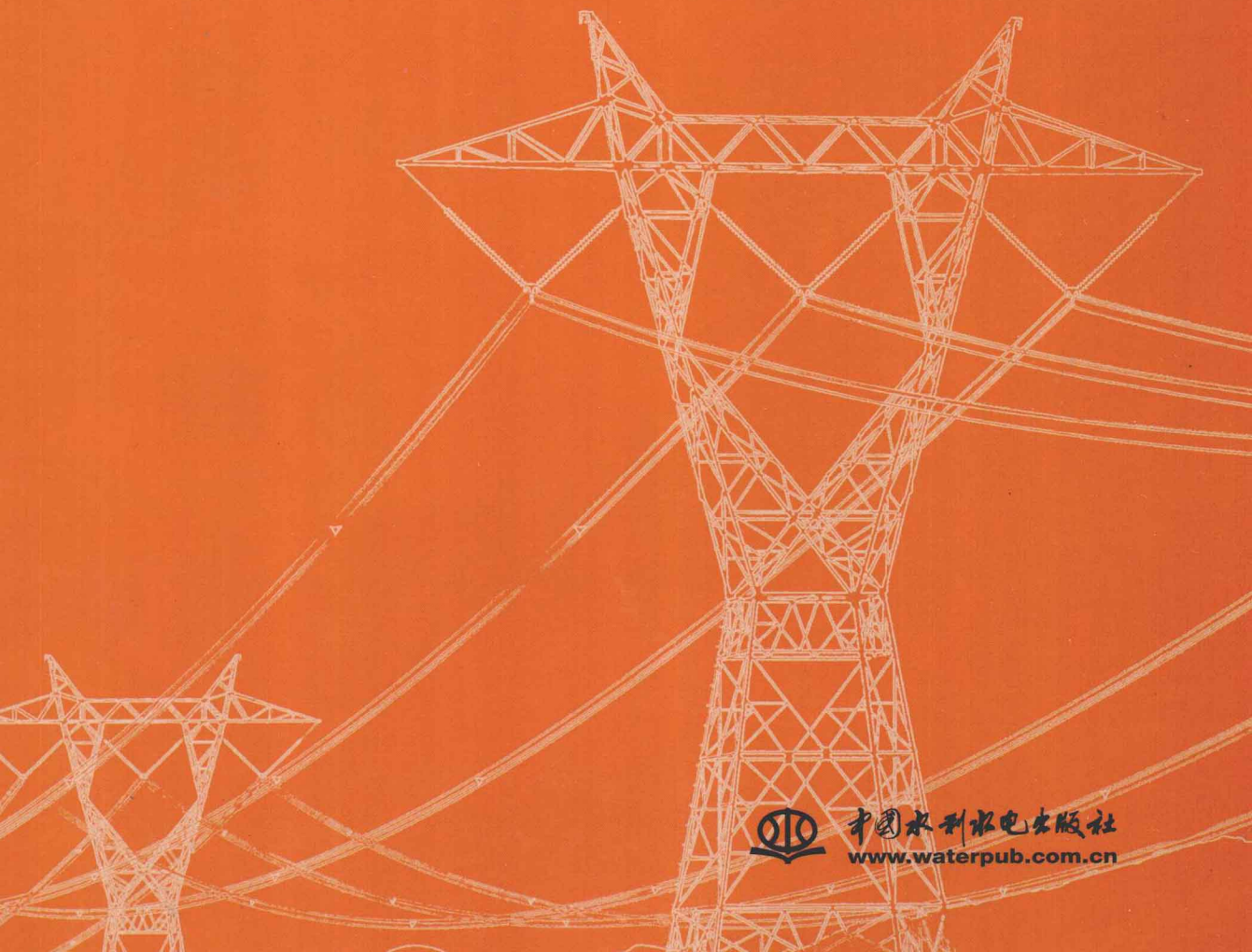




普通高等教育“十二五”规划教材

简明电路分析

吉培荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

简明电路分析

吉培荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分 12 章, 具体内容为: 电路的基本概念和两类约束、电路分析的基本方法、电路的基本定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路、谐振电路与频率特性、含有耦合电感和理想变压器的电路、三相电路和非正弦稳态电路、二端口网络、非线性电阻电路、动态电路的复频域分析、均匀传输线, 书后附有部分习题参考答案。

本书适合高等院校电气信息类专业师生用做电路课程教材或教学参考书, 并可供相关科技人员参考, 对参加各高校电路科目研究生入学考试的人员也有较好的参考价值。

图书在版编目 (C I P) 数据

简明电路分析 / 吉培荣编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 11
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-1857-0

I. ①简… ②吉… ③电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第274781号



书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 简明电路分析
作 者	吉培荣 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
刷 印	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.25印张 409千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言 /

电路课程是高等学校电子与电气信息类专业学生第一门重要的专业基础课。它具有理论严密、逻辑性强，工程背景广阔等特点，对培养学生的科学思维与归纳能力、分析计算能力、实验研究能力都有着非常重要的作用。

