

计算机辅助电路设计 系统理论及其应用

杨绍祺 编著

科学出版社

计算机辅助电路设计

系统理论及其应用

杨绍祺 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书着重介绍非线性电路的计算机辅助设计理论和方法。全书共十二章，前六章为基础部分，包括线性电路的计算机辅助分析、图论及其在计算机辅助电路设计中的应用、元器件模型、非线性电路直流和瞬态分析。其余六章的内容包括刚性常微分方程组的数值积分方法、非线性电路方程组解法、稀疏矩阵计算方法、灵敏度分析、优化电路设计和计算机辅助电路设计方法。

本书可供计算机、无线电、自动化、大规模集成电路设计方面的科技人员、教员、研究生和学生参考。

计 算 机 辅 助 电 路 设 计

系统理论及其应用

杨绍祺 编著

责任编辑 黄岁新 唐友群

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

序

计算机辅助电路设计是五十年代发展起来的一门新学科,涉及计算数学、现代物理学和计算机科学等若干分支,因而,是一门综合性学科。随着集成电路的飞速发展,计算机辅助电路设计的重要性显得日益突出。有不少科技人员正在研究有关的算法、元器件模型和系统软件,并应用它们解决科研与生产问题,计算机辅助电路设计系统已成为电路设计人员的有力助手。很多同志希望了解计算机辅助电路设计问题,有些同志甚至希望亲自解决科研生产中碰到的实际电路设计问题。但是,这些问题绝大多数是非线性电路设计问题,求解这类问题的有效算法又都分散在大量文献之中,因此目前急需有一本全面系统论述这方面内容的读物,本书就是在此情况下写成的,希望它能对读者了解和掌握有关的知识发挥一定作用。著者力图由浅入深地介绍非线性电路的计算机辅助设计理论、方法和应用。

全书共十二章,前六章介绍计算机辅助电路设计的基础知识,其余六章介绍有关的算法和优化电路设计问题。第一章介绍计算机辅助电路设计的简要历史、算法综述、电路分析系统原理。第二章介绍叠加法、广义节点法和计算机建立广义节点方程组的原理。第三章介绍图论及其在计算机辅助设计中的应用。第四章介绍二极管、晶体管、MOS管的直流和瞬态电路模型。第五章介绍非线性电路直流方程组的建立方法、计算机建立相应的广义 Newton-Raphson 方程组的原理和解这类方程组的比较有效的方法。第六章除把第五章的结果推广到瞬态分析问题之外,还介绍了传输线的瞬态分析、变阶算法和 LU 分解法。第七章讨论求解刚性电路方程组的数值积分方法。第八章讨论伴随网络及其在直流、频域、时域和非线性电路灵敏度分析中的应用。第九章介绍广义 Newton-Raphson 方法的基本理论、变换算法、变阶算法和组合算法。第十章讨论稀疏矩阵计算方法。第十一章研究优化电路设计问题和有关的算法。第十二章介绍计算机辅助电路设计系统及其应用。

阅读本书需要微积分、线性与非线性代数、电学和程序设计方面的基本知识。凡具有这些知识的读者,读完前六章便可着手利用计算机来辅助设计自己的电路。除第一章和第十二章外,每章后面均有习题,以帮助读者加深理解和应用所学得的知识。书末附有参考文献,供读者进一步学习和研究时查阅。著者希望本书能对从事计算机辅助电路设计的广大科技人员、教员和学生有所帮助。但是,由于这个领域发展十分迅速,应用相当广泛,著者深感自己学识浅陋,经验不足,且写作时间仓促,书中一定有不少缺点错误,恳请广大读者批评指正。

杨乔林同志与著者合作,在国内较早地开展了计算机辅助电路设计方面的研究工作,研制了电路分析系统 DFX-1 和 DFX-2,之后,著者又开发了 MOS 电路分析系统 DFX-MOS-1 和 DFX-MOS-2。这些系统都先后成功地用于科研生产。夏武颖和仇玉林、赵玉珂、侯秀芝等同志,分别在晶体管模型、MOS 器件模型和模型参数的测试方面提供了许多帮助。本书是科学出版社与杨乔林和著者作为该领域科研工作总结的约稿,我们合写了章节目录和内容提要的初稿,但由于杨乔林同志出国工作,未能参与此后的写作工作。本书是以著者在中国科学院研究生院授课时的讲义为基础写成的。在编写上述讲义时,著者参阅了杨乔林同志 1979 年在中国科技大学研究生院授课时的“计算机辅助电路设计”讲义。在写作过程中,著者得到了中国科学院计算技术研究所和研究生院许多

• i •

同志的热情鼓励与帮助。袁军同志给予了热情的支持与帮助，校阅了全稿，提出了宝贵意见。冯学忠同志校阅了部分原稿，提出了宝贵意见，并与著者一道，在中国科学院计算技术服务社举办的讲习班上，向来自全国各地的同行们作了介绍。参加讲习班的全体同志和研究生院的师生，也对原稿提出了宝贵意见。谈根林同志审阅了全稿，提出了宝贵意见。著者在此向给予热情支持、鼓励、帮助和合作的同志们表示深切的谢意。

