



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材
省级精品课程教材



电路分析

■ 嵇英华 刘 清 主编
■ 张国平 刘淑琴 蔡十华 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

电子电气基础课程规划教材

电 路 分 析

嵇英华 刘 清 主 编

张国平 刘淑琴 蔡十华 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“电路分析”课程的基本要求编写而成,全书系统地介绍了电路的基础知识,着重讲述了线性电路的基本原理和基本分析方法。内容包括:电路模型与基本规律,电路定理,电路的时域分析方法,正弦稳态电路的相量分析,拉普拉斯变换和网络函数,电路的矩阵分析初步,滤波器分析设计初步;最后简单介绍了 Multisim 仿真软件。本教材特别注重从电路理论与后续课程的知识点衔接出发,承上启下,把理想运算放大器等器件知识贯穿于各章节中,为后续专业课打下扎实的理论基础。

本书可作为高等院校电子信息、电气工程、自动控制、通信工程、计算机科学与技术等专业的本科教材,也可作为相关专业科技人员的参考书。

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

电路分析 / 嵇英华, 刘清主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.2
电子电气基础课程规划教材
ISBN 978-7-121-21858-3

I. ①电… II. ①嵇… ②刘… 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(2013)第 269035 号

责任编辑: 竺南直

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 20 字数: 512 千字

印 次: 2014 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.00 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

本书根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“电路分析”课程的基本要求编写而成，以培养应用型人才为目的，以应用、实用为原则，适应知识更新和课程体系改革需要，既便于教师教学参考又便于学生自学。

电路理论是根据电路模型探讨电路的分析计算方法和设计方法，在此基础上，研究电路的电气特性。电路理论包括两方面的内容：一是电路分析，二是电路综合设计。

电路分析是根据给定电路的结构及有关参数，计算电路各部分的电压及电流，研究电路的激励（输入）与响应（输出）之间的关系，分析电路的电气特性。电路综合是在给定电路系统的输入（激励）与输出（响应）之间的规律（或技术指标）的基础上，研究如何设计电路的形式并计算电路元件的参数，从而确定电路的结构。本书在重点介绍电路分析的同时，为培养学生的工程意识与应用综合能力，也简要讨论了电路综合（设计）。

本书内容由浅入深，主要由三部分组成：

（1）电路分析基础：主要介绍了电路模型和电路分析的基本规律（电路元件约束规律、电路拓扑结构约束规律）；电阻电路分析方法、动态电路和正弦稳态分析的基本方法，电路基本定理及其应用。

（2）频域分析与网络系统：重点阐述了拉普拉斯变换与网络函数、双口网络和线性电路矩阵分析法。

（3）现代电路系统设计：简要介绍滤波器设计基础与设计方法、计算机辅助电路分析与电路设计技术。

在保证教材结构体系完整的前提下，本书注重基本概念、基本方法和基本原理，注重从电路分析与后续课程的知识点衔接出发，承上启下，把二极管、晶体管、理想运算放大器等器件知识贯穿在相应的章节中，尤其是运算放大器作为电子信息技术领域应用非常广泛的器件，理想器件的运用与分析在各章节部分都有体现。为了便于教学，本书配有电子课件，任课教师可登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）免费注册下载。

全书共分12章，江西师范大学的嵇英华编写第1章并负责全书的统稿工作，张国平编写第3、6、9、12章，刘淑琴编写第4、7、10、11章，蔡十华编写5章、附录，并主要负责全书电路图的编辑工作，井冈山大学的刘清编写第2、8章。

江西师范大学“电路分析”课程是江西省精品资源共享建设课程，是江西师范大学电气类专业平台课程体系中的基础核心课程。我们在教学实践过程中重视培养学生的工程意识与工程实践能力。非常感谢江西省教育厅和江西师范大学对精品资源共享课程建设的大力支持。衷心感谢电子工业出版社多位编辑为本书的出版付出的辛勤劳动。

限于编者水平，难免有错误或不完善之处，恳请广大读者予以批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电路模型和基本规律	1
1.1 电路模型和集中参数假设	1
1.1.1 电路模型	1
1.1.2 集中参数假设	1
1.2 电路的基本变量和关联参考方向	2
1.2.1 电流	2
1.2.2 电压	3
1.2.3 关联参考方向	4
1.3 电功率	5
1.4 基尔霍夫定律	7
1.4.1 电路中的几个常用名词	7
1.4.2 基尔霍夫电流定律	7
1.4.3 基尔霍夫电压定律	9
习题 1	10
第 2 章 电路元件	12
2.1 理想二端电路元件的分类	12
2.2 理想二端电路元件	12
2.2.1 二端电阻元件	12
2.2.2 二端电感元件	18
2.2.3 二端电容元件	22
2.3 独立电源	25
2.3.1 理想独立电源	25
2.3.2 实际电源	28
2.4 基本信号	29
2.4.1 复指数信号	29
2.4.2 阶跃函数	30
2.4.3 冲激函数	31
2.5 多端元件	32
2.5.1 受控电源	32
2.5.2 回转器	35
2.5.3 理想变压器	36
2.5.4 耦合电感	38
2.6 运算放大器	40
2.6.1 运算放大器简介	40

