

文章编号:1001-9081(2009)06-1532-04

基于可靠性分析的 MAS 构建优化算法

刘 永¹, 李 言¹, 李淑娟¹, 侯晓莉¹, 曾志斌²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048; 2. 集美轻工业学校 机电科, 福建 厦门 361022)

(liu_yong1981@163.com)

摘 要:采用多 Agent 技术进行制造系统建模时, Agent 间可靠有效的交互协作是系统成功处理离散制造任务的重要保障。以增强多 Agent 系统的可靠性为目的, 提出了使用并联式结构来构建多 Agent 系统的思想。在此基础上, 给出了并联式 Agent 系统的可靠性评价方法, 建立约束条件下的多 Agent 系统可靠性极大化问题的数学模型, 利用填充函数算法的思想构造该模型的求解算法, 并通过实例说明并联式结构和求解算法的有效性。

关键词:多 Agent 系统; 可靠性; 填充函数算法

中图分类号: TP302.7 **文献标志码:** A

Optimization algorithm for MAS construction based on reliability analysis

LIU Yong¹, LI Yan¹, LI Shu-juan¹, HOU Xiao-li¹, ZENG Zhi-bin²

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. Electromechanical Department, Jimei Light Industrial School, Xiamen Fujian 361022, China)

Abstract: Using multi-Agent technology to construct system modeling, reliable and effective cooperation between Agents is the important condition for dealing discrete manufacturing tasks. After a parallel connection structure was introduced to improve the reliability of Multi-Agent System (MAS), a reliability evaluation method for parallel Agent system was proposed, and a mathematic model was constructed for maximizing the reliability of MAS with constraint conditions. The filled function method was utilized to achieve solution algorithm of the model. The example results indicate the validity of the parallel connection and the method.

Key words: Multi-Agent System (MAS); reliability; filled function method

0 引言

多智能体系统 (Multi-Agent System, MAS) 是分布式人工智能领域的重要研究课题之一。由于 MAS 所具有自适应、自组织和良好的协调机制等特性, 被广泛应用于离散型制造系统的研究与开发中。Agent 技术被认为是建立下一代制造系统的有效手段^[1]。目前 MAS 主要用于产品设计与开发、生产计划与调度以及供应链关系管理系统等的建模中^[2], 还有一部分学者将其应用于复杂系统优化问题的求解中^[3]。然而, 大多研究工作中未能考虑由多 Agent 建立的生产系统的可靠性问题。

作为制造系统, 可靠性是个不可忽视的问题。近期只有文献[4]提出了移动 Agent 系统可靠性的估算方法, 用来分析计算机通信网络。而离散型制造系统不同于通信网络系统, 它是以分布式任务处理为主, 而且系统的可靠性不仅与 Agent 本身的性能有关, 还与系统任务的结构有着密切的联系。本文以 Agent 可靠性评价方法为基础, 结合离散任务的结构特征, 分析拟建 MAS 的可靠性, 从而指导系统在构建时避免不可靠因素的介入, 从系统建立的根源上提高 MAS 的整体可靠性。

在机械加工类的离散型制造系统中, 生产任务存在不连

续性, 可以进行有限细分, 并且可以通过分布式网络实现并行处理, 任务的执行关系构成一个活动网络图。而 Agent 映射为执行这些任务所需的各种物理资源 (主要指生产设备), 使得物理资源具有决策机制。实例化后的 Agent 根据自身资源的生产能力、运行状态等信息, 向任务管理 Agent 发出任务请求信息; 然后由任务管理 Agent 通过合同网评标形式来确定生产任务的承担者; 最后资源 Agent 通过交互协作按照活动网络的逻辑关系来完成中标任务^[1,5]。采用类似的方法构建的 MAS, 大多以成本最低和时间最短为目标。而本文是在相应的成本和时间的约束条件下, 以系统可靠性最大为目标, 使整个系统在满足成本要求的前提下提高了系统运行的成功率。下面我们先来讨论 MAS 可靠性的评价方法。

1 MAS 的可靠性分析

1.1 可靠性评价方法

影响 MAS 可靠性的因素很多, 但可以分为两大类: 1) 影响 Agent 软件体可靠性的因素 (如 Agent 软件的规模、复杂程度、开发方法以及它所支持的运行环境等)。2) 影响 Agent 映射对象 (物理资源) 可靠性的因素 (如资源的作业能力、故障率、使用寿命、在线时间, 等等)。此外, Agent 实体还可能受到不可抵御或者无法预料的自然因素的影响, 诸如自然灾

