

面向 21 世纪高等院校教材

# 电磁学教程

洪正平 刘杰 主编

DIAN CI XUE  
JIAO CHENG

山东大学出版社

面向 21 世纪高等院校教材

---

# 电 磁 学 教 程

洪正平 刘杰 主编

山 东 大 学 出 版 社

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁学教程/洪正平,刘杰主编. —济南:山东大学出版社,2001.8

ISBN 7-5607-2304-7

I. 电…

II. ①洪…②刘…

III. 电磁学-师范大学-教材

IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 055153 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

山东日照日报社印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 10.75 印张 278 千字

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—2200 册

定价:21.00 元

**版权所有,盗印必究!**

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部负责调换

# 前 言

本书是根据作者多年来在山东师范大学物理系讲授《电磁学》课程所使用的讲稿编撰而成的,内容广泛采用了国内外教学研究的最新成果,并充分体现师范院校的教学特点。目的在于为高等师范院校师生提供一本得心应手的电磁学教材或参考书。

本书从师范院校的特点出发,着重阐述了电磁学现象的基本规律和基本概念,力求使读者对电磁学课程的核心内容有一个较为全面深入的了解。全书主要包括“场”和“路”两部分。“场”包括静电场和静磁场;“路”包括直流电路、交流电路和磁路。为了开拓学生的知识面,本书对电磁学的一些最新发展作了介绍,力求将电磁学的最新成就融于基本概念和基本理论的阐述中。在本书的编写过程中注重和目前中学教学内容相衔接以及实际应用的需要。此外,书中还选编了一些有启发性的例题和习题,书末附有习题答案,希望对读者的学习能有所帮助。本书可供开设电磁学课的师范类及物理公共课教材选用。

本书编写分工如下:刘杰副教授:第四章、第八章、第九章及书中部分插图;洪正平副教授撰写了其余内容,编写了全部习题及答案,并负责全书的统稿。

本书在编写和出版过程中得到了林典要教授、张培基副教授的关心和帮助,并对本书的修改提出了许多意见和建议。本书的



出版得到了山东师范大学各级领导以及现代光学实验室的老师们的的大力支持和资助,同时还得到了山东师范大学出版基金的资助。对此一并表示衷心的感谢。

由于成书时间紧迫和作者水平所限,书中不妥和疏漏之处在所难免,真诚地希望读者批评指正。

编 者

2001 年 5 月于山东师范大学  
现代光学实验室

# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| <b>第一章 静电场</b> .....       | (1)  |
| 1.1 电荷 .....               | (1)  |
| 1.2 库仑定律 .....             | (3)  |
| 1.3 电场强度 .....             | (6)  |
| 1.4 高斯定理.....              | (17) |
| 1.5 安培环路定理.....            | (28) |
| 1.6 等位面 电场和电位的微分关系.....    | (38) |
| 习 题 .....                  | (41) |
| <b>第二章 静电场中的金属导体</b> ..... | (45) |
| 2.1 金属导体的静电平衡.....         | (45) |
| 2.2 导体表面的电场和电荷.....        | (47) |
| 2.3 封闭导体壳内外的场.....         | (51) |
| 2.4 有导体存在时静电问题的分析方法.....   | (54) |
| 2.5 电容和电容器.....            | (59) |
| 习 题 .....                  | (66) |
| <b>第三章 静电场中的电介质</b> .....  | (70) |
| 3.1 电介质对电场的影响.....         | (70) |
| 3.2 电介质的极化.....            | (71) |
| 3.3 极化强度和极化电荷.....         | (74) |



|            |                       |       |
|------------|-----------------------|-------|
| 3.4        | 有介质时的高斯定理             | (78)  |
| 3.5        | 静电场的能量                | (85)  |
| 3.6        | 有介质时的静电场方程            | (94)  |
|            | 习 题                   | (97)  |
| <b>第四章</b> | <b>稳恒电流</b>           | (102) |
| 4.1        | 电流的稳恒条件               | (102) |
| 4.2        | 一段均匀电路的欧姆定律 焦耳定律      | (106) |
| 4.3        | 电源及其电动势               | (113) |
| 4.4        | 一段含源电路的欧姆定律和闭合电路的欧姆定律 | (118) |
| 4.5        | 简单电路                  | (125) |
| 4.6        | 复杂电路与基尔霍夫定律           | (133) |
|            | 习 题                   | (139) |
| <b>第五章</b> | <b>稳恒电流的磁场</b>        | (143) |
| 5.1        | 磁相互作用                 | (143) |
| 5.2        | 毕奥-萨伐尔定律              | (145) |
| 5.3        | 磁场中的高斯定理和安培环路定理       | (151) |
| 5.4        | 磁场对载流导线的作用            | (160) |
| 5.5        | 运动电荷产生的磁场及电荷在磁场中的运动   | (166) |
|            | 习 题                   | (175) |
| <b>第六章</b> | <b>磁介质</b>            | (179) |
| 6.1        | 磁介质的磁化                | (179) |
| 6.2        | 磁化强度                  | (183) |
| 6.3        | 有磁介质时静磁场的基本规律         | (185) |
| 6.4        | 铁磁质                   | (192) |
| 6.5        | 磁路定律及其应用              | (197) |
| 6.6        | *磁场的边值条件              | (203) |
|            | 习 题                   | (206) |



