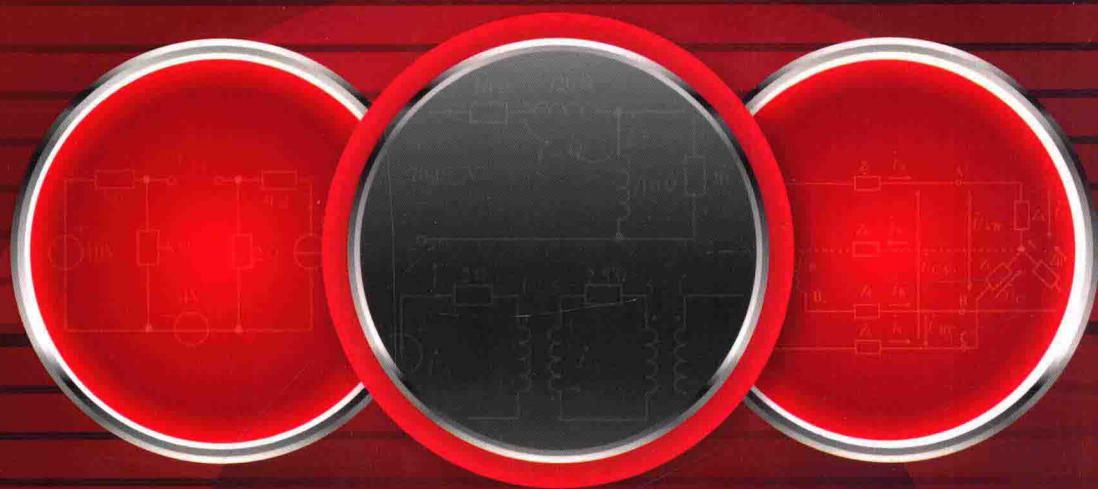


普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析基础

曾令琴 主编 周文俊 陈建国 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析基础

曾令琴 主 编
周文俊 陈建国 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据应用型人才培养要求编写的。理论内容主要有：电路的基本概念和定律、电路原理及基本分析方法、单相正弦交流电路、相量分析法、谐振、互感耦合电路和变压器、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等。实践教学内容包括与理论内容相关的实验指导，还有电工实习项目，注重学生素质培养和应用型人才能力培养，真正体现了“应用型”人才培养的教学模式。

本教材配备了立体化教学资源，配套资料包括教学大纲、多媒体教学课件、课程辅导与习题详解以及试题库等。

本书可作为应用型本科和高职高专电类各专业教材，同时也适用于相关工程技术人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/曾令琴主编. —北京：化学工业出版社，2013.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-17863-3

I. ①电… II. ①曾… 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 (2013) 第 150054 号

责任编辑：王听讲

文字编辑：吴开亮

责任校对：陶燕华

装帧设计：关 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 376 千字 2013 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电路分析基础课程是大学本科、高职高专、中职电类各专业的重要技术基础课程，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，具有很强的实践性。

本书围绕应用型人才培养目标，内容贴近工程实际，注重测试技能和电路分析技能，同时兼顾对学生的素质培养。本教材根据课程内容的广泛性与复杂性，采用科学、合理的方法对教学内容进行归类合并，各学校可以自由选择相关专业所需要的知识模块；同时，在教材中加入了实验指导和实训项目，注重工程技术实际应用，既为学生后续课程服务，又能培养学生的工程技术应用能力。另外，为了给教师和学生提供教学方便，我们对教材进行了立体化建设，除了纸质主教材外，还制作了非常实用的多媒体教学课件，并且提供与教材相配套的教学大纲、试题库、习题详细解析等，需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

全书共分 12 章，建议课时如下：第 1 章和第 2 章是理论基础，建议课时 24 学时；第 3 章、第 4 章 16 学时；第 5 章 8 学时；第 6 章 10 学时；第 7 章 8 学时；第 8 章 10 学时；第 9 章 8 学时；第 10 章 8 学时；第 11 章 6 学时；第 12 章 8 学时（以上课时均包括实践教学环节课时）。如果实验课可以单独设课时，建议全课程理论总学时不低于 86 学时。各校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，但要求保证实际教学课时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，则总实验和实训学时数建议不低于 86 学时，保证学生的技能和工程应用能力的培养。

