

基于观测器的非线性网络控制系统容错控制

王燕锋, 井元伟, 张嗣瀛

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 研究了一类基于观测器的非线性连续网络控制系统容错控制器设计问题. 针对传感器采用时间驱动方式, 控制器和执行器均采用事件驱动方式的网络控制系统, 设计了观测器, 建立了基于状态观测器的增广闭环系统模型. 利用线性矩阵不等式和自由权矩阵的方法, 推导出闭环系统渐近稳定的充分条件, 给出了观测器和容错控制器协同设计的方法. 实例仿真证明了所用方法的有效性.

关键词: 容错控制; 非线性网络控制系统; 观测器; 传感器故障; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault-tolerant control for nonlinear networked control systems based on observer

WANG Yan-feng, JING Yuan-wei, ZHANG Si-ying

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: We investigate the fault-tolerant controller design for a class of nonlinear continuous networked control systems based on the observer. For the networked control systems with clock-driven sensor and event-driven controller and actuator, the corresponding observer is designed and the augmented closed-loop system model is built. The sufficient condition of the stability for the closed-loop system is derived by using linear matrix inequalities and free-weighting matrices. The method of coordinate design of the observer and the fault-tolerant controller is also presented. Finally, a simulation example validates the proposed method.

Key words: fault-tolerant control; nonlinear networked control system; observer; sensor failure; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

网络控制系统(networked control systems, NCS)是一种分布式的控制系统, 它以网络作为信号传输的载体, 通过实时网络构成闭环反馈控制系统^[1]. 在控制系统的规模日益增大及控制算法越来越复杂的情况下, 人们对控制系统的可靠性的要求也越来越高, 而提高系统可靠性及安全性的方法之一就是增强系统的容错能力, 因此容错控制得到了广泛的重视. 在NCS具有资源共享, 易维护等优点的同时, 不可避免地存在着网络传输时延、时序错乱等问题^[2-3]. 这些问题直接给控制系统的可靠性及安全性设计带来了新的挑战, 因此研究NCS的容错控制具有重要的意义. 文献[4]对于一类具有时变时延的线性NCS, 利用Lyapunov时延依赖稳定理论, 设计了鲁棒容错控制器. 文献[5]把NCS建模为含不确定性的离散控制系统, 给出了基于观测器的容错控制器. 文献[6]将NCS建模为多输入多输出的离散时间时滞系统, 根据故障估计信息, 设计了基于滑模理论的主动容错控制器. 文献[7]针对具有随机故障的NCS,

分析了系统的 H_2/H_∞ 性能, 并给出了基于静态输出反馈控制器的容错方法. 然而上述文献关于NCS容错控制的研究, 都是以线性系统作为被控对象. 在工程实际中, 被控对象大多是非线性的. 但关于非线性NCS的容错控制问题的研究还不多见.

本文针对一类非线性连续被控制对象, 在网络环境和传感器故障情况下, 研究NCS的容错控制问题. 利用Lyapunov稳定理论, 基于线性矩阵不等式和自由权矩阵的方法, 给出了使闭环系统渐近稳定的充分条件, 设计了基于观测器的容错控制器. 用 $y(t-\tau(t))$ 对 $x(t)$ 进行估计. 所设计的容错控制器不但可以补偿网络时延, 并且可以应用到当被控对象状态不可测的系统中. 最后给出的实例仿真验证了方法的有效性.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑一类非线性被控对象:

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

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是系统状态向量; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入向量; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是系统状态矩阵; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是输入矩阵; $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是 Lipschitz 非线性扰动, 满足

$$f(0) = 0, \frac{df(x(t))}{dx(t)} = \lambda(x(t)) = DF(x(t))E,$$

其中: D 和 E 是已知定常矩阵, $F(x(t))$ 是范数有界矩阵, 满足 $F^T(x(t))F(x(t)) \leq I$.

考虑如图 1 所示的 NCS.

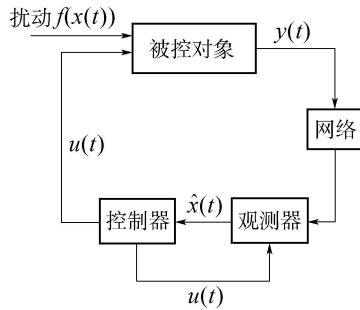


图 1 网络控制系统结构
Fig. 1 Structure of NCS

传感器以周期 h 对系统输出 $y(t)$ 进行采样, 并在 $kh, k \in \mathbb{N}$ 时刻将测量值 $y(kh)$ 传给控制器. 控制器在 $kh + \tau_k$ 时刻收到测量值, 其中 τ_k 为在 kh 时刻的测量值所经历的网络时延.

