第37卷 第15期 计 算 机 工 程 2011年8月
Vol.37 No.15 Computer Engineering August 2011

·工程应用技术与实现· 文章编号：1000—3428(2011)15—0243—03 文献标识码：A 中图分类号：N945

基于 Petri 网和 Agent 的复杂适应系统建模

赵业清[1]，朱道飞[1]，王 华[1]，毕贵红[2]，王建军[1]

(1. 昆明理工大学冶金节能减排教育部工程研究中心，昆明 650093；2. 昆明理工大学电力工程学院，昆明 650051)

摘 要：针对复杂适应系统内部关系繁杂、难于描述及计算机仿真建模困难等问题，提出一种基于时间 Petri 网和多 Agent 相结合的建模方法。以 Agent 为基本建模元素，用 Petri 网描述 Agent 内部的行为规则，实现复杂适应系统的 Petri 网与多 Agent 相结合的有机建模，可避免 Petri 网建模引起的模型空间爆炸和 Agent 内部推理机制不易描述等问题。结合某轧钢企业设备和工艺参数，在 OPEMCSS 仿真平台上建立基于多 Agent 的轧钢物流系统模型。仿真实验结果表明，该建模方法能够真实地反映复杂适应系统的特性。

关键词：Petri 网；多智能体；建模；复杂适应系统；轧钢系统

Modeling for Complex Adaptive System Based on Petri Nets and Agent

ZHAO Ye-qing[1], ZHU Dao-fei[1], WANG Hua[1], BI Gui-hong[2], WANG Jian-jun[1]

(1. Engineering Research Center of Metallurgical Energy Conservation and Emission Reduction, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

【Abstract】To make it easy and efficient internal mechanism for complex adaptive system and improve modeling capabilities of computer, a new modeling method is proposed based on combination of Time Petri Nets(TPN) and multi-Agent. In the method, Agent is used as basic modeling element and Petri nets are used to describe the internal rules of Agent, the model of complex adaptive system is established based on the combination of Petri nets and multi-Agent in the system, so that, the space explosion of the Petri nets model is prevented and the rules restriction of the Agent is avoided. According to the equipment technological parameters and the analysis of steel rolling system, the simulation model of the logistics system in steel rolling process is built by OPEMCSS package based on multi-Agent. The results show the system model can represent the facts of the complex adaptive system.

【Key words】Petri nets; multi-Agent; modeling; complex adaptive system; steel rolling system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.15.079

1 概述

制造业具有多品种、少批量、订单变化大、品种随机性强、合同期短等特点，这就要求制造系统能够适应产品的多品种、多规格的变化要求，使得生产流程趋于网络化和复杂化，所以现代企业制造系统就表现为复杂适应系统。

对复杂适应系统的研究方法很多，建模仿真是研究复杂适应系统的主要方法，不少学者基于 Petri 网开展了相关研究[1-5]。然而，Petri 网建立的模型系统依赖性比较强，而且模型结构较复杂，易导致模型空间状态爆炸等问题。文献[2]引入高级 Petri 网，有效解决了系统的复杂性问题，但对系统的抽象层次太高导致模型不能真实反映系统特性；文献[3-4]采用一种扩展 Petri 网方法，加强 Petri 网表达能力，降低系统模型规模；文献[5]把 Petri 网和面向对象技术相结合，实现对模型的结构化和工程化，但目前仍处于形式化建模阶段。对于复杂适应系统，如何有效利用功能强大的 Petri 网技术建模而又避免模型空间爆炸，仍是当前研究的重点。

复杂适应系统是一类具有代表性的复杂系统，且复杂适应系统理论把系统作为一个交互网络，其中的节点可看成具有自身目的与主动性的智能 Agent，各 Agent 能够与环境以及其他 Agent 进行交流、学习，并对自己的行为方式和结构进行更新，从而推动整个系统的演变和进化。本文采用时间 Petri 网和多 Agent 相结合的方法，可以有效地解决复杂适应系统静态结构和动态行为描述，避免系统 Petri 网模型空间爆炸等问题，实现对系统的动态建模与分析。

2 Petri 网

复杂适应系统运行是通过系统中 Agent 的动作来不断改变自身和环境状态实现的，是由一系列的动作和状态改变来完成，而 Petri 网系统的运行是通过激发变迁元素实现状态的改变，变迁元素的激发导致其前置元素和后置元素条件的变化，这是利用 Petri 网实现对复杂适应系统进行建模并加以分析的主要原因。

