

控制与决策

Control and Decision

高速采样下含网络攻击的信息物理系统 H_∞ 故障检测

杜峥, 刘孟凯, 周建勋, 张端金

引用本文:

杜峥,刘孟凯,周建勋,张端金. 高速采样下含网络攻击的信息物理系统 H_∞ 故障检测[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1395–1401.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1781>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

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

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods

控制与决策. 2021, 36(5): 1101–1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

工业信息物理系统安全风险动态表现分析量化评估模型

Quantitative evaluation model for dynamic performance analysis of security risk in industrial cyber physics systems

控制与决策. 2021, 36(8): 1939–1946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1479>

基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467–2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

高速采样下含网络攻击的信息物理系统 H_2/H_∞ 故障检测

杜 峥, 刘孟凯, 周建勋, 张端金[†]

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

摘 要: 研究高速采样情况下, 含有网络攻击的信息物理系统多目标故障检测问题. 考虑系统同时存在时变时延、执行器网络攻击和传感器网络攻击, 基于 Delta 算子对上述系统进行离散化处理, 建立在高速采样的条件下, 故障与攻击并存的离散时间模型. 构造 H_2/H_∞ 故障检测滤波器, 使系统具有对随机扰动的鲁棒性, 且具有对检测信号的高灵敏性. 采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函和线性矩阵不等式的方法, 提出系统具有渐近稳定性以及 H_2/H_∞ 性能的充分条件. 仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 信息物理系统; 攻击; 故障检测; 高速采样; 鲁棒性; 灵敏性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1781

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 杜峥, 刘孟凯, 周建勋, 等. 高速采样下含网络攻击的信息物理系统 H_2/H_∞ 故障检测 [J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1395-1401.

H_2/H_∞ fault detection of cyber-physical systems with cyber attacks under high speed sampling

DU Zheng, LIU Meng-kai, ZHOU Jian-xun, ZHANG Duan-jin[†]

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper studies the problem of multi-target fault detection for cyber-physical systems (CPSs) with cyber attacks under the condition of high speed sampling. The CPSs with time-varying delay, actuator cyber attack and sensor cyber attack is considered, and the system is discretized based on the Delta operator. Then a discrete-time model with fault and attack is established under high speed sampling. The H_2/H_∞ fault detection filter is constructed, which makes the system robust to random disturbances and highly sensitive to the detected signals. The sufficient conditions which can guarantee the asymptotic stability and H_2/H_∞ performance of the system are proposed by using the Lyapunov-Krasovskii functional and linear matrix inequalities (LMIs) approach. Simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: cyber-physical systems; attack; fault detection; high speed sampling; robustness; sensitivity

0 引言

信息物理系统 (cyber-physical systems, CPSs) 作为一个热门领域, 已被应用于众多智能系统中^[1]. 相较于传统物理系统, CPSs 中的网络传输层为信息传递带来了极大的便利. 然而, 由于网络的引入, CPSs 也会遭受许多网络攻击, 可能会造成重大的损失. 诸如 2010 年伊朗遭受的 StuxNet 病毒攻击、2014 年针对欧洲工业制造系统的 Havex 攻击、2015 年乌克兰发生的 BlackEnergy 3 攻击, 不仅给当地造成了巨大的经济财产损失, 也在全球范围产生了恐慌^[2]. 可见, 针对 CPSs 各类攻击的研究是尤为必要的. 文献 [3] 研究了

在 CPSs 遭受拒绝服务 (denial of service, DoS) 攻击下的安全控制设计问题; 文献 [4] 考虑了在虚假数据注入攻击以及干扰攻击的作用下, CPSs 的攻击检测和安全估计问题; 文献 [5] 研究了遭受 DoS 攻击下 CPSs 的全局输出反馈采样数据控制问题. 目前, 在 CPSs 的网络攻击方面已有一些成熟的研究成果.

除了上述来自外部的恶意攻击之外, CPSs 还会存在某些网络传输所固有的缺陷, 诸如出现时延、丢包、通信受限等问题^[6]. 这些内部故障虽然不像外部攻击一样针对特定的位置, 但若置之不顾, 则同样会造成诸多损失. 文献 [7] 考虑了时延和丢包的存在, 提

收稿日期: 2020-12-20; 录用日期: 2021-06-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61471323).

责任编辑: 李忠奎.

[†]通讯作者. E-mail: djzhang@zzu.edu.cn.

出了一个被动的CPSs架构,并利用波变量变换补偿较大的时延;文献[8]考虑了通信受限的问题,研究了一类CPSs的分布式协方差交集融合估计问题.这些由网络本身引起的故障也是不可忽视的,与针对外部攻击的防护同样重要.目前,同时考虑这两种因素进行检测的研究较少,然而在一个实际的物理环境中,外部网络攻击与内部故障是很可能同时出现的,若无视其中之一,则有可能造成不可估量的损失.故本文在同时存在网络攻击与时变时延的情况下,进行CPSs故障检测的研究.

