

隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计

李进, 姜顺, 潘丰

引用本文:

李进, 姜顺, 潘丰. 隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3418–3426.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1881>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

[具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制](#)

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault

控制与决策. 2021, 36(9): 2103–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

[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>

[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>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 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>

隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计

李进, 姜顺[†], 潘丰

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 研究隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与执行器故障的联合区间估计问题. 首先, 根据隐蔽式攻击信号的特性, 得到隐蔽式攻击信号的上下界信息; 然后, 将执行器故障视为增广状态, 构造与原系统等价的增广系统, 基于所得到的增广系统和隐蔽式攻击信号的上下界信息, 利用 L_∞ 滤波理论设计鲁棒增广状态区间观测器, 从而得到系统状态与执行器故障的联合区间估计; 最后, 通过仿真实例验证所提出方法的有效性和优越性.

关键词: 区间观测器; 隐蔽式攻击; 执行器故障; 故障区间估计; 状态区间估计; 网络化控制系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1881

引用格式: 李进, 姜顺, 潘丰. 隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计 [J]. 控制与决策, 2023, 38(12): 3418-3426.

Joint interval estimation of state and fault for networked control systems under stealthy attacks

LI Jin, JIANG Shun[†], PAN Feng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: An interval observer that can realize the joint interval estimation of the state and actuator fault is proposed for networked control systems (NCSs) under stealthy attacks. Firstly, the upper and lower bounds of the attacks are obtained according to the characteristics of the stealthy attacks. Secondly, the augmented system equivalent to the original system is obtained by considering the actuator fault as augmented state. Based on the obtained augmented system, the L_∞ performance index is used to suppress the interference and for the impact of the attacks, a robust augmented state interval observer is designed to obtain the joint interval estimation information of the state and actuator fault of the attacked system. Finally, the simulations verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

Keywords: interval observer; stealthy attacks; actuator fault; fault interval estimation; state interval estimation; networked control systems

0 引言

随着科技水平的快速发展, 现代工业系统的结构变得越来越复杂, 对可靠性和安全性提出了更高的要求. 然而, 这类复杂系统在带来巨大经济效益的同时也潜藏着一定的安全隐患, 系统中任何部件发生故障均有可能产生较大的财产损失或人员伤亡. 因此, 如何提高系统的可靠性和安全性是系统在实际应用中亟需解决的关键问题^[1-3]. 故障诊断和容错控制技术为提高系统可靠性和安全性提供了重要的理论支撑. 故障的幅值和变化规律是后续主动容错控制的重要基础, 因此故障估计已发展为故障诊断领域的热门研究问题^[4]. 目前, 故障估计领域的研究方法主要包括点估计方法和区间估计方法. 其中, 故障的点估

计通常需要假设干扰信号能量有限且满足确定的概率分布, 但是在实际系统中, 干扰信号可能是持续存在的且难以描述其统计特性, 这在很大程度上限制了该方法的应用^[5]. 为了解决这一问题, 有学者提出了故障区间估计^[6], 该方法只要求干扰未知但是有界即可, 无需其他先验知识. 因此, 区间估计比点估计具有更加广泛的适用性.

故障的区间估计常用方法包括集员滤波和区间观测器方法. 集员滤波方法的目标是不断更新与系统模型、测量数据以及外界扰动相一致的增广状态可行集, 从而得到包裹故障的一个最小多面体. 文献 [7-9] 和文献 [10] 分别利用该方法研究了离散时间线性系统传感器故障和执行器故障的区间估计问题, 尽

收稿日期: 2021-11-02; 录用日期: 2022-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61403168, 61876073).

[†]通讯作者. E-mail: haveshun@jiangnan.edu.cn.

管获取了故障区间信息,但是,该方法的计算复杂度会随着多面体维数增大而呈指数级增加. 区间观测器能够利用系统输入输出信息估计每一时刻待估量所在的区间,从而实现对系统待估量的实时界定,这种方法在故障诊断领域得到了广泛应用. 文献[11]采用坐标变换法设计区间观测器,获取了高速铁路牵引电机系统的传感器故障区间估计信息,该方法的性能依赖于坐标变换矩阵的选取,难以得到推广应用. 文献[12]针对具有未知但是有界的扰动和噪声的离散线性系统,设计了一种无需坐标的区间观测器,实现了对系统状态的区间估计,其基本思想是引入更多自由度放宽设计条件. 文献[13-14]将该区间估计的方法进行推广,以区间边界作为天然阈值,将其应用于切换系统和多智能体系统的故障检测问题的研究. 此外,随着信息技术和先进计算方法的快速发展,以及集散控制系统在工业系统中的广泛应用,使得对过程的监控管理已无法依靠传统的机理分析方法建立精确的数学模型,在此情况下,基于数据驱动的故障诊断方法更为有效. 基于数据驱动的故障诊断是在不需要获得系统精确解析模型的情况下,通过采集过程运行的实时数据,挖掘数据中隐含的异常工况相关信息完成对系统故障的分析和诊断. 文献[15]针对现有的基于无监督域自适应(unsupervised domain adaptation, UDA)方法存在特征信息提取缺失的问题,提出了一种域对抗图卷积网络用于UDA并实现跨域故障诊断. 文献[16]针对液压系统的高度非线性和数据样本的采集率不同等因素影响采样准确性的问题,提出了一种基于多采样率样本的深度学习方法. 针对实际的工业过程数据多模式、高维和易损坏等问题,文献[17]提出了一种鲁棒半监督投影和判别字典学习方法.

