

普通高等教育规划教材

电路理论

◎ 戴文 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书根据教育部颁布的“电路”课程教学大纲编写，全书共分为十章，主要内容为：电路的基本概念及定律、电路的基本分析方法和定理、正弦稳态电路的分析、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析法、动态电路的复频域分析法、二端口网络、网络方程的矩阵形式、非线性电路。书末附有部分习题参考答案。

本书在符合教学大纲的前提下，本着概念清楚、内容精练、重点突出的原则编写，文字叙述力求通俗易懂。本书可作为高等学校电类、仪器仪表类等专业的教材，也可以作为相近专业的本科生及研究生教材，同时可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路理论/戴文主编. —北京: 机械工业出版社, 2005.2

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-16010-X

I. 电... II. 戴... III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 002858 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 苏颖杰 王玉鑫

责任编辑: 苏颖杰 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·14.75 印张·363 千字

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书根据教育部颁发的“电路”课程教学大纲，本着概念清楚、内容精炼、重点突出、便于讲授和自学的原则编写。编者根据多年的教学经验，结合教学改革的实践，吸取了国内一些“电路”教材（见参考文献）的优点，并参考国外有关教材，编写了本书。本书在内容安排上，采取先线性电路后非线性电路的顺序；在线性电路中，采取直流、交流、动态电路分析的次序编写，将网络的矩阵方程和非线性电路安排在后面的章节中。这样便于将电路的计算机辅助分析方法应用于电路的稳态和动态分析。

本书第一、二、三章由戴文执笔，第四、十章由张晓军执笔，第五章由宗贵聪执笔，第六章由公茂法执笔，第七章由范迪执笔，第八章由孙秀娟执笔，第九章由肖海荣执笔，全书由戴文任主编，负责统稿。山东科技大学常福海教授担任主审，对本书进行了仔细审阅，并提出了很多具体的修改意见，谨致以衷心的感谢！

由于编者的水平有限，书中难免有不妥之处，殷切希望读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 电路的基本概念及定律 1

- 第一节 电路与电路模型 1
- 第二节 理想电路元件 3
- 第三节 基尔霍夫定律 8
- 第四节 无源一端口网络的等效变换 9
- 第五节 有源一端口网络的等效变换 13
- 习题 18

第二章 电路的基本分析方法和定理 21

- 第一节 支路电流法 21
- 第二节 网孔电流法和回路电流法 22
- 第三节 节点分析法 26
- 第四节 叠加定理 29
- 第五节 替代定理 31
- 第六节 戴维南定理、诺顿定理及最大功率传输 32
- 第七节 特勒根定理 38
- 第八节 互易定理 40
- 习题 44

第三章 正弦交流电路的稳态分析 48

- 第一节 正弦量的基本概念 48
- 第二节 正弦量的相量表示法 51
- 第三节 单一参数的交流电路 53
- 第四节 复阻抗、复导纳及等效变换 58
- 第五节 正弦交流电路中的功率及功率因数 62
- 第六节 正弦稳态电路的计算 67
- 第七节 串联及并联电路的谐振 68
- 第八节 耦合电感电路与理想变压器 74
- 习题 84

第四章 三相电路 88

- 第一节 三相电路的基本概念及连接方式 88
- 第二节 对称三相电路的计算 92
- 第三节 不对称三相电路的概念 94
- 第四节 三相电路的功率 96
- 习题 99

第五章 非正弦周期电流电路 102

- 第一节 非正弦周期信号的谐波分析法 102
- 第二节 非正弦周期信号的频谱 106
- 第三节 非正弦周期电流电路的有效值、平均值和平均功率 108
- 第四节 非正弦周期电流电路的计算 110
- 第五节 对称三相电路中的高次谐波 112
- 习题 115

第六章 动态电路的时域分析法 116

- 第一节 动态电路的方程及初始值 116
- 第二节 一阶电路的零输入响应 120
- 第三节 一阶电路的零状态响应和全响应 125
- 第四节 三要素法 130
- 第五节 一阶电路的阶跃响应 133
- 第六节 冲激函数和一阶电路的冲激响应 134
- 第七节 二阶电路的零输入响应 137
- 第八节 二阶电路的全响应、零状态响应和阶跃响应 144
- 习题 147

第七章 动态电路的复频域分析法 153

- 第一节 拉普拉斯变换的定义及性质 153
- 第二节 拉氏反变换——分解定理 157
- 第三节 线性动态电路的复频域模型 159
- 第四节 用复频域分析法计算线性电路 162
- 第五节 网络函数及其零点、极点 164
- 第六节 零、极点与冲激响应及频率响应的关系 167
- 第七节 卷积的应用 170
- 习题 171

第八章 二端口网络 175

- 第一节 二端口网络概述 175
- 第二节 二端口网络的方程和参数 176
- 第三节 二端口网络的连接 182
- 第四节 回转器和负阻抗变换器 183
- 习题 185

第九章 网络方程的矩阵形式	188	第一节 非线性元件	210
第一节 网络图论的概念	188	第二节 非线性电阻电路分析的图解法 ...	212
第二节 节点分析法	189	第三节 小信号分析法	214
第三节 回路分析法	196	第四节 分段线性近似法	217
第四节 割集分析法	200	习题	218
第五节 状态方程	204	部分习题答案	221
习题	207	参考文献	230
第十章 非线性电路	210		

