

1.1 前 言

随着电子计算机的飞速发展,计算机辅助设计的领域日益扩大,不断地向纵深发展。目前,在汽车工业、飞机工业、船舶工业、电子工业等等工业技术领域中,都在使用计算机辅助设计,以缩短设计生产周期、节约原材料、节省人力、降低成本、提高产品合格率等。在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、自动测试和版图设计自动化等等,内容十分丰富。由于篇幅所限,本书仅介绍计算机辅助电子电路性能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50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,才能使用它求解,1962年,有人研制出一个预先处理程序SCNN,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,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-1〔2〕,ECAP,CO-NNAP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. 瞬态分析相当费机器时间，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. 这些程序使用满矩阵方法求解线性代数方程组。大家知道，满矩阵方法需要存储很多量和使用很多量，分别大约与 n^2 ， n^3 成正比（于此， n 是线性代数方程组的阶数）。因此，大大地限制了问题的规模。

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，不利于推广应用。

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，SPICE，DPX2 等等。

由于这些系统的出现，计算机辅助电路设计得到日益广泛的应用，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——IBM 公司，到瑞典的商用电器公司〔4〕，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，对电路性能的影响的统计分析结果，以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，使用分离的电路器件，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详细设计阶段，应尽可能地用理论计算方法。但是，在过去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，特别在动态分析中，电路方程组是由线性与非线性微分-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，仅使用精度较差的图解法；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，还须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，还得重新推导电路方程，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并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，电路方程又要部分地，乃至全部地重新推导，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、寄存器等等之别。但是，这些电路有一个共同点，即他们都是由一些基本元件构成的，如电阻、电容、电感、二极管、晶体三极管、MOS晶体管、以及各种电压源和电流源等等，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。因此，我们不仅能利用计算机来求解电路方程，而且，可以自动建立电路方程，实现电路分析的完全自动化。

这里，我们利用电路分析系统程序DFX-2和DFX-MOS，扼要说明如何自动分析电子电路。

DFX-2和DFX-MOS是在DFX-1 [1]的基础上发展起来的。DFX-2是双极电路分析系统程序，DFX-MOS是MOS电路分析系统程序。它们都使用了稀疏矩阵计算方法、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法 [6]；可以对上千阶的电路进行直流分析、输入-输出特性分析和瞬态分析；它们都具有简便、易学的电路描述语言。因此，这两个系统具有比较高的解题效率。

用户利用它们的电路描述语言，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，是做直流分析，输入输出分析，还是瞬态分析？或这三者的任意组合？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-2的电路描述语言，编出的电路源程序，如

表1.1所示。

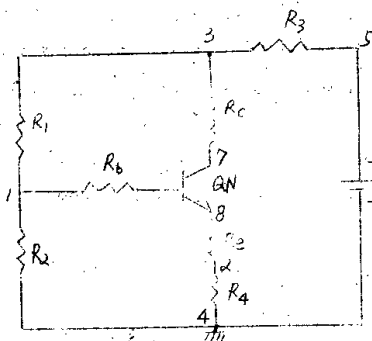


图1.1 带反馈的直流电路

表1.1 图1.1所示电路的源程序

#TT: CWFEB

#QB: DC;

#GN=4;

#TP=25;

#RT: 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=1;

EDC: 5-4=23;

#MCN=5.95-11; 8.9; 1.0826; 0.28; 3.8; 0.9;

0.316; 1; 1; 0.17;

```

L1G-3; 10; 1.6; 10; 1.98; 0.9; 0.156;
1; 1; 0.9863;
# OT: NV(1); NV(2); NV(3); NV(5); BV(7-3);
# END;

