

普通高等教育规划教材

大 学 物 理

下 册

主编 王祖源 张庆福
参编 彭海东 钟晓春 荣 健
主审 黄瑞霖

机械工业出版社

本教材是西南交通大学承担四川省教育厅“面向 21 世纪工科《大学物理》教学内容和课程体系改革”课题的研究成果。本教材立足素质教育,突出科学思想和科学方法,以对称性、整体论的概念和方法贯穿始终;加大教学内容现代化力度,强化作为 20 世纪物理学主要成果,现代物理思想方法载体和新技术基础的相对论、量子力学、非线性物理内容。全书分上、下两册,依照物理模型建立概念间的逻辑联系;在上册中讨论宏观粒子和多粒子体系,在下册中讨论场和微观粒子。

本教材可作为理工科大学非物理专业的物理教材,也可以作为专科院校、函授教师的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理. 下册/王祖源, 张庆福主编. —北京: 机械工业出版社, 2002. 4

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-10052-2

I. 大… II. ①王…②张… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 016205 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 季顺利 版式设计: 冉晓华 责任校对: 吴美英
商红云

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.375 印张·441 千字

0 001—4 000 册

定价: 24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本教材是西南交通大学承担，在四川省教育厅立项的“面向 21 世纪工科《大学物理》教学内容和课程体系改革”课题的研究成果。

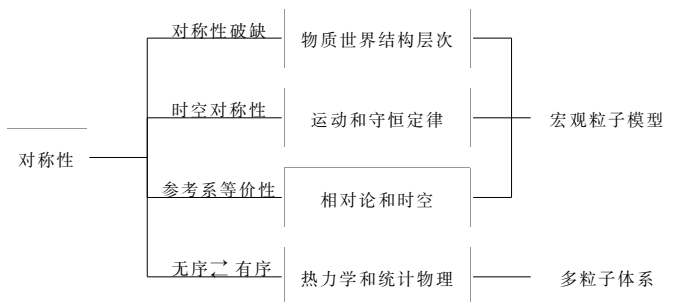
我们认为，物理教育是培养学生科学素质的教育。《大学物理》课程的教学目标在于让学生认识关于物质结构和物质运动的基本概念和普遍规律，建立较完整的物质世界图像和科学的世界观；培养学生勇于探索、求实创新的科学精神；帮助学生掌握科学方法，提高分析和解决问题的能力，从而为学生的持续发展打好基础。基于这样的认识，本教材的改革思路是：

一、突出科学思想和科学方法教育。在第一篇“物质世界”中即介绍在现代物理中占有重要地位的对称性思想方法，然后按微观—宏观—宇观层次阐述对物质世界基本结构的认识，从“理”和“物”两方面建立物质世界的总体图像，并以对称性、整体论的概念和方法贯穿始终。

二、加大教学内容现代化力度，强化作为 20 世纪物理学的主要成果——现代物理思想方法载体和新技术基础的相对论、量子力学、非线性物理内容。在用基础课风格讲授近代物理内容时遵循“观念更新、难点突破、重在概念、拓宽视野”的教学原则。

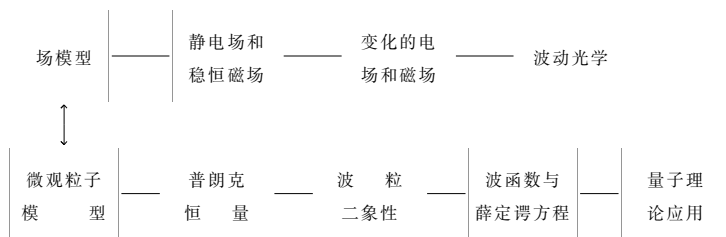
三、用现代物理观念审视经典物理内容。例如，经典力学部分以“时空对称性与守恒定律”为主题，经典电磁学部分以“场和场的描述”为主题，并突出其与现代工程技术的密切联系。

四、建立科学的教材结构。我们依照模型来建立概念间的逻辑联系：在上册中讨论宏观粒子和多粒子体系，在下册中讨论场和微观粒子。教材结构框图如下：



上册教学结构框图

IV 前 言



下册教学结构框图

本教材大纲曾在西南交通大学光电 97 级试行，在试行基础上形成讲义。该讲义在 98 级土木、机械、电气试点班试用后修订。其修订版在 99 级试点班试用，再次修订后定稿。

