



附：电工技术基础自学考试大纲

# 电工技术基础

组编 / 全国高等教育自学考试指导委员会  
主编 / 席时达

全国高等教育自学考试指定教材

机电一体化工程专业 (专科)

机械工业出版社

# 第一章 电路的基本概念和分析方法

本章首先介绍电路的基本概念和主要物理量、电路模型以及电路的状态和电气设备的额定值，然后讨论基尔霍夫两定律和电路的分析方法，最后介绍非线性电阻电路。我们在分析时先从直流电路出发，从中引出的概念、定律、定理和分析方法，也普遍地适用于交流电路和其他各种线性电路。因此，本章是全书的重要理论基础，务必认真学好。

通过本章的学习，应了解电路的基本概念和主要物理量，理解电流、电压的参考方向和电功率正负值的含义，理解电路模型的概念和理想电路元件的特性以及实际电源的两种电路模型，理解电路的三种状态和电气设备额定值的意义，掌握基尔霍夫定律，并能运用支路电流法、叠加定理和戴维南定理分析直流电路。

## 第一节 电路及其主要物理量

### 一、电路的概念

电流通过的路径叫做电路。一个完整的电路是由电源、负载、中间环节（包括开关和导线等）三部分按一定方式组成的。图 1-1a 是手电筒的实际电路，它由电池、电珠、开关和金属连片组成。当我们将手电筒的开关接通时，金属片把电池和电珠联接成通路，就有电流通过电珠，使电珠发光。这时电能转化为热能和光能。其中，电池是提供电能的元件，称为电源；电珠是用电元件，称为负载；金属连片相当于导线，它和开关是连接电源和负载，起传输和控制电能作用的，称为中间环节。

手电筒的电气原理图如图 1-1b 所示。原理图中所有电路元件一律采用国家规定的图形符号表示。

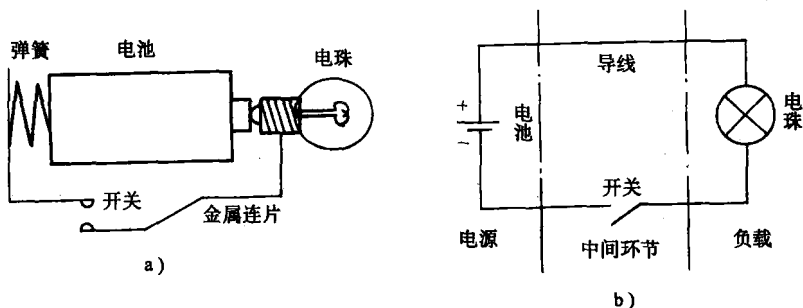


图 1-1 手电筒电路  
a) 实际电路 b) 电气原理图

电路按其功能可分为两类：一类是为了实现电能的传输和转换，例如一般的照明电路和动力电路，这类电路称为电力电路，手电筒就是最简单的电力电路；另一类是为了实现电信号的传递和转换，例如通信电路和检测电路，这类电路称为信号电路。

## 二、电路的主要物理量

### 1. 电流

电流的强弱用电流强度来度量,其数值等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。设在  $dt$  时间内通过导体某一横截面的电荷量为  $dq$ , 则通过该截面的电流强度为

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

在一般情况下, 电流强度是随时间而变的, 如果电流强度不随时间而变, 即  $dq/dt = \text{常数}$ , 则这种电流就称为恒定电流, 简称直流, 它所通过的路径就是直流电路。在直流电路中, 式(1-1)可写成

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

电流强度在工程上常简称为电流, 在电工标准中也规定不再采用“电流强度”这一名词。而电流又是一种物理现象, 即带电粒子(电荷)的定向运动。这样, “电流”一词便具有双重含义, 它有时表示电流强度这样一个物理量, 有时又表示电荷定向运动的物理现象。

我国法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。它规定电流的单位是安培(A)。1安=1库仑/秒(1C/s)。计量微小电流时, 以毫安(mA)或微安( $\mu\text{A}$ )为单位。

习惯上, 我们规定正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向为电流的实际方向, 如图1-2所示。

电流的方向是客观存在的。在简单电路情况下, 人们很容易判断出电流的实际方向, 如图1-3a中的  $I_1$ 、 $I_2$ 。倘若在图中a、b点之间再接入一个电阻  $R$  如图b所示, 那么该电阻中电流的实际方向就很难直观判定了。另外, 在交流电路中, 电流是随时间变化的, 在图上也无法表示其实际方向。为了解决这一问题, 需引入电流的参考方向这一概念。

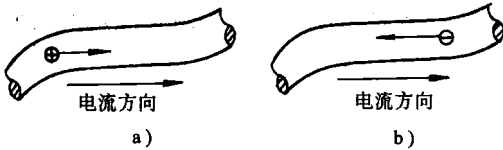


图1-2 电流的实际方向

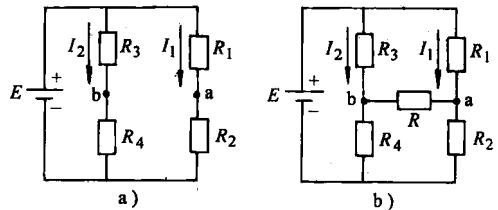


图1-3 电流方向的判断

参考方向也称正方向, 是假定的方向。电流的参考方向可以任意选定, 在电路中一般用箭头表示。当然, 所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当电流的参考方向与实际方向一致时, 电流为正值 ( $I > 0$ ); 当电流的参考方向与实际方向相反时, 电流为负值 ( $I < 0$ )。这样, 在选定的参考方向下, 根据电流的正负, 就可以确定电流的实际方向, 如图1-4所示。

在分析电路时, 首先要假定电流的参考方向, 并据此去进行分析计算, 最后再从答案的正负值来确定电流的实际方向。今后, 本书电路图上所标出的

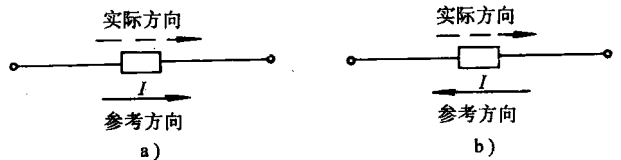


图1-4 电流的参考方向与实际方向

a)  $I > 0$  b)  $I < 0$

电流方向都是指参考方向。

### 2. 电压和电动势

带电粒子在电场中运动必然要做功。设有 a、b 两个极板，如图 1-5 所示，a 极板带正电，b 极板带负电，因而两极板间形成电场，其方向由 a 指向 b。当用导线和负载将电源的正负极联接成一个闭合电路时，正电荷将在电场力的作用下由正极 a 经导线和负载流向负极 b（实际上是自由电子由负极经导线和负载流向正极），从而形成电流。这时电场力对电荷做功，这种电场力做功的本领用电压来度量。

a、b 两点之间的电压  $U_{ab}$  在数值上等于单位正电荷在电场力作用下，由 a 点经外电路移动到 b 点电场力所做的功。若电场力移动电荷量  $Q$  所做的功为  $A$ ，则移动单位电荷所做的功为  $A/Q$ ，即  $U_{ab} = A/Q$ 。