全书集作者近30年来从事电路课程的教学经验编写而成，共十二章。本书具有科学性、系统性，便于学生学习，注重提高学生理论联系实际的能力。这里所谓的科学性体现在书中是指对电路理论的相关概念、原理、定义等内容的表述力求清晰、准确；系统性反映在书中是指对内容的组织十分注重知识的模块化及各部分知识之间的逻辑关系和内在联系；便于学习则是指对书中内容的组织和表述充分考虑到学生的认知规律和特点，并适当介绍一些属于方法性的内容来帮助学生掌握对难点内容的掌握。

本书充分吸收现有先进电路教材的优点，在整体体系和内容上与现有流行电路教材基本保持一致，但在具体结构和细节内容上又有自己的特色，本书凝结了作者多年来从事电路课程教学的心得，其中比较有特色内容有：将理想运算放大器的特性归纳为“虚短（假短）、实断（真断）”；证明了理想变压器传递直流的特性，并给出了这一特性与实际结合的路径；给出了快速列写星型电路与三角形电路等效变换公式的方法；强调电路模型与实际电路是两类不同的事物，两者既有密切联系，又有明显区别。

本前言附表中给出了80课时、64课时、48课时、32课时四种授课方案的内容和学时分配建议，供选用本教材的教师参考。

编写本书时，参考了书后列出的参考文献，收益颇多，在此对这些文献作者表示衷心感谢！

本书配有教学课件。

作者

2013年7月

附表

四种不同课时授课方案的课时分配建议

章号	名 称	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
第 1 章	电路的基本概念和两类约束	8	8	6	4
第 2 章	电路分析的基本方法	12	12	10	8
第 3 章	电路的基本定理	6	6	4	4
第 4 章	动态电路的时域分析	12	10	8	6
第 5 章	正弦稳态电路	8	6	6	6
第 6 章	谐振电路与频率特性	4	4	4	0
第 7 章	含有耦合电感和理想变压器的电路	4	4	4	0
第 8 章	三相电路和非正弦稳态电路	6	6	0	0
第 9 章	二端口网络	4	4	2	0
第 10 章	非线性电阻电路	4	2	2	2
第 11 章	动态电路的复频域分析	6	0	0	0
第 12 章	均匀传输线	4	0	0	0
	复习	2	2	2	2
	合计课时	80	64	48	32

对附表的说明：

80 课时的授课方案可基本完整讲授本书第 1 章至第 12 章的内容；64 课时的授课方案可基本完整讲授本书第 1 章至第 10 章的内容，这 10 章的内容是与教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“电路分析基础”教学基本要求完全对应的；48 课时和 32 课时为小课时的授课方案，书中有许多内容无法讲到。

32 课时的授课方案中，对以下内容可不涉及：1.7 节运算放大器、2.3 节回路电流法、2.5 节输入电阻与输出电阻、3.4 节最大功率传输定理、3.5 节对偶原理、4.7 节二阶电路的零输入响应、4.8 节二阶电路的零状态响应和全响应、4.9 节电路的阶跃响应、5.7 节功率因数的提高、5.8 节最大功率传输、第 6 章谐振电路与频率特性、第 7 章含有耦合电感和理想变压器的电路、第 8 章三相电路和非正弦稳态电路、第 9 章二端口网络、10.3 节分段线性化法等。采用 32 课时授课方案讲授电路内容时，对分散在书中各处的受控源内容，可以不讲或略讲。

以上授课方案仅供教师参考，本书包含的内容可方便教师根据教学对象的各种具体要求做出不同的安排。

目录 /

前言

第 1 章 电路的基本概念和两类约束	1
1.1 实际电路与电路模型	1
1.2 实际电路模型化与集中参数电路	2
1.3 电流和电压的参考方向	3
1.4 电能量与电功率	4
1.5 元件约束	5
1.6 拓扑约束	11
1.7 运算放大器	13
习题	18
第 2 章 电路分析的基本方法	21
2.1 电路的等效变换	21
2.2 支路法	31
2.3 回路电流法	34
2.4 节点电压法	40
2.5 输入电阻与输出电阻	45
习题	48
第 3 章 电路的基本定理	53
3.1 叠加定理与齐性定理	53
3.2 替代定理	57
3.3 戴维南定理和诺顿定理	58
3.4 最大功率传输定理	61
3.5 对偶原理	62
习题	63
第 4 章 动态电路的时域分析	67
4.1 储能元件	67
4.2 动态电路的方程与初始条件	71
4.3 动态电路初始条件的确定	74
4.4 RC 电路的时域分析	76
4.5 三要素法	80
4.6 RL 电路的时域分析	82

4.7	二阶电路的零输入响应	85
4.8	二阶电路的零状态响应和全响应	90
4.9	电路的阶跃响应	92
	习题	95
第 5 章	正弦稳态电路	100
5.1	正弦交流电路的基本概念	100
5.2	正弦量的相量表示	102
5.3	相量形式的拓扑约束和元件约束	105
5.4	阻抗和导纳及其串并联	109
5.5	正弦稳态电路的相量分析法	112
5.6	正弦稳态电路的功率	117
5.7	功率因数的提高	120
5.8	最大功率传输	122
	习题	124
第 6 章	谐振电路与频率特性	130
6.1	谐振的定义	130
6.2	RLC 串联谐振电路	130
6.3	RLC 并联谐振电路	132
6.4	具有谐振性质的其他电路	134
6.5	网络函数与网络的频率特性	135
6.6	谐振电路的频率特性	140
	习题	144
第 7 章	含有耦合电感和理想变压器的电路	148
7.1	耦合电感与耦合系数	148
7.2	耦合电感的同名端	149
7.3	耦合电感的元件约束	150
7.4	实际变压器的耦合电感模型	154
7.5	耦合电感的去耦等效电路	155
7.6	理想变压器	159
7.7	理想变压器传递直流的特性及讨论	162
	习题	163
第 8 章	三相电路和非正弦稳态电路	167
8.1	三相电源	167
8.2	三相电路的连接与结构	168
8.3	对称三相电路	172
8.4	不对称三相电路	174
8.5	三相电路的功率及测量	175
8.6	非正弦周期信号的傅里叶级数展开和信号的频谱	177