定义 1 时间 Petri 网[6]是一个五元组，$TPN=(P,T;F,M_0,I)$，其中，$(P,T;F,M)$ 是一个原型 Petri 网；I 是定义在变迁集合的时间区间函数：

$$I:T\to R_0\times(R_0\cup\{\infty\})$$

其中，R_0 表示非负实数集。

对于 $t\in T$，若 $I(t)=[\alpha,\beta]$ 那么当变迁 t 在标识 M 有发生

基金项目：云南省自然科学基金资助项目(2008ZC007M)；昆明理工大学校基金资助项目(KKZ3200827057)

作者简介：赵业清(1975－)，男，博士研究生，主研方向：复杂系统优化，复杂系统过程建模；朱道飞，讲师、博士；王 华，教授、博士生导师；毕贵红，教授、博士；王建军，讲师、博士

收稿日期：2011-03-16 **E-mail：**wanghuaheat@hotmail.com

权时，至少要经过 α 个时间单位才能发生；如果在此时间内没有其他的变迁发生而使 t 发生权丢失，那么变迁最晚在 β 个时间单位内必然发生。

定义 2 复杂适应系统是一个三元组 $MAS=(A,MA,R)$，其中：

(1) $A=\{A_i,i=1,2,\cdots,n\}$ 是一个有限 Agent 集合；A_i 是系统中物理实体的 TPN 模型；

(2) MA 是系统中的一个管理 Agent；

(3) $R=\{R_{ij},i,j=1,2,\cdots,n;i\neq j\}$ 是系统中不同 Agent 之间外部动作交互的关系集合。

定义 3 智能体 A_i 的面向对象时间 Petri 网为 $OTPNA_i=(TPNA_i,MI)$，其中：

(1) $TPNA_i$ 是智能体 A_i 的时间 Petri 网模型；

(2) MI 是对象的消息接口集合，包括输入消息接口和输出消息接口。

定义 4 管理 Agent 为一个四元组 $MA=(ILP,G,K,Z)$，其中：

(1) ILP 是一个智能连接库所，负责建立 Agent 之间的消息通道；

(2) G 是 Agent 之间的消息通道；

(3) K 是知识库，存储 Agent 的知识、行为规则和消息；

(4) Z 是一个决策机构，实现系统任务的接收、分解和分配，并把最终结果反馈给用户，实现系统的实时更新。

3 复杂适应系统体系结构

根据复杂适应系统的特点，将复杂适应系统设计成由任务 Agent、管理 Agent、接口 Agent、信息 Agent 4 类 Agent 组成的多智能体系统。各类 Agent 在系统中处于不同的层次，扮演不同的角色，实现不同的功能，复杂适应系统结构如图 1 所示。

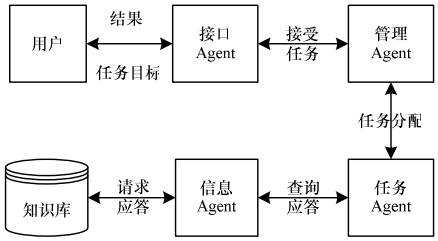


图 1 复杂适应系统结构示意图

任务 Agent 的主要功能：

(1)接收任务委托书；

(2)提取问题的求解目标；

(3)制定目标的求解计划；

(4)定义信息查询目标；

(5)计划分解，匹配合适的任务 Agent 或信息 Agent。

管理 Agent 的主要功能：

(1)接收通过接口 Agent 提交的任务和目标；

(2)对任务进行评估和分解，发出招标信息；

(3)接收任务 Agent 的投标协议；

(4)接收任务 Agent 的结果，进行评判，给予赏罚；

(5)把运行结果反馈给接口 Agent。

接口 Agent 的功能为接受用户的任务需求指令，并以合适的方式把系统运行结果反馈给用户。

信息 Agent 和知识库紧密结合，为任务 Agent 提供信息以及智能服务。

4 复杂适应系统建模

在复杂适应系统中，当系统接收到任务时，管理 Agent 根据系统环境和本区域知识，将任务和目标进行分解，通过招投标方式实现任务分配，任务 Agent 获得任务委托书后，提取问题的求解目标，制定目标的求解计划，定义信息查询目标，对任务和目标进行细分，匹配合适的任务 Agent，完成任务的执行并返回执行结果。在整个复杂适应系统执行过程中，任务主要是任务 Agent 来完成，其他各类 Agent 主要起服务和协调作用，本文就任务 Agent 进行讨论分析，其他 Agent 限于篇幅，在此不做讨论。

4.1 任务 Agent 时间 Petri 网描述

为更好地对任务 Agent 进行分析，下面用时间 Petri 网对其行为进行描述。任务 Agenti TPN 示意图及任务 $Agent_i$ TPN 的库所和变迁过程如图 2、表 1 所示。

