

# 一个可处理多种约束的多层布线通孔最少化算法

马 琪<sup>1</sup>, 严晓浪<sup>2</sup>

(1. 杭州电子工业学院 CAD 研究所, 浙江杭州 310037; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027)

**摘 要:** 本文分析了常用的 VLSI 多层布线图模型线段-相交图 SCG 的局限性, 提出了对 SCG 模型的修正, 并基于该模型用模拟退火算法来解决通孔最少化问题, 算法可以处理严格和非严格分层的布线, 并考虑了许多物理约束的处理方法. 实验证明算法可以较大程度地减少通孔.

**关键词:** 多层布线; 通孔最少化; 线段-相交图; 模拟退火

**中图分类号:** TN402      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2001) 08-1086-04

## Constrained Via Minimization with Practical Considerations for Different Styled Multi-Layer Routing

MA Qi<sup>1</sup>, YAN Xiaolang<sup>2</sup>

(1. CAD Research Center, Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

2. School of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** The weakness of the commonly used Segment Crossing Graph (SCG) model for VLSI multi-layer routing is first discussed, then a Modified Segment Crossing Graph model is presented, and finally a modified simulated annealing approach for constrained via minimization problem on the basis of this model is given. In the algorithm, many physical constraints are taken into consideration, and both restricted and non-restricted layer model routing can be treated. The experimental results prove the number of vias can be reduced largely.

**Key words:** multi-layer routing; constrained via minimization; SCG; simulated annealing

### 1 引言

通常 VLSI 多层布线采用的分层原则是 HV 严格分层原则, 这种分层原则对于提高布通率很有效, 但引入了大量通孔. 通孔降低了芯片的可靠性和成品率, 增加了制造成本, 还增大了芯片面积, 对电路性能也会产生一定影响. 因此, 减少芯片中通孔的数目是十分具有现实意义的问题. 另外, 非严格分层的布线结果由于其布线算法大都没有采取通孔优化策略, 其通孔数目也可以大量减少.

通孔最少化问题可分为两类——有约束通孔最少化问题和无约束通孔最少化问题, 有约束通孔最少化 Constrained Via Minimization (CVM) 即: 对一个已经完成的详细布线, 如何在不变布线线段平面位置的条件下, 求一个合理的线段分层, 使所需的通孔数目最少. 图 1(a) 是 HV 分层四层布线的例子, 存在大量通孔. 图 1(b) 是同一个布线经有约束通孔最少化后的分层, 由于没有局限于 HV 分层原则, 整个布线只需一个通孔.

文献[1]最先描述了三层 CVM 问题, 并用平面图顶点着色问题证明了 3CVM 的 NP 完全性, 还提出了一种局部优化

的算法, 这种算法逐一检查每个通孔, 通过对与该通孔相连的线段布线层再分配, 来消除该通孔. 文献[2, 3]则提出了总体优化的 3CVM 算法, 是将已布线段当无层处理, 用线段-相交图模型 SCG 来表示这种无层布线, 再将每一线段分配到更好的层位上, 使通孔尽可能多地被消去, 结果比文[1]要好. 文献[4]对[2]进行了扩充, 用 SCG 来描述多层 CVM ( $k$ CVM,  $k \geq 3$ ) 问题, 并提出了一个总体优化和局部优化相结合的启发式算法. 但由于 SCG 模型对  $k$ CVM 问题描述的局限性, 上述算法的优化效果受到了一定程度的影响, 且都不能对非 HV 分层的布线进行通孔优化; 又由于算法设计上的欠考虑, 许多来自实际的物理约束的处理都被简化甚至忽略了.

本文通过分析 SCG 图模型的局限性, 对该模型进行了修正, 使它能表征多种约束, 能同时描述严格/非严格分层布线, 并基于此提出了一个多层布线通孔最少化的模拟退火算法, 该算法考虑了许多物理约束的处理.

### 2 线段-相交图 SCG

#### 2.1 线段-相交图的概念

线段-相交图模型 (Segment Crossing Graph SCG) 是文献

[4]用以描述  $k$ CVM 问题的图模型, 有以下定义:

定义 1 所有布线段的平面位置已确定, 但其分层未定的一个“未分层”或曰“不完整”的详细布线称为无层布线, 如图 1(c) 即为图 1(a) 和(b) 的无层布线.

