

一种柔性路径下的跨单元调度方法

李冬妮¹ 肖广雪¹ 王妍¹ 唐加福²

摘要 针对单元制造系统 (Cellular manufacturing system, CMS) 中需要多个单元协作完成的特殊工件, 提出柔性路径下跨作业 (Job shop) 单元的特殊工件调度方法 — 基于信息素的方法 (Pheromone-based approach, PBA). 基于多 Agent 对单元制造系统建立模型, 提出了冗余单元的概念, 建立了多 Agent 之间的协商机制. 同时通过建立 Agent 联盟, 减少通信量的同时增强系统的鲁棒性和调度优化的全局性. 实验结果表明, 与常见的组合调度规则相比, 本文提出的方法在 5 种性能指标上具有显著优势.

关键词 单元制造系统, 跨单元调度, 柔性路径, 多代理, 信息素

引用格式 李冬妮, 肖广雪, 王妍, 唐加福. 一种柔性路径下的跨单元调度方法. 自动化学报, 2012, 38(6): 969–975

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00969

An Inter-cell Scheduling Approach Considering Flexible Processing Routes

LI Dong-Ni¹ XIAO Guang-Xue¹ WANG Yan¹ TANG Jia-Fu²

Abstract Aiming at the problem of scheduling in cellular manufacturing system (CMS) with exceptional parts that need to visit machines located at multiple job shop cells, a pheromone-based approach (PBA) is proposed in this paper. Multi-agents are used to develop the model of CMS. Redundant cells are defined and redundant paths are taken out from the flexible processing routes. Besides, agent coalitions are established to reduce communication cost and to make the solution more global. Simulation results show that compared to the common scheduling rules and their combination, the proposed approach has significant advantages in five performances.

Key words Cellular manufacturing systems (CMS), inter-cell scheduling, flexible route, multi-agent, pheromone

Citation Li Dong-Ni, Xiao Guang-Xue, Wang Yan, Tang Jia-Fu. An inter-cell scheduling approach considering flexible processing routes. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(6): 969–975

跨单元调度问题 (Inter-cell scheduling) 因特殊工件 (Exceptional parts, EP) 在单元间移动而产生, 这些特殊工件的工序需要在多个单元的机器上加工完成^[1]. 目前国内外有关跨单元调度问题的研究还很少, 可以分为两种类型, 即跨流水单元调度 (Flow shop scheduling) 和跨作业单元调度 (Job shop scheduling). 跨流水单元调度的特征是所有的工件都以相同的处理顺序在机器上加工. 据我们了解, 与经典的流水调度问题^[2] 相比, 目前有三篇文章对流水车间的跨单元调度问题进行了研究. Yang

等^[3] 考虑工件至多在两个单元间移动, 且只移动一次. 然而在现实中工件在两个以上单元之间的移动问题更为普遍^[4]. Solimanpur 等^[5] 考虑了特殊工件在两个以上单元间的移动问题. Gholipour-Kanani 等^[6] 提出一种基于分散搜索的元启发式算法. 跨作业单元调度的特征使工件可以以不同的加工路径访问机器, 据我们了解目前只有两篇文献对这一问题进行了研究. Tang 等^[7] 使用分散搜索方法解决特殊工件跨单元调度问题. 工件族中的每个工件都有一条已知路径, 特殊工件需要在若干个单元之间移动完成. Elmi 等^[8] 在 Tang 等问题模型的基础上, 允许可重入工件, 即一个工件的不连续工序可以在同一台机器上加工. 采用模拟退火的方法, 编码方式和 Tang 等的方案相同, 同时利用邻近结构优化最终解. 上述文献对跨单元调度问题的研究都假定特殊工件跨单元的路径是已知的, 但是实际生产中普遍存在着机器能力部分重叠的情况, 工件可以通过不同的机器序列加工. 这就是 Lin 等^[9] 提出的“柔性路径”. 经典的作业车间调度问题是一个 NP-hard 问题^[10–11], 而柔性路径的引入使其更加复杂. 关于考虑柔性路径下的跨作业单元调度问题目前尚未见文献公开发表, 本文针对这一问题选取 5

收稿日期 2011-09-22 录用日期 2012-02-02
Manuscript received September 22, 2011; accepted February 2, 2012

国防基础科研重点项目 (A0920110023), 北京市自然科学基金 (4122069) 资助

Supported by Key Projects of National Defense Basic Scientific Research (A0920110023) and Beijing Natural Science Foundation (4122069)

本文责任编辑 宋士吉

Recommended by Associate Editor SONG Shi-Ji

1. 北京理工大学计算机学院智能信息技术北京市重点实验室 北京 100081 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004

