



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理教程

(第三版)

下册

贾瑞皋 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理教程

(第三版)

下册

贾瑞皋 主 编

贾瑞皋 李元成
徐 军 张 军 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第二版的基础上参照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新制定的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》(正式报告稿)修订的。本次修订保留了新教学基本要求确定的全部核心内容(A类内容),选择了相当数量的扩展内容(B类内容)和关于高新技术及学科前沿发展的内容。本书的突出特点是:建立了大学物理力学部分的新体系;综合素质培养与教学内容相结合;解决了一些大学物理教材中以前没有解决和没有解决好的问题;采用科技论文通常的写法。

本书分上、下两册,上册包括力学、狭义相对论、振动与波动、波动光学、热物理学,下册包括电磁学和量子物理。与之配套的有电子教案和习题解答。本书可作为理工学科非物理类专业大学物理课程的教材或参考书,也可作为成人教育或远程教育师生及中学教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程.下册/贾瑞皋主编. —3版. —北京:科学出版社,2009
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-03-025283-8

I. 大… II. 贾… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 145507 号

责任编辑:昌盛 窦京涛 杨 然 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

陈海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

*

1994 年 1 月中国石油大学出版社第一版

1998 年 12 月中国石油大学出版社第二版

2009 年 8 月第 三 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 8 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—9 000 字数:443 000

定价:27.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

目 录

第十章 真空中的静电场..... 1	
一、电磁理论的建立和发展	一、导体的静电平衡条件
二、电磁学的理论框架	二、导体壳和静电屏蔽
三、经典电磁学理论的局限性	§ 11.2 静电场中的电介质 53
§ 10.1 电荷 库仑定律..... 3	一、电介质的极化
一、电荷及其量子化	二、极化强度矢量
二、电荷守恒定律	三、电介质的极化规律
三、库仑定律	四、电位移矢量 有电介质时的高斯定理
四、静电力的叠加原理	五、电介质的性质方程
§ 10.2 静电场 电场强度..... 9	六、电介质的击穿
一、电场	七、铁电体 压电效应
二、电场强度	§ 11.3 电容器的电容 65
三、点电荷的场强公式	一、孤立导体的电容
四、电场强度的叠加原理	二、电容器
五、电荷连续分布的带电体产生的电场强度	三、电容的计算
六、电场线	四、电容器的联接
七、带电粒子在电场中的运动	五、电容式传感器及其应用
§ 10.3 高斯定理 16	§ 11.4 电场的能量 69
一、 E 通量	一、静电场的能量
二、高斯定理	二、电荷与外场的相互作用能
三、高斯定理的应用举例	本章小结 72
§ 10.4 电势 23	习题十一 73
一、静电场的环路定理	第十二章 恒定电流 77
二、电势差 电势	§ 12.1 恒定电流条件 77
三、电势叠加原理	一、电流密度矢量
四、电势参考点的选取原则	二、电流的连续性方程
五、电场强度与电势的微分关系	三、欧姆定律的微分形式
六、库仑平方反比律及其重要意义	四、焦耳定律的微分形式
本章小结 39	五、恒定电流条件
习题十 41	六、静电平衡过程的弛豫时间
第十一章 静电场中的导体和电介质 ... 46	§ 12.2 电动势 恒定电路 83
§ 11.1 静电场中的导体 46	一、电动势
	二、简单电路的计算

* 三、复杂电路的计算		二、磁化强度与磁化电流的关系	
本章小结	89	三、有磁介质时磁场的基本规律	
习题十二	89	§ 14.2 磁介质的性质方程	141
第十三章 恒定磁场	91	§ 14.3 铁磁质	144
§ 13.1 磁场 磁感应强度	91	一、铁磁质的磁化规律	
一、磁现象 磁场		二、铁磁质的分类	
二、磁感应强度矢量		三、磁畴	
三、磁感应线		本章小结	148
四、洛伦兹力		习题十四	149
五、带电粒子在均匀磁场中的运动		第十五章 电磁感应 电磁场理论	151
* 六、非均匀磁场的磁约束		§ 15.1 电磁感应定律	151
七、地球的磁场		一、电磁感应现象的发现	
八、霍尔效应		二、楞次定律	
§ 13.2 电流的磁场	98	三、法拉第电磁感应定律	
一、毕奥-萨伐尔定律		四、公式 $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ 中负号存在的相对性和必要性	
二、毕-萨定律的应用		五、自然规律表示方法的选取	
三、匀速运动电荷的电磁场		§ 15.2 动生电动势和感生电动势	156
§ 13.3 磁场的高斯定理和安培环路定理	107	一、动生电动势	
一、磁场的高斯定理		二、动生电动势对应的非静电力	
二、安培环路定理		三、感生电动势和感应电场	
§ 13.4 磁场对载流导体的作用	115	四、变化磁场的无源性的证明	
一、安培定律		五、电场的环流	
二、磁场对平面载流线圈的作用		六、电子感应加速器的原理	
§ 13.5 对称性原理及其在电磁学中的应用	122	§ 15.3 互感和自感	164
一、对称性		一、互感	
二、对称变换		二、自感	
三、因果关系 对称性原理		三、互感与自感的关系	
四、对称性原理的应用		§ 15.4 磁场的能量	168
五、关于高斯定理和安培环路定理		一、磁场的能量	
六、对称性原理是更基本的规律		二、互感磁能	
本章小结	130	§ 15.5 位移电流 麦克斯韦电磁理论	172
习题十三	131	一、位移电流	
第十四章 恒定磁场中的磁介质	135	二、位移电流密度中的 $\frac{\partial p}{\partial t}$ 是极化电流密度	
§ 14.1 磁介质的磁化	135		
一、分子电流 磁化强度			

