

电路分析及磁路

(上册)

吴治隆 毛正明 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括: 电路的基本概念和基本定律, 电阻电路的等效变换, 线性电阻网络的一般分析方法, 线性电阻网络的基本定理, 非线性电阻电路, 动态电路分析。

本书以分析方法为线, 按电路元件及电路定律, 电阻性电路分析, 动态电路分析, 正弦稳态电路分析和磁路的顺序安排。在二端口网络之前, 简要介绍拉普拉斯变换在电路分析中的应用, 并引出网络函数的概念。本书可供普通高等教育电类各专业使用, 也可供成人高等教育本、专科电类各专业使用。

电路分析及磁路(上册)

吴治隆 毛正明 主编

责任编辑: 谭 敏 版式设计: 谭 敏

责任校对: 何建云 责任印制: 张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人: 张鸽盛

社址: 重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编: 400030

电话: (023) 65102378 65105781

传真: (023) 65103686 65105565

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9 字数: 202 千

1995 年 1 月第 1 版 2002 年 12 月第 8 次印刷

印数: 38 001—42 000

ISBN 7-5624-0978-1/TM·37 定价: 9.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题, 本社负责调换

版权所有 翻印必究

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区 14 所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了 50 门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了 50 门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;

2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。

3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;

4. 减少不必要的数理论证和数学推导;

5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;

6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;

7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区 14 所院校专科教育的办学经验,是西部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求和教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年
仲夏

前 言

本书是机类、电类系列专科教材之一,供专科电类各专业使用。全书讲课约需 100 学时。

全书分上、下两册,共十三章。在内容的选择上,既包括了电路分析传统的基本内容,也适当地增加了非线性电阻电路分析及受控源、运算放大器电路的分析,充实了磁路,以适应后续课程和工程实际的需要。在系统上,以分析方法为线,按电路元件及电路定律,电阻性电路分析,动态电路分析,正弦稳态电路分析和磁路的顺序安排。在二端口网络之前,简要介绍拉普拉斯变换在电路分析中的应用,并引出网络函数的概念。在使用中,可以根据需要对先后顺序作灵活处理。书中各章章末安排了小结、思考题和较多的习题。全书采用国际单位制和国家统一的图形及文字符号标准。

参加本书编写的有:四川轻化工学院吴治隆(第一、二章)、渝洲大学张礼和(第三、四章)、贵州工学院毛正明(第五、六章)、陕西工学院王生春(第七、八、九、十三章)和云南工学院李彬华(第十、十一、十二章)。吴治隆和毛正明担任上册的主编,王生春担任下册的主编。

西安交通大学邱关源教授担任本书的主审,他自始至终给予了热忱的关怀和指导,提出了许多宝贵意见。我们谨向邱关源教授表示最衷心地感谢。

重庆大学出版社对本书的编写和出版给予了通力合作；西部地区 15 所兄弟院校的同行提供了许多建设性意见和建议；编者所在院校的领导和有关同志给予了强有力的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平和经验所限，书中的不足和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1993 年 7 月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律.....	1
内容提要.....	1
引言.....	1
§ 1-1 电路和电路模型	2
§ 1-2 电流、电压和功率	5
§ 1-3 电阻元件及欧姆定律	12
§ 1-4 电容元件及其电压、电流关系	17
§ 1-5 电感元件及其电压、电流关系	24
§ 1-6 电压源和电流源	27
§ 1-7 受控源	33
§ 1-8 基尔霍夫定律	35
本章小结	41
思考题	41
习题一	42
第二章 电阻电路的等效变换	53
内容提要	53
引言	53
§ 2-1 电阻的串联和并联	53
§ 2-2 Y形网络和 形网络的等效变换	60
§ 2-3 电源两种模型的等效变换	65