1. Beijing Laboratory of Intelligent Information Technology, School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. National Key Laboratory of Process Industry Automation, Northeastern University, Shenyang 110004

种性能测试指标,即平均工件流动时间、最大完工时间、平均延迟、延迟工件率和平均跨单元率,结合文献 [12] 提出一种基于信息素的多 Agent 协商方法 (Pheromone-based approach, PBA). 本文的主要贡献在于: 针对柔性路径下的跨单元调度问题,在允许工件随机动态到来的情况下,提出一种基于信息素的 PBA 方法,该方法通过柔性路径的选择减小跨单元次数,并基于 Agent 联盟 (Coalition) 改进解的全局优化性能. 根据目前的文献检索情况,本文首次将 Multi-agent 方法应用于跨单元调度问题.

1 问题描述

单元制造系统 (Cellular manufacturing system, CMS) 由多个加工单元组成,每个单元内有若干台加工能力不同的机器,可以完成工艺相似的工件族的生产. 由于特殊工件的存在,导致工件需要在多个单元间转移. 本文只考虑特殊工件跨多个单元间的调度问题,因此,下文所提到的工件都是指特殊工件. 本文研究的具有柔性路径的跨单元调度问题描述如下:

1) 工件动态随机到来; 每个工件具有多道工序,其中大部分工序可以在同一个单元内完成,少部分需要跨单元协作完成.

2) 由于单元之间机器加工能力部分重叠,导致工件具有柔性路径,但对于某个工件的特定工序,在每个单元内至多有一个可加工机器.

3) 考虑单元间移动时间,而忽略单元内移动时间,不同单元间移动时间因移动距离和工件类别而不同.

4) 工件的各工序在可选机器上的加工时间 (包含机器启动时间 (Setup time)) 是已知的,同时每个工件都有固定的交货期,作为该工件期望的完成时间.

5) 同一个工件的工序之间具有次序约束; 同一时刻,每台机器一次只能加工一个工件.

6) 每台机器加工工件都是非中断非抢占式的.

7) 原材料短缺以及操作人员空缺的情况也不在本文的考虑范围内.

如表 1 所示, CMS 由 4 个单元和 4 个随机到来的工件组成,工件的全部工序并不能在单独的某一单元内完成,如工件 1 的工序 2 和工序 3 需要在其他单元内完成. 由于单元 3 和单元 4 内都具有加工工序 3 的机器,所以工件 1 的跨单元加工路径具有 2 条,分别是 $R1 = 1 - 2 - 3$ 和 $R2 = 1 - 2 - 4$.

定义如下符号描述上述问题:

i : 工件集的索引 ($i = 1, \dots, J$);

q_i : 工件 i 的工序集索引 ($q_i = 1, \dots, N$);

R : 工件 i 的跨单元路径集合;

L_j : 工件 i 的跨单元路径集索引 ($j = 1, \dots, r$);

m : 工件的下一道工序可选的加工机器索引;

t : 当前时刻;

t_m : 机器上当前工件的加工完成时刻;

$P_{avg,i}$: 工件 i 的历史平均处理时间;

N_m^t : 在 t 时刻机器 m 的缓冲队列中等待加工的工件集合;

p_{ji} : 工件 i 的第 j 道工序的历史平均加工时间;

p_{jim} : 工件 i 的第 j 道工序在机器 m 上的加工时间;

d_i : 工件 i 的交货期;

m_{qi} : 可以加工工件 i 的第 q 道工序的机器集合;

Tr_i : 工件 i 的单位距离的转移时间;

$H_{c,c'}$: 单元 c 到单元 c' 的距离;

s_i^t : 在 t 时刻工件 i 的松弛时间.

表 1 工件的各工序在单元内各机器上的加工时间 (分钟)

Table 1 Operation-machine load matrix (min)

加工时间		机器					
		单元 1		单元 2		单元 3	单元 4
工件	工序	M1	M2	M3	M4	M5	M6
工件 1	O11	4	-	-	-	-	-
	O12	-	-	2	-	-	-
	O13	-	-	-	-	8	6

2 基于信息素的多 Agent 协商

蚁群优化算法 (Ant colony optimization, ACO) 是解决优化问题的有力工具,在生产调度问题中有着广泛应用^[13]. 本文将 ACO 中信息素的思想引入到 MAS (Multi-agent system) 的协商机制中,通过去除冗余路径减少协商机制的复杂度. 同时还引入联盟的思想,减少通信量的同时增强鲁棒性.