三、麦克斯韦方程组		四、力学量用算符表示	
本章小结·····	178	五、薛定谔方程的简单应用	
习题十五·····	179	六、扫描隧道显微镜	
第十六章 量子物理基础 ·····	183	§ 16.7 氢原子·····	212
一、19 世纪末的三大发现		一、波函数的方位角部分 $\Phi(\varphi)$	
二、量子物理学的创立和发展		二、波函数的极角部分 $\Theta(\theta)$	
§ 16.1 黑体辐射 普朗克量子假说		三、波函数的径向部分 $R(r)$	
·····	186	四、电子的波函数	
一、基尔霍夫定律		五、电子的概率密度分布	
二、黑体辐射		六、电子云图	
三、经典物理的困难 普朗克量子假说		§ 16.8 电子的自旋 四个量子数	
§ 16.2 光电效应 爱因斯坦光子理论		·····	218
·····	189	一、施特恩-盖拉赫实验	
一、光电效应及其实验规律		二、电子的自旋	
二、经典物理的困难		三、原子中电子的壳层结构	
三、爱因斯坦光子理论		本章小结·····	223
四、光电效应的应用		习题十六·····	225
§ 16.3 康普顿效应 光的波粒二象性		第十七章 固体物理的量子理论 激光	
·····	192	·····	227
一、康普顿效应		§ 17.1 晶体的结构和能带·····	228
二、光的波粒二象性		一、晶体的结构	
§ 16.4 玻尔的氢原子理论·····	194	二、周期性势场与电子的共有化	
一、氢原子光谱的规律		三、能带的形成和能带结构	
二、原子的核式结构与经典物理学的矛盾		四、导体、半导体和绝缘体的能带结构	
三、玻尔理论的基本假设		§ 17.2 半导体和半导体技术·····	231
四、轨道半径量子化		一、本征半导体和杂质半导体	
五、能量量子化		二、半导体的光学性质	
六、氢原子光谱的波数公式		三、半导体器件原理	
§ 16.5 实物粒子的波粒二象性·····	199	§ 17.3 激光·····	236
一、旧量子论的缺陷		一、受激吸收	
二、德布罗意假设		二、受激辐射	
三、波函数的统计诠释		三、自发辐射	
四、不确定关系		四、受激吸收、受激辐射和自发辐射的关系	
§ 16.6 薛定谔方程·····	205	五、粒子数反转和光放大	
一、薛定谔方程的提出		六、光振荡的阈值条件	
二、一维粒子的薛定谔方程		七、激光器	
三、三维情况下的薛定谔方程		本章小结·····	245

习题十七·····	247	一、射线的生物效应	
第十八章 原子核物理和粒子物理简介		二、辐射剂量	
·····	248	三、辐射的防护	
§ 18.1 原子核的基本性质·····	248	四、放射性同位素的应用	
一、原子核的成分、质量和电荷		§ 18.5 粒子物理简介·····	262
二、原子核的大小与密度		一、粒子发现简况	
三、原子核的自旋与磁矩		二、粒子的相互作用	
§ 18.2 原子核的结合能 核力和核模型		三、粒子的分类	
·····	250	四、守恒定律	
一、原子核的质量亏损		五、强子结构的“夸克”模型	
二、原子核的结合能		六、粒子物理的标准模型	
三、核力和核模型		§ 18.6 宇宙学简介·····	270
四、核反应过程中的守恒定律		一、宇宙的结构	
五、重核裂变及其应用		二、哈勃定律 宇宙膨胀	
六、轻核的聚变及其应用		三、宇宙学的标准模型	
§ 18.3 原子核的衰变·····	257	四、恒星的演化	
一、天然放射性现象		五、宇宙中的暗物质和暗能量	
二、原子核的衰变规律		本章小结·····	275
三、放射性衰变规律的应用		习题十八·····	277
§ 18.4 射线对人体的影响及其防护		习题答案·····	279
·····	260	参考文献·····	284

第十章 真空中的静电场

一、电磁理论的建立和发展

人类很早就对静电现象和静磁现象有了一定的认识. 公元 3 世纪, 晋朝张华的《博物志》中有梳头或脱衣服时产生火花和响声的记载, 这是人类关于摩擦起电的早期纪录. 司南(图 10-1)是用天然磁石制成的, 样子像一把汤勺, 圆底, 可以放在平滑的“地盘”上并保持平衡, 且可以自由旋转. 当它静止的时候, 勺柄就会指向南方, 因此古人称它为“司南”. 战国时期的著作《韩非子》中就有: “先王立司南以端朝夕.” “端朝夕”就是正四方、定方位的意思. 这是人类关于磁现象及应用的早期纪录.