收稿日期: 2009-01-04; 修回日期: 2009-02-24。

基金项目: 教育部春晖计划项目 (Z2005-1-61004); 校青年科学研究计划项目 (102-210811)。

作者简介: 刘永 (1981-), 男, 山西忻州人, 博士研究生, 主要研究方向: 网络制造、生产计划与调度; 李言 (1960-), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电测控、精密加工、生产控制; 李淑娟 (1968-) 女, 陕西蒲城人, 教授, 主要研究方向: 敏捷制造、生产控制与调度; 侯晓莉 (1979-), 女, 陕西西安人, 助教, 主要研究方向: 先进制造、机械实验教学; 曾志斌 (1970-), 男, 福建莆田人, 博士, 主要研究方向: 虚拟企业联盟、供应链关系管理。

害以及能源的中断等不确定性因素。因此,本文在单个 Agent 的可靠性评价中采用模糊因素分析法,即结合模糊评价方法和可靠性因素分析方法。通过对 MAS 中的单个 Agent 影响系统可靠性的因素进行模糊评价分析,以确定 Agent 各影响因素发生的概率,进而确定整个多 Agent 系统的可靠性。

采用模糊风险因素分析法进行 Agent 可靠性评价的基本思路是:综合考虑 Agent 的各种影响因素,确定每种影响因素的可靠程度,计算出 Agent 的可靠性。其具体步骤是:1) 选定影响因素,构成影响因素集;2) 根据评价的要求,划分等级,确定评价标准;3) 对各种影响因素进行独立评价,得出评价矩阵和权重矩阵;4) 计算出评价结果。

假设选定影响因素 r_1, r_2, \dots, r_n 对 Agent 作评价, $w(r_j)$ 表示影响因素 r_j 在 $Agent(A_i)$ 总体可靠性中所占的权重:

$$\sum_{j=1}^n w(r_j) = 1, 0 < w(r_j) < 1.$$

A_i 关于风险因素 r_j 的可靠度为 a_{ij} , 则该 Agent 的可靠度为 $R(A_i) = \sum_{j=1}^n w(r_j) \times a_{ij} (i = 1, 2, \dots, m)$, 则对于由多个 Agent 组成的系统可靠性结构如图 1(a) 所示, 其可靠度为:

$$R = \prod_{i=1}^m R(A_i) = \prod_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n w(r_j) \times a_{ij} \right) \quad (1)$$

对 Agent 作可靠性评估之后, 在构建多 Agent 系统中就可以通过设定可靠性阈值, 剔除低于该阈值的 Agent, 以控制整个系统的可靠性。

1.2 提高可靠性的并联结构

多 Agent 系统中, 各子任务之间具有先序关系, 构成了一个活动网络。传统的 MAS 中一个子任务通常由一个 Agent 来承担, 当该 Agent 失败时, 势必影响整个系统的正常运行。因此, 重要任务应该由两个或两个以上的 Agent 承担, 即一种角色由多个 Agent 来扮演。这符合一个任务可由多个资源共同完成的实际生产情况, 是提高 Agent 系统可靠性的一个有效途径。

假设整个任务由 g 个子任务组成, 这些子任务由其先序关系构成一个活动网络 H 。系统任务的完成时间是 T , 对于子任务 $i (i = 1, 2, \dots, g)$, 设有 m_i 个 Agent 来投标, 投标的 Agent 集 $D_i = \{1, 2, \dots, m_i\}$, 子任务 i 的备选 $Agent_j$ 的投标价格是 bid_{ij} , 处理时间是 q_{ij} , 可靠度是 R_{ij} 。设任务管理 Agent 从 D_i 中选择若干个 Agent 来承担该系统任务, 这些 Agent 构成的集合为 E_i , 则 $E_i \subseteq D_i$ 。

任务管理 Agent 把子任务 i 分包给 E_i 中各 Agent 来完成时, 往往会综合考虑 Agent 的各种评价因素, 来确定其承担子任务 i 的份额。为分析的方便起见, 假设 E_i 中各 Agent 承担子任务 i 的份额是一样的, 于是完成子任务 i 所需的时间:

$$t(E_i) = \frac{1}{|E_i|} \max_{j \in E_i} q_{ij} \quad (2)$$

完成子任务 i 所需成本

$$c(E_i) = \sum_{j \in E_i} \frac{bid_{ij}}{|E_i|} = \frac{1}{|E_i|} \sum_{j \in E_i} bid_{ij} \quad (3)$$

