

文章编号: 1001-0920(2005)06-0660-05

## 可重构制造系统的Petri网建模和分析方法

王芳, 徐德, 任思成, 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:** 提出一种针对可重构制造系统的Petri网建模和分析方法。根据生产流程图可以得出制造系统的基本网模型, 扩展基本网模型即可得到系统的Petri网模型。当生产任务发生改变并建立新的生产流程图时, 可直接从原来的基本网模型构造出新构形的基本网模型。此外给出了系统重构代价的评价方法。仿真研究验证了该方法的有效性。

**关键词:** 可重构制造系统; Petri网; 生产流程图; 构形

中图分类号: TP 205

文献标识码: A

## Petri net modeling and analysis method for reconfigurable manufacturing systems

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

(Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: WANG Fang, Email: zhwfang765@sohu.com)

**Abstract:** The modeling and analysis method based on Petri net for reconfigurable manufacturing system is proposed. Via a production flow chart, the basic net model of the manufacturing system can be constructed, which can be extended to the Petri net model of the system. While the production mission is changed and new production flow chart is acquired, the basic net model of new configuration can be deduced from original one directly. A way to evaluate reconfiguring cost of the system is presented also. The simulation result shows that the method is effective.

**Key words:** reconfigurable manufacturing system; Petri net; production flow chart; configuration

### 1 引言

可重构制造系统(RMS)是一种对市场需求变化具有快速响应能力的可重新构形的可变制造系统, 该系统能在现有系统的基础上, 在系统规划与设计规定的范围内, 通过系统构件自身变化和数量增减, 以及构件间联系变化等方式动态地改变其构形, 从而达到根据发生的变化调整生产过程、生产功能和生产能力, 实现较短的系统研制周期和斜升时间、较低的重构成本、较高的加工质量和经济效益<sup>[1]</sup>。所谓系统的构形是确定条件下系统的某个临时固定状态, 主要包括3个方面: 包含全部组织构件的集合; 每种构件的属性或性质; 构件间的关系<sup>[2]</sup>。

当市场需求发生变化时, 如何按照一定的指标

快速确定系统的重构方案, 是RMS实施的关键。为了评价一个待选重构方案的性能, 需要首先获得描述系统资源分布的模型。如何基于市场的不确定性、客户订单的多变性以及制造过程中各种不可预知因素出现的随机性等, 建立能够精确揭示RMS内涵的动态随机模型是RMS技术的基础。对制造系统的建模和仿真通常采用运筹学方法、马尔可夫过程、排队论以及Petri网理论等。文献[3]给出了RMS的马尔可夫过程。文献[4]构建了一个3D图形仿真环境对系统布局进行分析。鉴于Petri网能很好地描述制造系统的各种动态响应行为, Petri网建模方法在RMS建模问题中获得了广泛应用。例如, 蔡宗琰等<sup>[5]</sup>提出的生产设备TOOPN模型和RMS的赋时可重构

收稿日期: 2004-08-13; 修回日期: 2004-11-15

基金项目: 国家973计划项目(2002CB312200)

作者简介: 王芳(1977—), 女, 河北石家庄人, 博士后, 从事先进制造系统理论的研究; 谭民(1962—), 男, 广东新会人, 研究员, 博士生导师, 从事先进机器人控制、系统可靠性等研究。

Petri 网模型 TRPN, 以及 TRPN 模型的可重构算法; Kuo<sup>[6]</sup>提出了用DCTPN 为RMS 建模 通常基于上述模型的布局设计问题讨论的是, 如何确定模块化生产单元的最佳布局, 使得在完成新的生产任务过程中运输设备(如AGV 或移动机器人)的移动距离最短

RMS 的重构方案除了应符合上述最优布局的要求之外, 新构形还应满足重构代价小、生产效率高的要求 本文提出一种通过生产流程图建立系统的 Petri 网模型的方法 首先给出基本网模型的概念; 然后阐述了由生产流程图生成基本网模型的规则, 以及基本网模型的重构规则; 同时给出了将基本网模型扩展为系统的 Petri 网模型的基本思路, 应用得到的 Petri 网模型可以对系统的生产率等性能指标进行仿真; 最后给出了评价系统重构代价的方法

## 2 概念及符号

文中涉及的概念和符号说明如下:

1) 设映射  $g: X \rightarrow Y$ , 则记  $g(Z) = \{y \mid y = g(x), x \in Z, Z \subset X\}$ ; 同理, 若  $g: X \times Y \rightarrow Z$ ,  $X$  和  $Y$  均为可数集, 则

$$g(P, Q) = \begin{bmatrix} g(p_{|1}, q_{|1}) & \dots & g(p_{|1}, q_{|k}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g(p_{|p}, q_{|1}) & \dots & g(p_{|p}, q_{|k}) \end{bmatrix},$$

$$P = \{p_1, \dots, p_{|p}\} \subset X, Q = \{q_1, \dots, q_{|k}\} \subset Y.$$

2) 矩阵运算“ $*$ ”, 设  $U * V$  的计算结果为  $W$ , 其中:  $U = [u_{ij}]_{x \times z}$ ,  $u_{ij}$  为变量符号;  $V = [v_{ij}]_{z \times y}$ ,  $v_{ij} \in R$ ;  $W = [w_{ij}]_{x \times y}$ , 则

$$w_{ij} = - \sum_{\substack{z \\ \text{sgn}(v_{kj}) < 0}} \{u_{ik}\} + \sum_{\substack{z \\ \text{sgn}(v_{kj}) > 0}} \{u_{ik}\},$$

$$i = 1, 2, \dots, x, j = 1, 2, \dots, y. \quad (1)$$

式中: “ $-$ ”表示集合相减运算, “ $+$ ”表示集合并运算,  $w_{ij}$  为一个集合运算表达式 通常“ $*$ ”运算出现在表达式  $L + U * V = Z$  中, 其中:  $U$  和  $V$  的定义如上;  $L = [l_{ij}]_{x \times y}$ ,  $Z = [z_{ij}]_{x \times y}$ , 其元素均为集合 当  $v_{ij} \neq \emptyset$ ,  $i = 1, 2, \dots, x, j = 1, 2, \dots, y$  时, 式(1)中

$$w_{ij} = \sum_{\substack{z \\ \text{sgn}(v_{kj}) > 0}} \{u_{ik}\}$$

为一集合, 此时  $W = U * V$  是一个以集合为元素的矩阵

## 3 基本网模型及其重构规则

### 3.1 基本网模型的定义

定义可重构制造系统的基本网模型为 4 元组  $N = (T, P, O, I)$ . 其中:  $T$  为所有变迁的集合, 对应制造系统的加工设备  $P$  为所有库所的集合, 每个变迁具有唯一的输出库所, 表示该加工过程是否完成 每

个变迁的输出库所又可作为其他变迁的输入库所, 任意的  $t \in T$ , 如果  $t$  的前集  $(\bullet t)$  中库所的个数大于 1, 即  $|\bullet t| > 1$ , 那么  $t$  对应组装设备或焊接设备; 否则  $t$  对应的设备对某种原材料或半成品进行铣、刨、磨等深加工 若  $p \in P, \bullet p$  为空集, 即  $\bullet p = \emptyset$ , 那么  $p$  称为系统输入端口, 对应系统生产加工所需的原材料 本文假设所有的原料都需加工后才能组装, 即任意的  $t \in T$ , 且  $|\bullet t| > 1, \bullet t$  中不包含系统输入端口  $O: T \rightarrow P$  称为输出函数, 任意  $t \in T, t \bullet = \{O(t)\}$ ;  $I: T \rightarrow 2^P$  称为输入函数, 任意  $t \in T, I(t) = \bullet t$  可重构制造系统的基本网模型与文献[7]中有向网是等价的, 为便于描述系统的重构过程, 在此将采用不同的表达方式

假设制造系统中所有的加工设备不可以移动, 但可方便地从系统移入移出, 且有充足的运输设备来实现加工设备间的物料传送 基本网模型  $N = (T, P, O, I)$  反映了系统当前构形的主要特征, 并且可通过产品的加工流程图方便地得到

### 3.2 基于生产流程图的基本网模型生成规则

设有向图  $G(M, E)$  表示产品的生产流程图, 其中:  $M$  是该图所有顶点的集合,  $E$  是所有边的集合  $G$  中的顶点与系统的加工设备相对应, 并用机床的代号来表示,  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ ,  $n$  为系统机床总数 对于  $m_1, m_2 \in M$ , 若从  $m_1$  到  $m_2$  存在有向边连接, 则表示零件经由  $m_1$  加工后送入  $m_2$  加工 对加工流程图  $G$  采用联结矩阵表示法, 图的联结矩阵与图一一对应 设  $C = [c_{ij}]_{n \times n}$  为  $G$  的联结矩阵, 则

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{从 } m_i \text{ 到 } m_j \text{ 有边连接;} \\ 0, & \text{从 } m_i \text{ 到 } m_j \text{ 无边连接} \end{cases} \quad (2)$$

定义与联结矩阵  $C$  同名的函数为,  $C: M \times M \rightarrow \{0, 1\}$ ,  $C(m_i, m_j) = c_{ij}, m_i, m_j \in M$ .

