



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 工程电路分析基础

主 编 齐 超 刘洪臣 王竹萍

高等教育出版社



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 工程电路分析基础

主 编 齐 超 刘洪臣 王竹萍



01011010101010101

03011010101010111

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书侧重于从工程应用角度介绍电路基本理论、分析方法。以电压、电流响应为线索,依次讲解直流电路、动态电路和交流电路相关内容。全书共10章,包括基尔霍夫定律及电路元件、线性直流电路分析、电路定理、运算放大器、动态电路时域分析、正弦电路分析基础、交变电路分析及功率、滤波电路和谐振现象、三相电路和二端口网络,每章最后均以工程应用示例结束。

全书降低了电路理论难度,增加了工程实际应用内容分析和介绍。本书以基本理论实用、基础知识够用、分析方法好用、实践设计管用、专业技能适用为出发点,且具有围绕工程应用讲授电路理论的特色。

本书可作为普通高等学校、应用型本科院校和继续教育学院的电气类、电子信息类和自动化类专业教材,也可作为工程技术人员和电类爱好者学习参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程电路分析基础 / 齐超, 刘洪臣, 王竹萍主编

— 北京: 高等教育出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-04-045968-5

I. ①工… II. ①齐… ②刘… ③王… 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(2016)第168930号

策划编辑 王勇莉	责任编辑 王耀锋	封面设计 赵阳	版式设计 童丹
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘春萍	责任印制 毛斯璐	

出版发行 高等教育出版社	网 址 <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址 北京市西城区德外大街4号	<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码 100120	网上订购 <a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷 国防工业出版社印刷厂印刷	<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本 787mm×1092mm 1/16	<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张 17.25	版 次 2016年12月第1版
字 数 420千字	印 次 2016年12月第1次印刷
购书热线 010-58581118	定 价 29.80元
咨询电话 400-810-0598	

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 45968-00

# 前 言

按照《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》,我国高等工程教育的教学改革将进一步深入,随着我国工程教育认证、“本科教学工程”、“卓越工程师教育培养计划”、地方本科院校转型等一系列工作的推进,将积极引导我国高等工程教育的人才培养模式、专业和课程建设进行改革。电气类、电子信息类和自动化类专业又是我国高等工程教育的重要组成部分,随着经济的发展,这些专业在智能制造、能源互联网、机器人等领域将发挥重要作用,这也对我国相应的人才培养提出了更高的要求。为了适应我国电气类、电子信息类和自动化类专业的教学改革与发展,高等工程教育将进一步强化学生工程能力的培养,以便更加适应社会发展要求,适应行业和区域的经济需求。为电气类、电子信息类和自动化类专业教学提供优质、适用的工程应用型教材及配套资源和服务,是我们编写这本教材的初衷。

电路课程是高等院校工科电气类、电子信息类和自动化类专业必修的一门重要技术基础课。它是培养学生掌握现代电路基本理论,学习和理解各专业其他课程的入门课,教材编写的是否合适,能不能引导学生对相关专业的浓厚兴趣,并为后续课程的学习和将来实际应用、从事科学研究奠定扎实的电路理论和实践基础起着重要的作用。根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制订的《高等学校电路课程教学基本要求》,近年来,各出版社出版了多种《电路》教材,这些教材的特点大多适用于国内一些重点本科高校。但随着大众化的高等教育发展,应用型高校或重点高校下设的独立学院日益增多,培养的学生主要是面向现代社会建设、生产、管理、服务等一线岗位,要求毕业后能够直接从事实际工作、解决具体工程问题、是维持工作有效运行的面向工程的应用型人才。目前的情况是这些院校使用的教材更多只是对现有适用于我国重点高校本科教材章节和内容的删删减减,或问题分析简单化,其应用性和针对性不够突出,难以达到因材施教的目的。我们经过对这类院校学生的多年教学实践,对教学内容进行调整、精炼和更新,既遵照电路理论体系的知识框架,又针对工程应用型院校人才培养目标,精心设计教学内容,科学安排知识结构,编写出了《工程电路分析基础》这本教材。该教材编写的目标是使该书做到基本理论实用,基础知识够用,分析方法好用,实践设计管用,专业技能适用,具有围绕工程应用讲授电路理论的特色。

全书共10章,涵盖了电路分析中的直流、暂态和交流三大部分。第1章基尔霍夫定律及电路元件,介绍了对全书集中参数电路均适用的两大基本定律和电路分析常用到的元件特性;引入了多量程电压表和电流表工程应用示例。第2章线性直流电路分析和第3章电路定理,分别从网络方程和等效变换角度分析电路问题;引入了惠斯通电桥测电阻和光伏发电最大功率点跟踪工程应用示例。第4章运算放大器,对应用于电子技术领域的典型基本运放电路进行分析,这章是在实际应用中正确使用运算放大器的重要基础;引入了仪用放大器工程应用示例。第5章动态电路时域分析,介绍了电路发生变动时从一个稳态到另一个稳态的过渡过程;引入了汽车点火等效电路和闪光灯简化电路工程应用示例。第6章正弦电路分析基础和第7章交变电路分析及功率,是对直流分析方法的拓展,同时培养学生通过变换域简化实际问题思维方式;分别引入了

