

集中式与分布式鲁棒状态融合估计

金学波¹, 孙优贤²

(1. 浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 现代控制工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 研究不确定多传感器系统的鲁棒估计问题是多传感器融合估计理论的一个重要研究方向. 本文以鲁棒滤波理论为基础, 给出了不确定多传感器系统的多胞型描述模型, 并利用 LMI 方法给出集中式鲁棒状态融合估计问题的解, 证明了将集中式鲁棒融合估计转化为相同估计性能的分布式融合估计算法的条件. 最后给出了分布式不确定多传感器系统的状态融合估计的一个算例.

关键词: 不确定多传感器融合系统; 集中式鲁棒融合估计; 分布式鲁棒融合估计; H_∞ 滤波

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Centralized and distributed robust state fusion estimation

JIN Xue-bo¹, SUN You-xian²

(1. College of Information and Electronics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2. Institute of Modern Control Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: The study of robust state estimation for uncertain multisensor system is an important field of multisensor fusion estimation theory. Based on robust filtering theory, this paper develops polytopic models of uncertain multisensor system and centralized robust fusion estimation by linear matrix Inequality (LMI) method, and proves the exact transforming condition, by which robust centralized estimation can be transformed to the distributed fusion method with the same fusion estimation performance. Finally, an example is given to illustrate the estimation approach for the distributed uncertain multisensor system.

Key words: uncertainty multisensor fusion system; centralized robust fusion estimation; distributed robust fusion estimation; H-infinity filtering

1 引言(Introduction)

不确定多传感器系统的鲁棒融合估计已经越来越引起人们的重视. 多传感器系统估计主要有两种方法: 集中式与分布式^[1]. 与集中式融合相比, 分布式融合具有可靠性高、再生能力强、通信数据相对较少等优点, 因此, 不确定多传感器系统的分布式鲁棒融合算法更具有实际意义. 然而, 分布式融合方法一直是多传感器融合系统状态估计的难点问题, 不确定融合系统更是如此.

集中式鲁棒融合估计的基础为单传感器鲁棒滤波问题. 关于鲁棒滤波, 研究者已提出了一系列基于 Lyapunov 稳定性研究结果和方法^[2,3]. 而线性矩阵不等式处理方法可以克服 Riccati 方程处理方法存在的许多不足, 给出问题可解的一个凸约束条件, 近年来再一次受到学术界的关注^[4~7].

本文将用多胞型方法描述不确定多传感器系统模型, 以基于 LMI 方法的鲁棒滤波理论为基础, 给出离散不确定多传感器系统的集中式鲁棒状态融合估计问题的解, 并推导分布式融合估计算法.

2 系统模型(System model)

考虑一类由多胞型模型描述的不确定多传感器系统

$$\begin{cases} x(k+1) = \hat{A}x(k) + \hat{B}w(k), \\ y_i(k) = \hat{C}_i x(k) + \hat{D}_i v_i(k), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

其中: 系数矩阵 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}_i, \hat{D}_i$ 是不确定的, $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是 k 时刻系统状态, $w(k) \in \mathbb{R}^h$ 是过程噪声向量. 设系统共有 N 个传感器, $y_i(k) \in \mathbb{R}^m$ 是第 i 个传感器的测量向量, $v_i(k) \in \mathbb{R}^m$ 为互不相关的测量噪声.

3 集中式鲁棒 H_∞ 融合估计 (Centralized robust H_∞ fusion estimation)

假设系统(1)是渐近稳定的,对给定的常数 $\gamma > 0$, 要求设计集中式鲁棒 H_∞ 融合滤波器

$$\hat{x}(k+1) = A_f \hat{x}(k) + \sum_{i=1}^N B_{f_i} y_i(k), \quad (2)$$

使系统(1)与滤波器(2)组成的闭环系统满足以下的设计指标:

- i) 闭环系统是渐近稳定的;
- ii) 从系统噪声到估计误差的闭环传递函数满足 $\|T(z)\|_\infty < \gamma$;
- iii) 估计误差方差满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} E\{e^T(k)e(k)\}$ 的上界最小化.

