



袁艳红 主编

COLLEGE PHYSICS

大学物理学

(下册)



清华大学出版社

袁艳红 主编

COLLEGE PHYSICS

大学物理学

(下册)

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书参照了教育部物理基础课程教学指导分委员会制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，涵盖了基本要求中的核心内容。在内容选取上采用压缩经典，简化近代；削枝强干，突出重点；简约理论论证，适度增加应用等方法，以适应不同院校和专业对大学物理的要求。同时考虑到技术应用型院校的特点和实际情况，在保证必要的基本训练的基础上，适度降低了例题和习题的难度。

全书分上、下两册。上册内容包括力学、机械振动、机械波和热学。下册包括电磁学、光学、狭义相对论和量子物理。

本书可作为技术应用型高等院校工科类专业大学物理课程的教材，可作为非物理专业大学物理课程的教材或参考书，也可供文理科相关专业选用和社会读者阅读。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/袁艳红主编.--北京：清华大学出版社，2010.9

ISBN 978-7-302-23009-0

I. ①大… II. ①袁… 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(2010)第 107184 号

责任编辑：邹开颜

责任校对：赵丽敏

责任印制：王秀菊

出版发行：清华大学出版社

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者：清华大学印刷厂

装 订 者：三河市兴旺装订有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：16 插 页：1 字 数：383 千字

版 次：2010 年 9 月第 1 版 印 次：2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数：1~3000

定 价：29.00 元

产品编号：038437-01

物理学是研究物质结构、性质、运动和相互作用基本规律的科学,也是一门与实践紧密结合的科学,是自然科学和技术科学的基础之一。物理学的教学不仅传授本学科的基本知识,更重要的是使学生掌握科学的认识论、方法论,培养学生的思维方法,提高学生的思辨能力。因此,大学物理不仅是一门重要的基础课,也是大学生素质教育的重要内容。这就是为什么目前,非物理的理工类专业均开设大学物理课的缘故。然而要写好满足理工科不同专业的要求而又区别于物理专业的教科书,并非易事。

袁艳红教授主编的《大学物理学》是一本适合技术应用型高等院校非物理专业使用的教材。本书不仅渗透了编者的教学经验,而且还体现了她在教学改革方面的一些创新思路。整套教材较全面地介绍了物理学的基本内容,体现了一定的时代性、应用性。本书注重物理概念阐述,避免复杂的数学推导;内容由浅入深、由易到难、由具体到抽象,图文并茂,文字流畅、并重视趣味性和直观性,通俗易懂,便于自学。全书除大学本科学学生所必需的物理基本知识外,还适当地向学生介绍一些现代物理前沿知识,有利于学生开阔眼界、启迪思维、丰富想象、培养创新能力。此外,对于物理知识在高新技术中的某些应用,如量子信息技术、纳米技术、激光技术、声悬浮技术、磁悬浮技术、全息技术等,结合教学作了一些介绍并留给有兴趣者进一步学习具体技术的“接口”。这有利于培养学生分析问题、解决问题,理论联系实际的能力。本教材内容在深度和广度上,符合教育部规定的有关大学物理教学的基本要求,例题和习题选配得当,难易程度适中,适合技术应用型高等院校工科类各专业用作大学物理课程的教材,也可供其他非物理专业用作大学物理课程的教材或参考书,还可供社会读者阅读。

作为高等教育教学改革和教材建设的一项成果,该书具有一定的创新性。这套“大学物理”教材对高等教育教材的建设作出了贡献,对技术应用型工科院校大学物理教育将会有较大裨益。

