



中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

电路分析基础

主 编 陈海洋

副主编 马丽萍 吴园 刘娟花 袁洪琳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

电路分析基础

主 编 陈海洋

副主编 马丽萍 吴 园

刘娟花 袁洪琳

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是由长期从事电路理论教学的一线教师,按照电路理论教学要求精心写作而成的,它吸收了大量现代电路理论的教学思想与研究成果,将电路理论课程中的基本内容与工程应用有机地融为一体。本书在编排上,重点突出、条理清晰、论述细致、可读性好,是一本便于自学的现代电路理论教材。

本书共七章,主要内容包括电路的基本概念、基本元件和基本定律,电路的等效分析方法,电路的一般分析方法及方程法,电路定理,线性时不变动态电路暂态过程的时域分析,线性时不变动态电路的正弦稳态分析,线性时不变正弦稳态交流电路的频率响应,含耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期激励作用下线性时不变电路的稳态分析。

本书适合于高等院校电气类、自动化类、电子信息类、计算机类等专业的学生使用,也适合于其他工科专业的学生使用,还可作为工程技术人员以及高校教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/陈海洋主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5606-4882-8

I. ①电… II. ①陈… III. ①电路分析 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 031344 号

策 划 毛红兵 刘玉芳

责任编辑 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.5

字 数 315千字

印 数 1~3000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-4882-8/TM

XDUP 5184001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

“电路理论”是教育部规定的电子信息类专业的专业基础课，也是电气工程、信息工程、控制工程、计算机及微电子等领域的一门重要的基础学科。在新工科背景下，对电路理论的教材体系和内容排布的更新与变革提出了新的更高的要求。为了适应这些要求，本书是在借鉴国内外优秀教材特点的基础上，结合一线教师的教学实践体会，并针对我国教学体系与教学实践改革的现状与要求，本着知识体系完备，循序渐进、深入浅出、内容贴近工程实际、注重电路分析的原则精心编写的。

“电路分析基础”这门课主要研究的是电路中电磁现象的变化规律。在新工科的背景下，旨在培养学生独立分析问题和解决问题的能力，进而培养学生的创新能力、实践能力，为后续相关学科的学习打下坚实的基础。

本书采用了国际上流行的 EDA 工具之一——Multisim 软件编写了大量例题。其目的在于引导学生使用 Multisim 工具来分析、设计、验证电路，培养学生的应用能力和创新能力。Multisim 这一工具为电路课程的学习提供了充分的实验手段和条件。它不仅可以显示数据采集、存储、分析、处理、传输及控制的过程，对方案进行论证、选定和设计，还可以随时改变电路参数来调整电路，使之更加合乎要求，得出较为理想的电路。应用这些软件，可以把许多抽象和难以理解的内容变得生动、形象化，更为重要的是用计算机辅助分析电路本身就给学生提供了一种分析问题和解决问题的思维方法。

本书共七章。第 1 章电路模型和电路定律，介绍电路的基本概念、基本定律。第 2 章电阻电路分析，介绍电路的基本分析方法。第 3 章动态电路的时域分析，主要介绍一阶电路的时域分析、阶跃函数与阶跃响应。第 4 章正弦稳态电路分析，主要介绍基尔霍夫定律的相量形式、正弦稳态电路相量分析法、三相电路等。第 5 章互感与理想变压器，主要介绍耦合电感的去耦等效和理想变压器。第 6 章电路频率响应，主要介绍常用 RC 一阶电路的频率特性和常用 RLC 串联谐振电路的频率响应。第 7 章非正弦周期电流电路，介绍非正弦周期电流电路的基本概念及计算。

本书由陈海洋担任主编，负责全书的统稿，马丽萍、刘娟花、吴园、袁洪琳担任副主编。其中，陈海洋编写了第 3 章、第 4 章的 4.8 节、第 6 章，马丽萍编写了第 1 章、第 2 章的 2.5~2.9 节，吴园编写了第 4 章的 4.1~4.7 节、第 5 章，袁洪琳编写了第 7 章及附录，刘娟花编写了第 2 章中的 2.1~2.4 节内容。