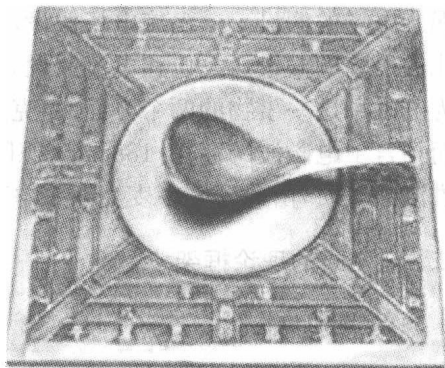


图 10-1 司南

16 世纪起人类才开始对电、磁现象进行系统研究. 1600 年, 英国医生吉尔伯特发表了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》. 1705 年, 米切尔提出磁极之间的相互作用力服从平方反比定律.

由于没有恰当的方法产生稳定的静电, 所以对电现象的研究比对磁现象的研究困难得多. 1772 年, 英国科学家卡文迪许(Cavendish)把电力与万有引力类比, 猜测电荷之间的相互作用服从平方反比定律, 并做了相应的理论分析和实验. 可惜, 他没有发表自己的实验结果! 1785 年, 法国科学家库仑(Coulomb)公布了他用扭秤实验得到的电力的平方反比定律, 使电学和磁学研究进入定量研究阶段! 应当指出, 库仑的实验结果远不如卡文迪许的实验结果精确.

尽管大多数科学家认为: 没有任何理由认为电与磁之间存在任何直接的联系, 但是, 也有一些科学家相信电与磁之间存在着联系. 丹麦物理学家奥斯特(Oersted)就是其中之一, 他努力寻找电与磁之间的联系. 1820 年 7 月 21 日, 奥斯特向科学界宣布, 他发现了电流的磁效应. 这一重大发现第一次揭示了电与磁的联系, 突破了长期以来认为电与磁互不相干的观念, 开创了电磁学研究的新纪元, 电磁学作为统一的科学从此宣告诞生. 电流磁效应的发现为电磁学研究的发展带来一个飞速发展的辉煌时期, 对科学技术的发展起了难以估量的作用.

奥斯特发现电流的磁效应后, 很快法国科学家安培(Ampère)发现了电流元之间相互作用的规律——安培定律, 并且提出磁现象的本质是电流、是电荷的定向运动产生的. 在拉普拉斯的帮助下, 毕奥(Boit)和萨伐尔(Savart)发现了电流元产生磁场的规律——毕奥-萨伐尔定律.

奥斯特发现电流的磁效应后, 人们就提出电流磁效应的逆效应是什么? 是否存在这种逆效应? 如何寻找这种逆效应? 1831 年, 英国科学家法拉第(Faraday)发现了电磁感应

现象.

电荷之间有相互作用,电流之间有相互作用,电流与运动电荷及磁极之间有相互作用,这些相互作用的机制是什么?或者,电磁相互作用的机制是什么?这是一个古老的问题.在揭示万有引力、电力、磁力等非接触物体之间的相互作用力的机制时,曾提出过超距作用和近距作用两种对立的观点.这两种观点长期争论不休,莫衷一是.在大多数科学家主张超距作用的情况下,法拉第坚持相信近距作用观点,认为电磁相互作用需要介质,这种介质就是场.麦克斯韦继承了法拉第的场的观点,并用场的观点研究电磁学,提出变化的磁场能产生涡旋电场的假设——涡旋电场假设,从而解释了电磁感应现象,进而提出变化的电场产生变化的磁场的假设——位移电流假设,并用一组方程表示电磁场的规律.至此,电场和磁场成为电磁场这一事物的两个方面.麦克斯韦根据他得到的方程组推导出电磁场的波动方程,从而预言了电磁波的存在.1888年,德国科学家赫兹用实验证明了电磁波的存在,并测定了电磁波的性质,由此证实了麦克斯韦电磁理论的正确性.

二、电磁学的理论框架

1. 场的概念

电磁学的研究对象是电磁场.场有两种不同的概念:一种是数学场;另一种是物理场.

(1) 数学场是指在空间的每一点都对应某个物理量的确定值,这个空间就称为该物理量的场.如果这个物理量是矢量,则称为矢量场,例如速度场等.如果这个物理量是标量,则称为标量场,例如温度场、大气压力场等.如果物理量可表示为空间位置的函数,那么该物理量就是场.如果物理量不随时间变化,则称为稳恒场或恒定场;随时间变化的场称为非稳恒场或交变场.数学场是为了研究方便才引入的一个概念.

(2) 物理场是传递相互作用的介质.物理场也称为相互作用场.物理场具有物质的属性,物理场有质量、能量和动量等.实物物质和场物质是物质存在的两种基本形态.场物质存在于整个空间,如电场、磁场、引力场、核力场等.任何相互作用都是依靠相应的场来实现的.场物质和实物物质的重要不同是:场物质具有空间可入性,而实物物质具有空间不可入性.

场的概念的提出为电磁学(相互作用)研究指出了正确方向,使电磁学研究得到迅速发展.场的概念在物理学的其他领域有非常广泛和非常重要的应用.场是物理学中最重要的基本概念之一.

