高等学校教材

大学物理学（下册）

主　编　常文利
副主编　万桂新　欧阳玉花

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理学（下册）

主　编　常文利
副主编　万桂新　欧阳玉花

高等教育出版社·北京

内容提要

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010年版），结合编者多年的教学实践和教改经验编写而成。本教材没有沿袭传统教材的思路，而是采用了一种新的知识体系，即以物质世界的层次和存在形式为主线，按照由经典物理到近代物理，由少体问题到多体问题，由线性系统到复杂系统的思路，来介绍工科大学物理的教学内容。

本书分为上、下两册，上册包括宏观低速实物物质的运动规律和经典波，下册包括场与电磁相互作用、近代物理基础和多粒子体系的热物理。

本书适合普通高等学校工科各专业学生学习使用，也可作为教师或相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学．下册 / 常文利主编．-- 北京 ：高等教育出版社，2017.1

ISBN 978-7-04-045951-7

Ⅰ．①大… Ⅱ．①常… 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 176568 号

Daxue Wulixue

策划编辑 忻 蓓　　责任编辑 忻 蓓　　封面设计 赵 阳　　版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹　　责任校对 吕红颖　　责任印制 田 甜

出版发行	高等教育出版社	网　　址	http://www.hep.edu.cn
社　　址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印　　刷	北京宏伟双华印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开　　本	787 mm×1092 mm　1/16		http://www.hepmall.cn
印　　张	19.75		
字　　数	490千字	版　　次	2017年1月第1版
购书热线	010-58581118	印　　次	2017年1月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定　　价	37.50元

物 料 号　45951-00

目录

第三篇　场与电磁相互作用

第 9 章　场论概论 …… 2

9.1　经典场概念 …… 2

9.2　标量场与矢量场 …… 4

9.3　场量分析 …… 7

第 10 章　静电场 …… 10

10.1　电荷　库仑定律 …… 10

10.2　电场　电场强度 …… 13

10.3　静电场的高斯定理及其应用 …… 21

10.4　静电场的环路定理　电势 …… 30

10.5　电场强度与电势的关系 …… 37

10.6　导体中的静电场 …… 39

10.7　电介质中的静电场 …… 44

10.8　电容　电容器 …… 48

10.9　静电场的能量 …… 53

本章提要 …… 56

习题 …… 56

第 11 章　运动电荷的磁场 …… 61

11.1　恒定电流　电动势 …… 61

11.2　磁场　磁感应强度 …… 66

11.3　毕奥-萨伐尔定律 …… 70

11.4　磁场的高斯定理和安培环路定理 …… 82

11.5　磁场对运动电荷及载流导线的作用 …… 95

11.6　磁介质中的磁场 …… 110

本章提要 …… 119

习题 …… 120

第 12 章　电磁场的统一理论 …… 126

12.1　电磁感应定律 …… 126

12.2　产生感应电动势的机理 …… 133

12.3　磁场能量 …… 152

12.4　麦克斯韦方程组 …… 155

本章提要 …… 164

习题 …… 165

第四篇　近代物理基础

第 13 章　狭义相对论基础 …… 170

13.1　经典力学的危机与相对论问题的提出 …… 170

13.2　爱因斯坦的两个基本假设　洛伦兹变换 …… 177

13.3　爱因斯坦的时空观 …… 183

13.4　狭义相对论动力学基础 …… 189

本章提要 …… 196

习题 …… 198

第 14 章 量子力学基础 …… 202
14.1 黑体辐射 普朗克量子化 …… 202
14.2 光的波粒二象性 …… 207
14.3 玻尔氢原子理论 …… 216
14.4 德布罗意物质波 …… 223
14.5 不确定关系 …… 227
14.6 波函数 薛定谔方程 …… 230
本章提要 …… 234
习题 …… 235

第五篇 多粒子体系的热物理

第 15 章 多粒子体系的热物理 …… 238
15.1 理想气体的描述 …… 238
15.2 理想气体的统计规律 …… 248
15.3 热力学第一定律及其应用 …… 267
15.4 循环过程 卡诺循环 …… 284
15.5 热力学第二定律 …… 293
本章提要 …… 299
习题 …… 300

习题答案 …… 306
常用物理常量表 …… 311

第 三 篇

场与电磁相互作用

前两篇讨论了实物物质运动的描述，本篇开始讨论区别于实物物质的另外一种物质形态——场.

