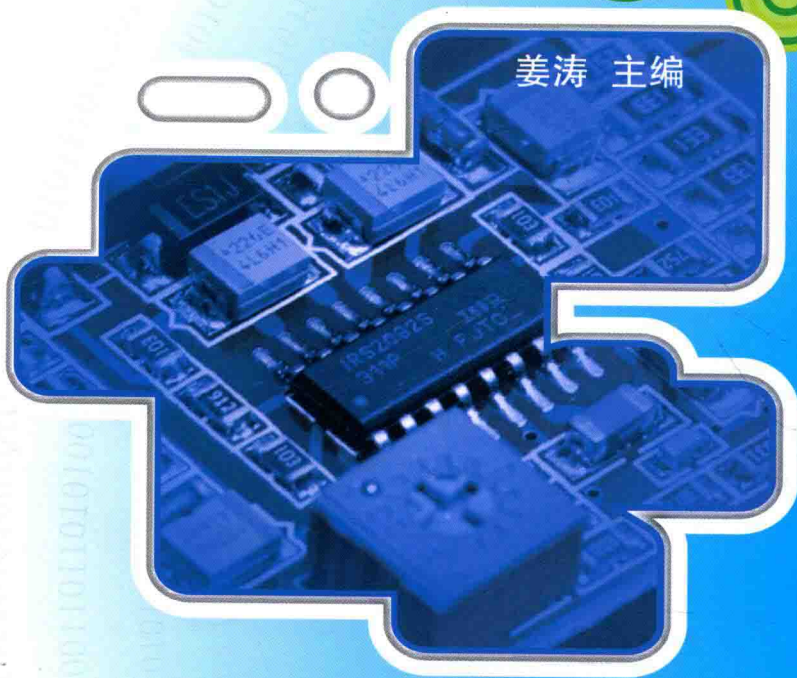




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

简明电路分析

姜涛 主编



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

简明电路分析

主 编 姜 涛
主 审 姚 毅



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书内容以线性电路的特性和分析方法为主线,在介绍基本元件特性和基本电路模型的基础上,讨论了电路的基本定理定律、分析方法和计算机模拟仿真方法,并为适应时代技术的发展引入了计算机电路分析软件的介绍。为满足电路课程教学改革的需求,本书本着“简明、适用、够用”的原则,强调基础知识、基本概念和电路的基本求解方法,语言通俗易懂,表述清晰明了,内容精练实用,并在每章末介绍了典型电路的计算机分析和仿真实例,还配有精选的例题和大量习题。

本书可作为电子信息、通信技术、自动控制、电气及其自动化、机电一体化和计算机等专业的本科电路基础教材,也可作为相关专业成人教育、网络远程教育的本专科教材,还可供学生和工程技术人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

简明电路分析/姜涛主编. —北京:北京大学出版社, 2015. 9

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978 - 7 - 301 - 26062 - 3

I. ①简… II. ①姜… 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 (2015) 第 163082 号

书 名	简明电路分析
著作责任者	姜 涛 主编
责 任 编 辑	程志强
标 准 书 号	ISBN 978 - 7 - 301 - 26062 - 3
出 版 发 行	北京大学出版社
地 址	北京市海淀区成府路 205 号 100871
网 址	http://www.pup.cn 新浪官方微博: @北京大学出版社
电 子 信 箱	pup_6@163.com
电 话	邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667
印 刷 者	三河市北燕印装有限公司
经 销 者	新华书店
	787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 498 千字
	2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷
定 价	48.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010 - 62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010 - 62756370

前 言

本书是为电子信息、通信技术、自动控制、电气及其自动化、机电一体化和计算机等各类本专科专业电路课程编写的短学时教材,适合 50~80 学时的电路分析(电路原理)课程使用。

电路分析(电路原理)课程是电路理论的入门课程,是电工电子信息类专业最重要的技术基础课程。考虑到近年来,尤其是扩招以后,学生对基础知识掌握的程度有所下降,学生普遍对“电”的印象相当淡薄,很多电路的基础知识甚至电路的识读都需要重新建立,加之学时大幅减少,对电路课程的教学工作造成了极大的困难。本书正是针对这些主要矛盾而编写的。本书力求用通俗易懂的语言讲清电路的物理概念,用简单明了的步骤分析电路的求解,使学生易于理解、自学和掌握。学生通过对本书的学习,可对电路的基本特性、定理定律和分析方法有一个清晰的了解,为后续课程的学习和工程应用打下基础。为便于学习和使用,下面对本书的编写体系、课程特点和学习方法等问题进行介绍,供读者阅读时参考。

1. 电路分析课程的任务是讨论和研究集总参数电路的基本理论与分析方法,从而实现对一般电路的分析和求解。通过对本书的学习,学生可掌握电路系统基本元件的特性,以及电路的基本概念、结构、定理定律和分析方法及相应的实验技能,为电类各专业后续课程的学习奠定理论基础。任何一个门类的知识均包含“分析”与“综合”两个方面,本书着重于“分析”,所谓分析就是分解、剖析,在对基本电路元件、电路单元研究的基础上,将其应用于对复杂电路系统的求解。本课程在培养学生严肃认真的科学作风、抽象思维能力、电路识读和分析计算能力、实验研究能力和总结归纳能力等方面起着至关重要的作用。

