



湖南大学应用物理系 组编 陈曙光 张智 文利群 黄述熙 主编  
蔡建乐 郑采星 主审

# 大学物理 (下册)

DAXUE WULI

湖南大学出版社

# 大 学 物 理

## 下 册

湖南大学应用物理系 组编

陈曙光 张 智 主编  
文利群 黄述熙

湖南大学出版社

2003年·长沙

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上下册)/陈曙光等主编.

—长沙:湖南大学出版社,2003.1

ISBN 7-81053-589-7

I. 大… II. 陈… 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 108957 号

## 大学物理(上下册)

Daxue Wuli(Shang Xia-Ce)

陈曙光等 主编

- 
- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 责任编辑 | 俞 涛 陈灿华                      |
| <input type="checkbox"/> 出版发行 | 湖南大学出版社                      |
|                               | 社址 长沙市岳麓山 邮码 410082          |
|                               | 电话 0731-8821591 0731-8821315 |
| <input type="checkbox"/> 经 销  | 湖南省新华书店                      |
| <input type="checkbox"/> 印 装  | 国防科技大学印刷厂                    |
- 

- |                             |                         |                             |              |                             |      |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> 开本 | 850×1168 32开            | <input type="checkbox"/> 印张 | 22.5         | <input type="checkbox"/> 字数 | 545千 |
| <input type="checkbox"/> 版次 | 2003年1月第1版              | <input type="checkbox"/>    | 2003年1月第1次印刷 |                             |      |
| <input type="checkbox"/> 印数 | 1-10 000册               |                             |              |                             |      |
| <input type="checkbox"/> 书号 | ISBN 7-81053-589-7/O·44 |                             |              |                             |      |
| <input type="checkbox"/> 定价 | 30.00元                  |                             |              |                             |      |
- 

(湖南大学版图书凡有印装差错,请向承印厂调换)

# 目 次

## 第 4 篇 电磁学

13	真空中的静电场	(3)
13.1	电荷的基本性质	(4)
13.2	库仑定律	(6)
13.3	电场与电场强度	(9)
13.4	高斯定理	(19)
13.5	电势	(27)
	思考题	(38)
	习题	(40)
14	静电场中的导体和电介质	(44)
14.1	导体的静电平衡	(45)
14.2	电介质的极化 电极化强度	(55)
14.3	电位移矢量 电介质中的高斯定理	(60)
14.4	电容与电容器	(64)
14.5	静电场能量 电场能量密度	(69)
14.6	大气电现象	(74)
14.7	静电学的若干应用	(76)
	思考题	(78)
	习题	(80)

15	稳恒电流的磁场 .....	(84)
15.1	电流密度矢量 电动势 .....	(85)
15.2	磁场 磁场的高斯定理 .....	(91)
15.3	毕奥-萨伐尔定律 .....	(94)
15.4	安培环路定理 .....	(99)
15.5	磁场对载流导线的作用力 .....	(106)
15.6	带电粒子在磁场中的运动 .....	(115)
* 15.7	电磁场的相对性 .....	(121)
* 15.8	有电动势的电路 .....	(125)
* 15.9	温差电动势 .....	(131)
	思考题 .....	(133)
	习题 .....	(135)
16	磁介质的磁化 .....	(142)
16.1	磁介质的磁化 磁化强度矢量 .....	(143)
16.2	磁场强度矢量 有介质时的安培环路定理 .....	(146)
16.3	顺磁质与抗磁质 .....	(150)
16.4	铁磁质 .....	(152)
* 16.5	磁路定律 .....	(157)
	思考题 .....	(158)
	习题 .....	(159)
17	电磁场 .....	(161)
17.1	法拉第电磁感应定律 .....	(162)
17.2	动生电动势 .....	(165)
17.3	感生电动势 .....	(170)
17.4	自感与互感 .....	(176)
17.5	磁场的能量 .....	(181)

17.6	位移电流	(186)
17.7	麦克斯韦方程组	(191)
17.8	电磁波	(193)
17.9	电磁振荡 电磁波的辐射和传播	(198)
	思考题	(203)
	习题	(204)

