

文章编号: 1001-0920(2006)03-0343-04

联邦滤波器容错信息分配方法研究

邱 恺, 吴训忠, 张宗麟, 魏瑞轩, 陈天如
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 研究了子系统发生传感器故障时, 信息分配系数对故障子系统和无故障子系统性能的影响。在此基础上, 提出了根据各个子系统可能发生故障的概率进行信息分配的容错信息分配方法。根据该方法, 可降低故障通过反馈重置对其他无故障子系统的污染程度, 提高无故障子系统的容错性和备份能力, 减少故障信息在重构联邦滤波器中的影响程度和持续时间, 从而可使系统快速输出不含故障信息的融合结果。理论分析和实例仿真证明了所提出方法的正确性和有效性。

关键词: 联邦滤波; 反馈重置; 容错信息分配原则; 重构能力; 传感器故障

中图分类号: V 249.32 **文献标识码:** A

On Fault-tolerant Information Sharing Scheme for Federated Filters

QIU Kai, WU Xun-zhong, ZHANG Zong-lin, WEI Rui-xuan, CHEN Tian-ru

(Institute of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China Correspondent: QIU Kai, E-mail: qiukai_em@163.com)

Abstract: The effects of the information sharing scheme (ISS) for the federated filter (FF) on the global fusion estimate and the local estimates are analyzed. Then a fault tolerant ISS for the FF running in reset feedback mode is presented. The key to this scheme is that the information factor for each local filter is adjusted according to the probability of arising of the failure in its own corresponding subsystem. This scheme may reduce the contamination from the faulty local filter on healthy local filters via the fusion reset and improve the fault-tolerance and backup capability of the filters. Hence, the reconstructed FF may make a quick recovery to generate global solutions without fault information. Theoretic analysis and simulation show the effectiveness of the method.

Key words: Federated filter; Reset and feedback; Fault tolerant ISS; Re-configurability; Sensor failure

1 引 言

Carlson 提出的联邦滤波算法^[1], 在计算量、容错性等方面具有明显优势, 不但为多传感器融合的系统设计和算法研究提供了理论基础, 同时也为容错组合导航提供了一种有效的解决方案和实现方法^[2~7]。“信息分配”是联邦滤波器研究和设计中的一个关键问题^[2], 直接影响联邦滤波器的容错性和精度等性能。为此, 文献[3~7]等分别提出了根据各子滤波器的精度进行调整的信息分配方法, 但关于故障条件下的信息分配问题却极少考虑。

一般而言, 由于故障检测的滞后性, 当子系统传感器故障被检测出时, 可能已经发生了一段时间, 并且由于反馈重置而使其他的无故障子系统受到污染。这样, 当故障隔离后, 故障信息依然会在重构后的联邦滤波器中影响较长时间。因此, 如果在故障发生时, 能够提高其他无故障子系统的抗污染能力, 必然有利于减少故障的影响程度和时间, 使重构的联邦滤波器快速输出不含故障信息的融合结果。

本文从理论上具体分析了故障条件下信息分配

收稿日期: 2005-01-13; 修回日期: 2005-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(60304004); 空军工程大学博士学位论文创新基金项目

作者简介: 邱恺(1977—), 男, 湖北通山人, 博士生, 从事信息融合技术、故障检测等研究; 张宗麟(1940—), 男, 西安人, 教授, 博士生导师, 从事惯性导航与组合导航的研究

系数对故障滤波器和无故障滤波器的影响 在此基础上,提出了一种根据各个子系统可能发生故障的概率进行信息分配的容错信息分配方法

2 问题提出

2.1 联邦滤波算法

不失一般性,设系统的状态方程和第*i*个子系统的量测方程分别为

$$\begin{cases} X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + W(k); \\ Z_i(k) = H_i X(k) + V_i(k), i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

其中: $W(k) \sim N(0, Q(k)), V_i(k) \sim N(0, R_i(k))$.

