



文章编号:1001-9081(2018)07-2095-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018010135

求解阻塞混流生产机器人制造单元调度问题的分支定界算法

赵晓飞^{1,2}, 郭秀萍^{1*}

(1. 西南交通大学 经济管理学院, 成都 610031; 2. 重庆文理学院 经济管理学院, 重庆 402160)

(*通信作者电子邮箱:guoxiuping0029@sina.com)

摘要:针对阻塞混流生产机器人制造单元调度问题,为了同时优化机器人运行顺序和工件加工顺序,提出了分支定界算法。首先,定义机器人活动,将双排序转化为单排序;其次,构建顺序插入规则生成可行解;最后,依据顺序插入规则,设计了分支过程。通过计算随机生成算例,计算结果表明:工作站个数为3时,分支定界算法得到的目标函数值与CPLEX相同,但平均运行时间比CPLEX降低38.58%,证实了分支定界算法的有效性;工作站个数大于3时,与CPLEX相比,在同等时间内,有85.19%的算例搜索到更好解,因此,对于大规模情形,分支定界算法更有价值。

关键词:机器人制造单元;分支定界算法;混流生产;顺序插入规则;阻塞

中图分类号: TP278; F273 **文献标志码:**A

Branch and bound algorithm for solving hybrid flow shop robotic cells scheduling problem with blocking

ZHAO Xiaofei^{1,2}, GUO Xiuping^{1*}

(1. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. School of Economics and Management, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: Focusing on hybrid flow shop robotic cells scheduling problem with blocking, for optimizing simultaneously robotic operation sequence and part input sequence, a branch and bound method was proposed. Firstly, robotic activity was defined to transfer double sequence into single sequence. Secondly, order insertion rule was proposed for obtaining feasible solution. Finally, according to the order insertion rule, branching process was designed. Stochastically generated instances were computed by CPLEX and branch and bound method. When there were three tanks in robotic cells, the value of objective function got by branch and bound method was the same as that of CPLEX; but compared to CPLEX, the average computation time was reduced by 38.58%. So the branch and bound method was effective. When the number of tanks exceeded three and the computation time did not exceed 600 seconds, compared to CPLEX, 85.19% of instances could be found out better solution. It means that the branch and bound method is more valuable, especially for big scale problems.

Key words: robotic cell; branch and bound algorithm; hybrid flow shop; order insertion rule; blocking

0 引言

机器人制造单元是一种先进生产系统,广泛应用于机械制造、电路板印刷(Printed Circuit Board, PCB)以及半导体制造等行业^[1-4]。典型机器人制造单元由一个输入装置、一个输出装置、多个工作站以及一个由计算机控制的机器人组成。

由于市场需求由大批量、少品种向小批量、多品种转变,且机器人制造单元技术改进,使得机器人制造单元由生产同类型工件向生产多类型工件转换^[5-6]。为了合理生产多类型工件,提高系统效率,将待加工的多类型工件组成一个最小工件集(Minimum Part Set, MPS),按照混流方式周期生产。

由于文献[7]证明了工作站数大于2的混流生产机器人制造单元调度问题是NP难的,因此以工作站个数为分类标准,将该问题分为两大类:一类是工作站数等于2;一类是工作站数大于2。工作站数等于2时,该问题可以转化为推销员旅行问题

(Travel Saleman Problem, TSP)^[8-10],易于求解,但仅限于1-度生产策略情形。工作站数等于3时,研究者通过枚举机器人运行顺序^[7,9,11-12],设计了多种启发式方法,但这些方法没能同时优化工件加工顺序和机器人运行顺序。文献[13]首次同时优化了工件加工顺序和机器人运行顺序,并证实了同时优化工件加工顺序和机器人运行顺序优于固定一个顺序优化另一个顺序,但该研究前提是工作站数等于3。文献[14-15]在文献[13]研究基础上,首次设计化学反应优化求解该问题,得到了更好解。

以上优化方法仅适用于工作站数为2或3时的阻塞混流生产机器人制造单元调度问题,很难推广到更多工作站情形;因此,设计新的优化方法,同时优化机器人运行顺序和工件加工顺序,求解阻塞混流生产机器人制造单元调度问题就显得尤为重要。文献[16]研究了阻塞单件车间(Job-shop)机器人制造单元调度问题,给出了可行解构建条件,同时优化了工件加工顺序和机器人活动顺序。由于混流生产和单件车间的不

收稿日期:2018-01-16;修回日期:2018-03-10;录用日期:2018-03-15。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(71471151, 61573264);中央高校基本科研业务费专项(26816WCX04);国家社会科学基金资助项目(17BJL101);重庆市教委科学技术项目(KJ1711293)。

作者简介:赵晓飞(1980—),男,四川盐亭人,博士研究生,主要研究方向:生产调度优化、智能算法; 郭秀萍(1977—),女,内蒙古武川人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向:调度优化、智能算法。



同,以文献[16]研究为基础,本文首先构建了工作站编号与工件编号与机器人活动之间的数量关系;其次,提出了顺序插入规则修正文献[16]给出的可行解构建条件;第三,文献[16]限定了跨周期加工工件数,本文放松了该假设,认为跨周期加工工件理论上来说可以有无限多个,增加了顺序插入规则适用性。