另一方面,随着通信、控制和计算机技术的快速发展与深度融合,网络化控制系统得到了快速发展和广泛应用. 开放共享的通讯网络在增加系统灵活性和可扩展性的同时,也给恶意的网络攻击提供了可乘之机^[18]. 一般而言,依据攻击方式的不同可将网络攻击分为虚假数据注入攻击^[19-20]、拒绝服务干扰攻击^[21-22]和重播攻击^[23-24]. 隐蔽式攻击作为一种特殊的虚假数据注入攻击,攻击方式为攻击者通过在状态值中引入任意偏差,使得系统传输错误数据,从而破坏系统性能^[25]. 文献[18]和文献[25-26]均研究了隐蔽式攻击下系统的状态区间估计问题,但是,隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计问题鲜有学者研究,这也是本研究动力之一.

基于以上分析,本文将研究隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计问题. 综合考虑执行器故障、过程干扰和隐蔽式攻击对NCSs的影响,首先,根据隐蔽式攻击信号保持隐蔽的条件,获得攻击信号的上下界信息;然后,将执行器故障视为增广状态,构造与原系统等价的增广系统,基于所得到的增广系统和攻击信号边界信息设计鲁棒增广状态区间观测器,从而得到系统状态和执行器故障的区间估计;最后,通过仿真实例验证所提出方法的有效性和优越性.

1 问题描述

考虑如下系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k) + w(k) + \tilde{F}f(k), \\ y(k) = \tilde{C}x(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 、 $u(k) \in R^m$ 、 $y(k) \in R^p$ 、 $w(k) \in R^d$ 和 $f(k) \in R^s$ 分别为系统状态向量、输入向量、输出向量、过程干扰和执行器故障向量, \tilde{A} 、 \tilde{B} 、 \tilde{C} 和 \tilde{F} 为具有适当维数的矩阵.

对于系统(1),本文给出以下假设.

假设1 系统(1)中的初始状态向量 $x(0)$ 、过程干扰 $w(k)$ 是未知但是有界的,且满足

$$\underline{x}(0) \leq x(0) \leq \bar{x}(0), \quad \underline{w}(k) \leq w(k) \leq \bar{w}(k), \quad (2)$$

其中 $\underline{x}(0)$ 、 $\bar{x}(0)$ 、 $\underline{w}(k)$ 和 $\bar{w}(k)$ 为已知向量.

假设2 存在一个非奇异矩阵 $S \in R^{n \times n}$ 使得 $D = SAS^{-1}$ 为Schur且非负的.

假设3 存在待设计的参数矩阵 T 和 L 使得 $TA - LC$ 为非负且Schur的.

现考虑NCSs在通信网络传输数据的过程中遭受攻击者发起的隐蔽式攻击,有

$$y_a(k) = y(k) + a(k), \quad (3)$$

其中 $a(k)$ 为隐蔽式攻击信号.

在遭受攻击的情况下,系统(1)可重写为

$$\begin{cases} x(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k) + w(k) + \tilde{F}f(k), \\ y_a(k) = \tilde{C}x(k) + a(k). \end{cases} \quad (4)$$

定义1^[18] 对于系统(1)和(4),初始状态分别为 $\xi_1, \xi_2 \in [\underline{x}_0, \bar{x}_0]$, 初始输入干扰分别为 $w_1, w_2 \in [\underline{w}(k), \bar{w}(k)]$, 使得

$$y_a(k, \xi_1, w_1, a(k)) = y(k, \xi_2, w_2), \quad \forall k \geq 0, \quad (5)$$

则攻击信号 $a(k)$ 可称为隐蔽式攻击信号.

引理1^[27] 若向量 $x(k)$, $\underline{x}(k)$, $\bar{x}(k) \in R^n$ 满足

$$\underline{x}(k) \leq x(k) \leq \bar{x}(k), \quad \forall k \geq 0,$$

则对于任意的常数矩阵 $M \in R^{m \times n}$ 均有

$$\begin{aligned} M^+ \underline{x}(k) - M^- \bar{x}(k) &\leq Mx(k) \leq \\ M^+ \bar{x}(k) - M^- \underline{x}(k). \end{aligned} \quad (6)$$

引理2 [28] 针对系统 $x(k+1) = Ax(k) + b(k)$. 其中: 矩阵 A 为非负矩阵且 Schur, $x(k) \in R^n, b(k) \in R^n$ 且满足 $b(k) \geq 0, \forall k \geq 0$. 若初始条件 $x(0) \geq 0$, 则该系统为非负系统.

为了得到较为准确的区间估计信息, 通过分析攻击信号保持隐蔽的条件进而获得该信号的上下界信息是十分必要的. 本文的目的是在隐蔽式攻击下设计适当的区间观测器实现对系统状态 $x(k)$ 和执行器故障 $f(k)$ 的联合区间估计.

2 隐蔽式攻击信号上下界的估计

为了估计执行器故障 $f(k)$, 将其视为增广状态向量的一部分, 得到增广状态向量

$$\tilde{x}(k) = [x^T(k), f^T(k-1)], \quad (7)$$

并构造如下增广系统:

$$\begin{cases} E\tilde{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + Bu(k) + \bar{I}w(k), \\ y_a(k) = C\tilde{x}(k) + a(k). \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} I_n & -\tilde{F} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \tilde{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{I} &= \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [\tilde{C} \quad 0], \quad y_a(k) = y_a(k). \end{aligned}$$

当系统遭受隐蔽式攻击时, 给出如下区间观测器以估计 $a(k)$:

$$\begin{cases} \underline{a}(k) = (CS^{-1})^+ \underline{\theta}(k) - (CS^{-1})^- \bar{\theta}(k), \\ \bar{a}(k) = (CS^{-1})^+ \bar{\theta}(k) - (CS^{-1})^- \underline{\theta}(k), \\ \underline{\theta}(k+1) = D\underline{\theta}(k) - \tilde{S}(\bar{w}(k) - \underline{w}(k)), \\ \bar{\theta}(k+1) = D\bar{\theta}(k) + \tilde{S}(\bar{w}(k) - \underline{w}(k)). \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\bar{a}(k), \underline{a}(k) \in R^p$ 分别为隐蔽式攻击信号 $a(k)$ 的上界和下界估计值.