交流电桥、RC滤波器用于前置放大电路、移相/选频电路及工频交流耐压试验等工程应用示例。第8章滤波电路和谐振现象,第9章三相电路,侧重于对第6章、第7章正弦电路理论部分的实际应用;分别引入了无线电能传输电路、接收机输入电路、安全用电及相序辨识器等工程应用示例。第10章二端口网络,从外部电气特性角度对在实际工程中起传输、变换和控制的二端口电路模型进行必要的介绍和简单的设计;引入了LC阶梯网络综合、负阻抗变换器及阻抗匹配网络等工程应用示例。

整本书降低了电路理论难度,增加了工程实际应用内容分析和介绍。精编和精选的例题多具有典型性、实用性、理论实践一体性。编写以“实用、够用、好用、管用、适用”为原则,以教师好讲,学生好学为宗旨,希望大家费力少、理解深且用处大。本书可作为普通高等学校、应用型本科院校和继续教育学院的电气、信息和自动化类专业教材,也可作为工程技术人员和电类爱好者学习参考用书。

参加本书编写的人员有哈尔滨工业大学齐超(第5-8章),刘洪臣(第1-4章),哈尔滨理工大学王竹萍(9、10)章。感谢国网黑龙江省电力有限公司培训部齐赛提供一些有价值的工程应用示例,哈尔滨华德学院电子系张昌玉和郭宏老师提供了部分习题和解答。全书成稿后,承蒙江南大学燕庆明教授的认真审阅,提出了宝贵意见,基本已采纳修改,在此向燕庆明教授致以诚挚谢意。感谢高等教育出版社编辑细致耐心的工作使本书得以规范、优美的版面呈现给读者。全书由齐超复核统稿,由于编者水平有限,书中难免有误或不妥之处,还请使用本书的老师和同学批评指正。编者邮箱 qichao@hit.edu.cn 或 fenmiao@hit.edu.cn。

齐 超

2015年12月于哈尔滨

# 目 录

第 1 章 基尔霍夫定律及电路元件 .....	1	2.1.1 端口及等效 .....	33
1.1 实际电路及电路模型 .....	1	2.1.2 电阻的串、并联化简电路 .....	34
1.2 电路中的物理量 .....	2	2.2 电源和电阻的串联与并联 .....	35
1.2.1 电流 .....	2	2.2.1 电压源串联 .....	35
1.2.2 电压 .....	4	2.2.2 电压源并联 .....	35
1.2.3 功率与能量 .....	5	2.2.3 电流源并联 .....	36
1.3 基尔霍夫定律 .....	6	2.2.4 电流源串联 .....	36
1.3.1 基本术语 .....	6	2.2.5 电压源与支路并联 .....	37
1.3.2 基尔霍夫电流定律 .....	7	2.2.6 电流源与支路串联 .....	37
1.3.3 基尔霍夫电压定律 .....	8	2.2.7 实际电压源与实际电流源 等效变换 .....	37
1.4 电阻元件 .....	9	2.2.8 受控源与电阻的串并联等效 .....	38
1.4.1 线性电阻的端口特性 .....	10	2.3 电阻的星形和三角形联结 .....	41
1.4.2 线性电阻的功率 .....	10	2.3.1 星形接法和三角形接法 .....	41
1.4.3 开路与短路 .....	11	2.3.2 Y- $\Delta$ 等效变换 .....	41
1.4.4 电阻的串联 .....	11	2.3.3 电桥平衡 .....	44
1.4.5 电阻的并联 .....	13	2.4 支路电流法 .....	46
1.4.6 时变电阻与非线性电阻 .....	14	2.5 回路电流法 .....	48
1.5 电感元件 .....	14	2.5.1 回路电流 .....	48
1.5.1 电感元件的端口特性方程 .....	15	2.5.2 回路电流方程的一般形式 .....	49
1.5.2 电感元件的功率和能量 .....	16	2.5.3 电路中有电流源支路的分析 .....	51
1.5.3 电感元件的串联与并联 .....	16	2.5.4 电路中有受控源的处理 .....	52
1.6 电容元件 .....	17	2.6 节点电压法 .....	52
1.6.1 电容元件的端口特性方程 .....	18	2.6.1 节点电压 .....	53
1.6.2 电容元件的功率和能量 .....	19	2.6.2 节点电压方程的一般形式 .....	53
1.6.3 电容元件的串联与并联 .....	19	2.6.3 电路中有纯电压源支路的 分析 .....	56
1.7 独立电源 .....	21	2.6.4 电路中有受控源支路的处理 .....	57
1.7.1 独立电压源 .....	21	2.6.5 电路中有电流源串电阻支路的 分析 .....	58
1.7.2 独立电流源 .....	24	2.6.6 弥尔曼定理 .....	59
1.8 受控电源 .....	26	2.7 工程应用示例——惠斯通电桥测 电阻 .....	60
1.9 工程应用示例 .....	28	习题 2 .....	61
1.9.1 多量程电压表 .....	28		
1.9.2 多量程电流表 .....	28		
习题 1 .....	29		
第 2 章 线性直流电路分析 .....	33		
2.1 电阻的串、并联等效化简 .....	33		

