



## 基于平行Petri网的制造系统调度与控制一体化方法

李大成 罗继亮 孙莎莎 聂维余 聂卓 方慧娟

### The Integrated Method of Scheduling and Control for Manufacturing Systems Based on Parallel Petri Nets

LI Da-Cheng, LUO Ji-Liang, SUN Sha-Sha, NIE Wei-Yu, NIE Zhuo-Yun, FANG Hui-Juan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200842>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 时滞忆阻神经网络动力学分析与控制综述

An Overview of Dynamics Analysis and Control of Memristive Neural Networks With Delays

自动化学报. 2021, 47(4): 765–779 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200691>

### 高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望

Integration of Train Control and Online Rescheduling for

High-speed Railways: Challenges and Future

自动化学报. 2019, 45(12): 2208–2217 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2019.y000004>

### 云控制系统并行任务分配优化算法与并联控制

Parallel Task Assignment Optimization Algorithm and Parallel Control for Cloud Control Systems

自动化学报. 2017, 43(11): 1973–1983 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2017.c160504>

### 工业网络系统的感知-传输-控制一体化:挑战和进展

Towards the Integration of Sensing, Transmission and Control for Industrial Network Systems: Challenges and Recent Developments

自动化学报. 2019, 45(1): 25–36 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180484>

### 车联网:基于ACP的智能车辆网联管理与控制

Parallel Internet of Vehicles: The ACP-based Networked Management and Control for Intelligent Vehicles

自动化学报. 2018, 44(8): 1391–1404 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c170463>

### 批处理机上具有两类释放时间的工件集竞争调度问题

The Competing Job Sets Scheduling Problems With Two Types of Release Dates on Batching-Machine

自动化学报. 2020, 46(1): 168–177 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c170536>

# 基于平行 Petri 网的制造系统调度与控制一体化方法

李大成<sup>1,2</sup> 罗继亮<sup>1,2</sup> 孙莎莎<sup>1,2</sup> 聂维余<sup>1,2</sup> 聂卓赞<sup>1,2</sup> 方慧娟<sup>1,2</sup>

**摘要** 为了消除制造系统调度层与控制层之间的隔阂, 实现对生产事件快速灵活响应, 本文提出了一种调度与控制一体化的方法. 首先, 定义了一种新型 Petri 网模型, 即平行 Petri 网, 从而集成地描述了传感器、执行器、任务和资源信息, 构建制造系统的信息物理系统模型; 其次, 提出了一种从平行 Petri 网到赋时 Petri 网的抽象简化方法, 大规模压缩优化调度所需搜索的状态空间; 再次, 定义了策略 Petri 网以描述最优调度策略. 最后, 给出了平行 Petri 网与策略 Petri 网同步执行算法, 使得平行 Petri 网与物理系统同步执行.

**关键词** 调度, 控制, 平行 Petri 网, 赋时 Petri 网

**引用格式** 李大成, 罗继亮, 孙莎莎, 聂维余, 聂卓赞, 方慧娟. 基于平行 Petri 网的制造系统调度与控制一体化方法. 自动化学报, 2023, 49(4): 845–856

**DOI** 10.16383/j.aas.c200842

## The Integrated Method of Scheduling and Control for Manufacturing Systems Based on Parallel Petri Nets

LI Da-Cheng<sup>1,2</sup> LUO Ji-Liang<sup>1,2</sup> SUN Sha-Sha<sup>1,2</sup> NIE Wei-Yu<sup>1,2</sup> NIE Zhuo-Yun<sup>1,2</sup> FANG Hui-Juan<sup>1,2</sup>

**Abstract** In order to eliminate the gap between the scheduling layer and the control layer and achieve fast and flexible response to production events of manufacturing systems, an integrated method of scheduling and control is proposed in this paper. First, a novel Petri-net model that is called a parallel Petri net is defined, which integrates sensors, actuators, tasks and resources to establish the cyber-physical system model of a manufacturing system. Secondly, a method of transforming parallel Petri nets to timed Petri nets is proposed to much compress the state space required to be searched for optimal scheduling. Thirdly, a strategy Petri net is defined to describe an optimal scheduling strategy. Finally, the algorithm for synchronizing executions of a parallel Petri net and a strategy Petri net is given, which realizes the synchronous execution of parallel Petri nets and physical systems.

**Key words** Scheduling, control, parallel Petri nets, timed Petri nets

**Citation** Li Da-Cheng, Luo Ji-Liang, Sun Sha-Sha, Nie Wei-Yu, Nie Zhuo-Yun, Fang Hui-Juan. The integrated method of scheduling and control for manufacturing systems based on parallel Petri nets. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(4): 845–856

随着工业 4.0 的发展, 越来越多的设备集成在同一个工业互联网中, 构成了大规模的信息物理系统, 状态空间组合式快速增长; 与此同时, 传统制造的单一性已经无法满足市场需要, 订单趋向于小批量、定制化和多批次, 生产过程的动态变化日趋剧

烈; 无论是调度策略的求解, 还是执行控制代码设计和调试, 都面临指数级计算复杂性的挑战, 加上调度层和控制层相互割裂, 很难满足信息物理系统对生产事件的快速灵活响应的要求.

平行系统<sup>[1]</sup>的提出为信息物理系统的实现提供了可行方案, 信息和物理虚实结合, 在信息空间中计算决策, 在物理世界控制执行<sup>[2]</sup>. 这意味着可以将调度策略求解和控制指令计算作为虚拟对象, 自动化装置作为实体对象, 虚拟对象与实体对象平行演化, 在统一的时空里实现调度优化和控制执行.

Petri 网能够描述在信息物理系统中的顺序、并行、同步和异步行为, 是刻画信息空间的优秀建模工具. 但是如果用来做控制, Petri 网缺少与实体对象之间的输入输出接口; 如果用来做调度, 又缺少成本信息, 所以需要扩展 Petri 网语法语义.

文献 [3] 研究了 Petri 网的活性问题, 用于设计

收稿日期 2020-10-10 录用日期 2021-02-09

Manuscript received October 10, 2020; accepted February 9, 2021

国家自然科学基金 (61973130), 福建省自然科学基金 (2017J01117), 华侨大学研究生科研创新基金 (18014082009) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61973130), Natural Science Foundation of Fujian Province (2017J01117), and Postgraduates' Innovative Fund in Scientific Research of Huaqiao University (18014082009)

本文责任编辑 鲁仁全

Recommended by Associate Editor LU Ren-Quan

1. 华侨大学信息科学与工程学院 厦门 361021 2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心 厦门 361021

1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021 2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021

更高允许度的死锁预防的控制器. 文献 [4] 提出了将原始约束转化为可容许约束的方法, 克服了不可控或不可观测变迁给控制器带来的设计困难. 这些方法的提出都为设计信息物理系统的 Petri 网模型提供了理论支撑. 同时为了解决 Petri 网在输入输出上的局限性, 研究者们对 Petri 网做了相应扩展<sup>[5-8]</sup>. 文献 [9] 利用控制解释 Petri 网对期望的闭环系统行为进行建模, 从模型中提取离散事件控制器以便在可编程逻辑控制器 (Programmable logical controller, PLC) 上实现控制逻辑. 文献 [10] 提出了分布式的控制方法, 利用控制解释 Petri 网建立中央控制器, 为具有输入输出信号的本地控制器分配控制任务. 文献 [11] 研究了有色 Petri 网, 其中有色的托肯代表了产品类型以及状态变化时的相关信息, 减小了模型的规模. 文献 [12] 给出了梯形图到普通 Petri 网的转化算法, 并通过生成的可达图来定位梯形图中的竞争路径. 文献 [13] 则通过将 Petri 网与一阶逻辑相结合构建了系统执行框架用于实际的制造系统中. 文献 [14-15] 分别给出了扩展 Petri 网到现场可编程门阵列 (Field-programmable gate array, FPGA) 和 PLC 的翻译方法, 加快了程序开发的进程. 但以上工作中, Petri 模型仍需要翻译成控制语言, 不足以描述平行系统, 于是学者在文献 [16] 中提出了平行 Petri 网, 在原有网结构的基础上定义了动作函数和激活函数, 可以描述平行系统物理层中各单元的行为, 同时封装的传感和执行变量为信息层和物理层的交互提供了通道.

