



工业和信息化部“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工理论基础

■ 席志红 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工理论基础

席志红 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为工业和信息化部“十二五”规划教材。

本书围绕电工、电路的基本理论,介绍了电路的基本概念和定律,电阻电路的变换与化简,电路分析方法和网络定理,正弦稳态电路的相量分析法,互感电路分析与理想变压器,谐振电路,周期非正弦电路的傅里叶级数展开分析法,三相电路,一阶暂态、二阶暂态电路分析,高阶电路微分方程的拉氏变换求解法,并对 Multisim 电路分析工具和利用 MATLAB 语言进行辅助电路分析做了简要介绍。全书配有较丰富的例题与习题,并配有历史人物、历史故事、工程应用实例等内容。

本书可作为高等学校相关课程的教材或教学参考书,也可供科技人员参阅。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工理论基础 / 席志红等编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.9

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-26599-0

I. ①电… II. ①席… III. ①电工学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 155748 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.5 字数: 400 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书为工业和信息化部“十二五”规划教材。

“电工理论基础”是将原电类专业的“电路分析”课程与非电类工科专业的“电工技术”课程整理合并而成的一门新课程，面向高等学校理工科专业开设，建议学时数为 56~64。

本书吸取了哈尔滨工程大学原《电路基础》(姜钧仁主编，哈尔滨工程大学出版社 2002 年出版)、《电工技术》(席志红主编，哈尔滨工程大学出版社 2008 年出版)、《电路基础》(付永庆主编，高等教育出版社 2008 年出版)等一系列教材的使用经验，结合我校近 4 年的教学实践，整合编写而成。编写时更多地借鉴了姜钧仁主编的《电路基础》叙述细腻、通俗易懂的写作风格。

本着理论基础和技术基础并重的编写宗旨，本书注重电路理论的完善与分析推导的科学严谨性，也注重理论与实际的紧密联系，对各部分内容按重要程度不同进行分级，内容上尽量做到基本理论全面扎实，兼顾重点突出、层次分明、工程应用性强的要求，适合少学时开设。

本教材的编写思路和框架设计以及全书的统稿由席志红负责。参加本教材编写工作的老师及分工如下：荣海泓，第 1、2 章；刘庆玲，第 3 章；李鸿林，第 4 章；张驰，第 5 章；李志刚，第 6、7 章；席志红，第 8 章；张忠民，第 9 章；禹永植，第 10 章。

由于电类专业与非电类工科专业对电学知识和技能的要求差异很大，要兼顾共性需求和个性需求，而对课程学时数、开课学期又有限制，所以整合两门课程，编写立意明确、内容适当的教材是一件困难的事情。我们的尝试有很多不足之处，恳请读者批评指正。

本书在编写过程中得到哈尔滨工业大学吴建强教授、哈尔滨工程大学刁秋庭教授两位审稿专家，工业和信息化部“十二五”规划教材专著立项评审委员会第七评审专家组的指正，以及电子工业出版社等有关单位的大力协助，在此一并表示感谢。

编著者

于哈尔滨工程大学

(xizhi hong@hrbeu.edu.cn)

课程定位与教材建设思路

1. 课程定位

针对本科生教育实行大类培养的趋势, 我校面向工科专业学生开设了一系列基础平台课程, 学生在完成了这些基础平台课程学习后可以重新自由选择专业, 其选择不限于电类或非电类专业。“电工理论基础”就是这一系列基础平台课程之一, 于第3学期开设, 总学时64, 是将原电类专业的“电路分析”课程与非电类工科专业的“电工技术”课程整理合并而成的一门新课程。目前本课程已经试运行4年。

电子科学技术的发展非常迅速。为了更好地跟踪科技的发展, 适应社会需要, 各高校都在大力进行着多种形式的教学改革与探索, 也都面临着科技人才所需的知识和技能在不断增加, 而有限的大学教育时间不变的矛盾。围绕本课程的改革, 目前国内比较普遍的做法依然是按照电类与机械类两个大方向对“电路分析”或“电工学”课程进行精简和压缩。我们立足于“宽口径、厚基础”的人才培养原则, 要求理工科学生除了必须具备数学、物理、外语等公共基础知识外, 还要具备力学、机械、电工、计算机编程等基本理论知识, 在这些基础课程之上, 学生进入各个专业后, 视专业需求不同再补充欠缺的基础知识或继续后续课程的学习。

“电工理论基础”要求的先修课程有微积分、大学物理、复变函数与积分变换等; 其后续课程有网络与系统分析、电子线路Ⅰ(模拟部分)、电子线路Ⅱ(数字部分)、电子技术和通用电器技术, 其中前三门为电类工科专业设计, 后两门为非电类工科设计。

2. 教材设计思路

根据我们特殊的人才培养方针和课程设置方式, 电工基础理论课程必须在电类工科与非电类工科专业对电学知识的不同需求之间寻找折中与平衡, 既受开课学期和学时的限制, 又要适应宽口径要求, 还要做到基础扎实。

鉴于此, 电工理论基础教材的设计思路是:

(1) 在学时大幅度压缩的客观条件下, 在原“电路分析”和“电工技术”的基础上, 以降低理论的科学性、严谨性、完善性为标准, 求同去异。将原两门课程内容重叠的部分整合, 取长补短, 形成新的教学内容; 将两门课程不重叠的部分内容转移到后续课程中。

