

中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目

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

电路分析

郭琳 姬罗栓 编著

Electric Circuit Analysis



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



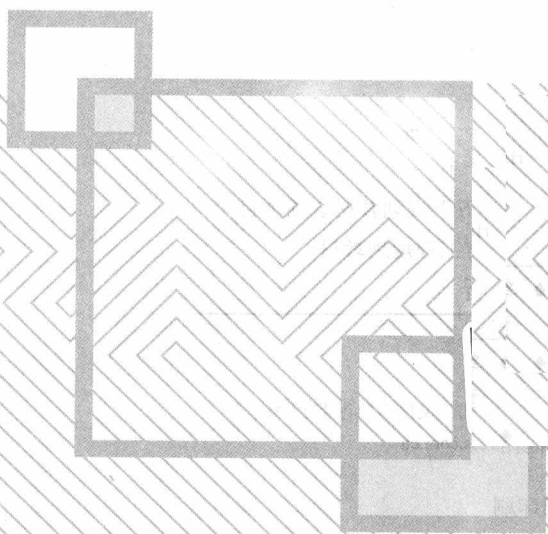
精品系列

中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目
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

电路分析

郭琳 姬罗栓 编著

Electric Circuit Analysis



人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 郭琳, 姬罗栓编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010.9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-22745-4

I. ①电… II. ①郭… ②姬… 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(2010)第135046号

内 容 提 要

本书共9章, 内容包括电路基本概念和电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的分析方法、电路定理、一阶动态电路、正弦稳态电路分析、谐振电路、互感耦合电路和三相电路。本书内容安排删繁就简, 突出重点, 注重教学的实用性, 适合于少学时的教学要求。

本书可作为应用型本科院校电子信息类及相关电类各专业的教材, 也可作为工程技术人员参考用书。

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

电 路 分 析

-
- ◆ 编 著 郭 琳 姬罗栓
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 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 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14
字数: 339千字
- 2010年9月第1版
2010年9月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-22745-4

定价: 26.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

“电路基础”课程是高等工科院校电子信息类各专业的一门重要技术基础课程,对于学生后续专业课程的学习有着重要的影响。由于学生基础、教学侧重点、办学层次等方面的差异,以及学生对专业基础课程的掌握程度,不同层次的院校对于“电路基础”课程教材有着不同的要求。尤其是如雨后春笋般涌现出的应用型本科院校,很显然不适用于使用以往为一本、二本甚至更高层次院校学生编写的教材。应用型本科院校迫切需要一本侧重基本理论与概念的理解,避免复杂数学推导,注重培养学生分析问题和解决问题能力的新型教材,本书正是为了顺应这一要求而编写的。

目前,很多电路分析或电路原理的教材偏重深奥的理论推导,经过教学实践证明,这对于应用型本科院校的学生是不适合的。在使用这一类教材进行教学的过程中,我们发现,学生往往纠结于繁琐的数学推导中,不仅难以理解其中的基本理论和概念,还会使他们对于这一门课程的学习望而却步,产生厌学心理,进而影响后续专业课程的学习。本书在把握删繁就简的同时,注重教学的实用性,在总体结构上力求重点突出,概念清晰,尽量避免深奥的纯数学推导,使用简洁、通俗的语言,阐明基本问题。本书注意了课程的连贯性,给出了较多的例题和习题,适合于少学时的教学要求。

作者多年来一直从事本学科的研究与教学,结合在实际教学工作中遇到的问题和解决的经验,在本课程教学讲义的基础上,编写了本书。全书共分为9章,教学参考学时数为56学时,各专业可根据自己的实际情况制定教学方案。

其中,第1章为电路基本概念和电路定律,主要介绍电路的基本概念,包括电路和电路模型、电路的基本物理量、电路元件和基尔霍夫定律;第2章为电阻电路的等效变换,主要讲解了电阻电路的等效变换,包括简单电阻电路的等效变换、电阻星形联接和三角形联接的等效变换、电源的等效变换等;第3章为电阻电路的分析方法,重点介绍了支路电流法、网孔电流法、回路电流法和节点电压法等;第4章为电路定理,讲述了叠加定理、齐次定理、替代定理、戴维南定理、诺顿定理及最大功率传输定理;第5章为一阶动态电路,介绍了电容元件和电感元件的定义、伏安关系,重点讲述了一阶电路的零输入响应、零状态响应、全响应和一阶电路的三要素法;第6章为正弦稳态电路分析,讲述了正弦量的特征以及正弦量的相量表示法,基尔霍夫定律的相量形式以及电阻、电感、电容在相量法中的特性,阻抗、导纳的概念,正弦稳态电路的相量法分析和计算;第7章为谐振电路,主要从频率特性这个角度来分析谐振电路;第8章为互感耦合电路,主要介绍了互感电路

