

第 1 章 民用建筑电气技术电路基本知识

本章主要介绍民用建筑电气技术和工程设计中有关电路方面的基本知识。主要介绍电工常用名词、直流电路、单相和三相正弦交流电路计算等内容,为民用建筑的电气设计准备必要的基本知识。

1.1 常用电工名词及计量单位和符号

电子——带有负电荷的基本粒子。电子的电量等于 $-1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ (库[仑])。

电荷——电荷分为正电荷和负电荷。电子是电荷的最小单位,物体得到或失去电子,称该物体带电;得到电子的物体带负电,失去电子的物体带正电。电荷与电荷之间存在着相互的作用力:同性电荷相互排斥,异性电荷相互吸引。

电流——带电粒子有规则的运动称为电流。习惯上规定,正电荷定向移动的方向为电流的方向。在金属导体中,电流的方向与自由电子移动的方向正好相反。

电流强度——描述电流强弱的物理量。设在某时间 t 内通过某导体横截面的电量为 q ,则在该导体内的电流强度 $I=q/t$ 。如果在 1s 内通过该横截面的电量为 1C ,则该导体内的电流强度 $I=1\text{C}/1\text{s}=1\text{A}$ (安[培])。

电流密度——在单位横截面上通过的电流大小,称为电流密度,其单位是 A/mm^2 (安/毫米²)。

电位——在电场力的作用下,把单位正电荷从 a 点移动到规定的参考点所做的功,称为参考点的电位。在理论研究中,常取无限远点作为电位的参考点;但在实际应用中,常取大地作为电位的参考点。电位的单位为 V (伏[特])。

电压——在电场力的作用下,把单位正电荷由 a 点移到 b 点所做的功,称为 a 点到 b 点的电压,亦称 a 、 b 两点间的电位差。电压的单位为 V 。

电动势——在电源内部,电力把正电荷从负极移到正极所做的功 W 与被移送的电量 q 的比值,称为该电源的电动势,即 $\epsilon=\frac{W}{q}$ 。电动势的单位与电位、电压的单位相同,也是 V 。

导体——带电粒子能在其内自由移动的物体称为导体。各种金属、各种酸、碱、盐的水溶液以及人体等均属于导体。导体的电阻率一般小于 $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。

绝缘体——带电粒子不能在其内部自由移动的物体称为绝缘体,亦称为电介质。如橡胶、塑料、云母、陶瓷、干木材和空气等均是绝缘体。绝缘体的电阻率一般大于 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 。

半导体——导电性能介于导体与绝缘体之间的物体称为半导体。如锗、硅、硒等属于半导体。半导体的电阻率一般在 $10^{-6} \sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 之间。

电导——描述导体传导电流本领的物理量称为电导,其符号表示为 G ,单位为 S (西[门子]),简称西)。

电导率——表示物质导电性能的参数称为电导率,又叫电导系数,其单位为 S/m(西/米)。

电阻——导体一方面能让电荷在其中通过,另一方面又对通过它的电荷产生阻碍作用,这种阻碍作用称为导体的电阻。电阻值的大小与导体的长度 L 成正比,与导体的横截面积 S 成反比,还与导体的材料性质有关。计算电阻的公式为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-1)$$

式中: R ——电阻, Ω ;

ρ ——导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

L ——导体的长度, m;

S ——导体的横截面积, mm^2 ;

电阻率又称电阻系数,是表示物质导电性能的参数。不同材料的电阻率也不同。材料的电阻率越大,导电性能就越差。

电感——是自感与互感的统称。

自感——由于通过闭合回路(或线圈)内的电流变化,引起穿过该回路(或线圈)所包围面积的磁通量也跟着变化而产生感应电动势的现象,称为自感现象,其所产生的感应电动势,称为自感电动势。

