

文章编号: 1001-0920(2009)03-0365-06

基于一阶混杂 Petri 网的柔性制造系统粗糙控制

廖伟志^{1,2}, 古天龙³, 元昌安², 赵岭忠³

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071; 2. 广西师范学院 信息技术系, 南宁 530001; 3. 桂林电子科技大学 计算机系, 广西 桂林 541004)

摘要: 研究基于一阶混杂 Petri 网模型的柔性制造系统粗糙控制. 为构造正确的一阶混杂 Petri 网模型行为演变图, 提出了确定改变 Macro 状态事件的新方法; 进而给出了柔性制造系统优化与控制算法, 并基于粗糙集合理论和所给出的算法, 提出了柔性制造系统的粗糙控制方法. 最后通过一个实例验证了该方法的有效性.

关键词: 一阶混杂 Petri 网; 柔性制造系统; 粗糙集; 粗糙控制

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Rough control for FMS based on first-order hybrid Petri nets

LIAO Wei-zhi^{1,2}, GU Tian-long³, YUAN Chang-an², ZHAO Ling-zhong³

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Department of Information Technology, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China; 3. Department of Computer Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China. Correspondent: LIAO Wei-zhi, E-mail: liaowz@gxtc.edu.cn)

Abstract: A rough control for flexible manufacturing system (FMS) based on first-order hybrid Petri nets (FOHPNs) is presented. To construct a correctly behavior evolution graph for FOHPNs, a new approach to determine the event of changing a Macro state is developed. Furthermore, an optimization and control algorithm for FMS is presented, and a rough control method for FMS is developed based on rough set theory and the proposed algorithm. Finally, an example shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: First-order hybrid Petri nets; Flexible manufacturing system; Rough set; Rough control

1 引言

许多柔性制造系统都是典型的混杂系统. 迄今, 柔性制造系统的优化与控制还缺少有效而可行的方法, 即使是一个规模很小的系统, 要求出系统的最优解乃至局部最优解都是极为困难的. 其根本原因在于系统的混杂特性难以用传统的数学模型来描述, 从而导致难以用传统的方法进行求解^[1,2]. 由 David 和 Alla^[3] 提出的混杂 Petri 网 (HPN), 是混杂系统模拟和分析的有效工具之一, 它能结合图形分析、描述和评估混杂系统的动态行为. 为了增强 HPN 的描述能力, 研究人员针对不同的应用领域对 HPN 进行扩展, 主要有一阶混杂 Petri 网^[4]、微分 Petri 网^[5]、间歇 Petri 网^[6]、广义混杂 Petri 网^[7]等.

文献[4]定义了一阶混杂 Petri 网, 并结合混杂 Petri 网模型行为演变与线性规划, 实现了制造系统

的优化与控制. 该文主要存在两点不足: 1) 所给的混杂 Petri 网模型行为演变, 没有考虑改变 Macro 状态事件间相互作用对演变正确性的影响, 从而导致在许多情形下优化与控制是错误的; 2) 不能揭示柔性制造系统参数变化与系统最优解之间的关系.

本文针对上述问题, 以一阶混杂 Petri 网模型为基础, 分析了改变 Macro 状态各个事件之间的相互作用, 并提出相应的判定规则, 从而给出了基于事件相互作用的柔性制造系统优化与控制算法; 基于粗糙集合理论和所给出的算法, 进一步提出了柔性制造系统的粗糙控制方法. 柔性制造系统的实例表明了所提出方法是有效的.

2 一阶混杂 Petri 网形式化定义

定义 1 一阶混杂 Petri 网为 6 元组 (P, T, F, W, S_{dc}, C) . 其中: P 为库所集, T 为迁移集, F 为关系

收稿日期: 2008-01-09; 修回日期: 2008-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60563005, 60763012); 广西青年科学基金项目(桂科基 0640032).

作者简介: 廖伟志(1974—), 男, 广西凤山人, 副教授, 博士, 从事形式化技术及其应用等研究; 古天龙(1964—), 男, 山西芮城人, 教授, 博士生导师, 从事形式化技术、混杂系统等研究.