2. 考虑到近年来电路分析课程学时的大幅减少和学生基础知识薄弱的实际情况,使该课程逐渐淡化了作为电路理论课程的概念,而逐渐偏重于将其作为电类专业课的入门、桥梁和工具。本书对课程内容做了一些精简和调整,以更加紧凑的方式讲授电路分析的核心内容,但又保证不影响电路基本理论的完整性和对基本分析方法的充分讨论。本书将电路分析课程教学的基本要求和目标确定为:以元件特性为基础,以电路的识读和分析为核心,强调掌握根据电路列写方程的分析方法。编写以“简明、适用、够用”为原则,按“一”“二”“三”的编排体系展开,即一个假设——集总电路、理想模型的假设;两类约束——由电路连接关系决定的结构约束关系和由电路元件伏安特性决定的元件约束关系;三大基本概念(和分析方法)——叠加概念、分解概念和变换(域)概念。力求突出“讲清物理概念,回避繁冗推证,强调结论解法,注重实际运用”的特色。

3. 根据以上而定的基本架构,本书内容分为两个单元,即直流电阻电路分析和动态电路分析。

第一单元:直流电阻电路分析,由第 1~3 章组成,这是本书的核心内容,构成了电路分析的基本理论和分析方法的完整体系。这一单元主要讨论由直流电源和电阻元件构成

的电路的电路结构、电路变量、电路元件、电路模型和两类约束的概念，利用两类约束、电路定理定律和基本分析方法对一般电路系统进行分析 and 求解的方法，并介绍了利用 EWB 对直流电路进行仿真分析的方法。

第二单元：动态电路分析，由第 4~7 章组成。第 4 章讨论动态元件的定义、特性和动态电路响应的时域分析方法，动态电路的微分方程解法和一阶电路响应的三要素解法以及二阶电路的物理过程和响应。第 5 章讨论正弦稳态电路的相量分析方法，相量模型、阻抗及其变换、相量法和正弦稳态功率及计算。第 6 章讨论互感和变压器元件的定义、特性及等效模型，含互感和理想变压器电路的分析及其功率。三相交流电路的概念及对称三相交流电路的分析方法。第 7 章讨论动态电路的 s 域分析方法，复频率的概念、 s 域模型及网络的零极点和频率响应。最后，介绍了利用 EWB 对正弦稳态电路、互感电路和三相电路、电路频率响应的分析和仿真。

4. 学习方法及要求。通过对本课程的学习，希望学生达到“定理概念清楚，基本解法熟悉，分析过程工整，求解快速准确”的基本要求。学生在学习时首先要注重物理概念的理解和掌握，在理解物理机制、重现物理情景的基础上掌握电路的基本概念和定理定律；其次要注重电路的识读，基本单元电路的熟知，基本分析求解方法、过程的掌握，最大限度地减少公式尤其是电路方程的死记硬背，养成“看着电路写方程”的良好习惯；再次要明白先要学会走才能学会跑的道理，尤其对于初学阶段、一般层次的学生更需要脚踏实地、按部就班地进行，只有熟练地掌握了规范工整的常规求解方法和过程，在今后的实际工作中才能够正确地灵活应用；最后，目前电路分析课程多被当成一门工具课程来开设，既然是工具一要简便，二要熟练，但不要被简单迷惑而有所轻视，因为熟才能生巧，所以还要求学生必须亲自动手进行大量等效电路的绘制和电路方程的列写，这一点对于现在的很多学生还需特别强调。

5. 为适应新技术的发展，让学生尽早接触计算机辅助分析的方法和思想，本书还在每章的末尾加入了用 EWB 对电路进行分析(仿真)的介绍，以激发学生对常用电子电路分析、设计软件学习的兴趣。本书将计算机应用软件与传统电路理论教学相结合，使之相互补充。传统分析方法侧重于用数学方法描述和求解电路，而计算机软件可以得到输入(激励)和输出(响应)之间直观形象的结果，这将有利于对电路理论和特性的理解和掌握；利用计算机软件可以对电路进行虚拟实验，得到其十分接近于真实环境的“仿真”结果，这对激发学生的兴趣、培养其创新能力大有裨益。另外，本书有意将软件部分安排为必修的自学内容，一方面培养学生的自学能力，另一方面要告诉学生计算机工具软件若需要也是可以自学的，在今后还有很多非常重要的电子电路常用软件需要通过自学去掌握，如 Multisim、Proteus、Protel、Altium Designer、Max+plus 等。

本书由姜涛主编并负责全书的统稿和修改工作。具体编写分工为：姜涛编写第 1~5 章，陶雪容编写第 6 章，庞尚珍编写第 7 章和全书的 EWB 仿真，罗伟负责本书主要章节的习题和解答，肖辉为本书的前期策划做了很多工作。本书由姚毅教授主审，并提出了大量宝贵的修改意见。

本书编者均长期使用李瀚荪编写的经典教材《电路分析基础》进行授课，其理论体系和教学方法对编者有深刻、有益的影响，并体现于日常的教学工作和本书的编写之中，书中引用了李老先生的部分思想和内容，在此表示深深的敬意和感谢！本书在编写中也参考了大量国内外优秀的教材和参考书，在此一并表示感谢！



