

第二章

简单电阻电路的分析

等效变换是分析电路的一种重要方法,其主要思想是用简单的电路等效替代复杂的电路。本章重点对简单电阻电路的等效变换进行分析和研究。等效变换是电工基础的入门基础,也是进一步学习交流电路及各章节的基础。

第一节 电阻的串、并联

等效变换在实际中广泛地使用。例如,额定值为 220 V、1 kW 的白炽灯和额定值为 220 V、1 kW 的电炉,虽然结构和性能完全不同,但是,对 220 V 电源而言,输出的电流和功率完全相等;再如,收音机既可用干电池作为电源,也可以用稳压电源作为电源,对收音机来说,干电池和稳压电源是等效的。

如图 2-1 所示,若给电路 (a) 和 (b) 施加相同的电压 u , 两电路产生的电流 i 和 i' 相等, 则称电路 (a) 和 (b) 互为等效。对外电路而言, 互为等效的电路 (a) 和 (b) 可以相互替换, 这就是电路的等效变换。

电路等效变换的条件是相互等效的两个电路具有相同的电压、电流关系, 等效变换的是外电路中的电压、电流及功率。

电路进行等效变换的目的是使电路的分析计算更加简单。

一、电阻的串联

电路中, 多个电阻首尾依次相连构成电阻的串联, 如图 2-2 (a) 所示为三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的串联电路。

如图 2-3 所示圣诞节期间圣诞树上忽亮忽灭的彩灯就是串联连接, 串联的灯泡中有一个灯泡装有双金属片的自动开关。当双金属片发热断开时, 灯泡全部熄灭; 冷却后双金属片重新接通电路, 所有的灯泡又变亮。

电阻串联具有以下的特点:

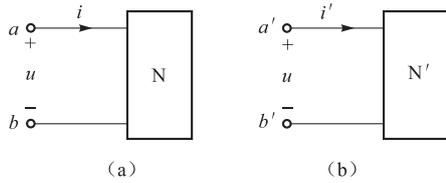


图 2-1 等效电路

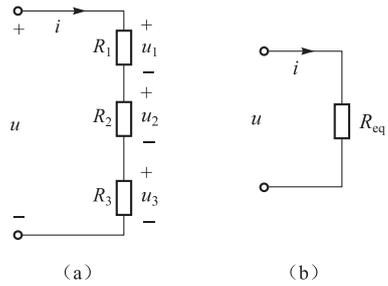


图 2-2 电阻串联电路
(a) 串联电路; (b) 等效电路



图 2-3 彩灯电路

(1) 通过串联电阻的电流为同一电流, 即

$$u_1=R_1i \quad u_2=R_2i \quad u_3=R_3i \quad (2-1)$$

(2) 串联电阻的总电阻(等效电阻)等于各电阻之和。

由 KVL 可知, 外加电压等于各个电阻上电压之和, 即

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 + u_3 = R_1i + R_2i + R_3i \\ &= (R_1 + R_2 + R_3)i = R_{\text{eq}}i \end{aligned}$$

其中

$$R_{\text{eq}} = \frac{u}{i} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2-2)$$

由式(2-2)可知: 电阻串联的等效电阻等于各串联电阻之和, 等效电路如图 2-2 (b) 所示。

若推广到一般情况: n 个电阻串联, 等效电阻等于各串联电阻之和, 即

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

(3) 串联电阻两端的电压与其阻值成正比。

由式(2-1)可知:

$$\frac{u_1}{R_1} = \frac{u_2}{R_2} = \frac{u_3}{R_3}$$

电阻串联后各电阻上的电压与总电压之间的关系称做分压关系。由式(2-1)和式(2-2)可知

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} u \\ u_2 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} u \\ u_3 &= \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} u \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

(4) 电阻串联时总的吸收功率等于各电阻吸收消耗的功率之和, 即

$$p = ui = u_1 i + u_2 i + u_3 i \quad (2-4)$$

串联电阻的分压原理应用十分广泛。如电子线路中常用电位器实现可调串联分压电路; 串联电阻分压还可以用来扩大电压表的量程。

例 2-1 图 2-4 所示电路是闪光灯电路, 已知电池的内阻(内阻用 r 表示)是 0.3Ω 。(1) 由于电池内阻的存在, 使用时, 电池会发热; (2) 电流流过电池时, 内阻上会有压降, 使电池的端电压下降; (3) 电池可提供的电流是有限值(约 5 A)。

试计算当开关闭合时, 用以代表闪光灯的 2.5Ω 电阻两端的电压为多少?

解 电源内阻虽然是隔着电源连接, 但流过的是同一电流, 所以三个电阻是串联连接, 由串联分压公式可得

$$U_B = \frac{R_B}{r_1 + r_2 + R_B} (U_S + U_S) = \frac{2.5}{2.5 + 0.3 + 0.3} \times 3 = 2.42 \text{ V}$$

思考题: 如果因为侵蚀的原因, 开关闭合时有 1.2Ω 的电阻, 那么灯泡两端的电压为多少?

例 2-2 图 2-5 所示电路是实际中常用的一种可调串联分压电路。 R_P 是一个可变电阻, 滑动端上部电阻为 R_{P1} , 下部电阻为 R_{P2} 。已知 $R_1 = R_2 = 100 \Omega$, $R_P = 200 \Omega$, $U_i = 12 \text{ V}$, 问 U_0 的可调范围为多大?

解 当 $R_{P2} = 0$ 时, U_0 最小

$$U_{0\min} = \frac{R_2}{R_1 + R_P + R_2} U_i = \frac{100}{100 + 200 + 100} \times 12 = 3 \text{ V}$$

当 $R_{P2} = R_P = 200 \Omega$ 时, U_0 最大

$$U_{0\max} = \frac{R_2 + R_P}{R_1 + R_P + R_2} U_i = \frac{100 + 200}{100 + 200 + 100} \times 12 = 9 \text{ V}$$

故 U_0 的可调范围为 $3 \sim 9 \text{ V}$ 。

思考题：如果 U_0 外接的是 100Ω 的负载，重解本题，可以得出什么结论？

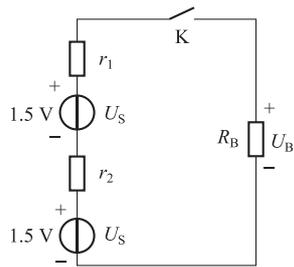


图 2-4 例 2-1 图

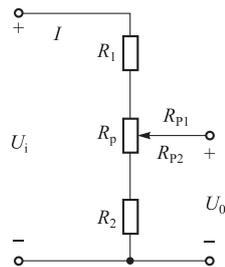


图 2-5 例 2-2 图

例 2-3 欲将一个内阻 R_g 为 $1 \text{ k}\Omega$ ，满刻度电流 I_g 为 $10 \mu\text{A}$ 的表头改装成量程为 10 V 的电压表，如图 2-6 所示，问需串联一个多大电阻？

解 由图 2-6 可知

$$U = (R_g + R)I_g$$

$$R = \frac{U}{I_g} - R_g = \frac{10}{10 \times 10^{-6}} - 1000 = 999 \text{ k}\Omega$$

如果要改装为多量程的电压表，则需串联不同的分压电阻，如图 2-7 所示为双量程电压表，图中“-”表示电压表的负端；“+”表示电压表的正端。

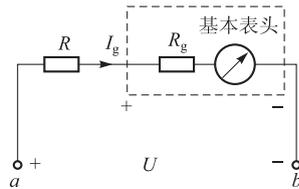


图 2-6 例 2-3 图

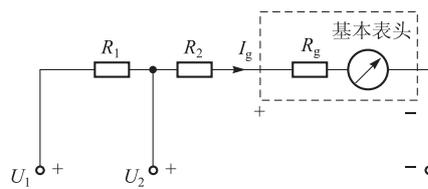


图 2-7 双量程电压表

思考题：如果将内阻 R_g 为 $1 \text{ k}\Omega$ ，满刻度电流 I_g 为 $10 \mu\text{A}$ 的表头改装成量程为 10 V 和 20 V 的双量程电压表，试求电阻 R_2 。

二、电阻的并联

汽车前灯电路中，前灯电阻的首端连接在一起，尾端连接在一起，这种连接关系称为电阻的并联连接。如图 2-8 (a) 所示为三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的并联电路。

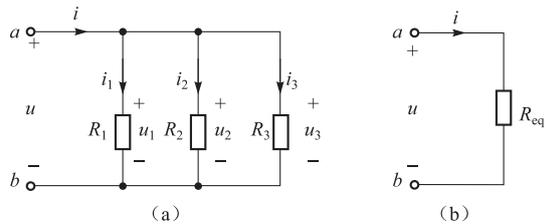


图 2-8 电阻的并联及其等效电路

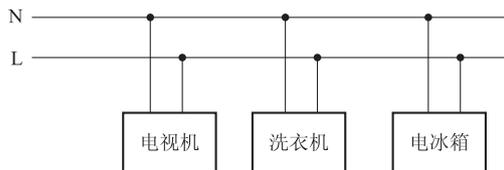


图 2-9 家用电器的连接

并联连接的应用实例很多,如图 2-9 所示的家用电器都是采用并联连接方式,即其中某一家用电器不工作时,不影响其他家用电器的工作。

电阻并联电路具有以下的特点:

(1) 并联电阻的端电压相等,即

$$u_1 = u_2 = u_3 = u \quad (2-5)$$

(2) 总电流等于各支路电流之和。

由 KCL 可知,总电流等于各个支路电流之和,即

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (2-6)$$

(3) 电阻并联的等效电阻倒数等于各电阻的倒数之和。

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} + \frac{u}{R_3} = u \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (2-7)$$

由图 2-8 (b), 根据欧姆定律得

$$i = \frac{u}{R_{\text{eq}}} \quad (2-8)$$

比较式 (2-7)、式 (2-8) 可得

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2-9)$$

即电阻并联等效电阻的倒数等于各并联电阻倒数之和,等效电路如图 2-8 (b) 所示。

若推广到一般情况: n 个电阻并联,等效电阻的倒数等于各并联电阻倒数之和,即

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

(4) 电阻并联时总的吸收功率等于各电阻吸收的功率之和,等于等效电阻吸收的功率。

即

$$p = ui = \frac{u^2}{R_1} + \frac{u^2}{R_2} + \frac{u^2}{R_3} = \frac{u^2}{R} \quad (2-10)$$

在电路分析中常遇到两个电阻并联的情况,如图 2-10 所示,其等效电阻为

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

为方便书写,引入并联符号 $R_{\text{eq}} = R_1 // R_2$ 。例如: $R_{\text{eq}} = 3 // 6 = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 2 \Omega$

各并联支路电流的分流公式为

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{u}{R_1} = \frac{Ri}{R_1} = \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i \\ i_2 &= \frac{u}{R_2} = \frac{Ri}{R_2} = \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

例 2-4 欲将一个内阻 R_g 为 50Ω , 满刻度电流 I_g 为 5 mA 的表头改装成量程为 10 mA 的电流表, 问需并联一个多大电阻?