8.7 非正弦周期信号的有效值、平均值和平均功率	182
8.8 周期性非正弦稳态电路的计算	184
习题	187
第9章 二端口网络	191
9.1 二端口网络概述	191
9.2 二端口网络的约束方程	191
9.3 二端口网络参数的相互转换	199
9.4 二端口网络的等效电路	200
9.5 二端口网络的互联	204
9.6 二端口网络的网络函数	206
习题	208
第10章 非线性电阻电路	212
10.1 非线性电路和非线性电阻元件	212
10.2 图解法	214
10.3 分段线性化法	215
10.4 小信号分析法	216
习题	220
第11章 动态电路的复频域分析	224
11.1 拉普拉斯变换的定义及其性质	224
11.2 拉普拉斯反变换	227
11.3 复频域形式的拓扑约束和元件约束	230
11.4 用拉普拉斯变换法分析电路	233
11.5 复频域形式的网络函数	235
习题	237
第12章 均匀传输线	241
12.1 均匀传输线及其方程	241
12.2 均匀传输线的正弦稳态解	243
12.3 行波与反射系数	248
12.4 均匀传输线的特性与无畸变均匀传输线	250
习题	253
部分习题参考答案	255
参考文献	268

第 1 章 电路的基本概念和两类约束

本章主要介绍电路理论中的一些基本概念和基础知识，核心内容是电路模型、元件约束、拓扑约束。本章的具体内容包括实际电路与电路模型、实际电路模型化与集中参数电路、电压和电流的参考方向、电能量与电功率、元件约束、拓扑约束、运算放大器。

1.1 实际电路与电路模型

电路一词有两重含义：其一是指实际电路；其二是指电路模型。实际电路是指由各种实际电器件用实际导线按一定方式连接而成的、具有特定功能的电流的通路；电路模型是指由定义出来的各种理想电路元件用理想导线按一定方式连接构成的图形。实际电路与电路模型既有密切联系，又有明显区别。在一定条件下，实际电路可抽象成电路模型，供理论分析和计算所用。将理论分析和计算结果应用于实际电路，可使人们掌握实际电路的特性。电路也称为电网络、电系统，简称为网络、系统。电路、网络、系统是人们为了从不同侧面描述电路而提出的术语，在电路理论中，对于这三者并不加以区分。

实际电路的种类和功能很多，但总体来讲，大致可分成强电系统和弱电系统两类：强电系统进行电能量的传输、分配；弱电系统进行电信号的传输、处理。

对电路模型进行理论分析和计算的方法很多，各种方法的共同依据和基础是电路的拓扑约束和元件约束。电路的拓扑约束和元件约束以及各种具体的分析计算方法构成了电路理论的主体内容。

电路理论是为了研究实际电路的电磁过程而提出和发展的一门科学理论，其基本物理量是电压、电流、电荷和磁通（或磁链）。对于随时间变化的情况，电压、电流、电荷通常分别用小写字母 $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $q(t)$ 表示，简写为 u 、 i 、 q ；对于不随时间变化的情况，电压、电流、电荷通常分别用大写字母 U 、 I 、 Q 表示；磁通（或磁链）用 $\varphi(t)$ [或 $\psi(t)$] 表示，简写为 φ （或 ψ ）。

实际电路通过模型化转换为电路模型。如图 1.1 (a) 所示为手电筒电路，对其进行模型化后得到的电路模型如图 1.1 (b) 所示。图 1.1 (a) 中的各元件均是实际元件，而图 1.1 (b) 中的各元件均是定义出来的理想元件。应强调的是实际电路与电路模型是完全不同的。如图 1.1 (a) 中的灯泡上不能加过大电压，否则会被烧毁，实际电路中的各器件必须工作在实际特性限定的范围内；而电路模型中各理想元件工作在定义的特性上，如图 1.1 (b) 中的电阻 R_L （灯泡的模型）上可加任意电压，定义的特性不同于实际的特性。再如，图 1.1 (a) 中的电池是一个元件，但在图 1.1 (b) 中该电池被模型化为理想电压源与理想电阻两个元件的串联。正确认识实际电路与电路模型的联系与差异，不仅有助于

