

离散数学及其应用教育部重点实验室工作总结报告

(2015年2月10日)

实验室名称： 离散数学及其应用教育部重点实验室

主管部门： 福建省教育厅

依托单位： 福州大学

实验室概况： 在迅速发展的计算机科学技术及信息技术等领域，离散数学是重要的基础学科和支撑学科，它的发展和影响是一个国家科学技术发展水平的重要因素。以福州大学“离散数学与理论计算机科学研究中心”为依托的离散数学及其应用教育部重点实验室于2007年7月获教育部批准立项建设。目前，实验室共有固定研究人员32人，其中教授16人，副教授15人，具有博士学位31人。实验室由马志明院士担任学术委员会主任，范更华教授担任实验室主任。实验室位于福州大学铜盘校区。2007年11月完成了实验室装修一期工程；2009年3月完成了二期装修工程，达到“环境优美、设备一流”。按国际研究所标准建设基础设施，为每位研究人员及来访学者提供40平米宽敞办公室及一流科研设备。为每位研究生提供一个工位及台式电脑。已建成无线网覆盖实验室3000平米的科研、办公场所。重视网络建设，保证网络高速畅通。订购相关专业的国外数据库及原版图书，已基本建成一流的专业图书资料室。

一、本年度对实验室人员进行了调整，淘汰了实验室近年来考核垫底的人员，并将数学与计算机学院中部分优秀人员邀请其进入实验室工作，研究成员数量由原来27名增加到32名，40岁以下研究人员21人，占研究人员65.6%。具有博士学位人员比例由56%提高到97%，具有海外研究工作或学习经历的成员有24名，占75%，并且研究队伍具有很好的学缘结构，大部分成员最后学历取得学校或研究机构均不相同（相同者不超过3人），形成了一支年龄、学历、学缘等结构合理、研究水平高、充满活力的研究队伍。通过成员调整从而研究方向调整也进行了调

整，实验室现有四个研究方向：图论与组合数学、大规模集成电路设计中的数学方法、优化理论与算法、控制理论与应用。

二、本年度实验室在研科研项目国家 973 计划课题 1 项，国家自然科学基金 14 项，其中重点项目 1 项，面上项目 3 项，青年项目 10 项。教育部重点项目 1 项，高等学校博士学科点专项科研基金 1 项。新增国家自然科学基金 3 项，其中重点项目 1 项，为网络设计中的离散数学方法（11331003），范更华。面上项目 2 项，分别为

1. 超图的张量表示及其谱理论研究（11471077），常安。
2. 图像超分辨率盲重建方法的若干关键问题研究（61473330），夏又生。

实验室成员陈德旺、牛玉贞、于元隆获福建省“闽江学者奖励计划”项目资助，实验室成员陈国龙教授主持的“福建省大数据应用技术重大研发平台”获福建省科技重大创新平台资助，郭文忠教授主持的“跨媒体大数据的云服务关键技术与产业化”获省发改委产业技术联合创新专项资助。

实验室成员陈国龙教授、郭文忠教授主持的“离散粒子群优化算法的构建及其应用”获福建省自然科学三等奖。

实验室成员王美清教授参与的“全方位协同育人，培养高素质工程科技人才的研究与实践”获福建省第七届高等教育教学成果奖特等奖。

三、实验室不仅是高水平科学研究中心，也是高层次人才培养基地。实验室以应用数学、计算机应用技术省级重点学科，国家集成电路人才培养基地，离散数学“211 工程”建设重点学科，应用数学博士点以及两个一级学科硕士点（数学、计算机科学与技术）为支撑，形成具有一定规模的离散数学高层次人才培养体系。实验室将充分利用自身的条件，围绕主攻方向，提升开放层次，促进学术交流与合作，使实验室整体研究水平达到国内领先水平，某些研究方向达到国际先进水平，为国家及福建地方建设做出突出贡献。本年度培养硕士研究生 24 名。

四、 年度科研成果

实验室根据拟定的研究计划，在各个研究问题方面开展了深入地研究工作，在课题研究中取得了一些很好的研究结果。本年度课题组研究成员在国内外重要专业刊物上发表研究 SCI 收录论文 46 篇，EI 收录论文 4 篇，主要科研成果如下：

