

欺骗性攻击下基于动态事件触发的网络控制系统的混合 H_∞ 和无源故障检测

花雪芬, 王为群

南京理工大学数学与统计学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月10日; 发布日期: 2024年4月18日

摘要

本文基于动态事件触发研究了受欺骗性攻击的非线性网络控制系统的故障检测问题。利用一个服从伯努利分布的随机变量来描述欺骗性攻击, 设计了动态事件触发机制以节省网络资源, 构造了相应的Lyapunov函数, 得到了滤波误差系统均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性能的充分条件。故障检测滤波器参数的设计以线性矩阵不等式的形式给出。最后通过一个数值算例, 比较了动态事件触发方案与静态事件触发方案, 说明了所提方法的有效性。

关键词

网络控制系统, 动态事件触发机制, 欺骗性攻击, 故障检测, 混合 H_∞ 和无源性

Mixed H_∞ and Passive Fault Detection for Networked Control Systems Based on Dynamic Event-Triggered Mechanism under Deception Attacks

Xuefen Hua, Weiqun Wang

School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Apr. 10th, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

This paper investigates the problem of fault detection in nonlinear networked control systems sub-

文章引用: 花雪芬, 王为群. 欺骗性攻击下基于动态事件触发的网络控制系统的混合 H_∞ 和无源故障检测[J]. 动力系统与控制, 2024, 13(2): 81-90. DOI: 10.12677/dsc.2024.132008

ject to deception attacks based on dynamic event-triggered mechanism. A random variable obeying the Bernoulli distribution is used to describe the deception attack. In order to save network resources, a dynamic event-triggered mechanism is designed, the corresponding Lyapunov function is constructed and sufficient conditions are obtained for the filtering error system to be mean-square asymptotically stable and to satisfy the mixed H_∞ and passive property. The design parameters of the fault detection filter are given in the form of linear matrix inequalities. Finally, the effectiveness of the proposed method is illustrated by comparing the dynamic event-triggered scheme with the static event-triggered scheme through a numerical arithmetic example.

Keywords

Networked Control Systems, Dynamic Event-Triggered Mechanism, Deception Attacks, Fault Detection, Mixed H_∞ and Passive Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

网络控制系统由于其成本低、易于安装、易于维护等优点,在过去的几十年里受到了广泛的关注,目前在多智能体系统、智能电网、无人机、工业自动化等工业有许多应用[1] [2] [3] [4]。在工程系统中,外部干扰和系统故障也是不可避免的问题,对网络控制系统的故障检测也受到许多关注。文献[5]研究了一类双通道随机丢包的时滞系统,给出了在任意转移概率矩阵下 H_∞ 故障检测滤波器的设计方法。文献[6]研究了一类非线性随机切换系统,在异步切换下设计了故障检测滤波器。文献[7]研究了具有信号量化和随机丢包的网络控制系统的故障检测问题,并将相应的故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题。文献[8]采用混合 H_∞ 和无源性能指标,引入了加权故障信号设计加权滤波器,研究了带有丢包的网络控制系统的故障检测问题,但没有考虑事件触发方案。

由于网络的开放性,通信信道不可避免地会受到恶意攻击。欺骗性攻击是一种典型的网络攻击,研究者们也提出了一些有效的方法来对抗欺骗性攻击。文献[9]研究了受欺骗性攻击的网络控制系统的事件触发控制问题,并协同设计了事件触发参数和与模态相关的控制器增益。在文献[10]中,时间触发方案与事件触发方案之间的切换服从伯努利分布,作者解决了受欺骗性攻击的神经网络混合驱动滤波器设计问题。文献[11]研究了欺骗攻击下网络系统的有限时间滤波器设计问题,得到了可行的滤波器参数和事件触发通信参数。文献[12]研究了一类具有多噪声的离散时间随机系统的安全控制问题,以对抗系统受到随机发生的 DoS 攻击和欺骗性攻击。

为了节约网络资源,事件触发机制已被广泛应用于网络控制系统。例如,文献[13]研究了受网络攻击的网络控制系统的分布式事件触发控制问题,每个传感器可以自行决定采样数据是否将被传送到网络。相对于静态事件触发机制,为了进一步减少对有限网络资源的浪费,提出了动态事件触发策略。文献[9]利用相对误差信息和过去释放的信号信息改进了事件触发方案,研究了受欺骗性攻击的网络控制系统的控制问题。文献[14]考虑离散动态事件触发机制,研究了受欺骗攻击的时滞离散网络系统的有限时间故障检测问题。文献[15]对一类受到网络攻击的非线性网络系统,设计了自适应事件触发阈值参数,在有限频域内得到了一种类似观测器的故障检测滤波器。文献[16]研究了一类离散时间网络控制系统的自适应事件触发的故障检测问题,实现了通信网络带宽的有效利用。

