

高等学校教材

# 大学物理教程

(中册)

丛选忠 李海门 主编

机械工业出版社

高等学校教材

# 大学物理教程

(中 册)

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 编 | 丛选忠 | 李海门     |
| 副主编 | 王天泰 | 宋庆功 李恩山 |
| 主 审 | 陈荣金 |         |



机械工业出版社

(京)新登字 054号 117

本书是根据1993年公布的高等工业学校“大学物理课程教学基本要求修订稿”编写的,采用了全国自然科学名词审定委员会1988年公布的物理学规范名词和我国的法定计量单位。

全书分三册。上册包括力学、机械振动与机械波、热学,中册是电磁学,下册包括波动光学和近代物理基础。全书可在130~140学时内授完。

本书为理工科大学和师范院校非物理专业的教材,也可作为电视大学、夜大、函授、成人教育的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程(中册)/丛选忠,李海门主编. -北京:机械工业出版社,1995.4

高等学校教材

ISBN 7-111-04583-1

I. 大… I. ①丛… ~~丛选忠,李海门主编. 大学物理教程(中册). 1995.4~~ ②电磁学-高等学校-教材 1

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第12000号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:王世刚 版式设计:冉晓华 责任校对:贾立萍

封面设计:郭景云 责任印制:卢子祥

河北和印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

1995年4月第1版·1995年4月第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/32·8印张·173千字

0 001- 7 000 册

定价: 1.60 元

# 前 言

以物理学基础知识为内容的大学物理课程，其所包括的经典物理、近代物理和物理学在科学技术上应用的初步知识等，是理工科大学和师范院校非物理专业大学生所必备的。因此，对这些专业而言，大学物理课程是一门重要的必修课。

大学物理课程的作用不仅在于为学生较系统地打好必要的物理基础，而且使学生初步了解科学的思想方法和研究问题的方法，开阔思路，激发探索和创新精神，增强适应能力。这对以后的工作和进一步学习新理论、新技术，不断更新知识，都将发生深远的影响。

本书是在多年教学实践的基础上，根据1993年公布的高等工业学校“大学物理课程教学基本要求修订稿”编写的，可供理工科大学和师范院校非物理专业教学使用。在编写中，力求做到：

在阐明物理基本概念、基本规律和基本方法的同时，尽可能多地介绍其在科学技术和日常生活中的应用，以说明物理学对科学技术发展的重要作用 and 与日常生活的紧密联系，提高学生解决实际问题的能力。

适当介绍一些物理学的前沿动向，使学生认识到物理学仍处在发展之中，以期拓宽视野，激发学好物理学的欲望。

讲究文字上的简明流畅，物理框架的清晰完整。注意在传授知识的同时，重视分析、解决问题的思路与方法的描述。

有针对性地介绍一些著名物理学家的生平和物理学史，

以求学生能从中受益。培养严谨治学、勤奋求实、开拓进取、勇攀高峰的精神。

各章的习题难易不同，供教学选用，书后附有习题答案。

书中标有 \* 号的章节和正文中的小字部分，是供选择学习的内容。

本书由唐山工程技术学院、唐山教育学院等院校联合编写。天津市高等学校教材工作研究会理事长、天津大学陈荣金教授主审。王耀华、张玉成、孙志信、魏环、张文华、毕长泉等参加了中册部分章节的编写及有关工作。

由于编者学识有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指教。

编者 1994.10

# 目 录

## 前 言

## 第四篇 电 磁 学

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第十章 静电场           | 2  |
| 第一节 电荷 库仑定律       | 2  |
| 第二节 静电场 电场强度      | 7  |
| 第三节 电场线 电通量       | 19 |
| 第四节 静电场的高斯定理      | 24 |
| 第五节 静电场的保守性       | 33 |
| 第六节 电势能 电势        | 35 |
| 第七节 电场强度与电势梯度的关系  | 44 |
| 习题十               | 50 |
| 第十一章 静电场中的导体和电介质  | 56 |
| 第一节 静电场中的导体       | 56 |
| 第二节 静电场中的电介质      | 66 |
| 第三节 电容 电容器        | 70 |
| 第四节 电介质中的高斯定理 电位移 | 77 |
| 第五节 电场的能量 能量密度    | 82 |
| *第六节 静电的应用        | 85 |
| 习题十一              | 90 |
| 第十二章 恒定电流         | 93 |
| 第一节 电流强度 电流密度     | 93 |
| 第二节 电阻率 欧姆定律      | 97 |

