

重放攻击下多智能体系统 H_∞ 一致性PID控制

宋金波^{1,2}, 董宏丽^{2,3,4}, 申雨轩^{2,3}, 侯男^{2,3†}

(1. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 人工智能能源研究院, 黑龙江 大庆 163318;

3. 东北石油大学 黑龙江省网络化与智能控制重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

4. 东北石油大学 三亚海洋油气研究院, 海南 三亚 572025)

摘要: 本文针对一类带有加性噪声和乘性噪声的离散多智能体系统, 研究重放攻击下多智能体系统的 H_∞ 一致性比例-积分-微分(PID)控制问题. 首先, 根据智能体的测量输出设计状态观测器, 对智能体的状态进行有效估计, 观测器设计过程中考虑了系统测量输出从传感器传输到观测器过程中受到重放网络攻击的影响. 然后, 利用智能体与其邻居智能体的估计状态差设计PID控制器. 利用李雅普诺夫稳定性理论和代数图论, 证明在该控制策略下, 多智能体系统在重放攻击存在的情况下达到预期的 H_∞ 性能指标. 最后, 利用线性矩阵不等式(LMI)方法求解观测器和控制器增益, 利用数值仿真验证了所设计的观测器和PID控制器的有效性.

关键词: 多智能体; 重放攻击; PID控制; H_∞ 性能; 观测器

引用格式: 宋金波, 董宏丽, 申雨轩, 等. 重放攻击下多智能体系统 H_∞ 一致性PID控制. 控制理论与应用, 2024, 41(4): 658 – 666

DOI: 10.7641/CTA.2023.20798

H_∞ -consensus PID control of multi-agent systems under replay attack

SONG Jin-bo^{1,2}, DONG Hong-li^{2,3,4}, SHEN Yu-xuan^{2,3}, HOU Nan^{2,3†}

(1. College of Electrical Engineering and Information, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China;

2. Artificial Intelligence Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China;

3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Networking and Intelligent Control, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China;

4. Sanya Offshore Oil & Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya Hainan 572025, China)

Abstract: This paper takes into account the H_∞ -consensus proportional-integral-derivative (PID) control problem for a class of discrete-time multi-agent systems with additive noise and multiplicative noise under the replay attack. First, the state observer is designed according to the measurement output of the agent to effectively estimate the state of the agent. In the process of observer design, the influence of replay attack is considered in the transmission of system measurement output from sensor to observer. Second, PID controller is designed by employing the estimated state difference between the agent and its neighbor agent. Based on the Lyapunov stability theorem and algebraic graph theory, it is shown that, under such control strategy, the multi-agent system can reach the expected H_∞ performance index in the presence of replay attack. Finally, the linear matrix inequality (LMI) method is utilized to solve the gains of observer and controller. A numerical simulation is conducted to verify the effectiveness of the designed observer and PID controller.

Key words: multi-agent; replay attack; PID control; H_∞ performance; observer

Citation: SONG Jinbo, DONG Hongli, SHEN Yuxuan, et al. H_∞ -consensus PID control of multi-agent systems under replay attack. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(4): 658 – 666

1 引言

在过去的数十年里, 因为多智能体系统在工程领域的广泛应用, 如移动机器人控制、分布式优化、飞行器的编队控制等, 引起很多学者对多智能体系统协同

控制问题的研究兴趣^[1-5]. 一致性控制作为最重要的一类协同控制, 长期以来一直是控制理论与控制工程领域的一个基础性研究课题. 所谓的一致性控制, 就是指系统运行过程中设计控制器, 使得被控变量达到

收稿日期: 2022-09-09; 录用日期: 2023-09-04.

†通信作者. E-mail: bayan2@163.com; Tel.: +86 15945920395.

本文责任编辑: 张焕水.

国家自然科学基金项目(U21A2019, 61873058, 62103096, 62103095), 海南省科技专项项目(ZDYF2022SHFZ105), 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2022F009), 黑龙江省博士后经费项目(LBH-Z20119)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U21A2019, 61873058, 62103096, 62103095), the Hainan Province Science and Technology Special Fund (ZDYF2022SHFZ105), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2022F009) and the Heilongjiang Postdoctoral Foundation (LBH-Z20119).

一致. 学者们对一致性控制问题进行了大量的研究, 并取得了一定的研究成果^[6-10].

