

时延网络控制系统的稳定性

樊卫华, 蔡 骅, 陈庆伟, 胡维礼

(南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对网络控制系统中存在的 uncertain 时延, 首先讨论了系统的建模问题. 系统中传感器采用时间驱动, 执行器与控制器采用事件驱动, 传感器的数据采用单包传输. 假设传输时延小于采样周期, 网络控制系统可以建模为一类具有不确定性的线性离散时延系统. 利用 Lyapunov 方法, 给出了闭环系统渐近稳定的充分条件, 基于相应的线性矩阵不等式可行解, 可以求解状态反馈控制律. 最后, 用仿真例子验证了该方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 不确定延时; 稳定性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Stability of networked control systems with time-delay

FAN Wei-hua, CAI Hua, CHEN Qing-wei, HU Wei-li

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Considering the uncertain delay of networked control systems, the modeling problem is discussed firstly. Suppose the sensor node is time-driven, the executor and the controller are event-driven, the sampled data were lumped together into single data packet and the transfer delay is less than one sampling period, the networked control system is modeled as an uncertain discrete linear system with delay. Then based on the Lyapunov functional approach, sufficient condition of asymptotic stability is given, and the state feedback controller is obtained based on the feasible solution of the linear matrix inequalities. The simulation verified the validity of the method.

Key words: networked control systems; uncertain delay; stability; linear matrix inequality(LMI)

1 引言 (Introduction)

网络控制系统 (Networked control systems, NCS) 是指用通讯网络代替传统的点对点的连接方式构成的闭环控制系统. NCS 中的各种信息, 包括参考输入、对象输出、控制器输出, 通过网络在控制系统的各部件 (传感器、控制器与执行器) 之间传输、交换.

通讯网络加入到系统的反馈通道中, 使得 NCS 的分析和设计更加复杂. 在 NCS 中, 由于信息传输的分时复用, 待发送的信息只有在网络空闲时才能被发送, 这就不可避免地导致传输的时延, 而且该时延随着网络负载的变化而变化, 是时变不确定的. 控制系统的分析和设计必须考虑传输时延的影响. 文献[1]假设时延为符合某种统计规律的随机量, 在已知时延统计规律的情况下, 借助随机控制理论设计使系统稳定的控制器. 这种假设符合网络数据流比较小的情况, 当数据流比较大时, 假设不尽合理, 且时延的概率分布未必可知. 文献[2]利用在控制器和执行器接收端设置接收缓冲区的方法, 将随机时延

转化为固定时延, 采用预测控制方法设计补偿控制器. 这种方法的缺点是缓冲区的引入导致所有的时延都转化为最大时延, 人为地扩大了时延, 降低了系统的性能. 文献[3]将时延看成时变、有界的量, 当系统采样周期远小于被控对象主导时间常数的情况下, 将系统处理为准连续系统, 然后将系统转化为 μ 综合的标准结构, 利用 Matlab 中的 μ 综合和分析工具箱完成控制器的设计. 该方法对系统的采样周期有严格要求, 较小的采样周期又加重了网络的负载, 可能使假设条件不成立.

本文针对网络控制系统的时变、有界时延, 给出了广义被控对象的离散模型, 并将其转化为具有不确定性的线性离散系统. 该模型并不要求知道时延的统计规律, 相对于文献[1], 本文中的条件更容易满足, 且本文对系统的采样周期没有特殊的要求, 比文献[3]更能符合实际系统. 在此基础上, 研究了系统的稳定性, 并利用 LMI 方法设计控制器, 最后给出了数值仿真例子.

2 网络控制系统模型的建立 (Networked control systems modeling)

典型的网络控制系统结构如图1所示.图中 x , $\hat{x}$ 分别表示被控对象的状态及其在控制器接收端的镜像, u , $\hat{u}$ 分别表示控制量及其在执行器接收端的镜像.由于网络的引入,信号的传输存在时延,分别用 τ_k^{sc} , τ_k^{ca} 表示传感器到控制器的传输时延和控制量到执行器的传输时延.实际控制系统中,还需要考虑计算时延,一般可将其归并到上述两个时延中,对整个系统的分析是等价的.

对于图1所示的网络控制系统作如下假设:

- 1) 传感器节点由时间驱动,以固定的周期 T ($T > 0$) 对被控对象采样,并将数据(被控对象的状态量)存放在单个数据包中发送到网络;
 - 2) 控制器节点为事件驱动,采样数据到达时刻,计算控制量并输出;
 - 3) 执行器节点也为事件驱动,控制量到达时刻,执行相应的动作;
 - 4) 网络传输存在不确定时延,不考虑数据包丢失,且控制回路总的时延 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$,且 $0 \leq \tau_k \leq T$.
- 以上假设,很大一部分符合网络控制系统的情况.

