

控制与决策

Control and Decision



事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

李艳辉, 陶莹莹

引用本文:

李艳辉, 陶莹莹. 事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 3059–3065.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究

Cascading failure of double layer networked command information system

控制与决策. 2020, 35(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696>

异构网络中基于鸽群优化算法的D2D资源分配机制

Resource allocation for D2D based on pigeon-inspired optimization algorithm in heterogeneous networks

控制与决策. 2020, 35(12): 2959–2967 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0526>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

基于不变网络模型和故障注入的分布式信息系统故障溯源方法

Fault source location algorithm for distributed information system based on invariant network and fault injection

控制与决策. 2020, 35(11): 2723–2732 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0214>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

李艳辉[†], 陶莹莹

(东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 研究事件触发机制下具有不可靠通信的离散网络化控制系统的 H_∞ 故障检测问题, 首先, 为了节约网络资源, 采用事件触发机制来判断采样数据是否传输到网络中; 其次, 利用 Bernoulli 随机变量描述数据在网络传输中的丢包, 综合考虑以上约束, 建立一种能同时描述事件触发策略、数据丢包、分布时滞和时变时滞的网络化控制系统模型, 运用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式求解方法将故障检测滤波器的设计转化成 H_∞ 凸优化问题; 最后, 通过数值仿真验证事件触发机制下的故障检测滤波器不仅节约网络资源而且可以有效地检测出系统故障信息。

关键词: 事件触发机制; 网络化控制系统; Bernoulli 分布; 分布时滞; 故障检测

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0456

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李艳辉, 陶莹莹. 事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测 [J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 3059-3065.

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

LI Yan-hui[†], TAO Ying-ying

(College of Electrical and Information Engineering, Northeastern Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: This paper is concerned with the event-triggered H_∞ fault detection problem for discrete-time networked control systems with unreliable communication links. Firstly, an event-triggered mechanism is proposed to determine whether the sampled data is transmitted to the network in order to save network resources. Then, a Bernoulli process is employed to model the phenomenon for the packet losses. Considering the above constraints, a networked control system model is established, which can simultaneously describe the event triggering strategy, data losses, distributed delay and time-varying delay. The sufficient conditions for the fault detection filter are obtained using the Lyapunov stability theory and the linear matrix inequality method. Finally, the numerical simulation is conducted to prove that the fault detection filter under the event-triggered mechanism not only saves networked resources, but also effectively detects system fault information.

Keywords: event-triggered mechanism; networked control systems; Bernoulli distribution; distributed delay; fault detection

0 引言

随着计算机网络技术的高速发展,工业系统向着复杂化、网络化和智能化方向发展,区别于传统控制系统中点对点的通信模式,网络化控制系统资源共享,具有较高的可靠性和灵活性,便于安装和维护等优点被广泛地应用于各个领域. 尽管如此,网络化控制系统不可避免地存在缺陷,例如,有限的通信资源和网络承载能力,影响了网络信道上数据传输的完整性,从而产生时间延迟、数据丢包、通信约束等问题,

给系统的分析和综合带来很多困难^[1-3]. 一方面,传统滤波方案中通常假设被控对象的测量输出等于滤波器的输入信号^[4],在实际网络控制系统中,由于网络资源有限,这种理想情况通常不能满足;另一方面,网络化控制系统中的数据通信和计算多是基于时间,无疑增加了传感器和数据采样的频率,使得有限的网络通信资源消耗增加,为了克服传统时间触发通信的缺点,减少通信资源的占用和一些不必要的计算,学者们提出了基于事件触发的数据传输策略^[5-6]. 在事件

收稿日期: 2019-04-13; 修回日期: 2019-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673102); 东北石油大学研究生教育创新工程项目(JYCX-CX06-2018).

[†]通讯作者. E-mail: Liyanhui@nepu.edu.cn.

触发机制下,只有满足预先设定好的触发条件时,数据才能从传感器传输到控制器或滤波器,网络资源仅在需要时被占用,所以这种零散发生的控制任务的平均频率比周期采样系统的任务频率要低得多,从而可以极大地减少网络资源的占有率.基于以上优点,事件触发策略已被广泛地用在随机系统^[7]、非线性系统^[8]、网络化控制系统^[9]等工程系统中.对于保证控制系统所需性能并降低通信资源的利用率,在网络化控制系统中进一步研究事件触发问题是有意义的.