基于上述分析, 考虑动态事件触发机制, 研究欺骗性攻击下网络控制系统的混合 H_∞ 和无源故障检测是有实际价值的。本文的主要贡献总结如下: 1) 比较了动态与静态事件触发方案, 设计的动态事件触发方案可以更有效地利用网络资源。2) 获得了滤波误差系统在欺骗性攻击下均方渐近稳定的充分条件, 并设计了混合 H_∞ 和无源性故障检测滤波器, 能够快速检测故障。

2. 问题描述

考虑一类非线性网络控制系统:

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

其中, $x(t) \in R^n$ 是状态向量, $y(t) \in R^m$ 是测量输出, $f(t) \in R^q$ 是待检测故障, $v(t)$ 是满足集合 $L_d = \left\{ v(t) : 0 < \int_0^\infty v^T(t)v(t)dt \leq d \right\}$ 的外源性干扰信号, $g(t, x(t))$ 是一个非线性向量函数且满足:

$$g^T(t, x(t))g(t, x(t)) \leq \epsilon^2 x^T(t)N^T Nx(t), \quad (2)$$

其中, $\epsilon > 0$ 为已知常数, A, B, C, E, F, N 为具有适当维数的已知矩阵。

当 $f(t) \neq 0$ 时, 系统出现故障, 为了检测故障, 设计如下的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f \hat{y}(t), \\ r(t) = C_f x_f(t), \end{cases} \quad (3)$$

其中, $x_f(t) \in R^n$ 为 $x(t)$ 的状态估计, $r(t) \in R^p$ 为残差信号, $\hat{y}(t)$ 表示故障检测滤波器的输入。矩阵 A_f, B_f, C_f 是待确定的具有适当维数的系数矩阵。

为节省更多的网络资源, 采用如下的动态事件触发方案:

$$e^T(t)\Phi e(t) \geq \delta(t)y^T(t_k h)\Phi y(t_k h), \quad (4)$$

其中, $e(t) = y(t) - y(t_k h)$ 测量误差, $t_k h$ 是最新的事件触发时刻, 假设第一个事件发生在时刻 $t_0 = 0$ 。 $\delta(t)$ 是动态事件触发参数, Φ 是一个待设计的正定权重矩阵。一旦满足了事件触发条件, 测量的输出数据 $y(t_k h)$ 将被更新, 如图 1 所示。下一个触发时刻 $t_{k+1} h$ 由以下触发条件决定:

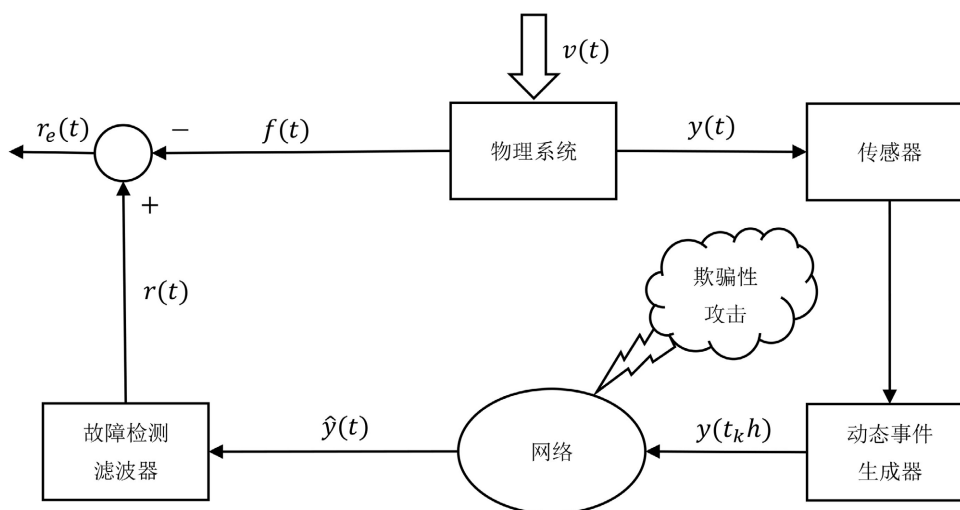


Figure 1. Structure diagram of event-triggered networked control system

图 1. 基于事件触发的网络控制系统结构图

$$t_{k+1}h = t_k h + \inf \{lh | e^T(t) \Phi e(t) \geq \delta(t) y^T(t_k h) \Phi y(t_k h)\}. \quad (5)$$