在CPSs中,被控对象的输入和输出通常是模拟信号,而控制器则一般是数字系统,因此需要对模拟信号进行离散化处理.进行离散化的传统方法大多是使用移位算子(即 q 算子)进行采样得到,然而随着采样速率的提高, q 算子的离散化会引起一系列问题.文献[9]将Delta算子应用到高速采样的环境中,不仅能避免 q 算子的弊端,而且使离散化后的系统无限趋近于原始连续时间系统.故本文选择Delta算子对高速采样下的CPSs进行离散化处理.

本文将进行如下工作:1)在高速采样的条件下,考虑内部故障与外部攻击同时出现的情况,使用Delta算子对连续时间系统进行离散化处理,构造高速采样下时变时延与网络攻击同时存在的离散时间系统模型;2)设计基于观测器的 H_2/H_∞ 故障检测滤波器,对系统稳定性以及 H_2/H_∞ 性能进行分析;3)通过仿真分析比较不同情况下性能指标的优劣,并验证系统的检测性能.

注1 \mathbf{R}^n 表示 n 维欧氏空间; I 表示单位矩阵; $A > 0$ 表示矩阵 A 为正定矩阵, A^T 和 $E[A]$ 分别表示 A 的转置和均值; $*$ 表示对称矩阵中与主对角线另一侧元素相对称的元素.

1 问题描述

考虑如下线性连续时间信息物理系统模型:

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

其中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 表示系统的状态向量, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 表示系统的控制输入, $y(t) \in \mathbf{R}^s$ 表示系统的测量输出, A, B, C 分别表示相应维数的矩阵.

Delta算子的定义^[10]如下所示:

$$\delta x(t) = \begin{cases} dx(t)/dt, & h = 0; \\ (x(t+h) - x(t))/h, & h \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中 h 表示系统进行离散化时的采样间隔.

使用Delta算子对系统(1)作离散化处理,可得

$$\begin{cases} \delta x(k) = A_\delta x(k) + B_\delta u(k), \\ y(k) = C_\delta x(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中 $A_\delta, B_\delta, C_\delta$ 表示Delta域内相应参数.

各类网络攻击原理与形式各有不同,但根据其目标位置可分为执行器攻击和传感器攻击.考虑如下执行器网络攻击以及传感器网络攻击:

$$\begin{cases} u_a(k) = u(k) + B_a a_a(k), \\ y_a(k) = y(k) + D_a a_s(k). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $a_a(k)$ 和 $a_s(k)$ 分别表示作用在执行器和传感器的攻击信号, B_a 和 D_a 表示相应维数的矩阵.

考虑系统中的时变时延以及可能遭受的网络攻击,将式(4)代入系统(3)可得如下系统:

$$\begin{cases} \delta x(k) = A_\delta x(k) + A_{s\delta} x(k - d_k) + B_\delta u(k) + B_{d\delta} d(k) + B_{f\delta} f(k) + B_\delta B_a a_a(k), \\ y(k) = C_\delta x(k) + D_{d\delta} d(k) + D_{f\delta} f(k) + D_a a_s(k). \end{cases} \quad (5)$$

其中: $d(k)$ 表示随机扰动; $f(k)$ 表示系统中出现的故障信号; d_k 表示时变时延,其范围为 $d_m \leq d_k \leq d_M$; $A_{s\delta}, B_{d\delta}, B_{f\delta}, D_{d\delta}, D_{f\delta}$ 分别表示相应维数的矩阵.

为了便于后续处理,令 $a(k) = \begin{bmatrix} a_a(k) \\ a_s(k) \end{bmatrix}$, $B_{a\delta} = [B_\delta B_a \ 0]$ 以及 $D_{a\delta} = [0 \ D_a]$,则系统(5)可化简为

$$\begin{cases} \delta x(k) = A_\delta x(k) + A_{s\delta} x(k - d_k) + B_\delta u(k) + B_{d\delta} d(k) + B_{f\delta} f(k) + B_{a\delta} a(k), \\ y(k) = C_\delta x(k) + D_{d\delta} d(k) + D_{f\delta} f(k) + D_{a\delta} a(k). \end{cases} \quad (6)$$

令 K 为控制器增益,取如下状态反馈控制律:

$$u(k) = Kx(k). \quad (7)$$

构造如下基于观测器的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \delta \hat{x}(k) = A_\delta \hat{x}(k) + A_{s\delta} \hat{x}(k - d_k) + B_\delta u(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C_\delta \hat{x}(k), \\ r(k) = y(k) - \hat{y}(k). \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\hat{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 表示状态向量的估计值, $\hat{y}(k) \in \mathbf{R}^s$ 表示下一时刻系统的测量输出, $r(k) \in \mathbf{R}^s$ 表示残差信号, $L \in \mathbf{R}^{n \times l}$ 表示滤波器增益矩阵.

