

结构化三层次 Petri 网及在 MPS 监控系统中的应用

周 昕, 杨根科

(上海交通大学自动化系 CIMS 实验室, 上海 200030)

摘要: 基于模块化制造系统(MPS)的监控问题, 提出了一种扩展的结构化三层次 Petri 网建模方法, 把 MPS 系统从整体、局部再到细节进行不同层次的描述; 使用消息库来解决 Petri 子网间的通信问题。该建模方法, 有效地降低了系统建模的复杂度, 增强了开发的相应监控系统可靠性与可重用性。根据此模型开发 MPS 监控软件, 验证了该建模方法的有效性。

关键词: Petri 网; 可重用性; 模块化制造系统; 监控

Structured Three-layer Petri Net and Application in MPS Supervisory Control

ZHOU Xin, YANG Genke

(CIMS Lab of Automation Dept., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

【Abstract】 Based on supervisory control problem of modular production system (MPS), a structured 3-layer extended Petri net(PN) is proposed, which describes the MPS in view of entire system, components and details respectively. The message-places are employed to solve communication problem among different sub-PNs. This method not only reduces the MPS modeling complexity efficiently, and enhances the reliability and reusability of the corresponding supervisory control system. Finally supervisory control software for the MPS is developed in terms of the PN modeling, to certify the effectiveness of this method.

【Key words】 Petri net; Reusability; Modular production system; Supervisory control

模块化制造系统(Modular Production System, MPS)是一种复杂的新型柔性制造, 它将制造系统分解成一些结构和功能独立的标准单元模块, 然后按照特定产品的制造需求进行模块的组合。这是一种高度并发、异步、分布、非确定的制造系统, 开发其监控系统需要清晰完整的数学模型。

Petri 网是一种描述分析异步、并发、冲突、同步系统的有力工具^[1], 其图形化描述及动态结构相对其它自动机和算子代数等方法, 在复杂系统表达、可理解性与可实现性方面上具有更大优势, 广泛应用于制造系统建模^[2]。

然而使用中出现问题: 一是模型规模庞大。如一种基于规则嵌入赋色 Petri 网模型的装配仿真^[3], 其模型已达一定规模, 而 MPS 制造由多个此类单元模块组成, 会导致组合爆炸问题。二是难以兼顾层次结构和细节描述。文献[4]给出了一种用于半导体生产调度仿真的上下分层 Petri 网, 把握整体结构, 但下层分析终止于设备群间关系, 没有描述某个设备具体操作逻辑细节。三是建模方法比较单一, 往往只使用 1、2 种拓展 Petri 网^[3,6]描述系统, 忽视了可以综合使用多种拓展 Petri 网, 利用各自的优点从不同层面来对复杂系统建模。

针对以上缺陷, 本文给出一种用于 MPS 监控系统设计的结构化三层次拓展 Petri 网^[1,7], 根据每层在模型中的地位作用, 用不同类型的 Petri 子网集描述对象, 使模型整体和细节都清晰明了。监控系统开发人员能根据模型的层次独立开发, 自下而上进行整合, 化繁为简, 并提高系统重用性和拓展性。

1 结构化三层次拓展 Petri 网模型

基本 Petri 网用五元组 $PN=(P, T, I, O, M)$ 表示: P 、 T 分别代表库所、变迁有限集; I 、 O 分别是输入、输出函数; M 是 PN 标识, 特别 M_0 代表系统初始标识。从基本 Petri 网能

派生各种拓展 Petri 网模型, 如赋时、着色和面向对象 Petri 网等。

结构化层次的拓展 Petri 网 Structured Hierarchical Petri Net (SHPN), 用于描述 MPS 系统, 将系统分为 3 层。SHPN = (SLPN, MLPN, DLPN),

其中: (1)SLPN(System Level PN)系统级 Petri 网 SLPN = (P, T_{sa}, I, O, M)。P、I、O、M 同基本 Petri 网, T_{sa} 用于描述工序的高层次抽象变迁^[4]。SLPN 用于描述整个 MPS 工作流程, 以及各个功能模块之间的协作配合关系。