本教材所属课题于 2000 年 9 月通过省教育厅鉴定。其中对教材部分的评价是：“在教材内容现代化方面，改变了传统的‘确保经典，扩展近代’的模式。通过提炼‘知识结构’，使现代物理学中的相对论、量子力学、复杂性研究进入主渠道，对教材内容现代化做了有益的探索，教材面貌焕然一新。采用了教材整体设计与教学实践相结合的方式，通过教学反馈，不断修正，提高了教材的可教性。”

西南交通大学“大学物理”课程改革从 1993 年开始迄今已经 8 年，前期的教学实践为本教材的编写打下了好的基础。本教材大纲经王殖东、陈泽民、朱荣华、皮名嘉、杨光群、王彬、缪钟英、李崇虎等专家审评；黄瑞霖、袁玉辉、徐国忠教授及西南交通大学应用物理系基础物理教研室全体教师参与教材大纲的讨论；本教材编写、试用及出版过程得到西南交大教务处的大力支持，在此一并致谢。同时感谢在本教材编写中所参阅的著作、文献的作者。

本书的编写人员是：绪论、第一篇：徐行可、张晓；第二篇：徐行可、张星辉、彭海东；第三篇：徐行可；第四篇：王莉、张星辉；第五篇：王祖源、彭海东、钟晓春、荣健；第六篇：张庆福、王祖源。教材上册由王莉、徐行可统稿；下册由王祖源、张庆福统稿。全书由黄瑞霖教授审阅。

大学物理内容体系改革是一项需要不断努力、反复实践的艰巨课题。我们所做的工作还很不成熟，加上编者自身水平的局限，缺点、错误在所难免，期望得到专家、同行和读者的批评指正。

编 者

2002 年 1 月于成都

目 录

前言

第五篇 电磁场与电磁波

第十一章 真空中的静电场	1
第一节 场和场的描述	2
第二节 静电的基本现象和基本规律	6
第三节 静电场及其描述	9
第四节 电场分布和电场对带电体的作用	24
思考题和习题	39
第十二章 真空中的稳恒磁场	45
第一节 磁的基本现象和基本规律	45
第二节 稳恒磁场及其描述	50
第三节 若干磁场分布的计算	58
第四节 磁场对电流及运动电荷的作用	66
* 第五节 磁场是从哪里来的	77
思考题和习题	81
第十三章 物质中的静电场和稳恒磁场	87
第一节 导体中的静电场	87
第二节 电介质中的静电场	92
第三节 电场的能量	97
第四节 磁介质中的稳恒磁场	99
思考题和习题	104
第十四章 变化中的磁场和电场	107
第一节 电磁感应现象及其规律	107
第二节 感应电动势	110
第三节 自感和互感	120
第四节 磁场能量	124
第五节 位移电流	126

VI 目 录

第六节 麦克斯韦方程组	131
热点浅谈 磁单极子	134
思考题和习题	135
第十五章 波动光学	141
第一节 光的电磁理论	141
第二节 光的偏振	144
第三节 光的干涉	151
第四节 光的衍射	171
* 第五节 信息光学简介	186
思考题和习题	198
参考文献	204
第六篇 量子物理学基础	
第十六章 光的粒子性	205
第一节 具有里程碑意义的普朗克常数 h	205
第二节 从黑体热辐射谈普朗克常数 h 的发现过程	207
第三节 光电效应 爱因斯坦光子理论	213
第四节 康普顿散射	218
第五节 光的波粒二象性	223
思考题和习题	225
第十七章 实物粒子的波动性	228
第一节 物质波假设和实验验证	228
第二节 普朗克常数 h 制约一些量的不确定范围——不确定关系	236
第三节 波动性和粒子性	240
思考题和习题	242
第十八章 波函数与薛定谔方程	244
第一节 波函数与算符	244
第二节 波函数的统计解释	247
第三节 薛定谔方程	249
第四节 薛定谔方程简单应用	254
思考题和习题	263
第十九章 氢原子结构	264
第一节 原子的核式结构	264

