

多艾真体的鲁棒性归约模型

龚 涛, 蔡自兴

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于问题归约方法, 对理想分布式离散型多艾真体系统鲁棒性问题进行分解和变换, 消解为单艾真体的鲁棒性问题和各艾真体之间离散控制过程的鲁棒性问题, 从而降低研究对象难度级别和问题元数. 利用较简单鲁棒性问题的求解, 就可推导出整个多艾真体系统鲁棒性判据, 并总结为多艾真体鲁棒性归约模型和定理. 对于实际多艾真体系统, 提出多艾真体的鲁棒相关性模型, 用以表示离散型多艾真体中各个艾真体之间的鲁棒相关性. 然后分析多艾真体的鲁棒性归约模型与鲁棒相关性模型之间的转化关系. 最后, 通过仿真实验验证鲁棒性模型及其定理的正确性和应用前景.

关键词: 鲁棒性归约模型; 鲁棒相关性; 鲁棒性归约定理; 鲁棒相关性模型; 多艾真体

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A

Model of reducing robustness of multi-agent system

GONG Tao, CAI Zi-xing

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Hunan Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the problem reduction method, robustness problem of discrete multi-agent system in the ideal distributed environment was reduced and transformed into that of single agents and discrete control processes. So the problems were simplified and research difficulty degree was descended. Then by solving less difficult robustness problems, the robustness conditions of the whole multi-agent system could be found. Such was called the model and theorem on reducing robustness problem of multi-agent system. For real multi-agent system, the model on robustness relativity of multi-agent system was conducted advanced, the relation between the reducing model and the relativity model had been analyzed and the simulation experiment was conducted to test the models and theorem.

Key words: model on reducing robustness problem; robustness relativity; robustness reducing theorem; model on robustness relativity; multi-agent system

1 引言 (Introduction)

在实际的计算机控制过程中, 离散型多艾真体系统的鲁棒性分析问题很复杂. 目前关于这方面的研究正在增多, 主要有: 智能控制鲁棒性判据研究方法^[1,2]; 非线性系统控制理论与李雅普诺夫稳定性理论、小增益理论以及耗散性或无源性等理论相结合的鲁棒系统分析和设计方法^[3]; 多艾真体鲁棒性的尝试性分析方法^[4]; 多艾真体鲁棒性的应用研究问题^[5]. 但由于离散型多艾真体鲁棒性问题很复杂和单艾真体的鲁棒性理论未能很好利用, 因此必须寻找多艾真体鲁棒性研究的新方法. 问题归约法是一种把问题由繁化简、由多元转化为一元的有效分析方法^[6]. 本文提出利用问题归约方法, 对理想分布

式离散型多艾真体系统的鲁棒性问题进行分解和变换, 消解为单艾真体的鲁棒性问题和各艾真体之间的离散控制过程的鲁棒性问题, 归纳出多艾真体的鲁棒性归约模型. 基于多艾真体的鲁棒性归约模型, 在讨论实际非理想分布式多艾真体的鲁棒性时, 建立了鲁棒相关性模型, 用来描述各艾真体鲁棒性的相互影响和相互制约关系, 从而可以得出实际离散型多艾真体的鲁棒性判据集的结构和性质, 为此类鲁棒性问题的解决打下理论基础.

2 多艾真体的鲁棒性归约模型 (Model on reducing robustness problem of multi-agent system)

考察在理想的分布式环境中, 各个艾真体分别

完成不同的任务,因而各个艾真体的鲁棒性是相互独立的.基于问题归约方法,可分两种情况讨论此时离散型多艾真体系统的鲁棒性.

2.1 层次型分布式离散多艾真体系统(Hierarchical distributed discrete multi-agent system)

在层次型分布式多艾真体系统中,考虑高层艾真体和底层多艾真体的运行过程以及高层艾真体对底层多艾真体的离散控制过程,整个多艾真体系统的体系结构由图1所示.

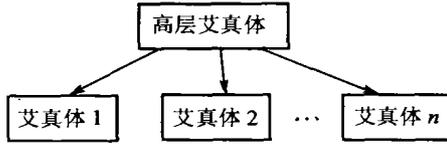


图1 层次型分布式离散多艾真体系统的体系结构图
Fig. 1 Structure of hierarchical distributed discrete multi-agent system

这样,运用问题归约方法,可以把层次型分布式离散多艾真体系统的鲁棒性问题分解为3个子问题:1)高层艾真体的鲁棒性分析问题;2)底层各个艾真体的鲁棒性分析问题;3)高层艾真体对底层多艾真体离散控制过程的鲁棒性问题^[7].