在进行多智能体系统一致性控制研究过程中, 不可避免地需要智能体之间、智能体各部件之间进行数据通信. 目前, 大部分的研究都是假设网络通信是实时有效的. 但是, 随着计算机技术和无线通信技术的发展, 在智能体与其邻居智能体通信或者智能体本身测量传感器与观测器进行数据传输时, 可能会遭到网络攻击, 影响系统的性能, 这一现象引起了学者们的研究兴趣^[11-15]. 其中, 文献[12]阐述了目前物理信息系统的网络安全问题, 从工程角度描述了拒绝服务攻击、重放攻击和欺骗攻击对系统产生的影响, 同时讨论了减小或消除网络攻击对系统稳定性、鲁棒性和可靠性影响的方法; 文献[11]对连续多智能体系统在网络攻击情况下的稳定性进行了分析, 提出了基于Kullback-Libeler发散的准则来判断智能体收到的邻居信息是否可靠; 文献[13]研究了领航-跟随多智能体系统在外部扰动和拒绝服务攻击情况下的 H_∞ 安全一致控制问题, 给出了系统满足性能指标的充分条件; 文献[14]研究了物理信息系统在重放攻击下的安全问题, 为了检测出重放攻击的存在, 文中提出了基于随机编码方案的检测方法, 在不牺牲系统任何性能的情况下检测出重放攻击. 由此可见, 网络攻击在数据传输中是很重要的问题, 并且不同的攻击类型对多智能体系统的一致性性能的影响, 还有待更进一步的研究.

另一方面, 在现代控制理论中, 由于状态反馈能够提供更丰富的状态信息, 所以更多的采用状态反馈, 从而使系统容易获得更优异的性能. 但是, 状态一般是不可测量的, 为了获得智能体的有效状态信息, 需要利用智能体的测量输出观测出智能体的状态. 针对多智能体系统的状态观测器设计也涌现出了大量的研究成果^[16-20]. 例如, 文献[16-17]研究了领航-跟随非线性多智能体系统的一致性控制问题. 具体地, 文献[16]考虑了分数阶非线性多智能体系统的一致性控制问题; 文献[17]研究了在半马尔可夫切换拓扑和网络攻击下的一致性控制问题; 文献[19]研究了离散时变多智能体系统在外部分扰和测量丢失情况下的有限时域 H_∞ 一致性控制问题. 在这些文献中都考虑到智能体实际的状态不可测, 所以对每一个智能体设计了状态观测器, 进而基于观测状态设计控制协议, 使得多智能体系统达到预期的性能指标. 由此可见, 基于观测信息的一致性控制更具有实际意义.

在获得了智能体系统具体的状态信息后, 控制器的设计是保证智能体系统达到预期指标的重要环节. 众所周知, 比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制由于结构简单、稳定性好、易调节、易实现等优点在不同的工业系统中广泛地应用^[21-22]. 在大部分的文献中, PID控制器的增益是根

据经验调节的, 并且在传统的PID参数调节过程中没有考虑系统过程噪声的影响, 因此导致PID控制效果不佳. 鉴于这个问题, 很多学者致力于研究PID控制器的鲁棒性^[23-26]. 例如, 文献[23]针对线性时滞系统, 在网络攻击情况下, 设计了基于观测器的PID控制器, 并通过线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法求取了控制器参数, 保证系统具有指数均方稳定的性能; 文献[24]针对连续多智能体系统进行了PID控制器设计, 以保证达到多智能体系统的一致性性能指标. 目前, 针对离散多智能体系统的PID控制研究还比较少见.

另外, 在不同的鲁棒设计技术中, H_∞ 性能是系统外部干扰对控制输出影响的有效度量, 通过设计 H_∞ 一致性PID控制器可以有效地保证系统的暂态和稳态性能. 鉴于以上研究热点问题的讨论, 本文的研究创新点总结如下: 1) 在多智能体系统的信息传输中考虑了重放攻击发生情况下的观测器设计问题; 2) 基于观测状态设计了多智能体系统一致性状态反馈PID控制器, 并通过线性矩阵不等式求解凸优化问题获得了PID控制器参数; 3) 获得了系统在重放攻击发生情况下, 满足 H_∞ 一致性性能指标的基于观测状态的控制方案存在的充分条件. 最后, 通过线性矩阵不等式求解出观测器及控制器的增益, 并通过仿真算例验证所提出的控制方案能够实现较好的一致性控制.

2 预备知识

考虑具有 N 个智能体的系统, 智能体之间的通信拓扑关系用有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{H})$ 表示, 其中: $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示 N 个智能体的集合, $\mathcal{E} = \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示智能体连接的边的集合, 非负矩阵 $\mathcal{H} = [h_{ij}]_{N \times N}$ 表示智能体之间的连接关系的权重. 一般来讲, $h_{ij} > 0$ 表示第 i 个智能体和第 j 个智能体具有通信关系, 若没有通信关系, 则 $h_{ij} = 0$, $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} : (j, i) \in \mathcal{E}\}$ 表示智能体 i 的所有邻居智能体的集合. 另外, 定义拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}]_{N \times N}$, 其中的元素 $l_{ii} = \sum_{j=1}^N h_{ij}$, $l_{ij} = -h_{ij}$, $i \neq j$.

