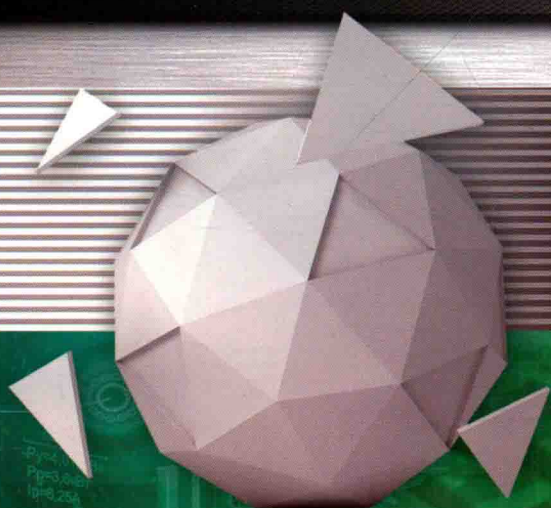


普通高等教育“十三五”规划教材

电路分析基础

曾令琴 郑崇伟◎主编

3



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

赠教学课件、教学大纲、习题详解、思考题解答、试题库等

普通高

划教材

电路分析基础

主 编 曾令琴 郑崇伟
副主编 王 磊 施肖菁 李 慧
参 编 庄友谊 闫 曾 原立格

机械工业出版社

本书是按照应用型人才培养目标的要求编写的。本书从理论上较为系统地阐述了电路的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共分12章,内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、单相正弦交流电路、正弦稳态电路的相量分析法、谐振电路、互感耦合电路与变压器、三相电路、电路的暂态分析、非正弦周期电流电路、二端口网络、均匀传输线和拉普拉斯变换。从学生应用能力的培养上,本书提出了相关的实践教学内容,包括与理论内容相关的实验指导,还有注重学生素质培养、应用型人才能力培养的电路实训项目,真正体现了应用型人才培养的教学模式。本书各章均配有与基本内容密切相关的例题和习题。

本书可作为高等工科院校应用型人才培类各专业教材,也可供有关科技人员学习参考。

为方便教学,本书配有免费教学大纲、高品质的教学课件、章后习题详解、节后思考题解答、试题库等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电(010-88379564)或邮件(cmpqu@163.com)索取,有任何技术问题也可通过以上方式联系。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/曾令琴,郑崇伟主编. —北京:机械工业出版社,2017.7
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-57005-9

I. ①电… II. ①曾… ②郑… 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(2017)第124268号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲世海 责任编辑:曲世海 王宗锋

责任校对:余瑞鑫 封面设计:陈沛

责任印制:孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2017年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·351千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57005-9

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

“电路分析基础”是高等工科院校电类各专业的一门重要专业基础课程，也是电类学生知识结构的重要组成部分，在人才培养中起着十分重要的作用，具有较强的实践性。通过对“电路分析基础”的学习，学生可以掌握电类技术人员必须具备的电路基本原理、基本概念以及电路基本分析方法，初步掌握各种常用电工仪器、仪表的使用及简单的电工测量方法，为后续专业课的学习奠定基础；同时，通过本课程的学习，能够提高自身理论联系实际的能力。

本书围绕应用型人才培养目标，立足于“加强基础，注重应用，精选内容，贴近实际”的原则，注意到对先修课程及后续课程的合理分工与衔接、配合问题，同时兼顾对学生的素质培养，采用科学的方法对广泛而复杂的课程内容进行了合理的整合。在阐述课程中诸多重要知识点及重要概念时，逐字逐句进行推敲，力求做到文字方面的通俗易懂，同时就各个知识点及概念定律，精心选编了相关的例题与习题，以达到对学生的真正起到引路作用；同时，本书加入了实验教学指导项目，真正把立足点移到了工程实际应用上，做到既为学生后续课程服务，又能直接服务于工程技术应用能力的培养，具有很强的实践性。另外，为了给教师和学生提供教学和学习上的方便，我们对教材进行了立体化建设，除了纸质主教材外，还制作了品质较高、操作性较强的教学课件，提供与教材相配套的教学大纲、试题库、章后习题详细解析、节后思考题解答等。

全书共分12章，第1章和第2章是课程的理论基础，建议课时为24学时；第3章、第4章建议为16学时；第5章建议为8学时；第6章建议为10学时；第7章建议为8学时；第8章建议为10学时；第9章建议为8学时；第10章建议为8学时；第11章建议为6课时；第12章建议为8课时（以上课时均包括实践教学环节课时）。实验课可以单独设课时，建议全课程理论总学时数不低于86学时，也可根据各专业课制定的不同选择适合于本专业的教学模块组合，但要求保证实践教学课时数不低于各模块的建议学时数，以保证教学质量。若按教材全部实践教学环节实施，则总实验、实训学时数建议不低于86学时，以保证学生应用能力的培养。