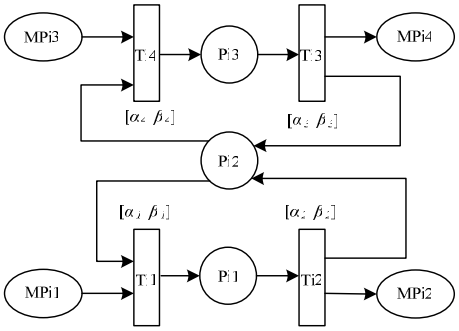


图 2 任务 Agenti TPN 示意图

表 1 任务 $Agent_i$ TPN 的库所和变迁

库所	消息库所	变迁
Pi1:工件加工状态	MPi1:请求设备启动	Ti1:工件开始加工
Pi2:设备空闲状态	MPi2:完成加工消息	Ti2:工件加工结束
Pi3:设备检修状态	MPi3:设备检修消息	Ti3:设备检修结束
	MPi4:设备检完消息	Ti4:设备开始检修

任务 Agent 的工作流程描述为：

```
While (Task_ Get( Agenti))
{ //任务 Agent 获得任务时
    If (MPi1 AND Pi2) Then Ti1
    {Act_ I(Ti1) = [α_i1, β_i1] ;
      If (Pi1) Then (Ti2 AND Out_Msg(MPi2))
      { Act_ I(Ti2) = [α_i2, β_i2] };
      Task_i_Number++;//任务数
    }
      If (MPi3 AND Pi2) Then Ti4
      {Act_ I(Ti4) = [α_i4, β_i4] ;
       If (Pi3) Then (Ti3 AND Out_Msg(MPi4))
          { Act_ I(Ti3) = [α_i3, β_i3] };
       Maintain_i_number++;//维修数
}
}
```

4.2 任务 Agent 之间的交互

在复杂适应系统中，任务 Agent 之间的消息传递可以用 Agent 之间的关系来表示，如 $R_{ij}(i\neq j)$ 表示消息由任务 Agent A_i 传到 Agent A_j。当任务 Agent A_j 通过招投标获得任务后，只有消息发送方(Agent A_i)的消息库所 OM_i 中有标志(token)时，Agent A_j 输入消息库所 IM_j 才会被触发，此时 Agent A_j 的变迁(T_j)发生，Agent A_j 的具体执行过程由其时间 Petri 网模型中的关系弧决定。复杂适应系统中各任务 Agent

之间的消息传递关系如图 3 所示。

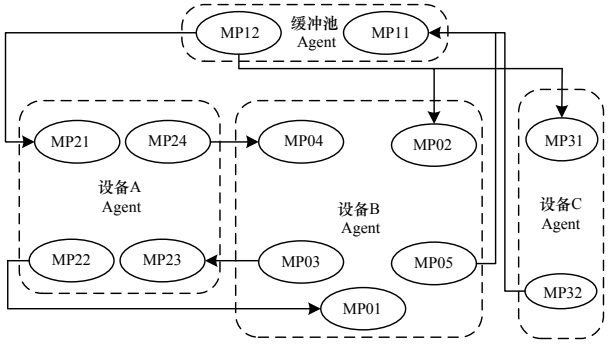


图 3　各任务 Agent 消息传递示意图

由图 3 可以看出，当设备 A 完成对零件的加工(变迁 T2 发生)，则发出卸载要求，导致消息库所 MP24 中有标志(token)，当设备 B 收到卸载请求后(MP04 中有标志(token))，则进行如下推理：

Step1 设备 B Agent 根据其内部 TPN 网模型生成规则，检查其状态是否为空(P4 是否有标志(token))，如非空，则开始装载零件(T1 发生)，调用装载行为函数 Load()，进行行为计算。

Step2 在 Load()函数中，由多个实体运行子程序组成，根据工件的位置，计算出相关组件运动轨迹，并对 Agent 中的参数进行校正、修改。

Step3 设备 B Agent 根据计算移动到目的地后(T2 发生)，调用 Unload()函数，继续进行行为计算。

Step4 在 Unload()函数中，多个实体运行子程序计算相关组件的运行轨迹，修正 Agent 中的参数，完成卸载任务。

Step5 根据系统中各 Agent 的属性对显示画面进行实时更新。

5　模型仿真分析

OPEMCSS(Operational Evaluation Modeling for Context-Sensitive Systems)是基于 CSS 理论和 OPEM 语言的图形仿真模型库系统，本文采用 OPEMCSS 软件包对轧钢复杂适应系统进行建模，在某钢铁企业棒线厂的生产线中有一台加热炉、一台初轧机、4 台中轧机、4 台精轧机。

