

不确定非线性网络化系统的鲁棒 H_∞ 控制

戴建国, 崔宝同

(江南大学 通信与控制工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 用T-S(Takagi-Sugeno)模糊方法研究了带有参数不确定的非线性网络化系统的鲁棒控制. 首先, 考虑到诱导时延和数据丢包等网络因素的影响, 基于事件驱动的保持器的更新序列建立闭环反馈系统的采样模型, 并将其转化为状态中附加两个时滞变量的连续T-S模糊系统. 然后, 利用时滞系统方法, 分析不确定闭环模糊系统的鲁棒 H_∞ 性能, 并设计相应的鲁棒 H_∞ 模糊控制器. 最后, 仿真例子表明了方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; T-S模糊模型; 时滞系统; 采样系统; 事件驱动

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust H-infinity control of nonlinear networked systems with uncertainty

DAI Jian-guo, CUI Bao-tong

(College of Communications and Control Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: The robust control for nonlinear networked systems with parameter uncertainties by the T-S(Takagi-Sugeno) fuzzy approach is investigated. Firstly, with consideration of the effect of network conditions, such as network-induced delays and data packet dropouts, we develop a sampled-data model for the closed-loop feedback system based on the updating sequence of the event-driven holder. This model is converted to a continuous T-S fuzzy system with two additive-delay components in the states. Next, by using the delay system approach, the robust H-infinity performance for the uncertain closed-loop fuzzy system is analyzed, and the robust H-infinity fuzzy controller is designed. Finally, a simulation example is provided to illustrate the effectiveness of method.

Key words: networked control systems; T-S fuzzy mode; time-delay systems; sampled-data systems; event driven

1 引言(Introduction)

近年来, 网络控制系统(networked control systems, NCSs)在现代控制工程中受到广泛应用, 而且, 有关NCSs的分析与综合也取得一批研究成果^[1~3]. 同时, 由于T-S模糊模型能够很好地逼近非线性系统, 所以应用T-S模型对非线性NCSs进行稳定性分析和控制器设计方面也有很多研究^[4,5].

众所周知, 网络会引起不确定的诱导时延和数据丢包, 所以, 成功传递至执行器的数据包不再依照采样序列. 特别地, 当采样信号经过 A/D 转换器量化时, 由于其孔径时间通常远小于采样周期, 所以一个采样周期内所保持的状态信号有可能被事件驱动的量化器多次量化, 并以各个不同的传输时延进行网络数据的分别传输. 因此, 以上情况下难以有效地基于采样序列建立闭环NCSs的状态反馈模型, 这也是文献[1,4,5]所采用的方法值得改进的原因.

另外, 当驱动端的零阶保持器(zero-order holder, ZOH)采用事件驱动时, 则经过信号量化、网络传递时延和数据丢包后成功传输至执行器的每个信号都能导致ZOH的一次更新. 进而, 通过限制ZOH相邻更新时刻的间隔, 就能使得NCSs在一定时间区间内至少进行一次成功的信息传递以保证反馈系统的稳定性. 例如, 文献[6,7]以ZOH的更新时刻为模型建立的时间序列, 分别研究了线性NCSs的 H_∞ 反馈控制和 H_∞ 鲁棒滤波器设计.

然而, 当控制对象表现为很强的非线性特性时, 文献[6,7]的研究结果不再适用. 有鉴于此, 本文同时考虑到模型参数的一类有理非线性不确定性, 采用T-S模糊方法研究非线性NCSs的鲁棒 H_∞ 控制. 首先, 基于ZOH的更新序列, 建立闭环NCSs的采样模型, 并将其转化为状态变量中附加两个不同性质时滞变量的连续时间域模糊系统. 然后, 对不确定闭环

模糊系统进行鲁棒 H_∞ 性能分析和 H_∞ 控制器综合. 由于考虑了闭环系统内部的信号采样和零阶保持器的行为, 所以被控对象不需要离散化.