本书由曾令琴、郑崇伟主编，曾令琴负责并完成了对教材内容的全部审核工作；王磊、施肖菁担任副主编；庄友谊、闫曾、原立格参加编写。

为了使本书日臻完善，敬请使用本书的教师和工程技术人员对书中存在的错漏和不足之处，能及时给予批评指正。

编 者

目 录

前 言	
第1章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路的组成及功能	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路分析的变量	4
1.2.1 电流及其参考方向	4
1.2.2 电压及其参考方向	5
1.2.3 关联参考方向	5
1.2.4 电位及其电路参考点	6
1.2.5 电功和电功率	6
1.3 电路基本定律	8
1.3.1 欧姆定律 (VAR)	8
1.3.2 几个常用的电路名词	9
1.3.3 基尔霍夫定律 (KCL、KVL)	9
1.4 独立电源	12
1.4.1 理想电压源	12
1.4.2 理想电流源	13
1.4.3 实际电源的两种电路模型	13
1.5 电路的等效变换	14
1.5.1 电阻之间的等效变换	14
1.5.2 电源之间的等效变换	16
1.6 直流电路中的几个问题	18
1.6.1 电路中各点电位的计算	18
1.6.2 电桥电路	19
1.6.3 负载获得最大功率的条件	20
1.6.4 受控源	20
小结	22
应用能力培养课题一: 电路测量预备知识及能力的训练	22
应用能力培养课题二: 基尔霍夫定律的验证实验	29
习题	30
第2章 电路的基本分析方法	33
2.1 支路电流法	33
2.2 网孔电流法	35
2.3 节点分析法	37
2.3.1 节点电压法	37
2.3.2 弥尔曼定理	39
2.4 叠加定理	40

2.5 戴维南定理	42
2.6 互易定理	44
2.6.1 互易定理的第一种形式	44
2.6.2 互易定理的第二种形式	45
2.6.3 互易定理的第三种形式	45
小结	46
应用能力培养课题三：叠加定理和戴维南定理的验证	47
习题	48
第3章 单相正弦交流电路	50
3.1 正弦交流电路的基本概念	50
3.1.1 正弦量的三要素	50
3.1.2 相位差	53
3.2 单一参数的正弦交流电路	54
3.2.1 电阻元件	54
3.2.2 电感元件	56
3.2.3 电容元件	59
小结	62
应用能力培养课题四：家庭安全用电常识	63
应用能力培养课题五：参观电厂	64
习题	64
第4章 正弦稳态电路的相量分析法	66
4.1 复数及其运算	66
4.1.1 复数及其表示方法	66
4.1.2 复数运算法则	67
4.2 相量和复阻抗	68
4.2.1 相量	68
4.2.2 复阻抗	68
4.3 相量分析法	69
4.3.1 RLC 串联电路的相量模型分析	69
4.3.2 RLC 并联电路的相量模型分析	71
4.3.3 应用实例	72
4.4 复功率	77
4.4.1 正弦交流电路中的功率	77
4.4.2 复功率	78
4.4.3 功率因数的提高	79
小结	81
应用能力培养课题六：三表法测量电路参数的实验	82
应用能力培养课题七：荧光灯电路的连接及功率因数的提高实验	84
习题	87
第5章 谐振电路	90
5.1 串联谐振	90
5.1.1 RLC 串联电路的基本关系	90
5.1.2 串联谐振的条件	91

5.1.3	串联谐振电路的基本特性	91
*5.1.4	串联谐振回路的能量特性	92
5.1.5	串联谐振电路的频率特性	93
5.2	并联谐振	95
5.2.1	并联谐振电路的谐振条件	96
5.2.2	并联谐振电路的基本特性	96
5.2.3	并联电路的频率特性	97
5.2.4	并联谐振电路的一般分析方法	98
5.2.5	电源内阻对并联谐振电路的影响	98
5.3	正弦交流电路的最大功率传输	100
5.4	谐振电路的应用	101
	小结	102
	应用能力培养课题八：串联谐振的研究	102
	习题	105
第6章	互感耦合电路与变压器	106
6.1	互感的概念	106
6.1.1	互感现象	106
6.1.2	互感电压	107
6.1.3	耦合系数和同名端	107
6.2	互感电路的分析方法	108
6.2.1	互感线圈的串联	108
6.2.2	互感线圈的并联	109
6.2.3	互感线圈的T形等效	110
6.3	空心变压器	111
6.4	理想变压器	112
6.4.1	理想变压器的条件	113
6.4.2	理想变压器的主要性能	113
6.5	全耦合变压器	114
6.5.1	全耦合变压器的定义	114
6.5.2	全耦合变压器的等效电路	115
6.5.3	全耦合变压器的变换系数	115
	小结	116
	应用能力培养课题九：变压器参数测定及绕组极性判别实验	117
	习题	119
第7章	三相电路	121
7.1	三相交流电的基本概念	121
7.2	三相电源的连接	123
7.2.1	三相电源的星形联结	123
7.2.2	三相电源的三角形联结	124
7.3	三相负载的连接	125
7.3.1	三相负载的Y联结	125
7.3.2	三相负载的 Δ 联结	130
7.4	三相电路的功率	131
	小结	133

