

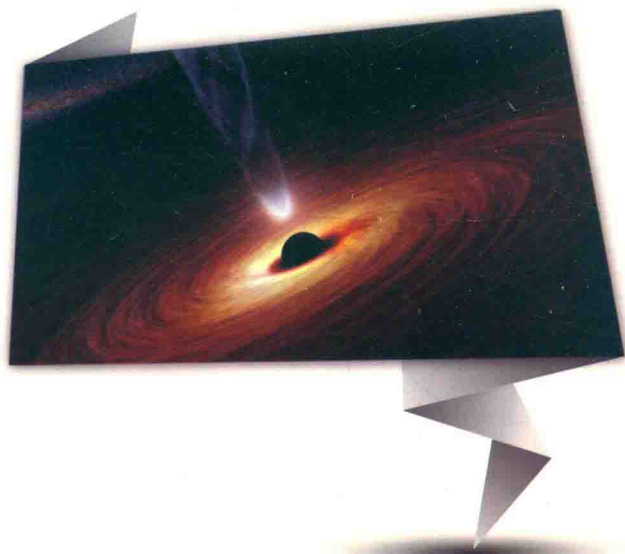


普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

主 编 杨先卫

PHYSICS

大学物理 (下册)



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等院校物

大学物理

(下册)

主 编 杨先卫
副主编 王忠龙 杨种田
黄祥平 杨雄波



北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书是依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新制定的《非物理类理工学科学科大学物理课程教学基本要求》的精神而编写的一套大学物理“互联网+”立体化教材。全书分上、下两册,上册的内容主要包括力学篇、波动光学篇和热学篇;下册的内容主要包括电磁学篇和近代物理学篇。与教材配套的还有《大学物理学习指导》一书,两者既可彼此独立,又可相互配套使用。本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试,为了适应现代网络信息化的发展需求,本书的每章均设置多个二维码,让读者自主扫描获得动画、视频、演示实验等线上资源,从而拓展了大学物理的学习内容。

本书以实现学习兴趣浓厚、学习方式灵活、学习内容丰富、学习效果良好为目标,以问题为导向,激发读者兴趣;重视物理知识的应用,加强理论联系实际;将多媒体资源与纸质教材进行了有效的结合,使得学习方式立体化;注意内容的体系化、系统性和逻辑性,尽力反映新科技发展概况,同时内容的难度较适宜。

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/杨先卫主编.——北京:北京邮电大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5635-4950-4

I. ①大… II. ①杨… 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(2016)第264934号

书 名	大学物理(下册)
主 编	杨先卫
责任编辑	唐咸荣
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	15.5
字 数	403千字
版 次	2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-4950-4

定价:37.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

“广益教育”APP 操作说明


本书为“互联网+”立体化教材，配有助学助教平台——“广益教育”APP。使用前，请按照下列步骤操作使用。

步骤一，先使用智能手机扫描本书封面图标中的二维码（见下图），下载安装免费的“广益教育”APP。提示：下载界面会自动识别安卓或苹果手机。



步骤二，安装成功之后，点击“广益教育”APP 进入使用界面。

步骤三，首次使用请先注册。注册时，注意教师和学生身份的选择，默认是学生身份。

步骤四，注册成功后，使用时，请按照软件提示或宣传视频操作即可。提示：教材中的二维码和带有标志的图片可以直接扫描，显示相关内容。

在使用过程中，如有疑问，请使用下列联系方式与我们沟通！

手机：13811568712

QQ：2181743958

电子邮箱：2181743958@qq.com

前言

本书是依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新制定的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》的指导意见,落实《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》的精神,在总结编者多年从事大学物理课程教学的经验和体会,吸取当前国内外优秀大学物理教材精华,结合网络信息化的发展需求,充分利用现代信息技术的基础上,将传统纸质教材与视频、动画、演示实验等线上资源有机结合,以实现学习兴趣浓厚、学习方式灵活、学习内容丰富、学习效果良好等目标而编写的大学物理“互联网+”立体化教材.本书的主要特点是:

