文章编号: 1001-0920(2006)11-1270-05

一种复杂多智能体系统不一致性递推协调算法

李成安, 吴铁军
(浙江大学 智能系统与决策研究所, 杭州 310027)

摘 要: 为解决复杂多智能体系统的不一致性协调问题, 在扩展自私-利他协调原则的基础上, 提出了一种递推协调算法, 通过递推协调各智能体对任务的重视程度, 以降低系统的不一致性, 使系统的任务求解决策一致化. 同时证明了该算法的收敛性, 并以计算实例说明该算法比现有方法具有更好的性能.

关键词: 一致性; 扩展自私-利他协调原则; 递推协调
中图分类号: TP18 **文献标识码**: A

Recursive Inconsistency Coordination Algorithm for Complicated Multi-agent Systems

LI Cheng-an, WU Tie-jun
(Intelligent Systems and Decision Making Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: LI Cheng-an, E-mail: chenganli@tom.com)

Abstract: A recursive algorithm for the coordination of complicated multi-agent systems inconsistency is proposed based on extended ego-altruistic coordination principle. A parameter is used to adjust the coordination. The consistency of task solving decisions among agents is reached through recursively coordinating the preference degrees that the agents assign to the tasks and the convergence of the algorithm is proved. A case study shows that the algorithm is effective and has better performance than existing approaches.

Key words: Consistency; Extended ego-altruistic coordination principle; Recursive coordination

1 引 言

在复杂大系统的多智能体任务求解模型中, 通常各个智能体所处的地位不同, 外界环境多变且存在一定的不确定性, 各智能体拥有不同的资源和环境, 因而对于给定任务的处理往往出现不同程度的不一致性[1~5]. 这种不一致性使智能体之间不能很好地协作, 甚至不能完成给定的任务. 因此各智能体之间通过协调减少或消除其不一致性, 是提高系统整体性能的一个重要课题.

目前已提出一些处理系统不一致性的协调策略, 如赢者通吃策略(WTA)、层次赢者通吃策略(HWTA)[6]、以多数智能体的结论为标准的策略[1]等等. 但是对于自主性较强和智能体之间差异较大的系统来说, WTA 和HWTA 只考虑最重要智能体的行为, 是一种极端、过于保守和主观的协调, 没有体现智能体的自主性和智能体之间的差异, 可能导致智能体不能接受协调结果; 而使用以多数智能体的结论为标准的方法则可能因无法构成多数而难以完成协调.

针对现有协调策略的不足, 考虑到智能体不但具有自私性, 而且也具有权衡利弊从而相互妥协的理性[7], 本文在自私-利他原则[8]基础上提出一种充分考虑各智能体的自治性和协作性的扩展自私利他协调原则, 并由此提出一种递推协调算法. 本文通过理论证明了该算法的收敛性, 实例仿真说明该算法是有效的.

收稿日期: 2005-08-01; 修回日期: 2006-03-01.
基金项目: 国家973 计划项目(2002CB312203).
作者简介: 李成安(1969—), 男, 重庆人, 博士生, 从事多智能体、数据挖掘等研究; 吴铁军(1950—), 男, 南京人, 教授, 博士生导师, 从事大系统智能控制、非线性控制等研究.

2　多智能体系统的不一致性定义及判别

假定一个多智能体任务求解系统, 由 m 个智能体和 n 个任务组成, 分别表示为 $A = \{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$ 和 $P = \{P_1, P_2, \cdots, P_n\}$. 此外, 设各智能体的重要性是不同的, 记为 $W(A) = \{w(A_1), w(A_2), \cdots, w(A_m)\}$, 其中: $w(A_i)$ 表示 A_i 的重要程度, $W_{s,t}(A) = (w(A_s) + w(A_t))/2$ 为智能体对 (A_s, A_t) 的重要程度 设各任务也存在不同的重要性, 记为 $W(P) = \{w(P_1), w(P_2), \cdots, w(P_n)\}$, 其中: $w(P_j)$ 表示任务 P_j 的重要程度, $W_{ij}(P) = (w(P_i) + w(P_j))/2$ 为任务对 (P_i, P_j) 的重要程度

