

普通高等教育“十二五”规划教材

D A X U E W U L I J I C H U

大学物理基础

中册

刘炳胜 李海宝 郭铁梁 主编
任常愚 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

D A X U E W U L I J I C H U

大学物理基础

中册

刘炳胜 李海宝 郭铁梁 主编

任常愚 主审

裴延波 任忠先 时红艳 等编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据教育部高等学校工科物理基础课程教学指导分委员会 2008 年制定的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》编写的。本书紧扣该教学基本要求,在选材上突出物理图像,弱化数学推演。本书分三册出版,上册包括力学、热学;中册是电磁学,讲述物理学的电磁学部分;下册包括振动与波动、波动光学、近代物理。本册内容包括静电场、导体电学、电介质、稳恒磁场、磁介质、电磁感应、电磁波等。内容的选择上除了讲解经典基本内容外,通过渗透式教学方法,注重物理思想、物理方法的融入;同时为适应 CDIO 教学模式的教学改革需要,积极渗透和融入与教学内容紧密结合的工程教育素材,适时插入现代物理概念与物理思想,安排了许多与现代实际应用有密切联系的例题。同时,为了扩大学生的现代物理知识领域,本书还专辟了本章小结、习题和相关著名物理学家简介。

本书可作为高等理工院校理工科各专业大学物理基础课程的教材,也可供其他有关专业选用或作为读者自学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础. 中册/刘炳胜,李海宝,郭铁梁主编. —北京:化学工业出版社,2010.11
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-09524-4

I. 大… II. ①刘…②李…③郭… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 182680 号

责任编辑:满悦芝
责任校对:郑捷

文字编辑:韩亚南
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 372 千字 2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00 元

版权所有 违者必究

前 言

大学物理是理工科大学生必修的基础理论课。时代飞速发展,科技日新月异,作为一切自然科学和工程技术的基础,物理学有着突飞猛进的发展。为适应现代化建设的需要,大学物理教学必须适时更新教学内容、教学手段和方法,不仅要培养学生的思维能力、主动学习能力,以及应用物理知识解决问题的能力,还要培养学生将物理知识应用于交叉领域的能力和创新能力。因此,全书增加了许多应用方面的新内容,并简单介绍了某些前沿问题。

从体系上,为保持教材内容与形式的和谐性,同时也考虑到实际教学工作的连续性,整套教材基本架构分为三册:上册为力学篇和热学篇,中册为电磁学篇,下册为波动学篇、相对论篇、近代物理篇。全书在编写过程中,既吸收以往经典的物理理论精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学知识,同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍近代物理以及高新技术的发展,注重物理思想的渗透和工程教育素材的开发与融入,使全书内容具有鲜明的时代特色和工程气息。

本教材还注重方法论的教育,如归纳和演绎、分析和综合、类比和等效、对称和守恒、决定性和概然性等。在能力培养方面,注重培养学生把握本质、提出问题和分析解决问题的能力。教材内容还包含了一定自学内容,一些半定量的延伸性、扩展性知识,学生可以在教师的指导下通过自学来获取,借以培养自学能力,确立“终生学习”的观点。由于大学物理教学除了“授业”外,还有“育人”的任务,为此,本套教材介绍了科学大师的事迹,简要说明了他们的思想境界、治学态度、开创精神和学术成就。通过对科学家的介绍,培养学生严肃认真、不怕艰苦的学习态度,勉励学生重视大学物理学的学习,使学生了解学习物理学在培养人的正确思维方法和科学素养等方面的重要作用。

本书是2005年黑龙江省新世纪高等教育教学改革工程项目——“网络环境下大学物理教学体系的研究与实践”、2006年黑龙江省教育科学“十一五”规划课题——“网络环境下的大学物理协同教学模式的研究与实践”的一项研究成果。本书的编写同时也是大学物理渗透式教学方法、适应当前CDIO(构思、设计、实现和运作)教学模式改革在教材方面的一项尝试性工作。全套书共分为三册。

本书为中册,由刘炳胜、李海宝、郭铁梁编写。内容分为三部分:电磁相互作用的经典理论,电磁场与介质的相互作用,非稳恒电路。书中主要以场为主线,介绍静电场、稳恒磁场、电磁感应及变化磁场、变化电场等,最后总结归纳为麦克斯韦方程组和电磁场理论。其中第8~10章由李海宝编写;第11、12章由郭铁梁编写;刘炳胜编写第13、14章并负责统稿和定稿。本书在介绍理论知识的同时,积极渗透和融入了一些有用的物理效应如压电效应、磁致伸缩效应、趋肤效应,以及铁磁性、铁电性等。为了让读者更好掌握教材内容,书中给出了大部分习题的参考答案,供读者参考。

本书在编写过程中也得到了其他院校教师的指导和帮助,哈尔滨工业大学裴延波、时红艳博士帮助查阅了部分参考文献,校对了全部书稿并给出了书中习题的参考答案;黑龙江工程学院任忠先提供并绘制了书中大部分插图。书中参考了一些插图、科学家信息等,在此对相关作者表示感谢!

