

大学物理教程

第二册

电磁学

吴锡珑 主编

上海交通大学出版社

356364

大学物理教程

第二册

电 磁 学

吴锡珑 主编

胡盘新 朱咏春 审



上海交通大学出版社

沪新登字 205 号

DW 56 59 P
内 容 提 要

本书是上海交通大学以国家教委 1987 年颁布的《高等工业学校物理课程教学基本要求》为依据编写的物理教材。全书共分四册：第一册力学、相对论和热物理学，第二册电磁学，第三册波动学和量子物理学，第四册学习指导和系列化习题。

本书在提高大学物理教材的科学性和教学性，体现教材内容的现代化方面作了进一步的探索。书中并附有介绍物理学前沿和科技新领域有关内容的多篇选读材料。

本书可作为理工科大学及专科院校的物理教材或参考书，也可供其他高等院校师生及中学物理教师参考。



大学物理教程

(第二册)

出版：上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)

发行：新华书店上海发行所

印刷：上海交通大学印刷厂

开本：850×1168(毫米)1/32

印张：10.875

字数：287000

版次：1991 年 12 月 第 1 版

印次：1991 年 12 月 第 1 次

印数：1—12000

科目：255—607

ISBN7-313-00913-5/O·4

定价：4.55 元

目 录

第三篇 电磁学	1
第十章 静电场	3
*§10-1 场的描述	3
§10-2 电力和电荷	7
§10-3 库仑定律 电力叠加原理	10
§10-4 电场强度	12
§10-5 高斯定理	23
§10-6 高斯定理的应用	30
§10-7 环流定理 电势	36
§10-8 电势的计算	40
§10-9 等势面和电势梯度	47
思考练习题	54
选读材料10 静电电子透镜	58
第十一章 导体电学	68
§11-1 导体的静电平衡性质	68
§11-2 空腔导体 静电屏蔽	76
§11-3 电容和电容器	82
§11-4 传导电流	87
§11-5 电动势 稳恒电场	94
§11-6 稳恒电流电路定律	97
思考练习题	102
选读材料11 超导电性和高温超导体	106
第十二章 电介质	117
§12-1 电介质的极化	117

§12-2	极化强度和极化电荷	121
§12-3	介质中的静电场	126
§12-4	电位移矢量	131
§12-5	介质边界两侧的静电场	138
§12-6	静电场能	142
	思考练习题	149
	选读材料12 热电体、压电体和铁电体	152
第十三章	稳恒磁场	160
§13-1	磁力和磁场 磁感应强度	160
§13-2	毕奥-萨伐尔定律	165
§13-3	磁高斯定理 安培环路定理	175
§13-4	磁场对载流导线的作用	185
§13-5	带电粒子的运动	196
*§13-6	电磁相对性	202
	思考练习题	209
	选读材料13 磁聚焦和磁约束	214
第十四章	磁介质	224
§14-1	顺磁性和抗磁性	224
§14-2	磁化强度和磁化电流	231
§14-3	介质中的磁场 磁场强度	236
§14-4	铁磁性	242
	思考练习题	249
	选读材料14-1 磁在信息技术中的应用	252
	选读材料14-2 磁泡	257
第十五章	变化电磁场	265
§15-1	电磁感应定律	265
§15-2	动生电动势	269
§15-3	感生电动势 感应电场	276
§15-4	自感和互感	290

§15-5	电感和电容电路中的暂态电流	300
§15-6	磁场能量	305
§15-7	位移电流	310
§15-8	麦克斯韦电磁场方程组	321
	思考练习题	325
	选读材料15 电磁场的相对论变换	332

第三篇 电磁学

前两篇已阐述了实物运动的一些基本规律，本篇介绍电磁相互作用和电磁场的运动规律。运动和相互作用是物质的永恒属性，所有自然现象是物质运动的表现，又都是物质间相互作用的结果。物质的运动、结构和性质无不与相互作用有关。所以，研究物质间相互作用的性质和规律是物理学的重要内容。

