

第1章 电工学常识

1.1 电的相关概念

1. 电 路

电路就是电流通过的路径，由电气元件按一定的方式连接而成。无论是简单电路还是复杂电路，都由三个基本部分组成。

电源：提供电能或信号的装置，如发电机、电池和各种信号源。

负载：即用电设备，它将电能或电信号转换成非电形式的能量或信号。例如，电炉将电能转变为热能，电动机将电能转变为机械能，电解槽将电能转变为化学能，电视机能将电磁波信号转变为视听信号，等等。

中间设备：电源和负载之间的连接设备，用来传输、分配和控制电能和电信号。如导线、开关、仪表及保护装置等设备。

电路有三种状态（见图 1-1）：

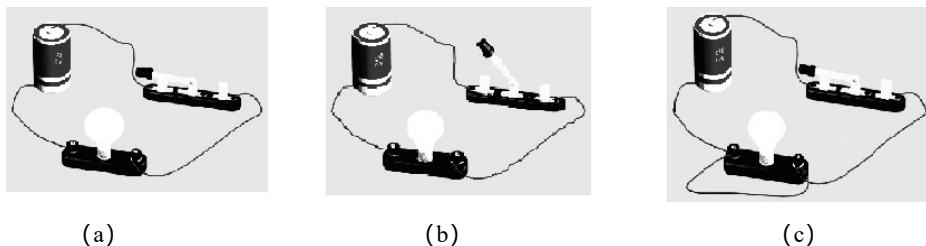


图 1-1 电路的三种状态

(1) 工作状态。把电路中的开关接通，使电源与负载连通，构成了闭合回路。在小灯泡的电路中，当开关闭合后小灯泡亮起来的工作状态，这时电路中有电流，电池供给电能，灯泡消耗电能转变为热能发光。这种状态又称为通路或闭路，如图 1-1 (a) 所示。

(2) 开路状态。开关打开，小灯泡熄灭，电路中没有电流通过的状态称为开路，又叫作断路，如图 1-1 (b) 所示。

(3) 短路状态。当电源两端的导线直接相连，这时电源输出的电流不经过负载，只经过连接导线直接流回电源，此时电路中出现很大的电流可能会损坏电气设备，应该及时避免，如图 1-1 (c)。

2. 电路模型与电路图

(1) 电路模型。

由理想元件组成的与实际电器元件相对应的电路，并用统一规定的符号表示而构成的电路，就是实际电路的模型。电路模型是实际电路抽象而成的，它近似地反映实际电路的电气特性。用不同特性的电路元件按照不同的方式连接就构成不同特性的电路。

(2) 电路图。

用电路元件符号表示电路连接的图，叫电路图。由电路图可以得知组件间的工作原理，为分析性能，安装电子、电器产品提供规划方案。

实际电路和电路图的关系如图 1-2 所示。常用电气元件符号电路模型如表 1-1 所示。



图 1-2 实际电路与电路图的关系

表 1-1 常用电气元件符号与电路模型

图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号	名称
	开关		电阻器		接机壳
	电池		电位器		接地
	发电机		电容器		端子
	线圈		电流表		连接导线不连接导线
	铁心线圈		电压表		熔断器
	抽头线圈		扬声器		灯

3. 电 流

电流是电荷定向运动形成的。在金属导体中，电流是由自由电子在外电场作用下，有规则运动形成的。在某些液体和气体中，电流是由阴离子或阳离子在电场力作用下进行有规则运动形成的。

规定正电荷的移动方向为电流的方向。在分析与计算电路时，有时事先无法确定电路中电流的真实方向。为了计算方便，先假设一个电流方向，称为电流的参考方向，用箭头在电路图中表明。如果计算结果电流为正值，则电流的实际方向与参考方向一致；如果计算结果电流为负值，则电流的实际方向与参考方向相反。如图 1-3 所示。