第二节	原子光谱的实验规律	267
第三节	玻尔的氢原子理论	269
第四节	氢原子的薛定谔方程解	277
	思考题和习题	286
第二十章	量子理论应用简介	288
第一节	半导体物理基础	288
第二节	激光及其应用	302
* 第三节	非线性光学简介	314
第四节	超导与超流	320
第五节	纳米科学技术简介	334
	热点浅谈 固体光源	343
	思考题和习题	345
参考文献	346
附录	347
附录 A	人物译名对照	347
附录 B	习题参考答案	350

第五篇 电磁场与电磁波

公元前 600 年，古希腊的塞利斯记载了琥珀摩擦后能吸引草屑的现象，这是历史上对电现象的第一次文字记载。差不多同一时代，在我国的春秋战国时期，也已经知道琥珀摩擦后能吸引轻微物体的电现象，同时还知道天然磁石间相互吸引的磁现象，并发明了天然磁石制作的指南针。起初，人们认为电现象和磁现象是两种互不相关的自然现象。直到 1820 年，奥斯特发现了电流对磁针的作用，安培观察到磁铁对电流、电流与电流之间的相互作用以后，才开始认识到电与磁之间存在着密切的内在联系。1831 年，法拉第电磁感应现象的发现，树立了电磁学发展史上的重大里程碑，使人们从对电力、磁力的研究进入到对电场、磁场的研究，世界开始进入电气化时代。在前人的研究基础上，1865 年，麦克斯韦发展了场的概念，系统总结了电学和磁学研究的新成就，提出了电磁场理论，预言了电磁波的存在，并预言光也是一种电磁波。赫兹通过实验发现电磁波，并证实它的传播速度等于光速，1905 年爱因斯坦建立了狭义相对论，通过洛仑兹变换可以说明磁场与电场的联系。至此，电与磁统一的电磁学已发展成为经典物理学中相当完善的一个分支，可以用来说明宏观领域内的各种电磁现象。

本篇将从电磁学的三个基本实验规律出发，讨论静电场、稳恒磁场、变化中的电磁场的基本现象和规律，最后介绍位于电磁波谱中可见光波段的波动光学规律。

第十一章 真空中的静电场

本章着重讨论相对于观察者静止的带电体产生的电场——静电场。描述静电场最完备的方法是考查它对封闭曲面的通量和对闭合曲线的环流，计算电场强度 E 的空间分布，即 $E = E(r)$ 。这里，我们将首先介绍静电的基本现象和基本规律，研究真空中静电场的高斯定理和环路定理；再从点电荷电场强度公式和场的叠加原理出发，介绍计算 E 分布的基本方法。

第一节 场和场的描述

一、场的概念、标量场和矢量场

场的概念来源于数学，它是矢量分析的基础。在数学上，场是从量的方面去描述客观世界的某些共同特征，是客观世界的数量关系和空间形式的一种表示方式。

物理上场的定义是：当一个物理现象发生在空间（或空间的某个部分）中，如果描述该物理现象的某些物理量在此空间的每一点处都有一个确定的值，那么这些物理量的总体称为场。

如果该物理量是标量，就称在该空间中形成了一个标量场。例如，温度场、密度场是标量场；如果该物理量是矢量，则称为矢量场。速度场、电场、磁场都属于矢量场。

根据场的定义不难明白，场概念的本质是：物理量是用空间坐标点来表征的；用数学的语言来说，物理量是空间坐标的点函数。因此，在讨论场的性质时，我们的着眼点往往不是个别地方的物理量，而是该物理量与空间坐标之间的函数关系，即是一种空间分布。

这样，所谓的标量场，是指刻画某个物理现象的物理量 u 在给定空间点的数性函数，即

$$u = u(r) = u(x, y, z) \quad (11-1-1)$$

而给定一个矢量场，就相当于物理量 A 是给定空间点的矢量函数，即

$$A = A(r) = A(x, y, z) \quad (11-1-2)$$

或

$$A = A_x(x, y, z)i + A_y(x, y, z)j + A_z(x, y, z)k$$

若描述场的物理量 A 在空间各处的对应值不随时间发生变化，则称该场为稳定场；否则，就是变化场。

一般来说，真实的场是变化场。但是在一些实际问题中，如果在较短的时间内，物理量变化很小，就可以将它近似看作稳定场。为了简化，以下的分析只讨论稳定场，但所得的结论也适用于非稳定场每一瞬间的情况。