## 第 5 篇 量子力学

18	量子物理学基础	(215)
18.1	热辐射 普朗克能量子假说	(217)
18.2	光的粒子性	(220)
18.3	氢原子光谱和玻尔理论	(229)
18.4	粒子的波动性	(234)
18.5	薛定谔方程	(239)
18.6	氢原子的量子力学处理	(248)
18.7	电子自旋 4 个量子数	(251)
18.8	原子核外电子的壳层结构	(253)
* 18.9	量子物理学的技术应用——扫描隧穿显微镜	(256)
	思考题	(258)
	习题	(258)
19	激光与固体电子学简介	(262)
19.1	激光的产生	(262)
19.2	激光的特性与应用	(269)
19.3	激光与非线性光学 激光与光纤通信	(270)
19.4	固体电子能带	(278)
19.5	半导体及其应用	(282)
19.6	超导电性	(287)

思考题·····	(290)
习题·····	(291)
<b>20 原子核和粒子物理简介·····</b>	<b>(292)</b>
20.1 原子核的基本性质·····	(292)
20.2 核力和核的结构模型·····	(297)
20.3 原子核的放射性衰变·····	(300)
20.4 核反应与几种典型的核反应·····	(303)
20.5 基本粒子谱系·····	(304)
20.6 强子的夸克模型·····	(305)
* 20.7 穆斯堡尔效应·····	(307)
思考题·····	(308)
习题·····	(310)
<b>习题参考答案·····</b>	<b>(311)</b>
<b>附录 基本物理常数表·····</b>	<b>(319)</b>

第 4 篇

电 磁 学





## 13 真空中的静电场

### 本章导引

本章主要阐明真空中的静电场的基本性质以及描述这些性质的两个重要物理量——电场强度与电势的意义以及两者之间的联系。

在库仑定律的基础上,把两个电荷间的相互作用看成是一个电荷产生的电场对另一个电荷的作用,由此引入电场的概念。对静电场基本性质的研究成为本章的主要内容。

一方面,从力与能量的角度研究静电场。根据电场对电荷的作用力,引入描述静电场基本性质的物理量——电场强度概念;通过电场力做功而研究静电场的能量特点,得其为保守力场,并由此引入电势的概念。

另一方面,从通量和环流的角度研究静电场,得到反映静电场性质的两个基本规律:高斯定理(通量)和环路定理(环流)。前者表明静电场是“有源”场——电荷是电场之源;后者说明静电场是“无旋”场——静电场是保守力场。这也是一般情况下研究矢量场时主要关心的问题。

学习本章时应该注意:

(1) 掌握电场强度和电势的概念及其计算方法。计算电场强度常见的方法有三:一是利用电场强度叠加原理(矢量叠加);二是利用高斯定理(高斯定理对静电场是普遍适用的,但仅对电荷分布具有空间对称性的电荷系统,才能用此定理计算电场强度);三是利用电场强度与电势的微分关系。

计算电势常见的方法有二:一是利用电势叠加原理(标量叠

加);二是利用电场强度与电势的积分关系.

(2) 高斯定理及环路定理是静电场的基本规律. 本章从库仑定律导出场强高斯定理和环路定理,但也可以从高斯定理及场强环路定理出发研究静电学问题,得到的结论相同.

## 13.1 电荷的基本性质

物体能产生电磁现象,现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动. 通过对电荷(包括静止的和运动的电荷)的各种相互作用和效应的研究,人们现在认识到电荷的基本性质有以下几个方面.

### 13.1.1 电荷的种类

实验事实表明:自然界只存在两种性质不同的电荷,一种是负电荷,一种是正电荷. 同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引. 两种电荷的存在,反映了电世界的一种基本对称性. 若把所有电荷的电性作一变换,正电变为负电,负电变为正电,则人们观测到的电力不变. 一个由带正电的原子核与带负电的电子组成的电世界所发生的现象,与一个带负电的原子核和带正电的电子所组成的电世界所发生的现象,在实验上不存在任何可观测的差异. 也就是说,对电荷电性的变换是一种对称变换. 说电子带负电只不过是人为的约定而已.