2.1 多 Agent 协商模型

本文定义 4 种基本角色: 工件 Agent、机器 Agent、单元 Agent 以及管理 Agent. 工件 Agent 为每个工件形成的 Agent; 单元 Agent 为各个制造单元生成的 Agent; 机器 Agent 为制造单元内部各个机器形成的 Agent; 管理 Agent 为一个用来管理和维护全局信息的虚拟 Agent. 这 4 种 Agent 允许自由协商交互,以协同求解复杂问题.

2.2 协商过程

协商过程主要由两个子问题组成: 1) 工件选择跨单元的路径; 2) 机器选择工件的执行顺序.

将一个工件的所有可选单元路径描述为一个有向无环图 $M(V_m, E_m)$, 其中节点集 $V_m = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $v_i (1 \leq i \leq n)$ 表示制造单

元. 有向边集 $E_m = \{\langle v_i, v_j \rangle | 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\}$, 有序对 $\langle v_i, v_j \rangle$ 表示节点间的移动方向为 $v_i \rightarrow v_j$. 为了讨论方便, 向节点集合 V_m 中加入两个虚拟节点 v_s 和 v_e , 使得图 M 构成一个两端闭合的有向无环图 $G(V, E)$, 即图 G 只有一个起始节点 v_s 和一个终止节点 v_e .

工件的跨单元路径分 4 种类型: 1) 只有一个起始节点和一个终止节点 (如图 1(a) 所示); 2) 有多个起始节点和一个终止节点 (如图 1(b) 所示); 3) 有一个起始节点和多个终止节点 (如图 1(c) 所示); 4) 多个起始节点和多个终止节点 (如图 1(d) 所示). 则以上 4 种类型路径分别加入 v_s 和 v_e 后构成的图 $G(V, E)$ 如图 2 所示.

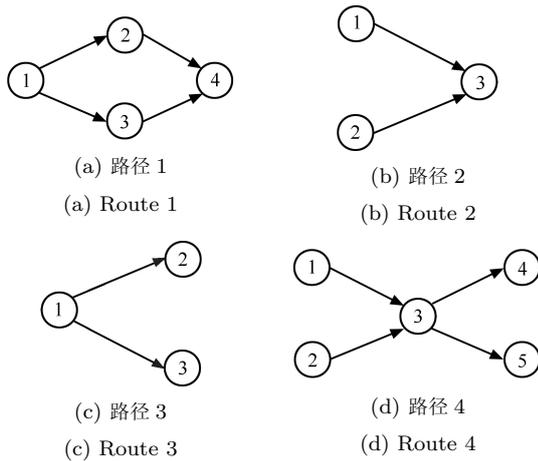


图 1 4 种类型的柔性路径
Fig. 1 Four types of flexible routes

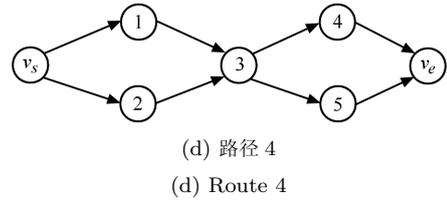
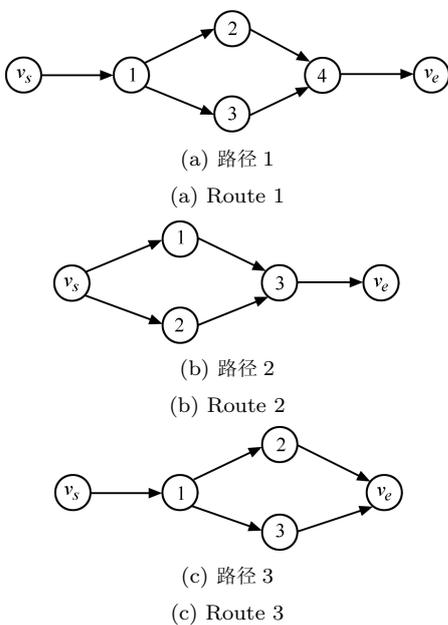


图 2 加入 v_s 和 v_e 后构成的闭合有向无环图
Fig. 2 Directed acyclic graphs after adding v_s and v_e

定义 1 (冗余单元). 每一个工件的有向无环图 $G(V, E)$, 从节点 v 到 v' 的路径是有向边集合 E 的子集, 表示为 $\{\langle v, v_{i,1} \rangle, \langle v_{i,1}, v_{i,2} \rangle, \dots, \langle v_{i,m-1}, v_{i,m} \rangle, \langle v_{i,m}, v' \rangle\}$, 如果 $\exists \langle v, v' \rangle \in E$, 那么 $\forall j (1 \leq j \leq m)$, 节点 $v_{i,j}$ 称为冗余节点, $v_{i,j}$ 所代表的单元称为冗余单元. 同时, 把有向边 E 的子集 $\{\langle v, v_{i,1} \rangle, \langle v_{i,1}, v_{i,2} \rangle, \dots, \langle v_{i,m-1}, v_{i,m} \rangle, \langle v_{i,m}, v' \rangle\}$ 所代表的路径称为冗余路径.

