

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.10.018

基于 Petri 网的机床座类柔性生产线调度模型^{*}

贾云富¹, 张 凯²

(1. 珠海市技师学院 信息技术系, 广东 珠海 519000;
2. 太原理工大学 信息与计算机学院, 山西 太原 030600)

摘要:在柔性生产线的调度过程中,存在柔性单元间关系复杂且离散并行的问题,为此,以机床座类柔性生产线为例,提出了一种适用于柔性生产线调度研究的 Petri 网模型。首先,分析了 Petri 网的组成结构,设计了柔性单元变迁的延时函数;然后,分析了生产线中各柔性单元的生产调度关系,建立了柔性单元的模块化 Petri 网模型;最后,采用了模块化柔性单元简化座类柔性生产线的 Petri 网调度模型,研究了生产调度过程中多个系统与柔性单元间信息的传递关系,建立了基于信息流的 Petri 网模型;通过采用可达树分析法,研究了可能出现的变迁序列,设计了 Petri 网的可达树图,对所建立的 Petri 网模型的可行性进行了验证。研究结果表明:基于 Petri 网建立的机床座类柔性生产调度模型是可行的、合理的,可进一步在此基础上进行柔性生产线的动态生产调度。

关键词:柔性生产线调度;柔性单元;可达树分析法;制造执行系统;柔性制造系统;信息传递关系;离散并行;信息流

中图分类号:TH165;TP18

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)10-1470-07

Scheduling model of machine tool seat flexible production line based on Petri net

JIA Yun-fu¹, ZHANG Kai²

(1. Department of Information Technology, Zhuhai Technician College, Zhuhai 519000, China;
2. School of Information and Computer Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China)

Abstract: Aiming at the problem of complex and discrete parallel relationships among flexible units in the scheduling process of flexible production lines, a Petri net model applicable to the scheduling study of flexible production lines was proposed, taking the flexible production lines of machine tool holders as an example. Firstly, the composition structure of Petri net was analyzed, and the delay function of flexible unit variation was designed. Then, the production scheduling relationship of each flexible unit in the production line was analyzed, and the modular Petri net model of flexible unit was established. Finally, the scheduling Petri net model of modular flexible unit simplified seat class flexible production line was adopted, and the transfer relationship between multiple systems and flexible units in the production scheduling process was studied, and the Petri net model based on information flow was established. The information transfer relationship between multiple systems and flexible units in the production scheduling process was studied, and the Petri net model based on information flow was established. The reachable tree analysis method was adopted to study all possible change sequences, and the reachable tree diagram of Petri net was designed to verify the feasibility of the established Petri net model. The research results show that the flexible production scheduling model of machine tool seat class based on Petri net was feasible and reasonable, and the dynamic production scheduling of flexible production line can be further carried out on this basis.

Key words: flexible production line scheduling; flexible cell; reachable tree analysis method; manufacturing execution system (MES); flight management system (FMS); information transfer relationship; discrete parallel; information flow

收稿日期:2022-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12173027)

作者简介:贾云富(1979-),男,河北沧州人,硕士,高级讲师,主要从事路由算法及工程应用方面的研究。E-mail:money52013140@126.com

0 引言

产品的系列化、定制化促进了柔性生产线和控制系统的发展。作为一种典型的离散并行系统,在高度自动化的生产制造过程中,柔性生产线的调度过程受加工环境与控制系统等多种因素的影响,导致其实现的难度很大^[1]。

在制造过程中,生产调度的本质是根据柔性生产线运行情况进行合理的资源分配。目前,柔性生产线调度方法研究主要是采用贪婪搜索方法、模拟退火算法、遗传算法和拉格朗日松弛技术等新的优化技术,获取更优质的调度解,并且结合启发式调度规则满足生产调度的实例化需求^[2]。以上方法都是以运行时间或者轨迹作为最优调度评价的指标进行分析。但是在实际生产过程中,柔性生产线的生产调度是由随机离散并行事件进行触发的,难以用固定的衡量指标进行研究。

Petri 网是用于离散的、分布式系统的理论模型,其对柔性生产线中每个柔性单元间的触发关系进行描述,利于研究离散并行生产调度问题^[3]。对此,国内外学者已经进行了大量的研究。