人们在本世纪 30 年代就已认识到，自然界有四种不同性质的相互作用，即引力作用、电磁作用、弱作用和强作用。70 年代末出现了弱电统一理论，并在 1983 年为实验证实。使人们进一步认识到电磁作用和弱作用实际上是统一的弱电作用的不同表现，正如电力和磁力是统一的电磁力的不同表现。弱电统一的成功使物理学家有理由相信：也许自然界仅有一种统一的相互作用。

大量实验事实证明，物质间相互作用不是超距地发生，而是由场传递的。例如，电磁力就是由电磁场传递的。因此，要研究相互作用的规律，就要研究场的性质，即研究场的产生、变化和运动的规律。研究表明，场不同于原子和分子所组成的实物，它是物质的一种特殊形态。正是场与实物间的相互作用，才导致了实物间的相互作用。

电磁作用是物质世界中最普遍的相互作用之一，这种作用既存在于宏观物体间，也存在于分子和原子内。电磁力比质引力强 10^{39} 倍，比强作用或弱作用的作用范围大 10^{20} 倍。电磁学就是研究物质间电磁相互作用，研究电磁场的产生、变化和运动的规律。

对于电磁现象的定量研究是从 18 世纪库仑定律建立时开始

的，后由高斯、安培、法拉第等人逐步确立了电和磁的各个定律。在这期间，法拉第首先提出了电场和磁场的概念。到 19 世纪中叶，麦克斯韦以其深刻的物理思想为基础，运用高超的数学技巧，建立了一组电磁场方程。这个方程组综合了各种宏观电磁现象的规律，从理论上发现了电磁波，并揭示出光的电磁本质。后来，洛仑兹又将麦克斯韦电磁理论应用于物质内的原子和分子，发展成电子论，从而可从微观角度解释物质的许多电磁性质。通常将以麦克斯韦电磁场方程为核心的电磁理论称为经典电磁学。电磁学是继牛顿力学之后物理学理论的又一重要成果。

众所周知，学习电磁学之所以重要，一方面在于电能和电器广泛用于各种领域；另一方面，正是电磁学向人们提供了关于电磁场的性质及其运动的完整理论，这些理论和方法在研究场的方面具有普遍意义。同时，有关电磁的一些知识也是学习其他物理理论，特别是原子、分子等微观理论和工科专业后继课程的基础。

第十章 静电场

在电荷周围的空中“存在着所观察到的电磁现象借以产生、并处于运动之中的物质”。麦克斯韦的这一论断早已为大量事实所证实，在电荷周围空间中的这种物质就是电磁场。相对于观察者为静止的电荷称静电荷，它产生的电场称静电场。静电荷只产生电场，不产生磁场，因此可以单独研究电场的性质和规律。本章还假定电荷的周围为真空，这样可以不涉及电场同其他物体或媒质的相互作用。为了描述静电场，首先引入描述电场的的一个物理量——电场强度，并从库仑定律出发得出静电场通量遵从的高斯定理，接着根据静电场的环流定理证明静电力是保守力，从而引入描述静电场的另一个物理量——电势。

*§ 10-1 场的描述

一、什么是场

按字义理解，所谓“场”是指某种物理量在空间的一种分布。例如，大气中不同地点有不同的温度就构成温度场，海洋中不同地点的海水有不同的流速就构成速度场，如此等等。而温度 T 和速度 v 就称为相应的场量。场量不仅与空间位置有关，而且也可能随时间变化，故它们一般可写成时空坐标 x, y, z, t 的函数，例如 $T(x, y, z, t)$ 和 $v(x, y, z, t)$ 。在同一时刻对应空间每一点就有场量的一个量值（还可能有一个方向）。因此，场在某时刻的状态对应的场量值是无限多的，这说明场是一个具有无穷多自由度的体系。通常将场量为标量的场称为标量场，场量为矢量的场称为矢量场。如果场量与空间坐标无关，就称为均匀场；

