

超平面概略布线算法的研究*

陈志超 薄建国 马佐成 庄文君

王守觉

(中国科学院北京软件工程中心 北京 100083)

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文提出体现多层布线内在本质约束的新模型:超平面布图模型及超平面概略布线算法. 该算法以全新的逆向删冗策略成功地解决了布线线序问题,使线网布线真正达到并行处理; 基于总体分析方法,以布线层数和通孔最少为目标,通过动态地分析线网间相互位置关系, 全局考虑地释放各线网占据的不合理布线资源,使布线过程避免了迭代,以较高处理效率获得高精度的解.

EEACC: 1130B, 2210B, 2570; CCACC: 5110C, 5120

1 引言

当今的集成电路技术正沿着超大规模,高集成度,高速度和高成品率方向发展,随着这一发展的深入,对集成电路的制造和设计提出了新的挑战. 当前,光刻线宽已进入亚微米水平,单片集成度已近百万门级,多层布线工艺已趋成熟,超平面布图模型的出笼成为一种势在必行的趋势. 从布图整体上讲,它解决了电路规模增大到一定程度所带来的集成密度和电路速度问题.

2 超平面布图模型

超平面布线是在传统的通道布线模型(在 1 至 2 布线层中完成布图布线)之外的立体空间进行布线. 其线网引出端点不再局限于模块四周的 Pin,也可从模块内部由通孔引到上层布线空间. 通孔位置可在模块内同一线网的任何位置上,其端点可以是一条线上的任何点,称其为端点流. 超平面布线的端点流使布线具有更大的灵活性并消除了各级模块内向边界引端点的方向性错误.

定义: **超平面:** 超平面可以抽象成一个立体空间,底面由于挖去了子电路模块这个布线障碍而变得凹凸不平,线网的端点(流)位于这个立体表面的随机位置. 线网的互连是在这个立方体内实现的,在 x, y 方向上线网沿由设计规则规定的 grid 网格走线,在 z 方向上线网走线在各个布线层上.

* 国家自然科学基金资助项目,国家“八五”攻关资助项目

陈志超 博士,从事大规模集成电路版图计算机辅助设计的研究,兴趣在计算机网络,ICCAD 及图论研究

1995 年 12 月 5 日收到初稿,1996 年 3 月 13 日收到修改稿

如果通道模型实现布线的子电路模块是在下二层上紧密排列,占据了这二层的所有布线空间,则超平面空间退化成 M 减 2 层的立方体,底面光滑,这是超平面模型一个较简单的情况。此文主要研究这种简化了的模型。

3 超平面布线

假设布局已完成,布线模型是简单的 M 减 2 层无障碍立方体,线网端点在立方体表面随机分布,两点线网,自由分层布线。100% 布通率作为布线第一目标,通孔、拐弯作为第二目标。对于连线长度最小化目标,我们在线网概略布线阶段,在布线模式上加以某些限制,使其在此阶段布线结果中,所有线网都以最短路径实现互连。

线网的布线区域:为简化线网连线长度与电路性能的关系问题,在布线前期(概略布线阶段)令所有线网都沿最短路径连线。因此线网可能的走线区域被限制在两端点所构成的矩形区域范围内。布线可分为四个阶段:概略布线、详细布线、线网分段及层分配、几何布线。在布线前两个阶段,决定每个线网在超平面上的位置。本文中我们研究平面上线网的拓扑布线。

概略布线:按照一定规则把平面空间划分成一系列矩形大网格。这些大网格基于 grid 网格,但形状和大小不一定一致。这些大网格称之为 GRR(Global Routing Region)网格。此网格有的很大,有的也可能很小,小到等同于一个 grid 网格。每个线网概略布线结果是从由连通两个端点所在 GRR 的一系列相连 GRR 所表达的,线网布线路径是 GRR 路径而非 grid 路径。为控制线网连线长度,令所有线网沿最短 GRR 路径布线。