HU L 等人^[4]为了解决系统中的资源共享、加工路线灵活和材料随机的柔性制造系统生产调度问题,将时间变迁 Petri 网和加工过程顺序创新的结合使用,为其生产调度提供了解决方案。WENZELBURGER P 等人^[5]针对实际制造过程中结构流程的转变、控制策略的升级以及生产调度问题,基于 Petri 网模型建立了生产过程和工厂运行的自动模型,为柔性生产车间调度问题提供了可行方案。POUYAN A A 等人^[6]借助 Petri 网的无死锁、稳定和循环的特性,将柔性制造单元与实时控制器结合,以针织合成技术合成其 Petri 网调度模型,并将实例应用于柔性制造系统中。郑金来等人^[7]为了高效地完成含机器人的并行自动生产线的动作流程设计,实现最快速的生产节拍,基于时序 Petri 网建立了含约束条件的混合整数规划模型,得到了最优的生产流程设计方案。姜明壮、张斌等人^[8,9]基于高级赋时 Petri 网模型,针对生产线装配以及 AGV 小车运输过程,进行了调度模型的分析,由相关分析方法以及实例,针对 Petri 网模型对生产调度规划的可行性进行了验证。黄波等人^[10]针对复杂的柔性制造控制系统,随机创建了指定数目和满足指定条件的测试模型算法,建立了自顶向下的柔性制造系统 Petri 网模型,降低了柔性制造系统调度研究的复杂性。

在上述国内外学者的研究中,对柔性制造系统的调度研究较多,而对具体的柔性生产线以及柔性单元

间的调度关系研究较少,并且没有考虑柔性生产线与系统信息之间的相互影响。

针对以上情况,笔者以机床座类柔性生产线为研究对象,提出一种基于 Petri 网的柔性生产线调度模型,即通过分析各个柔性单元中的运行关系,建立柔性单元的模块化 Petri 网模型,并简化柔性生产线的整体 Petri 网模型;根据系统间的信息流向与传递关系,建立适用于系统间的 Petri 网模型;通过可达树分析法验证各个 Petri 网模型的可行性。

1 Petri 网

1.1 Petri 网定义

Petri 网是研究离散并行系统调度问题模型的有效方法。Petri 网是一种由信息组成的网状模型,以条件和事件为节点的有向二分图,在此基础上,添加状态信息的托肯分布状态,并按一定规则进行事件驱动状态演变,实现对柔性生产的运行状态仿真^[11]。

通常其形式化定义为一个六元组,如下式所示:

$$TPN = (P, T, F, K, D, M_0) \quad (1)$$

式中: P —库所的集合,表示系统的状态; T —变迁的集合,表示调度系统状态消耗令牌产生的变化; F — P 与 T 间的有向弧集,表示两者间的关联关系; K —各个库所初始状态的令牌集,表示可使用的资源数量; D —变迁延时的时间集,表示事件变迁所需的时间; M_0 —库所的初始标识向量,表示模型中库所的托肯分布情况。

1.2 延时函数

在 Petri 网中,变迁延时的分析本质是对延时函数的确定。 D 是 Petri 网变迁的延时时间集,延时函数是由时间集间的关联关系确定^[12]。

定义每个柔性单元的 $D(T_i)$ 为变迁 T_i 所需要的时间,其中, $i = 1, 2, \dots, n$; 定义每个工序的 $D(T_j)$ 为变迁 T_j 所需的时延,其中, $j = 1, 2, \dots, m$; 则生产加工所需要的时间为:

$$D = D(T_1) + D(T_2) + \dots + D(T_n) \quad (2)$$

在生产过程中,对于任一工序所需要的时间为:

$$D(T_i) = A_1 + A_2 \quad (3)$$

式中: A_1 —工序正常加工所需时间; A_2 —工序故障修复所需时间。

其中:

$$A_1 = \sum_{j=1}^n D(T_{(i+1)j}) \quad (4)$$

$$A_2 = \sum_{j=n+1}^m D(T_{(i+1)j}) \quad (5)$$

为了分析柔性生产线调度的合理性,则需分析出

$D_{\min}$, 以此作为柔性生产调度优化的衡量指标^[13]。

2 基于 Petri 网的柔性单元调度模型

2.1 柔性生产线的 Petri 网定义

在柔性生产线中,主要的加工运行载体是卧式加工中心、各种机器人、物流小车、进出料丝杠以及托盘交换转置等设备。

笔者将各个实体设备状态作为库所 P , 设备的状态变换作为变迁 T , 通过有向弧 F 进行连接, 形成适用于柔性生产线的系统调度 Petri 网模型。

2.2 柔性单元的模块化 Petri 网模型

为了降低生产调度问题的复杂度,笔者将生产线模块化分为多个柔性单元组合建立的 Petri 网模型。在生产线加工过程中,将各种加工设备状态作为库所,将零件的加工状态变化作为变迁。在机床座类生产线中,各个柔性单元模块的 Petri 网模型库所、变迁含义如表(1~4)所示。

