

具有时延和数据包丢失的网络控制系统稳定性

张喜民^{1,2}, 李建东¹, 陈实³

(1. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 中国航空第631研究所, 陕西 西安 710068; 3. 浙江万里学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 针对单数据包传输情况, 将同时存在网络诱导时延和数据包丢失的网络控制系统建模为具有事件约束的异步动态系统, 依据Lyapunov稳定性原理, 提出了同时存在网络诱导时延和数据包丢失的网络控制系统指数稳定的网络诱导时延条件和数据包丢失条件, 对条件进行了实例仿真验证, 仿真结果表明该条件是有效的.

关键词: 网络控制系统; 延时; 数据包丢失; 稳定性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Stability of the networked control systems with time-delay and data packet dropout

ZHANG Xi-min^{1,2}, LI Jian-dong¹, CHEN Shi³

(1. State Key Lab.of Integrated Service Networks, XIDIAN University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. The 631 Research Institute of China Aviation, Xi'an Shaanxi 710068, China;

3. Zhejiang Wanli University, Ningbo Zhejiang 315100, China)

Abstract: This paper is concerned with the stability criteria for the single-packet transmission networked control systems with time-delay and data packet dropout. By modeling the networked control systems as an asynchronous dynamical system with rate constraints on events, the sufficient time-delay criterion and data packet dropout criterion for the exponential stability of the networked control systems are presented and proved by using the Lyapunov stability theory. The simulation with a practice example is given to show the effectiveness of our methods.

Key words: networked control systems; time-delay; data packet dropout; stability

1 引言(Introduction)

通过网络形成的闭环反馈控制系统称为网络控制系统(networked control systems, NCS)^[1~6]. NCS与传统的点对点结构的控制系统相比, 具有可远程操作与控制、可自行故障诊断、系统配置灵活、安装与维护简便、可靠性高等诸多优点^[5~7], NCS在工业控制领域中有着越来越广泛的应用, NCS将成为工业自动控制系统的主流和重要发展方向. 但是, NCS各组件之间通过网络传输信息必然存在通讯诱导时延, 通讯诱导时延的引入会降低NCS的性能甚至引起系统不稳定, 也增加了NCS分析和设计的难度, 基于多种理想假设的传统控制理论已不适用于NCS^[4,7], 人们从多个角度研究NCS, 提出了以满足系统稳定和动态性能为目标的新控制策略, 其中, 稳定性问题是NCS的一个最基本的问题.

Branicky等^[6]用混合控制系统的分析方法研究

了网络诱导时延小于一个采样周期NCS的稳定性; Nilsson等^[2,3]探讨了网络随机时延具有马尔可夫特性的NCS, 将随机网络通讯时延的NCS归于线性二次型Gauss最优控制问题(LQG), 给出了闭环NCS均方稳定条件; 文献[6~9]对NCS的稳定性问题也进行了相关的研究; 以上研究只考虑存在网络诱导时延的情况. 樊卫华等^[10]研究了具有时延和数据包丢失的状态反馈的NCS, 给出了一个NCS的稳定性判定条件, 但没有分析数据包丢失率对NCS稳定性的影响; Wei ZHANG等^[5~7]分别讨论了仅有网络诱导时延和仅有数据包丢失无网络诱导时延的NCS稳定条件, 但没有讨论同时存在网络诱导时延和数据包丢失的情况. 本文将单包传输的NCS建模为具有事件约束的异步动态系统, 应用Lyapunov稳定性原理, 探讨了具有网络诱导时延和数据包丢失的NCS稳定性, 给出了同时存在网络诱导时延和数据包丢失

的NCS稳定的网络诱导时延条件和数据包丢失率条件.

2 NCS建模(NCS modeling)

NCS的原型如图1所示^[6]: 系统主要包括现场设备(被控对象)和离散控制器.

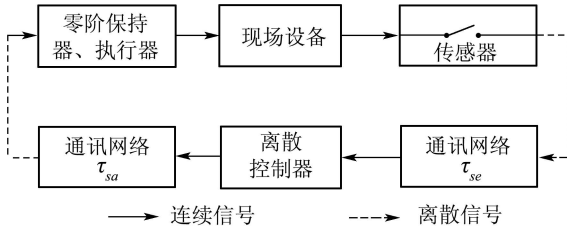


图 1 网络控制系统原型

Fig. 1 Model of networked control system

被控对象可用方程(1)表示:

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

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为系统控制输入, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ 为系统输出, A, B, C 为适维常数系数矩阵.