§ 2-4 含受控源电路的等效变换	69
本章小结	71
思考题	72
习题二	72
第三章 线性电阻网络的一般分析方法	81
内容提要	81
引言	81
§ 3-1 支路电流法	81
§ 3-2 网孔电流法	85
§ 3-3 节点电压法	93
§ 3-4 含受控源电阻网络的分析方法	100
* § 3-5 运算放大器电路	105
本章小结	111
思考题	114
习题三	115
第四章 线性电阻网络的基本定理	123
内容提要	123
引言	123
§ 4-1 叠加原理	123
§ 4-2 戴维南定理及诺顿定理	130
§ 4-3 互易定理	145
§ 4-4 最大功率传输定理	147
本章小结	151
思考题	154
习题四	157
第五章 非线性电阻电路	166
内容提要	166

引言	166
§ 5-1 非线性电阻元件	167
§ 5-2 非线性电阻电路的图解法	172
§ 5-3 小信号分析法	177
* § 5-4 分段线性化法	184
本章小结	188
思考题	189
习题五	190
第六章 动态电路分析	193
内容提要	193
引言	193
§ 6-1 动态电路及其初始条件的计算	194
§ 6-2 一阶电路的零输入响应	204
§ 6-3 一阶电路的零状态响应	216
§ 6-4 一阶电路的全响应和三要素法	225
§ 6-5 单位阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	233
§ 6-6 二阶电路的零输入响应	239
本章小结	254
思考题	256
习题六	257
参考文献	267
上册部分习题答案	268

第一章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

介绍电路模型和理想电路元件,学习集总电路的基本定律——基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

引 言

电工技术广泛应用于现代社会的各个领域,包括工业、农业、国防、科研、第三产业乃至家庭生活。不断涌现的高新技术也无不利用各式各样的电路来完成其复杂的任务。发展的趋势表明,社会现代化程度越高,对电工技术的依赖程度也越大。社会和技术的进步促进了电路理论这门学科的发展,使之成为当今工程教育的重要基础之一。本书的主要任务不是讨论各种电路的诸多用途,而是介绍预测给定电路性状的基本方法——电路分析。

学习这门课程就好象学习一种语言,学习和掌握基本的“词汇”和“语法”是至关重要的。本章介绍的基本电路元件及其特性和反映电路联接特性的基本定律——基尔霍夫定律相当于电路分析的基本“词汇”和“语法”,经过这种训练,不难接受后续各章提出的各种电路的具体分析方法。我们鼓励同学们认真探讨这门学科,在学习中追求的不仅仅是懂得一点点知识,而是要在工作中运用不断更新的知识分析处理各种实际电路问题的能力。

我们首先引入反映实际器件主要电气性能的电路模型的概念,从而了解实际电路的研究与电路理论这门学科之间的关系。接着重温描述电路中物理过程的3个常用变量——电流、电压和功率,引进电流参考方向和电压参考极性的概念。然后讨论电路元件及其特性,其中包括电阻、电容、电感、电压源、电流源及受控源。最后学习在电路分析中起极其重要作用的基尔霍夫定律。这样,就将对学习后续各章所要用的基本概念和思路有一个系统的了解。

§ 1-1 电路和电路模型

实际电路是由电气器件相互联接而成的。所谓电气器件泛指实际的电路部件,如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管和电源等等。图 1-1(a) 所示的一个简单实际电路由

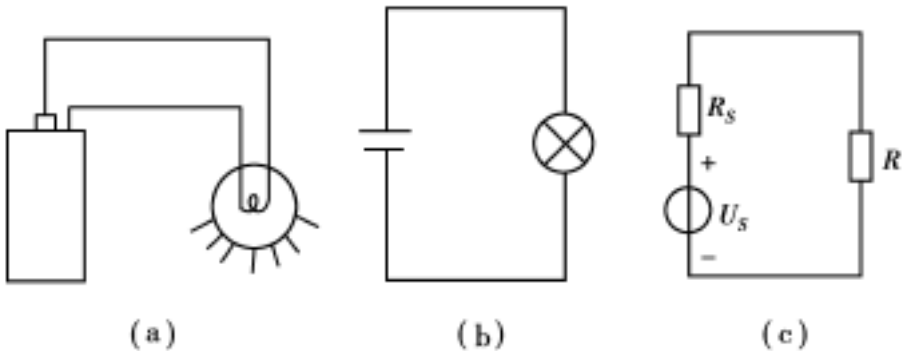


图 1-1 实际电路及其电气图和模型

干电池、小灯泡和联接导线组成。电气器件可以用图形符号表示,表 1-1 列举了一些我国国家标准中的图形符号。采用

摘自《中华人民共和国国家标准 电气图用图形》(GB4728), 中国标准出版社, 1986 年。

这些符号可绘出表明各电气器件相互联接关系的电气图。图 1-1(b) 即为上述简单实际电路的电气图。

表 1-1 部分电气图用图形符号
(根据国家标准 GB4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
联接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		电感器绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		电池		直流发电机	
伏特表				直流电动机	

