

# 基于嵌套网的 JADE 建模

阮 军<sup>1,2</sup>, 李德华<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学信息工程学院, 武汉 430063)

**摘要:**良好的形式化建模方法是大规模开发和应用多 Agent 系统(MAS)的必要条件之一,使用多层的嵌套网对 JADE 进行层次化建模,给出面向对象的 MAS 与 NP-nets 之间的对照关系。指出通过引入层次结构,不仅能有效地控制状态空间的规模,而且能通过网托肯的嵌套方式克服 Petri 网结构演化的困难。

**关键词:**多 Agent 系统; 嵌套网; 建模

## Modeling for JADE Based on Nested Petri Nets

RUAN Jun<sup>1,2</sup>, LI De-hua<sup>1</sup>

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074;  
2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

**【Abstract】**A good modeling method for Multi-Agent System(MAS) is one of the necessary conditions for large-scale development and application of MAS. Nested Petri nets (NP-nets) as modeling tools are applied to Java Agent Development Framework(JADE), and a relationship of contrast between NP-nets and MAS which is based on object oriented programming is established. It not only can effectively restrict the scale of state space by using hierarchical structure, but also can overcome the tremendous difficulties of the structure evolution of Petri nets by nesting net token within others.

**【Key words】**Multi-Agent System(MAS); Nested Petri nets(NP-nets); modeling

### 1 概述

作为多 Agent 系统(MAS)主要的形式化建模工具, Petri 网技术的运用倍受关注。文献[1]提出了一种面向 Agent 的 Petri nets 分析方法;文献[2]建立了 MAS 的层次 Petri 网系统模型;文献[3]以 OPN 为基础建立了一种 MAS 模型。而文献[4]提出嵌套网(Nested Petri nets, NP-nets),它是有色网的一种扩展,也是一种 MAS 的形式化方法,网托肯(net token)与 Agent 相对应。它的网托肯采用的是值语义(value semantics),在表达能力与行为的可判定性之间做出较好的折中。

本文根据一种开源的 MAS 的框架 JADE<sup>[5]</sup>的层次结构,采用嵌套网进行系统建模,分析面向对象的 MAS 与 NP-nets 之间的对照关系。

### 2 JADE 简介

JADE 是一个兼容 FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agents)规范的用以开发 MAS 的框架。它主要包括 3 大部分: Agent 类库,分布式 MAS 运行平台和运行管理以及调试的图形化工具集。本文以文献[5]中给出的图书购买程序为例,进行嵌套网建模。设这里有  $M$  个买家,  $N$  个卖家。每位买家都有一本自己想求购的目标图书(由用户输入的),每位卖家也都有自己能卖出图书的价格清单(由用户输入的)。此程序的流程如下:

(1)买家  $Buyer_k$  进行询价,向所有由 DF Agent 提供的图书卖家发出含目标图书名称的 CFP(Call for Proposal)消息(数量为  $N$ );然后等待卖家们的回复。

(2)收到此消息的卖家检查自己的价格清单,如果有此书就向买家  $Buyer_k$  回复 PROPOSE 消息,并返回该书的售价;如

果没有此书,卖家就向  $Buyer_k$  回复 REFUSE 消息。

(3)买家  $Buyer_k$  收到某个卖家  $Seller_i$  的回复时,如果其售价是当前的最低价则记录此卖家的 AID 以及图书的售价;并累计已收到的回复消息的总数  $cnt$ ,当  $cnt$  达到  $N$  后,  $Buyer_k$  进入交易环节。

(4)买家  $Buyer_k$  向最终出价最低的卖家  $Seller_a$  发出 ACCEPT\_PROPOSAL 消息,订购目标图书,然后等待  $Seller_a$  的回复。

(5)卖家  $Seller_a$  收到买家  $Buyer_k$  的定购消息后,检查价格清单确认当前是否还有此书,如果还有则向  $Buyer_k$  发出 INFORM 消息确认,并从价格清单移除该书的记录;如果已经没有该书了,则向  $Buyer_k$  发出 FAILURE 消息。

(6)买家  $Buyer_k$  收到  $Seller_a$  的 INFORM 消息表示交易成功,否则交易失败。此后,买家  $Buyer_k$  当前的购书任务完成。

