

控制与决策

Control and Decision

FDI攻击下异构互联信息物理系统分布式攻击估计

陈丽, 郭胜辉

引用本文:

陈丽, 郭胜辉. FDI攻击下异构互联信息物理系统分布式攻击估计[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4073-4082.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1308>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation

控制与决策. 2021, 36(8): 1963-1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

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>

丢包和量化约束下的不确定系统分布式滚动时域估计

Distributed moving horizon estimation for stochastic uncertain system with packet dropouts and quantized measurements

控制与决策. 2021, 36(7): 1771-1778 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1603>

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049-1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

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>

FDI攻击下异构互联信息物理系统分布式攻击估计

陈丽, 郭胜辉[†]

(苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对含有虚假数据注入 (false data injection, FDI) 攻击和传感器故障的异构互联信息物理系统, 研究分布式攻击估计器设计问题. 首先, 将系统状态和传感器故障增广成等价的广义状态空间模型, 利用该模型和子系统间的关联信息设计分布式攻击估计观测器. 在分布式观测器的设计中, 引入中间变量和输出估计误差反馈项, 使观测器具有灵活参数矩阵结构, 适用于不同状态维度子系统组成的异构系统, 实现对攻击信号和传感器故障的同时估计. 其次, 对动态误差系统进行稳定性分析, 利用 H_∞ 性能来抑制攻击信号和外部干扰对估计效果的影响, 同时以线性矩阵不等式的形式给出观测器增益矩阵的求解方法. 最后, 通过数值仿真和对比仿真验证所提攻击估计方法的可行性.

关键词: FDI攻击; 互联信息物理系统; 异构系统; 分布式观测器; 状态估计; 攻击估计

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1308

引用格式: 陈丽, 郭胜辉. FDI攻击下异构互联信息物理系统分布式攻击估计[J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 4073-4082.

Distributed attack estimation of heterogeneous interconnected cyber-physical systems under FDI attacks

CHEN Li, GUO Sheng-hui[†]

(School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The problem of distributed attack estimator design is studied for heterogeneous interconnected cyber-physical systems with false data injection (FDI) attacks and sensor faults. Firstly, the system state and sensor fault are augmented into an equivalent generalized state space model, and the distributed attack estimation observer is designed by using the model and the correlation information between subsystems. In the design of the distributed observer, the intermediate variable and the output estimation error feedback term are introduced so that the observer has a flexible parameter matrix structure, which is suitable for heterogeneous systems composed of subsystems with different state dimensions and realizes the simultaneous estimation of attack signals and sensor faults. Then, the stability of the dynamic error system is analyzed, and the H_∞ performance is employed to suppress the influence of attack signals and external disturbances on the estimation effect. Meanwhile, the solution method of the observer gain matrix is obtained as a linear matrix inequality. Finally, the feasibility of the proposed attack estimation method is verified by numerical simulation and comparative simulation.

Keywords: FDI attack; interconnected cyber-physical systems; heterogeneous system; distributed observer; state estimation; attack estimation

0 引言

信息物理系统 (cyber-physical system, CPS) 的出现以及信息网络的融合, 使得传统控制系统由孤立的个体逐渐形成互联, 在系统安装和维护方面降低了成本^[1], 已成为描述大型复杂控制系统的重要架构之一, 如常见的互联电力系统^[2-3]. 然而, 互联 CPS 的各个子系统通过网络进行信息传送时, 极易受到不法分

子的恶意攻击, 并且发生在一个子系统上的攻击信号可以通过耦合影响到其他子系统, 导致整个系统处于不安全的状态^[4]. 因此, 研究互联 CPS 中的攻击估计问题是具有重要意义的.

互联 CPS 中子系统相互作用的存在, 使得系统在攻击检测和攻击估计问题上变得复杂, 吸引了学者深入研究. 文献^[5]针对多个子系统组成的 CPS 设计出

收稿日期: 2023-09-14; 录用日期: 2024-02-14.

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX22_3274); 江苏高校境外研修计划项目.

[†]通讯作者. E-mail: shguo@usts.edu.cn.

未知输入观测器,解决了系统在含有输入故障情况下的状态估计问题;文献[6]对CPS提出了一种具有鲁棒特性的滑模观测器设计方法.然而,文献[5-6]设计的观测器需要满足较多的约束条件,限制了实际应用的范围.为摆脱上述观测器匹配条件的束缚,文献[7]通过引入中间变量,提出中间观测器,实现系统故障估计的同时突破了观测器的匹配条件.

随着现代工程系统愈加复杂,所需传输的数据也更为庞大.若海量的信息都需要传输到集中处理中心,必然会提高对通信网络的要求,极易导致通讯线路堵塞^[8].特别地,一旦集中处理中心遭到破坏,系统下一步工作将无法正常工作^[9],此时常见的集中式系统状态估计^[10]以及攻击估计方法不再适用.分布式结构估计方法不需要全局测量数据就能够实现各个子系统的状态和攻击估计,避免了大量数据传输,近年来得到广泛关注^[11].文献[12]在无向图的假设下,提出一种无需引入任何性能规范但具有鲁棒特性的分布式中间估计器,实现了网络动态系统故障估计;文献[13]在有向通信拓扑结构下,针对同时含有执行器和传感器故障的多智能体系统,提出一种新的分布式中间观测器设计方法.这些研究主要是针对同构系统展开的,但现代工业控制系统的复杂性不仅限于同构系统.在线性异构系统方面,文献[4]研究含有输入、输出扰动的异构互联系统,利用构造增广系统减少系统维数的形式,设计了能够在鲁棒 H_∞ 优化意义下抑制扰动的分布式故障估计观测器;文献[14]针对异构互联系统,研究系统含有故障时的故障估计问题,提出利用子系统间的关联信息,设计了分布式故障估计观测器的方法;文献[15]针对FDI攻击下的互联电力系统,构建分布式中间观测器,解决了各个子系统的安全状态估计问题.在非线性异构系统方面,文献[16]针对故障不可预测的情况,解决了有限时间内系统故障分布式估计问题.上述针对异构系统故障和攻击的估计研究均是考虑各个子系统的状态参数不同、维度相同的情况,而关于异构系统中子系统状态的参数和维度都不相同的研究成果还较少.文献[17]对由无人机和无人车构成的异构多智能体系统,开展了分布式故障估计器的设计,虽然考虑了不同状态维度组成的系统,但在进行观测器设计前处理成相同状态维度的模型.

综合上述讨论,本文主要研究同时存在FDI攻击和传感器故障的情况下,由不同状态维度子系统构成的互联CPS分布式攻击信号和传感器故障估计观测器设计问题.首先将传感器故障视为系统内部状态,

构造等价的增广系统;其次引入中间变量重构攻击信号,设计出分布式观测器,不仅能够同时估计系统攻击信号和传感器故障,还克服了传统观测器需要满足的约束条件;接着利用 H_∞ 性能抑制攻击和干扰对观测器估计效果的影响,并利用线性矩阵不等式技术求解观测器的增益矩阵.本文主要贡献有:

1) 与文献[12-13]不同,本文直接使用子系统的误差系统进行稳定性分析,从而解决由不同状态维度子系统组成的异构互联CPS攻击信号估计问题.