|      |                        |     |
|------|------------------------|-----|
| 第三节  | 电流的功和功率 焦耳定律 .....     | 101 |
| 第四节  | 电源 电动势 .....           | 103 |
| 第五节  | 含有电源的电路 .....          | 105 |
| 第六节  | 基尔霍夫方程组 .....          | 109 |
| 习题十二 | .....                  | 116 |
| 第十三章 | 恒定电流的磁场 .....          | 119 |
| 第一节  | 磁场 磁感应强度 .....         | 119 |
| 第二节  | 毕奥—萨伐尔定律 .....         | 130 |
| 第三节  | 磁通量 磁场的高斯定理 .....      | 137 |
| 第四节  | 安培环路定理 .....           | 139 |
| 第五节  | 运动电荷的磁场 .....          | 148 |
| 习题十三 | .....                  | 149 |
| 第十四章 | 磁场对电流的作用 .....         | 153 |
| 第一节  | 磁场对载流导线的作用 安培定律 .....  | 153 |
| 第二节  | 磁场对载流线圈的作用 .....       | 156 |
| 第三节  | 平行长直电流间的相互作用 .....     | 161 |
| 第四节  | 磁场对运动电荷的作用 洛仑兹力 .....  | 163 |
| 第五节  | 磁场对运动电荷作用的应用举例 .....   | 167 |
| 习题十四 | .....                  | 173 |
| 第十五章 | 磁介质 .....              | 178 |
| 第一节  | 磁介质 磁化强度 .....         | 178 |
| 第二节  | 磁场强度 磁介质中的安培环路定理 ..... | 182 |
| 第三节  | 铁磁质 .....              | 186 |
| 习题十五 | .....                  | 191 |
| 第十六章 | 电磁感应 .....             | 194 |
| 第一节  | 电磁感应定律 .....           | 194 |
| 第二节  | 动生电动势 .....            | 202 |
| 第三节  | 感生电动势 有旋电场 .....       | 207 |
| 第四节  | 自感和互感 .....            | 214 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第五节 磁场能量 .....           | 219 |
| 习题十六 .....               | 223 |
| 第十七章 电磁场 电磁波 .....       | 227 |
| 第一节 麦克斯韦电磁场理论的基本概念 ..... | 227 |
| 第二节 麦克斯韦方程组的积分形式 .....   | 232 |
| 第三节 电磁波 .....            | 234 |
| 习题十七 .....               | 240 |
| 习题答案 .....               | 242 |
| 参考文献 .....               | 246 |



## 第四篇 电 磁 学

电磁现象是一种常见的物理现象，电磁学就是研究电磁现象基本规律的学科。早在 2600 年前，古希腊人就发现琥珀经过摩擦后，能吸引轻小物体；在我国春秋战国时期就有“磁石”的记载；指南针是中国古代四大发明之一。但是，在 2000 余年的时间里，人们一直认为电现象和磁现象是彼此独立的，直到 1820 年奥斯特(Oersted, H. Ch., 1777~1851 年，丹麦)发现通电导线近旁的小磁针会发生偏转，才开始了对电与磁关系的新认识。电流磁效应的发现，引起了许多科学家的关注。1831 年法拉第(Faraday, M., 1791~1867 年，英国)总结出电磁感应定律，把电磁学的研究推向新的阶段。麦克斯韦(Maxwell, J. C., 1831~1879 年，英国)在总结前人工作的基础上，提出了“位移电流”的概念，于 1865 年导出了麦克斯韦方程组，把电荷、电流与电场、磁场之间的普遍关系用数学式明确地表示出来，并预言了电磁波的存在。1888 年，赫兹(Hertz, H. R., 1857~1894 年，德国)证实了这一预言，开辟了电磁波研究和应用的新纪元。

今天，电磁学已成为许多物理理论和应用科学的基础。从工农业生产到科技研究，乃至日常生活都有着广泛的应用。

## 第十章 静 电 场

相对于观察者静止的电荷激发的电场称为静电场。本章主要研究真空中的静电场，要求掌握静电场的电场强度和电势的概念，以及电场强度叠加原理和电势叠加原理；掌握电势与电场强度的积分关系；能计算一些简单问题中的电场强度和电势；理解电场的高斯定理和环路定理；掌握用高斯定理计算电场强度的条件和方法；了解电势与电场强度的微分关系。