如果要考虑优化问题, 那么就需要将成本因素扩展到 Petri 网模型当中. 通过给库所或变迁赋上时间, 引入赋时 Petri 网的概念, 就可以形式化地给出调度优化问题<sup>[17-19]</sup>, 即通过搜索赋时 Petri 网可达图, 找到最小执行时间, 求解出系统的最优调度策略. 文献 [20-21] 分析了网结构的行为属性, 针对定时离散事件系统具有工作周期的特点, 研究了赋时事件图中所有可能的循环来进行调度. 但现有研究更多的是将赋时 Petri 网与智能搜索算法相结合来进行调度. 文献 [22] 率先将赋时 Petri 网与 A\* 算法相结合, 该方法不需要通过遍历可达图, 而是通过构建启发式函数来求解调度策略. 文献 [23] 通过开发新的启发式函数, 考虑了系统中的托肯剩余时间, 带有权重的弧以及多资源情况, 扩大了 A\* 算法在赋时 Petri 网中的使用范围. 文献 [24] 利用集束搜索算法在可达图每一层仅扩展设定宽度的结点, 使得搜索以受控的方式向目标结点前进, 大大节省了搜索时间. 文献 [25] 则利用遗传算法对赋时 Petri 网进行调度, 并设计了控制器避免系统死锁. 文献 [26] 通过智能体综合考虑了系统 Petri 网模型,

环境信息以及满意度模型实现了对任务的规划调度. 为提高算法搜索效率, 文献 [27-28] 中对复杂系统进行了模块化建模, 提高了大型系统的 Petri 网设计效率.

在前期工作<sup>[16]</sup>中, 我们并未考虑调度优化问题. 本文大幅扩展了平行 Petri 网的定义, 分别给变迁和动作函数加上了标签和时间信息, 使之不局限于对系统的控制, 同样也适用于调度, 从而构建出制造系统的平行 Petri 网模型. 同时通过简化压缩平行 Petri 网, 仅保留原有模型中调度相关的结构和信息, 使其转化为赋时 Petri 网, 利用赋时 Petri 网求解出最优调度策略, 将其描述为策略 Petri 网, 最后借助同步算法使得系统平行网与策略网同步执行, 在此基础上设计了 C 和 PLC 程序, 借助 TwinCAT 平台, 实现了平行 Petri 网对物理设备的感知、控制和执行.

本文结构如下: 第 1 节回顾了标签赋时 Petri 网和 TwinCAT 的相关概念; 第 2 节定义了平行 Petri 网; 第 3 节给出了平行 Petri 网的赋时 Petri 网和策略 Petri 网的生成方法; 第 4 节给出了调度与控制一体化的执行算法; 第 5 节进行了实验验证; 第 6 节对全文进行了总结.

## 1 基本概念

Petri 网结构是一个四元组  $N = (P, T, F, W)$ ,  $P$  和  $T$  分别为库所集和变迁集;  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  是连接库所和变迁的有向弧集合;  $W: F \rightarrow \{1, 2, \dots\}$  是一个映射, 为  $F$  中每条弧指定一个正整数权重. 在本文中, 所有弧的权重默认为 1; 令  $x \in P \cup T$  是 Petri 网  $N$  的节点,  $x$  的前置集  $\bullet x$  定义为  $\bullet x = \{y \in P \cup T | (y, x) \in F\}$ ,  $x$  的后置集  $x^\bullet$  定义为  $x^\bullet = \{y \in P \cup T | (x, y) \in F\}$ ;  $C^-$  和  $C^+$  是 Petri 网结构的前置和后置关联矩阵,  $\forall p \in P, \forall t \in T, (p, t) \in F \Rightarrow C^-(p, t) = W(p, t), (p, t) \notin F \Rightarrow C^-(p, t) = 0; (t, p) \in F \Rightarrow C^+(p, t) = W(p, t), (t, p) \notin F \Rightarrow C^+(p, t) = 0$ .  $C = C^+ - C^-$  表示其关联矩阵. Petri 网记作  $G = (N, m_0)$ , 其中  $m_0$  为初始标识. 如果  $m \geq C^-(\cdot, t)$ , 那么  $t$  在标识  $m$  下状态使能, 用  $m[t]$  表示, 状态使能的变迁  $t$  可以激发, 生成新的标识  $m' = m + C(\cdot, t)$ , 记作  $m[t]m'$ .  $T^*$  是  $T$  中的变迁组成的变迁串的集合.  $m[\sigma]$  表示变迁激发序列  $\sigma = t_{\sigma_1}t_{\sigma_2}\dots t_{\sigma_k}, k \in \{1, 2, \dots\}$ , 在  $m$  处状态使能.  $m[\sigma]m'$  表示  $m$  经过激发序列  $\sigma$  得到新的标识  $m'$ . Petri 网在初始标识处状态使能的激发序列集合为  $L(G) = \{\sigma \in T^* | m_0[\sigma]\}$ , 可达标识集为  $R(G) = \{m | \sigma \in L(G), m_0[\sigma]m\}$ .

标签 Petri 网定义为  $G_l = (N, m_0, \Sigma, l)$ , 其中

$N$  为一个 Petri 网结构,  $\Sigma$  为标签的集合, 每个标签为一个字母;  $l: T \rightarrow \Sigma \cup \{\varepsilon\}$  是将标签映射到变迁的标签函数, 每个变迁的标签都是  $\Sigma$  中的一个字母或者空字符  $\varepsilon$ . 在本文中, 假设任意两个变迁  $t_1$  和  $t_2$ , 如果  $l(t_1) \neq \varepsilon \wedge l(t_2) \neq \varepsilon$ , 那么  $l(t_1) \neq l(t_2)$ .  $\Sigma^* = \Sigma \cup \{\varepsilon\}$  为标签组成的标签串的集合. 存在一个自然映射关系:  $\rho: T^* \rightarrow \Sigma^*$ , 其中任意变迁序列  $\sigma = t_1 t_2 \cdots t_n$ ,  $\rho(\sigma) = l(t_1) l(t_2) \cdots l(t_n)$ .

库所赋时 Petri 网表示为  $G_d = (N, m_0, d)$ ,  $d: P \rightarrow \{0\} \cup \mathbf{R}^+$  表示附在库所上的时延函数, 时延可以是零或正实数. 本文中涉及的赋时 Petri 网遵从如下假设: 如果一个库所的时延不为 0, 那么该库所的最大标识为 1. 对于赋时 Petri 网的任意变迁  $t$ , 如果在当前标识下是使能的, 并且它的每一个输入库所中的托肯在其所在的库所的停留时间超过该库所的时延, 那么该变迁可以激发.

TwinCAT<sup>[29]</sup> 是基于 Windows 操作系统的 PLC 控制平台, 并为 C/C++ 提供了接口, 可以实现 C/C++ 与 PLC 语言的联合编程.

## 2 平行 Petri 网

在学者提出的平行 Petri 网<sup>[6]</sup>中, 解决了与环境交互的问题, 但缺乏调度相关信息, 需要加入成本因素, 扩展平行 Petri 网的定义.

**定义 1.** 平行 Petri 网是一个 11 元组  $G = (N, m_0, \Sigma_I, \Sigma_O, \Sigma_A, \Sigma_L, \Sigma_{id}, \lambda_A, \lambda_L, \lambda_{id}, \lambda_z)$ , 其中:

- 1)  $N$  是普通 Petri 网结构.
- 2)  $m_0$  是初始标识.
- 3)  $\Sigma_I$  为输入字母表, 每个元素是一个来自传感器的输入信号.
- 4)  $\Sigma_O$  为输出字母表, 每个元素是一个送往执行机构的输出信号.
- 5)  $\Sigma_{id}$  为标签字母表, 其中每个元素是一个标签符号, 用以指定系统事件的身份.

6)  $\lambda_A: P \rightarrow \Sigma_A$  是将库所集映射到动作集的函数, 它给每个库所附一个动作函数. 动作函数是从输入信号集到输出信号集的映射, 即  $2^{\Sigma_I} \rightarrow \Sigma_O$ , 动作函数的集合为  $\Sigma_A$ ; 给定任意库所  $p$ , 如果  $\lambda_A(p) \neq \emptyset$ , 那么称库所  $p$  为动作库所; 否则, 称其为非动作库所.

7)  $\lambda_L: P \rightarrow \Sigma_L$  是将库所集映射到激活函数集的函数, 它给每个库所附一个激活函数. 激活函数是用来终止动作函数执行和激活变迁执行的判断条件, 是输入和输出信号集的集合到 0 或 1 的映射, 即  $2^{\Sigma_I \cup \Sigma_O} \rightarrow \{0, 1\}$ ,  $\Sigma_L$  为激活函数的集合. 且  $\forall p \in P$ :  $\lambda_A(p) = \alpha \rightarrow \lambda_L(p) = \bar{\alpha}$ .

8)  $\lambda_{id}: T \rightarrow \Sigma_{id} \cup \{\varepsilon\}$  是将变迁映射到标签的函数, 其中, 每一个变迁的标签为一个字母或者一个空字符  $\varepsilon$ . 每个变迁至少有一个标签符号, 该标签不与其他变迁共享.  $\forall t_i, t_j \in T$ ,  $\lambda_{id}(t_i) = \lambda_{id}(t_j) = \varepsilon$  或  $\lambda_{id}(t_i) \neq \lambda_{id}(t_j)$ .