采用图 1(b) 的并联式可靠性结构, 则子任务 i 的可靠度为:

$$R(E_i) = 1 - \prod_{j \in E_i} (1 - R_{ij}) \quad (4)$$

根据可靠性理论, 通过并联的方法可以提高子任务 i 的可靠度, 这与实际情况也是吻合的。

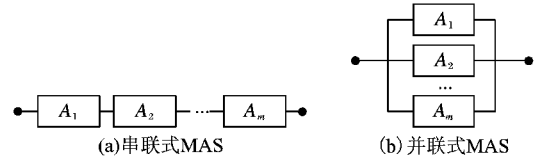


图1 MAS 的可靠性结构

由上面分析可知, 当每个子任务 i 选择了中标的 Agent 集 E_i 后, 则完成子任务 i 所需时间 $t(E_i)$, 费用 $c(E_i)$ 及子任务 i 的可靠度 $R(E_i)$ 就可以求出。于是整个任务的完工时间 $t(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 可以用文献[4] 中的关键路径法求出, 整个任务的总费用为 $\sum_{i=1}^g c(E_i)$ 。

由 1.1 节的分析, 整个任务的可靠度为:

$$\prod_{i=1}^g R(E_i) = \prod_{i=1}^g \left(1 - \prod_{j \in E_i} (1 - R_{ij}) \right) \quad (5)$$

提高多 Agent 系统完成任务的可靠性, 我们采用了由多个 Agent 共同承担一个子任务, 这必然会增加整个任务的执行成本。因此, 我们在满足任务完成时间约束条件下, 研究使得总体执行成本最小的任务分配问题。

故假设整个任务的投入成本为 B , 假设整个任务的完成时间为 T , 于是, 为每个子任务选择若干个中标 Agent, 使得整个任务的可靠性最大这一问题的数学模型如下:

$$\max \prod_{i=1}^g R(E_i) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^g c(E_i) \leq B \\ & t(E_1, E_2, \dots, E_g) \leq T \\ & E_i \subseteq D_i; i = 1, 2, \dots, g \end{aligned}$$

由式(5) ~ (6) 得:

$$(P) \quad \max \prod_{i=1}^g \left(1 - \prod_{j \in E_i} (1 - R_{ij}) \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^g \frac{1}{|E_i|} \sum_{j \in E_i} bid_{ij} \leq B \\ & t(E_1, E_2, \dots, E_g) \leq T \\ & E_i \subseteq D_i; i = 1, 2, \dots, g \end{aligned}$$

其中 $t(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 为根据式(2) 中完成子任务 i 所需时间 $t(E_i)$, 用关键路径法求出。

式(7) 的问题是 NP 完全的, 因而式(7) 的问题是 NP 困难的。由于问题(P) 是非线性的组合优化问题, 且在实际中问题的规模较大, 故给出求解问题(P) 的一个近似算法。

2 问题的求解算法

不失一般性, 假设子任务 i 的候选 $Agent_j$ 的投标价格 bid_{ij} 是整数, 执行时间 q_{ij} 也是整数 ($j = 1, 2, \dots, m_i; i = 1, 2, \dots, g$)。令 $|E|$ 是 $|E_1|, |E_2|, \dots, |E_g|$ 的最小公倍数, 则易知问题(P) 的约束的惩罚项为 $G(E_1, E_2, \dots, E_g)$:

$$G(E_1, E_2, \dots, E_g) = \max \left\{ 0, |E| B - \sum_{i=1}^g \frac{|E|}{|E_i|} \sum_{j \in E_i} bid_{ij}, D - t(E_1, E_2, \dots, E_g) \right\} \quad (8)$$

且 $G(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 是整数。

定理 1 问题(P) 与下列问题(PP) 有相同的最大解和最大值(证明略)。

$$(PP) \quad \max \prod_{i=1}^g \left(1 - \prod_{j \in E_i} (1 - R_{ij}) \right) - G(E_1, E_2, \dots, E_g) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } E_i \subseteq D_i; i = 1, 2, \dots, g$$

以下为描述方便, 记 $f(E_1, E_2, \dots, E_g) = \prod_{i=1}^g (1 - \prod_{j \in E_i} (1 - R_{ij})) - G(E_1, E_2, \dots, E_g)$, 把问题 (PP) 改写为如下问题:

$$\begin{aligned} \text{(PP)} \quad & \max f(E_1, E_2, \dots, E_g) \\ \text{s. t. } & E_i \subseteq D_i; i = 1, 2, \dots, g \end{aligned} \quad (10)$$

