

文章编号: 1001-0920(2009)11-1677-05

## 基于 Agent 的分形供应链自适应协同计算

周建频<sup>1</sup>, 张 勤<sup>2</sup>

(1. 集美大学 航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 东北电力大学 经济管理学院, 吉林省 吉林市 132012)

**摘 要:** 应用分形、智能 Agent 和神经网络自适应控制技术, 研究分形供应链适应环境变化的结构模式和策略模式, 探讨了分形供应链 Agent 关联结构, 提出了分形供应链双层自适应协同计算模式, 论述了资源 Agent, 信息协调 Agent, 人机交互 Agent 和领域计算 Agent 之间的相互作用关系. 以一个分形模块的策略协同为分析对象, 研究了领域单元的自适应协同计算模式, 分析了分形模块的成本模型, 并对基于 Agent 交互的神经网络模型部分进行了算例仿真.

**关键词:** 分形供应链; Agent; 计算; 协同; 神经网络

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Adaptive synergy computing of Agent-based fractal supply chain

ZHOU Jian-pin<sup>1</sup>, ZHANG Qin<sup>2</sup>

(1. College of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. School of Economics and Management, Northeastern Dianli University, Jilin 132012, China. Correspondent: ZHOU Jian-pin, E-mail: jianpinzhou@jmu.edu.cn)

**Abstract:** By applying fractal, intelligent Agent and neural network adaptive control technology, structural pattern and policy pattern of fractal supply chain adapting to environmental changes are researched. After exploring the correlation structure of fractal supply chain Agent, adaptive dual synergy computing mode of fractal supply chain is proposed. Then the interaction between resource Agent, information coordination Agent, human-machine interactive Agent and domain computing Agent is discussed. By analyzing policy synergy in a fractal module, an approach to adaptive synergy computing schema of a domain unit is studied, and cost model of fractal module is analyzed. Finally, the part of neural network model based on Agent interaction is simulated.

**Key words:** Fractal supply chain; Agent; Computing; Synergy; Neural network

### 1 引 言

供应链系统可看作一个复杂适应系统, 供应链管理既需要局部的灵活适应性, 又要具有全局的目标协同性. 由此引入基于 Agent 的供应链建模方法, 即将供应链映射为多 Agent 系统. 一般有以下两种研究倾向: 一种是基于简单 Agent 建模的仿真方法, 侧重于研究供应链网络系统的集合行为模式<sup>[1]</sup>, Agent 行为及 Agent 间的互动方式由规则决定, 从较宏观的角度研究 Agent 系统的演化、适应等概率状态, 如群体智能、自组织和涌现等现象; 另一种以较复杂 Agent 构造为基础, 如信念、愿望、意图(BDI)模型, 研究侧重于应用 Agent 系统的自治性、智能性、互操作性、适应性和鲁棒性等功能, 以及

Agent 之间的通信协商机制和结构关联模式.

文献[2]从面向 Agent 的软件工程角度对供应链系统中各种 Agent 角色模型进行分析和设计; [3]研究分布智能系统构造模块, 分析了基于 Agent 角色和功能模块相匹配的供应链任务分解、动态调度和协调机制; [4]试图整合供应链宏观和微观两个层次, 结合自上而下的系统动态模型和自下而上的 Agent 建模两种方式, 通过 Agent 的订单处理和评价等模块实现局部智能化运作, 并通过供应链网络反馈进行全局协调. 从上述研究可以看出, 一种适应的结构对于供应链 Agent 系统局部与全局的适应与协同十分重要.

分形供应链是具有自相似、自组织和自适应特

收稿日期: 2008-12-11; 修回日期: 2009-02-28.

基金项目: 福建省青年人才创新项目(2007F3068).

作者简介: 周建频(1968—), 男, 吉林省吉林市人, 讲师, 博士, 从事分布计算、供应链管理的研究; 张勤(1962—), 男, 吉林柳河人, 副教授, 硕士, 从事电子商务的研究.

点的仿生型组织系统,应具有突出的资源利用能力、生存能力和发展能力,而基于 Agent 的建模是一种以 Agent 为基本模块模拟人类组织的方法,因此可以自然地将二者结合.对于分形供应链的研究,一般从自相似特征的角度进行分析,如分形组织结构和系统操作流程的分层细化等.文献[5]对具有分形嵌套结构的中小企业网络在项目、资源和信息等方面的合作机制进行了建模分析;文献[6]从理论上探讨了分形生产制造系统,由合作类型的 Agent 作为基本分形单元构成,系统具有自组织性、灵活性和重用性.目前对于分形供应链与 Agent 系统的结合模式,还缺乏较具体的研究.分形供应链的目标是将分形结构与 Agent 角色、Agent 通信和关联机制、Agent 策略模式等因素有机结合,实现供应链整体的适应性和对局部 Agent 模块的相对控制性.

