

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.011

传感器饱和约束下网络化系统的故障检测

李尚霖 姜 顺 潘 丰

(江南大学物联网工程学院,轻工过程先进控制教育部重点实验室,无锡,214122)

摘要: 针对通信带宽受限和传感器饱和约束的网络环境,通过引入一种基于事件触发机制的传输策略,研究一类网络化动态系统的故障检测问题。首先,以全阶滤波器作为残差发生器并利用状态增广的方法将原系统故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题;然后,利用 Lyapunov 稳定性理论和时滞系统自由权阵分析方法建立了故障检测滤波器的存在条件,并基于此条件求解凸优化问题得到最优滤波器参数;最后,通过数值仿真验证所提出事件触发机制故障检测方法的有效性。

关键词: 事件触发机制;网络化系统;故障检测;传感器饱和约束

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0809-10

Fault Detection for Networked Systems with Sensor Saturation

LI Shanglin, JIANG Shun, PAN Feng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, 214122, China)

Abstract: The fault detection problem is investigated for a class of networked systems with sensor saturation and communication constraint. A novel event-triggered mechanism is introduced to save limited network resource in the sensor-to-filter channel. After properly augmenting the states of the original system and the fault detection filter, the addressed fault detection problem is converted into an auxiliary H_∞ filtering problem. By utilizing Lyapunov stability theory and free-weighting matrix technique, the sufficient conditions for the existence of the fault detection filter is established in terms of linear matrix inequalities, and the corresponding optimal filter parameters can be easily derived by solving a convex optimization problem via a semi-definite program method. Finally, a numerical example is provided to illustrate the validity of the event-triggered fault detection scheme.

Key words: event-triggered mechanism; networked systems; fault detection; sensor saturation

网络化系统是被控对象和各部件之间通过共享通讯网络连接而形成的复杂控制系统,它具有连接简单、灵活性强、容易扩展、便于维护等优点^[1-2]。但由于网络的引入,也不可避免地产生传输时延、数据包丢失、量化误差及带宽受限等问题,这些网络诱导因素能够对系统性产生较大的影响,严重时甚至会引起系统崩溃。为了降低网络因素对系统性能的不利影响,国内外学者进行了一系列研究探索,并取得了丰富的研究成果。对于网络诱导时延

问题,文献[3]利用预测控制方法补偿时延影响,研究了基于事件触发机制的网络化系统的镇定问题;文献[4]将时延建模为系统的不确定性,证明了其标称系统的可控性。对于通信受限下网络化多传感器系统,文献[5]采用序贯卡尔曼滤波方法解决实时滤波的问题。另外,文献[6-10]针对网络中数据丢包和量化对系统性能的影响从不同方面进行了探讨分析。

近年来,随着人们对系统可靠性和安全性要求

收稿日期: 2018-09-23; **修订日期:** 2019-10-20

通信作者: 姜顺,男,副教授, E-mail: havesun@jiangnan.edu.cn。

引用格式: 李尚霖,姜顺,潘丰. 传感器饱和约束下网络化系统的故障检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 809-818. LI Shanglin, JIANG Shun, PAN Feng. Fault Detection for Networked Systems with Sensor Saturation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 809-818.

的不断提高,网络化系统的故障检测问题也激发了科研人员的极大关注。针对一类具有通信时延的线性网络化控制系统,Sauter等人^[11]使用自适应方法研究了故障检测问题。Chabir等人^[12]构建带有网络通讯约束的动态系统模型,研究了四旋翼直升机姿态传感器故障检测问题。Ahmadi等人^[13]利用多面体不确定性对网络诱导的时延进行建模,研究了存在扰动的网络化控制系统的故障检测与分离问题。针对存在随机时延的网络环境,黄鹤等人^[14]研究了一类网络控制系统的 H_∞ 故障检测滤波器设计问题;冒泽慧等人^[15]研究了带有马尔科夫时滞的鲁棒故障检测问题;王燕锋等人^[16]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;Li等人^[17]应用广义系统方法,研究了信噪比约束下网络化系统的故障检测和容错控制问题。

上述文献在研究网络化系统的故障检测时,针对通讯网络中的传输方式多采用的是等时间间隔触发的传统周期触发机制,在实际网络带宽有限的情况下不可避免的产生网络拥堵。为了减少网络拥塞,更好地利用网络资源,本文选择了一种更有效的事件触发通讯传输策略,研究传感器饱和约束下网络化系统的故障检测问题。首先,通过引入全阶滤波器作为残差发生器,再利用状态增广的方法将原系统故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题;然后,构造恰当连续Lyapunov-Krasovskii泛函来分析滤波误差系统的 H_∞ 性能。再利用自由权矩阵理论和线性矩阵不等式技术,建立了由线性矩阵不等式描述的滤波器存在条件,该条件刻画了触发参数,网络时变延时参数,滤波器参数之间满足一定的制约关系。通过求解线性矩阵不等式可得到目标滤波器参数,再根据凸优化理论获取最优滤波器参数和 H_∞ 性能指标。

1 问题描述

基于事件触发机制的网络化系统故障检测结构框图如图1所示。

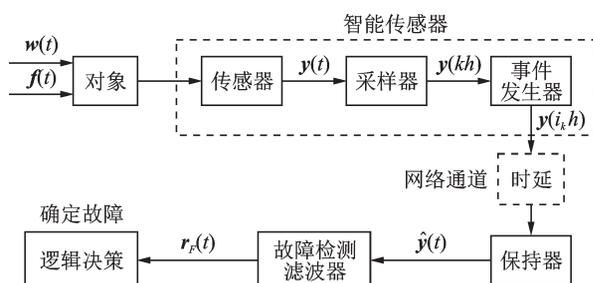


图1 基于事件触发机制的故障检测结构框图

Fig. 1 Block diagram for fault detection with event-triggered scheme

系统由监控对象、智能传感器、零阶保持器和故障检测滤波器构成,其中智能传感器与远程的故障检测滤波器之间通过共享的通讯网络连接。系统的测量输出经过采样之后,某些采样时刻的数据包将通过网络通道传输到故障检测滤波器用于残差产生。虚线框中的智能传感器由常规传感器、采样器、事件触发器以及存储器构成。与常用的普通传感器相比,本文所采用的传感器能够实现数据包的“按需”发送。系统的测量输出以等周期的形式进行采样后,当前时刻的采样数据是否发送,需要通过事件触发器依据预定的触发条件对采样信息进行筛选,当满足触发条件时,予以发送,否则不发送。这种传输策略能够在保证及时检测故障发生的情况下,尽可能少地发送数据包,以达节省网络资源和降低能耗的目的。