动态事件触发参数 $\delta(t)$ 是时变的[15], 满足下列表达式:

$$\dot{\delta}(t) = \frac{u}{\delta(t)} \left[\frac{1}{\delta(t)} - \delta_0 \right] e^T(t) \Phi e(t), \quad (6)$$

其中, u, δ_0 是给定的正常数。如果 $u = 0$, 则上述动态事件触发方案将退化为具有固定阈值的静态事件触发方案。

当没有欺骗性攻击时, 根据事件触发条件(5), 滤波器的输入 $\hat{y}(t)$ 为 $y(t_k h)$, 并且保持不变直到下一个新的触发信号到达。用测量误差表示事件触发采样状态 $y(t_k h)$, 即 $y(t_k h) = y(t) - e(t)$ 。

当存在欺骗性攻击时, 攻击者通过在真实信号中注入一定的欺骗信号来破坏数据包。滤波器的真实输入描述如下:

$$\hat{y}(t) = [1 - \alpha(t)] q(y(t)) + \alpha(t) y(t_k h), \quad (7)$$

其中, $q(t)$ 是欺骗信号, $q(t)$ 满足以下约束条件:

$$\|q(t)\|_2 \leq \|Qy(t)\|_2, \quad (8)$$

$Q > 0$ 是一个常数矩阵, 用于表示欺骗性攻击函数的上界。

$\alpha(t)$ 是一个伯努利分布变量, 满足以下分布:

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\alpha(t) = 1\} = E\{\alpha(t)\} = \alpha_1, \\ \text{Prob}\{\alpha(t) = 0\} = 1 - \alpha_1 = \bar{\alpha}_1, \\ \text{Var}\{\alpha(t)\} = E\{(\alpha(t) - \alpha_1)^2\} = \alpha_1 \bar{\alpha}_1, \end{cases}$$

其中, $\alpha_1 \in [0, 1]$ 是已知常数。当 $\alpha_1 = 0$ 时, 表示真实的输入被欺骗信号 $q(t)$ 所取代。

记 $\xi(t) = [x^T(t), x_f^T(t)]^T$, $\omega(t) = [v^T(t), f^T(t)]^T$, $r_e(t) = r(t) - f(t)$ 。由方程(1)和(3), 可以得到下列滤波误差系统:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = \bar{A}\xi(t) + \alpha(t) A_1 \xi(t) + \bar{B}\omega(t) - \alpha(t) \bar{E}e(t) + (1 - \alpha(t)) \bar{E}q(t) + \bar{F}g(t, H\xi(t)), \\ r_e(t) = \bar{C}\xi(t) - \bar{D}\omega(t), \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_f \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_f C & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B & E \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix}, \bar{F} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{C} = [0 \quad C_f], \bar{D} = [0 \quad I], H = [I \quad 0].$$

根据残差信号, 设计如下的残差估计函数:

$$F(t) = \left(\frac{1}{t} \int_0^t r^T(s) r(s) ds \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

残差估计阈值 F_{th} 为:

$$F_{th} = \sup_{v(t) \in L_d, f(t)=0} F(t). \quad (11)$$

故障检测判据是:

$$\begin{cases} F(t) > F_{th} \Rightarrow \text{报警}, \\ F(t) \leq F_{th} \Rightarrow \text{不报警}. \end{cases} \quad (12)$$

定义 1. [17] 如果对任意初始条件 $\xi(0)$,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \left\{ \|\xi(t)\|^2 \right\} = 0,$$

则称系统(9)在均方意义上是渐近稳定的。

定义 2. [18] 对给定标量 $\alpha > 0$, $\gamma > 0$, $\rho \in [0, 1]$, 如果下列条件满足, 则称系统(9)是均方渐近稳定且满足混和 H_∞ 和无源性能。

- 1) 当 $\omega(t) = 0$, 系统(9)是均方渐近稳定的。
- 2) 当 $\omega(t) \neq 0$, 在零初始条件下有下式成立:

$$E \left\{ \int_0^\infty (-\rho r_e^\top(t) r_e(t) + 2\gamma(1-\rho) r_e^\top(t) \omega(t)) dt \right\} \geq E \left\{ -\gamma^2 \int_0^\infty \omega^\top(t) \omega(t) dt \right\}. \quad (13)$$

当 $\rho = 0$, 式(13)表示无源性能指标; 当 $\rho = 1$, 式(13)表示 H_∞ 性能指标; 当 $\rho \in (0, 1)$, 式(13)表示混合 H_∞ 和无源性能指标。

本文的目标是给出保证系统(9)在所设计的动态事件触发条件下是均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性能的充分条件, 并获得混合 H_∞ 和无源故障检测滤波器(3)的参数, 使得出现故障时系统能快速报警。

