



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 电路基础理论

天津大学电工原理教研室 编

孙雨耕 主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 电路基础理论

天津大学电工原理教研室 编

孙雨耕 主编

DIANLU JICHU LILUN



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS  
北京

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。内容涵盖教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路理论基础”课程教学基本要求和“电路分析基础”课程教学基本要求。

全书共分十三章, 主要内容包括: 电路元件和电路基本定律、电阻电路的一般分析方法、电路定理、含运算放大器电阻电路、正弦交流稳态电路、三相电路、非正弦周期电流电路、线性电路动态过程的时域分析、线性电路动态过程的复频域分析、电路图论和网络方程、二端口网络、均匀传输线、非线性电阻电路。每章配有大量的例题和习题。附录包括状态方程的解、磁路、OrCAD 简介和 MATLAB 简介四部分。

本书适合普通高等学校电子与电气信息类专业师生使用, 也可供有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路基础理论/孙雨耕主编; 天津大学电工原理教研室编. —北京: 高等教育出版社, 2011. 5

ISBN 978 - 7 - 04 - 031714 - 5

I. ①电… II. ①孙…②天… 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 (2011) 第 056918 号

策划编辑 杜 炜      责任编辑 曲文利      封面设计 赵 阳      责任绘图 杜晓丹  
版式设计 马敬茹      责任校对 杨雪莲      责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	涿州市京南印刷厂	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787×1092 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	35	版 次	2011 年 5 月第 1 版
字 数	860 000	印 次	2011 年 5 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	49.80 元

---

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 31714-00

# 前 言

《电路基础理论》是在遵循教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路理论基础”课程教学基本要求和“电路分析基础”课程教学基本要求的基础上编写的,全书共十三章,其内容涵盖了该基本要求的全部知识点(包括可选内容),但不限于这些知识点。本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可供电子与电气信息类本科各专业用作电路课程的教材,也可作为本课程的教学参考书。

本书是在继承和发扬天津大学电工原理教研室多年来的教学传统、教学风格并总结经验之后写成的。在内容的编排上,总体结构仍然遵循“从特殊到一般”的原则,即先集总参数电路,后分布参数电路;先线性非时变电路,后非线性电路;先时域稳态电路,后时域暂态电路;先恒定电流电路和正弦交流电路,后非正弦电流电路;先时域暂态分析,后频域分析以及先经典电路理论,后近代电路理论等。电路课程教材既要保持理论上的完整性与系统性,又要为后续学科基础课和专业课课程提供必要的知识基础。目前,已有很多高校将电路课程安排在第一学年的第二学期,而线性代数课程若也安排在第二学期,学生尚不具备矩阵知识。因而本书将经典电路理论的内容置于前,完全可以满足后续的电子技术、电机学等课程的开设;将电路图论、二端口网络等内容置于后,有利于图论知识的系统性介绍,有利于和数学课的衔接,可以使学生较容易地接受电路的系统分析和计算机辅助电路分析。二端口网络内容置于后的考虑也是如此,有利于在复频域或频域中讨论二端口网络的特性,有利于联系实际。在集总参数电路知识有相当积累之后,在分布参数电路中,本书是按分布参数电路的波动方程及其一般解——正弦稳态解(篇幅相对较多,主要考虑工程应用)——暂态解(波过程)的次序编排的。以上这种内容编排也有利于使用本书的高校在教学改革中对部分内容的取舍与整合。此外超出电路课程教学基本要求的部分内容,以“\*”号注明。故使用本教材时,电路课程的学时可由使用者灵活掌握。

强调基本理论、基本概念和基本方法而不过于着重技巧性问题;在保持科学性、系统性的前提下,如何使教材具有启发性,便于学生阅读,从而有利于教与学,是所有编写电路教材的同行们共识的原则,共同的追求目标。我们也尽可能努力去做。

本书在学生易于理解和接受的前提下,尽量联系实际,以增强学生对理论的理解,提高学习的目的性。表现在从实际问题引出概念;在内容中加入联系实际的问题;以例题或习题的方式给出实例;例如本书单列一章介绍运算放大器,其中介绍了典型的运放功能电路,介绍了分析运放电路的一般方法——节点电压法、零子-任意子法,这些内容既是第二章介绍的电路分析方法的计算实例,又是构成第十一章介绍的二端口器件——负阻抗变换器、回转器等的核心部件,并加深对二端口网络性能的理解。又如增加了三相电路中的高次谐波、三相功率的测量、滤波器分析等,不一一列举。很多内容学生可以在自行设计后通过实验进一步学习。

为了与从事电路课程教学的同行们相互学习交流,配合本书还有一套电路课程电子教案(使用本教材的教师可通过“中国高校电子电气课程网”免费下载,网址 <http://ee.cncourse>。

com),它遵循本书的教学安排次序和内容,但并非与其雷同,仅供使用本书时参考,也便于学生自学。与本书配套的还有已由高等教育出版社出版、由天津大学孙雨耕等主编的《电路网络课程》。