9)  $\lambda_z: \Sigma_A \rightarrow \{0\} \cup \mathbf{R}^+$  表示每个动作函数对应的动作的执行时间.

**定义 2.** 给定平行 Petri 网当前获得的标签集合  $\Sigma_E$  和任意变迁  $t$ , 如果  $\lambda_{id}(t) \in \Sigma_E$ , 并且  $\forall p \in \bullet t$ :  $\lambda_L(p) = 1$ , 那么变迁  $t$  是同步使能的.

**定义 3.** 平行 Petri 网的演化规则定义如下:

- 1) 一旦动作库所被标识, 立即执行附在库所上的动作函数和激活函数;
- 2) 如果一个变迁既是状态使能, 又是同步使能, 则该变迁是使能的;
- 3) 只有使能的变迁可以激发, 且任何变迁  $t$  的激发满足状态方程  $m' = m + C(\cdot, t)$ .

根据定义 1~3, 我们描述了平行 Petri 网的定义及其运行规则: 首先, 在库所上附加了动作函数和激活函数, 从而利用动作函数驱动执行机构, 利用激活函数扫描传感器信号实现 Petri 网与物理实体的交互; 其次, 在变迁上附加了标签字符, 从而可以实现 Petri 网与信息空间的其他虚拟实体 (比如优化策略) 之间的同步; 最后, 动作函数上附加了执行时间属性, 从而可以描述系统运行的时间成本, 为优化调度提供了依据.

生产制造等物理信息系统是由众多的单元按照一定的业务逻辑耦合而成的, 因此, 可以采用模块化的方法为其设计平行 Petri 网模型. 因篇幅限制, 本文不再对平行 Petri 网的设计问题展开讨论, 在第 5 节将利用一个实验示例演示其设计过程.

## 3 平行 Petri 网的优化调度方法

### 3.1 平行 Petri 网的抽象和简化

平行 Petri 网为信息物理系统搭建了严谨的数学模型, 而且模型中包含了时间等成本信息. 这意味着可以利用它来研究优化调度问题.

根据平行 Petri 网的定义, 它的运行需要来自物理世界的同步信号, 因此无法直接作为优化的仿真模型, 而且模型中存在大量与优化调度不相关的冗余结构, 状态空间会组合式快速增长. 虽然目前智能搜索算法可以避免遍历可达图, 但其搜索效率难以保证. 通过网结构的简化技术可以指数地减小可达图的规模, 是降低计算复杂性的有效手段. 因此需要对平行 Petri 网进行简化, 抽象仅保留调度

相关结构和信息的仿真模型. 而赋时 Petri 网恰好满足这个要求.

**定义 4.** 如果一个平行 Petri 网存在有序三元组  $(p, t, p')$ , 且满足: 1)  $\bullet t = \{p\}$ ; 2)  $t \bullet = \{p'\}$ ; 3)  $|\bullet p| = |p \bullet| = 1$ ; 4)  $|\bullet p'| = |p' \bullet| = 1$ ; 5)  $m_0(p) = m_0(p') = 0$ , 那么称该三元组为一个融合结构, 记作  $\omega$ . 融合结构的集合记作  $\Omega$ .

**定义 5.** 给定平行 Petri 网  $G$  和它的一个融合结构  $\omega = (p, t, p')$ , 在网中设计库所  $p_\omega$ , 如果满足下列条件: 1) 对于  $p$  的输入变迁  $t'$ , 添加一个从  $t'$  到  $p_\omega$  的有向弧, 即  $(t', p_\omega)$ ; 2) 对于  $p'$  的输出变迁  $t''$ , 添加一个从  $p_\omega$  到  $t''$  的有向弧, 即  $(p_\omega, t'')$ , 那么  $p_\omega$  称为  $\omega$  的宏库所.

根据定义 4 和定义 5, 可以设计将平行 Petri 网简化为赋时 Petri 网的算法.

**算法 1.** 平行 Petri 网到赋时 Petri 网的简化算法

**输入.** 平行 Petri 网  $G = (N, m_0, \Sigma_I, \Sigma_O, \Sigma_A, \Sigma_L, \Sigma_{id}, \lambda_A, \lambda_L, \lambda_{id}, \lambda_z)$ .

**输出.** 赋时 Petri 网  $\bar{G} = (\bar{N}, \bar{m}_0, \bar{\lambda}_d)$ .

```

1 for all  $p \in P$  do
2   if  $\lambda_A(p) = \emptyset$  then
3      $\lambda_d(p) = 0$ ;
4   else
5      $\lambda_d(p) = \lambda_z(\lambda_A(p))$ ;
6   end if
7 end for
8  $\bar{N} = N$ ;
9 while  $\Omega \neq \emptyset$  do
10  从融合结构的集合  $\Omega$  中选择任意一个  $\omega = (p, t, p')$ ;
11  根据定义 5 设计一个宏库所  $p_\omega$ , 即  $\bar{P} = \bar{P} \cup \{p_\omega\}$ ,  $\bar{F} = \bar{F} \cup \{(t_1, p_\omega), (p_\omega, t_2)\}$ , 其中  $t_1$  是  $P$  的输入变迁,  $t_2$  是  $P$  的输出变迁;
12  从  $\bar{N}$  中删除融合结构  $\omega$ ;
13   $m_0(p_\omega) = 0$ ;
14   $\lambda_d(p_\omega) = \lambda_d(p) + \lambda_d(p')$ ;
15   $\Omega = \Omega - \{\omega\}$ ;
16 end while
17 for all  $p \in \bar{P}$  do
18   $\bar{m}_0(p) = m_0(p)$ ;
19   $\bar{\lambda}_d(p) = \lambda_d(p)$ ;
20 end for
    
```

算法 1 描述了平行 Petri 网到赋时 Petri 网的简化过程, 包含两个部分: 首先, 删除控制相关信息; 其次, 将融合结构压缩为宏库所. 下面以图 1 为例阐述整个简化过程的细节:

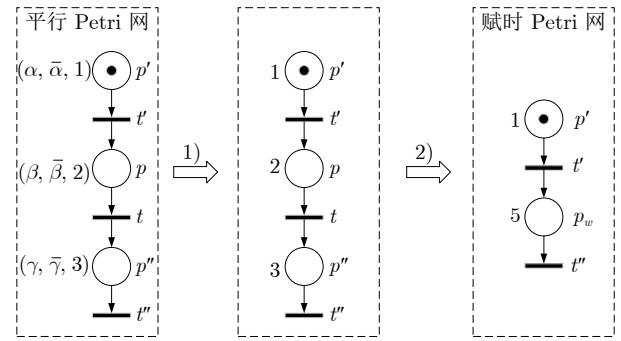


图 1 平行 Petri 网到赋时 Petri 网简化过程

Fig.1 Process of simplifying parallel Petri nets into timed Petri nets

1) 首先, 给库所附加时延. 对于动作库所, 其时延为对应动作函数的执行时间; 对于非动作库所, 其时延为 0. 其次, 移除平行 Petri 网各库所上的动作函数和激活函数一类的控制信息. 如图 1 中的平行 Petri 网所示, 库所  $p'$  的动作函数  $\lambda_A(p') = \alpha$ , 激活函数  $\lambda_L(p') = \bar{\alpha}$ , 动作函数执行时间  $\lambda_z(\alpha) = 1$ ; 所以赋给库所  $p'$  的时延  $\lambda_d(p') = \lambda_z(\alpha) = 1$ . 然后, 去除  $p'$  的动作函数  $\alpha$  和激活函数  $\bar{\alpha}$ . 库所  $p$  和  $p''$  同理.

2) 对于网中的融合结构, 将其压缩为宏库所, 宏库所的时延为原有库所时延之和, 托肯数为 0; 对于非融合结构, 则保持不变. 从图 1 中可以看出, 网中存在融合结构  $(p, t, p'')$ , 所以将库所  $p$  和  $p''$  以及变迁  $t$  压缩为宏库所  $p_\omega$ , 并添加有向弧  $(t', p_\omega)$  和  $(p_\omega, t'')$ . 宏库所的时延为 5、 $p$  和  $p''$  的时延之和. 对于库所  $p'$  和变迁  $t'$ , 保持不变. 由此即可简化为赋时 Petri 网模型.

**定义 6.** 给定一个信息物理系统的平行 Petri 网, 如果它的一个标识表示这个信息物理系统任务完成时的状态, 则该标识称为平行 Petri 网的目标标识.

**定义 7.** 给定一个平行 Petri 网和它的目标标识  $m_g$ , 如果标识  $\bar{m}_g$  是赋时 Petri 网的一个标识, 并且  $\forall p \in \bar{P} : \bar{m}_g(p) = m_g(p)$ , 那么  $\bar{m}_g$  就是赋时 Petri 网的目标标识.

