

文章编号: 1002-0411(2001)03-284-05

## 基于 Petri 网/COM 的物流系统建模仿真技术

李霄峰<sup>1</sup> 徐立云<sup>1</sup> 邵惠鹤<sup>1</sup> 任德祥<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学自动化研究所 上海 200030; 2. 上海宝钢技术中心自动化所 上海 201900)

**摘要:** 本文针对制造业的复杂物流系统, 采用分层有色 Petri 网进行建模, 并提出一种基于 COM 的 HCPN 仿真技术, 其模块化和层次化的概念不仅为通用的物流仿真提供了清晰、灵活的解决方案, 而且使其具有很强的灵活性和可扩展性. 文中以某钢厂炼钢连铸物流系统为例, 描述了如何使用 Petri 网和 COM 相结合构造物流仿真系统. 本文的方法同样适用于 FMS 等其它 DEDS 的建模与仿真.

**关键词:** 有色 Petri 网; 物流; COM; 组件; 接口

中图分类号: TP13

文献标识码: B

### MODELING AND SIMULATION OF PHYSICAL DISTRIBUTION SYSTEM USING PETRI NET & COM

LI Xiao-feng<sup>1</sup> XU Li-yun<sup>1</sup> SHAO Hu-i-he<sup>1</sup> REN De-xiang

(1. Dept. of Automation, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, P. R. of China;

2. Institute of Automation, Baosteel Group, Shanghai 201900)

**Abstract:** In this paper, Hierarchical and Colored Petri Net is used to model physical distribution system of manufacturing enterprise and a method based on COM Technology is proposed to simulate the HCPN model, which not only provides modular and hierarchical conceptions to design general simulation distinctly, but also strengthens the flexibility and extensibility of the simulation system. We also demonstrate how to realize the simulation system by using Petri net & COM for a steel-making and continuous casting system. The proposed method can also to be applied in FMS and other DEDS.

**Keywords:** colored petri net, physical distribution, COM (Component Object Model), component, interface

## 1 引言(Introduction)

企业的物流情况反映了企业的整体生产状况. 对物流系统的研究包括解决物流平衡和需求平衡中的问题, 发现和预测生产中的瓶颈和关键路径, 优化企业生产运行方案, 以达到充分挖掘设备潜力、提高通过能力、降低库存水平、降低能耗、加快资金周转的目的. 制造系统企业大多是具有非常复杂的物流系统, 对于如此大规模的系统建设和生产组织决策, 不仅要求设计者、决策者能够实现生产的多路径的物流平衡(生产计划协调, 生产批量的协调)、资源的平衡(不同设备的任务分配)、时间的平衡(生产线的列车时刻表的制定), 而且要有足够的灵活性以保证企业能够对变幻莫测的市场需求作出应变. 由于制造系统企业的产品可多达上百种, 不同的产品有不

同的加工路径, 因此对由这些工艺流程组成的系统进行分析研究非常困难. 并且对于这类系统的生产计划调度, 已经证明是 NP 完全问题. 采用仿真技术来分析和研究物流系统能够以很低的成本较好地解决这些问题. 因此物流系统的建模和仿真成为越来越受到现代制造业关注.

本文首先提出用分层有色 Petri 网对物流系统进行建模, 并运用组件对象模型(COM)技术实现仿真子模型, 使得物流仿真系统具有很好的灵活性和可扩展性. 该方法还可以应用于柔性制造系统的仿真中, 为企业生产计划调度(Production Planning and Scheduling)、资源调度等物流管理提供了一种很好的仿真设计模式.

