

国家电工电子教学基地系列教材《基础电路分析》 配套教材
北京市高等教育精品教材立项项目《现代电路分析》

国家电工电子教学基地系列教材

电路分析 学习指导及习题精解

◎ 高 岩 杜普选 闻 跃 编著



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



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



国家电工电子教学基地系列教材《基础电路分析》配套教材
北京市高等教育精品教材立项项目《现代电路分析》

国家电工电子教学基地系列教材

电路分析学习指导及习题精解

高 岩 杜普选 闻 跃 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是作为国家电工电子教学基地系列教材《基础电路分析(第2版)》和《现代电路分析(第2版)》的教学辅助参考教材而编写的,主要内容分为两部分:第1部分为“基础电路分析”,由第1章至第6章组成,第2部分为“现代电路分析”,由第7章至第12章组成。

本书第1部分与《基础电路分析(第2版)》对应,包括基本概念、电路变量的约束关系、线性电路分析方法、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的变换域分析、基础电路分析习题解答。

第2部分与《现代电路分析(第2版)》对应,包括现代电路分析基础知识、线性电路的矩阵分析、非线性电路直流分析、双口网络的参数分析、运算放大器电路的分析及应用、现代电路分析习题解答。

本书可作为计算机、电子工程、通信、控制类本科生用辅助学习参考教材,也可用做成人、远程教育本科生或自学辅助学习参考教材,对从事电路分析教学人员也是一本有益的辅助教学参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

图书在版编目(CIP)数据

电路分析学习指导及习题精解/高岩,杜普选,闻跃编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2005.2

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7-81082-380-9

I. 电… II. ①高… ②杜… ③闻… III. 电路分析—高等学校—自学参考资料
IV. TN711.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 003198 号

责任编辑:韩 乐 特邀编辑:郑宏云

出 版 者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印 刷 者:北京东光印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:23.5 字数:526千字

版 次:2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷

书 号:ISBN 7-81082-380-9/TN·28

印 数:1~5 000册 定价:29.00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 赵乐沅 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 张晓冬 陈后金 邹家驷 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程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。

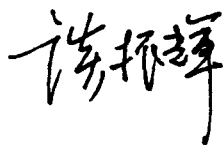
本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《电路分析学习指导及习题精解》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《信号与系统学习指导及习题精解》、《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》、《数字信息处理综合设计实验》、《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、北京交通

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。

北京交通大学
“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, reading '谈振辉' (Tan Zhenhui), written in a cursive style.

2005年1月

前 言

本书是作为国家电工电子教学基地系列教材《基础电路分析（第2版）》和《现代电路分析（第2版）》的教学辅助参考教材而编写的。

本书从整体上对电路分析的系统方法及“基础电路分析”和“现代电路分析”两部分知识结构作了较全面的分析，从多角度对重要概念进行了论述、归纳，有利于加深对这些重要概念的认识；对分析方法进行了科学归类，便于系统掌握。书中给出了大量解题实例和习题参考解答，对高效率地提高具体电路分析的技能将十分有益。

本书在内容的先后次序安排上与《基础电路分析（第2版）》和《现代电路分析（第2版）》对应，同时尽量避免与原教材不必要的重复，起到与原教材相辅相成的作用。此外本书在编写上考虑了相对独立性，采用小标题、小段落形式，便于查阅，可作为学习和教授这两门课程人员的辅助参考教材。

本书第1章至第6章为第1部分，即基础电路分析部分。第1章讨论了电路分析的系统方法，基础电路分析的知识结构及电路、电路变量、参考方向等基本概念的要害。第2章讨论了拓扑约束、基本元件约束的要害及其应用的基本规律。第3章以较为简单的直流激励条件下的电阻电路为对象，讨论了从分析电路的激励和响应关系的角度出发的叠加法，从化简电路的角度进行分析的等效法，从分析一般化电路分析的角度出发的规范法，这三个方法是基础电路分析的基本方法。第4章以直流激励条件下的动态元件电路为对象，运用电路分析的基本方法，讨论了动态电路时域分析的主要特点。第5章讨论了正弦信号和复频率信号激励下电路的变换域分析的基本方法，包括正弦相量分析，基本 s 域分析和电路频率特性分析。第6章分类给出了《基础电路分析（第2版）》的习题解答。

