

University

大学物理学

Physics

下册

主 编 张立红 刘 冰
副主编 徐志杰 赵培河

高等教育出版社

University

Physics

大学物理学

下册

主 编	张立红	刘 冰
副主编	徐志杰	赵培河
参 编	刘素美	董梅峰
	周 勇	展凯云
	牛 莽	曲晓波
		彭爱华



内容提要

本书是以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)的基本精神为依据而编写的,并将首届国家级教学名师、华中科技大学和中国石油大学(华东)特聘教授李元杰创立的中华数字化教学改革成果融入教材中,解决了一些传统大学物理教材中没有解决的问题。本书改变了纯知识的传授,加强了物理模型的建立、物理思想和方法的培养,把传授思想、方法和知识放在同等重要的地位;将传统教材中面面俱到的教学内容变为问题引导式内容,突出了对学生自主探究式学习能力和创新能力的培养。

全书分为上、下两册,上册包括力学、振动与波动、热学,下册包括电磁学、量子物理及其应用。本书可作为普通高等学校理工科各专业大学物理课程的教材或参考书,也可供同等学力的相关读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/张立红,刘冰主编.--北京:
高等教育出版社,2018.3
ISBN 978-7-04-048170-9

I. ①大… II. ①张… ②刘… 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(2017)第177266号

DAXUE WULIXUE

策划编辑 缪可可
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 张海雁
责任校对 张薇

封面设计 姜磊
责任印制 尤静

版式设计 杜微言

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 北京市大天乐投资管理有限公司
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 17.75
字数 430千字
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 2018年3月第1版
印 次 2018年3月第1次印刷
定 价 38.80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 48170-00

大学物理学

主 编
张立红 刘 冰
副主编
徐志杰 赵培河

- 1 电脑访问<http://abook.hep.com.cn/1250624>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号 (20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 点击“进入学习”, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过电脑访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 abook@hep.com.cn。



补充阅读
材料



演示实验



DTP 课件



预习题

<http://abook.hep.com.cn/1250624>

目 录

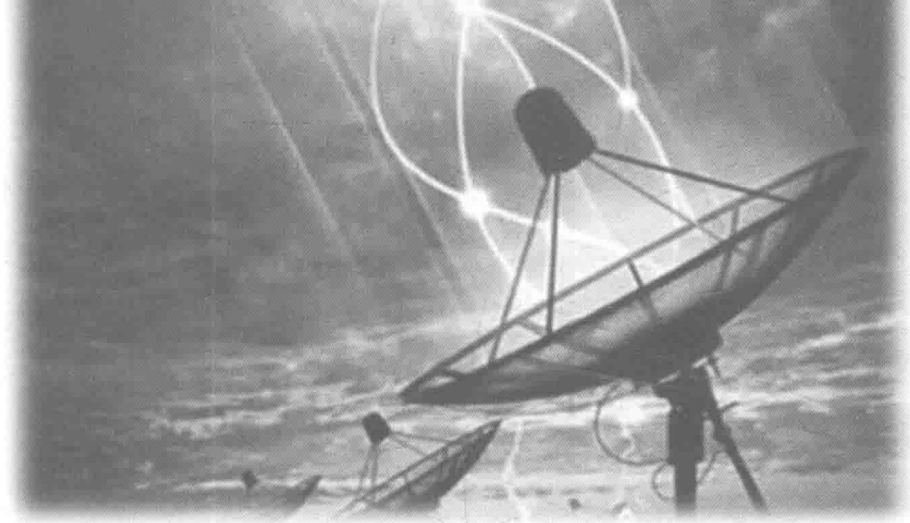
第四篇 电 磁 学

第九章 静电场	3
§ 9.1 矢量场及其研究分析方法	4
§ 9.2 电场的起源 电荷	8
§ 9.3 电场的描述——电场强度、 电场线	13
§ 9.4 静电场的高斯定理	23
§ 9.5 电场的描述——电势、等势面	30
§ 9.6 静电场中的导体	38
§ 9.7 静电场中的电介质	45
§ 9.8 电容、电容器	53
§ 9.9 静电场的能量	60
本章习题	63
第十章 恒定电流	71
§ 10.1 恒定电流和电流场	72
§ 10.2 电动势	82
本章习题	84
第十一章 恒定磁场	87
§ 11.1 磁场 磁感应强度	88
§ 11.2 磁场的性质描述	101
§ 11.3 磁场对运动电荷、载流导 线的作用	109
§ 11.4 磁场与物质的相互作用	120
本章习题	132