根据量子场论的观点,场和实物粒子有不可分割的关系,即一切粒子都可以看作相应的物理场的最小单位(量子).光子是电磁场的量子,电子是电子场的量子,引力子是引力场的量子.

对大学生而言,场的概念是生疏的.研究场要应用场论的数学知识,场论的数学知识也是生疏的.这是学习电磁学感到困难的主要原因.在大学物理的电磁学部分,场论的数学知识用得还不是太多,因此,牢固地掌握场的概念是学好电磁学的关键.

2. 电磁学的理论框架

任何一种理论都要首先根据研究对象的特征和性质定义适当的概念,根据实验规律进行归纳,应用适当的数学方法进行演绎推理,从而建立理论.理论对未知进行预言,应用实验

证实预言的正确. 这就是建立理论的基本过程.

电磁学的研究对象——场, 不同于经典力学的研究对象——质点或质点系, 也不同于热物理学的研究对象——热力学系统. 它们的特征、性质都不相同, 所以定义的概念、研究方法也不相同.

静止电荷是产生静电场的源, 静电场有对其中的电荷产生力的作用的性质, 为描述这一性质, 定义了电场强度的概念. 电场力移动电荷时要做功, 为了描述这一性质, 定义了电势的概念. 电场强度和电势分别是矢量场和标量场. 所以可以看出, 电荷产生电场强度和电势的规律、电场对电荷的作用以及带电粒子在电场中的运动构成了静电学的主要研究内容. 恒定电流是产生恒定磁场的源. 恒定磁场对电流产生作用. 电流的本质是电荷的定向运动, 所以, 电流、运动电荷产生磁场的规律, 磁场对电流、运动电荷的作用的规律构成恒定磁场的基本内容. 电磁感应是实验发现的电和磁之间的另一种联系, 麦克斯韦涡旋电场假设和位移电流假设给出的是电场和磁场之间密不可分的关系, 麦克斯韦提出了电磁场的概念并建立了电磁场运动的基本理论——麦克斯韦方程组. 根据麦克斯韦方程组预言了电磁波的存在并得到实验验证. 这就是经典电磁理论的基本框架.

三、经典电磁学理论的局限性

经典电磁学理论的建立是物理学发展史上的重要里程碑, 是可以和牛顿经典力学相媲美的巨大成就, 对生产力的发展, 对人类文明进步起了并且继续起着不可估量的影响. 但是, 任何理论都有其适用范围和局限性.

导体棒在均匀恒定磁场中垂直磁场运动时, 在和磁场相对静止的参考系中分析, 导体两端应有正负电荷积累; 在和导体相对静止的参考系中分析, 导体两端应没有正负电荷积累. 带电粒子在实验室中运动, 在实验室参考系中分析, 空间应有电场和磁场, 但在和带电粒子相对静止的参考系中分析, 空间应只有电场没有磁场……这些问题都反映出经典电磁学的局限性. 正是经典电磁学的局限性成为建立狭义相对论的必要性, 并促使了狭义相对论的建立. 这体现了科学发展的模式.

§ 10.1 电荷 库仑定律

一、电荷及其量子化

1. 两种电荷

实物物质是由分子、原子组成的, 原子是由带正电荷的原子核和带负电荷^①的电子组成的. 原子核是由质子和中子组成的, 中子总体呈电中性, 质子带正电荷. 一个质子所带的正电荷的量和一个电子所带负电荷的量在数值上是相等的. 若用 e 表示一个质子所带的电荷, 则一个电子所带的电荷是 $-e$.

通常情况下, 原子核所含质子的个数和核外电子的个数是相等的, 也就是原子所带正电

^① “正电”、“负电”是 1747 年美国科学家富兰克林(Franklin)定义的. 富兰克林把丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷取名为正电荷, 把毛皮摩擦过的橡胶棒上所带的电荷取名为负电荷.

荷和负电荷在数值上是相等的,所以,宏观物体在通常情况下,对外不显电性(或是电中性).不论使用何种方法(例如摩擦),使物体得到或失去一定数量的电子,使物体所含电子的总数与所含质子的总数不再相等,这时就说这物体带了电.得到电子(电子总数大于质子总数)的物体带负电,失去电子(电子总数小于质子总数)的物体带正电.摩擦起电的本质就是由于两个物体之间的摩擦作用,使一些电子从一个物体转移到另一个物体上的结果.

2. 电荷的量子性

1911年,密立根(Milikan)用油滴实验最先测出了电子的电量.通常用 e 表示电子电量的绝对值(叫元电荷),密立根测出电子的电量的绝对值为 $e=1.60\times 10^{-19}\text{C}$.元电荷1998年的推荐值是

$$e = 1.602\,176\,462(63) \times 10^{-19}\text{C}$$

迄今为止,各种实验证明,电子是自然界中具有最小电量的粒子.任何带电体和所有带电的微观粒子所带的电量都是电子电量的整数倍.这个结论表明,任何电荷的量值只能取一系列分立的数值而不能连续地变化.电荷的这一性质叫做电荷的量子性.