3. 主要结果

下面的定理给出了保证滤波误差系统(9)在动态事件触发条件下是均方渐近稳定的且满足混合 H_∞ 和无源性能的充分条件。

3.1. 混合 H_∞ 和无源稳定性分析

定理 1. 给定正数 $\alpha_1, u, \delta_0, \gamma, \rho$, 如果存在适当维数的对称正定矩阵 P, Φ , 使

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & * & * & * & * & * & * & * \\ \alpha_1 (P\bar{E})^\top & -u\delta_0\Phi & * & * & * & * & * & * \\ \Pi_{31} & 0 & \Pi_{33} & * & * & * & * & * \\ (P\bar{F})^\top & 0 & 0 & -I & * & * & * & * \\ \Pi_{51} & 0 & 0 & 0 & -I & * & * & * \\ \sqrt{\rho}\bar{C} & 0 & -\sqrt{\rho}\bar{D} & 0 & 0 & -I & * & * \\ \sqrt{u}\hat{C}\Phi & -\sqrt{u}\Phi & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Phi & * \\ \epsilon\hat{N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= (\bar{A} + \alpha_1 A_1)^\top P + P(\bar{A} + \alpha_1 A_1) + \bar{Q}^\top \bar{Q}, \Pi_{51} = \bar{\alpha}_1 (P\bar{E})^\top, \\ \Pi_{31} &= (P\bar{B})^\top - \gamma(1-\rho)\bar{C}, \Pi_{33} = -\gamma^2 I + 2\gamma(1-\rho)\bar{D}^\top, \\ \hat{C} &= [C \ 0], \hat{N} = [N \ 0], \bar{Q} = Q\hat{C}, \end{aligned}$$

则系统(9)是均方渐近稳定的且满足混合 H_∞ 和无源性能指标。

证明. 取 Lyapunov 函数 $V(t)$,

$$V(t) = \xi^T(t)P\xi(t) + \frac{1}{2}\delta^2(t), \quad (15)$$

对 $V(t)$ 沿着系统(9)的轨迹求导, 可得:

$$\dot{V}(t) = 2\xi^T(t)P\dot{\xi}(t) + \dot{\delta}(t)\delta(t), \quad (16)$$

要保证系统(9)是均方渐近稳定的, 需要证明 $E\{\dot{V}(t)\} < 0$ 成立[19]。要使滤波误差系统满足混合 H_∞ 和无源性能指标, 由定义 2, 需证下式成立:

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}(t) + J(t)\} &\leq 0, \\ J(t) &= \rho r_e^T(t)r_e(t) - 2\gamma(1-\rho)r_e^T(t)\omega(t) - \gamma^2\omega^T(t)\omega(t). \end{aligned} \quad (17)$$

改写非线性项约束(2), 有:

$$\epsilon^2 \xi^T(t) \hat{N}^T \hat{N} \xi(t) - g^T(t, H\xi(t))g(t, H\xi(t)) \geq 0, \quad (18)$$

改写欺骗信号约束(8), 有:

$$\xi^T(t) \bar{Q}^T \bar{Q} \xi(t) - q^T(t)q(t) \geq 0, \quad (19)$$

根据事件触发条件(5), 当 $t \in [t_k h, t_{k+1} h)$, 在下一个事件触发条件满足之前, 有:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t)\delta(t) &= u \left[\frac{1}{\delta(t)} - \delta_0 \right] e^T(t) \Phi e(t) \\ &\leq u y^T(t_k h) \Phi y(t_k h) - u \delta_0 e^T(t) \Phi e(t) \\ &= u [\hat{C}\xi(t) - e(t)]^T \Phi [\hat{C}\xi(t) - e(t)] - u \delta_0 e^T(t) \Phi e(t), \end{aligned} \quad (20)$$

由此, 可得:

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}(t) + J(t)\} &\leq E\{\dot{V}(t) + J(t) + \epsilon^2 \xi^T(t) \hat{N}^T \hat{N} \xi(t) - g^T(t, H\xi(t))g(t, H\xi(t))\} \\ &\leq 2\xi^T(t)P[\bar{A}\xi(t) + \alpha_1 A_1 \xi(t) + \bar{B}\omega(t) - \alpha_1 \bar{E}e(t) + \bar{\alpha}_1 \bar{E}q(t) + \bar{F}g(t, H\xi(t))] \\ &\quad + \rho [\bar{C}\xi(t) - \bar{D}\omega(t)]^T [\bar{C}\xi(t) - \bar{D}\omega(t)] - 2\gamma(1-\rho) [\bar{C}\xi(t) - \bar{D}\omega(t)]^T \omega(t) \\ &\quad - \gamma^2 \omega^T(t)\omega(t) + u [\hat{C}\xi(t) - e(t)]^T \Phi [\hat{C}\xi(t) - e(t)] - u \delta_0 e^T(t) \Phi e(t) \\ &\quad + \epsilon^2 \xi^T(t) \hat{N}^T \hat{N} \xi(t) - g^T(t, H\xi(t))g(t, H\xi(t)) + \xi^T(t) \bar{Q}^T \bar{Q} \xi(t) - q^T(t)q(t) \\ &= \zeta^T(t) \Xi \zeta(t), \end{aligned} \quad (21)$$

