

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.024

# 基于面向对象时间约束 Petri 网的 加工-装配车间资源可调度性研究

鲁建厦, 景 峰, 董巧英

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:**为了解决加工装配车间的资源冲突问题,提出了基于面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间资源可调度性判定方法。该方法给出了面向对象时间约束 Petri 网的语义描述和可调度性定义,建立了基于面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间的建模方法,提出了基于加工装配车间各资源生产的最早触发开始时间和最晚触发结束时间的车间可调度性判定依据与判定步骤,并给出了资源不可调度时的改进方法。给出了应用实例,验证了所提出的判定方法的有效性。

**关 键 词:**加工装配车间;可调度性;Petri 网;约束

中图分类号:TB497 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)03-0090-06

## Schedulability Analysis of Resource for Process-Assembly Workshop Based on Oriented Object Timing Constraint Petri Nets

LU Jianxia, JING Feng, DONG Qiaoying

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** To solve the resource conflict problem of processing and assembly workshop, a process-assembly workshop resource schedulability method based on Oriented Object Timing Constraint Petri Nets (OOTCPN'S) was proposed. The semantic description and schedulability definition of OOTCPN'S were presented, and the modeling method of process-assembly workshop based on OOTCPN'S was established. The judgment basis and step of workshop schedulability based on earliest fire beginning time and latest fire ending time of processing assembly workshop resource were put proposed, and a improved method was put forward when resource was not schedulable. Finally, the effectiveness verification of judgment method was discussed in detail.

**Key words:** process-assembly workshop; schedulability; Petri nets; constraint

离散型制造生产是一个复杂的生产过程,由于生产资源有限和生产任务突发原因,经常会发生多个任务竞争同一资源的情况。对这类由生产任务导致的资源冲突问题的研究往往称为资源可调度性研究,目前有关资源可调度性的研究主要集中在工作流的可调度性分析方面,但在资源的有限性、任务的突发性及调度的时间性方面有相似性,具有一定的借鉴意义。文献[1-3]给出了工作流的建模方法,降低了工作流建模的复杂度。文献[4]建立了协同过程资源可调度性模

型,并给出了产品协同设计过程资源约束的可调度性规则及算法。此外,还有一些学者采用 Petri 网建模的方法,提出了工作流的可调度性的分析和验证方法<sup>[5-7]</sup>。这些研究是针对工作流的资源可调度性分析建模与分析方面,但有关加工装配车间资源可调度性研究未见文献。

由于加工装配车间生产过程中的资源可调度性具有明显的时间属性,对于这类问题的研究不仅要考虑生产任务本身的时间约束,还要考虑资源提供者能够

收稿日期:2013-11-09;修回日期:2013-12-10

基金项目:国家自然科学基金(70971118),浙江省自然科学基金(LY12E05021)

作者简介:鲁建厦(1963),男,浙江余姚人,浙江工业大学教授,博士生导师,主要研究方向为精益生产、生产调度、制造业信息化。E-mail:ljx@zjut.edu.cn

给予该生产任务的时间约束。面向对象时间约束 Petri 网 (Oriented Object Timing Constraint Petri Nets, OOTCPN'S) 是一种具有丰富时间语义, 可对具有并发、冲突、动态特性的活动过程进行建模的扩展时间 Petri 网<sup>[8-10]</sup>。因此采用面向对象时间约束 Petri 网技术, 对加工装配车间的资源可调度性进行研究有较好的优势。该方法通过面向对象时间约束 Petri 网模型, 直观的反映出加工装配车间的生产过程和时间约束, 通过可调度性分析和时间约束修正, 达到消除系统中资源冲突的目的。

## 1 基于 OOTCPN'S 的加工装配车间建模方法

为了研究对加工装配车间资源进行可调度性判定方法, 需要给出采用 OOTCPN'S 建立加工装配车间的模型的方法。首先需要对 OOTCPN'S 进行语义描述, 然后进行可调度性定义。

### 1.1 OOTCPN'S 的语义描述

在 OOTCPN'S 中, 系统由对象和对象间关系组成, 将系统中相似的组成部分抽象成对象, 各部分之间的信息传递作为对象间关系, 则 OOTCPN'S 的形式化定义见以下几点。