**定义 8.** 给定一个平行 (赋时) Petri 网, 如果标识变迁的交替序列  $\pi = m_{\pi_0}[t_{\pi_1}]m_{\pi_1}[t_{\pi_2}] \cdots m_{\pi_{n-1}}[t_{\pi_n}]m_{\pi_n}$  满足下列条件: 1)  $m_{\pi_0} = m_0$ ; 2)  $m_{\pi_{k-1}} \geq C^-(\cdot, t_k)$ ,  $m_{\pi_k} = m_{\pi_{k-1}} + C(\cdot, t_k)$ ,  $1 \leq k \leq n$ ; 3)  $m_{\pi_n}$  是一个平行 (赋时) Petri 网的目标标识, 那么称  $\pi$  为平行 (赋时) Petri 网的一条执行轨迹. 变迁序列  $t_{\pi_1}t_{\pi_2} \cdots t_{\pi_n}$  称为  $\pi$  的激发序列, 记作  $\pi^\uparrow$ .  $\pi$  的运行时间记作  $d(\pi)$ .

**定义 9.** 给定一个平行 (赋时) Petri 网执行轨迹的集合  $\Pi$ , 如果一条执行轨迹的执行时间最小, 那么称其为最优执行轨迹, 平行 (赋时) Petri 网的最优执行轨迹的集合记作  $\Pi^*$ .

**定义 10.** 给定一个平行 Petri 网及其赋时 Petri 网, 如果  $\pi$  是平行 Petri 网的一条执行轨迹,  $\bar{\pi}$  是赋时 Petri 网的一条执行轨迹, 并且从  $\pi$  的激发序列  $\pi^\uparrow$  中剔除不存在于赋时 Petri 网的变迁后的变迁序列等于  $\bar{\pi}$  的激发序列, 那么  $\pi$  和  $\bar{\pi}$  是同步的.

**定理 1.** 给定任意平行 Petri 网和其赋时 Petri 网, 下列结论成立: 1) 对于平行 Petri 网上的每一条执行轨迹, 赋时 Petri 网上都有一条唯一的执行轨迹与之同步; 2) 对于赋时 Petri 网上的一条执行轨迹, 平行 Petri 网上都有至少一条执行轨迹与之同步.

**证明.** 假设平行 Petri 网的执行轨迹为  $\pi = m_0[\pi^\uparrow]m_g$ , 其中,  $\pi^\uparrow = t_{\pi_1}t_{\pi_2}t_{\omega_1}t_{\omega_2}\cdots t_{\omega_m}t_{\pi_n}$ ,  $t_{\omega_m} \in \omega_m$ ,  $m \in \{1, 2, \cdots\}$ ; 简化得到的赋时 Petri 网的执行轨迹为  $\bar{\pi} = \bar{m}_0[\bar{\pi}^\uparrow]\bar{m}_g$ , 其中,  $\bar{\pi}^\uparrow = t_{\pi_1}t_{\pi_2}\cdots t_{\pi_n}$ . 根据算法 1 和定义 4,  $m_0$  和  $m_g$  不是融合结构的一部分,  $\exists p_0, p_g \in \bar{P}$ ,  $\bar{m}_0(p_0) = m_0(p_0)$ ,  $\bar{m}_g(p_g) = m_g(p_g)$ . 所以只需证明激发序列  $\pi^\uparrow = \bar{\pi}^\uparrow$ , 即可证明  $\pi$  和  $\bar{\pi}$  是同步的. 因为  $t_{\omega_m}$  是  $\pi$  中的变迁但不是  $\bar{\pi}$  中的变迁, 同时也是融合结构  $\omega_m$  的组成元素, 将平行 Petri 网简化为赋时 Petri 网时需要压缩融合结构, 压缩  $\omega_m$  意味着  $t_{\omega_m}$  被移除, 所以移除  $t_{\omega_m}$  后得到  $\pi = \bar{\pi}$ , 根据定义 10,  $\pi$  和  $\bar{\pi}$  是同步的. 而且由于平行 Petri 网中存在融合结构, 所以简化得到的赋时 Petri 网的变迁集  $\bar{T} \in T$ , 简化得到的赋时 Petri 网中的执行轨迹是唯一的. 同理可证得 2).  $\square$

**定理 2.** 给定任意平行 Petri 网和其赋时 Petri 网, 下列结论成立: 1) 对于平行 Petri 网上的每一条最优执行轨迹, 赋时 Petri 网上都有一条唯一的最优轨迹与之同步; 2) 对于赋时 Petri 网上的一条最优轨迹, 平行 Petri 网上都有至少一条最优轨迹与之同步.

根据定义 9 和定理 1, 很容易证明定理 2, 故该证明从略.

### 3.2 平行 Petri 网的策略网生成方法

在将平行 Petri 网简化为赋时 Petri 网之后, 可以通过搜索可达图求解出最优执行轨迹, 一条最优执行轨迹对应一个调度策略. 而最优执行轨迹不止一条, 因此最优调度策略本质上是变迁的偏序关系. 为了形式化地表示这样的偏序关系, 本文拟将其建模为一个普通 Petri 网 (称为策略 Petri 网), 以便于

利用它与平行 Petri 网同步, 实现平行 Petri 网按照最优策略执行.

根据定义 6~9, 给出赋时 Petri 网的最优调度策略的 Petri 网描述方法.

#### 算法 2. 策略 Petri 网的生成算法

**输入.** 赋时 Petri 网  $\bar{G}$ .

**输出.** 策略 Petri 网  $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{m}_0)$ .

- 1 生成赋时 Petri 网的可达图  $R(\bar{G}, \bar{m}_0) = (V, F, W)$ , 顶点集  $V$  中的元素表示可达图中的标识, 那么  $F$  中的有序对  $(v_1, v_2)$  表示网可以从标识  $v_1$  经过一个变迁  $t = W(v_1, v_2)$  的激发到达标识  $v_2$ ;
- 2 计算赋时 Petri 网最优执行轨迹的集合  $\Pi^*$ ;
- 3 从可达图  $R$  上删除所有不在最优执行轨迹上的标识对应的结点, 得到的子图记作  $R^*$ ;
- 4 **for all**  $v \in V^*$  **do**
- 5     为  $v$  设计一个库所  $p_v$ ;
- 6      $\hat{P} = \hat{P} \cup \{p_v\}$ ;
- 7     **if**  $v$  是初始标识 **then**
- 8          $\hat{m}_0(p_v) = 1$ ;
- 9     **else**
- 10          $\hat{m}_0(p_v) = 0$ ;
- 11     **end if**
- 12 **end for**
- 13 **for all**  $w \in W^*$  **do**
- 14     为有序对  $(v_1, v_2)$  对应库所对  $(p_{v_1}, p_{v_2})$  设计一个变迁  $t_{v_1v_2}$ ;
- 15     画一条有向弧使得  $p_{v_1}$  指向  $t_{v_1v_2}$ , 画另外一条有向弧使得  $t_{v_1v_2}$  指向  $p_{v_2}$ ;
- 16      $\hat{T} = \hat{T} \cup \{t_{v_1v_2}\}$ ;
- 17 **end for**

算法 2 描述了平行 Petri 网的策略 Petri 网的生成过程, 步骤 1~3 移除了赋时 Petri 网可达图中不在最优轨迹上的标识结点, 得到了只包含组成最优轨迹标识结点的子图  $R^*$ ; 步骤 4~17 为  $R^*$  中每个标识结点设计对应库所, 对于初始标识对应库所, 其库所标识为 1, 其他库所标识为 0, 对于具有先后关系的标识, 为其对应库所设计了变迁并用有向弧连接, 构成了策略 Petri 网  $\hat{G}$ .