由引起自感现象的磁通量与产生此磁通量的电流之比值,称为该回路(或线圈)的自感系数,简称自感,以字母 L 表示,单位为 H(亨利),自感系数 L 的数值是由回路(或线圈)本身的特性决定的,与回路(或线圈)的形状、大小,以及周围介质的磁导率有关。一个确定回路(或线圈)的自感系数是一定的。

互感——两个线圈相互接近,当其中一个线圈中的电流发生变化时,引起穿过另一个线圈所包围面积的磁通量也跟着变化而产生感应电动势的现象,叫做互感现象,其所感应的电动势叫做互感电动势。

引起互感现象的磁通量与产生此磁通量的电流之比值叫做该线圈的互感系数,简称互感。理论和实践都证明,这两个线圈的互感系数在数值上是相等的,并以字母 M 表示、单位为 H。互感系数的数值只与线圈的形状、大小、两个线圈的相对位置,以及周围介质的磁导率有关。

感抗——当交流电通过电感电路时,电感有阻碍交流电流通过的作用,这种作用称为感抗,其数值由下式求得

$$X_L = 2\pi fL \quad (1-2)$$

式中: X_L ——自感抗, Ω ;

f ——交流电的频率, Hz(赫[兹])。

L ——自感, H。

电容——两个彼此绝缘而又互相靠近的导体,具有储存电荷的能力,这个能力称为电容,以字母 C 表示。电容的数值等于一侧导体所储存的电荷量 Q 与该两导体间的电位差 U 的比值,即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-3)$$

容抗——当交流电流通过电容电路时,电容具有阻碍电流通过的作用,这种作用称为容抗,其数值由下式求得

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1-4)$$

式中: X_C ——容抗, Ω ;

f ——交流电的频率, Hz;

C ——电容, F(法[拉])。

阻抗——当交流电流通过同时具有电阻、电感、电容的电路时,它们共同产生阻碍电流通过的作用,这种作用称为阻抗,其数值由下式求得

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad (1-5)$$

式中: Z ——阻抗, Ω ;

L ——自感, H。

直流电——大小和方向都不随时间改变的电流,称为恒定电流,也就是通常所说的直流,即直流电。

正弦交流电——大小和方向都随时间作周期性变化的电流,称为交流电,电流(电压、电动势)随时间作正弦规律变化的交流电,称为正弦交流电。

正弦交流电的三要素——正弦交流电由频率(或周期)、幅值(或有效值)和初相位来确定。频率、幅值和初相位称为确定正弦交流电的三要素。

正弦交流电的频率——正弦交流电在每秒钟内交变的次数称为频率,用字母 f 表示,单位为 Hz(赫[兹])。在我国和大多数国家都采用 50Hz 作为电力标准频率,所以 50Hz 也称为工频。

正弦交流电的周期——正弦交流电变化一次所需的时间称为周期,用字母 T 表示,单位为 s(秒)。

频率与周期为倒数关系,即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-6)$$

角频率——描述正弦交流电变化快慢的还可用角频率来表示,因为一个周期内经历了 2π 弧度,所以角频率为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-7)$$

式中: ω ——正弦交流电的角频率,它的单位是 rad/s(弧度每秒)。

幅值——正弦交流电在一个周期内瞬时值中最大的值称为幅值或最大值,用带下标“m”的大写字母来表示,如 I_m 、 U_m 及 E_m 分别表示电流、电压及电动势的幅值。正弦交流电在一个周期内任一瞬间的值称为瞬时值,用小写字母来表示,如 i 、 u 及 e 分别表示电流、电压及电动势的瞬时值。

有效值——有效值是根据电流的热效应来规定的。假定一个正弦交流电流 i 通过电阻 R 在一个周期内产生的热量,和另一个直流电流 I 通过同样大小的电阻 R 在相等的时间内产生的热量相等,则表明这两天电流的热效应量是相等的,因此把这个直流电 I 在数值上定为交流电 i 的有效值。

