

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLU LILUN JICHU

电路理论基础

(第二版)

梁贵书 主 编
董华英 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TM13/121-2

2007

DIANLU LILUN JICHU

电路理论基础

(第二版)

主 编 梁贵书
副主编 董华英
编 写 吉长祜
主 审 江缙光



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书分为 15 章, 主要内容包括电路模型及其基本规律、简单电路和等效变换、复杂电阻电路的分析、电路定理、双口网络、线性动态电路的时域分析、正弦稳态电路的相量模型、正弦稳态电路的相量分析、谐振与互感、三相电路、非正弦周期信号线性电路的稳态分析、简单非线性电路、线性动态电路的复频域分析、电路代数方程的矩阵形式、分布参数电路。为便于教学, 每章后附有习题, 并在书后附有部分习题答案。本书根据教育部新颁布的电路理论基础课程和电路分析基础课程的教学基本要求, 并结合目前教学实际编写, 适合强电、弱电类专业的电路和电路分析课程使用。

本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化、自动化以及其他相关专业的电类专业基础课教材, 也可作为高职高专和函授教材, 同时可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路理论基础/梁贵书主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5905 - 2

I. 电... II. 梁... III. 电路理论—高等学校—教材
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100965 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2007 年 9 月第二版 2007 年 9 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 599 千字

定价 39.80 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书是根据国家教育部审定的“电路理论基础”和“电路分析基础”两门课程的教学基本要求,并结合目前实际,为强电和弱电两类专业“电路”和“电路分析”两门课程编写的通用教材。

本书共分15章。在教材内容的选取上,以电路的基本概念、基本理论和基本分析方法为主。在对基本内容、传统内容和新内容的处理上,本着删繁就简、三者兼顾、以前两者为主和适应大众化高等教育教改需要的原则,力求比例恰当。在介绍传统理论和方法的基础上,适当引入现代电路理论的一些概念和方法,体现基础性、时代性和先进性,如介绍了改进节点法和稀疏表格法等新内容。教材不仅是人类知识的载体,也是人类思维方法和认知过程的载体,所以在编写本书时,力求做到循序渐进、深入浅出,符合大多数学生的认知规律,便于其自学;注意正文、例题和习题的密切配合,突出理论和方法中所蕴涵的数学概念、物理概念和工程概念,实现原理、方法和应用的有机结合,努力使学生在学教材的过程中,既能够获取有效的知识,又能够锻炼和提高自主学习能力。

本书选编了较多的例题和习题,以便使学生较好地掌握基本内容,培养分析问题和解决问题的能力。本书适当选用了一些与专业有关的习题和计算机仿真分析习题,以利于学生今后专业课程的学习和提高学生结合实际以及培养运用通用电路分析软件分析电路的能力。

书中标有星号(*)的章节和习题以及小字排印的部分为一些加深加宽内容,可根据实际需要进行取舍。

本版根据读者意见,在第一版基础上做了一些修改和更正,使本书更加完善。

本书由华北电力大学梁贵书和董华英共同编写,吉长祜参加了部分编写工作。

本书承清华大学江缉光教授仔细审阅,提出的宝贵修改意见进一步提高了本书的质量,在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,教研室的同事们对本书内容的深度、广度和体系的安排进行过充分的讨论,并提出了不少宝贵的建议,对此深表谢意。

限于编者的水平和工作中的疏忽,书中可能留有错误和不妥之处,恳请读者批评指正,以便加以改进。

通信地址:河北省保定市华北电力大学19号信箱 邮编 071003

E-mail地址: gshliang@263.net

编 者

2007年6月于华北电力大学

目 录

前言

绪论	1
第一章 电路模型及其基本规律	6
1.1 集中参数电路	6
1.2 电路的基本物理量和参考方向	7
1.3 基尔霍夫定律	11
1.4 二端元件	15
1.5 受控源	25
1.6 直接用两类约束分析电路	27
习题一	30
第二章 简单电路和等效变换	36
2.1 单回路电路和双节点电路的分析	36
2.2 等效二端网络	41
2.3 常用的基本等效二端网络	42
2.4 输入电阻	50
2.5 星形网络和三角形网络的等效变换	51
* 2.6 电源位移	53
习题二	55
第三章 复杂电阻电路的分析	59
3.1 概述	59
3.2 支路分析法	60
3.3 节点分析法	62
3.4 网孔分析法	66
3.5 图论的基本知识	70
3.6 回路分析法	73
* 3.7 改进节点分析法	75
* 3.8 线性电阻电路解的存在性和惟一性	76
习题三	77
第四章 电路定理	83
4.1 叠加定理和齐性定理	83
4.2 等效电源定理	87
4.3 替代定理	92
4.4 特勒根定理	93
4.5 互易定理	96

