

控制与决策

Control and Decision

基于相对输出信息的多智能体系统分布式故障检测

李俨, 杨晨

引用本文:

李俨, 杨晨. 基于相对输出信息的多智能体系统分布式故障检测[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1901–1908.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1986>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制](#)

Fixed-time distributed sliding mode cooperative control for multiple surface vessels with actuator faults

控制与决策. 2023, 38(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0747>

[基于分布式观测器的多自主水下机器人确定学习控制](#)

Deterministic learning control of multiple autonomous underwater vehicles based on a distributed observer

控制与决策. 2023, 38(2): 388–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0958>

[基于有限时间未知输入观测器的一类受扰非线性系统故障检测与估计](#)

Fault detection and estimation for a class of disturbed nonlinear systems based on finite-time unknown input observers

控制与决策. 2022, 37(11): 2941–2948 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0538>

[一阶多智能体受扰系统的自抗扰分布式优化算法](#)

Active disturbance rejection distributed optimization algorithm for first-order multi-agent disturbance systems

控制与决策. 2022, 37(6): 1559–1566 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1572>

[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>

基于相对输出信息的多智能体系统分布式故障检测

李 俨, 杨 晨[†]

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘 要: 针对一类邻居控制信息未知, 且节点只能获得相对输出信息的多智能体系统, 研究基于未知输入观测器的分布式故障检测问题, 以实现节点对自身及邻居故障的实时检测. 首先, 通过对节点动力学模型进行分解与变换, 构造出基于相对输出信息的故障检测参考模型, 并给出未知输入观测器的存在性证明; 接着, 设计不依赖邻居节点控制信息的未知输入观测器, 突破控制信息缺失导致观测器失效的理论难题; 最后, 借助未知输入观测器设计故障检测算法, 并完成算法的分布式实现. 仿真结果验证了所提方法的有效性与先进性.

关键词: 故障检测; 多智能体系统; 未知输入观测器; 相对输出信息; 参考模型; 分布式算法

中图分类号: TP277

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1986

引用格式: 李俨, 杨晨. 基于相对输出信息的多智能体系统分布式故障检测[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1901-1908.

Distributed fault detection of multi-agent system based on relative output information

LI Yan, YANG Chen[†]

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For a class of multi-agent systems where the control information of neighbor nodes is unknown and only local relative output information is available for each agent, the distributed fault detection problem based on the unknown input observers is investigated in this paper, and the real-time fault detection of agent itself and its neighbors is realized. Firstly, by decomposing and transforming the node dynamics, a reference model for fault detection based on the relative output information is constructed, and the existence of the unknown input observer is proved. Then, the unknown input observer that decoupled from the control information of neighbor nodes is designed, which breaks the limitation that the lack of control information may lead to the failure of the observer. Finally, the fault detection algorithm based on the unknown input observer is designed, and the distributed implementation of the algorithm is achieved. The simulation results validate the effectiveness and improvements of the proposed algorithm.

Keywords: fault detection; multi-agent system; unknown input observer; relative output information; reference model; distributed algorithm

0 引 言

多智能体系统以其结构灵活、鲁棒性强、群体智能涌现等优势成为现代控制系统的经典案例, 并在工业生产、交通运输、生物医药、军事装备等诸多领域得到了广泛应用^[1-4]. 然而, 随着系统规模及复杂程度的不断提高, 系统故障将难以避免. 与传统单一控制系统相比, 多智能体系统缺乏中心节点来统筹系统的整体行为, 这导致单一节点故障极易通过节点间的协同与合作关系扩散至整个系统, 给系统的安全性带来

严峻挑战. 在此背景下, 如何针对多智能体系统开发可靠的故障检测算法, 成为一个亟待解决的限制其发展的关键问题.

现有面向多智能体系统的故障检测研究大多是在传统基于定量分析的故障检测算法上进行改进, 使其满足多智能体系统分布式、高动态、强实时性等需求. 按检测方法区分, 现有成果主要可分为基于解析模型和数据驱动的故障检测方法两大类. 基于解析模型的故障检测方法由于动态特性好、可靠性高等

收稿日期: 2021-11-15; 录用日期: 2022-03-28.

基金项目: 科技创新 2030 —— “新一代人工智能” 重大项目 (2020AAA0108100); 国家自然科学基金青年基金项目 (62103304); 上海市青年科技英才扬帆计划项目 (21YF1450500); 上海市市级科技重大专项 (2021SHZDZX0100); 上海市科研计划项目 (19511132101).

责任编辑: 叶丹.

[†]通讯作者. E-mail: yang_chen@tongji.edu.cn.

优势得到广泛应用,其研究起始于20世纪70年代初期^[5],经过多年发展,目前已建立完备的理论体系.未知输入观测器是该领域研究中的常用工具,Shames等^[6-7]在一系列文章中研究了借助未知输入观测器对多智能体系统进行故障检测的基本方法.在此基础上,针对更为复杂的非线性多智能体系统^[8]、高阶异构非线性多智能体系统^[9]、切换拓扑多智能体系统^[10]、带有未知扰动的多智能体系统^[11]等,均有相应研究成果出现.此外,基于滑模观测器^[12-13]、最优鲁棒状态观测器^[14-15]的故障检测方法也已应用至多智能体系统中.数据驱动的故障检测方法因其可以从数据中直接观测出系统的整体运行状态,避免系统模型对检测算法影响的优势受到了学者们的关注^[16-17].但考虑到该方法通常需要大量历史数据做支撑,且需要对每个节点都进行长时间的离线调试,因此更加适用于对运动学特性不敏感的静态多智能体系统(如智能传感器网络等^[18]).