考虑如下所示的一类连续时间系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_w w(t) + B_f f(t) \\ y(t) = \text{sat}(Cx(t)) + D_w w(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量; $y(t) \in \mathbb{R}^m$ 为测量输出; $w(t) \in \mathbb{R}^p$ 和 $f(t) \in \mathbb{R}^l$ 分别为测量噪声和未知故障信号,并满足 $L_2[0, \infty)$; A, B_w, B_f, C 和 D_w 为已知适当维数的常数矩阵。系统的测量输出受到传感器饱和约束影响,饱和函数 $\text{sat}(\cdot): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ 可表示为

$$\text{sat}(v) = [\text{sat}^T(v_1), \text{sat}^T(v_2), \dots, \text{sat}^T(v_m)]^T \quad (2)$$

对于每个传感器饱和函数 $\text{sat}(v_k) = \text{sign}(v_k) \cdot \min\{v_{k,\max}, |v_k|\}$, ($k=1, 2, \dots, m$), 其中 $v_{k,\max}$ 为饱和向量第 k 行的最大值。这里“sign”代表符号函数。

定义1^[18-19] 对于非线性函数 $\varphi: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ 是扇形有界的,且满足

$$(\varphi(v) - K_1 v)^T (\varphi(v) - K_2 v) \leq 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}^m \quad (3)$$

式中: $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 为实数矩阵,且 $K = K_2 - K_1$ 是对称正定阵。则称 φ 满足扇区条件 $[K_1 \ K_2]$ 。

对于对角矩阵 L_1 和 L_2 ,满足条件 $0 \leq L_1 < I \leq L_2$ 。将系统式(1)的饱和函数 $\text{sat}(Cx(t))$ 分解成线性部分和非线性部分如下

$$\text{sat}(Cx(t)) = L_1 Cx(t) + \varphi(Cx(t)) \quad (4)$$

式中:非线性向量函数 $\varphi(Cx(t))$ 满足扇区条件 $K_1 = 0, K_2 = L = L_2 - L_1$,则可知满足如下条件

$$\varphi^T(Cx(t)) [\varphi(Cx(t)) - LCx(t)] \leq 0 \quad (5)$$

在周期触发机制下,网络系统故障检测问题已经得到了充分研究。目前有关文献较少去考虑节约网络资源和避免网络拥塞的问题。本文选择了一种更有效的事件触发通讯传输策略,能够减少数

据包发送数量,从而达到降低了网络负载和节约能耗的目的。根据文献[20]所提出的事件触发机制,假定事件触发条件如下

$$[\mathbf{y}((k+j)h) - \mathbf{y}(kh)]^T \boldsymbol{\Omega} [\mathbf{y}((k+j)h) - \mathbf{y}(kh)] > \sigma \mathbf{y}^T((k+j)h) \boldsymbol{\Omega} \mathbf{y}((k+j)h) \quad (6)$$

$$j=1,2,\dots$$

式中: $\sigma \in [0,1)$, $\boldsymbol{\Omega} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为正定加权矩阵。采样器以固定周期 h 在时刻 $s_k (k=0,1,2,\dots; s_0=0)$ 采集输出信号。为了进一步简化,定义如下触发函数

$$f(\mathbf{y}_k, \mathbf{y}_{k+j}) = [\mathbf{y}_{k+j} - \mathbf{y}_k]^T \boldsymbol{\Omega} [\mathbf{y}_{k+j} - \mathbf{y}_k] - \sigma \mathbf{y}_{k+j}^T \boldsymbol{\Omega} \mathbf{y}_{k+j} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{y}_k \triangleq \mathbf{y}(kh)$ 。根据触发函数,只有当触发条件满足的情况下,事件发生器才会将数据发送给远程的滤波器。由此可知发送数据是采样数据的一

$$[i_k h + \tau_i, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}) = [i_k h + \tau_i, i_k h + h + \tau_M) \cup$$

$$\left\{ \bigcup_{d=1}^{l-1} [i_k h + dh + \tau_M, i_k h + dh + h + \tau_M) \right\} \cup [i_k h + dh + \tau_M, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}})$$

此时,定义函数 $\tau(t)$ 为

$$\tau(t) = \begin{cases} t - i_k h & t \in [i_k h + \tau_i, i_k h + h + \tau_M) \\ t - i_k h - dh & t \in [i_k h + dh + \tau_M, i_k h + dh + h + \tau_M), \quad d=1,2,\dots,l-1 \\ t - i_k h - lh & t \in [i_k h + lh + \tau_M, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}) \end{cases} \quad (10)$$

由此可以推知

$$\begin{cases} \tau_i \leq \tau(t) \leq h + \tau_M & t \in [i_k h + \tau_i, i_k h + h + \tau_M) \\ \tau_i \leq \tau_M \leq \tau(t) \leq h + \tau_M & t \in [i_k h + dh + \tau_M, i_k h + dh + h + \tau_M), \quad d=1,2,\dots,l-1 \\ \tau_i \leq \tau_M \leq \tau(t) \leq h + \tau_M & t \in [i_k h + lh + \tau_M, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}) \end{cases} \quad (11)$$

当 $t \in [i_k h + \tau_i, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}})$, 对于情形 1, 定义误差向量 $\mathbf{e}_k(t) = 0$ 。对于情形 2, 定义

$$\mathbf{e}_k(t) = \begin{cases} 0 & t \in [i_k h + \tau_i, i_k h + h + \tau_M) \\ \mathbf{y}(i_k h + dh) - \mathbf{y}(i_k h) & t \in [i_k h + dh + \tau_M, i_k h + dh + h + \tau_M), \quad d=1,2,\dots,l-1 \\ \mathbf{y}(i_k h + lh) - \mathbf{y}(i_k h) & t \in [i_k h + lh + \tau_M, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}) \end{cases} \quad (12)$$