根据以上所述,可得

$$\int_0^T Ri^2 dt = RI^2 T \quad (1-8)$$

由此可得出正弦交流电的有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1-9)$$

当正弦电流用三角函数式 $i = I_m \sin \omega t$ 表示时,则有

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1-10)$$

因为正弦电流 i 是由作用在电阻 R 两端的正弦电压 u 产生的,所以同样可推得正弦电压的有效值

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (1-11)$$

正弦电压的表达式为 $u = U_m \sin \omega t$, 则

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (1-12)$$

有效值都用大写字母表示,和表示直流的字母一样。

一般所讲的正弦电压或电流的大小,都是指它的有效值。一般交流电流表和电压表的刻度也是根据有效值来定的。

初相位——正弦交流电计时起点($t=0$)时的相位角,用 ψ 表示。正弦交流电是随时间而变化的,要确定一个正弦交流电,除了频率、幅值以外,还须确定初相位。正弦交流电流可表示为

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-13)$$

上式中, $t=0$ 时的初相位 $\psi=0$; 正弦交流电流也可表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1-14)$$

上式中, $t=0$ 时的初相位为 ψ 。初相位为零,正弦交流电流的初始值($t=0$ 时的值)为零。初相位为 ψ , 正弦交流电的初始值 $i_0 = I_m \sin \psi$, 不等于零。

正弦交流电表达式中的角度 ωt 和 $(\omega t + \psi)$ 称为正弦交流电的相位角或相位。

有功功率——交流电路的平均功率,也叫有功功率,以字母 P 表示,表达式为

$$P = UI \cos \varphi \quad (1-15)$$

式中: P ——有功功率, W(瓦[特]);

U ——交流电压的有效值, V;

I ——交流电流的有效值, A;

φ ——交流电压与交流电流之间的相位角差或相位差。相位差是由电路(负载)的参数决定的。只有在纯电阻负载的情况下电压与电流才会同相位,它们的相位差 $\varphi=0$, 对于其他负载,其相位差 $\varphi=0^\circ \sim 90^\circ$ 。

无功功率——在具有电感或电容的电路中,电感或电容与电源之间发生能量互换; 在半个周期内把电源送来的能量储存起来,而在另半个周期内又把储存的能量送还给电源,这

样周而复始地进行,但上述过程中只有这样能量的互换,并不真正消耗能量。在电工计算中,为了衡量这个交换能量的规模,将它定义为无功功率,其表达式为

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1-16)$$

式中: Q ——无功功率, var(乏);

U ——电压的有效值, V;

I ——电流的有效值, A;

φ ——电压与电流的相位差, ($^{\circ}$)。

视在功率——在具有电阻及电抗(感抗与容抗的统称)的电路中,电压与电流有效值的乘积,称为视在功率,其表达式为

$$S = UI \quad (1-17)$$

式中: S ——视在功率, V · A;

U ——电压的有效值, V;

I ——电流的有效值, A。

功率因数——有功功率与视在功率的比值,称为功率因数,其表达式为

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1-18)$$

式中: $\cos \varphi$ ——功率因数, φ 称为功率因数角,它是电压与电流之间的相位差;

P ——交流电路的有功功率,即平均功率, W;

S ——视在功率, V · A。

由于有功功率是小于或等于视在功率的,所以功率因数 $\cos \varphi$ 的数值为 0~1。

相电压——三相电源线中任一根火线与中性线之间的电压,称为相电压,以字母 U_{ϕ} 表示。

线电压——三相电源线中任意两根火线之间的电压,称为线电压,以字母 U_l 表示。

相电流——三相负载中,每相负载中流过的电流,称为相电流,以字母 I_{ϕ} 表示。

线电流——三相电源线,每相电源线中流过的电流,称为线电流,以字母 I_l 表示。

1.2 直流电路的计算

1.2.1 电阻的计算

1. 导体的电阻

求导体电阻用式(1-1)。导体电阻不是固定不变的,它随着导体温度的不同而有所变化,其关系式为

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-19)$$

式中: α ——电阻的温度系数, $1/^{\circ}\text{C}$;