其中,

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= [\xi^T(t), e^T(t), \omega^T(t), g^T(t, H\xi(t)), q^T(t)]^T, \\ \Xi &= \begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * & * \\ \Xi_{21} & -u\delta_0\Phi & * & * & * \\ \Xi_{31} & 0 & \Xi_{33} & * & * \\ (P\bar{F})^T & 0 & 0 & -I & * \\ \Pi_{51} & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} + \rho \Xi_1^T \Xi_1 + u \Xi_2^T \Phi \Xi_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Xi_{11} &= (\bar{A} + \alpha_1 A_1)^T P + P(\bar{A} + \alpha_1 A_1) + \epsilon^2 \hat{N}^T \hat{N} + \bar{Q}^T \bar{Q}, \Xi_{21} = \alpha_1 (P\bar{E})^T, \\ \Xi_{31} &= (P\bar{B})^T - \gamma(1-\rho)\bar{C}, \Xi_{33} = -\gamma^2 I + 2\gamma(1-\rho)\bar{G}^T, \Pi_{51} = \bar{\alpha}_1 (P\bar{E})^T, \\ \Xi_1 &= [\bar{C} \ 0 \ -\bar{D} \ 0 \ 0], \Xi_2 = [\hat{C} - I \ 0 \ 0 \ 0].\end{aligned}$$

对条件(14)中 $\Pi < 0$ 应用 Schur 补定理[20], 可以保证 $\Xi < 0$, 则:

$$E\{\dot{V}(t) + J(t)\} \leq \zeta^T(t) \Xi \zeta(t) < 0. \quad (22)$$

当 $\omega(t) = 0$, $J(t) = \rho r_e^T(t) r_e(t) > 0$,

$$E\{\dot{V}(t)\} = E\{J(t) + \dot{V}(t) - J(t)\} < 0. \quad (23)$$

因此, 由李亚普诺夫稳定性理论[19]可知, 系统(9)是均方渐近稳定的。

当 $\omega(t) \neq 0$, 在零初始条件下 $E\{V(0)\} = 0, E\{V(\infty)\} \geq 0$, 则:

$$E\left\{\int_0^\infty J(t) dt\right\} \leq -E\left\{\int_0^\infty \dot{V}(t) dt\right\} \leq 0. \quad (24)$$

因此, 根据定义 2, 系统(9)是均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性能指标的。证明完毕。

3.2. 混合 H_∞ 和无源故障检测滤波器设计

定理 2. 对于给定正数 $\alpha_1, u, \delta_0, \gamma, \rho$, 如果存在适当维数的对称正定矩阵 X, Y, Φ 和矩阵 A_f, B_f, C_f , 使得下列矩阵不等式成立:

$$Y - X < 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & \alpha_1 B_f & -u\delta_0 \Phi & * & * & * & * & * & * & * \\ \Pi_{41} & B^T X & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * & * \\ \Pi_{51} & E^T X & 0 & \Pi_{54} & \Pi_{55} & * & * & * & * & * \\ F^T Y & F^T X & 0 & 0 & 0 & -I & * & * & * & * \\ 0 & \bar{\alpha}_1 B_f & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & * & * & * \\ \Pi_{81} & 0 & 0 & -\sqrt{\rho} \bar{D} & 0 & 0 & 0 & -I & * & * \\ \sqrt{u} C \Phi & \sqrt{u} C \Phi & -\sqrt{u} \Phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Phi & * \\ \epsilon N & \epsilon N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (26)$$