掌握电路理论的精髓，也有助于将理论应用于实际。

为简化起见，人们经常将实际电路和电路模型（理想电路）统一简称为电路，有些初学者受此影响，往往会把实际电路与电路模型混为一谈，对此要加以注意。

本书电路一词即指实际电路，也指电路模型。在单纯使用电路一词容易产生问题的地方，会分别使用实际电路或电路模型（理想电路）的说法，以避免产生问题。

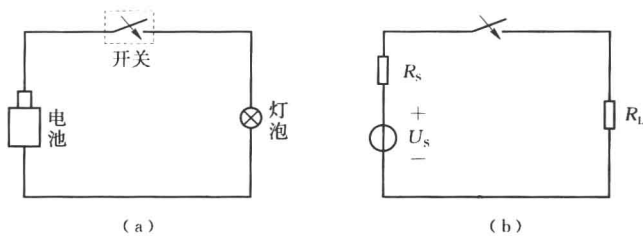


图 1.1 手电筒电路及其电路模型

1.2 实际电路模型化与集中参数电路

实际电路种类繁多，其分析虽然可以通过测量等手段进行，但更方便的方法是先将实际电路转化为电路模型，然后对电路模型进行分析计算，最后再将分析与计算结果应用于实际电路。此外，在实际电路设计过程中，对电路模型进行分析和计算也是必不可少的一个环节。

将实际电路转换为电路模型的过程称为模型化，它是一个对实际电路抽象和近似的过程。

实际情况不同，模型化的结果就会有所不同，因此同一个实际电路，在不同工作条件或不同精度要求下可有不同的模型化结果，即有不同的电路模型。一般而言，对实际电路近似的程度愈高，电路模型就愈复杂，反之，则愈简单。例如图 1.1 (a) 中的电池，在图 1.1 (b) 中被模型化为理想电压源与理想电阻的串联组合，若忽略电池工作时本身也消耗能量这一因素，在模型化时可将电池仅仅用理想电压源表示。

实际电路、电路模型、模型化三者的关系用形象的语言来说，可表述为“电路模型与实际电路可比作是大河的两岸，模型化是将两者联系起来的桥梁”。而连接两岸的桥梁有多种多样，也就是说对同一个电路进行模型化的过程可以是多种多样的，最终得到的电路模型也可以是有所不同的。

实际电路工作时的电磁现象非常复杂，为简化分析，使分析过程能够进行，人们引入了集中参数元件和集中参数电路的概念。集中参数元件是定义出来的元件，因此也称为理想元件。理想元件的主要特征是有精确的数学定义，每一种元件只表示一种电磁现象。由集中参数元件和理想导线构成的电路，称为集中参数电路。

任何实际电路在工作时各处均存在能量损耗、电场储能和磁场储能三种效应。人们用理想电阻元件（参数）描述能量损耗特性，用理想电容元件（参数）描述电场储能特性，用理想电感元件（参数）描述磁场储能特性。由于实际电路中能量损耗、电场储能和磁场储能三种效应均连续分布于电路和器件中，所以实际电路各处均分布有电阻、电容、电

感，因此实际电路是分布参数电路。分布参数电路的分析是比较复杂的，很多时候理论分析难以进行。但在一定条件下，将实际电路模型化为集中参数电路，不仅带来分析上的便利，而且理论分析结果也满足工程实际的要求，这时，就可将实际电路模型化为集中参数电路。

一般而言，当实际电路的尺寸 l 与其上的电磁波的波长 λ 满足式 (1.2.1) 所示关系时，实际电路可模型化为集中参数电路。

$$l \leq \frac{1}{10} \lambda \quad (1.2.1)$$

式中 $\lambda = c/f$ ，这里 c 是实际电路中电磁波的传播速度，通常可近似用真空中电磁波的传播速度表示，即 $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ ； f 为电路中正弦信号（电压或电流）的频率，若电路中存在多个不同频率的正弦信号，则 f 为频率最高的正弦信号的频率。

我国工频正弦交流电的频率 $f = 50 \text{ Hz}$ ，对应的波长为 $\lambda = c/f = 6000 \text{ km}$ ， $\frac{1}{10} \lambda = 600 \text{ km}$ ，一般的用电设备和小范围区域内的电力网尺寸均小于 600 km ，因此可将这些实际电路模型化为集中参数电路，对这样的集中参数电路进行理论分析，将分析结果应用于实际，可满足工程要求。如电力工程中，通常将几何尺寸小于 300 km 的电力网和长度小于 300 km 的输电线作为集中参数电路处理。对几何尺寸超过 600 km 的电力网和长度超过 600 km 的高压输电线，则不适合将它们模型化为集中参数电路，因为如果将它们模型化为集中参数电路，理论分析的结果与实际相比将存在工程意义上不能接受的误差，此时，对实际电路应建立分布参数电路模型。工作在高频条件下的微波电路几何尺寸通常并不大，但因实际工作频率高，电磁波的波长短，也需按分布参数电路的分析方法对微波电路作理论分析。

应该注意的是，式 (1.2.1) 给出的标准不是绝对的，只是最低要求。在计算精度要求高的场合，可把实际电路模型化为集中参数电路的条件提高到 $l \leq \frac{1}{100} \lambda$ 。

1.3 电流和电压的参考方向

在电路分析中，人们约定导线中电流的实际方向为正电荷移动的方向，任意两点之间电压的实际方向为高电位点指向低电位点的方向。在进行电路分析时，由于电压、电流的实际方向往往是未知的，或者是随时间变化的，因此，必须预先假定电压、电流的方向并加以标定，这一标定的方向称为参考方向。