4.6 对偶原理	97
习题四	99
第五章 双口网络	105
5.1 双口网络的基本概念	105
5.2 双口网络的参数及其方程	106
5.3 双口网络的等效电路	114
5.4 双口网络的复合连接	116
5.5 双口网络方程的应用示例	118
* 5.6 含源双口网络	120
5.7 含运算放大器的电阻电路分析	122
5.8 回转器	125
习题五	126
第六章 线性动态电路的时域分析	132
6.1 动态电路的输入—输出方程	132
6.2 动态电路的初始值	138
6.3 线性动态电路的经典分析法	142
6.4 直流—阶线性电路的三要素法	147
6.5 线性特性和时不变特性	151
6.6 两种特殊的零状态响应——单位阶跃响应和冲激响应	155
6.7 二阶线性电路的零输入响应	162
6.8 零状态响应的卷积积分算法	165
6.9 动态电路的状态方程	166
习题六	171
第七章 正弦稳态电路的相量模型	178
7.1 正弦量	178
7.2 正弦稳态响应	181
7.3 相量	183
7.4 两类约束的相量形式	188
7.5 相量模型	192
习题七	195
第八章 正弦稳态电路的相量分析	197
8.1 阻抗和导纳	197
8.2 正弦稳态电路的功率	203
8.3 正弦稳态电路的相量分析	210
8.4 用相量图分析正弦稳态电路	213
8.5 正弦稳态下的网络函数	215
习题八	219
第九章 谐振与互感	226
9.1 串联谐振	226

9.2 并联谐振	229
9.3 耦合电感	232
9.4 含耦合电感电路的分析	237
9.5 理想变压器	240
习题九	243
第十章 三相电路	248
10.1 三相电路的基本概念	248
10.2 不对称三相电路	251
10.3 对称三相电路	253
10.4 三相电路的功率	255
习题十	258
第十一章 非正弦周期信号线性电路的稳态分析	262
11.1 非正弦周期电流和电压	262
11.2 非正弦周期信号电路的平均功率	266
11.3 非正弦周期信号电路的稳态分析:谐波分析法	266
* 11.4 对称三相电路中的高次谐波	270
习题十一	272
第十二章 简单非线性电路	275
12.1 非线性元件	275
12.2 非线性电阻电路的方程	281
12.3 非线性电阻电路的图解法	282
12.4 非线性电阻电路的小信号分析法	285
12.5 分段线性化法	287
* 12.6 简单非线性动态电路的分析	291
习题十二	296
第十三章 线性动态电路的复频域分析	300
13.1 拉普拉斯变换	300
13.2 运算电路	308
13.3 线性动态电路的复频域分析法	312
13.4 网络函数	316
习题十三	321
第十四章 电路代数方程的矩阵形式	325
14.1 有向图的矩阵表示和基尔霍夫定律的矩阵形式	325
14.2 支路方程的矩阵形式	329
14.3 电路代数方程的矩阵形式	334
* 14.4 稀疏表格法	337
习题十四	339
第十五章 分布参数电路	342
15.1 均匀传输线及其方程	342

15.2 均匀传输线的正弦稳态解	344
15.3 行波和波的反射	347
* 15.4 无畸变线	352
15.5 无损耗线及其线上的驻波	353
15.6 波过程	357
习题十五	365
部分习题参考答案	368
参考文献	384

绪 论

一、本课程的地位、作用和任务

本课程是高等学校电子与电气信息类专业的一门重要技术基础课，是研究电路理论的入门课程，是学习后续专业基础课和专业课的桥梁。本课程以分析电路中的电磁现象，研究电路的基本规律及电路的分析方法为主要内容，已成为培养工程技术人员，特别是电气工程师的重要基础课。通过本课程的学习，使学生掌握电路的基本理论、分析计算电路的基本方法，为进一步学习电路理论打下初步的基础，并为后续课程准备必要的电路知识。本课程理论严密，逻辑性强，在培养学生的辩证抽象思维能力和严肃认真的科学作风，树立理论联系实际的工程观点和提高学生分析问题、解决问题的能力，以及加强基本技能训练等方面起着重要的作用。

二、电路理论的发展简史和现状

电路理论是当代电工科学技术的重要理论基础之一，在经历了一个多世纪的漫长道路之后，它已发展成为一门体系完整、逻辑严密、具有强大生命力的学科领域。20世纪30年代，电路理论形成了一门独立的学科。在此之前，它仅仅被看成是电磁学的一个分支。从19世纪20年代到20世纪30年代这一时期，最主要的成果有欧姆定律（1827年）、基尔霍夫定律（1845年）、阻抗概念（1911年）、Foster的电抗定律（1924年）、暂态响应概念（1926年）、等效电路概念、多口网络概念、长线理论等，并且形成了电路模型的概念。所有这一切都是为了满足当时电力工程和通信工程的需要。