## 2 分层有色 Petri 网(Hierarchical CPN)

定义 1 CPN 块是一个九元组集合  $CPN_i = (P_i, T_i, A_i, H_i, X_i, Y_i, V_i, M_i^0)$ , 其中:

(1)  $P_i = \{p_k \mid k = 1, 2, \dots, n\}$  是一组库所集;

(2)  $T_i = T_i^{s0} \cup T_i^{si} \cup T_i^* = \{t_s \mid s = 1, 2, \dots, m\}$  是一组变迁集;

(3)  $T_i^{s0} = \{t^s \mid (\forall p_k \in P_i \Rightarrow (p_k, t^s) \notin F)\}$  是一组源变迁集;

(4)  $T_i^{si} = \{t^s \mid (\forall p_k \in P_i \Rightarrow (t^s, p) \notin H)\}$  是一组阱变迁集;

(5)  $T_i^* = \{t^* \mid (\exists p_k, P_i \in p_i \Rightarrow (p_k, t) \in F_i \wedge (t, p_j) \in H_i)\}$  是一组内部变迁集.

定义 2 分层有色 Petri 网是一个六元组集合  $HCPN = \{B, D, FD, PT, FT, MN\}$ , 其中:

(1)  $B$  是一组有限的 CPN 块  $b_i$  的集合;

(2)  $D \subseteq P$  是一组有限的替代库所集合 (Substitute);

(3)  $FD: D \rightarrow B$  对应从替代库所  $D$  到 CPN 块  $B$  的弧函数;

(4)  $PT \subseteq T$  是一组有限的端口变迁集合;

(5)  $FT: (T^{s0} \cup T^{s0}) \rightarrow 2^{PT}$  是从 CPN 块的源变迁, 阱变迁及内部变迁向端口变迁的赋值弧函数;

(6)  $MN \in B_{MS}$ , 表示 CPN 块的多集 (MultiSet).

定义 3 替代库所  $d$  的等价替代物是一 CPN 块. 其中, 替代库所  $d$  的输出输入变迁被 CPN 块的源变迁和阱变迁替代, 然后将替代库所  $d$  从新的 CPN 块中移走.

定义 4 一个 CPN 块的等价替代物即为一替代库所  $d$ , 其中, CPN 块的源变迁和阱变迁由替代库所  $d$  的输出输入变迁替代, 然后将 CPN 块从主网中移走.

“替代库所”是整个 HCPN 层次化和结构化的基础. 对于复杂的物流系统, 我们在主干 Petri 网中引入替代库所, 替换掉那些可以从网中分离的单元, 同时在  $d$  库所和由  $d$  库所代表的 CPN 块之间建立赋值关系. 该方法实际上是一种同时具有模块化和层次化思想的建模方法. 模块化是指对可分离的单元单独建模, 然后将其挂到主 Petri 网上, 每个子系统都是一个单独的模块; 层次化是指每一层次的 PN 中的某些部分可以被继续细分为更详细的 Petri 网模型. 该方法不仅有利于简化复杂系统的建模过程, 同时也有利于在仿真实现时, 软件的模块化设计. 为缩小 Petri 规模, 我们采用颜色来描述 Petri 网中流动的令牌.

### 3 HCPN 对炼钢连铸物流系统进行建模 (Modeling steel-making and continuous casting system using HCPN)

我们以某钢厂炼钢连铸物流系统为例, 说明运用 HCPN 建模的步骤.

#### 1) 某钢厂炼钢连铸物流系统简介

在炼钢连铸物流系统中, 被加工对象是由炼铁厂生产的高温铁水, 它通过鱼雷车运输到炼钢厂, 炼钢厂将铁水吊装入转炉, 转炉将铁水吹炼成钢水, 吹炼完的钢水倒入转炉下的钢水包中, 台车将钢水包运到吊车跨, 吊车再将钢水包吊到相应精炼设备, 由精炼设备对钢水进行二次精炼处理. 精炼设备有三种: RH、KIP、CAS. 精炼处理结束后, 由吊车将钢水包吊到连铸机处进行浇铸, 或者吊到相应的模铸跨, 用模铸吊车将钢水包吊起进行铸锭.