其中,卧式加工中心 Petri 网模型定义如表 1 所示。

表 1 卧式加工中心

库所	含义	变迁	含义
P_{w1}	故障、关机状态	T_{w1}	异常变化
P_{w2}	预定状态	T_{w2}	修复变化
P_{w3}	等待状态	T_{w3}	派单变化
P_{w4}	上料状态	T_{w4}	上料变化
P_{w5}	加工状态	T_{w5}	加工变化
P_{w6}	下料状态	T_{w6}	下料变化
		T_{w7}	结束变化

机器人 Petri 网模型定义如表 2 所示。

表 2 机器人

库所	含义	编号	含义
P_{r1}	故障、关机状态	T_{r1}	异常变化
P_{r2}	预定状态	T_{r2}	修复变化
P_{r3}	等待状态	T_{r3}	派单变化
P_{r4}	抓取状态	T_{r4}	抓取变化
P_{r5}	放置状态	T_{r5}	放置变化
		T_{r6}	完成变化

物流小车 Petri 网模型定义如表 3 所示。

表 3 物流小车

库所	含义	变迁	含义
P_{a1}	故障、关机状态	T_{a1}	异常变化
P_{a2}	等待状态	T_{a2}	修复变化
P_{a3}	定位状态	T_{a3}	派单变化
P_{a4}	运输状态	T_{a4}	定位变化
		T_{a5}	完成变化

进出料丝杠 Petri 网模型定义如表 4 所示。

表 4 进出料丝杠

库所	含义	变迁	含义
P_{s1}	故障、关机状态	T_{s1}	异常变化
P_{s2}	预定状态	T_{s2}	修复变化
P_{s3}	进料等待状态	T_{s3}	派单变化
P_{s4}	进料运输状态	T_{s4}	进料变化
P_{s5}	进料交换状态	T_{s5}	进料托盘变化
P_{s6}	出料等待状态	T_{s6}	进料完成变化
P_{s7}	出料交换状态	T_{s7}	出料托盘变化
P_{s8}	出料运输状态	T_{s8}	出料变化
		T_{s9}	完成变化