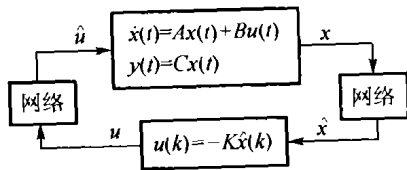


图1 网络控制系统结构

Fig. 1 Structure of networked control system

在上述假设下,控制系统中各信号的时序如图2所示,图中 t_k 表示第 k 个采样时刻.

设被控对象由下列状态方程描述:

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

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为对象状态, $u(t) \in \mathbb{R}$ 为对象输入, $y(t) \in \mathbb{R}$ 为对象输出, A, B, C 为适维常系数矩阵.对式(1)进行离散化并考虑时延的影响,可得

$$x_{k+1} = A_d x_k + \int_{t_k}^{t_k+T} e^{A(t_k+T-\tau)} B u(\tau) d\tau. \quad (2)$$

由图2给出的各信号时序,可知

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

因此包含网络的广义被控对象的离散时间模型为

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_{d0}(\tau_k) u_k + B_{d1}(\tau_k) u_{k-1}. \quad (3)$$

其中 $A_d = e^{AT}$, $B_{d0}(\tau_k) = \int_0^{T-\tau_k} e^{At} dt B$, $B_{d1}(\tau_k) = \int_{T-\tau_k}^T e^{At} dt B$;式中 B_{d0}, B_{d1} 显然是时变的.对上述模型进行适当的变换,以便进行控制器的设计.

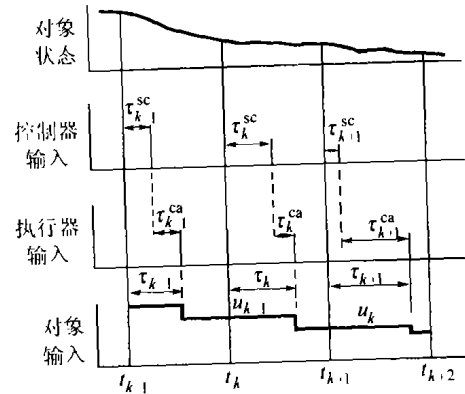


图2 网络控制系统的信号时序

Fig. 2 Sequence of the signals in networked control system

由矩阵理论可知,若 A 含有 n 个互异的特征根,则可化成对角阵,否则可化为约当标准型.若 A 可以对角化,则 $A = \Lambda \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \Lambda^{-1}$,其中 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为矩阵 A 的特征值, $\Lambda = [\Lambda_1, \dots, \Lambda_n]$ 为矩阵 A 的特征向量组成的矩阵.不失一般性,设 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 均不为0.因此,

$$\begin{aligned} B_{d0}(\tau_k) &= \int_0^{T-\tau_k} e^{At} dt B = \\ \Lambda \text{diag} \left(\int_0^{T-\tau_k} e^{\lambda_1 t} dt, \dots, \int_0^{T-\tau_k} e^{\lambda_n t} dt \right) \Lambda^{-1} B &= \\ B_0 + \Lambda \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 (T-\tau_k)}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n (T-\tau_k)} \right) \Lambda^{-1} B. \end{aligned}$$

其中 $B_0 = \Lambda \text{diag}(-\frac{1}{\lambda_1}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n}) \Lambda^{-1} B$. 而

$$\begin{aligned} \Lambda \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 (T-\tau_k)}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n (T-\tau_k)} \right) \Lambda^{-1} B &= \\ \Lambda \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 a_1}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n a_n} \right) \times \\ \text{diag} (e^{\lambda_1 (T-\tau_k-a_1)}, \dots, e^{\lambda_n (T-\tau_k-a_n)}) \Lambda^{-1} B &= \\ DF(\tau_k) E. \end{aligned}$$

其中

$$D = \Lambda \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 a_1}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n a_n} \right), \quad (4)$$

$$F(\tau_k) = \text{diag} (e^{\lambda_1 (T-\tau_k-a_1)}, \dots, e^{\lambda_n (T-\tau_k-a_n)}), \quad (5)$$

$$E = \Lambda^{-1} B. \quad (6)$$

$a_1, \dots, a_n$ 的选取要使得 $e^{\lambda_i (T-\tau_k-a_i)} < 1, i = 1, \dots, n$.