作为一位年轻教授,肯花时间和精力编出这样一本教材实属难能可贵,特为之序。

侯 洵

2010年6月16日

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式以及相互作用规律的科学，是人类探索自然奥秘的过程中形成的学科。物理学最初是从对力学运动规律的研究发展起来的，后来又研究热现象、电磁现象、光现象以及辐射的规律。到19世纪末，物理学已经形成了一个完整的体系，被称为经典物理学。在20世纪初的30年里，物理学经历了一场伟大的革命——相对论和量子力学诞生了，从此产生了近代物理学。相对论和量子力学是现代物理学的两大理论支柱，直接促进了现代科学技术的发展。超大规模的集成电路、人工设计的新型材料、激光技术的应用和发展、低温与超导、新能源的开发和应用等，究其根源，无不以现代物理学基本原理为基础。

以经典物理学、近代和现代物理学基础为主要内容的大学物理课程，是高等院校非物理专业学生的一门重要的学习课程。该课程在学生科学素质的培养、科学技术的学习中起着重要的作用。

随着时代的发展，年轻人的兴趣和志向更加多元化，我国高等教育的大众化的步伐，使得人才培养模式发生了重大变化。因此作者和教师的任务就是探索如何在新形势下，教好大学物理这门课，以适应21世纪对高素质人才的科学素质的需要。本书就是为了满足培养技术应用型人才的高等学校对大学物理课程改革发展和实际教学的要求而编写的。以下几点是本书编写的主要思路与特点。

(1) 提高全民族科学文化素质，培养具有一定理论知识和较强实践能力的应用型人才，是应用型人才教育的价值取向。在这样的教育思想指导下，以“基本要求”中的核心内容构成本书的基本框架，同时选取少量的拓展内容作为知识的扩展和延伸，所有拓展内容均冠以“*”号，删去它们并不影响全书的系统性和连贯性。并且选取了一定数量的与教材内容相配合的原理应用的内容和阅读材料，以便使学生了解物理学的基础性、前瞻性，以及物理学与人们生活的密切相关性，增加学生学习的趣味性，拓宽视野和创新意识。

(2) 在内容选取上，一方面，尽可能地现代物理学的认识高度，自上而下审视经典物理学内容；另一方面，现代物理学内容较抽象，涉及的数学深奥、复杂，对于低年级非物理专业学生实施教学有一定的难度，因此在处理这部分内容时，可采用普通物理学的教学方法。本书在注重物理概念准确性的基础上，尽可能避免复杂的数学推证，采用图形图像，在物理概念、物理规律的阐述上力

求运用辩证唯物主义观点,做到由浅入深、由易到难、由具体到抽象、由特殊到一般。文字流畅、通俗易懂、便于自学。

(3) 本书在内容衔接上,避免了与中学物理内容的简单重复,而是在中学物理的基础上深入提高,并增加了许多高等工科大学应有的物理内容。考虑到不同地区、不同专业大学物理教学的情况,并且考虑了中学物理课程改革对大学物理课程教学可能带来的影响,适度地降低了部分内容的起点,希望能较好地与中学物理基础相衔接。

(4) 本书的一个特点是加强例题和习题的基础性、应用性和典型性。有些题目与实践的联系较密切,且物理原理清楚,有较强的实际应用意义和一定的趣味性。并且习题内容和数量选择与教材内容相配合,类型有填空题、选择题和计算题,难度由浅到深,有较好的适用性。

(5) 本书还注意了以现代观点审视传统物理教学内容,根据现代教育思想理念,充分利用各种现代教育技术手段,全面整合文字和数字等资源,构成较为完整的教学资源体系。由纸质教材、纸质辅助教材、电子教案和网络课程等组成立体化系列教材。

全书采用国际(SI)单位制,书后有矢量运算、物理量的名称、符号及单位、常用物理常量表、习题参考答案及参考文献。

本书分为上、下两册。由袁艳红教授主编,陈锐老师统稿。袁艳红老师编写了正文;陈锐老师编写了第5、6、7、8、13、14、15章的习题,并画了相应章节的图;赵华老师编写了第1、2、3、4章的习题,并画了第11、12章的图;金华老师编写了第9、10、11、12章的习题,并画了第9、10章的图;柯磊老师编写了英语的物理名词和部分原理的应用;林星星老师画了第1、2、3、4、7、8章的图。陈锐、赵华、林璠老师对本书进行了校对。

