



国家电工电子教学基地系列教材

基础电路分析

(第2版)

Fundamental Circuit Analysis

◎ 闻 跃 高 岩 杜普选 编著

◎ 左 垠 主审



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北方交通大学出版社
<http://press.njtu.edu.cn>



国家电工电子教学基地系列教材

基础电路分析

(第2版)

闻 跃 高 岩 杜普选 编著

左 垠 主审

清华大学出版社
北方交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是国家电工电子教学基地系列教材之一,着重讲述电路基础知识和基本分析方法,介绍电路分析软件的使用。内容以经典电路分析方法和线性电路分析为主,讨论对象包括含有二端有源和无源元件、受控源、互感、变压器和运算放大器的电路,分析方法包括电路基本定律、基本定理、等效方法、系统化方法以及计算机模拟方法。

本书适应工科电工电子类课程体系改革需要,内容精练,强调基础知识、计算机方法的应用,软件方法与基本电路分析方法对应、与理论内容同步,并配有相应的例题和习题。

本书可作为计算机、电子工程、通信、控制类本科生教材,也可用做成人、远程教育本专科生教材或自学参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

基础电路分析/闻跃,高岩,杜普选编著. —北京:北方交通大学出版社,2003.10

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7-81082-196-2

I. 基… II. ①闻… ②高… ③杜… III. 电路分析—高等学校—教材
IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 077202 号

责任编辑:韩 乐

印 刷 者:北京东光印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686045,62237564

清 华 大 学 出 版 社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:22.75 字数:509千字

版 次:2003年10月第2版 2003年10月第1次印刷

印 数:6000册 定价:30.00元

国家电工电子教学基地系列教材

编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委 员 (以姓氏笔画为序)

王化深	卢先河	刘京南	朱定华	沈嗣昌
严国萍	杜普选	李金平	李哲英	张有根
张传生	陈后金	邹家驖	郑光信	屈 波
侯建军	贾怀义	徐国治	徐佩霞	廖桂生
薛 质	戴瑜兴			

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

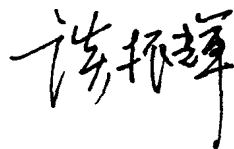
- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北方交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北方交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '高辉' (Gao Hui), written in a cursive style.

2003年8月

前 言

本书作为通信、控制、电子工程和计算机等相关专业本科二年级的电路分析基础短学时教材,主要介绍线性电路的基础分析方法,适合一学期约 64 学时的电路课程。

电路分析作为整个电路理论中的基础部分,已经建立了成熟的理论、分析方法乃至知识讲授体系,国内外均有大量的电路理论专著和教材,系统地介绍经典电路分析理论的时域、频域和复频域的各种分析方法。近年的电路教材大多增加有源电路、非线性电路内容,或引入矩阵和计算机辅助分析方法等,用以更新教学内容。

本书的编写目标是要适应知识更新和课程体系改革的需要,为上述专业当前课程设置的实际要求提供适用教材。本书编写中主要考虑如下几个方面。

一、为适应知识快速更新的需要,目前教学改革的趋势是课程增多,课时减少,因而需精简和调整电路课程的内容。按以上专业实际课程设置,属于电路理论体系中的许多内容已经放在其他课程中讲授。要用更紧凑的方式讲授电路分析的核心内容,同时不应牺牲对基本理论和方法的讲授深度。因此,本书只包含线性电路分析的基础部分,其他经典内容,如非线性电路、矩阵方法、变换域分析等,移至“现代电路分析”和“信号与系统”等课程中。这样的安排既有利于新知识的引入,又可以让基础内容保持相对稳定,使本书适应宽口径和短学时教学。

二、重视电路分析课程作为专业课的入门和桥梁作用。注意与后续课程的衔接,在分析内容中讲解物理概念,介绍工程应用背景,激发学生的兴趣。同时,知识点编排和讲解、数学工具的运用等,考虑到以往学生理解上的难点,力图使本书成为一本学生喜爱的教材。在例题和习题的内容选择与要求方面,强调基本概念和方法,适当淡化手工计算技巧。介绍实际应用背景,增加一些综合性分析、简单设计问题,以期培养学生分析和解决问题的能力。

三、目前电路分析与仿真软件的使用已经非常普及,本教材引入计算机软件的应用,将软件方法作为必要内容来要求。将软件工具应用与电路理论教学相结合有很多好处:传统课程内容侧重用数学方法描述和求解电路;而计算机软件工具可以在分析结果的可视化方面补充理论分析,能直观呈现电路的输入和输出波形,有利于对电路性质及理论概念的理解和掌握;利用软件工具还可以接触到更接近于实际器件的模型,进行虚拟试验等,是培养学生创新能力的重要手段。

