

文章编号: 1001-0920(2007)10-1165-05

一类基于观测器的网络控制系统鲁棒控制器设计

邱占芝¹, 张庆灵²

(1. 大连交通大学 软件学院, 辽宁 大连 116028; 2. 东北大学 系统科学研究所, 沈阳 110004)

摘要: 研究一类基于状态观测器的网络控制系统鲁棒稳定性和鲁棒控制器设计问题. 考虑传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动以及小于等于一个采样周期的不确定时延, 建立了基于状态观测器的网络控制系统增广模型. 利用线性矩阵不等式方法推导出该系统鲁棒稳定的条件, 进一步给出了鲁棒控制律和状态观测器设计方法. 数值仿真算例证明了分析方法和结果的有效性.

关键词: 网络控制系统; 鲁棒控制器设计; 状态观测器; 线性矩阵不等式; 不确定时延

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Robust controller design for a class of networked control systems based on state observer

QIU Zhan-zhi¹, ZHANG Qing-ling²

(1. Software Technology Institute, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Institute of Systems Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: QIU Zhan-zhi, E-mail: zhanzhiquok@163.com)

Abstract: The problem of robust stability and robust controller design for a class of networked control systems (NCS) based on state observer is studied. Considering time-driven sensors, event-driven actuators and the controller, and the uncertain time-delay less than and equal to one sampling period, an augmented mathematic model for the NCS based on state observer is developed. By using linear matrix inequality formulation, the conditions of the robust stabilization for the NCS are derived. Furthermore, the designs for the robust control law and the state observer are presented. A numerical simulation example shows the effectiveness of the analysis method.

Key words: Networked control systems; Robust controller design; States observer; Linear matrix inequality; Uncertain time-delay

1 引言

21 世纪以来,网络控制系统(NCSs)广泛应用于国防和工业的各个领域,基于网络的控制理论和控制方法不断涌现,如系统建模与稳定性分析^[1,2]、鲁棒与 H_∞ 控制^[3-5]等,但大多是基于被控对象的全部状态可测.在实际 NCSs 中,分布于不同地理位置的系统各节点通过网络交换信息时,不仅网络带宽和通信机制的限制存在信息通信时延,而且由于环境或经济条件的因素,一般只能测量到部分信息.为此,一些学者研究了 NCSs 的状态估计问题^[6-9],但基于观测器的 NCSs 控制却少有报道.

本文针对传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动的 NCSs,考虑不超过一个采样周期的不确

定时延,研究基于状态观测器的 NCSs 鲁棒控制器设计问题,给出了鲁棒控制律存在的条件,进而给出鲁棒控制律及状态观测器设计方法.最后通过数值仿真说明分析方法及研究结果的有效性.

2 NCSs 建模

用 y 表示传感器输出, u 表示控制输入.传感器时钟驱动,以周期 T 采样输出,经网络诱导时延 τ_{sc} 后传到控制器;控制器收到信息后计算处理,输出的控制信号经网络诱导时延 τ_{ca} 后送到执行器,采用零阶保持器的执行器将控制信号恢复成分段连续的控制输入 u .假设网络传输数据时无时序错乱和包丢失,不考虑过程干扰和测量噪声,忽略控制器计算时延,整个闭环回路第 k 采样周期的网络时延为 τ_k (τ_k

收稿日期: 2006-06-13; 修回日期: 2006-08-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574011); 辽宁省教育厅计划项目(20060107).

作者简介: 邱占芝(1960—),女,辽宁朝阳人,教授,博士,从事网络控制系统、计算机应用技术的研究; 张庆灵(1956—),男,辽宁营口人,教授,博士生导师,从事广义大系统鲁棒控制、网络控制等研究.

$= \tau_{sc}^k + \tau_{ca}^k)$, τ_k 不确定, 满足 $\tau_k \leq T$.

NCS 的被控对象模型可表示为

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

其中: $x(t) \in R^n, u(t) \in R^r$ 和 $y(t) \in R^m$ 分别为被控对象的状态、控制输入和测量输出; A, B 和 C 是具有相应维数的常矩阵.