本书由陕西师范大学的苗润才教授和上海电机学院的杨若凡教授担任主审工作,他们在评审时对原稿提出了十分详尽和具体的修改意见。在本书的编写和修改过程中,得到了上海电机学院的孙振武教授和朱泰英教授的帮助和关心。在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者学识和教学经验所限,可能对基本要求理解不深,处理不当,书中缺点和错误在所难免,真诚企盼使用本书的读者批评指正。

编者
2010年8月

第 9 章 静电场	1
9.1 电荷和库仑定律	1
9.1.1 电荷的量子化	1
9.1.2 电荷守恒定律	2
9.1.3 库仑定律	3
9.1.4 静电力叠加原理	4
9.2 电场和电场强度	4
9.2.1 电场	4
9.2.2 电场强度	5
9.2.3 点电荷的电场强度	6
9.2.4 电场强度叠加原理	6
9.2.5 任意带电体(连续带电体)的电场强度	8
原理应用 喷墨打印机	10
9.3 电场强度通量 高斯定理	11
9.3.1 电场线	11
9.3.2 电场强度通量	13
9.3.3 高斯定理	15
9.3.4 高斯定理的应用	16
9.4 静电场的环路定理 电势	20
9.4.1 静电场力是保守力	20
9.4.2 静电场的环路定理	21
9.4.3 电势能 电势和电势差	21
9.4.4 电势的计算	23
9.5 电势与电场强度的关系	26
9.5.1 等势面	26
9.5.2 电势与电场强度的关系	27
原理应用 离子推进器	28
内容提要	29
习题	30

第 10 章 静电场中的导体和电介质	35
10.1 静电场中的导体	35
10.1.1 导体的静电平衡条件	35
10.1.2 静电平衡时导体上电荷的分布	36
10.1.3 静电屏蔽	37
原理应用 静电除尘器	40
10.2 静电场中的电介质	41
10.2.1 电介质对电场的影响 相对电容率	41
10.2.2 电介质的极化	41
10.2.3 电极化强度矢量	42
10.3 电位移 有电介质时的高斯定理	43
10.3.1 有电介质时的高斯定理	43
10.3.2 电场强度、电极化强度和电位移之间的关系	44
10.4 电容 电容器	46
10.4.1 孤立导体的电容	46
10.4.2 电容器的电容	47
10.4.3 电容器的并联和串联	50
10.5 静电场的能量	51
原理应用 心脏除颤器	53
内容提要	53
习题	55
第 11 章 稳恒磁场	60
11.1 恒定电流	60
11.1.1 电流 电流密度	60
11.1.2 恒定电流	62
11.1.3 电动势	62
11.2 磁场 磁感应强度	63
11.2.1 磁的基本现象	63
11.2.2 磁感应强度	64
11.3 毕奥-萨伐尔定律	65
11.3.1 磁场叠加原理	65
11.3.2 毕奥-萨伐尔定律	66
11.3.3 毕奥-萨伐尔定律的应用举例	66
11.3.4 磁矩	69
11.4 磁场的高斯定理	69
11.4.1 磁感应线	69
11.4.2 磁通量	70
11.4.3 磁场的高斯定理及其应用	71

