

文章编号: 1001-0920(2006)07-0730-05

## 基于析取图的非周期可重构流水作业的建模与优化

任思成, 徐德, 王芳, 谭民

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080)

**摘要:** 针对可重构制造这一新的制造模式, 研究一类非周期可重构流水作业的建模与优化问题. 非周期可重构流水作业由析取图模型表示, 基于析取图模型, 选取完成所有作业的最大时间  $C_{\max}$  作为优化的目标, 建立相应的混合整数规划求解置换、一般和无缓冲区 3 种情况下非周期可重构流水作业的最优配置和最优调度.

**关键词:** 可重构制造; 非周期流水作业; 析取图; 建模与优化

**中图分类号:** TH16; TP29

**文献标识码:** A

## Disjunctive Graph Based Acyclic Reconfigurable Flow Shop Modeling and Optimization

REN Si-cheng, XU De, WANG Fang, TAN Min

(Laboratory of Complex Systems and Intelligent Sciences, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: REN Si-cheng, E-mail: sicheng\_ren@mail.ia.ac.cn)

**Abstract:** The problem of acyclic reconfigurable flow shop modeling and optimization is studied for the new manufacturing paradigm—reconfigurable manufacturing system. The acyclic reconfigurable flow shops can be modeled as disjunctive graphs, based on which mixed-integer programs are established to find the optimal configuration and optimal schedule under three different cases (i.e., under permutation, general and blocking cases) with makespan  $C_{\max}$  minimization.

**Key words:** Reconfigurable manufacturing; Acyclic flow shop; Disjunctive graph; Modeling and optimization

### 1 引言

传统的制造模式表现为: 专用制造系统由专用自动化生产设备组成, 系统结构为刚性, 适合于单品种、大批量的生产; 柔性制造系统由价格昂贵的通用计算机数控机床和其他可编程自动化设备组成, 通过设备的功能冗余来实现系统的柔性, 适合于小批量、多品种的生产. 传统的制造模式已无法满足未来发展的要求, 即迅速准确地响应复杂多变的市场需求. 正是在这种背景下, 科研人员提出一种新的制造模式——可重构制造系统(RMS). Koren 等将可重构制造系统定义为: 通过快速改变结构、硬件和软件部分, 实现调整一个零件族内的生产能力和功能性, 以响应市场或不规则需求的突然变化<sup>[1]</sup>.

许多学者从不同方面对可重构制造系统进行广泛的研究. Zhao 等提出产品按顾客需求进行分类, 同一类的产品系统按对应配置进行制造, 并讨论了相关的最优配置、最优选择策略和性能评估等问题<sup>[2-5]</sup>. Yigit 等将产品看作由多个单元模块组成, 模块的不同组合决定了产品的类型, 并解决了模块化产品的优化问题<sup>[6,7]</sup>. 其他研究还有配置选择<sup>[8]</sup>、异常处理<sup>[9]</sup>等. 可重构制造的研究进展可参见文献<sup>[10]</sup>.

本文在“模块独立于机床, 模块与机床的不同组合产生不同配置”的观点下, 研究一类非周期可重构流水作业的建模与优化问题.

收稿日期: 2005-05-25; 修回日期: 2005-08-16

基金项目: 国家 973 计划项目(2002CB312200).

作者简介: 任思成(1979—), 男, 山东邹城人, 博士生, 从事可重构制造系统建模与优化的研究; 谭民(1962—), 男, 广东新会人, 研究员, 博士生导师, 从事机器人学、可重构制造系统等研究.