定义冗余单元的目的是为了减少工件跨单元的次数, 在定义 1 的基础上规定这样的准则: 对于工件的任意一道工序 (第一道除外), 如果它能够和该工件的上一道工序在同一个单元完成, 那么该工序必须在该单元完成, 而不能转移到其他单元. 通过去除冗余路径可以缩小协商规模, 降低协商机制的复杂度.

定义 2 (PBA 路径). 对于某一工件, 从 v_s 到 v_e 的所有跨单元路径看成一个集合, 表示为 $R = \{\{\langle v_s, v_{1,1} \rangle, \langle v_{1,1}, v_{1,2} \rangle, \dots, \langle v_{1,n_1-1}, v_{1,n_1} \rangle, \langle v_{1,n_1}, v_e \rangle\}, \{\langle v_s, v_{2,1} \rangle, \langle v_{2,1}, v_{2,2} \rangle, \dots, \langle v_{2,n_2-1}, v_{2,n_2} \rangle, \langle v_{2,n_2}, v_e \rangle\}, \dots, \{\langle v_s, v_{r,1} \rangle, \langle v_{r,1}, v_{r,2} \rangle, \dots, \langle v_{r,n_r-1}, v_{r,n_r} \rangle, \langle v_{r,n_r}, v_e \rangle\}\} (1 \leq n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_r, r \geq 1, r$ 为路径条数). 除去 v_s 和 v_e 之外, 令所有路径的共同路径段为 $S = \{S_p^k | S_p^k = \{\langle v_{1,p+1}, v_{1,p+2} \rangle, \langle v_{1,p+2}, v_{1,p+3} \rangle, \dots, \langle v_{1,p+k-1}, v_{1,p+k} \rangle\} (k \geq 1, p \geq 0)\}$, 其中 $\forall S_p^k$ 和 $S_j^t (p < j)$ 满足 $p+k < j$ 且 $p \geq 0, k \geq 1, t \geq 1, j+t \leq n_1$. 对于任意一条路径 L_j , 集合 $\complement_{L_j} S$ (全集 L_j 中子集 S 的补集) 表示的边的集合称为 PBA 路径段集. 每条路径的 PBA 路径段集中, 所有有向边 (或弧) 的终端点 (Terminal node) (除去 v_e) 所组成的集合, 称为该路径的 PBA 节点集.

定义 3 (联盟 Agent). 对于图 $G(V, E)$, 从起始节点 v_s 到终止节点 v_e 的每一条路径 L_j 的 PBA 节点集组成一个联盟, 为这个联盟生成的 Agent 则称为联盟 Agent. 由一个单元构成的联盟是最简单的联盟 Agent.

定理 1. 假设一个工件的跨单元路径集 R , 其中任意一条路径 $L_j (1 \leq j \leq r, r$ 为路径集 R 的元素个数) 的 PBA 路径段集为 PBA_{L_j} , 所有 $PBA_{L_j} (1 \leq j \leq r)$ 组成的集合为 R_{PBA} . 那么, 在

进行该工件的跨单元柔性路径决策时, 仅根据集合 R_{PBA} 进行决策, 与根据完整路径集 R 进行决策, 在工件的调度上是等效的.

证明. 设一个工件具有两条跨单元路径, 分别为 L_1 和 L_2 , 两条路径对应的 PBA 路径段集分别表示为 PBA_1 和 PBA_2 .

路径 L_1 被选中的概率为 P_{L_1} , 路径 L_2 被选中的概率为 P_{L_2} , PBA_1 被选中的概率为 P_{PBA_1} , PBA_2 被选中的概率为 P_{PBA_2} , 公共路径段集被选中的概率为 P_s . 按照本文提出的路由决策方案, $P_s = 1$, 并且公共路径段集被选中与 PBA 路径段集被选中是相互独立的. 因此每条路径被选中的概率与其 PBA 路径段集被选中的概率相等. \square

2.2.1 工件决策跨单元路径

管理 Agent 具有 CMS 内所有的单元及单元内机器的信息. 当新的工件到来后, 为其创建一个工件 Agent, 工件 Agent 向管理 Agent 注册信息, 包括交货期、工件的所有工序及其次序约束关系. 管理 Agent 根据注册信息为新来的工件提供可行路径集合, 并对可行路径集合进行处理, 去除冗余路径, 判断 PBA 路径和非 PBA 路径.