本书的附录内容有四部分:状态方程的解,磁路,OrCAD 简介, MATLAB 简介。书后还附有名词索引和各章的部分习题参考答案,供使用者参考。

参与本书编写工作的有:钱巨玺(第一、二、三章),姜常珍(第七、十二章及附录 B),周树棠(第五章),宋学军(第九章),余晓丹(第八、十、十一章及附录 A),李桂丹(第四、六、十三章及附录 C、附录 D)。全书经孙雨耕教授审定,修改、补充和定稿,余晓丹和李桂丹协助孙雨耕做了大量修改完善工作。课程组的刘丽萍、杨挺、李造利和张强等教师也对部分章节提出修改意见或进行图文编辑等辅助工作。

感谢天津大学电工原理教研室杨山教授、刘美轮教授以及刘建猷、李文中、张荣华等同志,他们的教学经验为本书的编写提供了宝贵的借鉴。本书编写过程中还参阅了部分国内外优秀教材,也对这些教材的作者致以谢意。本书经浙江大学倪光正教授和上海交通大学陈洪亮教授仔细审阅并提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式: yuxd @ tju. edu. cn。

编者

2011年1月

# 目 录

第一章 电路元件和电路基本定律 .....	1	般分析法 .....	102
1-1 电路和电路模型 .....	1	习题 .....	106
1-2 元件中的电压、电流和 电功率 .....	3	第五章 正弦交流稳态电路 .....	108
1-3 电路元件 .....	8	5-1 正弦交流电的基本概念 .....	108
1-4 基尔霍夫定律 .....	17	5-2 电阻、电感和电容中的正弦 电流 .....	112
1-5 等效概念和等效变换 .....	22	5-3 正弦量的相量 表示 .....	118
习题 .....	30	5-4 复阻抗、复导纳及其等效 变换 .....	123
第二章 电阻电路的一般分析		5-5 正弦电路中的功率 .....	129
方法 .....	35	5-6 正弦稳态电路的分析计算 .....	136
2-1 电路方程的独立性和 $2b$ 法 方程 .....	35	5-7 谐振电路 .....	143
2-2 支路电流法 .....	38	5-8 互感耦合电路 .....	154
2-3 节点电压法 .....	41	5-9 理想变压器 .....	163
2-4 回路电流法 .....	49	习题 .....	169
习题 .....	55	第六章 三相电路 .....	176
第三章 电路定理 .....	59	6-1 三相电源和三相电路 .....	176
3-1 齐次性原理和叠加定理 .....	59	6-2 对称三相电路 .....	180
3-2 替代定理 .....	65	6-3 三相电路的功率 .....	183
3-3 特勒根定理 .....	66	6-4 对称三相电路的计算 .....	186
3-4 互易定理 .....	71	6-5 不对称三相电路的计算 .....	191
3-5 戴维南定理 .....	75	*6-6 三相电路中的功率 测量 .....	194
3-6 诺顿定理 .....	82	习题 .....	197
3-7 最大功率传输定理 .....	84	第七章 非正弦周期电流电路 .....	200
3-8 对偶原理 .....	86	7-1 非正弦周期函数的傅里叶 级数 .....	200
习题 .....	88	7-2 有效值、平均值和平均 功率 .....	208
第四章 含运算放大器电阻 电路 .....	94	7-3 非正弦周期电流电路的 计算 .....	213
4-1 运算放大器及其电路模型 .....	94		
4-2 典型含运算放大器的电阻 电路 .....	97		
4-3 含运算放大器电阻电路的一			

* 7-4 滤波电路 .....	216	10-6 回路分析法 .....	349
* 7-5 对称三相电路中的谐波 .....	221	10-7 割集分析法 .....	351
* 7-6 非周期信号的傅里叶 变换 .....	224	* 10-8 含受控源电路的节点 分析法 .....	354
习题 .....	228	10-9 状态变量和状态方程 .....	357
<b>第八章 线性电路动态过程的时域 分析 .....</b>	<b>230</b>	习题 .....	367
8-1 动态电路及其初始条件 .....	230	<b>第十一章 二端口网络 .....</b>	<b>371</b>
8-2 阶跃函数和冲激函数 .....	235	11-1 二端口网络的方程和 参数 .....	371
8-3 一阶电路的零输入响应 .....	238	11-2 二端口网络的等效电路 .....	385
8-4 一阶电路的零状态响应 .....	245	11-3 有载二端口网络 .....	388
8-5 一阶电路的全响应 .....	249	11-4 复合二端口网络 .....	393
* 8-6 一阶电路在正弦激励下 的响应 .....	260	11-5 二端口器件 .....	399
8-7 一阶电路的冲激响应 .....	265	习题 .....	406
8-8 一阶电路对任意激励的 响应 .....	269	<b>第十二章 均匀传输线 .....</b>	<b>410</b>
8-9 二阶动态电路 .....	272	12-1 电路参数的分布性与电磁 传输 .....	410
习题 .....	279	12-2 均匀传输线方程 .....	413
<b>第九章 线性电路动态过程的复频 域分析 .....</b>	<b>285</b>	12-3 均匀传输线的正弦稳态 响应 .....	417
9-1 拉普拉斯变换 .....	285	12-4 均匀传输线的输入阻抗 及负载工作状态 .....	425
9-2 拉普拉斯变换的基本性质 .....	287	12-5 均匀无损耗传输线的正 弦稳态解 .....	429
9-3 用部分分式展开法求原 函数 .....	293	12-6 均匀传输线的集总参数 等效电路 .....	436
9-4 复频域形式的电路定律和 电路模型 .....	298	12-7 无损耗线终端接电阻时 的阶跃响应 .....	439
9-5 用复频域分析法解电路的 动态过程 .....	304	12-8 无损耗线波过程的一般 求解方法 .....	447
9-6 网络函数 .....	311	习题 .....	453
习题 .....	316	<b>第十三章 非线性电阻电路 .....</b>	<b>456</b>
<b>第十章 电路图论和网络方程 .....</b>	<b>320</b>	13-1 非线性电阻 .....	456
10-1 网络的图 .....	320	13-2 图解分析法 .....	459
10-2 图的矩阵表示 .....	326	13-3 分段线性分析法 .....	465
10-3 标准支路及其方程的矩阵 形式 .....	338	13-4 数值分析法 .....	470
10-4 节点分析法 .....	343	13-5 小信号分析法 .....	474
10-5 网孔分析法 .....	346	习题 .....	478

