

# 基于 AND 与 Petri 网映射的分布式装配系统建模方法<sup>\*</sup>

## Modeling Method for Discrete Assembly System Based on AND and Petri Net

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 闫振国 张杰 李原 王延平

**[摘要]** 为降低分布式装配系统(Discrete Assembly System, DAS)建模复杂度,有效支撑系统性能分析与优化,提出了一种基于活动网络图(Activity Network Diagram, AND)和 Petri 网映射的分布式装配系统建模方法。该方法中,首先采用装配作业的分级对象建模框架,快速构建装配作业过程的活动网络图;然后,在活动网络图与 Petri 网结构元素分析的基础上,采用关联映射规则实现 Petri 网结构的自动生成;最后,给出了 Petri 网模型中装配作业规则设定和初始作业状态设定的方法。此外,采用某型飞机襟副翼装配为例,验证了方法的有效性。

**关键词:** 装配系统 活动网络图 Petri 网 作业模型

**[ABSTRACT]** A modeling method based on Activity Network Diagram (AND) and Petri Net is proposed for performance analysis and optimization of Discrete Assembly System (DAS). In the method, according to hierarchical modeling framework, activity network diagram for assembly work station is established rapidly. Then, a net structure mapping approach is presented, which can transform activity network diagram to Petri net, and the setting method of original state and assembly rules in Petri net are discussed. In addition, the example of a flaperon assembly is introduced, and the result demonstrates the functionality of the method algorithm.

**Keywords:** Assembly system Activity network diagram Petri net Assembly work model

大型复杂产品的装配作业组织模式与普通工业产品有很大不同。以飞机装配为例,其零部件数量众多、装配作业单元零散分布于现场的各个区域,在生产模式上存在“大流程、小封闭”的隐性流水特征,属于 DAS。与一般流水装配线相比, DAS 还存在手工作业量大、装

配自动化水平参差不齐和装配周期长等典型特征,现场资源和时间浪费现象较为普遍,现场作业平衡和现场控制的复杂度高。因此,研究 DAS 的建模、分析与控制方法,对提升制造企业过程控制能力,推动装配技术能力与过程控制能力的同步协调发展有重要的理论意义和应用价值。

从建模方法的角度分析,当前可用于制造系统过程建模的有 IDEF、Petri 网、面向对象等多种典型方法。其中, IDEF 是面向结构的分析方法,在集成模型框架、过程模型等建模方面可给出较好的解决方案<sup>[1-3]</sup>,但难以实现典型离散制造系统的定量性能分析。面向对象建模主要包括以 Coad 和 Yourdon<sup>[4]</sup> 为代表的多层次建模和以 Rumbaugh 为代表的多视图分析建模,其具有良好的继承性、封装性。但对于复杂制造系统来讲,建模方式较难理解和掌握。Petri 网具有比较严格的数学基础和较强的离散事件动态系统描述能力,在制造系统建模中得到了广泛的应用<sup>[5-8]</sup>。但是,由于 Petri 网方法描述复杂的系统时过于繁琐,缺乏层次化的设计理念。因此,较难解决复杂系统的过程建模问题。

为支撑 DAS 的性能分析与优化,本文提出了一种基于 AND 与 Petri 网关联映射的系统建模方法。该方法既可有效简化复杂装配系统建模过程、降低建模复杂度,又可运用 Petri 网成熟的数学分析工具,保证作业过程描述的可靠性与系统分析数据的准确性。

## 1 DAS 的基本定义

为便于讨论,首先给出 DAS 的定义如下:

[定义 1] DAS: 可表示为  $DAS = \{St, RI\}$ 。其中:  $St$  为装配工作站对象的有限集合,是复杂产品装配任务执行的载体;  $RI$  为装配工作站对象关系集合,约束各个站之间的逻辑顺序。

对任意装配工作站  $St$  可给出如下定义:

[定义 2] 装配工作站( $St$ ): DAS 中的工作站可表示为  $St = \{O, A, B, H, R, G\}$ 。其中:  $O$  为工作站包含工序的有限集合;  $A$  为工序关系集合;  $B$  为工作站的缓冲区位容量,其值为一个正整数;  $H$  为工作站包含工序