同理,可以证明 $B_{d1}(\tau_k) = B_1 - DF(\tau_k)E$,其中

$$B_1 = \Lambda \text{diag}(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 T}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n T}) \Lambda^{-1} B. \quad (7)$$

当 A 具有 0 特征值和重特征值时,不失一般性,设 A 具有一个 0 特征值以及一个 r 重特征值 λ^* ,其余均为非 0 互异特征值,即 $A = \Lambda \text{diag}(0, J_1, J_2) \Lambda^{-1}$,其中 J_1 由 A 的互异特征值 $\lambda_2, \dots, \lambda_{n-r}$ 组成的对角块, $J_2 \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 是与 λ^* 对应的约当块.通过计算可得

$$B_0 = \Lambda \text{diag}(T, \tilde{J}_1, \tilde{J}_2) \Lambda^{-1} B.$$

其中

$$\tilde{J}_1 = \begin{bmatrix} -(1/\lambda_2) & & \\ & \ddots & \\ & & -(1/\lambda_{n-r}) \end{bmatrix},$$

$$\tilde{J}_2 = \begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda^*} e^{\lambda^* T} & & \\ \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^* T - 1) e^{\lambda^* T} & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ \frac{1}{\lambda^{*r}} \sum_{k=1}^r (-1)^{k-1} \frac{(\lambda^* T)^{r-k}}{(r-k)!} e^{\lambda^* T} & \dots & \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^* T - 1) e^{\lambda^* T} & \frac{1}{\lambda^*} e^{\lambda^* T} \end{bmatrix}, & \lambda^* \neq 0 \\ \begin{bmatrix} 0 & & 0 \\ T^2/2 & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ T^r/r! & \dots & T^2/2 & 0 \end{bmatrix}, & \lambda^* = 0, \end{cases}$$

$$D = \Lambda \text{diag}(\alpha_1, \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 a_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_{n-r}} e^{\lambda_{n-r} a_{n-r}}, P_2).$$

其中 $\alpha_1 > \tau_k, \alpha_l, l = 2, \dots, n-r$ 的选取使得 $e^{\lambda_l(T-\tau_k-\alpha_l)} < 1, P_2 \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 为对角可逆矩阵,且使得 $\|P_2^{-1} \tilde{J}_2\| < 1$,

$$\tilde{J}_2 = \begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda^*} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & & \\ \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^*(T-\tau_k) - 1) e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ \frac{1}{\lambda^{*r}} \sum_{j=1}^r (-1)^{j-1} \frac{[\lambda^*(T-\tau_k)]^{r-j}}{(r-j)!} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & \dots & \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^*(T-\tau_k) - 1) e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & \frac{1}{\lambda^*} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} \end{bmatrix}, & \lambda^* \neq 0, \\ \begin{bmatrix} -\tau_k & & \\ (T-\tau_k)^2/2 & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ (T-\tau_k)^r/r! & \dots & (T-\tau_k)^2/2 & -\tau_k \end{bmatrix}, & \lambda^* = 0, \end{cases}$$

$$F(\tau_k) = \text{diag}(-\frac{\tau_k}{\alpha_1}, e^{\lambda_2(T-\tau_k-\alpha_2)}, \dots, e^{\lambda_{n-r}(T-\tau_k-\alpha_{n-r})}, P_2^{-1} \tilde{J}_2),$$

$$E = \Lambda^{-1} B.$$

$$\tilde{J}_2 = \begin{cases} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda^*} & & \\ \frac{1}{\lambda^{*2}} & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ (-1)^r \frac{1}{\lambda^{*r}} & \dots & \frac{1}{\lambda^{*2}} & -\frac{1}{\lambda^*} \end{bmatrix}, & \lambda^* \neq 0, \\ \text{diag}(T, \dots, T), & \lambda^* = 0, \end{cases}$$

$$B_1 = \Lambda \text{diag}(0, \tilde{J}_1, \tilde{J}_2) \Lambda^{-1} B.$$

其中

$$\tilde{J}_1 = \begin{bmatrix} (1/\lambda_2) e^{\lambda_2 T} & & \\ & \ddots & \\ & & (1/\lambda_{n-r}) e^{\lambda_{n-r} T} \end{bmatrix},$$

由上述推导,广义被控对象的离散时间模型可以转化为

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_d x_k + (B_0 + DF(\tau_k)E) u_k + \\ &\quad (B_1 - DF(\tau_k)E) u_{k-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中, B_0, B_1, D, E 为定常矩阵, 且 $F^T(\tau_k)F(\tau_k) \leq I$, 如不加特殊说明, 记 $F(\tau_k)$ 为 F .

