

时延转移概率部分未知的网络控制系统鲁棒 H_∞ 故障检测

王燕锋[†], 王培良, 蔡志端

(湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000)

摘要: 针对具有时延的离散网络控制系统, 研究了时延转移概率部分未知条件下的鲁棒 H_∞ 故障检测问题. 首先, 利用两个独立的有限维数的Markov链分别描述传感器至控制器时延及控制器至执行器时延, 把网络控制系统建模为具有两个Markov链的控制系统. 在此基础上构造了故障检测滤波器, 利用状态增广的方法建立了闭环系统模型. 然后, 以矩阵不等式的形式得到了闭环系统随机稳定并满足给定 H_∞ 性能的条件, 给出了相应控制器、滤波器增益矩阵及最小 H_∞ 衰减水平的求解方法, 并得到了转移概率和最小 H_∞ 衰减水平之间的关系. 最后实例仿真表明, 所得到的故障检测滤波器不仅对故障敏感而且对外部扰动具有鲁棒性.

关键词: 故障检测滤波器; 转移概率矩阵; Markov链; 鲁棒 H_∞ 性能

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Robust H-infinity fault detection for networked control systems with partly unknown time-delay transition probabilities

WANG Yan-feng[†], WANG Pei-liang, CAI Zhi-duan

(School of Engineering, Huzhou University, Huzhou Zhejiang 313000, China)

Abstract: This paper investigates the robust H-infinity fault detection problem for the discrete networked control system with time-delays on condition that the transition probabilities of time-delays are partly unknown. First, the time-delay from sensor to controller and the time-delay from sensor to actuator are both considered which are described by two independent Markov chains of finite dimensions. The networked control system is molded as a control system which contains two Markov chains. Furthermore, the fault detection filter is constructed and the closed-loop system is established by the state augmented method. Next, the conditions which make the closed-loop system stochastically stable and achieve prescribed H-infinity performance are obtained in terms of linear matrix inequalities, and the method of calculating the corresponding controller, fault detection filter gain matrices and the minimum H-infinity attenuation level is given. The relationship between transition probabilities and minimum H-infinity attenuation level is also obtained. Finally, the simulation example shows that the proposed fault detection filter is not only sensitive to fault and but also robust to exogenous disturbance.

Key words: fault detection filter; transition probability matrix; Markov chain; robust H-infinity performance

1 引言(Introduction)

网络控制系统(networked control system, NCS)是通过共享网络构成的闭环反馈控制系统, 具有成本低、结构灵活、易维护等优点^[1-2], 在复杂工业控制领域获得了广泛的应用. 然而, 网络的引入不可避免地产生时延、数据包丢失等问题^[3-4], 从而增加了系统的复杂性, 并给NCS的可靠性带来了新的挑战. NCS的控制器设计及故障检测等问题得到了广泛关注并出现了很多研究成果^[5-7].

网络时延很多情况下是随机的, 在进行NCS控制

器设计及故障检测时, 随机时延常常建模为有限状态的Markov链^[8-9], 这种方法的优点是: 可以描述当前时刻时延与上一时刻时延之间的依赖关系, 并可以把数据包丢失包含进来. 文献[8]用两个独立的Markov链分别描述传感器至控制器(sensor to controller, S-C)时延 τ_k 及控制器至执行器(controller to actuator, C-A)时延 μ_k , 把闭环系统建模为含有两个Markov链的控制系统, 并得到了依赖于 τ_k 和 μ_{k-1} 的状态反馈控制器. 然而, 因 μ_{k-1} 的信息到达控制器之前需要经历S-C时延, 控制器在时刻 k 通常无法得到 μ_{k-1} 的信息. 对此,

收稿日期: 2016-06-06; 录用日期: 2016-10-18.

[†]通信作者. E-mail: neu2009wyf@163.com; Tel.: +86 572-2321989.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(61503136, 61573137, 61573136, 61603133), 浙江省自然科学基金项目(LY12F03008), 湖州市自然科学基金项目(2014YZ07)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61503136, 61573137, 61573136, 61603133), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY12F03008) and Natural Science Foundation of Huzhou (2014YZ07).

文献[9]对文献[8]进行了改进,给出了依赖于 τ_k 和 $\mu_{k-\tau_k-1}$ 的动态输出反馈控制器.文献[10]针对具有Markov特性的S-C时延C-A时延,给出了模态依赖的保成本控制器设计方法.在故障检测方面,文献[11]把S-C时延及C-A时延之和建模为Markov链,将闭环NCS建模为Markov跳变线性系统,设计了 H_∞ 故障检测滤波器.文献[12]将控制输入作为外部输入处理,把闭环NCS建模为Markov跳变线性系统,构造了系统的残差发生器,把故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题.

文献[8-12]均假设时延转移概率是全部已知的,然而对于实际的通信网络,得到时延全部的转移概率通常很难,因此在时延转移概率部分未知的条件下进行NCS的相关研究具有重要的实际意义.在时延转移概率部分未知的情况下,NCS的控制器设计及故障检测也出现了一些成果.如,文献[13]考虑网络只存在于传感器和控制器之间的情况,利用变采样周期的方法研究了S-C时延转移概率部分未知的NCS镇定问题.在文献[14]中,作者考虑一类具有S-C时延的非线性NCS,利用状态增广的方法,把时变时延转化为系统的内部参数,将NCS建模为Markov跳变系统,给出了状态反馈控制器的设计方法.文献[15]把S-C时延及C-A时延之和建模为Markov链,在Markov链的转移概率部分未知的情况下,给出了故障检测滤波器存在的充分条件,并以Moore-Penrose逆的形式给出了系统性能优化问题的解.目前,用两个独立的Markov链分别描述S-C时延及C-A时延,在S-C时延及C-A时延转移概率均部分未知的条件下进行NCS控制器设计及故障检测的研究尚未见报道.

