

第一章 电 场

1-1. 电场和电场强度

我们知道，自然界中任何物质都是由电子、质子、中子等基本粒子组成的。质子带有正电荷，中子不带电，质子和中子结合成为原子核。电子带有负电荷，它环绕在原子核的周围按一定的轨道不停地运动着，正象行星绕着太阳运动一样。

在平常情况下，物体内的正电荷与负电荷数量相等，因此物体呈中性，亦即不带电。如果用摩擦或其他方法使物体获得了电子，则物体成为带负电的带电体；如果使物体失去了电子，则物体成为带正电的带电体。

带电体的周围有电场存在，电场是物质的一种特殊形态。

实验证明，电场有两种表现：一是电场对处在场内的另一电荷有力的作用；二是电荷在电场内顺着电场力的方向移动时，电场力要对它做功，这就表明电场内具有能量。

电荷在电场内的某一点上所受到的电场力，与电荷的电量 Q 成正比，但同一电荷在电场内的不同点上所受到的电场力，可能各不相同。由此可见，电荷在电场内的某一点上所受到的电场力，不仅与电荷所带的电量 Q 成正比，而且还与该点的电场强弱成正比，即

$$F = \mathcal{E}Q. \quad (1-1)$$

上式中 $\mathcal{E} = \frac{F}{Q}$ ，称为电场强度。电场强度是描述电场内某一点的特性的物理量。它是一个矢量，其数值等于电场作用于该点

的单位电荷上的力，其方向则规定为同正电荷在该点的受力方向一致。在式(1-1)中，如果电场力 F 的单位为牛顿(简称牛)，电荷 Q 的单位为库仑(简称库)，那末电场强度的单位就是牛/库。

为了使电场形象化，通常用电力线来描绘电场。在绘制电力线时，应使电力线上任一点的切线方向与这一点的电场方向(即该点电场强度的方向)相同，并使同电力线相垂直的单位面积中穿过的电力线数，等于或正比于该处电场强度的数值。这样，根据电力线的密度和所指的方向，就能直接看出电场的强弱和方向。

如果在电场内的所有各个点上，电场强度的数值均相等，方向都相同，这样的电场就称为均匀电场。均匀电场可用疏密均匀的平行电力线来表示。图 1-1 是带有异号电荷的两平行平板间的电场。图 1-2 是孤立带电球体的电场。

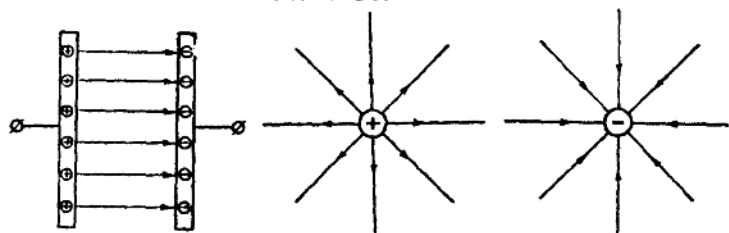


图 1-1. 两平行平板间的电场。 图 1-2. 带正电和带负电的孤立球体的电场。

1-2. 电位和电压

物体在不同的位置上具有不同的重力位能。与此相似，电荷在电场中的不同位置上也具有不同的位能。电荷在电场内的某一点上所具有的位能称为电位能。

要确定电位能的大小，必须选择一参考点(又称为基准点)作为比较标准。参考点的选择可以是任意的，通常选择大地作为参考点，即认为电荷在地面上的电位能为零。因此，电荷在电场内某