### 2 非周期可重构流水作业的建模

工件的加工过程包含若干个连续的阶段, 每一阶段可将工件看作由某一特定的功能模块加工完成。模块必须依附于某台机床, 这里的机床被认为是能同时容纳一个或多个模块的载体或通用平台, 比如机器人如果配备了切割和钻孔模块, 就能完成切割和钻孔任务。专用机床可看作只具备一个模块的机床, 而数控机床则可看作为实现柔性而同时具备多个模块的机床。然而, 无论专用机床还是数控机床, 模块和机床是永远绑定在一起的。为能快速调整系统的生产能力和功能性, 以响应市场需求的变化, 一种可行的解决方法是使模块独立于机床, 即模块可从一台机床上移除并添加到另一台机床上。模块独立于机床, 模块同机床的不同组合产生了不同的配置。一般而言, 不同配置下的系统将表现出不同的性能。可重构制造的目的就是找到一种方法, 对资源进行合理的分配, 以达到最佳的系统性能。

非周期流水作业是一种传统的生产制造组织方式。在流水作业中, 工件经过串行排列的机床进行加工, 每种工件经过机床的顺序相同, 而每台机床上的工件顺序则可不同。若每台机床上的工件顺序相同, 则称为置换流水作业。显然, 置换流水作业是流水作业的一类特殊情况。在有些情况下, 由于空间和成本等因素的限制, 机床间不允许存在缓冲区, 工件有可能发生阻塞, 这类流水作业称为无缓冲区流水作业。结合模块独立于机床的观点, 本文得到一类非周期可重构流水作业。为便于问题的描述, 现作如下定义:

$J = \{J_k | k = 1, 2, \dots, |J|\}$  为工件集合,  $J_k$  表示第  $k$  种工件;  $M = \{M_j | j = 1, 2, \dots, |M|\}$  为机床集合,  $M_j$  表示第  $j$  台机床;  $m = \{m_i | i = 1, 2, \dots, |m|\}$  为模块集合,  $m_i$  表示第  $i$  个模块;  $m(J_k)$  表示加工工件  $J_k$  所需模块的集合, 满足  $m = \bigcup_{k=1}^{|J|} m(J_k)$ ;  $\sigma(J_k) = \{(m_{i_1}, m_{i_2}) | m_{i_1}, m_{i_2} \in m(J_k)\}$  为加工工件  $J_k$  的模块顺序集合, 有序偶  $(m_{i_1}, m_{i_2})$  表示模块  $m_{i_1}$  在加工次序上先于模块  $m_{i_2}$ ;  $\sigma = \bigcup_{k=1}^{|J|} \sigma(J_k)$  为模块顺序集合。

模块与机床的组合由配置矩阵  $Y$  唯一表征。  $Y$  定义如下:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{模块 } m_i \text{ 在机床 } M_j \text{ 上;} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$Y = B^{|m| \times |M|}, B = \{0, 1\}$$

因为任一模块在一种配置下只能位于某一台机床上, 故有约束

$$\sum_{j=1}^{|M|} y_{i,j} = 1, i = 1, 2, \dots, |m| \quad (1)$$

满足式(1)的配置矩阵  $Y$  称为一种配置

模块  $m_i$  所在的机床编号  $M I(m_i)$  可表示为  $M I(m_i) = \sum_{j=1}^{|M|} j y_{i,j}$ 。由流水作业的特点可知, 若模块  $m_{i_1}$  在加工次序上先于模块  $m_{i_2}$ , 则其对应的机床编号应满足

$$M I(m_{i_1}) \leq M I(m_{i_2}), (m_{i_1}, m_{i_2}) \in \sigma$$

即

$$\sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_1,j} \leq \sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_2,j}, (m_{i_1}, m_{i_2}) \in \sigma, \quad (2)$$

当且仅当  $m_{i_1}$  和  $m_{i_2}$  位于同一台机床时等式成立。同时满足式(1)和(2)的配置矩阵  $Y$  称为一种可行配置。

假设工件  $J_k$  在模块  $m_i$  上的加工时间  $z_{k,i}$  是确定不变的常量, 则工件模块加工时间矩阵  $Z$  定义为

$$z_{k,i} = \begin{cases} \text{非 0 常数, 模块 } m_i \in m(J_k); \\ 0, \text{ 否则} \end{cases}$$

