



本书赠送电子教案

国家精品课程主干教材
高等院校通信与信息专业规划教材

电路分析基础

BASIS OF CIRCUIT ANALYSIS



陈晓平 李长杰 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM133/80

2008

国家精品课程主干教材

高等院校通信与信息专业规划教材

电路分析基础

陈晓平 李长杰 主编
殷春芳 傅海军 参编

机械工业出版社

本书是根据国家教育部修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》，并充分考虑各院校少学时的教学计划及现代科技发展趋势，为电子信息类各专业学生编写的教材。本书内容包括：电路基本概念和电路定律、电阻电路的等效变换、电路的分析方法、电路定理、动态电路的时域分析、正弦交流电路的稳态分析、谐振电路、互感电路、三相电路、利用 MATLAB 进行电路计算、基于 OrCAD/PSpice 的电路分析。

本书基本概念讲述清楚，易于读者理解；基本分析方法归类恰当、思路清晰、步骤明确、易于读者掌握。为了很好地帮助读者理解基本内容，书中配有丰富的例题及详尽的解题步骤，并将先进的计算软件 MATLAB、OrCAD/PSpice 应用于电路的计算分析，这对掌握现代电路的分析方法和工具的使用是非常有益的。

本书可作为普通高等学校电子信息类各专业的电路分析基础课程的教材，也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/陈晓平, 李长杰主编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1

高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 23203 - 2

I. 电… II. ①陈…②李… III. 电路分析 - 高等学校 - 教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 206375 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 时 静 责任校对: 吴美英

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 李 妍

北京富生印刷厂印刷

2008 年 3 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.25 印张 · 448 千字

0001—5000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 23203 - 2

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任 乐光新

编委会副主任 张文军 张思东 杨海平 徐澄圻

编委会委员 王金龙 冯正和 刘增基 李少洪

邹家禄 吴镇扬 赵尔沅 南利平

徐惠民 彭启琮 解月珍

秘 书 长 胡毓坚

副 秘 书 长 许晔峰

出版说明

单行本

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

“电路分析基础”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。教学实践表明,学生对技术基础课程的掌握程度,直接影响后续专业课程的学习,由此,引导学生掌握电路理论的基本概念和基本分析方法,培养学生科学的思维能力,提高分析问题和解决问题的技能是本书编写的宗旨。

本书是根据国家教育部修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》编写的,在内容选材上遵守“加强基础、精选内容,结合实际、逐步更新,突出重点、利于教学”的原则,并注意了与“高等数学”、“大学物理”等先修课程及“电子技术”、“信号与系统”等后续课程的分工、衔接和配合,做到对先修课程巩固加深和为后续课程打好基础。在文字叙述方面,力求突出重点,分散难点,由浅入深,通俗易懂。在结构安排上,注意逻辑性和合理性。为了使读者能更好地掌握电路理论的基本内容及分析方法,本教材还精心选编了大量的例题和习题,并配备了习题参考答案,使之与正文有机结合,融为一体,有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。为了使学生在大学学习阶段就基本学会电路分析中先进的分析方法并会使用现代的工具软件,本教材在附录中分别介绍了 MATLAB、OrCAD/PSpice 在电路理论中的计算与分析,进一步拓宽了学生思维,满足了现代电路分析、设计工作的需要。

考虑到大学的教学特点,本教材在编写时注意教材的教学适用性,在总体结构上力求简明,章节内容安排上既注意了课程体系的连贯性,又保持了一定的独立性,可适应于少学时的教学要求和教学计划。

本教材是作者在总结多年教学实践的基础上,参考已出版的同类优秀教材编写而成的。参加本书编写的是江苏大学电气信息工程学院殷春芳(第1、2章)、李长杰(第3、8章、附录A、B)、陈晓平(第4、5、7章)、傅海军(第6、9章),其中附录C由对应章节作者共同完成。本书由陈晓平教授、李长杰副教授担任主编,并负责全书的统稿。由于编者水平有限,书中不足与错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 电路基本概念和电路定律 1