#### 2) HCPN 建模物流系统的步骤

##### a. 建立递阶的层次模型

首先研究整个生产流程, 把系统划分为不同的层次, 确定同一层次的系统以及各个系统的上层与下层, 这样就建立起一个分层的系统以及相关拓扑图. 对于炼钢连铸系统, 我们将其划分为主物流层和设备子层.

主物流层由炼钢连铸的主要生产设备组成, 铁水通过主物流层后, 形成连铸坯和模铸坯; 设备子层将各生产设备放大、细化, 完整描述各设备的运行状况. 设备子层的每个对象作为仿真的基本物流模型.

##### b. 建立对象模型

在各个层次上, 列出对象的名称、属性、方法、消息(事件). 这里的对象是广义的概念, 在所讨论的层次上, 一个子系统亦作为一个对象进行处理. 以第二层中的转炉对象为例, 其属性包括平均吹炼时间、平均清理时间, 转炉的当前状态, 炉次编号, 下一发生事件, 随机变量的概率分布特性, 当前加工计划等; 操作包括铁水与废钢的装载、钢水吹炼、炼钢完毕后清理炉渣; 事件包括开始装载铁水、装载结束、开始吹炼、吹炼结束等等.

我们将炼钢连铸系统的作业设备分为八个模型: 转炉、RH、KIP、CAS、CC(连铸机)、IC(模铸)、台车、吊车.

##### c. 建立子网模型和整个 HCPN 模型

根据系统的复杂程度, 建立系统及子系统内的事件列表, 建立事件之间的关系表, 构造子网模型和整个系统的 HCPN 模型.

下图即为运用 HCPN 对某钢厂炼钢连铸系统建模结果. 为了清晰起见, 弧的权函数以及有色 token 略去.

