

# Analysis and Application of Process Modeling Method for Flexible Manufacturing System Based on GSPN

Shiyi Gao<sup>1,2</sup>, Mingyang Zhao<sup>1</sup>, Yuanyuan Zou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>) Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 (E-mail: gshiyi@sia.cn)

<sup>2</sup>) Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract**—Based the use of Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN) a process model has been built up on the Flexible Manufacturing System (FMS). The modeling method has been analysed in this paper. Stochastic variables and the exponential distribution have been used to describe the uncertainty properties of the activities, behaviors and states. Also the state space of the research graph has been compressed based on Markov theory to get the steady probability. This model can be used to analyse the utility of the resource, the probability of a fault, the waiting time of a state and the throughput of the modeling in the FSM. This model also provides evidences to evaluate and optimize FMS. In the end, a laser blank welding system has been analysed and realized based on this model.

**Keywords**—Petri net, Flexible manufacturing system, Process model

## 基于 GSPN 的柔性制造系统过程建模方法分析与应用

高世一<sup>1,2</sup> 赵明扬<sup>1</sup> 邹媛媛<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>)中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016 <sup>2</sup>)中国科学院研究生院 北京 100049

**摘要** 柔性制造系统在运行过程中具有随机性特点, 适合采用广义随机 petri 网 (GSPN) 建模方法建立系统过程模型。本文对 GSPN 的过程建模方法进行了分析和研究, 该建模方法使用随机变量, 分布函数来描述过程模型中事件的活动、行为、状态等不确定的特征, 通过马尔可夫链理论对可达图的状态空间进行压缩, 最终求出系统的稳定状态概率。它能分析柔性制造系统的资源利用率、发生故障概率、某一状态等待时间、过程模型吞吐量等性能参数, 为评价和优化柔性制造系统性能提供了依据。以激光拼焊加工制造系统为实例进行了分析和实现。

**关键词** petri 网, 柔性制造系统, 过程建模

### 1. 引言

柔性制造系统 (Flexible manufacturing System, FMS) 通常由机械设备、机器人、传输带等组成, 是用来完成装配、卸载、产品加工等特殊操作的复杂制造系统。它能够根据制造任务或生产环境的变化而迅速进行调整, 对制造环境有着很强的适应性, 表现出极大的柔性。柔性制造系统中的过程控制和建模是近年来新兴的技术, 它对动态制造模型性能的评定和可重构制造系统的产生有很大的推进作用。

Petri 网是一种适用于多种系统, 尤其是离散事件动态系统 (DEDS) 的图形化、数学化建模工具, 它为描述和研究具有并行、异步、分布式和随机性等特征的信息加工系

统提供了强有力的工具。针对赋时 Petri 网所考虑的时间是确定的, 不能描述制造过程中事件活动或状态转换的随机性, Molly、Florin 和 Natkin 等人独立提出了把变迁与随机的指数分布实施相联系起来的思想, 即随机 petri 网 (SPN)。随机 petri 网由于在描述动态离散系统和数学建模方面引入了概率分布, 描述能力得到增强, 但 SPN 的状态空间会随着问题的增大而指数性地增长, 在某种程度上增加了 petri 网分析的难度, 增加了对系统模型性质的判断和计算的困难。而基于同一问题, GSPN 状态空间较 SPN 的状态空间有所减小<sup>[1]</sup>, 因而 GSPN 建模方法在工业应用上得到了推广<sup>[2][3]</sup>。

## 2. GSPN 和过程建模

### 2.1 广义随机 petri 网基本概念

定义：广义随机 petri 网是一个六元组<sup>[5]</sup>， $N_{GSPN} = (P, T, F, W, M_0, \lambda)$ ，其中：

- (1)  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  是库所集合；
- (2)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_n\}$  是变迁集合。变迁集  $T$  划分为两个子集：时间变迁集  $T_t = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  以及瞬时变迁集  $T_i = \{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_n\}$ 。满足条件  $T = T_t \cup T_i, T_t \cap T_i = \emptyset$ ；
- (3)  $F$  为有向弧集， $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ， $F$  中允许有禁止弧；
- (4)  $W$  是权函数， $M_0$  是初始标识；
- (5)  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$  是变迁平均实施速率集合，或者是其它随机分布的特征量；
- (6)  $H$  为在一个标识  $M$  下，由若干个变迁构成的一个可实施变迁集合。