2.6.2	理想运算放大器的基本特性	41
2.6.3	理想运算放大器的简单应用	42
习题 2		44
第 3 章 电阻电路分析的一般方法		49
3.1	支路电流法	49
3.2	节点电压分析法	50
3.3	网孔电流分析法	57
习题 3		62
第 4 章 电路定理		67
4.1	线性电路和叠加定理	67
4.2	替代定理	72
4.3	戴维南定理与诺顿定理	74
4.3.1	戴维南定理	74
4.3.2	诺顿定理	75
4.3.3	定理应用分析	76
4.4	互易定理	81
4.5	最大功率传输定理	84
习题 4		87
第 5 章 动态电路的时域分析		90
5.1	动态电路的初始条件	90
5.2	常系数微分方程经典解法	93
5.3	一阶 RC 电路的响应	94
5.3.1	一阶 RC 电路的电路方程	94
5.3.2	一阶 RC 电路的零输入响应	95
5.3.3	一阶 RC 电路的零状态响应	97
5.4	一阶 RL 电路的响应	99
5.4.1	一阶 RL 电路的电路方程	99
5.4.2	一阶 RL 电路的零输入响应	100
5.4.3	一阶 RL 电路的零状态响应	101
5.5	一阶电路分析的三要素法	102
5.6	简单二阶动态电路	106
5.6.1	RLC 串联电路方程的建立	106
5.6.2	RLC 串联电路的零输入响应	108
5.6.3	RLC 串联电路对阶跃函数的零状态响应	110
5.6.4	一般二阶电路分析	113
习题 5		115
第 6 章 正弦稳态分析		118
6.1	正弦稳态分析基础	118
6.1.1	正弦量及其三要素	118

6.1.2	复数基础知识简介	121
6.1.3	基尔霍夫定律的相量形式	125
6.2	阻抗、导纳和相量模型	127
6.2.1	三种基本元件 (R、L 和 C) 的 VCR 的相量形式	127
6.2.2	阻抗和导纳	131
6.3	正弦稳态混联电路的分析	135
6.3.1	节点电压分析法	136
6.3.2	网孔电流分析法	138
6.3.3	戴维南定理和诺顿定理的应用	140
6.3.4	正弦稳态电路的相量图求解法	141
6.4	含有耦合电感和变压器的正弦稳态电路的分析	142
6.4.1	耦合电感 VCR 的相量形式	142
6.4.2	耦合电感的等效电路	142
6.4.3	含有耦合电感和理想变压器的正弦稳态电路的计算	144
6.5	正弦交流电路中的功率	146
6.5.1	二端网络的瞬时功率	146
6.5.2	二端网络的平均功率	146
6.5.3	二端网络的无功功率	147
6.5.4	二端网络的功率因数和视在功率	149
6.5.5	二端网络的复功率	150
6.5.6	正弦稳态电路中的二端网络的最大功率传输	151
6.6	非正弦周期信号激励下的稳态电路的分析	154
6.6.1	电路与电子技术中常见的非正弦周期性信号的傅里叶级数的表示	154
6.6.2	非正弦周期性信号的有效值和平均功率	156
6.6.3	非正弦周期性信号激励下的电路的稳态响应	157
习题 6		158
第 7 章	三相电路	163
7.1	三相交流电路	163
7.1.1	对称三相电源	163
7.1.2	三相电源的连接法	164
7.1.3	三相电路	166
7.2	对称三相电路的计算	167
7.2.1	$Y_0 - Y_0$ 连接的对称三相电路	167
7.2.2	$Y - \Delta$ 连接的对称三相电路	168
7.3	不对称三相电路	170
7.4	三相电路的功率及测量	173
7.4.1	对称三相电路的功率、功率因数	173
7.4.2	不对称三相电路的功率、功率因数	174
7.4.3	三相功率的测量	174
习题 7		176