解 由图 2-11 可知, $I = 10 \text{ mA}$ 时

$$\begin{aligned} I_R &= I - I_g = 10 - 5 = 5 \text{ mA} \\ RI_R &= R_g I_g \\ R &= \frac{R_g I_g}{I_R} = \frac{50 \times 5 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-3}} = 50 \Omega \end{aligned}$$

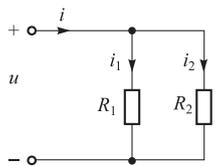


图 2-10 两个电阻并联

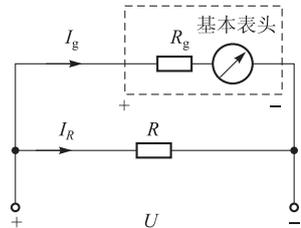


图 2-11 例 2-4 图

思考题: 如果将内阻 R_g 为 50Ω , 满刻度电流 I_g 为 5 mA 的表头改装成量程为 10 mA 和 20 mA 的双量程电流表, 画出双量程电流表的示意图, 并试求电阻 R_2 。

三、电阻的混联

电路中, 若既有电阻的串联, 又有电阻的并联, 则把这种连接称为混联。混联电路, 经过串、并联化简仍可得到一个等效电阻。

图 2-12 所示的混联电路中, 经串、并联化简得到的等效电阻为

$$R_{\text{eq}} = R_1 + (R_3 + R_4) // R_2$$

例 2-5 如图 2-12 所示的电路, 已知 $u=100\text{ V}$, $R_1=7.2\ \Omega$, $R_2=64\ \Omega$, $R_3=6\ \Omega$, $R_4=10\ \Omega$, 求电路的等效电阻及其各支路的电流。

解 由图 2-12 可知, R_3 与 R_4 串联, 再与 R_2 并联, 之后与 R_1 串联。其等效电阻为

$$R = R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + (R_3 + R_4)} = 7.2 + \frac{64 \times (6 + 10)}{64 + (6 + 10)} = 20\ \Omega$$

各支路电流分别为

$$i_1 = \frac{u}{R} = \frac{100}{20} = 5\text{ A}$$

$$i_2 = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} i_1 = \frac{6 + 10}{64 + 6 + 10} \times 5 = 1\text{ A}$$

$$i_3 = i_1 - i_2 = 5 - 1 = 4\text{ A}$$

思考题: 试求出各个电阻上的压降和电阻消耗的功率。

例 2-6 试求图 2-13 (a) 所示电路的等效电阻。

解 由图可知, $6\ \Omega$ 、 $3\ \Omega$ 和 $2\ \Omega$ 电阻分别连到 a 和 b 两点, 而 $4\ \Omega$ 电阻两端连到同一点 b 上, 故被短路。所以图 2-13 (a) 的电路可以等效成图 2-13 (b) 的电路。

其等效电阻为

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}} = 1\ \Omega$$

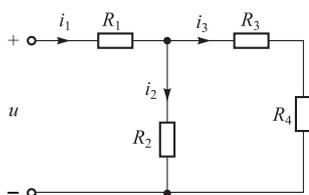


图 2-12 混联电路

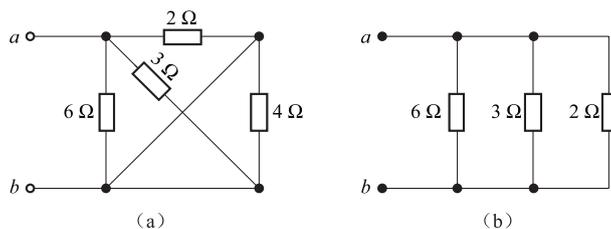


图 2-13 例 2-6 图

思考题: 电路中 $4\ \Omega$ 的电阻会影响电路的等效电阻吗? 为什么? 并总结如何判断电阻短路。

自测题

1. 当日光灯或电炉子的电阻丝烧断后, 再将其接起来, 日光灯会比原来更亮, 电炉子会比原来热得更快。这是为什么?

2. 在实际工程中, 某技术员手头只有标称阻值为 $100\ \Omega$ 、 $\frac{1}{8}\ \text{W}$ 的电阻若干, 现需要规格为 $200\ \Omega$ 、 $\frac{1}{4}\ \text{W}$ 和 $50\ \Omega$ 、 $\frac{1}{4}\ \text{W}$ 的电阻, 该怎么处理?

3. 如图 2-14 所示, 求开关 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 依次闭合后, 电路的等效电阻。通过计算判断一个电路中并联的电阻越多其等效电阻越大还是越小, 并根据这个原理解释一下电路的超载问题。

4. 求图 2-15 所示电路中的 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 和等效电阻 R_{ab} 。

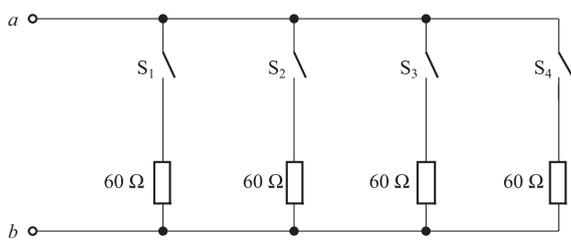


图 2-14 题 3 图

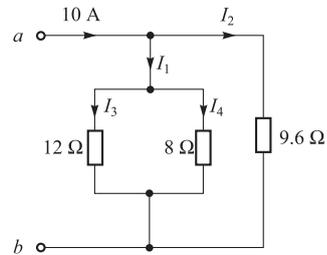


图 2-15 题 4 图

5. 某收音机采用串联分压电路给各级放大器供电, 电路如图 2-16 所示, 图中标出了各级所需电压和电流, 试计算各电阻值。

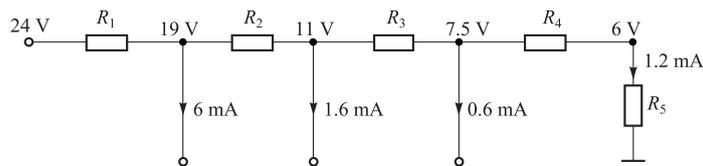


图 2-16 题 5 图

答案

1. 电阻变小。

2. 将两个 $100\ \Omega$ 、 $\frac{1}{8}\ \text{W}$ 的电阻进行串联和并联。

3. 等效电阻分别为 $60\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $15\ \Omega$, 电路中并联的负载越多, 电路的总电流就越大, 电路的负载额度也越大。

4. $\frac{20}{3}\ \text{A}$ $\frac{10}{3}\ \text{A}$ $\frac{8}{3}\ \text{A}$ $4\ \text{A}$ $R_{\text{eq}}=3.2\ \Omega$

5. $R_1 = \frac{25}{47}\ \text{k}\Omega$ $R_2 = \frac{40}{17}\ \text{k}\Omega$ $R_3 = \frac{35}{18}\ \text{k}\Omega$ $R_4 = 1.25\ \text{k}\Omega$ $R_5 = 5\ \text{k}\Omega$

第二节 万用表的基本原理

在实际工程中，万用表是电气工程的眼睛，是必不可少的测量工具，如图 2-17 所示。万用表可用来测量直流电压、直流电流、电阻及交流电压等，在讨论了电阻串、并联的基础上，本节介绍万用表的基本原理。

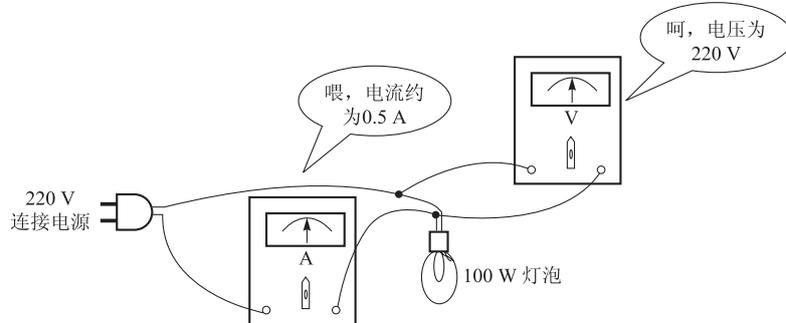


图 2-17 万用表是电气工程的眼睛

一、表头

万用表各种不同的测量都是由表头来指示。表头是一个灵敏的测量机构，表头内有一可动的线圈，线圈的电阻称为表头的内阻。当表头线圈通有电流时，表头内的永久磁铁产生磁场力使线圈发生偏转（线圈偏转的角度与线圈中通过的电流成正比），并通过固定在线圈上的指针指示线圈所偏转的角度。当指针指示满标度时，流过线圈中的电流称为满偏电流。内阻和满偏电流是描述表头特性的两个参数，分别以 R_g 和 I_g 表示。

二、直流电压的测量

将表头串联一分压电阻，即构成一个最简单的直流电压表，如图 2-18 (a) 所示。由欧姆定理可得

$$I = \frac{U}{R_g + R}$$

由于表头内阻 R_g 和分压电阻 R 的阻值是固定的，因此，通过表头的电流与被测电压成正比。所以，只要在标度盘上按照电压刻度，根据指针的偏转就能指示被测电压的值。