本书由河南理工大学万方科技学院曾令琴副教授主编，并负责全书统稿和对教材内容进行立体化配套建设工作；温州大学城市学院的周文俊副教授、中国人民解放军防空兵指挥学院陈建国担任副主编，河南理工大学万方科技学院王振玲、梁妍参编。

为了进一步提升教材质量，欢迎使用本教材的师生和工程技术人员对书中存在的错漏和不足之处，给予批评指正。

编者

2013 年 9 月

目 录

第1章 电路的基本概念、基本定律

1.1 电路和电路模型	1	1.4.3 实际电源的两种电路模型	12
1.1.1 电路的组成及功能	1	1.5 电路的等效变换	13
1.1.2 电路模型	2	1.5.1 电阻之间的等效变换	14
1.2 电路的基本物理量	4	1.5.2 电源之间的等效变换	16
1.2.1 电流	4	1.6 直流电路中的几个问题	17
1.2.2 电压、电位和电动势	5	1.6.1 电路中各点电位的计算	17
1.2.3 电功和电功率	6	1.6.2 电桥电路	18
1.2.4 参考方向	7	1.6.3 负载获得最大功率的条件	19
1.3 基尔霍夫定律	8	1.6.4 受控源	20
1.3.1 几个常用的电路名词	9	小结	21
1.3.2 结点电流定律	9	实训项目一 电路测量预备知识及技能	
1.3.3 回路电压定律	10	的训练	22
1.4 电压源和电流源	11	实验一 基尔霍夫定律的验证	28
1.4.1 理想电压源	12	习题	29
1.4.2 理想电流源	12		

第2章 电路的基本分析方法

2.1 支路电流法	33	2.5 戴维南定理	42
2.2 回路电流法	35	小结	43
2.3 结点电压法	37	实验二 叠加定理和戴维南定理的	
2.3.1 结点电压法	37	验证	44
2.3.2 弥尔曼定理	39	习题	46
2.4 叠加定理	40		

第3章 单相正弦交流电路

3.1 正弦交流电路的基本概念	48	3.2.2 电感元件	54
3.1.1 正弦量的三要素	48	3.2.3 电容元件	56
3.1.2 相位差	51	小结	60
3.2 单一参数的正弦交流电路	52	习题	61
3.2.1 电阻元件	52		

第4章 相量分析法

4.1 复数及其运算	63	4.4 复功率	74
4.1.1 复数及其表示方法	63	4.4.1 正弦交流电路中的功率	74
4.1.2 复数运算法则	64	4.4.2 复功率	75
4.2 相量和复阻抗	65	4.4.3 功率因数的提高	76
4.2.1 相量	65	小结	78
4.2.2 复阻抗	65	实验三 三表法测量电路参数	79
4.3 相量分析法	66	实验四 日光灯电路的连接及功率因数的提高	81
4.3.1 RLC 串联电路的相量模型分析	66	习题	84
4.3.2 RLC 并联电路的相量模型分析	68		
4.3.3 应用实例	69		

第5章 谐振电路

5.1 串联谐振	87	5.2.4 并联谐振电路的一般分析方法	94
5.1.1 RLC 串联电路的基本关系	87	5.2.5 电源内阻对并联谐振电路的影响	95
5.1.2 串联谐振的条件	88	5.3 正弦交流电路的最大功率传输	96
5.1.3 串联谐振电路的基本特性	88	5.4 谐振电路的应用	97
* 5.1.4 串联谐振回路的能量特性	89	小结	98
5.1.5 串联谐振电路的频率特性	90	实验五 串联谐振的研究	99
5.2 并联谐振	92	习题	101
5.2.1 并联谐振电路的谐振条件	93		
5.2.2 并联谐振电路的基本特性	93		
5.2.3 并联电路的频率特性	94		

