

文章编号: 1000-8152(2004)06-1020-05

## 时延网络化控制系统的 $H_2/H_\infty$ 混合控制

谢林柏<sup>1,2</sup>, 方华京<sup>1</sup>, 纪志成<sup>2</sup>, 郑英<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 江南大学 控制科学与工程研究中心, 江苏 无锡 214036)

**摘要:** 针对存在多步随机传输时延的网络化控制系统模型, 研究了其随机稳定性及  $H_2/H_\infty$  混合控制问题. 在一定的系统通信控制模式下, 网络传输时延可以建模为一个马尔可夫随机过程, 通过增广系统状态的方法将原系统转化为一个具有随机跳变系数的离散系统, 同时通过建立随机跳变 Lyapunov 函数, 构建了满足系统随机稳定的  $H_\infty$  次优和  $H_2/H_\infty$  混合控制状态反馈控制器. 该控制器可通过求解一组耦合的矩阵不等式而得. 仿真结果表明了此方法的可行性.

**关键词:** 网络化控制系统;  $H_2/H_\infty$  混合控制; 随机时延; 马尔可夫过程

**中图分类号:** TP202      **文献标识码:** A

## Mixed H-two/H-infinity control of networked control systems with delay

XIE Lin-bo<sup>1,2</sup>, FANG Hua-jing<sup>1</sup>, JI Zhi-cheng<sup>2</sup>, ZHENG Ying<sup>1</sup>

(1. Department of Automatic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Research center of Control Science and Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi Jiangsu 214036, China)

**Abstract:** Based on the mathematical model of networked control system with multi-step stochastic transmission delay, the problems of the stochastic stability and disturbance attenuation are discussed. It has been showed that the transmission delay can be viewed as a Markov process under certain system communication model and the whole system can be transferred into a generalized discrete-time system with jumping parameters. Then, the suboptimal H-infinity and H-two/H-infinity mixed control state feedback controllers are constructed using stochastic Lyapunov functions, which preserves the stochastic stability of system. These two kinds of controllers are presented through numerical solution of a set of coupled matrix inequalities. The simulation results show the validity of the design methods.

**Key words:** networked control system; H-two/H-infinity mixed control; stochastic delay; Markov process

### 1 引言 (Introduction)

网络化控制系统的特点是控制系统中的回路通过网络信道连接而形成系统闭环<sup>[1-3]</sup>, 简称为 NCS (Networked control system). 视其回路中所嵌入的网络系统结构的不同, 可以将其大致分为基于专用网络的网络化控制系统和基于公用网络的网络化控制系统. 目前, 比较流行的基于总线技术构架的系统, 比如 DeviceNet、ControlNet 以及 LonWorks<sup>[3]</sup> 等均是前者, 而在公用计算机网络如 Internet 上构筑的控制系统则是后者, 这是一种完全分布式的控制方式.

与传统意义上的控制系统相比, 网络化控制系统有如下的优点:

① 系统的连接线大大减少, 使控制系统物理结构相对简单, 节约了系统集成的成本;

② 实现资源共享, 交互性好;

③ 便于系统安装、维护和扩展.

当然网络的引入同时也会给控制系统分析带来很多问题, 最明显的是由于信息传输过程中时延的存在而对系统稳定性和性能的影响. 特别是当系统中存在随机时延时, 使得系统的分析与设计变得复杂. 在有关网络化系统分析与设计的文献<sup>[1-4]</sup>中, 有的考虑了定常时延, 有的通过设计调度算法将随机时延转化为定常时延来研究. 文献<sup>[5-7]</sup>考虑了具有马尔可夫延迟特性的网络化系统的设计问题.

