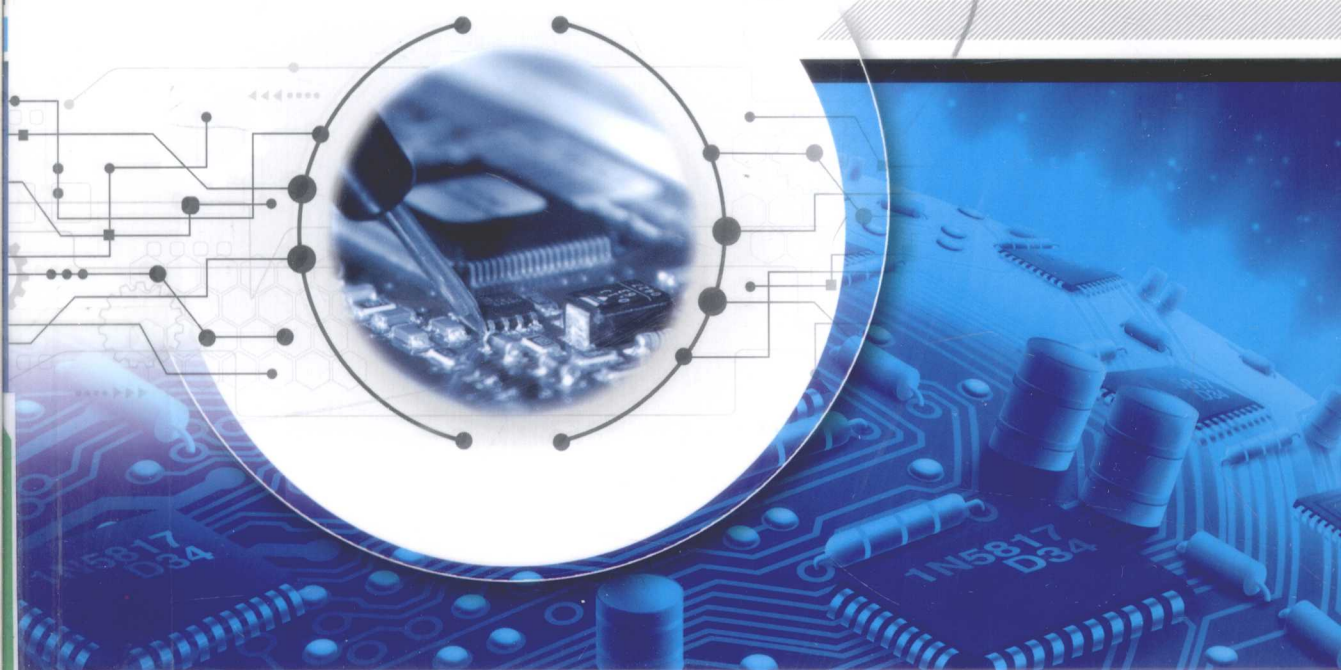


普通高等教育“十三五”规划教材

电路

林珊 ◎ 编

Circuit



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

电 路

林 珊 编
秦朝明 主审

机 械 工 业 出 版 社

本书依据教育部颁布的高等学校电类专业“电路分析基础”和“电路理论基础”课程的基本要求,结合新的课程体系和教学内容,总结编著近二十年实际教学经验,通过探索、改革和总结编写而成。

全书共13章,主要内容有:电路的基本概念与基本定律、电路的等效变换、电路的基本定理、线性电路的基本分析方法、含有集成运算放大器的电阻电路、动态电路的时域分析、正弦稳态交流电路分析、三相交流电路、非正弦周期电流电路、含耦合电感的电路与变压器、线性动态电路的复频域分析、二端口网络、非线性电阻电路分析简介。每章节配有一定数量、难易适当、紧扣教学内容的例题、思考与练习及习题。对例题的讲解详尽,书末附有习题参考答案,有利于学生自学和教师施教。

本书以工程实践中正在使用的电路分析基础理论为主,在突出电路的基本理论、基本分析方法的同时,注重理论联系实际,并将复杂问题简单化,理论问题工程化。全书内容叙述上力求简明扼要,重点突出;将基本概念讲述清楚,易于读者接受和理解;将基本分析方法讲解透彻,步骤明确,通俗易懂,使读者更容易掌握。分析过程更为紧凑,体系与内容均较新颖。书中包含了许多工程和生活中的电路应用实例,有利于提高学生对该学科的兴趣,有利于加深学生对理论知识的理解。

本书可作为自动化类、电气类、电子信息类、计算机类等专业本科生电路课程的教材,也可供相关专业技术人员使用和参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路 / 林珊编. —北京:机械工业出版社, 2016.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-54083-0

I. ①电… II. ①林… III. ①电路—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第140260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:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王康

责任校对:杜雨霏 封面设计:张静

责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·529千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54083-0

定价:45.00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

序

对于学生而言，电路是什么？恐怕每个与电类专业有关的学生的理解都不一样。很多人会觉得电路是所有电类课程的基础，其很多分析方法和思维方式都体现了工程上解决实际问题的思路。也有不少将来可能去发电厂或电力公司工作的人认为，电路是他们职业的起步课程，确实有很多与电有关的单位或企业将电路理论知识作为考察新员工的第一步。而对于门外汉或其他专业的同学而言，电路也许会是他们对电类专业感兴趣的第一步。总而言之，电路对于电类专业的重要性就如同基石对于建筑。