11.5	安培环路定理	72
11.5.1	安培环路定理	72
11.5.2	安培环路定理的应用	73
11.6	磁场对载流导线的作用	75
11.6.1	安培定律	76
11.6.2	磁场对平面载流线圈作用的力矩	78
	原理应用 电力系统中母线所受的安培力	79
11.7	磁场对运动电荷的作用	80
11.7.1	洛伦兹力 带电粒子在均匀磁场中的运动	80
11.7.2	带电粒子在现代电磁场技术中的应用举例	82
11.8	磁场中的磁介质	84
11.8.1	磁介质 磁化强度	84
11.8.2	磁介质中的安培环路定理 磁场强度	86
	原理应用 超导	88
	内容提要	90
	习题	91
第 12 章 电磁感应与电磁场		97
12.1	电磁感应现象及其基本规律	97
12.1.1	电磁感应现象	97
12.1.2	法拉第电磁感应定律	98
12.1.3	楞次定律	99
	原理应用 电吉他	102
12.2	动生电动势和感生电动势	103
12.2.1	动生电动势	103
12.2.2	感生电动势	105
12.2.3	涡电流	107
	原理应用 磁悬浮技术	108
12.3	互感和自感	108
12.3.1	互感现象 互感和互感电动势	109
12.3.2	自感现象 自感和自感电动势	110
12.4	磁场的能量	112
12.4.1	载流长直螺线管的磁能	112
12.4.2	磁场的能量	113
*12.5	麦克斯韦电磁场理论简介	114
12.5.1	位移电流 全电流的安培环路定理	115
12.5.2	涡旋电场	117
12.5.3	麦克斯韦方程的积分形式	117
*12.6	电磁振荡 电磁波	118

12.6.1	电磁波的产生与传播	118
12.6.2	真空中的平面电磁波及其特性	119
12.6.3	真空中电磁波的能量	121
12.6.4	电磁波谱	121
原理应用	核磁共振及其医学成像原理	122
内容提要	124
习题	125
第 13 章	光学	130
* 13.1	几何光学的基本原理	131
13.1.1	光的直线传播定律	131
13.1.2	光的反射和折射定律	131
13.1.3	全反射	132
* 13.2	光在平面和球面上的成像以及薄透镜成像规律	133
13.2.1	光在平面上的反射、折射成像	133
13.2.2	光在球面上的折射和反射成像	134
13.2.3	薄透镜	136
* 13.3	光学仪器	139
13.3.1	照相机	139
13.3.2	显微镜	140
13.3.3	望远镜	141
13.4	相干光	142
13.4.1	光的相干性	142
13.4.2	普通光源的发光机制	143
13.4.3	相干光的获得	143
13.5	杨氏双缝干涉 劳埃德镜	144
13.5.1	杨氏双缝干涉实验	144
13.5.2	劳埃德镜实验	146
13.6	光程 薄膜干涉	147
13.6.1	光程	147
13.6.2	薄膜干涉	149
原理应用	激光干涉仪	152
13.7	光的衍射 单缝衍射	154
13.7.1	光的衍射现象	154
13.7.2	惠更斯-菲涅耳原理	155
13.7.3	单缝衍射	155
13.8	光栅 光栅衍射	158
13.8.1	光栅	158
13.8.2	光栅衍射	159

13.9	光的偏振	161
13.9.1	光的偏振 线偏振光和自然光	162
13.9.2	偏振片 起偏和检偏	163
13.9.3	马吕斯定律	163
13.9.4	反射光和折射光的偏振	164
*13.10	激光简介	166
13.10.1	激光的基本原理	166
13.10.2	氦氖激光器	168
13.10.3	激光的特点及应用	169
	原理应用 全息摄影	170
	内容提要	171
	习题	172
第 14 章	狭义相对论	176
14.1	伽利略变换 牛顿力学相对性原理遇到的困难	177
14.1.1	伽利略相对性原理 伽利略变换	177
14.1.2	经典力学的时空观	179
14.1.3	光速依赖于惯性参考系的选取吗	179
14.2	狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	180
14.2.1	狭义相对论的基本原理	180
14.2.2	洛伦兹变换式	181
*14.2.3	洛伦兹速度变换式	182
14.3	狭义相对论的时空观	184
14.3.1	同时性的相对性	184
14.3.2	时间的延缓	184
14.3.3	长度收缩	186
14.4	狭义相对论动力学基础	187
14.4.1	质量与速度的关系	188
14.4.2	相对论的动量	188
14.4.3	相对论的动能	189
14.4.4	相对论能量 质能关系	190
14.4.5	相对论的动量和能量关系	190
	原理应用 原子核裂变和聚变	192
	原理应用 光伏发电简介	193
	内容提要	195
	习题	196
第 15 章	量子物理	198
15.1	黑体辐射 普朗克能量子假设	199

