

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

本章介绍电路的基本概念与基本定律，包括电路模型、电路中的基本物理量、电路的工作状态、基本电路元件、电压与电流的参考方向、基尔霍夫定律、电位的概念等。这些概念和定律是电路分析的基础，必须很好地理解和掌握，以便为后续课程的学习打下基础。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的作用及组成

电路就是电流的通路，是为实现某种功能而建立的。电路的作用大致可分为两类：一类是实现能量的传输与转换，电力系统就是其典型电路，如图 1-1 所示；另一类是实现信号的传递与处理，音频放大电路就是其典型电路，如图 1-2 所示。电路通常由电源（或信号源）、负载、中间环节三部分组成。

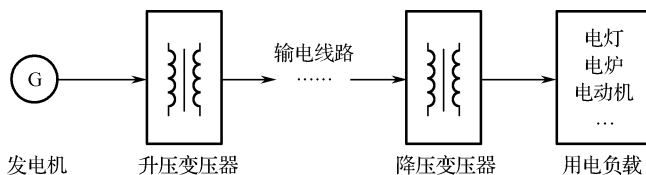


图 1-1 电力系统

在电力系统中，发电机是电源，将机械能转换为电能；电灯、电炉、电动机等电气设备是负载，负载是消耗电能的设备，将电能转换为光能、热能、机械能等；变压器和输电线路是电路中的中间环节。

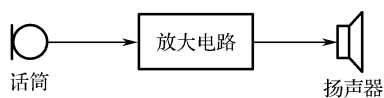


图 1-2 音频放大电路

在音频放大电路中，话筒是信号源，将声音信号转换成微弱的电信号；扬声器是负载，将电信号转换成声音信号；放大电路是中间环节，将话筒输出的微弱电信号放大，去推动扬声器发声。

通常把规模较大或结构较复杂的电路称为网络或系统，把实现部分功能的电路称为子系统，一个系统可由多个子系统构成。

电源或信号源也称为电路中的激励，它们推动电路工作；由激励在电路中产生的电压或电流称为响应。电路分析就是讨论电路中激励与响应之间的关系。

1.1.2 电路模型

组成实际电路的元器件往往具有多种电磁性质。一个线圈不仅具有储存磁场能量的特性，

即电感特性，也有消耗电能的电阻特性，线圈的匝间还存在分布电容，即具有电容特性。此外，线圈有体积、线径等特性，所以要对实际元器件进行精确的分析是很困难的。

在对实际电路进行分析时，首先要将电路中的元器件用理想化的电路元件来代替，并建立电路的数学模型（简称为电路模型或电路）。理想电路元件就是具有单一电磁特性的元件，理想化的电阻元件只具有消耗电能的特性，理想电感元件只具有储存磁场能量的特性，理想电容元件只具有储存电场能量的特性，理想电源元件只具有产生电能的特性，等等。此外，理想电路元件具有集中（或集总）参数的特性，不用考虑元件的尺寸大小。

在直流电路和低频电路中，线圈通常用一个电感元件和一个电阻元件的串联电路来等效，如图 1-3（a）所示。在高频电路中，线圈匝间的分布电容不能忽略，线圈要用如图 1-3（b）所示的电路来等效。同一个实际的电路元器件，在不同的条件下，具有多个不同的电路模型。在建立电路模型时，要根据电路的工作条件，保留元器件的主要电磁特性，忽略次要因素，在满足精确度要求的前提下，尽量选用简化的电路模型，以便于电路的分析。

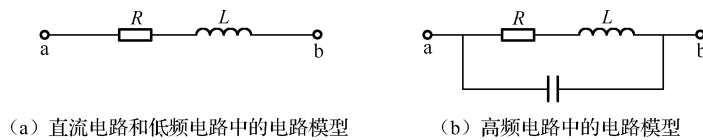


图 1-3 线圈的电路模型

练习与思考

电力系统和电子线路中的电路各由哪几部分组成？分别起什么作用？

1.2 电路中的基本物理量

1.2.1 电流

电荷在电场力的作用下做有规则的运动，单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流，用公式表示为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中，电荷量 q 的单位是 C（库仑），时间的单位是 s（秒），电流的单位是 A（安培）。

国家标准规定，不随时间变化的物理量用大写字母表示，随时间变化的物理量用小写字母表示。在直流电路中，电荷量 Q 和电流 I 不随时间变化，都用大写字母表示，式（1-1）可写为

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

通常，公式中的物理量用小写字母来表示，用于表示变化的量或一般情况。将公式应用到直流电路中时，只需把相应物理量换成大写字母即可。

电流除使用基本单位 A 以外，还经常使用辅助单位，如 mA（微安）、 μ A（毫安）等。辅助单位是在基本单位的前面加相应的词头构成的，这些词头的含义如表 1-1 所示。

表 1-1 部分国际单位制词头

词 头	G	M	k	m	μ	n	p
中文名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
含 义	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

规定正电荷运动的方向为电流的实际方向，但是对实际电路进行分析时，很多时候并不能预先知道电流的实际方向，尤其在交流电路中，电流的方向随时间变化。这时，可先设定任意一个方向，作为电流的参考方向（或正方向），简称电流的方向。电流的方向在电路用实线箭头来表示，如图 1-4 所示。图中的方框表示一个二端元件（可以是电阻、电感、电容、电源等），虚线箭头表示电流的实际方向。电流的方向除用箭头表示外，还可用双下标表示，如 i_{ab} 表示电流的方向为由 a 到 b，显然 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

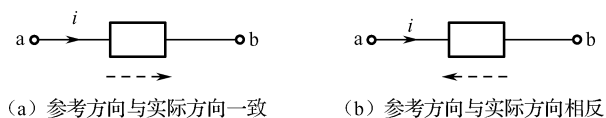


图 1-4 电流的参考方向与实际方向

在图 1-4 (a) 中，电路的参考方向与实际方向一致， $i > 0$ ，电流为正值；在图 1-4 (b) 中，电路的参考方向与实际方向相反， $i < 0$ ，电流为负值。所以，只有选定了参考方向以后，电流才有正、负之分。本书电路图中标出的电流方向均为参考方向，不再单独说明。

1.2.2 电压

电路中 a、b 两点之间的电压，也称为 a、b 两点之间的电位差，在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功，用公式表示为

$$u_{ab} = V_a - V_b = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中， V_a 为 a 点的电位， V_b 为 b 点的电位， w 表示移动电荷所做的功，其单位是 J（焦耳），电压和电位的单位是 V（伏特）。

电压的实际方向是从高电位指向低电位，即电位降的方向，故电压又称为电压降。若无法预先知道电压的实际方向，在电路分析时要先假设一个方向作为电压的参考方向，简称电压的方向。当电压的参考方向与实际方向一致时，电压数值为正，反之为负。

在电路中，用符号“+”和“-”表示电压的极性，“+”端为高电位端，“-”端为低电位端，电压的方向是从“+”端指向“-”端。电压的方向也可用实线箭头或双下标表示，如图 1-5 所示。 u_{ab} 表示 a 端为正极性端，b 端为负极性端， u_{ba} 则相反，并且 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