二、矢量场及其完备描述

1. 场线

对于矢量场 A ，在给定的空间点， A 的大小和方向都可以唯一地确定。为了形象地描述矢量场，人们曾经作过许多尝试，其中的一种方法是在空间的各点画出一系列带箭头的矢量来获得关于矢量场的图像，其中每一个矢量表示在该处场的大小和方向。但是由于这样要画许多小箭头来表示矢量分布，使图像过于繁杂，所

以这种描述方式并不常用。

描述矢量场最常用的辅助工具是场线。场线的画法是这样规定的：①由于在矢量场内每一点的 A 都有确定的方向，所以可以在场内人为地画出一些曲线，使曲线上每一点的切线方向与相应点 A 的方向一致，这种曲线就称为场线。②在场中任一点，穿过垂直于该点的 A 矢量的单位面积的场线条数，等于该点 A 的大小。这样，就把场线密度与 A 的大小联系起来。场线密度小的地方表示该处 $|A|$ 小，场线密度大的地方表示该处 $|A|$ 大，如图 11-1-1 所示。



图 11-1-1

在以后的学习中，我们将讨论电场线和磁感应线，它们都是场线的一种。

2. 对闭合曲面的通量

在任意一个矢量场 $A(x, y, z)$ 中，定义通过曲面 S 的通量为矢量函数对曲面 S 的面积分 $\iint_S A(x, y, z) \cdot dS$ 。

通量是描述矢量场基本性质的物理量，它是从流体力学引出的概念。在流体力学的研究中，常常在流体中取一个假想的截面 S ，则截面上每一点都相应有一个确定的流速，截面上各点的流速分布构成一个流速场 $v(x, y, z)$ 。若在截面上取一个面元 dS ，以 \hat{n} 表示其法向单位矢量（由此可以定义该面元的面元矢量 $dS = dS\hat{n}$ ），显然单位时间内穿过 dS 的流体体积为 $v \cdot dS$ ，这样 $\iint_S v \cdot dS$ 就是单位时间内通过截面 S 的流量，称为 v 对截面 S 的通量。

通量是与面积有关的物理量，为了更好地理解这个概念，我们从“元通量”的引入开始。

(1) 穿过面元 dS 的通量 在矢量场 A 中取一个无限小面积元 dS ，规定它的法向单位矢量为 \hat{n} ，这样就定义该面元的面元矢量为 $dS = dS\hat{n}$ ，由于 $dS \rightarrow 0$ ，这样面元 dS 上各点的 A 可以认为是均匀的，设在该面元处的矢量为 A ，如图 11-1-2 所示。定义

$$d\Psi = A \cdot dS = A \cdot \hat{n} dS \quad (11-1-3)$$

为穿过 dS 的元通量。根据场线密度的规定， $d\Psi$ 也就是穿过面元 dS 的场线条数。

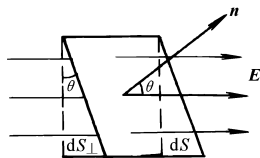


图 11-1-2 通过 dS 的元通量

(2) 穿过封闭曲面 S 的通量 对于非无限小的封闭曲面来说，曲面上 A 的大小和方向一般是逐点变化的，这时必须将元通量的概念进一步推广：在矢量场 A 中取某个封闭曲面 S ，该封闭面称为高斯面，将该曲面分割为无限多个连续的面积元 ΔS_i ，即 $S = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta S_i$ ，对于

任意一个面元 ΔS_i , 根据惯例, 规定指向外侧为该面元的法线方向 \hat{n}_i , 这样就定义了该面元的面元矢量 $\Delta S_i = \Delta S_i \hat{n}_i$, 设该面元处的 A 矢量为 A_i , 则根据元通量的定义式 (11-1-3) 有

$$\Psi_i = A_i \cdot \Delta S_i$$

为穿过该面元 ΔS_i 的元通量, 即场线条数。根据数学上曲面积分的概念, 穿过封闭曲面 S 的场线总条数 (或 A 对 S 的通量) 为

$$\Psi = \sum_{i=1}^{\infty} \Psi_i = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \Delta S_i = \oiint_S A \cdot dS \quad (11-1-4)$$

对于上式我们作以下的讨论:

论:

1) 如图 11-1-3 所示, 对于曲面上场线穿出处, 矢量 A 的方向与该处面元法线成锐角, 曲面此部分通量为正值; 曲面上场线穿入处, A 与面元法线成钝角, 曲面此部分通量为负值。式 (11-1-4) 给出了“穿入”与“穿出”通量的代数和。

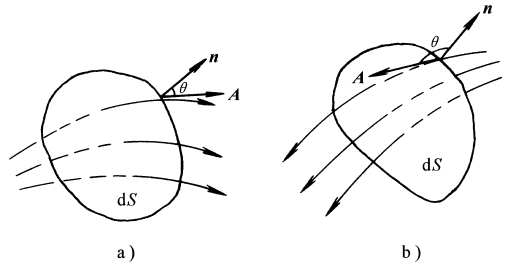


图 11-1-3

当 $\Psi > 0$ 时, 表示“穿出”的场线多于“穿入”的场线, 即穿出 S 的净条数 > 0 , 因而 S 内必有产生场线的“源”; 当 $\Psi < 0$ 时, 穿出场线少于穿入的场线, 即穿出 S 的净条数 < 0 , S 内必有消失场线的“汇”。

2) 若矢量场 A 对某个封闭高斯面 S 的通量 $\Psi = 0$, 那么, 有以下两种可能性: 其一, A 的场线是封闭曲线, 这样穿过 S 的场线净条数为零; 其二, 封闭曲面 S 内部没有源或汇。

3) 通量和散度。设有矢量场 $A(x, y, z) = A_x(x, y, z)i + A_y(x, y, z)j + A_z(x, y, z)k$, A_x, A_y, A_z 在任一闭合曲面 S 上, 及其所围体积 V 内, 都具有一阶连续偏导数, 则有

$$\oiint_S A \cdot dS = \iiint_V (\nabla \cdot A) dV \quad (11-1-5)$$

上式称为高斯公式, 其中 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$, $\nabla \cdot A$ 称为 A 的散度。

3. 对闭合曲线的环流

环流是描述矢量场的另一个基本物理量。数学上把矢量场 $A(x, y, z)$ 沿一条规定了绕行方向的有向闭合曲线 L 的线积分 $\oint_L A \cdot dl$ 称为矢量场 A 对闭合曲线 L 的环流。

环流与旋度有如下关系:

设空间一矢量场 $A(x, y, z) = A_x(x, y, z)i + A_y(x, y, z)j + A_z(x, y, z)k$, 若 A_x, A_y, A_z 在任一闭合曲线 L 上、以及在以 L 为边界的曲面 S 上, 都有一阶连续偏导数, 那么有

$$\oint_L A \cdot dl = \iint_S (\nabla \times A) \cdot dS \quad (11-1-6)$$

上式称为斯托克斯公式, 其中 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$, $\nabla \times A$ 称为 A 的旋度。

最初, 旋度的引入是用来描述运动流体的性质的, 为了看到旋度是怎样与旋涡或旋转相联系的, 可以考虑一种理想的旋转流动, 即流体以恒定的角速度 ω 绕 z 轴旋转。这时, 流体在 r 处的速度为

$$v = r\omega e_0^\wedge$$

利用 $e_0^\wedge = -\sin\omega t i + \cos\omega t j$ 可得

$$v = r\omega \left[-\frac{y}{r}i + \frac{x}{r}j \right] = -\omega y i + \omega x j$$

$$\nabla \times v = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\omega y & \omega x & 0 \end{vmatrix} = 2\omega k$$

若将翼轮或涡轮放在该流体中, 就会旋转起来, 当轮轴指向平行于上述 z 轴时, 旋转角速度将达到极大值。显然, 均匀流速场以及辐射状分布的球对称流速场都是零旋度的矢量场。它们都没有旋转的特征。

通常, 我们把旋度处处为零的矢量场, 称为无旋场; 否则就是有旋场。

4. 场的确定性问题

数学上可以证明: 在空间某区域内, 如果一个矢量场 A 的散度 $\nabla \cdot A$ 、旋度 $\nabla \times A$ 以及该区域的边界条件唯一确定 (换句话说, 在满足一定边界条件的情况下, 只要知道矢量场 A 对任意闭合曲面的通量和对任意闭合曲线的环流), 那么, 在这个区域内 $A = A(x, y, z)$ 就可以唯一地确定了。