(2) 教材内容要涉及面广, 要延续电路理论的完善与分析推导的科学严谨性。鉴于课程学时少, 所以要重点突出, 层次分明, 对各部分内容要按重要程度的不同进行分级。教学内容还要工程应用性强, 理论与实际紧密联系。

(3) 教材内容有延展性, 例题与习题依难度和复杂度阶梯式递进。教师可根据课程的具体要求选择部分题目, 其余题目可供学生自学, 给不同层次的学生提供延伸学习和练习的空间。

(4) 每一章后都附有“本章内容延展与工程应用实例”。将本章的基础理论延展到工程应用或后续课程中, 为学生开展课外学习提供素材。

(5) 为增加教材的趣味性和易读性, 插入部分名人介绍或历史背景故事, 提高学生的人文素养, 引导其树立循序渐进、努力钻研、锲而不舍的科学精神。

(6) 对计算机辅助电路分析方法与工具加以介绍, 供学生参阅, 为学生课外求解和分析较复杂电路提供帮助。

目 录

第1章 电路模型和电路定律	(1)	3.3.1 含纯电压源支路的分析	(39)
1.1 电路与电路模型	(1)	3.3.2 含串联电阻的电流源电路的分析	(40)
1.2 电流、电压及其参考方向	(2)	3.3.3 含受控源电路的分析	(41)
1.2.1 电流	(3)	3.4 叠加定理	(43)
1.2.2 电压、电动势、电位	(3)	3.5 替代定理	(46)
1.2.3 关联参考方向与非关联参考方向	(4)	3.6 戴维南定理与诺顿定理	(47)
1.3 电功率和能量	(5)	3.6.1 戴维南定理	(47)
1.4 电阻元件	(6)	3.6.2 诺顿定理	(51)
1.5 电容元件	(7)	3.7* 回路电流法	(52)
1.6 电感元件	(10)	3.8* 特勒根定理	(54)
1.7 电压源和电流源	(12)	3.9* 互易定理	(57)
1.8 受控源	(13)	本章内容延展与工程应用实例	(59)
1.9 基尔霍夫定律	(14)	历史人物	(60)
1.9.1 基尔霍夫电流定律	(14)	习题三	(60)
1.9.2 基尔霍夫电压定律	(15)	第4章 正弦电路的稳态分析	(66)
本章内容延展与工程应用实例	(17)	4.1 正弦量的基本概念	(66)
历史人物	(18)	4.2 正弦量的相量表示	(68)
习题1	(18)	4.3 基尔霍夫定律和电路元件伏安关系的相量形式	(71)
第2章 电阻电路的等效变换和化简	(21)	4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	(71)
2.1 等效电路的概念	(21)	4.3.2 电路元件伏安关系的相量形式	(71)
2.2 电阻的串联和并联	(21)	4.4 复阻抗和复导纳	(74)
2.3 电阻的星形和三角形连接及其等效互换	(24)	4.4.1 复阻抗和复导纳定义	(74)
2.4 含受控源电路的等效电阻	(26)	4.4.2 复阻抗和复导纳的串并联	(76)
2.5 电源的串联和并联	(27)	4.5 正弦电路的分析方法	(77)
2.6 实际电源两种模型的等效变换	(28)	4.6 正弦电路的功率	(83)
本章内容延展与工程应用实例	(31)	4.6.1 瞬时功率	(83)
历史人物	(32)	4.6.2 有功功率、无功功率和视在功率	(84)
历史故事	(32)	4.6.3 复功率	(84)
习题2	(32)	4.6.4 功率因数的提高	(85)
第3章 电路的分析方法和网络定理	(35)	4.6.5 最大功率传输	(86)
3.1 支路电流法	(35)	历史人物	(88)
3.2 节点电压法	(37)	历史故事	(88)
3.3 节点法几种特殊情况的处理	(39)	本章内容延展与工程应用实例	(89)

习题四	(90)	本章内容延展与工程应用	(150)
第5章 互感电路	(95)	历史人物	(151)
5.1 互感系数和耦合系数	(95)	习题八	(152)
5.2 互感电压及同名端	(97)	第9章 暂态电路	(154)
5.3 去耦等效电路	(100)	9.1 动态电路方程及其初始条件	(154)
5.4 含有互感元件的正弦电路	(102)	9.2 一阶电路的暂态响应	(157)
5.5 变压器原理	(104)	9.2.1 一阶电路恒定输入下的 全响应	(158)
5.5.1 线性变压器	(105)	9.2.2 一阶电路的零输入响应	(162)
5.5.2 理想变压器	(107)	9.2.3 一阶电路的零状态响应	(164)
本章内容延展与工程应用实例	(108)	9.3 一阶电路的三要素法	(167)
历史人物	(110)	9.4 二阶电路的暂态响应	(172)
历史故事	(110)	9.4.1 二阶电路的零输入响应	(172)
习题五	(111)	9.4.2 二阶电路的零状态响应	(177)
第6章 谐振电路	(113)	9.4.3 二阶电路的全响应	(178)
6.1 串联电路的谐振	(113)	9.5* 以拉普拉斯变换求高阶电路 的暂态过程	(178)
6.2 串联电路的谐振曲线	(115)	历史人物	(180)
6.3 并联电路的谐振	(117)	本章内容延展与工程应用实例	(181)
本章内容延展与工程应用实例	(119)	习题九	(181)
习题六	(120)	第10章 Multisim 与 MATLAB 计算机辅助电路分析方法 简介	(185)
第7章 周期性非正弦电路	(124)	10.1 Multisim 10.0 的基本功能及 操作	(185)
7.1 周期函数分解为傅里叶级数	(124)	10.1.1 Multisim10.0 的基本界面	(185)
7.2 周期性非正弦电压、电流的有 效值 平均功率	(127)	10.1.2 Multisim 10.0 的电路创建 与分析	(186)
7.3 周期性非正弦电路的计算	(129)	10.2 MATLAB (R2010a) 基本功能 及操作	(190)
7.4 滤波电路的概念	(131)	10.2.1 MATLAB R2010a 基本 界面	(190)
本章内容延展与工程应用实例	(134)	10.2.2 矩阵的基本运算	(191)
习题七	(134)	10.2.3 MATLAB 绘制二维图形	(191)
第8章 三相电路	(138)	参考文献	(194)
8.1 对称三相电源	(138)		
8.1.1 三相电源的星形连接	(139)		
8.1.2 三相电源的三角形 (Δ) 连接	(139)		
8.2 对称三相电路的计算	(140)		
8.3 不对称三相电路的概念	(145)		
8.4 三相电路的功率及其测量	(147)		