|                          |       |
|--------------------------|-------|
| <b>第七章 电磁感应</b> .....    | (209) |
| 7.1 电磁感应现象 .....         | (209) |
| 7.2 法拉第电磁感应定律 .....      | (212) |
| 7.3 动生电动势 .....          | (218) |
| 7.4 感生电动势 .....          | (223) |
| 7.5 自感和互感 .....          | (230) |
| 7.6 暂态过程 .....           | (239) |
| 7.7 磁能 .....             | (248) |
| 习 题.....                 | (253) |
| <b>第八章 交流电路</b> .....    | (259) |
| 8.1 描述简谐交流电的特征量 .....    | (260) |
| 8.2 交流电路中的基本元件 .....     | (262) |
| 8.3 交流电路的矢量分析法 .....     | (267) |
| 8.4 交流电路的复数分析法 .....     | (272) |
| 8.5 交流电的功率 .....         | (280) |
| 8.6 谐振现象 .....           | (287) |
| 习 题.....                 | (294) |
| <b>第九章 电磁场和电磁波</b> ..... | (298) |
| 9.1 位移电流 .....           | (298) |
| 9.2 麦克斯韦方程组 .....        | (306) |
| 9.3 电磁波 .....            | (308) |
| 习 题.....                 | (321) |
| <b>部分习题参考答案</b> .....    | (323) |



# 第一章 静 电 场

## 1.1 电 荷

### ● 1.1.1 两种电荷

很早以前,人们就发现了用毛皮或丝绸摩擦过的有机玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒等都具有吸引轻小物体的作用,这表明它们在摩擦后处于一种特殊的状态,我们把处于这种状态下的物体称为**带电体**,并说它们带有了电荷或带了电。用摩擦的方法使物体带电叫做**摩擦起电**。实验表明,无论用什么方法使物体带电,所带的电荷只有两类:或者与丝绸摩擦过的有机玻璃棒上的电荷相同,或者与毛皮摩擦过的硬橡胶棒上的电荷相同。为了区别这两种电荷,我们把前者称为正(阳)电荷,后者称为负(阴)电荷。电荷之间的相互作用规律是:**同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引**。

### ● 1.1.2 物质的电结构

摩擦可以使物体带电这一实验事实,可以用物质的微观结构来解释。我们所见到的宏观物体都是由分子、原子组成的。任何



元素的原子都是由带正电的原子核和一定数量的绕核运动的带负电的电子构成的。原子核又是由带正电的质子和不带电的中子构成的。一个质子所带正电荷的电量与一个电子所带负电荷的电量相等。在通常情况下原子内的电子数和原子核内的质子数相等,因而整个原子是电中性的。因此,通常宏观物质呈电中性状态。但是,一旦物体因某种原因得到或失去电子,使得电子数与质子数不再相等,物体就呈现出带电性。就是说它带有电荷。摩擦起电就是通过摩擦的方法使电子从一个物体转移到另一个物体上的。材料不同的两种物体摩擦后会出现等量异号的电荷。实验表明,当两种等量异号的电荷相遇时,相互中和。随着近代物理学的发展,可以证明下列核反应: ${}_{90}\text{Th}^{234} \rightarrow {}_{91}\text{Pa}^{234} + {}_{-1}\text{e}^0$ , 该反应似乎可以看成 ${}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_1\text{p}^1 + {}_{-1}\text{e}^0$ 。这启发我们想到尽管中子不带电,但可以认为中子处于正负电荷中和的状态。可以推论,一切物质都是由带电粒子组成的。因此,可以说一切物质都具有质量,也都具有电量。