1.1 电气工程与电路理论	1
1.2 电路和电路模型	1
1.2.1 实际电路	1
1.2.2 电路模型	2
1.3 电流和电压的参考方向	3
1.3.1 电流的参考方向	3
1.3.2 电压的参考方向	4
1.3.3 电压与电流的关联参考方向和非关联参考方向	5
1.3.4 国际单位制中变量的单位	6
1.4 电功率和能量	6
1.4.1 电能	6
1.4.2 功率	7
1.5 电阻元件	8
1.5.1 电阻和电导	8
1.5.2 电阻元件的伏安特性	9
1.5.3 电阻元件的开路和短路	10
1.5.4 电阻元件的功率和电能	10
1.6 电压源和电流源	11
1.6.1 电压源	11
1.6.2 电流源	12
1.7 受控电源	13
1.8 基尔霍夫定律	15
1.8.1 基尔霍夫电流定律	15
1.8.2 基尔霍夫电压定律	17
1.9 习题	18

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	24

2.1.4 电阻的混联	26
-------------------	----

2.2 电阻的星形联结和三角形联结的等效变换	28
------------------------------	----

2.2.1 星形联结与三角形联结	28
------------------------	----

2.2.2 星形—三角形联结之间的等效变换	29
-----------------------------	----

2.3 电源的等效变换	32
-------------------	----

2.3.1 电压源、电流源的串联和并联	32
---------------------------	----

2.3.2 实际电源的两种模型及其等效变换	34
-----------------------------	----

2.4 习题	36
--------------	----

第3章 电阻电路的分析方法 40

3.1 支路电流法	40
-----------------	----

3.2 网孔电流法和回路电流法	44
-----------------------	----

3.2.1 网孔电流法	44
-------------------	----

3.2.2 回路电流法	47
-------------------	----

3.3 结点电压法	51
-----------------	----

3.4 习题	56
--------------	----

第4章 电路定理 60

4.1 叠加定理和齐次定理	60
---------------------	----

4.1.1 叠加定理	60
------------------	----

4.1.2 齐次定理	64
------------------	----

4.2 替代定理	65
----------------	----

4.3 戴维宁定理和诺顿定理	68
----------------------	----

4.3.1 戴维宁定理	68
-------------------	----

4.3.2 诺顿定理	75
------------------	----

4.4 最大功率传输定理	77
--------------------	----

4.4.1 负载获得最大功率的条件	78
-------------------------	----

4.4.2 负载获得最大功率的计算	78
-------------------------	----

4.4.3 传输效率	81
------------------	----

4.5 习题	82
--------------	----

第5章 动态电路的时域分析 87

5.1 电容元件和电感元件	87
---------------------	----

5.1.1 电容元件	87	7.2 并联谐振电路	199
5.1.2 电感元件	92	7.2.1 简单 RLC 并联电路	200
5.1.3 电容与电感的等效变换	96	7.2.2 电感线圈与电容并联电路	201
5.2 换路定律和初始值的确定	98	7.3 串并联谐振电路	205
5.2.1 换路定律	98	7.4 习题	209
5.2.2 初始值的确定	99		
5.3 一阶电路的动态响应	100	第8章 互感电路	211
5.3.1 一阶电路的零输入响应	101	8.1 互感电路的基本概念	211
5.3.2 一阶电路的零状态响应	107	8.1.1 互感现象	211
5.3.3 一阶电路的全响应	112	8.1.2 耦合电感的伏安关系	212
5.4 一阶电路的三要素法	114	8.1.3 互感线圈的同名端及耦合电感的电路模型	213
5.5 一阶电路的阶跃响应	119	8.1.4 耦合因数	215
5.5.1 阶跃函数	119	8.2 互感电路的计算	215
5.5.2 阶跃响应	121	8.2.1 耦合电感的串联	216
5.6 二阶电路的动态响应	124	8.2.2 耦合电感的并联	217
5.6.1 二阶电路的零输入响应	124	8.2.3 耦合电感的三端连接	218
5.6.2 二阶电路的零状态响应和全响应	132	8.3 空心变压器	220
5.7 习题	136	8.3.1 空心变压器的电路模型及方程	220
第6章 正弦稳态电路分析	143	8.3.2 空心变压器的等效电路及引入阻抗	221
6.1 正弦量及其相量表示	143	8.4 理想变压器	223
6.1.1 正弦量	143	8.4.1 理想变压器的电路模型及方程	223
6.1.2 正弦量的相量表示	146	8.4.2 理想变压器的阻抗变换作用	224
6.2 电路定律及电路元件的相量形式	152	8.5 习题	225
6.2.1 基尔霍夫定律的相量形式	152		
6.2.2 电阻元件的相量模型	153	第9章 三相电路	229
6.2.3 电感元件的相量模型	153	9.1 三相电路的基本概念	229
6.2.4 电容元件的相量模型	154	9.1.1 对称三相电源	229
6.3 阻抗与导纳	157	9.1.2 对称三相电路的连接方式	231
6.3.1 阻抗和导纳	158	9.1.3 线电压(电流)与相电压(电流)之间的关系	233
6.3.2 阻抗与导纳间的等效变换	161	9.2 对称三相电路的计算	234
6.3.3 阻抗(导纳)的串、并联	162	9.2.1 星形—星形系统	234
6.4 正弦稳态电路的分析	163	9.2.2 星形—三角形系统	236
6.5 正弦稳态电路的功率	169	9.2.3 三角形—星形系统	237
6.5.1 正弦稳态一端口电路的功率	169	9.2.4 三角形—三角形系统	238
6.5.2 复功率	175	9.2.5 复杂的对称三相电路	238
6.5.3 功率因数的提高	176	9.3 不对称三相电路的分析	239
6.5.4 最大功率传输	179	9.4 三相电路的功率及测量	242
6.6 习题	182	9.4.1 三相电路的功率	242
第7章 谐振电路	189		
7.1 串联谐振电路	189		

