

计算机辅助电路 分析与设计

李本俊
解月珍 编著
陈建田

北京邮电学院出版社

计算机辅助电路 分析与设计

李 本 俊
解 月 珍 编著
陈 建 田

北京邮电学院出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了计算机辅助电路分析与设计的基本原理与算法，并注意到反映国内外的新技术和一些实用程序的用法。全书共分七章，包括线性电路的稳态分析、元器件模型、非线性电路的直流分析、动态网络的瞬态分析、灵敏度分析、电子线路的最优化设计和电路分析程序运用等。全书力求简洁、扼要，重点突出。在介绍算法的同时，给出程序框图，以便在计算机上实现。

本书可作为理工科大院校有关专业的教科书或教学参考书，也可以供从事电子线路分析与设计的工程技术人员使用。

计算机辅助电路分析与设计

编 著 李本俊 解月珍 陈建田
责任编辑 王守平

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

天津市大邱庄印刷厂印刷

850×1168毫米 1/32 印张 8.5625 字数 222.5 千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数1-5000册

ISBN 7-5635-0016-2/TP·3 定价：2.05 元

前 言

随着应用电子计算机技术的发展,计算机辅助电路分析与设计,在实际使用中取得了越来越显著的效果,本书将着重介绍计算机辅助电路分析中的基本理论、算法和软件技术及应用,尽量介绍较为实用的算法和技术,便于在计算机上实现。

本书是通过编者多次教学实践,在原讲义的基础上,参考国内外有关资料,经过删繁增新,编写而成。其中第一章、第三章、第七章由李本俊副教授编写;绪论、第二章、第四章由解月珍副教授编写;第五章、第六章由陈建田副教授编写。

对于理工科大学的本科高年级,讲授本书内容约需40—50学时左右,读者应具备线性代数,计算数学,FORTRAN 算法语言以及电路理论方面的基础知识。

在本书编写过程中,得到了我院无线电工程系及应用物理系的大力支持,特在此致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中谬误之处难免,敬请读者批评指教。

编 者

一九八八年八月
于北京邮电学院

目 录

绪 论

- 一、什么是电子线路的计算机辅助设计..... (1)
- 二、计算机辅助分析与设计的内容..... (3)

第一章 线性网络的稳态分析

- § 1.1 网络拓扑学的基本原理..... (12)
 - 一、网络拓扑学上的一些名词术语..... (12)
 - 二、拓扑矩阵..... (17)
 - 三、克希荷夫定律的矩阵表达式..... (21)
 - 四、拓扑短阵 A 、 B_f 及 Q_f 间的关系..... (25)
- § 1.2 线性代数方程组的解法..... (32)
 - 一、主元素消去法..... (32)
 - 二、LU分解法..... (37)
- § 1.3 节点分析法..... (39)
 - 一、节点电压方程的导出..... (40)
 - 二、直接列写增广矩阵 $[Y_n : I_n]$ 的方法..... (51)
- § 1.4 直流分析程序简介..... (61)
- § 1.5 改进节点法..... (64)
 - 一、混合方程组的建立..... (64)
 - 二、混合方程组的直接列写..... (67)
 - 三、稀疏表格法..... (71)

第二章 电路元器件模型

- § 2.1 二极管与双极型晶体管的数学模型..... (73)
 - 一、二极管模型..... (73)
 - 二、双极型晶体管模型..... (76)

§ 2.2 场效应晶体管的数学模型	(86)
一、结型场效应管模型	(86)
二、MOS 场效应管模型	(89)
§ 2.3 运算放大器的宏模型	(93)
一、输入阻抗的模拟	(95)
二、增益特性的模拟	(95)
三、电压摆动速率的模拟	(96)
四、最大输出电压范围的模拟	(97)
五、输出阻抗的模拟	(98)
第三章 非线性电路的直流分析	
§ 3.1 非线性电路直流方程组的建立	(101)
§ 3.2 非线性代数方程组的解法	(103)
一、匹卡德算法 (<i>Picard's Method</i>)	(103)
二、牛顿法 (<i>Newton-Raphson's Method</i>)	(108)
三、改进的N-R 算法	(117)
四、伴随网络分析法	(118)
§ 3.3 非线性网络的直流分析程序	(125)
一、程序中的有关算法说明	(125)
二、程序框图	(126)
第四章 动态网络的瞬态分析	
§ 4.1 几种常用数值积分公式	(130)
一、欧拉法 (<i>Euler Algorithm</i>)	(130)
二、梯形法 (<i>Trapezoidal Algorithm</i>)	(133)
三、线性多步法 (<i>Linear Multistep Algorithm</i>)	(135)
§ 4.2 误差及数值稳定	(141)
一、误差	(141)
二、差分方程的稳定性问题	(141)
三、稳定区域	(145)