由于网络环境的特殊性,网络化控制系统中存在的故障信息更加复杂,系统中任何一个环节发生故障,都将对实际工程系统造成严重的后果,如系统运行失效、瘫痪和各种数据信息丢失等,及时检测出系统中的故障信息不仅可以有效提高系统的安全性和运行的可靠性,还可以减少系统中的事故发生率,因此故障检测问题成为系统设计过程中必须要考虑的问题^[10-12].由复杂的网络环境引起的不可靠通信无疑对故障检测问题提出新的挑战.

本文在事件触发机制下,研究具有分布时滞和数据丢包情况下网络化控制系统的故障检测问题.利用事件触发策略,减少网络通道中传输的数据量;采用满足 Bernoulli 分布的随机变量描述数据传输过程中在网络通道上的丢包现象;基于 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式求解方法,在保证故障检测滤波系统均方渐近稳定的基础上将故障检测滤波器的设计问题转化成 H_∞ 凸优化问题.最后通过数值仿真验证了故障检测滤波器设计方法的有效性.

1 问题描述

考虑受故障信号影响的分布时滞离散网络化控制系统

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ Ax(k) + A_d x(k - \tau(k)) + \\ A_h \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i x(k-i) + B_1 \omega(k) + B_2 f(k), \\ y(k) = Cx(k) + D_1 \omega(k) + D_2 f(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态; $y(k) \in \mathbf{R}^m$ 为系统测量输出; $\omega(k) \in \mathbf{R}^q$ 为系统的扰动输入信号; $f(k) \in \mathbf{R}^p$ 为系统故障信号; A 、 A_d 、 A_h 、 B_1 、 B_2 、 C 、 D_1 、 D_2 为适维常数矩阵; $\tau(k)$ 为离散时变时滞,满足 $\tau_m \leq \tau(k) \leq \tau_M$, 其中 τ_m 和 τ_M 分别表示最小和最大时延; $\lambda_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots)$ 满足

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \leq \sum_{i=1}^{\infty} i \lambda_i < +\infty.$$

设计如下故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}_f(k+1) = A_f \hat{x}_f(k) + B_f \bar{y}(k), \\ r(k) = C_f \hat{x}_f(k) + D_f \bar{y}(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中: A_f 、 B_f 、 C_f 和 D_f 表示待求滤波器参数矩阵, $\hat{x}_f(k) \in \mathbf{R}^n$ 为滤波器的状态估计向量, $r(k) \in \mathbf{R}^m$ 为残差信号.

为了得到网络传输时刻的序列 $\{k_s\}_{s=0,1,\dots}$, 采用文献[7]提出的事件触发条件

$$k_{s+1} = \min_{k > k_s} \{k | e_y^T(k) W e_y(k) > \epsilon y^T(k) W y(k)\}. \quad (3)$$

其中: ϵ 为事件触发阈值, W 为待求的事件触发权值矩阵, $e_y(k) = y(k_s) - y(k)$, $k \in [k_s, k_{s+1})$.

由于网络通信能力的限制,数据传输经过网络时,会产生数据丢包的情况,也就是说,只有部分数据能够从原系统传输到故障检测滤波器中,对于一个事件触发时刻 k_s ,若没有发生数据丢包,则当前的测量数据 $y(k_s)$ 会传输到滤波器中,对于所有的 $k \in [k_s, k_{s+1})$ 有 $\bar{y}(k) = y(k_s)$. 如果发生了数据丢包现象,则上一事件触发时刻 $y(k_{s-1})$ 的数据将会被故障检测滤波器使用,从而滤波器的实际输入为

$$\bar{y}(k) = \delta(k_s) y(k_s) - (1 - \delta(k_s)) \bar{y}(k-1), \quad (4)$$

$\delta(k_s)$ 为满足 Bernoulli 分布的随机变量,有如下概率分布:

$$\begin{cases} \text{prob}\{\delta(k_s) = 0\} = \bar{\delta}, \\ \text{prob}\{\delta(k_s) = 1\} = 1 - \bar{\delta}, \end{cases}$$

其中 $\bar{\delta} \in [0, 1]$.