本文针对阻塞混流生产机器人制造单元调度问题,构建了顺序插入规则,生成可行解。以顺序插入规则为基础,构建了分支定界算法求解该问题。

1 问题描述与模型构建

本文研究的机器人制造单元由 m 个工作站 P_1, P_2, \dots, P_m ;一个由计算机控制的物料搬运机器人;一个输入装置 P_0 和一个输出装置 P_{m+1} 组成。由 n 个多类型工件 J_1, J_2, \dots, J_n 组成的 MPS 同时在机器人制造单元上被加工。 $J_j (1 \leq j \leq n)$ 从 P_0 进入机器人制造单元,依次在 m 个工作站 P_1, P_2, \dots, P_m 上加工,最后从 P_{m+1} 离开机器人制造单元,不考虑重入和平行工作站情形,不考虑加工中断情形,且同一时间,每个工作站最多加工一个工件。 J_j 在 P_i 上的加工时间 $a_{i,j} (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n)$ 为常数,工件类型不同,加工时间 $a_{i,j}$ 一般不同。机器人负责工件在工作站之间、输入装置和工作站以及工作站和输出装置之间的移动。同一时刻,机器人最多能搬运一个工件。机器人移动 $r_{i,j}$ 包含 3 步操作:1) 机器人从 P_i 卸下 J_j ;2) 机器人搬运 J_j 从 P_i 到 P_{i+1} ;3) 机器人将 J_j 装入 $P_{i+1} (0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n)$,其开始时间为 $t_{i,j}$,执行 $r_{i,j}$ 耗时 $d_{i,j}$,也称为有载移动时间,为常数。 $c_{q,k}$ 是机器人在 P_q 与 P_k 之间不搬运工件移动耗费的时间 ($0 \leq q, k \leq m+1$),即空载移动时间。目标是最小化两个相邻 MPS 中第一个工件进入机器人制造单元所经过的时间,即加工周期 T 。另外本文假设以下两式成立:

$$d_{h,j} \geq c_{h,h+1}; 1 \leq j \leq n, 0 \leq h \leq n \quad (1)$$

$$c_{q,k} \leq c_{q,l} + c_{l,k}; 0 \leq l, q, k \leq m+1 \quad (2)$$

式(1)表示相邻工作站之间,有载移动时间不小于空载移动时间;式(2)是三角不等式。

为了便于数学模型构建,给出以下符号定义。

$y_{i,h}^{i,j}$ 表示决策变量,当 $t_{i,j} > t_{l,h}$ 时, $y_{i,h}^{i,j} = 1$;否则 $y_{i,h}^{i,j} = 0 (0 \leq i, l \leq m, 1 \leq j, h \leq n)$ 。

M 表示足够大的正实数。

数学模型如下。

目标函数:

Minimize T

约束:

$$(y_{i,j}^{(i-1),j} T + t_{i,j}) - (t_{(i-1),j} + d_{(i-1),j}) \geq a_{i,j}; \\ 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

$$y_{(i-1),j}^{i,j} + y_{(i-1),h}^{i,h} + y_{i,j}^{(i-1),h} + y_{i,h}^{(i-1),j} \geq 3; j \neq h, \\ 1 \leq i \leq m, 1 \leq j, h \leq n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{i,j}^{(i-1),j} \leq 1; 1 \leq i \leq m \quad (5)$$

$$t_{i,j} - t_{l,h} \geq d_{l,h} + c_{(l+1),i} - M(1 - y_{i,h}^{i,j}); \\ 0 \leq i, l \leq m, 1 \leq j, h \leq n \quad (6)$$

$$t_{l,h} - t_{i,j} \geq d_{i,j} + c_{(i+1),l} - M y_{i,h}^{i,j}; \\ 0 \leq i, l \leq m, 1 \leq j, h \leq n \quad (7)$$

$$t_{i,j} \geq d_{0,1} + c_{1,i}; \quad (8)$$

$$i \neq 0 \text{ 或 } j \neq 1 \text{ 且 } 0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

$$T \geq t_{i,j} + d_{i,j} + c_{(i+1),0}; 0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (9)$$

$$t_{0,1} = 0 \quad (10)$$

$$y_{i,h}^{0,1} = 0; 0 \leq l \leq m, 1 \leq h \leq n \quad (11)$$

$$t_{i,j} \geq 0; 0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (12)$$

$$T \geq 0 \quad (13)$$

$$y_{i,h}^{i,j} = \begin{cases} 1, & t_{i,j} \geq t_{l,h}; 0 \leq i, l \leq m, 1 \leq j, h \leq n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

约束(3)保证了工件加工时间约束;约束(4)和约束(5)确保工作站容量约束不被违反;约束(6)和约束(7)避免机器人冲突;约束(8)给出了 $t_{i,j}$ 的开始时间不小于 $t_{0,1}$ 的开始时间;约束(9)给出了加工周期的下界;约束(10)和(11)界定了每个周期总是从 $t_{0,1}$ 开始;约束(12)和(13)是非负约束;约束(14)是 0-1 变量约束。