应用能力的培养课题十：三相电路电压、电流的测量	134
习题	136
第 8 章 电路的暂态分析	138
8.1 暂态分析的基本概念和定律	138
8.1.1 基本概念	138
8.1.2 换路定律	139
8.2 一阶电路的暂态分析	141
8.2.1 一阶电路的零输入响应	141
8.2.2 一阶电路的零状态响应	143
8.2.3 一阶电路的全响应	145
8.2.4 一阶电路暂态分析的三要素法	146
8.3 一阶电路的阶跃响应	148
8.3.1 单位阶跃函数	148
8.3.2 单位阶跃响应	149
8.4 二阶电路的零输入响应	150
小结	152
应用能力的培养课题十一：一阶电路响应测试	153
习题	155
第 9 章 非正弦周期电流电路	158
9.1 非正弦周期信号	158
9.1.1 非正弦周期信号的产生	158
9.1.2 非正弦周期信号的分解	159
9.2 谐波分析和频谱	160
9.2.1 非正弦周期信号的傅里叶级数表达式	160
9.2.2 非正弦周期信号的频谱	162
9.2.3 波形的对称性与谐波成分的关系	162
9.2.4 波形的平滑性与谐波成分的关系	163
9.3 非正弦周期信号的有效值、平均值和平均功率	164
9.3.1 非正弦周期量的有效值和平均值	164
9.3.2 非正弦周期量的平均功率	165
9.4 非正弦周期信号作用下的线性电路分析	165
小结	168
应用能力的培养课题十二：非正弦周期电流电路研究	169
习题	171
第 10 章 二端口网络	173
10.1 二端口网络的一般概念	173
10.2 二端口网络的基本方程和参数	174
10.2.1 阻抗方程与 Z 参数	174
10.2.2 导纳方程与 Y 参数	176
10.2.3 传输方程与 A 参数	177
10.2.4 混合方程与 h 参数	178
10.2.5 二端口网络参数之间的关系	178
10.2.6 实验参数	179
10.3 二端口网络的输入阻抗、输出阻抗和传输函数	180

10.4 线性二端口网络的等效电路	183
10.4.1 无源线性二端口网络的 T 形等效电路	183
10.4.2 无源线性二端口网络的 Π 形等效电路	184
10.4.3 T 形网络和 Π 形网络的等效变换	184
10.4.4 多个简单二端口网络的连接	185
10.5 二端口网络的特性阻抗和传输常数	186
10.5.1 二端口网络的特性阻抗	186
10.5.2 二端口网络的传输常数	187
10.6 二端口网络应用简介	188
10.6.1 相移器	188
10.6.2 衰减器	188
10.6.3 滤波器	188
小结	189
应用能力培养课题十三: 线性无源二端口网络的研究	191
习题	193
第 11 章 均匀传输线	195
11.1 分布参数电路	195
11.1.1 分布参数电路的条件	195
11.1.2 分布参数电路的分析方法	195
11.2 均匀传输线的正弦稳态响应方程式	196
11.2.1 均匀传输线的微分方程	196
11.2.2 均匀传输线方程的稳态解	197
11.3 均匀传输线上的波和传播特性	198
11.4 终端接有负载的传输线	200
11.4.1 反射系数	200
11.4.2 终端阻抗匹配的均匀传输线	200
11.4.3 终端阻抗不匹配的均匀传输线	201
小结	202
习题	203
第 12 章 拉普拉斯变换	204
12.1 拉普拉斯变换的定义	204
12.2 拉普拉斯变换的基本性质	206
12.3 拉普拉斯反变换	208
12.3.1 $F_2(s) = 0$ 有 n 个单根	209
12.3.2 $F_2(s) = 0$ 有共轭复根	210
12.3.3 $F_2(s) = 0$ 具有重根	210
12.4 应用拉氏变换分析线性电路	211
12.4.1 单一参数的运算电路	212
12.4.2 耦合电感的运算电路	213
12.4.3 拉氏变换在线性电路的应用	214
小结	218
应用能力培养课题十四: 常用元器件的识别、测试及焊接技术练习	219
习题	222
参考文献	223

第1章 电路的基本概念和基本定律

随着科学技术的飞速发展,现代电工电子设备种类日益繁多,规模和结构更是日新月异,但无论怎样设计和制造,这些设备绝大多数仍是由各式各样的电路所组成。不论电路的结构多么复杂,它们和最简单的电路之间还是具有许多基本的共性,遵循着相同的规律。本章的重点就是要阐明这些共性并分析电路的基本规律。