---

附录 A 状态方程的解 .....	482	C-2 设置分析类型和参数 .....	509
A-1 状态方程的时域解析 解法 .....	482	C-3 查看仿真结果 .....	510
A-2 状态方程的复频域解法 .....	487	C-4 仿真实例 .....	511
附录 B 磁路 .....	491	附录 D MATLAB 简介 .....	515
B-1 磁路及其基本定律 .....	491	D-1 MATLAB 基本操作 .....	515
B-2 铁磁材料的磁性能 .....	494	D-2 MATLAB 语言要点 .....	516
B-3 恒定磁通磁路的计算 .....	496	D-3 MATLAB 二维绘图 .....	521
B-4 交变磁通磁路 .....	501	D-4 仿真实例 .....	521
附录 C OrCAD 简介 .....	505	部分习题参考答案 .....	524
C-1 绘制电路原理图 .....	505	中英文名词索引 .....	537
		参考文献 .....	550



# 第一章 电路元件和电路基本定律

电路理论的重要内容之一是研究电路的基本规律和分析方法。为此首先要定义电路及与电路相关的基本术语、电路的分类;其次要介绍电路的基本变量——电压、电流、电荷、磁通,介绍功率和能量的计算方法;然后研究构成电路的主要电路元件的约束方程。电路即由这些电路元件以一定方式连接而成。用什么去分析、计算电路?主要应用基尔霍夫定律和元件端子间的电压、电流约束关系。学习本章应沿着这条思路,并通过今后各章的学习牢固掌握这些基本概念和方法。

本章介绍的电压、电流的参考方向问题以及等效变换的概念也非常重要,应注意理解并熟练运用,它们将一直贯穿本书始终。

## 1-1 电路和电路模型

电路的功能是进行电能(electric energy)(或电信号)的传输、分配(或处理)及与其他形式的能量的相互转换。为实现某种目的,将若干个电气器件(electric device)以一定方式连接起来,形成电流的通路,这就是人们经常遇到的实际电路。

实际电路多种多样,使用目的各有不同。例如在电力系统中,火力发电厂将热能转换成电能,电能经升压变压器送到输电线路,在终端又经降压变压器和配电网络输送给用户,供企业的电动机、家庭用的微波炉、洗衣机等电器使用,转换为机械能、热能等。其传输过程中还包括必要的测量和控制等电气器件,是一个大功率的实际电路(系统)。实际的电气器件种类繁多,既有大型的电气器件(如前例的发电机、变压器、电动机等),也有小型或微型电气器件。目前在 $1\text{ cm}^2$ 的超大规模集成电路芯片上可集成 $1.08 \times 10^9$ 以上个晶体管。这些电气器件所涉及的物理过程很广泛。人们把将其他形式的能量(化、机、光、热、风等)转变为电能的器件叫做电源(source),把将电能转变为其他形式的能量的器件叫做负载(load),所以实际电路是由电源和负载经过控制、测量等器件连接而成的电流通路。其中的负载电压(voltage)、电流(current)是由电源产生的,故电源也称为激励源(excitation source),简称激励(excitation),由激励在电路中产生的电压、电流也称为响应(response);激励又可称为电路的输入(input),响应也可称为电路的输出(output)。

电路理论不研究各种能量相互转换的机理,只关心电路中的电磁过程。在物理学的电磁场理论中,磁场(magnetic field)强度向量( $H$ )、电场(electric field)强度向量( $E$ )、电位移(electric displacement)向量( $D$ )和磁感应(magnetic induction)强度向量( $B$ )是四个基本物理量,而电流、电压、电荷(electric charge)和磁通(链)(magnetic flux(linkage))是与上述四个基本物理量一一对应的。因而可由电流、电压、电荷和磁通(链)表征电路中的电磁过程,这四个物理量称为电路

的**基本变量**(fundamental variable)。电气器件的性能可用它们外接端子处基本变量之间的关系,如电压和电流的代数方程或微分方程来描述。实际电气器件的性能方程很复杂,为了简化对器件的数学描述,常常略去其次要的物理过程,把它理想化。理想化的方程在一定条件下能正确反映实际器件的基本物理现象。理想化器件的数学模型叫做**电路元件**(circuit element)。