本篇具体研究电磁场及其规律.1785 年库仑定律揭开了电磁现象的理论定量研究的序幕.随后，通过泊松、高斯等人的研究，形成了静电场的超距作用理论.1820 年奥斯特发现了电流磁效应后，很快毕奥、萨伐尔、安培、拉普拉斯等做了进一步的定量研究，提出了安培定律和毕奥-萨伐尔定律.1831 年法拉第发现了著名的电磁感应现象，进一步揭示了电与磁的联系.麦克斯韦在前人成果的基础上，创新地提出感应电场和位移电流的假设，1865 年建立了统一的电磁场理论——麦克斯韦方程组.该理论预言了电磁波的存在，并且指出光是一种电磁波，这样把光学统一到电磁学理论中，形成经典电磁学理论.这一理论使人类对宏观电磁现象的认识达到了一个崭新的高度，是从牛顿建立力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学史上最重要的理论成果.

1905 年爱因斯坦创建了相对论，这不但使人们对牛顿建立的力学有了更全面的认识，也使人们对已知的电磁现象和理论有了更深刻的理解.电磁场是一个统一的实体，从不同的参考系观测，同一电磁场可以表现为电场、或磁场、或电场和磁场并存.

经典电磁学理论认为电磁场是空间连续分布的.20 世纪初，基于光电效应及热辐射规律的研究，近代物理揭示出电磁场是由不带电的、分立的粒子——光子组成，从而建立了量子场论，它更全面、深刻地阐述了电磁场的规律.

电磁学是自然科学和现代工程技术的基础，其与许多工程技术领域的交叉是当代科技前沿中最活跃的部分之一.电磁、磁应变、磁光、磁阻、超导、核磁共振、磁制冷、磁光谱等效应，是高新技术领域应用的重要基础.例如 2007 年诺贝尔物理学奖表彰的巨磁阻效应，是大幅提高移动硬盘存储能力同时减小硬盘体积技术的物理基础，这个效应使移动硬盘存储能力的快速升级换代成为可能.磁性材料的微波吸收涂层又称为隐形涂层，它是现代隐形飞机的技术关键.工程实践中常将非电学量转化成电学量测量，因此，电磁测量显得更加重要.电磁学是现代工程技术人员必备的基本知识.

第9章 场论概论

场概念的产生最初是源于人们对流体的研究，这个概念一经提出便立即被用于分析和描述流体的流动性质.然而，除了作为一种方便的描述工具被人们分析和运用之外，在当时，场概念本身并没有被赋予什么实际的物理意义，因此，当时的场也只是流于一种数学形式，并不代表什么物理实在.事情的转机出现在19世纪中后期，在这一时期法拉第、麦克斯韦和赫兹等一批电磁理论的开拓者，为场的发展注入了新的革命性内容.这就是，新生的场概念不仅彻底地打破了旧有的机械观，更为重要的是，它为人们描绘出一幅新的物理图像，并由此开辟出一条通向近代物理思想观念的道路.至此，作为一种物理实在，场便在赫然间登上了物理学的舞台，成为人们分析和研究的对象.

9.1 经典场概念

从古希腊时代的自然哲学到现代物理学，在不懈的追求和探索中，人们认识到丰富多彩、仪态万千的物质世界以两种基本形式存在着——实物和场.

实物具有静止质量，占有一定空间，是以空间间断形式存在的物质形态.而场与实物物质的存在形态有明显的不同.例如，几个场可以占据同一个空间，场与实物可以共占一个空间，即场具有可侵入性，而实物物质却不一样.场没有确定的空间范围，是以连续形式存在着的物质形态.与实物存在形式的多样性一样，场的存在形式也是多样的，如电磁场、引力场、胶子场等.场与实物一样具有质量、动量、能量，一样遵从能量守恒、动量守恒等物质运动的普遍规律.

经典力学仅适用于实物，不完全适用于场.例如，经典力学认为力的作用是超距作用，可以超越空间瞬时地传递.但是，现代理论认为，两物体间的相互作用实际上是依靠场来传递的，而场的

传递速度是有限的，因而两个物体间的相互作用的传递需要时间.当施力物体的作用已经发出，而受力物体尚未接受到这种力之前，受力物体并未受到力，这时施力物体和受力物体的相互作用显然并不遵守牛顿第三定律.