R_1 、 R_2 ——温度变化前的电阻和温度变化后的电阻, Ω ;

t_1 、 t_2 ——变化前的温度和变化后的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

几种常用导体的电阻率和电阻温度系数见表 1-1。

表 1-1 几种导体的电阻率和电阻温度系数

导体材料	20℃时的电阻率/($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	电阻温度系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
银	0.0165	0.00361
铜	0.0175	0.0041
金	0.022	0.00365
铝	0.029	0.00423
钼	0.0477	0.00479
钨	0.049	0.0044
锌	0.059	0.0039
镍	0.073	0.00621
铁	0.0978	0.00625
锗	0.105	0.00393
锡	0.114	0.00438
铅	0.206	0.0041
汞	0.958	0.0009
康铜(54%铜,46%镍)	0.50	0.00004
铜镍锌合金	0.42	0.00004
锰铜(86%铜、12%锰、1%镍)	0.40	0.00002

2. 电路中的电阻联接方式

电路中的电阻有串联、并联和混联等三种联接方式,还有星形和三角形联接,见图 1-1。

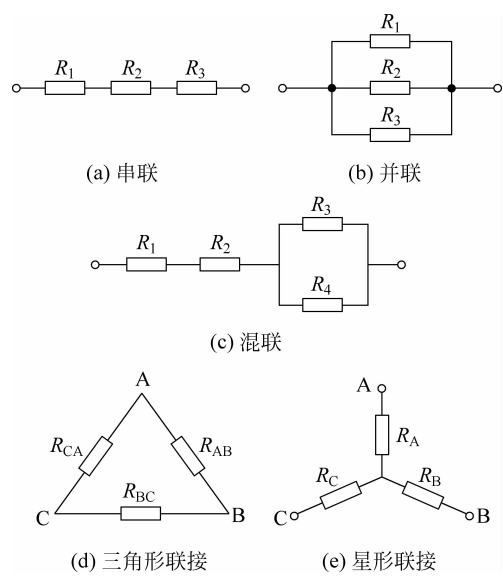


图 1-1 电路中的电阻联接

(1) 串联(图 1-1(a))

串联电阻的计算公式为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \tag{1-20}$$

式中： R ——串联总电阻， Ω ；

R_1, R_2, R_3 ——各串联分电阻, Ω 。

(2) 并联(图 1-1(b))

并联电阻的计算公式为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

或

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1-21)$$

式中: R ——并联总电阻, Ω ;

R_1, R_2, R_3 ——各并联分电阻, Ω 。

(3) 混联(图 1-1(c))

混联电阻的计算公式为

$$R = R_1 + R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = R_1 + R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-22)$$

式中: R ——混联总电阻, Ω ;

R_1, R_2 ——串联分电阻, Ω ;

R_3, R_4 ——并联分电阻, Ω 。

(4) 三角形联接和星形联接(图 1-1(d)、(e))

在电阻计算中,经常要把三角形联接的电阻等效变换成星形联接的电阻,或把星形联接的电阻等效变换成三角形联接的电阻。

三角形联接→星形联接的变换公式为

$$\left. \begin{aligned} R_A &= \frac{R_{AB} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \\ R_B &= \frac{R_{AB} R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \\ R_C &= \frac{R_{BC} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

式中: R_A, R_B, R_C ——星形联接的各路电阻, Ω ;

R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} ——三角形联接的各边电阻, Ω 。

星形联接→三角形联接的变换公式为

$$\left. \begin{aligned} R_{AB} &= R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C} \\ R_{BC} &= R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A} \\ R_{CA} &= R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B} \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

1.2.2 欧姆定律

1. 部分电路的欧姆定律

如图 1-2 所示为部分电路。实践证明,通过该电路的电流 I 与其两端之间的电压 U 成

正比,而与该电路的电阻 R 成反比,这种关系叫做欧姆定律,用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-25)$$