## 2 网络化控制系统的数学模型 (Mathematics model of NCS)

考虑如图 1 所示的网络化控制系统模型框图。图中,  $G$  为被控对象, 传感器  $S$  将对象输出进行采样后经公用的网络信道传至控制器  $K$ 。同样地, 控制器产生的控制信号由网络传至保持器  $H$  (包含在执行器中) 后, 成为分段连续的控制输入信号  $u$ 。系统中的传感器、执行器以及控制器均为网络中的独立节点。图中,  $\tau_{sc}$  和  $\tau_{ca}$  分别表示由于网络的存在而产生的随机传输时延, 其中  $\tau_{sc}$  为传感器至控制器的传输时延,  $\tau_{ca}$  为控制器至执行器的传输时延。

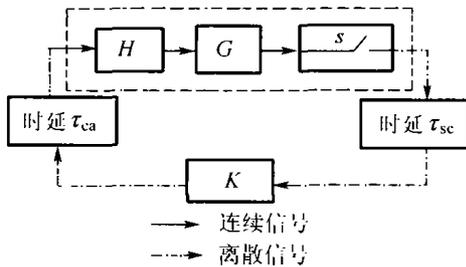


图 1 网络化控制系统模型  
Fig. 1 Model of NCS

通常, 网络中的设备如智能型的传感器, 执行器等有两种主要的工作控制方式: 时间驱动模式和事件驱动模式。时间驱动模式是按周期操作的方式; 事件驱动模式是按事件操作的方式, 即网络节点只被特定的事件驱动来进行相关的操作。通常为了建模的方便以及尽量保证控制系统信息的有序发送和接收, 控制器节点采用事件驱动方式, 传感器和执行器采用同步时间驱动的方式, 并分别在传感器和控制器发送端设立发送缓冲区以使数据包有序地发送, 在执行器接收端设置接收缓冲区来接收。在这种假设模式下, 网络设备只能在每个采样时刻对被控对象进行操作, 从而使信息传输时延为整数个采样周期, 简化了系统建模并减少了随机时延的可能取值个数。

为分析简便起见, 通常将一个周期内的  $\tau_{sc}$  和  $\tau_{ca}$  以及因网络设备计算而产生的时延一并考虑为  $\tau_k$ <sup>[2]</sup>。图 2 为对应于上述工作控制模式下的一个系统信息时序示意图。

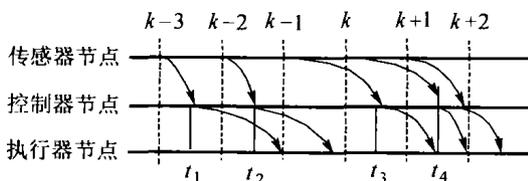


图 2 信息传输时序图

Fig. 2 Information transmission order

考虑如下的连续对象状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_0w_0(t) + B_1w_1(t) + B_2u(t), \\ z_1(t) = C_1x(t) + D_1w_1(t) + D_2u(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in \mathbb{R}^m, w_0(t), w_1(t) \in \mathbb{R}^l, z(t) \in \mathbb{R}^p$ , 分别为系统的状态、控制输入、外部噪声输入及量测输出。假设从传感器信息  $x_k$  产生到控制信息  $u_k$  到达执行器的最大时延为  $d$ , 则在上述系统工作控制模式下对系统(1)进行离散化, 得

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + B_{w_0}w_0(k) + B_{w_1}w_1(k) + \beta_0\Gamma U_k + \beta_1\Gamma U_{k-1} + \dots + \beta_d\Gamma U_{k-d}, \\ z_1(k) = C_1x(k) + D_1w_1(k) + D_2\beta_0u_k + D_2\beta_1u_{k-1} + \dots + D_2\beta_du_{k-d}. \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\Phi = e^{AT}, \Gamma = \int_0^T e^{A^T t} dt \cdot B_2, B_{wi} = \int_0^T e^{A^T t} dt \cdot B_i, i = 0, 1, T$  为采样周期;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_d \in \{0, 1\}$ , 且满足

$\sum_{i=0}^d \beta_i = 1$ , 即在  $kT$  采样时刻, 执行器端的控制量为  $u_k, u_{k-1}, \dots, u_{k-d}$  中的一个。式(2)即为具有随机传输时延的网络化控制系统开环数学模型。

