

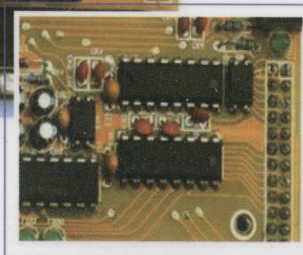
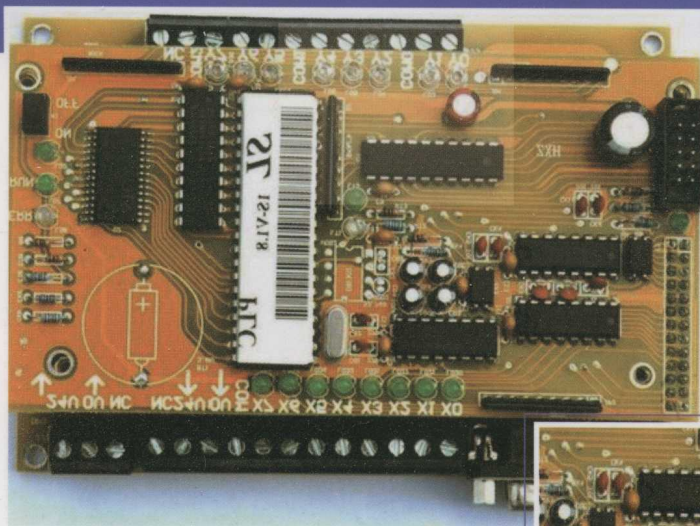


高等学校应用型特色规划教材



电路原理

蒋学华 主编
陈佩江 左玉虎 副主编



免费赠送电子课件

在内容选材上立足于“加强基础、优化内容、突出重点、精选例题”，在论述风格上力求简洁明了、通俗易懂。

- 在重要或难懂之处，皆辅之以适当的例题，其中有些例题还采用了一题多解的方法，以求读者更好地掌握分析电路的基本思路。



清华大学出版社

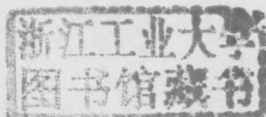
内容简介

高等学校应用型特色规划教材

电路原理

蒋学华 主 编

陈佩江 左玉虎 副主编



浙江工业大学图书馆



72015263

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以现代电工技术的基本知识、基本理论为主线,以培养应用能力为目的,较为系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和分析方法。全书共 12 章,各章的主要内容包括电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电路分析的基本方法、电路的基本定理、电容与电感、动态电路的时域分析、正弦稳态交流电路、三相电路、耦合电感电路、动态电路的复频域分析、双口网络、非线性电阻电路等。

本书适于作为普通高等院校电气、电子、自动化、通信、计算机、自控等相关专业的教科书,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可供科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/蒋学华主编. —北京:清华大学出版社,2014.1

(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-33019-6

I. ①电… II. ①蒋… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 145978 号

责任编辑:李春明

装帧设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23.25

字 数:561 千字

版 次:2014 年 1 月第 1 版

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:46.00 元

产品编号:039261-01

前 言

“电路原理”是普通高等院校电类及相关专业的一门重要的专业基础课程，可为后续专业课程和科研实践提供必要的预备知识。电路理论本身具有较强的逻辑性、系统性、理论性和灵活性，因而有利于培养学生严谨的逻辑思维能力和灵活的问题分析能力，从而进一步培养学生的创新能力。通过本课程的学习，学生应能掌握电路的基本原理、分析与计算电路的基本方法。对直流电路、正弦交流电路、过渡过程动态电路都能进行稳态和暂态分析。

本书内容符合教育部颁发的《电路课程教学基本要求》，全书以现代电工技术的基本知识、基本理论为主线，以培养应用能力为目的，较为系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和分析方法。主要内容有电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电路分析的基本方法、电路的基本定理、电容与电感、动态电路的时域分析、正弦稳态交流电路、三相电路、耦合电感电路、动态电路的复频域分析、双口网络及非线性电阻电路。

本书内容的深度和广度符合现阶段我国普通高校电气、电子、自动化、通信、计算机、自控等专业的电路教学要求。在内容选材上，本书立足于“加强基础、优化内容、突出重点、精选例题”，在论述风格上力求简洁明了、通俗易懂。书中对一些重要内容的处理方法，在参考大量相关教材和资料的基础上，经过分析比较和精心优化后确定下来的，其目的在于追求推理上的简明易懂和论述上的规范统一。在重要或难懂之处，本书皆辅之以适当的例题，其中有些例题还采用了一题多解的方法。书中对一些重要的电路分析方法特别总结出了一般的解题步骤，以求读者更好地掌握分析电路的基本思路。书中每章教学目标，对内容做了简要介绍并提出学习要求；每章小结对内容做了概括总结，以求读者更系统全面地掌握相关的基本理论和分析方法。每章都配有适当的习题，以利于读者练习和自学，并通过解题领悟“在分析、求解电路问题的过程中，学会有关电路原理、求解方法”的真谛。