式中: I ——电流, A;
 U ——电压, V;
 R ——电阻, Ω 。

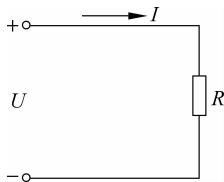


图 1-2 部分电路

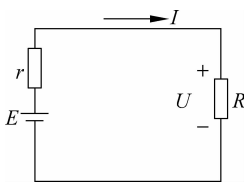


图 1-3 简单全电路

2. 全电路欧姆定律

图 1-3 为简单的全电路,它是由电源、负载和联接导线等组成。全电路欧姆定律的关系式为

$$I = \frac{E}{R + r} \quad \text{或} \quad U = E - Ir \quad (1-26)$$

式中: I ——电流, A;
 E ——电源电动势, V;
 R ——负载电阻, Ω ;
 r ——电源内电阻, Ω ;
 U ——负载的端电压, V。

1.2.3 基尔霍夫定律

对于比较复杂的电路,通常使用基尔霍夫定律来进行计算。这个定律既适用于直流电路,也适用于交流电路,是分析和计算电路的基本定律。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律又叫节点电流定律:对于电路中的任一节点,流入该节点的电流的代数和恒等于从该点流出的电流的代数和。或者说,流入任一节点的电流和从该节点流出的电流的总和为零。其数学表达式为

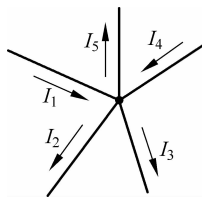
$$\sum I = 0 \quad (1-27)$$

图 1-4 所示有 5 个支路电流汇集于节点,根据图中标出的电流方向,可列出该节点的电流方程式为

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$$

$$\text{或} \quad I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

$$\text{即} \quad \sum I = 0$$



对于 $\sum I$ 中各电流 $I_1, I_2, \dots, I_5$ 前面的符号,通常

图 1-4 有 5 个支路电流汇集的节点

规定：流入节点的电流为正(+)，流出节点的电流为负(-)。

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律，又叫回路电压定律：在任一回路中，电动势的代数和恒等于各电阻上电压降的代数和。其数学表达式为

$$\sum E = \sum IR \quad (1-28)$$

图 1-5 是一个由两个电源 E_1, E_2 并联对电阻 R 供电的复杂电路。该电路包含两个回路。任取其中 ADBCA 回路，根据基尔霍夫第二定律，列这个回路的方程式。通常先任意选定一个回路绕行方向(如图中虚线所示)，并规定与绕行方向一致的电动势符号为正(+)，反之为负(-)；与绕行方向一致的电压降符号为正(+)，反之为负(-)。由此而列出该回路的电压方程式为

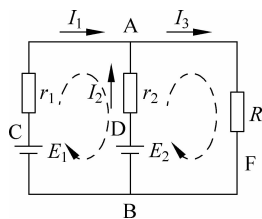


图 1-5 两个电源并联对电阻 R 供电

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2$$

如将以上各项均用电压表示，则得

$$U_1 - U_2 = U_3 - U_4$$

移项后得

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

即

$$\sum E = 0 \quad (1-29)$$

这表明，沿回路绕行方向(顺时针或逆时针方向)，回路中各段电压降的代数和恒等于零。这就是基尔霍夫电压定律在电阻电路中的另一种表达式。

例 1-1 如图 1-5 所示。已知蓄电池电动势 $E_1 = 2.15\text{V}$, $E_2 = 1.9\text{V}$, 蓄电池内阻 $r_1 = 0.1\Omega$, $r_2 = 0.2\Omega$, 负载电阻 $R = 2\Omega$ 。

试问：(1) 通过负载电阻 R 及各电源的电流是多少？

(2) 两个蓄电池的输出功率各是多少？

解 根据题意，设 I_1 、 I_2 和 I_3 分别为通过蓄电池 E_1 、 E_2 和负载电阻 R 的电流，电流方向假定如图所示。根据基尔霍夫第一定律，可列出节点的 A 的电流方程为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

