

低功耗优先的片上网络映射优化方法

欧阳一鸣, 张 岚, 梁华国

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 在分析片上网络通讯功耗与通讯流量的关系模型的基础上, 针对片上网络设计中的映射问题, 提出了一种新的降低通讯功耗的映射方法, 该方法首先对映射过程做预处理, 划分成若干候选图, 将通讯量大的 IP 核映射到与其他资源节点距离较短的位置上, 利用预处理的结果产生初始解, 结合流量估算技术对映射空间动态搜索, 从而实现将通讯任务图中的 IP 核映射到 NoC 结构图的资源节点上. 实验结果表明该方法能有效地降低 NoC 的通讯流量, 从而更加适合求解片上网络的低功耗映射问题.

关键词: 片上系统; 片上网络; 低功耗; 映射

中图分类号: TP391.76

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)03-0054-05

An Optimization Mapping Method with Low Power for NoC

OUYANG Yi-ming, ZHANG Lan, LIANG Hua-guo

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A low power mapping method was proposed in this paper for NoC mapping problem based on analyzing the relationship between communication power and communication flow. In order to low down the communication flow of NoC, the proposed method first uses approximated pre-mapping, which maps the larger communication flow IP core to the position close to other vertexes. In mapping step we use the result of pre-mapping step to search better solutions, which fulfills the mapping process from IP core in communication task graph to resource vertex in NoC architecture graph. Experimental results show that communication flow is decreased and it is effective to solve mapping problem with low power.

Key words: system on chip; network on chip; low power; mapping

1 引言

对于片上网络映射算法的研究, 主要是基于功耗优先的映射模型, 研究热点都集中在针对 NoC 映射问题降低系统功耗的优化技术与智能算法上^[1].

文献[2]中采用了基于优先队列的分支限界算法, 依赖于有效的限界函数的选取, 该算法在节点数较少时, 可以在较短时间内获得最优解, 随着规模的增大, 算法复杂度陡然上升. 文献[3]中采用两步遗传算法实现通讯任务图的映射, 包括任务分配、资源节点映射和路由生成, 其目标优化函数是系统执行时间, 采用最短路径作为节点间的通讯路径, 但未考

虑网络拥塞状况对通讯路径的影响. 文献[4]中采用了人工智能领域的最大最小蚁群算法, 利用启发式信息来确定信息素等参数, 具有较快的收敛速度, 但局部搜索中的两交换法易使算法陷入局部最优解. 文献[5]中提出一种改进禁忌搜索算法 TSNM, 该算法由局部搜索和精英重组 2 个步骤经过多次迭代完成, 适于求解大规模 NoC 映射问题.

在分析片上网络通讯功耗与通讯流量的关系模型给出了 NoC 映射问题的完整定义基础上, 提出一种新的降低通讯流量的映射方法, 弥补以上智能算法容易陷入局部最优解和传统分支限界算法运行时间长的缺点.

收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60876028); 国家自然科学基金重点项目(60633060); 安徽省自然科学基金项目(090412034)

2 NoC 映射问题模型

IP 核映射问题就是将通讯任务图中的处理单元分配到 NoC 结构图中的资源节点上去,其目标是使系统的通讯功耗最小.下面给出该问题的完整定义^[6].

定义 1 IP 核通讯任务图 $CTG(U, E)$:在有向图 $CTG(U, E)$ 中,每一个顶点 $u_i \in U$ 表示一个 IP 核,每条边 $e_{ij} \in E$ 表示 IP 核 u_i 到 IP 核 u_j 的通讯任务.每条边 e_{ij} 上的权值 w_{ij} 代表了 IP 核 u_i 到 IP 核 u_j 通讯数据量,权值 $L(e_{ij})$ 代表了 IP 核 u_i 到 IP 核 u_j 最大通信时延.

式(1)给出了 n 个 IP 核间的通信关系矩阵 $W = [w_{ij}] (0 \leq i \leq n-1, 0 \leq j \leq n-1)$,若 IP 核 u_i 和 IP 核 u_j 之间无通讯关系,则 $w_{ij} = 0$.