多智能体系统中节点的运行状态受到自身及其邻居共同影响,为保系统安全,节点需同时检测自身及邻居节点中的故障.然而,邻居节点的控制信息作为其内部信息通常不会共享,尤其是当系统面临诸如灾区救援无可用信号、战场电磁屏蔽、密林或室内通信受限等环境时,节点仅依赖车载传感器采集数据,此时邻居节点的控制信息将更加难以获得.考虑到现有的故障检测算法需要依赖控制信息界定正常控制行为和故障行为,控制信息的缺失将严重影响算法的有效性.此外,多智能体系统特殊的分布式结构决定了节点通常只能获得包括相对位置、相对速度等在内的局部相对信息^[19-21],而由此导致的未知输入观测器不存在等理论难题也将进一步限制检测算法的有效性.上述缺陷给故障检测算法的实际应用带来了诸多限制,但现有研究对此却少有关注.

本文针对仅能获得局部相对输出信息的多智能体系统设计分布式故障检测算法,主要创新点在于:

1) 给出不依赖邻居节点控制信息的未知输入观测器的存在性证明,并有针对性地设计新的故障检测架构,从理论上突破邻居控制信息缺失导致现有故障检测算法失效的难题;

2) 通过巧妙模型变换构造出故障检测参考模型,克服节点仅获得相对输出信息时,其动力学模型不存在对应未知输入观测器用以检测故障的缺陷;

3) 设计基于未知输入观测器的故障检测算法,推导出可行的故障节点定位逻辑,并完成故障检测算法的分布式实现.

1 预备知识与问题描述

1.1 系统建模

本文使用如下标准数学符号: \mathbf{R} 代表实数, \mathbf{R}^n 和 $\mathbf{R}^{m \times n}$ 分别代表对应维度的实数向量和实数矩阵, $\text{rank}(\cdot)$ 代表矩阵的秩, $\text{diag}(\cdot)$ 代表对角矩阵, I_n 代表单位矩阵, $\mathbf{1}_{m \times n}$ 代表所有元素均为1的矩阵, $\mathbf{0}_{m \times n}$ 代表所有元素均为0的矩阵, $\|\cdot\|$ 代表向量的欧几里得范数, \otimes 代表克罗内克积.

考虑由 N 个节点构成的多智能体系统,节点间的连接关系由无向连通图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 描述.其中: $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点集, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 为边集.若边 $(i, j) \in \mathcal{E}$,则称节点 i 与节点 j 互为邻居节点.记节点 i 的邻居集为 \mathcal{N}_i , $c_i = |\mathcal{N}_i|$ 为集合的势.对于无向连通图 \mathcal{G} ,其Laplace矩阵 $L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 定义为

$$l_{ii} = |\mathcal{N}_i|, l_{ij} = \begin{cases} -1 & \Rightarrow j \in \mathcal{N}_i; \\ 0 & \Rightarrow j \notin \mathcal{N}_i. \end{cases} \quad (1)$$

引理1 对于无向连通图 \mathcal{G} ,其Laplace矩阵 L 为实对称半正定矩阵,满足 $L\mathbf{1}_{N \times 1} = \mathbf{0}_{N \times 1}$,且 $\lambda_1 = 0 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$,其中 λ_i ($i = 1, 2, \dots, N$)为矩阵 L 的特征值.

带有故障信号的节点动力学模型可由如下线性时不变系统描述:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + Ef_i(t), \\ y_i(t) &= Cx_i(t). \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $x_i \in \mathbf{R}^{n_x}$ 、 $u_i \in \mathbf{R}^{n_u}$ 和 $y_i \in \mathbf{R}^{n_y}$ 分别表示节点的状态向量、控制输入向量和输出向量; $f_i \in \mathbf{R}^{n_f}$ 表示故障信号,若 $f_i \neq \mathbf{0}$,则代表节点 i 中存在故障; $A \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}$ 、 $B \in \mathbf{R}^{n_x \times n_u}$ 、 $C \in \mathbf{R}^{n_y \times n_x}$ 、 $E \in \mathbf{R}^{n_x \times n_f}$ 为对应维度的系统矩阵.

多智能体系统的分布式特性导致模型(2)中节点的绝对输出向量 $y_i(t)$ 难以直接获得(如节点的全局位置、全局速度等).为使本文研究更具普适性,假定节点只能获得局部相对输出向量

$$z_{ij} = y_i(t) - y_j(t) = C(x_i(t) - x_j(t)), \forall j \in \mathcal{N}_i.$$

考虑如下相对输出向量的累加和形式:

$$z_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} z_{ij}, \quad (3)$$

其中 $z_i \in \mathbf{R}^{n_y}$.节点的控制协议具有如下一般形式:

$$u_i(t) = \Xi z_i(t) + \xi_i(t). \quad (4)$$

其中: Ξ 为一致性控制率, $\xi_i(t)$ 为节点外部参考输入.一致性是多智能体系统的基本特征,故本文假定多智能体系统满足如下输出一致性假设.

假设 1 (多智能体系统的输出一致性假设) 对于由无向连通图 \mathcal{G} 描述的多智能体系统, 节点动力学模型如式 (2) 所示. 若系统中不存在故障节点, 即 $\forall i \in \mathcal{V}, f_i(t) \equiv 0$, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\xi_i(t) - \xi_j(t)\| = 0, i, j \in \mathcal{V}$, 则所有节点可达成输出一致, 满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_i(t) - y_j(t)\| = 0, i, j \in \mathcal{V}$.

1.2 问题建模

为检测节点动力学模型 (2) 中的故障信号 $f_i(t)$, 设计具有如下形式的状态观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i(t) &= F\omega_i(t) + TBu_i(t) + Ky_i(t), \\ \hat{x}_i(t) &= \omega_i(t) + Hy_i(t). \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\omega_i(t)$ 是观测器状态向量, $\hat{x}_i(t)$ 是状态估计向量.

