文章编号: 1001-0920(2009)09-1394-04

基于连续故障模型的 Delta 算子系统可靠鲁棒 H_∞ 控制

陈金玉[1], 肖民卿[2]
(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 福建师范大学 数学与计算机科学学院, 福州 350007)

摘 要: 研究具有执行器故障的 Delta 算子线性不确定系统的可靠鲁棒 H_∞ 问题. 设计控制器, 确保在执行器发生故障时闭环系统仍能保持鲁棒稳定, 且满足给定的 H_∞ 指标. 针对执行器连续故障模型, 运用线性矩阵不等式方法, 得到 Delta 算子系统 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器的存在条件和设计方法, 并进一步给出了 Delta 算子系统最优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的设计方法. 数值算例表明, 该设计方法是有效而可行的.

关键词: Delta 算子系统; 执行器故障; 可靠控制; 鲁棒 H_∞ 控制; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Reliable robust H_∞ control for Delta operator systems with continuous failure model

CHEN Jin-yu[1], *XIAO Min-qing*[2]
(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China. Correspondent: CHEN Jin-yu, E-mail: cqchenjy@cqu.edu.cn)

Abstract: The reliable robust H_∞ control problem is studied for the Delta operator systems with actuator failure. The purpose is to design a controller which can tolerate actuator failures, such that the Delta operator closed-loop system is asymptotic stable for all admissible uncertainties, and the H_∞-performance index of the closed-loop system is less than a given upper bound. A more practical model of actuator failure, continuous failure model, is considered. A sufficient condition for the existence of the state feedback α-suboptimal reliable robust H_∞ controllers is derived by using the linear matrix inequality approach. Then the design procedures of such controllers and optimal reliable robust H_∞ controllers are proposed respectively. A numerical example demonstrates the effectiveness and feasibility of the design methods.

Key words: Delta operator system; Actuator failure; Reliable control; Robust H_∞ control; Linear matrix inequality

1 引 言

Delta 算子系统是近年来控制理论与应用研究的热点问题之一[1-6]. 可靠控制是指:针对系统部件(如执行器、传感器)可能出现的故障,设计相应的控制器,确保控制系统在故障发生的情况下,仍具有期望性能的一类控制问题[7-10].

对于 Delta 算子系统的可靠控制,已取得一些研究成果. 如文献[2]研究了具有执行器故障和传感器故障的可靠 H_∞ 控制问题,给出了 Delta 域界实引理;在此基础上,运用 Riccati 方程方法讨论了基于状态观测器的可靠控制. [3]研究了具有执行器故障的 Delta 算子系统可靠鲁棒 H_∞ 控制问题,将故障执行器输入视为外部干扰信号的一部分进行处理. [4]研究了具有执行器故障的 Delta 算子不确定系统可靠鲁棒 D-稳定控制问题. 这些研究都是基于故障的离散模型进行的.

最近,文献[6,7]基于一类更具一般性的故障模型——连续故障模型[8],研究了 Delta 算子系统 D-稳定可靠控制问题. 本文基于这种连续故障模型,研究 Delta 算子系统的可靠鲁棒 H_∞ 控制问题. 运用线性矩阵不等式方法,充分利用连续故障模型的结构信息,给出了 Delta 算子系统 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器的存在条件和设计方法,并进一步给出了 Delta 算子系统最优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的设

收稿日期: 2008-09-11; **修回日期**: 2008-12-03.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60673014); 福建省教育厅科技基金项目(JA08037).
作者简介: 陈金玉(1969—),男,福建仙游人,副教授,博士后,从事智能控制、数据挖掘的研究; 肖民卿(1970—),男,福建莆田人,副教授,博士,从事代数理论、鲁棒控制的研究.

计方法.

2 问题描述

考虑 Delta 算子范数有界参数不确定系统

$$\delta x(k) = (A + \Delta A)x(k) + (B_1 + \Delta B_1)u(k) + B_2 w(k), \quad (1a)$$

$$z(k) = Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 w(k). \quad (1b)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 为系统状态向量; $u(k) \in R^m$ 为控制输入; $z(k) \in R^s$ 为被调输出; $w(k) \in R^p$ 为外部扰动输入; A, B_1, B_2, C, D_1 和 D_2 为已知适维常数矩阵; ΔA 和 ΔB_1 为系统不确定性,且具有如下形式:

$$[\Delta A \quad \Delta B_1] = EF[G_1 \quad G_2].$$

式中: E, G_1 和 G_2 为已知适维常数矩阵,反映系统不确定性的结构; F 为满足 $F^T F \le I$ 的适维不确定参数矩阵, F 可以是时变的,通常称满足 $F^T F \le I$ 的不确定性矩阵 F 为允许的不确定性.