下面根据文献[7-8]的填充函数算法的思想构造求解问题 (PP) 的一个算法。

定义 1 设 (E_1, E_2, \dots, E_g) 是问题 (PP) 的一个解, 其邻域 $N(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 定义为:

$$N(E_1, E_2, \dots, E_g) = \{(E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \mid E'_i \subseteq D_i, \text{ 且 } E'_i \text{ 由 } E_i \text{ 中删去一个元素, 或从 } D_i \text{ 中取一个元素加入 } E_i \text{ 中组成} (i = 1, 2, \dots, g)\}$$

定义 2 (E_1, E_2, \dots, E_g) 称为问题 (PP) 的局部极大解, 若 $\forall (E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \in N(E_1, E_2, \dots, E_g)$, 有 $f(E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \leq f(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 。

首先构造求解问题 (PP) 的一个局部极大解的局部搜索算法。

算法 1 局部搜索。

第 1 步 任取 $(E_1, E_2, \dots, E_g), E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$ 。

第 2 步 若 $\forall (E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \in N(E_1, E_2, \dots, E_g)$, 有 $f(E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \leq f(E_1, E_2, \dots, E_g)$, 则 (E_1, E_2, \dots, E_g) 是问题 (PP) 的局部极大解, 退出, 否则转第 3 步。

第 3 步 在 $N(E_1, \dots, E_g)$ 中找出一个解 (E'_1, \dots, E'_g) , 使得 $f(E'_1, \dots, E'_g) > f(E_1, \dots, E_g)$, 令 $E_i = E'_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 转第 2 步。

由于问题 (PP) 是 NP 困难问题, 因此由算法 1 找到的局部极大解一般不可能是问题 (PP) 的最大解, 故在用局部搜索算法求解问题 (PP) 时, 如何跳出当前局部极大解的领域是求解问题 (PP) 的算法的关键, 文献[7-8]给出一个很好的机制。下面根据本文问题的特殊性来构造本文的求解算法。

设 $(E_1^*, E_2^*, \dots, E_g^*)$ 是问题 (PP) 的当前局部极大解, 对 $E_i \subseteq D_i, i = 1, 2, \dots, g$ 定义 (E_1, E_2, \dots, E_g) 与 $(E_1^*, E_2^*, \dots, E_g^*)$ 的距离 $d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*)$ 为:

$$d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*) = \max_{1 \leq i \leq g} |E_i \oplus E_i^*| \quad (11)$$

其中 \oplus 是集合的对称差运算。

显然 $d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*) \geq 0$, 且 $d(E_1^*, \dots, E_g^*; E_1^*, \dots, E_g^*) = 0$ 。

引理 1 若 $d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*) > 0$, 则存在 $(E'_1, E'_2, \dots, E'_g) \in N(E_1, E_2, \dots, E_g)$ 使得 $d(E'_1, \dots, E'_g; E_1^*, \dots, E_g^*) \leq d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*) - 1$ 。

构造函数 $U(E_1, \dots, E_g)$:

$$U(E_1, \dots, E_g) = \begin{cases} f(E_1, \dots, E_g), \\ f(E_1, \dots, E_g) > f(E_1^*, \dots, E_g^*) \\ f(E_1, \dots, E_g) - \alpha d(E_1, \dots, E_g; E_1^*, \dots, E_g^*), \\ f(E_1, \dots, E_g) \leq f(E_1^*, \dots, E_g^*) \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\alpha \geq 0$ 是参数。构造如下问题:

$$\begin{aligned} \text{(AP)} \quad & \max U(E_1, \dots, E_g) \\ \text{s. t. } & E_i \subseteq D_i; i = 1, 2, \dots, g \end{aligned} \quad (13)$$

定理 2 对于式 (12) 定义的 $U(E_1, \dots, E_g), (E_1^*, \dots, E_g^*)$ 是问题 (AP) 的局部极大解 (证明略)。

定理 3 若 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (AP) 的局部极大解, 且 $f(E'_1, \dots, E'_g) > f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (PP) 的局部极大解 (证明略)。

定理 4 若 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (AP) 的全局最大解, 则 (E'_1, \dots, E'_g) 也是问题 (PP) 的全局最大解 (证明略)。

定理 5 若 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (AP) 的局部极大解, $f(E'_1, \dots, E'_g) \leq f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 且 $(E'_1, \dots, E'_g) \neq (E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则只要适当增大 α 的值, (E'_1, \dots, E'_g) 就不是问题 (AP) 的局部极大解 (证明略)。