本书第1~6章、第11章、第12章由蒋学华编写，第7章、第8章由左玉虎编写，第9章、第10章由陈佩江编写，全书由蒋学华统稿。

本书既可作为普通高等院校电气、电子、自动化、通信、计算机、自控等相关专业的教科书，也可作为成人教育和继续教育的教材，还可供科技人员参考。

本书在编写过程中，课程组老师和部分学生提出了很好的意见和建议，同时本书的编写还参考了一些教材和文献，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路及电路模型	1
1.1.1 电路的组成	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路分析的基本物理量	3
1.2.1 电流及其参考方向	3
1.2.2 电压及其参考方向	4
1.2.3 电功率	6
1.3 基尔霍夫定律	8
1.3.1 相关概念	8
1.3.2 基尔霍夫电流定律	9
1.3.3 基尔霍夫电压定律	10
1.4 理想电路元件	12
1.4.1 理想电阻元件	13
1.4.2 理想电压源	15
1.4.3 理想电流源	16
1.5 受控源	17
1.5.1 受控源的定义	17
1.5.2 受控源的分类	17
本章小结	20
习题 1	21
第 2 章 电阻电路的等效变换	29
2.1 二端电路等效的概念	29
2.1.1 二端电路	29
2.1.2 电路等效的概念	29
2.2 电阻串、并联电路的等效变换	30
2.2.1 串联电阻电路的等效变换	30
2.2.2 并联电阻电路的等效变换	31
2.2.3 混联电阻电路的等效变换	33
2.3 电阻三角形连接与星形连接的等效变换	34
2.3.1 电阻的两种连接方式	35
2.3.2 三角形连接电路变换为星形连接电路	35
2.3.3 星形连接电路变换为三角形连接电路	36
2.4 含独立电源电路的等效变换	37
2.4.1 电压源的串、并联及等效电路	37
2.4.2 电流源的并、串联及等效电路	39
2.4.3 两种实际电源模型的等效变换	41
2.5 含受控源电路的等效变换	43
本章小结	45
习题 2	46
第 3 章 电路分析的基本方法	55
3.1 网络拓扑的基本知识	55
3.1.1 图的概念	55
3.1.2 树的概念	56
3.1.3 回路与基本回路	57
3.1.4 割集与基本割集	58
3.2 支路电流法	58
3.2.1 KCL 和 KVL 的独立方程数	59
3.2.2 支路电流法方程	60
3.2.3 支路电流法举例	61
3.3 网孔电流法	63
3.3.1 网孔电流	63
3.3.2 网孔电流法方程	64
3.3.3 网孔电流法举例	65
3.4 节点电压法	68
3.4.1 节点电压	68



3.4.2 节点电压法方程.....	69	5.2.2 电感元件的伏安关系	140
3.4.3 节点电压法举例.....	70	5.2.3 电感的功率和储能	142
3.5 回路分析法和割集分析法.....	73	5.3 电容与电感的对偶关系.....	144
3.5.1 回路分析法.....	73	本章小结.....	145
3.5.2 割集分析法.....	76	习题 5.....	146
3.6 含有运算放大器的电路分析.....	79	第 6 章 动态电路的时域分析	153
3.6.1 运算放大器模型.....	80	6.1 换路定律和电路初始值的计算.....	153
3.6.2 含理想运放的电路分析.....	82	6.1.1 换路	153
本章小结.....	84	6.1.2 换路定律	154
习题 3.....	85	6.1.3 初始值及其计算	155
第 4 章 电路的基本定理	94	6.2 一阶电路的零输入响应.....	157
4.1 叠加定理和齐次定理.....	94	6.2.1 RC 电路的零输入响应	157
4.1.1 叠加定理.....	94	6.2.2 RL 电路的零输入响应	160
4.1.2 齐次定理.....	98	6.3 一阶电路的零状态响应.....	162
4.2 替代定理.....	100	6.3.1 RC 电路的零状态响应	162
4.3 戴维南定理和诺顿定理.....	103	6.3.2 RL 电路的零状态响应	165
4.3.1 戴维南定理.....	103	6.4 一阶电路的全响应及其分解.....	166
4.3.2 诺顿定理.....	108	6.4.1 全响应	166
4.4 最大功率传输定理.....	110	6.4.2 全响应的两种分解	168
4.5 特勒根定理.....	114	6.5 一阶电路的三要素法.....	169
4.5.1 特勒根定理一.....	115	6.6 一阶电路的阶跃响应.....	173
4.5.2 特勒根定理二.....	115	6.6.1 阶跃函数	173
4.6 互易定理.....	116	6.6.2 阶跃响应	174
4.6.1 互易定理一.....	117	6.7 一阶电路的冲激响应.....	175
4.6.2 互易定理二.....	118	6.7.1 冲激函数	175
4.6.3 互易定理三.....	119	6.7.2 冲激响应	176
本章小结.....	121	6.8 一阶 RC 微分电路和积分电路	179
习题 4.....	122	6.8.1 微分电路	179
第 5 章 电容与电感.....	130	6.8.2 积分电路	180
5.1 电容元件.....	130	6.9 二阶电路的动态过程.....	181
5.1.1 电容元件的基本性质.....	130	6.9.1 RLC 串联电路微分方程	
5.1.2 电容元件的伏安关系.....	132	的建立	181
5.1.3 电容的功率和储能.....	136	6.9.2 二阶 RLC 串联电路的零输入	
5.2 电感元件.....	138	响应	182
5.2.1 电感元件的基本性质.....	139	6.9.3 二阶 RLC 串联电路的零状态	
		响应	186