以上推导表明, 考虑网络传输时延的广义被控对象的离散模型(3)可以转化为具有不确定性的线性离散对象(8), 因此网络控制系统的镇定问题就转化为一类具有不确定性的线性离散系统的镇定问题.

3 控制器设计(Controller design)

本文研究的任务是对具有不确定性的线性离散系统(8), 设计状态反馈控制律

$$u_k = K \hat{x}_k, \quad (9)$$

使得闭环系统

$$\begin{aligned} x_{k+1} = & A_d x_k + (B_0 K + DFEK) x_k + \\ & (B_1 K - DFEK) x_{k-1} \end{aligned} \quad (10)$$

稳定, 其中 $K \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ 为反馈增益常数矩阵, $\hat{x}_k$ 为控制器的输入.

引理 1 (Schur 补) 给定常数矩阵 A, P, Q , 其中 $Q = Q^T, P^T = P > 0$, 则 $A^T P A + Q < 0$ 成立, 当且仅当 $\begin{bmatrix} -P^{-1} & A \\ A^T & Q \end{bmatrix} < 0$ 或者 $\begin{bmatrix} Q & A^T \\ A & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0$.

引理 2^[4] 设 W, M, N, F 为具有适当维数的实矩阵, 其中 $F(k)$ 满足 $F(k)^T F(k) \leq I$, W 为对称矩阵, 那么

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

当且仅当存在常数 $\epsilon > 0$, 使得

$$W + \epsilon^{-1} N^T N + \epsilon M M^T < 0.$$

定理 1 假设(8)描述的对象状态均可测, 采用式(9)所示的控制律, 若存在对称正定阵 P, Q 和标量 $\epsilon > 0$, 以及反馈增益阵 K 使得下列矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} \epsilon D D^T - P^{-1} & A_d + B_0 K & B_1 K & 0 \\ (A_d + B_0 K)^T & -P + Q & 0 & (EK)^T \\ (B_1 K)^T & 0 & -Q & (-EK)^T \\ 0 & EK & -EK & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

则该闭环系统是渐近稳定的.

证 选取 $V_k(x) = x_k^T P x_k + x_{k-1}^T Q x_{k-1}$, 其中 P, Q 为对称正定阵, 显然 $V_k(x) > 0$.

$$\Delta V_k(x) = V_{k+1}(x) - V_k(x) =$$

$$x_{k+1}^T P x_{k+1} + x_k^T Q x_k - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T Q x_{k-1}.$$

将式(10)代入上式得

$$\Delta V_k(x) =$$

$$\begin{aligned} & x_k^T \Phi^T P \Phi x_k + x_k^T \Phi^T P \Psi x_{k-1} + \\ & x_{k-1}^T \Psi^T P \Phi x_k + x_{k-1}^T \Psi^T P \Psi x_{k-1} + \\ & x_k^T Q x_k - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T Q x_{k-1} \triangleq \\ & (x_k^T, x_{k-1}^T) \Xi \begin{pmatrix} x_k \\ x_{k-1} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

其中

$$\Phi = A_d + B_0 K + DFEK,$$

$$\Psi = B_1 K - DFEK,$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Phi^T P \Phi - P + Q & \Phi^T P \Psi \\ \Psi^T P \Phi & \Psi^T P \Psi - Q \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由式(11)以及引理 1 有

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A_d + B_0 K & B_1 K \\ (A_d + B_0 K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_1 K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + \epsilon \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [D^T \ 0 \ 0] + \epsilon^{-1} [0 \ EK \ -EK]^T [0 \ EK \ -EK] < 0. \quad (13)$$

由引理 2, 若 F 满足 $F^T F \leq I$, 则式(13)等价于

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -P^{-1} & A_d + B_0 K & B_1 K \\ (A_d + B_0 K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_1 K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F [0 \ EK \ -EK] + \\ & [0 \ EK \ -EK]^T F^T \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T < 0, \end{aligned}$$

亦即

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \Phi & \Psi \\ \Phi^T & -P + Q & 0 \\ \Psi^T & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

由引理 1 和式(14)可得 $\Xi < 0$, 闭环系统稳定.

证毕.