本书共分为六章,第 1,2 章介绍基本概念及一般线性电阻电路的分析方法。其中第 1 章介绍电路变量、电路元件和电路模型、基尔霍夫定律,以及利用两类约束关系对简单电路的分析方法。

第 2 章介绍线性电路的特性及其基本分析方法,包括叠加定理、戴维南与诺顿定理和等效变换方法,以及节点分析和网孔分析两种系统化方法。更多内容,如割集分析和回路分析、互易定理等转移到后续课程中。

第 3 章介绍动态元件和电路的动态分析时域方法,介绍动态响应的基本概念,动态方程建

立与求解的一般步骤,一阶电路和二阶电路动态过程的基本特点,以及直流一阶电路的简化分析方法——三要素法。更多的时域分析方法和变换域分析法在后续课程中介绍。

第4,5章讨论正弦交流稳态电路分析。第4章介绍正弦稳态电路的相量分析方法,包括正弦功率的计算,第5章介绍含线性变压器、互感元件电路和三相电路的正弦稳态分析。

第6章介绍复频率、 s 域分析的基本概念,引入网络函数的概念及其在分析中的应用,在此基础上介绍电路频率响应概念,研究一阶和二阶电路的频率特性。本章作为分析基础内容不仅是为了加强电子通信类学生所需要的必要概念,也是为了与后续课程更好地衔接,适应对整个系列课程学习的实际需要。

在每一章中,结合相关内容介绍电路分析与仿真软件 Electronics Workbench 的应用,讲解相关的分析仿真功能,给出分析示例,并配有相应的计算机分析与仿真作业。

本书由闻跃主编并编写第1,2,4,6章,高岩和杜普选分别编写第3章和第5章。全书的编写思路与内容选择由所有作者共同讨论确定。本书的编写得益于很多教师和同学的共同努力,张源和张卫东同学为本书图文录入和编辑付出了辛勤的劳动,在此衷心致谢。因作者水平和时间所限,本书内容不当之处,敬请各位老师和同学指正。

本书受北方交通大学出版基金资助。

编 者
2003年9月

目 录

第 1 章 基本概念和基本规律	1
1.1 电路模型和电路分析	1
1.1.1 实际电路与电路模型	1
1.1.2 集中参数电路假设	2
1.1.3 电路分类	3
1.1.4 电路分析	4
1.1.5 计算机电路分析方法	4
1.2 电路变量	5
1.2.1 电流与电荷	6
1.2.2 电压与能量	6
1.2.3 电压与电流的关联参考方向	7
1.2.4 功率	8
1.3 连接约束关系	9
1.3.1 电路拓扑概念	10
1.3.2 基尔霍夫电流定律	11
1.3.3 基尔霍夫电压定律	12
1.4 元件约束关系	14
1.4.1 理想元件特性及其分类	14
1.4.2 电阻元件	14
1.4.3 独立电源	16
1.4.4 开路与短路	19
1.5 用两类约束关系求解电路	20
1.5.1 支路变量法	20
1.5.2 电阻分压与分流	22
1.6 受控源和运算放大器	25
1.6.1 受控源	25
1.6.2 运算放大器	27
1.7 EWB 简单直流分析	32
习题	36
第 2 章 线性电路分析方法	48
2.1 线性电路与叠加定理	48
2.1.1 线性电路的齐次性	48

2.1.2 线性电路的叠加性	49
2.2 等效分析法	52
2.2.1 等效电路	52
2.2.2 基本等效变换关系	54
2.2.3 基本等效变换应用举例	56
2.2.4 星型与三角型电阻电路的等效转换	58
2.2.5 替代方法	60
2.3 戴维南与诺顿定理	62
2.3.1 戴维南定理与诺顿定理	62
2.3.2 应用戴维南(诺顿)定理的分析	64
2.3.3 最大功率传输	66
2.4 节点分析法	67
2.4.1 节点方程	68
2.4.2 用节点法分析电路	69
2.4.3 纯电压源支路的处理	71
2.4.4 含受控源电路的节点分析	72
2.5 网孔分析法	73
2.5.1 网孔方程	73
2.5.2 网孔分析求解电路	74
2.5.3 网孔法分析中对纯电流源支路的处理	75
2.5.4 含受控源电路的网孔分析	76
2.6 EWB 线性电阻电路分析	77
习题	85