基于以上理论, 我们设计求解问题 (PP) 的算法的思想如下: 取 $\alpha = 0$, 先用算法 1 找到问题 (AP) 的一个局部极大解 (E_1^*, \dots, E_g^*) , 它也是问题 (PP) 的局部极大解。构造问题 (PP) 在 (E_1^*, \dots, E_g^*) 处的函数 $U(E_1, \dots, E_g)$ 。

任取 $E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 从 (E_1, \dots, E_g) 处用算法 1 求解问题 (AP), 得到一个局部极大解 (E'_1, \dots, E'_g) , 若 $f(E'_1, \dots, E'_g) > f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则由定理 3 知 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (PP) 的局部极大解, 令 $E_i^* = E'_i (i = 1, 2, \dots, g)$; 否则若 $(E'_1, \dots, E'_g) \neq (E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则增大 α 的值, 再用算法 1 从 (E'_1, \dots, E'_g) 开始局部极大化 $U(E_1, \dots, E_g)$; 而若 $(E'_1, \dots, E'_g) = (E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则令 $\alpha = 0$, 任取 $E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 重复上述过程。

由定理 5 及其证明过程可知, 当任取 $E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 用算法 1 解问题 (AP), 当 α 逐步增大时, 极大化点列将趋于 (E_1^*, \dots, E_g^*) 或者比 (E_1^*, \dots, E_g^*) 更好的解。

算法 2 填充函数算法。

第 1 步 取定 $\delta > 0, N_L$ 为充分大的正数, $N = 0, \alpha = 0$ 。任取 $E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 用算法 1 从 (E_1, \dots, E_g) 开始解问题 (PP) 得一局部极大解 (E_1^*, \dots, E_g^*) 。

第 2 步 若 $N > N_L$, 则停止计算, 输出 (E_1^*, \dots, E_g^*) 作为问题的近似全局最大解, 否则令 $N = N + 1$, 随机选取 $E_i \subseteq D_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 转第 3 步。

第 3 步 用算法 1 从 (E_1, \dots, E_g) 开始解问题 (AP), 得一局部极大解 (E'_1, \dots, E'_g) 。

第 4 步 若 $f(E'_1, \dots, E'_g) > f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则令 $\alpha = 0, E_i^* = E'_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 转第 2 步。

第 5 步 若 $f(E'_1, \dots, E'_g) \leq f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 且 $(E'_1, \dots, E'_g) \neq (E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则令 $\alpha = \alpha + \delta, E_i = E'_i (i = 1, 2, \dots, g)$, 转第 3 步; 否则转第 2 步。

说明:

1) 算法 2 中的参数 δ 是式 (12) 中参数 α 每次增大的值, N_L 是算法 2 中随机选取初始解的最多个数, 本文用其作为算法 2 终止的参数。

2) 在第 4 步中, 若 $f(E'_1, \dots, E'_g) > f(E_1^*, \dots, E_g^*)$, 则由定理 3 知 (E'_1, \dots, E'_g) 是问题 (PP) 的局部极大解, 而在第 5 步中, 根据定理 5, 通过逐步增大 α 的值, 算法 2 可跳出当前收敛的不好的局部极大解。

3 实例分析

以图 2 所示任务构成的活动网络图为例。该系统任务由 8 个子任务构成, 每个子任务的投标 Agent 的可靠度、处理时

间和投标价格见表1。

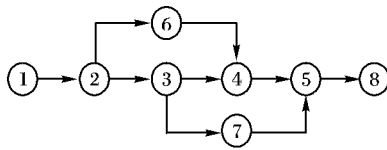


图2 系统任务的活动网络

表1 Agent 的投标参数

任务	Agent	可靠度 R_{ij}	时间 q_{ij}	成本 bid_{ij}
任务 1	A_{11}	0.98	6	12
	A_{12}	0.95	6	10
	A_{13}	0.92	4	8
任务 2	A_{21}	0.94	8	10
	A_{22}	0.96	6	14
	A_{23}	0.90	6	9
任务 3	A_{31}	0.86	2	7
	A_{32}	0.88	4	8
	A_{33}	0.90	6	10
任务 4	A_{41}	0.92	5	6
	A_{42}	0.95	5	7
	A_{43}	0.98	6	8
任务 5	A_{51}	0.85	3	6
	A_{52}	0.88	2	8
	A_{53}	0.89	3	8
任务 6	A_{61}	0.90	3	16
	A_{62}	0.92	4	18
	A_{63}	0.87	2	15
任务 7	A_{71}	0.96	8	10
	A_{72}	0.94	6	8
	A_{73}	0.93	5	8
任务 8	A_{81}	0.86	2	5
	A_{82}	0.88	3	6
	A_{83}	0.90	4	8