1) 系统  $S$  是一个四元组, 可表示为:  $S = \{O, R, C, T_c\}$ ,  $S$  称为面向对象时间约束 Petri 网。其中:  $O$  为系统对象的集合;  $R$  为对象间关系;  $C$  为 token 颜色, 代表不同的 token;  $T_c$  为时间约束。系统的行为表现为对象内部的变迁活动以及对象间的信息传递。为了方便分析各车间之间的可调度性, 假定以一种产品作为分析对象, 所以 token 中不加入色彩的属性。

2) 对象  $O$  代表系统中生产节点, 其中:  $O_i$  为对象中活动变迁的有限集合,  $O_c$  为对象中门变迁的有限集合;  $O_{T_c}$  表示对象时间约束, 且  $O_{T_c} = \{O_c, O_d\}$ ,  $O_c$  是整数对  $(O_{T_{cmin}}, O_{T_{cmax}})$ , 表示变迁  $O_c$  的可触发时间区间,  $O_d$  是表示  $O_c$  的触发延迟时间。

### 1.2 OOTCPN'S 的可调度性定义

OOTCPN'S 中对象间的门变迁使能触发可以改变对象的输入输出信息库所的状态, 从而使对象内变迁触发, 完成一个操作。同时基于 OOTCPN'S 的加工装配车间模型中的变迁包含了可调度性的含义。若变迁考虑 token 的到达时间  $O_{tokenarr}$ , 并变迁可成功的完成触发, 则称该变迁为强可调度的; 若变迁不考虑 token 的到达时间  $O_{tokenarr}$ , 并且变迁可成功的完成触发, 则称该变迁为弱可调度的。变迁的不可调度性由于加入时间的约束可有 3 个不同的表现形式, 即: ①变迁无法使能; ②变迁成功使能, 但无法触发; ③变迁可触发, 但不

可成功完成触发。

根据强触发原则, 所有用于变迁使能的 token 在  $O_c$  触发后, 先保留在原输入对象的输出信息库所中, 若变迁  $O_c$  成功触发, 则直至变迁  $O_c$  延时结束后, token 输出到相应的输出库所中; 若变迁  $O_c$  未成功触发, 则 token 可用于其他对象的变迁触发。定义  $T_{EE}$  为最早使能开始时间,  $T_{LE}$  为最晚使能结束时间,  $T_{EF}$  为最早触发开始时间,  $T_{LF}$  为最晚触发结束时间,  $T_{begin}$  为变迁  $t$  实际触发开始时间,  $T_{end}$  为变迁  $t$  实际触发结束时间,  $T_{dur}$  表示变迁  $t$  的触发延迟时间。图 1 为各时间对与使能时间区间和触发时间区间的关系。

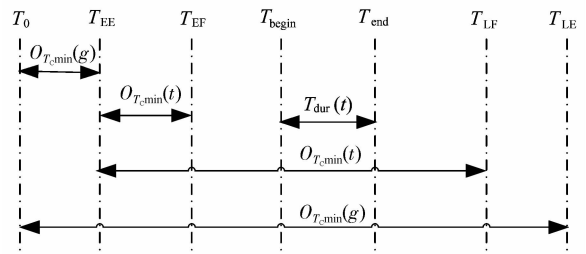


图 1 变迁各时间区间的关系

Figure 1 Time interval relationship of transition

## 2 基于 OOTCPN'S 的加工装配车间资源可调度性判定及改进方法

### 2.1 基于 OOTCPN'S 的加工装配车间可调度性判定依据

加工装配车间中各生产节点是否可调度, 实际上就是模型中对象内变迁是否可以成功的完成触发, 而变迁  $t$  是否成功的触发由触发时间区间最早触发开始时间  $T_{EF}(t)$  和最迟触发结束时间  $T_{LF}(t)$  决定, 而  $T_{EF}(t)$  和  $T_{LF}(t)$  受使能时间区间  $T_{EE}(t)$  和  $T_{LE}(t)$  影响, 所以首先确定  $T_{EE}(t)$  和  $T_{LF}(t)$  的计算。

