

电路CAD技术 在模拟电路中的应用

陈柏孙 著

上海科技教育出版社

Dianlu

CAD

Jishu

*zai MONI DIANLU Zhong de
Yingyong*

TX 710.5
C 36

370470

电路 CAD 技术 在模拟电路设计中的应用

陈柏孙 著

上海科技教育出版社

(沪)新登字116号

电路 CAD 技术在模拟电路设计中的应用

陈伯孙 著

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路393号)

各地新华书店经销 上海市印刷十二厂印刷

开本850×1168 1/32 印张10.625 字数245000

1993年9月第1版 1993年9月第1次印刷

印数1—2200

ISBN 7-5428-0705-6

—TN·1—

定价: 8.40元

前 言

电路 CAD 技术一般指电路的计算机辅助分析 (Computer Aided Analysis 简称 CAA) 和计算机辅助设计 (Computer Aided Design 简称 CAD), 它综合了电路理论、半导体物理、计算数学和程序设计等学科, 是一门独特的新技术学科。电路设计师可以利用 CAD 技术对产品的电路进行分析、参数优化、漂移设计和容差设计, 为元器件的认定标准提供依据。使产品的设计周期大大缩短, 并使之成本降低、可靠性提高。

电路 CAD 技术提出至今, 已有几十年历史, 并在数字电路的设计中获得广泛的应用。但是, 在模拟电路的设计中, 电路 CAD 技术尚未获得广泛的应用。至今还较少看见有系统地介绍电路 CAD 技术在模拟电路设计中实际应用的著作。

由于大多数电子产品是一个复杂的系统, 而一般设计师能得到的大都是通用电路分析程序 (如 *Spice*), 这样就很难简单地用手头上的电路分析程序来分析产品中的电路。一般设计师在用电路分析程序来分析产品前, 要先做一些预处理工作, 使电路 CAD 的实施成为可能。而要具备这种能力, 就要求电路设计师既熟悉待分析的电路, 又熟悉电路 CAD 技术。

由于上述原因, 本书介绍了一套基本的模拟电路 CAD 程序及其设计方法, 以使读者掌握电路 CAD 技术的基础理论并了解其基本程序。本书还着重介绍了电路 CAD 技术在一些典型模拟电路设计中的应用实例, 希望能对使用电路 CAD 技术的设计师提供一些启发和帮助。

本书的应用实例及程序, 取材于我的教学和科研实践。在定稿过程中, 朱鸿鹄教授审阅了除第十二章、第十三章以外的其他各章内容, 并提出诸多宝贵意见。上海科技教育出版社在本书的出

版过程中，给予我极大支持和帮助，使本书得以出版和读者见面，谨在此表示感谢！

我的妻子黄民仪花了整整半年的业余时间帮我对全书作文字润色并誊抄了全部书稿，使本书得以顺利完成，我谨以本书献给我的妻子。

陈柏孙

上海大学 1987年9月初稿

1989年9月修改

目 录

前言

第一章 概述..... 1

§ 1.1 什么是计算机辅助电路分析与设计 1

§ 1.2 计算机辅助电路分析的步骤 4

第二章 常用电路的元件模型..... 7

§ 2.1 线性元件模型 9

§ 2.2 非线性元件模型 9

§ 2.2.1 二极管与双极型三极管的模型12

§ 2.2.2 稳压管19

§ 2.2.3 场效应管19

§ 2.2.4 集成运放23

第三章 电路基本分析程序.....25

§ 3.1 电路方程的建立25

§ 3.1.1 用节点法建立电路方程25

§ 3.1.2 改进节点法建立电路方程31

§ 3.2 线性代数方程组的数值解法35

§ 3.2.1 高斯(Gauss)消去法.....35

§ 3.2.2 列主元素高斯消去法41

§ 3.3 程序设计44

§ 3.3.1 稳态分析程序44

§ 3.3.2 蒙特卡洛容差分析程序58

§ 3.3.3 非线性直流和非线性瞬态程序61

第四章 电视机图象中放吸收回路的计算机辅助设计.....78

§ 4.1 目标函数的选定78

§ 4.2 中放吸收回路的计算机辅助分析79

§ 4.3 原电路的改进设计82

§ 4.4 计算机分析结果与实验结果的比较	89
第五章 电视接收机第三中放的最佳工作点及动态特性设计	92
§ 5.1 第三中放电路的设计分析	92
§ 5.1.1 动态范围与功率的关系	92
§ 5.1.2 幅频与相频特性	93
§ 5.2 第三中放电路计算机辅助分析	96
§ 5.3 第三中放电路的改进设计	100
§ 5.3.1 分析改进	100
§ 5.3.2 试验与测试	102
第六章 电视机场扫描电路温度补偿特性设计	104
§ 6.1 场扫描电路	104
§ 6.1.1 场扫描电路分析	104
§ 6.1.2 帧缩的原因	105
§ 6.2 设计思想	107
§ 6.2.1 用交流稳态分析程序分析场扫描电路波形畸变的原理	107
§ 6.2.2 温度最佳补偿的算法步骤	109
§ 6.2.3 敏感元件的温度特性	110
§ 6.3 场电路温度补偿的计算机仿真	112
§ 6.3.1 原场扫描电路的温升仿真	114
§ 6.3.2 最佳补偿曲线的寻求	114
§ 6.3.3 理想补偿曲线的实现	117
§ 6.3.4 改进前后的电视接收机的高温负荷试验	119
第七章 录放机均衡电路的参数优化设计	120
§ 7.1 参数设计的目标函数	120
§ 7.2 放音频率均衡电路的参数设计	121
§ 7.2.1 放音均衡补偿特性指标的分析及正交表头的设计	122
§ 7.2.2 因素变化对输出频响特性曲线的影响	124
§ 7.2.3 稳定性指标分析	129
§ 7.2.4 指标的综合平衡	134
§ 7.2.5 结论	137

第八章 谐振型图形均衡器的 CAD	138
§ 8.1 电子均衡器简介	138
§ 8.2 谐振型音调电路的设计	140
§ 8.2.1 电路的结构设计	140
§ 8.2.2 电路的参数设计	143
第九章 无线电对讲机滤波器的设计	154
§ 9.1 低通滤波器的国产化	154
§ 9.1.1 原电路的介绍及分析	154
§ 9.1.2 改进电路设计	160
§ 9.1.3 容差分析	168
§ 9.1.4 几个问题的讨论	169
§ 9.2 高通滤波器的国产化	170
§ 9.2.1 音频高通滤波器 AFH16F400·0A1 简介	170
§ 9.2.2 电路的设计	172
第十章 串联型稳压电源的分析与改进设计	181
§ 10.1 稳压电源电路的基本原理和分析目标函数	181
§ 10.1.1 基本原理	181
§ 10.1.2 目标函数	182
§ 10.2 稳压电源的分析	182
§ 10.2.1 直流稳态分析	183
§ 10.2.2 交流分析	188
§ 10.2.3 对原稳压电路 CAA 的小结	189
§ 10.3 稳压电源的设计	190
§ 10.3.1 设计方案(一)	190
§ 10.3.2 设计方案(二)	202
第十一章 电视机行输出电路 CAA	205
§ 11.1 行电路简化及预处理	207
§ 11.1.1 电路简化	208
§ 11.1.2 电路预处理	208
§ 11.1.3 各元件参数值的求解	210
§ 11.2 行电路 CAA 的实现	214
§ 11.2.1 赋初值问题	215

§ 11.2.2	行输出电路的电路描述	216
§ 11.2.3	输出结果	217
第十二章	金星 C56-402 场输出电路 CAA 和热分析	220
§ 12.1	电路概述	220
§ 12.2	场输出电路的非线性瞬态分析	222
§ 12.2.1	程序的选用以及输入信号和其他数据的处理	222
§ 12.2.2	静态工作点设置和温度变化时反馈量的估算	224
§ 12.2.3	场输出电路非线性瞬态分析	227
§ 12.3	场输出厚膜电路的热分析	230
§ 12.3.1	热分析的目的	230
§ 12.3.2	热路图的建立	230
§ 12.3.3	热阻和晶体管功耗的计算	232
§ 12.3.4	场输出厚膜组件的温度分布	234
§ 12.3.5	场输出厚膜电路应力分析和管子失效率预计	236
第十三章	彩电 8801 机开关电源 CAD	239
§ 13.1	彩电 8801 机开关电源的系统设计	239
§ 13.2	彩电 8801 机芯开关电源参数设计	243
§ 13.2.1	目标函数	245
§ 13.2.2	确定考察因素	245
§ 13.2.3	寻找优化参数(如条件)	246
附录一:	直流分析(包括灵敏度)程序 DC	251
附录二:	交流(稀疏)分析程序 SAC	262
附录三:	灵敏度分析及最坏情况分析程序	277
附录四:	MONTE CARLO 法容差分析程序	287
附录五:	非线性直流分析程序 D.S.	298
附录六:	非线性瞬态分析程序 C.D.	315

第一章 概 述

§ 1.1 什么是计算机辅助电路分析与设计

计算机辅助分析(*Computer Aided Analysis* 简称 CAA) 和计算机辅助设计(*Computer Aided Design* 简称 CAD)是在计算方法、电路理论和程序设计基础上发展起来的新技术。

所谓电路设计,就是由设计者根据设计要求,参考有关资料,运用自己的专业知识和经验,提出初步的设计方案,然后通过计算机进行分析和计算,对方案的正确与否作出论证,再进行修改和重新分析,直到设计方案符合要求为止。一般讲,设计是一个反复分析的过程。其中既包括设计者的创造性劳动,也包括大量重复性的计算和实验工作。

由于生产和技术的发展,电子产品在社会上的作用也日益增强。生产单位和用户对产品的精度、质量和可靠性的要求也越来越高,在一项新的电子产品的产生周期中,设计环节所占比重是很大的。现在传统的设计方法已不能适应新的要求,已经逐渐成为产品更新换代的主要障碍之一。

现在我们讨论图 1-1 所示的电路设计流程图。传统电路设计师根据设计要求,凭借自己的经验,参考有关资料和样机,按设计要求采用新技术、提出电路框图,再进行电路结构设计和参数设计,最后定出初步的设计方案。为了验证方案的可行性,可以采用解析法或实验方法进行。原则上解析法可以适用于任何电路,但实际上,这种方法只能用于较小规模的简单电路。所以传统设计方法,大都采用实验凑试方法。设计师根据初始设计方案,用实际元件在实验板上试验,测试和修改电路参数或结构,最后确定一个可行的方案。由于元件参数的离散性,有限次的实验测试结果很

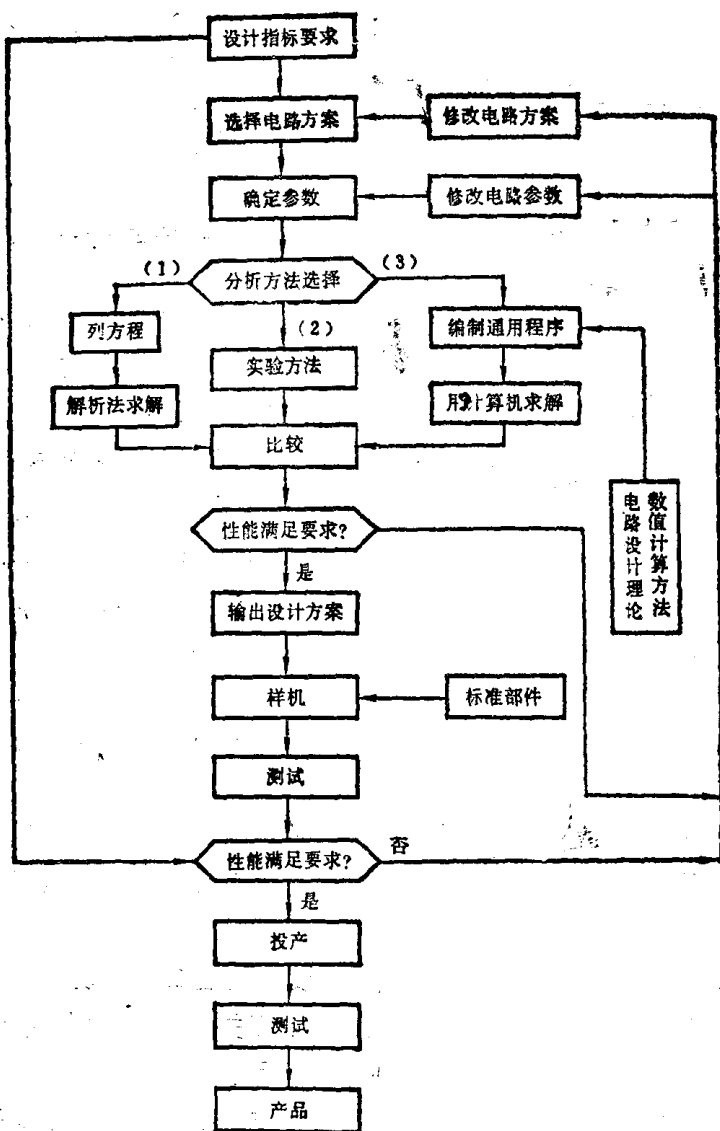


图 1-1

难反映所定方案的系统稳定性，及大批生产时的一致性。为了解决上述问题，还必须进行样机试制，以便进一步进行方案的性能评价，对方案进行再一次的检验和修改，然后投入小批量生产，以检

验产品的一致性及合格率。最后经标准定型后才正式投入生产。显然这种传统的设计方法存在严重缺陷,设计效率很低,从方案选择到正式投产,周期很长。由于受到测试仪器及所能得到的元器件规格的限制,实验精度也不高。

CAD 技术的流程,如图 1-1 中(3)所示。由于电子计算机为电路计算提供了一个有效的工具,人们根据现代电路理论,应用计算方法的成果,编制各种应用程序,无需任何元件实物,就可以在电子计算机上模拟电路的各种性能,以及获得电路在所设定的技术条件下批量生产时产品的稳定性和一致性。

采用 CAD 技术后,设计效率得到了提高,产品周期也因此缩短。由于计算机具有计算能力和存贮能力,再加之各种应用程序的建立,所以在提出设计方案后的相当短的时间里,电路设计师就可以运用 CAD 技术完成结构设计、参数设计、优化设计、容差设计和可靠性设计,并在此基础上提出元器件认定标准和工艺依据。设计方案的正确合理,可以提高产品的性能,降低产品的成本。采用 CAD 技术后,可以把设计师花在实验凑试中的大量精力用到理论分析上去,使设计师从手工估算、查曲线、绘图中解放出来,把精力更集中到关键性的问题和创造性环节上去。

当然我们也应该清醒地认识到,如果说解方程的实施是传统解析法的最大困难,那么电路系统的数学描写则是 CAD 技术应用的重大困难。由于测量技术的限制,今天我们还不能随心所欲地得到所需的每一个元器件的模型参数;由于元器件的离散性,元器件的数学模型参数和物理模型参数之间存在不一致性;今天的电路 CAD 系统还不能解决电路设计师所提出的所有问题,甚至还不能完全按照电路设计师所习惯的方式给出电路分析结果。但是在进行电路的过渡过程分析以及具有统计意义的分析和设计(例如容差分析和设计,整机可靠性分析和设计)时,电路 CAD 技术在电子产品设计上表现出越来越重要的作用,也正是在这个意义上,可以说,不掌握电路 CAD 技术,就等于没有掌握现代电子产品设计技术。

§ 1.2 计算机辅助电路分析的步骤

怎样用计算机作为工具来辅助分析各种电路问题呢？我们以

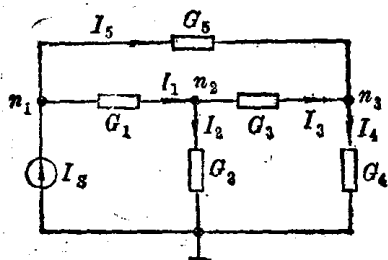


图 1-2

手算为例，来看一个简单电路的分析步骤。如图 1-2 所示电路，求其输出电压 V_3 。

把克希荷夫电流定律 (KCL) 和欧姆定律相结合，可以列出用节点电压来表示的节点电压方程。

节点 1 (n_1):

$$(G_1 + G_5)v_1 - G_1v_2 - G_5v_3 = I_s$$

节点 2 (n_2):

$$-G_1v_1 + (G_1 + G_2 + G_3)v_2 - G_3v_3 = 0$$

节点 3 (n_3):

$$-G_5v_1 - G_3v_2 + (G_3 + G_4 + G_5)v_3 = 0$$

经整理，上述方程组可以写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_5 & -G_1 & -G_5 \\ -G_1 & G_1 + G_2 + G_3 & -G_3 \\ -G_5 & -G_3 & G_3 + G_4 + G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

写作简化形式如下：

$$Y_N V_N = I$$

然后就可以运用求解线性方程组的算法解上述方程。

用计算机作工具辅助电路分析时，步骤也是如此。大致过程如图 1-3 所示。

由于计算机具有记忆功能，实际上对绝大多数电路设计师来说，使用 CAD 技术的过程比图 1-3 所示的步骤更简单，一般只要做如图 1-4 所示工作。

电子计算机辅助分析程序的种类，一般可以从两方面加以区

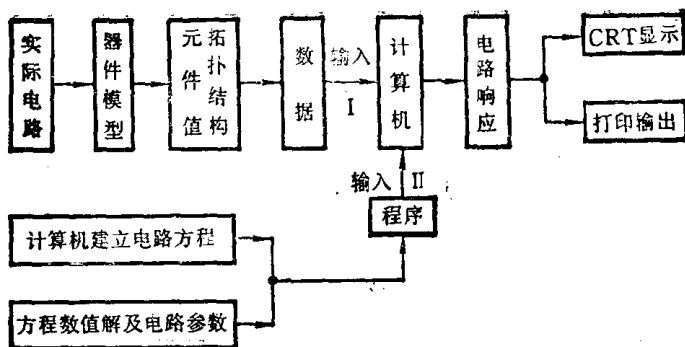


图 1-3

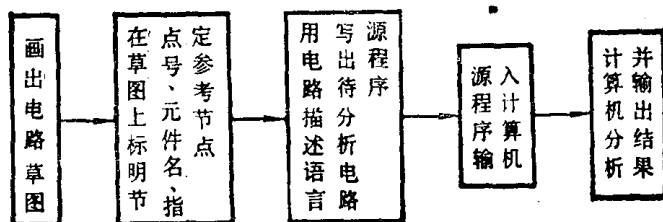


图 1-4

分。从电路理论方面看,有节点分析法,回路分析法,割集分析法和状态变量分析法。从程序功能来看,可以分为稳态(直流、交流)分析,瞬态分析。总的又可以分为线性分析和非线性分析。在这些基础上发展起来的容差分析、频谱分析、可靠性分析等应用程序就不胜枚举了。

电子线路 CAD 技术在发达工业国家现已得到广泛使用,我国尚处在摸索、总结、推广阶段。目前大部分电子线路分析程序,是通用电路分析程序。程序本身有相当自由度,在实际运用时,熟悉所用程序的特征和限制(存贮的限制、功能、模型级别、精度、输入输出条件等)是非常重要的。另外,常常会碰到所希望分析的电路无法直接用通用程序进行分析,对这样的问题,要弄清待分析问题的本质后,方可采取相应的对策。大多数情况下,是能够用通用程序分析所要分析的电路的。为了更好地掌握 CAD 技术,积累数据和整理数据也很重要。

OAD 程序的应用领域可从低频到高频,对高频分析时,电路的分布电容,导线的等效电感等复杂的模拟是必不可少的。在分单元分析时,各单元间相互的影响有时也是不可忽略的。尤其要注意的是,当所获得的分析结果明显与实验或定性结论不符时,不要轻易怀疑程序、元件模型。而要仔细检查你所建立的单元模型有无差错,即被分析单元和有关联的其他单元之间有无不当地忽略了相关因素。抓住这一线索,顺藤摸瓜,往往能得到满意的结果。

第二章 常用电路的元件模型

具体电路由实际元件组成,用 CAD 技术分析电路时,必须首先建立电路元件模型。若电路元件的电压和电流成线性关系则称线性元件,如线性电阻、电容、电感、电流源和电压源等。若电路元件的电压和电流不成线性关系则称非线性元件,如二极管、双极型晶体管、MOS 晶体管和结型场效应管等。

反映线性元件的电压和电流关系的等效模型,称线性等效模型;反映非线性元件的电压和电流关系的等效模型,称非线性等效模型。在 CAA 时,要求由各种等效模型来描述电路中各种不同的元件。这些模型既要便于计算机对电路计算,又能正确反映元件的电特性。

一般来说,模型的精度越高,分析得到的结果也越精确。所以在进行 CAD 时,一般希望被分析电路中的元件模型越精确越好。其实,模型精度越高,模型的结构也越复杂,元件模型内部节点相应增加,计算时间必然增加。而在整机电路 CAA 时,由于电路元件的离散性,即使同一种型号的一批晶体管也几乎不存在特性完全相同的情况。所以在整机电路 CAA 中,究竟选用怎样的模型好,要根据分析的要求,区别对待。原则是只要能反映元件在电路中的实际作用,越简单越好。

1. 直流分析

要求计算电路的直流工作点,或分析电路的直流工作特性。对不含非线性元件的电路,用线性直流分析程序。对含非线性元件的电路,用非线性直流分析程序。在某些小范围直流特性分析中,即使电路具有非线性元件,也可选用线性直流分析程序。因为非线性元件在工作点附近的一个小范围里,可认为它是近似线性的。

在考虑了它的工作状态后，只要输入直流工作点处的模型参数即可。

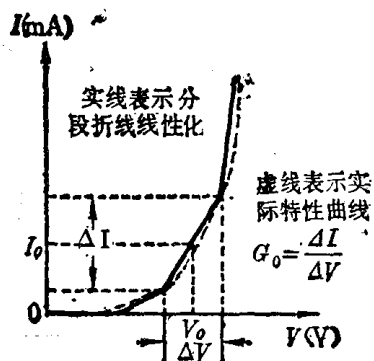


图 2-1

例如，二极管特性如图 2-1 所示。其实际特性曲线，可用三段折线近似，如果电压只在某一值的附近作微小的变动，则二极管的导纳就可用 $I=I_0$ 处的斜率 $G_D = \frac{\Delta I}{\Delta V}$ 表示。电压与电流成线性关系。

2. 交流分析

又称频域分析。要求计算小信号线性化电路的电压或电流随频率的变化。在交流分析中，电流、电压值都采用复数表示，相应的阻抗和导纳也采用复数表示。所以用交流分析可以得到电路的幅频特性和相频特性。对于非线性元件所采用的等效电路是小信号线性等效模型，它的模型参数与直流工作点有关。所以，在交流分析前必须进行非线性直流分析，再测得元件在工作点附近的参数并作线性元件处理。

3. 瞬态分析

又称时域分析，要求计算电路的电流或电压随时间的变化。此时在非线性元件的等效模型中，不但应包括非线性直流模型，还应考虑电容的效应。这样引入等效电容的模型，称为瞬态等效模型。

总之，对不同的分析要求，要选用不同的等效模型。

元件模型的建立大致上分两种方式，一种是以元件的物理原理为基础，导出元件端口上的信号电压与电流的数学关系来建立方程，一般称它为物理模型。另一种是从元件的电特性出发，用电路来模拟元件端口的特性，称端口模型。

在集成电路的 CAA、CAD 中，非线性元件大都用前一种模型，但在整机电路 CAA、CAD 中，由于后一种模型在电子工程中广泛流行，因此在许多场合使用后一种模型显得更为方便。本章将对这二种模型都作介绍，供读者选用。对于 MOS 晶体管，考虑到它