对于每个工件的所有可选路径, 管理 Agent 将非 PBA 路径部分的信息告知有关的单元 Agent, 并发送针对该工件形成联盟的消息. 联盟 Agent 形成后等待接收工件 Agent 发送的加工请求信息. 同时, 管理 Agent 将处理之后的路径信息发送给工件 Agent, 工件 Agent 根据接收到的路径信息, 分别对 PBA 路径和非 PBA 路径采取相应的措施. 对于 PBA 路径, 工件 Agent 告知路径中相应的单元 Agent, 单元 Agent 将分配到的工件的待加工工序放入机器的缓冲队列中等待加工, 并更新相应机器 Agent 的缓冲队列信息. 对于非 PBA 路径, 工件 Agent 向若干个联盟 Agent 发送 CFP (Call for proposal). 联盟 Agent 收到请求后将形成联盟 Agent 的各单元 Agent 的信息素发送给工件 Agent. 工件 Agent 计算各个联盟 Agent 被选择的概率, 选中其中一个联盟 Agent, 并向其发送确认信息, 同时向其他未被选中的联盟 Agent 发送拒绝信息. 被选中的联盟 Agent 告知相关的单元 Agent 将工件的加工任务放入机器的缓冲队列中.

2.2.2 机器决策工件的执行顺序

当机器加工完成当前工件后, 机器 Agent 检查其缓冲队列, 如果队列中只有一个待加工工件, 那么直接加工该工件. 如果缓冲队列中的待加工工件有两个或两个以上, 那么机器 Agent 向可加工的工件 Agent 发送 CFP. 各工件 Agent 收到机器 Agent 的请求后计算信息素并且发送给机器 Agent. 机器

Agent 根据收到的信息素计算各个工件 Agent 被选择的概率, 从中选择一个工件 Agent 后对其发送确认信息, 同时对其他未被选中的工件 Agent 发送拒绝消息. 被选中的工件 Agent 确认信息后加工该工件. 当该工件加工完成之后, 机器将该工件在单元内的加工信息告知管理 Agent, 用于统计工件的平均加工时间等信息. 当机器的缓冲队列中没有待加工的工件时, 该机器 Agent 的协商过程停止. 以上两部分协商过程同时进行并且不断重复, 直到没有新的工件到来并且所有已分配的工件都加工完毕后停止.

2.3 信息素的计算

整个协商过程可以抽象为两部分: 1) 工件选择路径; 2) 机器选择下一步加工的工件. 假设有 n 个工件, 平均每个工件具有 r 道工序, 则 PBA 的在线时间复杂度是 $O(rn^2)$.

2.3.1 机器决策工件的执行顺序

在工件选择路径的过程中, 机器的信息素在很大程度上影响候选机器被选择的概率. 基于本文的假设, 对于每个工件的某一工序, 每个单元内至多有一个可加工机器, 那么工件 Agent 最后选择出来的机器路径也就是工件的跨单元路径. 具体过程见第 3.2 节.

机器 m 的信息素计算通过式 (1) 得到:

$$\tau_m(t) = e^{-((t_m - t - H_{c,c'}Tr_i) + \sum_{h \in N_m^i} p_{jhm} + p_{qim})} \quad (1)$$

其中, $t_m - t - H_{c,c'}Tr_i$ 表示工件到达机器 m 后, 机器 m 可用的等待时间, 其中 $H_{c,c'}Tr_i$ 表示工件由上单元移动到当前单元所花费的时间. $\sum_{h \in N_m^i} p_{jhm}$ 表示机器 m 的任务缓冲队列中, 所有待加工工件的完成时间. p_{qim} 表示当前工件 i 在机器 m 上所需的加工时间.

工件 i 的第 q 道工序选择机器 m 的概率通过式 (2) 得到:

$$P(m) = \frac{\tau_m(t)^\alpha \eta_{qim}^\beta}{\sum_{\tilde{m} \in M_{qi}} [\tau_{\tilde{m}}(t)^\alpha \eta_{q\tilde{m}}^\beta]} \quad (2)$$

其中, 参数 α 和 β 决定信息素和启发式信息的影响程度大小.

工件 i 的第 q 道工序选择机器 m 上加工的启发式信息 η_{qim} 的计算见式 (3):

$$\eta_{qim} = \frac{1}{p_{qim}} \quad (3)$$

从上面分析可知, 机器 m 被选中的概率即为其所在单元被选中的概率, 在此基础上, 根据式 (4) 计

算联盟被选中的概率.

$$P_{l_{in}} = \frac{\prod_{m \in l_{in}} P(m)}{\sum_{l_{in} \in L_i} \prod_{m \in l_{in}} P(m)} \quad (4)$$

2.3.2 工件排序

当机器 m 完成当前工件后, 需要选择下一个工件. 同样基于信息素计算机器 m 缓冲队列中, 各个工件的信息素以及被选择的概率.