<sup>\*</sup> 国家 863 项目(2009AA044601)、中国博士后基金项目(47 批)资助。

的作业工时集合;  $R$  为工作站内部的作业资源集合;  $G$  表示工作站在多级装配系统中所处的级别。

资源  $R$  是各类工序实施的基础,任意  $r_i \in R$  可支撑一项或多项工序,可进一步给出如下定义:

[定义 3] 装配作业资源( $r$ ): 设任意装配工作站中的某项资源可表示为:  $r=\{Te, Ac, Pr\}$ ,其中:  $Te$  为资源类型;  $Ac$  为资源数量;  $Pr$  是需要资源提供服务的站内工序集合,且  $Pr \subseteq O$ 。

## 2 作业模型的 AND 表示方法

作业模型可以抽象描述复杂产品的装配作业过程,表达装配系统中工序、工作站、资源等要素间的相互作用和影响,是分析和优化装配系统的重要支撑。

### 2.1 装配作业的分级对象建模框架

DAS 属于大型复杂系统,为降低建模复杂度,本文提出一种基于模块化理念的参数化作业模型构建框架。在 DAS 中,可将任意装配工作站看作一个模块化单元,单元内部封装了装配作业逻辑,不同单元之间通过描述的关联关系来保持紧密协作。在作业模型构建过程中可将任意 作为独立对象实施建模,然后采用 组合生成符合产品装配组织模式的子系统,用于现场生产能力和优化。依据装配系统的多级装配特征按自底向上的顺序实施分级建模,是作业模型构建需要遵循的又一原则。底层工作站交付的装配体是上层工作站实施作业的基础,因此依据“零件→组件→…→部件→大部件→产品”逐步产生作业模型具有普遍意义,可作为系统建模的通用框架。

### 2.2 作业对象的 AND 构建

本文在 DAS 基本定义的基础上,提出采用 AND 方法来快速建立装配系统的作业模型。为便于讨论,首先给出如下定义:

[定义 4] AND ( $A_p$ ): 设任意装配工作站的 AND 可表示为  $A_p=\{D, L\}$ ,其中:  $D$  为活动网络的拓扑节点序列;  $L$  为网络图的边集合,  $\{l_{ij}|i, j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中,  $i, j$  为活动节点的拓扑序列编号。

若将装配系统中的任意装配工作站  $St$  当作建模对象,可采用一个相应的  $A_p$  来表示站内作业逻辑。进一步给出活动节点  $d_i$  的详细定义:

[定义 5] 活动节点( $d_i$ ): 装配工作站的 AND 节点可表示为  $d_i=\{o_i, h_i, R_i\}$ ,其中:  $o_i$  为节点对应的站内工序,且  $o_i \in O$ ;  $h_i$  为节点对应工序的作业工时,且  $h_i \in H$ ;  $R_i$  为节点对应工序所需的资源集合,且  $R_i \subset R, R_i \neq \emptyset$ 。

从 [定义 5] 看出,任意活动节点  $d_i \in D$  都围绕工作站内部的工序构建,并且包含了对应的工时和资源信息。因此,活动节点 可看作一项作业工序的执行实体。

与此同时,依据网络图的边集合 可形成装配作业过程的完整描述。

AND 符合管理人员抽象表达装配作业过程的基本习惯,有助于快速产生各装配工作站的作业模型。在任意  $St$  对应  $A_p$  的构建过程中,给出如下映射函数:

$$\begin{cases} f_1: O \rightarrow D \\ f_2: A \rightarrow L \\ f_3: R(o_i) \rightarrow R_i \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $f_1$  是  $St$  内部工序集合  $O$  到 AND 节点序列  $D$  的映射函数。由于站内装配作业启动过程中大多存在并行开始的多个工序,但存在唯一的完成工序,为便于后续讨论,给出表示站内装配作业启动的虚拟起始活动节点  $d_s$ ,其余节点均与  $o_i \in O$  一一对应;  $f_2$  是工序关系集合到 AND 边集合的映射函数;  $f_3$  是站内资源集合  $R$  中工序  $o_i$  所需资源向  $R_i$  的映射,  $R_i$  是  $R$  一个子集。