为了便于分析做以下合理假设:

假设 1 传感器采用时间驱动方式, 以固定周期 h 对被控对象进行采样, 并将测量值发送到网络.

假设 2 控制器和执行器均采用事件驱动方式, 当数据包到达时, 控制器和执行器各完成相应动作.

假设 3 被控对象(1)中的输入矩阵 B 列满秩.

针对传感器失效, 引入失效阵 $H = \text{diag}\{h_1, h_2, \dots, h_m\}, i = 1, 2, \dots, m$, 其中 $H \neq 0$ 且 $H \in \phi$, ϕ 为所有可能的传感器失效阵的集合.

$$h_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个传感器正常,} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个传感器失效.} \end{cases}$$

对于系统(1), 考虑传感器失效及测量值所经历的时延, 构造如下结构的观测器:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + f(\hat{x}(t)) + Bu(t) + L[Hy(kh) - C\hat{x}(kh)], \forall t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}]. \quad (2)$$

定义 $\tau(t) = t - kh, \forall t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}]$, 则式(2)可以写为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + f(\hat{x}(t)) + Bu(t) + L[Hy(t - \tau(t)) - C\hat{x}(t - \tau(t))].$$

假设存在实数 $\tau_M > 0$, 使得 $0 \leq \tau(t) \leq \tau_M$.

取控制律为

$$u(t) = K\hat{x}(t). \quad (3)$$

注 1 由于 $\tau(t) = t - kh, \forall t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}]$, 易得 $\tau_k \leq \tau(t) \leq h + \tau_{k+1}, \forall t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}]$. τ_M 可以用来反映所允许的网络传输时延.

注 2 本文只考虑网络存在于传感器和控制器之间的情况. 若控制器和执行器之间也存在网络, 那么控制器表达式为 $u(t) = K\hat{x}(t - \tau_{ca}(t))$, 式中 $\tau_{ca}(t)$ 为控制器到执行器的时延. 运用与本文类似的方法即可进行观测器与控制器的协同设计.

注 3 对于假设 3 中矩阵 B 列满秩, 仅是为了应用引理, 从而方便求解矩阵不等式.

定义 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, 由式(1)和式(2)可得

$$\dot{e}(t) = A(x(t) - \hat{x}(t)) + f(x(t)) - f(\hat{x}(t)) - L[HCx(t - \tau(t)) - C\hat{x}(t - \tau(t))].$$

$$f(x(t)) = \int_0^1 \lambda(s)|_{s=(1-\lambda)x(t)} x(t) d\lambda,$$

$$f(x(t)) - f(\hat{x}(t)) = \int_0^1 \lambda(s)|_{s=x(t)-\lambda e(t)} e(t) d\lambda,$$

因而

$$\dot{e}(t) = (A + \int_0^1 \lambda(s)|_{s=x(t)-\lambda e(t)} e(t) d\lambda + LCE \cdot (t - \tau(t)) + L(HC - C)x(t - \tau(t)), \quad (4)$$

其中 λ 为 0 到 1 的实数. 定义增广向量 $\xi(t) = [x^T(t) e^T(t)]^T$, 则闭环系统可以写为

$$\dot{\xi}(t) = A_c \xi(t) + A_d \xi(t - \tau(t)), \quad (5)$$

式中:

$$A_c = A_{cn} + \Psi(\xi(t)),$$

$$A_{cn} = \begin{bmatrix} A + BK & -BK \\ 0 & A \end{bmatrix},$$

$$\Psi(\xi(t)) = \begin{bmatrix} \int_0^1 \lambda(s)|_{s=(1-\lambda)x(t)} d\lambda & 0 \\ 0 & \int_0^1 \lambda(s)|_{s=x(t)-\lambda e(t)} d\lambda \end{bmatrix} =$$

$$D_c \int_0^1 F_c(\lambda, x(t), e(t)) d\lambda E_c,$$

其中:

$$D_c = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix}, E_c = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix},$$

$$\int_0^1 F_c(\lambda, x(t), e(t)) d\lambda = \begin{bmatrix} \int_0^1 F(s)|_{s=(1-\lambda)x(t)} d\lambda & 0 \\ 0 & \int_0^1 F(s)|_{s=x(t)-\lambda e(t)} d\lambda \end{bmatrix},$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L(HC - C) & LC \end{bmatrix}.$$

介绍几个本文所用到的引理.