### ● 1.1.3 电荷守恒定律

大量实验证明,电荷不能被创造,也不能被消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体上,或从物体的一部分转移到另一部分。也就是说,在一个与外界没有电荷交换的系统中,无论进行任何物理过程,正负电荷的代数和始终保持不变。这称为**电荷守恒定律**。近代物理实验表明,电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立,而且在一切微观过程中也成立,它是物理学中的基本定律之一。

到目前为止的所有实验表明,电子或质子是自然界中带有最小电荷量的粒子,任何带电体或其他微观粒子所带的电荷量都是电子或质子电荷量的整数倍。这表明物体所带的电荷量不可能连续地取任何值,而只能取某一基本单元的整数倍,这个基本单元就是一个电子或质子所带的电量,测量表明: $e = -1.6 \times 10^{-19}$ 库仑



(称作电子电荷量)。电荷量的这种只能取分立的、不连续量值的性质,称为电荷的量子性。近代物理从理论上预言有一种电量为  $\frac{1}{3}e$ ,  $\frac{2}{3}e$  的基本粒子(称为层子或夸克)存在,并认为质子和中子等许多粒子都是由层子组成,不过至今尚未在实验中发现。

电荷的另一个重要特性是它的相对论不变性,即电荷的电量与它的运动状态无关。在不同的参考系中观察同一带电粒子的电量不变。

#### ● 1.1.4 导体 半导体 绝缘体

电荷可以从物体的一部分转移到另一部分,但并不是所有物体都允许电荷顺利通过,习惯上按照电荷在其中是否容易转移或传导它,把物体分为三类:① 电荷能够从产生的地方迅速转移或传导到其他部分的物体称作**导体**,如金属、电解液、人体、电离的气体、地球等;② 电荷几乎只能停留在产生的地方的物体称作**绝缘体**,如玻璃、橡胶、丝绸、陶瓷、未电离的气体等;③ 电荷的转移能力介乎于导体和绝缘体之间的物体称作**半导体**,这类物体对温度、光照、杂质、电磁场等外加条件极为敏感。特别指出,这种分类不是绝对的,它们之间没有严格的界限,在一定条件下,物体转移或传导电荷的能力(或称导电能力)将发生变化。

## 1.2 库仑定律

物体带电后的主要特征是带电体之间有相互作用力。实验表明,两个静止的带电体之间的相互作用力除了与带电体的电量及相对位置有关外,还与带电体的大小、形状及电荷分布有关。要用实验直接确立所有这些因素对带电体相互作用力的影响是困难



的。为了简化讨论,我们引入一个理想化的模型——点电荷。所谓点电荷,就是带电的质点。带电体能否被看作点电荷,取决于所研究问题的精度。

1785年,法国物理学家库仑通过扭称实验(称为库仑扭称实验)总结出两个点电荷之间的相互作用力所遵循的规律,称为库仑定律。其表述如下:真空中两个静止的点电荷  $q_1$  和  $q_2$  之间的相互作用力的大小与  $q_1$  和  $q_2$  电量的乘积成正比;和它们之间距离的平方成反比;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。库仑定律的数学表达式为:

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (1.2-1)$$

式中  $q_1$  和  $q_2$  分别表示两个点电荷的电量,  $\mathbf{F}_{12}$  表示  $q_1$  对  $q_2$  作用力,  $r$  表示  $q_1, q_2$  之间的距离,  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  表示  $q_1$  指向  $q_2$  的单位矢量,  $k$  是比例常数,它由公式中各量的单位决定。无论  $q_1, q_2$  的正负如何, (1.2-1) 式都适用。当  $q_1, q_2$  同号时,  $\mathbf{F}_{12}$  沿  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  的方向, 为排斥力; 当  $q_1, q_2$  异号时,  $q_1$  与  $q_2$  的乘积为负值,  $\mathbf{F}_{12}$  沿  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  的反方向, 为吸引力。当下标对调时,  $\hat{\mathbf{r}}_{21} = -\hat{\mathbf{r}}_{12}$ , (1.2-1) 式还说明,  $q_2$  对  $q_1$  的作用力  $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$ , 如图 1.2-1 所示。

两静止点电荷之间的库仑力符合牛顿第三定律。(1.2-1) 式各量的单位取决于所采用的单位制, 本书采用国际单位制。在国际单位制中, 电量的单位为库仑, 它定义为导线中通有一安培的稳恒电流时, 在一秒钟内通过横截面的电量为一库仑, 即 1 库仑 = 1 安培·秒。