令 $\lambda \triangleq h + \tau_M$, 当 $t \in [i_k h + \tau_i, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}})$ 时, 则有 $\tau(t) \in [0, \lambda]$, 由上述分析可以得到

$$\begin{cases} 0 \leq \sigma \mathbf{y}^T(t - \tau(t)) \boldsymbol{\Omega} \mathbf{y}(t - \tau(t)) - \mathbf{e}_k^T(t) \boldsymbol{\Omega} \mathbf{e}_k(t) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{y}(t - \tau(t)) + \mathbf{e}_k(t) & t \in [i_k h + \tau_i, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}) \end{cases} \quad (13)$$

故障检测滤波器是故障检测系统关键的部分, 通过残差来确定系统中故障的发生与否, 假定全阶滤波器具有如下的形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_F(t) = \mathbf{A}_F \mathbf{x}_F(t) + \mathbf{B}_F \hat{\mathbf{y}}(t) \\ \mathbf{r}_F(t) = \mathbf{C}_F \mathbf{x}_F(t) + \mathbf{D}_F \hat{\mathbf{y}}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{x}_F(t) \in \mathbf{R}^n$ 为滤波器状态; $\hat{\mathbf{y}}(t) \in \mathbf{R}^m$ 为滤波

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \hat{\mathbf{A}} \boldsymbol{\xi}(t) + \hat{\mathbf{T}} \mathbf{H} \boldsymbol{\xi}(t - \tau(t)) + \hat{\mathbf{B}}_\varphi \varphi(\mathbf{C} \mathbf{H} \boldsymbol{\xi}(t - \tau(t))) + \hat{\mathbf{B}}_e \mathbf{e}_k(t) + \hat{\mathbf{B}}_\omega \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{e}(t) = \hat{\mathbf{C}} \boldsymbol{\xi}(t) + \hat{\mathbf{F}} \mathbf{H} \boldsymbol{\xi}(t - \tau(t)) + \mathbf{D}_F \varphi(\mathbf{C} \mathbf{H} \boldsymbol{\xi}(t - \tau(t))) + \mathbf{D}_F \mathbf{e}_k(t) + \hat{\mathbf{D}}_\omega \boldsymbol{\omega}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{e}(t) = \mathbf{r}_F(t) - \mathbf{f}(t)$, $\boldsymbol{\xi}(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}_F^T(t)]^T$, $\boldsymbol{\omega}(t) = [\mathbf{w}^T(t) \quad \mathbf{f}^T(t) \quad \mathbf{w}^T(t - \tau(t))]^T$;

个子集。为方便处理, 考虑如下区间 $[i_k h + \tau_i, i_k h + h + \tau_M)$, $[i_k h + dh + \tau_M, i_k h + dh + h + \tau_M)$, 其中: d 为一个正整数。考虑如下情形:

情形 1 如果 $i_k h + h + \tau_M \geq i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}$, 定义函数 $\tau(t)$ 为

$$\tau(t) = t - i_k h, \quad t \in [i_k h + \tau_i, i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}]$$

由此可以得到

$$\tau_i \leq \tau(t) \leq (i_{k+1} - i_k)h + \tau_{i_{k+1}} \leq h + \tau_M \quad (8)$$

情形 2 如果 $i_k h + h + \tau_M < i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}}$, 因为 $0 \leq \tau_i \leq \tau_M$, 可以知道存在 l , 使得

$$i_k h + lh + \tau_M \leq i_{k+1} h + \tau_{i_{k+1}} \leq i_k h + lh + h + \tau_M \quad (9)$$

并且 $\mathbf{y}(i_k h)$ 和 $\mathbf{y}(i_k h + dh)$, $d=1,2,\dots,l$, 满足 $f(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}_{i+d}) \leq 0$ 。另外, 还可以得到

器输入; $\mathbf{r}_F(t) \in \mathbf{R}^l$ 为残差信号; $\mathbf{A}_F, \mathbf{B}_F, \mathbf{C}_F$ 和 \mathbf{D}_F 为待设计的滤波器参数。

考虑系统方程式(1)和滤波器方程式(14), 结合事件触发机制式(13)和饱和约束函数式(4), 可以得到滤波误差系统的状态方程如下

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_F \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_F \mathbf{L}_1 \mathbf{C} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{B}}_\varphi = \hat{\mathbf{B}}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_F \end{bmatrix},$$

$$H = [I \ 0], \hat{B}_w = \begin{bmatrix} B_w & B_f & 0 \\ 0 & 0 & B_f D_w \end{bmatrix}, \hat{C} = [0 \ C_f], \\ \hat{F} = D_f L_1 C, \hat{D}_w = [0 \ -I \ D_f D_w].$$

文献[13-15, 21]在研究网络化系统故障检测问题时,传感器至故障检测滤波器之间的网络通道均采用传统的周期触发通讯方式,并未考虑如何节约网络资源和降低能耗的问题;文献[22]虽然研究了基于事件触发机制的网络化系统的故障检测问题,但文中的方法仅适用于传感器偏差故障的检测,而且未考虑非线性饱和约束问题。在实际工程应用中,传感器饱和是极易发生的现象,本文中引入的非线性饱和约束是较为广泛存在的一类饱和现象,如电机的磁饱和,社会经济系统中的成本约束,控制系统中的限幅器等。本文所研究的问题与已有结果不同,在充分考虑传感器可能存在的非线性饱和约束下,研究基于事件触发机制的网络化系统的过程故障检测问题,所研究的问题更具一般性。

根据上述分析可知该滤波误差系统模型融合了网络传输时延,传感器饱和约束参数、事件触发参数、测量噪声和未知故障信号。原系统的故障检测问题就转化为带有未知参数误差系统的 H_∞ 滤波问题。下面将寻找最优的滤波器参数 A_F, B_F, C_F 和 D_F 使得滤波误差系统满足如下条件:

(1) 当 $w(t) = 0$ 时,滤波误差系统式(15)是渐近稳定的。

(2) 在零初始条件下,对任何的非零向量 $w(t) \in L_2[0, +\infty]$,滤波误差 $e(t)$ 都满足 $\|e(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2$,其中 γ 为 H_∞ 扰动抑制系数。

这里采用残差评估机制检测故障是否发生,其中残差评估函数 $J(t)$ 和阈值 J_{th} 分别表示为

$$J(t) = \left\{ \int_0^t r_F^T(s) r_F(s) ds \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$J_{th} = \sup_{w \in L_2, f=0} \left\{ \int_0^L r_F^T(s) r_F(s) ds \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