若忽略同一台机床上模块间切换的耗时, 则工件  $J_k$  在机床  $M_j$  上的总加工时间  $w_{k,j}$  等于  $J_k$  在  $M_j$  上所需模块加工时间的累加和, 即

$$w_{k,j} = \sum_{m_i \in m(J_k), M I(m_i)=j} z_{k,i}$$

可表示为

$$w_{k,j} = \sum_{i=1}^{|m|} z_{k,i} y_{i,j}, \quad (3)$$

或矩阵形式

$$W = ZY \quad (4)$$

其中:  $W$  为工件机床加工时间矩阵,  $Z$  和  $W$  分别描述了工件集合  $J$  与模块集合  $m$  和机床集合  $M$  在加工时间上的关系。

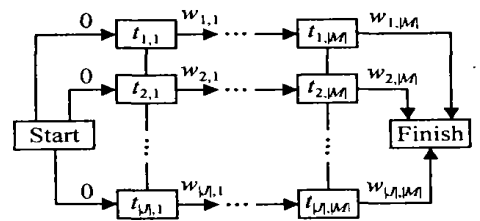


图 1 非周期可重构流水作业的析取图模型  $G_1$

非周期可重构流水作业可由图 1 的析取图<sup>[11]</sup>  $G_1 = (V, CA, DA)$  表示。其中

$$V = \{t_{k,j} | k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, |M|\} \cup \{\text{Start}, \text{Finish}\}$$

为顶点集合,  $t_{k,j}$  表示工件  $J_k$  在机床  $M_j$  上的加工活动, Start 和 Finish 分别表示开始和结束;

$$CA = \{(t_{k,j}, t_{k,j+1}) | k = 1, 2, \dots, |J|\}$$

$$j = 1, 2, \dots, |M| - 1 \} \{ (\text{Start}, t_{k,1}), \dots, |M| - 1 \} \{ (\text{Start}, t_{k,1}), \\ (t_{k,|M|}, \text{Finish}) \mid k = 1, 2, \dots, |J| \};$$

为合取(有向)弧集合,合取弧 $(t_{k,j}, t_{k,j+1})$ 表示同一工件 $J_k$ 顺序经过机床 $M_j$ 和 $M_{j+1}$ 加工,弧的权重为 $w_{k,j}$ ,合取弧 $(\text{Start}, t_{k,1})$ 表示工件 $J_k$ 的加工准备,其权重为0(假定所有工件的加工准备时间为0),合取弧 $(t_{k,|M|}, \text{Finish})$ 表示工件 $J_k$ 完成在所有机床上的加工活动,其权重为 $w_{k,|M|}$ ;

$$DA = \{ (t_{k_1,j}, t_{k_2,j}), (t_{k_2,j}, t_{k_1,j}) \mid k_1, k_2 = \\ 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2, j = 1, 2, \dots, |M| \}$$

为析取(无向)弧集合,析取弧对 $(t_{k_1,j}, t_{k_2,j})$ 和 $(t_{k_2,j}, t_{k_1,j})$ 的权重分别为 $w_{k_1,j}$ 和 $w_{k_2,j}$ ,表示不同工件 $J_{k_1}$ 和 $J_{k_2}$ 在同一台机床 $M_j$ 上的加工顺序

在给定调度下,若 $J_{k_1}$ 先于 $J_{k_2}$ 加工,则析取弧对转化为有向弧 $(t_{k_1,j}, t_{k_2,j})$ ;反之则为有向弧 $(t_{k_2,j}, t_{k_1,j})$ .所有析取弧对有向化后,析取图成为一个有向无圈图.例如,当给定调度规则为先到先服务(FCFS)且工件顺序为 $J_1, J_2, \dots, J_{|J|}$ 时,析取图有向化后等价于图2的有向图 $G_2$