其中,

$$\begin{aligned}\Pi_{11} &= YA + A^T Y + \bar{Q}^T \bar{Q}, \Pi_{21} = XA + A^T Y + \alpha_1 B_f C + A_f + \bar{Q}^T \bar{Q}, \Pi_{41} = B^T Y - \gamma(1-\rho)C_f, \\ \Pi_{22} &= XA + A^T X + \alpha_1 B_f C + \alpha_1 C^T B_f^T + \bar{Q}^T \bar{Q}, \Pi_{51} = E^T Y - \gamma(1-\rho)C_f, \Pi_{54} = \gamma(1-\rho)\bar{D}, \\ \Pi_{55} &= 2\gamma(1-\rho)\bar{D} - \gamma^2 I, \Pi_{81} = \sqrt{\rho} C_f, \bar{Q} = QC,\end{aligned}$$

则称系统(9)是均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性能指标的, 相应滤波器(3)的参数为:

$$A_f = (Y - X)^{-1} A_f, B_f = (Y - X)^{-1} B_f, C_f = C_f.$$

证明. 将定理 1 中 P 分块:

$$P = \begin{bmatrix} X_1 & * \\ X_2 & X_3 \end{bmatrix}, P^{-1} = \begin{bmatrix} Y_1 & * \\ Y_2 & Y_3 \end{bmatrix}.$$

定义

$$M_1 = \begin{bmatrix} Y_1 & I \\ Y_2 & 0 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} I & X_1 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix}, J = \text{diag} \{M_1^T, I, I, I, I, I, I, I, I\}.$$

则有 $PM_1 = M_2$, 矩阵 $P > 0$ 成立当且仅当 $M_1^T PM_1 > 0$, 即 $X_1 - Y_1^{-1} > 0$ 。根据 $PP^{-1} = I$, 有 $X_1 Y_1 + X_2^T Y_2 = I$, 故 X_2, Y_2 为可逆矩阵。对条件(14)中每项左右两端分别乘以 J 和 J^T , 之后再每项左右两边同乘以 $\text{diag} \{Y_1^{-1}, I, I, I, I, I, I, I, I\}$, 令:

$$Y = Y_1^{-1}, X = X_1, A_f = X_2^T A_f Y_2 Y_1^{-1}, B_f = X_2^T B_f, C_f = C_f Y_2 Y_1^{-1},$$

可得式(26)成立。根据定理 1, 条件(25)和(26)能保证系统(9)是均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性能指标的, 证明完毕。

4. 数值仿真

本节给出一个例子来验证所设计的事件触发方案和故障检测滤波器的有效性。

例: 系统(1)的系数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [-0.1 \quad 1], F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

取初始状态为 $x(0) = [-0.64, 0.51]^T$, 设外部扰动 $v(t) = 0.2e^{-2t}$, 非线性项 $g^T(t, x(t)) = [0.2\sin(t), 0]$, 令 $\gamma = 2.267, \rho = 0.5, \delta_0 = 0.6$, 故障信号为:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 3.5 \leq t \leq 5.5, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

利用 MATLAB 求解定理 2 中条件(25)和(26), 得到事件触发参数矩阵为 $\Phi = 0.4489$, 相应混合 H_∞ 和无源故障检测滤波器参数如下:

$$A_f = \begin{bmatrix} -3.1037 & -1.6094 \\ 5.1596 & -1.4416 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0.4416 \\ -0.2280 \end{bmatrix}, C_f = [-0.4588 \quad 0.1302].$$

图 2(a)为残差信号, 可以看出在有故障和无故障情况下残差信号最终均为零, 说明设计的故障检测滤波器可以很好地估计故障。图 2(b)为事件触发时刻, 图 3(b)为 $E\{\xi^T(t)R\xi(t)\}$ 的运动轨迹, 虽然系统在 3.5 s 到 5.5 s 受到故障影响, 但从轨迹图可以看出系统(9)是渐近稳定的。图 3(a)为有故障和无故障情况下的残差估计函数 $F(t)$ 与估计阈值 F_{th} , 当有故障发生时, 残差估计函数 $F(t)$ 在 $t = 3.6$ s 会超过估计阈值, 系统会发生报警, 说明设计的滤波器性能良好, 可及时检测到故障。

对系统(9), 当 $u = 0$ 时, 式(5)即为静态事件触发方案, 动态与静态事件触发参数 δ 与事件触发次数之间的关系如表 1 所示。事件触发参数 δ 越大, 事件触发次数越少, 传输的数据越少。因此, 与静态事件触发方案相比, 动态事件触发方案(5)可以在保持系统性能的同时, 减少信号的传输数量, 节约了网络资源。

