



BY 8-13-27

# 第五章

# 电学计量

# 一、电工原理基础知识

## (一) 基本要求

1. 了解下述基本概念：电力线、电场、电场强度、电位、电位差、电动势、静电感应等。
2. 熟练掌握欧姆定律及其应用。
3. 熟练掌握克希霍夫第一和第二定律及其应用。
4. 熟练掌握计算直流电路的等效发电机定理 (Thevenin 定理或译为戴维南定理)，叠加原理，节总电压法，回路电流法。
5. 熟练掌握串联电路、并联电路、混联电路的计算，Y- $\Delta$ 变换，以及各自的特点。
6. 熟练掌握焦耳 - 楞次定律及其应用。
7. 熟练掌握电压、电流、电功、电功率（有功、无功）、电阻、电感、电容、电抗（感抗、容抗）、阻抗、导纳（电导、电纳）等概念及有关计算。
8. 了解下述基本概念：磁力线、磁场、磁通量、磁感应强度等。并熟练掌握右手螺旋法则、左手定则、右手定则。
9. 熟知电磁感应现象，熟练掌握楞次-法拉第电磁感应定律。正确理解自感和互感。
10. 了解正弦波交流电的主要概念（频率、周期、相位、相位差、功率因数、最大值、有效值、平均值、瞬时值等），了解非正弦波和谐波的概念。
11. 了解变压器的原理及使用方法。

## (二) 例题与解答

例题 1 对于图 (5.1.1)，下面哪一条答案是正确的？

- (1) A、B 之间的电阻

$$R_{AB} = \sqrt{R_3^2 + (R_1 - R_2)^2} ;$$

- (2) 总电流通过  $R_3$ ；

- (3) 总电阻  $R_T = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$ ；

- (4) 如果  $R_1$  比  $R_3$  小，则流过  $R_1$  的电流将大于流过  $R_3$  的电流。

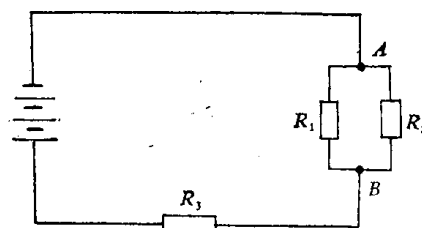


图 5.1.1

解答：答案(2)是正确的，因为电路中的总电流必须通过串联电阻  $R_3$ 。答案(4)是错误的，因为流入  $R_3$  的是总电流，流入  $R_1$  的是分电流。答案(1)和(3)中的公式也都是错误的。

例题 2 对于图(5.1.2)，哪一条答案是正确的？

- (1) 是交流串联电路中感抗  $X_L$  上的电压降、容抗  $X_C$  上的电压降和电阻上的电压降的矢量图；

- (2) 相当于公式  $Z = \sqrt{L^2 + C^2}$ ；

(3) 相当于公式  $Z = \sqrt{R^2 + L^2 + C^2}$ ;

(4) 如果每一条支路 (OA、OB和OC) 的阻抗都是相等的, 在数学上将等于零。

解答: 答案(1)是对的。图(5.1.2)所示图形是串联电路的感抗压降、容抗压降和电阻压降的矢量图。对于交流串联电路, 如果OA和OB相等, 由于感抗和容抗互相抵消, 因此电路的等效阻抗仅呈现纯电阻性质(线段OC)。答案(4)是错误的。答案(2)和(3)中的公式也是错误的, (3)中的公式应为  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 。

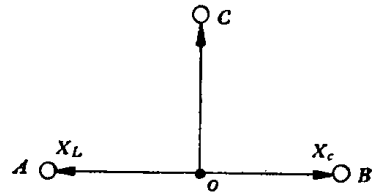


图 5.1.2

例题 3 若一个电阻通过 1 毫安电流时, 耗散功率为 5 瓦, 问下列阻值中哪一个是正确的?

- (1)  $5 \Omega$
- (2)  $5000 \Omega$
- (3)  $500000 \Omega$
- (4)  $5M \Omega$

解答: 答案(4)是正确的。根据功率的定义和欧姆定律  $P = EI = I^2R = E^2/R$  得

$$5W = (1 \times 10^{-3} A)^2 \times R$$

$$R = 5 \times 10^6 \Omega = 5M \Omega$$

例题 4 5600欧姆的电阻和4700欧姆的电阻并联, 下述哪个并联等效电阻正确?

- (1)  $2553 \Omega$ ;
- (2)  $2555 \Omega$ ;
- (3)  $25533 \Omega$ ;
- (4)  $2555330 \Omega$ 。

解答: 答案(2)是正确的。并联等效电阻的计算公式是

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

代入  $R_1$ 、 $R_2$  的数值得

$$R = \frac{5600 \times 4700}{5600 + 4700} = 2555 (\Omega)$$

例题 5 对于图(5.1.3), 哪一条答案是正确的? ( $X_{C1} = 10 \Omega$ ,  $X_{C2} = 100 \Omega$ )

- (1) 总电容等于  $110 \Omega$ ;
- (2) 电容器  $C_2$  的电容量比较小;
- (3) 总容抗小于  $10 \Omega$ ;
- (4) 电抗将随着频率的增加而增加。