限于作者的水平，书中难免有疏漏之处，热切期待各位读者赐教指正，以便再版后能更好地臻于大家。

作 者

2018 年 3 月

目 录

C O N T E N T S

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 电路模型和电路定律 | 1 |
| 1.1 电路和电路模型 | 1 |
| 1.1.1 电路及其组成 | 1 |
| 1.1.2 电路模型 | 2 |
| 1.2 电路变量 | 2 |
| 1.2.1 电流及其参考方向 | 2 |
| 1.2.2 电压及其参考方向 | 3 |
| 1.2.3 功率和能量 | 4 |
| 1.3 电阻元件 | 5 |
| 1.4 电压源和电流源 | 6 |
| 1.4.1 电压源 | 6 |
| 1.4.2 电流源 | 7 |
| 1.5 受控源 | 7 |
| 1.6 基尔霍夫定律 | 8 |
| 1.6.1 基尔霍夫电流定律 | 9 |
| 1.6.2 基尔霍夫电压定律 | 10 |
| 1.7 电路等效 | 13 |
| 1.7.1 电路等效的一般概念 | 13 |
| 1.7.2 电阻的串联和并联等效 | 13 |
| 1.7.3 理想电源的串联与并联等效 | 16 |
| 1.8 两种电源模型的等效变换 | 18 |
| 1.9 电阻的 Y- Δ 连接等效变换 | 20 |
| 1.10 输入电阻 | 23 |
| 习题 1 | 24 |
| 第 2 章 电阻电路分析 | 27 |
| 2.1 支路电流法 | 27 |
| 2.1.1 支路电流法 | 27 |
| 2.1.2 KCL 和 KVL 的独立方程 | 28 |
| 2.1.3 支路电流法的步骤和特点 | 29 |
| 2.2 网孔分析法 | 31 |
| 2.3 回路电流法 | 36 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| 2.4 | 结点电位法 | 39 |
| 2.5 | 叠加定理 | 45 |
| 2.6 | 齐次定理 | 49 |
| 2.7 | 替代定理 | 50 |
| 2.8 | 等效电源定理 | 51 |
| 2.8.1 | 戴维宁定理 | 51 |
| 2.8.2 | 诺顿定理 | 54 |
| 2.9 | 最大功率传输定理 | 56 |
| | 习题 2 | 58 |
| 第 3 章 | 动态电路的时域分析 | 62 |
| 3.1 | 电容元件与电感元件 | 62 |
| 3.1.1 | 电容元件 | 62 |
| 3.1.2 | 电感元件 | 64 |
| 3.2 | 动态电路的基本概念 | 66 |
| 3.2.1 | 动态电路的特点 | 66 |
| 3.2.2 | 换路定则 | 67 |
| 3.3 | 一阶电路的零输入响应、零状态响应和全响应 | 68 |
| 3.3.1 | 一阶电路的零输入响应 | 68 |
| 3.3.2 | 一阶电路的零状态响应 | 73 |
| 3.3.3 | 一阶电路的全响应 | 76 |
| 3.4 | 阶跃函数与阶跃响应 | 78 |
| 3.4.1 | 阶跃函数 | 78 |
| 3.4.2 | 阶跃响应 | 80 |
| | 习题 3 | 81 |
| 第 4 章 | 正弦稳态电路分析 | 85 |
| 4.1 | 正弦交流电的基本概念 | 85 |
| 4.1.1 | 正弦量的三要素 | 85 |
| 4.1.2 | 正弦量的周期、频率和角频率 | 86 |
| 4.1.3 | 正弦量的瞬时值、最大值和有效值 | 87 |
| 4.1.4 | 正弦量的相位、初相位和相位差 | 88 |
| 4.2 | 正弦交流电的相量表示法 | 90 |
| 4.2.1 | 复数的表示及运算 | 90 |
| 4.2.2 | 正弦量的相量表示 | 93 |
| 4.3 | 基尔霍夫定律的相量形式和基本元件伏安关系的相量形式 | 96 |
| 4.3.1 | 基尔霍夫定律的相量形式 | 97 |
| 4.3.2 | 基本元件伏安关系的相量形式 | 97 |
| 4.4 | 阻抗和导纳 | 103 |
| 4.4.1 | 阻抗 Z | 103 |
| 4.4.2 | 导纳 Y | 105 |

| | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 4.4.3 | 阻抗串联模型与导纳并联模型的等效互换 | 107 |
| 4.4.4 | 正弦稳态电路仿真 | 108 |
| 4.5 | 正弦稳态电路相量法分析 | 112 |
| 4.5.1 | 串、并、混联电路的分析 | 112 |
| 4.5.2 | 网孔、节点分析法用于正弦稳态电路的分析 | 115 |
| 4.5.3 | 戴维宁定理用于正弦稳态电路的分析 | 116 |
| 4.5.4 | 相量图法 | 117 |
| 4.6 | 正弦稳态电路的功率 | 118 |
| 4.6.1 | 一端口网络的功率 | 118 |
| 4.6.2 | 功率因数的提高 | 121 |
| 4.7 | 正弦稳态电路中的功率传输 | 124 |
| 4.8 | 三相电路 | 127 |
| 4.8.1 | 三相电路的基本概念 | 127 |
| 4.8.2 | 对称三相电路的计算 | 131 |
| | 习题 4 | 134 |
| 第 5 章 | 互感与理想变压器 | 138 |
| 5.1 | 耦合电感元件 | 138 |
| 5.1.1 | 耦合电感 | 138 |
| 5.1.2 | 耦合电感的伏安关系 | 140 |
| 5.1.3 | 耦合电感的同名端 | 141 |
| 5.2 | 耦合电感的去耦等效 | 144 |
| 5.2.1 | 耦合电感的串并联等效 | 144 |
| 5.2.2 | 耦合电感的 T 形等效 | 147 |
| 5.2.3 | 仿真实验 | 149 |
| 5.3 | 理想变压器 | 153 |
| 5.3.1 | 理想变压器的伏安关系 | 153 |
| 5.3.2 | 含理想变压器的电路分析 | 156 |
| | 习题 5 | 158 |
| 第 6 章 | 电路频率响应 | 163 |
| 6.1 | 网络函数与频率响应 | 163 |
| 6.1.1 | 网络函数 | 163 |
| 6.1.2 | 网络频率特性 | 165 |
| 6.2 | 常用 RC 一阶电路的频率特性 | 166 |
| 6.2.1 | RC 一阶低通电路的频率特性 | 166 |
| 6.2.2 | RC 一阶高通电路的频率特性 | 167 |
| 6.3 | RLC 谐振电路 | 169 |
| 6.3.1 | RLC 串联谐振电路 | 169 |
| 6.3.2 | 实用 RLC 并联谐振电路 | 175 |
| | 习题 6 | 177 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 第7章 非正弦周期电流电路 | 180 |
| 7.1 非正弦周期信号 | 180 |
| 7.2 非正弦周期信号分解为傅立叶级数 | 181 |
| 7.3 有效值、平均值和平均功率 | 184 |
| 7.4 非正弦周期电流电路的计算 | 187 |
| 7.5 非正弦周期电流电路的计算机仿真 | 192 |
| 习题7 | 193 |
| 附录 | 195 |
| 习题答案 | 202 |
| 参考文献 | 208 |

第1章 电路模型和电路定律

本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发，重点讨论了欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效、输入电阻等重要概念。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路及其组成

电路是电流通过的路径。实际电路通常由一些电路器件(如电源、电阻器、电感、电容器、变压器、仪表、二极管、三极管等)组成。每一种电路实体部件都具有各自不同的电磁特性和功能。复杂的电路称为网络。

电路的形式是多种多样的，但从电路的本质来说，其组成都有电源、负载、中间环节三个最基本的部分。例如图 1.1.1 所示的手电筒电路。

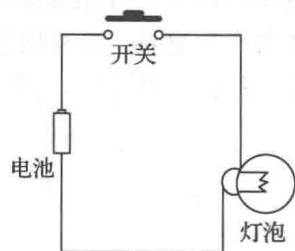


图 1.1.1 手电筒电路

凡是将化学能、机械能等非电能转换成电能的供电设备，均称为电源，如干电池、蓄电池和发电机等；凡是将电能转换成热能、光能、机械能等非电能的用电设备，均称为负载，如电热炉、白炽灯和电动机等；连接电源和负载的部分，称为中间环节，如导线、开关等。