(2)MLPN (Module Level PN) 模块级 Petri 网

$MLPN = (P_s, P_m, T_{ma}, I, O, M)$ 。P_s、P_m 分别代表状态、消息库所, T_{ma} 代表模块层的抽象变迁, I、O 和 M 同基本 Petri 网。这是一种带抽象变迁的面向对象扩展 Petri 网, 是 SLPN 中 T_{sa} 的展开。模块间通过消息库所中流动消息 token 来实现, 降低系统模型各部分耦合度。消息库所在 win32 平台下, 可以通过拓展 Windows 消息机制实现, 在 Linux 或 Unix 平台下, 则可通过自定义队列来完成消息库所的构建。

MLPN 处理模块内部运行机制和模块间相互通信, 是 SHPN 模型中核心的一层。

(3)DLPN(Device Level PN)设备级 Petri 网

$DLPN = (P, T, I, O, M, RT)$ 。是具有变迁时间的赋时 Petri 网, RT 为点火时间函数。DLPN 描述设备某个工艺, 如机械手

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60174009, 60574063)

作者简介: 周 昕(1979 -), 男, 硕士生, 主研方向: 离散事件系统建模, 柔性加工制造, 面向对象方法; 杨根科, 博导

收稿日期: 2006-01-29 **E-mail:** xinzhou@sju.edu.cn

的搬运、复位、焊接的具体步骤，没有复杂的交互关系，但是 SHPN 对应控制逻辑的基础。每次变迁对应设备一个基本操作，具有原子性，不可再拆分。

SHPN 模型与整个监控系统模型关系如图 1。层次化的 SHPN 内部是一种树型结构，分别从系统、模块、设备三层次，对 MPS 从整体流程、局部功能到操作细节 3 方面分别加以描述。SHPN 构成上层控制逻辑层，调用底部驱动层，由驱动操作硬件。

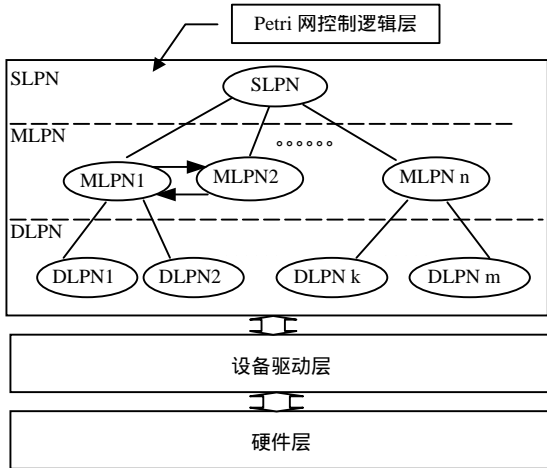


图 1 结构化 3 层次 petri 网及内外结构

建模时采用自顶向下逐层建模的方法，先给出整体结构 SLPN，后考虑局部 MLPN 和细节 DLPN。但在参照该模型开发 MPS 监控系统时，则相反，采用一种自底向上的流程，从最底层 DLPN 开始，实现每个设备的具体操作，然后由 MLPN 完成模块功能，最后根据 SLPN 整合成完整监控系统。

2 结构化多层次 Petri 网应用实例

系统为 985 实验室建设项目 MPS 实验平台，由投料站、搬运站、加工站、安装搬运站、安装站和分类站 6 个标准模块单元组成，如图 2(a)。原料由投料站通过电机转盘传送到位，被搬运站机械手送入加工站，经过 2 道加工，由机械手送至安装站，按照工件类型进行不同组装，再由机械手运至分类站进行成品分类，完成整个模块化制造过程。

