

# 计算机辅助电路 分析与设计

周 昌 著

科 学 出 版 社

# 计算机辅助电路分析与设计

周 昌 著

科 学 出 版 社

1983

## 内 容 简 介

本书详尽地论述了利用电子计算机对电路进行分析与设计的基本理论和计算方法。主要内容包括：线性电路的频率分析、线性代数方程的解法、稀疏矩阵技术、非线性电路的直流分析、非线性电路的瞬态响应、计算机辅助电路设计等。

本书可供高等院校无线电专业的师生参考，也可供从事电路与系统分析和设计的科技工作者或工程技术人员参阅。

## 计算机辅助电路分析与设计

周 昌 著

责任编辑 李淑兰 孙月湘

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

轻工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1983年7月第一版 开本：850×1168 1/32

1983年7月第一次印刷 印张：5 7/8

印数：0001—13,200 字数：150,000

统一书号：15031·497

本社书号：3099·15—8

定 价：1.10 元

献  
给

冯秉铨教授

## 序 言

“计算机辅助电路分析与设计”是近十年经过了许多变化的一门学科。寻求更有效和更可靠的算法的研究正在继续进行。所以,这一学科的书仅是它“瞬变”中的一个写照。

1979 年秋,在华南工学院短期讲学中介绍了本书的内容。由于讲学的时间有限,所以不可能包括这门学科的全部课题,也不可能较详细地论述任何一个课题。因此,本书应看作是电路分析与设计的计算方法的入门。有兴趣的读者可参阅各章后面所附的参考资料,以及参阅工程和数学杂志中有关新的解法,特别是讨论有关折线化的线性电路和解常微分方程的  $\Delta$ ——稳定的一步隐式等方面新近发表的文章。

尽管本书的材料很扼要,但对提供研究电路分析程序的基础来说,它是足够的。其实,这是此次讲学的目的。

在我个人方面,访问华南工学院是我阔别了三十三年后第一次来中国。我为能有机会回中国并为四个现代化做贡献而讲学,感到十分愉快。我衷心感谢鼓励我前来讲学的朱福熙教授,以及从中国各地前来的听讲者;感谢他们耐心的听讲和认真而又热烈的讨论;感谢打字员和翻译者,他们在繁忙中为及时完成本书的出版而付出劳动。特别是,衷心感谢邀请我前来讲学的已故的冯秉铨教授。在我认识他的短暂时间里,他给我留下了在教育方面的一个纯朴的真理:学问要一丝不苟,为人民服务要无限忠诚。我谨以本书献给冯秉铨教授。

周 昌

1980 年 5 月

## 前 言

本书系根据美国哥伦比亚大学电机工程与计算机科学系系主任周昌 (Omar Wing) 教授于 1979 年秋在华南工学院短期讲学的内容整理而成。参加整理的有我院无线电工程系研究生李兆森、刘耦耕、蔡汉添、全惟伦、陈新云、黄乔峰、李嘉穗。欧阳景正副教授、张遐龄讲师作了校阅, 并经冯秉铨教授审订。无线电新技术研究室的许多同志对本书的缮写、绘图付出了大量劳动。冯秉铨教授生前原准备写一篇序言, 不幸他过早地离开了我们。本书凝聚着冯秉铨教授的一片心血。

徐秉铨

1980 年 6 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 绪论 .....                 | 1  |
| § 0-1 历史回顾 .....         | 1  |
| § 0-2 数值计算与数学分析 .....    | 3  |
| § 0-3 作为分析问题的电路设计 .....  | 4  |
| 第一章 线性电路的频率分析 .....      | 8  |
| 引言 .....                 | 8  |
| § 1-1 电路元件的模型 .....      | 9  |
| § 1-2 电路节点方程的建立 .....    | 14 |
| 第二章 增益、相位、群延迟和敏感度 .....  | 28 |
| § 2-1 节点方程的解 .....       | 28 |
| § 2-2 增益和相位 .....        | 29 |
| § 2-3 群延迟 .....          | 30 |
| § 2-4 敏感度 .....          | 30 |
| § 2-5 传递函数极点和零点的计算 ..... | 36 |
| 第三章 线性代数方程组的解法 .....     | 43 |
| § 3-1 矩阵的范数 .....        | 43 |
| § 3-2 条件数 .....          | 45 |
| § 3-3 LU 分解 .....        | 47 |
| § 3-4 计算量 .....          | 50 |
| § 3-5 高斯消去法 .....        | 51 |
| § 3-6 部分主元法 .....        | 53 |
| § 3-7 迭代的改进 .....        | 55 |
| 第四章 稀疏矩阵技术 .....         | 58 |
| § 4-1 概述 .....           | 58 |
| § 4-2 迪尼-沃克尔法 .....      | 61 |
| § 4-3 马尔科威茨法 .....       | 67 |
| § 4-4 按行、按列选主元 .....     | 70 |