2.2 对等型分布式离散多艾真体系统(Equipollent distributed discrete multi-agent system)

在对等型分布式多艾真体系统中,考虑各个艾真体的运行过程以及各个艾真体之间的离散控制过程,整个多艾真体系统的体系结构由图2所示.

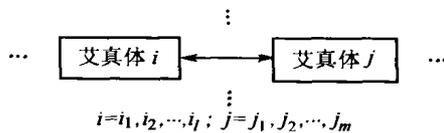


图2 对等型分布式离散多艾真体系统的体系结构图
Fig. 2 Structure of equipollent distributed discrete multi-agent system

这样,运用问题归约方法,可以把对等型分布式离散多艾真体系统的鲁棒性问题分解为两个子问题:1)各个艾真体的鲁棒性分析问题;2)各个艾真体之间离散控制过程的鲁棒性分析问题.

2.3 多艾真体的鲁棒性归约模型(Model on reducing robustness problem of multi-agent system)

设离散型多艾真体系统A由n个艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和艾真体之间的离散控制过程 $C_{jk} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ (如果是层次型结构,还有一个高层艾真体 A_0)构成,记为 $\{A_i, C_{jk} | i = 1, 2, \dots, n; j, k = 1, 2, \dots, n\}$;各个艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒

性判据集分别为 $R_{A_i}, i = 1, 2, \dots, n$,高层艾真体 A_0 (如果有)的鲁棒性判据集为 R_{A_0} ,各艾真体之间的离散控制过程 $C_{jk} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集为 $R_{C_{jk}} (j, k = 1, 2, \dots, n)$,则整个离散型多艾真体系统A的鲁棒性归约模型可用鲁棒性判据集表示:

$$R_A = \begin{cases} \bigcup_{i=1}^n (R_{A_i} \cap \bigcap_{\exists j=1 \text{ 或 } k=i; j, k=1, 2, \dots, n} R_{C_{jk}}), & \text{当 } A_0 \text{ 不存在时;} \\ \bigcup_{i=1}^n (R_{A_i} \cap \bigcap_{\exists j=1 \text{ 或 } k=i} R_{C_{jk}}) \cap R_{A_0}, & \text{当 } A_0 \text{ 存在时.} \end{cases} \quad (1)$$

2.4 鲁棒性归约定理(Theorem on reducing robustness problem)

根据多艾真体的鲁棒性归约模型和问题归约方法,显然可推导出理想分布式离散型多艾真体系统的鲁棒性判据定理,称之为鲁棒性归约定理.

定理(鲁棒性归约) 对于理想分布式离散型多艾真体系统,其鲁棒性判据可以从两种情况分析:

1) 当系统处于层次型分布式环境时,离散型多艾真体系统的运行过程 $\{A_0, A_i, C_{0i}\}$,其中 A_0 表示高层艾真体的运行过程,底层各艾真体的控制过程记为 $A_i, i = 1, 2, \dots, n$ (n 表示底层艾真体的个数), C_{0i} 表示 A_0 对 A_i 的离散控制过程}的鲁棒性判据集为

$$\{P(A_0) > 0\} \cap \left(\bigcap_{i=1}^n \{Q_i(A_i) > 0\} \right) \cap \{R(C_{0i}) > 0\}, \quad (2)$$

其中, $\bigcap_{i=1}^n \{\cdot\}$ 表示对集合列 $\{Q_i(A_i) > 0\}$ 取并运算,高层艾真体的鲁棒性判据集记为 $\{P(A_0) > 0\}$,底层各艾真体的鲁棒性判据集分别记为 $\{Q_i(A_i) > 0\}$,高层艾真体对底层多艾真体离散控制过程的鲁棒性判据集记为 $\{R_i(C_{0i}) > 0\}$;

2) 当系统处于对等型分布式环境时,离散型多艾真体系统运行过程 $\{A_i, C_{jk}\}$ 的鲁棒性判据集为

$$\bigcup_{i=1}^n (\{P_i(A_i) > 0\} \cap \bigcap_{\exists k=1 \text{ 或 } j=i; j, k=1, 2, \dots, n} \{Q_{jk}(C_{jk}) > 0\}), \quad (3)$$