2 基础理论

针对混流生产机器人制造单元调度问题,文献[8]证明了 1 度机器人运行顺序共有 $m!$ 个,因此,随着工作站个数增多,通过枚举机器人运行顺序优化工件加工顺序的求解策略基本不可行;当然,如果枚举工件加工顺序,优化机器人运行顺序也仅在理论上可能。为此,构建混流生产机器人制造单元调度问题的可行解就成为求解该问题的关键。为了构建可行解先给出机器人活动定义。

定义 1 $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 称为机器人活动,定义如下:

$$\tau_{i+(m+1)(j-1)} = i + (m+1)(j-1); 1 \leq j \leq n, 0 \leq i \leq m \quad (15)$$

依据定义 1, $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 与 $r_{i,j}$ 一一对应,因此,每个 $r_{i,j}$ 的开始时间也是执行机器人活动 $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 的开始时间。应用机器人活动,将工件排序和机器人运行排序转化为机器人活动排序。例如,由 4 个工作站 P_1, P_2, P_3, P_4 、一个机器人、一个输入装置 P_0 和一个输出装置 P_5 组成机器人制造单元。MPS 由工件 J_1, J_2, J_3 组成, $r_{i,j}$ 与 $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 的关系如表 1 所示。

表 1 $r_{i,j}$ 与 $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 的关系

Tab. 1 Relationship between $r_{i,j}$ and $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$

工件	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
J_1	$r_{0,1} \rightarrow \tau_0$	$r_{1,1} \rightarrow \tau_1$	$r_{2,1} \rightarrow \tau_2$	$r_{3,1} \rightarrow \tau_3$	$r_{4,1} \rightarrow \tau_4$
J_2	$r_{0,2} \rightarrow \tau_5$	$r_{1,2} \rightarrow \tau_6$	$r_{2,2} \rightarrow \tau_7$	$r_{3,2} \rightarrow \tau_8$	$r_{4,2} \rightarrow \tau_9$
J_3	$r_{0,3} \rightarrow \tau_{10}$	$r_{1,3} \rightarrow \tau_{11}$	$r_{2,3} \rightarrow \tau_{12}$	$r_{3,3} \rightarrow \tau_{13}$	$r_{4,3} \rightarrow \tau_{14}$

优化阻塞混流生产机器人制造单元调度问题,实质是对 $r_{i,j}$ 的开始时间排序。依据定义 1,对 $r_{i,j}$ 的开始时间排序,可以转化为对机器人活动 $\tau_{i+(m+1)(j-1)}$ 调度。因为本文考虑周期调度,总认为每个机器人活动调度中, τ_0 排第一个,因此, $S = (\tau_0, \tau_{\sigma(1)}, \tau_{\sigma(2)}, \dots, \tau_{\sigma(n(m+1)-1)})$ 为问题的解,其中 σ 是 $\{1, 2, \dots, n(m+1) - 1\} \rightarrow \{1, 2, \dots, n(m+1) - 1\}$ 的置换。为了便于表述,假设 $job(h)$ 为机器人活动 τ_h 搬运的工件; $Q(h)$ 为机器人活动 τ_h 起始工作站对应下标 ($0 \leq h \leq n(m+1)$)。为了判断解 S 是否可行,给出定义 2。

定义 2 满足以下条件的机器人活动调度称为可行机器



人活动调度:

1) 执行 $\tau_i (0 \leq i \leq n(m+1)-1)$ 前, $job(i)$ 必须被装载在 $P_{Q(i)}$ 上,且完成加工;

2) 禁止机器人向非空工作站装载工件;

3) 禁止机器人向空工作站卸载工件。

依据表 1,解 $S_1 = (\tau_0, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_1, \tau_2, \tau_5, \tau_{14}, \tau_6, \tau_3, \tau_4, \tau_7, \tau_{10}, \tau_8, \tau_9, \tau_{11})$ 是可行机器人活动调度。

3 顺序插入规则

定义 2 可以判断给定解是否可行,但不能构建可行解,因此,本章给出构建可行解的规则:顺序插入规则。

文献[16]给出了阻塞作业车间机器人制造单元调度问题可行解构建规则,但是由于作业车间和混流生产的区别,仅利用文献[16]给出的规则会产生不可行解。令 $Rdone$ 为部分可行机器人活动集合, $Rtodo$ 为未排序机器人活动集合。例如:利用文献[16]提出规则, $Rdone = \{\tau_0, \tau_9, \tau_{14}\}$ 满足可行性要求;但是, $Rdone = \{\tau_0, \tau_9\}$ 不满足定义 2 中条件 3), 故 $Rdone = \{\tau_0, \tau_9, \tau_{14}\}$ 不是部分可行机器人活动调度。

阻塞混流生产机器人制造单元调度问题是阻塞作业车间机器人制造单元调度问题的特殊情形,故本文以文献[16]提出规则为基础,提出了顺序插入规则构建阻塞混流生产机器人制造单元调度问题可行解。顺序插入规则的条件 1、条件 2 由文献[16]提出,余下条件下文给出,满足这 6 个条件之一的 $Rdone$ 是不可行的。