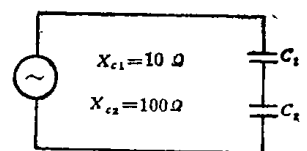


图 5.1.3

解答: 答案(2)是对的, 电容器  $C_2$  的容量较小。根据容抗公式  $X_C = 1/2\pi fc$ , 可知容抗与电容  $C$  成反比,  $C_1$  的容抗  $X_{C1}$  小于  $C_2$  的容抗  $X_{C2}$ , 所以  $C_1$  的电容量

一定大于 $C_2$ 的电容值。

**例题 6** 当两个电阻并联时，每个电阻耗散 5 瓦功率。同样这两个电阻串联，并且每个电阻也耗散 5W 功率时，下列总的功耗值中，哪一个是正确的？

- (1) 10W
- (2) 5W
- (3) 2.5W
- (4) 7.5W

**解答：**答案(1)是对的。当两个电阻并联时，耗散的功率相等，意味着二者电阻值相等，而电阻值相等的两个电阻无论是串联或并联，组合的等效功耗，即总瓦数都是相加的。

**例题 7** 在图(5.1.4)中，电源的内阻  $R_i = 10$  欧姆，当负载  $R_L$  为何值时，从电源传输到  $R_L$  上的功率最大？

- (1)  $1\Omega$
- (2)  $10\Omega$
- (3)  $100\Omega$
- (4) 必须知道电源的电压问题才能有解。

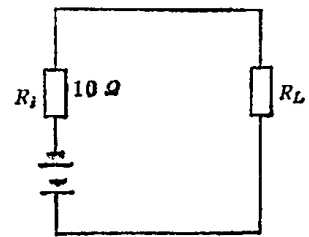


图 5.1.4

**解答：**答案(2)是正确的。当负载  $R_L$  等于电源的内阻，即  $R_L = R_i = 10\Omega$  时，电源传输给负载的功率最大。

**例题 8** 在图(5.1.5)所示桥式整流电路中，当 A 点相对于 B 点总的正电压达到最大值时，通过  $D_1$  的电流是：

- (1) 0
- (2) 最大
- (3) 从 A 到 C
- (4) 从 C 到 A

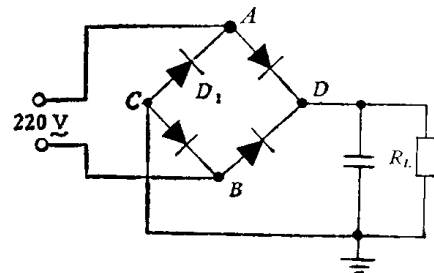


图 5.1.5

**解答：**答案(1)是正确的。当 A 点比 C 点 (和 B 点) 电位高时， $D_1$  不能导通，可以流过  $D_1$  的电流为零。

**例题 9** 在图(5.1.6)所示的  $R L C$  串联谐振电路中 ( $R = 10\Omega$ ,  $X_L = 10\Omega$ ,  $X_C = 10\Omega$ )，选一正确答案。

- (1) 等效阻抗等于 20 欧姆；
- (2) 从电阻  $R$  中减去容抗  $X_C$  与感抗  $X_L$  之和得到等效阻抗；

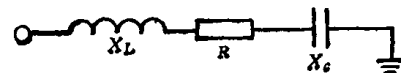


图 5.1.6

- (3) 等效阻抗是 30 欧姆；
- (4)  $X_C$  和  $X_L$  互相抵消，等效阻抗是 10 欧姆。

**解答：**正确答案是(4)。  $R L C$  串联电路阻抗计算公式为

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

串联谐振时,  $X_L$ 和 $X_C$ 相等而互相抵消, 因此

$$Z = \sqrt{R^2} = 10 \Omega$$

例题10 一个5亨利的扼流圈, 15750赫的感抗是多少? 选一正确答案.

- (1) 222700  $\Omega$
- (2) 494550  $\Omega$
- (3) 78750  $\Omega$
- (4) 494.5  $\Omega$

解答: 正确答案是(2).  $X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 15750 \times 5 = 494550 \Omega$ .

例题11 试述电流有哪些效应?

解答: 电流有三种效应, 即,

- (1) 热效应——电流通过电路时, 产生热量.
- (2) 化学效应——电流通过溶液时, 使溶液起分解作用.
- (3) 磁效应——电流通过导线时, 在周围产生磁场.

例题12 已知电源电压( $U$ )等于10伏, 现要取用1伏电压, 怎样解决?

解答: 可用电阻分压的方法解决, 如图(5.1.7)所示.  $U$ 为电源电压, 分压电阻  $R_1$ 和 $R_2$

上的电压分别为 $U_1$ 和 $U_2$ , 则  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

因为

$$U = U_1 + U_2$$

则

$$\frac{U - U_2}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

设  $U_2 = 1V$ , 则可求出分压电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 的关系为  $R_1 = 9R_2$ 从上式可知 $R_1$ 是 $R_2$ 的9倍, 便能在 $R_2$ 两端(即 $a$ 与 $b$ )得到1伏电压. 实际应用时要注意,  $U$ 可用恒压源, 分压电阻值要足够大.

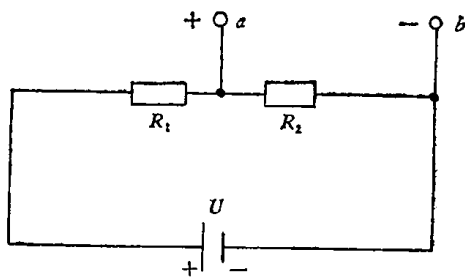


图 5.1.7

例题13 图(5.1.8)中, 电源电压 $U$ 为15伏, 电阻 $R_1$ 为10千欧,  $R_2$ 为20千欧. 问电阻 $R_1$ 上的电压 $U_1$ 是多少? 若用灵敏度为5000欧/伏的万用表的10伏量程档, 去测量 $R_1$ 两端的电压, 试问电压表的指示是多少? 测量的相对误差有多大?