电路元件是单个部件。每一元件只反映一种电磁现象,用一种特定的函数来表示。电路元件由实际器件抽象而来,然而并非与实际器件一一对应。尽管实际电气器件有成千上万种,电路元件却只有少数几种。任何实际电气器件都可用一个或几个元件的组合来代表,且具有足够的精确度。

表示电路元件端子变量间关系的数学表达式称为元件的**约束方程**(constraint equation)。如果元件的约束方程是线性代数方程或线性微分方程,则称它为**线性元件**(linear element);如果电路元件的约束方程是非线性代数方程或非线性微分方程,则称它为**非线性元件**(nonlinear element)。

在电压与电流(有时还涉及电荷或磁通)之间及与它们的导数之间的相互联系的系数称为元件的**参数**(parameter)。元件参数是常数时称为**非时变元件**(time-invariant element),元件参数随时间按某种规律变化时称为**时变元件**(time-varying element)。非线性元件的参数是其端子变量的函数。

若电路元件端子的电压、电流不是空间坐标函数,称该元件为**集总参数元件**(lumped-parameter element),这只是在电气器件的几何尺寸比电压、电流的波长小很多的条件下才成立。这时可把器件看成一个点,而不考虑空间因素。仅含集总参数元件的电路称为**集总参数电路**(lumped-parameter circuit)。若此条件不满足,则电压、电流将既与时间有关,又与空间坐标有关,也就是说它们将是时空函数。描述这种器件的约束方程将是偏微分方程,这种器件的理想化模型叫做**分布参数元件**(distributed-parameter element)。

由电路元件按一定方式连接而成的理想化电路可作为实际电路的**电路模型**(circuit model),简称为**电路**(electric circuit)。将电路元件用图形符号表示并用理想导线连接,便是理论分析用的电路图。以最简单的手电筒为例,图 1.1(a)是手电筒的实际电路,图 1.1(b)是它的**电气图**(electric diagram)。它是由干电池、开关、灯泡和筒壳组合而成。其中筒壳可构成导体,将干电池、开关和灯泡连接成一个整体。通过开关动作可以实现电池和灯泡的接通和断开,以达到应用电能的目的。可用图 1.1(c)所示电路图描述手电筒电路,此图为手电筒的电路模型,亦称手电筒电路(图中的电压源  $U_s$  和电阻  $R_s$  等图形和符号将在本章 1-3 节中介绍)。

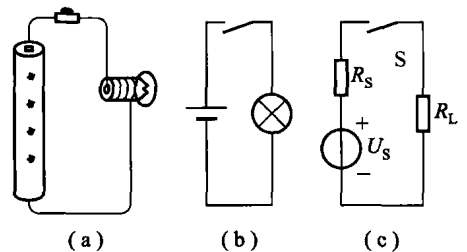


图 1.1 手电筒电路

电路理论由两部分内容组成:一是在电路元件的约束方程和连接方式为已知时,研究该电路对给定激励(输入)产生的响应(输出),即是研究电路的基本规律和计算方法——**电路(网络)分析**(circuit(network) analysis);二是研究如何构成电路,使其满足响应与激励之间预定关系的要求——**电路(网络)综合**(circuit(network) synthesis)。本书主要研究电路分析。研究电路的理论基础是电磁学,电荷守恒定律和能量守恒定律是两个基本公设。

电路的响应与激励之间的关系决定该电路是否为线性、非时变或集总参数的。可以把元件有关性质的定义推广应用到电路。一般地说,只含有线性元件的电路为**线性电路**(linear circuit),其基本特点是适用叠加定理(第三章):对电路同时施加若干个激励的响应等于每一个单独激励所产生的响应之代数和。含有一个及以上非线性(或时变,或分布参数)元件的电路称为非线性(或时变,或分布参数)电路。

严格地说,实际电路都是非线性、分布参数的。但在多数情况下,用集总的线性元件来模拟,可以达到工程所需要的精确度。

## 1-2 元件中的电压、电流和电功率

### 1. 电压和电流

电路元件按其外接端子的数目,可分为二端元件、三端元件、多端元件等。图 1.2 为任意二端元件。端子 1、2 与其他元件相连接。端子间电压和电流分别用  $u$  和  $i$  表示。根据电流连续性原理,从一个端子流进的电流等于从另一个端子流出的电流。

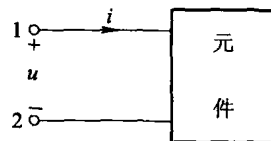


图 1.2 二端元件

电流既是一种物理现象,又是与磁场强度对应的物理量。作为电路的一个基本变量,其定义是:通过某个截面上的电荷量对时间的变化率,即

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

其中,  $q$  为电荷的符号。电荷  $q$  是沿所指方向穿过该截面的正电荷  $q_+$  与反方向穿过该截面的负电荷  $q_-$  的绝对值之和。电流的符号为  $i$  (在直流电流或一些特殊情况下,也可以用大写的  $I$  表示)。在国际单位制(SI)中,规定电荷的基本计算单位为库仑(Coulomb),简称库,符号为 C;规定电流的基本计算单位为安培(Ampere),简称安,符号为 A;规定时间的单位为秒(second),符号为 s。于是式(1-2-1)表明,当每秒流过截面的电荷为 1 C 时,电流为 1 A。根据电流的大小,有时也用微安( $\mu\text{A}$ ),  $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ ;毫安(mA),  $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ ;或千安(kA),  $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$  等表示电流。