粒子物理理论认为,存在带电量为 $\pm\frac{1}{3}e$ 和 $\pm\frac{2}{3}e$ 的粒子,这些粒子称为夸克,并且认为质子、中子等微观粒子是由这些更深层次的夸克组成的.

1977年至1981年间,费尔坂克(Fairbank)等人曾报导了实验发现超导铌球上存在分数电荷 $\pm\frac{1}{3}e$,但尚未见到有关分数电荷方面的进一步报导.有的理论认为,在自然界夸克是不能单独存在的.

也许令人难以置信,就在检测元电荷的同时有可能发生了第一例观察到分数电荷的事件,1909年密立根在一篇论文^①的结论段中写道:

“... I have discarded one uncertain and unduplicated observation apparently upon a singly charge drop, which gave a value of the charge on the drop some 30 percent lower than the final value of e .”

意思是在一个油滴上出现的数据,由于不太确定、未重复出现而被他丢掉了,这一电荷数据比最终得到的 e 值低30%左右.密立根对单个数据处理的严谨态度是令人赞赏的,而这一段文字使得他有可能成为第一个观察到分数电荷(fractional charge)的人.到目前为止,分数电荷仍然是一个悬而未决的命题.不过应注意的是,即使分数电荷存在,它们仍然是量子化的,只不过新的元电荷是原来的 $\frac{1}{3}$ 而已.

这里讨论电磁现象的宏观规律,所涉及的电荷一般是元电荷的许多倍.在宏观电磁理论中,只从平均效果上考虑,认为电荷连续地分布于带电体上,而忽略电荷的量子性所引起的微观上的不连续性.另外,当带电体电量发生变化时,由于电荷的变化量远远大于 e ,也认为电量是可以连续变化的.在阐述某些宏观现象的微观本质时,仍然要从电荷的量子性出发.

^① R. A. Millikan, A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of the charge, Phil. Mag. 1910, 19:209.

二、电荷守恒定律

使原来不带电的物体带电的过程称为起电. 两个绝缘体在适当条件下相互摩擦后, 两者都会带电, 这是因为两绝缘体相互摩擦时, 都有一些电子挣脱原子核的束缚并运动到另一个物体上去. 但材料不同的两个物体在摩擦过程中得到的电子数和失去的电子数是不相等的, 所以总效果是一个物体失去电子, 另一个物体得到电子, 失去电子的物体带正电, 得到电子的物体带负电. 相互摩擦的两个物体总是同时带电, 并且所带电荷总是等量异号.

静电感应是另一种常用的起电方法. 如图 10-2(a) 所示, 用绝缘棒支持的导体球 A、B、C, 导体球 A 带正电荷, 导体球 B 和 C 大小相等、相互接触, B、C 都不带电. 把球 A 移近球 B, 但不与 B 接触, 这时把 B、C 分开, 则发现 B 和 C 分别带了异号电荷, 如图 10-2(b) 所示. 把 A 球移走, B、C 上的电荷不变. 这种使金属导体带电的方法叫做静电感应起电. 若将 B、C 再次接触, 则发现 B、C 两球又都不带电了, 如图 10-2(c) 所示. 这说明 B、C 两球再次接触前所带电量是等值异号的.

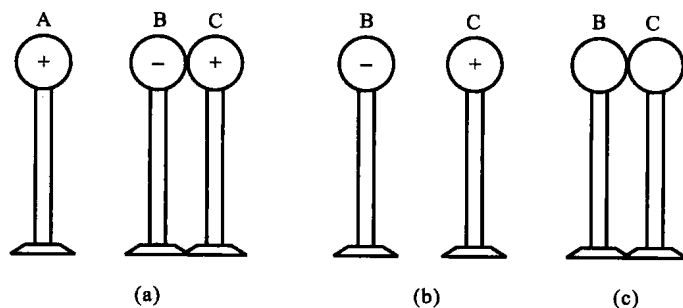


图 10-2 静电感应

上面的结果说明, 一个与外界无电荷交换的系统(相互摩擦的两个物体, 或金属导体球 B 和 C)在摩擦起电或静电感应起电过程中, 系统内电量的代数和保持不变.

大量实验证明, 在一个与外界没有电荷交换的系统内所发生的任何物理过程中, 系统内正负电荷的代数和保持不变, 这个结论称为电荷守恒定律. 近代科学实验证明, 电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立, 而且在一切微观过程中(例如, 核反应和其他基本粒子过程中)都成立. 例如, 高能光子(γ 射线)和原子核相碰时, 会产生正、负电子对(电子对的产生); 反之, 当一对正、负电子相互靠近时会融合而消失, 在消失处产生 γ 射线(电子对的湮灭). 光子不带电, 正、负电子所带电量等值反号, 其代数和为零, 故在此微观过程中尽管发生了带电粒子的产生或湮灭, 但系统电荷的代数和并没有改变.

需要指出, 电荷量是一个相对论不变量. 电荷量与其运动状态无关, 也就是说, 在不同参考系中观测, 同一带电粒子的电量不变. 电荷的这一性质称为电荷的相对论不变性.

三、库仑定律

1. 点电荷

在和观察者相对静止的参考系中, 静止电荷之间的相互作用的理论叫静电学.