本书的编写工作得到了四川理工学院“电路分析”教材建设项目的支持。

由于作者水平有限加之时间仓促，书中内容难免存在不当之处，敬请各位老师和同学们指正，作者邮箱：jetwash@163.com，365639720@qq.com。

编 者

2015 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的概念及约束关系 1

1.1 电路的集总假设及电路模型 1

1.1.1 电路的基本概念 1

1.1.2 电路分析与设计 3

1.1.3 集总假设及电路模型 4

1.1.4 电路的分类 5

1.2 电路变量及功率 6

1.2.1 电流 7

1.2.2 参考方向 7

1.2.3 电压 8

1.2.4 关联与非关联的参考方向 8

1.2.5 功率及能量 9

1.3 电路的结构约束关系 10

1.3.1 常用电路术语 11

1.3.2 基尔霍夫节点电流定律 11

1.3.3 基尔霍夫回路电压定律 12

1.4 电路的元件约束关系 14

1.4.1 电阻元件 14

1.4.2 独立电源 16

1.4.3 受控源 19

1.5 简单电路分析 21

1.5.1 电阻电路的分压与分流 21

1.5.2 三个典型最简电路分析 23

1.6 EWB 的简单应用 30

本章小结 32

习题 33

第 2 章 电路方程及分析方法 41

2.1 KCL、KVL 的独立性 41

2.2 支路分析 42

2.3 网孔分析 43

2.3.1 网孔方程 43

2.3.2 用网孔法求解电路 45

2.3.3 在网孔法中对电流源支路

的处理 46

2.3.4 网孔法中特殊情况的处理 方法 47

2.4 节点分析 49

2.4.1 节点方程 49

2.4.2 用节点法求解电路 51

2.4.3 节点法中电压源支路的处理 方法 51

2.4.4 含受控源电路的处理方法 ... 55

2.4.5 节点分析与网孔分析的 对照 55

2.5 电路的对偶关系 56

2.6 EWB 电阻电路仿真 58

本章小结 59

习题 60

第 3 章 电路定理及分析方法 64

3.1 线性性质及网络函数 64

3.1.1 线性电路的齐次性 65

3.1.2 网络函数 66

3.2 叠加定理 67

3.2.1 叠加定理的表述 68

3.2.2 叠加方法的应用 69

3.3 分解方法和变换方法 71

3.3.1 分解方法 72

3.3.2 变换方法 73

3.4 单口网络的伏安关系 73

3.4.1 单口网络 VCR 的描述 73

3.4.2 单口网络 VCR 的获得 74

3.5 置换定理 76

3.5.1 置换定理的表述 76

3.5.2 置换定理的应用 78

3.6 单口网络的等效 79

3.6.1 等效的概念 79

3.6.2 电阻电路的等效 80

3.6.3 独立源的串并联	84
3.6.4 实际电源模型及变换	86
3.6.5 含源单口网络的等效变换 (化简)	87
3.7 戴维南定理及诺顿定理	91
3.7.1 定理的表述	91
3.7.2 等效电路参数的求得	92
3.8 最大功率传输定理	98
3.9 特勒根定理及互易定理	101
3.9.1 特勒根定理	101
3.9.2 互易定理	102
3.10 EWB 复杂直流电路的仿真	104
本章小结	105
习题	106
第 4 章 动态电路分析	116
4.1 动态元件及其特性	117
4.1.1 电容元件	117
4.1.2 电感元件	121
4.1.3 电阻、电容、电感的性质 及约束关系	124
* 4.1.4 电容、电感的串并联	125
4.2 动态电路及分析方法	127
4.2.1 动态电路的概念及状态 变量	127
4.2.2 用分解方法和叠加方法 求动态电路响应	129
4.3 一阶电路及响应	130
4.3.1 零输入响应	130
4.3.2 零状态响应	133
4.3.3 RC 一阶电路的全响应	136
4.3.4 RL 一阶电路的响应	137
4.4 三要素法求一阶电路响应	138
4.4.1 三要素的求解	139
4.4.2 三要素法求一阶电路 响应	140
4.5 二阶电路及响应	148
4.5.1 LC 电路的振荡过程	148
4.5.2 RLC 串联电路的响应	149
4.5.3 GLC 串联电路的响应	153
4.6 EWB 动态电路仿真	153
本章小结	157
习题	159

第 5 章 正弦稳态电路分析	167
5.1 正弦电量及稳态响应	167
5.1.1 正弦电量的表示	167
5.1.2 正弦稳态响应	169
5.2 变换方法及相量	171
5.2.1 变换方法	171
5.2.2 复数	171
5.2.3 相量	174
5.3 两类约束的相量形式	175
5.3.1 相量的线性性质	175
5.3.2 基尔霍夫定律的相量形式	177
5.3.3 三种基本元件 VCR 的相量 形式	178
5.3.4 阻抗和导纳——VCR 形式 的统一	182
5.4 相量分析法——用类比方法分析 正弦稳态电路	184
5.4.1 相量模型	184
5.4.2 单口网络的阻抗和导纳	185
5.4.3 RLC 的串联和并联	186
5.4.4 复杂正弦稳态电路分析	189
5.4.5 相量模型的等效	191
5.4.6 戴维南定理和诺顿定理	194
5.4.7 相量图法	195
5.5 正弦稳态功率	197
5.5.1 瞬时功率及能量	198
5.5.2 三种单一元件的功率及 能量	199
5.5.3 单口网络的三个功率	203
5.5.4 复功率及复功率守恒	207
5.6 最大功率传输定理	209
5.7 EWB 正弦稳态电路仿真	212
本章小结	214
习题	216
第 6 章 互感电路及三相电路	226
6.1 互感	226
6.1.1 互感的概念	226
6.1.2 互感的 VCR	229
6.2 含互感电路的分析	231
6.2.1 耦合电感的串并联	231
6.2.2 耦合电感的 T 形去耦 等效	233