将多胞型描述模型(1)重新写为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}\zeta(k), \\ y(k) &= \bar{C}x(k) + \bar{D}\zeta(k). \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} y(k) &= [y_1^T(k), y_2^T(k), \dots, y_N^T(k)]^T, \\ \zeta(k) &= [w^T(k) \quad v_1^T(k) \quad \dots \quad v_N^T(k)]^T, \\ \bar{B} &= [\hat{B}^T \quad 0]^T, \quad \bar{D} = [0 \quad \hat{D}^T]^T, \\ \bar{A} &= \hat{A}, \quad \bar{C} = \hat{C}, \\ \hat{C} &= [\hat{C}_1^T \quad \hat{C}_2^T \quad \dots \quad \hat{C}_N^T], \\ \hat{D} &= [\hat{D}_1^T \quad \hat{D}_2^T \quad \dots \quad \hat{D}_N^T]^T. \end{aligned}$$

假定 $T = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix}$ 属于某个给定的多胞型 D_c , T_j 是多胞型 D_c 的顶点:

$$T_j = \begin{bmatrix} \bar{A}_j & \bar{B}_j \\ \bar{C}_j & \bar{D}_j \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, q. \quad (4)$$

将式(3)代入滤波器式(2),定义滤波误差 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, 并设 $\bar{x}(k) = [x^T(k) \quad \hat{x}^T(k)]^T$, 则闭环系统方程为

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}\zeta(k), \\ e(k) &= \bar{C}\bar{x}(k). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 \\ B_f \bar{C} & A_f \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B} \\ B_f \bar{D} \end{bmatrix}, \\ \bar{C} = [I \quad -I], \\ B_f = [B_{f_1} \quad B_{f_2} \quad \dots \quad B_{f_N}]. \end{cases} \quad (6)$$

定理 1 对于给定的常数 $\gamma > 0$ 和系统(1), 存在一个鲁棒 H_∞ 融合滤波器(2)当且仅当存在对称矩阵 $P_\infty > 0$ 及 H , 使得

$$\begin{bmatrix} P_\infty & * & * & * \\ 0 & \gamma^2 I & * & * \\ P_\infty \bar{A} & P_\infty \bar{B} & P_\infty & * \\ \bar{C} & 0 & 0 & I \end{bmatrix} > 0, \quad (7)$$

$$\bar{B}^T P_\infty \bar{B} \leq H. \quad (8)$$

其中: “*” 表示矩阵的上三角与下三角对称, $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ 由式(6)确定, 并且估计方差满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{e^T(k)e(k)\} \leq \text{tr}(H). \quad (9)$$

证 可知闭环系统(5)渐近稳定且 $\|T(z)\|_\infty < \gamma$ 当且仅当存在满足矩阵不等式

$$\begin{aligned} &\bar{A}^T P_\infty \bar{A} - P_\infty + \bar{A}^T P_\infty \bar{B} [\gamma^2 I - \\ &\bar{B}^T P_\infty \bar{B}]^{-1} \bar{B}^T P_\infty \bar{A} + \bar{C}^T \bar{C} < 0 \end{aligned}$$

的对称矩阵 P_∞ , 且使得 $\gamma^2 - \bar{B}^T P_\infty \bar{B} > 0$. 则根据矩阵的 Schur 补引理可得

$$\begin{bmatrix} -P_\infty + \bar{C}^T \bar{C} & 0 & \bar{A}^T \\ 0 & -\gamma^2 I & \bar{B}^T \\ \bar{A} & \bar{B} & -P_\infty^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

应用 Schur 补引理及矩阵运算规则后分别左乘和右乘矩阵 $\text{diag}(I, I, P_\infty, I)$, 即可得矩阵不等式(7).

下面讨论估计方差是否满足式(9). 由方差分析可知闭环系统状态的估计方差为 $\lim_{k \rightarrow \infty} E\{e^T(k)e(k)\} = \text{tr}(\bar{B}^T P \bar{B})$, 其中矩阵 $P > 0$ 是以下 Lyapunov 矩阵方程的解:

$$\bar{A}^T P \bar{A} - P + \bar{C}^T \bar{C} = 0.$$

若 P_∞ 是上述矩阵不等式的可行解, 则可得

$$\bar{A}^T P_\infty \bar{A} - P_\infty + \bar{C}^T \bar{C} \leq 0.$$

由于矩阵 $\bar{A}$ 是渐近稳定的, 可推出 $P \leq P_\infty$, 得到

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{e^T(k)e(k)\} \leq \text{tr}(\bar{B}^T P_\infty \bar{B}) = \text{tr}(H).$$