定理1 若受攻击系统(4)满足假设1和假设2, 则传感器攻击信号 $a(k)$ 满足

$$\underline{a}(k) \leq a(k) \leq \bar{a}(k), \quad \forall k \geq 0. \quad (10)$$

证明过程与文献[18]中的定理1的证明类似, 故此略.

3 增广状态区间观测器设计

定理1中已经给出了隐蔽式攻击信号 $a(k)$ 的上界估计值 $\bar{a}(k)$ 和下界估计值 $\underline{a}(k)$, 现针对增广系统

(8)设计如下区间观测器:

$$\begin{cases} \bar{\xi}(k+1) = \\ TA\bar{x}(k) + TBu(k) + L(y_a(k) - C\bar{x}(k)), \\ \bar{x}(k) = \bar{\xi}(k) + \bar{\Delta}(k-1) + Ny_a(k); \\ \underline{\xi}(k+1) = \\ TA\underline{x}(k) + TBu(k) + L(y_a(k) - C\underline{x}(k)), \\ \underline{x}(k) = \underline{\xi}(k) + \underline{\Delta}(k-1) + Ny_a(k). \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\bar{\xi}(k) \in R^{n+s}$ 和 $\underline{\xi}(k) \in R^{n+s}$ 为中间状态变量, $\bar{x}(k) \in R^{n+s}$ 和 $\underline{x}(k) \in R^{n+s}$ 分别为增广状态 $\tilde{x}(k)$ 的上界和下界估计值, $T \in R^{(n+s) \times (n+s)}, N \in R^{(n+s) \times p}$ 和 $L \in R^{(n+s) \times p}$ 为待设计的参数矩阵. $\bar{\Delta}(k) \in R^{n+s}$ 和 $\underline{\Delta}(k) \in R^{n+s}$ 的表达式如下所示:

$$\begin{cases} \bar{\Delta}(k) = -L^+ \underline{a}(k) + L^- \bar{a}(k) - N^+ \underline{a}(k+1) + \\ N^- \bar{a}(k+1) + (T\bar{I})^+ \bar{w}(k) - (T\bar{I})^- \underline{w}(k), \\ \underline{\Delta}(k) = -L^+ \bar{a}(k) + L^- \underline{a}(k) - N^+ \bar{a}(k+1) + \\ N^- \underline{a}(k+1) + (T\bar{I})^+ \underline{w}(k) - (T\bar{I})^- \bar{w}(k). \end{cases}$$

其中待设计的参数矩阵 T 和 N 满足

$$TE + NC = I_{n+s}. \quad (12)$$

引理3 区间观测器(11)中矩阵 T 和 N 的通解为

$$T = M^\dagger \theta_1 + HW\theta_1, \quad (13)$$

$$N = M^\dagger \theta_2 + HW\theta_2. \quad (14)$$

其中: $M = \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}$, M^\dagger 为矩阵 M 的伪逆矩阵, $\theta_1 = \begin{bmatrix} I_{n+s} \\ 0 \end{bmatrix}$, $\theta_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix}$, $\bar{n} = n + s + p$, $W = I_{\bar{n}} - MM^\dagger$, $H \in R^{(n+s) \times \bar{n}}$ 为任意矩阵.

证明 式(12)可重写为

$$[T \quad N] \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} = I_{n+s}. \quad (15)$$

注意到, 增广系统(8)中的 E 和 C 满足

$$\text{rank} \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} I_n & -F \\ 0 & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + s.$$

结合式(15)和文献[28]中的引理1, 得到 $[T \quad N]$ 的通解为

$$[T \quad N] = \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}^\dagger + H \left(I_{\bar{n}} - \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix}^\dagger \right).$$

因此, 式(13)和(14)成立. \square

参数矩阵 T 和 N 确定后, 由式 (8) 和 (12), 得到

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= (TE + NC)\tilde{x}(k+1) = \\ &TA\tilde{x}(k) + TBu(k) + T\bar{I}w(k) + NC\tilde{x}(k+1). \end{aligned} \quad (16)$$

定义如下估计误差:

$$\begin{aligned} \bar{e}(k) &= \bar{x}(k) - \tilde{x}(k), \\ \underline{e}(k) &= \underline{x}(k) - \tilde{x}(k). \end{aligned} \quad (17)$$

将式 (11) 和 (16) 代入 (17), 得到动态估计误差的上下界如下式所示:

$$\bar{e}(k+1) = (TA - LC)\bar{e}(k) + \bar{\delta}(k), \quad (18)$$

$$\underline{e}(k+1) = (TA - LC)\underline{e}(k) + \underline{\delta}(k). \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{\delta}(k) = La(k) + Na(k+1) - T\bar{I}w(k) + \bar{\Delta}(k), \\ \underline{\delta}(k) = La(k) + Na(k+1) - T\bar{I}w(k) + \underline{\Delta}(k). \end{cases}$$

本文接下来的任务是为系统 (8) 建立如式 (11) 所示的区间观测器, 即设计合适的参数矩阵 T 、 N 和 L 使得误差动态系统 (18) 和 (19) 满足如下条件.

