

三维互连电感电阻的快速提取

杨 柳, 王泽毅

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: VLSI 电路的特征尺寸已降至深亚微米量级, 频率已达 2GHz. 为保证高性能电路设计的正确性, 需快速而精确地计算互连寄生电感电阻. 本文提出了一种适合三维层次互连结构的描述格式, 提出一种考虑趋肤效应的电流细丝自动划分方法, 实现了改进的非均匀立方体划分多极加速计算. 数值结果表明, 在可比精度下, 它比当前十分先进的多极加速提取软件 FastHenry^[1] 快数倍以至数十倍.

关键词: VLSI; 寄生电感; 电路模型法; 趋肤效应; 多极加速

中图分类号: O241 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)11-1593-04

A 3-D Fast Inductance and Resistance Extractor for Interconnects

YANG Liu, WANG Ze-yi

(Dept. of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the development of the VLSI circuits, the feature size has been decreased to the deep sub micron level, and working frequency has reached to 2GHz. In order to assure the correctness of the IC design with high performance, the parasitic interconnect inductance and resistance should be calculated quickly and accurately. In this paper, we propose a description format to fit for 3-D hierarchical interconnect, an approach to automatically partitioning filaments in consideration of skin effect. An improved multipole accelerative computation based on the non uniform cube subdivision is implemented. Numerical results show that it runs faster than the FastHenry^[1] from several to several tens' times with comparable accuracy.

Key words: VLSI; parasitic inductance; PEEC; skin effect; multiple acceleration

1 引言

VLSI 电路已普遍使用 0.18 微米及 5-6 层布线技术, 集成密度很大, 时钟频率达 2GHz 以上, 互连寄生效应对电路性能的影响已非常显著, 必须为电路的设计、综合、优化和验证快速提供寄生参数信息, 以缩短设计周期, 减少费用. 当前, 工作频率的提高, 远比特征尺寸下降的速度高, 这使得精确快速的寄生电感电阻提取对高性能电路设计具有关键意义^[1].

目前, 三维(3-D)互连寄生电感电阻计算可分作两类, 一是等效电路模型法, 70 年代由 IBM 公司 Watson 研究中心 Ruehli 等人引进互连参数提取, 得到广泛应用, 如著名商用软件 RAPHAEL 及 MIT 研发的先进软件 FastHenry^[1] 都基于这方法. 二是近年提出的直接边界元与间接边界元方法, 由于具有较少的离散变量并易于模拟超高频复杂结构下的涡流电磁效应, 已受到关注. 上述两类方法中, 前者相对成熟, 后者仍有待研究.

文献[1]以 Ruehli 提出的部分电感为基础, 将导体离散化为电流细丝, 形成网孔方程组, 并用 GMRES 迭代求解该线性方程组. 由于矩阵是稠密的, GMRES 迭代的矩阵向量乘花费很大, 为了提高计算速度, FastHenry^[1] 采用多极加速计算^[1,2]

技术, 具有显著的速度优势.

本文实现了基于电路模型法的三维互连寄生电感电阻快速提取. 与文献^[1]相比, 作了如下工作. 首先, 根据三维互连结构特点, 提出了一种描述格式, 能够描述顶视为梯形的互连结构, 与 FastHenry 仅能处理长方形导体块相比, 具有较好的几何描述精度. 其次, 根据文献[3]趋肤深度的概念, 提出一种考虑趋肤效应的电流细丝划分方法. 除此, 本文采用一种改进的非均匀立方体划分多极加速方法, 并在其基础上对立方体划分层数和电流细丝再细化两方面作了改进, 使精度得到保证, 运算速度较文献[1]的均匀立方体划分有较大提高.

第二节介绍基于部分电感的电路模型法, 第三节介绍一种互连描述格式, 第四节讨论导体的自动划分, 第五节介绍非均匀立方体划分方法的改进, 第六节给出数值结果与比较, 第七节为结论.

