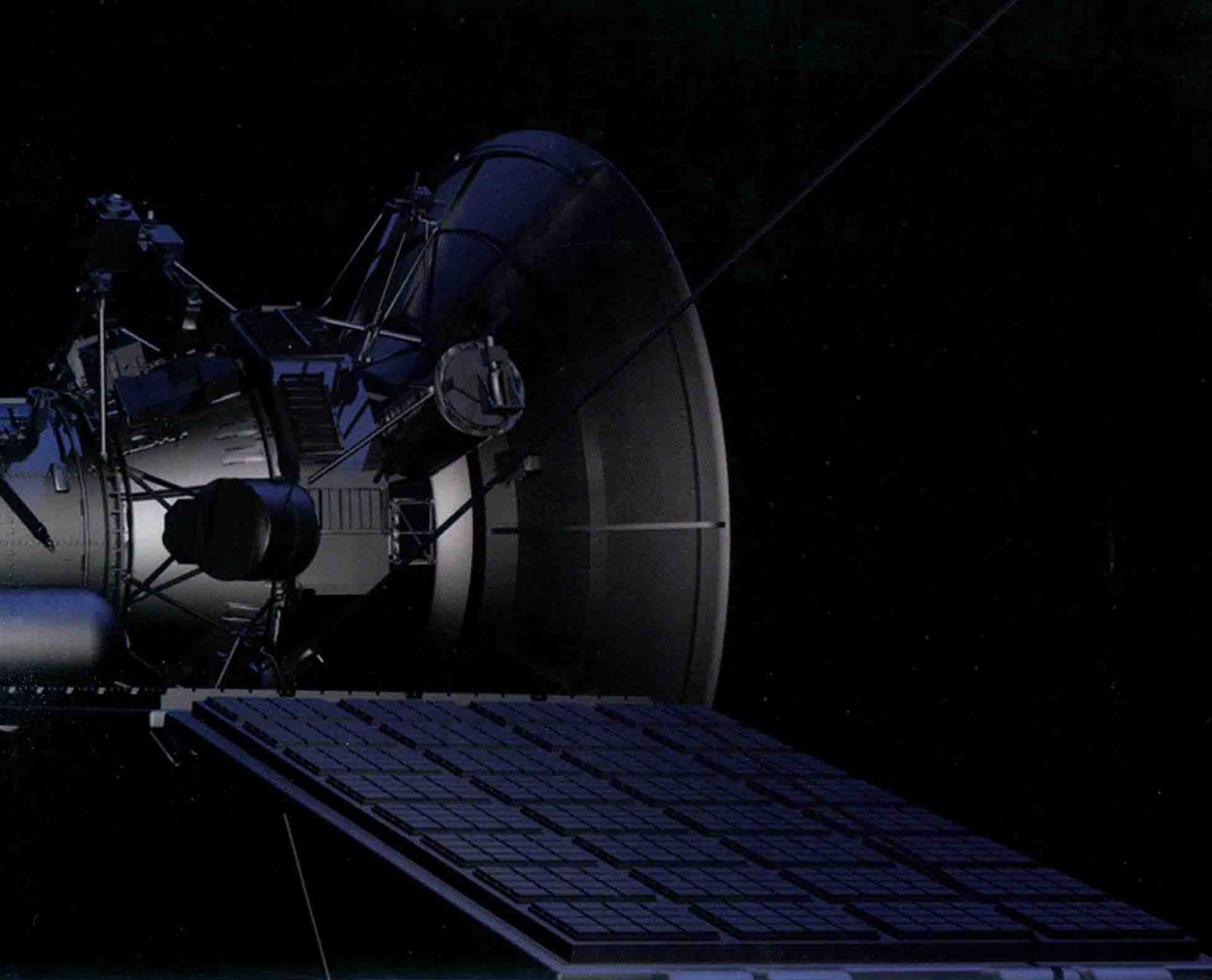




iCourse · 教材

大学物理

(第三卷)电磁学

主编 胡海云 吴晓丽 缪劲松

高等教育出版社



iCourse · 教材

前言

大学物理 (第三卷)电磁学

主编 胡海云 吴晓丽 缪劲松

高等教育出版社·北京

内容简介

本套教材分为四卷,第一卷力学与热学,包括质点力学、刚体力学、连续体力学、气体动理论、热力学基础;第二卷波动与光学,包括振动、波动、几何光学基础、光的干涉、光的衍射、光的偏振;第三卷电磁学,包括静电场、静电场中的导体和电介质、恒定磁场、电磁感应和电磁场;第四卷近代物理,包括狭义相对论力学基础、微观粒子的波粒二象性、薛定谔方程及其应用、固体中的电子、原子核物理。各章后均有本章提要、思考题和习题,书末备有习题参考答案和活页作业单。

