

## 区间化时变时延的网络化切换系统建模与控制

刘 斌<sup>1</sup>, 刘义才<sup>1,2†</sup>

(1. 武汉科技大学 信息科学与工程学院; 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心 湖北 武汉 430081;

2. 武汉商学院 机电工程与汽车服务学院, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 研究了具有从传感器到控制器和控制器到执行器存在双边时变时延的网络控制系统指数稳定性的问题. 首先将时延变化范围划分为多个等分区间, 然后采用增广矩阵的方法建立了参数不确定的离散时间切换闭环系统模型. 同时基于平均驻留时间分析方法, 给出了系统满足指数稳定的条件, 接着进一步的建立了时延区间划分个数与系统状态指数衰减率的定量关系. 该方法有效降低了系统设计的保守性, 一定程度上减少了系统状态收敛的时间. 最后通过数值仿真验证了所提方法的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 时变时延; 切换系统; 平均驻留时间; 稳定

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Modeling and control of networked switched systems with partitioned time-varying delay

LIU Bin<sup>1</sup>, LIU Yi-cai<sup>1,2†</sup>

(1. Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of Ministry of Education; Institute of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China;

2. School of Mechanical-electronic and Automobile Engineering, Wuhan Business University, Wuhan Hubei 430056, China)

**Abstract:** The exponential stability problem is studied for the networked control systems with bilateral time-varying delay of sensor-to-controller and controller-to-actuator. A discrete-time switched closed-loop system with uncertain parameters is modeled by partitioning the range of time-varying delay into multi-equal intervals and using the method of augmented matrix. Then the condition meeting the exponential stability in the closed-loop system is presented, and the quantitative relation between the number of delay intervals and the exponential decay rate is established based on the approach of average dwell time. The proposed design method can decrease the conservatism of the system design and shorten the convergence time to some degree. Finally, the simulation results are given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** networked control systems; time-varying delay; switched system; average dwell time; stability

### 1 引言(Introduction)

近年来, 通过网络连接的传感器、控制器和执行器等节点来完成数据交换的网络控制系统(networked control systems, NCSs)受到了广泛的关注和研究. 相对于传统的点对点控制模式, NCSs实现了远程信息资源共享, 节约了系统设计成本, 增强了系统的可维护性以及具有高度灵活性等优点, 广泛应用于工业控制网络、传感器网络、远程医疗手术、无人机以及云控制系统等领域<sup>[1-3]</sup>.

然而在带宽有限的网络中, 数据在传输过程中不

可避免地会存在时延, 而且受到网络协议类型、拓扑结构、负载变化等因素的影响, 该时延将会随时间变化, 它将会引起系统性能下降甚至破坏其稳定性. 因此目前它成为NCSs分析和设计考虑的基本问题之一.

针对信息在网络传输过程中的时变时延, 文献[4]采用接收缓存的方法将其转化为定常时延, 然后设计控制器, 但此方法人为地增加了时延, 会降低系统的性能. 文献[5-9]将时变时延转化为不确定的参数但满足范数有界条件, 或者将其转化为凸多面体不确定项<sup>[10]</sup>, 建立了参数不确定的离散线性控制系统模型,

收稿日期: 2016-6-29; 录用日期: 2017-03-21.

† 通信作者. E-mail: liuyicai027@foxmail.com; Tel.: +86 15308639880.

本文责任编辑: 薛安克.

国家自然科学基金项目(61104027, 61573263)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61104027, 61573263).

并利用不确定系统分析方法给出了系统稳定的条件, 但此方法需要对多个参数进行调节或者要求较为复杂算法保证不确定参数矩阵满足范数有界性条件. 文献[11]将时变时延分解为均值部分和不确定部分, 同样将其描述为一类离散时间范数有界不确定的条件, 然后利用鲁棒控制的方法设计稳定化状态反馈控制器, 并建立了时延上界和时延变化范围与系统稳定性之间的关系, 该方法有效地解决了时变时延引起的指数时变项问题, 但是忽略了时变时延部分的动态信息, 因此相应的分析和设计方法存在有一定程度的保守性. 文献[12-18]将时延特性描述为基于Markov的随机过程, 建立了基于离散时间跳变系统模型, 并采用基于Markov的随机系统方法给出相应的分析和设计要求. 然而在实际的通信网络中, 时延是时变的, 用Markov链去刻画时延的跳变特性, 需要计算出各个时延值之间的转移概率, 这在实际工程应用中是非常难实现的, 或者需要付出很高的成本, 因此在很多情况下, 基于随机系统的方法就不再适用. 文献[19-20]采用模型预测的控制思想来解决网络诱导时延问题, 基本思想是控制器事先算出基于整数倍采样周期的多个未来预测控制序列, 然后执行器根据具体时延的大小选取相应的控制量, 从而可补偿时延带来的输入滞后问题; 文献[21]则在一个采用周期时间内采用广义预测控制(generalized predictive control, GPC)算法与线性插值原理相结合, 并提高执行器读取缓冲区的频率来提高时延补偿性能. 基于预测时延补偿思想, 文献[22]在控制器里事先预存与确定时延相关的参数并计算出控制序列, 然后执行器采用事件驱动的方式, 并根据从传感器到执行器的时延值在控制序列中选取适当控制量输出给对象. 文献[23]将时延变化范围按区间划分, 并建立了相应的Lyapunov- Krasovskii泛函, 由于利用了小区间范围内的积分不等式来处理泛函, 因此降低了系统设计的保守性, 文献同时给出了系统满足稳定的条件, 并描述了区间划分个数和时延上届的关系. 文献[24]同样将时延范围按区间划分, 利用时延区间均值代替实际时延值, 并采用区间分割法对时延进行预测, 最后采用状态观测器完成对系统状态的估计, 进而计算出系统所需要的控制量, 通过仿真对比, 得出了此方法能够提高系统的性能结论, 但是并未得到有效的数学证明.

由于切换系统能够有效描述自然, 社会以及工程系统由于外界环境的变化而表现出不同的模态, 因此广泛应用于输电系统, 交通控制系统, 飞行控制系统等领域<sup>[25-27]</sup>. 近年来大批学者将具有时变时延和丢包的神经网络系统描述为切换系统, 并对其稳定性分析和控制器设计方法做了深入研究<sup>[28-31]</sup>.