引入状态估计误差 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$,联立式(6)~(8)可得如下系统:

$$\begin{cases} \delta e(k) = \bar{A}e(k) + \bar{B}e(k - d_k) + \bar{E}d(k) + \bar{F}f(k) + \bar{G}a(k), \\ r(k) = C_\delta e(k) + D_{d\delta} d(k) + D_{f\delta} f(k) + D_{a\delta} a(k). \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &= A_\delta + B_\delta K - LC_\delta, \quad \bar{B} = A_{s\delta}, \\ \bar{E} &= B_{d\delta} - LD_{d\delta}, \quad \bar{F} = B_{f\delta} - LD_{f\delta}, \\ \bar{G} &= B_{a\delta} - LD_{a\delta}. \end{aligned}$$

为使系统具有鲁棒性的同时,尽可能具备更好的检测性能,本文使用 H_- 性能表示系统对故障信号的灵敏性^[11],使用 H_∞ 性能表示系统对随机干扰的鲁棒性,使系统在抑制干扰的同时,更容易辨别出待检测信号,达到更快检测到故障的目的。

为提高系统的鲁棒性,取 $\bar{r} = (r(k) + r(k-1))/2$,构造如下残差评价函数以及阈值:

$$\begin{cases} J(\bar{r}) = \|\bar{r}(k)\|_{2,w} = \sqrt{\sum_{k=k_0}^{k_0+w} \bar{r}^T(k)\bar{r}(k)}, \\ J_{th} = \sup_{d \in l_2, f=0} \|\bar{r}(k)\|_{2,w}. \end{cases} \quad (10)$$

其中: k_0 表示起始时间, w 表示评价步长。

由下述情况可判断是否存在故障:

$$\begin{cases} J(\bar{r}) > J_{th} \Rightarrow \text{出现故障}, \\ J(\bar{r}) \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障}. \end{cases} \quad (11)$$

下面分析系统(9)的渐近稳定性以及 H_-/H_∞ 性能,引入如下引理。

引理1^[12] 如果存在对称矩阵 S_{11} 、 S_{22} 以及矩阵 S_{12} ,则以下3种情况是互相等价的:

- 1) $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix} < 0$;
- 2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
- 3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$.

引理2^[13] 若在 Δ 域内存在 Lyapunov 泛函 $V(x(k))$ 满足以下条件,则该系统是渐近稳定的:

- 1) 在初始状态 $x(k) = 0$ 时,有 $V(x(k)) \geq 0$;
- 2) 在非初始状态下,有 $\delta V(x(k)) < 0$.

引理3^[11] 若系统是渐近稳定的,且满足下述条件,则该系统具有 H_-/H_∞ 性能:

- 1) 在零初始状态且存在随机扰动 $d(k) \in l_2[0, +\infty)$ 的情况下,系统满足(其中 γ 和 η 分别表示 H_∞ 和 H_- 性能指标):

$$E \left[\sum_{k=0}^{\infty} \|r(k)\|_2^2 - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|d(k)\|_2^2 \right] < 0; \quad (12)$$

- 2) 在零初始状态下,系统满足

$$E \left[\sum_{k=0}^{\infty} \|r(k)\|_2^2 - \eta^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|f(k)\|_2^2 \right] > 0. \quad (13)$$

2 主要结果

定理1 给定标量 $\gamma > 0$,若存在正定矩阵 P 和 Q ,使得下述线性矩阵不等式成立,则系统(9)是渐近

稳定的,且具有 H_∞ 性能:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{111} & (h\bar{A} + I)^T P \bar{B} & \Omega_{113} \\ * & h\bar{B}^T P \bar{B} - Q/h & h\bar{B}^T P \bar{E} \\ * & * & \Omega_{133} \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega_{111} &= [(h\bar{A} + I)^T P (h\bar{A} + I) + Q - P]/h + \\ &\quad (d_M - d_m)Q + C_\delta^T C_\delta, \\ \Omega_{113} &= (h\bar{A} + I)^T P \bar{E} + C_\delta^T D_{d\delta}, \\ \Omega_{133} &= h\bar{E}^T P \bar{E} + D_{d\delta}^T D_{d\delta} - \gamma^2 I. \end{aligned}$$

证明 选取如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$\begin{cases} V(e(k)) = V_1(e(k)) + V_2(e(k)) + V_3(e(k)), \\ V_1(e(k)) = e^T(k) P e(k), \\ V_2(e(k)) = \sum_{i=1}^{d_k} e^T(k-i) Q e(k-i), \\ V_3(e(k)) = h \sum_{i=d_m+1}^{d_M} \sum_{j=1}^i e^T(k-j) Q e(k-j), \end{cases}$$