设智能体 A_k 对各任务的重视程度不同, 并会通过这些重视程度的不同而影响到每个任务的完成质量, 其重视程度可用模糊逻辑来表达 令隶属函数 $d_k(P_i, P_j)$ 表示 A_k 对任务 P_i 和 P_j 的相对重视程度, 其定义参见文献[1]. 因此 A_k 对任务集合 P 中各任务的相对重视程度可用模糊矩阵 D_k 来表示, 即

$$D_k = [d_{ij}^k]_{n\times n}. \tag{1}$$

其中: $d_{ij}^k = d_k(P_i, P_j)$, $i, j = 1, 2, \cdots, n$, $k = 1, 2, \cdots, m$, 且 $d_{ij}^k + d_{ji}^k = 1$, $d_{ii}^k = 0.5$.

根据以上对多智能体系统中智能体对于任务相对重视程度的定义, 关于系统不一致性的语义描述为: 若系统中大多数智能体对大多数任务的相对重视程度有相当大的差异, 则称该系统是不一致的

为了度量系统的不一致性程度, 定义一个描述 "多数不一致性" 的模糊概念 Q, 其含义是: "给定集合中大多数成员不具有某种共同性质", 其隶属函数定义如下:

$$\mu_Q(x) = \begin{cases} 1, & x \geq b; \\ \dfrac{x - a}{b - a}, & a < x < b; \\ 0, & x \leq a. \end{cases} \tag{2}$$

其中: x, a 和 b 均为实数, 且 $0 \leq a \leq b \leq 1$; a 和 b 分别为充分一致性和充分不一致性阈值, 其大小由经验确定; $\mu_Q(x) = 1$ 表示集合中大多数成员一定不具有该共同性质, $\mu_Q(x) = 0$ 表示大多数成员一定具有该共同性质

在上述系统不一致性定义的基础上, 可通过文献[1] 提供的判定方法来判别系统的不一致性: 首先计算所有智能体对某一任务对的不一致性程度 $V(P_i, P_j)$; 再计算大多数智能体对该任务对的不一致性程度 $V_F(P_i, P_j)$; 最后确定大多数智能体对大多数任务的不一致性程度 U. 如果 $U \leq a$, 该多智能体系统是一致的; 否则该系统是不一致的, 需要进行协调, 以达到充分一致 具体计算步骤可参见文献[1].

3　系统不一致性的递推协调策略

对系统的不一致性进行协调是指, 在系统存在不一致性的情况下, 充分利用各智能体自身的影响实现智能体之间的相互协作以消除系统的不一致性 其目的是在保证全局一致的前提下充分考虑各智能体自身的知识、资源等, 给予其充分的自主性和独立性, 实现优化协调

3.1　扩展自私 - 利他协调原则

在分布式专家系统中, 利用自私 - 利他原则, 使各专家之间既相互协作, 同时兼顾每个专家自己的影响, 很好地解决了存在不确定时的协作问题[3, 8, 9]. 由于多智能体系统中智能体具有自治性和相互支持等特点[7], 同样可以利用自私 - 利他原则的思想来解决多智能体系统的不一致性协调问题 但当各智能体自主性很强且相互之间存在较大差异时, 简单的利用自私 - 利他原则进行协调可能导致智能体原有的决策改变太大, 使其不能接受或整体协调代价较大而不能满足系统要求 因此, 本文对该原则进一步扩展, 提出一种新的可调节协调作用的协调原则 —— 扩展自私 - 利他协调原则, 以便灵活地改善协调性能