根据以上分析,本文考虑S-C时延及C-A时延转移概率均部分未知的情况,研究NCS的鲁棒 H_∞ 故障检测问题.构造了故障检测滤波器,利用状态增广的方法建立了闭环系统模型,得到了闭环系统随机稳定的条件,并给出了控制器和滤波器增益矩阵的求解方法.实例仿真说明所得到的故障检测滤波器不仅对故障敏感,而且对外部扰动具有鲁棒性.

2 问题描述(Problem formulation)

本文所考虑的NCS的结构如图1所示.

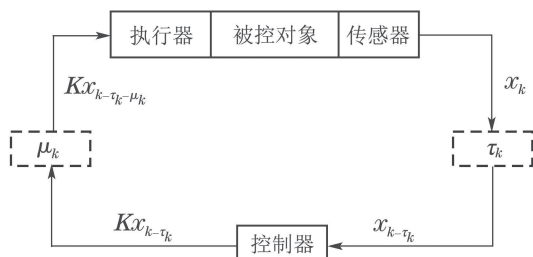


图1 网络控制系统结构

Fig. 1 Structure of the NCS

图1中 τ_k 和 μ_k 分别表示S-C和C-A时延,且分别

在有限集合 $M = \{\tau_{\min}, \dots, \tau_{\max}\}$, $N = \{\mu_{\min}, \dots, \mu_{\max}\}$ 中取值,其转移概率矩阵分别为 $\Lambda = [\lambda_{ij}]$, $\Pi = [\pi_{rs}]$. λ_{ij} 和 π_{rs} 的定义如下:

$$\begin{aligned}\lambda_{ij} &= P(\tau_{k+1} = j | \tau_k = i), \\ \pi_{rs} &= P(\mu_{k+1} = s | \mu_k = r),\end{aligned}$$

式中:

$$\sum_{j=\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \lambda_{ij} = 1, \quad \sum_{s=\mu_{\min}}^{\mu_{\max}} \pi_{rs} = 1, \quad \lambda_{ij} \geq 0, \quad \pi_{rs} \geq 0.$$

本文中, τ_k 和 μ_k 的转移概率均是部分未知的,即矩阵 Λ 和 Π 中的某些元素是无法得到的.对于 $\forall i \in M$,令 $M = M_k^i + M_{uk}^i$,其中, $M_k^i = \{j : \lambda_{ij} \text{ 是已知的}\}$, $M_{uk}^i = \{j : \lambda_{ij} \text{ 是未知的}\}$.如果 $M_k^i \neq \emptyset$,则 M_k^i 和 M_{uk}^i 可以进一步表示为 $M_k^i = \{M_{k_1^i}, M_{k_2^i}, \dots, M_{k_d^i}\}$, $M_{uk}^i = \{M_{\bar{k}_1^i}, M_{\bar{k}_2^i}, \dots, M_{\bar{k}_{n_M-d}^i}\}$,其中 $1 \leq d \leq n_M$, n_M 为集合 M 元素的个数.

类似地,对于 $\forall r \in N$,令 $N = N_k^r + N_{uk}^r$,其中, $N_k^r = \{s : \pi_{rs} \text{ 是已知的}\}$, $N_{uk}^r = \{s : \pi_{rs} \text{ 是未知的}\}$.如果 $N_k^r \neq \emptyset$,则 N_k^r 和 N_{uk}^r 可以进一步表示为

$$\begin{aligned}N_k^r &= \{N_{k_1^r}, N_{k_2^r}, \dots, N_{k_g^r}\}, \\ N_{uk}^r &= \{M_{\bar{k}_1^r}, M_{\bar{k}_2^r}, \dots, M_{\bar{k}_{n_N-g}^r}\},\end{aligned}$$

其中 $1 \leq g \leq n_N$, n_N 为集合 N 元素的个数.

考虑如下的NCS状态方程:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_p x_k + B_p K x_{k-\tau_k-\mu_k} + B_d d_k + B_f f_k, \\ y_k = C_p x_k, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_k \in \mathbb{R}^n$ 是系统状态向量, $y_k \in \mathbb{R}^m$ 是系统输出向量, $d_k \in \mathbb{R}^v$ 是 L_2 有界的外部扰动信号, $f_k \in \mathbb{R}^q$ 是 L_2 有界的故障信号, A_p, B_p, B_d, B_f, C_p 是适当维数的定常矩阵, K 是控制器增益矩阵.在控制器端构造如下的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_p \hat{x}_k + B_p K x_{k-\tau_k} + L(y_{k-\tau_k} - \hat{y}_{k-\tau_k}), \\ \hat{y}_k = C_p \hat{x}_k, \\ r_k = V(y_{k-\tau_k} - \hat{y}_{k-\tau_k}), \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ 为滤波器的状态向量, $\hat{y}_k \in \mathbb{R}^m$ 为滤波器的输出向量, $r_k \in \mathbb{R}^q$ 为残差, L 为滤波器增益矩阵, V 为残差增益矩阵.