<b>第3章 电路定理</b> .....	65	5.2 一阶电路三要素公式 .....	109
3.1 叠加定理和齐性定理 .....	65	5.2.1 一阶电路微分方程 .....	109
3.1.1 叠加定理 .....	65	5.2.2 三要素公式 .....	110
3.1.2 齐性定理 .....	69	5.2.3 三要素公式分析 .....	112
3.2 置换定理 .....	71	5.3 一阶RC电路 .....	113
3.3 戴维宁定理与诺顿定理 .....	72	5.3.1 RC电路的放电 .....	113
3.3.1 戴维宁定理 .....	72	5.3.2 RC电路的充电 .....	114
3.3.2 诺顿定理 .....	73	5.3.3 RC电路全响应 .....	116
3.3.3 戴维宁和诺顿等效电路的 计算 .....	74	5.4 一阶RL电路 .....	117
3.4 最大功率传输定理 .....	80	5.4.1 无源RL电路 .....	117
3.4.1 最大功率 .....	80	5.4.2 直流激励RL电路 .....	119
3.4.2 效率 .....	83	5.4.3 RL电路全响应 .....	120
3.5 工程应用示例——光伏发电最大 功率点跟踪介绍 .....	84	5.5 阶跃响应和脉冲响应 .....	121
习题3 .....	86	5.5.1 阶跃响应与单位阶跃特性 .....	121
<b>第4章 运算放大器</b> .....	89	5.5.2 延迟阶跃响应和脉冲响应 .....	122
4.1 运算放大器 .....	89	5.6 状态方程分析法 .....	123
4.1.1 运算放大器的端口特性 .....	89	5.7 工程应用示例 .....	124
4.1.2 理想运算放大器 .....	91	5.7.1 汽车点火等效电路 .....	124
4.2 比例运算电路 .....	92	5.7.2 闪光灯简化电路 .....	125
4.2.1 反比例运算电路 .....	92	习题5 .....	126
4.2.2 同比例运算电路 .....	93	<b>第6章 正弦电路分析基础</b> .....	130
4.3 加法和减法运算电路 .....	95	6.1 正弦信号 .....	130
4.3.1 反相求和运算电路 .....	95	6.1.1 正弦信号的三要素 .....	130
4.3.2 同相求和运算电路 .....	95	6.1.2 正弦电流电路常用的几个 概念 .....	131
4.3.3 减法运算电路 .....	96	6.1.3 正弦信号有效值传统测量 方法 .....	133
4.4 积分和微分运算电路 .....	97	6.2 正弦量的相量表示 .....	134
4.4.1 积分运算电路 .....	97	6.2.1 复数表示法 .....	134
4.4.2 微分运算电路 .....	97	6.2.2 正弦量的相量表示 .....	135
4.5 含运放电路的节点电压分析 .....	98	6.2.3 正弦量运算与相量运算的 对应关系 .....	137
4.6 工程应用示例——仪用放大器 .....	99	6.3 KCL/KVL和RLC各元件伏安特性的 相量形式 .....	138
习题4 .....	101	6.3.1 KCL/KVL相量形式 .....	138
<b>第5章 动态电路时域分析</b> .....	105	6.3.2 RLC各元件伏安特性的相量 形式 .....	140
5.1 暂态过程和初始值 .....	105	6.4 RLC串联阻抗和GCL并联导纳 .....	144
5.1.1 暂态过程的产生 .....	105	6.4.1 阻抗 .....	144
5.1.2 换路定律 .....	106	6.4.2 RLC串联电压/电流相量图和	
5.1.3 初始值的计算 .....	106		

波形 .....	145	<b>第 8 章 滤波电路和谐振现象</b> .....	189
6.4.3 导纳 .....	147	8.1 频率特性和滤波 .....	189
6.4.4 阻抗与导纳的等效 .....	149	8.1.1 网络函数 .....	189
6.5 正弦含源一端口网络等效电路 .....	151	8.1.2 低通滤波电路 .....	190
6.6 工程应用实例 .....	153	8.1.3 高通滤波电路 .....	191
6.6.1 交流电桥 .....	153	8.1.4 带通滤波电路 .....	192
6.6.2 RC 滤波器用于前置 放大电路 .....	154	8.2 串联谐振电路 .....	194
习题 6 .....	154	8.2.1 谐振条件 .....	194
<b>第 7 章 交变电路分析及功率</b> .....	157	8.2.2 串联谐振特点 .....	195
7.1 正弦稳态电路相量分析法 .....	157	8.3 并联谐振电路 .....	197
7.1.1 简单正弦稳态电路分析 .....	157	8.3.1 谐振条件 .....	197
7.1.2 正弦稳态电路一般分析法 .....	158	8.3.2 谐振特点 .....	197
7.1.3 交流运算放大器电路分析 .....	161	8.4 工程应用示例 .....	200
7.2 含互感元件正弦稳态电路分析 .....	162	8.4.1 无线电能传输电路 .....	200
7.2.1 二端口互感 .....	162	8.4.2 接收机输入电路 .....	201
7.2.2 去耦等效电路 .....	164	习题 8 .....	203
7.3 变压器分析 .....	168	<b>第 9 章 三相电路</b> .....	206
7.3.1 理想变压器 .....	168	9.1 三相电源和三相负载 .....	206
7.3.2 全耦合变压器 .....	170	9.1.1 三相电压 .....	206
7.3.3 铁心变压器 .....	171	9.1.2 对称三相电源、三相负载 .....	207
7.4 正弦稳态电路的功率 .....	171	9.1.3 对称三相电路连接 .....	208
7.4.1 瞬时功率 .....	172	9.2 对称三相电路中电压、电流和功率 .....	209
7.4.2 有功功率和无功功率 .....	172	9.2.1 星形联结相/线电压、电流 关系 .....	209
7.4.3 视在功率和功率三角形 .....	173	9.2.2 角形联结相/线电压、电流 关系 .....	211
7.4.4 功率因数的提高 .....	174	9.2.3 对称三相电路功率计算 .....	213
7.5 周期非正弦信号 .....	176	9.2.4 三相电路功率测量 .....	213
7.5.1 周期非正弦信号的 谐波分解 .....	177	9.3 对称三相电路计算 .....	214
7.5.2 有效值和真有效值 .....	177	9.3.1 端线无阻抗对称三相电路 计算 .....	214
7.5.3 平均值 .....	178	9.3.2 单相计算法 .....	215
7.5.4 平均功率 .....	178	9.4 简单不对称三相电路分析 .....	218
7.5.5 总谐波失真率 .....	179	9.4.1 中性点位移 .....	218
7.6 周期非正弦电路的分析 .....	179	9.4.2 对称分量法 .....	219
7.7 工程应用示例 .....	182	9.4.3 照明系统故障分析 .....	220
7.7.1 移相电路 .....	182	9.4.4 单相负载引起三相电路 不对称 .....	221
7.7.2 选频电路 .....	183	9.4.5 三相不平衡度 .....	222
7.7.3 工频交流耐压试验 .....	183		
习题 7 .....	184		