采用结构化多层次 Petri 网建模产生一个结构清晰的层次化模型。具体如下。

2.1 系统级 Petri 网

SLPN 层锁定整体构架，明确各模块之间的分工和在系统中的地位，模块内部细节被封装。MPS 实验平台的系统层 Petri 网的描述如图 2(b)及表 1 所以。

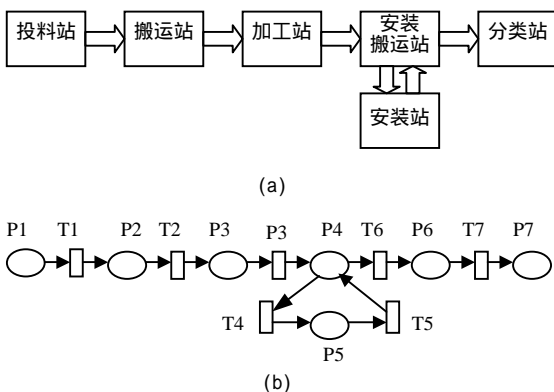


图 2 MPS 实验平台结构与系统级 Petri 网

表 1 (Table 1) 系统级 Petri 网库所变迁

库所	含义	变迁	含义
P1	原料处于投料站模块	T1	投料站模块操作
P2	原料处于搬运站模块	T2	搬运站模块操作
P3	原料处于加工站模块	T3	加工站模块操作
P4	半成品处于安装搬运站模块	T4	安装搬运站模块操作
P5	半成品处于安装站模块	T5	安装站模块操作
P6	成品处于分类站模块	T6	安装搬运站模块操作
P7	产品处于输出区	T7	分类站模块操作

冲突处理：如图 2 中库所 P4 的 token 有 2 个走向，通过不同的变迁，一个走向安装站模块，另一个走向分类站模块。解决方法是依据当前 token 代表工件所处加工步骤，决定下一步变迁。token 所处位置的跟踪，依赖其数据结构中一个整数型域的值，如下所示：

```
typedef struct _processStatus{
    unsigned int nID;
    unsigned int nStep;
    ...
} Token_processStatus;
```

nID 表示工件编号，nStep 记录当前工序步骤。Token 的 nStep 值为 3 时走向 T4，值为 5 时走向 T6。

2.2 模块级 Petri 网

MLPN 层是对系统级 Petri 网某个抽象变迁的描述，注重 MPS 的模块单元运作时内部机制和外部条件。以复杂的安装搬运站模块为例，如图 3 及表 2 所以。

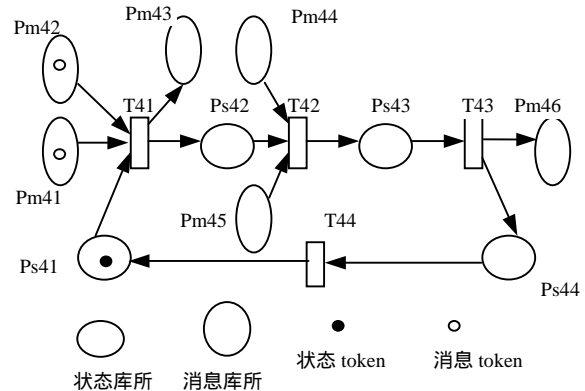


图 3 模块级 Petri 网 (安装搬运站模块)

表 2 安装搬运模块 Petri 网库所变迁

状态库所	含义	消息库所	含义	抽象变迁	含义
Ps41	机械手准备好	Pm41	对象已达安装搬运站	T41	搬运至安装站
Ps42	工件到安装站	Pm42	安装站就绪	T42	搬运至分类站
Ps43	工件到分类站	Pm43	对象在组装台就位	T43	通知分类站/本站机械手等待复位
Ps44	机械手待复位	Pm44	对象组装完毕	T44	机械手复位
		Pm45	分类站接收台就绪		
		Pm46	成品在分类站就绪		

启动时,安装搬运站机械手处于复位状态 Pos1(图 4b),当上站向本站模块发送工件到位消息,且安装站向本站发送设备空闲的消息,就触发本站机械手动作搬运至 Pos2,送消息通知安装站;安装站完成操作,向本站发送消息,同时向分类站发送准备接收的消息,触发本站机械手再度动作,将物品搬运至 Pos3,然后复位返回 Pos1。

单元模块的动作依赖本站状态和前后站的消息通信。token 在消息库中流动起到联系协调模块间操作的作用,在 C/c++中对应一个枚举型(enum)数据结构,如

```
typedef enum_messageType {
    robotReady = 0,
    assembleComponentReady,
    assembleFinish,
    distriComponetReady,
    ...
} MessageType;
enum 类型保证一个消息库所只接收某种特定消息。
```

2.3 设备级 Petri 网

DLPN 层负责对设备工艺操作的实现。每种工艺操作所需一系列的动作组合,例如机械手一次单向搬运,需要执行“下降->抓取->上升->旋转定位->释放”连续动作。这些动作逻辑顺序依赖设备本身,不和其它功能模块进行通信,因而对应 Petri 网图形是一种单向的顺序结构,一个库所接一个变迁延续至结束。库中所流动的 token 对应一个描述设备状态的数据结构,如 3 自由度机械手 token:

```
typedef struct_robotStatus{
    unsigned int    nPosX;
    unsigned int    nPosY;
    unsigned int    nPosZ;
    bool            bHoldingComponent;
}Token_RobotStatus;
```