本书编写同时吸收了本校教师金永君、姜洪喜、刘辉、魏英智、徐宝玉、张琳、任敦

亮、李晓萍、尹向宝、丁宏伟、王丰、李社等的宝贵建议，在此表示衷心的感谢！

由于编者学识有限，内容和体系改革的实践经验还不够，不妥之处在所难免，望读者批评指正，编者不胜感谢。

编 者

2010 年 10 月于冰城哈尔滨

目 录

第3篇 电 磁 学

引言	1	习题	37
第8章 真空中的静电场	2	第9章 导体电学	40
8.1 场的描述	2	9.1 导体的静电平衡性质	40
8.1.1 场的定义	2	9.1.1 静电平衡	40
8.1.2 场与实物	4	9.1.2 导体的静电平衡性质	41
8.1.3 标量场的等值面和梯度	4	9.1.3 静电平衡下导体上的电荷分布	42
8.1.4 矢量场的通量和环流	5	9.1.4 避雷针	44
8.2 电荷及库仑定律	6	9.1.5 静电屏蔽	45
8.2.1 电荷	6	9.2 电容器和电容	48
8.2.2 电荷电量的量子性	7	9.2.1 孤立导体的电容	49
8.2.3 电荷守恒定律	7	9.2.2 电容器的电容	49
8.2.4 库仑定律	8	9.2.3 常见电容器及其电容	49
8.2.5 静电力叠加原理	10	9.2.4 电容器的并联和串联	52
8.3 电场强度	10	9.3 范德格拉夫起电机	54
8.3.1 静电场	10	9.3.1 范德格拉夫起电机的结构与原理	54
8.3.2 电场强度	11	9.3.2 范德格拉夫起电机的应用	54
8.3.3 点电荷系电场的电场强度	11	9.4 稳恒电流	55
8.3.4 连续分布电荷电场的电场强度	13	9.4.1 电流强度	55
8.4 高斯定理	19	9.4.2 电流密度	56
8.4.1 电场线	19	9.4.3 稳恒电流	57
8.4.2 电通量	20	9.4.4 稳恒电场	57
8.4.3 高斯定理	21	9.5 电动势	58
8.4.4 高斯定理的应用	23	9.5.1 电源	58
8.5 静电场的环路定理	26	9.5.2 电动势	58
8.5.1 电场力的功	26	9.6 稳恒电流电路定律	59
8.5.2 静电场的环路定理	26	9.6.1 电流和电压的参考方向	59
8.6 电势	27	9.6.2 欧姆定律	60
8.6.1 电势能	27	9.6.3 基尔霍夫电路定律	62
8.6.2 电势差和电势	28	9.6.4 稳恒电流的功和功率	65
8.6.3 电势叠加原理	29	本章小结	66
8.6.4 电势的计算	29	思考题	67
8.6.5 电偶层的电势及心电图原理	31	习题	67
8.7 等势面及电势梯度	33	第10章 电介质	70
8.7.1 等势面	33	10.1 电介质的极化	70
8.7.2 电势梯度	34	10.1.1 介质的微观电结构	70
本章小结	35	10.1.2 电介质的极化	71
思考题	36		

10.1.3 电介质的击穿场强与击穿电压	71	11.5.4 任意形状线圈在匀强磁场中受到的磁力矩	106
10.2 电极化强度	72	11.5.5 磁场力的功	107
10.2.1 电极化强度矢量	72	11.6 带电粒子在磁场中的运动	108
10.2.2 电极化强度和极化电荷面密度的关系	72	11.6.1 洛伦兹力	108
10.3 电介质中的静电场	72	11.6.2 洛伦兹力与安培力的关系	108
10.3.1 电介质对电容的影响及相对电容率	72	11.6.3 带电粒子在磁场中的运动	109
10.3.2 电介质对电场的影响	73	11.6.4 洛伦兹力的应用	111
10.3.3 极化电荷和自由电荷的关系	74	本章小结	116
10.3.4 极化强度和电场强度的关系	74	思考题	118
10.4 电位移矢量及有介质时的高斯定理	74	习题	118
10.4.1 有电介质时的高斯定理	74	第12章 磁介质	121
10.4.2 电位移矢量和电场强度的关系	75	12.1 顺磁性和抗磁性	121
10.4.3 有电介质时的高斯定理的应用	76	12.1.1 原子中电子的磁矩	121
10.5 电场的能量	79	12.1.2 磁场中的核外电子	122
10.5.1 电荷系的静电能	79	12.1.3 磁介质的顺磁性和抗磁性	123
10.5.2 静电场的能量	81	12.2 磁介质的磁化	124
本章小结	84	12.2.1 磁化强度	124
思考题	85	12.2.2 磁化电流	125
习题	86	12.3 介质中的磁场	126
第11章 稳恒磁场	87	12.3.1 有磁介质的磁高斯定理	126
11.1 磁场及磁感应强度	87	12.3.2 有磁介质的安培环路定理	126
11.1.1 磁力	87	12.4 铁磁质	129
11.1.2 磁场	89	12.4.1 磁滞回线	129
11.1.3 磁感应强度	90	12.4.2 铁磁质的理论解释	131
11.2 毕奥-萨伐尔定律	91	12.4.3 铁磁材料的应用	132
11.2.1 毕奥-萨伐尔定律	91	12.5 磁路	133
11.2.2 运动带电粒子的磁场	92	12.5.1 磁路	133
11.2.3 毕奥-萨伐尔定律的应用	93	12.5.2 磁路定律	133
11.3 磁高斯定理	96	12.5.3 磁路定律的应用	135
11.3.1 磁感应线	96	12.5.4 铁磁屏蔽	136
11.3.2 磁通量	96	本章小结	136
11.3.3 磁高斯定理	97	思考题	138
11.4 安培环路定理	98	习题	138
11.4.1 安培环路定理	98	第13章 电磁感应	140
11.4.2 安培环路定理的应用	100	13.1 电磁感应定律	140
11.5 磁场对载流导线的作用	103	13.1.1 法拉第通量法则	140
11.5.1 安培力	103	13.1.2 法拉第电磁感应定律	142
11.5.2 电流国际单位的定义	104	13.1.3 楞次定律	145
11.5.3 矩形平面载流线圈在匀强磁场中受到的磁力矩	105	13.1.4 涡电流及其典型效应	148
		13.2 动生电动势	150
		13.2.1 洛伦兹力产生动生电动势	150
		13.2.2 动生电动势产生过程中的能量转换	151
		13.2.3 动生电动势的计算	152
		13.2.4 交流发电机的原理	155