20世纪30~40年代，电路在理论上进一步成熟。在此期间的重要成果有网络综合逼近理论（1930年）、正实函数的概念（1931年）、网络函数概念（1936年）、Nyquist稳定判据（1932年）、电路的综合实现等。到了20世纪40年代，这门学科的体系在分析方面主要包括直流、交流和暂态几个组成部分；在综合方面主要包括实现、逼近和等值方面问题。

20世纪40年代以后，随着通信技术和控制技术的急剧发展，电路理论经历了一次重大变革。这一发展阶段大体上延伸到20世纪的50年代末和60年代初。在此期间的主要成果有特勒根定理（1952年）、状态变量分析（20世纪60年代初）、拓扑分析等。这一次重大变革标志着电路理论在学术体系上进一步完备，在学术思想上进一步成熟。通常把20世纪60年代以前的发展阶段称为传统电路理论或经典电路理论阶段。

20世纪50年代中期以来，由于各种新型非线性器件的出现，使电路元件由线性向着非线性发展、由时不变向着时变发展、由无源向着有源发展。这使原来为线性、时不变、无源和双向元件的RLC电路理论发展成为非线性、时变、有源、非互易、大规模的电路理论；计算机的广泛使用不仅为电路理论研究提供了崭新的分析工具，而且变革了电路的分析和设计方法。这导致了20世纪60年代以后的又一次重大变革。在这一发展过程中，现代数学向电路理论提供了锐利的武器，使这一学科在理论上的完备性和逻辑上的严密性达到了一个高峰。通常称20世纪60年代以后的电路理论为现代电路理论或近代电路理论。

目前，电路理论又有了较大的发展，而且还在不断发展。

三、电路理论的研究方法

电路理论公认有两个组成部分,即电路分析和电路综合。电路分析就是在特定的激励下求一个给定电路的响应;电路综合则是在特定的激励下为了实现预期的响应而来构建一个电路。二者之中电路分析是基础。也有人把模拟电路故障诊断看作是电路理论的第三个组成部分。就电路分析而言,电路分析方法分为经典分析法和现代分析法。经典分析法往往要借助一些解题技巧,所能分析计算的电路远不及现代分析方法分析计算的电路范围广、规模大、速度快。但是,经典分析法能提供清楚的物理概念和阐明电路中物理现象的本质;而现代分析方法是借助计算机迅速地求得电路的解答。因此,两者是相辅相成,缺一不可的。

电路分析研究的直接对象是电路模型,而不是我们所能看得见和摸得着的实际电路。由实际电路抽象出电路模型,然后根据电路的一些基本定律和定理建立起电路的数学模型(即数学方程),并对其进行定性分析或定量分析以取得分析结果,这是分析电路问题采用的方法之一。

分析电路的目的是要了解电路的特性。电路分析常用的另一种方法是在电路的输入端施加一种激励信号(电压或电流),观察电路中某一部分的响应(电压或电流),当得知电路对特定激励所产生的响应时,也就掌握了这一电路的特性。但是,可施加的激励是多种多样的,这就引起了电路工作者对各种电信号的分析和研究。研究结果表明,如同一个复杂运动可以分解成一系列简单运动的合成一样,一个复杂的电信号也可以分解成一系列简单信号。因此,只要了解电路对简单信号激励的响应也就足以了解电路的特性了,这种观点就导致了时域分析和频域分析两种方法。在电路理论的发展史中,20世纪40年代之前注重时域分析,之后(特别是到20世纪50年代之后),频域分析也受到了应有的重视。这两种分析方法是电路理论中两个同等重要、相辅相成的部分;而且在现代电路理论中,频域分析越来越显示出它的特殊重要性。

四、本书的主要内容及其内在关系

像其他学科一样,电路理论也是以电荷守恒和能量守恒为自身赖以建立的基本原理;同时还有一条电路的集中化假设。两条基本原理所回答的分别是关于电荷和能量的规律性问题;基尔霍夫电压定律和电流定律分别是集中化假设下能量守恒和电荷守恒的逻辑推论。电路的集中化假设认为集中参数元件是不占空间尺寸的。电路理论所研究的是电路的基本规律及其计算方法,掌握电路的基本规律首先在于掌握元件的互连规律性(称为结构约束或拓扑约束)和元件自身的规律性(称为元件约束)。为了认识电路,还必须研究电路中信号(电压、电流、电荷或磁链等电路的物理量)的变化规律性和相互之间的关系,这正是电路分析和计算的目的所在。