1)重视物理知识的应用,加强理论联系实际,拓展大学物理学习内容

本书在每一章都设置了一个开篇问题,这些问题具有极强的知识性和趣味性,需要读者学习完该章的内容后,才能灵活地运用相关知识点进行分析和求解.以问题为导向可以最大程度激发读者学习物理的浓厚兴趣;另外,在内容中嵌入大量的物理知识在生活和工程实践中的具体应用,让读者在学习物理的过程中找到乐趣,认识到学习物理并不仅仅是枯燥的理论学习 and 研究,认识到为什么学习物理以及物理与其他学科之间的联系.教材中,物理知识的应用不仅有工程技术领域的应用,例如多普勒声呐、低温技术、光栅与相控阵雷达、超级电容器、磁共振成像、磁流体发电机、核电技术等等;也有日常生活层面的应用,例如猫为什么会有九条命、夜间声音为什么会比白天传得远、晕车的罪魁祸首、如何防雷电等等.

2)将多媒体资源与纸质教材进行了有效的结合,学习方式立体化

本书对部分物理概念、物理原理、物理过程及物理知识设置了二维码,让读者自主扫描获得相关文字、动画、视频和演示实验等资源,从而将纸质教材中静态的、抽象的物理知识直观化、具体化、形象化和生动化,让读者认识到物理世界的美妙,从而帮助读者更好地对物理知识进行理解和掌握.另外,教材中对物理学家的介绍也是通过扫描二维码来实现的.

3)加强了大学物理内容的体系化、系统性和逻辑性

本书力求知识点和概念的平滑引入,力求物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于读者阅读和理解;使读者整体把握物理知识的能力受到必要的训练,有利于培养学生严密的逻辑思维能力.

本套书的力学篇由王忠龙、刘高潮、许瑞珍、王习东编写;波动光学



篇由肖焱山、王飞编写;热学篇由杨雄波编写;电磁学篇由杨种田、曹敦厚、朱丽娅编写;近代物理学篇由黄祥平、周银娥编写;二维码资源由杨先卫制作完成;教材的阅读材料和学习指导书的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由杨先卫负责全书的修改和定稿工作。

三峡大学对本套书的出版给予了诸多支持,北京邮电大学出版社的有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢。

编写适合教学改革需要的“互联网+”立体化教材是一种探索,由于编者水平有限、经验不足,本书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2016年9月

目 录

第 12 章 导体和电介质 28

电磁学篇

第 11 章 真空中的静电场 2

11.1	电荷和库仑定律	3
11.1.1	电荷	3
11.1.2	库仑定律	4
11.2	静电场	5
11.2.1	静电场	5
11.2.2	电场强度	6
11.2.3	几种带电体系的场强	8
11.3	静电场的高斯定理及其应用	11
11.3.1	电场线	11
11.3.2	电通量	11
11.3.3	真空中静电场的高斯定理	13
11.4	静电场的环路定理	17
11.4.1	静电场力的功	17
11.4.2	静电场的环路定理	19
11.5	电势	19
11.5.1	电势的定义	19
11.5.2	点电荷的电势	20
11.5.3	电势叠加原理	21
11.5.4	等势面	22
11.5.5	场强与电势 电势梯度	23
	本章提要	25
	习题	26