在故障检测系统中,为了提高系统对故障信号的敏感性,需要设计一个加权故障模型 $\hat{f}(z) = W(z)f(z)$, $W(z)$ 表示加权矩阵,其状态空间形式如下:

$$\begin{cases} \hat{x}_w(k+1) = A_w \hat{x}_w(k) + B_w f(k), \\ \hat{f}(k) = C_w \hat{x}_w(k) + D_w f(k). \end{cases} \quad (5)$$

其中: A_w 、 B_w 、 C_w 和 D_w 为已知的参数矩阵; $\hat{f}(k)$ 为加权故障信号;定义状态变量

$$\xi(k) = [x_w^T(k) \quad x^T(k) \quad \hat{x}_f^T(k) \quad \bar{y}^T(k)]^T,$$

$$v(k) = [\omega^T(k) \quad f^T(k)]^T,$$

$$e(k) = r(k) - \hat{f}(k),$$

结合方程(1)~(5),应用矩阵增广思想,可得加权故障检测系统

$$\left\{ \begin{aligned} \xi(k+1) &= \tilde{A}_1 \xi(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{A}_2 \xi(k) + \\ &\quad \tilde{A}_d \xi(k - \tau(k)) + \tilde{A}_h \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \xi(k-i) + \\ &\quad \tilde{B}_1 v(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{B}_2 v(k) + \\ &\quad \tilde{B}_3 e_y(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{B}_4 e_y(k), \\ e(k) &= \tilde{C}_1 \xi(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{C}_2 \xi(k) + \\ &\quad \tilde{D}_1 v(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{D}_2 v(k) + \\ &\quad \tilde{F}_1 e_y(k) + (\delta(k) - \bar{\delta}) \tilde{F}_2 e_y(k). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

其中

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} A_0 & 0 & 0 \\ \bar{\delta} B_f C_0 & A_f & (1-\bar{\delta}) B_f \\ \bar{\delta} C_0 & 0 & 1-\bar{\delta} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} B_0 \\ \bar{\delta} B_f D_0 \\ \bar{\delta} D_0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ B_f C_0 & 0 & -B_f \\ C_0 & 0 & -I \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_d = \begin{bmatrix} A_{d0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_h = \begin{bmatrix} A_{h0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f D_0 \\ D_0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\delta} B_f \\ \bar{\delta} I \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \\ I \end{bmatrix},$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} A_w & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 & B_w \\ B_1 & B_2 \end{bmatrix},$$

$$A_{d0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix}, \quad A_{h0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_h \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C}_1 = [\bar{\delta} D_f C_0 - \bar{C}_w \quad C_f \quad (1-\bar{\delta}) D_f],$$

$$\tilde{C}_2 = [D_f C_0 \quad 0 \quad -D_f], \quad \tilde{D}_1 = \bar{\delta} D_f D_0 - \bar{D}_w,$$

$$\tilde{D}_2 = D_f D_0, \quad \tilde{F}_1 = \bar{\delta} D_f, \quad \tilde{F}_2 = D_f,$$

$$C_0 = [0 \quad C], \quad D_0 = [D_1 \quad D_2],$$

$$\bar{C}_w = [C_w \quad 0], \quad \bar{D}_w = [0 \quad D_w].$$

本文的目标是设计如方程(2)所示的 H_∞ 滤波器,使得故障检测系统(6)均方渐近稳定,且零初始条件下,对于任意非零 $v(t) \in l_2[0, \infty)$,存在常数 $\gamma > 0$,使故障检测系统(6)满足

$$\mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 \right\} < \gamma^2 \mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \|v(k)\|^2 \right\}.$$

引理1 [13] 设 $M \in R^n$ 是正定矩阵, $x_i \in R^n$ 和常数矩阵 $a_i \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots$) 满足以下不等式:

$$\left(\sum_{i=1}^{+\infty} a_i x_i \right)^T M \left(\sum_{i=1}^{+\infty} a_i x_i \right) \leq \left(\sum_{i=1}^{+\infty} a_i \right) \sum_{i=1}^{+\infty} a_i x_i^T M x_i.$$

通常,故障检测系统由残差发生器、残差评价函数和阈值组成,残差评价函数 $J(k)$ 和阈值 J_{th} 如下:

$$J(k) = \mathbb{E} \{ \|e(k)\|_{2,T} \} =$$

$$\mathbb{E} \left\{ \left(\sum_{k_0}^{k_0+T} e^T(k) e(k) \right)^{1/2} \right\},$$

$$J_{th} = \sup_{\omega \in l_2, f=0} J(k);$$

$J(k) > J_{th} \Rightarrow$ 故障 $\Rightarrow$ 报警, $J(k) \leq J_{th} \Rightarrow$ 无故障.

