

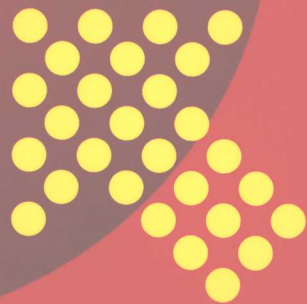
21世纪高等学校规划教材



DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

董惠 主编
黄向慧 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

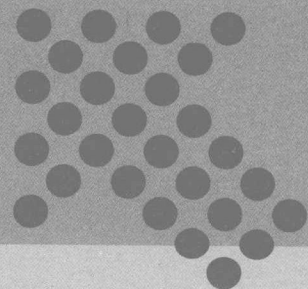
21世纪高等学校规划教材



DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

主 编 董 惠
副主编 黄向慧
编 写 刘 利 卫铭斐 杨战社
主 审 段哲民



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 13 章，主要内容包括：电路分析的基本概念和定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析、电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态分析、含耦合电感的电路分析、三相电路、电路的频率响应、非正弦周期电流电路、动态电路的复频域分析、二端口网络、电路方程的矩阵形式、MATLAB 软件与电路分析等。各章配有较丰富的典型例题和习题，书末附有参考答案。

本书可作为普通高等学校电气信息类和其他相关专业的“电路分析基础”教材，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/董惠主编. —北京：中国电力出版社, 2010
21 世纪高等学校规划教材
ISBN 978 - 7 - 5083 - 9712 - 2

I. ①电… II. ①董… III. ①电路分析—高等学校—教材
IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 205407 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 422 千字
定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

电路分析基础是高等工科院校电类专业的一门重要的技术基础课。目前,在许多高校电路课程学时压缩的情况下,如何在较短的时间内完成电路分析基本知识的学习,对这门课程的教学提出了更高的要求,需要在教学内容、教学方法与手段、教材编写等多方面进行改进,为此,我们组织多年从事电路理论研究和教学的教师编写了这本《电路分析基础》教材。

教材编写的特点是,确保基本概念、基本定律和基本方法的完整性,注重内容的新颖和实用性,使之能满足培养创新型、实用型人才的要求。教材编写过程中,力求做到深入浅出、重点突出、详略得当、叙述简明扼要,利于教师教学和学生学习;教材内容组织循序渐进,从静态电路到动态电路,从直流电路到正弦交流电路,从时域分析到频域分析,符合学习规律;教材将解题思路融于例题中,步骤明确;每章开始有内容提要,起承上启下作用,结尾对主要内容做出小结;结合计算机技术的发展,引入 MATLAB 进行电路分析,体现了电路分析的新方法;书中编排了较多的典型例题和习题,书末附有习题答案仅供参考。

本书由董惠主编和统稿,并编写了第 1、2、4 章,黄向慧协助统稿,并编写了第 6、7、8 章,刘利编写了第 9、10、12 章,卫铭斐编写了第 3、13 章和附录,杨战社编写了第 5、11 章。

本书由西北工业大学段哲民教授主审,提出了许多宝贵的修改意见,谨致以衷心的感谢。本书在编写过程中,参考了许多国内外优秀的教材,各位专家学者的经验使编者受益匪浅。感谢许多前辈和同行给予我们的关怀和支持。

由于作者水平所限,书中难免会有疏漏和错误,殷切希望同行专家和读者批评指正。

编者

2009 年 10 月

目 录

前言

第1章 电路分析的基本概念和定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流、电压和功率	2
1.3 电路元件	6
1.4 电阻元件	6
1.5 理想电源	7
1.6 受控电源.....	10
1.7 基尔霍夫定律.....	11
习题1	14
第2章 电阻电路的等效变换	18
2.1 电路的等效变换.....	18
2.2 电阻的等效变换.....	19
2.3 电阻的Y— Δ 连接及其等效变换	22
2.4 理想电源的串联和并联.....	25
2.5 实际电源的两种模型及其等效变换.....	26
2.6 输入电阻.....	28
习题2	30
第3章 电阻电路的一般分析	34
3.1 电路的图.....	34
3.2 支路电流法.....	37
3.3 回路电流法.....	38
3.4 结点电压法.....	42
3.5 含理想运算放大器的电阻电路.....	46
习题3	50
第4章 电路定理	54
4.1 叠加定理和齐性定理.....	54
4.2 替代定理.....	57
4.3 戴维宁定理和诺顿定理.....	59
4.4 最大功率传输定理.....	64
4.5 对偶原理.....	66
4.6 特勒根定理和互易定理.....	67
习题4	71

