

面向虚拟企业的蚁群劳动分工建模与仿真^①

肖人彬, 陶振武

(华中科技大学系统工程研究所, 武汉 430074)

摘要: 针对虚拟企业的复杂性特征, 提出了以群集智能这种新颖的复杂系统建模手段研究虚拟企业的组建和运行过程. 在将虚拟企业运行特点与蚁群劳动分工模型进行对比分析的基础上, 将企业单元定义为人工蚂蚁, 根据虚拟企业运行的要求重新设计蚂蚁的属性特征、任务执行和学习规则、活动环境等模块, 建立了扩展的蚁群劳动分工模型. 采用该模型对虚拟制造式、供应链式、组织虚拟式等 3 种具有代表性的虚拟企业组织进行建模和仿真, 实验表明仿真结果与实际情况比较吻合, 运行过程能够体现出虚拟企业运行的自组织行为特征, 该模型可为类似虚拟企业的组建、任务规划和利益分配提供依据. 最后分析了扩展蚁群劳动分工模型的内在特性和适用范围, 并对今后研究的方向进行了展望.

关键词: 复杂性; 虚拟企业; 群集智能; 蚁群; 劳动分工

中图分类号: N94 F406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2009)01-0057-13

0 引言

处于激烈的市场竞争中, 企业只有在尽量短的时间内以最有效的方式生产出充分满足客户需求的产品, 才能实现企业的可持续发展. 为此企业自发地要求突破自身的组织界限以谋求组织模式在更大范围内的变革, 集中本企业的核心能力并与其他拥有互补性核心能力的企业联合形成动态联盟, 从而催生了虚拟企业这种崭新的组织模式^[1]. 虚拟企业是由若干独立企业通过信息网络而组成的一种临时性合作组织, 它所涉及的问题和方面繁多, 属于一类复杂系统^[2]. 虚拟企业具有明显的生命周期性, 一般可将其生命周期划分为 4 个阶段^[3]: 酝酿期、组建期、运行期、解体期. 由于酝酿期的关键问题是市场机遇识别与实现模式的选择, 若要对该阶段进行建模和仿真, 就会涉及整个市场环境的建模问题, 这在目前情况下还难以完成. 导致虚拟企业解体的因素也颇为复杂, 大体上可以归纳为 4 类: 由于虚拟企业达到了自

组织临界状态^[4]而发生自然解体; 由于组建期合作伙伴选择不当, 导致许多子任务无法正常完成, 但中途更换合作伙伴又可能造成更大的损失, 因此中途解体以避免更大的损失; 由于外部环境的变动, 市场机遇中途消失, 虚拟企业失去了存在的必要而被迫解体; 虚拟企业中某些企业单元因利益分配不公而中途退出所造成的虚拟企业解体. 目前关于虚拟企业解体问题的研究还比较缺乏^[3]. 因此, 本文工作主要围绕虚拟企业的组建期和运行期这两个主要的生命周期阶段展开探讨.

按照不同的标准, 可以将虚拟企业分为不同类别^[5-6]. 文献 [7] 依据虚拟企业的运作形式将其划分为以下几类: 合资经营式、转包承包式、供应链式、组织虚拟式、虚拟研发式、虚拟制造式、虚拟销售式和虚拟服务式等. 为了验证本文提出的模型的有效性, 按照由简到繁、循序渐进的方式选取了其中具有代表性的虚拟制造式、供应链式、组织

① 收稿日期: 2006-11-06; 修订日期: 2008-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60474077); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-05-0653).

作者简介: 肖人彬 (1965-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: rbxia@mail.hust.edu.cn

虚拟式等 3 种虚拟企业的实例进行仿真实验. 虚拟制造式虚拟企业实例侧重于验证扩展蚁群劳动分工模型在静态条件下虚拟企业运行期的任务自组织分配特性, 供应链式虚拟企业实例侧重于验证该模型在动态条件下虚拟企业运行期的任务自组织分配特性, 组织虚拟式虚拟企业实例则侧重于采用该模型仿真此类虚拟企业的组建和运行过程.

现有关于虚拟企业建模的研究主要采用“自上而下”的方法为指导, 所建立的模型存在以下问题:

- (1) 模型大多是静态的, 难以随外部条件变化而改变, 缺乏动态性;
- (2) 对于单元的中途加入和退出的原因和后果无法描述, 需要重新建模, 鲁棒性差;
- (3) 针对不同的虚拟企业组织形式, 需要定制不同的模型, 适应性不强;
- (4) 缺乏单元学习对虚拟企业演变的影响方面的研究.

从本质上讲, 虚拟企业的组建是特定市场条件下的自组织行为, 存在着大量的非线性、非稳定、不连续和不确定的问题^[8]. 复杂系统理论和复杂性研究方法的发展为上述问题的解决带来了新的希望, 特别是近年来发展起来的群集智能理论与方法, 在复杂系统建模与仿真和复杂问题求解方面体现出动态性、适应性、鲁棒性, 有助于弥补上述现有虚拟企业建模方法存在的缺陷. 群集智能是指众多行为简单的个体相互作用过程中涌现产生的整体智能行为^[9]. 群集智能的研究始于意大利学者 Dorigo 开发的蚂蚁算法^[10]. 受蚁群在觅食过程中总能找到从巢穴到食物源的最短路径这一现象的启发, 他提出了用于求解旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP) 的蚂蚁系统 (Ant System)^[11], 后来又归纳提炼出蚁群优化 (ant colony optimization, ACO) 元启发方法^[12]. 目前, 又有其他学者根据蚁群的劳动分工^[13]和墓地构造^[14]等现象提出了一系列模型和算法. Kennedy 等人^[15]则通过观察鸟群的协作觅食活动, 开发出粒子群优化方法 (particle swarm optimization, PSO). 群集智能与大多数 Multi-Agent System 和 Role-Based Agent^[16, 17]方法的最主要的区别在于: ①指导思想完全是“自下而上”的; ②个体的结构和行

为更简单, 更容易实现; ③个体间的通信方式是局部范围内基于媒质的间接交互方式.

自组织劳动分工是蚁群等社会性昆虫的重要特征. 在生物蚁群社会中, 蚁群的劳动分工具有多个层次的划分, 第一个层次的划分一般可分为从事繁殖的个体和从事日常工作的个体. 对从事日常工作的个体又可以进行下一层次的划分, 如可分为寻找食物的蚂蚁和建筑巢穴的蚂蚁等. 蚁群劳动分工的显著特点就是由个体的行为柔性产生的群体分工的可塑性: 执行各项任务的蚂蚁的比率, 在内部繁衍生息的压力和外部侵略挑战的作用下是可以变化的. 值得注意的是, 蚂蚁是在不具备任何关于群体需求的全局信息的情况下, 自动地实现群体内个体的分工, 并达到一个相对的平衡, 使得每个蚂蚁都在忙碌地工作, 且其结果又恰好符合群体对各项工作的要求.