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{01} & w_{02} & \cdots & w_{0,n-1} \\ w_{10} & 0 & w_{12} & \cdots & w_{1,n-1} \\ w_{20} & w_{21} & 0 & \cdots & w_{2,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{n-1,0} & w_{n-1,1} & w_{n-1,2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义 2 NoC 结构图 $NAG(V, P)$:在有向图 $NAG(V, P)$ 中,每一个顶点 $v_i \in V$ 表示 NoC 上的一个资源节点,边 $p_{ij} \in P$ 表示节点 v_i 到节点 v_j 的通讯路径,边 p_{ij} 上的权值 f_{ij} 表示节点 v_i 到节点 v_j 通讯流量.

设 $nhop_{ij}$ 表示 NoC 结构图 $NAG(V, P)$ 中节点 v_i 到节点 v_j 的跳距(曼哈顿距离),即: $nhop_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$,则 v_i 到 v_j 通讯流量 f_{ij} 的值可以由下式求解得到

$$f_{ij} = w_{ij} \times nhop_{ij}$$

给定 IP 核通讯任务图 $CTG(U, E)$ 和 NoC 结构图 $NAG(V, P)$,且满足 $|U| = |V|$,NoC 映射问题被定义成如下的映射函数:

$$\text{map}: U \rightarrow V \Rightarrow v_j = \text{map}(u_i) \quad \forall u_i \in U, \exists v_j \in V$$

由文献[3]给出的 NoC 通讯功耗模型可知,每 bit 数据从节点 v_i 到节点 v_j 通讯功耗为

$$E_{ij} = (nhop_{ij} + 1) \times E_s + nhop_{ij} \times E_l \quad (2)$$

式中, E_s 和 E_l 表示每 bit 数据的在经过路由器的转发功耗和相邻路由器的通道上的传输功耗,则 NoC 系统通讯功耗 E 为

$$E = \sum_{i \leq |V|} \sum_{j \leq |V|} [(nhop_{ij} + 1) \times E_s + nhop_{ij} \times E_l] \times w_{ij}$$

$$= \sum_{i \leq |V|} \sum_{j \leq |V|} f_{ij} \times (E_s + E_l) + \sum_{i \leq |V|} \sum_{j \leq |V|} E_s \times w_{ij} \quad (3)$$

式中,除 $\sum_{i \leq |V|} \sum_{j \leq |V|} f_{ij}$ 外,其余均为常数,故低功耗映射算法优化的目标函数为

$$\begin{aligned} \text{Obj:} \quad & \min \left\{ \sum_{i \leq |V|} \sum_{j \leq |V|} f_{ij} \right\} \\ \text{s. t.} \quad & \text{map}(u_s) = v_i, \forall u_s \in U \exists v_i \in V \\ & \text{map}(u_t) = v_j, \forall u_t \in U \exists v_j \in V \\ & nhop_{ij} \leq L(e_{st}) \end{aligned} \quad (4)$$

基于低功耗映射模型给出的优化目标函数,就可以计算出映射中的最小通讯流量,从而为实现文中提出的降低功耗的映射方法提供了很好的支持.

3 算法流程

图 1 所示为文中算法框架流程图,从图中可以看出,映射算法主要由三部分构成:NoC 问题模型分析、预映射过程和映射过程.映射算法主要由以下两部分构成.

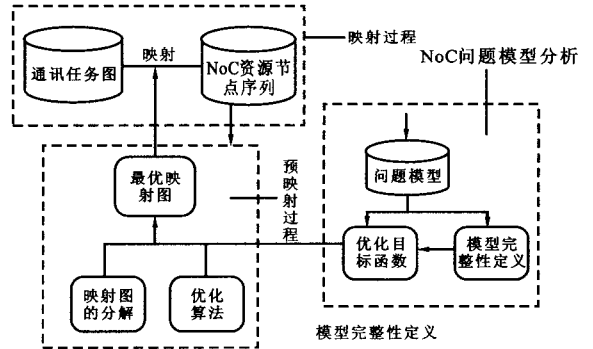


图 1 文中算法框架流程图

第一阶段的预处理算法采用一种有效的贪心策略,将通讯量大的 IP 核映射到与其他资源节点距离较短的位置上.中间映射过程分解成若干个候选映射图,每个候选映射图均按上述策略进行 IP 核映射,最后选择所有候选图中目标函数值即总通讯流量最小的候选图作为预映射的结果.