依据 DAS 和 AND 的基本定义,给出任意工作站  $St$  作业模型的 AND 构建步骤如下:

- (1) 获取工作站  $St$  的工序有限集合  $O$ ,依据映射函数  $f_1$  生成 AND 的节点拓扑集合  $D$ ;
- (2) 对  $\forall d_i \in D$ ,依次获取与  $o_i$  对应的作业工时  $h_i$ ;
- (3) 对  $\forall d_i \in D$ ,依据映射函数  $f_3$  获取工序  $o_i$  所需的作业资源集合  $R_i$ ;
- (4) 获取工作站的工序关系集合  $A$ ,依据映射函数  $f_2$  将  $\forall a_{ij} \in A$  转换为图边  $l_{ij}$ ,生成 AND 的图边集合  $L$ ;
- (5) 依据图边集合  $L$  连接所有活动节点,生成 AND。

## 3 AND 与 Petri 网结构的映射

在 AND 的基础上,可借助 Petri 网中成熟的数学方法进行装配作业装配工作站内部参数的定量分析。本文探讨一种从 AND 向 Petri 网的快速转换方法。

为便于讨论,本文引入一些 Petri 网的基本定义。PN (Petri Net) 是描述分布式系统的一种模型,它既能描述系统的结构,又能模拟系统的运行,其中描述系统结构的部分称为网。从形式上看,网是没有孤立节点的有向二分图。一个 PN 网的结构元素包括:位置(Place)、变迁(Transition)和弧(Arc)。位置用于描述可能的系统局部状态(条件或状况),例如在制品、装配资源、缓冲区等;变迁用于描述修改系统状态的事件,如装配任务执行;弧使用两种方法规定局部状态和事件之间的关系,它们引述事件能够发生的局部状态。

为适应 DDAS 的需要, Petri 网的形式化定义如下所示:

[定义 6]  $P/T$  系统: 一个六元组  $\Sigma = (P, T, F, K, W, M_0)$ ,是一个  $P/T$  系统,其中:  $P$  是库所的有限集合;  $T$

是变迁的有限集合;  $F$  是流关系,  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ , 即连接弧集合, 且  $P \cup T \neq \emptyset, P \cap T \neq \emptyset$ ;  $K$  是位置容量函数;  $W$  是弧权函数;  $M_0$  是初始标识 (Marking), 满足:  $\forall p \in P: M_0(p) < K(p)$ 。

[定义 7] 内部结构网: 一个内部结构网可表示为  $OPN_i = \{\Sigma, \lambda\}$ , 其中:  $\Sigma$  是定义 6 中的一个基本  $P/T$  系统;  $\lambda$  是  $P/T$  系统  $\Sigma$  中变迁  $T$  的实施速率集合。

内部结构网对基本  $P/T$  系统进行以下扩充:

- 变迁集  $T$ : 将变迁  $T$  划分为时间变迁集与瞬时变迁集 2 个子集,  $T = T_t \cup T_i, T_t \cap T_i = \emptyset$ 。时间变迁集  $T_t = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ , 瞬时变迁集  $T_i = \{t_{k+1}, \dots, t_m\}$ 。

- 库所集  $P$ : 将库所分为状态库所与资源库所 2 个子集,  $P = P_s \cup P_r, P_s \cap P_r = \emptyset$ 。状态库所集  $P_s = \{p_1, p_2, \dots, p_j\}$ , 资源库所集  $P_r = \{p_{j+1}, \dots, p_n\}$ 。