第一章 电路的基本概念及定律

本章主要介绍电路与电路模型、电路的基本物理量、理想的电路元件及基尔霍夫定律。

第一节 电路与电路模型

一、实际电路与电路模型

电路是由若干电气设备或器件组成一体的总称。实际电路种类繁多，形式各异，概括起来具有两方面的作用：一是实现电能的传输、分配及转换，如电力系统由发电机、变压器、输电线和用户组成的电力网；二是信号的传输、处理和储存，如通信电路将接收信号进行放大、变换和传输等。实际电路在工作时，所涉及到的物理量非常广泛，但就电路理论而言，我们只关心其电磁过程，即电压、电流、电荷和磁通所表征过程及电路共同的属性或特点。实际电路的电气特性都与电路中的物理过程有关，按性质可以分为输送能量、消耗能量、储存能量等。为了便于对电路进行分析研究，人们常将一个实际电气器件抽象为能够较准确地反映其主要电磁性能的理想电路元件来表征。基本的电路元件有三种：

理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件。通常用电阻元件表征电阻器、电炉等实际器件消耗的能量；用电源元件来表征电池、发电机等提供电能的实际器件或设备的主要电磁性能；电容和电感元件分别用来表征储存电能和磁能的主要性能。图 1-1 所示的手电筒电路是一个最简电路，也是一个理想化的电路模型。电路中包含了一个电路所具有的四个基本组成部分：电源、负载、控制元件和连接导线。电源和负载之间由两条理想导线相连。

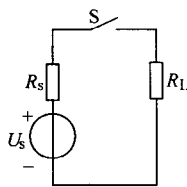


图 1-1 电路模型

U_s —电源电压

R_s —电源内阻

R_L —负载电阻

S—开关

在本书中，如果没有特别说明，所讨论的电路都是电路模型，简称电路。电路又称为电网络，后者一般对于复杂的电路而言，例如高压电力网络、大规模集成电路等，但一般情况下，二者在含义上没有本质区别。

二、集中参数电路

当实际电气器件的几何尺寸远远小于其内部电磁过程的物理量的波长 λ 时，称为集中参数电路，即

$$L \ll \lambda \quad (1-1)$$

式中 λ ——波长， $\lambda = c/f$ ， c 为光速， f 为电路的电磁波工作频率 (Hz)。

由此抽象出来的理想电路元件，亦称为集中参数元件。在集中参数电路中，电磁现象都集中在元件内部发生，即能量的消耗发生在电阻元件的内部，电场和磁场的储能发生在电容和电感元件的内部，而忽略周围电磁波的影响。当实际电路的几何尺寸可以和工作电磁波波长相比拟时，此电路就不能按照集中参数电路来对待，而要用分布参数电路及电磁场理论来分析。本书只讨论集中参数电路。

综上所述，在电路理论中，常把作用在电路上的电源或信号称为激励，通常也叫做输

入；在激励作用下，电路中的电压或电流称为响应，也叫做输出。所谓电路分析，是指在已知电路结构和元件参数及外加激励条件下，寻求电路的响应（输出）。如果已知激励和响应，寻求电路结构和元件参数，在电路理论中属于“电路综合”，又称为电路设计。本书的任务是前者，即电路分析。将实际电路抽象为电路模型来研究，理想电路元件是组成电路模型的最小单元，而电路模型是由理想元件相互连接而成的，在一定条件下，足以模拟实际电路中的器件。在电路模型中，根据理想元件端子的数目可分为二端、三端、四端元件等。

三、电路中的基本物理量及参考方向

1. 基本变量

在电路分析中，电压、电流、电荷和磁通是电路中的基本变量，而电压、电流是电路理论中用得最多的两个基本变量。所谓基本变量是指用它们可以方便地表示出电路中的其他物理量。

2. 电流及其参考方向

电荷在电场力的作用下，做有规律的定向移动形成电流，单位为安培（A）。其量值称为电流强度，表示单位时间内通过导体横截面的电荷量，即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

(1-2)

在某一元件或一段电路中，电流的实际方向习惯上规定为正电荷移动的方向，一般用箭头表示，如图 1-2 所示，表示电流从 A 点流向 B 点。

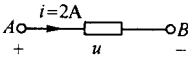


图 1-2 电阻元件

在简单电路中，电流的实际方向很容易判别，但是当电路比较复杂时，就难以判别电流的实际方向。例如，图 1-3a 所示桥式电路，电阻 R_5 中的电流是由 c 流向 d ，还是由 d 流向 c ，无法直观地判断出，必须经过计算才能知道，即在电路分析和计算之前，不仅未知电流的大小，而且也未知电流的方向。为此，引入“参考方向”这一概念。在电路分析中可以任意选择一个方向作为电流的参考方向，用箭头或双下标表示。当电路计算结果或给定的电流值大于零，说明电流的实际方向与参考方向相同；如果小于零，则说明电流的实际方向与图中相反。图 1-3b

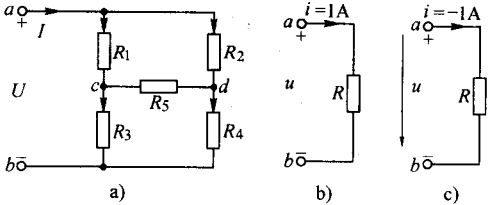


图 1-3 电压、电流的参考方向

中电流为正值，说明电流的实际方向与参考方向相同，即电流由 a 流向 b 。而图 1-3c 中， i 为负值，说明电流的实际方向与参考方向相反，即电流由 b 流向 a 。