第 5 章 动态电路的时域分析	76
5.1 动态元件	76
5.2 动态电路的方程建立及其初始条件	79
5.3 一阶电路的零输入响应	82
5.4 一阶电路的零状态响应	87
5.5 一阶电路的全响应	91
5.6 一阶电路的三要素法	93
5.7 一阶电路的阶跃响应	96
5.8 一阶电路的冲激响应	98
5.9 二阶电路	100
习题 5	107
第 6 章 正弦稳态分析	111
6.1 正弦交流电的基本概念	111
6.2 正弦交流电的相量表示法	114
6.3 电路定律的相量形式	119
6.4 阻抗和导纳	123
6.5 正弦稳态电路的分析	130
6.6 正弦稳态电路的功率	135
6.7 正弦稳态最大功率传输	140
习题 6	142
第 7 章 含耦合电感的电路分析	148
7.1 耦合电感元件	148
7.2 含耦合电感电路的分析	151
7.3 空芯变压器	155
7.4 理想变压器	158
习题 7	162
第 8 章 三相电路	165
8.1 三相对称电源	165
8.2 三相负载	168
8.3 对称三相电路的计算	170
8.4 不对称三相电路的计算	173
8.5 三相电路的功率	174
习题 8	177
第 9 章 电路的频率响应	181
9.1 频域网络函数和频率响应	181
9.2 简单 RC 电路的频率特性	183
9.3 串联谐振电路	185
9.4 并联谐振电路	188
习题 9	190

第 10 章 非正弦周期电流电路	194
10.1 非正弦周期信号	194
10.2 非正弦周期函数展开成傅里叶级数	195
10.3 有效值、平均值和平均功率	199
10.4 非正弦周期电流电路的计算	201
习题 10	204
第 11 章 动态电路的复频域分析	207
11.1 拉普拉斯变换	207
11.2 拉普拉斯反变换的部分分式展开	210
11.3 运算电路	212
11.4 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	214
11.5 复频域网络函数	216
习题 11	219
第 12 章 二端口网络	221
12.1 二端口网络概述	221
12.2 二端口网络的方程和参数	222
12.3 二端口网络的等效电路	228
12.4 二端口网络的转移函数	229
12.5 二端口的连接	232
习题 12	234
第 13 章 电路方程的矩阵形式	237
13.1 网络的图和割集	237
13.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	238
13.3 回路电流方程的矩阵形式	242
13.4 结点电压方程的矩阵形式	244
13.5 割集电压方程的矩阵形式	246
13.6 状态变量和状态方程	248
习题 13	250
附录 MATLAB 软件与电路分析	252
部分习题答案	260
参考文献	270



第1章 电路分析的基本概念和定律

电路理论主要研究电路的基本规律及其分析方法，它包括电路分析和电路综合两大方面。电路分析是指在给定电路结构和元件参数的条件下，求解电路在特定的激励下的响应；电路综合则是在给定电路技术指标的情况下，设计出电路并确定元件参数。本书仅限于学习电路分析方面的内容。

本章讨论电路分析最基本的概念和定律。主要介绍电路及其模型的构成，电路的一些物理量，电流、电压参考方向的概念，电阻、理想电源和受控电源等电路元件，研究与电路连接方式有关的基本定律——基尔霍夫电流和电压定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 实际电路及其功能

在通信、控制、计算机、电力等众多领域，广泛使用着各种类型的电路，线性的和非线性的、时变的与时不变的、模拟的与数字的等，它们种类繁多、功能各异。

实际电路是为了实现某种特定功能，由实际电气元件按照一定的方式连接而成的电流通路。实际电气元件，如电阻器、电容器、电感器、电动机、电源等，其共同的特点是在工作时内部存在电磁过程。实际电路的基本功能可以概括为两种：

- (1) 实现电能的产生、传输、分配和转换，如电力系统、手电筒电路等；
- (2) 实现电信号的处理，如语音信号、图像信号和控制信号等。

实际电路的形式和功能多种多样，有的十分复杂，如通信系统、计算机网络、电力系统等；有的非常简单，如日常生活中使用的手电筒电路。尽管实际电路形式多样，功能各异，但随着电流的通过，电路中总是进行着电能与其他形式能量的相互转换。实际电路通常都是由电源、负载和中间环节三部分组成。发出电能或产生电信号的设备称为电源，用电设备称为负载，中间环节是指将电源和负载连成通路的电气元件。

1.1.2 电路模型及其意义

电路理论研究的电路不是指实际电路，而是实际电路的模型。电路模型是指用理想电路元件或其组合来代替实际的电气元件而组成的理想化电路。把实际电路理想化是为了便于分析和设计。

如何将实际电气元件抽象为理想电路元件呢？实际电路中使用着各种电气元件，如发电机、电动机、变压器、晶体管及电阻器和电容器等，每一种电气元件工作时产生的电磁现象和能量转换关系一般都比较复杂。不同的实际电气元件，若具有相同的主要电磁性能，在一定条件下可以用同一个元件模型表示；同一个实际电气元件在不同的应用条件下，其元件模型可以有不同的形式。可见，实际电路中的电磁现象往往比较复杂，需要在一定条件下对实际电气元件加以近似和理想化，忽略某些次要性质，用一个表征其主要性能的理想元件作为实际电气元件的模型。例如灯泡、电炉、电阻器等实际电气元件，它们主要是消耗电能的，