本书第7章至第12章为第2部分，即现代电路分析部分。第7章介绍了有关现代电路分析的基础知识。第8章分别讨论了以标准支路作为基本对象和以元件作为基本对象的矩阵分析要点。第9章讨论了简单的直流非线性电阻电路图解法和解析法的要点。第10章讨论了以常见的双口网络为对象，从网络函数角度出发分析电路的参数分析法，包括一般双口网络参数、特性参数、波参数及工作参数的分析要点。第11章以理想运算放大器

电路为对象,从策动点阻抗和传递函数的角度出发,讨论一般运算电路、阻抗变换电路和滤波电路分析的要点。第12章给出了《现代电路分析(第2版)》的习题解答。

习题中的仿真解答由于篇幅所限,未收入本书,有意者请与作者联系。

本书由高岩主编并编写第1部分第1,2,3,4章和6.3节及第2部分第9,10,11章和12.4,12.5;杜普选编写第1部分6.6节及第2部分第7,8章和12.1,12.2,12.3,12.6;闻跃编写第1部分第5章和6.1,6.2,6.4,6.6节。全书编写思路与内容选择由所有作者共同确定。本书的编写得益于很多教师和同学的支持和帮助,陈满堂同学在本书编写过程中做了大量的图文录入和编辑工作,在此衷心致谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请读者指正。

本书得到北京交通大学教材出版基金的资助。

编 者

2005年1月

目 录

第 1 部分 基础电路分析

第 1 章 基本概念	3
1.1 电路分析的系统方法与知识结构	3
1.2 电路的基本概念	5
第 2 章 电路变量的约束关系	9
2.1 电路结构与连接约束	9
2.2 基本元件与元件约束	11
2.3 两个约束应用的基本原理	13
第 3 章 线性电路分析方法	18
3.1 叠加方法	18
3.2 等效方法	23
3.3 规范方法	35
第 4 章 动态电路的时域分析	44
4.1 动态元件基本特性	44
4.2 动态电路及分析方法	45
4.3 动态响应的分解与叠加	52
4.4 信号的叠加与阶跃响应	53
第 5 章 正弦稳态电路和电路的频率特性	55
5.1 相量分析方法	55
5.2 正弦稳态功率	58
5.3 互感、变压器和三相电路	63
5.4 网络函数和频率特性分析	68
第 6 章 基础电路分析习题解答	74
6.1 基本概念和基本规律	74
6.2 线性电路分析方法	94

6.3 动态电路分析	133
6.4 正弦稳态相量分析	176
6.5 互感电路与三相电路	207
6.6 网络函数和 s 域分析	223

第2部分 现代电路分析

第7章 现代电路分析基础知识	261
7.1 现代电路分析和基础电路分析的关系	261
7.2 线性方程组直接解法	263
7.3 稀疏矩阵	264
第8章 线性电路的矩阵分析	267
8.1 网络拓扑	267
8.2 以标准支路为对象的矩阵分析	270
8.3 以基本元件为对象的矩阵分析	272
第9章 非线性电路直流分析	286
9.1 基本概念	286
9.2 图解分析法	286
9.3 解析分析法	287
第10章 双口网络的参数分析	292
10.1 基本概念	292
10.2 双口网络参数及其应用	293
10.3 工作参数理论	304
第11章 运算放大器电路的分析及应用	306
11.1 电阻性基本运算放大器电路	306
11.2 阻抗变换与基本滤波电路	307
第12章 现代电路分析习题解答	315
12.1 矩阵运算的计算机方法及稀疏矩阵	315
12.2 电路的矩阵方法	320
12.3 建立方程的一般方法	329
12.4 非线性电路直流分析	335
12.5 双口网络分析	345
12.6 运算放大器及有源滤波器	353
参考文献	365

第 1 部分

基础电路分析

第1章 基本概念

提要 基础电路分析首先应明确如下几个基本概念：什么是电路？电路有哪些特性(变量)需要分析？为什么分析这些特性？分析电路特性的系统方法是什么？基础电路分析是通过什么方式论述电路分析的系统方法？基础电路分析的知识结构是什么？