Table 1. Times of static and dynamic event triggers under different δ

表 1. 不同 δ 下静态与动态事件触发次数

δ	静态事件触发	动态事件触发
$\delta = 0.1$	68	36
$\delta = 0.3$	47	34
$\delta = 0.5$	39	30

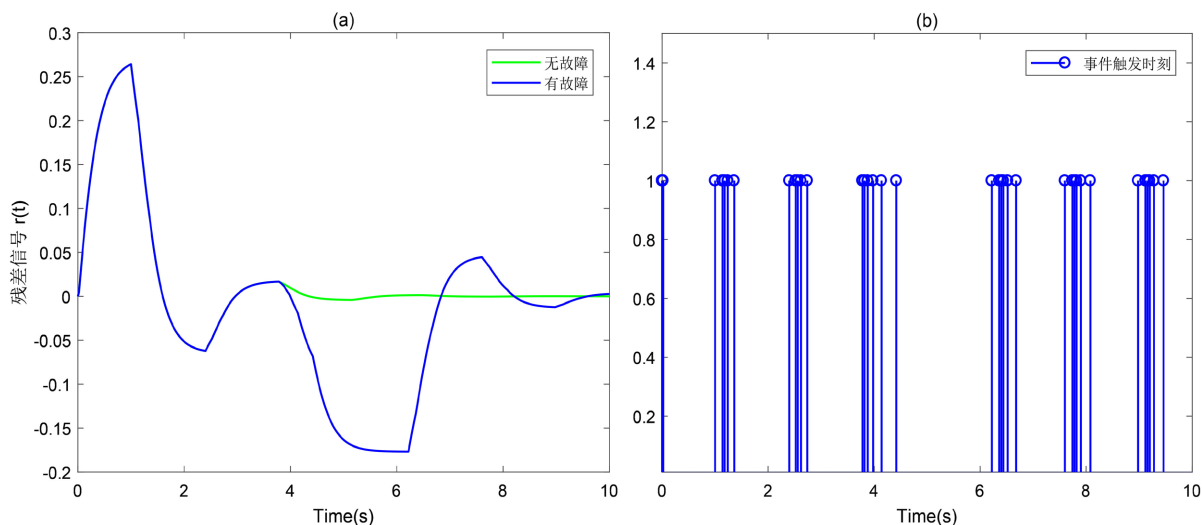


Figure 2. Residual signal and event-trigger instant

图 2. 残差信号和事件触发时刻

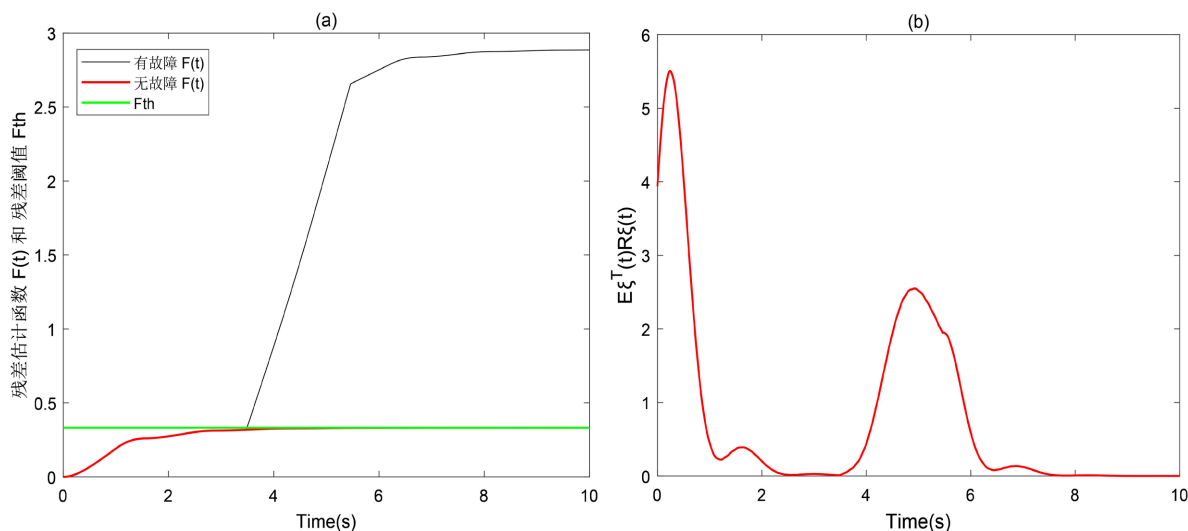


Figure 3. Trajectory of residual estimation function between residual threshold and $E\{\xi^T(t)R\xi(t)\}$

图 3. 残差估计函数与阈值、 $E\{\xi^T(t)R\xi(t)\}$ 的轨迹

5. 结论

本文研究了欺骗性攻击下的非线性网络控制系统的故障检测问题。利用伯努利分布的变量描述欺骗攻击, 采用动态事件触发条件, 构造了含动态事件触发参数的 Lyapunov 函数, 给出了保证滤波误差系统均方渐近稳定且满足混合 H_∞ 和无源性的充分条件, 设计了故障检测滤波器和事件触发参数。本文所设计的故障检测滤波器性能好, 能及时检测到故障; 与常用的静态事件触发条件比较, 本文所设计的动态触发条件在保持系统性能的同时, 减少了事件触发次数, 节约了宝贵的网络资源。

