

文章编号: 1000-6893(2004)06-0615-04

基于赋时可重构 Petri 网的可重构制造系统建模

蔡宗琰

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

Timed Reconfigurable Petri Net-Based Modeling of Reconfigurable Manufacturing System

CAI Zong-yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 系统建模是可重构制造系统生产管理控制技术的基础。分析了可重构制造系统的建模需求,提出基于赋时可重构 Petri 网的可重构制造系统建模的方法。该建模方法是先建立可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型,再通过修改其建模元素得到可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型。实例研究表明基于赋时可重构 Petri 网的可重构制造系统建模方法能够满足可重构制造系统的建模需求,因此它是可重构制造系统的正确的形式化表示。

关键词: 飞行器制造技术; 建模; 赋时可重构 Petri 网; 可重构制造系统; 赋时面向对象 Petri 网

中图分类号: V260.2; TH166 **文献标识码:** A

Abstract: The modeling of system is the key technology of the production management and control of reconfigurable manufacturing system. Consequently the modeling requirements of reconfigurable manufacturing system are analyzed. The modeling methodology based on timed reconfigurable Petri nets is then suggested for reconfigurable manufacturing system. With the methodology given above, the timed reconfigurable Petri nets of the current system of reconfigurable manufacturing system are built firstly, then modeling elements are revised to reconfigure the reconfigurable manufacturing system. An example of the timed reconfigurable Petri nets of reconfigurable manufacturing system is given to demonstrate the variations of modeling element after the reconfigurable manufacturing system is reconfigured. By the above research, it is indicated that the model of timed reconfigurable Petri nets of reconfigurable manufacturing system built in this paper is one of the correct formalization of reconfigurable manufacturing systems.

Key words: aircraft manufacturing technology; modeling; timed reconfigurable Petri net; reconfigurable manufacturing system; timed object-oriented Petri net

可重构制造系统(Reconfigurable Manufacturing System, RcMS)是当今先进制造领域的研究热点之一^[1,2]。它是一旦需要就面向机床级和系统级进行重构,实现准确地提供所需的制造能力和生产能力以快速适应变化的市场的新制造哲理^[3,4]。由于建立 RcMS 的系统模型是分析和控制可重构制造系统的基础,因此开展可重构制造系统建模研究是非常必要的。

1 可重构制造系统的建模要求

可重构制造系统的主要重构方法有: 重构可重构机床(Reconfigurable Manufacturing Ma-

chine Tool, RcMT),使其成为具备新制造功能的 RcMT; 增加机器到制造系统中或从制造系统中移走机器,或在制造系统中进行机器的替换。但从 RcMS 建模的观点看,对重构后的 RcMT,可将其看作是一个具有新制造功能的机床,它仍是一个生产设备对象;在 RcMS 中替换机器可看作是从制造系统中移走机器和增加机器到制造系统中这两种方法的组合。因此,对 RcMS 建模与分析而言,实施 RcMS 重构的本质是增加机器到系统中,或从系统中移走机器。同时,系统中设备的增加或移走将使设备之间的信息传输关系产生变化。因此,所建立的 RcMS 的系统模型必须满足生产设备对象的可重用、可增加/移走和生产设备对象之间的信息可交互的要求。

可重构制造系统是一种基于事件的异步与并

收稿日期:2003-11-03; 修订日期:2004-03-20
基金项目:江苏省博士后科学基金(20020105)资助项目

发制造系统。在基于事件的异步与并发制造系统的建模与分析方面, Petri 网获得广泛的应用,但随着系统规模的扩大, Petri 模型变得非常复杂。因此,传统的 Petri 模型不适合于 RcMS 的建模。文献[5]针对 RcMS 重构前后生产设备的作业安排会产生变化的情况,提出了面向可重构制造系统的生产设备的赋时面向对象 Petri 网(Timed Object-oriented Petri Net, TOOPN)模型,实现了可重构制造系统中生产设备的形式化表示,满足了可重构制造系统的生产设备对象可重用的要求。本文继续文献[5]的工作,基于可重构制造系统的赋时可重构 Petri 网(Timed Reconfigurable Petri Net for RcMS, TRPN-RcMS)模型对可重构制造系统进行建模。建模过程分两步,即先建立可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型,再通过修改其建模元素得到可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型。