函数, W 为权值函数, S_{dc} 为迁移的时间延时函数, C 为引发速率区间. 具体含义详见文献[4].

3 基于一阶混杂 Petri 网的柔性制造系统优化与控制

3.1 FAG 方法及其存在的问题

文献[4]提出了基于一阶混杂 Petri 网的混杂系统优化与控制方法 (FAG 方法). 在该方法中, 正确构造演变图是最优求解的基础和关键, 而正确判定改变 Macro 状态事件是正确构造演变图的核心问题.

在 FAG 方法中, 判定改变 Macro 状态事件时, 没有发现事件间的相互作用对演变图的影响, 这将导致在许多情形下无法构造出正确的演变图, 从而导致系统优化与控制是错误的.

3.2 基于事件互作用的 FAG 方法

3.2.1 改变 Macro 状态事件的判定规则

改变 Macro 状态的事件有 3 种: 事件 E1 —— 离散迁移引发时间到; 事件 E2 —— 连续库所标识由非 0 变为 0, 从而使其输出迁移的引发速率发生改变; 事件 E3 —— 离散迁移的连续输入库所经填充其标识等于库所到迁移的弧的权值. 当不考虑事件间的相互作用时, 改变 Macro 状态事件确定的唯一依据是上述 3 个事件发生时间的早晚, 哪一个发生的时间最早, 它就是改变 Macro 状态的事件.

文献[4]认为: 1) 若 3 个事件发生的时间相等, 则这 3 个事件均为改变 Macro 状态的事件; 2) 若任意两个事件发生的时间相等, 且比另一个事件发生的时间早, 则这两个事件为改变 Macro 状态的事件. 事实上, 这一结论在上述事件间产生作用时是错误的, 其根本原因在于忽略了事件间的相互作用对模型行为演变的影响.

下面给出改变 Macro 状态事件间相互作用的性质:

性质 1 设 k 为一 Macro 状态的初始时刻, 且 t_j 为离散迁移. 如果满足下面 3 个条件:

- 1) 存在连续库所 p_i , 使得 $p_i \neq t_j$;
- 2) t_j 在时刻 $k + d_j$ 引发 (事件 E1);
- 3) 若不考虑 t_j 在时刻 $k + d_j$ 引发, 则库所 p_i 在时刻 $k + d_j$ 的标识为 0, 且存在连续迁移 $t_h \rightarrow p_i$, 使得 $v_h(k)$ 发生改变 (事件 E2), 否则库所 p_i 在时刻 $k + d_j$ 的标识为非 0 正实数.

那么事件 E1 对事件 E2 产生作用.

性质 2 设 k 为一 Macro 状态的初始时刻, 且 t_j 为离散迁移. 如果满足下面 3 个条件:

- 1) 存在连续库所 p_i , 使得 $p_i \neq t_j$;
- 2) 若库所 p_i 在时刻 $k + d_j$ 的标识为非 0 正实

数, 则 t_j 在时刻 $k + d_j$ 引发 (事件 E1);

- 3) 库所 p_i 在时刻 $k + d_j$ 的标识为 0 (事件 E2). 那么事件 E2 对事件 E1 产生作用.

性质 3 设 k 为一 Macro 状态的初始时刻, t_j 为离散迁移, 且 $d_j = 0$. 如果满足下面 3 个条件:

- 1) 存在连续库所 p_i , 使得 $p_i \neq t_j$;
- 2) 库所 p_i 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 的标识为 0 (事件 E2), 其中 B_i 为库所 p_i 的动态平衡量^[4];
- 3) 若不考虑库所 p_i 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 的标识为 0, 则 t_j 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 引发 (事件 E3).

那么事件 E2 对事件 E3 产生作用.