其中文献[28]其本质是利用执行器的采样频率高于传感器采样频率的时间驱动策略, 将时变时延引起

指数时变项按小区间分解为多个定常项, 并将具有时变短时延的网络控制系统描述为一类离散时间切换系统, 给出了系统满足指数稳定的条件. 文献[29]采用与文献[28]同样的策略解决了系统中的长时延问题, 此方法减少了设计的保守性, 但是执行器采用时间驱动, 又会人为地增加网络时延.

基于以上分析, 本文采用事件驱动的方式, 可有效减少由于执行器采用时间驱动而产生的等待时延, 同时将传感器到控制器(sensor-to-controller, S-C)的反馈通道时延和控制器到执行器(controller-to-actuator, C-A)的前向通道时延按区间划分, 将时变时延在整个区间范围内变化的不确定性问题转化为在小区间范围内变化的不确定性问题, 并建立了基于参数不确定的离散时间切换系统模型, 然后采用平均驻留时间的方法给出了模型依赖的时变控制器增益, 从而可有效降低系统设计的保守性. 同时随着时延区间划分个数的增加, 一定程度上可减少系统状态收敛的时间.

## 2 问题描述和系统建模(Problem description and system modeling)

针对图1所示的存在双边时变时延的网络控制系统作如下合理假定:

- 1) 传感器采用时间周期为 $T$ 的驱动模式;
- 2) 执行器和控制器采用事件驱动, 当新的数据到达节点时, 立即执行相关操作;
- 3) 不考虑执行器获取缓冲器数据的时间以及控制器的运算时间, 只考虑从S-C反馈通道和C-A前向通道的时变时延 $\tau_k^{sc}$ ,  $\tau_k^{ca}$ , 并满足 $\tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < T$ ;
- 4) 系统状态可测以及网络数据包带有时间戳信息, 但不考虑系统丢包问题.

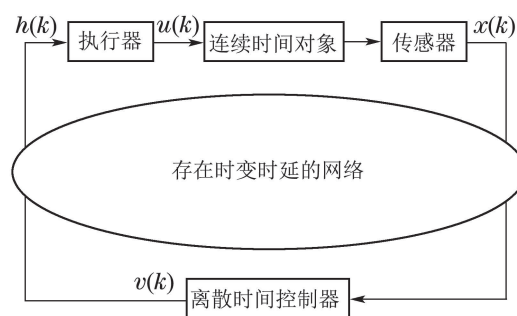


图1 具有双边时变时延的网络控制系统结构框图

Fig. 1 Structure of the NCSs with bilateral time-varying delay

如图2所示, 将系统采样周期 $T$ 划分为 $N$ 等分, 每等分时间间隔为 $T_0$ , 即满足 $T = NT_0$ . 则在任意的第 $k$ 个时间周期内有

$$\begin{cases} n_{0k}, n_{1k} \in Z_0 = \{1, \dots, N\}, \\ n_{0k} + n_{1k} = N, \\ n_{0k}T_0 + n_{1k}T_0 = NT_0 = T. \end{cases} \quad (1)$$

当传感器所获取的系统状态信息经过了 $t_k$  ( $t_k =$

$\tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$ 时间滞后, 然后才到达执行器, 并且落到了  $[n_{0k}, T_0, (n_{0k} + 1)T_0]$  区间内. 由于使用了事件驱动, 在  $[kT, kT + t_k]$  内, 执行器的输出值为  $u(k-1)$ , 在  $[kT + t_k, (k+1)T]$  时间内输出值为  $u(k)$ .

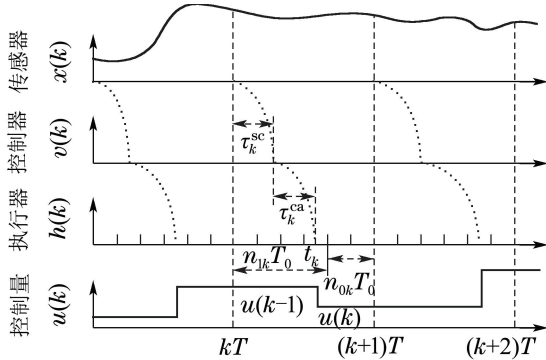


图2 时延区间化的网络控制系统的信号时序图

Fig. 2 Timing diagram of NCSs with partitioned bilateral random delay

假设连续时间对象的状态空间模型为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (2)$$

其中:  $x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in \mathbb{R}$  分别为系统的对象状态, 输入和输出,  $A, B$  为适当维数的矩阵.

令

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{AT}, T = (n_{0k} + n_{1k})T_0 = NT_0, \\ t_k &= T - (n_{0k}T_0 + \tau_k), \tau_k \in [0, T_0], \\ \Gamma_{0k} &= \int_0^{n_{0k}T_0} e^{As} ds \cdot B, \\ \Gamma_{1k} &= \int_{n_{0k}T_0}^T e^{As} ds \cdot B, \bar{F}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} e^{As} ds, \\ \delta &> \max_{\tau_k \in [0, T_0]} \|\bar{F}(\tau_k)\|_2 = \left\| \int_0^{T_0} e^{As} ds \right\|_2, \\ E &= B, D_k = \delta e^{An_{0k}T_0}, F(\tau_k) = \delta^{-1} \int_0^{\tau_k} e^{As} ds. \end{aligned}$$

因此有  $F^T(\tau_k)F(\tau_k) = \delta^{-2}\bar{F}^T(\tau_k)\bar{F}(\tau_k) < I$  并且令  $\lambda_{\max}(X), \lambda_{\min}(X)$  分别表示矩阵  $X$  的最大特征值和最小特征值及  $*$  代表矩阵的对称部分.

考虑系统双边时变时延的影响, 对其离散化

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= e^{AT}x_k + \int_0^{T-t_k} e^{As} ds \cdot B \cdot u_k + \\ &\int_{T-t_k}^T e^{As} ds \cdot B \cdot u_{k-1} = \Phi x_k + \\ &\int_0^{n_{0k}T_0 + \tau_k} e^{As} ds \cdot B \cdot u_k + \\ &\int_{n_{0k}T_0 + \tau_k}^T e^{As} ds \cdot B \cdot u_{k-1} = \\ &\Phi x_k + \left( \int_0^{n_{0k}T_0} e^{As} ds + \right. \\ &\left. e^{An_{0k}T_0} \int_0^{\tau_k} e^{As} ds \right) \cdot B \cdot u_k + \\ &\left( \int_{n_{0k}T_0}^T e^{As} ds - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. e^{An_{0k}T_0} \int_0^{\tau_k} e^{As} ds \right) \cdot B \cdot u_{k-1} = \\ &\Phi x_k + (\Gamma_{0k} + D_k F(\tau_k)E) \cdot u_k + \\ &(\Gamma_{1k} - D_k F(\tau_k)E) \cdot u_{k-1}. \quad (3) \end{aligned}$$

从式(3)中可以看出,  $n_{0k}, n_{1k}$  只能在一个有限集合内取值, 并且当各自取不同值时, 系统模型将会表现出不同形式.