若某个元件上电流的方向是从高电位端流向低电位端，则称该元件上电压与电流取关联参考方向，如图 1-6 (a) 所示；反之，则称为非关联参考方向，如图 1-6 (b) 所示。在采用关联参考方向时，不必全部标出该元件上电流和电压的参考方向，通常只标出电流的参考方向即可。若不采用关联参考方向，则电压与电流的参考方向必须全部标出。为简化电路分析，应尽量采用关联参考方向。

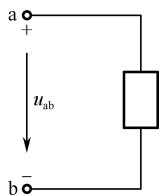


图 1-5 电压的表示方法

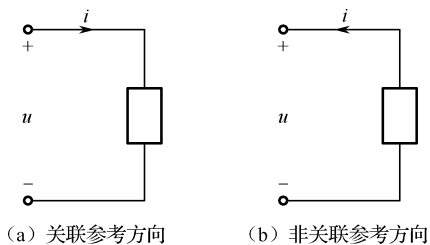


图 1-6 电压与电流参考方向的关联

1.2.3 电功率

单位时间内转换的电能称为元件的电功率，简称功率，用公式表示为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

功率 p 的单位为 W（瓦特）。

若元件上的电压和电流采用关联参考方向，则该元件吸收的功率为

$$p = ui \quad (1-5)$$

若元件上的电压和电流采用非关联参考方向，则该元件吸收的功率为

$$p = -ui \quad (1-6)$$

在式 (1-5) 和式 (1-6) 中，若 $p > 0$ ，则表示该元件实际上是吸收功率，起负载作用；若 $p < 0$ ，则表示该元件实际上是发出或产生功率，起电源作用。在一个电路中，所有元件吸收功率的代数和为零，称为功率平衡，用公式表示为

$$\sum p = 0 \quad (1-7)$$

需要注意，在式 (1-5) 和式 (1-6) 所表示的元件吸收功率的公式中有两套符号，即 ui 前面的正、负号和 u 、 i 本身的正、负号。

1.2.4 电能

在时间 t 内转换的电功率称为电能，对于负载元件来说，即在时间 t 内元件吸收或消耗的电能，用公式表示为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} uiddt \quad (1-8)$$

在直流电路中，电能的表达式为

$$W = Pt = UI t \quad (1-9)$$

电能 W 的单位是 J（焦耳），在工程上常用 $\text{kW}\cdot\text{h}$ （千瓦时）作为电能的计量单位，1 千瓦时即 1 度电。千瓦与焦耳的换算关系为 $1\text{kW} = 3.6 \times 10^6\text{J}$ 。

例 1.2.1 图 1-7 所示的电路由 4 个元件组成，已知 $U_1 = U_2 = 3\text{V}$ ， $U_3 = 4\text{V}$ ， $U_4 = 7\text{V}$ ， $I_1 = -1\text{A}$ ， $I_2 = 3\text{A}$ ， $I_3 = -2\text{A}$ 。（1）求各元件的功率，并指出哪些是电源，哪些是负载；（2）验证电路中功率平衡。

解：（1）元件 1 为关联参考方向， $P_1 = U_1 I_1 = 3 \times (-1) = -3\text{W}$ ，

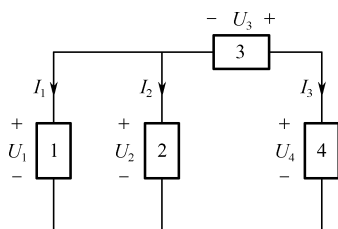


图 1-7 例 1.2.1 电路图

元件 1 为电源。

元件 2 为关联参考方向, $P_2 = U_2 I_2 = 3 \times 3 = 9\text{W}$, 元件 2 为负载。

元件 3 为非关联参考方向, $P_3 = -U_3 I_3 = -4 \times (-2) = 8\text{W}$, 元件 3 为负载。

元件 4 为关联参考方向, $P_4 = U_4 I_4 = 7 \times (-2) = -14\text{W}$, 元件 2 为电源。

(2) 功率平衡关系

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = -3 + 9 + 8 - 14 = 0\text{W}$$

练习与思考

1.2.1 电路如图 1-8 所示, 流过电阻的电流 I 是多少?

1.2.2 某一电路元件接于 a、b 两点之间, 已知 $U_{ab} = -12\text{V}$, a、b 两点哪点的电位高。

1.2.3 电路如图 1-9 所示, 已知 $U = 6\text{V}$, $I = -2\text{A}$, 求各个元件的功率, 并判断哪些元件是电源, 哪些元件是负载。

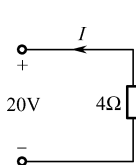
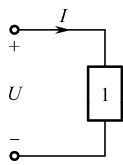
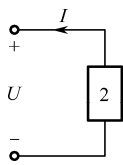


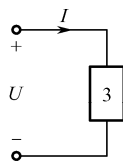
图 1-8 练习与思考 1.2.1 的图



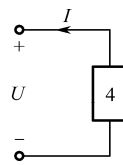
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-9 练习与思考 1.2.3 的图

1.3 电路的状态

通常, 电路有三种工作状态, 即通路、开路和短路, 下面分别对其说明。

1.3.1 通路

当电源与负载接通, 电路中有电流通过时, 电路的这一状态称为通路。在图 1-10 中, 当开关 S 闭合时, 电路就处于通路状态。

通路时, 电源向负载输出功率, 电源处于有载工作状态。电源产生的功率应等于负载电阻 R_L 和电源内电阻 R_0 上消耗的功率之和, 电路中的功率是平衡的, 用公式表示为

$$U_S I = R_0 I^2 + UI \quad (1-10)$$

通常, 导线的电阻很小, 导线上产生的电压降和功率损耗可忽略不计。当电路中的电流较大或线路很长时, 导线上的电压降和功率损耗就不能忽略。

各种电气设备在出厂时, 都标注有额定值 (也称为铭牌数据)。额定值表示该电气设备可长时间工作的条件或极限工作条件。当电气设备的实际工作条件等于其额定值时, 称该电气设备处于额定工作状态 (或额定状态)。

例如, 某个日光灯标注 220V/40W, 表示它可在 220V 电源电压下长期工作, 消耗功率是 40W。若电源电压偏离其额定值 220V 较大, 该日光灯则不能正常工作, 或因电压过高而损坏, 或因电压过低而不能启动。