条件 1 在 $Rtodo$ 中任意选择机器人活动 τ_f, τ_{f-1} 存在,且 $job(f) = job(f-1)$,将 τ_f 插入 $Rdone$ 末端,若对任意 τ_h, τ_{h+1} 存在,有 $job(h) = job(h+1)$ 和 $Q(f-1) = Q(h)$ 成立,但 $\tau_h \in Rdone$ 而 $\tau_{h+1} \in Rtodo$ 或 $\tau_{h+1} \in Rdone$ 而 $\tau_{f-1} \in Rtodo$ 。

条件 2 在 $Rtodo$ 中任意选择机器人活动 τ_f ,且 τ_{f+1} 存在, $job(f) = job(f+1)$,将 τ_f 插入 $Rdone$ 末端,若对任意 τ_h, τ_{h+1} 存在,有 $job(h) = job(h+1)$ 和 $Q(f) = Q(h) \neq m$ 成立,但 $\tau_h \in Rdone$ 而 $\tau_{h+1} \in Rtodo$ 或 $\tau_{f+1} \in Rdone$ 而 $\tau_h \in Rtodo$ 。

条件 3 在 $Rtodo$ 中任意选择机器人活动 τ_f ,将 τ_f 插入 $Rdone$ 末端,对任意 $\tau_h \in Rdone$,若 $Q(f) = Q(h) = m$,但 $\tau_{f-1} \in Rtodo$ 。

条件 4 在 $Rtodo$ 中任意选择机器人活动 τ_f ,将 τ_f 插入 $Rdone$ 末端,对任意 $\tau_h \in Rdone$,若 $Q(f) \neq Q(h)$,且 $Q(f) = m$, $job(f) = job(h)$,但 $\tau_f - \tau_h < m$ 。

条件 5 在 $Rtodo$ 中任意选择机器人活动 τ_f ,将 τ_f 插入 $Rdone$ 末端,对任意 $\tau_h \in Rdone$,若 $Q(f) \neq Q(h)$,且 $Q(h) = m$, $job(f) = job(h)$,但 $\tau_h - \tau_f < m$ 。

条件 6 若 $J_{\delta(1)}, J_{\delta(2)}, \dots, J_{\delta(l)} (l < n)$ 是 $Rdone$ 中上一个加工周期未完成加工的工件,但工件 $J_{\delta(1)}, J_{\delta(2)}, \dots, J_{\delta(l)}$ 在当前周期的输入顺序和完成顺序不一致。 δ 为跨周期加工工件顺序的置换。

条件 3、条件 4 和条件 5 关注工作站是否冲突,条件 6 关注跨周期加工工件的加工顺序是否一致。条件 3 保证两个连续的 P_m 之间,一定存在一个 P_{m-1} ;条件 4 和条件 5 确保混流生产性质不被违反。

利用顺序插入规则构建可行解的步骤如下:

步骤 1 令 $Rdone = \{\tau_0\}$, $Rtodo$ 包含余下机器人活动,

假设除 P_1 外,所有工作站为空。

步骤 2 利用顺序插入规则,选择插入 $Rdone$ 末端,并使得 $Rdone$ 是部分可行的机器人活动,从 $Rtodo$ 中删除该机器人活动。

步骤 3 重复步骤 2,直到 $Rtodo$ 为空集。

例如,考虑表 1 给出的机器人活动。初始状态: $Rtodo = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7, \tau_8, \tau_9, \tau_{10}, \tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{14}\}$, $Rdone = \{\tau_0\}$ 。假设工作站 P_i 为空 ($2 \leq i \leq 4$)。

接下来,选择 $Rtodo$ 中所有可能机器人活动插入 $Rdone$ 中第 2 个位置,可能的部分可行机器人活动分别为: $\{\tau_0, \tau_1\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_7\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_8\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_9\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_{12}\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_{13}\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_{14}\}$ 。余下机器人活动不能排在 $Rdone$ 中第 2 个位置。因为,如果排 τ_2, τ_3, τ_4 中的一个, τ_1 未排,违反流水线性质;如果排 τ_6 或 τ_{11} ,机器人从 P_0 搬运 J_2 或 J_3 ,但是 P_1 被 J_1 占用,违反文献[16]给出的条件 1;如果排 τ_5 或 τ_{10} ,违反文献[16]给出的条件 2。