则联邦滤波算法^[1-3]可由下列方程描述:

$$\begin{cases} Q_i^{-1}(k-1) = \beta Q^{-1}(k-1), \\ P_i^{-1}(k-1) = \beta_i P_g^{-1}(k-1), \\ \hat{X}_i(k-1) = X_g(k-1); \end{cases} \quad (2)$$

$$X_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)X_i(k-1); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_i(k, k-1) = \\ \Phi(k, k-1)P_i(k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q_i(k-1); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_i^{-1}(k) = \\ P_i^{-1}(k, k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_i^{-1}(k)\hat{X}_i(k) = \\ P_i^{-1}(k, k-1)X_i(k, k-1) + \\ H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_g(k) = P_g(k) \left[\sum_{i=1}^n P_i^{-1}(k)\hat{X}_i(k) + \right. \\ \left. P_m^{-1}(k)\hat{X}_m(k) \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$P_g^{-1}(k) = \sum_{i=1}^n P_i^{-1}(k) + P_m^{-1}(k). \quad (8)$$

其中:分配系数 $\beta_i (i=1, \dots, n, m)$ 满足 $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n + \beta_m = 1$,即遵守信息守恒原理, β_m 为主滤波器分配系数

2.2 信息分配对全局融合估计及子滤波器的影响

如果子滤波器在每个量测更新之后进行信息的反馈重置,则由式(2)~(4),可得子滤波器*i*的第*k*步的一步预测估计和方差分别为

$$\begin{aligned} \hat{X}_i(k, k-1) = \\ \Phi(k, k-1)\hat{X}_g(k-1) = \\ \hat{X}_g(k, k-1), \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_i(k, k-1) = \beta_i^{-1} P_g(k, k-1). \quad (10)$$

2.2.1 分配系数对全局最优性的影响

将式(9)和(10)分别代入式(5)~(8),得

$$\begin{aligned} P_g^{-1}(k) = \\ P_g^{-1}(k, k-1) + \sum_{i=1}^n H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_g(k) = \\ P_g(k) \left[P_g^{-1}(k, k-1)\hat{X}_g(k, k-1) + \right. \\ \left. \sum_{i=1}^n H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)说明,信息分配系数不影响全局估计的最优性;式(12)说明子系统的传感器故障依然会污染全局估计,并通过反馈重置进一步污染其他正常的子滤波器,但对全局估计的污染程度不受子滤波器的信息分配系数影响

2.2.2 分配系数对每个子滤波器精度的影响

由式(10)及(5)可知,如果分配系数 β_i 越大,即受全局反馈重置的影响越大,则 $P_i(k)$ 越小,子滤波器*i*精度越高 反之, β_i 越小,则 $P_i(k)$ 越大,子滤波器*i*精度越低 因此,信息分配系数的不同会影响子滤波器的滤波精度

2.3 当前信息分配方法存在的问题

当前有不少文献^[3-7]提出了多种不同的信息分配方法,但基本上都只考虑了子系统没有发生传感器故障时的信息分配方法,而对于子系统发生传感器故障时的“信息分配”问题却极少考虑

文献[3]等认为信息分配应遵循以下原则:在子滤波器*i*中,如果子系统*i*的精度越差,其分配系数越大;如果子系统*i*的精度越高,其分配系数越小 显然,由第2.2.2节的分析可知,这种信息分配方法可以改善精度较低的子系统滤波精度,从而提高了精度较低的子系统的故障备份能力 但是,若考虑到子系统发生传感器故障,根据这类信息分配方法将面临一个可能的严重问题:如果精度较高的子系统发生故障,那么其他精度较低的无故障子系统将受到更严重的污染,这对于滤波器的重构是非常不利的 本文后面的分析将证明这一结论,并针对子系统传感器故障条件下的信息分配问题,提出了一种容错信息分配方法

3 故障条件下信息分配与子系统的关系

对于第*i*个子滤波器,由式(6)可知,重置反馈后的第*k*步状态估计为

$$\begin{aligned} \hat{X}_i(k) = \\ P_i(k)P_i^{-1}(k, k-1)\hat{X}_i(k, k-1) + \\ P_i(k)H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k) = \\ P_i(k)P_i^{-1}(k, k-1)\hat{X}_g(k, k-1) + \\ P_i(k)H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k). \end{aligned} \quad (13)$$