三、电场和磁场的描述

如前面所提及的, 电场和磁场都是矢量场。对于这种矢量场的描述, 当然要遵循前面关于矢量场确定性问题提出的准则。如果用 E 来描述电场的电场强度矢量, 用 B 作为描述磁场的磁感应强度矢量, 将上面关于矢量场的完备性描述应用到对电磁场的描述上, 具体表现为讨论以下几个问题:

1) 讨论电场和磁场与空间坐标的函数关系, 即寻求不同情况下的函数表达式

$$E = E(r), B = B(r)$$

2) 用电场线和磁感应线形象地描述电场和磁场的分布。

3) 研究电场强度和磁感应强度对一个封闭曲面的通量, 即分别考查 $\oiint_s E \cdot dS = ?$ 和 $\oiint_s B \cdot dS = ?$

4) 研究电场强度和磁感应强度对一个闭合回路的环流, 即分别考查 $\oint_L E \cdot dl = ?$ 和 $\oint_L B \cdot dl = ?$

下面, 我们将分别对电场和磁场进行上述四个方面的讨论, 从而较全面地认识电场和磁场的性质。

第二节 静电的基本现象和基本规律

一、电荷

1. 电荷与物质

电是物质的一种基本特性。物质的电性质来自物质的微观结构。我们知道, 原子核中质子带正电, 核外电子带等量负电。由于原子核内质子数与核外电子数相等, 通常原子呈电中性, 宏观物体也呈电中性。而由于某些原因失去了一些电子的物体带正电, 得到了多余电子的物体带负电。物体带电的多少称**电荷量**, 简称**电荷**或**电量**。在国际单位制 (SI) 中电量的单位是库仑 (C)。

2. 电荷量子化

一个电子所带电量的绝对值称为**基本电荷**, 用 e 表示。目前 e 的测量值为

$$e = (1.602\ 189\ 2 \pm 0.000\ 004\ 6) \times 10^{-19} \text{C}$$

实验证明, 在自然界中电荷总是以基本电荷的整数倍出现的, 这个特性称为**电荷的量子性**。在第一篇中已经指明, 除夸克外的所有基本粒子的电荷数都是整数。虽然理论预言每个夸克或反夸克带电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$, 但实验上至今尚未发现单独存在的夸克, 即使得到证实, 在夸克这一层次上, 以 $\frac{1}{3}e$ 为基本电荷, 电荷仍是量子化的。由于宏观物体带电时一般带有大量的基本电荷, 我们描述电磁现象的宏观规律时可以从平均效果上考虑, 认为电荷是连续分布在带电体上的, 而只在阐明宏观现象的微观本质时才考虑电荷的量子性。

3. 电荷守恒

电子是非常稳定的基本粒子, 现在估计电子的寿命超过 10^{21} 年, 比推测的宇宙年龄还长。由于电荷量子化和电子的稳定性, 我们知道, 对于一个系统, 如果没有静电荷出入其边界, 那么该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变, 这就是**电荷守恒定律**。由于宏观物体的带电、电中和以及物体内的电流等过程都是微观带电粒子在物体内运动的结果, 所以电荷守恒实际上也就是在各种变化中系

统内粒子的总电荷数守恒。近代物理实验已经证实电荷守恒是一切宏观和微观过程都必须遵循的基本规律。而且从理论上指出电荷守恒也是自然界对称性（规范对称性）的一种反映。

4. 电荷的相对论不变性

实验证明，一个带电体所带的电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量相同。电荷的这一特性叫做电荷的相对论不变性。

二、库仑定律

对电现象最早的定量研究是在 18 世纪。1784~ 1785 年间，库仑通过扭称实验总结出两个静止点电荷之间相互作用的定量规律，现称之为库仑定律。所谓点电荷，是指这样的带电体，它本身的几何线度比起它到其它带电体的距离小得多。这种带电体的形状和电荷在其中的分布已无关紧要，因此我们可以把它抽象成一个带电的几何点。

库仑定律可以表述为：在真空中，两个静止点电荷之间相互作用力的大小与它们的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离 r 的平方成反比；作用力的方向沿着它们的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。 1121

如图 11-2-1 所示，用 F_{12} 表示 q_2 对 q_1 的作用力， $r_{12} = r_1 - r_2$ 表示 q_1 指向 q_2 的矢径， \hat{r}_{12} 表示其单位矢量，则库仑定律可以表示为