鉴于生物蚁群的劳动分工与虚拟企业的组建和运行十分相似, 本文将以蚁群劳动分工模型为基础对虚拟企业的组建和运行过程进行建模和仿真研究.

1 基本蚁群劳动分工模型

Bonabeau 等人^[18]在对蚁群的任务分配行为进行深入研究的基础上, 提出了一种固定响应阈值模型 (fixed response threshold model, FRTM). 该模型可以简单地描述如下: 对于每个蚂蚁都存在一个固定的响应阈值, 每个响应阈值对应于其对某个任务的响应, 个体的响应阈值的水平可反映行为响应的实际差别或反映察觉相关任务的刺激的不同方式. 环境中对应每一个任务存在着一个刺激强度, 当一个任务的刺激强度超过了某个蚂蚁的响应阈值时, 它就开始从事该项工作. 当执行某一特定任务的个体退出时, 该任务所对应的刺激强度会增加, 直到达到最初没有执行该任务的具有较高响应阈值的个体的水平, 从而激发这些个体开始执行该任务.

1) 环境刺激值 s 随时间变化

环境刺激是个体响应任务的直接驱动力, 只要有任务出现, 环境对个体就会有一个刺激值. 刺激值与任务量成正比, 任务量越大则刺激值越大, 反之则小.

随着个体的加入, 任务会逐步被完成, 相应的环境刺激值就会减少; 但是只要任务未完全结束, 那么为了刺激个体加入完成, 其形成的环境刺激会随时间的延长而增加。增加的规则如下

$$s(t+1) = s(t) + \delta - \partial \cdot n_{act} \quad (1)$$

式中, t 为离散时间变量, $s(t)$ 表示 t 时刻的环境刺激值, δ 表示每个时间段内环境刺激的增加值, ∂ 表示每个个体在单位时间段内完成的的任务量, n_{act} 为该时间段内参与执行任务的个体总数。

2) 非活动个体对环境刺激的响应

当任务的出现导致环境给予个体一个刺激值之后, 个体 i 会结合本身的属性 (即响应阈值) 确定参与任务的概率

$$P(S_i = 0 \rightarrow S_i = 1) = \frac{s^n}{s^n + \theta_i^n} \quad (2)$$

式中, S_i 表示个体 i 的活动状态, 其值为 1 时表示参与执行任务, 为 0 时则表示未参加。 $P(S_i = 0 \rightarrow S_i = 1)$ 表示非活动个体 i 响应环境刺激由状态 0 转变为状态 1 的概率, θ_i 为个体 i 的响应阈值。在文献 [18] 的模型中, 指数 n 为控制阈值函数曲线形状的常量, 一般情况下取值为 2

由式 (2) 可以看出, 在 θ_i 不变的情况下, s 的值越大, 则 P 值越大。这说明当环境刺激越强时, 个体响应任务的概率也越大; 而在 s 不变的情况下, θ_i 值越大, 则 P 值越小, 说明当个体的阈值越高时, 个体响应任务的概率就越小。

3) 活动个体退出任务的概率

当个体 i 参与了任务之后, 每过一个时间段, 将根据以下概率决定是否退出:

$$P(S_i = 1 \rightarrow S_i = 0) = p \quad (3)$$

式中, $P(S_i = 1 \rightarrow S_i = 0)$ 表示活动个体 i 状态由 1 转 0 即退出任务的概率。为简化模型, p 一般为常数。

需要说明的是: 个体参与任务的概率和退出任务的概率是相互独立的。

2 扩展蚁群劳动分工模型

2.1 基本蚁群劳动分工模型的特点分析

根据 Bonabeau 和 Dorigo 的算法仿真实验, 并与一些已有的实际数据进行了对比, 发现该模型与虚拟企业的行为之间存在一些相似之处: ① 都

是在任务出现后, 形成一个由多个个体形成的团队, 共同将任务完成; ② 不论是蚂蚁还是市场中的企业都是根据任务和自己的实际能力来决定是否加入任务的执行; ③ 个体与企业参加与否都是自发的, 没有任何强制性; ④ 蚁群劳动分工模型中环境刺激量随时间变化的特性与虚拟企业组织中市场需求变化类似。

基于这样的认识, 我们就可以在上述基本蚁群劳动分工模型的基础上加以扩展, 以满足虚拟企业行为仿真研究的需要。

2.2 模型扩展的思路

上面所述的蚁群劳动分工模型比较简化, 其目标任务属性与蚂蚁个体的属性都显得单一, 如果直接用于虚拟企业组织建模与仿真, 并不能很好地反映出市场环境与企业行为的复杂性, 因此需要对该模型加以适当的改进, 重新设计蚂蚁的属性特征、任务执行和学习规则、活动环境等模块。

通过与虚拟企业组织的特点进行对比, 可从以下几个方面入手对基本蚁群劳动分工模型加以扩展。

(1) 在基本蚁群劳动分工模型中, 任务单一化, 仅有一个总任务; 而在实际市场中, 如果出现一个需要很多企业配合才能抓住的市场机遇, 与之对应的这项任务通常是比较复杂的, 一般情况下任何一个企业都无法单独将其完成。因此, 在扩展的劳动分工模型中, 首先我们要将任务界定为是一个可以划分为多个子任务的总任务。

(2) 在基本蚁群劳动分工模型中, 由于仅有一个任务, 因此其对应个体的响应阈值也就只有一个。但在实际市场中, 每个企业都拥有自身独特的核心能力。需要说明的是: 所谓独特的核心能力并不意味着只有该企业具有这一能力, 或者该企业除了此项能力之外就没有别的能力了, 而是每个企业都有多个核心能力, 只不过是每个核心能力的强弱有所区别而已。因此, 在扩展模型中, 将每个企业看作是一个 Agent, 每个子任务都对应一项核心能力, 每个企业 Agent 都有对应于子任务的多个响应阈值。

(3) 基本蚁群劳动分工模型中的蚂蚁个体没有记忆功能, 它们的响应阈值是一个固定值, 在整个运行过程中保持不变。也就是说这些个体没有

“学习”的能力, 不管它们对一项任务重复执行了多少次, 其对该项任务的响应阈值都是不变的, 这显然与实际不符. 因此, 在扩展模型中有必要对其进行改进, 如果个体参加了一项任务, 则该个体对应于此项任务的响应阈值就会降低, 与此同时, 由于个体本身资源的制约, 它的其他响应阈值就有可能提高.

2.3 扩展蚁群劳动分工模型描述

首先, 给出扩展模型中所需的若干变量的定义.