其中, $\bigcup_{i=1}^n \{\cdot\}$ 表示对集合列 $\{P_i(A_i) > 0\}$ 取并运算,各艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集分别记为 $\{P_i(A_i) > 0\}$,艾真体 A_j 与 A_k 之间的离散控制过程 C_{jk} 的鲁棒性判据集为

$$\begin{cases} \{Q_{jk}(C_{jk}) > 0\}, & C_{jk} \text{ 过程存在;} \\ \emptyset, & C_{jk} \text{ 过程不存在.} \end{cases} \quad (4)$$

这样,基于多艾真体的鲁棒性归约模型及其定理,就可以利用单艾真体的鲁棒性理论和离散控制过程的鲁棒性理论,对实际的离散型多艾真体系统的鲁棒性问题展开深入的研究了。

3 多艾真体的鲁棒相关性 (Robustness relativity of multi-agent system)

研究实际离散型多艾真体系统的鲁棒性问题,需建立一系列新的理论框架,搭好艾真体的鲁棒性问题从多元向一元转化的“桥梁”。

3.1 鲁棒相关性的概念 (Concepts of robustness relativity)

定义 1 鲁棒隶属度。

设艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n (n \text{ 为艾真体的个数}))$ 的鲁棒性判据集分别记为 $R_{A_i}, i = 1, 2, \dots, n$, 整个多艾真体系统的鲁棒性判据集表示为 R . 对于任意的 $R_B \subset R, R_B$ 对 R_{A_i} 的隶属度记为

$$\mu_{R_B}(R_{A_i}): R_{A_i} \rightarrow [0, 1], \quad (5)$$

$\mu_{R_B}(R_{A_i})$ 称为 R_{A_i} 的鲁棒隶属度。

鲁棒隶属度用来描述单艾真体的鲁棒性判据集对多艾真体系统的鲁棒性判据集的任意子集的贡献程度。

定义 2 鲁棒相关性。

实际多艾真体的环境往往达不到理想分布式要求,多艾真体系统中某些艾真体的鲁棒性对另一些艾真体的鲁棒性相互影响和相互制约,它们的鲁棒性判据集的某些部分是密切相关的,称这种性质为鲁棒相关性。

定义 3 鲁棒相关关系。

设 R_i 和 R_j 为两个非空的鲁棒性判据模糊集,则其直积 $R_i \times R_j$ 中的一个模糊子集 R_k 是从 R_i 到 R_j 的模糊关系,称为鲁棒相关关系,记为

$$R_{R_i \times R_j} = \{((r_i, r_j), \mu_{R_k}(r_i, r_j)) \mid r_i \in R_i, r_j \in R_j\}. \quad (6)$$

鲁棒相关关系反映各艾真体的鲁棒性判据集之间的鲁棒相关性。

定义 4 鲁棒相关系数。

用来表示各艾真体的鲁棒性之间相互关联程度的系数,称为鲁棒相关系数。

例 艾真体 A_1 与 A_2 的鲁棒性之间 80% 相关,则它们的鲁棒相关系数为 0.8。

定义 5 鲁棒性判据集的运算及其法则。

设 R_i 和 R_j 为鲁棒性判据论域 R 中两个非空的

鲁棒性判据模糊集,其鲁棒隶属度分别为 $\mu_{R_i}(R)$ 和 $\mu_{R_j}(R)$, 则对于所有 $r \in R$, 存在下列运算:

1) R_i 和 R_j 的并记为 $R_i \cup R_j$, 其隶属函数定义为

$$\begin{aligned} \mu_{R_i \cup R_j}(r) &= \mu_{R_i}(r) \vee \mu_{R_j}(r) = \\ &= \max \{ \mu_{R_i}(r), \mu_{R_j}(r) \}. \end{aligned} \quad (7)$$

2) R_i 和 R_j 的交记为 $R_i \cap R_j$, 其隶属函数定义为

$$\begin{aligned} \mu_{R_i \cap R_j}(r) &= \mu_{R_i}(r) \wedge \mu_{R_j}(r) = \\ &= \min \{ \mu_{R_i}(r), \mu_{R_j}(r) \}. \end{aligned} \quad (8)$$

3) R_i 的补记为 \bar{R}_i , 其隶属函数定义为

$$\mu_{\bar{R}_i}(r) = 1 - \mu_{R_i}(r). \quad (9)$$

鲁棒性判据模糊集并、交和补运算满足幂等律、交换律、结合律、分配律、吸收律、同一律、迪摩根 (DeMorgan) 律、复原律和对偶律 (逆否律), 互补律不成立^[6]。

