

第一篇 电工技术

电工电子技术是高等学校工科非电类专业的一门技术基础课程，它主要研究电工技术和电子技术的理论与应用。

电工技术包括电路、电机及电器控制技术三部分。作为技术类基础课程，在学习时应着重关注其基础性、应用性和先进性。

基础性指电工电子技术研究的是电工电子的基本理论、基本知识和基本技能。因此，电工技术应为非电类专业学生后续专业课程的学习打下基础，也为自学、深造、拓宽和创新打下基础。

应用性指非电类专业学生学习电工技术重在应用。他们应具有将电工技术应用于本专业和发展本专业的能力，因此电工技术课程内容要理论联系实际；要重视实验技能的训练；要从国情实际出发，培养学生的分析和解决实际问题的能力。

先进性指电工技术要反映现代电工技术的发展水平。因此，电工电子技术课程内容和体系要随着电工技术的发展、工科专业的教学需要而不断更新和改革。

第 1 章 直流电路

本章主要讨论电路的基本物理量、电路的基本定律以及应用它们分析与计算各种直流电路的方法和电路中电位的计算等。这些问题虽然在直流电路中提出，但也适用于交流电路，它们是分析、计算电路的基础理论。其中有些内容虽然以前在物理课程中讲过，但为了加强理论的系统性和满足电工技术的需要，仍列入本章中，以便读者在温故知新的基础上，进一步巩固和加深对这些内容的理解，并能充分地应用和扩展这些内容。

知识点和学习要求

(1) 了解电路的基本组成及各部分的作用，熟悉电气设备额定值及电路工作状态；了解电路模型基本概念；了解理想电路元件与实际元器件的区别；牢固掌握线性元件的伏安特性；正确认识理想电压源和理想电流源的概念及特点；熟悉电源模型与实际电源的对应关系及电源模型之间的等效互换方法等。

(2) 认识电压、电流参考（正）方向在电路分析中的重要性；掌握电压、电流实际方向与参考方向的联系；掌握电能与电功率概念的不同点；理解电流的热效应，了解电流的热效应在实际工程中和实际生活中的应用。

(3) 理解基尔霍夫电流和电压定律的内容及其扩展应用；掌握应用以上两个定律分析一般电路的方法和技能。

(4) 掌握叠加定律和戴维南定理分析电路的步骤和适用场合，并能应用它们对电路进行分析和计算。

1.1 电路的组成及基本物理量

1.1.1 电路的组成

电路是由各种电气设备按一定方式用导线连接组成的总体，它提供了电流通过的闭合路径。这些电气设备包括电源、开关、负载等。

电源是把其他形式的能量转换为电能的装置，例如，发电机将机械能转换为电能。

负载是取用电能的装置，它把电能转换为其他形式的能量。例如，电动机将

电能转换为机械能，电热炉将电能转换为热能，电灯将电能转换为光能。图 1.1 为一简单电路。导线和开关用来连接电源和负载，为电流提供通路，把电源的能量供给负载，并根据负载需要接通和断开电路。

电路的功能和作用有两类：第一类功能是进行**能量的转换、传输和分配**，例如，供电电路；第二类功能是进行**信号的传递与处理**，例如，扩音机的输入是由声音转换而来的电信号，通过晶体管组成的放大电路，输出的便是放大的电信号，从而实现信号的放大功能。电视机可将接收到的信号，经过处理转换成图像和声音。

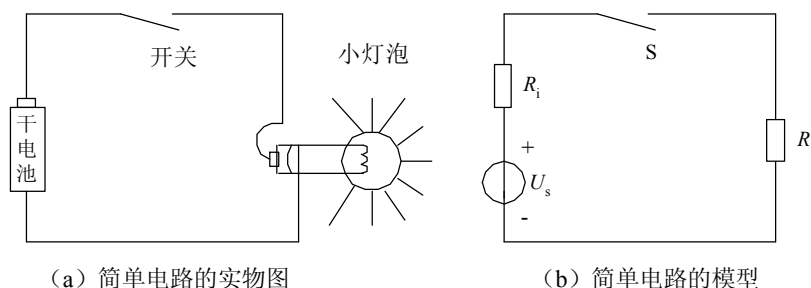


图 1.1 简单电路

1.1.2 电路的基本物理量

1. 电流

电流是由电荷的定向移动形成的。当金属导体处于电场内时，自由电子要受到电场力的作用，逆着电场的方向作定向移动，这就形成了电流。我们称其大小和方向均不随时间变化的电流为恒定电流，简称**直流**。

电流的强弱用**电流强度**来表示，电流强度 i 用单位时间内通过导体截面的电量 q 来表示，即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

如果电流不随时间而变化，即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$ ，则这种电流称为直流电流。直流电流用大写字母 I 表示，此时式 (1-1) 可以写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

我国的法定计量单位是以国际单位制 (SI) 为基础的。在国际单位制中，电流的单位是 A (安[培])。在 1 秒内通过导体横截面的电荷为 1C (库[仑]) 时，其

电流则为 1A。

计算微小电流时, 电流的单位用 mA (毫安)、 μA (微安) 或 nA (纳安), 其换算关系为

$$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}, 1\text{nA}=10^{-9}\text{A}$$

习惯上, 规定正电荷的运动方向表示电流的实际方向。在外电路, 电流由正极流向负极; 在电源内部, 电流由负极流向正极。

在简单电路中, 电流的实际方向可由电源的极性确定; 在复杂电路中, 电流的方向有时难以事先确定。为了分析电路的需要, 我们便引入了电流的参考方向 (也称为正方向) 的概念。

在进行电路计算时, 先任意选定某一方向作为待求电流的参考方向 (或称为正方向), 并根据此正方向列写方程、进行计算。若计算得到结果为正值, 说明了电流的实际方向与选定的正方向相同; 若计算得到结果为负值, 说明电流的实际方向与选定的正方向相反。图 1.2 表示电流的参考方向 (图中实线所示) 与实际方向 (图中虚线所示) 之间的关系。电流的参考方向也可以用字母表示, 如 i_{ab} 表示电流的参考方向从 a 到 b , i_{ba} 表示电流的参考方向从 b 到 a , 如图 1.2 (c)、(d) 所示。因 i_{ab} 与 i_{ba} 相差一个负号, 故

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-3)$$

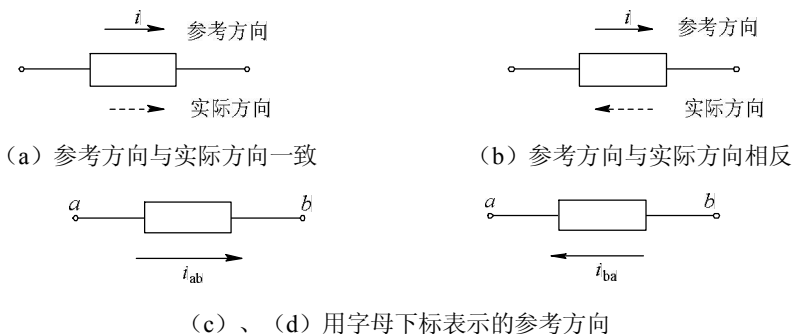


图 1.2 电流的方向

2. 电压

电场力把单位正电荷从电场中点 A 移到点 B 所做的功 W_{AB} 称为 A 、 B 间的电压, 用 u_{AB} 表示, 即

$$u_{AB} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta q} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-4)$$

在 SI 中, 电压的单位为 V (伏[特])。如果电场力把 1C 电量从点 A 移到点 B

所做的功是 1J (焦耳), 则 A 与 B 两点间的电压就是 1V。

计算较大的电压时用 kV (千伏), 计算较小的电压时用 mV (毫伏)。其换算关系为

$$1\text{kV}=10^3\text{V}, 1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$$

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 即由 “+” 极指向 “-” 极, 因此, 在电压的方向上电位是逐渐降低的。