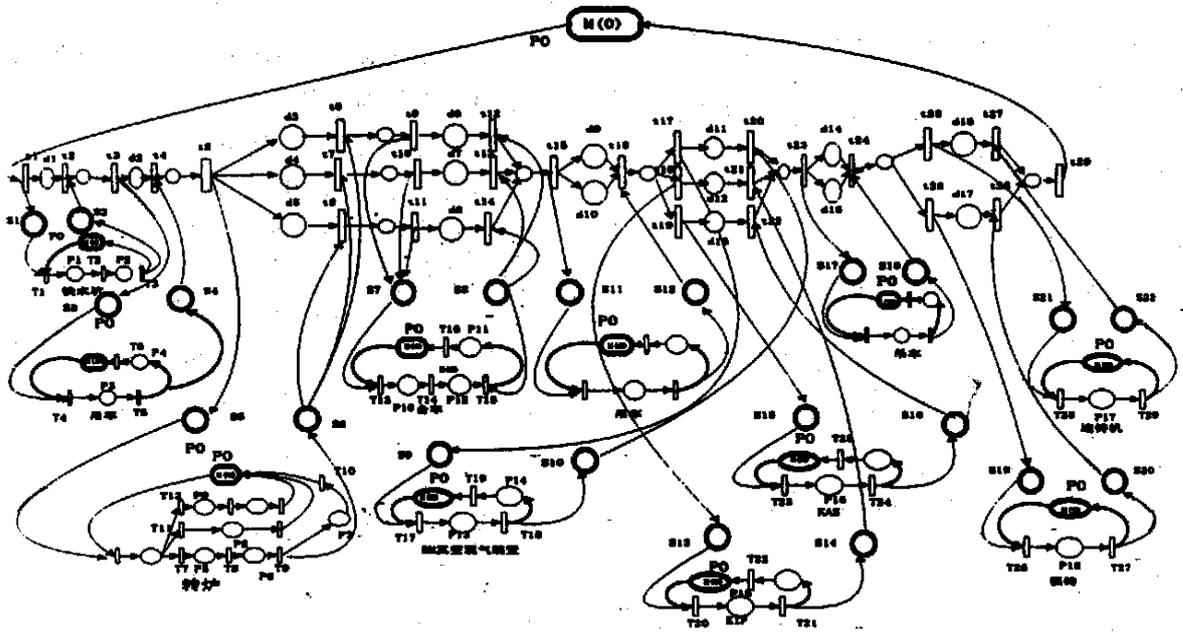


图1 炼钢连铸物流系统的 HCPN 模型

Fig. 1 The HCPN model of steel-making and continuous casting system

#### 4 基于 COM 的 Petri 网模型的仿真实现 (Simulation model of HCPN by using COM technology)

根据建模方法, 我们可以容易地将物流过程分解成若干个子网模型(见图 1 的设备子层), 不同的子网模型分别代表不同的生产单元设备. 显然, 这种分解结构不仅有利于简化复杂系统的建模, 同时也有利于软件开发的模块化设计. 为了对该模型进行分析研究, 我们以组件对象模型(Component Object Model)技术作为实现 HCPN 仿真模型的核心基础.

##### 4.1 COM 建立 HCPN 仿真模型的优点

COM 是 Microsoft 定义的一种访问软件服务的通用方法, 它能够跨越链接库、应用程序、系统软件甚至网络. 它是第三方厂家将其产品集成到 Windows DNA 中的主要方式, 使各种解决方案由一块块可重复使用的软件组件构成, 使开发人员能够快速构建和测试应用程序. 组件(Component)是通过一些接口(Interface)实现与外部的交互, 接口是一组较高层次的, 抽象的系统功能的集合, 由一些属性(Attribute)和方法(Method)组成. 使用 COM 实现 HCPN 仿真模型具有如下优点:

a. COM 提供了一种有效的途径将软件分块, 每块软件提供各自的服务, 开发者能够使用面向对象

的方法去设计和开发程序, 简化了复杂系统. 由于 HCPN 中的子网模型具有相对的独立性, 可以将每个子网模型用一个组件来实现.

b. COM 是独立于编程语言的, 它定义了一个对象必须支持的二进制接口, 用户能使用不同的编程语言来编写支持该接口的 COM 对象和调用该对象的客户. 因此, 无论是 VB, VC, COBOL 还是 PASCAL 开发人员, 都可以在遵循接口定义标准的前提下, 用不同的语言开发模型, 然后动态地将模型挂接到仿真平台上. 显然, 模型的语言无关性将给开发人员建立 HCPN 仿真模型提供极大的便利.

c. HCPN 中的各个子网模型很容易用组件实现. 子网模型的特性可以用组件的属性来表示. 子网模型的行为(变迁)可以用组件的方法来表示.

d. 采用组件构造子网仿真模型, 大大增强了建模的灵活性, 降低了建模的复杂性. 用户能很容易地用图形化组态形式建立复杂的物流仿真对象. 用户通过拖放(Pick-Place)建立模型、通过连线操作建立模型之间的联系, 模型对象是在运行时, 动态地获得与其输入输出相联系的前后模型的特性. 避免了传统意义上的模型对象往往在设计过程中就假定了与之相关联的模型的相关信息缺点.

##### 4.2 物流系统仿真的通用接口定义

在物流系统的仿真中, 不同的模型具有不同的

特性. 但是, 不论这些模型的具体特性如何, 都具有一些共性. 这些共性通过模型组件的一个通用接口 (我们称之为 IServer 接口) 的属性和方法来实现. 通过定义通用接口, 使得仿真具有了的可扩展性. 通用接口属性提供如下功能:

- 1) 设置随机变量的随机分布参数;
- 2) 对外提供该模型下一发生事件的时间及类型;
- 3) 当加工单元进入加工状态时, 提供设置设备的加工状态, 加工类型;
- 4) 当设备加工完毕后, 设置清理状态及清理需要的时间;
- 5) 为工件的下一步加工工序提供各种路由选择;

通用接口方法提供如下功能:

- 1) 动态地增加、删除与之相连的模型对象的接口, 这一功能与通过模型的输出输入端口间连线以建立模型关联的功能相对应;
- 2) 查询与该模型在物理拓扑结构上相关联的其他模型的相关信息;
- 3) 仿真数据统计功能, 如统计平均设备利用率、平均等待时间等.