解答:

(1) 根据电阻串联分压关系, 求出电阻  $R_1$  上的电压  $U_1$

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U = \frac{10}{10 + 20} \times 15 = 5 \text{ (V)}$$

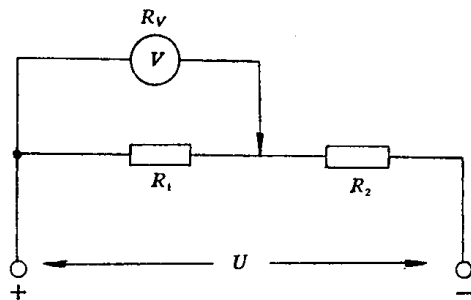


图 5.1.8

(2) 万用表10伏量程档输出电阻值  $R_v$  等于50千欧, 用它测量时相当于在 $R_1$ 上并联一个电阻 $R_v$ , 此时的等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_V}{R_1 + R_V} = \frac{10 \times 50}{10 + 50} \approx 8.33 \text{ (K}\Omega\text{)}$$

此等效电阻与 $R_2$ 串联，改变了电路的分压比。等效电阻 $R$ 上的电压以 $U'$ 表示

$$U' = \frac{R}{R + R_2} U = \frac{8.33}{8.33 + 20} \times 15 = 4.41 \text{ (V)}$$

即是说，电阻 $R_1$ 上的电压原为5伏，接上万用表进行测量时，测得电压却是4.41伏。因此，测量的相对误差 $\beta$

$$\beta = \frac{\text{测量值} - \text{真实值}}{\text{真实值}} \times 100\% = \frac{4.41 - 5}{5} \times 100\% = -11.8\%$$

这一项误差很可观，完全是由测量方法造成的，值得注意。

**例题14** 图(5.1.9)中，电源内阻为 $r_0$ 、电动势为 $\varepsilon$ ，电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 为负载。求

- (1) 当开关 $K$ 断开时 $AB$ 两点的电压；
- (2) 当开关 $K$ 接通时 $AB$ 两点的电压；
- (3) 试比较(1)和(2)所得结果，说明外电路的总负载电阻与路端电压的关系。

解答：

$$(1) \text{ 当 } K \text{ 断开时，电流 } I_1 = \frac{\varepsilon}{r_0 + R_1}$$

$$\text{所以 } V_{AB} = I_1 R_1 = \frac{R_1}{r_0 + R_1} \varepsilon$$

$$(2) \text{ 当 } K \text{ 接通时，电阻 } R_2 \text{ 与 } R_1 \text{ 并联，并联等效电阻 } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{电流 } I_2 = \frac{\varepsilon}{r_0 + R}$$

$$\text{所以 } V'_{AB} = I_2 R = \frac{R}{r_0 + R} \varepsilon$$

(3) 因为电源内阻 $r_0 \neq 0$ ，所以 $V'_{AB} < V_{AB}$ ，可见外电路总负载电阻减小，则路端电压降低。只有当电源内阻 $r_0 \rightarrow 0$ 时，路端电压才不随负载变化而等于电源电动势（通常称恒压源）。

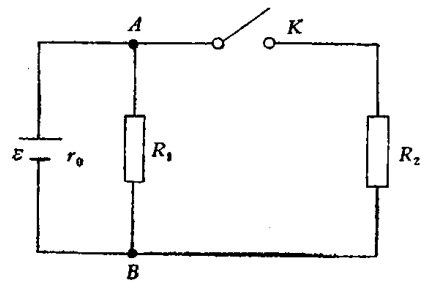


图 5.1.9

**例题15** 如图(5.1.10)所示，电源电压 $E_1 = 24\text{V}$ ，电源电压 $E_2 = 8\text{V}$ ，电阻 $R_1 = 3\text{K}\Omega$ ，电阻 $R_2 = 2\text{K}\Omega$ ，电阻 $R_3 = 2.5\text{K}\Omega$ ，求 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

解答：

由图(5.1.10)列出方程

$$\begin{cases} I_3 R_3 = E_1 - I_1 R_1 & (5.1.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 R_3 = E_2 - I_2 R_2 & (5.1.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 = I_1 + I_2 & (5.1.3) \end{cases}$$

将(5.1.3)式代入(5.1.1)、(5.1.2)式可得

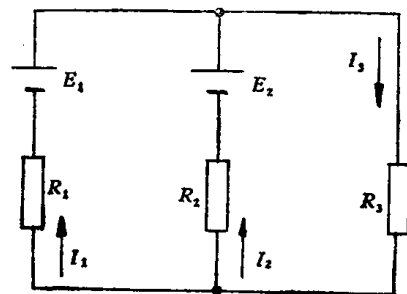


图 5.1.10

$$I_1(R_1 + R_3) = E_1 - I_2 R_3 \quad (5.1.4)$$

$$I_1 R_3 = E_2 - I_2(R_2 + R_3) \quad (5.1.5)$$

由 (5.1.4) 和 (5.1.5) 式得

$$\frac{R_1 + R_3}{R_3} = \frac{E_1 - I_2 R_3}{E_2 - I_2(R_2 + R_3)}$$

解得

$$I_2 = \frac{(R_1 + R_3)E_2 - R_3 E_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \quad (5.1.6)$$

