

文章编号: 1001-0920(2008)03-0325-04

基于异步动态系统的网络控制系统故障检测

吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟, 胡维礼

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 研究一类具有时延和数据包丢失的网络控制系统故障检测问题. 当数据包丢失率一定时, 针对系统是否存在数据包丢失的两种情况, 分别设计了状态观测器, 并将整个观测器系统等效为具有两个事件的异步动态系统, 给出了系统指数稳定的矩阵不等式条件和故障检测的判断规则. 最后通过仿真示例验证了所提出方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 异步动态系统; 故障检测; 指数稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fault detection for networked control systems based on asynchronous dynamical systems

LV Ming, WU Xiaobei, CHEN Qingwei, HU Weili

(Institute of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: LV Ming, E-mail: lumtz@163.com)

Abstract: The problem of fault detection is studied for a class of networked control systems with time delays and data packet dropout. When data packet rate is fixed, the state observer is designed respectively for the system with or without data packet dropout. And the whole observer system is equal to the asynchronous dynamical system with two events. The matrix inequality conditions for the exponential stability and the decision rule for fault detection of the system are given. Finally, an illustrative example shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: Networked control system; Asynchronous dynamical system; Fault detection; Exponential stability

1 引言

随着控制系统的规模日益扩大, 系统中各个单元不再局限于同一物理空间. 网络控制系统就是这样一类控制系统. 它利用网络作为信息传输的媒介, 形成一个闭环回路, 极大地增强了控制的灵活性. 当然, 网络的传输不一定总是可靠的. 在带宽受限、各节点互相竞争等情况下, 可能发生某些通道的数据包丢失现象.

文献[1]研究存在时延和数据包丢失的控制器设计问题, 将系统建模成随机时延切换模型, 利用 Lyapunov 方法给出了使系统均方渐近稳定的条件. 文献[2]研究存在数据包丢失和多包传输的网络控制系统稳定性问题, 建立了多包传输网络控制系统模型, 并给出了判定系统指数稳定性的充分条件. 上述文献考虑的都是系统未发生故障的建模和控制问题. 文献[3, 4]考虑了网络控制系统发生故障的检测问题, 但假定系统在传输过程中不存在数据包丢失.

本文在上述文献的基础上, 研究具有数据包丢

失且可能发生执行器或传感器故障的情况下, 网络控制系统的故障检测问题.

2 问题描述

网络控制系统的被控对象模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bv(t) + f(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 为状态向量, $v(t)$ 为输入向量, $y(t)$ 为输出向量.

传感器故障一般可转化为执行器故障的形式. 为了研究方便, 本文统一采用故障向量 $f(t)$ 来表示.

本文的研究目的是: 在一定的数据包丢失率下, 对系统设计故障观测器, 并比较观测器和原系统状态, 得到观测器状态估计误差. 在确保误差系统稳定性的基础上, 利用故障检测残差对系统故障进行检测. 整个系统结构如图 1 所示.

对系统作如下假设:

1) 传感器、控制器为时间驱动, 执行器为事件

收稿日期: 2006-10-18; 修回日期: 2007-01-22.

作者简介: 吕明(1980—), 女, 江苏泰州人, 博士生, 从事网络控制系统、故障检测的研究; 吴晓蓓(1958—), 女, 成都人, 教授, 博士生导师, 从事基于网络的测控技术、智能控制等研究.

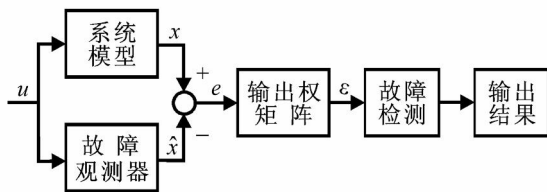


图1 故障检测系统结构

驱动,采样周期为 h ;

2) 控制时延 $\tau^c \in [0, h]$, 输出时延 τ^s 相对于 h 可忽略不计;

3) 采用单包传输;

4) 传感器与控制器之间存在数据包丢失.

网络介入后,按照采样周期对被控对象进行离散化,可得

$$\begin{cases} x_{k+1} = Lx_k + M_0(\tau^c/k)u_k + M_1(\tau^c/k)u_{k-1} + f_k, \\ y_k = Cx_k. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$L = e^{Ah}, M_0(\tau^c/k) = \int_0^{h-\tau^c/k} e^{As} ds B,$$

$$M_1(\tau^c/k) = \int_{h-\tau^c/k}^h e^{As} ds B.$$

由矩阵理论可知,如果矩阵 A 含有 n 个互异特征根,则可化成对角阵,得到

$$A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^{-1}.$$

其中: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为 A 的特征值, $\Gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ 为对应的特征向量组成的矩阵.