第6章 互感耦合电路与变压器

6.1 互感的概念	102	6.4.1 理想变压器的条件	108
6.1.1 互感现象	102	6.4.2 理想变压器的主要性能	108
6.1.2 互感电压	103	6.5 全耦合变压器	110
6.1.3 耦合系数和同名端	103	6.5.1 全耦合变压器的定义	110
6.2 互感电路的分析方法	104	6.5.2 全耦合变压器的等效电路	110
6.2.1 互感线圈的串联	104	6.5.3 全耦合变压器的变换系数	110
6.2.2 互感线圈的并联	105	小结	111
6.2.3 互感线圈的 T 形等效	106	实验六 变压器参数测定及绕组极性判别	112
6.3 空心变压器	107	习题	115
6.4 理想变压器	108		

第7章 三相电路

7.1 三相交流电的基本概念	117	7.2 三相电源的连接	119
----------------------	-----	-------------------	-----

7.2.1 三相电源的 Y 形连接	119	7.4 三相电路的功率	127
7.2.2 三相电源的 Δ 形连接	120	小结	129
7.3 三相负载的连接	121	实验七 三相电路电压、电流的测量	129
7.3.1 三相负载的 Y 形连接	121	习题	132
7.3.2 三相负载的 Δ 形连接	125		

第 8 章 电路的暂态分析

8.1 换路定律	134	8.3 一阶电路的阶跃响应	143
8.1.1 基本概念	134	8.3.1 单位阶跃函数	144
8.1.2 换路定律	135	8.3.2 单位阶跃响应	145
8.2 一阶电路的暂态分析	137	8.4 二阶电路的零输入响应	146
8.2.1 一阶电路的零输入响应	137	小结	148
8.2.2 一阶电路的零状态响应	139	实验八 一阶电路的响应测试	149
8.2.3 一阶电路的全响应	141	习题	151
8.2.4 一阶电路暂态分析的三要素法	142		

第 9 章 非正弦周期电流电路

9.1 非正弦周期信号	153	9.3 非正弦周期信号的有效值、 平均值和平均功率	159
9.1.1 非正弦周期信号的产生	154	9.3.1 非正弦周期量的有效值和 平均值	159
9.1.2 非正弦周期信号	154	9.3.2 非正弦周期量的平均功率	159
9.2 谐波分析和频谱	155	9.4 非正弦周期信号作用下的线性 电路分析	160
9.2.1 非正弦周期信号的傅里叶级数 表达式	155	小结	163
9.2.2 非正弦周期信号的频谱	157	实验九 非正弦周期电流电路研究	164
9.2.3 波形的对称性与谐波成分的 关系	157	习题	165
9.2.4 波形的平滑性与谐波成分的 关系	158		

第 10 章 二端口网络

10.1 二端口网络的一般概念	167	10.3 二端口网络的输入阻抗、输出 阻抗和传输函数	173
10.2 二端口网络的基本方程和 参数	168	10.3.1 输入阻抗和输出阻抗	173
10.2.1 阻抗方程和 Z 参数	168	10.3.2 传输函数	174
10.2.2 导纳方程与 Y 参数	170	10.4 线性二端口网络的等效 电路	175
10.2.3 传输方程和 A 参数	171	10.4.1 无源线性二端口网络的 T 形 等效电路	176
10.2.4 混合方程与 H 参数	171	10.4.2 无源线性二端口网络的 π 形	
10.2.5 二端口网络参数之间的关系	172		
10.2.6 实验参数	172		

等效电路	177	10.6 二端口网络应用简介	180
10.4.3 T形网络和 π 形网络的等效 变换	177	10.6.1 相移器	180
10.4.4 多个简单二端口网络的连接	177	10.6.2 衰减器	180
10.5 二端口网络的特性阻抗和 传输常数	179	10.6.3 滤波器	180
10.5.1 二端口网络的特性阻抗	179	小结	182
10.5.2 二端口网络的传输常数	179	实验十 线性无源二端口网络的研究 ...	183
		习题	185