|                             |                          |            |
|-----------------------------|--------------------------|------------|
| § 4-5                       | 几种选主元方案的折衷——门限主元选择 ..... | 71         |
| § 4-6                       | 稀疏矩阵的数据结构 .....          | 73         |
| § 4-7                       | LU 分解的数据结构 .....         | 81         |
| § 4-8                       | $b$ 向量中的填入量 .....        | 86         |
| § 4-9                       | 正向消去和反向替代 .....          | 89         |
| <b>第五章 非线性电路的直流分析 .....</b> |                          | <b>93</b>  |
| § 5-1                       | 非线性电路的节点方程 .....         | 93         |
| § 5-2                       | 牛顿法 .....                | 98         |
| § 5-3                       | 非收敛 .....                | 99         |
| § 5-4                       | 阻尼 .....                 | 99         |
| <b>第六章 非线性电路的瞬态分析 .....</b> |                          | <b>106</b> |
| § 6-1                       | 概述 .....                 | 106        |
| § 6-2                       | 电路方程的建立 .....            | 110        |
| § 6-3                       | 稳定性问题 .....              | 124        |
| § 6-4                       | 正向欧拉公式 .....             | 125        |
| § 6-5                       | 反向欧拉公式 .....             | 129        |
| § 6-6                       | 梯形公式 .....               | 132        |
| § 6-7                       | 吉尔公式 .....               | 136        |
| § 6-8                       | 反向求导公式 .....             | 148        |
| <b>第七章 计算机辅助电路设计 .....</b>  |                          | <b>161</b> |
| § 7-1                       | 电路设计问题 .....             | 161        |
| § 7-2                       | 电路设计中的最优化方法 .....        | 166        |

# 绪 论

## § 0-1 历史回顾

电路理论是一门重要的基础理论，对电子科学技术的发展有着积极的影响。因此，从基尔霍夫(Kirchhoff)创立了电路分析的基本定律以来，电路问题就一直是人们关心的问题，电路工作者在这方面做出了巨大的努力和杰出的成就。表 0-1 给出了电路理论的历史发展及其代表人物。

表 0-1 电路理论的历史发展

|                                      | 分 析                            | 综 合                            | 年 代       |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 线<br>性<br>电<br>路                     | Kirchhoff<br>Maxwell<br>Kelvin |                                | 1870—1900 |
|                                      | Steinmetz                      | Campbell, Zobel<br>Pupin       | 1900—1910 |
|                                      | Bode<br>Foster                 | Foster, Cauer<br>Bennett, Bode | 1910—1935 |
|                                      | Kron                           | Brune                          | 1935—1950 |
|                                      | Guillemin<br>Mason             | Darlington<br>Bott-Daffin      | 1935—1955 |
|                                      | Percival<br>Seshu, Meyeda      | Fujisawa                       | 1956—1965 |
| 非<br>线<br>性<br>与<br>线<br>性<br>电<br>路 | Bryant<br>Pottle               | CAD                            | 1967      |
|                                      | Hachtel<br>Brayton             |                                | 1967      |
|                                      | Rohrer<br>Director<br>Calahan  |                                | 1977      |
|                                      | Tinney Walker                  |                                | 1967      |
|                                      |                                |                                |           |

众所周知,在计算机出现并获得广泛使用以前,传统的电路分析与设计方法主要是依靠人工计算和实验室分析,这虽然在很大程度上解决了一般的电路问题,但对于较为复杂的电路,尤其是近年来发展起来的大规模集成电路等非线性电路,用传统的方法是无法解决的。

1967年以后,半导体材料以及计算机获得普遍使用,非线性电路尤其是数字电路也随之获得广泛的使用,对于这类电路的分析设计也越来越重要。运用计算机进行电路的分析与设计受到电路工作者的重视,过去的线性电路及其处理方法日渐被淘汰,而计算机辅助电路设计(简称CAD)作为一门新技术正迅速地发展起来。

表0-2示出CAD技术的早期历史以及发展状况。早在20世纪三十年代初就有人利用网络分析器(network analyzer)来解决电力系统的问题;第二次世界大战期间,由于对雷达以及脉冲电路的需要,曾运用模拟计算机(analog computer)来解决这些电路问题;