本章内容可划分为三个部分:电路的基本概念及电路物理量;基尔霍夫定律及电源模型;电路等效。本章内容既是贯穿全书的重要理论基础,也是实用电工技术中通用的理论依据,要求读者在学习中应予以足够的重视。

教学要求:

理论教学要求:了解和熟悉电路模型和理想电路元件的概念;理解和区分电压、电流、电动势、电功率的概念及其描述问题时方法上的区别;进一步熟悉欧姆定律及其扩展应用;充分理解和掌握基尔霍夫定律的内容,并能初步运用基尔霍夫定律分析电路中的实际问题;深刻理解和掌握参考方向在电路分析中的作用;理解和领会电路等效问题,熟练掌握无源二端网络和有源二端网络等效化简的基本方法。

实验教学要求:了解实验室的情况;熟悉常用电路仪器、仪表及其简单使用方法;学会测量直流电路中的电压和电流,学会用万用表测量电阻的方法。

1.1 电路和电路模型

学习目标:

了解基本电路的组成及其功能,理解电路模型及其理想电路元件的概念,熟悉实际电路模型化的条件,掌握实际电路元件与理想电路元件在电特性上的差别。

1.1.1 电路的组成及功能

电流通过的路径称为电路。

实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、二极管、晶体管等)组成。每一种电路实体部件具有各自不同的电磁特性和功能,按照人们的需要,把相关电路实体部件按一定方式进行组合,就构成了一个个电路。如果某个电路元器件数量很多且电路结构较为复杂时,通常又把这些电路称为电网络。

手电筒电路、单个照明灯电路是实际应用中最为简单的电路实例,电动机电路、雷达导航设备电路、计算机电路、电视机电路显然是较为复杂的电路,但不管简单还是复杂,电路的基本组成部分都离不开三个基本环节:电源、负载和中间环节。

电源:向电路提供电能的装置,如电池、发电机等。电源可以将其他形式的能量转换成电能,如电池把化学能转换为电能,发电机把热能、机械能或原子能等转换为电能。在电路

中，电源是激励，是激发和产生电流的因素。

负载：在电路中接收电能的装置，如电灯、电动机等。负载把从电源接收到的电能转换为人们需要的能量形式，如电灯把电能转变成光能和热能，电动机把电能转换为机械能，充电的蓄电池把电能转换为化学能等。在电路中，负载是响应，是接收和转换电能的用电器。

中间环节：电源和负载之间连通的传输导线、控制电路通断的控制开关、保护和监控实际电路的设备（如熔断器、热继电器、低压断路器等）等称为电路的中间环节。中间环节在电路中起着传输和分配能量、控制和保护电气设备的作用。

工程应用中的实际电路，按照功能的不同可概括为两大类：

① 电力系统中的电路：特点是大功率、大电流。其主要功能是对发电厂发出的电能进行传输、分配和转换。

② 电子技术中的电路：特点是小功率、小电流。其主要功能是实现电信号的传递、变换、储存和处理。

1.1.2 电路模型

电路理论是一门建立在理想化模型基础上的公共基础性工程学科，电路理论研究的对象并不是工程实际电路，而是与工程实际电路相对应的、由理想电路元件按一定方式连接组成的电路模型。对实际电路进行模型化处理，就是要在工程允许的范围内，用一些理想电路元件表征实际电路器件的主要电磁特性，忽略其次要因素，从而简化对实际问题的分析和计算。实践证明，这种抽象出实际电路器件的“电路模型”，是简化电路分析和计算最行之有效的办法。

电路模型中的理想电路元件，是用数学关系式严格定义的假想电路元件，每一种理想电路元件的电特性都是单一的、确切的，可用来精确地表示实际电路器件上具有的某种特定的电磁性能。如理想电阻元件可用来表征实际电路器件上耗能的电特性；理想电感元件可用来表征实际电路器件储存或释放磁场能量的电特性；理想电容元件则用来表征实际电路器件上储存或释放电场能量的电特性。例如，电炉的主要电磁特性是将电能转换成热能，且这种能量转换过程显然不可逆，属于耗能。电路理论中研究电炉电路时，就可根据其主要电磁特性将电炉抽象为一个理想电阻元件，并且根据电炉耗能的多少赋予相应的阻值。实际电容器的主要工作方式是充、放电，充放电过程中表现的主要电磁特性是储存和释放电场能量，其漏电现象可忽略时，在电路理论中可抽象为一个理想电容元件。显然，理想电路元件是在一定条件下实际电路器件的理想化和近似，其数学关系均对应实际电路器件的基本物理规律。