2 系统描述(System description)

考虑如图1的NCSs, 假设非线性被控对象可以描述为T-S模糊系统, 其第 i 条规则为:

If $z_1(t)$ is W_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is W_p^i , Then

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ (A_i + \Delta A_i(t))x(t) + \\ (B_i + \Delta B_i(t))u(t) + B_{1i}w(t) = \\ \bar{A}_i x(t) + \bar{B}_i u(t) + B_{1i}w(t), \\ y(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $z_j(t)$ ($j = 1, \cdots, p$) 为前件变量, W_j^i ($i = 1, \cdots, n$) 是模糊集, n 为模糊规则数; $x(t) \in \mathbb{R}^r$ 是系统状态, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ 是输出, $w(t) \in \mathbb{R}^p$ 是外部扰动; $A_i, B_i, B_{1i}, C_i, D_i$ 为常数矩阵, $\bar{A}_i = A_i + \Delta A_i(t), \bar{B}_i = B_i + \Delta B_i(t)$. 另外, 全文假设前件变量不依赖于输入变量和扰动.

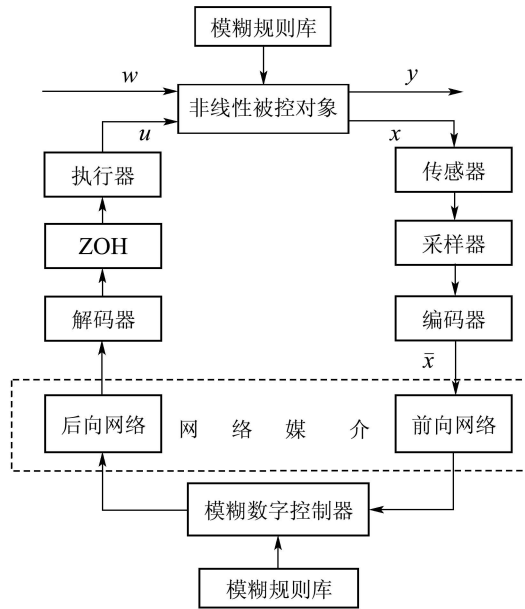


图1 非线性NCSs结构图

Fig. 1 Structural diagram of nonlinear NCSs

$\Delta A_i(t), \Delta B_i(t)$ 反映系统模型参数的一类有理非线性不确定性, 即具有如下结构形式^[8]:

$$[\Delta A_i(t) \quad \Delta B_i(t)] = H_i \Delta [E_{ai} \quad E_{bi}], \quad (2)$$

$$\Delta = [I - F(t)\mathcal{J}]^{-1} F(t). \quad (3)$$

其中: $H_i, E_{ai}, E_{bi}, \mathcal{J}$ 是常数矩阵, $F(t) \in \mathbb{R}^n$. 且有

$$F^T(t)F(t) \leq I. \quad (4)$$

另外, 为保证对所有允许的不确定矩阵 $F(t)$, $I - F(t)\mathcal{J}$ 是可逆的, 必须

$$I - \mathcal{J}\mathcal{J}^T > 0. \quad (5)$$

显然, 当 $\mathcal{J} = 0$ 时, 条件(2)~(5)所描述的不确定性就是通常所说的范数有界不确定. 采用单点模糊化, 乘积推理, 中心加权反模糊化的推理方法, 则全局模糊系统模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t)) (\bar{A}_i x(t) + \bar{B}_i u(t) + B_{1i} w(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t)) (C_i x(t) + D_i u(t)). \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\mu_i(z(t)) = \varpi_i(z(t)) / \sum_{i=1}^n \varpi_i(z(t)),$$

$$\varpi_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p W_j^i(z_j(t)).$$

$W_j^i(z_j(t))$ 表示 $z_j(t)$ 在 W_j^i 中的隶属度函数, 且:

$$\mu_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t)) = 1,$$

$$z(t) = [z_1(t) \quad z_2(t) \cdots z_p(t)]^T.$$

如图1所示, 由于编解码器是自动化装置, 可以不考虑它们对系统控制效果的影响, 且控制器用计算机程序实现, 控制输出采用数字量保持方案. 假设传感器和采样器为时钟驱动, 且时钟同步; 采样器的采样周期为 h ; 控制器和ZOH以及执行器为事件驱动. 由于ZOH的更新信号从采样时刻需经历信号传递时延 τ_k ($\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$, τ_k^{sc} 和 τ_k^{ca} 分别是网络的前后向诱导时延) 才能到达保持器, 因此, 若标记ZOH的更新时刻为 t_k ($k = 1, 2, \cdots$), 则基于平行分布补偿机制可以设计如下第 i 条模糊控制规则:

If $z_1(t)$ is W_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is W_p^i , Then

$$u(t) = K_i x(t_k - \tau_k),$$

$$t_k \leq t < t_{k+1}, \quad i = 1, \cdots, n. \quad (7)$$

其中 K_i 为局部控制增益. 所以, 全局模糊控制律为

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t_k - \tau_k)) K_i x(t_k - \tau_k),$$

$$t_k \leq t < t_{k+1}. \quad (8)$$

注1 网络诱导时延总是存在的^[9], 且是不可导的区间时滞^[7]. 因此, 可以假设网络信号传递时延 τ_k 存在最小值 τ_m 和最大值 τ_M , 即 $0 < \tau_m \leq \tau_k \leq \tau_M$.

注2 网络数据丢包的结果是该事件的时间区间里ZOH没有进行事件更新, 从而采样器的效果是空采样. 因此, 若假设一个采样周期内A/D转换器执行一次, 那么网络丢失一个数据包, 则对执行器端的影响就是ZOH的更新时刻延后一个采样周期. 换言之, 网络丢失一个数据包的情况等效为ZOH的更新周期内的一个采样周期的时延.

显然, ZOH的更新周期是变化和不确定的, 决定于网络诱导时延和数据丢包数. 首先, 在时刻 t_k 更新

信号的传递时延为 τ_k , 而在时刻 t_{k+1} 更新信号的传递时延为 τ_{k+1} , 所以由诱导时延在时间间隔 $t_{k+1}-t_k$ 内引起的时延为 $\tau_{k+1}-\tau_k$. 其次, 由注2可知, 若将从更新时刻 t_k 到更新时刻 t_{k+1} 所累积的数据丢包数记为 δ_{k+1} , 则由数据丢包在 $t_{k+1}-t_k$ 内引起的时延为 $\delta_{k+1}h$. 最后, 从时刻 t_k 起, 须有一个成功传递的数据包在时刻 t_{k+1} 更新ZOH, 那么其在 $t_{k+1}-t_k$ 内除了经历传递时延 τ_k 从采样器到达ZOH外, 本身也引起一个采样周期的时延. 所以, 有如下表达式:

$$t_{k+1}-t_k=(\delta_{k+1}+1)h+\tau_{k+1}-\tau_k. \quad (9)$$

由式(6)和式(8)可得如下以采样系统表示的闭环NCSs的全局模糊模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\mu_i(z(t))\mu_j(z(t_k-\tau_k))(\bar{A}_i x(t)+\bar{B}_i K_j x(t_k-\tau_k)+B_{1i} w(t)), \\ y(t)=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\mu_i(z(t))\mu_j(z(t_k-\tau_k))(C_i x(t)+D_i K_j x(t_k-\tau_k)), \quad t_k \leq t < t_{k+1}. \end{cases} \quad (10)$$

仿照文献[6]的方法, 可以令

$$t_k-\tau_k=t-\tau_m-\tau(t), \quad (11)$$

其中:

$$\tau(t)=t-t_k+\tau_k-\tau_m, \quad t_k \leq t < t_{k+1},$$

则

$$\begin{aligned} 0 &\leq \tau(t) < t_{k+1}-t_k+(\tau_k-\tau_m)= \\ &(\delta_{k+1}+1)h+\tau_{k+1}-\tau_k+(\tau_k-\tau_m) \leq \\ &(\bar{\delta}+1)h+\tau_m-\tau_m \triangleq \lambda, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\bar{\delta}$ 表示ZOH的相邻两个更新时刻之间的最大数据丢包数, 满足 $0 \leq \delta_k \leq \bar{\delta} (k=1, 2, \dots)$.