电压总是相对两点之间的电位而言的, 所以可用双下标表示, 前一个下标 (如 A) 代表起点, 后一个下标 (如 B) 代表终点。电压的方向则由起点指向终点, 有时用箭头在图上标明。当标出的参考方向与电压的实际方向相同时, 见图 1.3 (a), 电压为正值; 当标出的参考方向与实际电压方向相反时, 见图 1.3 (b), 电压为负值。

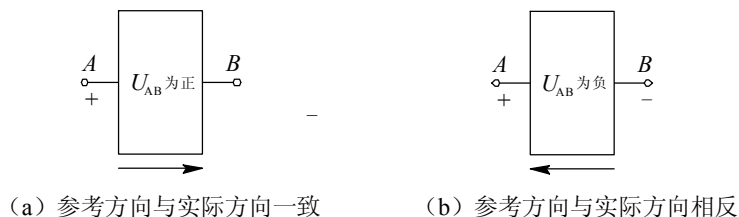


图 1.3 电压的正负与实际方向

小提示: 对于电路中的一个元件, 若电压、电流的参考方向取向相同称为**关联参考方向**; 若电压、电流的参考方向取向相反称为**非关联参考方向**。

3. 电动势

为了维持电路中有持续不断的电流, 必须有一种外力, 把正电荷从低电位处 (如负极 B) 移到高电位处 (如正极 A)。在电源内部就存在着这种外力。

如图 1.4 所示, 在电源内部, 外力克服电场力把单位正电荷由低电位 B 端移到高电位 A 端, 所做的功称为**电动势**, 用 E 表示。电动势的单位也是 V。如果外力把 1C 的电量从点 B 移到点 A , 所做的功是 1J, 则电动势就等于 1V。

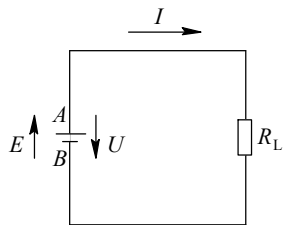


图 1.4 电动势

电动势的实际方向规定为从低电位指向高电位, 即由“-”极指向“+”极。

4. 电功率

在直流电路中, 根据功的定义, 电场力所做的功是 $W=IUt$ 。单位时间内电场力所做的功称为电功率, 则

$$P = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-5)$$

在 SI 中, 功率的单位是 W (瓦[特])。对于大功率, 常采用 kW (千瓦) 或 MW (兆瓦) 作单位; 对于小功率, 则用 mW (毫瓦) 或 μ W (微瓦) 作单位。

在电源内部, 外力做功, 正电荷由低电位移向高电位, 电流逆着电场方向流动, 将其他形式的能量转变为电能, 其电功率为

$$P = EI \quad (1-6)$$

小提示: 对于电路中的某一支路, 如果电流、电压选用关联参考方向, 则所得的 P 应看成支路接收的功率, 计算所得功率为负值时, 表示支路实际发出的功率。如果电流、电压选用非关联参考方向, P 应看成支路发出的功率, 即计算所得功率为正值时, 表示支路实际发出的功率; 计算所得功率为负值时, 表示支路接收的功率。故对于电路中的一个元件, 在电压、电流取关联参考方向时, 若计算结果 $P>0$, 说明该元件是耗能元件; 若计算结果 $P<0$, 说明该元件是供能元件。

当已知设备的功率为 P 时, 在 t 秒内消耗的电能为

$$W = Pt$$

电能就等于电场力所做的功, 单位是 J (焦[耳])。在电工技术中, 往往直接用 W·s (瓦特秒) 作单位, 实用上则用 kW·h (千瓦小时) 作单位, 俗称 1 度电。

$$1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\times 10^6\text{W}\cdot\text{s}$$

1.2 欧姆定律及电路模型

欧姆定律指出: 导体中的电流 I 与加在导体两端的电压 U 成正比, 与导体的电阻 R 成反比。

1.2.1 一段电路的欧姆定律

图 1.5 所示电路是不含电动势, 只含电阻的一段电路。

若 U 与 I 参考方向一致, 如图 1.5 (a) 所示, 则欧姆定律表示为

$$U=IR \quad (1-7)$$

若 U 与 I 参考方向相反, 如图 1.5 (b) 所示, 则欧姆定律表示为

$$U=-IR \quad (1-8)$$

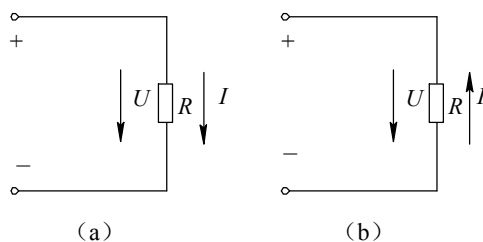


图 1.5 一段电路

在 SI 中, 电阻的单位是 Ω (欧[姆]), 计量大电阻时用 $k\Omega$ (千欧) 或 $M\Omega$ (兆欧)。其换算关系为

$$1k\Omega=10^3\Omega, 1M\Omega=10^6\Omega$$

通常, 我们把电阻的倒数称为电导, 即

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

在 SI 中, 它的单位为 S (西[门子])。

1.2.2 全电路的欧姆定律

图 1.6 所示是简单的闭合电路, R_L 为负载电阻, R_0 为电源内阻, 若略去导线电阻不计, 则此段电路应用欧姆定律为

$$I=\frac{E}{R_L+R_0} \quad (1-9)$$

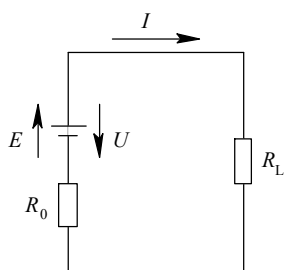


图 1.6 简单的闭合电路

式 (1-9) 的意义是: 电路中流过的电流, 其大小与电动势成正比, 与电路的全部电阻成反比。电源的电动势和内电阻一般认为是不变的, 所以, 改变外电路电阻就可以改变回路中的电流大小。

1.2.3 理想电路元件及电路模型

1. 理想电路元件

在一定条件下对实际器件加以理想化，只考虑其起主要作用的某些电磁现象。

理想**电路元件**是一种理想化的模型，简称为电路元件。**电阻元件**是一种只表示消耗电能的元件，**电感元件**是表示其周围空间存在着磁场而可以存储磁场能量的元件，**电容元件**是表示其周围空间存在着电场而可以存储电场能量的元件等，如图 1.7 所示。

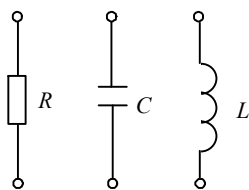


图 1.7 理想电路元件

对具有两个引出端的元件，称为**二端元件**；对具有两个以上引出端的元件，称为**多端元件**。

2. 电路模型

实际电路设备可以用一个或若干个理想电路元件经理想导体连接来模拟，这种模拟电路称为实际电路设备的**电路模型**。如一个干电池，可以用一个理想电压源和一个电阻串联表示。灯泡可用一个理想电阻表示，如图 1.1 (b) 所示。

3. 线性电阻、非线性电阻

在温度一定的条件下，把加在电阻两端的电压与通过电阻电流之间的关系称为**伏安特性**。

一般金属电阻的阻值不随所加电压和通过的电流而改变，即在一定的温度下其阻值是常数。这种电阻的伏安特性是一条经过原点的直线，如图 1.8 (a) 所示，这种电阻称为**线性电阻**。其电路模型可用一个理想电阻表示。由图 1.8 (a) 可见，线性电阻遵守欧姆定律。

电阻的电阻值随电压和电流的变化而变化，其电压与电流的比值不是常数，这类电阻称为**非线性电阻**。例如，半导体二极管的正向电阻就是非线性的，它的伏安特性如图 1.8 (b) 所示。