工件 i 的信息素计算见式 (5):

$$\tau_i(t) = e^{-\frac{S_i^t}{P_{avg-i} - \sum_{j=1}^q p_{ji}}} \quad (5)$$

其中, S_i^t 表示松弛时间. 松弛时间 S_i^t 通过式 (6) 得到.

$$S_i^t = d_i - t - P_{avg-i} - \sum_{j=1}^q p_{ji} \quad (6)$$

其中, $P_{avg-i} = \sum_{j=1}^q p_{ji}$ 表示从当前时刻 t 到工件 i 所有工序全部完成所需的时间, 即该工件的剩余加工时间.

工件 i 被选择概率与机器被选择概率相似, 由信息素和启发式信息组成, 计算公式见式 (7):

$$P(i) = \frac{\tau_i(t)^\alpha \eta_{qim}^\beta}{\sum_{h \in N_m^t} [\tau_h(t)^\alpha \eta_{qih}^\beta]} \quad (7)$$

其中, 参数 α, β 与式 (2) 中的定义相同. 启发式信息同样根据式 (3) 计算得到.

3 仿真实验与分析

随机生成了 5 组不同规模的测试数据, 包括大、中、小三个规模. 将 11 种调度规则组合成 5×7 的规则组合, 并且和本文提出的 PBA 方法进行对比, 通过平均工件流动时间、最大完工时间、平均延迟、延迟工件率和平均跨单元率等 5 个性能指标进行分析.

3.1 平均工件流动时间

从 35 种规则组合中选取其中的 11 种在平均工件流动时间 (Mean flow time, MFT) 上与 PBA 进行比较. 如图 3 中所示, PBA 在所有 5 种规模下该性能指标均优于规则组合. 在选取的规则组合中, 不存在某种组合在所有规模下均优于其他组合的情况, 并且它们在同一数据规模下的 MFT 没有明显差异. 比较 PBA 与规则组合在该性能指标上的差异发现, 差异最小的是 EAT + SPT \times TOT 组合, 较 PBA 的均值高 5.46%.

3.2 最大完工时间

从 35 种规则组合中选取 11 种, 在不同数据规模下, 与 PBA 在最大完工时间 (Maximum completion time, MCT) 上进行比较. 如图 4 所示, 在该性能指标上 PBA 是最优的, 比规则组合中性能最好的 LU + LPT 组合低 6.38%. 同时, 规则组合中不存在某一种组合在所有的数据规模下均优于其他组合的情况.

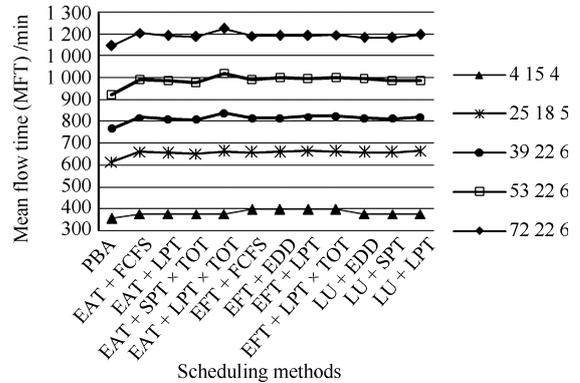


图 3 PBA 与规则组合的 MFT 对比
Fig. 3 Comparative results of MFT for the PBA and the combinations of rules

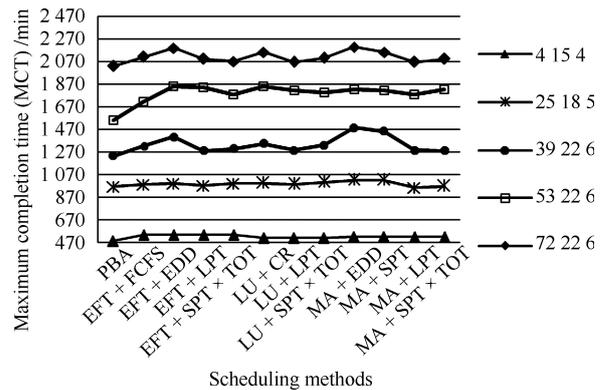


图 4 PBA 与规则组合的 MCT 对比
Fig. 4 Comparative results of MCT for the PBA and the combinations of rules

3.3 平均延迟

如图 5 所示, PBA 在所有 10 种规模的实验数据下, 所获得的平均延迟 (Mean tardiness, MT) 都是最小的, 比选取的 11 种规则组合中性能最好的 EAT + SPT \times TOT 组合低 357.76%. 在规则组合中, 不存在某种组合在所有的数据规模下, 平均延迟都小于其他组合的情况.