3. 电压及其参考方向

电压是描述电场力对单位正电荷做功大小的一个物理量，单位为伏特（V）。其量值表示电场力推动单位正电荷从电路中某一点到另一点所做的功。可见，电压总是和电路中的两点有关。而两点的电位有高低之分，对此称为电压的极性，即电压的方向。电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端。

电位是与电压本质相同的物理量，所谓电位指某一点与参考点之间的电压。在电路分析时，首先在元件或一段电路上假设电压的参考方向。电压的参考方向可以用箭头、正负号（见图 1-3）或双下标表示，如 M_{ab} 表示 a 、 b 之间电压的参考方向为由 a 指向 b 。同样，如果计算所得电压为正值，说明电压的实际方向与参考方向相同；如果计算所得电压为负值，

说明电压的实际方向与参考方向相反。

综上所述,所谓参考方向是人为任意假设的,且引入参考方向的概念后,在某一元件或一段电路中电压和电流的参考方向只有两种可能性,要么与实际方向相同,要么与实际方向相反。当电压和电流的参考方向相同时,称为关联参考方向,即电流从电压的高电位端经电路元件流向低电位端,否则为非关联参考方向。所以在进行电路分析时,首要任务就是标出电压和电流的参考方向,同时约定:在关联参考方向下,只需标出电压和电流其中一个的参考方向即可。

第二节 理想电路元件

一、电阻元件

在集中参数电路中,每一种电路元件都能反映某种确定的电磁性能。对于一个二端元件,如果在任何时刻,其元件上电压与电流的关系可以用电压-电流特性方程来表示,则称此二端元件为二端电阻元件,简称电阻元件,其图形符号如图 1-4a 所示。与特性方程对应的 $u-i$ 平面上(或 $i-u$ 平面上)的曲线称为电阻的电压-电流特性(伏安特性)曲线。若一个二端元件的伏安特性曲线如图 1-4b 所示,是一条通过原点的直线,则称此二端元件为线性电阻元件,否则为非线性电阻元件(关于非线性电阻元件将在第十章中讨论)。

在任意时刻,电阻元件两端电压与电流之间的关系,在其关联参考方向下,服从欧姆定律,即

$$u = Ri \quad (1-3)$$

式中 u ——电压 (V);

R ——正实常数,其值也简称为电阻 (Ω);

i ——电流 (A)。

令 $G = 1/R$, 则上式写成

$$i = Gu \quad (1-4)$$

式中 G ——电导 (S)。

由电阻的伏安特性曲线可见,电阻元件在某一时刻的电流(电压)取决于同一时刻的电压(电流)值,而与元件以前的状态无关,凡是具有这种性质的元件称为无记忆性元件;电阻元件为无记忆性元件。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时,可以得出电阻元件的功率表达式为

$$P = UI \text{ 或 } P = RI^2 = GU^2 \quad (1-5)$$

式中 P ——功率 (W)。

当 R 和 G 为正实常数时, $P \geq 0$, 表明电阻元件总是消耗功率,是一种耗能元件。从能量的角度看,从 t_0 到 t 时刻输入到电阻元件中的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{t_0}^t Ri^2(\zeta) d\zeta \quad (1-6)$$

式中 W ——能量 (J)。

上式表明,线性电阻元件 ($R > 0$) 只能把吸收的电能转换成热能消耗掉,而不能发出能量。具有这种性质的元件,称为无源元件,即线性电阻元件是一种具有无记忆和耗能的无源元

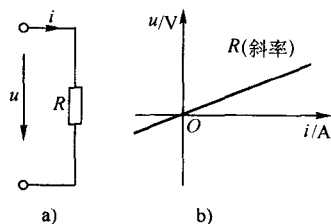


图 1-4 电阻元件及伏安特性

件。

二、电容元件

在工程技术中，电容器是实际电路中使用较为广泛的一种元件，其图形符号如图 1-5a 所示。电容器虽然种类较多，但基本结构是在两层金属板间隔以不同的绝缘介质组成。当在极板上施加电压后，两极板上分别聚集起等量异号的电荷，并在介质中建立起电场且储存电场能量。当电源移出后，电荷继续聚集在极板上，电场继续存在。

对于一个二端元件，在任意时刻所储存的电荷与元件两端电压的关系，可以用 $u-q$ 平面上一条过原点的曲线来描述，则该元件就称为电容元件。这条曲线即为电容元件的库伏特性曲线。如果库伏特性曲线是一条过原点的直线，如图 1-5b 所示，则称为线性电容元件，简称为电容。此时，电容的电荷与电压成正比，即

$$q(t) = Cu(t) \quad (1-7)$$

式中 q ——电荷 (C)；

C ——正实常数，电容元件的参数，其值也简称为电容 (F)；

u ——电压 (V)。

如果电容元件的电压和电流取关联参考方向，如图 1-5a 所示，则

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-8)$$

上式表明，电容元件的电流与端电压的变化率成正比。当电压对时间的变化率越高，电流越大；如变化率为零，则电流为零。故电容器在直流电源作用下，其电流恒为零，相当于开路，或者说电容器有隔断直流（简称隔直）的作用。