令  $\sigma_k \in \mathbb{Z}_0$  是一个关于时间的切换分段常数, 称为切换信号,  $n_{0k}, n_{1k}$  的取值由  $\sigma_k$  来控制, 即

$$\begin{aligned} [n_{1k}, n_{0k}] &= [1 \ N - 1] \rightarrow \sigma_k = 1, \\ [n_{1k}, n_{0k}] &= [2 \ N - 2] \rightarrow \sigma_k = 2, \\ &\vdots \\ [n_{1k}, n_{0k}] &= [N \ 0] \rightarrow \sigma_k = N. \quad (4) \end{aligned}$$

因此式(3)具有个子系统模型形式. 令系统的增广矩阵  $z(k) = [x^T(k) \ u^T(k-1)]^T$ , 则式(3)可以表述为开环离散时间切换系统模型.

$$S_{0k} : z(k+1) = \bar{\Phi}_{\sigma_k} z(k) + \bar{\Gamma}_{\sigma_k} u(k), \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{\sigma_k} &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{1\sigma_k} - D_{\sigma_k} F(\tau_k)E \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{\Gamma}_{\sigma_k} &= \begin{bmatrix} \Gamma_{0\sigma_k} + D_{\sigma_k} F(\tau_k)E \\ I \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

当网络负载等因素变化时, 时延也将随之改变, 相应的系统也会发生切换. 针对开环离散时间切换系统模型(5), 采用时延模型依赖的时变控制器增益, 即对每个子系统采用不同的反馈控制增益. 令系统的控制器为  $u(k) = K_{\sigma_k} z(k)$  则可得闭环离散时间切换系统模型  $S_{ck}$ .

$$\begin{aligned} z(k+1) &= \tilde{\Phi}_{\sigma_k} z(k) = \\ &\left( \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{1\sigma_k} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_{0\sigma_k} \\ I \end{bmatrix} K_{\sigma_k} + \right. \\ &\left. \begin{bmatrix} D_{\sigma_k} \\ 0 \end{bmatrix} F(\tau_k) ([0 \ -E] + EK_{\sigma_k}) \right) z(k) = \\ &(\hat{\Phi}_{\sigma_k} + \hat{\Gamma}_{\sigma_k} K_{\sigma_k} + \hat{D}_{\sigma_k} F(\tau_k) (\hat{E} + E_0 K_{\sigma_k})) z(k), \quad (6) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{\sigma_k} &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{1\sigma_k} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_{0\sigma_k} \\ I \end{bmatrix} K_{\sigma_k} + \\ &\begin{bmatrix} D_{\sigma_k} \\ 0 \end{bmatrix} F(\tau_k) ([0 \ -E] + EK_{\sigma_k}), \\ \hat{\Phi}_{\sigma_k} &= \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{1\sigma_k} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{\Gamma}_{\sigma_k} = \begin{bmatrix} \Gamma_{0\sigma_k} \\ I \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\hat{D}_{\sigma_k} = \begin{bmatrix} D_{\sigma_k} \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{E} = [0 \quad -E], E_0 = E.$$

由于系统存在着S-C和C-A双边时变时延,因此本文采用了时延预估补偿机制<sup>[22]</sup>的思想来设计系统工作方式,即根据数据包的时间戳信息,执行器分析当前从传感器到执行器整个的网络时延大小并选择相应的时延区间模型依赖的控制增益值输出给控制对象.

### 3 系统的指数稳定性分析 (Exponential stability analysis of NCSs)

**定义 1** 在一定的切换信号 $\sigma(k)$ 作用下,若存在常数 $\alpha > 0, 0 < \gamma < 1$ ,对于离散时间切换闭环系统模型(6),使得对于任意有限的初始状态 $x(k_0)$ 满足 $\|x(k)\| \leq \alpha\gamma^{(k-k_0)}\|x(k_0)\|, \forall k \geq k_0$ 则称系统的平衡点 $x = 0$ 在切换信号作用下是全局一致指数稳定且具有衰减率 $\gamma$ .

**定义 2** 对任意的 $k_2 > k_1 \geq 0$ ,令 $N_\sigma(k_2, k_1)$ 表示在时间区间 $[k_1, k_2]$ 内系统 $\sigma(k)$ 切换的次数,若存在 $\tau_a$ 使得

$$N_\sigma(k_2, k_1) \leq N_0 + \frac{k_2 - k_1}{\tau_a}$$

成立,则称 $\tau_a$ 为系统切换信号的平均驻留时间,其中 $N_0$ 称为表示系统的颤抖界,通常 $N_0 = 0$ .

**引理 1**<sup>[26]</sup> 针对离散时间切换系统(6),给定常数 $-1 < \lambda < 0$ ,假定存在 $C^1$ 函数, $V_p(k) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,及 $\kappa_\infty$ 类函数 $\kappa_1, \kappa_2$ 对于 $\forall p \in Z_0$ ,若有

$$\kappa_1(\|x(k)\|) \leq V_p(k) \leq \kappa_2(\|x(k)\|),$$

$$\Delta V_p(k) < \lambda V_p(k),$$

且对于 $\forall(\sigma(k_i) = p, \sigma(k_{i-1}) = q) \in Z_0 \times Z_0, p \neq q$ ,存在 $u > 1, p \in Z_0$ ,使得

$$V_p(x(k_i)) < uV_q(x(k_i))$$

成立,那么离散时间切换系统全局一致指数稳定,只要其切换信号的平均驻留时间满足

$$\tau_a > \tau_a^* = -\frac{\ln u}{\ln(1 + \lambda)}. \quad (7)$$

**定理 1** 针对离散时间切换系统(6),如果存在 $u > 1, -1 < \lambda < 0$ ,以及对称矩阵 $P_p > 0, P_q > 0, \forall(p, q) \in Z_0 \times q$ ,使得

$$\tilde{\Phi}_p^T P_p \tilde{\Phi}_p - (1 + \lambda)P_p < 0, \quad (8)$$

$$P_p < uP_q \quad (9)$$

成立,则离散切换系统(6)是全局一致指数稳定,只要切换信号满足式(7)的平均驻留时间要求.

