

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

新工科大学物理

下册 电磁学、光学与量子力学

李翠莲 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

新工科大学物理

李翠莲 主编

下册 电磁学、光学与量子力学



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分上下两册,上册为力学与热学部分,下册为电磁学、光学和量子力学。下册包括 34 个知识点精讲和相应知识点课后习题中部分难题的详解。每个知识点从层层递进的若干问题出发揭示知识点的内涵和外延,并配设若干课后练习。

本书可作为非物理类大学本科生的物理教材,也可作为期末、考研复习时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新工科大学物理.下册,电磁学、光学与量子力学 /
李翠莲主编. —上海:上海交通大学出版社, 2020
ISBN 978-7-313-21781-3

I. ①新… II. ①李… 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(2019)第 173013 号

新工科大学物理(下册电磁学、光学与量子力学)

XIN GONGKE DAXUE WULI (XIA CE DIANCIXUE GUANGXUE YU LIANGZI LIXUE)

主 编: 李翠莲

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 391 千字

版 次: 2020 年 1 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-21781-3

定 价: 59.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 19

印 次: 2020 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

前言

为了响应教育部“推进新工科建设与发展,开展新工科研究和实践”的号召,发挥综合性大学的优势,适应面向未来新技术和新产业发展的需要,推动理工科向工科延伸,我们编写了这套能向新技术和新产业各领域不断渗透、有助于提高未来社会接班人科学素养和创新能力的《新工科大学物理》教材。下面从三个方面介绍本套教材期待解决的问题、特色和创新点。

首先,目前国内使用的大学物理教材版本众多:有上海交通大学基础物理教研室编的《大学物理教程》、朱峰主编由清华大学出版社出版的《大学物理》、北京大学出版社出版的《简明大学物理》等。关于大学物理的习题集就更多了,这里不一一列举。这些教材为物理理论在工科学生中的普及和推广起到了重要的作用。然而,这些物理教材一般只强调物理公式的推导和习题应用,物理学丰富的发展史、物理学在现代工业、国防、科研中的应用却被忽略了,造成学生普遍感到物理学枯燥无趣,且深奥难懂。因此,《新工科大学物理》的第一个要解决的问题就是掀开物理学神秘的面纱,让学习者明白物理是有故事的,是有趣的。

其次,当代学生生活在知识爆炸、信息畅通的时代,纯粹的知识灌输远远不能满足学生的需要,培养学生的学习能力、创新能力比任何时代都更加迫切。正如爱因斯坦指出的“发展独立思考和独立创新的一般能力,应该始终放在首位”。著名物理学家杨振宁也在清华大学上了一学期《大学物理》后感慨地说,“如今中国学生学习认真、严谨,但缺乏创新意识和创新能力”。因此,配合国家开发新技术和新产业的战略需求,切实加强培养学生的创新意识和创新能力是《新工科大学物理》教材要解决的第二个问题。

怎样才能培养学生的创新意识、提高学生的创新能力呢?我们知道爱因斯坦在他 26 岁时就完成论文《论动体的电动力学》,独立而完整地提出狭义相对性原理,开创物理学的新纪元,他的创新能力是毋庸置疑的。那么,他的创新能力从哪里来的呢?读过爱因斯坦传记的读者都知道,早在中学时代,爱因斯坦就从伯恩斯坦所著的多卷本《自然科学通俗读本》中了解了整个自然科学领域里主要的成果和方法。这套书的第一卷的开始部分就论述了有关光速以及光和距离的内容,以至于当时 16 岁的爱因斯坦在无意中想到了一个奇特的“追光悖论”。从此,开始了长达 10 年的关于光速相对性以及关于光的传播介质“以太”存在问题的探索。这样,在他 26 岁那年发表