性质 4 设 k 为一 Macro 状态的初始时刻, t_j 为离散迁移, 且 $d_j = 0$. 如果满足下面 3 个条件:

- 1) 存在连续库所 p_i , 使得 $p_i \neq t_j$;
- 2) t_j 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 引发 (事件 E3);
- 3) 若不考虑 t_j 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 引发, 则库所 p_i 在时刻 $k + m_i(k) / |B_i|$ 的标识为 0 (事件 E2).

那么事件 E3 对事件 E2 产生作用.

性质 5 设 k 为一 Macro 状态的初始时刻, t_j 和 t_h 为离散迁移, 且 $d_h = 0$. 如果满足下面 2 个条件:

- 1) 若不考虑 t_j 在时刻 $k + d_j$ 引发, 则 t_h 在时刻 $k + d_j$ 引发 (事件 E3);
- 2) 若不考虑 t_h 在时刻 $k + d_j$ 引发, 则 t_j 在时刻 $k + d_j$ 引发 (事件 E1).

那么事件 E1 (E3) 对事件 E3 (E1) 产生作用.

基于上述性质, 给出判定改变 Macro 状态事件的规则如下:

若 E1, E2 和 E3 每个事件发生的时间为无穷大, 即 3 个事件均不发生, 则行为演变进入一个稳定的状态;

若 E1, E2 和 E3 这 3 个事件中的一个事件发生的时间比其他两个事件发生的时间早, 则该事件为改变 Macro 状态的事件;

若 E1, E2 和 E3 这 3 个事件中有两个事件发生的时间相等 (未考虑事件相互作用情形下单独计算的结果), 则改变 Macro 状态事件的判定规则为:

- 1) If (E1 = E2) then C_M_E = E1;
- 2) If (E2 = E1) then C_M_E = E2;
- 3) If (E2 = E3) then C_M_E = E2;
- 4) If (E3 = E2) then C_M_E = E3;
- 5) If (E1 = E3) then C_M_E = E1 = E3;

若 E1, E2 和 E3 这 3 个事件发生的时间相等 (未考虑事件相互作用情形下单独计算的结果), 则改变

Macro 状态事件的判定规则为：

- 6) If (E1 E2) then C_M_E = E1 E3 ;
- 7) If (E2 E1) then C_M_E = E2 E3 ;
- 8) If (E2 E3) then C_M_E = E1 E2 ;
- 9) If (E3 E2) then C_M_E = E1 E3 ;
- 10) If (E1 ←E3) then C_M_E = E1 E3 ;
- 11) If (E1 E2) (E2 E3) then C_M_E = E1 ;
- 12) If (E1 E2) (E3 E2) then C_M_E = E1 E3 ;
- 13) If (E1 E2) (E1 ←E3) then C_M_E = E1 (E2 E3) ;
- 14) If (E2 E1) (E2 E3) then C_M_E = E2 ;
- 15) If (E2 E1) (E3 E2) then C_M_E = E3 ;
- 16) If (E2 E1) (E1 ←E3) then C_M_E = E2 (E2 E3) ;
- 17) If (E2 E3) (E1 ←E3) then C_M_E = E2 (E1 E2) ;
- 18) If (E1 E2) (E2 E3) (E1 ←E3) then C_M_E = E1 E2 ;
- 19) If (E2 E1) (E2 E3) (E1 ←E3) then C_M_E = E2 ;
- 20) If (E1 E2) (E3 E2) (E1 ←E3) then C_M_E = E1 E3 ;
- 21) If (E2 E1) (E3 E2) (E1 ←E3) then C_M_E = E2 E3 .

在上述规则中,if 后面的语句为对事件之间作用的描述,如规则 1) 中的 E1 E2,表示事件 E1 对事件 E2 产生作用;在一些规则中出现了 E1 ←E3,表示这两个事件对对方均产生作用.then 后面的语句为改变 Macro 状态事件的赋值语句,用 C_M_E 表示改变 Macro 状态的事件,其结果或为唯一的事件,或同时为两个事件(用符号 表示),或为两个事件中的一个(用符号 表示,这种情形即为有效冲突的发生).

3.2.2 算法描述

下面给出在指定时间 T_H 内,以最大化机器生产率为优化目标的柔性制造系统的优化与控制算法.