在整个程序中买家对应 Agent 的子类 BookBuyerAgent,买家的目标图书为其字符串成员变量,购书行为被封装到 Behaviours 的子类 RequestPerformer 中。卖家对应 Agent 的子类 BookSeller Agent,卖家的价格清单为 Hashtable 的实例;其行为被分为 2 部分:一是询价的处理,二是交易的处理。它们分别被封装到 2 个循环执行的 behaviours 的子类 OfferRequestsServer 和 PurchaseOrders-Server 中。

### 3 JADE 的嵌套网模型

文献[4]提出的嵌套网(Nested Petri nets, NP-nets)是有色

**作者简介:**阮 军(1976 - ),男,讲师、在职博士研究生,主研方向:人工智能,信息传输与处理;李德华,教授、博士生导师

**收稿日期:**2008-01-24 **E-mail:** justin.ryan@163.com

网的一种扩展形式，它存在 2 种托肯——网托肯和原子托肯 (atom token)。嵌套网由网元件 (net component)  $H$  组成， $H$  是 Petri 网的一种扩展形式。最高层的网元件  $H_0$  是一个特殊的网元件——系统网 (system net)。网托肯在系统网中运行，或者嵌套在网托肯中。嵌套网的库所与有色网的库所类似。而它的变迁扩展为 3 种不同的触发过程，分别是自治过程、垂直同步过程和水平同步过程。自治过程是网托肯中的无标记变迁的触发过程，遵循高级 Petri 网的触发规则；垂直同步过程是网的变迁与它的网托肯的变迁同时触发的过程，但仅限于相邻的两层之间；水平同步过程它是同一库所中的 2 个网托肯的内部相关联的变迁同时触发的过程。另外，为了简化网模型的描述，这里用到 Petri 网的一种扩展形式——保留弧 (reserve arcs)，表示当变迁触发时库所中的托肯仍然保留 (托肯可能存在更新)，保留弧用双箭头表示。

在 JADE 的应用开发中，大量的代码与 2 个方面相关：其一是派生的 Agent 子类的成员变量，它们描述了 Agent 的心智状态；其二是派生的 Behaviour 类，它们描述了 Agent 的行为。在嵌套网中，Agent 的群体可以与系统网 ( $H_0, M_0$ ) 相对应，在 JADE 中就是 MAS 运行平台，这里记为  $S_{net}$ ；Agent 与网托肯 ( $H_1, M_1$ ) 相对应，( $H_1, M_1$ ) 描述 JADE 中的 Agent 类及其子类的内部结构与功能，记为  $A_{net}$ ；Agent 类中聚合的 Behaviour 类以及其子类与下一级的网托肯 ( $H_2, M_2$ ) 相对应，记为  $B_{net}$ 。因此整个 JADE 平台可以分解为 3 层嵌套网结构。也就是说，将顶层的系统网映射为 MAS 运行平台；将 Agent 映射为网托肯  $A_{net}$ ，它的动态行为或任务映射为下级的网托肯  $B_{net}$ ；而将 Agent 的心智状态封装为  $A_{net}$  的原子托肯，将任务的目标以及相关信息的封装到  $B_{net}$  的原子托肯中。

### (1) 系统网 $S_{net}$

$S_{net}$  包含 2 种原子托肯和 1 种网托肯。其中，原子托肯  $m$  为封装 FIPA ACL 消息的数据结构，网托肯  $A$  为  $A_{net}$  的实例，即买家 Agent 和卖家 Agent；原子托肯  $aid$  为 JADE 中 Agent 的 AID。