2 可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型

在系统第 n 次重构后,可重构制造系统的赋时可重构 Petri 网模型 $S_{t,n}$ 定义为

$$S_{t,n} = \{ O_{t,n}, R_{t,n}, L_n, M_{t,n,0} \} \quad (1)$$

式中: $O_{t,n}$ 为第 n 次重构后, RcMS 中生产设备的赋时面向对象 Petri 网(TOOPN)[5]的集合; $R_{t,n}$ 为第 n 次重构后, RcMS 中不同设备对象之间的赋时信息传输关系的集合; L_n 为第 n 次重构后, TRPN-RcMS 的颜色集合; L_n 为 TRPN-RcMS 中门的输入输出逻辑关系函数,它规定了通过一个门从相关的信息发送对象到相关的信息接收对象流动的托肯流; $M_{t,n,0}$ 为第 n 次重构后, TRPN-RcMS 的赋时初始标记的集合。

2.1 $O_{t,n}$ 的定义

$$O_{t,n} = \{ O_{t,ni}, i = 1, 2, \dots, I_n \} \quad (2)$$

式中: $O_{t,ni}$ 为第 n 次重构后, RcMS 中生产设备对象的 TOOPN; I_n 为第 n 次重构后,系统中生产设备对象的总数。

2.2 $R_{t,n}$ 的含义

$$R_{t,n} = \{ R_{t,nij}, i, j = 1, 2, \dots, I_n, i \neq j \} \quad (3)$$

式中: $R_{t,nij}$ 为第 n 次重构后 RcMS 中信息发送对象 $O_{t,ni}$ 和信息接受对象 $O_{t,nj}$ 之间的赋时信息传输关系,即

$$R_{t,nij} = \{ IA_{nij}, G_{nij}, OA_{nij}, E_{t,nij} \} \quad (4)$$

式中: IA_{nij} 为从 $O_{t,ni}$ 的 OM_{ni} 到 G_{nij} 的门跃迁输入连接弧的集合; OA_{nij} 为从 G_{nij} 到 $O_{t,nj}$ 的 IM_{nj} 的门跃迁输出连接弧的集合; G_{nij} 为门跃迁的集合,门跃迁在第 n 次重构后,位于 RcMS 中 $O_{t,ni}$ 的输出信息位 OM_{ni} 和 $O_{t,nj}$ 的输入信息位 IM_{nj} 之间; $E_{t,nij}$ 是 RcMS 中 $O_{t,ni}$ 的输出信息位 OM_{ni} 和 $O_{t,nj}$ 的输入信息位 IM_{nj} 之间的赋时连接弧的表达式

$$E_{t,nij} = [E_{t,nij}(IA_{nij}), E_{t,nij}(OA_{nij})] \quad (5)$$

式中: $E_{t,nij}(IA_{nij})$ 为门跃迁赋时输入连接弧的表达式; $E_{t,nij}(OA_{nij})$ 为门跃迁赋时输出连接弧的表达式。

这些表达式与生产设备对象的 TOOPN 的赋时输入输出表达函数的表示方法^[6,7]相同,它们决定了对每一次激发 G_{nij} ,通过 IA_{nij} 和 OA_{nij} 流动的托肯的数量、颜色及对象之间通讯的时间。

2.3 L_n 的定义

G_n 为系统中门的集合,即 RcMS 中与 $R_{t,nij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, I_n, i \neq j$) 有关的所有门的并