假定系统状态均可量测,采用状态反馈控制,控制器为

$$u = Kx. \quad (2)$$

考虑控制系统存在执行器故障,执行器故障模型为连续故障模型

$$u^f = Mu, \quad (3)$$

其中 M 称为执行器连续故障矩阵,具有如下形式:

$$M = \mathrm{diag}[m_1, m_2, \cdots, m_p],\ i = 1,2,\cdots,p,$$
$$0 \le m_{li} \le m_i \le m_{ui},\ 0 < m_{ui}.$$

当 $m_i = 0$ 时,表示第 i 个执行器完全失效;当 $m_i = 1$ 时,表示第 i 个执行器工作正常;当 $m_i \ne 0$ 和 1 时,表示第 i 个执行器部分失效,意味着第 i 个执行器输出信号偏离准确值.

现给出如下记号:

$$\breve{M} = \mathrm{diag}[m_{l1},\cdots,m_{lp}],$$
$$\widehat{M} = \mathrm{diag}[m_{u1},\cdots,m_{up}],$$
$$\bar{M} = \frac{1}{2}(\widehat{M}+\breve{M}),\ J = \frac{1}{2}(\widehat{M}-\breve{M})\bar{M}^{-1},$$
$$L = \mathrm{diag}[l_1,\cdots,l_p] = (M-\bar{M})\bar{M}^{-1},$$
$$|L| = \mathrm{diag}[|l_1|,\cdots,|l_p|].$$

则有 $\breve{M} \le M \le \widehat{M},\ M = \bar{M}(I+L),\ |L| \le J \le I.$

由控制器(2)和执行器故障(3)可知,Delta 算子闭环系统为

$$\delta x(k) = \tilde{A}x(k) + B_2 w(k), \quad (4a)$$

$$z(k) = \tilde{C}x(k) + D_2 w(k). \quad (4b)$$

其中

$$\tilde{A} = (A+\Delta A) + (B_1+\Delta B_1)MK,$$
$$\tilde{C} = C + D_1 MK.$$

本文研究的问题是:已知系统执行器故障模型参数矩阵 $\breve{M}$ 和 $\widehat{M}$,给定常数 $\alpha > 0$,寻求状态反馈控制律 K,使得对于系统所有容许的不确定性 F 和执行器所有容许的故障 M (F 和 M 均可为时变的),闭环系统(4)满足:

1) 当 $w(k) = 0$ 时,系统渐近稳定;

2) 系统的可靠鲁棒 H_∞ 性能

$$J_\infty = \sup_{w,F,M}\{\|z\|_2 / \|w\|_2 : w \in L_2[0,\infty)\} < \alpha$$

其中: $\|\cdot\|_2$ 定义为

$$\|f\|_2 = \left[T\sum_{k=0}^{\infty} f^T(k) f(k)\right]^{1/2},$$

$L_2[0,\infty)$ 表示集合 $\{f : \|f\|_2 < \infty\}$, z 是闭环系统(4)在零初始条件下对扰动 $w \in L_2[0,\infty)$ 的输出响应.

如果这样的控制律 K 存在,则称状态反馈控制器(2)为 Delta 算子系统(1)具有 H_∞ 性能 α 的可靠鲁棒控制器,或 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器.

3 主要结果

引理 1(Delta 算子系统界实引理)[2] 对于 Delta 算子闭环系统(4),给定常数 $\alpha > 0$,若存在对称矩阵 $P > 0$,使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}P + P\tilde{A}^T & B_2 & \sqrt{T}P\tilde{A}^T & P\tilde{C}^T \\ B_2^T & -\alpha^2 I & \sqrt{T}B_2^T & D_2^T \\ \sqrt{T}\tilde{A}P & \sqrt{T}B_2 & -P & 0 \\ \tilde{C}P & D_2 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

成立,则 Delta 算子系统(4)渐近稳定,且 H_∞ 性能满足 $J_\infty < \alpha$.