表0-2 CAD技术的早期历史以及发展状况

| 研 究 的 问 题              | 使 用 的 计 算 机          | 年 代  |
|------------------------|----------------------|------|
| 电力系统分析                 | 网 络 分 析 器            | 1930 |
| 通信电路<br>滤波器,均衡器        | 继电器式计算机              | 1944 |
| 达林顿滤波器<br>伯德均衡器        | 电子管计算机               | 1944 |
| 脉冲电路                   | 模 拟 计 算 机            | 1948 |
| 数字电子电路                 | 晶体管计算机               | 1959 |
| 电力网络分析<br>集成电路,中规模集成电路 | 集成电路计算机              | 1969 |
| ⋮                      | ⋮                    | ⋮    |
| 大规模集成电路<br>高压电网        | 分布计算机网络<br>并 行 计 算 机 | 1985 |

电子管计算机的出现,虽然也有有力地推进了某些电路的分析设计,但只是在晶体管计算机以及集成电路计算机深入电路理论领域之后,才使以前的靠人工计算以及实验分析的传统方法迅速地被计算机取代。与此同时,围绕 CAD 技术的近代应用数学也相应得到迅速的发展。随着电路理论的不断深入,还需要更大更快的计算机以及更完善的计算方法。CAD 技术目前已经发展为一门新兴的学科,成为电子技术的一个重要分支。

## § 0-2 数值计算与数学分析

一般来说,电路方程式的解法有两种:数值解法(numerical solution)和分析解法

(analysis solution)。例如,

对一个线性电路进行频率分析(见图 0-1),其中

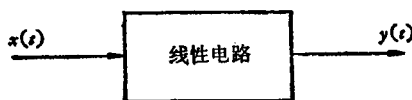


图 0-1 电路示意方框图

$x(t)$ ,  $y(t)$  是该电路的输入、输出信号,且  $x(t) = X e^{st}$ ;  $y(t) = Y e^{st}$  ( $X, Y$  为振幅);电路的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y}{X} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}$$

$$= K \frac{\prod_{k_1} (s - z_{k_1})}{\prod_{k_2} (s - p_{k_2})}$$

其中  $k_1 = 0, \cdots, n$ ;  $k_2 = 0, \cdots, m$ 。所谓分析解法就是通过求解各系数  $a_{k_1}$ ,  $b_{k_2}$  以及各零点  $z_{k_1}$ , 极点  $p_{k_2}$ ; 且由  $H(s)$  得出  $H(j\omega)$ , 从而直接获得电路的增益响应与相位响应,显然它们是连续的曲线。而电路的数值解法则是根据电路的节点方程式:

$$Y(j\omega) \mathbf{X} = \mathbf{J}$$

其中  $Y(j\omega)$  为导纳函数,  $\mathbf{X}$  为电压,  $\mathbf{J}$  为电流。由各频率点  $\omega_1, \omega_2, \cdots$  可以求出各点的增益响应和相位响应,显然这是一系列的离散值。

但是, 一个较为复杂的电路的传递函数  $H(s)$  往往是很难直接写出来的, 因而, 用分析解法来获得电路的输出指标同样是困难的。较为方便的做法是用数值解法, 因此本书不打算讨论分析解法。

又如, 在对一个电路进行瞬态分析时, 可以写出电路的冲击响应:

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)] = \sum A_k e^{\alpha_k t} t^{h_k} \cos(\beta_k t + \theta_k)$$

分析解法是要要求  $A_k, \alpha_k, \beta_k, \theta_k, h_k$ ; 然后由  $h(t)$  可知输出的冲击响应曲线(连续的), 而数值解法是根据电路的状态方程:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{u}(t)$$

利用

$$x(t_{k+1}) = \sum_p a_p x(t_{k-p}) + \dots$$

逐点地求出电路的瞬态响应(离散的)。

线性电路的分析在今天已不那么重要了, 它完全可以包括在非线性电路的分析中, 而在非线性电路的分析中, 一般不能用分析解法而只能用数值解法, 因此, 本书只着重讨论电路的数值解法。

### § 0-3 作为分析问题的电路设计

为什么要用计算机来解决电路问题? 最简单的回答是现在的电路很复杂。例如, 一块普通的逻辑集成电路就是由许多晶体二极管、三极管以及其他元件组成。这样的电路有很多节点, 依靠人工计算来解决是相当困难的。而计算机可以代替人去计算, 按照人给定的程序计算出所需的结果, 并能保证电路的精度, 而且可以获得最佳的电路方案。