$H$  有如下两种情况：

- ① 如果  $H$  全部由时间变迁组成，则  $H$  中任一时间变迁  $t_i \in H$  实施的概率为：

$$\lambda_i / \sum_{t_k \in H} \lambda_k \quad (1)$$

② 如果  $H$  包含若干个瞬时变迁和若干个时间变迁或不包含时间变迁时，只有瞬时变迁使能，时间变迁不使能。选择瞬时变迁使能，要根据一个概率分布函数来确定。 $H$  中在一个标识  $M$  下，多个可实施的瞬时变迁发生冲突，可以在系统中定义冲突的概率，确定它们之间的实施概率选择。

任意具有有限库所与有限变迁的标识 SPN 都等价于某个一维离散马可夫过程，而有界 SPN 等价于某个有限马可夫过程或马可夫链<sup>[4]</sup>。在 GSPN 中，通常赋予了瞬时变迁较高的优先权，为了解决两个或两个以上瞬时变迁同时激发的冲突，引入了服从离散随机分布的随机开关，这些附加的建模能力并不破坏 GSPN 与马可夫的等价性。由等价的马可夫链得到的稳定状态概率可用于计算库所中的期望托肯 (token) 数、库所占有托肯的概率以及某一变迁使能的概率，赋予托肯实际物理意义，就可以求出柔性制造系统的性能参数：如平均生产率、平均库存水平、以及平均资源利用率，过程模型吞吐量等。

### 2.2 GSPN 稳态概率求解方法

设  $S$  为 GSPN 的状态空间， $S$  分为实存状态集  $T$  和消失状态集  $V$ ，其元素个数分布为  $|S| = K_s$ ， $|T| = K_t$ ， $|V| = K_v$ ，其中， $K_s = K_t + K_v$ ， $S = T + V$ ，且  $T \cap V = \emptyset$ 。

为了保证 GSPN 状态过程存在稳定状态概率分布，通常对 GSPN 做如下假设：

- (1) GSPN 是有界的，即可达集是有穷的；
- (2) 激发速率与时间无关，是非时变的；
- (3) 任何可达标识返回初始标识的概率不为零，即在可达集中的标识相互之间都是可达的。

这样得到的 GSPN 同构于马可夫链 MC。对 MC 进行压缩处理，可去掉消失状态，以计算仅由实存状态构成的状态空间的转移概率矩阵<sup>[5]</sup>。

定义  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ， $1 \leq i \leq n$ ， $1 \leq j \leq n$  为状态空间转移概率矩阵：

- (1) 若  $i \neq j$ ， $a_{ij}$  为从状态  $i$  到状态  $j$  的所有变迁激发率之和；
- (2) 若  $i = j$ ， $a_{ij} = -\sum_{i \neq j} a_{ij}$ 。

设  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n\}$  为马可夫链  $n$  个实存状态稳定概率组成的行向量，由马可夫链理论可得如下方程组：

$$\begin{cases} \pi A = 0 \\ \sum_i \pi_i = 1 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq n, \quad 0 \leq \pi_i \leq 1 \quad (2)$$

该方程组的解即为  $n$  个可达标识的稳定概率  $\pi_i = P[M_i]$  ( $1 \leq i \leq n$ )。

### 2.3 柔性制造系统过程建模及性能评估

为了利用 GSPN 对柔性制造系统性进行分析评估，应首先建立系统的 PN 模型，然后根据初始标识产生可达图，再得出马可夫链并对其进行分析。具体步骤如下：

- (1) 建立系统的 PN 模型，并将指数分布时延与所有变迁关联；
- (2) 产生可达图。将图中的每一弧都给定该弧所对应的变迁的激发率，从而得到马可夫链。将所有标识记为  $M = \{m_0 m_1 m_2 \dots m_{q-1}\}$ ，此处  $q = |R(m_0)|$ ，是状态总数；
- (3) 分析马可夫链，按 2.2 节方法求出变迁激发稳定状态概率，根据文献[6]，利用下列指标对系统性能进行评估：