对于图1所示的NCS作如下假设: 1) 传感器节点由时间驱动, 以固定的周期 $h (h > 0)$ 对被控对象采样, 并将采样数据(被控对象的状态量)封装在单个数据包中发送到网络; 2) 离散控制器节点为事件驱动, 离散控制器一旦成功接收到采样数据, 立刻计算控制量并输出; 3) 零阶保持、执行器节点也为事件驱动, 零阶保持、执行器一旦成功接收到控制量数据, 立刻执行相应的动作; 4) 网络中数据的通讯存在不确定时延, NCS中的总时延 τ_k 主要包括3个部分: $\tau_k = \tau_{sck} + \tau_{cak} + \tau_{ck}$, 其中: k 表示时延产生于第 k 个采样周期, τ_k 指传感器发送数据到零阶保持、执行器接收到数据间的时延, τ_{sck} 指传感器发送数据到离散控制器接收到数据间的时延, τ_{cak} 指离散控制器发送数据到零阶保持、执行器接收到数据间的时延, τ_{ck} 是离散控制器的数据计算、处理时延, τ_{ck} 随所执行操作的计算量不同而变化, 但实际上 τ_{ck} 比 τ_{sck} , τ_{cak} 小很多, 而且可以通过适当的软、硬件设计来进一步减小, 因此可将 τ_{ck} 归于 τ_{cak} 或者忽略^[2,3]; 5) 假设 $0 \leq \tau_k \leq h$.

基于以上假设, 具有网络诱导时延和数据包丢失的NCS可用图2所示模型表示.

图2所示模型中, 数据 $x(kh)$ 在通讯过程中, 不仅存在时延, 而且还会出现3种情况^[10]: 1) 数据包成功传输; 2) 数据包尝试传输时, 网络被占用, 本次发送放弃; 3) 数据包已发送, 但在通讯过程中丢失或时延过大. 情况1) 为成功传输, 标记为事件 S_1 ; 情况2) 和3) 均为数据包丢失, 标记为事件 S_2 .

图2所示模型中, 数据 u_k 在通讯过程中, 也同样不仅存在时延, 而且也会出现上述3种情况, 数据 u_k 在通讯过程中事件 S_2 发生等同于数据 $x(kh)$ 在通讯过程中事件 S_2 发生. 根据以上分析, 可对图2所示模型进行如下简化: 1) 将数据 u_k 的网络通讯时延与数据 $x(kh)$ 的网络通讯时延合并用总时延 τ_k 表示; 2) 将数据 u_k 在通讯过程中事件 S_2 发生归于数据 $x(kh)$ 在通讯过程中事件 S_2 发生; 3) 将数据 u_k 的网络传输丢失率与数据 $x(kh)$ 的网络传输丢失率合并. 具有网络诱导时延和数据包丢失的NCS简化模型如图3所示.

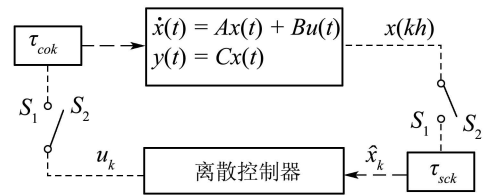


图 2 具有时延和数据包丢失的NCS模型

Fig. 2 Model of NCS with time-delay and data packet dropout

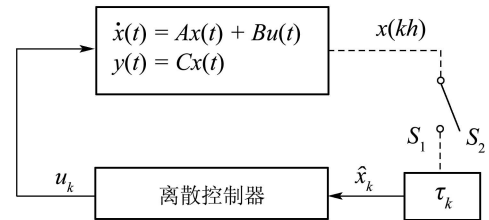


图 3 具有时延和数据包丢失的NCS简化模型

Fig. 3 Laconic Model of NCS with time-delay and data packet dropout

图3所示模型在事件 S_1 发生时, 有

$$\hat{x}_k = \begin{cases} x((k-1)h), & kh < t < kh + \tau_k, \\ x(kh), & kh + \tau_k < t < (k+1)h. \end{cases}$$