引理 2[4] 给定适维矩阵 Y, E 和 G,其中 Y 是对称的,则

$$Y + EFG^T + GF^T E^T < 0$$

对于所有满足 $F^T F \le I$ 的矩阵 F 都成立,其充分必要条件是存在一个常数 $\varepsilon > 0$,使得

$$Y + \varepsilon EE^T + \varepsilon^{-1} GG^T < 0.$$

引理 3[7] 给定适维矩阵 Y, E 和 G,其中 Y 是对称的,则

$$Y + EHG^T + GHE^T < 0 \quad (6)$$

对于所有满足 $H^2 \le I$ 的对角矩阵 H 都成立,其充分必要条件是存在一个对角矩阵 $U > 0$,使得

$$Y + EUE^T + GU^{-1}G^T < 0. \quad (7)$$

下面给出本文的主要结论. 对于 Delta 算子不确定系统(1),已知系统执行器连续故障模型参数矩阵 $\breve{M}$ 和 $\widehat{M}$,则有如下定理:

定理 1 对于给定常数 $\alpha > 0$,若存在对称矩阵 $P > 0$,对角矩阵 $S > 0$,矩阵 X 及正数 $\varepsilon > 0$,使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 & * & * & * & * & * & * \\ B_2^{\mathrm T} & -\alpha^2 I & * & * & * & * & * \\ \Gamma_2 & \sqrt{T}B_2 & -P+\varepsilon T EE^{\mathrm T} & * & * & * & * \\ CP+D_1\widetilde{M}X & D_2 & 0 & -I & * & * & * \\ G_1P+G_2\widetilde{M}X & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I & * & * \\ JX & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & * \\ S\widetilde{M}B_1^{\mathrm T} & 0 & \sqrt{T}S\widetilde{M}B_1^{\mathrm T} & S\widetilde{M}D_1^{\mathrm T} & S\widetilde{M}G_2^{\mathrm T} & 0 & -S \end{bmatrix} < 0. \tag{8}$$

其中

$\Gamma_1 = AP + PA^{\mathrm T} + B_1\widetilde{M}X + X^{\mathrm T}\widetilde{M}B_1^{\mathrm T} + \varepsilon EE^{\mathrm T}$,

$\Gamma_2 = \sqrt{T}AP + \sqrt{T}B_1\widetilde{M}X + \varepsilon\sqrt{T}EE^{\mathrm T}$,

$*$ 表示由矩阵对称性得到的矩阵子块. 则 Delta 算子系统(1) 具有 H_∞ 性能 α 的可靠鲁棒控制器存在,控制律为 $K = XP^{-1}$.

证明 由引理 1 知,若存在矩阵 K 和对称矩阵 $P < 0$,使得式(5) 对于系统所有容许的不确定性 F 和执行器所有容许的故障 M 均成立,则存在 Delta 算子不确定系统(1) 具有 H_∞ 性能 α 的可靠鲁棒控制器.

下面讨论式(5) 成立的充分必要条件. 记

$\Theta_1 = (A + B_1MK)P$,

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} \Theta_1+\Theta_1^{\mathrm T} & * & * & * \\ B_2^{\mathrm T} & -\alpha^2 I & * & * \\ \sqrt{T}\Theta_1 & \sqrt{T}B_2 & -P & * \\ (C+D_1MK)P & D_2 & 0 & -I \end{bmatrix},$$

$\Phi_1 = [E^{\mathrm T} \quad 0 \quad \sqrt{T}E^{\mathrm T} \quad 0]$,

$\Xi_1 = [(G_1 + G_2MK)P \quad 0 \quad 0 \quad 0]$.

于是,式(5) 可展开为

$$\Psi_1 + \Phi_1^{\mathrm T}F\Xi_1 + \Xi_1^{\mathrm T}F^{\mathrm T}\Phi_1 < 0. \tag{9}$$

由引理 2 知,式(9) 对于所有满足 $F^{\mathrm T}F \leq I$ 的矩阵 F 成立,当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$,使得

$$\Psi_1 + \varepsilon\Phi_1^{\mathrm T}\Phi_1 + \varepsilon^{-1}\Xi_1^{\mathrm T}\Xi_1 < 0. \tag{10}$$

由矩阵 Schur 补性质知,式(10) 成立等价于

$$\begin{bmatrix} \Theta_1+\Theta_1^{\mathrm T}+\varepsilon EE^{\mathrm T} & * & * & * & * \\ B_2^{\mathrm T} & -\alpha^2 I & * & * & * \\ \sqrt{T}\Theta_1+\varepsilon\sqrt{T}EE^{\mathrm T} & \sqrt{T}B_2 & -P+\varepsilon T EE^{\mathrm T} & * & * \\ (C+D_1MK)P & D_2 & 0 & -I & * \\ (G_1+G_2MK)P & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0 \tag{11}$$