注1 在实际网络化控制系统中,有限的数据传输能力通常不能满足大量数据的传输要求. 事件触发机制是通过判断当前传输的数据是否为有效数据,若是有效数据则通过网络传输到滤波器中,反之则舍弃,从而达到缓解网络通信压力的目的.

注2 在网络化控制系统中,数据传输过程中不可避免地发生丢包,使得故障检测滤波器的实际输入不等于系统的测量输出,而且事件触发机制下,不满足事件触发条件的数据也会被舍弃,不能通过网络信道传输到滤波器中,因此本文采用式(4)表示滤波器的实际输入信号.

2 事件触发机制下 H_∞ 故障检测滤波器性能分析

本节中,将研究故障检测系统均方渐近稳定的充分条件以及分析事件触发机制下的 H_∞ 性能,为后面的故障检测滤波器设计提供理论依据.

定理1 对于具有分布时滞的网络化控制系统(1),给定正标量 γ, ϵ 和 $\bar{\delta} \in [0, 1]$,若存在正定对称矩阵 $P > 0, Q > 0, Z > 0$ 以及事件触发权值矩阵 W ,满足以下不等式:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} \\ * & \Xi_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

则故障检测系统(6)均方渐近稳定并具有 H_∞ 性能指标 γ . 其中

$$\Xi_{11} = \begin{bmatrix} \psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & -Q & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -1/\bar{\lambda} Z & 0 & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & * & -W \end{bmatrix},$$

$$\Xi_{12} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1^T P & \delta \tilde{A}_2^T P & \tilde{C}_1^T & \delta \tilde{C}_2^T & \sqrt{\epsilon} \tilde{C}_0^T W \\ \tilde{A}_d^T P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{A}_h^T P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{B}_1^T P & \delta \tilde{B}_2^T P & \tilde{D}_1^T & \delta \tilde{D}_2^T & \sqrt{\epsilon} \tilde{D}_0^T W \\ \tilde{B}_3^T P & \delta \tilde{B}_4^T P & \tilde{F}_1^T & \delta \tilde{F}_2^T & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Xi_{22} = \text{diag}\{-P \quad -P \quad -I \quad -I \quad -W\},$$

$$\psi = -P + (\tau_M - \tau_m + 1)Q + \bar{\lambda}Z.$$

证明 选择如下形式的Lyapunov函数:

$$V_i(k, \xi(k)) = \sum_{i=1}^4 V_i(k, \xi(k)),$$

$$V_1(k, \xi(k)) = \xi^T(k) P \xi(k),$$

$$V_2(k, \xi(k)) = \sum_{i=k-\tau(k)}^{k-1} \xi^T(i) Q \xi(i),$$

$$V_3(k, \xi(k)) = \sum_{j=-\tau_M+2}^{-\tau_m+1} \sum_{i=k+j-1}^{k-1} \xi^T(i) Q \xi(i),$$

$$V_4(k, \xi(k)) = \sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i \sum_{j=k-i}^{k-1} \xi^T(j) Z \xi(j).$$

当 $k \in [k_s \quad k_{s+1})$ 时,沿系统状态求差分,并对 $E\{\Delta V_4(k, \xi(k))\}$ 应用引理1,可得

$$E\{\Delta V_1(k, \xi(k))\} =$$

$$E\{\xi^T(k+1)P\xi(k+1) - \xi^T(k)P\xi(k)\},$$

$$E\{\Delta V_2(k, \xi(k))\} \leq$$

$$E\{\xi^T(k)Q\xi(k) - \xi^T(k-\tau(k)) \times$$

$$Q\xi(k-\tau(k)) + \sum_{i=k+1-\tau_M}^{k-\tau_m} \xi^T(i)Q\xi(i)\},$$

$$E\{\Delta V_3(k, \xi(k))\} =$$

$$E\left\{(\tau_M - \tau_m)\xi^T(k)Q\xi(k) - \sum_{i=k+1-\tau_M}^{k-\tau_m} \xi^T(i)Q\xi(i)\right\},$$

$$E\{\Delta V_4(k, \xi(k))\} \leq$$

$$E\{\bar{\lambda}\xi^T(k)Z\xi(k)\} -$$

$$\frac{1}{\bar{\lambda}} \left(\sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i \xi(k-i) \right)^T Z \left(\sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i \xi(k-i) \right).$$