其各个柔性单元模块的 Petri 网模型如图 1 所示。

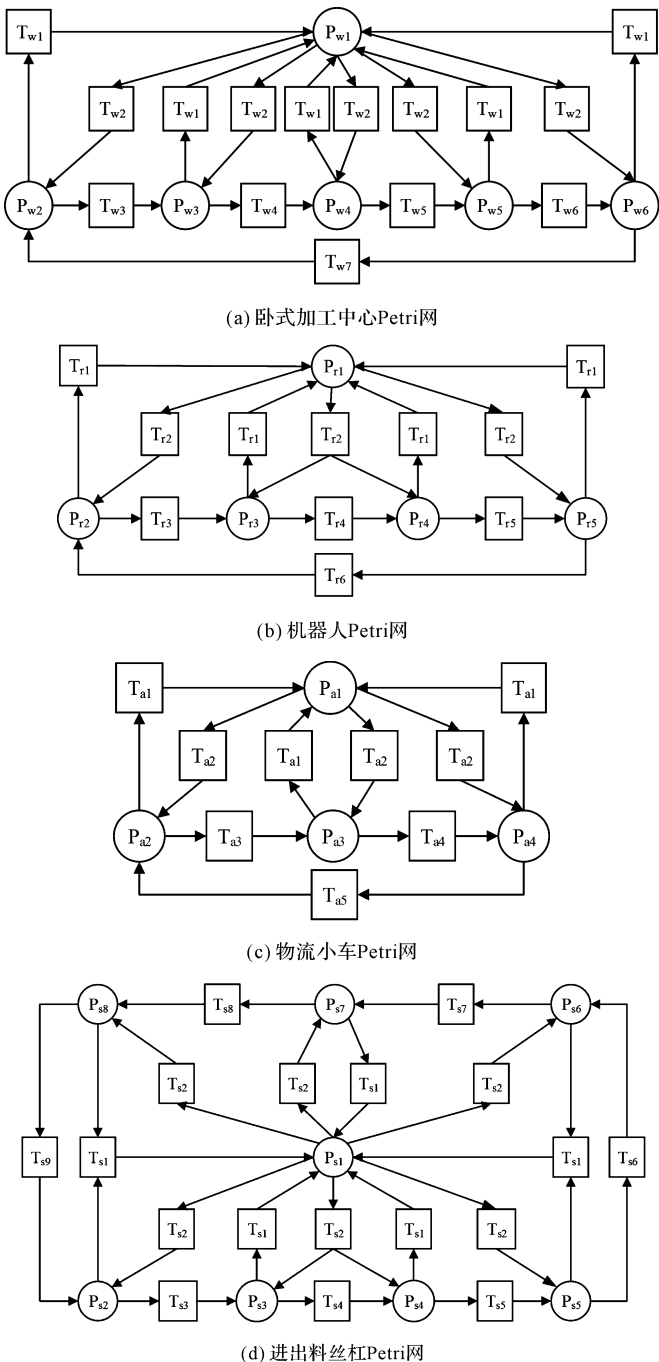


图 1 柔性单元模块 Petri 网模型

3 案例分析与验证

3.1 机床座类柔性生产线

机床座类柔性生产线集成了制造执行系统 (MES)、柔性制造系统 (FMS) 等系统,在整个零件制

造中,主要针对不同规格的机床座类零件完成柔性化加工。

机床座类柔性生产线设备布局示意图如图 2 所示。

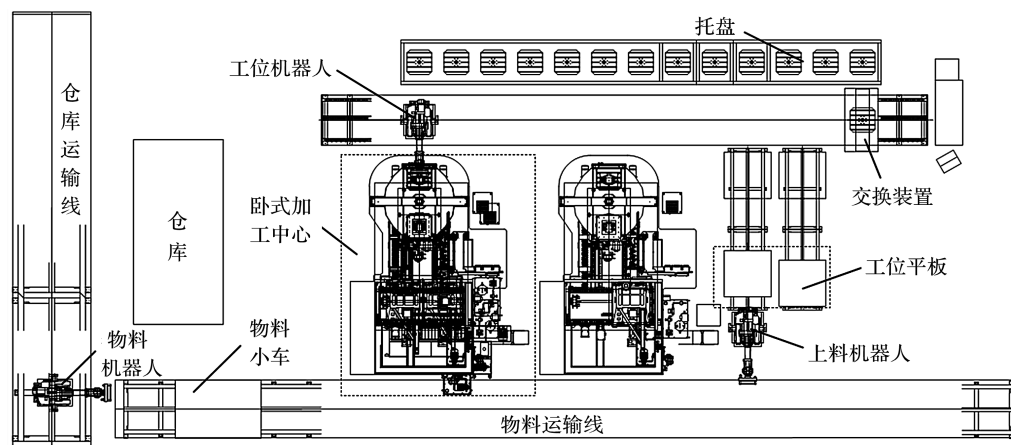


图2 机床座类柔性生产线

机床座类柔性生产线的主要设备包括:卧式加工中心、托盘及其交换装置、上下料机器人、工位平板及其进出料丝杠、物流小车、仓库运输线等。

该生产线主要规划制造包括:电机座、螺母座、轴承座等 10 多种不同种类或规格的零件,不同零件的自动工装是不一样的。在生产过程中,根据 MES 系统的零件编排,以及 FMS 系统控制托盘交换装置,实现零件在加工设备中的交换。

生产线加工流程如图 3 所示。

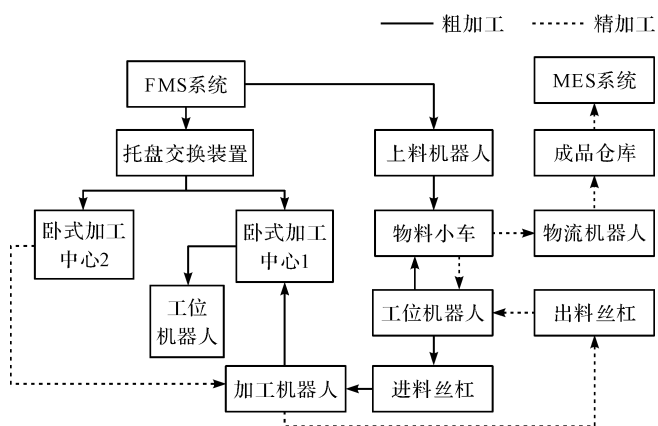


图3 生产线加工流程

由图 3 可知:在机床座类柔性生产线的加工过程中,除主要的机器人、物流小车、进出料丝杠等设备的调度使用外,还应明确以下事项:

(1)在托盘交换过程中,加工零件由人工装夹在托盘的夹具上;

(2)零件加工完成后,由物料小车及各运输线运

出,由人工取下成品后,使用后的托盘和夹具由相关人员运回托盘仓库;

(3)托盘编号、夹具编号、零件编号必须一一对应才能保证 MES、FMS 等系统间信息传递的有效性和零件加工的合理性。

3.2 机床座类柔性生产线的调度模型

3.2.1 柔性生产线的模块化 Petri 网建模

以机床座类柔性生产线工艺流程为研究基础,笔者根据生产线布局,由柔性单元模块构建整体的 Petri 网模型。

机床座类柔性生产线 Petri 网如图 4 所示。

在机床座类柔性生产线中,如果将每一个库所的延时函数进行累加,那么数据的变化过程将过于复杂^[14]。因此,笔者只研究每个柔性单元间的延时函数,简化整体 Petri 网模型,并且赋予每个柔性单元间的延时函数为 $D(T_i)$ 。