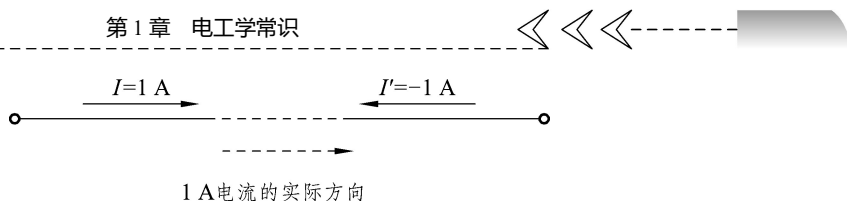


图 1-3 假设电流方向

电流的大小等于通过导体横截面的电荷量与通过这些电荷量所用的时间的比值。设有一电流流过导体，若在时间 t 内穿过导体截面 S 的电荷为 q ，则通过导体的电流定义为

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

电流的单位是安培 (A)。1 A (安) 就是每秒通过导体横截面的电荷量为 1 C (库)。此外，电流单位符号还常用 kA (千安)、mA (毫安) 和 μA (微安) 等表示。它们与 A (安) 的关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

4. 电压与电动势

电压也称作电势差或电位差，是衡量单位电荷在静电场中由于电势不同所产生的能量差的物理量。此概念与水位高低所造成的“水压”相似。其大小等于单位正电荷因受电场力作用从 A 点移动到 B 点所做的功，电压的方向规定为从高电位指向低电位的方向。电压的国际单位制为伏特 (V，简称伏)，常用的单位还有毫伏 (mV)、微伏 (μV)、千伏 (kV) 等。

它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ kV} = 1\,000 \text{ V}, \quad 1 \text{ V} = 1\,000 \text{ mV}, \quad 1 \text{ mV} = 1\,000 \mu\text{V}$$

电路中因其他形式的能量转换为电能所引起的电位差，叫做电动势，简称电势。用字母 E 表示，单位是伏 (V)。

电动势是描述电源性质的重要物理量。电源的电动势是和静电力的功密切联系的。所谓非静电力，主要是指化学力和磁力。在电源内部，非静电力把正电荷从负极板移到正极板时要对电荷做功，这个做功的物理过程是产生电源电动势的本质。非静电力所做的功，反映了其他形式的能量有多少变成了电能。因此，在电源内部，非静电力做功的过程是能量相互转化的过程。电源的电动势正是由此定义的，即非静电力把正电荷从负极移到正极所做的功与该电荷量的比值。

电动势的大小等于非静电力把单位正电荷从电源的负极经过电源内部移到电源正极所做的功。比如设 W 为电源中非静电力 (电源力) 把正电荷量 q 从负极经过电源内部移送到电源正极所做的功，其跟被移送的电荷量的比值就是电动势，则电动势大小为

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-2)$$

电动势是电源的专有名词，而电压是指外电路。电源电动势的大小等于外电路电压加上电

源内部电压。电路开路时，电压等于电源电动势。电动势的方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的正极，即与电源两端电压的方向相反。

5. 电功与电功率

把电能转换成其他形式的能量时（如热能、光能），电流都要做功。电流所做的功叫作电功。根据公式 $I = \frac{q}{t}$ 、 $U = \frac{A}{q}$ 以及欧姆定律，可得电功 W 的数学式为

$$W = Uq = IUt \quad (1-3)$$

或
$$W = I^2 Rt \quad (1-4)$$

或
$$W = \frac{U^2}{R} t \quad (1-5)$$

式中，若电压单位为伏，电流单位为安，电阻单位为欧，时间单位为秒，则电功单位就是焦耳，简称焦，用字母 J 表示。

电功不能表示电流做功的快慢，因为不知道这些功是在多长时间内完成的，我们把单位时间内电流所做的功称为电功率，用字母 P 表示，即：

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-6)$$

式中，若电功单位为焦耳，时间单位为秒，则电功率的单位是焦耳 / 秒。焦耳 / 秒又称瓦特，简称瓦，用字母 W 表示。

在实际工作中，电功率的常用单位还有千瓦（kW）、毫瓦（mW）以及马力等。

$$1 \text{ 千瓦 (kW)} = 10^3 \text{ 瓦 (W)}$$

$$1 \text{ 毫瓦 (mW)} = 10^{-3} \text{ 瓦 (W)}$$

$$1 \text{ 马力} = 0.735 \text{ kW}$$

在实际工作中，电功的单位常用千瓦小时（kW·h），也叫“度”。我们经常所说的 1 度电就是 1 千瓦·小时。负载消耗电功的多少，可以用电度表来测量。

例 1-1 一个额定值为“220 V、60 W”的白炽灯，平均每天使用 3 小时，电价是 0.6 元/(kW·h)，每月（30 天）应付多少电费？

解：由已知条件得白炽灯功率为 $P = 60 \text{ W} = 0.06 \text{ kW}$

每天消耗的电能为： $W = Pt = 0.06 \text{ kW} \times 3 \text{ h} = 0.18 \text{ kW} \cdot \text{h}$