第 1 章 电路模型和电路定律

本章介绍电路与电路模型的基本概念和基本的电路定律。主要内容有：电路模型的基本概念；描述电路的基本物理量电流、电压及其参考方向；电路的功率和能量；构成电路的基本电路元件及其伏安关系；描述电路中电流、电压约束关系的基尔霍夫定律。

1.1 电路与电路模型

实际电路(electric circuit)是为实现某种功能,由用电设备和器件相互连接组成的总体。如图 1-1(a)所示,干电池(cell)和灯泡由两根导线(wire)连接起来便构成一个简单的照明电路。

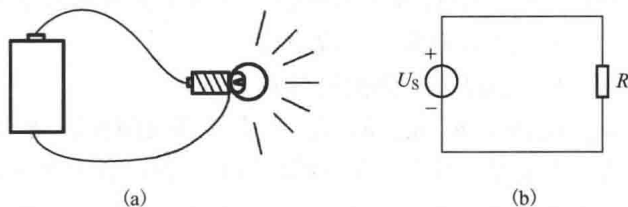


图 1-1 实际电路与电路模型

实际电路的作用可分为两方面:一方面完成电能的传输、分配以及电能与其他各种形式的能量(energy)之间的相互转换,如电力系统、照明系统等;另一方面可以产生、变换和处理某种电信号(signal),如电子技术中振荡、扫描、放大、调谐等。

实际电路的组成可能非常简单,也可能十分复杂。无论简单还是复杂,总要包含以下三个基本部分:

(1) 电源(source):产生并提供电能的设备或器件,其功能是将其他形式的能量转变为电能,为电路提供能源,如电池、发电机等;

(2) 负载(load):吸收或消耗电能的设备或器件,如灯泡、电炉、扬声器等,又称用电器或换能器,其功能是将电能转变为其他所需形式的能量;

(3) 导线:用来连接各种用电设备或器件,使之形成完整的电路,并在其中引导电流(current),传输能量。

此外,电路中还会有各种控制和保护设备或装置,如开关、继电器和熔断器等。

研究和分析电路问题就是研究和分析发生在电路中的各种物理过程和电磁现象(electromagnetic phenomena)。每种实际电路的设备或器件都可能同时发生几种电磁现象。为便于研究和分析,通常用理想电路元件及其组合来代替实际电路的设备或器件,构成与实际电路对应的电路模型(circuit model)。理想电路元件是实际电路器件在一定条件下的理想化模型,是具有某种单一电磁性质的假想元件。例如,理想电阻元件(resistor)表示将电能转换成其他形式的能量且不可逆消耗的物理过程。电炉、电灯等实际电路器件都可以用理想电阻元件来代替。理想电压源(voltage source)元件表示将其他形式的能量转换成电能并可对外提供确定电压(voltage)的电路器件。干电池、蓄电池等实际电路器件在不考虑

电池内部对电能的消耗的条件下, 可以用理想电压源元件代替; 否则, 用理想电压源元件和理想电阻元件的串联组合来代替。

当实际电路的尺寸远小于其工作频率下电磁波的波长时, 电路的电磁过程可视为集中在元器件内部进行。在任一时刻, 流入二端元件一端的电流恒等于流出元件另一端的电流, 即电流通过元件的时间相对于电流的变化周期可以忽略不计。我们把这样的元件称为集中参数元件(lumped element)。由集中参数元件构成的电路称为集中参数电路(lumped circuit)。本书讨论的均为集中参数电路。

对图 1-1(a) 所示的实际电路, 用理想电阻元件 R 代替小灯泡, 用理想电压源元件 U_s 代替干电池(电池内部对电能的消耗忽略不计), 用线段代替连接导线(导线电阻忽略不计), 就可以得到与之对应的电路模型, 如图 1-1(b) 所示。这种由理想电路元件组成、反映实际电路连接关系的电路模型图, 又称电路图(circuit diagram), 通常简称为电路(circuit)。

本书所提及的电路均指由理想电路元件构成的电路模型, 而不是实际电路。同时, 将理想电路元件简称为电路元件。

结构比较复杂的电路又称(电)网络(network)。电路和网络在本书中没有严格的区别, 可以通用。描述电路或网络有一些常用的概念或术语, 以图 1-2 所示网络为例, 介绍如下。