9.5 工程应用示例 .....	223	10.4.1 二端口级联 .....	238
9.5.1 安全用电 .....	223	10.4.2 二端口串联和并联 .....	239
9.5.2 相序辨识器 .....	224	10.5 互联变压器电气特性分析 .....	241
习题9 .....	224	10.5.1 PT二端口网络Y参数矩阵 .....	241
<b>第10章 二端口网络</b> .....	<b>227</b>	10.5.2 PT端口电气特性 .....	242
10.1 二端口基本概念 .....	227	10.5.3 变压器互联 .....	242
10.2 二端口方程和参数 .....	228	10.6 工程应用示例 .....	243
10.2.1 阻抗参数方程及Z参数 .....	228	10.6.1 LC阶梯网络综合 .....	243
10.2.2 导纳参数方程及Y参数 .....	230	10.6.2 负阻抗变换器 .....	244
10.2.3 传输参数和混合参数 .....	232	10.6.3 阻抗匹配网络 .....	246
10.2.4 参数互换 .....	233	习题10 .....	248
10.3 二端口网络等效电路 .....	234	<b>习题参考答案</b> .....	<b>252</b>
10.3.1 互易二端口等效电路 .....	234	<b>参考文献</b> .....	<b>266</b>
10.3.2 非互易二端口等效电路 .....	235		
10.4 二端口网络互联 .....	237		

# 第 1 章

## 基尔霍夫定律及电路元件

### 引言:

本章首先介绍电路中最基本的物理量,包括电流、电压、功率及电能。其次介绍基本的电路元件,包括电阻元件、电感元件、电容元件及电源元件,其中电源元件又包括独立电源和受控电源两种,并分析这些元件的物理特性及端口特性方程。最后介绍电路最基本的定律:基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

### 1.1 实际电路及电路模型

实际电路是为了实现某种实际功能而由一些电气器件相互连接而成的电流的通路,它的主要作用是实现电能和电信号的传输、转换或信息的处理、传递。实际电路种类繁多,形式各异,特性和作用各不相同,如电视机、手机、计算机、通信系统及电力网络中都可以看到各种各样的实际电路。能量传输、转换的典型实例是电力系统。发电机将其他形式的能源转换为电能,再通过变压器和输电线路将电能输送给工厂、农村和千家万户的用电设备,这些用电设备再将电能转换为机械能、热能、光能或其他形式的能量。具有这种功能的电路一般被称为电力电路。通信系统则是建立在信息的发送者和接收者之间用来完成信息的处理和传递的实际电路,这样的电路一般被称为电子电路。

从电气器件在电路中所起的作用来讲,电路一般由三部分构成,如图 1.1.1(a)所示。第一部分是电源电路,它是产生电能和电信号的装置,作用是给后续电路提供能量,如电池等。第二部分是负载电路,它的作用是将电能转换成其他形式的能量或者将电信号传输给其他的电路,如灯泡等。第三部分是传输和控制电路,它的作用是将电能传输给负载或对其进行相应的控制,如导线和控制电能通断的开关等。电气图如图 1.1.1(b)所示。

在实际电路分析中,为了简化电路的计算,把实际电路器件用抽象的、能够准确反映实际电气器件主要电磁特性的理想电路元件来表征。如电阻元件用来表征电阻器、灯泡等实际器件消

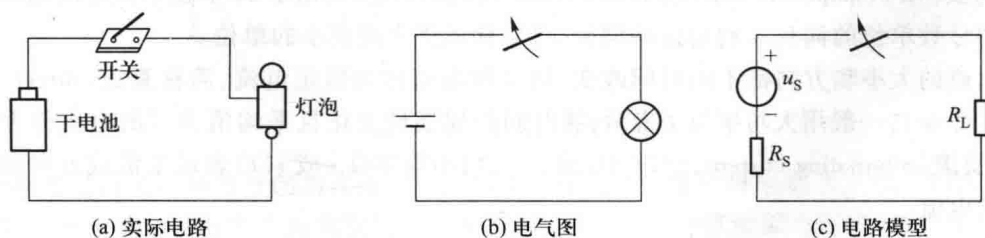


图 1.1.1 电路的组成和电路模型

耗电能的主要电磁特性;电源元件用来表征电池、发电机等实际器件或设备提供电能的主要电磁特性;电感元件用来表征存储磁场能量的电感线圈的主要电磁特性;电容元件用来表征存储电场能量的电容器的主要电磁特性。将这些理想电路元件通过理想导线按照实际电路的连接关系连接起来便构成电路模型,如图 1.1.1(c)所示。电路模型是对实际电路在一定程度上的近似反映,要求反映得越精确,建立的模型将越复杂。从另外一个角度看,一个电路模型也只是在一定条件下反映某一个实际电路,超出此范围,则需要更换不同的模型。