在(1.2-1)式中若选定  $F, r, q$  的单位分别为牛顿、米、库仑后, 比例常数  $k$  要通过实验来测定。实验测得

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2$$

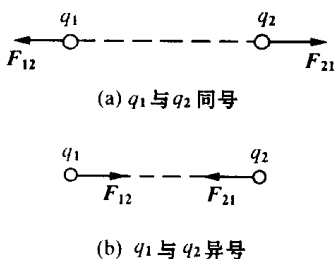


图 1.2-1 库仑定律



为方便起见,常写成

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

式中  $\epsilon_0$  称为真空中的介电常数,是一个基本物理常数,由实验测定,它的值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2$$

引入  $\epsilon_0$  后,(1.2.1)式可写成

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (1.2-2)$$

尽管库仑定律是从宏观带电体的实验结果总结出来的,但是,近代的实验表明,对于原子内的质子、电子这样的微观带电粒子,即使它们之间的距离小至  $10^{-15} \text{ m}$ ,库仑定律仍然成立。可以证明,对库仑定律的适用条件可放宽到只要施力电荷静止即可,受力电荷可以运动。

实验指出,当空间有多个点电荷存在时,任意两个点电荷之间的静电力不因其他点电荷的存在而改变。因此,作用在任意一个点电荷上的总的静电力等于其他点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和。这称为静电力的**叠加原理**。

用库仑定律和静电力的叠加原理,原则上可以求出任意两个带电体之间的相互作用力。我们可以把其中任一个带电体划分成许多足够小的带电元,使得每个带电元都能看成点电荷,这样,每个带电体就可以看成是一组点电荷的集合体,这样,两个带电体之间的静电力就等于这两组点电荷之间的相互作用力。

库仑定律和叠加原理是静电学中的两条最基本的实验定律。以后我们将进一步看到,静电学的基本定律都可以由它们导出。



## 1.3 电场强度

### ● 1.3.1 电 场

两个带电体之间并不直接接触,但它们之间却有相互作用力。这说明带电体周围存在一种特殊物质,它不像实物那样由分子、原子构成,但却是一种特殊存在的,它对处在其中的任何电荷都有作用力,我们把这种特殊物质称为**电场**。任何电荷都会在自己周围的空间激发电场,该电场对位于其中的任何其它电荷都有作用力。对于两个点电荷  $q_1$  和  $q_2$  来说,  $q_1$  处于  $q_2$  激发的电场中,受到  $q_2$  的电场施加的作用力;另一方面,  $q_2$  也处于  $q_1$  激发的电场中,受到  $q_1$  的电场施加的作用力。因此,电荷与电荷之间的作用力是通过电场来完成的。用一个图示概括,则为

电荷 $\longleftrightarrow$ 电场 $\longleftrightarrow$ 电荷

静止电荷激发的电场称为**静电场**。静电场是电磁场的一个特例。场和实物是物质存在的两种不同形式,电磁场和实物一样具有能量、动量、质量。电磁场能够独立存在,即使激发它的电荷已经消失,它仍然能继续向前传播,这些都表明了它的物质性。但是,场也有它的特殊性,实物占据的空间不能被其他实物所占据,而几个电荷产生的静电场却可以同时占据同一空间,也就是说场可以叠加,所以,我们称场是一种特殊物质。

### ● 1.3.2 电场强度矢量

为了对电场进行定量研究,我们引入电场强度矢量的概念。由于电场对位于其中的电荷有施力的本领,我们可以把点电荷  $q_0$  放于其中,通过测量它受的力来研究电场。用以探测电场的电荷



$q_0$  称为**试探电荷**。为了测量的准确性,试探电荷应满足两个条件:① 它的电量应充分小,它的引入不会影响原来电场的分布,以保证所要研究的电场不受试探电荷的影响;② 它的几何线度要足够小,以至可以把它看成点电荷,以保证可以逐点地研究场的性质。实验表明,把同一试探电荷  $q_0$  放入电场中不同地点时,  $q_0$  所受力的方向和大小逐点不同,但在电场中一个给定点处,  $q_0$  所受力的方向完全一定的。如果在电场中某给定点处我们改变试探电荷  $q_0$  的量值,可以发现,  $q_0$  所受力的方向不变,但力的大小却和  $q_0$  的量值成正比的改变。可见试探电荷在电场中某点所受的力,不仅与试探电荷所在点的电场性质有关,而且与试探电荷本身的电量有关。但比值  $F/q_0$  却与试探电荷本身无关,它是反映电场本身性质的。因此,我们在电场中不同点放置相同的试探电荷,哪一点电荷受力大,我们就说哪一点的场强就大。我们把该比值定义为电场强度,简称场强,用  $E$  表示

$$E = F/q_0 \quad (1.3-1)$$

上式表明,电场中某点的电场强度是一个矢量,其大小等于单位正电荷在该点所受的电场力,方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致。在电场中任意一点有一个确定的电场  $E$ ,对同一场中的不同点,  $E$  一般不同,所以,电场强度是一个矢量点函数。如果电场中各场强的大小和方向都相同,那么这种电场称为**均匀电场**,均匀电场是静电场的一个特例。