由于控制输入 $u(t)$ 在一个周期内分段连续, 考虑 $\tau_k \in [0, T], u(t)$ 可描述为

$$u(t) = \begin{cases} u(k-1), & t_k < t \leq t_k + \tau_k; \\ u(k), & t_k + \tau_k < t \leq t_k + T. \end{cases} \quad (2)$$

因此, 被控对象可离散化为^[2]

$$x(k+1) = A_d x(k) + (B_0 + DF(\tau_k)E)u(k) + (B_1 - DF(\tau_k)E)u(k-1), \quad (3)$$

$$y(k) = Cx(k). \quad (4)$$

其中 A_d, B_0, B_1, D 和 E 参见文献[2].

采用状态观测器估计被控对象状态. 考虑网络时延, 为使状态估计误差尽可能小, 观测器采用带有时延补偿功能的模型^[6]. 考虑式(3)和(4)及时延 $\tau_k \in [0, T]$, 假定 A_d 非奇异, (A_d, C) 能观测, 则状态观测器模型变为^[9]

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & A_d \hat{x}(k) + B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + \\ & L[y(k) - CA_d^{-1}(\hat{x}(k) - \\ & B_0 u(k-1) - B_1 u(k-2))]. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n$ 为观测器输出, L 为具有相应维数的观测器增益.

因为存在时延, 所以 k 时刻观测器输入为

$$y(k) = Cx(k-1). \quad (6)$$

考虑式(3), (5)和(6), 则观测器(5)变为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & LCA_d^{-1}x(k) + (A_d - LCA_d^{-1})\hat{x}(k) + \\ & B_0 u(k) + (B_1 - LCA_d^{-1}DFE)u(k-1) + \\ & LCA_d^{-1}DFEu(k-2). \end{aligned} \quad (7)$$

定义估计误差

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k). \quad (8)$$

反馈控制器采用如下无记忆模型:

$$u(k) = K\hat{x}(k). \quad (9)$$

联立式(3)和(7)~(9), 则基于观测器的闭环 NCS 模型为

$$\begin{aligned} x(k+1) = & [A_d + (B_0 + DFE)K]x(k) - \\ & (B_0 + DFE)Ke(k) + \\ & (B_1 - DFE)Kx(k-1) - \\ & (B_1 - DFE)Ke(k-1). \end{aligned} \quad (10)$$

其结构如图 1 所示.

估计误差方程为

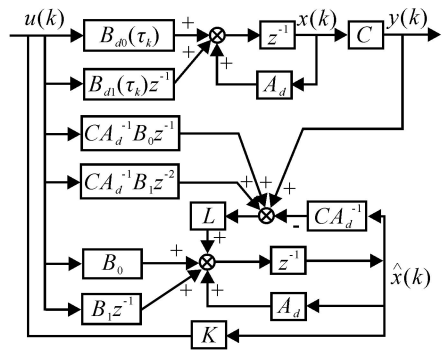


图 1 基于状态观测器的 NCS 结构

$$\begin{aligned} e(k+1) = & DFEKx(k) + (A_d - LCA_d^{-1} - DFEK)e(k) + \\ & (LCA_d^{-1} - 1)DFEKx(k-1) - \\ & (LCA_d^{-1} - 1)DFEKe(k-1) - \\ & LCA_d^{-1}DFEKx(k-2) + LCA_d^{-1}DFEKe(k-2). \end{aligned} \quad (11)$$

记

$$\begin{aligned} \overline{A_0} &= A_d + (B_0 + DFE)K, \\ \overline{A_1} &= (B_1 - DFE)K, \\ \overline{A_2} &= -LCA_d^{-1}DFEK, \\ \overline{A_0} &= DFEK, \quad \tilde{B}_2 = LCA_d^{-1}DFEK, \\ \tilde{B}_0 &= A_d - DFEK - LCA_d^{-1}, \\ \overline{B_1} &= -(B_1 - DFE)K, \\ \overline{A_1} &= (LCA_d^{-1} - 1)DFEK, \\ \overline{B_0} &= -(B_0 + DFE)K, \\ \tilde{B}_1 &= DFEK - LCA_d^{-1}DFEK. \end{aligned}$$

则基于状态观测器的闭环 NCSs 增广模型为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A_0} & \overline{B_0} \\ \overline{A_0} & \tilde{B}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{A_1} & \overline{B_1} \\ \overline{A_1} & \tilde{B}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-1) \\ e(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \overline{A_2} & \tilde{B}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-2) \\ e(k-2) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

定义 1 设有不确定时延的 NCS(1), 若在基于状态观测器(7)的控制律(9)作用下渐近稳定, 则控制律(9)称为基于状态观测器的鲁棒控制律.