然后,令 $Rtodo = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7, \tau_8, \tau_{10}, \tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{14}\}$, $Rdone = \{\tau_0, \tau_9\}$ 。此时 P_1 被占用,其余工作站为空。从 $Rtodo$ 中选择所有可能机器人活动插入 $Rdone$ 中第 3 个位置,可能的部分可行机器人活动分别为: $\{\tau_0, \tau_9, \tau_1\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_9, \tau_7\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_9, \tau_8\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_9, \tau_{12}\}$ 、 $\{\tau_0, \tau_9, \tau_{13}\}$ 。余下机器人活动不能排在第 3 个位置。因为,如果排 τ_2, τ_3, τ_4 中的一个, τ_1 未排,违反流水线性质;如果排 τ_5 或 τ_{11} ,违反文献[16]给出的条件 2;如果排 τ_6 或 τ_{11} ,机器人从 P_0 搬运 J_2 或 J_3 ,但是 P_1 被 J_1 占用,违反文献[16]给出的条件 1;如果插入 τ_7 或 τ_8 ,虽然满足文献[16]给出的条件 1 和条件 2,但是不满足条件 5;如果插入 τ_{14} ,虽然满足文献[16]给出的条件 1 和条件 2,但是不满足条件 3。依据顺序插入规则,得可行机器人活动调度为: $S_2 = (\tau_0, \tau_9, \tau_1, \tau_2, \tau_{10}, \tau_{11}, \tau_3, \tau_4, \tau_{12}, \tau_5, \tau_{13}, \tau_{14}, \tau_6, \tau_7, \tau_8)$ 。以上可行机器人活动调度构建过程如图 1。

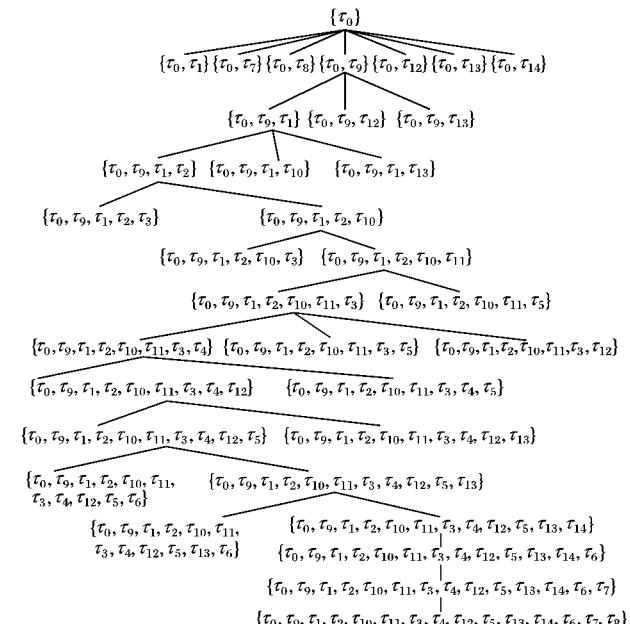


图 1 可行机器人活动调度构建过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of construction process of feasible robotic activity schedule

理论上,阻塞混流生产机器人制造单元调度问题解的个数为 $(n(m+1)-1)!$ 。表 2 给出了小规模时理论解个数与可



行解个数的比较。从表2可以发现,利用顺序插入规则生成可行解的个数远远小于解的个数,可以有效减少搜索空间。

表2 理论解个数与可行解个数比较

Tab. 2 Number comparison of theoretical solutions and feasible solutions

$n \times m$	$n \times (m + 1)$	解的数量	
		可行解	理论解
5 × 2	15	768	>8E10
5 × 3	20	168 960	>1E17
5 × 4	25	136 195 632	>1E23
4 × 2	12	96	>3E07
4 × 3	16	7 098	>1E12
4 × 4	20	1 476 900	>1E17

4 分支定界算法

分支定界算法两个关键点是:剪枝策略与上界的确定。首先,利用文献[16]给出的下界计算方法,选择使得部分可行机器人活动调度下界最小的节点继续分支,即通过深度优先搜索找到问题的一个上界;然后,在分支过程中,再次利用文献[16]给出的下界计算方法,计算部分可行机器人活动的下界;最后,利用上界和下界进行剪枝,继续搜索,求得该问题的最好解。具体步骤如下:

步骤1 令 $Rdone = \{\tau_0\}$, $Rtodo$ 包含余下机器人活动,假设除 P_1 外,所有工作站为空。

步骤2 利用顺序插入规则,选择插入 $Rdone$ 末端,并使得 $Rdone$ 是部分可行的所有机器人活动,组成集合 Ω 。

步骤3 利用文献[16]给出的下界计算方法,计算集合 Ω 中每个机器人活动插入 $Rdone$ 后的下界。

步骤4 选择最小下界对应的机器人活动插入 $Rdone$ 末端,从 $Rtodo$ 中删除该机器人活动。

步骤5 重复步骤2~4,直到 $Rtodo$ 为空集。计算获得可行解的目标函数值,作为分支定界算法的上界,记为当前最好解。

步骤6 利用回溯算法和文献[16]给出的下界计算方法,计算其他分支的下界:若下界大于上界,则剪枝;否则,利用顺序插入规则,继续分支。

步骤7 若得到的目标函数值小于当前最好解,更新当前最好解。

步骤8 若搜索完所有分支或满足算法终止条件,输出最优解或满意解。

5 结果比较

以顺序插入规则构建的分支定界(Branch and Bound, BB)算法利用 C++ 语言编程,在 CPU 为 Intel Core i5-4460 CPU@ 3.20 GHz,内存为 8 GB 的环境下运行。运行时间为以秒计的 CPU 时间。终止条件为 CPU 时间 600 s。