式中 L 表示有限的评估时间长度。系统是否发生故障通过下面的规则进行判断

$$\begin{cases} J(t) > J_{th} & \text{发生故障} \Rightarrow \text{报警} \\ J(t) \leq J_{th} & \text{未发生故障} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq 2\xi^T(t) P^T [\hat{A}\xi(t) + \hat{T}H\xi(t - \tau(t)) + \hat{B}_\varphi \varphi(CH\xi(t - \tau(t))) + \hat{B}_e e_k(t) + \hat{B}_w w(t)] + \\ &\xi^T(t) H^T QH\xi(t) - \xi^T(t - \lambda) H^T QH\xi(t - \lambda) + \lambda \xi^T(t) H^T R H \dot{\xi}(t) - \int_{t-\lambda}^t \xi^T(s) H^T R H \dot{\xi}(s) ds - \\ &2\eta^T(t) MH [\xi(t) - \xi(t - \tau(t)) - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{\xi}(s) ds] - 2\eta^T(t) NH [\xi(t - \tau(t)) - \xi(t - \lambda) - \int_{t-\lambda}^{t-\tau(t)} \dot{\xi}(s) ds] - \\ &2\varphi^T(CH\xi(t - \tau(t))) [\varphi(CH\xi(t - \tau(t))) - LCH\xi(t - \tau(t))] + \\ &\sigma y^T(t - \tau(t)) \Omega y(t - \tau(t)) - e_k^T(t) \Omega e_k(t) + \\ &\gamma^{-1} e^T(t) e(t) - \gamma^{-1} e^T(t) e(t) - \gamma w^T(t) w(t) + \gamma w^T(t) w(t) \end{aligned} \quad (21)$$

2 主要结果

通过构造恰当的连续Lyapunov-Krasovskii泛函来分析滤波误差系统的 H_∞ 性能,利用自由权矩阵理论和线性矩阵不等式技术,建立了由线性矩阵不等式描述的滤波器存在条件。

定理1 给定标量 $\lambda > 0$ 和 $0 < \sigma < 1$,若存在标量 $\gamma > 0$ 和矩阵 $\Omega > 0, Q > 0, R > 0, P > 0$,以及适当维数矩阵 M, N ,使得

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{11} + \Gamma + \Gamma^T & \Sigma_{12}(i) & \Sigma_{13} & \Sigma_{14} \\ * & -\lambda R & 0 & 0 \\ * & * & -R & 0 \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

$i = 1, 2$

其中

$$\Sigma_{11} = \begin{bmatrix} \theta_{11} & P^T \hat{T} & 0 & P^T \hat{B}_\varphi & P^T \hat{B}_e & P^T \hat{B}_w \\ * & \sigma C^T L_1^T \Omega L_1 C & 0 & \theta_{24} & 0 & \theta_{26} \\ * & * & -Q & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \theta_{44} & 0 & \theta_{46} \\ * & * & * & * & -\Omega & 0 \\ * & * & * & * & * & \theta_{66} \end{bmatrix}$$

$$\theta_{11} = P^T \hat{A} + \hat{A}^T P + H^T QH$$

$$\theta_{24} = \sigma C^T L_1^T \Omega + C^T L^T, \theta_{26} = \sigma C^T L_1^T \Omega \kappa$$

$$\theta_{44} = -2I + \sigma \Omega, \theta_{46} = \sigma \Omega \kappa, \theta_{66} = -\gamma I + \sigma \kappa^T \Omega \kappa$$

$$\kappa = [0 \ 0 \ D_w], \Sigma_{12}(1) = \lambda M, \Sigma_{12}(2) = \lambda N$$

$$\Sigma_{13} = \sqrt{\lambda} \Pi^T H^T R, \Pi = [\hat{A} \ \hat{T} \ 0 \ \hat{B}_\varphi \ \hat{B}_e \ \hat{B}_w]$$

$$\Sigma_{14} = [\hat{C} \ \hat{F} \ 0 \ D_f \ D_f \ \hat{D}_w]^T$$

$$\Gamma = [-MH \ M - N \ N \ 0 \ 0 \ 0]$$

则基于事件触发机制的滤波误差系统式(15)是渐近稳定的,并且满足 H_∞ 性能指标。

证明 构造Lyapunov-Krasovskii泛函为

$$V(t) = \xi^T(t) P \xi(t) + \int_{t-\lambda}^t \xi^T(s) H^T QH \xi(s) ds + \int_{t-\lambda}^t \int_\theta^t \dot{\xi}^T(s) H^T R H \dot{\xi}(s) ds d\theta \quad (20)$$

对 $V(t)$ 关于 t 求导,并利用自由加权矩阵方法,则有

式中 : $\eta^T(t)=[\xi^T(t) \xi^T(t-\tau(t))H^T \xi^T(t-\lambda)H^T \varphi^T(CH\xi(t-\tau(t)))e_k^T(t)\omega^T(t)]$ 。

为了简化处理,令 $\xi^T(t,s)=[\eta^T(t) \dot{\xi}^T(s)H^T]$, $\Xi_1=\begin{bmatrix} \Sigma & \Sigma_{12}(1) \\ * & -\lambda R \end{bmatrix}$, $\Xi_2=\begin{bmatrix} \Sigma & \Sigma_{12}(2) \\ * & -\lambda R \end{bmatrix}$, $\Sigma=\Sigma_{11}+\Gamma+\Gamma^T+\Sigma_{13}R^{-1}\Sigma_{13}^T+\gamma^{-1}\Sigma_{14}\Sigma_{14}^T$ 。根据式(21),可以得到

$$\dot{V}(t) \leq \frac{1}{\lambda} \int_{t-\tau(t)}^t \xi^T(t,s)\Xi_1\xi(t,s)ds + \frac{1}{\lambda} \int_{t-\lambda}^{t-\tau(t)} \xi^T(t,s)\Xi_2\xi(t,s)ds - \gamma^{-1}e^T(t)e(t) + \gamma\omega^T(t)\omega(t) \quad (22)$$