算法 1 基于事件互作用的柔性制造系统优化与控制算法

输入：柔性制造系统的一阶混杂 Petri 网模型、时间 T_H ;

输出：系统在时间 T_H 内机器生产率的最大平

均值 AMPR.

Step1: 初始化混杂 Petri 网模型参数.

Step2: 验证模型,若模型符合定义 1,则转 Step3;否则,返回 Step1,修改参数.

Step3: 根据 $m(k)$ 和使能规则,计算迁移的使能集 $T_E(m(k))$,迁移的非使能集 $T_N(m(k))$ 和 0 库所集 $P_E(m(k))$, $k = 0$.

Step4: 设目标函数为 $v_{j1} + v_{j2} + \dots + v_{jk}$,其中 $v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}$ 为连续迁移 $t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jk}$ 的引发速率.根据线性规划求出 v_1, v_2, \dots, v_k 如下:

$$\begin{cases} \max v_{j1} + v_{j2} + \dots + v_{jk}; \\ v_1 \leq V_1^{\max}, \dots, v_m \leq V_m^{\max}, \\ v_1 \geq V_1^{\min}, \dots, v_m \geq V_m^{\min}, \\ v_{1k} \leq V_k^{\max}, \dots, v_k \leq V_k^{\min}, \\ C(p_{2k+1}, t_j) v_j = 0, \\ \dots \\ C(p_l, t_j) v_j = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $s_j = 0(1 \leq j \leq l)$, $\{t_1, t_2, \dots, t_k\} = T_E(m(k))$, $\{p_{2k+1}, \dots, p_l\} = P_E(m(k))$.

Step5: 令 $MPR_k = v_{j1} + v_{j2} + \dots + v_{jk}$, $v^c(k) = (v_1, \dots, v_k, v_1, \dots, v_k)$. 其中: v_1, \dots, v_j 为迁移 t_1, \dots, t_k 的引发速率,大小均为 0; $\{t_1, \dots, t_k, t_1, \dots, t_k\} = T_C$.

Step6: 根据文献[4]的方法计算 Event_set.

Step7: 基于 Event_set,根据 3.2.1 节的判定规则确定改变 Macro_k 状态的事件 Event_k,并计算 Macro_k 的时间区间大小 Δ_k .

Step8: 若 Event_k 为空,则转 Step12.

Step9: 令 $k_{+1} = k + \Delta_k$,根据文献[4]的式(4)计算 $m^c(k_{+1})$ 和 $m^d(k_{+1})$.

Step10: 令 $k = k + 1$,转到 Step2.

Step11: 计算

$$AMPR = \left(\sum_{i=0}^{k-1} MPR_i + MPR(T_H - \sum_{i=0}^{k-1} \Delta_i) \right) / T_H.$$

Step12: 结束.

在该算法中,Event_set 为文献[4]不考虑事件 E1, E2 和 E3 之间相互作用的情况下,所得到的改变 Macro 状态的事件集.

算法 1 与 FAG 方法的本质区别在于:在构造演变图的过程中,判定改变 Macro 状态事件时考虑了事件间的相互作用,即利用 3.2.1 节的判定规则,保证了系统优化与控制的正确性.

4 柔性制造系统的粗糙控制方法

FAG 方法存在的另一个问题是:不能揭示柔性



制造系统参数变化与系统最优解大小之间的关系。粗糙控制是一种新型的基于规则的智能控制方法,人们利用粗糙集理论代替知识工程师的作用,从操作专家的操作数据中自动提取控制规则,利用这些规则进行粗糙控制^[8,9]。

为了实现柔性制造系统的粗糙控制,本节以算法 1 为基础,把系统参数及在不同系统参数下的系统最优解作为操作数据,利用粗糙集理论提取控制规则,从而实现系统的粗糙控制。有关粗糙集理论的基本概念参见文献[10]。