引理 1^[10] 设有实矩阵 W, M, N 和 $F(k)$, 其中 W 对称, $F(k)$ 满足 $F^T(k)F(k) \leq I$, 则有

$$W + MF(k)N + N^T F^T(k)M^T < 0,$$

当且仅当存在标量 $\varepsilon > 0$, 使得

$$W + \varepsilon MM^T + \varepsilon^{-1}N^T N < 0.$$

3 鲁棒控制器设计

定理 1 基于状态观测器的 NCS(12) 是鲁棒渐近稳定的, 则存在对称正定矩阵 $P_n (n = 1, 2, \dots, 6)$ 和标量 $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3, 4) > 0$, 满足下列条件:

$$\begin{bmatrix} P_3 + P_5 - P_1 & * & * & * & * \\ 0 & P_4 + P_6 - P_2 & * & * & * \\ 0 & 0 & -P_3 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -P_4 & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_d + B_0 K & -B_0 K & B_1 K & -B_1 K & 0 \\ 0 & A_d & 0 & 0 & 0 \\ EK & -EK & -EK & EK & 0 \\ EK & -EK & -EK & EK & 0 \\ 0 & -CA_d^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & EK & -EK & -EK \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ -P_6 & * & * & * & * & * & * \\ 0 & N_1 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & N_2 & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_3 & * \\ EK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_4 I \end{bmatrix} < 0.$$

$$\Delta V(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \\ x(k-1) \\ e(k-1) \\ x(k-2) \\ e(k-2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{21} & A_{22} & A_{32} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} A_{41}^T & A_{51}^T & A_{61}^T \\ A_{42}^T & A_{52}^T & A_{62}^T \\ A_{43}^T & A_{53}^T & A_{63}^T \\ A_{44} & A_{54} & A_{64} \\ A_{54} & A_{55} & A_{65} \\ A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \\ x(k-1) \\ e(k-1) \\ x(k-2) \\ e(k-2) \end{bmatrix} =$$

$$z^T(k) \Phi_z(k).$$

$$(16)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{11} &= \overline{A_0^T} P_1 \overline{A_0} + \overline{A_0^T} P_2 \overline{A_0} + P_3 + P_5 - P_1, \\ A_{21} &= \overline{B_0^T} P_1 \overline{A_0} + \overline{B_0^T} P_2 \overline{A_0}, \\ A_{31} &= \overline{A_1^T} P_1 \overline{A_0} + \overline{A_1^T} P_2 \overline{A_0}, \\ A_{32} &= \overline{A_1^T} P_1 \overline{B_0} + \overline{A_1^T} P_2 \overline{B_0}, \\ A_{51} &= \overline{A_2^T} P_2 \overline{A_0}, \\ A_{41} &= \overline{B_1^T} P_1 \overline{A_0} + \overline{B_1^T} P_2 \overline{A_0}, \\ A_{55} &= \overline{A_2^T} P_2 \overline{A_2} - P_5, \\ A_{61} &= \overline{B_2^T} P_2 \overline{A_0}, A_{52} = \overline{A_2^T} P_2 \overline{B_0}, \\ A_{66} &= \overline{B_2^T} P_2 \overline{B_2} - P_6, \\ A_{42} &= \overline{B_1^T} P_1 \overline{B_0} + \overline{B_1^T} P_2 \overline{B_0}, \\ A_{22} &= \overline{B_0^T} P_1 \overline{B_0} + \overline{B_0^T} P_2 \overline{B_0} + P_4 + P_6 - P_2, \\ A_{33} &= \overline{A_1^T} P_1 \overline{A_1} + \overline{A_1^T} P_2 \overline{A_1} - P_3, \\ A_{43} &= \overline{B_1^T} P_1 \overline{A_1} + \overline{B_1^T} P_2 \overline{A_1}, \\ A_{53} &= \overline{A_2^T} P_2 \overline{A_1}, A_{54} = \overline{A_2^T} P_2 \overline{B_1}, \\ A_{44} &= \overline{B_1^T} P_1 \overline{B_1} + \overline{B_1^T} P_2 \overline{B_1} - P_4, \\ A_{63} &= \overline{B_2^T} P_2 \overline{A_1}, A_{65} = \overline{B_2^T} P_2 \overline{A_2}, \\ A_{64} &= \overline{B_2^T} P_2 \overline{B_1}, A_{62} = \overline{B_2^T} P_2 \overline{B_0}, \\ z^T(k) &= [x^T(k), e^T(k), x^T(k-1), \\ &\quad e^T(k-1), x^T(k-2), e^T(k-2)]. \end{aligned}$$