依据 Schur 补引理,由式(19,22)可知 $\Xi_1 < 0$, $\Xi_2 < 0$,由此,可以得到

$$\dot{V}(t) \leq -\gamma^{-1}e^T(t)e(t) + \gamma\omega^T(t)\omega(t) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & 2\xi^T(t)P^T[\hat{A}\xi(t)+\hat{T}H\xi(t-\tau(t))+\hat{B}_\varphi\varphi(CH\xi(t-\tau(t)))]+ \\ & \xi^T(t)H^TQH\xi(t)-\xi^T(t-\lambda)H^TQH\xi(t-\lambda)+\lambda\xi^T(t)H^TRH\xi(t)-\int_{t-\lambda}^t \dot{\xi}^T(s)H^TRH\xi(s)ds - \\ & 2\eta_0^T(t)MH[\xi(t)-\xi(t-\tau(t))-\int_{t-\tau(t)}^t \dot{\xi}(s)ds]-2\eta_0^T(t)NH[\xi(t-\tau(t))-\xi(t-\lambda)-\int_{t-\lambda}^{t-\tau(t)} \dot{\xi}(s)ds]- \\ & 2\varphi^T(CH\xi(t-\tau(t)))[\varphi(CH\xi(t-\tau(t)))-LCH\xi(t-\tau(t))]+\sigma y^T(t-\tau(t))\Omega y(t-\tau(t)) \end{aligned} \quad (27)$$

式中 : $\eta_0^T(t)=[\xi^T(t) \xi^T(t-\tau(t))H^T \xi^T(t-\lambda)H^T \varphi^T(CH\xi(t-\tau(t)))]$ 。

令 : $\zeta_0^T(t,s)=[\eta_0^T(t) \dot{\xi}^T(s)H^T]$, $\Psi_1=\begin{bmatrix} \Delta & \Delta_{12}(1) \\ * & -\lambda R \end{bmatrix}$, $\Psi_2=\begin{bmatrix} \Delta & \Delta_{12}(2) \\ * & -\lambda R \end{bmatrix}$, $\Delta=\Delta_{11}+\Gamma_0+\Gamma_0^T+\Delta_{13}R^{-1}\Delta_{13}^T$, $\Delta_{11}=\begin{bmatrix} \theta_{11} & P^T\hat{T} & 0 & P^T\hat{B}_\varphi \\ * & \sigma C^T L_1^T \Omega L_1 C & 0 & \theta_{24} \\ * & * & -Q & 0 \\ * & * & * & \theta_{44} \end{bmatrix}$, $\Delta_{12}(1)=\lambda M$,

$\Delta_{12}(2)=\lambda N$, $\Delta_{13}=\sqrt{\lambda}\Pi_0^T H^T R$, $\Pi_0=\begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{T} & 0 & \hat{B}_\varphi \end{bmatrix}$, $\Gamma_0=\begin{bmatrix} -MH & M-N & N & 0 \end{bmatrix}$ 。

然后,根据式(27),可以得到

$$\dot{V}(t) \leq \frac{1}{\lambda} \int_{t-\tau(t)}^t \xi_0^T(t,s)\Psi_1\xi_0(t,s)ds + \frac{1}{\lambda} \int_{t-\lambda}^{t-\tau(t)} \xi_0^T(t,s)\Psi_2\xi_0(t,s)ds \quad (28)$$

依据 Schur 补引理,由式(19,28)可知 $\Psi_1 < 0$,

$$\bar{\Sigma}_{11} = \begin{bmatrix} -G-G^T & G^T\hat{A}+P & G^T\hat{T} & 0 & G^T\hat{B}_\varphi & G^T\hat{B}_e & G^T\hat{B}_\omega & G^T \\ * & -P+H^TQH & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \sigma C^T L_1^T \Omega L_1 C & 0 & \theta_{24} & 0 & \theta_{26} & 0 \\ * & * & * & -Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \theta_{44} & 0 & \theta_{46} & 0 \\ * & * & * & * & * & -\Omega & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \theta_{66} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -P \end{bmatrix}$$

两边关于 t 从 0 到 $+\infty$ 进行积分可得

$$V(+\infty)-V(0) \leq \int_0^{+\infty} [-\gamma^{-1}e^T(t)e(t) + \gamma\omega^T(t)\omega(t)]dt \quad (24)$$

在零初始条件下,由 $V(t)$ 定义,可知 $V(0)=0$, $V(+\infty) \geq 0$,由式(24)可得

$$\int_0^{+\infty} e^T(t)e(t)dt \leq \gamma^2 \int_0^{+\infty} \omega^T(t)\omega(t)dt \quad (25)$$

即 $\|e(t)\|_2 \leq \gamma\|\omega(t)\|_2$,证明了 H_∞ 性能指标。

当 $\omega(t)=0$,则 $e_k(t)=0$ 。根据 $V(t)$ 定义,可得

$$\lambda_{\min}(P)\|\xi(t)\|^2 \leq V(t) \leq (\lambda_{\max}(P) + \lambda\lambda_{\max}(H^TQH) + \lambda^2\lambda_{\max}(H^TRH))\|\xi(t)\|^2 \quad (26)$$

此时,对 $V(t)$ 的两边关于 t 求导,则有

$\Psi_2 < 0$,由此,可以得到 $\dot{V}(t) < 0$,即滤波误差系统是渐近稳定的。证毕。

虽然定理 1 给出了滤波误差系统满足 H_∞ 性能指标的条件,遗憾的是式(19)中存在李亚普诺夫矩阵 P 和滤波器参数 A_F, B_F, C_F 耦合的非线性项,无法直接使用 MATLAB 的 LMI 工具箱进行求解。下面通过引入附加矩阵解除耦合,获得新的性能准则。

定理 2 给定标量 $\lambda > 0$ 和 $0 < \sigma < 1$,若存在标量 $\gamma > 0$ 和矩阵 $\Omega > 0, Q > 0, R > 0, P > 0$, 以及适当维数矩阵 M, N, G ,使得

$$\begin{bmatrix} \bar{\Sigma}_{11} + \Lambda_1 & \bar{\Sigma}_{12}(i) & \bar{\Sigma}_{13} & \bar{\Sigma}_{14} \\ * & -\lambda R & 0 & 0 \\ * & * & -R & 0 \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad i=1,2 \quad (29)$$