总之,电路理论研究的对象不是实际电路,而是电路模型。电路模型简称为电路。从给定的电路模型研究其行为就是电路分析;从要求的电路行为探讨如何构成一个符合要求的电路模型则是电路综合。

常见的电路元件是一些集中参数电路元件,其元件的特性可由端点上的电压和电流来确切描述,而元件上电压与电流的关系可由一些参数来表示。由集中参数元件构成的电路称为集中参数电路。但有一些元件必须考虑参数的分布特性,除了端子上的电压和电流外,还须考虑它们沿元件的分布规律,这样的元件称为分布参数元件,由分布参数元件构成的电路称为分布参数电路。例如远距离的输电线和电视天线的馈线等。

## 1.2 电路中的物理量

电路分析是在给定电路的结构和参数的情况下,确定电路的性能和行为。分析电路应有对电路的数学描述,这是由电路的一些物理量,如电流、电压、电荷、磁链、功率和能量等来表示的,这些物理量统称为电路变量或网络变量。本节简要介绍电流和电压的概念,着重介绍它们的参考方向。

### 1.2.1 电流

电场的作用使电荷运动或移动,大量电荷的有规则运动或移动即形成电流,用符号  $i$  来表示,即

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

规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。可见电流一词有两个不同的意义:一是指一种物理现象;另一个是指量化描述该现象的物理量。

电荷的 SI 单位为库[仑](coulomb,符号 C),时间的 SI 单位为秒(second,符号 s)时,电流的 SI 单位为安[培](ampere,符号 A), $1 \text{ A} = 1 \text{ C}/1 \text{ s}$ 。表 1.2.1 列出了 SI 单位中规定的用来构成十进倍数和分数单位的词头。利用这些词头,可以构成更大或更小的单位。

若电流的大小和方向都不随时间改变,则这种电流称为恒定电流,简称直流(direct current,记作 DC 或 dc),一般用大写字母  $I$  表示;随时间作周期性变化且平均值为零的电流称为交变电流,简称交流(alternating current,记作 AC 或 ac),用小写字母  $i$  或  $i(t)$  表示量值或方向随时间任意变化的电流。

表 1.2.1 SI 倍数与分数词头

倍率	词头名称词	词头符号	分率	词头名称词	词头符号
$10^{24}$	尧[它] yotta	Y	$10^{-1}$	分 deci	d
$10^{21}$	泽[它] zetta	Z	$10^{-2}$	厘 centi	c
$10^{18}$	艾[可萨] exa	E	$10^{-3}$	毫 milli	m
$10^{15}$	拍[它] peta	P	$10^{-6}$	微 micro	$\mu$
$10^{12}$	太[拉] tera	T	$10^{-9}$	纳[诺] nano	n
$10^9$	吉[咖] giga	G	$10^{-12}$	皮[可] pico	p
$10^6$	兆 mega	M	$10^{-15}$	飞[母托] femto	f
$10^3$	千 kilo	k	$10^{-18}$	阿[托] atto	a
$10^2$	百 hecto	h	$10^{-21}$	仄[普托] zepto	z
10	十 deka	da	$10^{-24}$	幺[科托] yocto	y

电流是一个有方向的物理量,在电路分析中,电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。例如在图 1.2.1 中电流可从 a 流向 b 或相反,分别用  $i_{ab}$  和  $i_{ba}$  表示。



图 1.2.1 一段电路中电流的方向

但对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中电流的实际方向是十分困难的,如交流电路中电流的实际方向经常在改变,即使在直流电路中,要指出复杂电路中某一电路元件电流的实际方向也不是一件容易的事。在进行电路分析时,为了列写电路方程,我们常常需要预先假设一个电流方向。这个预先假设的电流方向称作参考方向,电流的参考方向可以任意选定,但一经选定就不能再改变,在假设电流的参考方向之后,电流便是代数量。电流的实际方向不一定与电流的参考方向一致,可由计算结果和参考方向共同来判断。如图 1.2.2 所示。

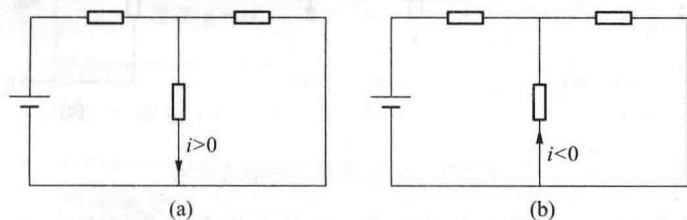


图 1.2.2 电流的参考方向

当所选定的电流参考方向与实际方向一致时,则经过计算后得电流为正值,如图 1.2.2(a) 所示;当电流所选定的参考方向与实际方向相反时,则电流的计算结果为负值,如图 1.2.2(b) 所示。电流的参考方向也可以用“ $\rightarrow$ ”表示。

