



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

史健芳 陈惠英 李凤莲 等 编著

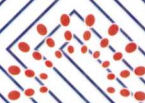
电路分析基础 (第2版)

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Basis of Circuit Analysis (2nd Edition)



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列

013023664



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

TM133-43
64-2

史健芳 陈惠英 李凤莲 等 编著

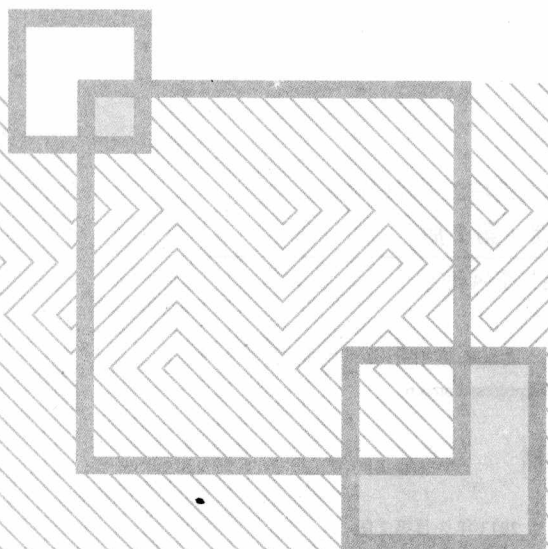
(第2版)

电路分析基础

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering



Basis of Circuit Analysis (2nd Edition)



TM133-43
64-2



北航

C1630509

人民邮电出版社

北京



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础 / 史健芳等编著. — 2版. — 北京 :
人民邮电出版社, 2013. 3
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-29402-9

I. ①电… II. ①史… 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(2012)第222179号

内 容 提 要

本书以电路理论的经典内容为核心,以提高学生的电路理论水平和分析解决问题的能力为出发点,以培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”,具有创新精神和实践能力人才为目的。

全书较全面地阐述了电路的基本理论,并适当引入电路新技术。内容遵从先易后难,由浅入深,循序渐进的原则。主要包括电路的基本概念及基本元件、等效变换、基本分析方法、基本定理、动态电路分析、非直流动态电路的分析、正弦稳态电路分析、三相电路、频率响应、耦合电感的电路分析、双口网络、拉普拉斯变换及其应用、非线性电路、仿真软件 Multisim10.0 在电路分析中的应用 14 章内容。每章精选适量例题及填空、选择、计算题,以加深对理论的理解。在叙述中力求文字简练,通俗易懂。

本书可作为高等院校电子信息、通信、测控技术及仪器、自动化、自动控制、计算机等电类本科专业的教材,也可供有关专业工程技术人员及其他相关人员阅读参考。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

电路分析基础(第2版)

-
- ◆ 编 著 史健芳 陈惠英 李凤莲等
责任编辑 邹文波
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.75 2013 年 3 月第 2 版
字数: 518 千字 2013 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-29402-9

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

第2版前言

电路分析基础是高等理工院校电类专业电子电路系列课程的一门重要技术基础课。为体现培养素质型、能力型人才的办学理念,使教材达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”,具有创新精神和实践能力人才的目的,编者结合多年的教学经验,在第1版的基础上再版。

本书在内容上注重电路基本概念、基本理论、基本方法的全面性、完整性,突出重点,合理统筹,充分考虑与后续课程的衔接,适度引入新内容,拓宽专业知识面。在内容编排上,遵从先易后难,由浅入深,循序渐进的原则,首先介绍电路的基本概念、基本分析方法、基本定理,再引入动态元件,介绍动态电路的分析方法,最后自然过渡到稳态电路,将难点分散于各章节中,便于学生掌握。在叙述中力求文字简练,通俗易懂。对难点、重点进行深入分析和讨论,每个重要知识点精选适量例题及习题,进一步加深读者对理论的理解。在例题和习题编排方面,强调基本概念和分析方法,由易到难,由浅入深,注重培养学生分析问题和解决问题的能力,尽量避免繁琐的计算。

本书在注重基本知识和基本内容的同时注意理论联系实际。针对理工科学生理论与实际脱节的情况,加强了电路在实际应用中的内容。如增加了运算放大器、积分电路、微分电路、耦合电路、频率特性、滤波器等,并且在各章节中精选一定数量的与实际相关的例题和习题,进一步说明基本理论在实际中的应用,增强学生的工程意识与创新能力,更加适应理工科学生的需要。

本书注重反映电路的发展方向,引入现代电路新技术。如引入仿真软件 Multisim 10.0 对电路进行分析,便于使用本教材的读者初步熟悉现代电路的分析手段,提高应用计算机分析电路的能力,增强学生学习的主动性与积极性,激发了学生的求知欲望,有效地解决学时少、内容多的矛盾,为以后的学习、工作和科学研究打下扎实的理论 and 实践基础。