2) 分布式观测器设计时引入输出估计误差反馈项和可设计标量,相较于传统中间观测器设计方法^[7,12],这不仅增加了用于计算观测器参数矩阵不等式的可行性,还增加了设计自由度.此外,还提高了观测器对攻击信号和传感器故障的估计性能.

3) 构造分布式观测器时只需要每个子系统自身信息和邻域子系统的连通信息,避免了集中式结构需要传输庞大数据的弊端.

符号说明: R^n 表示 n 维欧氏空间, $R^{n \times m}$ 表示 $n \times m$ 维矩阵集合, $\|\cdot\|$ 表示矩阵(或向量)的2范数, I_n 表示 n 维的单位矩阵, $\mathbf{0}$ 表示零矩阵, N^T 表示矩阵 N 的转置, N^\dagger 表示矩阵 N 的伪逆矩阵, $\text{diag}\{*\}$ 表示对角矩阵, $*$ 表示对称矩阵中的对称项, $\text{rank}(N)$ 表示矩阵 N 的秩, $N > 0$ 表示 N 是正定矩阵.

1 问题描述

1.1 异构互联CPS的状态空间模型

FDI攻击是影响传输数据可靠性的网络攻击,攻击者通过向系统注入虚假信息、篡改数据等手段,导致系统信息失去真实性,从而误导系统控制过程^[11,18-19].为此,本文针对 k 个异构子系统构成的互联CPS,研究其执行器信道的传输数据(如图1)遭到破坏时,系统的状态和攻击估计问题.

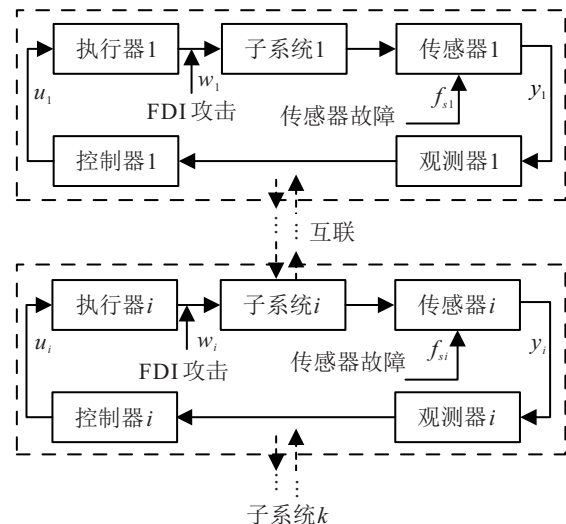


图1 互联CPS的分布式攻击估计设计框图

在FDI攻击下,受外部扰动、传感器故障影响的连续非线性异构互联CPS的状态空间方程表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i \Phi_{x_i}(x_i(t), t) + \\ D_i w_i(t) + D_{d_i} d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + G_i f_{s_i}(t), \end{cases} \quad i \in \{1, 2, \dots, k\}. \quad (1)$$

其中: $x_i(t) \in R^{n_i}$ 、 $u_i(t) \in R^{m_i}$ 和 $y_i(t) \in R^{p_i}$ 分别表示子系统 i 的状态、控制输入和输出; $\Phi_{x_i}(x_i(t), t) \in R^{r_i}$ 表示子系统 i 的非线性函数; $w_i(t) \in R^{q_i}$ 、 $d_i(t) \in R^{d_i}$ 和 $f_{s_i}(t) \in R^{g_i}$ 分别表示子系统 i 的攻击信号、外部干扰和传感器故障; α_i 表示耦合强度; H_{ij} 表示相邻子系统间的耦合矩阵; A_i 、 B_i 、 F_i 、 D_i 、 D_{d_i} 、 C_i 、 G_i 为已知常数矩阵(若 $B_i = D_i$, 则表示执行器受到攻击), 矩阵 D_i 和 G_i 为列满秩, 矩阵 C_i 为行满秩.

假设1 非线性函数满足Lipschitz

$\|\Phi_{x_1}(x_1(t), t) - \Phi_{x_2}(x_2(t), t)\| \leq \tau_i \|x_1(t) - x_2(t)\|$, 其中 τ_i 表示Lipschitz常数.

假设2 $\text{rank}\left(\begin{bmatrix} \lambda I_{n_i} - A_i & D_i & 0 \\ C_i & 0 & G_i \end{bmatrix}\right) = n_i + q_i + g_i$, 其中 λ 为任意实部非负的复数.

假设3 攻击信号和传感器故障满足 $\|\dot{w}_i(t)\| < \phi_1$ 和 $\|\dot{f}_{s_i}(t)\| < \phi_2$. 其中: $\phi_1 \geq 0$, $\phi_2 \geq 0$, 且未知.

注1 值得注意的是, 本文研究的互联CPS(1)既不要求参数相同, 也不要求状态维数相同. 假设1是处理非线性系统常见假设, 类似的假设可见文献[20-22]. 假设2是观测器存在的必要条件, 类似假设如文献[5,12]. 假设3只限制了攻击信号和传感器故障的变化是有界的, 允许其本身是无界或可以很大, 而多数文献要求其本身有界, 如文献[23].

1.2 状态转换

令 $\xi_{1i}(t) = [x_i^T(t) \quad f_{s_i}^T(t)]^T$, 系统(1)转换为

$$\begin{cases} K_{1i} \dot{\xi}_{1i}(t) = A_{1i} \xi_{1i}(t) + B_{1i} u_i(t) + D_{1i} w_i(t) + \\ F_{1i} \Phi_{x_i}(M_{1i} \xi_{1i}(t), t) + J_{1i} G_i f_{s_i}(t) + \\ D_{d_{1i}} d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{1ij} \xi_{1j}(t), \\ y_i(t) = C_{1i} \xi_{1i}(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$K_{1i} = \begin{bmatrix} I_{n_i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{1i} = \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ 0 & -G_i \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} B_{1i} &= \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_{1i} = \begin{bmatrix} F_i \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_{1i} &= [C_i \quad G_i], \quad D_{1i} = \begin{bmatrix} D_i \\ 0 \end{bmatrix}, \\ D_{d_{1i}} &= \begin{bmatrix} D_{d_i} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H_{1ij} = \begin{bmatrix} H_{ij} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ J_{1i} &= \begin{bmatrix} 0 \\ I_{p_i} \end{bmatrix}, \quad M_{1i} = [I_{n_i} \quad 0]. \end{aligned}$$