### 1.2.2 电压

在物理学中我们已经知道,若将无穷远处定为参考点,将单位正电荷从某一点 a 移动到参考点,电场力所作的功的大小称为 a 点的电位。在电路理论中,电位的物理意义同物理学中所讲的电位是一样的,只不过参考点的选择是电路中的某点而不是无穷远,a 点的电位是将单位正电荷沿电路中所约束的路径从 a 点移动到参考点电场力所做的功,用  $\varphi_a$  表示。

电路中电场力将单位正电荷由 a 点移动到 b 点时,失去或得到的能量(或电场力所做的功)称为 a、b 两点间的电位差,也是 a、b 间的电压  $u_{ab}$ ,即

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

式中, $dW_{ab}$ 表示电场力将  $dq$  的正电荷从 a 点移动到 b 点所作的功,单位为焦[耳](Joule,符号 J);电压的单位为伏[特](Volt,符号 V),在工程应用中经常用千伏(kV)、毫伏(mV)等单位。

如果正电荷由 a 点转移到 b 点获得能量,则 a 点为低电位,b 点为高电位。如果正电荷由 a 点转移到 b 点失去能量,则 a 点为高电位,b 点为低电位。正电荷在电路中转移时电能的得失表现为电位的升高或降低,即电压升或电压降。电压的方向规定为从高电位指向低电位的方向。

如果电压的大小和方向都不随时间改变,则这种电压称为恒定电压,一般用大写字母  $U$  表示;随时间作周期性变化且平均值为零的电压称为交变电压。

像需要为电流指定参考方向一样,也需要为电压指定参考方向。电流的参考方向用箭头表示,电压的参考方向则在元件或电路的两端用“+”“-”符号来表示。“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端。如图 1.2.3 中,如果 a 点电位高于 b 点电位,即电压的实际方向是由 a 到 b,两者的方向一致,则  $u > 0$ ;如果实际电位是 b 点高于 a 点,两者的方向相反,则  $u < 0$ 。有时为了表示方便,可用一个箭头表示电压的参考方向,如图 1.2.3(b)所示;还可以用双下标表示,如图 1.2.3(c)所示, $u_{ab}$ 表示 a 点的电位高于 b 点的电位。

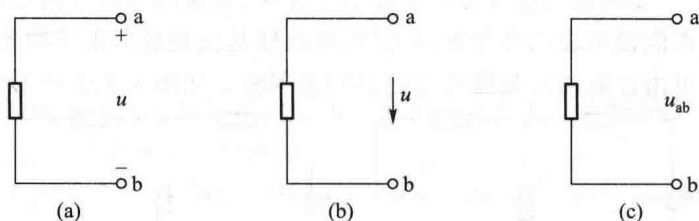


图 1.2.3 电压参考方向的表示法

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。若指定流过元件的电流参考方向是从电压参考方向的正极性端流入,负极性端流出,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 1.2.4(a)所示;当电流的参考方向是从电压参考方向的负极性端流入,正极性端流出,即两者的参考方向不一致,称为非关联参考方向,如图 1.2.4(b)所示。



图 1.2.4 关联和非关联参考方向示意图

### 1.2.3 功率与能量

在电力系统及电力设备中,所需要的不仅是电流本身,而且是伴随电压、电流的电能。功率(power)是度量电路中电能转换速率的物理量,其量值定义为单位时间内所消耗的能量,即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1.2.3)$$

如图 1.2.4(a)所示,由于  $u, i$  为关联参考方向,根据  $dq = idt$  及式(1.2.2)得

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.4)$$

功率的单位为瓦[特](Watt,符号 W)。

如图 1.2.4(b)所示,由于  $u, i$  为非关联参考方向,元件“吸收”的功率为

$$p = -ui \quad (1.2.5)$$

则式(1.2.5)实际代表该电路在“发出”功率。一段电路(或元件)实际是吸收功率还是发出功率,要根据该电路(或元件)上电压、电流的参考方向和计算结果的正负共同来决定,如表 1.2.2 所示。

表 1.2.2 功率与参考方向的关系

关联/非关联	$p$	计算结果	实际功率
关联参考方向	吸收 $p = ui$	$>0$	吸收
		$<0$	发出
	发出 $p = -ui$	$>0$	发出
		$<0$	吸收
非关联参考方向	发出 $p = ui$	$>0$	发出
		$<0$	吸收
	吸收 $p = -ui$	$>0$	吸收
		$<0$	发出

例如,在图 1.2.4(a)所示电路中,如果令  $u = -2\text{ V}, i = 1\text{ A}$ ,由于  $u, i$  为关联参考方向,则吸收的功率  $p = -2\text{ V} \times 1\text{ A} = -2\text{ W} < 0$ ,表明该元件实际上发出了  $2\text{ W}$  的功率;如选择图 1.2.4(b)所示的电路,如果令  $u = 2\text{ V}, i = 1\text{ A}$ ,由于  $u, i$  为非关联参考方向,则发出的功率  $p = 2\text{ V} \times 1\text{ A} = 2\text{ W} > 0$ ,表明该元件的确发出了  $2\text{ W}$  的功率。

功率等于能量的转化速率,根据式(1.2.4)可得在  $t_0$  到  $t$  时间内,电路吸收(电压电流为关联参考方向时)或发出(电压电流为非关联参考方向时)的能量为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.2.6)$$