12.1	导体的静电平衡	29
12.1.1	导体的静电平衡条件	29
12.1.2	静电平衡时导体上的电荷分布	30
12.1.3	静电平衡时导体表面的电荷分布与 面外附近场强的关系	31
12.1.4	静电屏蔽	32
12.2	导体的电容	34
12.2.1	孤立导体的电容	34
12.2.2	电容器的电容	34
12.3	导体中的恒定电流和电场	36
12.3.1	电流 电流密度矢量	36
12.3.2	电流的连续性方程	37
12.3.3	欧姆定律的微分形式	38
12.3.4	电源 电动势	39
12.4	静电场中的电介质	40
12.4.1	电介质的极化	40
12.4.2	电极化强度矢量	41
12.4.3	电介质存在时的高斯定理	43
12.4.4	电位移矢量 D 和电介质中总场强 E 的关系	43
12.4.5	电介质对电容器电容的影响	44
12.5	静电场的能量	45
12.5.1	点电荷系的相互作用能	45
12.5.2	电容器储存的能量	46
	本章提要	47
	习题	48

阅读材料 压电效应与压电体 50

第 13 章 稳恒磁场 53

13.1 磁场 磁感应强度 54

13.1.1 磁现象 54

13.1.2 磁感应强度 55

13.2 毕奥-萨伐尔定律 57

13.2.1 毕奥-萨伐尔定律 57

13.2.2 运动电荷的磁场 58

13.2.3 毕奥-萨伐尔定律的应用 59

13.3 磁场中的高斯定理 63

13.3.1 磁感应线 63

13.3.2 磁通量 63

13.3.3 磁场中的高斯定理 64

13.4 磁场的安培环路定理 65

13.4.1 安培环路定理 65

13.4.2 安培环路定理的应用 67

13.5 磁场对载流导线的作用 69

13.5.1 安培定律 69

13.5.2 两根平行的无限长载流直导线间的
相互作用 71

13.5.3 磁场对载流线圈的作用 72

13.5.4 磁力的功 73

13.6 磁场对运动电荷的作用 74

13.6.1 洛伦兹力 74

13.6.2 带电粒子在均匀磁场中的运动 75

13.6.3 霍尔效应 76

13.7* 回旋加速器 磁聚焦 78

13.7.1 回旋加速器的基本原理 78

13.7.2 磁聚焦 79

13.8 磁介质 81

13.8.1 磁介质的分类 81

13.8.2 抗磁质与顺磁质的磁化 82

13.8.3* 磁化强度 83

13.8.4 磁介质中的高斯定理和
安培环路定理 84

13.8.5 铁磁质 86

本章提要 88

习题 89

阅读材料 等离子体及其磁约束 94

第 14 章 电磁感应 97

14.1 电磁感应定律 98

14.1.1 电磁感应现象 98

14.1.2 楞次定律 99

14.1.3 法拉第电磁感应定律 100

14.2 动生电动势 102

14.3 感生电动势 感生电场 105

14.3.1 感生电动势 105

14.3.2 感生电场 106

14.4 自感应和互感应 108

14.4.1 自感 108

14.4.2 互感 110

14.5 磁场的能量 111

14.5.1 自感磁能 互感磁能 111

14.5.2 磁场能量密度 112

本章提要 113

习题 114

第 15 章 电磁场和电磁波 117

15.1 位移电流 麦克斯韦方程组 118

15.1.1 传导电流和位移电流 118

15.1.2 全电流定律 120

15.1.3 麦克斯韦方程组 121

15.2* 电磁波 122

15.2.1 电磁振荡 赫兹实验 123

15.2.2 平面电磁波	124	16.5.3 能量与动量的关系	161
15.2.3 电磁波谱	125	16.6* 广义相对论简介	161
15.3* 电磁场的能量与动量	126	16.6.1 非惯性系与惯性力	162
15.3.1 电磁场的能量	127	16.6.2 惯性质量和引力质量	162
15.3.2 电磁场的动量	127	16.6.3 广义相对论的基本原理	163
15.3.3 电磁场的物质性	128	16.6.4 广义相对论的实验验证	163
本章提要	128	本章提要	164
习题	129	习题	166
阅读材料 遥感技术	130	阅读材料 宇宙与大爆炸	167