根据教学基本要求对电路基本理论课程内容的规定,本书只涉及电路分析的基本内容。本书突出了工科专业基础课程和专业课程中通用的模型、等效和替代、线性叠加、选择合适变量建立方程等方法,核心内容有电路模型及其两类约束、等效和替代、线性叠加、选择合适电路变量建立电路方程等。两类约束指拓扑约束和元件约束。拓扑约束的核心是基尔霍夫定律,另外还介绍了特勒根定理;元件约束是指元件的特性方程,本书只涉及基本元件,包括电阻、电感、电容、独立电源、受控源、运算放大器、回转器、耦合电感和理想变压器等。两类约束是电路分析的基本依据。等效和替代、线性叠加、选择合适电路变量建立电路方程等方法是两类约束的具体体现。等效和替代是电路经典分析法中的一种重要方法,等效

变换、等效电源定理和替代定理等是其中心内容；线性叠加是线性电路所特有的一种性质，其主要内容有叠加定理和齐性定理等；选择合适电路变量建立电路方程涉及的内容有节点分析法、网孔分析法、回路分析法、割集分析法、支路分析法、改进节点法、稀疏表格法、状态变量分析法、输入—输出方程以及双口网络等。等效和替代以及选择合适电路变量建立电路方程的方法是电路中的通用方法，不仅适用于线性电路，也适用于非线性电路；而线性叠加的方法只适用于线性电路，对非线性电路不适用。

下面逐章作内容简介。

第一章为电路理论的基础，首先介绍了电路模型的概念，引入了电路的物理量和参考方向。接着给出了基尔霍夫定律并指明了其适用范围，介绍了电阻、电压源、电流源、电容和电感以及受控源。作为本章的结束，介绍了2b分析法和电路的分类。第二章至第五章研究电阻电路。电阻电路是其他类型电路分析的基础。第二章的中心内容是介绍电路中的等效概念及简单电路的等效变换分析法。其内容包括简单电路的分析法、常用的等效二端网络、星形—三角形网络变换和电源位移，并引入了输入电阻的概念。本章介绍的等效概念将贯穿全书。第三章为复杂电阻电路的一般分析方法。主要介绍了支路分析法、节点分析法、网孔分析法和回路分析法。为了列写方程的方便等，介绍了图论的基础知识。另外还简要阐述了为适应计算机分析需要提出的一种一般性分析方法——改进节点分析法；最后扼要介绍了线性电阻电路解的存在性和惟一性概念。第四章重点讨论电路的一些性质，内容包括叠加定理、齐性定理、等效电源定理、替代定理、特勒根定理、互易定理和对偶原理。第五章是网络的参数表示法，介绍了双口网络的参数方程以及它们的应用，讨论了双口网络的互易性和对称性以及双口网络的连接。作为本章的结束，引入了两种双口元件——运算放大器和回转器。前者已在电路中用作标准的积木块，在实际中获得了广泛的应用；后者是一典型的非互易元件，它的引入曾使非互易电路得到深入的研究。第六章介绍动态电路的时域经典分析法，重点讨论一阶和二阶线性电路，内容包括动态电路输入—输出方程的建立及其求解方法，并建立了全响应、零输入响应、零状态响应、暂态响应和稳态响应等概念，讨论了电路固有频率与时域响应的对应关系。为简化直流一阶电路的分析，突出归纳出“三要素法”。这一方法与其说是一阶电路响应的求法之一，还不如说是复习电阻电路的内容，起到了后次复习前次的作用。为了对时域分析法有个完整的概念，还介绍了单位阶跃响应和冲激响应的概念以及零状态响应的卷积积分算法。第七章至第九章主要介绍正弦稳态电路。第七章和第八章讨论正弦稳态电路的相量分析法，它是频域分析法的基础。在第七章中首先介绍相量〔变换〕，以示数学变换在电路中的应用，并与第十三章的拉普拉斯变换相呼应。然后讨论了两类约束方程的相量形式，进而引出了相量模型，这一章与第一章相呼应。第八章引入阻抗和导纳的概念，从而使得电阻电路的分析方法可推广到相量模型中去。另外着重讨论了正弦稳态电路的功率、相量图分析法和正弦稳态下的网络函数。第九章首先讨论了正弦稳态电路的谐振现象。然后介绍了貌似相同而实质不同的两个双口元件——耦合电感和理想变压器以及含有这两种元件的电路的分析方法。第十章研究三相电路，重点是对称三相电路的计算及三相电路的功率。第十一章为非正弦周期信号电路的稳态分析，介绍了非正弦周期信号的傅立叶级数展开及其有效值，非正弦周期信号电路的功率和稳态分析；另外还讨论了对称三相电路的高次谐波及其特点。第十二章为简单非线性电路，介绍了非线性电阻电路的几个基本概念，以及非线性动态电路中诸如跳跃现象、振荡现象等的一些特殊现象。在分析方法上着重介绍了