其中

$$\Theta_{11} = -X - X^T, \Theta_{12} = -Y - Z^T, \Theta_{13} = X^T A +$$

$$\tilde{P}_1, \Theta_{14} = \tilde{A}_F + \tilde{P}_2, \Theta_{22} = -Z - Z^T$$

$$\Theta_{23} = Y^T A + \tilde{P}_2^T, \Theta_{24} = \tilde{A}_F + \tilde{P}_3$$

$$\Theta_{33} = -\tilde{P}_1 + Q$$

$$\Theta_{57} = \sigma C^T L_1^T \Omega + C^T L_2^T - C^T L_1^T$$

$$\Theta_{77} = -2I + \sigma \Omega, \Theta_{(11,11)} = -\gamma I + \sigma D_w^T \Omega D_w$$

$$\tilde{A}_1 = \text{diag}\{0, 0, \tilde{F} + \tilde{F}^T, 0, 0\}$$

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} -\tilde{M} & 0 & \tilde{M} - \tilde{N} & \tilde{N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{M}^T = [\tilde{M}_1^T \tilde{M}_2^T \tilde{M}_3^T \tilde{M}_4^T \tilde{M}_5^T \tilde{M}_6^T \tilde{M}_7^T \tilde{M}_8^T \tilde{M}_9^T]$$

$$\tilde{N}^T = [\tilde{N}_1^T \tilde{N}_2^T \tilde{N}_3^T \tilde{N}_4^T \tilde{N}_5^T \tilde{N}_6^T \tilde{N}_7^T \tilde{N}_8^T \tilde{N}_9^T]$$

$$\tilde{\Sigma}_{12}(1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda \tilde{M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{\Sigma}_{12}(2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda \tilde{N} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{\Sigma}_{13} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{\Pi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} J_1 = \text{diag}\{J_G, J_G, I, I, I, I, I, J_G\}, J_2 = \text{diag}\{J_1, I, I, I\}, J_3 = \text{diag}\{J_G, I, I, I, I, I\} \\ X = G_{11}, Y = G_{12} G_{22}^{-1} G_{21}, Z = G_{21}^T G_{22}^{-T} G_{21}, J_G^T P J_G = \begin{bmatrix} \tilde{P}_1 & \tilde{P}_2 \\ \tilde{P}_2^T & \tilde{P}_3 \end{bmatrix} \\ \tilde{M} = J_3^T M, \tilde{N} = J_3^T N, \tilde{A}_F = G_{21}^T A_F G_{22}^{-1} G_{21}, \tilde{B}_F = G_{21}^T B_F, \tilde{C}_F = C_F G_{22}^{-1} G_{21}, \tilde{D}_F = D_F \end{cases} \quad (38)$$

对式(29)两边分别乘以 J_2^T 及 J_2 进行全等变换, 可以推知不等式(29)和不等式(34)是等价的。由式(38)可以得到滤波器参数矩阵

$$A_F = G_{21}^{-T} \tilde{A}_F G_{21}^{-1} G_{22}, B_F = G_{21}^{-T} \tilde{B}_F, C_F = \tilde{C}_F G_{21}^{-1} G_{22}, D_F = \tilde{D}_F \quad (39)$$

注意到式(35)中并未包含矩阵 G_{21} 和 G_{22} , 但是滤波器式(14)的传递函数可以表示为

$$T_{r_f \hat{y}} = C_F (sI - A_F)^{-1} B_F + D_F \quad (40)$$

将式(39)中的滤波器参数矩阵代入式(40), 并考虑关系式(38), 可得

$$T_{r_f \hat{y}} = \tilde{C}_F (sI - G_{21}^{-1} G_{22} G_{21}^{-T} \tilde{A}_F)^{-1} \cdot G_{21}^{-1} G_{22} G_{21}^{-T} \tilde{B}_F + \tilde{D}_F = \tilde{C}_F (sI - Z^{-T} \tilde{A}_F)^{-1} Z^{-T} \tilde{B}_F + \tilde{D}_F \quad (41)$$

形如式(14)的滤波器, 其参数可由式(35)得到。

考虑到网络中存在时变时延对系统性能的影响, 为了获取最优性能指标, 对滤波误差系统式(15)采用凸优化的方法得到基于事件触发机制的故障检测滤波器最优解

$$\text{Minimize: } \gamma \quad \text{s. t. : 式(34)} \quad (42)$$

因此, 可以得到最优的 H_∞ 性能指标 γ_{\min}

$$\tilde{\Sigma}_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{T} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Pi} = \sqrt{\lambda} [RA \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ RB_w \ RB_f \ 0]^T$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 0 \ \tilde{C}_F \ \tilde{D}_F L_1 C \ 0 \ \tilde{D}_F \ \tilde{D}_F \ 0 \ -I \ \tilde{D}_F D_w \end{bmatrix}^T$$

则基于事件触发机制的滤波误差系统式(15)是渐近稳定的, 并且满足 H_∞ 性能指标。而且, 若不等式(34)存在可行解, 则目标滤波器参数为

$$A_F = Z^{-T} \tilde{A}_F, B_F = Z^{-T} \tilde{B}_F, C_F = \tilde{C}_F, D_F = \tilde{D}_F \quad (35)$$

证明 为了方便, 首先将矩阵 G 分解成如下形式

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (36)$$

为了进行合同变换, 假设矩阵 G_{21} 和 G_{22} 是可逆的, 从而可定义可逆矩阵

$$J_G = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & G_{22}^{-1} G_{21} \end{bmatrix} \quad (37)$$

为了进一步简化, 给定如下关系式

3 数值仿真

为了验证本文所提出的故障检测方法的有效性, 将通过如下仿真例子进行说明, 系统式(1)中参数如下

$$A = \begin{bmatrix} -2.8 & 0.8 & 0.1 \\ -2.5 & -1.2 & 0.7 \\ 1 & 0.9 & -1.1 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.8 \\ -0.7 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} -1.5 \\ 1.6 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1.2 & 2.1 & -0.5 \\ 0 & 1.1 & 0.9 \end{bmatrix}, D_w = \begin{bmatrix} 1.8 \\ 0.6 \end{bmatrix}$$