将 (5.1.6) 式代入 (5.1.5) 式解得

$$I_1 = \frac{R_2 E_1 + R_3(E_1 - E_2)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \quad (5.1.7)$$

(5.1.6)、(5.1.7) 两式相加得

$$I_3 = \frac{R_1 E_2 + R_2 E_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \quad (5.1.8)$$

代入数值得

$$I_1 = 4.756 \text{ mA}$$

$$I_2 = -0.865 \text{ mA}$$

$$I_3 = 3.891 \text{ mA}$$

$I_2$  中负号表示电流的实际方向与图 (5.1.10) 中所示方向相反。

**例题16** 有四节电池，其中每节电池的电动势  $\varepsilon_1$  均为1.5伏、内阻  $r_0$  均为0.5欧，联接如图 (5.1.11)，向电阻为10欧的负载  $R$  供电。求

(1) 电路中的总电流  $I$ ;

(2) 路端电压  $U$ 。

**解答:**

(1) 因为总电动势  $\varepsilon = 2\varepsilon_1 = 1.5 \text{ V} \times 2 = 3 \text{ V}$

$$R = 10 \Omega$$

$$\text{总内阻 } r = \frac{2r_0 \times 2r_0}{2r_0 + 2r_0} = r_0 = 0.5 \Omega$$

$$\text{所以总电流 } I = \frac{\varepsilon}{r + R} = \frac{3}{0.5 + 10} = 0.2857 \text{ (A)}$$

(2) 路端电压

$$U = IR = 0.2857 \times 10 = 2.857 \text{ (V)}$$

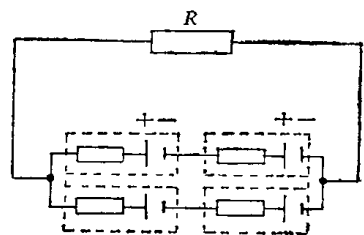


图 5.1.11

**例题17** 有三个灯泡  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别标着“12V4W”、“12V8W”、“12V4W”，接在电路中如图 (5.1.12) 所示，电源电压  $E$  为12伏，内阻可忽略不计。求

(1) 开关  $K_1$ 、 $K_2$  断开时， $A$ 、 $B$  灯泡哪个亮？

(2)  $K_1$ 、 $K_2$  接通时，通过  $A$ 、 $B$ 、 $C$  灯泡的电流各为多少？

**解答:**



(1) 由  $W = \frac{V^2}{R}$

得

$$R_A = \frac{V^2}{W_A} = \frac{(12)^2}{4} = 36 \text{ } (\Omega)$$

$$R_B = \frac{V^2}{W_B} = \frac{(12)^2}{8} = 18 \text{ } (\Omega)$$

$$R_C = \frac{V^2}{W_C} = \frac{(12)^2}{4} = 36 \text{ } (\Omega)$$

当开关  $K_1$ 、 $K_2$  断开时，回路的总电流  $I$  为

$$I = \frac{E}{R_A + R_B} = \frac{12}{36 + 18} = \frac{2}{9} \text{ (A)}$$

此时，A 灯泡的实际功率为  $W'_A$

$$W'_A = I^2 R_A = \left(\frac{2}{9}\right)^2 \times 36 \approx 1.8 \text{ (W)}$$

B 灯泡的实际功率  $W'_B$

$$W'_B = I^2 R_B = \left(\frac{2}{9}\right)^2 \times 18 \approx 0.9 \text{ (W)}$$

所以，A 灯泡比 B 灯泡亮。

(2) 当  $K_1$ 、 $K_2$  接通时，显然流过 A 灯泡的电流等于零。此时，B、C 灯泡两端的电压为 12 伏。根据欧姆定律

$$I_B = \frac{E}{R_B} = \frac{12}{18} = \frac{2}{3} \text{ (A)}$$

$$I_C = \frac{E}{R_C} = \frac{12}{36} = \frac{1}{3} \text{ (A)}$$

**例题 18** 要将  $I_G$  为 3 毫安的表头量限扩大 8 倍，已知分流电阻  $R_s$  与表头（内阻为  $R_G$ ）并联的等效电阻为 20 欧。求表头电路的电阻  $R_G$  和分流电阻  $R_s$ 。

**解答：** 根据题意可画出如图 (5.1.13) 线路。已知  $I_G = 3\text{mA}$

$$I = 24\text{mA}$$

分别用分流公式及等效电阻公式列出以下方程式

$$\begin{cases} \frac{R_s}{R_s + R_G} \times 24 = 3 \\ \frac{R_s R_G}{R_s + R_G} = 20 \end{cases}$$