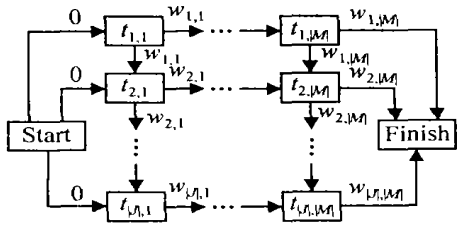


图2 给定调度规则为FCFS工件顺序为 $J_1, J_2, \dots, J_{|J|}$ 时的有向图模型 $G_2$

无缓冲区非周期可重构流水作业的析取图模型 $G_3 = (V, CA, DA)$ 如图3所示.其中

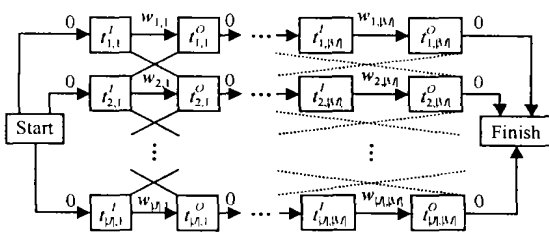


图3 无缓冲区非周期可重构流水作业的析取图模型 $G_3$

$$V = \{ t_{k,j}^s, t_{k,j}^e \mid k = 1, 2, \dots, |J|, j = \\ 1, 2, \dots, |M| \} \cup \{ \text{Start}, \text{Finish} \},$$

$t_{k,j}^s$ 和 $t_{k,j}^e$ 分别表示工件 $J_k$ 在机床 $M_j$ 上加工活动的开始和结束;

$$CA = \{ (t_{k,j}^s, t_{k,j}^e) \mid k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, \\ |M| \} \cup \{ (t_{k,j}^e, t_{k,j+1}^s) \mid k = 1, 2, \dots, |J| \},$$

$$DA = \{ (t_{k_1,1}^e, t_{k_2,1}^s), (t_{k_2,1}^e, t_{k_1,1}^s) \mid k_1, k_2 = 1, 2, \\ \dots, |J|, k_1 < k_2 \} \cup \{ (t_{k_1,j}^e, t_{k_2,j-1}^s), \\ (t_{k_2,j}^e, t_{k_1,j-1}^s) \mid k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, \\ k_1 < k_2, j = 2, 3, \dots, |M| \}.$$

顶点 $t_{k,j}^s$ 的输出弧权重为 $w_{k,j}$ , $t_{k,j}^e$ 的输出弧权重为0

### 3 非周期可重构流水作业的优化

记工件 $J_k$ 的加工完毕时间为 $C_k$ ,则完成所有作业的最大时间 $C_{\max}$ 可表示为

$$C_{\max} = \max_k C_k, k = 1, 2, \dots, |J|$$

$C_{\max}$ 等于析取图有向化后顶点Start和Finish间的关键路的长度,它取决于调度策略和配置的选择.一般而言,不同调度策略和配置下的 $C_{\max}$ 是不同的.最优配置定义为使得 $C_{\max}$ 为最小的配置.优化问题就是寻找最优的调度策略和最优配置,使得 $C_{\max}$ 为最小.本节在析取图模型的基础上,采用数学规划的方法,求解置换一般和无缓冲区3种情况下非周期可重构流水作业的优化问题

#### 3.1 置换非周期可重构流水作业的优化

$G_1$ 中的析取弧对 $(t_{k_1,j}, t_{k_2,j})$ 和 $(t_{k_2,j}, t_{k_1,j})$ 对应于析取约束

$$x_{k_2,j} - x_{k_1,j} \leq w_{k_1,j} \quad x_{k_1,j} - x_{k_2,j} \leq w_{k_2,j}$$

其中 $x_{k,j}$ 表示加工活动 $t_{k,j}$ 的开始时刻.对于置换调度,每台机床上的工件加工顺序相同,可以定义变量

$$\beta_{k_1,k_2} = \begin{cases} 1, & \text{工件 } J_{k_1} \text{ 先于工件 } J_{k_2} \text{ 加工, } k_1 < k_2; \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

引入 $\beta_{k_1,k_2}$ 后,析取约束可以等价地转化为一对不等式约束

$$x_{k_2,j} - x_{k_1,j} + R(1 - \beta_{k_1,k_2}) \leq w_{k_1,j}, \\ x_{k_1,j} - x_{k_2,j} + R\beta_{k_1,k_2} \leq w_{k_2,j}$$