一般对象结构的内部的变迁为单输入变迁, 即多个输入 token 并行激发; 组合对象结构的内部变迁为多输入变迁, 即需要满足多个输入 token 同时使能才可激发。且若变迁  $t$  强可调度, 当且仅当: ①enable  $(g)$ ; ② $T_{LF}(t) - T_{EF}(t) \geq O_d(t)$ 。

对于一般对象结构, 一个对象可能会有多个输入并行激发,  $g$  表示一般对象的输入门变迁, 则为分析每次激发的可调度性, 需要计算  $T_{LF}(t)$  和  $T_{EF}(t)$ , 则首先计算  $T_{EE}(t)$  和  $T_{LE}(t)$ :

$$T_{EE}(t) = O_{tokenarr}(g) + O_{T_{cmin}}(g), \quad (1)$$

$$T_{LE}(t) = O_{tokenarr}(g) + O_{T_{cmax}}(g). \quad (2)$$

再计算  $T_{LF}(t)$  和  $T_{EF}(t)$ :

$$T_{EF}(t) = T_{EE}(t) + O_{T_{cmin}}(g) = O_{tokenarr}(g) + O_{T_{cmin}}$$

$$(g) + O_{T_{Cmin}}(t), \quad (3)$$

$$T_{LE}(t) = \min [T_{LE}(t), O_{tokenarr}(g) + O_{T_{Cmax}}(g) + O_{T_{Cmax}}(t)] = O_{tokenarr}(g) + \min [O_{T_{Cmax}}(g), O_{T_{Cmin}}(g) + O_{T_{Cmax}}(t)] \quad (4)$$

对于组合对象结构,一个对象需要满足多个输入同时使能才可激发,即对象内部变迁的可调度性受到每个输入的制约, $g_k$  表示组合对象的不同输入门变迁:

$$T_{EE}(t) = \max_k [\min(O_{tokenarr}(g_k)) + (O_{T_{Cmin}}(g_k))] \quad (5)$$

$$T_{LE}(t) = \min_k [\max(O_{tokenarr}(g_k)) + (O_{T_{Cmax}}(g_k))] \quad (6)$$

再计算  $T_{LF}(t)$  和  $T_{EF}(t)$ :

$$T_{EF}(t) = \max_k [\min(O_{tokenarr}(g_k)) + (O_{T_{Cmin}}(g_k))] + O_{T_{Cmin}}(t) \quad (7)$$

$$T_{LE}(t) = \min_k [\min [\max O_{tokenarr}(g_k) + O_{T_{Cmax}}(g_k)], \min [\max (O_{tokenarr}(g_k)) + O_{T_{Cmin}}(g_k)] + O_{T_{Cmax}}(t)] \quad (8)$$

## 2.2 基于 OOTCPN'S 的加工装配车间资源可调度性改进方法

在 OOTCPN'S 中,资源可调度性对应着时间约束,所以消除不可调度资源就是对该资源时间约束的改进。由于对象间的可调度性是独立的,所以当检测出第  $i$  个对象  $O_i$  的内部变迁不可调度时,只需要对  $O_i$  对象的时间约束进行修正即可,不需修正  $O_i$  前的对象序列。

第 1 步:对系统中各对象进行时间约束分析,确定对象结构,根据不同的对象结构依照公式计算  $T_{EF}$  和  $T_{LF}$ ,根据公式确定不可调度点。

第 2 步:令  $H = O_D(t) - \{T_{LF}(t) - T_{EF}(t)\}$ ,  $O_{T_{Cmin}}(t)' = O_{T_{Cmin}}(t) - H$ ,若  $O_{T_{Cmin}}(t)' > 0$ ,则执行下一步,否则  $O_{T_{Cmin}}(t)' = 0$ ,  $k = O_{T_{Cmin}}(t) - H$  执行第 4 步。

第 3 步:重新依照公式(3)、(4)、(7)、(8)计算,若  $T_{LF}(t) - T_{EF}(t) \geq O_D(t)$ ,则执行第 8 步,否则执行第 2 步。

第 4 步:令  $P = \min_k [\max [O_{tokenarr}(g_k)] + O_{T_{Cmax}}(g_k)] - \min_k [\max [O_{tokenarr}(g_k)] + O_{T_{Cmin}}(g_k)] - O_{T_{Cmax}}(t)$ ,若  $P > 0$  则执行下一步,否则执行第 6 步。