工程实际中的电感线圈，其主要电磁特性是吸收电能建立磁场，以达到机电能量转换目的。我们可把这种电磁特性用一个理想电感元件来表征。但是，实际电感线圈通常是在一个骨架上用漆包线绕制而成，根据热效应原理，漆包线通电后必定发热而产生能量损耗，即实际电感线圈“耗能”的电特性也往往不能忽视，电路中可用一个表征其耗能特性的电阻元件与一个表征其建立磁场特性的电感元件相串联作为这个实际电感线圈的电路模型。另外，用漆包线绕制而成的电感线圈，由于匝与匝之间，层与层之间相互绝缘，所以在高频情况下必然存在着电容效应。由此可知，同一实体电路部件，其电磁特性是多元化和复杂化的，并且在不同的外部条件下，它们呈现的电磁特性也会各不相同。即一种电路模型只对应一定条件下的一种情况，条件变了，电路模型也要进行相应的改变。

实际电路元件的“理想电路模型”分为有源和无源两大类，如图 1-1 所示。

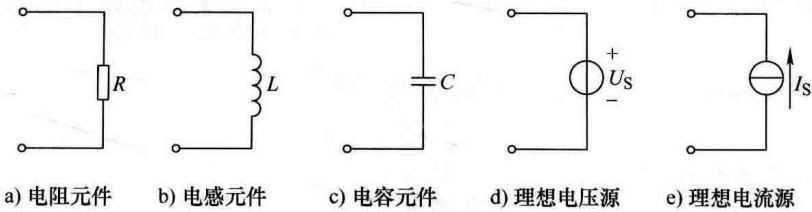


图 1-1 理想电路元件的电路模型

图 1-1a 所示为只具有耗能特性的电阻元件，图 1-1b 所示的是只具有建立和释放磁场特性的电感元件，图 1-1c 所示的是只具有储存和释放电场能量特性的电容元件，它们在电路中作为接收电能、转换电能的负载。图 1-1d 所示的是有源二端元件理想电压源，图 1-1e 所示的是理想电流源，它们是电路中的独立源，担负着向电路各部分提供电压和电流的重任，是电路中的激励；三大电路元件接收到的电压和电流称为响应。显然，电路中如果没有激励是不会产生响应的，二者是一种因果关系。

对实际元器件的模型化处理，使得不同的实体电路部件，只要具有相同的电磁性能，在一定条件下就可以用同一个电路模型来表示，显然降低了实际电路的绘图难度。而且，同一个实体电路部件，处在不同的应用条件和环境下，其电路模型可具有不同的形式。有时模型比较简单，仅由一种元件构成；有时比较复杂，可用几种理想元件的不同组合构成。这种对实际电路进行模型化处理的方法，对工程实际中的分析和计算带来了极大的方便。

例如，图 1-2 所示是一个最简单的手电筒电路及其电路模型。

由图 1-2 可看出，手电筒的实体电路画法较为复杂，而电路模型显然清晰明了。

对电路进行分析，就是要寻求实际电路共有的一般规律，电路模型就是用来探讨存在不同特性的各种真实电路中规律的工具，是与实际电路相对应的、由理想电路元件构成的电路图。

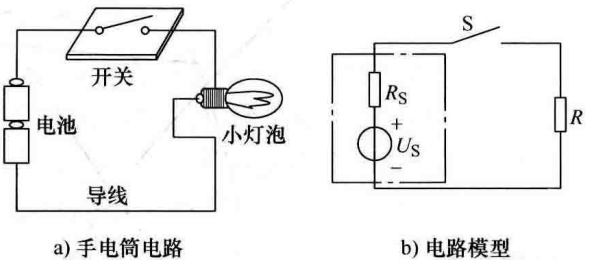


图 1-2 手电筒电路及其电路模型

电路模型具有两大特点：一是它里面的任何一个元件都是只具有单一电特性的理想电路元件，因此反映出的电现象均可用数学方式进行精确地分析和计算；二是对各种电路模型的深入研究，实质上就是探讨各种实际电路共同遵循的基本规律。

需要指出的是，上面所讲到的各种电路模型，只适用于低、中频电路的分析，因为在低、中频电路中，其中的电路元件基本上都是集总参数元件（即次要因素可以忽略的元件），集总参数元件的电磁现象都分别集中在元件内部产生。而在高频和超高频电路中，元件上的电磁过程并不是集中在元件内部进行，因此要用“分布电路模型”来抽象和进行描述。

本书中如不特殊说明，电路中的元件均按集总参数元件处理。

思考题

1.1.1 电路由哪几部分组成？各部分的作用是什么？

1.1.2 试述电路的分类及其功能。

1.1.3 何谓理想电路元件？如何理解“理想”二字在实际电路中的含义？何谓电路模型？

1.1.4 你能说明集总参数元件的特征吗？

1.2 电路分析的变量

学习目标：

从工程应用的角度上重新认识电流、电压这两个电路的基本变量，掌握它们的国际单位制，理解电压、电流之间的关联参考方向与非关联参考方向在电路分析中的意义；了解电位与电压的区别和联系，掌握电功和电功率的概念及其定义。