### 第一节 电荷 库仑定律

电已在人们的生活和生产中得到广泛利用，人们对电的认识和研究始于电荷。

**电荷** 实验告诉我们，任何两个质料不同的物体相互摩擦后都有吸引轻小物体的性质。这表明，摩擦后的物体处于一种新的状态，我们就说它带了**电荷**，简称**带电**。这种处于带电状态的物体称为**带电体**。

不同的带电体所带电荷是否相同呢？所有的实验结果表明：物体所带电荷只有两种，一种叫正电荷，以“+”号表示；另一种叫负电荷，以“-”号表示。带电体间的相互作用可由实验测定，带同种电荷的物体相互排斥，带异种电荷的物体相互吸引。

带电体所带电荷数量的多少，叫作**电量**，以符号 $Q$ 或 $q$ 表示。电量的单位是**库仑**，简称**库**，符号是C。

**电荷守恒定律** 在正常状态下，物体是不带电的。当两种不同物体因摩擦而带电时，它们所带的电荷总是等量异号，且同时出现。反之，当两种等量异号的电荷相遇时，它们互相抵消而使物体呈电中性。由此可见，当一种电荷出现时，必有等量的异号电荷同时出现；当一种电荷消失时，也必伴随着等量的异号电荷同时消失。这表明，电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或从物体的这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里，任何物理过程中电荷的代数和保持不变。这就是**电荷守恒定律**。

**物质的电结构 电荷的量子化** 近代物理学已经证明，通常的物质是由分子、原子组成的。而原子由电子和原子核组成，原子核又由质子和中子组成。电子带负电，质子带正电，两者电量相等。在巨大核力作用下，质子和中子被牢固地束缚在原子核内。电子以电子云的形式围绕原子核高速运动。正是由于物质内部这些粒子之间的相互作用，才使电子围绕原子核运动而形成稳定的原子，又使原子以不同的形式结合形成不同的分子，又使分子以不同的形式结合形成千变万化的物质种类。物质的这种电结构，是各种宏观电现象的内因。在正常状态下，物体中任意部分所包含的电子数和质子数相等，物体不呈现电性。当由于某种作用，物体（或其中的一部分）获得或失去一定数量的电子，使电子数和质子数不再相等，这时物体将呈现电性。当电子数大于质子数时，物体显示负电性；当电子数小于质子数时，物体显示正电性。所以说，使物体带电的内在因素，正是物质内部固有存在的电子和质子这两类基本电荷。

物质电结构模型的建立，揭示了物体带电的本质，预示

了电荷的量子性。实验测得原子内部电子和质子电荷绝对值相等，质子所带电量约为  $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ，用符号  $e$  表示，则有  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。电子所带电量就是  $-e$ 。至今所有的实验表明，一切带电粒子所带电量  $Q$  都是  $\pm e$  的整数倍，即  $Q = \pm ne$  ( $n$  为整数)。就是说：电量以一个最小的基本电量存在，基本电量就是  $\pm e$ 。电荷这种只能取分立的，不连续的量值的性质叫作**电荷的量子化**。

**库仑定律** 一般说来，影响两个带电体间相互作用力的因素是复杂的，它不仅与带电体所带的电量、相互之间的距离有关，而且还与它们各自的几何形状、大小、电荷在其上的分布及周围电介质的性质有关。唯有真空中两个静止的点电荷之间的相互作用，能把影响作用力的因素减少到一种最简单、最基本的情况。所谓点电荷是从实际带电体中抽象出来的一个具有相对意义的概念。当带电体本身的线度比起带电体间的距离小得多，以致可以忽略带电体的形状、大小及电荷在其上的分布时，在这种条件下，可以把带电体看成是集中了全部电量的点，称为**点电荷**。

1785 年，库仑在精巧的“扭秤”实验的基础上总结出点电荷间相互作用的规律，其内容是：在真空中，两个静止的点电荷之间的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。这就是**库仑定律**。

---

① 按近代物理夸克理论，强子（介子和重子的合称）是由夸克构成的，夸克所带电量为  $+2e/3$  或  $-e/3$ 。斯坦福大学一研究组称已发现所带电量为  $e/3$  的粒子，但许多专家对此提出疑义。