整体赋时 Petri 网模型如图 5 所示。

由图 5 可知:整体赋时 Petri 网模型将柔性单元看作库所,添加延时函数表达各个柔性单元间变迁存在的延时关系,减少库所间产生的延时函数误差累积,提高生产调度的精确度。此外,当出现调度问题时,可根据柔性单元状态进行动态调度调整,合理运行机床座类柔性生产线中的每个柔性单元。

机床座类柔性生产线的整体赋时 Petri 网库所、变迁定义,如表 5 所示。

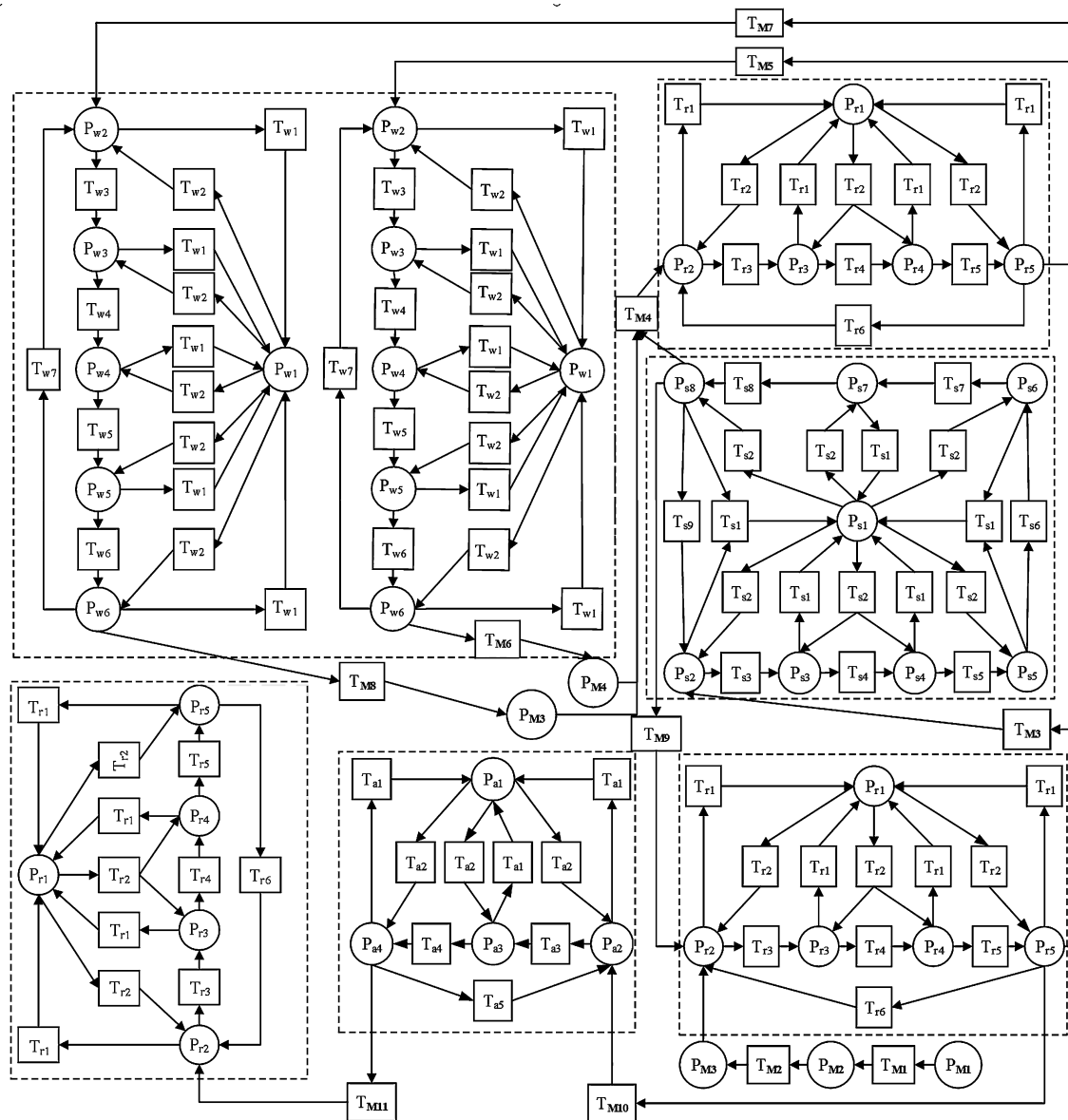


图 4 机床座类柔性生产线 Petri 网

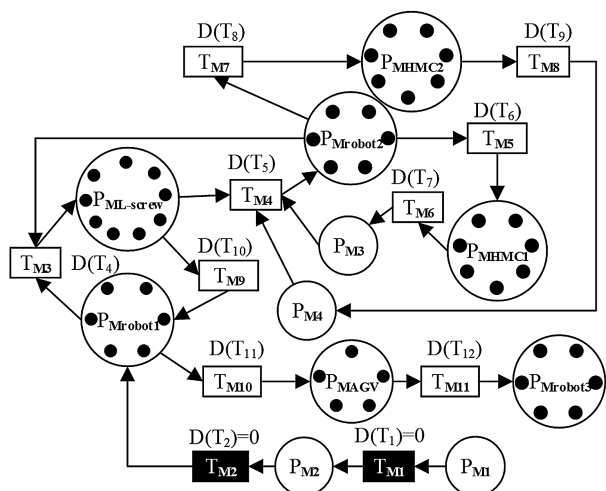


图 5 整体赋时 Petri 网模型

●—库所中含有的令牌代表柔性单元拥有的资源数量；
■—瞬时变迁表示变迁时间短，可忽略；□—赋予延时函数的变迁

表 5 整体赋时 Petri 网库所、变迁定义

库所	含义	变迁	含义
P_{M1}	生产预定状态	T_{M1}	上料申请变化
P_{M2}	加工上料状态	T_{M2}	上料完成变化
P_{M3}	粗加工完成状态	T_{M3}	进给丝杠调用变化
P_{M4}	精加工完成状态	T_{M4}	工位机器人调用变化
$P_{Mrobot1}$	上料机器人搬运状态	T_{M5}	加工中心 1 调用变化
$P_{ML-screw}$	进给丝杠交换状态	T_{M6}	粗加工完成变化
$P_{Mrobot2}$	工位机器人搬运状态	T_{M7}	加工中心 2 调用变化
P_{MHCM1}	加工中心 1 加工状态	T_{M8}	精加工完成状态
P_{MHCM2}	加工中心 2 加工状态	T_{M9}	上料机器人调用变化
P_{MAGV}	物料小车运输状态	T_{M10}	物料小车调用变化