1.2.1 电流及其参考方向

物理学的知识告诉我们：电荷有规则的定向移动形成电流。工程应用中，电流的大小则是用单位时间内通过导体横截面的电荷量进行衡量的，称为电流强度，简称电流。

在稳恒直流电路中，电流的大小和方向不随时间变化，应采用大写英文字母 I 表示，即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-1)$$

交流电路中电流的大小和方向随时间变化，变化的电流应采用小写英文字母 i 表示，即

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

式(1-1)和式(1-2)中，当电量 q 采用国际制单位库仑【C】，时间 t 采用国际制单位秒【s】时，电流 $I(i)$ 的单位就是国际制的安培【A】。

电流还有较小的单位毫安【mA】、微安【 μA 】和纳安【nA】，它们之间的换算关系为

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} = 10^9\text{nA}$$

电路分析中，一般把变化的电路变量用小写英文字母表示，而把恒定的电路变量用大写英文字母表示。如式(1-1)中的恒值电流采用大写英文字母，而式(1-2)中的变化电流采用小写英文字母。电路变量表示符号的不同，代表的意义也各不相同，这一点在电路理论中十分严谨，切不可张冠李戴。

电流变量是一个代数量，作为代数量只有大小没有方向显然无意义。所以在求解电路时，应首先选定电流的参考方向。物理学中习惯上规定正电荷移动的方向作为电流的方向，这一习惯规定同样适用于电路。但是，对于一个给定的交流电路而言，由于电流的实际方向不断随时间变化，直接给出某支路电流的真实方向显然十分困难；即使是直流情况下，对较为复杂的电路要正确指出某支路电流的真实方向有时也不是易事。为此，在对电路进行分析时，需首先在电路图上标出各支路电流的参考方向。

参考方向原则上可任意选取，但一经选定，分析计算的过程中就不能再改变。根据参考方向列方程求得某支路电流为正值时，说明该支路电流的实际方向与选取的参考方向一致；如果某支路电流在参考方向下计算结果为负值，则说明该支路电流的真实方向与假设的参考方向相反。

1.2.2 电压及其参考方向

根据物理学可知，电场力将单位正电荷从电场中的一点移至电场中的另一点所做的功定义为电压，如 a、b 两点的直流电压，其数学表达式为

$$U_{ab} = \frac{W_a - W_b}{q} \quad (1-3)$$

式中，当电功的单位用焦耳【J】，电量的单位用库仑【C】时，电压的单位是伏特【V】。电压的单位还有千伏【kV】和毫伏【mV】，各种单位之间的换算关系为

$$1\text{V} = 10^{-3}\text{kV} = 10^3\text{mV}$$

从工程实际应用上来看，电压是电路中产生电流的根本原因。例如一个电阻元件，在它两端加上电压，便会有电流通过该电阻元件，而电流通过电阻元件时必定会在电阻元件上发生能量转换，使电阻元件的电流流出端电位降低。

电压变量也是一个代数量，同样存在方向的问题。规定：某段支路或某元件上电压的方向，应与其高极性端“+”指向低极性端“-”，即电压的方向是电位降低的方向。因此，电学中通常又把电压称为电压降。

电路分析中，某条支路或某元件上电压的真实方向往往也不易直接看出，同样需要在解题之前在电路图上标出各电压的参考方向，以便于对各电压求解时根据参考方向列写电压方程。电压采用双下角标，其参考方向由假定的高极性端指向假定的低极性端，参考方向下某电压 U_{ab} 计算结果得正值，说明 a 点电位高于 b 点电位，其真实方向与参考方向相符；如果参考方向下计算结果 U_{ab} 是负值，说明 a 点电位低于 b 点电位，选取的参考方向与真实方向相反。

1.2.3 关联参考方向

电路分析的任务是已知电路中的元件参数和“激励”（电源），去寻求电路中的“响应”（电压和电流），从而得到不同电路激励所对应的不同“响应”的规律。“寻求规律”是要有依据的，这个依据就是对电路列写方程式或方程组。在电路图上标出电压、电流的参考方向，就是为电路方程式中的各电量提供正、负依据，在这些参考方向下方可列写出相应的电路方程，进而求得“响应”（待求电压、电流）的结果。

在分析和计算电路的过程中，各电流、电压的参考方向是任意选定的，两者之间相对独立。参考方向是人为假定的分析依据，一经确定，整个分析过程中就不能再随意更改。但是，为了方便起见，当假设某元件是负载时，一般把元件两端电压的参考方向与通过元件中的电流的参考方向选成一致，如图 1-3a 所示，这种参考方向称为关联参考方向。关联参考方向下如果电压、电流都是正值，则说明元件的真实性质是负载，电流通过负载时进行能量转换，使元件的电流流出端电位降低；当假设某元件是电源时，参考方向一般选择非关联参考方向，如图 1-3b 所示。元件究竟是负载还是电源，需根据计算结果来判断。关联参考方向下如果元件上电压为正、电流为负，或电压为负、电流为正，都说明元件上电压、电流的真实方向为非关联，原来假定的负载实际上是一个电源。