假设第  $k$  个采样周期内的传输时延为  $\tau_k$ , 则由控制模式可知传输时延序列  $\{\tau_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$  构成一马尔可夫过程<sup>[5]</sup>, 即  $p\{\tau_{k+1} = j \mid \tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k = i\} = p\{\tau_{k+1} = j \mid \tau_k = i\}, i, j \in S = \{0, 1, \dots, d\}$ 。设其一步转移概率为  $p\{\tau_{k+1} = j \mid \tau_k = i\} = q_{ij}$ , 其中,  $q_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^d q_{ij} = 1$ 。在假设的控制工作模式下对马尔可夫时延过程做进一步的分析可得<sup>[5]</sup>, 当  $i+2 \leq j \leq d$  时,  $q_{ij} = 0$ 。有关延迟的分布情况可以用实验的方法测量或者直接由理论推导而得; 也可以在信息包中加“时戳<sup>[2]</sup>”来在线获得时延的具体大小。

定义增广的状态向量

$$X_k = [x_k^T \quad u_{k-d} \quad \dots \quad u_{k-1}]^T,$$

则系统(2)表示为

$$\begin{cases} X_{k+1} = \bar{A}_i X_k + \bar{B}_0 w_0 k + \bar{B}_1 w_1 k + \bar{B}_2 u_k, \\ z_1 k = \bar{C}_1 X_k + \bar{D}_1 w_1 k + \bar{D}_2 u_k. \end{cases} \quad (3)$$

式中下标  $k$  表示采样时刻  $kT$  的简写,

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} \Phi & \beta_d \Gamma & \beta_{d-1} \Gamma & \cdots & \beta_1 \Gamma \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & I \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{0i} = [B_{w0}^T \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{0}]^T,$$

$$\bar{B}_{1i} = [B_{w1}^T \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{0}]^T,$$

$$\bar{B}_{2i} = [\beta_0 \Gamma^T \ \mathbf{0} \ \cdots \ I]^T,$$

$$\bar{C}_{1i} = [C_1 \ D_2 \beta_d \ \cdots \ D_2 \beta_1],$$

$$\bar{D}_{1i} = D_1, \bar{D}_{2i} = D_2 \beta_0, i = 0, 1, \dots, d.$$

### 3 随机稳定下的干扰抑制 (Disturbance attenuation under stochastic stability)

考虑随机系统模型(3), 约定  $\|z\|_2 = \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} E(z_k^T z_k) \right\}^{1/2}$ , 其中  $z \in l_2([\Omega, J, Q], [0, N-1])$ ,  $\Omega$  为样本空间,  $J$  为概率事件,  $Q$  为概率.

**定义 1**<sup>[8]</sup> 如果随机系统(3)满足

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} X_k^T X_k \mid X_0, \tau_0 \right\} < R(X_0, \tau_0).$$

其中  $R(X_0, \tau_0)$  为有限正实数, 则称系统(3)是随机稳定的.

由定义 1 可知, 系统随机稳定隐含了渐近稳定.

**定理 1** 考虑具有跳变参数的系统  $X_{k+1} = \bar{A}_i X_k, z_k = \bar{C}_i X_k$ , 如果存在矩阵  $P_i > 0$ , 使得

$$\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i < 0, \quad (4)$$

其中  $\bar{P}_i = \sum_{j=0}^d q_{ij} P_j, q_{ij}$  为一步转移概率,  $i = 0, 1, \dots, d$ , 则系统是随机稳定的.

**证** 令  $V_k(\tau_i) = X_k^T P_i X_k$ , 则

$$E\{V_{k+1} \mid X_k\} - E\{V_k\} = X_k^T (\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i) X_k = -X_k^T R X_k.$$

因此,

$$E\{V_{k+1} \mid X_k\} \leq E\{V_k\} - \lambda_{\min}(R) \|X_k\|^2.$$

其中,  $R > 0$  使得  $-X_k^T R X_k < 0$ , 从而满足式(4). 进一步推导可知系统满足随机稳定性要求.