电路的种类繁多，但从电路的功能来说，其作用分为两个方面：其一，实现电能的传输和转换，如电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其它形式的能量(热能、水的势能、原子能或太阳能等)转换成电能，通过变压器、输电线输送给各用户负载，在那里又把电能转换成机械能、光能、热能，为人们生产、生活所利用。其二，进行信息的传递与处理，如电话、收音机、电视机、手机中的电路。

如图 1.1.2 所示，接收天线将载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后，通过接收机电路把输入信号(又称激励)处理为人们所需要的输出信号(又称响应)，送到扬声器或显像管，再还原为语言、音乐或图像。

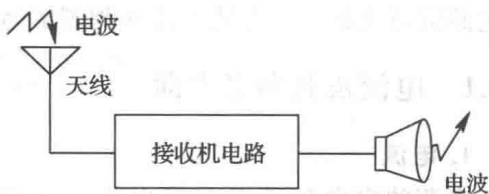


图 1.1.2 接收机电路

1.1.2 电路模型

实际电路的电磁过程是相当复杂的，难以进行有效的分析和计算。在电路理论中，为了便于实际电路的分析和计算，通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理，即忽略次要因素，抓住足以反映其主要电磁特性，抽象出实际电路器件的“电路模型”。

例如电阻器、灯泡、电炉等，这些电气设备接受电能并将电能转换成光能或热能，光能和热能显然不可能再回到电路中，因此把这种能量转换过程不可逆的电磁特性称为耗能。这些电气设备除了具有耗能的电特性，当然还有其它一些电磁特性，但在研究和分析问题时，即使忽略其它这些电磁特性，也不会影响整个电路的分析和计算。因此，可以用一个只具有耗能电特性的“电阻元件”作为它们的电路模型。

将实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁性质的元件，称为理想电路元件，简称为电路元件。每一种电路元件都可以用严格的数学关系加以定义。常用的电路元件有：表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件及电压源元件和电流源元件等。

由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。如图 1.1.1 所示，电池在对外提供电压的同时，内部也有电阻消耗能量；灯泡除了具有消耗电能的性质(电阻性)外，通电时还会产生磁场，具有电感性。但电感微弱，可忽略不计，于是可认为灯泡是一电阻元件，用 R_L 表示。图 1.1.3 是图 1.1.1 的电路模型。

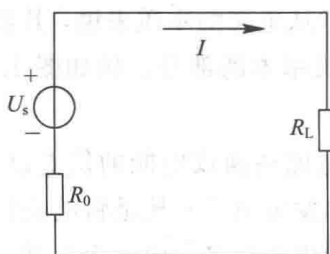


图 1.1.3 手电筒电路的电路模型

1.2 电路变量

在电路问题分析中，人们所关心的物理量是电流、电压和功率。在具体展开分析、讨论电路问题之前，首先建立并深刻理解与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流

电荷的定向移动形成了电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度亦简称为电流。

定义：单位时间内通过导体横截面的电荷量，用公式表示为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

式中, i 表示随时间变化的电流, dq 表示在 dt 时间内通过导体横截面的电量。

在国际单位制中, 电流的单位为安培, 简称安(A)。实际应用中, 大电流用千安(kA)表示, 小电流用毫安(mA)或微安(μ A)表示。它们的换算关系是:

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

在外电场的作用下, 正电荷将沿着电场方向运动, 而负电荷将逆着电场方向运动(金属导体内的自由电子在电场力的作用下定向移动形成电流)。习惯上规定: 正电荷的运动方向为电流的正方向。

2. 电流的参考方向

在一些很简单的电路中, 如图 1.1.3 所示, 电流从电源正极流出, 经过负载回到电源负极。在分析复杂电路时, 一般难于判断出电流的实际方向; 对于交流电流, 电流的方向随时间改变, 所以它的实际方向也就很难确定。

所谓电流的参考方向, 就是在分析计算电路时, 先任意选定某一电流方向。电流的参考方向通常用带箭头的线段表示, 箭头所指方向表示电流的流动方向, 并根据此方向进行分析计算。计算结果为正, 说明电流的参考方向与实际方向相同; 计算结果为负, 说明电流的参考方向与实际方向相反。图 1.2.1 表示了电流的实际方向(图中实线所示)与参考方向(图中虚线所示)之间的关系。