记

$$C_x = P_i(k)P_i^{-1}(k, k-1),$$

$$C_z = P_i(k)H_i^T(k)R_i^{-1}(k),$$

则

$$\hat{X}_i(k) = C_x \hat{X}_g(k, k-1) + C_z Z_i(k). \quad (14)$$

显然, C_x 反映了子滤波器 i 的状态估计对系统融合状态一步预测的利用权重, 即子滤波器受全局反馈重置的影响程度; C_z 反映了子滤波器对其自身量测的利用权重

将式(10) 代入(5), 再代入 C_x 和 C_z 可得

$$\begin{aligned} C_x = & [\beta_i P_g^{-1}(k/k-1) + \\ & H_i^T(k) R_i^{-1}(k) H_i(k)]^{-1} \beta_i P_g^{-1}(k, k-1) = \\ & [P_g^{-1}(k/k-1) + \\ & \beta_i H_i^T(k) R_i^{-1}(k) H_i(k)]^{-1} P_g^{-1}(k, k-1), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C_z = & [\beta_i P_g^{-1}(k/k-1) + \\ & H_i^T(k) R_i^{-1}(k) H_i(k)]^{-1} H_i^T(k) R_i^{-1}(k). \end{aligned} \quad (16)$$

由式(15) 和(16), 容易得出以下结论:

如果子滤波器 i 的第 $k-1$ 步信息分配系数 β_i 越大, C_x 也越大, 即子滤波器对系统的融合状态估计的利用程度越高, 而 C_z 却越小, 此时子滤波器对自身量测的利用程度越低. 反之, β_i 越小, C_x 越小, C_z 越大, 即子滤波器对系统融合状态估计的利用程度越低, 对自身量测的利用程度越高. 因此, 信息分配系数反映了各子滤波器对系统信息以及它们自身量测信息的利用程度

假设子系统 i 正常时的量测方差为 R_i , 当该子系统在第 k 步估计时发生了传感器故障, 则可以认为其等价于一个实际的量测方差为 R_r 的正常系统. 因此, R_r 和 R_i 满足下面关系式: $R_r \gg R_i$, 也即 $R_r^{-1} \ll R_i^{-1}$, 不妨设 $R_i^{-1} = \Delta r + R_r^{-1}$. 显然, Δr 反映了故障量的大小

在子系统故障条件下, 关于信息分配系数与各子系统的关系, 有以下结论

性质 1 量测精度越高的子滤波器发生故障时, 对全局的污染强度将越大; 反之, 量测精度越低的子滤波器发生故障时, 对全局的污染强度将越小

证明 由式(10) 和(6) 可得, 子滤波器 i 在全局融合中的作用为

$$\begin{aligned} P_i^{-1}(k) X_i(k) = & \\ P_i^{-1}(k, k-1) X_i(k, k-1) + & \\ H_i^T(k) R_i^{-1}(k) Z_i(k) = & \\ \beta_i P_g^{-1}(k, k-1) X(k, k-1) + & \\ H_i^T(k) R_i^{-1}(k) Z_i(k). & \end{aligned} \quad (17)$$

显然, 子滤波器 i 对全局融合的作用主要体现在量

测修正项 $H_i^T(k) R_i^{-1}(k) Z_i(k)$. 如果该子滤波器的量测质量越好, 即 R_i 越小, 那么对全局融合的影响越大, 反之则小. 当系统发生传感器故障时, 实际量测方差 $R_r \gg R_i$, $R_r^{-1} \ll R_i^{-1}$, 将 $R_i^{-1} = \Delta r + R_r^{-1}$ 代入 $H_i^T(k) R_i^{-1}(k) Z_i(k)$, 可得

$$\begin{aligned} H_i^T(k) R_i^{-1}(k) Z_i(k) = & \\ H_i^T(k) R_r^{-1}(k) Z_i(k) + H_i^T(k) \Delta r Z_i(k) & \\ H_i^T(k) \Delta r Z_i(k). & \end{aligned} \quad (18)$$