设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 均不为 0, 则有^[5]

$$M_0(\tau^c/k) = M_0 + DFE, M_1(\tau^c/k) = M_1 - DFE. \quad (3)$$

其中

$$M_0 = \text{diag}(-1/\lambda_1, \dots, -1/\lambda_n)^{-1} B, \quad (4)$$

$$M_1 = \text{diag}(\frac{1}{\lambda_1} e^{1h}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{nh})^{-1} B, \quad (5)$$

$$D = \text{diag}(\frac{1}{\lambda_1} e^{1^1}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{n^n}), \quad (6)$$

$$E = \Gamma^{-1} B, \quad (7)$$

$$F = F(k) = \text{diag}(e^{1(h-\tau^c/k-1)}, \dots, e^{n(h-\tau^c/k-n)}). \quad (8)$$

选择 λ_i 使得 $\lambda_i(h-\tau^c/k-i) \neq 0$, 因此 $F^T F^{-1}$ 系统方程可化为

$$\begin{cases} x_{k+1} = Lx_k + (M_0 + DFE)u_k + \\ (M_1 - DFE)u_{k-1} + f_k, \\ y_k = Cx_k. \end{cases} \quad (9)$$

考虑传感器与控制器之间数据包丢失的情况,用 k 表示第 k 个周期传感器到控制器的数据是否传输成功,即

$$k = \begin{cases} 1, & \text{传输成功;} \\ 0, & \text{传输失败.} \end{cases} \quad (10)$$

且数据包的丢失率一定,即

$$\Pr(k = 0) = \rho, \quad 0 < \rho < 1.$$

假定原系统在无数据包丢失的情况下,控制规则 $u_k = Kz_k$ 能使系统稳定.系统可等价于具有 $k = 1$ 和 $k = 0$ 两个事件的异步动态系统.下面分别进行讨论.

3 系统分析与设计

事件 1 $k = 1$, 传输成功.

构造观测器

$$\hat{x}_{k+1} = L\hat{x}_k + M_0 u_k + M_1 u_{k-1} + H(y_k - \hat{y}_k). \quad (11)$$

定义观测器状态估计误差向量 $e_k := x_k - \hat{x}_k$, 则系统无故障时 ($f_k = 0$) 的观测器误差状态方程为

$$e_{k+1} = (L - HC)e_k + DFEKz_k - DFEKz_{k-1},$$

其中控制器接收端能利用的数据为 $z_k = y_k = Cx_k$.

则有

$$e_{k+1} = (L - HC)e_k + DFEKCx_k - DFEKCx_{k-1}. \quad (12)$$

事件 2 $k = 0$, 传输失败.

y_k 被丢失, 状态估计变为^[1]

$$\hat{x}_{k+1} = L\hat{x}_k + M_0 u_k + M_1 u_{k-1}.$$

则系统无故障时的观测器误差状态方程为

$$e_{k+1} = Le_k + DFEKz_k - DFEKz_{k-1}.$$

此时,用控制器接收缓存中最近一个周期的数据代替本周期未能成功传输的数据,即 $z_k = z_{k-1}$. 则有

$$e_{k+1} = Le_k. \quad (13)$$

综合事件 1 的式(12)和事件 2 的式(13),定义增广向量 $w_k = [e_k^T \ x_k^T \ x_{k-1}^T]^T$, 可得

$$w_{k+1} = \Lambda w_k, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

其中

$$\Lambda = \begin{bmatrix} L - HC & DFEKC & -DFEKC \\ 0 & L + M_0 KC + M_1 KC & -DFEKC \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L + M_0 KC + M_1 KC & -DFEKC \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}.$$

且事件 1 和事件 2 的发生率分别为 $1 - \rho$ 和 ρ . 显然,式(14)为具有两个事件的异步动态系统.

4 稳定性分析

当系统正常时,整个观测器系统应保持稳定.为此下面研究系统的稳定性问题.

