

第一章 直流电路的基本概念

§ 1-1 电路的概念

所谓电路是电流通过的路径。最简单的电路是由电源、负载和连接导线组成。电源是将其他形式的能量转换成电能的装置。随着电流的流动，电路中有将其他形式的能量转换成电能的负载。

图 1-1 为电路图，电源用 E 表示，负载用 R 表示，连接导线电阻忽略。

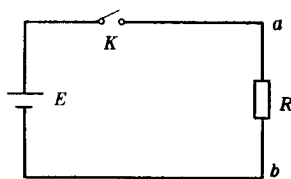


图 1

电路分外电路和内电路。从电源一端经过负载再回到电源另一端的电路称为外电路。电源内部的通路称为内电路。如电池两极之间的电路就是内电路。

电路通常有 3 种状态：

(1) 通路。即开关 K 闭合，构成闭合回路，电路中有电流流过。

(2) 开路。开关 K 断开或电路一处断开，被切断的电路中没有电流流过。开路也称为断路。

(3) 短路。若电路中 a 、 b 两点用导线直接接通，称为负载被短路。

电能在于工农业生产、科研、国防和日常生活中有着广泛的应用。在计算机、自控、通讯等各个领域，应用电路来完成各种任务。

§ 1-2 电流与电流密度

一、电流

任何物质都是由分子组成，分子是由原子组成，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子组成。在通常情况下，原子核所带的正电荷数等于核外电子所带的负电荷数。所以，原子是中性的，不显电性，物质也不显带电的性能。当人们给予一定外加条件时（如接上电源），就能迫使金属或某些溶液中的电子发生有规则的运动。

把单位时间内通过导体截面的电量称为电流。它实质是电荷有规则的定向运动形成的。在金属导体中，电流是电子在外电场作用下有规则地运动形成的。在某些液体或气体中，电流则是正离子或负离子在外电场作用下有规则运动形成的。

规定以正电荷运动的方向为电流的方向。在金属导体中，电子运动形成的电流方向与电子流动方向相反。

电流的大小取决于在一定时间内通过导体横截面的电荷量多少。电流的大小用电流强度来衡量，通常规定：一秒钟内通过导体截面的电量称为电流强度，以字母 I 表示。若在 t 秒内通过导体截面电量是 Q 库仑 (C) 则电流强度 I 用下式表示：

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

若在一秒钟内通过导体横截面的电量为 1 库仑 则电流强度就是 1 安培。

安培简称安 以字母 A 表示 还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA)。它们之间的换算关系是：

1 千安 (kA) = 10^3 安 (A)

1 毫安 (mA) = 10^{-3} 安 (A)

1 微安 (μ A) = 10^{-6} 安 (A)

通常把电流强度简称为电流。因此，电流不但表示一种物理现象，而且也代表一个物理量。

电流分交流和直流，凡大小和方向都不随时间变化的电流称直流，凡大小和方向都随时间变化的电流称为交流。

交流电流的大小是随时变化的，我们可以将在一个很短的时间 Δt 内 导体截面的电量变化看作 ΔQ 则瞬时电流强度 i 为

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1-2)$$

在实际问题中，电流真实方向往往难以在电路中标出。如交流电路中电流随时间变化，很难用一个固定的箭头来表示真实方向，即使在直流电路中，在求解复杂电路时，也往往难以事先判断某支路中电流的实际方向。为此，在分析与计算电路时，可任选定某一方向作为电流的正方向，亦称参考方向（见图 1-2）。我们规定 如果电流的真实方向与参考方向一致 电流为正值 二者相反，电流为负值。在未标电流参考方向的情况下，电流的正、负毫无意义。为此，在分析电路时，先任意假设电流参考方向，以最后计算结果正、负来确定电流的真实方向。



图 1-2

二、电流密度

在实际工作中 有时需要选择导线的粗细 (截面) 这就要用到电流密度这一概念。所谓电流密度，就是当电流在导体的横截面

上均匀分布时，该电流与导体横截面的比值。这样，电流密度 J 可用下式表示：

$$J = \frac{I}{S} \quad (1-3)$$

上式中 当电流强度 I 用 A 作单位 面积 S 用 mm^2 作单位时 电流密度的单位是 A/mm^2 。导线允许的电流密度随导体截面不同而不同。当导线中通过的电流超过允许电流时，导线将发热、冒火 而出现事故。