其中 nPosX、nPosY、nPosZ 代表空间坐标 x、y、z, bHoldingComponent 代表机械手是否正抓着工件。每经过一次变迁,token 变量值就变化一次,对应于实际的机械手移动了位置或进行过“抓/放”操作。

2.4 底层设备驱动

图 1 显示了 DLPN 和驱动的联系。MPS 试验平台机电部分由 OMRON 公司 CPM2A 型 PLC 直接控制,与上位机交互通过 HostLink 串口协议。监控软件向 PLC 发送控制或查询命令,实现对 PLC 内存通道 I/O 点的读写,从而监控设备运行。

2.5 MPS 监控系统软件特性

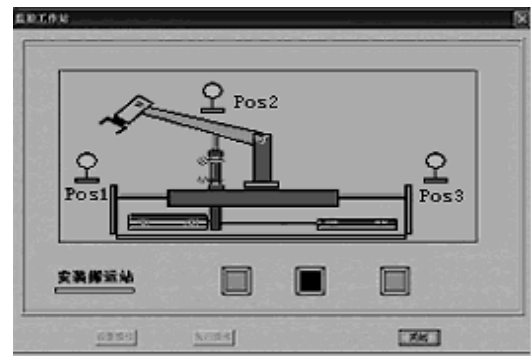
为适应 MPS 制造模块单元的可组合配置特性,监控系统设计成组态软件。现场(硬件设备或系统结构)发生改变时,相应更改软件的配置就能运行。

MPS 系统被拆分的标准单元模块本身是稳定的,它对应的控制逻辑是 3 层次 Petri 网中的 MLPN 和 DLPN,通过程序编码完成逻辑并在编译期间实现。封装后,其繁琐细节对用户不可见,只通过接口交互。而 MPS 单元模块间的组合方式依赖生产需求,其控制逻辑对应 SLPN,用户完全可控,通过监控软件的组态设置来实现。

图 4(a)展示了 MPS 组态设置界面,可配置每个模块站对应的 PLC 地址、通道、位,以及站间消息通信方式。图 4b 展示了安装搬运站的监控界面。用户通过图形界面 (GUI) 监视设备运行,具有操作权限还能通过命令按钮直接控制现场设备。



(a)



(b)

图 4 MPS 系统设置界面站监控界面

3 结构化 3 层次 Petri 网的可重用性

模型具有的结构化特点,以及 MLPN 层使用面向对象 Petri 网来描述,使得当系统发生变化时,原模型具有较高的可重用性。

例如,MPS 实验平台加工工艺发生变化,在安装搬运站后增加了成品检测站,对模型修改简单的分层次进行。首先,修正系统级 Petri 网,在 T6 之后、T7 之前,插入新的成品检测抽象变迁 Tc、对应的状态库所 Pc 以及输入输出弧;模块级 Petri 网,需要新增能实现检测单元模块功能的子 Petri 网,同时增加修改前驱后继模块的消息库所,使新模块接入整个系统模型;最后添加检测站在设备级 Petri 网的实现,这是独立的,只与设备本身运作机制有关。

开发时把每层次的各个 Petri 子网描述的控制逻辑封装成类,对外部只暴露接口(Interface),并以微软 COM 组件的形式实现。当系统修改后,就不需要重新提供新版本的整个庞大的软件,而只需更新少量的 dll(Dynamic link library, COM 组件形式之一)和相关文件,就能实现系统升级,确保了系统整体上的高可重用性。

4 结论

文章针对 Petri 网在应用中出现的不足,面向模块化制造系统,给出了一种结构化 3 层次拓展 Petri 网模型,将其用于 MPS 柔性制造实验平台的监控系统开发中,取得了良好的效果。该模型层次清晰,有效降低模型规模和复杂度。并且易于修改和扩充,具有很高的可重用性。鉴于一般制造系统也有和 MPS 模块化制造系统类似的复杂性,该 3 层次模型也能在其建模中发挥作用。

参考文献

- 1 Murata T. PetriNets: Properties, Analysis and Application[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.
- 2 Lefranc G. Modeling of a Manufacturing System Using Petri Nets[C]. Proceedings of the 24th Annual Conference of IECon'98, 1998, 1: 137-142.

(下转第 202 页)