$$(13)$$

其中:符号“*”表示对称项,
 $N_1 = \varepsilon_1 DD^T - P_1^{-1}$,
 $N_2 = \varepsilon_2 DD^T - P_2^{-1} + \varepsilon_3 LL^T$,
 $N_3 = \varepsilon_4 (CA_d^{-1}D)(CA_d^{-1}D)^T - \varepsilon_3 I$.

证明 选择对称正定矩阵 $P_n, n = 1, 2, \dots, 6$,
定义 Lyapunov 函数

$$V(k) =$$

$$x^T(k) P_1 x(k) + e^T(k) P_2 e(k) +$$

$$x^T(k-1) P_3 x(k-1) + e^T(k-1) P_4 e(k-1) +$$

$$\sum_{i=1}^2 x^T(k-i) P_5 x(k-i) +$$

$$\sum_{j=1}^2 e^T(k-j) P_6 e(k-j) > 0,$$

$$(14)$$

$$\Delta V(k) =$$

$$x^T(k+1) P_1 x(k+1) + e^T(k+1) P_2 e(k+1) +$$

$$x^T(k) P_3 x(k) + e^T(k) P_4 e(k) + x^T(k) P_5 x(k) +$$

$$e^T(k) P_6 e(k) - x^T(k) P_1 x(k) - e^T(k) P_2 e(k) -$$

$$x^T(k-1) P_3 x(k-1) - e^T(k-1) P_4 e(k-1) -$$

$$x^T(k-2) P_5 x(k-2) - e^T(k-2) P_6 e(k-2).$$

$$(15)$$

考虑 NCS 模型(12),有

根据 Lyapunov 稳定性理论, $V(k) > 0, \Delta V(k) < 0$,即 $\Phi < 0$ 时 NCS(12) 鲁棒渐近稳定. 因此有

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} & A_{51} & A_{61} \\ A_{21} & A_{22} & A_{32} & A_{42} & A_{52} & A_{62} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{43} & A_{53} & A_{63} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{54} & A_{64} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{65} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} < 0.$$

$$(17)$$

根据 Schur 补性质和引理 1,并选 $\varepsilon_1 > 0$,则式(17)变为

 © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$\begin{bmatrix} P_3 + P_5 - P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_4 + P_6 - P_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -P_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -P_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P_5 \rightarrow \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_d + B_0 K & -B_0 K & B_1 K & -B_1 K & 0 \\ \overline{A_0} & \overline{B_0} & \overline{A_1} & \overline{B_1} & \overline{A_2} \\ EK & -EK & -EK & EK & 0 \\ 0 & (A_d + B_0 K)^T & \overline{A_0}^T & (EK)^T & \\ 0 & -(B_0 K)^T & \overline{B_0}^T & -(EK)^T & \\ 0 & (B_1 K)^T & \overline{A_1}^T & -(EK)^T & \\ 0 & -(B_1 K)^T & \overline{B_1}^T & (EK)^T & \\ \leftarrow 0 & 0 & \overline{A_2}^T & 0 & < 0. \quad (18) \\ -P_6 & 0 & \overline{B_2}^T & 0 & \\ 0 & \varepsilon_1 DD^T - P_1^{-1} & 0 & 0 & \\ \overline{B_2} & 0 & -P_2^{-1} & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & \end{bmatrix}$$