当电路中有电流流经电气器件时,就会有电磁效应产生(如电能的损耗或电场能、磁场能的储存),利用电磁效应可实现能量的转换和传输以及信息的存取和信号的处理。

电路理论是电气工程的基础学科,它主要研究电路中发生的电磁效应及其规律。通常采用电流、电荷、电压和磁通这样一些物理量来描述电路中发生的物理过程,其中特别感兴趣的是器件的端子电流和端子间的电压。当实际电路中电流或电压的最高工作频率所对应的电磁波波长 λ 远大于电路的最大几何尺寸 d (即 $\lambda \gg d$) 时,器件的端电流和端电压具有确定的单值。我们称这种电路为集总参数电路,简称集总电路。换句话说,电磁波沿集总电路传播所经历的时间同电磁波的周期相比可以忽略不计,因而集总电路的几何尺寸也就无关紧要了。譬如我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km,工作在这一频率下的电路,在相当大的范围内都可当成集总电路。当条件 $\lambda \gg d$ 不能满足时,应当成分布参数电路处理,这不属于本书讨论的范畴。

电气器件中产生的电磁效应实际上是很复杂的,譬如电流流经电阻器,既有热效应引起的电能损耗,也同时伴随有磁效应;一个电感线圈通以电流时,不仅有磁场产生和线圈电阻的热损耗,同时线匝之间还有电场存在。因此,实际电路的分析往往是很困难的。实践表明,在一定条件下把实际器件理想化,忽略其次要性质,用一个足以表征其主要性能的抽象元件或组合来表示,称为器件的模型,能足够精确地反映实际电路的性状。譬如一个电阻器,其磁效应与热效应相比可以忽略不计时,可当成一个理想电阻元件,而当磁效应和热效应都必须考虑时,可用一个理想电阻元件和一个理想电感元件的串联组合作为电阻器的模型。可见,同一电气器件在不同条

件下应采用不同的模型。关于建模问题已超出本书范畴。今后为区别起见,把实际电路器件简称为器件,而把理想化电路元件简称为元件。电路元件具有确定的电磁性质和精确的数学定义。实际电路中的器件代之以相应的元件或元件组合便得到相应的电路模型。电路理论研究的对象不是实际电路本身,而是相应的电路模型。电路模型由电路元件通过理想导线(电阻为零)联接而成。其中的元件包括二端元件如电阻、电感、电容,三端元件如运算放大器,四端元件如变压器等。具有3个以上端钮的元件通称为多端元件。

图 1-1(a) 的电路模型如图 1-1(c) 所示,其中电阻元件 R 表示负载(小灯泡),电压源 U_s 和电阻元件 R_s 相串联表示电源(干电池),联接导线用理想导线(线段)表示。如果 $R_s \ll R$, 电源可以只用电压源 U_s 模拟。

电路理论的任务在于通过对电路中电磁效应的研究,预测电路的性状,其目标在于改进电路设计、改善电路性能和降低成本。它的内容包括电路分析和电路综合(或设计)两个方面,分析是综合的基础。本书作为电路分析的入门,主要介绍电路的基本概念、基本定律和基本计算方法。这些基本知识无论对学习后续课程或是分析和解决实际工程技术问题来说都是重要的基础。

§ 1-2 电流、电压和功率

在电路中,十分重要的物理现象是电荷的运动,而电荷有规则地移动便形成电流。我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称电流,用符号 i 表示。于是