在事件 S_2 发生时, $x(kh)$ 丢失, 有

$$\hat{x}_k = x((k-1)h), \quad kh < t < (k+1)h.$$

对图3所示模型中的被控对象离散化, 当事件 S_1 发生时, 有

$$S_1: x((k+1)h) = \Phi x(kh) + \Gamma_0(\tau_k)u(kh) + \Gamma_1(\tau_k)u((k-1)h). \quad (2)$$

当事件 S_2 发生时, 有

$$S_2: x((k+1)h) = \Phi x(kh) + \Gamma u((k-1)h), \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{Ah}, \quad \Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{A\xi} B d\xi, \\ \Gamma_1(\tau_k) &= \int_{h-\tau_k}^h e^{A\xi} B d\xi, \quad \Gamma = \int_0^h e^{A\xi} B d\xi. \end{aligned}$$

假设离散控制器的控制律为

$$u(kh) = -K\hat{x}(kh), k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

则图3所示的闭环控制系统可用方程(5)(6)表示, 为了表示方便, 省略了采样周期 h :

$$S_1: z(k+1) = \tilde{\Phi}_1 z(k), \quad (5)$$

$$S_2: z(k+1) = \tilde{\Phi}_2 z(k), \quad (6)$$

其中:

$$z(k) = [x(k) \quad \hat{x}(k-1)]^T,$$

$$\tilde{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(\tau_k)K & -\Gamma_1(\tau_k)K \\ I & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} \Phi & -\Gamma K \\ 0 & I \end{bmatrix}.$$

3 稳定性条件(Stability criteria)

定义 1 若存在常数 $\alpha > 1$, 对于动态系统的状态变量 x_k , $x_k \in \mathbb{R}^n$, 若: $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha^k \|x_k\| = 0$, 则称动态系统是指数稳定的^[2].

引理 1 对于矩阵 A , $A \in \mathbb{R}^n$, 不等式(7)成立:

$$\lambda_{\min}(A)I \leq A \leq \lambda_{\max}(A)I, \quad (7)$$

其中: $\lambda_{\min}(A)$ 为矩阵 A 的最小特征值, $\lambda_{\max}(A)$ 为矩阵 A 的最大特征值, I 为单位矩阵.

引理 2 对于异步动态系统 $x(k+1) = f_{S_i}(x(k))$, $i = 1, 2, \dots, M$, 离散事件 S_i 的发生概率分别为 r_1, r_2, \dots, r_M , $0 \leq r_i \leq 1$, 且 $\sum_{i=1}^M r_i = 1$, 若存在Lyapunov函数 $V(x(k)) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$, 和标量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$, 且条件(8)~(10)成立, 则系统是指数稳定的^[11]:

$$\beta_1 \|x\|^2 \leq V(x) \leq \beta_2 \|x\|^2, \quad (8)$$

$$\alpha_1^{r_1} \alpha_2^{r_2} \dots \alpha_M^{r_M} > \alpha > 1, \quad (9)$$

$$V(x(k+1)) - V(x(k)) \leq (\alpha_i^{-2} - 1)V(x(k)). \quad (10)$$

定理 1 对于图3所示的网络控制系统, 假定数据包网络传输总成功率为 r , $0 \leq r \leq 1$, 如果存在标量 α_1, α_2 和Lyapunov函数 $V(z(k)) = z^T(k)Pz(k)$, $P > 0$, 且条件(11)~(13)成立, 则系统是指数稳定的:

$$\alpha_1^r \alpha_2^{1-r} > 1, \quad (11)$$

$$\tilde{\Phi}_1^T P \tilde{\Phi}_1 \leq \alpha_1^{-2} P, \quad (12)$$

$$\tilde{\Phi}_2^T P \tilde{\Phi}_2 \leq \alpha_2^{-2} P. \quad (13)$$

证 图3所示系统, 对于Lyapunov函数 $V(z(k))$, 由引理1, 有

$$\lambda_{\min}(P) \|z(k)\|^2 \leq V(z(k)) \leq \lambda_{\max}(P) \|z(k)\|^2.$$

由定理1的假设条件: $P > 0$, 可知 $\lambda_{\min}(P) >$

0 , $\lambda_{\max}(P) > 0$ ^[11], 所以, 系统满足引理2的条件(8).

由定理1的条件(11), 可知系统满足引理2的条件(9).