由加工流程图  $G$  获得系统基本网模型  $N$  的规则如下:

1) 建立从  $G$  的顶点集  $M$  到  $N$  的变迁集  $T$  的一一映射  $f$ , 即  $T = f(M)$ ;

2) 任意的  $t \in T$ , 定义  $p = O(t)$ , 令  $P = \{p \mid p = O(t), t \in T\}$ ;

3) 将  $O(t), t \in T$  按照与  $M$  对应的顺序排成一行向量  $O = [O(t_1), O(t_2), \dots]$ , 同样将  $I(t), t \in T$  组成行向量  $I = [I(t_1), I(t_2), \dots]$ , 则  $I = O * C$ ;

4) 任意的  $t \in T$ , 如果  $I(t) = \emptyset$ , 则定义  $I(t) = \{p\}$  ( $p \in P$  为系统输入端口), 并将  $p$  存入库所集  $P$ .

### 3.3 基本网模型的重构规则

可重构制造系统通过重新构形, 快速调整制造过程, 制造功能和制造生产能力, 以适应不断变化的

市场需求 当新的生产任务下达时, 决策支持系统制定出新的生产流程图(可能有多个), 对于每个生产流程图或生产方案需建立相应的系统模型进行性能评价, 以便确定最优方案以及对方案进行调整 下面将给出如何根据新产品的生产流程图, 在系统原基本网模型的基础上得到重构后的基本网模型 在此将系统构形的改变归纳为添加生产设备, 移走生产设备, 生产设备在加工流程图中逻辑顺序的改变, 以及相应软件的调整

设系统原生产  $a$  族零件, 其加工流程图为  $G_a(M_a, E_a)$ ,  $G_a$  的联结矩阵为  $C_a$ , 系统的基本网模型为  $N_a(T_a, P_a, O_a, I_a)$ ,  $T_a = f_a(M_a)$ . 现转为生产  $b$  族零件, 加工流程图为  $G_b(M_b, E_b)$ , 联结矩阵为  $C_b$ , 设系统重构后的基本网模型为  $N_b(T_b, P_b, O_b, I_b)$ . 根据  $G_a$  和  $G_b$ , 由  $N_a$  重构为  $N_b$  的规则如下:

1) 令  $M^0 = M_a \setminus M_b, M^- = M_a \setminus M^0, M^+ = M_b \setminus M^0$ .

2) 令  $T_b^0$  为  $M^0$  对应的变迁集, 即  $T_b^0 = f_a(M^0) = f_b(M^0)$ , 令  $P_b = O_a(T_b^0)$ ,  $\forall t \in T_b^0, O_b(t) = O_a(t)$ ,

$$I_b(t) = \begin{cases} \emptyset, & C_a(M_a \times f_a^{-1}(t)) = \Omega; \\ I_a(t), & \text{其他,} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $f_a^{-1}$  为  $f_a$  的逆函数,  $\Omega$  表示元素全为零的列向量

3) 令  $T_b^1$  为  $M^+$  对应的变迁集, 即  $T_b^1 = f_b(M^+)$  ( $T_b^1 \cap T_a = \emptyset$ ),  $T_b = T_b^0 \cup T_b^1$ , 则  $f_b$  是从  $M_b$  到  $T_b$  的一一映射, 定义  $P_b^1 = O_b(T_b^1)$  ( $P_b^1 \cap P_a = \emptyset$ ), 将  $P_b^1$  存入  $P_b$