场作为物理实在的观点源于法拉第.1831 年英国实验物理学家法拉第在总结自己有关电磁现象的实验结果时认定，磁铁周围必定存在某种“状态”，而电磁作用也绝不可能是一种超距作用.紧接着，法拉第又大胆地引入了“具有张力的电”和“磁力线”的概念，并进而绘制出表示磁力线的图形，如图 9-1 所示.在磁力线图形的注释中，法拉第指出，“我不得不深信磁力线概念的真实性，因为它是以实验为基础建立起来的，而不是纯粹假设性的东西”.这意味着，在法拉第眼里磁力线并不是一些假想的几何线，而是的的确确代表了一种实在的物理客体.因此，法拉第也被人们誉为“正确理解电磁现象的带路人”.

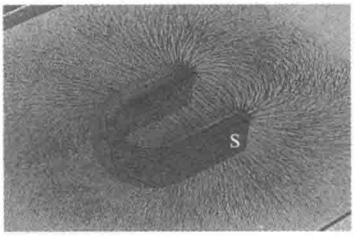


图 9-1　铁屑在蹄形磁铁周围的分布

不仅如此，法拉第还进一步强调，许多力线可以组成力管，而力管的截面则表征着其所在区域内力的强弱.就这样，几乎是在无意间，法拉第就把自己的力线和力管概念与当时流行的流速场论中的流线和流管概念，放在了一个可以进行对比考察的位置.至此，以场论分析作为研究手段的电磁理论便呼之欲出了.

后来，事情的发展正如人们所看到的那样，法拉第的后辈麦克斯韦不久便完成了力线即场的数学表达，他建立了统一的电磁场理论.这个理论的建立，不仅完成了一次物理学的深刻变革，同时也更加突出了数学方法在科学研究中的地位，因为数学的计算结果可以通过物理实验来加以验证，并进而求得与自然规律的一致性.用麦克斯韦的话说就是，“在物理研究过程中所揭示的、以相同形式在物理现象中反复出现的数学规律，将有助于人们把注意力集中到数学规律上，并逐步达到更大的普遍性和更高的精确性”.换句话说，数学可以为科学研究提供精确而简洁的形象化语言、数量计算与分析手段，以及推理原则和抽象能力.

鉴于麦克斯韦在以数学推动物理学进展中的突出成就，尤其是在场理论研究中的巨大贡献，爱因斯坦在纪念麦克斯韦 100 周年诞辰的撰文中曾经作过这样的评价：“撇开麦克斯韦的工作在物理学各重要部门中所产生的影响不谈，单就他在我们所关心的物理实在的本性概念中所造成的变革而言，我们完全应该重视这样的事实，在麦克斯韦之前人们总是以为，物理实在——就其所代表的自然界中的事件而论——它应当是质点，而质点的变化轨迹完全是由那些服从全微分方程的运动所

描绘成.可是,在麦克斯韦之后,人们则不得不认为,物理实在要由连续的场来代表,所不同的是它将服从偏微分方程,人们将无法对其作出机械论的解释.毫无疑问,实在概念所经历的这种变革,是自牛顿时代以来物理学的一次最为深刻和最富有成效的变革."

9.2 标量场与矢量场

9.2.1 概述

就数学而言,所谓的场是指一种随时间和空间变化的函数.如果这种函数的值是标量,则该函数所代表的场就被称为标量场 φ.标量场有不随时间变化的静态场 $\varphi(x,y,z)$ 与随时间变化的时变场 $\varphi(x,y,z,t)$ 之分.例如,用于刻画电场的电势 $U(r)$ 就是空间位置的标量函数,如图 9-2 所示.