习题 6.....	191
第 7 章 正弦稳态交流电路.....	199
7.1 正弦量的基本概念.....	199
7.1.1 正弦量的三要素.....	199
7.1.2 正弦电流、电压的有效值.....	200
7.1.3 同频率正弦电流、电压的 相位差.....	201
7.2 正弦量的相量分析法.....	202
7.2.1 复数及其运算.....	203
7.2.2 正弦量的相量表示法.....	204
7.2.3 相量图.....	205
7.3 电阻、电感、电容的相量关系.....	206
7.3.1 电阻元件.....	206
7.3.2 电感元件.....	208
7.3.3 电容元件.....	211
7.4 阻抗与导纳的串、并联.....	213
7.4.1 二端网络阻抗和导纳的 定义.....	214
7.4.2 阻抗与导纳的串联和并联.....	216
7.5 正弦稳态电路的相量分析.....	217
7.5.1 电路定律的相量形式.....	218
7.5.2 电路的相量模型.....	219
7.5.3 电路的相量分析.....	220
7.6 谐振电路.....	227
7.6.1 正弦交流电路的频率特性.....	227
7.6.2 串联谐振电路.....	227
7.6.3 并联谐振电路.....	233
7.7 正弦稳态电路的功率.....	237
7.7.1 瞬时功率和平均功率.....	237
7.7.2 视在功率和无功功率.....	238
7.7.3 复功率.....	239
7.7.4 功率因数及其提高.....	240
7.8 正弦稳态电路的最大功率传输 定理.....	242
本章小结.....	244
习题 7.....	248

第 8 章 三相电路.....	254
8.1 三相电源.....	254
8.1.1 三相电源的产生.....	254
8.1.2 三相电源的连接.....	255
8.2 负载星形连接的三相电路分析.....	258
8.2.1 三相四线制电路.....	258
8.2.2 三相三线制电路.....	261
8.3 负载三角形连接的三相电路分析.....	261
8.4 三相电路的功率及其测量.....	263
8.4.1 三相电路的功率.....	263
8.4.2 三相电路的功率测量.....	263
本章小结.....	265
习题 8.....	266
第 9 章 耦合电感电路.....	270
9.1 耦合电感.....	270
9.1.1 互感.....	270
9.1.2 同名端与耦合系数.....	272
9.2 耦合电感的串联和并联.....	274
9.2.1 耦合电感的串联.....	274
9.2.2 耦合电感的并联.....	277
9.3 耦合电感的去耦等效电路.....	278
9.4 空心变压器.....	281
9.4.1 原边等效电路.....	282
9.4.2 副边等效电路.....	283
9.5 理想变压器.....	284
9.5.1 理想变压器的电压和电流 变换.....	284
9.5.2 理想变压器的阻抗变换.....	286
本章小结.....	288
习题 9.....	289
第 10 章 动态电路的复频域分析.....	294
10.1 拉普拉斯变换.....	294
10.1.1 拉普拉斯变换.....	294
10.1.2 拉普拉斯变换的基本性质.....	295
10.1.3 拉普拉斯反变换.....	299

