

一种 ISPD98 电路网表到超图的转换算法

冷 明, 孙凌宇, 郭恺强, 朱 平

(井冈山大学 计算机科学系, 江西 吉安 343009)

摘 要: 以电路测试基准 ISPD98 的模型用例及对应的超图为例, 阐述了 ISPD98 电路网表文件格式、超图的压缩存储格式和文件存储格式. 提出了一种 ISPD98 电路网表到超图的转换算法. 它读取 ISPD98 电路网表文件数据, 将其映射到超图的压缩存储格式, 并存储为指定的超图文件存储格式, 从而有效地将电路划分问题转换为超图划分优化问题. 实验表明, 该转换算法能正确地将 ISPD98 电路网表转换为超图的文件存储格式, 有效地避免了直接在 ISPD98 电路网表上进行划分, 提高了电路划分的效率.

关键词: 电路网表; 超图; 转换; 电路测试基准

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0111-04

An Effective Algorithm for Converting ISPD98 Netlist into Hypergraph

LEN Ming, SUN Ling-yu, GUO Kai-qiang, ZHU Ping

(Department of Computer Science, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China)

Abstract: We describe the netlist format of ISPD98, compressed storage format (CSF) and file storage format (FSF) of hypergraph, taking the model of ISPD98 and corresponding hypergraph as an example. Furthermore, we propose an effective algorithm for converting ISPD98 netlist into hypergraph, which reads the netlist of ISPD98, converts the netlist of ISPD98 into CSF of hypergraph and saves as FSF of hypergraph. We also give the implementation of the algorithm which converts the circuit partitioning into the hypergraph partitioning. The experiment and analysis show that the algorithm can rightly convert the netlist of ISPD98 into FSF of hypergraph and its objective is to improve the efficiency of circuit partitioner by avoiding partitioning the netlist of ISPD98 directly.

Key words: netlist; hypergraph; conversion; circuit benchmark

1 引言

电路划分主要用在 VLSI 设计中的设计封装、综合、设计优化、FPGA 划分、模拟和测试等场合中, 是集成电路设计的关键一步^[1-2]. 在 VLSI 设计中被划分的对象一般是由逻辑门或标准单元组成的电路, 其目的是将这些标准单元分为两个或者多个电路子集, 有效地降低 VLSI 设计的复杂性并提高其性能^[2]. 为了将电路单元划分到电路子集上, 必须从图论和组合理论的角度来建立 VLSI 划分问题的数学模型. 文献[3]首次提出用带权值的无向图描述

电路. 文献[4]给出了无向权图、交点图、有向图等数学模型建立电路构造图的过程. 孙凌宇和冷明基于电路划分的需求, 给出了 ISPD98 电路网表、VLSI 设计到无向赋权图的转换算法或系统, 目的在于将电路划分问题转换为无向赋权图划分优化问题^[5-6]. 相比图而言, 超图为 VLSI 划分提供了更为精确的模型: 每条超边可以连接两个以上的结点, 对应于电路单元间的连线可以连接两个以上的电路单元.

文中采用超图来构造电路划分的数学模型, 并验证了 ISPD98 电路网表到超图转换算法的有

收稿日期: 2010-12-28; **修回日期:** 2011-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61063007); 江西省自然科学基金项目(2009GQS0060); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ10201, GJJ09590)

效性.

2 ISPD98 电路网表格式

文献[7]给出了 ISPD98 电路测试基准,作为进行电路划分测评的基准工具. ISPD98 是基于 IBM 公司设计部门给出的一系列内部电子产品经过转换得到的,其中包括总线仲裁器、总线电桥芯片、内存及周边元件扩展总线接口、通讯适配器、内存控制器、处理器和图形适配器等.

图 1 和表 1 给出了 ISPD98 如何保存电路的实际连接关系. 图 1 中电路包括 4 个单元(Cells)、3 个输入输出(Pads)、5 个信号(Nets)及 13 个引脚(Pins),其中单元记为‘a’加编号(编号从 0 开始),输入输出记为‘p’加编号(编号从 1 开始). 描述电路连接关系的是 ISPD98 给出的. net 文件、. are 文件和. netD 文件共 3 个文件,且文件格式如表 1 所示.. net 文件描述了电路单元间的连接关系,其中前 5 项内容为 5 个实体(Entries),分别为 ignored、# Pins、# Nets、# Modules、# Pads,一个信号的开始标记为‘s’. 图 1 总共包括 5 个信号,且每个信号可以连接两个或两个以上的 modules. 例如图 1 中最左边的信号从 p1 开始,到达 a0 和 a1.. are 文件是每个 module 大小的列表.. netD 文件是在. net