点上所具有的电位能，就可用电荷从该点移到地面时电场力所做的功来表示。

假设图 1-3 是一均匀电场，并把右面的金属板和大地接通，使它们成为一体，于是，正电荷在 A 点上所具有的电位能为

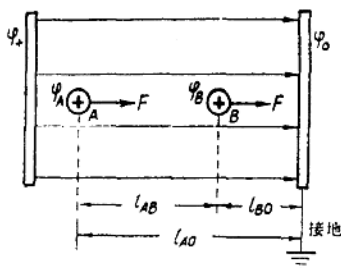


图 1-3. 电荷在均匀电场中的电位。

$$W_A = F \cdot l_{A0} = \mathcal{E} Q l_{A0}.$$

同理，正电荷在 B 点上的电位能为

$$W_B = F \cdot l_{B0} = \mathcal{E} Q l_{B0}.$$

正电荷在电场内某点上的电位能与它所带电量 Q 的比值，称为该点的电位，用 φ 表示，即

$$\varphi_A = \frac{W_A}{Q}; \quad \varphi_B = \frac{W_B}{Q}.$$

由此可见，电场内某点的电位在数值上就等于单位正电荷在该点所具有的电位能。显然，电场内某点的电位愈高，就表示单位正电荷在该点所具有的电位能愈大。

电场内两点之间的电位差就称为这两点之间的电压，用 U 表示。例如 A、B 两点之间的电压为

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B. \quad (1-2)$$

在电工技术中，电压和电位都是很重要的物理量。

电压的单位是伏特，简称伏 (V)。较大的电压单位是千伏 (kV)，1 千伏 = 10^3 伏；较小的单位是毫伏 (mV)，1 毫伏 = 10^{-3} 伏。通常电灯线路的电压为 220 伏；机床照明灯的电压是 36 伏；高压输电线的电压是 35 千伏、110 千伏、220 千伏等。

如前所述，在实用上我们常取大地的电位为零，用 φ_0 表示。因

此,场内某点的电位也就等于该点与地面(零电位点)之间的电压。显然,电位的单位也是伏。

电压的方向规定为由高电位点指向低电位点,即在电压的方向上电位是逐点降低的。

由公式(1-2)可知,在均匀电场内,电压与电场强度有如下的关系:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{F \cdot l_{AB}}{Q} = \mathcal{E} l_{AB}.$$

因此
$$\mathcal{E} = \frac{U}{l}.$$

上式表明,当 l 一定时,如果电压 U 愈高,则电场愈强。电场强度的单位又可用伏特每米(伏/米)来表示。

1-3. 导体和电介质

导体可分为第一类导体和第二类导体。

金属都是第一类导体。在金属中,原子外层的电子与原子核的结合比较松弛,因此,这部分电子很容易脱离自己的原子核,而在原子之间游动,这样的电子称为自由电子。因失去电子而形成的金属的正离子构成了导体的骨架,它们只能在自己的位置上作微小的振动。在平常情况下,金属中虽然有大量的自由电子,但它们只是在作无规则的热运动,此时通过导体任一截面的电量平均值等于零。当自由电子受到电场力的作用时,它们就顺着电场力的作用方向作定向运动,因而形成了电流。

酸、碱和一些盐类的水溶液,即电解液,是第二类导体。电解质在溶剂的作用下,能分解成正离子和负离子(即为缺少电子和电子过多的原子或原子团)。例如,氯化钠溶解在水中,则分解成带正电的钠离子和带负电的氯离子。这些离子在电场力的作用下,

正离子顺着电场方向运动,而负离子则逆着电场方向运动,因而在电解液中形成了电流。

单位体积内含有极少量的自由电子或离子的物体称为绝缘体。在电场力的作用下,这些物体中所形成的电流微不足道,通常就认为它们是不导电的。气体和一部分液体(矿物油、漆)以及除去金属和碳以外大多数的固体都是绝缘体。应该指出,绝缘体并不是绝对不导电的。当绝缘体受到强大的电场作用时,或在过高的温度下,都可能发生击穿现象。所谓击穿就是指绝缘体丧失了绝缘性能而变成了导体。

导电性能介于导体和绝缘体之间的一些物体,称为半导体,例如,用做整流器的氧化亚铜,用做晶体管的锗、硅等皆是半导体。目前,半导体在工业技术上的应用正在日益迅速发展。

思 考 题

1-1. 在均匀电场内的 A 、 B 两点上各有一电荷,其电量分别为 Q_A 和 Q_B , 如果它们所受的电场力 $F_A = F_B$, 问 Q_A 与 Q_B 是否相等? 为什么?

1-2. 电压与电位之间有何关系? 假定电场内某两点的电位都很高, 这两点间的电压是否就很大?