引理 1^[8] 对于任意正定矩阵 W 、正常数 γ 、及

向量函数 $\dot{x} : [-\gamma, 0] \rightarrow \mathbb{R}^n$, 如下不等式恒成立:

$$-\gamma \int_{t-\gamma}^t \dot{x}^T(s)W\dot{x}(s)ds \leq \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\gamma) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -W & W \\ W & -W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\gamma) \end{bmatrix}.$$

引理 2^[9] 给定适当维数的矩阵 Y, D, E , 其中 Y 为对称矩阵, 则 $Y + DFE + E^T F^T D^T < 0$ 对所有满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F 成立, 当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$, 使得 $Y + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0$.

引理 3^[10] 对于给定的列满秩矩阵 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, 其奇异值分解式为

$$B = U \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T,$$

当且仅当 $R_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为如下结构:

$$R_1 = U \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{12} \end{bmatrix} U^T,$$

则存在矩阵 $X \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 使得 $R_1 B = BX$. 其中: $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $V \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 为正交矩阵, $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为矩阵 B 的非零奇异值, $R_{11} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $R_{12} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$.

本文主要工作是完成容错控制器和观测器的协同设计, 使系统在传感器失效的情况下仍渐近稳定.

3 容错控制器和观测器协调设计(Co-design of observer and fault-tolerant controller)

定理 1 对于给定的实数 $\tau_M > 0$, 如果存在正定矩阵 P, Q, Z 及 W 使

$$\begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} & * & * \\ \tau_M^{-1}W & 0 & \Xi_{33} & * \\ \Xi_{41} & \Xi_{42} & 0 & \Xi_{44} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

成立, 式中:

$$\begin{aligned} \Xi_{11} &= Q - RA_c - (RA_c)^T - \tau_M^{-1}W, \\ \Xi_{21} &= -SA_c - (RA_d)^T, \quad \Xi_{22} = -SA_d - (SA_d)^T, \\ \Xi_{33} &= -Q - \tau_M^{-1}W, \quad \Xi_{41} = P - TA_c + R^T, \\ \Xi_{42} &= -TA_d + S^T, \quad \Xi_{44} = -\tau_M Z + T + T^T, \end{aligned}$$

则传感器失效时闭环系统(5)仍保持渐近稳定.

证 构造Lyapunov函数

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t),$$

其中 P, Q, Z 为正定矩阵,

$$V_1(t) = \xi^T(t)P\xi(t), \quad V_2(t) = \int_{t-\tau_M}^t \xi^T(\alpha)Q\xi(\alpha)d\alpha,$$

$$V_3(t) = \int_{-\tau_M}^0 \int_{t+\beta}^t \dot{\xi}^T(\alpha)Z\dot{\xi}(\alpha)d\alpha d\beta.$$

沿着系统(5)的任意轨线, $V(t)$ 关于时间的导数:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2\xi^T(t)P\dot{\xi}(t) + \xi^T(t)Q\xi(t) - \\ &\quad \xi^T(t - \tau_M)Q\xi(t - \tau_M) + \\ &\quad \tau_M \dot{\xi}^T(t)Z\dot{\xi}(t) + \int_{t-\tau_M}^t \xi^T(\alpha)Z\xi(\alpha)d\alpha + \\ &\quad 2[\xi^T(t)R + \xi^T(t - \tau(t))S + \dot{\xi}(t)T] \times \\ &\quad [\dot{\xi}(t) - A_c\xi(t) + A_d\xi(t - \tau(t))], \end{aligned}$$

其中 R, S, T 为自由矩阵.