第 5 步:令  $h = -k$ ,若  $P > h$ ,则  $O_{T_{Cmin}}(t)' = O_{T_{Cmin}}(t) + h$ ,若  $P < h$ ,  $O_{T_{Cmin}}(t)' = O_{T_{Cmin}}(t) + h$ ,  $O_{T_{Cmin}}(g)' = O_{T_{Cmin}}(g) + h - P$ ,执行第 7 步。

第 6 步:令  $h = -k$ ,若  $-P > h$ ,则  $O_{T_{Cmax}}(g)' =$

$O_{T_{Cmax}}(g) + h$ ,若  $-P < h$ ,  $O_{T_{Cmax}}(g)' = O_{T_{Cmax}}(g) + h$ ,  $O_{T_{Cmax}}(t)' = O_{T_{Cmax}}(t) + h + P$ ,执行第 7 步。

第 7 步:重新依照公式(3)、(4)、(7)、(8)计算,若  $T_{LF}(t) - T_{EF}(t) \geq O_D(t)$ ,则下一步,否则执行第 4 步。

第 8 步:程序结束。

## 3 实例应用

### 3.1 实例选取与假设

为了验证基于 OOTCPN'S 的加工装配车间资源可调度性判定方法的有效性,选取了某千斤顶生产企业,该企业共有 9 大类车间,包括原材料仓库、金加工车间、冲压车间、焊接车间、抛丸车间、磷化车间、电镀车间、油泵装配车间、喷漆车间及整机装配车间,属于较典型的加工装配车间。由于客户需求变化,需要在现生产计划中紧急增加一个新的生产任务,为了消除由于新增任务而导致的资源冲突,则需要对车间资源的可调度性进行判定,若不能满足,则需要给出改进方案。

为方便建立模型,系统假设为:

- 1) 只模拟系统中的一种产品,并将该产品以一个 token 来表示;
- 2) 各个加工过程的合格率为 100%,不考虑废品回流和报废;
- 3) 设备不出现故障停机;
- 4) 模拟开始时 0 时刻所有物料均已到达仓库;
- 5) 系统中的时间约束值以经验数据给出,不考虑数据的随机波动。

### 3.2 基于 OOTCPN'S 的加工装配车间模型建立

建立该企业的基于面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间模型,如图 2、图 3 所示。图中,以有向弧连接,并已标明有向弧指向位置。此外图 2 中包含一组控制对象,即 SCOB,控制对象只进行信息的控制,并没有物理实体。2 个控制对象中前者对抛丸工序进行排程,后者对喷漆工序进行排程,以确保系统不会发生资源冲突,产生死锁。

表 1 为加工装配车间的对象语义和对象内部活动变迁的时间约束,表 2 为门变迁的时间约束,其中 SCOB1, SCOB2, SCOB3 为抛丸的控制对象,CG1, CG2 和 CG3 为控制对象门变迁,则 SCOB 和 CG 均没有时间约束。