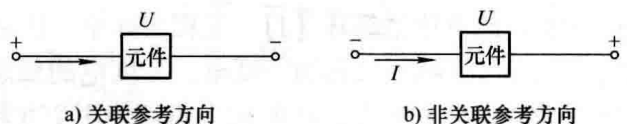


图 1-3 关联与非关联参考方向

运用参考方向时，有两个问题要注意：

① 参考方向是列写方程式的需要，是待求值的假定方向而不是待求值的真实方向，所以不必去追求其物理实质是否合理。

② 在分析、计算电路的过程中，出现“正、负”“加、减”及“相同、相反”这几个概念时，切不可把它们混为一谈。

1.2.4 电位及其电路参考点

电路中各点位置上所具有的电势能称为电位。物理学中定义：电场力把单位正电荷从电场中某 X 点移到参考点所做的功称为 X 点的电位，用 V_x 表示，采用单下角标。电位定义式的形式显然与电压类同，因此它们的单位相同，都是伏特【V】。所不同的是：电位是某点到参考点的电压，其高低正负均相对于参考点而言，规定电路参考点的电位为零。某点电位为正值，说明该点电位比参考点电位高；某点电位为负值，说明该点电位相对参考点低。这就好比空间讲高度一样，规定海平面的高度为参考零高度，则各处空间高度均以海平面为基准测出其高度值，没有参考高度讲空间各点的高度无意义。同样，电路中的电位也具有相对性，只有先明确了电路的参考点，再讨论电路中各点的电位才有意义。但是，电路中任意两点间电压的大小与参考点无关，仅取决于电路中两点电位的差值，是绝对量，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

电路参考点的选取理论上也是任意的。但实际应用中，由于大地的电位比较稳定，所以经常以大地作为电路参考点。有些设备和仪器的底盘、机壳往往需要与接地极相连，这时我们也常选取与接地极相连的底盘或机壳作为电路参考点。电子技术中的大多数设备，很多元件常常汇集到一个公共点，为分析和研究实际问题的方便，又常常把电子设备中的公共连接点作为电路的参考点。

实际上，电路中某点电位的数值，等于该点到参考点之间的电压。因此，在电子技术中检测电路时，常常选取某一公共点作为参考点，用电压表的负极表棒与该点相接触，而正极表棒只需接其他各点来测量它们的电位是否正常，即可查找出故障点。引入电位的概念后，给分析电路中的某些问题带来了不少方便。例如，一个电子电路中有 5 个不同的点，任意两点间均有一定的电压，直接用电压来讨论要涉及 10 个不同的电压，而改用电位讨论时，只需把其中的一个点作为电路参考点，只讨论其余 4 个点的电位就可以了。

1.2.5 电功和电功率

1. 电功

电流能使电动机转动，电炉发热，电灯发光，说明电流具有做功的本领。电流做的功称为电功。电流做功的同时伴随着能量的转换，其做功的大小显然可以用能量进行度量，即

$$W = UIt \quad (1-5)$$

式中，电压的单位用伏特【V】，电流的单位用安培【A】，时间的单位用秒【s】时，电功（或电能）的单位是焦耳【J】。工程实际中，还常常用千瓦时【kWh】来表示电功（或电能）的单位，1kWh 又称为一度电。一度电的概念可用下述例子解释：100W 的白炽灯使用 10h 耗费的电能是 1 度；40W 的白炽灯使用 25h 耗费电能也是 1 度；1000W 的电炉加热 1h，耗费电能还是 1 度，即 1 度 = 1kW × 1h。

2. 电功率

单位时间内电流做的功称为电功率。电功率用 P 表示，即

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-6)$$

式中，电功的单位用焦耳【J】，时间的单位用秒【s】，电压的单位为伏特【V】，电流的单位为安培【A】时，电功率的单位是瓦特【W】。

用电器铭牌上的电功率是它的额定功率，是对用电设备能量转换本领的度量，例如“220V，100W”的白炽灯，说明它两端加 220V 电压时，可在 1s 内将 100J 的电能转换成光能和热能；1 只“220V，40W”的白炽灯，则指它两端加 220V 电压时，在 1s 内只能将 40J 的电能转换成光能和热能，显然，“220V、100W”的白炽灯能量转换的本领大。需要注意的是：用电器实际消耗的电功率只有实际加在用电器两端的电压等于它铭牌数据上的额定电压时，才等于它铭牌上的额定功率。用电器上加的实际电压小于额定电压时，由于用电器的参数不变，则通过的电流也一定小于额定电流，电功率是电压、电流的乘积，因此实际功率必定小于额定功率；当用电器上加的实际电压大于额定电压时，由于用电器的参数不变，则通过的电流也一定大于额定电流，实际功率也必定大于额定功率。