定义 6 等价艾真体。

用统一的形式描述的不同艾真体称为等价艾真体, 它们的鲁棒性显然也是等价的, 即可用统一形式来描述。

基于以上定义, 可以推导出有关多艾真体的鲁棒相关性的性质定理。

3.2 鲁棒相关性的性质定理 (Theorem of robustness relativity)

定理 1 设艾真体 A_i, A_j 的鲁棒性判据集分别为 R_{A_i}, R_{A_j} , 多艾真体系统鲁棒性判据集为 R , R 对 $R_{A_i} \cup R_{A_j}$ 的隶属度为 $\mu_{R_{A_i} \cup R_{A_j}}(R)$, 艾真体 A_i 与 A_j 的鲁棒相关系数为 λ , 则

$$\mu_{R_{A_i} \cup R_{A_j}} = (1 - \lambda) \mu_{R_{A_i}} + \mu_{R_{A_j}} = (1 - \lambda) \mu_{R_{A_j}} + \mu_{R_{A_i}}. \quad (10)$$

证 因为艾真体 A_i 与 A_j 的鲁棒相关系数为 λ , 根据定义 4, $(1 - \lambda)R_{A_i}$ 与 $(1 - \lambda)R_{A_j}$ 可以看成相互独立的, 所以

$$(1 - \lambda)R_{A_i} \subset (R_{A_i} \cup R_{A_j}),$$

$$(1 - \lambda)R_{A_j} \subset (R_{A_i} \cup R_{A_j}).$$

由于 λR_{A_i} 与 λR_{A_j} 密切相关, 所以 λR_{A_i} 与 λR_{A_j} 对 R 的贡献程度是相同的. 因此,

$$\mu_{R_{A_i} \cup R_{A_j}} = \mu_{(R_{A_i} \cup R_{A_j} - \lambda R_{A_i})} = \mu_{(R_{A_i} \cup R_{A_j} - \lambda R_{A_j})},$$

$$\mu_{R_{A_i} \cup R_{A_j}} = (1 - \lambda) \mu_{R_{A_i}} + \mu_{R_{A_j}} = (1 - \lambda) \mu_{R_{A_j}} + \mu_{R_{A_i}}.$$

特别地,当 A_i 为 A_j 等价艾真体时,令 $R_{A_i} = R_{A_j} = R_A$, 则

$$\mu_{R_{A_i} \cup R_{A_j}} = (2 - \lambda) \mu_{R_A} \quad (11)$$

定理 2 对于 n 元等价艾真体系统 $\{A_i, C_{jk} \mid i = 1, 2, \dots, n; j, k = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 A_i 的鲁棒性判据集相同, 均记为 R_A , 高层艾真体 A_0 (如果有) 的鲁棒性判据集表示为 R_{A_0} , 各艾真体之间的离散控制过程 $C_{jk} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集表示为 $R_{C_{jk}}, j, k = 1, 2, \dots, n, n_j$ 个艾真体的鲁棒相关系数记为 $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, m (m$ 为某常数), 多艾真体系统的鲁棒性判据集记为 R , 则

$$\mu_{\bigcup_{i=1}^m R_{A_i}} = \sum_{j=1}^m [n_j - (n_j - 1)\lambda_j] \mu_{R_A} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mu_{\bigcup_{i=1}^m (R_{A_i} \cap \bigcap_{j=1}^m R_{C_{jk}})} = 1, & \text{若 } A_0 \text{ 不存在;} \\ \mu_{[\bigcup_{i=1}^m (R_{A_i} \cap \bigcap_{j=1}^m R_{C_{jk}}) \cap R_{A_0}]} = 1, & \text{若 } A_0 \text{ 存在.} \end{cases} \quad (13)$$

证 当 $n = 1$ 时, 定理 2 显然成立.

当 $n = 2$ 时, 由定理 1 可得式(12)成立; 再根据鲁棒归约模型及其定理可知, 式(13)也成立.