1) 估计的增广状态满足关系 $\underline{\tilde{x}}(k) \leq \tilde{x}(k) \leq \bar{\tilde{x}}(k)$;

2) 当 $\bar{\Delta}(k) = 0, \underline{\Delta}(k) = 0, a(k) = 0$ 和 $w(k) = 0$ 时, 估计误差系统 (18) 和 (19) 全局渐近稳定;

3) 对于任意的非零 $\bar{\Delta}(k)$ 、 $\underline{\Delta}(k)$ 、 $a(k)$ 和 $w(k)$, 估计误差 $\bar{e}(k)$ 和 $\underline{e}(k)$ 满足 L_∞ 性能指标, 即

$$\begin{aligned} \|\bar{e}(k)\| &\leq \sqrt{1/\gamma} \times \\ &\sqrt{\lambda^k \bar{V}(0) + \|\bar{\Delta}(k)\|_\infty^2 + 2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \|\underline{e}(k)\| &\leq \sqrt{1/\gamma} \times \\ &\sqrt{\lambda^k \underline{V}(0) + \|\underline{\Delta}(k)\|_\infty^2 + 2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

注 1 为了验证所提出方法的优越性, 将其与文献 [29] 的基于反馈框架的区间观测器设计方法进行对比. 文献 [29] 的方法需要设计一个矩阵 T 满足矩阵 $T(MA - LC)T^{-1}$ 是 Schur 矩阵且矩阵的每个元素均为非负的, 而所提出方法只需矩阵 T 和 N 满足维数相容, 无其他任何限制性条件, 其在实际应用方面更具有普适性.

定理 2 针对遭受隐蔽式攻击的系统 (8), 若其参数满足假设 1 和假设 2, 隐蔽式攻击信号的上下界满足定理 1, 且区间观测器 (11) 的待设计参数矩阵 T 和 L 满足假设 3, 则有

$$\underline{\tilde{x}}(k) \leq \tilde{x}(k) \leq \bar{\tilde{x}}(k), \quad \forall k \geq 0. \quad (22)$$

证明 结合误差系统 (18)、(19) 和引理 1, 得到如下不等式:

$$L^+ \underline{a}(k) - L^- \bar{a}(k) \leq La(k) \leq L^+ \bar{a}(k) - L^- \underline{a}(k),$$

$$N^+ \underline{a}(k+1) - N^- \bar{a}(k+1) \leq Na(k+1) \leq$$

$$N^+ \bar{a}(k+1) - N^- \underline{a}(k+1),$$

$$(T\bar{I})^+ \underline{w}(k) - (T\bar{I})^- \bar{w}(k) \leq T\bar{I}w(k) \leq$$

$$(T\bar{I})^+ \bar{w}(k) - (T\bar{I})^- \underline{w}(k).$$

因此, 得到

$$\begin{cases} La(k) - L^+ \underline{a}(k) + L^- \bar{a}(k) \geq 0, \\ Na(k+1) - N^+ \underline{a}(k+1) + N^- \bar{a}(k+1) \geq 0, \\ (T\bar{I})^+ \bar{w}(k) - (T\bar{I})^- \underline{w}(k) - T\bar{I}w(k) \geq 0; \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} La(k) - L^+ \bar{a}(k) + L^- \underline{a}(k) \leq 0, \\ Na(k+1) - N^+ \bar{a}(k+1) + N^- \underline{a}(k+1) \leq 0, \\ (T\bar{I})^+ \underline{w}(k) - (T\bar{I})^- \bar{w}(k) - T\bar{I}w(k) \leq 0. \end{cases} \quad (24)$$

由式 (23) 和 (24), 得到 $\bar{\delta}(k) \geq 0, \underline{\delta}(k) \leq 0$. 此外, $\bar{x}(0)$ 和 $\underline{x}(0)$ 满足

$$\bar{\tilde{x}}(0) = \begin{bmatrix} \bar{x}(0) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{\tilde{x}}(0) = \begin{bmatrix} \underline{x}(0) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

由 $\underline{x}(0) \leq x(k) \leq \bar{x}(0)$, 得到 $\underline{\tilde{x}}(0) \leq \tilde{x}(k) \leq \bar{\tilde{x}}(0)$, 根据上下界误差的定义, 有 $\bar{e}(k) \geq 0, \underline{e}(k) \leq 0$.

区间观测器 (11) 的待设计参数矩阵 T 和 L 满足假设 3, 因此 $TA - LC$ 为非负矩阵. 结合引理 2 和误差系统的定义 (17), 易得到

$$\underline{\tilde{x}}(k) \leq \tilde{x}(k) \leq \bar{\tilde{x}}(k), \quad \forall k \geq 0. \quad \square$$

实际上, 仅仅设计 $TA - LC$ 为非负矩阵不足以得到准确的区间估计, 为了获得紧密的增广状态区间估计, 从而使得区间观测器 (11) 的上界估计 $\bar{x}(k)$ 和下界估计 $\underline{x}(k)$ 尽可能地接近 $x(k)$, 本文采用 L_∞ 性能指标来抑制过程干扰和隐蔽式攻击的影响, 提出了如下定理.

定理 3 假设区间观测器 (11) 的初始条件 $\bar{\tilde{x}}(0)$ 和 $\underline{\tilde{x}}(0)$ 满足 $\underline{\tilde{x}}(0) \leq \tilde{x}(0) \leq \bar{\tilde{x}}(0)$, 给定标量参数 $\gamma > 0$ 和 $0 < \lambda < 1$, 若存在一个对角矩阵 $P \in R^{(n+s) \times (n+s)}$, 矩阵 $Y \in R^{(n+s) \times p}$ 使得如下线性矩阵不等式成立:

$$PTA - YC \geq 0, \quad (26)$$

$$P \succ \gamma I, \quad (27)$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & * \\ \Xi_{21} & -P \end{bmatrix} < 0, \quad (28)$$

$$\Xi_{11} =$$

$$\begin{bmatrix} -\lambda P & * & * \\ 0 & -(1-\lambda)I & * \\ 0 & 0 & -(1-\lambda)I \rightarrow \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ & * & * \\ & * & * \\ \leftarrow & * & * \\ & -(1-\lambda)I & * \\ & 0 & -(1-\lambda)I \end{bmatrix},$$

$$\Xi_{21} =$$

$$[PTA - YC \quad Y \quad PN \quad -PT\bar{I} - PT\bar{I} \quad P],$$

则区间观测器(11)为增广系统(8)的一个鲁棒区间观测器,估计误差 $\bar{e}(k)$ 和 $\underline{e}(k)$ 分别满足式(20)和(21)定义的 L_∞ 性能指标.其中: $\bar{V}(0) = \bar{e}^T(0)P\bar{e}(0), \underline{V}(0) = \underline{e}^T(0)P\underline{e}(0)$.若不等式(26)~(28)可解,则结合引理3得到待设计的参数矩阵 T, N 和 L 的表达式为

$$T = M^\dagger \theta_1 + HW\theta_1, \tag{29}$$

$$N = M^\dagger \theta_2 + HW\theta_2, \tag{30}$$

$$L = P^{-1}Y, \tag{31}$$

其中 $H \in R^{(n+s) \times \bar{n}}$ 为任意矩阵.