对于学生而言，什么是好教材？或许每个学生有每个学生的想法。但是总体而言，学生们希望自己手里的教材是一本能以简练的语言，告知自己最多知识的经典著作。不可否认的是，在当今的教科书市场上有不少经典电路教材。我自己读过不少现在大学所采用的电路教材，这些教材都非常好地贯彻着“知其然知其所以然”的讲解原则。讲解详细，用词专业，有时候读起来如同读一本非常厚的论文一样。可是，对于学生而言，在同时有若干门课程的时候，这样的教材能否激发学生对电路的兴趣？恐怕不能。简单问题复杂化，这是很多教材的通病。对于很多知识点，在实际生活和工作中，更重要的是理解其如何被运用，而不是纠结于一个公式如何被推导。

我选择自动化专业，并对电路等有关电学技术产生兴趣，很大程度上源于我的母亲：林珊老师。虽然我并不在她所任教的大学读书，但是我有幸聆听了她很多课程。虽然她上课会用到如今的一些教材，但从不拘泥于教材。因为她能将复杂问题简单化，理论问题工程化。这是她一贯的教学方法，或许这正是那么多学生对她钟爱有加的主要原因。我也听过其他优秀老师的课程，虽然也相当专业，但或许缺乏林老师上课时候的某种魅力。虽然已经在大学里学完了她教过的课程，但如果能有机会，我希望能继续听她上课。

我相信，一位好的老师一定能将她的教学理念和教学思想融入到自己所撰写的教材当中。在当初林老师写《电工学》那套教材时就体现出来了。简单、通俗、易懂，这两本书很好地诠释了这门课程的精髓。作为工具书又很好地囊括了电路、模拟电子技术、数字电子技术的基本知识点。至今这两本书依然摆在我的书架上。而当林老师将部分电路文稿发给我，让我先睹为快的時候，我觉得很大程度上还原了她上课时候所提炼的知识点和讲解方法。我相信作为读者，即便不能亲临她的课堂，仍然能通过这本书领略到她二十多年的丰富教学经验。

希望作为自动化专业的学生，读完这本教材能觉得选择自动化专业是自己最正确的选择；作为其他专业的学生能开始对电学感兴趣；作为工具书使用者能很好地查阅到自己想要的材料。而我作为林老师的儿子和跟她学习最长时间的学生，希望她的书能帮助更多的人，也希望她能写更多好的教材。希望所有读者都能提出宝贵的建议，让其成为一本经典的电路教材。

许悦聪

于新加坡南洋理工大学

前 言

电路课程是高等工科院校电类专业重要的专业技术基础课程之一。科学技术的不断发展进一步加强了各学科之间的相互联系，电路理论也越来越多地渗透到其他各学科，因此，电路课程已不仅限于电类工科专业，众多理科类专业也将其作为必修课程。通过对该课程的学习，学生获得必需的电路基础理论、电路分析计算能力及测量等基本知识与实践技能，为学习专业课程，树立理论联系实际的观点，提高实践动手能力，培养创新意识和创新能力，打下必要的基础。

近年来，我国高等教育为了主动适应教育要“面向现代化、面向世界、面向未来”的需要，大力推动教学体制改革。随着教学改革的深化，作为电类工科各专业的重要专业技术基础课程的电路也发生了相当大的变化。本书就是针对新的教学大纲、新的课程体系，在多年教学实践的基础上，总结丰富的教改经验和科研成果，消化吸收国内外优秀教材的长处编写而成的。

传统的电路在课程设置上着重追求内容的完整性和系统性，侧重理论推导的严密过程。但是，随着当今社会学科的发展与细化，这种课程设置已经不太适应新形势的发展。教学改革的思路之一就是要把以往单一的、纵向的课程设置变为纵向和横向相互交汇的形式，以整体、融合、发展和应用的观念建立新的课程内容体系，把课程内容层次化、模块化，使基础理论知识与实践应用更好地结合，较好地解决知识爆炸与课时紧张的矛盾。

本书按新教学大纲的要求，对传统的教学内容进行合理的精选、改写、补充和整合。本着“够用、实用、能用”的原则，降低了理论深度，压缩了基础性的原理叙述部分，不过分强调理论的系统性、严密性和完整性。除保留基础的传统内容外，还削减了陈旧的复杂理论推导和应用较少的公式。增加了典型实例电路剖析，这些实例注重理论联系实际，搭建了从理论到应用的桥梁，突出了电路在实际生活、生产中的应用。既增加了学生的学习兴趣，又引导学生思考，以便加强培养学生应用所学电路知识解决实际问题的意识与综合能力。

本书的体系结构注重基础知识的内在关系，突出基本概念和基本原理，进一步理顺教学内容之间的关系。内容的编排与同类书相比有一定的调整，以遵循人的认知规律，更有利于学生按照严谨的思维方式接受相关的知识点，并采用比较有效和精练的方式把问题交代清楚，便于施教与自学，力求做到学以致用。这样做更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

全书共分13章，内容由浅入深，介绍了电路的理论基础、分析方法及实际应用。运用系统分析法、时域分析法、相量分析法、拉普拉斯变换法、网络参数分析法、图解分析法等数学工具对直流稳态电阻电路、动态电路、正弦稳态电路、含有耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电路、二端口网络等各种电路模型进行分析计算。全书力求概念准确、内容新颖、深入浅出、语言流畅、可读性强。既注重基本原理的必要讲解，又力求突出工程上的实用性。明确指出本课程的重点和难点内容，以及读者在学习中常见的疑难之处与易混淆的概念，以便读者深刻理解、熟练掌握。

本书所配例题具有典型性并能适当兼顾工程实际，例题解答过程详尽清楚。每章配有适量且有针对性的思考与练习以及难易适当的习题，习题与例题类型尽量密切结合，读者参考相关例题的解答能够较顺利地完成习题，方便读者自学，易于教师教学。书中标有星号(*)的内容属于加深加宽的参考内容，可根据实际需要而有所取舍。