电压 u 的参考方向有多种表达方式，“+”、“-”号是最常用的表达方式，也可用箭头表示，还可用双下标表示，这三种表示方法如图 1.2 (a) 所示；双下标的表示方法为 u_{AB} ，它表示 A、B 两点之间电压的参考方向由 A 指向 B。电流 i 的参考方向多用箭头表示，也可用双下标表示，这两种表示方法如图 1.2 (b) 所示；双下标的表示方法是 i_{AB} ，它表示电流 i 的参考方向由 A 指向 B。有了参考方向，结合求出或给定的物理量的具体符号和数值，便可确定物理量的实际大小和方向。例如在图 1.2 (a) 中，假定已得到 $u = 1 \text{ V}$ ，则表明电压的大小是 1 V ，实际方向如图中箭头所示；若得到的是 $u = -1 \text{ V}$ ，则表明

电压的大小是 1V，实际方向与图中箭头方向相反。同理，在图 1.2 (b) 中，假定已得到 $i=1\text{A}$ ，则表明电流的大小是 1A，实际方向如图中箭头所示；若得到的是 $i=-1\text{A}$ ，则表明电流的大小是 1A，实际方向与图中箭头方向相反。可见，在预先标定电压、电流参考方向的情况下，通过给出或求出的电压、电流的表现形式（函数式或数值），就可确定电压、电流的实际大小和方向。

电路中，电压和电流是两个不同的物理量，它们的参考方向是分别指定的。如果指定的流过某一元件（或局部电路）的电流的参考方向与指定的该元件（或局部电路）的电压的参考方向相同，则把此时的电压和电流称为关联参考方向，简称关联方向，在图 1.3 (a) 中， u 与 i 就为关联方向。当电压和电流的参考方向不一致时，则称为非关联的参考方向，简称非关联方向，在图 1.3 (b) 中， u 与 i 就被称为非关联方向。图 1.3 中的 N 表示某个局部电路，它可由多个元件构成，也可以仅由一个元件构成。

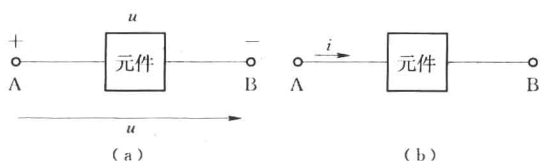


图 1.2 电压和电流参考方向的表示

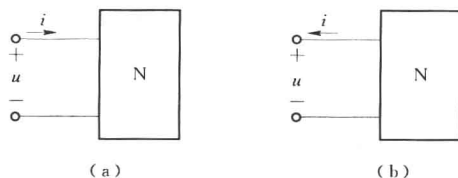


图 1.3 电压和电流的关联参考方向和非关联参考方向

关于电压和电流的参考方向，需要强调的是：①电压、电流的参考方向可任意地独立选定，但一旦选定，在电路分析和计算过程中则不应随意改变；②在本书对电路进行分析和计算过程中，电路图中所标出的所有的电压、电流的方向均为参考方向，而非实际方向。

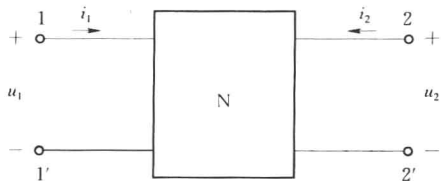


图 1.4 四端网络

图 1.3 所示的电路有两个引出端，因而被称为二端电路，二端电路也可称为一端口电路。所谓端口是指这样的一对端子，其一个端子流入的电流恒等于另一个端子流出的电流。集中参数电路中的二端电路其两个端子自然满足端口条件。

图 1.4 所示为有四个引出端子的电路，称为四端网络，将四端网络的端子分为两对，若一对端子满足端口条件，另一对端子必然也满足端口条件，此时四端网络可称为二端口网络，二端口网络是四端网络的特例。

1.4 电能量与电功率

当电路工作时，电场力推动正电荷在电路中运动，电场力对电荷做功，同时电路吸收能量。

图 1.5 所示电路中，电压 u 和电流 i 的参考方向一致，为关联参考方向。在 dt 时间内通过该电路的电荷量为 $dq=idt$ ，它由 a 端移到 b 端，电场力对其做的功为 $dA=udq$ ，因此电路吸收的能量为

$$dW = dA = udq \quad (1.4.1)$$

即

$$dW = uiddt \quad (1.4.2)$$

功率为能量对时间的变化率, 则图 1.4 所示电路的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1.4.3)$$

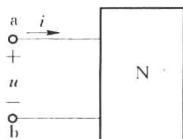


图 1.5 电路的功率计算

式 (1.4.3) 表明, 电压和电流取关联参考方向时, 乘积 “ ui ” 表示电路吸收能量的速率。如果 $p = ui > 0$, 表示该电路确实在吸收能量; 如果 $p = ui < 0$, 表示该电路在吸收负能量, 即实际在发出能量。若将图 1.4 所示电路中电流的参考方向加以改变, 使得电压和电流的参考方向不一致, 即为非关联方向时, 如果仍用 $p = ui$ 公式计算电路的功率, 则 $p = ui > 0$ 表示电路实际发出能量, $p = ui < 0$ 表示电路实际吸收能量。