例 1-1 某照明电路中需要通过 21A 的电流 问应采用多粗的铜导线？（设铜导线允许电流密度为 $6\text{A}/\text{mm}^2$ ）

$$\text{解 } S = \frac{I}{J} = \frac{21}{6} = 3.5(\text{mm}^2)。$$

§ 1-3 电位与电压

一、电位

当把车子从甲地推到乙地 或吊车把货物从地面吊起 车和货物都受到了力的作用，且在受力的方向上移动了一段距离。这时我们认为，力对物体做了功。用符号 A 表示功， F 表示力， L 表示距离，那么：

$$A = FL$$

我们从物理学中知道 带电体的周围存在着电场 电场对处在场内的电荷也有力的作用，这种力称为电场力。当电场力使电荷移动时 我们就说电场力对电荷做了功。如图 1-3 所示的均匀电场中 电场力 f 把正电荷 Q 从 a 点移至 O 点和从 b 点移到 O 点所做的功。

设 a 点与 O 点间的距离是 L_{aO} ， b 点与 O 点间的距离是 L_{bO} ，则电场力 f 将 Q 从 a 点移到 O 点做的功是：

$$A_{aO} = fL_{aO}$$
 电场力 f 将 Q 从 b 点移到 O 点做的功是：

$$A_{bO} = fL_{bO}$$

如果电荷的电量增加一倍，那么作用在电荷上的电场力也增加一倍，电场力所做的功也就相应地增加一倍。即在一个已知的电场内，电场力做的功

A_{aO} 、 A_{bO} 与电荷量成正比。电位的定义是：电场力把单位正电荷从电场中的某点移到参考点所做的功，称为该点的电位。以 O 点为参考点时 a 点的电位 φ_a 为

$$\varphi_a = \frac{A_{aO}}{Q} \quad (1-4)$$

以 O 点为参考点时 b 点的电位 φ_b 为

$$\varphi_b = \frac{A_{bO}}{Q} \quad (1-5)$$

电位是一个相对量，是相对参考点而言的。参考点的选取是任意的。参考点选取不同，电位数值也不相同，但两点间的电位差是不变的。

如果功的单位是焦耳(J) 电荷的单位是库仑(C) 则电位的单位是伏特 用字母 V 表示。计算微小的电压时，以毫伏 mV 或微伏 μV 为单位。计算高电位时，则以千伏 kV 为单位。其换算关系为

$$\begin{aligned}
 1kV &= 10^3V & 1mV &= 10^{-3}V \\
 1\mu V &= 10^{-3}mV = 10^{-6}V
 \end{aligned}$$

二、电压

为了衡量电场力对电荷做功的能力，引入电压这一物理量，

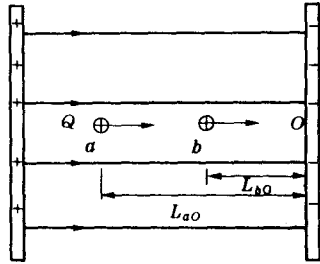


图 1-3 电场力作功

a, b 两点间的电压 U_{ab} 在数量上等于电场力把单位正电荷从 a 点移至 b 点所做的功。即单位正电荷从 a 点(高电位)移至 b 点(低电位)所失去的电能。

电压单位同电位一样。电压方向是从高电位指向低电位。

在交流电路或复杂的直流电路中，某一支路的电压的真实极性很难确定时，如同电路中电流的参考方向一样，也要假设该支路电压的参考极性。电压参考极性选取是任意的。参考极性在元件或电路两端用“+”、“-”来表示，也可以用一个箭头来表示。当计算结果某一元件上电压为正，说明该支路电压与参考极性方向相同，为负说明该支路电压真实极性与参考极性相反(见图 1-4)。

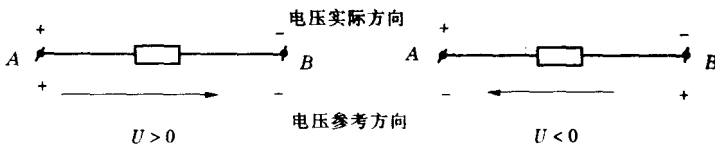


图 1-4

在未标支路电压参考极性的前提下，电压正、负毫无意义。电流的参考方向和电压的参考极性本可独立无关的任意假设，但为了方便，采用关联的参考方向，即电流参考方向与电压参考极性方向一致。

电压可用电压表来测量。测量时要注意量程，并使电压表的正负极和被测电压一致，然后把表并联在电路中。

§ 1-4 电动势

在电源内部，局外力(不是电场力)把单位正电荷从低电位移至高电位所做的功，称为电动势 E 。由于静电场把单位正电荷从高电位移至低电位，运动的结果使静电场的电荷分布发生了变化，