将各智能体对某任务对 (P_i, P_j) 的相对重视程度按大小排序, 得到序列 $D_{ij} = \{d_{ij}^1, d_{ij}^2, \cdots, d_{ij}^m\}$. 实际中, 由于智能体的局限性和个人趋向, 往往只接受相近的意见或受相近意见的影响, 因此本文假设对每个 $A_s (s \in \{1, 2, \cdots, m\})$, 只考虑来自其相邻的 A_{s-1} 和 A_{s+1} 的影响 其中: A_{s-1} 对 A_s 存在正影响, 即使 A_i 提高对某任务对的相对重视程度; A_{s+1} 对 A_s 存在负影响, 即使 A_s 降低对该任务对的相对重视程度, 其他智能体对 A_s 无影响 特别地, A_1 只受 A_2 的影响, A_m 只受 A_{m-1} 的影响

基于上面的假设和文献[8], 本文定义一个描述智能体之间相互影响效应的扩展自私 - 利他协调原则:

给定 m 个智能体对某任务对 (P_i, P_j) 的相对重视程度序列 $D_{ij} = \{d_{ij}^1, d_{ij}^2, \cdots, d_{ij}^m\}$, 在智能体之间相互影响的作用下, 各智能体对该任务对的相对重视程度将修正为

$$d_{ij}^{k\,\prime} = \begin{cases} d_{ij}^k - I(\sigma_{ij}^k), & k = 1; \\ d_{ij}^k + I(\sigma_{ij}^k) - I(\sigma_{ij}^{k+1}), & 1 < k < m; \\ d_{ij}^k + I(\sigma_{ij}^k), & k = m. \end{cases} \tag{3}$$

其中: d_{ij}^k 和 $d_{ij}^{k\,\prime}$ 分别为修正前后 A_k 对 (P_i, P_j) 的相对重视程度值; $\sigma_{ij}^k = \left| d_{ij}^k - d_{ij}^{k-1} \right|$ 为 A_{k-1} 和 A_k 对 (P_i, P_j) 的相对重视程度的差值; $I(\sigma_{ij}^k)$ 为描述 A_{k-1} 影响 A_k 关于 (P_i, P_j) 相对重视程度评价效应的一个影响

显著性函数, 如下式定义:

$$I(d)=\begin{cases}d/\alpha, & d\le s/2;\\(s-d)/\alpha, & d>s/2\end{cases}\tag{4}$$

其中: d 表示两个智能体对任务对的相对重视程度差异; s 为大于系统中智能体对所有任务对的相对重视程度最大值与最小值之间差值的一个实数(如 $s\ge 1$); α 为调节参数, $\alpha\ge 2$ 且为整数, 当 $\alpha=2$ 时即为文献[8] 定义的自私 - 利他原则.

由于 $I(d)$ 是 α 的单减函数, 因此根据式(3) 的修正策略, 对任两个智能体, α 越大, 则 $I(d)$ 越小, 表示这两个智能体自主性较强, 因此它们之间的协调作用强度较小. 相反, α 越小, 则 $I(d)$ 越大, 表示这两个智能体的自主性较弱, 因此它们之间的协调作用强度较大. 由此可知, 通过 α 可以调节协调作用强度的大小, 或间接地反映智能体自主性的强弱. 同时, 原自私 - 利他协调原则是上述协调原则的一个特例, 因此具有原自私 - 利他协调原则的所有优点.

3.2 基于扩展自私 - 利他协调原则的递推协调算法

对于存在不一致性的复杂多智能体系统, 根据实际要求设置调节参数 α. 由于智能体是自主和相互支持的[7], 多个智能体可利用第 3.1 节的扩展自私 - 利他协调原则对关于两个任务的相对重视程度序列进行修正, 从而减小它们之间关于任务相对重视程度的差异. 但仅仅一次修正不一定能保证系统的一致性, 因此可通过反复多次协调, 直到目标达到. 首先分析各个智能体多次利用扩展自私 - 利他协调原则, 对两个任务的相对重视程度进行修正时, 修正结果的渐近性质.