2 电路模型法

将每个直导体在截面上离散为平行的细导线段, 假定电流在细导线截面上均匀分布. 该离散系统的电路如图 1 所示. 细丝的电流与电压有如下关系

收稿日期: 2001-11-28; 修回日期: 2002-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69876024); 国家自然科学基金国际合作交流项目基金(No. 60121120706); NSF under award(No. CCR-0096383)

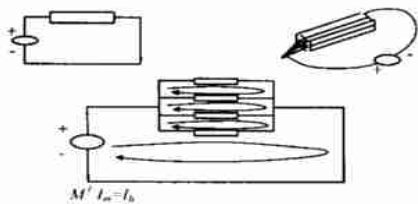


图 1 一个导体离散化为细丝后对应的电路及网孔

$$ZI_b = V_b \quad (1)$$

$$Z = R + j\omega L \quad (2)$$

其中, I_b , V_b 分别为细丝的电流和电压, Z 为细丝阻抗, ω 是频率, $R \in \mathcal{R}^{b \times b}$ 的对角线元素为细导线段直流电阻, $L \in \mathcal{R}^{b \times b}$ 是稠密的部分电感对称矩阵, 其元素为

$$L_{ij} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{1}{a_i a_j} \int_i \int_j \frac{l_i^0 l_j^0}{r_{ij}} dv_j dv_i \quad (3)$$

其中, $a_i a_j$ 为细导线段 i 与 j 的截面面积, V_i , V_j 为其体积, $l_i^0 l_j^0$ 为细导线段的单位轴向向量, r_{ij} 为两细导线段微元 dv_j 与 dv_i 之间的距离。

根据 Kirchhoff 电压定律, 与该离散系统对应电路的节点电压有

$$MV_b = V_s \quad (4)$$

而网孔中的电流满足

$$M^T I_m = I_b \quad (5)$$

其中, M 为离散电路的网孔矩阵, 上标 t 表示转置, $I_m \in \mathcal{R}^p$ 为网孔电流向量。

将式(4)与式(5)代入式(1), 得到

$$M Z M^T I_m = V_s \quad (6)$$

用 GMRES 迭代求解方程(6), 就可以计算出导体的电感 L 和电阻 R 。

3 一种互连描述格式

当前, 半导体生产普遍使用平面工艺, 这意味着互连导线都呈现层次的分布。若以衬底作为 XOY 平面, 则各层互连线沿 Z 轴水平分布, 如图 2 所示。针对这种结构特点, 本文设计了一种便于描述与处理形体间几何关系的格式, 它由二维互连结构描述扩展而成, 以描述互连都呈层次分布的准 3-D 结构为主, 并兼有描述如通孔及封装中出现的非层次互连结构的能力。

为适应描述层次结构的导体, 引入层的定义。在层的定义中可包括所有该层导体共有的信息。用层定义导体时, 导体的位置坐标是二维的, 并且同层导体很多相同特点都可以放在层的定义中, 而不必

对每个导体加以定义, 方便了用户。同时, 为适应对复杂非层次分布互连结构的描述, 本语言也可以描述穿越层的导体, 这时, 导体描述不依

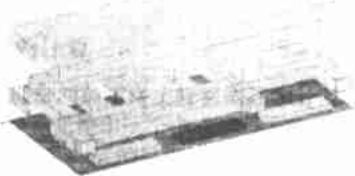


图 2 一个典型的三维层次互连结构

赖于层的定义, 导体位置坐标变成三维的。

应当指出, 文献[1]只能描述和计算顶视为矩形的结构, 而在新的描述格式中, 可描述和计算顶视为梯形的结构, 在涉及环等复杂结构计算时, 具有较高的几何描述精度。

4 细丝的自动划分

趋肤效应将使导体截面电流密度呈现非均匀分布, 本文提出的细丝自动划分方法即基于上述考虑, 介绍如下。当电流密度降低至导体表面的 $1/e$ 处称为趋肤深度, 它的公式^[3]为

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)} \quad (7)$$

其中, f 为频率, σ 为导体电导率, μ 为介质的磁导率。

(1) 如果 $W/n \leq \delta/2$, 邻近导体表面 $n-1$ 个电流细丝的尺寸 $\Delta W = \delta/4$, 中间电流细丝尺寸为 $\Delta W = W - (n-1)\delta/4$ 。