注1 在时刻 k ,滤波器的输入为 $Kx_{k-\tau_k}$,而作用在被控对象上的控制输入为 $Kx_{k-\tau_k-\mu_k}$,两者的输入不一致,因此不能构造如下结构的滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_p \hat{x}_k + B_p K x_{k-\tau_k-\mu_k} + L(y_{k-\tau_k} - \hat{y}_{k-\tau_k}), \\ \hat{y}_k = C_p \hat{x}_k, \\ r_k = V(y_{k-\tau_k} - \hat{y}_{k-\tau_k}). \end{cases} \quad (3)$$

当C-A时延不变时,可在观测器端设置长度为C-A时延的缓冲区间^[16],这种情况下可以采用如式(3)所示的滤波器.

定义状态估计误差及残差误差信号

$$e_k = x_k - \hat{x}_k, \quad (4)$$

$$r_{ek} = r_k - f_k. \quad (5)$$

定义增广向量

$$z_k = [x_k^T \ e_k^T]^T, \ \omega_k = [d_k^T \ f_k^T]^T.$$

由式(1)–(2)和式(4)–(5)可得闭环系统方程为

$$\begin{cases} z_{k+1} = Az_k - (I_1LC + B_{p1}KI_2)z_{k-\tau_k} + \\ \quad B_{p2}KI_2z_{k-\tau_k-\mu_k} + B_2\omega_k, \\ r_{ek} = VCz_{k-\tau_k} - I_3\omega_k, \\ z_k = \eta_k, \ k \in \{-\tau_{\max} - \mu_{\max}, \dots, 0\}, \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ 0 & A_p \end{bmatrix}, \ B_2 = \begin{bmatrix} B_d & B_f \\ B_d & B_f \end{bmatrix}, \\ B_{p1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_p \end{bmatrix}, \ B_{p2} = \begin{bmatrix} B_p \\ B_p \end{bmatrix}, \ C = [0 \ C_p], \\ I_1 &= [0 \ I]^T \in \mathbb{R}^{2n \times n}, \ I_2 = [I \ 0] \in \mathbb{R}^{n \times 2n}, \\ I_3 &= [0 \ I] \in \mathbb{R}^{q \times (v+q)}. \end{aligned}$$

定义增广向量

$$\xi_k^T = [z_k^T \ z_{k-1}^T \ z_{k-2}^T \ \dots \ z_{k-\tau_{\max}-\mu_{\max}}^T]^T,$$

则系统(6)可以写为

$$\begin{cases} \xi_{k+1} = (\tilde{A} - \tilde{I}_1LCE_{\tau_k} - \tilde{B}_{p1}KI_2E_{\tau_k} + \\ \quad \tilde{B}_{p2}KI_2E_{\tau_k+\mu_k})\xi_k + \tilde{B}_2\omega_k, \\ r_{ek} = VCE_{\tau_k}\xi_k - I_3\omega_k, \\ \xi_k = \varphi_k, \ k \in \{-\tau_{\max} - \mu_{\max}, \dots, 0\}, \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 & \dots & 0 & 0 \\ I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & I & 0 \end{bmatrix}, \ \tilde{I}_1^T = [I_1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$\tilde{B}_{p1}^T = [B_{p1}^T \ 0 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$\tilde{B}_{p2}^T = [B_{p2}^T \ 0 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$\tilde{B}_2^T = [B_2^T \ 0 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$E_{\tau_k} = [0 \ I \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$E_{\tau_k+\mu_k} = [0 \ 0 \ I \ \dots \ 0],$$

其中: E_{τ_k} 的第 $(1 + \tau_k)$ 分块为单位阵, 其余为零阵, $E_{\tau_k+\mu_k}$ 的第 $(1 + \tau_k + \mu_k)$ 分块为单位阵, 其余为零阵.

给出如下定义:

定义 1^[9] 对于任意初始状态 ξ_0 及初始模态 $\tau_0 \in M, \mu_0 \in N$, 若存在正定矩阵 $W > 0$ 使得不等式

$$\mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi_k\|^2 \mid \xi_0, \tau_0, \mu_0\right\} < \xi_0^T W \xi_0 \quad (8)$$

成立, 则称无扰动的系统(7)是随机稳定的.

本文的目的是在 τ_k 和 μ_k 的转移概率均部分未知的条件下, 设计滤波器(2)使得:

1) 在 $\omega_k = 0$ 时, 系统(7)随机稳定;

2) 在零初始条件下, 残差误差信号 r_{ek} 满足如下的 H_{∞} 性能指标:

$$\mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} r_{ek}^T r_{ek}\right\} < \gamma^2 \mathbb{E}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \omega_k^T \omega_k\right\}, \quad (9)$$

其中 $\gamma > 0$ 称为 H_{∞} 衰减水平.

分别选择残差评价函数 J_k 和阈值 J_{th} 如下:

$$J_k = \mathbb{E}\left\{\sum_{\rho=l_0}^{l_0+k} \sqrt{r_{\rho}^T r_{\rho}}\right\}, \quad (10)$$

$$J_{th} = \sup_{\omega_k \in L_2, f_k=0} \mathbb{E}\left\{\sum_{\rho=l_0}^{l_0+L_0} \sqrt{r_{\rho}^T r_{\rho}}\right\}, \quad (11)$$

其中: l_0 为初始评价时刻, L_0 为评价函数最大步长. 通过对比 J_k 和 J_{th} 即可检测出是否有故障发生:

$$\begin{cases} J_k \leq J_{th} \Rightarrow \text{正常}, \\ J_k > J_{th} \Rightarrow \text{故障}. \end{cases} \quad (12)$$

注 2 NCS 故障检测滤波的基本思想是, 设计控制器和滤波器增益矩阵使得闭环系统稳定且使残差信号能够检测到故障的发生. 即, 在正常的工作条件下, 滤波器能够跟踪系统的状态, 残差信号为零或接近零的相对较小的量; 当故障发生时, 残差信号将发生较大变化, 灵敏地检测到系统的故障.