电压表的量程 U_L 是指电压表所能测量的最大电压。显然，当被测电压 $U = U_L$ 时，通过表头的电流 $I = I_g$ ，由欧姆定律可求得分压电阻的阻值为

$$R = \frac{U_L - R_g I_g}{I_g} \quad (2-12)$$

利用转换开关可将电压表制成多量程的，如图 2-18 (b) 所示。万用电表的直流电压的测量电路，如图 2-18 (c) 所示。

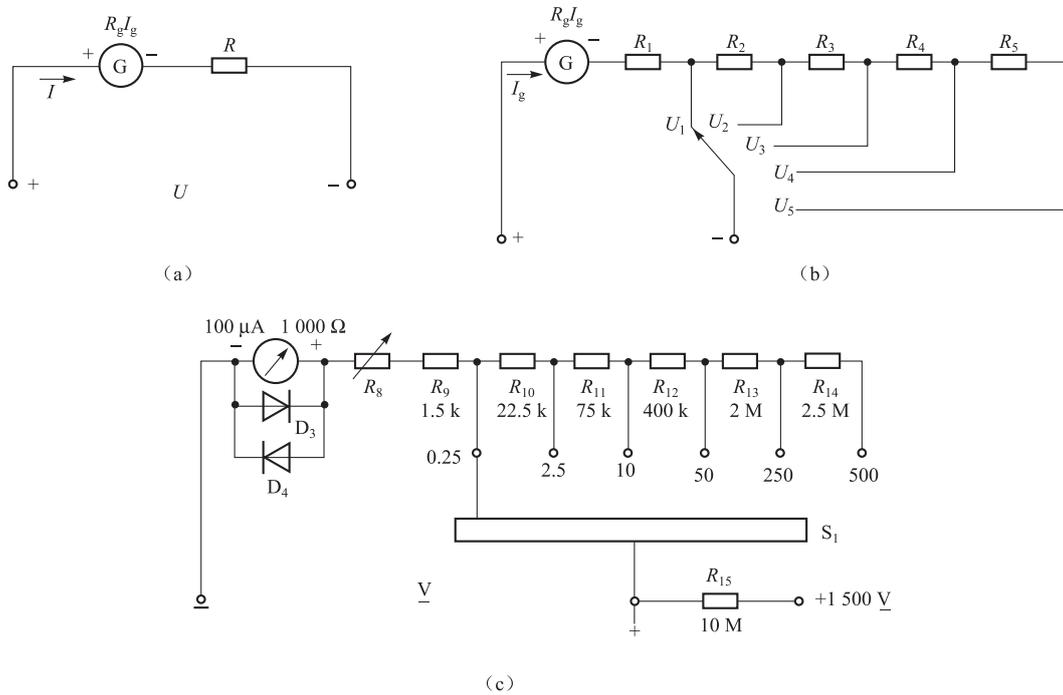


图 2-18 直流电压表的原理图

例 2-7 图 2-18 (b) 表示某万用电表的直流电压表部分，共有五个量程： $U_1=2.5 \text{ V}$ ， $U_2=10 \text{ V}$ ， $U_3=50 \text{ V}$ ， $U_4=250 \text{ V}$ ， $U_5=500 \text{ V}$ ，表头参数为 $R_g=3 \text{ k}\Omega$ ， $I_g=50 \mu\text{A}$ ，求各分压电阻。

解 由式 (2-8) 分别求出各分压电阻的值为

$$R_1 = \frac{U_1 - R_g I_g}{I_g} = \frac{2.5 - 3 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6}}{50 \times 10^{-6}} \Omega = 47 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_2 - U_1}{I_g} = \frac{10 - 2.5}{50 \times 10^{-6}} \Omega = 150 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{U_3 - U_2}{I_g} = \frac{50 - 10}{50 \times 10^{-6}} \Omega = 800 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = \frac{U_4 - U_3}{I_g} = \frac{250 - 50}{50 \times 10^{-6}} \Omega = 4 \times 10^3 \text{ k}\Omega = 4 \text{ M}\Omega$$

$$R_5 = \frac{U_5 - U_4}{I_g} = \frac{500 - 250}{50 \times 10^{-6}} \Omega = 5 \times 10^3 \text{ k}\Omega = 5 \text{ M}\Omega$$

三、交流电压的测量

图 2-19 是交流电压表的基本原理电路图, 与直流电压表所不同是增加了二极管 V_1 和 V_2 。由于二极管具有单向导电的性能, 二极管 V_1 只在交流电压的正半周或负半周时导通, 所以, 虽然被测的是交流电压, 但通过表头的却是单方向的电流。当被测的是正弦交流电压时, 指针所偏转的角度与被测的交流电压 U 成正比。

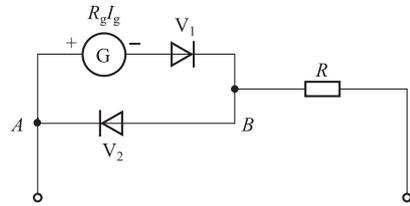


图 2-19 交流电压表的原理图

四、直流电流的测量

将表头并联分流电阻, 即构成一个最简单的直流电流表, 如图 2-20 (a) 所示。由分流公式得

$$I_g = \frac{R}{R_g + R} I$$

上式表明, 在一定的分流电阻下, 通过表头的电流 I_g 与被测电流 I 成正比。所以, 只要在标度盘上按照电流刻度, 根据指针偏转就能直接指示被测电流的值。

电流表的量程 I_L 是指电流表所能测量的最大电流。显然, 当被测电流 $I = I_L$ 时, 通过表头的电流 $I = I_g$, 可得

$$R = \frac{R_g I_g}{I_L - I_g} \quad (2-13)$$

利用转换开关, 可将电流表制成多量程的, 如图 2-20 (b) 所示, 实际的万用表直流电流的测量电路如图 2-20 (c) 所示。

五、电阻的测量

万用电表可以用来测量电阻, 其原理如图 2-21 所示。表头 G 的内阻为 R_g , 满偏电流为 I_g ; R 是可变电阻, 也叫调零电阻; 电池的电动势是 E , 内阻是 r 。

当红、黑表笔相接时, 如图 2-21 (a) 所示, 调节 R 的阻值, 使

$$I_g = \frac{E}{R_g + r + R}$$

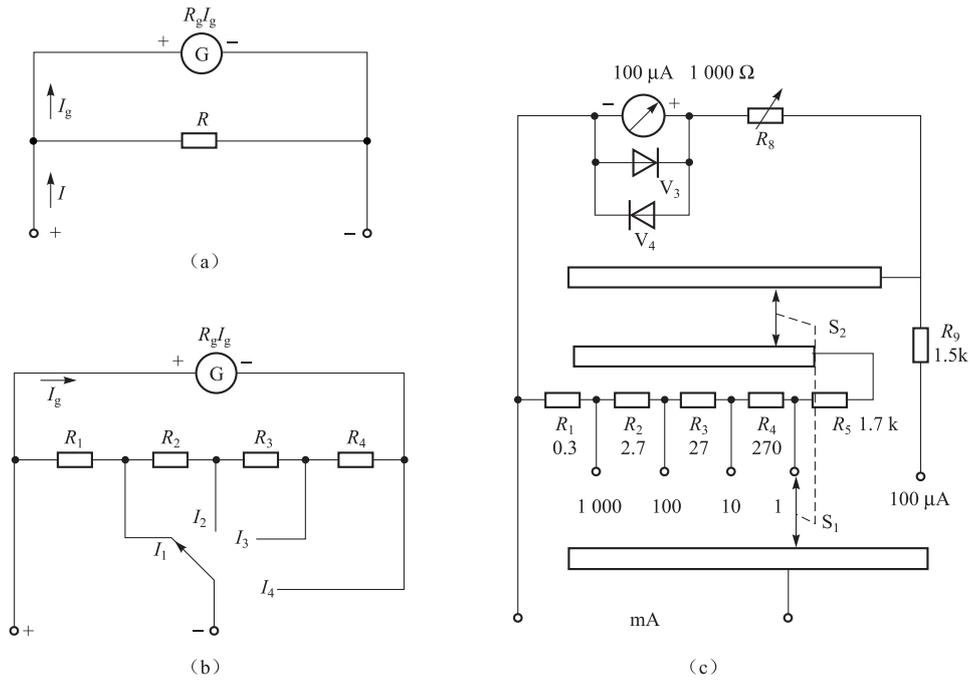


图 2-20 直流电流表的原理图

则指针满偏时,表明红、黑表笔间的电阻为零。当红、黑表笔不接触时,如图 2-21 (b) 所示,电路中没有电流,指针不偏转,表明表笔间的电阻是无穷大。当红、黑表笔间接入某一电阻 R_x 时,如图 2-21 (c) 所示,则通过电流表的电流

$$I_g = \frac{E}{R_g + r + R + R_x} \quad (2-14)$$

R_x 改变, I_g 随着改变。可见每一个 R_x 值都有一个对应的电流值 I_g 。在刻度盘上直接标出与 I_g 对应的电阻 R_x 的值,就可以从表盘上直接读出它的阻值。

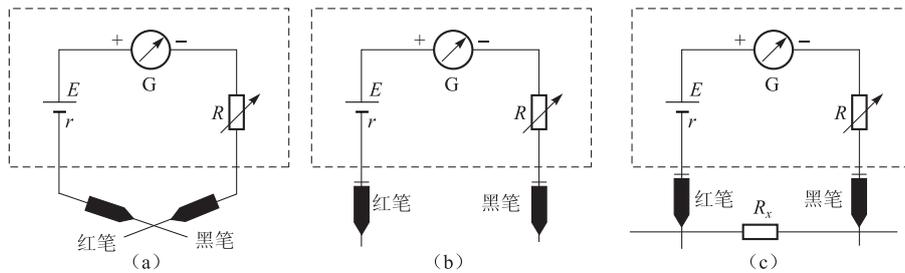


图 2-21 欧姆表的原理图

用万用表的欧姆挡来测电阻是很方便的,但是电池用久了,内阻 r 和电动势 E 都要变化,将使指示的电阻值产生很大的误差,因此,用万用表只能粗略地测量电阻。选择欧姆挡的量程时,使指针的偏转角为满偏角的 $2/3$ 以内,在该范围内测的阻值相对精度较高。