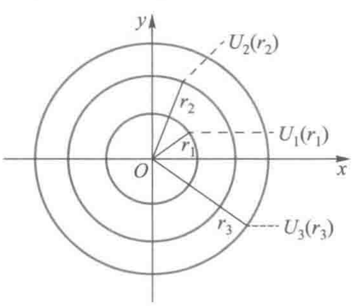


图 9-2 电势 $U(r)$ 标量场

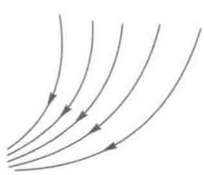


图 9-3 矢量场

如果函数的值是个矢量,则其对应的场就称为矢量场 $\boldsymbol{A}$;矢量场的场量对时空的依赖将同时体现在大小和方向两个方面都具有随时间变化的特征.其中,不随时间变化的是静态场 $\boldsymbol{A}(x,y,z)$,而随时间变化的则是时变场 $\boldsymbol{A}(x,y,z,t)$.例如,流体的流速场、引力场以及电磁场等都是矢量场.对于一般矢量场 $\boldsymbol{A}$,如果存在一系列空间曲线,且曲线上每点的切线方向都与该点处的场矢量方向重合,我们就称该曲线为矢量场的矢量线,如图 9-3 所示.在各种具体的场中,矢量线都有确切的物理含义.例如,重力场的矢量线是重力线,而流速场的矢量线则是流线.因此,如果能够描绘出一个矢量场的矢量线,那也就把矢量场给形象地表示出来了.对于矢量场 $\boldsymbol{A}$,我们可以采用如图 9-3 所示的方式来加以表征.

在数学上,矢量场总是借助场的微分形式和积分形式表达的.其中,微分形式用于刻画场在局部邻域内由一点到另一点的变化特征,而积分形式则描述了场的整体性质,如场的通量与环量等.

9.2.2 矢量场的通量和环量

为了能更好地说明场通量概念,我们可以首先考察一下人

们熟知的流速场流量的意义.假设现在空间存在流速场,想要描述整体流体流量的大小,我们在流速场中与流速相垂直的方向引入截面有向面元矢量 $\Delta\boldsymbol{S}$,则在单位时间内流过截面面元的流体流量的大小可以表示为 $\boldsymbol{v}\cdot\Delta\boldsymbol{S}$,如图 9-4 所示,流体穿过整个截面 S 的流量称为通过曲面 S 的流体总通量,用 Φ 表示,即

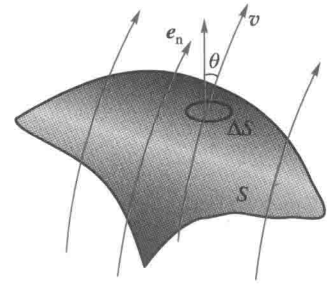


图 9-4　流速场中通过任意曲面的场通量

$$\Phi=\sum\boldsymbol{v}\cdot\Delta\boldsymbol{S}$$

当有向面元面积取极限 $\Delta S\to 0$ 时,上述场通量可表达为

$$\Phi=\int_S\boldsymbol{v}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}\tag{9-1}$$

对于普遍的矢量场,上述表达式依然成立,即

$$\Phi=\int_S\boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}\tag{9-2}$$

场通量是标量,而这里又定义了面元矢量,其实,这个有向面元矢量描述的是该场点的场量与面元之间的关系,面元矢量的方向性表现为

$$当\ \theta<\frac{\pi}{2}时,\quad \mathrm{d}\Phi>0$$

$$当\ \theta>\frac{\pi}{2}时,\quad \mathrm{d}\Phi<0$$

$$当\ \theta=\frac{\pi}{2}时,\quad \mathrm{d}\Phi=0$$

因此,图 9-4 中面元矢量的场通量 $d\Phi>0$.实际上,也可以规定图 9-4 中法线的反方向为面元矢量方向.

对于闭合曲面而言,闭合曲面将空间分成了内、外两个部分.我们规定闭合有向曲面的法线方向以由内指向外为正,如图 9-5 所示.因此,当矢量线穿出曲面时,$0<\theta<\pi/2$,场通量为正;当矢量线穿入曲面时,$\pi/2<\theta<\pi$,场通量为负.

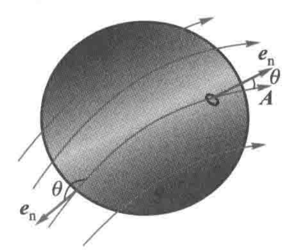


图 9-5　通过闭合曲面的场通量

场通量既可以为正,也可以为负,同时还可以取作零.当矢量穿出某个闭合面时,认为该闭合面中存在产生该矢量场的场源;当矢量进入这个闭合面时,认为该闭合面中存在汇聚该矢量场的场漏.一般情况下,闭合曲面上有向面元的方向通常是指曲面的外法线方向.因此,当闭合曲面中有场源存在时,矢量场通过该曲面的通量一定为正;反之,当闭合曲面中有场漏存在时,则矢量场通过该曲面的通量一定为负.那么自然地,矢量场的场源又被称为正源,而其场漏则叫做负源.