引理 2 [22] 对于节点动力学模型 (2), 观测器 (5) 可构成未知输入观测器的充分必要条件如下:

- 1) $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E) = n_f$;
- 2) 矩阵 $\begin{bmatrix} sI_{n_x} - A & E \\ C & 0 \end{bmatrix}$ 对于所有 $\text{Re}(s) \geq 0$ 均列满秩.

假设 2 对于由无向连通图 \mathcal{G} 描述的多智能体系统, 其所有节点 $i \in \mathcal{V}$ 的系统矩阵 A, B, C, E 均满足引理 2 中所述条件.

注 1 假设 2 成立是借助未知输入观测器对多智能体系统进行故障检测的前提, 且假设 2 本身并不严苛 [6], 相关条件可通过对节点动力学模型进行合理变换达成 [22].

本文的研究目标是针对所有节点设计未知输入观测器 (5), 使得节点自身及其所有邻居均可检测到故障信号 $f_i(t)$. 对于多智能体系统, 设计未知输入观测器 (5) 存在诸多限制: 一方面, 节点通常只能获得相对输出向量 $z_i(t)$, 这使得未知输入观测器 (5) 无法直接设计, 且由引理 2 给出的存在条件也不再成立; 另一方面, 为保证系统安全, 控制向量 $u_i(t)$ 通常为节点私有信息, 不与邻居节点共享, 此时邻居节点中针对目标节点 i 的未知输入观测器会因缺少关键信息 $u_i(t)$ 而失效. 由此, 本文待解决的问题可总结如下:

- 1) 给出仅依赖相对输出信息 $z_i(t)$ 的未知输入观测器存在性证明, 并给出观测器具体设计方法;
- 2) 完成邻居控制信息无法获得条件下, 基于未知输入观测器的故障检测算法设计及有效性验证.

2 基于未知输入观测器的故障检测算法

2.1 参考模型设计

将节点动力学模型 (2) 及相对输出向量 (3) 扩展至整个多智能体系统, 可得

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ (I_N \otimes A)x(t) + (I_N \otimes B)u(t) + (I_N \otimes E)f(t), \\ z(t) = (L \otimes C)x(t). \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} x(t) &:= [x_1^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T, \\ u(t) &:= [u_1^T(t), \dots, u_N^T(t)]^T, \\ f(t) &:= [f_1^T(t), \dots, f_N^T(t)]^T, \\ z(t) &:= [z_1^T(t), \dots, z_N^T(t)]^T. \end{aligned}$$

推论 1 由无向连通图 \mathcal{G} 描述的多智能体系统, 其扩张节点动力学模型 (6) 不存在对应的未知输入观测器用以检测 $f(t)$.

证明 由引理 2 可知, 模型 (6) 存在未知输入观测器的必要条件之一是 $\text{rank}((L \otimes C)(I_N \otimes E)) = \text{rank}(I_N \otimes E)$. 考虑到 $\text{rank}((L \otimes C)(I_N \otimes E)) = \text{rank}(L)\text{rank}(CE)$, 由引理 1 可知矩阵 L 有且仅有一个 0 特征值, 于是 $\text{rank}((L \otimes C)(I_N \otimes E)) = (N - 1)n_f < \text{rank}(I_N \otimes E) = Nn_f$, 由此未知输入观测器存在的必要条件不成立, 推论 1 得证. \square

为获得可用于故障检测的参考模型, 考虑对模型 (6) 进行变换. 由引理 1 可知 L 为实对称半正定矩阵, 于是 L 的所有单位化特征向量构成正交矩阵 $Q \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 且满足

$$\begin{aligned} Q^T Q &= Q Q^T = I_N, \\ Q^T L Q &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}_{1 \times (N-1)} \\ \mathbf{0}_{(N-1) \times 1} & A \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $A = \text{diag}(\lambda_2, \dots, \lambda_N)$. 对式 (6) 作如下变量替换:

$$\begin{cases} \bar{x}(t) = (P \otimes I_{n_x})^{-1}x(t) := [\bar{x}_1^T(t), \dots, \bar{x}_N^T(t)]^T, \\ \bar{z}(t) = (Q \otimes I_{n_y})^T z(t) := [\bar{z}_1^T(t), \dots, \bar{z}_N^T(t)]^T. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $P = QR, R \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为待设计的满秩系数矩阵, 于是有

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= (I_N \otimes A)\bar{x}(t) + (P^{-1} \otimes B)u(t) + (P^{-1} \otimes E)f(t), \\ \bar{z}(t) &= (Q^T L P \otimes C)\bar{x}(t). \end{aligned}$$

对矩阵 R 进行分块

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} \in \mathbf{R}^{1 \times 1} & R_{12} \in \mathbf{R}^{1 \times (N-1)} \\ R_{21} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times 1} & R_{22} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix},$$

可得

$$Q^T L P = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}_{1 \times (N-1)} \\ \Lambda R_{21} & \Lambda R_{22} \end{bmatrix}.$$

进一步令 $R_{21} = \mathbf{0}_{(N-1) \times 1}$, 并对矩阵 P^{-1} 进行分块

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} P_{11} \in \mathbf{R}^{1 \times 1} & P_{12} \in \mathbf{R}^{1 \times (N-1)} \\ P_{21} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times 1} & P_{22} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix}.$$

于是有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \underbrace{(I_{N-1} \otimes A)}_{\tilde{A}} \tilde{x}(t) + \underbrace{(I_{N-1} \otimes B)}_{\tilde{B}} \tilde{u}(t) + \underbrace{(I_{N-1} \otimes E)}_{\tilde{E}} \tilde{f}(t), \\ \tilde{z}(t) = \underbrace{(AR_{22} \otimes C)}_{\tilde{C}} \tilde{x}(t). \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &:= [\tilde{x}_2^T(t), \dots, \tilde{x}_N^T(t)]^T, \\ \tilde{z}(t) &:= [\tilde{z}_2^T(t), \dots, \tilde{z}_N^T(t)]^T, \\ \tilde{u}(t) &= ([P_{21} \ P_{22}] \otimes I_{n_u})u(t), \\ \tilde{f}(t) &= ([P_{21} \ P_{22}] \otimes I_{n_f})f(t) := \\ &[\tilde{f}_2^T(t), \dots, \tilde{f}_N^T(t)]^T. \end{aligned}$$