与判断功率的吸收和发出一样,要同时依据式(1.2.6)的计算结果和电流电压的参考方向来判断一段电路实际上是发出电能还是吸收电能。

## 1.3 基尔霍夫定律

电压、电流是表征一个电路工作状态的基本物理量,电路中的电压、电流受到两种约束:一种约束来自于电路的互联方式,称为结构约束,体现这种约束的是1847年德国物理学家基尔霍夫[Gustav Robert Kirchhoff(1824—1887)]建立的两个基尔霍夫定律;另一种约束来自于组成电路的元件,称为元件约束,体现这种约束的是各种不同的元件本身的电磁特性。本节先来介绍基尔霍夫电流定律,在介绍这个定律之前,我们先来介绍电路结构中的一些基本术语。

### 1.3.1 基本术语

电路元件是构成电路的基本单元,它们互联而成电路。元件互联方式不同,电路的结构也不同,电路结构用支路、节点、路径、回路、网孔等术语来描述。下面以图1.3.1为例来说明。

**支路(branch):** 电路中一个二端元件称为一条支路,为了方便,也可以把若干个二端元件的串联,构成电路的一个分支,且流过该分支的电流相同,称该分支为一条支路。

**节点(node):** 若干支路的连接点称为节点,其中两条支路的连接点称为简单节点。图1.3.1中,1、2、3、4、5、6、7分别是单个二端元件,8、9可以看成是两条支路,也可以看成是一条支路,因为流过的电流相同。如果8、9看成是两条支路,则⑥节点便是一个简单节点,如果8、9看成是一条支路,则没有节点⑥。而①、③、④、⑤是由三条支路连接成的节点,②是由四条支路连接成的节点。因此,图1.3.1中共有9条支路,6个节点;或者看作8条支路,5个节点。

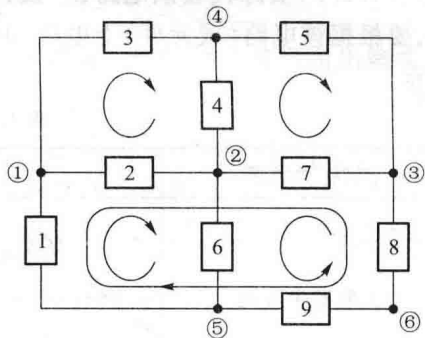


图 1.3.1 电路结构示例

**路径(path):** 在任意两个节点之间,由不同的支路和不同的节点(不含两个端点)依次连接成的一条通路称为这两个节点之间的路径。路径可以用支路集合或节点集合来表示。例如图1.3.1中,支路集合{3,5}或节点集合{①,④,③}都表示始端节点①与终端节点③之间的路径。两个节点之间通常存在多条路径,例如支路集合{1,9,8}或节点集合{①,⑤,⑥,③}也是节点①与节点③之间的路径。

**回路(loop):** 由支路组成的闭合路径称为回路。例如图1.3.1中,支路集合{1,2,6}、{6,7,8,9}、{2,3,5,7}、{1,2,7,8,9}都是回路。回路有顺时针和逆时针两个方向,用集合中元素的顺序或箭头表示回路的方向。

**网孔(mesh):** 不包含任何支路的回路(即内部或外部不包含任何支路)称为网孔。例如图1.3.1中,支路集合{1,2,6}、{6,7,8,9}、{3,4,2}、{4,5,7}分别表示4个网孔,而{1,2,7,8,9}不属于网孔,因其内部包含了支路6。

**短路 (short circuit):** 一条支路, 如果不管其电流是任何有限值, 电压恒等于零, 则称为短路。

**断路 (open circuit):** 如果不管其电压是任何有限值, 电流恒等于零, 则称为开路或断路。

### 1.3.2 基尔霍夫电流定律

**基尔霍夫电流定律 (简称 KCL)** 是描述电路中各支路电流间相互关系的定律, 是电路结构对支路电流的约束, 它有两种表述形式, 第一种表述为: 在集中参数电路中, 任一时刻流出 (或流入) 任一节点的支路电流代数和等于零, 即

$$\sum i_k = 0 \quad (i_k \text{ 表示第 } k \text{ 条支路电流}) \quad (1.3.1)$$

通常规定当式 (1.3.1) 中  $i_k$  参考方向为流出节点时,  $i_k$  的前面取 “+” 号, 流入节点时,  $i_k$  前面取 “-” 号。

上式的正确性可由电流的连续性来说明, 根据电荷守恒原理, 在集中参数电路中, 电路元件以外的任何部分都不可能聚集电荷, 哪怕是在极短时间内的暂时聚集也是不可能的。因此说 KCL 揭示了在每一节点上电荷的守恒性。