图3所示的系统, 当事件 S_1 发生时, 由式(5), 对于Lyapunov函数 $V(z(k))$ 有

$$V(z(k+1)) - V(z(k)) = z^T(k+1)Pz(k+1) - z^T(k)Pz(k) = -z^T(k)(\tilde{\Phi}_1^T P \tilde{\Phi}_1 - P)z(k).$$

由定理1的条件(12), 有

$$V(z(k+1)) - V(z(k)) \leq z^T(k)(\alpha_1^{-2} - 1)Pz(k) = (\alpha_1^{-2} - 1)z^T(k)Pz(k) = (\alpha_1^{-2} - 1)V(z(k)).$$

同理, 当事件 S_2 发生时, 由定理1的条件(13), 有

$$V(z(k+1)) - V(z(k)) \leq (\alpha_2^{-2} - 1)V(z(k)),$$

所以, 系统满足引理2的条件(10).

令: $i = 1, 2$, 由引理2, 可知图3所示的系统是指数稳定的. 证毕.

定理 2 对于图3所示的网络控制系统, 如果闭环系统在只有事件 S_1 发生的情况下是指数稳定的, 在事件 S_1, S_2 都发生的情况下: 1) 若开环系统是临界稳定的, 事件 S_1 发生的概率 r (数据包网络传输总成功率)满足: $0 < r \leq 1$, 则, 闭环系统也是指数稳定的; 2) 若开环系统是不稳定的, 事件 S_1 发生的概率 r 满足条件(14), 则闭环系统还是指数稳定的:

$$\frac{1}{1 - \gamma_1/\gamma_2} < r \leq 1, \quad (14)$$

式中: $\gamma_1 = \log[\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1)]$, $\gamma_2 = \log[\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_2)]$.

证 1) 由定理2的假设条件: 闭环系统在只有事件 S_1 发生的情况下是指数稳定的, 所以, 有 $\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1) < 1$; 开环系统是临界稳定的, 所以, 有 $\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_2) = 1$. 令: $\alpha_1^{-2} = \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1)$, $\alpha_2^{-2} = \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_2)$, 则, $\alpha_2 = 1$, $\alpha_1 > 1$, 所以, 当 $0 < r < 1$ 时, 有 $\alpha_1^r \alpha_2^{1-r} > 1$.

假设矩阵 $P > 0$, 由引理1, 有

$$\tilde{\Phi}_1^T P \tilde{\Phi}_1 \leq \lambda_{\max}(\tilde{\Phi}_1) P \lambda_{\max}(\tilde{\Phi}_1) = \lambda_{\max}(\tilde{\Phi}_1) P = \alpha_1^{-2} P.$$

同理, 有 $\tilde{\Phi}_2^T P \tilde{\Phi}_2 \leq \alpha_2^{-2} P$ 成立.

由定理1, 可知此时闭环系统是指数稳定的; 当 $r = 1$ 时, 闭环系统只有事件 S_1 发生, 由定理2的假设条件可知, 此时闭环系统也是指数稳定的. 所以, 定理2的1)成立.

2) 令: $\gamma_1 = \log[\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1)] = \log[\alpha_1^{-2}]$, $\gamma_2 = \log[\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_2)] = \log[\alpha_2^{-2}]$, 将其代入式(14), 可得式(15)

$$\frac{1}{1 - \log(\alpha_1)/\log(\alpha_2)} < r \leq 1, \Rightarrow$$

$$\frac{\log(\alpha_2)}{\log(\alpha_2) - \log(\alpha_1)} < r \leq 1, \Rightarrow$$

$$\begin{cases} r \log(\alpha_1) + (1 - r) \log(\alpha_2) > 0, \\ \log(\alpha_1) \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

对不等式(15)两边同时去对数, 整理可得: $\alpha_1^r \alpha_2^{1-r} > 1$. 类似定理2的1)的证明, 当矩阵 $P > 0$, 有 $\tilde{\Phi}_1^T P \tilde{\Phi}_1 \leq \alpha_1^{-2} P$, $\tilde{\Phi}_2^T P \tilde{\Phi}_2 \leq \alpha_2^{-2} P$ 成立, 同样由定理1, 可知此时闭环系统是指数稳定的. 即: 定理2的2)成立. 证毕.