给出两个本文在处理矩阵不等式时用到的引理:

引理 1^[17] 给定标量 $\lambda_i \geq 0$ 和矩阵 $P_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N$, 有下式成立:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i P_i \leq \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{i=1}^N P_i. \quad (13)$$

引理 2 对于给定的标量 $\lambda_i \geq 0, \pi_r \geq 0$ 及矩阵 $P_{i,r} \geq 0, i = 1, 2, \dots, N_1, r = 1, 2, \dots, N_2$, 下式恒成立:

$$\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} \lambda_i \pi_r P_{i,r} \leq \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} P_{i,r}. \quad (14)$$

证 采用数学归纳法证明引理 2. 当 $N_1 = 1, N_2 = 1$ 时, 有 $\lambda_1 \pi_1 P_{1,1} \leq \lambda_1 \pi_1 P_{1,1}$, 式(14)显然成立. 假设 $N_1 = k_1, N_2 = k_2$ 时式(14)成立, 即

$$\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r P_{i,r} \leq \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} P_{i,r}. \quad (15)$$

当 $N_1 = k_1 + 1, N_2 = k_2 + 1$ 时, 式(14)的左边:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2+1} \lambda_i \pi_r P_{i,r} = \\ &\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r P_{i,r} + \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i \pi_{k_2+1} P_{i,k_2+1} + \\ &\sum_{r=1}^{k_2} \lambda_{k_1+1} \pi_r P_{k_1+1,r} + \lambda_{k_1+1} \pi_{k_2+1} P_{k_1+1,k_2+1} \leq \\ &\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} P_{i,r} + \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i \pi_{k_2+1} P_{i,k_2+1} + \end{aligned}$$

$$\sum_{r=1}^{k_2} \lambda_{k_1+1} \pi_r P_{k_1+1,r} + \lambda_{k_1+1} \pi_{k_2+1} P_{k_1+1,k_2+1}.$$

由引理1,

$$\begin{aligned} \pi_{k_2+1} \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i P_{i,k_2+1} &\leq \pi_{k_2+1} \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i \sum_{i=1}^{k_1} P_{i,k_2+1}, \\ \lambda_{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2} \pi_r P_{k_1+1,r} &\leq \lambda_{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2} \pi_r \sum_{r=1}^{k_2} P_{k_1+1,r}. \end{aligned}$$

因此,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2+1} \lambda_i \pi_r P_{i,r} &\leq \\ \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} P_{i,r} &+ \pi_{k_2+1} \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i \sum_{i=1}^{k_1} P_{i,k_2+1} + \\ \lambda_{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2} \pi_r \sum_{r=1}^{k_2} P_{k_1+1,r} &+ \lambda_{k_1+1} \pi_{k_2+1} P_{k_1+1,k_2+1}. \end{aligned}$$

当 $N_1 = k_1+1, N_2 = k_2+1$ 时, 式(14)的右边:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2+1} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2+1} P_{i,r} &= \\ (\sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i + \lambda_{k_1+1}) (\sum_{r=1}^{k_2} \pi_r + \pi_{k_2+1}) &(\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{i=r}^{k_2} P_{i,r} + \\ \sum_{i=1}^{k_1} P_{i,k_2+1} + \sum_{r=1}^{k_2} P_{k_1+1,r} &+ P_{k_1+1,k_2+1}) \geq \\ \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{r=1}^{k_2} P_{i,r} &+ \pi_{k_2+1} \sum_{i=1}^{k_1} \lambda_i \sum_{i=1}^{k_1} P_{i,k_2+1} + \\ \lambda_{k_1+1} \sum_{r=1}^{k_2} \pi_r \sum_{r=1}^{k_2} P_{k_1+1,r} &+ \lambda_{k_1+1} \pi_{k_2+1} P_{k_1+1,k_2+1}. \end{aligned}$$

即引理得证.

3 主要结论(Main result)

定理 1 当 $\omega_k = 0$ 时, 闭环系统(7)是随机稳定的, 当且仅当存在矩阵 K, L 及正定矩阵 $Q_{i,r} > 0, Q_{j,s} > 0$ 使得如下的矩阵不等式对于所有的 $i, j \in M, r, s \in N$ 均成立:

$$\begin{aligned} \Xi &\triangleq \\ [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}]^T & \\ (\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} &+ \\ \sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s}) & \\ [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}] - & \\ Q_{i,r} &< 0. \end{aligned} \quad (16)$$

证 充分性. 选取 Lyapunov 函数 $V(\xi_k, \tau_k, \mu_k) = \xi_k^T Q_{\tau_k, \mu_k} \xi_k$, 那么,

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(\xi_k, \tau_k, \mu_k) | \tau_k = i, \mu_k = r\} &= \\ E\{V(\xi_{k+1}, \tau_{k+1}, \mu_{k+1})\} - E\{V(\xi_k, \tau_k, \mu_k)\} &= \\ \xi_k^T ([\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}]^T & \\ Q_{j,s} [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}] - & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{i,r}) \xi_k &= \\ \xi_k^T ([\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}]^T & \\ (\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} &+ \\ \sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s}) & \\ [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}] - & \\ Q_{i,r}) \xi_k. \end{aligned}$$

如果式(16)成立, 那么,

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(\xi_k, \tau_k, \mu_k) | \tau_k = i, \mu_k = r\} &\leq \\ -\lambda_{\min}(-\Xi) \xi_k^T \xi_k &\leq -\alpha \|\xi_k\|^2, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 α 为 $-\Xi$ 的最小特征值. 对于任意 $T \geq 1$, 由式(17)可得

$$\begin{aligned} E\{\sum_{k=0}^T \|\xi_k\|^2\} &\leq \frac{1}{\alpha} (E\{V(\xi_0, \tau_0, \mu_0)\} - \\ E\{V(\xi_{T+1}, \tau_{T+1}, \mu_{T+1})\}) &\leq \\ \frac{1}{\alpha} E\{V(\xi_0, \tau_0, \mu_0)\} &= \frac{1}{\alpha} \xi_0^T Q_{\tau_0, \mu_0} \xi_0. \end{aligned}$$

由定义1, 系统(7)随机稳定.