本文借鉴文献[17]中算例生成方式。 $a_{i,j}$ 为整数,且 $a_{i,j} \sim U[20, 99] (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n); d_{h,j} = 6 (1 \leq j \leq n, 0 \leq h \leq m); c_{q,k} = 4 \lceil q - k \rceil (0 \leq q, k \leq m + 1)$ 。其中:inf 表示给定时间内未求得可行解;CT 表示计算时间,单位为 s。

表3给出了 n 为 4、5、6 时, m 为 3、4 时, 分支定界法(BB) 和 CPLEX12.5 的计算结果比较。在表3中,P 表示问题,例如

J6P1 表示 6 个工件时的第一个问题。给定 m 值和 n 随机生成 5 个算例, 每个算例每种算法运行 10 次, 取平均计算时间和平均目标函数值进行比较。从表3中可以发现,两种方法都能在合理的时间求得最优解,且随着工件数或工作站数增多,计算时间变长,证实了算法的有效性。

表3 不同 m 值时两种算法的运行时间和目标函数值对比Tab. 3 Comparison of computation time and objective function value of two algorithms with different m

m	P	CPLEX		BB		m	P	CPLEX		BB	
		T	CT/s	T	CT/s			T	CT/s	T	CT/s
4	J4P1	334	0.12	334	0.05	4	J4P1	382	0.17	382	0.09
	J4P2	419	0.31	419	0.03		J4P2	427	0.33	427	0.16
	J4P3	415	0.17	415	0.01		J4P3	437	0.20	437	0.17
	J4P4	369	0.31	369	0.01		J4P4	369	0.20	369	0.21
	J4P5	402	0.27	402	0.02		J4P5	429	0.24	429	0.24
5	J5P1	459	0.30	459	0.29	5	J5P1	490	0.41	490	11.76
	J5P2	532	0.20	532	0.16		J5P2	532	0.51	532	3.55
	J5P3	528	0.34	528	0.08		J5P3	528	0.42	528	1.92
	J5P4	461	0.20	461	0.08		J5P4	475	0.34	475	2.06
	J5P5	471	0.98	471	0.04		J5P5	501	0.59	501	5.80
6	J6P1	541	1.15	541	1.86	6	J6P1	567	6.55	567	85.33
	J6P2	646	2.28	646	1.23		J6P2	646	10.06	646	30.90
	J6P3	617	1.65	617	1.21		J6P3	619	4.02	619	95.54
	J6P4	531	1.47	531	0.56		J6P4	549	4.51	549	46.32
	J6P5	548	0.98	548	0.96		J6P5	587	5.04	587	34.65

表4给出了 $n \in [7, 15]$ 且为整数; $m \in [4, 20]$ 且为偶数时, 分支定界法和 CPLEX12.5 的计算结果比较。每个算例每种算法运行 10 次, 取平均计算时间和平均目标函数值进行比较。

在总共 81 个算例中, CPLEX 给出了 14 个算例的可行解, 占比 17.28%, 随着算例规模变大, 在给定时间内不能求得可行解; 而分支定界法给出了所有算例的可行解。CPLEX 给出了两个算例的最优解, 分别为 $n = 7, m = 4$ 和 $n = 8, m = 4$; 分支定界法给出了 $n = 7, m = 4$ 算例的最优解。两种方法都给出解的算例中, 仅有两个算例, 分别为 $n = 7, m = 4$ 和 $n = 7, m = 8$, 是分支定界法的解不劣于 CPLEX。总的来说, 小规模算例时, CPLEX 的求解效率和精度高于分支定界法, 当算例规模变大, 分支定界法的效率高于 CPLEX, 因此, 利用顺序插入规则构建的分支定界法具有求解大规模问题的能力。

6 结语

本文针对阻塞混流生产机器人制造单元调度问题, 利用机器人活动将工件加工顺序和机器人运行顺序合二为一, 将二维调度问题转化为一维调度问题。为了同时优化该问题的工件加工顺序和机器人运行顺序, 提出了顺序插入规则构建可行解。以顺序插入规则为基础, 构建了分支定界法。通过计算随机生成的算例表明, 分支定界法相对于 CPLEX 在求解大规模问题时更有优势。后续研究可以从以下两方面考虑: 一是研究分支定界法的剪枝策略和下界计算方式, 提高算法效率; 二是利用顺序插入规则构建可行解, 设计启发式算法或智能优化算法, 提高解的质量。



表4 不同n值时两种算法的运行时间和目标函数值比较

Tab. 4 Comparison of computation time and objective function value of two algorithms with different n