本文针对这一目标,将规则融于结构,利用分形结构来协同供应链 Agent 间的互动行为,设计了供应链分形资源 Agent 的内部关联结构,并提出基于分形 Agent 单元的双层自适应协同计算模式.本文使用计算这一术语来概括表达供应链 Agent 的策略协同、控制与适应所包括的范畴.

## 2 基于 Agent 的分形供应链协同结构

### 2.1 分形供应链 Agent 结构与关联

供应链 Agent 有不同的功能角色,并需要相应的 Agent 系统服务设施以及中间件环境支持.这里按供应链协同计算的角度分类,包括资源 Agent,信息协调 Agent,人机交互 Agent 和领域计算 Agent 等角色类型.资源 Agent 对应资源的状态、目标和策略等功能,以 BDI 模式为基础并加以改造设计;信息协调 Agent 沟通连接各部分的资源 Agent,并作为资源 Agent 协调中介的角色;人机交互 Agent 是人机交互接口途径,将管理者的目标、意愿和主观评价信息转换成策略模型,传递给相关 Agent.

在分形供应链中,分形模块是由业务流程上相邻资源节点构成的供需系统模块,是供应链的一个缩影,这种模式在供应链中具有普遍性,可作为供应链各个层次的基本分形单元.分形模块的构建应与供应链契约相结合,供应链契约与供应链分形结构相对应,可包括全局契约和局部契约.分形模块与局部契约相对应,只有在局部契约相关资源 Agent 策略生成规则上达成一致的资源节点才能聚合形成分形模块.同时,分形模块的尺度范围,即包含的供需资源节点数量应符合供应链分形结构的规划.每个分形模块与一个 Agent 小组<sup>[7]</sup>相对应,资源 Agent 对应模块内的各个节点企业或部门,是描述供应链结构的主体,其内部结构及关联如图 1 所示.

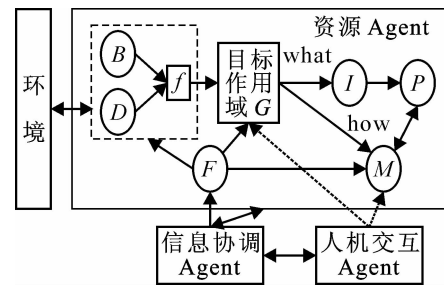


图 1 资源 Agent 的内部关联结构

图 1 中:  $B$  表示信念集合,  $D$  表示期望集合,  $I$  表示意图集合,  $P$  表示策略集合,  $f$  表示过滤函数模块,  $F$  表示分形信息集合,  $M$  表示资源流程模式映射模型, 虚线表示间接联系. 与普通 BDI 模式相比, 在资源 Agent 中增加了一个分形信息模块、目标作用域和资源映射模型, 信念目标的形成属于半自主模式<sup>[8]</sup>, 这种机制可通过供应链契约建立. 关联结构包括两部分内容: 从信念、期望到目标作用域解决“做什么(what)”; 从目标作用域到意图、策略演化和映射模型解决“怎么做(how)”.

分形信息模块通过外部接口连接信息协调 Agent, 通过内部接口连接资源 Agent 的目标作用域, 并传递分形信息. 分形信息是关于分形供应链动态的重要信息和知识, 如供应链目标、结构、竞争策略、总体计划、运作状态、上下游协同模式和各环节物流速度均衡状况等信息. 分形信息的作用是针对 what 部分参与意图集合的形成, 对于 how 部分参与策略空间演化的概率变换以及映射  $M$  的模型信息. 目标作用域处于关联结构的中心, 来自信念、期望和分形信息的作用结果, 将映射到意图集合. 分形信息以一定的比例权限参与作用域中意图的生成, 即  $a\% \times \text{filter}(B, D, I) + b\% \times F \rightarrow I$ , 表示意图  $I$  的生成来自两部分: 一部分由过滤函数  $f$  对当前的信念  $B$  和期望  $D$  过滤形成, 占  $a\%$  的比例; 另一部分由分形信息决定, 占  $b\%$ . 映射模型  $M$  的功能是将资源 Agent 对应的结构、流程、策略模式和本地信息等映射到领域计算单元中.