本书适合作为理工科各专业的大学物理课程的教材或教学参考书,也可作为综合性大学和高等师范院校相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 第三卷,电磁学 / 胡海云, 吴晓丽, 缪劲松主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2017.7
iCourse · 教材
ISBN 978-7-04-047598-2

I. ①大… II. ①胡… ②吴… ③缪… III. ①物理学-高等学校-教材②电磁学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 074359 号

DAXUE WULI (DI SAN JUAN) DIANCIXUE

策划编辑 李 颖	责任编辑 缪可可	封面设计 张志奇	版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹	责任校对 陈旭颖	责任印制 赵义民	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 22.5
字 数 550 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2017 年 7 月第 1 版
印 次	2017 年 7 月第 1 次印刷
定 价	42.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 47598-00

前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的自然科学,它具有完整的科学体系、独特有效的研究方法、丰富的知识,所有这些对于培养 21 世纪的科学研究工作者及工程技术人员都是必不可少的。因此以物理学基础为内容的大学物理课程是理、工、经、管、文等本科各非物理专业必修的一门基础课。

当前,以计算机、手机和网络技术为核心的现代信息技术正在改变着我们的生产方式、生活方式、工作方式和学习方式,并可能引起教育和教学的革命性改革。北京理工大学大学物理教学团队充分利用自身的教育资源优势,一直积极开展大学物理课程的网络建设。北京理工大学“大学物理”课程 2008 年被评为北京市精品课;2014 年入选中国大学 MOOC 首批建设课程,分力学与热学、波动与光学、电磁学、近代物理四个模块进行讲授,并基于 MOOC 开展面向多元化专业人才培养的大学物理模块化分层次混合式教学;“物理之妙里看‘花’”2016 年被评为国家级精品视频公开课。

我们之所以新编一套教材,是因为不仅要考虑结合国内外的教学改革进展及信息化技术,还要考虑在充分总结和吸取广大教师和学生对原北京市精品教材(《大学物理》苟秉聪、胡海云主编)意见的基础上,依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010 年版)进行编写。在写作风格上力求物理图像清晰,物理思想突出;论述力求深入浅出并有适量的技术应用和理论扩展。同时力求贯彻以学生为主体、教师为主导的教育理念,遵循学生混合式学习的认知规律,结合 MOOC 教学,通过立体化设计,体现“导学”“督学”“自学”“促学”思想,展现物理以“物”喻理、以“物”明

理、以“物”悟理的学科特点,使学生多方位地开展学习,增加教材的可读性和趣味性。

本套教材编者均为大学物理教学的一线优秀教师,具有多年丰富的教学、教改经验。第一卷主编老师为:刘兆龙(第1、第2章),石宏霆(第3章),冯艳全(第4、第5章);第二卷主编老师为:李英兰(第1、第2章),郑少波(第3—第6章);第三卷主编老师为:胡海云(第1、第2章),吴晓丽(第3章),缪劲松(第4章);第四卷主编老师为:缪劲松(第1章),胡海云(第2、第3章),冯艳全(第4章),吴晓丽(第5章)。我们感谢北京理工大学的物理学前辈苟秉聪教授等为本套教材打下的良好基础,感谢北京理工大学教务处、高等教育出版社物理分社等对本套教材的编写与出版的积极支持。