为便于学生参阅同类国外原版教材及相关资料,了解国内外电路新技术,增强学习的主动性,书中对第一次出现的术语都标有英文,书末附有书中出现术语的中英文对照表。

目录上标以*号的部分,可供学生拓宽知识面或根据不同专业需要选用。

本书共分14章,由史健芳任主编,陈惠英、李凤莲任副主编,并由史健芳进行统稿。其中,第1章由李鸿燕执笔,第2章由刘建霞执笔,第3章由刘彦隆执笔,第4章由史健芳执笔,第5章由陈惠英、李化执笔,第6章由李化执笔,第7章、第9章由李凤莲执笔,第8章、第10章由史健芳、赵永强执笔,第11章由赵永强、刘彦隆执笔,第12

章、第14章由陈惠英执笔,第13章由路秀芬执笔,附录由陈惠英整理。在此,谨向人民邮电出版社邹文波编辑、书后所列参考文献的各位作者以及给予我们支持和帮助的领导和同事表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在缺陷和疏漏,恳请读者批评指正。

编 者

2012年12月

目 录

第 1 章 电路的基本概念及基本元件 1

1.1 电路与电路模型 1

1.2 电路的基本变量 2

1.2.1 电流与电压 2

1.2.2 功率和能量 4

1.3 基尔霍夫定律 6

1.3.1 基尔霍夫电流定律 7

1.3.2 基尔霍夫电压定律 8

1.4 电阻元件 10

1.5 理想电压源与理想电流源 12

1.5.1 理想电压源 12

1.5.2 理想电流源 14

1.6 实际电源的模型 15

1.7 受控源 16

本章小结 19

习题 19

第 2 章 电路的等效变换 23

2.1 等效变换的概念 23

2.2 电阻的联接 24

2.2.1 电阻的串联 24

2.2.2 电阻的并联 25

2.2.3 电阻的混联 29

2.2.4 星形电阻网络与三角形电阻网络的等效变换 29

2.3 电源的联接及等效变换 34

2.3.1 电压源的联接 34

2.3.2 电流源的联接 35

2.3.3 电压源串联电阻与电流源并联电阻的等效变换 35

本章小结 37

习题 39

第 3 章 电路的基本分析方法 43

3.1 图论基础 43

3.1.1 图的基本概念 43

3.1.2 树的基本概念 44

3.2 基尔霍夫方程的独立性 46

3.3 网孔分析法 47

3.4 节点分析法 52

3.5 回路分析法 56

*3.6 割集分析法 60

3.7 含运算放大器的电阻电路的分析 66

本章小结 69

习题 69

第 4 章 电路的基本定理 73

4.1 齐次定理和叠加定理 73

4.1.1 齐次定理 73

4.1.2 叠加定理 74

4.2 替代定理 78

4.3 戴维南定理和诺顿定理 80

4.3.1 戴维南定理 81

4.3.2 诺顿定理 88

4.4 最大功率传递定理 91

4.5 *特勒根定理 93

4.6 *互易定理 95

4.7 对偶原理 100

本章小结 101

习题 102

第 5 章 直流动态电路的分析 106

5.1 动态元件 106

5.1.1 电容元件 106

5.1.2 电感元件 111

*5.2 微分方程的求解 115

5.3 直流一阶电路的分析 118

5.3.1 一阶电路的零输入响应 118

5.3.2 一阶电路的零状态响应 122

5.3.3 一阶电路的完全响应 125

5.4 直流二阶电路的分析 131

5.4.1 二阶串联电路的零输入响应	131	7.6.2 单口网络的有功功率、无功功率、视在功率和复功率	187
5.4.2 二阶串联电路的完全响应	137	7.6.3 最大功率传输	194
5.4.3 二阶并联电路的响应	138	本章小结	197
本章小结	140	习题	198
习题	141	第8章 三相电路	202
第6章 非直流动态电路的分析	146	8.1 三相电路概述	202
6.1 正弦交流动态电路的分析	146	8.2 三相电路的连接	203
6.1.1 正弦电压(电流)	146	8.2.1 三相电源的连接	203
6.1.2 有效值	147	8.2.2 三相负载的连接	205
6.1.3 正弦激励下一阶动态电路的分析	148	8.3 对称三相电路的计算	205
*6.2 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	149	8.4 不对称三相电路的计算	208
6.2.1 一阶电路的阶跃响应	150	8.5 三相电路的功率	209
6.2.2 一阶电路的冲激响应	151	本章小结	210
*6.3 一阶动态电路的应用	154	习题	210
6.3.1 积分电路	155	第9章 电路的频率响应	214
6.3.2 耦合电路	156	9.1 正弦激励下稳态电路的响应	214
6.3.3 微分电路	156	9.1.1 同频率正弦激励下稳态电路的响应	214
本章小结	158	9.1.2 不同频率正弦激励下稳态电路的响应	214
习题	158	9.2 正弦稳态的网络函数	216