### 2.2 分形供应链双层协同结构与特点

分形供应链有两种分形应用: 分形结构模式和分形策略模式. 分形结构模式对应供应链网络结构规划、资源组织和资源 Agent 目标协调与互动方式的战略层问题; 分形策略模式对应具体运作策略的形成、动态规划、执行和控制等战术层问题. 对应两种分形模式设立供应链双层协同计算系统: Agent 领域计算层和 Agent 协调交互层. 领域计算层由各种领域计算单元的 Agent 角色组成, 协调交互层由信息协调 Agent, 资源 Agent 和人机交互 Agent 组

成. 各个层次的信息协调 Agent 形成一个遍及供应链的协调网络系统, 协同各资源领域 Agent 的分布计算. 每个层次区域的信息协调 Agent 既有自己的局部优化目标, 又要接收上一层次协调 Agent 的协同信息、目标策略和评价信息. 信息协调 Agent 可对分形模块的运作信息, 如时间、空间、资源、结构、环境等要素进行本地诊断和全局评估. 这种基于 Agent 的分形结构供应链主要特点如下:

1) 自相似性. Agent 类型与通用信息模板对应, 便于采用统一的模式对供应链流程和资源结构进行信息编码<sup>[9]</sup>, 利于供应链动态重构.

2) 自组织性. 在分形模块内部以及分形模块之间, 各角色 Agent 能自动沟通和协商, 动态聚合 Agent 小组与匹配计算资源, 可提高供应链的资源组合效率和对环境的响应能力.

3) 知识共享性. 一个分形模块的最佳实践策略模式可抽象为通用策略模板, 利于策略型信息在供应链各分形 Agent 小组中的共享、学习与适应.

4) 自适应性. 双层协同计算模式使分形模块 Agent 小组形成协商 → 计算 → 评价反馈 → 供应链权衡 → 调节的反馈环, 便于协同供应链的运作节奏.

### 3 供应链策略自适应协同模式分析

#### 3.1 分形模块供需自适应协同模式

供应链环境的不确定性常导致供应链供给与需求在时间和空间上难以匹配, 使得供应链中生产和物流环节的库存流动速度难以均衡. 常用的订货策略, 如动态规划或整数规划对需求的变化敏感性较差, 难以动态适应市场环境变化. 下面采用一种基于双层启发式规划和神经网络自校正预测控制原理的自适应评判方法(Adaptive critic methods)<sup>[10]</sup>, 领域单元 Agent 小组的计算模型采用系统辨识神经网络、自适应评判神经网络和系统控制神经网络 3 个模型. 系统辨识神经网络通过离线学习和在线修正来充分逼近实际系统, 获得系统的雅可比(Jacobi)矩阵信息; 自适应评判神经网络模型利用系统辨识的信息, 得出对应某一策略控制器的预期性能函数的梯度估计值, 估计系统在将来各个时刻状态与将要发生的成本的关系, 利用这些评估信息阶段性地调整神经网络控制器的权重参数, 调整后的神经网络控制器则更新库存控制策略.

自适应控制领域的计算单元由领域 Agent 计算小组构成, 包括系统映射 Agent 和评判控制 Agent. 系统映射 Agent 中包含神经网络系统辨识模型, 评判控制 Agent 包含自适应评判和神经网络控制模型. 神经网络自适应策略控制的角色以 Agent 结构

实现, 并使计算过程与 Agent 交互相结合, 例如可动态调整评判控制 Agent 评判器参数的权重. 这种双层自适应协同计算模式的原理如图 2 所示.