的基本概念，耦合电感的 VCR，分析了空心变压器和理想变压器的特点；第 9 章为三相电路，介绍了有关三相电路的概念，讨论了对称三相电路和不对称三相电路的分析方法，及三相电路的功率。

本书可作为应用型本科院校或独立学院电子信息类及相关电类各专业的教材，也可作为工程技术人员参考用书。

本书第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章由姬罗栓编写，第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章由郭琳编写，全书由郭琳统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者给予批评指正。

编 者

2010 年 7 月

目 录

第1章 电路基本概念和电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路的作用及组成部分	1
1.1.2 电路元件和电路模型	1
1.1.3 电路的工作方式	3
1.2 电流和电压的参考方向	3
1.2.1 电流的参考方向	3
1.2.2 电压的参考方向	4
1.2.3 电压与电流的关联参考方向和非关联参考方向	5
1.2.4 国际单位制中变量的单位	5
1.3 电功率和能量	5
1.3.1 电能	6
1.3.2 功率	6
1.4 电位及其电位的计算	8
1.5 电阻元件	9
1.5.1 电阻和电导	9
1.5.2 电阻元件的伏安特性	10
1.5.3 电阻元件的开路和短路	11
1.5.4 电阻元件的功率和电能	11
1.6 电压源和电流源	12
1.6.1 电压源	12
1.6.2 电流源	13
1.7 受控电源	14
1.8 基尔霍夫定律	15
1.8.1 基尔霍夫电流定律	16
1.8.2 基尔霍夫电压定律	17
习题	19
第2章 电阻电路的等效变换	23
2.1 简单电阻电路的等效变换	23
2.1.1 电路等效变换的概念	23
2.1.2 电阻的串联	24
2.1.3 电阻的并联	25
2.1.4 电阻的混联	26
2.2 电阻的星形连接和三角形连接的等效变换	27
2.2.1 星形连接与三角形连接	27
2.2.2 星形—三角形连接之间的等效变换	28
2.3 电源的等效变换	31
2.3.1 电压源、电流源的串联和并联	31
2.3.2 实际电源的两种模型及其等效变换	33
习题	35
第3章 电阻电路的分析方法	39
3.1 支路电流法	39
3.2 网孔电流法和回路电流法	43
3.2.1 网孔电流法	43
3.2.2 回路电流法	45
3.3 节点电压法	49
习题	54
第4章 电路定理	57
4.1 叠加定理和齐次定理	57
4.1.1 齐次定理	57
4.1.2 叠加定理	58
4.2 替代定理	62
4.3 戴维南定理和诺顿定理	64
4.3.1 戴维南定理	64
4.3.2 诺顿定理	72
4.4 最大功率传输定理	74
4.4.1 负载获得最大功率的条件	74
4.4.2 负载获得最大功率的计算	75
4.4.3 传输效率	77
习题	79
第5章 一阶动态电路	83
5.1 电容元件及其伏安关系	83
5.1.1 电容元件	83

5.1.2 电容元件的伏安关系	84	6.3.2 电感元件	134
5.1.3 电容元件的储能	86	6.3.3 电容元件	135
5.1.4 电容的串联和并联	87	6.4 相量形式的基尔霍夫定律	138
5.2 电感元件	89	6.5 阻抗、导纳及其串联、并联电路的分析	140
5.2.1 电感元件	89	6.5.1 阻抗 Z	140
5.2.2 电感元件的伏安特性	90	6.5.2 导纳	141
5.2.3 电感的储能	91	6.5.3 阻抗和导纳的等效互换	143
5.2.4 电感元件的串联、并联	92	6.5.4 阻抗串联的等效阻抗	144
5.3 动态电路的基本概念	92	6.5.5 导纳并联的等效导纳	144
5.3.1 概念	92	6.6 正弦稳态电路的分析	147
5.3.2 换路定律	93	6.7 正弦交流电路的功率	149
5.3.3 初始值的计算	95	6.7.1 二端网络的功率	150
5.4 一阶电路的零输入响应	99	6.7.2 功率因数的提高	154
5.4.1 RC 电路的零输入响应	99	6.7.3 复功率	155
5.4.2 RL 电路的零输入响应	102	6.8 正弦稳态最大功率传输	156
5.4.3 零输入响应的一般形式	103	习题	158
5.5 一阶电路的零状态响应	104	第 7 章 谐振电路	164
5.5.1 RC 电路的零状态响应	104	7.1 串联电路的谐振	164
5.5.2 RL 电路零状态响应	107	7.1.1 串联电路的谐振现象	164
5.5.3 RC 串联电路充放电过程的应用	109	7.1.2 串联谐振的条件	165
5.6 一阶电路的全响应	111	7.1.3 谐振频率	165
5.7 一阶电路的三要素法	114	7.1.4 串联谐振电路的基本特征	166
习题	119	7.2 串联谐振电路的频率特性	168
第 6 章 正弦稳态电路分析	122	7.2.1 串联谐振电路的谐振曲线	168
6.1 正弦交流电的基本概念	122	7.2.2 通频带	170
6.1.1 交流电的概念	122	7.3 并联电路的谐振	171
6.1.2 正弦量的三要素	122	7.3.1 并联谐振的条件与谐振频率	172
6.1.3 交流电的有效值	124	7.3.2 并联谐振电路的特征	172
6.1.4 相位差	125	7.3.3 电感线圈与电容并联的电路	173
6.2 正弦量的相量表示法	126	7.4 并联谐振电路的谐振曲线和通频带	175
6.2.1 复数简介	126	习题	176
6.2.2 正弦量的表示法	129	第 8 章 互感耦合电路	178
6.2.3 相量图表示法	130	8.1 互感	178
6.2.4 两个同频率正弦量之和	131	8.1.1 互感现象	178
6.2.5 正弦量的微分与积分	131	8.1.2 互感系数和耦合系数	179
6.3 正弦交流电路中的 R、L、C 元件	133	8.1.3 耦合电感的伏安关系	180
6.3.1 电阻元件	133	8.1.4 互感线圈的同名端	181