### 3.3 资源可调度性判定及资源约束改进

由图 2、图 3 可以看出,除仓库外加工装配车间的对象可分为一般对象结构和组合对象结构以及控制对象,如表 3 所示。

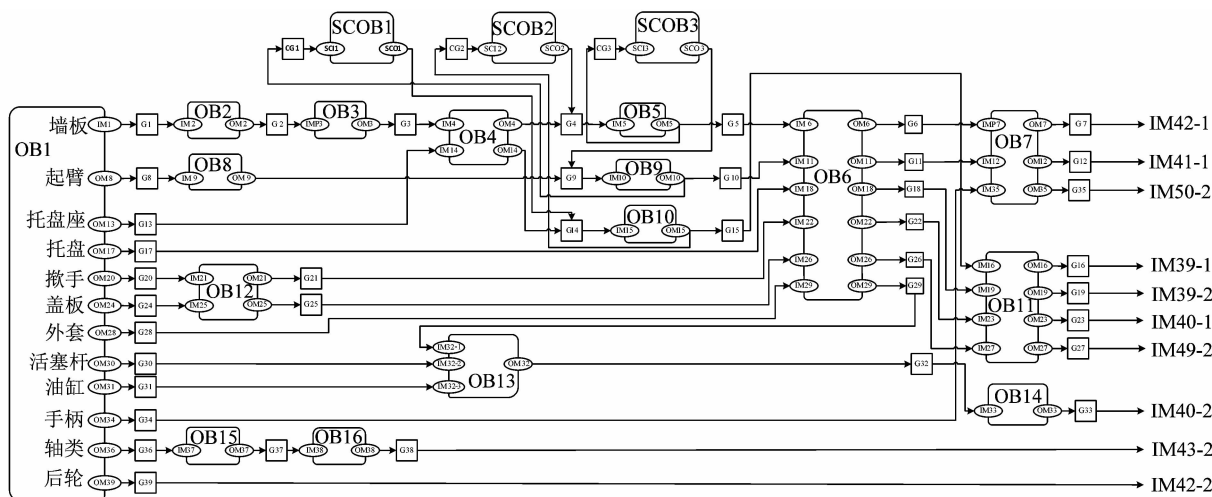


图2 基于面向对象时间约束 Petri 网的加工车间模型

Figure 2 Processing workshop model based on OOTCPN'S

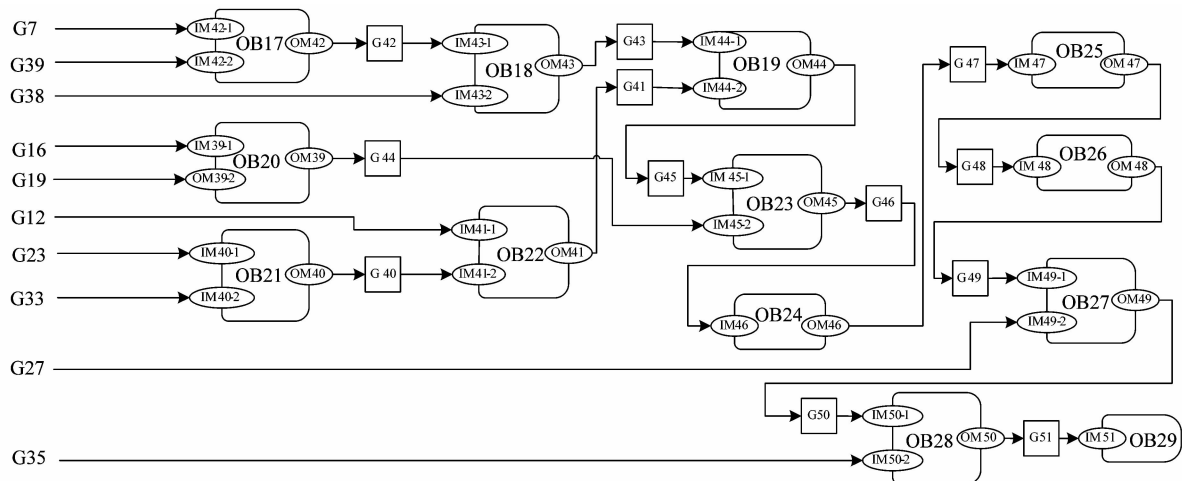


图3 基于面向对象时间约束 Petri 网的装配车间模型

Figure 3 Assembly workshop model based on OOTCPN'S

表1 面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间对象时间约束

Table 1 Process-assembly workshop object time constraint based on OOTCPN'S

| 对象   | 对象语义   | 时间约束          | 时延 | 对象    | 对象语义     | 时间约束      | 时延 |
|------|--------|---------------|----|-------|----------|-----------|----|
| OB1  | 材料仓库   | $(0, \infty)$ | 0  | OB17  | 安装后轮     | $(1, 5)$  | 4  |
| OB2  | 剪板车间   | $(2, 8)$      | 4  | OB18  | 安装轴类件    | $(1, 8)$  | 3  |
| OB3  | 冲压一车间  | $(1, 6)$      | 2  | OB19  | 安装油泵     | $(1, 8)$  | 4  |
| OB4  | 焊接一车间  | $(1, 7)$      | 5  | OB20  | 安装托盘座部件  | $(2, 8)$  | 3  |
| OB5  | 抛丸车间-1 | $(3, 6)$      | 3  | OB21  | 油泵配撤手    | $(1, 7)$  | 3  |
| OB6  | 磷化车间   | $(2, 6)$      | 3  | OB22  | 油泵配起臂    | $(1, 8)$  | 3  |
| OB7  | 喷漆车间   | $(2, 8)$      | 4  | OB23  | 安装托盘座    | $(2, 9)$  | 4  |
| OB8  | 焊接二车间  | $(2, 8)$      | 4  | OB24  | 紧固产品     | $(1, 10)$ | 4  |
| OB9  | 抛丸车间-2 | $(3, 6)$      | 3  | OB25  | 调压       | $(1, 7)$  | 3  |
| OB10 | 抛丸车间-3 | $(3, 6)$      | 3  | OB26  | 检验       | $(1, 6)$  | 3  |
| OB11 | 喷漆车间-2 | $(2, 8)$      | 5  | OB27  | 装盖板      | $(1, 6)$  | 2  |