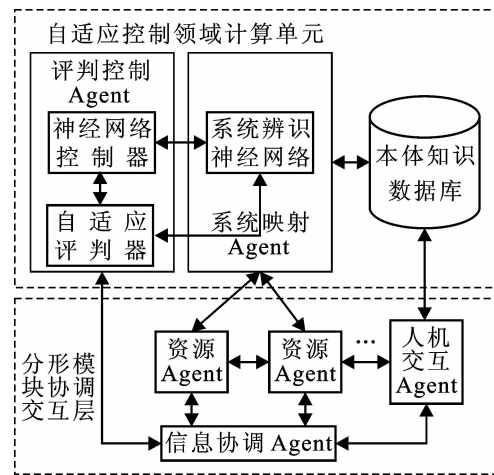


图 2 分形模块 Agent 的双层自适应协同计算模式

协调交互层和领域计算单元具有对应映射关系. 分形模块的各资源 Agent 与领域计算单元中的系统映射 Agent 动态交换资源的运作状况信息和策略信息, 如市场需求、订货策略、库存和运输状况、生产计划等. 人机交互 Agent 通过人机接口获得对应资源管理者的策略与评判信息, 将这些信息转化传递给对应资源 Agent 和信息协调 Agent, 以调整策略模型、规则选择概率和分形信息的比例权重等. 供应链各资源 Agent 和协调 Agent 间的沟通作用, 是一个自适应学习与协同计算的过程. 一方面, 资源 Agent 自治与适应; 另一方面, 接受信息协调 Agent 与人机交互 Agent 的相对控制.

#### 3.2 一个分形模块的运作成本与目标分析

以供应链的一个供需模块, 即分形模块作为研究对象进行分析, 设分形模块包括供应节点、需求节点和缓冲库存仓储节点, 如图 3 所示.

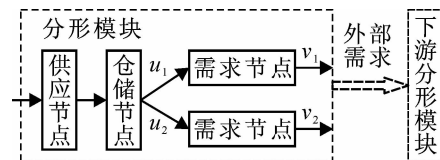


图 3 供应链供需分形模块网络速度模型

为了更好地反映系统库存变化的动态性, 这里将  $t$  时段的持有库存和在途库存与上一期的缺货需求量总和为一个变量  $x(t)$ , 称为动态库存状态变量, 并以周作为循环周期, 则对于节点  $n$ , 有如下状态转移方程:

$$x(n, t + 1) = x(n, t) + u(n, t) - v(n, t). \quad (1)$$

式中:  $x(n, t)$  表示  $t$  时段节点  $n$  的动态库存状态变量,  $x(n, t + 1)$  表示  $t + 1$  时段节点  $n$  的动态库存状

态变量,  $u(n, t)$  表示流入节点  $n$  的订货控制速度,  $v(n, t)$  表示节点  $n$  的库存流出速度.

供应链管理需要降低供需网络模块的总成本, 同时还要考虑时间、服务模式 and 反应敏捷性等指标, 可通过调整供应、生产、物流等模式来改善, 如生产资源重组、外包生产、改变物流方式、更改配送频率等. 但模式调整通常要付出额外的成本, 这些成本需要量化考虑. 设模式调整对系统第  $t$  时段的输出贡献量为  $y(n, t)$ , 则  $t$  时段系统输出变量为

$$v(n, t) = f(x(n, t), y(n, t)). \quad (2)$$

由于订货周期、生产过程提前期和物流等因素导致系统流入与输出之间存在延迟, 设  $\phi$  是系统在  $t$  时段流入与流出的转换比例系数,  $0 < \phi \leq 1$ , 则式(2)可表示为

$$v(n, t) = \phi x(n, t) + y(n, t). \quad (3)$$

通过调整模式, 可以增加流入与流出的转换速度, 获得额外的转换量  $y(n, t)$ . 设  $m$  是增加转换量的模式调整系数,  $0 \leq m \leq 1$ , 则有

$$y(n, t) = m(1 - \phi)x(n, t). \quad (4)$$

上下游分形模块的供需匹配程度是反映供应链协同的重要指标. 设  $s$  为循环周期供给水平, 表示上游供应速度变量与下游需求速度变量的比率, 即

$$s = v(n, t)/v(d, t), \quad (5)$$

式中  $v(d, t)$  表示外部需求速度. 系统的控制变量包括订货速度变量  $u$  和增加转换的模式速度变量  $m$ , 控制速度变量  $u$  是循环周期内的订货频率  $f(n, t)$  和每次订货批量  $q(n, t)$  的函数.