在电路分析中，将电压与电流间存在微分与积分关系的元件称为动态元件，可见电容元件为动态元件。由式 (1-8) 亦可得出电容元件的电压为

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\zeta) d\zeta = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\zeta) d\zeta + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\zeta) d\zeta \\ &= u_c(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\zeta) d\zeta \end{aligned} \quad (1-9)$$

上式表明，在任一时刻，电容电压不仅取决于 $t_0 \sim t$ 的电流值，还取决于此刻之前的初始值电压。因此，电容元件是一种记忆性元件。

在电压和电流取关联参考方向时，线性电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

式中 p ——功率 (W)。

上式在关联参考方向下，当 $p > 0$ 时，表示元件吸收能量，即电场力做功； $p < 0$ 时，表示元件释放能量。

从能量的角度出发，电容元件所吸收的电场能量为

$$W_c = \int_{-\infty}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t u(\zeta) C \frac{du(\zeta)}{d\zeta} d\zeta$$

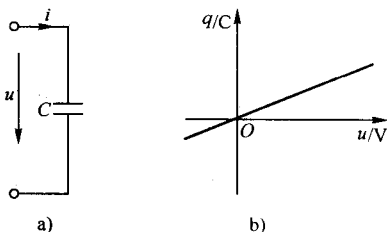


图 1-5 电容元件及库伏特性

$$= C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u(\zeta) du(\zeta) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \quad (1-11)$$

式中 W_C ——电场储能 (J)。

上式表明, 在 $-\infty$ 至 t 时间内, 电容所吸收的能量为两个时刻电容上所储存的能量之差, 当 $C > 0$ 时, 若 W_C 为正值, 表明电容元件在吸收能量; 反之, 电容元件在释放能量。对于一个理想电容元件所释放出的能量, 等于所储存的能量, 所以电容元件是一种不耗能的无源元件。如果 $t = -\infty$ 时, $u(-\infty) = 0$, 其电场储能也为零, 则在任意时刻 t , 电容元件储存的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-12)$$

上式表明, 在任意时刻 t 电容元件上所储存的能量, 只与该时刻的电容电压有关。当电压 ($u > 0$) 增加时, $du/dt > 0$, $P > 0$, 表明有能量输入给电容元件, 电容所储存的能量 $W_C(t)$ 增加; 当电压减小时, $du/dt < 0$, $P < 0$, 表明电容元件向外释放储存的能量, 电容所储的能量 W_C 减少。上述表明, 电容元件是一个动态、有记忆性、无源的储能元件。

三、电感元件

在工程实际中, 用导线绕制成的线圈可以看成是实际电路中的电感元件。当线圈通过电流时, 每匝线圈都将产生磁通 Φ , 与线圈交链成磁通链, 同时在线圈中储存磁场能量。如果忽略线圈的绕制电阻和电容效应, 就形成了一个理想电感元件。其图形符号如图 1-6a 所示。

如果一个二端元件, 在任意时刻流过的电流 i 与其产生的磁通链之间的关系可以用 i - Ψ 平面上一条曲线 (韦安特性) 来表示时, 则该二端元件称为电感元件。如果韦安特性曲线为一条过原点的直线如图 1-6b 所示, 则称为线性电感元件, 简称电感。此时电感的磁通链与电流成正比, 即

$$\Psi(t) = Li(t) \quad (1-13)$$

式中 Ψ ——磁通链 (Wb);

L ——正实常数, 电感元件的参数, 其值也简称为电感 (H);

i ——电流 (A)。

由电磁感应定律可知, 当线圈中的磁通链发生变化时, 在线圈两端子间将产生感应电压。如果电感元件中的电流 i 与磁通链 Ψ 满足右螺旋定则, 且电流与元件上的电压取关联参考方向时, 电感元件两端的自感电压为

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$

上式表明, 线性电感元件的端电压与流过电流的变化率成正比, 表明电感元件是一动态元件。在直流电路中, 电感元件的端电压为零, 相当于短路。对应于任一时刻 t , 电感元件中的电流为

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\zeta) d\zeta = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\zeta) d\zeta + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\zeta) d\zeta$$

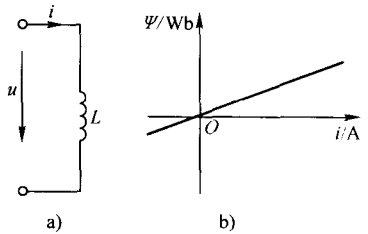


图 1-6 电感元件及韦安特性

$$= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\zeta) d\zeta \quad (1-15)$$

上式表明, 电感元件在任一时刻的电流值不仅取决于 $t_0 \sim t$ 的电压值, 还与初始值电流有关。因此, 电感元件是一种记忆性元件。

在 u 和 i 取关联参考方向时, 在任一时刻电感元件所吸收的功率为

$$P = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-16)$$

式中 P ——功率 (W)。

上式表明, 在关联参考方向下, 当 $P > 0$ 时, 电感元件吸收能量, 即电场力做功; $P < 0$ 时, 电感元件释放能量。

电感元件从 $-\infty$ 到当前时刻 t 所输入的磁场能量为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{-\infty}^t p(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t u(\zeta) i(\zeta) d\zeta = \int_{-\infty}^t L \frac{di(\zeta)}{d\zeta} i(\zeta) d\zeta \\ &= L \int_{i(-\infty)}^{i(t)} i(\zeta) di(\zeta) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) \end{aligned} \quad (1-17)$$