| OB12 | 冲压二车间  | $(2, 6)$      | 2  | OB28  | 装箱       | $(1, 7)$  | 4  |
| OB13 | 油泵装配车间 | $(1, 9)$      | 5  | OB29  | 入库       | $(1, 5)$  | 2  |
| OB14 | 喷漆车间-3 | $(2, 8)$      | 4  | SCOB1 | 抛丸排程控制单元 |           |    |
| OB15 | 金加工车间  | $(1, 5)$      | 2  | SCOB2 | 抛丸排程控制单元 |           |    |
| OB16 | 电镀车间   | $(2, 9)$      | 5  | SCOB3 | 抛丸排程控制单元 |           |    |

表2 面向对象时间约束 Petri 网的加工装配  
车间门变迁时间约束

Table 2 Transition time constraint of process-assembly  
workshop based on OOTCPN'S

| 变迁  | 时间约束   | 变迁  | 时间约束   | 变迁  | 时间约束   |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| G1  | (1,9)  | G19 | (1,8)  | G37 | (2,10) |
| G2  | (2,7)  | G20 | (2,7)  | G38 | (3,9)  |
| G3  | (1,7)  | G21 | (2,8)  | G39 | (3,8)  |
| G4  | (3,9)  | G22 | (3,11) | G40 | (1,8)  |
| G5  | (2,8)  | G23 | (1,8)  | G41 | (0,9)  |
| G6  | (3,9)  | G24 | (2,7)  | G42 | (1,9)  |
| G7  | (1,5)  | G25 | (2,8)  | G43 | (1,9)  |
| G8  | (3,8)  | G26 | (3,11) | G44 | (1,9)  |
| G9  | (3,9)  | G27 | (1,6)  | G45 | (1,9)  |
| G10 | (2,8)  | G28 | (2,8)  | G46 | (1,10) |
| G11 | (3,9)  | G29 | (3,10) | G47 | (1,7)  |
| G12 | (1,8)  | G30 | (3,10) | G48 | (1,7)  |
| G13 | (2,9)  | G31 | (3,10) | G49 | (1,6)  |
| G14 | (3,9)  | G32 | (3,9)  | G50 | (1,8)  |
| G15 | (3,9)  | G33 | (1,8)  | G51 | (1,5)  |
| G16 | (1,8)  | G34 | (3,9)  | CG1 |        |
| G17 | (2,8)  | G35 | (1,8)  | CG2 |        |
| G18 | (3,11) | G36 | (1,7)  | CG3 |        |