这里传感器饱和函数 $\text{sat}(Cx(t))$ 表示为

$$\text{sat}(Cx(t)) = \begin{cases} v_{Cx(t), \max} & Cx(t) > v_{Cx(t), \max} \\ Cx(t) & -v_{Cx(t), \max} \leq Cx(t) \leq v_{Cx(t), \max} \\ -v_{Cx(t), \max} & Cx(t) < -v_{Cx(t), \max} \end{cases}$$

其中饱和值为 $v_{Cx(t), \max} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$ 。

基于事件触发机制和考虑传感器饱和约束, 假定 $h = 0.1, \lambda = 0.15, \sigma = 0.1, L_1 = \begin{bmatrix} 0.95 & 0 \\ 0 & 0.95 \end{bmatrix}$,

$L_2 = \begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 0 & 1.1 \end{bmatrix}$ 。根据定理 3, 通过求解凸优化问题式(42), 可以获得最优 H_∞ 性能指标 $\gamma_{\min} =$

1.2105 和相应的触发参数矩阵 $\Omega = \begin{bmatrix} 0.3210 & -0.2580 \\ -0.2580 & 0.2286 \end{bmatrix}$ (为方便,其他相关参数在此忽略)。并且,获得目标滤波器参数矩阵如下

$$A_F = \begin{bmatrix} -2.8715 & 0.4403 & -0.1291 \\ 1.0989 & -2.5081 & 0.0747 \\ 2.4179 & -0.5146 & -1.4464 \end{bmatrix}$$

$$B_F = \begin{bmatrix} -0.0838 & -0.0515 \\ -0.8085 & -0.4115 \\ -0.4420 & -0.5890 \end{bmatrix}$$

$$C_F = [0.0627 \quad 0.0144 \quad -0.0464]$$

$$D_F = [0.0050 \quad 0.0257]$$

注意到 H_∞ 性能指标非常重要,反映出残差信号对外部扰动信号的抑制水平,它的值会受到触发

条件,网络时延和传感器饱和约束的影响。从表1和表2可以看出,随着参数 σ 和 λ 的增大, γ 的值也在相应增大。另外,表3给出了最优性能指标 γ 受传感器饱和约束条件变化的影响。

表1 随参数 σ 变化的最优性能指标 γ

Tab. 1 Optimal performance index γ for different σ

σ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
γ_{\min}	1.2105	1.2533	1.2851	1.3103	1.3315

表2 随参数 λ 变化的最优性能指标 γ

Tab. 2 Optimal performance index λ for different σ

λ	0.15	0.55	1.55	3.55	5.55	7.55	9.55
γ_{\min}	1.2105	1.2869	1.5520	2.8721	5.514	29.3727	14.3916

表3 随参数 L_1, L_2 变化的最优性能指标 γ

Tab. 3 Optimal performance index γ for different L_1, L_2

L_1	$\begin{bmatrix} 0.55 & 0 \\ 0 & 0.55 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.65 & 0 \\ 0 & 0.65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.75 & 0 \\ 0 & 0.75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.85 & 0 \\ 0 & 0.85 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.95 & 0 \\ 0 & 0.95 \end{bmatrix}$
γ_{\min}	7.9095	5.3106	3.2487	1.8220	1.2105
L_2	$\begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 0 & 1.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.3 & 0 \\ 0 & 1.3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.7 & 0 \\ 0 & 1.7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.9 & 0 \\ 0 & 1.9 \end{bmatrix}$
γ_{\min}	1.2105	3.2509	7.9183	14.6901	23.5804

为了进一步验证上述故障滤波器的有效性,假定干扰噪声信号 $\omega(t)$ 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机信号,并假设故障信号具有如下形式

$$f(t) = \begin{cases} 4.5\sin(0.5\pi t) & t \in [50, 150] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

在零初始条件下,通过 MATLAB 仿真,得到残差随时间变化情况如图2所示。图3给出了由故障检测滤波器产生的残差和阈值的随时间 t 的变化情况。根据残差评估机制的阈值表达式(17),选取评估时间长度 $L = 200$ s,可以求得阈值 $J_{th} = 0.2586$ 。再由残差评估函数的表达式(16),经过计算比较可得 $J(t)|_{t=55.4} = 0.2615 > 0.2586$,即 5.4 s 以内检测出故障。另外,图4给出了参数

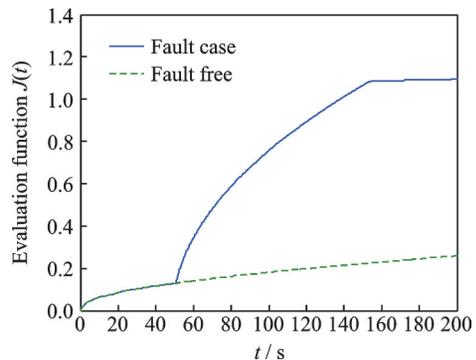


图3 残差评估函数 $J(t)$

Fig. 3 Evolution of the residual evaluation function $J(t)$

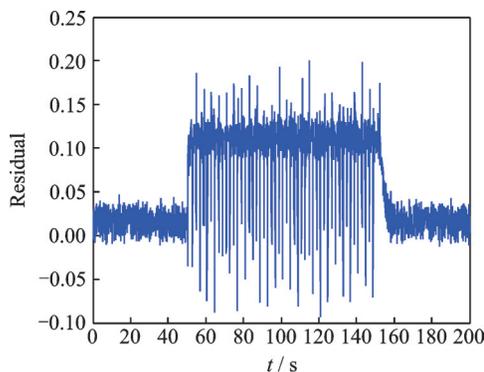


图2 残差信号 $r_F(t)$

Fig. 2 Residual signal $r_F(t)$

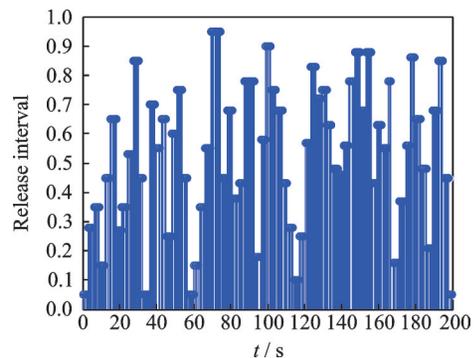


图4 事件触发时刻与触发间隔

Fig. 4 Event-triggered release instants and intervals

$\sigma = 0.1$ 时的事件触发图。在评估时间 200 s, 采样的次数为 2001 次, 而传感器发送的次数为 853 次,

意味着事件触发机制数据发送率仅有42.63%,这大大降低了网络负担,减少了网络拥塞。由此,可以看出所设计的故障检测滤波器能够在故障发生后快速的做出判断检测出故障;并且,基于事件触发机制的传输策略可以减少数据发送量,节约网络资源,充分说明了所提出方法的有效性。