在国际单位制中，电压的单位是伏特 (V)。当电场力把 1C (库仑) 的电荷从一点移到另一点所做的功为 1J (焦耳) 时，该两点间的电压为 1V。计量微小电压时，则以毫伏 (mV) 或微伏 ( $\mu V$ ) 为单位。计量高电压时，则以千伏 (kV) 为单位。

电压的实际方向习惯上规定从高电位点指向低电位点，即电压降的方向。但在分析电路时，也需选取电压的参考方向。

当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正 ( $U > 0$ )；相反时，电压为负 ( $U < 0$ )，如图 1-6 所示。

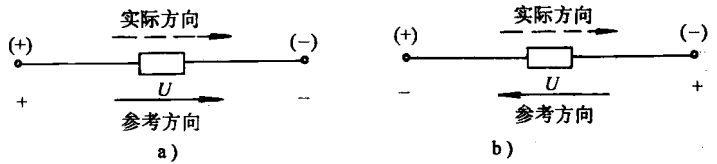


图 1-6 电压的参考方向与实际方向  
a)  $U > 0$  b)  $U < 0$

电压的参考方向可用箭头表示，也可用双下标 (如  $U_{ab}$ ) 表示，也可用极性 “+”、“-” 表示。“+” 表示高电位，“-” 表示低电位。本书一般情况下采用极性表示法。

在分析和计算电路时，电压和电流参考方向的假定，原则上是任意的。但为了方便起见，元件上的电压和电流常取一致的参考方向，这称为 关联参考方向。

图 1-7a 所示电路的  $U$  与  $I$  参考方向一致，则其电压与电流的关系是  $U = RI$ ；而图 1-7b 所示电路的  $U$  与  $I$  参考方向不一致，则电压与电流的关系是  $U = -RI$ 。可见，在列写电压与电流的关系式时，式中的正负号由它们的参考方向是否一致来决定。

### 3. 电位

在电气设备的调试和检修中，经常要测量各点的电位，看其是否符合设计数值。电位是度量电路中各点所具有的电位能大小的物理量，它在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所做的功。

对照电位与电压的定义，不难理解电路中任意一点的电位，就是该点与参考点之间的电压，而电路中任意两点之间的电压，则等于这

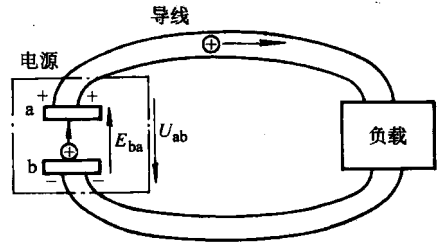


图 1-5 电压与电动势

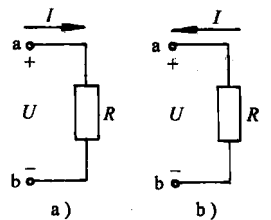


图 1-7 关联参考方向与非关联参考方向  
a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

两点电位之差。因此，电位的测量实质上就是电压的测量，即测量该点与参考点之间的电压。另外，如果测出电路中任意两点的电位  $V_a$  和  $V_b$ ，就可以计算出这两点之间的电压  $U_{ab}$ ，其关系式为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

现以图 1-8 为例来讨论 A 点与 B 点电位的计算。在电位计算前先选取参考点，令该点电位为零，电路图上用图形符号  $\perp$  表示。在图 1-8a 中，选择 O 点作为参考点，即令

$$V_O = 0$$

则

$$V_A = U_{AO} = V_A - V_O = 1V$$

$$V_B = U_{BO} = -U_{OB} = V_B - V_O = -1V$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = 2V$$

在图 1-8b 中，以 B 点为参考点，即令

$$V_B = 0$$

则

$$V_A = U_{AB} = V_A - V_B = 2V$$

在图 1-8c 中，以 A 点为参考点，即令

$$V_A = 0$$

则

$$V_B = U_{BA} = -U_{AB} = V_B - V_A = -2V$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = 2V$$

可以看出，参考点选得不同，电路中各点的电位也不同，但任意两点间的电位差不变。在图 1-8a、b、c 中，A、B 两点之间的电压为定值。所以各点的电位高低是相对于参考点而言的，而两点间的电压值则与参考点的选择无关。

分析电子电路时，经常用电位来讨论问题，这给电路分析带来方便，如某电路有 4 个节点（电路的交叉点称为节点），任意两个节点之间都有电压，当用电压来讨论问题时，就会涉及到 6 个不同的电压值。然而改用电位来讨论时，选取其中 1 个节点为参考点，设其电位为零，则只需讨论其余 3 点的电位就可以了。因此，在电子线路中，往往不再把电源画出，而改用电位标出。图 1-9 是电路的一般画法与用电位表示的习惯画法对照。

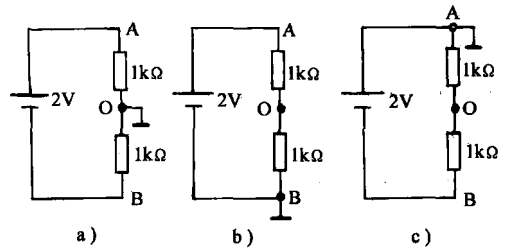


图 1-8 电位的计算示例

对于电位来说，参考点的概念是十分重要的，因为电位是一个相对物理量，如果不选择参考点去讨论电位是没有意义的。

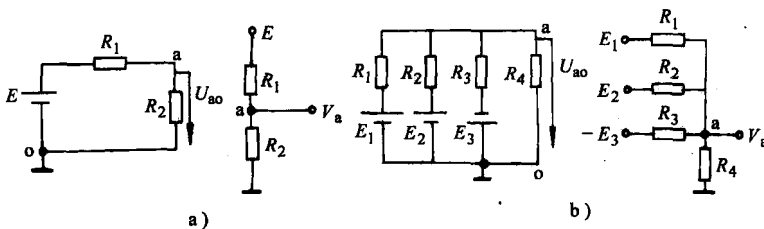


图 1-9 电路的一般画法与用电位表示的习惯画法对照

电位参考点的选取原则上是任意的，但实用中常选大地为参考点，在电路图中用图形符号  $\perp$  表示。有些设备的外壳是接地的，凡与机壳相联的各点，均是零电位点。有些设备的机壳不接地，则选择许多导线的公共点（也可是机壳）作参考点，电路中用图形符号  $\perp$  表示。

**例 1-1** 试计算图 1-10a 所示电路中 b 点的电位  $V_b$ 。

**解** 图 1-10a 的电路按一般画法如图 1-10b 所示，故电路中的电流

$$I = \frac{V_a - V_c}{R_1 + R_2} = \frac{9 - (-6)}{100 + 50} = \frac{15}{150} \text{ mA} = 0.1 \text{ mA}$$