9.4.2	三相电路的瞬时功率	243
9.4.3	三相电路功率的测量	244
9.5	习题	247

附录		251
----	--	-----

附录 A	利用 MATLAB 进行电路计算	251
------	------------------	-----

附录 B	基于 OrCAD/PSpice 的电路分析	262
附录 C	部分习题参考答案	274

参考文献		282
------	--	-----

第1章 电路基本概念和电路定律

本章首先介绍了电路的基本概念，主要涉及：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；还重点讲述了由于电路元件的相互连接对电路中电流、电压分布所形成的约束，即基尔霍夫定律。

1.1 电气工程与电路理论

随着社会的不断进步和科学技术的飞速发展，电作为一种优越的能量形式和信息载体成为当今经济建设和社会生活中不可或缺的重要部分。在过去的一个半世纪，电气工程已经在改变人们的生活方式和工作方式方面扮演了重要的角色，在生活中非常普及，广泛出现在通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统以及信号处理系统中。

电气工程领域涉及面非常广泛，这些不同的领域是否有共同的部分呢？这共同的部分就是电路。电路是实际电气系统特性的近似数学模型，是跨越各个工程学科、有着广泛应用的电路理论的结晶，为学习电气工程提供了重要的基础。

电路理论是研究静止和运动电荷的电磁理论的特例，尽管广义的电磁理论似乎是研究电信号的出发点，但是在应用的时候不仅麻烦，而且需要使用高深的数学知识，解决方案非常复杂，而使用电路理论则能获得简单而又足够精确的解决方案，其重要作用显而易见。

可以肯定地说，模型、数学技术和电路将成为构建系统的三大基本框架，在未来的工程学探索中将发挥日益强大的作用。

1.2 电路和电路模型

1.2.1 实际电路

为了实现电能或电信号的产生、传输、加工及利用，人们将各种所需要的电器元件或设备，按一定方式连接起来而构成的集合称为电路，也称电网络。

日常生活中经常接触到的电器元件或设备有各种电源、电阻器、电感器、电容器、变压器、电子管、晶体管、固体组件等，而由这些元器件或设备通过连接构成的实际电路也遍布生活的各个领域。有些实际电路十分庞大、复杂，可以延伸到数百乃至上千千米之外，例如由发电机、变压器、输电线及各种用电负载组成的电力系统，或现在迅速发展的通信系统等。而有些电路则可以被局限在非常微小的面积之内，例如，某些芯片虽然只有指甲盖大小却是由成千上万个晶体管相互连接集成的一个复杂电路或系统。前述的电路无论尺寸大小，其内部结构都是比较复杂的，也有些实际电路是非常简单的，例如手电筒就是一个简单的电路。