推论 对于定理 1 所描述的系统, 若存在正定对称阵 X, Q 和标量 $\epsilon > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} \epsilon D D^T - X & (A_d + B_0 K)X & B_1 K & 0 \\ X(A_d + B_0 K)^T & -X + XQX & 0 & X(EK)^T \\ (B_1 K)^T & 0 & -Q & (-EK)^T \\ 0 & EKX & -EK & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

则闭环系统是渐近稳定的。

对式(11)前乘、后乘 $\text{diag}(I, P^{-1}, I, I)$, 并令 $X = P^{-1}$ 可得式(15)。

4 仿真(Simulation)

考虑网络控制系统的被控对象的状态方程为

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t).$$

取采样周期 $T = 10 \text{ ms}$, 并假定网络中的信息传输时延 $\tau_k \in [0, T]$, 且是时变的. 因此系统的离散时间模型为 $x(k+1) = A_d x(k) + B_{d0}(\tau_k)u(k) + B_{d1}(\tau_k)u(k-1)$, 其中 $A_d = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.01 \\ 0 & 0.999 \end{bmatrix}$,

$$B_{d0}(\tau_k) = \int_0^{T-\tau_k} e^{A_d t} dt B, B_{d1}(\tau_k) = \int_{T-\tau_k}^T e^{A_d t} dt B. \text{ 进一步, 取 } \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \text{ 经过计算可得: } B_0 =$$

$$\begin{bmatrix} -9.99 \\ 1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 9.99 \\ -0.99 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 100 \\ 0 & -10 \end{bmatrix}, E =$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} -\tau_k & 0 \\ 0 & e^{-0.1(T-\tau_k)} \end{bmatrix}. \text{ 要求设计一个状态反馈控制律, 使得闭环系统稳定.}$$

利用 Matlab 5.3 的 LMI 工具箱, 据式(15)可得状态反馈控制律 $u_k = [-0.1674 \quad 0.016] x_k$. 当系统的初始状态为 $[2, -0.5]$ 时, 系统的状态响应曲线如图 3 所示, 系统是稳定的。

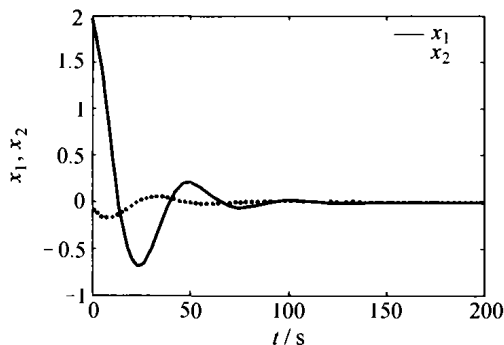


图 3 闭环系统的仿真结果

Fig. 3 Simulation result of the closed-loop system

5 结论(Conclusion)

假设网络控制系统的传感器是时间驱动的, 而控制器和执行器为事件驱动, 且存在小于采样周期的不确定时延. 本文将网络控制系统的一般模型转化为一类不确定线性离散系统, 并给出了稳定性的充分条件, 通过 LMI 问题的求解, 可以得到反馈增益阵的参数, 因此也可借此设计控制器. 最后的仿真结果表明本文所提出的方法是有效性的。

参考文献(References):

- [1] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 时延网络控制系统均方指数稳定的研究[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 278-281, 289.
(YU Zhixun, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Research on mean square exponential stable of time-delayed network control system [J]. Control and Decision, 2000, 15(3): 278-281, 289.)
- [2] ROGELIO L, ASOK R. An observer-based compensator for distributed delays [J]. Automatica, 1990, 6(5): 903-908.
- [3] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于 H_∞ 和 μ 综合的闭环网络控制系统的设计[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 307-311.
(YU Zhixun, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Design of closed loop network control system based on H_∞ and μ -synthesis [J]. J of Tongji University, 2001, 29(3): 307-311.)
- [4] LI X, de SOUZA C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: a LMI approach [J]. IEEE Tran on Automatic Control, 1997, 42(8): 1141-1144.

作者简介:

樊卫华 (1975—), 男, 南京理工大学在读博士, 主要研究方向为网络控制系统, E-mail: weihua.fan@tom.com;

蔡 骅 (1966—), 男, 南京理工大学自动化系副教授, 主要研究方向为计算机控制及网络控制, E-mail: hcai@mail.njust.edu.cn;

陈庆伟 (1963—), 男, 南京理工大学自动化系教授, 主要研究方向为智能控制及计算机控制系统, E-mail: cqwl002@sina.com;

胡维礼 (1941—), 男, 南京理工大学自动化系教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制、智能控制理论及应用等, E-mail: hwl1002@sina.com.