第13卷 第8期　　半 导 体 学 报　　Vol. 13. No. 8
1992 年 8 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Aug., 1992

一个新的 Over-The-Cell 布线算法*

黄浦江　洪先龙　王尔乾
（清华大学计算机系，北京，100084）

1991 年 5 月 16 日收到，1992 年 1 月 27 日修改定稿

本文提出了一个新的 Over-The-Cell 通道布线算法．我们将布线问题分为两个阶段：1）单元区布线，2）通道区布线．单元区布线的目标是最大可能地减小通道密度，而不同于以往算法总企图在单元区嵌入最多的线网．文中提出了最大密度段的概念，单元区布线优先选取覆盖最大密度段的线网，这更有利于降低通道密度．布线结果只需利用较少的单元区走线道，便可有效地降低通道密度，因而增强了算法的实用性．本文提出的算法已在 SUN4/110 工作站上用 C 语言编程实现，运行结果优于国内外已发表算法的结果．

CCACC：7410D

一、引　言

在标准单元或门阵列版图设计模式中，总体布线之后，需要由通道布线在单元行之间完成线网的连通（如图 1 所示）．

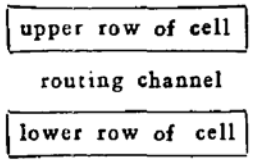

图 1　单元行间的通道布线

通道布线是 VLSI 自动版图设计的一个重要环节，自提出以来已进行了广泛的研究，并且有不少优秀算法发表[2,3,6]．传统的通道布线算法仅限制在通道内部实现线网连通，通道宽度受通道密度的限制，很难减少布线面积．双层金属工艺布线时，单元内部连线通常利用第一层金属与多晶层完成，因此单元行上的第二层金属可用来进行整个芯片的布线，以进一步减少芯片面积与缩短线网长度，这就是 Over-The-Cell 通道布线（以下简称为 OTC 布线）．OTC 通道布线结果一般都优于传统通道布线结果，因为它们将一些线网布在单元区，因而降低了通道密度．随着双层金属工艺的广泛应用，单元区布线愈加变得现实和重要．在门阵列设计模式中，固定通道走线容量经常导致自动版图设计的失败，所以利用单元区布线以减小通道压力显得非常必要．OTC 通道布线属于 NP-hard[1]，并常被分为如下两个子问题：1）单元区布线，2）通道区布线．现有的 OTC 布线算法[1,4,5]，单元区布线目标都是在单元区嵌入最可能多的线网．这类算法存在两个缺点：1. 在单元区嵌入线网虽然很多，但并不一定能使通道密度降低最多，因而就不能更好地减少布线所占面

* 国家自然科学基金资助项目．

积，所以该类算法的目标与减少布线所占面积的目标并不一致。 2. 该类算法都忽略了单元区的走线容量。比如算法[1]在解决"困难例子"时上下单元区的密度分别为 8 和 7，而通道区密度仅为 16。

为了克服上述两个缺陷，本文提出了一个新的 OTC 通道布线算法，其中单元区布线算法以降低通道密度，而不是嵌入尽可能多的线网为目标。

二、问 题 描 述

我们假设通道区有两层金属可供走线，而单元区仅有一层金属可用于走线，因此单元区所布线网必须是平面化的。图 2 显示了一个有效的 OTC 布线结果。

为了简化通道布线，将一个多端线网首先拆分为若干连续两端线网。拆分的方法是简单地从左到右逐列扫瞄，同一线网的连续两个引线端点构成一个两端线网。根据线网的两个端点所在位置将其分为 LT、LB、LR、TT、TB、TR、BT、BB 和 BR 共九种类型，如表 1 所示。在这些线网中，TB 和 BT 型线网不能布在单元区，TT 和 BB 型线网均可能布在单元区域，其它类型在走线限制不严格的情况下，也可能布在单元区。

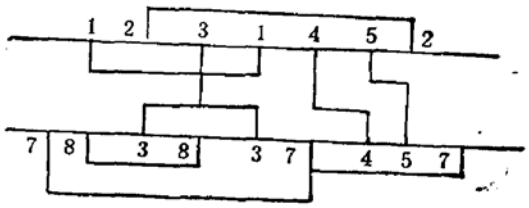

图 2　一个有效的 OTC 布线结果

为了精确地描述算法，首先给出如下定义。

- **局部密度和通道密度**：给定一个通道，第 i 列的局部密度为穿越该列的线网数。通道密度 k 为该通道内局部密度的最大值。
- **最大密度段 (MDS)**：如果从第 m 列到第 n 列局部密度均等于通道密度，并且第 m－1 列和第 n＋1 列的局部密度小于通道密度，则 m 列到 n 列构成一个最大密度段，简写作 MDS。
- **线网跨距**：一个两端线网所跨越的列数。
- **覆盖**：假定线网 m 和 n 起始列分别为 a，b，终止列分别为 c，d，如果 a＜b 且 c＞d，称作线网 m 覆盖 n。
- **嵌套层数**：如果网线未覆盖任何线网，则其嵌套层数为 1；否则，其嵌套层数为它所覆盖的线网的最大嵌套层数加 1。