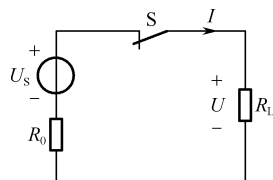


图 1-10 通路

某台直流稳压电源标注 12V/5A，表示其输出直流电压为 12V，最大输出电流为 5A。

1.3.2 开路

当某一部分电路断开时，称该部分电路处于开路状态。开路处电流为零，开路处的电压应视电路的情况而定。

在图 1-11 中，若开关 S2 断开，则由 S2 和 R_2 构成的支路开路。若开关 S1 断开，则称为电源开路。电源开路时，其输出电流为零，输出电压称为开路电压，开路电压 U_{OC} 等于 U_S ，用公式表示为

$$U_{OC} = U_S \quad (1-11)$$

1.3.3 短路

当某一部分电路的电阻值为零时，则称该部分电路处于短路状态（也称为短接）。发生短路时，短路处电压为零，短路处的电流应视电路的情况而定。

在图 1-12 中，当开关 S1 或 S2 单独闭合时，称为局部短路；当开关 S1、S2 都闭合时，则称为电源短路。电源短路时，其输出电压为零，输出电流称为短路电流 I_{SC} ，短路电流的大小仅由电源内电阻 R_0 决定，用公式表示为

$$I_{SC} = \frac{U_S}{R_0} \quad (1-12)$$

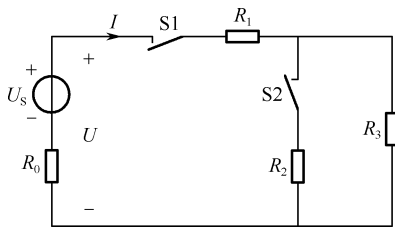


图 1-11 开路

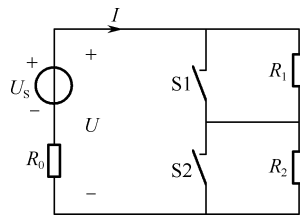


图 1-12 短路

电源短路时，电路中的电流很大，使电源和导线过热，容易烧坏电源或引起火灾。因此，工作中应尽量避免发生这种事故，并且在电路中要接入熔断器等短路保护装置，以便在出现这类事故时迅速切断电源。

例 1.3.1 某电源的开路电压 $U_{OC} = 18V$ ，短路电流 $I_{SC} = 6A$ ，试求该电源的内电阻 R_0 和电源电压 U_S 。

解：电源电压 U_S 等于其开路电压 U_{OC}

$$U_S = U_{OC} = 18V$$

由式 (1-12) 可求出电源的内电阻 R_0

$$R_0 = \frac{U_S}{I_{SC}} = \frac{18}{6} \Omega = 3\Omega$$

练习与思考

1.3.1 额定电压为 220V、额定功率为 100W 的白炽灯，其电阻是多少？若接到 380V 或 110V 的电源上使用，会出现什么问题？

1.3.2 某发电机的额定电流为 60A，只接了 40A 的照明负载，问其余 20A 的电流流到哪里去了？

1.3.3 电路如图 1-13 所示，试计算开关 S 断开和闭合两种情况下电压 U_{ab} 和 U_{cd} 的大小。

1.3.4 某电源的开路电压 $U_{OC} = 24V$ ，短路电流 $I_{SC} = 12A$ ，若外接 4Ω 的负载电阻，电源的输出电流 I 为多少？

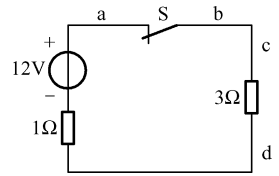


图 1-13 练习与思考 1.3.3 的图

1.4 基本电路元件

电路元件是组成电路的基本单元，按其特性可分为有源元件和无源元件，也可分为线性元件和非线性元件。

无源元件是不需要电源就能工作，或者说不需要电源就能显示其特性的电子元件。无源元件主要是电阻类、电感类和电容类等元件。有源元件是需要加电源才能工作，或者说需要加电源才能显示其特性的电子元件，如各类受控电源、晶体管、集成电路等；通常把独立电源也看作有源元件。

线性元件的外部特性（简称外特性）成线性关系，非线性元件的外部特性不成线性关系。对于不同元件，其外特性不同。对于电阻元件，外特性是指其 $u-i$ 关系。对于电感元件，外特性是指其 $\Psi-i$ 关系。对于电容元件，外特性是指其 $q-u$ 关系。

全部由线性元件组成的电路称为线性电路，含有非线性元件的电路称为非线性电路。

下面将分别讨论各种基本电路元件的电压、电流、功率、能量等特性。

1.4.1 电阻元件

电阻元件是表征电路中消耗电能的元件，电阻元件上的电压和电流一般取关联参考方向，如图 1-14 (a) 所示。

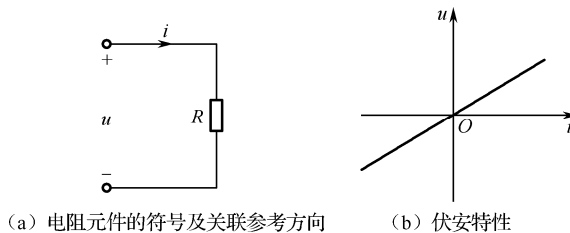


图 1-14 线性电阻元件

电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻，线性电阻的阻值是一个常数，因而其电压、电流之间的关系符合欧姆定律，即

$$u = Ri$$

电阻元件的外特性也称为伏安特性（或 $u-i$ 关系），对于线性电阻，其外特性是一条经过原点的直线，如图 1-14 (b) 所示。非线性电阻的伏安特性不是一条经过原点的直线。

电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

1.4.2 电感元件

电感元件是具有储存磁场能量性质的电路元件。线圈（也称为电感线圈）是典型的电感元件，当线圈的电阻很小可忽略不计时，线圈就是一个理想的电感元件。

图 1-15 (a) 所示是一个线圈，其匝数为 N ，当通过电流 i 时，产生的磁通为 Φ ，磁链 Ψ 定义为线圈的匝数与磁通的乘积，即

$$\Psi = N\Phi$$

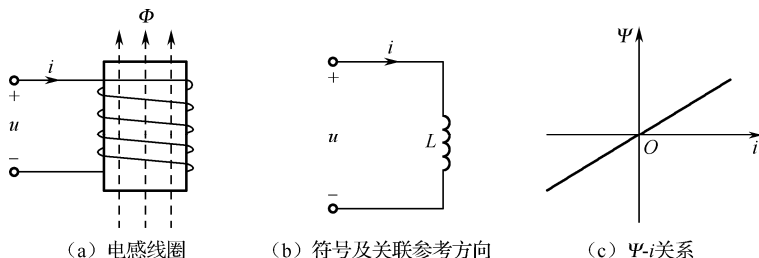


图 1-15 线性电感元件

线圈的电感 L 定义为磁链 Ψ 与电流 i 的比值，即

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

电感的单位为 H（亨利），磁链 Ψ 和磁通 Φ 的单位为 Wb（韦伯），电感的符号如图 1-15 (b) 所示。

若电感 L 为常数，则这种电感称为线性电感；若电感 L 不为常数，则这种电感称为非线性电感。对于线性电感，其外特性（ Ψ - i 关系）为一条通过原点的直线，如图 1-15 (c) 所示。

在电压和电流取关联参考方向时，根据电磁感应定律，可得到电感元件的伏安关系

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-13)$$

上式说明，电感元件两端的电压与通过它的电流的变化率成正比，与电流的大小无关。电流的变化率越大，电压值越大。在直流电路中，通过电感元件的电流恒定不变，其端电压为零，电感元件相当于短路。