设分形模块运作成本为  $C_o(t)$ , 是库存持有成本、订货成本、因缺货产生的惩罚成本和模式调整成本之和, 计算公式如下:

$$C_o(t) = C_h(t) + C_p(t) + C_x(t) + C_m(t). \quad (6)$$

式中:  $C_h(t)$  代表库存持有成本,  $C_p(t)$  代表订货成本,  $C_x(t)$  代表缺货成本,  $C_m(t)$  代表模式调整成本. 这些成本的计算公式如下:

$$C_h(t) = \sum_{n=0}^N c_h(n)x(n, t), \quad (7)$$

$$C_p(t) = \sum_{n=0}^N c_p(n)f(n, t), \quad (8)$$

$$C_x(t) = \sum_{n=0}^N c_x(n)(1 - s)v(d, t), \quad (9)$$

$$C_m(t) = \sum_{n=0}^N c_m(n)m(1 - \phi)x(n, t). \quad (10)$$

式中  $c_h(n)$ ,  $c_p(n)$ ,  $c_x(n)$  和  $c_m(n)$  分别代表单位库存持有成本、单位采购成本、单位缺货成本和单位模式变化成本. 自适应控制的目的是找出最优控制量序列, 使性能指标函数达到最小. 这里的性能函数采

用预期成本函数  $J(t)$ , 是指在某一控制策略下从现在到未来将要发生的成本. 设  $U(t)$  为  $t$  时段性能函数, 则  $J(t)$  可用迭代形式表示为<sup>[11]</sup>

$$J(t) = U(t) + \gamma J(t+1), \quad (11)$$

式中  $\gamma$  代表时间折扣率因子.

控制评判 Agent 需要与信息协调 Agent 互动, 受到分形信息相对控制和人机交互的作用, 因而同时具有分形模块的局部目标和供应链全局目标. 因此性能指标函数  $U(t)$  使用权重参数构造如下:

$$U(t) = \sum_{k=1}^K \omega_k C_k(t). \quad (12)$$

各成本的权重参数向量  $\omega$  的取值范围构成参数向量空间, 且  $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ .

如果考虑分形模块运作成本和供应链协同两项指标, 则衡量分形模块运作节奏与供应链上下游间协调程度的指标用速度成本  $C_v(t)$  代表.  $C_v(t)$  取决于上下游模块节点间的循环周期供给水平  $s$ , 则性能指标函数  $U(t)$  可量化表示为

$$U(t) = W_1 C_o(t) + W_2 C_v(t), \quad (13)$$

$$C_v(t) = \sum_{n=0}^N a(n)e^{1-s}, \quad (14)$$

式中  $a(n)$  是第  $n$  个节点的速度量化系数. 这里速度成本指标采用指数函数的目的是在速度极不平衡时这个节点可能成为供应链中的一个瓶颈, 需较快地增加速度指标在整个优化性能指标中的权重.

## 4 算例仿真

### 4.1 仿真设计与方法

对图3所示的一个分形模块进行仿真, 需求节点1和节点2的输出由外部需求拉动. 假设只有一种商品, 在供应链范围内各个企业建立互相协作的供应链契约、激励机制和利益分配协议. 在双层协同计算结构下, 领域计算单元中通过系统映射 Agent 与评判控制 Agent 的交互实现策略自适应协同控制. 针对神经网络自适应协同控制模型的算法部分进行仿真, 系统辨识神经网络、自适应评判神经网络和系统控制神经网络都采用3层BP神经网络模型. 按式(13)性能函数考虑分形模块运作成本和供应链协同两项指标, 权重参数  $\omega$  的比例采用两种协调结果, 即  $(\omega_1 : \omega_2) = (0.8 : 0.2)$  和  $(\omega_1 : \omega_2) = (0.5 : 0.5)$ , 通过改变效用成本指标的权重分配, 对比两种情况下循环周期供给水平  $s$  和分形模块运作成本  $C_o$  的仿真结果.

分形模块外部需求模式采用基准需求和随机需求的组合. 首先分别应用平稳需求模式和递增需求模式, 与一个泊松分布随机噪声的组合需求进行训

练;然后利用实际数据作为随机噪声,与递增需求模式组合为检测数据进行测试.所采用的系统训练数据和测试数据的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$  如表 1 所示.

表 1 系统训练与测试数据

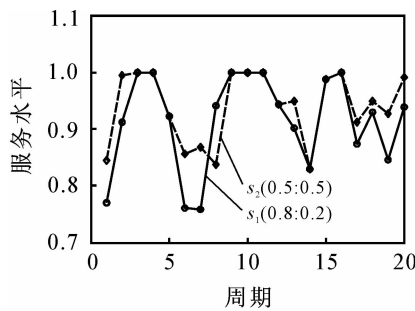
需求分布模式		节点 1	节点 2
平稳需求和泊松分布 (训练数据)	$\mu$	1985	1910
	$\sigma$	902	653
递增需求和泊松分布 (训练数据)	$\mu$	1878	2165
	$\sigma$	1170	904
递增需求和实际数据 (检测数据)	$\mu$	2070	1952
	$\sigma$	1086	1269