表 1　线网分类表

	T	B	R
L	LT	LB	LR
T	TT	TB	TR
B	BT	BB	BR

OTC 布线的第一步是利用通道上下单元区进行布线。问题可描述为：在不违犯平面化约束的前提下，通过单元区布线从而最大限度的降低通道密度。

三、单元区布线

单元区布线的主要任务是选择布在单元区的线网，其主要过程如下：

1. 收集候选线网

按照前边的线网分类，一般只有 TT 和 BB 两种类型的线网可能被布在单元区，如果限制不严格，LT，LB，TR 和 BR 类型的线网也可布在单元区，本文考虑非严格限制的情况. 所有 TT，LT 和 TR 型子网存在表 TTnetlist 中，它们可能被布在上单元区. BB，BR 和 LB 型子网只可能被布在下单元区，它们存在表 BBnetlist 中.

2. 线网选择

这是一个迭代过程. 每次选择的线网从通道中消除后，都将减少通道的一个最大密度段. 当通道密度不能降低时，迭代过程结束.

首先要建立最大密度段表 (maximum density segment) MDSeglist，表中每个最大密度段包括该段的起始列和终止列号及该段的跨距.

对每一最大密度段，从 TTnetlist 或 BBnetlist 中寻求线网，加入到单元区线网集中. 该线网应满足两个条件：1. 它至少覆盖了当前最大密度列段. 2. 它和已被选择作为单元区线网集中任何线网都不相交. 第一个条件保证了所选择的线网布到单元区后，通道里至少少了一个最大密度段. 只有这样才能符合算法提出的降低通道密度的目标. 第二个条件保证了该线网加入到单元区线网集后，所有线网仍然可平面化嵌入.

由于 TTnetlist 和 BBnetlist 中的线网分别只能布在上单元区和下单元区，所以从其中选择了线网之后应区分对待，分别置于 TOCNetlist 和 BOCNetlist 中.

当一个子网被选作单元区线网后，应从 TTnetlist 和 BBnetlist 中以及通道线网集中消除该子网，并修改该子网所覆盖列的通道局部密度，删除 MDSlist 中被该线网覆盖的最大密度段. 如果最大密度段表为空，则通道密度下降了一个轨道，再次计算新的最大密度段表 MDSlist，重复上述选择过程. 如果找不到符合条件的线网，则转入线网选择后处理.

对于最大密度段表的处理遵循从左到右的原则，即从左到右逐个处理最大密度段.

线网选择有两种策略，一种是优先选择那些覆盖了最大密度段而且跨度小的线网，另一种是优先选择那些覆盖了最大密度段而且跨度大的线网. 这两种策略实现起来大同小异，第一种是把 TTnetlist 和 BBnetlist 按线网跨距从小到大排序，第二种则是按线网跨距从大到小排序.

实验结果表明第二种策略稍优于第一种策略，因为它选择的单元区线网跨距相对较长，通常一个线网就覆盖了若干最大密度段.

3. 选择线网后处理

经过第二步的处理，通道密度已无法再降低了，但还有线网可以嵌入到单元区. 后处理的目的是在不增加上下单元区线网密度的前提下，选择尽可能多的线网加入到 TOCNetlist 或 BOCNetlist 中. 这一步选择的线网应满足下述两个条件：1. 它和单元区线网集中任何线网都不相交. 2. 把它加入到 TOCNetlist 或 BOCNetlist 中，不会增

加上单元区域或下单元区的密度．这先要计算上下单元行各列的局部密度及最大密度，然后从经过第二步线网选择之后剩余 TT 型或 BB 型线网中选取．

如果单元区有足够的走线容量，后处理选取线网时可不受第二个条件限制，以便在单元区嵌入更多的线网．

4. 单元区内平面化布线

单元区化布线每个线网都占一个水平轨道，因而可使布线大大简化．我们可以根据线网嵌套层数来决定其走线轨道．例如有一线网序列 {2，3，4，5}，其端点序列为 {2，3，4，4，3，2，5，5}，则各线网的走线道分别为：3，2，1，1．布线结果如图 3 所示．