第7章 正弦稳态电路分析	161	9.3 RLC 电路的频率响应	218
7.1 复数	161	9.4 谐振	221
7.2 相量法基础	162	9.4.1 串联谐振	221
7.3 基尔霍夫定律的相量形式	167	9.4.2 并联谐振	223
7.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)的相量形式	167	9.5 非正弦周期函数激励下稳态电路的响应	224
7.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)的相量形式	167	*9.6 波特图	228
7.4 相量模型	169	*9.7 滤波器	232
7.4.1 基本元件伏安关系的相量形式	169	9.7.1 低通滤波器	232
7.4.2 阻抗和导纳	173	9.7.2 高通滤波器	234
7.4.3 相量模型	175	9.7.3 带通滤波器	235
7.5 正弦稳态电路的分析	177	9.7.4 带阻滤波器	236
7.5.1 一般正弦稳态电路的分析	177	本章小结	236
7.5.2 单口网络相量模型的等效	180	习题	237
7.6 正弦稳态电路的功率	184	第10章 含有耦合电感和理想变压器电路的分析	241
7.6.1 元件的功率	185	10.1 耦合电感的伏安关系式	241

10.1.1 耦合电感·····	241	11.4.3 双口网络的串并联和并串 联·····	268
10.1.2 耦合电感的伏安关系及电路 模型·····	243	11.4.4 双口网络的级联·····	268
10.1.3 耦合电感伏安关系式的相量 形式·····	244	本章小结·····	269
10.2 耦合电感的去耦等效电路·····	244	习题·····	269
10.2.1 用受控源表示的耦合电感的 去耦等效电路·····	245	第 12 章 拉普拉斯变换及其应用·····	273
10.2.2 有一个公共端的耦合电感的 去耦等效电路 (T 型电路去耦)·····	245	12.1 拉普拉斯变换·····	273
10.3 含有耦合电感电路的分析·····	247	12.1.1 拉普拉斯变换的定义·····	273
10.3.1 耦合电感电路的串联·····	247	12.1.2 常用信号的拉普拉斯变换·····	274
10.3.2 耦合电感电路的并联·····	249	12.1.3 拉普拉斯变换的性质·····	275
10.3.3 空心变压器·····	249	12.2 拉普拉斯反变换·····	277
10.4 理想变压器的伏安关系·····	252	12.3 线性电路的复频域解法·····	279
10.4.1 理想变压器的理想极限条 件·····	252	12.3.1 电路元件的复频域形式·····	279
10.4.2 理想变压器的电路模型及 伏安关系·····	252	12.3.2 基尔霍夫定律的复频域 形式·····	281
10.5 含理想变压器电路的分析·····	254	12.3.3 线性动态电路的复频域分 析法·····	281
10.6 理想变压器的实现·····	255	本章小结·····	285
本章小结·····	255	习题·····	286
习题·····	256	第 13 章 非线性电路简介·····	289
第 11 章 双口网络·····	259	13.1 非线性电阻元件·····	289
11.1 双口网络·····	259	13.1.1 非线性电阻元件的伏安特性·····	289
11.2 双口网络的伏安关系·····	259	13.1.2 非线性电阻元件的串联和 并联·····	291
11.2.1 双口网络的导纳矩阵和阻抗 矩阵及其相互关系·····	259	13.2 非线性电容元件和电感元件·····	293
11.2.2 双口网络的混合矩阵和传 输矩阵·····	261	13.2.1 非线性电容元件·····	293
11.2.3 各参数矩阵之间的关系·····	263	13.2.2 非线性电感元件·····	294
11.3 双口网络的等效电路·····	264	13.3 非线性电阻电路的分析·····	294
11.3.1 双口网络的等效电路·····	264	13.3.1 非线性电阻电路方程的 列写·····	295
11.3.2 含有受控源的双口网络的 等效电路·····	265	13.3.2 非线性电阻电路常用的分 析方法·····	295
11.4 双口网络的连接·····	267	本章小结·····	299
11.4.1 双口网络的串联·····	267	习题·····	300
11.4.2 双口网络的并联·····	267	第 14 章 仿真软件 Multisim 10.0 在 电路分析中的应用·····	304
		14.1 仿真软件 Multisim 10.0 简介·····	304
		14.1.1 仿真软件 Multisim 10.0 的 特点·····	304