无论实际电路的尺寸与复杂程度如何，我们都可以把它们看成由三个基本部分组成：供电装置（如电信号的发生器，即电源）、用电设备（即负载）和中间环节（即连接导线、控制开关等）。由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的，因此电源又称为激励，而由它作用产生的电压和电流称为响应。有时根据激励和响应的因果关系，又把激励称为输入，响应称为输出。利用实际电路可以实现各种各样的功能，概括起来主要有以下几个方面：

1) 实现能量的转换、传输和分配。例如，水能、热能、核能等先通过发电机转化成电能，然后通过变压器和输电线将其进行传输和分配，最后将电能转换成用户所需要的机械能、光能和热能等。在系统中提供电能的设备称为电源，而吸收和消耗电能的设备称为负载。

2) 实现各种电信号（如语音信号、图像信号等）的传输和处理。利用一定的电路设备，可对给定信号进行放大、滤波、调制和解调，以获得所需的信号（输出）。

3) 实现信息的储存、数学运算和设备运行的控制等。计算机中的寄存器和 CPU 就是典型的信息储存和数学运算电路，而实现控制功能的电路在日常生活中更是举不胜举。

1.2.2 电路模型

电路理论的主要任务是研究电路中发生的电磁现象，用电压（或电荷）、电流（或磁通）等物理量来描述其中的过程。由于研究电路的目的通常是计算电路中各器件的端子电流和端子间的电压，一般不考虑器件内部发生的物理过程，因此可以根据各元器件端部主要物理量间的约束关系对电路中的实际元器件进行理想化处理，引入一些抽象化的理想元件模型，再根据电路的实际连接情况将这些理想元器件加以连接，就可以建立实际电路的模型。通常将由理想元器件所构成的电路称为实际电路的电路模型，简称电路模型。电路模型的建立可以简化对电路的分析和计算，本书讨论的电路均为电路模型。

建立电路模型的首要任务是引入能客观反映实际元器件基本性质的理想电路元件，这些理想电路元件是组成电路模型的最小单元，具有精确的数学定义，能够反映实际电路中的电磁现象，表征其电磁性质。例如，用理想电阻元件表示消耗电能的器件；理想电感元件表示具有产生磁场、储存磁能作用的器件（如各种电感线圈）；理想电容元件表示具有产生电场、储存电场能作用的器件（如各种电容器）；电源元件表示将具有其他形式的能量转换成电能的元件，诸如发电机、电池等器件。将这些理想元件适当地连接起来，便可构成实际电路的模型。理想电路元件根据其与电路其他部分连接的端子数目可划分为二端、三端、四端元件等。

实际电路用途各异，种类繁多，几何尺寸也相差很大。如果构成电路的器件以及电路本身的尺寸远远小于电路以最高频率工作时电磁波的波长，或者说电磁波通过电路的时间认为是瞬间的，则可以用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。如上面所述的电阻、电感、电容等，都分别集总地表现实际电路中的电场或磁场的作用。如果二端元件中有确定的电流，端子间有确定的电压，则这样的元件称为集总（参数）元件，由集总（参数）元件构成的电路称为集总（参数）电路。本书只考虑集总电路。

图 1-2-1a 所示为手电筒的实际简单电路，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 1-2-1b 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原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 来等效，连接导线用理想导线（其电阻为零）或线段表示。

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。有的电路的建模比较简单，例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

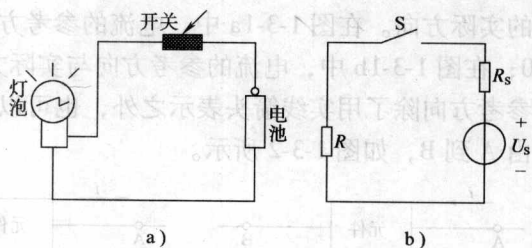


图 1-2-1 实际电路与电路模型

a) 实际电路 b) 电路模型

型建得太复杂就会造成分析和计算的困难，太简单则不足以反应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，这里不作进一步阐述。

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。

1.3 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可能是未知的，也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。