根据基尔霍夫第二定律，对回路 ADBCD 和 AFBDA 可分别列出电压方程。假设回路按顺时针方向绕行，则得

$$I_1 r_1 - I_2 r_2 = E_1 - E_2 \quad (2)$$

$$I_2 r_2 + I_3 R = E_2 \quad (3)$$

将式(1)~(3)联立，代入电动势和电阻的数值，有

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 0.1I_1 - 0.2I_2 = 0.25 \\ 0.2I_2 + 2I_3 = 1.9 \end{cases}$$

解此方程组，得

$$I_1 = 1.5\text{A} \quad I_2 = -0.5\text{A} \quad I_3 = 1\text{A}$$

负载电阻 R 两端的电压降为

$$U_{AF} = I_3 R = 1 \times 2 = 2\text{V}$$

所以蓄电池 E_1 的输出功率为

$$P_1 = I_1 U_{AF} = 1.5 \times 2 = 3\text{W}$$

所以蓄电池 E_2 的输出功率为

$$P_2 = I_2 U_{AF} = -0.5 \times 2 = -1\text{W}$$

消耗在负载电阻 R 上的功率为

$$P_3 = I_3^2 R = 1^2 \times 2 = 2\text{W}$$

从上述计算结果看出,蓄电池 E_2 不仅没有输出功率,反而从外部获得功率,即蓄电池 E_2 处于被充电状态。由此可知,电动势值不同的几个蓄电池并联运行,供给负载的电流并不一定比一个蓄电池供电电流大,有时电动势较小的蓄电池变成了电路中的负载而吸收能量。所以在使用几个蓄电池并联供电时应尽量避免这种情况的发生。

通过这个例题可见,应用基尔霍夫第一定律和第二定律计算该复杂电路时,列出了三个方程:一是节点电流方程,该电路中共有 2 个节点,但只能列出 $2-1=1$ 个独立电流方程;再是回路电压方程,该电路共有 3 条支路,形成 AFBDA、ADBCA、AFBCA 三个回路(又称网孔),但只能列出 $3-(2-1)=2$ 个独立的网孔回路方程。

推而广之,一个复杂电路若有 n 个节点,只能列出 $n-1$ 个独立的电流方程;若有 b 条支路,可形成 b 个网孔,但只能列出 $l=b-(n-1)$ 个独立的回路电压方程。

1.2.4 直流电源的计算

1. 直流电源的串联

图 1-6 是三个直流电源的串联。串联后的总电动势等于各直流电源电动势之和,总内阻等于各直流电源内阻之和,即

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (1-30)$$

$$r = r_1 + r_2 + r_3 \quad (1-31)$$

式中: E ——直流串联电源的总电动势, V;

E_1 、 E_2 、 E_3 ——串联各直流电源的电动势, V;

r ——串联直流电源的总内阻, Ω ;

r_1 、 r_2 、 r_3 ——串联各直流电源的内阻, Ω 。

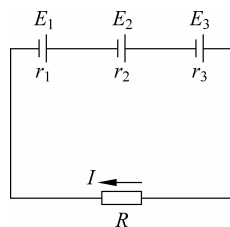


图 1-6 直流电源的串联

如果直流电路中接入的负载电阻为 R ,则直流电路中流过的电流

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R + r_1 + r_2 + r_3} = \frac{E}{R + r} \quad (1-32)$$

式中: I ——直流串联电路中流过的电流, A;

R ——直流串联电路的负载电阻, Ω 。

2. 直流电源的并联

图 1-7 是多个直流电源的并联。并联后的总电动势等于单个直流电源的电动势,并联后的总内阻等于单个直流电源内阻的 $\frac{1}{n}$,即

$$E = E_1 = E_2 = E_3 \quad (1-33)$$