15.1.1	黑体 黑体辐射	199
15.1.2	黑体辐射的瑞利-金斯公式 经典物理的困难	200
15.1.3	普朗克假设 普朗克黑体辐射公式	201
15.2	光电效应 爱因斯坦方程	202
15.2.1	光电效应的实验规律	202
15.2.2	光的波动说遇到的困难	204
15.2.3	爱因斯坦方程	204
15.2.4	光的波粒二象性	206
15.3	康普顿效应	207
15.4	氢原子的玻尔理论	209
15.4.1	氢原子光谱的规律性	210
15.4.2	氢原子的玻尔理论	211
15.5	德布罗意波 实物粒子的二象性	214
15.5.1	德布罗意假设	214
15.5.2	德布罗意假设的实验验证	215
	原理应用 扫描隧穿显微镜	217
15.6	不确定关系	218
15.7	波函数 薛定谔方程及简单应用	221
15.7.1	波函数及其统计解释	221
15.7.2	薛定谔方程	222
15.7.3	薛定谔方程的应用	223
	原理应用 碳纳米管及其应用	227
	内容提要	231
	习题	232
	附录 G 电磁学、光学和近代物理的量和单位	234
	习题参考答案	236
	参考文献	242

静 电 场

电磁运动是物质运动的又一种基本运动形式。电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一,自然界里的所有变化,几乎都与电和磁相联系。所以,研究电磁运动对于深入认识物质世界是十分重要的。同时,由于电磁学已经渗透到现代科学技术的各个领域,并已成为许多科学和技术的理论基础,因而学习电磁学,掌握电磁运动的基本规律,具有极其重要的意义。

一般来说,运动电荷将同时激发电场和磁场,电场和磁场是相互联系的。但是,在某种情况下,例如当所研究的电荷相对于观察者静止时,电荷在这个静止的参考系中就只激发电场,而无磁场。这个电场就是本章所讨论的静电场。场是物质存在的一种特殊形式,不同于以往的研究对象。

本章的主要内容有:真空中静电场的基本定律——库仑定律,静电场的两条基本定理——高斯定理和环路定理,描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势。

查利·奥古斯丁·库仑(Charles-Augustin de Coulomb 1736—1806年),法国工程师、物理学家。他用扭秤测量静电力和磁力,导出了著名的库仑定律。库仑定律使电磁学的研究从定性进入定量阶段,是电磁学史上一个重要的里程碑。1781年他发现了摩擦力与压力的关系,得出摩擦定律、滚动定律和滑动定律。



9.1 电荷和库仑定律

9.1.1 电荷的量子化

自然界中存在两种电荷(electric charge),即正电荷和负电荷。历史上约定:用丝绸摩擦的玻璃棒带正电,用毛皮摩擦的橡胶棒带负电。同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。

物体所带电荷的多少叫做电量,常用 Q 或 q 表示,在国际单位制中,电荷量的单位是 C(库[仑])。1897 年英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson)发现了电子,验证了电子带负电,并直接测出了电子的电量。后来人们又发现了质子和中子。质子带正电荷,中子不带电。一个质子和一个电子所带电量的绝对值相等。原子的电性是由它所包含的质子数和电子数决定的。在正常情况下,原子核所带的质子数与核外的电子数相等,整个原子呈电中性(electric neutrality)。如果原子失去了一个或多个电子,原子就表现为带正电;如果原子获得了一个或多个电子,原子就表现为带负电。原子失去或获得电子的过程,称为电离。