因而也就改变了各点的电场强度，电位就不可能保持恒定的电流，为了保持恒定电流就必须有一种局外力（如化学力）。电动势的方向是从低电位指向高电位的。单位同电压单位一样。电压和电动势都表示做功，方向不一样。电压指负载端，电动势是指电源端。形成回路时电压总比电动势要小些（因电源内总是有内阻的），只有在开路时（电路中 $I=0$ ）电压和电动势才相等。

§ 1-5 电功和电功率

一、电功

把电能转换成其他形式的能量（如热能、光能等）电流都要流动。电流所做的功称为电功。由 $I = \frac{Q}{t}$ 、 $U = \frac{A}{Q}$ 可得电功 A 。即

$$A = UQ = UIt \quad (1-6)$$

或
$$A = I^2 R t \quad (1-7)$$

$$A = \frac{U^2}{R} t \quad (1-8)$$

上式中 若电压单位为 V 电流单位为 A 电阻单位为 Ω 时间单位为 s 则电功单位是焦耳 J 。

二、电功率

电功不能表示电流做功的快慢，我们把单位时间内电流所做的功 称为电功率 用 P 表示 即

$$P = \frac{A}{t}$$

上式中，若电功单位为 J 时间单位为 s 则电功率的单位是 J/s 、 J/s 又称瓦 用 W 表示。

在实际工作中，电功率的单位还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 及马力 非国际通用单位 筭。其换算关系为

$$\begin{aligned}1\text{kW} &= 10^3\text{W} \\1\text{mW} &= 10^{-3}\text{W} \\1\text{ 马力} &= 0.735\text{W}\end{aligned}$$

由式 (1-6)、(1-7)、(1-8) 还可得到电功率的计算公式：

$$P = UI \quad (1-9)$$

或

$$P = I^2 R \quad (1-10)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-11)$$

电功率常用千瓦小时 (kW·h) 表示，也称“度”。即 1 度电就是 1 千瓦·小时。

三、电流热效应

电流通过电阻时，电流所做的功 A 被电阻吸收并全部转换为热能，以热量的形式表现出来。电阻产生的热量 Q 为

$$Q = 0.24 I^2 R t \quad (1-12)$$

Q 的单位是卡 (cal) 其国际通用单位为 J 换算关系为 $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ 。

四、负载的额定值

为使电气元件和设备长期安全工作，都规定一个最高工作温度。温度取决于热量，而热量又由电流、电压或功率决定。因此，我们把电气元件和设备长期工作所允许的电流、电压和功率称为额定电流、额定电压和额定功率。设备外壳铭牌上所标定的值均为额定值。

§ 1-6 欧姆定律

一、无源线段电路的欧姆定律 (见图 1-5)

(1) 该元件上电压 U 与电流 I 比值 R 是一个常数, 它表征了电路的特征, 与 U 、 I 大小无关。其 U (伏) $\sim i$ (安) 关系曲线是一条通过原点的直线, 且于原点为对称。这种元件称为线性电阻元件。如 $U \sim i$ 关系不是通过原点直线, 这种元件称为非线性元件。

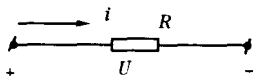


图 1-5

(2) U 一定时, R 越大, I 越小。
有公式:

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

式中 ρ ——电阻率;

l ——导线长度, m;

S ——导线截面积, mm^2 ;

R ——导体电阻, Ω

把电阻倒数称电导。电导用 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R}$$

电导单位是 $1/\Omega$ 亦称西门子, 用字母 S 表示。

(3) 在 U 、 I 关系参考方向下, 有

$$P = UI$$

$P > 0$ 吸收电能; $P < 0$ 释放电能。

二、含源线段电路的欧姆定律 (见图 1-6)

分析图 1-6(a):

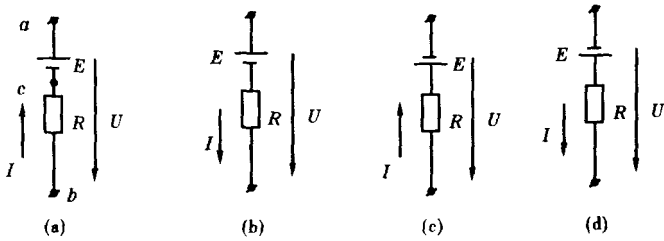


图 1-6

$$\varphi_c + E = \varphi_a$$

$$\varphi_b - \varphi_c = IR$$

$$U = \varphi_a - \varphi_b = E - RI$$

$$I = \frac{E - U}{R}$$

一般表达式为

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R}$$

E 和 U 符号的确定是当 E 、 U 与电流方向一致时取“+”，否则取“-”。

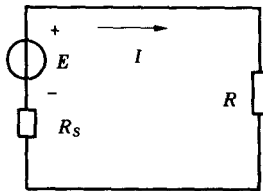


图 1-7

三、闭合回路

由图 1-7 得

$$I = \frac{E}{R + R_s}$$

§ 1-7 电路的三种状态

一、通路状态

通路就是电路中开关闭合。在这种状态下，根据负载的大小，分为满载、轻载、过载三种情况。如负载在额定功率下的工作状态称额定工作状态或满载；低于额定功率的工作状态叫轻载；高出额定功率的工作状态叫过载。