定义 $C'_{1i} = [C_i \quad 0]$, 结合式(1)得到

$$G_i f_{s_i}(t) = y_i(t) - C'_{1i} \xi_{1i}(t). \quad (3)$$

将式(3)代入系统(2)中, 系统(2)可被重写为

$$\begin{aligned} K_{1i} \dot{\xi}_{1i}(t) &= (A_{1i} - J_{1i} C'_{1i}) \xi_{1i}(t) + B_{1i} u_i(t) + \\ &F_{1i} \Phi_{x_i}(M_{1i} \xi_{1i}(t), t) + D_{1i} w_i(t) + \\ &J_{1i} y_i(t) + D_{d_{1i}} d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{1ij} \xi_{1j}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

令 $E_{1i} = [0 \quad E_i^T]^T \in R^{(n_i+p_i) \times p_i}$, $K_{2i} = K_{1i} + E_{1i} C_{1i}$, 其中 E_i 为满秩矩阵, 并由式(4)得

$$\begin{aligned} K_{2i} \dot{\xi}_{1i}(t) &= \\ &(A_{1i} - J_{1i} C'_{1i}) \xi_{1i}(t) + B_{1i} u_i(t) + D_{1i} w_i(t) + \\ &F_{1i} \Phi_{x_i}(M_{1i} \xi_{1i}(t), t) + J_{1i} y_i(t) + D_{d_{1i}} d_i(t) + \\ &E_{1i} C_{1i} \dot{\xi}_{1i}(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{1ij} \xi_{1j}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

由于 $K_{2i} = \begin{bmatrix} I_{n_i} & 0 \\ E_i C_i & E_i G_i \end{bmatrix}$, 表明 K_{2i} 为列满秩矩阵, 则存在伪逆矩阵 K_{2i}^\dagger 满足 $K_{2i}^\dagger K_{2i} = I_{(n_i+g_i)}$. 计算得到 $K_{2i}^\dagger = \begin{bmatrix} I_{n_i} & 0 \\ -G_i^\dagger C_i & G_i^\dagger E_i^{-1} \end{bmatrix}$. 将式(5)等号两边分别乘以 K_{2i}^\dagger 得到

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{1i}(t) &= A_{2i} \xi_{1i}(t) + B_{2i} u_i(t) + D_{2i} w_i(t) + \\ &F_{2i} \Phi_{x_i}(M_{1i} \xi_{1i}(t), t) + J_{2i} y_i(t) + \\ &D_{d_{2i}} d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij} \xi_{1j}(t) + E_{2i} \dot{y}_i(t). \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{2i} &= K_{2i}^\dagger (A_{1i} - J_{1i} C'_{1i}), \quad B_{2i} = K_{2i}^\dagger B_{1i}, \\ F_{2i} &= K_{2i}^\dagger F_{1i}, \quad D_{2i} = K_{2i}^\dagger D_{1i}, \\ J_{2i} &= K_{2i}^\dagger J_{1i}, \quad D_{d_{2i}} = K_{2i}^\dagger D_{d_{1i}}, \\ H_{2ij} &= K_{2i}^\dagger H_{1ij}, \quad E_{2i} = K_{2i}^\dagger E_{1i}. \end{aligned}$$

2 主要结果

2.1 分布式观测器设计

对系统(6)设计分布式观测器,引入中间变量

$$\partial_i(t) = w_i(t) - N_i(\xi_{1i}(t) - E_{2i}y_i(t)). \quad (7)$$

其中: $N_i = \varsigma_i D_{2i}^T$, ς_i 为待定标量. 将式(6)代入(7)并求导得到

$$\begin{aligned} \dot{\partial}_i(t) = & \dot{w}_i(t) - N_i \left(A_{2i}\xi_{1i}(t) + B_{2i}u_i(t) + \right. \\ & F_{2i}\Phi_{xi}(M_{1i}\xi_{1i}(t), t) + D_{2i}w_i(t) + \\ & \left. J_{2i}y_i(t) + D_{d2i}d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}\xi_{1j}(t) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

为消除式(6)中的 $\dot{y}_i(t)$, 定义 $\xi_{1i}(t) = \xi_{2i}(t) + E_{2i}y_i(t)$. 结合式(6), 计算得到

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{2i}(t) = & A_{2i}\xi_{1i}(t) + B_{2i}u_i(t) + D_{2i}w_i(t) + \\ & F_{2i}\Phi_{xi}(M_{1i}\xi_{1i}(t), t) + J_{2i}y_i(t) + \\ & D_{d2i}d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}\xi_{1j}(t) + \\ & E_{2i}\dot{y}_i(t) - E_{2i}y_i(t). \end{aligned}$$

设计子系统 i 的分布式中间观测器形式如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_{2i}(t) = & A_{2i}(\hat{\xi}_{2i}(t) + E_{2i}y_i(t)) + B_{2i}u_i(t) + \\ & F_{2i}\Phi_{xi}(M_{1i}\hat{\xi}_{1i}(t), t) + D_{2i}\hat{w}_i(t) + \\ & J_{2i}y_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}\hat{\xi}_{1j}(t) + \mu_{1i}L_{1i}\varphi_{1i}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\partial}}_i(t) = & -N_i \left(A_{2i}\hat{\xi}_{1i}(t) + B_{2i}u_i(t) + \right. \\ & F_{2i}\Phi_{xi}(M_{1i}\hat{\xi}_{1i}(t), t) + D_{2i}\hat{w}_i(t) + J_{2i}y_i(t) - \\ & \left. \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}\hat{\xi}_{1j}(t) \right) + \mu_{1i}L_{2i}\varphi_{1i}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\hat{w}_i(t) = \hat{\partial}_i(t) + N_i(\hat{\xi}_{1i}(t) - E_{2i}y_i(t)), \quad (11)$$

$$\hat{\xi}_{1i}(t) = \hat{\xi}_{2i}(t) + E_{2i}y_i(t), \quad (12)$$

$$\hat{y}_i(t) = C_{1i}\hat{\xi}_{1i}(t). \quad (13)$$

其中: $\hat{\xi}_{1i}(t)$ 、 $\hat{\xi}_{2i}(t)$ 、 $\hat{\partial}_i(t)$ 、 $\hat{y}_i(t)$ 、 $\hat{w}_i(t)$ 分别表示 $\xi_{1i}(t)$ 、 $\xi_{2i}(t)$ 、 $\partial_i(t)$ 、 $y_i(t)$ 、 $w_i(t)$ 的估计值, μ_{1i} 表示可选标量, $L_{1i} \in R^{(n_i+g_i) \times p_i}$ 和 $L_{2i} \in R^{q_i \times p_i}$ 表示观测器的增益矩阵, 输出估计误差反馈项 $\varphi_{1i}(t) = y_i(t) - \hat{y}_i(t)$.