现用表 1.1 介绍在电路理论中常用的 SI 倍数单位、名称和因数。

表 1.1 SI 中的倍数

符号	名称	因数	原文(法文)	符号	名称	因数	原文(法文)
T	太	$10^{12}$	tera	m	毫	$10^{-3}$	milli
G	吉	$10^9$	giga	$\mu$	微	$10^{-6}$	micro
M	兆	$10^6$	maga	n	纳	$10^{-9}$	nano
k	千	$10^3$	kilo	p	皮	$10^{-12}$	pico

电流是有实际方向的。在物理学中,规定电流的实际方向为正电荷移动的方向。但在分析计算电路前,电流的实际方向常常是未知的。例如在图 1.3 中,该二端元件中电流的实际方向可能为从 a 到 b,也可能为从 b 到 a。当计算复杂电路时,不可能事先判断出各元件电流的实际方向。

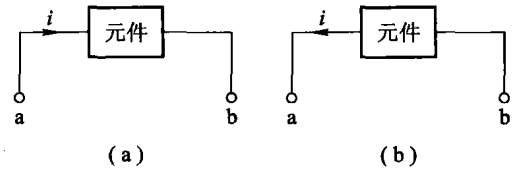


图 1.3 电流方向

不仅如此,流过元件电流的实际方向还可能是随时间变化的,有时从 a 到 b,有时从 b 到 a。基于以上原因,在列写电路方程以前,首先要指定一个电流的参考方向(reference direction),在电路图中用箭头“→”表示。然后根据各元件电流的参考方向列写电路方程。当计算出的某电流结果为正值时,说明该电流的实际方向与所设的参考方向一致;若为负值,说明实际方向与参考方向相反,即由计算结果的正负来判断某电流在某瞬时的真实方向。这就把有实际方向的变量  $i$  转化为有正、负之分的代数量,便于分析计算。

电流常是时间的函数  $i = i(t)$ ,图 1.4 给出几种典型的电流随时间变化的波形。在指定参考方向后,得到的这些电流  $i(t)$  可以为正、为负或为零。电流按照随时间变化的规律可有直流、交流、周期和非周期等类型。方向不随时间变化的电流为直流,如图 1.4(a)、(b)所示,其中图 1.4(a)为恒定直流,图 1.4(b)为脉动(变动)直流,即大小随时间变化,但方向不随时间变化的电流;大小和方向皆随时间变化的电流为交流,如图 1.4(c)、(d)和(e)所示,其中图 1.4(c)和(d)为周期(periodic)电流,即随时间作周期变化的电流,图 1.4(e)为非周期(aperiodic)电流,即随时间任意变化,无周期规律的电流。图 1.4(d)还是交变(alternating)电流,即电流随时间作周期变化,并且一周期的平均值为零。

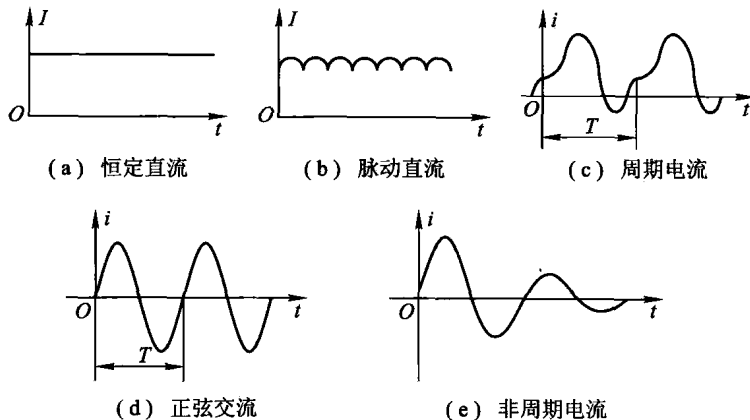


图 1.4 电流类型

电压是与电场强度相对应的一个基本变量,其定义是:电场力(electric field force)将单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功,用  $u_{ab}$  表示两点间的电压,用  $W_{ab}$  表示所作的功,则

$$u_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-2-2)$$

电压一般用符号  $u$  表示(直流电压或一些特殊情况下,也可用大写的  $U$  表示)。在国际单位制(SI)中功的基本计算单位为焦耳(Joule),简称焦,符号为 J。电压的基本计算单位是伏特

(Volt), 简称伏, 符号为 V, 也可以根据电压数值大小用微伏 ( $\mu\text{V}$ )、毫伏 (mV) 或千伏 (kV) 等表示。显然, 当电场力将 1 C 的电荷从 a 点移至 b 点时, 若所作的功为 1 J, 则 a、b 两点间电压为 1 V。

电压又称**电位差** (potential difference), 即与电压相关的另一个物理量是**电位** (potential)。电位的物理意义是: 在电路中可任选一点为**参考点** (reference point) (零电位点, 可用符号  $\perp$  表示), 其他某一点与参考点间的电压称为该点的电位。例如, 分别用  $u_a$ 、 $u_b$  表示 a 点和 b 点电位, 可有