实验发现, 真空中两个静止带电体之间的电性相互作用力, 不仅和两个带电体的电量、

距离有关,而且与它们的大小、形状以及电荷在带电体上的分布有关.当带电体的几何线度远小于带电体之间的距离时,带电体的大小、形状以及电荷在带电体上的分布对它们之间的相互作用力的影响非常小,可以忽略不计.如果带电体的几何线度远小于它到其他带电体的距离,这种带电体称为点电荷.带电体被简化为点电荷后,可以用一个几何点标记它的位置.两个带电体之间的距离就是标志它的位置的两个几何点之间的距离.与质点类似,点电荷是理想模型.理论和实验证明,电荷球对称分布的带电体对球外的影响可视为位于球心处的点电荷对球外产生的影响.

2. 库仑定律

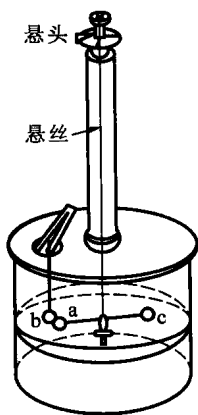


图 10-3 库仑扭秤

法国物理学家库仑发明了扭秤,如图 10-3 所示,并用扭秤研究两个点电荷之间的相互作用力的规律.1785 年库仑发表了实验结果,这就是库仑定律.

库仑定律可表述为:真空中两个静止点电荷之间的相互作用力与这两个点电荷的电量的乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比,作用力的方向沿两点电荷的连线,同性电荷相互排斥,异性电荷相互吸引.这个结论称为库仑定律.库仑定律可用矢量公式表示为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (10-1)$$

式中, q_1 、 q_2 分别表示两个点电荷的电量(带有正、负号), r_{21} 表示两点电荷之间的距离, $\mathbf{F}_{21}$ 表示 q_2 受 q_1 的作用力, $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 表示由 q_1 指向 q_2 方向上的单位矢量, k 为比例系数, k 的数值和单位根据其他各量的单位由实验测定.当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 同方向,表明 q_2 受 q_1 的斥力;当 q_2 与 q_1 异号时, $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 反方向,表明 q_2 受 q_1 的吸引力.由式(10-1)可以看出,真空中两个静止点电荷之间的相互作用力符合牛顿第三定律.

在 SI 中,电量的单位是库仑(C),长度单位是米(m),力的单位是牛顿(N),实验测定比例常量 k 的数值和单位为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

通常引入另外一个常量 ϵ_0 来代替 k

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

于是,库仑定律的形式可以写成

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (10-2)$$

这里引入的常量 ϵ_0 叫做真空电容率,其 1998 年推荐值为

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,818 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

在库仑定律表示式中引入 4π 因子的作法,称为单位制的有理化.单位制有理化的结果虽然使库仑定律的数学形式变得复杂了些,但却使以后经常用的电磁学规律的数学形式中不出

现 4π 因子,因而变得简单些.电磁学单位制有理化的优越性在今后的学习中读者会逐步体会到.

实验证明,点电荷在空气中的作用力和在真空中的作用力相差极小,也就是空气的电容率与真空电容率相差极小,故对于空气中的静止点电荷式(10-2)仍可应用.

库仑力是自然界中的一种基本相互作用力.库仑定律是关于一种基本相互作用力的定律.库仑力与距离 r 的平方成反比常简称为平方反比律.电磁学的某些基本规律与平方反比律有关.平方反比律的精确性不断经历着实验的考验,至今仍是某些物理学家关注的问题之一.现代精密实验指出,与平方反比律中幂指数 2 的差不超过 10^{-16} ,且距离 r 在 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{m}$ 的范围内库仑定律仍然成立.

例题 1 氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$.问这两个粒子间的静电力和万有引力各为多大?

解 由于电子的电荷是 $-e$,质子的电荷为 $+e$,而电子的质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$,质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{kg}$,所以由库仑定律,求得两粒子间的静电力大小为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \times (1.6 \times 10^{-19} \text{C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{m})^2} = 8.1 \times 10^{-6} \text{N}$$

由万有引力定律,求得两粒子间的万有引力为

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \times 9.1 \times 10^{-31} \text{kg} \times 1.7 \times 10^{-27} \text{kg}}{(5.3 \times 10^{-11} \text{m})^2} \\ &= 3.7 \times 10^{-47} \text{N} \end{aligned}$$

由计算结果可以看出,氢原子中电子与质子的相互作用的静电力远比万有引力大,前者约为后者的 10^{39} 倍.因此在原子、分子中,一般忽略万有引力.

例题 2 卢瑟福(Rutherford, 1871~1937)在他的 α 粒子散射实验中发现, α 粒子具有足够高的能量,使它能达到与金原子核的距离为 $2 \times 10^{-14} \text{m}$ 的地方.试计算在这个地方时, α 粒子所受金原子核的斥力的大小.

解 α 粒子所带电量为 $2e$,金原子核所带电量为 $79e$,由库仑定律可得此斥力为

$$F = \frac{2e \times 79e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \times 2 \times 79 \times (1.6 \times 10^{-19} \text{C})^2}{(2 \times 10^{-14} \text{m})^2} = 91 \text{N}$$

此力约相当于 10kg 物体所受的重力.此例说明,在原子尺度内电力是非常强的.