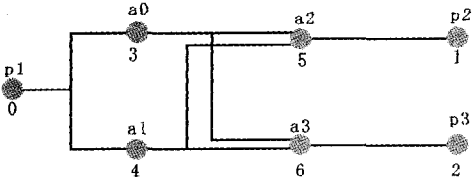


图 1 电路测试基准 ISPD98 的模型
表 1 电路测试基准 ISPD98 的文件格式

. net 文件	. are 文件	. netD 文件
0	a0 5	0
13	a1 1	13
5	a2 8	5
7	a3 7	7
3	p1 3	3
p1 s 1	p2 9	p1 s O
a0 l	p3 3	a0 l I
a1 l		a1 l I
a0 s 1		a0 s O
a2 l		a2 l I
a3 l		a3 l I
a1 s 1		a1 s O
a2 l		a2 l I
a3 l		a3 l I
a2 s 1		a2 s O
p2 l		p2 l I
a3 s 1		a3 s O
p3 l		p3 l I

文件格式基础上,增加了信号线的输入输出方向,每个 module 标识为‘O’或‘I’.

3 超图的物理存储格式

数据的物理存储结构,作为数据逻辑结构的物理存储方式,应根据问题所要求的响应速度、处理时间、修改时间、存储空间和单位时间的处理量等在内存中建立起数据存储映像[8]. 超图 $H=(V, E^h)$ 在不同的物理存储结构下会产生不同的算法时间复杂度和空间复杂度,因此超图的划分算法通常采取的是压缩存储格式(Compressed storage format, CSF). 对于图 1 中的模型,将其对应的超图采用 CSF 格式进行存储,如图 2 所示. 该存储格式的特征就是没有使用指针链表,有效地减少了空间浪费,结构简单.

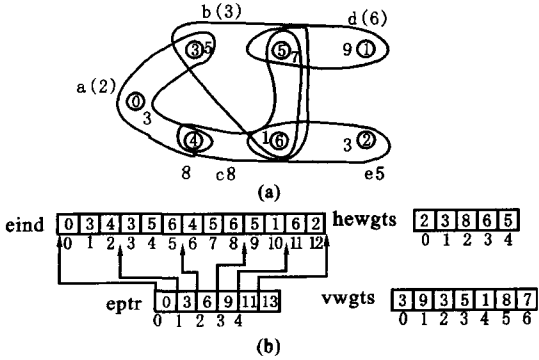


图 2 电路测试基准 ISPD98 模型对应的 CSF 格式

CSF 存储格式使用数组 eptr 存储每条超边对应邻接结点列表的起始位置信息;使用数组 eind 存储每条超边的邻接结点信息. 假设数组地址从零开始,结点编号从零开始,则第 i 条超边的邻接结点列表存储在数组 eind 中,位置从 eptr[i]开始,到 eptr[i+1]-1 结束,即从数组 eind[eptr[i]]到 eind[eptr[i+1]-1]. 例如,图 2(a)中包含 7 个结点和 5 条超边,图 2(b)中数组 eind 存储每条超边的邻接结点信息,且数组 eind 的大小为. net 文件的 # Pins 数值;数组 eptr 存储每个超边对应邻接结点列表的起始位置,第 i 条超边的终止位置为第 i+1 条超边的起始位置减 1,且数组 eptr 的大小为. net 文件的 # Nets 数值加 1,即数组 eptr 最后一个元素用于存放最后一条超边的终止位置.

当超图为超边赋权超图、结点赋权超图、赋权超图时,CSF 存储结构使用数组 vwgts 存储结点的权值信息,数组 vwgts 的大小为. net 文件的 # Modules 数值;使用数组 hewgts 存储超边的权值信息,数组 hewgts 的大小为. net 文件的 # Nets 数值. 如图 2(b)所示,第 i 个结点的权值存放在 vwgts[i],第

j 条超边的权值存放在 $hewgts[j]$.