计 算 题

1-1. 已知电场内某几点的电位是 $\varphi_A = 20$ 伏, $\varphi_B = 10$ 伏, $\varphi_C = 10$ 伏, 求电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{AC} 各等于多少?

1-2. 已知图 1-4 的导线 A 上的电位 φ_A 高于导线 B 上的电位 φ_B , 试绘出 A 、 B 两点间的电压方向。设 $\varphi_A = +50$ 伏, $U_{AB} = 100$ 伏, 求 $\varphi_B = ?$

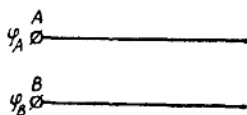


图 1-4. 计算题 1-2 的图。

1-3. 试求图 1-5, a 和 b 的两电极间的绝缘体所承受的电场强度值.

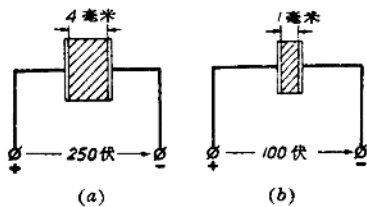


图 1-5. 计算题 1-3 的图.

第二章 直流电路

2-1. 电源与电动势

当电灯、电炉、电动机等用电器通过电流时，这些用电器就把所取得的电能转换成其他形态的能。因此，需要有一种可以把非电能转换成电能的装置，才能向用电器不断地供给电能。把非电能转换成电能的装置称为电源。常用的电源有发电机、蓄电池等。发电机是把机械能转换成电能的一种装置；蓄电池则是把化学能转换成电能的一种装置。

在电源的两端分别聚集有正电荷和负电荷，所以在电源的两极间始终有电场存在。电源两端分别聚集正电荷和负电荷的过程，现以直流发电机为例，说明如下：当发电机中的导体切割磁力线时，由实验得知，导体内的正电荷和负电荷将分别受到磁场力（称为局外力，用 $F_{\text{外}}$ 表示）的作用，于是正电荷和负电荷就分别向导体的两端聚集，如图 2-1 所示^①。

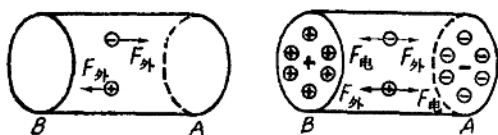


图 2-1. 电荷受局外力和电场力的作用情况。

随着电荷的聚集，导体中出现了电场。此后，导体中的电荷不仅受到局外力 $F_{\text{外}}$ 的作用，而且还受到电场力 $F_{\text{电}}$ 的作用。由于电

^① 图 2-1 中的磁场方向是自读者指向图，而导体的运动方向是向上的，但图中都未示出。

场力对电荷的作用与局外力的作用相反,因此 $F_{电}$ 阻碍电荷向两端聚集.当 $F_{电}$ 增大到与 $F_{外}$ 相等时,导体中的正电荷和负电荷就停止向两端移动,这时导体的两端已经聚集了一定数量的电荷,两端之间建立了一定强度的电场,因而此时电源两端出现了电位差.由此可见,这种建立电场的过程,亦即是局外力克服电场力驱使正电荷和负电荷分别向两端移动的做功过程.这种由局外力驱使正电荷和负电荷分别向电源两端移动时所做的功就转换成电能.

局外力把正电荷从 A 端移到 B 端所做的功 W_{AB} 与被移动的电荷 Q 的比值,称为 A 、 B 两端间的电动势,用 E 表示,即

$$E_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q}. \quad (2-1)$$

由此可见, A 、 B 两端间的电动势在数值上就等于局外力把单位正电荷从 A 端移到 B 端所做的功.

电动势的单位是伏.如果局外力把1库电量从 A 端移到 B 端所做的功是1焦耳(简称焦),则 A 、 B 两端间的电动势就等于1伏.

电动势的方向规定为由低电位端指向高电位端,即在电动势的方向上电位是逐点升高的.