根据引理1可知

$$-\int_{t-\tau_M}^t \dot{\xi}^T(\alpha)Z\dot{\xi}(\alpha)d\alpha \leq \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \tau_M) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\tau_M^{-1}W & \tau_M^{-1}W \\ \tau_M^{-1}W & -\tau_M^{-1}W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \tau_M) \end{bmatrix},$$

因此, $\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) + \dot{V}_3(t) \leq \varphi^T(t)\Xi\varphi(t)$, 其中:

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} & * & * \\ \tau_M^{-1}W & 0 & \Xi_{33} & * \\ \Xi_{41} & \Xi_{42} & 0 & \Xi_{44} \end{bmatrix},$$

$$\varphi^T(t) = [x^T(t) \quad x^T(t - \tau(t)) \quad x^T(t - \tau_M) \quad \dot{x}^T(t)]^T.$$

因此, 若式(6)成立, 则 $\dot{V}(t) < 0$, 传感器失效时闭环系统(5)仍保持渐近稳定. 证毕.

定理 2 对于给定的实数 $\tau_M > 0$, 及常数 λ_1, λ_2 , 如果存在正定矩阵

$$\begin{aligned} P &= \begin{bmatrix} P_{11} & * \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & * \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}, \\ Z &= \begin{bmatrix} Z_{11} & * \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_{11} & * \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}, \\ R_1 &= U \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix} U^T, \end{aligned}$$

R_2, \bar{K}, \bar{L} , 及标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$, 则

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{11} & * & * & * & * \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & * & * & * \\ \tau_M^{-1}W & 0 & \Sigma_{33} & * & * \\ \Sigma_{41} & \Sigma_{42} & 0 & \Sigma_{44} & * \\ \Sigma_{51} & \Sigma_{52} & 0 & \Sigma_{54} & \Sigma_{55} \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

成立, 式中:

$$\begin{aligned} \Sigma_{11} &= \\ & Q - \tau_M^{-1}W + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 E^T E & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 E^T E \end{bmatrix} - \\ & \begin{bmatrix} R_1 A + B\bar{K} & -B\bar{K} \\ 0 & R_2 A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^T R_1^T + \bar{K}^T B^T & 0 \\ -\bar{K}^T B^T & A^T R_2^T \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{21} &= \lambda_1 \begin{bmatrix} R_1 A + B\bar{K} & -B\bar{K} \\ 0 & R_2 A \end{bmatrix} - \\ &\quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{L}(C - HC) & -\bar{L}C \end{bmatrix}, \\ \Sigma_{22} &= -\lambda_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{L}(C - HC) & -\bar{L}C \end{bmatrix} - \\ &\quad \lambda_1 \begin{bmatrix} 0 & (C - HC)^T \bar{L}^T \\ 0 & -C^T \bar{L}^T \end{bmatrix}, \\ \Sigma_{33} &= -Q - \tau_M^{-1} W, \\ \Sigma_{41} &= P - \lambda_2 \begin{bmatrix} R_1 A + B\bar{K} & -B\bar{K} \\ 0 & A \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} R_1^T & 0 \\ 0 & R_2^T \end{bmatrix}, \\ \Sigma_{42} &= -\lambda_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{L}(C - HC) & -\bar{L}C \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} R_1^T & 0 \\ 0 & R_2^T \end{bmatrix}, \\ \Sigma_{44} &= -\tau_M Z + \lambda_1 \begin{bmatrix} R_1 + R_1^T & 0 \\ 0 & R_2 + R_2^T \end{bmatrix}, \\ \Sigma_{51} &= -\begin{bmatrix} R_1 D & 0 \\ 0 & R_2 D \end{bmatrix}^T, \Sigma_{52} = -\lambda_1 \begin{bmatrix} R_1 D & 0 \\ 0 & R_2 D \end{bmatrix}^T, \\ \Sigma_{54} &= -\lambda_2 \begin{bmatrix} R_1 D & 0 \\ 0 & R_2 D \end{bmatrix}^T, \Sigma_{55} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 I & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 I \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