14.1.2 仿真软件 Multisim 10.0 的 操作界面	305
14.1.3 仿真软件 Multisim 10.0 的 仿真方法	306

14.2 仿真软件 Multisim 10.0 在电路 中的应用	306
附录 中英名词对照	317
参考文献	322

本章主要内容：电路分析的主要内容是在给定电路结构、元件参数的条件下，寻求电路输出和输入之间的关系。本章首先介绍电路模型、电压、电流、功率的概念以及集中电路中电压、电流应遵循的基本定律，然后介绍电阻、电压源、电流源和受控源等电路元件以及元件的电压、电流之间的关系。

1.1 电路与电路模型

电路(circuit)是指电流流经的通路，是为了某种需要由一些电气设备或器件按一定的方式联合起来构成的通路。电路种类繁多，应用广泛，在电子信息、通信、自动控制、电力、计算机等领域用来完成各种各样的任务。如电力系统中发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明等完成电能传输和转换的电路；再如电子信息、通信工程等领域中对语音、文字、图像等信号传输、处理和接收的电路；还有完成控制、存储等复杂功能的大规模及超大规模集成电路等。虽然电路形式多种多样，但从电路本质来说，都由电源(source)、负载(load)和中间环节三个最基本部分组成。电源是将化学能、机械能等非电能转换成电能的供电设备，如干电池、蓄电池和发电机等；负载是将电能转换成热能、光能、机械能等非电能的用电设备，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。比如我们熟悉的手电筒电路，由电池、灯泡、外壳组成；电池把化学能转换成电能供给灯泡，灯泡把电能转换成光能作照明之用，电池和灯泡通过外壳连接起来。

实际电路工作时，电路中和电路周围存在电场和磁场，电场和磁场具有能量，反映电场储能性质和磁场储能性质的参数(parameter)分别是电容(capacitance)和电感(inductance)；反映电路中能量损耗的电路参数(circuit parameter)是电阻(resistance)。由于电场储能、磁场储能以及能量损耗具有连续分布的特性，所以这三种反映能量过程的参数是连续分布的，存在于电路的任何部分，即每个实际电路器件都与电能的消耗及电能、磁能的储存现象有关。但电路中电压和电流的频率(frequency)在不太高的条件下，即在电路的部件及电路的尺寸远小于电路周围电磁波的波长时，可忽略电路参数的分布性对电路性能的影响，近似认为能量损耗、电场储能和磁场储能三种过程分别集中在电阻、电容和电感中进行。这种将实际器件理想化(模型化)，只考虑它们的主要物理性质、忽略次要因素的理想化元件称为集中(总)参数元件(lumped element)，简称元件。如集中电阻元

件(简称电阻元件或电阻)反映能量损耗性质(不储存电场能量和磁场能量),集中电容元件(简称电容元件或电容)反映电场储能性质(不消耗电能、不储存磁能),集中电感元件(简称电感元件或电感)反映磁场储能性质(不消耗磁能、不储存电能)。集中元件的电磁过程都集中在元件内部进行。对于对外具有两个端钮(如电阻、电容、电感)在任何时刻从一个端钮流入的电流恒等于从另一个端钮流出的电流,且流过元件的电流与元件两端的电压具有确定数值关系的元件称为二端元件(two-terminal element)。由集中参数元件构成的电路称为集中参数电路(lumped circuit)(电路模型或简称电路)。较复杂的电路又称为电网络(简称网络)(network)。在本书中,“电路”和“网络”通用。将集中参数元件用模型符号表示,画出的图称为电原理图(电路图)。电路图和元件的尺寸与实际电路和实际器件的尺寸无关。

实际电路的类型以及工作时发生的物理现象千差万别,组成电路的器件、设备种类繁多。本书不探讨每一个实际器件和电路,只研究集中参数电路。如不特别声明,本书中提到的电路指集中参数电路,元件指集中参数元件。

例如我们前面提到的手电筒电路的电路模型如图 1-1 所示,灯泡用电阻元件 R_L 、干电池用电压源 U_S 和电阻元件(内阻) R_0 串联表示。

电路模型是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅计算过程大为简化,而且能更清晰地反映电路的物理实质。

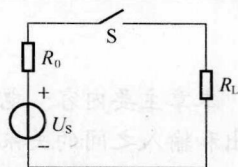


图 1-1 手电筒电路模型

1.2 电路的基本变量

电路分析的主要目的是分析电路模型,得出电路的电性能,电性能常用一组可表示为随时间变化的量——变量(variable)来描述。电流、电压和功率是最基本的变量。因此,分析求解这些变量成为电路分析的主要任务。