1.3.1 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

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-3-1)$$

i 称为电流，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，所以在描述一个电流时要同时给出电流

的大小和方向。图 1-3-1 代表电路的一部分，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，这时可选定其中任一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 i 便成为了代数量。一般电路图中用实线箭头代表电流 i 的参考方向，虚线箭头代表电流 i 的实际方向。在图 1-3-1a 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 1-3-1b 中，电流的参考方向与实际方向相反，此时电流 i 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，例如 i_{AB} 代表电流的参考方向是由 A 到 B，如图 1-3-2 所示。

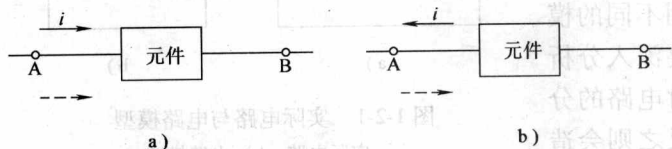


图 1-3-1 电流的参考方向
a) $i > 0$ b) $i < 0$

图 1-3-2 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 的正负来判断实际方向。在图 1-3-3a 中，设元件电流的参考方向是从 A 指向 B，电流的波形如图 1-3-3b 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。

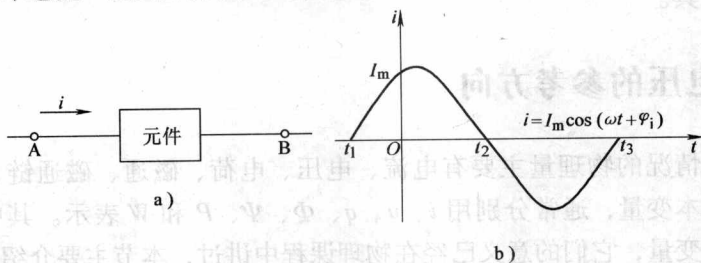


图 1-3-3 电流实际方向的判断

指定电流参考方向之后，可以根据电流数值的正、负来确定电流的实际方向。

1.3.2 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到另一点时，电场对电荷做功。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。

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

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-3-2)$$

在电场中可取一点作为参考点, 记为 P, 设此点的电位为零。电场中的一点 A 至 P 点的电压 U_{AP} 规定为 A 点的电位, 记为 φ_A , 即

$$\varphi_A = U_{AP}$$

在电路问题中, 可以任选电路中的一点作为参考点, 例如取“地”作为参考点。两点间的电压不随参考点的不同而改变。用电位表示 A, B 两点间的电压, 有

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

显然又有

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = -U_{AB}$$

即两点间沿两个相反方向(从 A 到 B 和从 B 到 A)所得到的电压符号相反。

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的, 其值与参考点的选取有关; 电压则是对电路中某两点而言的, 其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压, 实际上是指该点与参考点之间的电压, 此时它与该点的电位是一致的。

与电流相似, 电路中某两点间的电压的参考方向也有两种可能, 为了分析方便, 同样可以指定其中任意方向为电压的参考方向。

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 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

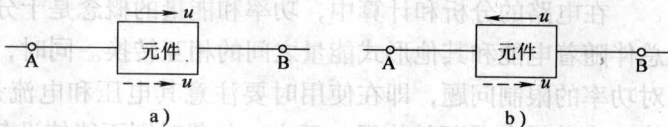


图 1-3-4 电压的参考方向

a) $u > 0$ b) $u < 0$

与电流一样, 当选定了电压的参考方向后, 电压 u 就成为了代数量。

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 $u < 0$ 。这两种情况见图 1-3-4, 其中实线箭头代表电压参考方向, 虚线箭头代表电压实际方向。

指定电压参考方向之后, 同样可以根据电压数值的正、负来确定电压的实际方向。

1.3.3 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实际分析之前, 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正参考极性端流入, 从负参考极性端流出, 如图 1-3-5a 所示, 称电压和电流为关联参考方向;

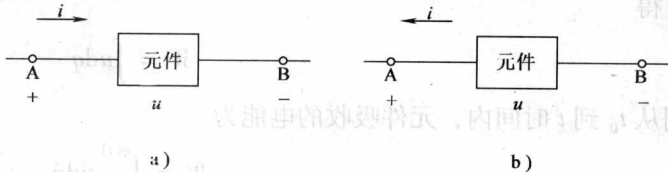


图 1-3-5 电压电流的关联和非关联参考方向

a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

若两者参考方向选取不一致，则称为非关联参考方向，如图 1-3-5b 所示。

这里需要强调的是，今后在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。

1.3.4 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。在 SI 单位中规定的用来构成十进倍数和分数单位的词头常用的有以下几种：