第 11 章 均匀传输线

11.1 分布参数电路的概念	187	11.3.1 行波	190
11.1.1 分布参数电路	187	11.3.2 特性阻抗	191
11.1.2 分布参数电路的分析方法	188	11.3.3 传播常数	191
11.2 均匀传输线的正弦稳态 响应方程式	188	11.4 终端接有负载的传输线	192
11.2.1 均匀传输线的微分方程	188	11.4.1 反射系数	192
11.2.2 均匀传输线方程的稳态解	189	11.4.2 终端阻抗匹配的均匀传输线	193
11.3 均匀传输线上的波和传播 特性	190	11.4.3 终端不匹配的均匀传输线	193
		小结	194
		习题	195

第 12 章 拉普拉斯变换

12.1 拉普拉斯变换的定义	196	12.4.3 应用拉氏变换分析线性电路	204
12.2 拉普拉斯变换的基本性质	197	小结	208
12.3 拉普拉斯反变换	199	习题	209
12.4 应用拉氏变换分析线性 电路	202	实训项目二 常用元器件的识别、测试及 焊接技术练习	209
12.4.1 单一参数的运算电路	202	实训项目三 常用电工工具的使用及配盘 练习	212
12.4.2 耦合电感的运算电路	204		

参考文献	224
-------------------	------------

第 1 章

电路的基本概念、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的。电路的结构不论多么复杂,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。在“电路基础”课程中,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。

【本章教学要求】

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、仪表及其简单的使用方法;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、三极管等)组成。每一种电路实体部件都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,就构成了电路。如果某电路元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。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，控制电路的通、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、空气开关等）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

人们设计和制作各种电路部件，是为了利用它们的主要电磁特性实现人们的需要。例如，制作一个滑线变阻器，主要是利用它对电流呈现阻力的性质；制作一个电压源，主要是利用其能在正负极间保持一定电压的性质。但实际上滑线变阻器不仅具有对电流呈现阻力的性质，同时电流通过它时还会在其周围产生磁场；实际的电压源也总是存在内阻的，因此使用时不可能保持定值的端电压。因此，在对实际电路进行分析和计算时，如果将实际电气部件的全部电磁特性都加以考虑，问题势必复杂化，造成分析和计算上的困难。

为了方便对实际电路的分析和计算，在电路理论中，通常在工程允许的条件下对实际电路进行模型化处理。例如电阻器、灯泡、电炉等，它们在工频电路中接受电能并将电能转换成光能或热能被人们所利用，光能和热能显然不可能再回到电路中转换成电能，这种能量转换过程不可逆的电磁特性称之为耗能。这些电气设备的主要电磁特性就是耗能，除此之外，它们当然还存在其他一些电磁特性，但在工频电路的分析中，只考虑它们耗能的电磁特性，忽略其他不重要的电磁特性，显然对整个电路的分析、计算并不产生影响，且会给解决问题带来事半功倍的实效。这种抓住主要因素、忽略次要因素的理想化模型处理是工程实际应用中的一种常用和有效解决问题的方法。在电路理论中，凡是具有耗能电磁特性的电气设备，都可以用一个理想电路元件——“电阻元件”来表示，因此电阻元件就在电路分析中成为耗能元件的电路模型。显然，电路模型不仅可为分析和计算实际电路带来方便，对电路图也起到了简化和统一的效果。

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。我们把这种电磁特性用一个理想“电感元件”来表征，这个理想化电路元件吸收电能后只建立磁场，因此“电感元件”只具有吸收电能建立磁场的单一电磁特性。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，即实际电感线圈也存在着“耗能”的电特性。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，所以还存在着电容效应。这说明，实际电感线圈的电特性是多元、复杂的。在电路分析中，我们根据抓住主要因素，忽略次要矛盾的模型化处

理条件，可具体问题具体分析。例如，直流电路中工作的电感线圈由于在稳态下不存在电磁感应，电容效应也可忽略不计时，直流稳态下的电感线圈就可以用一个只具有耗能电磁特性的电阻元件来表征；工频情况下的电感线圈吸收电能建立磁场是其主要功能，但线圈通电发热的耗能因素也不能忽略，电容效应由于微乎其微可不加考虑，这种情况下，电感线圈的电路模型就可以用一个理想电阻元件和一个理想电感元件的串联组合来表征；实际电感线圈在某中频条件下，当电容效应也不能忽略时，其电路模型显然就要用一个电阻、电感元件的串联组合，再与一个电容元件相并联来进行恰当表征了；高频下的电感线圈往往可以忽略耗能的电磁特性，这时的电路模型就可以用电感元件和电容元件的并联组合来表征。某些高频下，如电感线圈在电路中作为扼流圈时，甚至只考虑电容效应来建立其电路模型。