6.2.3 含耦合电感电路的分析	235	7.2.1 网络函数的概念	280
6.2.4 空心变压器及反映阻抗	236	7.2.2 网络函数的零极点	282
6.2.5 耦合电感的功率	239	7.3 频率响应	285
6.3 理想变压器电路分析	240	7.3.1 强制响应与复平面矢量	285
6.3.1 理想变压器的 VCR	241	7.3.2 零极点与频响曲线	287
6.3.2 电压及电流变换性质	242	7.3.3 一阶频率特性	288
6.3.3 阻抗变换性质	242	7.3.4 二阶频率特性	291
6.3.4 理想变压器的功率	243	7.4 波特图	295
6.4 三相电路	244	7.4.1 波特图的概念	295
6.4.1 三相电源	244	7.4.2 一、二阶频响的波特图	296
6.4.2 三相电源的连接及相线 电压	246	7.5 EWB 频率分析	300
6.4.3 三相负载的连接及相线 电流	247	本章小结	302
6.4.4 三相电路的功率	253	习题	302
6.5 EWB 互感和三相电路仿真	255	附录 A EWB 简介	308
本章小结	258	A.1 什么是 EWB	308
习题	259	A.2 EWB 的界面	308
第 7 章 网络函数及 s 域分析	267	A.2.1 EWB 主窗口	308
7.1 复频域分析法	267	A.2.2 EWB 菜单栏	309
7.1.1 拉普拉斯变换及基本 性质	267	A.2.3 EWB 工具栏	311
7.1.2 拉普拉斯反变换	270	A.2.4 EWB 元件库	311
7.1.3 线性电路的复频域模型	273	A.3 EWB 电路的创建与运行	313
7.1.4 s 域分析法——用类比方法 分析复频域模型	275	A.4 EWB 电路的仿真实验	316
7.2 网络函数	279	附录 B 部分习题参考答案	317
		参考文献	329

第1章

电路的概念及约束关系

基本内容：本章着重讨论电路的基本概念和基本关系。首先，在集总假设基础上引入电路元件、电路模型和电路变量等基本概念，并由此得出电路的约束关系——基尔霍夫定律和元件伏安关系，这就是我们所说的“一个假设，两类约束”；然后，通过3个最简电路及其求解举例说明直接利用两类约束分析简单电阻电路的方法。

基本要求：掌握集总概念、电量及参考方向、功率及其符号；掌握KCL、KVL和VCR两类约束关系及两套符号的运用；熟练运用两类约束求解简单电路。

1.1 电路的集总假设及电路模型

1.1.1 电路的基本概念

电具有瞬时传递、清洁方便和便于控制的显著优点，已经深入到了工农业生产、国防科研、文化娱乐和日常生活的方方面面，“电”已成为当今信息社会的显著特征，与现代人的生产、生活密不可分。电的作用和应用主要表现在以下两方面：一是实现电能的生产、传送和转化(转化为其他形式的能，即对外做功)，这构成了现代生产活动、日常生活电气化应用的基础，即所谓“强电”范畴的电力电气系统；二是实现电信号的传输、处理和交换，电以其具有携带信息的能力在通信、计算机等领域得到了最广泛的应用，同时电又是控制其他形式能量最有效的手段，这使其在自动控制领域具有不可替代的地位，即所谓“弱电”范畴的电子、通信、计算机、生物医学工程、自动控制系统等。

大到发电站、长距离输电线路，小到各种集成电路芯片，从简单的电动玩具到复杂的超级计算机，电路千差万别，功能各有不同，但它们都受共同的基本物理规律——电磁现象支配。电磁理论主要研究电气元件及其内外部空间的电磁现象，即“场”的规律，而电路理论主要研究电气元件的外部特性以及“路”中电路变量的关系。电磁场和电路理论都研究一个物理系统中所发生的电磁过程，电路中元件的特性和电路的基本关系是电磁现象和过程在特定条件下的产物，是电磁场理论的具体体现，而“场”更重要的是研究电磁过程普遍的、一般的规律。因此，只有深刻理解电磁过程的物理规律才能很好地掌握电路的特性和关系。

实际的电路(electrical circuit)由电阻器、电容器、电感器(线圈)、电源和导线、开关

等电路部件或晶体管、集成电路等电子元器件按照所需实现的功能，按照一定的结构关系互相连接而成，并由此构成各种电气和电子系统。以最简单的手电筒电路为例，它由电池、灯泡、开关及外壳(充当连接导线)组成，如图 1-1(a)所示。其中，电池为电路提供能量——电源，灯泡通电后产生热和光——负载，开关和导线担负电源与负载的连接与控制作用——中间环节。任何一个完整的电气与电子电路系统都由**电源、负载和中间环节**三个基本部分组成，即电路结构的**三要素**。