n	m	CPLEX		BB		n	m	CPLEX		BB		n	m	CPLEX		BB	
		T	CT/s	T	CT/s			T	CT/s	T	CT/s			T	CT/s	T	CT/s
7	4	669	31.73	669	428.56	10	4	952	600.00	980	600.00	13	4	1261	600.00	1418	600.00
	6	776	600.00	980	600.00		6	1144	600.00	1239	600.00		6	inf	600.00	1594	600.00
	8	1084	600.00	1060	600.00		8	inf	600.00	1530	600.00		8	inf	600.00	2135	600.00
	10	inf	600.00	1484	600.00		10	inf	600.00	1968	600.00		10	inf	600.00	2524	600.00
	12	inf	600.00	1667	600.00		12	inf	600.00	2220	600.00		12	inf	600.00	3007	600.00
	14	inf	600.00	2119	600.00		14	inf	600.00	2674	600.00		14	inf	600.00	3585	600.00
	16	inf	600.00	2484	600.00		16	inf	600.00	3209	600.00		16	inf	600.00	3847	600.00
	18	inf	600.00	2840	600.00		18	inf	600.00	3501	600.00		18	inf	600.00	4529	600.00
	20	inf	600.00	3260	600.00		20	inf	600.00	4439	600.00		20	inf	600.00	4732	600.00
	4	724	124.88	768	600.00		4	1046	600.00	1185	600.00		4	1444	600.00	1466	600.00
8	6	901	600.00	963	600.00		6	inf	600.00	1419	600.00		6	inf	600.00	1687	600.00
	8	inf	600.00	1343	600.00		8	inf	600.00	1869	600.00		8	inf	600.00	2132	600.00
	10	inf	600.00	1518	600.00		10	inf	600.00	2127	600.00		10	inf	600.00	2662	600.00
	12	inf	600.00	2043	600.00		12	inf	600.00	2517	600.00		12	inf	600.00	3573	600.00
	14	inf	600.00	2262	600.00		14	inf	600.00	3167	600.00		14	inf	600.00	3776	600.00
	16	inf	600.00	2581	600.00		16	inf	600.00	3417	600.00		16	inf	600.00	4499	600.00
	18	inf	600.00	3160	600.00		18	inf	600.00	3735	600.00		18	inf	600.00	4966	600.00
	20	inf	600.00	3575	600.00		20	inf	600.00	4466	600.00		20	inf	600.00	5537	600.00
	4	867	600.00	973	600.00		4	1230	600.00	1261	600.00		4	1512	600.00	1567	600.00
	6	1009	600.00	1105	600.00		6	inf	600.00	1663	600.00		6	inf	600.00	1860	600.00
9	8	inf	600.00	1357	600.00		8	inf	600.00	1870	600.00		8	inf	600.00	2234	600.00
	10	inf	600.00	1725	600.00		10	inf	600.00	2487	600.00		10	inf	600.00	2845	600.00
	12	inf	600.00	2060	600.00		12	inf	600.00	2117	600.00		12	inf	600.00	3726	600.00
	14	inf	600.00	2574	600.00		14	inf	600.00	3407	600.00		14	inf	600.00	4228	600.00
	16	inf	600.00	2779	600.00		16	inf	600.00	3646	600.00		16	inf	600.00	4578	600.00
	18	inf	600.00	3507	600.00		18	inf	600.00	4213	600.00		18	inf	600.00	5277	600.00
	20	inf	600.00	3761	600.00		20	inf	600.00	4528	600.00		20	inf	600.00	6052	600.00

参考文献 (References)

- [1] YAN P, WANG G, CHE A, et al. Hybrid discrete differential evolution algorithm for biobjective cyclic hoist scheduling with reentrance [J]. Computers & Operations Research, 2016, 76: 155 – 166.
- [2] AMRAOUI A E, ELHAFSI M. An efficient new heuristic for the hoist scheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2016, 67(3): 184 – 192.
- [3] ZHU Q, ZHOU M, QIAO Y, et al. Scheduling transient processes for time-constrained single-arm robotic multi-cluster tools [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2017, 30(3): 261 – 269.
- [4] KIM D, KIM H, LEE T. Optimal scheduling for sequentially connected cluster tools with dual-armed robots and a single input and output module [J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(11): 3092 – 3109.
- [5] KIM H, LEE J, LEE T. Noncyclic scheduling of cluster tools with a branch and bound algorithm [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2015, 12(2): 690 – 700.
- [6] LEI W, CHE A, CHU C. Optimal cyclic scheduling of a robotic flowshop with multiple part types and flexible processing times [J]. European Journal of Industrial Engineering, 2014, 8(2): 143 – 167.
- [7] HALL N G, KAMOUN H, SRISKANDARAJAH C. Scheduling in robotic cells: complexity and steady state analysis [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109(1): 43 – 65.
- [8] SETHI S P, SRISKANDARAJAH C, SORGER G, et al. Sequencing of parts and robots moves in a robotic cell [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 1992, 4(3): 331 – 358.
- [9] HALL N G, KAMOUN H, SRISKANDARAJAH C. Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells [J]. Operations Research, 1997, 45(3): 421 – 439.
- [10] ANEJA Y P, KAMOUN H. Scheduling of parts and robot activities in a two machine robotic cell [J]. Computer & Operations Research, 1999, 26(4): 197 – 312.
- [11] KAMOUN H, HALL N G, SRISKANDARAJAH C. Scheduling in robotic cells: heuristics and cell design [J]. Operational Research, 1999, 47(6): 821 – 835.
- [12] ZAHROUNI W, KAMOUN H. Transforming part-sequencing problems in a robotic cell into a CTSP [J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(1): 114 – 123.
- [13] ZAHROUNI W, KAMOUN H. Sequencing and scheduling in a three-machine robotic cell [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(10): 2823 – 2835.
- [14] 赵晓飞, 郭秀萍. 改进的求解机器人制造单元调度问题的化学反应优化算法[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2): 245 – 251. (ZHAO X F, GUO X P. Improved chemical reaction optimization algorithm for solving robotic cell scheduling problem [J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26(2): 245 – 251.)