在整个轧钢复杂适应系统中，接口 Agent 接收用户轧制任务并提交给管理 Agent，管理 Agent 根据任务种类和特性通过招投标的形式分配任务给相应任务 Agent(加热炉 Agent、粗轧 Agent、中轧 Agent、精轧 Agent)，各任务 Agent 状态随时间变化，不断接收和执行任务，并及时把任务完成情况反馈给管理 Agent，管理 Agent 对结果进行汇总并通过接口 Agent 显示给用户，实现任务在复杂适应系统中的顺利完成。

在对历史数据统计分析基础上，结合实际情况，随机抽取 10 天 30 个班次(8 h/班次)分别对该厂的 2 种主要产品(Q235J-¢6.5 mm, Q235J-¢8 mm)进行仿真(由于钢坯在加热炉加热时间较久且波动较小，为突出后继工序对物流时间影响，仿真中没有考虑钢坯在加热炉中加热时间)，实际生产数据平均物流时间与仿真结果如图 4 所示，仿真结果与实际数据一致，说明所建模型的正确有效性。图 5 显示出轧钢系统中同工序上工位设备利用率均衡。仿真过程中还发现，下游 Agent 的执行速度对上游 Agent 的执行速度影响较大，如果下游 Agent 的资源数较小，容易造成堵塞，而当下游资源数较多时，则容易造成下游机器效率低下，系统资源的浪费，所以通过建模仿真可以发现系统中物流瓶颈，从而为改进系统物流平衡、顺畅和提高设备利用率等提供参考和有益指导。

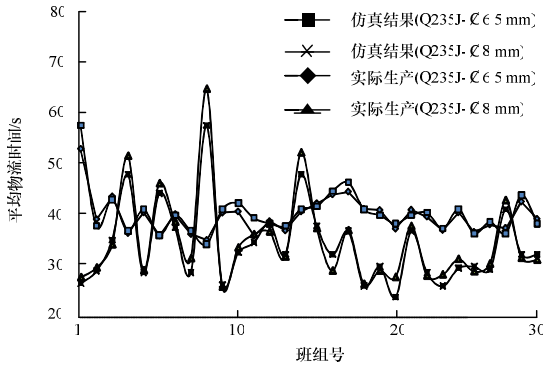


图 4　轧钢系统生产数据与仿真结果比较

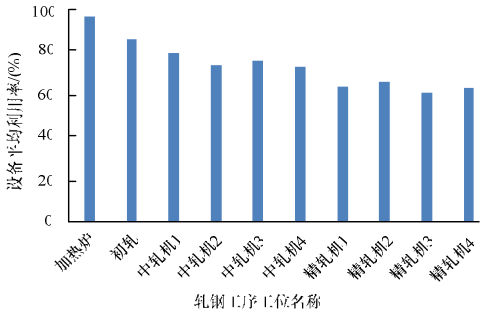


图 5　各工位设备的平均利用率

6　结束语

本文采用一种 Petri 网和 Agent 相结合的方法，通过任务 Agent、管理 Agent、接口 Agent、信息 Agent 等 4 类 Agent 来描述复杂适应系统，并利用时间 Petri 网实现对任务 Agent 间消息交互机制和内部结构的定义与分析，对某轧钢企业物流系统在平台 OPEMCSS 上加以建模实现。系统中设备参数的优化对物流时间的影响以及仿真系统软件的开发是下一步的研究工作。

参考文献

[1] Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Application[EB/OL]. (1989-08-06). http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=24143.

[2] Mendes J M, Leitao P, Colombo A, et al. Service Oriented Process Control Using High Level Petri Nets[C]//Proc. of IEEE International Conference on Industrial Information. [S. l.]: IEEE Press, 2008.

[3] 张　伟, 刘　峰. 价格着色 Petri 网的最小成本可达问题[J]. 计算机工程, 2009, 35(1): 79-81.

[4] Calin C, Adrian G, Constantin F, et al. Diagnosis of Complex Systems Using Ant Colony Decision Petri Nets[C]//Proc. of the 1st International Conference on Availability, Reliability and Security. [S. l.]: IEEE Press, 2006.

[5] Motameni H, Movaghar A, Shirazi B, et al. Analysis Software with an Object-oriented Petri Nets Model[J]. World Applied Sciences Journal, 2008, 4(3): 565-576.

[6] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

编辑　陈　文