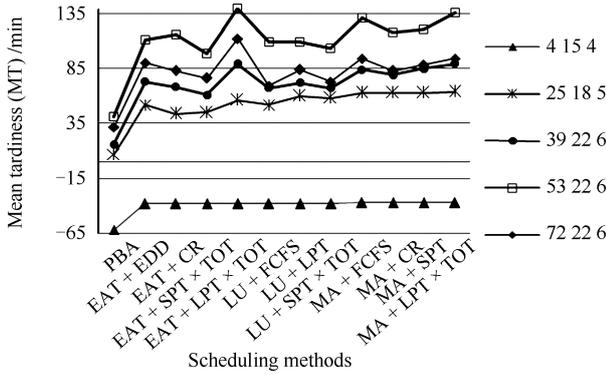


图 5 PBA 与规则组合的 MT 对比

Fig. 5 Comparison of MT for the PBA and the combinations of rules

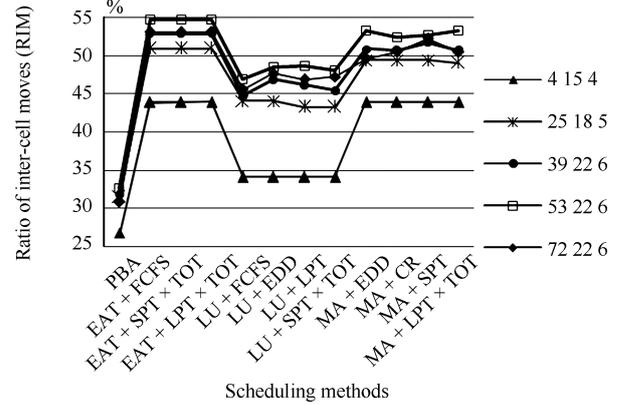


图 7 PBA 与规则组合的 RIM 对比

Fig. 7 Comparison of RIM for the PBA and the combinations of rules

3.4 延迟工件率

不同数据规模下的延迟工件率 (Ratio of tardy parts, RTP) 如图 6 所示, 在该性能指标上 PBA 是最优的, 比选取的 11 种规则组合中性能最好的 EAT + SPT × TOT 组合低 25.37%。同时, 在规则组合中, 不存在某种组合在所有的数据规模下均优于其他组合的情况。

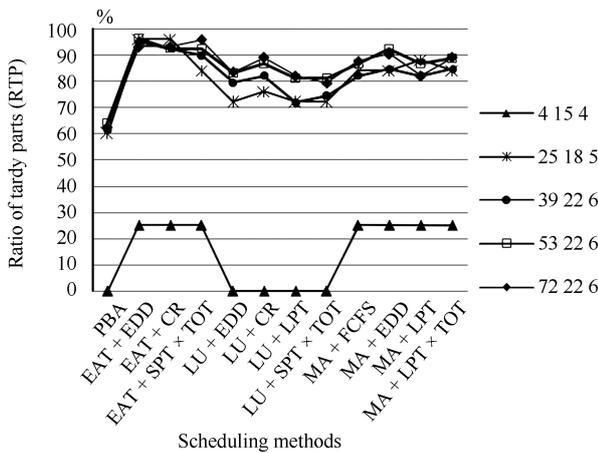


图 6 PBA 与规则组合的 RTP 对比

Fig. 6 Comparison of RTP for the PBA and the combinations of rules

3.5 平均跨单元率

从图 7 中可以看出, PBA 在所有 5 种规模的实验数据下, 所获得的平均跨单元率 (Ratio of inter-cell moves, RIM) 都是最优的, 比选取的 11 种规则组合中性能最好的 EAT + FCFS 组合低 42.76%。同时, 在规则组合中, 不存在某种组合在所有的数据规模下均优于其他组合的情况。

4 结论

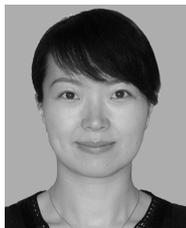
本文提出一种 PBA 方法解决具有柔性路径的跨作业单元调度问题, 通过仿真实验比较了 PBA 和调度规则组合的性能, 验证了 PBA 的有效性和鲁棒性。