13.3 感生电动势	156	14.1.2 位移电流的假设	194
13.3.1 感生电动势产生的机理	156	14.1.3 全电流环路定律	195
13.3.2 感生电场	156	14.2 麦克斯韦电磁场理论	199
13.3.3 感生电动势的计算	158	14.2.1 麦克斯韦电磁场理论的基本思想	199
13.3.4 感应电动势的相对性	160	14.2.2 麦克斯韦方程组的积分形式	199
13.3.5 电子感应加速器	161	14.2.3 麦克斯韦方程组的微分形式	202
13.4 自感与互感	164	14.3 电磁波	203
13.4.1 自感现象	164	14.3.1 电磁波的形成	204
13.4.2 互感现象	168	14.3.2 自由空间中的电磁波	204
13.4.3 自感与互感的关系	171	14.3.3 电磁波的性质	206
13.4.4 两个线圈串联的自感系数	172	14.3.4 光的电磁理论	206
13.5 暂态过程	173	14.4 电磁场的物质性	207
13.5.1 RL 电路的暂态过程	173	14.4.1 电磁场的能量	207
13.5.2 RC 电路的暂态过程	175	14.4.2 电磁波的能流密度	208
13.5.3 RLC 电路的暂态过程	177	14.4.3 电磁场的动量	210
13.6 磁场能量	179	14.4.4 电磁场的质量	211
13.6.1 自感磁能	179	结束语	212
13.6.2 互感磁能	180	本章小结	212
13.6.3 磁场能量	182	思考题	213
本章小结	185	习题	213
思考题	186	习题答案	215
习题	187	参考文献	222
第 14 章 电磁场和电磁波	192		
14.1 位移电流	192		
14.1.1 问题的提出	193		

第3篇 电 磁 学

引 言

电磁学是研究电磁现象及其规律和应用的物理学分支学科。主要内容包括电场、磁场、电磁感应、电磁波、电磁场以及有关电荷、带电物体的动力学等。

早期，由于磁现象曾被认为是与电现象独立无关的，因此磁学是作为一门和电学相平行的学科进行研究的。1820年，丹麦物理学家奥斯特发现了当伽伐尼电池与铂丝相连时，靠近铂丝的小磁针摆动了的实验现象；1831年，英国物理学家法拉第发现了用伏打电池给一组线圈通电（或断电）的瞬间，另一组线圈获得了感生电流的实验现象。基于这两个重要的实验发现，即电流的磁效应和变化磁场的电效应，电磁学从原来互相独立的两门学科（电学、磁学）逐渐发展成为物理学中一个完整的分支学科。

19世纪下半叶，英国物理学家麦克斯韦总结了宏观电磁现象的规律，并引进位移电流的概念，提出了用一组偏微分方程来表达电磁现象的基本规律，建立了麦克斯韦方程组。麦克斯韦于1873年出版的科学名著《电磁理论》，系统、全面、完美地阐述了电磁场理论，成为经典物理学的重要支柱之一。麦克斯韦的电磁理论预言了电磁波的存在，其传播速度等于光速，这一预言后来被德国物理学家赫兹的实验所证实。电磁波的发现和现代无线电技术的广泛应用，进一步丰富了电磁场理论。

社会发展的现代化程度越高，电磁学的应用就越广泛。空间技术、激光技术、超导技术及信息技术，与电磁学密切相关；电工学、电子学、无线电学、自动控制、等离子体物理学等技术学科和新学科都是基于电磁学而发展创立的；现代物理所获得的许多新成果，若想转化成生产力，也必须依靠电磁学理论的辅助。

第 8 章 真空中的静电场

“真空中的静电场”学习导读

基本要求：(1) 掌握静电场的电场强度、电通量的概念以及电场强度叠加原理，能计算一些简单问题中的电场强度；(2) 理解电荷守恒定律及静电场的高斯定理，掌握用高斯定理计算电场强度的条件和方法；(3) 掌握静电场的电势的概念以及电势叠加原理，掌握电势与电场强度的积分关系，能计算一些简单带电体中的电势；(4) 理解静电场的环路定理。