实际万用表的电路原理图如图 2-22 所示。

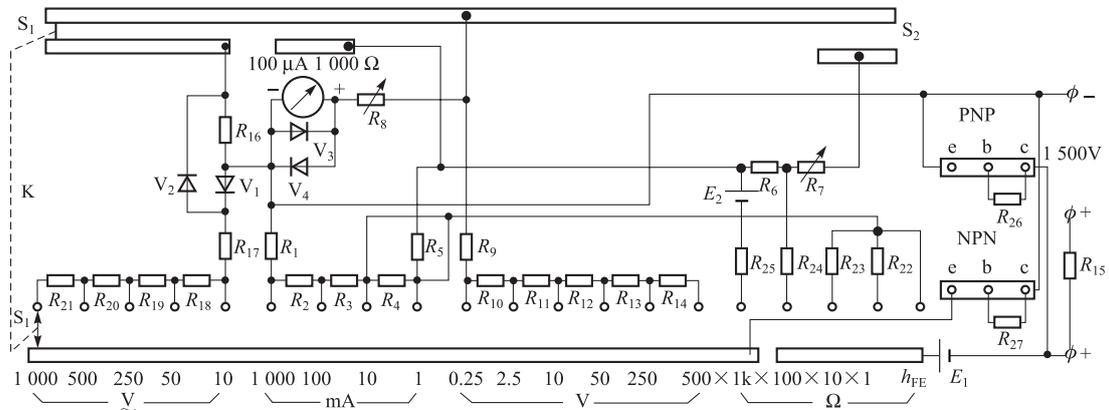


图 2-22 万用表的原理图

六、使用万用表的注意事项

正确使用万用表,需要注意以下几点:

(1) 使用前认真阅读说明书,充分了解万用表的性能,正确理解表盘上各种符号和字母的含义及各标度尺的读数,了解和熟悉转换开关等部件的作用和用法。

(2) 测量前,要观察表头指针是否处于零位(电压、电流标度尺的零点),若不在零位,则应调整表头下方的机械调零旋钮,使其指零。否则,测量结果将不准确。

(3) 测量前,要根据被测量的项目和大小,把转换开关拨到相应的挡位,并选择合适的量程挡。量程的选择,应尽量使表头指针偏转到标度尺满刻度偏转的 $2/3$ 左右。如果事先无法估计被测量的大小,可在测量中从最大量程挡逐渐减小到合适的挡次。每次拿起表笔准备测量时,一定要再校对一下测量挡位和量程。

(4) 测量时,要根据选好的挡位和量程,明确应往哪一条标度尺上读数,并应清楚标度尺上一个小格代表多大数值,读数时眼睛应位于指针正上方。对有弧形反射镜的表盘,当看到指针与镜里的像重合时,读数最准确。一般情况下,除了应读出整数外,还要根据指针的位置再估计读取一位小数。

(5) 测量直流电流及电压时,为防止指针反方向偏转,将电表接入电路时,要注意“+”、“-”端的位置。测电流时,应使被测电流从电表“+”端进去从“-”端出来;测电压时,

电表“+”端应接被测电压的正极，“-”端接负极。如果事先不知道被测电流的方向和被测电压的极性，可将任意一支表笔先接触被测电路或元器件的任意一端，另一支表笔轻轻地试触一下另一被测端，若表头指针向右（正方向）偏转，说明表笔正负极性接法正确，若表头指针向左（反方向）偏转，说明表笔极性接反了，交换表笔即可测量。

(6) 测量电流时，万用电表必须串联到被测电路中。如果将电流表误与负载并联，因它的内阻很小，近似于短路，会导致仪表被烧坏。更不可将电流表直接接在电源的两端，否则，将会造成更坏的后果。

(7) 测量电压时，万用电表必须并联在被测电压的两端。当测量高电压时，则要在测量前将电源切断，将表笔与被测电路的测试点连接好，待两手离开后，再接通电源进行读数，以保证人身安全。

(8) 测量电阻前必须先将被测电路的电源切断，绝不可在被测电路带电的情况下进行测量；接着要调整欧姆零点，每次更换倍率挡时，都应重新调整；然后将表笔跨接在被测电阻或电路的两端进行测量。

(9) 在测量过程中，严禁拨动转换开关选择量程，以免损坏转换开关触点，同时也可避免误拨到过小量程挡而撞弯指针或烧坏表头。

(10) 测量结束，应将万用电表转换开关拨到最高交流电压挡，防止下次测量时不慎损坏表头。这样做也可避免将转换开关拨到欧姆挡，两只表笔偶然相碰短路，消耗表内电池的电能。

第三节 电阻的星形与三角形连接的等效变换

如图 2-23 所示，当电桥不平衡时， R_5 电阻上有电流流过，此时电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 之间既非串联又非并联，这样就无法用我们前面介绍的知识求出其等效电阻，该如何来求复杂电路的等效变换呢？本节介绍星形和三角形连接的等效变换。

一、星形连接和三角形连接

电路中，常有三个电阻连接成如图 2-24 所示。图 2-24 (a) 中三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 其中一端连接在一起，而另一端分别通过 1、2、3 三个端钮与外电路连接，该种连接方式称为星形（Y 形）连接；图 2-24 (b) 中， R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} 三个电阻依次连接在三个节点的每两个节点之间构成一个回路的连接方式，称之为三角形（ Δ 形）连接。

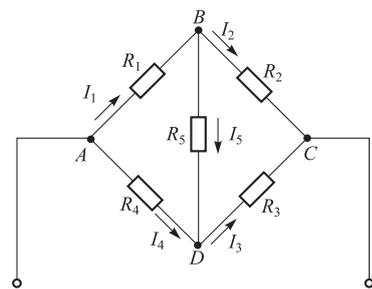


图 2-23 复杂电路

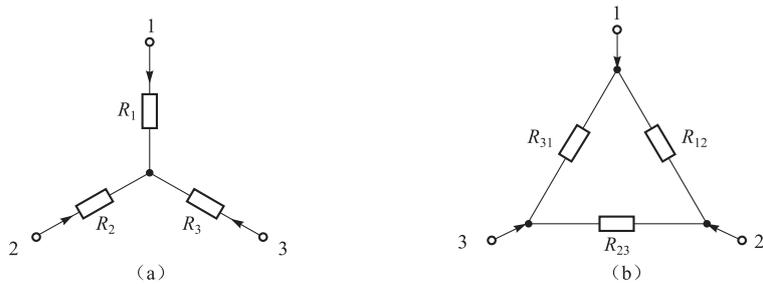


图 2-24 星形连接与三角形连接

二、电阻的星形连接和三角形连接的等效变换

电路中进行星形、三角形的等效变换的目的是将复杂电路变换成简单的串、并联电路，以便于分析和计算。如图 2-23 所示的电路中，要计算电阻 R_{AC} 就不能直接用串、并联的方法。如将连接到三个节点 A 、 B 、 D 构成三角形连接的电阻 R_1 、 R_4 、 R_5 变成星形连接，用星形连接的三个电阻 R_A 、 R_B 、 R_D 等效替换 R_1 、 R_4 、 R_5 ，如图 2-25 所示，这样就可以利用串、并联的方法计算等效电阻 R_{AC} 。

星形、三角形等效变换的原则是：任意两个端口间施加相同的电压，两电路产生相同电流（即端口特性相同）。

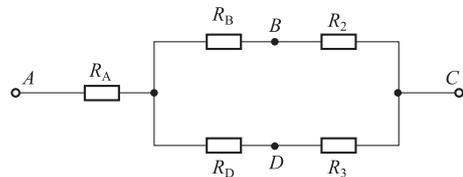


图 2-25 复杂电路变换成简单电路

1. 三角形连接等效变换成星形连接

电阻由三角形连接变换成星形连接时，即将图 2-24 (b) 变换成 (a)，已知三角形连接的阻值 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} ，求星形连接等效电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 。

按端口特性相同的原则可求得星形连接等效电阻为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}} \\ R_2 &= \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}} \\ R_3 &= \frac{R_{31} + R_{23}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}} \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

当三角形连接中三个电阻相等，即 $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$ 时，有

$$R_Y = R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1}{3}R_{\Delta}$$

2. 星形连接等效变换成三角形连接

电阻由星形连接变换成三角形连接时，即将图 2-24 (a) 变换成 (b)，已知星形连接等

效电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ，求三角形连接的阻值 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} 。

按端口特性相同的原则可求得三角形连接等效电阻为

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

当星形连接中三个电阻相等，即 $R_1=R_2=R_3=R_Y$ 时，有

$$R_{\Delta} = R_{12} = R_{23} = R_{31} = 3R_Y$$

式 (2-15) 和式 (2-16) 等效变换公式非常有规律，可结合电阻在不同电路中的表示方式来记忆。

例 2-8 求图 2-26 (a) 所示电桥的等效电阻 R_{ab} 。

解 方法一

分析：将连接到节点 1、2、3 上 Δ 连接的电阻等效变换成 Y 连接。由于 $R_{\Delta} = 6 \Omega$ ，可得

$$R_Y = \frac{1}{3} R_{\Delta} = 2 \Omega$$

等效电路如图 2-26 (b) 所示。

对应等效电阻为

$$R_{ab} = 2 + \frac{(2+6) \times (2+2)}{(2+6) + (2+2)} = \frac{14}{3} \Omega$$

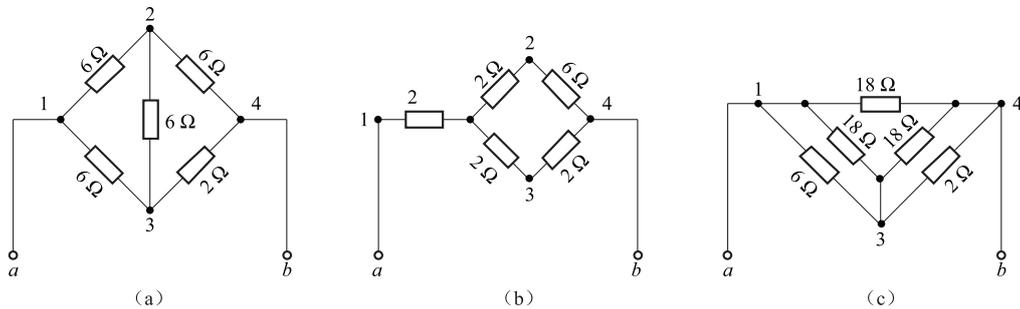


图 2-26 例 2-8 图

方法二

分析：将连接到节点 2 上 Y 形连接的电阻等效变换成 Δ 连接。由于 $R_Y=6 \Omega$ ，可得

$$R_{\Delta} = 3R_Y = 3 \times 6 = 18 \Omega$$

等效电路如图 2-26 (c) 所示。

对应等效电阻为

$$R_{ab} = \frac{\left(\frac{6 \times 18}{6 + 18} + \frac{2 \times 18}{2 + 18} \right) \times 18}{\left(\frac{6 \times 18}{6 + 18} + \frac{2 \times 18}{2 + 18} \right) + 18} = \frac{14}{3} \Omega$$

