

# BROS: 带有电源网优化策略的积木块式版图布线系统

郑 宁 朱 青 冯之雁 严晓浪

杭州电子工业学院 CAD 研究所, 杭州 310037

洪先龙

连永君

清华大学计算机科学系, 北京 100084      北京集成电路设计中心, 北京 100016

(1992 年 1 月 27 日收到; 1992 年 4 月 11 日收到修改稿)

本文简述了一种积木块式版图布线系统。它的特征是基于通道的定义和排序, 动态地完成布线任务。它包括: 一种层次式的自上而下的电源网布线和电源网的系统实现策略; 一种结合了总体压缩的高效的多子图合并的总体布线方法, 有效地匹配了通道的容量与布线区域的密度; 带有通道压缩的 L 型通道和直通道的一体化通道布线完成了详细布线; 环形通道的布线完成了包括电源网在内的 I/O 压焊块的连接。在测试标准例子的结果比较表明 BROS 要优于其它的 BBL 布线系统。

CCACC: 7410D

## 一、引言

随着大规模集成电路(LSI)的发展, 特别是专用集成电路(ASIC)需求的迅速增长, IC 设计系统必须以设计周期短、优良的可靠性和低成本来适应其品种多、批量小、功能强和集成度高等特点。本布线系统就是一个为此目的而设计开发的可供实用化的计算机辅助设计系统。它是国家重点工程集成电路计算机辅助设计“熊猫”系统下的一个子系统。已于一九八九年十二月完成开发和测试。

BROS 系统是针对 BBL 模式的布线特性而进行开发的。以国内现有的工艺条件为基础, 适合于单层金属或双层金属工艺条件下的 BBL 布线设计的自动完成。BROS 是一个由若干个布线子工具的有机组合优化而成的一个布线系统。它与已有的 BBL 布线系统所不同的最显著特征是: 在增强了布线系统的灵活性和实用性的同时, 首次系统地实现了 P/G 网复杂模型的自动布线、P/G 网与信号网的一体化优化嵌入和动态调整的总体优化思想<sup>[1]</sup>。

通常, 在集成电路芯片设计中, 会遇到两条电源网(Power & Ground Nets)的布线问

\* 国家自然科学基金资助项目。

题。在版图自动布线系统中,P/G 网的布线方法的可适应性和优化结果,都将明显地影响整个芯片的电性能和面积的优化。这是因为:

(1)P/G 网与芯片中的每一个功能块相连接,用以满足各模块馈电引脚的电性能要求,所以 P/G 网是两条几乎涉及整个芯片的各个位置的全局线网。

(2)芯片的扩散层和多晶层不适合于承载具有较大电流馈电线网的布线。所以为满足电性能的要求,P/G 网必须尽可能布设在同一金属层上。在单层金属层上进行两条电源网的同时布线,必须满足互不相交的所谓平面性要求。这样 P/G 网布线不只是一个求最短路径问题。

(3)P/G 网与一般信号网不同的是 P/G 具有可变线宽特性。

(4)在布线区域内电源网与信号网互相影响,为了保证电性能要求,一般总是将电源网布线优先于信号网考虑。但同时在通道详细布线时,又希望与信号网进行一体化优化嵌入。传统的详细布线算法无法满足这一要求。

(5)BBL 的模式本身在结构上具有不规则性,同时在集成电路设计中并没有限制馈电压焊块和馈电引脚的数量及放置位置。这就给系统实现 P/G 网单层平面最短路径的优化布线带来了困难。

近年来,国际上对 BBL 模式下的 P/G 网自动布线问题仍未获得令人满意的解决方法。其中[2]采用平面扫描法,限制馈电压焊块和馈电引脚的个数及放置位置的基础上,将 P/G 网二维平面布线问题转化成一维问题序列进行处理。[3]采用一种基于图模型的算法。在放宽馈电压焊块数目的同时,严格限制馈电引脚数目。通过电性能优化和图分析技术,力求达到 P/G 网的优化布线目标。由此可见,已有的 P/G 网布线算法受模型简化的制约,无法适应实用芯片设计要求。因此也就无法在布线系统中与信号网有机地结合起来进行总体优化布线。