可规定当电压和电流为非关联参考方向时, 功率的计算公式为 $p = -ui$, 当电压和电流为关联参考方向时, 功率的计算公式为 $p = ui$ 。这样做的好处是从计算结果上可直接得出电路吸收或发出能量的统一结论, 即 $p > 0$ 时表示电路吸收能量, $p < 0$ 时表示电路发出能量。

吸收能量、发出能量的含义是清晰的, 但人们普遍采用吸收功率、发出功率的说法, 这里, 电路 (或元件) 吸收功率, 是指电路 (或元件) 以功率数值所示的速率吸收能量; 电路 (或元件) 发出功率, 是指电路 (或元件) 以功率数值所示的速率发出能量。因此, 吸收功率和发出功率的含义应分别理解为吸收能量和发出能量。

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位是瓦特, 符号为 W。工程上常用的功率单位有兆瓦 (MW)、千瓦 (kW) 和毫瓦 (mW) 等, 它们与瓦 (W) 的换算关系为 $1\text{MW} = 10^6\text{W}$ 、 $1\text{kW} = 10^3\text{W}$ 、 $1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$ 。

电路中的能量通过对功率的时间积分得到。从 t_0 到 t 时间内电路 (或元件) 吸收的能量由下式表示, 即

$$W = \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t ui d\xi \quad (1.4.4)$$

在国际单位制 (SI) 中, 能量的单位为焦耳, 符号为 J。工程和生活中还采用千瓦小时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 作为电能的单位, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 也称为 1 度 (电)。两者的换算关系为

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 10^3\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

在电路的分析计算中, 功率和能量的计算是十分重要的, 这是因为实际电路在工作时总伴有电能和其他形式能量的相互转换; 此外, 电气设备、实际电路器件在工作时本身还存在功率的限制, 在使用时应注意其电压或电流是否超过额定值 (指设备正常工作所要求的数值)。如果过载 (即电压或电流超过额定值), 会使设备或器件损坏, 或使电路不能正常工作。

1.5 元 件 约 束

1.5.1 电路元件

前面已提及, 实际电路总体来说可分成传输能量的电路和传输或处理信号的电路两

类。对传输能量的电路，可将其看成是由发出能量的电源部分、传输能量的传输部分、消耗能量的负载部分三个部分组成；对传输或处理信号的电路，可将其看成是由发出信号的信号源、传输或处理信号的中间环节、接受信号的接受部分组成。

实际电路的各个组成部分是由单个或多个实际元件连接而成的。实际元件类型很多，发出能量或信号的有旋转发电机、电池、热电偶、信号发生器、感应元件、天线等，传输部分中的有变压器、频率转换器、放大器、输电线、信号馈线等，消耗电能或接受信号的有电炉、电动机、照明灯具、音箱、电阻器、投影仪等。

电路模型是由理想元件连接而成的，理想元件是定义出来的元件，有精确的数学描述。理想元件包括理想电阻、理想电容、理想电感、理想电源（电压源、电流源）、理想受控源（电压控制电压源、电流控制电压源、电压控制电流源、电流控制电流源）、理想运算放大器、理想耦合电感（理想互感）、理想变压器等。

各种理想元件都是为了描述实际电路的性质而定义出来的。理想电阻用来反映实际电路消耗电能量的性质，理想电容用来反映实际电路形成电场并储存电场能的性质，理想电感用来反映实际电路形成磁场并储存磁场能的性质，理想电源用来反映实际电源提供能量或信号的性质，理想受控源、理想运算放大器、理想耦合电感（理想互感）、理想变压器等用来描述实际电路各组成部分在物理过程上的相互关联的关系，可见这些理想元件与实际电路是有密切联系的。

在电路模型范畴，为了简化起见，人们往往将理想元件中的理想二字省略，如将理想电阻简称为电阻，将理想耦合电感（理想互感）简称为耦合电感（互感），不过对理想变压器而言，理想二字不可省略。

1.5.2 电阻与电导

理想电阻元件也称为线性电阻元件，是一个二端元件（有两个引出端），它的特性定义如下：当电压和电流取关联参考方向时，在任何时刻，其两端的电压 u 和流过的电流 i 服从线性关系，即

$$u = Ri \quad (1.5.1)$$

将上式改写，可有

$$i = Gu \quad (1.5.2)$$

式 (1.5.1) 中的系数 R 称为电阻元件的电阻，符号如图 1.6 (a) 中所示；式 (1.5.2)

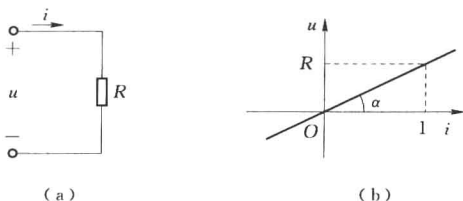


图 1.6 线性电阻元件及其伏安特性

中的系数 G 称为电阻元件（电导元件）的电导， R 与 G 是互为倒数的关系，即 $G=1/R$ 。在国际单位制（SI）中， R 的单位为欧姆，简称欧，符号为 Ω ； G 的单位为西门子，简称西，符号为 S。在多数情况下，电阻元件和电导元件可视为是同一种元件，但在某些场合，如本书后面会讨论的对偶原理中，电阻元件和电导元件