电阻  $R_1$  上的电压降  $U_{ab} = R_1 I = 100 \times 0.1 \text{ V} = 10 \text{ V}$

故 b 点的电位  $V_b = V_a - U_{ab} = V_a - R_1 I = (9 - 10) \text{ V} = -1 \text{ V}$

或  $V_b = V_c + U_{bc} = V_c + R_2 I = (-6 + 50 \times 0.1) \text{ V} = -1 \text{ V}$

计算表明，当选取电位参考点以后，电路中的各点都具有确定的电位，与计算的路径无关。

#### 4. 电动势

在图 1-5 所示的电路中，正电荷在电场力作用下不断从 a 极板流向 b 极板，如果没有一种外力作用，a 极板因正电荷的减少会使电位逐渐降低，而 b 极板则因正电荷的增多会使电位逐渐升高，故 a、b 两点之间的电位差就会减小，最后减为零。联接导线上的电流也会减小，最后为零。为了维持导线中的电流，必须使 a、b 两极板间保持一定的电压，这就要借助外力使移动到 b 极板的正电荷经过另一路径回到 a 极板，在这过程中，外力要克服电场力做功，这种外力是非电场力，我们称它为电源力。

为衡量电源力对电荷做功的能力，我们引出电动势这个物理量。电动势在数值上等于电源力将单位正电荷从电源负极（b 点）移到电源正极（a 点）所做的功，用  $E$  表示。

电动势的实际作用方向是在电源内部由低电位端指向高电位端，是电位升高的方向。电动势的参考方向也可用箭头、双下标或“+”、“-”极性表示。如果不考虑电源内部可能存在的其他形式的能量转换，则电源力对单位正电荷所做的功等于单位正电荷增加的位能，即

$$\text{电动势 } E_{ba} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

电动势的单位与电压相同，也是伏特（V）。

#### 5. 电能和电功率

在图 1-5 所示的直流电路中，a、b 两点的电压为  $U$ ，在时间  $t$  内电荷  $Q$  受电场力作用从 a 点经负载移到 b 点，电场力所做的功为

$$\text{功 } A = UQ = UI t \quad (1-5)$$

这就是在时间  $t$  内所消耗（或吸收）的电能，而单位时间内消耗的电能称为电功率（或简称为功率），即负载和导线消耗（或吸收）的电功率

$$\text{电功率 } P = A/t = UI \quad (1-6)$$

电场力做功所消耗的电能是电源提供的。在时间  $t$  内，电源力将电荷  $Q$  从电源负极经电源内部移到正极所做的功为

$$A_E = EQ = EI t \quad (1-7)$$

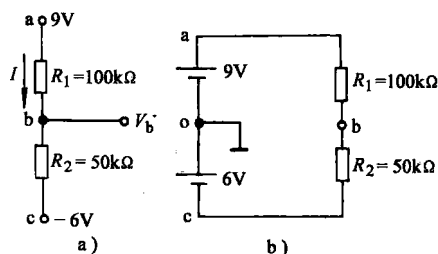


图 1-10 例 1-1 的电路

电源产生（或发出）的电功率

$$P_E = EI \quad (1-8)$$

在一个电路中，电源产生的功率与负载、导线以及电源内阻上消耗的功率总是平衡的，遵从能量守恒和转换定律。在忽略电源内阻的条件下，则

$$P = P_E$$

即

$$U = E$$

端电压  $U$  和电动势  $E$  的大小相等，但作用方向相反。

在国际单位制中，功的单位是焦耳（J），功率的单位是瓦特（W）。比瓦特大的单位是千瓦（kW）， $1\text{kW} = 1000\text{W}$ ；比瓦特小的单位是毫瓦（mW）。

在电路分析中，不仅要计算功率的大小，有时还要判断功率的性质，即该元件是产生功率还是消耗功率。根据电压和电流的实际方向可以确定电路元件的功率性质：

当  $U$  和  $I$  的实际方向相同，即电流从“+”端流入，从“-”端流出，则该元件是消耗（取用）功率，属负载性质。

当  $U$  和  $I$  的实际方向相反，即电流从“+”端流出，从“-”端流入，则该元件是输出（提供）功率，属电源性质。

由此可见，在电路元件上  $U$  和  $I$  的参考方向选得一致的条件下，当  $P = UI$  为正值时，表明  $U$ 、 $I$  的实际方向相同，该元件是负载性质，消耗功率；当  $P$  为负时，表明  $U$ 、 $I$  的实际方向相反，该元件是电源性质，输出功率。如果  $U$ 、 $I$  的参考方向选得不一致，则情况相反。

**例 1-2** 某电路中的一段支路含有电源，如图 1-11a 所示，支路电阻为  $R_0 = 0.6\Omega$ ，已知电压与电流的关系为  $U = E - R_0 I$ ，测得该有源支路的端电压为  $230\text{V}$ ，电路中的电流  $I = 5\text{A}$ ，试求：

- (1) 有源支路的电动势；
- (2) 有源支路在电路中是属于电源性质还是属于负载性质？
- (3) 写出功率平衡关系式。

**【解】**

- (1) 因为

$$U = E - R_0 I$$

所以

$$E = U + R_0 I = (230 + 0.6 \times 5)\text{V} = 233\text{V}$$

(2) 由于有源支路的电动势  $E$  大于外电压  $U$ ，故电流  $I$  的实际方向如图 1-11b 所示。即  $I$  与  $U$  的实际方向相反，有源支路在电路中是属于电源性质，它向外电路提供电能。

- (3) 电动势发出的功率为

$$P_E = EI = 233 \times 5\text{W} = 1165\text{W}$$

向外电路发出的功率为

$$P = UI = 230 \times 5\text{W} = 1150\text{W}$$

内阻上消耗的功率为

$$\Delta P = I^2 R_0 = 5^2 \times 0.6\text{W} = 15\text{W}$$

功率平衡关系式为

$$P_E = P + \Delta P$$

计算表明，有源支路中电动势发出的功率为  $1165\text{W}$ ，其中  $15\text{W}$  消耗于内阻上， $1150\text{W}$  输送给外电路。

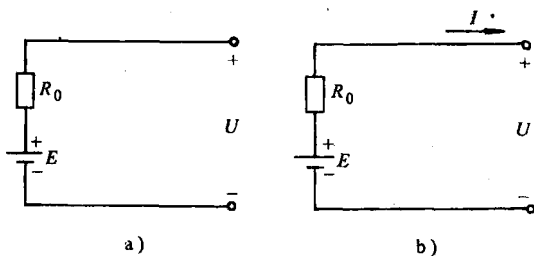


图 1-11 例 1-2 的图

### 思考题

- 1.1-1 何谓电路？它由哪几个基本部分组成？在电力电路中各部分起什么作用？
- 1.1-2 将图 1-12 所示电路的电源画出，并标出电位参考点。
- 1.1-3 将图 1-13 改画成用电位表示的电路图。
- 1.1-4 电路中电位相等的各点，如果用导线接通，对电路其他部分有没有影响？
- 1.1-5 忽略电路中导线的电阻，则导线上各点电位是相等的，如果把导线断开，对电路其他部分有没有影响？
- 1.1-6 在图 1-14 所示电路中，已知  $R_2=R_4$ ， $U_{AD}=15V$ ， $U_{CE}=10V$ ，试用电位差的概念计算  $U_{AB}$ 。