**定理 2** 在随机系统(3)中考虑状态反馈,  $u_k = K_i X_k, i = 0, \dots, d$ , 及给定实数  $\gamma > 0$ , 对任给  $z_1, w_1 \in l_2[0, N-1], w_0 = 0$ , 如果存在矩阵  $P_i > 0$ , 使得

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i + \hat{C}_{1i}^T \hat{C}_{1i} & \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{B}_{1i} + \hat{C}_{1i}^T \bar{D}_{1i} \\ \bar{B}_{1i}^T \bar{P}_i \bar{A}_i + \bar{D}_{1i}^T \hat{C}_{1i} & -\gamma^2 I + \bar{B}_{1i}^T \bar{P}_i \bar{B}_{1i} + \bar{D}_{1i}^T \bar{D}_{1i} \end{bmatrix} < 0.$$

(5)

其中  $\bar{P}_i = \sum_{j=0}^d q_{ij} P_j, i = 0, 1, \dots, d, \hat{A}_i = \bar{A}_i + \bar{B}_{2i} K_i, \hat{C}_{1i} = \bar{C}_{1i} + \bar{D}_{2i} K_i$ , 则系统(3)是随机稳定的且满足干扰抑制  $\|z_1\|_2 < \gamma \|w_1\|_2$ .

**证** 闭环系统状态方程为(零初始状态)

$$\begin{cases} X_{k+1} = (\bar{A}_i + \bar{B}_{2i} K_i) X_k + \bar{B}_{1i} w_{1k}, \\ z_{1k} = (\bar{C}_{1i} + \bar{D}_{2i} K_i) X_k + \bar{D}_{1i} w_{1k}. \end{cases}$$

令

$$J_N = \|z_1\|_2^2 - \gamma^2 \|w_1\|_2^2 = \quad (6)$$

$$E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z_{1k}^T z_{1k} - \gamma^2 w_{1k}^T w_{1k}) \right\} =$$

$$E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z_{1k}^T z_{1k} + V_{k+1}(\tau_{k+1}) - V_k(\tau_k) - \gamma^2 w_{1k}^T w_{1k}) \right\} - E\{V_N(\tau_N)\}.$$

其中  $V_k(\tau_k) = X_k^T P_i X_k$  为 Lyapunov 函数,

$$E\{V_{k+1}(\tau_{k+1})\} = \sum_{j=0}^d p\{\tau_{k+1} = j \mid \tau_k = i\} X_k^T P_j X_k.$$

将闭环状态方程代入得

$$J_N \leq$$

$$E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} (z_{1k}^T z_{1k} + V_{k+1}(\tau_{k+1}) - V_k(\tau_k) - \gamma^2 w_{1k}^T w_{1k}) \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} \xi_k^T W_i \xi_k < 0, i = 0, 1, \dots, d.$$

其中,  $\xi_k = [X_k^T \ w_{1k}^T]^T, W_i$  即为式(5)左边的矩阵. 当  $W_i < 0$  时, 定理 1 的条件满足, 即系统(3)是随机稳定的且具有干扰抑制水平  $\gamma$ .