与上述场通量的表达相类似,我们还可以进一步定义矢量场的环量.为此,我们需要再重新考察一下重力场 $\boldsymbol{g}$ 对质点 m 做的功:

$$W_{12}=\int_{r_1}^{r_2} m\boldsymbol{g}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{9-3}$$

如果要计算重力对质点沿某闭合曲线运动一周所做的功,则其做功大小必然为零:

$$\oint_l m\boldsymbol{g}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0 \tag{9-4}$$

而任何一个具有这种性质的矢量场通常也被称为保守场.

需要强调的是,并非所有的场都是保守场.例如,我们此前提到的流体的流速场就不具有保守的性质,因为这种场所对应的上述闭合曲线的线积分并不等于零,即

$$I=\oint_L \boldsymbol{v}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}\neq 0 \tag{9-5}$$

在通常情况下,这种线积分又称为流速场的环流量,简称环量,其积分值的大小取决于积分路径与流体的流动特性.类似地,一个任意矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的环量则可以定义为

$$I=\oint_L \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{9-6}$$

可见,若在闭合有向曲线 L 上,矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的方向处处与线元 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 的方向保持一致,则环量 $I>0$;反之,则 $I<0$.总之,环量可以用来描述矢量场的涡旋特征.

作为环量不等于零的例子,上面已例举流速场.我们也可以举生活中的事例,例如,人头顶的头发形成的“旋”就是环量不为零的情况.环量不为零的矢量场也可以称为涡旋场.

在通常情况下,涡旋场都有一个明显的涡旋中心,如龙卷风在其中心处所引发的高速涡旋的风眼.当然,这种涡旋中心也并不一定总是表现为直线,有时它会发生弯曲,甚至最终能够闭合成为环状结构,即形成所谓的涡旋环.例如,通常喷吐的烟圈就是典型的涡旋环.在通常情况下,诸如烟圈一类的涡旋环不会保持太久.

9.3 场量分析

9.3.1 标量场的梯度

在数学上，标量场是指需要由标量函数来描述的场. 尽管标量场并不具有空间取向的特征，但它在空间分布上的非均匀性必然要表现出对空间位置的依赖性. 为此，人们引入了标量场的方向导数，以便用于刻画标量场在空间中的不均匀性，以及随空间变化的特征. 假设标量场 $\varphi(x,y,z)$ 沿空间任一方向线元 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}=\mathrm{d}x\boldsymbol{i}+\mathrm{d}y\boldsymbol{j}+\mathrm{d}z\boldsymbol{k}$ 的变化量为 $\mathrm{d}\varphi$，则 $\mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}l$ 就被称为 $\varphi(x,y,z)$ 沿 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 方向的方向导数，如图 9-6 所示. 标量场的方向导数被定义为

$$\left.\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}l}\right|_P=\lim_{\Delta l\to 0}\frac{\varphi(P')-\varphi(P)}{\Delta l}$$

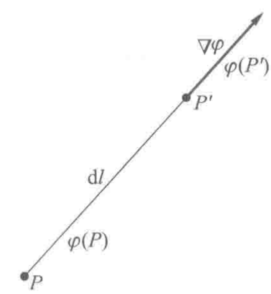


图 9-6　标量场的方向导数

当上述标量场的方向导数能够在某一方向上取得最大值时，则这个最大方向导数就被称为该标量场的梯度. 标量场的梯度通常用符号∇表示，即

$$\nabla\varphi=\frac{\partial\varphi}{\partial x}\boldsymbol{i}+\frac{\partial\varphi}{\partial y}\boldsymbol{j}+\frac{\partial\varphi}{\partial z}\boldsymbol{k} \tag{9-7}$$

式中，∇称为梯度算子：

$$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{i}+\frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{j}+\frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{k} \tag{9-8}$$

值得注意的是，一个标量场的梯度也将同时构成一个矢量场；梯度矢量场在某点的大小等于该点的最大方向导数，其方向则为相同点处具有最大方向导数的方向. 例如，电场标量势 $U(r)$ 的梯度就对应着电场，也即 $\boldsymbol{E}=\nabla U$. 并且梯度矢量场不仅能够体现标量场随空间位置变化的特征，同时还有可能对标量场本身造成影响. 例如，气压梯度将直接决定风速和风的走向，并从而影响气压场的分布. 同样，温度的差异，即温度场的梯度要引起热量的流动，而这种流动也势必会导致温度场的变化.