半导体三极管的输入、输出电阻也都是非线性的。对于非线性电阻的电路，其电路模型不可用一个理想电阻来简单表示，欧姆定律也不再适用。

全部由线性元件组成的电路称为线性电路。本章仅讨论线性直流电路。

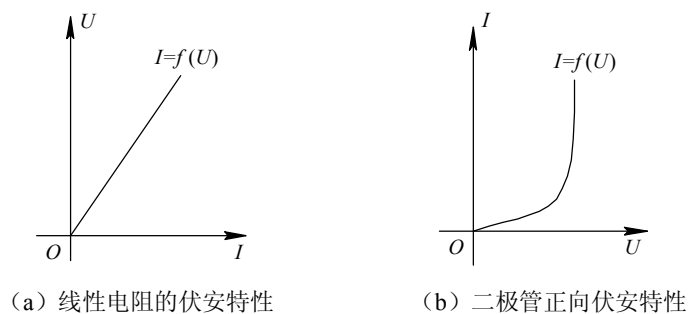


图 1.8 电阻的伏安特性

1.3 电阻的串联及并联

由于工作的需要，常将许多用电设备按不同的方式连接起来，组成一个电路网络。

1.3.1 电阻的串联

由若干个电阻顺序地连接成一条无分支的电路，称为**串联电路**。图 1.9 所示电路是由三个电阻串联组成的。

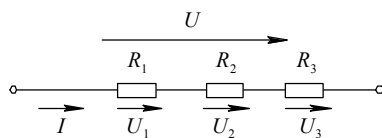


图 1.9 电阻的串联

电阻元件串联有以下几个特点：

- (1) 流过串联电路各元件的电流相等，即

$$I_1 = I_2 = I_3 = I \quad (1-10)$$

- (2) 等效电阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-11)$$

- (3) 总电压

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-12)$$

- (4) 总功率

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1-13)$$

- (5) 电阻串联具有分压作用，即

$$U_1 = \frac{R_1 U}{R}, U_2 = \frac{R_2 U}{R}, U_3 = \frac{R_3 U}{R} \quad (1-14)$$

在实际应用中, 利用串联电阻分压的原理可以扩大电压表的量程, 还可以制成电阻分压器。

【例 1.1】 现有一表头, 满刻度电流 $I_G=50\mu\text{A}$, 表头的电阻 $R_G=3\text{k}\Omega$, 若要改装成量程为 10V 的电压表, 如图 1.10 所示, 试问应串联一个多大的电阻?

解: 当表头满刻度时, 它的端电压为 $U_G=50\times 10^{-6}\times 3\times 10^3=0.15\text{V}$ 。设量程扩大到 10V 时所需串联的电阻为 R , 则 R 上分得的电压为 $U_R=10-0.15=9.85\text{V}$, 故

$$R = \frac{U_R R_G}{U_G} = \frac{9.85 \times 3 \times 10^3}{0.15} = 197\text{k}\Omega$$

即应串联 $197\text{k}\Omega$ 的电阻, 方能将表头改装成量程为 10V 的电压表。

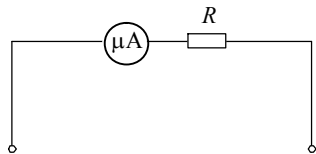


图 1.10 例 1.1 图

1.3.2 电阻的并联

将几个电阻元件都接在两个共同端点之间的连接方式称为**并联**。图 1.11 所示电路是由三个电阻并联组成的。

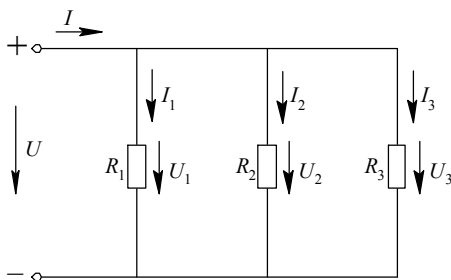


图 1.11 电阻的并联

并联电路的基本特点:

(1) 并联电阻承受同一电压, 即

$$U=U_1=U_2=U_3 \quad (1-15)$$

(2) 总电流

$$I=I_1+I_2+I_3 \quad (1-16)$$

(3) 总电阻的倒数

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-17)$$

即总电导

$$G=G_1+G_2+G_3 \quad (1-18)$$

若只有两个电阻并联, 其等效电阻 R 可用下式计算

$$R=R_1 // R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-19)$$

式(1-19)中, 符号“//”表示电阻并联。

$$(4) \text{ 总功率} \quad P=P_1+P_2+P_3$$

(5) 分流作用

$$I_1 = \frac{RI}{R_1}, \quad I_2 = \frac{RI}{R_2}, \quad I_3 = \frac{RI}{R_3} \quad (1-20)$$

利用电阻并联的分流作用, 可扩大电流表的量程。在实际应用中, 用电器在电路中通常都是并联运行的, 属于相同电压等级的用电器应并联在同一电路中, 这样才能保证它们都在规定的电压下正常工作。

【例 1.2】有三盏电灯接在 110V 电源上, 如图 1.11 所示, 其额定值分别为 110V、100W, 110V、60W, 110V、40W, 求总功率 P 、总电流 I 以及通过各灯泡的电流及等效电阻。

解: (1) 因外接电源符合各灯泡额定值, 各灯泡正常发光, 故总功率为

$$P=P_1+P_2+P_3=100+60+40=200\text{W}$$

(2) 总电流与各灯泡电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200}{110} \approx 1.82\text{A}$$

(3) 等效电阻及各电阻的电流为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{110}{1.82} \approx 60.4\Omega$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{100}{110} \approx 0.909\text{A}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{60}{110} \approx 0.545\text{A}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{40}{110} \approx 0.364\text{A}$$

1.4 电气设备的额定值及电路状态

1.4.1 电气设备的额定值

电气设备的额定值是根据设计、材料及制造工艺等因素，由制造厂家给出的设备各项性能指标和技术数据。按照额定值使用设备时，既安全可靠，又经济合理。它有如下几项：

(1) 额定电流 (I_N)。电气设备长时间稳定运行时的允许电流，称为**额定电流**。

(2) 额定电压 (U_N)。为了限制电气设备的电流并考虑绝缘材料的绝缘性能等因素，允许加在电气化设备上的电压限值，称为**额定电压**。

(3) 额定功率 (P_N)。在直流电路中，额定电压与额定电流的乘积就是**额定功率**，即

$$P_N = U_N I_N \quad (1-21)$$

电气设备的额定值都标在铭牌上，使用时必须遵守。例如，一盏日光灯，标有“220V，60W”的字样，表示该灯在 220V 电压下使用，消耗功率为 60W，若将该灯泡接在 380V 的电源上，则会因电流过大将灯丝烧毁；反之，若电源电压低于额定值，虽能发光，但灯光暗淡。

1.4.2 电路的工作状态

电路在工作时有三种工作状态，分别是**通路**、**短路**、**断路**。

1. 通路（有载工作状态）

如图 1.12 所示，当开关 S 闭合，使电源与负载接成闭合回路，电路便处于**通路**状态。在实际电路中，负载都是并联的，用 R_L 代表等效负载电阻。

电路中的用电器是由用户控制的，而且是经常变动的。当并联的用电器增多时，等效负载电阻 R_L 就会减小，由于电源电动势 E 通常为一恒定值，且内阻 R_0 很小，电源端电压 U 变化很小，所以电源输出的电流和功率将随之增大，这时称为电路的负载增大。当并联的用电器减少时，等效负载电阻 R_L 就会增大，电源输出的电流和功率将随之减小，这种情况称为负载减小。可见，所谓负载增大或负载减小，是指增大或减小负载电流，而不是增大或减小电阻值。

电路中的负载是变动的，所以，电源端电压的大小也随之改变。电源端电压 U 随电源输出电流 I 的变化关系，即 $U = f(I)$ 称为电源的外特性。即

$$U = E - IR_0 \quad (1-22)$$

外特性曲线如图 1.13 所示。

根据负载大小，电路在通路时又分为三种工作状态。当电气设备的电流等于额定电流时，称为满载工作状态；当电气设备的电流小于额定电流时，称为轻载工作状态；当电气设备的电流大于额定电流时，称为过载工作状态。