了《论动体的电动力学》，成功地解释他的“追光悖论”，创立狭义相对论也就是水到渠成的事了。从这个事例我们明白了创新是需要源头、需要传承、需要视野的。再举一个例子，谈谈什么是物理，物理与工程的联系又是怎样的。1824年，卡诺著写的建立热力学理论的第一篇法文文章中最基本的一句话，“任何不以做功为目的的热传导都是浪费”，就是热力学最根本的原理。它是不是与网上某句关于结婚和恋爱关系的流行语很像呀。卡诺的热力学原理问世10年以后，克拉珀龙在1834年才读懂了它，并画出了卡诺的理想热机的循环图。克拉珀龙在自己文章的最后还随手甩了一句话，说“如果对于任何一部热机，不以做功为目的的热传导都是在浪费的话，那么灶上面那个正烧开水的壶，它最大的浪费的地方不在壶里面，而在炉子和水壶的交界处。”而这样一句话等了约50年以后才终于被一位工程师R.狄塞尔(R. Diesel)读懂。他说，如果最大的浪费是在炉子和灶台的交界面上，那么好的热机就不应该把炉子架在灶上，而应该是把灶建到炉子里面，从此，世界上有了内燃机。卡诺、克拉珀龙、狄塞尔这些人是不是真正的有大学问的人？从这些人的故事中我们是否对什么是物理学、物理学与工程技术又有怎样的联系有所感悟？

最后，谈谈物理学与工程专业的联系。我国的高中教师、学生及学生家长往往不管物理学在生产工程和生活中有什么用，只要学生能举一反三做得出物理练习，高考获得较高分，学生、家长、中学教师都满意。到了大学，大学生已步入成年人的门槛，他们不得不思索自己在未来职业生涯中究竟干什么，什么是最适合自己的，什么是值得他们终身追求的目标等等。而物理学作为自然科学的基础学科，几乎物理学的每个知识点开发出去都是一个工程应用领域。比如，大家爱不释手的手手机，就是量子力学基础上的能带理论开发的半导体器件与麦克斯韦方程组预言的电磁波理论完美结合的产物；又比如现代高大上的虚拟现实技术就是半导体技术结合光的偏振、光的干涉和衍射知识点的应用。所以，在每一个知识点的理论讲授结束后，除了讲解一些例题让学生熟悉、掌握该知识点以外，增加该知识点在生产工程和生活上的应用实例是必要的，这有助于工科学生在以后的专业选择中有的放矢，也为学生找到适合自己的专业进行有益的尝试。这是《新工科大学物理》教材要解决的第三个问题。

为了培养学生科学思维能力和创新能力，有效解决上面三个问题，本套教材贯彻落实新工科教育的三个新元素。

第一是新理念，本套教材把科学研究的启蒙教育融入本科学生大学物理教学中，这个新理念贯穿于整套教材的每一个知识点的阐述中。时间跨入21世纪，中华民族要实现复兴，要引领世界，只是紧跟欧美的工作是远远不够的，需要在中国大地上涌现出一批原创性的工作。要实现这个目标，首先需要全面提高中华民族的科学素养，因为只有整个民族科学素质高了，才会有人才不断涌流出原创性的工作。因此，在事关民族未来的大学物理教育中还原物理学本来丰满的面目，让物理学中涉及的每个知识点都以“它从哪里来”的故事开始，以解决“它可能到哪里去”的问题结束；用一个个生动具体化的故事来阐述被高度抽象的物理学原理，还原大学物理学本来具有的

故事性、趣味性、启发性特点,这有助于培养学生的好奇心和发现意识,让每个正常智力的人都可以掌握物理学研究方法,成为敢于突破、敢于创新但又不盲目乱动、有物理学原理底蕴的人。正如 SpaceX 创始人马斯克那样,每当工程师们觉得某些技术是痴心妄想,马斯克就盯着对方,问:这个技术违反哪一条物理学原理?对方答不出来,就只能去不断尝试,最后获得了巨大的成功。这正是科学研究启蒙教育融入本科教育中的目的。

第二是新架构。本套教材不像以前的大学物理教材以力学、热学、电磁学、光学和量子力学作为大块,在其下再分章节的内容安排模式来编排所有大学物理知识点,而是在深入研究和贯彻教育部“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,保证 A 类知识点不减少的基础上,对大学物理的知识点架构做了大幅度改变。新的架构是在力学、热学、电磁学、光学、量子力学五大物理学体系中精选出 66 个重要的知识点(涵盖教育部“基本要求”中的 74 个 A 类知识点全部和 52 个 B 类知识点的一部分)分上册 32 章、下册 34 章来组织学习。这种架构划分与上海交通大学工科本科生每学期大学物理 32~34 次课(每次课 2 小时)相适应。更重要的是,这种架构编排的教材给每个知识点以平等的地位、同样的重要性,让工科类本科学生对大学物理教育中的每个知识点保持新鲜感,在整个一个学年的大学物理学习中保持旺盛的求知欲望;也给对某一知识点有特别兴趣的学生以拓展学习的空间。