结合注1, 式(9)和式(12), 可知

$$t_{k+1}-t_k \leq (\bar{\delta}+1)h+\tau_m-\tau_m=\lambda. \quad (13)$$

即表示ZOH更新周期的最大允许值为 λ .

将式(11)代入式(10), 并简记

$$\begin{aligned} \mu_i &= \mu_i(z(t)), \\ \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} &= \mu_j(z(t-\tau(t)-\tau_m)), \end{aligned}$$

则可得连续时间域闭环系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\mu_i\mu_j^{\tau_m, \tau(t)}[\bar{A}_i x(t)+\bar{B}_i K_j x(t-\tau(t)-\tau_m)+B_{1i} w(t)], \\ y(t)=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\mu_i\mu_j^{\tau_m, \tau(t)}[C_i x(t)+D_i K_j x(t-\tau(t)-\tau_m)], \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{并且 } \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} \geq 0, \sum_{j=1}^n \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} = 1.$$

定义 1 给定 $\gamma > 0$, 对于所有满足式(2)~(5)的不确定性, 若以下条件被满足, 则称闭环系统(14)

具有H_∞性能界 γ 鲁棒渐近稳定:

1) $w(t) \equiv 0$ 时, 闭环系统(14)是渐近稳定的;

2) 零初始条件下, 对于任意非零的 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 控制输出 $y(t)$ 满足 $\|y(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2$.

3 主要结果(Main results)

本文将设计形如式(7)的反馈控制率, 使得闭环系统(14)在H_∞性能界 γ 下鲁棒渐近稳定.

定理 1 考虑图1的NCSs. 给定 $\gamma > 0$ 和正常数 $\mathcal{U}, \tau_m, \lambda, \rho$, 满足式(5)的常数矩阵 $\mathcal{J}$ 以及局部控制增益 $K_j (j=1, \dots, n)$, 如果存在对称正定矩阵 $P, Q, M_l (l=1, 2)$ 使得如下线性矩阵不等式组(15)成立, 则闭环系统(14)是具有H_∞范数界 γ 鲁棒渐近稳定的:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{ij} & \rho S & N_{ij}^T & \Psi_{ij} \\ * & -\rho I & \rho \mathcal{J}^T & 0 \\ * & * & -\rho I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$i, j = 1, \dots, n.$$

$$\text{其中: } \Pi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_{11ij} & \Pi_{12ij} & \Pi_{13ij} & \Pi_{14ij} & \Pi_{15ij} \\ * & \Pi_{22ij} & \Pi_{23ij} & 0 & 0 \\ * & * & \Pi_{33ij} & \Pi_{34ij} & 0 \\ * & * & * & \Pi_{44ij} & \Pi_{45ij} \\ * & * & * & * & \Pi_{55ij} \end{bmatrix},$$

$$N_{ij} = [E_{ai} \ 0 \ E_{bi} K_j \ 0 \ 0],$$

$$\Psi_{ij} = [\Pi_{16ij}^T \ 0 \ \Pi_{17ij}^T \ 0 \ 0]^T,$$

$$\Pi_{11ij} = P A_i + A_i^T P + Q - M_1,$$

$$\Pi_{12ij} = M_1, \quad \Pi_{13ij} = P B_i K_j,$$

$$\Pi_{14ij} = \mathcal{U} A_i^T P, \quad \Pi_{15ij} = P B_{1i},$$

$$\Pi_{16ij} = C_i^T, \quad \Pi_{22ij} = -Q - M_1 - M_2,$$

$$\Pi_{23ij} = M_2, \quad \Pi_{33ij} = -M_2,$$

$$\Pi_{34ij} = \mathcal{U} K_j^T B_i^T P, \quad \Pi_{36ij} = K_j^T D_i^T,$$

$$\Pi_{44ij} = \tau_m^2 M_1 + \lambda^2 M_2 - 2\mathcal{U} P,$$

$$\Pi_{45ij} = \mathcal{U} P B_{1i}, \quad \Pi_{55ij} = -\gamma^2 I,$$

$$S = [H^T P \ 0 \ 0 \ \mathcal{U} H^T P \ 0]^T.$$

证 选取如下Lyapunov函数:

$$V(t) = x^T(t) P x(t) + \int_{t-\tau_m}^t x^T(s) Q x(s) ds +$$

$$\tau_m \int_{t-\tau_m}^t (s - (t - \tau_m)) \dot{x}^T(s) M_1 \dot{x}(s) ds +$$

$$\lambda \int_{t-\nu}^{t-\tau_m} [s - (t - \nu)] \dot{x}^T(s) M_2 \dot{x}(s) ds + \lambda^2 \int_{t-\tau_m}^t \dot{x}^T(s) M_2 \dot{x}(s) ds. \quad (16)$$

其中: $P, Q, M_l (l=1, 2)$ 为正定对称矩阵, $\nu = \tau_m + \lambda$. $V(t)$ 沿着系统(14)的轨迹关于 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^n \mu_i (x^T(t) (P \bar{A}_i + \bar{A}_i^T P) x(t) + 2x^T(t) P B_{1i} w(t)) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} (2x^T(t) P \bar{B}_i K_j x(t - \tau(t) - \tau_m)) + \\ & x^T(t) Q x(t) - x^T(t - \tau_m) Q x(t - \tau_m) + \\ & \tau_m^2 \dot{x}^T(t) M_1 \dot{x}(t) + \lambda^2 \dot{x}^T(t) M_2 \dot{x}(t) - \\ & \tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{x}^T(s) M_1 \dot{x}(s) ds - \\ & \lambda \int_{t-\nu}^{t-\tau_m} \dot{x}^T(s) M_2 \dot{x}(s) ds. \end{aligned} \quad (17)$$

对式(17)的积分项应用文献[10]的引理3可得

$$\begin{aligned} -\tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{x}^T(s) M_1 \dot{x}(s) ds \leq & -(\int_{t-\tau_m}^t \dot{x}(s) ds)^T M_1 (\int_{t-\tau_m}^t \dot{x}(s) ds), \\ -\lambda \int_{t-\nu}^{t-\tau_m} \dot{x}^T(s) M_2 \dot{x}(s) ds \leq & -(\int_{t-(\tau(t)+\tau_m)}^{t-\tau_m} \dot{x}(s) ds)^T M_2 (\int_{t-(\tau(t)+\tau_m)}^{t-\tau_m} \dot{x}(s) ds). \end{aligned} \quad (18)$$

(19)

另外, 对于给定的 $\mathcal{U} > 0$, 由式(14)可知

$$\begin{aligned} -2\mathcal{U} \dot{x}^T(t) P \dot{x}(t) + \\ 2\mathcal{U} \dot{x}^T(t) P (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} (\bar{A}_i x(t) + \\ \bar{B}_i K_j x(t - \tau(t) - \tau_m) + B_{1i} w(t))) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

同时, 对式(14)应用文献[5]的引理1, 可得

$$\begin{aligned} y^T(t) y(t) \leq & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} (C_i x(t) + D_i K_j x(t - \tau(t) - \tau_m))^T (C_i x(t) + D_i K_j x(t - \tau(t) - \tau_m)). \end{aligned} \quad (21)$$

结合式(17)~(21), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) + y^T(t) y(t) - \gamma^2 w^T(t) w(t) \leq & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} [\xi^T(t) (\Sigma_{ij} + \Psi_{ij} \Psi_{ij}^T) \xi(t)], \end{aligned} \quad (22)$$