1913 年,美国物理学家密立根(R. A. Milikan)在他的油滴实验中发现,油滴上的电量总是某一基本电荷的整数倍,证明了微小粒子所带电荷量的变化是不连续的,它只能是基本电荷 e 的整数倍。这种电荷量只能一份一份地取分立的、不连续数值的性质,叫做**电荷的量子化**(charge quantization)。电荷量子化是个实验规律,现有的实验结果已在相当高的精度下验证了电荷的量子化。不过,常见的宏观带电体所带的电荷量远大于电子的电荷量,在一般灵敏度的电学测试仪器中,电荷的量子化是显示不出来的。因此,在分析带电情况时,可以认为电荷是连续变化的。

迄今所知,电子是自然界中存在的最小负电荷,质子是**最小正电荷**。它们的带电量都是**基本电荷 e** ,

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

1964 年,盖尔曼(M. Gell-Mann)等人提出**夸克模型**,即一些粒子是由称为夸克和反夸克的更小粒子组成,每一个夸克带有 $\pm 2e/3$ 或 $\pm e/3$ 电量。在这一模型中,夸克是受到“禁闭”的。迄今为止,尚未在实验中找到自由状态的夸克。现在,分数电荷仍是一个悬而未决的命题。不过好在即使分数电荷存在,仍然不会改变电荷量子化的结论,只不过新的基本电荷量是原来的 $1/3$ 而已。

9.1.2 电荷守恒定律

在正常情况下,物质是由呈电中性的原子组成的,其整体也呈电中性。要使物体带电,可利用摩擦起电、接触起电、静电感应等方法。摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实表明,任何使物体起电的过程或带电体被中和的过程,都是电荷从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分。在这种过程中,电荷既不能消灭,也不能产生,只能使原有的电荷重新分布。由此就可以总结出**电荷守恒定律**(law of conservation of charge):一个孤立系统的总电荷(即系统中所有正、负电荷之代数和)在任何物理过程中始终保持不变。所谓孤立系统,就是指它与外界没有电荷的交换。

在微观过程中,近代科学研究表明电荷守恒定律仍然成立。例如高能光子(γ 射线)和一个重原子相碰时,该光子会转化为一对正负电子(电子对的产生);反之,当一对正负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(电子对的湮灭)。光子不带电,正负电子所带的电等量异号,故在此微观过程中尽管粒子产生或湮灭,但过程前后电荷的代数和仍没有变。

电荷守恒定律就像能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律那样,也是自然界中一条基本的守恒定律,在宏观和微观领域中普遍适用,是物理学中普遍的基本定律之一。

9.1.3 库仑定律

1785年,法国物理学家库仑通过扭秤实验,总结出真空中两个静止的点电荷间相互作用的基本规律,称为真空中的库仑定律,简称库仑定律(Coulomb law)。点电荷是一种理想模型,是指当带电体的形状和大小与它们之间的距离相比能够忽略时,可以将带电体看作是电荷量集中于一个几何点上。因此点电荷是对实际带电体的一种简化和抽象,是一个理想化模型。同力学中的质点模型一样,点电荷可以使电学中问题的研究大为简化。一个带电体能否看成一个点电荷,必须根据具体情况来决定。虽然有时不能把一个带电体看成一个点电荷,但是可以把它看为许多点电荷的集合体,从而能够由点电荷遵从的规律出发,得出我们所寻找的结论。

库仑定律可表述为:在真空中,两个静止点电荷之间的相互作用力的方向沿着它们的连线,同号相斥,异号相吸;作用力的大小与两电荷的电荷量乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。

如图9-1所示,两个点电荷分别为 q_1 和 q_2 ,若以 r 表示 q_2 的位矢,其大小为 $|r|=r$,方向从 q_1 指向 q_2 ,则电荷 q_2 受到 q_1 的作用力 F 为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(\frac{r}{r} \right) = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (9-1)$$

式中, $e_r = r/r$ 是沿 r 方向的单位矢量,它标志着位矢的方向; k 是比例系数,在国际单位制中, $k = 8.9875 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2)/\text{C}^2$,计算时,我们通常取近似值 $k \approx 9 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2)/\text{C}^2$ 。