解方程可得

$$R_G = 160 \text{ } \Omega$$

$$R_s = 22.9 \text{ } \Omega$$

另一种解法：用欧姆定律求出路端电压  $U_{ab}$ 。

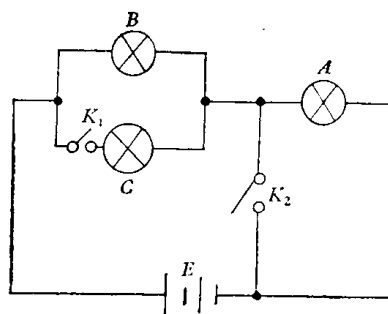


图 5.1.12

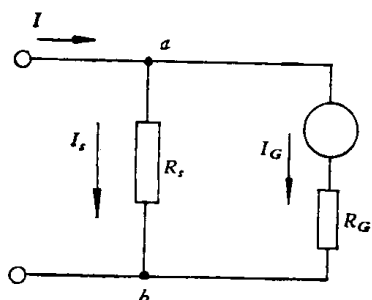


图 5.1.13

$$U_{ab} = 20 \times 24 = 480 \text{ (mV)}$$

由于并联电阻上的端电压相等，而且已知  $R_G$  中的电流为 3 毫安， $R_S$  中的电流  $I_S$  为 21 毫安。

$$\text{所以 } R_G = \frac{U_{ab}}{I_G} = \frac{480}{3} = 160 \text{ } (\Omega)$$

$$R_S = \frac{U_{ab}}{I_S} = \frac{480}{21} = 22.9 \text{ } (\Omega)$$

**例题19** 有一电路如图 (5.1.14) 所示电源电压  $E_1 = 20\text{V}$ ，内阻  $r_1 = 0.5\Omega$ ；电源电压  $E_2 = 4\text{V}$ ，内阻  $r_2 = 0.1\Omega$ ；负载电阻  $R_1 = 2\Omega$ 、 $R_2 = 10\Omega$ 、 $R_3 = 4\Omega$ 、 $R_4 = 8\Omega$ ，试应用克希霍夫定律，求流过  $R_1$  的电流  $I_1$ 、流过  $R_2$  的电流  $I_2$ 、流过  $R_4$  的电流  $I_3$ 。

解答：设电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的方向如图 (5.1.14) 中箭头所示。

(1) 沿  $a b c f d e a$  回路有

$$I_1(r_1 + R_1 + R_3) + I_2(r_2 + R_2) = E_1 + E_2$$

(2) 沿  $a b d e a$  回路有

$$I_1(r_1 + R_1 + R_3) + I_3 R_4 = E_1$$

(3)  $I_1 = I_2 + I_3$

将数据代入可得

$$\begin{cases} 6.5 I_1 + 10.1 I_2 = 16 \text{ (A)} \\ 6.5 I_1 + 8 I_3 = 20 \text{ (A)} \\ I_1 = I_2 + I_3 \end{cases}$$

解方程组得

$$I_1 \approx 1.66\text{A}$$

$$I_2 \approx 0.51\text{A}$$

$$I_3 \approx 1.15\text{A}$$

由于  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的符号均为正，所以实际电流方向与图 (5.1.14) 中箭头所示方向相同。

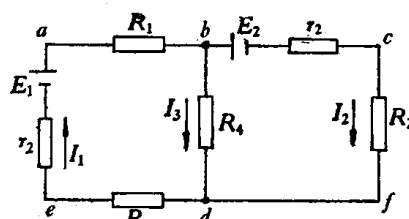


图 5.1.14

**例题20** 试用回路电流法，求各支路电流 (见图5.1.15)。

解答：此电路有三个独立回路，其中电流分别为

$I_I$ 、 $I_{II}$ 、 $I_{III}$ ，用回路电流法列出方程：

$$\begin{cases} R_{11}I_I - R_{12}I_{II} - R_{13}I_{III} = E_I \\ -R_{21}I_I + R_{22}I_{II} - R_{23}I_{III} = E_{II} \\ -R_{31}I_I - R_{32}I_{II} + R_{33}I_{III} = E_{III} \end{cases}$$

方程式中

$$R_{11} = R_1 + R_4 + R_6 \quad R_{22} = R_2 + R_5 + R_6$$

$$R_{33} = R_3 + R_4 + R_5$$

分别为三个回路的自有电阻。

$$R_{12} = R_{21} = R_6 \quad R_{23} = R_{32} = R_5$$

$$R_{13} = R_{31} = R_4$$

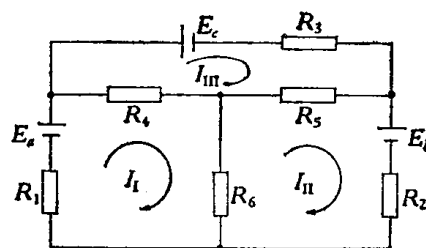


图 5.1.15

分别为两个回路间的互有电阻。 $E_I$ 、 $E_{II}$ 、 $E_{III}$ 分别为三个回路的回路电势， $E_I = E_a$ ， $E_{II} = -E_b$ ， $E_{III} = -E_c$ 。

三个回路电流  $I_I$ 、 $I_{II}$ 、 $I_{III}$  解出之后，按支路电流与回路电流的关系，即可求出各支路的电流：

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I & I_2 &= -I_{II} & I_3 &= -I_{III} \\ I_4 &= I_{III} - I_I & I_5 &= I_{III} - I_{II} & I_6 &= I_I - I_{II} \end{aligned}$$

**例题21** 已知电流源电流  $I_s$  为 1.5 安，电压源电动势  $E$  为 24 安，电阻  $R_1$  为 100 欧， $R_2$  为 200 欧，连接成如图 (5.1.16) 线路。试用迭加定理计算  $R_1$  及  $R_2$  支路的电流。

**解答：** 设流过  $R_1$ 、 $R_2$  支路的电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ ，电流方向假定如图中箭头所示。

(1) 先求出电流源  $I_s$  单独作用时的电流。拆去电压源  $E$ ， $E$  所在处两端短路，这时图 (5.1.16) 简化成图 (5.1.17) 电路。由图 (5.1.17) 可看出，这时  $R_1$  与  $R_2$  是并联的。用分流公式可求出