第 8 章 电路复频域分析法	179
8.1 拉普拉斯变换	179
8.2 拉普拉斯变换的基本性质	180
8.3 拉普拉斯反变换	182
8.4 运算电路	185
8.4.1 基尔霍夫定律的运算表达式	185
8.4.2 理想电路元件 VCR 的运算表达式及运算模型	186
8.4.3 运算分析方法	187
8.5 网络函数	189
8.6 谐振电路的频率响应	192
8.6.1 正弦稳态的网络函数	192
8.6.2 网络函数的频率特性	193
8.6.3 RLC 串联谐振电路	193
8.6.4 RLC 并联谐振电路	196
习题 8	198
第 9 章 双口网络	200
9.1 双口网络的参数	200
9.1.1 双口网络的导纳矩阵与 Y 参数	201
9.1.2 双口网络的阻抗矩阵与 Z 参数	203
9.1.3 双口网络的混合矩阵与混合参数	204
9.1.4 双口网络的传输矩阵与传输参数	206
9.1.5 双口网络的各种参数之间的相互转换	209
9.2 双口网络的等效电路	212
9.2.1 Z 参数等效电路	213
9.2.2 Y 参数等效电路	213
9.2.3 H 参数等效电路	214
9.3 双口网络的连接	216
9.3.1 双口网络的级联	216
9.3.2 双口网络的串联	217
9.3.3 双口网络的并联	219
9.3.4 双口网络的混联	220
9.4 负阻抗变换器	221
习题 9	222
第 10 章 图论	227
10.1 图论的基本定理	227
10.2 回路分析	229
10.2.1 回路分析的两个基本规律	229
10.2.2 线性时不变网络的回路分析	231
10.2.3 回路阻抗矩阵的性质	232
10.3 割集分析	233

10.3.1	割集分析的两个基本规律	233
10.3.2	线性时不变网络的割集分析	235
10.3.3	割集导纳矩阵的性质	236
10.4	B 和 Q 之间的关系	236
10.5	支路电压、电流关系的矩阵形式	238
10.5.1	用支路阻抗矩阵表示的支路电压、电流关系的矩阵形式	238
10.5.2	用支路导纳矩阵表示的支路电流、电压关系的矩阵形式	240
习题 10		243
第 11 章	滤波器设计	246
11.1	滤波器的设计基础	246
11.1.1	分贝	246
11.1.2	滤波器的定义与分类	247
11.1.3	频率和阻抗的归一化	249
11.2	无源滤波器	250
11.3	有源滤波器	254
11.3.1	一阶有源低通滤波器	254
11.3.2	一阶有源高通滤波器	254
11.3.3	有源带通滤波器	255
11.3.4	带阻滤波器	256
11.3.5	巴特沃思逼近的概念	257
11.3.6	有源二阶电路的频率特性	259
11.4	滤波器的快速设计方法	261
习题 11		267
第 12 章	计算机辅助设计	269
12.1	计算机辅助设计技术简介	269
12.2	Multisim 2001 仿真软件基础	270
12.2.1	仿真软件 Multisim 2001 简介	270
12.2.2	仿真软件 Multisim 2001 的电路应用实例	272
12.3	Multisim 2001 仿真软件在电路分析中的基本应用	274
12.4	Multisim 2001 仿真软件在电路中的高级应用	279
12.4.1	直流工作点的分析	279
12.4.2	瞬态分析	280
12.4.3	交流分析	282
12.4.4	扫描分析	283
习题 12		288
习题参考答案		292
附录 A	常用电阻电容电感的分类与识别	300
参考文献		309

第 1 章 电路模型和基本规律

电路分析的基本任务是根据电路模型探讨电路中电压、电流，以及功率传输的分析计算方法，在此基础上，研究各种电路的电气特性。

电路分析主要是根据给定电路的结构及有关参数，计算电路各部分的电压及电流，研究电路的激励（输入）与响应（输出）之间的关系，分析电路的电气特性。

本章重点介绍电路模型的建立与电路运行的基本规律，它是整个电路理论学科的基础。

1.1 电路模型和集中参数假设

1.1.1 电路模型

电路理论以电路模型为研究对象，电路模型是由理想电路元件相互连接组成的网络来描述电路性能的一种模型。理想电路元件是指可以用一个单一参数来表征实际器件的抽象表示，具有明确的数学定义。

人们通过设计制造各种实际电路元件（如电阻器、电容器、电感器、晶体管、运算放大器等），再将实际电路元件按一定的要求连接起来，以实现电信号的采集、交换、传输、存储和测试等任务，从而形成了具有一定电气功能的电路系统，通常称它们为实际电路。