由此可知，同一实体电路部件，其电磁特性是多元和复杂的，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。

进行模型化处理的思路，就是要在工程允许的范围内，用一些理想元件表征实际元器件的主要电磁特性，忽略它们的次要电磁特性，从而大大简化对实际问题的分析和计算。电路理论中的这种抽象出实际电路器件的“电路模型”，也是简化电路分析和计算的最行之有效的方法。

实际电路元件的“电路模型”分为有源和无源两大类，如图 1.1 所示。

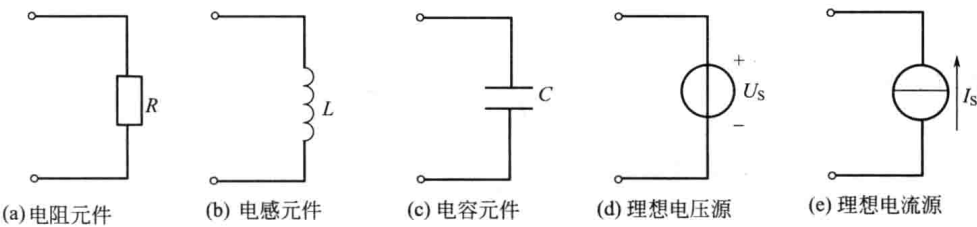


图 1.1 无源和有源的理想电路元件的电路模型

由于用电器上的电磁特性无非就是耗能、储存磁场能和储存电场能三种，因此可抽象出图 1.1 中的电阻元件（只具有耗能的电磁特性）、电感元件（只具有建立储存磁场能的电磁特性）和电容元件（只具有储存电场能的电磁特性），通常把电阻、电感、电容这三个无源二端理想元件称为电路的三大基本元件，简称为电路元件。电路元件是实际电路器件的理想抽象，其电磁特性单一而确切。

图 1.1 中的有源二端元件，其中的“源”是指它们能向电路提供电能。如果电源的主要供电方式是向电路提供一定的电压，称为电压源；若主要供电方式是向电路提供一定的电流，则称为电流源。

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，这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，给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它的电路模型。

由图 1.2 可看出，手电筒的实体电路画法较为复杂，而电路模型显得清晰明了。

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于不同特性的各种真实电路中共有规律的工具。简单地说，电路模型就是与实际电路相对应的、由理想电路元件构成的电路图。

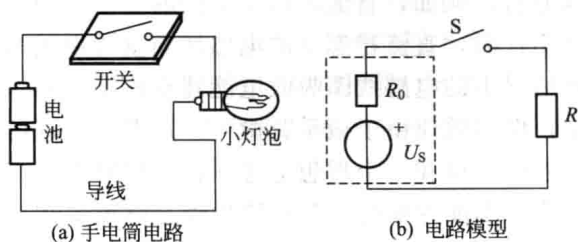


图 1.2 手电筒电路及其电路模型

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磁特性的理想电路元件，因此反映出的电磁现象均可用数学方式进行精确的分析和计算；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，其中的电路元器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过程都分别集中在元件内部进行。而在高频和超高频电路中，元器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。

本教材中如不做特殊说明，电路中的元器件均按符合集总参数元件处理。

●【学习思考】●

- (1) 电路由哪几部分组成，各部分的作用是什么？
- (2) 试述电路的分类及其功能。
- (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？
- (4) 你能说明集总参数元件的特征吗？你如何在电路中区分电源和负载？

