

# 第2篇 电工基础

主编单位:

上海工业大学

主 编:

许亚甲

编写人:

陈洪生 胡之光 张宪荣

殷元璋 张朝汉

3/65.02/5002

# 常用符号表

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| $A$ ——矢量磁位           | $U_0, U_0'$ ——中线电压, 中点位移     |
| $B$ ——磁感应强度 (磁通密度)   | $u$ ——瞬时电压                   |
| $B_r$ ——剩余磁感应强度      | $V$ ——体积                     |
| $B_s$ ——饱和磁感应强度      | $v$ ——速度                     |
| $b$ ——电纳             | $W$ ——功, 能, 能级               |
| $b_c$ ——容纳           | $W_e$ ——电场能量, 逸出功            |
| $b_L$ ——感纳           | $W_m$ ——磁场能量, 激发态能级          |
| $C$ ——电容             | $w$ ——电磁场能量密度                |
| $c_0$ ——真空中光速        | $w_e$ ——电场能量密度               |
| $D$ ——电位移            | $w_m$ ——磁场能量密度               |
| $E$ ——电场强度, 电动势      | $x$ ——电抗                     |
| $e$ ——瞬时电动势          | $x_c$ ——容抗                   |
| $F$ ——力, 磁动势         | $x_L$ ——感抗                   |
| $f$ ——力, 频率          | $Y$ ——复导纳                    |
| $f_0$ ——谐振频率 (固有频率)  | $y$ ——导纳                     |
| $g$ ——电导             | $Z$ ——复阻抗                    |
| $g_m$ ——磁导           | $Z_n$ ——中线阻抗                 |
| $H$ ——磁场强度           | $z$ ——阻抗                     |
| $H_c$ ——矫顽磁场强度       | $\alpha$ ——电阻温度系数, 衰减常 (系) 数 |
| $H_L$ ——磁化强度         | $\beta$ ——相移常数               |
| $h$ ——普朗克常数          | $\gamma$ ——电导率, 固有传输常数       |
| $I$ ——电流强度           | $\delta$ ——介质损耗角, 电流密度, 阻尼系数 |
| $I_l$ ——线电流          | $\delta_c$ ——全电流密度           |
| $I_\phi$ ——相电流       | $\epsilon$ ——介电常数 (电容率)      |
| $i$ ——瞬时电流           | $\epsilon_0$ ——真空介电常数        |
| $k$ ——玻尔兹曼常数, 耦合系数   | $\epsilon_r$ ——相对介电常数        |
| $k_c$ ——波阻因数         | $\kappa$ ——磁化率               |
| $k_d$ ——畸变因数         | $\lambda$ ——波长               |
| $k_f$ ——波形因数         | $\mu$ ——磁导率                  |
| $L$ ——电感, 自感         | $\mu_i$ ——起始磁导率              |
| $l$ ——长度             | $\mu_m$ ——最大磁导率              |
| $M$ ——互感, 力矩         | $\mu_0$ ——真空磁导率              |
| $m$ ——质量, 磁矩         | $\mu_r$ ——相对磁导率              |
| $N$ ——线圈匝数           | $\mu_s$ ——增量磁导率              |
| $P$ ——功率, 极化强度       | $\mu_{diff}$ ——微分磁导率         |
| $P_{Fe}$ ——铁损        | $\mu_{rec}$ ——回复磁导率          |
| $P_{Feo}$ ——比损耗      | $\rho$ ——电阻率, 电荷体密度          |
| $p$ ——瞬时功率, 电矩       | $\sigma$ ——电荷面密度             |
| $Q$ ——电量, 品质因数, 无功功率 | $\tau$ ——电荷线密度, 时间常数         |
| $q$ ——电量             | $\phi$ ——磁通 (磁通量)            |
| $r$ ——电阻             | $\phi_E$ ——电场强度通量            |
| $r_m$ ——磁阻           | $\varphi$ ——电位, 阻抗角          |
| $S$ ——面积, 视在功率       | $\varphi_m$ ——标量磁位           |
| $T$ ——周期, 畸变功率, 绝对温度 | $\chi$ ——极化率                 |
| $t$ ——时间, 温度         | $\psi$ ——磁链, 初相角             |
| $U$ ——电压             | $\omega$ ——角频率               |
| $U_l$ ——线电压          | $\omega_0$ ——谐振角频率           |
| $U_m$ ——磁压           | $\omega'$ ——自由振荡角频率          |
| $U_\phi$ ——相电压       | $\cos \varphi$ ——功率因数        |

# 第1章 电的一般物理概念

恩格斯指出：“地球上几乎没有一种变化发生而不同时显示出电的现象”（《自然辩证法》）。电是物质的一种属性。本章将从原子的微观结构来说明若干电现象及其机理。

## 1 电荷与电磁场的概念

### 1.1 电荷与电量守恒定律

电荷是物质的固有属性之一。自然界不存在脱离物质而单独存在的电荷。

电荷有两种。一种叫正电荷，用符号“+”表示；另一种叫负电荷，用符号“-”表示。负电荷总是和电子相联系的；正电荷则和失去电子的原子、原子团或分子相联系的。如果某物体带有正的或负的电荷，那就是该物体失去或得到了一些电子的结果。电荷之间存在着相互的作用，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。

电荷的数量，称为电量，常用符号 $Q$ 、 $q$ 表示，在有理化 MKSA 单位制（简称 MKSA 制）中，它的单位是库仑。

通常，物体中正负电荷的数量是相等的。由于正负电荷的电性能相反，因而相互中和，物体在宏观上不呈现电性能。正负电荷是相互依存、相互矛盾着的双方，有了带正电荷的物体就必然同时出现带负电荷的物体，而且电量相等。总之，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能被转移（分离或中和）。电荷在转移前后，其总电量（正负电量的代数和）不变，这一规律叫做电量守恒定律。

### 1.2 电磁场的概念

在电荷的周围存在着一种特殊的物质——场。电荷之间的相互作用，就是通过这种场来进行的。

电荷相对于观察者是静止的情况下，和电荷相联系的场也是静止的。这种场称为静电场（见第2章）。当电荷运动而形成恒定电流时，则在恒定电流的周围存在稳定电场和稳定磁场（见第3章）。当电荷运动而形成交变电流时，则在交变电流的周

围空间存在着相互联系着的随时间变化的电场和磁场。这种场叫做交变电磁场（见第4章）。交变电磁场能以电磁波的形式向着四周空间辐射出去。但当交变电流的频率较低而所考虑的距离又较短，因而可以忽略辐射等现象时，这种交变电磁场就称为似稳电磁场。电工领域所涉及的一般就是这种似稳电磁场（见第4章第8节）。

## 2 原子

物质是无限可分的。以气态、液态或固态存在的物质，都是由分子组成的，而分子则由更小的粒子——原子所组成。

原子是由原子核和绕核运动的若干个电子组成。原子核由质子和中子两种基本粒子组成。质子与中子等基本粒子也只是物质分割的无限系列中的一个层次。质子带正电，其电量与电子电量相等，静止质量 $\odot$ 约为 $1.67 \times 10^{-27}$ 公斤。中子是不带电的中性粒子，其静止质量基本上与质子相同。

### 2.1 电子

电子是基本粒子之一，带有负电荷。目前已知自然界中存在的最小电量就是一个电子的电量（常用 $e$ 表示），物体所带的电量都是这个最小电量的整数倍。一个电子的电量等于 $-1.602 \times 10^{-19}$ 库仑。因此，一库仑的电量相当于 $6.24 \times 10^{18}$ 个电子所带的电量的绝对值之和。电子的静止质量约为 $9.1 \times 10^{-31}$ 公斤，差不多是质子质量的 $\frac{1}{1836}$ ，所以原子的质量几乎全部集中在原子核上。

原子中的电子除了作绕核运动外，还作自旋运动。它们除了具有电的性质以外，还有磁的性质（见第3章5.2）。

$\odot$  物体的质量是随运动速度而变的，物体以速度 $v$ 运动时的质量 $m$ 为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}$$

