

CACA

龙广明
洪先家
孙启泽
王亚玲
柳

计算机辅助 电路分析

算法和软件技术

清华大学出版社

内 容 简 介

本书着重介绍计算机辅助电路分析中的算法和软件技术,包括在计算机上自动建立电路方程的技术、线性分析方法的稀疏矩阵技术、非线性分析技术、数值积分技术、灵敏度分析方法、非线性元件模型的处理、电路分析程序的数据结构、编译技术和软件结构等。书中尽量介绍比较新的、实用的内容,并引入必要的程序实例说明。在附录中给出了我们研制的、由四机部组织鉴定通过的小型计算机上的通用电路分析程序 GCAPN 的使用说明。

本书可作为大专院校有关专业师生的教科书或教学参考书,也可供从事半导体电路和电子线路设计的有关技术人员使用。

计算机辅助电路分析 ——算法和软件技术

洪先龙等 编著

清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

轻工业出版社印刷厂排版

北京海淀区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 850×1168 / 32 印张: 137/16 字数: 340千字

1982年9月第一版 1983年3月第一次印刷

印数: 1—25,000

统一书号: 15235·48 定价: 1.95元

前 言

计算机辅助电路分析(或模拟)技术是电路设计的有力工具,它对于研制一般电子线路设备及大规模集成电路所起的作用是人所共知的。目前越来越多的电子线路的设计师和集成电路设计工作者重视和使用这门技术,并且在实际使用中取得了越来越显著的效果。

电路分析作为一门学科也已有较长的发展历史,随着电子工业的发展,特别是由于应用了电子计算机技术,其面貌焕然一新。国外有不少讲述电路分析的基本理论和方法的书,但都偏重于电路或者网络理论。有些书讲述计算机辅助电路分析方面内容,但也都侧重于基本方法,对于电路分析程序中遇到的实际问题,特别是由于大规模集成电路发展所带来的问题,例如非线性分析、大稀疏网络、刚性常微分方程等问题,缺乏实用的解决方法。作为一个应用软件,描述语言和软件技术在电路分析程序中也是不可忽视的内容,而介绍这方面的书几乎没有。国内出版的几本这方面的书也是如此。

本书将着重介绍计算机辅助电路分析中的算法和软件技术,包括自动建立电路方程技术、线性分析方法的稀疏矩阵技术、非线性分析技术、数值积分技术、灵敏度分析方法、非线性元件模型的处理、电路分析程序的数据结构、编译技术和软件结构等。书中尽量介绍比较新的、实用的算法和技术,并且以在计算机上实现为原则。必要时引入程序实例说明。

为了使读者能深入掌握较新的算法,在每章开始都简单地介绍各章有关的基础知识,在每章后面都列出有关参考书籍和文献。书中的程序实例大部分是用 FORTRAN 语言编写的,少量

是用BASIC语言写的，且都已在DJS-130机上运行通过。

为了掌握本书内容，读者应具备线性代数、计算数学、BASIC和FORTRAN算法语言的基本知识，以及电路理论方面的基础。

参加全书编写的有洪先龙（第一、四、五、九章）、孙家广（第二、八章）、吴启明（第六、七章）、王泽毅（第三章）和柳西玲（第九章）。由洪先龙负责主编。

本书有部分内容是编者研制的通用电路分析程序GCAP的经验总结，它的小型机版本GCAPN已运行于DJS-130机和NOVA机上，并已经由四机部组织鉴定通过。为了使读者有可能利用GCAPN进行实践的机会，本书最后附有三个附录，给出了GCAPN的使用和上机方法。

在编写过程中得到了系和教研室同志的积极支持。我校电工教研室肖达川教授、孙树勤付教授、夏仁平同志对本书初稿进行了仔细的审阅，提出了很多宝贵意见。在此，仅致以衷心的感谢。