8.2 互感线圈的连接.....	184	9.1.1 对称三相电源.....	198
8.2.1 互感线圈的串联.....	184	9.1.2 三相电源的连接方式.....	200
8.2.2 互感线圈的并联.....	186	9.2 三相负载的连接及对称三相	
8.2.3 耦合电感的三端连接.....	188	电路的计算.....	202
8.3 理想变压器.....	189	9.2.1 三相负载的连接.....	202
8.3.1 理想变压器及伏安关系.....	189	9.2.2 对称三相电路.....	204
8.3.2 理想变压器的阻抗变换.....	191	9.2.3 对称三相电路的计算.....	204
8.4 空芯变压器.....	192	9.3 不对称三相电路的概念.....	209
8.4.1 空芯变压器的电路模型.....	192	9.4 三相电路的功率.....	211
8.4.2 空芯变压器的反映阻抗.....	193	9.4.1 三相电路的功率.....	211
习题.....	194	习题.....	212
第9章 三相电路.....	198	参考文献.....	215
9.1 三相电路概述.....	198		

本章将介绍电路的基本概念，主要包括电路和电路模型，电压、电流的参考方向，电功率和能量；理想电阻元件、理想电流源、理想电压源及受控源的概念和特性；电路中电压、电流所受到的两类约束，其中一类约束来自元件的本身性质，即元件的伏安关系，而另一类约束来自元件的相互连接方式，即基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的作用及组成部分

实际电路是为了实现某种应用目的，由若干电器设备或器件按一定方式用导线连接而成的电流通路。

实际电路的形式多种多样，但就其作用而言，可以划分为两大类。其中一类主要是实现电能的传输和转换，这类电路有时称为电力电路或强电电路。典型的例子是电力系统，发电机组产生的电能通过变压器、输电线等输送给各用电单位，这就构成了一个很复杂的电路。又如我们所熟识的手电筒的电路，是用来照明的一种最简单的电力电路，它由电池、灯泡和开关按钮通过手电筒壳（导体）连接而成。其中电池是提供电能的器件，这类器件称为电源；灯泡是耗用电能的器件，这类器件称为负载；而按钮和导体介于电源和负载之间，起着传输和控制作用，这类器件称为中间环节。在一般电路中，中间环节还包括保障安全用电的保护电路、测量仪器等。

另一类电路主要是实现信号的传输和处理，这类电路有时候称为电子电路或弱电电路。最简单的例子就是收音机电路，其中天线用以接收无线电波，向电路提供电信号，是收音机电路的信号源，属于另一类电源；耳机是将电信号转换成声音的器件，属于另一类负载。线圈、电容器、半导体二极管是进行调谐、检波的器件，属于中间环节。

电源、负载和中间环节，是电路的3个基本组成部分。

1.1.2 电路元件和电路模型

用于构成实际电路的电器设备和器件，统称为实际电路元件，简称为实际元件。实际元件不但种类繁多，而且对一个实际元件来说，其电磁性能也不是单一的。例如，实验室用的

滑线变阻器由导线绕制而成，当有电流通过时，不仅会消耗电能（具有电阻性质），而且还会产生磁场（具有电感性质）；不仅如此，导线的匝与匝之间还存在分布电容（具有电容性质）。上述性质交织在一起的，而且电压、电流频率不同时，其表现程度也不一样。