为进行电气特性的分析，用一些能反映单一电磁性质的抽象化、理想化的电路元件，通过各种不同的连接方式组合而成电路模型，这是研究电路问题的常用方法。用理想电路元件的组合来模拟实际的电路，进而分析研究电路的电气特性是必要的和可能的。实际的电路器件功能各异，所涉及的物理过程广泛，通常包含声、光、热、化、电、磁等方面的问题。本课程只关心其中的电磁过程，这种电磁过程最后都要归结为电路的电压、电流以及它们所形成的电功率之间的关系。例如，理想的电阻元件是一种只表示消耗电能，产生焦耳热效应的器件；理想电容器只表示电荷及电场能量的存储；理想电感元件只表示磁通和磁场能量的存储等。这样，任何实际电路元件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表征。根据已建立的电路模型，研究其中电压、电流和电功率之间的联系规律，为分析、综合和设计实际电路准备理论基础，是本课程的主要任务。如图 1.1.1 所示，基于电路模型运用电路理论和现代计算技术，我们就能够研究电路的电气特性并设计出性能超群的电子电路。

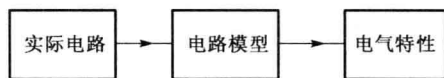


图 1.1.1 研究电路电气特性的建模过程

1.1.2 集中参数假设

理想化电路元件的就是建立在集中参数假设的基础之上：一个实际电路元件可用一个参数或多个参数来表征，而不必考虑它的几何尺寸，这种参数称为集中参数。常见的电路元件是集中参数元件，其电气特性是由它们端点上的电压和电流之间的关系（有时还必须涉及电荷或磁通）来确切地表达的，这种关系通常可用参数来描述。有限个集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。

集中参数假设实际表明：只有当实际电路的尺寸远小于电路正常工作时信号最高频率所对应的波长，电路中的电磁过程才可以分别研究，每一类物理过程才可以用一个理想化的模型来表征。实际电路参数都是分布的，但在一定条件之下可用集中参数电路模型作为工程简化来进行分析计算。这种模型是由若干个集中参数电路元件和一些理想导线互连而成。在这种模型中人们感兴趣的只是各个电路元件端子间的电压和流过各端子的电流；而对元件内部的物理过程不感兴趣。这样就可以约定计量电压的路径一律不经过元件内部，以便为电压与路径无关创造条件。由于全部电路元件的作用必须能体现电路中各种能量的转换，这样才能不但使元件间互连的导线都理想化（无电阻），空间媒质也都理想化（无漏导），传导电流只能在导线和元件中流过；而且导线和节点都不能再积聚电荷（已由各电容元件考虑），任何回路也都不能再链结磁通（已由电感元件考虑）。这样就使得在电路模型的分析计算中，不但电压与路径无关，从而可以认为在设定参考点后，电位是单值的；而且空间不能再有位移电流，从而电路中的传导电流也可以认为必然是连续的了。总之，在集中参数假设下，可以认为电路中流动的信号仅仅是时间的函数，而与空间坐标无关，电压和电流可以表示为 $u(t)$ 和 $i(t)$ ，基尔霍夫电路定律才能应用。

例如，我国电力系统的供电频率是 50Hz，它对应的波长为 $\lambda = 6000\text{km}$ 。显然，在此频率下，实验室电路元件的尺寸 $l \ll \lambda$ ，元件的尺寸可忽略不计，电路可看作为集中参数电路。相反，长距离输电线路则不能看作为集中参数电路。

例 1.1.1 GSM900/1800 双频手机的工作信号频率为 900MHz 和 1800MHz，试判别该手机电路是否满足集中参数假设。

解 因为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

所以

$$\lambda(900) = 0.33\text{m}, \quad \lambda(1800) = 0.17\text{m}$$

在集成电路中，元器件的尺寸一般在微米级别，因而当手机电路采用大规模集成电路时，满足集中参数假设的要求。

如果一个电路中的参数是按几何尺寸连续分布的，这种参数称为分布参数。不满足集中化假设的元件称为分布参数元件，由分布参数元件构成的电路称作分布参数电路。但是，分布参数电路理论也是建立在集中参数电路理论基础上的，一个分布参数电路可以看成是一串集中参数电路序列的极限。本书只讨论集中参数电路。

1.2 电路的基本变量和关联参考方向

电路的电气特性是通过电流、电压和电功率等物理量来描述的。在电路分析与设计中，主要是通过计算电流、电压和电功率来定量地描述电路的状态或电路元件的特征。本节讨论电路中几个常用的物理量。

1.2.1 电流

电荷的定向运动称为电流，其大小用单位时间内通过导体等势面的电荷量来计算，即

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

电荷的单位为库仑 (C)，电流的基本单位为安培 (A)， $1\text{ A} = 1\text{ C/s}$ 。实用中，电流的单位还有 kA，mA， μA 。