第三是新内容。

(1) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的**发展史内容**。这部分内容包括当时遇到了怎样的难题需要建立该知识点,建立该知识点的过程中经历了哪些困难,走过哪些弯路,最后怎样统一到目前这个认识的等等。《新唐书·魏徵传》云:“以铜为鉴,可正衣冠;以古为鉴,可知兴替;以人为鉴,可明得失。”每个学习物理的学习者了解一些知识点的发展史才能明白该知识点在人类认识自然的历史长河中所起的作用、所处的位置,才有尊敬和发自内心的赞赏和敬畏。这是培养学生敬畏自然,形成按照自然规律办事的行为习惯不可缺少的环节。本套教材加上发展史内容,希望能改变每个知识点、每个公式在学生心中的较为枯燥的形象,让它们不再显得过于刻板、无趣,而是丰满的、美丽的。

(2) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的**新研究方法**,尽量用两种或者两种以上的科学研究方法获得该知识点。让学生从前辈物理学家那里学习遇到问题时思考解决问题的方法,在阅读、查找、讨论、推理、归纳等实践中完成一个个小目标。整个学年下来读懂物理学的大目标就完成了。例如,在“单摆”知识点中,本套教材分别用量纲分析和逻辑推演法分析单摆振动周期与摆长、摆球质量、重力加速度的关系。其中量纲分析法用简单而有效的方法初步探讨决定单摆振动周期的要素,逻辑推演法用牛顿第二定律和数学推理探寻单摆振动规律背后的原因。

(3) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的**新应用**

以及可能的拓展内容。这里的应用不仅仅指用知识点所涉及的物理原理解题,而是实实在在地在工业、国防和日常生活中的应用。如在“光的偏振”知识点中,本套教材分析了偏振片在三维影视中的应用和偏振片在现代高科技“虚拟现实”中的重要应用。将基础的物理知识、物理原理与现代高科技结合在一起,大大提高了学生学习的愿望,也使我们摆脱了知识与生活脱节、原理与现实脱节的局面,回答了百姓关心的“学这个知识有什么用”的问题。本套教材还为每个知识点预估了今后可能拓展的方向。学习者通过这套教材学习,能从物理这棵大树的根和杆去接枝,他们在工作中的涌现出原创性的、重大的成果将是水到渠成的事。

(4) 本教材增加了用 Python 求解物理问题、把物理问题形象化、生活化的内容。目前,计算物理已成为除实验物理和理论物理外的第三种研究物理的方法,研究生已大量使用各种计算机语言、计算机程序研究物理学、化学、药学等,但是,计算物理还没有引入大学物理教学中。本教材增添这部分内容,一方面可以弥补以前大学物理教材的不足,更重要的是可以拓展学生用物理原理处理实际问题的范围。目前的教材能处理的问题是基于一一些具有高度对称性、忽略了许多次要因素的理想情形下得到的结论。现实问题要复杂得多,用 Python 语言编程处理物理问题,把忽略的次要因素加进去后会得到一些新的结论,发现一些新的现象,这也是一种创新。而且,这样处理的结果与生活中的实践结果更接近,使物理理论指导工科实践的意义得到彰显,有助于激发学习者学习物理理论的兴趣。目前这版教材这方面内容仅开始试点,再版时会增加 Python 编程解决物理问题的数量和质量,增加表征物理过程的二维码动画、游戏等内容。

最后,本书每个知识点后配设 3~7 道练习与思考题,其中一道题具有现代应用典型代表意义,且有一定难度。这样安排的目的是既兼顾普通学生熟悉、掌握知识的需要,又考虑个别学有余力的学生拓展知识面,多往深处理解和拓展知识的需要。本书可作为非物理类本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习准备考试强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