OTC 布线，单元区线网的选择是最灵活最关键的一步，而多端线网分解成二端子网的方法则决定了单元区线网的选择范围．

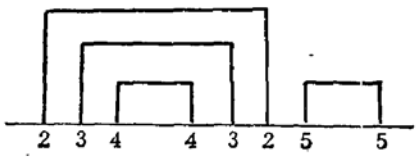

图 3　平面化嵌入次序

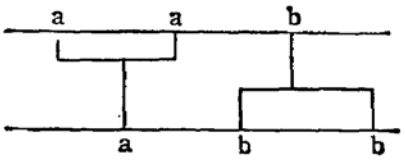

图 4　线网分解方法的缺点

本文中的分解方法，会缩小单元区线网的选择机会．例如对于图 4 中的线网，本来每条线网都可能有一段被布在单元区，但本文的多端线网分解方法使这种机会丧失了，因为它把线网分解成了两个 TB 和 BT 型的子网．找到一种好的分解方法，可进一步改善算法的结果．

四、实验结果与结论

OTC 布线的第二阶段即通道布线由一个基于 DRAFT[2] 和 YACR2[3] 的算法完成，它允许不同层的不同线网相互重叠．我们在 SUN4/110 工作站（SunOS 3.2 操作系统）上用 C 语言实现了本文提出的布线算法．

表 2 是 OTC 布线的实验结果．表 3 是本文布线结果与算法[1]结果的比较．算法[1]是目前国内外文献看到的最优结果，对于所有测试例子，本文的结果都优于文献[1]的结果．

本文提出的算法以降低通道密度为目标，改变以往单元区嵌入线网最多的策略．这样在上下单元区嵌入线网密度较小的情况下，能很好地降低通道密度，大大增加了 Over-The-Cell 布线算法的实用性．

本文研究的 OTC 问题是把一个通道和其上下单元行作为整体考虑，可称之为面向通道的 OTC 问题，另外也可把一个单元行和其上下通道作为整体考虑，这种研究方式可称为面向单元的 OTC 问题．本文提出的思想也可应用于面向单元的 OTC 问题．

表 2、表 3 中，dens 代表通道原始密度，LD 代表下单元区密度，UD 代表上单元区密度，ND 代表新的通道密度，CT 代表布线所用通道内的轨道数，时间单位为秒．

表 2 布线结果

Ex.	dens	LD	UD	ND	CT	CPU
YK.1	12	2	2	9	10	0.60
YK.3a	15	3	3	12	12	0.82
YK.3b	17	3	3	13	13	0.94
YK.3c	18	3	3	14	14	1.18
diff.	19	5	4	16	17	2.06

表 3 布线结果与算法[1]的比较

Ex.	opt. 2L sol.	sol. in [1]				our sol.			
		LD	UD	ND	CT	LD	UD	ND	CT
YK.1	12	3	4	9	10	2	2	9	10
YK.3a	15	6	3	12	12	3	3	12	12
YK.3b	17	5	2	13	13	3	3	13	13
YK.3c	18	4	3	14	15	3	3	14	14
diff.	19	7	8	16	17	5	4	16	17

参 考 文 献

[1] Jing Sheng Cong and C.L.Liu, *IEEE Trans. on CAD*, **CAD-9** (4), 408, (1990).
[2] C. S. Ying, X.L. Hong and E.Q. Wang, Proc. of ICCAD-87, pp. 386—389, (1987).
[3] James Reed *et al.*, *IEEE Trans. on CAD*, **CAD-4**(3), 208, (1985).
[4] H. E. Krohn, Proc. of 20th DAC, pp. 665—670, (1983).
[5] Y. Shiraishi and Y. Sakemi, *IEEE Trans. on CAD*, **CAD-6**(1), 462, (1987).
[6] T. Yoshimura and E.S. Kuh, *IEEE Trans. on CAD*, **CAD-1** (1), 25,(1982).

A New Over-The-Cell Channel Router

Huang Pujiang Hong Xianlong and Wang Erqian

(Department of Computer Sci. & Tech., Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract

A new over-the-cell channel router is presented. We solve the over-the-cell problem in two steps: 1) routing over cell, and 2) routing within channel. The first step aims at reducing the channel density as far as possible by routing some critical nets over the cells. Previous research assumed that the more nets being routed over the cells the greater the reduction in the channel density. We found that only critical nets being routed over the cell may reduce the channel density. We define the maximum density segment (MDS) in the channel and the nets to be routed over the cells are chosen among the nets which cover the MDSs, such that the channel density is likely reduced. The second step can be done using a conventional channel router. The program is coded in C and implemented on a SUN4/110 workstation. The experimental results are comparable to or better than those previously published results.

CCACC: 7410D