第十二章 变化的电磁场	140
§ 12.1 电磁感应定律	141
§ 12.2 动生电动势和感生电动势	149
§ 12.3 自感和互感	161
§ 12.4 磁场的能量	167
§ 12.5 位移电流 全电流安培 环路定理	171
§ 12.6 麦克斯韦方程组	176
§ 12.7 电磁波	181
本章习题	188

第五篇 量子物理及其应用

第十三章 量子物理基础	197
§ 13.1 光的波粒二象性	198
§ 13.2 实物粒子的波粒二象性	208
§ 13.3 量子力学的基本动力学方程	213
§ 13.4 定态薛定谔方程的求解	224
§ 13.5 电子自旋 原子的壳层结构	233
本章习题	238
第十四章 固体物理的量子 理论 激光	242
§ 14.1 晶体的结构和能带	243
§ 14.2 半导体和半导体技术	255
§ 14.3 激光	261
本章习题	275



第 四 篇

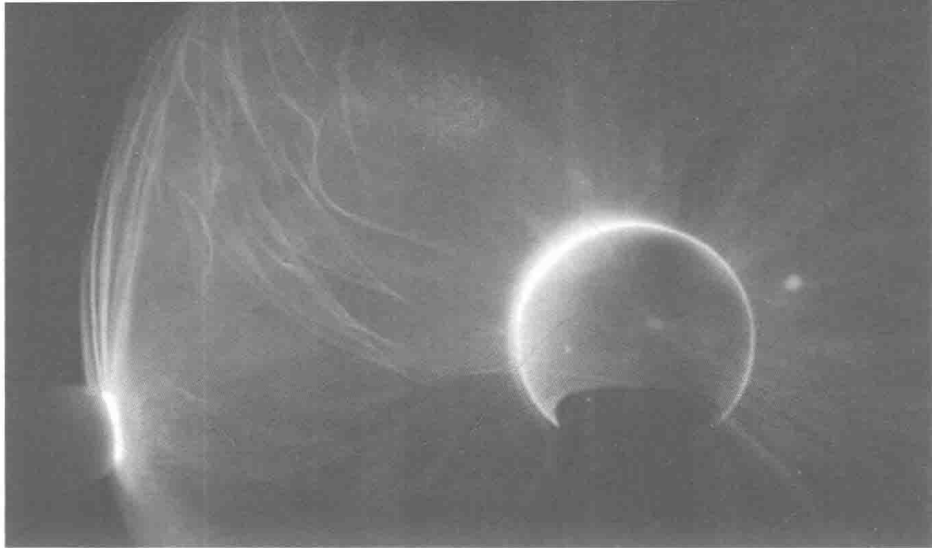
电 磁 学

1996年5月11日,罗布·霍尔,一支世界最高峰探险队的领队,被暴风雪困在了珠穆朗玛峰高达8000米以上的南侧峰顶上.上午9时左右,他通过无线电以及卫星电话,在他生命的最后时刻与远在新西兰的妻子通话.他们的话被转换成变化的电磁场,以不可思议的速度在空间传播,形成的波越过重重阻碍,连接着远隔四分之一地球周长的爱人.这种波就是历史上首次被赫兹所发现的,却被赫兹认为“不具有任何实际用途”的无线电波.

无线电波和微波、红外线、可见光、紫外线和X射线等统称为电磁波.电磁波由变化的电场和变化的磁场相互激发产生,以恒定的速度在空气中传播,携带着能量和信息,与人类的生活息息相关.

“存在电磁波”和“光是电磁波”是麦克斯韦电磁场理论的神奇预言和精彩结论.该理论的实验和理论基础主要有库仑定律、奥斯特的电流磁效应、安培定律、法拉第场和场线理论及电磁感应现象、赫兹的电磁波实验等.