定义 2 在无层布线中, 原来布线中的通孔称为候选通孔, 图 1(c) 中用小圆点  $v$  表示. 候选通孔意为在重新分层后它有成为通孔的可能性但并不一定能成为通孔.

定义 3 在无层布线中, 同一线网在水平或垂直方向的最长连线称为线段. 图 1(c) 中用  $s$  表示.

定义 4 在无层布线中, 两条属于不同线网的线段有一个相交点, 称相交, 相交的线段不能布在同一层上.

定义 5 给定一个多层无层布线, 定义图  $G_s = (V_s, E_v \cup E_c)$  为它的线段-相交图(SCG), 如图 1(d) 所示. 其中顶点集  $V_s$  中每个顶点代表一条线段; 边集分成两个子集, 通孔边集  $E_v$  与相交边集  $E_c$ .  $E_v$  中的边(通孔边)表示该边两个连接顶点所对应的线段由候选通孔相连接, 在(d) 中用虚线表示;  $E_c$  中的边(相交边)表示对应的线段相交, 用实线表示.

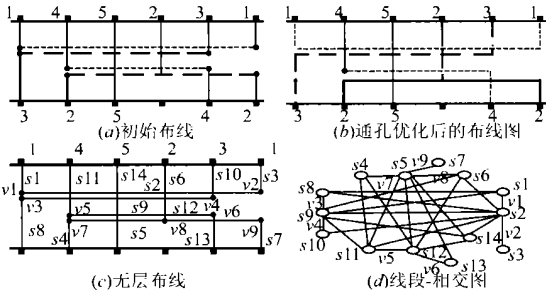


图 1 一个四层布线实例

可以将  $k$ CVM 问题描述为 SCG 图特定的  $k$  着色问题. 若每一层布线用一种颜色表示,  $k$ CVM 问题就相对于在该  $k$  层布线的 SCG 图上用  $k$  种颜色对每个顶点进行着色,  $k$ CVM 问题等价于对 SCG 图的每个顶点着上合适颜色, 使得在满足  $E_c$  边连接的两个顶点着不同的颜色的前提下, 使  $E_v$  边连接的两顶点尽可能着相同的颜色.

因此, 在 SCG 图中若我们作如下定义: 赋予顶点  $u$  的颜色称为顶点  $u$  的已着色(active color)  $a(u)$ ; 与顶点  $u$  以通孔边相连的所有顶点的集合称为顶点  $u$  的相容邻接顶点集  $A(u)$ ; 与顶点  $u$  以相交边相连的所有顶点的集合称为顶点  $u$  的约束邻接顶点集  $C(u)$ ; 而把  $C(u)$  中所有已着色点的已着色的集合叫做顶点  $u$  的约束颜色集, 记作  $c(u)$ . 则对 SCG 着色应满足

$$a(u) \notin c(u) \text{ for all } u \text{ in } G_s \quad (1)$$

用 SCG 表示多层布线通孔最少化问题存在着一定的局限性:

- (1) SCG 不能描述非严格分层的布线.
- (2) 在原来的布线分层中不是通孔, 但可以容纳一个通孔(即可能成为通孔). SCG 没有将这样的点看作候

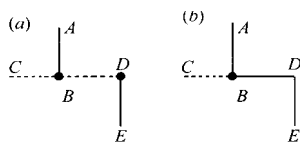


图 2 多度通孔的优化

选通孔, 使其不能参加优化, 所得结果的优化程度要受到影响.

(3) 在一个布线中, 与候选通孔相连的线段数称为该候选通孔的度  $n$ . 在两端线网中, 所有候选通孔的度都等于 2. 但在多端线网中, 一个候选通孔的度可能大于 2. 对存在多度通孔的布线, 基于 SCG 的算法(如[4]) 优化程度会有影响. 如在图 2(a) 中,  $AB$ 、 $CD$ 、 $DE$  为线段, 若  $AB$ 、 $DE$  存在约束不能改变布线层,  $CD$  中的  $CB$  存在约束导致整个  $CD$  不能改变布线层, 使通孔数目不能减少.