**证** 令时间序列 $k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, k_{i+1}, \dots, k_{N_\sigma(nT,0)}$ 是 $nT$ 个时间内各个子系统的切换点,且是

右连续的.令 $V_p(z(k)) = z^T(k)P_p z(k), p \in Z_0$ 为子系统的Lyapunov函数,则对于 $k \in [k_i, k_{i+1}]$ ,反复利用式(8)–(9)有

$$\begin{aligned} & V_{\sigma(k_i)}(z(k)) < \\ & (1 + \lambda)^{(k-k_i)} V_{\sigma(k_i)}(z(k_i)) < \\ & \mu(1 + \lambda)^{(k-k_i)} V_{\sigma(k_i^-)}(z(k_i^-)) < \\ & \mu(1 + \lambda)^{(k-k_i)} (1 + \lambda)^{(k_i-k_{i-1})} V_{\sigma(k_{i-1})}(Z(k_{i-1})) \\ & \mu^2(1 + \lambda)^{(k-k_i)} (1 + \lambda)^{(k_i-k_{i-1})} V_{\sigma(k_{i-1})}(Z(k_{i-1})) \\ & \vdots \\ & \mu^{N(k_i,0)} (1 + \lambda)^{(k-k_i)} (1 + \lambda)^{(k_i-k_{i-1})} \dots \times \\ & (1 + \lambda)^{(k_1-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)). \end{aligned}$$

令 $k_0 = 0, V_{\sigma(k)}(z(k)) = V_{\sigma(k_i)}(z(k))$ ,因此基于切换信号满足平均驻留时间式(7),有

$$\begin{aligned} & V_\sigma(k)(z(k)) < \\ & \mu^{N(k,0)} (1 + \lambda)^{(k-k_i)} (1 + \lambda)^{(k_i-k_{i-1})} \dots \times \\ & (1 + \lambda)^{(k_1-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)) = \\ & \mu^{N(k,0)} (1 + \lambda)^k V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)) \leq \\ & \mu^{N(k,0) + \frac{k}{\tau_a}} (1 + \lambda)^k V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)) = \\ & \exp(N_0 \ln \mu) (\mu^{\frac{1}{\tau_a}} (1 + \lambda))^k V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)). \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \min_{p \in Z_0} \lambda(P_p), \beta_2 = \max_{p \in Z_0} \lambda_{\max}(P_p), \\ \gamma^* &= \mu^{\frac{1}{\tau_a}} (1 + \lambda), \end{aligned}$$

所以有

$$\begin{aligned} \beta_1 \|z(k)\| &\leq V_{\sigma(k)}(z(k)) < \\ \exp(N_0 \ln \mu) (\mu^{\frac{1}{\tau_a}} (1 + \lambda))^k V_{\sigma(k_0)}(z(k_0)) &\leq \\ \exp(N_0 \ln \mu) \gamma^{*k} \cdot \beta_2 \|z(0)\|. \end{aligned}$$

令 $\alpha = \exp(N_0 \ln \mu) \beta_2 / \beta_1$ ,则有

$$\|z(k)\| \leq \alpha \gamma^{*k} \|z(0)\|.$$

假设初始时刻 $u(-1) = 0$ .因此有

$$\begin{aligned} \|x(k)\| &\leq \|z(k)\| \leq \alpha \gamma^{*k} \|z(0)\| = \\ &\alpha \gamma^{*k} \|x(0)\|. \end{aligned}$$

当 $\gamma^* < 1$ ,即满足不等式(7)时,则系统指数稳定,其指数衰减率为 $\gamma^* = \mu^{\frac{1}{\tau_a}} (1 + \lambda)$ .

系统(6)的各个子系统描述了当网络诱导时延在小区间 $[iT_0, (i+1)T](i = 0, 1, \dots, N-1)$ 内变化的控制系统模型.不等式(8)表明系统(6)中各个子系统内部是指数稳定并具有指数衰减率 $(1 + \lambda)$ ;当网络诱导时延发生变化,则系统模型将会在各个子系统之间切换,在切换过程中其指数衰减率将会增加到 $(1 + \lambda)$ 的 $\mu^{\frac{1}{\tau_a}}$ 倍.当系统时变时延在各个子系统之间的跳变频率不是很频繁时,即平均驻留时间满足条件不等

式(7)时,系统才能稳定的,但系统性能将会随着切换频率的增加而降低.

#### 4 控制器设计及系统实现(The controller design and system implementation)

**引理2** (Schur补引理) 假如存在矩阵 $S_1, S_2$ 和 $S_3$ , 其中 $S_2^T = S_2 > 0, S_3^T = S_3$ , 则 $S_1^T S_2 S_1 + S_3 < 0$ 成立等价于

$$\begin{bmatrix} -S_2^{-1} & S_1 \\ S_1^T & S_3 \end{bmatrix} < 0, \text{ 或 } \begin{bmatrix} S_3 & S_1^T \\ S_1 & -S_2^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

**引理3** 给定具有相应维数的矩阵 $W, D$ 和 $E$ , 其中 $W$ 为对称阵, 对于所有满足 $F^T F < I$ 的矩阵 $F$ , 有 $W + DFE + E^T F^T D^T < 0$ , 当且仅当存在 $\varepsilon > 0$ , 使得 $W + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0$ .

**定理2** 若存在 $-1 < \lambda < 0, \mu > 1, p \in Z_0$ , 对于离散时间切换闭环系统模型(6), 如果存在 $Y_p, X_p = X_p^T > 0, p \in Z_0$ , 以及 $\varepsilon > 0$ 满足以下线性矩阵不等式(LMIs):

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda)X_p & * & * \\ \hat{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma}_p Y_p & \varepsilon \hat{D}_p \hat{D}_p^T - X_p & * \\ \hat{E} X_p + E_0 Y_p & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} -\mu X_q & * \\ X_q & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in Z_0, \quad (11)$$

且切换信号满足平均驻留时间式(7), 则系统全局一致指数稳定, 此时系统模型依赖下的反馈增益为 $K_p = Y_p X_p^{-1}$ .