思考题：将 2Ω 的电阻改成为 6Ω ，2、3 之间的电阻还起作用吗？为什么？

综上所述，在电路分析中，不管是把星形连接等效变换成三角形连接，还是将三角形连接等效变换成星形连接，电路的分析结果是一样的。应用星形连接与三角形连接等效变换的目的是为了简化电路的分析。选择电路中的元件构成星形还是三角形连接时，要注意电路的连接关系，否则变换后可能会使下一步的分析更复杂。

自测题

1. 写出电阻的 Y 连接与 Δ 连接的等效变换公式。
2. 电路如图 2-27 所示，若求电阻 R_{ab} ，有几种等效方法？

试画出其等效电路图。

答案

2. $R_{ab} = 2.5 \Omega$

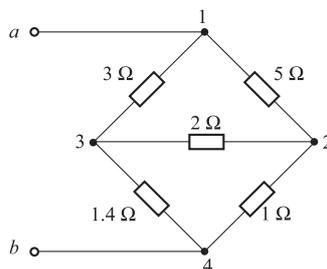


图 2-27 题 2 图

第四节 电压源、电流源的连接及等效变换

一、独立源的串联和并联

1. 电压源的串联

由 KVL 可知，当 n 个电压源串联时，如图 2-28 (a) 所示，其等效电压源的电压等于各串联电压源电压的代数和，如图 2-28 (b) 所示。即

$$u_S = u_{S1} + u_{S2} + \cdots + u_{Sn} = \sum_{k=1}^n u_{Sk} \quad (2-17)$$

如果 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向一致，式中 u_{Sk} 前面取“+”号，否则取“-”号。

2. 电流源的并联

由 KCL 可知，当 n 个电流源并联时，如图 2-29 (a) 所示，其等效电流源的电流等于各并联电流源电流的代数和，如图 2-29 (b) 所示。即

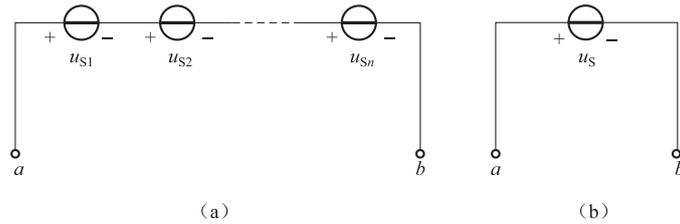


图 2-28 电压源的串联

$$i_S = i_{S1} + i_{S2} + \cdots + i_{Sn} = \sum_{k=1}^n i_{Sk} \quad (2-18)$$

如果 i_{Sk} 的参考方向与 i_S 的参考方向一致，上式中 i_{Sk} 前面取“+”号，否则取“-”号。

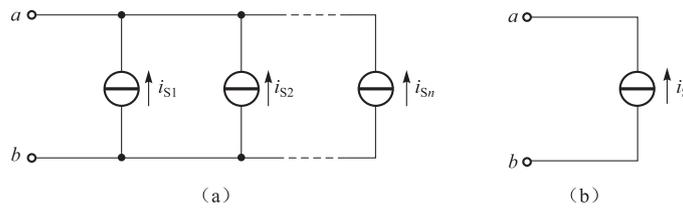


图 2-29 电流源的并联

3. 电压源的并联和电流源的串联

只有在电压值相等的电压源之间才允许同极性并联，由 KVL 可知，其等效电压源的电压为同值的电压，如图 2-30 所示。

注意：电压值不相等的电压源不能并联，否则将不满足 KVL，因而不允许存在。

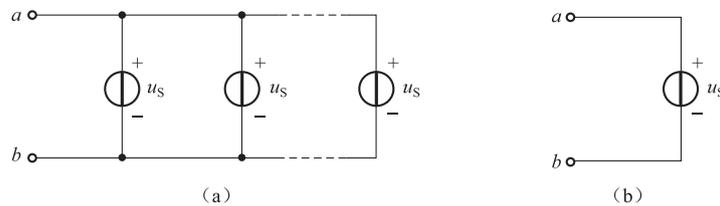


图 2-30 电压源的并联

同理，只有电流值相等的电流源才允许同方向串联，由 KCL 可知，其等效电流源的电流为同值的电流，如图 2-31 所示。

注意：电流值不相等的电流源不能串联，否则将不满足 KCL，因而不允许存在。

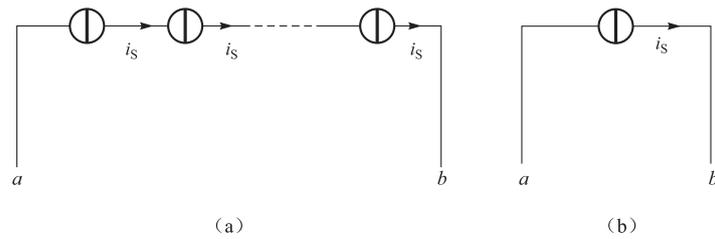


图 2-31 电流源的串联

二、独立源的等效变换

任一元件或支路与电压源 u_s 并联时，对端口电压无影响，如图 2-32 所示。根据等效变换的条件，图 2-32 (a) 所示的电路可以等效变换成图 2-32 (b) 所示的电路；图 2-32 (c) 所示的电路可以等效变换成图 2-32 (d) 所示的电路。

结论：电压源与任何线性元件或支路并联时，可等效成电压源。

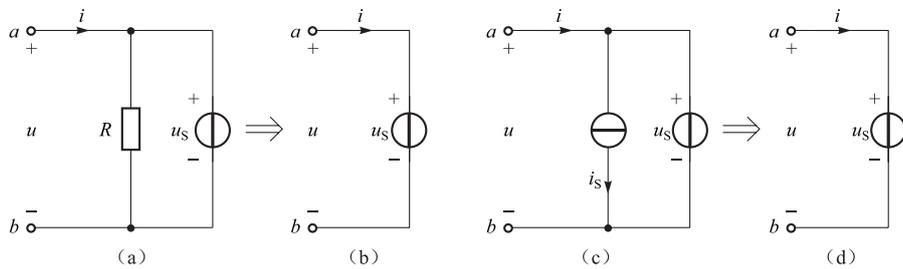


图 2-32 电压源与支路的并联

同理，任一元件或支路与电流源 i_s 串联时，对端口电流无影响，如图 2-33 所示。根据等效变换的条件，图 2-33 (a) 所示的电路可以等效变换成图 2-33 (b) 所示的电路；图 2-33 (c) 所示的电路可以等效变换成图 2-33 (d) 所示的电路。

结论：电流源与任何线性元件或支路串联时，可等效成电流源。

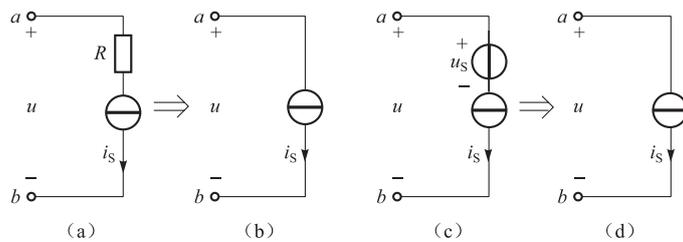


图 2-33 电流源与支路的串联

例 2-9 试求图 2-34 (a) 所示电路的最简等效电路。

解 (1) 图 2-34 (a) 中 $1\ \Omega$ 电阻、 $1\ \text{A}$ 电流源与 $4\ \text{V}$ 的电压源是并联关系, 可等效为 $4\ \text{V}$ 的电压源, 如图 2-34 (b) 所示;

(2) 图 2-34 (b) 中 $5\ \Omega$ 电阻、 $4\ \text{V}$ 电压源与 $2\ \text{A}$ 的电流源是串联关系, 可等效为 $2\ \text{A}$ 的电流源, 如图 2-34 (c) 所示。

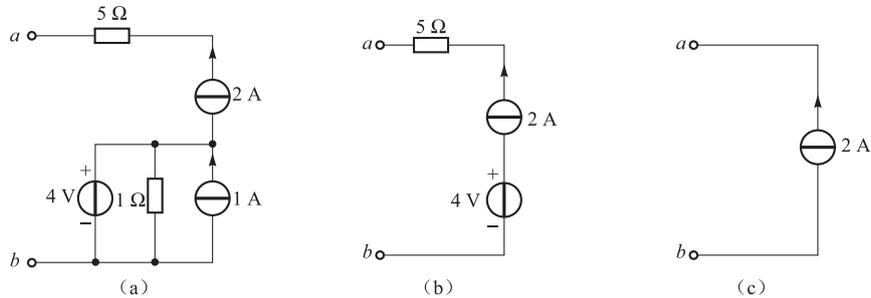


图 2-34 例 2-9 图

思考题: $5\ \Omega$ 电阻、 $1\ \Omega$ 电阻和 $1\ \text{A}$ 电流源对外电路有影响吗? 为什么?