第二阶段采用与估值技术相结合的分支限界算法搜索最优解.预映射的总通讯流量作为分支限界法的限界值.递归定义的分支限界算法搜索到任一结点时,对应已映射的 IP 核集合的总通讯流量可以由上述定义计算得到,未映射的 IP 核集合的总通讯流量可以按照可能的最小通讯流量值估算得出.若两者之和大于预映射的总通讯流量,表明该当前结点不包含可行解,剪去不满足限界值的分支,否则,继续按深度优先的策略向下搜索,直到所有 IP 映射完成.

4 算法描述

4.1 预处理算法

预处理算法是为了得到一个目标函数近似最优值的启发式算法. 在这一阶段, 将中间映射过程划分为 $|V|$ 个候选映射图 $\text{TempNAG}[0 \cdots |V|-1]$, 首先选择数据通讯量最大的 IP 核, 将其映射到 $|V|$ 个候选映射图中的任意位置, 但需满足其在 $|V|$ 个候选图中的位置两两互不相同. 然后将通讯任务图 $\text{CTG}(V, E)$ 中每个 IP 核按数据通讯量大小降序排列, 数据通讯量较大的 IP 优先映射到候选映射图上. 每个 IP 核将执行以下步骤来完成在 $|V|$ 个候选图上的映射. 算法步骤描述如下:

Step1. $\text{NAG}(V, P)$ 初始值为 $\emptyset$; 计算 $\text{CTG}(U, E)$ 每个 IP 核与相邻节点的数据通讯量之和, 将 CTG 中的节点按通讯量降序排列;

Step2. 选择排好序中的首元素, 即通讯量最大的那个节点 $u_{\max} \in U$

For $i = 0$ to $|V| - 1$

映射到 $u_{\max}$ 到 $v_i \in \text{TempNAG}[i]$, 其中

$$x_i = i \bmod n \quad y_i = \lfloor i/n \rfloor$$

Step3. While (not all $u \in \text{CTG}(U, E)$ are mapped)

选择未映射 IP 集合中通讯量最大的 IP 核 u_k

if (u_k 与已映射的 IP 核间有通信关系)

计算 u_k 的理想位置 (x_k, y_k) , 其中

$$x_k = \frac{\sum_{u_t \in M} (w_{k,t} + w_{t,k}) \times x_{u_t}}{\sum_{u_t \in M} (w_{k,t} + w_{t,k})}$$

$$y_k = \frac{\sum_{u_t \in M} (w_{k,t} + w_{t,k}) \times y_{u_t}}{\sum_{u_t \in M} (w_{k,t} + w_{t,k})}$$

(x_k, y_k) 通常为小数, 故将 u_k 映射到距离

(x_k, y_k) 曼哈顿距离最近的空闲节点 (x'_k, y'_k) 上,

(x'_k, y'_k) 取值满足

$$\min \{ |x'_k - x_k| + |y'_k - y_k| \}$$

Else

将 u_k 映射到距离中心位置最近的空闲节点 (x'_k, y'_k)