式中 W_L ——磁场储能 (J)。

如果当 $t = -\infty$ 时, $i(-\infty) = 0$, 则任意时刻 t , 输入的磁场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-18)$$

即在任一时刻 t , 电感元件所储存的能量, 只与该时刻流过的电感元件中电流数值的大小有关。

由式 (1-17)、式 (1-18) 可以进行与电容元件类似的讨论, 当 $|i|$ 增加时, $W_L > 0$, 电感元件吸收能量; 当 $|i|$ 减小时, $W_L < 0$, 元件释放能量。所以电感元件是一种储能元件, 且不会释放出多于它吸收或储存的能量, 即电感元件为动态、有记忆性、无源的储能元件。

四、理想电压源

理想电压源是一个有源二端元件, 是实际电源的理想化模型。干电池是大家熟悉的一种电源, 如果电池的内阻为零, 则电流为任何值时电池的电压均为定值, 其值等于电池的电动势, 此时它就是一个理想的电压源。理想电压源也简称电压源。由此可定义一个二端元件: 如果其端电压与流过该元件的电流无关, 且为恒定值, 则称此二端元件为电压源, 其图形符号如图 1-7a 所示。

当 u_s 为恒定值时, 也称恒压源或直流电源, 有时也用图 1-7b 所示符号表示。电压源的伏安特性如图 1-7c 所示, 是一条平行于电流轴的直线, 表明其端电压恒等于 U_s , 与其电流的大小无关。当 $U_s = 0$ 时, 该平行线与电流轴重合, 则此时电压源相当于一条短路线。如果电压源为时变函数 $U_s(t)$, 则称为时变电压源, 其伏安特性曲线对应于不同时刻, 是一族平行于电流轴的直线。

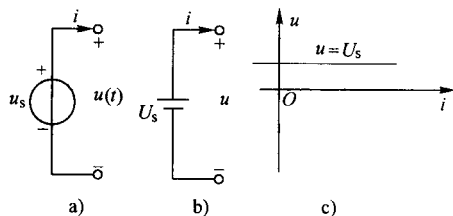


图 1-7 电压源及伏安特性

u_s —电压源电压 $u(t)$ —端电压

综上所述,电压源两端的电压与流过电源的电流大小无关,但流过电压源电流的大小、取决于与电压源相连接的外电路,即外电路决定了电压源工作电流的大小,从而使电压源的工作状态发生改变。若电压源与外电路相接,如图 1-8 所示,在图示 u 与 i 取非关联参考方向时,电压源的功率为

$$P = ui \quad (1-19)$$

当 $P > 0$ 时,电压源发出功率,处于供电状态,即电源状态;当 $P < 0$ 时,电压源吸收功率,工作在用电状态,即负载状态。

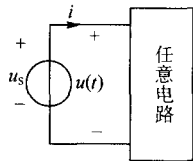


图 1-8 电压源与
外电路相连

五、理想电流源

理想电流源也是一个有源二端元件,是实际电流源的理想化模型。

例如,光电池在一定照度下可以产生一定值的电流,该电流与照度成正比,而与电流源两端的电压大小无关。理想电流源也简称为电流源。由此电流源的定义为:如果一个二端元件的输出电流与该元件两端的电压无关,且为恒定值,则称此二端元件为电流源,其图形符号如图 1-9a 所示,图中箭头表示电流源电流的参考方向。当 i_s 为恒定值时,也称恒流源或直流电流源。电流源的伏安特性如图 1-9b 所示,是一条与电压轴平行的直线,表明其输出电流恒定,与端电压的大小无关。当 $i_s = 0$ 时,该平行线与电压轴重合,此时,电流为零,即电流源相当于开路。若电流源的电流为时变函数 $i_s(t)$,则称为时变电流源,对应不同时刻,其伏安特性曲线是一族平行于电压轴的直线。

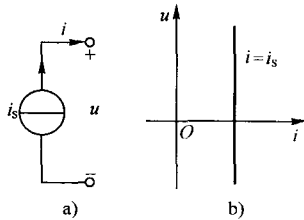


图 1-9 电流源及伏
安特性曲线

上述表明,电流源的输出电流与端电压大小无关,但其端电压必须由外电路决定。当外电路改变时,电流源的端电压随之变化,从而使电流源的工作状态发生变化。若电流源与外电路相连,如图 1-10 所示,在图示的非关联参考方向下,电流源的功率为

$$P = ui \quad (1-20)$$

当 $P > 0$ 时,电流源发出功率,处于供电状态,即电源状态; $P < 0$ 时,电流源吸收功率,工作在用电状态,即负载状态。

以上两种电源常称为“独立”电源。

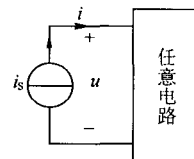


图 1-10 电流源
与外电路相连

六、受控源

在电子电路中,元器件的电压或电流受另一条支路电压或电流的控制,而不能用独立源来描述。例如,晶体三极管的集电极电流受基极电流的控制;对于集成运算放大器,其输出电压受到输入电压的控制。像这种某一处的电压或电流受电路中另一处电压(电流)控制的特性,需要引入另一种模型元件,即受控电源来描述(简称受控源)。不难得出,控制变量和受控变量不同的组合,将形成四种类型的受控源,即电压控制的电压源(VCVS)、电压控制的电流源(VCCS)、电流控制的电压源(CCVS)和电流控制的电流源(CCCS)。图 1-11 所示为四种类型受控源的符号,图中用菱形符号表示受控电源以区别于独立电源,而 μ 、 g 、 r 、 β 分别为控制系数,即电压传输比、转移电导、转移电阻、电流传输比。当这些系数为常数时,相应的受控源为线性受控源。本书只讨论含线性受控源的电路。