其中:

$$\xi(t) = [x^T(t) \quad x^T(t - \tau_m) \quad x^T(t - \tau(t) - \tau_m) \quad \dot{x}^T(t) \quad w^T(t)]^T,$$

$$\Sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11ij} & \Pi_{12ij} & \Sigma_{13ij} & \Sigma_{14ij} & \Pi_{15ij} \\ * & \Pi_{22ij} & \Pi_{23ij} & 0 & 0 \\ * & * & \Pi_{33ij} & \Sigma_{34ij} & 0 \\ * & * & * & \Pi_{44ij} & \Pi_{45ij} \\ * & * & * & * & \Pi_{55ij} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{11ij} &= P \bar{A}_i + \bar{A}_i^T P + Q - M_1, \quad \Sigma_{13ij} = P \bar{B}_i K_j, \\ \Sigma_{14ij} &= \mathcal{U} \bar{A}_i^T P, \quad \Sigma_{34ij} = \mathcal{U} K_j^T \bar{B}_i^T P. \end{aligned}$$

式(23)可写成

$$\Sigma_{ij} = \Pi_{ij} + S \Delta N_{ij} + N_{ij}^T \Delta^T S^T.$$

所以应用文献[8]的引理2, 条件

$$\begin{aligned} \Sigma_{ij} + \Psi_{ij} \Psi_{ij}^T = \\ \Pi_{ij} + \Psi_{ij} \Psi_{ij}^T + S \Delta N_{ij} + N_{ij}^T \Delta^T S^T < 0 \end{aligned}$$

成立的充要条件是, 当且仅当存在常数 $\rho > 0$ 使得

$$\begin{bmatrix} \Pi_{ij} + \Psi_{ij} \Psi_{ij}^T & \rho S & N_{ij}^T \\ * & -\rho I & \rho \mathcal{J}^T \\ * & * & -\rho I \end{bmatrix} < 0. \quad (24)$$

利用Schur补可知式(15)能保证式(24)成立, 从而

$$\dot{V}(t) + y^T(t) y(t) - \gamma^2 w^T(t) w(t) < 0. \quad (25)$$

对式(25)的左边从0到 T 积分, 并令 $T \rightarrow \infty$, 则在零初始条件下可得

$$\|y(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2.$$

其次, 当 $w(t) \equiv 0$ 时, 按照同样的方法, 可解得

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i \mu_j^{\tau_m, \tau(t)} [\zeta^T(t) \Omega_{ij} \zeta(t)], \quad (26)$$

其中

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

Ω_{ij} 为式(23)中 Σ_{ij} 的四阶主子式构成的矩阵. 进而, 可知式(14)渐近稳定. 根据定义1, 定理1得证.

证毕.

定理2 考虑图1的NCSs. 给定 $\gamma > 0$ 和正常数 $\mathcal{U}, \tau_m, \lambda, \rho$, 满足式(5)的常数矩阵 $\mathcal{J}$. 如果存在对称正定矩阵 $X, \bar{Q}, \bar{M}_l (l = 1, 2)$ 和任意适当维数矩阵 $Y_j (j = 1, \dots, n)$, 使得下式(27)成立, 则存在形如式(7)的控制律使得闭环系统(14)具有 H_∞ 范数界 γ 鲁棒渐近稳定:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{ij} & \rho \bar{S} & \bar{N}_{ij}^T & A_{ij} \\ * & -\rho I & \rho \mathcal{J}^T & 0 \\ * & * & -\rho I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (27)$$

其中:

$$\Gamma_{ij} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11ij} & \Gamma_{12ij} & \Gamma_{13ij} & \Gamma_{14ij} & \Gamma_{15ij} \\ * & \Gamma_{22ij} & \Gamma_{23ij} & 0 & 0 \\ * & * & \Gamma_{33ij} & \Gamma_{34ij} & 0 \\ * & * & * & \Gamma_{44ij} & \Gamma_{45ij} \\ * & * & * & * & \Gamma_{55ij} \end{bmatrix},$$

$$\bar{S} = [H^T \ 0 \ 0 \ \mathcal{U}H^T \ 0]^T, \quad A_{ij} = [\Gamma_{16ij}^T \ 0 \ \Gamma_{36ij}^T \ 0 \ 0]^T,$$