在电路分析中，如果对实际器件的所有性质加以考虑，将是十分困难的。为了便于对实际电路进行分析和数学描述，在电路理论中采用了模型的概念，这就是在一定条件下，对实际元件加以近似化、理想化，用只具有单一电磁性能的理想电路元件来代表它。所以，理想电路元件是实际元件抽象出来的理想化模型。一种实际元件可用一种或几种理想电路元件的组合来表征。例如，上面提到的滑线电阻器，若只考虑其消耗电能的性质，则可用电阻元件来表征；若还考虑电磁场的作用，则可用电阻元件与电感元件的组合来表征。同样，对于电磁性能相近的实际元件，也可用同一种理想电路元件近似地表征。例如，所有的电阻器、灯泡、电烙铁、电熨斗等，都可用电阻元件来表征。在电路分析中，常用的理想电路元件只有几种（如电阻元件、电感元件、电容元件、电源元件等），它们可以用来表征千千万万种实际元件。以后常将理想电路元件简称为电路元件，它们都有各自的精确定义和数学模型，在电路中用规定的符号表示。

有电路元件的电路，称为电路模型。今后我们研究的电路都是电路模型，并非实际电路。所有的实际电路，不论简单的还是复杂的，都可以用几种电路元件所构成的电路模型来表征。例如，手电筒的连接电路如图 1-1-1 所示。图 1-1-2 (a) 所示为手电筒的简单电路，图中用两根导线将灯泡和干电池连接起来形成闭合通路，使灯泡发光，用来照明。其电路模型如图 1-1-2 (b) 所示。用理想直流电压源 U_S 和反映干电池内部损耗的电压源内电阻 R_S 的串联组合来等效表示实际电路中作为电源的干电池，灯泡作为消耗能量的负载用电阻 R_L 来等效，连接导线用理想导线（其电阻为零）或线段表示。

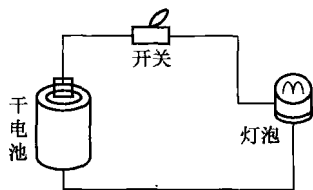


图 1-1-1 手电筒连接电路

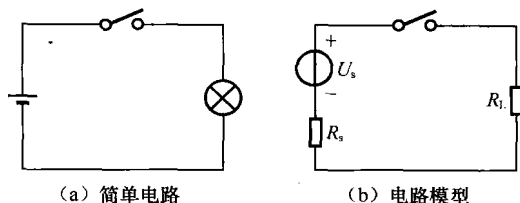


图 1-1-2 手电筒电路

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立其模型，简称建模。有的电路建模比较简单，如上述手电筒的例子。有的器件或系统在建模时需要考虑其工作条件，工作条件不同，同一实际器件可能会采用不同的模型；有的器件或系统在建模时则需要深入分析其中的物理现象。模型取得恰当，对电路的分析和计算结果就与实际情况接近，反之则会造成很大的误差，甚至出现自相矛盾的结果。模型建立得太复杂就会造成分析和计算的困难，太简单则不足以反映所需求解的实际情况。建模问题需要运用有关的知识专门研究，这里不再进一步阐述。

需要强调的是，今后本书中所说的电路一般均指由理想电路元件构成的电路模型，并非实际电路，而（电路）元件则为理想电路元件。

电路理论课程的主要内容是分析电路中的电磁现象和过程，研究电路定律、定理和电路

分析方法,并讨论各种计算方法,这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。

1.1.3 电路的工作方式

电路在工作时,对电源来说,通常处于3种方式之一:负载、空载和短路。

负载工作时,负载与电源接通,负载中有电流通过,该电流称为负载电流,负载电流的大小与负载电阻有关。通常负载都是并联的,它们的两端接在一定的电压下,因此当负载增加时(如并联的负载数目增加),负载电阻减小,负载电流增大,即功率增大。一般所说的负载的大小,指的是负载电流或功率的大小,而不是指负载电阻的大小。

空载时,负载与电源未接通,电路不通,电路中的电流为零。这时电源的端电压叫做空载电压或开路电压。

短路是指由于某种原因使电源两端直接接通,这时电源两端的外电阻等于零,电源输出的电流仅由电源内阻限制,此电流称为短路电流。一般电源内阻很小,所以此电流将很大,以致烧毁电源、导线等。短路通常是一种严重事故,为了避免短路的发生,一般在电路中接入熔断器或其他自动保护装置,一旦发生事故,它们能迅速将故障电路自动切断。

