

文章编号: 1001-0920(2005)03-0280-05

短时延网络控制系统的鲁棒 H_2/H_∞ 状态观测器设计

朱张青¹, 周川^{1,2}, 胡维礼¹

(1. 南京理工大学自动化系, 江苏南京 210094; 2. 清华大学智能技术与系统重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对受白噪声干扰的短时延网络控制系统, 将随机时延对系统的影响转化为未知有界不确定项, 在不改变闭环系统结构的前提下, 利用鲁棒控制理论提出了系统的 H_2/H_∞ 状态观测器设计方法; 证明了所设计状态观测器估计输出对随机时延引起的不确定项的 H_∞ 鲁棒性, 给出了估计输出对白噪声干扰的鲁棒 H_2 性能指标的求解方法和观测器增益阵的确定方法. 最后通过仿真实例证实了所设计状态观测器的有效性和鲁棒性.

关键词: 网络控制系统; 短时延; 状态观测器; 鲁棒性

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Design of robust H_2/H_∞ states observer for networked control systems with short time-delay

ZHU Zhang-qing¹, ZHOU Chuan^{1,2}, HU Wei-li¹

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Laboratory of Intelligent Technology and System, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: ZHU Zhang-qing, E-mail: htc8888@sina.com)

Abstract: By means of the robust control theory, an approach to design H_2/H_∞ states observer for networked control systems with short time-delay under white noise is proposed without changing the structure of the systems. The effect of short random time-delay to the systems is regarded as the unknown bounded uncertain disturbance. The robustness of H_∞ norm from the estimated outputs of states observer to the unknown bounded uncertain disturbance is proved in details. The performance value of H_2 norm from the estimated output to white noise and the observer gain matrix are given. Finally, the simulation results show that the method is effective.

Key words: networked control systems; short time-delay; states observer; robustness

1 引言

网络控制系统(NCS)是指信息传输通过一个实时网络的闭环控制系统. 与传统的点对点控制相比, 网络控制系统具有可实现资源共享、远程操作、成本低和容易维护等优点, 已广泛应用于大型工业过程控制及小型局域系统(如航天器、船舶和新型高性能汽车等)^[1]. 由于将通讯网络引入实际控制系统, 系统的信号传输要经过实时网络, 从而使系统的分析和设计变得比较复杂.

目前, NCS的研究主要集中在系统建模、稳定

性分析和优化控制等方面, 而有关NCS状态观测器特别是鲁棒状态观测器设计的研究成果还很少. 文献[2, 3]采用卡尔曼滤波器得到NCS的状态估计, 用于系统状态反馈控制, 但在线计算量大, 鲁棒性差. 文献[4, 5]通过在网络闭环系统中增加缓冲器, 以时延补偿的方法设计了NCS状态观测器, 这样虽然降低了设计难度, 却人为地使网络时延变为最大值, 改变了系统的结构, 降低了系统的性能.

本文对具有白噪声干扰的短时延NCS, 通过矩阵分解, 将随机时延对系统的影响转化为未知有界

收稿日期: 2004-05-20; 修回日期: 2004-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174019); 清华大学智能技术与系统国家重点实验室基金项目

作者简介: 朱张青(1968—), 男, 安徽无为, 博士生, 从事智能故障诊断、容错控制的研究; 胡维礼(1941—), 男, 江苏东台人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、网络控制系统等研究.

不确定项,在不改变闭环系统结构的前提下,提出了系统的 H_2/H 状态观测器的设计方法;证明了状态观测器估计输出对随机时延引起的不确定项的 H 鲁棒性,给出了估计输出对白噪声干扰的鲁棒 H_2 性能指标的求解方法和观测器增益阵的确定方法;最后通过仿真证实了本文所提出方法的有效性