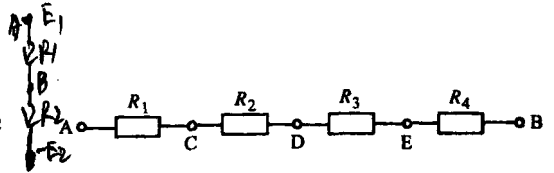
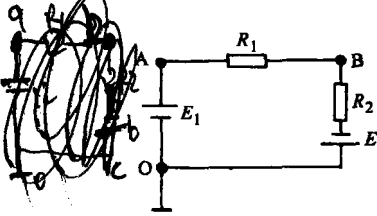
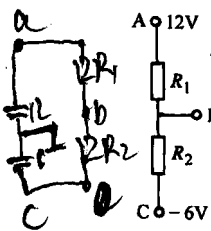


图 1-12 题 1.1-2 的电路      图 1-13 题 1.1-3 的电路      图 1-14 题 1.1-6 的电路

- 1.1-7 在图 1-15 所示电路中，已知  $U=-10V$ ， $I=2A$ ，试问 a、b 两点，哪点电位高？元件 A 是电源还是负载？
- 1.1-8 在检修电子仪器时，说明书上附有线路图，其中某一局部线路如图 1-16 所示。用电压表测量发现  $U_{AB}=2V$ ， $U_{BC}=0$ ， $U_{CD}=4V$ ， $U_{DE}=0$ ， $U_{AE}=6V$ 。试判断线路中可能出现的故障是什么？
- 1.1-9 上题的线路故障可否用测量电位的方法进行判断？如何测量？
- 1.1-10 图 1-17 示电路中，三个电阻吸收的功率之和是多少？

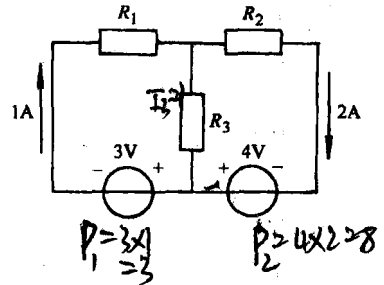
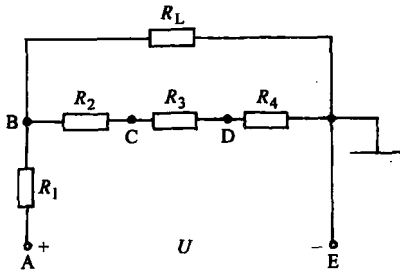
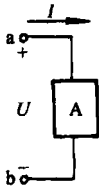


图 1-15 题 1.1-7 电路      图 1-16 题 1.1-8 电路      图 1-17 题 1.1-10 电路  $P_3 = U \cdot I = 1W$

## 第二节 电路模型

### 一、概述

实际电路中，电气元件的品种繁多，在电路分析中，为了简化分析和计算，通常在一定条件下，突出实际电路元件的主要电磁性质，忽略其次要因素，把它近似地看作理想电路元件。例如用“电阻”这个理想的电路元件来代替电阻器、电阻炉、灯泡等消耗电能的实际元件；用内电阻和理想电压源相串联的理想元件的组合来代替实际的电池等等。用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来代替实际电路中的具体元件，称为实际电路的模型化。在电路分析中，常用的理想电路元件只有几种，它们可以用来表征千万种实际器件。



由理想电路元件构成的电路称为电路模型。图 1-18b 是手电筒的电路模型，图中的电珠用理想电阻元件  $R$  来代替，电池用理想电阻元件  $R_0$  和理想电压源  $U_s$  的串联来代替 ( $U_s$  的数值等于电池的电动势)。今后我们在电路分析中讨论的电路都是电路模型。电路模型虽然与实际电路的性能不完全一致，但在一定条件下，是在工程上允许的近似范围内，实际电路的分析完全可以用电路模型来代替，从而使电路的分析与计算得到简化。

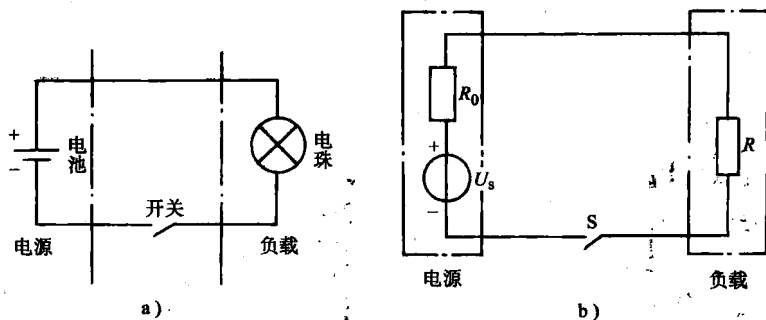


图 1-18 手电筒电路模型  
a) 电气原理图 b) 电路模型

## 二、理想电路元件

我们知道，电流的周围存在着磁场，电荷的周围存在着电场，磁场和电场中都储存着能量。因此，一般来说，电路中除了产生电能的过程之外，还存在着三种基本的能量转换过程，即电能的消耗、磁场能的储存和电场能的储存。用来表征电路中这三种物理性质的理想电路元件分别称为理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件。而电能的产生则由理想电源元件来表示，它有理想电压源和理想电流源两种形式。这样一来，无论哪一种电路，一般都可以抽象成由理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件和理想电压源、理想电流源这五种理想电路元件中的一种或几种来组成的电路模型。

上述理想电路元件，其端电压与通过它的电流之间都有确定的关系，这种关系称为元件的伏安特性，它由元件的性质来决定。

### 1. 电阻元件

理想电阻元件简称为电阻元件，它是从实际电阻器抽象出来的理想模型。像灯泡、电阻炉、电烙铁等这类实际电阻器件，当忽略其电感、电容作用时，可将它们抽象为只具有消耗电能性质的电阻元件。

在图 1-19a 中，电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向相同， $R$  是理想电阻元件，由欧姆定律可知，电阻元件的伏安特性是

$$u = Ri \quad (1-9)$$

它表示电阻元件的端电压和流过它的电流成正比。比例系数  $R$  称为电阻，是表示电阻元件特性的参数。图 1-19b 是其伏安特性曲线，它是一条通过原点的直线。通常我们把伏安特性为直线的电阻称为线性电阻。

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 ( $\Omega$ )，当电路两端的电压为 1V，通过的电流为 1A 时，则该段电路的电阻就为  $1\Omega$ 。较大的计量单位有千欧 ( $k\Omega$ )、兆欧 ( $M\Omega$ )。