### 4 混合 $H_2/H_\infty$ 控制 (Mixed H-two/H-infinity control)

在系统(3)中附加输出方程  $z_{2k} = \bar{C}_{2i} X_k + \bar{D}_{3i} u_k$ , 并在扩展系统中定义如下的传递函数的  $H_2$  范数<sup>[9]</sup>:

$$\|T_{z_2 w_0}\|_2^2 = \sum_{i=0}^d \text{tr}(\bar{B}_{0i}^T L_{oi} \bar{B}_{0i}) = \sum_{i=0}^d \text{tr}(\bar{C}_{2i} L_{ci} \bar{C}_{2i}^T). \quad (7)$$

其中,  $L_{oi}, L_{ci}, i = 0, \dots, d$ , 分别为能观、能控型格莱姆矩阵, 满足如下 Lyapunov 方程:

$$-L_{oi} + \sum_{j=0}^d \hat{A}_i^T (q_{ij} L_{oj}) \hat{A}_i + \hat{C}_{2i}^T \hat{C}_{2i} = 0, \quad (8)$$

$$-L_{cj} + \sum_{j=0}^d \hat{A}_i (q_{ij} L_{ci}) \hat{A}_i^T + \bar{B}_{0j} \bar{B}_{0j}^T = 0. \quad (9)$$

$\text{tr}(\cdot)$  为求迹运算,  $\hat{C}_{2i} = \bar{C}_{2i} + \bar{D}_{3i} K_i, K_i$  为控制器. 由 Riccati 不等式的单调性可知  $0 \leq L_{oi} < L'_{oi}$ , 其中  $L'_{oi}$  满足

$$-L'_{oi} + \sum_{j=0}^d \hat{A}_i^T(q_{ij}L'_{oj})\hat{A}_i + \hat{C}_{2i}^T\hat{C}_{2i} < 0. \quad (10)$$

因此有

$$\|T_{z_2w_0}\|_2^2 = \sum_{i=0}^d \text{tr}(\tilde{B}_{0i}^T L_{oi} \tilde{B}_{0i}) < \sum_{i=0}^d \text{tr}(\tilde{B}_{0i}^T L'_{oi} \tilde{B}_{0i}), \quad (11)$$

$T_{z_2w_0}$  为  $w_0$  至  $z_2$  的闭环传函,从而次优  $H_2/H_\infty$  混合控制性能指标可取为:给定实数  $\gamma > 0$ , 使得  $\|T_{z_1w_1}\|_\infty^2 < \gamma^2$ , 且满足  $\|T_{z_2w_0}\|_2^2 < \min \text{tr}(\sum_{i=0}^d \tilde{B}_{0i}^T L_{oi} \tilde{B}_{0i})$ . 结合 3 中的  $H_\infty$  干扰抑制问题,  $H_2/H_\infty$  混合控制问题有如下结论.

**定理 3** 给定实数  $\gamma > 0$ , 如果存在矩阵  $M_{1i} > 0, M_{2i} > 0, Y > 0$  和  $N_{1i}, N_{2i}$ , 使得

$$\begin{bmatrix} YI & \tilde{B}_0^T \\ \tilde{B}_0 & Q_1 \end{bmatrix} > 0, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -M_{1i} & \mathbf{0} & H_{1i}^T & M_{1i}\hat{C}_{1i}^T \\ \mathbf{0} & -\gamma^2 I & H_{2i}^T & \tilde{D}_{1i}^T \\ H_{1i} & H_{2i} & -Q_2 & \mathbf{0} \\ \hat{C}_{1i}M_{1i} & \tilde{D}_{1i} & \mathbf{0} & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -M_{2i} & H_{3i}^T & (\tilde{C}_{2i}M_{2i} + \tilde{D}_{3i}N_{2i})^T \\ H_{1i} & -Q_1 & \mathbf{0} \\ \tilde{C}_{2i}M_{2i} + \tilde{D}_{3i}N_{2i} & \mathbf{0} & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