### 3 $k$ CVM 的图模型: 修正的线段-相交图 MSCG

#### 3.1 修正的线段-相交图 MSCG 的概念及其优点

对 SCG 的定义 2、3、4 作如下修正:

定义 2 在无层布线中, 不与其它任何连线相交的一段最大连线称候选通孔, 它至少可以容纳一个通孔.

定义 3 在无层布线中, 连接两个候选通孔(或管脚端)的连线称为线段.

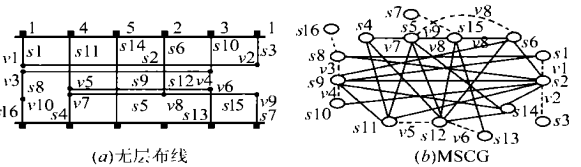


图 3 新定义无层布线和相应的 MSCG

定义 4 在无层布线中, 两条属于不同线网的线段有一个及一个以上的相交点, 则称这两条线段相交.

把定义 2-4 作了修正的 SCG 称为修正的线段-相交图 MSCG, 图 3 就是图 1 布线的无层布线及相应的 MSCG.

MSCG 可以表征非严格分层布线. 非严格分层布线的一种称为 knock knee 的布线模式, 如图 4(a), 线网  $a$  和线网  $b$  布在不同层并相交在所谓的 knock knee 点, 图中用小方框标注. 其 MSCG 可表示成图 4(b). 非严格分层布线较常见的交叠布线, 如图 4(c), 不同层的布线部分交叠(overlap), 用小矩形标注, 其 MSCG 可表示成图 4(d).

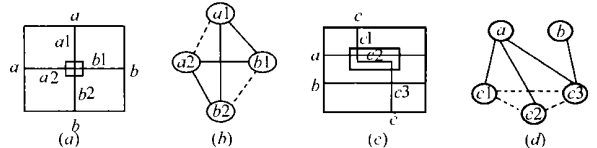


图 4 表征非严格分层布线的 MSCG

对如图 2 中的多度通孔的情况, 由于在 MSCG 中  $CB$  和  $BD$  成为不同的线段, 通孔数目可以减少一个, 如图 2(b). 记候选通孔为  $v_m^n$ , 与  $v_m^n$  相连的线段有  $n(n-1)/2$  种可能的线段配对情况. 当  $n=2$  时,  $n(n-1)/2=1$ , 一个候选通孔对应 SCG 中的一条相应的通孔边; 当  $n>2$  时,  $n(n-1)/2>1$ , 每个线段对对应 MSCG 中的一条通孔边, 这些通孔边所代表的是同一个候选通孔, 即一个多度候选通孔对应 MSCG 中的多条相应的通孔边. 定义被某个候选通孔  $v_m^n$  所对应的  $n(n-1)/2$  条通孔边连接的所有  $n$  个顶点组成  $v_m^n$  的对应顶点集  $V_c(v_m^n)$ . 只

有当与候选通孔  $v_m^n$  相连的所有  $n$  条线段都布在同一布线层时, 即 MSCG 着色如满足

$$a(u) = \text{the same value for all } u \in V_c(v_m^n) \quad (2)$$

该候选通孔  $v_m^n$  才能被消除. 如在图 4 中,  $v_8 = v_8^3$ ,  $V_s(v_8^3) = \{s_5, s_6, s_{15}\}$ .

### 3.2 物理约束对 MSCG 着色的限制

对某些引脚只能出现在固定层导致与它相连的线段也被限制布在该层及某些线网必须布在某些特定的布线层的情况, 由于与该线段相对应的顶点必须着以与特定布线层相应的颜色并在着色过程中固定, 把此类顶点  $u$  称为静态限制着色顶点 (static restrictedly colored vertex),  $u$  所应着的颜色的集合称为  $u$  的静态限制色集  $s(u)$ . 显然 MSCG 着色应满足:

$$a(u) \in s(u) \text{ if } u \text{ is a static restrictedly colored vertex} \quad (3)$$

某些工艺只能制造连接相邻金属层的通孔, 在这种工艺下, 在 MSCG 中顶点  $u$  的着色应满足

$$\begin{aligned} |a(v) - a(u)| &\leq 1 \text{ for all } v \in \\ \{v | (u, v) \in E_v\} \text{ for all } u \text{ in } G_s \end{aligned} \quad (4)$$