4 结 论

本文在考虑传感器饱和约束下,研究了一类带有有时变时延的网络化系统的故障检测问题。首先,设计合适的故障检测滤波器将问题转化为 H_∞ 滤波问题;其次,通过构造恰当的Lyapunov-Krasovskii泛函和自由权矩阵理论,得到滤波误差系统渐近稳定且满足预设 H_∞ 性能指标的充分条件;然后,采用凸优化的方法得到基于事件触发机制的故障检测滤波器的最优参数。最后,利用仿真例子验证了本文所提出的故障检测方法的有效性。

参考文献:

- [1] GUPTA R A, CHOW M Y. Networked control system: Overview and research trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2527-2535.
- [2] 赵丹阳. 网络化控制系统的事件驱动控制策略研究[D]. 北京:北京化工大学, 2014.
ZHAO Danyang. The research of event-driven control strategy on networked control systems[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [3] YANG Hongjiu, GUO Xiaodong, DAI Li, et al. Event-triggered predictive control for networked control systems with network-induced delays and packet dropouts[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(4): 1350-1365.
- [4] 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.
XIE Chengxiang, FAN Weihua, HU Weili. Modeling and control method of a class of networked control systems with short time-delay[J]. Journal of Nanjing University of Science & Technology, 2009, 33(2): 156-160.
- [5] 张冬梅, 茹安狄, 程善. 通信受限下网络化多传感器系统序贯卡尔曼滤波加权融合[J]. 控制与决策, 2017, 32(12): 2162-2168.
ZHANG Dongmei, RU Andi, CHENG Shan. Sequential Kalman filter weighted fusion for networked multi-sensor systems with communication constraints[J]. Control and Decision, 2017, 32(12): 2162-2168.
- [6] 姜顺, 方华京. 有界丢包情况下网络化控制系统的可靠保成本控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(S1): 163-168.
- JIANG Shun, FANG Huajing. Reliable guaranteed cost control for networked control systems with bounded packet dropouts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(S1): 163-168.
- [7] ISHIDO Y, TAKABA K, QUEVEDO D E. Stability analysis of networked control systems subject to packet-dropouts and finite-level quantization[J]. Systems & Control Letters, 2011, 60(5): 325-332.
- [8] LI Fangwen, SHI Peng, WANG Xingcheng, et al. Robust H_∞ filtering for networked control systems with Markovian Jumps and packet dropouts[J]. Modeling Identification & Control, 2014, 35(3): 159-168.
- [9] TANG Z, JU H P, LEE T H. Dynamic output-feedback-based H_∞ design for networked control systems with multipath packet dropouts[J]. Applied Mathematics & Computation, 2016, 275: 121-133.
- [10] SHENG Li, WANG Zidong, WANG Weibo, et al. Output-feedback control for nonlinear stochastic systems with successive packet dropouts and uniform quantization effects[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2017, 47(7): 1181-1191.
- [11] SAUTER D, LI Shanbin, AUBRUN C. Robust fault diagnosis of networked control systems[J]. International Journal of Adaptive Control & Signal Processing, 2010, 23(8): 722-736.
- [12] CHABIR K, SID M A, SAUTER D. Fault diagnosis in a networked control system under communication constraints: A quadrotor application[J]. International Journal of Applied Mathematics & Computer Science, 2014, 24(4): 809-820.
- [13] AHMADI A A, SALMASI F R. Detection and isolation of actuator and sensor faults for networked control systems[J]. Optimal Control Applications & Methods, 2017, 38(3): 355-375.
- [14] 黄鹤, 谢德晓, 张登峰, 等. 具有随机马尔可夫时延的网络控制系统 H_∞ 故障检测[J]. 信息与控制, 2010, 39(1): 6-12.
HUANG He, XIE Dexiao, ZHANG Dengfeng, et al. H_∞ fault detection for networked control system with random Markov delays[J]. Information & Control, 2010, 39(1): 6-12.
- [15] 冒泽慧, 周东华, 吉吟东, 等. 具有随机传输时滞的网络化控制系统故障检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(S1): 32-35.
MAO Zehui, ZHOU Donghua, JI Yindong, et al.

- Fault detection of networked control systems with stochastic transfer delays[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(S1): 32-35.
- [16] 王燕锋, 王培良, 蔡志端. 时延转移概率部分未知的网络控制系统鲁棒 H_∞ 故障检测[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(2): 273-279.
WANG Yanfeng, WANG Peiliang, CAI Zhiduan. Robust H_∞ fault detection for networked control systems with partly unknown time-delay transition probabilities[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(2): 273-279.
- [17] GUO Fumin, REN Xuemei, LI Zhijun, et al. Fault detection and fault-tolerant control over signal-to-noise ratio constrained channels[J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2018, 28(7): 2806-2827.
- [18] CAO Yongyan, LIN Zongli, CHEN B M. An output feedback H_∞ controller design for linear systems subject to sensor nonlinearities[J]. *IEEE Trans on Circuits & Systems*, 2003, 50(7): 914-921.
- [19] YANG Fuwen, LI Yongmin. Set-membership filtering for systems with sensor saturation [J]. *Automatica*, 2009, 45(8): 1896-1902.
- [20] HU Songlin, YUE Dong. Event-based H_∞ filtering for networked system with communication delay [J]. *Signal Processing*, 2012, 92(9): 2029-2039.
- [21] LIU Bo, XIA Yuanqing, YANG Yi, et al. Robust fault detection of linear systems over networks with bounded packet loss [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2012, 349(7): 2480-2499.
- [22] WANG Yulong, SHI Peng, LIM Chengchew, et al. Event-triggered fault detection filter design for a continuous-time networked control system [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(12): 3414-3426.
- [23] APKARIAN P, TUAN H D, BERNUSSOU J. Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and H_2 synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(12): 1941-1946.

(编辑:孙静)