展开 $\overline{A_0}, \overline{B_0}, \overline{A_1}, \overline{B_1}, \overline{A_2}$ 和 $\overline{B_2}$, 选择 $\varepsilon_j > 0, j = 2, 3, 4$, 多次引用引理 1 和 Schur 补性质, 并记 $N_1 = \varepsilon_1 DD^T - P_1^{-1}, N_2 = \varepsilon_2 DD^T - P_2^{-1} + \varepsilon_3 LL^T, N_3 = \varepsilon_4 (CA_d^{-1}D)(CA_d^{-1}D)^T - \varepsilon_3 I$, 则式(18) 变为式(13). $\square$

定理 2 如果存在对称正定矩阵 $X_n (n = 1, 2, \dots, 6)$, 矩阵 W_1, W_2 和 Y , 标量 $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, 5) > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} N_5 & * & * & * & * \\ 0 & N_6 & * & * & * \\ 0 & 0 & -X_3 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -X_4 & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_d X_1 + B_0 W_1 & -B_0 W_2 & B_1 W_1 & -B_1 W_2 & 0 \rightarrow \\ 0 & A_d X_2 & 0 & 0 & 0 \\ EW_1 & -EW_2 & -EW_1 & EW_2 & 0 \\ EW_1 & -EW_2 & -EW_1 & EW_2 & 0 \\ 0 & -CA_d^{-1}X_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & EW_1 & -EW_2 & -EW_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ -X_6 & * & * & * & * \\ 0 & * & * & * & * \\ \leftarrow 0 & \overline{N_1} & * & * & * \\ 0 & \overline{N_2} & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_3 \\ EW_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_4 I \\ 0 & 0 & Y & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_3 I \end{bmatrix}$$

$< 0.$ (19)

其中: 符号“ $*$ ”表示对称项,

$$\begin{aligned} \overline{N_1} &= \varepsilon_1 DD^T - X_1, \\ \overline{N_2} &= \varepsilon_2 DD^T - X_2, \\ N_3 &= \varepsilon_4 (CA_d^{-1}D)(CA_d^{-1}D)^T - \varepsilon_3 I, \\ N_5 &= X_3 + X_5 - X_1, \\ N_6 &= X_4 + X_6 - X_2. \end{aligned}$$

则状态观测器增益为

$L = Y^T/\varepsilon_3,$ (20)

鲁棒控制器增益为

$K = W_1 X_1^{-1}.$ (21)

证明 如果存在鲁棒控制律, 则定理 1 必然成立. 根据 Schur 补性质, 式(13) 变换后再左乘、右乘 $\text{diag}\{P_1^{-1}, P_2^{-1}, P_1^{-1}, P_2^{-1}, P_1^{-1}, P_2^{-1}, I, I, I, I, I, I\}$, 并令 $\overline{N_2} = \varepsilon_2 DD^T - P_2^{-1}, X_1 = P_1^{-1}, X_2 = P_2^{-1}, X_3 = X_1 P_3 X_1, X_4 = X_2 P_4 X_2, X_5 = X_1 P_5 X_1, X_6 = X_2 P_6 X_2, Y = \varepsilon_3 L^T, W_1 = KX_1, W_2 = KX_2$, 则式(13) 变为式(19). 因此观测器增益 $L = Y^T/\varepsilon_3$, 控制器增益 $K = W_1 X_1^{-1}.$ $\square$

4 数值仿真

考虑如下被控对象:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -2 & -3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ C &= [0.01 \quad -0.1]. \end{aligned}$$

假设 NCSs 的采样周期为 10 ms, 通信网络的数据传输时延不确定或未知, 但满足 $\tau_k \leq T$. 由于 A 的特征值为 -1 和 -2 , 对应特征向量选为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix},$$

可计算出

$$\begin{aligned} B_0 &= \begin{bmatrix} 0.500 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} -0.500 & 0 \\ 0.009 & 9 \end{bmatrix}, \\ A_d &= \begin{bmatrix} 0.999 & 9 & 0.009 & 9 \\ -0.019 & 7 & 0.970 & 3 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