其中 $R$ 为一充分大常数

置换非周期可重构流水作业,最优配置和最优置换调度由混合整数规划MIP1给出

$m$  in  $C_{\max}$ ;

subject to

$$x_{k,j+1} - x_{k,j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k,i} y_{i,j} = 0,$$

$$k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, |M| - 1;$$

$$C_{\max} - x_{k,|M|} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k,i} y_{i,|M|} = 0, k = 1, 2, \dots, |J|;$$

$$x_{k_2,j} - x_{k_1,j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k_1,i} y_{i,j} + R(1 - \beta_{k_1,k_2}) = 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$x_{k_1, j} - x_{k_2, j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k_2, i} y_{i, j} + R \beta_{k_1, k_2} = 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_2, j} - \sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_1, j} = 0, (m_{i_1}, m_{i_2}) \in \alpha,$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} y_{i, j} = 1, i = 1, 2, \dots, |m|;$$

$$C_{\max}, x_{k, j} \in \{0, 1\}, \beta_{k_1, k_2} \in \{0, 1\}, k_1 < k_2$$

最优解  $y_{i, j}^*$  和  $\beta_{k_1, k_2}^*$  为所求最优配置和最优置换调度,  $C_{\max}^*$  为最优配置和最优置换调度下完成所有作业的最大完成时间

### 3.2 一般情况下非周期可重构流水作业的优化

考虑到一般情况下各台机床上的工件加工顺序可能不相同, 可以定义变量

$$\eta_{j, k_1, k_2} = \begin{cases} 1, & \text{工件 } J_{k_1} \text{ 在机床 } M_j \text{ 先于} \\ & \text{工件 } J_{k_2} \text{ 加工, } k_1 < k_2; \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

类似地, 析取约束可由一对不等式约束等价地表示为

$$x_{k_2, j} - x_{k_1, j} + R(1 - \eta_{j, k_1, k_2}) \leq w_{k_1, j},$$

$$x_{k_1, j} - x_{k_2, j} + R\eta_{j, k_1, k_2} \leq w_{k_2, j}$$

最优配置  $y_{i, j}^*$  和最优调度  $\eta_{j, k_1, k_2}^*$  由混合整数规划M IP2 决定

$m \in C_{\max};$

subject to

$$x_{k, j+1} - x_{k, j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k, i} y_{i, j} = 0,$$

$$k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, |M| - 1;$$

$$C_{\max} - x_{k, |M|} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k, i} y_{i, |M|} = 0, k = 1, 2, \dots, |J|;$$

$$x_{k_2, j} - x_{k_1, j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k_1, i} y_{i, j} + R(1 - \eta_{j, k_1, k_2}) = 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$x_{k_1, j} - x_{k_2, j} - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k_2, i} y_{i, j} + R\eta_{j, k_1, k_2} = 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_2, j} - \sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_1, j} = 0, (m_{i_1}, m_{i_2}) \in \alpha,$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} y_{i, j} = 1, i = 1, 2, \dots, |m|;$$

$$C_{\max}, x_{k, j} \in \{0, 1\}, \eta_{j, k_1, k_2} \in \{0, 1\}, k_1 < k_2$$

### 3.3 无缓冲区非周期可重构流水作业的优化

无缓冲区非周期可重构流水作业是置换的一类

特殊情形 类似地, 在引入变量  $\beta_{k_1, k_2}$  后, 可将  $G_2$  中的析取弧对  $(\ell_{k_1, 1}^i, \ell_{k_2, 1}^i)$ ,  $(\ell_{k_2, 1}^i, \ell_{k_1, 1}^i)$  和  $(\ell_{k_1, j}^i, \ell_{k_2, j-1}^i)$ ,  $(\ell_{k_2, j}^i, \ell_{k_1, j-1}^i)$  分别对应的析取约束