成立. 将 $M = \widetilde{M}(I + L)$ 代入式(11),并记

$\Omega_1 = AP + PA^{\mathrm T} + B_1\widetilde{M}KP + PK^{\mathrm T}\widetilde{M}B_1^{\mathrm T} + \varepsilon EE^{\mathrm T}$,

$\Omega_2 = \sqrt{T}AP + \sqrt{T}B_1\widetilde{M}KP + \varepsilon\sqrt{T}EE^{\mathrm T}$,

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} \Omega_1 & * & * & * & * \\ B_2^{\mathrm T} & -\alpha^2 I & * & * & * \\ \Omega_2 & \sqrt{T}B_2 & -P+\varepsilon T EE^{\mathrm T} & * & * \\ CP+D_1\widetilde{M}KP & D_2 & 0 & -I & * \\ G_1P+G_2\widetilde{M}KP & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix},$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} B_1\widetilde{M} \\ 0 \\ \sqrt{T}B_1\widetilde{M} \\ D_1\widetilde{M} \\ G_2\widetilde{M} \end{bmatrix}, \quad \Xi_2 = \begin{bmatrix} PK^{\mathrm T} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

于是,式(11) 可展开为

$$\Psi_2 + \Phi_2L\Xi_2^{\mathrm T} + \Xi_2L\Phi_2^{\mathrm T} < 0. \tag{12}$$

由于 $|L| \leq J \leq I$,可将 L 写成 $L = JH$,其中 H 为满足 $H^2 \leq I$ 的对角矩阵. 于是,式(12) 可写成

$$\Psi_2 + \Phi_2H(\Xi_2J)^{\mathrm T} + (\Xi_2J)H\Phi_2^{\mathrm T} < 0. \tag{13}$$

易知式(12) 对于所有满足 $|L| \leq J$ 的 L 均成立,等价于式(13) 对于所有满足 $H^2 \leq I$ 的对角矩阵 H 成立. 由引理 3 知,这等价于存在一个对角矩阵 $S > 0$,使得

$$\Psi_2 + \Phi_2S\Phi_2^{\mathrm T} + (\Xi_2J)S^{-1}(\Xi_2J)^{\mathrm T} < 0. \tag{14}$$

记 $X = KP$,即 $K = XP^{-1}$. 由矩阵 Schur 补性质,式(14) 成立等价于(8) 成立. □

利用定理 1,可得到当系统含有执行器故障时,Delta 算子系统(1) 的 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的设计方法. 定理 1 中的式(8) 是关于矩阵变量 P, S, X 及变量 ε 的线性矩阵不等式,可用 Matlab 软件的 LMI 工具箱进行求解. 若可行解存在,并记为 $(\bar{P}, \bar{S}, \bar{X}, \bar{\varepsilon})$,则说明系统存在 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器,状态反馈控制律为 $K = \bar{X}\bar{P}^{-1}$.

进一步对 α 进行搜索,可求得使 Delta 算子闭环系统(4) 的扰动抑制度(即 H_∞ 性能) 最小的可靠鲁棒 H_∞ 控制器,称这样的控制器为系统的最优可靠鲁棒 H_∞ 控制器. 基于 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的存在条件,通过求解如下凸优化问题:

$$\min_{P,S,X,\varepsilon} \alpha^2, \quad \text{s.t 式(8)}. \tag{15}$$

可求得 Delta 算子系统(1) 的最优可靠鲁棒 H_∞ 控制

器. 问题(15) 是具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题, 可应用 LMI 工具箱进行求解. 如果存在最优解($\bar{\alpha}$, $\bar{P}$, $\bar{S}$, $\bar{X}$, $\bar{\varepsilon}$), 则 Delta 算子系统(1) 的最优可靠鲁棒 H_∞ 控制律为 $K = \bar{X}\bar{P}^{-1}$, 相应的闭环系统(4) 的最小扰动抑制度为 $\bar{\alpha}$.