在电路中,虽然受控源和独立源都是有源元件,但两者性质不同。独立源在电路中起

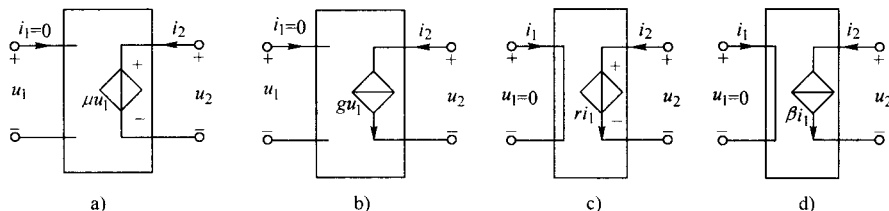


图 1-11 四种类型的受控源

a) VCVS b) VCCS c) CCVS d) CCCS

“激励”作用，能独立地向电路提供能量并产生相应的响应。而受控源表示的只是不同支路物理量之间的相互关系，在电路中不能起激励作用，即当电路中不存在独立源时，受控源不能独立地产生相应的响应。

在电路分析中，受控源作为一种有源元件存在时，并不一定都画成图 1-11 所示的形式。在电路中，只要体现出一条支路的电压或电流受其他支路电压或电流的控制，它们就构成了一个受控源，如图 1-12 所示。

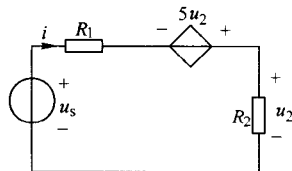


图 1-12 含受控源的电路

第三节 基尔霍夫定律

电路是由电路元件互连而成的，各个元件上的电压和电流在受到元件伏安特性约束的时，还要受到网络（电路）结构的约束。而基尔霍夫定律就是描述这种约束的基本定律，即电流定律和电压定律。

一、电路的几个名词

(1) 支路 在电路中流过同一电流的一段电路称为支路。如图 1-13 中，共有 3 条支路。（有时也把电路中每个二端元件当作电路的一条支路，见第九章第一节）

(2) 节点 有三条或三条以上支路的连接点称为节点。如在图 1-13 中，共有 c 、 b 两个节点。（有时也把元件的连接点称为节点，见第九章第一节）

(3) 回路 由支路组成的闭合路径。如在图 1-13 中，共有 3 个回路 $acba$ 、 $cdcb$ 、 $acdba$ 。

(4) 网孔 在平面电路（元件布置在一个平面上而其端线不出现交叉重叠的电路）中，回路内部不含有支路的回路。如图 1-13 中，共有两个网孔 $acba$ 和 $cdcb$ 。

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（简称 KCL）用来描述电路结构对支路电流间的约束关系。定律的表述如下：在集中参数电路中，任一时刻，对任一节点，所有支路电流的代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-21)$$

上式规定电流流入节点的取正，流出节点的取负（相反规定也可以）。

例 1-1 对图 1-14a 所示电路，列写出基尔霍夫电流定律方程。

解 根据图中各支路电流的参考方向写出

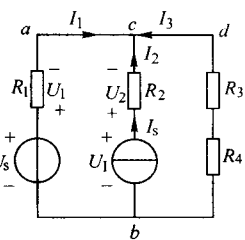


图 1-13 电路名词示意图

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0 \text{ 或 } i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

因此,基尔霍夫定律还可以这样表述:在集中参数电路中,任一时刻,流入任一节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。其数学表达式为

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-22)$$

KCL 反映的是连接于一个节点的各支路电流之间的关系,即节点上各支路电流均服从 KCL 的线性约束,是电荷守恒定律的一种体现。

KCL 不仅适用于节点,也适用于电路任一假设的封闭面。对于具有 N 个端子的电路,可以用封闭面将该电路的一部分包围起来,看成是一个广义节点。如图 1-14b 中由点画线包围起来的部分电路,就是一个广义节点。对外的 3 个端钮的电流满足 KCL,即

$$i_1 + i_2 = i_3$$

即流入封闭面的电流等于流出该封闭面的电流。

三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述的是电路结构对同一回路各段电压间的约束关系,定理的表述如下:

在集中参数电路中,任一时刻,沿任一回路各段电压的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-23)$$

在应用上式时,首先要指定回路的绕行方向(顺时针或逆时针)。若支路电压的参考方向与回路绕行方向一致,电压取正号,反之取负号。

例 1-2 试列写图 1-15 所示回路的 KVL 方程。

参考极性如图所示,从 a 点出发,按顺时针方向绕行一周,则 KVL 方程为

$$-u_2 + u_3 - u_{s1} - u_1 = 0$$

KVL 不仅适合于闭合回路,也适应于假想回路,即由一个假想支路构成的非闭合回路。例如,图 1-15 中, $cbdc$ 就是一个假想回路,其中 dc 段并未画出支路。