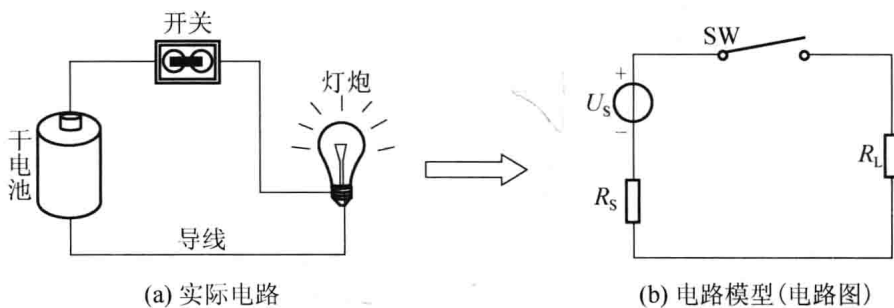


图 1-1 手电筒实际电路及电路模型

各种电路部件和电子元器件都使用抽象、形象和更具一般意义的、规范的符号表示，图 1-2 列举了我国国家标准(GB4728)中的部分电气、电子元器件符号。电路符号非常多，各个不同应用领域、各个不同国家或行业又略有差别，我们将在今后的学习中逐渐介绍。利用各种电路符号绘制的电路连接关系图叫**电路图**(circuit diagram)，它**确定了一个给定电路的约束关系**，这是电路分析中电路的最主要表现形式和以后我们求解电路的基本依据。前述手电筒的电路图如图 1-1(b)所示。

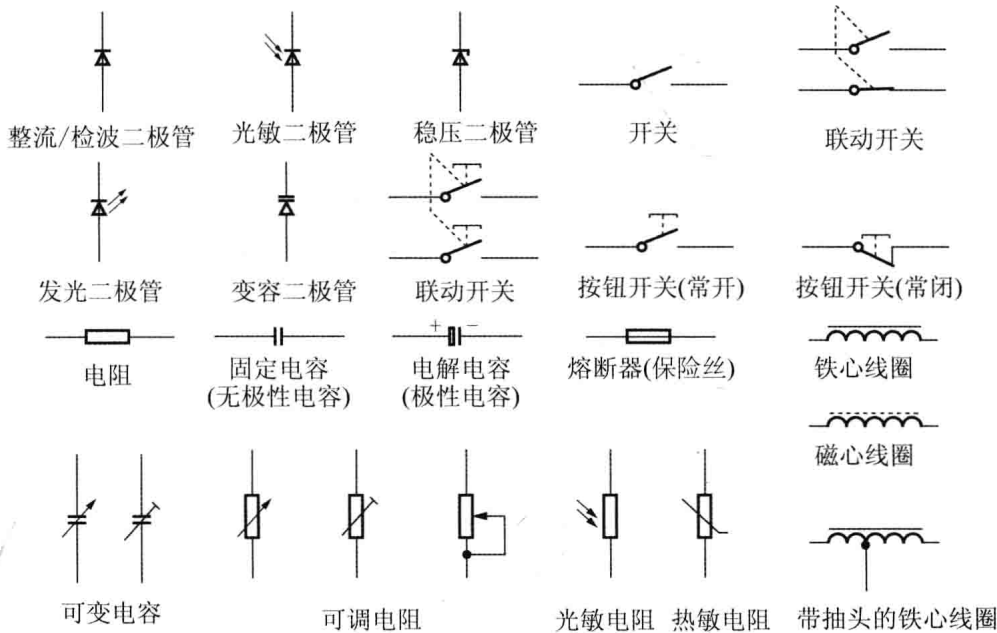


图 1-2 常用的电气元件图

1.1.2 电路分析与设计

电路的一般性问题可用图 1-3 表示, 图中三者分别为: 电路系统, 又称为**网络(network)**, 它由电路元件按一定结构关系连接而成; 输入, 又称为电路的**激励(incentive)**; 输出, 即电路对激励的**响应(response)**, 即电路中的电流或电压)。



图 1-3 电路系统框图

在已知电路的结构及元件参数条件下(即给定电路), 由激励求响应或由响应求激励, 即求激励和响应间的函数关系称为**电路分析**。反之, 在确定的激励、响应关系条件下(即给定函数关系或功能), 求电路的结构和元件参数称为**电路设计**(或称电路综合)。表 1-1 可以比较清楚地看出电路分析和电路设计各自的任务。

表 1-1 电路分析与电路设计

网 络	激 励	响 应	研究范畴
✓	✓	?	电路分析
✓	?	✓	电路分析
?	✓	✓	电路设计

在当今信息社会, 电工电子技术的应用涵盖了基于电子现象的几乎所有工程活动领域, 电路系统可以实现各种各样的功能, 包括能量传输、转化和控制, 信号检测、分析、滤波、放大、变换以及各种运算和函数的产生等。电路分析的任务是弄清电路系统中元件特性、电路结构和电路变量所遵从的基本关系, 从而明确给定电路的功能特性及应该得到的结果。而电路设计(综合)是在电路分析已知结果(元件和电路特性)的基础上, 根据用户所提出的设计功能或技术要求, 选择适当的电路元件和单元电路, 按照一定的结构关系组合连接成为电路系统。电路分析理论和技术是电路设计综合的前提和理论基础。随着微电子学的发展, 电路系统规模和复杂程度不断增加, 电路理论从经典方法发展到现代的、系统化的方法, 出现众多分支领域。但是, 基本的电路分析理论和方法仍然是最重要的, 它是所有电路理论的基础, 是通往包括电力、电子、通信、测量、控制、计算机和生物医学工程等众多工程技术领域的桥梁。本书通过学习电路分析的理论和方法, 使学生掌握电路的基本分析方法和基本特性, 为学习电类专业课程和以后的电路设计打下基础。

需要明确的是, 在进行电路分析时, 给定电路的响应有一个唯一的解; 而在进行电路设计时, 实现相同功能(或技术要求)的电路往往可以有多种不同的方案。当然, 在设计过程中还需要反复地利用电路分析方法检验设计结果能否满足设计要求, 现在更多的是利用计算机软件进行辅助设计和仿真, 可以得到事半功倍的效果。