相应的容错控制器和观测器增益矩阵分别为

$$K = V \Sigma^{-1} R_{11} \Sigma V^T \bar{K}, L = R_2^{-1} \bar{L}.$$

证 根据引理2及Schur引理, 式(6)等价于

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & * \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= \begin{bmatrix} \Omega & * \\ -SA_{cn} - (RA_d)^T & -SA_d - (SA_d)^T \end{bmatrix}, \\ \Gamma_{21} &= \begin{bmatrix} \tau_M^{-1} W & 0 \\ P - TA_{cn} + R^T & -TA_d + S^T \\ -D_c^T R^T & -D_c^T S^T \end{bmatrix}, \\ \Gamma_{22} &= \begin{bmatrix} -Q - \tau_M^{-1} W & * & * \\ 0 & \Sigma_{44} & * \\ 0 & -D_c^T T^T & \Sigma_{55} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\Omega = Q - RA_{cn} - (RA_c)^T - \tau_M^{-1} W + \Sigma_{55} E_c^T E_c.$$

定义

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}, S = \lambda_1 R, T = \lambda_2 R,$$

其中 λ_1, λ_2 为自由参数. 由于

$$R_1 = U \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{12} \end{bmatrix} U^T,$$

由引理3可知存在矩阵 X 使得 $R_1 B = BX$, 令 $\bar{L} = R_2 L, \bar{K} = XK$, 并将 R, S, T 及 \bar{K}, \bar{L} 代入到式(8)即得到式(7). 由

$$R_1 B = BX, R_1 = U \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix} U^T,$$

$$\begin{aligned} B &= U \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T U \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T = \\ &U \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} V^T X, \end{aligned}$$

可得 $K = V \Sigma^{-1} R_{11} \Sigma V^T \bar{K}$. 证毕.

4 实例仿真(Instance of simulation)

考虑一类非线性被控对象:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + f(x(t)) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases}$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -2 \end{bmatrix}, f(x(t)) = \begin{bmatrix} 4 \sin(x_1(t)) \\ -\cos(x_2(t)) \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 5 & 2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ 6 & 7 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

易得

$$\frac{df(x(t))}{dx(t)} = \lambda(x(t)) = DF(x(t))E,$$

其中:

$$F(x(t)) = \begin{bmatrix} \cos(x_1(t)) & 0 \\ 0 & \sin(x_2(t)) \end{bmatrix}, D = E = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

系统的初始状态为 $x^T(0) = [1 \ -3]^T$, 观测器的初始状态为 $\hat{x}^T(0) = [0 \ 0]^T$. 假设系统采样周期为 $h = 0.01$ s, $\tau_M = 0.02$, 取 $\lambda_1 = 0.1, \lambda_2 = 0.3$. 传感器至控制器的网络诱导时延在 $[0 \ 0.1]$ 之间随机产生, 如图2所示. 根据定理2, 利用MATLAB中LMI工具箱, 当传感器1发生故障, 即 $H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 时, 解得

$$K = \begin{bmatrix} -2.9833 & 0 \\ 1.2438 & -4.9874 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0.0628 & 0.3492 \\ -3.1638 & -0.8971 \end{bmatrix};$$

当传感器2发生故障, 即 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 时, 解得

$$K = \begin{bmatrix} -0.5692 & 0.8921 \\ 0.3256 & -1.9831 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0.0628 & 0.3492 \\ -3.1638 & -0.8971 \end{bmatrix};$$

当传感器均正常时, 即 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 时, 解得

$$K = \begin{bmatrix} -3.8454 & 1.6572 \\ 2.4925 & -4.9452 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.0628 & 0.3492 \\ -3.1638 & -0.8971 \end{bmatrix}.$$

$x_1(t)$, $x_2(t)$ 的相应曲线分别如图3和图4所示. 图中: 1表示传感器1发生故障时的曲线; 2表示传感器2发生故障时的曲线; 3表示传感器均正常时的曲线.