证明 由定理2可知,若 $TA - LC$ 为非负, $\underline{\tilde{x}}(0) \leq \tilde{x}(0) \leq \bar{\tilde{x}}(0)$,则 $\underline{\tilde{x}}(k) \leq \tilde{x}(k) \leq \bar{\tilde{x}}(k)$.由于矩阵 P 为对角矩阵, $P > 0$ 意味着 $P > 0$,若下式成立:

$$P(TA - LC) \geq 0, \tag{32}$$

则 $TA - LC \geq 0$.令 $Y = PL$,有

$$PTA - YC \geq 0. \tag{33}$$

对于误差动态系统(18),考虑如下李亚普诺夫函数:

$$\bar{V}(k) = \bar{e}^T(k)P\bar{e}(k). \tag{34}$$

李亚普诺夫函数 $\bar{V}(k)$ 的增量可推导为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}(k) &= \\ e^T(k+1)Pe(k+1) - e^T(k)Pe(k) &= \\ ((TA - LC)e(k) + La(k) + Na(k+1) - \\ T\bar{I}w(k) + \bar{\Delta}(k))^T P((TA - LC)e(k) + La(k) + \\ Na(k+1) - T\bar{I}w(k) + \bar{\Delta}(k)) - e^T(k)Pe(k) &= \\ \eta^T(k) \Pi \eta(k). \end{aligned}$$

其中

$$\eta^T(k) = [e^T(k) \quad a^T(k) \quad a^T(k+1) \quad w^T(k) \quad \bar{\Delta}^T(k)].$$

Π 的定义如下式所示:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & * & * & * & * \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & * & * & * \\ \Omega_{31} & \Omega_{32} & \Omega_{33} & * & * \\ \Omega_{41} & \Omega_{42} & \Omega_{43} & \Omega_{44} & * \\ \Omega_{51} & \Omega_{52} & \Omega_{53} & \Omega_{54} & \Omega_{55} \end{bmatrix}.$$

其中

$$\Omega_{11} = (TA - LC)^T P(TA - LC) - P,$$

$$\Omega_{21} = L^T P(TA - LC), \quad \Omega_{22} = L^T PL,$$

$$\Omega_{31} = N^T P(TA - LC),$$

$$\Omega_{32} = N^T PL, \quad \Omega_{33} = N^T PN,$$

$$\Omega_{41} = (-T\bar{I})^T P(TA - LC),$$

$$\Omega_{42} = (-T\bar{I})^T PL,$$

$$\Omega_{43} = (-T\bar{I})^T PN, \quad \Omega_{44} = (-T\bar{I})^T P(-T\bar{I}),$$

$$\Omega_{51} = P(TA - LC), \quad \Omega_{52} = PL, \quad \Omega_{53} = PN,$$

$$\Omega_{54} = P(-T\bar{I}), \quad \Omega_{55} = P.$$

注意到, T 和 N 在引理3中已给出.令 $Y = PL$,运用Schur补引理,不等式(28)等价于下式:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{11} & * & * & * & * \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & * & * & * \\ \Omega_{31} & \Omega_{32} & \Omega_{33} & * & * \\ \Omega_{41} & \Omega_{42} & \Omega_{43} & \Omega_{44} & * \\ \Omega_{51} & \Omega_{52} & \Omega_{53} & \Omega_{54} & \Omega_{55} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\lambda - 1)P & 0 & 0 \\ 0 & (1 - \lambda)I & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \lambda)I \rightarrow \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ \leftarrow & 0 & 0 \\ & (1 - \lambda)I & 0 \\ & 0 & (1 - \lambda)I \end{bmatrix} < 0. \tag{35}$$

不等式(35)左边乘以 $\eta^T(k)$,右边乘以 $\eta(k)$,得到

$$\begin{aligned} \bar{V}(k) &= \lambda \bar{V}(k) + (1 - \lambda)(a^T(k)a(k) + a^T(k+1) \times \\ & a(k+1) + w^T(k)w(k) + \bar{\Delta}^T(k)\bar{\Delta}(k)). \end{aligned} \tag{36}$$

当 $\bar{\Delta}(k) = 0$,过程干扰 $w(k)$ 和隐蔽式攻击信号 $a(k)$ 均为0时,李亚普诺夫函数的增量为

$$\bar{V}(k+1) - \bar{V}(k) \leq (\lambda - 1)\bar{V}(k) \leq 0.$$

因此,误差系统(18)全局渐近稳定.