4) 定义分块矩阵  $C_1$  和  $C_2$  如下:

$$C_1 = \begin{matrix} M^0 \\ M^+ \\ M^- \end{matrix} \begin{bmatrix} C_a(M^0 \times M^0) & \emptyset \\ 0 & 0 \\ C_a(M^1 \times M^0) & \emptyset \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{matrix} M^0 \\ M^+ \\ M^- \end{matrix} \begin{bmatrix} C_b(M^0 \times M^0) & C_b(M^0 \times M^+) \\ C_b(M^+ \times M^0) & C_b(M^+ \times M^+) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将集合  $O_a(f_a(M^0)), O_b(f_b(M^+)), O_a(f_a(M^-))$  中元素依次排列成一行向量  $O$ , 将  $I_b(t), t \in T_b^0$  按照与  $M^0$  对应的顺序排成一行向量, 并在其后添加若干空集使其扩展为  $|M_b|$  维行向量, 记该行向量为  $I_1$ , 令  $I_2 = I_1 + O * (C_2 - C_1)$ , 用  $I_2$  各位的值依次为输入函数  $I_b(t), t \in T_b$  赋值

5) 任意的  $t \in T_b$ , 如果  $I_b(t) = \emptyset$ , 则定义  $I_b(t) = \{p\}$  ( $p \in P_a$ , 为系统输入端口), 并将  $p$  存入库所

集  $P_b$ .

上述规则中, 步骤 1) 将重构前后的设备集合进行划分, 其中  $M^-$  是系统重构后移走设备的集合,  $M^+$  是增添设备的集合,  $M^0$  是保持不变的设备集合 步骤 2) 中,  $N_b$  从  $N_a$  继承了  $M^0$  对应的变迁集合, 以及这些变迁的输出函数和输出库所; 它们的输入函数也暂时保持不变, 但重构后系统输入端口的数量和位置可能会发生变化, 因此将原系统的输入端口删除, 由步骤 5) 生成新的输入端口 步骤 3) 将  $M^+$  对应的变迁以及这些变迁的输出库所增添到  $N_b$  中 步骤 4) 修正由于  $M^-$  的删除,  $M^+$  的增加和  $M^0$  中设备相对位置的改变造成的  $N_b$  输入函数的变化, 若矩阵  $C_2 - C_1$  中某行(设对应设备  $m_i$ ) 某列(设对应设备  $m_j$ ) 的元素为 1, 表明重构后增加了从  $m_i$  到  $m_j$  的联接; -1 表明重构后取消了从  $m_i$  到  $m_j$  的联接; 0 则表明  $m_i$  到  $m_j$  的联接关系重构前后无变化

#### 4 基本网模型的扩展

无论是通过生成规则, 还是重构规则得到的基本网模型, 都需要进一步扩展为能够更详尽描述系统动态行为的高级 Petri 网模型, 如时间 Petri 网等 在此采用“自顶向下”的建模思想将基本网模型扩展为系统的 Petri 网模型 一方面将基本网模型中的变迁逐步精化; 另一方面增加对运输设备、存储设备等的描述, 同时 Petri 网每一步扩展都需遵循一定的规则, 以保证网系统的有界性、活性和可逆性保持不变<sup>[8]</sup>. 此外, Zimmemann 等<sup>[9]</sup> 提出的模型模板库的思路值得借鉴, 模板描述了一系列相近的制造系统资源, 通过一个匹配模块自动代入系统模型的功能块 基本网模型中的变迁最终可以扩展为一个子 Petri 网, 并将其作为一个模块存在模块库中 当基本网模型重构后, 对于  $M^0$  中元素对应的变迁直接调用库中的模块; 对于  $M^+$  中元素对应的变迁生成新的模块, 并存入库中

#### 5 重构开销的评价方法

当满足新产品生产要求的重构方案(产品的加工流程图)有多种时, 需要从中选择综合性能较好的最佳方案 系统构形的选择应考虑以下两个指标: 实现新构形的开销和重构后系统的生产能力

通过对由基本网模型扩展而来的 Petri 网仿真, 可以对重构后系统的动态性能作出评估<sup>[10-12]</sup>. 重构实施的代价可以是费用开销、时间开销或人员开销, 具体包括设备重新排列、新设备的安装和无用设备的拆除这几方面的开销 其中设备重排可以看作设备从系统拆除后, 再按新的逻辑关系重新安装的过程, 因此将某台设备重排的开销视为安装和拆除该设备的开销之和 设系统中每台设备安装和拆除的

平均开销均已事先做出了统计, 对于某设备  $m$  其安装和拆除的开销分别用  $A(m)$  和  $B(m)$  表示 则系统由生产  $a$  族零件(生产流程图的关联矩阵为  $C_a$ ) 转为生产  $b$  族零件, 且所选的生产流程图的关联矩阵为  $C_b$  时, 系统重构开销的计算规则如下:

按基本网模型重构规则的步骤 1) 划分设备集合  $M^0, M^-, M^+$ , 并按步骤 4) 定义  $C_1$  和  $C_2$ , 令  $C_3 = C_1 - C_2$  令变量  $H = 0$ , 搜索  $C_3$  的任意一行(设该行对应  $M^0, M^-$  或  $M^+$  中的设备  $m$ ). 若该行中出现 1, 令  $H = H + A(m)$ ; 若出现 - 1, 则令  $H = H + B(m)$ . 当  $C_3$  所有行搜索完毕时,  $H$  即为系统从生产流程图  $C_a$  确定的构形重构为  $C_b$  对应构形的开销

以上重构代价的计算可以在基本网模型重构的过程中同时进行

### 6 仿真研究

将本文提出的基本网模型的生成规则、重构规则以及重构代价评价方法分别用 Matlab 编程实现, 应用上述算法对一个简单制造系统的重构过程进行仿真

初始时系统生产某族零件的流程图如图 1 所示 将该生产流程图的关联矩阵以及相应设备的符号集合(按照关联矩阵的排列顺序) 分别输入基本网模型生成程序, 可自动获得系统基本网模型的有关数据, 见表 1(其中  $p_{11}, p_{12}, p_{13}$  为输入端口). 基本网模型中的每一个变迁都可根据相应设备的特点扩展为一个子 Petri 网 为便于描述, 下文中任意变迁  $t$  均扩展为图 2 所示的子 Petri 网 扩展后  $t$  为一确定时间变迁, 其时延  $\tau$  为该变迁对应的机床在系统中加工某零件的平均操作时间 库所  $p$  的容量为 1, 表示变迁  $t$  是否空闲 最终得到系统的 Petri 网模型如

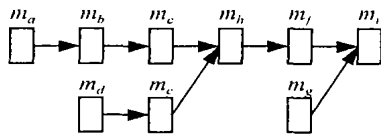


图 1 初始生产流程图

表 1 初始基本网模型的有关数据

设备集 $M$	$m_a$	$m_b$	$m_c$	$m_d$	$m_e$	$m_f$	$m_g$	$m_h$	$m_i$
$T = f(M)$	$t_a$	$t_b$	$t_c$	$t_d$	$t_e$	$t_f$	$t_g$	$t_h$	$t_i$
$O(T)$	$p_a$	$p_b$	$p_c$	$p_d$	$p_e$	$p_f$	$p_g$	$p_h$	$p_i$
$I(T)$	$\{p_{11}\}$	$\{p_a\}$	$\{p_b\}$	$\{p_{12}\}$	$\{p_d\}$	$\{p_h\}$	$\{p_{13}\}$	$\{p_c, p_e\}$	$\{p_f, p_g\}$



图 2 变迁的扩展

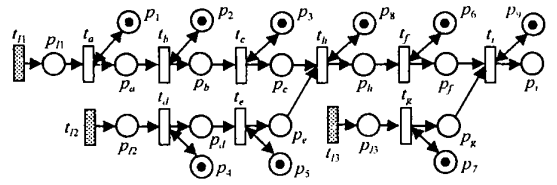
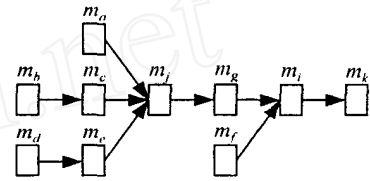


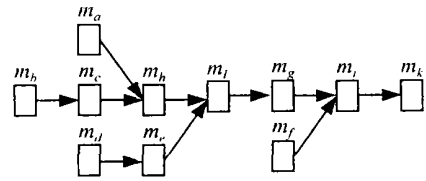
图 3 初始时系统的 Petri 网模型

图 3 所示, 其中所有库所的容量均为 1, 每个输入端口前增加一个瞬时变迁, 表示生产原料充足且输入系统无延时

现系统转为生产另一族零件, 设该族零件存在两种可行的生产流程(系统构形), 分别如图 4 所示 这里仅以图 4(a) 中的构形 1 为例说明如何根据重构规则生成相应的基本网模型



(a) 生产流程图 1(构形 1)



(b) 生产流程图 2(构形 2)

图 4 新任务的两种生产流程图

步骤 1) 将所涉及的设备划分为  $M^0 = \{m_a, m_b, m_c, m_d, m_e, m_f, m_g, m_i\}, M^- = \{m_h\}, M^+ = \{m_j, m_k\}$ .