假设 $n = l$ 时, 定理 2 成立, 即

$$\mu_{\bigcup_{i=1}^m R_{A_i}} = \sum_{\exists m > 0, j=1}^m [n_j - (n_j - 1)\lambda_j] \mu_{R_A}$$

当 A_0 不存在时

$$\mu_{\bigcup_{i=1}^l (R_{A_i} \cap \bigcap_{j=1}^l R_{C_{jk}})} = 1,$$

当 A_0 存在时

$$\mu_{[\bigcup_{i=1}^l (R_{A_i} \cap \bigcap_{j=1}^l R_{C_{jk}}) \cap R_{A_0}]} = 1.$$

当 $n = l + 1$ 时, 相当于在原有的 l 元等价艾真体系统的基础上, 再增加一个等价艾真体 A_{l+1} , 则把原有的 l 元等价艾真体系统看作一个艾真体 A' , 根据定理 1 可得

$$\mu_{R_{A'} \cup R_{A_{l+1}}} = (1 - \lambda) \mu_{R_{A_{l+1}}} + \mu_{R_{A'}} \quad (14)$$

其中艾真体 A' 与 A_{l+1} 的鲁棒相关系数记为 λ , 把式(12)代入式(14)得

$$\mu_{R_{A'} \cup R_{A_{l+1}}} = [(\sum_{j=1}^m n_j + 1) - (\sum_{j=1}^m (n_j - 1)\lambda_j + \lambda)] \mu_{R_A}$$

令 λ 取适当常数, 式(12)在 $n = l + 1$ 时也成立.

所以定理 2 的式(12)对所有 n 都成立.

根据多艾真体的鲁棒性归约模型及其定理, 利用定理 1 和定理 2 的式(12), 显然可以推导出式(13)在 $n = l + 1$ 时同样成立.

4 鲁棒相关性模型 (Model of robustness relativity)

利用问题归约思想, 建立了离散型多艾真体系统在理想分布式环境中的鲁棒性归约模型及其定理, 并且创建了实际多艾真体系统的鲁棒相关性的理论框架之后, 对于实际离散型多艾真体系统, 根据各艾真体之间的鲁棒相关性, 就能把鲁棒性归约模型推广到鲁棒相关性模型, 用以深入分析实际多艾真体系统的鲁棒性特点.

对于实际离散型 n 元艾真体系统

$$\{A_i, C_{jk} \mid i = 1, 2, \dots, n; j, k = 1, 2, \dots, n\},$$

其中各个艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集分别表示为 $R_{A_i}, i = 1, 2, \dots, n$, 高层艾真体 A_0 (如果有) 的鲁棒性判据集记为 R_{A_0} , 艾真体之间的离散控制过程 $C_{jk} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集记为 $R_{C_{jk}}, j, k = 1, 2, \dots, n, n_j$ 个艾真体的鲁棒相关系数记为 $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, m (m$ 为某常数), 多艾真体系统的鲁棒性判据集记为 R , 则离散型多艾真体系统的鲁棒性判据集 R 的求解问题可以分解和转化为以下子问题:

- 1) 各个艾真体 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集 $R_{A_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ 的求解问题;
- 2) 高层艾真体 A_0 (如果有) 的鲁棒性判据集 R_{A_0} 的求解问题;
- 3) 艾真体之间离散控制过程 $C_{jk} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ 的鲁棒性判据集 $R_{C_{jk}} (j, k = 1, 2, \dots, n)$ 的求解问题.

在各子问题求解的基础上, 利用定理 1 和定理 2 以及鲁棒相关性系数, 对各种子问题的鲁棒性判据解集进行运算, 从而求解出整个复杂的离散型多艾真体系统的鲁棒性判据集问题.

这就称为离散型多艾真体系统的鲁棒相关性模型, 其模型结构如图 3 所示, 其中自顶向下的箭头表示分解与归约, 自底向上的箭头表示鲁棒性判据集

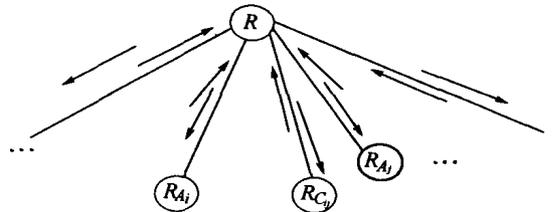


图 3 离散型多艾真体系统的鲁棒相关性模型
Fig. 3 Model on robustness relativity of discrete multi-agent system

的运算与综合.

整个多艾真体的鲁棒相关性模型是自顶向下逐步分解和变换鲁棒性问题,不断降低问题难度和元数,直到可以消解为比较容易解决或者已经能够解决的鲁棒性问题,如某些单艾真体的鲁棒性问题和某些离散控制过程的鲁棒性问题,然后对这些本原问题求解;接着反过来自底向上,利用多艾真体的鲁棒性相关模型以及定理1和定理2,对本原问题的各种鲁棒性判据解集进行运算,从而求解出整个离散型多艾真体系统的鲁棒性判据集.