$S_{net}$  是从开发者的角度对 JADE 平台进行简单抽象得出来的，这里将整个 MAS 运行平台的功能认为包括 2 部分，即多 Agent 之间的异步消息传递和 Agent 的生命周期管理，如图 1(a) 所示。这里异步消息传递部分对应 MTS，分布式消息通道的出口和入口分别看作为发件箱和收件箱 2 个库所，各个 Agent 的消息通过抽象的黑箱式的变迁 DISTRIBUTE 完成消息交换与分发。Agent 生命周期管理主要描述 Agent 的运行与资源的管理。最主要的任务就是不断地收取每个 Agent 所对应的消息，这里由 RECEIVE 变迁表示，它将收到的属于自己的消息  $m$  通过垂直同步触发  $A_{net}$  之中变迁  $\overline{RECEIVE}$  传递到  $A_{net}$  的内部收件箱——库所 AP3，从而完成消息的接收。如果没有属于自己的消息，则 Agent 处于休眠或等待状态。另一个任务就是管理 Agent 的运行状态，初始化后所有  $A_{net}$  都置于库所 IDLE 中。这里只给出释放 Agent 的部分模型，即在库所 SIGN 中放入原子托肯  $aid$ ，则通过变迁  $\overline{DESTROY}_A$  释放 AID 等于  $aid$  的 Agent，同时通过垂直同步触发  $A_{net}$  之中  $\overline{DESTROY}_A$  析构 Agent 内部的成员变量。Agent 的其他 4 种状态的实现类似。

### (2) Agent 模型 $A_{net}$

如图 1(b) 所示， $A_{net}$  也包含 2 种原子托肯和 1 种网托肯， $m$  同前，原子托肯  $a$  为 Agent 的内部状态，网托肯  $B$  为  $B_{net}$  的实例，即 Agent 的行为。不同类型的 Agent 拥有不同的网托肯和原子托肯，并且部分变迁需要被重载，但它们共用相同的 Petri 网结构。

在本例中，对于买家 BookBuyerAgent，原子托肯  $a$  存储着买家的目标图书名称和图书卖家们的地址 AID (这里忽略卖家 AID 获取过程)；其网托肯  $B_{net}$  对应买家的行为模式，它被程序中的 RequestPerformer 类所封装。而对于卖家 BookSellerAgent，原子托肯  $a$  存储着卖家的价格清单；其网托肯  $B_{net}$  却包含 2 种实例，分别对应询价和交易的 2 种行为模式，及 OfferRequestsServer 类和 PurchaseOrdersServer 类所描述的过程。除此之外，不同的  $A_{net}$  中的变迁 SETUP 和 ACTION 的内涵不同。

这里将 Agent 的结构抽象为由 3 个部分所组成：(1) 内部的运行管理，主要包含成员变量的构造和析构，以及通过变迁 SETUP 对 Agent 进行初始化过程。(2) 消息的处理。当有新消息到达库所 AP3 后，能处理消息  $m$  的  $B_{net}$  实例  $B$  从任务池 (库所 TASK) 中被提出，组成三元组  $(a, B, m)$ 。这里可以将  $(a, B, m)$  看作是基于模型的反射型 Agent 的内核， $a$  代表了 Agent 的内部状态以及它对外部世界的认知； $m$  则相当于由传感器返回的外部世界状态；而  $B$  是消息的处理器，它封装着条件-行动规则集。 $B_{net}$  的启动通过  $A_{net}$  的变迁 ACTION 垂直同步触发  $B_{net}$  中的  $\overline{ACTION}$  实现，并将三元组  $(a, B, m)$  中的  $(a, m)$  传入库所 BP1 中，如图 1(c) 所示。