给定 m 个智能体对任一任务对 (P_i, P_j) 的相对重视程度序列 $D_{ij}=\{d_{ij}^1, d_{ij}^2, \cdots, d_{ij}^m\}$, 不失一般性, 设 $d_{ij}^1\ge d_{ij}^2\ge\cdots\ge d_{ij}^m$. 现对 D_{ij} 中的所有元素进行递推修正, 记 $D_{ij}^0=\{d_{ij}^0(1), d_{ij}^0(2), \cdots, d_{ij}^0(m)\}$, 其中: $d_{ij}^0(p)=d_{ij}^p$, $p=1,2,\cdots,m$. 首先, 用扩展自私 - 利他协调原则对 D_{ij}^0 的所有元素进行修正, 得到 D_{ij}^1. 如此类推, $D_{ij}^k=\{d_{ij}^k(1), d_{ij}^k(2), \cdots, d_{ij}^k(m)\}$ 为用该原则对 D_{ij}^{k-1} 的所有元素进行修正得到的结果组成的相对重视程度序列, $k=1,2,3,\cdots$. 定义序列 D_{ij}^k 的残差为

$$\Delta_{ij}^k=\frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}(d_{ij}^k(l)-\overline{D_{ij}^k})^2,\tag{5}$$

其中 $\overline{D_{ij}^k}=\sum_{l=1}^{m}d_{ij}^k(l)/m$. 当递推修正的次数不断增加时, 关于相对重视程度序列的残差, 可得到如下结论:

定理 1 对任一任务对 (P_i, P_j), 利用扩展自私 - 利他原则, 对智能体的相对重视程度序列 D_{ij} 进行递推修正得到的残差序列 $\Delta_{ij}^0, \Delta_{ij}^1, \Delta_{ij}^2, \cdots$ 满足

$$\lim_{k\to\infty}\Delta_{ij}^k=0.\tag{6}$$

证明 分 3 步来证明.

Step 1: 先证序列 $d_{ij}^k(1)-d_{ij}^k(m)$ 关于 k 的单调收敛性. 对 D_{ij}^0 中任意相邻两数 $d_{ij}^0(p)\ge d_{ij}^0(p+1)$, 通过式(3) 和式(4) 变换后有 $d_{ij}^1(p)\ge d_{ij}^1(p+1)$, 从而可知对每个序列 D_{ij}^k, 其元素仍是单调递减的, 其元素间最大差距为 $d_{ij}^k(1)-d_{ij}^k(m)$. 由式(3) 易知

$$0\le d_{ij}^k(1)-d_{ij}^k(m)\le d_{ij}^{k-1}(1)-d_{ij}^{k-1}(m),\tag{7}$$

即 $d_{ij}^k(1)-d_{ij}^k(m)$ 是关于 k 的非负有界单调递减序列, 因此必存在 $d_{ij}\ge 0$, 满足

$$\lim_{k\to+\infty}(d_{ij}^k(1)-d_{ij}^k(m))=d_{ij}.\tag{8}$$

Step 2: 证明 $d_{ij}=0$, 用反证法. 设 $d_{ij}\ne 0$, 则 $d_{ij}>0$, 因此对任意小的正数 $0<\epsilon<\dfrac{d_{ij}}{2^{m+1}(m-1)}$, 存在正整数 r. 当 $t>r$ 时, 有

$$d_{ij}\le d_{ij}^t(1)-d_{ij}^t(m)<d_{ij}+\epsilon,\tag{9}$$

那么至多经过有限 l 次变换将使最大元素 $d_{ij}^t(1)$ 至少减小 $\dfrac{d_{ij}}{2^m(m-1)}$, 而 $d_{ij}^t(m)$ 不会减小, 则

$$d_{ij}^{t+l}(1)-d_{ij}^{t+l}(m)<d_{ij}-\epsilon<d_{ij},\tag{10}$$

与式(9) 矛盾, 故 $d_{ij}=0$ 成立.