$$x_{k_2, 1}^i - x_{k_1, 1}^i = 0, x_{k_1, 1}^i - x_{k_2, 1}^i = 0,$$

$$x_{k_2, j-1}^i - x_{k_1, j}^i = 0, x_{k_1, j-1}^i - x_{k_2, j}^i = 0$$

转化为等价的不等式约束

$$x_{k_2, 1}^i - x_{k_1, 1}^i + R(1 - \beta_{k_1, k_2}) \leq 0,$$

$$x_{k_1, 1}^i - x_{k_2, 1}^i + R\beta_{k_1, k_2} \leq 0;$$

$$x_{k_2, j-1}^i - x_{k_1, j}^i + R(1 - \beta_{k_1, k_2}) \leq 0,$$

$$x_{k_1, j-1}^i - x_{k_2, j}^i + R\beta_{k_1, k_2} \leq 0$$

其中  $x_{k, j}^i$  和  $x_{k, j}^o$  分别表示加工活动  $t_{k, j}$  的开始和结束时刻

对于图 3 中的析取图模型, 可建立如下的混合整数规划M IP3 求解最优配置  $y_{i, j}^*$  和最优调度  $\beta_{k_1, k_2}^*$

$m \in C_{\max};$

subject to

$$x_{k, j}^o - x_{k, j}^i - \sum_{i=1}^{|M|} z_{k, i} y_{i, j} = 0,$$

$$k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, |M|;$$

$$x_{k, j+1}^i - x_{k, j}^o = 0,$$

$$k = 1, 2, \dots, |J|, j = 1, 2, \dots, |M| - 1;$$

$$C_{\max} - x_{k, |M|}^o = 0, k = 1, 2, \dots, |J|;$$

$$x_{k_2, 1}^i - x_{k_1, 1}^i + R(1 - \beta_{k_1, k_2}) \leq 0,$$

$$k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$x_{k_1, 1}^i - x_{k_2, 1}^i + R\beta_{k_1, k_2} \leq 0,$$

$$k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$x_{k_2, j-1}^i - x_{k_1, j}^o + R(1 - \beta_{k_1, k_2}) \leq 0,$$

$$j = 2, 3, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$x_{k_1, j-1}^i - x_{k_2, j}^o + R\beta_{k_1, k_2} \leq 0,$$

$$j = 2, 3, \dots, |M|, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, |J|, k_1 < k_2;$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_2, j} - \sum_{j=1}^{|M|} j y_{i_1, j} = 0, (m_{i_1}, m_{i_2}) \in \alpha,$$

$$\sum_{j=1}^{|M|} y_{i, j} = 1, i = 1, 2, \dots, |m|;$$

$$C_{\max}, x_{k, j}^i, x_{k, j}^o \in \{0, 1\}, y_{i, j} \in \{0, 1\},$$

$$\beta_{k_1, k_2} \in \{0, 1\}, k_1 < k_2$$

### 4 实例分析

4 种工件  $J_1, J_2, J_3, J_4$  由机床  $M_1, M_2, M_3, M_4$  组成的非周期可重构流水作业进行加工, 加工  $J_1$  和  $J_2$  需要顺序经过模块  $m_1, m_2, m_3, m_4$ , 加工  $J_3$  需要顺序经过模块  $m_1$  和  $m_3$ , 加工  $J_4$  需要顺序经过模块  $m_1, m_2, m_4$  工件模块加工时间矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} 40 & 40 & 40 & 40 \\ 40 & 10 & 10 & 40 \\ 30 & 0 & 20 & 0 \\ 10 & 20 & 0 & 20 \end{bmatrix}$$

则工件集合  $J = \{J_1, J_2, J_3, J_4\}$ , 机床集合  $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ , 模块集合  $m = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$ , 模块顺序集合  $\sigma = \{(m_1, m_2), (m_2, m_3), (m_3, m_4)\}$ . 取  $R = 10\ 000$ , 采用优化软件包 CPLEX 求解混合整数规划 MIP1, MIP2 和 MIP3 置换、一般和无缓冲区 3 种情况下对应的最优配置、最优调度和完成所有作业的最大时间由表 1 给出