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_q\}$: 市场机遇出现后需要共同完成的任务.

$T_j (j = 1, 2, \dots, q)$: 分解后的子任务.

$s_j (j = 1, 2, \dots, q)$: 子任务 j 的环境刺激值.

$K_i = \{k_1, k_2, \dots, k_q\}$: 企业 Agent i 对应的核心能力集合, $i = 1, 2, \dots, N, N$ 为企业 Agent 的总数.

θ_j : 企业 Agent i 对应子任务 j 的响应阈值, 由核心能力确定.

δ_j : 执行子任务 j 时的单位时间环境刺激增量.

∂_j : 衡量由于企业 Agent i 执行子任务 j 所引起需求减少的比例因子, 即企业 Agent i 执行子任务 j 的效率.

$S_j(t)$: 企业 Agent i 在 t 时刻对于子任务 j 的执行状态, 如果正在执行则用 1 表示, 反之为 0.

n_{act}^j : 执行任务 j 的企业 Agent 个数.

$P(S_j = 0 \rightarrow S_j = 1)$: 企业 Agent i 参加子任务 j 的概率.

$P(S_j = 1 \rightarrow S_j = 0)$: 企业 Agent i 退出子任务 j 的概率.

ζ_j : 企业 Agent 的“学习”系数, 它用来刻画的现象是: 一旦某企业 Agent i 积累了执行某一任务 j 的经验, 则由于生产能力的提高或者生产成本的下降会使得它执行类似任务的阈值降低.

φ_i : 企业 Agent 的响应阈值对于其他任务的“遗忘”系数, 即一旦某企业 Agent i 调集资源执行某一类任务, 则会导致其执行其他任务的阈值升高. 同一个企业 Agent 对于其他所有任务的遗忘系数是相同的.

扩展蚁群劳动分工模型的结构描述如下:

1) 环境刺激

当市场出现一个任务 T , 为了方便建模, 将 T 划分为 q 个子任务: $T = \{T_1, T_2, \dots, T_q\}$. 与基本模型类似, 对应于每个子任务都存在一个环境刺激值, 它反映了执行该子任务的紧急程度: 刺激值越高, 则越容易吸引到企业 Agent 来完成此项子任务. 企业 Agent 结合环境刺激值与自己的响应阈值共同决定是否参与到该项子任务中. 与基本模型中的刺激值一样, 在子任务未被完成时, 每过一个单位时间段, 子任务的刺激值都会自增一个常量 δ_j . 而根据参与的企业 Agent 的情况, 会不同程度地部分完成各子任务, 其多少取决于参与任务的企业 Agent 的总数 n_{act}^j 和每个企业 Agent 的任务执行效率 ∂_j .

类似式 (1), 子任务的环境刺激值 $s_j (j = 1, 2, \dots, q)$ 的演化公式为

$$s_j(t+1) = s_j(t) + \delta_j - \sum_{i=1}^N \partial_j S_{ij}(t) \quad (4)$$

并且有

$$n_{act}^j = \sum_{i=1}^N S_{ij}(t) \quad (5)$$

2) 企业 Agent 的属性

每个企业 Agent 具有单一或多个核心竞争力和类似加工量、销售量的阈值属性特征, 且对应于不同的任务. 企业 Agent 执行子任务 T_j 的“能力”由核心竞争力计算得到, 即可采用函数 $f(T_j, K_i)$ 表达. 而一旦确认企业 Agent 承担该项子任务, 则企业 Agent i 是否执行子任务 T_j 的阈值 θ_j 按下面的规则更新

$$\theta_l(t+1) = \zeta_l \cdot \theta_l(t), l \in n_j \quad (6)$$

$$\theta_k(t+1) = \varphi_i \cdot \theta_k(t), k \notin n_j \quad (7)$$

式中, n_j 是与任务 T_j 具有相同阈值的所有任务的编号的集合, ζ_l 和 φ_i 分别为“学习”和“遗忘”系数, $\zeta_l < 1, \varphi_i > 1$.

3) 加入与退出概率

沿用基本劳动分工模型中的概率计算方法, 类似式 (2)、式 (3), 有

$$P(S_j = 0 \rightarrow S_j = 1) = \frac{s_j^n}{s_j^n + \theta_j^n} \quad (8)$$

$$P(S_j = 1 \rightarrow S_j = 0) = p \quad (9)$$

式中, p 为一预设值.

4) 仿真规则

① 在一个离散时间段内, 空闲的企业 Agent

会根据自己的属性特征和外部任务需求, 按任务执行规则确定是否参与完成任务; 忙碌的企业 Agent 会综合目前的任务执行情况和回报等来决定是否退出执行任务。

② 企业 Agent 具有学习能力, 会根据过去执行任务的情况来调整自己的属性特征, 即阈值水平。

③ 任务一旦被执行, 它对企业 Agent 的刺激强度会下降, 被企业 Agent 选择执行的概率降低; 而当某任务长期处于“饥饿”状态时, 它对企业 Agent 的刺激强度会自动增加, 直到有企业 Agent 执行该任务。

2.4 算法实现

步骤 1 设离散时间变量 $t = 0$ 设置 N 个企业 Agent 的属性值: 响应阈值 θ_{ij} 、“学习”和“遗忘”系数, 以及初始化的子任务环境刺激值 $s_j(0)$;

步骤 2 根据式 (8)、式 (9) 得到本时间段内各个体对任务的响应以及退出任务的情况, 并根据式 (5) 计算执行任务的个体的总数 n_{acc}^j ;

步骤 3 根据式 (6)、式 (7) 更新每个个体的属性值;

步骤 4 根据式 (4) 更新 $s_j(t+1)$, 如果 $s_j(t+1) > 0$ 转到步骤 2 否则, 转到步骤 5

步骤 5 统计仿真结果, 输出。

3 虚拟企业运行仿真实验

虚拟企业的组织结构形式多种多样, 想仅用一种模型完全描述虚拟企业的所有形式和各个细节是不可能的。根据前面的分析可以发现, 虚拟企业要完成的共同任务、企业单元的核心竞争力、企业单元的自适应能力是影响虚拟企业组建和运行的三个最为重要的因素, 因此本节按照从简单到复杂、从特殊到一般的思路, 根据文献 [7] 对虚拟企业的分类标准, 选取 3 个具有典型意义的虚拟企业实例进行仿真实验, 以验证本文提出的扩展模型的有效性和分析该模型的特点。

3.1 虚拟制造式虚拟企业仿真

在企业生产过程中, 为了完成某一个临时性的生产任务, 例如某大型设备的单件生产制造, 往往需要多个企业结成临时性的联盟, 并在较短时

间内完成该项任务。而由于任务的完成, 该联盟也随之解体。对于这类实例的模型仿真过程中, 总体任务是单一的, 且很明确, 一般不会发生变化, 企业单元的核心能力也是确定的, 短期内难以改变。由于任务的临时性特点, 企业单元没有必要也很难进行经验学习和自适应调整。因此这类虚拟企业行为的特点是: 单任务、固定阈值、无学习。