#### a. 柔性制造系统资源利用率

设  $G$  表示制造系统某一资源的特定操作，如  $G \subset R(m_0)$ ，则：

$$\text{Prob}(G) = \sum_{m_i \in G} \pi_i \quad (3)$$

#### b. 系统产品平均库存

设  $G_{ij} \in R(m_0)$ ，且  $G_{ij}$  中每一标识下库所  $P_i$  中的托肯数是  $j$ ，则  $k$  有界库所中的托肯数的期望值，即该产品的平均库存为：

$$E(m(P_i)) = \sum_{j=1}^k j \text{Prob}(G_{ij}) \quad (4)$$

c. 系统的平均生产率

设  $G_j \in R(m_0)$ , 且  $G_j$  使  $t_j$  使能, 则单位时间内  $t_j$  的平均激发次数为:

$$f_j = \sum_{m_i \in G_j} \pi_i \lambda_{ij} \quad (5)$$

其中,  $\lambda_{ij}$  是  $t_j$  在  $m_i$  下的激发率, 设  $T' \in T$ , 那么该系统的生产率为:

$$g = \sum_{T_j \in T'} f_j \quad (6)$$

### 3. 激光拼焊制造系统实例应用

#### 3.1 实例概述

激光拼焊技术是将两块或多块具有相同或不同机械性能、不同表面状态的钢板使用激光焊接的方法连接成毛坯件, 然后进行整体冲压成轿车结构件。近几年, 激光拼焊技术在欧美等国家得到迅速发展。在汽车工业生产中, 采用激光拼焊技术可以降低车身重量、降低油耗、减少污染排放, 因而, 激光拼焊在降低生产成本、提高生产率、减少材料消耗等方面都有十分重要的作用。

激光拼焊制造系统是将两块不同厚度的钢板采用激光拼焊技术进行自动焊接的生产装备, 是复杂的、柔性要求很高的全自动生产制造系统。使用 GSPN 对该制造系统进行建模, 可以分析其过程参数变化规律, 也可以此为依据获得较高的生产效率、较合理的资源利用率及得到更平衡的流。

#### 3.2 GSPN 过程建模及分析

采用 GSPN 网对激光拼焊制造系统进行数学建模, 可以对系统的主要性能指标: 生产率、生产节拍、产品报废率等有一个准确评估; 同时, 可以分析系统运行的过程参数, 准确估计各状态的逗留时间和转换时间, 如焊接料片在系统某个状态下的流通时间及影响其流通的因素等。通过对系统过程参数的分析, 为评估系统设计、提高系统运行效率提供了理论依据。

激光拼焊线设备主要由上料工作台、上料机器人、定位夹紧机构、激光焊接系统、打浅坑装置、下料机器人、质量检测装置、控制系统和激光器组成。生产工艺流程如图 1 所示, 上料机器人把料片放到上料工作台上, 由传输带运至精密剪切工位, 经过剪切工序, 使料片的端面尺寸精度符合激光焊接要求。把剪后的料片放在焊接工位, 通过定位夹紧机构定位夹紧, 开始焊接, 在焊接过程中质量检测装置对焊缝质量进行实时检测, 焊接完毕, 再对料片打浅坑, 然后下料, 完成整个焊接加工过程。

假设系统上料区有足够的料片, 料片加工时间、料片

运输时间、激光焊接等工序、设备故障及维修均服从指数分布, 且 3 台机器人工作完好, 不会发生故障, 则建立激光焊接制造系统的 GSPN 模型如图 2 所示。对图 2 进行 P 不变量分析, 可知该系统模型为活性的且是有界的。