$$G_n = \bigcup_{i,j=1, i \neq j}^{I_n} G_{nij} \quad (6)$$

L_n 为从 G_n 定义的门输入输出逻辑关系函数,它规定了通过一个门从相关的信息发送对象到相关的信息接收对象流动的托肯流,即

$$\begin{aligned} \forall g \in G_n: \{ \{ \cdot, g^n = (om_1, om_2, \dots, om_{q_i}) \}, \\ L_n(\cdot, g^n) = \{ / (om_1, om_2, \dots, om_{q_i}) \}, \\ \{ g \cdot^n = (im_1, im_2, \dots, im_{q_0}) \}, \\ L_n(g \cdot^n) = \{ / (im_1, im_2, \dots, im_{q_0}) \} \} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: \cdot, g^n 为第 n 次重构后,连接到门 g 的输出信息位的集合; $g \cdot^n$ 为第 n 次重构后,连接到门 g 的输入信息位的集合; q_i 为连接到门 g 的输出信息位的数量; q_0 为连接到门 g 的输入信息位的数量; \cdot 为关系操作 or; \cdot 为关系操作 and; \cdot (Z_1, \dots, Z_R) 为由操作符 \cdot 作用于信息位 (Z_1, Z_2, \dots, Z_R) 的逻辑操作,如 $Z_1 \cdot Z_2$ 表示 Z_1 或 Z_2 被选择, $Z_1 \cdot Z_2$ 表示 Z_1 和 Z_2 被选择。

2.4 $M_{t,n,0}$ 的定义

$$M_{t,n,0} = (MM_{t,n,0}, SM_{t,n,0}) \quad (8)$$

式中: $MM_{t,n,0}$ 为第 n 次重构后 RcMS 中所有生产设备对象的输入输出信息位的赋时初始标记;

$MM_{t,n,0} = \bigcup_{i=1}^{I_n} MM_{t,ni,0}$; $SM_{t,n,0}$ 为第 n 次重构后, RcMS 中所有生产设备对象的状态位的赋时初始标记 $SM_{t,n,0} = \bigcup_{i=1}^{I_n} SM_{t,ni,0}$ 。

3 可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型

根据可重构制造系统的建模要求,可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型必须体现可重构制造系统重构过程中生产设备对象的重用、增加/移走和生产设备对象之间的信息传输关系变化的情况。这可利用赋时可重构 Petri 网的可重构性来实现,即通过修改可重构制造系统的赋时可重构 Petri 网的建模元素来实现。

设 $S_{t,n} = (O_{t,n}, R_{t,n}, L_n, M_{t,n,0})$ 表示可重构制造系统的当前系统, $S_{t,n+1} = (O_{t,n+1}, R_{t,n+1}, L_{n+1}, M_{t,n+1,0})$ 表示可重构制造系统第 $n+1$ 次重构后的系统,则通过修改 $S_{t,n}$ 的建模元素可得到 $S_{t,n+1}$,其具体过程如下:

(1) Step1:修改生产设备对象的动态建模元素

根据重构后制造系统的零件需求,在重构 RcMS 时需要改变其生产设备的作业任务安排。这可通过重用生产设备对象的静态 OPN,修改其动态建模元素 C_{ni} 和 $E_{t,ni}$ 以及赋时初始标记实现。即

$$\left. \begin{aligned} C_{(n+1)i} &= C_{ni} - C_{ni}^a + C_{ni}^r \\ E_{t,(n+1)i} &= E_{t,ni} - E_{t,ni}^a + E_{t,ni}^r \\ M_{t,(n+1)i,0} &= M_{t,ni,s} - M_{t,ni,s}^r + M_{t,ni,s}^a \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $C_{(n+1)i}, C_{ni}$ 分别为设备对象 O_i 新的、原来的与 SP_i, IM_i, OM_i 有关的颜色集合; C_{ni}^a, C_{ni}^r 分别为从设备对象 O_i 中加入、删去的与 SP_i, IM_i, OM_i 有关的颜色集合; $E_{t,(n+1)i}, E_{t,ni}$ 分别为设备对象 O_i 新的、原来的赋时输入输出关系表达式; $E_{t,ni}^a, E_{t,ni}^r$ 分别为从设备对象 O_i 中加入、删去的赋时输入输出关系表达式。 $M_{t,(n+1)i,0}, M_{t,ni,s}$ 分别为设备对象的 $O_{t,ni}$ 新的、原来的赋时初始标记; $M_{t,ni,s}^r, M_{t,ni,s}^a$ 为从设备对象的 $O_{t,ni}$ 中删去、加入的赋时标记。

(2) Step2:修改 TRPN-RcMS 的颜色集合

$$L_{n+1} = L_n - L_n^a + L_n^r \quad (10)$$

式中: L_{n+1} 为由于加进对象或从系统中移走对象,系统新的颜色集合; L_n^a 为与加进 $O_{t,n}^a$ 有关的被加进系统的颜色子集合; L_n^r 为与移走 $O_{t,n}^r$ 有关的从系统中移走的颜色子集合。