其中  $\tilde{B}_0, H_{1i}^T, H_{2i}^T, H_{3i}^T, Q_1$  和  $Q_2$  分别为

$$\tilde{B}_0^T = [\tilde{B}_{00}^T \quad \tilde{B}_{01}^T \quad \cdots \quad \tilde{B}_{0d}^T],$$

$$H_{1i}^T = [\sqrt{q_{i0}}(\tilde{A}_i M_{1i} + \tilde{B}_{2i} N_{1i})^T \quad \cdots \quad \sqrt{q_{id}}(\tilde{A}_i M_{1i} + \tilde{B}_{2i} N_{1i})^T],$$

$$H_{2i}^T = [\sqrt{q_{i0}}\tilde{B}_{1i}^T \quad \sqrt{q_{i1}}\tilde{B}_{1i}^T \quad \cdots \quad \sqrt{q_{id}}\tilde{B}_{1i}^T],$$

$$H_{3i}^T = [\sqrt{q_{i0}}(\tilde{A}_i M_{2i} + \tilde{B}_{2i} N_{2i})^T \quad \cdots \quad \sqrt{q_{id}}(\tilde{A}_i M_{2i} + \tilde{B}_{2i} N_{2i})^T],$$

$$Q_1 = \text{diag}(M_{10}, M_{11}, \cdots, M_{1d}),$$

$$Q_2 = \text{diag}(M_{20}, M_{21}, \cdots, M_{2d}),$$

$$\hat{C}_{1i}M_{1i} = \tilde{C}_{1i}M_{1i} + \tilde{D}_{2i}N_{1i},$$

$$M_{2i} = E_i M_{1i},$$

$E_i$  为非奇异常数阵, 则系统 (3) 是随机稳定的且有  $\|z_1\|_2^2 < \gamma^2 \|w_1\|_2^2, \|T_{z_2w_0}\|_2^2 < \text{tr}(Y)$ . 反馈控制增益阵  $K_i = N_{1i}M_{1i}^{-1}, i = 0, 1, \cdots, d$ .

**证** 令  $\sum_{i=0}^d \text{tr}(\tilde{B}_{0i}^T P_i \tilde{B}_{0i}) < Y$  且将其转化可得式 (12). 在不等式 (5) 和 (10) 中令  $M_{1i} = P_i^{-1}, N_{1i} =$

$K_i M_{1i}, M_{2i} = L'_{oi}^{-1}, N_{2i} = K_i M_{2i}$ , 用 Schur 补不等式转化分别可得式 (13), (14). 由于式 (5) 和 (10) 的形式类似, 这里取特殊关系的变量  $M_{1i}, M_{2i}$ .

如果在定理 3 中求极小值  $\min \text{tr}(Y)$  则可求得次优  $H_2/H_\infty$  混合控制问题的解.

### 5 仿真研究 (Simulation research)

考虑系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.14 \\ 1.8 \end{bmatrix} w_0 + \begin{bmatrix} 0.1 \\ 2 \end{bmatrix} w_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 640 \end{bmatrix} u, \quad (15)$$

$$z_1 = [12.6 \quad 0.1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$z_2 = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + u. \quad (17)$$

取采样周期为 5 ms, 并设网络中信息的最大传输时延  $d = 2$ , 干扰输入为正态分布的噪声. 假设状态初始值为  $x_0 = [0.4 \quad 0.6]^T$ , 网络传输时延的概率分布为  $P_0 = 0.4, P_1 = 0.3, P_2 = 0.3$ , 则得一步状态转移矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