图 1.2.1 电流参考方向与实际方向

1.2.2 电压及其参考方向

1. 电压

电路中, 电场力把单位正电荷(q)从 a 点移到 b 点所做的功(W)就称为 a 、 b 两点间的电压, 也称电位差, 记

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2.2)$$

在国际单位制中, 电压的单位为伏特, 简称伏(V)。实际应用中, 大电压用千伏(kV)表示, 小电压用毫伏(mV)或微伏(μ V)表示。它们的换算关系是:

$$1\text{kV} = 10^3 \text{V} = 10^6 \text{mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

电压的方向规定为从高电位指向低电位。

2. 电压的参考方向

在比较复杂的电路中, 往往不能事先知道电路中任意两点间的电压, 为了分析和计算方便, 与电流的方向规定类似: 在分析计算电路之前必须对电压标以极性(正、负号), 或标以方向(箭头), 这种标法是假定的参考方向, 如图 1.2.2 所示。采用双下标标记时, 电压的参考方向意味着从 a 指向 b , 两端电压记作 u_{ab} ; 若电压参考方向选 b 点指向 a 点, 则应写

成 u_{ba} ，两者仅差一个负号，即 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。



图 1.2.2 电压参考方向的表示方法

分析求解电路时，先按选定的电压参考方向进行分析、计算，再由计算结果中电压值的正负来判断电压的实际方向与电压参考方向是否一致，即电压值为正，则实际方向与参考方向相同；电压值为负，则实际方向与参考方向相反。

3. 电流和电压的关联参考方向

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流参考方向是从电压正极性的一端指向负极性的一端，即两者的参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1.2.3(a)所示。当两者不一致时，称为非关联参考方向，如图 1.2.3(b)所示。人们常常习惯采用关联参考方向。



图 1.2.3 关联参考方向

1.2.3 功率和能量

功率与电压和电流密切相关。当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时，电场力要对电荷做功，这时，元件吸收能量；反之，正电荷从电压“-”极到电压的“+”极时，电场力作负功，元件对外释放电能。

从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的能量可根据电压的定义求得

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于 $i = dq/dt$ ，所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d(\xi) \tag{1.2.3}$$

能量的单位为焦耳(J)，简称焦，功率的单位为瓦特(W)，简称瓦。

式(1.2.3)中 i 和 u 都是时间的函数，并且是代数量，因此，电能 W 也是时间的函数，且是代数量。电功率是能量对时间的导数，在电工中，电功率常常简称为功率。

在图 1.2.3(a)所示电压、电流参考方向关联的情况下，功率可写成

$$p = ui \tag{1.2.4}$$

式(1.2.4)是按吸收功率计算的，即当 $p > 0$ 时，表示该段电路吸收功率； $p < 0$ 时，表示该段电路发出功率。

在图 1.2.3(b)所示电压和电流的非关联参考方向下，功率可写成

$$p = -ui \tag{1.2.5}$$

应根据电压、电流参考方向是否关联，来选取相应的计算吸收功率的公式。

【例 1.2.1】如图 1.2.4 电路中， $U_{s1} = 4 \text{ V}$ ， $U_{s2} = 1 \text{ V}$ ， $R_1 = 2 \Omega$ ， $R_2 = 1 \Omega$ 。计算两个电源的功率，判断是吸收功率还是发出功率。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad I &= \frac{U_{s1} - U_{s2}}{R_1 + R_2} = \frac{4 - 1}{2 + 1} = 1 \text{ A} \\ U &= R_2 I + U_{s2} = 1 \times 1 + 1 = 2 \text{ V} \\ P_1 &= -4 \times 1 = -4 \text{ W} < 0 \\ P_2 &= 1 \times 1 = 1 \text{ W} > 0 \end{aligned}$$