由式 (1-13) 可得出电感元件上由电压 u 求电流 i 的公式

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-14)$$

式中， $i(0)$ 为 $t=0$ 时电感元件上电流的初始值。

在电压和电流取关联参考方向时，电感元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-15)$$

式中， $p > 0$ ，表示电感元件吸收功率，电感元件将输入的电能转换为磁场能量储存； $p < 0$ ，表示电感元件发出功率，电感元件将储存的磁场能量转换成电能释放。

假设 $t=0$ 时，电感元件的初始电流和储能为零，则在任一时刻 t 电感元件的储能即为在 $0 \sim t$ 这段时间内电感元件吸收的电能为

$$W_L = \int_0^t p dt = \int_0^t Li \frac{di}{dt} dt = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,电感元件的储能与电流*i*的大小有关,电流*i*的绝对值增大,电感元件储能就增多;反之,电感元件储能减少。由于一般电路中的电源不能提供无穷大的功率,因而电感元件的储能 W_L 和电流*i*不能突变。

1.4.3 电容元件

电容元件是具有储存电场能量性质的电路元件。用绝缘材料将电容器的两个极板隔开,两个极板上分别储存正、负电荷,极板之间形成电场。对于电容器,一般忽略其极板间的漏电。图1-16(a)所示是电容元件的符号及电压、电流的参考方向。

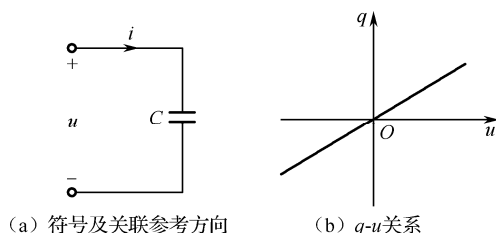


图 1-16 线性电容元件

电容*C*定义为其储存的电荷*q*与极间电压*u*的比值,即

$$C = \frac{q}{u}$$

电容的基本单位为F(法拉),常用单位为 μF (微法)和 pF (皮法)。

若电容*C*为常数,则这种电容称为线性电容;若*C*不为常数,则这种电容称为非线性电容。对于线性电容,其外特性(*q-u*关系)为一条通过原点的直线,如图1-16(b)所示。

在电压和电流取关联参考方向时,根据电流的定义,可得到电容元件的伏安关系

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

上式说明,通过电容元件的电流与其两端电压的变化率成正比,与电压的大小无关。当电容元件两端的电压变化时,电容元件两端的电荷随之变化,电容元件才有电流通过。在直流电路中,电容元件两端的电压不变,通过电容元件的电流为零,电容元件相当于开路。

由式(1-17)可得出电容元件由电流*i*求电压*u*的公式

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 idt + \frac{1}{C} \int_0^t idt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (1-18)$$

式中, $u(0)$ 为 $t=0$ 时电容元件上电压的初始值。

当电压和电流取关联参考方向时,电容元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-19)$$

式中, $p > 0$,表示电容元件吸收功率,电容元件将输入的电能转换为电场能量储存; $p < 0$,表示电容元件发出功率,电容元件将储存的电场能量转换成电能释放。

假设 $t=0$ 时,电容元件的初始电压和储能为零,则在任一时刻*t*电容元件的储能即为在 $0 \sim t$ 这段时间内电容元件吸收的电能,即

$$W_C = \int_0^t p dt = \int_0^t Cu \frac{du}{dt} dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-20)$$

上式表明，电容元件的储能与电压 u 的大小有关，电压 u 的绝对值增大，电容元件储能就增多；反之，电容元件储能减少。由于一般电路中的电源不能提供无穷大的功率，因而电容元件的储能 W_C 和电压 u 不能突变。

1.4.4 理想电压源

理想电压源两端的电压 u_S 总保持某个给定的时间函数，即 $u_S = u(t)$ 。理想电压源两端的电压 u_S 不受外电路的影响，而流过它的电流是任意的，电流的大小由外电路决定。理想电压源的符号如图 1-17 (a) 所示。

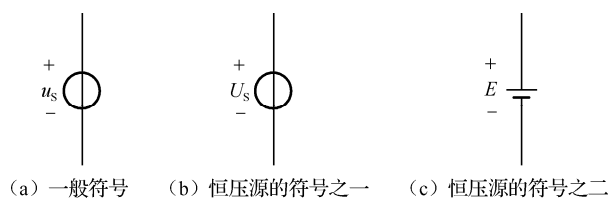


图 1-17 理想电压源的符号

当 u_S 为恒定值时，这种电压源称为恒压源。恒压源的符号如图 1-17 (b) 和图 1-17 (c) 所示，恒压源的伏安特性如图 1-18 所示。

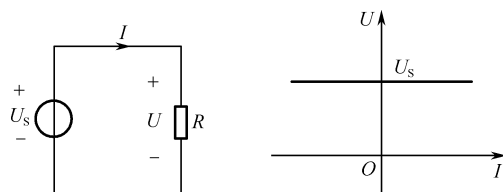


图 1-18 恒压源的伏安特性

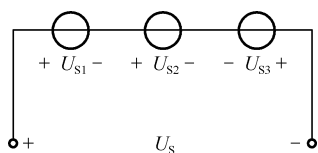


图 1-19 多个恒压源的串联

当多个恒压源串联时，总电压等于各个恒压源电压的代数和。在图 1-19 中，有 3 个恒压源相串联，其总电压为

$$U_S = U_{S1} + U_{S2} - U_{S3}$$

恒压源与其他元件（或支路）并联时，对外电路可等效为恒压源自身，如图 1-20 所示。只有当两个恒压源的大小和极性相同时，才允许其并联，否则禁止它们并联。

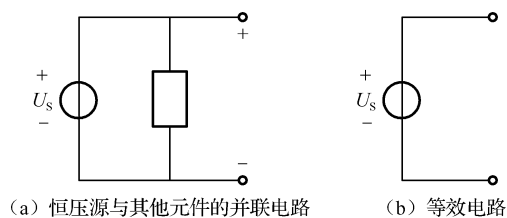


图 1-20 恒压源与其他元件的并联

1.4.5 理想电流源

理想电流源的电流 i_S 总保持某个给定的时间函数, 即 $i_S = i(t)$ 。理想电流源的电流 i_S 不受外电路的影响, 而它两端的电压是任意的, 端电压的大小由外电路决定。理想电流源的符号如图 1-21 (a) 所示。