5 鲁棒性归约模型和相关性模型的关系 (Relation between the two models)

鲁棒性归约模型对实际离散型多艾真体的鲁棒相关性模型研究有着重要意义.鲁棒性问题由多元化为一元、由复杂化简、由难解化为易解的主要思想精要都在鲁棒性归约模型中体现了,这就是通用的强大的问题归约思想和方法的运用.就其本质而言,鲁棒性归约模型是对理想分布式环境中离散型多艾真体系统的鲁棒性进行分析,鲁棒相关性模型是对实际多艾真体系统的鲁棒性和各艾真体的鲁棒性之间的相关性进行分析.鲁棒性归约模型是鲁棒相关性模型的简化模型,鲁棒相关性模型是对鲁棒性归约模型的深化和推广.因此,鲁棒性归约模型和鲁棒相关性模型是一脉相承、相互关联的,鲁棒性归约模型是研究鲁棒相关性模型的基础,鲁棒相关性模型是鲁棒性归约模型的实际应用发展.

在理想分布式环境下,由于各艾真体鲁棒性之间没有相关性,也就是说相互独立,各艾真体的鲁棒相关系数都为0,因而,鲁棒相关系数在鲁棒相关性模型的作用为0,所以此时,鲁棒相关性模型就可简化为鲁棒性归约模型.反过来,利用各艾真体的鲁棒相关性分析,就可以搭建由鲁棒性归约模型向鲁棒相关性模型转化的“桥梁”,通过鲁棒相关性理论新框架的创建和完善,把鲁棒性归约定理和单艾真体的鲁棒性分析方法转化为实际离散型多艾真体系统的鲁棒性分析工具.因此,鲁棒性归约模型对鲁棒相关性模型而言不仅必不可少,而且是学习鲁棒相关性模型的首选内容,是设计鲁棒相关性模型的框架,是应用鲁棒相关性模型的变中不变的思想和方法.所以切不可认为鲁棒相关性模型是鲁棒性归约模型的替代,相反地,鲁棒性归约模型是鲁棒相关性模型不可缺少的核心部分.

6 实验与仿真(Experiment and simulations)

上文介绍了多艾真体的鲁棒归约模型及其定理、鲁棒相关性模型及鲁棒相关性定理,并给予相应

的证明.这样,利用这些定理与方法就可以把多艾真体的鲁棒性问题转化为单个艾真体及其控制过程的鲁棒性问题来求解,这样无论是问题的难度和维数都降低了,从而达到突破难题和简化计算的目的.下文举个实例仿真说明,文献[8]给出了简单环境中两个机器人 A_1 和 A_2 采用进化算法进行路径规划的鲁棒性问题.每个机器人看作艾真体,两个艾真体是按照分布式原则工作的,这样就可以认为两个艾真体的鲁棒相关系数 λ 就为0,即相互独立.因此,本例中只要知道单个艾真体的鲁棒性判据,就可以运用多艾真体的鲁棒归约模型及其定理计算其鲁棒性.现在通过实验保证每个机器人的路径规划过程是具有鲁棒性的,分别如图4、图5、图6和图7所示.从每个机器人的50次重复仿真可以看出,经过1000代进化分别得到第1个移动机器人和第2个移动机器人路径规划的次优解,每个机器人的次优解都是接近的.根据移动机器人自主导航的进化控制的鲁棒渐近稳定性判据得知,这两个机器人的路径规划过程是鲁棒渐近稳定的^[9].

由图4和图5可以看出,因为环境是随机选择的,并且移动机器人的路径规划过程在进化算法的保障下每次仿真总能得到近似的次优解,所以第1个机器人的路径规划过程具有鲁棒性.

由图6和图7可以看出,因为环境是随机选择的,并且移动机器人的路径规划过程在进化算法的保障下每次仿真总能得到近似的次优解,所以第2个机器人的路径规划过程也具有鲁棒性.并且,第1个机器人和第2个机器人路径规划的进化次优解与顶点的关系是不同的.这是两个不同的独立的鲁棒控制过程的结果.根据多艾真体的鲁棒归约定理,这两个机器人分布式路径规划的过程也应该是具有鲁棒性的.为了证实以上模型及其定理的正确性和可