当静电场中某点的场强  $E$  已知时,位于该点的电量为  $q$  的点电荷所受的静电力为:

$$F = qE \quad (1.3-2)$$

在国际单位制中电场强度的单位是牛顿/库仑,以后将会看到,这一单位还可以写成伏特/米。



### ● 1.3.3 电场强度的计算

#### (1) 点电荷的电场

由场强的定义及库仑定律可知,点电荷  $Q$  激发的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.3-3)$$

式中  $\hat{\mathbf{r}}$  为从  $Q$  点指向场点的单位矢量,  $r$  是  $Q$  到场点的距离。上式表明,点电荷  $Q$  的场强数值随场点与  $Q$  的距离按平方反比规律减小,方向则沿场点与  $Q$  点的连线,当  $Q > 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\hat{\mathbf{r}}$  同向,场强方向背离  $Q$  点,当  $Q < 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\hat{\mathbf{r}}$  反向,场强方向指向  $Q$  点。

当电场由  $n$  个点电荷激发时,用  $\mathbf{F}_i$  表示第  $i$  个点电荷对试探电荷  $q_0$  作用的静电力,根据力的叠加原理,  $q_0$  在电场中某点所受的静电力

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i q_0}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (1.3-4)$$

式中  $Q_i$  是第  $i$  个点电荷的电量,  $\mathbf{F}_i$  是  $Q_i$  对  $q_0$  的作用力,  $r_i$  是  $Q_i$  到场点( $q_0$  点)的距离,  $\hat{\mathbf{r}}_i$  是从  $Q_i$  指向场点的单位矢量。根据场强的定义,场点的电场强度为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0 = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (1.3-5)$$

式中  $\mathbf{E}_i$  是第  $Q_i$  个点电荷单独存在时在场点产生的电场强度。(1.3-5)式表明,在多个点电荷产生的电场中,某点的电场强度等于每个点电荷在该点产生的电场强度的矢量和,这称为场强的**叠加原理**。

例题 1.3-1 一对等量异号的点电荷  $+q$  和  $-q$ , 相距  $l$ , 求两点电荷延长线上一点  $P$  和中垂面上一点  $P'$  的场强。设  $P$  和  $P'$  到两电荷连线中点  $O$  的距离都是  $r$ 。

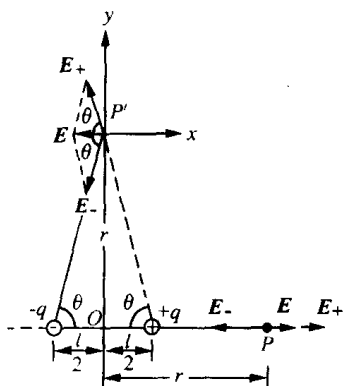




【解】 如图 1.3-1 所示, 在  $l$  的延长线上取一点  $P$ , 由 (1.3-3) 式  $+q$  和  $-q$  在  $P$  点激发的场强的大小为 ( $q$  为算术量)

$$E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r - \frac{l}{2})^2}$$

$$E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r + \frac{l}{2})^2}$$



因为  $E_+$  和  $E_-$  的方向相反, 所以合场强的大小为

图 1.3-1 电偶极子的电场

$$\begin{aligned} E &= E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(r + \frac{l}{2})^2 - (r - \frac{l}{2})^2}{(r + \frac{l}{2})^2(r - \frac{l}{2})^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2rl}{(r - \frac{l}{2})^2(r + \frac{l}{2})^2} \end{aligned} \quad (1.3-6)$$

方向向右。

在  $l$  的中垂面上取一点  $P'$ , 由图 1.3-1 可知,  $+q$  和  $-q$  在  $P'$  点激发的场强的大小相等, 即

$$E_+ = E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r^2 + \frac{l^2}{4})}$$

$P'$  点的总场强的大小为

$$\begin{aligned} E &= 2E_+ \cos \theta = 2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r^2 + \frac{l^2}{4})} \frac{\frac{l}{2}}{(r^2 + \frac{l^2}{4})^{1/2}} \\ &= \frac{ql}{4\pi\epsilon_0(r^2 + \frac{l^2}{4})^{3/2}} \end{aligned} \quad (1.3-7)$$