10.2 运算电路与运算方法.....	302	11.4.2 双口网络的连接	331
10.2.1 电路元件的运算模型.....	302	11.5 含双口网络的应用电路分析.....	333
10.2.2 电路定律的运算形式.....	305	11.5.1 负阻抗变换器	333
10.3 动态电路的拉普拉斯变换分析.....	306	11.5.2 回转器	334
本章小结.....	309	本章小结.....	336
习题 10.....	311	习题 11.....	338
第 11 章 双口网络.....	316	第 12 章 非线性电阻电路.....	343
11.1 双口网络概述.....	316	12.1 非线性电阻元件.....	343
11.1.1 单口网络.....	316	12.1.1 非线性电阻元件的伏安	
11.1.2 双口网络.....	316	特性	343
11.1.3 双口网络的特性表示.....	317	12.1.2 静态电阻与动态电阻	344
11.2 双口网络的 Z 参数与 Y 参数.....	317	12.2 非线性电阻电路的分析方法.....	345
11.2.1 双口网络的 Z 参数	317	12.2.1 图解法	346
11.2.2 双口网络的 Y 参数	321	12.2.2 小信号分析法	349
11.3 双口网络的 H 参数与 T 参数	324	12.2.3 折线近似法	353
11.3.1 双口网络的 H 参数.....	324	本章小结.....	355
11.3.2 双口网络的 T 参数.....	328	习题 12.....	356
11.4 双口网络的参数转换及连接.....	330	参考文献.....	361
11.4.1 双口网络参数间的相互			
转换.....	330		

第 1 章 电路的基本概念与定律

【教学目标】

电路分析的主要研究对象是电路。电路分析的基本物理变量是电流、电压、功率。电路中的理想元件有电阻、电压源、电流源和受控源等。基尔霍夫定律是分析电路的基本定律。通过本章的学习，了解电路模型；熟悉电路的基本物理量；理解电流和电压的参考方向；了解理想电路元件特性；掌握独立电源与受控电源的联系与差别；重点掌握基尔霍夫定律。

1.1 电路及电路模型

电路分为实际电路和电路模型，在电路分析中所讨论的电路主要是电路模型。

1.1.1 电路的组成

大家经常使用的手电筒的实际电路如图 1.1 所示。

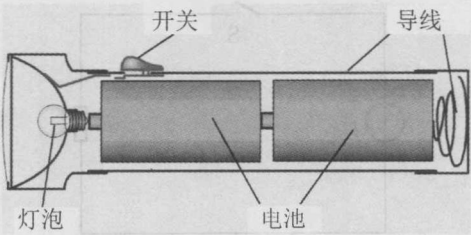


图 1.1 手电筒的实际电路

该电路的组成主要包括：提供电能的电池，简称电源(Electric Source)；将电能转换为光能和热能的小灯泡，称为负载(Load)；连接电源与负载的导线；控制电路的接通与断开的控制元件，即开关。

1. 电路

电路(Electric Circuit)是电气器件按一定方式连接构成的电流通路。有些实际电路是十分庞大和复杂的，可以延伸到数百公里以外，如电力系统及通信系统等；有些电路可以局限在几平方毫米以内，如集成电路芯片可能小到不大于指甲盖，但上面却有成千上万个晶体管相互连接成为一个复杂的电路系统；还有些电路则非常简单，如手电筒电路。

2. 电路的分类

实际电路种类繁多，但从作用和功能来说可概括地分为两大类。

(1) 进行能量的产生、传输、分配、转换的电路。例如，电力系统的发电机组将其他形式的能量转换成电能，经变压器、输电线传输到各用电部门，在那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能量而加以利用，完成能量转换的功能。

(2) 实现信号的传递与处理的电路。例如，电视机电路将接收到的电信号经过调谐、滤波、放大等环节的处理，使其成为人们所需要的图像和声音，完成电信号的处理、变换等功能。这种电路在自动控制、通信、计算机技术等方面应用广泛。

1.1.2 电路模型

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管运算放大器、传输线、电源、信号发生器、控制开关等电气器件和设备连接而成的电路，称为实际电路。图 1.1 就是一个简单的实际电路。实际电路在工作时所涉及的物理量很复杂，为了便于对电路进行分析研究，常将一个实际电气器件用理想元件来表示。理想电路元件就是在一定条件下忽略实际器件的次要性能，突出其主要性能，将实际器件抽象成有精确数学定义的假想元件。

例如，电灯、电炉等器件通常用电阻元件来表征；电池、发电机等提供电能的实际器件或设备可以用电源元件来表征。

用理想电路元件构成的电路称为电路模型(Circuit Model)。

图 1.2 所示为手电筒的电路模型，图中 U_s 是一个理想电压源，代替电池； R 是理想电阻元件，只消耗电能，代替灯泡； S 是开关元件；连接这 3 个元件的细实线是理想导线，起着传输电能的作用。

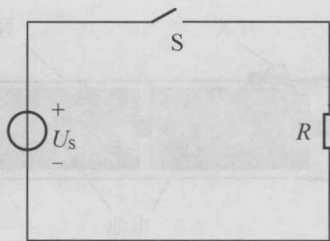


图 1.2 手电筒的电路模型

可见，用抽象的理想元件及其组合近似地替代实际器件，即可构成与实际电路相对应的电路模型。无论是简单的还是复杂的实际电路，都可以通过理想化的电路模型充分地进行描述。

需要指出的是：理想电路元件不完全等同于电路器件，而一个电路器件在不同条件下的电路模型也可能不同。例如，电炉主要是消耗电能转变为热能，一般用电阻元件表示；但若电路电源频率增大，则电路内的电阻丝产生的磁场能量就不能忽略，其模型就不能只用一个电阻元件表示，还需包含电感。在电路的电压、电流频率不太高的情况下，常假定一个元件中只存在一种能量转换关系，即只有电能消耗的元件为电阻，只有电场储能的元件为电容，只有磁场储能的元件为电感。只存在一种能量转换关系的元件称为集总参数元件，由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。