3.1.1 仿真数据和模型参数设置

此时扩展模型退化为原来的基本模型, 下面给出采用基本蚁群劳动分工模型对这类虚拟企业进行运行仿真的一个实例。该实例中, 基本模型的各参数值选取如下: 设企业 Agent 的总量为 10 并按生产能力分为两种类型, 一种类型的 Agent 的阈值 $\theta_1 = 3.0$ 另一种 Agent 的阈值 $\theta_2 = 8.0$ 两种类型的 Agent 各占总数的一半。 $s(0) = 10.0$ $\delta = 3.0$ $\rho = 1.0$ $p = 0.2$ $n = 2$

运行结果如下表 1 所示 (0 1 表示个体的状态, 执行任务为 1, 退出任务为 0):

表 1 面向单任务的虚拟企业运行仿真结果

Table 1 Simulation results of virtual enterprise operation for single task

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	$s = 6$
2	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	$s = 1$
3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	$s = -1$

结果显示, 10 个 Agent 按照算法模型协作完成了任务。虽然每个 Agent 只按照自己的规则行动, 但最终结果是共同完成了同一个任务。重复运行此模型, 虽然每次执行和退出任务的时机不同, 运行的周期不同, 个体状态不同, 任务刺激的变化不同, 但是最终结果都是一致的, 即协作完成同一个任务。

虽然每个 Agent 的行为都具有一定的随机性, 但模型仿真的结果是确定了, 体现出良好的收敛性。

3.1.2 参数分析

下面考察扩展模型在进行这类虚拟企业运行仿真时参数值变化对结果的影响。首先取 $\delta = 5.0$ 其他参数同上, 运行结果见表 2; 然后保持以上其他参数不变, 调整 θ 值, 令 $\theta_1 = \theta_2 = 5.0$ 仿真结果见表 3。

表 2 $\delta = 5.0$ 时的仿真结果
Table 2 Simulation results for $\delta = 5.0$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	$s = 9$
2	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	$s = 6$
3	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	$s = 3$
4	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$s = 2$
5	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	$s = 1$
6	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	$s = 1$
7	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	$s = 2$
8	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	$s = 4$
9	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$s = 4$
10	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	$s = 3$
11	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	$s = 4$
12	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	$s = 3$
13	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	$s = 1$
14	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	$s = 0$

表 3 $\theta_1 = \theta_2 = 5.0$ 时的仿真结果
Table 3 Simulation results for $\theta_1 = \theta_2 = 5.0$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	$s = 8$
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	$s = 4$
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	$s = 0$

由表 2可以看出,前 5个响应阈值低的 Agent 共参与执行任务 51次,后 5个响应阈值较高的 Agent则只参与执行任务 29次.而在表 3中,由于两类的阈值都设定为 5.0,前 5个原来响应阈值低的 Agent共参与执行任务 13次,后 5个原来响应阈值较高的 Agent则参与执行任务 12次,两类 Agent参与执行任务的次数相近.这一现象说明

了响应阈值的设置起到了预期的作用,区别出了不同能力的 Agent参与任务的可能性.

在表 2中,虽然在时刻 5和时刻 13任务的刺激都已经降到了 1,但是它们向后的发展却是不相同的,时刻 5过后,任务的刺激又逐渐上升,而时刻 13过后,环境刺激降低到了 0,即任务已完成.这个现象表明虽然任务的刺激一样,但是 Agent每次做出的决定却不一定相同.

在对参数进行调整的过程中发现,无论如何调整参数,如更改个体数目、阈值、任务的环境刺激值及刺激增加值等,只要满足任务的刺激增加值小于所有 Agent在一个周期内所能完成的任务量这个条件,该任务就一定能被协作完成.由此可见,对于虚拟制造式的虚拟企业仿真,扩展模型在一定条件下具有很强的鲁棒性.

3.2 供应链式虚拟企业仿真

物流配送是一种常见的典型供应链式虚拟企业,与 3.1节的虚拟制造式虚拟企业不同之处在于物流配送的目标是要完成多项任务,而相同之处在于企业单元的核心能力(如运输能力、仓库容量等)也是确定的,在短期内难以改变.同样,由于配送任务的时间跨度小,企业单元没有必要也很难进行经验学习和自适应调整.因此这类虚拟企业行为的特点是:多任务、单阈值、无学习.

本节给出的运行实例主要验证在多任务情况下用于虚拟企业仿真的扩展劳动分工模型的相关特性.

3.2.1 仿真实例和模型参数设置

某物流企业某城市有两个配送中心,为该城市及其周边郊区城镇的各大商场配送家电和电子产品.已知该物流企业有 10个客户,它与 2个配送中心的距离 $d_j (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 10)$ 如表 4所示^[19].

表 4 配送中心与客户的距离列表(单位:千米)
Table 4 List of the distance between distribution center and customer (unit kilometer)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p1	50.0	30.0	70.0	110.0	80.0	120.0	140.0	80.0	90.0	100.0
p2	40.0	60.0	75.0	90.0	200.0	100.0	120.0	100.0	60.0	110.0

假设各配送中心的库存足够,但运输能力不尽相同,这里运输能力是指一天之内(按 8h计算)所有车辆能够行驶的千米数.本实例的参数设置

如下:

配送中心 1的运输能力: $C_1 = 2.500$ 设其对应的 $\theta_1 = 1.0$

配送中心 2 的运输能力: $C_2 = 50Q$ 设对应的

$$\theta_2 = 5.0$$

客户 j 的订货量服从 1 至 10 的平均分布:

$Q_j (j = 1, 2, \dots, 10) = \text{unifom}(1, 10)$, 且任务的环境刺激值由订货量决定: $s_j = Q_j$;

客户 j 的交货期限服从 2 至 5 的平均分布:

$$D_j (j = 1, 2, \dots, 10) = \text{unifom}(2, 5);$$

配送中心 i 退出子任务 j 的概率: $P(S_{ij} = 1 \rightarrow$

$$S_{ij} = 0) = 0.2$$

执行子任务 j 时的单位时间环境刺激增加量:

$$\delta_j = 1.0$$

由于配送中心对客户的配送能力除了与运输能力有关之外, 还受到与客户距离远近这一条件的限制, 因此, 配送中心 Agent 的响应能力应由运输能力和距离两者共同决定

$$P(S_{ij} = 0 \rightarrow S_{ij} = 1) = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \alpha \cdot \theta_j^2 + \beta \cdot d_{ij}^2}$$

$$(\alpha = 0.7, \beta = 0.3)$$

3.2.2 仿真结果分析

为了便于分析模型运行的性能, 本文定义了评价虚拟企业运行状况的 3 个指标:

1) 企业 Agent 的忙闲程度 (degree of busyness and idleness DBE)

$$DBE = \frac{\text{Agent 每天实际执行任务的时间}}{\text{Agent 每天可以利用的最长时间}} \quad (10)$$

2) 任务的完成效率 (efficiency of completion EC)

$$EC = \frac{\text{任务的实际完成时间}}{\text{任务被要求完成的时间}} \quad (11)$$

3) 企业 Agent 完成任务的百分数 (percent of completion PC)

$$PC = \frac{\text{Agent 完成该任务的量}}{\text{该任务的总量}} \times 100\% \quad (12)$$

按第 2 节给出的扩展模型进行编程, 以一个月 (30d) 为周期对本实例进行仿真运行. 每个配送中心的忙闲程度如图 1 所示, 每个任务的完成效率如图 2 所示, 每个配送中心分别完成各个任务的百分数如图 3 所示 (图中上部分曲线对应于配送中心 1, 下部分对应于配送中心 2).

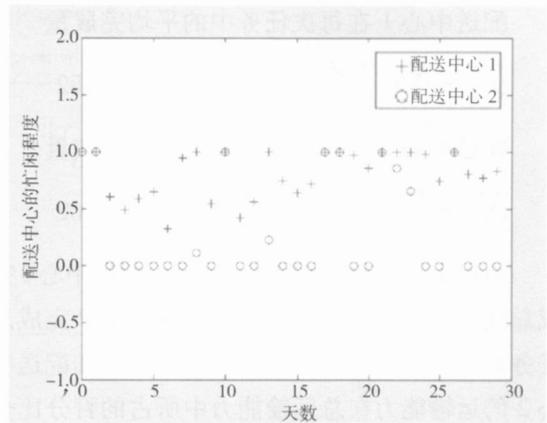


图 1 配送中心的忙闲程度

Fig. 1 The degree of busyness and idleness of distribution centers

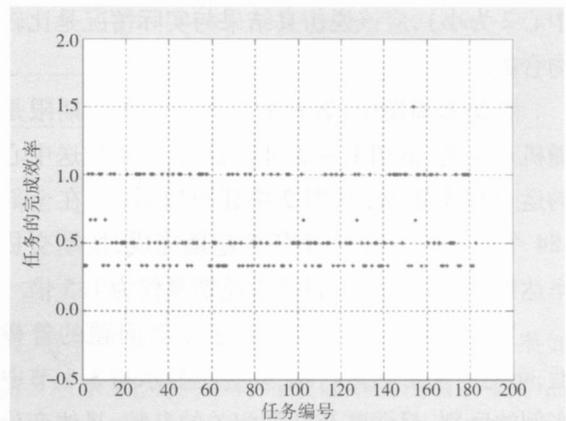


图 2 任务的完成效率

Fig. 2 Accomplishment efficiency of tasks

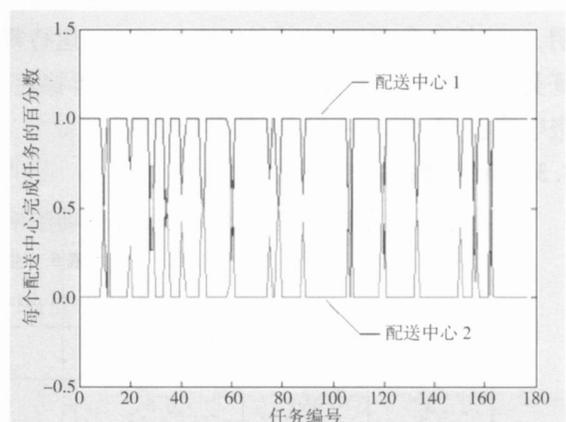


图 3 每个配送中心完成任务的百分数

Fig. 3 The percentage of the task accomplished by each distribution center

根据仿真数据还可以计算出以下观测值:
每次任务的平均订货量

$$\bar{Q}_i = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \approx 5.283$$

配送中心 1在每次任务中的平均完成量

$$\overline{Q_{1,i}} = \frac{Q_{1,1} + Q_{1,2} + \dots + Q_{1,n}}{n} \approx 4.482$$

配送中心 2在每次任务中的平均完成量

$$\overline{Q_{2,i}} = \frac{Q_{2,1} + Q_{2,2} + \dots + Q_{2,n}}{n} \approx 0.802$$

由以上观测值和图 3可以看出, 配送中心 1完成总任务的百分比为 84.83%, 配送中心 2完成总任务的百分比为 15.17%, 而配送中心 1和配送中心 2的运输能力在总运输能力中所占的百分比分别为 83.33%和 16.67%, 再考虑到距离参数的影响作用(配送中心 1到各客户的距离之和较配送中心 2为小), 应该说仿真结果与实际情况是比较吻合的。

在仿真周期中, 客户的订货量和交货期限是随机产生的。从图 1~ 3可以看出, 两个配送中心的运行状态正常; 从图 2中还可以看出, 在全部 184个任务中, 只有 1个任务超期完成, 按期交货率达到 99%以上, 而且最大超期量仅为 1.5倍。

要进一步检验该模型对于此类问题的鲁棒性, 可对有关参数进行调整。为了显示与 3.1节中实例的区别, 只调整与任务相关的参数, 具体变化为: $Q_i (i = 1, 2, \dots, 10) = \text{unifom}(1, 8); D_i (i = 1, 2, \dots, 10) = \text{unifom}(2, 4)$ 。相应的仿真实验表明, 虽然任务参数设置不同, 但模型都可以运行得到类似的理想结果, 从而表现出了良好的鲁棒性。限于篇幅, 不再一一给出仿真实验结果。

3.3 组织虚拟式虚拟企业仿真

随着市场竞争的日趋激烈, 产品对市场的响

应速度显得尤为重要。中小型企业要在这样的形势下求得生存, 一个重要的手段就是建立长期的中小企业联盟, 发挥各自优势, 共同承担生产任务。前两种虚拟企业组织形式是以任务为导向的临时性组织, 而组织虚拟式虚拟企业则是建立在组织结构上的长期合作型组织。组织虚拟式虚拟企业所要完成的任务是多方面的, 且随着订单的变化很快发生变化。由于这里虚拟企业具有较长的生命周期, 企业单元的核心能力会发生改变, 包括核心能力的根本性转变或者是某方面能力的加强与减弱等; 为了能从合作中获得更多的利益, 企业单元向其它企业单元学习和自适应调整。因此这类虚拟企业行为的特点是: 多任务、多阈值、有学习。