必要性. 假设系统(7)是随机稳定的, 即

$$E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi_k\|^2 | \xi_0, \tau_0, \mu_0\} < \xi_0^T W \xi_0. \quad (18)$$

令

$$\xi_k^T \hat{Q}_{\tau_k, \mu_k} \xi_k = E\{\sum_{t=k}^T \xi_t^T H_{\tau_t, \mu_t} \xi_t\}, \quad (19)$$

其中 $H_{\tau_t, \mu_t} > 0$. 假设 $\xi_k \neq 0$, 由式(18)及 H_{τ_t, μ_t} 的正定性可知如下极限是存在的:

$$\begin{aligned} \xi_k^T Q_{\tau_k, \mu_k} \xi_k &\triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \xi_k^T \hat{Q}_{\tau_k, \mu_k} \xi_k = \\ \lim_{T \rightarrow \infty} E\{\sum_{t=k}^T \xi_t^T H_{\tau_t, \mu_t} \xi_t\}. & \end{aligned} \quad (20)$$

由 ξ_k 任意性, 进一步可得

$$Q_{\tau_k, \mu_k} = \lim_{T \rightarrow \infty} \hat{Q}_{\tau_k, \mu_k}. \quad (21)$$

由式(20)可知 $Q_{\tau_k, \mu_k} > 0$.

考虑如下式子:

$$\begin{aligned} E\{\xi_k^T \hat{Q}_{\tau_k, \mu_k} \xi_k\} - & \\ E\{\xi_{k+1}^T \hat{Q}_{\tau_{k+1}, \mu_{k+1}} \xi_{k+1} | \tau_k = i, \mu_k = r\} &= \\ \xi_k^T (\hat{Q}_{i,r} - [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}]^T & \\ (\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} \hat{Q}_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} \hat{Q}_{j,s} &+ \\ \sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} \hat{Q}_{j,s} + \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} \hat{Q}_{j,s}) & \\ [\tilde{A} - \tilde{I}_1 L C E_i - \tilde{B}_{p1} K I_2 E_i + \tilde{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}]) \xi_k. & \end{aligned}$$

当 $T \rightarrow \infty$, 由上式及式(21)可得 $\Xi < 0$, 定理得证.

推论 1 当 $\omega_k \neq 0$ 时, 给定残差权值矩阵 V 及标

量 $\gamma > 0$, 若存在矩阵 K, L 及正定矩阵 $Q_{i,r} > 0, P_{j,s} > 0, Q_{j,s} > 0$ 使得

$$\begin{bmatrix} -Q_{i,r} & * & * & * \\ 0 & -\gamma^2 I & * & * \\ VCE_i & -I_3 & -I & * \\ \bar{A} & \bar{B}_2 & 0 & -\bar{P}_{j,s} \end{bmatrix} < 0, \quad (22)$$

$$P_{j,s} Q_{j,s} = I, \quad (23)$$

式中:

$$\begin{aligned} \bar{A}^T &= [\sqrt{\lambda_{iM_k^i} \pi_{rN_k^r}} \bar{A}^T \ \dots \\ &\quad \sqrt{(1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{rl})(1 - \sum_{l \in N_k^i} \pi_{il})} \bar{A}^T], \\ \bar{B}_2^T &= [\sqrt{\lambda_{iM_k^i} \pi_{rN_k^r}} \bar{B}_2^T \ \dots \\ &\quad \sqrt{(1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{rl})(1 - \sum_{l \in N_k^i} \pi_{il})} \bar{B}_2^T], \\ \bar{A} &= [\bar{A}^T \ \dots \ \bar{A}^T], \quad \bar{B}_2 = [\bar{B}_2^T \ \dots \ \bar{B}_2^T], \\ \bar{A} &= \bar{A} - \bar{I}_1 LC - \bar{B}_{p1} K I_2 E_i + \bar{B}_{p2} K I_2 E_{i+r}, \\ \bar{P}_{j,s} &= \text{diag}\{P_{M_{k_1}^i, N_{k_1}^r} \ \dots \ P_{M_{k_{nM-d}}^i, N_{k_{nM-d}}^r}\}. \end{aligned}$$

对于所有的 $i, j \in M, r, s \in N$ 均成立, 那么具有转移概率部分未知的闭环系统(7)是随机稳定的, 并且满足式(9)所示的H_∞性能指标.