### 3.1 活动节点的 Petri 网结构映射

在装配工作站  $St$  内部, 活动节点  $d_i$  代表装配工序  $o_i$  以及相关的资源和属性, 装配体每经过一个活动节点其状态就会发生一次变化, 并最终形成可交付的装配体。对于  $\forall d_i \in D$ , 建立活动节点到 Petri 内部网结构的映射函数如下:

$$\begin{cases} f_1: \{O, L\} \rightarrow \{P_s, T, F\} \\ f_2: \{R, L\} \rightarrow \{P_r, F\} \\ f_3: H \rightarrow \lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $f_1$  是活动节点中工序到变迁和状态库所的映射函数;  $f_2$  是作业资源向资源库所的映射函数;  $f_3$  是工序工时向对应变迁实施速率的映射函数。上述映射函数在应用过程中要遵循一系列的规则, 具体讨论如下:

(1) 工序的映射 ( $f_1$ )。

在工作站  $St$  对应的活动网络  $Ap$  中,  $\forall d_i \in D$  对应的工序  $o_i$  可表示为一个起始状态库所  $p_i(s)$ 、变迁  $t_i$ 、终止

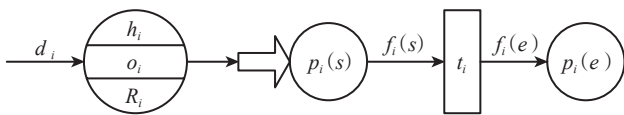


图1 活动节点的Petri网结构映射  
Fig.1 Petri net structure mapping of active node

状态库所  $p_i(e)$ , 然后用连接弧  $f_1(s)$  与  $f_1(e)$  进行顺序连接。

图 1 展现了一个活动节点工序映射的示例。

(2) 资源的映射 ( $f_2$ )。

将工序  $o_i$  所依赖的资源  $\forall r_j \in R$  映射为一个资源库所  $p_j$ , 然后与  $o_i$  对应的变迁  $t_i$ 、资源供给有向弧  $f_i(s)$  和资源释放有向弧  $f_i(r)$  构成一个资源服务闭环结构

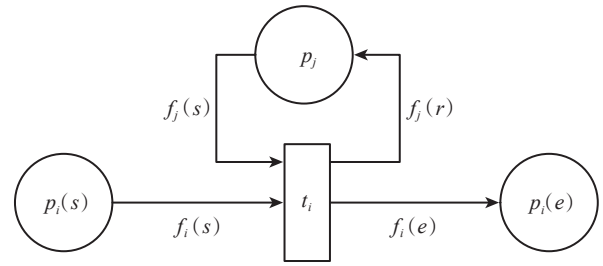


图2 工序资源的Petri网结构映射  
Fig.2 Petri net structure mapping of process resources

$p_i \rightarrow f_i(s) \rightarrow t_i \rightarrow f_j(r)$ 。

图 2 在图 1 的基础上展现了一个工序的资源网结构映射示例。

(3) 工时的映射 ( $f_3$ )。

工时是装配作业工序在时间维度上的基本属性。对于  $\forall t_i \in T$ , 可从活动节点  $d_i$  包含的  $h_i$  属性中获取变迁实施速率  $\lambda_i$ , 其中  $\lambda_i = l/h_i$ 。

### 3.2 工作站 Petri 网结构的整合

上节重点讨论了 AND 中工序、资源和工时向 Petri 网结构的基本映射问题, 但这些网结构都是孤立存在的, 还不能形成完整的装配工作站 Petri 网结构。为了建立完整描述工作站装配作业逻辑的网结构, 本节进一步阐述网结构的简化与整合方法。

(1) 状态库所的简化与整合。

对于  $\forall t_i \in T$  都存在与其对应的状态库所  $p_i(s)$  和  $p_i(e)$ 。若 2 个工序对应的变迁  $t_i$  与  $t_{i+1}$  为连续作业, 则  $t_i$  的终止状态  $p_i(e)$  即为  $t_{i+1}$  的初始状态  $p_{i+1}(s)$ 。因此, 可将  $p_i(e)$  与  $p_{i+1}(s)$  进行合并, 从而维护网结构的完整性。