1.2 电路的基本物理量

●【学习目标】●

在高中物理学的基础上，进一步熟悉电流、电压、电功率等电路物理量的概念，学会从工程应用的角度重新理解电流、电压、电功率，掌握它们的国际单位制；理解电位的相对性和电压的绝对性，区分电压和电动势的相同点和不同点；深刻领会参考方向的问题。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向移动形成电流。在稳恒直流电路中，电流的大小和方向不随时间变化；在正弦交流电路中，电流的大小和电荷移动的方向按正弦规律变化。

在金属导体内部，自由电子可以在原子间做无规则运动；在电解液中，正负离子可以在溶液中自由运动。如果在金属导体或电解液两端加上电压，在金属导体内部或电解液中就会形成电场，自由电子或正负离子就会在电场力的作用下，做定向移动从而形成电流。

电流的大小是用单位时间内通过导体横截面的电量进行衡量的，称为电流强度，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

稳恒直流电路中, 电流的大小及方向都不随时间变化时, 其电流强度可表示为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

注意: 在电路理论中, 一般把变量用小写的英文字母来表示, 而把恒量用大写的英文字母来表示。如式(1.1)中的电流和电量都是用的的小写英文字母, 而式(1.2)中则用大写。这一点在电学中十分重要, 切不可张冠李戴。

高中物理学中, 我们把电荷的定向移动称为电流, 即电流表明一种物理现象。在电学中, 电路中的电流强度简称电流, 电流是电路中的主要参量, 各种用电器的应用就是它们通过电流吸收电能并把电能转换成其他形式能量为人们所利用的实例。

物理学习上规定正电荷移动的方向作为电流的正方向, 这一习惯规定同样适用于电路。实际中, 电流的作用方向对它的作用效果并不产生不同的影响, 因此电流是标量。但在电路的分析和计算中, 电流的大小用来定量地反映电流的强弱, 电流的方向则要用方程式中各电流前面的“+”、“-”号加以区别。

在式(1.1)和式(1.2)中, 当电量 $q(Q)$ 的单位采用国际制单位库仑【C】、时间 t 的单位用国际制单位秒【s】时, 电流 $i(I)$ 的单位就应采用国际制安培【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

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

1.2.2 电压、电位和电动势

1. 电压

根据物理学可知, 电压就是将单位正电荷从电场中的一点移至电场中的另一点时, 电场力所做的功, 用数学式可表达为

$$U_{ab} = \frac{W_a - W_b}{q} \quad (1.3)$$

式中, U_{ab} 就是电压。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

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

由欧姆定律可知, 如果把一个电压加在电阻两端, 电阻中就会有电流通过。实际电路中的情况也是如此, 当我们在负载两端加上一个电压时, 负载中同样会有电流通过, 而电流通过负载时必定会在负载两端产生电压降, 即发生能量转换的过程。电学中从工程实际上认为: 电压是电路中产生电流的根本原因(就像水路中产生水流的原因是必须存在水位差一样)。

电压在电路分析中同样存在方向问题。一般规定: 电压的正方向由高电位“+”指向低电位“-”, 因此电学中通常把电压称为电压降。

2. 电位

电路中各点位置上所具有的势能称为电位。空间各点位置的高度都是相对于海平面或某个参考高度而言的, 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。电路理论中规定: 电位参考点的电位取零值, 其他各点的电位值均要和参考点相比, 高于参考点的电位是正电位, 低于参考点的电位是负电位。

参考点的选取理论上是任意的。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。

电位的高低正负都是相对于参考点而言的。只要电路参考点确定之后，电路中各点的电位数值就是唯一确定的。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，而正极表棒只需点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，其余只讨论 4 个点的电位就可以了。

电位的定义式与电压的定义式的形式相同，因此它们的单位相同，也是伏特【V】。所不同的是，电位特指电场力把单位正电荷从电场中的一点移到参考点所做的功。为了区别于电压，在电学中把电位用单注脚的“V”表示，电压和电位的关系为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.4)$$

即电路中任意两点间电压，在数值上等于这两点电位之差。由式(1.4)也可以看出，电压是绝对的量，电路中任意两点间的电压大小，仅取决于这两点电位的差值，与参考点无关。