四、Stiff方程	(147)
§ 4.3 动态元件的伴随模型	(149)
一、电容的伴随模型	(150)
二、电感的伴随模型	(150)
三、互感的伴随模型	(151)
§ 4.4 非线性动态网络的瞬态分析	(156)
一、二极管及双极型晶体管的瞬态等效电路	(157)
二、电路的瞬态分析程序简介	(160)
第五章 灵敏度分析	
§ 5.1 概论	(165)
一、问题的提出	(165)
二、灵敏度的定义	(165)
三、计算灵敏度的方法	(166)
§ 5.2 增量网络法	(167)
一、增量网络的形成	(167)
二、用增量网络法计算灵敏度	(170)
§ 5.3 伴随网络法	(175)
一、特勒根定理	(175)
二、伴随网络的构成	(176)
三、用伴随网络法求灵敏度	(183)
四、直流灵敏度分析程序简介	(189)
§ 5.4 转置法	(191)
第六章 电子线路的最优化设计	
§ 6.1 概论	(198)
一、电路的最优化设计	(198)
二、最优化设计的数学描述	(198)
三、目标函数	(200)
§ 6.2 最优化基本原理	(202)
一、函数的极值	(202)

二、求极值的方法	(206)
§ 6.3 一维搜索法	(208)
一、寻找最小点存在的区间的方法	(209)
二、0.618法 (黄金分割法)	(210)
三、内插法求函数的极小值	(213)
§ 6.4 无约束多变量函数最优化方法	(216)
一、最速下降法 (梯度法)	(217)
二、牛顿法	(221)
三、共轭梯度法	(223)
四、变尺度法	(234)

第七章 电路分析程序的运用

§ 7.1 通用电路模拟程序PSPICE及其使用简介	(240)
一、PSPICE程序简介	(240)
二、PSPICE程序的使用	(242)
§ 7.2 微机上使用的电路分析程序Cap-Ⅱ简介	(250)
一、硬件环境及启动	(250)
二、元器件及菜单功能	(252)
三、电路分析	(263)

参考文献

绪 论

计算机辅助设计 (*Computer Aided Design* 简称CAD) 是以电子计算机为主要工具的设计方法, 是计算机一个很重要的应用领域。它是在计算技术、模拟理论和应用数学等基础上发展起来的一门新的而又发展极为迅速的学科。目前已广泛应用于各个领域。电子线路的CAD则是CAD技术中发展较早和较成熟的一个方面。

一、什么是电子线路的计算机辅助设计

要搞清楚这个问题, 首先介绍一下传统的电子电路的设计方法, 即手工估算及物理模拟的方法。

首先设计人员根据指标的要求, 参考有关资料, 凭借他的经验, 初步确定电路方案; 然后简化电路及元器件模型, 根据已知的参数用解析法进行手工估算, 由分析结果检验设计的正确性。再到实验室搭实验电路板进行物理模拟, 用电子仪表测量电路的性能, 看是否满足设计指标。若不符合要求, 则需修改元件参数, 反复凑试, 甚至完全修改电路方案, 直到电路性能满足指标要求为止。作为一个定型产品, 还需做性能样机试制及小批量生产, 以进一步检验设计的正确性和产品的合格率, 最后定型投产。

这种传统的设计方法, 对一般较简单的电路还是有效的, 目前我国仍被采用。但它却存在不可克服的缺点。首先, 因为对电路的分析主要靠手工估算, 就必须对元器件的等效电路和模型做大量的近似和简化, 忽略寄生参量的影响, 这就使计算结果与实际性能往往差距很大。其次, 传统的设计方法不能进行容差分析和最坏情况分析, 就无法估计元器件的容差范围, 以保证产品

合格率，不能模拟某些破坏性故障，就无法确保产品的可靠性。这种方法设计效率低、周期长，不能适应电子产品更新换代的要求。

随着电子工业的迅速发展，电子设备和系统日趋复杂，规模越来越大，集成度越来越高，传统的设计方法已无法胜任。尤其对大规模和超大规模集成电路，在几个平方毫米或十几个平方毫米的芯片上，集成几千甚至上万个晶体管、电阻和电容等元件，这样根本不可能用解析法对电路进行手工计算，也无法搭实验电路板进行实验，传统的设计方法遇到了不可逾越的障碍。

电子计算机的出现，并以惊人的速度迅猛发展，以及计算技术的高度发达，使电路的分析与设计发生了革命性的变化。计算机以它神速的运算能力、手工估算无法达到的精度以及大容量的存贮功能使它成为设计人员的得力助手，广泛用于大规模集成电路和一般电子线路的设计中，而且大规模集成电路的发展反过来又促进了计算机的发展。

电子线路的计算机辅助设计包括计算机辅助电路分析(Computer Aided Analysis——CAA)和最优化设计。其设计过程如图1框图所示。

在这里模拟各种电路的各种特性，无需任何实际元件，各种功能的计算机应用程序取代了大量的仪器仪表。所以从某种意义上说，计算机本身就是一个现代化的实验室。它使设计效率提高，周期短缩；同时，对电路的分析计算可以根据要求使用精确的元器件模型，使设计准确合理，从而提高产品质量；通过容差分析和最坏情况分析可大大提高产品的合格率和可靠性；节省了原材料和人力，使设计人员从繁琐的计算和事务性劳动中解脱出来，用于创造性的劳动。另外CAD技术不仅进行电路的设计，还可以进行印刷电路板的设计、集成电路的排板和布线以及各种逻辑功能的模拟等等。总之，CAD技术对传统的电路设计方法进行了一场技术革命。但是，目前计算机还不能完全进行自动设

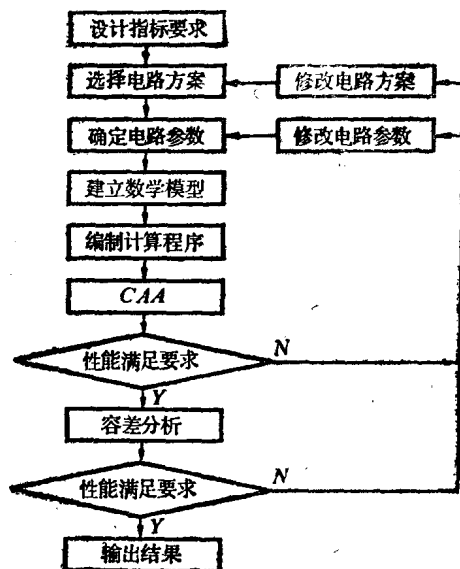


图 1 电子线路CAD流程图

计。设计方案的提出和改进、计算方法的选取、计算结果的分析与判断等，均须设计人员来担任，计算机还只是一种设计工具。因此，我们称这种过程为计算机辅助设计。

二、计算机辅助分析与设计的内容

电子线路的CAD是以CAA为基础的，而电路分析的内容则根据电路性质的不同也不完全一样。但不论什么性质的电路网络，需要进行的电路分析问题大致可以归为以下几类：

1. DC分析。即求线性或非线性电阻网络的直流解。
2. AC分析。求线性动态网络的频域特性。
3. 瞬态分析。求线性或非线性动态网络的时域特性，或非线性动态网络的稳态周期解。
4. 噪声分析。以噪声源作为输入求AC或瞬态解。
5. 容差分析。进行灵敏度和最坏情况分析。

CAD的中心问题是编制有效的各种功能的分析和设计程序，

但这是一个工作量很大又非常复杂的事情。如果要求每个设计人员都必须编制分析或设计程序，是不可能的，也是不值得的。因此要求有“通用”的程序以供设计人员使用。一个好的通用电路分析或设计程序大体分为以下几个部分：

1. 输入

描述电路网络的拓扑结构及元件参数的语言。要求直观易懂、书写自由、使用方便、且能够识别输入错误。

目前的电路分析与设计程序大多数采用“自由格式”的输入语言。它提供了描述电路结构、元件参数、分析类型、运行条件和输出要求等各种语句，用户使用非常方便。近年来又出现了采用人机交互方式输入语言，用户可以通过人机交互设备（如光笔图形显示器）直接将电路图和元件参数送入计算机，使用极其方便，且直观易懂，容易修改。当然这需要有交互式设备和相应的输入软件。

2. 建立器件的数学模型

我们知道，每一个具体电路都是由实际的元器件组成，要想对电路进行计算机辅助分析，首先必须根据需要用各种等效电路描述这些元器件，并建立表示它们的数学关系式，这就是数学模型。通用分析程序应有将实际元器件转换为相应的数学模型的能力。大型的电路分析或设计程序还备有专门的模型库，贮存一些常用的器件模型，以备调用。

模型的精度在很大程度上决定了分析结果的精度和速度，但并不是在任何时候都采用最精确的模型，精度要求太高必然会增加计算时间和存储空间。采用什么模型要根据使用条件和分析目的而异。总之，模型既要能反映器件的性能，又要综合考虑分析的精度、存储容量和计算时间。

3. 电路方程式的建立

电路分析与设计程序根据用户输入的电路结构、元件参数及分析要求自动建立电路方程式。随着CAD技术的发展，建立电

路方程的方法也在相应地变化和发展。目前使用较多的有节点法（改进节点法）、状态变量法、混合法和稀疏表格法等。这些方法都各有千秋，一般根据分析要求的不同、电路类型不同，选择程序简单、计算量少的方法。

4. 电路方程的求解

电路方程大致分为三类：线性代数方程组、非线性代数方程组和常微分方程组。在电路分析程序中，对这三类方程组的求解均使用数值解法，其中线性代数方程组的求解是电路分析与设计中最基本的数值解法，很多问题最终都归结为求解或反复求解线性的代数方程组。

主元消去法和LU分解法是两种最常用的求解线性代数方程组的方法。但当电路方程组的系数矩阵很大且稀疏（即矩阵中的非零元素只占很少）时，稀疏矩阵技术使计算量大大下降。

对于非线性代数方程组的求解，则首先将非线性代数方程组线性化，再使用线性代数方程组解法迭代求解。目前流行的线性化方法是Newton—Raphson算法。

常微分方程组的数值解法很多，但基本上可分为隐式和显式积分两种。隐式积分的数值稳定性较好，故较多地被采用。

5. 输出结果

通用电路分析与设计程序应有多种输出选择，用户可根据分析要求的不同，选择不同内容的输出。如直流工作点、频率响应、瞬态响应等。同时，可以根据用户的要求，或用数据表格、或用曲线表示。

一个好的通用电路分析与设计程序要求占用机时少、占内存空间小和使用方便等特点。

目前国内外各种电路分析与设计程序很多，其中以美国加州大学贝克莱分校电子研究实验室研制的SPICE程序流行最广，它是用自由格式输入、采用改进节点法列电路方程、用Newton—

Rapkson改进算法进行非线性直流工作点分析、稀疏矩阵技术求解线性代数方程组、变阶变步长隐式积分进行瞬态分析。

近年来，CAD技术在我国发展也很快，在理论和算法的研究以及通用程序的编制方面，都取得了不少成果。我们坚信，在各个领域里，随着CAD的广泛应用，必将更好地推动我国四化的进程。

最后，作为前面论述的说明，我们列出几个计算电路的实例及其分析结果。

例1 集成运算放大器 $\mu A-741$ 的直流工作点和频率特性分析。

$\mu A-741$ 是通用型运算放大器，自它问世以来得到广泛地应用。它有两个放大级和输出级（如图2所示），用手工计算其直流工作状态，尤其是频率响应是极其复杂而且不够精确的。下面我们给出部分计算机分析结果。

* * * * * NODE VOLTAGE :

NODE VOLTAGE		NODE VOLTAGE		NODE VOLTAGE	
1	0.0000	2	0.0003	3	14.4493
4	- 0.5946	5	- 0.5945	6	- 1.1287
7	- 13.7972	8	- 13.6143	9	- 14.3793
10	- 14.9906	11	- 14.9906	12	- 14.9054
13	- 14.2939	14	14.3480	15	15.0000
16	- 15.0000	17	- 14.2272	18	- 14.9315
19	- 1.2441	20	0.6694	21	0.0520
22	- 0.6207	23	- 0.0021	24	- 14.9998
25	0.0023	26	- 0.0057		

* * * * * TRANSISTOR OPERATING POINTS :

...	IC	VBE	BETA	GM	RPI	...
Q1	.976E-05	5.59	157.02	.379E-03	.396E+06	
Q2	.985E-05	.595	156.98	.381E-03	.394E+06	
Q3	-.939E-05	-.534	20.10	.363E-03	.551E+05	
Q4	-.944E-05	-.534	20.10	.365E-03	.548E+05	
Q5	.931E-05	.593	150.29	.360E-03	.416E+06	
Q6	.931E-05	.593	150.38	.360E-03	.416E+06	
Q7	.121E-04	.600	161.65	.468E-03	.321E+06	
Q8	-.179E-04	-.551	20.00	.691E-03	.290E+05	
Q9	-.179E-04	-.551	20.06	.691E-03	.290E+05	
Q10	.188E-04	.612	153.25	.727E-03	.206E+06	
Q11	.729E-03	.706	150.00	.282E-01	.532E+04	
Q12	-.676E-03	-.652	50.00	.261E-01	.191E+04	
Q13A	-.225E-03	-.652	20.00	.872E-02	.229E+04	
Q13B	-.676E-03	-.652	20.00	.261E-01	.765E+03	
Q14	-.162E-03	.667	150.40	.625E-02	.240E+05	
Q16	.199E-04	.613	156.85	.768E-03	.195E+06	
Q17	.680E-03	.704	150.09	.263E-01	.570E+04	
Q18	.200E-03	.673	150.01	.775E-02	.193E+05	
Q19	.236E-04	.617	150.00	.913E-03	.164E+06	
Q20	-.161E-03	-.615	50.04	.623E-02	.802E+04	
:						

* * * * * FREQUENCY CHARACTERISTIC:

(由于篇幅所限, 不再列写数据, 只画出频率特性曲线如图 3 所示)

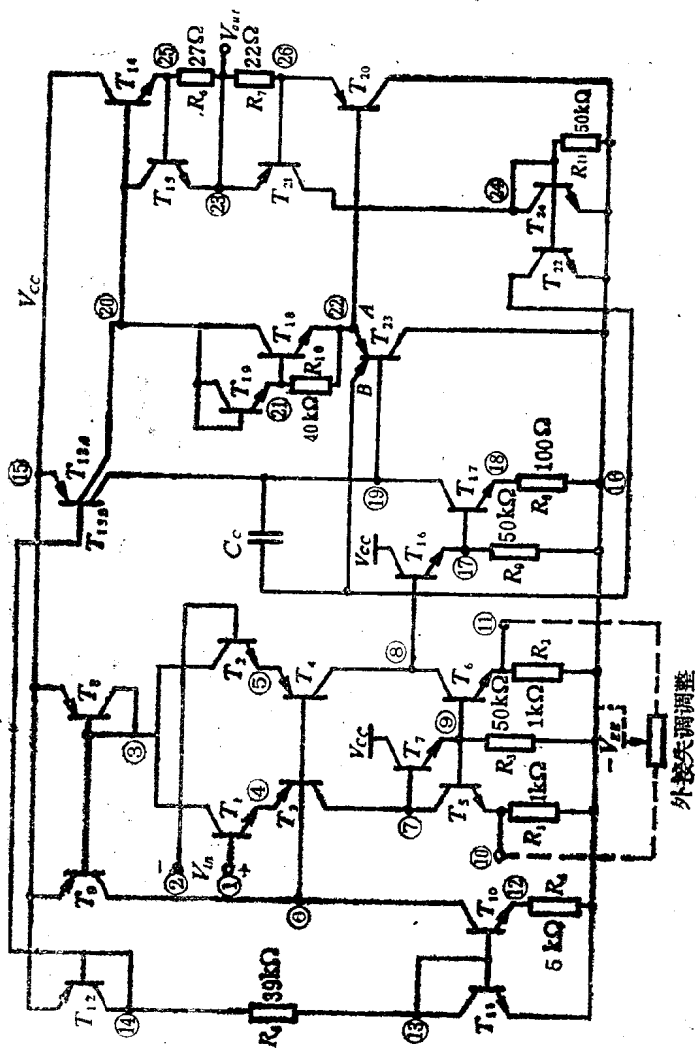


图 2 $\mu A-741$ 运算放大器电路

例2 图4所示电路是TTL逻辑门电路，其负载是下一级门电路的输入，用瞬态分析其输出特性。

输入数据

V _{cc}	1	0	5	
V _{in}	2	0	PULSE	0 4 5ns 1ns 1ns 10ns
R1	1	3	4k	
R2	1	5	1.6k	
R3	1	6	120	
R4	1	11	4k	
R5	1	13	1.6k	
R6	9	0	2k	
R7	8	10	25	
R8	14	0	2k	
Q1	4	3	2	MOD1
Q2	5	4	9	MOD1
Q3	6	5	7	MOD1
Q4	7	7	8	MOD1
Q5	10	9	0	MOD1
Q6	12	11	8	MOD1
Q7	13	12	14	MOD1

•MODEL MOD1 NPN BF=150 RB=100 VA=150

•IS=1.E-15 CJC=2PF TF=0.3ns

•TF V(8) V1N

•TRAN 1ns 30ns

•PLOAT TRAN V(8) V2)

•END

输出结果如下 (部分)