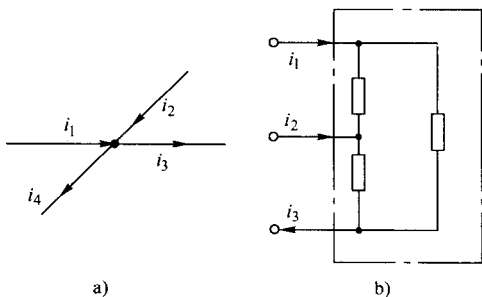


图 1-14 例 1-1 图

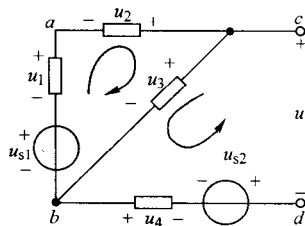


图 1-15 例 1-2 图

第四节 无源一端口网络的等效变换

一、等效的概念

在电路分析中,常常需要将电路的某部分结构进行等效变换,以达到简化电路的目的。如果一个一端口网络的伏安关系与另外一个网络的伏安关系相同,则称这两个网络相等效。电路的变换必须遵循一个原则:电路变换前后其外部伏安特性保持不变,即等效变换。本节将应用电路的三条基本定律,推导出一些基本变换的方法。

二、电阻电路的串并联等效

在图 1-16a 所示电路中,电阻 R_1 和 R_2 为串联连接(关于电阻串、并联的概念已在物理学中讲述,故不再重复)。在端口电压电流取关联参考方向时,元件的伏安关系为

$$u_1 = R_1 i$$

$$u_2 = R_2 i$$

外接端钮上的电压为

$$u = u_1 + u_2 = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i \quad (1-24)$$

图 1-16b 中 R 元件上的伏安关系为

$$u = R i \quad (1-25)$$

比较式 (1-24) 和式 (1-25) 可知, 只要满足 $R = R_1 + R_2$, 则两电路对外的伏安关系相同, 两电路相互等效。

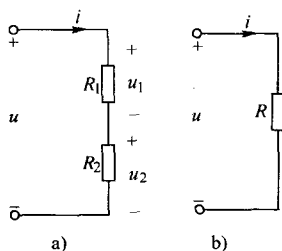


图 1-16 串联电阻的等效

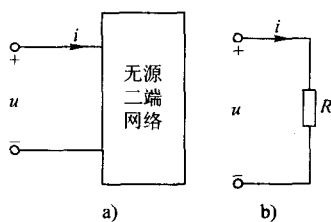


图 1-17 无源一端口网络

同理可以推出, 由 n 个电阻串联成的电路与仅含一个电阻 R 的电路, 当满足 $R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$ 时, 两电路相互等效。此时, R 称为等效电阻, 其值为 n 个电阻之和, 即

$$R = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-26)$$

在电路分析中, 常把一组元件作为一个整体看待, 当这个整体只有两个端钮与外部电路相接, 且流入一个端子的电流等于流出另一个端子的电流时, 称为一端口网络或二端网络。仅由电阻元件组成的一端口网络称为无源一端口网络, 电路如图 1-17a 所示。

这时一端口网络的整体作用相当于一支路, 所以不论一端口电阻网络内部结构如何复杂, 都可以用一个等效电阻支路代替, 如图 1-17b 所示。其中, R 称为一端口网络的等效电阻, 又称为一端口网络的输入电阻。

例 1-3 求图 1-18a 所示电路当开关 S_1 、 S_2 闭合时的等效电阻。

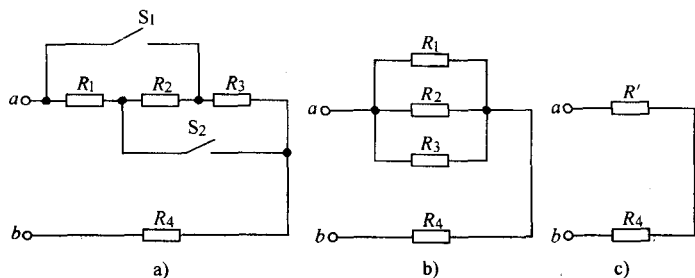


图 1-18 例 1-3 图

解 S_1 、 S_2 闭合后的等效电路如图 1-18b、c 所示。其中, $R' = R_1 // R_2 // R_3$ 。等效电阻 $R = R' + R_4$ 。

此例说明, 当电阻串、并联关系不易看出时, 可以在不改变元件间连接关系的条件下,

缩短无阻导线, 尽量避免相互交叉, 将电路整理成比较容易判别串并联关系的形式。另有一些电路, 它们的结构并非简单的串并联组合, 但在特定条件下或采用一些特定的方法, 也可以化简成简单电路进行计算。

例如, 图 1-19a 所示的惠斯登电桥电路, 若求 a 、 b 间的等效电阻, 可由电桥的平衡关系知

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

电桥满足此平衡条件时, 电阻 R_5 支路的电流为零。 R_5 支路可以用开路等效, 如图 1-19b 所示。既然 R_5 中的电流为零, 则 c 、 d 两点的电位相同, 所以也可以用一无阻导线将 c 、 d 两点连接起来, 如图 1-19c 所示。无论是图 1-19b 还是图 1-19c, 对 a 、 b 两端来说, 可求得同一数值的等效电阻。