本书适用于高等院校电类工科专业，既可以作为电路相关课程的教材，也可以作为广大读者自学电路课程和实践的参考书。

本书由广东工业大学自动化学院林珊编写，秦朝明老师主审。

广东工业大学自动化学院的罗小燕书记、主管教学的蔡述庭副院长、学院办公室的黄和平老师、电气系的曾珞雅老师等对本书的编写及出版给予了大力的支持和帮助，在此谨向这些领导和老师致以衷心的感谢！

在本书的编写过程中，我的儿子许悦聪同学给予了极大的精神鼓励和支持，众多过去的、现在的学子们给予了鼓励和支持，在此本人表示最衷心的感谢！

本人作为一名普通平凡的高校教师，谨以此书献给所挚爱的高等教育事业！

限于作者水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。联系邮箱：alice333.happy@163.com。

林珊

于广东工业大学

目 录

序

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律 1

1.1 实际电路与电路模型 1

1.1.1 实际电路概述 1

1.1.2 电路模型 3

1.2 电路的基本物理量 5

1.2.1 电流及其参考方向 5

1.2.2 电压、电位及电动势 6

1.2.3 电能和电功率 9

1.3 电路元件 12

1.4 电阻元件 13

1.4.1 电阻的电压电流关系及伏安特性 曲线 14

1.4.2 电阻元件的功率和能量 16

1.4.3 特殊的电阻元件 16

1.4.4 电阻元件的工程应用基础 17

1.5 独立电源 17

1.5.1 理想电压源和实际电压源 18

1.5.2 理想电流源和实际电流源 19

1.6 受控电源 21

1.7 基尔霍夫定律 23

1.7.1 基尔霍夫电流定律 24

1.7.2 基尔霍夫电压定律 25

1.8 电路中电位的计算 29

习题 31

第2章 电路的等效变换 35

2.1 等效变换 35

2.2 电阻的等效变换 36

2.2.1 电阻的串联和并联 36

2.2.2 电阻的星形联结与三角形联结的 等效变换 41

2.2.3 电桥电路 44

2.3 独立电源的等效变换 46

2.3.1 电压源的串联和并联 46

2.3.2 电流源的并联和串联 48

2.3.3 实际电源的等效 49

2.3.4 多电源电路的等效 50

2.4 受控源的等效变换 52

2.5 无源二端电路的等效 54

习题 56

第3章 电路的基本定理 59

3.1 叠加定理 59

3.2 替代定理 62

3.3 等效电源定理 63

3.3.1 戴维南定理 63

3.3.2 诺顿定理 67

3.4 最大功率传输定理 70

习题 74

第4章 线性电路的基本分析方法 76

4.1 电路的图 76

4.2 支路电流法 77

4.3 网孔电流法和回路电流法 79

4.3.1 网孔电流法 80

4.3.2 回路电流法 83

4.4 结点电压法 84

习题 88

第5章 含有集成运算放大器的电阻 电路 90

5.1 集成运算放大器的电路模型 90

5.1.1 集成运算放大器的工作特性及 电压传输特性 91

5.1.2 集成运放工作在线性区的分析 方法 93

5.2 集成运放的基本运算电路 94

习题 100

第6章 动态电路的时域分析 102

6.1 动态元件 102

6.1.1 电感元件 102

6.1.2 电容元件 105

6.2 换路定则及初始值的确定 108

6.2.1 换路及换路定则 108

6.2.2 初始值的确定 109

6.3 一阶动态电路的时域分析法 112

6.3.1 一阶动态电路微分方程的建立	112	7.9.2 并联谐振	195
6.3.2 一阶动态电路的三要素分析法	115	*7.10 滤波器电路	197
6.4 一阶动态电路的几种常见响应	120	7.10.1 低通滤波器	197
6.4.1 一阶电路的零输入响应	120	7.10.2 高通滤波器	199
6.4.2 一阶电路的零状态响应	125	7.10.3 带通滤波器	200
6.4.3 一阶电路的全响应	128	习题	201
6.4.4 一阶电路的实际应用	131	第8章 三相交流电路	206
6.5 二阶动态电路的时域分析法	132	8.1 三相电源	206
6.6 一阶电路的阶跃响应	134	8.1.1 三相电源的星形联结	208
6.6.1 阶跃函数	135	8.1.2 三相电源的三角形联结	209
6.6.2 一阶电路的阶跃响应	136	8.2 三相电路负载的连接	210
6.7 冲激函数和冲激响应	138	8.3 三相电路的Y-Y联结方式	212
6.7.1 冲激函数	138	8.3.1 三相四线制的Y-Y联结	212
6.7.2 一阶电路的冲激响应	139	8.3.2 三相三线制的Y-Y联结	214
习题	141	8.4 三相电路的Y- Δ 联结方式	218
第7章 正弦稳态交流电路分析	144	8.5 三相电路的功率	223
7.1 正弦量	144	8.5.1 三相电路功率的计算	223
7.1.1 正弦量的基本概念	144	8.5.2 三相电路有功功率的测量	225
7.1.2 正弦量的三要素	145	习题	228
7.2 正弦量的相量表示	149	第9章 非正弦周期电流电路	230
7.2.1 复数及其运算	150	*9.1 非正弦周期信号的分解	231
7.2.2 相量表示	152	9.2 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	233
7.3 基本元件伏安关系的相量模型	155	9.2.1 非正弦周期量的有效值	233
7.3.1 电阻元件伏安特性的相量模型	155	9.2.2 非正弦周期量的平均值	234
7.3.2 电感元件伏安特性的相量模型	156	9.2.3 非正弦周期量的平均功率	234
7.3.3 电容元件伏安特性的相量模型	157	9.3 非正弦周期电流电路的分析	236
7.4 基尔霍夫定律的相量模型	161	习题	240
7.4.1 基尔霍夫电流定律的相量模型	161	第10章 含耦合电感的电路与变压器	242
7.4.2 基尔霍夫电压定律的相量模型	162	10.1 互感	242
7.5 正弦稳态电路的阻抗与导纳	163	10.2 含有互感电路的计算	246
7.5.1 复阻抗	163	10.2.1 耦合电感的串联	246
7.5.2 复导纳	167	10.2.2 耦合电感的并联	248
7.5.3 阻抗与导纳的等效变换	171	10.2.3 耦合电感的单端相连(T形连接)	249
7.6 正弦稳态电路的相量分析法	173	10.3 空心变压器	251
7.7 正弦稳态电路的功率	178	10.4 理想变压器	254
7.7.1 瞬时功率	178	10.5 功率传输的模式匹配	258
7.7.2 有功功率和无功功率	180	习题	259
7.7.3 视在功率和复功率	182	第11章 线性动态电路的复频域分析	262
7.7.4 功率因数的提高	184		
7.7.5 最大功率传输	186		
7.8 频率特性与网络函数	188		
7.9 电路的谐振	190		
7.9.1 串联谐振	191		

