

大规模集成电路模拟技术中改进型支路撕裂法

赵进全, 路 灿, 韩玉兰, 江慰德

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种改进型的支路撕裂法, 该方法将撕裂支路等效为受一定条件约束的电流源支路, 引入松弛法和迭代法, 从而将整个电路转变为若干个相对独立的子电路. 该方法不需要对电路中的节点、支路按特殊规则进行划分, 能够有效地分析含有纯电压源支路的电路及非线性电路, 对迭代初始值要求低, 收敛快, 方法简单. 计算实例验证了该方法的可靠性和有效性.

关键词: 大规模集成电路; 改进型支路撕裂法; 非线性电路; 电压源支路

中图分类号: TN321; TN710 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)08 - 0828 - 03

Modified Branch Tearing Method for the Analysis of Very Large Scale Integrated Circuit

Zhao Jinquan, Lu Can, Han Yulan, Jiang Weide

(School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: In the analysis of very large scale integrated circuit (VLSI), the branch tearing method, which is initiated from the node voltage method, is difficult to analyze the nonlinear circuits and the circuits with branches of voltage sources, so a modified branch tearing method is presented, where iteration and relaxation technology are adopted, the tearing branches is considered as the branches of current sources which are restricted by specific conditions, and the VLSI is divided into some relatively independent subcircuits. And the circuit response can be obtained as the response of each subcircuit is gained. It is unnecessary for the nodes and branches of the circuit to be arrayed with the specific regulation, and the initial data of the iteration affect the method slightly, thus the nonlinear circuits and the circuits with branches of voltage sources can be analyzed effectively. An example is given to confirm its simplicity, validity and reliability.

Key words: very large scale integrated circuit; modified branch tearing method; nonlinear circuit; branch of voltage source

随着集成技术的发展, 单片集成度迅速提高, 在一个芯片上可集成由数十万乃至上百万个晶体管构成的电路. 在目前的条件下, 要完成如此大规模电路的电路模拟问题, 所需的计算时间和存储要求都是无法接受的. 因此, 将大规模电路的模拟问题转化为若干个子电路的模拟问题, 进行并行计算, 尽可能地缩短电路模拟时间和降低存储要求, 是目前大规模电路模拟技术研究的一个重要方向.

由于大规模电路是由许多相互联系的子电路组成的, 在将大规模电路的分析问题转化为若干子电

路的分析问题, 既要做到能独立地、逐个地、并行地处理各个子电路, 又要考虑各个子电路之间的相互作用, 就需要一些专门的分解技术和算法, 其中包括撕裂技术和松弛技术. 支路撕裂法将电路中部分支路撕裂后, 剩下了若干个互不联系的子电路, 通过对支路、节点按一定规则进行划分, 所建立的电路方程 (以下简称支路撕裂电路方程) 的系数矩阵具有加边的块对角形式. 具有这种结构的方程, 各个子电路方程可以相对独立地求解或进行并行计算^[1-5]. 然而, 基于节点电压法的支路撕裂法存在难以分析非

线性电路和含纯电压源支路电路等问题,为此本文提出了一种改进型的支路撕裂法.该方法把撕裂支路等效为受一定条件约束的电流源支路,通过引入松弛法和迭代算法,从而将整个电路的分析问题转变为若干个相对独立的子电路分析问题.改进型的支路撕裂法不需要对电路中的支路、节点按一定规则进行划分,也不需要使电路方程的系数矩阵具有加边块对角的形式,可以采用改进的节点电压法等其他有效的电路分析方法,电路可以是非线性的和含纯电压源支路的电路,迭代收敛速度快,对初始值要求低.

1 支路撕裂法^[1,2]简介

将一个大规模电路看成是由许多子电路 S_1, S_2, \dots, S_k 通过少量的支路 t_1, t_2, \dots, t_h 连接而成,如图1所示.如果将连接支路 t_1, t_2, \dots, t_h 撕裂,那么整个电路将变为 k 个互不相联的子电路.通过对电路中的节点、支路按一定的规则划分,得到支路撕裂法电路方程

$$\begin{bmatrix} Y_{n1} & & 0 & A_{t1} \\ & Y_{n2} & & A_{t2} \\ & & \ddots & \dots \\ 0 & & & Y_{nk} & A_{tk} \\ A_{t1}^T & A_{t2}^T & & A_{tk}^T & -r_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ \dots \\ U_{nk} \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{o1} \\ J_{o2} \\ \dots \\ J_{ok} \\ E_{ot} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Y_{ni}, U_{ni}, J_{oi} 和 $A_{ti} (i = 1, k)$ 分别为第 i 个子电路的节点导纳、电压和电流矩阵及撕裂支路的关联矩阵; r_t, I_t 和 E_{ot} 分别为撕裂支路的电阻、电流和电源电压矩阵.式(1)常采用如下求解方法.