电源聚集有正电荷的一端,称为正极,用符号“+”表示;聚集有负电荷的一端,称为负极,用符号“-”表示.电源的表示符号如

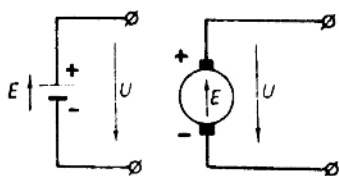


图 2-2. 电源的表示符号.

图 2-2 所示.图中电动势 E 的方向是由“-”指向“+”,即由低电位点指向高电位点;电压 U 的方向是由“+”指向“-”,即由高电位点指向低电位点.

2-2. 电路的概念

电路就是导电的回路.它由电源、负载(即用电器的)和连接导

线组成,如图 2-3 所示.对电源来讲,负载和连接导线叫做外电路,电源内部的电路则叫做内电路.

由于电源内有电动势存在,所以在电源两端就存在着电位差,亦即有电压.在电路接通后,负极上的电荷则通过连接导线和负载流向正极.随着电荷的移动,电源两端的正电荷和负电荷比电

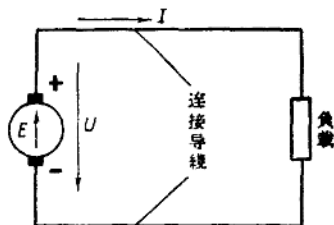


图 2-3. 最简单的电路.

路未接通时减少了,电源内的电场力也跟着减小,这样一来,局外力便大于电场力.在局外力的作用下,电源内部的负电荷就继续由正极流向负极,于是在电路内形成了连续不断的电流.由此可见,只要在闭合回路中存在着电动势(即有局外力做功),则此电路中就能产生一持续的电流.

习惯上规定用正电荷移动的方向来表示电流的方向.因此,外电路中的电流方向是由正极指向负极,亦即由高电位点指向低电位点,故在负载上顺着电流的方向电位是逐点降低的.在内电路中,电流的方向是由负极指向正极,亦即由低电位点指向高电位点,因此,在电源内顺着电流的方向电位是逐点升高的.

电流的强弱用电流强度来表示.如果电流的大小和方向均不随时间变化,这种电流称为恒定电流,简称直流.对于直流,其电流强度是用单位时间内通过导体横截面的电量来度量的,即

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (2-2)$$

电流的单位是安培,简称安(A).如果在 1 秒钟内通过导体横截面的电量是 1 库,则此电流为 1 安.

流过导体某一横截面的电荷数总是等于同时间内流经该导体

另一横截面的电荷数，这就是电流的连续性原理。否则将会在电路的某一段上造成电荷的无限堆集，这是不可能的。因此，在一条无分支的电路上，不论各段导体横截面的大小如何，电流总是处处相等的。图 2-3 所示的电路是一无分支电路，因此流过电源的电流与流过负载的电流相等。

2-3. 电能和电功率

在电流通过电路的同时，电路内还发生了能量的转换。

在电源内，局外力不断地克服电场力对正电荷做功，从而使正电荷的电位能升高。正电荷在电源内获得了能量，把非电能转换成电能。在外电路中，正电荷在电场力作用下，不断地通过负载，从而使正电荷的电位能降低。正电荷在外电路中放出能量，把电能转换成其它形态的能。由此可见，在电路中，电荷只是一种转换和传输能量的媒介物，电荷本身并不产生或消耗任何能量。通常所说的用电，就是指取用电荷所携带的能量而言。