思考　标量场的方向导数体现出了标量场的哪些变化特征？标量场的梯度有什么物理意义？

9.3.2 矢量场的散度与旋度

在矢量场 $\boldsymbol{A}(x,y,z)$ 的空间中取一闭合有向曲面 S,设该曲面包围的体积为 ΔV.当 $\Delta V\to 0$ 时,矢量场 $\boldsymbol{A}$ 对闭合曲面的场通量与 ΔV 之比的极限定义为矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的散度,即

$$\nabla\cdot\boldsymbol{A}=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\oint_S \boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}}{\Delta V} \tag{9-9}$$

由式(9-9)容易看出,矢量场的散度将同时构成一个散度标量场,它代表了该矢量场在空间某点处穿越曲面 S 的总通量对包围体积的变化率,也即反映了散度场对相应矢量场的激发情况.因此,散度又被称为矢量场在对应点上的源强度.

类似地,若考虑在矢量场 $\boldsymbol{A}$ 空间中有一闭合曲线 L,且 L 围成的面积为 ΔS,则当 $\Delta S\to 0$ 时,矢量场 $\boldsymbol{A}$ 对闭合曲线的环量与 ΔS 之比的极限称为矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的旋度,即

$$\nabla\times\boldsymbol{A}=\lim_{\Delta S\to 0}\frac{\oint_L \boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{\Delta S} \tag{9-10}$$

由此可见,矢量场的旋度是一个用来描述矢量空间涡旋强弱的矢量,其方向就是指向矢量场在给定空间点处具有最大环量的方向,而其大小则体现着最大环量的数值.并且容易证明,在直角坐标系中矢量场的散度与旋度可以表示为

$$\nabla\cdot\boldsymbol{A}=\frac{\partial A_x}{\partial x}+\frac{\partial A_y}{\partial y}+\frac{\partial A_z}{\partial z} \tag{9-11}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{A}=\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}-\frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\boldsymbol{i}+\left(\frac{\partial A_x}{\partial z}-\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\boldsymbol{j}+\left(\frac{\partial A_y}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\boldsymbol{k} \tag{9-12}$$

至此,我们已经给出了梯度、散度以及旋度的微分定义,这些定义所体现的就是场在某点附近的变化性质.尽管在场空间中各点的梯度、散度或旋度可能不同,但它们用于描述场的微分变化特性的目标却是相同的.因此,梯度、散度以及旋度在场量分析中始终占有最为重要的地位.

另外,还需要特别指出的是,对于一个旋度满足 $\nabla\times\boldsymbol{A}=0$ 的无旋场 $\boldsymbol{A}$,可以将其表示为一个标量场的 φ 的梯度,即 $\boldsymbol{A}=\nabla\varphi$.相应地,对于一个散度满足 $\nabla\cdot\boldsymbol{A}=0$ 的无源场 $\boldsymbol{A}$,也同样可以将其表示为一个矢量场 $\boldsymbol{A}'$ 的旋度,即 $\nabla\times\boldsymbol{A}'=\boldsymbol{A}$.

可以证明，标量场的梯度必为无旋场，即$\nabla\times(\nabla\varphi)=0$.矢量场的旋度必为无源场，即$\nabla\cdot(\nabla\times\boldsymbol{A})=0$.

思考　矢量场的散度和旋度有什么物理意义？

不仅如此，利用上述结论还可以得出如下两个积分变换式，即所谓关于场量的基本定理——散度定理

$$\oint_S \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}=\int_V \nabla\cdot\boldsymbol{A}\mathrm{d}V \tag{9-13}$$

和斯托克斯定理

$$\oint_L \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int_S \nabla\times\boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{9-14}$$

式中，S 代表积分区域 V 的闭合曲面，而 L 则代表相应积分界面的边界曲线.