11.1 拉普拉斯变换	262	12.3.2 Y 参数等效电路	301
11.1.1 拉普拉斯变换的定义	262	12.4 二端口网络的连接	303
11.1.2 拉普拉斯变换的性质	263	12.4.1 二端口网络的级联	304
11.1.3 用部分分式法进行拉普拉斯 反变换	265	12.4.2 二端口网络的串联	305
11.2 运算电路分析法	270	12.4.3 二端口网络的并联	307
11.2.1 电路定律的复频域运算模型	271	12.5 二端口网络应用实例	309
11.2.2 线性元件电压电流关系的复频域 运算模型	271	习题	310
11.2.3 应用拉普拉斯变换的运算电路法 分析线性电路	274	* 第 13 章 非线性电阻电路分析	
习题	277	简介	314
第 12 章 二端口网络	280	13.1 非线性电路元件	314
12.1 二端口网络的定义	280	13.1.1 非线性电阻	314
12.2 二端口网络的网络参数	280	13.1.2 非线性电感	316
12.2.1 二端口网络的开路电阻 R 参数及 开路阻抗 Z 参数	281	13.1.3 非线性电容	316
12.2.2 二端口网络的短路电导 G 参数及 短路导纳 Y 参数	285	13.2 非线性电阻电路的图解法	317
12.2.3 二端口网络的混合 H 参数及 $\hat{H}$ 参数	288	13.2.1 只含一个非线性电阻的电路	317
12.2.4 二端口网络的传输 $T(A)$ 参数及 $\hat{T}(\hat{A})$ 参数	292	13.2.2 含多个非线性电阻的电路	318
12.2.5 二端口网络参数间的转换	296	13.3 小信号分析法	321
12.3 二端口网络的等效电路	300	习题	323
12.3.1 Z 参数等效电路	300	习题参考答案	325
		附录	336
		附录 A 电阻器的命名方法、标称值及功率 等级	336
		附录 B 电容器的命名方法及标称容量 系列	338
		参考文献	339



电路是研究电路分析普遍规律的一门学科，是电子技术、通信技术、自动控制系统等有关电类相关课程重要的理论基础，通过研究电路的规律来指导实际电路的设计，以便实现各种控制功能。

电路的基本概念和基本定律是电路分析的基础，本章重点介绍电路模型、常用物理量、基本元件以及基尔霍夫定律。这些基本概念和基本定律贯穿全书，通过本章的学习，为后续各章的学习研究打下坚实的基础。

1.1 实际电路与电路模型

在人们的日常生活和生产实践中，电路无处不在。从手电筒、电饭煲、电视机、电冰箱等家用电器到工业自动化控制系统、通信系统、计算机系统等各个方面都离不开电路。当前，集成电路的应用已渗透到各个领域，集成度越来越高，在很小的芯片上容纳的部件、元器件数目越来越多，可达数百万或更多，这些元器件相互连接构成了复杂的电路系统。

1.1.1 实际电路概述

1. 电路的功能以及组成

实际电路（Circuit）是由各种电气设备如发电机、蓄电池、变压器、电动机、晶体管、集成元件、各种电阻器和电容器等设备，通过导线相互连接而构成电流通路的实际装置，人们使用不同的实际电路来实现各种控制过程，完成各种任务。在电力系统、自动控制、电子通信、计算机以及其他各类系统中，电路的作用和功能有不同的表现形式，但概括起来，主要有两方面的作用：一方面是进行能量的转换，并实现电能的传输和分配，如图 1-1a 所示的电力系统。首先，发电机将其他形式的能转换成电能，电能通过输电线进行传输，为了减少远距离传输过程中电能的损耗，要先利用升压变压器升压，进行高压传输，用户使用前，必须通过降压变压器降压，达到安全的工作电压后，才可以供给负载使用。显然，在电力系统整个工作过程中，通过电源、负载和中间环节三个组成部分来实现电能的转换和传输。电路另一方面的作用是实现信号的采集、传递和处理，如图 1-1b 所示的扩音机。传声器先把语音或音乐等信息转换为相