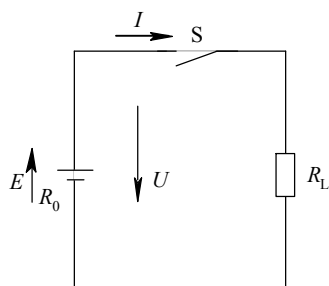


图 1.12 通路的示意图

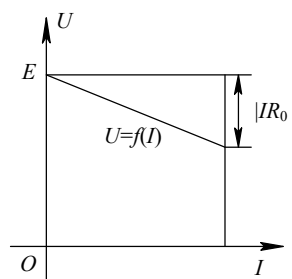


图 1.13 电源的外特性

2. 断路

所谓**断路**，就是电源与负载没有构成闭合回路。在图 1.12 所示电路中，当 S 断开时，电路处于断路状态。断路状态的特征是

$$R=\infty, I=0 \quad (1-23)$$

电源内阻消耗的功率

$$P_E=0 \quad (1-24)$$

负载消耗的功率

$$P_L=0 \quad (1-25)$$

电源端电压

$$U_0=E \quad (1-26)$$

此种情况，也称为电源的空载。

3. 短路

所谓**短路**，就是电源未经负载而直接由导线接通成闭合回路，如图 1.14 所示。

图中折线是指明短路点的符号。短路的特征是

$$R=0, U=0 \quad (1-27)$$

$$I_S = \frac{E}{R_0} \quad (1-28)$$

$$P_L=0 \quad (1-29)$$

$$P_E=I_S R_0 \quad (1-30)$$

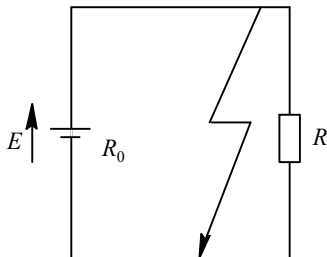


图 1.14 短路的示意图

因为电源内阻 R_0 一般都很小，所以短路电流 I_S 总是很大。如果电源短路事故未迅速排除，很大的短路电流将会烧毁电源、导线及电气设备，所以电源短路是一种严重事故，应严加防止。

为了防止发生短路事故，以免损坏电源，常在电路中串接熔断器。熔断器中装有熔丝。熔丝是由低熔点的铅锡合金丝或铅锡合金片做成的。一旦短路，串联在电路中的熔丝将因发热而熔断，从而保护电源免于烧坏。

熔断器的符号如图 1.15 所示，熔断器在电路中的接法如图 1.16 所示。



图 1.15 熔断器的符号

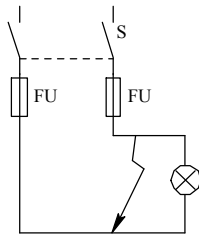


图 1.16 熔断器在电路中的安装

1.5 电压源、电流源及其等效变换

1.5.1 电压源

铅蓄电池及一般直流发电机等都是电源，它们是具有不变的电动势和较低内阻的电源，称为电压源，如图 1.17 (a) 所示。

如果电源的内阻 $R_0 \approx 0$ ，当电源与外电路接通时，其端电压 $U=E$ ，端电压不随电流变化，电源外特性曲线是一条水平线，如图 1.17 (b) 所示。这是一种理想情况，通常把具有不变电动势且内阻为零的电压源称为理想电压源或恒压源，用

图 1.17 (c) 的模型来表示。

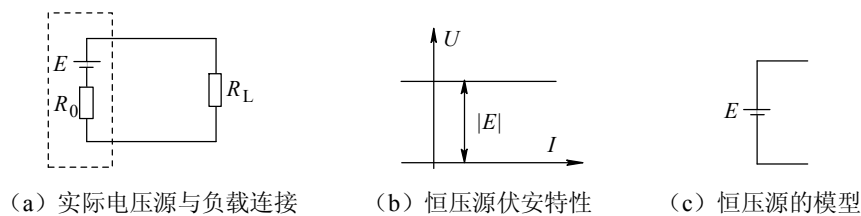


图 1.17 电压源

理想电压源是实际电源的一种理想模型。例如，在电力供电网中，对于任何一个用电器（如一盏灯）而言，整个电力网除了该用电器以外的部分，可以近似地看成是一个理想电压源。

当电源电压稳定在它的工作范围内，该电源就可认为是一个恒压源。如果电源的内电阻远小于负载电阻 R_L ，随着外电路负载电流的变化，电源的端电压可基本保持不变，这种电源就接近于一个恒压源。

1.5.2 电流源

对实际电源，可以建立另一种理想模型，叫电流源。如果电源输出恒定的电流，即电流的大小与端电压无关，我们称这种电源为**理想电流源**。

对于直流电路来说，理想电流源输出恒定不变的电流 I_S ，它与外电路负载大小无关，其端电压由负载决定。理想电流源简称电流源或恒流源，如图 1.18 所示。恒流源的伏安特性如图 1.19 所示。

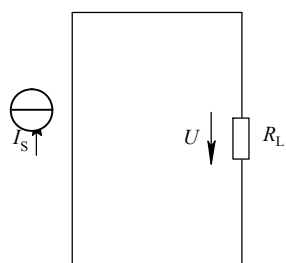


图 1.18 恒流源模型

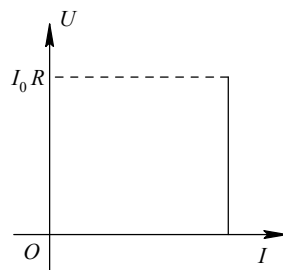


图 1.19 恒流源的伏安特性

当电流源与外电路接通时，回路电流是恒定的。实际的电流源即使没有与外电路接通，其内部也有电流流动；与负载接通后，电源内部仍有一部分电流流动，另一部分电流则通过负载，因此，实际电流源可以用理想电流源 I_S 与一个电阻 R_i

并联表示，如图 1.20 所示。

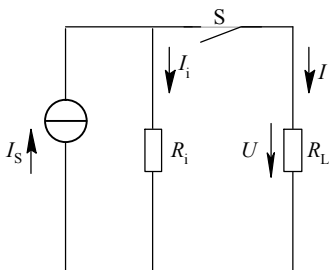


图 1.20 实际的电流源与负载连接

空载时，即 S 断开，通过 R_i 的电流 I_i 等于 I_S ，端电压为 $I_S R_i$ ，外电路电流 $I=0$ ；外电路短路时，端电压 $U=0$ ， $I=I_S$ ， $I_i=0$ ；有负载时， $U=I_i R_i=I R_L$ ， $I_i+I=I_S$ ，即

$$I = I_S - \frac{U}{R_i} \quad (1-31)$$

由上式可知：①负载电流 I 总是小于恒流源的短路电流 I_S ；②负载电流增大，端电压减少；③负载电流愈小，内阻上的电流就愈大，内部损耗也就愈大，所以，电流源不能处于空载状态。

1.5.3 电压源与电流源的等效变换

一个实际的电源，既可以用理想电压源与内阻串联表示，也可以用理想电流源与内阻并联表示。对于外电路而言，如果电源的外特性相同，无论采用哪种模型计算外电路电阻 R_L 上的电流、电压，结果都相同。从这个意义上来说，对外电路而言，两种模型是可以等效变换的，如表 1.1 所示。

表 1.1 实际电压源与电流源的比较

电压源模型	电流源模型
$U=E-IR_0$	$U=I_S R_i - I R_i$
$I = \frac{E-U}{R_0}$	$I = I_S - \frac{U}{R_i}$

由表 1.1 比较可知，当满足下列关系时，两者可以互换，即

$$R_i=R_0, \quad E=I_S R_i \text{ 或 } I_S = \frac{E}{R_0} \quad (1-32)$$

小提示：电压源与电流源的等效变换电路如图 1.21 所示。关于两者的等效变换，

我们有如下的结论:

(1) 电压源与电流源的等效变换只能对外电路等效, 对内电路则不等效。

(2) 把电压源变换为电流源时, 电流源中的 I_S 等于电压源输出端短路电流 I_S , I_S 方向与电压源对外电路输出电流方向相同, 电流源中的并联电阻 R_i 与电压源的内阻 R_0 相等。

(3) 把电流源变换为电压源时, 电压源中的电动势 E 等于电流源输出端断路时的端电压, E 的方向与电流源对外输出电流的方向相同, 电压源中的内阻 R_0 与电流源的并联电阻 R_i 相等。

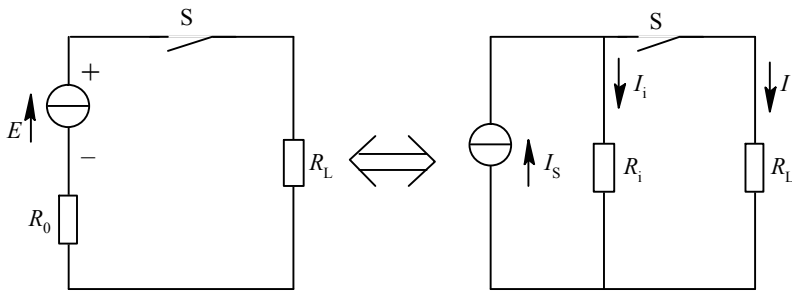


图 1.21 电压源与电流源的等效变换

(4) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。

【例 1.3】 已知两个电压源, $E_1=24\text{V}$, $R_{01}=4\Omega$; $E_2=30\text{V}$, $R_{02}=6\Omega$, 将它们同极性相并联, 试求其等效电压源的电动势和内电阻 R_0 。

解: 如图 1.22 所示, 先将两个电压源分别等效变换为电流源。

$$I_{S1} = \frac{E_1}{R_{01}} = \frac{24}{4} = 6\text{A}$$

$$I_{S2} = \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{30}{6} = 5\text{A}$$

将两个电流源合并为一个等效电流源, 即

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = 6 + 5 = 11\text{A}$$

然后, 将这个等效电流源变换成等效电压源, 即

$$R_0 = \frac{R_{01} \times R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = 2.4\Omega$$

$$E = R_0 I_S = 2.4 \times 11 = 26.4\text{V}$$

则

$$R_0 = 2.4\Omega$$

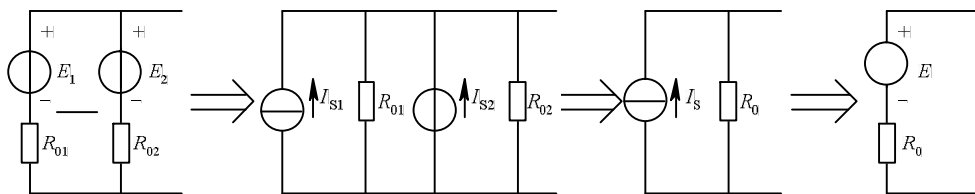


图 1.22 例 1.3 图

1.6 基尔霍夫定律及其应用

对于一个电路，我们首先关心的问题是对其分析，分析电路的方法可能有多种，但最基本的分析方法是基尔霍夫定律。为此，先介绍电路的几个基本概念，然后学习基尔霍夫电压定律、基尔霍夫电流定律。

(1) 电路中每一段不分支的电路，称为**支路**，例如，图 1.23 (a) 中 BAF 、 BCD 、 BE 等都是支路。

(2) 电路中三条或三条以上支路相交的点，称为**节点**，例如，图 1.23 (a) 中的 B 、 E 都是节点。

(3) 电路中任一闭合路径，称为**回路**，例如，图 1.23 (a) 中 $ABEFA$ 、 $BCDEB$ 、 $ABCDEFA$ 等都是回路。

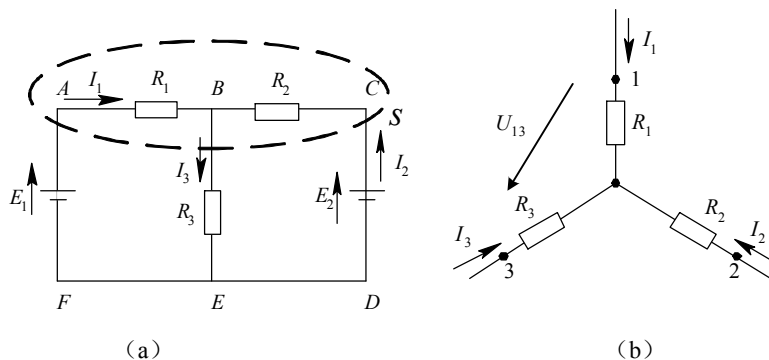


图 1.23 复杂电路

1.6.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在电路中，任何时刻对于任一节点而言，流入节点电流之和等于流出节点电

流之和, 即

$$\Sigma I_1 = \Sigma I_0 \quad (1-33)$$

如图 1.23 (a) 所示, 对节点 B 有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

对节点 E 有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

小提示: ①在图 1.23 (a) 中, 对节点 B 和节点 E , 只有一个独立的 KCL 方程。一般而言, 一个电路有 n 个节点, 则有 $n-1$ 个独立的 KCL 方程。

②KCL 原本是适用于节点的, 但也可以把它推广运用于电路的任一假设的封闭面。例如图 1.23 所示封闭面 S 所包围的电路, 同样有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

1.6.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在电路中, 任何时刻沿任一回路绕行一周, 回路中所有电压的代数和等于 0, 即

$$\Sigma U = 0 \quad (1-34)$$

如图 1.23 所示, 沿 $ABCDEF$ 回路, 有

$$E_1 - E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0$$

应用 KVL 定律时, 先假定绕行方向, 当电压的参考方向与绕行方向一致时, 则此电压取正号, 反之取负号。

小提示: ①对于一个电路, 可列出多少个独立的 KVL 方程? 一般而言, 若某电路有 m 条支路, n 个节点, 则可列出 $[m-(n-1)]$ 个独立的 KVL 方程。

②KVL 原本是适用于回路的, 但也可以把它推广运用于电路的任一开口电路。例如图 1.23 (b) 所示的开口电路有

$$U_{13} = I_1 R_1 - I_3 R_3$$

1.6.3 基尔霍夫定律的应用——支路电流法

分析、计算复杂电路的方法很多, 现介绍一种基本的方法——支路电流法。

支路电流法是以支路电流为未知量, 应用基尔霍夫定律列出与支路电流数目相等的独立方程式, 再联立求解。应用支路电流法解题的方法步骤如下 (假定某电路有 m 条支路, n 个节点):

- (1) 标定各待求支路的电流参考正方向及回路绕行方向。
- (2) 应用基尔霍夫电流定律列出 $(n-1)$ 个节点方程。
- (3) 应用基尔霍夫电压定律列出 $[m-(n-1)]$ 个独立的回路电压方程式。

(4) 由联立方程组求解各支路电流。

【例 1.4】如图 1.24 所示电路， $E_1=10\text{V}$ ， $R_1=6\Omega$ ， $E_2=26\text{V}$ ， $R_2=2\Omega$ ， $R_3=4\Omega$ ，求各支路电流。

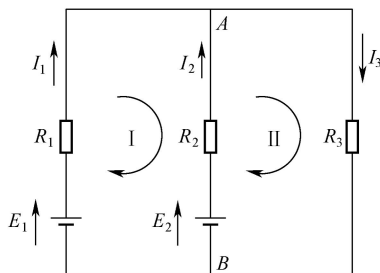


图 1.24 例 1.4 图

解：该电路有 2 个节点、3 个回路，故可以列出 $2-1=1$ 个独立节点方程，列出 $[3-(2-1)]=2$ 个独立的回路电压方程。

假定各支路电流方向如图 1.24 所示，根据基尔霍夫电流定律（KCL），对节点 A 有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