1.2 电流和电压的参考方向

描述电路工作情况的物理量主要有电流、电压、电荷、磁通、磁通链、电功率和电能,称为电路的基本变量,通常分别用 i 、 u 、 q 、 Φ 、 Ψ 、 P 和 W 表示。其中运用最多的是电流和电压这两个变量,它们的意义已经在物理课程中讲过,本节主要介绍它们的方向或极性的标注方法,即参考方向问题。

在电路分析中,当涉及某个元件或部分电路的电流或电压时,有必要指定电流或电压的参考方向,因为电流或电压的实际方向一般是未知的,有的可能是随时间变动的,而确定变量的参考方向可以使实际问题的求解简单化。

1.2.1 电流的参考方向

电荷的有规则运动形成了电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向,设 dt 时间内通过电路横截面的电荷量为 dq ,则有

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

其中, i 称为电流强度,简称电流,单位是A(安培,简称安)。

电流的大小和方向对电路的工作状态都有影响,所以在描述电路中的电流时要同时给出电流的大小和方向。图1-2-1所示为电路的一部分,其中方框代表某一个二端元件。电流 i 流过该元件时,其实际方向只有两种可能性,或是从A到B,或是从B到A,这时可选定其中任意一个方向作为电流的参考方向,它不一定是电流的实际方向。一旦指定了电流的参考方向,电流便成为了代数量。一般电路图中用实线箭头代表电流的参考方向。在图1-2-1(a)中,电流的参考方向与实际方向相同,此时电流 i 为正值,即 $i > 0$;在图1-2-1(b)中,电流的参考方向与实际方向相反,此时电流为负值,即 $i < 0$ 。电流的参考方向除了用实线

箭头表示之外,也可以用双下标表示,如 i_{AB} 代表电流的参考方向是由 A 到 B,如图 1-2-2 所示。

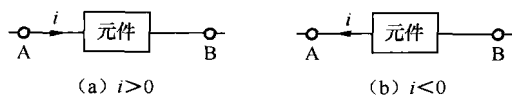


图 1-2-1 电流的参考方向

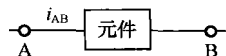


图 1-2-2 电流参考方向的双下标表示法

这样,在设定了电流的参考方向后,就可以根据电流 i 的正负值来判断实际方向。在图 1-2-3 (a) 中,设元件电流的参考方向是从 A 指向 B,电流的波形如图 1-2-3 (b) 所示。在前半个周期中,即 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时,由于 $i \geq 0$,所以电流的实际方向与参考方向一致,即此时电流 i 的实际方向由 A 指向 B;在后半个周期中,即 $t_2 \leq t \leq t_3$ 时,由于 $i < 0$,所以电流的实际方向与参考方向相反,即电流 i 的实际方向此时由 B 指向 A。

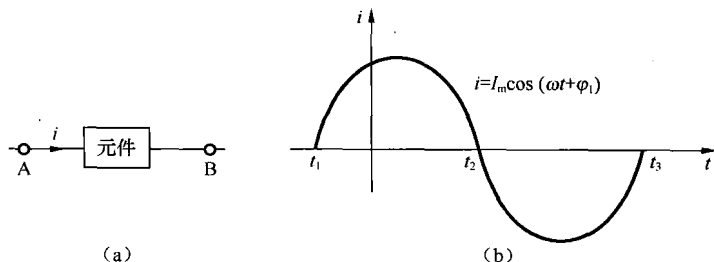


图 1-2-3 电流实际方向的判断

指定电流参考方向之后,可以根据电流数值的正、负值来确定电流的实际方向。

1.2.2 电压的参考方向

在电磁学中已经知道,电荷在电场中受到电场力的作用,当把电荷由电场中的一点移动到另一点时,电场一定会对电荷做功。处在电场中的电荷具有电位(势)能,恒定电场中的每一点有一定电位,由此引入重要的物理量——电压与电位。

电场中某两点 A、B 间的电压(或称电压降) U_{AB} 等于将正电荷 q 由 A 点移至 B 点电场力所做的功 W_{AB} 与该电荷 q 的比值,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-2-2)$$

电压是对电路中两点而言的,它表示两点之间的电位差。电压的实际方向规定为高电位点指向低电位点,即电位下降的方向。与电流相似,电路中某两点间的电压的参考方向是任意假定的电位下降的方向。在电路图中电压 $u(t)$ 的参考方向(或参考极性)一般用“+”、“-”极性来加以标示,此时电压的参考方向由“+”指向“-”,即为电压降的方向。电压的参考方向也可以在两点之间的电路旁用箭头表示,箭头的指向即为电压降的方向。电压的参考方向还可以用双下标来表示,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 两点之间的电压,但是由于参考方向不同,两者之间相差一个负号,即 $U_{BA} = -U_{AB}$ 。