定理 2 对于给定的常数 $\gamma > 0$ 和系统(1), 存在一个鲁棒 H_∞ 融合滤波器(2)当且仅当存在对称正定矩阵 X, R 及矩阵 H, S, T, Z, Y , 使得

$$\begin{bmatrix} R & * & * & * & * & * \\ R & X & * & * & * & * \\ 0 & 0 & \gamma^2 I & * & * & * \\ R \bar{A}_j & R \bar{A}_j & R \bar{B}_j & R & * & * \\ X \bar{A}_j + Z \bar{C}_j + S & X \bar{A}_j + Z \bar{C}_j & X \bar{B}_j + Z \bar{D}_j & R & X & * \\ I - T & I & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} > 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} H & * & * \\ R \bar{B}_j & R & * \\ X \bar{B}_j + Z \bar{D}_j & R & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} > 0. \quad (12)$$

其中“*”表示矩阵的上三角与下三角对称.

则滤波器的参数为

$$A_f = M^{-1} S R^{-1} N^{-T}, \quad B_f = M^{-1} T, \quad (13)$$

$$N = R^{-1}T^T, M = (I - XY)N^{-T}, \quad (14) \quad (12).$$

且估计方差满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{e^T(k)e(k)\} \leq \text{tr}(H). \quad (15)$$

证 将正定矩阵 P_∞ 和它的逆矩阵进行以下分块:

$$P_\infty = \begin{bmatrix} X & M \\ M^T & U \end{bmatrix}, P_\infty^{-1} = \begin{bmatrix} Y & N \\ N^T & V \end{bmatrix}. \quad (16)$$

其中: $X, Y \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是对称矩阵, 由 $P_\infty > 0$ 可得式

$$\begin{bmatrix} Y & * & * & * & * & * \\ I & X & * & * & * & * \\ 0 & 0 & \gamma^2 I & * & * & * \\ \bar{A}Y & \bar{A} & \bar{B} & Y & * & * \\ X\bar{A}Y + M\bar{B}_f\bar{C}Y + M\bar{A}_fN^T & X\bar{A} + M\bar{B}_f\bar{C} & X\bar{B} + M\bar{B}_f\bar{C} & I & X & * \\ Y - N^T & I & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} > 0.$$

再将上面不等式左边分别左乘和右乘 $\text{diag}(Y^{-1}, I, I, Y^{-1}, I, I)$, 并设

$$\begin{aligned} Y^{-1} &= R, M\bar{B}_f = Z, \\ M\bar{A}_fN^TY^{-1} &= S, N^TY^{-1} = T, \end{aligned} \quad (17)$$

得

$$\begin{bmatrix} R & * & * & * & * & * \\ R & X & * & * & * & * \\ 0 & 0 & \gamma^2 I & * & * & * \\ \bar{R}\bar{A} & \bar{R}\bar{A} & \bar{R}\bar{B} & R & * & * \\ X\bar{A} + Z\bar{C} + S & X\bar{A} + Z\bar{C} & X\bar{B} + Z\bar{D} & R & X & * \\ I - T & I & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} > 0.$$

考虑多胞型的顶点式(4)即得到式(10).

下面考虑估计误差的方差. 将矩阵的 Schur 补性质应用到式(8), 并将 $\bar{B}$ 及 P_∞ 代入后, 得

$$\begin{bmatrix} H & * & * \\ X\bar{B} + M\bar{B}_f\bar{D} & X & * \\ M^T\bar{B} + U\bar{B}_f\bar{D} & M^T & U \end{bmatrix} \geq 0.$$

将上式左边分别左乘和右乘 $\text{diag}(I, J^T)$ 及 $\text{diag}(I, J)$, 得到

$$\begin{bmatrix} H & * & * \\ \bar{B} & Y & * \\ X\bar{B} + M\bar{B}_f\bar{D} & I & X \end{bmatrix} \geq 0. \quad (18)$$

再将式(18)左边分别左乘和右乘 $\text{diag}(I, Y^{-1}, I)$, 利用变量代换式(17)同时考虑多胞型不确定模型的顶点式(4), 即可得到式(10). 又根据定理 1, 得系统的估计方差满足式(15).