需要说明的是, 模型(9)只能用于检测 $\tilde{f}(t) \in \mathbf{R}^{(N-1) \times n_f}$. 考虑到 $\tilde{f}(t) = ([P_{21} \ P_{22}] \otimes I_{n_f})f(t)$, 可将 $[P_{21} \ P_{22}]$ 视为 $\tilde{f}(t)$ 与 $f(t)$ 之间的逻辑对应矩阵, 通过设计矩阵 R 以合理规划 $\tilde{f}(t)$ 与 $f(t)$ 之间的逻辑对应关系, 最终借助对 $\tilde{f}(t)$ 的检测结果间接推断系统中的故障节点. 具体而言, 假定所需的逻辑对应矩阵为 $[P_{21}^* \ P_{22}^*]$, 选取适当的 $[P_{11}^* \ P_{12}^*]$, 令

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} P_{11}^* & P_{12}^* \\ P_{21}^* & P_{22}^* \end{bmatrix},$$

且 $\text{rank}(P^{-1}) = N$, 于是系数矩阵 R 可设计为

$$\begin{aligned} R &= Q^T P; \\ \text{s.t. } R_{21} &= \mathbf{0}_{(N-1) \times 1}. \end{aligned} \quad (10)$$

推论 2 对于参考节点动力学模型(9), 若 $\tilde{u}(t)$ 和 $\tilde{z}(t)$ 已知, 则未知输入观测器存在的充要条件是 $\text{rank}(R_{22}) = N - 1$, 且条件成立时式(10)有可行解.

证明 当 $\text{rank}(R_{22}) = N - 1$ 时, 可得 $\text{rank}(AR_{22}) = N - 1$, 参考引理 2 易证此为未知输入观测器存在的充要条件, 详细证明过程此处不再赘述. 接下来, 证明式(10)有可行解. 对 Q 进行分块

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} \in \mathbf{R}^{1 \times 1} & Q_{12} \in \mathbf{R}^{1 \times (N-1)} \\ Q_{21} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times 1} & Q_{22} \in \mathbf{R}^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix}.$$

由引理 1 可知 $L\mathbf{1}_{N \times 1} = \mathbf{0}_{N \times 1}$, 于是特征值 0 对应的特征向量为 $\mathbf{1}_{N \times 1}$, 可得 $Q_{11} = 1/\sqrt{N}$, $Q_{21} =$

$(1/\sqrt{N})\mathbf{1}_{(N-1) \times 1}$, 进一步结合 $QQ^T = I_N$ 可得

$$\begin{cases} Q_{12}Q_{12}^T = 1 - \frac{1}{N}, \\ Q_{22}Q_{12}^T = -\frac{1}{N}\mathbf{1}_{(N-1) \times 1}, \\ Q_{22}Q_{22}^T = I_{N-1} - \frac{1}{N}\mathbf{1}_{(N-1) \times (N-1)}. \end{cases} \quad (11)$$

易证 $\text{rank}(Q_{22}) = \text{rank}(Q_{22}Q_{22}^T) = N - 1$. 由式(10)可得

$$\begin{cases} R_{11}P_{11}^* + R_{12}P_{21}^* = Q_{11}, \quad R_{22}P_{22}^* = Q_{22}^T; \\ R_{11}P_{12}^* + R_{12}P_{22}^* = Q_{21}^T, \quad R_{22}P_{21}^* = Q_{12}^T. \end{cases} \quad (12)$$

于是只需满足 $\text{rank}(P_{22}^*) = N - 1$ 即可保证 $\text{rank}(R_{22}) = N - 1$. 不妨令 $P_{22}^* = I_{N-1}$, 代入式(12)可得 $P_{21}^* = -\mathbf{1}_{(N-1) \times 1}$. 进一步, 为保证 $\text{rank}(P^{-1}) = N$, 令 $P_{11}^* = 1$, $P_{12}^* = \mathbf{0}_{1 \times (N-1)}$, 易证 P_{11}^* 、 P_{12}^* 满足式(12), 由此

$$\begin{bmatrix} P_{11}^* & P_{12}^* \\ P_{21}^* & P_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times (N-1)} \\ -\mathbf{1}_{(N-1) \times 1} & I_{N-1} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

可构成式(10)的一个特解, 推论 2 得证. \square

式(13)给出了逻辑对应矩阵的一种可行构造方法, 此时 $\tilde{f}(t)$ 与 $f(t)$ 之间的逻辑对应关系可表示为

$$\begin{cases} \tilde{f}_i(t) \neq 0, \forall \tilde{f}_i(t) \in \tilde{f}(t) \Rightarrow f_1(t) \neq 0; \\ \tilde{f}_i(t) \neq 0, \tilde{f}_j(t) = 0, \forall j \neq i \Rightarrow f_i(t) \neq 0. \end{cases} \quad (14)$$

2.2 未知输入观测器设计

为检测模型(9)中的故障信号 $\tilde{f}(t)$, 设计具有如下形式的状态观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}(t) &= F\omega(t) + T\tilde{B}\hat{u}(t) + K\tilde{z}(t), \\ \hat{x}(t) &= \omega(t) + H\tilde{z}(t). \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $\omega(t)$ 是观测器状态向量, $\hat{x}(t)$ 是状态估计向量, $\hat{u}(t)$ 是输入估计向量. 考虑到多智能体系统中节点的控制输入信息是私有的, 对于 $\forall i \in \mathcal{V}$, $\hat{u}(t)$ 的选取规则定义为

$$\begin{aligned} \hat{u}(t) &= \\ &([P_{21} \ P_{22}] \otimes I_{n_u})((I_N \otimes \Xi)\hat{z}(t) + \mathbf{1}_{N \times 1} \otimes \xi_i(t)). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{z}(t) &= [\hat{z}_1^T(t), \dots, \hat{z}_N^T(t)]^T, \\ \hat{z}_j(t) &= z_{ij}(t) + \sum_{l \in \mathcal{N}_i \cap \mathcal{N}_j} z_{jl}(t), \end{aligned}$$

Ξ 、 $\xi_i(t)$ 与式(4)中定义相同.