本篇将带领大家感受一场“由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的”,“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来,物理学公理基础的最伟大的变革”.不可思议的是,这样一场伟大的变革竟然源自于小小的电荷.



本章预习题

静电是自然界中的普遍现象。人类在日常生活和工业生产中,掌握了静电的性质以及静电和物质之间的相互作用规律,从而可以利用静电现象为人类造福,更能够有效地预防静电现象带来的危害。上图为—辉光球放电照片,该球通电后,位于辉光球中央的电极激发高频电场,球内的稀薄惰性气体受高频电场的电离作用而发出迷幻的色彩。

第九章 静 电 场

人类对电现象的观察和探索最早起源于对静电现象的观测。1785年,法国科学家库仑完成了对静电现象的一系列精密的实验研究,使电现象的研究取得了历史性的突破,进入了定量研究的阶段。

静电学研究的对象是相对于观察者静止的电荷和它周围的电场。本章从电荷之间相互作用的实验规律出发,引入描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势,基于矢量场研究的一般方法,介绍静电场的高斯定理和环路定理,最后介绍静电场和物质的相互作用规律。

本章主要的物理思想和方法

1. 矢量和矢量场思想。
2. 边界信息决定整体及内部信息思想。

- §9.1 矢量场及其研究分析方法
- §9.2 电场的起源 电荷
- §9.3 电场的描述——电场强度、电场线
- §9.4 静电场的高斯定理
- §9.5 电场的描述——电势、等势面
- §9.6 静电场中的导体
- §9.7 静电场中的电介质
- §9.8 电容、电容器
- §9.9 静电场的能量

本章习题

3. 等效性思想.
4. 对称性思想.
5. 微积分思想.
6. 有限元法思想.

本章的基本要求

1. 了解静电现象,掌握静电的利用及其防护基本常识,了解电荷量子化的概念.

2. 掌握用库仑定律和电场叠加原理计算点电荷、点电荷系和几何形状简单的带电体(如均匀带电直导线、无限大带电平面、圆环、圆柱和球面等)激发的电场;基于 DTP 平台,能够设计并计算一般不规则带电体的电场强度.

3. 掌握电场强度通量的概念,理解并能熟练利用高斯定理计算电荷对称分布的带电系统的电场强度.

4. 理解静电力做功的基本特点,掌握静电场环路定理的意义及电势的基本概念;掌握用电势叠加原理和场强积分法计算形状规则带电体的电势分布.

5. 理解电势梯度的概念,初步掌握用场强和电势的微分关系计算电场强度分布的方法.

6. 掌握静电场和导体的相互作用规律.

7. 掌握静电场和电介质的相互作用规律,掌握电介质存在时的电场计算方法.

8. 掌握电容器的基本概念及电容的计算方法.

9. 掌握静电场能量的计算方法.

10. 学习过程中注意深刻理解和体会矢量和矢量场思想、有限元法思想和边界信息决定整体及内部信息等物理思想,注意将这些物理思想用于分析和实际问题之中.

§9.1 矢量场及其研究分析方法

一、场、矢量场

近代物理学认为,电荷之间、电流之间、电流与运动电荷及磁极之间的相互作用都是通过电磁场来传递的.电磁场是传递电磁相互作用的媒介,电磁学的研究对象是场.场是物质存在的

基本形式之一.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.场物质和实物物质不同的是:场物质具有空间可入性,而实物物质不具有空间可入性.

场有两种不同的概念,一种是数学场,另一种是物理场.

数学场:若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.物理量不随时间变化的场称为恒定场,随时间变化的场称为非恒定场,或交变场.数学场是为了研究方便而引入的一个概念.

物理场:物理场是传递相互作用的媒介,例如电场、磁场等.物理场也称为相互作用场.物理场具有物质的属性,具有质量、能量和动量等.

二、矢量场的研究及分析方法

“场”概念的提出为电磁学的研究指出了正确方向,使电磁学的研究得到迅速发展.在电磁学的理论体系中,电场和磁场都是矢量场,因此,学会如何去研究和分析矢量场对于深刻理解和掌握电磁学的基本知识和规律非常重要.日常生活中流体的速度场是大家比较熟悉的矢量场,大气现象中的旋风,海洋或河流中的漩涡,喷泉向外喷涌的泉水,都是速度场相关的例子.下面,我们从二维流体的速度场入手,探讨矢量场的研究和分析方法.