编者

2016年4月

目 录

绪论	1	习题	94
第 1 章 静电场	3	第 2 章 静电场中的导体和电介质	100
1.1 库仑定律	3	2.1 静电场中的导体	101
1.1.1 电荷	3	2.1.1 导体的静电平衡条件	101
1.1.2 库仑定律	8	2.1.2 静电平衡时导体上电荷的分布	103
1.1.3 电场力的叠加原理	13	2.1.3 静电屏蔽	112
1.2 电场 电场强度	15	2.1.4 有导体存在时静电场量的计算	115
1.2.1 电场	15	2.1.5 静电技术在实际中的应用	125
1.2.2 电场强度	16	2.2 静电场中的电介质	127
1.2.3 电场强度的计算	19	2.2.1 电介质对电场的影响	127
1.3 静电场的高斯定理	36	2.2.2 电介质的极化	128
1.3.1 电场线	36	2.2.3 电极化强度	131
1.3.2 电场强度通量	38	2.3 有介质时的高斯定理	134
1.3.3 高斯定理	42	2.3.1 电位移和有电介质时的高斯定理	135
1.3.4 利用高斯定理求静电场的分布	45	2.3.2 有电介质时高斯定理的应用	136
1.4 静电场的环路定理 电势	61	2.3.3 静电场的边界条件	140
1.4.1 静电场的环路定理	61	2.4 电容 电容器	141
1.4.2 静电势能	65	2.4.1 孤立导体的电容	141
1.4.3 电势和电势差	67	2.4.2 电容器的电容	142
1.4.4 电势的计算	70	2.4.3 电容器的连接	144
1.4.5 等势面	84	2.4.4 电容的计算及应用	145
1.4.6 电势梯度	86	2.5 静电场的能量	157
1.5 静电场中的电偶极子	90	2.5.1 电荷系的静电能	157
1.5.1 电偶极子在外电场中所受的力矩	90	2.5.2 电容器的能量	158
1.5.2 电偶极子在外电场中的电势能	90	2.5.3 静电场的能量 能量密度	161
本章提要	91	本章提要	165
思考题	94	思考题	166

习题	167	3.7.5 铁磁质	236
第 3 章 恒定磁场	173	本章提要	239
3.1 恒定电流	173	思考题	241
3.1.1 电流 电流密度	173	习题	242
3.1.2 欧姆定律的微分形式	176	第 4 章 电磁感应和电磁场	248
3.1.3 电源和电动势	180	4.1 法拉第电磁感应定律	248
3.2 磁场 磁感应强度	182	4.1.1 电磁感应现象	248
3.2.1 磁的基本现象	182	4.1.2 法拉第电磁感应定律	250
3.2.2 磁场与磁感应强度	186	4.1.3 楞次定律	253
3.2.3 磁感应线	187	4.2 动生电动势和感生电动势	254
3.3 毕奥-萨伐尔定律	189	4.2.1 动生电动势	255
3.3.1 毕奥-萨伐尔定律	189	4.2.2 感生电动势	260
3.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	190	4.2.3 感生电场	263
3.3.3 运动电荷产生的磁场	198	4.2.4 涡电流及电磁阻尼	270
3.4 磁场的高斯定理和安培环路定理	199	4.3 自感与互感	273
3.4.1 磁通量 磁场的高斯定理	199	4.3.1 自感	273
3.4.2 安培环路定理	200	4.3.2 互感	276
3.4.3 安培环路定理的应用	202	4.4 磁场的能量和能量密度	279
3.5 磁场对载流导线的作用	209	4.5 麦克斯韦方程组 电磁波	282
3.5.1 安培力	209	4.5.1 位移电流	282
3.5.2 磁场对载流线圈的作用	213	4.5.2 安培环路定理的普遍表达式	285
3.6 磁场对运动电荷的作用	217	4.5.3 麦克斯韦方程组	287
3.6.1 洛伦兹力	217	4.5.4 电磁波	289
3.6.2 带电粒子在磁场中的运动	218	* 4.6 超导	293
3.6.3 应用实例	222	4.6.1 超导体的物理特性	293
3.7 磁场中的磁介质	228	4.6.2 BCS 理论简介	295
3.7.1 磁介质对磁场的影响	228	4.6.3 约瑟夫森效应	296
3.7.2 磁介质的磁化	229	4.6.4 超导在技术中的应用	296
3.7.3 磁化强度矢量 M 与磁化电流	230	本章提要	297
3.7.4 有磁介质时的安培环路定理		思考题	301
磁场强度矢量 H	232	习题	301

附录	306
常用物理常量表	306
常用数值表	307

习题答案	307
索引	308
参考文献	308

绪论

电磁运动是物质的一种基本运动形式,电磁学是物理学的一个重要分支,它是研究电磁运动的基本规律包括物质之间的电磁相互作用以及电磁场的产生、变化和运动的规律的学科。电磁学不仅与人们的日常生活和生产技术有着十分密切的联系,是人类大规模生产电能、长距离传送电能和应用电能的科学基础,而且也是电工学、无线电电子学、电子计算机技术以及其他新科学、新技术发展的理论基础。