其中， $m_0$ 为物体静止时的质量， $c_0$ 为真空中的光速。

由于异性电荷的相吸作用,所以在通常情况下,原子中的电子是不能脱离原子的。而且原子中的电子数与核内的质子数是相等的,因而原子的总电量等于零,原子是中性粒子。

## 2.2 原子核中质子数与中子数的意义

具有相同质子数的原子属同一化学元素。目前已知的化学元素有105种,原子核内的质子数恰好是从1逐个增加到105。原子核内的质子数就是原子序数。具有相同质子数和不同中子数的各种原子,称为该元素的同位素。例如,碳元素有三种同位素(它们的原子核中都有6个质子,但所含的中子数则分别为6、7、8),叫做碳-12、碳-13、碳-14,符号分别为 $C^{12}$ 、 $C^{13}$ 、 $C^{14}$ 。这三种碳原子的质量显然是不等的。通常以碳-12质量的 $\frac{1}{12}$ 作为衡量原子、质子、中子等粒子质量的单位,叫做碳单位。一个质子或一个中子的质量约等于一个碳单位。将某原子的质量与一个碳单位相比较,所得的比值,称为该原子的原子量,约等于原子核中质子数与中子数之和。天然碳元素中含有三种同位素,原子量分别为12, 13, 14,而 $C^{12}$ 总占绝大部分,所以碳的平均原子量略大于12而为12.011。

## 2.3 原子中的电子能级

原子光谱的实验表明,在原子中运动的电子,它的能量只能是若干定值而不是任意值。电子具有的可能能量状态常用能级表示,图2-1-1示出了氢原子的能级。原子中电子的能量不能是任意值,这说明了原子中电子的运动状态不能是任意的。从量子力学可以得出和光谱实验相符的结论。

从量子力学可以得出,原子中电子的运动状态由四个量子数 $n$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $m_s$ 所决定。而允许的运动

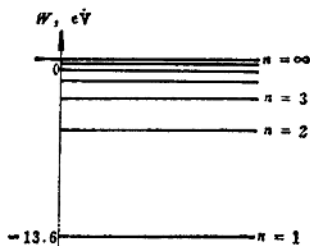


图2-1-1 氢原子的能级

状态要求： $n$ 取 $1, 2, \dots, n$ ，电子的能量基本上由 $n$ 决定， $n$ 称为主量子数； $l$ 取 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ ， $l$ 的值决定了电子轨道动量矩的大小， $l$ 称为角量子数； $m$ 取 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ， $m$ 值决定了电子的轨道动量矩在空间某一方向的分量， $m$ 称为磁量子数； $m_s$ 可取 $\pm \frac{1}{2}$ ，它决定了电子自旋动量矩在外磁场方向的分量， $m_s$ 称为自旋量子数。所以，量子数实质上是反映并决定电子各种不连续的物理量的。

用量子力学方法可得出氢原子的能级为：

$$W_n = -\frac{W_H}{n^2} \quad \text{J} \quad (2.1-1)$$

式中  $W_n$ ——第 $n$ 个能级的能量(物理学中能级能量常用 $E$ 表示) J (用单位为电子伏特 eV,  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

$W_H$ ——正常氢原子的电离能, 等于  $2.18 \times 10^{-18} \text{ J}$  (用值为  $13.6 \text{ eV}$ )

$n$ ——主量子数

## 2.4 原子中电子的壳层分布

当主量子数 $n$ 为某值时， $l$ 的可能值为 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ ，共 $n$ 个；当 $l$ 给定时， $m$ 的可能值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ ，共 $2l+1$ 个；当 $n, l, m$ 都给定时， $m_s$ 可为 $+\frac{1}{2}$ 和 $-\frac{1}{2}$ 两个可能值。所以，对于某个 $n$ 值，最多的电子数为

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = \frac{2+2(2n-1)}{2} n = 2n^2 \quad (2.1-2)$$

将原子中的电子按照 $n$ 值来划分，并对不同的 $n$ 值称为不同的层，这就称为电子壳层分布。通常用K、L、M、N、O、P...等符号分别表示 $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 时的壳层。从(2.1-2)式可以看出，K层最多可容纳2个电子；L层最多可容纳8个电子；M层最多可容纳18个电子；依此类推。当某个电子层容纳的电子数恰好是 $2n^2$ 个时，该电子层即为满壳层。但是，对于最外一个电子层来说，不论其 $n$ 为何值，最多只能容纳8个电子。

图2-1-2示出了氮原子、氯原子、铜原子的电子壳层分布。

从电子壳层的组成可以看出，除了K层以外，其余的壳层都含有 $l>0$ 的状态，所以电子壳层实际

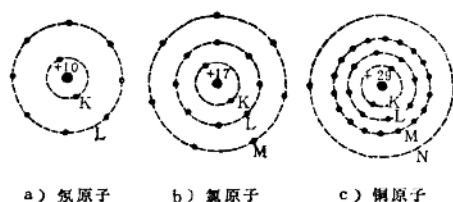


图2-1-2 氦、氯、铜原子的电子壳层分布

上包含了一组能级。

一个体系的能量愈小，就愈是稳定。这称为能量最小原理。原子中电子的分布，也符合这个原理。但是，量子力学还表明，在同一原子中，不能有两个或两个以上的电子具有相同的状态。这称为泡利不相容原理。所以，原子中电子的分布必须同时符合这两条原理。

对于多电子原子，电子的能量不仅与  $n$  有关，还与  $l$  有关。在同一个  $n$  值时，一般， $l$  愈大，能量也愈大。所以原子中电子的能量用  $n, l$  两个量子数来表示。在讨论原子结构时，常用  $s, p, d, f \dots$  等符号分别表示  $l = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。所以电子在原子中的分布将从能量最低的 ( $1s$ ) 状态开始。以氦原子为例，氦原子中10个电子的状态可以表示为：

$$(1s)^2(2s)^2(2p)^6$$

括号右上角的数字表示电子数。即两个电子是  $n = 1, l = 0$ ，因而属于K层；两个电子  $n = 2, l = 0$ ，因而属于L层；还有6个电子  $n = 2, l = 1$ ，因而也属于L层，所以L层共有8个电子。图2-1-3为大多数原子中电子分布的顺序图。

原子中的电子按照上述分布时，原子的能量最小，因而也最稳定。这种原子称为基态原子，这时电子所占的能级称为基态能级。当电子从外界获得能量（例如原子受高速粒子的碰撞或受光照射时），就从原来的能级跃迁到较高的能级，这时原子的状态称为激发态，而电子所占的能级称为激发态能级。处于激发态的原子是不稳定的，跃迁到激发态能级的电子在很短的时间内会自动地跃迁到原来的能级，同时以电磁波的形式辐射出能量，其频率与能量的关系为

$$h f_{mn} = W_m - W_n \quad \text{J} \quad (2-1-3)$$

式中  $h$  —— 普朗克常数，为  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$   
(习用值为  $6.626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ )

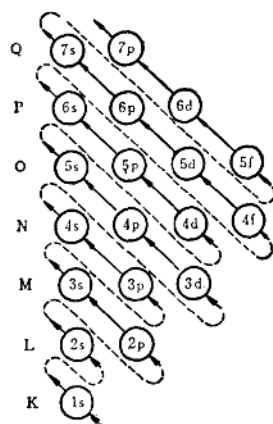


图2-1-3 电子填充顺序图

$f_{mn}$  —— 辐射电磁波的频率Hz (物理中习用符号为  $\nu_{mn}$ )

$W_m$  —— 激发态能级的能量 J

$W_n$  —— 基态能级的能量 J

能级的能量单位习用电子伏特，故能级用 eV 表示时，公式 (2-1-3) 右边要乘以  $1.6 \times 10^{-19}$ 。

当电子获得的能量足够大时，它可以脱离原子核的束缚，成为自由电子。而失去电子的原子就成为带正电的离子。对于这种自由电子来说，它的能量和一般物体一样，可取任意值。

严格地说，壳层分布并不表示电子在原子中的空间轨迹，而是能量分布。由于微观粒子的运动具有独特的规律，量子力学指出，原子中的电子在运动时是没有像宏观物体运动时那样的确定轨道的，只能得出电子出现在原子中某处的几率。如果用小黑点的多少来表示电子出现在原子中各处的几率大小，小黑点多的地方就是电子出现几率大的地方，小黑点少的地方就是电子出现几率小的地方，用这种方法描写电子在原子中出现的几率分布，称为电子云，见图2-1-4。电子的几率分布也就是它的电荷的几率分布，所以电子云可用来表示电子的电荷密度分布。按照电子的几率分布可作出等几率面。通常把由等几率面所围成而总几率很大的（例如达90%以上）空间区域作为电子云的实际空间分布。这种空间区域可随着电子的不同运动状态而有各种形状。在原子结构中，常把它称为轨道。显然，这