**定义 11.** 对于策略 Petri 网中的任意一条路径, 如果网中没有任何一条路径可以包含它, 那么称其为极大路径.

由算法 2 可得到下列性质:

**性质 1.** 策略 Petri 网是一个状态机.

**性质 2.** 策略 Petri 网是无环的.

**性质 3.** 策略 Petri 网内始终只有一个托肯.

**性质 4.** 策略 Petri 网的一条极大路径唯一地表示赋时 Petri 网的一条最优执行轨迹。

性质 1~4 可由算法 2 直接推导, 其证明从略。

#### 4 平行 Petri 网和策略 Petri 网的同步执行算法

得到策略 Petri 网后, 需要给出与其平行 Petri 网的同步执行算法, 使得调度和控制在一个系统中同步进行。

**定义 12.** 给定平行 Petri 网  $G$  和其策略网  $\hat{G}$ , 同步标签函数  $\hat{\lambda}_{id}$  是从平行 Petri 网的变迁集合到字符集合的一个映射, 其中  $\forall t \in T, t \in \hat{T} \rightarrow \hat{\lambda}_{id}(t) = \lambda_{id}(t), t \notin \hat{T} \rightarrow \hat{\lambda}_{id}(t) = \varepsilon$ 。

**定义 13.** 给定平行 Petri 网和其策略 Petri 网, 它们的同步运行条件是: 1)  $\forall t \in T$ , 如果存在同步标签函数  $\hat{\lambda}_{id}(t) = \lambda_{id}(t)$ , 那么平行 Petri 网和策略 Petri 网中的变迁  $t$  只有在同时使能时才能激发, 且为同时激发; 2)  $\forall t \in T$ , 如果  $\hat{\lambda}_{id}(t) = \varepsilon$ , 平行 Petri 网中的变迁  $t$  满足使能条件时立即激发。

**定理 3.** 如果平行 Petri 网与策略 Petri 网同步执行, 那么平行 Petri 网可以在最短的时间内到达目标标识。

**证明.** 根据性质 1~4 和定理 1, 平行 Petri 网中的任意一条最优轨迹, 策略 Petri 网上都有一条极大路径与之同步, 同时根据定义 9, 最优轨迹的执行时间最短。两者同步执行时, 假设变迁  $t$  在策略 Petri 网标识  $\hat{m}$  下使能, 经过空字符变迁, 平行 Petri 网当前标识  $m$  才能演化到  $m'$ ,  $m'$  是平行 Petri 网中使得变迁  $t$  使能的标识。根据定义 13, 只要遇到空字符变迁就立即激发, 所以  $m$  连续激发, 而策略 Petri 网标识  $\hat{m}$  下当前使能变迁为  $t$ , 未满足同步运行条件, 不会继续演化, 直到平行 Petri 网到达标识  $m'$ , 存在变迁  $t$  使得  $\hat{\lambda}_{id}(t) = \lambda_{id}(t)$ , 使得两个网中的变迁  $t$  同步使能。所以平行 Petri 网和策略 Petri 网同步执行时, 假设平行 Petri 网当前标识为  $m$ , 策略 Petri 网当前标识为  $\hat{m}$ , 对于任意策略 Petri 网当前标识下使能的变迁, 平行 Petri 网都可以通过激发空字符变迁到达使得该变迁使能的标识, 即

$$\forall t \in T, \hat{m} \geq \hat{C}^-(\cdot, t)$$

$$\exists \sigma \in T_\varepsilon^*, m' = m + C \cdot \vec{\sigma}, m' \geq C^-(\cdot, t) \quad (1)$$

综上, 平行 Petri 网可以在最短时间内到达目标标识。□

根据定义 12 和定义 13, 设计了策略 Petri 网与平行 Petri 网同步执行的算法。

#### 算法 3. 策略 Petri 网与平行 Petri 网同步执行算法

**输入.** 平行 Petri 网  $G$ , 策略 Petri 网  $\hat{G}$ 。

**输出.** 平行 Petri 网的目标标识  $m_g$ , 策略 Petri 网的目标标识  $\hat{m}_g$ 。

**function Strategy-net** ( $\hat{m}$ ) **returns** ( $\hat{m}, \beta$ )

```

1 while  $\hat{m} \neq \hat{m}_g$  do
2    $\Sigma_E = \emptyset$ ;
3   for all  $t \in \hat{T}$  do
4     if  $\hat{m} \geq \hat{C}^-(\cdot, t)$  then
5        $\Sigma_E = \Sigma_E \cup \{\hat{\lambda}_{id}(t)\}$ ;
6     end if
7   end for
8    $\beta = \text{random}(\Sigma_E)$ ;
9    $\hat{m} = \hat{m} + \hat{C}(\cdot, t)$ ;
10  return ( $\hat{m}, \beta$ )

```

**11 end while**

**function Parallel-net** ( $\hat{m}, \beta$ )

```

1 while  $m \neq m_g$  do
2    $\hat{m} = \hat{m}_0$ ;
3    $(\hat{m}, \beta) = \text{Strategy-net}(\hat{m})$ ;
4   for all  $t \in T$  do
5     读取下位机 PLC 中的变量  $\gamma$ ;
6     if [ $m \geq C^-(\cdot, t)$ ]  $\wedge$  [ $\wedge_{p \in t} \gamma(p)$ ] then
7       if  $\hat{\lambda}_{id}(t) == \varepsilon$  then
8          $m = m + C(\cdot, t)$ ;
9         向下位机 PLC 发送标识  $m$ ;
10        跳转到步骤 3;
11      else if  $\hat{\lambda}_{id}(t) == \beta$  then
12         $m = m + C(\cdot, t)$ ;
13        向下位机 PLC 发送标识  $m$ ;
14        跳转到步骤 2;
15      end if
16    end if
17  end for

```

**18 end while**

**function PLC**()

```

1 for  $p \in P$  do
2   读取上位机标识  $m$ ;
3   if  $m(p) \geq 1$  then
4     if  $p$  是非动作库所 do
5        $\lambda_L(p) = 1$ ;
6     else
7       执行动作函数  $\lambda_A(p)$ , 并以其计算结果更新
8       PLC 的输出;
9        $\lambda_L(p) = 1$ ;

```

```

9   end if
10   $\gamma(p) = \lambda_L(p)$ ;
11  向上位机发送变量  $\gamma$ ;
12  end if
13 end for

```

算法 3 由 Strategy-net、Parallel-net 和 PLC 三个函数构成。Strategy-net 和 Parallel-net 运行于同一计算内核上, 负责计算和决策平行 Petri 网的演化进程; PLC 运行在另一个计算内核, 负责感知和执行物理实体。Parallel-net 和 PLC 通过 ADS (Automation device specification) 通信<sup>[16]</sup> 进行数据传递。三个函数同时执行, PLC 负责读取当前标识并执行动作函数和激活函数; 策略网中,  $\Sigma_E$  是当前可选择的同步标签集合, 遍历当前所有可激发变迁, 将其同步标签放入集合  $\Sigma_E$ , 从中随机选择一个标签  $\beta$  传递给 Parallel-net; Parallel-net 读取 PLC 中的激活函数  $\gamma$ , 使平行网不断演化直到与  $\beta$  标签相同的变迁激发, 进行下一循环。

如图 2 所示, 算法 3 实际上给出了调度与控制一体化方法的执行框架, 该框架分为信息层和物理层, 信息层将平行 Petri 网和策略 Petri 网融合为一, 平行 Petri 网与物理系统同步, 一旦其中的动作库所被标识, 便调用封装的动作函数对输入信号进行计算处理, 并不断更新输出信号对物理系统进行实时控制。策略 Petri 网负责优化调度平行 Petri 网的执行, 从而实现了调度和控制同步进行。最终实现物理与信息平行演化, 虚实相互融合。

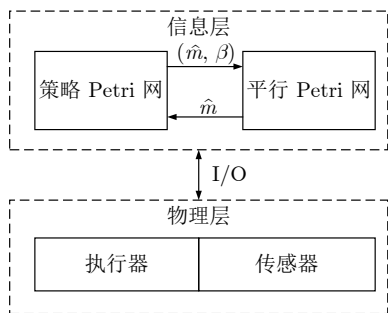


图 2 基于平行 Petri 网的调度与控制一体化执行框架  
Fig.2 Integrated execution framework of scheduling and control based on parallel Petri nets

## 5 实验验证

如图 3 所示, 该柔性组装实验系统包括供料、加工、装配、分拣和夹具搬运五个单元, 其工艺流程为: 供料单元将 A 型工件送至物料台; 夹具搬运单元夹取 A 型工件, 并将其运输到下一单元; 此后存

在两种加工流程: 1) 将 A 型工件运输到加工单元进行冲压, 然后在装配单元将 B 型工件装入 A 型工件, 最后通过分拣单元将不同材质的工件分流到物料槽中; 2) 先将 A 型工件运输至装配单元装配, 再送至加工单元冲压, 最后送至分拣单元分流。本实验系统选用了倍福嵌入式 PC (CX2040) 作为控制器, 以 Visual Studio 和 TwinCAT 作为软件平台编写实验系统的调度和控制程序。

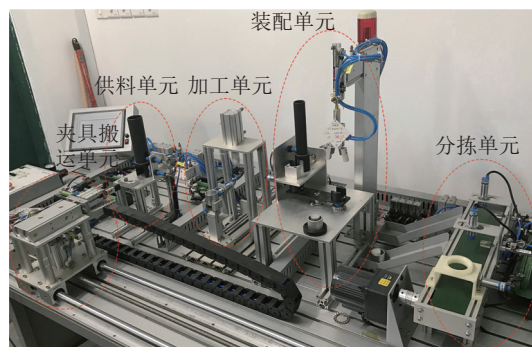


图 3 柔性组装实验系统  
Fig.3 Experiment system of flexible assembly

如图 4 所示, 为柔性组装实验系统每个单元建立一个平行 Petri 网模块, 并按照工艺流程将其组合为一个完整的平行 Petri 网。在初始标识下,  $p_{12}$  有两个托肯, 代表供料单元中存在两个 A 型工件;  $p_1$  有一个托肯, 代表输送单元在初始位置。在目标标识下,  $p_{49}$  应有两个托肯, 表示所有工件加工完成;  $p_1$  有一个托肯, 表示夹具搬运单元回到初始位置。