2 问题描述

闭环网络控制系统如图 1 所示

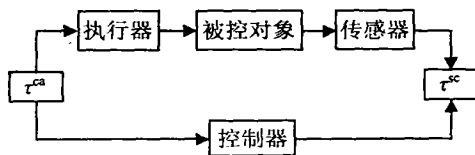


图 1 闭环网络控制系统结构

定义 1 网络诱导时延 τ 包括传感器-控制器时延 τ^{sc} 和控制器-执行器时延 τ^{ca} ; 短时延 NCS 是指网络诱导时延在区间 $[0, T]$ (T 为已知的系统采样周期) 内的 NCS

图 1 中设网络诱导时延 $\tau = (\tau^{sc} + \tau^{ca}) \in [0, T]$, 被控对象为线性时不变连续系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_P x(t) + B_P u(t), \\ y(t) = C_P x(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: A_P, B_P, C_P 为已知适维常数阵; $x(t), u(t), y(t)$ 为被控对象的状态、输入和输出向量

对式 (1) 在一个周期内积分, 可得短时延 NCS 离散状态方程^[1]

$$\begin{cases} x(k+1) = A x(k) + \Gamma_0 u(k) + \Gamma_1 u(k-1) + F_1 \rho(k), \\ y(k) = C x(k) + F_2 \rho(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $A = e^{A_P T}, C = C_P, \Gamma_0 = \int_0^{T-\tau} e^{A_P s} ds B_P, \Gamma_1 = \int_{T-\tau}^T e^{A_P s} ds B_P, \rho(k)$ 为零均值白噪声干扰, F_1 和 F_2 为已知适维阵

对系统 (2) 作如下假设:

- 1) A 是非奇异阵, 且 (A, C) 可观测;
- 2) 传感器节点由时间驱动, 以固定周期 T 对被控对象采样, 控制器和执行器节点为事件驱动;
- 3) 系统在信号传输时不存在时序错乱和数据包丢失现象

若以上 A_P 可对角化, 则

$$A_P = \Lambda \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_n \end{bmatrix} \Lambda^{-1}$$

其中: $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为矩阵 A_P 的特征值, $\Lambda = [\Lambda_1, \dots, \Lambda_n]$ 为其特征向量组成的矩阵

不失一般性, 设 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 均不为 0, 则有

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= \int_0^{T-\tau} e^{A_P t} dt B_P = \\ \Lambda \begin{bmatrix} \int_0^{T-\tau} e^{\lambda_1 t} dt & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \int_0^{T-\tau} e^{\lambda_n t} dt \end{bmatrix} \Lambda^{-1} B_P &= \\ B_0 + \Lambda \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1(T-\tau)} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n(T-\tau)} \end{bmatrix} \Lambda^{-1} B_P &= \\ B_0 + E_1 \Phi(k) E_2 = B_0 + w(k). & \quad (3) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} B_0 &= \Lambda \begin{bmatrix} -1/\lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -1/\lambda_n \end{bmatrix} \Lambda^{-1} B_P, \\ E_1 &= \Lambda \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 T} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n T} \end{bmatrix}, \\ \Phi(k) &= \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 \tau} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & e^{-\lambda_n \tau} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$E_2 = \Lambda^{-1} B_P, w(k) = E_1 \Phi(k) E_2$$

同理可得

$$\Gamma_1 = B_1 - E_1 \Phi(k) E_2 = B_1 - w(k), \quad (4)$$

其中

$$B_1 = \Lambda \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 T} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n T} \end{bmatrix} \Lambda^{-1} B_P. \quad (5)$$

当 A_P 能化为约当形或有 i 个 0 特征值时 ($0 < i < n$), 仍有类似结果, 但 $B_0, B_1, E_1, \Phi(k), E_2$ 要作相应改变

3 H_2/H 状态观测器设计

针对短时延 NCS (2), 构造如下状态观测器:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \\ &A \hat{x}(k) + B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + \\ &K [y(k) - C A^{-1} (\hat{x}(k) - B_0 u(k-1) - \\ &B_1 u(k-2))] \end{aligned} \quad (6)$$