散度定理表明，对矢量场中的某块体积 V 而言，其场量的散度对 V 的体积分等于穿过该体积之闭合表面的通量.因此，从数学角度看，散度定理建立了面积分与体积分之间的关系；而在物理上散度定理则强调了一定体积内的场源与相应场通量的等价性.例如，在某空间区域内的电荷量（即电场源），总是等于穿过包围这些电荷的闭合曲面的电场强度通量.这样，如果已知某区域内的场源分布情况，原则上就可以依据散度定理来求出其边界上的场；反之亦然.

同散度定理类似，斯托克斯定理不仅在数学上建立了面积分与线积分之间的关系，同时也从物理的角度确定了矢量场的旋度场对某曲面的总通量，应该等于该矢量场沿曲面边界的环量.因此，如果已知某区域面积中场的涡旋性质，那么，根据斯托克斯定理就能够分析出相应边界上场的分布状况；反之亦然.

思考　比较散度定理与斯托克斯定理的不同含义.

第10章 静 电 场

雷电是人类最早观察到的电现象,闪电与空气中很强的电场相联系.一次闪电的电势差可达1 000万伏,会危及人的生命.

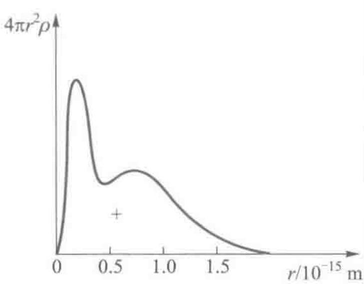
在这一章中,我们将讨论静止电荷间的相互作用和静电场.静电场是在相对于观察者静止的电荷周围存在的场物质的特殊形态,本章我们将介绍静电场的基本性质和规律,以及静电场与导体、电介质相互作用的规律.

10.1 电荷 库仑定律

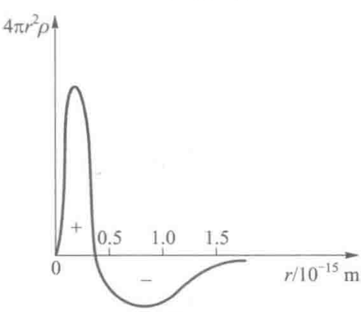
10.1.1 电荷

1. 电荷

电是物质的一种基本属性.物质的电性质来自物质的微观结构.雷电是人类最早观察到的电现象,人们对电现象的研究始于摩擦起电.实验证明,自然界中只有两种不同的电荷.美国物理学家富兰克林将其中的一种命名为正电荷,将另一种命名为负电荷.同号电荷互相排斥,异号电荷互相吸引.宏观带电体所带电荷种类的不同根源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同:电子带负电荷,质子带正电荷.近代物理实验证实,电子的电荷集中在半径小于10^{-18} m的体积内,如图10-1所示.宏观上,电子可被当成是一个无内部结构而有有限质量和电荷的“点”,这样的电荷称为点电荷.



(a) 质子内



(b) 中子内

图10-1 电荷分布

电荷量是定量描述电荷多少的物理量.在国际单位制中,电荷量的单位为库仑(C).

2. 电荷的量子化

实验证明,自然界中带电体所带的电荷量总是一个基本单元的整数倍.物体所带的电荷不是以连续的方式出现,而是以一个个不连续的量值出现的,电荷的这种特性叫做电荷的量子化.电荷的基本单元就是一个电子所带电荷量的绝对值e,称为元电

荷，即

$$e = 1.602\times10^{-19}\ \text{C}$$

实际上，1913 年密立根通过油滴实验测定 e，并且他测量的油滴电荷量数据中有分数电荷.近代理论提出基本粒子“夸克”所带的电荷量是$\pm\frac{1}{3}e$ 的整数倍.

在研究实际带电体时，绝大多数实验都涉及大量电荷量的变化，由于元电荷的量值很小，在宏观上，我们通常认为电荷量是可以连续变化的.

3. 电荷守恒定律

大量实验表明，一切摩擦起电过程其实都是使物体上正、负电荷分离或转移的过程.在这个过程中，电荷既不能被创造也不能被消灭.即在一个孤立的系统中，无论发生怎样的物理过程，系统中所有正、负电荷的代数和始终保持不变，这就是**电荷守恒定律**.电荷守恒定律不仅适用于宏观领域，在微观领域也是成立的.