定理 1 对于参考节点动力学模型(9)及输入估计向量(6), 若 $\text{rank}(R_{22}) = N - 1$, 则状态观测器

(15)可构成未知输入观测器,且可用于检测故障信号 $\tilde{f}(t)$,其系数矩阵满足

$$\begin{aligned} (H\tilde{C} - I_{(N-1)n_x})\tilde{E} &= 0, T = I_{(N-1)n_x} - H\tilde{C}, \\ F &= \tilde{A} - H\tilde{C}\tilde{A} - K_1\tilde{C}, K_2 = FH, \\ K &= K_1 + K_2. \end{aligned} \quad (17)$$

证明 首先由引理 2 及推论 2 可知,当 $\text{rank}(R_{22}) = N - 1$ 时未知输入观测器 (15) 存在,于是条件 (17) 有解,且矩阵 H 的一个特解为

$$H = \tilde{E}[(\tilde{C}\tilde{E})^T\tilde{C}\tilde{E}]^{-1}(\tilde{C}\tilde{E})^T, \quad (18)$$

其他矩阵 F 、 T 、 K 可对应求出.接着证明未知输入观测器 (15) 可用于检测故障信号 $\tilde{f}(t)$. 定义估计误差 $e(t) = \tilde{x}(t) - \hat{x}(t)$,由式 (9) 及 (15) 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (\tilde{A} - H\tilde{C}\tilde{A} - K_1\tilde{C})e(t) - \\ &[F - (\tilde{A} - H\tilde{C}\tilde{A} - K_1\tilde{C})]\omega(t) - \\ &[K_2 - (\tilde{A} - H\tilde{C}\tilde{A} - K_1\tilde{C})H]z(t) - \\ &T\tilde{B}\hat{u}(t) - (H\tilde{C} - I)\tilde{B}\hat{u}(t) - (H\tilde{C} - I)\tilde{E}\tilde{f}(t). \end{aligned}$$

将条件 (17) 代入可得

$$\dot{e}(t) = Fe(t) + T\tilde{B}(\hat{u}(t) - \hat{u}(t)). \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} T\tilde{B}(\hat{u}(t) - \hat{u}(t)) &= \\ T([P_{21} \ P_{22}] \otimes B)((I_N \otimes \Xi)(z(t) - \\ \hat{z}(t)) + \xi(t) - \mathbf{1}_{N \times 1} \otimes \xi_i(t)), \\ \xi(t) &= [\xi_1^T(t), \dots, \xi_N^T(t)]^T. \end{aligned}$$

由假设 1 可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\xi_i(t) - \xi_j(t)\| = 0$, 于是 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\xi(t) - \mathbf{1}_{N \times 1} \otimes \xi_i(t)\| = 0$. 进一步,若节点 i 为中心节点,即 $\forall l \in \mathcal{N}_j, l \in \mathcal{N}_i$,则其所有邻居节点的控制输入信息可借助式 (16) 重构,此时 $z(t) - \hat{z}(t) = 0$ 在任意时刻均成立;若节点 i 为非中心节点,即对于 $j \in \mathcal{N}_i, \exists l \in \mathcal{N}_j, l \notin \mathcal{N}_i$,此时 $z(t) - \hat{z}(t) = \sum_{l \in \mathcal{N}_j, l \notin \mathcal{N}_i} z_{jl}(t)$,考虑到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|z_{jl}(t)\| = 0$,于是有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|z(t) - \hat{z}(t)\| = 0$ 成立.由以上结论可推导出 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{u}(t) - \hat{u}(t)\| = 0$,于是对于式 (19),只需令 F 为 Hurwitz 矩阵即可保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$,此时状态观测器 (15) 可摒除故障信号 $\tilde{f}(t)$ 的影响估计系统的真实状态信息,即式 (15) 可用于检测故障信号 $\tilde{f}(t)$,定理 1 得证. \square

定理 1 不仅给出了未知输入观测器的存在性证明,同时也给出了其可行的构造方法.在此基础上,可进一步针对式 (15) 设计基于未知输入观测器的故障检测算法.

2.3 故障检测算法设计

残差生成与残差评价是故障检测的两大核心环节.首先,为生成可用于区分单一节点故障的残差信号,对参考模型 (9) 进行如下变形:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}\hat{u}(t) + \tilde{E}_i\tilde{f}_i(t) + \tilde{E}_{-i}\tilde{f}_{-i}(t), \\ \tilde{z}(t) = \tilde{C}\tilde{x}(t). \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\tilde{E}_i = I_{N-1}^i \otimes E$, I_{N-1}^i 为单位阵 I_{N-1} 的第 i 列, \tilde{E}_{-i} 为矩阵 \tilde{E} 剔除 \tilde{E}_i 后剩余部分构成的矩阵, $\tilde{f}_i(t)$ 为故障信号 $\tilde{f}(t)$ 的第 i 项元素, $\tilde{f}_{-i}(t)$ 为 $\tilde{f}(t)$ 剔除第 i 项元素后剩余部分构成的向量.