从非电能转换来的电能就等于电源的电动势与电荷 Q 的乘积，即

$$A = EQ = EIt.$$

此电能可分为两部分：其一是外电路取用的电能 A_1 ，其二是内电路消耗掉的电能 A_0 ，根据能量守恒定律得

$$A = A_1 + A_0.$$

外电路取用的电能等于外电路两端的电压 U （即电源的端电压）与电荷 Q 的乘积，即

$$A_1 = UQ = UI t.$$

电荷在内电路中移动时，把一部分电能转换成热能，这是无法利用的能量损失。根据以上公式得

$$A_0 = A - A_1 = (E - U) It.$$

式中 $(E-U)$ 通常用 U_0 来表示,称为电源内部电压降。于是

$$A_0 = U_0 It.$$

由此可得电路的能量平衡方程式为

$$EIt = UI t + U_0 It.$$

等式两边除以 It ,则得

$$E = U + U_0. \quad (2-3)$$

上式称为电路的电压平衡方程式。其意义是：电源电动势等于电源端电压与电源内部电压降之和。

在某段时间内,电路中产生(或损失)的电能与该段时间的比值称为电功率,用 P 来表示。在闭合电路中电源产生的电功率为

$$P_{\text{电源}} = \frac{EIt}{t} = EI; \quad (2-4)$$

负载取用的电功率为

$$P_{\text{负载}} = \frac{UI t}{t} = UI; \quad (2-5)$$

内电路损失的电功率为

$$P_{\text{损失}} = \frac{U_0 It}{t} = U_0 I. \quad (2-6)$$

这三者间的关系是

$$P_{\text{电源}} = P_{\text{负载}} + P_{\text{损失}}.$$

上式称为电路的功率平衡方程式。功率的单位是瓦特,简称瓦(W)。电能的单位是焦耳(瓦秒),简称焦。这些单位在电工应用上有时嫌太小,因此,功率的单位常用千瓦(kW),电能的单位常用千瓦小时(kWh)。1千瓦小时俗称1度电。

例 2-1. 如图 2-4 所示, 设已知电动势 $E=125$ 伏, 端电压 $U=115$ 伏, 电流 $I=4$ 安, 求 $P_{\text{电源}}$ 、 $P_{\text{负载}}$ 、 $P_{\text{损失}}$ 及 U_0 。

解: $P_{\text{电源}} = EI = 125 \times 4 = 500$ 瓦;

$P_{\text{负载}} = UI = 115 \times 4 = 460$ 瓦;

$$P_{\text{损失}} = U_0 I = (125 - 115) \times 4 = 40 \text{ 瓦};$$

$$U_0 = E - U = 125 - 115 = 10 \text{ 伏}.$$

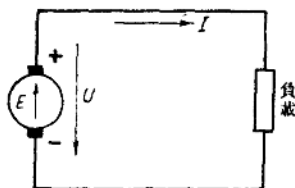


图 2-4. 例 2-1 的图.

例 2-2. 有一只 100 瓦的电灯接在 220 伏的线路中, 求电灯取用的电流.

解: 因为

$$P = UI,$$

即

$$100 = 220 \times I,$$

所以

$$I = 0.45 \text{ 安}.$$

2-4. 欧姆定律 · 电阻

1827 年欧姆由实验发现, 导体中的电流 I 的大小与加在导体两端的电压 U 成正比, 而与导体的电阻 R 成反比. 这个关系称为欧姆定律.

欧姆定律是计算电路的最基本定律, 在应用时常分为以下两种形式:

(一) 一段电阻电路的欧姆定律

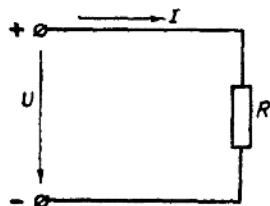


图 2-5. 一段电阻电路.

图 2-5 是闭合回路中的一段电路. 在这一段电路中不含电动势, 仅有电阻, 因此称为一段电阻电路. 根据欧姆定律可知, 流过电阻的电流的大小与加在电阻两端的电压成正比,

而与电阻值成反比,即

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2-7)$$

(二) 全电路的欧姆定律

图 2-6 是最简单的闭合回路, R 是负载电阻, r_0 是电源内电阻. 根据电压平衡方程式可得

$$E = U + U_0.$$

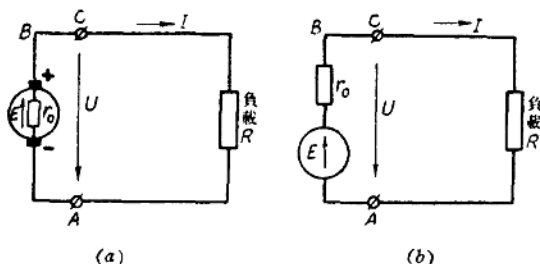


图 2-6. 最简单的闭合电路.