(2) 资源库所的简化与整合。

对  $\forall t_i \in T$  的激发都必须有相应的资源支撑, 在装配工作站内部有许多资源是可以共享的。为了减少网结构的冗余, 必须对共享资源的闭环结构进行简化和整合。设变迁  $t_i$  与  $t_{i+1}$  为连续作业, 其对应的资源库所集合分别为  $R_i$  和  $R_{i+1}$ 。若存在  $R_i \cap R_{i+1} = R_s = \emptyset$ , 那么说明  $\forall r_j \in R_s, j = 1, 2, \dots, n$  为变迁  $t_i$  与  $t_{i+1}$  的共享资源库所, 可将相应的资源服务闭环结构进行合并。

### 3.3 Petri 网模型的装配作业规则设定

对于装配工作站来说, 一个完整的 Petri 网结构模型能够描述作业过程以及各工序、资源间的相互关系, 但还需要添加相应的装配作业规则。

(1) 装配资源总量的添加规则。

在上述讨论中,  $\forall r_j \in R$  能够映射为网结构中的一个资源库所  $p_j$ , 可将其看作装配现场中一个存放资源  $r_j$  的仓库, 而存储仓库都应该具有一个可容纳资源数量的最

大值,称之为装配资源  $r_j$  的可用总量。依据定义 3 与 6, 对于  $\forall r_j \in R$ , 可建立相应的映射函数:

$$f: Ac(r_j) \rightarrow k(p_j), \quad (3)$$

其中,  $Ac(r_j)$  为装配工作站中资源  $r_j$  的数量,  $k(p_j)$  为 Petri 网中库所  $p_j$  的位置容量, 且  $k \in K$ 。

(2) 工序资源需求数量的添加规则。

工序在执行过程中需要用到不同种类和数量的资源。在 Petri 网结构中的  $\forall p_j \in P$ , 都有资源服务的闭环结构  $p_j \rightarrow f_j(s) \rightarrow t_i \rightarrow f_j(r)$ , 可通过有向弧的弧权函数来表示工序资源数量的需求规则, 对  $\forall t_i \in T$  并有如下映射函数:

$$\begin{cases} f_1: Count(r_j) \rightarrow w[f_j(s)] \rightarrow N^+ \\ f_2: Count(r_j) \rightarrow w[f_j(r)] \rightarrow N^+ \end{cases}, \quad (4)$$

其中,  $f_1$  表示工序在执行过程中按弧权函数值获取相应数量的资源;  $f_2$  表示工序完成后按弧权函数值释放相应数量的资源。

### 3.4 工作站的初始作业状态设定

在工作站 AND 的基础上, 描述装配作业过程的 Petri 网结构和相应的规则被逐步添加, 形成了包含装配逻辑和资源的工作站作业模型框架。但模型框架缺少作业状态标识描述一个特定的生产作业状态。

在工作站的 Petri 结构模型中, 可通过对初始标识  $M_0$  的定义来表示一个用于生产的初始作业状态。初始标识  $M_0$  的定义围绕状态库所集  $P_s = \{p_1, p_2, \dots, p_j\}$  和资源库所集  $P_r = \{p_{j+1}, \dots, p_n\}$  展开。

(1) 对于装配系统的在线批产数量(在制品)  $Q_p$ , 可将其映射为状态库所  $p_1$  的初始标识数量, 有如下映射函数:

$$f: Q_p \rightarrow M_0(p_1) \rightarrow N^+, \quad (5)$$

其中,  $p_1 \in P_s$ , 且  $M_0(p_1) < K(p_1)$ ;  $N^+$  为正整数, 且  $K \in N^+$ 。

(2) 对于装配现场针对车间订单的资源配置方案, 可将工作站内  $\forall r_j \in R$  的资源最大可用数量  $\text{Max}C(r_j)$  映射为对应资源库所  $p_j$  的初始标识数量, 有如下映射函数:

$$f: \text{max}C(r_j) \rightarrow M_0(p_j) \rightarrow N^+, \quad (6)$$

其中, 对于  $\forall p_j \in P_r, \exists M_0(p_j) < K(p_j)$ ;  $N^+$  为正整数。

通过以上工作, 工作站的初始作业状态完全映射为 Petri 网的初始标识  $M_0$ , 由此形成了可用于 DAS 分析的作业模型。

## 4 实例分析

由于机翼装配具有 DAS 的典型特征, 本文采用某型飞机机翼装配中襟副翼工作站作为研究内容的验证对象。襟副翼工作站包含的工序与资源情况如表 1 所示。

表1 襟副翼工作站的工序和资源

| 工序(O) | 名称       | 资源(R) | 名称     |
|-------|----------|-------|--------|
| $o_1$ | 装配后腹板    | $r_1$ | 骨架夹具   |
| $o_2$ | 装配翼梁     | $r_2$ | 总装夹具   |
| $o_3$ | 铆接骨架托板螺母 | $r_3$ | 补铆夹具   |
| $o_4$ | 装配下壁板    | $r_4$ | 检验夹具   |
| $o_5$ | 装配上壁板    | $r_5$ | 前部装配人员 |
| $o_6$ | 补铆上下壁板   | $r_6$ | 后部装配人员 |
| $o_7$ | 安装尾部型材   |       |        |
| $o_8$ | 安装前肋     |       |        |
| $o_9$ | 检查外形、偏扭  |       |        |

### 4.1 襟副翼工作站的 AND

依据作业模型的 AND 表示方法, 可建立如图 3 所示的襟副翼工作站的 AND。

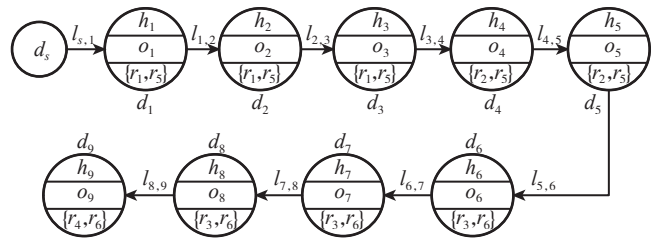


图3 襟副翼工作站的AND

Fig.3 AND of flaperon workstation

### 4.2 襟副翼工作站的 Petri 网模型

以图 3 所示的 AND 为基础, 可进一步生成襟副翼工作站的 Petri 网作业模型, 如图 4 与表 2 所示。

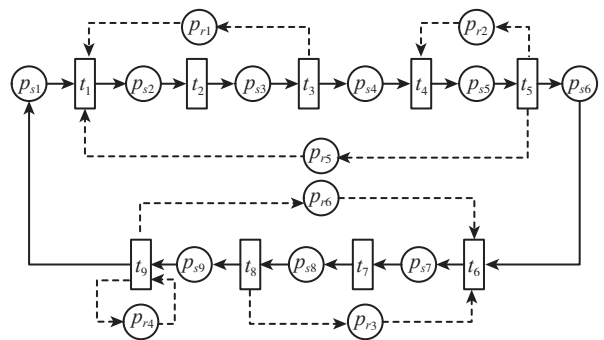


图4 襟副翼工作站的Petri网作业模型

Fig.4 Petri net work model of flaperon workstation

## 5 结论

为有效简化 DAS 建模过程, 降低建模复杂度, 并为 (下转第 78 页)

图5为母材及搅拌摩擦焊接接头断口形貌,试件断裂于焊接热影响区与热机影响区交界处。搅拌摩擦焊拉伸试样断后稍有颈缩,但不明显。图5(a)是母材拉伸断口微观形貌,断裂面与拉伸轴成45°角剪切断裂,断口存在较大韧窝和撕裂棱,显示出材料具有较好的塑性,为塑性断裂。图5(b)是接头拉伸断口微观形貌,断裂面与最大应力方向垂直,微观断口中存在大量的解理断裂及少量浅韧窝,其断裂形式为脆性为主韧性为辅的混合型断裂。

### 3 结束语

(1) 搅拌头形状对接头性能有一定的影响。对于6mm厚的7A60铝合金板材,采用直径12mm内凹型轴肩及三切面搅拌针形式的搅拌头进行焊接时焊缝成形美观,没有缺陷,性能优于其他搅拌头。