如图 10-1 所示, 两个电量分别为  $Q_1$  和  $Q_2$  的点电荷相距为  $r$ , 如果用  $F$  表示电荷  $Q_2$  受到电荷  $Q_1$  的作用力,  $r$  表示由施力电荷  $Q_1$  指向受力电荷  $Q_2$  的矢量, 则库仑定律的数学表达式为

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^3} r \quad (10-1)$$

$F$  的大小为

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (10-2)$$

电荷之间的这种作用力叫作**静电力**, 又称为**库仑力**。比例系数  $k$  的量值为

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{m/F} \approx 9.0 \times 10^9 \text{m/F}$$

为了使今后由库仑定律推出的电磁学公式简单些, 令  $k=1/(4\pi\epsilon_0)$ , 式中  $\epsilon_0$  叫作**真空电容率**, 又称**真空介电常量**。其值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$$

于是库仑定律的表达式 (10-1) 可改写为

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r \quad (10-3)$$

还应说明:

(1) 无论  $Q_1$  和  $Q_2$  的正负如何, 式 (10-3) 都成立。当  $Q_1$ 、 $Q_2$  同号时,  $F$  沿  $r$  的方向, 即为斥力; 当  $Q_1$ 、 $Q_2$  异号时,  $F$  沿  $-r$  的方向, 即为引力。

(2) 两个点电荷间的静电力不因第三个电荷的存在而改变。当一个点电荷受到两个以上点电荷作用时, 该点电荷受到的总静电力等于其它各个点电荷单独存在时作用于该点电

荷的静电力的矢量和。这便是静电力叠加原理。即

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i \quad (10-4)$$

(3) 如果相互作用的带电体不能满足点电荷条件, 或电荷连续分布在有限带电体上时, 可将带电体看作是许多点电荷的集合, 静电力叠加原理仍然适用。

**例题 10-1** 在真空中, 一长为  $l=20\text{cm}$  的细杆, 杆上均匀分布着正电荷, 线电荷密度为  $\lambda=1.0\times 10^{-5}\text{C/m}$ 。在杆的延长线上距杆的一端为  $d=10\text{cm}$  处, 有一电量为  $q=2.0\times 10^{-6}\text{C}$  的点电荷, 如图 10-2 所示。求点电荷所受的静电力。

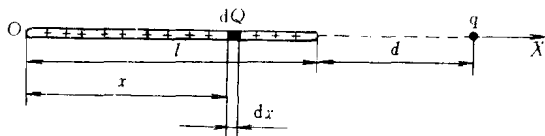


图 10-2 均匀带电细杆延长线上的电场强度

**解** 以杆的左端为原点  $O$ , 取  $X$  轴的正方向沿杆向右。在杆上任取一线元  $dx$ , 其上所带电量  $dQ=\lambda dx$ ,  $dQ$  可视为点电荷, 它与点电荷  $q$  的距离为  $r=(l+d)-x$ 。由库仑定律可知,  $q$  受到  $dQ$  的作用力的大小为

$$dF = \frac{qdQ}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 (l+d-x)^2}$$

方向沿  $X$  轴正方向。由于各线元上的电荷  $dQ$  对  $q$  的作用力的方向都相同, 因此,  $q$  所受到的合力  $F$  的方向也沿  $X$  轴正方向。合力的大小为

$$F = \int_0^l \frac{q\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 (l+d-x)^2} \\ = \frac{\lambda q}{4\pi\epsilon_0} \int_0^l \frac{dx}{(l+d-x)^2}$$

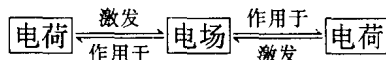
$$= \frac{\lambda q l}{4\pi\epsilon_0 d (d+l)}$$

代入数据得

$$\begin{aligned} F &= 9.0 \times 10^9 \\ &\times \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 2.0 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^{-2}}{10 \times 10^{-2} \times (10 \times 10^{-2} + 20 \times 10^{-2})} \text{N} \\ &= 1.2 \text{N} \end{aligned}$$

## 第二节 静电场 电场强度

**电场** 库仑定律反映了点电荷间相互作用的规律，但没有说明这种相互作用是如何进行的。近代物理学证明，任何电荷周围都存在着特殊形态的物质——**电场**。静止电荷产生的电场叫作**静电场**。产生电场的电荷叫作**场源**。电场的基本性质之一是对置于其中的电荷有力的作用，这种作用力就是前面所说的静电力，电荷之间的相互作用是通过电场进行的。其作用过程如下图所示