当 i_S 为恒定值时, 这种理想电流源称为恒流源。恒流源的符号如图 1-21 (b) 所示, 恒流源的伏安特性如图 1-22 所示。

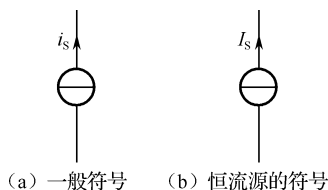


图 1-21 理想电流源的符号

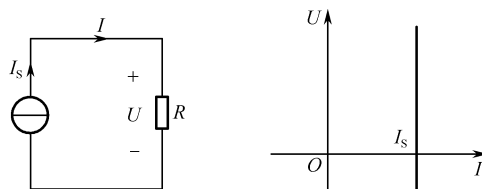


图 1-22 恒流源的伏安特性

当多个恒流源并联时, 总电流等于各个恒流源电流的代数和。在图 1-23 中, 有 3 个恒流源相并联, 总电流为

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} - I_{S3}$$

恒流源与其他元件 (或支路) 串联时, 对外电路可等效为恒流源自身, 如图 1-24 所示。

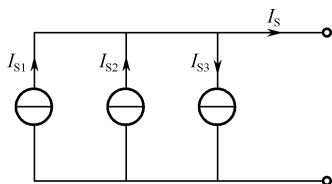


图 1-23 多个恒流源的并联

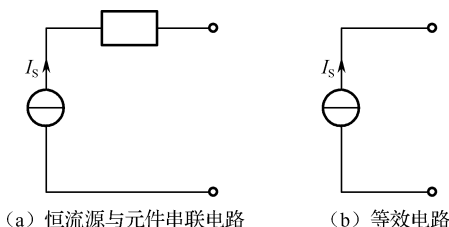


图 1-24 恒流源与元件的串联

例 1.4.1 电压源 U_S 与电流源 I_S 并联的电路如图 1-25 所示, 已知 $U_S = 3\text{V}$, $R_2 = 1\Omega$, $I_S = 2\text{A}$ 。试求电流 I_1 和电压 U_3 的大小。

解: 因为电路中电压源的电压 U_S 与电流源的电流 I_S 保持不变, 故

$$U_3 = U_S = 3\text{V}$$

$$I_1 = I_2 - I_S = \frac{U_S}{R_2} - I_S = \left(\frac{3}{1} - 2\right)\text{A} = 1\text{A}$$

例 1.4.2 电压源 U_S 与电流源 I_S 串联的电路如图 1-26 所示, 已知 $U_S = 3\text{V}$, $R_2 = 2\Omega$, $I_S = 2\text{A}$ 。求: (1) 电流 I_1 和电压 U_3 ; (2) 电压源 U_S 与电流源 I_S 消耗的功率, 哪个作电源? 哪个作负载?

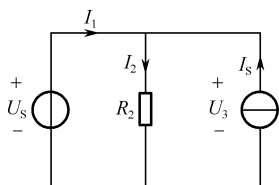


图 1-25 例 1.4.2 的电路图

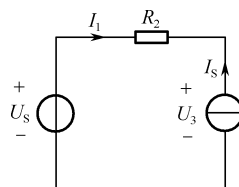


图 1-26 例 1.4.1 的电路图

解：(1) 因为电路中电压源的电压 U_S 与电流源的电流 I_S 保持不变，故

$$I_1 = -I_S = -2\text{A}$$

$$U_3 = U_S + R_2 I_S = (3 + 2 \times 2)\text{V} = 7\text{V}$$

(2) 把电压源、电流源均看作一个电路元件，根据式 (1-5) 和式 (1-6) 计算其吸收的功率：

电压源 U_S 取非关联参考方向， $P_1 = -U_S I_1 = -[3 \times (-2)]\text{W} = 6\text{W}$ ，电压源 U_S 是负载；

电流源 I_S 取非关联参考方向， $P_3 = -U_3 I_S = -(7 \times 2)\text{W} = -14\text{W}$ ，电流源 I_S 是电源。

练习与思考

1.4.1 如果一个电感元件两端的电压为零，其储能是否一定等于零？如果一个电容元件的电流为零，其储能是否一定为零？

1.4.2 电感元件通过恒定电流时可视为短路，此时电感 L 是否为零？电容元件两端加恒定电压时可视为开路，此时电容 C 是否为零？

1.4.3 理想电压源能否短路？能否开路？理想电流源能否短路？能否开路？

1.4.4 (1) 如图 1-26 所示，凡是理想电压源与理想电流源串联，电路中的电流是一定的，因而理想电压源不起作用。(2) 如图 1-25 所示，凡是与理想电压源并联的理想电流源，其端电压是一定的，因而理想电流源在电路中不起作用。这些说法是否正确？

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析电路的基本定律，包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律，它反映了电路中各元件上的电流和电压所遵循的基本规律。

在介绍基尔霍夫定律之前，先介绍几个电路分析中常用的名词。

支路：电路中的每一个分支称为支路。每条支路中流过的电流称为支路电流。

结点：3 条或 3 条以上支路的连接点称为结点。

回路：由支路围成的任一闭合路径称为回路。

网孔：内部不含其他支路的回路称为网孔。

在图 1-27 所示电路中，共有 3 条支路（分别对应支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ），2 个结点（a、b），3 个回路（abca、adba、adbca），2 个网孔（abca、adba）。

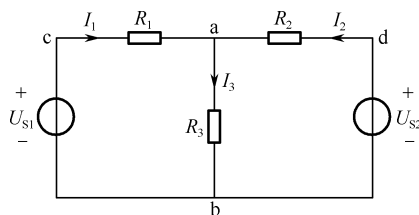


图 1-27 电路中的支路、结点和回路

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律用于描述结点处各支路电流之间的关系，其内容为：在任一瞬间，流

入任一结点的电流之和必等于流出该结点的电流之和，即

$$\sum i_{\text{in}} = \sum i_{\text{out}} \quad (1-21)$$

对于图 1-27 中的 a 点，用 KCL 可写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

上式也可改写为 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。因此，基尔霍夫电流定律也可这样描述：在任一瞬间，任一结点上电流的代数和恒等于零（如果规定流入结点的电流为正，则流出结点的电流为负），即

$$\sum i = 0 \quad (1-22)$$

基尔霍夫电流定律可推广到一个闭合面，其内容为：在任一瞬间，通过任一闭合面的电流的代数和为零。对于图 1-28 所示的电路，把虚线框看作一个闭合面，则存在如下电流关系：

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

基尔霍夫电流定律是电流连续性和“电荷守恒”原则的体现，在任一结点上电荷既不会产生也不会消失。

例 1.5.1 在图 1-28 所示的电路中，已知 $I_a = 3\text{A}$ ， $I_b = -2\text{A}$ ， $I_1 = 1\text{A}$ 。试求电流 I_c 、 I_2 和 I_3 。

解：

$$I_c = -(I_a + I_b) = -(3 - 2)\text{A} = -1\text{A}$$

$$I_2 = I_1 + I_b = (1 - 2)\text{A} = -1\text{A}$$

$$I_3 = I_a - I_1 = (3 - 1)\text{A} = 2\text{A}$$

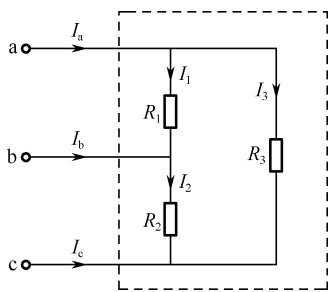


图 1-28 基尔霍夫电流定律的推广

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律用于描述回路中各元件上的电压之间的关系，其内容为：在任一瞬间，沿任一闭合回路绕行一周，各个元件上的电压降之和等于电压升之和，即