$P_{Mrobot3}$	物料机器人搬运状态	T_{M11}	物料机器人调用变化

3.2.2 基于信息流的柔性单元 Petri 网模型

根据机床座类柔性生产线的柔性单元体进行建模,只能表达柔性单元间的调度逻辑关系,而实际加工

过程中生产线的调度是根据信息变化实现对加工设备的控制调度^[15]。

针对制造过程中 MES、FMS 系统与柔性单元间的信息流传递关系,笔者建立关于任意加工设备的独立 Petri 网模型。

基于信息流的 Petri 网模型如图 6 所示。

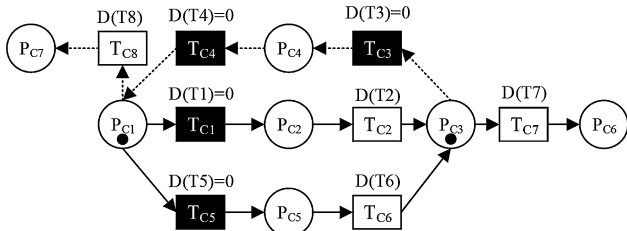


图 6 基于信息流的 Petri 网模型

该模型的初始标识为 $M_0 = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)^T$, 其模型的库所、变迁定义,如表 6 所示。

表 6 库所、变迁含义

库所	含义	变迁	含义
P_{C1}	MES 系统状态	T_{C1}	生产信息变化
P_{C2}	生产排程状态	T_{C2}	预定变化
P_{C3}	预定状态	T_{C3}	预定失败变化
P_{C4}	占用或故障状态	T_{C4}	故障反馈变化
P_{C5}	FMS 系统状态	T_{C5}	系统间信息变化
P_{C6}	设备调用状态	T_{C6}	预定控制变化
P_{C7}	等待或维修状态	T_{C7}	调用变化
		T_{C8}	暂缓变化

3.3 基于可达树的可行性分析

机床座类柔性生产线的 Petri 网模型是由库所和变迁组成,根据柔性单元间加工流程的先后关系进行图形化连接而成。其建模关系较为复杂,需要对其合理性进行可行性分析^[16]。可达树分析法可以有效验证 Petri 网的可行性,笔者通过对每个 Petri 网模型进行可行性分析,判断所建立的 Petri 网是否合理。