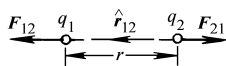


图 11-2-1 库仑定律

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \quad (11-2-1)$$

当下标 1 与 2 对调时，由于 $\hat{r}_{12} = -\hat{r}_{21}$ ，故有

$$F_{21} = -F_{12} \quad (11-2-2)$$

即静止电荷之间的相互作用满足牛顿第三定律。

在国际单位制中，式 (11-2-1) 的比例系数可以写成 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式，其中 ϵ_0 称为真空电容率，其 1986 年推荐值为

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

通常取 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

因此，在国际单位制中，库仑定律可以写成

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \quad (11-2-3)$$

库仑定律虽然是从宏观带电体间相互作用的实验中总结出来的，但近代有关原子的实验已经证实，分子和原子内部微观带电粒子间的相互作用也遵从库仑定律。目前认为，点电荷间距在 $10^{-17} \sim 10^7 \text{m}$ 范围内库仑定律都是成立的。

库仑定律中的平方反比关系是否严格成立是关系到许多近代物理结论的重要问题。物理学家设 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^{2+\delta}}$ ，并不断改进实验手段以更高的精度测量偏差值 δ ，结果如表 11-2-1 所示。

表 11-2-1 验证库仑定律平方反比关系的实验结果

实验者	时间(年份)	δ	实验者	时间(年份)	δ
罗比逊	1769	≤ 0.06	普利姆顿等	1936	$\leq 2 \times 10^{-19}$
卡文迪许	1773	≤ 0.02	考仑等	1968	$\leq 9.2 \times 10^{-12}$
库仑	1785	百分之几	巴兰特等	1970	$\leq 1.3 \times 10^{-13}$
麦克斯韦	1873	$\leq 5 \times 10^{-5}$	威廉姆斯	1971	$\leq 2 \times 10^{-16}$

可见，在目前测量精度范围内，库仑定律的平方反比关系是成立的。

【例 1】氢原子中电子和质子间距离 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，比较此二粒子间静电力和万有引力的大小。

解：

$$\text{电子: } q_e = -e \quad m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{质子: } q_p = e \quad m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{静电力: } F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{万有引力: } F_g &= \frac{Gm_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 3.7 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

所以
$$\frac{F_e}{F_g} = 2.2 \times 10^{39}$$

由此计算，我们知道在考虑原子内部结构时，与静电力相比，万有引力是完全可以略去不计的。

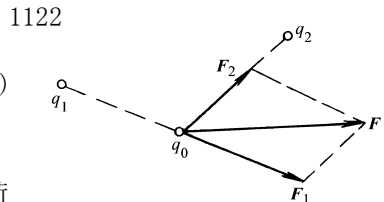
三、电力叠加原理

实验证明，当空间存在两个以上点电荷时，两个点电荷之间的作用力并不因为第三个点电荷的存在而改变。因此，任一点电荷所受的静电力等于空间所有其它点电荷单独存在时对该点电荷作用力的矢量和。这个结论叫做**电场力叠加原理**（图 11-2-2）。即

$$F = \sum_i F_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i r_i}{r_i^3} \quad (11-2-4)$$

式中， r_i 是由 q_i 指向 q_0 的矢量。

库仑定律和电力叠加原理是关于静止电荷间相互作用的两个基本实验定律，它们是静电学理论的基础。



q_0 与 q_1 同号，与 q_2 异号

图 11-2-2 电力叠加原理

第三节 静电场及其描述

一、静电场

1. 电场概念的引入

电场的概念起源于对库仑定律的解释。库仑定律给出了两个静止点电荷之间的相互作用力，但并没有说明这种作用是通过什么途径发生的。两个电荷相隔一定距离，虽无任何由原子、分子所组成的物质媒介，但却可以发生相互作用。

电荷间的相互作用究竟是怎样实现的？历史上曾经有过两种不同的观点。超距作用的观点认为电荷之间的相互作用不需要借助介质，也不需要传递的时间。即电荷间的相互作用可以超越空间和时间，直接、瞬时地实现。这种情况可以表示为