下面以文献 [20] 中的实例来验证用于组织虚拟式虚拟企业组建和运行过程仿真的扩展劳动分工模型的相关特性。

3.3.1 仿真实例和模型参数设置

广东是中国珠宝首饰生产基地, 拥有众多中小型珠宝加工企业。近年来, 随着市场需求量的激增, 这些中小型企业各自生产能力严重不足, 订单延期现象日益严重, 市场份额逐渐萎缩, 从而很多企业生产经营陷入困境。根据这些企业的经营现状, 结合虚拟企业的基本原理, 当地 5家有意合作的中小型加工企业, 自发形成长期的生产联盟, 试图解决各自生产能力不足的问题。

下面给出企业提供的与生产经营相关的有关数据和企业生产能力数据。

表 5 生产经营相关数据

Table 5 Related data for production and operation

产品种类	标准成本	标准工时(人日)	订货时间分布	订货数量分布
A	350	0.5	unifom(7, 30)	unifom(50, 80)
B	1500	3	unifom(7, 30)	unifom(50, 80)
C	1300	2.5	unifom(7, 30)	unifom(50, 80)
D	850	1.5	unifom(7, 30)	unifom(50, 80)
E	680	1	unifom(7, 30)	unifom(50, 80)

表 6 5 个合作企业单元的生产能力

Table 6 Production capacity of 5 cooperative enterprise units

生产商	可生产产品列表	生产成本报价	生产工时承诺 (人日)	每天可提供生产能力 (人日)
M 1	A	320	0.5	80
	C	1260	2.2	
	D	815	1	
M 2	B	1400	2.6	100
	E	660	0.8	
M 3	A	330	0.4	60
	C	1240	2	
M 4	D	820	1.4	120
	E	620	1.1	
M 5	B	1470	2.4	70
	C	1240	2.1	
	D	840	1.2	

模型的参数取值如下: 执行子任务 j 时的单位时间环境刺激增加量 $\delta_j = 3.0$ Agent i 执行子任务 j 的效率 $\theta_{ij} = 1.0$ Agent 退出概率 $p = 0.2$ 企业 Agent i 的学习系数 $\zeta_i = 0.9$ 遗忘系数 $\varphi_i = 1.1$

3.3.2 仿真结果分析

按第 2 节给出的扩展模型进行编程, 以一年 (360d) 为周期进行仿真运行. 每个企业单元的忙闲程度的观测值按式 (10) 计算, 结果如图 4 所

示. 每个订单的完成效率按式 (11) 计算, 结果如图 5 所示. 此实例中将每天接到的所有种类产品的订货总量当作一个总任务, 所以图 5 表现出来是每天一个总任务, 然后按照产品种类将其分为子任务. 而每个企业单元都有自己的核心竞争力, 按照他们各自的核心竞争力来选择各自需要完成的子任务及其数量. 企业 Agent 完成各个子任务的百分数按式 (12) 计算, 结果如图 6 所示.

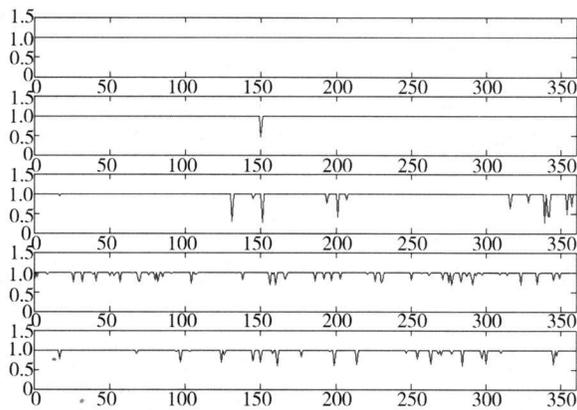


图 4 企业 Agent 的忙闲程度对比

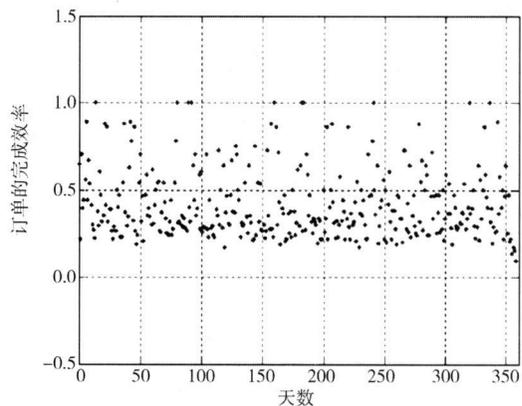


图 5 订单的完成效率

Fig. 4 Comparison of the busyness and idleness of enterprise agents

Fig. 5 Accomplishment efficiency of orders

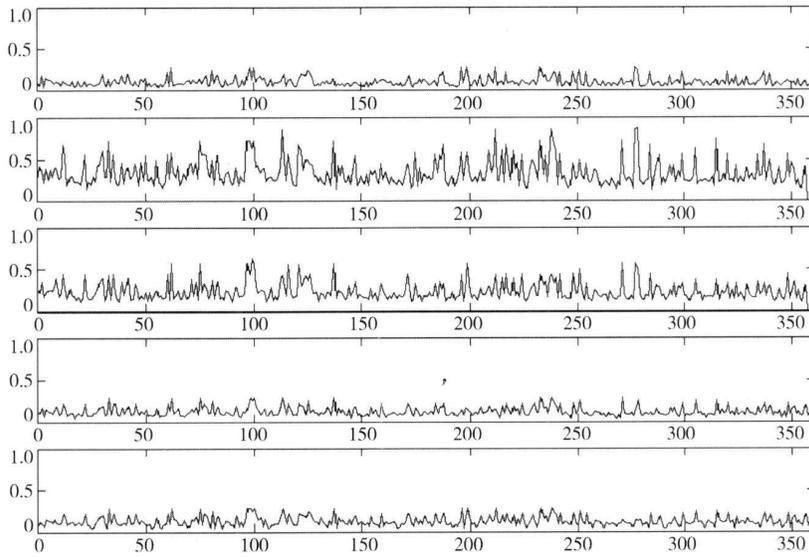


图 6 企业 Agent 完成各个子任务的百分数

Fig. 6 Percentage of each sub-task accomplished by enterprise agents

通过对图 4—图 6 的分析可以发现:

(1) 在图 4 中, 5 个企业 Agent 的忙闲程度线都呈“倒石钟乳”形, 即以 1 为基线, 部分向下突出. 这说明每个企业的绝大部分时间都在满负荷运转, 都能发挥各自的最大生产能力, 这对于虚拟企业后续的利润分配和进一步建立并形成信任和合作关系十分有利.