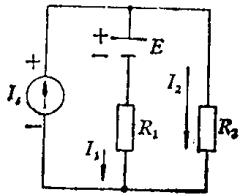


图 5.1.16

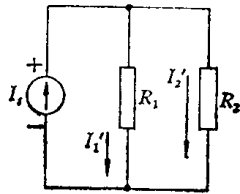


图 5.1.17

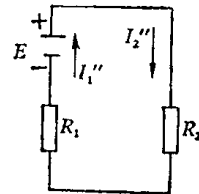


图 5.1.18

$$I_1' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_s = \frac{200}{100 + 200} \times 1.5 = 1 \text{ (A)}$$

$$I_2' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_s = \frac{100}{100 + 200} \times 1.5 = 0.5 \text{ (A)}$$

(2) 再求出电压源  $E$  单独作用时的电流。此时去掉电流源  $I_s$ ，电流源所在处可看成开路。这时图 (5.1.16) 简化成图 (5.1.18) 电路。由图 (5.1.18) 可看出，这时  $R_1$  与  $R_2$  是串联的。用欧姆定律可求出

$$I_1'' = I_2'' = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{24}{100 + 200} = 0.08 \text{ (A)}$$

(3) 根据迭加定理，实际电路中的  $I_1$  及  $I_2$  应是上述电流代数和：

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 1 - 0.08 = 0.92 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 0.5 + 0.08 = 0.58 \text{ (A)}$$

$I_1$ 、 $I_2$  均为正值，表明图 (5.1.16) 中标出的箭头方向与实际电流方向一致。

**例题22** 桥式电路中 (图5.1.19)，已知电阻  $R_1 = 4\Omega$ 、 $R_2 = 10\Omega$ 、 $R_3 = 22\Omega$ 、 $R_4 = 30\Omega$ 、 $R_5 = 60\Omega$ 、 $R = 11\Omega$ ，电源电压  $E = 22V$ 。试用回路电流法求各支路的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$  和  $I_5$ 。

**解答：** 根据图 (5.1.19) 的三个回路  $I'$ 、 $I''$ 、 $I'''$  的大小及其正方向 (顺时针) 列出方程组：

$$\begin{cases} (11 + 22 + 30)I' - 22I'' - 30I''' = 22 \\ -22I' + (4 + 60 + 22)I'' - 60I''' = 0 \\ -30I' - 60I'' + (10 + 30 + 60)I''' = 0 \end{cases}$$

求解上列方程组，各回路电流为：

$$I = I' = 1\text{A}$$

$$I'' = 0.8\text{A}$$

$$I''' = 0.78\text{A}$$

于是各支路电流为：

$$I = I' = 1\text{A}$$

$$I_1 = I'' = 0.8\text{A}$$

$$I_2 = I''' = 0.78\text{A}$$

$$I_3 = I' - I'' = 1 - 0.8 = 0.2\text{ (A)}$$

$$I_4 = I' - I''' = 1 - 0.78 = 0.22\text{ (A)}$$

$$I_5 = I'' - I''' = 0.8 - 0.78 = 0.02\text{ (A)}$$

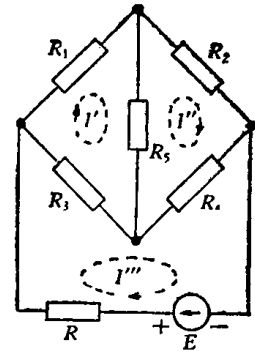


图 5.1.19

**例题23** 如图(5.1.20)，电源电压 ( $E_1 = 130\text{V}$ 、 $E_2 = 117\text{V}$ ，其内阻  $r_1 = 1\Omega$ 、 $r_2 = 0.6\Omega$ ，负载电阻  $R = 24\Omega$ )，试用迭加定理求流过负载  $R$  的电流  $I$ 。

**解答：**根据迭加定理，可将图(5.1.20)分解为图(5.1.21)和图(5.1.22)的迭加。所以，只要根据图(5.1.21)求出支路电流  $I'$ ，根据图(5.1.22)求出支路电流  $I''$ ，则

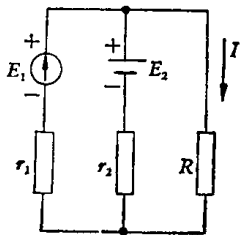


图 5.1.20

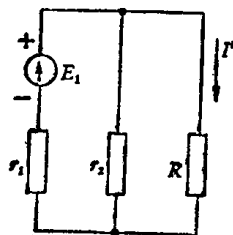


图 5.1.21

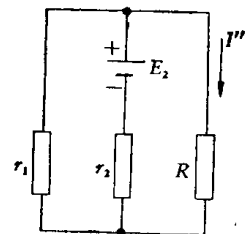


图 5.1.22

$$I = I' + I''$$

即

$$I'_1 = \frac{E_1}{r_1 + r_2 R / (r_2 + R)} = \frac{130}{1 + 0.6 \times 24 / (0.6 + 24)} = 82\text{ (A)}$$

$$I' = \frac{r_2}{r_2 + R} I'_1 = \frac{0.6}{0.6 + 24} \times 82 = 2\text{ (A)}$$

$$I'_2 = \frac{E_2}{r_2 + r_1 R / (r_1 + R)} = \frac{117}{0.6 + 1 \times 24 / (1 + 24)} = 75\text{ (A)}$$

$$I'' = \frac{r_1}{r_1 + R} I'_2 = \frac{1}{1 + 24} \times 75 = 3\text{ (A)}$$

所以  $I = I' + I'' = 2 + 3 = 5\text{ (A)}$

(箭头所示方向为实际电流的正方向。)