```

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; #QP: 是分析要求语句, 其后的“DC”表示要求做直流分析; #GN 是参考节点说明语句, 其后的“4”为图 1.1 中电路的参考节点号; #TP 是电路工作温度说明语句, 其后的“25”表示电路工作在摄氏 25 度; #ET: 是电路描述语句, 除了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 20 千欧姆。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 晶体三极管的代号, 冒号后面的三个数, 依次为搜集极节点、基极节点和发射极节点的编号, 表 1.1 中的晶体三极管 QN, 依次连接在电路节点 7、6 和 8 上, 等号后面的“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。“E_{DC}: 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 2.3 伏; 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) 表示要输出第 1 个节点的电压, BV(i-j) 表示要输出节点 i 和 j 之间的电压差。

电路分析系统程序 DFX-2, 根据表 1.1 所示的电路源程序,

便可控制 111 计算机, 自动建立并求解描述图 1. 1 所示电路的方程, 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 所示的源程序的形状十分相似, 其中,

OP: TS,

表 1. 2 图 1. 1 所示电路的分析结果

节点	电 压
V ₁	0.967375
V ₂	0.209234
V ₃	8.737260
V ₅	23.060000

表示要做瞬态分析; #TM: 是瞬态分析时间参数语句, DT=0.5,

表示时间步长为 0.5; NT=700, 表示从 0 毫微秒起, 分析到 700

毫微秒; FM1: 5-5-2-7=5-4, 8-4, 2; 为 MOS 晶体管语

句, FM 为 n-沟 MOS 晶体管的代号, 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, 等号后面的三个数, 依次为

管子的沟道长度、沟道宽度和它的其他参数的组号; C1: 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 3 微

法拉 (p^f);