而当场量不随时间改变时则可能包括两种不同的情况，一种称静场，另一种称稳恒场（其不同点将在以后说明）。

以上是就场的广义概念而言的。在物理学中，“场”系专指物质的一种特殊形态，例如引力场、电磁场、核力场等等。实物和场是物质的两种形态，它们具有不同的性质、特征和不同的运动规律。实物之间的各种相互作用总是通过各种场来传递的，例如，两个电荷间的电力和两个电流间的磁力是分别通过电场和磁场来传递的，其传递的方式如图 10-1 所示。图中实线表示 A 激发的场并作用于 B，虚线表示 B 激发的场并作用于 A。

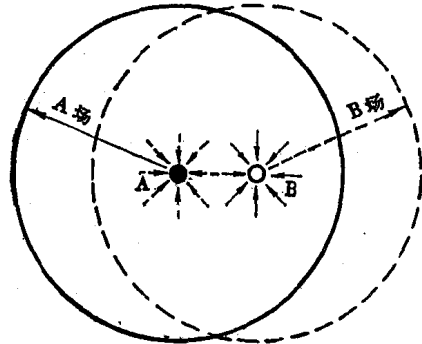


图 10-1

理论和实验证明静场储有质量和能量，运动的场还具有动量和角动量，而且场可以脱离激发它的源在空间以波的形式传播。

二、标量场的等值面和梯度

标量场的场量在空间各点只有大小，没有方向。为描述场的整体分布的特征，通常采用等值面（三维情形）和等值线（二维情形）的方法。图 10-2 示出了地形的等高线图 和 固体中的等温面图，沿垂直于等值面或等值线的方向可以计算场量的空间变化率，从而引入标量场的梯度。

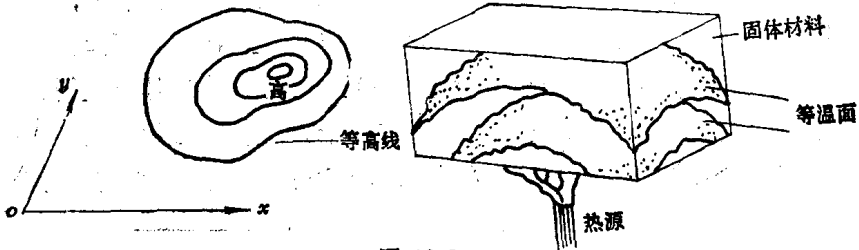


图 10-2

三、矢量场的通量和环流

1. 场线图

矢量场的场量在空间不同点上既可能有不同的量值也可能有不同的方向。如果将空间各点上的场矢量用在该处画出的一个小箭头代表，则大量小箭头的空间排列将能大致表征出场整体分布的特性，而且这些小箭头通常总是首尾相连，从而串成一条条有向的曲线，这曲线族就称为场线。场线上每点的切向代表该点场矢量的方向。另外还可用场线分布的疏密来反映场在各个区域的相对强弱（见图10-3）。

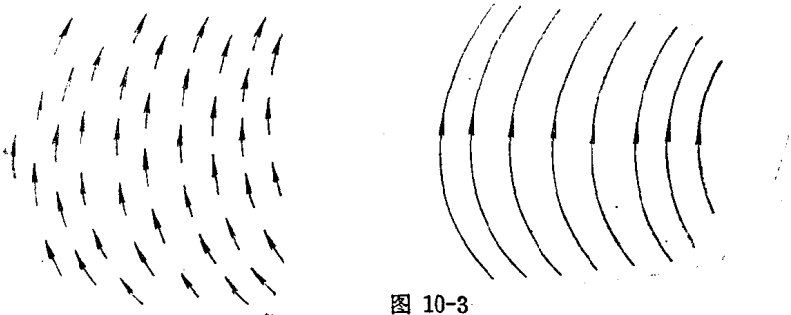


图 10-3

2. 通量

为了直观地说明矢量场中通量的概念，不妨以流体的速度为例子。设在不可压缩的流体中任取一曲面，那么单位时间内流过这个曲面的流体净质量就称为流体对这曲面的通量。在所选曲面是一闭合曲面的情况下，如果有流出闭合面的通量，则说明闭合面内一定存在喷出流体的源，相反，若有流入闭合面的通量，则说明闭合面内一定存在吸收流体的汇（负的源，见图10-4）。可见，利用通量的概念可以说明场与源的关系，而有关流体速度场的通量概念可以推广用以描述一切矢量场。