重点：(1) 电场强度及利用电场强度叠加原理和高斯定理计算电场强度；(2) 环路定理与电势的计算。

难点：(1) 电场强度的计算；(2) 电势梯度的概念。

相对于观测者静止的电荷或带电体所激发的电场称为**静电场**。如果电荷或带电体置于真空中，所激发的静电场即为真空中的静电场。本章将介绍描述静电场性质的物理量场强和电势，并探讨这两个物理量之间的联系；深入理解描述静电场规律的高斯定理和环路定理。

静电场是场物质中的一类。由于场是一种特殊的物质，下面简要地介绍场的有关知识和理论。

8.1 场的描述

8.1.1 场的定义

通常，弹力和摩擦力的作用都需要作用物体间直接接触。但是重力、万有引力、电荷之间的作用力以及磁体之间的作用力，可以不通过接触产生。那么，这种作用力是怎么从一个物体到另一个物体的呢？

这个问题在历史上有过长期的争论：一种观点认为这种作用力是**超距作用**，从一个物体到另一个物体是直接地不需要介质也不需要时间，以两个相对观测者静止的电荷之间的作用力为例，这种方式可以表示为电荷 $\rightleftharpoons$ 电荷；另一种观点以在 19 世纪 30 年代法拉第为代表，认为这些力是通过一种称为“场”的媒介传递的，即为一种**近距作用**。带电体或磁体周围产生了某种由电或磁激发的物质，法拉第把它们称为**电场**和**磁场**（地球周围则形成引力场），场则对放入其中的某些物体（如电场对放入场中的电荷）产生作用力。仍以两个相对观测者静止的电荷之间的作用力为例，其作用方式可以表示为电荷 $\rightleftharpoons$ 电场 $\rightleftharpoons$ 电荷。

1686 年，牛顿发表了根据开普勒行星运动定律得到的万有引力定律，并用以说明了月球和行星的运动以及潮汐现象，这是一项伟大的发现。牛顿的引力定律似乎支持超距作用观点，但是牛顿本人并不赞成超距作用解释。他在一封信中写道：“很难想象没有别种无形的媒介，无生命无感觉的物质可以无须相互接触而对其他物质起作用 and 产生影响……引力对于物质是天赋的、固有的和根本的，因此，没有其他东西的媒介，一个物体可超越距离通过真空对另一物体作用，并凭借和通过它，作用力可从一个物体传递到另一个物体，在我看来，

这种思想荒唐之极，我相信从来没有一个在哲学问题上具有充分思考能力的人会沉迷其中……”由此可见，牛顿本人是倾向于近距观点的。

超距和近距两种对立观点在18世纪初争论十分激烈。但由于引力定律说明太阳系内星体的运动获得极大的成功，而在探索近距方面并未获得实际结果，超距作用观点得以流行开来。拉格朗日、拉普拉斯和泊松等人从引力定律发展得出数学上简单而优美的势论，更为有利地支持了超距作用的观点。于是，超距作用观点盛行起来，并被移植到物理学的其他领域，早期的电磁理论也是超距作用理论。整个18世纪和19世纪的大半，超距作用观点在物理学中居统治地位。

如何判断超距的观点是否正确呢？其实，如果超距作用是正确的，则这种电荷间的作用力与中间介质无关，且不需要时间，但事实并非如此。19世纪30~40年代，法拉第对于电磁现象的实验研究作出了卓越的贡献。法拉第反对超距作用观点，并对之进行批判。他用“力线”描述磁极之间和带电体之间的相互作用，指出这些力线在空间是一些曲线而不是直线，因此，电的或磁的相互作用就不会是超距作用所想象的那种直接作用；他研究了插入的电介质对带电体间电力强度的影响，认为这种影响表明电力的作用不可能是超越距离的直接作用，同样的效应也发生在磁现象中；他还根据所发现的电磁感应现象指出，仅有导线的运动事实不足以产生电流，磁铁的周围必定存在某种“状态”，导线就是在其区域内移动才产生感应电流的；此外，他对于磁光效应的研究使他相信光和电磁现象有某种联系，他甚至猜测磁效应的传播速度可能与光的速度有相同的量级。

法拉第的“力线”思想及开尔文将电磁“力线”同流体流动进行的数学类比，深深地打动了年轻的麦克斯韦。1856—1865年，他致力于将全部已知的电磁现象概括为统一的理论，得到了今天成为电磁学基础的数学方程组，并由此推论得出存在并以有限速度传播的电磁波，其波速就是光速。1887年，赫兹完成了观察电磁波的著名实验，确认了麦克斯韦电磁理论的正确性；1898年，李纳和维谢尔分别提出了推迟势，为电磁作用以有限速度传播找到了确切的表示。至此，超距作用观点在电磁学领域内已被多数物理学家所抛弃。

但抛弃超距作用，也不等于持近距作用观点就是完全正确的。持近距作用观点的科学家认为物体之间的所有作用力都必须通过某种中间媒介物质来传递。因此，空间不可能是空无所有的，它被“以太”这种媒介物质所充满。以太无所不在，没有质量，绝对静止。以太虽然不能被人的感官所感觉，但却能传递力的作用，如磁力和月球对潮汐的作用力。但是充当传递媒介的以太存在吗？