下面结合基于事件互作用的柔性制造系统优化与控制算法和粗糙集理论,给出基于一阶混杂 Petri 网的柔性制造系统的粗糙控制算法。该算法主要包括以下步骤:

(1) 属性的选择

由算法 1 可知,一旦混杂 Petri 网迁移的引发规则确定后,各迁移的引发速率大小便成为决定机器生产率最大平均值的主要因素,为此选择迁移的引发速率作为考虑的对象。选择时遵循的原则是:选择迁移的最小和最大引发速率作为属性。

(2) 数据收集与属性取值编码

1) 数据收集:首先随机生成各个迁移的最小和最大引发速率若干组,基于每组各个迁移的最小和最大引发速率,按算法 1 求出机器生产率最大平均值,从而构成对象数据表;然后根据属性取值编码给出决策表。

2) 属性取值编码:高(H),中(M),低(L),最小和最大引发速率的隶属函数均取三角函数,如何确定依赖于具体问题。

(3) 数据约简

利用粗糙集理论实现条件属性约简和规则约简,即找出多余条件属性,在决策表中去除多余列,并消去因删除而造成的重复行,从而得到约简决策表。将所得到的最简规则存入知识库,作为粗糙控制的依据。

(4) 粗糙控制的实现

采用知识库中的最简决策规则来实现粗糙控制,即利用决策规则改变最小或最大引发速率的值,并通过算法 1 求解,从而改变最大平均值。

5 柔性制造系统粗糙控制实例

现在考察文献[4]中一个柔性制造系统(图 1)的粗糙控制。该系统有 5 个缓冲区和 3 台机器,假设缓冲区 B2 和 B3 的最大容量分别为 C_{B2} 和 C_{B3} ,其他缓冲区的容量无限大。各台机器在运行一定时间后将停止运转而进入维修状态。

具体参数为:半产品进入缓冲区 B1 的速率区间

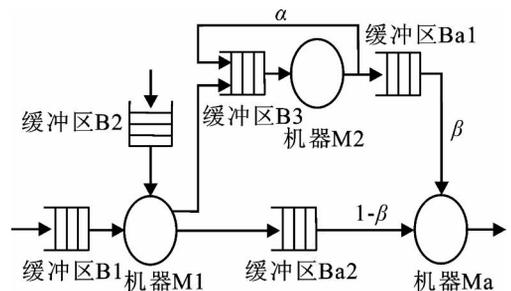


图 1 某一柔性制造系统

为 $[V_{in1}^{min}, V_{in1}^{max}]$, 半产品进入缓冲区 B2 的速率区间为 $[V_{in2}^{min}, V_{in2}^{max}]$; 机器 M1 的引发速率区间为 $[0, V_{M1}]$, 机器 M2 的引发速率区间为 $[0, V_{M2}]$, 机器 Ma 的引发速率区间为 $[0, V_{Ma}]$; 机器 M1 的运行时间为 $f_{,M1}$, 维修时间为 $r_{,M1}$; 机器 M2 的运行时间为 $f_{,M2}$, 维修时间为 $r_{,M2}$; 机器 Ma 的运行时间为 $f_{,Ma}$, 维修时间为 $r_{,Ma}$; $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.8$ 。

该系统的一阶混杂 Petri 网模型参见文献[4]的图 8。假设系统的各个参数为: $V_{in1}^{min} = 2, V_{in1}^{max} = 5, V_{in2}^{min} = 0, V_{in2}^{max} = 4, V_{M1} = 7, V_{M2} = 5, V_{Ma} = 7$; 其他参数同文献[4]。

下面求解系统在 20 个时间单位内 MPR 的最大平均值。设瞬时引发速率向量 $v = [v_{in1}, v_{in2}, v_{M1}^1, v_{M1}^2, v_{M2}, v_{Ma}]^T$, $c = [0, 0, 1, 1, 1, 1]^T$, 初始时刻 $t_0 = 0$, $m^d(t_0) = [1, 0, 1, 0, 1, 0]$, $m^c(t_0) = [0, 0, C_{B2}, 0, C_{B3}, 0, 0, 0, 0]$ 。