3. 环流

设在流体中任意选取一闭合曲线路径，看看流体沿此路径

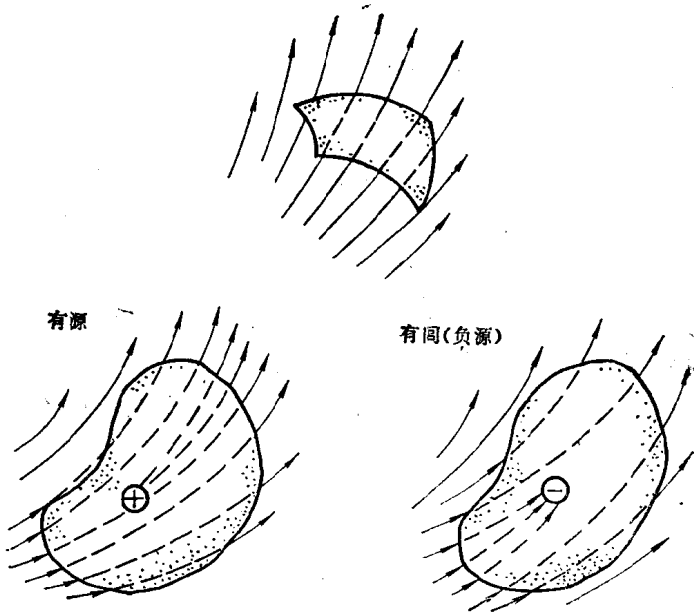


图 10-4

是否有环流。这话的意思是：设想沿这条路径有一个闭合的细管道，看流体在此管道中沿某一方向是否有净流动。流体中环流的大小说明流体在流动中所具有的涡旋性质。若在整个流体区域内对任取的闭合回路都无环流，这种流动称为无旋流动（见图 10-5）。环流的概念也可推广用以描述一切矢量场。通量、环流和梯度等是讨论电场和磁场性质时经常要研究的一些概念。

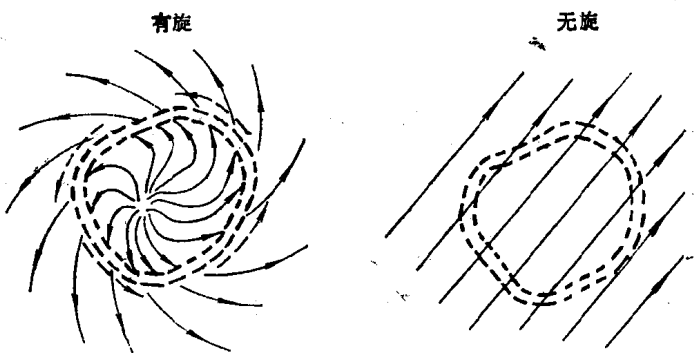


图 10-5

§ 10-2 电力和电荷

一、电力

在宏观世界和微观领域中都具重要性的相互作用是电磁作用。因此人们对电磁现象的规律也研究得最为深入、最富有成果。目前已经知道电磁相互作用具有以下一些特征：

(1) 就质子与电子的相互作用力来说，其静电力比质引力要强约 10^{39} 倍，即 1 千万亿亿亿倍。

(2) 电磁力伸展的范围很大，是一种长程力，而强作用和弱作用的力程只有 10^{-13} m，即仅限于在原子核大小的范围内。

(3) 电磁力有吸引和排斥两种形式，因此，电磁力可予以屏蔽或中和。

(4) 电力比磁力要强 c^2 倍 (c 为光速)。

二、电荷

电荷是代表物质间发生电力相互作用的一种属性，正如引力质量是反映物质间产生引力的一种属性一样。电荷与质量一样，同物质是不可分的。虽然如此，人们却经常将具有电荷的微观粒子称为带电粒子，但不要将“带电”两字误解为电荷是一种外加的东西。另一方面，宏观物体通常是由等量的电子和质子构成，只有当电子数和质子数的平衡被破坏时，即物体有了多余电子或多余质子的情况下才显示出电荷的存在，可见，将这种宏观物体称为带电体也未始不可。