电路理论分析的对象为理想电路元件组成的电路模型，而非实际电路。

电路理论主要是研究电路的电磁现象，用电流、电压等物理量描述其中的物理过程。

电路理论是一门研究电路分析与电路设计的基础工程学科。电路分析的任务是根据已知的电路结构和元件参数,在一定的外加电源激励下,求解电路中的电压、电流,也称为电路的“响应”。电路设计是研究如何构造一个电路,使其满足给定的性能指标。学习电路分析是为电路设计打基础。

本书的主要内容是探讨电路的基本定律和定理,并讨论电路的各种计算分析方法,为学习电子信息技术、电气技术、自动化技术和计算机技术等打下必要的理论基础。

1.2 电路分析的基本物理量

电路分析的任务是对给定的电路确定其电性能,而电路的电性能通常可以通过一组物理量来描述,最常用的有电流、电压和电功率。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流的定义

带电粒子的定向运动形成电流,为了表征和描述电流的大小,把单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,简称电流(Electric Current),用符号 $i(t)$ 表示,即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,这种电流称为恒定电流,简称直流电流(Direct Current, DC),一般用英文大写字母 I 表示。随时间变化的电流简称交流电流(Alternating Current, AC),常用英文小写字母 i 表示。

国际单位制中,电流的单位为安[培](A),1安=1库/秒,即 $1\text{A}=1\text{C/s}$ 。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μA)作为电流单位。它们的关系是

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

2. 电流的参考方向

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。但是对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中电流的真实方向是十分困难的,如交流电路中电流的真实方向经常改变,即使在直流电路中,要指出复杂电路中流经某一电路元件的电流的真实方向也不是一件很容易的事。在进行电路分析时,为了列写电路方程的需要,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为参考方向(Reference Direction),参考方向是在电路图中用箭头任意标定的电流方向,如图 1.3 所示。

电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变。经过计算,若求得 $i > 0$,表示电流的实际方向和参考方向一致;若 $i < 0$,则表示电流的实际方向和参考方向相反。

如图 1.3(a)所示,当 $I = 5\text{A}$ 时,表示电流实际方向和参考方向都是从 a 流向 b;如图 1.3(b)所示,当 $I = -5\text{A}$ 时,表示电流的实际方向是从 b 流向 a。

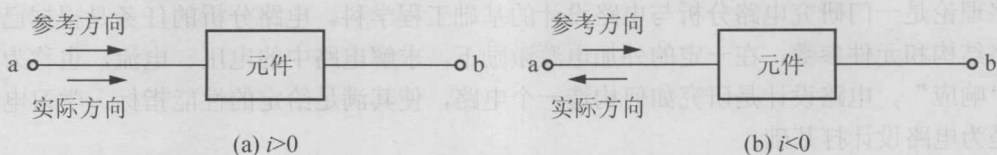


图 1.3 电流的参考方向

在进行电路分析时，必须先标出电流的参考方向，才能正确进行方程的列写和求解，题目中给出的电流方向均是参考方向。只有规定了参考方向，电流的正负才有意义。

1.2.2 电压及其参考方向

1. 电压的定义

电路中电场力将单位正电荷由 a 点移到 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，即 a、b 间的电压(Voltage)，即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

不随时间变化的电压称为直流电压，用英文大写字母 U 表示。随时间变化的电压称为交流电压，用英文小写字母 u 表示。

电压 u 的单位是伏[特](V)。常用电压单位还有毫伏(mV)、微伏(μ V)。它们的关系是

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

2. 电压的参考方向

如同电流标定参考方向一样，在进行电路分析时首先需对电压标定参考方向，如图 1.4 所示，电压的参考极性是在元件或电路的两端用“+”“-”符号来表示。“+”号表示高电位，“-”号表示低电位。

电压的参考方向可以任意选定，但一经选定，就不再改变。经过计算，若求得 $u > 0$ ，表示电压的实际方向和参考方向一致；若 $u < 0$ ，则表示电压的实际方向和参考方向相反。另外，还可以用双下标表示，如 u_{ab} 表示 a、b 两点间电压的参考方向是从 a 指向 b 的。