跨单元转移过程中的时间开销主要由两部分组成, 一是跨单元转移时间, 二是工件族之间的机器切换时间。本文仅考虑了跨单元转移时间, 下一步将把基于工件族的机器切换时间纳入研究范畴, 在路径选择协商中考虑机器切换时间的影响。同时将考虑更加复杂的制造环境, 特别是随机扰动的情況下如何进行动态调整。

References

- 1 Wang Xiao-Qing, Tang Jia-Fu. Cell management considering parts processed on machines in multiple cells based on scatter search approach. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(10): 125–131 (王晓晴, 唐加福. 基于分散搜索的零部件跨单元生产的单元管理方法. *机械工程学报*, 2009, **45**(10): 125–131)
- 2 Jiang Yi-Wei, Wei Qi. An improved algorithm for a hybrid flow-shop problem in graphics processing. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(11): 1381–1386 (蒋义伟, 魏麒. 图形处理中一类 Flow-shop 问题的改进算法. *自动化学报*, 2011, **37**(11): 1381–1386)
- 3 Yang W H, Liao C J. Group scheduling on two cells with intercell movement. *Computers and Operations Research*, 1996, **23**(10): 997–1006
- 4 Garza O, Smunt T L. Countering the negative impact of intercell flow in cellular manufacturing. *Journal of Operations Management*, 1991, **10**(1): 92–118
- 5 Solimanpur M, Vrat P, Shankar R. A heuristic to minimize makespan of cell scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 2004, **88**(3): 231–241
- 6 Gholipour-Kanani Y, Tavakkoli-Moghaddam R, Khorrami A. Solving a multi-criteria group scheduling problem for a cellular manufacturing system by scatter search. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2011, **28**(3): 192–205

- 7 Tang J F, Wang X Q, Kaku I, Yung K L. Optimization of parts scheduling in multiple cells considering intercell move using scatter search approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010, **21**(4): 525–537
- 8 Elmi A, Solimanpur M, Topaloglu S, Elmi A. A simulated annealing algorithm for the job shop cell scheduling problem with intercellular moves and reentrant parts. *Computers and Industrial Engineering*, 2011, **61**(1): 171–178
- 9 Lin G Y J, Solberg J J. Effectiveness of flexible routing control. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1991, **3**(3–4): 189–211
- 10 Zhang Chang-Sheng, Sun Ji-Gui, Yang Qing-Yun, Zheng Li-Hui. A hybrid algorithm for flowshop scheduling problem. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(3): 332–336
(张长胜, 孙吉贵, 杨轻云, 郑黎辉. 一种求解车间调度的混合算法. *自动化学报*, 2009, **35**(3): 332–336)
- 11 Xie Zhi-Qiang, Xin Yu, Yang Jing. Machine-driven integrated scheduling algorithm with rollback-preemptive. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(11): 1332–1343
(谢志强, 辛宇, 杨静. 可回退抢占的设备驱动综合调度算法. *自动化学报*, 2011, **37**(11): 1332–1343)
- 12 Rajabinasab A, Mansour S. Dynamic flexible job shop scheduling with alternative process plans: an agent-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, **54**(9–12): 1091–1107
- 13 Liu Min. A survey of data-based production scheduling methods. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 785–806
(刘民. 基于数据的生产过程调度方法研究综述. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 785–806)

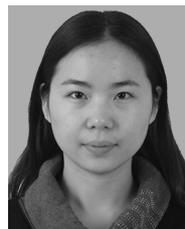


李冬妮 北京理工大学计算机学院副教授. 主要研究方向为生产控制与调度, 供应链与物流管理.

E-mail: ldn@bit.edu.cn

(**LI Dong-Ni** Associate professor at the School of Computer Science, Beijing Institute of Technology. Her research interest covers production con-

trol and scheduling, supply chain and logistics management.)



肖广雪 北京理工大学计算机学院硕士研究生. 主要研究方向为供应链与物流管理. 本文通信作者.

E-mail: xiaoguangxue@gmail.com

(**XIAO Guang-Xue** Master student at the School of Computer Science, Beijing Institute of Technology. Her research interest covers supply chain and

logistics management. Corresponding author of this paper.)



王妍 北京理工大学计算机学院硕士研究生. 主要研究方向为生产调度.

E-mail: wyamy815@gmail.com

(**WANG Yan** Master student at the School of Computer Science, Beijing Institute of Technology. Her main research interest is production scheduling.)



唐加福 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为供应链与物流管理, 工程产品设计与管理, 商业与服务系统运作管理.

E-mail: jftang@mail.neu.edu.cn

(**TANG Jia-Fu** Professor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His

research interest covers supply chain and logistics management, project product design and management, operation management of commerce and service systems.)