## 二、BROS 布线系统中的 P/G 网优化实现策略

由于电源网的特殊性和复杂性,以往的布线系统中均未能直接开发电源网的优化布线。在一个系统中运用电源网的布线工具,必须考虑到整个系统的协调性和完备性。为了适应一个典型的 BBL 布线系统的动态优化过程,电源网的自动布线工具就可能涉及到诸多的问题:

(1)不能像以往的电源网布线算法那样,静态孤立地仅仅考虑电源网的布线。

(2)布线模型应更加灵活和实用。

(3)电源网布线在系统中的实现必须考虑到对信号网布线的影响和总体优化的效果。

(4)由于电源网具有不同于信号网的特殊性,它在系统中将介入到各个阶段的各个子工具的处理过程中。因此,BROS 系统中的各个子工具必须同时处理和优化信号网与电源网的布线。

针对以上问题,BROS 系统成功地把电源网的特性和整个布线系统有机地结合在一起。一方面对已有的布线系统各子工具进行了可适应电源网处理的开发。另一方面提出了电源网布线在系统中实现的优化策略。这个策略由四个部分组成:

- (1) 开发出一种适应 P/G 网复杂模型的拓扑路径布线算法: 层次式自上而下的一体化完成的 P/G 网平面性分析和拓扑路径的分配.
- (2) 可适应动态调整的 P/G 网实体尺寸计算工具.
- (3) 结合在布局的动态调整过程中, 电源网的拓扑路径信息保持平面性的动态可修改.
- (4) 与信号网通道布线一体化完成的电源网无网格平面化详细嵌入.

显然, 这四个部分并不是顺序地、独立地仅仅完成电源网的布线任务, 而是使电源网与整个层次式 BBL 自动设计系统有机地结合起来, 从而达到整个版图布线设计的优化目标.

### 三、BROS 布线系统的特点

#### 1. BROS 的布线模型与工艺基础

BROS 的布线模型是基于“熊猫”系统的要求. 可处理任意矩形尺寸的模块布局. 允许有 non-slicing 的布局结构. 网的引脚分布在功能模块的周界上, 允许有不等宽、不等间距及电等价的引脚存在. 芯片周界上分布着信号网与电源网的压焊块. 每条信号网与电源网允许有多个压焊块. 芯片内部存在着一条电源网和一条地网的馈电, 并且尽量要求电源网(P/G Nets)布设在最上层金属层上.

#### 2. BROS 的布线总体策略

BBL 布线系统本身是完全模拟人工的设计过程. 因而 BROS 系统从 BBL 布线特征出发, 遵循人工完成整个布线过程的几个不同阶段, 分别提供了各种设计子工具. 总体优化集成为一个交互/自动的 BBL 布线设计系统.

#### 3. BROS 系统的结构

图 1 是一个典型的不带电源网处理的 BBL 布线系统结构图. 它是以美国 U. C. Berkeley 的 BEAR 系统<sup>[4]</sup>为蓝本的. 图 2 是具有电源网优化布线策略的 BROS 布线系统的结构图.

### 四、BROS 布线系统中的主要子工具

#### 1. 电源网的拓扑布线<sup>[4]</sup>

在集成电路芯片设计中, 通常会遇到 P/G 网的布线问题. 为了满足实用系统的设计要求, 针对以往 P/G 网拓扑路径布线算法受模型简化制约的缺点, BROS 成功地开发出了一种基于层次式的自上而下的 P/G 网拓扑路径优化布线算法. 一体化完成了 P/G 网