引理 1^[6] 设 $M, D, F(k), E$ 为适维实矩阵, 其中 M 为对称阵, 且 $F^T(k)F(k) = I$. 则有

$$M + DF(k)E + [DF(k)E]^T < 0,$$

当且仅当存在常数 $\alpha > 0$, 使得

$$M + DD^T + \alpha^{-1}E^TE < 0.$$

引理 2^[7] 对于异步动态系统 $x_{k+1} = f_i(x_k)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 设离散事件 $1, 2, \dots, N$ 的发生率为

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N, 0 \leq \lambda_i \leq 1, \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1. \text{ 如果存在}$$

Lyapunov 函数 $V(x_k)$, 以及对应于离散事件 $1, 2, \dots, N$ 的标量 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \beta_i > 0$, 满足 $\beta_1 \beta_2 \dots \beta_N > 1$, 以及

$$V(x_{k+1}) - V(x_k) \leq (\beta_i - 1)V(x_k).$$

则该系统指数稳定.

注 1 与一般 Lyapunov 函数意义下的指数稳定性不同, 异步动态系统的指数稳定性是整个系统平均意义下的指数稳定性, 并不要求每个子系统都是稳定的.

定理 1 对于网络控制系统(14), 假定数据包丢失率为 $(0 < \alpha < 1)$, 如果存在对称正定矩阵 P 及标量 $\beta_1 > 0, \beta_2 > 0, \beta_3 > 0$, 使得

$$\beta_1 \beta_2 \beta_3 > 1, \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T P - Q_i & 0 & \bar{E}^T \\ * & -P & P\bar{D} & 0 \\ * & * & -\alpha^{-1}I & 0 \\ * & * & * & -L \end{bmatrix} < 0. \tag{16}$$

其中

$$= \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L + M_0 KC & M_1 KC \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix},$$

$$Q_i = \tilde{H}_i^T P, i = 1, 2,$$

$$\tilde{H}_1 = \begin{bmatrix} HC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{H}_2 = 0.$$

则该系统是指数稳定的.

证明 由于系统(14)含有两个事件, 根据引理 2 的第一个不等式, 令 $N = 2$, 并将事件 1 和事件 2 的发生率 $\lambda_1 = 1 - \lambda_2$ 和 $\lambda_2 = \lambda_2$ 分别代入, 可得式(15).

下面证明式(16), 令

$$\beta_1 = \begin{bmatrix} L - HC & 0 & 0 \\ 0 & L + M_0 KC & M_1 KC \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} = -\tilde{H}_1,$$

$$\beta_2 = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L + M_0 KC & M_1 KC \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} = -\tilde{H}_2,$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D \\ D \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{E} = [0 \quad EKC \quad -EKC].$$

则式(14)可化为

$$w_{k+1} = (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E})w_k, i = 1, 2. \tag{17}$$

取 Lyapunov 函数 $V(w_k) = w_k^T P w_k$, 当

$$(\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E})^T P (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E}) - \beta_i^2 P < 0 \tag{18}$$

时, 有

$$V(w_{k+1}) - V(w_k) \leq (\beta_i^2 - 1)V(w_k).$$

利用 Schur 补, 式(18)等价于

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T + (\bar{D}\bar{F}\bar{E})^T \\ \beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E} & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

上式中同时含有 P 和 P^{-1} , 对其进行线性化处理, 两边分别左乘和右乘 $\text{diag}(I, P)$, 可得

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T P + (\bar{D}\bar{F}\bar{E})^T P \\ P (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E}) & -P \end{bmatrix} < 0.$$

上式即为

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T P \\ P (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E}) & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ PD \end{bmatrix} F [E \quad 0] + \left(\begin{bmatrix} 0 \\ PD \end{bmatrix} F [E \quad 0] \right)^T < 0.$$

由引理 1, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T P \\ P (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E}) & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ PD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ PD \end{bmatrix}^T + \alpha^{-1} [E \quad 0] J^T [E \quad 0] < 0.$$

即

$$\begin{bmatrix} -\beta_i^2 P & P^T P \\ P (\beta_i + \bar{D}\bar{F}\bar{E}) & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \bar{E}^T \\ PD & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \bar{E}^T \\ PD & 0 \end{bmatrix}^T < 0.$$

再次利用 Schur 补, 并令 $Q_i = \tilde{H}_i^T P$, 可化为线性矩阵不等式, 即得式(16).

注 2 由 $Q_i = \tilde{H}_i^T P$ 可将非线性矩阵不等式线性化, 从而能直接利用 Matlab 的 LMI 工具箱进行求解. 在实际应用中, 常用试凑的方法选取式(15)中的标量 β_1 和 β_2 , 这样比较简便. 当满足定理 1 条件时, 系统的观测器增益矩阵为 $H = \bar{I}P^{-1}Q_i^T \bar{I}^T C^+$, 其中 $\bar{I} = [I \quad 0 \quad 0]$. 如果 C 可逆, 则 $H = \bar{I}P^{-1}Q_i^T \bar{I}^T C^{-1}$.