四、静电力的叠加原理

库仑定律给出了真空中两个静止点电荷之间相互作用力的规律.当考虑三个或三个以上的点电荷、一般带电体之间的相互作用时,就必须补充另外一个实验事实:任意两个点电荷之间的作用力不受其他电荷存在的影响.作用在每一个点电荷上的静电力等于其他各个点电荷单独存在时作用于该点电荷的静电力的矢量和,这个结论称为静电力的叠加原理.叠加原理为解决任意点电荷系之间的静电作用问题、有一般带电体存在时的静电作用问题提供了依据和计算方法.

若有 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ 和点电荷 q_0 [图 10-4(a)],根据库仑定律, q_i 作用在点电荷 q_0 上的静电力为

$$\mathbf{F}_{0i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_0}{r_{0i}^2} \mathbf{e}_{r_{0i}}$$

式中, r_{0i} 是 q_i 与 q_0 之间的距离, $\mathbf{e}_{r_{0i}}$ 是 q_i 指向 q_0 方向的单位矢量.

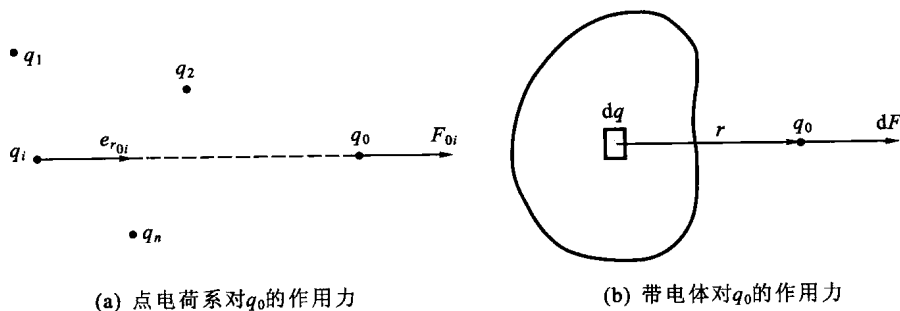


图 10-4 带电体对 q_0 的作用力

由静电力的叠加原理, q_0 受到的总的静电力等于其他各个点电荷作用在 q_0 上的静电力的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{01} + \mathbf{F}_{02} + \cdots + \mathbf{F}_{0i} + \cdots + \mathbf{F}_{0n} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{0i} \quad (10-3)$$

$$\mathbf{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{0i}^2} \mathbf{e}_{r_{0i}} \quad (10-4)$$

电荷连续分布的带电体对点电荷 q_0 的作用力也可根据库仑定律和叠加原理求解. 把带电体分成无限多个电荷元 dq , 如图 10-4(b) 所示, 每个电荷元可以当作一个点电荷, 电荷元 dq 与点电荷 q_0 之间的静电力 $d\mathbf{F}$ 遵守库仑定律

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 dq}{r^2} \mathbf{e}_r$$

式中, r 是由电荷元 dq 到点电荷 q_0 的距离, $\mathbf{e}_r$ 是由 dq 指向 q_0 方向的单位矢量. 根据叠加原理, 带电体对点电荷 q_0 的作用力等于所有电荷元对 q_0 作用力的矢量和. 因此, 点电荷 q_0 受到的静电力为

$$\mathbf{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (10-5)$$

上式的积分区间是整个带电体.

如果电荷分布在一定空间体积内, 电荷体密度为 ρ (单位体积内的电量, $\rho = \frac{dq}{dV}$), 则电荷元的电量为

$$dq = \rho dV$$

式(10-5)的积分区间为整个带电体. 如果电荷分布在一个空间曲面上, 电荷面密度为 σ (单位面积内的电量, $\sigma = \frac{dq}{dS}$), 则电荷元的电量为

$$dq = \sigma dS$$

式(10-5)的积分区间为空间带电曲面. 如果电荷分布在一条空间曲线上, 电荷线密度为 λ

(单位长度曲线上的电量, $\lambda = \frac{dq}{dl}$), 则电荷元的电量为

$$dq = \lambda dl$$

式(10-5)的积分区间为空间带电曲线.

应该指出的是:绝对不可轻易地认为叠加原理是理所当然的,或是可以由力的叠加原理推导出来的. 叠加原理是由实验事实总结出来的,可能有一些涉及极小距离或极强作用的情况,此时叠加原理不再成立.

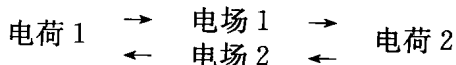
库仑定律和叠加原理是关于静止电荷相互作用的两个基本实验定律,应用它们原则上可以解决静电学的全部问题.