表3 对象结构

Table 3 Object structure

| 对象   | 对象结构 | 对象   | 对象结构 | 对象    | 对象结构 |
|------|------|------|------|-------|------|
| OB1  | 起始对象 | OB12 | 一般对象 | OB23  | 组合对象 |
| OB2  | 一般对象 | OB13 | 组合对象 | OB24  | 一般对象 |
| OB3  | 一般对象 | OB14 | 一般对象 | OB25  | 一般对象 |
| OB4  | 一般对象 | OB15 | 一般对象 | OB26  | 一般对象 |
| OB5  | 一般对象 | OB16 | 一般对象 | OB27  | 组合对象 |
| OB6  | 一般对象 | OB17 | 组合对象 | OB28  | 组合对象 |
| OB7  | 一般对象 | OB18 | 组合对象 | OB29  | 一般对象 |
| OB8  | 一般对象 | OB19 | 组合对象 | SCOB1 | 控制对象 |
| OB9  | 一般对象 | OB20 | 组合对象 | SCOB2 | 控制对象 |
| OB10 | 一般对象 | OB21 | 组合对象 | SCOB3 | 控制对象 |
| OB11 | 一般对象 | OB22 | 组合对象 |       |      |

控制对象只用作构建对象的加工序列,不含时间约束,不做调度性分析,所以将一般结构对象和组合结构对象分别进行讨论。

1) 一般对象结构的可调度性分析和修正。根据式(3)、(4)、(5)、(6)验证对象的可调度性,对于对象 OB8:有  $T_{LF} - T_{EF} = 3 < O_D = 4$ ,则 OB8 的内部变迁不可调度,同理可以验证其余一般结构的对象均可调度。

运用时间约束修正算法对 OB8 进行修正,得出: $H = O_D - \{T_{LF} - T_{EF}\} = 4 - \{8 - 5\} = 1$ ,则  $O'_{T_{Cmin}} = O_{T_{Cmin}} - 1 = 1$ ,得  $O_{T_C} = [1, 8]$  时,满足可调度约束条件,即 OB8 强可调度。

2) 组合对象结构的可调度性分析和修正。取

OB17 为例,OB17 有 2 个输入门变迁 G7 和 G39,默认材料 0 时刻到达材料仓库,即  $O_{tokenarr} = 0$ ,则根据式(5)、(6)、(7)、(8)得出  $T_{LF} - T_{EF} = 53 - 46 = 7 > O_D = 4$ ,则 OB17 是强可调度的,同理可以计算其他组合对象都是强可调度的。因为各生产节点的时间约束是相互独立的,所以修正过程不会影响到原可调度的生产节点,只需重新验算修正节点即可,所以得到的基于 OOTCPN'S 的加工装配车间模型是可调度的。

通过实例表明,基于 OOTCPN'S 的加工装配车间可调度性判定方法可以找出系统的资源冲突节点,并可以应用时间约束修正方法予以消除,得到无资源冲突的系统。因此该方法不仅提供了一个直观的加工装配车间生产过程建模工具,而且可以判定和修正生产节点的资源约束,并达到消除资源冲突的目的,所以该方法对生产系统的资源可调度性分析和优化是有效的。

#### 4 结语

加工装配系统是一个复杂的系统,包含了多种加工工序和装配之间复杂的调度关系,增加了资源冲突分析的难度。为了判定加工装配车间的资源可调度性,提出了基于面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间资源可调度性判定方法。主要研究内容与成果为:①给出了基于 OOTCPN'S 的加工装配车间模型建立方法。采用 OOTCPN'S 对加工装配系统进行建模,将不同的车间和工艺封装成对象来简化模型,以及降低系统分析难度。②提出了可调度性判定依据与步骤,并给出了不可调度时资源约束的改进方法。③进行了实例验证。选用千斤顶生产企业的实例,说明了基于面向对象时间约束 Petri 网的加工装配车间资源可调度性判定方法及修正算法的有效性,对生产系统的资源冲突分析和优化是有效的。但研究中还存在研究对象单一的问题,只考虑了一种产品的资源约束,从多种产品资源约束的方向有待进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 李建强,范玉顺. 工作流模型可调度性验证与分析方法[J]. 机械工程学报,2004,40(3):93-98.
- [2] 庞辉,方宗德,赵勇. 时间约束工作流模型的简化分析与可调度性验证[J]. 计算机集成制造,2008,14(11):2217-2223.
- [3] 钟诗胜,汤新民,李涛. 时间约束层次细化工作流建模及验证研究[J]. 计算机集成制造,2006,12(11):1773-1778.
- [4] 郭银章,曾建潮. 基于 TCPN 的协同设计过程资源约束可调度性分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(10):1780-1788.

(下转第 99 页)