设闭合回路的绕行方向为顺时针方向，对回路 I，有

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

对回路 II，有

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

联立方程组：

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 10 - 26 = 6I_1 - 2I_2 \\ 26 = 2I_2 + 4I_3 \end{cases}$$

解方程组，得

$$I_1 = -1\text{A}, I_2 = 5\text{A}, I_3 = 4\text{A}$$

这里解得 I_1 为负值，说明实际方向与假定方向相反，同时，说明 E_1 此时相当于负载。

1.7 电路中电位的计算

在电子电路中，我们有时关心哪一点电位高，哪一点电位低，为此，有必要

引入电位的概念。在电路中要求得某点的电位值，必须在电路中选择参考点，这个参考点叫**零电位点**。零电位点可以任意选择。在电工技术中，为了工作安全，通常把电路的某一点与地连接，称为接地。这时，电路的接地点就是电位等于零的参考点。它是分析线路中其余各点电位高低的比较标准，用符号“ $\perp$ ”表示。

电路中某点的**电位**，就是从该点出发，沿任选的一条路径“走”到参考点所经过的全部电位降的代数和。

计算电位的方法和步骤如下：

(1) 选择一个零电位点，即参考点。

(2) 标出电源和负载的电压极性。

按 E 的方向是由负极指向正极的原则，标出电源的正负极性，设电流方向，将电流流入端标为正极，流出端为负。

(3) 求点 A 的电位时，选定一条从点 A 到零电位点的路径，从点 A 出发沿此路径“走”到零电位点，不论这一路经过的是电源，还是负载，只要是从正极到负极，就取该电位降为正，反之就取负值，然后求代数和。

以图 1.25 (a) 电路为例，选点 D 为参考点（见图 1.25 (b)），各电源的极性和 I 的方向如图中所示，求点 A 的电位时有三条路径：

沿 AE_1D 路径： $V_A = E_1$

沿 ABD 路径： $V_A = I_1 R_1 + I_3 R_3 + E_3$

沿 $ABCD$ 路径： $V_A = I_1 R_1 + I_2 R_2 - E_2$

显然，沿 AE_1D 路径计算点 A 电位最简单，但三种计算方法的结果是完全相同的。

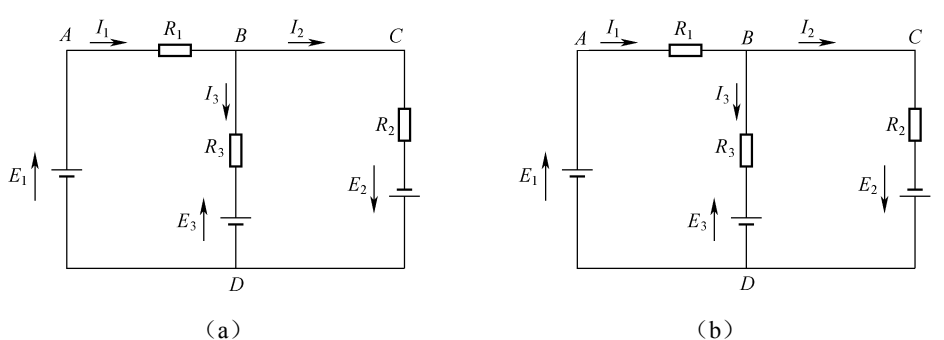


图 1.25 电位的计算

【例 1.5】 在图 1.26 所示电路中，若 $R_1=5\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $R_3=15\Omega$ ， $E_1=180V$ ， $E_2=80V$ ，若以点 B 为参考点，试求 A 、 B 、 C 、 D 四点的电位 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D ，同时求出 C 、 D 两点之间的电压 U_{CD} ，若改用点 D 作为参考点再求 V_A 、 V_B 、 V_C 、

V_D 和 U_{CD} 。

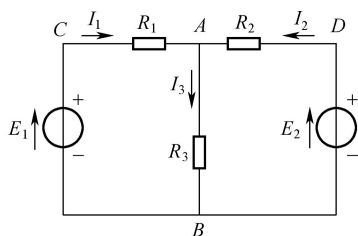


图 1.26 例 1.5 图

解: (1) 根据基尔霍夫定律列方程有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (\text{节点 } A)$$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 \quad (\text{回路 } CABC)$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 \quad (\text{回路 } DABD)$$

解方程组得

$$I_1 = 12\text{A}, \quad I_2 = -4\text{A}, \quad I_3 = 8\text{A}$$

(2) 若以点 B 为参考点, 则

$$V_B = 0$$

$$V_A = I_3 R_3 = 8 \times 15 = 120\text{V}$$

$$V_C = E_1 = 180\text{V}$$

$$V_D = E_2 = 80\text{V}$$

$$U_{CD} = V_C - V_D = 180 - 80 = 100\text{V}$$

(3) 若以点 D 为参考点, 则

$$V_D = 0$$

$$V_A = -I_2 R_2 = -(-4) \times 10 = 40\text{V}$$

$$V_B = -E_2 = -80\text{V}$$

$$V_C = I_1 R_1 - I_2 R_2 = 12 \times 5 - (-4) \times 10 = 100\text{V}$$

$$U_{CD} = V_C - V_D = 100 - 0 = 100\text{V}$$

1.8 戴维南定理和叠加定理

1.8.1 戴维南定理

在复杂电路的计算中, 若只需计算出某一支路的电流, 可把电路划分为两部分, 一部分为待求支路, 另一部分看成是一个有源两端网络 (具有两个端的网络

称为两端网络)。假如有源两端网络能够化简为一个等效电压源,则复杂电路就变成一个等效电压源和待求支路相串联的简单电路,如图 1.27 所示, R 中的电流就可以由下式求出:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-35)$$

戴维南定理指出:任何一个有源两端线性网络都可以用一个等效的电压源来代替,这个等效电压源的电动势 E 就是有源两端网络的开路电压 U_0 , 它的内阻 R_0 等于从有源两端网络看进去的电阻(网络电压源的电动势短路, 电流源断路)。

如图 1.27 所示,从 AB 两端看进去,各电动势短路为零, A 、 B 两点之间的等效电阻为 R_0 , 则

$$R_0 = \frac{R_{01} \times R_{02}}{R_{01} + R_{02}}$$

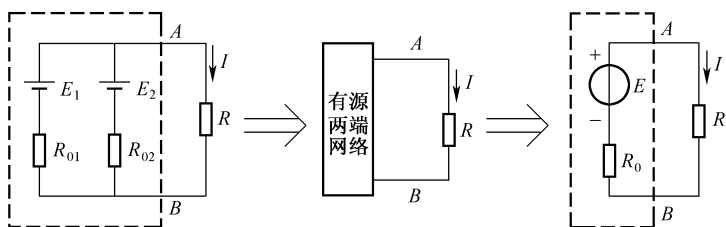


图 1.27 有源电路的等效变换

【例 1.6】图 1.28 (a) 所示为一不平衡电桥电路, 试求检流计的电流 I 。

解: (1) 画出等效电路, 见图 1.28 (b)。

$$U_{oc} = 5I_1 - 5I_2 = 5 \times \frac{12}{5+5} - 5 \times \frac{12}{10+5} = 2V$$

(2) 画出等效电阻计算图, 见图 1.28 (c)。

a 、 b 两点之间的等效电阻为

$$R_0 = \frac{5 \times 5}{5+5} + \frac{10 \times 5}{10+5} = 5.83\Omega$$

(3) 计算 I 的电路如图 1.28 (d) 所示, 即

$$I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R_g} = \frac{2}{5.83 + 10} = 0.126A$$