由于我们水平有限，因此书中一定有不少错误和不妥之处。殷切希望读者批评指正。

编者

一九八一年七月 于清华大学

目 录

第一章 概述	(1)
§1 什么是计算机辅助电路分析	(1)
§2 电路分析的基本内容	(6)
§3 计算机辅助电路分析发展概况	(13)
§4 电路分析程序GCAP与SPICE简介	(16)
第二章 电路方程的自动建立	(21)
§1 自动建立电路方程的理论基础	(21)
一、引言	(21)
二、网络拓扑的基本定义	(22)
三、基本关联矩阵 A_i 及其基尔霍夫定律表达式	(25)
四、基本回路矩阵 B_i 及其基尔霍夫定律表达式	(31)
五、基本割集矩阵 C_i 及其基尔霍夫定律表达式	(34)
六、 A_i 、 B_i 、 C_i 之间的关系	(37)
§2 自动建立电路方程的常用方法	(38)
一、节点法	(38)
二、状态变量法	(47)
三、稀疏表格法	(56)
四、改进节点法	(60)
第三章 线性直流分析的数值方法——稀疏矩阵技术	(71)
§1 线性代数方程组解法——Gauss消去法及LU分解法	(71)
一、Gauss消去法	(72)
二、LU分解法	(78)

§2 电路方程的特点及稀疏矩阵技术引入的必要	(80)
§3 稀疏矩阵存贮技术及GCAP存贮结构	(82)
一、连接表法	(83)
二、连续连接表法	(84)
三、函数计算存贮格式	(86)
四、双重连接表法	(87)
五、结构对称化存贮	(89)
§4 填入及其极小化方法	(91)
一、什么叫填入	(91)
二、填入的确定	(93)
三、填入极小化方法	(98)
四、GCAP中的予排序方法	(102)
五、无检索的消去过程	(106)
§5 稀疏矩阵技术的其它方面	(107)
一、确定主元序列的其它方法	(108)
二、逆的因子分解形式	(113)
三、主容限法及其它	(115)
四、关于参考节点的选取	(117)
§6 有关解精度的一些问题	(118)
一、范数及浮点运算的舍入误差	(118)
二、精确度的检验	(121)
三、线性代数方程组的性态	(121)
四、矩阵的条件数	(122)
五、舍入误差的影响	(124)
六、提高精确度的措施	(126)
§7 复系数方程组的处理	(127)
§8 适用于大网络的一些方法	(130)
一、块消去法	(130)

二、撕裂法	(122)
三、并行算法	(125)
第四章 非线性分析数值方法	(142)
§1 简单迭代法	(143)
§2 牛顿-拉夫森方法	(144)
§3 用牛顿-拉夫森方法进行非线性元件的 线性化	(148)
§4 割线法	(152)
§5 收敛性	(154)
§6 改进牛顿-拉夫森方法	(157)
§7 简单限界算法	(159)
§8 阻尼法	(162)
§9 高阶校正法	(166)
§10 成组算法	(168)
§11 源步进法和伪瞬态法	(172)
§12 初值予估算算法	(174)
§13 小结	(175)
第五章 瞬态分析数值方法	(180)
§1 向前欧拉算法	(182)
§2 向后欧拉算法	(183)
§3 多步积分法	(185)
§4 局部截断误差和稳定性	(186)
§5 稳定区域	(191)
§6 稳定性和Stiff方程组	(193)
§7 局部截断误差准则	(195)
§8 局部截断误差的估计	(195)
§9 梯形方法	(198)
§10 Gear算法	(199)
§11 Gear-2方法	(214)

§12 龙格-库塔法 (Runge-Kutta)	(204)
§13 隐式 A 稳定的 Runge-Kutta 法	(205)
§14 各种隐式积分法的局部截断误差比较	(206)
§15 向后差分方法-BDF 法	(209)
§16 离散电路模型(伴随模型)	(214)
一、电容的离散电路模型	(214)
二、电感的离散电路模型	(217)
§17 迭代次数控制步长方法	(218)
§18 利用截断误差估计下次步长	(219)
§19 变阶变步长的 Gear 积分法	(221)
§20 BDF 方法的变阶变步长处理	(229)
§21 小结	(231)
第六章 灵敏度分析	(233)
§1 前言	(233)
§2 增量网络法	(235)
一、线性网络灵敏度的增量网络法	(235)
二、非线性网络的增量网络的构成	(243)
三、增量网络法的时域灵敏度分析	(247)
§3 伴随网络法	(250)
一、Tellegen 定理	(250)
二、伴随网络的构成	(253)
三、线性网络灵敏度的伴随网络法	(259)
四、非线性网络灵敏度的伴随网络法	(265)
第七章 电路元件的数学模型	(270)
§1 前言	(270)
§2 线性元件	(272)
一、无源元件的瞬态等效模型	(273)
二、无源元件的交流等效模型	(276)
三、电压源和电流源	(276)