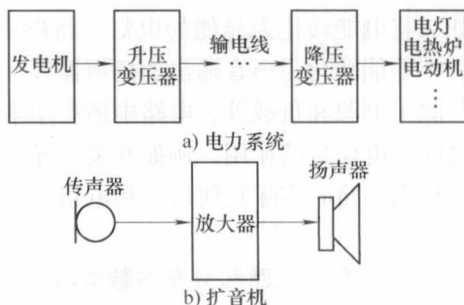


图 1-1 电路示意图

应的电压和电流，形成电信号，显然，传声器是提供电信号的信号源。但这种电信号很微弱，必须通过中间环节——放大器进行“加工处理”，放大成足够大的电信号，然后通过电路传递到作为负载的扬声器，推动扬声器工作，把电信号还原成人们所需要的语音或音乐信号。又如收音机和电视机，它们的接收天线（信号源）把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，然后通过电路对信号进行传递和处理（调谐、变频、检波、放大等），送到扬声器和显像管（负载），还原为原始信息。无论是扩音机、收音机还是电视机电路，都具有对信号进行转换、传递和处理的作用。

因此，电路具有传输和变换电能，实现电信号的采集、传递和处理等基本功能。又如，滤波电路可以滤除无用信号、让有用信号通过；整流电路可以将交流电变换成直流电输出；计算机的存储电路可用来存放数据等。比较复杂的电路呈网状，常称为网络（Network）。实际上，电路与网络这两个名词并无明显的区别，一般可以通用。

实际电路的组成方式很多，结构形式多种多样，电路器件的品种千差万别，日新月异。例如，用导线和开关将电池和小灯泡连接起来组成了照明用的手电筒，就是一个十分简单的电路。而有些实际电路非常复杂，例如，电能的产生、输送和分配是通过发电机、变压器、输电线等完成的，它们形成了一个庞大而复杂的电力系统电路。但是，任何一个完整的实际电路，无论结构是十分简单，还是非常复杂，通常都是由电源、负载和中间环节三个部分组成。

电源（Power Source）是为电路提供能量或电信号的电器设备。例如，把机械能、热能、水能或原子能等其他形式的能转换为电能的发电机，将化学能转换成电能的蓄电池，将光能转化为电能的太阳能电池等，都是常见的提供电能的电源。另外，用来提供各类电信号的信号源也属于电源。无论是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，推动电路工作的电源或信号源所提供的电压或电流都称为激励（Excitation）。所以，电源或信号源也称为激励电源，简称激励源。由激励源在电路中形成的电压和电流称为响应（Response）。有时也根据激励与响应之间的因果关系，把激励源称为输入，响应称为输出。所谓电路分析，就是在已知电路的结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

负载（Load）是电路中将电能转化为其他形式的能、并利用电能进行工作的用电设备。例如，将电能转化为光能的电灯，将电能转化为机械能的电动机，将电能转化为内能的电炉，将电能转化为声音输出的扬声器等，都是常见的负载。

除了电源和负载外，电路中还有用来连接电源和负载的中间环节，它起传输、分配和控制电能和电信号的作用，例如开关、导线、控制电路中的保护设备、变压器等。

根据电路的实际几何尺寸和电路的工作信号波长，电路可分为集中参数电路和分布参数电路。

2. 集中参数电路和分布参数电路

当实际电路的几何尺寸远小于其使用时信号最高工作频率所对应的波长时，电磁波传送过程在瞬间完成，即电磁波沿电路传播的时间几乎为零，此时电路尺寸可以忽略不计，这样的电路称为集中（也称为集总）参数电路。集中参数电路的特点是电路中任意两点间的电压和任意支路上的电流是完全确定的，只是时间的函数，而与器件的几何尺寸和空间位置无关。

以常见的中波段收音机电路为例，如某广播电台工作信号的最高频率为 $f = 1600\text{kHz}$ ，

传播速度为光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 则信号频率的波长 λ 为

$$\lambda = c/f = [3 \times 10^8 / (1600 \times 10^3)] \text{ m} = 187.5 \text{ m}$$

收音机电路的实际尺寸远远小于此波长, 显然满足集中参数电路条件。又如, 某一计算机 CPU 芯片的尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$, 工作频率为 $f = 200 \text{ MHz}$, 则相应的波长 $\lambda = 1.5 \text{ m}$, 可见芯片的尺寸也远小于工作频率的波长, 因此该芯片也视为集中参数电路。

如果实际电路的几何尺寸大于其工作信号的波长, 电路中的电压和电流不仅是时间的函数, 还与器件的几何尺寸和空间位置有关, 这样的电路称为分布参数电路。在电力系统中, 远距离的高压电力传输线是典型的分布参数电路, 因为 50 Hz 电压的波长 $\lambda = 6000 \text{ km}$, 但输电线路长达几百甚至几千千米, 实际电路的尺寸接近或大于工作信号的波长。在通信系统中发射天线的实际尺寸虽不太大, 但发射信号的频率很高, 波长很短, 也应作为分布参数电路处理。例如, 某手机的信号工作频率为 $f = 1800 \text{ MHz}$, 对应的波长 $\lambda = 0.167 \text{ m}$ 。因此, 如果手机天线的尺寸达到 20 mm , 就不能视为集中参数电路, 而是分布参数电路。

由于工作信号频率越低, 波长越长。所以, 工作信号频率较低的电路, 它的实际电路尺寸一般远小于其工作频率的波长。本书中所讨论的电路和电路元件均满足集中参数电路的条件, 为叙述方便把集中参数电路简称为电路。分布参数电路与集中参数电路的分析方法完全不同, 分布参数电路将在其他课程中讨论。