- (1) 支路(branch): 网络中没有分岔的一段电路。
 - (2) 节点(node): 3 条或 3 条以上支路的连接点。
- 在图 1-2 中, 有 $R_1, u_{s1}, R_2, u_{s2}, R_3, u_{s3}, R_4, R_5, R_6$ 共 6 条支路和 A, B, C, D 共 4 个节点。支路 R_4, R_5, R_6 不含电源, 称为无源支路; 其余 3 条支路均含有电源, 称为含源支路。

应该指出, 支路和节点的定义不是唯一的。本书采用上述的支路和节点的定义。有时为了方便, 也可以定义一个二端元件为一条支路, 支路之间的连接点即为一个节点。若按这种定义, 则图 1-2 中有 9 条支路和 7 个节点(除 A, B, C, D 4 点外, 还有 A', B', C' 3 点亦为节点)。

- (3) 回路(loop): 网络中由若干条支路组成的闭合路径(path)。图 1-2 中共有 7 个回路, 分别是 $AA'BDA, BB'CDB, CC'ADC, AA'BB'CDA, BB'CC'ADB, CC'AA'BDC$ 和 $AA'BB'CC'A$ 。

- (4) 平面网络(planar network): 如果将一个网络展开在平面上, 经过适当的调整可以使其所有支路均互不交叉, 则称该网络为平面网络; 否则称为非平面网络。

可以证明, 4 个及少于 4 个节点(节点为本书定义)的网络均为平面网络。显然, 图 1-2 是一个平面网络。

- (5) 网孔(mesh): 在平面网络中, 没有被支路穿过的回路, 称为网孔。网孔是一种特殊的回路。在图 1-2 中的 7 个回路中, 只有回路 $AA'BDA, BB'CDB, CC'ADC$ 是网孔。

应该指出, 只有对平面网络才有网孔的概念; 对非平面网络, 只有回路的概念而没有网孔的概念。

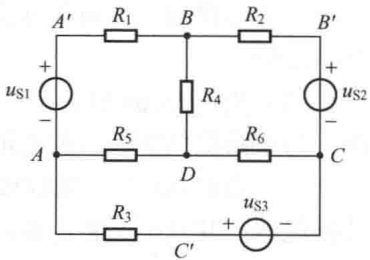


图 1-2 网络常用概念示例

1.2 电流、电压及其参考方向

描述电路性能的物理量统称为电路的变量(variable), 如电流、电压、电荷(charge)、磁链(fluxlinkage)等。其中常用的是电流和电压。

1.2.1 电流

电荷有规则的运动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流的大小用电流强度来表示。电流强度指单位时间内通过载流体横截面积的电荷量,即:

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

式中,电荷 q 的单位为库仑(C);时间 t 的单位为秒(s);电流强度 $i(t)$ (简记 i)的单位为安培(Ampere),简称安(A),也可以用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)作为电流单位,其换算关系如下:

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

电流是矢量,因此其大小和方向要同时给出或同时确定。流经电路中某一具体支路的电流,其实际方向只有两种可能,非此即彼;但在实际的电路分析中,有时很难准确判别电流的实际方向。为了便于分析,我们事先指定一个电流方向,当然这一方向不一定是电流的实际方向。这一事先任意指定的电流方向称为电流的参考方向(reference direction)。

电流的参考方向指定后,电流的数值将有正负之分。当电流的实际方向与参考方向一致时,把电流表示为正值;反之,把电流表示为负值。电流的参考方向一般直接标在其所在的支路上,像图 1-3 所示的一段电路,电流的实际方向如虚线箭头所示,由 A 流向 B,大小为 2 A。若指定的参考方向如图 1-3(a)所示,则电流 $i = 2 \text{ A}$;若指定的参考方向如图 1-3(b)所示,则电流 $i = -2 \text{ A}$ 。

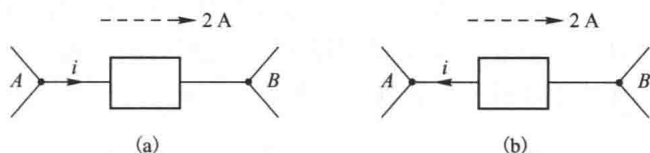


图 1-3 电流参考方向示意图

用电设备和器件工作时电流不应超过它的额定电流(rated current)。额定电流是指用电器在额定环境条件(环境温度、日照、海拔、安装条件等)下,长期连续工作时的允许电流。

1.2.2 电压、电动势、电位

电路的电压、电动势、电位是既彼此关联又有区别的物理量。

1. 电位(potential)

单位正电荷在电路中某点所具有的电位能,称为该点的电位。

电位的数值是相对于所选定的参考点的。电位参考点是规定其电位能为零的点,可以任意指定,通常都是选取电路中接地或接机壳的公共端为参考点。电位用字母 v 表示,如 A 点的电位用 v_A 来表示。当 A 点的电位高于参考点时, $v_A > 0$;反之, $v_A < 0$ 。电路中某点的电位将随参考点的不同而不同。但参考点一旦确定,电路中各点的电位便都有了唯一的确定值。电位的这一性质称为电位的单值性。