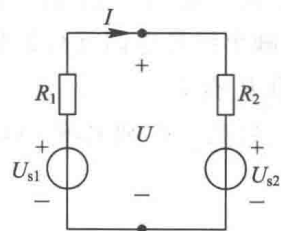


图 1.2.4 例 1.2.1 图

所以 P_1 为输出功率， P_2 为吸收功率。

由 $p = ui$ 可知，一台发电机要发出大功率，不但要有大电流，还要有高电压。但是实际上，任何电器设备的电压、电流都受到条件的限制，电流受温升的限制，电压受绝缘材料耐压的限制。电流过大或电压过高，都会使电器设备受到损坏。为使设备正常工作，电压、电流必须有一定的限额，这个限额称为电器设备的额定值。

任何设备在额定值下工作的理想状况，称为满载，超过额定值的工作为过载。少量的过载尚可，因为任何电器设备都有一定的安全系数，但严重过载是不允许的，因此使用前必须进行严格的选择。

每一台电器设备的各种额定值之间有一定的关系，因此，每种电器设备只给出部分额定值，不必全部给出。如日光灯的额定电压为 220 V，额定功率为 40 W 等。

1.3 电阻元件

线性二端电阻元件(简称电阻元件)是这样的元件：在电压和电流取关联参考方向时，任何时刻其两端的电压和电流关系可写为

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

式中， R 为电阻元件的参数，称为元件的电阻。电阻元件的图形符号如图 1.3.1(a) 所示。当电压单位用 V，电流单位用 A 时，电阻的单位为 Ω (欧姆，简称欧)。

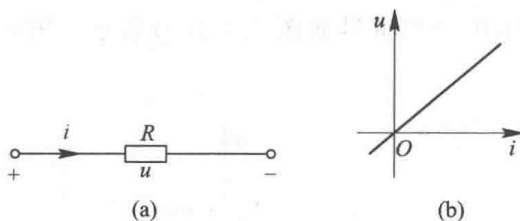


图 1.3.1 电阻元件及其伏安特性曲线

令 $G = 1/R$ ，式(1.3.1)变成

$$i = Gu \quad (1.3.2)$$

式中， G 称为电阻元件的电导。电导的单位是 S(西门子，简称西)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反，则欧姆定律应写为

$$u = -Ri \quad (1.3.3)$$

由于电压和电流的单位是伏特和安培，因此电阻元件的特性称为伏安特性。图 1.3.1 (b) 画出线性电阻元件的伏安特性曲线，它是通过原点的一条直线。直线的斜率与元件的电阻 R 有关。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时，电阻元件消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1.3.4)$$

式中， R 和 G 是正常数，故功率 P 恒为非负值。所以电阻元件是一种无源元件。实际电阻器消耗的功率都有规定的限度，超过规定值就会使电阻器因过热而损坏。所以实际使用电阻器时，既要使电阻值大小符合要求，又要注意消耗的功率不要超过其允许值。

电阻元件在 $t_0 \sim t$ 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1.3.5)$$

电阻元件将吸收的电能转换成热能。今后，为了叙述方便，把电阻元件简称为“电阻”。

非线性电阻元件的电压电流关系不满足欧姆定律，而遵循某种特定的非线性函数关系。其伏安特性一般可写为

$$u = f(i) \quad \text{或} \quad i = g(u)$$

如果一个电阻元件具有以下电压电流关系：

$$u(t) = R(t)i(t) \quad \text{或} \quad i(t) = G(t)u(t)$$

这里 u 和 i 仍是比例关系，但比例系数 R 是随时间变化的，称为时变电阻元件。

1.4 电压源和电流源

电压源和电流源是二端有源元件，是在一定条件下从实际电源抽象出来的一种理想模型。

1.4.1 电压源

理想电压源(简称电压源)提供的电压总能保持某一恒定值或一定的时间函数，而与通过它们的电流无关。理想电压源的符号如图 1.4.1(a) 所示。图中的“+”“−”号是参考极性， u_s 为电压源的端电压。

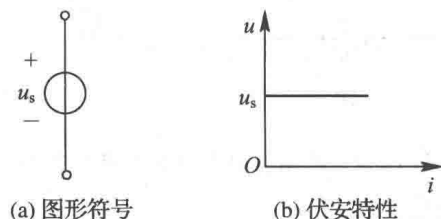


图 1.4.1 理想电压源

理想电压源的输出电压与输出电流之间的关系称为伏安特性，如图 1.4.1(b) 所示。电压源的特点：① 输出电压 u_s 是由它本身所确定的定值，与输出电流和外电路的情况无关；② 输出电流 i 不是定值，与输出电压和外电路的情况有关。