1. 电荷的正负性

电力的重要特征是有吸引和排斥两种形式，这是由于存在两种电荷，并且同种相斥，异种相吸的缘故。1733年，迪费 (Du Fay) 首先将这两种电荷称为玻璃电 (玻璃棒被丝绸摩擦所带的电) 和树脂电 (橡胶棒被毛皮摩擦所带的电)。1750年，富兰克

林 (B. Franklin) 将其改称为正电和负电。

2. 电荷的量子性

电荷的量度称为电量。1897年, 汤姆孙 (J.J. Thomson) 发现电子。电子是一个具有最小静质量、带有最小负电荷的粒子, 其电量的近代测量值

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

C 是电量的 SI 单位, 称为库仑。它是电流强度单位——安培 (A) 的导出单位。它们的关系是 $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$, 即 1 C 等于 1 A 的电流强度在 1 s 内流过某截面的电量 (电流强度单位 A 的规定详见十三章)。

1913年, 密立根 (R. Millikan) 进行油滴实验, 测定了带电的油雾滴上的电量, 大量实验数据证实每个油滴上所带电量总是 e 的整数倍。1919年, 发现了质子, 确定它是带电量 $+e$ 的粒子。精密测量证明, 质子的正电荷和电子的负电荷在电量上是精确相等的 (达到 10^{-20} 的精度)。近代基本粒子实验查明: 所有基本粒子或带 $+e$, 或带 $-e$, 或为中性。因此, 在自然界中, e 是电量最小的基元电荷, 可称为电荷的量子。而任何电荷的电量总为基元电荷 e 的整数倍, 这一事实称为电荷的量子性。1964年, 盖尔-曼 (M. Gell-Mann) 首先提出, 一些基本粒子是由称为夸克和反夸克的更小粒子组成, 并预计夸克和反夸克的电量应取 $\pm \frac{1}{3} e$ 或 $\pm \frac{2}{3} e$ 。但这一假设迄今尚未得到实验证实, 今后即使真的发现了夸克也不会改变电荷的量子性这一结论。

3. 电荷守恒性

实验证明, 在一个孤立系统中, 系统所具有的正负电荷电量的代数和总保持不变。这一性质称为电荷守恒定律。在微观粒子的反应过程中, 反应前后的基元电荷总数是守恒的。例如, 一个高能光子在原子核附近能转化为一个正电子 ($+e$) 和一个电子 ($-e$), 即电子偶; 反之, 电子偶又可以湮灭产生几个光子, 而

在这些反应前后，基元电荷总数保持为零。对于宏观带电体的起电、中和、感应和极化等现象，其系统所带电荷电量的代数和也总保持不变。

4. 电荷运动不变性

实验还证明，一个电荷，其电量与它的运动速度或加速度均无关。例如加速器将电子或质子加速时，随着粒子速度的变化，它们质量的变化是很明显的，但电荷却没有任何变化的迹象。这是电荷与质量的不同之处。电荷的这一性质表明系统所带电荷与参考系无关，即具有相对论不变性。

需要指出，今天人们对电荷的认识还是不很完全的，在理论上还不能说明自然界中的最小电量为什么是 e ，也不能解释为什么电量 e 能聚集在电子那样小的尺度内(小于 10^{-13} m)，而不会因巨大的斥力而崩溃。我们只能将这些未解的谜搁在一边，转而研究电荷所产生的各种现象和规律。

表 10-1 某些物体所带电量值(C)