(下转第2118页)



精确,有利于推动振动检测技术的发展。在未来的研究中,将重点放在振动诊断算法中,尤其是可以在振动检测嵌入式设备中运行的轻量级诊断算法,进一步减轻工作站电脑的计算压力,提高系统的实时性。

参考文献 (References)

- [1] 尚剑宇, 邓志红, 付梦印, 等. 制导炮弹转速测量技术研究进展与展望 [J]. 自动化学报, 2016, 42(11): 1620–1629. (SHANG J Y, DENG Z H, FU M Y, et al. Advance and perspective on spin rate measurement technology for guided projectile [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(11): 1620–1629.)
- [2] ZHU W L, SUN S L, QU Z J. Nonlinear vibration fault diagnosis of hydroelectric generator based on multi-scale wavelet [C]// Proceedings of the 2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 426–430.
- [3] MOLODOVA M, OREGUI M, NUNEZ A, et al. Axle box acceleration for health monitoring of insulated joints: a case study in the Netherlands [C]// Proceedings of the 2014 IEEE 17th Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 822–827.
- [4] 陈高杰. 基于无线传感器网络的桥梁振动检测系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 11–12. (CHEN G J. Research on vibration measurement system for bridges based on wireless sensor networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 11–12.)
- [5] HERRANEN H, KUUSIKI A, SAAR T, et al. Acceleration data acquisition and processing system for structural health monitoring [C]// Proceedings of the 2014 IEEE Metrology for Aerospace. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 244–248.
- [6] TANG Y, ZHU Z C, SHEN G, et al. Real time acceleration tracking of electro-hydraulic shake tables combining inverse compensation technique and neural-based adaptive controller [J]. IETE Access, 2017, 5: 23681–23694.
- [7] 傅亚光, 杨亚璞, 曾丽丽, 等. 基于 PROFIBUS DP 总线的换流站测控装置研制 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 118–124. (FU Y G, YANG Y P, ZENG L L, et al. Development of measurement & control device based on PROFIBUS DP for converter stations [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 118–124.)
- [8] 陈静. Profibus 现场总线技术在新建电厂中的应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 30–38. (CHEN J. Application investigation of Profibus in newly-built power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 30–38.)
- [9] XIA K, ZHU L L, MIAO S, et al. Design of building air-conditioner control system based on PROFIBUS [C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1715–1718.
- [10] 汪宇辰. 智能轮式机器人平台软硬件设计和系统控制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 26–28. (WANG Y C. The design of intelligent wheeled robot platform [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 26–28.)
- [11] OSRTOS. RT-Thread — open source RTOS [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://www.osrtos.com/rtos/rt-thread>.
- [12] QIU L F, SHI Z Y, LIN H Z, et al. Design and implementation of wireless transmission using CC3100 based on RT-Thread [C]// Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 159–161.
- [13] 黄政, 韩立新, 肖艳. 一种基于移动终端的新型计步方法 [J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1856–1871. (HUANG Z, HAN L X, XIAO Y. A new step detection approach based on mobile termination [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1856–1871.)
- [14] ALEX S S, DANIEL A E, JAYANAND B. Reduced order extended Kalman filter for state estimation of brushless DC motor [C]// Proceedings of the 2016 Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 239–244.
- [15] 张强, 石抗抗, 王海舰, 等. 一种自供电销轴受力检测系统研究 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(10): 1613–1618. (ZHANG Q, SHI K K, WANG H J, et al. One kind of research on a self-powered pin force detection system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(10): 1613–1618.)

This work is partially supported by the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (17511106902, 15DZ1100400).

SU Leihao, born in 1992, M. S. candidate. His research interests include embedded system, sensor network.

ZHU Minghua, born in 1963, Ph. D., reasearch fellow. His research interests include wireless sensor network, embedded system.

(上接第 2099 页)

- [15] 赵晓飞, 郭秀萍. 求解机器人制造单元调度问题的化学反应优化算法 [J]. 运筹与管理, 2017, 26(6): 34–40. (ZHAO X F, GUO X P. Chemical reaction optimization algorithm for solving robotic cell scheduling problem [J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(6): 34–40.)
- [16] BRUCKER P, BURKE E, GROENEMEYER S. A branch and bound algorithm for the cyclic job-shop problem with transportation [J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(12): 3200–3214.
- [17] KAMOUN H, HALL N G, SRISKANDARAJAH C. Scheduling in robotic cells: heuristics and cell design [J]. Operations Research, 1999, 47(6): 821–835.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (71471151, 61573264), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (26816WCX04), the National Social Science Foundation of China (17BJL101), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1711293).

ZHAO Xiaofei, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests include production scheduling and optimization, intelligent algorithm.

GUO Xiuping, born in 1977, Ph. D., associate professor. Her research interests include scheduling optimization, intelligent algorithm.