场和由原子、分子组成的实物一样具有能量、动量等属性。以后我们将会看到电场是电磁场的一种特殊情形，电磁场的物质性在它处于迅变的情形下能明显地显露出来。不同的是实物的分子或原子所占据的空间不能同时被另一分子或原子所占据。但是几个电荷产生的电场，却可以同时占据同一空间。因此说，场和实物是物质存在的两种不同形态。

**电场强度** 下面首先研究静电场的力的性质。为此，我们在电场中引入一检验电荷。所谓检验电荷必须满足以下两个条件：第一，它的电量  $q$  要足够小，以致它的引入不会影响原来电场的分布；第二，它的几何线度也要足够小，小到可

以视为点电荷，从而使它所检验的区域可看作是电场中的一点。

设电量为  $Q$  的点电荷场源位于  $O$  点，它的周围存在静电场。将检验电荷  $q$  依次分别放在  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点，如图

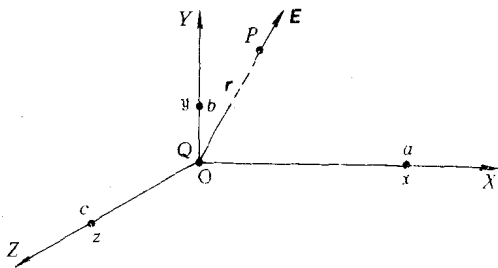


图 10-3 点电荷的电场强度

10-3 所示。由库

仑定律可知， $q$  受的静电力分别为

$$\frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 x^2} \mathbf{i}, \quad \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 y^2} \mathbf{j}, \quad \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 z^2} \mathbf{k}$$

可见在电场中不同的点， $q$  受力的大小和方向一般不同。这就表明，不同点的电场的强弱和方向一般不同。将检验电荷  $q$  放在场中某点  $P$ ，该点称为**场点**。当检验电荷电量为  $q$  时，它所受的静电力为  $F$ ，若依次改变检验电荷的电量为  $2q$ 、 $3q$ 、……，则发现它所受的静电力依次变为  $2F$ 、 $3F$ 、……，其比值

$$\frac{F}{q} = \frac{2F}{2q} = \frac{3F}{3q} = \dots = \text{恒矢量}$$

实验结果告诉我们，对任意带电体的电场均有上述性质。比值  $F/q$  与检验电荷无关，只与该点在电场中的位置有关，完全由电场决定。因此，我们用比值  $F/q$  来描述电场本身的性质，称它为**电场强度**，用符号  $E$  表示，即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (10-5)$$

可见，静电场中某点的电场强度的大小等于单位电荷在该点所受静电力的的大小；其方向就是正电荷在该点所受静电力的



方向。电场强度的单位是**伏特每米**，简称**伏每米** (V/m)。而由式 (10-5) 给出的单位是**牛顿每库仑** (N/C)，两者在本质上是**一致**的。

如果电场中各点的  $E$  都相同，那么称这种电场为**均匀电场**。

知道了某场点的电场强度  $E$ ，如果置于该点的电荷  $q$  不改变原来电场的分布，那么由电场强度定义式 (10-5) 可以计算出电荷  $q$  所受的静电力  $F$ ，有

$$F = qE \quad (10-6)$$

当  $q$  为正时， $F$  与  $E$  的方向一致；当  $q$  为负时， $F$  与  $E$  的方向相反。

**电场强度叠加原理 电场强度的计算** 现在根据式 (10-5) 来讨论电场强度的计算方法，并从静电力叠加原理引出**电场强度叠加原理**。

### (1) 点电荷的电场强度

设场源是点电荷，电量为  $Q$ 。以场源所在处为原点  $O$ ，空间任意一场点  $P$  到场源的距离为  $r$ ，见图 10-4，把正检验电荷  $q$  放在  $P$  点，由库仑定律知， $q$  受的静电力为

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r}$$

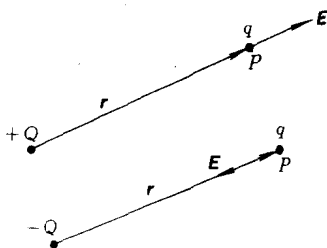


图 10-4 点电荷电场强度的方向

式中  $\mathbf{r}$  是  $P$  点相对  $O$  点的位置矢量。由电场强度定义式 (10-5)， $P$  点的电场强度为

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (10-7)$$