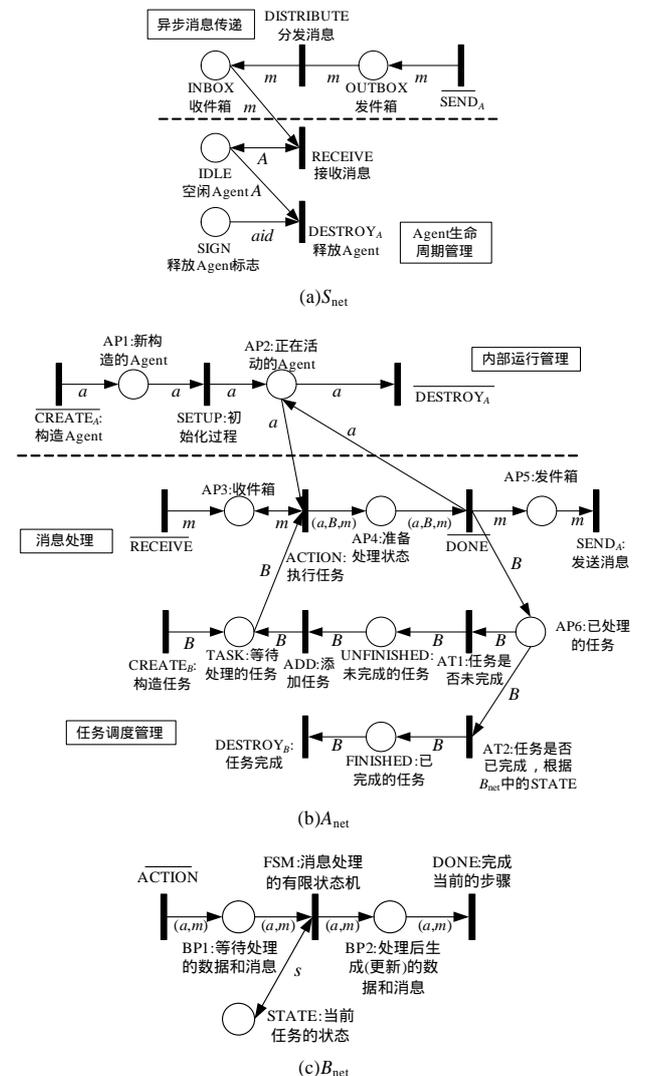


图 1 JADE 的 NP-nets 模型

然后，通过由变迁 FSM 处理后生成新的  $(a', m')$  进入库所 BP2，并更新  $B_{net}$  的内部状态 (由库所 STATE 中的原子托肯  $s$  保

存)。这里， $a'$ 为对Agent内部状态和知识的更新；消息 $m'$ 为Agent的响应。最后，通过变迁DONE的触发，垂直同步触发 $A_{net}$ 中的 $\overline{DONE}$ ，将响应消息 $m'$ 带回库所AP5，随后触发变迁 $SEND_A$ 将消息 $m'$ 通过垂直同步触发发送到 $S_{net}$ 中的库所OUTBOX，至此完成消息的处理和发送过程。只是对于不同的 $B_{net}$ 或不同的时刻，这里的消息 $m$ 和 $m'$ 可能为空。当变迁 $\overline{DONE}$ 被同步触发时，更新后的表示Agent内部状态的原子托肯 $a$ 交还运行管理部分，任务执行后的网托肯 $B$ 送交任务调度管理子网。(3)任务的调度管理。所有等待执行的网托肯 $B$ 都置于库所TASK，等待对应消息的到来。网托肯 $B$ 由变迁ACTION调用并执行任务后又由变迁 $\overline{DONE}$ 返回到库所AP6。如果网托肯 $B$ 所表示的任务已经完成则网托肯被释放，否则就放入任务池中等待下一次的执行。

### (3)行为模型 $B_{net}$

前面已经介绍了网托肯 $B$ 的调用过程。在 $B_{net}$ 中，二元组 $(a, m)$ 表示托肯 $B$ 的拥有者的心智状态和当前任务正在处理的消息(外部世界的变化)。原子托肯 $s$ 表示当前任务执行过程中所处的状态，比如：开始和结束。变迁FSM表示ACL消息处理的有限状态机，它是FIPA交互协议模型的抽象代替。它的具体结构已经有较多研究，这里不再重复。要提到的是，变迁FSM的接口是固定的，即它的连接弧是不变的。不同的 $B_{net}$ 中只是变迁FSM所代表的有限状态机(交互协议模型)不同，以及原子托肯 $s$ 的颜色集不同，但它们共用相同的Petri网结构。比如，对于买家的行为RequestPerformer，变迁FSM中包含图书询价和定购2个操作阶段的描述，可以由一个CFP协议模型进行表达；对应到Java程序中就是一组以托肯 $s$ 的取值为条件的条件分支语句。因而根据CFP协议，本例的库所STATE的托肯 $s$ 的颜色集共有4种取值：{“开始”，“询价中”，“交易中”，“结束”}，对应交易过程中的4种状态。当托肯 $s$ 的值为“结束”并且网托肯 $B$ 到达库所AP6后， $A_{net}$ 中的变迁AT2将触发，并释放该网托肯。对于卖家有OfferRequestsServer和PurchaseOrdersServer 2种行为，它们同样使用相同的 $B_{net}$ 结构。OfferRequestsServer的变迁FSM表示询价的处理，PurchaseOrdersServer的FSM表示交易的处理。它们的原子托肯 $s$ 的颜色集中只有一种取值：{“开始”}，因为以上2种行为是循环执行的，而且没有中间状态存在。