$$\Gamma_{11ij} = A_i X + X A_i^T + \bar{Q} - \bar{M}_1,$$

$$\Gamma_{12ij} = \bar{M}_1, \quad \Gamma_{13ij} = B_i Y_j, \quad \Gamma_{14ij} = \mathcal{U} X A_i^T,$$

$$\Gamma_{15ij} = B_{1i}, \quad \Gamma_{16ij} = X C_i^T,$$

$$\Gamma_{22ij} = -\bar{Q} - \bar{M}_1 - \bar{M}_2, \quad \Gamma_{23ij} = \bar{M}_2,$$

$$\Gamma_{33ij} = -\bar{M}_2, \quad \Gamma_{34ij} = \mathcal{U} Y_j^T B_i^T,$$

$$\Gamma_{36ij} = Y_j^T D_i^T, \quad \Gamma_{44ij} = \tau_m^2 \bar{M}_1 + \lambda^2 \bar{M}_2 - 2\mathcal{U} X,$$

Rule 1 : If $x_1(t)$ is about 0, Then $\dot{x}(t) = (A_1 + \Delta A_1(t)) \times x(t) + B_1 u(t) + w(t), y(t) = C_1 x(t) + D_1 u(t)$,
 Rule 2 : If $x_1(t)$ is about $\frac{\pi}{2}$, Then $\dot{x}(t) = (A_2 + \Delta A_2(t)) \times x(t) + B_2 u(t) + w(t), y(t) = C_2 x(t) + D_2 u(t)$.

隶属度函数为:

$$\mu_1(x_1(t)) = (0.5\pi - |x_1(t)|) / (0.5\pi),$$

$$\mu_2(x_1(t)) = 1 - \mu_1(x_1(t)).$$

外部干扰取为

$$w(t) = 0.5 \sin(2\pi t) \exp(-0.5t).$$

系数矩阵取为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-(0.5mgl + Mgl)}{J} & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-2(0.5mgl + Mgl)}{\pi J} & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \end{bmatrix}, \quad C_1 = C_2 = [0 \ 1],$$

$$D_1 = D_2 = 0.$$

式(2)~(5)所示的参数不确定取为: H 为 2 阶单位阵,

$$E_{a1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}, \quad E_{b1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{J} = 0, \quad F(t) = \sin t.$$

对于网络环境, 可以假设采样周期为 $h = 0.01$ s; 网络信号传递时延的最小值为 $\tau_m = 0.01$ s, 最大值为 $\tau_M = 0.05$ s; ZOH 相邻更新时刻间的最大数据丢包数为 $\bar{\delta} = 1$. 据此, 可解得 $\lambda = 0.06$ s.

当选取 $\mathcal{U} = 0.1, \rho = 0.3$, 利用 MATLAB 可从定理 2 (最小化 γ^2) 解得最优 H_∞ 性能界为 $\gamma^* = 0.2345$,

$$\Gamma_{45ij} = \mathcal{U} B_{1i}, \quad \Gamma_{55ij} = -\gamma^2 I,$$

$$\bar{N}_{ij} = [E_{ai} X \ 0 \ E_{bi} Y_j \ 0 \ 0].$$

同时, 反馈增益为 $K_j = Y_j X^{-1} (j = 1, \dots, n)$.

4 仿真例子(Simulation example)

假设图 1 的被控对象为单连接刚体机器人手臂^[5]:

$$J\ddot{\theta} = -(0.5mgl + Mgl) \sin \theta + u, \quad (28)$$

其中: θ 为机器人手臂的旋转角, $m = 1.5$ kg 为负载的质量, $M = 3$ kg 为手臂的质量, $g = 9.8$ m/s² 是重力加速度; $l = 0.5$ m 和 $J = 0.875$ kg · m² 分别为手臂的长度和惯性; u 表示手臂关节处的转矩输入.