2. 电压

电路中某两点之间的电位之差,称为这两点之间的电压。

习惯上把电场力的方向,即由高电位端指向低电位端的方向称为电压方向。所以电压也是

矢量，用字母 u 表示。习惯上用“+”、“-”极性表示电压的方向，且规定电压方向由“+”指向“-”。如图 1-4(a)中表示 A 点的电位高于 B 点的电位，电压方向由 A 点指向 B 点，数值为 $u = v_A - v_B$ 。随着电荷的移动，正电荷所具有的电位能在减少，减少的能量被这段电路所吸收。因此，电路中某两点之间的电压也可以说成是单位正电荷在电场力的作用下由一点移到另一点的过程中所失去的电位能，即：

$$u = v_A - v_B = \frac{dw}{dq} \tag{1-2}$$

式中， dw 为电荷 dq 在由 A 点移到 B 点的过程中所失去的总电位能。电位能的单位为焦耳(J)，电荷量的单位为库仑(C)，电压的单位为伏特(Volt)，简称伏(V)。电位和电压的单位相同。

实际计算中，也可以用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)作为电压的单位，其换算关系如下：

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

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的，其值与参考点的选取有关。电压则是对电路中某两点而言的，其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压，实际上是指该点与参考点之间的电压，此时它与该点的电位是一致的。

与电流相似，电路中某两点间电压的实际方向有时也很难判别。为分析方便，可以指定任一方向为电压的参考方向：当电压的实际方向与参考方向一致时，电压值为正；反之，电压值为负。在指定参考方向下，根据电压数值的正或负，就可以确定电压的实际方向。

电压的参考方向可用参考极性(reference polarity)即“+”、“-”极性来标示；也可以如图 1-4(b)所示，在两点间的电路旁用箭头标示；还可以用符号双下标来表示，如 u_{AB} 表示该电压的参考方向为由 A 指向 B 。显然 u_{AB} 与 u_{BA} 是不同的，虽然它们都表示 A 、 B 两点间的电压，但由于参考方向不同，两者之间相差一个负号，即 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

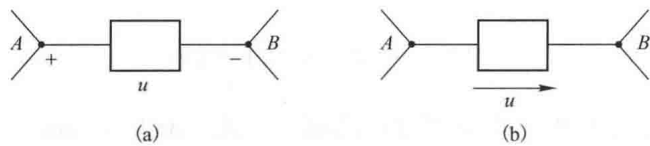


图 1-4 电压参考方向示意图

同额定电流一样，实际用电设备和器件工作时有额定电压(rated voltage)的限制。额定电压是指用电器正常工作时的电压。超过额定电压会造成设备过流，导致设备过热或损坏；而低于额定电压时，设备无法正常工作或不工作。

3. 电动势(electromotive force)

电动势只存在于电源内部，其数值等于将单位正电荷由低电位端经电源内部移动到高电位端时电源所做的功，方向由低电位指向高电位。

电动势用字母 e 表示。与电压用来描述电源之外的电路中正电荷的电位降落相反，电动势一般用来描述电源内部正电荷电位的升高。对电源来讲，其外部的电压和内部的电动势大小相等而方向相反。例如，图 1-4(a)的方框中的元件若为电源元件，则 A 、 B 两点之间的电动势为 $e_{AB} = v_B - v_A = -u_{AB}$ 。电动势和电压的单位相同。

1.2.3 关联参考方向与非关联参考方向

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。在对任何具体电路进行实际分

析之前,都应先指定各有关电流和电压的参考方向,否则分析将无法进行。原则上,电流与电压的参考方向可以各自独立地任意指定。习惯上,同一段电路的电流和电压常常选取相互一致的参考方向,如图 1-5 所示,我们称这样选取的参考方向为关联参考方向。若两者方向选取不一致,则称为非关联参考方向,如图 1-6 所示。

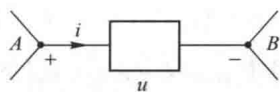


图 1-5 关联参考方向

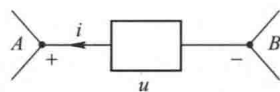


图 1-6 非关联参考方向

这里需强调一下,今后我们在谈到电流和电压的方向时,如无特别声明,一般指的都是图中标示的参考方向,而不是其实际方向。初学者必须特别注意并逐步适应这一点。

1.3 电功率和能量

在电路分析和研究中,除了关注电压、电流的情况,电路能量的流动以及电能与其他形式能量的相互交换也是十分重要的。(电)功率(power)是量度电路中能量转换速率的一个物理量。电功率与电压、电流密切相关。

一段电路上电压、电流取关联参考方向时(如图 1-5 所示),正电荷在电场力的作用下由高电位端移动到低电位端,通过这段电路将失去一部分电位能,这部分能量被这段电路所吸收。由式(1-2)可知,这段电路吸收的能量为

$$dw = udq$$

则单位时间内这段电路吸收的能量即电功率(简称功率)为

$$p = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

式(1-3)说明,在关联参考方向下,一段电路所吸收的功率为其电压和电流的直接乘积。

当电压和电流为非关联参考方向时(如图 1-6 所示),则这段电路吸收的功率为

$$p = -ui$$

以上所计算的功率是以吸收为前提的。若计算结果为 $p > 0$,表明这段电路的确是吸收功率的;若 $p < 0$,则表明这段电路实际上是发出功率的。

一段电路功率的计算也可以发出为前提,即非关联参考方向下,正电荷由低电位端移动到高电位端,通过这段电路将获得一部分电位能,获得的这部分能量由这段电路所发出。这段电路所发出的功率为

$$p' = \begin{cases} ui & (\text{非关联方向}) \\ -ui & (\text{关联方向}) \end{cases}$$

若计算结果为 $p' > 0$,表明这段电路的确是发出功率的;若 $p' < 0$,则表明这段电路实际是吸收功率的。

功率的单位为瓦特(Watt),简称瓦(W)。1 瓦特相当于 1 焦耳/秒(J/s)。

实际计算中,也可以用千瓦(kW)、毫瓦(mW)为功率单位,其换算关系如下:

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

用电设备和器件本身都有额定功率(rated power)的限制。额定功率是指用电器在额定电压与额定电流的条件下工作时的功率。若用电器的实际功率大于额定功率,则用电器可能会损坏;反之,用电器无法正常运行。

图 1-5 所示的一段电路在时间区间 $t_0 \sim t$ 内从外界吸收的电能为

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

若 $w > 0$ ，表明这段电路的确是吸收电能的；若 $w < 0$ ，则表明该段电路实际是发出电能的。电能的单位为焦耳(J)。工程上常用瓦秒或千瓦时(kW·h)做电能的单位，千瓦时又称度。

例 1-1 求图 1-7 所示各元件或电路的功率。图中 $u_1 = 4 \text{ V}$ ， $i_1 = 0.2 \text{ A}$ ， $u_2 = 6 \text{ V}$ ， $i_2 = -0.5 \text{ A}$ ， $u_s = 3 \text{ V}$ ， $i = 2 \text{ mA}$ 。

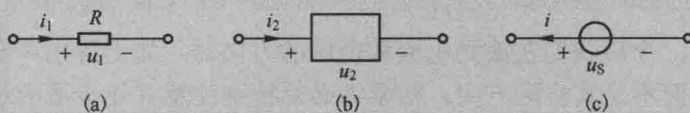


图 1-7 例 1-1 电路

说明：在求各功率之前应先明确所求功率是吸收还是发出的。在关联参考方向下， $p = ui$ 是吸收的功率；反之，则为发出的功率。

解 图(a)中电阻吸收的功率为

$$p_1 = u_1 i_1 = 4 \times 0.2 = 0.8 \text{ W}$$

图(b)中该段电路吸收的功率为

$$p_2 = u_2 i_2 = 6 \times (-0.5) = -3 \text{ W}$$

由于 $p_2 < 0$ ，说明这段电路实际发出 3W 的功率。

图(c)中电压源发出的功率为

$$p_{u_s} = u_s i = 3 \times (2 \times 10^{-3}) = 6 \text{ mW}$$

1.4 电阻元件

电路元件是电路最基本的组成单元。每种元件都有其精确的数学定义和特定的表示符号，以及不同于其他元件的独有特性，正是这些特性构成了建立完整的电路方程的两种约束关系之一，即元件本身的特性所形成的电压电流关系(Voltage Current Relation, VCR)，简称伏安关系。

电阻元件是电路中应用最广泛的元件。许多实际的电路器件(如电阻器、电热器、电灯泡、扬声器等)都可以用电阻元件来表示。

电阻元件是其特性可以用 $u-i$ 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在 $u-i$ 平面上表示电阻元件特性的曲线称为电阻元件的伏安特性曲线，简称伏安特性(Volt-Ampere characteristic)。如果伏安特性是一条通过 $u-i$ 平面坐标原点的直线，则称其对应的电阻元件为线性电阻元件(linear resistor)；否则，为非线性电阻元件(non-linear resistor)。图 1-8(a)所示特性曲线对应的是线性电阻元件，图 1-8(b)所示的两条特性曲线对应的都是非线性电阻元件。

线性电阻元件的电路符号如图 1-9 所示。在关联参考方向下，线性电阻元件的 VCR 满足欧姆定律(Ohm's Law)

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-5)$$

式中， R 、 G 在一般情况下均为不变的正实常数，与 u 、 i 无关，且 $G = 1/R$ 。 R 反映了元件对电流的阻碍能力，称为元件的电阻(resistance)，单位为欧姆(Ohm)，用字母 Ω 表示；电压一定时， R 越大，电流越小。 G 反映了元件对电流的传导能力，称为元件的电导

(conductance), 单位为西门子(Siemens), 用字母 S 表示; 电压一定时, G 越大, 电流越大。 R 和 G 都是电阻元件的参数, 它们从不同的角度反映了电阻元件的特性。

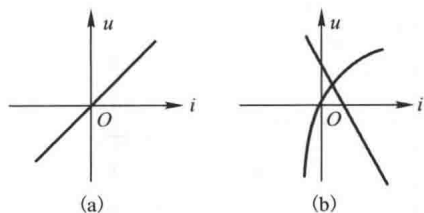


图 1-8 电阻元件的伏安特性曲线



图 1-9 电阻元件的电路符号

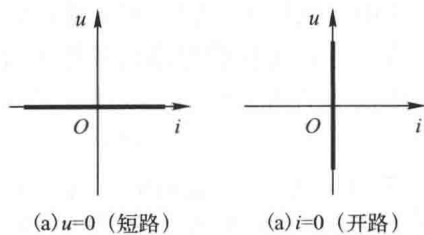


图 1-10 极端情况下电阻元件的伏安特性

当 $R=0$ 或 $G \rightarrow \infty$ 时, 由式(1-5)可知, 无论 i 为何值(只要为有限值), 将恒有 $u=0$ 。此时电阻元件的伏安特性将与 i 轴重合, 如图 1-10(a)所示, 这种情况下电阻元件的作用相当于短路(short circuit)。任何一个元件或一段电路只要其两端电压为零, 便可视为短路。