4 超图的文件存储格式

图 1 的模型用例,对应的超图文件存储格式采用文献[9]给出的格式,如图 3 所示. 对于超图 $H = (V, E^h)$, 文件的第 1 行第一个参数 x 给出了超边的数目 $|E^h|$, 第二个参数 y 给出了结点的数目 $|V|$, 第三个参数 fmt 用 0、1、10、11 来区分非赋权超图、超边赋权超图、结点赋权超图、赋权超图, 其中非赋权超图的参数 fmt 为 0, 且可以省略.

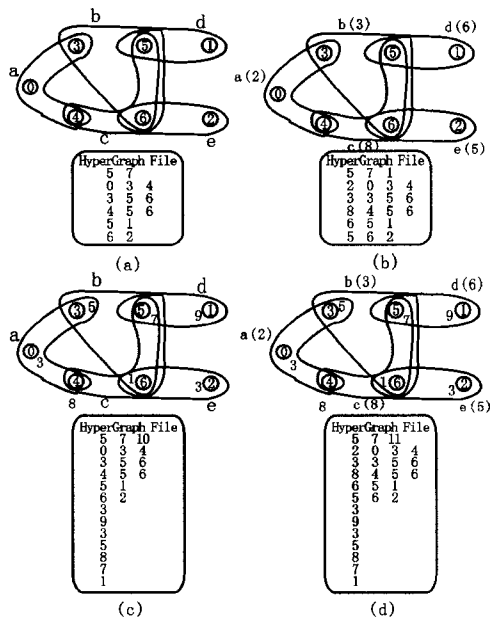


图 3 电路测试基准 ISPD98 模型对应的文件存储格式

图 3(a) ~ (d) 分别给出了非赋权超图、超边赋权超图、结点赋权超图、赋权超图的文件存储格式. 文件从第 2 行开始到第 $|E^h| + 1$ 行的每行代表着一条超边的相关信息. 如果结点被赋予权值, 则文件从第 $|E^h| + 2$ 行开始到第 $|E^h| + |V| + 1$ 行 (即文件尾) 的每行代表着一个结点的权值信息. 图 3(a) 仅给出超边的结点信息, 例如第 2 行对应超边 a 的信息为 $\{0, 3, 4\}$. 图 3(b) 在给出超边结点信息的同时给出了超边的权值, 例如第 2 行对应超边 a 的信息为 $\{2, 0, 3, 4\}$. 图 3(c) 在给出超边结点信息的同时还给出了结点的权值, 例如第 7 行对应结点 0 的权值为 3. 图 3(d) 在给出超边结点信息的同时, 既给出了超边的权值, 又给出了结点的权值, 相当于图 3(b) 和图 3(c) 合并后的信息.

5 ISPD98 电路网表到超图的转换算法

文中提出了 ISPD98 电路网表到超图的转换算

法, 将电路单元看作为超图中的结点, 电路单元间的连线看作为超图中的超边, 从而将电路划分问题转换为超图划分优化问题. 该转换算法涉及到关键问题是: 正确地读取 ISPD98 电路网表文件数据, 将其映射到超图的压缩存储格式, 并存储为指定的超图文件存储格式. ISPD98 电路网表到超图的转换算法伪代码如下:

```

INPUT: .netD file, .are file
OUTPUT: hyper graph file
01 Begin
02 Read # Pins, # Nets, # Modules, # Pads entries
from .net file;
03 Create all vertices according to the # Modules entry;
04 Build the Hash— table for each vertex based on the
name of Module;
05 For Each Net from .net file according to identifier
's' Do Begin
06 Create the Hyperedge by setting the index value of
array eptr
07 For Each Pin in each net Do Begin
08 Find the vertex in the Hash— table according to the
name of Pin
09 Add the vertex to the Hyperedge by setting the value
of the array eind
10 End For
11 End For
12 For Each vertex u in Hypergraph Do Begin
13 Read the weight of vertex u from .are file;
14 End For
15 Output three entries ( # Nets, # Modules, fmt)
of Hypergraph
16 For Each Hyperedge e in Hypergraph Do Begin
17 For Each vertex u in each Hyperedge e Do Begin
18 Output the index of vertex u in specified format
19 End For
20 End For
21 For Each vertex u in Hypergraph Do Begin
22 Output the weight of vertex u in specified format;
23 End For
24 End