与电流一样,当选定了电压的参考方向后,电压 u 就成了代数量。若电压的参考方向与实际方向相同,电压值为正值,即 $u>0$;反之,若电压的参考方向与实际方向相反,电压值为负值,即 $u<0$ 。这两种情况如图 1-2-4 所示。

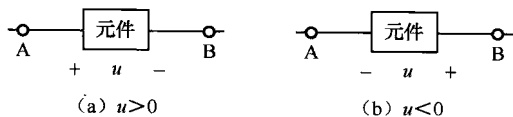


图 1-2-4 电压的参考方向

指定电压参考方向之后,同样可以根据电压数值的正、负值来确定电压的实际方向。

1.2.3 电压与电流的关联参考方向和非关联参考方向

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分析之前,都应该先指定有关电流和电压的参考方向,否则分析将无法进行。原则上,电流和电压的参考方向可以独立地任意指定,参考方向选取的不同,只影响其值的正、负,而不会影响问题的实际结论。但在习惯上,同一段电路的电压和电流的方向通常选取相互一致的参考方向,即电流的参考方向从电压的“+”参考极性端流入,从“-”参考极性端流出,如图 1-2-5 (a) 所示,称电压和电流为关联参考方向。今后电路分析中经常采用关联参考方向的约定,即电路中标示了电流可省去电压标示,反之亦然。若两者参考方向选取不一致,则称为非关联参考方向,如图 1-2-5 (b) 所示,这时两者会同时标示出来,不可省略。

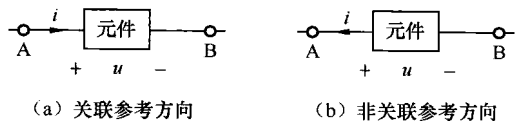


图 1-2-5 电压电流的关联和非关联参考方向

需要强调的是,在后续章节中谈到电流和电压的方向时,如无特殊声明,一般指的都是图中标注的参考方向,而不是实际方向。

1.2.4 国际单位制中变量的单位

在国际单位制(SI)中,电流的单位是A(安培,简称安),电荷的单位是C(库仑,简称库),电压和电位的单位是V(伏特,简称伏)。在处理实际问题时,常常会遇到有时很大或很微小的量值,就需要引入相关的单位来处理,如

$$1\mu\text{A}(\text{微安})=1\times 10^{-6}\text{A}(\text{安})$$

$$2\text{kV}(\text{千伏})=1\times 10^3\text{V}(\text{伏})$$

$$3\text{GA}(\text{吉瓦})=3\times 10^9\text{W}(\text{瓦})$$

等。

1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,功率和能量的概念是十分重要的,这是因为电路在工作状态下总伴随着电能和其他形式能量之间的相互转换。同时,电气设备、电路部件在工作时都有着对功率的限制问题,即在使用时要注意其电压和电流是否超过其额定值,过载(超过额定值)会使设备或部件烧毁,反之,欠载时则不能使设备正常工作。

1.3.1 电能

电路中伴随着电荷的移动进行着能量的转换。当正电荷在电场力的作用下从元件的正极经过元件运动到负极时, 电场力对电荷做正功, 正电荷将失去一部分电位能, 而这部分能量被元件所吸收。反之, 当正电荷从元件的负极经过元件运动到正极时, 电场力做负功, 正电荷获得一部分电位能, 而这部分能量由元件发出。

在物理学中已经知道, 电场中某两点 A、B 间的电压等于将单位正电荷由 A 点移至 B 点时电场力所做的功, 即

$$u = \frac{dW}{dq}$$

可得

$$W = \int u dq$$

则从 t_0 到 t 时间内, 元件吸收的电能为

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

由于电流 $i = \frac{dq}{dt}$, 即

$$dq = i dt$$

所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-3-1)$$

式中 u 和 i 都是时间的函数, 同是代数量, 因此电能 W 也是时间的函数, 且是代数量。设 u 和 i 为关联参考方向, 当 $W > 0$ 时, 元件吸收电能; 当 $W < 0$ 时, 元件释放电能。

1.3.2 功率

功率是能量对时间的导数, 即

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

如图 1-2-5 (a) 所示, 当电压和电流采用关联一致参考方向时, 计算功率的公式为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-3-2)$$