二、短路状态

如果负载被阻值近似为零的导体接通，这时电源就处于短路状态（如图 1-8）。在这种状态下，电路中电流（短路电流） $I_D = \frac{E}{R_0}$ ，由

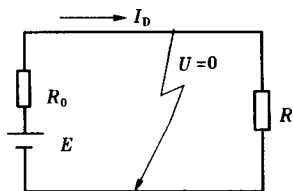


图 1-8

于电源内阻 R_0 很小，使 I_D 达到很大的数值，使电源烧毁。为防止短路，常见的方法是电路中安装熔断器。熔断器中的熔丝是由低熔点的铅锡合金、银丝制成。当电流增大到一定数值时，熔丝先被熔断，从而切断电路。

在短路时，负载 $U = 0$ 。

短路状态的主要特点是：短路电流很大，电源端电压为零。

通常电源内阻基本不变且数值很小，故可近似认为电源的端电压就等于电源的电动势。

三、开路状态

开路即为电源两端或电源某处断开，电路中电流为零，电源端电压和电动势相等。

第二章 简单直流电路的计算

§ 2-1 电阻的串联、并联和混联

一、串联的特点

所谓电阻串联，是电阻元件按顺序一个接一个地联接（见图 2-1）。其特点如下：

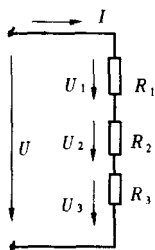


图 2

(1) 串联电路每个电阻都流过同样的电流。

(2) 电路两端总电压等于各个电阻元件两端电压之和 即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2-1)$$

(3) 串联电路总电阻（等效电阻）等于各串联电阻之和 即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2-2)$$

(4) 在串联电路中 各电阻上的分压与各电阻值成正比 即

$$U_n = \frac{R_n}{R} U \quad (2-3)$$

二、并联的特点

所谓电阻并联 就是各电阻一端联在一起 另一端也联在一起。

(1) 并联电路中各电阻承受同一个电压，即

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \quad (2-4)$$

(2) 并联电路中的总电流等于各电阻中的电流之和 即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2-5)$$

(3) 并联电路的总电阻 等效电阻 的倒数 等于各并联电阻的倒数之和 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \quad (2-6)$$

如两个电阻并联 有

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

(4) 在电阻并联电路中，各支路分配的电流与支路的电阻值成反比，即

$$I_n = \frac{R}{R_n} I \quad \text{其中, } R = R_1 // R_2 // R_3 \cdots // R_n \quad (2-7)$$

如两个电阻并联，最常用的是两条支路的分流公式，由式(2-7) 得

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (R_1 \text{ 支路的电流})$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (R_2 \text{ 支路的电流})$$

三、混联电路

在一个电路中，既有电阻的串联，又有电阻的并联，这种联接方式称为混合联接。

计算电阻混联电路时，一般先求出并联或串联部分的等效电阻 逐步化简 求出总的等效电阻 计算出总电流 然后再求各部分的电压、电流和功率等。

§ 2-2 电路中各点电位的计算

电路的工作状态，通过电路中各点的电位可以反映出来。在

电工和电子技术中，经常用到电位的计算。

计算电位时，先指定一个计算的参考点，即是零电位的点。如图 2-2 中选 d 为零电位点。

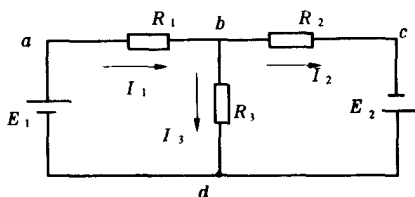


图 2-2

(1) 选好零电位点。可任意指定，但应以计算方便为好。

(2) 选择路径。要计算某点的电位，可从这点出发，通过一定的路径到另一个电位点。该点的电位，就等于此路径上全部电压和电动势的代数和。路径可任意选择，如图 2-2 中， c 点电位可由 R_2 、 R_3 到 d 点， $\varphi_c = -R_2 I_2 + R_3 I_3$ 。电位的大小与路径无关。电阻上的电压正负，根据电阻上电流方向确定。电源的电动势的正负，一般是直接给出的。