1.1 电路分析的系统方法与知识结构

1. 电路

实际电路是由实际电气器件相互连接组成的。实际电气器件除了具有某种主要电磁特性外，还具有某些其他次要特性(比如一个实际电感线圈除了存在电磁感应特性外，绕制线圈的导线还存在电阻特性)。

电路模型是由仅体现某一主要电磁特性的理想化电路元件相互连接组成。理想化电路元件是在一定条件下对具有多种特性的实际电气器件的一种近似。

模型化是指对实际电路进行分析得到电路模型的过程。

2. 电路分析

电路分析包括对实际电路的试验分析和电路模型的理论分析。

实际电路的试验分析是对给定的实际电路通过实验进行的。

电路模型的理论分析是通过对给定的电路模型应用电路理论通过数学分析进行的。在不产生误解的前提下，“电路分析”一词表示电路模型的理论分析。

电路分析的目的是分析电路所表现出的能量现象。当人们将电压和电流从电路所表现的能量现象中分离出来，得以测量时，使得对这种能量现象的认识更加清晰，使得对电路的分析成为可能，所以电路分析主要是通过对电路的电压和电流特性的分析实现的。

3. 电路分析的系统方法

电路分析的系统方法如图 1-1 所示，其要点如下。

① 实际电路的分析是通过实验的方法对实际电路的特性进行分析。

② 电路模型是通过对实际电路模型化得到的,包括符号与数学模型。

③ 电路模型的特性是由组成电路的元件约束和元件相互连接的拓扑约束决定,这两个约束是电路分析的依据。

④ 电路分析包括如下三个基本方法:从分析响应和激励关系的角度出发的叠加法,从化简电路的角度出发的等效法和从分析电路全部特性的角度出发的规范法。

⑤ 模型分析的结果是电路模型的特性。

⑥ 排除人为因素(如操作失误、计算错误等因素),在一定条件下,实际电路特性与电路模型特性分析的结果应该一致。如果不一致,通过分析找到原因对提高电路分析的理论水平和完善电路分析的理论体系都将是十分有益的。

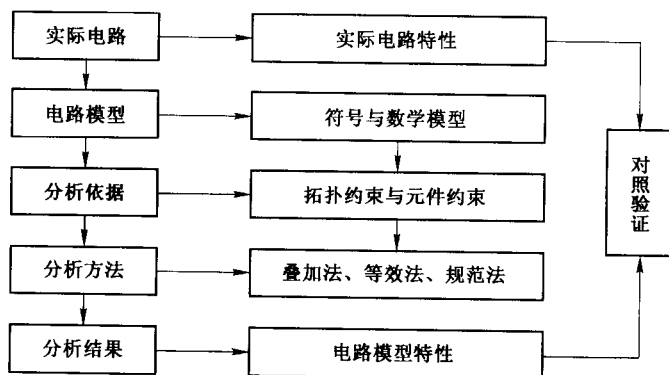


图 1-1 电路分析的系统方法

4. 基础电路分析知识结构

基础电路分析试图通过对一些典型电路的分析介绍电路分析的系统方法,基础电路分析的总的目标是解决电路的理论分析的基本原理和方法问题,图 1-2 示意基础电路分析的知识结构,有如下特点。

① 第一部分是以较为简单的线性电阻电路为对象,从电路模型、电路模型的特性、电路特性的约束到电路特性的分析方法,较为全面地讨论电路分析的基本原理和方法。该部分仅涉及较为简单的线性代数知识。

② 电阻、电感、电容构成了完备无源元件体系,基础电路分析的第二个内容是分析含有电感、电容元件的动态电路。该部分是应用第一部分的分析原理对动态电路进行分析。描述含有动态元件的动态电路变化规律需要用到微分方程,通过对具有一定代表性的直流激励下的一阶和二阶电路的分析认识动态电路时域分析的基本原理,主要涉及较为简单的一阶和二阶常系数线性微分方程求解的数学知识。时域分析突出了电路响应的时域特性。

③ 第三部分对具有代表性的正弦信号作为电路输入激励的电路进行分析。该部分仍然是应用第一部分的分析原理对正弦信号激励下电路的稳态特性进行分析。由于引入了数学变换知识, 所以又被称为变换域分析。变换域分析突出了电路的频率特性, 便于分析一个具有一般意义的正弦稳态响应的幅度和相位特性。