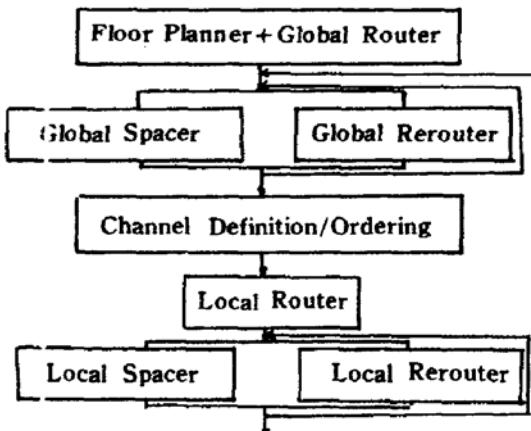


图 1 BEAR 系统结构图

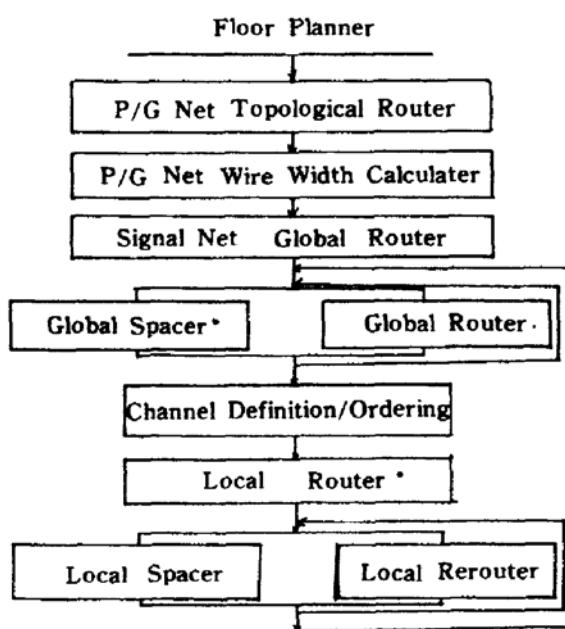


图 2 BROS 系统结构图

\* 表示含电源网的处理

化了 P/G 网交叉穿孔的位置.

P/G 网拓扑路径布线算法的主要步骤:

- (1) 层次式自上而下地对布局信息进行处理. 构造各个层次的总体规划图.
- (2) 每一层次均对当前模块集进行分离.
- (3) 远用启发式思想, 对 P/G 网馈电压焊块资源进行平面性布线分析和线网路径分配.

(4) 对各个单模块进行连线优化的环形河岸布线, 同时进行最少化的通孔处理.

图 3 是一个具有复杂模型的 P/G 网布线结果图示. 它较好地显示了此算法处理复杂模型 P/G 网的优越性和优化的 P/G 网拓扑路径布线结果.

## 2. 电源网的实体尺寸计算

由于电源网是变线宽的线网, 它占用芯片的面积较大. 为了既保证电源网的电性能要求, 又达到优化电源网布线结果占用芯片面积尽可能少. 必须对电源网的变线宽实体尺寸进行计算.

根据 BROS 布线系统的动态可调整的特性. 作为系统中的一个实体尺寸计算工具, 我们开发了一种基于“后根周游”思想的快速粗略的实体尺寸计算方法. 同时还提供了一种基于电网络理论的非线性多目标优化的实体尺寸精确计算方法. 这两种计算方法的结合可满足动态快速粗略估计和定位精确计算的不同要求.

的平面性分析和拓扑路径的分配. 尽可能将电源网布设在同一层金属层上.

根据 BBL 模式 P/G 网布线特性: 当芯片含有  $n$  个功能模块时, P/G 网平面性可布线的充要条件是每条电源网的有效馈电压焊块数分别等于或大于这  $n$  个模块上的同线网有效馈电引脚数之和再减  $(n-1)$ . 我们可对任意复杂形式的 P/G 网布线模型, 从芯片所含模块集开始, 采用“分离”思想, 将模块集一分为二直至单个模块集为止. 同时在每次“分离”过程中, 可将上层的馈电压焊块资源依据下层的平面性要求而进行分配. 这种分配方法遵循了压焊块资源的最大利用原则和最短路径原则. 并对初始给定条件已不满足可平面布线的 P/G 网, 可限制其在分枝较细的地方进行交叉穿孔. 在保证 P/G 网交叉数最少的前提下, 还优