4 仿真(Simulation)

假设NCS的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) = [1 \ 0]x(t). \end{cases} \quad (16)$$

离散控制器的控制方程为

$$u(k) = -K\hat{x}(k), k = 0, 1, 2 \dots, K = [3.75 \ 11.5]. \quad (17)$$

取采样周期 $h = 0.3$ s, 并假定网络中的数据通讯总时延 $\tau_k \leq 0.1$ s, 则闭环系统的离散化方程如式(5)(6), 其中的参数为

$$\tilde{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} 0.9925 & 0.2725 & -0.0075 & -0.023 \\ -0.075 & 0.7404 & -0.0375 & -0.115 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.2955 & -0.015 & -0.046 \\ 0 & 0.9704 & -0.1125 & -0.345 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}.$$

式(16)所示开环系统的单位阶跃响应为: $y = t + 10e^{-0.1t} - 10$, 开环系统是临界稳定的. 通过网络将(17)式所示的离散控制器引入到此开环系统中形成闭环系统, 图4是 $K = [3.75 \ 11.5]$, 无网络通讯延迟和数据包丢失情况和假设网络中的数据通讯时延为 $\tau_k = 0.1$ s、数据传输成功率为 $r = 0.7$ 情况下闭环系统的单位阶跃响应仿真输出曲线. 可以看出网络诱导时延和数据包丢失降低了系统的稳定性. 但闭环系统是稳定的.

运用线搜索算法和MATLAB中的求解线性矩阵不等式(LMI)可行性问题的工具包^[12]求解如下LMI问题:

$$\max (\alpha_1^{0.7}, \alpha_2^{0.3}),$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \tilde{\Phi}_i^T P \tilde{\Phi}_i \leq \alpha_i^{-2}, i = 1, 2, \\ P > 0, \end{cases}$$

得: $\alpha_1 = 1.1288, \alpha_2 = 0.7522$,

$$P = \begin{bmatrix} 8.1213 & 0.4781 & 0.9587 & 0.0381 \\ 0.4781 & 7.6276 & -0.1227 & 0.4620 \\ 0.9587 & -0.1227 & 7.2202 & -0.0223 \\ 0.0381 & 0.4620 & -0.0223 & 7.0488 \end{bmatrix}.$$

可验证: 闭环系统在网路诱导时延 $\tau_k = 0.1$ s 情况下, 系统的状态变量以 $\alpha = 1.0408$ 指数衰减, 系统是指数稳定的.

对于式(16)(17)所示的闭环系统, 可计算出: $\lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_1) = 0.7653, \lambda_{\max}^2(\tilde{\Phi}_2) = 1, 1/(1 - \gamma_1/\gamma_2) = 0$, 实验可验证: 对于任意的 $0 < r < 1$, 此闭环系统是指数稳定的.

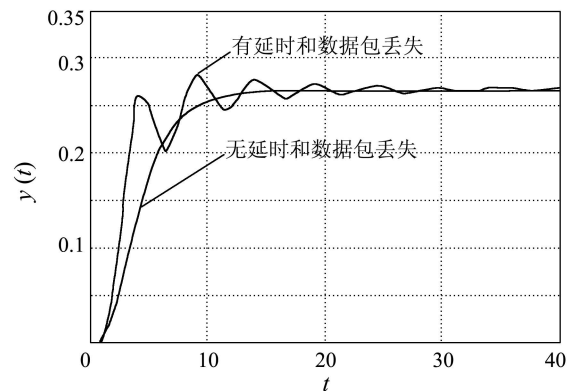


图4 网络控制系统单位阶跃响应曲线比较

Fig. 4 Comparison of the step response of NCS

5 结论(Conclusion)

本文针对单数据包传输情况, 将同时存在网络诱导时延和数据包丢失的NCS建模为具有事件约束的异步动态系统, 提出了同时存在网络诱导时延和数据包丢失的NCS指数稳定的网络诱导时延条件和数据包丢失条件, 对条件进行了实例仿真验证, 实验结果表明该条件是有效的.

参考文献(References):

- [1] HALEVI Y, RAY A. Integrated communication and control systems: Part I—Analysis[J]. *J of Dynamic Syst, Measure, Control*, 1988, 110(12): 367 – 373.
- [2] NILSSON J B, BERNHARDSSON B, WITTENMARK. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57 – 64.
- [3] NILSSON J. *Real-time control systems with delays*[D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [4] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L. Stability analysis of networked control systems[C]// *Proc of American Control Conference*. San Diego, New York: IEEE Press, 1999: 2876 – 2880.