注意到,由不等式(36)可推导出如下不等式:

$$\begin{aligned} \bar{V}(k) &\leq \\ \lambda^k \bar{V}(0) &+ (1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^i (a^T(k)a(k) + \\ &a^T(k+1)a(k+1) + w^T(k)w(k) + \\ &\bar{\Delta}^T(k)\bar{\Delta}(k)) \leq \\ \lambda^k \bar{V}(0) &+ (1-\lambda) \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^i (2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2 + \\ &\|\bar{\Delta}(k)\|_\infty^2) \leq \\ \lambda^k \bar{V}(0) &+ (1-\lambda^{k-1})(2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2 + \\ &\|\bar{\Delta}(k)\|_\infty^2). \end{aligned}$$

由 $0 < \lambda < 1$, 得到 $0 < \lambda^{k-1} < 1$, 有

$$\begin{aligned} \bar{V}(k) &\leq \\ \lambda^k \bar{V}(0) &+ 2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2 + \|\bar{\Delta}(k)\|_\infty^2. \end{aligned} \quad (37)$$

此外,由不等式(27),得到

$$\bar{e}^T(k)P\bar{e}(k) > \gamma \bar{e}^T(k)\bar{e}(k). \quad (38)$$

将式(38)代入(37),得到

$$\begin{aligned} \|\bar{e}(k)\|^2 &< \frac{1}{\gamma} \bar{V}(k) \leq \\ \frac{1}{\gamma} (\lambda^k \bar{V}(0) &+ 2\|a(k)\|_\infty^2 + \|w(k)\|_\infty^2 + \|\bar{\Delta}(k)\|_\infty^2). \end{aligned}$$

经上述证明,误差系统(18)全局渐近稳定且满足式(20)定义的 L_∞ 性能指标. 运用与上述相同的证明方法可证明误差系统(19)全局渐近稳定且满足式(21)的 L_∞ 性能指标. \square

4 仿真分析

本节通过一个经典的3容水箱系统验证所提出算法的有效性和优越性^[30-31]. 该系统由3个水箱、2个水泵和3个出水口组成,其具体结构如图1所示.

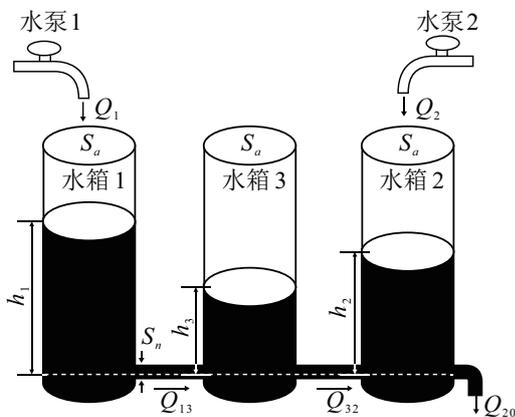


图1 3容水箱系统

该3容水箱系统3个液位分别为 h_1 、 h_2 和 h_3 , 根据托里切利定律可得到如下非线性连续时间系统模

型:

$$\begin{cases} S_a \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13}, \\ S_a \frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20}, \\ S_a \frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32}. \end{cases} \quad (39)$$

其中 Q_1 和 Q_2 分别为水泵1和水泵2供应的液体流入流量. Q_{ij} 为第 i 个水箱到第 j 个水箱的流量,表达式如下:

$$\begin{aligned} Q_{13} &= a_{z1} S_n \operatorname{sgn}(h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|}, \\ Q_{20} &= a_{z2} S_n \sqrt{2gh_2}, \\ Q_{32} &= a_{z3} S_n \operatorname{sgn}(h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|}. \end{aligned}$$

其中: a_{z1} 、 a_{z2} 和 a_{z3} 分别为3个水箱的流出系数,其值依据文献[30],取 $0.42 \leq a_{z1} \leq 0.50$, $a_{z3} = 0.58$ 和 $0.44 \leq a_{z2} \leq 0.52$. $S_a = 0.0154 \text{ m}^2$ 为3个水箱的横截面积; $S_n = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 为水箱间所有连接阀的横截面积.

进一步地,式(39)可重写为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{S_a} \begin{bmatrix} -Q_{13} \\ Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix} + \\ \frac{1}{S_a} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, \\ y = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (40)$$

本文考虑输入为水泵1和水泵2供应的液体流入流量,状态变量为3个水箱的液位;输出为水箱1和水箱2的液位,有

$$x = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}.$$

因此,可将式(40)写为如下状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(h) + Bu, \\ y = Ch. \end{cases}$$

其中

$$\begin{aligned} A(h) &= \frac{1}{S_a} \begin{bmatrix} -Q_{13} \\ Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix}, B = \frac{1}{S_a} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

该3容水箱系统表现为非线性,为了方便后续的研究,选取一个平衡点并在平衡点处采用泰勒展开

式,得到

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & a_1 \\ 0 & -(a_1 + a_3) & a_3 \\ a_1 & a_3 & -(a_2 + a_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

其中

$$a_1 = \frac{az_1 S_n \sqrt{2g}}{2S_a \sqrt{h_{10} - h_{30}}}, a_2 = \frac{az_2 S_n \sqrt{2g}}{2S_a \sqrt{h_{20}}},$$

$$a_3 = \frac{az_1 S_n \sqrt{2g}}{2S_a \sqrt{h_{30} - h_{10}}}, b = \frac{1}{S_a}.$$

考虑该系统是利用通讯网络进行控制的,且该系统受到恶意攻击者通过网络发起的隐蔽式攻击.注意到,在进水过程中液体波动会引起扰动,且该3容水箱系统可通过调节阀门手动添加渗漏故障.综上所述,对式(41)进行离散化,得到如下形式的离散时间系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k) + w(k) + \tilde{F}f(k), \\ y_a(k) = \tilde{C}x(k) + a(k). \end{cases}$$

其中

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0.8968 & -0.003 & 0.0841 \\ -0.0077 & 0.8394 & 0.077 \\ 0.0896 & 0.8678 & 0.8178 \end{bmatrix}, \tilde{F} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0.0318 & 0 \\ 0 & 0.0318 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