在平静流动的流体表面,每一点都有不同的速度矢量.为了研究流体的整体流动情况,在流体表面选取一个封闭的曲线 L , L 上各点的速度矢量如图9-1(a)所示,然后将速度矢量分别沿着曲线 L 的法线方向和切线方向进行分解,得到图9-1(b)和图9-1(c)所示两种情况.从图9-1(b)可以看出,相对于曲线 L 来说,法线方向的速度分量只有两种情况:一种是流出,一种是流入,这反映了 L 包围区域流体的流通情况.而图9-1(c)则反映了流体速度场中流体环绕曲线 L 的环流情况.显然,对于二维流体的速度场,只要针对流体矢量场中曲线 L 所包含区域的流通量和环流量进行研究,便可以掌握该区域流体整体的运动情况.



DTP 学件: 矢量场的通量和环量

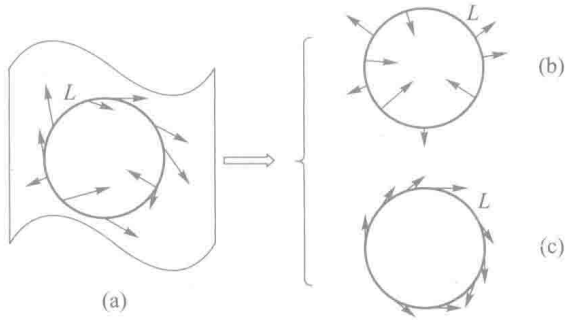


图 9-1 矢量场的研究和分析方法

将上述针对二维流体速度场的研究分析方法推广到三维矢量场.在三维矢量场中,任意选取一边界为 L 的曲面,和前面二维流体速度场类似,只要得到了矢量场中沿曲线 L 的环流量以及通过曲面 S 的流通量的相关信息,便掌握了该区域矢量场的整体情况.在三维矢量场中,通过曲面 S 的流通量简称为通量,沿曲线 L 的环流量简称为环量.

通量: 矢量场中,矢量 $\mathbf{A}$ 沿某一有向曲面 S 的面积分,定义为 $\mathbf{A}$ 通过曲面 S 的通量(图 9-2)

$$\Phi_A = \int_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \int_S A dS \cos \theta \tag{9-1}$$

式中 θ 为矢量 $\mathbf{A}$ 与面元 $d\mathbf{S}$ 的法线方向 $\mathbf{e}_n$ 之间的夹角,如图 9-2 所示.若 S 为闭合曲面,则有

$$\Phi_A = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S A dS \cos \theta \tag{9-2}$$

在直角坐标系中,有

$$\Phi_A = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S A_x dydz + A_y dzdx + A_z dxdy$$

通量 Φ_A 描述了闭合曲面 S 所包围的体积空间向外发散矢量场的能力,其数值决定矢量场的性质:有源性.

若 $\Phi_A = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = 0$, 则矢量场无源,

若 $\Phi_A = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \neq 0$, 则矢量场有源;

若 $\Phi_A > 0$, 则穿出 S 的通量多于穿入的通量,闭合曲面 S 内有产生矢量场的源,如图 9-3(a) 所示.

若 $\Phi_A < 0$, 则穿入 S 的通量多于穿出的通量,闭合曲面 S 内有产生矢量场的汇,如图 9-3(b) 所示.