电磁相互作用是自然界中的四种基本相互作用之一,是带电粒子与电磁场的相互作用以及带电粒子之间通过电磁场传递的相互作用。在强度上它次于强相互作用而强于引力相互作用和弱相互作用。电磁相互作用也是我们日常生活中比较重要的一种相互作用。我们所熟悉的弹性力和摩擦力等是由电磁力引起的;我们在生活中所观察到的大部分现象包括化学的、生物的过程都与分子、原子等粒子之间的电磁相互作用有关。例如,组成人体或植物等的基本物质,就是由原子和分子等这些粒子通过电磁相互作用聚集在一起的。无线电波、微波、光等形式的电磁辐射是由振荡的电场和磁场形成的。

人类对电磁现象的观察与研究的历史可分为两个阶段:

第一个阶段是观察与记录阶段。人类对电和磁现象的认识可以追溯到远古时期。公元前 6 世纪古希腊学者泰勒斯(Thales, 约前 625—前 547)就观察到摩擦起电的现象。在中国,早在公元前 4 世纪~公元前 3 世纪就有磁石吸引铁屑现象以及磁石指南等现象的记载。宋代科学家沈括(1031—1095)于 11 世纪末著的《梦溪笔谈》中记载了地磁偏角,并讨论用针在磁石上反复摩擦,使针带有磁性的方法。宋代,中国已将“司南”用于航海,后来经阿拉伯国家传到西方,促成大航海时代的到来。公元 16 世纪英国医生吉尔伯特(W. Gilbert, 1544—1603)对电和磁现象进行了系统的研究,并且采用了电力、电吸引以及磁极等名词。在这一时期,人们对电或磁的关注主要是出于好奇或者是直接应用它,比如说,对闪电的观察、对指南针的应用等。在这一阶段,人们认



授课视频:电磁学绪论

为,电和磁是完全不同的两种现象。

第二个阶段是定量研究阶段,这一阶段始于18世纪下半叶。1785年,法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806)公布了用自己设计的扭秤实验得到的电力平方反比定律,即后来成为电磁学基本定律的库仑定律,开启了电学的定量研究,这是对静电相互作用的系统研究。所谓静电就是指静止的电荷所产生的电学现象。从静电研究向动电研究的转变始于1800年,意大利物理学家伏打(Alessandro Volta, 1745—1827)发明了电堆,使得恒定电流的获得成为可能。然而在相当长的历史时期内,电和磁被看作是两种完全不同的现象分别加以研究。直到1820年丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1851)发现了电流可以使小磁针偏转即电流的磁效应,才使电学与磁学彼此隔绝的情况有了突破,电磁学的研究进入了新的阶段。同年,法国科学家安培(André-Marie Ampère, 1775—1836)对电磁相互作用力进行了深入研究,提出了安培定律。到了1831年,英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791—1867)的贡献尤为突出,他发现了电磁感应现象并提出了场的概念,进一步揭示了电磁现象的内在联系。1865年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在总结前人成就的基础上,极富创见地提出了感应电场和位移电流的假说,并将一切电、磁理论归纳到一组数学方程式即麦克斯韦方程组中,建立了一套电磁场理论,使电磁学真正发展起来。这样,电效应和磁效应是一种相互作用的两个方面,这种相互作用就是电磁相互作用。此后随着电磁理论不断完善,发电机和电动机相继问世,实现了电能与机械能相互转化,给人们生活带来翻天覆地的变化,推动新的工业革命。

我们在电磁学的学习中将着重从场的观点出发介绍静电场、恒定磁场的基本性质和基本规律,并涉及有介质时的情形,然后阐述电磁感应现象的物理本质,最后介绍电磁场理论的初步知识——麦克斯韦方程组。

第1章 静 电 场

静电场是由真空中相对于观察者静止的电荷或者带电体所产生的电场。本章首先由奥妙无穷的电现象认识电荷的基本性质如电荷的量子性、相对论不变性以及电荷守恒定律。然后我们介绍静电学的两个实验规律——库仑定律和电力叠加原理。从库仑定律的建立我们可以获得许多启示,对阐明物理学发展中理论和实验的关系,了解物理学的研究方法均会有所裨益。最后我们着重了解电场及其性质。一方面从电荷在电场中受力的作用出发,引入描述电场的重要物理量——电场强度,并在介绍电场线、电场强度通量概念的基础上重点介绍反映静电场有源性的高斯定理。另一方面,从电场力对电荷做功出发来研究电场的性质,得到反映静电场保守性的环路定理,从而引出电势能的概念和描述静电场的另一重要物理量——电势。此外还简要介绍等势面和电势梯度的概念,以进一步了解静电场的电场强度和电势的微积分关系。