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-2-3)$$

在此式中, 若  $u_a > u_b$ , 则  $u_{ab} > 0$ , 说明 a 点的电位高于 b 点的电位,  $u_{ab}$  为电位降, 因此必然有

$$u_{ba} = u_b - u_a = -u_{ab} \quad (1-2-4)$$

由此看出, 若  $u_{ab}$  为电位降, 则  $u_{ba}$  为电位升。

和电流一样, 电压也有其实际方向, 即从高电位到低电位的方向 (电位降方向)。但在分析、计算电路前, 电压的实际方向也是未知的, 也必须设定参考方向, 如图 1.5 所示。用“+”、“-”极性表示电压的参考方向, 即由“+”到“-”的方向; 电压的参考方向有时也用“ $\rightarrow$ ”表示, 箭头指向电位降的方向; 也有时用双下标如  $u_{ab}$  表示 a 点到 b 点为其电压的参考方向。当计算结果  $u$  的值为正时, 表明电位降的方向就是参考方向; 若计算结果  $u$  的值为负, 则表明电位降的方向与参考方向相反。于是电压这一基本变量也如电流一样转化为有正、负的代数量。

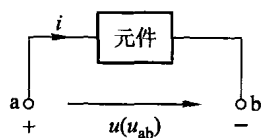


图 1.5 电压参考方向

在电路理论中, 某元件上的电流参考方向和电压参考方向均可以任意标定, 但由于已约定正电荷在电场力的作用下从高电位移向低电位而形成电流的方向, 即电流和电压的方向之间是相互关联的。假设一个元件上的电流参考方向与电压参考方向一致, 即电流从“+”极经元件到“-”极, 则将此时的电压、电流之间的方向关系称为**关联参考方向** (associated reference direction), 否则称为**非关联参考方向** (non-associated reference direction)。如在图 1.6 中, 对元件同时设定电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向时, 图 1.6(a) 为关联参考方向, 图 1.6(b) 为非关联参考方向。

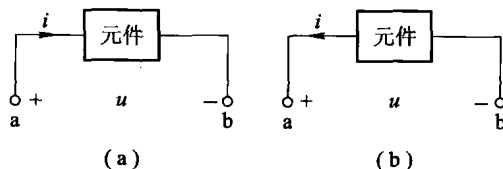


图 1.6 关联参考方向和非关联参考方向

在复杂电路分析中, 若规定各元件电压、电流均设定为关联参考方向, 为了简便, 常把电压 (或电流) 的参考方向省去, 只画电流 (或电压) 参考方向。

## 2. 电功率

由电压定义可知, 电压等于单位正电荷在电场力作用下, 从 a 点移至 b 点所作的功, 或在数值上等于外力克服电场力把单位正电荷从 b 点移至 a 点所作的功。这两个过程都将发生能量的转换——电能转换为其他形式的能量, 或其他形式的能量转换为电能。

在关联参考方向下,正电荷在电场力作用下,从高电位经元件移向低电位,此时元件将消耗或吸收电能。为衡量能量转换速率,现定义一个新的变量:若在  $dt$  时间内,消耗或吸收的能量为  $dW$ ,则将转换速率

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-2-5)$$

称为该元件的电功率,简称**功率**(power)。

由电压和电流的定义可知

$$dW = udq = uidt$$

代入式(1-2-5)可得

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-2-6)$$

功率的单位为**瓦特**(Watt),简称瓦,符号为 W。上式表明当  $u, i$  取关联参考方向时,若  $u = 1 \text{ V}, i = 1 \text{ A}$ ,则该元件吸收的功率  $p = 1 \text{ W}$ 。

在  $[t_0, t]$  时间间隔内,输送给元件的能量为

$$W(t) = \int_{t_0}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \quad (1-2-7)$$

如前所述,电能的单位是焦(J)。以  $1 \text{ W}$  的功率传输  $1 \text{ s}$  时的能量为  $1 \text{ J}$ 。在电力系统中常用瓦·时( $\text{W} \cdot \text{h}$ )或千瓦·时( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )计量电能,通常所说的 1 度电指  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。若

$$W(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)i(\tau)d\tau \geq 0 \quad (1-2-8)$$

成立,即到任意瞬间为止,送到元件的能量总为非负值,则该元件是能量的需求者,这类元件称为**无源元件**(passive element)。

如果一个元件的初始电压和初始电流为零,然后随时间按任意规律增长,最后又衰减到零,在整个过程中送入元件的总能量为零,则这种元件称为**无损元件**(lossless element),用公式表示为

$$W(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau)i(\tau)d\tau = 0 \quad (1-2-9)$$