当 Petri 网模型的库所集是有限的,则该模型具有有界性。机床座类柔性生产线 Petri 网模型,由可达树分析法建立机床座类柔性生产线 Petri 网可达树,如图 7 所示。

由图 7 可知:在整体赋时 Petri 网模型中拥有 3 种资源,分别为零件存储资源、加工设备资源、零件加工状态资源,故可将该模型的初始标识定义为 $M_0 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 。

初始状态 M_0 表示系统一开始等待零件毛坯的上料,设备中 robot1 处于预定状态,零件处于未粗加工状态。

在可达标识向量集合中 $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4,$

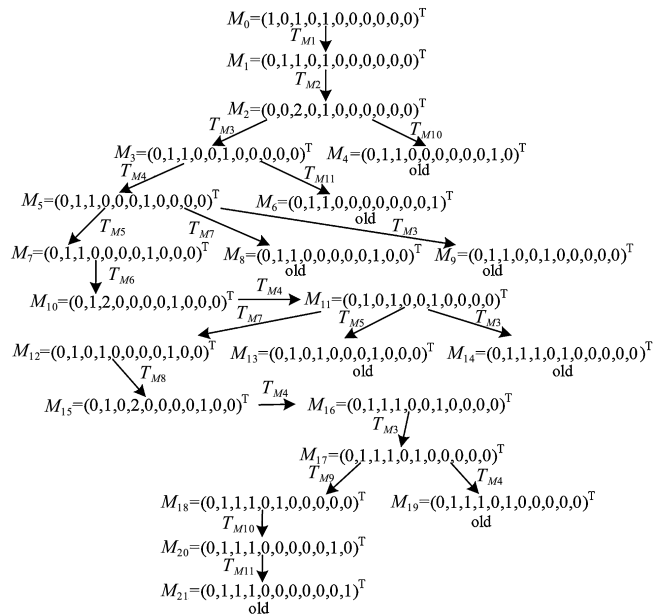


图 7 机床座类柔性生产线 Petri 网可达树

$M_{robot1}, M_{Lscrew}, M_{robot2}, M_{HMC1}, M_{HMC2}, M_{AGV}, M_{robot3}\}$, 其标识向量数是有限的,则该 Petri 网模型是有界的,并且是安全的。

对于该 Petri 网模型存在变迁 $T_i = \{T_1, T_2, \dots, T_{12}\}$ 使标识 M_0 转换为标识 M_{robot3} ,则该模型是可达的。

对任意 M_0 可达的标识向量 M ,都存在变迁 T 使其条件激活,则表明模型具有活性^[17]。

根据机床座类柔性生产线中状态的变迁依次绘制而成的可达树,凡是出现在可达性树中的每一个状态标识均是可达的。这样就可以得到所有可能出现的变迁序列,如下:

$$\begin{aligned}
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M10} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M11} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M3} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M7} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M5} \rightarrow T_{M6} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M5} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M5} \rightarrow T_{M6} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M3} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M5} \rightarrow T_{M6} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M7} \rightarrow T_{M8} \rightarrow \\
 &T_{M4} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \\
 &T_{M1} \rightarrow T_{M2} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M5} \rightarrow T_{M6} \rightarrow T_{M4} \rightarrow T_{M7} \rightarrow T_{M8} \rightarrow \\
 &T_{M4} \rightarrow T_{M3} \rightarrow T_{M9} \rightarrow T_{M10} \rightarrow T_{M11}
 \end{aligned}$$

同理,基于信息流的 Petri 网模型,笔者通过可达树分析法,建立基于信息流的 Petri 网可达树,如图 8 所示。

通过可达树分析法,可以得到的所有可能出现的变迁序列,如下:

$$\begin{aligned}
 &T_{C1} \rightarrow T_{C2} \rightarrow T_{C3} \rightarrow T_{C4} \rightarrow T_{C8} \\
 &T_{C5} \rightarrow T_{C6} \rightarrow T_{C3} \rightarrow T_{C4} \rightarrow T_{C8}
 \end{aligned}$$

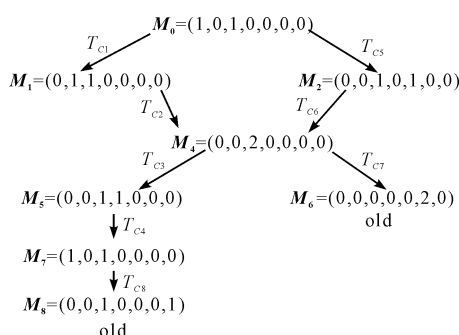


图 8 基于信息流的 Petri 网可达树

$$T_{c5} \rightarrow T_{c6} \rightarrow T_{c7}$$

$$T_{c1} \rightarrow T_{c2} \rightarrow T_{c7}$$

由图 8 可知:在整个机床座类柔性生产线系统中的基于信息流的 Petri 网模型也是可行性的。在实际生产中可以根据两模型的综合应用,实现对机床座类柔性生产线在制造过程中的生产调度优化。