在电磁学中,我们引入一个新的常量 ϵ_0 来取代 k ,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

常量 ϵ_0 称为真空电容率或真空介电常数。这样,真空中库仑定律便可完整地表示成如下的常用形式,

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (9-2)$$

当两个点电荷 q_1, q_2 是同号电荷,乘积 $q_1 q_2 > 0$, F 的方向沿 e_r 的方向,表示库仑力为斥力;当两个点电荷 q_1, q_2 是异号电荷, $q_1 q_2 < 0$, F 的方向沿 e_r 的反方向,表示库仑力为引力。

需要说明的是,虽然引入常量 ϵ_0 后库仑定律的形式变得复杂了,但是以后我们将会看到,用此推导出的重要电磁学公式中,却不会出现 4π 因子,从而使公式变得简洁。

两个点电荷 q_1 与 q_2 之间的库仑力是一对作用力与反作用力,如果电荷 q_2 受到 q_1 的作用力是 F ,则电荷 q_1 受到 q_2 的作用力是 $-F$ 。

库仑定律是直接从实验总结出来的规律,是静电场理论的基础。

【例题9-1】在氢原子的玻尔模型中,电子在静电力的作用下以一定的半径绕质子转动。设电子圆周运动轨道半径为 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{m}$,试比较它们之间的静电力和万有引力的大小。

解 电子和质子的电荷量和质量分别为: $q_e = -e, m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}, q_p = e, m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。由库仑定律和万有引力定律可得氢原子中的电子和质子的静电力和万有引

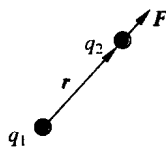


图9-1 库仑力

力的大小分别为

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{N}$$

$$F_g = \frac{Gm_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{N} = 3.7 \times 10^{-47} \text{N}$$

它们大小的比值为

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.2 \times 10^{39}$$

由此可知,在原子内部静电力比万有引力大得多,它们相差 39 个数量级!因此在考虑原子内部的相互作用时,万有引力完全可以忽略不计。

9.1.4 静电力叠加原理

静电力是矢量,满足矢量运算法则。当真空中有两个以上的点电荷时,作用在某一点电荷上的总静电力,等于其他各点电荷单独存在时对该点电荷所施加的静电力的矢量和,这是静电力叠加原理。

如图 9-2 所示,设 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 分别为点电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 单独存在时对点电荷 q 作用的静电力,则电荷 q 所受静电力的合力 F (矢量和)为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_i}{r_i^2} e_{r_i}$$

式中, r_i 为第 i 个点电荷 q_i 到受力电荷 q 的距离, e_{r_i} 为第 i 个点电荷 q_i 指向 q 的单位矢量。

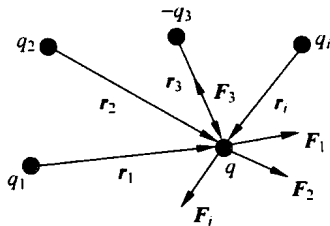


图 9-2 静电力的叠加原理



9.2 电场和电场强度

9.2.1 电场

日常生活中的许多实际例子告诉我们,相互作用必须借助于物质来传递,并且相互作用的传递需要一定的时间,也就是说作用是以一定的速度传递的。两个带电体在真空中并未直接接触,那么它们之间的相互作用是如何实现的呢?对于这个问题,历史上曾有长期的争论。一种观点认为,这类力不需要任何媒介,也不需要时间,就能由一个物体立刻作用到另一个相隔一定距离的物体上去,这种观点叫做“超距作用”观点。另一种观点认为这类力也是通过它们中间的媒介物质传递过去的,只是这种媒介我们看不见,这种媒介物质是充满空间的一种弹性物质,称为“以太”,这种观点叫做“近距作用”观点。直到 19 世纪,人们才从电、磁现象的实践和电磁波的发现中逐渐形成另一种观点:库仑力不是超距作用,电相互作用是通过场以有限速度传播的,充满空间的弹性物质“以太”也不存在。也就是说,任何带电体的周围空间内都存在一种特殊物质,这种特殊物质叫做由该带电体所激发的电场(electric field),当另一个带电体处于该带电体所激发的电场之中时,它就要受到所在处的电场力作用。换句话说,电荷与电荷之间是通过电场这种特殊物质而相互作用的。