其中假设,  $u(-\infty) = u(\infty) = 0$  和  $i(-\infty) = i(\infty) = 0$ 。

应注意,从式(1-2-6)到式(1-2-9)中的  $u$  和  $i$  是在关联参考方向下,“表示”元件吸收的功率或能量,即在列写公式时,是按照关联参考方向下,“表示”吸收功率的分析得出的。实际是否是吸收功率,要由两个因素确定:一是  $u$  和  $i$  参考方向的确定;二是  $u$  和  $i$  计算结果的正、负。若在关联参考方向下,计算结果  $p = ui > 0$ ,则该元件吸收功率(或能量),若  $p = ui < 0$  则实际为供出功率(或能量),故关联参考方向也称为**无源惯例方向**;反之,若设定  $u$  和  $i$  为非关联参考方向,上述各式“表示”的是供出功率(或能量),即此时若  $p > 0$ ,则为实际供出功率(或能量), $p < 0$  为实际吸收功率(或能量)。

**例题 1.2.1** 在图 1.7 所示电路中,已知元件电压  $U_1 = -20 \text{ V}, U_3 = 10 \text{ V}, U_4 = 15 \text{ V}$ 。试求

以 d 为参考点时, a、b 和 c 各点的电位及第 2、5 和 6 元件的电压。

解 因为以 d 点为参考点, 其他各点的电位为该点到 d 点的电压, 可得

$$U_b = U_{bd} = U_3 = 10 \text{ V}$$

$$U_a = U_{ad} = U_{ab} + U_{bd}$$

$$= U_1 + U_3 = (-20 + 10) \text{ V} = -10 \text{ V}$$

$$U_c = U_{cd} = U_{ca} + U_{ab} + U_{bd}$$

$$= -U_4 + U_1 + U_3 = (-15 - 20 + 10) \text{ V} = -25 \text{ V}$$

第三式中  $U_{ca} = -U_4$  是因为两者极性相反。待求各元件电压为

$$U_6 = U_c = -25 \text{ V}$$

$$U_5 = U_a = -10 \text{ V}$$

$$U_2 = U_c - U_b = (-25 - 10) \text{ V} = -35 \text{ V}$$

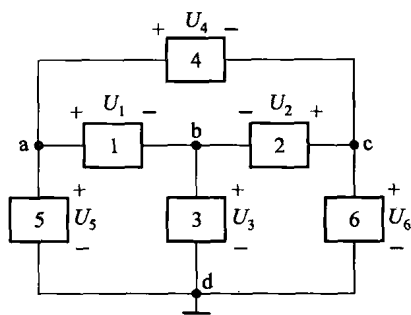


图 1.7 例题 1.2.1

例题 1.2.2 计算图 1.8 中各元件的功率。设图 1.8(a) 中, (1)  $I = 1 \text{ A}$ ,  $U = 2 \text{ V}$ ; (2)  $I = 1 \text{ A}$ ,  $U = -2 \text{ V}$ 。设图 1.8(b) 中, (1)  $I = -2 \text{ A}$ ,  $U = 3 \text{ V}$ ; (2)  $I = -2 \text{ A}$ ,  $U = -3 \text{ V}$ 。

解 在图 1.8(a) 中, 因为电压与电流的参考方向一致, 所以  $U$  与  $I$  的乘积表示该元件吸收的功率, 在情况(1)时, 元件吸收的功率为

$$P = UI = 2 \times 1 \text{ W} = 2 \text{ W}$$

在情况(2)时, 元件吸收的功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 \text{ W} = -2 \text{ W}$$

计算结果为负值, 表明此情况下, 该元件向外供出 2 W 功率。

在图 1.8(b) 中, 因为电压与电流的参考方向相反, 所以  $U$  与  $I$  的乘积表示该元件供出的功率, 在情况(1)时, 元件供出的功率为

$$P = UI = 3 \times (-2) \text{ W} = -6 \text{ W}$$

元件供出的功率为负值, 表明此情况下, 该元件实际在吸收功率。

在情况(2)时, 元件供出的功率为

$$P = UI = (-3) \times (-2) \text{ W} = 6 \text{ W}$$

计算结果为正值, 表明此情况下, 该元件向外供出 6 W 功率。

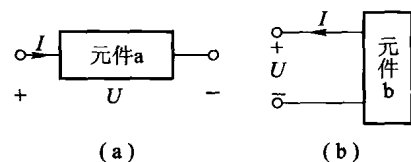
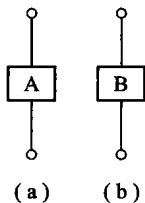


图 1.8 例题 1.2.2

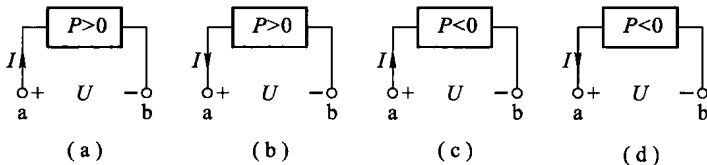
## 思考与练习

1.2.1 在题图 1.2.1 的 A 和 B 两元件中分别依关联参考方向和非关联参考方向标出电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向。

1.2.2 在题图 1.2.2 中的 4 种情况下,哪个元件吸收功率? 哪个元件供出功率?