由假设条件 2), 系统在 k 时刻输入观测器的输出信号为

$$y(k) = C x(k-1) + F_2 \rho(k-1). \quad (7)$$

由系统 (2) 可得

$$x(k-1) = A^{-1}(x(k) - \Gamma_0 u(k-1) - \Gamma_1 u(k-2) - F_1 \rho(k-1)). \quad (8)$$

式(7)和(8)代入(6),得

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & A \hat{x}(k) + B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + (KF_2 - \\ & KCA^{-1}F_1)\rho(k-1) + KCA^{-1}(x(k) - \hat{x}(k) - \\ & (\Gamma_0 - B_0)u(k-1) - (\Gamma_1 - B_1)u(k-2)). \end{aligned} \quad (9)$$

定义 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 为观测器状态估计误差,则状态估计误差方程为

$$\begin{aligned} e(k+1) = & (A - KCA^{-1})e(k) + (\Gamma_0 - B_0)u(k) + \\ & KCA^{-1}(\Gamma_0 - B_0)u(k-1) + (\Gamma_1 - B_1)u(k- \\ & 1) + KCA^{-1}(\Gamma_1 - B_1)u(k-2) + D_1 v(k). \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $D_1 = KCA^{-1}F_1 - KF_2, v(k) = D_1^{-1}F_1\rho(k) + \rho(k-1)$ 可视为新的零均值白噪声向量

式(3)和(4)代入(10),得

$$\begin{aligned} e(k+1) = & (A - KCA^{-1})e(k) + w(k)(u(k) - \\ & u(k-1)) + KCA^{-1}w(k)(u(k-1) - \\ & u(k-2)) + D_1 v(k). \end{aligned} \quad (11)$$

由于 $u(k) - u(k-1)$ 和 $u(k-1) - u(k-2)$ 皆为可测向量,则式(11)可改写成

$$e(k+1) = A_c e(k) + D_1 v(k) + D_2 w^T(k). \quad (12)$$

其中: $A_c = A - KCA^{-1}, D_2 = (u(k) - u(k-1))^T + KCA^{-1}(u(k-1) - u(k-2))^T, w^T(k)$ 可视为随机时延引起的不确定项 由短时延NCS的性质可知 $w^T(k)$ 有界

定义观测器输出残差方程

$$r(k) = H e(k), \quad (13)$$

其中 H 为输出加权矩阵

为使所设计的状态观测器估计输出能较好地跟踪实际系统状态变化,必须使观测器状态估计误差受随机时延引起的不确定项 $w^T(k)$ 和外加白噪声 $v(k)$ 的影响降到最小 根据鲁棒控制理论,可对应给出如下定义:

定义 2 状态观测器(6)称为短时延NCS的全阶鲁棒 H_2/H 状态观测器: 如果存在观测器增益阵 K ,使得观测器输出误差在不考虑干扰项时渐近稳定; 当干扰存在时,对给定的常数 $\gamma > 0$,对应于残差输出通道 $v(k) \rightarrow r(k)$ 的误差方程 $\lim_k E\{r^T(k)r(k)\}$ 的一个上界最小化,以及通道 $w^T(k) \rightarrow r(k)$ 的误差向量满足 $r(k)_2 <$

$$\gamma w^T(k)_2$$

引理 1^[2] 对于短时延NCS(2),如果 (A, C) 可观测,且 A 阵是非奇异阵,则 (A, CA^{-1}) 可观测

引理 2^[6] 对于给定的对称阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$,

其中 S_{11} 是 $r \times r$ 维阵,下面 3 个条件是等价的:

- 1) $S < 0$;
- 2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
- 3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$

定理 1 对于状态观测器输出残差(13),如果 (A, CA^{-1}) 可观测,且存在对称正定阵 P 和给定的常数 $\gamma > 0$,使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * \\ 0 & -\gamma I & * & * \\ P A_c & P D_2 & -P & * \\ H & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

则 $r(k)_2 < \gamma w^T(k)_2$ 必然成立,其中 $*$ 是由矩阵对称性得到的矩阵块

证明 由引理 2,不等式(14)可改写成

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & \gamma I \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由于不等式(15)是严格成立的,总存在适当的常数 $0 < \alpha < 1$,使得下式仍成立:

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & (1 - \alpha)\gamma I \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix}.$$

不考虑干扰项时,对观测器输出误差(12)取 Lyapunov 函数 $V(k) = e^T(k)P e(k)$,则有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) = & V(k+1) - V(k) = \\ & e^T(k+1)P e(k+1) - e^T(k)P e(k) = \\ & e^T(k)(A_c^T P A_c - P)e(k). \end{aligned}$$

由不等式(15)可得到 $P > A_c^T P A_c$,则有 $\Delta V(k) < 0$ 成立,即观测器输出渐近稳定

对于残差通道 $w^T(k) \rightarrow r(k)$,有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) = & e^T(k)(A_c^T P A_c - P)e(k) + \\ & w(k)D_2^T P A_c e(k) + e^T(k)A_c^T P D_2 w^T(k) + \\ & w(k)D_2^T P D_2 w^T(k). \end{aligned}$$

为证明 $\gamma w^T(k)_2$ 是 $r(k)_2$ 的一个上界,考虑 $J_k = r(k)_2^2 - (1 - \alpha)\gamma^2 w^T(k)_2^2$,则

$$J_k = [r(k)_2^2 - (1 - \alpha)\gamma^2 w^T(k)_2^2 +$$

$$\Delta V(k) - \Delta V(k) = \begin{bmatrix} e(k) \\ w^T(k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_c & D_2 \\ H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ w^T(k) \end{bmatrix} - \Delta V(k). \quad (16)$$

由式(16) 可得到 $J_k < -\Delta V(k)$, 即

$$r(k)^2 < (1 - \alpha) \gamma^2 w^T(k)^2 - \Delta V(k). \quad (17)$$

对不等式(17) 两端从 $k = 0$ 到 $k = n$ 求和, 在定义观测器零初始条件下, $\sum_{k=0}^n \Delta V(k) = V(n+1)$. 利用 $w^T(k)$ 是有界函数的性质, 可得

$$\sum_{k=0}^n r(k)^2 < (1 - \alpha) \gamma^2 \sum_{k=0}^n w^T(k)^2 - V(n+1)$$

$$(1 - \alpha) \gamma^2 \sum_{k=0}^n w^T(k)^2 > V(n+1).$$

显然 $V(n+1) > 0$, 从而有 $r(k)^2 < (1 - \alpha) \gamma^2 w^T(k)^2 < \gamma^2 w^T(k)^2 \Rightarrow r(k)^2 < \gamma^2 w^T(k)^2$

定理 1 表明, 在满足一定条件下, 状态观测器(6) 的输出残差对随机时延引起的不确定项 $w^T(k)$ 具有 H 鲁棒性^[6]. 下述定理将进一步保证所设计的状态观测器的输出残差具有对外加白噪声 $v(k)$ 的鲁棒性, 并给出短时延 NCS 鲁棒 H_2/H 状态观测器增益矩阵 K 的确定方法

定理 2 如果 P 是不等式(14) 的一个可行解, 而正定阵 P_2 满足如下 Lyapunov 方程:

$$A_c^T P_2 A_c - P_2 + H^T H = 0, \quad (18)$$

则 $P_2 < P$.

证明 若 P 是不等式(14) 的一个可行解, 则由引理 2 的性质可得

$$A_c^T P A_c - P + H^T H < 0 \quad (19)$$

由 A_c 的渐近稳定性即可推出 $P_2 < P$.