在 $\tau_k \leq T$ 内, 为保证

$e^{\lambda_i(T-\tau_k-a_i)} < 1, i = 1, 2, \dots, n,$

选取 $a_1 = a_2 = -1$. 则

$F(\tau_k) = \text{diag}(e^{-1(0.01-\tau_k+1)}, e^{-2(0.01-\tau_k+1)}),$

满足

$$\begin{aligned} F(\tau_k)^T F(\tau_k) &\leq I, \\ D &= \begin{bmatrix} -2.718 & 3 & -3.694 & 5 \\ 2.718 & 3 & 7.389 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

因为 A_d 非奇异, $\text{rank}[C/CA_d] = 2$, 所以观测器存在条件满足. 应用定理 2, 借助于 Matlab 6.5 的 LMI 工具箱求解该例, 得到可行解分别为

$$X_1 = \begin{bmatrix} 123.099\ 7 & -82.627\ 8 \\ -82.627\ 8 & 183.784\ 9 \end{bmatrix},$$
$$\varepsilon_3 = 127.899\ 3,$$
$$W_1 = [-0.001\ 2\ \ 0.000\ 1],$$
$$Y = [-1.279\ 0\ \ -14.068\ 9].$$

从而得到观测器增益为

$$L = Y^T/\varepsilon_3 = \begin{bmatrix} -0.010\ 0 \\ -0.110\ 0 \end{bmatrix},$$

控制器增益

$$K = W_1 X_1^{-1} = 10^{-4} [-0.134\ 4\ \ -0.055\ 0].$$

将此控制器增益 K 和观测器增益 L 应用于定理 1, 可知有可行解,说明系统是鲁棒渐近稳定的.

5 结 语

本文考虑网络控制系统状态难以检测的实际情况,针对一类传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动的网络控制系统,当网络诱导时延不大于一个采样周期时,建立了基于状态观测器的网络控制系统的数学模型,推导出该系统鲁棒稳定的条件,给出了鲁棒控制律和状态观测器的设计方法.通过数值仿真算例验证了本文分析方法及结果的有效性和可行性.

参考文献(References)

[1] Mastellone S, Abdallah C T, Dorato P. Model-based networked control for nonlinear systems with stochastic packet dropout [C]. 2005 American Control Conf. Portland, 2005: 2365-2370.

[2] 樊卫华, 蔡骅, 胡维礼, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-884. (Fan Wei-hua, Cai Hua, Hu Wei-li, et al. Stability of networked control systems with time-delay[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(6): 880-884.)

[3] Vu N P, Jiang J M, Andrey V S, et al. Robust stabilization of linear uncertain discrete-time systems via

a limited capacity communication channel[J]. Systems and Control Letters, 2004, 53: 347-360.

[4] Lin H, Zhai G, Antsaklis P J. Robust stability and disturbance attenuation analysis of a class of networked control systems[C]. The 42nd IEEE Conf on Decision and Control. Maui, 2003:1182-1187.

[5] Dong Yue, Han Qing-long, James Lam. Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty [J]. Automatica, 2005, 41: 999-1007.

[6] 于之讯, 蒋平, 陈辉堂, 等. 具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 125-130. (Yu Zhi-xun, Jiang Ping, Chen Hui-tang, et al. Design of states observer for network control system with transfer delay[J]. Information and Control, 2000, 29(2): 125-130.)

[7] Alexey S M, Andrey V S. The problem of state estimation via asynchronous communication channels with irregular [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(4): 670-676.

[8] Malyaves V, Savkin A V. The problem of optimal robust Kalman state estimation via limited capacity digital communication channels [J]. Systems and Control Letters, 2005, 54: 285-292.

[9] 朱张青, 周川, 胡维礼. 短时延网络控制系统的鲁棒 H_2/H_∞ 状态观测器设计[J]. 控制与决策, 2005, 20(3): 280-284. (Zhu Zhang-qing, Chou Chuan, Hu Wei-li. Design of robust H_2/H_∞ states observer for networked control systems with short time-delay [J]. Control and Decision, 2005, 20(3): 280-284.)

[10] Li X de, Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A linear matrix inequality approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1141-1144.