都可以用一个具有两个端子的理想电阻元件来反映其能量消耗的特征；各种实际的电容器主要是储存电能的，可以用一个具有两个端子的理想电容元件来表征；理想电感元件用来反映储存磁能的特征。理想电路元件用规定的电气图形符号表示，图 1-1 所示为理想电阻、电容和电感元件模型。

电路模型中的元件均指理想电路元件。图 1-2 (a) 所示为实际手电筒电路，其电路组成为：干电池（作为电源）、灯泡（作为负载）、开关和筒体（作为中间环节）。通常用图 1-2 (b) 所示的理想电路模型来代替它进行分析。其中，发出电能的干电池抽象为理想电压源 U_S 和理想电阻 R_S 的串联组合；作为负载的灯泡只考虑消耗电能的现象，抽象为理想电阻 R ；筒体是连接干电池与灯泡的中间环节（还包括开关），其电阻忽略不计，将其抽象为理想导线和开关。

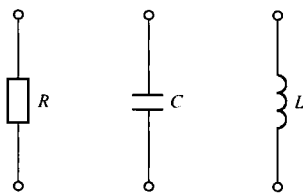


图 1-1 理想电阻、电容、电感元件模型

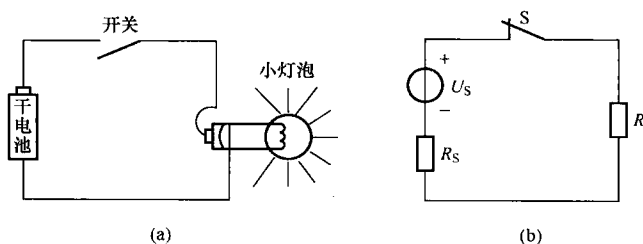


图 1-2 实际手电筒电路及其电路模型
(a) 实际电路；(b) 电路模型

本书研究的电路均为电路模型，简称电路。模型中的元件均指理想元件（理想两字常略去不写）。理想元件主要包括理想电阻、电容、电感和电源等。

电路分析的任务是根据已知的电路结构和元件参数，在特定的激励下，求得给定电路的响应。激励是指外加电源或信号源（一个用来携带信息的电流或电压，如音频信号电压），又称为电路的输入；响应是指由激励引起的电压或电流，又称为电路的输出。

需要指出，对实际电路理想化是建立在电路理论的一个重要假设的基础之上，即假设实际电路元件的电磁现象可以分别研究，且这些电磁过程分别集中在元件内部进行。这种被假定只反映一种主要的电磁性能的元素称为集总参数元件。由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路，简称集总电路。用集总电路模型近似地描述实际电路是有条件的，要求构成电路的元件及电路本身的尺寸远小于其最高工作频率所对应的波长。例如，我国电力系统的电压、电流为工频 50Hz，波长 6000km，当电力子系统的实际尺寸远小于该波长时视为集总参数电路；当进行远距离高压电力传输时，则不满足集总参数电路的条件，像这样的实际电路，应考虑用分布参数模型描述。本书仅涉及集总参数电路的分析。

1.2 电流、电压和功率

电路的特性是由基本物理量来描述的。在电路分析中，基本的物理量有电荷、磁链、电流、电压和功率等。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和功率等。

在物理学中已经初步介绍了电流和电压这两个物理量，本节着重介绍电流与电压的参考方向。虽然任何元件的电流和电压的实际方向具有明确的定义，但在电路分析中，某个元件

实际电流与电压的方向可能事先未知,也可能是随时间改变的,因此,事先指定电流和电压的参考方向是必要的。

1.2.1 电流及其参考方向

电流是由带电粒子(电子、离子)定向移动形成的。它被定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,用符号 i 表示,其数学表达式为

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

电流的单位是 A (安培)^①, $1\text{A}=1\text{C/s}$ 。常用单位还有 kA (千安)、mA (毫安)、 μA (微安) 和 nA (纳安) 等,且有

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

如果电流的大小和(或)方向随时间而变化,称为时变电流,记为 $i(t)$,简写为 i 。当时变电流以正弦规律变化时,称为正弦交流电流,此时 $\frac{dq}{dt}$ 按正弦规律变化。如果电流的大小和方向都不随时间改变,称为直流电流,即 $\frac{dq}{dt}=0$,电流通常用大写字母 I 表示。