式 (1.3.1) 称为节点的 KCL 方程, 它是与任意一个节点相连的所有支路电流必须满足的约束。下面以图 1.3.2 为例, 分别列写各节点的 KCL 方程, 结果如下。

$$\text{节点 ①:} \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (1.3.2)$$

$$\text{节点 ②:} \quad -i_2 - i_4 - i_6 + i_7 = 0 \quad (1.3.3)$$

$$\text{节点 ③:} \quad -i_5 - i_7 + i_8 = 0 \quad (1.3.4)$$

$$\text{节点 ④:} \quad -i_3 + i_4 + i_5 = 0 \quad (1.3.5)$$

$$\text{节点 ⑤:} \quad -i_1 + i_6 - i_9 = 0 \quad (1.3.6)$$

$$\text{节点 ⑥:} \quad -i_8 + i_9 = 0 \quad (1.3.7)$$

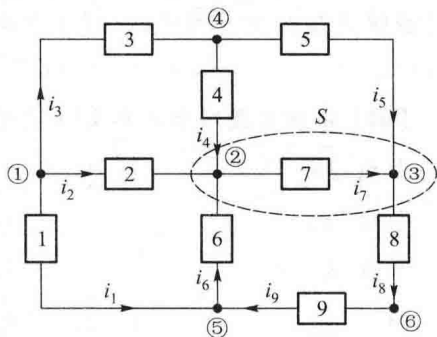


图 1.3.2 基尔霍夫电流定律示例

KCL 另一种表述为: 在集中参数电路中, 任一时刻流出 (或流入) 任一闭合边界  $S$  的支路电流代数和等于零, 即

$$\sum i_k = 0 \quad (1.3.8)$$

式 (1.3.8) 称为广义基尔霍夫电流定律。

为验证广义基尔霍夫电流定律, 将图 1.3.2 节点 ② 和节点 ③ 的 KCL 方程相加得

$$-i_2 - i_4 - i_5 - i_6 + i_8 = 0$$

上式左边就是流入闭合边界  $S$  的全部支路电流代数和。

如将流出节点的电流保留在等号一侧, 将流入节点的电流移至等号另一侧, 例如式 (1.3.3) 可以写成

$$i_7 = i_2 + i_4 + i_6$$

这表明: 任一时刻, 流出任一节点 (或闭合边界) 电流的代数和等于流入该节点电流的代数和, 即

$$\sum i_{\text{流出}} = \sum i_{\text{流入}} \quad (1.3.9)$$

在一个电路中, 每个节点和每个闭合边界均可列出 KCL 方程, 但所有这些方程并不都是相



互独立的。例如,在图 1.3.2 电路的 KCL 方程中,将式(1.3.2)至式(1.3.6)相加后的负值即得式(1.3.7)。不难验证:图中任一节点的 KCL 方程都是其余 5 个节点 KCL 方程的代数和,任一闭合边界的 KCL 方程都是闭合边界内节点 KCL 方程的代数和。但是,如果略去任一节点的 KCL 方程,则其余 5 个节点的 KCL 方程便是一组独立方程。推广到一般情况就是:在含有  $n$  个节点的电路中,任意  $(n-1)$  个节点的 KCL 方程是一组独立方程,这些节点称为独立节点。至于选择哪  $(n-1)$  个节点作为独立节点则是任意的。

**【例 1.3.1】** 电路如图 1.3.3 所示。根据已知支路电流求出其他支路电流。

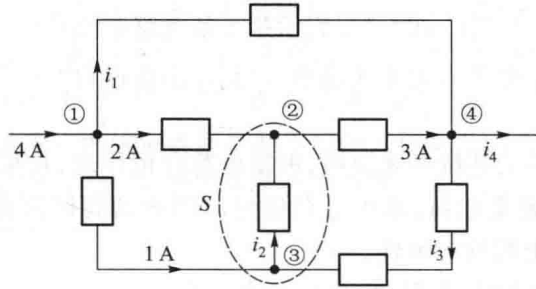


图 1.3.3 例 1.3.1

**【解】** 依次对图中节点列 KCL 方程得

$$\text{节点 ①:} \quad i_1 = 4 \text{ A} - 1 \text{ A} - 2 \text{ A} = 1 \text{ A}$$

$$\text{节点 ②:} \quad i_2 = 3 \text{ A} - 2 \text{ A} = 1 \text{ A}$$

$$\text{节点 ③:} \quad i_3 = 1 \text{ A} - 1 \text{ A} = 0 \text{ A}$$

$$\text{节点 ④:} \quad i_4 = 1 \text{ A} + 3 \text{ A} = 4 \text{ A}$$

若此题只求电流  $i_3$ ,对闭合边界  $S$  列写 KCL 方程,一步便得

$$i_3 = 3 \text{ A} - 2 \text{ A} - 1 \text{ A} = 0 \text{ A}$$

如果只求电流  $i_4$ ,请读者自行寻找简便方法。

### 1.3.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(简称 KVL)描述的是电路结构对支路电压(或节点间电压)的约束关系,它有两种表述形式,第一种表述为:在集中参数电路中,任一时刻沿任一回路各元件上的电压的代数和等于零,即

$$\sum u_k = 0 \quad (u_k \text{ 表示第 } k \text{ 个元件上的电压}) \quad (1.3.10)$$

通常规定当式(1.3.10)中  $u_k$  的参考方向与回路方向相同时, $u_k$  前面取“+”号;否则,取“-”号。

式(1.3.10)称为回路的 KVL 方程,它是任一回路所包含的支路电压必须满足的约束。下面以图 1.3.4 电路为例,说明基尔霍夫电压定律方程的列写:

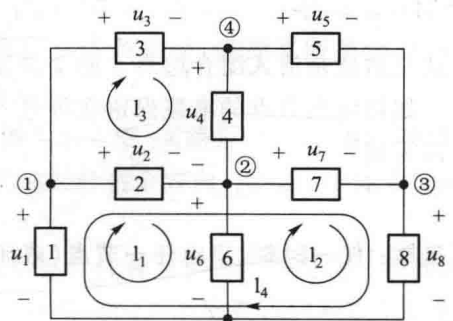


图 1.3.4 基尔霍夫电压定律示例