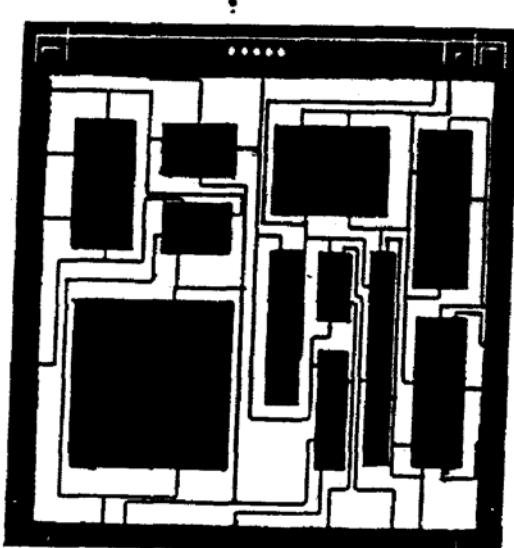


图 3 P/G 网拓扑布线实例

### 3. 信号网的总体布线

BROS 开发的信号网总体布线是基于芯片平面与总体规划图来进行。它根据信号网的关键性、引脚数和覆盖区域三个因素确定信号网的布线次序，运用多子图趋向合并的 Steiner 树算法，生成指定信号网在图模型上的优化 Steiner 树。

此算法根据 BBL 的特点，考虑了布线路径的容量和密度关系及电源网布线的影响等多方面的因素，取得了优于 BEAR 系统中的总体布线结果。表 1 是 BROS 总体布线与 BEAR 总体布线结果比较。

表 1 BROS 与 BEAR 总体布线结果比较

实例	hp	hughes	modem	xerox	intel
布线面积	-33%	-10.3%	0	+1.9%	*

注：\* BROS 可完成 intel 总体布线，BEAR 无法完成 intel 总体布线

+ BROS 比 BEAR 增加面积

- BROS 比 BEAR 减少面积

### 4. 电源网布线信息的动态存贮与修改

为了适应系统的动态可调整，电源网的拓扑路径信息和线宽信息的存贮必须与信号网总体布线信息的存贮相一致。为此，BROS 系统在已有的信号网总体布线信息存贮和修改方式<sup>[5]</sup>的基础上，提出了一种可适应电源网动态可调整的信息存贮方式。其主要特点是增加了电源网平面信息的表示。采用在瓶颈出入界面上对应的引脚按拓扑路径信息的平面性进行排序，并将此序号记录在相应的数据结构中。当布局调整后，电源网拓扑路径信息修改除了与信号网相一致的连通性恢复外，还必须进行电源网拓扑路径平面信息的恢复。

### 5. 布线区域的定义与排序

与以往的通道定义与排序方法所不同的是，BROS 布线系统中考虑到了已有定义区域和排序算法的静态缺陷。因而研制了一种基于动态思想的与通道布线交替进行的通道定义和排序过程<sup>[6]</sup>。适应于在详细布线过程中的通道调整，使当前可布通道的定义更趋合理性。

### 6. 通道详细布线

由于 BROS 系统允许 non-slicing 的布局结构，因此，通道定义和排序过程中会引入直通道和 L 型通道。针对 L 型通道，BROS 采取将其划分为一个直通道和一个三边通道来处理。与以往的算法<sup>[7]</sup>所不同的是，BROS 把这种分解看成不是通常意义上的严格区域划分，而是一种几何上的辅助手段。分解的目的是为了方便而又准确地建立 L 型通道内的种种约束关系。建立属于不同子通道但存在某种联系的加权约束图。把网与网之间，网与边界之间可能存在的约束关系集中反映到图上，从而把布线问题转化成相应的图论问题。然后开发了一个不规则边界无网格变宽度的通道布线算法<sup>[8]</sup>。它根据设计规则，在加权约束图的基础上，运用图论的方法完成线网的嵌入。

通过<sup>[7]</sup>中相同例子的测试，我们的 L 型通道布线结果更优化。其中每个例子中的各子通道的容量均达到其最大密度，且大多在非 dcleg 方式下成功地完成布线。图 4 是其