在直流情况下

$$P = UI \quad (1-3-3)$$

上式是按吸收功率来计算的, 即当 $p > 0$ ($P > 0$) 时, 表示该段电路吸收 (消耗) 功率; $p < 0$ ($P < 0$) 时, 表示该段电路发出 (产生) 功率。若电压和电流参考方向为非关联方向时 (见图 1-2-5 (b)), 计算功率的表达式为

$$p(t) = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI \quad (1-3-4)$$

判定是吸收功率还是发出功率的原则与式 (1-3-2) 和式 (1-3-3) 相同。

在此规定下将电流和电压的正负号如实代入公式, 那么功率的性质是吸收还是发出就看计算结果, 而计算公式与元件本身的性质无关。这些结论可以推广到任意一个不同性质的

元件或二端网络。

当电流单位为 A，电压单位为 V，时间单位为 s 时，电能的单位为 J（焦耳，简称焦），功率的单位为 W（瓦特，简称瓦）。

值得一提的是，实际中电能常用 kW·h（千瓦时，俗称度）来表示，且有

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

若一个元件吸收功率为 100W，也可以表述为其发出功率为 -100W。同理，一个元件发出功率为 100W，也可以表述为其吸收功率为 -100W，这两种说法是一致的。

例 1-3-1 求图 1-3-1 所示各元件或电路的功率。图中 $u_1 = 4\text{V}$, $i_1 = 0.2\text{A}$; $u_2 = 6\text{V}$, $i_2 = -0.5\text{A}$; $u_3 = 3\text{V}$, $i_3 = 2\text{mA}$ 。

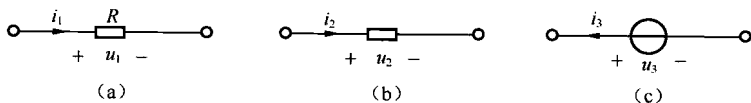


图 1-3-1 例 1-3-1 电路图

解 对于图 1-3-1 (a)，该元件上的电压和电流为关联参考方向，所以元件吸收的功率为

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

由于 $p > 0$ ，所以该元件确实吸收 0.8W 的功率。

对于图 1-3-1 (b)，该元件上的电压和电流为关联参考方向，所以元件吸收的功率为

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

由于 $p < 0$ ，所以该元件发出 3W 的功率。

对于图 1-3-1 (c)，该元件上的电压和电流为非关联参考方向，所以元件发出的功率为

$$p_3 = -u_3 i_3 = -3 \times (2 \times 10^{-3}) \text{ W} = -6 \times 10^{-3} \text{ W} = -6 \text{ mW}$$

由于 $p < 0$ ，所以该元件发出 6mW 的功率。

例 1-3-2 两个表示为盒 A 和盒 B 的电路如图 1-3-2 方式连接，连线中，电流 i 的参考方向和电压 u 的参考极性已在图中给出。根据下面规定的数值，计算连接后的功率，并说明功率的流向。

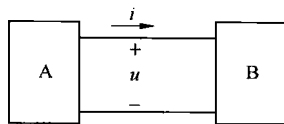


图 1-3-2 例 1-3-2 电路图

(1) $u = 20\text{V}$, $i = 12\text{A}$ 。

(2) $u = 100\text{V}$, $i = -6\text{A}$ 。

(3) $u = -30\text{V}$, $i = 5\text{mA}$ 。

(4) $u = 25\text{V}$, $i = -15\text{A}$ 。

解 对于 (1) 盒 B: $p = ui = 20 \times 12 \text{ W} = 240 \text{ W}$

盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向，确实为吸收功率。连接后的功率大小为 240W。可以验证，盒 A 上的电压 u 和电流 i 为非关联参考方向，所以盒 A 电路释放功率，即功率从 A 流向 B。

对于 (2) 盒 B: $p = ui = 100 \times (-6) \text{ W} = -600 \text{ W}$ ，连接后的功率大小为 600W。

盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向，确实为发出功率。可以验证，盒 A 上的电压 u 和电流 i 为非关联参考方向，所以盒 A 电路吸收功率，即功率从 B 流向 A。

同理，对于 (3) 盒 B: $p = ui = -30 \times 5 \text{ W} = -150 \text{ mW}$ ，连接后的功率大小为 150mW，功

率从B流向A；对于(4)盒B： $p = ui = 25 \times (-15) \text{W} = -375 \text{W}$ ，连接后的功率大小 -375W ，功率从A流向B。

1.4 电位及其电位的计算

电位是在电场中定义的概念。电场中某点的电位是指把单位正电荷在电场力的作用下从该点推移到无穷远电场所做的功。电位是一个相对量，其实电路是局限在一定路径之中的电场。在电路中引用电位概念，就得选定一个零电位参考点。电路中某点的电位是指在该点相对于参考点之间的电压。在工程图中，一般用一些图形符号表示零电位参考点，如图1-4-1所示。在电路分析中一般用图1-4-1(a)所示的符号表示一般的抽象零电位点；用图1-4-1(b)所示的符号表示以大地为零电位的参考点；在电子电路中通常以机壳位参考点，图形符号如图1-4-1(c)所示；图1-4-1(d)的符号表示安全接地。这些符号习惯上都称为接地，它们在工程上是有实际意义的。