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

另一种观点是法拉第提出的场论的观点。法拉第首先发现了电极化和磁化现象。在两个空间上被隔开的带电体或磁性体中间的物质，即使它是被认为本来没有电性或磁性的介质，对电力和磁力亦有普遍反映，可以通过悬浮在带电体周围的绝缘油中的针状晶体微粒或撒在磁铁周围的铁粉显示出力的作用线的形状来。法拉第由此认为，中间介质是发生电现象和磁现象的场所。这就是“场”的概念的来源。按照这种观点，带电体周围存在着传递电力的中间物质，称为**电场**。两个电荷间的作用力实际上是一个电荷的场施于另一个电荷的作用。而且电力的传递不是瞬时的，它需要传递的时间。这种近距作用观点可以具体表示为

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电场} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

超距作用与近距作用观点谁是谁非只能通过实验来检验。但静止电荷激发的电场不随时间变化，对场中电荷作用的时间效应显示不出来，所以无法在静电情况下判断哪种观点正确。然而，当人们发现了电磁波并证明光波也是电磁波以后，超距作用的观点就被彻底否定了。实验表明，在发射电磁波的天线中加速运动着的电子对远处接收天线中电子的作用是通过其间的电磁场以有限速率传递的；在电容器火花放电时，即使电荷和电流已经消失，仍然有电磁场以波的形式继续存在和传播。

2. 静电场

现代科学已经证实“场”是物质存在的一种形态。其基本属性是具有动量和能量，而且通过交换其场量子来传递物质间的相互作用。电磁场的场量子是光子，电磁场是通过交换光子来实现带电粒子之间的动量和能量传递的。

相对于观察者，静止的带电体周围的场称为**静电场**。其特点是电场分布不随时间变化。静电场是电磁场的一种特殊情况。

静电场的对外表现是：第一，场中任何带电体都要受到电场力的作用（即场与带电粒子间的动量传递）；第二，带电体在场中移动时，电场力对带电体做功（即场与带电粒子间的能量传递）。我们将从这两点出发，引入两个物理量：电场强度 E 和电势 U ，用来描述静电场的特性，从而方便地解决电荷间的相互作用问题。

二、电场强度矢量 E

在对电场进行定量的研究中，首先需要引入电场强度矢量的概念。这是从带电体在电场中受力的角度来研究电场的。

为了研究电场对场中电荷施力这一特性，把产生电场的电荷称为**场源电荷**，并在其电场中引入**检验电荷** q_0 。场源电荷可以是点电荷、点电荷系或者是具有某种电荷分布的带电体。而检验电荷 q_0 必须是电量足够小的点电荷。因为要电量足够小才能不计 q_0 对场源电荷的作用而引起的场源电荷分布的变化，要几何线度足够小才能用它来检测空间各个场点的性质。

实验发现：同一检验电荷在电场中不同场点受力的大小、方向各不相同，而在每一确定的场点受力的大小方向恒定；不同的检验电荷在同一场点受力的大小与检验电荷的电量成正比，而当检验电荷异号时所受电力的方向也相反。也就是说，比值 F/q_0 无论大小还是方向都与检验电荷无关而只随场点变化。于是我们可以用这个比值来描述电场本身的特性，称为**电场强度定义**（简称场强），用 E 表示。

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (11-3-1)$$

可见，电场中任一点的电场强度在数值上等于单位电量检验电荷在该点受到的作用力，方向与正检验电荷在该点受力方向相同。所以，电场强度描述了电场各点对电荷施力的强弱和方向的特性。在 SI 中， E 的单位是牛顿/库仑 ($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$)（以后会看到，该单位还可以写作 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ，这是实际中更经常用到的写法）。

如果电场中空间各点的电场强度大小和方向都相同，这种电场就称为**均匀电场**。一般情况下， E 是场源电荷的电量分布和空间位置的函数。我们要定量研究电场，就要去求出各种场源电荷的场强分布函数。按照场强的定义式，我们可以从库仑定律出发，通过求解带电体在电场中的受力来求解电场强度的空间分布。为此，我们首先考虑最基本的场源电荷——点电荷的场强分布。

【例 1】 求点电荷 q 所产生的电场中各点的电场强度。

解：如图 11-3-1 所示，以场源点电荷 q 所在处为坐标原点，将检验电荷 q_0 引入场中任一点（场点） P 处，设想 $q_0 > 0$ ，由库仑定律， q_0 所受的电场力为