注2 文献[7]指出, 观测器约束条件 $\text{rank}(C_i D_i) = \text{rank}(D_i)$ 在许多鲁棒观测器设计中起着重要作用, 用以实现干扰解耦, 例如滑模观测器^[6]和分布式观测

器^[24]都需要满足这一条件. 然而, 本文受文献[7]的启发, 利用攻击分布矩阵的特性, 构造一个中间估计量(式(7)), 从而突破该约束条件, 实现同时估计系统状态和攻击信号, 并在后文第3.2节例1中得到验证.

注3 过去的中间观测器设计方法中, 观测器参数矩阵选取为 $N_i = \varsigma_i D_{2i}^T$, D_{2i} 为攻击分布矩阵, ς_i 为事先选定常数^[7], 这导致观测器参数矩阵的结构是有限的. 为了使观测器参数矩阵结构更灵活, 受文献[13]启发, 观测器设计过程中, 在式(9)和(10)同时引入输出估计误差反馈项和可选标量 μ_{1i} . 这不仅增加了用于计算观测器参数矩阵不等式的可行性, 增加了设计自由度, 还提高了观测器的估计性能, 后文在第3.2节例2中得到验证.

定义系统状态估计误差 $e_{\xi_{1i}}(t) = \xi_{1i}(t) - \hat{\xi}_{1i}(t)$, 中间变量估计误差 $e_{\partial_i}(t) = \partial_i(t) - \hat{\partial}_i(t)$, 攻击信号估计误差 $e_{w_i}(t) = w_i(t) - \hat{w}_i(t) = e_{\partial_i}(t) + N_i e_{\xi_{1i}}(t)$, 非线性函数估计误差 $e_{\Phi_{xi}}(t) = \Phi_{xi}(M_{1i}\xi_{1i}(t), t) - \Phi_{xi}(M_{1i}\hat{\xi}_{1i}(t), t)$. 定义 $e_{\xi_{2i}}(t) = \xi_{2i}(t) - \hat{\xi}_{2i}(t)$, 由式(12)得到 $e_{\xi_{2i}}(t) = e_{\xi_{1i}}(t)$, 则结合式(6)、(9)、(10)、(12)得到误差动态表达式为

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\xi_{1i}}(t) = & A_{2i}e_{\xi_{1i}}(t) + F_{2i}e_{\Phi_{xi}}(t) + \\ & D_{2i}(e_{\partial_i}(t) + N_i e_{\xi_{1i}}(t)) + D_{d2i}d_i(t) - \\ & \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}e_{\xi_{1j}}(t) - \mu_{1i}L_{1i}\varphi_{1i}(t), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\partial_i}(t) = & \dot{w}_i(t) - N_i \left(A_{2i}e_{\xi_{1i}}(t) + F_{2i}e_{\Phi_{xi}}(t) + \right. \\ & D_{2i}(e_{\partial_i}(t) + N_i e_{\xi_{1i}}(t)) + D_{d2i}d_i(t) - \\ & \left. \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{2ij}e_{\xi_{1j}}(t) \right) - \mu_{1i}L_{2i}\varphi_{1i}(t). \end{aligned} \quad (15)$$

定义 $e_{\xi_{1i}, \partial_i}(t) = [e_{\xi_{1i}}^T(t) \ e_{\partial_i}^T(t)]^T$, 由式(14)和(15)得到

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\xi_{1i}, \partial_i}(t) = & (\bar{A}_i - \mu_{1i}L_{12i}\bar{C}_{1i})e_{\xi_{1i}, \partial_i}(t) + \\ & \bar{F}_i e_{\Phi_{xi}}(t) + \bar{K}_i d_i(t) + \bar{W}_i \dot{w}_i(t) - \\ & \bar{N}_i \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{3ij}e_{\xi_{1j}, \partial_j}(t). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A}_i = & \begin{bmatrix} A_{2i} + D_{2i}N_i & D_{2i} \\ -N_i A_{2i} - N_i D_{2i}N_i & -N_i D_{2i} \end{bmatrix}, \\ \bar{F}_i = & \begin{bmatrix} F_{2i} \\ -N_i F_{2i} \end{bmatrix}, \quad \bar{K}_i = \begin{bmatrix} D_{d2i} \\ -N_i D_{d2i} \end{bmatrix}, \\ \bar{N}_i = & \begin{bmatrix} I_{(n_i+g_i)} \\ -N_i \end{bmatrix}, \quad L_{12i} = \begin{bmatrix} L_{1i} \\ L_{2i} \end{bmatrix}, \quad \bar{W}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{q_i} \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_{1i} = & [C_{1i} \ 0], \quad H_{3ij} = [H_{2ij} \ 0]. \end{aligned}$$

文献[14-15]在进行误差系统稳定分析时,均将其转换为全局误差系统的形式.但是,若要为每个子系统设置不同的 H_∞ 性能指标抑制攻击信号和外部干扰对系统的影响,并以每个子系统的形式给出观测器增益矩阵存在的充分条件,使用全局估计误差系统形式实现较为困难.因此,本文不再对全局误差系统进行稳定性分析,从文献[25]得到启发直接使用子系统动态误差系统(16)展开稳定条件分析.

2.2 稳定性分析

引理1 [26] 对于任意矩阵 $Q_1 \in R^{n \times m}$ 和 $Q_2 \in R^{m \times h}$,存在 $\kappa > 0$ 满足不等式 $Q_1^T Q_2 + Q_2^T Q_1 \leq \kappa Q_1^T Q_1 + \kappa^{-1} Q_2^T Q_2$ 成立.

定理1 在满足假设1~假设3时,给定标量 μ_{1i} 、 κ_i 、 τ_i ,若存在正定矩阵 $P_i \in R^{(n_i+g_i+q_i) \times (n_i+g_i+q_i)}$ 和矩阵 $W_i \in R^{(n_i+g_i+q_i) \times p_i}$ 满足不等式:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \dots & \Sigma_{1k} \\ * & \Sigma_{22} & \dots & \Sigma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & \dots & \Sigma_{kk} \end{bmatrix} < 0. \quad (17)$$

其中

$$\Sigma_{ii} = \begin{bmatrix} \Sigma_{ii}^{11} & \Sigma_{ii}^{12} & \Sigma_{ii}^{13} & \Sigma_{ii}^{14} \\ * & -\gamma_{d_i}^2 I_{d_i} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_{w_i}^2 I_{q_i} & 0 \\ * & * & * & -\kappa_i I_{r_i} \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \Sigma_{ij}^{11} & 0 \\ * & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{ii}^{11} = (\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i})^T P_i + P_i (\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i}) + \tau_i^2 \kappa_i \bar{M}_i^T \bar{M}_i + I_{(n_i+g_i+q_i)},$$

$$\Sigma_{ii}^{12} = P_i \bar{K}_i, \Sigma_{ii}^{13} = P_i \bar{W}_i, \Sigma_{ii}^{14} = P_i \bar{F}_i,$$

$$\Sigma_{ij}^{11} = -(\alpha_i P_i \bar{N}_i H_{3ij} + \alpha_j H_{3ji}^T \bar{N}_j^T P_j),$$

$$\{i, j, i \neq j\} \in \{1, 2, \dots, k\}.$$

则误差系统(16)在满足 H_∞ 性能指标 γ_{d_i} 、 γ_{w_i} 下是渐近稳定的,子系统 i 的分布式观测器增益矩阵 $L_{12i} = P_i^{-1} W_i$.