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

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。为了电路分析和计算的方便,我们任意指定一个电流参考方向,用实线箭头标在电路图中。例如在分析电路中某个元件的电流时,如图 1-3 所示,假设指定的电流参考方向用实线箭头表示(即从 A 流向 B),电流实际方向用虚线箭头指向表示。实际方向根据计算结果得出,若计算出的电流 $i>0$,表明电流的实际方向与参考方向相同,即从 A 流向 B,如图 1-3 (a) 中虚线箭头所指方向;反之,若计算出的电流 $i<0$,表明电流的实际方向与参考方向相反,即从 B 流向 A,如图 1-3 (b) 中虚线箭头所指方向。可见,在分析电路时,必须事先规定电流变量的参考方向,根据参考方向以及计算出的电流的正负才能确定电流的实际方向。

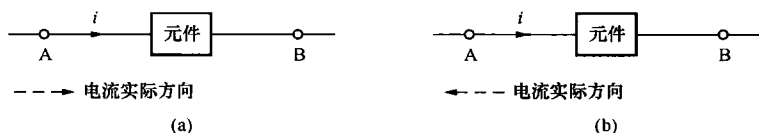


图 1-3 电流的参考方向

(a) $i>0$; (b) $i<0$

1.2.2 电压及其参考方向

电场力把单位正电荷由电路中 a 点移动到 b 点所做的功,称为 a、b 两点的电压,电压也称为电压降或电位差,用符号 u 表示,定义式为

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中, dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷变化量,单位为 C (库仑), dW 为电场力移动电荷所

① 本书采用国际单位制(SI)。

做的功，单位为 J（焦耳），电压的基本单位为 V（伏特）。

习惯上规定电压的实际方向是从高电位指向低电位。将高电位端用“+”号标注，低电位端用“-”号标注。在分析电路时，我们任意指定一个电压参考方向，指定由“+”端指向“-”端的方向就是电压的参考方向，如图 1-4 所示。例如，在分析电路中某个元件的电压时，假设指定的电压参考方向 A 端标注“+”，B 端标注“-”，电压实际方向用虚线箭头所指表示。实际方向根据计算结果得出，若计算出的电压 $u > 0$ ，表明电压的实际方向与参考方向相同，如图 1-4 (a) 所示，即该时刻 a 点的电位比 b 点电位高；若电压 $u < 0$ ，表明电压的实际方向与参考方向相反，如图 1-4 (b) 所示，则该时刻 a 点的电位比 b 点电位低。可见，在分析电路时，必须事先规定电压变量的参考方向，根据参考方向以及计算出的电压的正负，才能确定电压的实际方向。

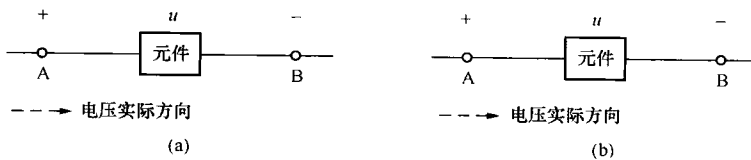


图 1-4 电压的参考方向

(a) $u > 0$; (b) $u < 0$

电压的参考方向也可以用箭头表示，箭头方向是由高电位点指向低电位点。或者用双下标表示，如 U_{ab} ，此时，下标 a 表示高电位点，b 表示低电位点。

如果电压的大小和（或）方向随时间而变化，称为时变电压，记为 $u(t)$ ，简写为 u 。当此时变电压以正弦规律变化时，称为正弦交流电压。如果电压的大小和方向都不随时间改变，称为直流电压，通常用大写字母 U 表示。

需要注意的是：分析电路前必须选定电压和电流的参考方向，参考方向一经选定，必须在电路图中相应的位置标注。

1.2.3 电流与电压的关联参考方向

对于一个元件来说，其电流和电压的参考方向可以任意设定，二者可以一致，也可以不一致。所谓关联参考方向是指电流与电压的参考方向一致，即电流的参考方向是从电压的“+”端流入，“-”端流出，如图 1-5 (a) 所示；否则称为非关联参考方向，如图 1-5 (b) 所示。

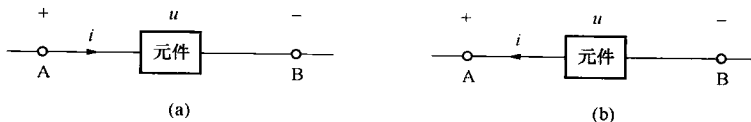


图 1-5 电压电流参考方向

(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

1.2.4 功率和能量

电路存在着能量的流动。电荷在电场中移动会吸收或释放能量，这种能量称为电能，用符号 W 表示，单位是 J（焦耳）。

元件从 t_0 到 t 时间内吸收的电能 W 为

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4)$$

现在来讨论电路中的某一部分或元件所吸收或发出的功率的计算, 功率用符号 p 表示。

用图 1-6 所示方框来表示该段电路, 它可能只是一个电阻元件或是一个电源, 也可能是若干元件的组合。采用关联的电压、电流参考方向如图中所示。设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电荷为 dq , 且 a 到 b 为电压降, 其值为 u , 在转移过程中电荷 (dq) 失去的能量为 dW , 电荷失去能量意味着这段电路吸收能量, 亦即能量由电路的其他部分传送到这一部分, 因此, 我们把能量传输 (流动) 的方向定为功率的实际方向, 即吸收功率, 如图中双线箭头所指。