表 2 列出了重构规则其余步骤的主要参数, 其中步骤 4) 中各矩阵分别为

$$C_1 = \begin{matrix} m_a & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_b & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_c & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_d & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_e & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_f & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_g & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_i & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_j & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_k & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_h & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix},$$

$m_a m_b m_c m_d m_e m_f m_g m_i m_j m_k$

表2 重构规则各步骤主要参数

步骤	$T_b$	$P_b$	$O(T_b)$	$I(T_b)$
2)	$t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f, t_g, t_i$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i$	$\emptyset, \{p_a\}, \{p_b\}, \emptyset, \{p_d\}, \{p_h\}, \emptyset, \{p_f, p_g\}$
3)	$t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f, t_g, t_i, t_j, t_k$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k$	$\emptyset, \{p_a\}, \{p_b\}, \emptyset, \{p_d\}, \{p_h\}, \emptyset, \{p_f, p_g\}, \otimes, \otimes$
4)	$t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f, t_g, t_i, t_j, t_k$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k$	$\emptyset, \emptyset, \{p_b\}, \emptyset, \{p_d\}, \emptyset, \{p_j\}, \{p_f, p_g\}, \{p_a, p_c, p_e\}, \{p_i\}$
5)	$t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f, t_g, t_i, t_j, t_k$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	$p_a, p_b, p_c, p_d, p_e, p_f, p_g, p_i, p_j, p_k$	$\{p_{11}\}, \{p_{12}\}, \{p_b\}, \{p_{13}\}, \{p_d\}, \{p_{14}\}, \{p_j\}, \{p_f, p_g\}, \{p_a, p_c, p_e\}, \{p_i\}$

注: 表中  $\otimes$  表示相应集合未定义

$$C_2 = \begin{matrix} m_a \\ m_b \\ m_c \\ m_d \\ m_e \\ m_f \\ m_g \\ m_i \\ m_j \\ m_k \\ m_h \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

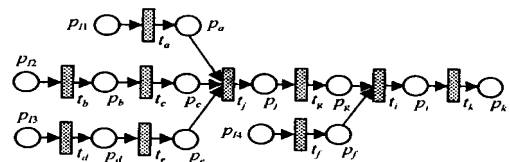
$$m_a \ m_b \ m_c \ m_d \ m_e \ m_f \ m_g \ m_i \ m_j \ m_k$$

$$C_2 - C_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

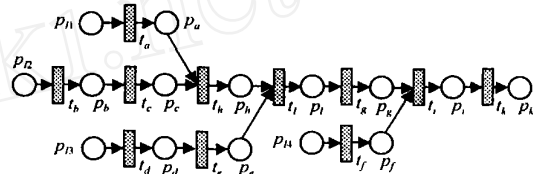
调用基本网模型的重构程序, 分别得到两种生产流程对应的基本网模型, 如图5所示。对两个基本网模型中新增变迁进行扩展(如图5(a)中  $t_j$  和  $t_k$ ), 而其余变迁的扩展模型可直接从初始时系统的Petri网模型中获得继承。受篇幅所限, 两种构形的Petri网模型图略。每台设备在图4所示生产过程中的平均加工时间见表3, 因为两个生产过程中相同设备的功能不变, 所以两图共有设备的加工时间相同。此外表3还列出了每台设备的平均安装时间和

表3 各设备的有关参数 (min)

设备	$m_a$	$m_b$	$m_c$	$m_d$	$m_e$	$m_f$	$m_g$	$m_h$	$m_i$	$m_j$	$m_k$	$m_l$
安装时间	40	50	70	30	50	60	50	60	80	100	30	60
拆卸时间	30	40	50	30	30	50	40	50	60	80	30	40
加工时间	7	5	6	5	7	4	5	8	7	9	3	6



(a) 构形1的基本网模型



(b) 构形2的基本网模型

图5 重构后的两个基本网模型

拆卸时间

将表3中各设备的安装和拆卸时间代入可重构代价评价程序, 分别计算得到构形1的重构时间为420 min, 构形2的重构时间为400 min。再将两种构形下系统的Petri网模型编程实现。通过对系统的生产过程仿真可知, 达到稳态时构形1的平均生产率为0.111个/min, 构形2的平均生产率为0.125个/min。依据上述数据可以得出构形2是重构代价小而生产效率高的理想构形。