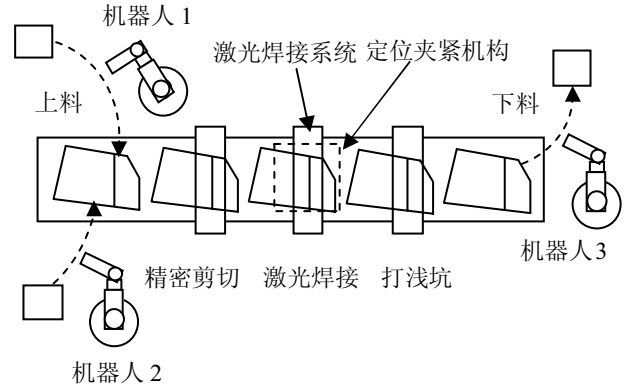


图 1 激光拼焊制造系统工艺流程图

图 2 所示的 GSPN 是由 19 个库所和 16 个变迁组成, 该 GSPN 模型是由 19 个库所和 16 个变迁组成, 其中 5 个立即变迁  $\{t_1, t_3, t_{11}, t_{15}, t_{16}\}$ , 其余为指数变迁。各库所和变迁含义如表 1 和表 2 所示。在初始标识下, 库所  $(p_1, p_2, p_3, p_{10}, p_{11}, p_{15}, p_{17}, p_{19})$  中各包含一个托肯。变迁  $t_1$  激发, 系统获得料片后开始运行。变迁  $t_{16}$  激发, 完成整个激光拼焊加工任务, 加工完毕的毛坯件被下料机器人搬运至半成品存放处, 然后系统返回到初始状态。

表 1 激光拼焊制造系统 GSPN 网模型库所含义

符号	含义
$p_1$	上料区存放待焊接料片
$p_2$	机器人 1 可利用
$p_3$	机器人 2 可利用
$p_4$	料片处于精密剪切状态
$p_5$	剪床发生故障报警
$p_6$	料片处于焊接工位
$p_7$	料片处于激光拼焊状态
$p_8$	质量检测系统检测到焊接故障报警
$p_9$	激光器发生故障
$p_{10}$	激光器处于待工作状态
$p_{11}$	夹紧机构将料片夹紧定位
$p_{12}$	料片处于打浅坑工位
$p_{13}$	料片打浅坑状态
$p_{14}$	浅冲设备出现故障报警
$p_{15}$	打浅坑设备处于待工作状态
$p_{16}$	焊接后的料片处于下料工位
$p_{17}$	机器人 3 可利用
$p_{18}$	料片下料
$p_{19}$	码垛区有容量

表 2 激光拼焊制造系统 GSPN 模型变迁含义

符号	含义
$t_1$	为激光拼焊系统提供料片
$t_2$	剪床平均故障时间
$t_3$	剪床平均维修时间
$t_4$	待焊接料片精剪完毕
$t_5$	待焊接料片开始激光拼焊
$t_6$	激光器平均故障时间
$t_7$	激光器平均维修时间
$t_8$	焊接料片不合格时间
$t_9$	排除焊接料片不合格时间
$t_{10}$	料片焊接完毕
$t_{11}$	料片开始打浅坑工序
$t_{12}$	浅冲设备平均故障时间
$t_{13}$	浅冲设备平均维修时间
$t_{14}$	浅冲工序完毕
$t_{15}$	开始码垛（即下料）
$t_{16}$	码垛完毕

表 3 激光拼焊制造系统 GSPN 状态集

标识	$P_0 \sim P_{19}$	状态
$m_0$	(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1)	消失
$m_1$	(0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1)	实存
$m_2$	(0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1)	消失
$m_3$	(0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1)	实存
$m_4$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,1,0,1)	消失
$m_5$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,1)	实存
$m_6$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1)	消失
$m_7$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0)	实存
$m_8$	(0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1)	实存
$m_9$	(0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1)	实存
$m_{10}$	(0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1)	实存
$m_{11}$	(0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,1,0,1)	实存

由表 3 可知,  $m_0, m_2, m_4, m_6$  为消失状态, 因为系统在该状态下滞留的时间为零, 等效的马可夫链如图 3 所示。该系统即包含实存状态又包含消失状态, 所以它是嵌入马可夫链, 在对其进行性能参数分析之前, 需要压缩处理, 以除去消失状态, 得到退化嵌入马可夫链。通过退化嵌入马可夫链, 由 2.2 介绍的方法可得到转换矩阵  $\mathbf{A}$ 。