在现代电路分析与设计中, 从简单的计算机辅助电路分析, 发展到涵盖整个电子系统设计和制造过程的电子设计制造自动化(EDA/CAM)。用计算机软件可以方便地解决大规模和非线性电路的分析问题, 而且, 计算机仿真软件利用更接近实际器件的组合元件模型, 模仿电路实际运行环境以及参数误差等条件, 使之得到非常接近于实际情况的电路特



性和结果。同时,仿真软件还可以结合抽象功能模块和模拟数字混合电路完成对单片机、可编程器件等复杂系统的仿真,并具有可视化功能,可以直观地研究电路输入和输出的波形关系。另外,利用软件提供的更接近工程实际的组合元件模型和虚拟仪器,可以方便、快捷和低成本地进行电路的分析、测量、设计和虚拟实验等。计算机软件技术已经和现代电工电子电路的分析和设计密不可分,占据非常重要的地位。

目前通行的电路分析软件是 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis),它是由美国加州大学伯克利分校开发的模拟电路仿真软件,事实上已经成为电路分析模拟仿真的标准方法。常用的还有 Multisim、Proteus 等,本书先让学生了解一个比较简单的 Electronics Workbench(电子工作平台,EWB)电路仿真软件,用它对由基本无源元件和简单有源元件构成的电路进行 SPICE 分析和虚拟电路实验,也可以作为电路计算结果的有效验算工具。

1.1.3 集总假设及电路模型

实际的电路部件和器件在电路中的表现往往是比较复杂的,除了它最主要、最本质的属性以外,一般还会因不同的工作条件和环境,表现出其他的一些次要属性。就以最常见的电灯泡为例,它的主要属性是对电流的阻碍作用(即电阻的属性,本质是对外做功而将电能转换为其他形式的能,如热和光),但是,当电流通过时还会产生磁场而表现出电感的属性,甚至还有其它一些更加复杂的属性,这为电路的分析带来困难。因此,在电路分析中,我们并不直接研究实际电路,而是研究实际电路的数学模型(理想化模型)——**电路模型(model)**。即在一定的条件下(工作条件不同可能其模型会有一些变化),对其进行理想化处理,忽略它的次要属性,用一个足以表征其本质属性的模型来表示,使我们的分析变得更加方便,更加容易得到我们所期望的结果,这也是科学研究所采取的一般方法。当然,理想化处理后所得到的“理论”结果与实际的结果可能会有一些偏差,如果这些偏差超出了我们能够接受的范围的话,则可以在当前条件下,将那些被忽略的次要属性重新添加进来,补充到电路模型中(用几个理想模型的组合表示)对理论结果进行修正,使其达到工程应用的要求。采用理想化模型的好处还表现在:电路元件只体现单一的电磁特性,可以用精确的数学关系来描述;一种电路元件可以表征一类实际器件,用很少的几种电路元件就可以描述种类繁多的实际器件。因此,利用理想化元件构成的电路模型可以更加有效、方便地对电路进行分析。

集总假设是最典型的电路理想化处理方法,其假设电能的消耗现象和电磁能量的存储现象是可以分别研究的,从而可以利用**集总参数元件**来构成电路模型,所得到的每一种集总元件都只表示一种基本电磁属性,且可用数学函数关系加以定义——**集总假设的意义**。例如,电阻元件只表现为消耗电能,电容元件只涉及与电场有关的现象,电感元件只涉及与磁场有关的现象。集总(集中)假设意味着把实际器件的电场和磁场分割开来,因为,假如电场和磁场发生相互作用,则所产生的电磁波将造成部分能量通过辐射损失掉,所以,只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总假设概念,即要求器件(或电路)的几何尺寸远小于正常工作频率所对应的波长——**集总假设条件**。



若实际电路的尺寸远小于其工作频率所对应的波长,我们就说它满足集中化条件,可以用集总参数电路作为其模型。即当电路满足集中化条件时,实际电路所在空间电磁场分布变化相对不明显,则电磁波动现象可以忽略,电路的尺寸可以忽略,也就是说电路的大小和形状不影响电路的特性。在这种情况下,集总电路的电磁过程可视为集中在器件内部,器件的特性与它们之间的相互距离、位置无关,可以用一个或一组参数来表征,其模型就是电路模型中的理想元件(element)。

设实际电路的最大尺寸为 d , 电路中的电磁信号(电压或电流)的波长为 λ , 则电路的集中化条件可以表示为

$$d \ll \lambda$$

用光速 c 除以不等式的两边, 可得集中化条件另一种表示

$$\tau \ll T$$

式中, $\tau = d/c$, 是电磁信号从电路的一端传递到电路的另一端所需要的时间; T 为信号的周期。上述条件即为判别实际电路是否可以看成是集总参数电路的依据。集中化条件显然是一个相对的概念, 电路的信号频率越高, 波长越短, 则要求电路的尺寸越小才能满足集中化条件。

例如, 一个中波收音机电路, 其工作信号的最高频率为 1600 kHz, 对应的波长为 187 m, 电路的实际尺寸(一般在 cm 量级)远远小于此波长, 因此可以用集总参数电路来描述。但比如, 在雷达、卫星通信等微波应用领域, 信号频率高达 1GHz 甚至更高, 这时信号的波长仅为厘米或毫米量级(一般称为厘米波或毫米波), 此时它与电路的尺寸可相比拟, 使信号在电路中的空间分布不再“均匀”, 从而不能再当作集总电路处理。又如, 我国交流市电频率为 50 Hz, 对应的波长为 6×10^6 m, 对于一般用电设备而言可以视为集总电路, 而对于超远距离输电线路而言, 就必须考虑电场、磁场在输电线路沿线的不同分布, 故也不能按集总电路来处理。

