

模拟集成电路宏模型计算机辅助自动建立¹

时龙兴 陈立* 葛军

(东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心 南京 210096)

*(南京电力高等专科学校电信系 南京 210013)

摘 要 本文提出一种新的模拟集成电路宏模型计算机辅助自动建立方法,通用性强、宏模型精度高。文中详细描述了建立过程,给出相应的软件流程,并对建立过程中的一些关键算法进行了探讨和创新。最后给出利用新方法建立二级运放宏模型的实例。

关键词 宏模型,符号分析,统计分析

中图分类号 TN431.1

1 引 言

在模拟集成电路自动化设计中^[1],一般采用器件模型进行电路设计和模拟,耗时较多,而采用宏模型^[2]可以大大节省计算时间和计算机内存,所以宏模型技术自出现以来一直很受重视。近年来产生了一些自动建立宏模型的方法,主要有两类:一类是符号分析方法^[3],目前已有一些实际的应用,典型的有 ISSAC^[3,4],主要缺陷是精度和复杂性存在矛盾;另一类是统计分析方法^[5],主要有基于多项式的 MFQI、GMDH^[6]等线性回归分析方法,也有 LM、Gauss-Newton^[7]等非线性回归分析方法,主要问题是对初值敏感。

本文提出了一种能自动建立精确电路宏模型的方法,该方法组合了符号分析方法和统计分析方法:对符号分析建模方法进行了改进,具有速度快、节省内存的特点;用 LM 非线性回归分析方法进行统计优化,精度较高。本文首先提出新的宏模型自动建立方法,然后详细介绍了宏模型建立过程中的关键算法和程序,最后给出了运用新方法建立宏模型的实例。

2 宏模型自动建立过程

新方法的基本思想是:首先利用符号分析技术对给定电路进行符号分析,生成能描述各元件参数与性能之间关系的符号表达式(符号模型),用它作为统计分析的逼近模型,并利用其系数作为统计分析的初始系数,然后使用统计分析方法进行优化,改善初始系数,优化后的宏模型根据要求简化,得到所要的宏模型。其设计流程如图 1。

符号分析是一种自动分析电路以获得电路性能符号宏模型的技术。其分析方法和过程类似于 SPICE 等数值分析工具,具有自动化程度高和适用于各种电路的特点。由于符号分析进行的是符号运算,精确的符号模型十分复杂,为了便于分析,需采取一些措施以得到形式较为简单的符号模型,然而这又是以牺牲精度为代价的。通过统计分析的方法优化符号模型可以补偿丢失的精度。

统计分析通过对电路进行逆向分析来获得电路性能的数学描述。由设计人员假定电路性能的描述形式,然后进行优化,最后得到近似的电路性能描述。显然,通过这种方法得到的电路性能描述形式更易于设计人员进行分析和处理。统计分析的主要问题是初值敏感,即

¹ 1997-04-11 收到, 1997-10-07 定稿

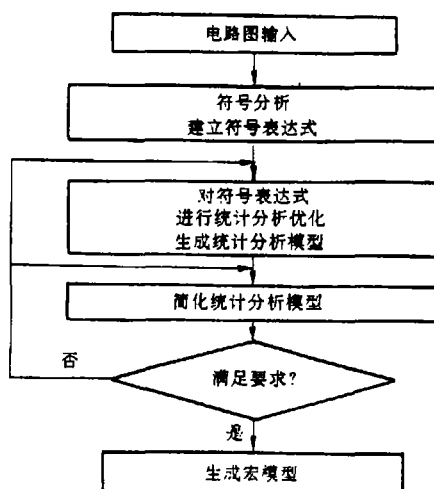


图 1 宏模型自动建立流程

当逼近函数或其系数与真实模型相近时, 统计分析可以得到较高精度的宏模型, 而相差较远时, 可能得不到所需结果, 甚至会得到很坏的后果。使用接近于真实模型的符号模型作为统计分析的逼近模型可以解决这个问题。

3 宏模型自动建立方法及实现

3.1 符号方程的建立和求解

符号方程的建立方法有节点法、改进节点法、稀疏矩阵法^[8]等, 这些都是从数值电路分析中移植过来的, 建立过程基本类似。如节点法描述如下:

$$\begin{bmatrix} Y_r & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ F \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中 Y_r 是节点导纳矩阵, J 、 F 为等效电流源、电压源矢量, B 、 C 、 D 为电流未知量关系式矩阵, V 、 I 为未知的节点电压、电流矢量。与数值分析不同的是, 对符号分析来说, 除未知量 V 、 I , 其余各量既可用符号也可以用数值表示, 因此数值方程也可看作是符号方程的一种形式。

在符号计算中, 每个参与运算的符号可被看作是一个分式, 其分子、分母又分别用一个多项式表示, 一般形式为

$$S = \frac{\sum_i \alpha_i x_i}{\sum_j \beta_j y_j}. \quad (2)$$

为此我们可以把符号定义为一个类, 它具有如 (2) 式的特征, 同时也可以把多项式定义为一个类, 它是由各单独的子项链接而成, 具体的数据结构使用 C++ 面向对象语言描述如下:

```

符号类 SYMBOL:
CLASS SYMBOL
{CLASS ITEM *NUMERATOR;    // 分子指针
  CLASS ITEM *DENOMINATOR; // 分母指针
}
  
```

```

public:
    SYMBOL operator +(var);
    SYMBOL operator -(var);
    SYMBOL operator *(var);
    SYMBOL operator /(var);}

```

多项式类 ITEM:

```

CLASS ITEM
{DOUBLE COEF;      // 系数
  CHAR *VAR;       // 变量符号
  CLASS ITEM *NEXT;}

```

我们对常用的四个运算符 (+、-、×、÷) 和赋值符 (=) 进行重载, 就可以方便地进行数值、符号的赋值和混合运算, 从而提高求解符号方程组的效率。多项式采用的是链表结构, 这样在进行符号运算时可以有效地合并同类项。基于以上改进的符号运算方法已在 VISUAL C++ 上实现, 在 PENTIUM/133, 16Mb 的硬件环境上运行结果较为满意。

3.2 复函数的最小二乘优化准则

在新方法中, 需要用统计分析^[9,10]的方法来做优化工作。在统计分析中, 主要的优化准则是最小二乘准则: 求参数 β 的估计值 $\hat{\beta}$, 使得 $\|Y - f(x, \beta)\|^2$ 在 $\beta = \hat{\beta}$ 达到最小值, 其中 $f(x, \beta)$ 是 x 和 β 的向量函数。在电路宏模型建立过程中, 要优化的若为实函数, 目标函数根据最小二乘准则可写为 $e^2 = \|Y - f(x, \beta)\|_{\min}^2$; 但若为复函数, 如运放的电压增益等, 则最小二乘目标函数为

$$e^2 = \left[\sqrt{(Y_r - f_r(x, \beta))^2 + (Y_i - f_i(x, \beta))^2} \right]_{\min}^2. \quad (3)$$

可以证明, 按 (3) 式定义目标函数后, 复函数的优化过程同实函数优化是一样的。由于直接对复数进行优化可能会由于模与相位的相互影响而得不到最优的结果, 因此我们建议对复数的模与相位分别定义目标函数进行优化, 即目标函数分别为:

$$e_m^2 = \left[\sqrt{(f_r^2(x, \beta) + f_i^2(x, \beta))} - Y_m \right]_{\min}^2, \quad e_p^2 = \left[\operatorname{tg} \frac{f_i(x, \beta)}{f_r(x, \beta)} - Y_p \right]_{\min}^2. \quad (4)$$

另外由于增益值绝对变化范围较大, 因此应采用相对误差的分析, 这时目标函数定义为

$$e_m^2 = \left[\frac{\sqrt{(f_r^2(x, \beta) + f_i^2(x, \beta))} - Y_m}{Y_m} \right]_{\min}^2, \quad e_p^2 = \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{f_i(x, \beta)}{f_r(x, \beta)} - Y_p}{Y_p} \right]_{\min}^2. \quad (5)$$

在重新定义目标函数后, 就可以利用已有的各种非线性统计分析方法对复函数进行统计分析优化。经验证, 按照 (5) 式定义目标函数, 可以得到较高的宏模型性能拟合精度。

3.3 LM 非线性统计分析算法实现

Levenberg-Marguard 算法^[5,11](简称 LM 算法) 是改进 Gauss-Newton 方法和最速下降法之间进行的平滑调和。后一方法在远离最小值时运用, 当接近最小值时它逐渐切换到前一方法。LM 算法描述如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{i+1} &= \beta_i + a_i d_i, \\ d_i &\text{是方程 } [J^T(\beta_i)J(\beta_i) + \mu_i I]d_i = -J^T(\beta_i)f(\beta_i)\text{ 的解,} \\ a_i &\text{是 } \rho(\alpha) = F(\beta_i + \alpha d_i)\text{ 的最小值点.} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当 μ_i 为零时,为改进的牛顿算法.一般情况下,改进的牛顿算法比较有效,而当 $J^T(\beta_i)J(\beta_i)$ 为奇异阵时就无能为力了.注意到 $J^T(\beta_i)J(\beta_i)$ 是非负定阵,则矩阵

$$J^T(\beta_i)J(\beta_i) + \mu I, \quad (\mu > 0), \quad (7)$$

一定是正定阵.我们采用了如下的步骤确定 μ_i :

- 计算 $F(\beta_i)$,
- 取一个适中的 μ_i 值,
- LOOP • 解线性方程组 (6) 得到 d_i , 并计算 a_i ,
- 计算 $F(\beta_{i+1})$, 其中 $\beta_{i+1} = \beta_i + a_i d_i$,
- 如果 $|F(\beta_{i+1}) - F(\beta_i)| < E$, 则结束,
- 如果 $F(\beta_{i+1}) \geq F(\beta_i)$, 则将 μ_i 扩大 N 倍, $\beta_i = \beta_{i+1}$, 再回到 LOOP,
- 如果 $F(\beta_{i+1}) < F(\beta_i)$, 将 μ_i 减少为 μ_i/N 时, $\beta_i = \beta_{i+1}$, 再回到 LOOP.

LM 算法在实际应用中被证明是十分有效的,并且成为非线性最小二乘法问题求解的标准.基于以上描述,我们在 VISUAL C++ 上编制了 LM 优化程序 LM-LU,其中 B 为系数向量, Lamda 即为 μ , step 为 μ 的调整步长.程序结构如下:

LM-LU(B, Lamda)

```
{ ReadSample(Y); // 读入样本点 Y[ ]
Function(X, B); // 以 B 为系数, 计算符号表达式的值 X[ ]
F=Gb(Y, X); // 计算目标函数 F
Do preF=F; // 保留上一次的目标函数值
Calc-J(J); // 计算 F 的雅可比矩阵 J[ ][ ]
Calc-A(A, D); // 计算矩阵 A = J^T J, 向量 D = J^T Y
// 根据 Lamda 改变 A 的对角元元素
UdataA(A, Lamda);
Ludcmp(A, m, indx, & d0); // 利用 LU 分解求 A^{-1} = (J^T J)^{-1}
Lubksb(A, m, indx, D); // 计算 D = A^{-1} D = (J^T J)^{-1} J^T Y
Gold(A0); // 利用黄金分割法求搜索长度 A0
UdataB(B, D, A0); // 改变系数向量 B = B + D * A0
Function(X, B);
F=Gb(Y, X);
IF(F > preF) Lamda *= Step;
ELSE Lamda /= Step;
// 若目标函数值变化大于指定值, 则进行迭代
}While(fabs(F-preF) > E)
Write(B); // 迭代结束, 保留最优系数在 B 中 }
```

从实际应用上来看,将 Step 定义为一个常数并不能完全满足要求,因为对不同的机器和矩阵来说情形都不一样.这里我们将优化函数本身作为待优化的函数, Step 为变量,即 $F=LM-LU(B, Lamda, Step)$,一开始为 Step 设定一个区间, Step 在此区间内变化,求 F 的最小值,则可得到最优解.在实际应用中我们选用了以下方法:让 Step 在一定区间内按某

一步长 S 变化 N 次, 求这 N 次中的最小值作为最优解, 其中 N 与 Step 可视做一次统计优化的情况而定. 程序流程如下: $F=LM-LU(B, \text{Lamda}, \text{Step});$

$F_{\min}=F; B_{\min}=B;$

for($i = 0; i < N; i + +$){ $F=LM-LU(B, \text{Lamda}, \text{Step});$

$if(F > F_{\min})\{F_{\min}=F; B_{\min}=B;\}$

$Step^*=S; \}$

实验证明, 该程序速度快、精度高, 同时保持了与符号运算软件的良好接口, 从而使整个宏模型建立的效率得到了提高.

4 实例

本文利用新方法建立了如图 2 所示二级运放增益的频率特性宏模型, 首先利用改进符号分析程序建立符号模型, 如 (8) 式所示. 然后使用 LM 优化程序对 (8) 式进行统计分析优化, 得到电路增益的频率特性宏模型.

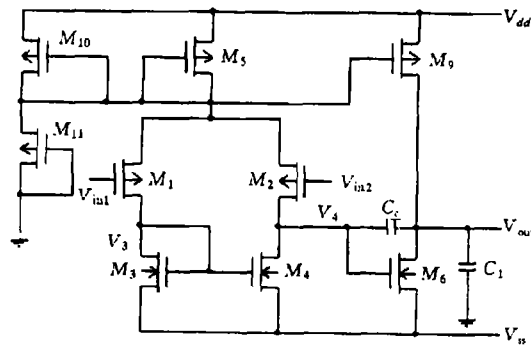


图 2 二级运放电路图

$$A_V = \frac{(B_2 - B_1)G_1G_5}{G_2G_6B_2 - B_1G_3G_6 + B_1G_4G_5}, \quad (8)$$

其中

$$G_1 = G_{m1}, \quad G_2 = -sCdg_3, \quad G_3 = G_{d13} + sCgs_5 + sCdg_3 + sCc - sCdg_5,$$

$$G_4 = sCdg_5 - sCc, \quad G_5 = G_{m5} - sCc + sCdg_5,$$

$$G_6 = G_{d5} + sCl + sCc - sCdg_5;$$

$$B_1 = -(G_{d13} + G_{m3} + sCgs_3 + sCdg_3), \quad B_2 = -(G_{m3} - sCdg_3).$$

接着, 本文分别利用符号模型和新方法建立的宏模型对电路增益的频率特性进行模拟, 并与 SPICE 模拟结果^[12]做了比较, 如图 3 所示.

最后, 表 1 给出分别采用符号分析建模和新方法建模的相对误差比较表.