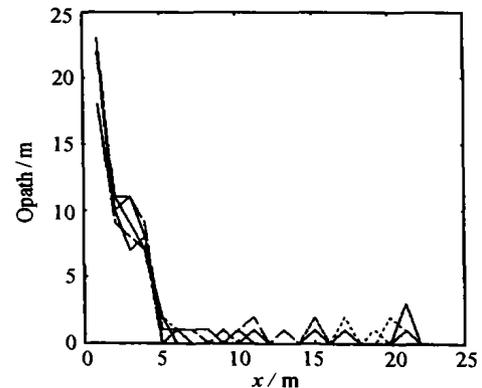


图4 第1个机器人前25次路径规划的进化次优解
Fig. 4 Sub-optimal solutions of Robot 1 path planning for first 25 times

用性,下面就通过实验数据图验证此结果.

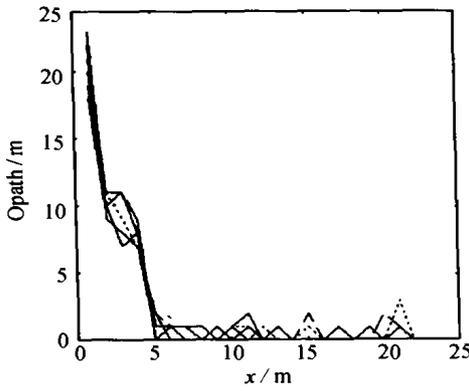


图5 第1个机器人后25次路径规划的进化次优解
 Fig. 5 Sub-optimal solutions of Robot 1 path planning for last 25 times

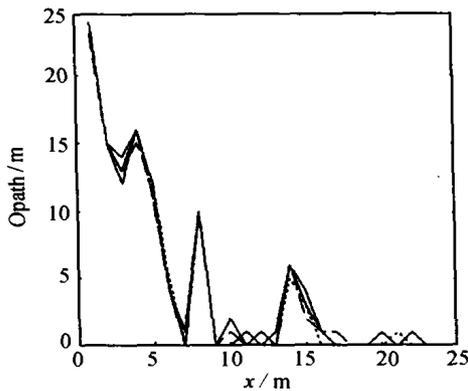


图6 第2个机器人前25次路径规划的进化次优解
 Fig. 6 Sub-optimal solutions of Robot 2 path planning for first 25 times

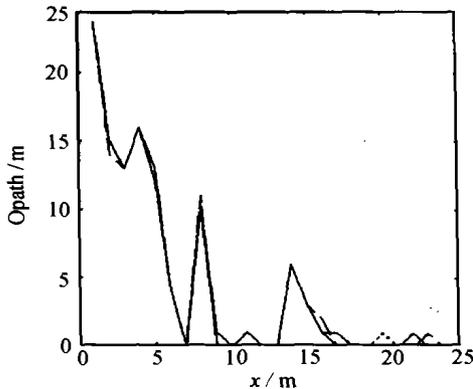


图7 第2个机器人后25次路径规划的进化次优解
 Fig. 7 Sub-optimal solutions of Robot 2 path planning for last 25 times

从图8和图9发现,当这两个机器人同时在其共同环境中进行分布式路径规划时,只要它们是分别独立运行的,互不影响,它们的进化次优解就会随着仿真实验的不断重复而保持近似的曲线,也就是说

它们一直在走着近似的次优路径.这说明多艾真体的鲁棒性在这两个艾真体控制过程中得到保证^[8].分布式的计算环境可以保持单个艾真体的鲁棒性能.这就验证了多艾真体鲁棒归约模型及其定理的正确性和可用性.因此,多艾真体的鲁棒归约模型及其定理可以用来归约多个机器人路径规划的鲁棒性问题,以简化和求解此类问题.

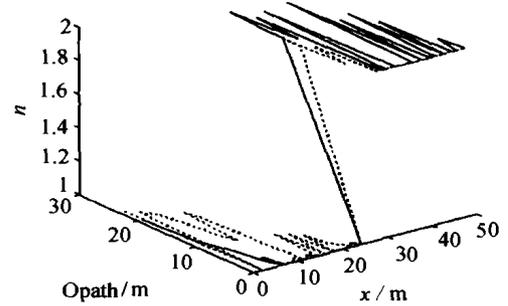


图8 两个机器人前15次路径规划的进化次优解
 Fig. 8 Sub-optimal solutions of two robot path planning for first 15 times