4. 电荷的相对论不变性

实验还证明，一个电荷的电荷量与它的运动状态无关，即在不同的参考系中测量的同一带电粒子的电荷量，结果相同，电荷的这一特性叫做电荷的相对论不变性.

视频:闪电的形成过程

文档:库仑

10.1.2 库仑定律

带电体之间的相互作用十分复杂，它与带电体的电荷量、体积、形状以及带电体间的相对位置等因素有关.当带电体本身的几何线度远小于它到其他带电体的距离时，带电体的形状、大小及电荷的分布对相互作用力的影响可忽略，库仑认为此时可以把带电体看作“点电荷”，提出点电荷这一理想模型.

1785 年法国物理学家库仑通过扭秤实验，首先对两个静止点电荷之间的相互作用作了定量研究.如图 10-2 所示的是库仑扭秤，它装置在一个直径和高都为 12 英寸（1 英寸＝2.54 厘米）的玻璃圆缸中，以免受空气的影响.上面盖一块玻璃板，板上有两个洞，中间安上一根高为 24 英寸的玻璃管，管下悬挂一根银丝 L，银丝 L 固定在旋钮 E 上.银丝 L 下面吊有一绝缘材料制成的横杆 S，杆的一端为小木球 A，另一端是平衡体 P.玻璃圆缸上有刻度 C.悬丝自由下垂时，横杆上的小木球指向零刻度.在此小木球旁又固定挂了另一个完全相同的

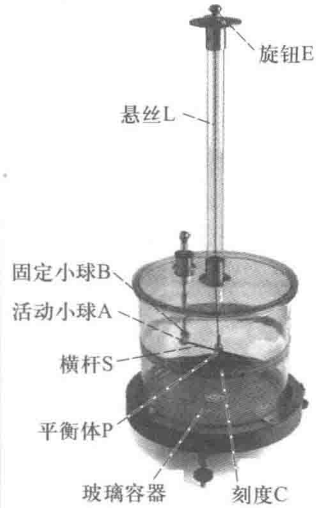


图 10-2　库仑扭秤

小木球 B.

实验时,先让固定的小木球 B 带电,然后 A、B 两球接触一下再分开.此时,两球所带电荷量相等,由于同性相斥,两球分离,使悬丝扭转,直到扭力与斥力相平衡.转动的角度可以从一固定刻盘上读出.银丝的转角与斥力成正比.

库仑根据实验总结出了点电荷之间的相互作用规律——库仑定律,这个规律可表述为:真空中两个静止的点电荷之间存在相互作用力,作用力的大小与这两个点电荷的电荷量之积成正比,与两个点电荷之间的距离的二次方成反比,作用力的方向沿着两点电荷的连线,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.其数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=k\frac{q_1q_2}{r^2}\boldsymbol{e}_r$$

式中,比例系数 k 由实验测定.$\boldsymbol{F}$ 表示 q_1 对 q_2 的作用力,r 为 q_1、q_2 之间的距离,$\boldsymbol{e}_r$ 为由 q_1 指向 q_2 的单位向量,如图 10-3 所示.当 q_1、q_2 为同号时,$\boldsymbol{F}$ 为斥力,其方向与 $\boldsymbol{e}_r$ 的方向一致;当 q_1、q_2 为异号时,$\boldsymbol{F}$ 为引力,其方向与 $\boldsymbol{e}_r$ 的方向相反.

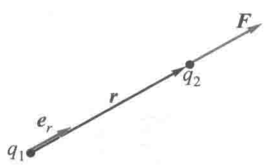


图 10-3 两静止点电荷的相互作用

在国际单位制中,力的单位为牛(N),电荷量的单位为库(C),距离的单位为米(m),用实验测得比例系数为

$$k=8.99\times10^{9}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}}$$

为了使由库仑定律推导出的一些常用公式简化,比例系数 k 通常写成

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

式中 ε_0 称为真空介电常量,也称为真空电容率.在国际单位制中,其值为

$$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C^2\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}}$$

则库仑定律又可以写为

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{10-1}$$

我们称静止电荷之间的相互作用 $\boldsymbol{F}$ 为库仑力或静电力.

思考 根据库仑定律,当 $r\to0$ 时,$F\to\infty$.但我们把两个带同种电荷、直径为 1 cm 的小球推靠在一起时却并不费力,这是为什么?