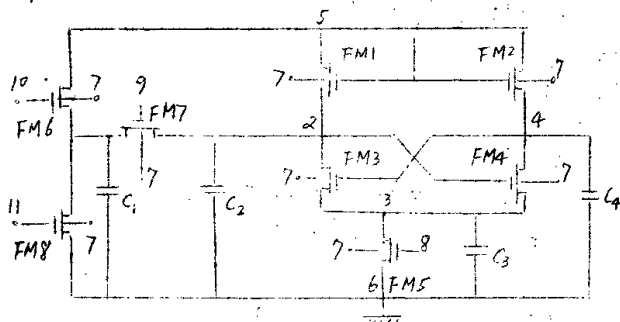


图 1. 2 WI 电路

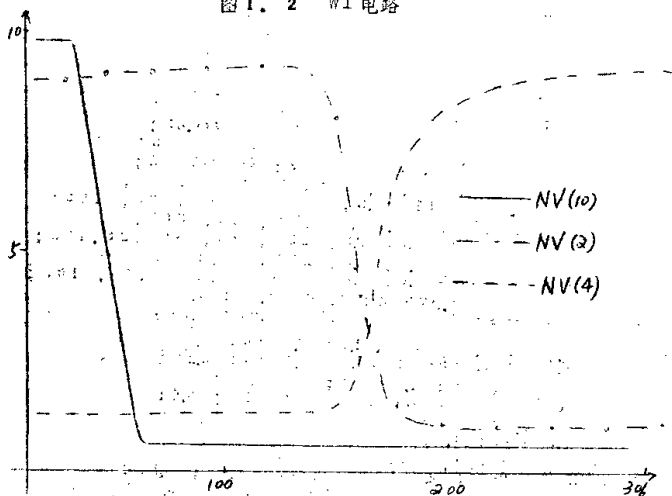


图 1. 3 WI 电路的瞬态响应曲线

表 1. 3 描述 WI 电路的电路源程序

```
# TT: WI
# QP: TS;
# GN = 6;
# MM: DT = 0.5; NT = 700;
# ET: FM1: 5-5-2-7=5-4, 8-4, 2;
      FM3: 2-4-3-7=5-4, 5-3, 1;
      FM4: 4-2-3-7=5-4, 5-3, 1;
      FM5: 3-8-6-7=5-4, 124-4, 1;
      FM6: 5-10-1-7=5-4, 140-4, 1;
      FM7: 1-9-2-7=5-4, 32-4, 1;
      FM8: 1-11-6-7=5-4, 94-4, 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=5-5;
      EPS1: 9-6=12, 0.6, 0, 50, 150, 30, 100;
      EPS2: 10-6=0.6, 0.8, 230, 30, 300, 30, 100;
      EPS3: 11-6=9.8, 0.6, 230, 30, 300, 30, 100;
# MEM1=800-9; 2979+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;
# MEM2=680-9; 2979+4; 0.118; 0.66; 0.58;
      2.64+4; 0.385-4; 11.7; 1.17+15; 0.29;
```

```

2. 0.85+4; 0; 7.45; 0; 0; 0.85; 0.5;
0; 0.85; 0.5;
# OT: NV(1); NV(2); NV(3); NV(4);
# OC: (+)X-TM; Y-NV(1, 12); Z-NV(3, 12);
# RV: FM7: (6) 32-4;
# END;

```

EPS1: 9-6-12, 0, 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, 表示横座标是时间, 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, 用户估计, 这两点的电压都不超过 12 伏; # 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: FM7: (6) 14-4, 表示将 MOS 元件语句“FM7: 1 1-9-2-7=5-4, 32-4, 1”中的第 6 个数改为 14-4, 即将该语句改为“FM7: 1-9-2-7=5-4, 14-4, 1”, 而后, 再分析一次。

将表 1. 3 所示电路源程序送入机器后, 电路分析系统程序 DFO-MOS, 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: 利用电路分析系统程序进行电路分析, 用户既不必研究器件模型、推导电路方程, 也不必研究有关的计

算方法, 推导计算公式, 只须用电路描述语句编写电路源程序, 正确地给出无器件参数, 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。

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领域, 代数方程解法、微分方程解法、积分方程解法等等各种计算方法, 计算数学中有的重要分支, 就是在研究电路分析问题中提出来的, 如“刚性”常微分方程组的积分方法, 就是在研究电路瞬态分析时发展起来的。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, 为计算数学开拓了新的天地, 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的高峰。

在这一章中, 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, 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。于此, $F: R^n \rightarrow R^n$ 是 n 维实数域内的向量函数, 由克希霍夫电流、电压律方程和支路方程组成; 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), 人们最初用广义 Newton-Raphson 方法

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

(1.2)

求解, 其中, 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

$$F(x, q, \dot{q}, t) = 0 \quad (1.3)$$

于此, 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, $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$, 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], 而隐

式数值积分方法，主要是精度问题。尤拉向后积分法的精度太低，有时，它以 0.001 毫微秒为时间步长算出的结果，不如梯形积分公式以 0.1 毫微秒为时间步长算出的结果好 [7]。为有效地解决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 Gear 积分方法，但 [20] 中指出：Gear 积分方法不稳定。我们在实践中发现：Gear 积分方法不适合于解某类刚性电路分析问题，[20] 中指出的不稳定问题，一部分是解这类问题时引起的，另一部分是在瞬态分析中，没有顾及病态矩阵的演变引起的。

上述问题可用另一种变阶变步长的隐式积分方法和适时选主元的稀疏矩阵算法解决。

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

$$\Delta(K) = F'(X(K))^{-1} F(X(K)) \quad (1.6)$$

其中， $\Delta(K) = X^{(K+1)} - X^{(K)}$ ，记 $Y = \Delta(K)$ ， $A = F'(X^{(K)})$ ， $B = -F(X^{(K)})$ ，(1.6) 可以改与为

$$AY = B \quad (1.7)$$

这就是说，对给定的 $X^{(K)}$ ，(1.6) 式实际上代表一个 n 维线性代数方程组。于此， 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 (1.7)，需要的存储容量和乘除法运算量，分别大约与 n^2 、 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，并提高解题效率。

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伪解法^[20]，即在正式分析一个电路之前，根据矩阵 A 的非零元素的分布情况，用局部最大填入量最小法，给定一个消去顺序，然后正式分析。它的主要优点是保持了矩阵 A 的稀疏性，易于程序实现，但由于它规定消去顺序时，没有考虑矩阵 A 中非零元素的大小，故往往因消去过程不稳定而求不到方程组 (1.7) 的解。

解决这一问题的最简单的办法是用双倍位运算求解，但这要使机器运算时间增加三倍乃至数十倍。〔5〕中给出的算法，能有效地解决这一问题。它根据矩阵 A 中非零元素的大小，用改进的局部最大填入量最小法，确定主元素；根据统计规律处理消去过程中新增的非零元素。因此，既保证了矩阵 A 的稀疏性，消去过程的稳定性，也使消去过程的乘除法运算量与 n 成正比。

1.4 电路分析系统程序

在这节中，我们首先以非线性电路瞬态分析为例，介绍电路分析系统程序流程，非线性电路瞬态分析系统程序的流程，如图 1.4 所示。它使用了解非线性电路方程组的组合法、自动变阶变步长的隐式积分方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。输入后，系统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: 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, 建立矩阵 A 的非零元素列号向量 $ICOL$ 、各行非零元素的个数向量 $IRNZ$, 各列非零元素个数向量 $ICNZ$ 和指示每行的第一个非零元列号在 $ICOL$ 中的位置的向量 $IRTR$ 。显然, 这是直接建立矩阵方程 (1.7) 的稀疏存储的一部分。

流程 4: 在电路瞬态分析中, 电源值往往是随时间变化的, 这一个流程计算时变电源在每个时刻的数值。

流程 5: 建立广义节点平衡方程组。实际上, 是计算矩阵 A 中的非零元的数值, 并存入向量 RE 中。 RE 与 $ICOL$ 中的元素, 是一一对应的。

流程 6: 求解稀疏矩阵电路方程, 它包括两个主要部分, 即选主元的高斯消去向前过程和不重选主元的高斯消去向后过程。

流程 7: 利用组合法, 修正非线性支路电压等。

流程 8: 对非线性电路, 判断组合迭代是否收敛, 若未收敛, 则转到流程 5 继续进行组合迭代, 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: 确定积分公式的阶和步长, 计算电容电流、电荷等。

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

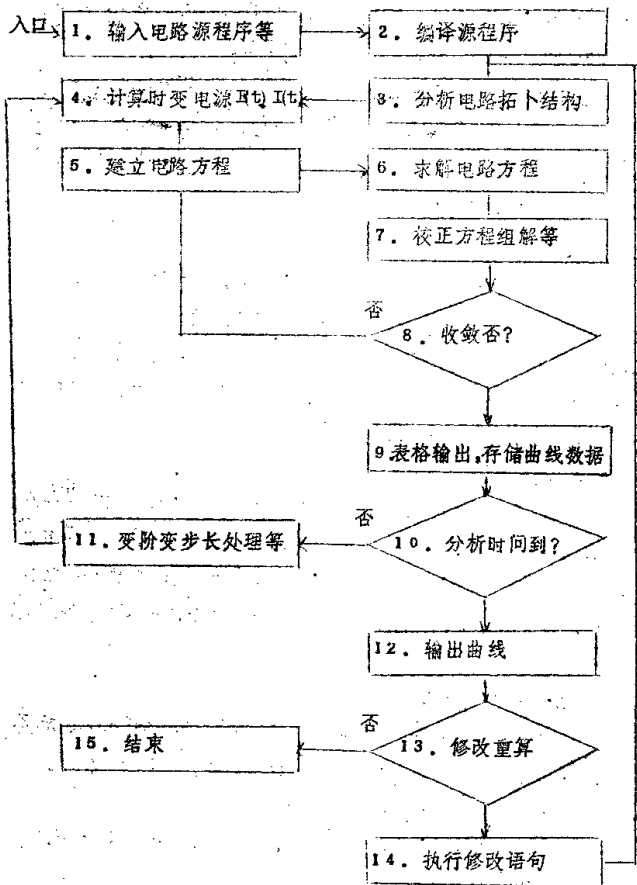


图 1. 4 非线性电路瞬态分析原理示意图