3. 电动势

电动势和电位一样属于一种势能，它反映了电源内部能够将非电能转换为电能的本领。从电的角度上看，电动势代表了电源力将电源内部的正电荷从电源负极移到电源正极所做的功，是电能累积的过程。电动势定义式的形式与电压、电位类同，因此它们的单位相同，都是伏特【V】。

电路中持续的电流需要靠电源的电动势来维持，这就好比水路中需要用水泵来维持连续的水流一样。水泵之所以能维持连续的水流，是由于水泵具有将低水位的水抽向高水位的本领，从而保持水路中两处的水位差，高处的水就能连续不断地流向低处。电源之所以能够持续不断地向电路提供电流，也是由于电源内部存在电动势的缘故。电动势用符号“E”表示。在电路分析中，电动势的方向规定由电源负极指向电源正极，即电位升高的方向。

1.2.3 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

$$W = UI t \quad (1.5)$$

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·小时【kW·h】来表示电功（或电能）的单位，1kW·h 又称为一度电。一度电的概念可用下述例子解释：100W 的灯泡使用 10 个小时耗费的电能是 1 度；40W 的灯泡使用 25 小时耗费电能也是 1 度；1000W 的电炉加热一个小时，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

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1.6)$$

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量度。例如“220V，100W”的白炽灯，说明它两端加 220V 电压时，可在 1 秒钟内将 100 焦耳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 1 秒钟内能将 40 焦耳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；若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。

1.2.4 参考方向

比较简单的直流电路，电压、电流的实际方向很容易看出来，可是对于复杂的直流电路，有时电路中电流（或电压）的实际方向很难预先判断出来；在交流电路中，由于电流（或电压）的实际方向在不断地变化，所以也无法在电路图中正确标出电流（或电压）某一瞬间的实际方向。

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，参考方向是人为假定的分析依据。但参考方向一经确定，整个分析过程中就不能再随意更改。为了避免麻烦，在假设元件是负载时，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（说明负载通过电流时要进行能量转换，其结果使电流流出端电位降低），如图 1.3(a) 所示。这种参考方向称为关联方向。当我们假设元件是电源时，参考方向一般选择非关联方向，如图 1.3(b) 所示。

在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。

分析和计算电路的最后结果，当某一所求电压或电流得正值，说明它在电路图上的参考方向与实际方向相同；若某一所求电压或电流得负值，则说明它在电路图上所标定的参考方向与该电量的实际方向相反。

方程式各量前面的加、减号规定：凡与参考方向一致的电量，前面取加号，凡与参考方向相反的电量，前面则取减号。

某元件上流过的电流与它两端电压为关联参考方向时，称方向相同，若流过元件上的电流与它两端电压为非关联参考方向时，称方向相反。实际负载上的电压、电流方向总是关联

的；实际电源上的电压、电流方向总是非关联的。因此，当假定一个元件是负载时，其参考方向通常选取关联方向，若假定一个元件是电源时，其参考方向通常选取非关联方向。



图 1.3 电压、电流参考方向

●【学习思考】●

- (1) 如图 1.3(a) 所示，若已知元件吸收功率为 -20W ，电压 $U=5\text{V}$ ，求电流 I 。
- (2) 如图 1.3(b) 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。
- (3) 电压、电位、电动势有何异同？
- (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？
- (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 基尔霍夫定律

●【学习目标】●

理解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，明确基尔霍夫定律是各种电路都必须遵循的普遍规律；熟悉基尔霍夫定律的内容，了解基尔霍夫定律的约束对象与欧姆定律的区别；尽快掌握基尔霍夫定律分析问题的方法；初步学会基尔霍夫定律的简单应用。

对任意一段电路，电流与该段电路两端的电压成正比，与该段电路中的电阻成反比。这一结论是在 1827 年由德国科学家欧姆提出的，因此称为欧姆定律。当电压与电流为关联参考方向时，欧姆定律可表示为

$$I = \frac{U}{R}$$

上式仅适用于线性电路，即欧姆定律体现了线性电路元件上的电压、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。