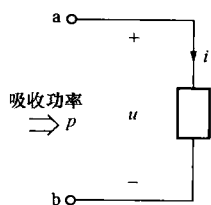


图 1-6 功率的方向

功率是指吸收能量的速率 (即单位时间内电能的变化量), 单位是 W (瓦特), 简称瓦。

当电压和电流取关联参考方向时, 定义元件吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t) i(t) \quad (1-5a)$$

当电压和电流取非关联参考方向时, 定义元件吸收的功率为

$$p(t) = -u(t) i(t) \quad (1-5b)$$

如同电压、电流一样, 功率被看作代数量, 也可为功率假设参考方向, 当计算出的功率为正时, 元件实际吸收功率, 为负时元件实际发出功率。

例 1-1 已知某元件两端的电压为 $3V$, A 点电位高于 B 点电位, 电流的实际方向为自 A 点到 B 点, 其值为 $2A$ 。试确定该元件是吸收功率还是发出功率?

解 假设元件的 u 、 i 取关联参考方向, 如图 1-5 (a) 所示, 则 $u=3V$, $i=2A$, 应用关联参考方向下的功率定义, 有

$$p = ui = 3 \times 2 = 6W > 0 \quad (\text{元件实际吸收 } 6W \text{ 功率})$$

假设元件的 u 、 i 取非关联参考方向, 如图 1-5 (b) 所示, 则 $u=3V$, $i=-2A$, 应用非关联参考方向下的功率定义, 有

$$p = -ui = -3 \times (-2) = 6W > 0 \quad (\text{元件实际吸收 } 6W \text{ 功率})$$

可以看出, 两种方法解得的结果是一致的。

例 1-2 在图 1-7 电路中, 已知 $U_1=1V$, $U_2=-6V$, $U_3=-4V$, $U_4=5V$, $U_5=-10V$, $I_1=1A$, $I_2=-3A$, $I_3=4A$ 。试求:

(1) 各元件吸收的功率;

(2) 整个电路吸收的功率。

解 各二端元件吸收的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 = (1V) \times (1A) = 1W \quad (\text{吸收 } 1W)$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-6V) \times (-3A) = 18W \quad (\text{吸收 } 18W)$$

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-4V) \times (4A) = 16W \quad (\text{吸收 } 16W)$$

$$P_4 = -U_4 I_1 = -5V \times 1A = -5W \quad (\text{发出 } 5W)$$

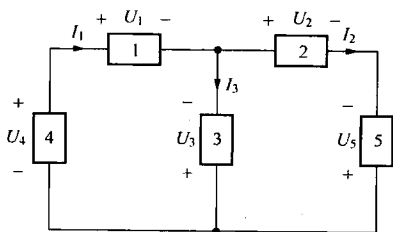


图 1-7 例 1-2 图

$$P_5 = -U_5 I_2 = -(-10\text{V}) \times (-3\text{A}) = -30\text{W} \quad (\text{发出 } 30\text{W})$$

整个电路吸收的功率为

$$\sum_{i=1}^5 P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 + 18 + 16 - 5 - 30 = 0$$

对于一个完整的电路而言，任一时刻电路中各元件吸收的功率总和应等于发出的功率总和，或者说总功率代数和为零，即必须满足功率守恒定律。

1.3 电 路 元 件

电路分析中的元件为理想元件。按元件的引出端子数目可分为二端和多端元件。对集总参数元件通常只关心其端子上的特性，这些特性通过端子间的物理量来描述，如库伏特性、伏安特性、磁链与电流之间的关系等。

根据元件的特性不同，其分类方式如下：

(1) 线性与非线性元件。如果元件端子间的特性关系（如上述的伏安特性、库伏特性等），可以通过两个物理量 x 和 y 来描述，而这两个物理量之间的函数关系可以用 $y=f(x)$ 或 $x=g(y)$ 来表示，即可以用 x, y 平面上一条过原点的直线来描述，则称该元件为线性元件；否则称为非线性元件。

(2) 时变与时不变元件。如果一个元件的特性不随时间变化，该元件称为非时变元件，否则为时变元件。

(3) 有源与无源元件。如果一个元件任何时刻吸收的能量总为非负值，即不向外电路提供能量，该元件称为无源元件，如电阻、二极管等；否则为有源元件，如电压源、电流源等。