- 1.1 库仑定律
- 1.2 电场 电场强度
- 1.3 静电场的高斯定理
- 1.4 静电场的环路定理 电势
- 1.5 静电场中的电偶极子

本章提要

思考题

习题

1.1 库仑定律

1.1.1 电荷

人类对电荷的认识最初源于摩擦起电现象和自然界的雷电现象。早在公元前6世纪,古希腊人就发现用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、头发等轻小物体。“电”这个词的英文 electricity 就是源自琥珀的希腊词语 elektron。公元1世纪,我国学者王充(27—约97)在其所著书籍《论衡》中也有“顿牟掇芥”的描述,指的是摩擦过的玳瑁甲壳能吸引像草芥之类的轻小物体。到16世纪末、17世纪初,人们进一步发现,其他的物体如玻璃棒用丝绸摩擦后,硬橡胶棒用毛皮摩擦后,都能吸引轻小物体,这种现象称



授课视频: 电荷的性质 a

为摩擦起电,也就是通过摩擦方法使物体带上了电荷,成为带电体. 继而人们发现雷击、感应、接触、光照等都可能使某些物体带电. 物体之所以产生各种电磁现象,就归因于物体带上了电荷,或者进一步说,物体之所以产生电磁现象,还由于这些电荷的运动. 人们通过对电荷的各种相互作用及其效应的研究,发现电荷有以下一些基本性质:

1. 电荷的种类及其性质

实验表明,自然界中只有两种电荷. 1747年,美国的物理学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790),也就是后来用拴钥匙的风筝捉天电,揭示了雷电现象的秘密,制作了避雷针的富兰克林用正电荷和负电荷将这两种电荷名称加以区分,这种命名法一直沿用至今. 也就是说,一种与在室温下用丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷相同,称为正电荷;而另一种与毛皮摩擦过的橡胶棒上所带的电荷相同,称为负电荷. 电荷的一个重要性质是同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引,即同号相斥、异号相吸. 当异种电荷在一起时,它们的效应有互相抵消的作用.

生活里有许多奥妙无穷的静电现象,这里我们不妨列举几个:

在干燥的天气中,我们用塑料梳子梳理头发时,头发往往会随着梳子飘了起来,并且越梳越蓬松. 这是因为塑料梳子在梳理头发的时候,容易摩擦起电,而使梳子带上负电荷,头发带上正电荷导致的静电现象.

许多隐形眼镜的材料和人眼中的蛋白质分子是通过静电吸引的,从而使人佩戴起来感觉比较舒适. 同样,一些化妆品也是通过静电吸力附着在皮肤的表面上. 若我们用手触摸物体的时候,往往会在其上留下带正电的蛋白质分子,在其上撒上带负电的金粉颗粒,就可以根据不同电荷相互吸引来揭示指纹.

在汽车生产中,我们也常采用静电喷漆技术,让车体带正电,油漆带负电,通过正负电荷的相互吸引来实现喷漆的均匀化.

令人惊异的是,自然界许多生物是带电的. 比如说,蜜蜂飞行的过程中,由于翅膀与空气摩擦往往使其带上正电荷,而花粉颗粒由于通过茎枝和大地相连带上负电荷,当蜜蜂飞到花朵附近时,它们之间的静电相互吸引,使得蜜蜂采集花粉的能力大为提高.

2. 电荷量

物体所带电荷数量的多少称为电荷量,常用 Q 或 q 表示. 正电荷量取正值,负电荷量取负值. 一个物体所带的总电荷量就是其所带正负电荷量的代数和. 在国际单位制中,电荷量的单位是

库仑,简称库,用C表示.库仑的定义为:让导线中通有1 A的恒定电流,则在1 s的时间内通过导线横截面的电荷量就为1 C,也就是 $1\text{ C}=1\text{ A}\cdot\text{s}$.

实验室里我们常用验电器来检验物体是否带电.如图1-1所示,验电器的主体结构看上去像一个小铜人,从上到下都是金属做成的.当检验物体是否带电的时候,让带电的物体和上方的金属球接触,其中一部分电荷就传给下方的两个金属片上,这两个金属片由于带同种电荷相互排斥而张开.