定义

$$\eta(k) =$$

$$\begin{bmatrix} \xi^T(k) & \xi^T(k-\tau(k)) & \sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i \xi^T(k-i)v^T(k) & e_y^T(k) \end{bmatrix},$$

并取 $\delta_0 = \sqrt{\delta(1-\delta)}$, 整理得

$$E\{\Delta V(k, \xi(k))\} + E\{\|e(k)\|^2\} - \gamma^2 \|v(k)\|^2 \leq$$

$$\Delta V(k, \xi(k)) + E\{\|e(k)\|^2\} - \gamma^2 \|v(k)\|^2 +$$

$$\epsilon y^T(k)W y(k) - e_y^T W e_y =$$

$$\eta^T(k)\Omega\eta(k).$$

对于所有的 $\eta(k) \neq 0, v(k) = 0$, 可得 $E\{\Delta V(k, \xi(k))\} < 0$, 从而可得故障检测系统(6)均方渐近稳定. 引入如下 H_∞ 性能指标:

$$J = E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} [e^T(k)e(k) - \gamma^2 v^T(k)v(k)]\right\}, \quad (8)$$

在零初始条件下, 即 $V(k, \xi(k))|_{k=0} = 0$ 时, $V(k, \xi(k))|_{k=\infty} > 0$, 从而有

$$\begin{aligned} J &\leq E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} [e^T(k)e(k) - \gamma^2 v^T(k)v(k)] + \right. \\ &\quad \left. V(k, \xi(k))|_{k=\infty} - V(k, \xi(k))|_{k=0}\right\} = \\ &E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} [e^T(k)e(k) - \gamma^2 v^T(k)v(k)] + \right. \\ &\quad \left. \Delta V(k, \xi(k))\right\}, \end{aligned}$$

对于任意非零向量 $V(k, \xi(k))$, 可得 $J < 0$, 即

$$E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2\right\} < \gamma^2 E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|v(k)\|^2\right\}. \quad \square$$

注3 定理1给出了事件触发机制下故障检测滤波器存在的充分条件, 这不仅依赖于时变时滞 $\tau(k)$ 的变化范围, 还依赖事件触发的相关参数, 以及用 Bernoulli 描述的数据丢包和分布时滞的影响. 本文将离散时变时滞的下界取为 τ_m , 相比时滞下界为0情况下, 此时结果的保守性更低^[14], 而且更具一般性的是考虑了无穷分布时延对离散系统的影响.

3 H_∞ 故障检测滤波器设计

定理2 对于具有分布时滞的网络化控制系统(1), 给定正标量 γ, ϵ 和 $\delta_0 \in [0 \quad 1]$, 若存在正定对称矩阵 $S > 0, R_1 > 0, R_2 > 0, Q_{11} > 0, Q_{12} > 0, Q_{13} > 0, Q_{22} > 0, Q_{23} > 0, Q_{33} > 0, Z_{11} > 0, Z_{12} > 0, Z_{13} > 0, Z_{22} > 0, Z_{23} > 0, Z_{33} > 0$ 和滤波器参数矩阵 A_F, B_F, C_F 和 D_F , 以及事件触发权值矩阵 W 满足

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Xi}_{11} & 0 & \tilde{\Xi}_{13} & \tilde{\Xi}_{14} \\ * & \tilde{\Xi}_{22} & \tilde{\Xi}_{23} & \tilde{\Xi}_{24} \\ * & * & \tilde{\Xi}_{33} & 0 \\ * & * & * & \tilde{\Xi}_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

则故障检测系统(6)均方渐近稳定且满足 H_∞ 性能指标 γ , 故障检测滤波器的参数矩阵为

$$A_f = X_1^{-1} A_F S^{-1} Y^{-T}, B_f = X_1^{-1} B_F,$$

$$C_f = C_F S^{-1} Y^{-T}, D_f = D_F.$$

其中矩阵 X_1 和 Y 满足

$$X_1 Y = I - R_1 S^{-1},$$

$$\tilde{\Xi}_{11} =$$

$$\begin{bmatrix} \kappa_{11} & -S + \tau Q_{12} + \bar{\lambda} Z_{12} & \tau Q_{13} + \bar{\lambda} Z_{13} \\ * & -R + \tau Q_{22} + \bar{\lambda} Z_{22} & \tau Q_{23} + \bar{\lambda} Z_{23} \\ * & * & \kappa_{33} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{13} =$$