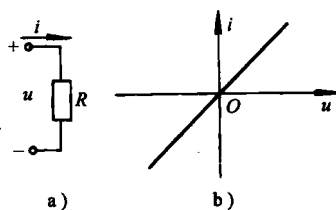


图 1-19 电阻元件  
a) 电路图 b) 伏安特性

习惯上,我们常称电阻元件为电阻,故“电阻”这个名词也有双重含义,它既表示电路元件,又表示元件的参数。

电阻元件取用的功率为

$$p=ui=i^2R=\frac{u^2}{R} \quad (1-10)$$

不论  $u$ 、 $i$  是正值或是负值,  $p$  总是大于零。上式说明电阻元件总是消耗电功率的,与电压、电流的实际方向无关,故电阻是耗能元件。

从式 (1-10) 还可以看出,当电流恒定时,电功率与电阻成正比 ( $p=i^2R$ ),例如线路上的电阻通常比用电器的电阻小得多,线路电流主要取决于用电器。当用电器不变,线路电阻改变时,线路上的电流基本恒定,这时线路上消耗的电功率与线路电阻成正比。当电压恒定时,电功率与电阻成反比 ( $p=u^2/R$ ),例如在通常情况下,线路上的电压降远小于用电器的端电压,因此,当用电器电阻改变时,由于电流变化而引起的线路电压降变化相对于用电器的端电压而言是很小的,可看成用电器的电压基本恒定,故用电器的电功率与用电器的电阻成反比。这里要注意的是:之所以会有两种完全相反的结论,是因为前提条件的不同。

## 2. 电感元件

理想电感元件简称为电感元件。它是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。当电感线圈中通以电流后,将产生磁通,在其内部及周围建立磁场,储存能量。当忽略导线电阻及线圈匝与匝之间的电容时,可将其抽象为只具有储存磁场能性质的电感元件。

根据电磁感应定律,当电感线圈中的电流  $i$  变化时,磁场也随之变化,并在线圈中产生自感电动势  $e_L$ 。当电压、电流、电动势的参考方向一致,如图 1-20 所示时,则有

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

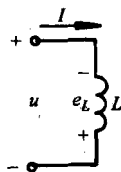


图 1-20 电感元件

上式表明,电感元件两端的电压是与电感线圈中因电流变化而产生的自感电动势相平衡的,电压的大小与线圈电流对时间的变化率成正比。比率系数  $L$  称为电感,是表征电感元件特性的参数。电流变化越快,电感元件产生的自感电动势越大,与其平衡的电压也越大。当电感元件中流过稳定的直流电流时,因  $di/dt=0$ ,  $e_L=0$ ,故  $u=0$ ,这时电感元件相当于短路。

在国际单位制中,电感的单位是亨利 (H),当电感线圈中电流变化率为  $1\text{A/s}$ ,产生  $1\text{V}$  的感应电动势时,则该电感线圈的电感为  $1\text{H}$ 。由于亨利单位太大,工程上一般采用毫亨 (mH) 或微亨 ( $\mu\text{H}$ )。

习惯上我们常把电感元件称为电感,故电感这个名词,既表示电路元件,又表示元件的参数,同样有双重含义。

将式 (1-11) 两边乘上  $i$  并积分,则得电感元件中储存的磁场能量为

$$W_L = \int_0^i uidi = \int_0^i Lididi = \frac{1}{2}Li^2 \quad (1-12)$$

上式说明,电感元件在某时刻储存的磁场能量,与该时刻流过的电流的二次方成正比。电感元件不消耗能量,故称为储能元件。

## 3. 电容元件

理想电容元件简称为电容元件,它是从实际电容器抽象出来的理想化模型。实际电容器

通常由两块金属极板中间充满介质（如空气、云母、绝缘纸、塑料薄膜、陶瓷等）构成，电容器加上电压后，两块极板上将出现等量异号电荷，并在两极板间形成电场，储存电场能量。当忽略电容器的漏电阻和电感时，可将其抽象为只具有储存电场能性质的电容元件。

电容器极板上储存的电量  $q$ ，与外加电压  $u$  成正比，即

$$q = Cu \quad (1-13)$$

式中，比例系数  $C$  称为电容，是表征电容元件特性的参数。

在国际单位制中，电容的单位是法拉 (F)。当将电容器充上 1V 的电压时，极板上若储存了 1C 的电量，则该电容器的电容就是 1F。由于法拉的单位太大，工程上一般采用微法 ( $\mu\text{F}$ ) 或皮法 (pF)。

电容这个名词也有双重含义，它既表示电路元件，又表示元件的参数。当电压和电流的参考方向一致时，如图 1-21 所示，则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

上式表明，电容元件中通过的电流是由于电容元件上储存的电量发生变化引起的，电流的大小与元件两端的电压对时间的变化率成正比。电压变化越快，电流越大。当电容元件两端加恒定电压时，因  $dq/dt=0$ ，故  $i=0$ ，电容元件相当于开路，故电容元件有隔直流的作用。

将式 (1-14) 两边乘上  $u$  并积分，可得电容元件极板间储存的电场能量为

$$W_C = \int_0^t u i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-15)$$

上式说明，电容元件在某时刻储存的电场能量与元件在该时刻所承受的电压的二次方成正比。电容元件也不消耗能量，是另一种储能元件。

#### 4. 理想电压源

无论流过多大电流，都能提供确定电压的电路元件称为理想电压源。它相当于一个只产生电动势而没有内部能量损耗的电源。图 1-22 是理想电压源的符号和伏安特性曲线。 $U_s$  为理想电压源的电压，相当于电源电动势。理想电压源的端电压为

$$U = U_s \quad (1-16)$$

理想电压源的电流  $I$  决定于外电路。

理想电压源实际上是不存在的，但如果电源的内阻远小于负载电阻，则端电压基本恒定，就可以忽略内阻的影响，近似地认为它是一个理想电压源。通常，稳压电源（或称为稳压器）和新的干电池都可近似地认为是理想电压源。

#### 5. 理想电流源

在电路中，无论它的端电压是多少，都能提供确定电流的电路元件称为理想电流源。图 1-23 是理想电流源的符号和伏安特性， $I_s$  为理想电流源的电流（也称为电激流）。理想电流源的输出电流为

$$I = I_s \quad (1-17)$$

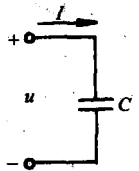


图 1-21 电容元件

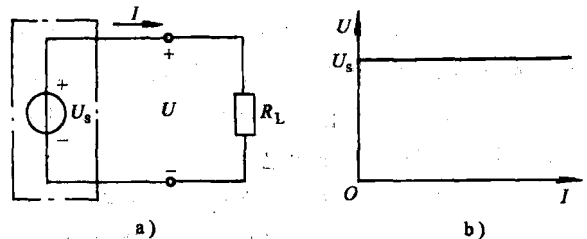


图 1-22 理想电压源  
a) 电路 b) 外特性

理想电流源的端电压  $U$  决定于外电路。

同样,理想电流源实际上也是不存在的,但如果电源的内阻远大于负载电阻,则电流基本恒定,也可近似地认为是理想电流源。通常,恒流电源(或称恒流器)、光电池和在一定条件下工作的晶体管都可近似地认为是理想电流源。