将图 4 所示平行 Petri 网进行简化: 根据算法 1, 删除表 1 中所示的所有融合结构, 添加宏库所, 保留调度相关的结构和信息, 将其压缩简化为图 5 所示的赋时 Petri 网模型。

根据算法 2, 首先, 利用 C 语言编写了赋时 Petri 网的可达图算法, 将系统赋时 Petri 网模型描述为矩阵形式输入可达图算法中, 计算图 5 所示赋时 Petri 网的可达图; 其次, 仅保留可达图中所有最优轨迹上的结点, 并为其设计对应库所, 即可构成图 6 所示柔性组装实验系统的策略 Petri 网, 为了简化方便, 图 5 中的变迁用弧和上面的标签来表示。策略 Petri 网的初始状态下, 只有  $\hat{p}_1$  有一个托肯;  $\hat{p}_{83}$  或  $\hat{p}_{84}$  任一库所被标识则是策略 Petri 网所要达到的目标状态。

根据算法 3 中的 PLC 函数, 为图 4 所示平行 Petri 网编写动作函数和激活函数的 TwinCAT PLC 程序。以图 4 中供料单元为例,  $p_{12}$  和  $p_{14}$  为缓



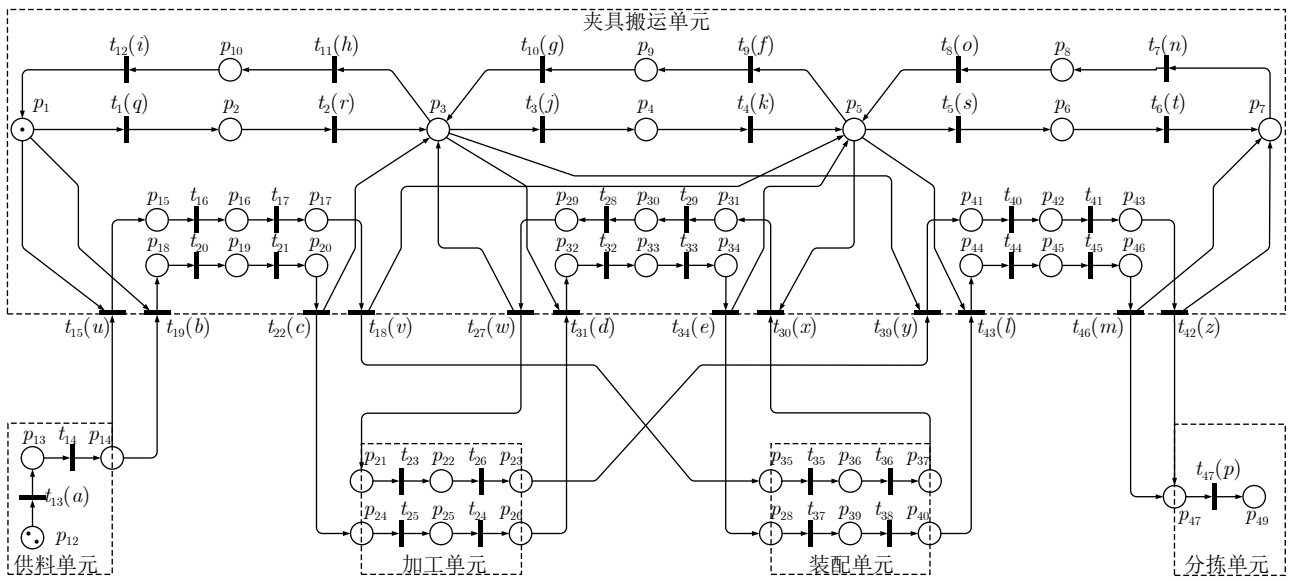


图 4 柔性组装实验系统平行 Petri 网

Fig.4 Parallel Petri nets of flexible assembly system

表 1 平行 Petri 网到赋时 Petri 网转换表

Table 1 Conversion table from parallel Petri nets to timed Petri nets

$t \in \omega$	$p \notin \omega$	$p \in \omega$	$p_w$	$\lambda_c(p)$	$\bar{\lambda}_d(p)$	$\bar{\lambda}_d(p_w)$
$t_{16}, t_{17}$		$p_{15}, p_{16}, p_{17}$	$p_{14}$	3, 70, 3		76
$t_{20}, t_{21}$		$p_{18}, p_{19}, p_{20}$	$p_{15}$	2, 35, 3		40
$t_{28}, t_{29}$		$p_{29}, p_{30}, p_{31}$	$p_{20}$	2, 35, 3		40
$t_{32}, t_{33}$		$p_{32}, p_{33}, p_{34}$	$p_{21}$	2, 35, 3		40
$t_{40}, t_{41}$		$p_{41}, p_{42}, p_{43}$	$p_{24}$	3, 70, 3		76
$t_{44}, t_{45}$		$p_{44}, p_{45}, p_{46}$	$p_{25}$	2, 35, 3		40
$t_{14}$		$p_{13}, p_{14}$	$p_{13}$	0, 30		30
$t_{23}, t_{24}$		$p_{21}, p_{22}, p_{23}$	$p_{16}$	0, 35, 0		35
$t_{25}, t_{26}$		$p_{24}, p_{25}, p_{26}$	$p_{17}$	0, 40, 0		40
$t_{35}, t_{36}$		$p_{35}, p_{36}, p_{37}$	$p_{22}$	0, 40, 0		40
$t_{37}, t_{38}$		$p_{38}, p_{39}, p_{40}$	$p_{23}$	0, 45, 0		45
	$p_1, p_3, p_5$			0	0	
	$p_7, p_{12}, p_{49}$			0	0	
	$p_2, p_4, p_6$			35	35	
	$p_8, p_9, p_{10}, p_{47}$			35	35	

冲库所, 所以动作函数  $\lambda_A(p_{12}) = \lambda_A(p_{14}) = \emptyset$ , 激活函数  $\lambda_L(p_{12})$  和  $\lambda_L(p_{14})$  始终为 1;  $p_{13}$  代表料筒传感器感知到工件 A, 推杆将其推出并收回的动作过程, 所以为该库所的动作函数  $\lambda_A(p_{13})$  编写了 PLC 程序.

根据算法 3 中策略 Petri 网和平行 Petri 网的同步算法, 设计了平行 Petri 网和策略 Petri 网的 C 语言执行引擎程序 Strategy-net 和 Parallel-net, 将图 4 所示平行 Petri 网和图 6 所示策略 Petri 网的关联矩阵输入到引擎程序中, 驱动两个网开始

同步执行. 以图 4 为例, 初始状态下, 策略 Petri 网有且只有一个使能变迁  $t_{13}$ , 所以同步标签为  $\hat{\lambda}_{id}(t_{13}) = a$ , 将其传递给平行 Petri 网; 此时平行 Petri 网中  $p_{12}$  被标识,  $t_{13}$  状态使能, 且  $\lambda_L(p_{12}) = 1$ , 当接收到来自策略 Petri 网的标签信息时, 满足条件  $\hat{\lambda}_{id}(t_{13}) = \lambda_{id}(t_{13}) = a$ , 平行 Petri 网和策略 Petri 网中的  $t_{13}$  同时激发,  $p_{13}$  和  $\hat{p}_2$  获得托肯. 一旦  $p_{13}$  被标识, 平行 Petri 网从策略 Petri 网中获取当前同步标签  $\hat{\lambda}_{id}(t_{19}) = b$ , 然后执行动作函数  $\lambda_A(p_{13})$ , 直