假设过程干扰为 $w(k) = 0.01\cos(k)$, 则干扰边界为 $\bar{w}(k) = -\underline{w}(k) = [0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T$, 由式(9)给出的攻击信号的上界 $\bar{a}(k)$ 和下界 $\underline{a}(k)$ 的表达式, 本文仿真中选取的隐蔽式攻击信号与文献[18]一致, 其形式为 $a(k) = \frac{\bar{a}(k) + \underline{a}(k)}{2}$. 系统初始状态的取值如下:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 1.5 \\ 1.5 \end{bmatrix}, \bar{x}(0) = \begin{bmatrix} 2.45 \\ 2.75 \\ 2.4 \end{bmatrix},$$

$$\underline{x}(0) = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.25 \\ 0.6 \end{bmatrix}.$$

给定 $\gamma = 0.0188, \lambda = 0.6, u(k) = 0.3$, 选取 H 矩阵

为

$$H = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

求解线性矩阵不等式(29)~(31), 得到增广状态观测器(11)的待设计参数为

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.45 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} -0.3380 & -0.3480 \\ -0.2976 & 0.0167 \\ -1.1488 & -0.5281 \\ 0.1914 & -0.4538 \end{bmatrix}.$$

本文选取2个执行器故障以验证所提出方法的有效性和优越性. 考虑系统发生如下形式的突变执行器故障:

$$f_1(k) = \begin{cases} 1.5, & 30 \leq k \leq 60; \\ 0, & k < 30, k > 60. \end{cases} \quad (42)$$

再考虑系统发生如下形式的缓变执行器故障:

$$f_2(k) = \begin{cases} 0, & k \leq 40; \\ -2 \sin(0.2(k - 40)), & k > 40. \end{cases} \quad (43)$$

通过与文献[29]方法的仿真对比得到如图2和图3所示的比较结果. 图2和图3分别为突变执行器故障和缓变执行器故障的区间估计结果.

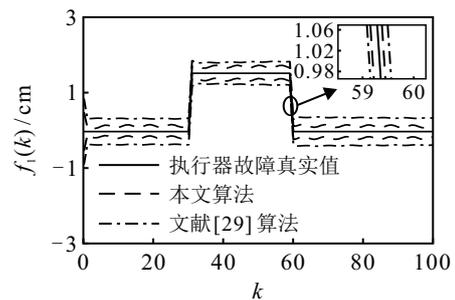


图2 突变执行器故障及其区间估计

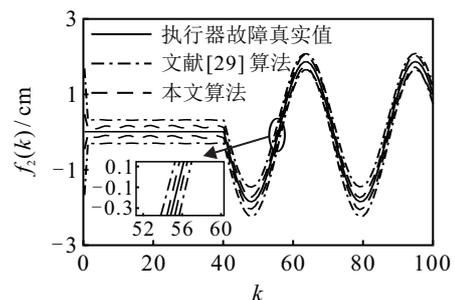


图3 缓变执行器故障及其区间估计

由对比结果可见,所设计区间估计方法利用攻击信号保持隐蔽的条件获得攻击信号的上下界信息,并通过将执行器故障视为增广状态实现系统状态与故障的联合估计,其不仅可完成多参数同步实时跟踪的任务,更为后续容错控制器的设计提供了极大的便利.此外,文献[29]的方法为了满足区间观测器设计条件引入了需要设计者自由选择的坐标变换矩阵 T ,若 T 选择不当,则区间观测器的估计结果可能较差,且迄今为止, T 的选取没有系统的解决方案,因此文献[29]的观测器设计方法的性能难以得到保证.总而言之,所提出方法适用范围更广且区间估计边界更精确,故障估计性能更优.

本文在系统发生时变故障时,估计出了系统状态的上下界,即3个水箱3个液位的上下界,仿真结果分别如图4~图6所示.

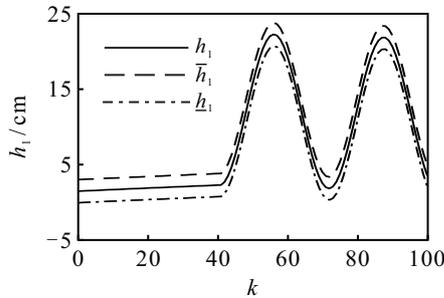


图4 第1个水箱液位 h_1 及其估计 \bar{h}_1 、 \underline{h}_1

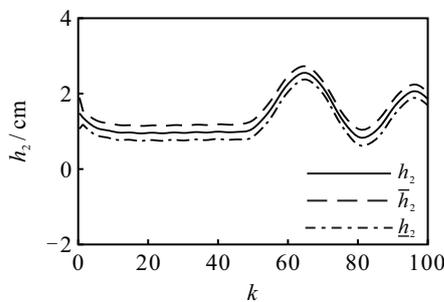


图5 第2个水箱液位 h_2 及其估计 \bar{h}_2 、 \underline{h}_2

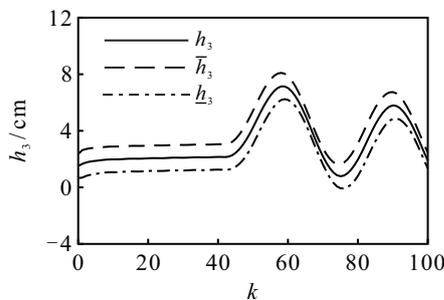


图6 第3个水箱液位 h_3 及其估计 \bar{h}_3 、 \underline{h}_3

5 结论

本文研究了隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计问题,综合考虑了执行器故障、过程干扰和隐蔽式攻击对NCSs的影响.首先,根

据隐蔽式攻击信号保持隐蔽的条件,获得了攻击信号的上下界信息;然后,将执行器故障视为增广状态向量,构造与原系统等价的增广系统,基于该增广系统和攻击信号边界信息设计鲁棒增广状态区间观测器,从而得到系统状态与执行器故障的区间估计;最后,通过仿真实例验证了所提出方法的有效性和优越性.所提出故障区间估计观测器设计方法适用于其他噪声未知但有界系统的故障区间估计问题.