1.2.1 电流与电压

1. 电流

带电粒子有秩序的移动形成电流(current)。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度(简称电流)指单位时间内通过导体横截面的电量。电流用 i 或 I 表示。

$$i(t) = dq/dt \quad (1-1)$$

式中, q 表示电量,单位为库伦(用字母 C 表示)。电流的单位是安培(简称安,用 A 表示),1 安培=1 库伦/秒。

电流的方向规定为正电荷移动的方向。大小和方向都不随时间变化而变化的电流称为恒定电流(直流电流),简称直流(direct current, dc 或 DC)。大小或方向随时间变化而变化的电流称为交变电流,简称交流(alternating current, ac 或 AC)。电路中一般用小写字母笼统地表示直流或交流变量,而用大写字母表示直流量。

电流的方向是客观存在的,但在分析较复杂的直流或交流电路时,事先难以确定电流的真实方向。所以分析计算时,在计算之前先任意选定某一方向作为电流的参考方向(reference direction),也称假设方向或标出方向。将参考方向用带方向的箭头标于电路图中,在参考方向之下计算电流。若电流的计算结果为正值,表明电流的真实方向与参考方向一致;若计算

结果为负值,表明电流的真实方向与参考方向相反。

例如,图 1-2 (a) 所示为电路的一部分,方框用来泛指元件。计算流过元件的电流时,先假设参考方向为 $a \rightarrow b$,如图 1-2 (b) 所示,在此参考方向之下计算电流,若值为 $1A$,表明实际方向与参考方向一致,即电流的实际方向由 a 流向 b ;若计算的电流值为 $-1A$,表明实际方向与参考方向相反,即电流的实际方向由 b 流向 a 。若参考方向为 $b \rightarrow a$,如图 1-2 (c) 所示,计算结果将正好与图 1-2 (b) 所示的计算结果相差一个负号。

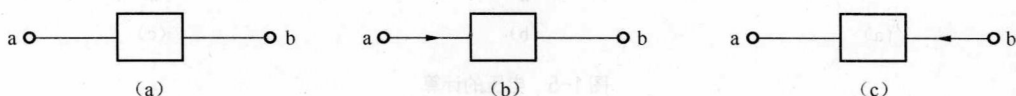


图 1-2 电流的计算

参考方向一经设定,在计算过程中便不再改变。由参考方向与电流的正、负号相结合可表明电流的真实方向。所以在参考方向之下计算出结果后不必另外指明真实方向。在没有假设参考方向的前提下,直接计算得出的电流值的正、负号没有意义。

2. 电压

电压 (voltage) 也叫电位差,如图 1-3 所示,图中 M 为部分电路, a 、 b 两点之间的电压为单位正电荷 q 由高电位点 (a) 转移到低电位点 (b) 时电场力所做的功,用 u 或 U 表示

$$u(t) = dw/dq \quad (1-2)$$

式中, w 代表能量,单位为焦耳 (用字母 J 表示)。电压的极性 (方向) 规定为正电荷 q 从 a 点转移到 b 点电场力做的功,即 a 点为高电位 (+) 端, b 点为低电位 (-) 端。电压的单位是伏特 (简称伏,用字母 V 表示)。

如果电压的大小和方向不随时间变化而变化,这样的电压称为恒定电压 (直流电压),如果电压的大小或方向随时间变化而变化,这样的电压称为交变电压 (交流电压)。

同样,电压的真实极性在计算之前也很难确定,与电流的参考方向类似,电压也可以假定参考极性 (参考方向)。计算之前,在电压参考极性的高电位端标 “+” 号,在参考极性的低电位端标 “-” 号,如图 1-4 所示。为了图示方便,也可用一个箭头表示电压的参考极性,如图中由 a 指向 b 的箭头,箭头方向表示电压降低的参考方向。另外还可用双下标形式,如 u_{ab} 表示 a 、 b 之间的电压降,即 a 为参考 “+” 端, b 为参考 “-” 端,显然有 $u_{ba} = -u_{ab}$ 。在参考极性的前提下计算电压时,若计算值为正,说明实际极性与参考极性相同,若计算值为负,说明实际极性与参考极性相反。

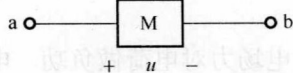


图 1-3 电压的定义

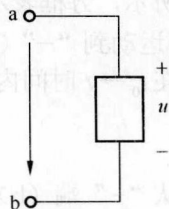


图 1-4 电压参考极性的表示方法

例如,图 1-5 (a) 所示是电路的一部分,方框用来泛指元件,计算元件两端电压时,首先标出电压的参考极性。参考极性可以任意假定,设 a 点为参考极性 “+” 端, b 点为参考极