上, (x'_k, y'_k) 的取值满足

$$\min \{ |x'_k - \lfloor m/2 \rfloor| + |y'_k - \lfloor n/2 \rfloor| \}$$

计算每个候选图 $\text{TempNAG}[i]$ 的通讯流量之和

Step4. $\min_flow\{\text{TempNAG}[|V|]\} \Rightarrow \text{NAG}(V, P)$

4.2 映射算法

在映射阶段, 使用分支限界算法来搜索最优解, 在这一步骤中, 使用上一步得到 $\text{NAG}(V, P)$ 的通讯流量作为限界函数值, 同时采用了一种跳距估值的技术来加速剪枝和搜索的速度. 算法描述如下:

```
Mapping( $u_i, \text{CTG}(U, E), \text{NAG}(V, P)$ )
{
  If (all  $u \in \text{CTG}(U, E)$  are mapped) {
    For( $j = 0$  to  $|V| - 1$ )
       $v_j$  上被映射  $\text{IP} \geq \text{TempNAG}(V, P)$ 
    Return  $\text{NAG}(V, P) = \text{TempNAG}(V, P)$ 
    low_flow = total flow( $\text{TempNAG}(V, P)$ )
  }
  Else
    For( $j = i$  to  $|V| - 1$ ) {
      If( $v_j$  in  $\text{TempNAG}(V, P)$  is a free location) {
        SwapIP( $v_i \leftrightarrow v_j$ )
        估算限界函数值 bound( $|V|$ )
        计算通讯时延 latency ( $\text{TempNAG}(V, P)$ )
        If(bound( $|V|$ ) less than low_flow)
          If (latency satifise constraint)
            Mapping( $u_{i+1}, \text{CTG}(U, E), \text{NAG}(V, P)$ )
            SwapIP( $v_i \leftrightarrow v_j$ )
      }
    }
}
```

为了很好地说明本算法的思想, 现将关键变量说明如下:

low_flow: 当前最小通讯流量, 初始值为 4.1 节中得到的 NoC 结构图通讯流量值.

bound($|V|$): 算法执行到映射当前 IP 时的通讯流量估计值, 作为限界函数剪去得不到最优解的分支. 式(5) 给出了 bound($|V|$) 的五个部分构成. 对应的当前映射方案的通讯流量 bound($|V|$) 可表示为

$$\text{bound}(|V|) = F_{m,m} + F_{m,s} + F_{n,s} + F_{n,n} + F_{m,n} \quad (5)$$

式中, $F_{m,m}$ 表示已映射的所有 IP 通讯流量之和, $F_{m,u}$ 表示选取的待映射 IP 与已映射的所有 IP 通讯流量之和, 由于已映射的所有 IP 和待映射 IP 在 NoC 结构图 $\text{NAG}(V, P)$ 中的位置是确定的, 所以 $F_{m,m}$ 和 $F_{m,s}$ 能够精确计算. $F_{n,s}$ 表示选取的待映射 IP 与未映射的所有 IP 通讯流量之和, $F_{n,n}$ 表示未映射的所 IP 通讯流量之和, $F_{m,n}$ 表示已映射的 IP 与未映射的 IP 间的通讯流量之和.

$F_{n,s}$, $F_{n,n}$ 和 $F_{m,n}$ 可以通过下式估算得到, 式中的 M 表示已映射的集合, $\bar{M}$ 表示未映射的 IP 集合.

$$F_{n,s} = \sum_{u_i \in M} (w_{i,s} + w_{s,i}) \times \text{nhop}_{i,s} \quad (6)$$

$$F_{n,n} = \sum_{u_i \in M} \sum_{u_j \in \bar{M}} (w_{i,j} + w_{j,i}) \times \text{nhop}_{i,j} \quad (7)$$

$$F_{m,n} = \sum_{u_i \in M} \sum_{u_j \in M} (w_{i,j} + w_{j,i}) \times nhop_{i,j} \quad (8)$$

变量 nhop 用来估算两个有通信关系 IP 在 NoC 结构图 NAG(V,P)的平均跳距取值,根据试验观察,随着平均跳距 nhop 取值的增大,算法执行时间逐渐减少,当 nhop 增长到 1.1 以上时,算法出现搜索停滞的现象,故 nhop 的合理取值在 1.0~1.1 之间.要保证最优解,取 nhop=1.

据数学分析可知,映射算法 Mapping 的时间复杂度和 bound(|V|) 相关,bound(|V|)与实际值 bound'(|V|)的误差越小算法就展开越少的多余分支,当满足不等式

$$|bound(|V|) - bound'(|V|)| \leq O(\log bound'(|V|)),$$

Mapping 算法的时间复杂度为 O(|V|);反之在最坏情况下,时间复杂度为 O(b^{|V|}),其中 b 为分支展开因子.当 NoC 结构图 NAG(V,P)中节点数 |V|较大时,算法复杂度陡然上升,最坏情况下呈指数级增长趋势,当问题规模增长到一定程度,其时间复杂度将超过实验接受范围,故此时实验中不采用对 nhop 进行精确估值来计算限界函数 bound(|V|),而是通过预处理阶段中 Step3.的贪心策略来对未映射的 IP 进行节点位置安排,并计算该映射结果对应的通讯流量之和.