图解法、小信号分析法和分段线性化法的基本原理。第十三章讨论线性动态电路的复频域分析。首先复习了拉普拉斯变换的定义和性质,接着讨论了两类约束方程的复频域形式,进而引出运算电路,并介绍了复频域分析方法。为了抓住复频域分析的要点,通过复频域分析认识了电路的特征,还介绍了网络函数和零极点两个内容。第十四章介绍线性电路矩阵代数方程的系统列写法。另外还介绍了为适应计算机分析需要提出的另一种一般性分析方法——稀疏表格法。作为最后一章,第十五章介绍了分布参数电路的一些基本概念和基本分析方法。

计算机是分析和设计电路的强有力工具,但考虑到在一门电路基础课程中既讲授电路分析原理,又讲授数值计算方法是困难的,所以,本书正文未涉及计算机辅助电路分析(CAA)等内容,但编入了少量用通用的电路仿真软件(如 SPICE 或 PSPICE 等)进行计算的习题。有关软件的使用方法学生可借助相关的使用手册学习。

五、习题的作用

解答习题,是学习过程中一个重要的实践性环节。任何一门自然科学课程,每当学习告一段落,都要做习题。只有通过解题的训练,才可以深刻领会、加深理解已学到的理论,并掌握灵活运用的方法,电路课程更是如此。解题的目的主要不是为了获得结果,而是为了训练正确运用理论分析问题、解决问题的能力,因而解题时就必须把主要精力放在思考问题与分析问题上,随时注意严密的逻辑思维与严格的科学论证。分析问题与解决问题的能力包括正确的逻辑思维及把这一思维完整地表达出来两个方面,因此还必须注意表达分析过程的逻辑性、完整性和条理性。

做习题时要做到举一反三,触类旁通,力争一题多解,达到灵活运用所学知识、开拓创新的目的。本书的习题大体上是按照这一考虑编排的。除了选编了供学生系统学习该课程的基本习题外,还选编了一些难度较大的习题,用以考察学生对本课程基本理论的掌握程度及灵活运用能力。这类习题一般需要一定的技巧,有利于培养学生创新的能力。毫无疑问,解题能力的提高,主要应当靠自己的实践,靠自己多做多练。但解题如同其他任何工作一样,前人的实践体验、他人的经验体会总是可以借鉴的,对自己总是可以起到启迪作用的。为此,读者可参阅一些电路题解方面的书籍,以提高解题能力。

六、电路学科能力的培养

学科能力的发展要靠知识结构和结构方法。电路理论研究的是电气工程中最基本、最普遍的基本规律及其计算方法。因此,电路知识之间的逻辑关系也最为明显和清晰,能形成非常严密的结构体系。知识形成体系,知识在体系中的位置、地位以及与其他知识的联系一旦被明显地揭示出来,就更便于理解、掌握,更有利于知识的存储、记忆和提取。对综合能力的培养,在很大程度上依赖于认知结构体系建立的好坏。相同的学习,不同的人对知识的掌握上差异不大,但在能力的差异上表现得比较突出。究其原因在于知识结构建立上的差异。一些人学到的知识彼此是分散的,看不到它们之间的联系,不能应用,更不能综合。可以说,能力在很大程度上依赖于知识,本质上不依赖于知识的多少,而是依赖于对知识的理解,依赖于知识的建立和掌握,依赖于利用各种知识指导实践的经验。因此,在学习的过程中,要掌握科学的学习方法,要学会自觉地对知识结构化、程序化处理。在教材中是一个一个地单一讲解知识的,在不同的情景下讲解的深度和广度不同。不断地总结知识体系、总结方法体系是必不可少的环节。进行总结整理有两个功效:程序化知识,形成结构,使杂乱的知识变为系统的、有用的知识;整理的本身就是在学习,是思维抽象和概括的过程,不但能

形成知识结构，更重要的是提高理解能力，形成能力结构。所以学习知识就是要不断地总结，不断地完善和提高，不断地扩展和挖掘，逐步揭示各个知识的内在联系和规律，使其形成一个有机整体。构建结构体系的程度和范围是多种多样的，可以是一章的知识内容，可以是某一部分的，还可以是一个专题的。