确立了上述通用的接口后, 我们将获得一种极其灵活的仿真架构, 仿真主程序仅需要对抽象的接口进行操作, 而无须考虑提供该接口具体实现的加工单元的实际物理特性, 不同的加工单元在接口定义的抽象层上是完全相同的. 比如, 转炉与 RH 精炼装置从物理特性上说, 显然有着截然不同的属性, 它们各自的 Petri 网模型中的变迁激发, 状态的转移过程大相径庭, 但它们将对外则提供相同的关于下一发生事件的时间及类型的功能. 仿真推进程序无须知道当前正在操作的接口是转炉的接口还是 RH

装置的接口, 只需要知道该接口对应的模型下一事件何时发生, 是何种类型即可. 这样通过扫描所有模型的未发生事件时间和类型, 选择最近发生事件来推进仿真时钟(事件调度法).

#### 4.3 建立基于 COM 的模型组件

对于前面建立的每一个 Petri 网子模型, 我们分别建立相应的模型组件. 前面 Petri 模型中的每个变迁代表一定意义的事件, 每个事件发生都需要对事件进行处理, 因此我们定义接口的方法来相应该事件. 每个组件至少包含前面所述的通用接口, 来实现相应的功能. 除此之外, 每个组件有自己的专用接口来完成基于前面子网模型的特定功能. 图 2 显示了基于 COM 的物流仿真程序框架.

#### 4.4 建立基于 COM 的 HCPN 仿真系统

建立上述模型组件后, 用户就能够在较为固定的仿真平台上, 根据现场布局进行组态, 通过拖放和连线方式建立模型以及模型之间的联系, 模型之间的连线表示设备间的可行路径(工序), 见图 3. 最后通过仿真获得的统计数据, 如设备利用率、设备前缓冲区平均队列、工件在设备前的平均等待时间等, 为合理安排物流系统、调整生产计划提供决策依据. 以这种方式, 可以做到在根本不修改或极少修改仿真主算法的情况下, 向仿真主框架上挂接任意的符合接口定义标准的模型. 比如, 当企业增加了新的设备后, 只需提供该设备的子网模型组件, 即可对新的系统进行仿真, 仿真系统无需进行重新编译, 使系统具有很强的升级性和可扩展性. 并且它将可以很容易地运用于其他的离散事件系统仿真中, 如柔性制造系统(FMS)、生产运输系统的物流等, 只要第三方的模型开发人员开发出符合接口定义标准的模型, 就可以挂接到主仿真系统上.