(1) VLSI 中的图论与优化算法研究工作

1、提出了解决 VLSI 混合单元布局问题的基于非光滑优化的技术。首先将半周长线长计算的总线长等价转换为 11 模线长，该线长计算方法是准确的，但是非光滑的。其次，密度约束也采用准确计算的方法。据此，我们构造了 VLSI 全局布局的非光滑优化问题。为求解具有多达数百万个变量的非光滑优化问题，我们构造了共轭次梯度算法，证明了算法的局部收敛性。为改进实际计算效果，我们提出了自适应步长控制策略和罚因子控制策略。同时，针对 11 模线长模型的特点，改进了超大规模集成电路的已有的最优选择聚类算法。

利用以上提出的方法和策略，我们构造了超大规模集成电路的基于非光滑优化的多级算法框架。对 ISPD 2005 和 ISPD 2006 标准测试电路的测试表明，我们的算法的布局效果是高质量的，所用计算时间也是较好的。

该研究工作论文投稿后审稿人和处理编辑认为该工作 “The overall methodology is novel and points out a new direction for modern placement research”, “an interesting direction for placement research”, 给予了很好的评价。

2、提出了一种基于增广拉格朗日函数法的 VLSI 全局布局算法并用来解决超大规模集成电路物理设计中的全局布局问题。首先，在允许少量单元可以重复的情况下，将超大规模集成电路全局布局问题近似转化成光滑的非线性规划问题。接着采用增广拉格朗日函数法求解此非线性规划问题。在求解过程中，采用一种动态的权重控制策略来平衡线长目标及重叠约束，并采用一种自适应的步长控制策略使得解的质量与求解时间达到最优平衡。对 IBM mixed-size benchmarks 和 ISPD 2006 的测试例子的测试表明，该布局算法的生成的解的质量超

过了当前已有的算法。该成果已发表在 The Journal of Supercomputing。

3、研究了超大规模集成电路布局算法 MAPPLE, COMPLx 和 SIMPL 中的一个非光滑凸优化问题, 该问题的目标函数是很多非光滑的半周长线长函数与一个强凸函数的和。基于 Nesterov 光滑化技术和 Excessive gap technique, 我们构造了一个一阶优化算法, 算法的优点是能获得半周长线长的信息, 且算法中的每个子问题有解析解。我们证明了算法的收敛速度是 $O(1/k^2)$, 其中 k 是迭代步数。按照连续复杂性理论, 该算法是最优的。初步实验证实了算法的理论结果。

4、单层芯片下绕障X结构Steiner最小树的构建。随着现代VLSI芯片密度的急剧增加, 越来越多的可重构组件被嵌入到芯片中, 例如IP核、宏模块等。这些组件在总体布线过程中是不能被穿越的, 从而使得绕障Steiner最小树构建问题显得尤为重要。针对传统曼哈顿结构限制布线方向仅为水平和垂直两种方式的缺点, 我们积极开展了X结构下绕障Steiner最小树的构建工作。首先, 由于粒子群优化算法 (PSO) 具有较强的全局搜索能力, 我们提出了一种基于PSO下的X结构Steiner树构建算法。该算法结合了传统遗传算法 (GA) 的交叉和变异操作算子, 并引入了一种基于并查集的边变换策略, 从而使得整个粒子种群具有较为强大的搜索能力。同时考虑到群智能算法效率偏低的弱点, 我们将若干种高效的启发式策略融入到PSO的求解过程, 从而大幅度的提高了整个算法的效率。据我们所知, 该工作是第一个基于X结构的绕障斯坦纳树构建算法, 且实验仿真取得了较为优异的布线质量。此外, 考虑到纯启发式策略效率高、运行模式简单等优点, 我们提出了一种快速的四步绕障X结构Steiner树启发式构建算法, 该算法首先基于德劳内三角剖分构建一棵跨越所有引脚的最小生成树 (MST), 然后构建两个关于MST边连接信息的快速查找表。通过两个查找表提供的边连接信息, 我们可以快速的将初始MST转换为一棵X结构下的Steiner树。最后, 针对前期生成的X结构Steiner树, 我们提出了一种基于边共享的提炼策略, 该策略可以进一步优化该Steiner树并生成最终的布线结果。实验结果表明, 该启发式策略在