$$\sum u_{\text{down}} = \sum u_{\text{up}} \quad (1-23)$$

对于图 1-29 所示的回路，按照图中的顺时针绕行方向，用 KVL 可写出

$$U_1 + U_{S2} = U_2 + U_{S1}$$

上式也可改写为 $U_1 - U_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$ 。因此，基尔霍夫电压定律也可这样描述：在任一瞬间，沿任一闭合回路绕行一周，各个元件上电压的代数和恒等于零（如果规定沿绕行方向电压降为正，则电压升为负），即

$$\sum u = 0 \quad (1-24)$$

基尔霍夫电压定律可推广到一个非闭合的回路，其内容为：在任一瞬间，沿任一非闭合回路绕行一周，各个元件上的电压再加上开口处电压的代数和恒等于零。对于图 1-30 所示的电路，设开口处电压为 U ，元件 1 和元件 2 上的电压分别为 U_1 和 U_2 ，则存在如下电压关系：

$$U + U_2 - U_1 = 0$$

KCL 反映了电路中结点处的电流约束关系，KVL 反映了回路中各元件上的电压约束关系。基尔霍夫定律只与电路的结构有关，与电路中的元件无关，与电源（信号源）的种类无关。不论是何种元件（电阻 R 、电感 L 、电容 C 、电压源、电流源），不论是线性元件还是非线性元件，不论是直流电源（信号源）还是交流电源（信号源），基尔霍夫定律普遍适用。

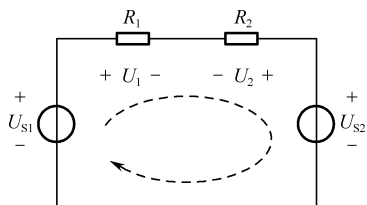


图 1-29 回路

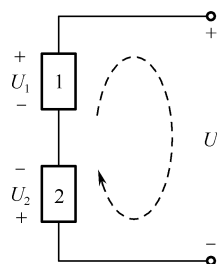


图 1-30 基尔霍夫电压定律的推广

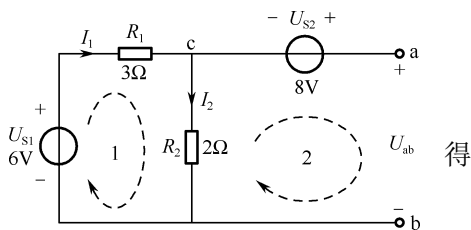


图 1-31 例 1.5.2 的图

例 1.5.2 求图 1-31 中 a、b 两端的电压 U_{ab} 。

解：对左边的回路 1 列 KVL 方程

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = U_{S1}$$

因为右边的回路 2 开路，故 $I_1 = I_2$ ，将数据代入上式

$$3I_2 + 2I_2 = 6$$

$$I_1 = I_2 = 1.2A$$

对右边的非闭合回路 2 列 KVL 方程

$$U_{ab} = U_{S2} + R_2 I_2$$

代入数据，整理得

$$U_{ab} = (8 + 2 \times 1.2)V = 10.4V$$

练习与思考

1.5.1 电路如图 1-32 所示，已知 $I_1 = 1A$ ， $I_2 = 2A$ ， $I_3 = -5A$ ， $I_4 = 8A$ ，求电流 I_5 。

1.5.2 电路如图 1-33 所示，已知 $I = 1.5A$ ， $R = 4\Omega$ ， $U_S = -4V$ ，求电压 U_{ab} 。

1.5.3 电路如图 1-34 所示，已知 $U_{ab} = 15V$ ， $U_1 = 4V$ ， $U_2 = 8V$ ，求电压 U_{cd} 。

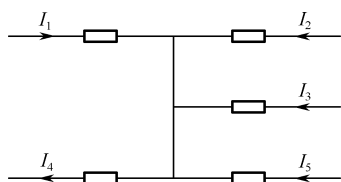


图 1-32 练习与思考 1.5.1 的图

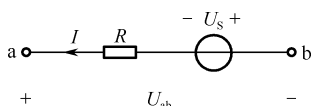


图 1-33 练习与思考 1.5.2 的图

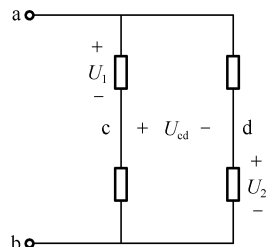


图 1-34 练习与思考 1.5.3 的图

1.6 电路中电位的概念及计算

电路中各点的电位是相对于参考点而言的，若规定参考点的电位为零，则电路中某一点的电位就等于该点到参考点之间的电压。在图 1-35 中，选择 d 点作为参考点时，电路中各点的电位分别为

$$\begin{aligned}
 V_a &= U_{ad} = U_{S1} = 140\text{V} \\
 V_b &= U_{bd} = R_3 I_3 = 6 \times 10\text{V} = 60\text{V} \\
 V_c &= U_{cd} = U_{S2} = 90\text{V} \\
 V_d &= 0\text{V}
 \end{aligned}$$

电路中任意两点之间的电压等于两点之间的电位差。在图 1-35 中, a、b 两点之间的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b = (140 - 60)\text{V} = 80\text{V}$$

电路中各点的电位与参考点的选取有关, 选取电路中不同的点作为参考点时, 电路中各点的电位随之发生变化, 但任意两点之间的电压不变。在图 1-36 中, 选择 b 点作为参考点时, 电路中各点的电位及 a、b 两点之间的电压分别为

$$\begin{aligned}
 V_a &= U_{ab} = R_1 I_1 = 20 \times 4\text{V} = 80\text{V} \\
 V_b &= 0\text{V} \\
 V_c &= U_{cb} = R_2 I_2 = 5 \times 6\text{V} = 30\text{V} \\
 V_d &= U_{db} = -R_3 I_3 = -6 \times 10\text{V} = -60\text{V} \\
 U_{ab} &= V_a - V_b = (80 - 0)\text{V} = 80\text{V}
 \end{aligned}$$

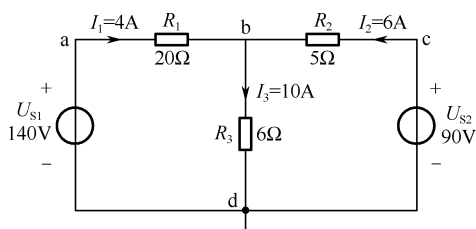


图 1-35 电位的求法 (选 d 点作为参考点)

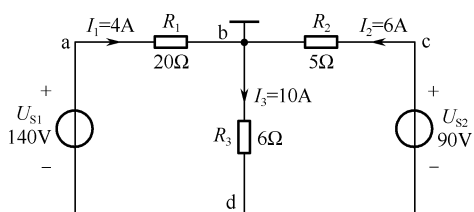


图 1-36 电位的求法 (选 b 点作为参考点)

在电路图中, 参考点通常用接地符号“⊥”标出。所谓接地, 并非真正与大地相接。在电子设备中, 通常用导线将参考点与机壳相连接, 作为整个电路的基准电位。

利用电位的概念, 还可以简化电路的画法。电源的一端接电路的参考点时, 为了作图简便, 通常不画出电源的符号, 只在电源的非接地端标注其电位的数值, 即用电位来表示电源。图 1-35 所示的电路可采用图 1-37 (a) 来表示。在电路中, 为使整个图形美观, 有时还需要将电路图进行一定的变形简化, 图 1-35 还可变换成图 1-37 (b) 或图 1-37 (c) 的形式。