其中 P 和 Q 均为正定矩阵。

首先,考虑 $d(k)$ 、 $f(k)$ 和 $a(k)$ 均为零的情况,对上述 Lyapunov-Krasovskii 泛函作如下变换:

$$\begin{aligned} \delta V_1(e(k)) &= E[V_1(e(k+1)) - V_1(e(k))]/h = \\ &\quad e^T(k)(h\bar{A} + I)^T P (h\bar{A} + I)e(k)/h + \\ &\quad e^T(k)(h\bar{A} + I)^T P \bar{B} e(k-1) + e^T(k-1) \cdot \\ &\quad \bar{B}^T P (h\bar{A} + I)e(k) + e^T(k-1)h\bar{B}^T P \cdot \\ &\quad \bar{B} e(k-1) - e^T(k) P e(k)/h, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta V_2(e(k)) &= E[V_2(e(k+1)) - V_2(e(k))]/h \leq \\ &\quad [e^T(k) Q e(k) - e^T(k-d_k) Q e(k-d_k)]/h + \\ &\quad \sum_{i=d_m+1}^{d_M} e^T(k-i) Q e(k-i), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta V_3(e(k)) &= E[V_3(e(k+1)) - V_3(e(k))]/h = \\ &\quad (d_M - d_m)e^T(k) Q e(k) - \\ &\quad \sum_{i=d_m+1}^{d_M} e^T(k-i) Q e(k-i), \end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned} \delta V(e(k)) &= \\ \delta V_1(e(k)) + \delta V_2(e(k)) + \delta V_3(e(k)) &\leq \\ [e^T(k) \quad e^T(k-d_k)] \Gamma_1 \begin{bmatrix} e(k) \\ e(k-d_k) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

其中

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} \kappa_1 & (h\bar{A} + I)^T P \bar{B} \\ * & h\bar{B}^T P \bar{B} - Q/h \end{bmatrix},$$

$$\kappa_1 = [(h\bar{A} + I)^T P(h\bar{A} + I) + Q - P]/h + (d_M - d_m)Q.$$

根据引理1和不等式(14)可得 $\Gamma_1 < 0$ 等价于 $\delta V(e(k)) < 0$. 由引理2可知,该系统是渐近稳定的.

接下来,考虑仅有 $d(k) \neq 0$ 的情况,令

$$\xi_1^T = [e^T(k) \ e^T(k - d_k) \ d^T(k)].$$

此时存在 $\delta V(e(k)) = \xi_1^T \Gamma_2 \xi_1$, 其中

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} \kappa_1 & (h\bar{A} + I)^T P\bar{B} & (h\bar{A} + I)^T P\bar{E} \\ * & h\bar{B}^T P\bar{B} - Q/h & h\bar{B}^T P\bar{E} \\ * & * & h\bar{E}^T P\bar{E} \end{bmatrix}.$$

为分析系统(9)的 H_∞ 性能,取

$$J_1 = E \left[\sum_{k=0}^{\infty} \|r(k)\|_2^2 - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|d(k)\|_2^2 \right] = E \sum_{k=0}^{\infty} [r^T(k)r(k) - \gamma^2 d^T(k)d(k)].$$

当 $d(k) \neq 0, k = 0$ 时,有 $V(e(0)) = 0$, 而当 k 趋近于 ∞ 时,有 $V(e(k)) > 0$. 故上式可作如下变换:

$$J_1 \leq E \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} [r^T(k)r(k) - \gamma^2 d^T(k)d(k)] + \delta V(\xi(k)) \right\} = \xi_1^T \Theta_1 \xi_1,$$

其中

$$\Theta_1 = \begin{bmatrix} \Omega_{111} & (h\bar{A} + I)^T P\bar{B} & \Omega_{113} \\ * & h\bar{B}^T P\bar{B} - Q/h & h\bar{B}^T P\bar{E} \\ * & * & \Omega_{133} \end{bmatrix}.$$

根据式(14)可得 $\Theta_1 < 0$. 由引理3可知,系统(9)是渐近稳定的,且满足 H_∞ 性能. \square

定理2 对于标量 $\eta > 0$, 若存在正定矩阵 X 和 Y , 使得以下LMI成立, 则系统(9)具有 H_- 性能:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{211} & (h\bar{A} + I)^T X\bar{B} & \Omega_{213} \\ * & h\bar{B}^T X\bar{B} - Y/h & h\bar{B}^T X\bar{F} \\ * & * & \Omega_{233} \end{bmatrix} < 0. \quad (15)$$

其中

$$\Omega_{211} = [(h\bar{A} + I)^T X(h\bar{A} + I) + Y - X]/h + (d_M - d_m)Y - C_\delta^T C_\delta,$$

$$\Omega_{213} = (h\bar{A} + I)^T X\bar{F} - C_\delta^T D_{f\delta},$$

$$\Omega_{233} = h\bar{F}^T X\bar{F} - D_{f\delta}^T D_{f\delta} + \eta^2 I.$$

证明 考虑如下Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$\hat{V}(e(k)) = e^T(k)X e(k) + \sum_{i=1}^{d_k} e^T(k-i)Y e(k-i) + h \sum_{i=d_m+1}^{d_M} \sum_{j=1}^i e^T(k-j)Y e(k-j),$$

其中 X 和 Y 均为正定矩阵.