定理 3 对于给定的常数 $\gamma > 0$, 系统(1)存在最优鲁棒 H_∞ 滤波器, 当且仅当优化问题

将 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ 及 P_∞ 代入式(7), 并将不等式左边分别左乘和右乘 $\bar{J}^T = \text{diag}(J^T, I, J^T, I)$ 及 $\bar{J} = \text{diag}(J, I, J, I)$, 其中

$$J = \begin{bmatrix} Y & -I \\ N^T & 0 \end{bmatrix},$$

得到

$$\begin{bmatrix} * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ \gamma^2 I & * & * & * & * & * \\ \bar{B} & Y & * & * & * & * \\ X\bar{B} + M\bar{B}_f\bar{C} & I & X & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & I & * & * \end{bmatrix} > 0.$$

$$\begin{cases} \min_{\beta, R, X, S, Z, T, H} \text{tr}(H) \\ \text{s.t. 1) 式(10); 2) 式(11); 3) 式(12).} \end{cases}$$

有最优解 β, X, R, H, M, S, T , 则此时由式(13)及(14)所解出的滤波器的估计误差方差满足式(15).

4 分布式鲁棒 H_∞ 融合估计 (Distributed robust H_∞ fusion estimation)

假设系统(1)是渐近稳定的, 对给定的常数 $\gamma > 0$, 要求根据各个传感器的测量值设计一组鲁棒 H_∞ 融合滤波器 $\hat{x}_i(k+1) = A_{f_i}\hat{x}_i(k) + B_{f_i}y_i(k)$ 及加权

矩阵 P_i , 满足 $\sum_{i=1}^N P_i = I$, 设分布式状态融合估计为

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=1}^N P_i \hat{x}_i(k), \quad (19)$$

使系统(1)与滤波器(19)组成的闭环系统满足设计指标 i) ~ iii).

定理 4 分布式鲁棒 H_∞ 融合滤波器(19)能够得到与集中式融合滤波器(2)相同的估计性能, 当且仅当

$$[P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_N][A_{f_1}^T \ A_{f_2}^T \ \cdots \ A_{f_N}^T]^T = A_f, \quad (20)$$

$$[P_1 B_{f_1} \ P_1 B_{f_2} \ \cdots \ P_1 B_{f_N}] = B_f. \quad (21)$$

其中 A_f, B_f 为集中式融合滤波器(2)的参数.

证 设

$$\hat{x}(k) = [\hat{x}_1^T(k) \ \hat{x}_2^T(k) \ \cdots \ \hat{x}_N^T(k)]^T,$$

$$y(k) = [y_1^T(k) \ y_2^T(k) \ \cdots \ y_N^T(k)]^T,$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_N],$$

可得到估计状态 $\hat{x}(k)$ 与 $\hat{\hat{x}}(k)$ 之间的关系为

$$\hat{x}(k) = P\hat{\hat{x}}(k). \quad (22)$$

现将滤波器组写成如下形式:

$$\hat{\hat{x}}(k+1) = \begin{bmatrix} A_{f_1} & & \\ & \ddots & \\ & & A_{f_N} \end{bmatrix} \hat{\hat{x}}(k) + \begin{bmatrix} B_{f_1} & & \\ & \ddots & \\ & & B_{f_N} \end{bmatrix} y(k). \quad (23)$$

设

$$\begin{aligned} \bar{A}_f &= \text{blackdiag}(A_{f_1} \ A_{f_2} \ \cdots \ A_{f_N}), \\ \bar{B}_f &= \text{blackdiag}(B_{f_1} \ B_{f_2} \ \cdots \ B_{f_N}), \end{aligned}$$

由式(22)和(23)可得系统的估计状态满足

$$\hat{\hat{x}}(k+1) = P\bar{A}_f\hat{\hat{x}}(k) + P\bar{B}_fy(k). \quad (24)$$

设 P_L^{-1} 为矩阵 P 的左逆, 则上式可写为

$$\hat{\hat{x}}(k+1) = P\bar{A}_fP_L^{-1}P\hat{\hat{x}}(k) + P\bar{B}_fy(k).$$

应用式(22)得 $\hat{\hat{x}}(k+1) = P\bar{A}_fP_L^{-1}\hat{\hat{x}}(k) + P\bar{B}_fy(k)$, 设 $P\bar{A}_fP_L^{-1} = A_f$, $P\bar{B}_f = B_f$ 可知其与集中式滤波器式(2)形式完全相同. 又可得 $P\bar{A}_f = A_fP$, 即

$$P_1A_{f_1} = A_fP_1, \ P_2A_{f_2} = A_fP_2, \ \cdots, \ P_NA_{f_N} = A_fP_N.$$

将上述各式相加即可得到式(20). 同理可得式(21).