环量: 矢量场中,矢量 $\mathbf{A}$ 沿某一闭合路径 L 的线积分,定义为 $\mathbf{A}$ 沿路径 L 的环量

$$\Gamma_A = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \oint_L A dl \cos \theta \tag{9-3}$$

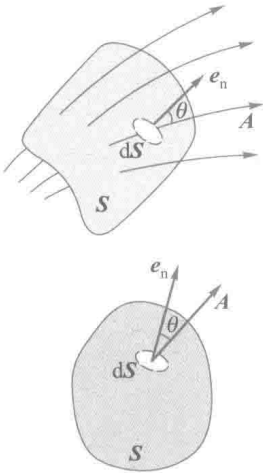


图 9-2 矢量场的通量

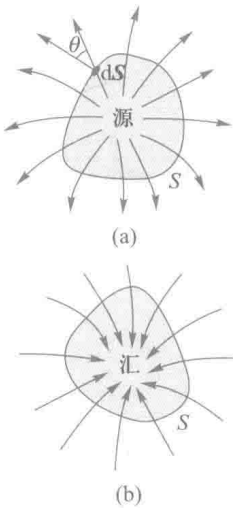


图 9-3 矢量场的源和汇

环量 Γ_A 描述了矢量场沿路径 L 传递环流的能力,其数值决定矢量场的性质:有旋性.

若矢量场中的每一场点均有

若 $\Gamma_A = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = 0$, 则矢量场无旋,

若 $\Gamma_A = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \neq 0$, 则矢量场有旋.

矢量场的通量和环量(图 9-4)是研究分析矢量场的最基本也是最重要的物理量,为了能够更加确切地描述矢量场中场点的性质,还需要给出散度和旋度的定义.

散度:当闭合曲面 S 向矢量场 $\mathbf{A}$ 中某点无限收缩时,矢量 $\mathbf{A}$ 通过闭合曲面 S 的通量与该曲面包围的体积之比的极限称为矢量场 $\mathbf{A}$ 在该点的散度

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}}{\Delta V} \quad (9-4)$$

矢量场的散度是标量,是空间坐标的函数,其代表了矢量场通量源的分布特性,矢量场中某一点散度的数值表征了包围该点无限小体积空间向外发散矢量场的能力.若已知矢量 $\mathbf{A}$ 空间的散度分布,通过闭合曲面 S 的通量可由下式给出:

$$\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_V (\nabla \cdot \mathbf{A}) dV \quad (9-5)$$

上式称为高斯定理,其详细的证明可参考相关的高等数学教材.从物理学上讲,高斯定理建立了区域 V 中的场与包围区域 V 的闭合边界 S 上的场之间的关系,即边界与内部之间的关系,边界信息决定内部信息,这是一种重要的物理学思想.读者可以从后续电磁学的学习中深刻领会这一物理学思想的重要性.

环量 Γ_A 描述了矢量场沿路径 L 传递环流的能力,为了反映矢量场中某一点 P 附近无限小闭合路径区域传递环流的能力,包围 P 点作一微小的有向面元 ΔS ,如图 9-5 所示,面元的法线方向 $\mathbf{e}_n$ 与闭合曲线 L 呈右手螺旋关系.当 ΔS 收缩到 P 点附近区域时,存在极限

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S}$$

则此极限称为矢量场 $\mathbf{A}$ 中在 P 点沿 $\mathbf{e}_n$ 方向的环量密度.由于面元是有方向的,在给定点 P 处,上述极限值对不同的面元是不同的.矢量场 $\mathbf{A}$ 在定点 P 的旋度定义为该点的最大环量面密度,方向沿此时的面元法线方向 $\mathbf{e}_n$,即

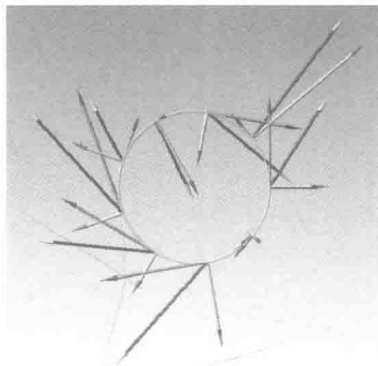


图 9-4 矢量场的通量和环量

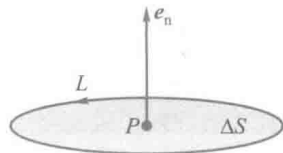


图 9-5 面元矢量与闭合曲线的方向关系

$$\nabla \times \mathbf{A} = \left[\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S} \right]_{\max} \cdot \mathbf{e}_n \quad (9-6)$$

矢量场的旋度是矢量,是空间坐标的函数,其代表了矢量场旋涡源的分布特性,矢量场中某一点旋度的数值表征了包围该点的无限小面积区域传递环流的能力.若已知矢量 $\mathbf{A}$ 空间的旋度分布,沿闭合路径 L 的环量可由下式给出:

$$\oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} \quad (9-7)$$

上式称为斯托克斯定理,其详细的证明可参考相关的高等数学教材.从物理学上讲,斯托克斯定理建立了区域 S 中的场与包围区域 S 的闭合曲线 L 上的场之间的关系,类似于高斯定理,斯托克斯定理同样体现了边界信息决定内部信息的物理学思想.