在观测器系统的稳定性得到保证之后, 可令 $k = Z w_k$, 其中 Z 为权矩阵, 作为故障检测残差, 并按下述规则判断系统是否发生故障:

$$\begin{cases} k \leq \bar{\gamma}, & \text{系统正常;} \\ k > \bar{\gamma}, & \text{系统故障.} \end{cases} \tag{19}$$

其中: $k = \sqrt{k^T k}$ 是向量的欧式范数, $\bar{\gamma}$ 为选定的故障检测阈值.

5 仿真示例

考虑被控对象模型

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -0.1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t),$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t).$$

设采样周期 $h = 1$ s, 化为离散域模型

$$x_{k+1} = Lx_k + (M_0 + DFE)u_k + (M_1 - DFE)u_{k-1} + f_k,$$

$$y_k = Cx_k.$$

其中

$$L = \begin{bmatrix} 1.1052 & 0 \\ 0 & 0.8187 \end{bmatrix}, M_0 = \begin{bmatrix} -1 \\ 5 \end{bmatrix},$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -1.1052 \\ 4.0937 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 11.0517 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} -0.1 \\ 1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} e^{-0.1} & 0 \\ 0 & e^{-0.2(1-\frac{1}{k})} \end{bmatrix}.$$

假定原系统的控制律为 $K = [-0.1259 -0.2718]$, 数据包丢失率 $\alpha = 0.1$, 则选择满足式(15)的 $\beta_1 = 1.05, \beta_2 = 0.85$, 并取 $\beta_3 = 0.6$. 利用 LMI 工具箱的 Feasp 求解器, 计算可得

$$P = \begin{bmatrix} 0.4201 & 0.1069 & -0.4114 \\ 0.1069 & 0.1398 & -0.1076 \\ -0.4114 & -0.1076 & 0.4266 \\ -0.1045 & -0.0917 & 0.1132 \\ 0.0889 & -0.0020 & -0.1031 \\ -0.0248 & -0.0117 & 0.0195 \\ -0.1045 & 0.0889 & -0.0248 \\ -0.0917 & -0.0020 & -0.0117 \\ 0.1132 & -0.1031 & 0.0195 \\ 0.1420 & 0.0020 & -0.0026 \\ 0.0020 & 0.2540 & -0.0115 \\ -0.0026 & -0.0115 & 0.1295 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.0832 & -0.0052 \\ -0.0052 & 0.0245 \end{bmatrix}.$$

令权重矩阵 $Z = [I \ 0 \ 0]$, 并假定系统在 $t = 4$ s 时发生阶跃型突变故障. 本文未考虑干扰等因素,

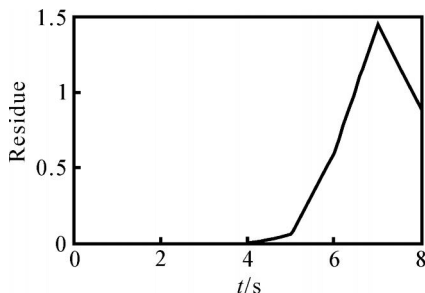


图 2 未发生数据包丢失时的残差

可选择故障检测阈值 $\bar{\gamma} = 0.05$. 通过仿真, 未发生和已发生数据包丢失时的故障检测结果分别如图 2 和图 3 所示. 残差的跳变说明了故障的发生, 系统可以据此发出故障报警信号.

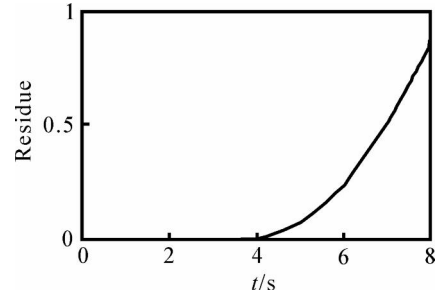


图 3 发生数据包丢失时的残差

6 结 语

数据包丢失是网络传输中难以避免的现象. 将这种现象作为已知条件, 考虑在其可能发生时的故障检测问题, 是一个新的研究课题. 本文将数据包未发生丢失和已发生丢失归结为两个独立的事件, 将观测器系统建模为异步动态系统, 利用后者的相关理论结果, 得出了系统指数稳定的充分条件. 通过给出的故障检测判断规则, 能对该类网络控制系统有效地进行故障检测.

数据包丢失虽然是网络传输中的一种普遍现象, 但当丢失的数据包超出容许的范围, 即丢失率过大时, 即使系统是无节点故障, 也会给系统的稳定性带来一定的影响. 因此, 对于数据包丢失本身的容错控制问题也是一个值得研究的方向.