推论 1 分布式鲁棒 H_∞ 融合滤波器(19)能够得到与集中式融合滤波器(2)相同的估计性能,

如果 $A_{f_i} = A_f, B_{f_i} = N \cdot B_f^i, P = \frac{1}{N}I$. 其中 $[B_f^1 \ B_f^2 \ \cdots \ B_f^N] = B_f, A_f, B_f$ 为集中式融合滤波器(2)的参数, N 为系统的传感器个数.

5 计算示例(Numerical example)

要求针对如下不确定离散多传感器系统

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & -0.8 \\ 0.9+a & -0.5 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -0.45 \\ -0.35 \end{bmatrix} w(k),$$

$$y_1(k) = [0.35 + b \quad -0.65]x(k) + 0.4v_1(k),$$

$$y_2(k) = [0.35 + b \quad -0.65]x(k) + 0.4v_2(k),$$

设计分布式鲁棒 H_∞ 滤波器. 其中 $w(k), v_1(k), v_2(k)$ 为单位方差的高斯白噪声, $0 \leq a \leq 0.3, 0 \leq b \leq 0.3$.

通过求解定理3的优化问题, 在 $\gamma = 5$ 的情况下得集中式鲁棒 H_∞ 滤波器的系数矩阵是

$$A_f = \begin{bmatrix} -0.3568 & -0.3207 \\ 0.7196 & 0.0828 \end{bmatrix},$$

$$B_{f_1} = \begin{bmatrix} 0.3666 \\ 0.4744 \end{bmatrix}, \ B_{f_2} = \begin{bmatrix} 0.3714 \\ 0.4808 \end{bmatrix}.$$

又根据推论1得到分布式鲁棒 H_∞ 滤波器组参数为

$$A_{f_1} = A_{f_2} = \begin{bmatrix} -0.3568 & -0.3207 \\ 0.7196 & 0.0828 \end{bmatrix},$$

$$B_{f_1} = 2 \times \begin{bmatrix} 0.3666 \\ 0.4744 \end{bmatrix}, \ B_{f_2} = 2 \times \begin{bmatrix} 0.3714 \\ 0.4808 \end{bmatrix},$$

则系统分布式融合估计为

$$\hat{\hat{x}}(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \hat{x}_1(k) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \hat{x}_2(k).$$

表1给出了鲁棒 H_∞ 滤波器组中的两个滤波器、分布式鲁棒融合估计及集中式鲁棒融合估计的方差. 可以看出, 分布式鲁棒融合估计与集中式鲁棒融合估计的性能完全相同, 而且可以得到比鲁棒滤波器组中的任意滤波器都小的估计方差.

表1 估计方差 $E\{(x_1 - \hat{x}_1)^2\}, E\{(x_2 - \hat{x}_2)^2\}$ 的比较

不同估计方法	$a = 0$ $b = 0$	$a = 0.1$ $b = 0.1$	$a = 0.2$ $b = 0.2$	$a = 0.3$ $b = 0.3$
鲁棒 H_∞ 滤波器 1	0.4021 0.5212	0.4171 0.5299	0.4456 0.5512	0.5435 0.5888
鲁棒 H_∞ 滤波器 2	0.4067 0.5245	0.4205 0.5325	0.4524 0.5534	0.5578 0.5905
分布式 鲁棒融合估计	0.4011 0.5209	0.4145 0.5289	0.4404 0.5496	0.5416 0.5858
集中式 鲁棒融合估计	0.4011 0.5209	0.4145 0.5289	0.4404 0.5496	0.5416 0.5858

6 结论(Conclusion)

本文给出了含有不确定参数的多胞型离散线性多传感器融合系统模型, 并在此基础上, 推导出了基于 LMI 的集中式及分布式鲁棒融合滤波器. 所提出的分布式鲁棒融合方法能够得到与集中式鲁棒融合完全相同的时域、频域估计特性, 这在工程实现上非常有利, 成功的解决了鲁棒分布式融合估计问题.