知识能形成结构，方法也能形成结构。电路分析方法是形成知识和应用知识解决问题的途径，这对形成综合能力来说比学习知识更重要。在学习时要不断总结电路的分析方法，同样使之形成体系，并且明确哪些是一般的、普遍使用的方法，哪些是特殊的方法，在什么条件下才能使用，如何运用它们。结构化的方法体系，就如同摆放有序的武器库，能随时针对不同的问题，灵活地提取不同的武器加以解决。经常出现的问题是，感觉某方法掌握了，但在解决相关问题时并不顺利，其原因是对方法理解不透，没有建立起方法的结构体系，不知道什么时候用、用哪一种、怎么用。有的人能够背出知识内容，就是不会解题，别人解出后，他也感到不难，可自己就是想不到。还有些人对于不理解的题，不会思考，不知道如何下手、分析。这些都与没有掌握方法体系有关。因此，学习过程不但要建立知识体系，更重要的是还要建立方法体系。

综上所述，只有在学习的过程中构建合理的电路知识体系和方法体系，才能达到培养电路学科能力的目的。

第一章 电路模型及其基本规律

【主要内容】

电路理论的基础,主要内容有:① 电路模型及其基本物理量,并引入了参考方向的概念;② 基尔霍夫定律;③ 电路元件,其中包括电阻、电容、电感、独立电源和受控源等;④ 电路的分类。

【学习要求】

- (1) 充分理解电路模型的概念。
- (2) 牢固掌握电压和电流参考方向的概念,并充分理解功率 $p > 0$ 和 $p < 0$ 的物理含义。
- (3) 熟练掌握基尔霍夫电流定律和电压定律。
- (4) 熟练掌握电路元件的伏安关系。
- (5) 深刻理解线性和非线性的概念,了解时变和时不变的概念。

【预备知识】

电磁学中的基本概念与高等数学的微积分。

1.1 集中参数电路

为了实现某种目的,把电器件或者设备按照一定的方式连接起来构成的整体称为实际电路。读者熟悉的电器件和设备有电阻器、线圈、电容器、二极管、三极管、电动机、变压器和发电机等。在日常生活中,实际电路到处可见,例如用来实现电能传输和分配的电力系统,处理和传输电信号的通信系统,存储信息的计算机电路等。虽然实际电路的种类繁多,功能也各不相同,但是它们都有着最基本的共性,遵循着相同的基本规律。

电路理论就是研究电路的基本规律及其计算方法的学科。通常把电路中提供电能的电器件和设备称为电源,而把消耗电能的电器件和设备称为负载。直接对实际电路进行分析和研究是很复杂、很困难、甚至是不可能的,像其他成熟完备的学科一样,电路理论也采用科学研究中总结出来的科学抽象分析方法,即模型分析法。这种分析方法的基本思想是先为所研究的实际电路建立合适的理想化模型,再以这些模型作为研究对象进行定性或定量的分析,

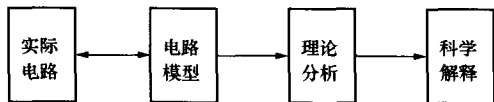


图 1-1 模型分析法的一般过程

然后对分析结果作出符合实际电路情况的科学解释。这一过程如图 1-1 所示。

只要模型取得足够准确,分析所得结论就能准确地反映实际电路的性能,而且还可以预测实际电路可能具有而尚未发现的性能。因此,

模型分析法对我们认识实际电路的规律性具有极其重要的指导意义。模型分析法的优点还在于我们可以将实际电路中共同的、本质的东西抽象出来,用统一的、普遍的方法进行处理和研究。

模型的概念对于读者来说并不陌生,化学中的元素、力学中的质点和刚体、电磁学中的

点电荷等都是这方面的典型例子。模型是实际研究对象的科学抽象，是由相应学科的一些特定的基本构造单元按照一定的方式相互连接起来的整体。它是对研究对象的一种科学逼近。在电路理论中，实际电路的模型称为电路模型，相应的基本构造单元称为电路元件。应该特别指出，电路元件是一种元件模型，它具有严格的科学定义，仅存在于概念之上，而电器件和设备则是实物。