参考文献(References)

- [1] 张小美, 郑毓番, 许建强, 等. 存在时延和数据丢失的网络控制系统的控制器设计[J]. 信息与控制, 2006, 35(3): 339-345.
(Zhang Xiao-mei, Zheng Yu-fan, Xu Jian-qiang, et al. Controller design of a networked control system with delay and data dropout [J]. Information and Control, 2006, 35(3): 339-345.)
- [2] 孙海燕, 侯朝桢. 具有数据包丢失及多包传输的网络控制系统稳定性[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 511-515.
(Sun Hai-yan, Hou Chao-zhen. Stability of networked control systems with data packet dropout and multiple-packet transmission[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 511-515.)
- [3] 谢林柏, 纪志成, 方华京. 具有异步时延的网络化控制系统故障检测[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11): 2717-2720, 2740.
(Xie Lin-bo, Ji Zhi-cheng, Fang Hua-jing. Fault detection for networked control systems with asynchronous measurement delays [J]. J of System Simulation, 2005, 17(11): 2717-2720, 2740.)

(下转第 332 页)

$$F_1 = [-86.8669 \quad -38.6877],$$

$$F_2 = [-217.3743 \quad -96.8970].$$

在初始状态 $x_r(0) = [-2 \quad 0]^T$ 和 $x(0) = [1 \quad -1]^T$ 时, x_{r1} , x_1 和 x_{r2} , x_2 的响应曲线分别如图 1 和图 2 所示.

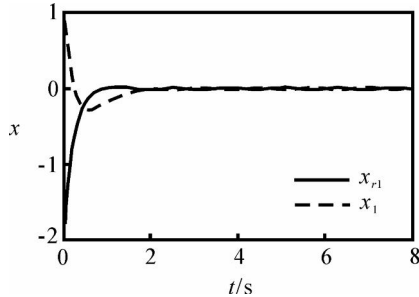


图 1 x_{r1} 和 x_1 的响应曲线

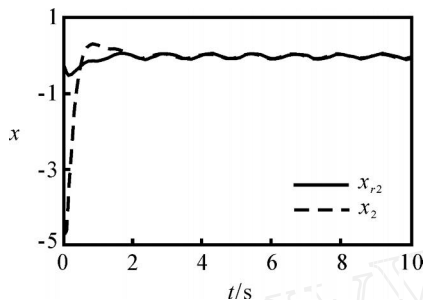


图 2 x_{r2} 和 x_2 的响应曲线

6 结 语

本文给出的 H 跟踪控制性能指标, 充分考虑到受控输出变量 $z(t)$ 中 $D_i = 0$ 时的情况, 并给出了 H 跟踪控制器系数存在的充分 LMI 条件. 整个计算过程简单、直观. 通过仿真实例可以看出, 状态变量与参考向量吻合的效果非常好, 这说明在本文控制算法下, H 跟踪误差比较小.

参考文献(References)

- [1] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of system and its application to modeling and control[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [2] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135-156.
- [3] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LMF-based designs [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1998, 6(2): 250-265.
- [4] Kim E, Lee H. New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 8(5): 523-533.
- [5] Liu X D, Zhang Q L. New approach H controller designs based on fuzzy observer for T-S fuzzy systems via LMI[J]. Automatica, 2003, 39(5): 1571-1582.
- [6] Chen B S, Tseng C S, Uang H J. Mixed H_2/H fuzzy output feedback control design for nonlinear dynamic systems: An LMI approach[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(3): 249-265.
- [7] Chen B S, Tseng C S, Uang H J. Robustness design of nonlinear dynamic systems via fuzzy linear control[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999, 7(5): 571-585.
- [8] Tseng C S, Chen B S, Uang H J. Fuzzy tracking control desing for nonlinear dynamic systems via T-S fuzzy model[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2001, 9(3): 381-392.
- [9] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J, et al. LMI control toolbox[M]. Natick: The Math Works Inc, 1995.

(上接第 328 页)

- [4] Zheng Ying, Fang Hua-jing, Wang Hua, et al. Fault detection approach for networked control system based on a memoryless reduced-order observer [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(4): 559-566.
- [5] 樊卫华. 网络控制系统的建模与控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
(Fan Wei-hua. The modeling and control of networked control systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.)

- [6] Li X, De Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A LMI approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42: 1141-1144.
- [7] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and application [J]. IEE Proc on Control Theory Application, 2003, 150(5): 546-550.