随着电子技术的深入发展, 电路越来越复杂, 一个复杂的电路甚至可以有数万个节点, 图 0-2 示出不同类型的电路具有不同的节点数; 电路越复杂, 它所包含的节点数就越多, 这时我们只有利用计算机才能有效地对电路问题进行分析和设计。

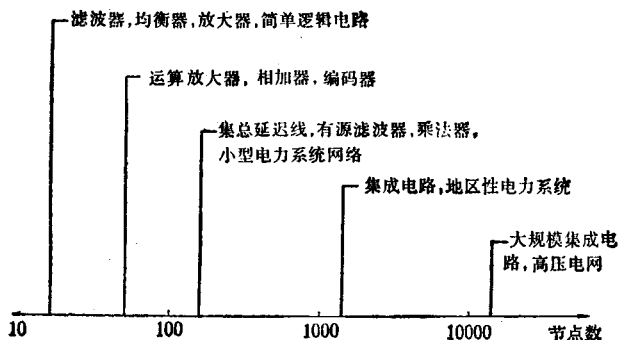


图 0-2 不同类型电路的节点数目

所谓电路问题, 主要有以下几个方面:

### 1. 线性电路的频率分析

通常在求解运算放大器、滤波器、均衡器等电路的过程中都要进行频率分析, 求出它们的增益响应、相位响应、群时延以及敏感度等, 有时也要求出电路的零点、极点和特征值。

### 2. 非线性电路的直流稳态分析

主要是求二极管、三极管的工作点, 这类问题虽然简单, 但要获得精确的解必须依靠计算机。

### 3. 电路的暂态分析(线性电路与非线性电路)

这类电路问题在目前是最普遍的, 由于计算机和数字技术的发展, 数字电路(如双稳态电路、门电路、相加器、移位寄存器、译码器等)得到广泛的使用, 这些电路大部分都是非线性电路, 它的暂态分析是很重要的电路问题。

### 4. 电路设计

电路设计实际上是个分析问题, 要设计一个电路, 先找出一个初步电路, 然后对该电路进行分析, 若输出指标不满足设计要求, 就要修改元件的参数甚至电路结构, 其后再重复进行分析、修正, 直到满意为止。这一设计过程由图 0-3 示出。

### 5. 统计分析

这在大量生产的电路中有十分重要的意义。实际上, 电路的

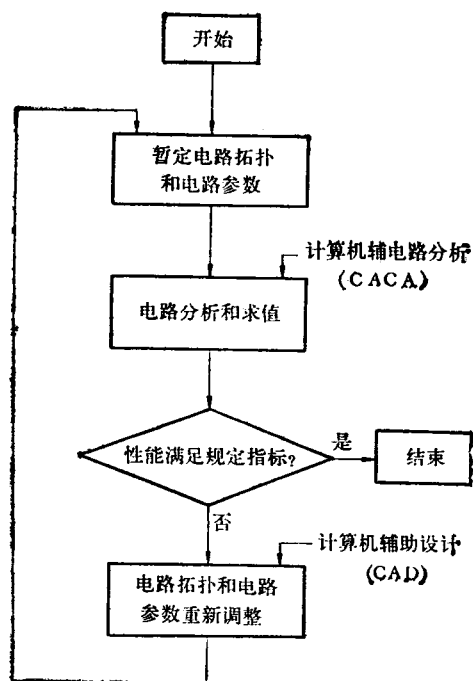


图 0-3 电路设计过程

各元件参数不可能做得绝对准确,总是存在一定的误差,而这些元件参数的误差又会直接影响电路的输出指标.因此,必须注意分析元件参数的精度能否保证电路的设计指标;或者相反,要根据电路

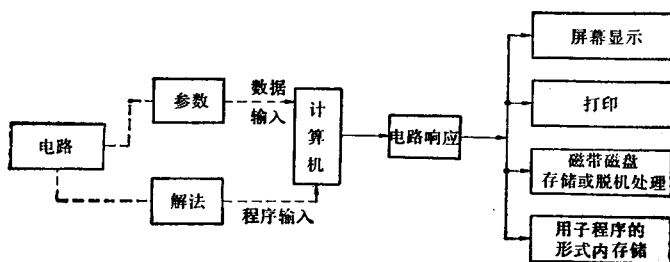


图 0-4 计算机解决电路问题的过程

的设计指标提出对元件精度的要求。这些也是目前电路问题的一个重要方面。

一个实际的电路问题从提出到用计算机获得结果，要通过一系列的处理过程，图 0-4 示出计算机解决电路问题的过程。任何计算机都有两个输入端，即数据输入和程序输入。计算机根据输入的数据和计算程序的要求计算出所需的结果（例如电路的响应），计算出的结果可以用不同的形式进行显示、存储和处理。用计算机解决电路问题一般要经过以下几个步骤：