根据算法 1, 首先求出初始 Macro 状态机器生产率的最大值, 其线性规划模型为

$$\begin{aligned} & \max_v [v_{M1}^1 + v_{M1}^2 + v_{M2} + v_{Ma}]; \\ & \text{s. t. } s_0 \left\{ \begin{aligned} & v_{in1} \leq V_{in1}^{max}, v_{in1} \geq V_{in1}^{min}, \\ & v_{in2} \leq V_{in2}^{max}, v_{in2} \geq V_{in2}^{min}, \\ & v_{M1}^1 + v_{M1}^2 + s_5 = V_{M1}, \\ & v_{M2} + s_6 = V_{M2}, \\ & v_{Ma} + s_7 = V_{Ma}, \\ & v_{M1}^1 - v_{in1} + s_8 = 0, \\ & v_{M1}^2 - v_{in2} + s_9 = 0, \\ & (1 - \alpha) v_{M2} - v_{M1}^1 + s_{10} = 0, \\ & v_{Ma} - (1 - \beta) v_{M2} + s_{11} = 0, \\ & (1 - \beta) v_{Ma} - v_{M1}^2 + s_{12} = 0. \end{aligned} \right. \end{aligned} \tag{2}$$

根据式(2)可求出最优解: $MPR_0 = 17.0$, $v_0 = [4.0, 3.0, 4.0, 3.0, 5.0, 5.0]^T$ 。

为使机器生产率在初始 Macro 状态下达到最大值,只要控制机器按速率 v_0 引发即可。设在 $t_1 = 15$ 时刻,只有唯一改变 Macro 状态的事件发生(机器 M2 出现故障需要维修,即离散迁移 $t_{f,M2}$ 引发),系统进入第 2 个 Macro 状态。根据算法 1 的 Step 8, 求出第 2 个 Macro 状态的初始标识并建立相应的线性规

划,可求出 $MPR_1 = 7.0, v_1 = [3.0, 4.0, 3.0, 4.0, 0.0, 0.0]^T$.

在 $t = 19$ 时刻,改变 Macro 状态的事件为缓冲区 B3 满,系统进入第 3 个 Macro 状态.可求出 $MPR_2 = 4.0, v_2 = [2.0, 4.0, 0.0, 4.0, 0.0, 0.0]^T$. 改变 Macro 状态的事件为机器 M2 已维修好.

在 $t = 23$ 时刻,系统进入第 4 个 Macro 状态.可求出 $MPR_2 = 17.0, v_2 = [2.0, 3.0, 4.0, 3.0, 5.0, 5.0]^T$ ($t = 23 > 20$, 算法结束),MPR 的最大平均值为 14.7.

利用算法 1 可求出系统在不同参数下 MPR 的最大平均值,具体见表 1. 基于对象数据表给出相应的决策表(表 2). 最小和最大引发速率取值小于等于 2 时,属性取值为 L;取值大于 2 小于 5 时,属性取值为 M;取值大于等于 5 时,属性取值为 H. 而 MPR 的最大平均值小于等于 14 时,属性取值为 L;取值大于 14 小于 14.5 时,属性取值为 M;取值大于 14.5 时,属性取值为 H.

表 1 对象数据表

对象	状态	V_{in1}^*	V_{in1}	V_{in2}	V_{M1}	V_{M2}	V_{Ma}	最大均值 $T_H = 20$
1	s_1	2	5	4	7	5	7	14.7
2	s_2	5	7	2	7	3	7	15.1
3	s_3	2	5	4	4	2	2	13.2
4	s_4	3	6	7	2	3	3	13.8
5	s_5	2	3	7	3	5	7	14.1
6	s_6	4	6	7	2	7	2	13.6
7	s_7	6	8	2	5	2	5	14.2
8	s_8	5	6	2	6	3	5	14.4