布线总长和运行速度两个方面取得了截止目前最为优异的效果。

5、多层芯片下绕障 X 结构 Steiner 最小树的构建。针对多层 X 结构绕障 Steiner 最小树问题，以最小化布线总代价为目标，并同时考虑到通孔数的优化，我们提出了一种基于离散 PSO 算法和惩罚机制的多层 X 结构绕障 Steiner 最小树构建算法。算法在粒子的更新公式中引入边变换操作以加强布线树的拓扑变化能力，进一步增加布线树的绕障能力和线长优化能力，并设计适合 X 结构 Steiner 最小树的边点对编码策略。通过提出合适的惩罚机制用以融入粒子的适应度函数设计，更有效地考虑绕障情况和通孔数，并从基于多层结构的全局角度考虑多层布线问题的求解空间，从而达到有力优化布线总代价的目的。同时，引入预处理策略大大减少了绕障情况的重复判断次数和通孔数的重复计算次数。实验结果表明该算法相关策略的有效性以及该算法相对同类算法能取得可观的布线总代价减少率，是在当前同类算法中具有最强的布线总代价优化能力。而且针对定向边约束的 X 结构绕障 Steiner 最小树这一更为接近实际芯片设计工艺的问题，重新定义布线边的代价，基于多层 X 结构绕障 Steiner 最小树构建算法的基础上，构建求解该问题的有效算法，并探讨不同定向边约束模型的优劣，以期为非曼哈顿结构布线提供一定的理论支撑。据我们所知，这是第一次开展定向边约束的 X 结构绕障 Steiner 最小树问题的研究。

6、时延驱动的 X 结构 Steiner 最小树构建。构建时延驱动 Steiner 树是 VLSI 性能驱动布线阶段中一个非常重要的问题。针对此问题，基于多目标 PSO (Multiple Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 和 Elmore 时延模型提出了一个构建 X 结构最小化半径线长生成树 (Minimum-cost Spanning Tree with a Minimum Radius, MRMCT) 的有效算法，进而有助于 X 结构性能驱动布线的研究。该算法设计了边变换操作和并查集策略以使算法的进化过程更为有效。另外，该算法考虑到拐弯数的优化工作，这是影响芯片可制造性的一个关键指标且对 VLSI 布线有重要意义。据我们所知，这是第一次在非曼哈顿结构性能布线工作中考虑到拐弯数的减少。相关实验结果表明该算法相对其他算法取得可观的性能优化效果，并且在不同 IC 工艺下算法是

稳定且有效的。

7、X 结构下拥塞驱动的总布线问题研究。针对 X 结构下的拥塞驱动的总布线问题，提出一种基于整数线性规划模型(Integer Linear Programming, ILP)、划分策略及 PSO 等技术的 VLSI 高质量 X 结构总布线算法。该算法基于一个新颖的 ILP 模型，可获得更为均布的布线方案，同时设计一个有效 PSO 算法用以求解所提 ILP 模型。为了使 ILP 模型更为有效求解，采用划分策略，将大规模的总布线问题划分为多个中小规模的问题，从总布线问题中最拥挤的区域开始布线，并以此扩张布线区域的大小。在总布线后续阶段，设计一个基于新布线边代价的迷宫算法，以优化线长和拥挤度均衡为目标，布通一些仍未完成布线的线网。据我们所知，这是第一次使用并行算法用以求解 X 结构总布线问题。实验结果表明该算法不仅在大规模电路中可获得较好解，还可在总线长方面相对现有工作而言取得最佳结果。

(2) 图论与组合研究工作

1、图染色问题是图论研究的核心问题。存在图 G ，使得 G 色数 $\chi(G)$ 与团数 $\omega(G)$ 可以差距任意大。对于图 G ，如果存在一个函数 f 使得 $\chi(G) \leq f(\omega(G))$ ，则称图 G 是在函数 f 下是 χ -有界的。如果 G 在函数 $f(x)=x+1$ 下是 χ -有界的，称 G 是 Vizing 有界的，著名的 Vizing 定理指线图是 Vizing 有界的，Beineke 在 1970 年证明了一个图 G 是线图当且仅当 G 不含有 9 个小的子图作为其导出子图，因此研究不含某些特殊导出子图的图是否是 Vizing 有界的变得非常有意义。设 (A, B) 是一对连通图，如果既不含 A 也不含 B 作为导出子图的图是 Vizing 有界的，则称 (A, B) 是好的 Vizing 对，Randerath 首次研究了好的 Vizing 对问题，并提出问题：确定所有的连通图对 (A, B) ，使得既不含 A 也不含 B 作为导出子图的图是 3-可染的，同时，猜测即不含三角形也不含叉图作为导出子图的图是 3-可染的，其中叉图是指剖分 $K_{1,4}$ 两条边得到的图。该文主要研究了 Randerath 猜想，证明了如果不含三角形的图 G 既不含五边形也不含叉图作为导出子图，则 G 是 3-可染的，从而部分验证了 Randerath 猜想。