1.4.2 电流源

理想电流源(简称电流源)提供的电流总能保持恒定值或一定的时间函数,而与它两端所加的电压无关,也称为恒流源。图 1.4.2(a)为理想电流源的符号。图中的箭头是理想电流源的参考方向, i_s 为电流源的端电流。

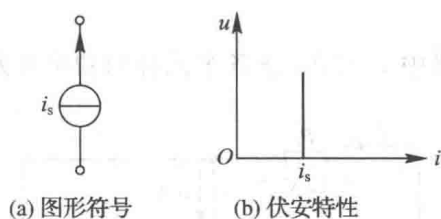


图 1.4.2 理想电流源

图 1.4.2(b)为理想电流源的伏安特性曲线。电流源的特点:① 输出电流 i_s 是由它本身所确定的定值,与输出电压和外电路的情况无关;② 输出电压 u 不是定值,与输出电流和外电路的情况有关。

1.5 受控源

受控源是用来表征在电子器件中所发生的物理现象的一种模型,它反映了电路中某处的电压或电流控制另一处的电压或电流的关系。

电压或电流的大小和方向受电路中其它地方的电压(或电流)控制的电源,称受控源。

受控源有两个控制端钮(又称输入端)、两个受控端钮(又称输出端)。根据控制量和被控制量是电压 u 或电流 i ,受控源可分四种类型:电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电流控制电压源(CCVS)、电流控制电流源(CCCS)。它们在电路中的图形符号分别如图 1.5.1 所示。 μ 、 g 、 r 、 β 都为相关的控制系数,其中 μ 、 β 无量纲, g 和 r 分别为

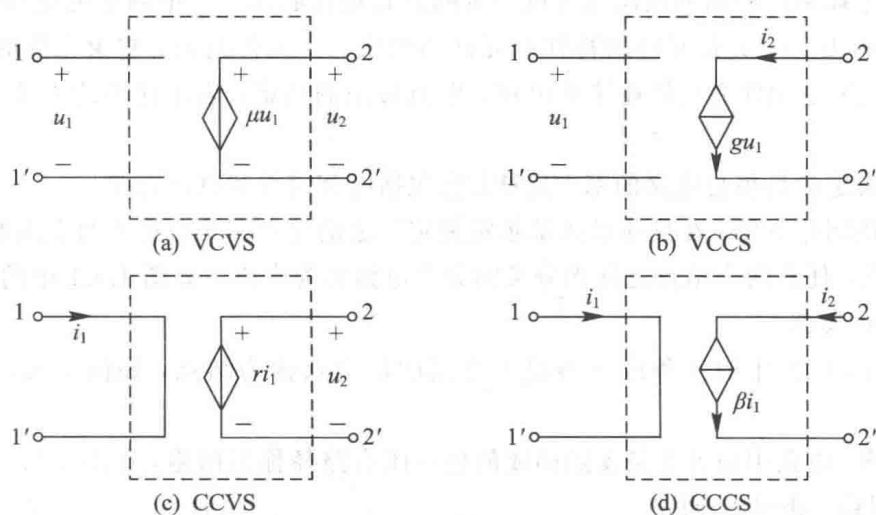


图 1.5.1 四种线性受控源

具有电导和电阻的量纲。当这些系数为常数时，被控制量与控制量成正比，这种受控源称为线性受控源。本书中所涉及的受控源均为线性受控源。

受控源与独立源的比较：① 独立源电压(或电流)由电源本身决定，与电路中其它电压、电流无关，而受控源的电压(或电流)由控制量决定；② 独立源在电路中起“激励”作用，在电路中产生电压、电流，而受控源只是反映输出端与输入端的受控关系，在电路中不能作为“激励”。