(2) 如果 $W/n > \delta/2$, 邻近导体表面 $n-1$ 个电流细丝的尺寸 $\Delta W = \delta/2$, 中间电流细丝尺寸为 $\Delta W = W - (n-1)\delta/2$ 。

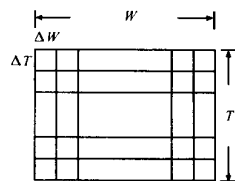


图 3 5×5 的细丝划分方法

用同样的方法可以求出高度方向电流细丝的尺寸 ΔT 。默认情况下, 每个导体在宽度和高度上的划分数为 5×5 , 如图 3 所示。

FastHenry^[1]中电流细丝的划分是由用户确定的, 并未考虑趋肤效应。因此, 当频率较高, 电流细丝尺寸未能与趋肤深度相适应时, 往往导致较大计算误差。

5 非均匀立方体划分的多极加速计算

多极加速的基本原理是运用了称为多极展开 (Multipole Expansions) 和局部展开 (Local Expansions) 两种近似计算。该方法把电场计算分为近场 (near field) 和远场 (far field) 两部分, 近场部分由通常的直接计算完成, 远场部分则用上述两种近似加速, 使计算复杂度呈线性关系 $O(n)$, n 为未知量数。多极加速方法在文献[1, 2]中有详细介绍, 本文不赘述。

应用多极加速算法, 必须区分各粒子间的远近关系。Greengard 等人先后提出了基于均匀立方体划分的快速多极算法和基于非均匀立方体划分的自适应多极算法^[4]。FastHenry^[1]采用均匀立方体划分, 把多极加速方法引入电感提取, 取得良好的效果。

通过对计算区域作不同层次的立方体 (cube, 三维) 或盒子 (box, 二维) 划分以区分粒子间的聚集程度和远近关系。FastHenry^[1]在使用均匀立方体划分时, 默认划分层数为 3。图 4 (b) 是对示于图 4 (a) 的粒子分布进行均匀盒划分的情形。但对大多数来自实际版图的互连寄生器件来说, 离散后的粒子分布往往极不均匀, 将产生大量空盒, 使计算效率严重下降^[2, 4]。图 4 (c) 是非均匀盒划分的情况。它与均匀盒划分的区别在于: 只细分那些粒子数大于某常数的盒, 从而避免空盒的大量出现^[2, 4]。上述非均匀盒划分存在四点不足, 一是未能避免出现空盒, 如图 4 (c) 中的盒 A 和盒 B; 二是某些粒子的近场较之均匀划分明显增加, 如图 4 (c) 中的点 a, 整个计算域

都是它的近场,而在均匀划分下,对 a 的作用均可视为远场;三是对某些导体分布极不均匀的版图,在粒子密度很大的区域,盒子层数明显增加,这样将导致多极加速上下行过程明显变慢;四是当电流细丝的尺寸远大于盒子尺寸时,将会导致远场计算的误差明显增加.为此,在非均匀立方体划分的同时,本文对划分层数以及电流细丝再细化作了改进,具体如下:

- (1) 完全去除空盒;
- (2) 对如图 4(c) 中所出现的盒子强行细分;
- (3) 当盒子所在层数大于选定的最大层数 FinestLevel ,不再细分.本文 FinestLevel 取值为 8.
- (4) 当电流细丝尺寸大于盒子尺寸的 2 倍时,沿电流细丝长度方向将电流细丝切割成 2 份.

在使用非均匀立方体划分同时,针对电感计算特点采取的上述改进措施,既能保证计算速度,又改善了计算精度.

6 数值结果与比较

计算程序用 C++ 语言编写,名为 FIE(Fast Inductance Extraction),在 SUN Enterprise450 上运行.

6.1 圆环的计算

本文提出的描述格式能够描述和计算顶视为梯形的结构.这里给出一个中心半径为 2.4142cm ,横截面为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的环状结构例子,如图 5(a).FastHenry 只能计算顶视为矩形的结构,因此用 8 个小矩形近似这个环状结构,如图 5(b)所示,再用本文介绍的格式描述 8 个梯形作近似,如图 5(c).得到的结果分别与文献[5]中给出的解析结果作比较.实验结果表明,用梯形近似环状结构,由于几何精度高,计算结果比 FastHenry 准确.