(3) Step3:增加/移走生产设备对象

$$O_{t,n+1} = O_{t,n} - O_{t,n}^r + O_{t,n}^a \quad (11)$$

式中: $O_{t,n}^r$ 为从系统中移走的对象的子集合, $O_{t,n}^r = (O_{t,ni}^r, i = 1, 2, 3, \dots, I_n^r) \subset O_{t,n}$; $O_{t,ni}^r$ 为从系统中被移走的第 i 个对象, I_n^r 为被移走的对象总数; $O_{t,n}^a$ 为被加进系统的对象的子集合, $O_{t,n}^a = (O_{t,ni}^a, i = 1, 2, 3, \dots, I_n^a) \notin O_{t,n}$; $O_{t,ni}^a$ 为被加进系统的第 i 个对象, I_n^a 是被加进系统的对象总数,且 $O_{t,n+1} = O_{t,n} - O_{t,n}^r + O_{t,n}^a$ 。

(4) Step4:增加/移走信息传输关系

$$R_{t,n+1} = R_{t,n} - R_{t,n}^r + R_{t,n}^a \quad (12)$$

式中: $R_{t,n}^r$ 为所有从系统中被移走的信息传输关系, $R_{t,n}^r = (R_{t,nij}^r, i, j = 1, 2, 3, \dots, I_n, i \neq j, O_{t,ni} \rightarrow O_{t,nj} \rightarrow O_{t,n}^r)$; $R_{t,n}^a$ 为所有被加进系统的信息传输关系, $R_{t,n}^a = (R_{t,nij}^a, i, j = 1, 2, 3, \dots, I_n, i \neq j, O_{t,ni} \rightarrow O_{t,nj} \rightarrow O_{t,n}^a)$ 。

(5) Step5:修改在系统重构后仍保留在系统中的信息传输关系

$$\left. \begin{aligned} R_{t,(n+1)ij} &= [IA_{nij}, G_{nij}, OA_{nij}, E_{t,(n+1)ij}] \\ E_{t,(n+1)ij} &= E_{t,nij} - E_{t,nij}^r + E_{t,nij}^a \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $E_{t,nij}^r$ 为从系统中被移走的 $O_{t,ni}$ 的输出信息位和 $O_{t,nj}$ ($i \neq j$) 的输入信息位之间的赋时连接弧表达式; $E_{t,nij}^a$ 为被加进系统的 $O_{t,ni}$ 的输出信息位和 $O_{t,nj}$ ($i \neq j$) 的输入信息位之间的赋时连接弧的表达式。

(6) Step6:修改门的输入输出逻辑关系函数

$$G_{n+1} = G_n - G_{i,n} + G_n^a \quad (14)$$

式中: $G_{i,n}$ 为因为从系统中移走 $O_{t,n}^r$ 而孤立的门的子集合; G_n^a 为因为 $O_{t,n}^a$ 被加进系统而增加的门的子集合。

相应地,输入输出逻辑关系函数变化为

$$\forall g \quad G_{n+1} : [L_{n+1}(\cdot g^{n+1}) = (\cdot g^n - \cdot g^{nr} + \cdot g^{na}), L_{n+1}(g \cdot^{n+1}) = (\cdot g^n - g \cdot^{nr} + g \cdot^{na})] \quad (15)$$

式中: $\cdot g^n$ 为在重构前通过门跃迁输入连接弧连接到 g 的输出信息位的集合; $\cdot g^{nr}$ 为原来通过门跃迁输入连接弧连接到 g 、在重构中因为移走 $O_{t,n}^r$ 而移走的输出信息位的集合; $\cdot g^{na}$ 为在重构中因为增加对象 $O_{t,n}^a$ 通过门跃迁输入连接弧连接到 g 的输出信息位的集合; $g \cdot^n$ 为原来 g 通过门跃迁输出连接弧连接到的输入信息位的集合; $g \cdot^{nr}$ 为在重构中因为移走对象 $O_{t,n}^r$ 而从原 g 通过门跃迁输出连接弧连接到的输入信息位中移走

的输入信息位的集合; $g.na$ 为在重构中因为加进对象 $o_{t,n}^a$ 而被加进的输入信息位的集合, 该集合中的每一个输入信息位与经 g 的门跃迁输出连接弧相连。