证 由引理2可得

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} \leq \\ &(1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{il}) \sum_{s \in N_k^r} \pi_{rs} \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_k^r} Q_{j,s}, \\ &\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} \leq \\ &(1 - \sum_{l \in N_k^r} \pi_{rl}) \sum_{j \in M_k^i} \lambda_{ij} \sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} Q_{j,s}, \\ &\sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} \leq \\ &(1 - \sum_{l \in N_k^r} \pi_{rl})(1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{il}) \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} Q_{j,s}. \end{aligned}$$

因此, 由schur引理,

$$\begin{aligned} &E\{\Delta V(\xi_k, \tau_k, \mu_k)\} + E\{r_{ek}^T r_{ek}\} - \gamma^2 E\{\omega_k^T \omega_k\} = \\ &\zeta_k^T \begin{bmatrix} \bar{A}^T \\ \bar{B}_2^T \end{bmatrix} \left(\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \right. \\ &\quad \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + \\ &\quad \left. \sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} \right) [\bar{A} \ \bar{B}_2] \zeta_k - \xi_k^T Q_{i,r} \xi_k + \\ &\zeta_k^T \begin{bmatrix} (VCE_i)^T \\ -I_3^T \end{bmatrix} [VCE_i \ -I_3] \zeta_k - \gamma^2 \omega_k^T \omega_k \leq \\ &\zeta_k^T \begin{bmatrix} \Pi_{11} & * \\ \bar{B}_2^T \bar{Q}_{j,s} \bar{A} - I_3^T VCE_i & \Pi_{22} \end{bmatrix} \zeta_k, \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= -Q_{i,r} + \bar{A}^T \bar{Q}_{j,s} \bar{A} + (VCE_i)^T (VCE_i), \\ \Pi_{22} &= \bar{B}_2^T \bar{Q}_{j,s} \bar{B}_2 + I_3^T I_3 - \gamma^2 I, \\ \bar{Q}_{j,s} &= \\ &\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_k^r} \lambda_{ij} \pi_{rs} Q_{j,s} + (1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{il}) \sum_{s \in N_k^r} \pi_{rs} \\ &\sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_k^r} Q_{j,s} + (1 - \sum_{l \in N_k^r} \pi_{rl}) \sum_{j \in M_k^i} \lambda_{ij} \\ &\sum_{j \in M_k^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} Q_{j,s} + (1 - \sum_{l \in M_k^i} \lambda_{rl})(1 - \sum_{l \in N_k^i} \pi_{rl}) \\ &\sum_{j \in M_{uk}^i} \sum_{s \in N_{uk}^r} Q_{j,s}, \\ \zeta_k^T &= [\xi_k^T \ \omega_k^T]^T. \end{aligned}$$

若

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & * \\ \bar{B}_2^T \bar{Q}_{j,s} \bar{A} - I_3^T VCE_i & \Pi_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

成立, 则

$$E\{\Delta V(\xi_k, \tau_k, \mu_k)\} + E\{r_{ek}^T r_{ek}\} - \gamma^2 E\{\omega_k^T \omega_k\} < 0.$$

对于上式, 将 k 从 0 到 ∞ 累加可得 $E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|r_{ek}\|^2\} <$

$\gamma^2 E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2\} + E\{V(\xi_0, \tau_0, \mu_0)\} - E\{V(\xi_{\infty}, \tau_{\infty}, \mu_{\infty})\}$. 由系统随机稳定及零初始条件可得

$$E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|r_{ek}\|^2\} < \gamma^2 E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2\},$$

即满足性能指标(9). 由式(24)及schur引理, 令 $P_{j,s} = Q_{j,s}^{-1}$, 即得式(22)-(23).

推论1中的约束条件不是线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI), 无法使用相关的LMI工具箱直接求解. 为了便于求解, 采用锥补线性化方法^[18-19] (cone complementarity linearization, CCL)将其转化为具有LMI约束的非线性最小化问题: 进一步,

$$\min \text{tr} \left(\sum_{j=\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \sum_{s=\mu_{\min}}^{\mu_{\max}} P_{j,s} Q_{j,s} \right), \text{ s.t. 式(22)和(25),}$$

$$\begin{bmatrix} P_{j,s} & I \\ I & Q_{j,s} \end{bmatrix} > 0. \quad (25)$$

给出控制器增益矩阵 K , 滤波器增益矩阵 L 及最小H_∞衰减水平 γ_{\min} 的求解算法:

Step 1 给定 $\gamma = \gamma_0$.

Step 2 求解式(22)(25), 得到一组可行解 $(P_{j,s}^0, Q_{j,s}^0, K^0, L^0)$, 令 $k = 0$.

Step 3 求解如下非线性最小化问题:

$$\min \text{tr} \left(\sum_{j=\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \sum_{s=\mu_{\min}}^{\mu_{\max}} Q_{j,s}^k P_{j,s} + P_{j,s}^k Q_{j,s} \right), \text{ s.t. (22)(25).}$$

令 $P_{j,s}^k = P_{j,s}, Q_{j,s}^k = Q_{j,s}, K^k = K, L^k = L$.

Step 4 检查式(22)-(23)是否满足, 若满足则适

当减小 γ , 即令 $\gamma = \gamma - \delta$, δ 为一正实数, 令 $k = k + 1$, 转到Step 3; 若迭代次数超过最大迭代次数则终止迭代.

Step 5 迭代终止后检查 γ . 若 $\gamma = \gamma_0$, 则此优化问题在给定的迭代次数内无解; 若 $\gamma < \gamma_0$, 则 $\gamma_{\min} = \gamma + \delta$.

注3 本文采用概率和相应矩阵分离的方法处理未知转移概率, 即

$$\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} \lambda_i \pi_r P_{i,r} \leq \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} \lambda_i \pi_r \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{r=1}^{N_2} P_{i,r}.$$

另一种方法是把已知的概率和未知的概率分离开, 然后将未知的概率舍弃不用, 但是这种方法将大大增加需要求解的矩阵不等式的数量.