由此可见，对于不同的网托肯 $B_{net}$ 中托肯 $s$ 的颜色集的域不同，其取值的含义也不相同；而且变迁FSM的功能也不相同，但是整个 $B_{net}$ 的结构却是相同的。这些正类似于面向对象技术的封装、继承、多态。JADE Agent与嵌套网NP-nets的对

比，如表1所示。

表1 JADE Agent与嵌套网NP-nets的对比

Agent 属性	实现技术	
	JADE Agent	NP-nets
结构	Agent 类	网托肯 $A_{net}$
状态	类的成员变量	原子托肯与库所
行为	behaviours 类	网托肯 $B_{net}$
反应性	类的成员函数	变迁
自发性	来源于条件-规则	来源于网结构
社会性	异步消息传递	水平同步触发
并发性	多线程并发	多层网(托肯)的局部并发
持续性	持续运行	托肯持续流动
交互方式	消息的传递	(网)托肯的传递

### 3 面向对象的 MAS 与嵌套网

综上所述，JADE在Agent中以容器的形式聚合behaviours子类的实例实现Agent行为的动态性，能在不改变Agent结构的前提下完成Agent功能的伸缩。对照这种方法，嵌套网采用层次模式使抽象的、稳定的状态和行为在网中进行表达，而具体的、可变的、动态的状态与行为就放入网托肯之中。由于Petri网中变迁与托肯之间的作用只能改变网的标识，状态空间的表示只能通过原子托肯来实现，网的结构无法动态改变。NP-nets试图使用网托肯的嵌套——增加系统的层次，形成(网-网托肯-原子托肯)3层以上的层次结构，通过动态地引入不同的网托肯，从而不断地改变整个Petri网的总体结构，克服结构演化的巨大困难。比如，要想动态地改变 $B_{net}$ 的行为模式，可以将现在的原子托肯 $s$ 转换为封装FIPA交互协议模型的网托肯 $P_{net}$ ，而原来的变迁FSM退化为输入输出的垂直同步触发的接口。同时，众所周知的另一个好外是，采用“层次化”结构的网模型可以有效地控制每一层Petri网的规模。

#### 参考文献

- [1] 陈为雄. 基于 Petri Nets 的 BDI Agent 模型[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 23-25.
- [2] 禹继国. 多主体行为模拟的层次 Petri 网方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(16): 26-28.
- [3] 于振华. 基于 Petri 网的多 Agent 系统设计与实现[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(3): 517-520.
- [4] Lomazova I A. Nested Petri Nets——A Formalism for Specification and Verification of Multi-Agent Distributed Systems[J]. Fundamenta Informaticae, 2000, 43(1-4): 195-214.
- [5] Caire G. JADE Programming Tutorial for Beginners[EB/OL]. (2003-12-01). <http://jade.tilab.com/doc/JADEProgramming-Tutorial-for-beginners.pdf>.

(上接第 203 页)

#### 参考文献

- [1] Koblitz N. Elliptic Curve Cryptosystems[J]. Mathematics of Computation, 1987, 48(177): 203-209.
- [2] Miller V S. Use of Elliptic Curves in Cryptography[C]//Proc. of CRYPTO'85. New York, USA: Springer-Verlag, 1986: 417-426.
- [3] IEEE. P1363-2000 Standard Specifications for Public Key Cryptography[S]. 2000.

- [4] 鲍可进, 宋永刚. 基于 FPGA 的有限域求逆算法的改进及实现[J]. 计算机工程, 2006, 32(23): 156-158, 170.
- [5] 高献伟, 欧海文, 董秀则, 等. 基于FPGA的 $GF(2^m)$ 求逆算法的设计研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(9): 135-137.
- [6] Bailey D V, Paar C. Efficient Arithmetic in Finite Field Extensions with Application in Elliptic Curve Cryptography[J]. Journal of Cryptology, 2001, 14(3): 153-176.