- (1) 建立电路元器件的模型；
- (2) 电路拓扑的描述；
- (3) 建立电路方程；
- (4) 提出计算程序（数值解法）；
- (5) 显示计算结果；
- (6) 解释计算结果。

图 0-5 示出用计算机解决电路问题的主要步骤。

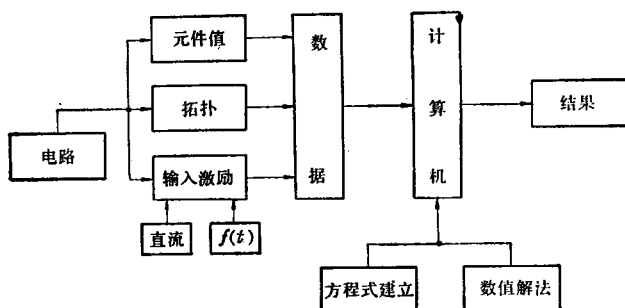


图 0-5 用计算机解决电路问题的主要步骤

# 第一章 线性电路的频率分析

## 引 言

任何计算线性电路频率响应的分析方法都必须适用于含有任意元件的任意拓扑量的电路。也就是说,必须适用于任何大小的电路。其次,要求能够利用计算机容易地建立各电路方程式,而不需要进行很多数据预处理的工作,象采用拓扑方法所需要的那样。

解决计算电路频率响应的问题有两种不同的途径。一种是求出所研究的网络函数的分析表示式,如电压传递函数、阻抗、反射系数和插入损耗等。它们可以表示为变量是复频率的两个多项式的比,也可以用极点和零点来表示。电路的增益、相位和群延迟可以通过在一组频率点上对网络函数求值得到。另一种途径根本不用求出网络函数,它直接可以从描述这一网络的平衡方程式中计算电路的各电压和电流值。尽管两种方法各有优缺点,但由于后一种方法导出的公式对频域分析和时域分析,对线性电路和非线性电路都适用,所以我们在这里主要研究它。而且,当电路很庞大,有很多激励源时,我们往往宁愿对电路进行严格的数值的研究。

在频域中,要对线性电路进行最基本的描述,必须有一组最大独立的电压方程(基尔霍夫电压定律 KVL)、一组最大独立的电流方程(基尔霍夫电流定律 KCL)和一组端点方程。其中每个端点方程对应于一个电路元件的端电压和电流。以各种方式联合这三组方程,便产生我们熟悉的弦方程式和树枝方程式。在弦方程式中,未知量是弦电流,而在树枝方程中,未知量是树枝电压。如果电路中不含有理想电流源,它可以用回路方程表征。如果是平面的,可以用网眼方程表述。如果电路中不含有理想电压源,它便

可以用节点方程描述。

从计算的观点来看,节点方程是最方便的。用通常的方法就可以建立节点方程。而要建立其他方程却需要找出诸如树枝和与之关联的弦、基本回路、基本割集或网孔这样一些拓扑量。然而,节点方程的应用限于不带有理想电压源的电路。而且电路中的每一元件,不管是两端的或多端的,都必须具有导纳特性。但是在实际电路中,这在事实上并不是一种限制。

另一方面,根据这三组基本方程式(KVL, KOL 和端点方程)建立起来的公式具有最大的灵活性。这里,电路中的元件不受限制,而且电路所含的各种理想电源的类型也没有限制。这种方法的缺点是方程的数目很大,尽管方程组的系数矩阵是很稀疏的。为了有效地进行计算,必须采用特殊的编程序技术。

在本课程中,我们主要研究节点公式法。

## § 1-1 电路元件的模型

为了建立电路方程,必须先建立电路各元件的模型。建立电路元件模型的方法很多,我们必须选择一种最适用于建立电路方程的方法。为此目的,以元件的导纳特性来描述元件的方法是最好的。各电路元件模型现分别列举如下:

1. 电阻器
2. 电容器

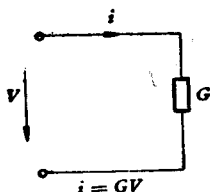


图 1-1 电阻器的电路模型

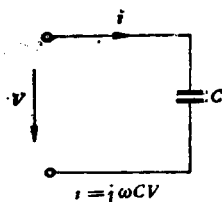


图 1-2 电容器的电路模型