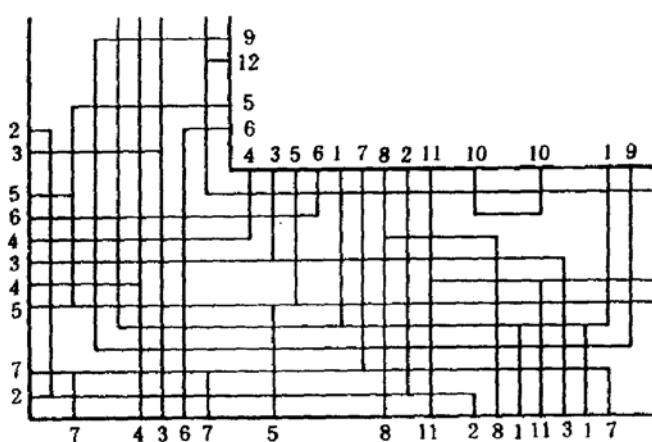


图 4 L 型通道布线实例

中的一个实例结果图。

同时,为了实现电源网平面化嵌入尽可能少地影响信号网的布线,我们从电源网的平面性和变线宽特性出发,考虑了电源网对信号网的如下几个方面的影响。

- (a) 穿越电源网时势必引入通孔。
- (b) 电源线的存在使信号网走线增加。
- (c) 对顶使信号网端子无法引出。
- (d) 无足够空间换层造成信号网走线阻塞。

针对以上问题,我们对电源网和信号网的实体嵌入进行了分步处理:首先,对电源网作适当的预处理,依据“同侧互连,异侧跨接”的思想,利用线性规划的方法来选择异侧网的跨接点的位置。将电源网布线对信号网布线的影响减至最低限度。预处理结束后,调用无网格变线宽的通道布线算法将电源网与信号网一体化详细嵌入。较好地完成了详细布线的总体优化目标。

## 7. 环形通道布线

基于单元库的自动布图系统中,在芯片周界的环形区域内,环形通道布线完成线网与压焊块的自动连接与压焊块的最终定位。由于传统的环形通道布线方法缺乏全局考虑,布线结果不够理想。而[9]所提出的一种环形通道全局布线算法是以选择最短路径为线网的拓扑路径,采用左边算法完成具体轨道的嵌入。然而此算法缺乏更多的优化措施。针对这种情况,BROS 的环形通道布线算法是在[9]的基础上增加了如下的一些优化措施:

- (a) 根据总体分析,匹配拓扑路径的约束关系,完成线网的拓扑路径分配。
- (b) 提出轨道的优化分配公式,轨道依权重重新定位,以优化连线总长。
- (c) 带压缩的河岸布线完成拐角区域的压焊块的连接。
- (d) 根据环形通道布线结果,调整压焊块的定位。

BROS 的环形通道全局优化布线算法由三个部分组成<sup>[10]</sup>:

(1) 拓扑路径的总体分配。实质上是在环形通道内确定全局线网的 MinC 路径。线网的总体分配以最小转角数路径为对象,从而在保证连线总长优化的基础上进行环形通道的布线密度均匀最小化。

(2) 实体嵌入。依据已分配的拓扑路径的起始引脚位置,沿顺时针方向进行线网排序,然后应用改进的左边算法和轨道交换技术来实现连线总长优化的实体嵌入。

(3) 压焊块的定位调整。为了保证 100% 布通率,对布线比较拥挤的拐角区域进行对接连线在出入界面方向的压缩来完成。此时需对压焊块进行定位的调整。

此算法在实例测试中与 BEAR 的环形通道布线方法进行了比较。我们的线网拓扑路径总体分配和轨道优化分配算法在对线网连线总长优化的基础上,具有比 BEAR 更小的环形通道内连线的最大密度。表 2 是 BROS 与 BEAR 环形通道布线结果比较。

表 2 BROS 与 BEAR 环形通道布线结果比较

实例	例 1	例 2	例 3	例 4	例 5	例 6
布线密度	-11%	-7.6%	-7.5%	-11%	-5.3%	-14.3%
连线总长	-0.4%	2.2%	1.3%	10.3%	5.1%	1.5%