例如,两个电荷 q_1 、 q_2 间的相互作用,可以看作是 q_1 作为场源电荷在周围空间激发的电场对电荷 q_2 有力的作用,也可以看作是 q_2 作为场源电荷在周围空间激发的电场对电荷 q_1 有力的作用。

现代科学和实践证明,场是物质存在的一种形式,它与实物一样也具有能量、动量和质量。但是,场是一种特殊的物质,它与我们平常所理解的由分子、原子微粒所构成的物质,在表现的形态上是不相同的。实物和场的不同具体体现在:①实物物质具有大小确定的存在空间,场是弥散在整个空间的;②实物物质具有不可入性,但它的运动形态具有可叠加性;场本身和运动形态都具有可叠加性。

如果带电体相对于观察者所在的惯性参考系(例如地球等)是静止的,那么在这带电体周围存在的电场称为**静电场**(electrostatic field)。

静电场的对外表现:①引入电场中的带电体,都要受到电场所作用的力。②当带电体在电场中移动时,电场所作用的力要对带电体做功。这表明电场具有能量。③电场能对引入电场中的导体产生静电感应,电场也能对引入电场中的电介质产生极化现象。

在这一章中,我们将通过静电场的这些对外表现来研究电场的性质。我们由电场强度和 Gauss 定理来研究电场所作用的力,由电势能和电势的概念来讨论电场所作用的力对带电体做的功,在第 10 章研究导体的静电感应和电介质的极化现象。

9.2.2 电场强度

既然可以把一个电荷引到空间某点,用观察它是否受到电场力的作用来判断该点是否存在电场,那么我们也一定可以根据这个电荷在该点受到的电场力的大小和方向来表征该点电场的状况。

实验表明,在一般情况下,当把电荷 q_0 引入某带电体所产生的电场时,由于电荷 q_0 所产生的电场的作用,引起了带电体上电荷的重新分布,因而带电体在周围所激发的电场情况也发生了改变。可是,如果电荷 q_0 电量很小,它所引起的电场变化也将很小。为此,可利用一个电量很小的正电荷 q_0 (称为试验电荷)来检测电场。试验电荷应是点电荷,以便能细致地反映出电场中各点的性质。

如图 9-3 所示,在电荷 q 形成的电场中 P 点,先后放置一系列量值不同而电性相同的试验电荷,例如, q_0 、 $2q_0$ 、 $3q_0$ 、 \dots , 实验指出,试验电荷受力的方向相同,而大小不同,相应地为 F 、 $2F$ 、 $3F$ 、 \dots 。在同一点 P 上,有

$$\frac{F}{q_0} = \frac{2F}{2q_0} = \frac{3F}{3q_0} = \dots = \text{恒矢量}$$

这表明在电场中的某一个确定点上,若试验电荷的量值改变,它所受的力的大小也改变,但后者与前者之比这个矢量却是确定不变的,亦即其大小和方向是一定的。换句话说,在电场中某一确定点上,尽管我们可以引入量值不同的试验电荷,然而,试验电荷所受的力与其量值之比并不因之而变,它与试验电荷的量值无关。

实验表明,对于电场中不同的点,一般来说矢量 F/q_0 的大小和方向是不同的,但在各点其大小和方向都分别确定。

由此可见, F/q_0 只与激发电场的电荷和电场中各点的位置有关,而与试验电荷 q_0 无

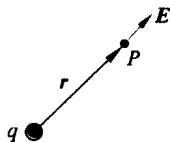


图 9-3 点电荷电场