4 实例仿真(Simulation example)

为说明所提方法的有效性, 考虑如下参数的被控对象^[13]:

$$A_P = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, B_P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.2 \end{bmatrix}, C_P = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 \\ 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}.$$

假设S-C时延 $\tau_k \in M = \{0, 1\}$, C-A时延 $\mu_k \in N = \{0, 1\}$, 为了得出转移概率和系统性能之间的关系, 考虑如下4种不同情况的时延转移概率矩阵:

$$A_1 = \begin{bmatrix} ? & ? \\ ? & ? \end{bmatrix}, \Pi_1 = \begin{bmatrix} ? & ? \\ ? & ? \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ ? & ? \end{bmatrix}, \Pi_2 = \begin{bmatrix} ? & ? \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix}, \Pi_3 = \begin{bmatrix} ? & ? \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix}, \Pi_4 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix}.$$

给定残差权值 $V = [0.1 \ 0.1]$, 根据推论1求得最小 H_∞ 衰减水平 γ_{\min} 如表1所示.

表1 不同转移概率矩阵下 γ_{\min} 的值

Table 1 γ_{\min} under different transition probability matrices

转移概率矩阵	$A_1 \Pi_1$	$A_2 \Pi_2$	$A_3 \Pi_3$	$A_4 \Pi_4$
γ_{\min}	1.0677	1.0536	1.0493	1.0198

从表1中可以看出, 已知的时延转移概率矩阵的信息越多, 那么 H_∞ 衰减水平 γ_{\min} 就越小, 即系统的扰动抑制能力越强.

假设系统的初始状态

$$x_{-1} = x_{-2} = [0 \ 0]^T, x_0 = [-1 \ 1]^T,$$

$$\hat{x}_{-1} = \hat{x}_{-2} = [0 \ 0]^T, \hat{x}_0 = [0.2 \ 0.2]^T.$$

d_k 为均匀分布在 $[-0.02 \ 0.02]$ 的随机信号, 故障信号

$$f_k = \begin{cases} 1, & k = 10, \dots, 20, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

网络时延初始模态 $\tau_0 = \mu_0 = 0$, τ_k 和 μ_k 分别如图2和图3所示. 针对具有转移概率矩阵 A_2 和 Π_2 的NCS, 根据推论1求得控制器增益矩阵 K 及滤波器增益 L 如下:

$$K = \begin{bmatrix} 0.0642 & -0.0414 \\ -0.1344 & 0.1059 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -0.2811 & 0.1849 \\ -0.1581 & -0.1401 \end{bmatrix}.$$

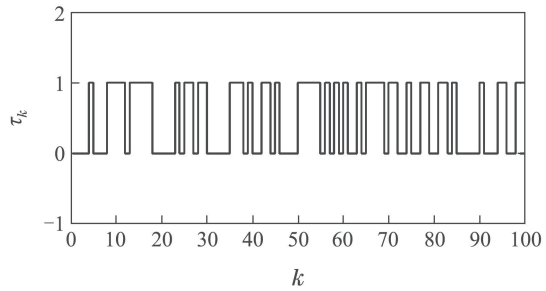


图2 S-C时延 τ_k

Fig. 2 S-C time-delay τ_k

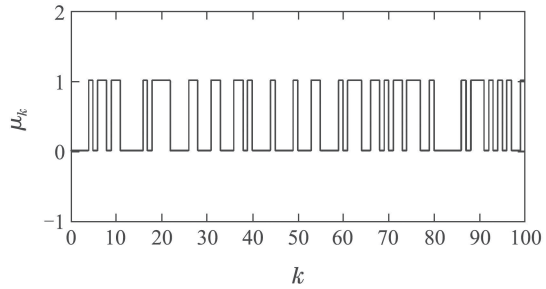


图3 C-A时延 μ_k

Fig. 3 C-A time-delay μ_k

选取残差评价函数为 $J_k = E\{\sum_{\rho=0}^k \sqrt{r_\rho^T r_\rho}\}$, 求得

$$J_{th} = \sup_{\omega_k \in L_2, f_k=0} E\{\sum_{\rho=0}^{100} \sqrt{r_\rho^T r_\rho}\} = 0.0066.$$

故障检测阈值 J_{th} = 0.0066. 残差信号, 残差评价函数 J_k 及阈值曲线分别如图4和图5所示. 从图4和图5中可以看到, 当故障发生时, 残差信号和残差评价函数均有明显的变化. 另外, 求得 $J_{11} = 0.0019 < J_{th} = 0.0066 < J_{12} = 0.0234$, 这意味着在故障发生的第3个时间周期, 故障滤波器就检测出了故障.

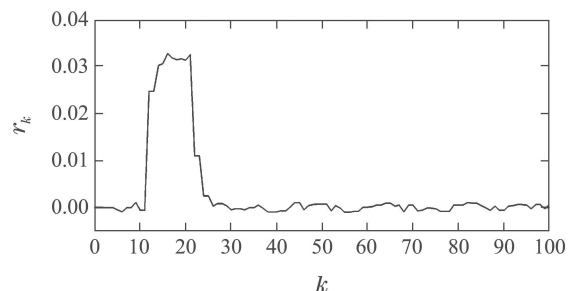
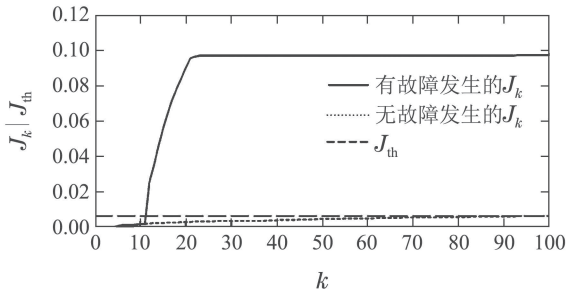