近代物理学篇

第 16 章 相对论 136

16.1 伽利略变换及经典力学时空观	138
16.1.1 伽利略变换	138
16.1.2 经典力学时空观	138
16.2 迈克耳孙-莫雷实验	139
16.2.1 伽利略变换的局限性	139
16.2.2 以太假说	140
16.2.3 迈克耳孙-莫雷实验	141
16.3 狭义相对论的基本原理	
洛伦兹变换	143
16.3.1 狭义相对论的基本原理	143
16.3.2 洛伦兹坐标变换	144
16.3.3 洛伦兹速度变换	147
16.4 狭义相对论的时空观	149
16.4.1 同时的相对性	150
16.4.2 时间膨胀效应	152
16.4.3 长度收缩效应	153
16.4.4 两种时空观的比较	155
16.5 狭义相对论动力学	156
16.5.1 相对论中的质量速率关系	156
16.5.2 相对论中的质能关系	158

第 17 章 量子力学基础 174

17.1 黑体辐射和普朗克的能量子假设	175
17.1.1 黑体辐射	175
17.1.2 普朗克能量子假设	177
17.2 光电效应和爱因斯坦的 光量子理论	178
17.2.1 光电效应	178
17.2.2 爱因斯坦的光量子理论	179
17.2.3 光的波粒二象性	180
17.3 康普顿效应	182
17.3.1 康普顿效应	182
17.3.2 康普顿效应的光量子理论解释	183
17.3.3 光电效应与康普顿效应	186
17.4 玻尔的氢原子理论	187
17.4.1 氢原子光谱的实验规律	187
17.4.2 玻尔的氢原子理论	188
17.4.3 玻尔理论的成功和局限性	192
17.5 粒子的波动性	192
17.5.1 德布罗意波	192
17.5.2 德布罗意波的实验验证	194
17.5.3 德布罗意波的统计解释	195
17.6 不确定关系	196



17.7	波函数和薛定谔方程	198	第 18 章*	新技术的物理基础	224
17.7.1	波函数	199			
17.7.2	薛定谔方程	200	18.1	固体的能带结构及其应用	225
17.8	薛定谔方程在一维定态问题中的应用	204	18.1.1	固体的能带结构	225
17.8.1	一维无限深势阱	204	18.1.2	半导体	226
17.8.2	一维方势垒与隧道效应	207	18.2	激光	228
17.9	量子力学对氢原子的应用	209	18.2.1	激光的形成机理	229
17.9.1	氢原子的定态薛定谔方程	209	18.2.2	粒子数反转	229
17.9.2	能级与波函数	210	18.2.3	光学谐振腔	230
17.10	多电子原子中的电子分布	213	18.2.4	激光的特性及应用	231
17.10.1	电子的自旋	213	18.3	超导	232
17.10.2	多电子原子中的电子分布	214	18.3.1	超导体的主要电磁特性	232
本章提要		217	18.3.2	BCS 理论	234
习题		219	18.3.3	超导材料的探索之路	234
阅读材料 量子通信		220	18.3.4	超导体的应用	236
			习题		237

电磁学篇

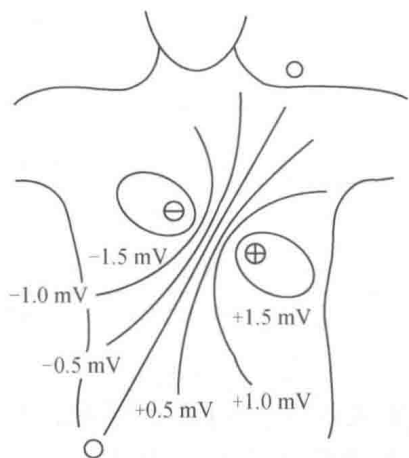
电磁现象是自然界存在的一种普遍现象,涉及现代生活和生产的各个领域.电磁学是研究电磁现象的科学,也是经典物理学的一部分.电磁学主要研究电荷、电流产生电场、磁场的规律,电场和磁场的相互关系,电磁场对电荷、电流的作用以及电磁场对物质的各种效应等,是学习理科、工科以及技术学科的重要基础.