3. 电路的工作状态

电路可能具有三种工作状态, 即通路、开路和短路。

1) 通路, 也称为闭路。一般指电源与负载接通、电路构成闭合回路。电路中有电流通过, 电气设备或元器件获得一定的电压和电功率, 处于工作状态, 进行能量的转换。

2) 开路, 也称为断路。是指不构成闭合回路、电路中某处无电流流过的情况。

3) 短路, 是指电路中的两点经电阻近似为零的导线直接相连的情况。

需要说明的是, 开路和短路有时是人为的、正常的状态, 有时可能是故障状态。当根据需要, 通过控制电器切断电路, 就是正常的开路, 而其他偶尔的原因使电路切断则是故障状态。根据需要, 将电路中某一部分短接, 这是正常的短路, 而由于其他意外的原因, 使电路的两个不同点短接, 则是故障状态。发生短路故障时, 电路中可能形成较大的短路电流, 对电路的设备造成一定程度的损坏。特别是当电源两端用导线直接连接时, 输出电流过大, 对电源来说属于严重过载, 如果没有采取保护措施, 电源或电器会被烧毁, 甚至发生火灾, 所以通常要在电路或电气设备中安装熔断器等保险装置, 以防止短路故障发生时出现不良后果。

电路理论所研究的对象并不是由实际器件构成的实际电路, 而是实际电路的科学抽象——电路模型 (Circuit Model)。

1.1.2 电路模型

实际电路是由电磁特性相当复杂的各种实际元器件通过导线相互连接而构成电流通路的装置。它们在电路中工作时, 所表现的物理特性并不是单一的。例如, 一个实际的绕线电阻, 当有电流通过时, 除了对电流呈现阻碍作用之外, 还在导线的周围产生磁场, 因而兼有电感器的性质。同时还会在各匝线圈间存在电场, 因而又兼有电容器的性质。所以, 直接对

由实际元器件构成的实际电路进行讨论和研究,往往很困难,有时甚至无法进行计算。

为了便于分析,常常在一定条件下对实际元器件加以近似化、理想化(或称模型化)。所谓理想化就是只考虑其中起主要作用的某些电磁性质,而忽略其他次要现象,或者将一些电磁现象分别表示。例如,在图 1-2a 所示的手电筒实际电路中,小灯泡不但发热消耗电能,而且在其周围还产生一定的磁场,但是可以只考虑其消耗电能的性能而忽略其磁场;闭合的开关和较短的导线则只考虑导电性能而忽略其本身的电能损耗;干电池不仅在正负极间能保持一定的电压对外部提供电能,同时,内部也有一定的电能损耗,但可以将它提供电能的性能与内部电能损耗分别表示。

因此,为了便于使用数学方法对电路进行分析,可将实际电路中的各种电器设备和元器件用一些能够表征它们主要电磁特性的理想元件模型来代替,这些定义的理想电路元件模型,简称为电路元件(Circuit Element)。在一定的工作条件下,由理想电路元件或它们的组合代替实际电路器件、按照一定的结构连接而成的电路,就是实际电路的电路模型。它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。(理想)电路元件是组成电路模型的最小单元,是具有某种确定电磁性质的基本结构。电路元件及它们的组合足以模拟实际电路中发生的物理过程。将各种电路元件用统一规定的图形符号表示,并用电阻为零的“理想导线”连接各电路元件的端子,就构成电路模型图,也叫电路原理图,简称电路图或电路。电路图是进行电路分析计算的研究对象。

图 1-2a 所示为一个简单的手电筒实际电路。用导线将干电池、开关、小灯泡连接起来,为电流流通提供了路径。其电路图如图 1-2b 所示,图中的电阻元件 R 作为小灯泡的电路模型,反映了小灯泡将电能转换为光能的电磁特性。用电压源 U_S 和电阻元件 R_S 的串联组合作为干电池的电路模型,分别反映了将干电池内储存的化学能转换为电能以及电池本身消耗能量的物理过程。用线段表示连接导线,用 S 表示忽略本身电能损耗的开关。

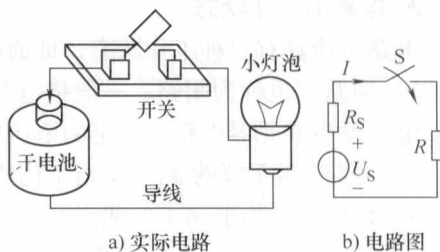


图 1-2 手电筒的实际电路及电路图

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立实际电路的理想电路模型的过程,简称建模。实际器件和电路的种类繁多,而电路元件却只有有限的几种,用电路元件建立的电路模型给实际电路的分析带来了方便,大大简化了电路的分析。建立实际器件的理想元件模型时,必须考虑工作条件,并按不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理特征和电学性能反映出来。理想元件与相应的实际器件主要的电磁特性应相同或接近。为了突出主要特性,使问题简化,往往忽略实际器件的一些次要的性能,因此,理想电路元件和实际器件不一定也不可能完全相同。例如,一个线圈在直流环境下工作,就只需考虑线圈内电流引起的能量消耗,它的模型就是一个电阻元件;在电流变化的情况下(包括交变电流),线圈电流产生的磁场会引起感应电压,此时相应的电路模型除电阻元件外,还应包含一个与之串联的电感元件;当电流变化很快时(包括高频交流),则还要考虑线圈导体表面的电荷作用,即电容效应,所以其模型中还需要包含电容元件。可见,在不同的工作条件下,同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得恰当,对电路进行分析计算的结果就与实际情况接近;模型取得不恰当,则会造成很大误差,甚至导致错误的结果。如果模型取得过于复杂则会造成

分析困难,取得过于简单则可能无法反映真实的物理现象。一般地,对电路模型的近似程度要求越高,电路模型越复杂。所以建立电路模型一般应指明它们的工作条件,如频率、电压、电流和温度范围等。另一方面,不同的实际器件在不同条件下,只要主要的电磁特性相同,就可以用相同的理想元件模型来代替。例如,电热炉、电烙铁、风扇等不同的电器,当只考虑它们消耗电能的电磁特性时,都可以用一个电阻元件来代替。

通常,由理想电路元件构成的电路又称网络,有时也把实际电路电器称为“电路元件”,本书中所涉及的电路或网络均指由理想元件构成的电路模型。

【思考与练习】

- 1.1.1 电路的作用有哪些?电路由哪些部分组成?具有哪几种工作状态?
- 1.1.2 在建立电路元件模型时要注意什么问题?