杨 绍 祺

1982年夏于北京

目 录

序	i
第一章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 计算机辅助电路设计方法	2
1.3 计算机辅助电路设计中的计算方法	6
1.4 电路分析系统	8
1.5 结语	10
第二章 线性电路分析方法	11
2.1 线性电路元件的数学模型	11
2.2 线性电路的节点分析法	13
2.3 广义节点分析法	16
2.4 计算机建立广义节点方程组	20
2.5 线性代数方程组解法	26
2.6 列主元素消去法程序 (CPG)	29
2.7 交流稳态分析	31
习题	33
第三章 图论与网络方程	36
3.1 图论基本概念	36
3.2 网络的矩阵表示	39
3.3 克希霍夫电流律 (KCL) 和克希霍夫电压律 (KVL) 的矩阵表示及其相关性	46
3.4 网络方程的几种形式	48
3.5 结语	61
习题	61
第四章 元器件模型	64
4.1 贮能元件模型	64
4.2 二极管电路模型	65
4.3 晶体管电路模型	67
4.4 MOS器件电路模型	75
习题	79
第五章 非线性电路直流分析	81
5.1 非线性电路直流方程组	81
5.2 非线性代数方程组解法	83
5.3 伴随模型法	86
5.4 计算机建立广义N-R方程组	92
5.5 改进的广义N-R迭代法	96
5.6 非线性电路直流分析程序流程	98
5.7 结语	98

习题	99
第六章 瞬态分析	101
6.1 问题描述	101
6.2 刚性常微分方程组解法	107
6.3 贮能元件的伴随模型	112
6.4 伴随模型法与瞬态分析	115
6.5 传输线的瞬态分析	120
6.6 变阶算法	127
6.7 LU分解法	128
6.8 结语	132
习题	132
第七章 电路分析中的数值积分方法	135
7.1 数值解的多项式近似	135
7.2 对多步积分方法的约束条件	138
7.3 几种多步数值积分方法	140
7.4 多步数值积分方法的稳定性	146
7.5 刚性常微分方程组的数值积分	152
7.6 多步积分方法的绝对稳定区	156
7.7 自动变阶变步长的多步算法	165
7.8 多步积分法的应用	173
7.9 结语	176
习题	176
第八章 灵敏度分析与应用	178
8.1 引言	178
8.2 泰勒根定理	181
8.3 直流灵敏度分析	184
8.4 频域灵敏度分析	194
8.5 时域灵敏度分析	201
8.6 非线性电阻网络的灵敏度分析	207
8.7 灵敏度分析的应用	209
习题	214
第九章 非线性电路方程组解法	217
9.1 N-R方法	217
9.2 广义N-R方法	220
9.3 变换算法	222
9.4 解非线性电路方程组的算法簇	226
9.5 组合算法	233
9.6 结语	243
习题	243
第十章 稀疏矩阵算法	244
10.1 引言	244
10.2 消去法与矩阵分解法之间的关系	245

10.3	选主元	249
10.4	存贮方法	256
10.5	综合稀疏矩阵算法	261
10.6	算法分析	267
	习题	269
第十一章	优化电路设计	271
11.1	问题描述	271
11.2	无约束优化	273
11.3	约束优化问题	290
11.4	最大最小优化	294
11.5	优化电路设计例子	297
11.6	结语	303
	习题	304
第十二章	计算机辅助电路分析系统及其应用	305
12.1	电路描述语言	305
12.2	电路分析程序原理	307
12.3	双极型电路的计算机辅助分析与设计	309
12.4	MOS电路的计算机辅助分析与设计	317
12.5	结语	322
参考文献		324

第一章 概 论

1.1 引 言

随着电子计算机的飞速发展,计算机辅助设计的领域也在日益扩大,不断发展。目前,在汽车、飞机、船舶、电子等工业技术领域中,都通过使用计算机辅助设计,来缩短生产周期、节约原材料、节省人力、降低成本、提高产品合格率。单就电子工业中的计算机辅助大规模集成电路研制而言,其内容就有:逻辑模拟与划分、电路性能分析与参数优化、自动布局布线、版图设计自动化和自动测试等,内容十分丰富。由于篇幅所限,本书仅介绍计算机辅助电子线路设计系统的理论和方法。

早在第一批电子计算机问世不久,科学家们就开展了计算机辅助电子线路的分析与设计研究工作。在五十年代,人们开展了用计算机设计滤波器的研究工作。线性滤波器就是计算机最早设计成功的一种电子线路。但是,在1960年以前,这方面的研究工作都是采用传统的科学计算的方式进行的。

1961年诞生了第一个求解电路方程的程序,叫SPARC。使用这个程序分析电路时,电路设计工程师必须先推导出电路方程,然后,才能用它求解。1962年,有人研制出一个预先处理程序SCAN。这个程序能自动建立电路方程。SCAN与SPARC合起来,便成了最早的电路分析系统程序之一。