§ 2-3 电桥的平衡条件

一、电桥电路

在实际工作中经常会遇到如图 2-3 的电路。其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 是四个桥臂。一条对角线 a 、 b 间电阻 R 另一条对角线接电源。整个电路是由四个桥臂和两条对角线组成。这样的电路称为电桥电路。如果所接电源为直流电源，则这种电桥称为直流电桥。

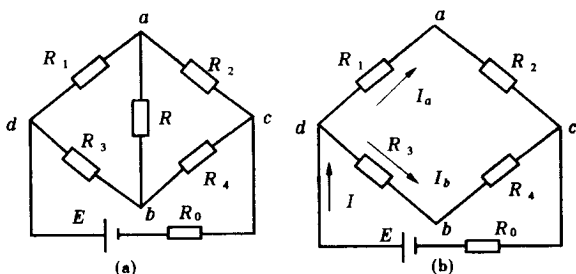


图 2-3

二、平衡条件

电桥电路的特点是当四个臂电阻值满足一定关系时会使在对角线 a 、 b 间的电阻 R 中没有电流通过。这种情况称为电桥平衡。显然要使 R 中无电流，就必须满足 a 、 b 两点电位相等的条件。因此在平衡条件下把 R 从电路中拿掉不会影响电路的其他部分这时电路就成为如图 2-3(b) 的状态。此时，总电流为 I ，流过 R_1 及 R_2 的电流 I_a 流过 R_3 、 R_4 的电流为 I_b 设 d 点为零电位那么

$$\varphi_a = -R_1 I_a = R_2 I_a + R_0 I - E$$

$$\varphi_b = -R_3 I_b = R_4 I_b + R_0 I - E$$

由 $\varphi_a = \varphi_b$ 得

$$R_1 I_a = R_3 I_b$$

$$R_2 I_a = R_4 I_b$$

将上两式相除后得

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

或

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2-8)$$

§ 2-4 负载获最大功率的条件

任何电路都进行着由电源到负载的功率传输。电源是有内阻的，因此，电源供出的总功率由内阻上的功率和负载获得的功率两部分组成。若内阻上的功率增大，则负载的功率就减小。图 2-4(a) 是一个具有负载 R 的闭合电路。图上 R 是负载的等效电阻。对于电源来说，电源内阻是一定的，而负载获得的功率和负载电阻 R 的大小有密切的关系。在图 2-4(a) 中 如果我们改变 R 大小 可以得到 R 上的不同大小的功率。负载获最大功率条件是什么呢？

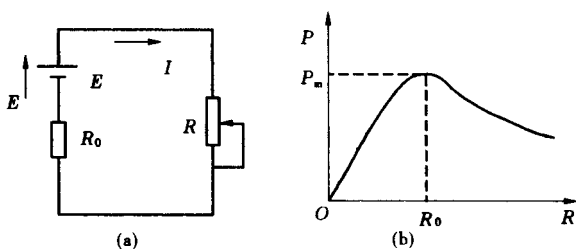


图 2-4

我们已经知道 负载 R 获得的功率为

$$\begin{aligned}
 P &= I^2 R = \left(\frac{E}{R + R_0} \right)^2 R = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2} \\
 &= \frac{E^2 R}{R^2 + 2RR_0 + R_0^2} \\
 &= \frac{E^2 R}{R^2 - 2RR_0 + 2RR_0 + 2RR_0 + R_0^2} \\
 &= \frac{E^2 R}{(R - R_0)^2 + 4RR_0}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{E^2}{(R - R_0)^2 / R + 4R_0} \quad (2-9)$$

从上式可见 E 和 R_0 都可近似看作常量，则只有在分母最小时，负载获得的功率 P 为最大值。即在 $R = R_0$ 时， P 达到最大值。因此，负载获最大功率的条件是：负载电阻等于电源内阻。负载获得的最大功率也是电源输出的最大功率。负载功率随电阻 R 变化的曲线如图 2-4(b)。

在 $R = R_0$ 时，负载获得的最大功率是：

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_0} \quad (2-10)$$

在负载获得最大功率时，因为 $R = R_0$ ，故在内阻和负载上消耗的功率相等。此时效率只有 50%。在电子技术中，突出的矛盾是使负载获最大功率，效率是次要问题，因此电路应尽可能工作在 $R = R_0$ 附近。而电力系统中正好相反，突出矛盾是输电效率，以尽可能减少内源内部损失、节约电力，因此必须使 $I^2 R_0 \ll I^2 R$ ，即 $R_0 \ll R$ 。