由于以太充满整个宇宙（姑且认为它存在），电磁波可在其中传播。假设太阳静止在以太系中，由于地球在围绕太阳公转，相对于以太具有一个速度 v ，因此如果在地球上测量光速，在不同的方向上测得的数值应该是不同的，最大为 $c+v$ ，最小为 $c-v$ 。如果太阳在以太系中不是静止的，地球上测量不同方向的光速，也应该有所不同。

1881—1884年，迈克尔逊和莫雷为测量地球和以太的相对速度，进行了著名的迈克尔逊-莫雷实验。实验结果显示，不同方向上的光速没有差异。该实验结果实际上证明了光速不变原理，即真空中光速在任何参照系下具有相同的数值，与参照系的相对速度无关，以太其实并不存在。后来又有许多实验支持了上面的结论。因此，持有近距作用观点的物理学家所坚持的以太为传递媒介是主观的，至今没有实验证明以太的存在。

既然超距作用是错误的，而承认近距作用又不能找到以太，物质之间的作用究竟是通过何种媒介传递的呢？在这里可以理解为，物质间的相互作用应该是一种近距作用，充当传递作用的媒介物质是一种特殊的物质，这种特殊的物质分布于存在作用物质的空间中。按照广义相对论的观点，空间本身就是某种物质或某种物质的分布。因此，将充当传递作用的媒介

物质所分布的空间, 定义为场空间, 简称为场。

8.1.2 场与实物

自然科学已经十分明确地揭示, 同一物质表现为两种最基本的现象形态, 一种是实物、粒子形态; 一种是场、波的形态。人们首先发现光的波粒二象性, 继而又提出物质波的思想, 认为一切物质粒子, 如电子、质子、中子等都有实物和波两种现象形态。在量子场论看来, 场是一种基本的、普遍的物质, 是相应的时空连续体, 粒子只不过是场的局部凝聚。物质此起彼伏、时散时聚, 散之伏之表现为场, 聚之起之表现为粒子。场是波, 粒子则是可以称为“波包”的东西。波与“波包”显然是对立的统一, 波随时随处形成“波包”, “波包”随时随处汇入波。有的科学家认为, 物质粒子的存在只不过是场的完美状态在那个位置的扰动, 几乎可以说仅仅是一点“瑕疵”。这个比喻颇有道理, 而且是形象生动的。仿此, 也可以把波比喻为广阔的沙漠, 而物体、粒子就像沙漠里的大大小的沙丘, 沙漠随时随处形成沙丘, 而沙丘随时随处汇入沙漠。还可以把场比喻为海洋, 物体、粒子就像海洋中大大小小的浪花, 海洋随时随处产生浪花, 浪花随时随处汇入海洋。在矛盾运动观看来, 这就表明场与实物总处于矛盾运动中。

现代科学认为, 场就是能量的海洋。因而场与实物的矛盾运动, 也就是能量与质量之间的矛盾运动。能量和质量即是物质运动的不同表现形式。现代科学又认为, 场就是时空几何。这样, 时空、场、能量、质量都处在统一而又交错的矛盾运动网络中。而其中只有有质量的实物物质是有形的, 其他都是无形的。无形与无形之间的关系应是更为密近的, 因此可以说, 时空与物质的矛盾运动首先更普遍地表现为时空与场、时空与能的矛盾运动。而场与实物的矛盾运动一定意义上是时空与场、时空与能矛盾运动的演化形式。时空与实物物质之间的矛盾运动带有一定的间接性。但是不论直接还是间接, 所涉及的一切矛盾运动都与时空联系着, 在一定意义上说, 都是时间与空间矛盾运动的转化形式。场是一种时空几何、时空结构, 实物也是一种时空几何、时空结构。宇宙的一切都是不同的时空结构。

通俗地讲, 空间被某种物质充实或激发之后, 就同这种物质的某种属性联系起来, 因此可以根据物质的这种属性来命名, 于是就有了“电场”、“磁场”之类的名词。事实上按照“场”的定义, 温度、质量密度、速度等物理量的分布空间, 可以相应称为“温度场”、“质量密度场”、“速度场”。

8.1.3 标量场的等值面和梯度

数学上把空间坐标的函数统称为“场”。“场”有“空间”的含义。在物理学中, 电场强度、磁感应强度、速度等物理量具有方向性, 即为**矢量**; 而温度、密度等物理量不具有方向性, 即为**标量**。因此“场”可以分为“矢量场”和“标量场”。如果以 U 表示某种标量场对应的物理量, 以 $\mathbf{A}$ 表示某种矢量场对应的物理量, 则标量场 U 和矢量场 $\mathbf{A}$ 可以表示成

$$U=U(x, y, z) \quad (8.1)$$

$$\mathbf{A}=\mathbf{A}(x, y, z) \quad (8.2)$$

如果函数 U 的值为常数 C , 则式(8.1) 可以表示成

$$U=U(x, y, z)=C \quad (8.3)$$

式(8.3) 表示的是一个曲面, 在这个曲面上, U 的值处处相等, 因此该曲面称为 U 的“等值面”。联系后面将要学习的电场, 在电场中, 电势(电位)相同的点所构成的曲面, 就称为“等势面”或“等位面”。