一般来说,理想电压源和理想电流源在电路中都是用来提供(产生)功率的。但有时也可能从电路中吸取(消耗)功率,例如蓄电池工作时向外电路提供功率,而处于充电状态时则从外电路吸取功率。如何判断电源是提供功率还是吸取功率?可根据电压、电流参考方向结合功率值的正负来确定。

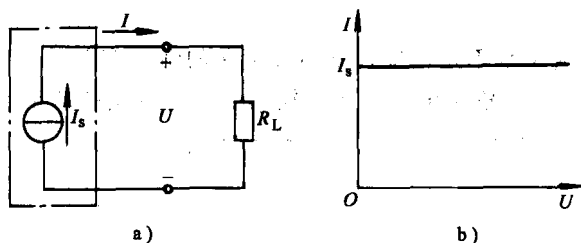


图 1-23 理想电流源

a) 电路 b) 外特性

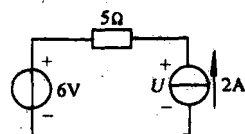


图 1-24 例 1-3 的图

**例 1-3** 电路如图 1-24 所示,求理想电流源的端电压和功率。

**【解】** 理想电流源的端电压由外电路决定,按图中所示极性,根据电位差的概念可得

$$U = (2 \times 5 + 6) \text{V} = 16 \text{V}$$

理想电流源的电流方向与端电压方向不一致,故

$$P = -16 \times 2 \text{W} = -32 \text{W}$$

功率为负值,表示电流源是提供功率的。

### 三、实际电源的两种电路模型

在电路中,一个实际电源在提供电能的同时,必然还要消耗一部分电能。因此,实际电源的电路模型应由两部分组成:一是用来表征产生电能的理想电源元件,另一部分是表征消耗电能的理想电阻元件。由于理想电源元件有理想电压源和理想电流源两种,故实际电源的电路模型也有两种,即电压源和电流源。

#### 1. 电压源

一个实际的电源(无论是发电机、电池还是各种信号源)可以用一个理想电压源和一个内电阻相串联的理想电路元件的组合来代替。这种电源的电路模型称为电压源。图 1-25a 所示的电路是电压源与外电路的联接。电压源的电动势、电流及其端电压的关系可由下式来表达:

$$U = U_s - IR_0 \quad (1-18)$$

在使用电源时,人们最关心的问题是当负载变化时,电路中的电

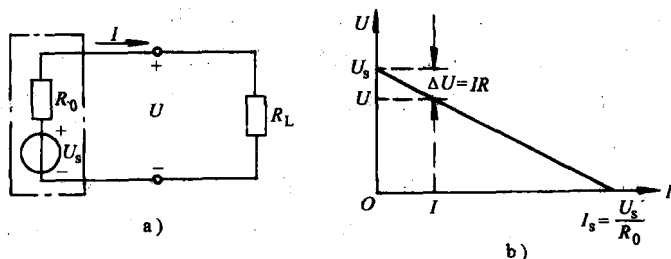


图 1-25 电压源

a) 电压源与外电路的联接 b) 伏安特性

流  $I$  与电源的端电压  $U$  将如何变化。因而我们有必要来研究  $U$  与  $I$  之间的关系，即  $U = f(I)$ 。这种关系称为电源的外特性。

式 (1-18) 就是直流电压源的外特性方程式。式中， $U_s$  和  $R_0$  是常数， $U$  和  $I$  之间的关系是线性关系，如图 1-25b 所示。

当电源开路时，输出电流  $I=0$ ，输出电压在数值上等于电源的电动势，即  $U=U_s$ 。

当电源负载时，输出电压在数值上小于电源的电动势，两者之差是内阻上的电压降  $\Delta U = IR$ 。当外电路的电阻  $R$  减小时，输出电流  $I$  增加，输出电压  $U$  随之下降。

当电压源短路时，输出电压  $U=0$ ，电动势全部都作用于内阻上，短路电流仅受内阻的限制，即  $I=U_s/R_0$ 。

可见，电压源的端电压  $U$  和输出电流  $I$  都不是定值，都与外电路的情况有关。

从电压源的外特性可以看出，内阻越小，输出电流变化时输出电压的变化就越小，即输出电压越稳定，直线越平。在理想情况下，内阻  $R_0=0$ ， $U$  为定值，即成为理想电压源，它的外特性是一条平行于横轴的直线。

## 2. 电流源

直流电压源的外特性方程式  $U=U_s-IR_0$  可改写为

$$I = \frac{U_s}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-19)$$

式中  $I_s$  为电源的短路电流， $I_s=U_s/R_0$ ； $I$  是电源的输出电流； $U$  是电源的端电压， $R_0$  为电源内阻。

式 (1-19) 表明，一个实际电源也可以用一个理想电流源  $I_s$  和电阻  $R_0$  相并联的电路模型来表示，如图 1-26a 所示。这种电源的电路模型称为电流源。

式 (1-19) 是直流电流源的外特性方程式。式中  $I_s$  和  $R_0$  是常数， $I$  和  $U$  之间的关系是线性关系，如图 1-26b 所示。

当电流源短路时，输出电压  $U=0$ ， $I_s$  全部成为输出电流，即  $I=I_s$ 。

当电流源负载时， $I_s$  不能全部输送出去，有一部分在内

阻上通过。当外电路的电阻增加时，在内阻上通过的电流增大，内阻上的压降也增大，即电流源的输出电压  $U$  增加，这时输出电流减小。

当电流源开路时，输出电流  $I=0$ ， $I_s$  全部从内阻中通过，内阻电压最大，即开路电压最大， $U_0=I_s R_0$ 。

可见，电流源的输出电流  $I$  和端电压  $U$  也不是定值，也与外电路的情况有关。

从电流源的外特性可以看出，内阻越大，输出电压变化时输出电流的变化就越小，即输出电流越稳定，直线越平。在理想情况下，内阻无穷大， $I$  为定值，即成为理想电流源，它的外特性是一条平行于横轴的直线。

## 3. 电压源和电流源的等效变换

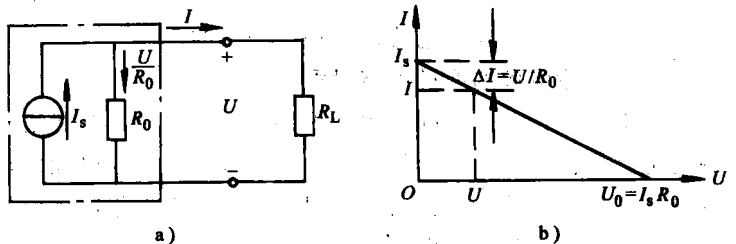


图 1-26 电流源

a) 电流源与外电路的联接 b) 伏安特性

图 1-25a 所示的电压源和图 1-26a 所示的电流源都可作为同一个实际电源的电路模型。在保持输出电压  $U$  和输出电流  $I$  不变的条件下, 相互之间可以进行等效变换。