宏观带电体所带电荷种类的不同是由于组成它们的微观粒子所带电荷种类不同.现代物理学关于物质结构的理论和实验表明,一切实物都是由原子和分子组成,而原子又由带正电的原子核和核外带负电的电子组成.原子核内带正电的粒子是质子,中子整体对外不呈电性.一个电子所带的电荷量和一个质子所带的电荷量数值相同,但符号相反.在一般情况下,一个物体中任何一部分都包含相同数目的质子和电子,所以对外界不呈现电性.当两个电中性的宏观物体相互摩擦时,可使一些电子从一个物体传给另一个物体,结果得到电子的物体就带负电,失去电子的物体就带正电.因此摩擦起电实际上就是通过摩擦作用使一些电子从一个物体转移到另一个物体的过程.物质的电结构决定了物体带电的本质,物体内部固有的带电的质子和带电的电子是物体的各种带电过程的内在根据.

3. 电荷的相对论不变性

电荷的相对论不变性,是指一个物体所带的电荷量与它的运动状态无关.即在不同的参考系内观察,同一带电物体的电荷量不变.例如,在回旋加速器实验中,根据电子电荷量不变这一结论导出的电子运动速度与实验结果相符合.较为直接的实验例子是:氢分子、氢原子都精确地是电中性的.二者都有两个质子,两个核外电子.这些电子的运动状态相差不大,但氢原子中两个质子的能量比氢分子中两个质子的能量大约一百万倍的数量级,因而运动状态有显著的差别.而氢分子和氢原子的电中性说明,质子的电荷量是与其运动状态无关的.

4. 电荷守恒定律

大量实验表明,在一个与外界没有电荷交换的系统内,正、负电荷量的代数和在任何物理过程中总是保持不变.这就是电荷守恒定律.

电荷守恒定律是物理学最基本的定律之一.近代科学实践证明,它不仅在一切实观过程(如摩擦起电、接触起电、感应起电等)中成立,一切微观过程也普遍遵守电荷守恒定律.例如,在原

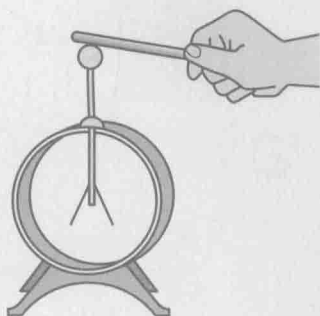


图 1-1 验电器



授课视频:电荷的性质 b

子核衰变过程 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ 中, 衰变前后电荷量的代数和保持不变. 在粒子的相互作用过程中, 尽管电荷是可以产生和消灭的, 电荷守恒定律也并未因此而遭到破坏. 例如, 在正负电子对的湮没过程中, 一对正负电子转化为两个不带电的光子, 即 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$. 而一个高能光子与一个重原子核作用时, 该光子又可以转化为一个正电子和一个负电子. 在这些过程中, 电荷的产生和消灭并不改变系统中电荷的代数和.

5. 电荷的量子性

在自然界中, 物体所带的电荷量总是以一个基本单元的整数倍出现. 电荷的基本单元即元电荷的概念, 最初是英国物理学家法拉第于 1833~1834 年通过电解的实验定律提出, 其后 1906~1908 年, 美国物理学家密立根 (Robert Andrews Millikan, 1868—1953) 通过著名的油滴实验, 直接测定了元电荷的量值.

密立根油滴实验的装置如图 1-2 所示. A、B 为平行的两块金属板, 分别与电源的正、负极相连接而带上等量的正、负电荷. 板中央开一个小孔, 从喷雾器喷出的带负电的油滴经小孔进入两板间后, 受到静电力 F_e 、重力 mg 和空气浮力 F_b 的作用. 通过电源调节金属板上的电荷量, 使油滴所受的三个力达到平衡, 并从显微镜中观测. 密立根油滴实验首先证明, 油滴上的电荷总是电子所带电荷量的整数倍. 到目前为止的所有实验都表明, 物体所带的电荷量不是以连续方式出现, 而是以一个基本单元的正负整数倍出现. 这个特性就称为电荷的量子性, 而这个基本单元就是一个电子所带电荷量的绝对值, 称为元电荷, 常以 e 表示, 其值为 $e = 1.602\,176\,620\,8(98) \times 10^{-19} \text{ C}$. 在计算中, 一般取 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$. 1923 年密立根获得诺贝尔物理学奖, 他的重要贡献之一, 就是测定了元电荷的量值.