Step 3: 由于 $d_{ij}^k(1)\ge d_{ij}^k(2)\ge\cdots\ge d_{ij}^k(m)$, 则 $\forall p, q=1,2,\cdots,m$, $p\ne q$, 必有下式成立:

$$\lim_{k\to\infty}(d_{ij}^k(p)-d_{ij}^k(q))=0.\tag{11}$$

因系统中待处理的任务总数是有限的, 由式(5) 和式(11) 知式(6) 成立. □

定理 1 说明, 按上述递推方法多次应用扩展自私 - 利他协调原则, 对 (P_i, P_j) 的相对重视程度进行修正, 则各智能体对该任务对的相对重视程度将逐渐趋于一致. 根据这个性质, 将其推广到所有任务对, 用扩展自私 - 利他协调原则对所有任务对的相对任务重视程度分别进行修正. 由于任务的有限性, 可知经过有限次数的修正, 可使系统的不一致性程度任意小.

因此根据定理 1, 可构成一种对系统中所有任务对的相对重视程度进行协调的递推算法, 其步骤如下:

Step 1: 初始化: 给定模糊矩阵 $D_k(k=1,2,\cdots,m)$, 一致性阈值 a 和 b, 参数 s, 可调节参数 α 及各智能体的重要程度向量 $W(A)$ 和各任务的重要性向量 $W(P)$, 令 $l=0$;

Step 2: 对 $D_k(k=1,2,\cdots,m)$ 计算系统的不一致性程度 U;

Step 3: 若 $U>a$, 则进入下一步, 否则输出 D_k

和协调次数 l 并退出;

Step 4: 对所有 $D_k(k = 1, 2, \cdots, m)$, 构造序列 $D_{ij} = \{d_{ij}^1, d_{ij}^2, \cdots, d_{ij}^m\}, 1 \le i < j \le n$, 并对其元素按大小排序, 然后根据式(3) 和式(4) 修正智能体对任务对的相对重视程度, 按式(1) 重新组成新的相对重视程度矩阵 D_k';

Step 5: 用 D_k' 替换原来的 D_k, 令 $l = l + 1$, 返回 Step 2

对于上面的递推协调算法, 根据定理 1, 可以得到如下结论:

定理 2　对于任意的充分一致性阈值 $a > 0$, 必存在正整数 T, 当协调次数大于 T 时, 系统的不一致性程度 $U < a$, 即系统是一致的

证明　对所有 $D_k(k = 1, 2, \cdots, m)$ 和整数对 (i, j) $(1 \le i < j \le n)$, 根据定理 1, 当协调次数 $l \to \infty$, 所有智能体对 (P_i, P_j) 的相对重视程度差异 $\left|d_{i,j}^s - d_{i,j}^t\right| \to 0$. 根据文献[1] 中式(4), 对所有智能体对 (A_s, A_t), 得知对 (P_i, P_j) 的相对重视程度的不一致性 $V_{ij}(A_s, A_t) \to 0$. 由于智能体数是有限的, 可利用文献[1] 中式(6) 得出所有智能体对 (P_i, P_j) 相对重视程度的不一致性程度 $V_F(P_i, P_j) \to 0$. 同时任务数也是有限的, 进一步由文献[1] 中式(8) 得知多智能体系统的不一致性程度 $U \to 0$. 因 $a > 0$, 由此可知必存在正整数 T, 当协调次数 $> T$, 满足 $U < a$, 即不一致的系统成为一致的系统 □

需要说明的是: 1) 算法的 Step 4 中对序列 D_{ij} 中的元素排序的目的是: 各智能体只参考与其相对重视程度最相近的智能体的影响; 2) 如果需要尽量考虑系统的协调性, α 可取较小的值 在其他因素不变的情况下, 此时影响显著性函数 $I(d)$ 相对较大, 因此智能体对任务的重视程度会面临较大的调整, 调整的代价可能也就较大; 如果需要尽量考虑各智能体的自主性, α 可以取较大的值, 这时智能体只需作较小的调整, 系统的代价也就较小. 因此适当的调节 α 可以减小或增加协调的大小, 从而达成有效的协调和合理的协调代价. 但是随着 α 增大, 协调的次数将可能增加, 使算法的收敛速度可能减慢