每月消耗的电能为： $0.18 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 5.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$

每月的电费为： $5.4 \times 0.6 = 3.24 \text{ 元}$

6. 电气设备的额定值

电气设备通电时，电流会使导电部分发热，使设备的温度升高。电流越大，温度升得越高，可能烧毁设备。为了保证设备长期安全运行，各种电气设备都规定了正常工作条件下最大允许



电流的数值，称为额定电流，用符号 I_N 表示。

很多电气设备给出了正常工作条件下允许电压的最大值，称为额定电压，记作 U_N 。如灯泡上标有“220 V、60 W”、电容器标有“400 V、20 μF ”等。如果设备超过额定电压工作，可能因电流过大而影响使用寿命，也可能因超过绝缘的耐压水平而损坏设备。

电气设备的额定电流、额定电压、额定功率及其他规定值（如电机的额定转速、额定转矩等）称为电气设备的额定值。额定值通常标在设备的铭牌上，所以也称铭牌值。电量的额定值一般只给出两个，其他可由公式计算得出。电气设备的额定值是按一定的运行条件而确定，如电力变压器是按环境温度 40°C 设计的。如果环境温度高于 40°C ，运行时要降低额定电流。

1.2 直流电路

直流电路就是电流方向不变的电路。直流电路的电流大小是可以改变的。电流的大小、方向都不变的称为恒定电流。

1. 电阻的串并联

接入电路中的用电器或电阻器有各种规格和阻值，使用时可根据需要将它们适当的连接，构成具有两个连接端的一个“组合电阻”，它可用一个等效的电阻来代替，其阻值叫做组合电阻的等效电阻（或总电阻）。电阻连接的基本方式有串联和并联两种。

1) 电阻的串联

(1) 电阻串联电路如图 1-4 所示。

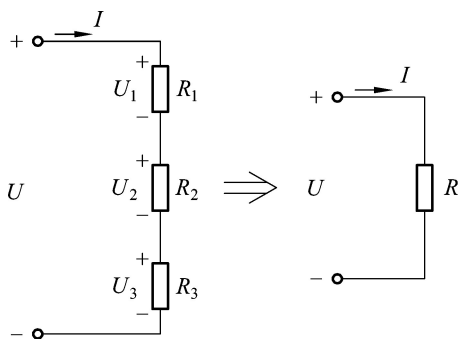


图 1-4 电阻的串联

(2) 电阻串联电路的特点。

- (a) 通过各电阻的电流相同，同为 I 。
- (b) 总电压等于各电阻分电压之和。即。

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

(c) 几个电阻串联的电路，可以用一个等效电阻 R 替代。

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

(d) 分压公式。

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R} U; \quad U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R} U。$$

(e) 功率分配。各个电阻上消耗的功率之和等于等效电阻吸收的功率，即：

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = R_1 I^2 + R_2 I^2 + R_3 I^2 = R I^2$$

应用：降压、限流、调节电压等。

2) 电阻的并联

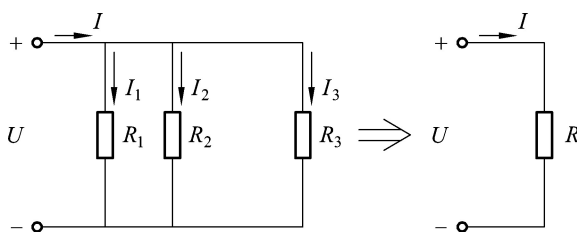


图 1-5 电阻的并联

(1) 电阻并联电路。如图 1-5 所示。

(2) 电阻并联电路的特点。

(a) 各电阻上电压相同；

(b) 各分支电流之和等于等效后的电流，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3;$$

(c) 几个电阻并联后的电路，可以用一个等效电阻 R 替代，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad G = G_1 + G_2 + G_3。$$

两个电阻并联时

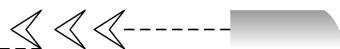
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