对于模型 (20),将 $\tilde{f}_{-i}(t)$ 视为未知输入信号,于是参考式 (15) 可设计如下基于未知输入观测器的残差生成器:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i(t) = F_i\omega_i(t) + T_i\tilde{B}\hat{u}(t) + K_i\tilde{z}(t), \\ \hat{x}_i(t) = \omega_i(t) + H_i\tilde{z}(t), \\ e_i(t) = \tilde{x}(t) - \hat{x}_i(t), r_i(t) = \tilde{C}e_i(t). \end{cases} \quad (21)$$

其中: $e_i(t)$ 为估计误差, $r_i(t)$ 为残差信号,系数矩阵 F_i 、 T_i 、 K_i 、 H_i 满足条件 (17). 需注意,由于此时只将 $\tilde{f}_{-i}(t)$ 视为未知输入信号,条件 (17) 中的 \tilde{E} 应替换为 \tilde{E}_{-i} . 采用与定理 1 相同的证明方式可得 $\dot{e}_i(t) = F_i e_i(t) + T_i \tilde{E}_{-i} \tilde{f}_{-i}(t)$. 考虑到 \tilde{C} 为满列秩矩阵,于是当 F_i 为 Hurwitz 矩阵时有 $\|e_i(t)\| = 0 \Leftrightarrow \|r_i(t)\| = 0 \Leftrightarrow \|\tilde{f}_{-i}(t)\| = 0$. 在式 (21) 的基础上,针对 $\tilde{f}(t)$ 中的每个元素分别构造基于未知输入观测器的残差生成器,即可获得一组残差信号 $r_2(t), \dots, r_N(t)$. 为提高残差评价的准确性,需进一步设计门限函数以完成残差评价,并在此基础上给出故障检测结果. 考虑如下残差评价逻辑:

$$\begin{cases} \|r_i(t)\| \geq J_{th} \Rightarrow \tilde{f}_i(t) \neq 0; \\ \|r_i(t)\| < J_{th} \Rightarrow \tilde{f}_i(t) = 0. \end{cases} \quad (22)$$

其中 J_{th} 为门限函数. 需要说明的是,门限函数的选取与设计同样会对故障检测算法的性能产生显著影响,目前相关研究已有大量成果出现. 考虑到相关工作并非本文的核心内容,这里采用最常用的门限函数设定逻辑,即 $J_{th} = \sup_{f_i=0} \|r_i(k)\|$,其具体取值将通过实验测试获得.

借助式 (22) 获得所有 $\tilde{f}_i(t) \in \tilde{f}(t)$ 的残差评价结果后,利用逻辑对应关系 (14) 即可推断出系统中的故障节点. 至此基于未知输入观测器的故障检测方法已全部设计完成,详细设计步骤可总结为如下算法.

算法 1 基于未知输入观测器的故障检测方法.

输入: 相对输出向量 $z_i(t), \forall i \in \mathcal{V}$, 系统矩阵 A 、 B 、 C 、 E ;

输出: 节点故障检测结果.

- 1) 依据系统拓扑 \mathcal{G} 及 Laplace 矩阵定义(1) 构造扩展系统模型(6);
- 2) 对 L 进行特征值分解, 构造 Q 、 Λ 满足式(7);
- 3) 参考式(13)设计 $[P_{21}^* \ P_{22}^*]$, 并进一步构造矩阵 P^{-1} ;
- 4) 对模型(6)作变量替换式(8);
- 5) 参考式(10)构造矩阵 R , 对 R 分块, 并设计参考模型(9);
- 6) 将参考模型(9)变形为式(20), 借助式(16)构造 $\hat{u}(t)$, 并对应设计残差生成器(21);
- 7) 参考式(17)计算 F_i 、 T_i 、 K_i 、 H_i , 代入式(21)中获得残差信号 $r_i(t)$;
- 8) 借助残差评价逻辑(22)获得残差评价结果;
- 9) 参考逻辑对应关系(14)获得对信号 $f_i(t)$ 的评价, 并对应输出节点故障检测结果.

算法1给出了故障检测算法的全局构造方法. 对于实际多智能体系统, 节点通常只能获得局部信息, 此时可将算法1分布化实现以适应实际系统需求, 同时降低算法的计算复杂度. 具体而言, 取系统中任意节点 i 为局部中心节点, 令 i 及其所有邻居构成局部检测网络 $\mathcal{G}_i = (\mathcal{V}_i, \mathcal{E}_i)$. 其中: $\mathcal{V}_i = \mathcal{N}_i \cup \{i\}, \mathcal{E}_i \subseteq \mathcal{V}_i \times \mathcal{V}_i$, 此时邻居节点的相对输出信息记为 $\forall j \in \mathcal{N}_i, z_j(t) = \sum_{l \in \mathcal{V}_i \cap \mathcal{N}_j} C(x_j(t) - x_l(t))$. 进一步, 参考算法1构建面向 \mathcal{G}_i 的故障检测算法, 保证节点 i 可实时监测自身及其所有邻居节点中的故障. 将上述设计过程重复应用至系统中的所有节点, 即可完成分布式故障检测算法设计.

从算法1的设计过程中可以看出, 该算法的主要计算量集中在对残差生成器(21)系数矩阵的设计上, 然而该过程只需在算法初始化阶段完成即可, 并不需要对系数矩阵进行实时更新. 由此, 每个节点在实际运行过程中只需将相对输出向量 $z_i(t)$ 及控制向量估计值 $\hat{u}(t)$ 输入残差生成器(21)中, 并相应计算出残差向量即可, 相关计算量极小, 不会对系统的实时性造成影响.