表 1 3 种可重构流水作业的最优配置、最优调度和完成所有作业的最大时间

类型	机床上的模块和工件排序				$C_{\max}^*$
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	
置换		$m_1$	$m_2, m_3$	$m_4$	210
		$J_4, J_2, J_1, J_3$	$J_4, J_2, J_1, J_3$	$J_4, J_2, J_1, J_3$	
一般情况	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	190
	$J_4, J_1, J_2, J_3$	$J_4, J_1, J_2, J_3$	$J_4, J_2, J_1, J_3$	$J_4, J_2, J_1, J_3$	
无缓冲区		$m_1$	$m_2, m_3$	$m_4$	210
		$J_4, J_1, J_2, J_3$	$J_4, J_1, J_2, J_3$	$J_4, J_1, J_2, J_3$	

在表 1 中, 一般情况下所对应的最优调度机床  $M_1$  和  $M_2$  具有相同的工件排序  $J_4, J_1, J_2, J_3$ , 而机床  $M_3$  和  $M_4$  具有相同的工件排序  $J_4, J_2, J_1, J_3$ . 一般情况下完成所有作业的最大时间 (190) 要小于置换和无缓冲区情况下完成所有作业的最大时间 (210). 此外, 本例中置换和无缓冲区情况实际上只需要 3 台机床, 而一般情况下则需要 4 台机床

## 5 结 语

可重构制造作为一种新的制造模式, 代表了未来制造业的发展方向. 下一步的研究工作将包括以下几个方面:

1) 选择完成所有作业的最大时间  $C_{\max}$  作为优化目标, 进一步考虑优化目标为其他性能准则的情况 (如工件加工的最大推迟完成时间  $L_{\max}$  等).

2) 考虑到重构代价等因素 (在重构过程中, 调整配置和调度策略所需时间和费用), 对不同配置下系统的性能进行综合评价.

3) 混合整数规划的求解属于 NP-hard 问题, 对于比较复杂的情况, 可采用近似方法获得问题的次优解.

4) 对于模块加工时间  $z_{k,i}$  为随机不确定的情况, 优化目标可定义为完成所有作业的最大时间期

望值  $EC_{\max}$ , 可采用随机规划的方法求解期望意义的最优配置和最优调度

## 参考文献 (References)

- [1] Koren Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable Manufacturing Systems [J]. *CIRP Annals*, 1999, 48(2): 527-540
- [2] Zhao X B, Wang J C, Luo Z B. A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System — Part 1: A Framework [J]. *Int J of Production Research*, 2000, 38(10): 2273-2285
- [3] Zhao X B, Wang J C, Luo Z B. A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System — Part 2: Optimal Configurations [J]. *Int J of Production Research*, 2000, 38(12): 2829-2842
- [4] Zhao X B, Wang J C, Luo Z B. A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System — Part 3: Optimal Selection Policy [J]. *Int J of Production Research*, 2001, 39(4): 747-758
- [5] Zhao X B, Wang J C, Luo Z B. A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System — Part 4: Performance Measure [J]. *Int J of Production Research*, 2001, 39(6): 1113-1126
- [6] Yigit A S, U lsoy A G, Allahverdi A. Optimizing Modular Product Design for Reconfigurable Manufacturing [J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2002, 13(4): 309-316
- [7] Yigit A S, Allahverdi A. Optimal Selection of Module Instances for Modular Products in Reconfigurable Manufacturing Systems [J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(17): 4063-4074
- [8] Abdi M R, Labib A W. A Design Strategy for Reconfigurable Manufacturing Systems (RM Ss) Using Analytical Hierarchical Process (AHP): A Case Study [J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(10): 2273-2299
- [9] Bruccoleri M, Amico M, Perrone G. Distributed Intelligent Control of Exceptions in Reconfigurable Manufacturing Systems [J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(7): 1393-1412
- [10] 任思成, 徐德, 王芳, 等. 可重构制造系统研究与发展 [J]. *制造业自动化*, 2005, 27(3): 1-8  
(Ren S C, Xu D, Wang F, et al. The Research and Development of Reconfigurable Manufacturing System [J]. *Manufacturing Automation*, 2005, 27(3): 1-8)
- [11] Pinedo M. *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.