本书只讨论线性元件，通常省略线性二字，主要涉及电阻、电感、电容等二端无源元件，电压源和电流源等二端有源元件，受控源和变压器等多端元件。

1.4 电 阻 元 件

实际的电阻器、白炽灯、电炉以及电烙铁等用电器，若忽略其电磁效应，只考虑其热效应，可以用电阻元件作为其模型。它向外有两个引出端，因此是一个二端元件。

电阻元件可以定义为：任一时刻，如果一个二端元件电压 u 与电流 i 的关系可以用 $u-i$ 平面上的唯一一条曲线来确定，则称该元件为电阻元件。

1.4.1 电阻元件的电压电流关系

由于电压的单位是伏，电流的单位是安，因此电阻元件的特性称为伏安特性或伏安关系。若电阻元件的电压 u 与电流 i 的关系为 $u-i$ 平面上过坐标原点的直线，则称为线性电阻元件，如图 1-8 (b) 所示，否则称为非线性电阻元件。今后所讨论的电阻元

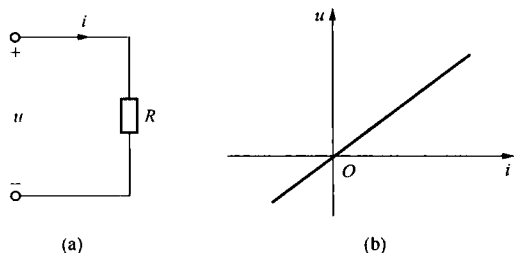


图 1-8 线性电阻元件及其伏安特性

(a) 线性电阻元件；(b) 其伏安特性

件，若不加说明，均指线性电阻。

线性电阻元件的图形符号如图 1-8 (a) 所示。在电压电流取关联参考方向下，电阻的伏安关系为

$$u = Ri \quad (1-6)$$

式 (1-6) 即为欧姆定律。用 R 表示电阻， R 也表示电阻元件的电阻值，单位是 Ω (欧姆)。当 u 、 i 曲线是过坐标原点位于第一、三象限的直线时， R 为正常数，否则为负常数。

令 $G = \frac{1}{R}$ ，则式 (1-6) 变成

$$i = Gu \quad (1-7)$$

式中： G 表示电导，是指电阻元件传导电流的能力，单位是 S (西门子)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

需要指出的是，当电压电流取非关联参考方向时，电阻的伏安关系为

$$\begin{aligned} u &= -Ri \\ i &= -Gu \end{aligned} \quad (1-8)$$

或

1.4.2 开路和短路

开路和短路是电路的两种特殊状态。开路是指电路中两点间无论电压 u 为何值，电流恒为零的情况，也称为“断路”。电路开路时，与其相连的电路两端阻值趋于无穷大，即 $R = \infty$ 或 $G = 0$ ，其伏安特性曲线与 u 轴重合，如图 1-9 (a) 所示。短路是指电路两点间的电压恒为零，与通过的电流无关。电路短路时，与其相连的电路两端阻值为零，即阻值 $R = 0$ 或 $G = \infty$ ，其伏安特性曲线与 i 轴重合，如图 1-9 (b) 所示。

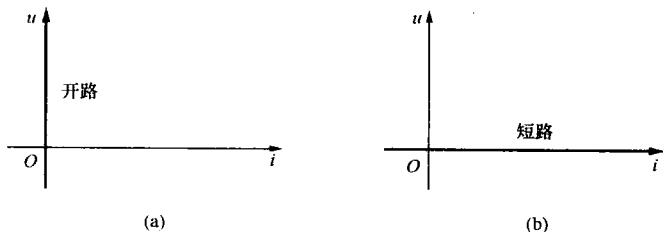


图 1-9 开路和短路

(a) 开路的伏安特性；(b) 短路的伏安特性

1.4.3 电阻元件的功率和电能

在 u 、 i 关联参考方向下，电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-9)$$

式 (1-9)， p 为代数量，当 $R > 0$ (或 $G > 0$) 时， $p > 0$ ，这表明正电阻总是吸收功率的，不可能发出功率。所以线性正电阻是一种无源元件。当 $R < 0$ (或 $G < 0$) 时， $p < 0$ ，这表明负电阻实际上是发出功率的，称为有源电阻。一般不加说明时电阻指正电阻。

电阻在 $t_0 \sim t$ 这段时间内吸收的电能

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-10)$$

电阻元件一般把吸收的电能转换成热能消耗掉。

1.5 理想电源

电源是电路中能量的来源，在电路中起激励作用，产生电流和电压。常用的直流电源有

干电池、蓄电池、直流发电机、直流稳压电源和直流稳流电源等。常用的交流电源有电力系统发出的正弦交流电源、交流稳压电源和产生多种波形的各种信号发生器等。

理想电源是从实际电源抽象而得到的理想化模型，当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计，只起到产生电能的作用时，这种电源便可以用一个理想电源元件来表示。理想电源分为理想电压源和理想电流源两种。它们都是二端元件。以后讨论中经常将“理想”二字省略。

1.5.1 理想电压源

理想电压源是指端子间能提供一个确定的、与流过端子电流无关的电压 $u_S(t)$ 的二端元件。该电压可以按照某一函数规律随时间变化，也可以恒定不变。电压 $u_S(t)$ 随时间变化的电压源，称为时变电压源；随时间周期性变化且平均值为零的时变电压源，称为交流电压源。当 $u_S(t)$ 恒定不变时，称为直流电压源，用 U_S 表示。