1.2 电路的基本物理量

实际电路的特性由电流、电压、功率等物理量来描述,常借助于电压、电流、功率来完成传输电能或信号、处理信号、测量、控制、计算等功能。电路分析的任务就是研究电路中电流、电压和功率等基本物理量,分析它们之间的关系及基本规律。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷有规则的定向运动形成电流 (Current)。电流产生的必要条件是电路必须是有电源的闭合路径。电流是一种物理现象,又是一个既有大小又有方向的基本物理量。电流定义为通过导体横截面的电荷量与所需时间之比,即电流在大小上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,用公式表示为

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

式中, i 表示电流; q 表示电荷量或电量; t 表示时间; dq 是在 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

国际单位制 (SI) 中,电流 i 的单位为安培 (A),电荷量 q 的单位为库仑 (C),时间 t 的单位为秒 (s)。规定 1 秒内通过导体横截面的电量为 1 库仑时,电流为 1 安培。电流常用的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等。它们之间的关系为

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

如果电流的大小和方向都不随时间而变,则这种电流称为直流电流 (Direct Current),简称直流 (DC)。直流电流通常用大写字母 I 表示,式 (1-1) 改写为

$$I = \frac{q}{t}$$

式中, q 是在 t 时间内通过导体横截面的电荷量。

若电流的方向随时间变化,称为变化电流,用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示。如果电流随时间按正弦或余弦规律变化,一个周期内电流的平均值为零,这样的变化电流称为正弦交流电

流 (Alternate Current), 简称交流 (AC), 也用 i 或 $i(t)$ 表示。

早期的科学家规定, 电流的正方向是正电荷流动的方向, 这个规定沿用至今。后来, 科学家发现电流本质上是电子的运动, 而电子是带负电的。因此, 电流的正方向是与电子运动的方向相反的。

当电路确定后, 电路中的电流的方向是客观存在的, 分析简单电路时, 可以由电源的极性判断电路中电流的实际方向。但在分析较为复杂的电路时, 往往很难事先判定电流的方向。另外, 对于方向随时间而变的交流电流, 无法用一个固定方向表示它的实际方向。为此, 先任意假定电流的某个方向作为分析与计算时的参考, 称为电流的参考方向 (Reference Direction)。设定了参考方向以后, 电流就是一个有正负值的代数量。在参考方向下, 通过电路定律或定理计算求得的电流若为正值, 则电流的实际方向与参考方向一致; 若计算出的电流为负值, 说明电流的实际方向与参考方向相反。这样就可以根据电流值的正负以及选定的参考方向来确定电流的实际方向。应当注意, 在未规定参考方向的情况下, 电流的正负号是没有意义的。

电路中电流的参考方向一般用箭头表示在电路图上, 并标以电流符号 i 或 I , 如图 1-3a 所示。也可以用双下标表示, i_{ab} 表示电流参考方向是由 a 到 b, 如图 1-3b 所示。如果参考方向选为由 b 指向 a, 则为 i_{ba} , 如图 1-3c 所示, 显然

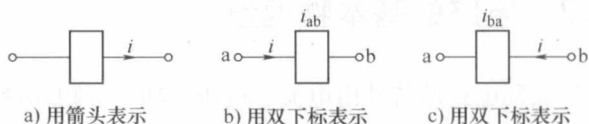


图 1-3 电流的参考方向

$$i_{ab} = -i_{ba}$$

在测量电流时, 应该把电流表串接在待测电路中, 而不能与待测电路并联。

1.2.2 电压、电位及电动势

1. 电压及其参考方向

正电荷在电场力的作用下, 由 a 点转移到 b 点, 电场力所作的功与电荷量的比值, 称为电压 (Voltage), 用公式表示为

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

式中, u_{ab} 表示 a、b 两点间的电压; dq 表示由 a 点转移到 b 点的电荷量; dW 为转移过程中电场力所作的功。

电压反映了将单位正电荷由 a 点转移到 b 点所需要的能量。

在转移过程中正电荷具有的电势能减少, 电势能减少意味着从高电势点到低电势点, 所以电势降低的方向为电压的实际正方向。电压也是既有大小又有方向 (极性) 的基本物理量。

在国际单位制 (SI) 中, 电压的单位是伏特 (V)。当电场力把 1 库仑的正电荷从一点转移到另一点所做的功为 1 焦耳 (J) 时, 则该两点间的电压为 1V。计量小的电压时, 则以毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 为单位; 计量高电压时, 则以千伏 (kV) 为单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

按电压随时间变化的情况,可分为直流电压的和交流电压。通常,直流电压用大写字母 U 表示,交流电压用小写字母 u 表示。

与电流类似,在分析电路时,也需要先任意假定电压的参考方向。选定电压的参考方向后,经分析计算得到的电压也成为有正、负的代数量。若电压为正值,则电压的实际方向与参考方向一致;若电压为负值,则电压的实际方向与参考方向相反。这样,就可以利用电压的正负值和假定的参考方向来确定电压的实际方向(极性)。电压的参考方向可任意设定,一般有三种表示方式:

(1) 参考极性表示法 在电路图上标出正(+)、负(-)极性,并标以电压符号 u 或 U 。如图 1-4a 所示,电压的参考方向从正(+)极性指向负(-)极性。

(2) 箭头表示法 采用箭头表示电压的参考方向,并标以电压符号 u 或 U ,如图 1-4b 所示。

(3) 双下标表示法 如图 1-4c 所示, U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b。而 U_{ba} 则表示电压的参考方向是由 b 指向 a, $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

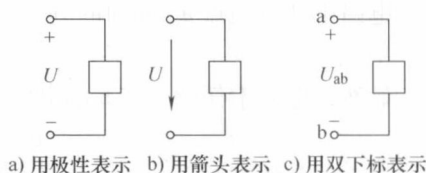


图 1-4 电压的参考方向

选定参考方向才能对电路进行分析计算,电压的正、负值才有意义。

关于电流、电压的参考方向,需要注意以下几个问题:

1) 电流、电压的实际方向是客观存在的,但往往难以事先判断。在分析问题时需要先假定电流、电压的方向,也就是要先人为选定参考方向,然后根据设定的参考方向进行电路的分析计算,列写关于电流、电压的方程。

2) 没标明参考方向的情况下,电流或电压的正、负值是没有意义的。

3) 参考方向一经选定,整个分析计算过程都以此为基准,不能随意变动。

4) 参考方向可以任意选定而不会影响计算结果,选择的参考方向相反时,求解出的电流或电压值相差一个负号,但最后得到的实际结果是相同的。

5) 电流参考方向和电压参考方向可以分别独立地任意设定。但为了分析方便,常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,即电流从电压的正极性(参考高电势)端流入该元件,而从它的负极性(参考低电势)端流出,如图 1-5a 所示。当同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致时,称为关联(Associated)参考方向。反之,当电流的参考方向与电压的参考方向相反时,则为非关联参考方向,如图 1-5b 所示。一般情况下,同一个元件的电流和电压的参考方向选为关联方向,可以只标注其中一个量的参考方向,另一个量的参考方向默认为相一致的关联方向,不需标注出来。

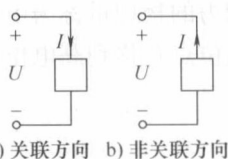


图 1-5 电压、电流的参考方向

2. 电位

在电路中任选一点 o 为参考点(Reference Node),则某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 就称为 a 点(相对于参考点)的电位(Potential),用 V_a 表示。参考点 o 的电位为零,即 $V_o = 0$ 。

电位是一个相对的量,其大小一般随着参考点的改变而变化。所以在计算电路中各点电位时,必须先选定电路中某一点作为电位参考点,即参考零电位点。电位的参考点可以任意

选取,选择的参考点不同,各点电位的量值也就不同。但为了测量的方便,通常以大地为参考点,线路中所有接地的点均为零电位点。一些有金属外壳的设备,由于外壳接了地,所有与外壳相接的点也就是零电位点了。而采用塑料外壳的仪器设备的电路一般与大地没有直接连通的点,通常规定电路中许多元件汇集的公共点为零电位点。如电子线路中的“地”就是这样的公共点。任何一个电路,无论复杂程度如何,电位参考点只能选一个。参考点在电路图中标上“接地”符号,或用“ $\perp$ ”符号标记。所谓“接地”,并非都真与大地相接,只是该点为参考零电位点。

电路中任意两点 a、b 间的电压等于这两点电位之差,所以,电压又称电位差。即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

显然,电路中任意一点 a 的电位实际上就是该点与参考点 o 间的电压,即

$$U_{ao} = V_a - V_o = V_a - 0 = V_a \quad (1-4)$$

引入电位的概念之后,电压的实际方向规定为由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向。

根据式(1-3),可由电路上各点电位,求得相应各段的电压;电压是针对电路中某两点而言的,与路径无关,与参考零电位点的选取也无关。在电路选定参考点后,也可由电路各段电压求得电路各点的电位。而电位的量值与参考点的选择有关,电位是有正负值的代数量。电路中各点电位的正负和大小都是相对选定的零参考点而言的,比零参考点高,电位为正;比零参考点低,电位为负。正数值越大则电位越高,负数的绝对值越大则电位越低。这就如同地球上各处的海拔都是相对某一海平面而言的一样。

在国际单位制(SI)中,电位的单位与电压一样,也为伏特(V)。

3. 电动势

电路中,在电场力作用下,正电荷一般总是从高电位点向低电位点运动。为了形成连续的电流,就要求在电源中有一个电源力作用在正电荷上,使正电荷逆着电场力方向运动,从低电位点移到高电位点,并把其他能量转换成电能。用来描述电源将其他形式的能量转换成电能能力的物理量称为电动势(Electromotive Force),它反映了单位正电荷在电源力作用下,从低电位点转移到高电位点时所增加的电能。用符号 e 表示,即

$$e = \frac{dW_s}{dq} \quad (1-5)$$

式中, dq 表示转移的电荷量; dW_s 为转移过程中正电荷增加的电能。

电能增加体现为电位从低电位点升高到高电位点,所以电动势的方向规定为在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位(“+”极性)端,即为电位升高的方向。而电压 u 的方向是从高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向,两者刚好相反。根据能量守恒定律,如果不考虑电源内部还可能其他形式的能量转换,则电动势 e 在量值上应等于电压 u 。虽然电动势与电压的物理意义并不相同,但就其对外部的效果而言,一个电源既可以用从负极性指向正极性的电动势来表示,也可以用正极性指向负极性的电压表示,二者量值相同,是没有区别的,所以近代电路理论中逐渐淡化了电动势这个量,但在电力工程和专业课程中,电动势这个概念还是有广泛的应用。

与电压相同,电动势也可分为直流、交流两大类,分别用符号 E 和 e 表示。电动势的单位也是伏特(V)。