(d) 分流公式。

$$I_1 = \frac{R}{R_1} I = \frac{G_1}{G} I, \quad I_2 = \frac{R}{R_2} I = \frac{G_2}{G} I$$

两电阻并联时的分流公式：

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$



(c) 功率分配:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} + \frac{U^2}{R_3} = \frac{U^2}{R}$$

应用: 分流、调节电流等。

3) 混联电路

电路里面有串联也有并联的就叫混联电路, 如图 1-6 所示。其中图 1-6 (a) 所示混联电路中, R_2 和 R_3 先并联, 然后与 R_1 串联; 图 1-6 (b) 所示混联电路中, R_2 和 R_3 先串联, 然后和 R_1 并联。

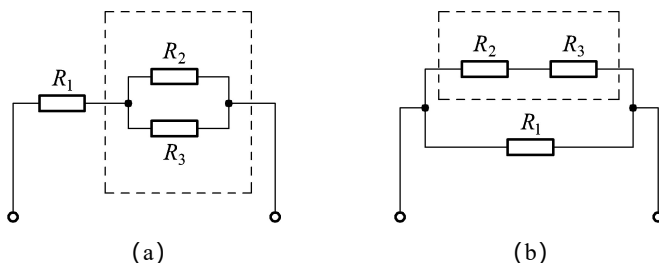


图 1-6 混联电路

混联电路的等效电路常用等电势点法。等电势点法的步骤为:

- (1) 观察电路图, 按 $a \rightarrow b$ 的顺序对各个节点对各个节标以字母 A, B, C, \dots
- (2) 对每个电阻按所联节点编号顺次连接起来, 就可得等效电路图。
- (3) 根据等效电路图判定串并联关系。

例 1-2 求图中混联电路的等效电阻

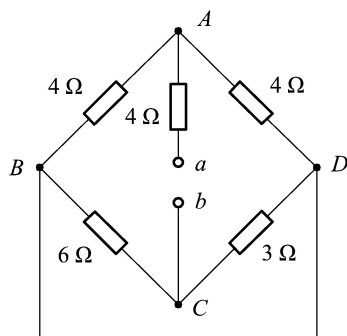


图 1-7 例 1-2 题图

利用等电势点法等效电路图为

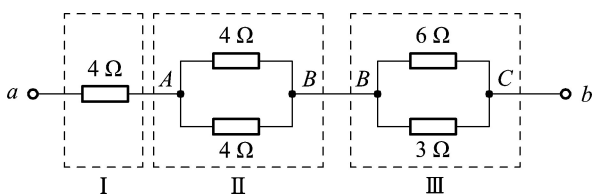


图 1-8 等效电路图

$$R_{ab} = 4\Omega + (4\Omega // 4\Omega) + (6\Omega // 3\Omega) = 4\Omega + \frac{4 \times 4}{4 + 4}\Omega + \frac{6 \times 3}{6 + 3}\Omega = 8\Omega$$

2. 欧姆定律

1) 部分电路欧姆定律

当在电阻 R 两端加上电压 U 时, 电阻中就有电流通过, 如图 1-9 所示。

欧姆定律: 通过电阻器的电流 I , 与电阻两端的电压 U 成正比, 与电阻 R 成反比。在电压、电流的参考方向一致的条件下, 数学表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-7)$$

若电压、电流的参考方向不一致, 则式 (1-7) 应写为:

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -IR$$

欧姆定律揭示了电路中电流、电压、电阻三者之间的关系, 是电路的基本定律之一, 它的应用非常广泛。

例 1-3 有一电阻, 当它两端加上 10 V 电压时, 流过的电流为 0.5 A, 求电阻的阻值。

解: 由 $I = \frac{U}{R}$ 得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10}{0.5} = 20(\Omega)$$

答: 所求电阻的阻值为 20 Ω 。

2) 全电路欧姆定律

全电路是指含有电源的闭合电路, 如图 1-10 所示。电源的内部一般都是有电阻的, 此电阻称为内电阻 (以下称电阻), 用 R_0 表示。为了分析方便, 通常在电路图上把 R_0 单独画出 (也可以不单独画出, 只在电源符号的旁边注明内阻的数值)。