4　计算实例

考虑一个多智能体系统不一致性协调例子: 由来自不同组织的 4 名成员组成的方案评审组, 对 4 个候选软件方案进行评审并最终由小组提出各成员认可的最佳候选解决方案 将每个成员看作一个智能体, 则智能体集合表示为 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, 方案集合表示为 $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$. 由于每个成员的知识、时间、资源和代表的组织利益等方面各自有所不同 从而使他们对各个方案的重视程度不同 假设各成员对方案的相对重视程度用模糊矩阵表示为

$$D_1 = \begin{bmatrix} - & 0.8 & 0.9 & 0.6 \\ & - & 0.9 & 0.95 \\ & & - & 0.85 \\ & & & - \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} - & 0.7 & 0.5 & 1.0 \\ & - & 0.4 & 1.0 \\ & & - & 0.4 \\ & & & - \end{bmatrix},$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} - & 1.0 & 0.8 & 0.9 \\ & - & 0.9 & 0.5 \\ & & - & 0.4 \\ & & & - \end{bmatrix},$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} - & 0.4 & 0.4 & 0.5 \\ & - & 0.4 & 0.4 \\ & & - & 0.3 \\ & & & - \end{bmatrix}.$$

取 $a = 0.1, b = 0.9, s = 1$. α 分别取值为 2, 3, 4, 10, 100. 设各智能体的重要程度为 $W(A) = \{0.80, 1.20, 1.10, 0.90\}$, 各方案的重要性为 $W(P) = \{0.85, 1.05, 1.15, 0.95\}$.

为了评价协调算法, 定义协调代价指标为

$$C = k_1 \sum_{k=1}^{4} w(A_k) \sum_{i,j=1, i<j}^{4} \left|d_{ij}^{k^*} - d_{ij}^{k}\right| W_{ij}(P) + k_2 l c_0. \tag{12}$$

其中: d_{ij}^{*k} 为协调完成后 A_k 对 (P_i, P_j) 的相对重视程度, $k_1 + k_2 = 1, k_1, k_2 \ge 0$ 为权系数, c_0 为协调一次的代价. 该指标综合考虑了各智能体因协调而带来的代价(指标中第 1 部分) 和协调过程本身的代价(指标中第 2 部分). 本文对 (k_1, k_2, c_0) 的 3 种情况进行仿真

本文用广泛应用的 WTA 算法[6] 与递推协调方法作比较 计算机仿真结果见表 1, 仿真结果表明: 在 $\alpha < 10$ 时, 递推协调算法的协调代价小于 WTA 算法 同时当 α 太大(如 $\alpha = 100$) 且协调过程本身的代价较大(如 $c_0 = 2$) 时, 递推协调算法的协调代价可能较大, 甚至比 WTA 算法大 因此, 综合考虑各智能体因协调而带来的代价和协调过程本身的代价, 选取适当的 α, 递推协调算法使智能体尽量保持其自主性和独立性, 协调代价较小, 具有比 WTA 算法更好的性能

表 1　系统不一致性协调算法的对比实验结果

(k_1, k_2, c_0)	WTA 算法	递推协调算法(α) 2	3	4	10	100
(0.9, 0.1, 0.2)	4.13	2.36	1.58	1.19	0.87	0.85
(0.1, 0.9, 0.2)	0.64	0.44	0.35	0.31	0.45	2.58
(0.1, 0.9, 2.0)	2.26	2.06	1.97	1.93	3.69	25.26

5 结 语

本文对于复杂多智能体系统的不一致性协调问题, 在自私-利他原则基础上提出了扩展自私-利他协调原则, 并进一步提出了系统不一致性的递推协调算法, 并证明了算法的收敛性. 该算法充分考虑了智能体的自主性和独立性, 具有较强的灵活性和实际意义, 通过实例说明该算法是有效的.

参考文献(References)

[1] 刘金琨, 王树青. 复杂系统多智能体不一致问题的研究[J]. *控制与决策*, 1999, 14(3): 249-252.
(Liu J K, Wang S Q. Inconsistency Research Based on Complicated Multi-agent System [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 249-252.)