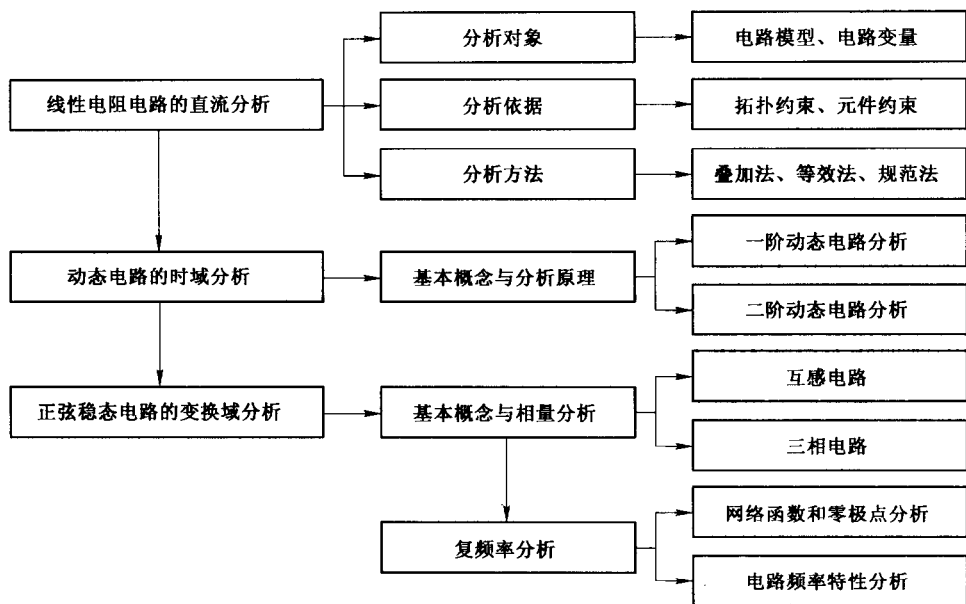


图 1-2 基础电路分析知识结构

1.2 电路的基本概念

1. 电路分类

基础电路分析中讨论的分析方法针对满足一定条件的电路, 电路的分类定义如下。

① 集中与分布参数电路。实际电路尺寸小于信号最高工作频率对应的波长的电路称为集中参数电路, 否则为分布参数电路。集中参数电路认为电磁过程集中在器件内部, 器件的特性与其几何尺寸和空间位置无关。基础电路分析以集中参数为前提对电路进行分析。

② 线性与非线性电路。仅由具有线性特性的线性元件组成的电路称为线性电路, 否则为非线性电路。线性与非线性是从作用于电路的输入激励和电路响应之间的关系划分电路。独立源本身不具有线性特性, 但通常将独立源作为电路的输入激励看待。基础电路分析仅涉及线性电路。

③ 非时变与时变电路。组成电路的所有元件的参数不随时间变化的电路称为非时变电路, 否则为时变电路。基础电路分析涉及非时变电路。

④ 无源与有源电路。全部由无源元件组成的电路为无源电路, 否则为有源电路。所谓无源元件是指在任何情况下吸收的能量都是非负的元件, 否则为有源元件。基础电路分析涉及有源和无源电路。

2. 电路变量

电路的主要变量有能量、功率、电流和电压。

电现象是一种能量的表现, 从电路的角度出发, 电荷是该能量的载体。用电荷及其所具有的能量可以定义便于测量和分析的其他变量。如上所述, 通过对这些从能量中分离出来的变量进行分析, 使得人们对电现象的认识更清晰, 使电路分析成为可能。

用电流描述电荷在电路中的流量和方向。电流是电荷的定向移动, 其大小用单位时间内通过电路某一横截面的电荷的数量衡量, 即 $i = \frac{dq}{dt}$ 。规定正电荷的移动方向为电流的实际流动方向。