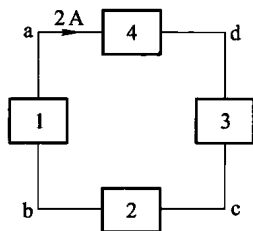
题图 1.2.1



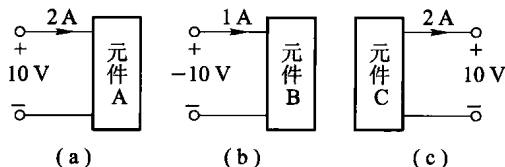
题图 1.2.2

1.2.3 在题图 1.2.3 中已知元件 1 供出功率 50 W,元件 2、3 和 4 吸收功率分别为 25 W、15 W 和 10 W。求  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{cd}$  和  $U_{da}$ 。

1.2.4 在题图 1.2.4 的 3 个电路中,哪个吸收功率? 哪个供出功率? 其值各为多少?



题图 1.2.3



题图 1.2.4

## 1-3 电路元件

本节首先介绍三个无源电路元件:电阻、电感和电容,它们分别用来反映电热效应、磁场效应和电场效应;再介绍两个有源二端元件——理想电压源和理想电流源;然后介绍表示元器件控制特性的受控源。

### 1. 电阻元件

电阻元件是电阻器、白炽灯、电炉等实际电气器件的理想化模型,这些电气器件主要的、共同的特征是消耗电能。电阻元件就是用来表示电路中电能消耗这一物理现象的理想元件。

一个二端元件,如果在任何时间  $t$ ,其端子间电压与流过其中的电流之间的关系可用  $u-i$  平面(或  $i-u$  平面)的一条曲线来表示,则称该元件为电阻元件(resistor),简称电阻。电阻的  $u-i$  关系也可以用代数方程  $f(u, i) = 0$  来表达,称为伏安特性(voltage-current characteristic)。一般情况下,电阻的伏安特性是非线性的。如果  $f(u, i) = 0$  是一条通过原点的直线,如图 1.9 所示,则称为线性电阻。线性电阻的电路符号如图 1.10 所示,通常电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向。

对于线性电阻,其端电压与流过的电流成正比,即

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

上式表征为熟知的欧姆定律(Ohm's law)。式中系数  $R$  为电阻元件的参数,称为电阻系数,简称电阻(resistance)。 $R$  反映了线性电阻元件伏安曲线的斜率,即

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-3-2)$$



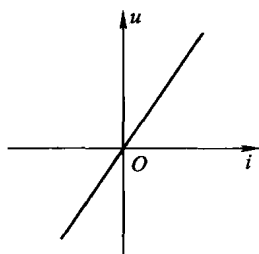


图 1.9 线性电阻伏安特性曲线

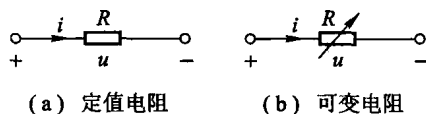


图 1.10 线性电阻电路符号

电阻的基本单位为欧姆(Ohm),简称欧,符号为 $\Omega$ 。 $R$ 的倒数 $G$ 是电阻元件的另一个参数,称为电导系数,简称电导(conductance),即

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u} \quad (1-3-3)$$

电导的基本单位为西门子(Siemens),简称西,符号为 $S$ 。

如果电阻的参数为负值,称为负电阻(negative resistor)。线性负电阻的伏安特性曲线如图 1.11 所示。如无特殊说明,通常所说的线性电阻元件均指正电阻。

根据电功率的定义式(1-2-6),按图 1.10 所选参考方向,电阻元件吸收的电功率为

$$p = ui$$

对线性电阻

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-3-4)$$

由此式可以看出,当电阻元件参数 $R$ 或 $G$ 为正值时,功率 $p$ 也为正值。在 $(-\infty, t)$ 时间内,线性电阻吸收的能量为

$$W_R(t) = \int_{-\infty}^t p d\tau = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau = R \int_{-\infty}^t i^2(\tau) d\tau = G \int_{-\infty}^t u^2(\tau) d\tau \quad (1-3-5)$$

若 $R > 0$ ,则到任何时刻 $t$ ,都有 $W_R(t) \geq 0$ ,可见正电阻元件总是从电路吸取能量,因而是无源元件。

将式(1-3-4)代入式(1-2-9)得

$$W(t) = R \int_{-\infty}^{+\infty} i^2(\tau) d\tau = G \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(\tau) d\tau > 0 \quad (1-3-6)$$

可见,正电阻不满足无损条件。

在恒定电流 $I$ 作用下,在时间间隔 $t$ 内电阻元件吸收的能量为

$$W_R = UI t = I^2 R t = U^2 G t$$

式(1-3-5)和式(1-3-6)均由线性电阻导出。不难理解,对非线性电阻,若其伏安特性曲线在 $u-i$ 平面的第 I 和第 III 象限,电阻值虽然是变动的但总是正值,也是无源有损元件。

随着科学技术的发展,当今利用电子器件可以较容易地制作出具有负电阻特性的器件。由式(1-3-5)可知,负电阻吸收的能量为负值,即可以向外供出能量。因此负电阻为有源元件。

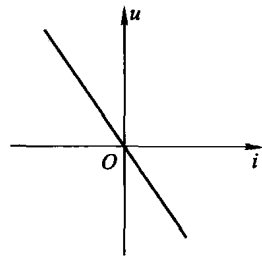


图 1.11 线性负电阻的伏安特性曲线