$$\begin{bmatrix} A_0^T S & \kappa_{19} & \delta_0 C_0^T R_2 & 0 & \delta_0 C_0^T B_F^T \\ A_0^T S & \kappa_{29} & \delta_0 C_0^T R_2 & 0 & \delta_0 C_0^T B_F^T \\ 0 & (1 - \delta_0) B_F^T & (1 - \delta_0) R_2 & 0 & -\delta_0 B_F^T \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{14} =$$

$$\begin{bmatrix} \delta_0 C_0^T R_2 & \kappa_{114} & \delta_0 C_0^T D_F^T & \sqrt{\epsilon} C_0^T W \\ \delta_0 C_0^T R_2 & \kappa_{214} & \delta_0 C_0^T D_F^T & \sqrt{\epsilon} C_0^T W \\ -\delta_0 R_2 & (1 - \delta_0) D_F^T & -\delta_0 D_F^T & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{22} = \text{diag}\{-Q \quad -1/\bar{\lambda} Z \quad -\gamma^2 I \quad -W\},$$

$$\tilde{\Xi}_{23} = \begin{bmatrix} A_{d0}^T S & A_{d0}^T R_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_{h0}^T S & A_{h0}^T R_1 & 0 & 0 & 0 \\ B_0^T S & \kappa_{69} & \delta_0 D_0^T R_2 & 0 & \delta_0 D_0^T B_F^T \\ 0 & \delta_0 B_F^T & \delta_0 R_2 & 0 & \delta_0 B_F^T \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \delta_0 D_0^T R_2 & \kappa_{614} & \delta_0 D_0^T D_F^T & \sqrt{\epsilon} D_0^T W \\ \delta_0 R_2 & \delta_0 D_F^T & \delta_0 D_F^T & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{33} = \begin{bmatrix} -S & -S & 0 & 0 & 0 \\ * & -R_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -R_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & -S & -S \\ * & * & * & * & -R_1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\Xi}_{44} = \text{diag}\{-R_2 \quad -I \quad -I \quad -W\},$$

$$\kappa_{11} = -S + \tau Q_{11} + \bar{\lambda} Z_{11},$$

$$\kappa_{29} = A_0^T R_1 + \delta_0 C_0^T B_F,$$

$$\kappa_{19} = A_0^T R_1 + \delta_0 C_0^T B_F + A_F^T,$$

$$\kappa_{114} = \delta_0 C_0^T D_F^T - \bar{C}_w^T + C_F^T,$$

$$\kappa_{214} = \delta_0 C_0^T D_F^T - \bar{C}_w^T,$$

$$\kappa_{33} = -R + \tau Q_{33} + \bar{\lambda} Z_{33},$$

$$\kappa_{69} = B_0^T R_1 + \delta_0 D_0^T B_F^T,$$

$$\kappa_{614} = \delta_0 D_0^T D_F^T - D_w^T.$$

证明 定义矩阵

$$P = \begin{bmatrix} R_1 & X_1 & 0 \\ X_1^T & X_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} I & I & 0 \\ Y^T S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} S & R_1 & 0 \\ 0 & X_1^T & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix},$$

得 $PT_1 = T_2, X_1 Y^T = I - R_1 S^{-1}$. 令

$$T_1^T Q T_1 = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ * & Q_{22} & Q_{23} \\ * & * & Q_{33} \end{bmatrix},$$

$$T_1^T Z T_1 = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ * & Z_{22} & Z_{23} \\ * & * & Z_{33} \end{bmatrix},$$

利用 $\text{diag}\{T_1, I, I, I, I, T_1, T_1, I, I, T_1\}$ 对不等式 (7) 作全等变换, 并定义

$$A_F = X_1 A_f Y^T S, B_F = X_1 B_f, C_F = C_f Y^T S,$$

$$D_F = D_f, \tau = \tau_M - \tau_m + 1,$$

得到不等式 (9), 从而定理 2 得证. $\square$

推论 1 γ 为优化变量, 事件触发机制下网络化控制系统 H_∞ 故障检测可求解以下凸优化问题:

$$\min \gamma; \text{ s.t. 式(9).}$$

4 数值仿真

本节将通过一个数值例子说明在事件触发机制下的故障检测方案是有效的. 离散网络化控制系统 (1) 的参数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.8 \\ -0.2 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -0.1 \\ 0.3 \end{bmatrix},$$