电压源的符号如图 1-10 所示，图中“+”、“-”号表示电压源电压的参考方向。

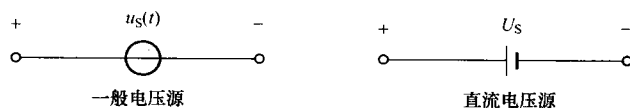


图 1-10 电压源

电压源工作时要与外电路连接，如图 1-11 (a)。理想电压源的特性为：其端电压 u 总是等于 $u_S(t)$ ，与流过它的电流无关，也就是说端电压是由电压源本身确定的，不受外电路的影响。图 1-11 (b) 示出电压源在 t_1 时刻的伏安特性曲线，它平行于 i 轴， t_1 时刻电压为 $u_S(t_1)$ 。若为直流电压源，则端电压 u 总是等于 U_S ，如图 1-11 (c) 所示。电压源的伏安特性为

$$u = u_S(t) \quad \text{或} \quad u = U_S \quad (1-11)$$

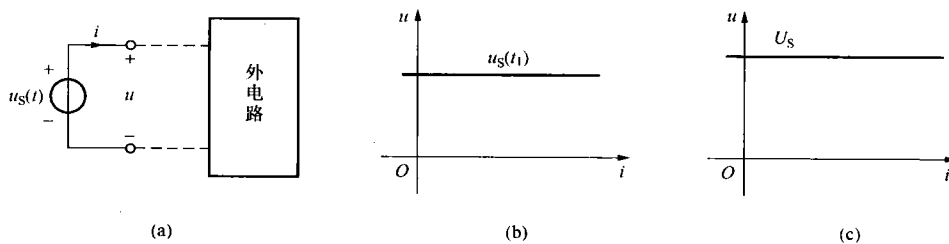


图 1-11 电压源及其伏安特性

(a) 电压源与外电路连接；(b)、(c) 电压源的伏安特性

电压源的电流 i 是由与其相连接的外电路决定的，而该电流可以从不同方向通过电压源，因此， p 可正可负， p 为负时，电压源实际发出功率，向外电路提供电能； p 为正时，电压源实际吸收功率，从外电路接收电能起负载作用。当电压源不接外电路时，电流 i 总为零，称为电压源开路或断路，开路电压仍为 u_S 。电压源短路是指与其连接的外电路相当于导线，此时， $u_S=0$ ，值得注意的是，理想电压源不允许短路。

1.5.2 理想电流源

理想电流源是指端子上能提供一个确定的、与其端电压无关的电流 $i_S(t)$ 的二端元件。该电流可以按照某一函数规律随时间变化，也可以恒定不变。电流 $i_S(t)$ 随时间变化的电流源，称为时变电流源；随时间周期性变化且平均值为零的时变电流源，称为交流电流源。当 $i_S(t)$ 恒定不变时，称为直流电流源，用 I_S 表示。

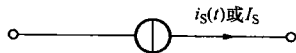


图 1-12 电流源

电流源的符号如图 1-12 所示，图中箭头表示电流源电流的参考方向。

电流源与外电路连接如图 1-13 (a) 所示。理想电压源的特性为：电流源的电流 i 总是等于 $i_S(t)$ ，与其两端的电压无关，也就是说电流是由电流源本身确定的，不受外电路的影响。图 1-13 (b) 所示电流源在 t_1 时刻的伏安特性曲线，它平行于 u 轴， t_1 时刻电流为 $i_S(t_1)$ 。若为直流电流源，则电流 i 总是等于 I_S ，如图 1-13 (c) 所示。电流源的伏安特性为

$$i = i_S(t) \quad \text{或} \quad i = I_S \quad (1-12)$$

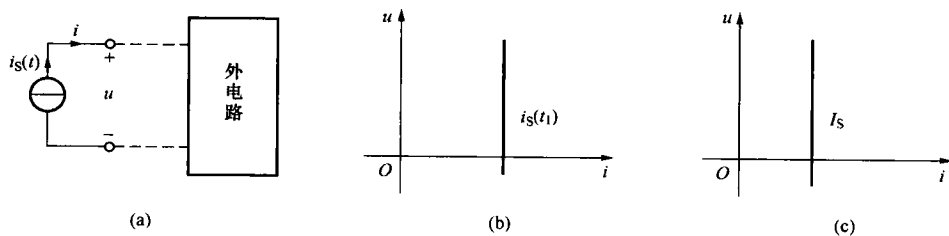


图 1-13 电流源及其伏安特性

(a) 电流源与外电路连接；(b)、(c) 电流源的伏安特性

电流源的端电压 u 是由与其相连接的外电路决定的，该电压的方向由外电路所确定。因此， p 可正可负， p 为负时，电流源实际发出功率，向外电路提供电能； p 为正时，电流源实际吸收功率，从外电路接收电能起负载作用。电流源可由稳流电子设备产生，如晶体管的集电极电流与负载无关；光电池在一定光线照射下光电子被激发产生一定值的电流等。