而某些工艺可以制造连接跨多层金属的通孔 (stacked via), 多层布线分层会出现如图 5 的另一种约束情况. 在图 5 (a) 的无层布线中, 线段 3 穿过了连接线段 1 和 2 的候选通孔, 那么在实际布线中, 线段 3 布线层不能位于线段 1 布线层和线段 2 布线层之间. 在对应得 SCG 图 5 (d) 中, 这种情况反映了顶点 1 和 2 的着色与顶点 3 的着色存在相互限制, 而且这种限制随着顶点着色的不同而改变. 把顶点 3 称为限制顶点 (restricting vertex), 把顶点对 (1, 2) 组成的集合称为限制顶点  $u$  (顶点 3) 的动态限制着色顶点对 (dynamic restrictedly colored vertex) 集  $D(u)$ . 在图 1 中可以找到许多这样的限制顶点和对应的动态限制着色顶点对集, 如  $s_{12}$  和  $D(s_{12}) = \{(s_5, s_6), (s_6, s_{15}), (s_5, s_{15})\}$ ,  $s_{15}$  和  $D(s_{15}) = \{(s_{12}, s_{13})\}$ . 这种工艺条件下, MSCG 着色应满足

if  $u$  is a restricting vertex,

then for all  $(v, w) \in D(u)$ ,  $a(u) > a(w)$  or

$$a(u) < a(v) \text{ and } a(u) < a(w) \quad (5)$$

if  $(u, v) \in D(w)$  where  $w$  is a certain restricting vertex, then

if  $a(v) > a(w)$ ,  $a(u) > a(w)$  or

$$a(v) < a(w), a(u) < a(w) \quad (6)$$

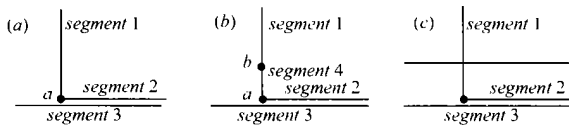


图 5 stacked via 的一种约束情况及其消除

由于 MSCG 引入了新的候选通孔的定义, 图 5 (a) 的着色动态限制关系可以通过候选通孔“逃逸”来消除. 见图 5 (b), 如果线段 1 在与候选通孔  $a$  相邻的部分 (图中是上部) 可以容纳通孔, 则 MSCG 会引入了另一个候选通孔  $b$  和另一线段 4. 那么经过通孔优化, 候选通孔  $a$  可能不能成为通孔, 而候选通孔  $b$  最终成为通孔, 即通孔从  $a$  处“逃逸”至  $b$  处. 图 5 (c) 中由于不能引入适当的候选通孔, 候选通孔  $a$  不能逃逸.

为表征以上约束, 在 MSCG 图中引入以下定义:

所有满足顶点  $u$  的约束 (1), (3), (5), (6) (或 (1), (3), (4)) 的颜色称为顶点  $u$  的可着色集, 记作  $r(u)$ .

### 3.3 MSCG 中通孔数目的计算

在可以制造连接非相邻布线层通孔的工艺中, 实际制造一个 stack via 相当于制造多个通孔. 如图 4 所示, 制造一个连接布线层 1 和布线层 3 的 stack via 相当于制造两个通孔. 而在 MSCG 中, 一个 stack via 是用一个候选通孔来表示的. 所以, 应该用下式来计算某个候选通孔  $v_m^n$  实际所代表的通孔数目:

the number of vias a via candidate  $v_m^n$  stands for=

$$\max_{u \in V_c(v_m^n)} a(u) - \min_{u \in V_c(v_m^n)} a(u) \quad (7)$$

## 4 基于模拟退火的 $k$ CVM 算法

由于  $k$  CVM 存在多种约束, 难以找到一个确定的搜索原则, 可用随机搜索的方法, 我们采用的是带记忆的模拟退火法. 把原布线对应的 MSCG 作为算法的初始解. 参数选择  $T_0 = 20$ ; 温度下降函数为  $T_k = \alpha^* T_{k-1}$ ,  $\alpha = 0.99$ .