(2) 图 6 中第 1 条曲线表明, 子任务 1 的紧急程度大, 而企业 Agent 对应于该任务的阈值又最小, 表明在市场环境中, 该子任务回报高且执行的难度小, 因此该任务应能很快被完成, 其对应的曲线整体上处于 5 条曲线的最下方. 图 6 中第 4 条和第 5 条曲线表明, 虽然子任务 4、5 的紧急程度高, 但企业 Agent 对应的阈值也非常高, 说明这些子任务虽然回报很高, 但是其执行的难度同样也很大, 所以需要经过一段时间才能完成. 图 6 中第 2 条和第 3 条曲线表明, 子任务 2、3 的紧急程度不高, 而且成本高, 执行难度大, 因此往往要花费较长的时间才能完成这两个子任务, 但是又不会超过订单期限的限制. 这些运行结果一方面与实际情况较为一致, 另一方面也为类似的虚拟企业的长期生产规划的制订提供了依据.

(3) 由图 4—图 6 中还可以发现, 每个周期中执行任务的企业 Agent 是不同的, 而且在其下一个周期, 一个或多个企业 Agent 的退出都不会使任务中断, 其他的企业 Agent 还会继续根据自身

的阈值和任务的紧急程度形成合理的决策. 这表明本文模型具有内在的自组织特性和动态适应性, 其仿真结果通常也会优于其他静态仿真方法.

4 分析讨论

通过对上述三个实例的仿真结果的分析, 可以归纳出扩展蚁群劳动分工模型的一些内在特性:

(1) 动态适应性. 虚拟企业所处的市场环境是复杂多变的, 企业 Agent 能够适应动态变化的仿真环境, 并能在运行过程中通过学习积累来改善和提升完成相应任务的核心能力.

(2) 行为柔性. 企业 Agent 的行为是柔性的, 它是否参与任务, 以何种程度参与任务完全取决于其对回报、自身能力和外部环境的综合判断, 并能不断进行调整, 而不需要一个专门的盟主对其进行任务指派和性能评估.

(3) 鲁棒性. 在模型运行的过程中, 某些企业 Agent 的临时退出或者加入不会引起虚拟企业组织的解体, 本文模型具有一定的鲁棒性.

虽然扩展劳动分工模型的这些特性对于虚拟企业的建模与仿真研究具有重要意义, 但这并不代表该模型适用于所有的虚拟企业组织模式. 下面将从虚拟企业组织构成的两层结构和三种模

式^[21]入手, 分析扩展蚁群劳动分工模型的适用范围。

文献 [21] 认为虚拟企业的组织模式从根本上是一种两层结构, 即整个虚拟企业由核心层和外围层构成。核心层由一个或几个企业构成, 通过建立一个协调指挥委员会 (Alliance Steering Committee, ASC), 负责整个虚拟企业的构建、内部协调、资源整合、战略决策等工作。根据两层结构的总体框架, 按照核心层成员的数量, 虚拟企业的组织模式又可划分为联邦模式 (Federation Mode)、星形模式 (Starlike Mode) 和平行模式 (Parallel Mode) 三种, 如图 7 所示。

联邦模式是一般意义上的、最为普遍的虚拟企业组织模式。这种模式是一种弱中央控制结构,

没有一个专门的企业作为盟主控制其他企业的行为, 主要由 ASC 负责战略决策、任务分解、支持与协调等功能。这种模式在整体上是他组织, 在局部上是自组织。

星形模式是在联邦模式基础上核心层不断缩小的极端状态, 核心层只有一个企业, 即盟主。盟主企业的管理层同时扮演 ASC 的角色, 其他合作伙伴组成外围层。星形模式是一种完全他组织的中央控制结构。

平行模式可以看作是核心层不断扩大的极端状态, 即虚拟企业不存在盟主, 也没有核心层和外围层之间的差别, 所有成员完全对等。这种分布式的虚拟企业组织模式具有非常明显的自组织特征。

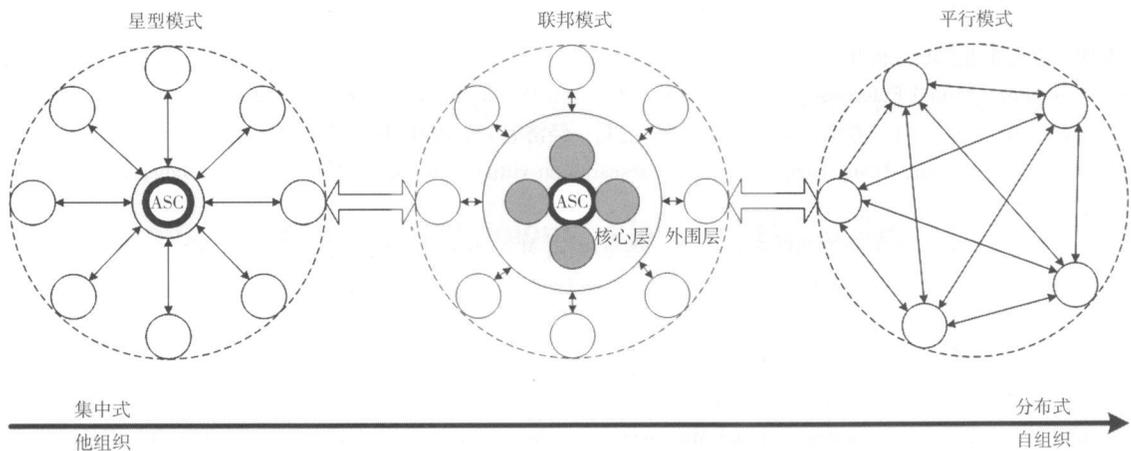


图 7 虚拟企业组织模式及其演变

Fig. 7 Organization pattern of virtual enterprises and its evolution

在星形模式和联邦模式中, 有一个专门的盟主或者 ASC 处于主导地位, 它们控制虚拟企业中的其他成员的行为, 承担了识别市场机遇、划分子任务、进行决策并管理下属成员企业的职能。这两种模式有自身的不足。当市场机遇出现时, 往往并不是一个很明确的任务, 而只是一个概念产品, 需要在以后的开发、生产中才能逐渐确定下来。在这种情况下, 对任务的划分以及对合作伙伴的评价都是比较模糊的, 如果按照合同网或市场机制招标投标的方式来确定每个子任务的承接企业, 由于一方面子任务的划分本来就是不明确的, 另一方面当某个承接子任务的成员企业因为某种原因无法完成任务时, 则此项任务需重新招标, 这势必影响产品的研发、生产及投入市场的时间, 因此,