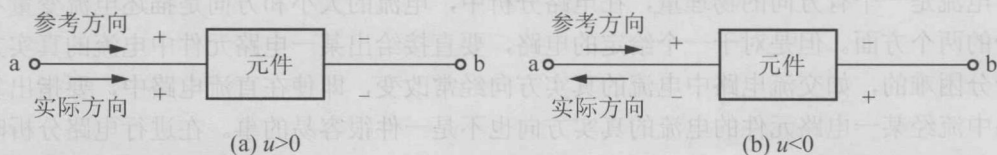


图 1.4 电压的参考方向

3. 关联参考方向

在以后的电路分析中，完全不必先考虑各电流、电压的实际方向究竟如何，而应首先在电路中标定它们的参考方向，然后按参考方向进行计算，由计算结果的正负值与标定的参考方向确定它们的实际方向，图中不需标出实际方向。参考方向可以任意选定，在图中

相应位置标注(包括方向和符号),但一经选定,在分析电路的过程中就不再改变。

为了分析电路方便,常将电压和电流的参考方向选得一致,称其为关联参考方向。

如果指定流过元件电流的参考方向是从标以电压“+”极的一端流向“-”极的一端,即两者的参考方向一致,称电压、电流的这种参考方向为关联参考方向;否则称为非关联参考方向。图 1.5(a)所示为关联参考方向,图 1.5(b)所示为非关联参考方向。

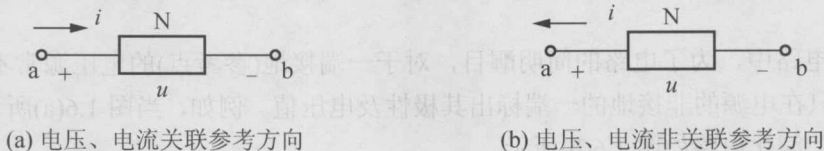


图 1.5 电压和电流的关联参考方向与非关联参考方向

4. 电位

为了分析的方便,常在电路中选某一点为参考点,把任一点到参考点的电压称为该点的电位(Potential),参考点的电位一般选为零,所以,参考点也称为零电位点。

电位用 v 或 V 表示,单位与电压相同,也是 V(伏)。

【例 1.1】在图 1.6 中,选 c 点为参考点时,已知 $V_a=30\text{V}$, $V_b=5\text{V}$, $V_d=-10\text{V}$ 。

求: (1) U_{ab} 、 U_{ad} 、 U_{bc} ; (2) 选择 b 点为参考点时,求其他三点的电位值。

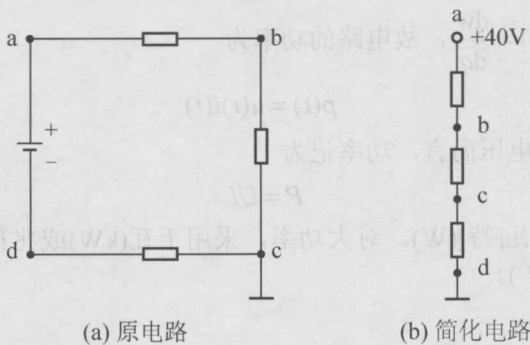


图 1.6 例 1.1 的电路

解: (1) 图 1.6(a)所示电路中 a、b 点间的电压 U_{ab} 是 a 点与 b 点电位之差,电压就是电位差,所以

$$U_{ab} = V_a - V_b = 30\text{V} - 5\text{V} = 25\text{V}$$

$$U_{ad} = V_a - V_d = 30\text{V} - (-10\text{V}) = 40\text{V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = 5\text{V} - 0\text{V} = 5\text{V}$$

(2) 若选 b 点为参考点,两点间的电压不变,根据电位的定义,现在 $V_b=0$ 。

由 $U_{ab} = V_a - V_b = 25\text{V}$ 可得

$$V_a = U_{ab} + V_b = 25\text{V} + 0 = 25\text{V}$$

由 $U_{ad} = V_a - V_d = 40\text{V}$ 可得



$$V_d = V_a - U_{ad} = 25\text{V} - 40\text{V} = -15\text{V}$$

由 $U_{bc} = V_b - V_c = 5\text{V}$ ，可得

$$V_c = V_b - U_{bc} = 0 - 5\text{V} = -5\text{V}$$

结论：电路中电位参考点可任意选择。当选择不同的电位参考点时，电路中各点电位均不同，电位具有相对性，但任意两点间电压保持不变，电压与参考点的选择无关，具有唯一性。

在电子电路中，为了电路的简明醒目，对于一端接地(参考点)的电压源常不画出电源的符号，而只在电源的非接地的一端标出其极性及电压值。例如，当图 1.6(a)所示电路选 d 为参考点时，简化电路如图 1.6(b)所示。

1.2.3 电功率

1. 电功率的定义

电路的基本功能之一是实现能量传输，为了描述和表征电荷和元件交换能量的快慢(速率)，引入电功率这个物理量。

电场力在单位时间所做的功称为电功率，简称功率(Power)，即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-3)$$