§3 二极管与双极型晶体管的数学模型	(278)
一、二极管模型	(278)
二、双极型晶体管模型	(282)
§4 MOS晶体管的数学模型	(296)
一、MOS晶体管的直流等效模型	(299)
二、MOS晶体管的瞬态模型	(301)
三、MOS晶体管模型的修正	(304)
四、MOS晶体管的小信号模型	(307)
五、MOS晶体管模型参数	(308)
§5 结型场效应晶体管的数学模型	(310)
第八章 电路描述语言	(319)
§1 电路描述语言的设计要求	(329)
§2 固定格式的电路描述语言	(321)
§3 自由格式的电路描述语言	(328)
一、引言	(328)
二、源程序结构	(328)
三、描述电路拓扑和元件的语句	(331)
四、控制执行和修改语句	(336)
五、GCAP电路描述语言简介	(338)
§4 交互式的电路描述语言	(340)
一、交互式电路描述语言的功能和构成	(340)
二、交互式电路描述语言的命令处理	(342)
三、交互式电路描述语言的使用	(347)
第九章 电路分析软件技术	(351)
§1 数据结构	(351)
一、链状结构	(352)
二、数组结构	(354)
三、树形结构	(356)
§2 电路描述语言的编译	(359)

一、固定格式输入语言的编译	(359)
二、自由格式电路描述语言的编译	(362)
(一) 字符表的建立和输入	(362)
(二) 拼数	(366)
(三) 名字的映象	(372)
(四) 取字符和存字符	(376)
(五) 语义处理程序	(377)
(六) 语法检查	(380)
(七) GCAP编译流程图	(381)
§3 软件结构	(382)
一、模块结构	(383)
二、模块间的联系方式	(384)
三、多种装配方案	(385)
附录 I GCAP电路分析语言的使用	(387)
附录 I GCAPN上机操作和有关限制	(487)
附录 II GCAPN电路分析语言错误信息表	(417)

第一章 概 述

§1 什么是计算机辅助电路分析

电路设计师在设计完电路后，总要进行校验。校验的方法无非是用物理的或数学的两种方法。在没有计算机时，人们用“纸和笔”的方法来进行数学模拟。先在纸上画出电路草图，标出有关信息和数据，然后根据基尔霍夫电压定律（KVL）、电流定律（KCL）和欧姆定律在纸上列出方程式，并借助于计算尺或计算机手工进行求解，根据解得的结果检验设计的正确性。由于要靠人工求解，因此“纸和笔”的方法有下列限制：

1. 电路要比较简单，否则人工计算有困难。
2. 元件类型也要比较简单。
3. 计算精度有限。
4. 当要重复计算时，时间太长。

另一种检验的方法是“实验装置板”方法，这是一种物理模拟的方法。即在实验装置板上按设计草图搭接一个实验电路，并通电进行实验。然后利用电表和示波器来测量电路性能，以此来检验设计的正确性。这种方法对设计一般电子、电工电路还是有效的。目前，它仍然是作为我们的检验方法之一。但它有下列限制：

1. 实验时间太长，特别是要作多种方案和元件参数的比较实验时尤其突出。
2. 要获得精确的元件值有困难，因此实验的精度不高。
3. 不能进行破坏性或边缘状态的实验，例如无法做高温、高压等条件下的电路运行状况的实验。

4. 容差和最坏情况分析有困难。

当进行大规模集成电路的设计时，已无法在实验装置板上搭接实验电路。一个包含有几千个甚至上万个晶体管、电阻和电容等元件的大规模集成电路，可以制作在几个平方毫米或者十几个平方毫米的硅片上。⁵ 而用实验装置板搭接出来的电路（如果能搭接的话！）也与实际电路差别太大，失去了物理模拟的意义。

随着电子工业的发展，特别是大规模集成电路的发展，电路设计越来越复杂，对设计的可靠性也要求越高，原来的“纸和笔”的方法和“实验装置板”的方法已不能适应，急需要解决电路设计的检验问题。

随着电子计算机的出现和计算技术的发展，利用计算机进行电路的数学模拟不但成为必要，而且有了可能。计算机辅助电路模拟也叫计算机辅助电路分析，它将要模拟的电路的数学问题编制成程序并利用计算机求解。由于计算机运算速度快、精度高，解决了“纸和笔”方法所不能解决的问题。它又不受破坏性条件的限制，可以进行各种破坏性条件的模拟，因此它也能解决“实验装置板”方法所不能解决的问题。目前，它已成为电路设计师有力的工具，被广泛地应用在大规模集成电路和一般电子线路的设计中，取得了显著的效果。