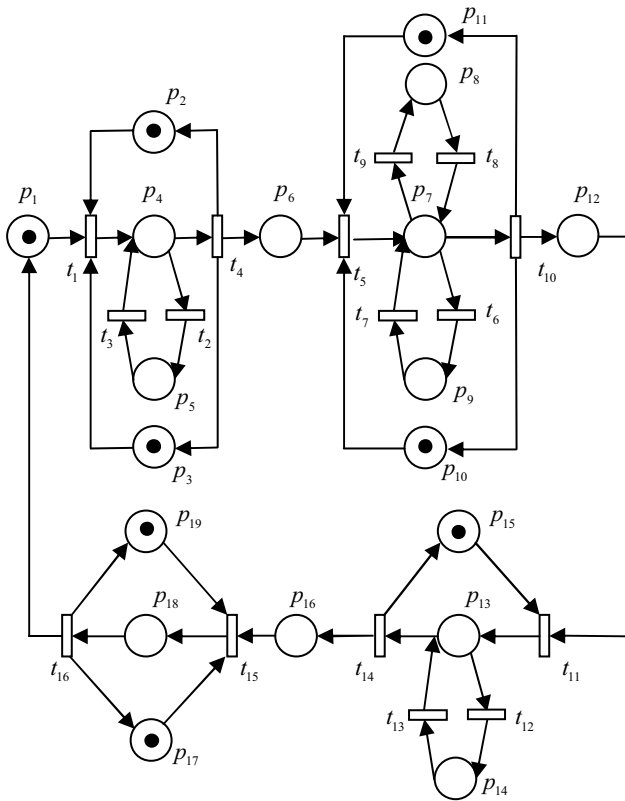


图 2 激光拼焊制造系统 GSPN 模型

由图 2 所示 GSPN 模型图及其初始标识可生成该模型所有状态集, 如表 3 所示。状态集由 8 个实存状态和 4 个消失状态构成。

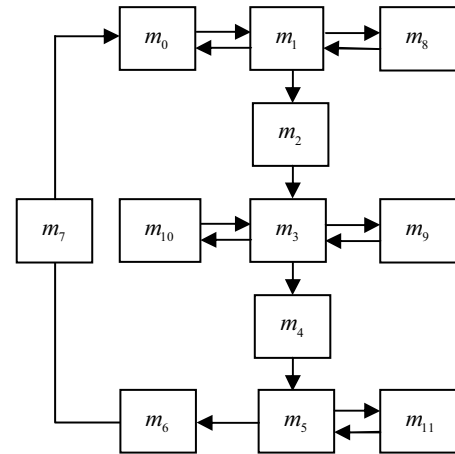


图 3 求解的嵌入马可夫链

令  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$ ,  $\mathbf{B} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$ , 在  $\mathbf{A}$  矩阵的最后一列增加列向量  $[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$  得到  $\mathbf{A}'$ , 可将公式 (1-1) 改为  $\pi \mathbf{A}' = \mathbf{B}$ , 对其求解即可求得系统稳定状态概率  $\pi$ 。

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\lambda_4 - \lambda_8 - \lambda_9 & \lambda_8 & 0 & 0 & \lambda_4 & \lambda_9 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\lambda_6 - \lambda_{11} & -\lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & \lambda_6 & 1 \\ \lambda_{12} & 0 & 0 & -\lambda_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \lambda_5 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \lambda_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{10} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \lambda_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_7 & 1 \end{bmatrix}$$

设  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{12}, \lambda_{13}]$ , 由生产经验统计确定  $\lambda = [10, 2, 2, 4, 8, 2, 2, 8, 10, 4, 2, 2]$ 。

$$\begin{aligned} \text{可得: } P[m_1] &= 0.0455 & P[m_3] &= 0.0568 \\ P[m_5] &= 0.2273 & P[m_7] &= 0.2273 \\ P[m_8] &= 0.0455 & P[m_9] &= 0.0284 \\ P[m_{10}] &= 0.1420 & P[m_{11}] &= 0.2273 \end{aligned}$$

基于这些稳态状态概率可以求出激光拼焊制造系统如下指标:

(1) 平均生产率和生产节拍

变迁  $t_{16}$  激发表示焊接后的料片被机器人 3 搬运到下料工作区, 完成整个加工任务, 该变迁在标识  $m_7$  下使能, 对应的库所为  $p_{18}$ 。系统的平均生产率由公式 (5) 可得:

$$g = 0.2273 \times 2 = 0.4546 \text{ (件/单位时间)}$$

生产节拍  $T = 1/g = 2.199$  (时间/件)