影响线网布线总层数最小的一个关键因素是线网走线路径分配不均匀,造成某些局部区域线网过于拥挤,使后续阶段布线(几何布线)不可布,从而布线层数增大。为达到层数最少的目标,应该尽可能避免出现拥挤的局部布线区域。最大 GRR 溢出量最小化可近似表达避免局域线网拥挤,进而近似表达层数最少的总目标。在自由分层线网最终布线中,合理地决定线网拓扑路径,减少线网交叉是减少通孔的有效措施。对于概略布线,线网交叉最少的目标函数能够比较好地体现通孔最小化目标。

超平面布线总目标是:层数最少及通孔和拐弯最少,因此概略布线目标函数定义为:①最大 GRR 溢出量最小;②线网总交叉数最少;即①minimize Den; ②minimize $\sum \text{Cross}$ 。

4 概略布线算法

我们的逆向过程删冗法能完全排除线网布线线序造成的布线结果精度不稳定,避免拆线重布的迭代改善过程的效率低问题。

逆向删冗法:允许线网交叉重叠前提下,线网连通路径是覆盖其端点的矩形布线区域,布线过程是在不破坏线网连通情况下,逐步“蚕食”(rode)每一线网的布线区域,使线网由矩形布线区域的面变成窄条连通的线。

对于多层无障碍布线问题,首先决定线网平面拓扑布线。然后把这个拓扑解进行分段和线网分层,最后确定每一线网的 LAYOUT 解。

逆向删冗法在本概略布线应用中,线网初始布线区是线网两端点所形成的矩形区域,蚕食的基本单位是 GRR,线网最终布线结果是相连 GRR 的集合。

定义 1:线网 GRR 路径:以 GRR 为基本单位,保持线网连通的 GRR 集合.如果从此 GRR 集合中去除任一 GRR 元素,线网连通性将被破坏.

定义 2:线网最短 GRR 路径:从线网一个端点沿 GRR 路径搜索,相邻 GRR 总是出现在当前 GRR 水平或垂直数轴的同一方向上.

[一]GRR 的生成:每一两点线网画出其矩形包络线,从而平面被分割成小块直线多边形面积.把每一拐点沿水平和垂直两方向延伸直至所有覆盖此拐点的线网覆盖区域被分割.即所有覆盖此拐点的线网构成的外围包络线就是直线延伸的限界.见图 1.

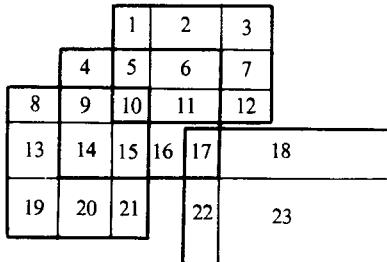


图 1

性质 1:对每一线网来说,只要内部包含其它线网的拐点(包括 terminal),就有通过此点的横竖两条分隔线.

性质 2:同一 GRR 所有 grid 位置针对覆盖它的线网来讲,具有完全相同的交叉属性.

GRR 这种划分的优点:(1)线网的拓扑总体路径与其它线网的交叉属性有密切联系(见后面线网局域分析).(2)每一 GRR 都为矩形,布线资源和溢出量较易于估算.(3)由于概略布线面向 GRR 网格,则在线网间交叉属性没受到影响情况下,对计算机存贮容量的要求比针对 grid 网格有很大降低,从而运算效率大大提高.

[二]概略布线第一目标函数的进一步讨论.最大 GRR 溢出量最小化目标与总交叉数最少有矛盾冲突的地方,为使线网不致于拥挤于某局部区域,就不得不牺牲线网某些较少交叉路径而改走交叉较多而溢出量较小的 GRR 路径.实际问题要求是:GRR 能够提供足够的线网布线 grid 网格资源,在此 GRR 就不会拥挤.因此目标函数可修改为 $\text{den} < C$, C 为一个负常数,是 GRR 上 grid 网格资源满足布线要求外留出的裕度.

定义 3:GRR 饱和:如果覆盖 GRR_j 的所有线网都不可蚕食 GRR_j ,则此 GRR 饱和.

