是知识的萌芽。”物理学就是一门培养好奇心的课程。量子论创始人普朗克上小学时听老师说:“想象一下,一个工人举起一块重石头,奋力地把它顶上房顶,他做功的能量没有消失。多少年以后,也许有一天,石头掉下来砸了某人的头。”这个解释能量守恒定律的例子使儿童时代的普朗克终生难忘,就像他恰巧被那个落下的石头砸着了一样,从此普朗克对物理规律产生了浓厚的的好奇心和兴趣。这说明学好物理可以让你变得聪明,而不是只有聪明人才能学好物理。

大学生学习大学物理重在掌握必要的物理学理论基础,通过学习初步掌握分析问题和研究问题的方法。与中学物理课程相比,大学物理课程虽然少了题海战术,也不会有脑筋急转弯之类的偏题和怪题,但是,物理学与数学一样,它毕竟是一门严谨的学科,学习过程的枯燥往往是难免的,为了拥有知识和能力,大学生仍然要忍耐这种甜蜜的枯燥,因为这是当代大学生必备的心理素质,也

是学好大学物理的基本功。

早期的大学物理教材的内容包罗万象,与中学物理重复严重,内容框架与理科物理类似,以至于大学物理课往往变成“瞌睡课”。为了改变学生这种被动学习的局面,安徽工业大学的物理课老师们早在20世纪90年代初就开展了一系列针对教学体系和教学内容方面的改革。首先于上个世纪末完成了《以素质教育为核心进行大学物理教学体系和内容的改革》的教改课题,该课题还荣获“冶金部教学成果二等奖”。在教改的同时,1999年大学物理课堂教学还在全校首次推出以PPT为特征的多媒体教学形式。紧接着编写《大学物理同步练习册》及建立标准化试题题库等教改配套工作也相继完成。与此同时,安徽工业大学物理演示厅正式投入使用。从此,我校大学物理课变成了最受学生欢迎的课程之一,还被评为安徽省省级精品课程和安徽省重点建设课程。这套由安徽工业大学应用物理系教师集体编写的《大学物理》教材正是以上成果的结晶。

这本《大学物理》(上、下)教材成功地解决了与中学物理内容重复的问题,突出了微积分和矢量运算等高等数学工具的应用;它删繁就简,深入浅出,力求避免使用一些艰涩的术语和复杂的公式,便于学生阅读;在内容结构、配套例题和课后习题等方面,它也别具匠心,能明显看出编者颇费了一番心血。大学物理课程教学改革是没有止境的,因此本书中即使存在一些不足之处也是难免的,希望他们今后不断修订和完善。但我仍要为这些年轻的同行们敢为人先和敢于探索的精神喝彩。

我相信这本教材会受到任课教师和学生欢迎的。

原安徽省政协常委、安徽工业大学教授

曹天宇

第二版前言

《大学物理》(第二版)是根据教育部非物理类专业课程教学指导委员会最新颁布的关于“普通高等院校非物理类专业课程教学基本要求”的精神,结合我校的定位、特点和培养目标以及在吸收广大师生提出合理和有益建议的基础上修订而成:

(1)对第一版教材中的疏漏和错误之处进行了认真修改。

(2)根据课时的变化,同时也是为了贯彻“少而精”的原则,对第一版教材的部分章节和内容进行了适当地调整。

(3)为了突出物理知识在实际中的应用,增加了一些介绍物理知识和物理思想在实际中应用的内容。

(4)适当介绍了一些反映学科前沿的问题以拓宽学生知识面。

(5)删除或更换了部分不合适的习题。

本书保留了第一版教材选材适当、概念清晰、语言精练的特点。本书的体系和章节顺序与第一版教材基本相同,教师在组织教学时,若有需要,可适当调整本书的章节顺序。

本书再版工作能够顺利进行,这与安徽工业大学数理科学与工程学院的领导及广大师生的大力支持是分不开的,在此,对他们表示衷心的感谢。

作为编者,我们努力地想让本书成为精品,但限于水平,因此再版教材中可能仍有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

第一版前言

大学物理为高等学校理工类专业的一门重要的基础课程,它的主要任务是为工程应用型人才的成长较系统地打下必需的物理学基础,同时培养学生初步掌握科学理论的学习方法和解决实际问题的基本方法,增强学生学习其他专业知识的能力,开阔学生视野,激发学生探索和创新的欲望,提高学生的综合素质。

为适应教学改革的新形势,进一步提高大学物理课程的教学质量,选择合适的教材就显得至关重要。为此,安徽工业大学应用物理系教师,结合自己多年的教学经验并吸收当前国内外大学物理课程教材编写的许多长处,集体编写了这本《大学物理》(上、下)教材。

本教材按照 120 学时设计(供选择),分为上下两册,共有 18 章。上册主要内容有力学、气体动理论和热力学基础、机械振动、机械波和波动光学等。下册主要内容有电磁学、狭义相对论和量子力学基础等。全书内容一般按照大多数高校的课堂教学顺序进行编排,这也与学生的认识过程以及物理规律的表现基本一致。

编者的初衷是为一般工科院校的本科生提供一套难度适中、深入浅出、篇幅不大、易教易学的大学物理教材,但在编写过程中,编者充分体会到了实现这一目标的困难与艰辛。令编者自豪的是,在困难面前,编者不仅没有止步,而且对本教材的编写还进行了适当地探索和创新。

首先,本教材对力学中质点运动学和质点动力学的内容进行了浓缩,原因是大学新生在学习大学物理之前已经在中学上了五年的物理课,再加上多年的应试教育和题海战术训练,给他们中间的许多人造成了物理课“概念抽象、内容繁多、题目难解、上课枯燥”的印象。因此本教材在力学部分中对学生已烂熟于心的力学概念不再用浩繁篇幅加以论述,而是大胆地进行了简化;另外,将微积分、矢量运算等高等数学工具应用于力学概念和定理的表述,尽量做到令人有耳目一新之感。

其次,本教材打破以往大多数《大学物理》教材将电磁学放在上册的惯例,

取而代之的是机械振动、机械波和波动光学。因为这些内容虽各自独立,可相互间又紧密联系,因此与上册内容放在一起,易教易学;另外,编者在多年的教学过程中还发现如果将电磁学安排在上册,学生在学习这部分内容时由于还没有掌握足够的高等数学知识,因此往往对微积分的学习会产生畏惧心理,再加上电磁学概念晦涩,从而会让有些学生丧失学习热情。

本教材的最大特点是思路清晰,表达准确,深入浅出,能让学生乐于阅读。本书在讲解物理学中的基本概念和基本原理时,力求避免使用一些艰涩的术语和复杂的公式;对重要的概念和原理,几乎都配有例题。为了便于教学,编者将可以作为选讲内容和适合学生自学的内容,在书目中特意用“*”标出;另外,还为各章配有一定量的思考题和习题,并提供了部分参考答案。

本教材的编写凝聚了安徽工业大学大学物理教研室绝大部分一线教师的心血。本教材编写分工如下:第1~3章,刘畅;第4章,丁成祥;第5章,刘剑、冀月霞;第6章,马建军;第7章,邹勇;第8章,王斌;第9~10章,莫绪涛;第11章,何贤美;第12章,吴建光;第13章,王东;第14章,夏金德;第16章,巢梨花;第17章,刘厚通;第18章,唐绪兵;第15章及各章后面的习题和答案,韩玉峰。全书由黄仙山统稿。

最后,感谢安徽工业大学招生办主任张清教授对本书的编写工作提出了许多宝贵意见,感谢安徽工业大学数理学院副院长孙文斌同志对本书的编写工作给予的大力支持,在此也对在编写过程中给予各种帮助的其他同仁表示诚挚的谢意。另外,还要感谢合肥工业大学出版社的编辑,他们为本书的顺利出版付出了同样的辛勤劳动。

教学是一门艺术,编写出好教材则能让这门艺术大放光彩。本书的成功编写是我们大学物理教研室的教师对多年教学实践的经验总结和对教学创新的有益尝试。鉴于编者水平有限、编写时间仓促,本书难免存在疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

电 磁 学 篇

第十一章 真空中的静电场	(4)
第一节 电荷 库仑定律	(4)
第二节 电场 电场强度	(7)
第三节 电场强度通量 高斯定理	(18)
第四节 静电场的环路定理 电势	(29)
* 第五节 电场强度与电势梯度的关系	(36)
本章小结	(40)
习题	(42)
第十二章 静电场中的导体和电介质	(45)
第一节 物质的电性质	(45)
第二节 静电场中的导体	(46)
第三节 静电场中的电介质	(52)
第四节 电容 电容器	(57)
第五节 电场的能量	(62)
本章小结	(65)
习题	(67)
第十三章 稳恒磁场	(69)
第一节 磁现象的电本质	(69)
第二节 磁场的计算	(72)
第三节 磁力线 磁通量 磁场的高斯定理	(79)

第四节 安培环路定理	(82)
本章小结	(88)
习题	(89)
第十四章 磁场对电流的作用	(92)
第一节 磁场对载流导线的作用	(92)
第二节 磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力	(97)
第三节 运动电荷在电场和磁场中的运动	(97)
本章小结	(104)
习题	(105)
第十五章 磁介质	(107)
第一节 磁介质和磁介质的磁化	(107)
第二节 磁场强度 磁介质中的安培环路定理	(109)
第三节 铁磁质	(112)
本章小结	(114)
习题	(115)
第十六章 电磁感应	(116)
第一节 电磁感应定律	(116)
第二节 动生电动势和感生电动势	(122)
第三节 自感 互感	(129)
第四节 磁场的能量 磁场能量密度	(134)
本章小结	(137)
习题	(137)

近代物理学篇

第十七章 狭义相对论基础	(142)
第一节 牛顿力学的相对性原理 伽利略变换式	(142)
第二节 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换式	(146)
第三节 狭义相对论的时空观	(150)

第四节 狭义相对论的动力学基础	(155)
本章小结	(158)
习题	(159)
第十八章 量子物理基础	(161)
第一节 黑体辐射 普朗克量子假设	(162)
第二节 光电效应与光子	(166)
第三节 氢原子的玻尔理论	(172)
第四节 波粒二象性	(180)
第五节 不确定关系	(182)
第六节 波函数 薛定谔方程	(185)
第七节 薛定谔方程在一维量子问题中的应用	(189)
本章小结	(197)
习题	(198)
下册习题参考答案	(201)
参考文献	(208)

电磁学篇

静电和静磁现象很早就被人类发现。由于存在摩擦起电现象,因此十八世纪以前,人们一直采用这类摩擦起电机来研究静电场,其代表人物如本杰明·富兰克林。人们在这一时期主要了解到了静电力同性相斥、异性相吸的特性,静电感应现象以及电荷守恒原理。

库仑定律是静电学中的基本定律,其主要描述了静电力与电荷电量成正比、与距离的平方成反比关系。人们曾将静电力与在当时已享有盛誉的万有引力定律做类比,发现彼此在理论和实验上都有很多相似之处。其间苏格兰物理学家约翰·罗比逊和英国物理学家亨利·卡文迪什等人都进行过实验,验证了静电力的平方反比律;法国物理学家库仑于1784年至1785年间进行了著名的扭秤实验,证实了静电力的平方反比律;库仑在其后的几年间还研究了磁偶极子之间的作用力,得出了磁力也具有平方反比律的结论。不过,库仑并未认识到静电力和静磁力之间有何内在联系,他一直将电力与磁力吸引和排斥的原因归结于假想的电流体和磁流体——具有正和负区别的、类似于“热质”的无质量物质。

库仑发现了磁力和电力一样遵守平方反比律,但他没有进一步推测两者的内在联系,然而人们在自然界中观察到的电流的磁现象(如富兰克林在1751年发现了放电能将钢针磁化)促使着人们不断地探索这种联系。首先发现这种联系的人是丹麦物理学家奥斯特,他本着磁力和电力一定有内在联系的信念进行了一系列有关的实验,最终于1820年发现接通电流的导线能对附近的磁针产生作用力,这种磁效应是沿着围绕导线的螺旋方向分布的。

在奥斯特发现电流的磁效应之后,法国物理学家让-巴蒂斯特·毕奥和费利克斯·萨伐尔进一步详细研究了载流直导线对周围磁针的作用力,并确定其

磁力大小正比于电流强度、反比于距离,方向垂直于距离连线,这一规律被归纳为著名的毕奥-萨伐尔定律。而法国物理学家安德烈-玛丽·安培在奥斯特的发现仅一周之后(1820年9月)就向法国科学院提交了一份更详细的论证报告,同时还论述了两根平行载流直导线之间磁效应产生的吸引力和排斥力。在这期间安培进行了四个实验,分别验证了两根平行载流直导线之间作用力方向与电流方向的关系、磁力的矢量性,确定了磁力的方向垂直于载流导体以及作用力大小与电流强度和距离的关系。安培还在数学上对作用力进行了推导,得到了普遍的安培力公式,这一公式在形式上类似于万有引力定律和库仑定律。1821年,安培从电流的磁效应出发,设想了磁效应的本质正是电流产生的,从而提出了分子环流假说,认为磁体内部分子形成的环形电流就相当于一根根磁针。1826年,安培从斯托克斯定理推导得到了著名的安培环路定理,证明了磁场沿包围产生其电流的闭合路径的曲线积分等于其电流密度,这一定理成为了麦克斯韦方程组的基本方程之一。安培的工作揭示了电磁现象的内在联系,将电磁学研究真正数学化,成为物理学中又一大理论体系——电动力学的基础。麦克斯韦称安培的工作是“科学史上最辉煌的成就之一”,后人称安培为“电学中的牛顿”。

在奥斯特发现电流磁效应之后的1821年,英国《哲学学报》邀请当时担任英国皇家研究所实验室主任的法拉第撰写一篇电磁学的综述,这导致了法拉第的研究工作转向电磁领域。法拉第研究了奥斯特的发现,也出于他同样认为自然界的各种力能够相互转化的观点,他猜想电流应当也如磁体一般,能够在其周围感应出电流。他在实验中发现对于两个相邻的线圈A和B,只有当接通或断开线圈A时,线圈B附近的磁针才会产生反应,也就是此时线圈B中产生了电流。如果维持线圈A的接通状态,则线圈B中不会产生电流,法拉第意识到这是一种瞬态效应。一个月后,法拉第向英国皇家学会总结了他的实验结果,他发现产生感应电流的情况包括五类:变化中的电流、变化中的磁场、运动的恒定电流、运动的磁体和运动的导线。法拉第电磁感应定律从而被表述为:任何封闭电路中感应电动势的大小,等于穿过这一电路磁通量的变化率。不过此时的法拉第电磁感应定律仍然是一条观察性的实验定律,确定感应电动势和感应电流方向的是俄国物理学家海因里希·楞次。海因里希·楞次于1833年总结出了著名的楞次定律。法拉第定律后来被纳入麦克斯韦的电磁场理论,从而具有了更简洁、更深刻的意义。

法拉第另一个重要的贡献是创立了力线和场的概念,力线实际是否认了超距作用的存在,这些思想成为了麦克斯韦电磁场理论的基础。爱因斯坦称其为“物理学中引入了新的、革命性的观念,它们打开了一条通往新的哲学观点的道

路”，意为场论的观念是有别于旧的机械观中以物质为主导核心的哲学观念。

麦克斯韦对电磁理论的贡献是里程碑式的。麦克斯韦自1855年开始研究电磁学，1856年他发表了首篇论文《论法拉第力线》，其中描述了如何类比流体力学中的流线和法拉第的力线，并用自己强大的数学功底重新描述了法拉第的实验观测结果，这部分内容被麦克斯韦用六条数学定律概括。1861年至1862年间，麦克斯韦发表了第二篇电磁学论文《论物理力线》。在这篇论文中，麦克斯韦尝试了所谓“分子涡流”模型，他假设在磁场作用下的介质中存在大量排列的分子涡流，这些涡流沿磁力线旋转，且角速度正比于磁场强度，分子涡流密度正比于介质磁导率。这一模型能很好地通过近距作用之说来解释静电和静磁作用以及变化的电场与磁场的关系。更重要的是，他预言了在电场作用下的分子涡流会产生位移，从而以势能的形式储存在介质中，这相当于在介质中产生了电动势。这成为了麦克斯韦预言位移电流存在的理论基础。1865年麦克斯韦发表了第三篇论文《电磁场的动力学理论》，在论文中，他坚持了电磁场是一种近距作用的观点，指出“电磁场是包含和围绕着处于电或磁状态的物体的那部分空间，它可能充有任何一种物质”。至此，麦克斯韦提出了电磁场一共包含有20个方程的方程组。1887年至1888年间，赫兹通过他制作的半波长偶极子天线成功接收到了麦克斯韦预言的电磁波，即电磁波是相互垂直的电场和磁场在垂直于传播方向的平面上的振动，同时赫兹还测定了电磁波的速度等于光速。赫兹实验证实电磁波的存在是物理学理论的一个重要胜利，同时也标志着一种基于场论的更基础的物理学即将诞生。爱因斯坦盛赞法拉第、麦克斯韦和赫兹的工作是“牛顿力学以来物理学中最伟大的变革”，而“这次革命的最大部分出自麦克斯韦”。

本篇主要介绍静电场和稳恒磁场的规律以及电磁感应规律。