由于 $i(t) = \frac{dq}{dt}$ ， $u(t) = \frac{dw}{dq}$ ，故电路的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

对直流电流和直流电压而言，功率记为

$$P = UI \quad (1-5)$$

功率的国际单位是瓦[特](W)。对大功率，采用千瓦(kW)或兆瓦(MW)；对小功率，采用毫瓦(mW)或微瓦(μW)。

2. 电功率的计算

如图 1.5(a)所示电路 N 的 u 和 i 取关联参考方向，故电路消耗的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-6)$$

对于图 1.5(b)所示电路 N，由于 u 和 i 取非关联参考方向，则 N 消耗的功率为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-7)$$

利用式(1-6)和式(1-7)计算电路 N 消耗的功率时，若 $p > 0$ ，则表示电路 N 确实消耗(吸收)功率；若 $p < 0$ ，则表示电路 N 吸收的功率为负值，实质上它将产生(提供或发出)功率。

【例 1.2】已知图 1.5(b)中， $i = -4\text{A}$ ， $u = -6\text{V}$ ，求其电功率。

解：因为图 1.5(b)中电压和电流为非关联参考方向，利用公式(1-7)，有

$$p(t) = -ui$$

$$= -(-6) \times (-4) = -24\text{W}$$

计算出功率 $p < 0$ ，表示电路为外部提供电功率。

注意：计算功率时必须注意电压 u 和 i 的关联参考方向，还需注意公式中各数值的正负号的含义。

【例 1.3】 电路如图 1.7(a) 所示，方框代表电源或电阻，各电压、电流的参考方向均已设定。已知 $I_1 = -2\text{A}$ 、 $I_2 = 1\text{A}$ 、 $I_3 = 3\text{A}$ ， $U_1 = 20\text{V}$ 、 $U_2 = -14\text{V}$ 、 $U_3 = 12\text{V}$ 、 $U_4 = -8\text{V}$ 、 $U_5 = -2\text{V}$ 。(1) 试标出各电压、电流的实际方向；(2) 求各元件消耗或向外提供的电功率，并验证是否满足功率守恒。

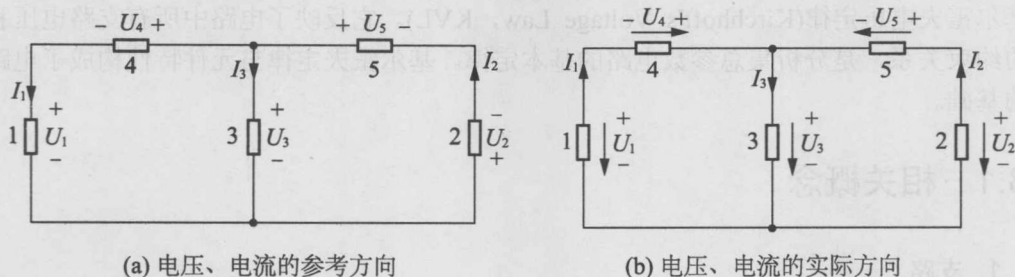


图 1.7 例 1.3 的电路

解：(1) 因为 I_2 、 I_3 、 U_1 、 U_3 为正值，所以其实际方向和参考方向一致，而 I_1 、 U_2 、 U_4 、 U_5 为负值，表明其实际方向与参考方向相反。图 1.7(b) 中标出各电压、电流的实际方向，电压也可以用箭头表示极性由“+”指向“-”。

(2) 利用图 1.7(a) 计算各功率为

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

$$P_2 = U_2 I_2 = -14 \times 1 \text{W} = -14 \text{W} \text{ (发出)}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 12 \times 3 \text{W} = 36 \text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_4 = U_4 I_1 = (-8) \times (-2) \text{W} = 16 \text{W} \text{ (吸收)}$$

由图 1.7(a) 知，元件 5 的电压与电流参考方向非关联，元件 5 的功率为

$$P_5 = -U_5 I_2 = -(-2) \times 1 \text{W} = 2 \text{W} \text{ (吸收)}$$

求功率的和有

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 0$$

也可以求得发出功率之和等于吸收功率之和。

在电路中，所有元件的功率的代数和为零，也就是在任何时刻发出的功率总是等于吸收的功率，称为功率守恒。

3. 电能

在从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收(或发出)的电能用 W 表示为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-8)$$

电能的单位为焦[耳](J)。1J 表示功率为 1W 的用电设备在 1s 时间内所消耗的电能。实用中常把千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)(俗称度)当做电能单位，有