6 结论(Conclusions)

应用满意控制思想, 研究 n 阶线性定常系统同时具有 H_∞ 指标与衰减度指标约束的PI控制的相容性问题. 基于边界穿越定理和D-分割法, 给出了一种有效求解相容性解集的方法. 与其他PI控制器设计方法相比, 本文给出的方法具有以下特点:

a) 给出的不是满足某一单一指标的唯一最优或次优解, 而是满足期望指标集的相容性解集, 为进一步进行控制器设计提供更大的自由度;

b) 给出了各期望指标之间可能存在竞争关系的相容性解集求取策略.

参考文献(References):

- [1] DOYLE J, GLOVER K, KHARGONEKAR P, FRANCIS B. State space solution to standard H_2 and H_∞ control problem[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(8): 831 – 847.
- [2] KEEL L H, BHATTACHARYYA S P. Robust, fragile or optimal[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1098 – 1125.
- [3] COMINOS P, MUNRO N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification[J]. *IEE Proc: Control Theory and Applications*, 2002, 149(1): 46 – 53.
- [4] GUO ZHI. A survey of satisfying control and estimation[C] // *Proc of the 14th IFAC World Congress*. Beijing: Pergamon Press, 1999: 443

– 447.

- [5] BHATTACHARYYA S P, CHAPPELLAT H, KEEL L H. *Robust Control: the Parametric Approach*[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1995.
- [6] RUAN S, WEI J. On the zeros of transcendental functions with applications to stability of delay differential equations with two delays[J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series A: Mathematical Analysis*, 2003, 10(6): 863 – 874.

作者简介:

李银侠 (1976—), 男, 南京理工大学自动化系博士研究生, 主要研究方向为多目标满意PID控制、火力控制, E-mail: lyinya178@126.com;

盛安冬 (1964—), 男, 南京理工大学自动化系研究员, 博士生导师, 主要研究方向为满意滤波、数据融合, E-mail: shengandong@126.com;

王远钢 (1964—), 男, 南京理工大学自动化系副教授, 主要研究方向为控制系统期望指标集的相容性、随机系统的满意控制与估计, E-mail: wyg@acl.dhs.org;

郭治 (1937—), 男, 南京理工大学自动化系教授、博士生导师、中国兵工学会理事, 主要研究方向为随机系统的满意控制与估计, E-mail: guozhi@mail.njust.edu.cn.

(上接第497页)

参考文献(References):

- [5] BRANICKY M S, PHILLIPS S M, ZHANG W. Stability of networked control systems: explicit analysis of delay[C] // *Proc of American Control Conference*. Chicago, USA, New York: IEEE Press, 2000: 2352 – 2357.
- [6] BRANICKY M S. Stability of hybrid systems: state of the art[C] // *Proc of American Control Conference*. San Diego, USA, New York: IEEE Press, 1997: 120 – 125.
- [7] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 85 – 99.
- [8] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [9] 刘玉忠, 于海斌. 具有大时延的网络控制系统的稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2004, 19(10): 1133 – 1136.
(LIU Yuzhong, YU Haibin. Analysis of stability for networked control systems with larger delay[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(10): 1133 – 1136.)
- [10] 樊卫华, 蔡骅, 吴晓蓓, 等. 具有延时和数据包丢失的网络控制系统的稳定性[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(5): 465

– 468.

(FAN Weihua, CAI Hua, WU Xiaobei, et al. Stability of networked control systems with time delay and data packet dropout[J]. *J of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(5): 465 – 468.)

- [11] RABELLO A, BHAYA A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2003, 150(5): 546 – 550.

- [12] GAHINET A, NEMIROVSHI A, LAUB, et al. *MATLAB LMI Control Toolbox*[M]. Natick, MA: MathWorks, 1995.

作者简介:

张喜民 (1973—), 男, 博士, 研究方向为网络控制技术、嵌入式系统, E-mail: zczya@sohu.com;

李建东 (1962—), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为宽带无线IP技术、移动通信技术, E-mail: jdli@mail.xidian.edu.cn;

陈实 (1972—), 男, 讲师, 主要研究领域为智能计算, E-mail: chenshi@zwu.edu.cn.