**证** 采用引理2, 对不等式(8)–(9)进行等效变换, 可得

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda)P_p & \tilde{\Phi}_p^T \\ \tilde{\Phi}_p & -P_p^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \in Z_0, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -\mu P_q & I \\ I & -P_p^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in Z_0. \quad (13)$$

令

$$X_p = P_q^{-1}, X_q = P_q^{-1}, p, q \in Z_0,$$

对式(12)左右分别乘以 $\text{diag}\{X_p, I\}$ , 对式(13)分别乘以 $\text{diag}\{X_q, I\}$ 可得

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda)X_p & (\tilde{\Phi}_p X_p)^T \\ \tilde{\Phi}_p X_p & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \in Z_0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -\mu X_q & * \\ X_q & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in Z_0, \quad (15)$$

不等式(15)即为式(11). 由于数据在传输过程中发生了时变传输时延, 因此从式(14)可得

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda)X_p & * \\ \hat{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma}_p Y_p & -X_p \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D}_p \end{bmatrix} F(\tau_k) [\hat{E} X_p + E_0 Y_p \quad 0] + [\hat{E} X_p + E_0 Y_p \quad 0]^T F^T(\tau_k) \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D}_p \end{bmatrix}^T < 0, \quad (16)$$

其中 $Y_p = K_p X_p$ .

由于 $F^T(\tau_k)F(\tau_k) < I$ 根据引理3, 将上式等效为

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda)X_p & * \\ \tilde{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma}_p Y_p & -X_p \end{bmatrix} + \varepsilon \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D}_p \end{bmatrix} [0 \quad \hat{D}_p^T] + \varepsilon^{-1} \begin{bmatrix} (\hat{E} X_p + E_0 Y_p)^T \\ 0 \end{bmatrix} [\hat{E} X_p + E_0 Y_p \quad 0] < 0. \quad (17)$$

继续采用引理2, 可得式(17)和式(10)是等效的. 证毕.

定理2说明了在区间化时变时延的系统模型(6)中, 只有平均驻留时间 $\tau_a$ 满足式(7)的条件, 并且式(10)–(11)有可行解时, 系统才能够指数稳定. 但是在实际应用中, 将会很难获得时延的跳变特性, 也就难以求得平均驻留时间 $\tau_a$ 的大小, 从而难以应用条件式(7). 因此基于以上分析, 并结合定理2可以得到推论1.

**推论1** 若存在 $-1 < \lambda < 0$ , 对于离散时间切换闭环系统模型(6), 选择合适的 $\mu$ 满足

$$1 < \mu \leq \frac{1}{1+\lambda}. \quad (18)$$

如果存在 $Y_p, X_p = X_p^T > 0, p \in Z_0$ , 以及 $\varepsilon > 0$ 满足不等式(10)–(11), 则对任意在区间 $(0, T)$ 变化的时变时延, 系统是指数稳定的, 并且指数衰减率 $\gamma^*$ 满足

$$\gamma^* \leq \mu(1+\lambda). \quad (19)$$

**证** 通过前面分析可知, 对于区间化时变时延的离散时间切换系统模型(6), 当满足不等式(7)(10)–(11)条件时, 系统状态指数衰减, 并且衰减率为 $\gamma^* = \mu^{\frac{1}{\tau_a}}(1+\lambda)$ . 由于对任意在区间 $(0, T)$ 变化的时变时延, 无论区间怎么划分, 实际系统的平均驻留时间一定满足 $\tau_a > 1$ ; 当选择 $\mu$ 满足 $1 < \mu \leq 1/(1+\lambda)$ 时, 则有 $1 > \tau_a^*$ , 可得式(7)成立. 因此衰减率为 $\gamma^* = \mu^{\frac{1}{\tau_a}}(1+\lambda) < \mu(1+\lambda)$ . 证毕.

本文提出了区间化时变时延方法, 目的就是为了减少系统设计的保守性, 因此为了进一步刻画时延区间划分的个数与系统指数衰减性能的关系, 在推论1的基础上进一步地给出了推论2.

**推论2** 对于离散时间切换闭环系统模型(6), 将时变时延区间 $(0, T)$ 划分为 $m$ 和 $m+1$ 等分, 当存在 $\lambda_m, \mu_m, \lambda_{m+1}, \mu_{m+1}$ 满足推论1条件, 且进一步地当满足

$$\mu_{m+1} < \frac{1+\lambda_m}{1+\lambda_{m+1}} \quad (20)$$

时, 则对任意在区间 $(0, T)$ 变化的时变时延, 划分为

$m + 1$ 等分时的系统指数衰减性能一定优于划分为 $m$ 等分时的性能。

证 基于前文分析可知, 当满足不等式

$$\frac{1}{\mu_{m+1}^{\frac{1}{\tau_{a(m+1)}}}} (1 + \lambda_{m+1}) < \frac{1}{\mu_m^{\frac{1}{\tau_{am}}}} (1 + \lambda_m), \quad (21)$$

则划分为 $m + 1$ 等分时系统指数衰减性能要优于划分为 $m$ 等分时的性能, 其中 $\tau_{a(m+1)}, \tau_{am}$ 分别表示划分为 $m + 1$ 和 $m$ 等分时时变时延跳变的平均驻留时间, 并且 $\tau_{a(m+1)} > 1, \tau_{am} > 1$ . 从不等式(21)易得

$$\frac{1}{\tau_{a(m+1)}} \log \mu_{m+1} - \frac{1}{\tau_{am}} \log \mu_m < \log \left( \frac{1 + \lambda_m}{1 + \lambda_{m+1}} \right). \quad (22)$$

又由于 $\mu_{m+1} > 1, \mu_m > 1$ , 则可得

$$\frac{1}{\tau_{a(m+1)}} \log \mu_{m+1} - \frac{1}{\tau_{am}} \log \mu_m < \frac{1}{\tau_{a(m+1)}} \log \mu_{m+1} < \log \mu_{m+1}. \quad (23)$$

因此当满足条件(20)时, 则不等式(21)成立. 证毕.