参考文献(References)

- [1] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 769-781. (Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 769-781.)
- [2] 周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1933-1943. (Zhou D H, Liu Y, He X. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1933-1943.)
- [3] Gao Z W. Fault estimation and fault-tolerant control for discrete-time dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3874-3884.
- [4] 张柯, 姜斌. 基于故障诊断观测器的输出反馈容错控制设计[J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 274-281. (Zhang K, Jiang B. Fault diagnosis observer-based output feedback fault tolerant control design[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(2): 274-281.)
- [5] 张文瀚, 王振华, 沈毅. 基于鲁棒正不变集的传感器故障区间估计[J]. 自动化学报, 2020, 46(9): 1986-1992. (Zhang W H, Wang Z H, Shen Y. Interval estimation for sensor fault based on robust positive invariant set[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(9): 1986-1992.)
- [6] Gouzé J L, Rapaport A, Hadj-Sadok M Z. Interval observers for uncertain biological systems[J]. Ecological Modelling, 2000, 133(1/2): 45-56.
- [7] 张文瀚, 王振华, 沈毅. 线性系统传感器故障的区间估计[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(6): 923-930. (Zhang W H, Wang Z H, Shen Y. Interval estimation of sensor fault for linear systems[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(6): 923-930.)
- [8] Tang W T, Wang Z H, Shen Y. Interval estimation for discrete-time linear systems: A two-step method[J]. Systems & Control Letters, 2019, 123: 69-74.
- [9] Zhou M, Cao Z C, Zhou M C, et al. Zonotopic fault estimation for discrete-time LPV systems with bounded parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(2): 690-700.
- [10] Zhang W H, Wang Z H, Raïssi T, et al. A state augmentation approach to interval fault estimation for descriptor systems[J]. European Journal of Control, 2020,

- 51: 19-29.
- [11] Tian Y, Zhang K, Jiang B, et al. Interval observer and unknown input observer-based sensor fault estimation for high-speed railway traction motor[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(2): 1137-1154.
- [12] Wang Z H, Lim C C, Shen Y. Interval observer design for uncertain discrete-time linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2018, 116: 41-46.
- [13] Zammali C, van Gorp J, Wang Z H, et al. Sensor fault detection for switched systems using interval observer with L_∞ performance[J]. *European Journal of Control*, 2021, 57: 147-156.
- [14] Zhang Z H, Yang G H. Distributed fault detection and isolation for multiagent systems: An interval observer approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, 2020, 50(6): 2220-2230.
- [15] Li T F, Zhao Z B, Sun C, et al. Domain adversarial graph convolutional network for fault diagnosis under variable working conditions[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-10.
- [16] Huang K K, Wu S J, Li F B, et al. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with multirate data samples[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(11): 6789-6801.
- [17] Huang K K, Wu Y M, Wang C, et al. A projective and discriminative dictionary learning for high-dimensional process monitoring with industrial applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(1): 558-568.
- [18] 刘坤, 张淇瑞, 郭航, 等. 隐蔽式攻击下的离散系统区间观测器设计[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(8): 1673-1680.
(Liu K, Zhang Q R, Guo H, et al. Interval observer design of discrete-time systems under stealthy attacks[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(8): 1673-1680.)
- [19] Liu J L, Xia J L, Tian E G, et al. Hybrid-driven-based H_∞ filter design for neural networks subject to deception attacks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2018, 320: 158-174.
- [20] Hou N, Wang Z D, Ho D W C, et al. Robust partial-nodes-based state estimation for complex networks under deception attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(6): 2793-2802.
- [21] Yuan Y, Yuan H H, Ho D W C, et al. Resilient control of wireless networked control system under denial-of-service attacks: A cross-layer design approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(1): 48-60.
- [22] Du D J, Li X, Li W T, et al. ADMM-based distributed state estimation of smart grid under data deception and denial of service attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, 2019, 49(8): 1698-1711.
- [23] Ye D, Zhang T Y, Guo G. Stochastic coding detection scheme in cyber-physical systems against replay attack[J]. *Information Sciences*, 2019, 481: 432-444.
- [24] Franzè G, Tedesco F, Lucia W. Resilient control for cyber-physical systems subject to replay attacks[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2019, 3(4): 984-989.
- [25] Li X, Wei G L, Ding D R. Interval observer design under stealthy attacks and improved event-triggered protocols[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks*, 2020, 6: 570-579.
- [26] Huong D C, Huynh V T, Trinh H. Interval functional observers design for time-delay systems under stealthy attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(12): 5101-5112.
- [27] Zhu F L, Zhang W, Zhang J C, et al. Unknown input reconstruction via interval observer and state and unknown input compensation feedback controller designs[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19(1): 145-157.
- [28] Zhang W H, Wang Z H, Shen Y, et al. Interval estimation of actuator fault by interval analysis[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2019, 13(16): 2717-2724.
- [29] Guo S H, Zhu F L, Zhu S X, et al. State and sensor fault interval estimations for discrete-time systems[C]. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*. Dalian, 2017: 7280-7284.
- [30] Zhou D H, He X, Wang Z D, et al. Leakage fault diagnosis for an internet-based three-tank system: An experimental study[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(4): 857-870.
- [31] Zhang Y, Wang Z D, Ma L F, et al. Annulus-event-based fault detection, isolation and estimation for multirate time-varying systems: Applications to a three-tank system[J]. *Journal of Process Control*, 2019, 75: 48-58.

作者简介

李进(1994—), 男, 硕士生, 从事区间观测器与故障诊断等研究, E-mail: 1328767943@qq.com;

姜顺(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事网络化控制系统故障诊断与容错控制等研究, E-mail: haveshun@jiangnan.edu.cn;

潘丰(1963—), 男, 教授, 博士, 从事生产过程建模、优化与控制等研究, E-mail: pan_feng_63@163.com.