图 8.1 中两曲面代表标量场中的两个无限接近的等值面, 函数 U 在这两个面上的值分别以 U 和 $U+dU$ 来表示。如果两个面在 P 点处垂直距离为 dr , 则比值 $\frac{dU}{dr}$ 称为标量场 U 在

P 点处的梯度值。在其他方向, $\frac{dU}{|dr|} \leq \frac{dU}{dr}$, 只有沿着 n_0 的法向 U 的变化最快, 因此梯度是有方向性的, 是一个矢量。梯度的方向垂直于等值面, 并沿着 U 增长的方向。

考虑到方向, 梯度的定义式表示成

$$\text{grad}U = \frac{dU}{dr} n_0 \quad (8.4)$$

式中, grad 为梯度的符号, 是英文 gradient 的缩写, 其汉语意思就是“梯度”; n_0 为 P 点处等值面的法向单位矢量。

式(8.4)只给出了梯度的定义, 且为一维情形。通常 $U = U(x, y, z)$, 即为一般的三维空间情形, 在这种情况下直接用式(8.4)计算梯度显然是不方便的, 为此需要寻找更为一般的计算方法和计算公式。

由图 8.1 可以看出, $dr = n_0 \cdot dr$, 将式(8.4)与 dr 相乘:

$$\text{grad}U \cdot dr = \frac{dU}{dr} n_0 \cdot dr = \frac{dU}{dr} dr = dU \quad (8.5)$$

而由

$$U = U(x, y, z)$$

$$dU = dU(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy + \frac{\partial U}{\partial z} dz \quad (8.6)$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot (dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j} + dz \mathbf{k}) \quad (8.7)$$

将式(8.7)代回式(8.5), 考虑到

$$dr = dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j} + dz \mathbf{k}$$

可以得到

$$\text{grad}U \cdot dr = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot dr \quad (8.8)$$

由于 dr 的选择是任意的, 因此得到

$$\text{grad}U = \frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k} \quad (8.9)$$

式(8.9)可以作为直角坐标系下, 标量场 U 在 P 点处的梯度值的计算公式。

为表达更加简捷, 引入矢性的偏导数算符

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

式(8.9)可以简写成

$$\text{grad}U = \nabla U \quad (8.10)$$

在物理学中, 梯度反映了单位时间或单位距离内某种物理量(如温度、气压、密度、速度、电势等)变化的程度。

8.1.4 矢量场的通量和环流

在矢量场中对于给定的一点, 有一个方向, 它沿某一曲线的切线方向, 这条曲线将形成一条矢量线, 又称场线(对静电场称为静电场线), 无穷多条这样的曲线构成一个矢量族, 如图 8.2 所示。一般来说, 在矢量场存在的场空间中, 引入矢量

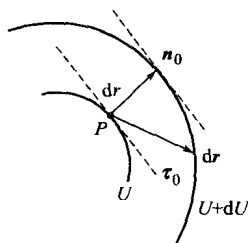


图 8.1 等势面

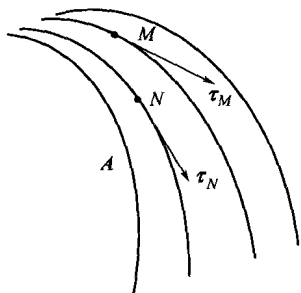


图 8.2 矢量场线与方向

线是为了形象地描述该矢量场。

$\mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}$ 称为 $\mathbf{A}$ 通过面元 $d\mathbf{S}$ 的**通量**，记作

$$d\Phi = \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}$$

有限面积 S 上通量表示为

$$\Phi = \iint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}$$

如图 8.3(a) 所示。

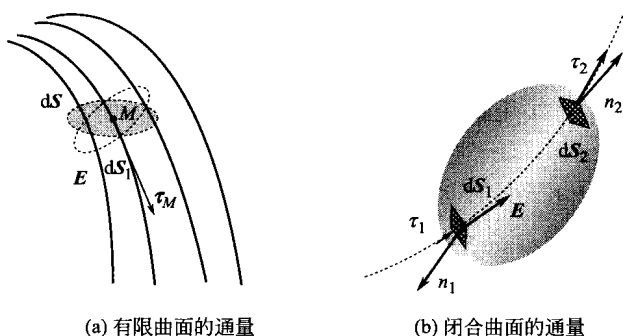


图 8.3 曲面的通量

闭合曲面 S 上，通量可以表示为

$$\Phi = \oiint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (8.11)$$

$d\mathbf{S}$ 的方向由面内指向面外，如图 8.3(b) 所示。

下面进行简单讨论。

- (1) $\Phi > 0$ ，进入的场线少，穿出的多，称 S 面内有源。
- (2) $\Phi = 0$ ，进入的与穿出的场线同样多，称 S 面内无源。
- (3) $\Phi < 0$ ，进入的场线多，穿出的少，称 S 面内有负源。

通过闭合曲面的场线的通量 $\Phi = \oiint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}$ ，通常用来描述空间某一范围内场的发散或会聚，它只具有局域性质，不能反映空间一点的情况。通量是矢量的面积分，它是否为零标志着矢量场是否有源。