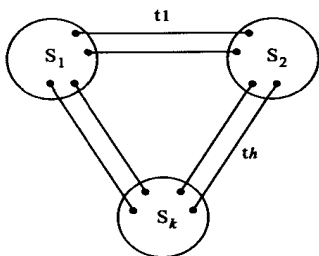


图1 支路撕裂法的电路结构

正向消去矩阵中的左下块,得到

$$\left(-r_t - \sum_{i=1}^k A_{ti}^T Y_{ni}^{-1} A_{ti} \right) I_t = E_{ot} - \sum_{i=1}^k A_{ti}^T Y_{ni}^{-1} A_{ti} \quad (2)$$

求解式(2),得撕裂支路电流 I_t . 对式(1)中前 k 个方程组进行回代,得到

$$Y_{ni} U_{ni} = J_{oi} - A_{ti} I_t \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

求解式(3)可获得节点电压 $U_{ni}, i = 1, 2, \dots, k$.

从以上分析可知,这是基于节点电压法的支路撕裂法,这种方法求解线性电路较为方便.但是,当电路中含有纯电压源支路时,该方法便遇到了难以解决的问题,因为节点电压法是不能分析含有纯电压源支路的电路.当电路中包含非线性元件时,如果撕裂支路包含非线性元件,那么由于撕裂支路电流 I_t 未知,式(3)无法求解.对非线性的子电路,由于节点导纳未知,即使采用迭代法,那么收敛问题、初始值问题等一系列非线性电路问题将会使该方法非常困难,甚至无法进行.

2 对支路撕裂法的改进

将式(1)变为

$$\begin{bmatrix} Y_{n1} & & 0 \\ & Y_{n2} & \\ & & \ddots \\ 0 & & & Y_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ \dots \\ U_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{o1} + A_{t1} I_t \\ J_{o2} + A_{t2} I_t \\ \dots \\ J_{ok} + A_{tk} I_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中,由于 $A_{ti} I_t (i = 1, 2, \dots, k)$ 表示与子电路 S_i 关联的撕裂支路电流,如果 $A_{ti} I_t$ 已知,式(4)就变成了 k 个独立的子电路方程

$$Y_{ni} U_{ni} = J_{oi} + A_{ti} I_t \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

由于各个子电路相对独立,式(5)可以是改进的节点方程,也可以是非线性方程.

撕裂支路电流的约束条件

$$I_t = f_i(U_{ni}) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

给出迭代算法如下

$$Y_{ni} U_{ni}^{(j+1)} = J_{oi} + A_{ti} I_t^{*(j)} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$I_t^{(j+1)} = f_i(U_{ni}^{(j+1)}) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

为了加快迭代收敛,防止发散,引入松弛法^[6]

$$I_t^{*(j+1)} = I_t^{(j+1)} + [I_t^{*(j)} - I_t^{(j+1)}] / \lambda \quad \lambda > 1 \quad (9)$$

首先,给出撕裂支路电流的初始值 $I_t^{*(j)} (j = 0)$, 求解式(7)得电路节点电压 $U_{ni}^{(j+1)} (i = 1, 2, \dots, k)$, 并将 $U_{ni}^{(j+1)} (i = 1, 2, \dots, k)$ 代入式(8)求出 $I_t^{(j+1)}$, 再由式(9)求出 $I_t^{*(j+1)}$. 然后,令 $j = j + 1$ 重复上述过程,直至 $|I_t^{*(j+1)} - I_t^{*(j)}| < \epsilon$, 或 $|U_{ni}^{(j+1)} - U_{ni}^{(j)}| < \epsilon (i = 1, 2, \dots, k)$ 为止.

从以上的分析过程可以看出,本文方法具有以下特点.

(1) 无须对电路中的节点、支路进行划分,只要将电路撕裂成若干个子电路即可.

(2) 由于撕裂支路看成是受一定条件约束的电流源支路,各个子电路是相对独立的,反复求解式

(7)、式(8)便可获得整个电路的响应. 整个过程主要是求解式(7), 即分析各个子电路, 方法简单.

(3) 由于各个子电路的求解是相对独立的, 所以式(7)可以采用改进型的节点电压法等其他有效的电路分析方法, 电路可以含纯电压源支路, 也可以是非线性的.

(4) 迭代法对于初始值的要求很高, 初始值取得不适当, 将可能导致发散或者振荡. 初始值选得越接近于实际值, 收敛越快. 然而, 在大规模电路中, 撕裂支路电流的实际值是未知的, 初始值 $I_t^{(0)}$ 选取得合理与否是很难预测的. 在本文方法中引入了电路的约束条件及松弛法, 降低了对初始值的要求. 只要松弛因子取得合理, 即使初始值取为 0, 也不影响迭代的收敛性.