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

1.3 基尔霍夫定律

电路是由元件互连而成的。电路中各元件的电压、电流受到两类约束：一类是元件本身的伏安关系约束，如电阻元件的欧姆定律；另一类是电路结构的约束，基尔霍夫定律就是描述电路结构约束的基本定律，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)。它反映了电路中所有支路电压和电流的约束关系，是分析集总参数电路的基本定律。基尔霍夫定律与元件特性构成了电路分析的基础。

1.3.1 相关概念

1. 支路

一个二端元件称为一条支路(Branch)。通常用 b 表示支路数。为了减少支路个数，往往将流过同一电流的几个元件的串联组合作为一条支路，如图 1.8 所示的电路中有 3 个支路， $a-c-b$ 为一条支路，同理， $a-d-b$ 、 $a-e-b$ 为另两条支路。流过支路的电流称为支路电流。

2. 节点

3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点(Node)。通常用 n 表示节点数。如图 1.8 所示的电路中，有 a 、 b 两个节点。

3. 回路

由支路组成的闭合路径称为回路(Loop)。通常用 l 表示回路数。如图 1.8 所示的电路中有 3 个回路，分别是 $a-c-b-d-a$ 、 $a-d-b-e-a$ 和 $a-c-b-e-a$ 。

4. 网孔

对平面电路，其内部不含任何支路的回路称为网孔(Mesh)。网孔是回路，但回路不一定是网孔。如图 1.8 所示电路中有两个网孔，即 $a-c-b-d-a$ 和 $a-d-b-e-a$ 。

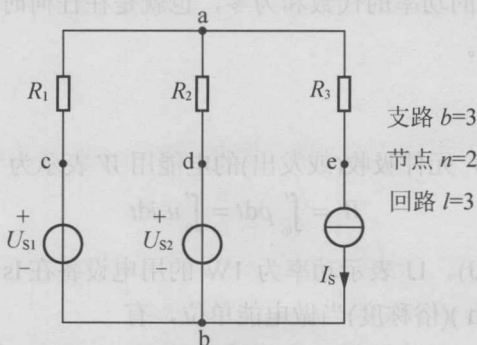


图 1.8 电路名词示意图

1.3.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)描述了电路中与节点相连的各支路电流之间的相互关系,它是电荷守恒在集总参数电路中的体现。

1. KCL 定律的内容

在集总参数电路中,任意时刻,任一节点上,所有支路电流的代数和为零,即

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-9)$$

KCL 定律也可以表述为:对于集总参数电路中的任一节点,在任意时刻,流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和,即

$$\sum i_{\lambda} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-10)$$

【例 1.4】列出图 1.9 所示电路的 KCL 方程,如果已知 $i_1 = 5\text{A}$, $i_2 = 7\text{A}$, $i_4 = -1\text{A}$, 求电流 i_3 的值。

解: 对图 1.9 所示电路中的 a 节点,利用 KCL 定律,有

$$\sum i = 0$$

流入节点 a 电流的代数和为零,即

$$i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

或流出节点 a 电流的代数和为零,即

$$-i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

或利用 KCL 方程 $\sum i_{\lambda} = \sum i_{\text{出}}$, 即

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

可得

$$\begin{aligned} i_3 &= i_2 + i_4 - i_1 \\ &= 7 + (-1) - 5 = 1(\text{A}) \end{aligned}$$

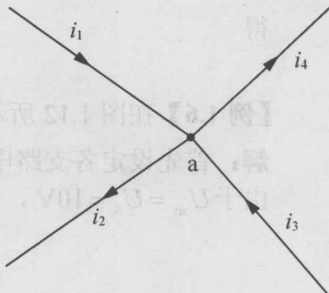


图 1.9 例 1.4 的电路

2. KCL 定律的说明

(1) KCL 实质上是电荷守恒原理在集总参数电路中的体现,即到达任何节点的电荷既不可能增加,也不可能消失,电流必须连续流动。

(2) 应用 KCL 列写方程时,首先要规定各支路电流的参考方向,然后根据参考方向取符号。可以规定流出节点的电流取正号,流入节点的电流取负号;或规定流入节点的电流取正号,流出节点的电流取负号,但在列写的同一个 KCL 方程中取符号规则应一致。

(3) 应将 KCL 代数方程中各项前的正负号与电流本身数值的正负号区别开来。

(4) KCL 不仅适用于节点,而且适用于任何一个封闭曲面,即对任意的封闭面 S,流入(或流出)封闭面的电流的代数和等于零。

图 1.10 所示为电子技术中经常使用的晶体三极管,其内部结构较复杂,但对封闭面来讲,仍符合基尔霍夫电流定律。所以对晶体三极管有

$$I_e = I_c + I_b$$

【例 1.5】图 1.11 所示电路中,已知 $I_2 = -1\text{A}$, $I_4 = 3\text{A}$, $I_6 = 4\text{A}$ 。求电流 I_1 、 I_3 、 I_5 的值。