注: +BROS 比 BEAR 增加

-BROS 比 BEAR 减少

## 五、结 论

BROS 布线系统是目前为止 BBL 模式布线系统中的一个较为完善、灵活和优化的布线系统。此系统已在 HP375 上用 C 语言实现,采用 X.11 图形窗口。在大量实例测试中及与 BEAR 布线结果的比较中,BROS 系统除了具有独特的系统全局优化处理 P/G 网布线的功能外,还在总体布线、L 型通道布线及环形通道全局布线等方面优于 BEAR 布线结果。图 5 是 BROS 系统对实例 ICCAD 的布线结果。

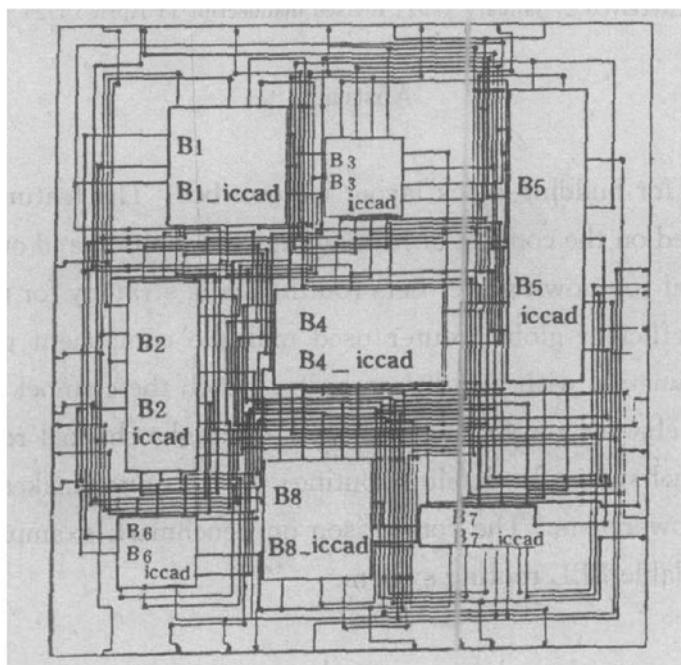


图 5 BROS 对 ICCAD 布线结果

致谢:参加 BROS 系统开发工作的还有孙国恩、邓学东、柯立刚等同志。北京集成电路设计中心的同志们给予了大力协助。刘伟平、华胜华、薄建国、尹锦柏等同志也给予了很多帮助。谨致诚挚的谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 郑宁,浙江大学硕士论文,1990.
- [2] Xiong Xiaoming, E. S. Kuh, Proc. of ICCAD'86, 6(1986).
- [3] S. Haru Yama, D. Fussell, Proc. of ICCAD'87, 38(1987).
- [4] W. M. Dai, et al., Proc. of ICCAD'87, 34(1987).
- [5] W. M. Dai, et al. Proc. of 24th DAC, 376(1987).

- [6] 冯之雁、严晓浪,全国第五届 IC-CAD 学术年会论文集,259(1989).
- [7] H. H. Chen, Proc. of 24th DAC, 152(1987).
- [8] 冯之雁、严晓浪,全国首届 ASIC 学术会议论文集,90(1990).
- [9] Deborah Wang, Proc. of 27th DAC, 193(1990).
- [10] 朱青、戴德龙、严晓浪、洪先龙、连永君,半导体学报,12(7),441(1991).

## BROS:A Building-Block Layout Routing System with Power Nets Optimal Strategy

Zheng Ning, Zhu Qing, Feng Zhiyan Yan Xiaolang

*Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou 310037*

Hong Xianlong

*Department of Computer, Tsinghua University, Beijing 100084*

Lian Yongjun(Y. Edmund Lien)

*Beijing IC Design Center, Beijing 100016*

(Received 27 January 1992; revised manuscript 11 April 1992)

### Abstract

A routing system for building-block layout is described. The feature in routing is a dynamic architecture based on the concept of routing region definition and ordering. It included: An efficient hierarchical top-down power nets routing and a strategy for its systematic implementation; A highly efficient global router used multiple component growth and merging method is used in conjunction with a global spacer to match the channel capacity and routing density; An L-shaped channel router together with a straight channel router is used in conjunction with the channel spacer for detailed routing; A ring router makes a connection to the I/O pads, including power nets. The comparison on benchmark examples concludes BROS outperforms other available BBL routing system.

CCACC: 7410D