3 仿真验证

参照文献[15]给出的 Pioneer-3 先锋机器人模型, 仿真部分采用如下典型的双积分器模型, 借以模拟实际多智能体系统的运行状态:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i \\ v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f_i, \quad (23)$$

$$z_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i - p_j \\ v_i - v_j \end{bmatrix}.$$

其中: p_i 、 v_i 分别对应节点 i 的位置和速度信息; z_i 为相对输出信息, 用以模拟系统在恶劣工作环境下无法建立无线网络通信, 只能借助车载速度及位置传感器测量局部相对信息的情况. 容易验证模型(23)满足引理2所述条件. 采用如下一致性控制协议:

$$u_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\gamma_p(p_i - p_j) + \gamma_v(v_i - v_j)), \quad (24)$$

其中 $\gamma_p = \gamma_v = 0.5$. 协议(24)的控制目标是使所有节点的速度与位置均达成一致. 节点间的连接关系如图1所示.

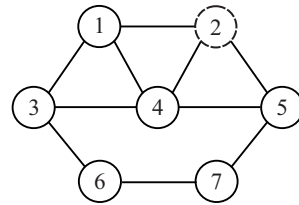


图1 多智能体系统拓扑图

以节点1为例, 将其视为中心节点构造局部检测网络 $\mathcal{G}_1 = (\{1, 2, 3, 4\}, \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 4)\})$, 于是有

$$L_1 = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}, \quad P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & -0.2887 & -0.8165 \\ 0.5 & -0.7071 & -0.2887 & 0.4082 \\ 0.5 & 0.7071 & -0.2887 & 0.4082 \\ 0.5 & 0 & 0.8660 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & -0.7071 & 0.7071 & 0 \\ 0 & -0.2887 & -0.2887 & 0.8660 \\ 0 & 0.4082 & 0.4082 & 0 \end{bmatrix}.$$

节点1中共存在3个未知输入观测器, 其观测器矩阵 H 、 T 、 F 、 K 可借助定理1对应求出. 为确保 F 为 Hurwitz 矩阵, 对 $(T\tilde{A}, \tilde{C})$ 采用极点配置方法设计矩阵 K_1 , 使得 F 所有特征值均配置为 -1 . 测试发现当取门限值为 2.5 时模型检测效果较好, 这里令 $J_{th} = 2.5$ 并将其作为系统预设参数.

选取节点2为故障节点, 其在 $t = 15s$ 时刻遭受故障信号 $f_2 = 2$ 影响, 同时为增加仿真结果的

真实性,为所有节点状态信息增加 $[-0.5 \quad 0.5]$ 范围内均匀分布的随机干扰.将本文提出的基于未知输入观测器的故障检测算法应用至节点1~6中,并令节点6中未知输入观测器的输入估计向量为 $\hat{u}(t) = [2\sin(t) \quad 2\sin(t)]^T$,借以模拟文献[19]中所述基于相对输出测量的故障检测架构在邻居节点控制信息未知情况下的故障检测结果.进一步,假设节点7可获得自身及邻居的绝对输出信息和控制输入信息,将文献[6,22]中所述基于未知输入观测器的经典故障检测方法应用至节点7,并将其检测结果与本文所述故障检测算法的检测结果进行对比.

图2给出了各个节点的故障检测结果,其中实线表示门限函数 J_{th} .为使图像展示更加直观,残差信号 $r_i(t)$ 下标不再采用 $i = 2, 3, \dots$ 的顺序标注方式,而是采用局部检测网络中与中心节点相关联的节点编号进行标注.节点1~6的残差评价结果及借助逻辑(14)推导出的故障检测结果可总结为表1.

从图2及表1可以看出,节点2及其邻居节点1、4、5均可成功检测出故障,这验证了本文所提算法的有效性.进一步,如图2(f)所示,节点6在控制输入信息无法获取的情况下产生了误检现象,与图2(a)~(c)及图2(e)的检测结果进行对照后可以表明,本文所述故障检测算法能够成功克服邻居节点控制输入未知导致的传统故障检测算法失效难题,这验证了本文所提算法的先进性.图2(g)给出了绝对输出信息和控制输入信息已知情况下,传统基于未知输入观测器故障检测方法的检测结果,对比图2(g)与图2(c)可以发现,本文所述故障检测算法的主要缺陷在于其更易受系统中干扰信号的影响,主要原因为:1)本文所述算法基于相对输出信息,其检测精度将受到多节点干扰的累加影响;2)受局部信息获取限制,本文给出的控制信息估计算法需一段时间的数据迭代才能消除对邻居节点控制信息的估计误差,而实际多智能体系统中邻居节点的控制信息可能时刻在发生变化,由此导致估计误差无法消除.

表1 多智能体系统各节点故障检测结果统计

节点编号 i	1			2			3		
邻居编号 j	2	3	4	1	4	5	1	4	6
残差评价 \tilde{f}_j	$\neq 0$	0	0	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	0	0	0
故障检测结果	$f_2 \neq 0$			$f_2 \neq 0$			G_3 无故障		
节点编号 i	4				5			6	
邻居编号 j	1	2	3	5	2	4	7	3	7
残差评价 \tilde{f}_j	0	$\neq 0$	0	0	$\neq 0$	0	0	$\neq 0$	$\neq 0$
故障检测结果	$f_2 \neq 0$				$f_2 \neq 0$			$f_6 \neq 0$ (误检)	