**例题24** 解释下列名词：(1) 交流电；(2) 正弦交流电；(3) 瞬时值；(4) 角频率；(5) 最大值（振幅值）；(6) 周期；(7) 频率。

**解答：**

- (1) 交流电——电流（或电势）的方向和大小随时间而变化。
- (2) 正弦交流电——电流（或电势）的方向和大小随时间按照正弦规律而变化。
- (3) 瞬时值——交流电流（或电势）在任一瞬间的数值。
- (4) 角频率——单位时间内变化的角度称为角速度，也称角频率。
- (5) 最大值——交流电最大的瞬时值。
- (6) 周期——交流电变化一周所需要的时间。
- (7) 频率——在单位时间内交流电重复变化的次数。

**例题25** 正弦交流电通常可用哪几个参数表示？

**解答：**用最大值、角频率和初相角就可正确表示正弦交流电。

**例题26** 两线路间的互感为80微亨，当传输线路发生短路时，电流增加的速率为 $3 \times 10^6$ 安/秒，求此瞬间线路中的互感电势的大小。

**解答：**线路间的互感  $M = 80$  微亨  $= 80 \times 10^{-6} \text{H}$ ，电流变化速率  $di_1/dt$  等于  $3 \times 10^6 \text{A/S}$ 。互感电势  $e_{M_2}$  的大小为

$$e_{M_2} = M \frac{di_1}{dt} = 80 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^6 = 240 \text{ (V)}$$

**例题27** 什么叫涡流？试述其危害及减小的方法。

**解答：**整块导体中，由于电磁感应而产生的感应电流叫涡流。涡流将使铁芯发热，造成能量损失，增加电能损耗；同时还有削弱原磁场的作用（即去磁作用）。在电器设备中应设法减小涡流，通常用互相绝缘的硅铜片（或坡莫合金）迭成铁芯，减小涡流。

**例题28** 电容器能否通过直流电，为什么？

**解答：**电容器在稳态时不能通过直流电流，因此常在一些交流电路中用它来隔直流。接入直流电路的电容器，当电路通电到达稳态后，电容器两端的电压已充电至和电源的直流电压相等且保持不变，而通过电容器的电流是与电容器两端的电压变化速率成正比例的，故当电容器两端的电压不变时，即其电压变化速率等于零，所以通过电容器的电流也等于零。

### (三) 思考题

1. 电流是如何形成的？电流的方向怎样规定？电子的运动方向是不是电流的方向？电子运动速度和电流传播速度是否一样？
2. 什么叫电动势，它和电压有什么区别？电压和电动势的方向是怎样规定的？
3. 一个新电池与一个很旧的电池串联供电，问旧电池是提供电能还是消耗电能（设新电池电动势为1.5伏、内阻为0.5欧，旧电池电动势为1.2伏，内阻为60欧，负载电阻为21欧）。

4. 电阻元件中正弦电压和电流的关系, 对于交流电压和电流的瞬时值、有效值、最大值、欧姆定律是否仍然适用?

#### (四) 学习与参考资料

1. 《电工基础》
2. 《电工仪器仪表检定与修理》 国防工业出版社 1978年
3. 《电气测量仪表原理与维修》 陕西省电管局中试所 1973年
4. 《电气测量仪表和测量》 瓦·奥·阿卢丘诺夫 人民教育出版社 1960年
5. 交直流精密电表校验装置 (说明书)

## 二、标准电池

### (一) 基本要求

1. 掌握计量学基础知识。
2. 掌握电工原理基础知识（具体要求参见本章第一节）。
3. 了解标准电池的原理（电化学回路、H型和单管型结构）和分类（饱和式和不饱和式及各自的特点）。
4. 了解标准电池温度系数的特点（正、负极的温度特性）；标准电池电动势的温度滞后效应；国产饱和式标准电池的电动势—温度公式：三次方和四次方公式。
5. 了解控温电池组和低温度系数标准电池组的结构特点。
6. 正确掌握标准电池使用的注意事项。
7. 熟练掌握标准电池的检定系统（检定系统图、标准的选择）；主要检定设备（电位差计、比较仪、指零仪、控温槽等）的原理和使用维护方法；检定方法（差值代替法、补偿代替法）。
8. 正确理解标准电池检定规程。
9. 熟练掌握标准电池的检定技术。
10. 基本掌握标准电池检定装置的误差分析。
11. 能正确处理检定结果及填写证书。
12. 了解国内外标准电池的最新动向。

### (二) 例题与解答

**例题 1** 试述标准电池的分类。

**解答：**标准电池按电解液（硫酸镉溶液）的浓度可分为饱和标准电池和不饱和标准电池。在整个使用温度范围内，电解液为饱和硫酸镉溶液并含有硫酸镉结晶者，称为饱和标准电池；而电解液保持不饱和者，称为不饱和标准电池。

**例题 2** 为什么标准电池有极化现象，怎样防止？

**解答：**标准电池在使用过程中，不可避免会发生充、放电现象。当电流通过电极时，出现电极电位偏离其平衡值的现象，称为电极的极化。当放电时，则电动势下降；当充电时，则电动势上升。其极化程度与充、放电电流大小及时间长短有关。由此可见，电极的极化影响标准电池电动势的稳定性。因此在使用标准电池时，应尽量避免或最大限度地减少其充、放电作用，如果电流很微弱（不大于1微安）且时间短暂，则因标准电池本身有去极剂，电极的极化微弱，充、放电后标准电池仍能很快恢复，对电动势的稳定性影响不会太大。