集总假设是本书的基本假设和出发点, 是整个理论体系的基础。在以后的讨论中未做特别说明时均指集总参数元件、理想电路模型, 以后所述的电路基本定理、定律也是在这一假设前提下得出的。

1.1.4 电路的分类

1. 线性与非线性电路

全部由线性元件组成的电路称为线性电路, 含有至少一个非线性元件的电路称为非线性电路。关于线性元件与非线性元件的定义将在本章介绍电路元件时给出。线性电路最基本的性质是具有齐次性和可加性, 有关性质在第 3 章专门讨论, 其含义可以用图 1-4 简单说明。

图中方框为线性电路, 即线性网络, x 表示电路的输入信号, 即激励, y 表示电路对输入信号所产生的输出, 即响应。

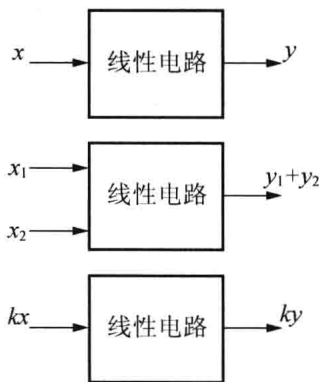


图 1-4 可加性和齐次性



齐次性为：若激励 x 作用于电路产生的响应为 y ，则激励 kx 作用于电路产生的响应必为 ky 。**可加性**为：若激励 x_1 产生的响应为 y_1 ，激励 x_2 产生的响应为 y_2 ，当 x_1 与 x_2 同时作用于电路时产生的响应则为 $y_1 + y_2$ ，即线性电路对于各个激励共同作用所产生的响应是各个激励的加权和。

严格的线性电路实际上是不存在的，但是大量的实际电路(往往是非线性电路)在一定条件下可以近似为线性电路，线性电路的研究已经形成一套成熟的理论和方便的方法，本书作为电路理论的入门教材，在未做特别说明时均研究线性电路。

2. 时变与非时变电路

若电路中所有元件的参数都不随时间变化，称为**非时变**(或称时不变)电路；若至少有一个元件的参数是随时间变化的，则为**时变**电路。非时变电路的基本特性是电路的响应不随激励施加的时间而改变，即若电路对激励 $x(t)$ 的响应为 $y(t)$ ，则非时变电路对于延迟激励 $x(t - t_0)$ 的响应必为 $y(t - t_0)$ 。假如是时变电路，因其电路参数和特性在随时间变化，则施加激励的时间不同它所得到的响应也是不一样的。在一个较长的时间范围内，元件的参数多少都会有所变化，所以严格意义的非时变电路实际上是不存在的，但大量实际电路在研究问题的有限时间期间，或在采取了一些有效的电路稳定措施后，都可以很好地近似为非时变电路。本书在未做特别说明时均研究非时变电路。

3. 有源与无源电路

关于有源元件、无源元件、有源电路、无源电路的概念，在电路理论中对于理想电路模型虽然有明确的定义，但在今后的学习中会发现，在电路理论中不同情况下和在工程应用(如电子技术)中其含义是有所差异的，在这里很难做出简单、明确、全面的描述，还需要在今后的学习中逐渐了解和掌握。这里仅从理想电路模型角度加以定义和描述。

全部由无源元件组成的电路称为**无源电路**，含有至少一个有源元件的电路称为**有源电路**。关于有源和无源的概念是从能量的观点来加以定义的，即如果一个电路元件，不管连接在任何电路中，不管连接方式如何，均满足下式：

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \geq 0$$

即在整个工作过程中吸收能量的总和都是非负的，即为**无源元件**；反之，为**有源元件**。关于功率和能量的定义及符号含义将在本章稍后介绍。显然，由无源元件组成的无源电路，其吸收能量关系也满足上式。

1.2 电路变量及功率

电路分析使我们能够得出给定电路的功能及特性，这些特性通常由一组时间函数变量来描述。它们是我们对给定电路分析时所列写的电路方程的变量，也是电路分析所期望得到的结果。物理学中电磁现象的两个变量——电荷和能量在电路分析中依然起着关键的作用，电路变量(简称**电量**)与物理学中对应变量的含义基本相同，在电路分析中主要分析可实际观察和测量的基本电量——电流和电压，及其派生变量——功率。



1.2.1 电流

电流是一个与电荷运动相关的物理量。物理学是自然科学的基础,电磁现象和电路的基本关系自然应由物理学理论得到。物质(导体)中的自由电子(以后还会接触到正负离子、电子-空穴对等)等可以自由运动的带电微粒称为**载流子**,由电荷量(Q 或 q)表示其所带电荷的多少,在国际单位制(SI)中的单位为库伦(简称库,C)。载流子在导体中的运动通常情况下是无规则的,从宏观角度观察是不带有倾向性的迁移,即不会形成电流。载流子在电场作用下做有规则的运动即形成**电流**——电流的物理意义,电流用 i 或 I 表示。一般而言,我们讨论任何一个电量、元件、电路和定理定律甚至解题方法时,至少应从物理意义、数学定义(函数表达式)和适用条件、性质等几方面进行学习和掌握。电流的数学定义为:单位时间通过导体横截面的电荷量,即