在设计模型依赖的时变控制器时, 采用一维搜索法来获取最小的 $\mu, \lambda$ , 从而可获得系统最小的指数衰减率. 具体算法如下: 在确保LMSs(10)–(11)有可行解的前提下, 首先选取尽可能小的参数 $\mu_0$ , 并选取合适的参数 $\lambda_0$ , 然后逐渐减小 $\lambda_0$ , 直到不等式LMSs(10)–(11)最后一次有可行解时对应的 $\lambda$ ; 接着固定 $\lambda$ , 逐渐减小 $\mu_0$ , 同样直到不等式LMSs(12)–(13)最后一次有

可行解时对应的 $\mu$ .

### 5 数值算例仿真(The numerical simulation)

算例 1 给出两轴磨粉机控制系统中的连续时间对象状态空间方程模型:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -18.18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -17.86 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 515.38 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 517.07 \end{bmatrix} u(t).$$

为了验证本文所提方法的有效性, 考虑其传感器采样周期为 $T = 1.2$  s, 作者分别将时变时延区间(0, 1.2 s)按1, 2, 4和6等分划分, 同时分别选取满足条件的最小 $\delta$ 值, 可求出对应的可行解条件 $\lambda, \mu$ 和系统指数衰减率上界, 如表1所示, 以及基于模型依赖的时变控制器增益.

表 1 不同时延区间划分对应的可行解和系统指数衰减率上界

Table 1 The feasible solutions and the upper bound of the system exponential decay rate corresponding to different interval divisions

区间数	$\delta$	$\lambda$	$\mu$	$\gamma^*$
未划分	1.21	-0.051	—	0.949
2等分	0.61	-0.095	1.001	0.906
4等分	0.31	-0.165	1.001	0.836
6等分	0.21	-0.220	1.011	0.789

1) 时变时延区间未划分时所求出的模型依赖的时变控制器增益为

$$K = \begin{bmatrix} -0.0013 & -0.0001 & 0 & 0 & 0.0973 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0011 & -0.0001 & 0 & 0.2033 \end{bmatrix}.$$

2) 时变时延区间划分二等分时所求出的模型依赖的时变控制器增益为

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.0027 & -0.0001 & 0 & 0 & -0.0203 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0023 & -0.0001 & 0 & 0.0975 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -0.0028 & -0.0002 & 0 & 0 & -0.0636 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0023 & -0.0001 & 0 & 0.0649 \end{bmatrix}.$$

3) 时变时延区间划分四等分时所求出的模型依赖的时变控制器增益为

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.0045 & -0.0002 & 0 & 0 & -0.0323 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0041 & -0.0002 & 0 & 0.0400 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -0.0046 & -0.0003 & 0 & 0 & -0.0546 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0041 & -0.0002 & 0 & 0.0248 \end{bmatrix},$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} -0.0048 & -0.0003 & 0 & 0 & -0.0948 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0042 & -0.0002 & 0 & -0.0073 \end{bmatrix},$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} -0.0051 & -0.0003 & 0 & 0 & -0.1573 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0045 & -0.0003 & 0 & -0.0578 \end{bmatrix}.$$

4) 时变时延区间划分六等分时所求出的模型依赖的时变控制器增益为

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \begin{bmatrix} -0.0054 & -0.0003 & 0 & 0 & 0.0455 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0051 & -0.0003 & 0 & 0.0673 \end{bmatrix}, \\
 K_2 &= \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0003 & 0 & 0 & 0.0322 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0052 & -0.0003 & 0 & 0.0551 \end{bmatrix}, \\
 K_3 &= \begin{bmatrix} -0.0056 & -0.0003 & 0 & 0 & 0.0084 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0053 & -0.0003 & 0 & 0.0336 \end{bmatrix}, \\
 K_4 &= \begin{bmatrix} -0.0058 & -0.0003 & 0 & 0 & -0.0239 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0054 & -0.0003 & 0 & 0.0042 \end{bmatrix}, \\
 K_5 &= \begin{bmatrix} -0.0056 & -0.0003 & 0 & 0 & 0.0080 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0053 & -0.0003 & 0 & 0.0336 \end{bmatrix}, \\
 K_6 &= \begin{bmatrix} -0.0057 & -0.0003 & 0 & 0 & -0.0129 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0054 & -0.0003 & 0 & 0.0056 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

针对系统初始状态 $x(0) = [2 \ 1 \ 0.6 \ 0.2]^T$ , 以及在区间 $(0, 1.2 \text{ s})$ 范围内任意变化的时变时延, 可得如图3-6所示系统的状态轨迹图. 结合表1可以看出所得的可行解均能满足推论1和推论2的条件, 并且从图3-6中可以看出, 随着时延区间划分个数的增加, 其系统状态的衰减性能越好, 趋于稳定的时间越短. 因此验证了本文所提方法的有效性.

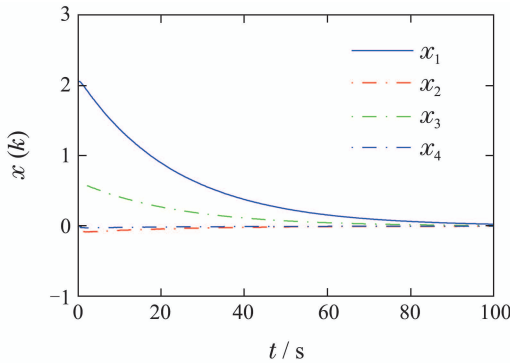


图3 时延区间未划分时的系统状态轨迹图

Fig. 3 The state trajectories of NCSs when the time delay interval is not partitioned

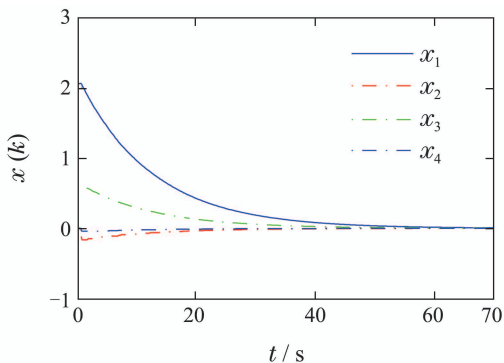


图4 时延区间划分为二等分时的系统状态轨迹图

Fig. 4 The state trajectories of NCSs when the time delay interval is partitioned into two equal intervals