从实际电路抽象出电路模型，本质上是把构成实际电路的电器件和设备抽象成电路元件的组合物。这一过程称为器件的造型或建模。对于同一个电器件或设备，根据不同的应用和要求，可以用不同的模型来表示。例如，一个电阻器在低频应用时，可用一个电阻元件作为其模型；但在高频应用时，通常必须考虑电阻器引线电感和寄生电容的影响。模型越精确其结构就越复杂，分析和计算的工作量就越大。一般在模型准确度和计算量之间采取折中的办法。器件建模的原理和方法本书不作讨论。但请记住，电路理论是建立在模型概念基础之上的，它的直接研究对象是电路模型，而不是实际电路。本书所采用的电路模型有些是实际电路的模型，有些却是人为地想像出来的。采用后者的目的是使读者对电路理论这一学科有更深刻的理解。

电路模型是实际电路的科学抽象，它是由电路元件按照一定方式用理想导线连接而成的整体，在这个整体中存在着电流的路径。电路模型分为集中参数电路模型和分布参数电路模型两种。当实际电路的几何尺寸 d 远小于电路工作时电磁波的波长 λ 时，即 $d \ll \lambda$ ，就说它满足集中化条件。此时，电信号在电路中的传输时间可以忽略不计，即忽略不计空间因素，而把电路中的电信号仅当作时间的函数。对于这种电路，可用端钮电流和端钮间电压在任一时刻都是完全确定值的电路元件来构成其电路模型，并称之为集中参数电路模型，本书简称为电路。构成集中参数电路模型的元件称为集中参数元件，简称电路元件或者元件。只有满足集中化条件的实际电路才能用集中参数电路作为其模型，否则需要用分布参数电路作为其模型。本书除了最后一章讨论分布参数电路外，其余内容都是讨论集中参数电路的。因此，集中化假设是本书的一个重要假设。

集中参数电路是把实际电路中交织在一起的电磁能量的损耗、储存和其他效应分别集中在不同的元件上，每一种元件通常只体现一种物理效应。例如，通常所说的电阻只体现电路的能量损耗，而电场和磁场储能则分别集中于电容和电感内部。

电器件按照其可触及的端钮分为二端电器件和多端电器件。与此相类似，电路元件根据其外接端钮的数目也分为二端元件和多端元件。图 1-2 示出了二端元件和三端元件的一般图形符号。这种将电路元件用图形符号表示的图称为元件图或者元件的电路符号。表示元件互连关系的图称为电路图。

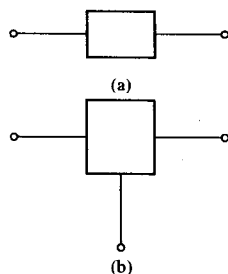


图 1-2 元件的电路图形符号
(a) 二端元件；(b) 三端元件

1.2 电路的基本物理量和参考方向

电路的特性是由电路的物理量来描述的。电路中涉及的物理量主要有电流、电压、电荷和磁链（即磁通链），本书称它们为基本变量。另外，〔电〕功率和〔电〕能量也是重要的物

理量, 本书称它们为基本复合量。这六个电量读者已在电磁学中学习过, 为了便于使用, 在此对本书用得较多的电流、电压和功率等三个电量作一简单复习。

1.2.1 电流

电荷的定向运动形成电流。电荷用 q 或 Q 表示, 它的单位为库 [仑]① (C)。我们把单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流 [强度], 用以衡量电流的大小, 用 i 或 I 表示, 其数学表达式为

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

当电荷以 C 为单位, 时间以 s 为单位时, 电流的单位为安 [培] (A)。

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流方向 (实际方向)。事实上, 电流是电子定向移动而形成的, 恰好与人为规定的方向相反。电流的大小可用电流表测量。由此可知, 电流可能代表一物理量, 也可能代表其物理量的大小, 应该注意区分两者关系。

大小和方向都不随时间而变化的电流称为恒定电流或直流电流 (dc 或 DC), 一般用大写字母 I 表示, 否则称为时变电流, 用小写字母 i ② 表示。大小和方向随时间作周期性变化且平均值为零的时变电流, 称为交流电流 (ac 或 AC)。

1.2.2 电压

单位正电荷由电路中一点移动到另一点所获得或失去的能量, 称为这两点之间的电压, 用符号 u 表示, 则

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

式中: dq 为从一点移动到另一点的电荷量, 单位为 C, dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量, 单位为焦 [耳] (J), 电压的单位为伏 [特] (V)。

如果在电路中选定一点作为参考点, 那么, 电路中任一点 p 到该参考点的电压称为 p 点的电位, 也称为 p 点的电压, 用 u_p 表示。显然, 参考点的电位为零。电路中各点的电位值与参考点的选择有关, 参考点不同, 各点的电位值也就不同。电路中任意两点 a 和 b 之间的电压 u_{ab} 等于 a 点的电位 u_a 与 b 点的电位 u_b 之差, 即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-3)$$