第3章 动态电路分析	100
3.1 动态元件	100
3.1.1 电容元件	100
3.1.2 电感元件	104
3.2 动态电路方程	108
3.2.1 动态电路	108
3.2.2 动态电路方程的建立	109
3.2.3 动态电路方程的解	111
3.3 初始值与直流稳态值的计算	113
3.3.1 直流激励条件下的稳态电路	113
3.3.2 初始值等效电路	117
3.3.3 电容电压和电感电流的突变分析(奇异电路)	119
3.4 开关直流一阶电路的动态响应	122

3.4.1 开关直流一阶电路的过渡过程	123
3.4.2 三要素法	125
3.5 动态响应的分解与叠加	129
3.5.1 零输入与零状态响应	129
3.5.2 固有响应与强迫响应	133
3.5.3 暂态响应与稳态响应	135
3.5.4 阶跃响应——零状态响应的特例	136
3.6 二阶电路的固有响应	138
3.7 EWB 动态电路分析	144
习题	150
第4章 正弦稳态相量分析	163
4.1 正弦信号与正弦稳态响应	163
4.1.1 正弦信号	163
4.1.2 正弦信号相位差	164
4.1.3 正弦信号有效值	166
4.1.4 正弦稳态电路	166
4.2 正弦相量	167
4.2.1 正弦信号的相量表示	167
4.2.2 相量的运算性质	169
4.3 两类约束关系的相量形式	171
4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	171
4.3.2 元件伏安特性的相量形式	173
4.4 阻抗与导纳	177
4.4.1 阻抗与导纳	177
4.4.2 阻抗的连接组合	178
4.4.3 阻抗分析应用举例	181
4.4.4 谐振电路	182
4.5 相量分析	184
4.5.1 简单电路	184
4.5.2 线性电路性质	187
4.5.3 规范化分析	189
4.6 正弦稳态功率	192
4.6.1 有功功率和无功功率	192
4.6.2 复功率与正弦功率计算	194
4.6.3 最大功率传输定理	197
4.7 EWB 正弦稳态电路分析	199

4.7.1 虚拟试验方法	199
4.7.2 AC 频率扫描分析	204
习题	207
第 5 章 互感电路与三相电路	218
5.1 互感	218
5.1.1 互感元件的伏安关系	218
5.1.2 同名端	219
5.1.3 互感元件的相量模型	220
5.1.4 互感元件的串联和并联	222
5.2 含互感电路的分析	224
5.2.1 一般分析方法	224
5.2.2 互感消去法	225
5.2.3 反映阻抗分析法	226
5.3 含变压器电路分析	229
5.3.1 理想变压器	230
5.3.2 全耦合变压器	233
5.3.3 实际互感或铁芯变压器	237
5.4 三相电路分析	239
5.4.1 三相电路的基本概念	239
5.4.2 电源和负载的星型联接	241
5.4.3 电源和负载的三角型联接	243
5.4.4 三相电路的功率	244
5.5 EWB 互感电路和三相电路分析	247
习题	251
第 6 章 网络函数和 s 域分析	260
6.1 复频率和 s 域阻抗	260
6.1.1 复频率	260
6.1.2 复频率阻抗和导纳	261
6.1.3 阻抗分析	264
6.2 网络函数	266
6.2.1 网络函数的概念	266
6.2.2 网络函数与 s 域电路模型	266
6.2.3 零极点	268
6.2.4 强迫响应与复平面矢量	270
6.3 频率响应	271

6.3.1 幅频特性和相频特性	271
6.3.2 频响曲线与零极点	273
6.3.3 频率响应的类型	274
6.4 一阶频率特性	276
6.4.1 一阶低通特性	276
6.4.2 一阶高通特性	278
6.5 二阶频率响应	280
6.5.1 带通特性	281
6.5.2 RLC 谐振电路	283
6.5.3 二阶低通、高通和带阻特性	285
6.5.4 有源二阶电路频率特性	287
6.6 波特图	290
6.6.1 波特图	290
6.6.2 一阶因子	291
6.6.3 二次因子	295
6.7 EWB 频响分析	297
习题	305
附录 A EWB 软件简介	315
附录 B 习题答案	335
参考文献	347

第1章 基本概念和基本规律

提要 本章讨论电路分析最基本的概念和规律。先介绍电路模型和电路变量,建立电路方程的两种变量约束关系——基尔霍夫定律和元件伏安特性,然后举例说明利用两类约束分析简单电阻性电路的方法,接着介绍受控源和运算放大器模型及含有这类元件电路的基本分析方法。

1.1 电路模型和电路分析

1.1.1 实际电路与电路模型

实际电路是由实际电气器件互相连接而成,是构成各种电子系统的基本构件。实际的电气器件,如电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路、发电机、电动机等,其共同特点是在工作时其内部存在电磁过程。用实际电路可构成各种应用系统,如通信、计算机、控制、动力、信号处理系统等。