【例 1.5.1】 图 1.5.2 电路中 $I=5\text{A}$ ，求各个元件的功率并判断电路中的功率是否平衡。

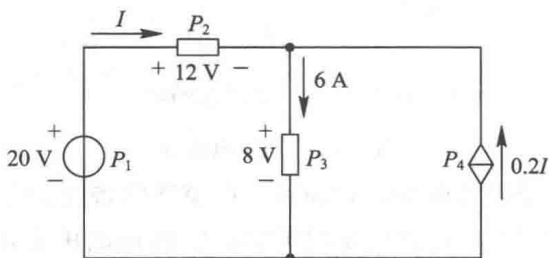


图 1.5.2 例 1.5.1 图

| | | |
|---|---|---------|
| 解 | $P_1 = -20 \times 5 = -100 \text{ W}$ | 发出功率 |
| | $P_2 = 12 \times 5 = 60 \text{ W}$ | 消耗功率 |
| | $P_3 = 8 \times 6 = 48 \text{ W}$ | 消耗功率 |
| | $P_4 = -8 \times 0.2I = 8 \times 0.2 \times 5 = -8 \text{ W}$ | 发出功率 |
| | $P_1 + P_4 + P_2 + P_3 = 0$ | 电路中功率平衡 |

1.6 基尔霍夫定律

任一电路都是由不同的电路元件按一定的方式连接起来的。电路中的电压、电流必然受到一定的约束。一类是元件的特性对元件的约束——元件约束，它由元件的伏-安特性来决定；另一类是元件之间的连接给电压、电流带来的约束，表示这类约束关系的是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律，它包括电流定律和电压定律。

为了叙述问题方便，在具体讲述基尔霍夫定律之前先介绍几个有关的常用电路术语。

(1) 支路：任意两个结点之间无分叉的分支电路称为支路。如图 1.6.1 中的 bafe 支路、be 支路、bcde 支路。

(2) 结点：电路中的三条或三条以上支路的汇交点称为结点，如图 1.6.1 中的 b 点、e 点。

(3) 回路：电路中由若干条支路构成的任一闭合路径称为回路，如图 1.6.1 中 abefa 回路、bcdeb 回路、abcdefa 回路。

(4) 网孔：不包围任何支路的单孔回路称网孔。如图 1.6.1 中 abefa 回路和 bcdeb 回路都是网孔，而 abcdefa 回路不是网孔。网孔一定是回路，而回路不一定是网孔。

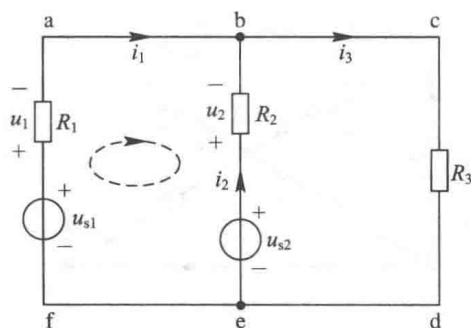


图 1.6.1 电路举例

1.6.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL):“在集总参数电路中,任何时刻,对任一结点,所有支路电流的代数和恒等于零”。

以图 1.6.1 所示的电路为例,对结点 b 应用 KCL,有

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

即

$$\sum i = 0 \quad (1.6.1)$$

式中,若流入结点的电流前面取“+”号,则流出结点的电流前面取“-”号。电流是流出结点还是流入结点,均根据电流的参考方向判断。

式(1.6.1)可写为

$$i_1 + i_2 = i_3$$

此式表明,流出结点 b 的支路电流等于流入该结点的支路电流。因此, KCL 也可理解为,任何时刻,流出任一结点的支路电流之和等于流入该结点的支路电流之和。

KCL 不仅可以用于结点,对于包含几个结点的闭合面也是适用的。例如,图 1.6.2 所示的电路中对封闭面 S 有

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

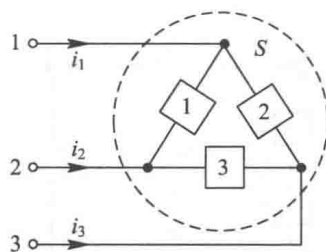


图 1.6.2 KCL 的推广

【例 1.6.1】 如图 1.6.3 所示,已知 $i_2 = 2 \text{ A}$, $i_4 = -1 \text{ A}$, $i_5 = 6 \text{ A}$, 求 i_3 。

解 因为

$$i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$