如果以集中控制的方式管理虚拟企业组建的整个过程, ASC 或盟主企业往往难以实施有效的管理和调节, 并且各成员企业之间存在彼此联系不够紧密的问题。

在平行模式中, 各企业地位平等, 市场机遇可能被其中任何一个企业所识别, 每个企业根据市场机遇的价值和本企业的核心能力和优势所在决定是否参与。特别是当虚拟企业所面临的市场环境复杂多变时, 平行模式具有更为强壮的鲁棒性, 并能实现工作任务的自组织分配和调整。因此, 从组织结构和运行机理上看, 扩展蚁群劳动分工模型更适合于平行模式的虚拟企业建模与仿真, 它提供了探索虚拟企业组织复杂性和内在运行机制的一种有效工具。

5 结束语

本文以群集智能方法中的蚁群劳动分工模型为基础,将企业单元定义为人工蚂蚁,根据虚拟企业运行的要求重新设计蚂蚁的属性特征、任务执行和学习规则、活动环境等模块,建立了扩展的蚁群劳动分工模型,并将其用于虚拟企业的行为描述。采用该模型对虚拟制造式、供应链式、组织虚拟式等三种具有典型代表性的虚拟企业进行了仿真研究,实验表明仿真结果与实际情况比较吻合,运行过程能体现虚拟企业的自组织行为特征。本文提出的模型可进一步为类似虚拟企业的组建、

任务规划和利益分配提供研究基础和参考依据。

今后的研究工作拟从以下几个方面展开:①本文所描述的企业 Agent 的属性和行为还显得不够充分,有待进一步扩展。②群集智能的理论、方法和实现技术的研究正在不断深入,蚁群劳动分工的模型有望随之得到进一步完善。③通过开发一个基于蚁群劳动分工模型的虚拟企业建模、仿真与分析平台,可以支持仿真环境下的系统模拟,有效地完成模型参数的调整、仿真数据的统计与跟踪以及性能指标的观测。④理论联系实际,将本文的研究结果应用于虚拟企业构建的实践之中,加以检验,从而促进群集智能理论的发展,使之提升到一个新的水平。

参考文献:

- [1]赵春明. 虚拟企业[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2000
Zhao Chunming. Virtual Enterprise[M]. Hangzhou: Zhejiang People's Press, 2000 (in Chinese)
- [2]叶飞, 孙东川, 张红. 虚拟企业的复杂性研究[J]. 经济管理, 2001(14): 10—15
Ye Fei, Sun Dongchuan, Zhang Hong. Complexity research on virtual enterprises[J]. Economic Management, 2001(14): 10—15 (in Chinese)
- [3]叶飞, 孙东川. 面向全生命周期的虚拟企业组建与运作[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
Ye Fei, Sun Dongchuan. Virtual Enterprises Formation and Operation for Entire Life Cycle[M]. Beijing: China Machine Press, 2005 (in Chinese)
- [4]Bak P. How Nature Works[M]. New York: Copernicus, 1996
- [5]陈剑, 冯蔚东. 虚拟企业构建与管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
Chen Jian, Feng Weidong. Construction and Management of Virtual Enterprises[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese)
- [6]叶丹, 战德臣, 徐晓飞等. 敏捷虚拟企业组织形态及描述方法[J]. 高技术通讯, 1997, 7(7): 26—30
Ye Dan, Zhan Dechen, Xue Xiaofei et al. Formalized specification on organization of agile virtual enterprise[J]. High Technology Letters, 1997, 7(7): 26—30 (in Chinese)
- [7]王成恩, 尹朝万, 罗焕佐等. 可重构制造系统[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000
Wang Chengen, Yin Chaowan, Luo Huanzuo et al. Reconfigurable Manufacturing Systems[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2000 (in Chinese)
- [8]周业铮, 吴正刚, 韩玉启. 虚拟企业的组织复杂性探讨[J]. 江苏商论, 2004, (7): 82—84
Zhou Yezheng, Wu Zhenggang, Han Yuqi. Study on the organization complexity of virtual enterprises[J]. Jiangsu Business Review, 2004, (7): 82—84 (in Chinese)
- [9]肖人彬, 陶振武. 群集智能研究进展[J]. 管理科学学报, 2007, 10(3): 80—96
Xiao Renbin, Tao Zhenwu. Research progress of swarm intelligence[J]. Journal of Management Sciences in China, 2007, 10(3): 80—96 (in Chinese)
- [10]Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems[M]. New York: Oxford University Press, 1999
- [11]Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29—41
- [12]Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithms and stigmergy[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16

851—871.

- [13] Kude C R, Bonabeau E. Cooperative transport by ants and robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30: 85—101.
- [14] Martin M, Chopard B, Aбуquеrque P. Formation of an ant cemetery: Swarm intelligence or statistical accident? [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2002, 18: 951—959.
- [15] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y H. *Swarm Intelligence*[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [16] 赵卫东, 黄丽华. 面向角色的多 agent workflow 模型研究 [J]. *管理科学学报*, 2004, 7(2): 55—62
Zhao Weidong Huang Lihua. Role-based multi-agent workflow systems [J]. *Journal of Management Sciences in China* 2004, 7(2): 55—62 (in Chinese)
- [17] Cho Y H, Kim J K, Kim S H. Role-based approach to business process simulation modeling and analysis [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1998, 35(1—2): 343—346
- [18] Bonabeau E, Theraulaz G, Deneubourg J L. Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies [J]. *Proc Roy Soc London B*, 1996, 263: 1565—1569.
- [19] 夏新海. 物流配送车辆调度优化研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004
Xia Xinhai. Vehicle Scheduling Optimization of Logistics Distribution [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [20] Li H L, Xiao R B. A multi-agent virtual enterprise model and its simulation with Swarm [J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(9): 1719—1737.
- [21] 包国宪, 贾旭东. 虚拟企业管理导论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006
Bao Guoxian, Jia Xudong. Introduction to the Management of Virtual Enterprises [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2006 (in Chinese)

Modeling and simulation of ant colony's labor division for virtual enterprises

XIAO Ren-bin, TAO Zhenwu

Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract For complex Virtual Enterprises (VE), this paper proposes that Swarm Intelligence (SI), a new method for complex system modeling, can be adopted to study the establishment and operation process of the VE. Based on the analysis of the characteristics of the operation process of VE and their comparison with the labor division model of the ant colony, a VE is defined as an artificial ant. The modules of the attributes of the ants, the task execution, the rule learning, and the activation environment of the ants are redesigned under the requirements of the operation of VE, and then the extended labor division model of the ant colony is built. Next the extended labor division model of the ant colony is employed to model and simulate the three typical VEs, i.e. the type of virtual manufacturing, supply chain, and virtual organization. The experiments show that the results can match the real cases well; the characteristics of self-organization of VE can be reflected in the operation process, and the model can provide the basis for the establishment, task planning, and benefit distribution of VE. Finally, the inherent characteristics and applications of the extended model are analyzed and some future directions of research are given.

Key words complexity; virtual enterprise; swarm intelligence; ant colony; labor division