人类对电磁现象的认识要追溯到公元前600年,古希腊和我国古代时期对自然界的电、磁现象都有记载,包括摩擦起电过程.到18世纪,人类对电的科学研究才逐渐发展起来,但在之前的很长一段时间内,人们都认为电和磁是两种独立的作用.直到19世纪,丹麦的自然哲学家奥斯特发现了电流的磁现象,英国物理学家法拉第等发现了电磁感应现象,才使得人们认识到电、磁现象有内在的统一性,并逐步建立起了“场”的观点.19世纪末,英国物理学家麦克斯韦建立起了能够包括库仑定律以来所有电磁学知识的统一理论,预言了电磁波的存在,并在1888年被赫兹的实验所证实.1896年,洛伦兹提出“电子论”,将麦克斯韦方程组应用到微观领域获得成功;1905年,爱因斯坦建立狭义相对论,根据其理论的基本原理可以通过洛伦兹变换从电场得到磁场,“电力”和“磁力”也第一次获得了统一.至此,电磁学已经发展成为经典物理学中相当完善的一个分支.

电磁学的发展也使人们能够更深入地理解自然界的各种电磁现象.首先,物质的电结构是物质的基本组成形式:实物由原子、分子组成,而原子由带正电的原子核和带负电的电子组成.其次,电磁场是物质世界的重要组成部分,场是物质存在的形式之一.第三,电磁作用是物质的基本相互作用之一,宏观范围内的各种接触力,如摩擦力、弹性力以及黏滞力等本质上都是原子间电磁作用的结果.

电磁学的发展也使得与电磁有关的相关技术得到了飞速发展.电磁技术在能源的合理开发、输送和使用方面起着重要作用,在实现机电控制和自动化,在信息的传递以及利用各种电效应实现非电量的电测方面也具有重要意义,在电子计算机的性能改进和广泛使用方面也是必不可少的.

本篇首先介绍静止电荷产生的静电场和稳恒电流产生的稳恒磁场的基本性质,再介绍电磁相互激发和作用的基本规律,最后介绍麦克斯韦电磁场理论和电磁波的基本知识.



心脏每收缩和舒张一次构成一个心动周期. 在每个心动周期, 人体体表电位将发生周期性的变化, 故在医学上可利用心电图机从体表引出多种形式的电位变化曲线(称为心电图). 上图是人体体表某一瞬时的电位分布图, 你能用所学的物理知识分析心动周期中体表电位变化的现象吗?

第 11 章

真空中的静电场

任何电荷都会在其周围激发电场, 相对于观察者静止的电荷所产生的电场称为静电场. 静电场是矢量场, 是研究电磁学的基础. 本章研究真空中的静电场, 主要内容包括以库仑定律为基础的场强叠加原理及其应用, 描述静电场基本特征的高斯定理和环路定理及其应用.

11.1 电荷和库仑定律

11.1.1 电荷

电荷是物体所带正电或负电的统称,是物质的一种基本属性.人类认识电现象开始于摩擦起电,比如,毛皮摩擦过的橡胶棒、丝绸摩擦过的玻璃棒可以吸引纸屑、羽毛等轻小物体,这种现象的产生就是因为橡胶棒、玻璃棒带上了电荷.这一现象在现代生活和工业中仍能找到,比如在静电复印机和激光打印机中,带上静电荷的纸张可以吸附细微的墨粉;带有较强静电的陶瓷片还能用作静电吸盘,吸住大面积的晶圆(硅片).

物体所带电荷的多少称为电量,用 q 或 Q 表示,在国际单位制中,其单位为库,符号是 C. 我们首先来了解一下电荷的基本性质.