**例题 3** 对于已定等、级的标准电池，经检定后如何判定其是否合格？

**解答：** 主要根据下列技术性能指标判定：

- (1) 在温度 20℃ 时的电动势实际值是否在允许范围内；
- (2) 一年内电动势值的允许变化；
- (3) 在检定期间（2—5 天）内电动势值的允许变化；
- (4) 内电阻值（在检定规程中有详细规定）。

**例题 4** 简述检定标准电池可用哪些方法。

**解答：** 检定标准电池可用差值替代法和补偿替代法。

(1) 检定 0.005 级、0.01 级和 0.02 级标准电池可用补偿替代法，即在同一补偿测量装置上先测标准量，再测被检量，从而得出被检量和标准量的差值，最后求得未知量。

(2) 对于 0.001 级以上高精度标准电池，一般宜用差值替代法进行检定，即在测量装置上先后测量标准、被检标准电池与过渡标准电池电动势之差值，从而求出被检的和标准的标准电池电动势的差值。当被检的和标准的标准电池均处于同一温度时，能直接得出被检标准电池在 20℃ 时的电动势值。

**例题 5** 检定标准电池时应具备哪些主要条件（以 0.005 级为例）？

**解答：** 当检定 0.005 级标准电池时，应具备如下条件：

- (1) 温度条件——与 20℃ 最大允许偏差  $\pm 2^\circ\text{C}$ ；
- (2) 标准电池间的最大允许温差  $0.1^\circ\text{C}$ ；
- (3) 标准电池温度最大允许变化率  $0.1^\circ\text{C}/\text{小时}$ ；
- (4) 恒温稳定时间不少于 3 天；
- (5) 标准的标准电池的等级为二等标准电池组；
- (6) 检定装置的极限误差不大于 10 微伏；
- (7) 测温温度计的最小分度值  $0.2^\circ\text{C}$ 。

作为标准的标准电池应满足相应的要求。

**例题 6** 使用标准电池时应注意些什么？

**解答：** 使用标准电池时应注意：

(1) 由于标准电池的电动势值随温度的变化而变化，故在使用温度范围内非 20℃ 时，应用电动势—温度公式对电动势值进行温度修正；标准电池应避免温度的急剧变化。

(2) 尽量避免或尽可能减小充、放电作用（充、放电流根据说明书的规定应限制在微安级以下），绝对禁止——即使是瞬时间的——短路，以免电极极化而引起电动势值下降，甚至使电池无法恢复到原有值。

(3) 避免受强光（阳光、灯光）直照，以防硫酸亚汞水解而使电动势变化，甚至无法使用。

(4) 为消除滞后效应，使用前应静置、恒温足够长的时间。

(5) 应轻拿轻放，不得振动和倒置。

**例题 7** 检定标准电池时需要哪些主要设备？



解答：检定标准电池的主要设备是：

- (1) 作标准的标准电池；
- (2) 比较仪（标准电池比较仪或电位差计）和检流计；
- (3) 过渡标准电池和校准用标准电池；
- (4) 恒温油槽或空气恒温箱；
- (5) 温度计。

例题 8 写出国产饱和标准电池在使用温度范围内的电动势—温度公式。

解答：国产饱和标准电池在使用温度范围（0℃—40℃）内的电动势—温度公式如下：

三次方式

$$E_t = E_{20} - [39.94(t - 20) + 0.955(t - 20)^2 - 0.0090(t - 20)^3] \times 10^{-6} \text{ (伏)}$$

四次方式

$$E_t = E_{20} - [39.94(t - 20) + 0.929(t - 20)^2 - 0.0090(t - 20)^3 + 0.00006(t - 20)^4] \times 10^{-6} \text{ (伏)}$$

例题 9 如何测定标准电池的内阻？列出方程，说明注意事项。

解答：如图（5.2.1）所示， $E$ ——标准电池电动势； $R_i$ ——标准电池的内阻； $R$ ——放电电阻。

(1) 测量步骤：

- ① 将开关  $K$  断开，测得标准电池的开路电势  $E$ ；
- ② 将开关  $K$  闭合，测得标准电池放电电流在  $R$  上的电压降

$U$ ，则

$$U = \frac{E}{R_i + R} R$$

所以

$$R_i = \frac{(E - U)R}{U} \approx (E - U)R$$

(因为  $U \approx 1$  伏)

(2) 注意事项：

- ① 标准电池的放电电流不得大于 1 微安（一般用 0.1 微安），因此放电电阻  $R$  应大于 1 兆欧（一般用 10 兆欧）等，电池测内阻按特殊规定进行；
- ② 绝对不允许用万用表等机械式仪表直接去测量标准电池的电动势。

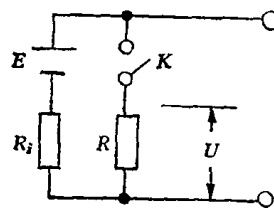


图 5.2.1

例题 10 试述标准电池的检定系统。

解答：标准电池的检定系统如图（5.2.2）所示。

例题 11 在标准电池检定系统中，装置极限误差是如何规定的，举例说明。

解答：设  $\xi_s$  为被检标准电池的检定累加极限误差， $\gamma_s$  为标准的标准电池 ( $E_s$ ) 电动势