(2) 搅拌头的转速与焊接速度的比值影响着焊接线能量。对于本文所针对的研究目标,当比值在1.5~2时焊接接头成型好,抗拉强度均在430MPa以上。

(3) 对7A60铝合金搅拌摩擦焊接头的显微硬度进行了分析,焊缝在焊接过程中发生了较大程度的软化,由于热影响区部分再结晶和过时效组织,使其硬度下降。

(4) 微观断口中存在大量的解理断口以及少量的浅韧窝,其断裂形式为脆性为主,韧性为辅的混合型断裂。

### 参考文献

- [1] Dumont D, DeSchamps A, Brechet Y. On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 356(1-2): 326.
- [2] Wu Y L, Fores F H, Alvarez A, et al. Microstructure and properties of a new super high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy C912. *Materials and Design*, 1997, 18(4-6): 21.
- [3] Thomas W M, Nicholas J C. Friction stir butt welding. England: No 9125978. 8, 1991.
- [4] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 69-75.
- [5] Krishnan K N. On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 327: 246-251.
- [6] 栾国红, North T H, 郭德伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析. *焊接学报*, 2002, 23(6): 62-66.
- [7] Liu H J, Fujii H, Maedaa M, et al. Tensile properties and fracture location of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy. *Journal of Material Processing Technology*, 2003, 142(5): 692-696.
- [8] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, 1997, 36(1): 69-75.

(责编 三丰)

(上接第72页)

表2 襟副翼工作站Petri网作业模型的元素语义

| 变迁             | 状态库所                | 资源库所              |
|----------------|---------------------|-------------------|
| $t_1$ : 装配后腹板  | $p_{s1}$ : 襟副翼装配开始  | $p_{r1}$ : 骨架夹具   |
| $t_2$ : 装配翼梁   | $p_{s2}$ : 后腹板装配完成  | $p_{r2}$ : 总装夹具   |
| $t_3$ : 铆接托板螺母 | $p_{s3}$ : 翼梁装配完成   | $p_{r3}$ : 补铆夹具   |
| $t_4$ : 装配下壁板  | $p_{s4}$ : 铆接螺母完成   | $p_{r4}$ : 检验夹具   |
| $t_5$ : 装配上壁板  | $p_{s5}$ : 下壁板装配完成  | $p_{r5}$ : 前部装配人员 |
| $t_6$ : 补铆上下壁板 | $p_{s6}$ : 上壁板装配完成  | $p_{r6}$ : 后部装配人员 |
| $t_7$ : 安装型材   | $p_{s7}$ : 补铆上下壁板完成 |                   |
| $t_8$ : 安装前肋   | $p_{s8}$ : 安装型材完成   |                   |
| $t_9$ : 检查外形   | $p_{s9}$ : 安装前肋完成   |                   |

系统性能分析和过程改进提供基础,本文提出一种基于AND和Petri网关联映射的DAS建模方法。首先基于DAS的典型特征,采用模块化理念给出了装配作业的分级对象建模框架,并提出作业对象的AND定义和构建步骤。然后建立了装配作业DAS与Petri网结构的关联映射方法,实现了作业模型AND向Petri网的自动转化,为计算机环境下的模型特性验证和参数求解奠定了基础。

### 参考文献

- [1] Hernandez-Matias J C, Vizan A. An integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006(10): 1016-1027.
- [2] 郭春明, 韩之俊. 基于IDEF0的产品生命周期过程建模. *机械制造*, 2005, 43(494): 29-30.
- [3] 牛东, 宁可. 基于IDEF3的过程建模方法及其支持工具. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(12): 30-34.
- [4] Buhr R J A, Casselman R S. *User Case Maps for Object-Oriented Systems*. Prentice-Hall International, Inc. 1996.
- [5] van der Aalst W M P. *A class of Petri Nets for Modeling and Analysing Business Processes*. Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computing Science, 1995.
- [6] Zhou M C, Venkatesh K. *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems-A Petri Net Approach*. Singapore: World Scientific, 1999.
- [7] Frey G. Assembly line sequencing based on Petri-net-invariants. *Control Engineering Practice*, 2000(8): 63-69.
- [8] Zhang W J, Freiheit T. Dynamic scheduling in flexible assembly system based on timed Petri nets model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005(21): 550-558.

(责编 夏宛)