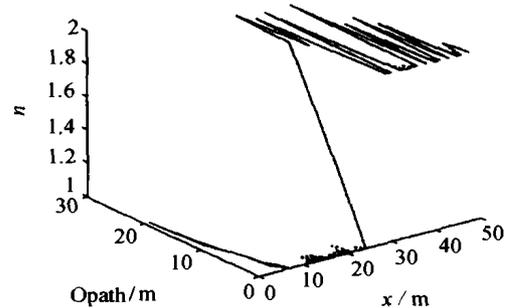


图9 两个机器人再15次路径规划的进化次优解
 Fig. 9 Sub-optimal solutions of two-robot path planning for next 15 times

主要的具体参数的计算结果: $\lambda = 0, \mu_R(R_{A_i}) = 0.5, i = 1, 2$, 其中 λ 表示鲁棒相关系数, R 表示双机器人路径规划的鲁棒性判据集, R_{A_i} 表示机器人 A_i 路径规划的鲁棒性判据集.

7 结论(Conclusions)

本文利用问题归约思想,分析了理想分布式离散多艾真体系统的鲁棒性问题,提出了鲁棒性归约模型及其定理;然后在探讨实际多艾真体系统的鲁棒性问题时,创建了多艾真体系统的鲁棒相关性理论框架,讨论了两个性质定理,并且利用多艾真体的鲁棒性归约模型及其定理,建立了求解实际离散型多艾真体系统的鲁棒性问题的鲁棒相关性模型,分析了鲁棒性归约模型和鲁棒相关性模型之间的转化关系,并通过仿真实验验证了多艾真体的鲁棒归约模型及其定理的正确性和可用性,从而为实际离散

型多艾真体系统的鲁棒性问题分析与应用提供了参考模型,为进一步研究多艾真体鲁棒性模型的辨识、改进和实现奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 蔡自兴,刘健勤.非确定性 TS 模糊神经模型鲁棒性的统计判据[J].中南工业大学学报,1997,28(6):586-588.
(CAI Zixing, LIU Jianqin. A statistical criterion of robustness for uncertainty TS fuzzy neural network model [J]. *J Central South University of Technology*, 1997,28(6):586-588.)
- [2] CAI Z X, LIU J Q, LIU J. A criterion of robustness based on fuzzy neural structure [J]. *High Technology Letters*, 1999,9(1):38-42.
- [3] 慕春棣,梅生伟,申铁龙.非线性系统鲁棒控制理论的一些新进展[J].控制理论与应用,2001,18(1):1-6.
(MU Chundi, MEI Shengwei, SHEN Tielong. New developments in robust nonlinear control theory [J]. *Control Theory & Applications*, 2001,18(1):1-6.)
- [4] CAI J F, LIU J Q, CAI Z X. System identification and robust criterion of discrete autonomous multi-agent system [A]. *Proc of SPIE-Int Symposium on Multispectral Image Processing* [C]. Bellingham, WA: The Int Society for Optical Engineering, 1998,3454:122-125.
- [5] COZIEN R F, ROSENBERGER C, EYHERABIDE P, et al. Multi-agent systems and neural networks for automatic target recognition on air images [A]. *Proc of SPIE-the Int Society for Optical Engineering Automatic Target Recognition X* [C]. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000,4050:139-148.
- [6] 蔡自兴,徐光祐.人工智能及其应用[M].第3版.北京:清华大学出版社,2003.
(CAI Zixing, XU Guangyou. *Artificial Intelligent: Principles and Applications* [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [7] CAI Zixing. *Intelligent Control: Principles, Techniques and Applications* [M]. Singapore: World Scientific, 1997.
- [8] 彭志红.合作式多移动机器人系统的路径规划:鲁棒辨识及鲁棒控制研究[D].长沙:中南大学,2000.
(PENG Zhihong. *Research on path planning, robust identification and robust control of cooperative multi-mobile robot systems* [D]. Changsha: Central South University, 2000.)
- [9] 周翔.移动机器人自主导航的进化控制理论及其系统平台的开发与应用研究[D].长沙:中南工业大学,1999.
(ZHOU Xiang. *Research on the theory of evolutionary control for navigation of autonomous mobile robot with development and application of its system platform* [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.)

作者简介:

龚涛 (1978—),男,中南大学信息科学与工程学院硕士研究生.目前研究方向有人工智能控制系统,智能计算,计算机网络和网络教育系统. E-mail: ciccic@csu.edu.cn;

蔡自兴 (1938—),男,中南大学信息科学与工程学院教授,博士生导师.研究方向为智能控制,人工智能、智能机器人等.