同理, 当 $R \rightarrow \infty$ 或 $G=0$ 时, 由式(1-5)可知, 无论 u 为何值(只要为有限值), 将恒有 $i=0$ 。此时电阻元件的伏安特性将与 u 轴重合, 如图 1-10(b)所示, 这种情况下电阻元件的作用相当于断路或开路(open circuit)。任何元件或一段电路, 只要流经其中的电流为零, 便可视为开路。短路和开路是以后经常用到的两个重要概念。

由线性电阻元件的伏安关系可知, 任何时刻线性电阻元件的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定, 而与该时刻以前的电流(或电压)无关。因此, 电阻元件是一种瞬时元件。

当电压、电流取关联参考方向时, 线性电阻元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Ri^2 = u^2 / R = Gu^2 = i^2 / G \quad (1-6)$$

即电阻元件吸收的功率与电流或电压的平方成正比。因此, 当 R 或 G 为正值时, 将恒有 $p \geq 0$ 。这说明正值电阻是纯粹的耗能元件(dissipative element)。此外, 由式(1-6)还可以看出: 当电流一定时, 阻值越大, 电阻吸收的功率越大; 当电压一定时, 阻值越大, 电阻吸收的功率越小。

线性电阻元件在时间区间 $t_0 \sim t$ 内吸收的电能为

$$w = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t Gu^2(\xi)d\xi$$

这些电能将被转换成热能消耗掉。

在关联参考方向下, 正值电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面的一、三象限。如果一个线性电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面的二、四象限, 则此元件的电阻将为负值, 负值电阻元件吸收的功率由式(1-6)知将小于零, 说明它实际上是发出电能的。负值电阻元件一般需经过特殊的设计。为了叙述方便, 把线性电阻元件简称为电阻。

1.5 电容元件

电容元件(capacitor)是实际电容器的理想化模型, 它反映了电压引起电荷聚集和电场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电容元件是其特性可以用 $q-u$ 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在 $q-u$ 平面上

表示电容元件特性的曲线称为电容元件的库伏特性曲线，简称库伏特性 (Coulomb-Volt characteristic)。如果库伏特性是一条通过 $q-u$ 平面坐标原点的直线，如图 1-11 所示，则称其对应的电容元件为线性电容元件，否则为非线性电容元件。

线性电容元件的电路符号如图 1-12 所示。
两个极板上的电荷与电压成线性关系，即

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

式(1-7)中， C 在一般情况下为一个不变的正实常数，与 q 、 u 无关，称为电容元件的电容 (capacitance)。电荷的单位为库仑 (C)，电压的单位为伏特 (V)；电容的单位为法拉 (Farad)，简称法 (F)。工程中也可以用微法 (μF) 和皮法 (pF) 做电容的单位，它们之间的换算关系为

$$1\mu\text{F}=10^{-6}\text{ F} \qquad 1\text{pF}=10^{-12}\text{ F}$$

随着加在电容两端的电压的变化，电容两极板上存储的电荷也随之变化。电荷增加的过程称为充电，电荷减少的过程称为放电。在充放电的过程中，必有电流产生。当电压电流为关联参考方向时，将有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt}$$

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

即

这就是线性电容元件的伏安关系。式(1-8)说明，线性电容元件的电流与其电压的变化率成正比，而与电压的大小无关。电压变化越快，电流越大；当电压恒定不变时，电流为零，此时电容元件相当于开路。由于电容元件的电流和电压之间所具有的上述动态关系，称电容元件是一种动态元件 (dynamic element)。

式(1-8)是用电压来表示电流的，是一种导数关系。如果用电流来表示电压，则电容元件的伏安关系又可以写成式(1-9)的积分形式：

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-9)$$

式中， t_0 为积分过程中的某个指定时刻，称为初始时刻；而

$$u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi$$

是 t_0 时刻的电容电压，称为电容的初始电压 (initial voltage)。

式(1-9)表明，任一时刻电容的电压不仅与该时刻的电流有关，而且与该时刻以前所有时刻的电流均有关。这说明，电容元件对其电流的全部“历史”具有记忆功能，所以电容元件是一种记忆元件 (memory element)。相比之下，电阻元件就不具有记忆功能，故电阻元件是一种无记忆元件。

如果取初始时刻 $t_0 = 0$ ，则式(1-9)可以写成

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

若 $u(0) = 0$ ，则上式可简化为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

电容元件还是一种储能元件 (energy storing element)。它能把从电路中吸收的能量以电场

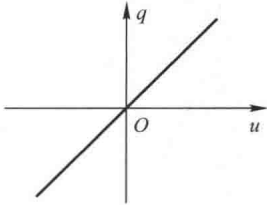


图 1-11 电容元件的库伏特性曲线

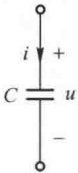


图 1-12 电容元件的电路符号

能的形式储存在元件的电场之中，而不是消耗掉。在适当的时候，储存的电场能会以某种方式释放出来；但释放的能量不会超过它所吸收并储存的能量，即电容元件本身既不消耗能量，也不会产生新的能量。

在关联参考方向下，电容元件吸收的功率为

$$p = ui = uC \frac{du}{dt}$$

电容元件在某时刻所储有的电场能，也就是它在过去所有时刻从外界吸收的能量为

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u(\xi)du(\xi) = \frac{1}{2}Cu^2(t) - \frac{1}{2}Cu^2(-\infty)$$