证明 选择Lyapunov函数为

$$V(t) = \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i e_{\xi_1, \theta_i}(t). \quad (18)$$

结合式(16),可得式(18)的导数表达式为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) [(\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i})^T P_i + \\ & P_i (\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i})] e_{\xi_1, \theta_i}(t) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) [\alpha_i P_i \bar{N}_i H_{3ij} + \\ & \alpha_j H_{3ji}^T \bar{N}_j^T P_j] e_{\xi_1, \theta_j}(t) + 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{F}_i e_{\Phi_{x_i}}(t) + \\ & 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{K}_i d_i(t) + 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{W}_i \dot{w}_i(t). \end{aligned} \quad (19)$$

根据假设1,得到

$$\begin{aligned} \|e_{\Phi_{x_i}}(t)\| = & \|\Phi_{x_i}(M_{1i} \xi_{1i}(t), t) - \Phi_{x_i}(M_{1i} \hat{\xi}_{1i}(t), t)\| \leq \\ & \tau_i \|M_{1i} e_{\xi_{1i}}(t)\|. \end{aligned}$$

进一步,计算得到

$$e_{\Phi_{x_i}}^T(t) e_{\Phi_{x_i}}(t) \leq \tau_i^2 e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) \bar{M}_i^T \bar{M}_i e_{\xi_1, \theta_i}(t), \quad (20)$$

其中 $\bar{M}_i = [M_{1i} \ 0]$.根据引理1,结合式(20)得到

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{F}_i e_{\Phi_{x_i}}(t) \leq \\ & \sum_{i=1}^k \left(e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) \left(\frac{1}{\kappa_i} P_i \bar{F}_i \bar{F}_i^T P_i + \tau_i^2 \kappa_i \bar{M}_i^T \bar{M}_i \right) e_{\xi_1, \theta_i}(t) \right). \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)代入(19)得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) \left[(\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i})^T P_i + P_i (\bar{A}_i - \mu_{1i} L_{12i} \bar{C}_{1i}) + \right. \\ & \left. \frac{1}{\kappa_i} P_i \bar{F}_i \bar{F}_i^T P_i + \tau_i^2 \kappa_i \bar{M}_i^T \bar{M}_i \right] e_{\xi_1, \theta_i}(t) - \\ & 2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) [\alpha_i P_i \bar{N}_i H_{3ij} + \\ & \alpha_j H_{3ji}^T \bar{N}_j^T P_j] e_{\xi_1, \theta_j}(t) + 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{K}_i d_i(t) + \\ & 2 \sum_{i=1}^k e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) P_i \bar{W}_i \dot{w}_i(t). \end{aligned} \quad (22)$$

定义指标函数为

$$\begin{aligned} J(t) = \dot{V}(t) + \sum_{i=1}^k (e_{\xi_1, \theta_i}^T(t) e_{\xi_1, \theta_i}(t) - \\ \gamma_{d_i}^2 d_i^T(t) d_i(t) - \gamma_{w_i}^2 \dot{w}_i^T(t) \dot{w}_i(t)). \end{aligned} \quad (23)$$

下面将式(22)代入式(23)得到

$$J(t) \leq \xi^T(t) \Omega \xi(t).$$

其中

$$\begin{aligned} \xi(t) = [e_{\xi_1, \theta_1}^T(t), d_{11}^T(t), \dot{w}_1^T(t), \dots, \\ e_{\xi_1, \theta_k}^T(t), d_{1k}^T(t), \dot{w}_k^T(t)]^T, \end{aligned}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \dots & \Omega_{1k} \\ * & \Omega_{22} & \dots & \Omega_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & * & \Omega_{kk} \end{bmatrix},$$

$$\Omega_{ii} = \begin{bmatrix} \Sigma_{ii}^{11} + \frac{1}{\kappa_i} P_i \bar{F}_i \bar{F}_i^T P_i & \Sigma_{ii}^{12} & \Sigma_{ii}^{13} \\ * & -\gamma_{d_i}^2 I_{d_i} & 0 \\ * & * & -\gamma_{w_i}^2 I_{q_i} \end{bmatrix},$$

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} \Sigma_{ij}^{11} & 0 \\ * & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

定义 $W_i = P_i L_{12i}$, 则观测器增益矩阵 $L_{12i} = P_i^{-1} W_i$. 当式(24)中 $\Omega < 0$ 时, 则有 $J(t) < 0$. 在零初始条件下, 由式(23)可以得到

$$V(t) + \int_0^t \sum_{i=1}^k (e_{\xi_1, \partial_i}^T(\tau) e_{\xi_1, \partial_i}(\tau) - \gamma_{d_i}^2 d_i^T(\tau) d_i(\tau) - \gamma_{w_i}^2 \dot{w}_i^T(\tau) \dot{w}_i(\tau)) d\tau =$$

$$V(t) + \int_0^t \sum_{i=1}^k \|e_{\xi_1, \partial_i}(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \sum_{i=1}^k \gamma_{d_i}^2 \|d_i(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \sum_{i=1}^k \gamma_{w_i}^2 \|\dot{w}_i(\tau)\|^2 d\tau < 0. \quad (25)$$

根据式(18)可知 $V(t) > 0$, 由式(25)进一步得到

$$\int_0^t \sum_{i=1}^k \|e_{\xi_1, \partial_i}(\tau)\|^2 d\tau < \int_0^t \sum_{i=1}^k \gamma_{d_i}^2 \|d_i(\tau)\|^2 d\tau + \int_0^t \sum_{i=1}^k \gamma_{w_i}^2 \|\dot{w}_i(\tau)\|^2 d\tau. \quad (26)$$

因此, 不等式(26)是式(24)中 $\Omega < 0$ 的充分条件. 根据 Schur 补引理^[27], 不等式 $\Omega < 0$ 等价于不等式(17). \square

3 仿真分析

针对异构互联 CPS, 3.1 节通过一个数值仿真例子验证所提分布式观测器的有效性, 3.2 节通过两个对比仿真例子表明所提方法的优势.