性“-”端,如图1-5(b)所示,在此参考极性之下计算电压,若计算得出电压 $u=1\text{V}$,表明实际极性与参考极性相同,若计算得出 $u=-1\text{V}$,表明实际极性与参考极性相反。

若参考极性为b点正极性,a点负极性,如图1-5(c)所示,计算得出的数值与图1-5(b)参考极性之下的值相差一个负号。

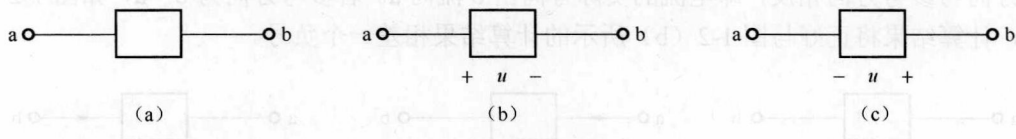


图1-5 电压的计算

与电流的参考方向类似,电压的参考极性一经设定,在计算过程中便不再改变。同样,由参考极性与电压的正、负号相结合可以表明电压的真实极性。所以计算出结果后不必另外指明真实极性。同样,在没有假设参考极性的前提下,直接计算得出的电压值的正、负号没有意义。

3. 关联参考方向

电压和电流的参考方向可以独立的任意假定,当电流的参考方向从标以电压参考极性的“+”端流入而从标以电压参考极性的“-”端流出时,如图1-6(a)所示,称电流与电压为关联参考方向(associated reference directions),而当电流的参考方向从标以电压参考极性的“-”端流入,而从标以电压参考极性的“+”端流出时,如图1-6(b)所示,称电流与电压为非关联参考方向。为了计算方便,常采用关联参考方向。

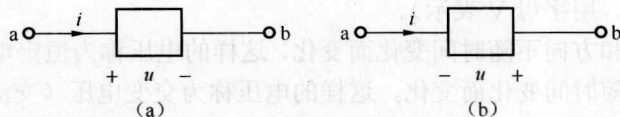


图1-6 参考方向的关联

1.2.2 功率和能量

功率(power)和能量是电路中的重要变量,电路在正常工作时常伴随着电能与其他形式能量的相互转换。器件或设备在使用时都有功率的限制,不能超过额定值,否则会损坏。

如图1-7所示,方框表示一段电路,当正电荷从该段电路的“+”(a)端运动到“-”(b)端时,电场力对电荷做功,电路吸收能量;在 $t_0 \rightarrow t$ 时间内,电路吸收的能量

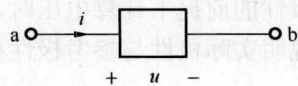


图1-7 电路的功率

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

当正电荷从“-”端(b)运动到“+”端(a)时,电场力对电荷做负功,电路向外释放能量。

单位时间内电路所吸收或释放的能量称为功率。图1-7所示电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t) \frac{dq(t)}{dt}$$

将电流定义式 (1-1)

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

代入得

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-3)$$

当电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A) 时, 功率的单位为瓦特 (W)。

由图 1-7 可见, 此时, 电压、电流为关联参考方向。在应用时 u 、 i 可任意单独假设方向, 当 u 、 i 取关联参考方向时, 利用 $p(t)=u(t)i(t)$ 若计算出 $p>0$, 表示该元件 (该段电路) 确实吸收功率; 若计算出 $p<0$, 表示该元件 (该段电路) 吸收功率为负, 即实际产生功率 (释放功率)。如一段电路 (或元件) 吸收的功率为 10W, 等效于产生的功率为 -10W。当 u 、 i 取非关联参考方向时, 功率可用式 $p(t)=-u(t)i(t)$ 计算, 计算出 $p>0$, 表示确实吸收功率, 计算出 $p<0$, 表示实际产生 (释放) 功率。

例 1-1 电路如图 1-8 所示, (1) 如图 1-8 (a) 中, 若 $i=1\text{A}$, $u=3\text{V}$, 求元件吸收的功率 p ; (2) 如图 1-8 (b) 中, 若 $i=1\text{A}$, $u=3\text{V}$, 求元件吸收的功率 p 。