定理 3 对于给定的常数 $\gamma > 0$, 下述优化问题:

$$\min_{A_c^*, P} \text{trace}(D_1^T P D_1), \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} -P & * & * & * \\ 0 & -\gamma^2 I & * & * \\ P A_c & P D_2 & -P & * \\ H & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

有最优解 A_c^* 和 P^* ; 相应地 $\lim_k E\{r^T(k)r(k)\} = \text{trace}(D_1^T P^* C_1)$; 观测器增益阵 K 由下式确定:

$$K = (A - A_c^*)(CA^{-1})^{-1}. \quad (22)$$

证明 定理 3 是一个具有线性矩阵不等式约

束和线性目标函数的凸优化问题, 必然有解. 为求解所设计观测器的 H_2 性能指标, 考虑观测器(6) 的残差输出通道 $v(k) \rightarrow r(k)$, 可得

$$\begin{cases} e(k+1) = A_c e(k) + D_1 v(k), \\ r(k) = H e(k). \end{cases} \quad (23)$$

由式(23), 得观测器输出残差 $r(k)$ 相对于白噪声 $v(k)$ 的传递函数 $G_{rv}(z) = H(zI - A_c)D_1$, 其中 $z = e^{j\theta}$, $\theta \in [0, 2\pi]$; 它的 H_2 范数记为 $\|G_{rv}(z)\|_2$. 令 $W(k) = E\{e(k)e^T(k)\}$, 则

$$E\{r^T(k)r(k)\} = E\{e^T(k)H^T H e(k)\} = E\{\text{trace}(H e(k)e^T(k)H^T)\} = \text{trace}(H W(k)H^T). \quad (24)$$

由定理 1 知系统(23) 稳定, 则 $\lim_k W(k)$ 必存在, 且等于它的能控格拉姆矩阵, 即

$$\lim_k W(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \exp(A_c k) D_1 D_1^T \exp(A_c^T k). \quad (25)$$

由式(24) 和(25) 可得

$$\lim_k E\{r^T(k)r(k)\} = \text{trace} \left(\sum_{k=0}^{\infty} H \exp(A_c k) D_1 D_1^T \exp(A_c^T k) H^T \right) = \text{trace} \left(\sum_{k=0}^{\infty} D_1^T \exp(A_c^T k) H^T H \exp(A_c k) D_1 \right).$$

取 $P_2 = \sum_{k=0}^{\infty} \exp(A_c^T k) H^T H \exp(A_c k)$, 即为式(23) 的能观格拉姆矩阵, 可得 $\lim_k E\{r^T(k)r(k)\} = \text{trace}(D_1^T P_2 D_1)$. 由能观格拉姆矩阵的性质可知 $P_2 > 0$, 且满足 Lyapunov 方程(18).

由 Parseval 引理知

$$\|G_{rv}(z)\|_2^2 =$$

$$\text{trace} \left(\sum_{k=0}^{\infty} H \exp(A_c k) D_1 D_1^T \exp(A_c^T k) H^T \right),$$

即 $\lim_k E\{r^T(k)r(k)\} = \text{trace}(D_1^T P_2 D_1)$ 是观测器输出残差 $r(k)$ 相对于白噪声 $v(k)$ 传递函数的 H_2 范数的平方. 根据定理 2, 可用 $\text{trace}(D_1^T P^* D_1)$ 作为估计残差 H_2 性能的上界^[7].

因为 A_c^* 和 P^* 是定理 3 的最优解, 而定理 3 的约束条件就是定理 1 的结论, 其目标函数在 $P = P^*$ 时为观测器的 H_2 性能指标的上界, 所以 A_c^* 和 P^* 是状态观测器(6) 满足鲁棒 H_2/H 性能条件下的解. 结合式(12) 可得

$$A_c^* = A - KCA^{-1}. \quad (26)$$

由式(26) 可知, 短时延 NCS 鲁棒 H_2/H 状态观测器增益矩阵 K 可由式(22) 确定

4 仿真算例

考虑短时延 NCS, 其参数阵为

$$A_p = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} -0.4 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$C_p = C = \begin{bmatrix} 0.35 \\ -0.65 \end{bmatrix}^T.$$

设系统采样周期 $T = 0.01$ s, 由于 A_p 是对角阵, 可认为 $\Lambda = \Lambda^{-1} = I_{2 \times 2}$ 由式(3)和(5)知

$$B_0 = \begin{bmatrix} -1.250 \\ -2.000 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1.0317 \\ 1.0008 \end{bmatrix}.$$