地表	约 -5×10^5
雷雨云	约 $10 \sim 10^2$
电容器(100 V, 50 μ F)	5×10^{-3}
直径 0.3 m 的导体球面 (达到击穿场强)	约 7.5×10^{-6}
百万 eV 范德格拉夫静电加速器的高压金属罩(直径 1m)	约 10^{-4}
电子	-1.6×10^{-19}
质子	1.6×10^{-19}
一杯(250g)水中包含的正负电荷	$\pm 1.3 \times 10^7$
人体中包含的正负电荷	$\pm 4 \times 10^9$

§ 10-3 库仑定律 电力叠加原理

一、库仑定律

最先对电力作定量研究的是库仑(C. A. Coulomb)。因为两个带电体间的电力与许多因素有关，其中包括电荷的正负，电量的多少，带电体的尺度和形状、它们的相对距离和运动情况，以及空间是否有媒质等。为简化问题，先提出点电荷的概念。一个形状和大小可以不计的带电粒子或带电体称为点电荷，这是电学中的一个理想模型，很类似于力学中的质点模型。当带电体的尺度和形状与带电体间的距离相比可以略去时，就可将它们视为点电荷。

库仑在 1785 年研究了在真空中两个静止点电荷之间的电力。通过实验，他总结出库仑定律：

在真空中两个静止点电荷间的相互作用电力，其方向沿两个点电荷的连线，同种电荷相斥，异种电荷相吸；其大小与两点电荷的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比。库仑定律可用矢量公式表示为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (10-1)$$

式中： \mathbf{F} 表示 q_2 对 q_1 的作用力， r 表示 q_1, q_2 间的距离， \hat{r} 表示从 q_2 指向 q_1 的单位矢量， k 仅是比例系数，如图 10-6 所示。

q_1 和 q_2 是视其电荷的正负而带有正负号的代数量。当 q_1 与 q_2 同号时， \mathbf{F} 与 \hat{r} 同向， $-\mathbf{F}$ 与 \hat{r} 反向，这时 q_1 与 q_2 相斥；当 q_1 与

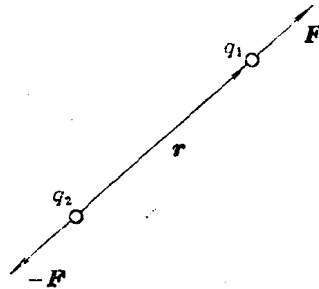


图 10-6

q_2 异号时, \mathbf{F} 与 $\hat{\mathbf{r}}$ 反向, $-\mathbf{F}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}$ 同向, 这时 q_1 与 q_2 相吸。

在 SI 中, 距离用米(m), 力用牛顿(N), 电量用库仑(C)作单位, 并由实验测得比例系数

$$k=8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2。$$

为了以后的方便, 通常采用另一常量 ϵ_0 , 使 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 而

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.8541 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2, \quad (10-2)$$

ϵ_0 称为真空介电常数(又称真空电容率)。因此, 库仑定律又可表示为

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}。 \quad (10-3)$$

库仑当时从实验得到 r 的幂为 2, 误差约为 10^{-2} 。现代可用更精密的测量方法证实 r 的幂取 2 的误差不超过 10^{-9} , 而且在 r 从 $10^{-15} \sim 10^7 \text{ m}$ 的广大范围内都证明库仑定律是正确有效的。

二、电力叠加原理

当空间存在多个点电荷时, 对于每两个点电荷间的电力, 库仑定律仍被证明是有效的。于是某个点电荷受到来自其他点电荷的总静电力应等于所有其他点电荷单独作用的静电力的矢量和, 这一结论称为电力叠加原理。

具体地说, 设有 n 个点电荷组成的点电荷系, 由库仑定律得出第 i 个点电荷 q_i 受到其他点电荷(以 q_j 表示)作用的总静电力

$$\mathbf{F} = \sum_j \mathbf{F}_j = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_j \frac{q_i q_j}{r_j^2} \hat{\mathbf{r}}_j, \quad (10-4)$$

r_j 和 $\hat{\mathbf{r}}_j$ 表示从 q_i 到 q_j 的距离和单位矢量。电力叠加原理是从实验得到的基本原理, 由此导致描述电场的一些重要物理量也满足叠加性。