是视为不同的。

线性电阻元件的伏安特性（电压电流关系）如图 1.6 (b) 所示，它是通过以 $u-i$ 为轴的平面直角坐标系原点的一条直线，直线的斜率与元件的 R 有关。

当线性电阻元件的电压 u 和电流 i 为如图 1.6 (a) 所示的关联参考方向时, 功率计算式为

$$P = ui = Ri^2 = u^2/R \quad (1.5.3)$$

或

$$P = ui = Gu^2 = i^2/G \quad (1.5.4)$$

则 t_0 到 t 时间内, 该电阻元件吸收 (消耗) 的能量为

$$W_R = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1.5.5)$$

若电阻元件的端电压无论为何值时, 流过它的电流恒为零, 则对应的电阻 $R = \infty$, 此种情况称为“开路”; 当电阻元件流过的电流无论为何值时, 它的两个端子之间的电压始终为零, 则对应的电阻 $R = 0\Omega$, 此时情况称为“短路”。

实际电阻元件与理想电阻元件的特性是不一样的, 如反映理想电阻元件特性的式 (1.5.1) 中, 电压和电流可为无穷大, 而实际电阻元件上的电压和电流是受限制的。当电压电流过大时, 实际电阻元件就会被烧毁。在实际电阻元件能够正常工作的电压和电流范围内, 若其上电压与电流的相互关系近似符合线性关系时, 就可把实际电阻模型化为线性电阻, 以方便进行理论分析和计算。

理想电阻是用来反映实际电路中消耗电能这一性质的, 此时式 (1.5.1) 中, R 的值大于零。但理想电阻元件的定义式中电阻的值并不一定限于正值, 可以是零值, 也可以是负值。为零值时就是理想导线, 为负值时表明该元件发出能量。实际电阻元件均是消耗能量的, 实际电源的用途是用来发出能量的。在某些情况下, 可以把一个发出能量的实际二端电路用负电阻表示, 即模型化为负电阻。

1.5.3 独立电源

独立电源是二端元件, 包括理想电压源和理想电流源两种。

理想电压源的定义: 二个端子间的电压为一个确定的时间函数或为常量, 该电压与端子上流过的电流以及外接电路无关。

理想电压源可简称为电压源, 它的图形符号如图 1.7

(a) 所示, 其电压电流特性可用式 (1.5.6) 表述为

$$\begin{cases} u(t) = u_s(t) \\ i(t) \text{ 由外接电路决定, 值域为 } (-\infty, +\infty) \end{cases} \quad (1.5.6)$$

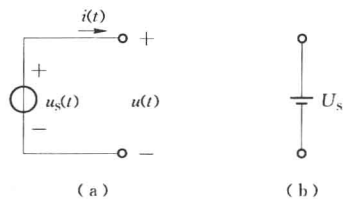


图 1.7 理想电压源的符号

式 (1.5.6) 中, $u_s(t)$ 为给定的时间函数, 与流过的电流 $i(t)$ 及外接电路无关; $i(t)$ 由外电路确定, 值域范围

为 $(-\infty, +\infty)$ 。当 $u_s(t)$ 为恒定值时, 电压源称为直流电压源, 往往表示为图 1.7 (b) 所示形式, 其中长划线表示电压源参考方向的“+”极, 短划线表示电压源参考方向的“-”极, U_s 表示恒定电压值。

图 1.8 (a) 给出的是电压源与外电路相连接的情况, 其端子 1、2 之间的电压 $u(t)$ 等于 $u_s(t)$, 它不受外电路的影响。图 1.8 (b) 给出的是直流电压源的伏安特性, 它是一条不随时间改变且平行于电流轴的固定直线。它表明该电压源的电压始终为 U_s , 电流可

以在 $-\infty \rightarrow +\infty$ 范围内取值。若 $u_s(t)$ 随时间变化，针对每一个时刻，都可得到一幅与图

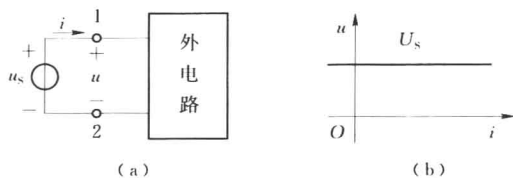


图 1.8 理想电压源的连接与特性

1.8 (b) 类似的伏安特性图，平行于横轴的直线在不同时间处于图中不同位置。

针对电压源，实际工作中通常将电压和电流的参考方向取为非关联方向 [见图 1.8 (a)]，若电压源功率的计算采用式 (1.5.7) 的形式，即

$$p(t) = u_s(t) i(t) \quad (1.5.7)$$

则 $p(t) > 0$ 表明该电压源在发出能量，外电路在吸收能量。非关联方向时功率的计算也可用 $p(t) = -u_s(t) i(t)$ 进行，此时 $p(t) < 0$ 表示电压源发出能量。

理想电流源的定义：端子上的电流为一个确定的时间函数或为常量，该电流与两个端子间的电压以及外接电路无关。

理想电流源可简称为电流源，它的图形符号如图 1.9 (a) 所示，其电压电流特性可用公式表述为

$$\begin{cases} i(t) = i_s(t) \\ u(t) \text{ 由外接电路决定，值域为 } (-\infty, +\infty) \end{cases} \quad (1.5.8)$$