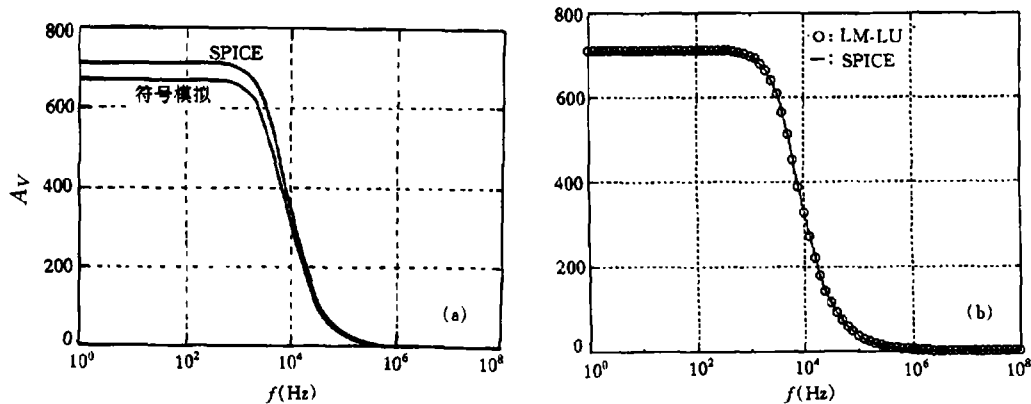


图 3 不同方法得到的频率特性结果 (a) 符号分析 (b) 新方法

表 1 不同建模方法相对误差比较表

	建模方法	平均误差	最大误差
$A_V - F$	符号分析	12.13%	81.14%
	新方法	0.45%	4.86%

5 结 论

本文提出的电路宏模型自动建立新方法组合了符号分析和统计分析的优点,具有通用性强和自动化程度高的特点。同时新方法对符号运算方法做了改进,使得适用电路规模更大,建模速度更快;建立了复函数优化准则,使得优化范围更广;使用 LM 非线性统计分析优化方法,建立的模型精度较高。目前整个方法已在 VISUAL C++ 上实现,具有结构清晰、易扩充和速度快的特点。

新方法也还存在一些待完善的地方,如在符号运算中加入因式分解功能,使解得的符号模型形式更加简单;进一步减少统计分析的计算量等。

参 考 文 献

- [1] 杨中华,等. 模拟集成电路设计自动化技术. 电子科学学刊, 1996, 18(2): 202-207.
- [2] 杨克衡. 计算机辅助设计技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 1995, 第八章.
- [3] Georges G, Gielen E. ISAAC: A symbolic simulator for analog integrated circuits. IEEE J. of SC, 1989, SC-24(6): 1587-1597.
- [4] Georges G, Gielen E. Analog circuit design optimization based on symbolic simulation and simulated annealing. IEEE J. of SC, 1990, SC-25(3): 707-713.
- [5] 程兴新,曹敏,等. 统计计算方法. 北京: 科学出版社, 1988, 第一章.
- [6] Slyblinski M A. Combination of interpolation and self-organizing approximation techniques—A new approach to circuit performance modeling. IEEE Trans. on CAD, 1993, CAD-12(11): 1775-1785.
- [7] 邓乃扬等. 无约束最优化计算方法. 北京: 科学出版社, 1982, 第六章.
- [8] 洪先龙,孙家广,等. 计算机辅助电路分析—算法和软件技术. 北京: 清华大学出版社, 1984, 第二章.
- [9] Julie Chen. STYLE: A statistical design approach based on nonparametric performance macro-modeling. IEEE Trans. on CAD, 1995, CAD-14(7): 794-802.

- [10] H-F Jyu, Sharad Malik. Statistical delay modeling in logic design and synthesis. 31st ACM/IEEE DAC, San Diego: 1994, 126-130.
- [11] Press W H, 等. 著, 傅祖云, 等. 译. C 语言数值算法大全 (第二版). 北京: 电子工业出版社, 1995, 第十五章.
- [12] Waisum W Wong. JFET circuit simulation using SPICE implemented with an improved model. IEEE Trans. on CAD, 1994, CAD-13(1): 105-109.

COMPUTER-AIDED AUTODEVELOPMENT OF ANALOG INTEGRATED CIRCUIT MACROMODEL

Shi Longxing Chen Li* Ge Jun

(*National ASIC System E & T Research Center, Southeast University, Nanjing 210096*)

*(*The College of Nanjing Electric Power, Nanjing 210013*)

Abstract In this paper, a novel computer-aided autodevelopment method of analog integrated circuit macromodel is presented. The new method can be employed generally, and the macromodel autodeveloped is accurate. The autodevelopment procedure of macromodel is described in details, and the relevant software flowchart is given. Then some researches and new ideas in the critical algorithm are presented. Finally, a design example using our new approach is presented.

Key words Macromodel, Symbol analysis, Statistical analysis, OOP(object oriented programming)

时龙兴: 男, 1964年生, 教授, 半导体器件与微电子学, 主要研究方向: 专用集成电路设计, 模拟集成电路计算机辅助设计.

陈立: 男, 1972年生, 硕士, 通信与电子系统, 主要研究方向: 模拟集成电路计算机辅助设计, 电路宏模型, 优化方法.

葛军: 男, 1974年生, 硕士, 半导体器件与微电子学, 主要研究方向: 模拟集成电路计算机辅助设计, 电路宏模型, 优化方法.