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

量值和方向均不随时间变化的电流，称为恒定电流，简称为直流 (dc 或 DC)；量值和方向随时间变化的电流，称为时变电流；工程上把量值和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流称为交流 (ac 或 AC)。

电流是标量，习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。

在讨论分析电路时，要涉及到电流和电压的方向，而事先往往很难判断出支路电压和支路电流的真实方向。为解决这个问题，可采用先任意假定它们的方向的办法。这种任意假定的方向称为参考方向。在参考方向下，电流为代数量。

电流参考方向用箭头来表示，如图 1.2.1 所示。当电流的参考方向与实际方向一致时，电流为正值；否则为负值，据此可以确定电流的实际方向。由此可知，在参考方向选定之后，电流就有了正值和负值之分，电流值的正负符号就反映了电流的实际方向。显然，在未标识参考方向的情况下，电流的正负是毫无意义的。

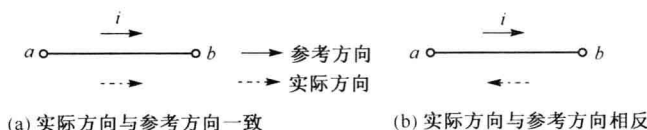


图 1.2.1 电流的参考方向与实际方向

例 1.2.1 如图 1.2.2 所示元件 N，当 $t \leq 6\text{ s}$ 时，其上电流大小为 1.2 A ，方向为从 a 流向 b ；当 $t > 6\text{ s}$ 时，电流大小为 3.0 A ，方向为从 b 流向 a 。根据图示参考方向，写出电流 i 的数学表达式。

解 $t \leq 6\text{ s}$ 时， i 的数学表达式为

$$i = 1.2\text{ A}$$

$t > 6\text{ s}$ 时， i 的数学表达式为

$$i = -3.0\text{ A}$$

负号表示电流的实际方向与图示参考方向相反。



图 1.2.2 例 1.2.1 电路

1.2.2 电压

电场力把单位正电荷从电路的一点移到另一点所做的功称为电路中两点间电压，即

$$u(t) = \frac{dW(t)}{dq} \quad (1.2.2)$$

将电路中任一点 o 作为参考点，规定参考点的电位为零。则电路中某点 a 的电位定义为单位正电荷从该点移动到参考点 o 电场力所做的功。用 u_a 表示。

$$u_a = u_{ao} = u_a - u_o$$

由此可知，电压也可以定义为电路中两点电位之差，即

$$u_{ab} = u_a - u_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.2.3)$$

其中, $\vec{E}$ 为电场强度。需要注意的是: 在集中参数电路中, 电路中两点间的电压与路径无关, 仅与起点和末点的位置有关。

电压的基本单位为伏特 (V), $1\text{V}=1\text{J/C}$ 。实用中, 电压的单位还有 kV, mV, μV 。

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

与电流一样, 电压也是标量, 在工程上习惯规定电位真正降低的方向为电压的实际方向, 其高电位端标 “+”, 低电位端标 “-”。

同样, 在电路分析中很难直接确定电压的实际方向。为了分析和计算的需要, 应选定电压的参考极性 (方向), 并用画在元件两端的 “+” 号和 “-” 号表示。当电压的参考极性与实际极性一致时, 电压为正值, 否则为负值, 据此可以确定电压的实际方向。

电压可分为直流电压、时变电压和交流电压。

例 1.2.2 如图 1.2.3 所示电路中, 以 d 为参考点时, 各节点电压为 $u_a=7\text{V}$, $u_b=5\text{V}$, $u_c=4\text{V}$ 。当以 a 为参考点, 求 u_b 、 u_c 和 u_d 。

解 选 d 为参考点, 所以

$$u_a = u_{ad} = 7\text{V}, u_b = u_{bd} = 5\text{V}, u_c = u_{cd} = 4\text{V}$$

当选 a 为参考点时, 有

$$u_b = u_{ba} = u_{bd} - u_{ad} = -2\text{V}, u_c = u_{ca} = u_{cd} - u_{ad} = -3\text{V},$$

$$u_d = u_{da} = u_{dd} - u_{ad} = -7\text{V}$$

且有

$$u_{ad} = u_a - u_d = 7\text{V}, u_{bd} = u_b - u_d = 5\text{V}, u_{cd} = u_c - u_d = 4\text{V}$$