$$A_d = \begin{bmatrix} -2.8 & 0.2 \\ -0.5 & -2.3 \end{bmatrix}, A_h = \begin{bmatrix} -1.3 & 0.7 \\ -0.3 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} -0.4 & -0.32 \\ -0.9 & 0.6 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.6 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.8 \end{bmatrix},$$

$$A_w = 0.2, B_w = 0.8, C_w = 0.5, D_w = 0.2,$$

$$\tau(k) = 2 + (1 + (-1)^k)/2, \lambda_i = 2^{-(i+3)}, \epsilon = 0.2,$$

$$\tau_m = 2, \tau_M = 3.$$

假设扰动信号 $\omega(k) = 5e^{-0.1k}(\text{rand}[0 \ 1] - 0.5)$,

故障信号为

$$f(k)=\begin{cases}2\sin k, & k=30,31,32,\dots,50;\\0.& \end{cases}$$

在事件触发阈值给定时,为说明数据丢包概率 $\bar{\delta}$ 和数据传输率之间的关系,假设事件触发800次,即发送数据的个数是800个, n 是满足事件触发条件的数据个数, r_e 表示数据传输率,具体关系如表1所示.由表1可看出, $\bar{\delta}$ 越大,满足事件触发条件而释放到网络通道中的传输数据越少,即数据的传输率越小.

表1 事件触发阈值 $\epsilon=0.2$, $\bar{\delta}$ 与 r_e 之间的关系

$\bar{\delta}$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
n	713	555	415	243	78
$r_e/\%$	89.125	69.375	51.875	30.375	9.75

设定网络丢包参数 $\bar{\delta}=0.5$,通过求解凸优化问题,可得到具有 H_∞ 性能最优解 $\gamma=0.3888$,故障检测滤波器参数矩阵和事件触发权值矩阵分别为

$$A_f=\begin{bmatrix}-9.1395 & 1.7129 & -1.8697 \\ 18.5646 & -3.2102 & 4.0615 \\ 10.6766 & -2.1972 & 2.5186\end{bmatrix},$$

$$C_f=[-53.5021 \quad 15.4524 \quad -10.1373],$$

$$B_f=\begin{bmatrix}0.1302 & -0.0818 \\ 0.3874 & -0.2652 \\ 0.3352 & -0.2081\end{bmatrix},$$

$$D_f=[-1.2453 \quad 2.4906],$$

$$W=\begin{bmatrix}12.4079 & -9.3206 \\ -9.3206 & 8.3085\end{bmatrix}.$$

图1是事件触发机制下网络化控制系统的残差输出曲线,图2是系统有无故障情况下残差评价函数和阈值曲线.由图2可知,系统阈值 $J_{th}=0.2982$,系统发生故障时,此时残差函数和残差评价函数均有明显的变化, $J(30)=0.3047>J_{th}$,故障检测滤波器可准确地检测出故障发生时刻 $k=30$,从而说明设计的故障检测滤波器是有效的.图3是事件触发机制下数据传输时刻和传输间隔,模拟时间为80,事件触发机制下有38个时刻的数据满足事件触发条件传输到故障检测滤波器,而时间触发方案中,需要80个时刻的测量数据均通过网络传输到故障检测滤波器中,因此事件触发机制大大减轻了网络间的通信压力,节约了网络资源,同时也保证故障检测系统具有较好的性能.