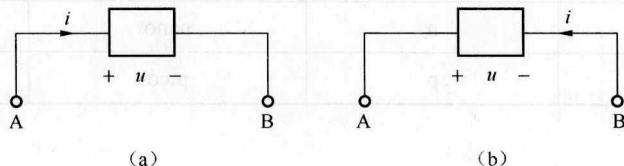


图 1-8 例 1-1 图

解 (1) 由图 1-8 (a) 知, 元件的电压与电流为关联参考方向, 吸收的功率为

$$p = ui = 3\text{W}$$

(2) 由图 1-8 (b) 知, 元件的电压与电流为非关联参考方向, 吸收的功率可用下式计算:

$$p = -ui = -3\text{W}$$

表明元件实际产生 (向外电路提供) 3W 的功率。

例 1-2 在图 1-9 所示电路中, 已知: $U_1=20\text{V}$, $I_1=2\text{A}$, $U_2=10\text{V}$, $U_3=10\text{V}$, $I_3=-3\text{A}$, $I_4=-1\text{A}$, 试求图中各元件的功率。

解 元件 1 的电压与电流为非关联参考方向, 吸收的功率

$$P_1 = -U_1 I_1 = -20 \times 2 = -40\text{W}$$

元件 2 的电压与电流为关联参考方向, 吸收的功率

$$P_2 = U_2 I_1 = 10 \times 2 = 20\text{W}$$

元件 3 的电压与电流为非关联参考方向, 吸收的功率

$$P_3 = -U_3 I_3 = -10 \times (-3) = 30\text{W}$$

元件 4 的电压与电流为关联参考方向, 吸收的功率

$$P_4 = U_3 I_4 = 10 \times (-1) = -10\text{W}$$

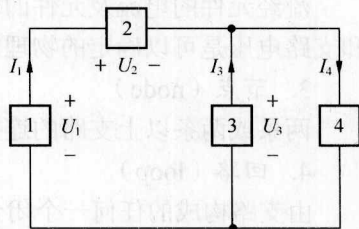


图 1-9 例 1-2 图

元件 1 和元件 4 吸收的功率为负, 说明它们实际产生功率; 元件 2 和元件 3 吸收功率为正, 实际确为吸收功率。可见, 同一电路中元件产生的功率之和等于元件吸收的功率之和, 此结论对所有的电路均成立, 符合能量守恒定律, 称为功率守恒, 记为

$$\sum P = 0$$

上面我们介绍了电压、电流、功率等变量，使用的都是国际单位制 (SI)，在实际使用中这些单位有时太大，有时太小。为了方便，常常在这些单位之前加上一个以 10 为底的正幂次或负幂次的词头，构成辅助单位。常用的国际单位制规定的词头如表 1-1 所示。

表 1-1 部分常用国际制词头

倍 率	词 头 符 号	词 头 名 称	
		法 文	中 文
10^9	G	giga	吉
10^6	M	mega	兆
10^3	k	kilo	千
10^{-3}	m	milli	毫
10^{-6}	μ	micro	微
10^{-9}	n	nano	纳
10^{-12}	p	pico	皮

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 是集中电路的基本定律，包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)。为了叙述方便，先介绍几个有关的概念。

1. 支路 (branch)

在集中电路中，将每一个二端元件称为一条支路。

2. 支路电流和支路电压

流经元件的电流及元件的端电压分别称为支路电流及支路电压。在任意时刻，支路电流和支路电压是可以确定的物理量，是集中电路分析研究的对象，符合一定的规律。

3. 节点 (node)

两条或两条以上支路的连接点。

4. 回路 (loop)

由支路构成的任何一个闭合路径。

5. 网孔 (mesh)

在回路内部不另含有支路的回路。

如图 1-10 所示电路，共有 5 个二端元件，即有 5 条支路，4 个节点，3 个回路，2 个网孔。由元件 1、2、3、4 及元件 3、5 构成的回路为网孔，元件 1、2、5、4 构成的回路不是网孔。

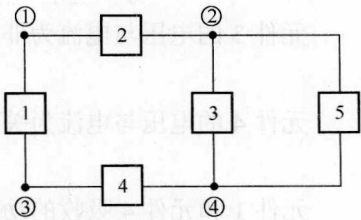


图 1-10 概念说明图

为方便起见，有时也将由多个二端元件串接起来 (流过同一电流) 的支路称为一条支路，如图 1-10 中，元件 2、1、4 串接而成也可看成一条支路，这样，图中便有 3 条支路，两个节

点（节点②和节点④）。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

由于电路中电流的连续性，电路中任一点（包括节点）都不能堆积电荷，而一个电路中电荷是守恒的，电荷既不能创造也不能消失。

如图 1-11 所示的集中电路，方框代表元件，以图中的节点 1 为例，与该节点相连接的各支路电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ，流进该节点的支路电流代数和 $i = i_1 + i_2 - i_3$ （设流入节点电流为正），