5 实验结果及分析

为了验证本算法的性能,针对一个实际的多媒体系统 MMS 展开实验,该系统包括 H263 编/解码器,MP3 编/解码器,由 25 个 IP 核组成,对应的任务通讯图如图 2 所示.算法采用 C++ 语言编写,采用 Intel P4 2.8GHz CPU,256MB 内存,Windows XP 操作系统下运行.图 3 中给出了该算法下多媒体系统 MMS 的 NoC 映射结果.

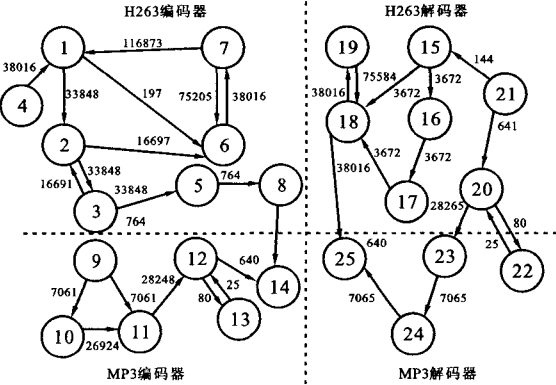


图2 多媒体系统 MMS 任务通讯图

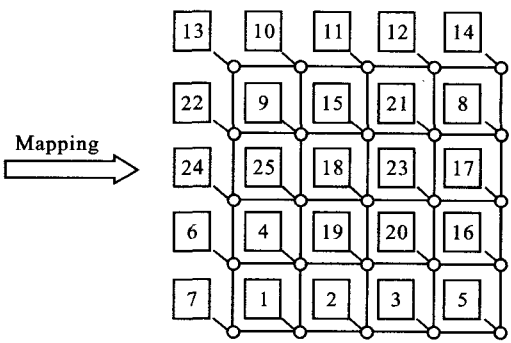


图3 MMS 的 NoC 映射结果

图 4 中给出了文中映射算法下得到的 NoC 通信流量随搜索时间变化的关系图,从图中可以看出:搜索从预处理阶段得到的通讯流量 759123 开始,随着搜索时间增大,通讯流量逐渐降低,算法执行到 3s 左右获得了多媒体系统 MMS 映射后的最小通讯流量 756540,较文献[5]中的结果优化了 15.6%左右.

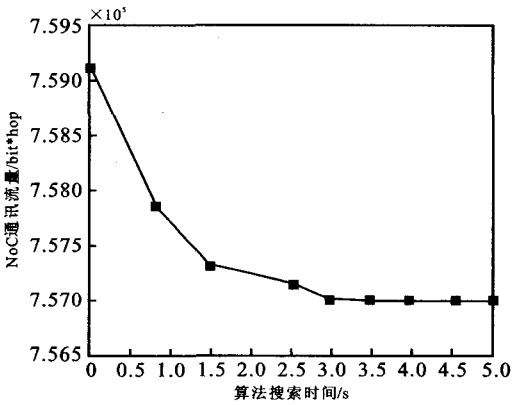


图4 NoC 通讯流量随时间变化关系图

表 1 中给出了几种映射算法下得到的 NoC 通信功耗实验结果,第一列是算法名称,第二列是算法对应的通信功耗,第三列是本方法改进的百分比,第四列是算法执行时间.从实验结果可以看出:

(1) 算法优化能力的评估. SA 算法^[2]在解决组合优化问题上具有通用性,但收敛性差,算法运行时间较长.而 EPAM 算法^[2]同时考虑了网络拥塞的状况,在 OE 路由算法下实现了最优的功耗映射.

表 1 NoC 通讯功耗实验结果比较

Algorithm	Power/mW	Improved/%	Runtime/s
SA	119.36	-1.3	25.55
EPAM	105.12	11.3	0.31
ROTS	130.06	-10	0.65
TSMN	130.06	-10	0.35
Proposed	117.7	—	3.0

RoTS算法和 TSNM 算法^[5]分别在 0.65s 和 0.35s 左右得到了多媒体系统 MMS 的映射后的 NoC 通讯功耗 130.06 mW. 从实验结果可以看出, 文中提出的算法在 3s 左右下获得的 NoC 通讯功耗的最优值明显优于 RoTS 和 TSNM, 降低系统功耗接近 10% 左右.