电路的基本定律除了欧姆定律，还有本节要讲的结点电流定律【KCL】和回路电压定律【KVL】，KCL 和 KVL 都是德国科学家基尔霍夫提出的，因此也把 KCL 称为基尔霍夫第一定律，把 KVL 称为基尔霍夫第二定律。1847 年，基尔霍夫将物理学中“流体流动的连续性”和“能量守恒定律”用于电路之中，创建了结点电流定律（KCL），之后根据“电位的单值性原理”又创建了回路电压定律（KVL）。欧姆定律体现了电路元件上的电压、电流约束关系，与电路的连接方式无关；而基尔霍夫定律则反映了电路整体的规律，具有普遍性，不但适合于任何元件组成的电路，而且适合于任何变化的电压与电流。基氏两定律和欧姆定律被人们称为电路的三大基本定律。

1.3.1 几个常用的电路名词

1. 支路

指一个或几个元件相串联后, 连接于电路的两个结点之间, 使通过其中的电流值相同。如图 1.4 中的 ab 、 adb 、 acb 三条支路。对一个整体电路而言, 支路就是指其中不具有任何分岔的局部电路。

2. 结点

电路中三条或三条以上支路的汇集点称为结点。如图 1.4 中的 a 点和 b 点。

3. 回路

电路中任意一条或多条支路组成的闭合路径称为回路。如图 1.4 中的 $abca$ 、 $adba$ 、 $adbca$ 都是回路。

4. 网孔

电路中不包含其他支路的单一闭合回路称为网孔, 如图 1.4 中的 $abca$ 和 $adba$ 两个网孔。网孔中不包含回路, 但回路中可能包含有网孔。

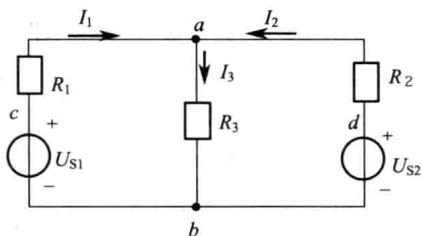


图 1.4 常用名词举例电路图

1.3.2 结点电流定律 (KCL)

KCL 指出, 对电路中任一结点而言, 在任一时刻, 流入结点的电流的代数和恒等于零。数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1.7)$$

列写 KCL 电流方程式时要注意, 必须先标出汇集到结点上的各支路电流的参考方向, 一般对已知电流, 可按实际方向标定, 对未知电流, 其参考方向可任意选定。只有在参考方向选定之后, 才能确立各支路电流在 KCL 方程式中的正、负号。对式 (1.7), 本教材中约定: 指向结点的电流取正, 背离结点的电流取负。若约定背离结点的电流为正, 指向结点的电流为负时, KCL 仍不失其正确性, 会取得相同的结果。

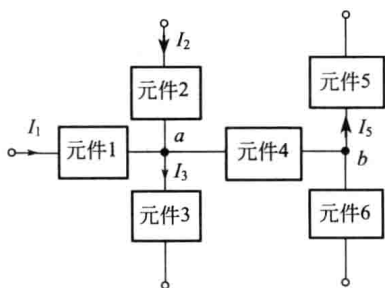


图 1.5 例 1.1 图

例 1.1 在图 1.5 所示电路中, 已知 $I_1 = -2\text{A}$, $I_2 = 6\text{A}$, $I_3 = 3\text{A}$, $I_5 = -3\text{A}$, 参考方向如图标示。求元件 4 和元件 6 中的电流。

解: 首先应在图中标示出待求电流的参考方向。设元件 4 上的电流方向从 a 点到 b 点; 流过元件 6 上的电流指向 b 点。

对 a 点列 KCL 方程式, 并代入已知电流值

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

$$(-2) + 6 - 3 - I_4 = 0$$

求得 $I_4 = (-2) + 6 - 3 = 1(\text{A})$

对 b 点列 KCL 方程式, 并代入已知电流值

$$I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

$$1 - (-3) + I_6 = 0$$

求得

$$I_6 = (-1) - 3 = -4(\text{A})$$

式中, I_6 得负值, 说明设定的参考方向与该电流的实际方向相反。

KCL 虽然是对电路中任一结点而言的, 根据电流的连续性原理, 它可推广应用于电路