略去连接导线的电阻不计, 那末加在负载电阻两端的电压就等于电源的端电压, 其值为

$$U = IR,$$

电源内阻上的电压降为

$$U_0 = Ir_0,$$

故

$$E = IR + Ir_0,$$

或

$$I = \frac{E}{R + r_0}. \quad (2-8)$$

公式(2-8)就是全电路的欧姆定律, 其意义是: 回路中流过的电流, 其大小与电动势成正比, 而与回路的全部电阻值成反比. 在通常情况下, 电源的电动势和内阻可认为是不变的, 因此, 外电路电阻的改变是影响电流大小的唯一因素. 当 R 减小时, 全电路的电阻

减小, 电流增大. 因为在正常的情况下 $r_0 \ll R$, 所以随着输出电流的增大, 电源的端电压 $U = E - Ir_0$ 将略有降低.

电源的端电压 U 和电源输出的电流 I 之间的关系, 即 $U = f(I)$

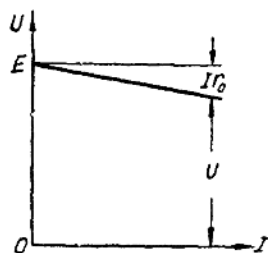


图 2-7. 电源的外特性曲线.

称为电源的外特性. 如果电源输出的电流 I 逐渐增大, 而端电压 U 却下降很少, 这说明该电源的外特性较好; 反之, 则较差. 图 2-7 即为电源的外特性曲线.

当电源与负载未构成闭合回路 (即未接通) 时, 这种状态称为断路. 在断路时, 电路中的电流等于零, 电源内部电压降也等于零. 这时电源的端电压与电动势相等, 即

$$U = E.$$

在上述简单的闭合回路中, 如果只知 E 、 r_0 和 U 的数值, 则只能从内电路方面来计算电流. 由于在 ABC 这一段电路 (图 2-6, a) 中, 除有 r_0 外, 还有 E 存在, 因此, 可用电阻 r_0 与电动势 E 相串联的电路 (图 2-6, b) 来代替. 因为电压 U 并非直接作用在 r_0 上, 所以不能用 U 除以 r_0 来计算这段电路上的电流. 由此可见, 要从内电路方面来计算电流, 只能从电源内部的电压降着手. 由等式

$$U_0 = Ir_0 = E - U$$

可知, 流过内电路的电流应为

$$I = \frac{E - U}{r_0}. \quad (2-9)$$

综上所述, 欧姆定律既可用于一段电路, 也可用于全电路. 我们在计算时, 应该根据已知条件正确地使用欧姆定律.

例 2-3. 如图 2-6 所示, 设 $E = 110$ 伏, $U = 100$ 伏, $r_0 = 1$ 欧, 求电流 I 、负载电阻 R 、电源内部电压降 U_0 .

解：根据已知条件，只能从内电路方面来求电流。由式(2-9)得

$$I = \frac{E - U}{r_0} = \frac{110 - 100}{1} = 10 \text{ 安},$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{10} = 10 \text{ 欧},$$

$$U_0 = E - U = 10 \text{ 伏}.$$

例 2-4. 如图 2-8 所示, 已知电路中的电源电动势 $E = 230$ 伏, 求当开关 K_1 及 K_2 均未闭合时的 U_{AF} 值; 如 K_2 闭合, K_1 未闭合, 再求 U_{AF} 和 U_{BC} .

解：当 K_1 和 K_2 均未闭合时, 电路处于断路状态, 故得

$$U_{AF} = E = 230 \text{ 伏}.$$

当 K_2 闭合、 K_1 未闭合时, 电路仍处于断路状态, 所以得 $U_{AF} = E = 230$ 伏.

由于电路中无电流, 在 AB 和 $CDGF$ 的各段电路上均无电压降, 即 B 点与 A 点、 C 点与 F 点的电位相等, 由此得

$$U_{BC} = E = 230 \text{ 伏}.$$

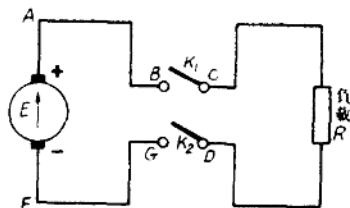


图 2-8. 例 2-4 的图.