2、在图论研究方面，侯建锋等证明了每个轮胎图都是无圈列表 8-可染的，从而改进了原有结果。在图划分问题方面，主要对图和超图的公平划分问题进行了考虑，在图的公平划分方面，完全解决了 Bollabas 和 Scott 提出的关于图 k -部公平划分的猜想，并回答了相关问题。在考虑图 k -部划分同时满足最大 k -割和每部分最小边数的问题，Bollabas 和 Scott 提出了其对边数上下界的猜想，我们研究了该猜想并部分证明了猜想，同时，从不同的角度对猜想进行了研究，改进了 Xu 和 Yu 的结果。在 1, 2 超图公平划分研究中，得到了 k -部划分中每部分导出子图的边数的紧的上界，从而完全解决了 Bollabas 和 Scott 提出的关于 1, 2 超图公平划分的猜想。在一致超图 k -部划分研究中，用一种新的思路得到了 k -部划分中每部分导出子图的边数的上界，改进了 Bollabas 和 Scott 的结果，同时，考虑了 4-一致超图的划分问题，验证了 4-一致超图上的 Bollabas 和 Scott 猜想。

(3) 控制理论与应用

控制理论与应用方向苏友峰教授与香港中文大学黄捷教授合作，提出非线性多自主体系统的分布式内模原理，发展了分布式反步迭代、分布式高增益观测器等新型镇定控制技巧，成功获得了一类二阶非线性多自主体系统的全局协作式输出调节问题的状态反馈解以及一类严格反馈型非线性多自主体系统的半全局协作式输出调节问题的输出反馈解。此项成果严格去除了现有相关工作中关于非线性项的全局 Lipschitz 假设，从而适用于求解更多更广的非线性多自主体系统的协同控制问题。自 2013 年以来，上述成果以科技论文形式发表于系统与amp;控制领域国际顶级期刊《Automatica》，包括长文 1 篇、短文 1 篇。

实验室成员江飞老师还研究了流体力学中瑞利-泰勒 (RT) 不稳定性问题及浮力致稳问题，其中 RT 问题目前已吸引许多数学家研究，比如 C. Fefferman 院士(菲尔兹奖获得者)曾在数学顶级杂志《Annals of Mathematics》发表与 RT 交界面破裂相关的论文。

a. 对于上重下轻的稳态密度，我们利用修正变分法构造出了一般有界区域上的 RT 问题的线性不稳定性解。由于我们考虑的是有物理

意义的有界区域，故为了进一步得到非线性不稳定性解，我们需要发展出与传统方法不一样的新想法来克服边界问题。对此，我们采用两种新的方法：第一，在构造非线性不稳定性解过程中，我们采用更精细的能量估计方法替代传统的齐次化原理；第二、我们提出新的具有最低正则性的能量泛函来证明线性不稳定性解的增长率刚好就是一切线性 RT 问题解的最大增长率。在流体力学中关于各类不稳定问题的解的构造一般都是在周期区域或无界区域上进行，我们首次在一般有界区域上（更具有物理意义）构造出不稳定解。

b. 对于下重上轻的稳态密度，且导数恒为常数时，我们可以用能量方法证明该稳态密度是稳定的，从而在数学角度上论证了浮力的致稳效果。最近我们一直尝试取消“导数恒为常数”的条件，为此，我们发展出一套新的更精细的两系能量方法，不但将会解决该遗留问题，还有望进一步解决著名的磁浮力问题，并为 Y. Fukui 等人在天体力学中观测到的磁飘移现象（发表在 Science 上）提供数学角度支持。

其结果得到审稿人好评，并被 Fefferman 推荐发表在《Adv. Math.》上发表。

五、学术活动

2014年3月15日至16日，在福州大学离散数学中心召开了“芯片自动化设计中的数学方法”（International Workshop on Mathematical Methods for Chip Design Automation）国际会议，有来自国内外50余位学者和研究生参加了会议。并在3月召开了“集成电路设计自动化及相关前沿问题高峰论坛”。

2014年12月，由中国人工智能学会认知系统与信息处理专委会主办，福州大学承办了“2014年国际认识系统与信息处理学术研讨会”，有来自国内外60余位学者和研究生参加了会议。

在本年度，共有 10 余位国内外知名学者到校访问，并作报告和进行合作研究，其中包含香港大学教授臧文安，美国乔治亚理工大学教授郁星星，美国乔治亚州立大学教授陈冠涛，南京大学教授何炳生等。