§ 9.2 电场的起源 电荷

一、电荷、电荷的量子化

1. 两种电荷

人类对电荷的认识最早是从摩擦起电现象开始的.人们在日常生活中发现,用丝绸摩擦过的玻璃棒或用毛皮摩擦过的橡胶棒能够吸引轻小的物体,人们把处于这种状态的玻璃棒、橡胶棒等物体称为带电体,认为这些物体带上了电荷.大量的实验证明,自然界中只存在两种电荷:正电荷和负电荷.正、负电荷的说法最早是由美国科学家富兰克林(B. Franklin, 1706—1790)提出的,这种名称一直沿用至今.按照原子理论,组成原子的基本粒子为电子、质子和中子.电子所带电荷为负电荷,质子所带电荷为正电荷.

事实上,所有宏观物体都含有大量的正、负电荷,电荷是物质的固有属性.当物体所带正电荷和负电荷数量上相等时,物体处于电中性状态,对外界不显电性.处于电中性的物体失去或获得电子时,该物体就成为带电体,处于电中性的物体失去电子带正电,得到电子带负电.摩擦起电现象的本质是物体之间电子的转移.

2. 电荷的量子化

物体所带电荷的量值叫做电荷量.在国际制单位中,电荷量

的单位是库仑,简称库,用C表示。

迄今为止,实验证实自然界中电荷量的最小单元是一个电子所带的电荷量的绝对值,称为元电荷。1913年,美国物理学家密立根(R. Millikan, 1868—1953)设计了著名的油滴实验,直接测定了此元电荷的量值为 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。实验还发现,任何带电体的电荷量 Q 都是元电荷的整数倍。这表明,电荷的量值不能以连续的方式出现,只能是分立的数值,即 $q = ne (n = 1, 2, 3, \dots)$,物体所带电荷量的不连续性称为电荷的量子化。

延伸阅读:近代物理学曾从理论上预言存在带电荷量为 $\pm e/3$ 、 $\pm 2e/3$ 粒子,称为夸克(quark),“夸克”源于爱尔兰作家詹姆斯·乔伊斯的小说《芬尼根的守灵夜》,原指海鸟的叫声,20世纪60年代,美国物理学家默里·盖尔曼(M. Gell-Mann)将“夸克”引进到了粒子物理学,来表示新发现的一种构成物质更深层次的粒子。

默里·盖尔曼在1964年提出了强子的夸克模型。他认为质子之类的粒子是由更基本的夸克组成。夸克与所有已知的亚原子粒子不同,它们带有分数电荷,例如 $\pm e/3$ 、 $\pm 2e/3$ 。夸克都是两两成对,或三三成群,永远不可能单独地被观测到。这就是著名的夸克模型。盖尔曼最初提出有三种夸克,即上夸克(u)、下夸克(d)和奇异夸克(s),相应的有三种反夸克,上夸克的电荷为 $+2e/3$,下夸克和奇异夸克的电荷为 $-e/3$ 。夸克理论后来因实验事实的补充而不断发展。1974年丁肇中和里克特(B. Richter)发现 J/ψ 粒子,原有的夸克理论已无法解释新的实验事实,因此有人引入了第四种夸克——粲夸克。1977年发现了重轻子,1978年又发现了 γ 粒子,促使人们相信还存在第五种夸克和第六种夸克。第五种夸克称为底夸克,第六种夸克称为顶夸克,每种夸克都有红、绿、蓝三色。2015年7月14日欧洲核子研究组织宣布,他们在利用大型强子对撞机测试时,数十亿粒子碰撞纪录的结果证明了“五夸克”(pentaquark)粒子的存在(图9-6)。专家表示发现此粒子有助于理解质子与中子如何构成物质。