(7) Step7: 修改赋时初始标记

$$\left. \begin{aligned} M_{t,n+1,0} &= (MM_{t,n+1,0}, SM_{t,n+1,0}) \\ MM_{t,n+1,0} &= MM_{t,n,s} - MM_{t,n,s}^r + MM_{t,n,s}^a \\ SM_{t,n+1,0} &= SM_{t,n,s} - SM_{t,n,s}^r + SM_{t,n,s}^a \end{aligned} \right\} (16)$$

式中: $MM_{t,n,s}^r$ 为从系统中移走的所有对象的信息位标记, $MM_{t,n,s}^r \subset MM_{t,n,s}$; $MM_{t,n,s}^a$ 为加进系统的所有对象的信息位的初始标记; $SMM_{t,n,s}^r$ 为从系统中移走的所有对象的状态位标记, $SMM_{t,n,s}^r \subset SMM_{t,n,s}$; $SM_{t,n,s}^a$ 为加进系统的所有对象的状态位的初始标记。

4 实例研究

在文献[8,9]中,作者以某航天制造企业 CIMS 工程为研究背景,提出了一个可重构制造系统的原型系统,并使用实例研究的方法验证本文所提出的可重构制造系统建模方法的正确性。其中,文献[8]验证了可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型的正确性;而文献[9]则验证了可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型的正确性。

实例研究的结果表明:利用生产设备对象的赋时面向对象 Petri 网和可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型可以形式化地表示 RcMS 的当前系统。根据可重构制造系统重构过程中生产设备对象的重用、增加或移走以及生产设备对象之间的信息传输关系的变化情况,通过修改可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网的建模元素可以得到可重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型。因此,基于赋时可重构 Petri 网的可重构制造系统建模是一种正确可行的可重构制造系统建模方法。

5 结论

可重构制造系统的建模是可重构制造系统系统分析、控制与优化的基础,因而它是分析和研究可重构制造系统的关键技术。本文提出的基于赋时可重构 Petri 网的可重构制造系统建模方法不仅能够实现可重构制造系统当前系统的形式化表示,而且可以通过修改可重构制造系统当前系统的赋时可重构 Petri 网模型的建模元素而获得可

重构制造系统重构后系统的赋时可重构 Petri 网模型。因此是一种正确而可行的可重构制造系统建模方法。

参考文献

- [1] Koren Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable manufacturing systems[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48 (2): 527 - 540.
- [2] Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000, 11(4): 403 - 419.
- [3] Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y, et al. Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13(2): 135 - 146.
- [4] 蔡宗琰,严新民. 计算机辅助可重构制造系统设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(2): 125 - 129. (Cai Z Y, Yan X M. Computer aided reconfigurable manufacturing system design [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2002, 14(2): 125 - 129.)
- [5] 蔡宗琰,王宁生,任守纲. 面向可重构制造系统的设备建模[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 195 - 199. (Cai Z Y, Wang N S, Ren S G. Reconfigurable manufacturing system oriented modeling of machine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(2): 195 - 199.)
- [6] Kuo C H, Huang H P. Failure modeling and process monitoring for FMS using colored timed Petri nets[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2000, 16(3): 301 - 312.
- [7] Nam Y H, Wohn K, Lee K H. Modeling and recognition of hand gesture using colored Petri nets[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A, 1999, 29(5): 515 - 521.
- [8] 蔡宗琰. 计算机辅助可重构制造系统设计的概念研究[D]. 西安:西北工业大学, 2002. (Cai Z Y. Conceptual study on computer aided reconfigurable manufacturing system design[D]. Xi an: Northwestern Polytechnical University, 2002.)
- [9] 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 - 166, 173. (Cai Z Y, Yan X M. Case study on reconfiguration algorithm for reconfigurable manufacturing system[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2003, 15(2): 162 - 166, 173.)

作者简介:



蔡宗琰(1964 -) 男,福建莆田人,副教授,南京航空航天大学博士后,2002年毕业于西北工业大学机械制造及其自动化专业。主要从事计算机集成制造系统、计算机辅助设计与产品数据管理、制造执行系统、可重构制造系统等研究。联系电话: 029-85251906, E-mail: dr-caizongyan@263.net

(责任编辑:蔡斐)