### 13.1.2 电荷的量子性

原子中带正电的质子,带负电的电子构成两种基本电荷,它们的电量的绝对值均为  $e$ . 经测定:

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}.$$

它是一个普适常数.

任何物体(或粒子)所带的电荷量只能是基本电荷  $e$  的整数倍,不能连续地变化,这种电量只能取分立的、不连续的量值的

性质,称为电荷的量子性.在粒子物理研究中,理论上曾预言有电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的粒子(夸克)存在,认为很多基本粒子是由若干种夸克或反夸克组成的.1990年诺贝尔物理奖就授予几位美国物理学家,以表彰他们对夸克理论的杰出贡献,使得电荷的最小值有了新的结论.但是,电荷量子化的规律并没有改变,即电荷只能取分立的、不连续的数值.

一般物体呈电中性,通过摩擦、静电感应可使物体带电,然而对宏观带电体,由于带电量比基本电荷大许多数量级,电荷的量子性显现不出来,可以认为电荷是连续变化的.

### 13.1.3 电荷守恒定律

实验指出,当有一种电荷出现时,必然有等量的异号电荷同时出现;当有一种电荷消失时,必然会有等量的异号电荷同时消失.

例如:在摩擦起电的过程中或 $\gamma$ 射线穿过铅板产生正、负电子对时,都有等量的正、负电荷同时出现;正、负电子对复合成 $\gamma$ 光子时,等量的正、负电荷同时消失.对于一个系统,若没有净电荷出入其边界,则不管发生什么变化,该系统内的正、负电荷的电量的代数和将保持不变,这就是电荷守恒定律.它是物理学中的基本定律之一.该定律由富兰克林于1747年提出.直到现在,无论是在宏观世界中,还是在原子、原子核和基本粒子范围内,都未发现违背电荷守恒定律的现象.

### 13.1.4 电荷的不变性

实验还证明,在给电子、质子加速时,高速的电子、质子的质量有明显变化,但电量却无任何改变,即一个电荷的电量与它的运动状态无关.也可以说,在不同的参考系内观察,同一带电粒子的电量不变.电荷的这一特性叫电荷的相对论不变性.

今举一例加以说明.一般情况下,不同种类分子中电子的

运动状态是不同的. 通过化学反应可以改变分子中电子的运动状态. 若电荷对其运动速率有一个十分微小的依赖关系, 由于物体中包含有大量分子, 则会通过化学反应产生十分可观的电量, 但这种效应从未被观测到过.

值得注意的是, 电荷不变性与电荷守恒是电荷的两个本质上不同的属性. 以往我们所接触的质量、动量与能量都是守恒量, 却不是不变量. 守恒量是指在选定的参照系里, 在某一过程中, 某物理量保持不变; 不变量是指在不同的参照系中, 对同一物理量的测量结果不变, 即与参照系选择无关.

值得强调的是, 正是两种电荷的存在及电荷的不变性, 使得由电荷组成并依靠电力结合起来的世界与由质点组成而依靠引力结合起来的世界有某些本质上不同的特征. 而电荷与质点都不存在内在的方向性, 以及电力与引力都遵循平方反比关系, 又使得这两个世界呈现出某些相似的特征.

## 13.2 库仑定律

研究静止电荷之间的相互作用及其规律的理论叫静电学. 它是以 1785 年法国科学家库仑通过实验总结出的定律——库仑定律为基础的. 这一定律的表述如下: 真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力大小与这两个电荷所带电量的乘积成正比, 与它们之间的距离的平方成反比, 作用力的方向沿着这两个点电荷的连线, 同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 这一规律用矢量公式表示为:

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \hat{\mathbf{r}}_{21}. \quad (13.1)$$

所谓点电荷, 是指这样的带电体, 它本身的几何线度与它到其他带电体的距离相比要小得多, 以至于它们的形状、大小、电荷的

分布情况对它们之间的相互作用力的影响可忽略不计而可看作一个带电的几何点. 电荷跟力学中的质点、刚体和热学中的理想气体等概念类似, 也是一种理想模型.