但是到目前为止,仍然没有在实验中发现处于自由状态的夸克,即便是以后实验证实了夸克的单独存在,电荷也仍然遵循量子化的基本规律。

3. 电荷守恒定律

大量实验证明,在一个与外界没有电荷交换的系统内,无论发生任何变化过程(物理过程、化学过程等),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。

电荷守恒定律是物理学的基本定律之一,在一切宏观过程和

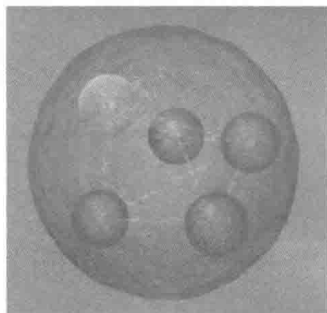


图9-6 五夸克模型

微观过程中都是成立的.如摩擦起电、静电感应、核衰变等过程中电荷守恒定律均成立.

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,同一带电粒子的电荷量不变.电荷的这一性质称为电荷的相对论不变性.

二、电荷间相互作用

1. 库仑定律

电荷之间具有相互作用,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.因而,带电体之间会有相互作用力.实验表明,带电体之间的作用力的大小和方向与带电体之间的距离、带电体的大小及几何形状、带电体的电荷量等诸多因素有关.库仑首先研究了两个点电荷之间的相互作用规律.当一个带电体本身的几何线度比所研究的问题中涉及的电荷间的距离小很多时,研究电荷之间的相互作用就可以完全不用考虑带电体的形状和电荷分布,而只将其当作一个带电的几何点来处理,这样的带电体称为点电荷.显然,点电荷的概念与质点、刚体等概念类似,是从实际情况中抽象出来的理想模型.点电荷具有相对性,一个带电体能否视为点电荷,要由问题所要求的精度而定.

两个点电荷之间的相互作用遵循库仑定律.1785年,法国物理学家库仑通过库仑扭秤实验(库仑扭秤如图9-7所示)总结出了两个静止点电荷之间的相互作用规律,即库仑定律,表述如下:

真空中,两个静止点电荷之间的相互作用力与这两个电荷的电荷量成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着两电荷的连线,同种电荷相斥,异种电荷相吸.其数学表达式为

$$\boldsymbol{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \boldsymbol{e}_{12} \quad (9-8)$$

式中, ϵ_0 为真空电容率,其值为

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

$\boldsymbol{F}_{12}$ 表示电荷 q_1 对 q_2 的作用力, $\boldsymbol{e}_{12}$ 表示从电荷 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量.

当 q_1 和 q_2 同号时, $q_1 q_2 > 0$, $\boldsymbol{F}_{12}$ 与 $\boldsymbol{e}_{12}$ 同方向,作用力为斥力;
当 q_1 和 q_2 异号时, $q_1 q_2 < 0$, $\boldsymbol{F}_{12}$ 与 $\boldsymbol{e}_{12}$ 反方向,作用力为引力.



图 9-7 库仑扭秤

库仑定律给出了真空中两个静止点电荷之间的相互作用规律.实验证实,静止电荷对运动电荷的作用力仍由式(9-8)给出,运动电荷之间的相互作用则不适于库仑定律.库仑力与距离 r 的平方成反比的规律称为平方反比定律,在电磁学的历史中,平方反比定律的精确性不断经历着实验的考验,至今仍是物理学家关注的问题之一.验证平方反比定律的一种方法是假定力按 $\frac{1}{r^{2+\delta}}$ 的规律变化,然后用实验测出 δ 的值.现代用精密实验手段测得 $\delta \leq 2 \times 10^{-16}$,这说明平方反比定律是非常精确的.

2. 静电力叠加原理

库仑定律只给出了真空中两个静止点电荷之间的相互作用规律,但在解决实际情况中一般带电体之间的相互作用问题时就必须基于一个基本原理——静电力的叠加原理:两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变,作用在一个点电荷上的静电力等于其他点电荷单独存在时作用于该点电荷的静电力的矢量和.