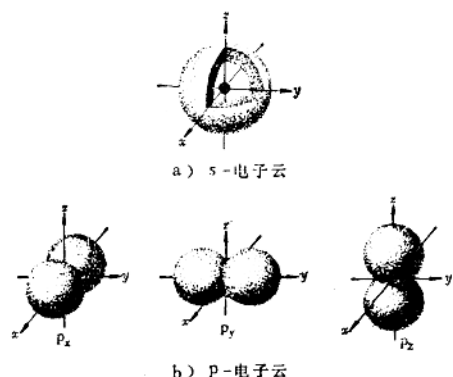


图2-1-4 电子云

与宏观轨道的含义是不同的,指的是电子常在这一空间区域内运动。

图2-1-4a为s-电子云。由于s态的轨道动量矩为零,所以s-电子云没有方向性,对原子核呈球面对称分布。正常氢原子中的电子云就是这种分布。图2-1-4b为p-电子云。p-电子云则由于轨道动量矩等于1而具有方向性,其图形为无柄哑铃状,切面为“8”字形。例如碳原子的电子结构为 $(1s)^2(2s)^2(2p)^2$ ,其中s电子均为自旋方向相反的配对电子,其1s的电子云为离核较近的球壳,2s的电子云则为离核较远的球壳,在外电子壳层还有2个p电子是不配对的,具有不同的轨道动量矩分量,所以它们的电子云是相互垂直的两个无柄哑铃。在有些原子中,p电子最多可达6个,恰好配成三对,其电子云可以形成 $p_x, p_y, p_z$ 三个垂直方向的无柄哑铃。

## 2.5 价电子

元素的化学性质主要决定于原子最外层中的电子数,这种电子称为价电子。最外层电子数是8时,原子特别稳定。它们通常不参与化学反应,称为惰性元素,如氖Ne、氩Ar、氪Kr、氙Xe、氡Rn等。虽然氦He最外层的电子数是2,但也是惰性元素,这是因为这两个电子已使最外层为满壳层了。一般,最外层电子数为1,2,3的元素,在化学反应中容易失去最外层电子,它们大多是金属。与此相反,最外层电子数为5,6,7的元素,其最外层容易获得电子,它们大多数是非金属。有些元素的原子,其次外层也有部分电子可以失去,这种

电子也叫价电子。在化学反应中,原子得到或失去的价电子数叫做原子价。同一种元素在不同的化学反应中可有不同的原子价。

## 2.6 离子

当中性的原子、原子团或分子失去电子(或得到电子)时,它的正负电荷就不再相等,成为带正电(或负电)的原子、原子团或分子。这种带电的原子、原子团或分子称为离子。带正电的叫正离子,带负电的叫负离子。一般,金属容易失去其价电子而成为正离子;非金属则容易获得电子而成为负离子。离子的化学性质与原子大不相同,如钠原子能与水起剧烈的化学反应,而钠离子就不能与水起化学反应。

## 3 分子

### 3.1 分子的组成

分子由原子组成。分子是保持物质化学性质的最小粒子。物质的分子由同一种原子组成的,叫做单质;由不同原子组成的,叫化合物。

在分子中,原子之间存在着强烈的相互作用。这种强烈的相互作用叫做化学键。化学键有多种类型,现在明确知道的有三种:离子键、共价键和金属键。

金属原子与非金属原子的结合,是由于原子间电子的转移,形成正离子和负离子,靠正负离子间的引力而结合起来的。这种化学键叫离子键,又叫电价键,离子键是没有方向性的。

由共有电子对把两个相同或不相同原子结合起来的化学键,叫共价键。

由于共价键构成的分子中不存在离子,只有原子,所以共价键又叫原子键。

如图2-1-5,当两个氯原子靠近时,每个

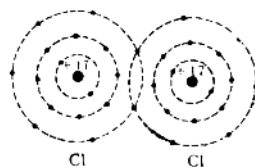


图2-1-5 氯分子的共价键结合

原子都给出一个价电子为两个原子所共有。两个原子核与共有电子对互相吸引,使两个氯原子结合成一个氯分子。共价键是靠自旋方向相反的电子配对结合的。当一个电子与另一个电子配对以后,就不能再与第三个电子配对了。这种性质叫做共价键的

饱和性。共价键还有方向性，例如，当两个氢原子的  $s$  电子和一个氧原子的两个  $p$  电子配对而形成水分子  $H_2O$  时，在两个  $O-H$  键之间总保持着  $105^\circ$  的夹角，见图2-1-6。图中两个原子之间的每条短线代表一个共价键。

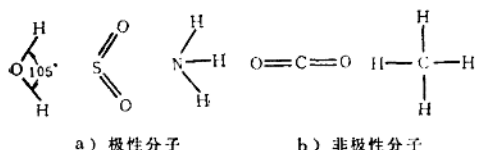


图2-1-6 极性分子与非极性分子

金属原子的价电子与原子核的联系比较松弛，因而金属原子很容易失去价电子，成为正离子。在金属晶体中，原子彼此靠得很近而且是有规律地排列起来的。其中正离子组成晶体点阵或晶格，见图2-1-7。这样，各个金属原子的价电子在原子间的相互作用下便脱离各自的原子，成为共有电子。它们可以在金属晶体中自由运动，所以称为自由电子。因此，金属晶体可以看成是由金属离子和自由电子所组成，其中金属离子则组成晶格。

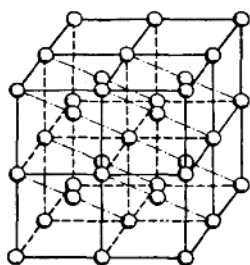


图2-1-7 锂金属的晶体结构(体心立方)

金属键是由自由电子和组成晶格的金属离子之间的相互作用构成的。金属键没有方向性和饱和性。

### 3.2 极性分子与非极性分子

在任何分子中，都有带负电的电子和带正电的原子核。对分子中所有的电子来说，可以认为它们的负电荷等效地集中于一点，有一个负电荷中心。同样，对所有的正电荷也有一个正电荷中心。凡是这两个电荷中心不重合的分子，叫做极性分子（又称有极分子），重合的叫非极性分子（又称无极分子）。由离子键构成的分子，是有极性的。由共价键构成的分子，结构不对称的为极性分子，结构对称的为非极性分子（见图2-1-6）。这可以从共价键的极性来说明。当共价键是在两个不同原子间形

成时，由于不同原子的原子核对共有电子对的吸引力不同，所以共有电子对偏向引力较强的原子，使该原子略带负电性，而另一个原子则略带正电性。这样，这种共价键就有了极性。例如，水分子中，氧原子略显负电性，氢原子略显正电性， $O-H$  键就有了极性。因此，由共价键构成的分子，结构不对称的为极性分子。

## 4 导体、绝缘体、半导体

### 4.1 能带的概念

在  $N$  个原子组成的晶体中，如果不考虑相邻原子间的作用，则各个原子的相应能级就完全相等，从而  $N$  个原子的相应能级就重迭在一起，称为简并能级。实际上，晶体中相邻原子间的距离很小，和原子的大小有同等数量级（原子的直径约为  $10^{-8}$  厘米），原子之间存在着相互作用，所以这些简并能级将分裂成  $N$  个与原来能级很接近的不同能级。

在实际晶体中，原子的数目  $N$  非常大，由于分裂出来的新能级又与原来的简并能级很接近，所以，相邻新能级间的距离非常小（数量级为  $10^{-22}$  电子伏特），几乎可以看成是连续的。这  $N$  个新能级形成一个带，称为能带，见图2-1-8。图中  $\Delta W$  表示能带的宽度。晶体中能带的宽度和原子间的距离有关，距离愈小则宽度愈大。

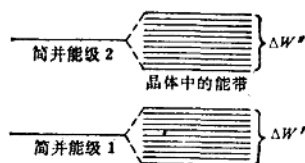


图2-1-8 晶体中能带的形成简图

由价电子所处的基态能级形成的能带称为价带。价电子则处于这些价带上。价带的宽度约几个电子伏特。如果价带中所有的能级都填满电子，则就成为满带 $\ominus$ 。

激发态能级也要形成能带。在基态时，这种能

$\ominus$  内电子壳层当然也要形成能带。但因一般原子的内电子壳层都填满电子，在形成能带时，这些能级也填满电子，通常这些电子对导电没有作用，所以可不予考虑。

带中没有电子,所以叫做空带。由于价电子经激发后可跃迁到空带中,从而参与导电,所以空带又叫导带。

由于晶体中原子的每一个能级都要形成一个能带,所以当两个相邻能带不重叠时,就会出现一个不存在能级的区间。这种区间称为禁带。

从能带角度来看,导体的能带特征是:或者价带未填满电子;或者价带和导带发生交迭。绝缘体的能带特征是:价带是满带,而且价带和导带之间的禁带宽度比较大。半导体的能带特征是:价带也是满带,但价带与导带之间的禁带宽度介于导体和绝缘体的禁带宽度之间,而且比绝缘体的禁带宽度要小得多。

#### 4.2 金属——第一类导体

金属都是导体。常温下,金属的电阻率在 $10^{-7}$ 欧·米以下。正因为金属是良好的导体,所以是电机工程中主要的导电材料。铜、铝、铁以及某些合金是常用的导电材料。

金属的导电原理可以用能带理论予以说明。例如,由单价原子组成的金属晶体,价带中有 $N$ 个能级,因而可以容纳 $2N$ 个电子,但现在只有 $N$ 个电子,所以价带只填了一半,见图2·1-9a。在外电场的作用下,价带中的电子可以从低能级跃迁到高能级,从而参与导电,因此这种金属就是导体。对于碱土金属,例如锌Zn,原子中有30个电子,它的电子结构是 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^4(4s)^2(3d)^{10}$ ,最外壳层的 $4s$ 状态已有2个电子,似乎 $4s$ 能带已填满,但实际上锌是导体。这是由于较高的能带(空带)与 $4s$ 能带发生了重叠,见图2·1-9b,使一部分 $4s$ 电子占有了重叠的较高能带的能级,因此 $4s$ 能带就不是满带,故锌是导体。但如钙Ca和铍Be等,由于能带重叠很小,所以导电性能较差。

金属导体的电阻随温度增加而增大。实验表

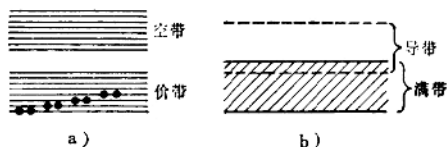


图2·1-9 金属的能带简图

明,微观粒子具有波粒二重性,既具有粒子性又具有波动性。从量子理论来看,金属导体的电阻来源于电子波和组成点阵的金属离子的相互作用。假定金属的点阵是理想的,而且没有振动,则电子波通过点阵时就不会发生散射,就像光通过理想晶体时没有散射一样。实际上,组成点阵的金属离子将随着温度的升高而在平衡位置附近作愈来愈强烈的振动,从而破坏了点阵的理想结构。这就使得电子波通过点阵时将发生散射。亦即,电子的运动将受到振动着的离子所产生的阻力。因此金属导体实际上存在着电阻。由于散射作用的强弱决定于温度的大小,所以金属导体的电阻随温度而变。当用电阻率表示时,则电阻率可写成

$$\rho_T = \rho(T)$$

$\rho(T)$ 表示由点阵热振动引起的电阻率。用量子力学对散射所作的理论计算表明,对于大多数金属说来,约当 $T > 273 \cdot 15$  K时, $\rho_T$ 近似地正比于 $T$ ,即

$$\rho_T \propto T$$

而约当 $T < 20$  K时,则 $\rho_T$ 近似地正比于 $T^5$ ,即

$$\rho_T \propto T^5$$

这些结论在一定的温度范围内与实验结果基本上是符合的。

由于一般的金属导体总含有杂质,所以一般说来,电阻率可写成

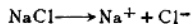
$$\rho = \rho_i + \rho_T$$

式中, $\rho_i$ 为由杂质原子引起电子波的散射而产生的电阻率,在杂质原子浓度很小时,它与温度无关,为一数值随杂质种类而定的常数。

#### 4.3 电解液——第二类导体

酸、碱、盐的水溶液都能导电。因此常把这类物质称为电解质,它的水溶液叫做电解液。

电解液能够导电,是由于电解质在水中发生电离,产生了带有不同电荷的离子。例如,食盐NaCl溶于水时,受到水分子的作用,电离成离子。即



由于电解液的导电是靠离子进行的,所以电解液导电的性质与离子的浓度有关。一般,离子的浓度愈大,导电性能愈好。

#### 4.4 绝缘体

几乎不能导电的物质称为绝缘体,或电介质。



常温下, 绝缘体的电阻率为 $10^7$ 欧·米以上。

绝缘体的结构最常见的有两种: 一种是由共价键结合的气体、液体或固体材料, 如氮气、变压器油、聚氯乙烯、环氧树脂、聚酰亚胺树脂等; 另一种是由离子键结合的固体化合物, 如玻璃、陶瓷、石英等。从这种结构本

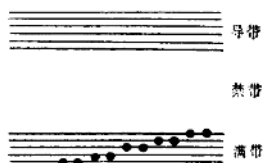


图2-1-10 绝缘体的能带简图

身来看, 由于电荷(电子、离子)比较牢固地束缚于键中, 因而没有自由电荷。所以表现为绝缘体。对于晶体来说, 能带理论的解释是, 其价带为满带, 且价带和导带之间的禁带宽度比较大(绝缘体的禁带宽度在10电子伏特左右), 见图2-1-10。只有在激发能很大时, 才能使电子从满带跃迁到导带, 表现出导电性。

#### 4.5 半导体

半导体是介于导体和绝缘体之间的物质。常温下, 它的电阻率约为 $10^{-7} \sim 10^8$ 欧·米。半导体的结构大多是共价键结合的晶体。但在半导体中, 价电子从共价键中脱离出来所需的能量比绝缘体的要小得多, 绝缘体要超过5电子伏特, 而半导体只要1电子伏特左右。

半导体可以按其组成成分而分为本征半导体和杂质半导体两类。

##### 4.5.1 本征半导体

半导体的能带(见图2-1-11)中, 禁带比较窄。例如, 在300 K时, 半导体锗Ge的禁带宽度为0.67电子伏特, 半导体硅Si的禁带宽度为1.106电子伏特; 其他半导体的禁带宽度一般在1电子伏特左右。理论上, 在温度为绝对零度时, 纯净半导体是不导电的。但在外界的激发下(外加足够强的电场, 利用光或热的激发), 可使一部分电

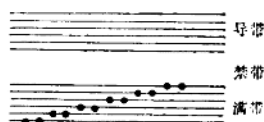


图2-1-11 半导体的能带简图

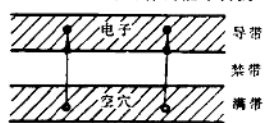
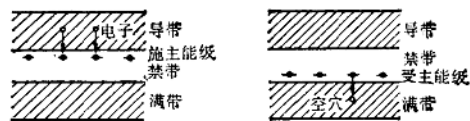


图2-1-12 本征半导体的电子跃迁

子从满带跃迁到导带, 见图2-1-12。这样, 半导体就能导电。但是, 这样一来, 满带中就出现了空位, 称为空穴。满带中的电子就能够迁入这空穴, 而在原先的能级中形成新的空穴。这种电子运动相当于空穴的反向运动。空穴是由于缺少一个电子而形成的, 所以它的运动相当于一个等值正电荷的运动。因此, 对于纯净的半导体来说, 在导带中电子导电的同时, 满带中必然有空穴导电, 而且参加导电的载流子数目也一定相等。这种导电机构称为本征导电, 而具有本征导电的半导体称为本征半导体。例如, 纯净的硅、锗等就是这类半导体。

##### 4.5.2 杂质半导体

在纯净半导体中, 掺入少量其他元素的原子, 这就成为杂质半导体。杂质半导体有两类。第一类是在四价元素如硅或锗半导体中, 掺入少量五价元素如磷、锑或砷等杂质。掺入的杂质在晶体中取代原来的四价原子后, 使杂质原子成为正离子, 多余的一个电子则在杂质离子形成的电场内运动。理论计算表明, 这种多余价电子的能级处于禁带但靠近导带。这种能级称为局部能级(也称杂质能级或束缚能级), 见图2-1-13a。杂质价电子在局部能级中并不参与导电。但是, 在受到热激发时, 很容易跃迁到导带中去, 所以又把这些局部能级叫做施主能级。温度不必很高, 施主能级中的电子就可被激发而跃迁到导带中去。因此, 虽然杂质原子不多, 但在常温下导带中的电子浓度却要比纯净半导体大好多倍, 从而大大地减小了半导体的电阻。显然, 这种半导体中载流子主要是电子。所以通常叫做电子型或N型半导体。



a) N型半导体

b) P型半导体

图2-1-13 杂质半导体的能带简图

第二类杂质半导体, 是在锗或硅半导体中, 掺入少量三价元素如硼或镉的原子。这时, 杂质原子在替代原来的原子时将缺少一个电子。但是这将在禁带中靠近满带处出现一些空着的杂质局部能级。见图2-1-13b。在温度不很高的情况下, 满带中的

电子就很容易被激发而跃迁到局部能级上去,同时在满带中形成空穴。由于这样的局部能级能收容满带跃迁来的电子,所以又称为受主能级。这种杂质半导体的载流子主要是满带中的空穴,所以称为空穴型或P型半导体。P型半导体中的空穴浓度比纯净半导体中的增加了好多倍,大大地减小了半导体的电阻。

用掺杂质的方法,可使一块半导体的一部分是P型的,另一部分是N型的。这样,在P型和N型的交界处就会形成一个特殊的薄层,称为PN结。PN结具有单向导电性,是许多半导体器件的基本组成环节。

## 5 金属的热电子发射

在通常温度下,金属几乎不发射电子。当金属的温度足够高时,会有大量电子从金属中发射出来。这种现象称为金属的热电子发射。由一个阳极和一个阴极组成的真空电子二极管(直热式二极管的阴极是灯丝),就是根据热电子发射而做成的一种电子器件。

实验证明,二极管中的饱和电流符合里查孙公式:

$$I_s = AT^2 e^{-\frac{W_e}{kT}} A \quad (2-1-4)$$

式中  $I_s$ ——饱和电流 A

$A$ ——金属的热发射常数 A/K<sup>2</sup>

$T$ ——绝对温度 K

$W_e$ ——逸出功 J (习用单位电子伏特 eV)

$k$ ——玻尔兹曼常数,等于  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K  
(习用值为  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/K)

一些金属的逸出功见表2-1-1。

表2-1-1 几种金属的逸出功 eV

| 金属名称 | $W_e$ | 金属名称 | $W_e$ | 金属名称 | $W_e$ |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 钨 W  | 4.5   | 钼 Mo | 4.2   | 钽 Ta | 4.2   |
| 钪 Th | 3.4   | 铯 Cs | 1.8   | 钾 K  | 2.3   |
| 钡 Ba | 2.5   | 铂 Pt | 5.3   | 镍 Ni | 4.6   |

金属中的自由电子可以看成是在一个势阱中运动 $\ominus$ 。根据量子理论,在势阱中运动的电子,其能量只能取分立值。所以金属中的自由电子是按能级分布的。绝对零度时,金属中所有的自由电子将按照能量最小原理和泡利不相容原理的要求,从最低

能级填起,直到能量为  $W_e$  的能级,使所有的自由电子填满为止,这个  $W_e$  能级称为费米能级,见图2-1-14。从图可以看出,要使电子逸出金属,必须给电子以  $W_e$  的附加能量,这个能量就是逸出功。

$T \approx 0$  时,电子的分布稍有不同。费米能级附近一些能级上的部分电子将受到热激发的作用,大部分将跃迁到费米能级以上的能级中,其余的则脱离金属而取



图2-1-14 金属中自由电子的逸出功

连续能量值。这部分电子就是热发射电子,其数量随着温度  $T$  而增加。量子理论证明,里查孙公式中  $A$  的理论值为:

$$A = \frac{4\pi m e k^2 S}{h^3} A/K^2 \quad (2-1-5)$$

式中  $m$ ——电子静止质量,为  $9.1 \times 10^{-31}$  kg

$e$ ——电子电量值,为  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$k$ ——玻尔兹曼常数

$h$ ——普朗克常数

$S$ ——阴极的表面积 m<sup>2</sup>

## 6 气体导电

一般说来,气体是良好的绝缘体,但在外来因素的作用下,气体分子可发生电离,产生出自由电子和正负离子,这时气体就变得能导电了。

气体的导电规律如图2-1-15所示。在充有气体的密封玻璃管内

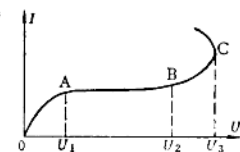


图2-1-15 气体的导电规律

装上两个电极,接上电源,逐渐增加电压。开始时,气体中的电流随着极间电压的升高而增加(图中OA段)。当电压升高到  $U_1$  并超过  $U_1$  时,电流基本上保持不变,达到饱和值 $\ominus$ (图中AB段)。此后,当电压超过  $U_2$  时,电流又随着电压的升高

$\ominus$  金属中的自由电子的势能,其图形类似于一个阱,故称势阱。

$\ominus$  气体导电时,电流的大小由参与导电的电子和离子的数目所决定。气体中的电子和离子是处在不断产生和复合的动平衡状态。当单位时间内气体中形成的电子和离子全部被吸向电极而形成电流时,电流就达到饱和值。

而增加(图中BC段),这是由于电子与正离子分别向阳极与阴极运动的过程中获得了较高的动能,与分子碰撞时使分子电离,产生出新的电子和离子。当电压一经达到 $U_3$ 后,电流突然增加,极间电压突然下降(图中C点之后),这是由于碰撞出来的电子和离子也可引起碰撞电离,使碰撞电离雪崩式地进行的结果。这一电压 $U_3$ 称为击穿电压,它与气体的压强和极间距离的乘积有关(击穿电压与压强乘距离的关系曲线称为巴申曲线)。

击穿电压以前的导电称为被激导电,击穿电压以后的导电称为自激导电。气体击穿后的放电形式,主要由气体的性质、压强、电极的形状和距离、外加电压的大小及电源的功率等因素所决定。

### 6.1 辉光放电

当气体压强较低(约1毫米汞柱),而且控制电路中电流的变化,则气体击穿后会出现如图2.1-16所示的特性,图中的CF段称为辉光放电。

辉光放电过程中,存在一段稳压区,即气体中电流改变时,极间电压几乎不变,如图2.1-16中的DE段所示。这是由于辉光放电时,在电流增加的同时,管内气体中性分子被碰撞电离的程度也加剧,辉光放电管的电导几乎随着电流的增加而正比地增大,从而出现 $U = I/g \approx \text{常量的缘故}$ 。这一DE段称为正常辉光放电。

如果控制电路,使电流继续增加时,管内电导不再随电流正比地增大,电压又随电流的增加而上升(图2.1-16中的EF段),这一段称为异常辉光放电。当电流达到F点时,电压又突然下降,辉光放电即过渡到弧光放电。

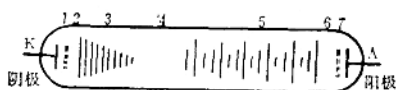


图2-1-17 辉光放电

- 1—阴极光层 2—阴极暗区 3—阴极辉  
4—法拉第暗区 5—阳极辉 6—阳极暗  
区 7—阳极光层

辉光放电时,气体中会出现交替分布的发光区(来源于激发态原子和正离子与电子的复合)和暗区,见图2.1-17。常见的霓虹灯就是辉光放电的例子。

### 6.2 弧光放电

弧光放电时,阴极表面的放电区域很集中,且有大量的电子发射出来,所以电流密度很大,而极间电位降很小,具有下降的伏安特性(见图2.1-16 F点之后的曲线),发出的光呈弧线状。

随着气体的压强不同和击穿的方式不同,气体击穿后的放电形式也不同。当在大气中直接将两个电极接触在一起,然后慢慢拉开,则可直接得到弧光放电。这种弧光放电可发生强烈的光和热,生产上常用于切割或焊接金属。

### 6.3 火花放电

在大气压下,如果电源的功率不足以产生和维持稳定的弧光放电,就会产生火花放电。火花放电总是间歇地发生的。

火花放电在其他条件不变时,击穿电压完全决定于电极之间的距离。例如,在高压技术中,常用测量两个球形电极之间发生火花时的距离,来测量高压的。

### 6.4 电晕放电

在大气中,靠近电位很高曲率半径很小的带电体周围,局部区域内的电场强度很大,可使气体分子发生电离,形成自激导电。这种自激导电称为电晕放电。电晕放电时气体的电离和发光只局限在靠近带电体表面的薄层里。这一薄层称为电晕层。电晕层外不发生电离而且没有自由电子,这一范围称为电晕放电的外围区域。电晕放电的电流是靠离子在外围区域中的运动而延续出去的。

高压输电线,以及高压电机的绕组有时会发生电晕放电。电晕放电时会产生臭氧、造成能量损耗和影响绝缘性能。

## 7 几种电效应

### 7.1 光电效应

金属受到光的照射时,电子从金属中逸出的现

象,称为光电效应。电子技术中应用的光电管就是根据光电效应做成的电子器件。

光是以光速运动着的粒子(即光子)流组成。每个光子的能量决定于光的频率,且等于 $hf$ 。金属中的自由电子吸收了光子而形成光电子,光子的能量部分消耗于逸出功 $W_e$ ,另一部分转换为光电子的动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。按照能量守恒与转换定律,应有

$$hf = \frac{1}{2}mv^2 + W_e \quad \text{J} \quad (2.1-6)$$

式中  $h$ ——普朗克常数

$f$ ——光的频率 Hz (物理学上习用符号 $\nu$ )

$m$ ——电子静止质量

$v$ ——电子的运动速度 m/s

$W_e$ ——金属的逸出功 J

上式称为爱因斯坦光电效应方程。从上式可以看出,对于一定的金属,不是任意频率的光都可产生光电效应, $f$ 必须满足不等式 $f \geq \frac{W_e}{h}$ 。

## 7.2 压电效应

某些晶体在受到压力或拉力的作用时,晶体的某两个侧面上将分别出现正负电荷。这种现象,称为压电效应。石英、酒石酸钾钠、钛酸钡等晶体都具有压电效应。晶体的压电效应具有这样的特点,如果晶体在受到压力时,某个面上是出现正电荷的,则当压力变成拉力时,该面上的电荷就变为负电荷。

压电效应是由于不对称晶体受到力的作用时,组成晶体的正负离子之间发生了不对称的相对位移,产生电矩,从而在晶体表面上出现极化电荷(见第2章6.1)。所以压电效应都是由于机械形变使晶体电矩发生变化而造成的 $\ominus$ 。

压电现象还有逆现象,即当压电体的两个面上加上电压时,压电体将发生形变,该现象叫做电致伸缩。

压电效应在无线电工程中应用很多,如用石英片来产生频率稳定的电振荡等。

## 7.3 热电效应

当用两种不同的金属组成闭合回路,并使两个接头处于不同的温度,则在此回路中将出现电流,

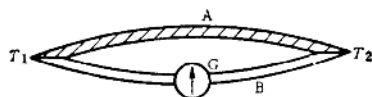


图2-1-18 温差电现象

A、B—两种不同的金属 G—检流计

如图2-1-18所示。可见,在这样的回路中有电动势存在。这个电动势称为温差电动势。

根据量子理论,金属中的自由电子是按能级分布的,绝对零度时,两种金属中的电子能级分布如图2-1-19所示。两种金属接触时,如果金属A中处于费米能级附近电子的能量大于金属B中费米能级的能量,则金属A中就有电子跃迁到金属B中。结果,金属A中电子减少而带正电,金属B中电子增加而带负电,使金属A中电子的势能降低,而金属B中电子的势能则升高,见图2-1-20。这样,两个金属之间就有了一定的电位差。当 $T \neq 0$ 时,金属中的自由电子将受到热激发而跃迁到费米能级以上的能级中,这些电子也将从金属A跃迁到金属B中,从而增加了由于温度引起的电位差。温差电动势就是来源于这部分电位差。

半导体也有温差电的现象,而且半导体的温差电动势可以比金属的大得多。

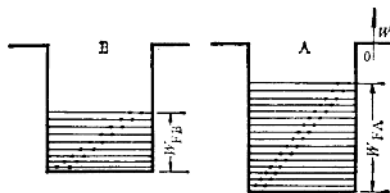


图2-1-19  $T = 0$  时金属中电子的分布

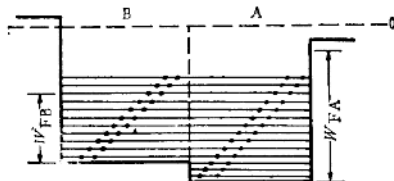


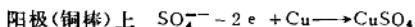
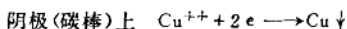
图2-1-20  $T = 0$  时金属A和金属B接触时电子的分布

$\ominus$  对称晶体不会产生压电效应。例如NaCl晶体,每个离子都是对称中心,当这种晶体受到力的作用时,正负离子之间不能产生不对称的相对位移,因此不产生电矩。

测量高温的热电偶就是利用了温差电现象,把许多温差电偶连接起来就组成温差电堆,可以得到比较大的电压或电流。

#### 7.4 电 化 学 效 应

电化学效应中最主要的是电解。电解液(或熔融电解质)在导电过程中伴随有化学反应,表现为插入溶液(或熔融体)的阳极和阴极上有物质析出。这种现象称为电解。电解过程中的化学反应可用反应式来表示。例如,在硫酸铜水溶液中,用碳棒作为阴极,铜棒作为阳极,并通以电流时,其电解的反应为:



这就是说,在阳极发生氧化反应,水溶液中的硫酸根离子在交出负电荷的同时,与阳极上的铜化合成硫酸铜而溶解于水中,成为硫酸铜水溶液。从现象看是阳极(铜)被腐蚀了。在阴极,发生了还原反

应,水溶液中的铜离子在取得负电荷的同时,沉积在阴极(碳棒)上而成为淡红色的铜层。在这一电解过程中,水溶液中的硫酸铜浓度不发生变化。

由于电解可以把电解液中的物质分离出来,因此电解的方法在工业上有广泛的应用。例如用于电冶、电镀、电铸等等。工业上提炼纯铜就是根据上述电解硫酸铜水溶液的原理。提炼时,以纯度很高的精铜作阴极、粗铜作阳极,可提炼出纯度高达99.999%的铜。

电解过程符合法拉第电解定律。

电解液与电极的氧化、还原反应,可使化学能转变为电能,形成化学电源。如果氧化、还原反应的可逆性很差,则这种电池就称为原电池或一次电池。干电池以及新近发展起来的将燃料的化学能转变为电能的燃料电池就属于这一类;反之,如果反应的可逆性很好,则这种电池就称为二次电池,如常用的铅蓄电池等。

## 第2章 静 电 场

在电工技术中经常要研究电磁场,电磁场是一种特殊形态的物质。电场是电磁场的一个方面,静电场是电场的一种特殊情况。缓慢变化的电场往往可以按静电场来处理,因此静电场的分析和计算广泛地用在高电压技术及其设备和电力系统等方面。静电场的分析包含着两个方面:(1)带电体及其与周围电场的联系;(2)带电或不带电的物体处于外电场中所受到力的作用。

### 1 静电场的概念

电荷的周围或变化磁场的周围存在着一种弥漫于空间的特殊形态的物质,叫做电场。通过电场,能使两个不相接触的带电体彼此吸引或排斥。电场具有能量,能与其他形式的能量相互转化。

原子内部的电场(微观电场)是极其复杂的。在电工技术中所研究的是宏观电场,宏观电场不考虑个别原子的细微结构,而是研究亿万个或更多原子或分子的总体电场。宏观电场在空间的分布是连续的,变化是平滑的。中性物质没有宏观电场,这

是因为相邻粒子的电场相互抵消的缘故。

物体中带电粒子总是不断地运动,永无静止的时候。但是如果所带的电荷在宏观上对观察者没有位移,则称为物体带着静电。在这种带电物体周围的电场,称为静电场。

### 2 电场强度

#### 2.1 库仑定律

在真空中两个点电荷 $\ominus$ 通过电场相互作用时,作用力 $F$ 的大小与它们的电量 $Q$ 和 $q$ 的乘积成正比,而与它们之间距离 $r$ 的平方成反比,即

$$F = K \frac{Qq}{r^2} \quad (2.2-1)$$

作用力的方向沿着它们连线的方向。如果 $Q$ 和 $q$ 的电荷异性,则作用力 $F$ 为吸力;如果 $Q$ 和 $q$ 的电荷

$\ominus$  在空间一个很小的区域内存在的电荷,如果可以看作集中存在于一个没有体积的点上时,则这种电荷称为点电荷。

同性, 则  $F$  为斥力。这个结论叫做库仑定律, 这个作用力叫做电力。

在公式 (2-2-1) 中, 采用 MKSA 单位制时,  $F$  的单位用牛顿,  $r$  的单位用米,  $Q$  和  $q$  的单位用库仑,  $K$  为比例常数, 在真空中  $K$  等于  $9 \times 10^9$  牛顿·米<sup>2</sup>/库仑<sup>2</sup>。

如果两个带电体虽然不是点电荷, 但它们之间的距离比它本身的尺寸大得多时, 仍可以按点电荷处理。

## 2.2 真空的介电常数 (真空的电容率)

在真空中, 公式 (2-2-1) 中的常数  $K$  一般用真空介电常数  $\epsilon_0$  来表达,

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2-2-2)$$

$\epsilon_0$  的值 (在 MKSA 制中) 为

$$\epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

## 2.3 点电荷的电场强度

电场强度是表征电场中每一点性质的一个物理量。点电荷  $Q$  的电场中某给定场点的电场强度  $E$ , 可以用一个电量很小的正试验点电荷  $+q$  在该点所受的力  $F$  来决定 (见图 2-2-1):

$$E = \frac{F}{q} \text{ V/m} \quad (2-2-3)$$

$E$  是一个矢量, 其方向和试验电荷所受到力的方向一致 (见图 2-2-2)。

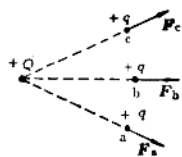


图 2-2-1 电场中试验电荷所受的力

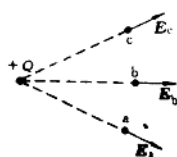


图 2-2-2 点电荷的场强方向

点电荷的电场强度  $E$  进一步可以写成

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} r^0 \text{ V/m} \quad (2-2-4)$$

式中,  $r^0$  是单位矢量, 其长度为 1, 方向是由源点指向场点。

## 2.4 电场强度的叠加原理

在空间某给定点由几个点电荷共同产生的电场

强度  $E$  是各个点电荷单独产生在这一点上的电场强度的叠加 (矢量和):

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{r_k^2} r_k^0 \text{ V/m} \quad (2-2-5)$$

式中  $r_k$ ——点电荷  $Q_k$  与场点之间的距离  $m$

$r_k^0$ ——由点电荷  $Q_k$  指向场点的单位矢量

如果空间某给定点的电场强度是由电荷连续分布的大尺度带电体产生的, 则上式中的叠加就应代之以积分。设  $dQ$  为电荷分布中的任一电荷元, 那末带电体的电场强度

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ}{r^2} r^0 \quad (2-2-6)$$

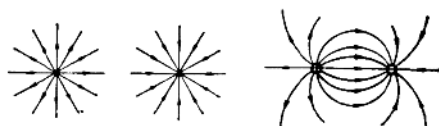
计算上述积分, 必须知道  $Q$  在带电体中的分布关系式。

## 2.5 电力线

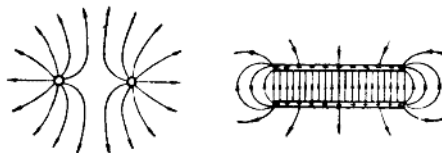
电力线是形象地表示电场分布的常用图示法。空间任一点上电力线的切线方向就是该点电场强度  $E$  的方向, 电力线的疏密程度即表示  $E$  的大小, 即在该点垂直于  $E$  的单位面积上所穿过的电力线根数正比于  $E$  的大小。

电力线有如下性质: (1) 既不闭合, 也不中断, 起始于正电荷, 终止于负电荷; (2) 任何电力线都不会相交。

图 2-2-3 是几种简单静电场的电力线分布图。图 2-2-3 a 表示平行带电板间的电场, 它是均匀强度电场, 简称均匀电场, 即电场中各处场强的大小相等且方向相同, 所以其电力线是疏密均匀的平行线。



a) 正电荷 b) 负电荷 c) 两个异性电荷



d) 两个同性电荷 e) 平行带电板

图 2-2-3 几种电场的电力线

但在板的边缘处电场是不均匀的。

### 3 电压与电位

#### 3.1 电场力的功

在场强为  $E$  的均匀电场中, 电量为  $+q$  的试验点电荷沿场强方向由  $a$  点移动距离  $l$  而达  $b$  点时 (图2-2-4), 电场力所做的功为

$$W_{ab} = Fl = qEl \quad \text{J} \quad (2.2-7)$$

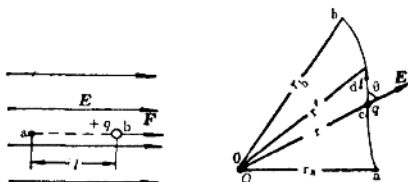


图2-2-4 电场力做功

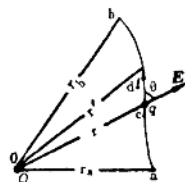


图2-2-5 电场力做功的计算

在点电荷  $Q$  的电场中, 电量为  $+q$  的试验点电荷移动一个长度元  $dl$  (图2-2-5), 电场力所作的功

$$\begin{aligned} dW &= F \cos \theta dl = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \\ &= q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \end{aligned} \quad (2.2-8)$$

试验点电荷由  $a$  点移动到  $b$  点时, 电场力所作的功

$$W_{ab} = q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad \text{J} \quad (2.2-9)$$

由公式 (2.2-9) 可知: 在点电荷的电场中, 电场力所做的功与路径无关, 仅与路径的起点和终点的位置有关。由几个点电荷共同产生的静电场, 电场力所做的功也就等于各个点电荷的电场力所做功的代数和。从而可以推论: 试验点电荷在任何静电场中移动时, 电场力所做的功与路径无关, 而仅与这试验电荷的电量以及路径起点和终点的位置有关。

试验点电荷在电场中运动时, 经过任何闭合路径又回到原来的位置, 电场力所做的功必为零, 即

$$q \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

#### 3.2 电压 (电位差)

在电场中, 单位正电荷由  $a$  点移到  $b$  点时, 电场力所做的功称为  $a$  点到  $b$  点的电压, 又称为电位差, 即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{V} \quad (2.2-10)$$

功  $W_{ab}$  的单位为焦耳, 电量  $q$  的单位为库伦。

$U_{ab}$  也只与  $a$ 、 $b$  两点的位置有关, 与所取的路径无关。所以在静电场中, 从任一点起, 不论沿任何闭合路径回到该点, 它的电压为零, 即

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (2.2-11)$$

静电场中电场强度的闭合线积分为零, 这是静电场的基本特性之一。

在均匀电场中, 如果  $l$  表示由  $a$  点沿电力线方向到  $b$  点的距离, 则

$$U_{ab} = El \quad (2.2-12)$$

#### 3.3 电位

在公式 (2.2-10) 中, 如以  $b$  为参考点, 则这时电压  $U_{ab}$  也可称为  $a$  点的电位, 用  $\varphi_a$  表示。电位  $\varphi_a$  与  $a$  点到参考点之间的路径无关, 当参考点选定后, 只与  $a$  点的位置有关。所以  $\varphi_a$  只有单一的值, 这叫做电位的单值性。电位是标量。

在理论上研究时, 常取无限远点作为电位的参考点; 在工程实用上, 则常常取大地作为电位的参考点。

$a$ 、 $b$  两点间的电位差  $U_{ab}$  也可用  $a$ 、 $b$  两点的电位  $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$  来表示:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad \text{V} \quad (2.2-13)$$

#### 3.4 等位面

静电场中电位相等的各点所组成的曲面叫做等位面。

当电荷沿等位面移动时, 电场力不作功; 等位面与电力线是成正交的, 电位降落的方向就是电力线的方向。

例如点电荷  $Q$  所产生的电场中, 与电荷相距为  $r$  的球面上各点的电位均为

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \text{V} \quad (2.2-14)$$

所以, 不同的等位面是以点电荷为中心的一系列同心球面, 如图2-2-6中的虚线所示。

图2-2-7中画出了正负带电板周围的等位面 (用虚线表示) 和电力线 (用实线表示)。

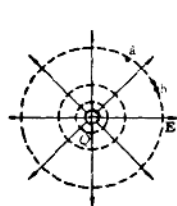


图2-2-6 点电荷场的等位面

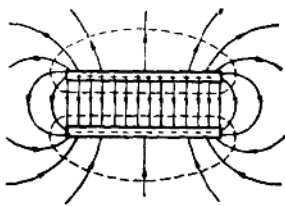


图2-2-7 正负带电板周围的等位面和电力线

### 3.5 电位梯度

电场某点的电位梯度, 大小是该点电位的最大增加率, 其方向就是这个最大增加率所处的方向 (图2-2-8)。电位梯度是一个矢量, 其数学表达式为

$$\text{grad } \varphi = \frac{d\varphi}{dn} \mathbf{n}^0 \quad \text{V/m} \quad (2.2-15)$$

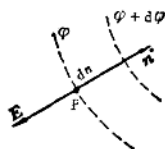


图2-2-8 电位梯度的表示

式中  $\mathbf{n}^0$ ——该点电位最大增加率所处方向的单位矢量

$n$ ——该方向上的距离

电位梯度与电场强度相等而相反, 即

$$\mathbf{E} = -\frac{d\varphi}{dn} \mathbf{n}^0 = -\text{grad } \varphi \quad (2.2-16)$$

上式在直角坐标中可以写成

$$\mathbf{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k}\right) \quad (2.2-17)$$

在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三个分量分别是

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (2.2-18)$$

## 4 静电场中的导体

### 4.1 静电感应

如把导体放入电场中, 导体内的自由电子受到电场力的作用, 要向着和电场相反的方向移动。如图2-2-9, 导体的  $ab$  面显示出带负电, 导体的  $cd$  面显示出带等量的正电。这种导体内的电荷因受外电

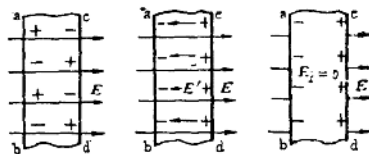


图2-2-9 电场中的导体

场作用而重新分布的现象叫做静电感应。

由于静电感应, 导体的两个表面上带有正负电荷, 导体内部因之而形成了一个和外电场  $E$  方向相反的附加电场  $E'$ 。当  $E$  和  $E'$  完全抵消, 即内部的电场  $E_i$  等于零时, 自由电子的定向运动才完全停止, 这种状态称为导体的静电平衡状态。

处于静电平衡状态的带电导体, 电荷的分布情况决定于导体表面的弯曲程度。一般来说, 表面弯曲程度大 (例如尖角处) 的地方, 电荷密度也大, 附近的电场也相应较强; 反之, 表面弯曲程度小 (例如平坦处) 的地方, 电荷密度也小, 附近的电场也相应较弱。

静电场中静止导体内部任何一点的电场强度为零; 整个导体是一个等位体, 导体的表面是一个等位面; 导体的内部各处没有静电荷, 电荷只能分布于导体的外表面。

### 4.2 静电屏蔽的概念

如果把有空腔的导体放入电场 (如图2-2-10),

由于导体内部任一点的场强为零, 所以这导体起了隔绝外电场的作用, 使外电场不能透入空腔内部。反之, 如果空腔导体内有带电体而产生电场 (如图2-2-11), 把空腔导体外表面接地, 则外表面的感应电荷就由于接地而中和, 使空腔内带电体的电场不能穿透到外部。这两种情况都叫做静电屏蔽。静电屏蔽广泛地用于电器、仪表和电缆等产品上, 使其不

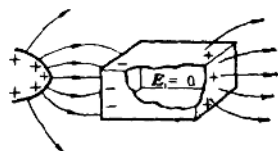


图2-2-10 金属壳内部不受外电场的干扰

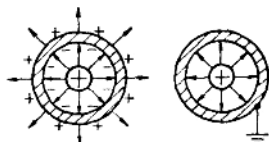


图2-2-11 接地金属壳内的电场对外无影响



受外界电场的干扰,也不对外界产生影响。

## 5 电偶极子

电偶极子是两个量值相等、极性相反、距离很近的一对电荷所组成的系统。

电偶极子的周围存在着静电场。如图2-2-12所示,场中任一点A只要 $r \gg h$ 时,它的电位是

$$\varphi = \frac{qh \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}^0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{V} \quad (2-2-19)$$

式中  $\mathbf{r}^0$ ——由电偶极子的中心O指向场点A的单位矢量

$\mathbf{p}$ ——电偶极子的电矩  $\text{C} \cdot \text{m}$

$$\mathbf{p} = q\mathbf{h} \quad (2-2-20)$$

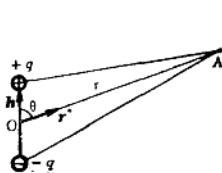


图2-2-12 电偶极子

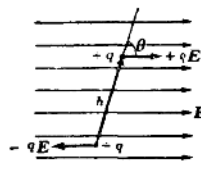


图2-2-13 电偶极子的力矩

矢量 $\mathbf{h}$ 代表由负电荷指向正电荷的有向距离。

如果电偶极子处于外电场中,由于距离 $h$ 很小,在它所在的范围内的外电场可以看作是均匀电场(场强为 $\mathbf{E}$ )。在这电场中电偶极子的正电荷受到外作用力 $+q\mathbf{E}$ ,负电荷受到外作用力 $-q\mathbf{E}$ ,这两个力构成一个力偶,由图2-2-13可以看出其力矩的大小为

$$M = qEh \sin \theta \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2-2-21)$$

力矩矢量的方向由力偶按右螺旋定则确定,即垂直穿入纸面,所以也可写成

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{h} \times q\mathbf{E} = q\mathbf{h} \times \mathbf{E} \\ &= \mathbf{p} \times \mathbf{E} \quad \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (2-2-22)$$

这是说,电偶极子受到外电场力的作用,总企图使它的电矩 $\mathbf{p}$ 与外电场 $\mathbf{E}$ 有一致的方向。

## 6 电场中的电介质

### 6.1 电介质的极化

在外电场力的作用下,电介质内的正负电荷会在空间位置上发生很小的偏移,形成电偶极子,破坏了电的中性状态,这种现象叫做电介质的极化。极化状态下的电荷叫做极化电荷,也称束缚电荷。

极化分两种类型:非极性分子的极化和极性分子的极化。

对于非极性分子组成的电介质(如氢、氮、聚乙烯、聚丙烯),在外电场不存在时,分子中正负电荷的作用中心是重合的,电介质呈现中性。但在外电场作用下,电场力改变了电子运动情况,正负电荷产生了偏移,形成极化。在外场强的一定限度内,电场愈强,分子的电矩愈大,电介质表面上出现的束缚电荷愈多,极化程度也愈高。

对于极性分子组成的电介质(如环氧树脂、玻璃、陶瓷),在外电场不存在时,分子中正负电荷的作用中心本来就不重合,有电矩,不过由于分子的不规则热运动,使电矩排列十分紊乱,在宏观上才呈现中性。但在外电场作用下,各个电偶极子便热运动的阻尼下在不同程度上循外电场的方向排列,形成极化。外电场愈强,电偶极子的排列愈整齐,极化程度也愈高。

### 6.2 极化强度

在电介质内,单位体积内电矩的矢量和称为极化强度,用矢量 $\mathbf{P}$ 表示

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \mathbf{p}}{\Delta V} \quad \text{C/m}^2 \quad (2-2-23)$$

式中, $\sum \mathbf{p}$ 是体积 $\Delta V$ 内由于极化而出现的电偶极子电矩的矢量和。

### 6.3 极化率

电介质内的电场,是电介质内束缚电荷的电场与外电场的合成。在一定限度内的场强中,电介质的极化强度 $\mathbf{P}$ 与电介质的合成场强 $\mathbf{E}$ 成正比,即

$$\mathbf{P} = \chi \mathbf{E} \quad (2-2-24)$$

式中, $\chi$ 是与电介质性质有关的比例常数,称为极化率( $\text{F/m}$ )。

极化率 $\chi$ 在各个方向上数值相同的,称为各向同性的电介质,其 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{E}$ 总有一致的方向。

极化率 $\chi$ 不随电场强度而改变的,称为线性电介质。

## 7 电介质的击穿

当电场增强到一定程度时,电介质内部区域的

⊗ 矢量之间的“×”号表示矢量积(下同)。