当定义 $x_1(t) = \theta, x_2(t) = \dot{\theta}$, 则非线性系统(28) 可用如下 T-S 模糊模型描述^[5]:

控制增益为 $K_1 = K_2 = [-1.7454 \ -9.3413]$.

当初始状态取为 $[\frac{\pi}{6} \ 0]^T$ 时, 闭环系统(14) 的仿真曲线如图 2 所示.

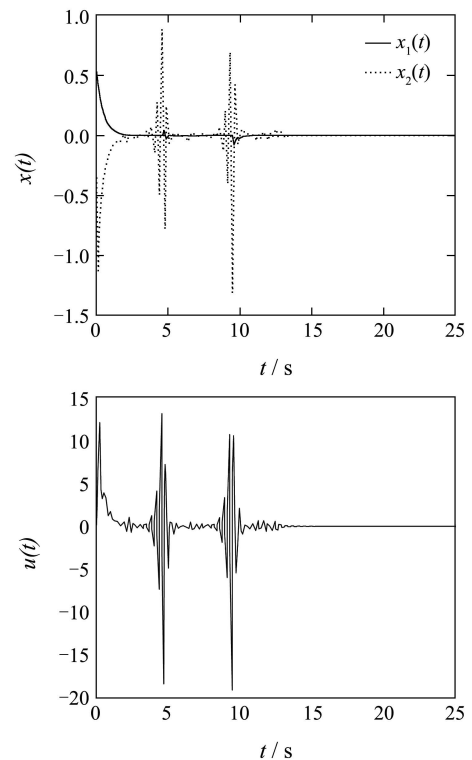


图 2 闭环系统(14)的状态响应和控制输入曲线

Fig. 2 State response and control input curve of the closed-loop system (14)

5 结论(Conclusion)

由于信号量化, 诱导时延和数据丢包等网络因素的影响, 传感器端时钟采样的数据无法有序和

完整地到达驱动端,并对闭环反馈系统的建模带来不利的影响.有鉴于此,本文采用执行器端ZOH的更新信号,建立不确定非线性NCSs的T-S模糊模型,并设计鲁棒 H_∞ 状态反馈模糊控制器.实际模型的仿真验证了所提方法的可行性.

参考文献(References):

- [1] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty[J]. *Automatica*, 2005, 41(6): 999 – 1007.
- [2] 薛燕, 刘克. 基于预测值控制的变采样网络控制系统[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 657 – 660.
(XUE Yan, LIU Ke. Variable-sampling-rate networked control systems based on prediction-value control[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 657 – 660.)
- [3] MA C L, FANG H J. Research on stochastic control of networked control system[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(2): 500 – 507.
- [4] JIA X C, ZHANG D W, ZHANG L H, et al. Modeling and stabilization for a class of nonlinear networked control systems: a T-S fuzzy approach[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(6): 1031 – 1037.
- [5] ZHANG H G, YANG J, SU C Y. T-S fuzzy-model-based robust H_∞ design for networked control systems with uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2007, 3(4): 289 – 301.
- [6] GAO H J, CHEN T W, LAM J. A new delay system approach to network-based control[J]. *Automatica*, 2008, 44(1): 39 – 52.
- [7] GAO H J, CHEN T W. H_∞ estimation for uncertain systems with limited communication capacity[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(11): 2070 – 2084.
- [8] LI L, LIU X D. New approach on robust stability for uncertain T-S fuzzy systems with state and input delays[J]. *Chaos, Solitons and Fractal*, 2009, 40(5): 2329 – 2339.
- [9] YUE D, HAN Q L. Network-based robust H_∞ filtering for uncertain linear systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 4(11): 4293 – 4301.
- [10] LIEN C H, YU K W, CHEN W D, et al. Stability criteria for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems with interval time-varying delay[J]. *IET Control Theory Applications*, 2007, 1(3): 764 – 769.

作者简介:

戴建国 (1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为网络控制系统和时滞系统, E-mail: xuehualuanwu@126.com;
崔宝同 (1960—), 男, 教授, 研究方向为大系统的建模和控制.