表 2 相应的决策表

对象	状态	V_{in1}^*	V_{in1}	V_{in2}	V_{M1}	V_{M2}	V_{Ma}	最大均值 $T_H = 20$
1	s_1	L	M	M	H	H	H	H
2	s_2	H	H	L	H	M	H	H
3	s_3	L	M	M	M	L	L	L
4	s_4	M	H	H	L	M	M	L
5	s_5	L	L	H	M	H	H	M
6	s_6	M	H	H	L	H	L	L
7	s_7	H	H	L	H	L	M	M
8	s_8	H	H	L	H	M	H	M

根据粗糙集理论,决策表中有限集合 $U = \{s_1, s_2, \dots, s_8\}$ 为论域. 根据论域对象所具有的不同属性划分对象,可知条件属性集 $C = \{V_{in1}^*, V_{in1}, V_{in2}, V_{M1}, V_{M2}, V_{Ma}\}$, 决策属性 $D = \{\text{最大平均值}\}$. U 上关于属性的等价类分别为

$$\begin{aligned}
U/\{V_{in1}^*\} &= \{\{s_1, s_3, s_5\}, \{s_2, s_7, s_8\}, \{s_4, s_6\}\}, \\
U/\{V_{in1}\} &= \{\{s_1, s_3\}, \{s_4, s_6, s_2, s_7, s_8\}, \{s_5\}\}, \\
U/\{V_{in2}\} &= \{\{s_1, s_3\}, \{s_2, s_7, s_8\}, \{s_5, s_4, s_6\}\}, \\
U/\{V_{M1}\} &= \{\{s_1, s_2, s_7, s_8\}, \{s_3, s_5\}, \{s_4, s_6\}\}, \\
U/\{V_{M2}\} &= \{\{s_1, s_5, s_6\}, \{s_2, s_4, s_8\}, \{s_3, s_7\}\}, \\
U/\{V_{Ma}\} &= \{\{s_1, s_2, s_5, s_8\}, \{s_3, s_6\}, \{s_4, s_7\}\}, \\
U/C &= \{\{s_1\}, \{s_2, s_8\}, \{s_3\}, \{s_4\}, \{s_5\}, \{s_6\}, \{s_7\}\}, \\
U/D &= \{\{s_1, s_2\}, \{s_3, s_4, s_6\}, \{s_5, s_7, s_8\}\}.
\end{aligned}$$

利用上述等价类知识,不难得出如下结果:

1) 由于 D 对条件属性 C 的正域 $pos_C(D) = \{s_1, s_2, \dots, s_7\}$ 与 D 对条件属性 V_{in1}^* 的正域 $pos_C(V_{in1}^*/D)$ 相同,属性 V_{in1}^* 是不必要的,即 V_{in1}^* 的大小不影响最大平均值的大小.

2) 有如下确定性规则:

$$\begin{aligned}
V_{Ma} = 'H' & \quad \text{最大平均值} = 'H', \\
V_{in2} = 'H' & \quad \text{最大平均值} = 'H', \\
V_{Ma} = 'L' & \quad \text{最大平均值} = 'L'.
\end{aligned}$$

这些规则明确了系统中哪些参数的改变不影响系统最优化结果,也明确了能影响系统最优化结果的系统参数. 基于这些规则便可实现柔性制造系统的粗糙控制.

最后从两方面对本文方法与文献[4]方法进行比较:

1) 本文方法能保证柔性制造系统 MPR 最大平均值的正确求解. 在表 1 的对象数据表中,当 $V_{in1}^{min} = 2, V_{in1}^{max} = 5, V_{in2}^{max} = 4, V_{M1} = 4, V_{M2} = 2, V_{Ma} = 2$ 时,通过算法 1 可求出 MPR 最大平均值为 13.2; 而利用文献[4]方法求出的结果为 12.8, 该结果是错误的, 主要原因是没有考虑事件 E2 对事件 E1 的作用, 认为机器 Ma 在时刻 12 为停机修复时间而不是运行时间, 因而使得 MPR 最大平均值变小.