由定理1可知,该系统是渐近稳定的,故此处只需证明其 H_- 性能即可. 为提高系统对故障的灵敏性,考虑仅存在 $f(k) \neq 0$ 的情况,则有

$$\delta \hat{V}(e(k)) = \xi_2^T \Gamma_3 \xi_2.$$

其中

$$\xi_2^T = [e^T(k) \ e^T(k - d_k) \ f^T(k)],$$

$$\Gamma_3 = \begin{bmatrix} \kappa_2 & (h\bar{A} + I)^T X\bar{B} & (h\bar{A} + I)^T X\bar{F} \\ * & h\bar{B}^T X\bar{B} - Y/h & h\bar{B}^T X\bar{F} \\ * & * & h\bar{F}^T X\bar{F} \end{bmatrix},$$

$$\kappa_2 = [(h\bar{A} + I)^T X(h\bar{A} + I) + Y - X]/h + (d_M - d_m)Y.$$

为了证明 H_- 性能,构造下式:

$$J_2 = E \left[\sum_{k=0}^{\infty} \|r(k)\|_2^2 - \eta^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|f(k)\|_2^2 \right] \geq$$

$$E \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} [r^T(k)r(k) - \eta^2 f^T(k)f(k)] - \delta \hat{V}(e(k)) \right\} = \xi_2^T \Theta_2 \xi_2,$$

$$\Theta_2 = \begin{bmatrix} -\Omega_{211} & -(h\bar{A} + I)^T X\bar{B} & -\Omega_{213} \\ * & -h\bar{B}^T X\bar{B} + Y/h & -h\bar{B}^T X\bar{F} \\ * & * & -\Omega_{233} \end{bmatrix}.$$

由不等式(15)可知 $\Theta_2 > 0$, 即 $J_2 > 0$, 故系统对故障信号具有 H_- 性能. \square

定理3 对于给定的标量 $\gamma > 0$ 和 $\eta > 0$, 若存在正定矩阵 P, Q, X, Y 满足下述线性矩阵不等式组, 则系统(9)是渐近稳定的, 且满足 H_-/H_∞ 性能:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{111} & 0 & 0 & \Phi_{114} & C_\delta^T \\ * & -Q/h & 0 & hA_{s\delta}^T P & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \Phi_{134} & D_{d\delta}^T \\ * & * & * & -hP & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{211} & 0 & -C_\delta^T D_{f\delta} & \Phi_{214} \\ * & -Y/h & 0 & hA_{s\delta}^T X \\ * & * & \Phi_{233} & \Phi_{234} \\ * & * & * & -hX \end{bmatrix} < 0. \quad (17)$$

其中

$$\Phi_{111} = (Q - P)/h + (d_M - d_m)Q,$$

$$\Phi_{114} = hA_\delta^T P + hK^T B_\delta^T P - hC_\delta^T W_1^T + P,$$

$$\Phi_{134} = hB_{d\delta}^T P - hD_{d\delta}^T W_1^T,$$

$$\Phi_{211} = (Y - X)/h + (d_M - d_m)Y - C_\delta^T C_\delta,$$

$$\Phi_{214} = (hA_\delta + hB_\delta K - hLC_\delta + I)^T X,$$

$$\Phi_{233} = \eta^2 I - D_{f\delta}^T D_{f\delta},$$

$$\Phi_{234} = hB_{f\delta}^T X - hD_{f\delta}^T W_2^T.$$

证明 根据引理1, 不等式(14)可以转化为如下的形式:

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} \Phi_{111} & 0 & 0 & (h\bar{A} + I)^T P & C_\delta^T \\ * & -Q/h & 0 & h\bar{B}^T P & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & h\bar{E}^T P & D_{d\delta}^T \\ * & * & * & -hP & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0.$$

同理, 不等式(15)可以等价如下式:

$$\Pi_2 = \begin{bmatrix} \Phi_{211} & 0 & -C_\delta^T D_{f\delta} & (h\bar{A} + I)^T X \\ * & -Y/h & 0 & h\bar{B}^T X \\ * & * & \eta^2 I - D_{f\delta}^T D_{f\delta} & h\bar{F}^T X \\ * & * & * & -hX \end{bmatrix} < 0.$$

将式(9)中的参数代入 Π_1 和 Π_2 , 并令 $W_1 = PL$, $W_2 = XL$, 即可得到式(16)、(17). \square

为了使系统在一定范围内同时具备更好的鲁棒性和更高的灵敏性(即在约束条件(16)、(17)下, 寻找最小的 γ 和最大的 η), 取 $\alpha = \gamma/\eta$, 则式(16)可转化为

$$\begin{bmatrix} \Phi_{111} & 0 & 0 & \Phi_{114} & C_\delta^T \\ * & -Q/h & 0 & \Phi_{124} & 0 \\ * & * & -\alpha^2 \eta^2 I & \Phi_{134} & D_{d\delta}^T \\ * & * & * & -hP & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (18)$$

即可将目标转化为如下凸优化问题: 在约束条件(17)、(18)下, 寻找最小的 α , 从而解出对应的 γ 和 η .