1. 电荷的种类

实验表明,自然界的电荷分为两种类型:正电荷和负电荷.而且同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引.根据现代物理学关于物质结构的理论,我们知道原子是由原子核和电子所构成的.将电子束缚在原子核周围的力是电磁相互作用力.我们规定,电子是带负电荷的粒子,而原子核中的质子是带正电荷的粒子.在正常情况下,物体的任何一部分所含的电子数目和质子的数目相等,所以对外不表现电性,称为电中性.而宏观物体失去电子会带正电(正电荷),物体获得额外的电子将带负电(负电荷).

2. 电荷的量子性和相对论不变性

自然界中,任何带电体的电量都是一个基本单元的整数倍,也就是说,存在着一个最小的电荷基本单元 e ,任何带电体所带的电量为 $Q = ne$,其中 n 是整数, e 是电荷量的最小单位.密立根油滴实验表明,这个值就等于电子或质子所带电量的绝对值,即 $e = 1.602\ 189\ 246 \times 10^{-19}$ C.

电荷的这种只能取离散的、不连续的量值的性质,称为电荷的量子化.由于 e 的量值较小,在宏观现象中往往涉及大量的电荷及其运动,因此不容易观察到电荷的量子性.所以,我们常常将电荷 Q 看成是可以连续变化的物理量,同时认为它在带电体上的分布也是连续的.

近代物理认为,组成物质的基本粒子由若干种夸克或反夸克组



库仑



密立根





成,夸克带有分数电荷,其电量是电子电量的 $\pm 1/3$ 、 $\pm 2/3$,但实验中尚未发现分数电荷.要说明的是,分数电荷并不改变电荷的量子性这一基本性质.

实验表明,电荷带电量的多少与运动状态无关,即在不同的参考系内观察,带电粒子的电量保持不变,这就是电荷的相对论不变性.这个结论告诉我们,不同的参照系对同一个电荷电量的描述是完全一样的.

3. 电荷守恒定律

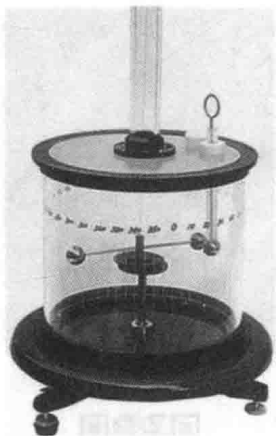
大量实验表明,在孤立系统内,无论发生怎样的物理过程(如摩擦起电,静电感应等),该系统电量的代数和保持不变,这就是**电荷守恒定律**.电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律.它不仅适用于宏观过程,也适用于微观过程.例如,在各种化学反应中,反应前和反应后的电荷代数和保持不变;在各种核反应过程中,反应前和反应后的电荷代数和也是相等的.在微观物理过程中,存在正负电子湮灭的现象,这一过程中,系统的电荷代数和并没有变化,因此也不违背电荷守恒规律.

在任何使宏观物体带电的过程(比如摩擦起电)中并不产生电荷,只是将原来的电荷部分分离开,分别聚集在物体的不同位置,或使一种符号的电荷从一物体迁移到另一物体.整个系统内的总电荷数保持不变.

11.1.2 库仑定律

带电体之间的相互作用十分复杂,它不仅与带电体所带的电量、体积大小、形状以及带电体之间的相对位置有关,而且还与带电体的电荷分布以及周围介质的性质有关.在某些实际情况中,我们可以将带电体进行简化处理.点电荷就是抽象出来的一个理想模型,它是一个没有形状和大小而只带有电荷的物体,类似于力学中的质点模型.当一个带电体本身的线度比所研究的问题中涉及的距离小很多时,该带电体的形状对所讨论的问题没有影响或其影响可以忽略,该带电体就可以看作一个带电的点,即点电荷.要说明的是,点电荷是一个相对的概念,至于带电体的线度比相关的距离小多少时它才能当作点电荷,要看问题所要求的精度而定.比如在宏观意义上讨论电子、质子等带电粒子时,完全可以把它们视为点电荷.