当布线过程达到了第一目标函数 $\text{den} < C$ 后,其它 GRR 的溢出量不大于 den ,因此后续的删冗过程全心致力于总交叉数最小目标.若最大溢出量 GRR 达到饱和而其 $\text{den} \geq C$,则对剩余未饱和 GRR 继续以 $\text{den} < C$ 为第一目标进行逆向删冗的 GRR 蚕食过程.

[三]概略布线算法流程

STEP1:把平面空间划分成 GRR 网格.

STEP2:对所有未饱和 GRR 选择具有最大准溢出量 Subden 的 GRR_i .

STEP3:对覆盖 GRR_i 的所有线网轮流进行局域分析,求出其相应的损益值 rodevalue .

STEP4:蚕食具有最大 rodevalue 值的可有效蚕食线网的 GRR 区域,使此线网 GRR 覆盖集减少,重新计算 GRR_i 的准溢出量.

STEP5:如果 $\text{Subden} \geq C$ 转 STEP2.

STEP6:对所有未饱和 GRR 选择具有最大线网覆盖数的 GRR_j .

STEP7:对覆盖 GRR_j 的所有线网进行局域分析求出其相应的损益值 rodevalue .

STEP8:蚕食具有最大 rodevalue 值的线网的 GRR 面积,使此线网 GRR 覆盖集减小.

STEP9:如果存在未饱和 GRR 转 STEP6.

STEP10:结束.此时,所有线网的 GRR 覆盖集就是概略布线的结果.

[四]线网局域分析

线网局部分析的任务是研究每一线网最终布线是否应该覆盖此 GRR, 给出覆盖此 GRR 合理性的定量值. 通过比较所有主线网的这个定量值, 选择一个或若干个线网, 蚕食掉它们覆盖域中的这个 GRR, 使其可布线区域进一步缩小.

定义 4: 主线网: 局部分析的一个对象线网.

定义 5: 从线网: 除主线网外的其它任意线网.

定义 6: 限制性最优路径: 是指主线网当前布线区域中, 不覆盖指定 GRR 的具有最少必然交叉的 GRR 路径. 其必然交叉的线网数为限制性最优路径的交叉数.

定义 7: 条件最优路径: 指主线网当前布线区域中, 必覆盖指定 GRR 的具有最少必然交叉的 GRR 路径. 其必然交叉的线网数为条件最优路径的交叉数.

如图 2 所示, 粗线表示主线网布线区域, 细线表示从线网布线区域(net_1, net_2, net_3). 对 GRR6 的限制性最优路径为 $(1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 11)$ 或 $(1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 11)$. 对 GRR6 的条件最优路径为: $(1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 11)$ 或 $(1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 11)$. 注意与 net_3 的交叉不是必然交叉, 因 net_3 的最终布线可能并不通过 GRR2, 4, 5, 7, 8.

定义 8: 删除损益值 rodevalue: 线网 K 对 GRR_i 的 rodevalue 等于条件最优路径交叉数与限制性最优路径交叉数之差.

由于 rodevalue 取的是限制性最优路径与条件最优路径的交叉数之差, 它说明如果主线网最终走线穿越这个 GRR, 所产生的交叉数要比不穿越这个 GRR 的交叉数多 rodevalue 个. rodevalue 值越大, 则此主线网越不应穿越这个 GRR, 而越应蚕食掉这个 GRR. rodevalue 值反映线网最终路径穿越某 GRR 的不合理性(仅指交叉数), 它只是对实际交叉情况的一个近似.

性质 3: 限制性(条件) 最优路径交叉数是同 GRR 路径实际交叉数的下限.

由于最优路径交叉数取的是当前必然交叉的线网数, 因此实际路径上交叉数要多于最优路径交叉数. 从后面的分析可知, 限制性(条件)最优路径交叉数是对实际交叉数的较好近似, 随着删冗过程深入, 各线网布线位置逐渐确定, 这种近似越来越精确, 最优路径交叉数逐步逼近实际交叉结果值. 且 rodevalue 取的是两种最优路径交叉数的相对差值, 抵消掉一部分误差.