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

电流的单位是物理学中7个基本量之一,单位为安培(简称安),用A表示($1\text{ A} = 1\text{ C/s}$)。常用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)和纳安(nA)等。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。如果电流的大小和方向都不随时间变化,则称为恒定电流或直流(缩写为DC),这时电流的符号可用 I 表示;否则称之为时变电流,这时电流的符号用 i 或 $i(t)$ 表示。若时变电流的大小和方向是周期性变化的,则称为交变电流,简称交流(缩写为AC)。

在集总电路中,电的传播是瞬间完成的(以光速传播),流过元件的电流可以是时间 t 的函数,但与空间位置无关(集总条件),因此,在任意时刻从任一元件的一端流入的电流与从另一端流出的电流是相等的(从电荷的守恒关系也可以得到相同的结论)、确定的和可测量的,电路中形成持续稳定电流的条件是具有闭合回路。如图1-5所示的方框泛指集总参数元件(甚至网络),a、b表示元件与外电路的连接端,需要特别注意的是,从元件a端流入的电流与从b端流出的电流是同一个电流 i 。以后的学习还会进一步看到,任何一个由多个元件构成的串联电路中电流的关系都是如此,这是集总电路一个非常重要的基本关系。

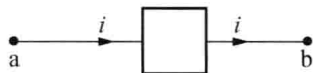


图1-5 集总元件的电流

1.2.2 参考方向

实际上,电路中电流的(真实)方向经常难以确定。比如,交流电流就不能用一个固定的箭头来标明其真实方向,即便是直流电流,尤其是在求解含有多个电源的复杂电路时,也很难事先就判断出电流的真实方向,这就给我们在求解电路时列写电路方程造成了困难。为此,引入**参考方向**(有时又称为“正方向”)的概念,即为求解电路的方便而人为假定的电流(以后还包括电压)的方向。以后在求解电路之前,需要先确定(假定)电路中所有电量的参考方向并标注在图中,并以此为依据列写电路方程和求解出结果。需要注意的是,这时求得的结果(电流和电压)均为代数量,从其值的符号结合图中标注的参考方向

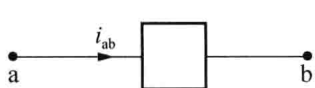


图 1-6 电流的参考方向

可得知电流(或电压)的真实方向,即当 $i > 0$ 时真实方向与参考方向一致;当 $i < 0$ 时真实方向与参考方向相反。在电路图中标注电流参考方向的常见方法有:用箭头指向和双下标标记法,如图 1-6 所示。显然,在同一个图中二者应该一致,其中 i_{ab} 表示

电流的参考方向从 a 流向 b。

参考方向是电路分析中最重要的基本概念之一,今后,在未做特别说明时,图中标注的电量方向均为参考方向,并以此为依据列写方程和求解。

1.2.3 电压

电压是一个与电荷运动所造成的能量变化相关的物理量。电场是一种势场,以正电荷在电场中的运动为例(负电荷的运动方向刚好相反),要么是在电场力的作用下由高电势(电位)端向低电势端运动而对外做功(电势能减少);要么是在外力(非电场力)作用下由低电势端运动到高电势端而获得能量(电势能增加)。需要注意的是,电荷在运动中能量的变化即为两点之间电势之差(电位差),所以,两点间电压的物理定义为:单位正电荷从电路的 a 点移动到 b 点时所失去的能量,用 u 、 U 或 v 、 V (究竟用 u 、 U 还是用 v 、 V 表示电压,在电路分析中没有太严格区分)表示。其数学定义为

$$u(t) = \frac{d\omega(t)}{dq} \quad (1-2)$$

电压的单位为伏特(简称伏, V, $1V = 1J/C$)。其他常用的单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等。

由上述定义可知,电压的真实方向是电场(电路)中电势降落的方向,所以电压通常又称为电压降。电场中两点间电压的大小及方向由其空间位置决定,与电荷在两点间运动的具体路径无关(势场的性质),实际上也与电荷是否运动无关,也就是说,即使在两点间没有电流(电荷的运动),电压也是存在的。显然应有,电路中任意两点间不管存在着多少条由元件(或网络)构成的并联电路,每个元件(或网络)上的电压是相等的。这与前述的串联电路各元件中电流相等一样,是集总电路又一个非常重要的基本关系。

同样道理,电压也存在大小及方向都不随时间变化的直流电压(U 、 V)和大小及方向都随时间变化的时变电压或交流电压(u 、 v)。实际上,电量的符号究竟用大写还是小写是有其一般含义的,凡不随时间变化的量用大写,即 I 、 U 、 V 等;凡随时间变化的量(即时间函数)用小写,即 i 、 u 、 v 或 $i(t)$ 、 $u(t)$ 、 $v(t)$ 。

为分析方便电压的方向也使用参考方向表示,在电路图中标注电压参考方向的常见方法有:用“+”表示高电位端、“-”表示低电位端,用箭头(由高指向低)表示和双下标标记法,如图 1-7 所示。显然,在同一个图中三者应该一致。

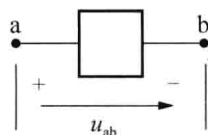


图 1-7 电压的参考方向

1.2.4 关联与非关联的参考方向

在电路中,任何一个元件都有一个流经其中的电流和两个端钮之间的电压,在为其电