式 (1.5.8) 中， $i_s(t)$ 为给定的时间函数，它与二个端子间的电压以及外接电路无关；电流源的端电压由外接电路决定，端电压的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。图 1.9 (b) 给出了电流源与外电路相连接的情况。

当 $i_s(t)$ 为常量 (恒定值) 时，这种电流源称为直流电流源。图 1.9 (c) 所示为直流电流源的伏安特性，它是一条不随时间改变且平行于电压轴的固定直线，它表明该电流源的电流始终为 I_s ，电压可以在 $-\infty \rightarrow +\infty$ 范围内取值。若 $i_s(t)$ 随时间变化，针对每一个时刻，都可得到一条与图 1.9 (c) 类似的伏安特性图，平行于纵轴的直线在不同时间处于图中不同位置。

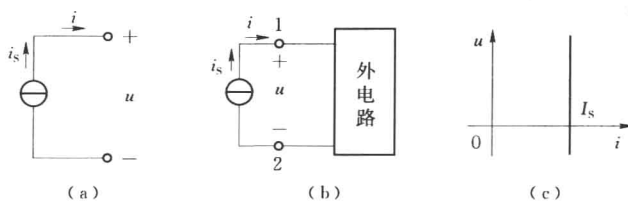


图 1.9 理想电流源的符号及特性

针对电流源，实际工作中通常将电压和电流的参考方向取为非关联方向，此种情况下，如果功率计算采用式 (1.5.9) 所示形式，即

$$p(t) = u(t) i_s(t) \quad (1.5.9)$$

则 $p(t) > 0$ 表明该电流源发出能量，外电路在吸收能量。也可用 $p(t) = -u_s(t) i(t)$ 进行功率计算，此时， $p(t) < 0$ 表示电流源发出能量。

常见的实际电压源如蓄电池、干电池、发电机和电子稳压器等，在一定工作条件下，其特性与理想电压源比较接近，此时，可将它们的电路模型用理想电压源表示；若考虑到实际电压源工作时本身消耗功率这一因素，则可用理想电压源与理想电阻的串联组合表示

实际电压源的电路模型。实际的电流源如光电池、电子稳流器等器件，在一定工作条件下，它们的特性与理想电流源比较接近，此时，可将它们的电路模型用理想电流源表示；若考虑到实际电流源工作时本身消耗功率这一因素，则可用理想电流源与理想电阻的并联组合表示实际电流源的电路模型。

电压源和电流源统称为独立电源，“独立”二字是相对后面要讨论的“受控”电源而言的。

1.5.4 受控源

受控源也被称为非独立电源，其输出的电压或电流不由自身决定，而是由电路中其他部分的电压或电流所控制，因此，被称为受控电源，简称受控源。受控源作为一种电路元件，并非严格意义上的电源，只是用来表明实际器件的电压、电流转移关系或互参数的一种方式而已。受控源在电路模型化过程中起非常重要的作用，许多实际电子器件的电路模型中均包含受控源。

受控源有四个引出端子，形成两个端口，其中一个为输入端口，另一个为输出端口，所以，受控源也被称为二端口元件。加在输入端口的是控制量，它可以是电压也可以是电流，而在输出端口输出的则是被控制的电压或电流。受控源可分为受控电压源和受控电流源两类，共有四种，分别是电压控制电压源（Voltage Controlled Voltage Source，简称为 VCVS）、电流控制电压源（Current Controlled Voltage Source，简称为 CCVS）、电压控制电流源（Voltage Controlled Current Source，简称为 VCCS）、电流控制电流源（Current Controlled Current Source，简称为 CCCS）。国家标准规定的四种受控源图形符号如图 1.10 所示，图 1.10 中各图依次表示 VCVS、CCVS、VCCS、CCCS。

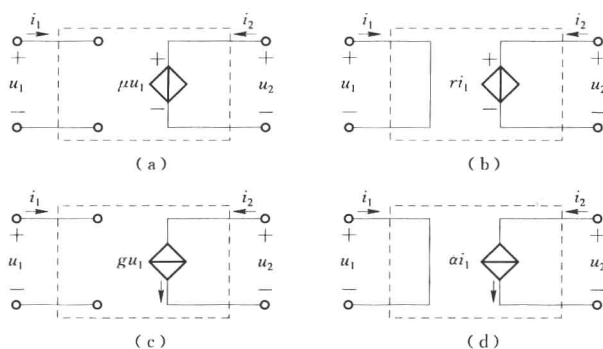


图 1.10 受控源图形符号

图 1.10 中，输出端口中的 μ 、 r 、 g 、 β 分别是相关的控制系数。其中： $\mu = u_2/u_1$ ，它是一个无量纲的数，称为电压控制电压源的转移电压比； $r = u_2/i_1$ ，它具有电阻的量纲，称为电流控制电压源的转移电阻； $g = i_2/u_1$ ，它具有电导的量纲，称为电压控制电流源的转移电导； $\beta = i_2/i_1$ ，它是一个无量纲的数，称为电流控制电流源的转移电流比。

如果控制系数为常数，则被控制量和控制量成正比，这种受控源被称为线性受控源，否则称为非线性受控源。本书只讨论线性受控源，为表述简明，略去“线性”二字，称为受控源。

电压控制电压源（VCVS）的特性方程为