式(13.1)中  $q_1, q_2$  分别表示两个点电荷的电量并包含符号;  $r_{21}$  表示两个点电荷的距离;  $\hat{r}_{21}$  是从  $q_1$  指向  $q_2$  的单位矢量;  $k$  为比例系数, 由公式中各量所选取的单位而定;  $F_{21}$  表示点电荷  $q_2$  所受的点电荷  $q_1$  的作用力(见图 13.1).

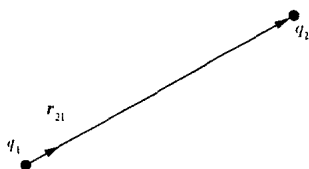


图 13.1 库仑定律示意图

由式(13.1)知: 两个静止的点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律, 即  $F_{21} = -F_{12}$ .

在国际单位制(SI)中, 比例系数

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}.$$

常将  $k$  写成  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  的形式, 并将库仑定律表示成

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \hat{r}_{21}, \quad (13.2)$$

式中  $\epsilon_0$  称为真空中的介电常数.  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{N}^{-1}$ .

实验证明, 点电荷放在空气中时, 其相互作用力与其在真空中的情况相差极小, 故式(13.2)的库仑定律对空气中的点电荷亦成立.

库仑定律是一条实验规律, 定律中关于静电相互作用的平方反比关系是根据实验提出的理论假设, 其正确性永远要经受实验的检验. 现代高能电子散射实验证实: 在小到  $1 \times 10^{-15} \text{ m}$  的范围, 库仑定律仍然精确地成立. 而通过人造地球卫星研究地球磁场时又证明了库仑定律精确地适用于大到  $1 \times 10^7 \text{ m}$  的范围, 并且有理由相信在更大的范围内库仑定律仍然有效. 然而,

在高能电子与质子碰撞的实验中,在短于  $1 \times 10^{-16}$  m 距离内发现:电力的测量结果比按库仑定律预期的计算结果要弱 10 倍,对此有两种解释,一种认为库仑定律所显示的平方反比关系在这一尺度内失效;另一种则认为此时质子已不能看成点电荷.目前,大多数物理学家倾向于后者.

令人感兴趣的是现代量子电动力学理论指出,库仑定律中分母的指数与光子的静止质量有关,若光子静止质量严格为零,则该指数严格地为 2. 若  $r$  的指数为  $2 + \alpha$ , 则光子的静止质量将可能不严格为零,目前的实验给出光子的静止质量的上限为  $1 \times 10^{-48}$  kg, 这差不多相当于  $|\alpha| \leq 1 \times 10^{-16}$ .

**例 13.1** 试求氢原子中电子与原子核之间电力与万有引力之比.

**解** 电子和质子的电量分别是  $-e$  和  $+e$ , 而  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C, 氢原子中电子与原子核(质子)之间电力的大小  $F_e = k \frac{e^2}{r^2}$ . 电子质量  $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  kg, 质子的质量  $m_p = 1.7 \times 10^{-27}$  kg, 它们之间的万有引力大小  $F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2}$ . 因此

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_g} &= \frac{k}{G} \cdot \frac{e^2}{m_e m_p} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9) \cdot (1.6 \times 10^{-19})^2}{(6.8 \times 10^{-11}) \cdot (9.1 \times 10^{-31}) \cdot (1.7 \times 10^{-27})} \\ &= 2.3 \times 10^{39}. \end{aligned}$$

可见,在此问题中,万有引力与电力作用相比十分微小,可忽略不计.