计算机辅助电路分析是一种“分析”或者“模拟”工具，它不是“设计”工具。它要求设计师先设计好电路，画出草图并标上相应信息和参数，然后将所设计的电路结构、元件参数等送入计算机，由计算机进行求解并输出结果，最后由设计者自行去判断电路的正确性。它不能代替人的设计工作，只是帮助人们去检验设计的正确性。目前，除了个别专门类型的电路以外，还不能用计算机进行电路的自动设计和最佳设计，此项工作还在研究中。

电路设计的过程可用图1.1.1来表示：

开始用计算机进行电路分析时，只是根据具体电路编制一个

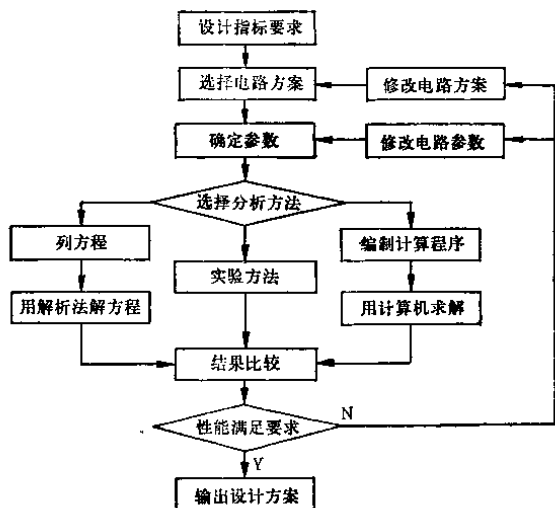


图 1.1.1 电路设计流程图

分析此电路的程序进行计算。当要分析另外电路时，又得重新编制分析程序。通常，要分析一个电路至少要作如下几方面工作：

第一步，对电路中各种元件建立数学模型，即要用数学公式去描述元件的电流电压特性及其与物理参数的关系。例如一个电阻值为 R 的电阻，其两端电压与电流关系可用

$$V=IR$$

表示。而一个二极管（如图1.1.2所示），其两端电压与流过二极管的电流之间的关系可用我们所熟知的下述公式表示：

$$I_D = I_S (e^{V_D/V_T} - 1)$$

其中 I_S 为反向饱和电流， V_T 为热电压。

第二步，建立电路方程。通常用人们所熟知的基尔霍夫电流

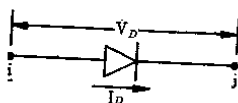


图 1.1.2 二极管示意图

定律(KCL)、基尔霍夫电压定律(KVL)和欧姆定律等来列方程。如图 1.1.3 所示的这样一个简单的电路，用上述这些定律可列出如下的代数方程组：

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) V_1 - \frac{1}{R_2} V_2 = \frac{E}{R_4} \\ -\frac{1}{R_2} V_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) V_2 = 0 \end{cases}$$

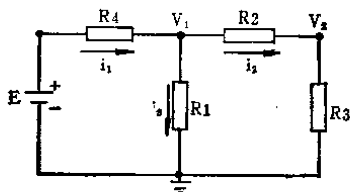


图 1.1.3 由电阻和电压源组成的简单电路

第三步，求解方程。这要涉及到线性代数方程组的求解方法、常微分方程组的求解方法和非线性代数方程的求解方法。

从上面看到，要分析一个电路，至少要进行上述三步，并要编制程序上机。这是一个工作量很大的事情，并且涉及到电路理论、计算数学、程序设计和半导体器件物理等方面的专业知识。要每个电路设计师自己去做上述这些工作，显然是效率低和不值得的。因此要进行计算机辅助电路分析就必须要有“通用”的电路分析程序。

一个通用的电路分析程序，最基本的要能对各种电路自动建立电路方程，然后求解方程并输出所需的结果。另外，程序中应备有元件的数学模型或允许用户自行定义数学模型。这样，设计师要分析一个电路时，只要将电路的结构和元件参数输入到计算机中，分析程序就能自动地进行分析，而不需要设计师自己去编程序。这里“通用”的含义是指“自动列方程，求解方程并输出等功能”，是相对于最初的只为一个电路而用的程序而言的。目前，除了能分析各种类型器件、各种性质的电路的通用分析程序以外，也有专为一类器件，如 MOS 晶体管、双极型晶体管等电路进行分析的“专用”电路分析程序，也有只能分析线性电路的线性电路分析程序等。这些电路分析程序，从自动列方程、解方程这些基本特点上是一样的。

为了方便电路设计师使用分析程序，能以比较直观而又简洁的方式表示要分析的电路的结构和元件参数，电路分析程序有必要向用户提供专为描述电路结构和元件参数的“电路分析程序的

输入语言”或者叫作“电路描述语言”。用户要进行电路分析时，只要用这个语言写出自己的电路结构和元件参数，指明分析类型和输出要求，

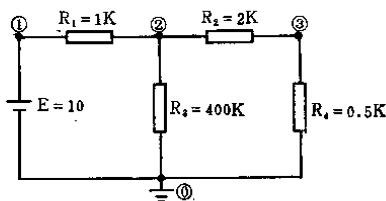


图 1.1.4 简单电路例子

就能进行他所需要的分析。只有此时，电路分析程序才能成为电路设计师有力的助手。如图1.1.4这样的电路，其电路结构和元件参数可描述成下面形式：

$$R1, 1-2=1K$$

$$R2, 2-3=2K$$

$$R3, 2-0=400K$$

$$R4, 3-0=0.5K$$

$$E, 1-0=10$$

这样的表示方式对电路设计师是很直观的，且易于学习和记忆。用户使用电路分析程序的大致步骤如图1.1.5所示。

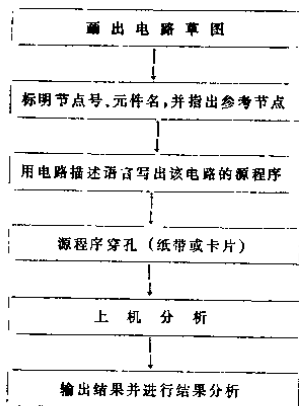


图1.1.5 使用电路分析程序流程图

§2 电路分析的基本内容

不同性质的电路网络，其要分析的内容不完全相同，分析的方法也不一定相同。从网络包含的元件类型划分，有电阻性网络和动态网络之分，前者不包含像电容或电感这样的贮能元件，而后者则一定包含有这样的贮能元件。从元件性质划分，又可分为线性网络和非线性网络。进一步的还可分成是MOS（金属-氧化物-半导体）晶体管类的电路和双极型晶体管类电路等。各种类型网络需要解决的电路分析问题可大致归纳成表1.2.1所示。

表1.2.1中所有的分析中，最基本的分析是直流（DC）、交流

表 1.2.1

各种网络的电路分析问题

网 络 类 型	要 分 析 的 问 题
1. 线性电阻网络和线性动态网络	(1) DC分析 (求线性电阻网络的直流解) (2) AC分析 (求线性动态网络的频率特性) (3) 瞬态分析 (求线性动态网络的瞬态特性) (4) 噪声分析 (把噪声源作为输入求AC解或瞬态解) (5) 容差分析 (灵敏度和最坏情况分析)
2. 非线性电阻网络	(1) 工作点分析 (求非线性电阻网络的直流解) (2) 驱动点特性的确定 (求驱动点电流和电压之间关系) (3) 传递特性确定 (求输出电压、电流作为输入电压、电流的函数关系)
3. 非线性动态网络	(1) 初始条件、偏置或平衡状态分析 (把所有电容开路, 电感短路时求工作点) (2) 瞬态分析 (求在用户或程序指定的初始条件下, 有或没有输入情况下的输出波形) (3) 稳态分析 (求有或没有输入情况下的稳态周期解)

(AC) 和瞬态 (TR) 分析。其它的分析问题都是在这三种分析的基础上进行的。

一个好的通用电路分析程序大体上由五个部分组成: 输入、器件模型处理、列方程、数值解和输出。本节只是简略地叙述每个部分的功能和处理内容, 以便使读者对电路分析程序的轮廓有个初步的了解, 更详细的内容将在以后各章中分别叙述。

一、输入

一个好的电路分析程序应具有一个供用户直观地描述电路结构和元件参数的输入语言, 此输入语言也叫做“电路描述语言”。用户用电路描述语言将要分析的电路写出源程序, 并穿孔在纸带或卡片上, 然后将纸带或卡片输入到计算机中, 由输入程序或叫做电路描述语言的编译程序进行加工处理。一个好的输入语言和编译程序应具有以下功能:

1. 能识别和处理由字母和数字等组成的“自由格式”语句