上述计算表明: 某点电位的高低与参考点的选择有关, 但两点间的电压与参考点无关。

1.2.3 关联参考方向

为了分析计算方便, 规范统一, 电流与电压往往采用关联参考方向, 其优点是: ① 对于一个支路只需标出电流或电压两种参考方向中的任意一种; ② 便于功率问题的讨论。

当某一元件或电路端口所假定的电压和电流的参考方向, 当参考电流从参考电压的正极 (+) 流入, 负极 (-) 流出, 则为关联参考方向; 否则为非关联参考方向。图 1.2.4(a) 表示元件上的电压和电流取关联参考方向, 图 1.2.4(b) 元件上的电压和电流取非关联参考方向。

参考方向之所以可以任意地指定, 是因为它本身并不表示电路所发生的实际物理过程。但是, 在参考方向选定之后, 就可以把计算所得的电压、电流的正负值和其参考方向联系起来考虑, 从而确定出它们的真实方向。本书约定, 除特别说明之外, 电压与电流均按关联一致参考方向进行分析和计算。

关于参考方向, 还需要强调以下几点:

(1) 任一电路元件上的电流和电压的参考方向都可以分别独立地加以指定; 对同一支路

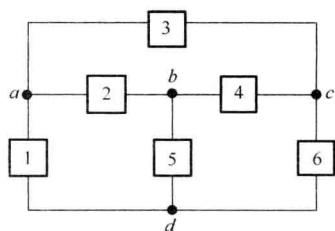
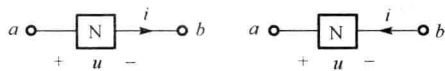


图 1.2.3 例 1.2.2 电路



(a) 关联参考方向

(b) 非关联参考方向

图 1.2.4 电压和电流的参考方向

或元件，参考方向相反的两个电流或电压量之间相差一个负号。参考方向可以任意假定而不会影响计算结果。

(2) 电流值和电压值的正与负，都只有在设定了它们的参考方向的前提下才有意义。如果电流、电压为正值，说明它们的实际方向分别与所设参考方向相同，否则相反。

(3) 无论电流、电压等物理量是直流还是交流，它们均是根据一定的参考方向写出的。描述任一电路元件或整个电路的电压、电流关系的任何方程也只有在选定了参考方向后才能明确建立；参考方向一旦选定，在电路分析过程中就不要再随意更改，以免造成混乱。

1.3 电 功 率

在电路分析和设计中还广泛采用功率或能量来表征电路的电气特性，因为电路的工作状态总是伴随有电能与其他形式能量的互相转换。另一方面，在电子信息系统与电气设备中，对其中的电路器件都是有功率限制的。在实际使用时其电流和电压不能超过额定值，否则会损坏部件或设备，不能正常工作。

电场力在单位时间内所做的功定义为电功率，即

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (1.3.1)$$

功率的单位为瓦特 (W)。实用中，功率的单位还有 kW，mW。

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

当 u 、 i 取关联一致的参考方向时，电功率可表述为

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t) i(t) \quad (1.3.2)$$

当 u 、 i 取非关联一致的参考方向时，电功率可表述为

$$p(t) = -u(t) i(t) \quad (1.3.3)$$

电功率是个代数量，根据以上两式可知：

$p(t) > 0$ ，元件（或电路）消耗（或吸收）功率；

$p(t) < 0$ ，元件（或电路）产生（或提供）功率。

根据能量守恒定理，对于一个由 b 个二端元件组成的电路，在任一时刻，所有二端元件吸收功率的代数和必须为零，即有电路的功率守恒。

$$\sum_{k=1}^b u_k(t) \cdot i_k(t) = 0 \quad (1.3.4)$$

式 (1.3.4) 也是特勒根定理的基本形式。特勒根定理的物理意义是：在任一时刻，任一集中参数电路的各支路所吸收或提供的瞬时功率之和为零。当二端元件（或二端网络）电压与电流取关联一致的参考方向，则从 t_0 到 t 时间内，该二端元件（或二端网络）吸收的电能为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.3.5)$$

例 1.3.1 如图 1.3.1 所示电路，已知 a 、 b 段产生功率 1500 W，其余三段消耗功率分别为 1000 W、350 W、150 W，若已知电流 $i = 20\text{ A}$ ，方向如图中所示。

(1) 标出各段电路两端电压的极性。

(2) 求出电压 u_{ab} 、 u_{cd} 、 u_{ef} 、 u_{gh} 的值。

解 (1) 当一段电路的电压 u 、电流 i 取关联参考方向时, 则功率 $p = ui$ 为正, 表示消耗功率, 若为负表示产生功率。

取各段电路电压参考方向与电流参考方向相关联。依题可得各电压的方向:

因为 $u_{ab} i = -1500 \text{ W}$ 产生功率, 所以电压极性 a 为负、 b 为正。

因为 $u_{cd} i = 1000 \text{ W}$ 消耗功率, 所以电压极性 c 为正、 d 为负。

因为 $u_{ef} i = 350 \text{ W}$ 消耗功率, 所以电压极性 e 为正、 f 为负。

因为 $u_{gh} i = 150 \text{ W}$ 消耗功率, 所以电压极性 g 为正、 h 为负。

(2) 电压 u_{ab} 、 u_{cd} 、 u_{ef} 、 u_{gh} 的值如下:

$$u_{ab} = -\frac{1500}{20} = -75 \text{ V}, \quad u_{cd} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ V}$$

$$u_{ef} = \frac{350}{20} = 17.5 \text{ V}, \quad u_{gh} = \frac{150}{20} = 7.5 \text{ V}$$

例 1.3.2 某元件的电压 u 和电流 i 波形如图 1.3.2 所示, u 和 i 为关联参考方向, 试求出该元件的吸收功率 $p(t)$ 。

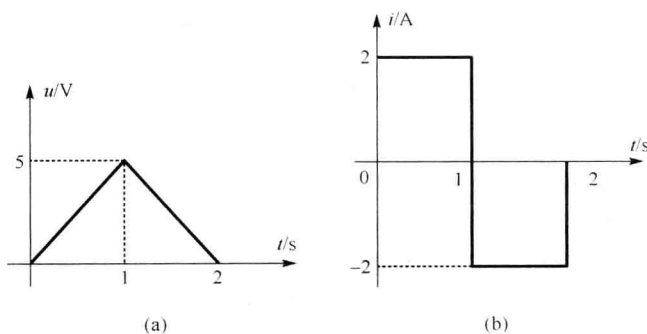


图 1.3.2 例 1.3.2 电路

解 根据 $u(t)$ 和 $i(t)$ 的波形图, 可写出 $u(t)$ 和 $i(t)$ 的表达式为

$$u(t) = \begin{cases} 5t & 0 \leq t \leq 1 \\ -5t + 10 & 1 \leq t \leq 2 \\ 0 & t \geq 2 \end{cases}$$

$$i(t) = \begin{cases} 2 & 0 < t < 1 \\ -2 & 1 < t < 2 \\ 0 & t > 2 \end{cases}$$

$u(t)$ 、 $i(t)$ 取并联方向, 则 $p(t) = u(t) i(t)$, 所以

$$p(t) = \begin{cases} 10t \text{ W} & 0 \leq t \leq 1 \\ 10t - 20 \text{ W} & 1 \leq t \leq 2 \\ 0 \text{ W} & t \geq 2 \end{cases}$$

1.4 基尔霍夫定律

对于任何集中参数电路，都要受到两类约束：拓扑约束和元件约束。两类约束决定了电路中各元件的电流与电压的大小，这两类约束是相互独立的。一是电路作为一个整体来看，应服从什么规律；另一个是电路的各个组成元器件（含电路的功能单元），具有何种电气特性？这两方面都是不可缺少的。因为，电路是由元件组成的，整个电路表现如何，既要看这些元件是怎样连接而构成一个整体的，又要看每个元件各具有什么特性。电气元件的特性是通过元件的电压与电流的伏安关系来描述的，而电路整体的基本规律，是通过基尔霍夫定律来描述的。

1.4.1 电路中的几个常用名词

为了便于描述基尔霍夫定律，先介绍几个电路的常用名词，以图 1.4.1 所示电路为例，其中方框符号表示一个元件（可以是电阻、电容、电感、独立电源或受控电源等），把具有两个端钮和外电路连接的元件叫二端元件，每一个二端元件都是一个最简单的二端电路。

工程上把首尾相接，成串相连的二端元件叫做串联元件，串联元件中流过的电流相等。如图 1.4.1 中的元件 1 和 7 就是串联元件；把首尾分别相接的二端元件叫做并联元件，并联元件两端的电压相等。如图 1.4.1 中的元件 5 和 8。

(1) 支路：一个二端元件就是一条支路，如图 1.4.1 中的元件 1~8 分别组成了 8 条支路。我们也可以将流过相同电流的几个串联二端元件看作为一条支路，如图 1.4.1 中的元件 1 和 7 组成一条支路；此时，图 1.4.1 中的元件 1~8 就组成了 7 条支路。支路两端的电压及流过该支路的电流分别称为支路电压和支路电流。