电路分析中，电功率也是一个有正、负之分的代数量。当一个电路元件上消耗的电功率为正值时，说明这个元件在电路中吸收电能，是负载；当电路元件上消耗的电功率为负值时，说明它非但没有吸收电能，反而在向外供出电能，起电源的作用，是电源。

例 1.1 二端电路对应某时刻各元件上的电压、电流情况如图 1-4 所示。求该时刻各元件上的功率，并判断各元件的性质。

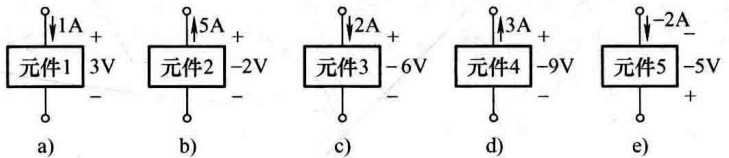


图 1-4 例 1.1

解：图 1-4a 中电压、电流方向关联，有

$P = UI = 3\text{V} \times 1\text{A} = 3\text{W}$ ，元件 1 吸收正功率，是负载。

图 1-4b 中电压、电流方向非关联，有

$P = -UI = -(-2\text{V}) \times 5\text{A} = 10\text{W}$ ，元件 2 吸收正功率，是负载。

图 1-4c 中电压、电流方向关联，有

$P = UI = -6\text{V} \times 2\text{A} = -12\text{W}$ ，元件 3 吸收负功率，是电源。

图 1-4d 中电压、电流方向非关联，有

$P = -UI = -(-9\text{V}) \times 3\text{A} = 27\text{W}$ ，元件 4 吸收正功率，是负载。

图 1-4e 中电压、电流方向非关联，有

$P = -UI = -(-5\text{V}) \times (-2\text{A}) = -10\text{W}$ ，元件 5 吸收负功率，是电源。

思考题

1.2.1 如图 1-3a 所示，若已知元件吸收功率为 -20W ，电压 $U = 5\text{V}$ ，求电流 I 。

1.2.2 如图 1-3b 所示，若已知元件中通过的电流 $I = -100\text{A}$ ，元件两端电压 $U = 10\text{V}$ ，求电功率 P ，并说明该元件是吸收功率还是发出功率。

1.2.3 电压、电位有何异同？

1.2.4 电功率大的用电器，电功也一定大，这种说法正确吗？为什么？

1.2.5 在电路分析中，引入参考方向的目的是什么？应用参考方向时，会遇到“正、负，加、减，相同、相反”这几对词，你能说明它们的不同之处吗？

1.3 电路基本定律

学习目标：

从工程应用的角度重新理解欧姆定律及其应用；熟悉基尔霍夫定律只取决于电路的连接方式，与其接入电路的方式无关这一特点，了解基尔霍夫定律是各种电路都必须遵循的普遍规律；理解基尔霍夫定律的内容及其约束对象；初步掌握应用基尔霍夫定律分析电路的方法。

1.3.1 欧姆定律 (VAR)

1826年4月，德国物理学家乔治·西蒙·欧姆 (Georg Simon Ohm, 1789年3月16日—1854年7月6日) 在他发表的论文《金属导电定律的测定》中提出：在同一电路中，通过某段导体的电流跟这段导体两端的电压成正比，跟这段导体的电阻成反比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

这一重要结论随着电路研究工作的发展越来越受到人们的重视，为纪念欧姆对电学的贡献，人们把上述结论称为欧姆定律，并把电阻的单位命名为欧姆，以符号 Ω 表示。

欧姆定律体现了线性电阻元件上的电压、电流约束关系，表明了元件特性只取决于元件本身，与其接入电路的方式无关这一规律。

式(1-7) 仅在关联参考方向下适用。这是因为电阻元件 R 中的电流和电压降的实际方向总是一致的。如果电压、电流方向非关联，则上式应改写为 $I = -U/R$ 。

欧姆定律表达式中的电压单位取【V】，电阻单位取【 Ω 】时，电流的单位是【A】。

电阻的倒数是电导，用符号 G 表示，单位是西门子【 $1/\Omega = S$ 】，因此欧姆定律又可写为

$$I = GU$$

例 1.2 已知电阻的铭牌数据为“ $2k\Omega$ 、 $0.25W$ ”，使用该电阻时，电压、电流不得超过多大数值？

解：由 $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ 可得 $I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{2000}} A \approx 0.0112 A = 11.2 mA$ ， $U = RI = 2 \times 11.2 V = 22.4 V$

工程实际中的线性电路，其中所有能量转换不可逆的因素都可以抽象为耗能元件电阻，因此欧姆定律的应用也得到了扩展。

例 1.3 已知交流接触器的线圈在直流 $20V$ 电压下通过的电流为 $4mA$ ，则该交流接触器线圈的直流铜耗电阻是多大？

解：根据欧姆定律可得

$$R = U/I = (20/0.004) \Omega = 5k\Omega$$