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,即电路模型。**电路模型**是由理想化的电路元件相互连接构成的。**理想化电路元件**(简称电路元件)是从实际器件的电磁特性抽象出来的数学模型,它包含两个方面,元件的电路符号和元件定义的数学表示。例如,图 1-1(a)、(b)分别是实际电阻元件及其电路模型。

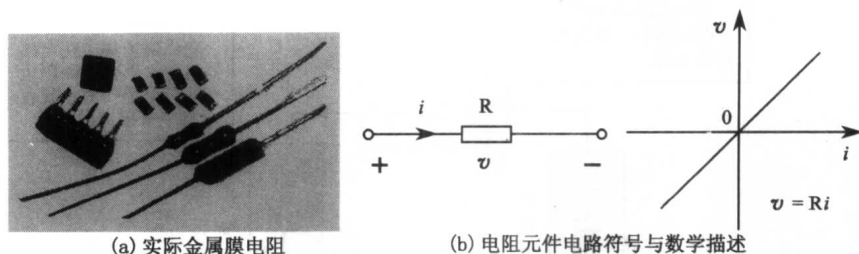


图 1-1 实际电阻元件及其电路模型

采用理想化电路元件的原因是:(1)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;(2)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可以描述种类繁多的实际器件。因此,对理想化元件构成的电路模型可以建立有效的分析方法。

实际器件除了具有某种主要的电磁特性外,还有某些其他的次要特性。因此,电路元件只

能近似代表实际器件。一个实际器件也可用多个电路元件的组合来作为它的模型,而且在不同的工作条件下,可以有不同的模型。实际器件如何近似和抽象,如何建立模型,与具体的应用有关。经过多年的研究,已经证明电路分析中采用的电路模型是成熟有效的,对电路模型的分析结果可以在一定的精度范围内预测实际电路的特性。

本书中所讨论的电路和元件,均指电路模型和理想化电路元件。

1.1.2 集中参数电路假设

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,可以用集中参数电路作为其模型。

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 去除不等式的两边, 可得集中化条件另一种表示

$$\tau \ll T$$

其中 $\tau = d/c$ 是电磁信号从电路的一端传到电路的另一端所需要的时间, T 为信号的周期。用上面的条件来判别实际电路是否可以看做集中参数电路。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, 电路的实际尺寸远远小于此波长, 因此可以用集中参数电路来描述。

当电路满足集中化条件时, 若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, 即电路的大小和形状不影响电路的特性。在这种情况下

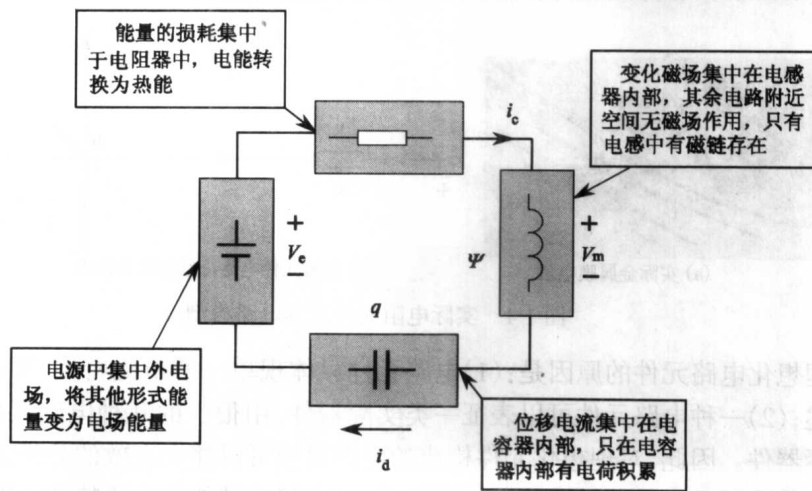


图 1-2 集中参数电路含义

下,集中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。例如,实际电阻器可以抽象为一个集中参数电阻值 R 。集中参数电路的含义如图 1-2 所示。由于实际电路都有一定的尺寸,因此集中参数电路只是对实际电路的近似描述,是一种理想化模型。

集中参数电路模型是电路理论中最基本的假设,是整个理论体系的基础。电路分析基础课程中所分析的电路均为集中参数电路。

1.1.3 电路分类

1. 线性与非线性电路

仅由线性元件组成的电路称为线性电路。若电路中至少含有一个非线性元件,则该电路称为非线性电路。线性元件与非线性元件的定义在介绍电路元件时给出。线性电路最基本的特性是具有叠加性和均匀性。电路的叠加性和均匀性将在第 2 章专门讨论,其含义可以用图 1-3 简单说明。