注 1　利用 Delta 算子系统与相应的连续时间系统以及通常离散时间系统的关系[1], 由定理 1 可得到连续时间系统和通常离散时间系统 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制的相应结论. 在定理 1 中, 取 $T = 0$, 可得到连续时间系统 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的存在条件. 对式(8) 左边矩阵作适当分块相合变换(第 3 行乘以 - 1 加到第 1 行, 第 3 列乘以 - 1 加到第 1 列), 取 $T = 1$, 并用 A 替换 I + A, 即得到通常离散时间系统 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 控制器的存在条件.

4　数值算例

在 Delta 算子线性不确定系统(1) 中, 设

$$A = \begin{bmatrix} -17 & 0 & 0 \\ -8 & -5 & 18 \\ -10 & -10 & -23 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -10 \\ 10 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -10 \end{bmatrix},$$

$$C = [-2 \quad 1.5 \quad 1], \quad D_1 = 0.5,$$

$$D_2 = 1, \quad E = [2.5 \quad -1 \quad 3.5]^T,$$

$$G_1 = [-0.2 \quad 1 \quad 0], \quad G_2 = 0.6.$$

采样周期为 $T = 0.1$, 系统稳定域为 $D(-10, 10)$. 假定闭环系统含有执行器故障, 故障模型如式(3), 故障矩阵 M 为一阶方阵, 取值范围为 $0.6 \le M \le 1.4$. 取 $\alpha = 20$, 要求设计 Delta 算子系统(1) 的 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器.

根据上节提出的方法, 利用 Matlab 的 LMI 工具箱中求解器 feasp 求解线性矩阵不等式(8), 算得可行解为

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} 0.4359 & -0.3063 & 0.6248 \\ -0.3063 & 0.9631 & -0.8010 \\ 0.6248 & -0.8010 & 1.6530 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X} = [0.4628 \quad -0.4558 \quad 1.5220].$$

这表明 Delta 算子系统(1) 的 H_∞ 性能为 20 的可靠鲁棒 H_∞ 控制器存在, 控制律为

$$K = [-0.5549 \quad 0.4864 \quad 1.3662].$$

假设系统不确定性 F 和执行器故障矩阵 M 均为时不变的, 则对于 F 和 M 所有可容许的取值, 闭环系统极点的分布如图 1 所示.

进一步要求设计 Delta 算子系统(1) 的最优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器. 利用 Matlab 的 LMI 工具箱中求解器 mincx 求凸优化问题(15) 的解, 算得

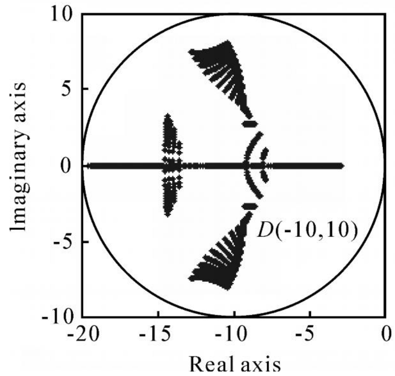

图 1　Delta 算子闭环系统的极点分布

最优解存在. Delta 算子系统(1) 的最优可靠鲁棒 H_∞ 控制律为

$$K = [-0.5620 \quad 0.5657 \quad 1.3855],$$

相应的闭环系统(4) 的 H_∞ 性能为 $\alpha_p = 9.2444$.

5　结　　论

本文研究 Delta 算子线性不确定系统的可靠鲁棒 H_∞ 控制问题. 针对系统含有执行器故障, 运用线性矩阵不等式方法, 给出了 α 次优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器的存在条件, 由此提出 α 次优和最优可靠鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器的设计方法. 文中考虑了更具一般性的连续故障模型, 充分利用连续故障模型的结构信息, 降低了可靠鲁棒 H_∞ 控制器存在条件的保守性. 数值算例表明, 本文提出的设计方法是有效而可行的.

参考文献(References)

[1] Middleton R H, Goodwin G C. Improved finite word length characteristics in digital control using Delta operator[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1986, 31(11): 1015-1021.

[2] Shor M H, Perkins W R. Reliable control in the presence of sensor/ actuator failures: A unified discrete/ continuous approach[C]. Proc of 30th Conf on Decision and Control. Brighton, 1991: 1601-1606.

[3] 向峥嵘, 陈庆伟, 胡维礼. 具有执行器故障的不确定 Delta 算子系统鲁棒 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 491-493.
(Xiang Z R, Chen Q W, Hu W L. Robust H_∞ control of uncertain Delta operator systems with actuator failure [J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 491-493.)