用电压描述电荷在电路中流动时能量的交换。将单位正电荷从电路中的 a 点移动到 b 点时所释放的能量定义为 a 到 b 两点间的电压, 即 $v_{ab} = \frac{dw}{dq}$ 。电压用正负极表示方向。当电荷释放能量时, 元件吸收了电荷的能量(转化为热能、电场能、磁场能、化学能等), a 为实际电压的正极, b 为实际电压的负极; 反之, 当电荷吸收能量时, 元件供给电荷能量(由元件的电场能、磁场能、化学能等提供), a 为实际电压的负极, b 为实际电压的正极。所以, 电路中电压的高低反映了电荷在电路中移动时能量的交换。对于不存在电流的两点间的电压应理解为电荷移动需要释放或吸收的能量。

功率描述了电荷在电路中移动时能量变化的速度。正电荷在移动中单位时间所释放的能量定义为功率, 即 $p = \frac{dw}{dt}$ 。单位时间释放的能量为元件单位时间吸收的能量, 所以上式定义了元件的吸收功率。

3. 电路变量的方向

电路变量必须同时指明大小和方向才能正确解释各种电现象, 实际方向通常是在该变量数值为正值条件下定义的方向, 归纳如下。

① 正电荷的移动方向为实际电流方向。

② 正电荷从电路中的 a 点移动到 b 点时释放能量, 则实际电压的方向是 a 为正极, b 为负极。

③ 移动的正电荷在单位时间内释放能量,则实际能量传递方向为电荷在提供能量,元件在吸收能量(在电路分析中常用元件实际的瞬时或平均吸收功率表示该能量实际传递方向)。

由于在电路分析完成前,很难在电路图中表明这些变量的实际方向,而且实际方向也可能不断变化,给电路分析带来许多不便,所以在电路分析中一般不采用实际方向,而是采用既能够在电路图中便于表示和分析,又不影响确定实际方向的假定方向,即参考方向。各变量参考方向按如下规则使用。

① 电流的参考方向用表示方向的单向箭头符号表示,如图 1-3(a)。

② 电压的参考方向用正负号或下标表示电压的正负极,如图 1-3(b),当电路中指定某节点为参考点时,任一节点与参考点间的电压定义为电位或节点电压,参考点的电位为零,如图 1-3(c)。

③ 通常以元件吸收能量(电荷释放能量)作为能量传递的参考方向,能量的方向不必在电路中标明,在无特殊说明情况下,均用元件吸收能量作为能量传递的参考方向(在电路分析中常用元件瞬时或平均吸收功率作为该能量的参考传递方向)。

④ 功率通常以元件吸收功率(电荷释放功率)作为功率传递的参考方向,功率的方向不必在电路中标明,在无特殊说明情况下,用元件吸收功率作为功率传递的参考方向。

使用参考方向时应注意如下几点。

① 电路分析中出现的所有变量必须有明确的参考方向才有意义。

② 电路分析中应明确变量及其参考方向与支路(或元件)的对应关系,即明确变量及其方向是哪个支路(或元件)的变量及其方向。

③ 参考方向一经确定后,在整个分析过程中不得改变。

④ 电路中同一变量只能有一个参考方向,不同变量可以有相同或不同的参考方向。

⑤ 结合变量的参考方向及变量数值的正负可判定变量的实际方向,即:当变量的数值为正时,参考方向与实际方向一致;当变量的数值为负时,参考方向与实际方向相反。

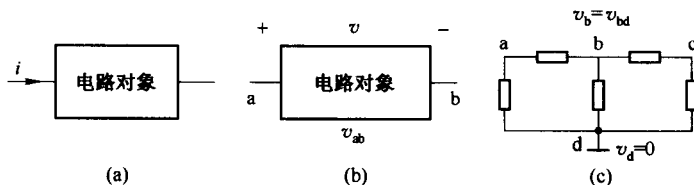


图 1-3 电压和电流参考方向的表示方式

电路中同一支路(或元件)的电压、电流、功率和能量之间存在一定约束关系,由于这些变量不仅有大小,而且有方向,所以同一支路(或元件)的这些变量间的约束关系与变量的参考方向有关。同一元件上的电压和电流的参考方向常按关联参考方向的原则确定,即电流的参考方向是从电压参考方向的正极到负极流过该支路(或元件),如图 1-4 所示。

判断电压和电流的参考方向是否为关联参考方向的关键是必须明确是否是同一电路对象