库仑定律只讨论两个静止的点电荷间的作用力,当考虑两个以上的静止点电荷之间的作用时,就必须补充另一个实验事实:两个点电荷之间的作用力不因第三个点电荷的存在而改变.因此,两个以上的点电荷对一个点电荷的作用力等于各个点电

荷单独存在时对该点电荷作用力的矢量和. 这个结论叫电力的叠加原理. 应注意的是, 叠加原理并非是逻辑推理的结果, 而是在实验基础上总结出来的基本事实. 有了库仑定律与叠加原理, 从原则上讲, 可解决静电学中所有电力的计算问题.

对于由几个静止的点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  组成的电荷系, 若以  $F_1, F_2, \dots, F_n$  分别表示它们单独存在时施于另一静止的点电荷  $q_0$  的电力, 则由电力的叠加原理,  $q_0$  受到的总电力  $F$  为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i q_0}{r_i^2} \hat{r}_i. \quad (13.3)$$

这就是叠加原理的数学表达式. 式中  $r_i$  为第  $i$  个点电荷  $q_i$  到  $q_0$  的间距,  $\hat{r}_i$  是  $q_i$  至  $q_0$  方向的单位矢量.

根据叠加原理, 若由  $q_1$  与  $q_2$  组成的系统对其他电荷没有电力作用 ( $F=0$ ), 即系统对外不显示电性, 我们称该电荷系统处于电中性状态. 在例 1 中曾指出氢原子内电力比引力大  $10^{39}$  倍, 但由于原子中保持了正负电荷量的精确相等, 所以一般物体在宏观尺度上表现为精确的电中性. 因此, 在宇宙天体之间万有引力起着主宰的作用.

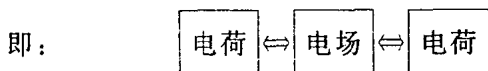
## 13.3 电场与电场强度

### 13.3.1 电场

点电荷间的相互作用力, 是如何得以实现的呢? 历史上曾有过两种观点. 一种观点认为, 这种作用是一个电荷超越空间直接施与另一电荷, 它们之间的作用既不需要借助媒介, 又不需要传递时间, 这就是所谓“超距作用”观点; 另一种观点认为, 这种作用是近距作用, 是通过一种充满在空间的弹性媒质“以太”来传递的. 近代物理学的发展证明, “超距作用”的观点是错误的. 尽管电力传递速度即光速极大, 传递时间极短, 但并非不需要时



间.而历史上持“近距离作用”观点的人所假定的那种弹性媒质“以太”也是不存在的.实际上,电荷周围存在电场,电场是一种特殊的物质,电荷间的相互作用是通过电场来实现的.当中性物质的正负电荷分开形成电场时,电场需要一定的时间才能传播到远处,并对远处的另一电荷发生作用.



所有电力是场物质(电场)与电荷的相互作用,称为电场力.与观察者相对静止的电荷产生的电场称静电场.静电场对电荷的作用力叫静电力.

电场的属性是通过它和其他物质的作用表现出来的.把电荷  $q_0$  放在电场中,电场对置于其中的电荷  $q_0$  有力的作用,有“力的属性”.如果让电荷  $q_0$  在电场力作用下从静止开始运动,电场力就会对电荷  $q_0$  做功,这就是说,电场还有做功的本领,有“能量的属性”.根据相对论的质能关系,任何质量都和一定的能量相对应,任何能量也和一定的质量相对应,所以能量和物质是不可分割的,电场具有能量是电场的物质性的一种表现.总之,电场和实物一样,具有质量、动量和能量等物质的基本属性,但它又不同于一般的实物,空间某处不能同时被两个物体占据,却可以由几个电场同时占有同一空间,即电场具有叠加性或“可入性”.

近代物理学的理论和实验完全证实了场的观点的正确性.让我们设想这样一幅物理图景:空间有两个电荷  $q_1$  与  $q_2$ ,并相隔一定距离,当  $q_2$  在电力作用下运动时,电荷  $q_2$  的动量、能量将发生变化,按守恒原理,必有其他物质参与并即时在相互作用过程中交换这些力学量,而能即时交换的只有场物质,不可能是相隔两地的带电体  $q_1$ .因此,只有在把实物与场都包括在内的物质系统中,守恒原理才得以确立.