(三) 电 阻

导体的电阻值 R 是与其长度 l 成正比, 与其截面积 S 成反比, 并与导体材料的性质有关, 即

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

式中 ρ 是电阻率。导体的材料不同, 其电阻率也不同。电阻率的倒数 $1/\rho$ 称为电导率 γ 。电阻的单位为欧姆, 简称欧 (Ω)。

当长度的单位为米、截面积的单位为毫米²、电阻的单位为欧时, 则电阻率的单位为 $\frac{\text{欧} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$ 。因此, 电阻率就是长度为 1

米、截面积为 1 毫米²的材料所具有的电阻值。

导体的电阻除与材料的性质、尺寸有关外，还与温度有关。大多数的金属，其电阻随温度升高而增大。

实验指出，温度在 0~100°C 范围内，金属导体的每欧电阻的变动量 $\left(\frac{R_2 - R_1}{R_1}\right)$ 与温度的变动量 $(t_2 - t_1)$ 近似地成为正比关系，

$$\text{即} \quad \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha(t_2 - t_1),$$

$$\text{或} \quad R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)].$$

上式中的 α 称为电阻温度系数，它等于温度每变动 1°C 时每欧电阻的变动量，其单位为 1/度； R_1 和 R_2 分别是温度为 t_1 和 t_2 时的电阻。

表 1-1 为几种常用的导电材料的电阻率和电阻温度系数。

表 1-1.* 几种常用导电材料的电阻率和电阻温度系数

材 料 名 称	电阻率 ρ [20°C] (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 α [0~100°C](1/°C)	用 途
银	0.0165	0.0036	导线镀银
铜	0.0175	0.004	导线，主要的导电材料
铝	0.0283	0.004	
铂	0.106	0.00398	热电偶或电阻温度计
康铜	0.44	0.000005	标准电阻
锰铜	0.42	0.000006	标准电阻
镍铬铁合金	1.12	0.00013	电 炉 丝
铜铬铁合金	1.3~1.4	0.00005	电 炉 丝
碳	10	-0.0005	电 刷

*表 1-1 给出的是近似值，它们随材料的纯度和成分的不同而有所改变。

利用电阻随温度而变的特性，可以制成电阻温度计，用来测量

温度。例如制造电机时,可以在电机绕组的内部安装铂丝电阻,以便测出电机运转时的内部的温度。

碳、电解液、半导体以及绝缘体的电阻随温度的升高而下降,它们的电阻温度系数是负值。

有些金属或合金,当它们处在温度很低的环境中,它们的电阻会突然大幅度地下降,以致变为零。例如,汞在 -268.85°C 时、铌钛合金在 -265°C 时均能表现出这种性质。具有这种性质的物体称为超导体。当材料处于超导状态时,由于电阻为零,所以超导体不会有热损耗,同时,在超导体中一经激起电流之后,即使取消外电场,电流也能长时间地维持下去。目前,利用低温超导体物质制成的元件,正在用于电子计算技术、原子能技术等方面。随着低温致冷技术的发展和新型超导电材料的发现,超导体技术必将获得广泛的应用。

2-5. 电阻的串联、并联、混联电路

在直流电路中,外电路常常是由许多电阻串联、并联或混联组成的。现在分别把这些电路的特点叙述如下:

(一) 串联电路

如果在一段电路上,把几个电阻一个接着一个地连接起来,并使其中没有分岔的支路,这种连接方式叫做串联,如图 2-9 所示。

串联电路的特点有:

1. 由电流的连续性原理可知,串联电路中的电流处处相同,即流过 R_1 、 R_2 、 R_3 的电流为同一电流。

2. 根据能量守恒定律,

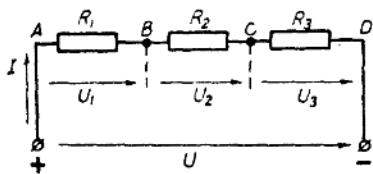


图 2-9. 串联电路。