(2) 算法搜索效率的评估. EPAM 算法, RoTS 算法和 TSNM 算法具有较快的收敛速度, 在算法执行 1s 以内获得最优解, 后两种算法随机产生一个新的初始解, 在解决组合优化问题的初期 NoC 通讯功耗值急剧下降, 收敛速度较快, 但降到某个值后, 容易陷入局部最优从而导致搜索停滞. 由于本文中预处理方法的有效性, 以及对于未映射节点通讯功耗的合理估计, 在 3s 左右获得问题的最优解, 时间复杂度在实验可接受的范围之内, 大大提高了对映射空间的搜索效率.

6 结束语

低功耗优先的 NoC 映射问题已逐渐成为 NoC 设计阶段研究的热点, 文中通过分析通讯功耗与通讯流量之间的数学关系模型, 利用分支限界算法降低了通讯流量, 该算法首先采用高效的贪心策略对映射过程做预处理, 将中间过程划分成几个候选图, 利用预处理得到的结果对映射空间做进一步深度优先搜索. 实验结果表明文中方法有效地降低了 NoC 的通讯流量和通讯功耗, 保证了片上服务质量, 为其他拓扑结构以及不规则 IP 的映射方法的拓展研究打下了基础, 我们下一步工作将针对此类情况展开研究.

参考文献:

- [1] Benini L, Micheli G D. Networks on chips: a new soc paradigm [J]. IEEE Computer, 2002, 35(1):70-78.
- [2] Hu J, Marculescu R. Energy-aware mapping for tile-based NoC architectures under performance constraints [C]// Proceedings of Asia South Pacific Design Automation Conference. Kitakyushu, 2003: 233-239.
- [3] Lei T, Kumar S. A two-step genetic algorithm for mapping task graphs to a network on chip architecture [C]// Proceedings of the Euromicro Symposium on Digital System Design, Belek. Antalya, 2003: 180-187.
- [4] Zhou Ganmin, Yin Yongsheng, Hu Yonghua, et al. NoC mapping based on ant colony optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(18): 7-11.
- [5] Chang Zhengwei, Xie Xiaona, Sang Nan, et al. An improved tabu search algorithm for network-on-chip mapping [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2008(2): 155-160.
- [6] 魏建军, 康继昌, 雷艳静. NoC 的平衡设计 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5): 54-57.
- [7] 常政威, 谢晓娜, 熊光泽. 求解二次分配问题的改进禁忌搜索算法 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(2): 21-24.

作者简介:

欧阳一鸣 男, (1963-), 副教授. 研究方向为嵌入式系统综合与测试、人工智能和模式识别等.

张 岚 男, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统综合与测试.

梁华国 男, (1959-), 教授, 博士生导师, 中国计算机学会容错计算专业委员会委员. 研究方向为嵌入式系统综合与测试、数字系统设计自动化.

(上接第 53 页)

- [2] 刘海峰, 王元元, 姚泽清, 等. 文本分类中一种混合型特征降维方法 [J]. 计算机工程, 2009, 35(2): 194-196.
- [3] 牛强, 王志晓, 陈岱, 等. 基于支持向量机的 Web 文本分类算法 [J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(9): 102-104.
- [4] 苏金树, 张博峰, 徐昕. 基于机器学习的文本分类技术研究进展 [J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1848-1859.
- [5] 王煜, 王正欧, 白石. 用于文本分类的改进 KNN 算法 [J]. 中文信息学报, 2007, 21(3): 76-81.
- [6] 王煜, 白石, 王正欧. 用于 Web 文本分类的快速 KNN 算

法 [J]. 情报学报, 2007, 26(1): 60-64.

作者简介:

刘海峰 男, (1962-), 博士, 副教授, 计算机学会会员. 研究方向为模式识别、文本分类.

陈 琦 女, (1979-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为决策分析.

刘守生 男, (1965-), 博士, 副教授. 研究方向为遗传算法、神经网络.

苏 展 女, (1982-), 硕士, 助教. 研究方向为机器学习.