3.1 数值仿真

考虑由两个不同状态维度子系统构成的互联 CPS, 状态空间方程描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i \Phi_{x_i}(x_i(t), t) + \\ \quad D_i w_i(t) + D_{d_i} d_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + G_i f_{s_i}(t), \\ i \in \{1, 2\}. \end{cases} \quad (27)$$

其中: 子系统1为4维, 子系统2为3维. 其他参数如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1.5 \\ 0 & 2 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$H_{12} = \begin{bmatrix} -0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{21} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad F_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T,$$

$$D_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad D_{d1} = [-1 \ 0 \ 1 \ 0.5]^T,$$

$$G_1 = [1 \ 0 \ 1]^T, \quad B_2 = [1 \ 1 \ 1]^T, \quad F_2 = [1 \ 0 \ 1]^T,$$

$$D_2 = [1 \ 1 \ 1]^T, \quad D_{d2} = [0 \ 1 \ -1]^T,$$

$$G_2 = [1 \ -2 \ 1]^T, \quad \alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = -1.$$

容易验证系统(27)满足观测器的匹配条件.

FDI攻击信号与传感器故障如下:

$$w_1(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 2]; \\ 2 \sin(\pi t), & t \in (2, 6]; \\ \cos(\pi t), & t \in (6, 20]. \end{cases}$$

$$w_2(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 0.25]; \\ 0.5 \sin(5\pi t - 1), & t \in (0.25, 5.5]; \\ \cos(0.5\pi t), & t \in (5.5, 20]. \end{cases}$$

$$f_{s1}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 0.25]; \\ 0.5 \sin(20t - 1), & t \in (0.25, 3]; \\ 1 - \sin(5\pi t), & t \in (3, 20]. \end{cases}$$

$$f_{s2}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 1.5]; \\ \cos(5\pi t), & t \in (1.5, 3.5]; \\ \sin(0.5\pi t), & t \in (3.5, 20]. \end{cases}$$

子系统1和子系统2的外部扰动分别假设为: $d_1(t) = \sin(0.7\pi t)$, $d_2(t) = -\cos(0.4\pi t)$. 选择 $E_1 = E_2 = I_3$, $\kappa_1 = 6$, $\kappa_2 = 5$, $\tau_1 = 2$, $\tau_2 = 3$, $\mu_{11} = \mu_{12} = 1$, $s_1 = 9$, $s_2 = 3$. 由式(17)解得观测器的增益矩阵为

$$L_{121} = 10^4 \times \begin{bmatrix} -0.0037 & 0.2301 & -0.0337 \\ 0.0001 & 0.0026 & -0.0004 \\ -0.0104 & 0.0225 & 0.0013 \\ -0.0017 & -0.0529 & 0.0089 \\ 0.0140 & -0.2538 & 0.0326 \\ 0.3748 & -6.7778 & 0.8703 \end{bmatrix},$$

$$L_{122} = \begin{bmatrix} -2.4302 & 27.6955 & 37.8731 \\ 19.0229 & 15.6234 & 1.1199 \\ -15.6263 & 20.8778 & 42.2655 \\ -5.4285 & -29.6888 & -32.9860 \\ -4.5351 & -284.1874 & -360.2424 \end{bmatrix}.$$

设定子系统1的状态初值为
 $[0.03358 \ 0.005 \ 0 \ 0]^T$,

子系统2的状态初值为 $[-0.0626 \ 0 \ 0]^T$. 子系统1和子系统2的状态仿真结果如图2所示, 其中 $e_{x_{1i}}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 表示子系统1中第 i 个状态的估计误差, $e_{x_{2i}}$ ($i = 1, 2, 3$) 表示子系统2中第 i 个状态的估计误差. 可以看出, 观测器能够准确估计出不同维数子系统的状态. 图3展示了 FDI 攻击信号和传感器故障的估计效果, 其中 e_{w_1} 、 e_{w_2} 表示子系统1和子系统2的 FDI 攻

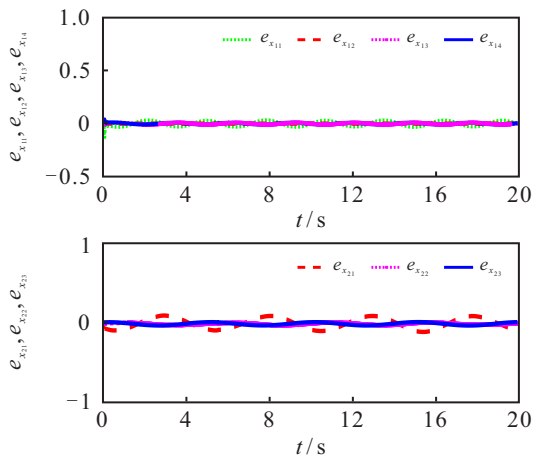


图2 子系统1和子系统2的状态估计误差

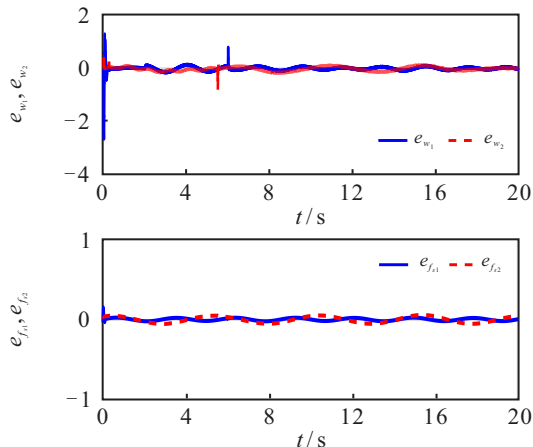


图3 FDI攻击估计误差和传感器故障估计误差

击估计误差, $e_{f_{s1}}$ 、 $e_{f_{s2}}$ 表示子系统1和子系统2的传感器故障估计误差. 由图3可见所提观测器对攻击信号以及传感器故障的估计效果是令人满意的.

3.2 对比仿真

例1 考虑如图4所示的4区域互联CPS仿真模型. 由于对比方法^[24]中未考虑系统的非线性情况、传感器故障以及外部干扰, 为此本例不考虑上述情况. 每个子区域的动态模型描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \\ A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + D_i w_i(t) - \alpha_i \sum_{j=1}^k H_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t), \end{cases} \quad i \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (28)$$

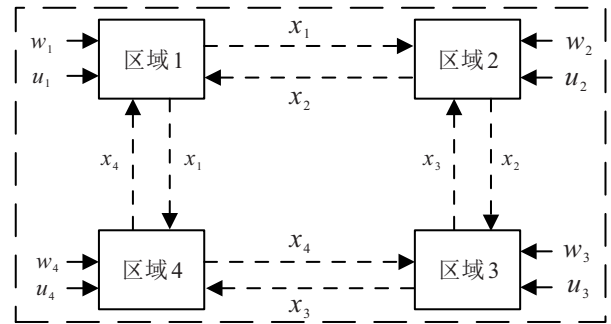


图4 4区域互联CPS

情况1 $\text{rank}(C_i D_i) = \text{rank}(D_i)$.