电流源短路时，其端电压 $u=0$ ，而电流 $i=i_S$ 。若一个电流源的 $i_S=0$ ，它相当于开路，理想电流源不允许开路。

当电路中所含的电源均为直流电源时，电路称为直流电路。直流电路中的电量如电压、电流等用大写字母表示。

例 1-3 电路如图 1-14 (a) 所示，试求图示各元件上的功率。

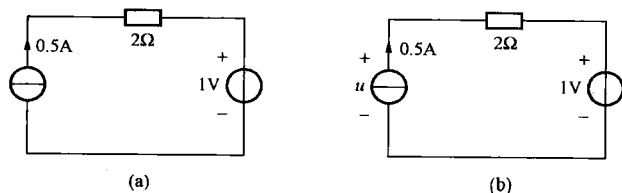


图 1-14 例 1-3 图

解 要求出每个元件的功率, 必须知道它们的电压和电流, 设所求的电压、电流参考方向如图 1-14 (b) 所示。图中电流源与另 2 个元件串联, 因此流过每个元件的电流都是 0.5A。

电压源的功率	$p_V = 1 \times 0.5 = 0.5(\text{W})$	(实际吸收 0.5W)
电流源的功率	$p_A = -u \times 0.5 = -2 \times 0.5 = -1(\text{W})$	(实际发出 1W)
电阻的功率	$p_R = 0.5^2 \times 2 = 0.5(\text{W})$	(实际吸收 0.5W)
可以验证	$\sum p_a = \sum p_e$	

1.6 受控电源

电源可以分为独立电源和非独立电源 (即受控电源) 两类。上一节介绍的理想电源和 2.5 节将要介绍的实际电源均属于独立电源 (简称独立源)。所谓独立电源, 是指电压源的电压 (电流源的电流) 确定, 与流过的电流 (两端的电压) 无关。

受控电源是一种非独立电源。受控电源是指电压或电流是受同一电路中其他支路的电压 (或电流) 控制的电源, 简称受控源, 分为受控电压源和受控电流源。受控源是从晶体管、电子管等电路中抽象出来的一种元件模型, 此外, 发电机、变压器等电磁耦合元件, 也可以用受控源电路来模拟。为了与独立电源的符号相区别, 受控电源的电路符号采用菱形, 如图 1-15 所示。

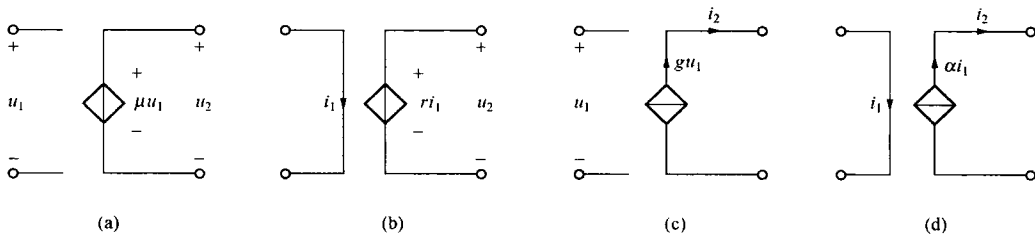


图 1-15 受控源示意图

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

受控源有两个端口 (称为二端口), 其输入端口施加控制电压或电流, 为控制端口; 输出端口输出的是被控的电压或电流, 为受控端口。受控电源分为四种:

电压控制电压源 (VCVS), 如图 1-15 (a) 所示, 输出电压 (被控制量) 为 u_2 , 控制量为 u_1 , $u_2 = \mu u_1$, 控制因子 μ 为无量纲的电压比例因子。

电流控制电压源 (CCVS), 如图 1-15 (b) 所示, 输出电压 (被控制量) 为 u_2 , 控制量为 i_1 , $u_2 = r i_1$, 控制因子 r 为电阻的单位。

电压控制电流源 (VCCS), 如图 1-15 (c) 所示, 输出电流 (被控制量) 为 i_2 , 控制量为 u_1 , $i_2 = g u_1$, 控制因子 g 为电导的单位。

电流控制电流源 (CCCS), 如图 1-15 (d) 所示, 输出电流 (被控制量) 为 i_2 , 控制量为 i_1 , $i_2 = \alpha i_1$, 控制因子 α 为无量纲的电流比例因子。

本书只讨论控制因子 μ 、 r 、 g 、 α 为常数, 被控量与控制量成正比的情况, 这种受控源称为线性受控源。

受控源与独立源在电路中的作用有着本质的区别。独立源作为电路的输入、代表着外界