由于编者水平有限,书中存在的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 电荷、库仑定律及电场	001
一、电荷、库仑定律及电场研究背景	001
二、电荷、库仑定律及电场强度的数学描述及物理解析	004
三、电场与电场强度概念的科学意义及影响	005
四、静电场在工农业中的应用	006
五、应用举例	006
六、练习与思考	011
第二章 电场线、电通量与高斯定理	012
一、电场线、电通量和高斯定理建立的背景	012
二、电场线、电通量和高斯定理的数学表述及物理解析	013
三、电场线、电通量及高斯定理的意义	017
四、应用举例	017
五、练习与思考	021
第三章 静电场的环路定理与电势	022
一、静电场的环路定理与电势建立背景	022
二、静电场的环路定理与电势的数学描述及物理解析	022
三、静电场环路定理的科学意义	027
四、练习与思考	028
第四章 静电场与导体的相互作用	029
一、静电场与导体的相互作用建立背景	029
二、静电场与导体相互作用的数学表示及物理解析	030
三、应用举例	032
四、练习与思考	033
第五章 电介质与外加静电场的相互作用	035
一、电介质与外加静电场相互作用规律建立背景	035
二、电介质与外加静电场相互作用的数学描述及物理解析	036
三、电介质与电场相互作用的研究意义	040

四、应用举例	040
五、练习与思考	042
第六章 电容器与静电场能	043
一、电容器、电容器的电容以及静电场能的研究背景	043
二、电容器电容和静电场能的数学表达及物理解析	044
三、电容器在电路中的应用	047
四、应用举例	048
五、练习与思考	051
第七章 电源、稳恒电流	053
一、电源与电流的研究背景	053
二、电流、电流密度的数学表述及物理解析	054
三、电源的应用	056
四、练习与思考	058
第八章 磁感应强度与电流的磁效应	059
一、磁感应强度及电流的磁效应研究背景	059
二、磁感应强度的数学描述及物理解析	060
三、磁感应强度以及毕奥-萨伐尔定律的意义及影响	062
四、应用举例	062
五、练习与思考	064
第九章 磁场的高斯定理和安培环路定理	065
一、磁场中的高斯定理和安培环路定理建立背景	065
二、磁场高斯定理和安培环路定理的数学描述及物理解析	065
三、磁场的高斯定理及安培环路定理的意义与影响	069
四、应用举例	070
五、练习与思考	071
第十章 磁场对载流导线的作用	072
一、磁场对电流作用的研究背景	072
二、磁场对电流作用力的数学表述及物理解析	073
三、磁场安培力(力矩)做功原理分析及其应用	074
四、应用举例	074
五、练习与思考	077
第十一章 霍尔效应	079
一、霍尔效应的发现	079
二、霍尔效应的数学描述及物理解析	080
三、霍尔效应的应用	082

四、霍尔效应研究的发展	083
五、应用举例	085
六、练习与思考	085
第十二章 磁介质及其与磁场的相互作用	087
一、磁介质及其与磁场相互作用研究背景	087
二、顺磁质、抗磁质磁性的数学描述及物理解析	088
三、顺磁质、抗磁质理论的科学意义及对人类生活的影响	093
四、应用举例	094
五、练习与思考	095
第十三章 铁磁质	097
一、铁磁质的研究背景	097
二、铁磁质性质的数学描述及物理解析	097
三、铁磁材料在工业和日常生活中的应用	100
四、练习与思考	101
第十四章 电磁感应现象及电磁感应定律	102
一、电磁感应现象及电磁感应定律建立背景	102
二、电磁感应定律的数学描述及物理解析	103
三、电子感应加速器	109
四、电磁感应定律的意义和影响	110
五、电磁感应之美	111
六、练习与思考	112
第十五章 自感、互感以及磁场的能量	115
一、自感、互感及磁场能量的研究背景	115
二、自感、互感以及磁场能量的数学描述及物理解析	116
三、自感、互感在工业和日常生活中的应用	121
四、练习与思考	121
第十六章 麦克斯韦方程组及电磁波	123
一、麦克斯韦方程及电磁波研究背景	123
二、麦克斯韦电磁理论与麦克斯韦方程组	125
三、电磁波性质	128
四、电磁理论的发展及其对人类社会的影响	129
五、练习与思考	130
第十七章 光的直线传播、光的反射及折射	132
一、光的直线传播、反射及折射的研究背景	132
二、光的直线传播、反射和折射的数学描述及物理解析	133