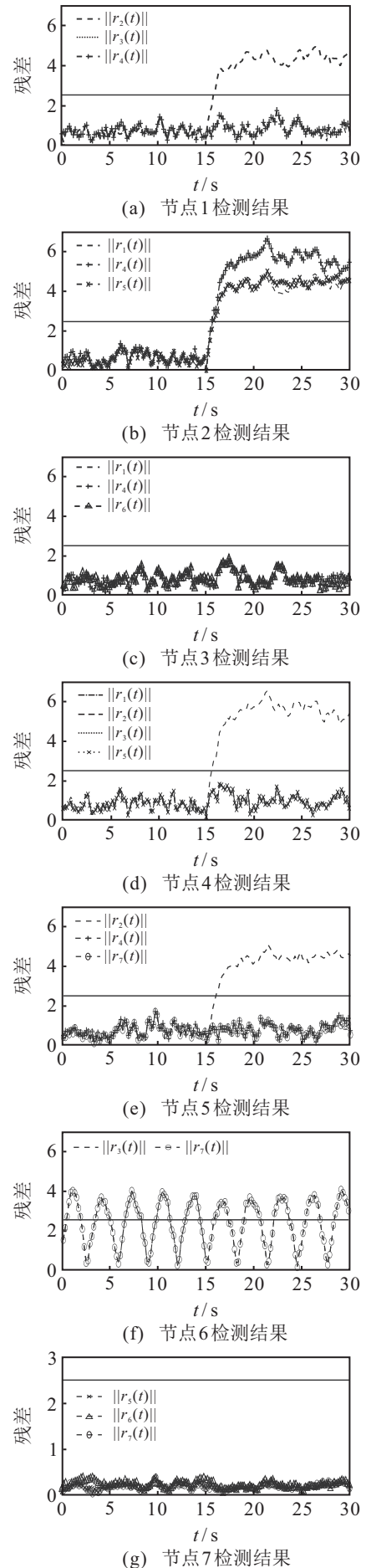


图2 节点1~7的故障检测结果

4 结论

本文考虑了实际应用场景中多智能体系统只能获得局部相对输出信息的限制,研究了基于未知输入观测器的分布式故障检测方法.一方面,通过构建故障检测参考模型并在此基础上设计未知输入观测器,突破了局部相对输出信息导致的未知输入观测器不存在的理论难题;另一方面,在对邻居控制信息进行估计与重构的基础上设计了不依赖控制信息的故障检测算法,并完成了算法的分布式实现,扩展了其在实际应用场景中的适用范围.值得注意的是,本文所述算法受干扰累加及估计误差影响存在鲁棒性较差的缺陷,后续研究将针对这一问题进一步开发鲁棒故障检测方法,以期提升系统的故障检测性能.

参考文献(References)

- [1] Chu T S, Wang J, Codecà L, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3): 1086-1095.
- [2] Ge X H, Han Q L, Ding L, et al. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and techniques[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(9): 3112-3125.
- [3] 刘金琨, 尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. *控制与决策*, 2001, 16(2): 133-140.
(Liu J K, Er L J. Overview of application of multiagent technology[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(2): 133-140.)
- [4] Shen Y, Wang X, Han S S, et al. Agent-based technology in intelligent vehicles and driving: State-of-the-art and prospect[J]. *Journal of Command and Control*, 2019, 5(2): 87-98.
- [5] Beard R V. *Failure accommodation in linear systems through self-reorganization*[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [6] Shames I, Teixeira A M H, Sandberg H, et al. Distributed fault detection for interconnected second-order systems[J]. *Automatica*, 2011, 47(12): 2757-2764.
- [7] Teixeira A, Shames I, Sandberg H, et al. Distributed fault detection and isolation resilient to network model uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(11): 2024-2037.
- [8] 陈刚, 林青. 基于观测器的多智能体系统一致性控制与故障检测[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(5): 584-591.
(Chen G, Lin Q. Observer-based consensus control and fault detection for multi-agent systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(5): 584-591.)
- [9] Liu X H, Gao X W, Han J. Observer-based fault detection for high-order nonlinear multi-agent systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 353(1): 72-94.
- [10] Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Distributed fault estimation observer design for multi-agent systems with switching topologies[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(16): 2801-2807.
- [11] Chen X X, Zhang K, Jiang B. Finite-time unknown input observer-based distributed fault diagnosis for multi-agent systems with disturbances[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2018, 37(10): 4215-4233.
- [12] Liu C, Jiang B, Patton R J, et al. Decentralized output sliding-mode fault-tolerant control for heterogeneous multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(12): 4934-4945.
- [13] Taoufik A, Defoort M, Djemai M, et al. Distributed global fault detection scheme in multi-agent systems with chained-form dynamics[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(9): 3859-3877.
- [14] Zhang K, Jiang B, Shi P. Adjustable parameter-based distributed fault estimation observer design for multiagent systems with directed graphs[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(2): 306-314.
- [15] Li Y, Fang H, Chen J, et al. Distributed cooperative fault detection for multiagent systems: A mixed H_∞/H_2 optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6468-6477.
- [16] Seng Ng Y, Srinivasan R. Multi-agent based collaborative fault detection and identification in chemical processes[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(6): 934-949.
- [17] Dang T B, Tran M H, Le D T, et al. Trend-adaptive multi-scale PCA for data fault detection in IoT networks[C]. *International Conference on Information Networking (ICOIN)*. Chiang Mai, 2018: 744-749.
- [18] Peng Y Y, Qiao W, Qu L Y, et al. Sensor fault detection and isolation for a wireless sensor network-based remote wind turbine condition monitoring system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 54(2): 1072-1079.
- [19] Menon P P, Edwards C. Robust fault estimation using relative information in linear multi-agent networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(2): 477-482.
- [20] Bai Y Q, Wang J Z. Observer-based distributed fault detection and isolation for second-order multi-agent systems using relative information[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(7): 3779-3802.
- [21] Luo M, Fang H, Li Y, et al. Distributed robust fault estimation using relative measurements for leader-follower multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(9): 4707-4715.
- [22] Jie C, Patton R J. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*[M]. Massachusetts: Springer, 1999.

作者简介

李俨(1991—),男,助理教授,博士,从事多智能体系统安全性与可靠性、故障检测、信息攻击检测等研究, E-mail: liyan_tongji@tongji.edu.cn;

杨晨(1992—),女,博士,从事故障检测理论、观测器理论等研究, E-mail: yang_chen@tongji.edu.cn.