3 算例

如图 2 所示电路, 已知 $I_{s1} = 3 \text{ A}$, $I_{s2} = 13 \text{ A}$, $I_{s3} = 2 \text{ A}$, $I_{s4} = 9 \text{ A}$, $I_{s5} = 4 \text{ A}$, $I_{s6} = 20 \text{ A}$, 所有电阻的阻值为 1, 二极管的伏安特性为 $I_D = I_S(e^{U_D/U_T} - 1)$. 取 $I_S = 10^{-9} \text{ mA}$, $U_T = 26 \text{ mV}$. 将支路 m、1 撕裂, 撕裂后的电路如图 3 所示.

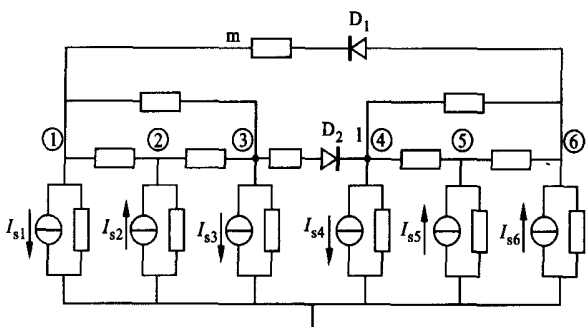


图 2 电路图

分别写出支路撕裂后, 两个子电路的方程及撕裂支路电流的约束条件

$$\begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{s1} - I_{mt} \\ I_{s2} \\ -I_{s3} - I_{lt} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n4} \\ U_{n5} \\ U_{n6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{s4} + I_{lt} \\ I_{s5} \\ I_{s6} + I_{mt} \end{bmatrix}$$

$$U_{n6} - U_{n1} = I_S(e^{U_{D1}/U_T} - 1) + U_{D1}$$

$$U_{n3} - U_{n4} = I_S(e^{U_{D2}/U_T} - 1) + U_{D2}$$

取 $I_S = 2 \times 10^{-6}$, 得各节点电压分别为

$$U_1 = 2.781\ 540 \text{ V}, U_2 = 5.995\ 066 \text{ V}$$

$$U_3 = 2.113\ 658 \text{ V}, U_4 = 0.886\ 342 \text{ V}$$

$$U_5 = 7.128\ 460 \text{ V}, U_6 = 4.004\ 934 \text{ V}$$

EWB 模拟程序的计算结果为

$$U_1 = 2.872\ 2 \text{ V}, U_2 = 5.995\ 1 \text{ V}, U_3 = 2.113\ 1 \text{ V}$$

$$U_4 = 0.886\ 9 \text{ V}, U_5 = 7.127\ 8 \text{ V}, U_6 = 4.004\ 9 \text{ V}$$

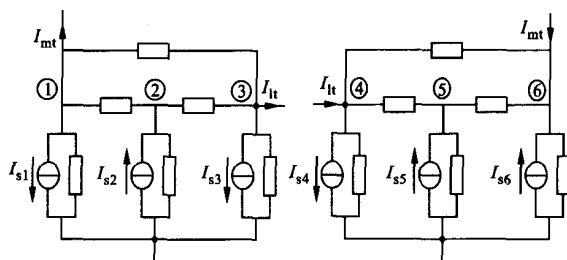


图 3 图 2 电路的子电路图

4 结论

改进型支路撕裂法不需要对电路中的支路、节点按规则进行划分, 也不需要电路方程的系数矩阵具有加边的块对角结构形式. 等效撕裂支路为受一定条件约束的电流源支路, 通过引入松弛法和迭代算法, 即可将大规模集成电路的模拟问题转换成若干个小规模子电路的模拟问题. 对于每一相对独立的较小规模的子电路, 可以使用任何有效的分析方法. 该方法可以分析非线性电路和包含纯电流源支路的电路, 对迭代的初始值要求低, 收敛快, 简单有效.

参考文献:

- [1] 彭沛. 大规模电路的模拟技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [2] 张良震. 大规模电路和超大规模集成电路计算机辅助设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- [3] 赵进全, 江慰德. 并行计算在电子线路分析中的应用[J]. 微电子学, 1997, 27(4): 258 - 261.
- [4] 商慧亮, 李锋. 二次物理分解法: 一种大规模非线性电阻网络的并行分析方法[J]. 复旦学报(自然科学版), 2003, 42(1): 29 - 34.
- [5] Li Feng, Woo P Y. A new concept of the virtual circuit and its application in large network analysis with tearing [J]. Int J Circ Theor App, 1999, 27(2): 283 - 291.
- [6] 邓建中, 刘之行. 计算方法[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

(编辑 杜秀杰)