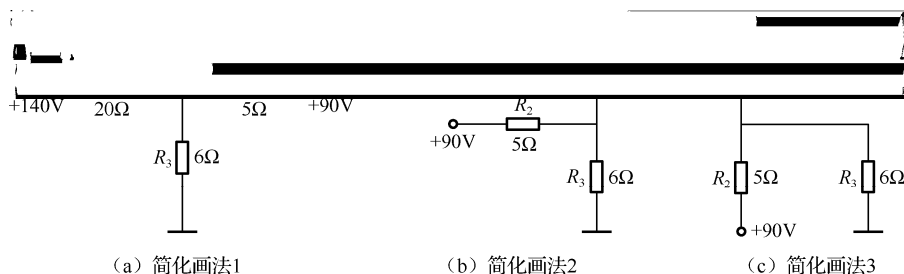


图 1-37 电源的简化画法

练习与思考

1.6.1 电路如图 1-38 所示, 分别计算开关 S 断开和闭合两种情况下 a 点的电位。

1.6.2 电路如图 1-39 所示, 已知 $U_{S1} = 12V$, $U_{S2} = -9V$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 8\Omega$, $R_3 = 12\Omega$, 求 a、b 两点的电位。若电阻 R_2 减小, a、b 两点的电位是升高还是降低? 试举例说明。

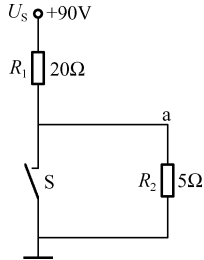


图 1-38 练习与思考 1.6.1 的图

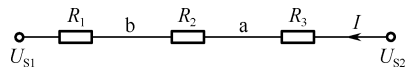


图 1-39 练习与思考 1.6.2 的图

1.7 Multisim14 仿真实验 基尔霍夫定律的验证

1. 实验目的

- (1) 验证基尔霍夫电流定律和电压定律。
- (2) 通过实验, 进一步理解参考方向与实际方向的关系。
- (3) 学习仿真软件 Multisim14 的基本应用。

2. 实验原理

验证基尔霍夫定律的实验电路如图 1-40 所示, 它由两个电压源 U_{S1} 、 U_{S2} 和多个电阻组成。根据基尔霍夫电流定律, 流过结点 A 的电流应符合以下关系:

$$\sum I = I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-25)$$

根据基尔霍夫电压定律, 在回路 ABCDA、ADEF A 中, 电压应符合以下关系:

$$\sum U = U_{AB} + U_{S2} + U_{CD} - U_{AD} = 0 \quad (1-26)$$

$$\sum U = U_{AD} + U_{DE} - U_{S1} + U_{FA} = 0 \quad (1-27)$$

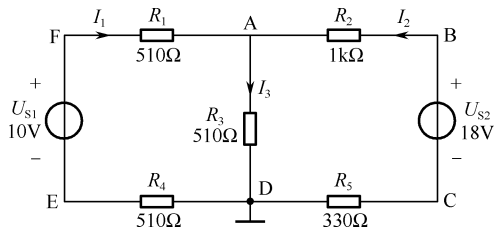


图 1-40 验证基尔霍夫定律的实验电路

3. 预习要求

- (1) 计算电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的数值, 填入表 1-2 中, 从理论上验证基尔霍夫电流定律是否

成立。

表 1-2 基尔霍夫电流定律的验证

电流数值及验证公式	计算值	测量值
I_1/mA		
I_2/mA		
I_3/mA		
验证公式是否成立 $\sum I = I_1 + I_2 + I_3 = 0$		

(2) 计算电压 U_{AB} 、 U_{CD} 、 U_{AD} 、 U_{DE} 、 U_{FA} 的数值，填入表 1-3 中，从理论上验证基尔霍夫电压定律是否成立。

表 1-3 基尔霍夫电压定律的验证

电压数值及验证公式	计算值	测量值	电压数值及验证公式	计算值	测量值
U_{AB}/V			U_{AD}/V		
U_{CD}/V			U_{DE}/V		
U_{AD}/V			U_{FA}/V		
验证公式是否成立 $\sum U = U_{AB} + U_{S2} + U_{CD} - U_{AD} = 0$			验证公式是否成立 $\sum U = U_{AD} + U_{DE} - U_{S1} + U_{FA} = 0$		

4. 实验内容及步骤

实验之前，先学习“第 9 章 仿真软件 Multisim14 的使用”，学会仿真软件 Multisim14 的基本操作方法。

(1) 选取元器件构建电路。

新建一个设计，命名为“实验一 基尔霍夫定律的验证”并保存。

从元件库中选取直流电源、电阻、直流电压表、直流电流表，放置到电路设计窗口中，修改元件的参数和名称，构建如图 1-41 所示的实验电路。各元器件的所属库如表 1-4 所示。

表 1-4 验证基尔霍夫定律的实验所用元器件及所属库

序号	元器件	所属库
1	直流电源 DC_POWER	Sources/POWER_SOURCES
2	接地 GROUND	Sources/POWER_SOURCES
3	电阻	Basic/RESISTOR
4	直流电压表 VOLTMETER	Indicators
5	直流电流表 AMMETER	Indicators

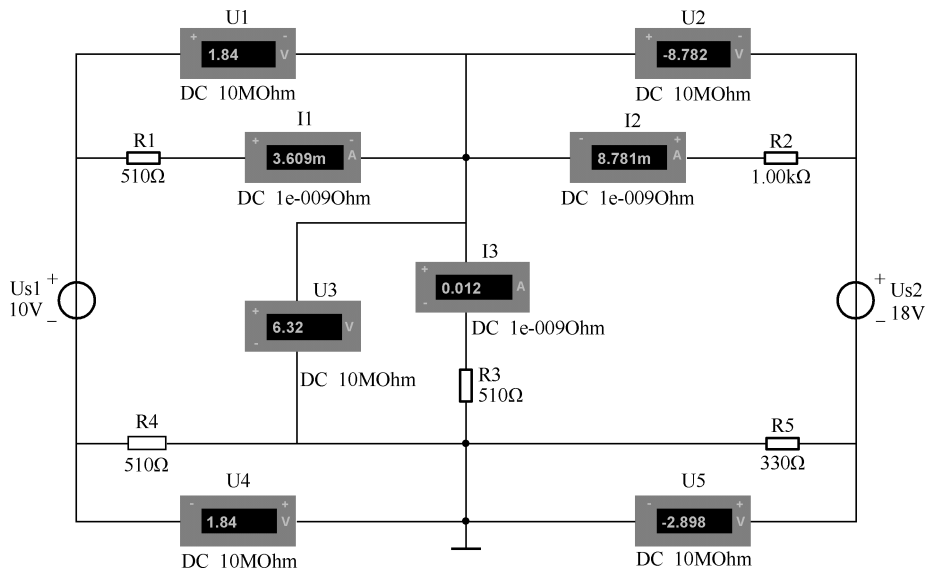


图 1-41 验证基尔霍夫定律的仿真电路

(2) 运行仿真电路，观测测量结果。

将各电流表的测量结果填入表 1-2 中，验证基尔霍夫电流定律是否成立。将各电压表的测量结果填入表 1-3 中，验证基尔霍夫电压定律是否成立。

练习与思考

1.7.1 将图 1-41 中的电压表和电流表都去掉，增加 5 个电压探针用于测试电路中各点的电位，实验电路如图 1-42 所示。实验前先计算出各点的电位，并将计算结果填入自制的表格中。将实验结果也填入表格中，比较实验结果是否与计算结果相符合。