区域1、区域3 ($i \in \{1, 3\}$) 的参数矩阵^[28]如下:

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{D_i^p}{2H_i^p} & \frac{1}{2H_i^p} & 0 & -\frac{1}{2H_i^p} \\ 0 & -\frac{1}{T_{\text{chi}}} & \frac{1}{T_{\text{chi}}} & 0 \\ -\frac{1}{R_i^p T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 \\ \sum_{j=1}^k 2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{gi}} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C_i = [I_3 \ 0_{3 \times 1}], \quad a_i = -1.$$

其中

$$\begin{aligned} D_i^p &= 1.5, \quad H_i^p = 0.02, \\ T_{\text{chi}} &= 0.17, \quad T_{gi} = 0.4, \\ R_i^p &= 0.05, \quad T_{ij} = 0.05, \quad j \in \{2, 4\}. \end{aligned}$$

区域2、区域4 ($i \in \{2, 4\}$) 的参数矩阵如下:

$$A_i = \begin{bmatrix} -1.5 & 1 & -0.7 & 0.3 \\ -1.5 & 0.6 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & -2 & 2 \\ 2 & -1.5 & 0.5 & -2 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{gi}} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$D_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a_i = -1.$$

其中 $T_{gi} = 0.35$.

设定4个区域内子系统的耦合矩阵为

$$H_{ij} = \begin{bmatrix} -0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中 $\{i, j, i \neq j\} \in \{1, 2, 3, 4\}$.

假设4区域内,区域1、区域3遭到攻击者攻击,其FDI攻击信号如表1所示;区域2、区域4未遭到攻击.

表1 区域1、区域3的FDI攻击信号

t/s	[0, 2]	(2, 3]	(3, 8]	(8, 9]	(9, 15]
$w_1(t)$	0	$0.02 \sin(5\pi t)$	$0.2 \sin(3\pi t)$	$0.02 \sin(5\pi t)$	0
t/s	[0, 5]	(5, 7]	(7, 15]		
$w_3(t)$	0	$0.1t$	$\cos(0.5\pi t)$		

在情况1下,分别使用所提方法和文献[24]方法,对区域1、区域3中的FDI攻击信号进行估计,估计效果如图5所示.从图5中可以发现两种方法都具有良好的估计性能,验证了所提方法的可行性.

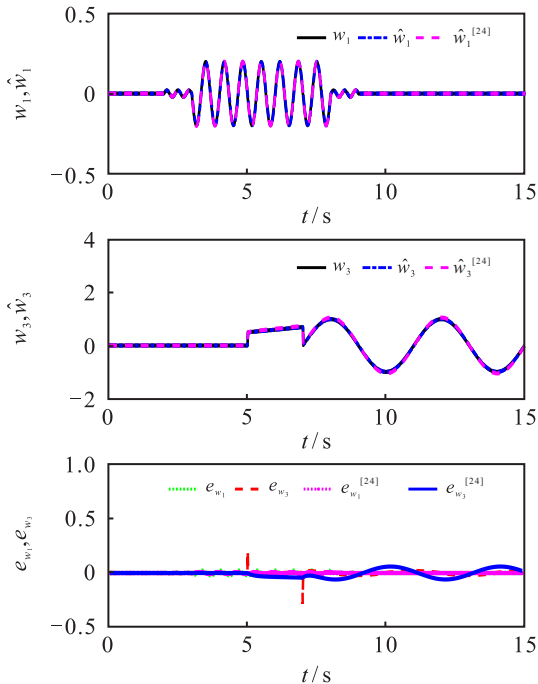


图5 情况1时攻击估计对比

情况2 $\text{rank}(C_i D_i) \neq \text{rank}(D_i)$.

仅改变情况1中区域2、区域4中的参数矩阵 C_i 为

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0.2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, i = 2, 4.$$

此时,容易验证区域2、区域4中的子系统不再满足文献[24]所提观测器中 $\text{rank}(C_i D_i) = \text{rank}(D_i)$ 的匹配条件.

在情况2下,图6和图7分别展示了本文所提观测器和文献[24]所提出的观测器对攻击信号的估计效果.从图7看出文献[24]中的观测器已经不能够估计出攻击信号,而本文所提观测器依然可以实现对攻击信号的准确估计.

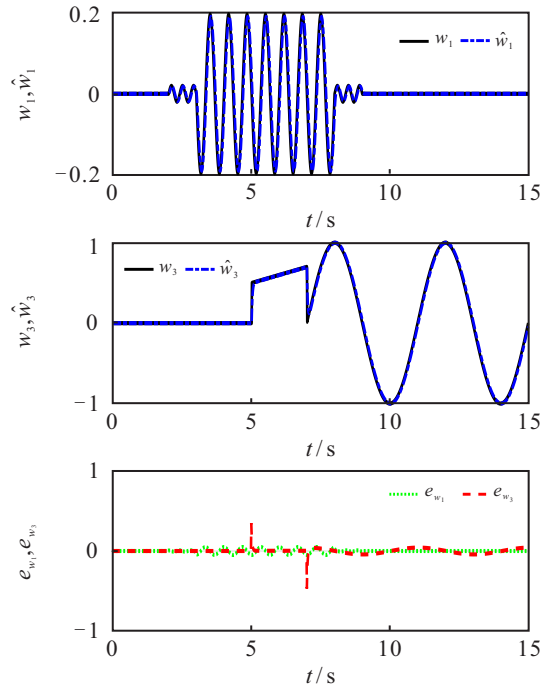


图6 情况2时本文所提方法攻击估计

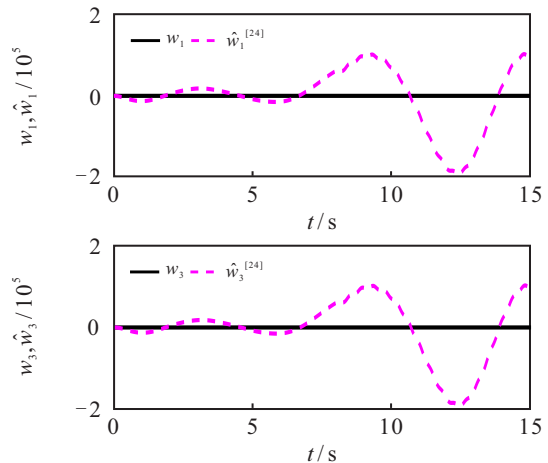


图7 情况2时文献[24]所提方法攻击估计

综合情况1和情况2下两种方法对攻击信号的估计效果,表明了是否满足文献[24]所提出的观测器的匹配条件对本文所提观测器没有影响,进一步说明了本文方法能够克服文献[24]所提观测器的匹配条件.

例2 为了验证所提观测器相较于过去的中间观测器在提高攻击估计性能方面的优势,对所提观测

器与文献[7]中的中间观测器进行对比仿真,使用3.1节子系统2的矩阵参数. 仿真结果见图8,其中图例 e_w 表示攻击估计误差. 通过引入输出估计误差反馈项减少了估计误差,提高了观测器的估计性能.