电压值与参考点的选择无关。

如果正电荷由 a 点移到 b 点获得能量, 则 a 点电位比 b 点低, 由 a 到 b 为电压升的方向; 如果正电荷由 a 点移到 b 点失去能量, 则 a 点为高电位, b 点为低电位, 由 a 到 b 为电压降的方向。习惯上把电压降的方向规定为电压的方向。电压的大小可用电压表来测量。

与电流类似, 电压可分为恒定电压和时变电压两种。凡是大小和方向都不随时间而变化的电压称为恒定电压, 又称为直流电压, 常用大写字母 U 表示, 否则称为时变电压, 一般用小写字母 u 表示。大小和方向随时间作周期性变化且平均值为零的时变电压, 称为交流电压。

① 去掉方括号为全称, 去掉方括号和其中的内容为简称, 以下同。本书采用以国际单位制 (SI) 为基础的我国法定计量单位。

② $i(t)$ 通常简记为 i , 其他物理量亦类似。

根据法拉第电磁感应定律, 电压与磁链 Ψ 满足下列关系

$$u = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-4)$$

磁链的主单位为韦〔伯〕(Wb)。

1.2.3 参考方向

电压不仅有大小, 而且有极性。同样, 电流不仅有强度, 而且也有方向。要完整地表示出电压和电流, 除了给出其大小外, 还应该给出其方向。但是, 在对电路分析之前, 电路中电压和电流的实际方向往往是未知的, 也可能是随时间变动的。因此, 有必要引入它们的参考方向。电路中电压和电流的实际方向在任一时刻只有两种可能, 先可以给电流任意指定一个方向作为其参考方向, 并用箭头表示, 如图 1-3 (a) 所示; 给电压任意指定一个参考极性, 并用图 1-3 (b) 所示的一对“+”、“-”符号表示。标有“+”的一端假定为高电位, “-”端为低电位。

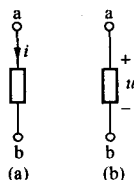


图 1-3 参考方向
(a) 电流参考方向;
(b) 电压参考方向

在指定的参考方向下, 当计算出的数值大于零时, 则表明参考方向与实际方向一致; 而当计算出的数值小于零时, 表明参考方向与实际方向相反。例如, 对于图 1-3 (a), 如果在时刻 t_0 , $i(t_0) = +4\text{A}$, 则意味着在 t_0 时刻, 有一大小为 4A 的电流由 a 端流向 b 端; 若在另一时刻 t_1 , $i(t_1) = -5\text{A}$, 这意味着在时刻 t_1 , 有一大小为 5A 的电流由 b 端流向 a 端。同样, 对于图 1-3 (b), 若在时刻 t_0 , $u(t_0) = 2\text{V}$, 这说明 a 端的电位比 b 端的电位高 2V ; 如果在另一时刻 t_1 , $u(t_1) = -3\text{V}$, 则说明 a 端的电位比 b 端的电位低 3V 。因此, 参考方向和数值的符号决定了电流、电压的实际方向。

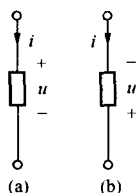


图 1-4 电压和电流参考方向的选取方式

(a) 关联参考方向;

(b) 非关联参考方向

电压和电流参考方向的选取是任意的, 二者之间没有任何相互依赖和相互约束的关系。不论如何选取电压和电流的参考方向, 不外乎图 1-4 所示的两种选取方式。图 1-4 (a) 所示的选取方式称为关联参考方向; 图 1-4 (b) 所示的选取方式称为非关联参考方向。所谓关联参考方向是指电流的参考方向从电压参考极性中标有“+”号的一端流入, 而从标有“-”号的另一端流出。当采用关联参考方向时, 可以只标出电压或者电流的参考方向即可。

参考方向又称为正方向, 关联参考方向又称为一致的参考方向或者一致正方向。除了上述标注参考方向的方法外, 本书有时也采用双下标标注的方法。例如, 见图 1-3, 若在表达式中使用 i_{ab} , 则表示电流的参考方向是由 a 端指向 b 端, 即为图 1-3 (a) 所示的参考方向。类似地, 若使用 u_{ab} , 则表示 a 端为“+”极性, b 端为“-”极性, 即为图 1-3 (b) 所示的参考方向。

参考方向在电路理论中起着十分重要的作用。电压和电流只有在指定参考方向的情况下, 计算出的正或者负的符号才有确切的含义; 描述电路元件或者整个电路的电压与电流之间关系的任何方程, 也只在选定的参考方向下才能成立。

1.2.4 功率

单位时间内一段电路吸收或者提供的能量称为该段电路的功率, 用字母 p 表示。即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-5)$$