因 $u(-\infty)$ 为储能之初的电容电压，故应有 $u(-\infty) = 0$ 。于是，电容元件在某时刻所储有的电场能为

$$w_C(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) \quad (1-10)$$

式(1-10)说明，电容元件在某时刻所储有的电场能与该时刻电压的平方成正比。它仅与该时刻的电压有关，而和以往电压的变化情况以及此时电流的大小甚至有无均无关。电容元件储存或释放能量的过程往往体现在电容元件两端电压的升高或降低，由于能量一般是不能突变的，所以电容元件两端的电压一般情况下是不能突变的。

为了叙述方便，把线性电容元件简称为电容。

例 1-2 已知电容元件的电容 $C = 2F$ ，加在其上的电压 u 的波形如图 1-13(a) 所示，电压、电流取关联参考方向，试画出其电流 i 、功率 p 和储能 w_C 的波形。

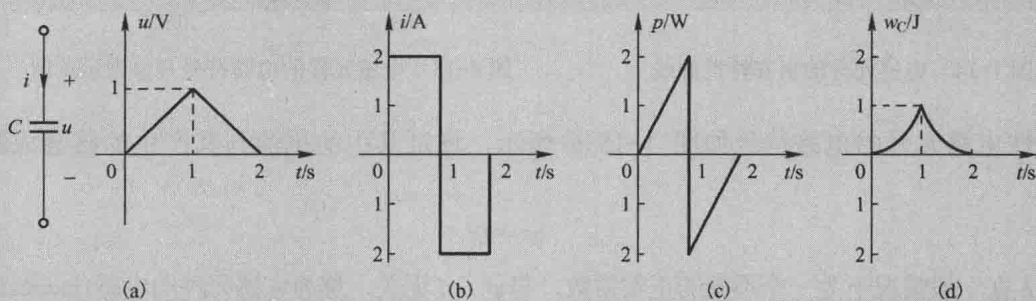


图 1-13 例 1-2 图

解 电容电压的表达式为

$$u(t) = \begin{cases} t \text{ V} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ -(t-2) \text{ V} & (1 \leq t \leq 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ V} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

电容的电流为

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} 2 \text{ A} & (0 < t < 1 \text{ s}) \\ -2 \text{ A} & (1 \text{ s} < t < 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ A} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

电流波形如图 1-13(b) 所示。

电容的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = \begin{cases} 2t \text{ W} & (0 < t < 1 \text{ s}) \\ 2(t-2) \text{ W} & (1 \text{ s} < t < 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ W} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

功率波形如图 1-13(c) 所示。

电容的储能为

$$w_c(t) = \frac{1}{2} C u^2(t) = \begin{cases} t^2 \text{ J} & (0 \leq t \leq 1 \text{ s}) \\ (t-2)^2 \text{ J} & (1 \leq t \leq 2 \text{ s}) \\ 0 \text{ J} & (t > 2 \text{ s}) \end{cases}$$

储能随时间变化的波形如图 1-13(d) 所示。

1.6 电 感 元 件

电感元件(inductor)是实际电感线圈的理想化模型。它反映了电流产生磁场和磁场能量储存这一物理过程和电磁现象。

电感元件是其特性可以用 ψ - i 平面上的一条曲线来表示的二端电路元件。在 ψ - i 平面上表示电感元件特性的曲线称为电感元件的韦安特性曲线, 简称韦安特性(Weber-Ampere characteristic)。如果韦安特性是一条通过 ψ - i 平面坐标原点的直线, 如图 1-14 所示, 则称其对应的电感元件为线性电感元件, 否则为非线性电感元件。

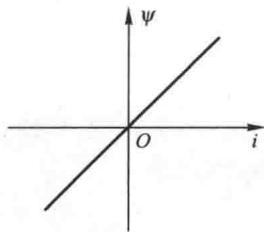


图 1-14 电感元件的韦安特性曲线

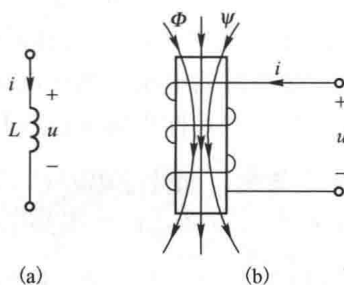


图 1-15 电感元件的电路符号及原理示意图

线性电感元件的电路符号如图 1-15(a) 所示, 通过其中的电流与其产生的磁链成线性关系, 即

$$\psi = Li \quad (1-11)$$

式中, L 在一般情况下为一个不变的正实常数, 与 ψ 、 i 无关, 称为电感元件的电感(inductance)。磁链的单位为韦伯(Wb); 电流的单位为安培(A); 电感的单位为亨利(Henry), 简称亨(H)。工程中也可以用毫亨(mH)和微亨(μH)做电感的单位, 它们之间的换算关系为

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H} \quad 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

可以把电感元件看作由无阻导线绕制而成的空芯线圈, 如图 1-15(b) 所示。当在线圈中通以电流 i 时, 线圈中产生磁通 Φ 并形成磁链 ψ 。如果电流是变化的, 磁链 $\psi = Li$ 也将随着变化。根据法拉第电磁感应定律(Law of Electromagnetic Induction), 磁链的变化将在线圈两端引起感应电压(induced voltage), 而且在电流与磁通或磁链的方向满足右手螺旋关系, 感应电压和电流方向一致的前提下, 将有

$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt}$$

即

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

这就是线性电感元件的伏安关系。式(1-12)说明, 线性电感元件的电压与其电流的变化率成正比, 而与电流的大小无关。电流变化越快, 电压越高; 当电流恒定不变时, 电压为零, 此时电感元件相