三、光的折射和反射应用典型实例——光纤通信	136
四、练习与思考	137
第十八章 光的偏振	138
一、偏振光研究背景	138
二、偏振光的数学描述及物理解析	139
三、光的偏振理论的应用——波片与旋光	144
四、偏振光知识在生活中的应用	146
五、练习与思考	147
第十九章 光的干涉	149
一、光的干涉理论建立背景	149
二、光的干涉现象的数学描述和物理解析	151
三、光的干涉理论的应用——对杨氏双缝干涉实验的理论解释	153
四、光的干涉理论和干涉现象对自然科学发展和人类生活的影响	156
五、练习与思考	157
第二十章 薄膜干涉	158
一、日常中的薄膜干涉现象	158
二、薄膜干涉的数学描述及物理解析	159
三、薄膜干涉的科学意义、对人类生活的影响及发展	163
四、应用举例	163
五、练习与思考	164
第二十一章 光的衍射	166
一、衍射现象的研究背景	166
二、光衍射现象的数学描述及物理解析	167
三、光的衍射理论的应用	168
四、衍射现象在现代信息记录、传递、搜集中的应用	171
五、练习与思考	172
第二十二章 光栅衍射	173
一、光栅衍射的研究背景	173
二、光栅衍射的数学描述及物理解析	174
三、光栅在现代工业和人类生活中的应用	178
四、应用举例	178
五、练习与思考	179
第二十三章 黑体辐射规律及普朗克能量量子假说	180
一、黑体辐射和普朗克能量量子论研究背景	180
二、黑体辐射规律和普朗克能量量子论的数学表述和物理解析	181

三、普朗克公式的拓展	184
四、黑体辐射研究的科学意义及对人类生活的影响	185
五、应用举例	185
六、练习与思考	187
第二十四章 光电效应	188
一、光电效应研究背景	188
二、光电效应的数学描述及物理解析	189
三、光电效应的科学意义及对人类生活的影响	194
四、练习与思考	194
第二十五章 原子结构、氢原子光谱、玻尔理论	196
一、原子结构、氢原子光谱及玻尔理论研究背景	196
二、氢原子线状光谱、玻尔理论的数学描述和物理解析	198
三、玻尔理论的意义及局限	202
四、里德伯公式和玻尔理论的应用举例	202
五、练习与思考	203
第二十六章 德布罗意波	204
一、德布罗意波的建立背景	204
二、德布罗意波的数学表述及物理解析	205
三、德布罗意波在科学技术、人类生活中的应用	206
四、应用举例	208
五、练习与思考	208
第二十七章 不确定关系	209
一、不确定关系以及态叠加原理建立背景	209
二、不确定关系以及态叠加原理的数学描述及物理解析	210
三、不确定关系的意义及影响	212
四、不确定关系的应用与发展	212
五、练习与思考	213
第二十八章 波函数统计诠释及态叠加原理	214
一、波函数统计诠释与态叠加原理的建立背景	214
二、波函数及其统计诠释、态叠加原理的数学描述及物理解析	215
三、波函数及其统计诠释和态叠加原理的意义	217
四、应用举例	217
五、练习与思考	218
第二十九章 薛定谔方程及其应用	219
一、薛定谔方程建立背景	219