此时, 系统的故障分量为 $H_i^T(k) \Delta r Z_i(k)$. 显然, 如果 R_i^{-1} 越大, 则 Δr 也越大, 从而 $H_i^T(k) \Delta r Z_i(k)$ 也越大. 因此, 当子滤波器 i 发生故障时, 该子滤波器对全局的污染程度也越大; 反之, 则小

性质 2 如果无故障子系统的信息分配系数越大, 受故障子系统的污染强度将越大; 反之, 如果无故障子系统的信息分配系数越小, 受故障子系统的污染强度将越小

证明 故障滤波器对其他无故障子滤波器的污染主要通过全局反馈重置实现. 式(12) 已说明, 当子滤波器 i 发生传感器故障时会污染全局估计且不受信息分配系数的影响. 式(15) 和(16) 说明, 无故障子系统信息分配系数越大, 受全局反馈重置的影响越大, 它利用已受污染的融合估计越多, 因此故障子系统通过全局反馈重置对它的污染强度也越大; 反之, 如果无故障子系统的信息分配系数越小, 则受污染强度越小

根据性质 2, 容易得出以下两个推论:

推论 1 如果故障子系统的信息分配系数越大, 那么该子系统对其他无故障子系统的污染程度越小; 反之, 如果故障子系统的信息分配系数越小, 那么它对其他无故障子系统的污染程度越大

推论 2 如果故障子系统的信息分配系数越大, 其受其他无故障子系统的修正强度将越大; 反之, 如果无故障子系统的信息分配系数越小, 其受其他无故障子系统的修正强度将越小

由以上性质及推论, 不难得出以下结论:

性质 3 如果子系统 i 的精度越高, 且信息分配系数越小, 那么当该子滤波器发生故障时, 对其他无故障子系统的污染程度将越大

推论 1 和性质 3 说明, 根据文献[7] 等的信息分配方法, 虽然可以改善精度较差的子系统的滤波精度, 但从系统的故障恢复和重构能力看, 如果高精度的子系统 i 发生故障时, 它对其他无故障子系统的污染也是最强的, 因此容错性不高

4 容错信息分配方法

综上所述, 在反馈重置情况下, 信息分配应遵循以下原则:

分配给发生故障概率较高的子系统以较大的信息分配系数, 而分配给发生故障概率较低的无故障子系统以较小的信息分配系数

这样, 可以减少故障的影响程度, 加强无故障子系统正确观测的修正作用, 从而提高无故障子系统的鲁棒性。为此, 本文提出如下信息分配方法:

设联邦滤波器由 n 个子系统构成。不失一般性, 假设各子系统发生故障的可能性具有以下关系:

$$F_1 > F_2 > \dots > F_i > \dots > F_{n-1} > F_n,$$

其中 F_i 表示系统发生故障的概率。则各子系统的信息分配系数应满足下面的关系:

$$\beta_1 > \beta_2 > \dots > \beta_i > \dots > \beta_{n-1} > \beta_n, \quad (19)$$

且有 $\beta_i = 1 - \beta_n$, β_n 为主滤波器的信息分配系数。可直接利用 F_i 进行信息分配, 即

$$\beta_i = F_i(1 - \beta_n) / \sum_{i=1}^n F_i \quad (20)$$

显然, β_i 满足信息守恒原理及式(19)。

5 算例仿真

简单起见, 考虑如下具有两个位移测量传感器的线性系统模型:

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + w(k-1),$$

$$Z_i(k) = H_i(k)X_i(k) + v_i(k), \quad i = 1, 2$$

其中: $X(k) = [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k)]^T$ 为三维向量, 分量分别为位移、速度和加速度; $Z_i(k)$ 为位移量测, 且设状态转移阵为 $\Phi(k, k-1) = [1, T/2, T^2/2; 0, 1, T; 0, 0, 1]$ 。不妨设

$$T = 0.05, \quad E[w] = [0, 0, 0]^T,$$

$$E[v_i] = 0, \quad i = 1, 2,$$

$$E[ww^T] = \text{diag}\{0, 0, 16\},$$

$$R_1 = E[v_1v_1^T] = 2.5\delta_j,$$

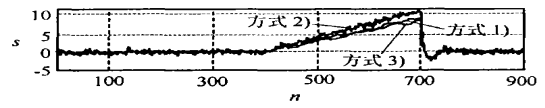
$$R_2 = E[v_2v_2^T] = 3\delta_j,$$

$$H_1 = H_2 = [2 \quad 0 \quad 0]$$

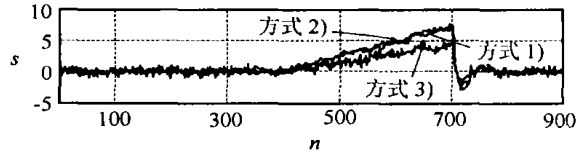
现设系统滤波时间为 900 步, 假设子系统 1 在运行 400 步后发生软故障, 运行 300 步后恢复正常, 且设软故障部分为 $\Delta Z(t) = 0.1(t - 400)$ 。设系统的主滤波器仅起融合作用, 即 $\beta_n = 0$ 。现以下面 3 种情况进行仿真:

- 1) 信息平均分配^[1], 即 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$;
- 2) 故障传感器的信息分配系数最小, 即分配系数满足 $\beta_1 < \beta_2$, 不妨设 $\beta_1 = 0.1, \beta_2 = 0.9$;
- 3) 故障传感器的信息分配系数最大, 即分配系数满足 $\beta_1 > \beta_2$, 不妨设 $\beta_1 = 0.9, \beta_2 = 0.1$ 。

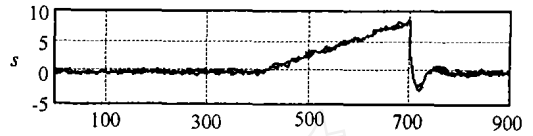
仿真结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在子滤波器 1 故障时, 根据本文思想, 即信息分配方式 3), 无故障子滤波器 2 受故障子滤波器 1 的影响最小, 因为该方式加强了无故障传感器量测的修正作



(a) 子滤波器 1 的估计位移



(b) 子滤波器 2 的估计位移



(c) 三种方式下的融合估计位移

图 1 故障时 3 种方式下的位移估计比较

用而减少了已受故障污染的融合全局结果的反馈影响, 显然这必然有利于故障隔离后的联邦滤波器的快速重构; 按信息分配方式 1), 即平均分配, 则影响次之; 而按方式 2), 子滤波器 2 受故障的影响最大, 子滤波器 1 的故障程度较之平均方法被进一步扩大, 因为这种方式加强了故障量测的修正作用。同时, 图 1 还说明, 3 种不同的信息分配方式并不能改变全局的融合精度和受故障污染程度。

6 结 语

减少故障子系统对其他无故障子系统的污染程度, 提高无故障子系统的鲁棒性, 是提高联邦滤波器的容错性能的一个重要途径。本文具体分析了在子系统故障条件下, 具有不同信息分配系数的子滤波器对故障的抗污染能力问题。在此基础上, 提出了一种根据子系统发生故障的概率进行信息分配的容错信息分配方法。理论分析和仿真结果说明, 在实际中根据各子系统故障的概率进行信息分配系数调整, 必然有利于改善联邦滤波器的容错性。

参考文献 (References)

[1] Carlson N A. Federated Square Filter for Decentralized Parallel Processes [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electric*, 1990, 26(3): 517-524

[2] Gao Y, Krakivsky E J, McLellan J F. Experience with the Application of Federated Filter Design to Kinematic GPS Positioning [A]. *Position Location and Navigation Symposium, IEEE PLANS '92* [C]. Monterey, 1992, (3): 314-320

(下转第 360 页)

扰动是有界的,满足匹配条件.设计了非线性无记忆控制器和改进的带有 σ -修正项自适应律,保证了闭环组合系统的解一致有界,且系统状态是一致渐近稳定的.仿真结果表明,该设计方案是可行而有效的,它可以解决实际系统中存在的含有不确定性和外部扰动的不确定时滞组合系统的分散控制问题