注2 该问题的最优解并不易解出, 若令 $P = X, Q = Y$, 则会增加其保守性. 为了减少保守性, 此处采取迭代法^[11,14]的思想, 具体算法如下所示.

算法1 最优解求取算法.

step 1: 设置最大迭代次数 j 和算法精度 σ .

step 2: 令 $P = X, Q = Y$ 以及 $W = W_1 = W_2$. 根据不等式(16)、(17)得出一组可行解 P_0, Q_0, W_0 , 记 $L = L_0 = W_0 P_0^{-1}$.

step 3: 将 L 作为已知矩阵, 求解式(17)、(18), 得出相应的最优解 P_i, Q_i, X_i, Y_i (其中 i 为迭代次数).

step 4: 将 P_i, Q_i, X_i, Y_i 作为已知常量, 求解不等式组(17)、(18), 得出相应的最优解 L_i, α_i .

step 5: 若 $|\alpha_{i-1} - \alpha_i| < \sigma$ 或 $i = j$, 则算法结束, 令 $\alpha_{opt} = \alpha_i, L_{opt} = L_i$, 并求得相应的 γ_{opt} 和 η_{opt} ; 否则, 令 $L = L_i$, 重复 step 3~ step 5.

3 仿真结果

首先分析离散化方法和各参数对系统性能的影响, 然后对系统的检测性能进行比较分析.

3.1 离散化方法对系统离散化的影响

考虑如下连续时间系统模型:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) &= [1 \ 0]x(t). \end{aligned} \quad (19)$$

为了比较不同离散化方法对系统的影响, 此处分别使用 q 算子和 Delta 算子, 并选取采样间隔 h 分别为 1 s 和 0.1 s 的情况对系统进行离散化处理, 所得系统模型的阶跃响应如图1所示.

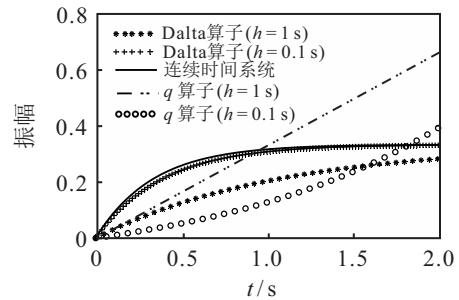


图1 不同离散化方法的阶跃响应

从图1可以看出, 随着采样间隔的减小, q 算子离散时间模型与原始连续系统模型会逐渐产生很大的偏离, 而使用 Delta 算子离散化后的系统则会逐渐趋近于原始连续系统, 且随着 h 的减小, 越来越接近于原始系统. 因此, 在高速采样的条件下, 选择 Delta 算子作为离散化工具更加合适.

3.2 时延对系统鲁棒性的影响

在此分析时变时延对系统鲁棒性的影响. 令 H_- 性能指标 η 为一常数(即 $\eta = 2$), 选取3种不同的时延, 设置系统(9)的参数如下所示:

$$\begin{aligned} A_\delta &= \begin{bmatrix} -6.101 & -1.921 \\ -1.041 & -4.397 \end{bmatrix}, \quad A_{s\delta} = \begin{bmatrix} 6.964 & 4.481 \\ 9.287 & 4.975 \end{bmatrix}, \\ B_\delta &= \begin{bmatrix} -1.974 \\ -3.145 \end{bmatrix}, \quad B_{d\delta} = \begin{bmatrix} 1.497 \\ -1.219 \end{bmatrix}, \quad B_{a\delta} = \begin{bmatrix} 1.501 & 0 \\ 4.521 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_{f\delta} &= \begin{bmatrix} 1.431 \\ 3.121 \end{bmatrix}, \quad C_\delta = [-0.567 \ 0.464], \quad D_{d\delta} = 0.241, \\ D_{a\delta} &= [0 \ 5.606], \quad D_{f\delta} = 3.135, \quad K = [2.934 \ 1.945]. \end{aligned}$$

所得系统的性能指标如表1所示.

表1 时延对鲁棒性的影响

d_k	d_M	d_m	H_∞ 性能指标 γ
$1 + (1 + (-1)^k)/2$	2	1	0.248 1594
$2 + \sin(\pi k)$	3	1	0.248 1664
$5/2 + 3 \cos(\pi k)/2$	4	1	0.248 1733

从表1可以看出, 随着时延的不断增大, H_∞ 性能指标 γ 逐渐增大, 可知此时系统鲁棒性逐渐减小, 即系统对随机扰动的抑制能力减弱.