将矢量场 $\mathbf{A} = \mathbf{A}(x, y, z)$ 中， $\mathbf{A}$ 沿一条有向闭合曲线 L （即取定了正线方向的闭合曲线）的线积分：

$$C = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{L} \quad (8.12)$$

称为 $\mathbf{A}$ 沿该曲线 L 的**循环量**或**流量**，即矢量 $\mathbf{A}$ 的**环流**。环流 $C=0$ 表明在区域内无涡旋状态，不闭合；反之，表明在区域内有涡旋状态存在，闭合。因此矢量的环流用来刻画矢量场在空间某一范围内是否有涡旋存在，具有局域性质。

8.2 电荷及库仑定律

8.2.1 电荷

古代人类就观察到“摩擦起电”现象，并认识到电只有正负两种，同种相斥，异种相吸。当时因不明白电的本质，认为电是附着在物体上的，因而称其为“电荷”，

并把显示出这种斥力或引力的物体称带电体。有时也称带电体为“电荷”，如“自由电荷”。

在这里将带正负电的基本粒子，称为电荷。其中，带正电的粒子称为正电荷（表示符号为“+”），带负电的粒子称为负电荷（表示符号为“-”）。带有电荷的基本粒子（如电子和质子），具有互相吸引或排斥的属性，这种吸引或排斥作用，以两个带电粒子的吸引力为例，它远远大于同等条件下这两个粒子之间的万有引力作用。

电荷的多少称为电荷量，即物质、原子或电子等所带的电的量，简称**电量**，单位是库[仑]（符号为C）。通常将“带电粒子”称为电荷，但电荷本身并非“粒子”，只是将它假想成粒子以方便描述。因此带电量多者称为具有较多电荷，而电量的多少同等条件下决定了力场（库仑力）的大小。

8.2.2 电荷电量的量子性

1907—1913年，美国实验物理学家密立根，用在电场和重力场中运动的带电油滴进行实验（图8.4），发现所有油滴所带的电量均是某一最小电荷的整数倍，该最小电荷值就是电子电荷。电荷具有量子性，任何电荷所对应的电量 Q 都是电子电荷 e 的整数 n 倍，即

$$Q = ne$$

e 的精确值（1986年推荐值）为 $1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。质子与电子电量（绝对值）之差小于 $(10 \sim 20)e$ ，通常认为两者的绝对值完全相等。电子十分稳定，估计其寿命超过1010亿年，比迄今推测的宇宙年龄还要长得多。



密立根

罗伯特·安德鲁·密立根（Robert Andrews Millikan, 1868—1953），美国实验物理学家。1868年3月22日生于伊利诺斯州的莫里森。密立根以其实验的精确著名。

从1907年开始，密立根致力于改进威尔逊云雾室并得到卢瑟福的肯定。1909年，他创造出测量电子电荷的平衡水珠法、平衡油滑法。1913年，他得到电子电荷的数值。

1953年12月19日密立根在加利福尼亚的帕萨迪纳逝世。

现有强子理论认为，组成电子等强子的更深层次的粒子——夸克，具有分数电荷，即其电荷为质子电荷的 $1/3$ 或 $2/3$ 。但实际上尚未发现自由夸克的存在，因此目前认为自然界能够自由存在的粒子电荷仍然是质子电荷的整数倍。但为什么电荷是量子化的是物理学至今仍未解决的一个难题。

8.2.3 电荷守恒定律

本杰明·富兰克林（Benjamin Franklin, 1706—1790），18世纪美国的实业家、科

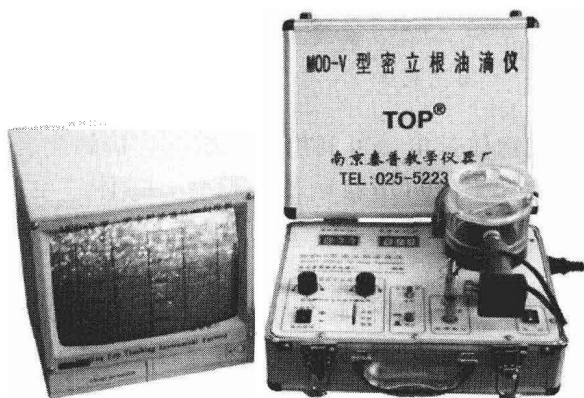
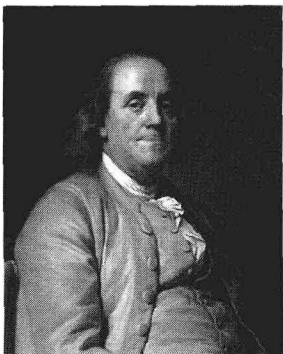


图8.4 MOD-V型密立根油滴仪



富兰克林

学家、社会活动家、思想家、文学家和外交家。他是美国历史上第一位享有国际声誉的科学家和发明家。为了对电进行探索曾经作过著名的“风筝实验”，在电学上成就显著，为了深入探讨电运动的规律，创造的许多专用名词，如正电、负电、导电体、电池、充电、放电等成为世界通用的词汇。他借用了数学上正负的概念，第一个科学地用正电，负电概念表示电荷性质，并提出了电荷不能创生、也不能消灭的思想，后人在此基础上发现了电荷守恒定律。他最先提出了避雷针的设想，由此而制造的避雷针，避免了雷击灾难，破除了迷信。

要使物体带电，可利用摩擦起电、接触起电、静电感应（感应起电）等方法。物体是否带电，通常可用验电器来检验。物体带电实际上是获得或失去电子的结果。这意味着电荷不能离开电子、质子而存在。电荷是电子、质子等微观粒子所具有的一种属性。

由摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实表明，一切起电过程其实都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程，在这种过程中，电荷既不能消灭，也不能创生，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**：一个孤立系统的总电荷（即系统中所有正、负电荷的代数和）在任何物理过程中始终保持不变。孤立系统，就是指它与外界没有电荷的交换。电荷守恒定律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。电荷守恒定律也可以表述为，在一个没有净电荷出入其边界的系统，其中正、负电荷电量的代数和保持不变。

现代物理研究表明，在粒子的相互作用过程中，电荷是可以产生和消失的。但电荷守恒定律并未因此遭到破坏。例如，一个高能光子与一个重原子核作用时，该光子可以转化为一个正电子和一个负电子（电子对的“产生”），即

$$\gamma_0 = e_- + e_+$$

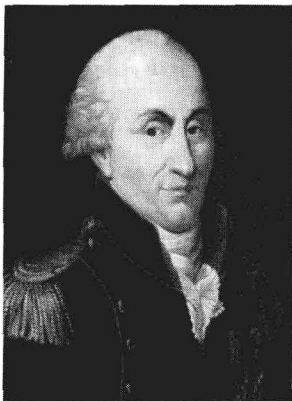
一个正电子与一个负电子在一定条件下相遇，又会同时消失而产生两个或三个光子（电子对的“湮灭”）。在已观察到的各种过程中，正、负电荷总是成对出现或消失。由于光子不带电，正、负电子又各带有等量异号电荷，所以这种电荷的产生与湮灭并不改变系统中电荷的代数和，因而电荷守恒定律仍然有效。

8.2.4 库仑定律

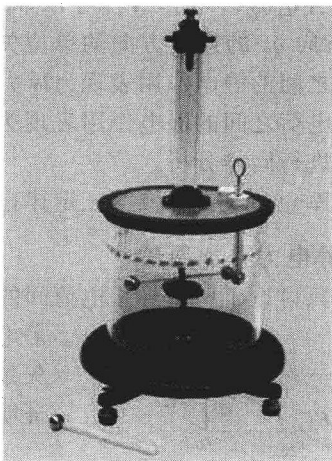
查利·奥古斯丁·库仑（Charlse-Augustin de Coulomb, 1736—1806），法国工程师、物理学家，1736年6月14日生于法国昂古莱姆，1806年8月23日在巴黎逝世。

库仑在1785—1789年，通过精密的实验对电荷间的作用力作了一系列的研究，连续在皇家科学院备忘录中发表了很多相关的文章。1785年，库仑用自己发明的扭秤建立了静电学中著名的库仑定律。

库仑定律是电学发展史上的第一个定量规律，它使电学的研究从定性进入定量阶段，是电学史中的一个重要的里程碑。库仑是18世纪最伟大的物理学家之一，他的杰出贡献是永远也不会磨灭的，电荷的单位就是以他的姓氏命名的。



库仑



库仑扭秤

电荷最基本的性质是与其他电荷相互作用，因而电荷之间相互作用的规律是电现象的基本规律。静止的带电体之间的相互作用力，称为静电力。由实验知道，任意两带电体，它们之间静电力的大小和方向，不但与它们所带的电量以及相互之间的距离有关，而且还与它们的形状有关，也就是说，当任一带电体的形状稍有变化时，静电力的大小和方向就会改变，这实际上反映出静电力与电荷在带电体上的分布有关。由此可见，影响静电力的因素比较复杂。作为基础这里探讨最简单的带电体——点电荷之间的静电力。

点电荷是指线度与距离比可以忽略的带电体，这里的距离是指相关研究点或相互作用的电荷之间的空间距离，因此单个电荷不能说点电荷。例如，粉笔、书本、课桌、门窗、大楼、地球等拥有一定体积的带电体，只有在一定条件下才可以看做点电荷。引入点电荷的意义在于，简化实验中不必要因素的影响，达到抓主要矛盾、找出作用规律的目的。

真空中两个点电荷之间的静电作用力公式是由法国工程师库仑于 1785 年在总结实验的基础上得出的，称为库仑定律。

库仑定律定律可以表述为，真空中两个点电荷作用力的大小与两个点电荷的电量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比；作用力的方向在两个点电荷的连线上，同性电荷相排斥，异性电荷相吸引。数学表达式（矢量式）为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.13)$$

式中， k 为常数， $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ ； $\mathbf{r}_0$ 为 q_1 和 q_2 连线上的单位矢量。

令 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ，进行有理化处理，则式(8.13) 可以表示成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.14)$$

式中， ϵ_0 为真空的介电常数或称为真空的电容量， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 。

库仑定律表明静电力与 r 的平方反比，是有心力。

对库仑定律的理解，应结合图 8.5 注意以下几点。

(1) 适用的范围：真空、相对于观察者静止、点电荷，现代科学证明小到分子原子内部、大到天体均适用。

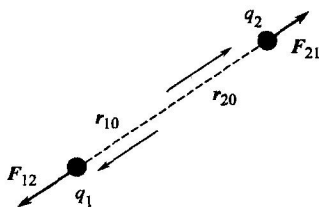


图 8.5 两个点电荷之间的作用力