致谢

在此对王为群教授对本篇论文提供的指导和帮助表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Qiu, J., Gao, H. and Ding, S. (2015) Recent Advances on Fuzzy-Model-Based Nonlinear Networked Control Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63**, 1207-1217. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2504351>
- [2] Shaukat, N., Khan, B., Ali, S., et al. (2018) A Survey on Electric Vehicle Transportation within Smart Grid System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 1329-1349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.092>
- [3] Lee, T. and Jiang, Z. (2008) Uniform Asymptotic Stability of Nonlinear Switched Systems with an Application to Mobile Robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **53**, 1235-1252. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923688>
- [4] Shen, M., Nguang, S., Ahn, C. and Wang, Q. (2019) Robust H_2 Control of Linear Systems with Mismatched Quantization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **64**, 1702-1709. <https://doi.org/10.1109/TAC.2018.2856899>
- [5] Zhou, J. and Zhang, D. (2019) H-Infinity Fault Detection for Delta Operator Systems with Random Two-Channels Packet Losses and Limited Communication. *IEEE Access*, **7**, 94448-94459. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928306>
- [6] 李天瑞. 基于事件触发的网络切换系统稳定性分析与 H_∞ 控制[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- [7] Li, F., Shi, P., Wang, X. and Agarwal, R. (2015) Fault Detection for Networked Control Systems with Quantization and Markovian Packet Dropouts. *Signal Processing*, **111**, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.12.014>
- [8] Feng, Y., An, W., Wen, J., et al. (2017) Mixed H_∞ and Passive Fault Detection for Networked Control Systems with Randomly Occurring Missing Data. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Dalian, 26-28 July 2017, 7477-7481. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028537>
- [9] Wu, Z., Xiong, J. and Xie, M. (2021) Improved Event-Triggered Control for Networked Control Systems Subject to Deception Attacks. *Journal of the Franklin Institute*, **358**, 2229-2252. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.12.018>
- [10] Liu, J., Xia, J., Tian, E. and Fei, S. (2018) Hybrid-Driven-Based H_∞ Filter Design for Neural Networks Subject to Deception Attacks. *Applied Mathematics and Computation*, **320**, 158-174. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.09.007>
- [11] Wu, J., Peng, C., Zhang, J. and Zhang, B. (2020) Event-Triggered Finite-Time H_∞ Filtering for Networked Systems under Deception Attacks. *Journal of the Franklin Institute*, **357**, 3792-3808. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.002>
- [12] Ding, D., Wang, Z., Wei, G. and Alsaadi, F. (2016) Event-Based Security Control for Discrete-Time Stochastic Systems. *IET Control Theory and Applications*, **10**, 1808-1815. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0135>
- [13] Liu, J., Tian, E., Xie, X. and Lin, H. (2019) Distributed Event-Triggered Control for Networked Control Systems with Stochastic Cyber-Attacks. *Journal of the Franklin Institute*, **356**, 10260-10276. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.01.048>
- [14] Wu, Z., Li, B., Chen, W. and Hu, J. (2023) Event-Triggered Finite-Time Fault Detection for Delayed Networked Systems with Conic-Type Nonlinearity and Deception Attacks. *Journal of the Franklin Institute*, **360**, 1768-1791. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.12.034>
- [15] Zhu, Q., Jiang, S. and Pan, F. (2022) Adaptive Event-Triggered Fault Detection for Nonlinear Networked Systems in Finite Frequency Domain under Stochastic Cyber Attacks. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **36**, 1537-1561. <https://doi.org/10.1002/acs.3409>
- [16] Wang, Y., Lim, C. and Shi, P. (2016) Adaptively Adjusted Event-Triggering Mechanism on Fault Detection for Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **47**, 2299-2311. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2631903>
- [17] Bolzern, P., Colaneri, P. and De Nicolao, G. (2010) Markov Jump Linear Systems with Switching Transition Rates: Mean Square Stability with Dwell-Time. *Automatica*, **46**, 1081-1088. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.03.007>
- [18] Zhang, B., Zheng, W. and Xu, S. (2013) Filtering of Markovian Jump Delay Systems Based on a New Performance Index. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, I. Regular Papers*, **60**, 1250-1263. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2246213>
- [19] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 60-170.
- [20] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 23-220.