算法中从原解生成新解 (新的 MSCG) 的方法如下:

(1) Select randomly a vertex  $u$  with the number of the set  $r(u) - a(u)$  large than 0 of from SCG;

(2) Uncolor  $u$ ;

(3) Select randomly a color  $a'(u)$  form the set  $r(u) - a(u)$  and assign it to vertex  $u$ ;

(4) Renew  $r(v)$  for  $v$  in  $A(u)$  and  $v = u$ ;

(5) Return  $S$  with a new color  $a'(u)$  assigned to  $u$ .

在对 MSCG 图的顶点  $u$  重新着色后, 通孔数目的变化只与  $u$  的相容邻接顶点集  $A(u)$  有关, 而与其它顶点无关, 所以在模拟退火法计算新解和原解 (两个 MSCG 图) 代价差 (通孔减少或增加数目) 时, 不用计算两者的通孔总数, 而只需计算  $A(u)$  内的通孔数目的变化, 可大大加快算法的运行速度.

## 5 实验结果

本算法用 C 语言编程, 在 Sun UltraSparc 10 工作站上实现. 表 1、2 列出了部分实例运行结果.

表 1 严格分层模式布线的通孔优化结果

实例	层数	线网数	原通孔数	优化后的通孔数/运行时间(工艺 1)		优化后的通孔数/运行时间(工艺 2)	
				无管脚限制	有管脚限制	无管脚限制	有管脚限制
SmallChanel [5] Fig. 6	3	10	23	0 / 0.06s	12 / 0.09s	0 / 0.08s	12 / 0.08s
ex. 1 [5] Fig. 9	3	21	57	40 / 1.20s	55 / 0.89s	40 / 0.98s	55 / 0.58s
ex. 3a [5] Fig. 10	3	30	68	50 / 1.10s	66 / 1.19s	50 / 0.90s	66 / 0.71s
With Objects [6] Fig. 3	4	14	42	/	/	5 / 0.83s	31 / 0.53s

表 2 非严格分层模式布线的通孔优化结果(有管脚限制)

实例	线网数	3 层布线			4 层布线		
		原通孔数	优化后	运行时间(s)	原通孔数	优化后	运行时间(s)
Burstein's Difficult	24	60	56	1.61	47	42	0.99
More Difficult	24	44	41	1.20	45	43	1.06
Augmented Dense	19	39	37	1.17	36	33	0.81
Modified Dense	19	49	46	1.14	46	43	0.83
Terminal Intensive	24	61	55	1.23	72	63	1.52

工艺 1: 只能制造连接相邻金属层的通孔; 工艺 2: 可以制造连接跨多层金属的通孔

## 参考文献:

- [ 1 ] Chang K C, et al. Layer assignment problem for 3 layer routing [ J ]. IEEE Trans. Computer, 1988, c- 37(5): 625- 632.
- [ 2 ] Chang K E, et al. Constrained via minimization for three layer routing [ J ]. IEEE Trans. CAD, 1989, 2( 6 ): 346- 354.
- [ 3 ] Takahashi K, et al. A heuristic algorithm to solve constrained via minimization for three layer routing problem [ A ]. Proc. of ISCAS [ C ], Monterey, California, 1998: 459- 463.
- [ 4 ] Fang S C, et al. Constrained via minimization with practical consideration for multi layer VLSI/ PCB routing problem [ A ]. Proc. of 28th DAC [ C ], San Francisco, 1991: 60- 65.
- [ 5 ] Chen Y K, et al. Three layer channel routing [ J ]. IEEE Trans. CAD, 1984, cad- 3( 2 ): 156- 163.

- [ 6 ] 王沅等. ARNTA: 基于线网类型分析的多层区域布线算法[ A ]. 全国第九届 LSI CAD 学术会议论文集[ C ], 黄山, 1998: 57- 60.

## 作者简介:



马 琪 男. 1968 年 4 月生于浙江绍兴. 2000 年毕业于浙江大学信电系, 电子科学与技术专业博士, 目前从事集成电路设计自动化方面的研究, 主要研究领域为 VLSI 布局布线、逻辑综合及模块生成.

严晓浪 男. 1947 年 1 月生于浙江杭州. 1981 年浙江大学硕士毕业, 教授, 博士生导师, 主要从事设计自动化方面的研究.