词头符号	T	G	M	k	m	μ	n	p
词头名称词	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
倍率	10 ¹²	10 ⁹	10 ⁶	10 ³	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²

例如：1μA = 10⁻⁶ A，10kV = 10 × 10³ V。

1.4 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。

1.4.1 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。

在电磁学中已经知道，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 点时电场力所作的功，即

可得

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



$$W = \int u dq$$

则从 t₀ 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

$$W = \int_0^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (14-1)$$

式中, u 和 i 都是时间的函数, 并且是代数量, 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。

1.4.2 功率

功率是能量对时间的导数, 即

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

由式(14-1)可知

$$p(t) = u(t) i(t) \quad (14-2)$$

上式表明, 元件在某瞬间吸收的功率等于该瞬间作用在该元件上的电压和流过该元件的电流的乘积, 而与元件本身的特性无关。

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, 实际中电能常用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$, 俗称度) 来表示, 且有

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

在具体的电路中, 有些元件吸收功率, 另一些则发出功率, 在应用式 (14-2) 求功率时应注意下列原则:

1) 当元件上电压和电流的参考方向取为关联参考方向时, p 表示元件吸收的功率。当 $p > 0$ 时, 表示该元件确实吸收功率; 反之, 当 $p < 0$ 时, 表示该元件发出功率。

2) 当元件上电压和电流的参考方向取为非关联参考方向时, p 表示元件发出的功率。当 $p > 0$ 时, 表示该元件确实发出功率; 反之, 当 $p < 0$ 时, 表示该元件吸收功率。

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

例 14-1 求图 14-1 所示各元件或电路的功率。图中 $u_1 = 4\text{V}$, $i_1 = 0.2\text{A}$; $u_2 = 6\text{V}$, $i_2 = -0.5\text{A}$; $u_3 = 3\text{V}$, $i_3 = 2\text{mA}$ 。

解 对于图 14-1a, 该元件上的电压和电流为关联参考方向, 所以

以元件吸收的功率为

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

由于 $p > 0$, 所以该元件确实吸收 0.8W 的功率。

对于图 14-1b, 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

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

由于 $p < 0$, 所以该元件发出 3W 的功率。

对于图 14-1c, 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

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

由于 $p > 0$, 所以该元件发出 6mW 的功率。

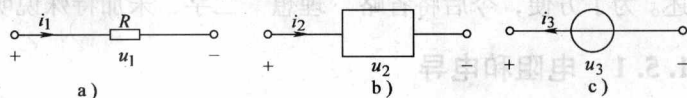


图 14-1 例 14-1 电路图

例 1-4-2 两个表示为盒 A 和盒 B 的电路如图 1-4-2 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。

(1) $u = 20\text{V}$, $i = 15\text{A}$ 。

(2) $u = 100\text{V}$, $i = -5\text{A}$ 。

(3) $u = -50\text{V}$, $i = 4\text{mA}$ 。

(4) $u = -25\text{V}$, $i = -16\text{A}$ 。

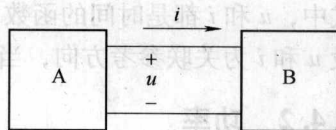


图 1-4-2 例 1-4-2 电路图

解 对于 (1): $p = ui = 20 \times 15\text{W} = 300\text{W}$, 连接后的功率大小为 300W 。

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; 可以验证, 盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 确实为吸收功率。

对于 (2): $p = ui = 100 \times (-5)\text{W} = -500\text{W}$, 连接后的功率大小为 500W 。

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; 可以验证, 盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 确实为发出功率。

同理, 对于 (3): $p = ui = -50 \times 4\text{W} = -200\text{W}$, 连接后的功率大小为 200W , 功率从 B 流向 A; 对于 (4): $p = ui = -25 \times (-16)\text{W} = 400\text{W}$, 连接后的功率大小为 400W , 功率从 A 流向 B。

1.5 电阻元件

电路元件是组成电路的最基本单元, 它通过端子与外部相连接, 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, 等等。

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、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, 今后将省略“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 (本节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下, 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