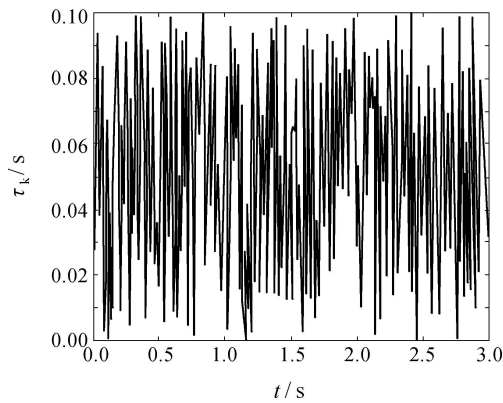


图2 网络诱导时延

Fig. 2 Network-induced time delay

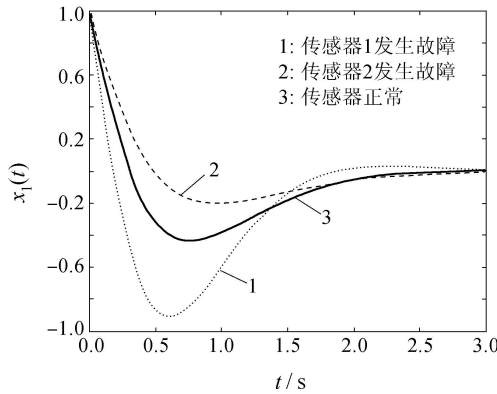


图3 状态 x_1 的响应曲线

Fig. 3 Responding curve of x_1

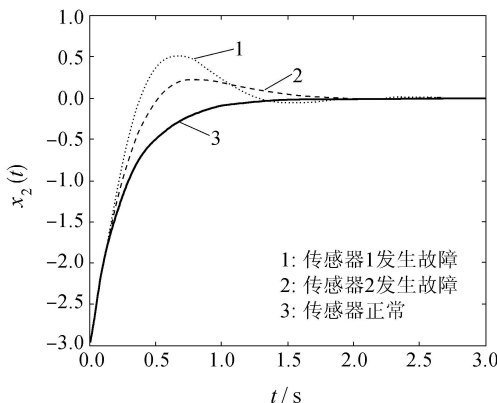


图4 状态 x_2 的响应曲线

Fig. 4 Responding curve of x_2

5 结论(Conclusions)

本文研究了一类具有传感器故障的非线性连续NCS容错控制问题. 在网络环境和传感器故障情况下, 设计了观测器, 建立了基于观测器的NCS的闭环模型, 利用Lyapunov稳定理论, 及线性矩阵不等式方法并结合自由权矩阵, 给出了使闭环系统渐近稳定的充分条件及观测器和控制器协同设计方法. 实际的NCS往往有数据包丢失的情况, 在此情况下, 本文的方法将失效, 因此当有数据包丢失时, 如何对非线性连续NCS进行观测器和容错控制器的协调设计是下一步的研究的工作.

参考文献(References):

- [1] SUN Y G, QIN S Y. Networked control systems with bounded packet dropout [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(1): 113 – 117.
- [2] 陈青, 吴敏. 具有网络丢包和时延的网络控制系统设计 [J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 293 – 296.
(CHEN Qing, WU Min. Design of networked controller for systems with packet dropout and networked-induced delays [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 293 – 296.)
- [3] HIDEAKI I. H_∞ control with limited communication and message losses [J]. *Systems & Control Letters*, 2008, 57(4): 322 – 331.
- [4] 郭一楠, 张芹英, 巩敦卫. 一类时变时延网络控制系统的鲁棒容错控制 [J]. *控制与决策*, 2008, 23(6): 689 – 696.
(GUO Y N, ZHANG Q Y, GONG D W, et al. Robust fault-tolerant control of networked systems with time-varying delays [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(6): 689 – 696.)
- [5] LI X, WU X B, GAO J. Observer-based guaranteed cost fault-tolerant controller design for networked control systems [J]. *Information Technology Journal*, 2011, 10(2): 394 – 401.
- [6] MAO Z H, JIANG B. Fault estimation and accommodation for networked control systems with transfer delay [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 378 – 743.
- [7] ABERKANE S, PONSART J C, SANTER D. Output-feedback control of a class of networked fault tolerant control systems [J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(1): 34 – 44.
- [8] HAN Q L. Absolute stability of time-delay systems with sector-bounded nonlinearity [J]. *Automatica*, 2005, 41(12): 2171 – 2176.
- [9] LI Y, GAO F R. Optimal guaranteed cost control of discrete-time uncertain systems with both state and input delays [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2001, 338(1): 101 – 110.
- [10] YANG F W, WANG Z D, HUNG Y S, et al. H_∞ control for networked systems with random communication delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.

作者简介:

王燕锋 (1980–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为网络控制系统, E-mail: neu2009wyf@163.com;

井元伟 (1956–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性控制理论、网络通信系统的控制与决策、飞行器姿态控制等, E-mail: ywjing@mail.neu.edu.cn;

张嗣瀛 (1925–), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统对称性及相似性结构理论、微分对策理论等, E-mail: zhangsiying@ise.neu.edu.cn.