1785年,法国物理学家库仑利用扭秤实验直接测定了两个带电球体之间相互作用的静电力(库仑力).在其实验的基础上,库仑总结出了两个点电荷之间相互作用的规律,即库仑定律.它可以表述为:在真空中,两个静止点电荷之间相互作用力的大小与它们电荷量的乘积成正比,与它们之间的距离平方成反比;作用力的方



库仑扭秤



向沿着两点电荷的连线, 同号电荷相互排斥, 异号电荷相互吸引.

其数学表达式为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \boldsymbol{r} \quad (11.1)$$

式中 q_1, q_2 为两点电荷所带电量, r 为两点电荷的距离, \boldsymbol{r} 为施力电荷指向受力电荷的位置矢量, ϵ_0 称为真空中的介电常数或真空电容率, 其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

关于库仑力, 有以下几点需要说明.

① 库仑力是两个点电荷之间的相互作用, 存在作用力与反作用力, 因此, 库仑力满足牛顿第三定律.

② 实验证明, 在空气中时, 两个点电荷之间的相互作用力与真空中的静电力相差极小, 库仑定律可以适用.

③ 库仑力的作用距离可在 $10^{-16} \sim 10^7 \text{ m}$ 范围. 近代物理研究表明, 原子、分子、固体、液体的相互作用(包括接触、摩擦、化学键、化学反应等)的微观本质都与电磁相互作用有关, 而且主要是库仑力.

此外, 两个点电荷之间的库仑力不会因第三个静电荷存在而改变. 当空间中有两个以上的点电荷存在时, 作用在每一个点电荷上的总库仑力等于其他各个点电荷单独存在时对该电荷的库仑力的矢量和, 即库仑力满足叠加原理.

11.2 静 电 场

11.2.1 静电场

库仑给出了两个静止点电荷之间的相互作用力的规律, 但是并没有说明这种静电力是如何传递的. 历史上最初的一种观点认为, 电荷之间的静电力是一个电荷直接作用到另一个电荷上, 不需要任何媒介, 也不需要时间的作用, 即所谓超距作用, 表示为

$$\text{电荷} \Leftrightarrow \text{电荷}$$

这种观点难以解释比如涉及运动电荷的许多实验现象. 另一种观点认为, 任何电荷都在自己的周围产生电场, 电荷间的相互作用是通过电场来传递的, 其方式为

$$\text{电荷} \Leftrightarrow \boxed{\text{电场}} \Leftrightarrow \text{电荷}$$

两个电荷之间的相互作用本质上是一个电荷的电场作用在另一个电荷上的电场力. 科学的发展证明了场的观点是正确的. 电场



是一种客观存在的物质形态,和一切实物粒子一样,它也具有能量、动量等属性.如果带电体相对于观察者来说是静止的,那么在它周围产生的电场就叫静电场.静电场最基本的性质就是对处于其中的电荷有力的作用.

场概念的引入在电磁学发展史上起着重要的作用,在现代物理学中,关于场的物质形态的研究也占有重要地位.通过本课程的学习,我们将会不断加深对场的认识,并逐步认识电磁场的物质性.

11.2.2 电场强度

1. 电场强度

若空间有一不变的静止带电体,则在带电体的周围存在着由它产生的静电场,为了定量描述静电场,我们有必要定义一个有效的物理量.利用静电场最基本的性质,可将一电量为 q_0 的试验电荷引入电场中,测量电荷的受力情况从而推知不同空间场点的电场性质.试验电荷是指这样一种电荷,它所带的电量必须足够小,以免由于它的引入对原有的电场产生影响;而且其几何线度也必须足够小,可以看作点电荷.实验表明,在给定的场点处,试验电荷 q_0 所受到的电场力 \boldsymbol{F} 与 q_0 之比为一常矢量,与 q_0 大小无关;不同的场点,比值不同.由此可见,比值 \boldsymbol{F}/q_0 与试验电荷无关,与空间场点的位置有关,即与电场本身的空间分布有关.我们定义这个物理量为电场强度,简称场强,用 \boldsymbol{E} 表示,即

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \quad (11.2)$$

这表明,电场中某点电场强度的大小,等于单位试验电荷所受的电场力,其方向与正的试验电荷受力方向相同.在国际单位制中,电场强度的单位是牛/库($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),也可以用伏/米($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$).