[2] 刘海龙. *动态环境下分布式智能系统的任务协作理论研究*[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
(Liu H L. *Task Cooperation for Distributed Intelligent Systems in the Dynamic Environment*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)

[3] Zhang C Q. Cooperation under Uncertainty in Distributed Expert Systems[J]. *Artificial Intelligence*, 1992, 56(1): 21-69.

[4] 李凡. *人工智能中的不确定性*[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 97-167.
(Li F. *The Uncertainty of Artificial Intelligence*[M]. Beijing: Weather Press, 1992: 97-167.)

[5] Paul G. Group Decision Support System [J]. *Decision Support System*, 1987, 3(3): 233-242.

[6] Masahiro Takatsuka, Terry M Caelli, Geoff A W West, et al. An Application of "Agent-oriented" Techniques to Symbolic Matching and Object Recognition[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(4): 419-429.

[7] 刘越, 陈火旺, 王怀民. 一种渐近式多Agent 合作理论[J]. *计算机学报*, 2003, 26(4): 454-459.
(Liu Y, Chen H W, Wang H M. A Theory of Reactive Multi-agent Cooperation[J]. *Chinese J of Computers*, 2003, 26(4): 454-459.)

[8] Khan N A, Jain R. Uncertainty Management in a Distributed Knowledge Based System[A]. *Proc IJCAI-85*[C]. Los Angels, 1985: 318-320.

[9] Jeff Y C, Jay M T. An Intelligent Framework for Enterprise Integration [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1991, 21(6): 1391-1408.

(上接第1252 页)

6 结 论

本文利用多Lyapunov 函数方法, 研究了线性离散切换系统的输出调节问题. 在假定每个子系统都不是输出调节问题可解的条件下, 分别给出了全息反馈控制器和误差反馈控制器作用下, 这类系统输出调节问题可解的两个充分条件. 同时还分别给出了相应的切换律和控制器的设计方案.

参考文献(References)

[1] Francis B A. The Linear Multivariable Regulator Problem [J]. *SIAM J Control Optimization*, 1977, 15(3): 486-505.

[2] Byrnes C I, Isidori A. Output Regulation for Nonlinear Systems: An Overviews[J]. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2000, 33(10): 323-337.

[3] Huang J. *Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications*[M]. New York: Springer Verlag, 2004: 4-24.

[4] Chen Z, Huang J. Robust Output Regulation with Nonlinear Exosystems[J]. *Automatica*, 2005, 41(8): 1447-1454.

[5] Savkin A V, Matveev A S. Cyclic Linear Differential Automata: A Simple Class of Hybrid Dynamical Systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(5): 727-734.

[6] Liberzon D, Morse A S. Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems[J]. *Control Systems Magazine*, 1999, 19(5): 59-70.

[7] Cheng D Z, Guo L, Huang J. On Quadratic Lyapunov Functions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(5): 885-890.

[8] Daafouz J, Riedinger P, Iung C. Stability Analysis and Control Synthesis for Switched Systems: A Switched Lyapunov Function Approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1883-1887.

[9] Jamal D, Jacques B. Robust Dynamic Output Feedback Control for Switched Systems[A]. *Proc of the 41st Conf on Decision and Control*[C]. Las Vegas, 2003: 4812-4817.

[10] Fujii S, Hespanha J P, Morse A S. Supervisory Control of Families of Noise Suppressing Controllers [A]. *Proc of the 37th Conf on Decision and Control* [C]. Tampa, 1998: 1641-1646.

[11] 刘玉忠, 赵军. 一类带扰动线性开关系统的误差反馈输出调节问题[J]. *控制与决策*, 2001, 16(增): 815-817.
(Liu Y Z, Zhao J. Problem on Output Regulation via Error Feedback for a Class of Switched Linear Systems with Disturbance[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(S): 815-817.)

[12] Isidori A. *Nonlinear Control Systems* [M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 391-402.