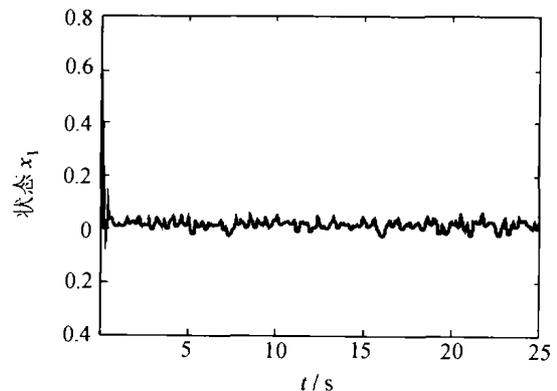
解定理 3 中矩阵不等式并令  $E_i$  为单位矩阵, 可得控制器增益为

$$K_0 = [-0.3772 \quad -0.0169 \quad 0.0000 \quad 0.0000],$$

$$K_1 = [-0.5382 \quad -0.0278 \quad 0.0000 \quad -1.0105],$$

$$K_2 = [-0.5003 \quad -0.0258 \quad -0.8056 \quad -0.0814].$$

给定干扰抑制水平  $\gamma = 10.8$ , 得到  $H_2$  控制性能指标值  $\min \text{tr}(Y) = 0.2353$ . 图 3 中的 (a), (b) 分别为状态的仿真结果, 由图中可以看出, 闭环系统状态很快能达到平衡状态, 显示出了良好的干扰抑制性能.



(a) 状态  $x_1$

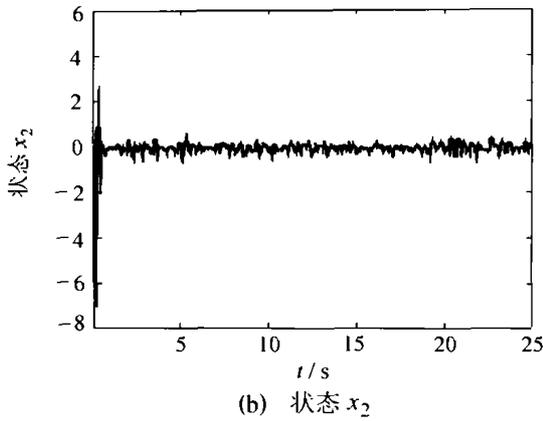


图3 闭环系统的状态响应

Fig. 3 Response of the closed-loop system states

## 6 结论(Conclusion)

研究了具有多步随机传输时延的网络系统的随机稳定性问题及干扰抑制问题. 在固定的通信控制模式下, 通过状态增广法将原系统转化为一个具有马尔可夫跳变参数的离散系统, 并给出了一种此类系统的  $H_\infty$  控制、 $H_2/H_\infty$  混合控制的设计方法. 仿真结果表明, 本文所用的分析与综合方法是有效可行的.

## 参考文献(References):

- [1] ZHANG Wei, BRANICKY M S. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 2(1): 84 - 99.
- [2] NILSSON J, BERNHARDSSON B, WITTENMARK B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delay [J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57 - 64.
- [3] LIAN Fengli, MOYNE J R, TILBURY D M. Performance evalua-

- tion of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 2(1): 66 - 83.
- [4] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 - 908.
- [5] LIN Xiao, HASSIBI A, HOW J P. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach [C]// *Proc of American Control Conference*. [s.l.]: [s.n.], 2000: 2199 - 2204.
- [6] YU Zhixun, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Research on control of network system with Markov delay characteristic [C]// *Proc of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [s.l.]: [s.n.], 2000: 3636 - 3640.
- [7] HU Shousong, ZHU Qixin. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877 - 1884.
- [8] CAO Yongyan, LAM J. Stochastic stabilizability and  $H_\infty$  control for discrete-time jump linear systems with time delay [J]. *J of the Franklin Institute*, 1999, 336(6): 1263 - 1281.
- [9] COSTA O L V, do VAL J B R, GEROMEL J C. A convex programming approach to  $H_2$  control of discrete-time Markovian jump linear systems [J]. *Int J Control*, 1997, 66(4): 557 - 579.

## 作者简介:

谢林柏 (1973—), 男, 2004年毕业于华中科技大学控制科学与工程系, 研究方向为网络化控制系统的分析与综合、鲁棒控制、控制系统故障检测, E-mail: xlbzyf@sohu.com;

方华京 (1955—), 男, 教授, 华中科技大学博士生导师, 研究方向为控制系统的故障检测与诊断、鲁棒控制等, E-mail: hjfang@public.wh.hb.cn;

纪志成 (1959—), 男, 博士, 江南大学教授, 主要从事电力电子、电力传动、网络控制等方面的研究;

郑英 (1976—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为网络化控制系统的主动容错控制、故障诊断等.