如已知  $U_s$  与  $R_0$  串联的电压源, 则与其等效的电流源为  $I_s$  与  $R_0$  并联, 而  $I_s = U_s/R_0$ ; 如已知  $I_s$  与  $R_0$  并联的电流源, 则与之等效的电压源为  $U_s$  与  $R_0$  串联, 而  $U_s = I_s R_0$ 。

在进行电压源和电流源的等效变换时还应注意:

(1) 电压源是电动势为  $U_s$  的理想电压源与内阻  $R_0$  相串联, 电流源是电流为  $I_s$  的理想电流源与内阻  $R_0$  相并联。它们是同一电源的两种不同电路模型。

(2) 变换时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) 理想电压源和理想电流源不能进行这种等效变换。因为理想电压源的电压恒定不变, 电流随外电路而变, 即电流不恒定; 而理想电流源的电流恒定, 电压随外电路而变, 即电压不恒定, 故两者不能等效。

在一些电路中, 利用电压源和电流源的等效变换关系, 可使计算大为简化。

**【例 1-4】** 设有两台直流发电机并联工作, 共同供给  $R=24\Omega$  的负载电阻。其中一台的电动势  $E_1=130\text{V}$ , 内阻  $R_1=1\Omega$ ; 另一台的电动势  $E_2=117\text{V}$ , 内阻  $R_2=0.6\Omega$ 。试求负载电流  $I$ 。

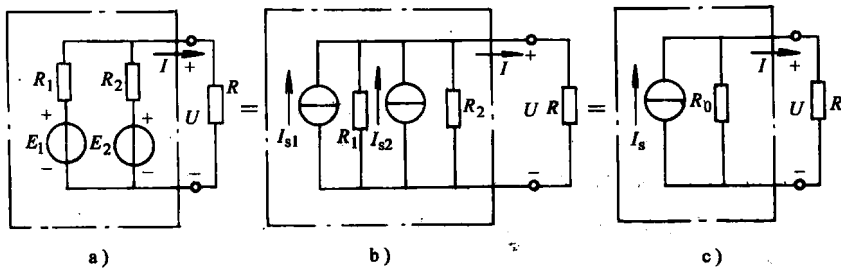


图 1-27 例 1-4 的电路及其等效变换

**【解】** 本题的电路如图 1-27a 所示。利用电压源与电流源的等效变换, 将原电路中的电压源变换成电流源, 如图 1-27b 所示。图中:

$$I_{s1} = E_1/R_1 = 130/1\text{A} = 130\text{A}$$

$$I_{s2} = E_2/R_2 = 117/0.6\text{A} = 195\text{A}$$

将两个并联的电流源合并成一个等效电流源, 如图 1-27c 所示。图中:

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = (130 + 195)\text{A} = 325\text{A}$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 0.6}{1 + 0.6}\Omega = 0.375\Omega$$

所以负载电流

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R} I_s = \frac{0.375}{0.375 + 24} \times 325\text{A} = 5\text{A}$$

#### 四、受控电源

上面介绍的电压源和电流源都是独立电源, 即电源的参数是一定的。还有一种非独立电源, 它们的参数是受电路中另一部分电压或电流控制的, 称为受控电源。例如, 他励直流电动机的电动势  $E$  受励磁电流  $I_f$  的控制, 可看成是一种受电流控制的电压源; 晶体管的集电

电流  $I_C$  受基极电流  $I_B$  的控制，可以看成是一种受电流控制的电流源。

受控电源像独立电流一样，也具有对外部电路输出电能的能力。它也有电压源和电流源之分。受控电源的控制量可能是电流，也可能是电压。因此，受控电源共有四种模型：电压控制电压源 (VCVS)、电流控制电压源 (CCVS)、电压控制电流源 (VCCS) 和电流控制电流源 (CCCS)。为了区别于独立电源，受控电源采用菱形符号。理想受控电源的四种模型如图 1-28 所示。

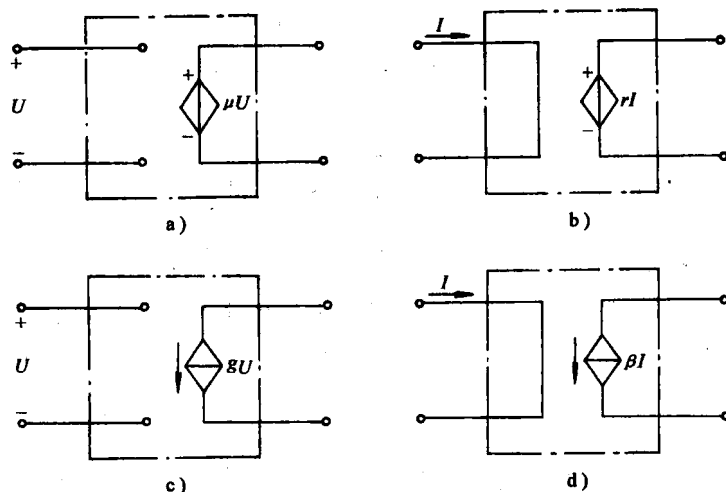


图 1-28 理想受控电源模型

a) 电压控制电压源 b) 电流控制电压源 c) 电压控制电流源 d) 电流控制电流源

图中的  $\mu$ 、 $r$ 、 $g$ 、 $\beta$  为有关的控制系数，其中  $\mu$  和  $\beta$  是没有量纲的纯数， $r$  具有电阻的量纲， $g$  具有电导（电阻的倒数）的量纲。控制系数不随控制电压或控制电流而改变的受控电源，称为线性受控电源。

受控电源主要用来模拟电子器件中的信号传输关系，即用来表示受控支路中的输出变量与控制支路中的输入变量之间的耦合关系。所以受控电源虽然有电源的形式，但本质上不同于独立电源。一旦控制量消失，则受控电源的电压或电流也就不存在了。

### 思考题

1.2-1 以下说法中，哪些是正确的？哪些是错误的？

- (1) 所谓线性电阻，是指该电阻的阻值不随时间的变化而变化。
- (2) 线性电阻的伏安特性与施加电压的极性无关，即它是双向性的。
- (3) 电阻元件在电路中总是消耗电能的，与电流的参考方向无关。
- (4) 根据式  $P=U^2/R$  可知，当输电电压一定时，若输电线电阻越大，则输电线损耗功率越小。
- (5) 电感元件两端的电压与电流的变化率成正比，而与电流的大小无关。
- (6) 当电容两端电压为零时，其电流必定为零。
- (7) 电路元件两端短路时，其电压必定为零，电流不一定为零；电路元件开路时，其电流必定为零，电压不一定为零。
- (8) 在稳定的直流电路中，电感元件相当于短路，电容元件相当于开路。