参考文献(References):

- [1] 何友, 王国宏, 陆大铨, 等. 多传感器信息融合及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 238-264.
(HE You, WANG Guohong, LU Dajin, et al. *Multisensor Information Fusion with Applications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 238-264.)
- [2] 刘诗娜, 费树岷, 冯纯伯. 线性不确定系统鲁棒滤波器的设计[J]. 自动化学报, 2002, 28(1): 50-55.
(LIU Shina, FEI Shumin, FENG Chunbo. Robust filter design for linear uncertain system[J]. *Acta Automatic Sinica*, 2002, 28(1): 50-55.)
- [3] 张勇, 史忠科, 戴冠中, 等. 离散系统的鲁棒卡尔曼滤波新方法

- [J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 505 - 508.
(ZHANG Yong, SHI Zhongke, DAI Guanzhong, et al. A new robust filter for uncertain discrete-time systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(4): 505 - 508.)
- [4] IWASAKI T, SKELTON R E. All controllers for the general H_∞ control problem: LMI existence conditions and state space formulas [J]. *Automatica*, 1994, 30(8): 1307 - 1317.
- [5] PALHARES R M. LMI approach to the mixed H_2/H_∞ filtering design for discrete-time uncertain systems [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(1): 292 - 296.
- [6] GEROMEL J C, de OLIVEIRA M C. H_2/H_∞ robust filtering for convex bounded uncertain systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(1): 100 - 107.
- [7] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 4 - 20.
(YU Li. *Robust Control—Linear Matrix Inequality (LMI) Methods* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 4 - 20.)

作者简介:

金学波 (1972—), 女, 副教授, 2003年毕业于浙江大学, 获博士学位, 目前主要研究方向为信息融合、状态估计、鲁棒控制等, E-mail: lysjxb@mail.hz.zj.cn;

孙优贤 (1940—), 男, 教授, 院士, 博士生导师, 研究方向为鲁棒控制、容错控制、故障诊断等。

下 期 要 目

- 支持向量机-模糊推理自学习控制器设计 袁小芳, 王耀南, 孙 炜
- 离散广义系统具有完整性的鲁棒二次稳定 陈跃鹏, 张庆灵, 周祖德, 姚 波
- 一个新型充要指数稳定性定理及其初步应用 胥布工
- 满意特征选择及其应用 张葛祥, 金炜东, 胡来招
- 双输入输出时滞过程解耦控制的解析设计 刘 涛, 张卫东, 欧林林
- 受扰非线性离散系统的前馈反馈最优控制 唐功友, 张宝琳
- 模糊 CMAC 及其在机器人轨迹跟踪控制中的应用 孙 炜, 王耀南
- 约束条件下的巡线机器人逆运动学求解 李 恩, 梁自泽, 谭 民
- 蜂窝系统功率控制算法 蔡 敏, 王 伟
- 发电机的非线性自适应逆推综合控制 王宝华, 杨成梧, 张 强
- 一类非确定欠驱动系统的串级模糊滑模控制 王 伟, 易建强, 赵冬斌, 柳晓菁
- 基于脉冲微分系统模型的有损网络控制系统研究 黄 剑, 关治洪, 王仲东
- 半 Markov 决策过程折扣模型与平均模型之间的关系 殷保群, 李 杰, 唐 昊, 代桂平, 奚宏生
- 自然计算研究进展 龚 涛, 蔡自兴
- 输入向量控制细胞神经网络全局指数稳定 曾志刚, 廖晓昕, 汪增福
- 基于 PCTSP 的热轧单元计划模型与算法 刘士新, 周山长, 宋健海, 王梦光
- 多输入多输出复杂时滞系统的预测函数控制及其鲁棒 D 稳定性条件 张 彬, 张卫东
- 基于免疫遗传算法的区域交通自适应协调控制 刘智勇, 李水友
- 自适应 Smith 补偿器在基于 IP 的网络控制系统中的应用 陈 鹏, 戴连奎
- 高速公路非线性反馈模糊逻辑匝道控制器 梁新荣, 刘智勇, 毛宗源
- 自由终端随机最优调节器的注记 张维海
- 参数不确定 SGCMG 系统的自适应操纵律设计 吴 忠
- 基于 DCT 域的高压缩图像去块效应算法 谢胜利, 石 敏
- 相互作用的量子系统模型及其物理控制过程 丛 爽
- 正定二次最优控制问题的最优值的估计 朱经浩, 王 成