3.3 系统灵敏性与鲁棒性的关系

为了分析系统的灵敏性与鲁棒性之间的关系,取时变时延为 $d_k = 1 + (1 + (-1)^k)/2$,设定不同的灵敏性,其余参数与3.2节相同.观察系统的 H_∞ 性能指标如表2所示.由表2可以看出,随着 η 的增大, γ 也逐渐增大,可知在系统灵敏性增大的同时,会牺牲系统的鲁棒性,灵敏性增大越多,系统的鲁棒性就越小.故不能为了检测效果而不断增大系统对检测信号的灵敏性,需要同时考虑到系统鲁棒性的情况.

表2 系统灵敏性对鲁棒性的影响

H_2 性能指标 η	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
H_∞ 性能指标 γ	0.2825	0.3026	0.3248	0.3499	0.3794

3.4 对故障信号的检测

无人车(unmanned ground vehicle, UGV)系统是一种可能会遭受到攻击的典型CPSs^[15-16],此处主要对其平动过程进行研究,其动力学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -b/M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \end{bmatrix} F_t(t). \quad (20)$$

其中: $r(t)$ 表示无人车的平动位移, $v(t)$ 表示其平动速度, M 表示质量, b 表示摩擦系数, $F_t(t)$ 表示驱动力.

现假定该系统的质量和摩擦系数均为1,则有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} F_t(t),$$

$$y(t) = [0.5 \ 0.5] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}.$$

其中 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 表示平动位移 $r(t)$ 和速度 $v(t)$.该系统与系统(1)结构相同,若同时考虑时变时延和网络攻击,则相应连续时间系统的参数为

$$A_s = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}, B_a = 1,$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \end{bmatrix}, D_d = 0.2, D_a = 1, D_f = 1, K = [2 \ 1].$$

使用Delta算子对其进行离散化处理,采样间隔选取为 $h = 0.0001\text{ s}$.假设扰动 $d(k)$ 为服从正态分布的随机信号,且其幅值不超过0.5.攻击信号选取为

$$a_a(k) = \begin{cases} 0.2|\sin k|, & 100 \leq k \leq 400; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$a_s(k) = \begin{cases} 0.15 \sin k + 0.15, & 100 \leq k \leq 400; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

取时变时延为 $d_k = 1 + (1 + (-1)^k)/2$,故障信号为

$$f(k) = \begin{cases} 0.1, & 100 \leq k \leq 400; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

算法精度为 $\sigma = 10^{-6}$,最大迭代次数为 $j = 30$.

调用Matlab的LMIs工具箱,可得如下参数:

$$L_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} 4.9989 \\ 3.9983 \end{bmatrix}, \alpha_{\text{opt}} = 0.1155,$$

则与 α_{opt} 对应的 H_-/H_∞ 性能指标为 $\eta_{\text{opt}} = 0.4923$ 和 $\gamma_{\text{opt}} = 0.0568$.仿真结果如图2所示.

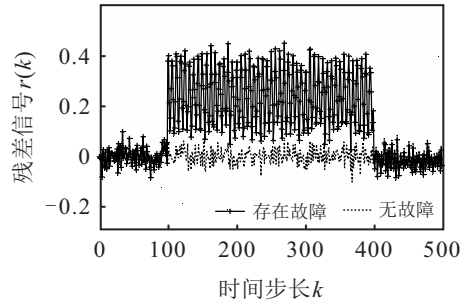


图2 残差信号

图2展示了故障出现前后的残差信号.在没有故障和攻击时,残差信号始终围绕0上下波动,并未出现较大振幅.当故障出现时(即 $k \geq 100$),残差信号产生了较大波动,直到故障消失时($k \geq 400$),残差信号重新回到0附近上下波动.

为了讨论本文方法在系统检测方面的灵敏性,按照文献[17]的方法(仅考虑 H_∞ 性能)以及本文方法分别进行仿真,所得仿真结果如图3和图4所示.

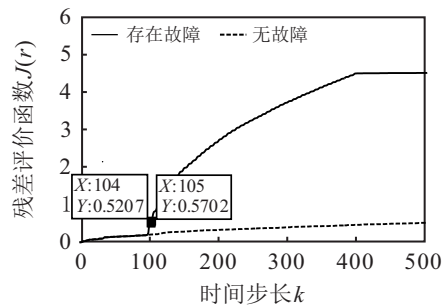


图3 残差评价函数(仅考虑 H_∞ 性能)

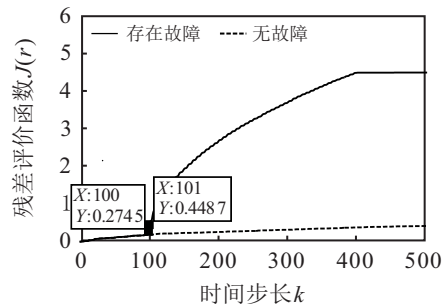


图4 残差评价函数(考虑 H_-/H_∞ 性能)

图3为仅考虑 H_∞ 性能的方法,可知系统阈值为 $J_{\text{th}} = 0.5287$,在异常出现后,有 $J_{105} = 0.5702$,即在异常出现后的第5步才可检测到,并不能很快地检测到故障的出现.图4为本文的方法,可得阈值为 $J_{\text{th}} = 0.4149$.当故障出现之后,残差评价函数在

$k = 101$ 时有 $J(\bar{r}) = 0.4487 > J_{th}$, 即在故障出现之后的第 1 步即可检测出故障的存在. 对比图 3, 本文方法确实提高了系统对故障信号的灵敏性.