表 1 环状结构例子的结果比较

Grover ^[5] (μH)	FastHenry (μH)	Error	梯 形 (μH)	Error
5.44×10^{-2}	5.23×10^{-2}	3.86%	5.42×10^{-2}	0.38%

表 2 不同划分数下的结果比较

	标准结果	自动划分	FastHenry	FastHenry	FastHenry	FastHenry	FastHenry	FastHenry	FastHenry
划分数	15×15	5×5	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7	8×8	9×9
结 果	0.1486nH	0.1485nH	0.1538nH	0.1517nH	0.1506nH	0.1499nH	0.1494nH	0.1492nH	0.1490nH
误 差		0.07%	3.50%	2.09%	1.35%	0.87%	0.54%	0.40%	0.27%

示于图 6.导体的电导率为 $5.81\text{e}7$,计算频率为 1G .从表 3 可看出,FIE 与 FastHenry 计算结果符合的比较好,最大误差仅为 2.28%.在速度上,FIE 优于 FastHenry.对规模最大的例子 Plane,FIE 有 1608 个变量,仅用 7.63 秒,而 FastHenry 用了 116.4 秒,加速比为 15.26.

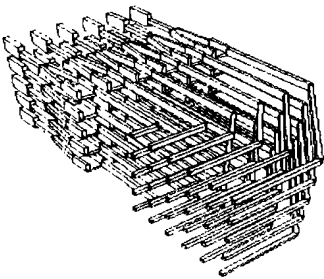


图 6 FastHenry 提供的 30pin 算例

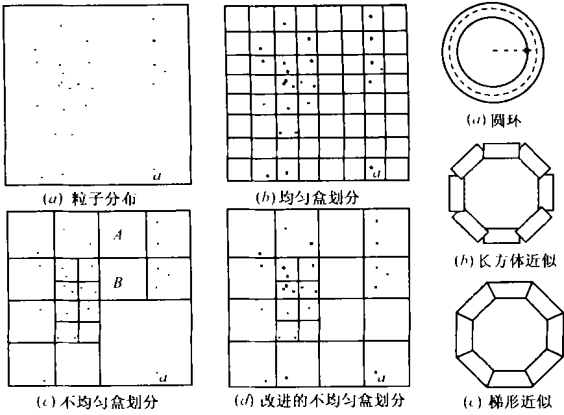


图 4 不同的盒划分(最细层盒所含粒子数小于等于 4)

图 5 分别用矩形和梯形近似圆环

6.2 导体的自动划分

根据趋肤深度定义及电流分布规律,本文提出了一种依据趋肤深度的导体自动划分方法.这里给出一个长宽高分别为 $20\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 的长方体导体,通过计算频率 20GHz ,取横截面划分分数细至 15×15 时计算结果作为标准的算例,说明本文自动划分算法是有效的.在该频率下,趋肤深度 $\delta = 0.467\mu\text{m}$.FastHenry 需将划分数提高至 11×11 方能使得邻近导体表面电流细丝尺寸小于趋肤深度.用 FastHenry 的划分方法和本文提出的依据趋肤深度的自动划分方法计算该例子,从表 2 可以看出,在精度可比的情况下本文方法的划分数远小于 FastHenry 的划分数.

6.3 计算速度的比较

本节将 FIE 与麻省理工学院(MIT)研制的三维电感和电阻提取程序 FastHenry^[1]作比较.FastHenry 具有优秀的计算性能,常被用作速度上的比较标准.FastHenry 在网上提供了五个表明其计算性能的算例,Simple: 仅一块导体, Vias: 通孔, 30pin: 30 个管腿, Hole: 底版有个孔, Plane: 底版,其中的 30pin

应当指出,表 3 数据还表明,规模越大,FIE 的加速比也越大.下面以 30 个管腿的算例考察产生这现象的原因.当变量数增加时,图 7 显示了 FIE 对 FastHenry 在总时间加速比、近场计算时间加速比、远场计算时间加速比三条曲线.当变量数增加时,FastHenry 的近场计算量急剧增加,而本文使用非均匀立方体划分方法的近场计算量变化不大,这是计算速度得到较大提高的主要原因,如图 7(b)所示.从图中可以看出,随着变量数的增加,总加速比越来越大.这也表明,改进立方体划分的多极加速计算由于采用完全避免空立方体产生以及控制划分层数等策略,有效限制了近场计算的过分增长.