1 线网相互关系分析

平面上, 主线网与从线网两线间的关系实际上是其接点相对位置的某种函数^[4]. 从主线网的两个端点出发分别作与数轴平行的四条直线, 可将平面分成 25 个区域: 9 个面域, 12 个线域, 4 个点域. 假设从线网的端点只位于 9 个面域之中, 则两线网位置关系有 $c_{19} + c_{29} = 45$ 种可能. 这 45 种可能情况按照可能的交叉属性可硬性分成 14 类, 对每类分别讨论其交叉属性, 对于从线网点位于线域(点域)的情况, 可把端点位置归到相邻两个(4 个)面域中的任一个之中. 这样, 从线网点如果位于点域或线域, 则主、从线网相对位置可能归属 45 种不同的情况, 进而归并到 14 种不同的类中. 虽然归并到不同的类, 由于其接点位置处于各类的边界上, 主从线网的交叉属性本质上是相同的, 计算上并不会引起误差. 在图 3 中我们列

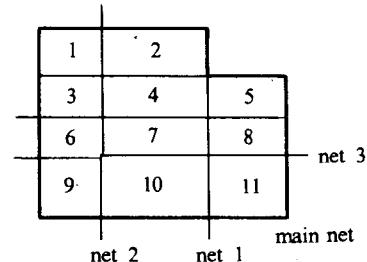


图 2

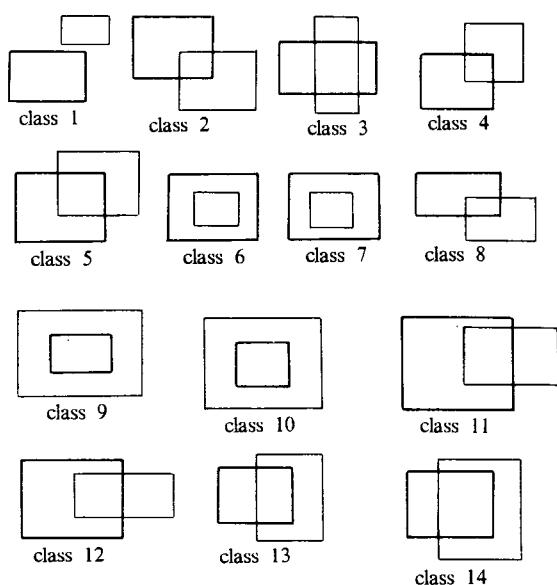


图 3

举了 14 类相对关系的典型图. 其中粗线表示主线网, 细线表示从线网, 线网端点由小黑点表示.

定义 9: 阴影区 shadow: 主线网布线域中一个 GRR 集合. 如果主线网最终布线结果覆盖此中的任一 GRR, 则必与产生此阴影区的从线网交叉.

认真分析上述 14 类情况, 可得知, 从线网对主线网构形没有影响, 如 1, 2, 3, 10, 13 类. 从线网不论自己布线区形状如何, 都对主线网构形产生相同的影响, 如 4, 6 类. 从线网不同的布线区形状对主线网产生不同的影响, 如 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14 类. 一般地讲, 主从线网反向, 主线网的阴影区与从线网布线区形状无关, 阴影区是由从线网的端点和主线网布线区域决定. 而主从线网同向, 阴影区则由主从线网覆盖区域共同决定.

因此, 对线网局域分析根据当前线网布线区状态动态地进行, 就可以对线网后续布线构形方向产生极为精确的指导, 使线网同时布线的优越性得到进一步加强.

2 改进的李氏搜索算法搜索最优路径

在主线网布线区内, 存在着各种不同形状和大小的阴影区, 主线网最终走线进入一个阴影区, 就必然与引起此阴影的从线网交叉, 在线网局域分析中要计算的限制性最优路径和条件最优路径都是最少交叉的路径, 即走线路径尽可能避开这个阴影区, 或者说, 走一条穿越最少阴影区的路径.