图4 残差信号 r_k

Fig. 4 Residual signal r_k

图5 残差评价函数 J_k 和阈值 J_{th} Fig. 5 Residual evaluation function J_k and threshold J_{th}

5 结论(Conclusions)

本文在S-C时延及C-A时延转移概率均部分未知的条件下,研究了NCS的鲁棒 H_∞ 故障检测问题.得到了新的引理来处理未知的时延转移概率,以矩阵不等式的形式给出了故障检测滤波器存在的条件,利用CCL的思想给出了控制器和滤波器增益矩阵的求解方法,实现了控制器和滤波器的协同设计,并且得到了转移概率矩阵和最小 H_∞ 衰减水平之间的关系,即已知的转移概率越多,则最小 H_∞ 衰减水平 γ_{\min} 越小,系统的干扰抑制能力也就越好.所得到的故障检测滤波器不仅对故障敏感,而且对外部扰动具有鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [2] GAO H J, MENG X G, CHEN T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2142 – 2148.
- [3] LI Xiuying, WANG Jinyu, SUN Shuli. Robust H_∞ filtering for network-based systems with delayed and missing measurements [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1401 – 1407.
(李秀英, 王金玉, 孙书利. 具有随机观测滞后和丢失的网络系统鲁棒 H_∞ 滤波 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(11): 1401 – 1407.)
- [4] LUO Xiaoyuan, LI Na, XU Kui, et al. Robust fault detection for nonlinear networked control systems with random packets loss [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(10): 1596 – 1600.
(罗小元, 李娜, 徐奎, 等. 具有随机丢包的非线性网络化控制系统鲁棒故障检测 [J]. *控制与决策*, 2013, 28(10): 1596 – 1600.)
- [5] WANG Zhaolei, WANG Qing, DONG Chaoyang, et al. Fault detection and optimization for networked control systems with unknown delay and Markov packet dropouts [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(9): 1537 – 1544.
(王昭磊, 王青, 董朝阳, 等. 存在未知时延和Markov丢包的网路控制系统故障检测与优化 [J]. *控制与决策*, 2014, 29(9): 1537 – 1544.)
- [6] ZHANG Y, LIU Z X, FANG H J, et al. H_∞ fault detection for nonlinear networked systems with multiple channels data transmission pattern [J]. *Information Sciences*, 2013, 221(1): 534 – 543.
- [7] HUANG He, XIE Dexiao, HAN Xiaodong, et al. Fault detection for networked control system with random packet dropout [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(1): 79 – 86.
(黄鹤, 谢德晓, 韩笑冬, 等. 具有随机丢包的一类网络控制系统的故障检测 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(1): 79 – 86.)
- [8] ZHANG L Q, SHI Y, CHEN T W, 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.
- [9] 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.
- [10] QIU L, XU B G, LI S B. Guaranteed cost control for discrete-time networked control systems with random Markov delays [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(4): 661 – 671.
- [11] MAO Z H, JIANG B, SHI P. H_∞ fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems [J]. *IET Control Theory & Application*, 2007, 1(5): 1336 – 1343.
- [12] HUANG He, ZHANG Dexiao, ZHANG Dengfeng, et al. H_∞ fault detection for networked control systems with random Markov delays [J]. *Information and Control*, 2009, 39(1): 6 – 12.
(黄鹤, 谢德晓, 张登峰, 等. 具有马尔科夫时延的网络控制系统 H_∞ 故障检测 [J]. *信息与控制*, 2009, 39(1): 6 – 12.)
- [13] YU Shuiqing, LI Junmin. Robust stabilization of networked control systems with nonlinear perturbation [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(12): 1917 – 1920.
(于水清, 李俊民. 具有非线性扰动的网络控制系统的鲁棒稳定性 [J]. *控制与决策*, 2012, 27(12): 1917 – 1920.)
- [14] WANG Y F, LI Z X, CHEN H Y, et al. Design for nonlinear networked control systems with time delay governed by Markov chain with partly unknown transition probabilities [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. DOI: 10.1155/2015/604246.
- [15] JIANG W L, DONG C Y, NIU E Z, et al. Observer-based robust fault detection filter design and optimization for networked control systems [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. DOI: 10.1155/2015/231749.
- [16] ZHAO Xianghui, HAO Fei. Absolute stability for a class of observer-based nonlinear networked control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 933 – 944.
(赵翔辉, 郝飞. 一类基于观测器的非线性网络化控制系统的绝对稳定性 [J]. *自动化学报*, 2009, 35(7): 933 – 944.)
- [17] WANG G L, ZHANG Q L, SREERAM V. Partially mode dependent H_∞ filtering for discrete-time Markovian jump systems with partly unknown transition probabilities [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(2): 548 – 556.
- [18] LI Hongbo, DENG Jianqiu, SUN Zengqi, et al. Delay-dependent state feedback controller design for a class of networked control systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1325 – 1330.
(李洪波, 邓建球, 孙增圻, 等. 网络控制系统的时延相关状态反馈控制器设计 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1325 – 1330.)
- [19] GHAOUI L E, OUSTRU F, AITRAMI M. A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1171 – 1176.

作者简介:

王燕锋 (1980–), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为网络控制系统设计及故障检测, E-mail: neu2009wyf@163.com;

王培良 (1963–), 男, 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为智能检测与控制、系统建模与故障诊断, E-mail: wpl@zjhu.edu.cn;

蔡志端 (1978–), 男, 副教授, 目前研究方向为功率变换器故障诊断、故障预测与容错控制, E-mail: czddule@zjhu.edu.cn.