二、薛定谔方程建立过程中所经历的困难	220
三、薛定谔方程的数学描述及物理解析	220
四、薛定谔方程的应用	222
五、薛定谔方程存在的问题	226
六、薛定谔方程的科学意义及影响	227
七、练习与思考	227
第三十章 一维散射——隧道效应	228
一、一维散射问题提出的背景	228
二、一维散射问题的数学描述和物理解析	228
三、一维散射问题的意义与影响	231
四、应用举例	231
五、练习与思考	232
第三十一章 氢原子的量子理论	233
一、氢原子研究背景	233
二、氢原子的量子理论描述和物理解析	234
三、氢原子中电子角动量取向量子化的证明——塞曼效应	235
四、氢原子量子理论的意义	237
五、练习与思考	237
第三十二章 电子自旋和泡利不相容原理	238
一、电子自旋和泡利不相容原理建立的背景	238
二、电子自旋与泡利不相容原理的数学描述及物理解析	239
三、电子自旋理论的应用——解释斯特恩-盖拉赫实验	241
四、对电子自旋的拓展理解	242
五、电子自旋理论的科学意义和可能的发展	243
六、练习与思考	244
第三十三章 激光	245
一、受激辐射理论的建立和激光技术的发展	245
二、激光理论的数学描述及物理解析	247
三、激光的意义及应用	250
四、练习与思考	252
第三十四章 量子纠缠、量子计算与量子信息	253
一、量子纠缠、量子计算与量子信息的研究历史	253
二、量子纠缠与量子信息的数学描述与物理解析	255
三、量子信息的应用举例	258
附录 典型难题详解	261

第一章 电荷、库仑定律及电场

电荷是物质吸引或排斥另一物质的一种属性。库仑定律是关于两个静止点电荷相互作用的规律。库仑定律指出两个静止点电荷之间的相互作用力与其电量的乘积成正比,与两个点电荷之间距离的平方成反比,方向在两个点电荷的连线上。

电场是电荷以及变化的磁场周围空间中存在的一种特殊媒介物质。电荷间的相互作用总是通过电场进行的,因此静电相互作用力又称为电场力。而电场强度是用来表示电场大小和方向的物理量,定义为检验电荷在电场中某一位置所受到的电场力与电荷量之比,其方向与正电荷在该位置所受电场力的方向相同。

一、电荷、库仑定律及电场研究背景

古希腊的哲学家泰勒斯发现琥珀经过毛皮摩擦以后可吸引轻小物体。1600年,英国医生威廉·吉尔伯特拓展了泰勒斯的研究,他用金刚石、蓝宝石、水晶、明矾、硫磺等物质做实验,同样发现了它们经摩擦后能吸引轻小物质。吉尔伯特在他的著作《论磁石》中首次把摩擦后的物质吸引轻小物体的性质称为物质的电性。1729年,史蒂芬·戈瑞发现了电传导现象,即通过特定的物体(特别是金属)可以让电相互传递。此后,一些研究者认为电是一种独立存在的物质,而不是与产生电的物体密不可分。1733年,查尔斯·堵费将电分为两种:玻璃电和琥珀电,即当玻璃与丝巾摩擦时,玻璃会生成玻璃电;当琥珀与毛皮摩擦时,琥珀会生成琥珀电。他认为这两种电会彼此相互抵消,并提出了电现象的双流体理论。1746年,富兰克林从一位英国朋友那里获得一个可以收集电荷的莱顿瓶,开始了对电现象长达10年的研究。富兰克林利用从雷云中收集到的电给莱顿瓶充电而得到电火花证明雷也是一种电现象,天电与地电是一致的。在此基础上,富兰克林提出了电荷、正电、负电概念以及电荷守恒假说(电荷不因摩擦玻璃管而产生,而只是从摩擦物转移到了玻璃管,且摩擦物失去的电荷与玻璃管得到的电荷严格相等)。1748年,法国的让·安东尼·诺雷发明了验电器来测量物体带电量的多少。1766年,普列斯特里首先对静电力与距离的关系进行了猜测。普列斯特里在1767年出版的《电的历史和现状》中写道:“电的吸引应该遵从与万有引力相同的定律,即按距离的平方而变化。”遗憾的是,他对电的排斥力没有做出猜测。1784年,法国物理学家库仑直接尝试通过类比万有引力定义的方法,定义静电力与两带电体间距离的关系为平方反比关系,然后通过实验来验证其正确性。

库仑还根据对称性利用相同的金属球互相接触的方法,巧妙地获得了各种大小的电荷,得出了电荷间的作用力与它们所带电量的乘积成正比的关系,从而得出

$f \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 的结论。这个结论就是现代物理学中的库仑定律。库仑定律发现后,人们