设真空中有 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系,依据静电力的叠加原理,该点电荷系对另一点电荷 q_0 的作用力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{10} + \mathbf{F}_{20} + \dots + \mathbf{F}_{n0} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{i0} \quad (9-9)$$

依据库仑定律表达式(9-8)可得

$$\mathbf{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{i0}^2} \mathbf{e}_{i0} \quad (9-10)$$

式中 r_{i0} 是 q_i 和 q_0 之间的距离, $\mathbf{e}_{i0}$ 是自点电荷 q_i 指向 q_0 方向的单位矢量.

由于电荷的量子化,实际带电体的带电荷量总是量子化的,但在研究实际宏观问题时,对于含有大量电子和质子的带电体系,通常可以认为电荷是连续分布的.对于电荷连续分布的带电体与点电荷之间的相互作用力问题,不能简单地应用点电荷之间的作用力公式(9-8)来计算,通常可以依据库仑定律和静电力的叠加原理来求解.

首先,基于微积分的思想,将整个带电体分成无限多个电荷元 dq ,每个电荷元 dq 可以看作点电荷,根据库仑定律,电荷元 dq 作用于 q_0 的静电力为

$$d\mathbf{F} = \frac{q_0 dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-11)$$

式中 r 是电荷元 dq 到点电荷 q_0 的距离, $\mathbf{e}_r$ 是电荷元 dq 指向受力电荷 q_0 方向的单位矢量,依据静电力叠加原理,作用于点电荷 q_0

的总静电力等于组成带电体的所有电荷元作用于该点电荷的库仑力的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-12)$$

上式的积分区间是整个带电体.利用该式来求解实际问题时,往往需要依据带电体的特点选取合适的电荷元 dq .

如果电荷分布在一定的体积区域,电荷体密度为 ρ (单位体积内的电荷量: $\rho = \frac{dq}{dV}$), 则电荷元 $dq = \rho dV$.

如果电荷分布在一定的面积区域,电荷面密度为 σ (单位面积内的电荷量: $\sigma = \frac{dq}{dS}$), 则电荷元 $dq = \sigma dS$.

如果电荷分布在一定的曲线上,电荷线密度为 λ (单位长度内的电荷量: $\lambda = \frac{dq}{dl}$), 则电荷元 $dq = \lambda dl$.

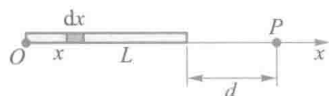


图 9-8 例题 9-1 用图

例题 9-1 如图 9-8 所示,真空中一长为 L 的均匀带电细直杆,总电荷量为 Q ,带电荷量 q_0 的点电荷放置在直杆延长线上到杆的一端距离为 d 的 P 点,求电荷 q_0 所受到的静电力.

解 建立如图所示坐标系,在直杆上距离坐标原点为 x 处取一长度为 dx 的电荷元,该电荷元带电为

$$dq = \frac{Q}{L} dx$$

根据库仑定律,电荷元 dq 对电荷 q_0 施加的电场力为

$$dF = \frac{q_0 dq}{4\pi\epsilon_0 (L-x+d)^2} \mathbf{i} = \frac{Qq_0 dx}{4\pi\epsilon_0 L (L-x+d)^2} \mathbf{i}$$

整个带电直杆对电荷 q_0 施加的电场力为

$$\mathbf{F} = \int dF = \int_0^L \frac{Qq_0 dx}{4\pi\epsilon_0 L (L-x+d)^2} \mathbf{i} = \frac{Qq_0}{4\pi\epsilon_0 d(L+d)} \mathbf{i}$$

物理方法总结: 叠加原理和叠加法

叠加原理是由实验事实总结出来的,直到现在,至少在宏观范围内尚未发现违反叠加原理的事实,但不能认为叠加原理是理所当然成立的,在涉及极小距离或极强相互作用的情况下,比如原子或亚原子范围尺度内,叠加原理不成立.许多物理量都具有可加性,服从叠加原理.根据可加性,可以把复杂的物理问题化解为简单的情况,再根据叠加原理进行叠加计算.这种把复杂问题看作是多个简单问题的叠加的方法叫做叠加法,这是物理学以及