```

设 ISPD98 电路网表中 # Modules 数为 m , # Pins 数为 n , # Nets 数为 t . 该转换算法中第 3 行到第 4 行为每个 Module 建立结点以及相关的查找表, 其循环次数为 m , 第 5 行到第 11 行循环嵌套为每个 Net 建立超边及其邻接结点, 其内循环次数为 n , 第 12 行到第 14 行读取每个结点的权值信息, 其循环次数为 m , 第 16 行到第 20 行循环嵌套输出每

条超边的邻接结点,其内循环次数为 n ,第 21 行到第 23 行输出每个结点的权值信息,其循环次数为 m ,因此算法时间复杂度为 $\Theta(3m+2n)$.该转换算法的空间复杂度取决于超图的 CSF 存储空间.基于图 2 给出的 CSF 存储结构定义,包含大小为 m 的数组 $vwgts$,大小为 n 的数组 $eind$,大小为 t 的数组 $hewgts$ 和 $eptr$,因此空间时间复杂度为 $\Omega(m+n+2t)$.

6 优化实验

为了验证 ISPD98 电路网表到超图转换算法的有效性,选用 Minnesota 大学 Karypis 教授基于多水平方法开发的超图划分系统 HMeTiS^[9].针对每组电路测试基准转换后的超图,进行了 20 次 ($Nruns=20$)二划分($nparts=2$)的实例验证;每次实验设定平衡约束参数均为 0.05 ($UBfactor=5$),允许划分得到的结点子集权值之和偏差为所有结点子集权值之和的 5%.对于实验结果,采用的评估指标为 20 次实例验证中得到的划分割切最小值和相应划分所消耗的时间;为了保证实验结果的可重复性,选用的随机数种子为 1234.

实验及分析表明,该转换算法能够正确地将 ISPD98 电路网表转换为超图的文件存储格式,有效地避免了直接在 ISPD98 电路网表上进行划分,提高了电路划分的效率.实验还针对每组电路测试基准转换后的超图,进行了多水平方法的粗化阶段五种结点匹配策略、优化阶段三种迁移优化策略的对比实验,验证了 ISPD98 电路网表到超图转换算法的有效性.

7 结束语

该算法将电路单元看作为超图中的结点,电路单元间的连线看作为超图中的超边,从而有效地将电路划分问题转换为超图划分优化问题.该算法的时间复杂度为 $\Theta(3m+2n)$,空间复杂度为 $\Omega(m+n+2t)$.

今后,将针对电路划分问题大多具备多约束、多目标的特征,探索基于多水平方法的多约束、多目标

的超图优化划分理论,为 VLSI 设计提供有效的划分工具.

参考文献:

- [1] Karypis G, Aggarwal R, Kumar V, et al. Multilevel hypergraph partitioning: applications in vlsi domain[C] //Proc. 34th Design Automation Conference. San Francisco, 1998: 526-529.
- [2] 孔昕,吴武臣. VLSI 互联线的延时优化研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4):66-69.
- [2] 南国芳. VLSI 物理设计中关键问题求解的算法研究[D]. 天津:天津大学, 2004.
- [3] Lengauer T. Combinatorial algorithms for integrated circuit layout[M]. Germany: Wiley-Teubner, 1990.
- [4] Alpert C J, Kahng A B. Recent directions in netlist partitioning, integration [J]. The VLSI Journal, 1995 (19): 1-81.
- [5] 孙凌宇,冷明. 一种 VLSI 设计到无向赋权图的转换系统[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 57-59.
- [6] 孙凌宇,冷明. 一种 ISPD98 电路网表到图的转换算法[J]. 井冈山学院学报, 自然科学, 2008, 29(4): 19-21.
- [7] Alpert C J. The ISPD98 circuit benchmark suite[C] //Proc. Intel Symposium of Physical Design. Japan, Pacifico Yokohama, 1998: 80 - 85.
- [8] 殷人昆,陶勇雷. 数据结构:用面向对象方法与 C++ 描述[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [9] Karypis G, Kumar V. HMeTiS 1.5.3: a hypergraph partitioning package [R]. USA: University of Minnesota, Department of Computer Science, 1998.

作者简介:

冷明 男,(1975-),博士,副教授.研究方向为 VLSI 算法分析与设计、组合分析与优化等.

孙凌宇 女,(1976-),硕士,副教授.研究方向为电子设计自动化、组合算法等.

郭恺强 男,(1978-),硕士,讲师.研究方向为组合分析与优化等.

朱平 男,(1955-),硕士,教授.研究方向为算法分析与设计等.