们对库仑定律中两个点电荷之间的作用力与其距离平方反比的精确程度和适用范围

很感兴趣。根据库仑当时的实验条件,他发现 $f \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$, 其中 $\delta \leq 0.02$ 。另一方面,

库仑定律的指数为 2 与光子静止质量为零这一结论是可以互相推导的。也就是说,假如这一指数与 2 产生了即使是很小的偏差,也会动摇物理学大厦的重要基石,因为现有的很多重要理论都是以库仑定律中指数为 2 作为基本前提的。因此,很多物理学家意识到,必须对这一定律的精确性,即对平方反比律做更多的检验,才能确保这一重要定律能正确无误地贡献于其他领域的研究。1971 年, E. R. 威廉斯(E. R. Williams)等人的实验证明 $\delta \leq (2.70 \pm 0.31) \times 10^{-16}$, 这一实验结果有力地支持了库仑定律,让人们不再怀疑它的正确性。半个世纪后,高斯提出用库仑定律来定义电荷量的大小,即如果两个带有等量电荷的物体相距 1 m 受到的静电力是 9.0×10^9 N,则这两个带电物体带的电量为 1 库仑(C)。从此,电量的基本单位定义为库仑。

物体由于摩擦或者其他原因带了电,我们说物体带了电荷。电荷的多少可以用验电器来测量,电荷的单位也确定了。那么,接下来的问题是:物体带的电量是否有极限?如果有,极大值是多少?极小值又是多少?密立根与他的研究生一起对这个问题做出了很好的回答。

1907—1913 年,美国实验物理学家罗伯特·安德鲁·密立根设计了一系列实验。他将两块水平放置的金属板分别与电源正、负极相接,使两块金属板上异种电荷。他首先想到的是用喷雾器喷出水滴,让水滴在平行板中电力和重力作用下运动以测出水滴带的电量。但由于水滴容易蒸发,实验数据很不稳定。他的研究生改进了他的实验,用油滴代替了水滴,让带电油滴进入两平板之间,调节电压使油滴受到的电场力与重力平衡,由此他们获得了许多稳定的实验数据,并通过这些数据计算出油滴所带电荷量。1910 年,密立根对实验进行了第三次改进,使油滴可以在电场力与重力平衡时上上下下地运动,而且在受到照射时还可看到因电量改变而致油滴突然变化,从而求出电荷量的改变值。1913 年,密立根通过对 146 次试验中的 58 次实验数据(他剔出了自己认为不好的数据)比较分析,发现所有油滴带的电量都是一个基本量的整数倍。这个数据非常清楚地表明了基本电荷的存在,他进一步算出了基本电荷的精确值 $(4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10}$ 静库仑[等于 $(1.592 4 \pm 0.001 7) \times 10^{-19}$ 库仑]。这个值与现代国际标准的测量值 $(1.602 176 53 \pm 0.000 000 14) \times 10^{-19}$ 库仑只差百分之一。这是一个惊人的发现,证明研究者从实验中确证了元电荷的存在。这个精确值也结束了关于对电子离散性的争论,确定了电子作为基本粒子