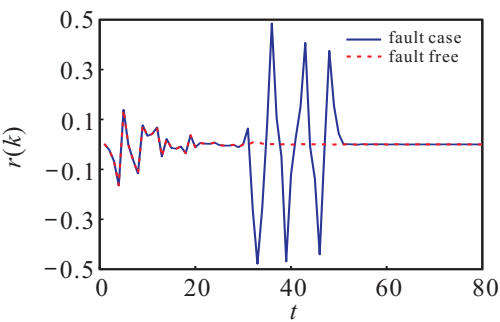


图1 残差函数

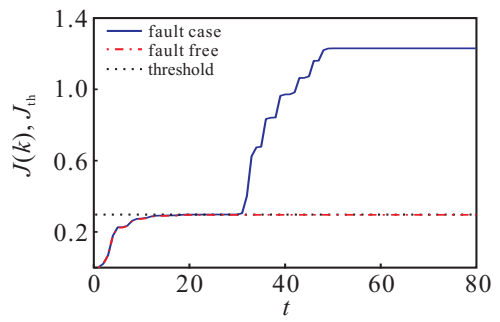


图2 残差评价函数和阈值

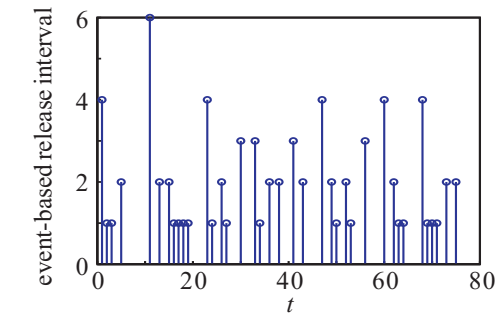


图3 事件触发时刻和间隔

5 结论

针对具有分布时滞和数据丢包的网络化控制系统,推证出事件触发机制下故障检测系统均方渐近稳定并满足 H_∞ 性能的充分条件,得到了滤波器和事件触发权值矩阵的参数化方法,为节约有限的网络资源采用一种事件触发方案,并设计了一个加权故障模型,目的是提高系统对故障信号的敏感性.仿真结果表明,本文方法不仅实现了期望的故障检测目标,而且借助于事件触发机制节约了大量的网络资源.

参考文献(References)

[1] Li Y, Zhang Q, Zhou X, et al. Basis-dependent and delay-dependent results on robust L_1 filtering for networked control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2016, 353(14): 3368-3385.

[2] Li M, Chen Y. Robust tracking control of networked control systems with communication constraints and external disturbance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4037-4047.

- [3] Li Y H, Zhang Q, Luo X L. Robust L_1 dynamic output feedback control for a class of networked control systems based on T-S fuzzy model[J]. Neurocomputing, 2016, 197: 86-94.
- [4] Ugrinovskii V. Distributed robust estimation over randomly switching networks using H_∞ consensus[J]. Automatica, 2013, 49(1): 160-168.
- [5] Wang X F, Lemmon M D. Event-triggering in distributed networked control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(3): 586-601.
- [6] Dong H L, Wang Z O, Alsaadi F E, et al. Event-triggered robust distributed state estimation for sensor networks with state-dependent noises[J]. International Journal of General Systems, 2015, 44(2): 254-266.
- [7] Ning Z, Yu J, Wang T. Simultaneous fault detection and control for uncertain discrete time stochastic systems with limited communication[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(17): 7794-7811.
- [8] Liu Y, Wang Z, He X, et al. Event-triggered filtering and fault estimation for nonlinear systems with stochastic sensor saturations[J]. International Journal of Control, 2017, 90(5): 1052-1062.
- [9] Yan H, Yan S, Zhang H, et al. L_2 control design of event-triggered networked control systems with quantizations[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(1): 332-345.
- [10] Su X J, Shi P, Wu L G, et al. Fault detection filtering for nonlinear switched stochastic systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(5): 1310-1315.
- [11] Long Y, Yang G H. Fault detection in finite frequency domain for networked control systems with missing measurements[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350(9): 2605-2626.
- [12] Hajshirmohamadi S, Davoodi M, Meskin N, et al. Event-triggered fault detection and isolation for discrete-time linear systems[J]. Iet Control Theory and Applications, 2016, 10(5): 526-533.
- [13] Shi P, Luan X L, Liu F. H_∞ filtering for discrete-time systems with stochastic incomplete measurement and mixed delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2732-2739.
- [14] Gao H J, Chen T W. Network-based H_∞ output tracking control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(3): 655-667.

作者简介

李艳辉(1970—), 女, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、滤波、智能控制等研究, E-mail: Liyanhui@nepu.edu.cn;

陶莹莹(1992—), 女, 硕士, 从事网络化控制系统的滤波、故障检测的研究, E-mail: Yying_tao@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

脉冲神经网络研究进展综述	胡一凡, 等
气动人工肌肉驱动的机器人控制方法研究现状概述	梁定坤, 等
概率犹豫模糊决策理论与方法综述	徐泽水, 等
领域专业知识富关联关系提取方法	李 青, 等
改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用	韩太林, 等
MADDPG算法经验优先抽取机制	何 明, 等
Actor-Critic框架下一种基于改进DDPG的多智能体强化学习算法	陈 亮, 等
小波包变换自适应振动控制方法	高伟鹏, 等
基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究	李文宇, 等
基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制	季 政, 等
基于解空间反向跳跃和信息交互强化的新型混合蛙跳算法	申晓宁, 等
基于KPCA和G-G聚类的多元时间序列模糊分段	王 玲, 等