采用文献[6]的分支定界算法,在完成时间约束下,以运行成本最小为目标,求解得到的多 Agent 系统其完成任务的最小费用是64,所需时间为22,而系统可靠度仅为0.387。利用本文的理论和算法,在完成时间22和运行成本70的约束

下,求解得到的系统多 Agent 集合为:

$$(A_{12}, A_{13}), (A_{23}, A_{21}), (A_{31}, A_{32}), (A_{41}, A_{42}), (A_{51}, A_{53}), (A_{61}, A_{63}), (A_{72}, A_{73}), (A_{81}, A_{82})$$

其可靠度是0.921,所需运行总成本是68.5,完成时间为15。可见采用并联结构方法构建 MAS,由多个 Agent 协作完成某项任务在很大程度上提高了系统的可靠性。虽然会引起系统运作成本的增加,但从整体效益上讲系统性能得到显著提升。

4 结语

本文借鉴机械领域的可靠性理论,建立了多 Agent 系统的可靠性分析方法,提出了提高多 Agent 系统可靠性的并联结构,并根据本文问题的特殊性构造了可靠性最大化问题的求解算法。实例表明,本文的理论是有效的,可以大大提高整个 Agent 系统运作的可靠性,从而在多 Agent 系统构建之初,就为系统的成功实施奠定了基础。

参考文献:

- [1] SHEN W M, HAO Q, HYUN J Y, *et al.* Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20(4): 415–431.
- [2] LEE J H, KMIN C O. Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: A review paper [J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(1): 233–265.
- [3] 赵博, 范玉顺. MAS 技术在生产调度研究中的应用[J]. *控制与决策*, 2003, 18(1): 1–7.
- [4] MOSAAB D, QUSAY H M. Monte Carlo simulation-based algorithms for estimating the reliability of mobile Agent-based systems [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2008, 31(1): 19–31.
- [5] 高志军, 颜国正, 丁国清. 基于网络的多 Agent 协作环境下的任务分配[J]. *计算机工程*, 2005, 31(10): 19–21.
- [6] ZENG Z B, LI Y, ZHU W X. Partner selection with a due date constraint in virtual enterprises [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 175(2): 1353–1365.
- [7] 朱文兴. 整数规划的一个填充函数算法[J]. *应用数学学报*, 2000, 23(4): 481–487.
- [8] 朱文兴, 傅清祥. 一个基于填充函数变换的对称 TSP 的局部搜索算法[J]. *计算机学报*, 2002, 25(7): 701–707.

(上接第 1531 页)

训练样本不足的问题,提高了一定范围内波动数列的预测精度,比单一 BP 网络和灰色预测的精度都高。此模型能够应用于水质参数预测和管理中,为河流水质预测提供重要的科学依据。

此模型对其他具有时间连续性的非单调递增或递减函数序列的预测具有重要的参考价值,应用前景十分广阔。这对灰色理论与其他预测模型的组合预测有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 肖新平, 宋中民, 李峰. 灰技术基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 王永庆. 人工智能原理与方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [5] 郝勇, 范君晖. 系统工程方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 袁健, 树锦. 神经网络模型在黄河水质预测中的应用分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 49–51.
- [7] 王弘宇, 马放, 杨开, 等. 灰色新陈代谢 GM(1, 1) 模型在中长期城市需水量预测中的应用研究[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2004, 37(6): 32–35.
- [8] 陈霞, 邱桃荣, 魏玲玲, 等. GM(1, 1) 模型和新陈代谢模型的应用比较[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(12): 157–159.
- [9] 仇芝. 灰色组合模型研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [10] 张大海, 江世芳, 史开泉. 灰色预测公式的理论缺陷及改进[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(8): 140–142.
- [11] 何海, 陈绵云. GM(1, 1) 模型预测公式的缺陷及改进[J]. *武汉理工大学学报*, 2004, 26(7): 81–83.
- [12] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [13] 张大海, 毕研秋, 毕研霞, 等. 基于串联灰色神经网络的电力负荷预测方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(12): 128–132.
- [14] 飞思科技产品研发中心. Matlab 6.5 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.