一般说来, \boldsymbol{E} 是空间坐标的函数,因此,我们对 \boldsymbol{E} 的研究通常就是给出 \boldsymbol{E} 的分布.若 \boldsymbol{E} 的大小、方向均与空间坐标无关,这种电场称为均匀电场(或称匀强电场).

2. 点电荷的电场

从库仑定律出发,我们很容易可以求得真空中点电荷 q 所激发的静电场.若将电量为 q_0 的试验电荷置于电场中的 P 点,由库仑定律知,试验电荷 q_0 受到的电场力为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^3} \boldsymbol{r}$$

由电场强度的定义可得 P 点处的电场强度为

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \boldsymbol{r} \quad (11.3)$$

由此可见,当 $q > 0$ 时, \boldsymbol{E} 与 \boldsymbol{r} 的方向相同;当 $q < 0$ 时, \boldsymbol{E} 与 \boldsymbol{r} 的方向

相反. 场强 \mathbf{E} 在空间呈球对称分布: 在以点电荷 q 为球心, r 为半径的球面上, 各点的场强大小相等, 方向与球面垂直.

3. 场强叠加原理

当空间同时存在若干点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 时, 把试验电荷 q_0 放在空间中任一点 P 处, 由库仑力的叠加原理知, q_0 的受力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_i + \dots + \mathbf{F}_n \quad (11.4)$$

式中, \mathbf{F}_i 代表 q_i 单独存在时所产生的静电场施于试验电荷 q_0 的静电力. 两边除以 q_0 得

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (11.5)$$

$$\text{即} \quad \mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i \quad (11.6)$$

式中, \mathbf{E}_i 表示 q_i 单独存在时在 P 点所产生的场强. (11.6) 式表明, n 个点电荷在空间某点产生的电场强度等于每个点电荷单独存在时在该点所产生的电场强度的矢量和, 这就是场强叠加原理, 是静电场的一条基本原理.

对于电荷连续分布的带电体产生的场强, 将带电体上的电荷划分成许多非常小的可看成点电荷的电荷元 dq , 设其中任一电荷元 dq 到点 P 的位矢为 \mathbf{r} , 距离为 r , 则该电荷元在 P 点产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.7)$$

由于电荷在带电体上连续分布, 因此带电体在 P 点处产生的场强为

$$\mathbf{E} = \int_Q d\mathbf{E} = \int_Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.8)$$

式中 \int_Q 表示对整个带电体求积分, 通常称为对源点的积分. 对于不同的电荷元 dq , 其 \mathbf{r} 的大小和方向都不一样, 因此积分时需要统一变量. 电荷均匀分布时, 通常我们将 dq 用长度单位和相应密度值表示出来, 具体情况根据电荷分布而定. 对于线分布, 取 $dq = \lambda dl$ (λ 为线密度, dl 为线电荷的线元长度); 对于面分布, 取 $dq = \sigma dS$ (σ 为面电荷密度, dS 为面积元的面积); 对于体分布, 取 $dq = \rho dV$ (ρ 为体电荷密度, dV 为体积元的体积).

注意到(11.8)式中 $d\mathbf{E}$ 是矢量, 积分也就是对无穷多的矢量 $d\mathbf{E}$ 进行叠加. 具体计算时须将 $d\mathbf{E}$ 分解到指定坐标轴上, 例如, 在直角坐标系中, $d\mathbf{E}$ 的三个分量为 dE_x 、 dE_y 、 dE_z , 分别求出 \mathbf{E} 的坐标分量:

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z$$

则 $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$.