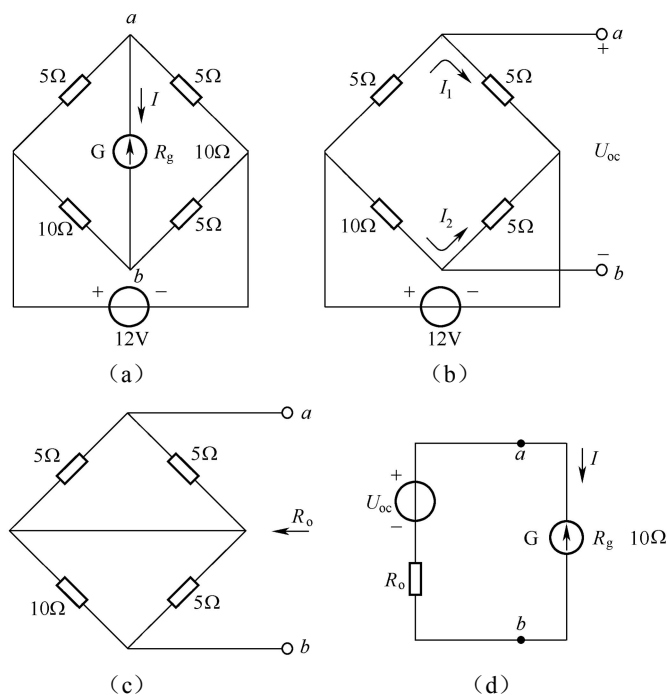


图 1.28 例 1.6 图

1.8.2 叠加定理

叠加定理是分析线性电路的一个基本定理。**叠加定理**指出：在线性电路中，当有两个或两个以上的独立电源作用时，则任意支路的电流（或电压）都可以认为是电路中各个电源单独作用时，在该支路中产生的各电流分量（或电压分量）的代数和。

【例 1.7】 对于图 1.29 (a) 所示电路，试求 R_2 的电流 I 。

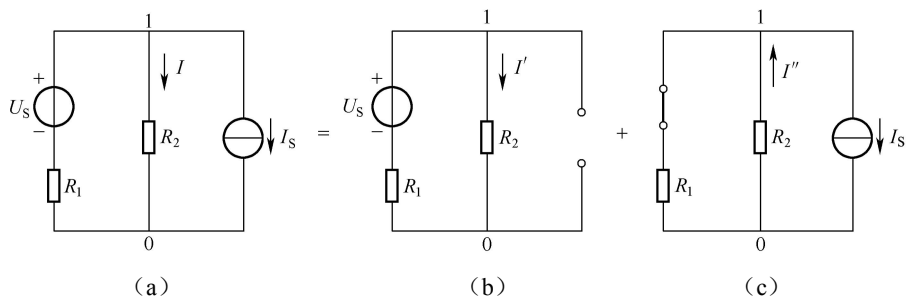


图 1.29 叠加定理举例

解：(1) 画出 U_S 单独作用时的等效电路，见图 1.29 (b)。

R_2 支路的电流 I'

$$I' = \frac{U_S}{R_1 + R_2}$$

(2) 画出 I_S 单独作用时的等效电路，见图 1.29 (c)。

R_2 支路的电流 I''

$$I'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S$$

(3) 求代数和

$$I = I' - I'' = \frac{U_S}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S$$

小提示：使用叠加定理时，应注意以下几点：

(1) 只能用来计算线性电路的电流和电压，对非线性电路，叠加定理不适用。

(2) 叠加时要注意电流和电压的参考方向，求其代数和，即各个电源单独作用，在该支路中产生的各电流分量或电压分量的参考方向与该支路电流或电压参考方向相同为正，相反为负，然后求和。

(3) 化为几个单独电源的电路来进行计算时，所谓电压源不作用，就是在该电压源电动势处用短路代替；所谓电流源不作用，就是在该电流源短路电流处用开路代替。

(4) 不能用叠加定理直接计算功率。

习题一

一、思考题

1. 在电路分析中，引入参考方向的目的是什么？
2. 对于电路中的一个元件，如何判断它是耗能元件还是供能元件？
3. 线性电阻与非线性电阻的主要区别是什么？
4. 欧姆定律不适用于非线性电路，为什么？
5. 应用参考方向时，你能说明“正、负”“加、减”及“相同、相反”这几对词的不同之处吗？
6. 用一个满刻度偏转电流为 $50\mu\text{A}$ ，电阻 R_G 为 $2\text{k}\Omega$ 的表头制成量程为 50mA 的直流电流表，应并联多大的分流电阻 R_2 ？

7. 某用电器的额定值为“220V, 100W”, 此电器正常工作 10h, 消耗多少电能? 合多少电量?

8. 一只标有“220V, 60W”的电灯, 当其两端电压为多大时电灯能正常发光? 正常发光时电灯的电功率是多少? 若加在灯两端的电压仅有 110V 时, 该灯的实际功率为多少? 额定功率有变化吗?

9. 某电阻接在 6V 的直流电源上, 已知某 1min 单位时间内通过该电阻的电荷为 3C, 求在这 1min 内电阻上通过的电流和电流所做的功各为多少?

10. 在图 1.25 所示电路中, 若以点 B 为参考点, 求 A 点的电位有几种求法, A 点的电位是多少?

二、填空题

1. 电源和负载的本质区别是: 电源是把_____能量转换成_____能的设备, 负载是把_____能转换成_____能量的设备。

2. 对电阻负载而言, 当电压一定时, 负载电阻越小, 则负载_____, 通过负载的电流和负载上消耗的功率就_____; 反之, 负载电阻越大, 说明负载_____。

3. 实际电路中的元器件, 其电特性往往_____而_____, 理想电路元件的电特性则是_____和_____的。

4. 电力系统中构成的强电电路, 其特点是_____, _____; 电子技术中构成的弱电电路的特点则是_____, _____。

5. 常见的无源电路元件有_____, _____和_____; 常见的有源电路元件是_____和_____。

6. 元件上电压和电流关系成正比变化的电路称为_____电路。此类电路中各支路上的_____和_____均具有叠加性, 但电路中的_____不具有叠加性。

7. 电流沿电压降低的方向取向称为_____方向, 这种方向下计算的功率为正值时, 说明元件_____电能; 电流沿电压升高的方向取向称为_____方向, 这种方向下计算的功率为正值时, 说明元件_____电能。

8. 电源向负载提供最大功率的条件是_____与_____的数值相等, 这种情况称为电源与负载相_____, 此时负载上获得的最大功率为_____。

9. _____是产生电流的根本原因。电路中任意两点之间电位的差值等于这两点间的_____。电路中某点到参考点间的_____称为该点的电位, 电位具有_____性。

10. 线性电阻元件上的电压、电流关系, 任意瞬间都受_____定律的约束; 电路中各支路电流任意时刻均遵循_____定律; 回路上各电压之间的关系则受_____定律的约束。这三大定律是电路分析中应牢固掌握的_____规律。

三、判断题

1. 电路分析中描述的电路都是实际中的应用电路。 ()
2. 电源内部的电流方向总是由电源负极流向电源正极。 ()
3. 大负载是指在一定电压下, 向电源吸取电流大的设备。 ()
4. 电压表和功率表都是串接在待测电路中。 ()
5. 实际电压源和电流源的内阻为零时, 即为理想电压源和电流源。 ()
6. 电源短路时输出的电流最大, 此时电源输出的功率也最大。 ()
7. 线路上负载并联得越多, 其等效电阻越小, 因此取用的电流也越少。 ()
8. 负载上获得最大功率时, 电源的利用率最高。 ()
9. 电路中两点的电位都很高, 这两点间的电压也一定很大。 ()
10. 可以把 1.5V 和 6V 的两个电池相串联后作为 7.5V 电源使用。 ()