参考文献(References)

- [1] Kolmanovskii V B, Nosov V R. *Stability of Functional Differential Equations* [M]. New York: Academic, 1986
- [2] Manu M Z, Mohammad J. *Time-delay Systems Analysis, Optimization and Application* [M]. New York: AT&T Bell Laboratories, 1987.
- [3] Wu H. Decentralized Adaptive Robust Control for a

Class of Large Scale Systems with Uncertainties in the Interconnections[J]. *Int J of Control*, 2003, 76(3): 253-265

- [4] Wu H. Decentralized Adaptive Robust Control for a Class of Large-scale Systems Including Delayed State Perturbations in the Interconnections[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1745-1751.
- [5] Gong Zhining, Wen Changyan, Dinesh P Mital. Decentralized Robust Controller Design for a Class of Inter-connected Uncertain Systems: With Unknown Bound of Uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(6): 850-854
- [6] Ioannou P A, Kokotovic P V. Robust Redesign of Adaptive Control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(3): 202-211.

(上接第346页)

- [3] 秦永元,张洪钺,汪叔华. *卡尔曼滤波与组合导航原理* [M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998
(Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. *Kalman Filter and Integrated Navigation Theory* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998)
- [4] 房建成,申功勋,万德钧. 车载GPS/DR/地图匹配组合导航系统的自适应联合卡尔曼滤波模型[J]. *控制与决策*, 1999, 14(5): 448-452
(Fang J C, Shen G X, Wan D J. An Adaptive Federated Kalman Filter Model for GPS/DR/Map Matching Integrated Navigation System in Land Vehicle[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(5): 448-452)
- [5] 刘淮,陈哲. NS/GPS/TERCOM 组合制导系统中的信息融合方法研究[J]. *宇航学报*, 2001, 22(3): 56-61

(Liu Z, Chen Z. Research on Information Fusion Method in NS/GPS/TERCOM System [J]. *J of Astronautics*, 2001, 22(3): 26-32)

- [6] 刘瑞华,刘建业. 联邦滤波信息分配新方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(2): 28-32
(Liu R H, Liu J Y. A New Method of Information Sharing in Federated Filter [J]. *J of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(2): 28-32)
- [7] 顾启泰,王颂. 联邦滤波器的最优性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(11): 1460-1463
(Gu Q T, Wang S. Optimized Federated Filter [J]. *J of Tsinghua University (Sci and Tech)*, 2003, 43(11): 1460-1463)

(上接第355页)

参考文献(References)

- [1] Cao Y Y, Frank P M. Stability Analysis and Synthesis of Nonlinear Time-delay Systems via Linear Takagi-Sugeno Fuzzy Models [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 124(2): 213-229
- [2] Lee K R, Kim J H, Jeung E T, et al. Output Feedback Robust H_∞ Control of Uncertain Fuzzy Dynamic Systems with Time-varying Delay [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 657-664
- [3] Zhang Y, Heng P A. Stability of Fuzzy Control Systems with Bounded Uncertain Delays [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(1): 92-96
- [4] Li C G, Wang H J, Liao X F. Delay-dependent Robust Stability of Uncertain Fuzzy Systems with Time-varying Delays [J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2004, 151(4): 417-421.
- [5] Guan X P, Chen C L. Delay-dependent Guaranteed Cost

Control for T-S Fuzzy Systems with Time Delays [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(2): 236-249.

- [6] Xie L, De Souza C. Robust H_∞ Control for Linear Systems with Norm-bounded Time Varying Uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(8): 1188-1191.
- [7] Yue D, Han Q L, Peng C. State Feedback Controller Design of Networked Control Systems [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 2004, 51(11): 640-644
- [8] Wu M, He Y, She J H, et al. New Delay-dependent Stability Criteria and Stabilizing Method for Neutral Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(12): 2266-2271.
- [9] Boyd S, Ghaoui E, Feron E, et al. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory* [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1994