1.2-2 图 1-29 所示各理想电路元件的伏安关系式中，哪些是正确的？哪些是错误的？

1.2-3 图 1-30 所示各电路中的电压  $U$  和电流  $I$  是多少？根据计算结果能得出什么规律性的结论吗？

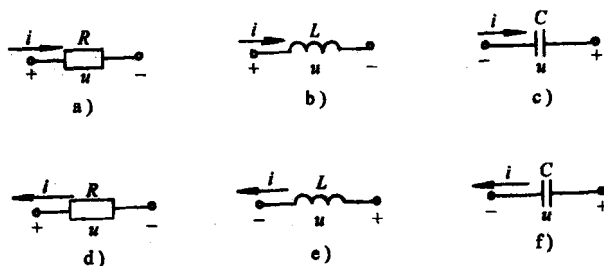


图 1-29 题 1.2-2 的图

- a)  $u = Ri$    b)  $u = Ldi/dt$    c)  $i = Cdu/dt$    d)  $u = -Ri$   
 e)  $u = -Ldi/dt$    f)  $i = -Cdu/dt$

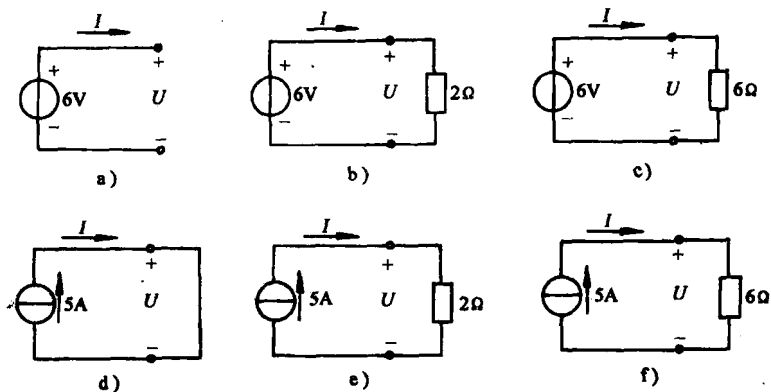


图 1-30 题 1.2-3 的电路

1.2-4 图 1-31 所示各电路中的电压  $U$  和电流  $I$  是多少?

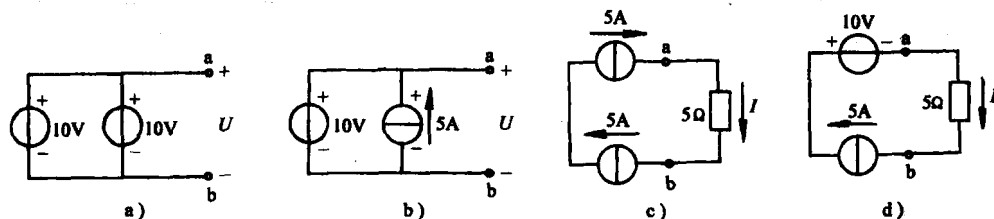


图 1-31 题 1.2-4 的电路

1.2-5 图 1-32 中两个电路  $N_1$ 、 $N_2$ ，一个是 1V 的理想电压源，一个是 1A 的理想电流源，当接入  $1\Omega$  电阻时，显然，两个电路输出的电压都是 1V，电流都是 1A，功率当然也是 1W。那么，能不能说这两个电路是等效的呢?

1.2-6 在分析电路中，若计算出某电阻两端的电压小于零，则该电阻是发出功率还是吸收功率?

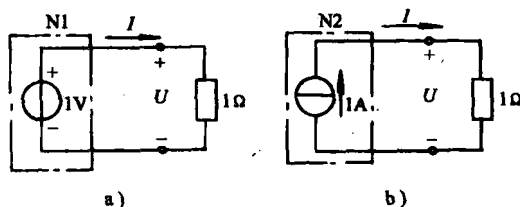


图 1-32 题 1.2-5 的电路



### 第三节 电路的状态和电气设备的额定值

#### 一、电路的状态

电路有空载、短路和负载三种状态。现就图 1-1 所示的手电筒简单电路来讨论电路的状态。我们用  $U_1$  表示电源的端电压  $U_{ab}$ ，用  $U_2$  表示负载的端电压  $U_{cd}$ ，如图 1-33 所示。

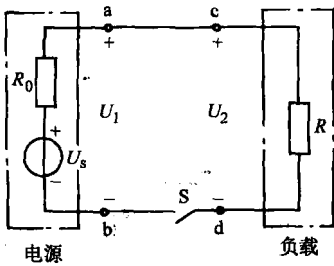


图 1-33 简单电路

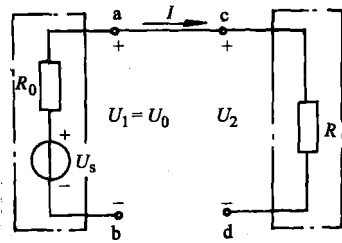


图 1-34 电路的空载状态

#### 1. 空载状态

空载状态又称为断路或开路状态，如图 1-34 所示，它是电路的一个极端运行状态，当开关断开或联接导线折断，就会发生这种状态。电路空载时，外电路所呈现的电阻可视为无穷大，故电路具有下列特征：

- (1) 电路中的电流为零，即  $I=0$ 。
- (2) 电源的端电压等于电源的电动势，即

$$U_1 = U_s - IR_0 = U_s$$

此电压称为空载电压或开路电压，用  $U_0$  表示。由此可以得出测量电源电动势的方法。

(3) 电源的输出功率  $P_1$  和负载所吸收的功率  $P_2$  均为零。这是因为，电源对外不输出电流，故

$$P_1 = U_1 I = 0$$

$$P_2 = U_2 I = 0$$

#### 2. 短路状态

当电源的两输出端钮 (a, b) 由于某种原因 (如电源线绝缘损坏、操作不慎等) 相接触时，会造成电源被直接短路的情况，如图 1-35 所示，它是电路的另一个极端运行状态。当电源直接短路时，外电路所呈现的电阻可视为零，故电路具有下列特征：

- (1) 电源中的电流最大，对负载输出的电流为零。

此时电源中的电流为

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \quad (1-20)$$

此电流称为短路电流。在一般供电系统中，电源的内电阻  $R_0$  很小，故短路电流  $I_s$  很大。但对外电路无电流输出，即  $I=0$ 。

- (2) 电源和负载的端电压均为零，即

$$U_1 = U_s - I_s R_0 = 0$$

$$U_2 = 0$$

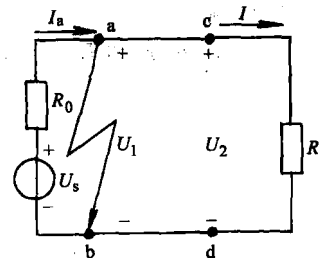


图 1-35 电路的短路状态