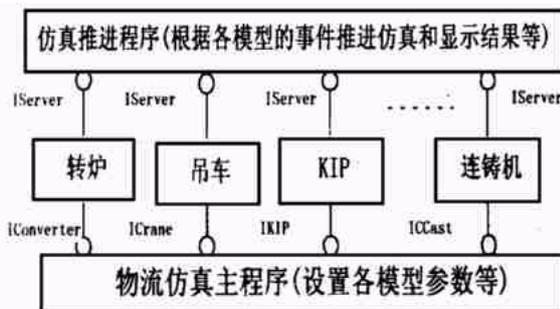


图 2 基于 COM 的物流仿真程序框架  
Fig. 2 The COM based simulation frame

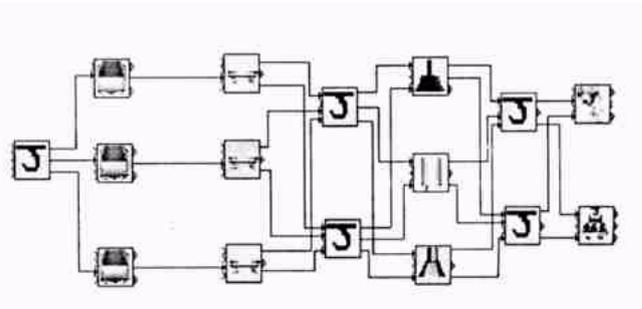


图 3 炼钢连铸物流系统的模型组态图

Fig. 3 Configuration of steel making and continuous casting system

## 5 结论(Conclusions)

本文提用一种基于 HCPN 的物流系统建模技术, 整个系统由具有相互联系的子网模型的集合组成. 其模块化技术和层次化概念使其能够对复杂系统进行建模. 并针对该模型, 提出使用 COM 技术设计仿真模型, 解决了复杂系统的综合和模型可重用性差的问题. 文中我们描述了如何使用 Petri 网和 COM 相结合构造炼钢连铸物流仿真系统. 该思想为生产物流系统的 PPS 研究以及 FMS 的建模仿真提供了一个很好的解决方案.

### 参 考 文 献 (References)

- 1 W Janneck. Modeling a Die Bonder with Petri Nets: A Case Study. IEEE Trans. Semi Manufacturing., Aug. 1998, 11: 404~ 409
- 2 Ausfelder, Craye; J- C. Gentina. A method of Hierarchical specification and prototyping of FMS. Proceedings of EPFA 1992;

(上接第 256 页)

## 4 结论(Conclusion)

通过对两种算法从不同方面进行比较可知, 应用算法的存在总有其合理性, 针对不同应用可以选择合适的算法. 算法 1 简单, 处理速度快, 适用于消息长度小于或等于 252 字节的应用, 但在存放短消息时会浪费大量的空间; 算法 2 同算法 1 相比有更大的灵活性, 适于情况多变的消息传输, 但由于它要在每次读或写之前进行存储区域的计算, 从而减缓了处理速度.

### 参 考 文 献 (References)

- 1 FOUNDATION(tm) Fieldbus Technical Overview. Revision 1.0, Fieldbus Foundation, 1996
- 2 FOUNDATION(tm) Specification System Architecture. Revision 1.0, Fieldbus Foundation, 1996

August 12- 14, 1992

- 3 D A Linkens. Scheduling and Optimisation for Heating of Steel Soaking Pits: Case Study for Hybrid Systems. IEE Pro. - Sci Meas. Technol., Sep. 1995, 142(2): 362~ 370
- 4 Kimon P Valvanis. On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems With Extended Petri Nets. IEEE Trans. Sys. Man. Cyber., January, 1990, 20(1): 94~ 110
- 5 刘 飞. CIMS 制造自动化. 机械工业出版社, 1997
- 6 张晓萍. 现代生产物流及仿真. 清华大学出版社, 1998

### 作者简介

李霄峰(1971- ), 男, 博士生. 研究领域为 FMS 建模仿真、混合系统建模分析.

徐立云(1973- ), 男, 博士生. 研究领域为生产计划与调度、冶金系统建模.

邵惠鹤(1936- ), 男, 博士生导师. 研究领域为化工过程建模与优化控制等.

Foundation 1.0, Fieldbus Foundation, 1996

- 3 FOUNDATION(tm) Specification System Management. Revision 1.1, Fieldbus Foundation, 1997
- 4 开放式网络和开放系统互连. (美) Adrian Tang 等著, 戴浩译, 电子工业出版社, 1994. 10
- 5 杨志家, 林 跃, 李亦彪著. 基金会现场总线实现可互操作的技术手段. 微计算机信息, 1998, 14(3)
- 6 张云生著. 实时控制系统软件设计原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1998

### 作者简介

周 侗(1970- ), 男, 硕士, 助研. 研究领域为现场总线.

徐皓冬(1969- ), 男, 硕士, 助研. 研究领域为工业以太网.

杨志家(1968- ), 男, 助研. 研究领域为现场总线、网络技术.

魏剑嵬(1976- ), 男, 工程师. 研究方向为现场总线.