电荷流进该节点的速率为 $\frac{dq}{dt}$ ，其中 q 为节点处的电荷。由于

节点只是理想导体的汇合点，不可能积累电荷，而电荷既不能

创造，也不能消失，所以节点处的 $\frac{dq}{dt}$ 必为零。根据电流的定义，节点处有

$$i = \frac{dq}{dt} = 0$$

故

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

表明流进（或流出）该节点的所有支路电流的代数和为零。这种规律可用基尔霍夫电流定律表述：任一集中电路中，在任一时刻，对于任一节点，流进（或流出）该节点的所有支路电流的代数和恒为零，即

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0 \quad (1-4)$$

式（1-4）称为基尔霍夫电流方程（KCL 方程），式中 K 为节点处的支路数， $i_k(t)$ 为流入（流出）节点的第 k 条支路的电流。“代数和”根据支路电流是流入节点还是流出节点判断，若流入节点的电流前取“+”号，流出节点的电流前则取“-”号。电流的流入、流出指电流的参考方向。

同理，图 1-11 其他节点的基尔霍夫电流方程为

$$\left. \begin{aligned} \text{节点2} \quad i_5 - i_2 - i_6 &= 0 \\ \text{节点3} \quad i_3 - i_1 - i_4 &= 0 \\ \text{节点4} \quad i_4 + i_6 - i_5 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

将式（1-5）移项可得

$$\left. \begin{aligned} \text{节点2} \quad i_5 &= i_2 + i_6 \\ \text{节点3} \quad i_3 &= i_1 + i_4 \\ \text{节点4} \quad i_4 + i_6 &= i_5 \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式（1-6）表明，流入节点的电流的和等于流出节点的电流之和。

KCL 既可用于节点，也可推广应用于电路中包含几个节点的任一假设的闭合面。这种闭合面有时也称为广义节点（扩大了的大节点）。

如图 1-12 所示，有 3 个节点，应用 KCL 定律可得

$$i_1 = i_2 + i_3$$

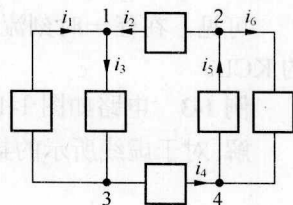


图 1-11 具有 4 个节点的电路

$$i_2 = i_{23} - i_{12}$$

$$i_3 = -i_{23} - i_{13}$$

上列3式相加得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

可见, 在任一时刻流进(或流出)封闭面的所有支路电流的代数和为零, 称为广义节点的 KCL。

例 1-3 电路如图 1-13 所示, 方框代表元件, 已知 $i_2 = 2\text{A}$, $i_4 = -3\text{A}$, $i_5 = -4\text{A}$, 求 i_3 。

解 对于虚线所示的封闭曲面由扩展 KCL 可知

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

可得

$$i_3 = i_2 + i_4 - i_5 = 2 + (-3) - (-4) = 3\text{A}$$

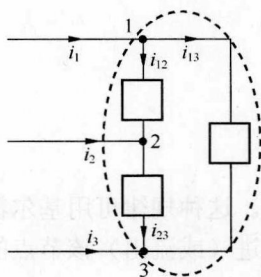


图 1-12 闭合面的 KCL

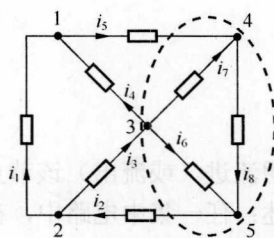


图 1-13 例 1-3 图

1.3.2 基尔霍夫电压定律

在任一电路中, 若某段时间内某些元件的能量有所增加, 为遵守同一电路中能量既不能创造也不能消失的能量守恒法则, 另一些元件的能量必定有所减少。

如图 1-14 所示的电路中, 若在某段时间内各元件得到的能量分别为: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 , 则由能量守恒法则可知:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 0 \quad (1-7)$$

由 1.2.2 知, 单位时间内电路吸收或释放的能量为功率, 式 (1-7) 对时间微分得

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 0 \quad (1-8)$$

式中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 分别为各元件的功率。在图中所标参考方向下将式 (1-3) 代入, 有

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -u_1 i_1 \\ p_2 &= u_2 i_2 \\ p_3 &= u_3 i_3 \\ p_4 &= u_4 i_4 \\ p_5 &= u_5 i_5 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

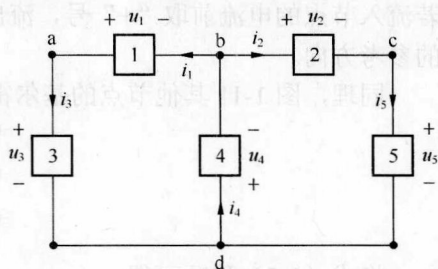


图 1-14 具有 3 个回路的电路