三、实际电压源与实际电流源之间的等效变换

在实际工程中, 理想电源并不存在, 实际电源都有内阻存在。对于内阻, 在实际电压源中采用内阻与理想电压源串联的方式来表示; 实际电流源中采用内阻与理想电流源并联的方式来表示。学了独立源的等效变换之后, 大家可以想一想, 实际电压源中能否采用内阻与电压源并联的方式来表示; 电流源中能否采用内阻与电流源串联的方式来表示。

实际电压源与实际电流源的模型如图 2-35 所示。

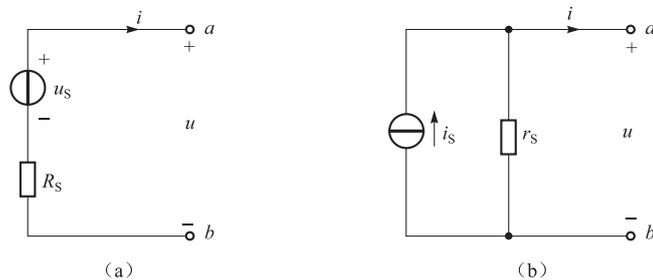


图 2-35 实际电压源与实际电流源

(a) 实际电压源; (b) 实际电流源

实际电压源的端口特性为

$$u = u_s - iR_s \quad (2-19)$$

实际电流源的端口特性为

$$i = i_s - \frac{u}{r_s} \quad (2-20)$$

1. 实际电压源转换成实际电流源

实际电压源转换成实际电流源，即电压源参数 u_s 、 R_s 已知，求等效的实际电流源参数 i_s 、 r_s 。

式 (2-20) 可转换为

$$u = i_s r_s - i r_s \quad (2-21)$$

根据等效变换的条件，比较式 (2-19) 和式 (2-21) 可知，只要满足

$$\left. \begin{aligned} r_s &= R_s \\ i_s &= \frac{u_s}{R_s} \end{aligned} \right\} \quad (2-22)$$

则图 2-35 所示两电路的外特性完全相同，两者可以互相置换。

2. 实际电流源转换成实际电压源

实际电流源转换成实际电压源，即电流源参数 i_s 、 r_s 已知，求等效的实际电压源参数 u_s 、 R_s 。

根据等效变换的条件，比较式 (2-19) 和式 (2-21) 可知，只要满足

$$\left. \begin{aligned} R_s &= r_s \\ u_s &= r_s i_s \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

则图 2-35 所示两电路的外特性完全相同，两者可以互相置换。

实际电源在等效变换时应注意以下几点：

(1) 实际电源的相互转换，只是对电源的外电路而言的，对电源内部则是不等效的。如电流源，当外电路开路时，内阻上仍有功率损耗；电压源开路时，内阻上并不损耗功率。

(2) 变换时要注意两种电路模型的极性必须一致，即电流源流出电流的一端与电压源的正极性端相对应。

(3) 实际电源的相互转换中，不仅只限于内阻，可扩展至任一电阻。凡是理想电压源与某电阻 R 串联的有源支路，都可以变换成理想电流源与电阻 R 并联的有源支路，反之亦然。

(4) 理想电压源与理想电流源不能相互等效变换。理想电压源的电压恒定不变，电流取决于外电路负载；理想电流源的电流是恒定的，电压取决于外电路负载，故两者不能等效。

在某些电路的分析计算中，利用实际电源的相互转换可使计算大为简化。

例 2-10 将图 2-36 (a) 所示的实际电压源等效变换成实际电流源。

解 由式 (2-22) 可得

$$r_s = 2 \Omega$$

$$i_s = \frac{u_s}{R_s} = \frac{4}{2} = 2 \text{ A}$$

所以等效的实际电流源如图 2-36 (b) 所示。

思考题：将电压源的电压极性变为下正上负，相应的等效电流源将如何变动？可以得出什么结论？

例 2-11 将图 2-37 等效变换成实际电压源。

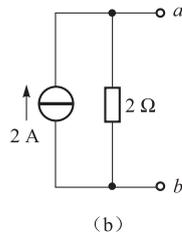
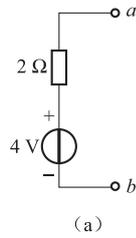


图 2-36 例 2-10 图

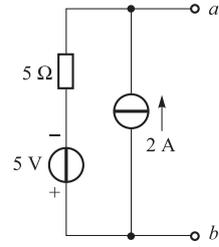


图 2-37 例 2-11 图

解 (1) 将实际电压源等效变换为实际电流源，如图 2-38 (a) 所示；

(2) 1 A 与 2 A 电流源并联成一个电流源，如图 2-38 (b) 所示；

(3) 将实际电流源转换为实际电压源，如图 2-38 (c) 所示。

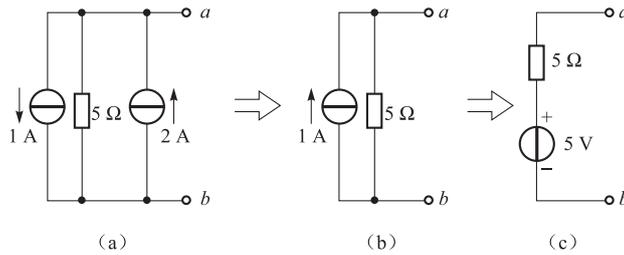


图 2-38 例 2-11 等效变换图

思考题：将 5 Ω 的电阻改为 10 Ω 电阻重解该题。

例 2-12 化简如图 2-39 (a) 所示电路，并求电流 I 。

解 利用电源的等效变换，可以将图 2-39 (a) 经 (b)、(c)、(d) 等效变换成为 (e)。由图 2-39 (e) 可得

$$I = \frac{9}{4+5} = 1 \text{ A}$$

思考题：如果将 3 Ω 电阻去掉，重解该题。

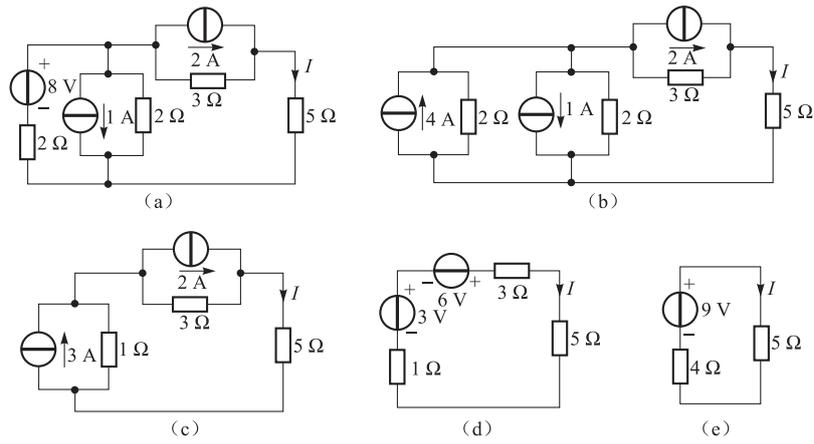


图 2-39 例 2-12 图

自测题

1. 等效化简图 2-40 所示的电路。

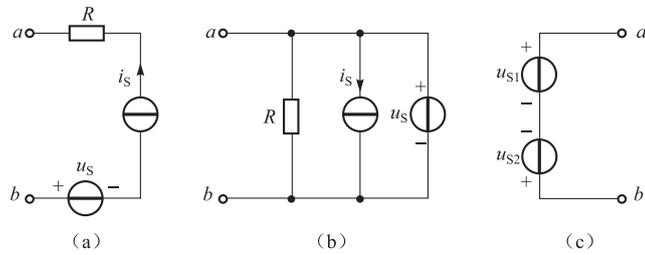


图 2-40 题 1 图

2. 如果图 2-41 所示的电路存在，应满足什么条件？如何化简呢？

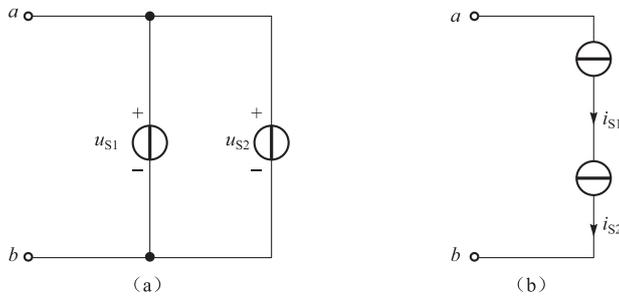
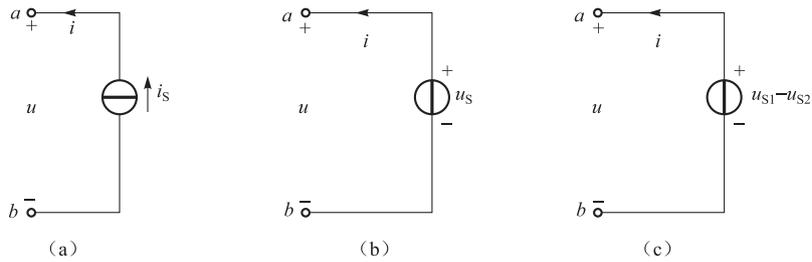


图 2-41 题 2 图

答案

1. 等效电路如图所示



2. (a) 电压源的电压相等。
 (b) 电流源的电流相等。

习 题 2

1. 一个额定值为 200 V、40 W 的灯泡和一个额定值为 200 V、80 W 的灯泡串联接到 200 V 的直流电源上，每个灯泡的实际功率是多少？电源输出功率是多少？若把这两个灯泡并联，情况又如何？

2. 求图 2-42 中各电路的等效电阻 R_{ab} 。

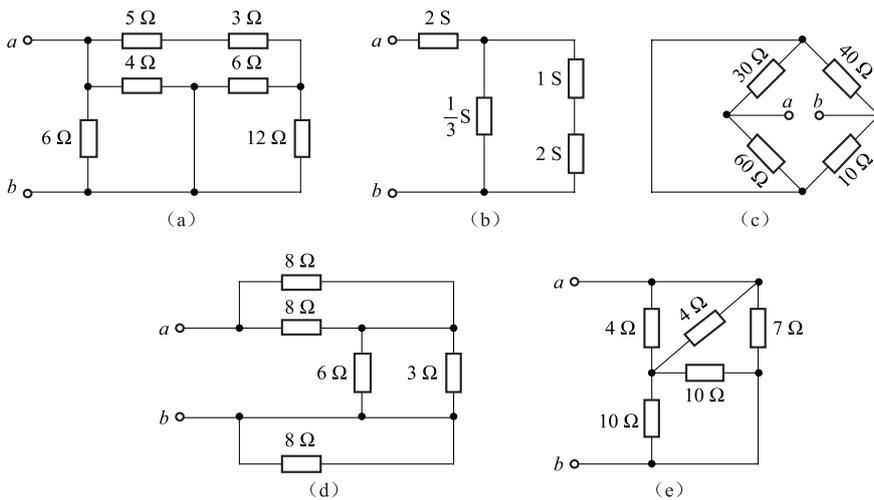


图 2-42 题 2 图

3. 如图 2-43 所示电路是直流电动机的一种调速电阻电路。该调速电阻电路由四个固定电阻串联而成。利用几个开关的闭合和断开，可得到多种电阻值。设四个电阻都是 $10\ \Omega$ ，试