(2) 节点：电路中两条或两条以上支路的连接点称为节点，如图 1.4.1 中的 a 、 b 、 c 和 d 。

(3) 回路：电路中由几条支路组成的闭合路径叫做回路，如图 1.4.1 中的 $\{2, 4, 6\}$ 、 $\{1, 2, 3, 7\}$ 、 $\{1, 2, 4, 5, 7\}$ 等都是回路。

(4) 网孔：当一个电路可以画在平面上而不出现交叉支路时，称为平面电路。在平面电路中有一些回路由单孔回路组成，这种内部不含有其他回路的单孔回路（最小的回路）叫做网孔。如图 1.4.1 中的 $\{5, 8\}$ 、 $\{2, 4, 6\}$ 、 $\{3, 4, 5\}$ 和 $\{1, 2, 3, 7\}$ 等都是网孔。

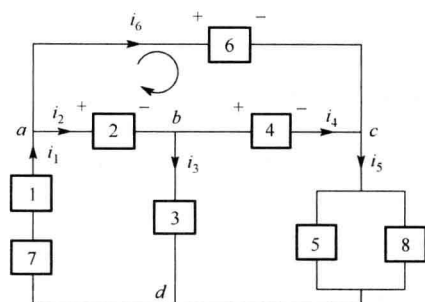


图 1.4.1 常用电路名词的说明

1.4.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL)：在任一时刻 t ，对于集中参数电路中的任一节点，流出该节点的所有支路电流的代数和等于零：

$$\sum_{k=1}^b i_k(t) = 0 \quad (1.4.1)$$

式中， b 为与某节点相连的支路数， $i_k(t)$ 为第 k 条支路的电流。

把基尔霍夫电流定律应用到某一节点时，首先要指定每一支路电流的参考方向。在支路电流的代数和中，可以设参考方向离开节点的电流带正号，参考方向指向节点的电流带负号。例如在图 1.4.1 所示的电路中，将 KCL 应用到节点 b ，可以得到

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

这是因为支路电流 i_3 和 i_4 的参考方向是离开节点的，而支路电流 i_2 的参考方向则是指向节点的。同样，应用 KCL 应用到节点 c ，可以得到

$$-i_4 + i_5 - i_6 = 0$$

式中第 1、3 项带负号，是因为电流 i_4 和 i_6 的参考方向指向节点 c 。

例 1.4.1 求图 1.4.2 电路中的电流 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 。

解 对节点 c ，由 KCL，得

$$i_4 = 5\text{A},$$

对节点 d ，由 KCL，得

$$i_3 = -3\text{A},$$

对节点 a ，由 KCL，得

$$i_2 = 4\text{A},$$

对节点 e ，由 KCL，得

$$i_1 = -1\text{A}$$

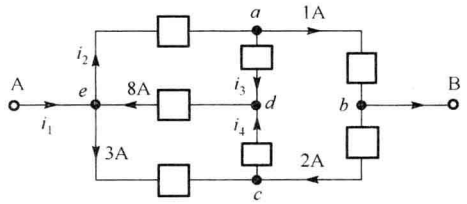


图 1.4.2 例 1.4.1 电路

基尔霍夫电流定律是非常重要的电路定律。这一定律由于它的简单性为人们所熟知。对于 KCL，我们还需要强调以下几点：

(1) KCL 给支路电流加上了线性约束。换句话说，KCL 给出的电路方程是以支路电流为变量的常系数线性齐次代数方程。

(2) KCL 只适用于集中参数电路，不适用于分布参数电路。KCL 仅仅是对集中参数电路中任意节点的一种线性拓扑约束，与各支路元件的性质无关。对于一个具有 n 个节点， b 条支路的电路来说，独立的 KCL 方程只有 $n-1$ 个。

(3) 由于某支路电流也是量度该支路中电荷流过的速率，因而 KCL 断言了在任何节点上都不能有电荷的累积。即，KCL 揭示了在每一节点上电荷的守恒。

(4) 基尔霍夫电流定律还可以推广到任一高斯面（习惯称为广义节点），所以 KCL 又可以表述为：对于任一集中参数电路中的任一广义节点，在任一时刻，流出广义节点的所有支路电流的代数和为零。

例 1.4.2 电路如图 1.4.3 所示，求电压 I_2 。

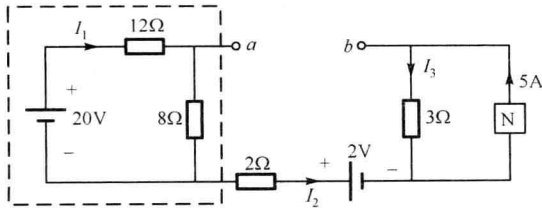


图 1.4.3 广义节点