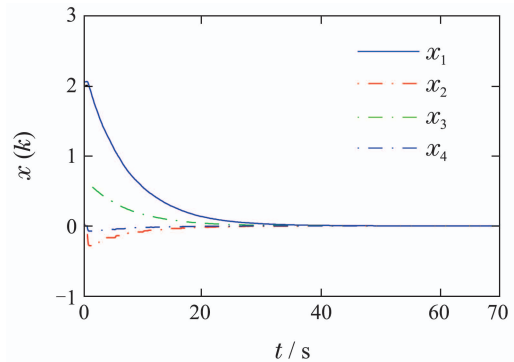


图5 时延区间划分为四等分时的系统状态轨迹图

Fig. 5 The state trajectories of NCSs when the time delay interval is partitioned into four equal intervals

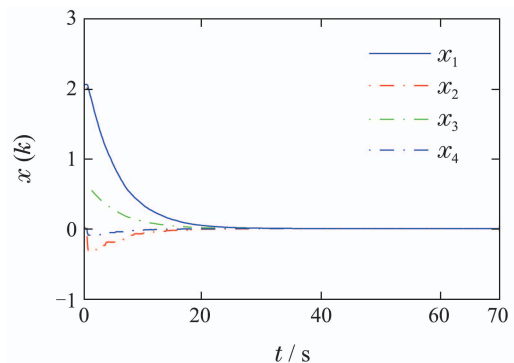


图6 时延区间划分为六等分时的系统状态轨迹图

Fig. 6 The state trajectories of NCSs when the time delay interval is partitioned into six equal intervals

**算例2** 给出参考文献[5-6]中连续时间对象状态空间方程模型:

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

同样选择传感器采样周期为 $T = 1 \text{ s}$ , 将整个采样周期范围内的时延按2等分划分, 给出满足条件的最

小值  $\delta = 0.56$ , 得出可行解  $\lambda = -0.44$ ,  $\mu = 1.001$  以及基于模型依赖的时变控制器增益为

$$K_1 = [-1.2592 \quad -5.9007 \quad -0.2827],$$

$$K_2 = [-1.6922 \quad -7.9779 \quad -0.7439].$$

采用文献[5]的方法, 但采样周期为 10 ms 时的控制器增益为

$$K = [-0.1674 \quad 0.016];$$

采用文献[6]的方法, 且采样周期为 1 s 时的控制器增益为

$$K = [-0.4307 \quad -2.4927],$$

分别给出在相同的初始条件  $x(0) = [2 \quad -0.5]^T$  以及在区间  $(0, 1 \text{ s})$  范围内任意变化的时变时延条件下的系统状态轨迹图. 从图 7-9 中可以看出, 相对文献 [5-6] 采用单一的控制器来解决在整个时变时延变化范围内的不确定性问题, 本文所提方法将时延范围进行划分, 将其转化为在小区间范围内变化的不确定性问题, 并采用多个区间模型依赖的控制器增益, 有效降低了系统设计的保守性, 一定程度上减少系统收敛到稳定状态所需要的时间.

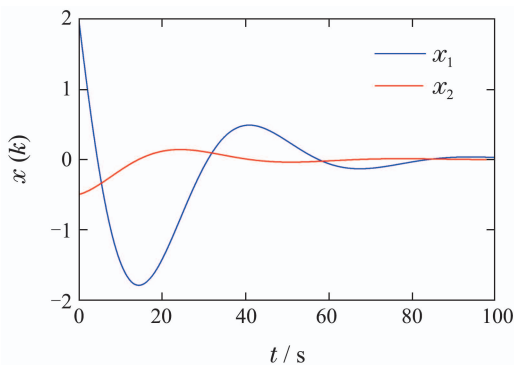


图 7 采用文献[5]的方法给出的系统状态轨迹图  
Fig. 7 The state trajectories of NCSs given by using the method in [5]

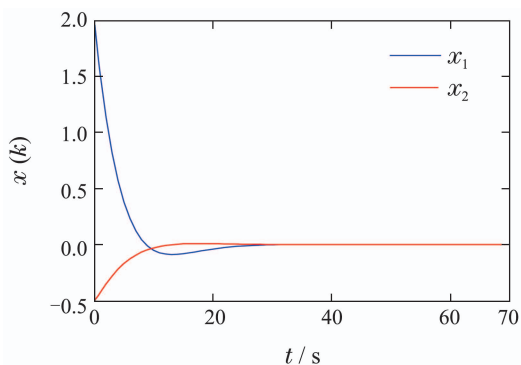


图 8 采用文献[6]的方法给出的系统状态轨迹图  
Fig. 8 The state trajectories of NCSs given by using the method in [6]

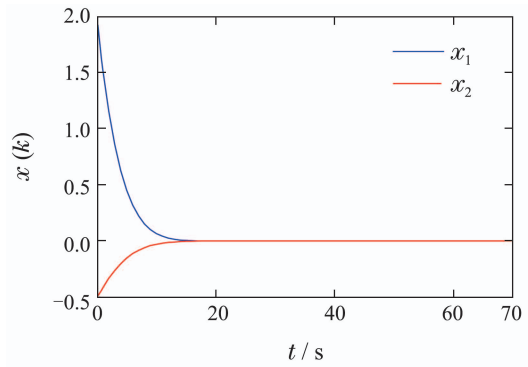


图 9 本文所提方法将时延区间划分为二等分时给出的系统状态轨迹图

Fig. 9 The state trajectories of NCSs given by using the proposed method in this paper to partitioning the time delay interval into two equal intervals

## 6 结论(Conclusions)

针对网络控制系统中双边时变时延, 为了进一步地降低系统设计的保守性, 本文将执行器和控制器均采用事件驱动的同时, 将时变时延最大可能的取值范围按区间划分, 将时变时延在整个区间范围内变化的不确定性问题转化为在小区间范围内变化的不确定性问题, 建立了不确定参数的离散时间切换系统模型, 并采用基于平均驻留时间的分析方法给出了系统满足指数稳定的条件, 确立了时延区间划分个数与系统状态指数衰减率的定量关系. 随着时延区间划分越细, 系统状态收敛速度越快. 但是随着划分区间个数的增加, 必然会增加子系统的个数, 求解线性矩阵不等式的个数也随之增加, 满足推论 1 和推论 2 条件的可行解将会越发困难, 一旦求不出其满足条件的可行解时, 时延区间继续划分就没有意义了. 另外, 当时变控制器增益个数随着区间划分增加到很大数目时, 在实际系统运行中, 将会导致执行器和控制器的计算及运行时间的增加, 从而会造成系统总的网络时延增加, 影响系统的性能. 因此, 在实际的应用中, 如何选取最优的指数衰减性能指标所对应的区间个数有待进一步地研究.