[4] 刘满, 井元伟, 张嗣瀛. Delta 算子系统 D 稳定鲁棒容错控制[J]. 东北大学学报, 2004, 25(8): 715- 718.
(Liu M, Jing Y W, Zhang S Y. D-stable robust fault-tolerant control for Delta operator systems[J]. J of Northeastern University, 2004, 25(8): 715-718.)

(下转第 1401 页)

时,$\xi' = (\xi'_i)_{i=1,2,3} = (0.606, 0.568, 0.566)$. 因此,最优方案为方案 1,且方案的排序结果为 $x_1 \succ x_2 \succ x_3$. 由文献[10]的直觉指数加权平均最大化模型,得到的最优权重向量 $W = (0.25, 0.40, 0.35)^{\mathrm{T}}$,相应的方案排序结果为 $x_1 \succ x_3 \succ x_2$.

这两种方法所得最优方案排序结果略有差异. 这是因为文献[10]方法没有充分利用所给的决策信息,如最优化权重模型的可行域比实际模型的可行域小,因此最优解是一个局部最优解,而不是全局最优解. 本文的相似度公式也比文献[10]定义的距离公式更合理.

5　结　论

本文研究基于直觉模糊集的多属性决策问题,提出一种基于直觉模糊集相似度的多属性决策方法. 在决策过程中,每个方案相对于属性关于模糊概念极好的值都是通过直觉模糊集表示的,属性权重也用直觉模糊集表示,这使本文方法比传统模糊集方法能更好地模拟实际的决策环境,从而建立更加符合现实的决策模型. 本文方法也可推广到多人多属性的群决策问题.

参考文献(References)

[1] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.

[2] Atanassov K T. Two theorems for intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 110(2): 267-269.

[3] Szmidt E, Kacprzyk J. Intuitionistic fuzzy sets in group decision making[J]. Note on Intuitionistic Fuzzy Sets, 1996, 2(1): 15-32.

[4] Szmidt E, Kacprzyk J. Remarks on some applications of intuitionistic fuzzy sets in decision making[J]. Note on Intuitionistic Fuzzy Sets, 1996, 2(3): 22-31.

[5] Szmidt E, Kacprzyk J. Group decision making via intuitionistic fuzzy sets[C]. FUBEST '96. Sofia, 1996: 107-112.

[6] Szmidt E, Kacprzyk J. Intuitionistic fuzzy sets for more realistic group decision making[C]. Int Conf on Transition to Advanced Market Institutions and Economies. Warsaw, 1997: 430-433.

[7] Szmidt E, Kacprzyk J. Distances between intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 114(3): 505-518.

[8] De S K, Biswas R, Roy A R. An application of intuitionistic fuzzy sets in medical diagnosis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 117(2): 209-213.

[9] Deng-Feng Li. Multi-attribute decision making models and methods using intuitionistic fuzzy sets[J]. J of Computer and System Sciences, 2005, 70(1): 73-85.

[10] Li D, Cheng C. New similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and application to pattern recognition[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1): 221-225.

(上接第 1397 页)

[5] 张爱玲, 张端金. Delta 算子描述的离散系统故障检测滤波器[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 273-277.
(Zhang A L, Zhang D J. Fault detection filter for Delta operator formulated discrete time systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 273-277.)

[6] 张端金, 张洛花, 苗启. 圆形区域极点配置的 Delta 算子系统鲁棒容错控制[C]. 第 27 届中国控制会议论文集. 昆明, 2008, 3: 693-697.
(Zhang D J, Zhang L H, Miao Q. Robust fault-tolerant control for Delta-operator systems with circular pole constraints[C]. Proc of 27th Chinese Control Conf. Kunming, 2008, 3: 693-697.)

[7] 肖民卿. 基于 LMI 的统一 D-稳定可靠控制器设计方法[C]. 第 27 届中国控制会议论文集. 昆明, 2008, 2: 36-40.
(Xiao M Q. An unified LMI approach to reliable D-stabilization controller design for linear systems[C]. Proc of 27th Chinese Control Conf. Kunming, 2008, 2: 36-40.)

[8] Veillette R J, Medanic J V, Perkins W R. Design of reliable control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 7(3): 290-304.

[9] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Reliable controller design for linear systems[J]. Automatica, 2001, 37(5): 717-725.

[10] Yao B, Wang F Z. LMI approach to reliable H_∞ control of linear systems[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(2): 381-386.