的地位。密立根因为他的关于基本电荷以及光电效应的工作被授予 1923 年的诺贝尔物理学奖。

根据库仑定律,人们明确了电荷与电荷之间相互作用力的大小和方向,但关于电荷与电荷之间的相互作用的性质还不十分清楚。以安培、韦伯、诺埃曼为代表的一批物理学家认为电荷与电荷之间的相互作用是直接的,不需要中介,也不需要任何传递时间。静电力的存在仅仅因为两个电荷都同时存在,如果只有单独一方时,就不存在这种作用能力,或者说这种力就突然在空间消失;当另一电荷再次出现时静电力又突然作用于对方。由于牛顿力学的成功,静电力的这种超距作用观点在物理学中得到广泛传播,而且以超距作用观点发展起来的电动力学在大量实际问题中获得成功,但它难以解释物质的相互作用通过“非物质”的虚空进行瞬时传递,这是这一理论的缺陷。以法拉第为代表的另一派物理学家受到磁力线思想的启发,认为电荷与电荷之间的作用也是近距离接触作用,并进而提出了电力线的思想。1820 年,奥斯特发现了电流的磁效应,即电流能使小磁针偏转,而后安培发现了磁场中电流受力的规律。不久以后,法拉第发现当磁棒插入闭合线圈时,会在线圈中产生电流,自此,人们发现了电和磁有着密不可分的关系。科学家们注意到在电荷之间或者电流间产生作用时,若一方产生了变化,另一方则会马上对这种变化产生反应,即使两者相隔一定距离也是如此。当时的人们并不知道电荷之间的作用是以什么方式传播的。法拉第在晚年第一次提出了电磁力的作用并不仅限于导体与带电体中,而是存在于带电体周围的空间中,也就是我们现在常说的电场,并且尝试用场线形象地描述电场。1851 年,法拉第在他发表的《论磁力线》一文中把磁力线、电力线类比为流体场,首次对场的物理图像做了直观的描述。他指出,场是由力线组成的,许多力线组成一个力管,它们将相反的电荷或者磁极联系起来。力线上任一点的切线方向就是该点场强的方向,力线的疏密程度则表示不同点场强的大小。法拉第在一张纸上撒上铁屑,用磁棒在下面轻轻振动,铁屑就连接成规则的曲线,他以此来证明力线和力管的存在。

法拉第在提出电场这一概念时并没有遇到太多困难,但是这一理论被世人接受的过程却很曲折。

人们最早对电现象的认识是电荷之间存在相互作用,而电荷移去后,相互作用的现象也就随之消失。在当时人们的印象中,电荷之间的作用是完全依附于电荷本身的。因此,在法拉第起初提出电现象是由电场这种特殊物质承载的概念时,人们并没有接受这一理论。法拉第去世后,麦克斯韦提出了相对完整的电磁理论,后又被赫兹所证实。这证明了电磁的作用并不完全依托于附近存在的电荷或磁体,而是可以在距离电荷很远的地方单独存在。人们这才意识到电荷周围的确存在着一种特殊的物质,也就是法拉第所说的电场。电场可以由静止电荷激发,也可以由变化的磁场激发。人们把静止电荷产生的电场称为静电场,把变化磁场激发的电场称为涡旋电场。这一章中主讲静电场,涡旋电场将在电磁感应相关内容中讲述。

二、电荷、库仑定律及电场强度的数学描述及物理解析

1. 点电荷模型

为了研究带电物体的性质及其对周围环境的影响,我们需要先将带电物体本身做一简化。与质点的定义类比,当带电物体本身的几何尺度远远小于考察的空间点与带电体之间的距离时,可将这个带电体视为一个点电荷。明显地,点电荷也是描述带电物体的理想化模型,是一个相对性概念,没有绝对意义上的点电荷。一般来说,当考察的空间点到带电体的距离是带电体本身尺度的 100 倍以上时,就可以将该带电体视为点电荷。

2. 库仑定律

库仑定律:真空中两个点电荷之间的静电相互作用力的方向在两个点电荷的连线上,其大小与这两个点电荷所带的电量成正比,与它们之间距离的平方成反比。库仑定律的数学表达式为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-1)$$

式(1-1)中, k 是比例常数, q_1, q_2 分别是两点电荷的电量的代数值,正电荷取正号,负电荷取负号, r 为两点电荷之间的距离, $\mathbf{e}_r$ 为从其中一个点电荷出发指向另一点电荷的方向单位矢量,如图 1-1 所示。式(1-1)与万有引力表达式 $\mathbf{F}_G =$

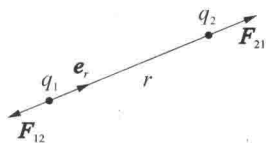


图 1-1

$-G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{e}_r$ 相比,两式中力与距离的关系是一样的,但由

于质量没有正负,万有引力只能有吸引力;而电荷有正负,所以库仑力既可以是引力,也可以是斥力,即同号电荷相斥,异号电荷相吸。另外,为了使推导结果中不含无理数因子 4π ,令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-2)$$

式(1-2)中, $\epsilon_0 = 8.854\,187\,82 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 为真空介电常数,一般近似地取 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。因此式(1-1)可以改写为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-3)$$

值得注意的是,电荷之间的作用是相互的,由式(1-3)可以得出

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (1-4)$$

即电荷与电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。