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

其中, q 表示电荷量, 在国际电位制(SI)中, 基本单位为库仑, 简称库(C)。电流的基本单位为安培, 简称安(A), 其量纲为

$$[A] = [C][s]^{-1} [\text{安}] = [\text{库}][\text{秒}]^{-1}$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向, 如图 1-2 所示。图中方框泛指元件, 虚线箭头表示电流方向。负电荷从 B 到 A 运动与正电荷从 A 到 B 运动是等效的。

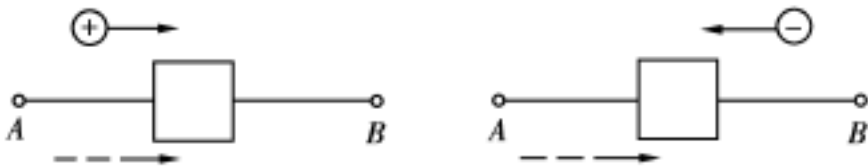


图 1-2 电流方向

由于电荷有正、负之分, 电荷在导体中的运动又有两种可能的方向, 而且运动方向还可能随时间改变。因此, 电流方向的表达是一个值得重视的问题。事实上, 在许多场合往往难以预先确定电路的真实方向, 而在电流方向随时间变化时, 也难以标定电流的真实方向。于是引用参考方向的概念来解决这一困难。所谓电流的参考方向, 就是假定的电流方向。如图 1-3 所示, 选择其中一个方向作为电流的方向, 这个方向叫做电流的参考方向(图中用实线箭头表示)。参考方向不一定是电流真实方向(图中用虚线箭头表示)。在选定的参考方向下, 电流是一个代数量, 电流为正值($i > 0$)时, 参考方向与真实方向一致; 反之, 电流为负值($i < 0$)时, 参考方向与真实方向相反。可见, 在标定参考方向后, 电流值的正或负就反映出电流的真实方向。在电路分析中, 重要的不是真实方向, 而是参考方向, 故常常把参考方向简称为方向。

在电路中, 电流的参考方向是任意选定的, 一般用箭头(标在联接线上或联接线旁)表示, 也可以用双下标表示, 如 i_{AB} 表示参考方向从 A 指向 B。显然, $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

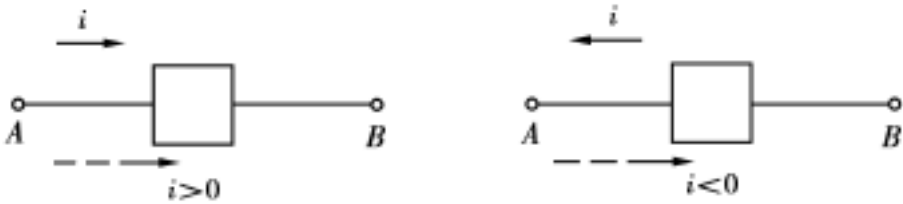


图 1-3 电流参考方向

电路中电流的存在伴随着能量的转换, 电压(电压降的简称)或电位差就是用来描述电路这一特性的物理量。电路中任意两点间的电压被定义为: 单位正电荷从高电位点移动到低电位点时所失去的能量, 用符号 u 表示。于是

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

其中 w 表示能量, 在国际单位制中, 单位为焦耳, 简称焦(J)。 q 表示电荷量, 单位为库(C)。电压的基本单位为伏特, 简称伏(V)。

习惯上把高电位点规定为正极性点, 低电位点规定为负极性点, 把电压的方向规定为从正极性点指向负极性点。

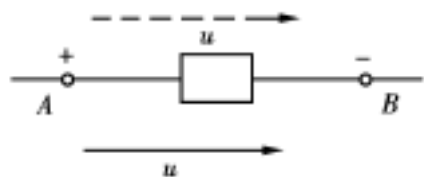


图 1-4 电压参考极性

如同讨论电流的方向一样, 也引用参考极性或参考方向的概念。电压的参考极性或参考方向就是假定的电压极性或电压方向。如图 1-4 所示。图中方框代表一个元件或一段电路, 实线箭头表示电压参考方向, 虚线箭头表示电压真实方向。在设定的参考极性或方向下, 电