由系统(2)得 $A = \begin{bmatrix} 1.008 & 0 \\ 0 & 1.005 \end{bmatrix}$ 为非奇异阵, 且

$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = 2$, 即 (A, C) 可观测 由引理1知 (A, CA^{-1}) 可观测

按式(6)构造系统的状态观测器, 取其输出残差加权阵 $H = C$. 根据定理3, 对于给定的常数 $Y = 0.8$, 应用LM I工具箱中的求解器 `mincx`, 计算得到观测器增益阵 $K = [-0.0643 \quad 0.8769]^T$, 对应的 $P^* = \begin{bmatrix} 1.5634 & -1.8635 \\ -1.8635 & 3.6721 \end{bmatrix} > 0$, 观测器 H_2 性能指标的上界为 $\text{trace}(D^T P^* D) = 0.1521$.

仿真时加入均值为零, 方差为0.2的白噪声干扰 观测器仿真200步的结果如图2和图3所示

由图2和图3可以看出, 尽管存在外加白噪声

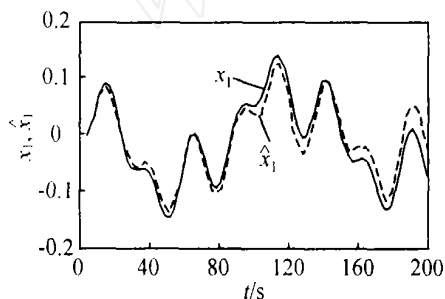


图2 状态 x_1 及其估计 \hat{x}_1

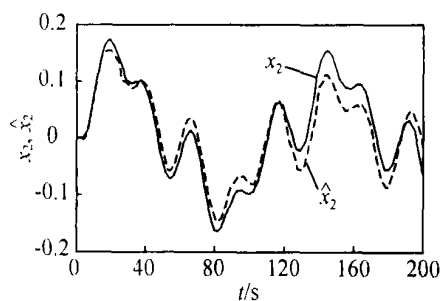


图3 状态 x_2 及其估计 \hat{x}_2

和系统随机时延所引起的有界不确定项干扰, 但所设计观测器的输出仍能较好地跟踪实际系统状态变化, 其跟踪误差总局限在很小的范围内, 表现出良好的准确性和鲁棒性

5 结论

在NCS的状态观测器设计中, 网络随机时延的影响一直是难以解决的问题 本文针对受白噪声干扰的短时延NCS, 利用矩阵理论, 提出将网络随机时延对观测器的影响看成是有界的未知输入干扰, 在不改变闭环系统结构的前提下, 设计了系统的鲁棒 H_2/H_∞ 状态观测器 与现有的NCS状态估计方法相比, 本文方法具有不影响NCS的性能、计算量小、鲁棒性强的特点, 为进一步实现NCS在线状态检测和反馈控制提供了条件

参考文献(References)

- [1] Zhang W, Brancky M S, Philips S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 84-99
- [2] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57-64
- [3] Mills D L. Jitter-based delay-boundary prediction of wide-area networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2001, 9(5): 578-590
- [4] 于之训, 蒋平, 陈辉堂, 等. 具有传输延时的网络控制系统中状态观测器设计[J]. *信息与控制*, 2000, 29(2): 125-130
(Yu Z X, Jiang P, Chen H T, et al. Design of states observer for network control systems with transfer delay [J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 125-130)
- [5] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 具有随机通讯延迟和噪声干扰的网络控制系统[J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 518-522
(Yu Z X, Chen H T, Wang Y J. Control of network system with random communication delay and noise disturbance[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 518-522)
- [6] Yu L, Chu J, Su H Y. Robust memoryless controller for linear time-delay systems with norm-bounded time-varying uncertainty [J]. *Automatica*, 1996, 32(12): 1759-1762
- [7] Palhares R M, Peres P L D. LM I approach to the mixed H_2/H_∞ filtering design for discrete-time uncertain systems[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 102(2): 239-261