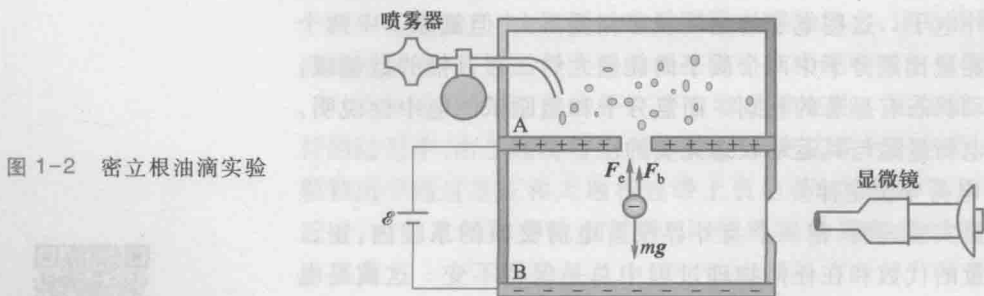


图 1-2 密立根油滴实验

自然界中任何一个物体或其他的微观粒子所带的电荷量 Q 都是元电荷 e 的整数倍, 可以写成 $Q = Ne$ 的形式, 其中, N 是一个整数. 例如, 电子的电荷量是 $-e$; 质子的电荷量是 $+e$; α 粒子, 即

氦核,是由紧密结合在一起的两个质子和两个中子所组成的,具有 $+2e$ 的电荷量.微观粒子所带的元电荷的个数称为它的电荷数,其是正整数或负整数.一个原子序号为 Z 的原子,带有 Ze 的正电荷,而核外有 Z 个电子,因而是电中性的.任何带电体的电荷只能以 e 为单位进行交换和变化,所以电荷的变化是不连续的.

近代物理从理论上预言中子、质子等强子是由被称为夸克和反夸克的更小的粒子组成,每一个夸克或反夸克所带的电荷量为 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$.目前物理学家们已经借助大型加速器实验发现六种夸克:上夸克、下夸克、粲夸克、奇夸克、底夸克和顶夸克.然而至今在实验中还没有检测到单独存在的夸克,即没有发现脱离强子自由运动的夸克.因此,人们仍然把电子电荷量的绝对值看作是元电荷.即使以后发现自由状态的夸克,依然不会改变电荷的量子性,而只是会改变元电荷的量值.

下面我们介绍电磁学中常用的两个理想模型.第一个理想模型是我们在讨论电磁现象的宏观规律时,所涉及的电荷量通常是元电荷的许多倍,因此我们可以认为电荷连续地分布在带电体上,而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏.例如,用毛皮摩擦塑料棒,可以转移 10^{10} 个甚至更多的电子.从微观上看,这些电子离散地分布在物体内.但由于元电荷 e 与 Ne 相比很小,所以在宏观电磁现象中电荷的量子性显示不出来.犹如宏观上我们看到的水是连续的,而微观上我们知道水是由一个个水分子组成,水分子之间实际上是有空隙的.宏观上对电荷的这种连续性处理非常有利于我们后面使用微积分方法来进行一些计算.

第二个理想模型是电学中经常用到的点电荷,它是一个没有形状和大小而只带有电荷的物体.在什么情况下才能应用这个理想模型呢?只有当一个带电体自身的几何线度远小于所研究的问题中涉及的距离时,该带电体的形状、大小及电荷在其上的分布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为没有内部结构只有有限的质量和电荷的几何点,即点电荷.点电荷这一概念只具有相对的意义,它本身不一定是很小的带电体.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.例如,电子所带的负电荷集中在半径约为 10^{-18} m的空间范围内,质子所带的正电荷是分布在半径约为 10^{-15} m的空间范围内.一般情况下,在讨论带电板、带电棒这些宏观意义上的问题时,我们都把电子和质子等带电粒子视为点电荷.此外,力学中可以把一切宏观物体看成是质点的集合,在电磁学中也可以把所有的宏观带电体看成是点电荷的集合.



授课视频:库仑定律

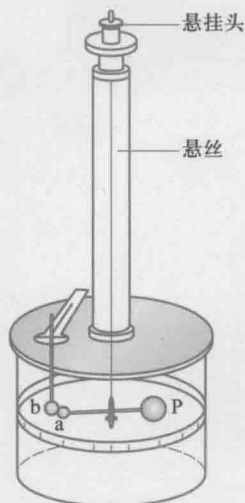


图 1-3 库仑扭秤装置

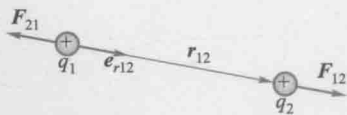


图 1-4 库仑定律

1.1.2 库仑定律

同种电荷相斥,异种电荷相吸.这是对于电荷之间相互作用的定性描述.实际上,在发现电现象以后的两千多年的时间里,人们对于电的认识一直处于定性阶段.最早的定量研究是在1785年,法国科学家库仑用他自己发明的扭秤装置测定了两个带电球体之间的相互作用力,并在此基础上提出了两个静止点电荷之间相互作用的规律,即库仑定律.