4.2 仿真结果

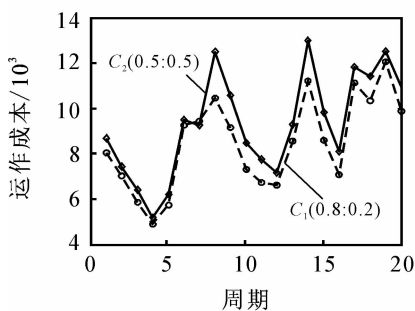
对于两种协调情况,性能指标函数的权重参数  $w$  的比例分别为  $(w_1:w_2) = (0.8:0.2)$  和  $(w_1:w_2) = (0.5:0.5)$ .采用实际数据作为随机噪声与递增需求模式组合作为检测数据,对神经网络控制器参数的调整周期为 1 周,得到 2 个需求节点 20 周的平均运行效果.对应于两种情况下的平均运作成本为

$$C_i = (C_o(1,t) + C_o(2,t))/2, i = 1,2.$$

两节点的平均循环周期供给水平  $s(w_1:w_2)$  和平均运作成本  $C(w_1:w_2)$  仿真结果如图 4 所示.



(a) 循环周期服务水平比较



(b) 运作成本比较

图 4 两种情况下的循环周期服务水平和运作成本

对比  $(w_1:w_2) = (0.8:0.2)$  和  $(w_1:w_2) = (0.5:0.5)$  两种情况,从 20 周的仿真结果可以看出,分形模块的循环周期平均供给水平  $s_1(0.8:0.2)$  通常低于  $s_2(0.5:0.5)$ ,而分形模块的平均运作成本  $C_2(0.5:0.5)$  略高于  $C_1(0.8:0.2)$ .这说明分形模块中各节点为供应链上下游供需速度协同目标付出了

额外的模式调整成本.因此,采用这种基于 Agent 的供应链自适应协同计算模式,可兼顾供应链局部的灵活适应性和全局的目标协同性.

5 结 论

本文以具有适应性和协同性的分形供应链为目标,较系统地提出了供应链 Agent 系统的分形信息、目标作用域、资源映射模型和双层协同计算结构、领域计算单元等创新模式和结构,有助于实现自组织、自学习和自适应的供应链系统发展.供应链协同计算模式以供应链契约为基础条件,因而契约规则的条件会影响协同与控制的程度.

参考文献(References)

[1] Pathak S D, Dilts D M, Biswas G. A multi-paradigm simulator for simulating complex adaptive supply chain networks[C]. Proc of the 2003 Winter Simulation Conf. New Orleans, 2003, 1: 808-816.

[2] Kendall E A. Role models — Patterns of agent system analysis and design[J]. BT Technol J, 1999, 17(4): 46-57.

[3] Chris J A, Bob Wielinga, Guus Schreiber. Organizational building blocks for design of distributed intelligent system [J]. Int J of Human-Computer Studies, 2004, 61(5): 567-599.

[4] Schieritz N, Grossler A. Emergent structures in supply chains — A study integrating agent-based and system dynamics modeling[C]. Proc of the 36th Annual Hawaii Int Conf. Hawaii, 2003: 94-102.

[5] Mercedes Canavesio A M, Ernesto Martinez. Enterprise modeling of a project-oriented fractal company for SMEs networking[J]. Computers in Industry, 2007, 58(8/9): 794-813.

[6] Ryu K, Jung M. Agent-based fractal architecture and modelling for developing distributed manufacturing systems[J]. Int J of Production Research, 2003, 41(17): 4233-4255.

[7] Sauer J, Appelrath H-J. Scheduling the supply chain by teams of agents[C]. Proc of the 36th Annual Hawaii Int Conf on System Sciences. Hawaii, 2003: 81-90.

[8] 白世贞, 郑小京. 供应链复杂自适应系统资源涌现的研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 93-104. (Bai S Z, Zhen X J. Research on supply chain complex adaptive system resources emergence [M]. Beijing: Science Press, 2008: 93-104.)

[9] 周建频, 杜文. 动态供应链重构的分形模式研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 925-930. (Zhou J P, Du W. Study of dynamic supply chain reconfiguration in fractal schema [J]. J of Beijing University of Technology, 2006, 32(10): 925-930.)

(下转第 1687 页)