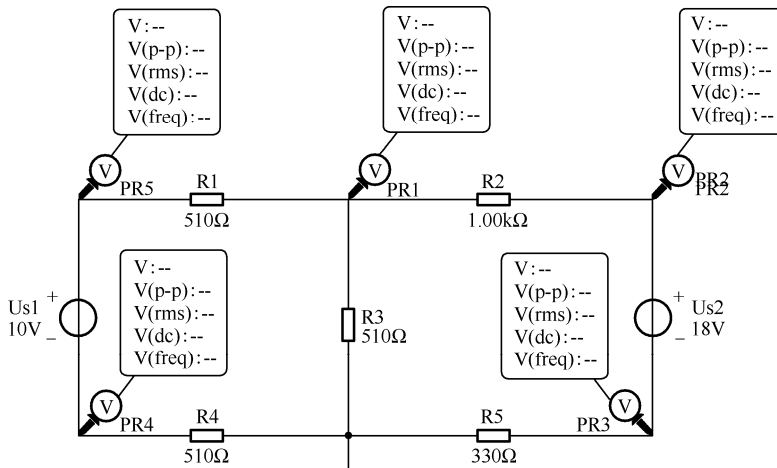


图 1-42 测量电位的仿真电路

1.8 课外实践 常用电子元器件的识别

电阻器、电感器、电容器是常用的电子元器件，本节介绍它们的种类、型号及命名方法、主要参数、标识方法等知识。通过本节的学习，加深对这些元器件的了解。

1.8.1 电阻器

电阻器在电路中常用作降压、限流或耗能元件使用，图 1-43 所示是几种常用电阻器的外形。

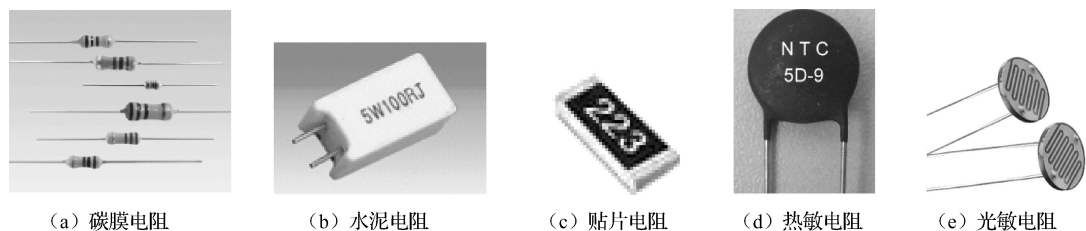


图 1-43 常见固定电阻器的外形

1. 电阻器的分类

根据制作材料、外形结构和用途的不同，电阻器主要有以下几种分类。

(1) 薄膜类电阻

薄膜类电阻的制作工艺是在玻璃或陶瓷基体上沉积一层碳膜、金属膜、金属氧化膜等形成导电薄膜，并通过控制薄膜的厚度，或通过刻槽使其有效长度增加，来控制电阻值。这类电阻器有碳膜电阻（RT 型）、金属膜电阻（RJ 型）、金属氧化膜电阻（RY 型）。

(2) 合金类电阻

合金类电阻是用块状合金（镍铬、锰铜、康铜）拉制成合金丝线或碾压成合金箔制成的电阻。这类电阻器有线绕电阻（RX 型）、精密合金箔电阻（RJ 型）。

(3) 合成类电阻

合成类电阻是将导电材料与非导电材料按一定比例混合成不同电阻率的材料制成的，其最突出的优点是具有高可靠性。这类电阻器有实心电阻（RS 型）、合成膜电阻（RH 型）、金属玻璃釉电阻（RI 型）、电阻网络（电阻排）。

(4) 特殊电阻

特殊电阻包括熔断电阻、水泥电阻、敏感类（如热敏、光敏、湿敏）电阻等。

2. 电阻器的型号及命名方法

根据图标 GB2470-1995 规定，电阻器的型号及命名方法如表 1-5 所示。

3. 电阻器的主要参数

电阻器的主要参数包括标称阻值、允许偏差、额定功率等。

(1) 标称阻值

标称阻值即电阻器上所标注的电阻值。电阻器按系列生产，包括 E6、E12、E24、E48、E96 和 E192 系列，其中前 3 种为普通电阻器系列，后 3 种为精密电阻器系列。

例如，E12 系列的电阻标称值包括 12 种阻值 1.0、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2 及其与 10^n 的乘积 (n 为整数，电阻的单位为 Ω)。

表 1-5 电阻器的型号及命名方法

第一部分：主称		第二部分：电阻体材料		第三部分：类型		第四部分：序号
字母	含义	字母	含义	符号	产品类型	用数字表示
R W	电阻器 电位器	T	碳膜	1, 2	普通型	对主称、材料、特征相同，仅尺寸、性能指标略有差别，但基本上不影响互换的产品给予同一序号；否则在序号后面用大写字母作为区别代号
		P	硼碳膜	3	超高频	
		U	硅碳膜	4	高阻	
		C	化学沉积膜	5	高温	
		H	合成膜	7	精密	
		I	玻璃釉膜	8	电阻器-高压	
		J	金属膜	8	电位器-函数	
		Y	金属氧化膜	9	特殊	
		S	有机实芯	G	高功率	
		N	无机实芯	T	可调	
		X	线绕	X	小型	
		R	热敏	L	测量用	
		G	光敏	W	微调	
		M	压敏	D	多圈	

示例：某电阻器的型号为 RJ73，表示精密金属膜电阻。

(2) 允许偏差

电阻器的实际阻值与标称阻值之间允许有一定的偏差范围，称为允许偏差，也称为误差。普通电阻器 E6、E12、E24 系列对应的允许偏差分别为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 。精密电阻器的允许偏差分别为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.05\%$ 等。

(3) 额定功率

电阻器的额定功率是指在规定的条件下，长期连续工作所允许消耗的最大功率。小功率电阻器的额定功率一般为 0.05W、0.125W、0.25W 等。

4. 电阻器的标识方法

电阻器的标识方法主要有直标法、文字符号法、数码法和色环表示法等。

(1) 直标法

直标法就是将电阻器的阻值、允许偏差、功率等参数和性能指标直接标注在电阻体上。

(2) 文字符号法

文字符号法是指用数字和文字符号有规律的组合，来表示阻值大小、允许偏差和小数点的位置。图 1-43 (b) 所示的水泥电阻标识为 5W100RJ，其中，5W 代表功率是 5W，100R