注 3 为了统一变量, 使对比分析更具可靠性, 此处仅参考了文献 [17] 中关于 H_∞ 性能的部分, 关于构建模型的约束条件以及具体参数皆与本文相同.

4 结 论

本文考虑了在高速采样的情况下, 含有网络攻击的 CPSs 故障检测问题, 建立了基于 Delta 算子的同时含有时变时延和两种网络攻击的离散时间模型. 为了使系统同时具备对扰动的鲁棒性以及故障信号的灵敏性, 构造了基于观测器的 H_2/H_∞ 滤波器. 通过 Lyapunov-Krasovskii 泛函和 LMIs 的方法分析了系统的稳定性及 H_2/H_∞ 性能. 通过仿真算例比较了不同情况下系统的性能指标, 并验证了所提方法的有效性. 对攻击和故障同时进行检测并加以辨识, 将是下一阶段研究的重点内容.

参考文献 (References)

- [1] Ding D R, Han Q L, Wang Z D, et al. A survey on model-based distributed control and filtering for industrial cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 2483-2499.
- [2] Tian J, Tan R, Guan X H, et al. Moving target defense approach to detecting stuxnet-like attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 291-300.
- [3] 孙洪涛, 彭晨, 王志文. DoS 攻击下的信息物理系统事件触发预测控制设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2303-2309.
(Sun H T, Peng C, Wang Z W. Event-triggered predictive control of cyber-physical systems under DoS attacks[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2303-2309.)
- [4] Guan Y P, Ge X H. Distributed attack detection and secure estimation of networked cyber-physical systems against false data injection attacks and jamming attacks[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks, 2018, 4(1): 48-59.
- [5] Li S, Ahn C K, Xiang Z R. Decentralized sampled-data control for cyber-physical systems subject to DoS attacks[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(4): 5126-5134.
- [6] 丁达, 曹杰. 信息物理融合系统网络安全综述[J]. 信息与控制, 2019, 48(5): 513-521.
(Ding D, Cao J. Overview of network security of cyber-physical systems[J]. Information and Control, 2019, 48(5): 513-521.)
- [7] Singh P, Behera L, Verma N K. Design of passivity based cyber physical system with Markovian losses and delay[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 1971-1976.
- [8] Chen B, Hu G, Ho D W C, et al. Distributed covariance intersection fusion estimation for cyber-physical systems with communication constraints[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(12): 4020-4026.
- [9] Goodwin G C, Leal R L, Mayne D Q, et al. Rapprochement between continuous and discrete model reference adaptive control[J]. Automatica, 1986, 22(2): 199-207.
- [10] Middleton R H, Goodwin G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(11): 1015-1021.
- [11] Wang J L, Yang G H, Liu J. An LMI approach to H_2 -index and mixed H_2/H_∞ fault detection observer design[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1656-1665.
- [12] 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: 1-272.
(Yu L. Robust control—Linear matrix inequality approach[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 1-272.)
- [13] Yang H J, Xia Y Q, Shi P, et al. Analysis and synthesis of Delta operator systems[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2012, 430: 1-274.
- [14] 周萌, 王振华, 王昶, 等. Lipschitz 非线性系统的 H_2/L_∞ 故障检测观测器设计[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 778-785.
(Zhou M, Wang Z H, Wang C, et al. H_2/L_∞ fault detection observer design for Lipschitz nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(6): 778-785.)
- [15] Lu A Y, Yang G H. Stability analysis for cyber-physical systems under denial-of-service attacks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(11): 5304-5313.
- [16] Shoukry Y, Tabuada P. Event-triggered state observers for sparse sensor noise/attacks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(8): 2079-2091.
- [17] Wang G L, Li Z Q, Miao X, et al. Fault detection of discrete-time delay Markovian jump systems with delay term modes partially available[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(5): 3045-3071.

作者简介

杜峥 (1996—), 男, 硕士生, 从事信息物理系统故障检测的研究, E-mail: zdu2019@stu.zzu.edu.cn;

刘孟凯 (1996—), 男, 硕士生, 从事信息物理系统滤波的研究, E-mail: mkliu@gs.zzu.edu.cn;

周建勋 (1991—), 男, 博士生, 从事网络系统故障检测的研究, E-mail: iejxzhou@gs.zzu.edu.cn;

张端金 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事检测与估计、网络系统控制等研究, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn.