

第一章 直流电路

第一节 电 路

一、电荷

在生产斗争、科学实验和日常生活中，几乎到处都要用到电。电究竟是怎么一回事呢？要了解电，首先得从物质结构谈起。

（一）物质结构

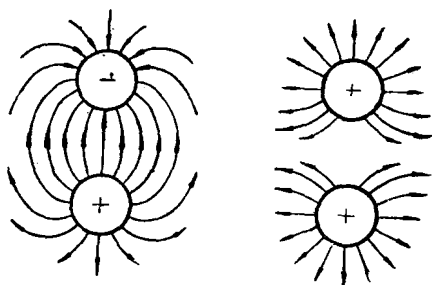
自然界的一切物质都是由分子组成的，分子又是由原子组成的，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。这些电子分层围绕着原子核作高速旋转。各种物质中围绕着原子核旋转的电子数目是不相等的。例如铜原子有29个电子，铝原子有13个电子，氢原子只有一个电子。在较外层轨道上旋转的电子与原子核结合得比较松弛。这些电子当受到外因作用时，可能离开自己的轨道在各原子之间作无规则的自由运动。习惯上把脱离了轨道而自由运动的电子叫做自由电子。在正常情况下，任何原子的电子所带负电荷的总电量与原子核所带正电荷的总电量都是相等的，因此物质不显带电。如果由于某种原因使物体获得电子或失去电子，则物体所带正负电荷的电量不相等而带电。获得电子的物体带负

电，失去电子的物体则带正电。实践证明正电荷与负电荷有同性相斥，异性相吸的特性。带电的物体叫带电体，不带电的物体叫中性体。

(二) 电场

实验证明，带电体的电荷对其周围空间其它电荷有作用力（吸引力或排斥力），这种作用力所能作用到的空间范围叫做电场。

这种作用力叫做电场力。电场力可使电荷移动而作功，即电场具有能量。由于电场具有力和能两种性质，所以电场是一种客观存在着的特殊物质。



(a)

(b)

1—1 电场的电力线

(a)异性电荷相吸 (b)同性电荷相斥；

为了能形象地描述

电场，常用假想的电力线来表示电场作用的方向、范围和强弱。电力线从正电荷起始，终止于负电荷，不互相交叉和重叠。图 1—1 是同性电荷和异性电荷的电力线。

二、电路

装有电池、电珠的手电筒，合上开关后，电珠有电流通过而发光。这种由电源（电池）、负载（电珠）、联接导线

(金属外壳)和开关等组成的电流通路叫做电路,如图1—2所示。

(一) 电源

电源是向电路提供电能的设备,它能将其它形式的能量(如化学能,机械能)转换成电能,用图1—3中的符号表示。

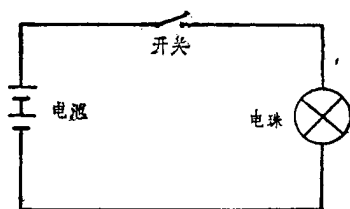


图1—2 手电筒电路

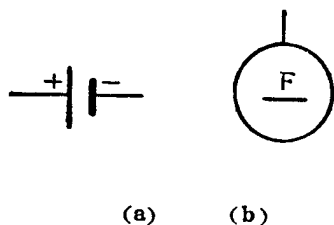


图1—3 电源符号
(a) 电池 (b) 直流发电机

电池(电源)是利用化学的方法,强迫原子中的部分电子与原子分离,使电子积聚在一端形成电源的负极(即电池的外壳),用符号“ $-$ ”表示。失去部分电子的原子积聚在另一端形成电源的正极(即电池中间的碳棒),用符号“ $+$ ”表示。

下面介绍与电源有关的三个概念——电位、电压和电动势。

1. 电位

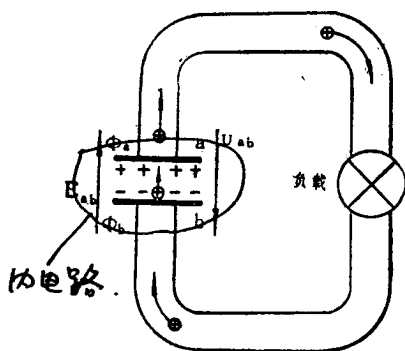
外力把正电荷从电场外移到电场内某点,就要克服电场力做功,这功就是该点的电位能。电场内某点单位正电荷所

具有的电位能，就叫做电位。电位的数值象高度一样，与参考点的选择有关。一般选取大地作参考点，即认为大地的电位为零。因为大地很大，即使它突然获得或失去电荷，其电位也不会改变，所以将大地作为电位的参考点比较合理。对一个电源来说，正极的电位高，负极的电位低。在生产上，任何电气设备中正常工作时不应带电的金属部分都要可靠地接地，使这些金属部分的电位与大地的电位一样为零，以保证人身安全。接地的符号为“ \perp ”。

电位常用字母“ ϕ ”表示。电位的单位为伏特，简称伏，用V表示。较大的单位为千伏，用KV表示。1千伏 = 1000伏。

2. 电压

电路中任意两点间的电位差叫做电压。常用字母“U”



表示。电压的方向是从高电位到低电位，其单位与电位的单位相同，也是伏或千伏。电压的高低用电压表测量，测量时并接在被测的电路上。

3. 电动势

图1—4是电路的示意图。电源的a端带

图 1—4
电荷的回路示意图

正电荷 b端带负电荷，因此a端的电位高于b端的电位。现在用导线通过负载把a、b两极连接起来。在电场的作用下，正电荷从高电位a沿导线经负载向低电位b流动（实际是带负电荷的电子沿相反的方向流动），形成电流。由于正电荷不断地从电源的a端流向b端，因而使a端的电荷不断减少，电位不断降低；而b端的正电荷则不断增多，电位不断升高。假设真的这样延续下去，那最后a、b两端电位将相等而无电位差，电荷将停止流动。但事实上，由于电源本身能产生一种外力，通过连接导线不断地把流到b端的正电荷经过电源内部送回到a端，从而维持a、b间有一定的电位差。我们把电源内维持两端的电位差的这种能力，叫做电动势，简称电势。电动势常用字母“E”表示。电动势的方向是从低电位指向高电位，其单位也与电位相同，是伏或千伏。

（二）负载

电路中的用电设备叫做负载。它将电能转换成其它形式的能量，如电动机将电能转换成机械能，电炉将电能转换成热能，电灯将电能转换成热能和光能。

（三）导线

电源与负载间的连接导线，起传送电流的作用。

此外，电路中还应装有开关、保险等设备。

电路也可分成内电路和外电路两部分。电源内部的通路叫内电路，除电源以外的电路叫外电路。内外电路合称叫完全电路。如果只有内电路或外电路，叫局部电路。

第二节 电流

一、电流的概念

电流就是电荷的定向流动。金属物质内部的自由电子，平时处于无规则的运动状态，因此流过导体任一横截面的平均电荷量为零。当这些自由电子在电场力的作用下作规则的

定向流动时，则在导体的任一横截面上便有一定数量的电荷流过，这样导体内部就产生电流。习惯上把正电荷流动的方向定为电流的方向。实际上，电流是电子的定向流动，即负电荷的定向流动，因此电流的方向与电子定向流动的方向是相反的。在

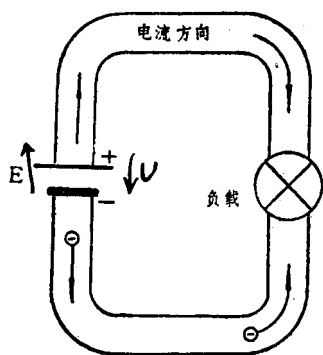


图 1—5

电流方向及电子流动方向

外电路，电流是从高电位流向低电位，即由正极到负极；而在内电路即电源内部，电流则是从低电位流向高电位，如图 1—5 所示。

二、电流强度及测量

通常用电流强度来表示电流的大小。我们把单位时间内

流过某一截面的电荷量叫做电流强度，简称电流。电流常用下式表示：

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

式中 I —— 电 流 强 度 (安)

Q —— 电 荷 量 (库 仑)

t —— 时 间 (秒)

电流强度的大小可用电流表(安培计,用符号 A 表示)进行测量。测量时,为了使通过表的电流与流过负载的电流完全一样,必须将电流表与负载串接起来,如图 1—6 所示。应注意,电流表切不可与负载并联,否则将要损坏。电流强度的单位为安培,简称安,常用字母 A 表示。多少电流才是一安培呢?每秒钟流过某一截面一库仑的电量就是一安培。一库仑为 625 亿亿个电子所带电量,安培这个单位有时显得太大,可用较小的单位毫安 (mA) 或微安 (μA)。

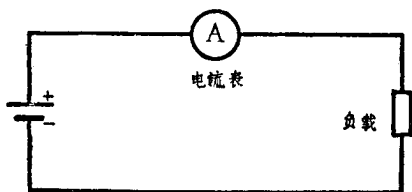


图 1—6 电流的测量

1安=1000毫安; 1毫安=1000微安。

三、电流密度

为了衡量通过导体单位截面上电流的大小,人们引进电

流密度这个概念。电流密度就是单位面积上通过电流的大小，常用字母 δ 表示，关系式为：

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ 安/毫米}^2 \quad (1-2)$$

式中 δ —— 电流密度 (安 / 毫米²)

I —— 通过截面的电流 (安)

S —— 电流所通过的截面积 (毫米²)

[例 1-1] 在截面为 2.5 毫米² 的导线上流过 5 安培的电流，求该导线的电流密度？

解 已知 $S = 2.5 \text{ 毫米}^2$ $I = 5 \text{ 安}$ ，

代入公式 (1-2) 得 $\delta = \frac{I}{S} = \frac{5}{2.5} = 2 \text{ (安 / 毫米}^2 \text{)}$ 。

正常工作时 (即在允许的最高温度范围内)，导线单位面积允许通过的最大电流，叫做该导线的允许电流密度。如果超过这个电流密度，导线就会过热而超过允许的最高温度。一般橡皮导线及电缆线的最高允许温度为 55°C，纸质绝缘电缆线为 80°C，裸导线为 70°C。导线发热超过允许的最高温度时，其绝缘层可能损坏而不能正常工作。由于环境不同，即散热条件不同，因此同一导线在不同环境下其允许电流密度也是不同的。截面在 10 毫米² 以内的铜质导线的允许电流密度 δ_{yx} (注：角注 yx 为“允许”的汉语拼音缩写) 可近似地取为：

1. 架空裸铜线 $\delta_{yx} = (8 \sim 12) \text{ 安 / 毫米}^2$ ；

2. 室内安装用绝缘铜导线 $\delta_{yx} = (6 \sim 8)$ 安/毫米²;

3. 变压器用铜导线 $\delta_{yx} = 2.5$ 安/毫米².

对于截面在10毫米²以内的铝芯绝缘导线(室内用)可近似地取 $\delta_{yx} = (4 \sim 5)$ 安/毫米²。在已知导线内通过的电流, 可根据公式(1—2)估算导线截面积。导线截面积也可根据允许最大持续电流来选择。满足的条件是导线允许最大的持续电流要大于或等于导线内实际的负载电流, 即:

$$I_{yx} \geq I_{fz} \quad (1-3)$$

式中 I_{fz} ——导线内实际负载电流 (fz 为“负载”的汉语拼音缩写);

I_{yx} ——导线允许最大持续电流。

附录表1和表2列出常用绝缘导线和架空裸导线的允许最大持续电流, 可供查用。

[例1—2] 有所五层楼房, 每层楼有电灯80盏, 用电时流经每盏电灯的电流为0.45安。试选择每层楼房的进户线和整个楼房的架空进线的导线。

解 每层楼房进户线内的实际负载电流为:

$$I_{fz} = 0.45 \times 80 = 36 \text{安}。$$

查附录表1, 选用10毫米²橡皮绝缘或塑料绝缘铝导线明敷设, 其允许负荷电流 $I_{yx} = 46$ 安, 由于 $I_{yx} = 46 \text{安} > I_{fz} = 36$ 安, 能满足要求。

而整个楼房实际总的负载电流为:

$$I_{fz} = 36 \times 5 = 180 \text{安}。$$

查附录表1，选用95毫米²的橡皮绝缘或塑料绝缘铝导线作架空进线，其允许负荷电流 $I_{yx}=225$ 安，也能满足要求。

或查附录表2，选用50毫米²的铝绞线作架空进线，其允许负荷电流 $I_{yx}=215$ 安，同样满足要求。

第三节 电阻

一、导体及其电阻

(一) 导体

导体就是比较容易传导电流的物体。导体有两大类：一是金属材料及碳，二是酸、碱、盐即电解质的水溶液。

为什么导体能比较容易地传导电流呢？唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。由于导体内存在着大量的自由电子或离子（金属和碳内存在着大量自由电子而电解质水溶液内存在着大量带电的离子），因此在其两端加上电压后，导体中的自由电子或离子便在电场力的作用下作定向移动而形成电流，这就是导体传导电流的物理过程。

(二) 导体的电阻

电子或离子在导体内作定向运动时是否通行无阻呢？不是的。“没有什么事物是不包含矛盾的，没有矛盾就没有世界。”实践证明，导体的自由电子在作定向运动的过程中，将与物体内其它运动着的原子、自由电子不断地发生碰撞，

使电子在运动中受到一定的阻碍，这就使得导体具有一定的电阻。电阻常用字母 R 或 r 表示。电阻的单位为欧姆，简称欧，用字母 Ω 表示。多少电阻为一欧姆呢？温度为 0°C 时，长 106.3 厘米，横截面积为 1 平方毫米的水银柱所具有的电阻就是一欧姆。在实用上电阻的单位也用仟欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($m\Omega$)。

$$1\text{兆欧} = 1000\text{仟欧} = 1000000\text{欧}$$

实验证明，导体的横截面积相等，长度相同但所用材料不同时，它们的电阻是不同的。这说明导体的电阻与做成导体的材料有关。此外，导体的电阻还与导体的长度、横截面积有关。相同材料做成的导体横截面相等时，较长的导体电阻较大，即导体的电阻与导体长度成正比。当导体长度相同时，则横截面积较大的导体电阻较小，即导体的电阻与导体截面积成反比。用公式表示就是：

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

式中 R ——导体的电阻（欧）

l ——导体的长度（米）

S ——导体的截面积（毫米²）

ρ ——导体材料在 20°C 时的电阻系数

（欧·毫米²/米）

附录表 3 列出的几种常用导体材料的电阻系数，可供查阅。

〔例 1—3〕 有一铜质导线，截面积为 6 毫米²，全长为 600 米，求 20°C 时的电阻为多少？

解 已知 $l=600$ 米； $S=6$ 毫米²，查表 3 得： $\rho=0.0172$ 欧·毫米²/米 代入公式 (1—4) 得 20°C 时的电阻为：

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0172 \times \frac{600}{6} = 1.72 \text{ 欧}$$

二、温度对电阻的影响

导体的电阻与导体的温度也有关系。当导体温度升高时，分子、原子和电子的热运动加剧，电子与它们碰撞的机会相应增多，因而阻碍增加，这就是说导体温度升高，电阻增大。但另一方面，温度升高时，电子运动的动能加大，因而使原子外层轨道上的电子脱离原子核的控制形成的自由电子数也相应增多，促使电流加大，这种情况又相当于导体电阻减小。到底温度升高总的电阻是增加还是减少，这得根据那方面的原因起主导作用而定。实践证明：各种金属材料温度升高时电阻将增大，碳及电解液则温度升高时而电阻减小。至于康铜及锰铜等合金的电阻则大致不受温度的影响而比较稳定，因此康铜及锰铜等合金常用作标准电阻的材料。金属材料电阻的变化，在 0~100°C 范围内，基本上与温度的变化成正比。因此，考虑温度影响的电阻公式为：

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-5)$$

式中 R_2 ——温度升高到 t_2 时导体的电阻（欧）
 R_1 ——温度在 t_1 时导体的电阻（欧）
 α ——导体材料的电阻温度系数（ $1/^\circ\text{C}$ ），可查

附录表 3

〔例 1—4〕有一铝架空线单程长 400 米，截面为 16 毫米²，试计算在 20°C 及 80°C 时的电阻。

解 已知 $l=400$ 米， $S=16$ 毫米²，

查附录表 3：取 $\rho=0.0283$ 欧·毫米²/米， $\alpha=0.004/^\circ\text{C}$ 因此导线在 20°C 时的电阻：

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S} = 0.0283 \times \frac{2 \times 400}{16} = 1.4 \text{ 欧}$$

导线在 80°C 时的电阻：

$$R_{80} = 1.4 [1 + 0.004(80 - 20)] = 1.736 \text{ 欧}$$

〔例 1—5〕电厂中的同步发电机，制造时在电机内部装有一个铂丝电阻元件，以便在发电机运行过程中测出电机内部的温度，以防止发电机温度过高而烧坏。已知 20°C 时元件的电阻为 49.5 欧。现发电机在运行中测得元件的电阻为 60.9 欧。问这时发电机内的温度是多少？（电机是 A 级绝缘，允许的温度为 105°C 。）

解 已知 $R_1=49.5$ 欧， $R_2=60.9$ 欧

查附表 3 铂在 $t_1=20^\circ\text{C}$ 时的温度系数为

$$\alpha = 0.00389/^\circ\text{C}。$$

根据公式（1—5）得此时发电机内的温度为：

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + t_1 = \frac{60.9 - 49.5}{0.00389 \times 49.5}$$

$$+ 20 = 59.2 + 20 = 79.2^\circ\text{C}$$

允许温度是 105°C ，发电机可以安全运行。

三、电阻的测量

在实际工作中，电阻的阻值差别很大，因此实际上测量时所用的仪表和方法也各不相同。电阻值一般可分为以下三类：

1. 大电阻——0.1兆欧以上； $100\text{K}\Omega$
2. 中电阻——1 欧—0.1兆欧；
3. 小电阻——1 欧以下。

(一) 大电阻的测量

大电阻一般都是指的绝缘电阻。输电线与大地间，导线与导线间，一切电气设备的导电部分之间，以及导电部分与金属外壳之间，都有绝缘电阻存在。当导线或电气设备长期运行时，绝缘电阻可能发生变化而降低。为了使用安全，必须经常进行检查测量。电气安全操作规程规定，导线的绝缘电阻每伏工作电压不得小于 1000 欧姆，例如工作电压为 220 伏时，绝缘电阻不得小于 $220 \times 1000 = 220000$ 欧 = 0.2 兆欧。

绝缘电阻可用兆欧表（即摇表）来测量。当测量输电线对地的电阻时，把兆欧表标有接地的一端接地，另一端接被测导线，如图 1—7 (a) 所示。然后以均匀的速度

(一般每分钟 120 转) 转动兆欧表摇柄, 从指针在刻度盘上所指示的位置即可读出绝缘电阻值。若测两导线间的绝缘电阻时, 必须将兆欧表的两端分别接于被测导线上, 如图 1—7 (b) 所示。其它用电设备的绝缘电阻, 仍可按照同样方法进行测量。

应当注意, 用兆欧表测量绝缘电阻时, 必须把电源先行断开。

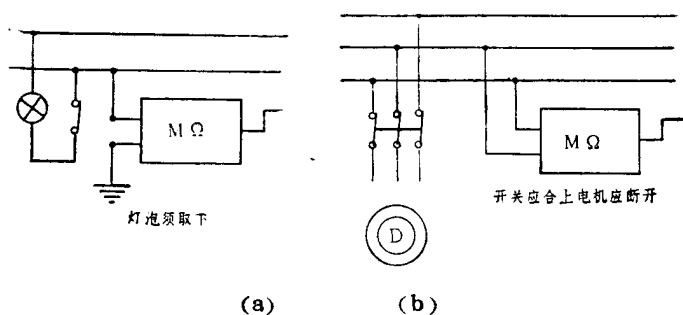


图 1—7 绝缘电阻的测量

(a) 灯泡须取下

(b) 开关合上, 电机应断开

(二) 中电阻的测量

中电阻用欧姆计进行测量, 或用万用电表的欧姆挡来测量, 其量程范围有 $R \times 1$, $R \times 10$, $R \times 1000$, $R \times 10000$ 等几档。测量时视电阻大小选用量程。测量前, 先将两表笔短接, 以调节零点。调零后, 用两表笔分别接于被测电阻两端, 如图 1—8 所示。读出指针在刻度盘上所指的电阻数值后, 乘以所选用量程档的倍率, 即得被测电阻的阻值。

例如选用量程为 $R \times 1000$ 档，指针所指数值为 23，则被测电阻值应为： $23 \times 1000 = 23000$ 欧。测量时也必须特别注意，先要拉断电源。

（三）小电阻的测量

小电阻常用电桥进行测量。但因平时电桥用得不多，这里不予介绍。必要时，请参看其他资料。

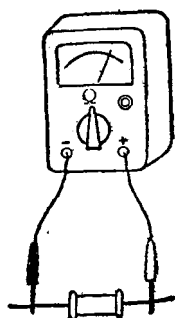


图 1—8
电阻的测量

四、绝缘体、绝缘强度及允许电压

（一）绝缘体

不容易传导电流的物体叫做绝缘体，或叫电介质。为什么绝缘体不容易传导电流呢？起决定作用的仍然是这种物质的内在因素。因为绝缘体内部的自由电子极少。它内部的电子绝大部分是被原子核束缚得很紧的束缚电子。这些束缚电子，即使在较强的电场作用下，也不容易脱离原子核的控制成为自由电子作定向运动，因此绝缘体不易传导电流。

绝缘材料是电气工程中不可缺少的材料，品种很多，一般分气体、液体、固体三大类，如空气、矿物油、橡皮、瓷类、云母、纸类、棉纱类、玻璃、木料、树脂等等。绝缘体可用绝缘强度来表示它的绝缘能力。

（二）绝缘强度及允许电压

上面讲了绝缘体不导电，但是不是绝缘体就绝对不导电

呢？不是的。绝缘体不导电是有条件的，超过一定的条件它就不再具有绝缘的性能。例如，当绝缘体上加的电压升高到一定程度时，束缚电子在强电场的作用下，开始脱离原子核的控制而成为自由电子作定向运动。这时绝缘体内便有电流流动，从而使绝缘遭到破坏而成为导体，这种现象就叫做绝缘被击穿。使绝缘体刚被击穿时所加的电压就叫做击穿电压。材料不同和厚度不同的绝缘体，其击穿电压也不同。通常用每毫米厚度的绝缘材料所加的击穿电压，来表示绝缘体的绝缘强度，如空气的绝缘强度为3—4千伏/毫米，变压器油的绝缘强度为25—57千伏/毫米等。常用绝缘材料的绝缘强度，见附录表4。

绝缘体和导体是相对而言的，没有绝对明显的界线。一种材料在低压下是良好的绝缘体，但在高压下就可能不再具有绝缘的性能了。因此，一般电器元件上所标的耐压，是指绝缘材料所能允许承受的最高电压，这就是允许电压。允许电压只相当于击穿电压的几分之一。

绝缘材料随着使用时间的增长，其绝缘性能也要降低；同时温度过高及绝缘体污秽、受潮等，也都会降低其绝缘性能。

〔例1—5〕 两平行极板间距为0.1毫米，其中填满了绝缘纸。试求平行极板间的允许电压及其击穿电压。

解 查附录表4得绝缘纸的击穿电压为5—7千伏/毫米，取5千伏/毫米，则击穿电压为；