求在下列三种情况下， a 、 b 两点间的电阻值。

- (1) S_1 和 S_5 闭合，其他开关断开；
- (2) S_2 、 S_3 和 S_5 闭合，其他开关断开；
- (3) S_1 、 S_3 和 S_4 闭合，其他开关断开。

4. 利用 Y- Δ 等效变换的方法，求图 2-44 中电桥的等效电阻 R_{ab} 。

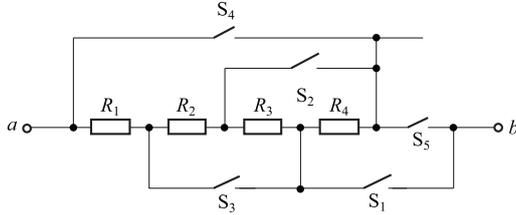


图 2-43 题 3 图

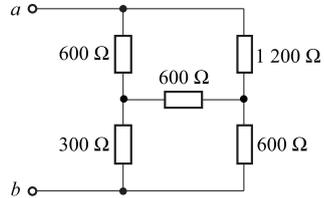


图 2-44 题 4 图

5. 如图 2-45 所示的双 Y 形电路，求开关 S 闭合及断开时 a 、 b 两端的等效电阻。

6. 如图 2-46 所示，求等效电阻 R_{ab} 。

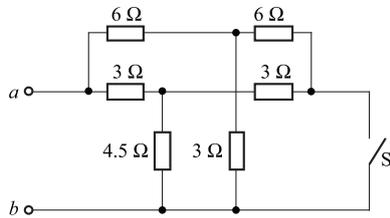


图 2-45 题 5 图

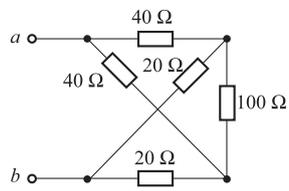


图 2-46 题 6 图

7. 试用电源等效变换法求图 2-47 中电流 i 。

8. 利用等效变换概念求图 2-48 所示电路中电流 I 。

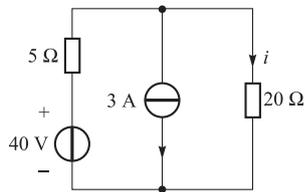


图 2-47 题 7 图

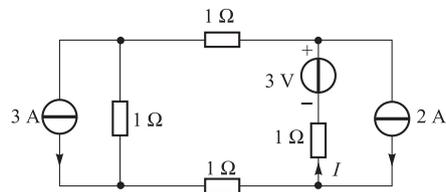


图 2-48 题 8 图

9. 如图 2-49 所示，试用电源等效变换法求电流 i 。已知 $u_{S1}=128\text{ V}$ ， $u_{S2}=124\text{ V}$ ， $i_S=1\text{ A}$ ， $R_1=8\ \Omega$ ， $R_2=4\ \Omega$ ， $R_L=4\ \Omega$ 。

10. 如图 2-50 所示电路，若 $u_2=4\text{ V}$ ，求 u_1 ， i 和 u_S ；

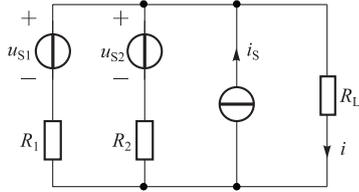


图 2-49 题 9 图

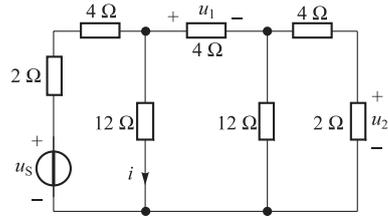


图 2-50 题 10 图

11. 如图 2-51 所示电路, 是电阻应变仪中的电桥电路。 R_1 是电阻丝, 黏附在被测零件上。当零件发生变形时, R_1 的阻值将发生变化, 毫伏计给出指示。在测量前将各电阻值调节到 $R_1=R_2=100 \Omega$, $R_3=R_4=200 \Omega$, 电源电压 $u_S=2 \text{ V}$, 这时电桥平衡, 毫伏计指示为零。假设毫伏计内阻为无限大, 试计算当毫伏计指示在 $-1 \sim 1 \text{ mV}$ 区间时, 电阻 R_1 的变化值 ΔR_1 (已知 $\Delta R_1 \ll R_1$)。

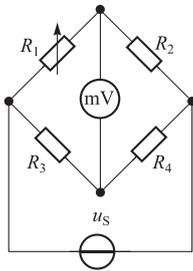


图 2-51 题 11 图

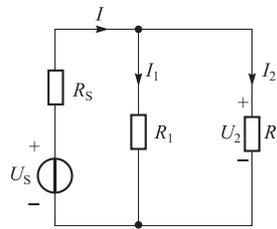


图 2-52 题 12 图

13. 如图 2-53 所示电路中, 已知 $u_{S1}=20 \text{ V}$, $u_{S2}=30 \text{ V}$, $i_{S1}=8 \text{ A}$, $i_{S2}=17 \text{ A}$, $R_1=5 \Omega$, $R_2=10 \Omega$, $R_3=10 \Omega$ 。利用电源的等效变换求图中的电压 u_{ab} 。

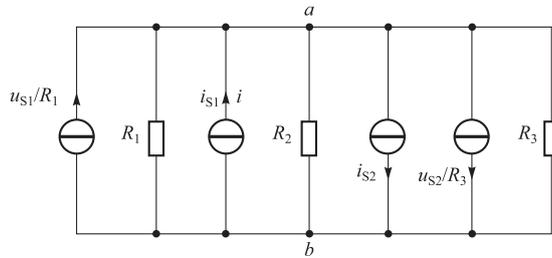


图 2-53 题 13 图

答案

1. 串联时: $P_{40\text{W}} = \frac{160}{9} \text{ W}$ $P_{80\text{W}} = \frac{80}{9} \text{ W}$ $P_{\text{电源}} = \frac{80}{3} \text{ W}$

并联时: $P_{40\text{W}} = 40 \text{ W}$ $P_{80\text{W}} = 80 \text{ W}$ $P_{\text{电源}} = 120 \text{ W}$

2. (a) $R_{ab}=2 \Omega$ (b) $R_{ab}=1.5 \Omega$ (c) $R_{ab}=28 \Omega$ (d) $R_{ab}=6 \Omega$ (e) $R_{ab}=3.5 \Omega$

3. (1) $R_{ab}=30 \Omega$ (2) $R_{ab} = \frac{40}{3} \Omega$ (3) $R_{ab}=5 \Omega$

4. $R_{ab}=600 \Omega$

5. 开关 S 闭合时: $R_{ab}=3 \Omega$; 开关 S 断开时: $R_{ab}=4 \Omega$

6. $R_{ab}=30 \Omega$

7. $i=1 \text{ A}$

8. $I=3 \text{ A}$

9. $i=19.2 \text{ A}$

10. $u_1=12 \text{ V}$ $i=2 \text{ A}$ $u_S=54 \text{ V}$

11. $-0.2 \Omega \leq \Delta R_1 \leq +0.2 \Omega$

12. $I_2 = 0.004 \text{ A}$

13. $u_{ab} = -20 \text{ V}$

实验三 电源外特性的测试及等效变换

一、实验目的

- (1) 掌握电源外特性的测试方法。
- (2) 验证电压源与电流源等效变换的条件。

二、实验仪器

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30 V	1	
2	可调直流恒流源	0~200 mA	1	
3	直流数字电压表	0~200 V	1	
4	直流数字毫安表	0~200 mA	1	
5	万用表		1	自备
6	电阻器	51 Ω , 200 Ω 300 Ω , 1 k Ω		DGJ-05
7	可调电阻箱	0~99 999.9 Ω	1	DGJ-05

三、实验原理

(1) 一个直流稳压电源在一定的电流范围内，具有很小的内阻。故在实用中，常将它视为一个理想的电压源，即其输出电压不随负载电流而变。其外特性曲线，即其伏安特性曲线 $U=f(I)$ 是一条平行于 I 轴的直线。实际的恒流源在一定的电压范围内，可视为一个理想的电流源。

(2) 一个实际的电压源（或电流源），其端电压（或输出电流）不可能不随负载而变，因它具有一定的内阻值。故在实验中，用一个小阻值的电阻（或大电阻）与稳压源（或恒流源）相串联（或并联）来模拟一个实际的电压源（或电流源）。

(3) 一个实际的电源，就其外部特性而言，既可以看成是一个电压源，又可以看成是一个电流源。若视为电压源，则可用一个理想的电压源 U_S 与一个电阻 R_0 相串联的组合来表示；若视为电流源，则可用一个理想电流源 I_S 与一电导 g_0 相并联的组合来表示。如果这两种电源能向同样大小的负载供出同样大小的电流和端电压，则称这两个电源是等效的，即具有相同的外特性。

(4) 一个电压源与一个电流源等效变换的条件为

$$I_S = U_S / R_0, \quad g_0 = 1 / R_0 \quad \text{或} \quad U_S = I_S R_0, \quad R_0 = 1 / g_0。$$