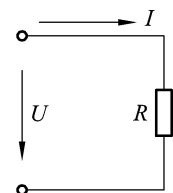


图 1-9 部分电路

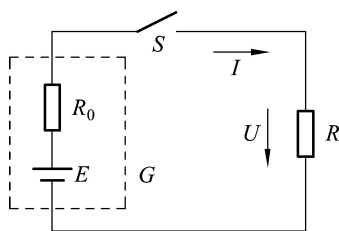
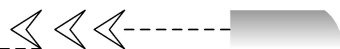


图 1-10 全电路

当开关 S 闭合时, 负载 R 上就有电流流过, 这是因为电阻两端有了电压 U 的缘故。电压 U 是电动势 E 产生的, 它既是电阻两端的电压, 又是电源的端电压。

下面讨论 E 与 U 的关系。开关 S 断开时, 电源的端电压在数值上等于电源的电动势 (方向是相反的)。当 S 闭合后, 如果用电压表测量电阻两端的电压便会发现, 所测数值比开路电压小, 或者说, 闭合电路中电源的端电压小于电源的电动势, 这是为什么呢? 这是因为电流流过电源内部时, 在内阻上产生了电压降 $U_0 = IR_0$ 。可见电路闭合时端电压 U 应该等于电源电动势减去电源内部压降 U_0 , 即

$$U = E - U_0$$

把 $U_0 = IR_0$ 和 $U = IR$ 代入上式可得:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-8)$$

3. 基尔霍夫定律

1) 关于电路结构的几个名词

- (1) 支路: 电路中通过同一电流的每一个分支称为支路。
- (2) 节点: 3 条或 3 条以上支路的连接点叫节点。
- (3) 回路: 电路中任意闭合路径称为回路。
- (4) 网孔: 内部没有跨接支路的回路称为网孔。

如图 1-11 所示电路图中, 支路有 6 条, 节点有 a、b、c、d 4 个, 回路有 8 个, 网孔有 3 个。

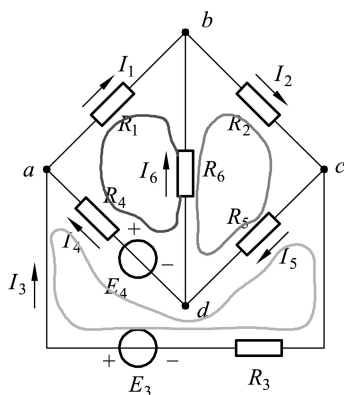


图 1-11 电路图

2) 基尔霍夫电流定律 (KCL)

(1) 内容：任一时刻，流入电路中任一节点的电流之和等于该节点流出的电流之和
表达式为

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \text{ 或 } \sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \text{ (节点电流方程)}$$

注：① 需要注意的是，KCL 中所提到的电流的“流入”与“流出”，均以电流的参考方向为准，而不论其实际方向如何。流入节点的电流是指电流的参考方向指向该节点，流出节点的电流其参考方向背离该节点。

② KCL 可改写为 $\sum I = 0$ ，即：对电路任一节点而言，电流的代数和恒等于零。

例 1-4 图 1.12 所示电路中，已知 $I_1 = 1 \text{ A}$ ， $I_2 = 2 \text{ A}$ ， $I_5 = 3 \text{ A}$ ，求该电路的未知电流。

解：由 KCL 定律知

对于节点 a，有 $I_3 = I_1 + I_2 = 1 + 2 = 3 \text{ (A)}$

对于节点 b，有 $I_5 = I_3 + I_4$ 所以 $I_4 = I_5 - I_3 = 3 - 3 = 0 \text{ (A)}$

对于节点 c，有 $I_6 = I_2 + I_4 = 2 + 0 = 2 \text{ (A)}$

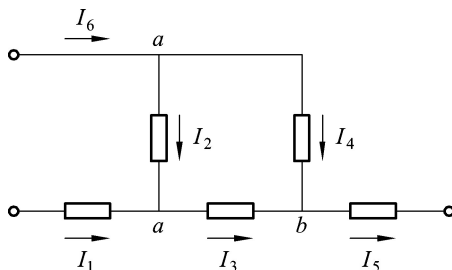


图 1-12 例 1-4 题图

(2) KCL 的推广：KCL 不仅适用于电路中的任一节点，还可推广应用于电路中任意假定的闭合曲面。

3) 基尔霍夫电压定律 (KVL)