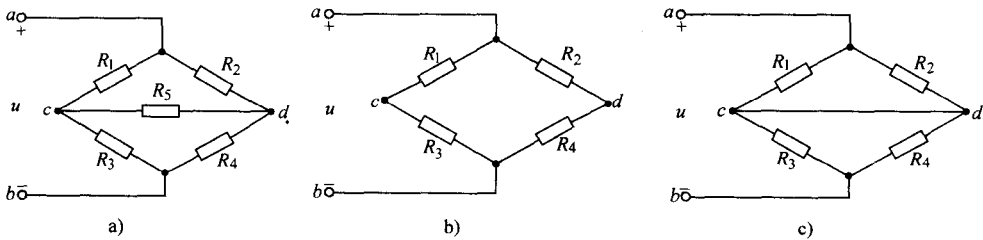


图 1-19 惠斯登电桥电路

由平衡电桥的分析可得到以下启示: 无电流的支路可以开路, 同电位的节点可以用无阻导线连接起来。这种方法特别适用于具有一定对称性的电路。

例 1-4 求图 1-20 所示电路的等效电阻 R_{ab} 。

解 此电路的电阻参数成比例, 若在 a 、 b 两端加一电压源, 则 c 、 d 两点的电位相等, 可以用一无阻导线将 c 、 d 两点短接起来, 求得:

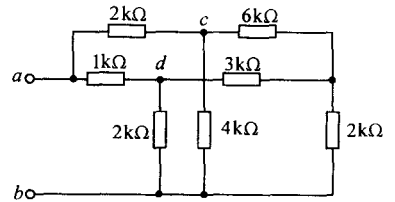


图 1-20 例 1-4 图

$$R_{ab} = 2 \parallel 1 + [(4 \parallel 2) \parallel (6 \parallel 3 + 2)] \text{ k}\Omega = \frac{2}{3} \text{ k}\Omega + \left[\frac{4}{3} \parallel (2 + 2) \right] \text{ k}\Omega = \frac{5}{3} \text{ k}\Omega$$

三、电阻的星形联结与三角形联结的等效变换

在电路中, 有时电阻的连接既非串联又非并联, 如图 1-21a 所示。电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和电阻 R_2 、 R_4 、 R_5 为星形联结 (或 Y 形联结); 电阻 R_1 、 R_2 、 R_5 和电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 为三角形联结 (或 Δ 形联结)。Y 形联结电阻的特点是: 三个电阻的一端接在一个公共节点上, 另一端分别接到三个不同的端钮上;

Δ 形联结电阻的特点是: 三个电阻分别接在每两个端钮之间, 并形成一回路。若能把图 1-21a 中的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 所组成的 Y 形电路, 等效变换成图 1-21b 中的 Δ 形电路 (由 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{34} 组成), 就可以用串、并联关系求解 1、4 端的等效电阻

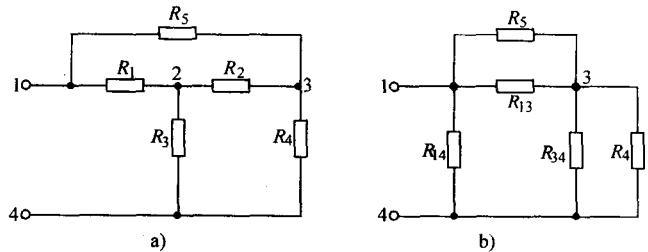


图 1-21 复杂电阻电路

阻。

对于星形和三角形联结如图 1-22a、b 所示，它们都有三个与外部电路相接的端钮，常称三端电路。它们之间进行等效变换时，参数之间应满足什么关系呢？

根据等效的概念，当以相同的电压分别施加于图 1-22a、b 所示电路的对应端钮，若流入对应端钮处的电流相等，则对应端钮间的输入电阻也相等。对于三端电阻电路来说，就是当第三端断开时，两电路中任一对应端钮间的总电阻相等，即

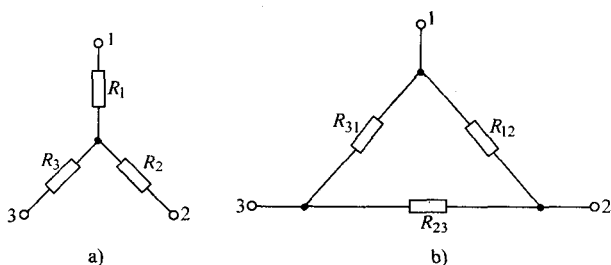


图 1-22 星形与三角形联结电路

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 + R_3 = \frac{R_{23}(R_{12} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 + R_1 = \frac{R_{31}(R_{12} + R_{23})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases} \quad (1-27)$$

将三角形电路转换成星形电路，联立式 (1-27) 解得

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases} \quad (1-28)$$

上式为三角形电路等效变换成星形电路等效电阻的计算公式。

若将星形电路转换成三角形电路，即 R_1 、 R_2 、 R_3 为已知，可由式 (1-28) 解得

$$R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1 = \frac{R_{12}R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (1-29)$$

将上式分别除以式 (1-28) 中各式，得

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_3} \\ R_{23} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_1} \\ R_{31} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_2} \end{cases} \quad (1-30)$$

上式为星形电路等效变换成三角形电路等效电阻的计算公式。

当星形联结或三角形联结的电阻参数都相等时，称为对称星形或对称三角形电路，即

$$\begin{cases} R_1 = R_2 = R_3 = R_Y \\ R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta} \end{cases}$$

由式 (1-28) 和式 (1-30)，可以得出对称三端电路的等效电阻为