2) 本文方法能有效实现 FMS 的粗糙控制. 文献[4]仅能求出 MPR 的最大平均值,但不能揭示柔性制造系统参数变化与系统最优解之间的关系. 本文通过粗糙集理论可获取 FMS 的控制规则,从而通过改变相关参数能改变 MPR 的最大平均值. 实验表明在本文所给的例子中,当 V_{Ma} 和 V_{in2} 的值增加时,MPR 的值也随之变大.

6 结 论

本文分析了一阶混杂 Petri 网模型行为演变中改变 Macro 状态事件之间的相互作用,并提出了相应的判定规则,该结果可保证混杂 Petri 网模型演变的正确性. 利用所给的判定规则,保证了基于一阶混杂 Petri 网柔性制造系统优化与控制算法的正确性. 结合优化算法和粗糙集理论,给出了柔性制造系

统的粗糙控制方法,实现了柔性制造系统的粗糙控制.实例分析表明所提出的方法是有效的.本文方法亦可推广到混杂间歇生产过程及其他混杂系统领域.

参考文献(References)

- [1] Chen H, Yang P, Yao D D. Control and scheduling in two-station queuing network: Optimal policies heuristics [J]. *Queueing Systems*, 1994, 18(4): 301-332.
- [2] Zhang R, Phillis Y A. Multiple control policies of two-station production network with two types of parts using fuzzy logic [C]. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Leuven, 1998: 2759-2764.
- [3] David R, Alla H. Hybrid Petri nets [C]. *European Control Conf*. Grenoble, 1991: 1472-1477.
- [4] Balduzzi F, Gua A, Menga G. First-order hybrid Petri nets: A model for optimization and control [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2000, 16(14): 382-399.
- [5] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri nets: Representing continuous systems in discrete event world [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 573-579.
- [6] Demongodin I, Prunet F. Batches Petri nets [C]. *Proc of Computer in Design, Manufacturing and Production*. Paris, 1993: 29-37.
- [7] 廖伟志, 古天龙. 基于一种新型混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制 [J]. *控制与决策*, 2007, 22(4): 366-372.
(Liao W Z, Gu T L. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(4): 366-372.)
- [8] 马志锋, 邢汉承, 郑晓妹. 粗糙控制中的规则获取策略研究 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2000, 177(6): 58-61.
(Ma Z F, Xing H C, Zheng X M. Research on the strategy of rule acquisition in rough control [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2000, 177(6): 58-61.)
- [9] 常晓艳, 刘振娟. 基于粗糙集属性约简的过程控制规则提取 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(增): 881-883.
(Chang X Y, Liu Z J. Rule abstract in process control based on attribute reduction of rough set [J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2004, 25(S): 881-883.)
- [10] 张赢, 李琛. 基于粗糙集理论的神经网络研究及应用 [J]. *控制与决策*, 2007, 22(4): 462-464.
(Zhang Y, Li C. Research on neural networks based on rough set theory [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(4): 462-464.)

(上接第 364 页)

参考文献(References)

- [1] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248.
- [2] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [3] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.
- [4] Rainer S, Price K. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *J of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [5] 刘波, 王凌, 金以慧. 差分进化算法研究进展 [J]. *控制与决策*, 2007, 22(7): 721-729.
(Liu B, Wang L, Jin Y H. Advances in differential evolution [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(7): 721-729.)
- [6] Madavan N K. Multiobjective optimization using a Pareto differential evolution approach [C]. *Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway: IEEE Service Center, 2002, 2: 1145-1150.
- [7] Robić T, Filipič B. DEMO: Differential evolution for multiobjective optimization [C]. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, 2005: 520-533.
- [8] 胡桂武, 彭宏. 利用混沌差分进化算法预测 RNA 二级结构 [J]. *计算机科学*, 2007, 34(9): 163-166.
(Hu G W, Peng H. An algorithm-based chaos differential evolution for predicting RNA secondary structure [J]. *Computer Science*, 2007, 34(9): 163-166.)
- [9] Coelho L S, Mariani V C. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2006, 21(2): 989-996.
- [10] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. *Evolutionary Computation*, 2000, 8(2): 173-195.