(2) 运行过程发生故障概率

$p_5, p_8, p_{14}$  分别表示剪床发生故障、激光器发生故障、打浅坑设备发生故障使系统处于停顿状态。对应的标识为  $m_9, m_{10}, m_{11}$  激发概率分别为 0.2, 0.1, 0.1。整个系统发生故障的概率为:

$$\begin{aligned} \text{Prob}(G) &= 0.0284 \times 0.2 + 0.1420 \times 0.1 + 0.2273 \times 0.1 \\ &= 0.04646 \end{aligned}$$

(3) 工艺流程资源利用率

$p_7$  表示激光处于焊接状态, 激光器正常使用, 对应的标识为  $m_3$ , 即  $G = \{m_3\}$ , 根据公式 (3) 可知激光器的利用率为 0.0568, 同理可知打浅坑设备和料片下料机器人的资源利用率均为 0.2273。

(4) 状态过程概率密度函数

在稳定状态下, 过程状态库所中包含的标记的数量为概率密度函数, 记为  $P[m(p) = i] = \sum_j P[m_j]$ , 其中  $p$  为库所,  $i$  为标记数量, 且  $m_j(p) = i$ 。

$p_5, p_8, p_{14}$  代表激光拼焊系统在不同情况下发生故障的状态, 其概率密度函数为:

$$\begin{aligned} P[m(p_5) = 1] &= 0.0284 & P[m(p_5) = 0] &= 0.9752 \\ P[m(p_8) = 1] &= 0.1420 & P[m(p_8) = 0] &= 0.8580 \\ P[m(p_{14}) = 1] &= 0.2273 & P[m(p_{14}) = 0] &= 0.7727 \end{aligned}$$

(5) 运行过程下一工序的等待时间

令  $t$  为标识  $m_i$  到  $m_j$  的转化时间, 它服从指数分布, 平均等待时间为  $t(m_i | m_j) = 1/\lambda_{ij}$ 。如料片精剪加工送至缓冲区库所  $p_6$  时,  $t_5$  的激发率为  $\lambda_5 = 8$ , 故激光焊接的等待时间为 0.125。

### 3.3 结果分析

由激光拼焊制造系统 GSPN 模型得到的上述参数, 可以评价系统工艺路径的优劣, 对给定的资源配置进行优化

和评估该系统的可靠性。例如,  $m_3$  标识为激光焊接过程, 资源利用率较低, 为影响系统的瓶颈资源, 为提高系统的生产率, 需要增加该资源的利用率。系统发生故障概率、工序等待时间、状态过程概率密度函数等参数清晰的描述了系统运行过程状态, 为系统仿真和试验提供了数据。

## 4. 结论

现代制造系统集成自动化技术、信息技术、网络技术于一体, 是复杂的生产系统, 对其过程建模的难度也大大增加。为了使制造系统满足设计要求, 必须通过各种数学方法建立符合实际需要的系统模型。GSPN 是描述离散事件动态系统的有力工具。讨论了基于 GSPN 制造系统过程建模的方法, 不但可以分析系统的过程性能参数, 而且为改进系统性能, 系统优化和仿真以及系统重组提供了数学依据。以激光拼焊制造系统为实例进行了分析。GSPN 是系统建模的有力工具, 但较复杂的系统, 模型的库所和变迁较多, 状态空间呈指数增长, 因此, 在模型状态空间的压缩处理上有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] M. Ajmone Marsan, G. Balbo and G. conte, "A class of generalized Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems," *ACM Trans. Comput. Sys.*, Vol. 2, no.2, pp. 93-122, 1984
- [2] B. Mazigh, J. Gresser and F. Simon, "GSPN modelling methods for performance and dependability evaluation of a real-life flexible manufacturing system," *Proc. IEEE*, vol. 7, pp.290-299, Oct. 1993
- [3] T. Murata, "Petri nets: properties, analysis and applications," *Proc. IEEE*, vol. 77, pp. 540-550, Apr. 1989
- [4] M K. Molloy, "performance analysis using stochastic Petri nets," *IEEE Transactions on computer*, vol.31, pp913-917, Sep. 1982
- [5] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价. 北京:清华大学出版社, 2005
- [6] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用. 北京:机械工业出版社, 2004