1962年,美国IBM公司发表了一个名叫TAP (Transistor Analysis Program)^[1]的电路分析程序。此后,很快出现了一批第一代的电路分析程序。例如,NET^[2],ECAP, CONNAP等等。

在第一代电路分析程序中,存在的主要缺点是:

- (1)对多数非线性电路,直流分析不收敛,也就是算不出这些电路的直流工作点。
- (2)瞬态分析相当费时,特别是对所谓的“刚性”电路,即最大时间常数与最小时间常数相差很大的电路,瞬态分析花费的时间,往往达到惊人的程度^[3]。
- (3)这些程序用的是满矩阵方法求解线性代数方程组。大家知道,满矩阵方法需要的存贮容量和乘除法运算量,分别大约与 n^2 、 $\frac{1}{3}n^3$ 成正比(这里, n 是线性代数方程组的阶数)。因此,大大地限制了可解问题的范围。

(4)器件模型,尤其是半导体器件模型,精度不够,也没有建立器件模型库。因此,影响计算结果的精度,不便于推广应用。

(5)电路描述语言的功能较差,书写时容易出错,不好检查,也妨碍推广应用。

经过十多年的研究,在所有这些方面都取得了重大进展,尤其在非线性电路方程组解法、刚性常微分方程组的积分方法和稀疏矩阵计算方法等方面取得了突破之后,出现了一批解题能力较强的计算机辅助电路设计系统,如ASTAP, AOP, AOP-VO, SPI-CE, DFX-3等等。

由于这些系统的出现,计算机辅助电路设计得到了日益广泛的应用,从工业高度发

展的美国,到第三世界的若干国家,从世界上最大的计算机公司——美国IBM公司,到瑞典的商用电器公司,都广泛使用计算机辅助电路设计。

可以预言,随着超大规模集成电路的发展,计算机辅助电路设计,必将成为计算机辅助设计计算机的关键环节之一。

1.2 计算机辅助电路设计方法

大家知道,要设计一个电路,总是从电路的性能指标出发,先大体选择方案,决定电路结构,然后,逐步地进行精细设计。

在方案选择阶段,人们一方面要分析电路的性能指标,收集整理各种电路资料,初步选择电路结构与方案。同时,还须对选出的方案进行必要的分析和计算,以便比较各初选方案的基本性能,进一步选出较好的方案。

在精细设计阶段,要确定电路的直流工作点、功耗范围、电路的瞬态响应、频率响应和其他特性;调整电路中的元器件参数,使电路性能达到最佳等。此外,在正式投产前,厂方还想知道电路性能指标的分布情况,也就是不同的电路结构、元器件参数等,对电路性能影响的统计分析结果,以便把握生产过程中的关键环节,确保产品质量。

从前,方案选择主要是靠电路设计者的经验;精细设计,往往要借助电路实验。即在电路实验板上,使用分离的电路元件,焊成要设计的电路,然后进行测试,看它是否符合设计要求。一般来说要反复地更换元器件,反复地进行测量,才能得到一个较好的方案。

电路实验方法有两个显著的缺点:元器件和其他材料消耗大;电路设计周期长,因而,人力的浪费更大。当然,在设计电子管电路、分离元件的晶体管电路时,这种方法还是可行的。但在设计集成电路,特别是大规模集成电路时,便会遇到一些难于克服的困难。首先,就单个的元件来说,集成元件的参数与分离元件的参数之间,往往有很大的差别,因此,用分离元件代替集成元件后,电路性能往往有显著变化。其次,集成电路的一些特性,如寄生效应,用分离元件是很难模拟的。此外,用分离元件进行容差设计、统计分析等,更是困难重重。

在电路的方案选择和精细设计阶段,应尽可能地用理论计算方法。但是,过去在理论计算方面的困难也是不少的。首先,在一般的电路中或多或少都包含有非线性元件,因而,描述这种电路的方程组含有非线性方程,特别在瞬态分析中,电路方程组是由线性与非线性的微分-代数方程组成的混合方程组,用人工方法求这类方程组的精确解,是极其困难的。过去,人们遇到这种问题时,若电路规模较小,便使用精度很差的图解法;对规模较大的问题,没有别的方法,只好用精度更差的方法,即用线性元件近似非线性元件,因而,分析结果是极其粗糙的,还要用电路实验方法来验证。其次,即便是线性电路,若规模较大,例如,对含有100个电路节点、数百个电路元件的电路,要用人工方法准确无误地写出描述它的电路方程组,并求得它的数值解,也不是轻而易举的。而且,如初步分析的结果表明,电路的结构要作一些改变,那么,还得重新推导和求解电路方程组,因此,手工计算的实际效果是很差的。

计算机的发展,为电路的自动分析和自动设计提供了物质基础,如前所述,人们开

始用计算机分析电路时,用的是半自动的方法,即人工推导电路方程,编制计算分析程序,而后用计算机求数值解。半自动的分析方法比手工分析方法进了一大步,但是,和手工分析方法一样,当电路结构需要改变时,电路方程组又要部分地,甚至全部地重新推导,其后的工作也要作相应的改变,因此,半自动分析方法的效率仍是很低的。

怎样提高电路分析的效率呢?大家知道,电路的种类是相当多的。从大的方面讲,有双极电路、MOS电路、双极MOS混合电路;在双极电路中,有ECL、TTL、 I^2L 等性能相差很大的电路;同是ECL或TTL电路,还有放大器、触发器、寄存器等区别。但是,这些电路有一个共同点,即它们都是由一些基本元件构成的,如电阻、电容、电感、二极管、晶体管、MOS管,以及各种电压源和电流源等,总之元件种类是有限的。而且,用这些基本元件联结起来,构成一定的电路时,要满足一些约束关系——克希霍夫电流定律和克希霍夫电压定律。根据上述共同点和约束关系,以及计算方法和计算机软件方面的其他成果,可用计算机自动建立并求解电路方程组,实现电路分析的完全自动化。

这里,我们利用电路分析系统DFX-3,扼要说明如何自动分析电子线路。

DFX-3是在DFX-1、DFX-2、DFX-MOS^[4-6]的基础上发展起来的。DFX-3是双极型晶体管电路和MOS电路分析系统。它使用了综合稀疏矩阵算法、自动变阶变步长的隐式数值积分方法^[5]和解非线性电路方程组的组合算法^[6],可以对数百阶的电路进行直流分析、输入-输出特性分析和瞬态分析,具有简便、易学的电路描述语言。因此,这个系统具有比较高的解题效率。

用户利用它的电路描述语言,可向机器提供他所设计的电路的结构、元件种类、元件参数值;提出分析要求,即提出是做直流分析、输入输出分析,还是瞬态分析,或者这三者的任意组合?说明要输出哪些节点电压,输出哪些曲线等。下面举两个简单的例子。

例1.1 图1.1中的电路,是个简单的晶体管电路,但它含有反馈,所以,手工分析比较困难,但用电路分析系统进行分析,却很容易。对这个电路,用DFX-3的电路描述语言,编出的电路源程序,如表1.1所示。现对该程序中的各语句作简要介绍。

在表1.1中,“#TT:”是电路代号语句,其后的“CWFB”即为图1.1所示电路的代号;“#OP:”是分析要求语句,其后的“DC”表示要求作直流分析;“#GN=”是参考节点说明语句,其后的“4”为图1.1所示电路的参考节点号;“#TP=”是电路工作温度说明语句,其后的“25”表示电路工作在25°C;“#ET:”是电路描述语句,除非线性元件的参数用另一语句给出外,电路的结构,元件种类和其他元件的参数,都在这句中给出。电阻语句“R1:1—3=20;”说明一个名叫R1的电阻,连接在电路的1号和3号节点之间,其阻值为20kΩ。所有以R开头的语句,均为电阻语句,单位都是千欧姆。QN是n-p-n晶体管的代号,冒号后面的三个数,依次为搜集极节点、基极节

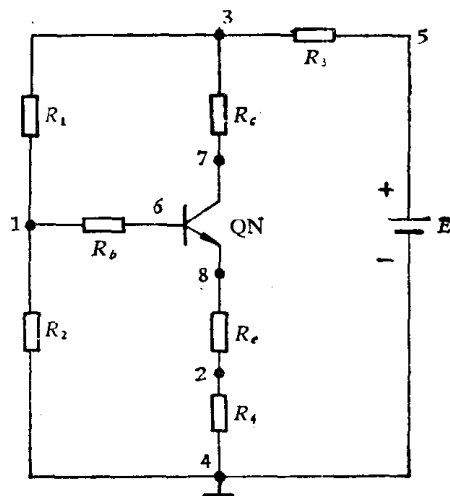


图1.1 简单的非线性电路

点和发射极节点的编号, 表 1.1 中的晶体管 QN, 依次连接在电路节点 7、6 和 8 上, 等号后面的“-8, 0.65”分别为 V_{BC} 、 V_{BE} 的迭代初值, 最后的“1”指出它的模型参数的组号, 与模型参数语句“#MQN1”中的“1”对应。这里, V_{BC} 、 V_{BE} 分别表示基极-搜集极和基极-发射极支路电压。“EDC: 5-4=23;”为直流电压源语句, 5 为电源的阳极, 4 为电源的阴极, 两极之间的电压差为 23V; 在“#MQN1=”后面的数, 是 1 号晶体管的模型参数, 这些参数包括饱和电流、电流放大系数, 以及瞬态分析时需要的结电容、扩散电容参数等; “#OT:”表格输出语句, 其后的 NV (1, 2, 3, 5) 表示要输出节点 1、2、3 和 5 的电压, BV ($i-j$) 表示要输出节点 i 和 j 之间的电压差。

表 1.1 图 1.1 所示电路的源程序

```
#TT: CWFB
#OP: DC;
#GN = 4;
#TP = 25;
#ET: R1:1-3 = 20;      R2:1-4 = 3;
      R3:3-5 = 3;      R4:2-4 = 0.047;
      RB:1-6 = 0.063;   RC:3-7 = 0.001;
      RE:2-8 = 0.00028; QN:7-6-8 = -8, 0.65, 1;
      EDC:5-4 = 23;
#MQN1 = 5.95-11; 8.9; 1.0826; 0.28; 3.8; 0.9;
        0.316; 1; 1; 0.5059-5;
        1.16-7; 10; 1.6; 10; 1.98; 0.9;
        0.156; 1; 1; 0.9863;
#OT: NV (1, 2, 3, 5); BV (7-3);
#END;
```

电路分析系统 DFX-3, 根据表 1.1 所示的电路源程序, 便可自动建立并求解图 1.1 所示电路的方程组, 而后, 输出计算结果, 如表 1.2 所示。

例 1.2 图 1.2 是 MOS 电路, 描述它的电路源程序如表 1.3 所示。这个源程序与表 1.1 所示的源程序十分相似。其中, “#OP:TS”, 表示要作瞬态分析; “#TM:” 是瞬态分析时间参数语句, DT=0.5, 表示基本时间步长为 0.5; NT=700, 表示从 0 ns 起, 分析到 700ns; “MN 1:5-5-2-7=5-4, 8-4, 3, 13, 3, 2;” 为 MOS 晶体管语句, MN 为 n-MOS 管的代号, 冒号后面的四个数, 依次为漏极、栅极、源极和衬底的节点编号, 等号后面的六个数, 依次为管子的沟道长度、沟道宽度、栅-源电压 V_{GS} 、源-衬底电压 V_{SB} 和漏-源电压 V_{DS} 的迭代初值以及其他参数的组号; “C1

表 1.2 图 1.1 所示电路的分析结果

节点	电 压
v 1	0.907375
v 2	0.209234
v 3	8.737260
v 5	23.000000

:1-6=3;”表示代号为 C1 的电容, 连接在电路节点 1 和 6 上, 电容值为 3pF; “EPS 1:9-6=12, 0.6, 0, 50, 150, 30, 100;”描述一个脉冲电压源, 它接在节点 9 和 6 上, 节点 9 为阳极, 节点 6 为阴极, 等号后面的数依次为脉冲源的高电平, 低电平, 起始时间, 上升时间, 平顶时间, 下降时间, 间隔时间; “#OC:”为曲线输出语句, X-TM, 表示横坐标是时间, Y-NV(1,12), 表示第一条曲线是节点 1 的电压随时间的

变化曲线。Z-NV(3,12) 表示第二条曲线是节点 3 的电压随时间的变化曲线, 12 是用户估计的这两点的电压的上限; “# RV:” 修改重算语句, 即要求将电路描述语句中给定的电路, 作本语句指定的修改, 而后重新分析一次。例如, “# RV:MN 7:(6)14-4;” 表示将MOS元件语句 “MN 7:1-9-2-7=5-4, 32-4, -8, 13, 0.1, 1 中的第6个数改为 14-4, 即将该语句改为 “MN 7:1-9-2-7=5-4, 14-4, -8, 13, 0.1, 1”, 而后再分析一次。

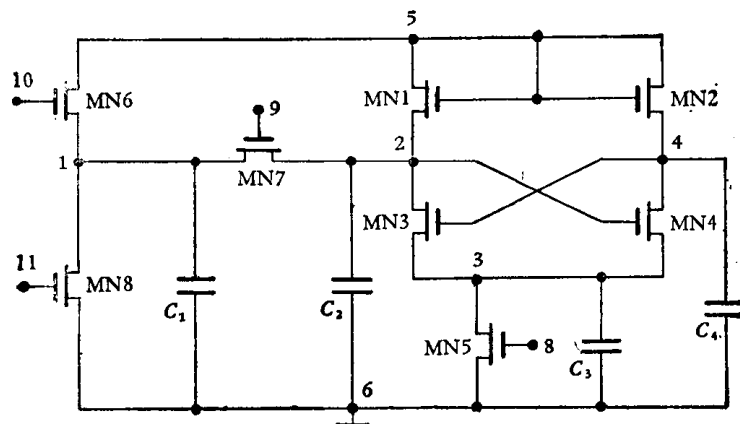


图1.2 WI电路

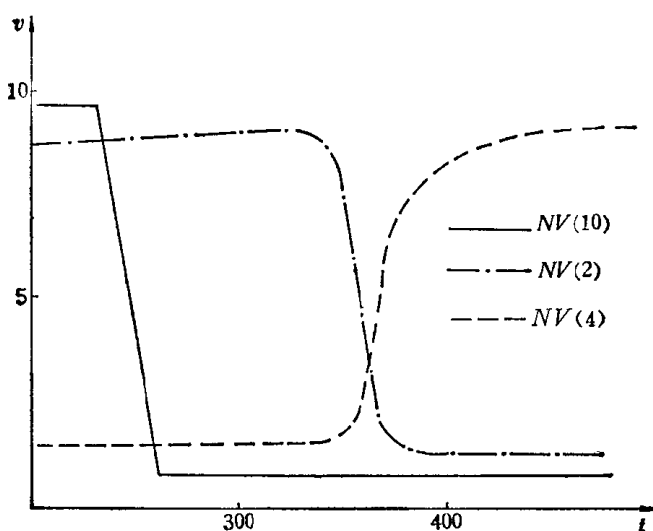


图1.3 WI电路的瞬态响应曲线

将表 1.3 所示电路源程序送入计算机后, 电路分析系统 DFX-3, 就可以自动地对这个电路进行瞬态分析, 它不仅输出类似于表 1.2 所示的节点电压值, 而且, 还绘出图 1.3 所示的瞬态响应曲线。

从这两个例子可以看出: 利用电路分析系统进行电路分析, 用户既不需要研究器件模型、推导电路方程, 也不需要研究有关的计算方法, 推导计算公式, 只要用电路描述语言编写电路源程序, 正确地给出元器件参数, 计算机就能自动地进行分析; MOS 电路和双极电路是两种性能截然不同的电路, 相应的分析程序也有很大不同, 但描述它们的电路源程序却十分相似。这既便于编译程序统一处理, 也便于用户掌握。

表1.3 描述WI电路的电路源程序

```

#TT:WI
#OP:TS,
#GN=6,
#TM:DT=0.5, NT=700,
#ET:MN1:5-5-2-7=5-4, 8-4, 3, 1.3, 3, 2,
    MN2:5-5-4-7=5-4, 8-4, 10, 6, 10, 2,
    MN3:2-4-3-7=5-4, 5-3, 1, 5, 8, 1,
    MN4:4-2-3-7=5-4, 5-3, 8, 5, 1, 1,
    MN5:3-8-6-7=5-4, 124-4, 8.5, 5, 0.3, 1,
    MN6:5-10-1-7=5-4, 140-4, -8, 13, 3, 1,
    MN7:1-9-2-7=5-4, 32-4, -8, 13, 0.1, 1,
    MN8:1-11-6-7=5-4, 94-4, 9.8, 5, 8, 1,
    C1:1-6=3,          C2:2-6=0.8,
    C3:3-6=0.04,       C4:4-6=0.88,
    EDC1:8-6=8.5,      EDC2:7-6=-5,
    EDC3:5-6=12,
    EPS1:9-6=12, 0.6, 0, 50, 150, 30, 100,
    EPS2:10-6=0.6, 9.8, 230, 30, 300, 30, 100,
    EPS3:11-6=9.8, 0.6, 230, 30, 300, 30, 100,
#MMN1=800-9, 2.979+4, 0.06, 0.55, 0.56, 6.5+4, 0.385-4, 11.7, 8.1+14, 0.28,
    2.085+4, 0, 7.45, 0, 0, 0.85, 0.5, 0, 0.85, 0.5,
#MMN2=680-9, 2.979+4, 0.118, 0.66, 0.58, 2.64+4, 0.385-4, 11.7, 1.17+15, 0.29,
    2.085+4, 0, 7.45, 0, 0, 0.85, 0.5, 0, 0.85, 0.5,
#OT:NV(1, 2, 3, 4),
#OC:(+ )X-TM, Y-NV(1, 12), Z-NV(3, 12),
#RV:MN7:(6)32-4,
#END,

```

1.3 计算机辅助电路设计中的计算方法

计算机辅助电路设计几乎涉及到计算数学的各个主要领域，诸如代数方程组、微分方程组、积分方程组解法，以及各种优化算法和概率统计方法。计算数学中有的重要分支，就是在研究电路分析问题提出来的，或在这一研究中得到了进一步的发展。如“刚性”常微分方程组的数值积分方法，在研究电路瞬态分析时得到了进一步的发展。稀疏矩阵计算方法，是在研究大电路分析时提出来的。因此，可以说，电路分析问题的研究工作，向计算数学提出了新的研究课题，而计算数学的发展，又推动着电路分析方面的研究工作不断地达到新高峰。

在这一节中，我们着重讲三方面的发展情况，即非线性电路方程组解法，电路瞬态分析方法和稀疏矩阵电路方程组解法。

1.3.1 非线性电路方程组解法

从数学上看，非线性电路方程组

$$F(x) = 0 \quad (1.1)$$

是一类非线性代数方程组。这里, $F: R^n \rightarrow R^n$ 是 n 维实数域内的向量函数, 由克希霍夫电流、电压律方程和电子元件的支路特性方程组成; x 是 n 维实数域内的向量, 由支路电压、支路电流和节点电压组成。

对方程组 (1.1), 人们最初用下述广义 Newton-Raphson 方法求解

$$x^{k+1} = x^k - F'(x^k)^{-1} F(x^k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2)$$

式中, F' 是 F 的雅可比矩阵, x^0 是解 x^* 的初始向量。这种方法对初始向量 x^0 的要求极严, 而且, 随着方程组阶数 n 的增大, 这一要求似乎越严。

数十年来, 人们为了放宽这一要求, 做了大量工作。阻尼法是最早提出的改进算法之一。

比较有效的算法还有电流校正法^[7]、变换算法^[8]、变阶算法^[9]和组合算法。这些方法, 我们将在以后逐渐介绍。

1.3.2 电路瞬态分析方法

电路瞬态分析问题可以归结为求解下述方程组

$$F(x, q, q', t) = 0 \quad (1.3)$$

式中, F 、 x 的含义和方程组 (1.1) 相同, q 是由电容电荷和电感磁通量组成的向量, $q' = \frac{dq}{dt}$, t 是时间自变量。求方程组 (1.3) 的数值解, 就是在每一时刻 t_m , 用适当的数值积分法把 q' 离散化, 然后, 利用电容电荷和电感磁通量的解析表达式, 将 (1.3) 化为

$$F(x(t_m)) = 0 \quad (1.4)$$

而后求解。

电路瞬态分析中最关键的问题是如何求解刚性方程组 (1.3)。实践证明: 对这类问题, 显式数值积分方法是不稳定的^[3], 而稳定的隐式数值积分方法, 主要是精度问题。尤拉向后积分法具有很好的稳定性, 但它的精度较低, 有时, 它以 0.001ns 为时间步长算出的结果, 不如梯形积分公式以 0.1ns 为时间步长算出的结果好^[7]。为有效地求解刚性电路瞬态分析问题, 人们做了大量工作^[10-19], 其中, 应用较多的是一、二阶的 Adams-Moulton 积分方法和 Gear 积分方法, 这些方法我们将在第七章中介绍。

1.3.3 稀疏矩阵计算方法

非线性电路分析问题, 需要反复地解

$$\Delta^{(k)} = F'(x^{(k)})^{-1} F(x^{(k)}) \quad (1.5)$$

式中, $\Delta^{(k)} = x^{(k)} - x^{(k+1)}$ 。记 $y = \Delta^{(k)}$, $A = F'(x^{(k)})$, $B = F(x^{(k)})$, 式 (1.5) 可改写为

$$Ay = B \quad (1.6)$$

这就是说, 对给定的 $x^{(k)}$, 式 (1.5) 实际上代表一个 n 阶线性代数方程组。这里, A 是 n 阶矩阵, B 是 n 维向量。如何迅速地求出 y , 显然是非线性电路分析中应考虑的主要问题之一。

大家知道, 用满矩阵高斯消去法解方程 (1.6), 需要的存贮容量和乘除法运算量, 分别大约与 n^2 、 $\frac{1}{3}n^3$ 成正比, 因此, 这种方法大大地限制了可解的问题规模, 解题效率也比较低。在电路分析中, 矩阵 A 是稀疏矩阵, 即它的大部分元素是零, 非零元素比较

少。对大多数实际电路，矩阵 A 平均每行每列仅有 4 至 6 个非零元素。如充分利用矩阵 A 的稀疏性，便可大大地扩大可解问题的规模，提高解题效率。

数十年来，人们在这方面做了大量工作，稀疏矩阵计算方法早已发展为计算数学的一个重要分支，人们正在从理论和实践两个角度进行探索。现在，用得比较广的方法是 LU 分解法^[20]。该算法在决定主元顺序时，通常仅考虑局部最大填入量，不考虑主元绝对值的大小，所以，虽能保持矩阵 A 的稀疏性，但不一定能保证消去过程的数值稳定性，因而，解的精度可能较差，甚至不满足方程 (1.6)。

文献[5]中给出的算法，根据矩阵 A 中非零元素的绝对值之大小，用局部最大填入量极小法，确定主元素；根据统计规律处理消去过程中新增加的非零元素。因此，既保证了矩阵 A 的稀疏性，消去过程的数值稳定性，也使消去过程的乘除运算量大约与 n 成正比。第十章中将专门介绍稀疏矩阵算法。

1.4 电路分析系统

电路分析程序是电路分析系统的主要组成部分。在这节中，我们首先以非线性电路瞬态分析为例，介绍电路分析程序流程。非线性电路瞬态分析程序的流程，如图 1.4 所示。

它使用了解非线性电路方程组的组合算法、自动变阶变步长的隐式数值积分法和稀疏矩阵电路方程组解法。

流程 1 输入如表 1.1、1.3 所示的电路源程序。电路源程序，一般存放于磁带上，或作为磁盘文件存在磁盘上，也可用纸带直接输入。输入后，电路分析程序自动将电路源程序印出，供用户校对、备案等。

流程 2 对电路源程序进行编译，建立此后诸步需要的各种表格、指针向量和其他信息，例如电路元件表、模型参数表、输出表、元件指针向量等。同时，对电路源程序进行语法检查。每查出一个错误，将出错符号及其前后若干个符号印出。而后，继续编译。待全部编译完后，若电路源程序无错，则执行流程 3，否则，停机。

流程 3 我们的稀疏矩阵算法不建立方程组 (1.6)，而是直接建立它的稀疏存贮形式，即直接建立数组 RE、ICOL、IRNZ、ICNZ 和 IRFR 等等。矩阵 A 的非零元素的