图中的方框表示电路, x 表示加在电路上的输入信号,或称激励; y 表示电路对该输入信号产生的输出,或称响应。叠加性的含义是: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 , 则当 x_1 与 x_2 共同作用于电路时产生的响应为 $y_1 + y_2$ 。均匀性的含义是:若激励 x 作用于电路产生的响应为

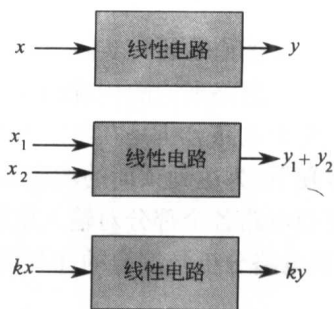


图 1-3 叠加性和均匀性

y , 则激励 kx 作用于电路产生的响应必为 ky 。换句话说,线性电路对于各个激励共同作用的响应是各个激励的加权之和。

严格说来,真正的线性电路在实际中是不存在的。但是大量的实际电路在一定条件下都可以近似视为线性电路。在电路理论中,对线性电路的研究已经有了相当长的历史,有了成熟的理论和方法。本书作为电路理论的入门教材,主要研究线性电路。

此外,为了讨论问题的方便,可以把激励电源(独立源)放在电路内部,独立源和线性无源元件组成的电路也称为线性含源电路或线性电路。

2. 时变与非时变电路

若组成电路的所有元件的参数都不随时间变化,则称这种电路为非时变电路。若电路中至少有一个元件的参数是随时间变化的,则称为时变电路。非时变电路的基本特性是电路的响应特性不随激励施加的时间而变化。具体来说,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 $y(t - t_0)$ 。而对于时变电路,施加激励的时间不同,它的响应形式也不同。严格地说,真正非时变电路在实际中是不存在的,即在足够长的时间范围内,电路元件的参数都会有变化。但大量实际电路在研究问题的时间段内,都可以很好地近似作为非时变电路处理。本书主要介绍非时变电路的分析。

3. 有源与无源电路

若电路中所含元件均为无源元件,则电路是无源电路;否则,是有源电路。有源和无源的概念是从能量的观点来定义的。所谓无源元件,是说如果一个电路元件,不管连接在任何电路中,不管连接方式怎样,其吸收能量的总和都是非负的,即

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

若上式不成立,则元件是有源的。功率和能量的定义将在后面的单元中介绍。对于由无源元件组成的无源电路,其吸收能量也满足上式。

将电路分为有源和无源电路,在分析方法上有重要意义。

1.1.4 电路分析

电路理论是研究实际电路系统的数学模型——电路的基本规律以及电路分析与综合方法的学科。电路理论的传统研究领域包括电路分析与电路综合两个分支。

所谓电路分析是在特定的激励下,求得给定电路的响应;电路综合(电路设计)则是在特定的激励下,为达到预期的响应而求得电路的参数。这里的激励是指外加电源和信号源输入,响应是指电路各个部分对输入电源、信号源的反应或输出。若将被研究的电路用一个方框来表示,则电路分析与综合的任务可用图 1-4 来表示。

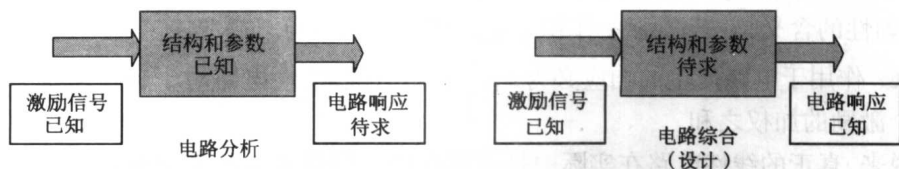


图 1-4 电路分析与电路设计

现今电路的应用几乎涵盖所有的工程领域,用电路构成的系统可以实现各种各样的功能,包括能量传输、控制、信号检测、分析、滤波、放大、变换、各种运算以及函数的产生等。电路设计是研究如何利用各种元件及元件组态实现这些功能,而电路分析理论和技术又是电路设计综合的前提和理论基础。随着微电子学的发展,电路规模和复杂程度不断增加,电路理论从经典方法发展到近代的、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非常重要的,它是所有电路理论的基础,是通往包括电力、电子、通信、测量、控制和计算机等众多工程技术领域的桥梁。

1.1.5 计算机电路分析方法

在现代电路分析与设计中,大量采用计算机分析和设计电路。从简单的计算机辅助电路分析,发展到覆盖整个电子系统设计周期的电子设计自动化。用计算机软件可以解决大规模