## 参考文献(References):

- [1] XIA Yuanqing. Cloud control systems and their challenges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(01): 1 – 12.  
(夏元清. 云控制系统及其面临的挑战 [J]. *自动化学报*, 2016, 42(1): 1 – 12.)
- [2] YOU Keyou, XIE Lihua. Survey of recent progress in networked control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 101 – 118.  
(游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(2): 101 – 118.)
- [3] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on technology of networked control systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5 – 8.



- [4] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 – 908.
- [5] FAN Weihua, CAI Hua, CHEN Qinwei, et al. Stability of networked control systems with time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 880 – 884.  
(樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880 – 884.)
- [6] XIE Chengxiang, FAN Weihua, HU Weili. Modeling and control method of a class of networked control systems with short time-delay [J]. *Journal of Nan Jing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 33(2): 156 – 160.  
(谢成祥, 樊卫华, 胡维礼. 一类短时延网络控制系统的建模和控制方法 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(2): 156 – 160.)
- [7] QIU Zhanzhi, ZHANG Qingling, LIU Ming. Guaranteed performance control for output feedback networked control systems with uncertain time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 274 – 278.  
(邱占芝, 张庆灵, 刘明. 不确定时延输出反馈网络化系统保性能控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(2): 274 – 278.)
- [8] PAN Y J, MARQUEZ H J, CHEN T. Stabilization of remote control systems with unknown time varying delays by LMI techniques [J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(7): 752 – 763.
- [9] XU Jilin, QU Baida, XU Baoguo. Modeling and  $H_\infty$  robust control for networked control systems with short time-delay [J]. *Computer Engineering and Design*, 2013, 34(1): 110 – 113.  
(胥吉林, 屈百达, 徐保国. 短时延网络控制系统的建模与 $H_\infty$ 鲁棒控制 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(1): 110 – 113.)
- [10] HETEL L, DAAFOUZ J, IUNG C. Analysis and control of LTI and switched systems in digital loops via an event-based modeling [J]. *International Journal of Control*, 2008, 81(7): 1125 – 1138.
- [11] ZHANG W A, YU L. A robust control approach to stabilization of networked control systems with short time-varying delays [J]. *Acta Automation Sinica*, 2010, 36(1): 87 – 91.
- [12] LIU Leiming, TONG Chaonan, WU Yankun. Markovian jump model of networked control systems with dynamic output feedback controllers [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(5): 627 – 631.  
(刘磊明, 童朝南, 武延坤. 一种带有动态输出反馈控制器的网络控制系统的Markov跳变模型 [J]. 自动化学报, 2009, 35(5): 627 – 631.)
- [13] SHI Y, YU B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(7): 1668 – 1674.
- [14] HUANG D, NGUANG S. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(3): 829 – 834.
- [15] ZHANG L, SHI L, CHEN T, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1177 – 1181.
- [16] SONG Yang, DONG Hao, FEI Minrui. Mean square exponential stabilization of Markov networked control systems based on switching frequentness [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(5): 876 – 881.  
(宋杨, 董豪, 费敏锐. 基于切换频度的马尔科夫网络控制系统均方指数镇定 [J]. 自动化学报, 2012, 38(5): 876 – 881.)
- [17] WANG J H, ZHANG Q L, BAI F. Robust control of discrete-time singular Markovian jump systems with partly unknown transition probabilities by static output feedback [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, 13(6): 1313 – 1326.
- [18] GUO C Y, ZHANG W D.  $H_\infty$  estimation for stochastic time delays in networked control systems by partly unknown transition probabilities of Markovian chains [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2013, 135(1): 145081 – 1450816.
- [19] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2008, 2(1): 7 – 15.
- [20] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Improved predictive control approach to networked control systems [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2008, 2(8): 675 – 681.
- [21] ZHUANG Lingyan, ZHANG Wenan, YU Li. GPC-based delay compensation approach for NCS with delays of non-integral multiple of sampling period [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(8): 1273 – 1273.  
(庄玲燕, 张文安, 俞立. 基于GPC的NCS非整数倍采样周期时延补偿方法 [J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1273 – 1273.)
- [22] TIAN G S, XIA F, TIAN Y C. Predictive compensation for variable network delays and packet losses in networked control systems [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 39(10): 152 – 162.
- [23] ZHANG Jun, LUO Dayong, SUN Miaoping. A new stability condition for networked control system with time varying delay based on time delay uneven-partitioning approach [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(1): 54 – 59.  
(张俊, 罗大庸, 孙妙平. 一种基于时滞区间不均分方法的变时延网络控制系统的稳定性条件 [J]. 电子学报, 2016, 44(1): 54 – 59.)
- [24] LIU Ding, LI Pan, ZHANG Xiaohui. A compensation method based on dividing time intervals for time delay of networked control system [J]. *Information and Control*, 2006, 35(3): 299 – 303.  
(刘丁, 李攀, 张晓晖. 一种基于区间分割的网络控制系统时延补偿方法 [J]. 信息与控制, 2006, 35(3): 299 – 303.)
- [25] CHENG Daizhan, GUO Yuqian. Advances on switched systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 954 – 960.  
(程代展, 郭宇骞. 切换系统进展 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 954 – 960.)
- [26] ZHANG H B, XIE D H, ZHANG H Y, et al. Stability analysis for discrete-time switched systems with unstable subsystems by a mode-dependent average dwell time approach [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 1081 – 1086.
- [27] ZHAO X D, ZHANG L X, SHI P, et al. Stability and stabilization of switched linear systems with mode-dependent average dwell time [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(7): 1809 – 1815.
- [28] ZHANG W A, YU L, YIN S. A switched system approach to  $H_\infty$  control of networked control systems with time-varying delays [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2011, 348(2): 165 – 178.
- [29] ZHANG W A, YU L. New approach to stabilisation of networked control systems with time-varying delays [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(12): 1094 – 1104.
- [30] YU J Y, WANG L, YU M. Switched system approach to stabilization of networked control systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(17): 1925 – 1946.
- [31] WANG J F, YANG H Z.  $H_\infty$  control of a class of networked control systems with time delay and packet dropout [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 217(18): 7469 – 7477.

### 作者简介:

刘斌 (1972–), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络控制系统、预测控制、复杂系统建模, E-mail: liubin0130@163.com;

刘义才 (1982–), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为网络控制系统、预测控制, E-mail: liuyicai027@foxmail.com.