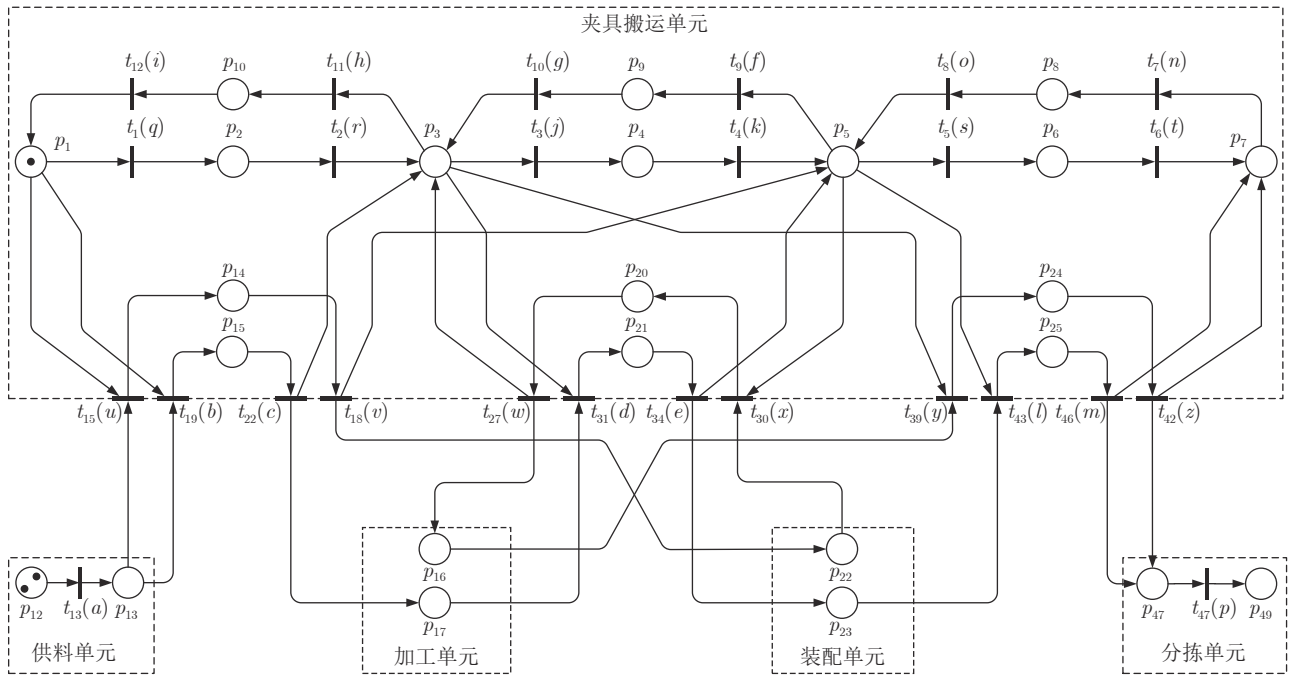


图 5 柔性组装实验系统赋时 Petri 网

Fig.5 Timed Petri nets of flexible assembly system

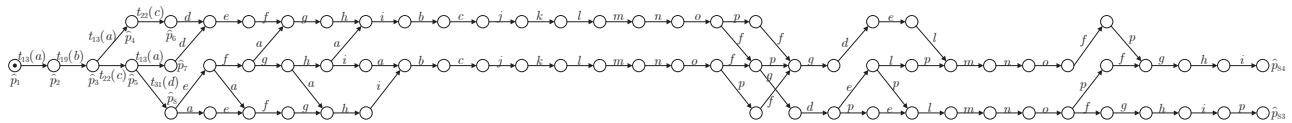


图 6 柔性组装实验系统策略 Petri 网

Fig.6 Strategy Petri nets of flexible assembly system

到动作函数执行完毕, 激活函数变为 1,  $t_{14}$  激发. 由于  $\lambda_{id}(t_{14}) = \varepsilon$ , 策略 Petri 网中已使能变迁  $t_{19}$  不激发直到平行 Petri 网演化到  $p_{14}$  被标识. 此时, 下一步执行面临多种选择. 平行 Petri 网可以选择激发  $t_{13}$ , 把第 2 个工件送入供料单元; 可以选择激发  $t_1$ , 使夹具搬运单元直接向加工单元移动; 也可以激发  $t_{15}$  或  $t_{19}$ , 让夹具搬运单元携带第 1 个工件, 将其送入加工单元或装配单元. 由于当前策略 Petri 网中已使能变迁为  $t_{19}$ , 引导平行 Petri 网选择变迁  $t_{19}$ , 此时同步标签相同, 两个网中  $t_{19}$  同时激发, 平行 Petri 网继续沿着策略 Petri 网安排的最优轨迹执行. 以此类推, 两个网同步演化直到达到目标状态.

在实验过程中, 采集了两个工件在各个加工单元中的运行时间, 如图 7 所示, 绘制了各单元的运行甘特图, 其中  $y$  轴代表柔性组装实验系统的各个单元,  $x$  轴代表运行时间. 工件 1 在各个单元中的加工时间分别为 30 s, 40 s, 45 s, 30 s, 155 s, 工件 2 在各个单元中的加工时间分别为 30 s, 40 s, 45 s,

30 s, 355 s, 符合图 4 所示平行 Petri 网中不同工件在各模块中的加工时间; 同时, 采集得到的系统总执行时间为 625 s, 与算法 2 中求解得到的最优轨迹的执行时间, 即系统的最小执行时间相等, 说明平行 Petri 网和策略 Petri 网能够同步运行, 且该执行轨迹为系统的最优执行轨迹.

本实验首先利用平行 Petri 网对柔性组装系统进行建模, 并为各个库所的动作函数和激活函数设计了 PLC 程序, 实现了平行 Petri 网对系统的控制; 其次, 将平行 Petri 网简化为赋时 Petri 网, 利用可达图算法求解出最优调度策略, 并将其表征为策略 Petri 网; 最后, 将平行 Petri 网和策略 Petri 网描述为矩阵形式, 将其输入 C 语言编写的同步算法中, 通过采集到的时间数据与求解得到的最优执行时间对比, 验证了该调度与控制一体化方法的可行性. 该方法的优势在于, 系统面对订单变化、故障等突发情况时, 即使求解得到了最优调度策略, 仍要面临繁冗的控制程序设计和调试过程, 大大降低了系统的可靠性和稳定性. 而本文方法是将调度和控制

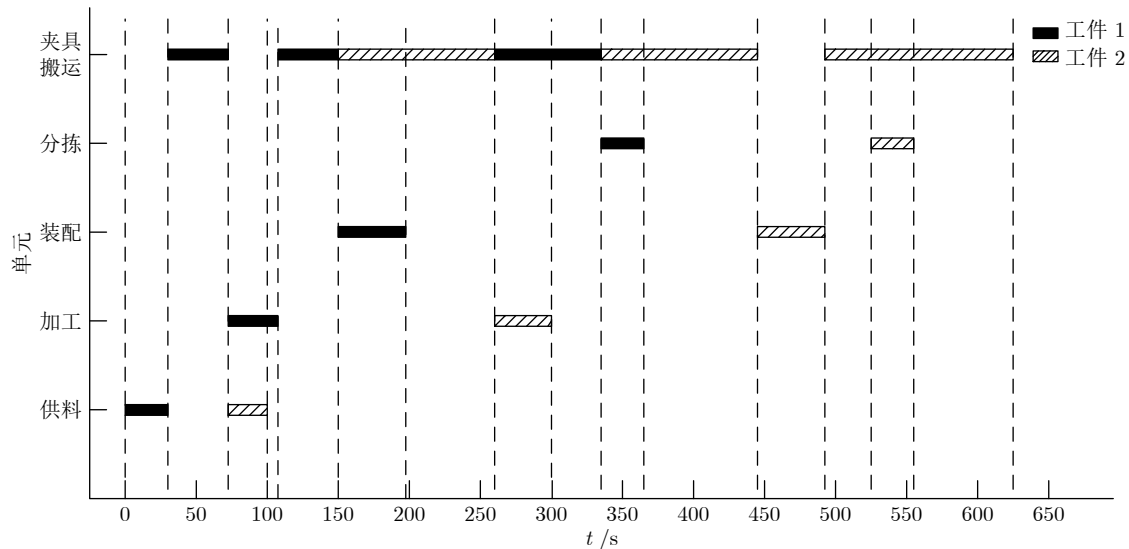


图 7 柔性组装实验系统最优调度甘特图

Fig. 7 Optimal scheduling Gantt chart of flexible assembly system

问题合二为一, 同步算法的提出使得我们可以把精力放在策略 Petri 网的设计上, 而不必过多考虑如何实现最优执行策略的问题. 当发生上述情况时只需将最优调度策略输入所设计的同步算法中, 就可以实现对实际系统的调度控制, 大大节省了时间, 使得系统能够柔性迅捷响应外界需求和变化, 提高生产效率.

## 6 结束语

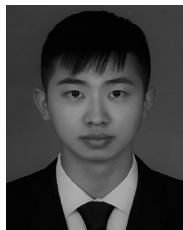
本文提出了制造系统的控制与调度一体化的方法. 利用平行 Petri 网构建制造系统的信息物理模型, 并压缩简化平行 Petri 网为赋时 Petri 网, 利用赋时 Petri 网求解最优调度策略, 并将其表示为策略 Petri 网, 设计了同步执行算法使得与平行 Petri 网同步运行, 并编写了 C 语言和 PLC 程序, 以 TwinCAT 为计算平台, 验证了本文方法, 在一个统一的模型上求解调度和控制问题, 使得调度问题的最优解本身即可以控制执行, 提高了系统对于生产事件的快速灵活响应的能力.