对于两种指标不一致, 或存在多种可行构形的情况, 可采取对每种构形的两个指标加权求和的方法获得其综合性能指标, 进而通过综合性能指标的比较得到最优构形。

7 结 语

本文提出了一种基于生产流程图的可重构制造系统Petri网建模方法。根据文中给出的生成规则可从生产流程图导出系统的基本网模型, 扩展基本网模型便可得到系统的Petri网模型。当系统的生产任务发生变化时, 依据提出的重构规则可直接从现有基本网模型得到新的生产流程图所对应的基本网模型, 从而避免了对系统中不变设备的重复建模。本文还给出了新构形重构开销的计算方法, 该计算可在基本网模型的重构过程中同时完成。通过对一个系统重构过程的仿真, 验证了该方法的有效性。

(下转第673页)

- [6] Hung C P. Integral variable structure control of nonlinear system using a CMAC neural network learning approach [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 2004, 34 (1): 702-709.
- [7] Lee C Y, Lee J J. Adaptive control for uncertain nonlinear systems based on multiple neural networks [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 325-333.
- [8] 张天平. 基于一种修改的李亚普诺夫函数的自适应模糊滑模控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(1): 137-142.
- (Zhang T P. A daptive fuzzy sliding mode control based on a modified Lyapunov function [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 137-142.)
- [9] Wang C H, Lin T C, Lee T T, et al. Adaptive hybrid intelligent control for uncertain nonlinear dynamical systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 2002, 32 (5): 583-597.
- [10] Slotine J E, Li W. *Applied nonlinear control*[M]. NJ: Prentice-Hall, 1991.

(上接第 664 页)

### 参考文献(References)

- [1] 梁福军, 宁汝新. 可重构制造系统理论研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(6): 36-43.  
(Liang F J, Ning R X. Theoretical research of reconfigurable manufacturing system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(6): 36-43.)
- [2] 王成恩. 制造系统的可重构性[J]. *计算机集成制造系统*, 2000, 6(4): 1-5.  
(Wang C E. On the possibility of manufacturing system reconfiguration [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2000, 6(4): 1-5.)
- [3] Nourelfath M, Ait-Kadi D, Soro I. Optimal design of reconfigurable manufacturing systems [A]. *Proc of 2002 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. Piscataway: IEEE, 2002, 3: TA 1L 1.
- [4] Yamada Y, Ookoudo K, Komura Y. Layout optimization of manufacturing cells and allocation optimization of transport robots in reconfigurable manufacturing systems using particle swarm optimization [A]. *Proc of 2003 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003: 2049-2054.
- [5] 蔡宗琰, 严新民. 可重构制造系统重构算法的实例研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(2): 162-173.  
(Cai Z Y, Yan X M. Case study on reconfiguration algorithm for reconfigurable manufacturing system [J]. *J of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 2003, 15(2): 162-173.)
- [6] Chung-Hsien Kuo. Resource allocation and performance evaluation of the reconfigurable manufacturing systems [A]. *Proc of 2001 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. Piscataway: IEEE, 2001: 2451-2456.
- [7] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998: 12-15.
- [8] Zhou M C, Frank DiCesare. *Petri net synthesis for discrete event control of manufacturing systems* [M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1993: 117-120.
- [9] Zimmernann A, Kühnel A, Hommel G. A modeling and analysis method for manufacturing systems based on Petri nets [A]. *Proc of 1998 Int Conf on Computational Engineering in Systems Applications* [C]. Tunisia, 1998: 276-281.
- [10] Zimmernann A, Bode S, Hommel G. Performance and dependability evaluation of manufacturing systems using Petri nets [A]. *Proc of 17th Int Conf on Application and Theory of Petri Nets* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 235-250.
- [11] Cavalieri S, Mirabella O, Zingarino G. A Petri net based approach for FMS performance evaluation [A]. *Proc of 23rd Int Conf on Industrial Electronics, Control and Instrumentation* [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997: 1204-1209.
- [12] Kuo C H, Huang H P. Modeling and performance evaluation of a controlled IC fab using distributed colored timed Petri net [A]. *Proc of 2000 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000: 2191-2196.