4 结束语

针对机床座类柔性生产线的离散并行系统调度复杂性,笔者通过 Petri 网对时间平衡性问题的分析,建立了柔性单元间与系统信息间的 Petri 网调度模型;各柔性单元模块化研究,简化了整个 Petri 网调度模型,并运用可达树分析法验证了 Petri 网模型的可行性。

研究结果表明:

(1)以柔性单元为柔性生产线的 Petri 网调度模型的基本单位,有利于清晰地表达调度过程中各个设备间的复杂关系,然后模块化每个柔性单元,得到简化的整体 Petri 网模型,降低生产调度的复杂性;

(2)在 Petri 网模型的可达树验证方法条件下,对所建立的 Petri 网模型进行分析,机床座类柔性生产线的调度模型是可行的、合理的,有利于实现对柔性生产线的动态调度。

在后续的研究工作中,笔者将在 Petri 网调度模型的基础上,为每个 Petri 网变迁进一步寻求最优的解,并根据 Petri 网的触发事件规则,实现对柔性生产线的动态调度。

参考文献 (References):

[1] 张瑞杰,何 舟,施威杰. 基于 Petri 网的车间物料配送及路径规划方法[J]. 现代制造工程,2021(6):17-24.

- [2] 赵 宁,吴 超,宁汝新,等. 面向配做的柔性生产线调度[J]. 机械工程学报,2005,41(7):180-185.
- [3] 李 秀,姜澄宇,王宁生,等. 一种面向对象的 Petri 网[J]. 南京航空航天大学学报,1999(2):77-82.
- [4] HU L, LIU Z, HU W, et al. Petri-net-based dynamic scheduling of flexible manufacturing system via deep reinforcement learning with graph convolutional network[J]. *Journal of Manufacturing Systems*,2020,55(2):1-14.
- [5] WENZELBURGER P, ALLGOWER F. A Petri net modeling framework for the control of flexible manufacturing systems[J]. *IFAC-Papers OnLine*,2019,52(13):492-498.
- [6] POUYAN A A, SHANDIZ H T, ARASTEHFAR S. Synthesis a Petri net based control model for a FMS cell[J]. *Computers in Industry*,2011,62(5):501-508.
- [7] 郑金来,张 猛,熊昌秀,等. 基于 Petri 网模型的自动线流程设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(1):60-63,68.
- [8] 姜明壮,李东波,童一飞. 基于赋时 Petri 网的机器人小臂装配线建模[J]. 机床与液压,2019,47(14):1-6.
- [9] 张 斌,李 建,马锦程,等. 基于赋时 Petri 网的磁导航 AGV 路径优化方法[J]. 中国计量大学学报,2020,31(3):378-385.
- [10] 黄 波,赵春霞,张佩云,等. 基于 Petri 网的柔性制造系统调度控制模型[J]. 计算机应用,2008(9):2410-2412.
- [11] 冒益海,韩卫光. 基于 Petri 网的柔性制造系统作业调度研究与实现[J]. 小型微型计算机系统,2010,31(5):1001-1005.
- [12] LATORRE-BIEL J I, FAULIN J, JUAN A A, et al. Petri net model of a smart factory in the frame of industry 4.0[J]. *IFAC-Papers OnLine*,2018,51(2):266-271.
- [13] 李先广,李聪波,刘 飞,等. 基于 Petri 网的机床制造过程碳排放建模与量化方法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(12):2723-2735.
- [14] MUSIC G. Petri Net based solution supervision and local searchfor Job Shop scheduling[J]. *IFAC-PapersOnLine*,2021,54(1):665-670.
- [15] WANG W, HU Y, XIAO X, et al. Joint optimization of dynamic facility layout and production planning based on petri net[J]. *Procedia CIRP*,2019(81):1207-1212.
- [16] 曾成碧,陈 光. 可达树分析法及其在测试中的应用[J]. 电子科技大学学报,1999(5):524-526.
- [17] 胡家宝. Petri 网的可达树分析法及其应用研究[J]. 计算机科学,1993(1):29-32,24.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

贾云富,张 凯. 基于 Petri 网的机床座类柔性生产线调度模型[J]. 机电工程,2022,39(10):1470-1476.

JIA Yun-fu, ZHANG Kai. Scheduling model of machine tool seat flexible production line based on Petri net[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*,2022,39(10):1470-1476.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>