接下来的工作, 将基于平行 Petri 网本身的拓扑结构, 研究网结构分解技术, 将大型调度问题等价分解为多个小型子问题, 减小计算复杂性, 使该方法能更好地应用于更为复杂的制造系统.

## References

- 1 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485-490  
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485-490)
- 2 Yang Lin-Yao, Chen Si-Yuan, Wang Xiao, Zhang Jun, Wang Cheng-Hong. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(11): 2001-2031  
(杨林瑶, 陈思远, 王晓, 张俊, 王成红. 数字孪生与并行系统: 发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, **45**(11): 2001-2031)
- 3 Fu Jian-Feng, Dong Li-Da, Xu Shan-Shan, Zhu Dan, Zhu Cheng-Cheng. An improved liveness condition for S4PR nets. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1439-1446  
(傅健丰, 董利达, 徐珊珊, 朱丹, 朱承丞. 一种改进型的 S4PR 网活性条件. 自动化学报, 2013, **39**(9): 1439-1446)
- 4 Luo J L, Zhou M C. Petri-net controller synthesis for partially controllable and observable discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(3): 1301-1313
- 5 Basile F, Faraut G, Ferrara L, Lesage J. An optimization-based approach to discover the unobservable behaviour of a discrete-event system through interpreted Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, **17**(2): 784-798
- 6 Yu H Y, Wu X Y, Wu X Y. An extended object-oriented Petri net model for mission reliability evaluation of phased-mission system with time redundancy. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, **197**: Article No. 106786
- 7 Uzam M, Ko B, Gelen G, Aksebzeci B H. Asynchronous implementation of discrete event controllers based on safe automation Petri nets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **41**(5): 595-612
- 8 Yadav A, Jayswal S C. Modeling of flexible manufacturing system: A review. *International Journal of Production Research*, 2018, **56**(7): 2467-2487
- 9 Moreira M V, Basilio J C. Bridging the gap between design and implementation of discrete-event controllers. *IEEE Transactions*

- on *Automation Science and Engineering*, 2014, **11**(1): 48–65
- 10 Jakovljevic Z, Lesi V, Mitrovic S, Pajic M. Distributing sequential control for manufacturing systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, **28**(4): 1586–1594
  - 11 Kaid H, Al-Ahmari A, Li Z W, Davidrajuh R. Intelligent colored token Petri nets for modeling, control, and validation of dynamic changes in reconfigurable manufacturing systems. *Processes*, 2020, **8**(3): Article No. 358
  - 12 Luo J L, Zhang Q, Chen X K, Zhou M C. Modeling and race detection of ladder diagrams via ordinary Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(7): 1166–1176
  - 13 Lu J, Ou C Y, Liao C, Zhang Z K, Chen K, Liao X P. Formal modelling of a sheet metal smart manufacturing system by using Petri nets and first-order predicate logic. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, **32**: 1043–1063
  - 14 Hajduk Z, Wojtowicz J. FPGA implementation of fuzzy interpreted Petri net. *IEEE Access*, 2020, **8**: 61442–61452
  - 15 Lee G B, Zandong H, Lee J S. Automatic generation of ladder diagram with control Petri net. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, **15**(2): 245–252
  - 16 Li Da-Cheng, Luo Ji-Liang, Sun Sha-Sha, Nie Wei-Yu, Fang Hui-Juan. Methods on synthesis and implementation of programmable logical controllers via parallel Petri nets. *Control Theory and Applications*, 2020, **37**(12): 2611–2617  
(李大成, 罗继亮, 孙莎莎, 聂维余, 方慧娟. 可编程逻辑控制器的平行 Petri 网设计与实现方法. 控制理论与应用, 2020, **37**(12): 2611–2617)
  - 17 Al-Ahmari A. Optimal robotic cell scheduling with controllers using mathematically based timed Petri nets. *Information Sciences*, 2016, **329**: 638–648
  - 18 Kammoun M A, Ezzeddine W, Rezg N, Achour Z. FMS scheduling under availability constraint with supervisor based on timed Petri nets. *Applied Sciences*, 2017, **7**(4): 399–418
  - 19 Li C, Wu W M. Scheduling FMS problems with heuristic search function and transition-timed Petri nets. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, **26**: 933–944
  - 20 Lee T, Kim H, Roh D, Sreenivas R S. Characterizing token delays of timed event graphs for k-cyclic schedules. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2017, **62**(2): 961–966
  - 21 Declerck P. Extremum cycle times in time interval models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, **63**(6): 1821–1827
  - 22 Lee Y D, DiCesare F. Scheduling flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, **10**(2): 123–132
  - 23 Huang B, Zhou M C, Abusorrah A, Sedraoui K. Scheduling robotic cellular manufacturing systems with timed Petri nets, A\* search, and admissible heuristic function. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, **19**(1): 243–250
  - 24 Mejia G, Nino K, Montoya C, Sanchez M A, Palacios J, Amodio L. A Petri net based framework for realistic project management and scheduling: An application in animation and video-games. *Computer and Operations*, 2016, **66**: 190–198
  - 25 Ren Lei, Wang Feng, Xing Ke-Yi. A Petri-net-based deadlock-free genetic scheduling for flexible manufacturing systems. *Control Theory and Applications*, 2010, **27**(1): 13–18  
(任磊, 王峰, 邢科义. 基于 Petri 网的柔性制造系统无死锁遗传调度算法. 控制理论与应用, 2010, **27**(1): 13–18)
  - 26 Li Yong, Li Kun-Cheng, Sun Bai-Qing, Zhang Qiu-Hao, Wang Yi-Na, Yang Jun-You. Multi-robot-multi-task coordination framework based on the integration of intelligent agent and Petri net. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(8): 2029–2049  
(李勇, 李坤成, 孙柏青, 张秋豪, 王义娜, 杨俊友. 智能体 Petri 网融合的多机器人-多任务协调框架. 自动化学报, 2021, **47**(8): 2029–2049)
  - 27 Davidrajuh R. Modeling humanoid robot as a discrete event system: A modular approach based on Petri nets. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation. Kota Kinabalu, Malaysia: IEEE, 2015. 277–282
  - 28 Zeller A, Jazdi N, Weyrich M. Functional verification of distributed automation systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, **105**: 3991–4004
  - 29 Hoffman A J, Basson A H. IEC 61131-3-based holonic control of a reconfigurable manufacturing subsystem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, **29**(5): 520–534



**李大成** 华侨大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为离散事件系统和 Petri 网理论与应用.  
E-mail: lidacheng@stu.hqu.edu.cn  
(**LI Da-Cheng** Master student at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University. His research interest covers discrete event systems and Petri nets theory and applications.)



**罗继亮** 华侨大学信息科学与工程学院教授. 2006 年获得浙江大学控制科学与工程博士学位. 主要研究方向为离散事件系统, Petri 网, 可编程逻辑控制器, 智能制造和机器人. 本文通信作者. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn  
(**LUO Ji-Liang** Professor at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University. He received his Ph.D. degree in control science and engineering from Zhejiang University in 2006. His research interest covers discrete event systems, Petri nets, programmable logic controllers, intelligent manufacturing systems, and robots. Corresponding author of this paper.)



**孙莎莎** 华侨大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为离散事件系统和 Petri 网理论与应用.

E-mail: sunshasha@stu.hqu.edu.cn

**(SUN Sha-Sha** Master student at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University.

Her research interest covers discrete event systems and Petri nets theory and applications.)

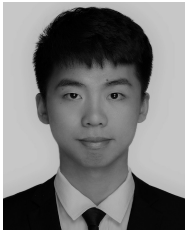


**聂卓贇** 华侨大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为鲁棒自适应控制, 干扰抑制控制, 非线性系统和智能机器人.

E-mail: yezhuyun2004@sina.com

**(NIE Zhuo-Yun** Associate professor at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University.

His research interest covers robust adaptive control, disturbance rejection control, nonlinear systems, and intelligent robot.)



**聂维余** 华侨大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为离散事件系统和 Petri 网理论与应用.

E-mail: nieweiyu@163.com

**(NIE Wei-Yu** Master student at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University.

His research interest covers discrete event systems and Petri nets theory and applications.)



**方慧娟** 华侨大学信息科学与工程学院讲师. 主要研究方向为离散事件系统和脑机接口.

E-mail: huijuan.fang@163.com

**(FANG Hui-Juan** Lecturer at the College of Information Science and Engineering, Huaqiao University.

Her research interest covers discrete event systems and brain-computer interface.)