图1-3为库仑扭秤装置的示意图,在细金属丝的下端悬挂一根水平秤杆,它的一端有一个小球a,另一端有一平衡体P,在a旁放置一个同它一样大小的固定小球b.为了研究带电体间的作用力,先使a和b都带一定电荷,这时秤杆因a端受力而偏转.平衡时悬丝的扭力矩等于电力施在a上的力矩.若悬丝的扭力矩同扭角间的关系已知,并测得秤杆的长度,就可以求出在此距离下a与b之间的作用力.

库仑定律表述如下:相对于惯性系观察,真空中两个静止点电荷之间的相互作用力(称为库仑力)的大小与这两个电荷所带电荷量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比;作用力的方向沿着这两个点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸.

库仑定律的数学表达式为

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{r12} \quad (1-1)$$

其中, $\mathbf{F}_{12}$ 为电荷 q_1 对电荷 q_2 的作用力; q_1 和 q_2 分别为两个点电荷的电荷量,其值可正可负; r_{12} 表示两个点电荷之间的距离;比例常量 k 称为库仑常量,在国际单位制中,由实验测得 $k \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$; $\mathbf{e}_{r12}$ 为从 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量;如图1-4所示.若以 $\mathbf{r}_{12}$ 表示 q_2 相对于 q_1 的位矢,其大小为 r_{12} ,方向从 q_1 指向 q_2 ,则

$$\mathbf{e}_{r12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \quad (1-2)$$

当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{12}$ 和 $\mathbf{e}_{r12}$ 同方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是斥力;当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}_{12}$ 和 $\mathbf{e}_{r12}$ 反方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是吸引力.

根据上面符号的约定,若要计算电荷 q_2 对电荷 q_1 的库仑力 $\mathbf{F}_{21}$,只需将 $\mathbf{e}_{r12}$ 反向即得.在这个意义上讲,库仑定律给出的两个静止点电荷之间的库仑力大小相等,方向相反,即

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (1-3)$$

为了使以后经常使用的电磁学规律的表达式得到简化,通常

引入另一常量 ε_0 , 使 $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, 这里引入的 ε_0 称为真空介电常量, 又称为真空电容率, 其值为

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$$

在计算中, 一般取 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$. 这样, 就得到真空中库仑定律如下的常用表达式

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_{r12} \quad (1-4)$$

在库仑定律的表达式中引入“ 4π ”因子的做法, 称为单位制的有理化, 这样做的结果虽然使库仑定律的形式变得复杂些, 但却使以后经常用到的电磁学规律的表达式因不出现“ 4π ”因子而变得相对简单些, 其优越性可以在以后的学习中逐步体会到.

注意库仑定律和万有引力定律的相似性: 二者均为平方反比定律 ($F \propto 1/r^2$). 但万有引力的大小与两质点质量的乘积成正比, 而且总是吸引力; 库仑力的大小与两个点电荷所带电荷量的乘积成正比, 并且可以是吸引力, 也可以是斥力.

库仑定律是关于一种基本力的实验定律, 二百多年以来, 经过 1773 年卡文迪许 (Henry Cavendish, 1731—1810)、1873 年麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879)、1936 年洛顿 (W. E. Lawton)、1971 年威廉斯 (Edwin R. Williams) 等人的实验测定, 幂指数 2 的精度一再提高. 现代精密实验测得幂指数 2 的误差已小于 10^{-16} , 使它成为迄今物理学中最精确的实验定律之一.

从高能电子散射实验到人造地球卫星的地球磁场研究等大量近代物理实验表明, 两个静止点电荷之间距离的数量级在 $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$ 的范围内, 库仑定律是极其精确地与实验相符合的. 一般认为, 在天体物理、空间物理等更大范围内仍然有效. 这说明库仑力是一种长程力.

例 1-1

按照量子理论, 在氢原子中, 核外电子快速地运动, 并有一定的概率出现在原子核即主要是质子的周围各处. 在基态下, 电子在半径 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的球面附近出现的概率最大. 根据经典模型, r 为正常情况下, 电子和质子之间的距离. 试计算和比较氢原子内电子和质子之间的电力和万有引力的大小. 已知电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 质子质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 引力常量为 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.



授课视频: 库仑定律 [例 1-1]