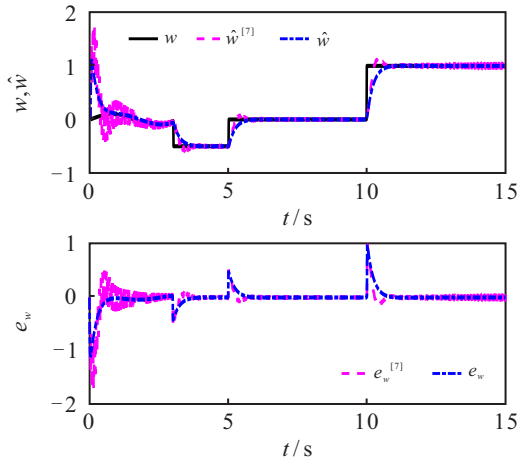


图8 攻击估计和估计误差对比

4 结论

本文提出了一种分布式观测器设计方法用以估计不同状态维度子系统组成的互联CPS的状态和FDI攻击信号,同时考虑了系统的传感器故障. 分布式观测器设计中引入中间变量和输出估计误差反馈项,使得观测器摆脱了传统观测器的匹配条件,且具有更灵活的观测器参数矩阵结构. 在误差动态系统进行稳定性分析时,利用线性矩阵不等式技术给出观测器增益矩阵计算方法. 最后,通过一个数值仿真、两个对比仿真,验证了所提方法的可行性和优越性. 在实际应用场景下,互联CPS可能面临混合模式的网络攻击,此情况下系统的分布式攻击估计问题将变得更加复杂,这将是下一步研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Liu Y, Peng Y, Wang B L, et al. Review on cyber-physical systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 27-40.
- [2] Xie L F, Cheng J, Zou Y L, et al. A dynamic-memory event-triggered protocol to multiarea power systems with semi-markov jumping parameter[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(10): 6577-6587.
- [3] Yang D Y, Wang B, Cai G W, et al. Data-driven estimation of inertia for multiarea interconnected power systems using dynamic mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(4): 2686-2695.
- [4] Mu Y F, Zhang H G, Yan Y Q, et al. Distributed observer-based robust fault estimation design for discrete-time interconnected systems with disturbances[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(10): 6737-6747.
- [5] Guo S H, Tang M Z, Huang D R, et al. State estimation and finite-frequency fault detection for interconnected switched cyber-physical systems[J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(9): 192204.
- [6] Ye L, Zhu F L, Zhang J. Sensor attack detection and isolation based on sliding mode observer for cyber-physical systems[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2020, 34(4): 469-483.
- [7] Zhu J W, Yang G H, Wang H, et al. Fault estimation for a class of nonlinear systems based on intermediate estimator[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(9): 2518-2524.
- [8] Wen S P, Yu X H, Zeng Z G, et al. Event-triggering load frequency control for multiarea power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1308-1317.
- [9] Chen B, Hu G Q, Ho D W C, et al. Distributed estimation and control for discrete time-varying interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(5): 2192-2207.
- [10] Gershon E, Shaked U, Yaesh I. 11 systems with state-multiplicative noise: Applications[C]. *H_∞ Control and Estimation of State-multiplicative Linear Systems*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 175-204.
- [11] 杨光红, 芦安洋, 安立伟. 网络攻击下的信息物理系统安全状态估计研究综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2093-2105.
(Yang G H, Lu A Y, An L W. A survey on secure state estimation of cyber-physical systems under cyber attacks[J]. Control and Decision, 2023, 38(8): 2093-2105.)
- [12] Zhu J W, Yang G H. Robust distributed fault estimation for a network of dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5(1): 14-22.
- [13] Han J, Liu X H, Gao X W, et al. Intermediate observer-based robust distributed fault estimation for nonlinear multiagent systems with directed graphs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7426-7436.
- [14] Zhang K, Jiang B, Chen M, et al. Distributed fault estimation and fault-tolerant control of interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(3): 1230-1240.
- [15] 翁世清, 翁品迪, 周京, 等. FDI攻击下互联电力系统的分布式安全状态估计[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1935-1941.

- (Weng S Q, Weng P D, Zhou J, et al. Distributed secure state estimation for interconnected power systems under FDI attacks[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(7): 1935-1941.)
- [16] Song X N, Man J T, Song S, et al. Finite-time fault estimation and tolerant control for nonlinear interconnected distributed parameter systems with Markovian switching channels[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(3): 1347-1359.
- [17] 郭晨阳, 张柯, 姜斌, 等. 基于中间观测器的异构多智能体系统分布式故障估计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3473-3481.
(Guo C Y, Zhang K, Jiang B, et al. Intermediate observer-based distributed fault estimation for heterogeneous multi-agent systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(12): 3473-3481.)
- [18] Zhou J Y, Yang W, Zhang H, et al. Security analysis and defense strategy of distributed filtering under false data injection attacks[J]. *Automatica*, 2022, 138: 110151.
- [19] Liu Y, Ning P, Reiter M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[J]. *ACM Transactions on Information and System Security*, 2011, 14(1): 1-33.
- [20] Xie Y K, Ma Q. Adaptive event-triggered neural network control for switching nonlinear systems with time delays[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 34(2): 729-738.
- [21] Chen J J, Chen B S, Zeng Z G. Adaptive dynamic event-triggered fault-tolerant consensus for nonlinear multiagent systems with directed/undirected networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, 53(6): 3901-3912.
- [22] Su Q Y, Wang H D, Sun C W, et al. Cyber-attacks against cyber-physical power systems security: State estimation, attacks reconstruction and defense strategy[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2022, 413: 126639.
- [23] 曹腾, 龚华军, 薛艺璇, 等. 基于迭代学习观测器的航天器姿态主动容错控制[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(7): 1323-1330.
(Cao T, Gong H J, Xue Y X, et al. Active fault-tolerant attitude control of spacecraft based on iterative learning observer[J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(7): 1323-1330.)
- [24] Mu Y F, Zhang H G, Yan Y Q, et al. A novel design approach to state and fault estimation for interconnected systems using distributed observer[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2023, 449: 127966.
- [25] Liang D G, Yang Y, Li R C, et al. Plug-and-play robust distributed fault estimation for interconnected systems[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2022, 9(5): 3385-3395.
- [26] Jabbari F, Benson R W. Observers for stabilization of systems with matched uncertainty[J]. *Dynamics and Control*, 1992, 2(3): 303-323.
- [27] Zhan F Z. *The schur complement and its applications*[M]. New York: Springer-Verlag, 2005: 47-60.
- [28] Liu S C, Liu P X. Distributed model-based control and scheduling for load frequency regulation of smart grids over limited bandwidth networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(5): 1814-1823.

作者简介

陈丽(1998—),女,硕士生,主要研究方向为信息物理系统状态估计和攻击估计, E-mail: lichen@post.usts.edu.cn;

郭胜辉(1983—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为观测器、故障诊断, E-mail: shguo@usts.edu.cn.