



普通高等教育“十二五”规划教材
面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理(下册)

姜大华 郭凤岐 张琳 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
面向 21 世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理（下册）

姜大华 郭凤岐 张 琳 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书是高校“十二五”规划教材,是为了顺应逐年发展的高等教育形势,针对广大进入高等教育阶段的学生编写的。按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的“理工科类大学物理课程教学基本要求(2010年版)”要求,本教材包含了所有规定的A类核心内容,同时为了拓宽学生思路,也编写了少量的B类扩展内容。本教材试图解决普遍存在的大学物理“学时少、内容多、难度大”的问题,在整体上建立物理学的基本框架,对经典物理内容进行精炼和深化,对近代物理内容进行精选和简化,使学生在获得具体知识的同时,保持对物理学的概括了解和兴趣。本书言简意赅,深入浅出,通俗易懂;同时重视概念,强调思路,简化教学过程。

本教材分为上、下两册,上册包括力学,狭义相对论,机械振动和机械波,热学;下册包括电磁学,光学,量子物理。本教材可以作为高等学校理工科非物理专业的教材,同时可供广大独立学院、二级学院本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/姜大华,郭凤岐,张琳主编. —北京:科学出版社,2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材 面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

ISBN 978-7-03-035080-0

I. ①大… II. ①姜…②郭…③张… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第148064号

责任编辑:曾 莉/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2012年8月第 一 版 印张:21 3/4

2012年8月第一次印刷 字数:496 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

进入 21 世纪以来,我国的高等教育已经从精英教育逐渐扩大到大众教育,各类不同层次的高校应运而生.为了适应独立学院的需要,2004 年,华中科技大学武昌分校正式出版了《大学物理》教材和《大学物理学习指导书》,较好地适应了我校起步阶段物理教学的需要.

随着高等教育事业的迅速发展,武昌分校逐渐成长壮大起来,而较低起点的原教材已经不能满足水平逐年提高的大学生的学习要求.在“国家中长期教育和发展规划纲要(2010—2020 年)”中,明确要求高等教育要将提高教育质量作为核心任务,强调教育改革的必要性和长期性,强调培养学生的探索精神和创新意识.教育部由此出台了新一轮的“理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 年版)”.大学物理作为高等学校理工科各专业的一门重要的通识性必修课程,它在学生的知识、能力和科学素质培养中起到其他课程不可替代的作用.我们根据教育部的指示精神和学校一贯奉行的“向高水平高等学校看齐”的办学宗旨,认识到原教材已经完成了它的历史使命,而需要一个程度相对高一些的教材,以适应新的形势和任务.为此,我们依据“理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 年版)”,结合物理教员历年的教学经验和独立学院的特点,重新编写了大学物理教材.本书的特点如下:

(1) 按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会、物理基础课程教学指导分委员会编制的“理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 年版)”.本教材包含了所有规定的 A 类核心内容,同时为了拓宽学生思路,也编写了少量的 B 类扩展内容.

(2) 编写中遵循“减少些严密性,增加些可接受性”的原则.公式的推导和证明尽量做到浅显易懂,采用“由特殊到一般,由点到面,对比类推”的方法,使学生能够听懂、看懂.

(3) 对一些较深、较难的内容,在编写中尽量遵循认知规律,由易到难,循序渐进.既便于老师讲解,也便于学生自学.这类内容中有一些用 * 号注明,有的放在附录中,是否讲解由教员根据学生的情况和教学的学时数作取舍.

(4) 例题选取突出物理概念,避免做数学游戏,采用简明扼要的解题方法.考虑到本书没有配套的学习指导书,以及大学物理学时数少,没有单独习题课的实际情况,我们适当地增加了例题的数量,并尽量兼顾不同的题型,同时增加“一题多解”的例题.

(5) 适当编写参考资料(小字部分).这部分有些是较深的内容,仅用以开拓学生眼界;有些是反映科学家的思想方法和物理学的观念变革,有助于学生既从科学的角度,又从人文的角度了解物理学.适当介绍物理学家的科学信念与物理学发展的密切关系,使学生接触到科学世界观和方法论,利于启迪学生的创新精神.

本书分上下两册,上册研究实物粒子的运动,包括实物粒子的有序运动(力学)和无序运动(热学)两部分.下册研究波动,分为三部分,第一部分(电磁学)研究电磁波的稳恒态

(静电场和稳恒磁场)和似稳态(电磁感应),第二部分(光学)研究电磁波和光波.第三部分(近代物理)研究物质的波粒二象性及建立在此基础上的量子物理学,以及固体物理.

本书由华中科技大学武昌分校物理教研室的老师集体编写,上册由郭凤岐(第一、二、四、五、六、七、八、十章),彭玉平(第三章),刘卫平(第九章)负责编写;下册由姜大华(第十一、十二、十三、十五、十七、十八、十九章),李庆荣(第十四章),朱小飞(第十六章),郭凤岐(第二十、二十一章)负责编写;姜大华和郭凤岐老师共同编写了第二十二章.张琳老师负责全书的审阅.

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请读者不吝批评指正.

编 者

2011年10月2日于武昌

目 录

第四篇 电 磁 学

预备知识——场的概念	3
一、物质的两种形态——物质实体和场	3
二、电磁场的描述方法	4
第十一章 真空中的静电场(Electrostatic Field in Vacuum)	5
§ 11-1 电荷守恒定律 库仑定律	5
一、电荷守恒定律	5
二、库仑定律	7
§ 11-2 电场强度 电场叠加原理	8
一、电场强度	8
二、电场强度叠加原理	8
三、场强的计算	9
§ 11-3 电场线 电通量 高斯定理	13
一、电场线	13
二、电通量	14
三、高斯定理	16
四、高斯定理的物理意义	17
五、应用高斯定理求场强	18
§ 11-4 电场力的功 电势	22
一、静电场力的功	22
二、静电场的环路定理	23
三、电势能和电势	23
四、电势叠加原理	25
五、电势的计算	26
§ 11-5 电场强度与电势的关系	29
一、等势面	29
* 二、电场强度与电势的微分关系	30
思考题 11	32
练习题 11	32

第十二章 静电场中的导体和电介质(The Conductor and Dielectric in an Electrostatic Field)	35
§ 12-1 静电场中的导体	35
一、静电感应 导体的静电平衡	35
二、静电平衡时导体上的电荷分布	36
三、静电屏蔽	39
§ 12-2 静电场中的电介质	42
一、电介质的影响	42
二、电介质的极化	43
§ 12-3 高斯定理在电介质中的表达	44
一、高斯定理在介质中的表达式	44
二、介质中高斯定理的应用	46
§ 12-4 电容器及其电容	47
一、孤立导体的电容	47
二、电容器的电容	48
三、几种常见电容器	49
§ 12-5 静电场的能量	53
一、电容器储能	53
二、静电场的能量 能量密度	54
思考题 12	56
练习题 12	57
第十三章 真空中恒定电流的磁场(Magnetic Field of Steady Current in Vacuum)	60
§ 13-1 磁现象及其本源	60
一、基本磁现象	60
二、磁性的本源	62
§ 13-2 磁场的高斯定理	63
一、磁感应强度 B 的定义	63
二、磁场的高斯定理	63
§ 13-3 毕奥-萨伐尔定律	66
一、毕奥-萨伐尔定律	66
二、运动电荷的磁场	67
三、毕奥-萨伐尔定律的应用	68
§ 13-4 安培环路定理	73
一、安培环路定理	73
二、安培环路定理的应用	75
§ 13-5 磁场对电流的作用	78
一、磁场对载流导线的作用力	78

二、磁场对载流线圈的作用	81
三、磁力的功	84
§ 13-4 带电粒子在磁场中的运动	86
一、带电粒子在均匀磁场中的运动 磁聚焦	86
二、带电粒子在非均匀磁场中的运动 磁镜 磁约束	88
三、霍尔效应	89
思考题 13	91
练习题 13	91
第十四章 磁场中的磁介质 (Magnetic Medium in Magnetic Field)	95
§ 14-1 磁介质	95
一、磁化现象	95
二、介质中的磁场 相对磁导率	96
三、磁介质分类	97
§ 14-2 顺磁质和抗磁质的磁化机制	98
一、分子磁矩和分子环流	98
二、顺磁质和抗磁质	100
§ 14-3 安培环路定理在介质中的表达	101
§ 14-4 铁磁质	104
一、铁磁质的磁化规律	104
* 二、铁磁材料	106
* 三、磁畴	107
思考题 14	108
练习题 14	108
第十五章 变化的电场和磁场 电磁波 (Change of the Electric Field and Magnetic Field, Electromagnetic Wave)	111
§ 15-1 电磁感应定律	111
一、电磁感应现象	111
二、电磁感应定律	113
§ 15-2 动生电动势	117
一、动生电动势的产生	117
二、关于洛伦兹力不做功的问题	119
§ 15-3 感生电动势 感生电场	123
§ 15-4 自感应和互感应	126
一、自感现象 自感系数 自感电动势	126
* 二、互感现象 互感系数 互感电动势	129

§ 15-5 磁场的能量 131

 一、自感磁能 131

 二、磁场的能量 磁能密度 132

§ 15-6 麦克斯韦电磁场理论简介 134

 一、变化的电场产生磁场 134

 二、麦克斯韦方程组 138

§ 15-7 电磁波简介 140

 一、电磁波的辐射和传播 140

 二、电磁波的波动方程 142

 三、平面电磁波 143

 四、电磁波谱 电磁波的应用 145

思考题 15 146

练习题 15 146

第五篇 光 学

第十六章 几何光学(Geometrical Optics) 153

 § 16-1 几何光学的基本定律 153

 一、反射定律 全反射 153

 二、折射定律 折射率 154

 § 16-2 光的反射成像和折射成像 155

 一、平面镜成像 155

 二、球面镜成像 156

 § 16-3 薄透镜 159

 一、薄透镜 159

 二、薄透镜成像公式 160

 三、常用薄透镜成像规律 161

 四、几何光学应用 162

思考题 16 168

练习题 16 169

第十七章 光的干涉(Interference of Light) 171

 § 17-1 光源 光波的叠加 171

 一、光的电磁理论 171

 二、光波的叠加 光的干涉 172

 三、光程 光程差与相位差 178

§ 17-2 双缝干涉	180
一、杨氏双缝	180
二、其他分波阵面装置 菲涅耳双镜(双面镜、双棱镜)	184
三、洛埃镜与半波损失现象	184
§ 17-3 薄膜干涉 薄膜的等倾干涉	186
一、薄膜干涉的一般性讨论	186
二、等倾干涉	192
§ 17-4 薄膜的等厚干涉	194
§ 17-5 迈克耳孙干涉仪	198
一、迈克耳孙干涉仪设计原理	198
二、“迈干”的应用	200
思考题 17	201
练习题 17	201
第十八章 光的衍射(Diffraction of Light)	203
§ 18-1 单缝夫琅禾费衍射	203
一、光的衍射现象	203
二、惠更斯-菲涅耳原理	204
三、单缝夫琅禾费衍射	205
§ 18-2 光栅衍射	214
一、光栅衍射现象和衍射原理	214
二、光栅衍射强度	215
三、光栅光谱	220
§ 18-3 光学仪器的分辨率	222
一、夫琅禾费圆孔衍射	222
二、瑞利判据	222
三、最小分辨角和仪器的分辨率	223
§ 18-4 X 射线衍射 布拉格方程	224
一、X 射线衍射	224
二、布拉格方程	225
思考题 18	226
练习题 18	227
第十九章 光的偏振(Polarization of Light)	229
§ 19-1 光的偏振特性	229
一、自然光	229
二、线偏振光	230
三、椭圆偏振光和圆偏振光	230

四、起偏与检偏	231
五、马吕斯定律	231
§ 19-2 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律	232
一、布儒斯特定律	232
二、玻璃片堆 布儒斯特定律的应用	234
§ 19-3 双折射现象	235
一、晶体的双折射现象	235
* 二、利用惠更斯原理作图	238
三、几种获得线偏振光的棱镜	239
§ 19-4 偏振光的干涉	240
一、波晶片 椭圆偏振光和圆偏振光	240
* 二、偏振光的干涉	242
三、物质偏振性的应用	244
思考题 19	247
练习题 19	248

第六篇 量子物理

第二十章 早期量子论(Old Quantum Theory)	253
§ 20-1 黑体辐射 普朗克的量子假设	253
一、热辐射	253
二、绝对黑体及其辐射实验规律	254
三、普朗克的量子假设	256
§ 20-2 光电效应	257
一、光电效应的实验规律	257
二、光的波动学说的缺陷	258
三、爱因斯坦光子假设	259
§ 20-3 康普顿效应	261
一、康普顿散射的实验规律	262
二、康普顿效应的量子理论	263
三、光的波粒二象性	266
§ 20-4 玻尔的氢原子理论	266
一、氢原子光谱	266
二、经典理论的缺陷	267
三、玻尔的氢原子理论	268
四、玻尔理论解释氢原子光谱	269
思考题 20	270
练习题 20	270

第二十一章 量子力学基础(Quantum Mechanics Foundation)	273
§ 21-1 德布罗意物质波	273
一、德布罗意假设	273
二、德布罗意波的实验验证	274
三、德布罗意波的统计解释	276
§ 21-2 不确定度关系	277
一、不确定量	277
二、不确定度关系	278
§ 21-3 波函数 薛定谔方程	280
一、波函数	280
二、薛定谔方程	282
三、定态薛定谔方程	283
§ 21-4 一维无限深方势阱中的粒子	284
§ 21-5 一维方势垒 隧道效应	287
§ 21-6 氢原子的量子力学理论	291
一、氢原子的量子化状态	291
二、氢原子中电子的几率分布	292
三、电子的自旋	293
* § 21-7 多电子原子中电子的分布	296
思考题 21	298
练习题 21	298
第二十二章 激光和固体的量子理论(Laser and Quantum Theory of the Solid State)	300
§ 22-1 激光原理	300
一、受激吸收 自发辐射和受激辐射	300
二、激光产生的条件	302
§ 22-2 激光器	302
一、红宝石激光器	302
二、氦-氖激光器	304
三、自由电子激光	305
* § 22-3 固体的能带结构	307
一、电子共有化与能带的形成	307
二、能带中电子的分布	308
* § 22-4 电子在能带中的填充和运动	309
一、满带、空带和导带	309
二、绝缘体 导体和半导体	310

* § 22-5 半导体的应用	311
一、半导体的掺杂	311
二、pn 结	312
三、半导体器件	313
* § 22-6 超导电性	315
一、超导电现象	315
二、超导的磁性	318
三、超导电性的理论解释(BCS 理论)	322
四、超导电性应用	323
思考题 22	323
练习题 22	324
 附录 A	 327
一、场论基础知识	327
二、场论在电磁学中的应用	330
附录 B	334

第 四 篇

电 磁 学 (Electromagnetism)

电磁学是研究电磁现象及其规律的学科。电磁相互作用是物质之间四种基本相互作用之一，它广泛地存在于宇宙空间的星体之间，也存在于微观领域的原子、分子之间；它既作用于一般的物体，也作用于地球上的生命体。因此它涉及天文、地理、化学、生物等多个自然科学领域。电磁学又是自然界中研究得最深入、应用得最有成效的一门学科，不论在理论上还是在科学技术和生产实践中都具有极其重要的地位。通常以麦克斯韦电磁理论为核心的电磁理论称为经典电磁学。

人类对于电现象和磁现象的最早记载是公元前 4 世纪左右。“顿牟掇芥，磁石引针”，我国东汉时期学者王充在《论衡·乱龙篇》中对电和磁现象作了详细的描述。中国和希腊几乎同时发现了磁石吸铁的现象，而中国则第一个利用磁石的指极性制造出指南针（司南）。在很长的一段历史时期内，静电场和恒定磁场是彼此独立、没有联系的两门学科。随着时代的发展，物理学家对电和磁的认识逐渐深入，电和磁之间的关系也日臻明确。

19 世纪上半叶，电学和磁学终于合二而一，发展成为电磁学。1819 年，丹麦物理学家奥斯特（Oersted, 1777—1851）发现了电流对磁针的作用，紧接着法国物理学家安培（Ampère, 1775—1836）于 1820 年发现了磁铁对电流以及电流之间的作用，提出磁性起源于分子环流的假设。1831 年伟大的英国物理学家法拉第（Faraday, 1791—1867）发现了**电磁感应定律**，为电磁波的发现奠定了坚实的实验基础。1865 年，著名的英国物理学家麦克斯韦（Maxwell, 1831—1879）总结了前人的成果，将电场和磁场的所有规律统一到同一个理论体系下，他将电磁场的主要规律和它们之间的相互激发用精确的数学方程表示出来，建立了系统的**电磁场理论**，预言了电磁波，并发现光的电磁本质。1888 年，德国物理学家赫兹（Hertz, 1857—1894）首次用**振荡偶极子**实验直接证实了电磁波的存在。法拉第和麦克斯韦为现代无线电电子工业的兴起，以及为人类进入信息时代作出了划时代的贡献。

本篇主要介绍电场和磁场的基本特性. 在描述方法上, 从场(field)的观点出发, 引入了“通量”(flux)和“环流”(circulation)这两个概念, 并在此基础上用数学方程描述电场和磁场的特性和规律. 最后简单介绍麦克斯韦电磁场理论和电磁波.

预备知识 —— 场的概念

一、物质的两种形态 —— 物质实体和场

1. 场概念的产生

电磁作用建立在场的概念之上,场的概念来源于物质的相互作用.两个质点之间的万有引力,两个电荷之间的静电力,两个运动电荷之间的磁力,它们是如何发生的?历史上对于力的作用是“超距”还是“近距”,争论了很长一段时间.18世纪末的欧洲,包括库仑、安培、韦伯在内的学者们,都信奉一种观点,认为万有引力或电力、磁力都是瞬间发生的,既无需经过时间,也无需跨越空间,这样的一种作用模式超越了时空,被称为“超距作用”.超距作用观点不仅在哲学上没有依据,在科学实践中也被否认.19世纪,法拉第在研究介质对电力、磁力的影响后,经过深入的思考,从本质上指出物质之间的电力和磁力不能凭空传递,而是靠另一种物质作为媒介来传递.法拉第说:“物质到处存在,没有不被物质占据的中空地带.”在带电体、磁体或电流周围存在着由它们激发的相应的某种物质,该物质连续弥漫在整个空间,无处不在,这种物质称为场,它起着传递电力或磁力的媒介作用.因此,电荷之间的相互作用力,是通过其中一个电荷所激发的场传递给另一个电荷的.电荷只和场发生相互作用.

用以下图示表示电荷之间通过场发生相互作用:

$$\text{电荷 1} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷 2}$$

运动电荷除了产生电场,同时还会产生磁场,因此运动电荷之间除了存在电场力以外还有磁力,磁相互作用也是通过场物质 —— 磁场来完成的,其作用图示与上面类同:

$$\text{运动电荷 1} \longleftrightarrow \text{磁场} \longleftrightarrow \text{运动电荷 2}$$

法拉第摒弃了超距作用观点,率先建立了场和媒质传递作用的概念.与超距作用不同,这是一种近距作用观念,法拉第指出场的建立是需要时间的,或者说力的传递是需要时间的.事实证明,引力场、电场、磁场,以及电磁场都是以光速传递着相互作用,处在相应的场中的质点、电荷或者电流仅仅是与场发生相互作用.简而言之,场观念的基本内容是:互不接触的两个物体间的相互作用,必须通过中间媒介来传递,传递相互作用是需要时间的.我们把中间媒介称为场,或者场物质.

2. 物质存在的两种形态

静止质量不为零的粒子称为实物粒子.实物粒子的物质性体现在它具有质量、能量、动量、角动量.为什么说场也是一种物质呢?这是因为场也具有质量、能量、动量和角动量等实物粒子的基本属性;场与粒子相互作用过程中,和实物粒子一样,也会发生质量、能量、动量、角动量的变化.

但是场和实物粒子又有形式上的不同.主要的差别是:实物粒子是不可入的,几个实物粒子不可能同时占据一个时空点,由此实物粒子是不可叠加的;而场无处不在,具有可入性,即多个场可以同时占据同一空间,因此场具有可叠加性.另一个差别是:一个运动的

实物粒子在空间形成运动轨迹,场运动起来却形成波,如引力波、电磁波等.而且场物质可以脱离激发它的源而在空间传播.

近代物理的研究表明,实物粒子和场是自然界物质存在的两种形态.(量子场论进一步指出,在物质存在的两种形式中,场是更加基本的形式,粒子则是场在特定条件下的某种状态.)

二、电磁场的描述方法

描述场的性质的物理量称为场量.通常场量是空间位置的函数,如果场量是矢量,则称为矢量场(vector field),记为 $f(x,y,z)$;如果场量是标量,则称为标量场,常记为 $\varphi(x,y,z)$.电荷激发的电磁场是矢量场,在场所及的空间连续分布并且具有叠加性.因此具体说来,电磁学中广泛用到一般的矢量运算,如矢量求和、矢量的点积和叉积、矢量微分以及积分等,这也是大学物理学中必须掌握的内容.

从总体上看,电磁场的描述方法是形象的场线描述和精确的数学方程描述的紧密结合.流线、力线、流管、场线等概念是由法拉第提出的,如电磁场中的电场线和磁场线,它直观地描述了电场和磁场.有了场线的概念,就有了矢量场中通量和环流的概念,于是形象的场线被量化,从而场的描述从定性到定量,场的性质得到准确的数学描述,并进一步上升到高度概括电磁场规律的电磁场方程——麦克斯韦方程组.麦克斯韦方程组是法拉第创造性思维和麦克斯韦高超的理性思考和数学技能的完美结合.麦克斯韦曾经谦逊地说过:“我只是将法拉第的光辉思想写出来了.”

麦克斯韦方程组分为积分形式和微分形式两种.前者是描述电磁场中某有限区域内整体特性的场方程,后者是逐点描述电磁场特性的场方程.将积分形式的方程变换成为微分形式,就会涉及矢量分析中散度和旋度概念和积分变换式.由于大学物理中对这些数学运算不作要求,所以我们只是在正文中较详细地介绍积分形式的麦克斯韦方程组,而直接给出方程组的微分形式.关于场线、通量和源的概念,以及如何得到微分形式的麦克斯韦方程,在附录 A 中给出.