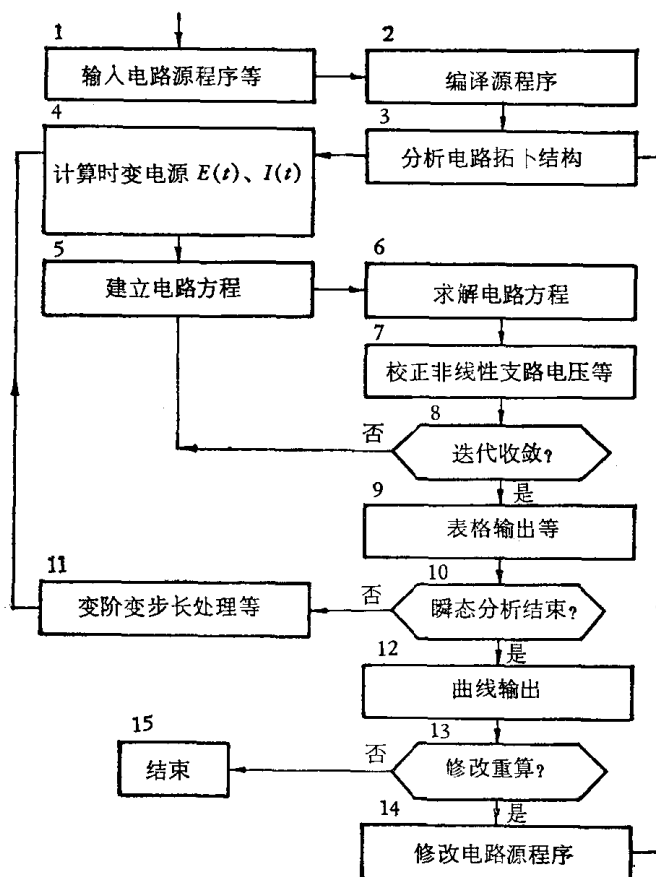


图1.4 非线性电路瞬态分析原理示意图

数值和列号, 分别按行存在数组 RE 和 ICOL 中, 这两个数组内的元素一一对应, 每行的第一个非零元素的列号在 ICOL 中的存放位置, 存在数组 IRFR 中; 数组 IRNZ 和 ICNZ 分别存放矩阵 A 的每行、每列的非零元素的个数。因此, 根据这些数组可以迅速地找到矩阵 A 的任一行的非零元素之信息。这个流程根据元件表中给出的电路的拓扑结构、元件指针向量和各类元件的数量, 用一次扫描方法, 建立数组 ICOL、IRNZ、ICNZ 和 IRFR 等等。由于矩阵 A 的非零元素的数值, 在广义 Newton-Raphson 迭代和瞬态迭代中, 可能发生变化, 故数组 RE 将在流程 5 中建立。

流程 4 在电路瞬态分析中, 电源值往往是随时间变化的, 这个流程计算时变电源在每个时刻的数值。

流程 5 建立瞬态广义 N-R 方程组。实际上, 是计算矩阵 A 中的非零元的数值, 并存入数组 RE 中。

流程 6 求解瞬态广义 N-R 方程组, 它包括选主元、符号 $L*U$ 分解、数值 $L*U$ 分解、正消过程与回代过程。

流程 7 利用组合算法, 修正非线性支路电压等。

流程 8 对非线性电路, 判断广义 N-R 迭代是否收敛, 若未收敛, 则转到流程 5 继续进行迭代, 否则, 执行流程 9。

流程 9 以数据表格形式, 输出分析结果, 加工并存储曲线输出信息。

流程 10 判断是否已达到预定的瞬态分析结束时间, 若已达到, 则转流程 12, 否则, 转流程 11。

流程 11 确定积分公式的阶和步长, 计算电容电流、电荷等。

流程 12 输出电路的瞬态响应曲线。

这就是非线性电路瞬态分析程序的主要流程。利用瞬态分析程序, 可以计算电路内各点的瞬态响应、延迟时间等。因此, 瞬态分析程序是改进电路动态性能设计的有力工具。

二十年来, 随着建立电路方程的方法、计算方法、软件技术和元器件模型等方面的发展, 计算机辅助电路分析与设计系统日益增多, 可解的问题的范围和规模日益扩大。现在, 电路分析系统已用于下列方面:

(1) 线性与非线性电路直流分析

求由线性元件组成的电路的直流工作点, 叫线性电路的直流分析。求含有非线性元件的电路的直流工作点, 叫做非线性电路的直流分析。电路的直流工作点, 就是电路中的各个电压源和电流源固定不变时, 电路所处的状态。直流分析可以用来确定电路的直流工作点, 也可以用来计算小信号交流分析的线性化模型参数和瞬态分析的初值。通过直流分析, 还可以得到电路中各个元件的直流工作点和功耗的大小。

(2) 交流小信号分析

当电路的输入为正弦或余弦的交流小信号时, 计算电路中各点的稳态响应, 叫做交流小信号分析。对于非线性电路, 首先要作直流分析, 算出电路的直流工作点, 在该工作点附近把非线性元件线性化, 然后, 再作交流小信号分析。

(3) 电路瞬态分析

当电路的输入是各种形状的脉冲时, 它计算电路中各点的瞬态响应、延迟时间等。