在如图1-4-2所示的电路中选择b点为零电位参考点，这时其他各点的电位是

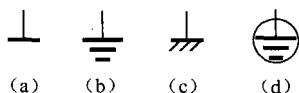


图 1-4-1 零电位参考点的符号图

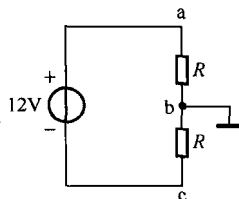


图 1-4-2 电路中的零电位参考点

$$U_{na} = 6\text{V}; \quad U_{nc} = -6\text{V}$$

如果把c点作为零电位参考点，则

$$U_{na} = 12\text{V}; \quad U_{nb} = 6\text{V}$$

从上述分析可见，任一点的电位随参考点的不同而不同，即电位是相对参考点而言的，这叫做电位的相对性。只有参考点选定之后，电路中各点的电位才有定值，而任意两点之间的电压则与参考点选择无关，如图1-4-2所示的电路中，无论电路的零电位点选择在哪一点，电压 $U_{ab} = 6\text{V}$ ， $U_{bc} = 6\text{V}$ 是不会改变的，这叫做电压的单值性。在电子电路中，电源的一端通常都是接“地”的。为了作图简便和图面清晰，习惯上常常不画电源而在电源的非接地端注以 $+U$ 、 $-U$ 等，或注明其电位的数值，如图1-4-3所示。

例 1-4-1 计算图1-4-4所示电路中开关合上和断开时各点的电位。

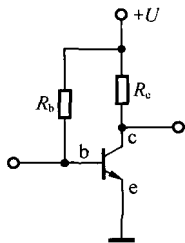


图 1-4-3 电路的一种习惯画法

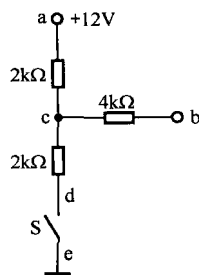


图 1-4-4 例 1-4-1 电路图

解 (1) S 断开时: $V_c = 0V$, $V_a = 12V$ 。由于电阻上无电流通过, 所以没有电压降, 故

$$V_a = V_b = V_c = V_d = 12V$$

(2) S 合上时: 由于电阻 $4k\Omega$ 上仍无电流通过, 故有

$$V_b = V_c = \frac{2}{2+2} \times 12V = 6V$$

此时

$$V_d = V_e = 0V$$

1.5 电阻元件

电路元件是组成电路的最基本元件, 它通过其端子与外部相连接, 元件的特性则通过与端子有关的物理量描述。每一种元件都反映某种确定的电磁性质, 都具有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。

电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端或四端元件等, 此外, 电路元件还可以分为有源元件和无源元件, 线性元件和非线性元件, 时不变元件和时变元件等。

在电路分析中, 二端元件主要有理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想电压源和理想电流源。本节将介绍二端线性电阻元件, 其他元件将在相关的后续章节中陆续讲述。为了方便, 书中将省略“理想”二字, 未加特殊说明, 一切元件均指理想电路元件。

1.5.1 电阻和电导

电阻元件是电路中应用最广的无源二端元件, 许多实际的电路器件如电阻器、电热器、灯泡等在一定条件下均可以用二端电阻元件来表示 (本书以后将二端线性电阻元件简称为电阻元件)。电阻元件的电磁性质就是消耗电能, 把电能转化成热能。

电阻元件的精确定义是: 元件端子间的电压和电流取关联参考方向时, 在任何时刻它两端的电压和电流关系服从欧姆定律, 即有

$$u = Ri \quad (1-5-1)$$

式中 R 称为电阻, 是一个常数。当电压的单位为 V , 电流的单位为 A 时, 电阻 R 的单位是 Ω (欧姆, 简称欧)。

令 $G = \frac{1}{R}$, 式 (1-5-1) 变成

$$i = Gu \quad (1-5-2)$$

式中 G 称为电阻元件的电导, 单位是 S (西门子, 简称西)。

电阻 R 和电导 G 是反映电阻元件性能而互为倒数的两个参数。如果说电阻反映一个电阻元件对电流的阻力, 那么电导就是一个衡量电阻元件导电能力强弱的参数。

电阻元件的图形符号及其伏安特性如图 1-5-1 所示。

值得强调的是, 如果电阻 (电导) 上的电压、电流为非关联参考方向, 如图 1-5-2 所示, 则欧姆定律公式中应冠以负号, 即

$$u = -Ri \quad (1-5-3)$$

$$i = -Gu \quad (1-5-4)$$