四、选择题

1. 当元件两端电压与通过元件的电流取关联参考方向时, 假设该元件 () 功率; 当元件两端电压与通过电流取非关联参考方向时, 假设该元件 () 功率。
 A. 吸收 B. 发出
2. 一个输出电压几乎不变的设备有载运行, 当负载增大时, 是指 ()。
 A. 负载电阻增大 B. 负载电阻减小 C. 电源输出的电流增大
3. 电流源开路时, 该电流源内部 ()。
 A. 有电流, 有功率损耗 B. 无电流, 无功率损耗
 C. 有电流, 无功率损耗
4. 某电阻元件的额定数据为“ $1\text{k}\Omega$ 、 2.5W ”, 正常使用时允许流过的最大电流为 ()。
 A. 50mA B. 2.5mA C. 250mA
5. 有“ 220V , 100W ”“ 220V , 25W ”白炽灯两盏, 串联后接入 220V 交流电源, 其亮度情况是 ()。
 A. 100W 灯泡最亮 B. 25W 灯泡最亮 C. 两只灯泡一样亮
6. 已知电路中 A 点的对地电位是 65V , B 点的对地电位是 35V , 则 $U_{\text{BA}} =$ ()。
 A. 100V B. -30V C. 30V
7. 图 1.30 中安培表内阻极低, 伏特表电压极高, 电池内阻不计, 如果伏特表被短接, 则 ()。
 A. 灯 R 将被烧毁 B. 灯 R 特别亮 C. 安培表被烧

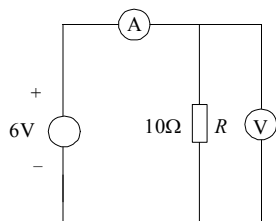


图 1.30

8. 图 1.30 中如果安培表被短接, 则 ()。
 - A. 电灯 R 不亮
 - B. 电灯 R 将被烧
 - C. 不发生任何事故
9. 如果图 1.30 电路中电灯灯丝被烧断, 则 ()。
 - A. 安培表读数不变, 伏特表读数为零
 - B. 伏特表读数不变, 安培表读数为零
 - C. 安培表和伏特表的读数都不变
10. 如果图 1.30 电路中伏特表内部线圈烧断, 则 ()。
 - A. 安培表烧毁
 - B. 电灯不亮
 - C. 电灯特别亮
 - D. 以上情况都不发生

五、简述题

1. 将一个内阻为 0.5Ω , 量程为 1A 的安培表误认为伏特表, 接到电压源为 10V , 内阻为 0.5Ω 的电源上, 试问此时安培表中通过的电流有多大? 会发生什么情况? 你能说说使用安培表应注意哪些问题吗?
2. 在 4 盏灯泡串联的电路中, 除 2 号灯不亮外其他 3 盏灯都亮。当把 2 号灯从灯座上取下后, 剩下 3 盏灯仍亮, 问电路中出现了何故障? 为什么?
3. 如何理解电路的激励和响应? 当电感元件和电容元件向外释放能量时, 能否将它们看作是电路激励?
4. 两个数值不同的电压源能否并联后“合成”一个向外电路供电的电压源? 两个数值不同的电流源能否串联后“合成”一个向外电路供电的电流源? 为什么?
5. 何谓二端网络? 有源二端网络? 无源二端网络? 对有源二端网络除源时应遵循什么原则?
6. 什么叫 1 度电? 1 度电有多大作用?
7. 如何测量某元件两端电压? 如何测量某支路电流?
8. 直流电路是否都是线性电路? 线性电路的概念如何正确表述?

六、计算题

1. 在图 1.31 所示电路中, 已知电流 $I=10\text{mA}$, $I_1=6\text{mA}$, $R_1=3\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$, $R_3=2\text{k}\Omega$ 。求电流表 A_4 和 A_5 的读数是多少?

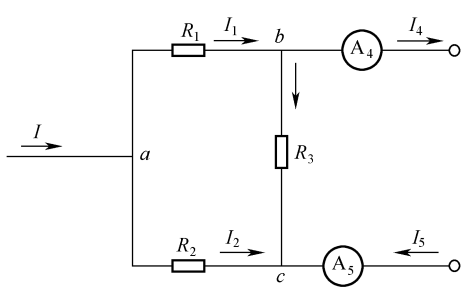


图 1.31

2. 在图 1.32 所示电路中, 有几条支路和节点? U_{ab} 和 I 各等于多少?

3. 求图 1.33 电路的等效电阻 R_{ab} 。

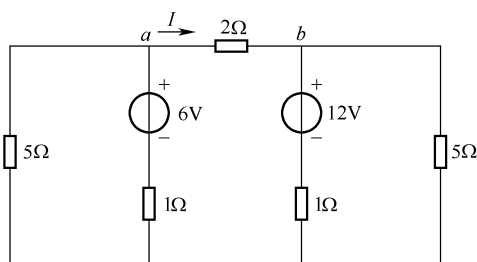


图 1.32

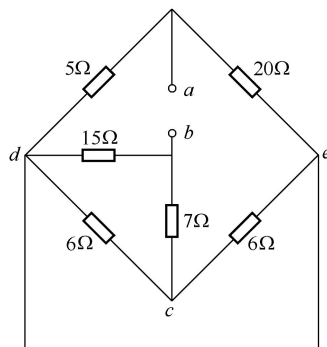


图 1.33

4. 简化图 1.34 所示各电路。

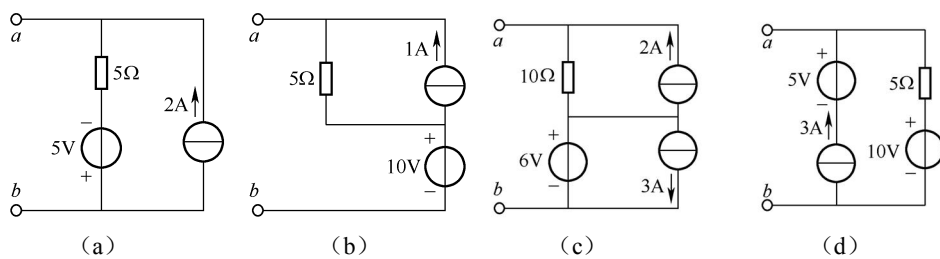


图 1.34

5. 分别用叠加定理和戴维南定理求解图 1.35 电路中的电流 I_3 。设 $U_{S1}=30\text{V}$, $U_{S2}=40\text{V}$, $R_1=4\Omega$, $R_2=5\Omega$, $R_3=2\Omega$ 。

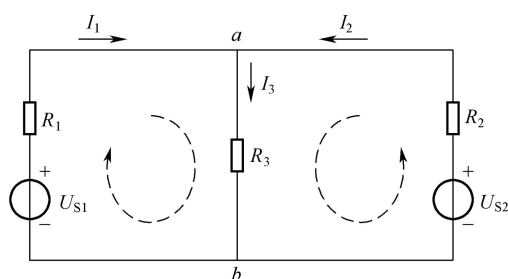


图 1.35

6. 图 1.36 所示电路中的 $R_1=2\Omega$, $R_2=4\Omega$, $R_3=6\Omega$, $U_{S1}=10\text{V}$, $U_{S2}=15\text{V}$, 试用戴维南定理求 I_3 。

7. 利用叠加定理求图 1.37 电路中的 U_o 。已知 $R_1=2\Omega$, $R_2=4\Omega$, $R_3=6\Omega$, $I_1=2\text{A}$, $I_2=1\text{A}$, $U_S=10\text{V}$ 。

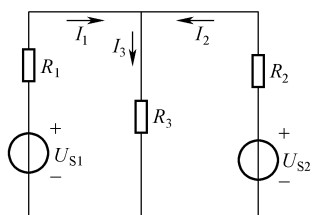


图 1.36

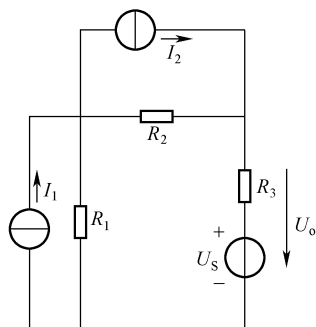


图 1.37