如图 2-54 所示。

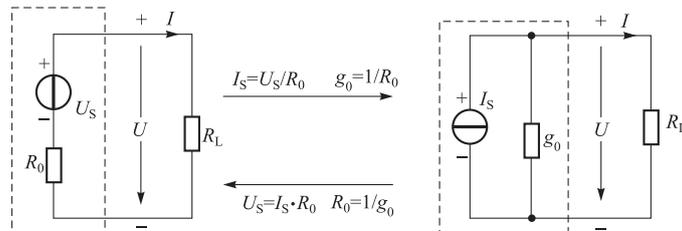


图 2-54

四、实验内容

1. 测定直流稳压电源与实际电压源的外特性

(1) 按图 2-55 接线。 U_S 为 +6 V 直流稳压电源。调节 R_2 ，令其阻值由大至小变化，记录两表的读数。

U/V							
I/mA							

(2) 按图 2-56 接线，虚线框可模拟为一个实际的电压源。调节 R_2 ，令其阻值由大至小

变化，记录两表的读数。

U/V							
I/mA							

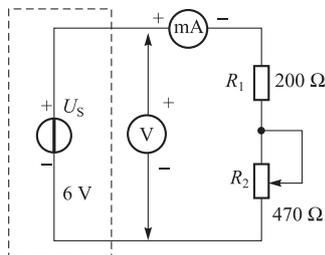


图 2-55

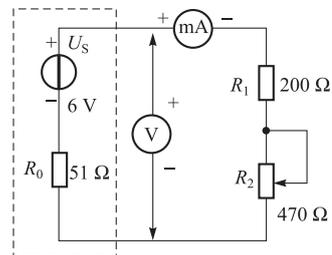


图 2-56

2. 测定电流源的外特性

按图 2-57 接线， I_S 为直流恒流源，调节其输出为 10 mA，令 R_0 分别为 1 k Ω 和 ∞ （即接入和断开），调节电位器 R_L （从 0 至 470 Ω ），测出这两种情况下的电压表和电流表的读数。自拟数据表格，记录实验数据。

3. 测定电源等效变换的条件

先按图 2-58 (a) 线路接线，记录线路中两表的读数。然后利用图 2-58 (a) 中右侧的元件和仪表，按图 2-58 (b) 接线。调节恒流源的输出电流 I_S ，使两表的读数与 2-58 (a) 时的数值相等，记录 I_S 的值，验证等效变换条件的正确性。

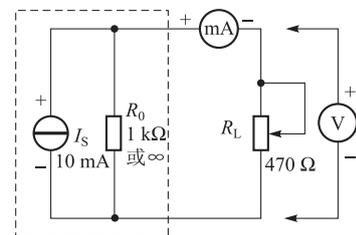
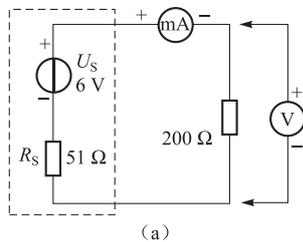
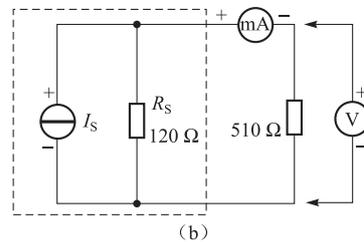


图 2-57



(a)



(b)

图 2-58

五、实验注意事项

(1) 在测电压源外特性时，不要忘记测空载时的电压值；测电流源外特性时，不要忘记

测短路时的电流值，注意恒流源负载电压不要超过 20 V，负载不要开路。

- (2) 换接线路时，必须关闭电源开关。
- (3) 直流仪表的接入应注意极性与量程。

六、思考题

- (1) 通常直流稳压电源的输出端不允许短路，直流恒流源的输出端不允许开路，为什么？
- (2) 电压源与电流源的外特性为什么呈下降变化趋势，稳压源和恒流源的输出在任何负载下是否保持恒值？

七、实验报告

- (1) 根据实验数据绘出电源的四条外特性曲线，并总结、归纳各类电源的特性。
- (2) 由实验结果，验证电源等效变换的条件。
- (3) 心得体会及其他。

阅读材料一

电阻的测量

电工测量中对电阻的测量，按阻值的大小可以分为小电阻测量、中等电阻测量和大电阻的测量。常用的仪表有：欧姆表（万用表欧姆挡）、电桥（惠斯通电桥、开尔文电桥）和兆欧表等。欧姆表主要用于中等电阻的测量，其测量方法简便但误差较大，广泛应用于一般的测量；电桥主要用于电阻的精确测量，精确测量小电阻时用双电桥，精确测量中等电阻时用单电桥，电桥测电阻时操作比较麻烦；兆欧表用于测量绝缘电阻。此外，还可以采用伏安法测量电阻。

一、伏安法

伏安法是用电压表测出电阻两端的电压，用电流表测出流过电阻的电流，再利用欧姆定理求得电阻阻值。

伏安法测量电阻在原理上很简单，但由于在电路中接入了电压表和电流表，测量仪表的内阻（理想的情况下电压表的内阻可以看作为无穷大，电流表的内阻看作为零，但实际的电压表和电流表并非如此）改变了电路的状态，给测量带来了误差。因此，根据被测电阻阻值的大小，电压表和电流表有两种接入方式，即电流表外接法 [图 2-59 (a)] 和电流表内接法 [图 2-59 (b)]。

电流表外接法中由于电压表的分流，电流表测的电流比流过电阻的实际电流要大些，计算出的电阻值比实际阻值小；电流表内接法中由于电流表的分压作用，电压表测的电压比电

阻两端的实际电压要大，计算出的电阻值比实际阻值大。

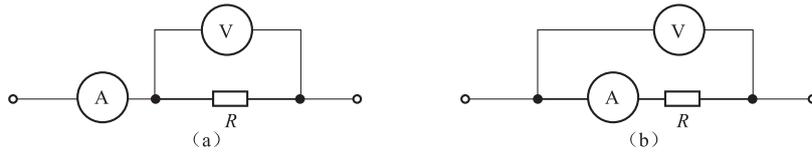


图 2-59 伏安法

二、惠斯通电桥

图 2-60 (a) 所示的电路为电桥电路。在电桥电路中， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 电阻所在的支路称为电桥的桥臂， B 、 D 两点间称为电桥的桥。通过调整桥臂各电阻的阻值可以实现无论桥放下 (BD 短路) 或升起 (BD 开路) 都不影响电路状态，该种情况称为电桥平衡。

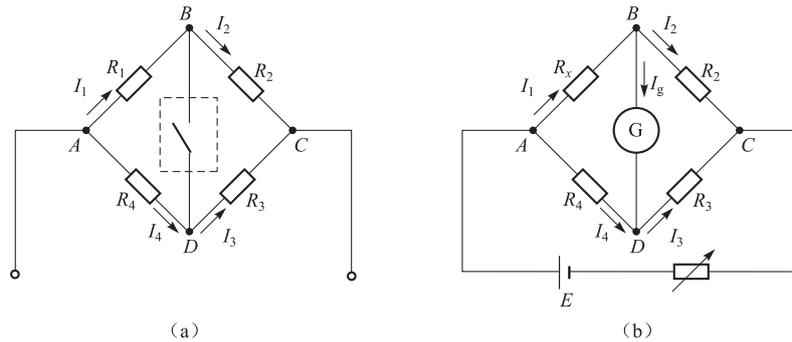


图 2-60 电桥电路和惠斯通电桥

电桥平衡时，桥臂电阻之间的关系为

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

即：相对的桥臂电阻乘积相等，此为电桥的平衡条件。

也可以写成为

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

直流单臂电桥又称为惠斯通电桥，适用于中等电阻的测量 ($1 \sim 10^6 \Omega$)。惠斯通电桥是用电桥平衡来测量电阻，电路如图 2-60 (b) 所示。桥臂电阻中 R_2 、 R_3 、 R_4 是阻值已知的电阻； R_x 为待测电阻； G 是灵敏电流计，用来比较 B 、 D 两点的电位。调节已知电阻的阻值，使通过检流计的电流 $I_g = 0$ (即 B 、 D 两点的电位相同) 时，表明电桥平衡。由电桥平衡的条件可知

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} R_4 \quad (2-24)$$

QJ-23 型直流单电桥面板右下角有一对标有“ R_x ”的接线柱，用于连接待测电阻。其左侧是电源支路开关“ S_B ”和检流计支路开关“ S_G ”。电桥内附检流计，也可以外接检流计。选用内附检流计时，用短接片将左下方 3 个接线柱的中间接线柱和标有“外接”的接线柱短接。如果选用外接检流计，需用短接片将中间接线柱和标有“内接”的接线柱短接，外接的检流计接在中间接线柱和“外接”接线柱之间。电桥内附电源为 3 节 1.5 V 干电池，面板左上方的“+”和“-”接线柱可供外接电源时使用。

QJ-23 型直流单电桥的使用方法如下：

- (1) 平稳放置电桥，开关“ S_B ”和“ S_G ”处于断开状态；打开检流计锁扣（锁扣用于锁住可动部分，防止搬动时损坏检流计的悬丝），调节调零器使指针指向零；
- (2) 用短而粗的导线连接待测电阻，注意接线处应保持良好的接触；
- (3) 根据待测电阻的估计值（电阻上的标注值或万用表测得），选择合适的倍率挡，原则是应使比较臂的四个电阻在测量时全部用上，以提高测量准确度；
- (4) 根据选好的倍率挡，置比较臂于估算值；
- (5) 按下电源支路开关“ S_B ”，再点按检流计支路开关“ S_G ”，调整比较臂电阻，直至检流计的指针指向零为止；
- (6) 根据面板各旋钮的位置正确读数，待测电阻为倍率值与比较臂阻值的乘积；
- (7) 测量结束，先断开开关“ S_G ”，再断开开关“ S_B ”，最后锁上检流计锁扣。

例 2-13 某电阻上标注的标称电阻为 $21\text{ k}\Omega$ ，单电桥测量时，倍率挡选 10^2 ，比较臂置 0 215 时平衡，此测量方法是否正确？

解 此种测量方法不正确。单电桥测量电阻的原则是应使比较臂的 4 个电阻全部用上，因此，倍率挡该选用 10^1 挡，使比较臂有四位读数，假定此时比较臂为 2 151，比较两种情况有

- (1) 倍率挡为 10^2 ，比较臂读数为 0 215 时

$$R_x = 0\ 215 \times 10^2 = 21\ 500\ \Omega$$

- (2) 倍率挡为 10^1 ，比较臂读数为 2 152 时：

$$R_x = 2\ 152 \times 10 = 21\ 520\ \Omega$$

可见，倍率挡选用 10^1 时，测量更精确。

严格地说， R_x 还应包括连接待测电阻导线的电阻和连接点的接触电阻，由于该部分电阻的阻值很小，与 R_x 相比通常可以忽略不计。