§ 10.2 静电场 电场强度

一、电场

用库仑定律和叠加原理原则上可以解决任意带电体之间的相互作用力问题,但库仑定律并没有回答“电荷之间的作用力是怎样产生的?”这样的问题. 正是这个问题的不同解释以及为此而进行的长期争论,导致了场概念的建立与场理论的产生和发展. 场概念和场理论把人们带入一个极为重要的物质领域. 对这个领域的认识成果大大促进了新生产技术的产生和发展,从而极大地推动了人类物质文明和精神文明的发展. 对场概念的建立和场理论发展,法拉第和麦克斯韦(Maxwell, 1831~1879)做出了杰出的贡献. 场的概念已成为近代物理学中最重要的基本概念之一. 电磁场理论已成为物理学基础理论之一,电磁场理论的应用成果对人类文明产生了并将继续产生极其重要的影响.

近代物理学证实:任何电荷都在自己周围的空间激发电场. 激发电场的电荷叫做场源电荷. 电场的基本性质之一是:它对处于其中的任何其他电荷都产生作用力,称为电场力. 因此,电荷与电荷之间是通过电场发生相互作用的. 具体地讲,电荷 1 在其周围空间产生电场 1,电荷 2 处于电场 1 的空间中,电场 1 对电荷 2 产生作用力;电荷 2 在其周围产生电场 2,电荷 1 处于电场 2 的空间中,电场 2 对电荷 1 产生作用力. 这种相互作用可概括为以下图示:



科学实验和生产实践证明:电磁场可以脱离电荷和电流而独立存在,它具有自己的运动规律,电磁场和实物(即由原子、分子组成的物质)一样具有能量、动量等物质属性. 总之,电磁场是物质的一种形态. 电磁场的物质性在迅速变化的情况下才能更明显地表现出来. 本章只讨论相对于观察者静止的电荷在其周围空间产生的电场——静电场,研究静电场的分布规律、带电粒子在静电场中受的力及其运动规律.

二、电场强度

电场的重要性质之一是对处于其中的电荷产生作用力. 为定量研究电场的这个性质,就必须把一个电荷 q_0 放入电场中并测量它受到的作用力. 这个电荷 q_0 也产生电场,并且影响所研究电场的电荷分布,从而改变所研究的电场的性质及分布. 为了使放入的电荷 q_0 对所

研究的电场产生的影响可以忽略, q_0 必须满足两个条件: 首先, q_0 的电量充分小, 小到对原来电荷分布的影响可以忽略不计; 其次, 电荷 q_0 的几何线度要足够小, 即可以把它当作点电荷, 这样才能用它来确定空间中各点的电场的性质. 满足这两个条件的电荷 q_0 称为检验电荷.

电场中任一固定点 P 常称为场点. 根据库仑定律, 在静电场中任一场点处检验电荷所受的静电力和检验电荷的电量 q_0 成正比. 如果把检验电荷换成等量异号电荷, 则力的大小不变, 但方向反转. 所以, 检验电荷在电场中某点受的电场力既与检验电荷的电量有关, 也与检验电荷的符号有关, 由此看来, 尽管检验电荷所受的力与电场的“力的性质”有关, 但不能表示电场的“力的性质”. 因为用来描述电场性质的物理量, 只能由电场本身决定.

由式(10-2)、式(10-3)、式(10-4)可以看出, 在电场中任意确定点检验电荷所受的力 F 与检验电荷的电量 q_0 的比值是一个与检验电荷的电量及正、负无关的确定的矢量. 这说明比值 $\frac{F}{q_0}$ 完全由电场决定, 并且能够反映电场本身的性质. 因此, 把检验电荷 q_0 在电场中某固定点所受的力 F 与检验电荷 q_0 的比值定义为该点的电场强度, 简称场强, 用 E 表示

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (10-6)$$

由上述定义可知:

(1) 电场中某点的电场强度矢量 E 的大小等于单位电荷在该点所受的电场力的大小; 电场强度的方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致.

(2) 在电场的空间中任何一点都定义了一个电场强度矢量 E , 因此电场强度矢量 E 是一个空间点函数, 即 $E=E(r)$, 一般 E 的大小和方向随场点位置的不同而不同, 这样的空间位置的矢量函数称为矢量场. 电场强度是一个矢量场.

(3) 如果电场中空间各点的场强 E 的大小和方向都相同, 这样的电场叫做均匀电场或匀强电场. 均匀电场是一种特殊电场.

电场强度 E 的单位由力 F 和电量 q_0 的单位根据式(10-6)决定. 在 SI 中, 电场强度的单位是牛顿每库仑($N \cdot C^{-1}$). 以后会看到, 这个单位与伏特每米($V \cdot m^{-1}$)是等价的, 后者是在实际中更常用.

三、点电荷的场强公式

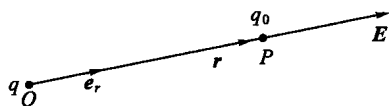


图 10-5 点电荷的场强

设点电荷的电量为 q , 它在其周围产生电场, P 点是电场中的任意一点, 它与 q 的距离为 r , 如图 10-5 所示. 为了计算场点 P 处的场强, 取 q 所在的位置为原点 O , 则 $OP=r$.

设想在场点 P 放一检验电荷 q_0 , 根据库仑定律, 检验电荷 q_0 所受的电场力为

$$F = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$$

式中, e_r 是沿 OP 方向的单位矢量. 根据定义式(10-6), P 点电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (10-7)$$