李氏算法不仅只应用于最短路径问题, 它还可以寻找最少费用路径的一类问题, 只要路径的费用函数是单调的(即如果 P 是 Q 路径的子路径, 则 P 的费用不大于 Q 的费用), 它就能够保证找到的路径是最少费用路径. 在我们的问题中, 路径的费用是此路径穿越的阴影区 shadow 个数. 这个费用函数是单调的. 因此算法能够保证找到最少穿越阴影区的最优路径. 算法的时间复杂性为 $O(k)$. 其中 k 为此线网可布线区的 GRR 个数.

李氏算法中提高布线效率的方法在我们的问题中都得到了充分的应用. 例如区域“迷宫”法中外加一个矩形框, 限制搜索网格数. 在我们的问题中, 这个外加框就是覆盖线网接点的最小矩形. Rubin 方法的定向搜索技术由于我们的布线路径的方向单调限定, 得以最充分的效率提高.

定理 1: 概略布线算法求出的所有线网其 GRR 路径是最短路径. (证明略)

[五] 概略布线算法评价

逆向删冗过程是一种面向布线区的算法, 很容易做到线网同时布线. 删冗布线初期的失误(由局域分析不精确造成)对最终布线结果造成影响较小. 随着蚕食 GRR 过程的不断进行, 线网布线区域缩小, 逐渐成形, 线网间相互关系的局域分析越来越精确, 使删冗沿更精确的方向进行.

5 结论及实验结果

表1给出我们实验例子的统计结果(SUN4工作站上,路径拓扑布线结果——规定线网沿“最短”路径走线,不可绕行——端点平面上位置是随机数发生器产生的)。

本文研究当前及未来工艺条件下的布线问题,在新模型下以全新布线方法进行多层平面布线。算法以动态分析线网间布线关系作基础,着眼于全局优化,具有很好的布线总体分析能力,达到了十分理想的总体布线结果。由于逆向删冗的并行处理策略,避免了线网调整的迭代处理,布线效率较高。

表1

	线网数	交叉数	溢出量	运算时间
例1	18	31	0	1"
例2	30	40	0	1'14"
例3	50	21	0	41"
例4	60	251	0	11'28"
例5	100	197	1	16'47"
例6	100	361	0	21'34"
例7	500	4068	0	130'

参 考 文 献

- [1] 鲁华祥,庄文君,王守觉:“通道损益分析法三层通道区布线算法”,《全国第四届DA会议论文集》,196~201,1993.
- [2] 鲁华祥,庄文君,王守觉:“自由分层式单ZONE三层通道区布线算法研究”,《全国第六届ICCAD论文集》,179~182,1991.
- [3] 庄文君,王守觉:“一种基于总体考虑的布线方法”,王守觉赴美讲学报告,1984.
- [4] 庄文君,计算机学报,1984,7(3): 217~227.
- [5] S. E. Hambrusch, IEEE Trans. on CAD, 1985, 4(1): 23~30.
- [6] Douglas Braun *et al.*: “Chameleon: A new multi-layer channel router”, Proc. 23rd Design Automation Conference, 1986, 495~501.

Algorithm on Superplane Routing

Chen Zhichao, Bo Jianguo, Ma Zuocheng and Zhuang Wenjun

(Beijing Software Engineering Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Wang Shoujue

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 5 December 1995, revised manuscript received 13 March 1996

Abstract This thesis builds a new layout model—superplane model. The new model can explore the nature of multilayer layout better than ever. Based on this new model, the routing has been studied emphatically and the superplane routing algorithm has been created simultaneously. The “rode” technique has been proposed for very successful solving the net order and all nets can be routed parallelly. For aiming at objective of minimum number of routing layer and via, dynamical distinguishing the related position of nets, global view of releasing the unreasonable resources owned by net, iteration could be avoided in the routing and precise results have been reached efficiently.

EEACC: 1130B, 2210B, 2570; CCACC: 5110C, 5120