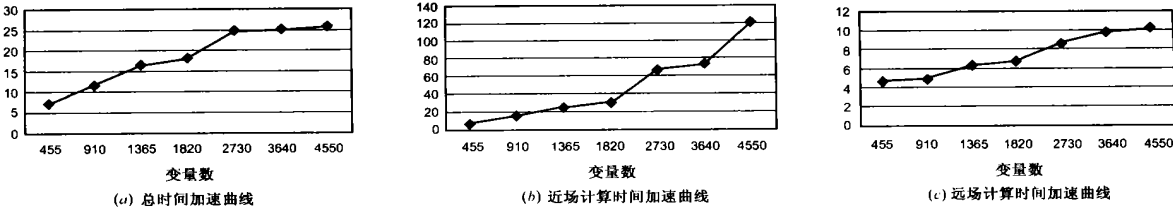


图 7 随变量数增加,30pin 加速比的变化曲线

表 3 FIE 与 FastHenry 就其提供的五个算例在可比精度下的速度比较

		变 量 数	电 感 (10^{-12}H)	时 间 (s)	误 差 (%)	加 速 比
Simple	FIE	128	63.37	0.40	1.17	2.75
	FastHenry	128	64.12	1.10		
Vias	FIE	372	5.56e7	6.51	2.28	3.94
	FastHenry	372	5.69e7	25.66		
30pin	FIE	455	2.60	2.19	1.51	7.20
	FastHenry	455	2.64	15.76		
Hole	FIE	724	126.49	1.03	1.34	7.60
	FastHenry	724	128.63	7.83		
Plane	FIE	1608	483.21	7.63	0.68	15.26
	FastHenry	1608	479.93	116.4		

7 结 论

本文应用电路模型法求解三维 VLSI 寄生电感电阻,介绍了一种方便层次互连结构描述,兼可描述非层次分布互连结构的描述格式.提出一种依据趋肤深度,对包括顶视为梯形的导体进行自动划分,实现了基于改进立方体划分,并作细丝自动细化的多极加速计算.以上工作使程序原型 FIE 取得了速度与精度的良好平衡.多个 FastHenry 提供的算例结果表明,在可比精度下,本文算法比优秀的 FastHenry 快数倍以至数十倍.

参考文献:

[1] M Kamon, M Tsuk, C Smithhisler, J White. FastHenry: A Multipole Accelerated 3-D Inductance Extraction Program [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Part 2, 1994, 1750- 1758.
[2] Z Wang, Y Yuan, Q. Wu. A Paralled Multipole Accelerated 3-D Capacitance Simulator Based on an Improved Model [J]. IEEE Trans. on CAD, 1996, 15(12): 1441- 1450.
[3] W T Weeks, L L Wu, M F McAllister, A Singh. Resistive and Inductive Skin Effect in Rectangular Conductors [J]. IBM Journal of Res, and Developments, 1979, 23(6): 652- 660.

[4] J Carrier, L Greengard, V. Rokhlin. A Fast Adaptive Multipole Algorithm For Particle Simulation [J]. SIAM J Sci. Stat. Comput. , 1988, 9 (4)669- 686.
[5] Grover, Frederick Warren. Inductance Calculations, working formulas and tables [M]. Inc, New York: D. Van Norstrand Company, 1946: 94 - 99.

作者简介:



杨 柳 男, 1977 年 12 月出生, 广西人, 博士研究生, 现从事 VLSI 中 3-D 互连寄生参数提取算法的研究.



王泽毅 男, 1940 年生于香港, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 VLSI CAD 中的器件模拟、互连分析及其中的串并行数值方法.