3 问题描述

3.1 系统模型

考虑 N 个智能体构成的多智能体系统, 其中智能体 i 的动态特性如下:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = Ax_i(k) + Bu_i(k) + \\ \quad Dx_i(k)\omega(k) + Ev_i(k), \\ y_i(k) = Cx_i(k), \\ z_i(k) = Mx_i(k), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ 和 $u_i(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 分别是系统的状态以及控制输入; $y_i(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 和 $z_i(k) \in \mathbb{R}^{n_z}$ 分别是系统的测量输出和控制输出; $\omega(k) \in \mathbb{R}$ 是具有零均值和

单位方差的乘性噪声; $v_i(k) \in l_2([0, \infty); \mathbb{R}^{n_v})$ 是系统外部噪声; A, B, C, D, E 和 M 为具有匹配维数的定常系统矩阵.

本文的主要目的是针对上述的智能体系统, 考虑系统的测量输出传输过程中受到重放攻击的情形下, 设计状态观测器使得智能体仍旧能够根据受到攻击的测量输出观测出状态信息, 并根据观测的状态进行状态反馈PID控制器设计, 使多智能体系统达到预期的 H_∞ 一致性性能指标.

3.2 重放攻击

在智能体一致性控制过程中, 每个智能体需要与其邻居智能体进行信息交互, 并且智能体自身传感器与观测器之间也需要信息传输. 在信息无线传输过程中, 经常会受到各种各样的网络攻击, 本文中主要考虑重放攻击. 在重放攻击中, 攻击者会窃取传输的信号并存储在存储器里, 然后从存储器中随机选择过去存储的信号进行传输^[19, 27]. 由于存储硬件的性能有限, 一般来讲, 攻击者截取且存储的信号是有限的. 以智能体 i 的测量信号为例, 假设攻击方信息存储上限为 $\bar{\mu}$, 那么存储的信号就可以描述为 $\mathcal{M}_i(k) \triangleq \{y_i(k_i^{(1)}), y_i(k_i^{(2)}), \dots, y_i(k_i^{(\bar{\mu})})\}$, 其中: $k_i^{(1)} \neq k_i^{(2)} \neq \dots \neq k_i^{(\bar{\mu})}$; $k_i^{(p)} < k, p = 1, 2, \dots, \bar{\mu}$. 由于重放攻击是将当前时刻的信号篡改为过去某一时刻的信号, 注入的是实际的信号而不是人为合成的, 具有一定的伪装性, 因此, 不容易被发现.

为了应对重放攻击, 可以通过引入时间戳的方法来处理传输的信号, 即每一个测量信号在传输给观测器之前就加入时间戳^[12, 28]. 引入符号 $\alpha_i(k)$ 表示重放攻击是否发生, 如果发生了重放攻击, 则 $\alpha_i(k) = 1$; 否则 $\alpha_i(k) = 0$. 当 $\alpha_i(k) = 0$ 时, 攻击者窃取测量信号 $y_i(k)$, 并将窃取的信号存入 $\mathcal{M}_i(k)$ 中. 如果存储空间有空余, 则直接存储; 如果存储空间已满, 则先移除最先窃取的数据, 然后将新窃取的数据存入. 此外, 引入变量 $d_i(k)$ 记录连续攻击的次数, 当观测器接收到来自传感器的测量输出信息时, 可以根据信息时间戳的信息判断出传输过程中是否发生了重放攻击, 并且可以根据每一时刻接收到的信息时间戳判断是否发生了连续的重放攻击, 并对连续攻击进行计数, 从而获得连续攻击次数 $d_i(k)$, 则

$$d_i(k) = \begin{cases} d_i(k-1) + 1, & \alpha_i(k) = 1, \\ 0, & \alpha_i(k) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

综上所述, 考虑重放攻击的影响, 在 k 时刻智能体 i 的观测器接收到的测量信号可以表示为

$$\bar{y}_i(k) = y_i(k - d_i(k)). \quad (3)$$

文中假设重放攻击是有能量限制的, 每一次的重放攻击都会消耗一定的能量, 因此, 攻击者连续发送重放攻击的次数是有上限的. 用 \bar{d}_i 表示连续攻击的最

大次数, 则 $d_i(k) \leq \bar{d}_i$.

3.3 基于观测器的控制器设计

本文利用智能体的测量输出估计其状态, 并利用估计的状态设计状态反馈PID控制器, 从而使得系统在重放攻击和噪声存在的情况下满足预期的 H_∞ 一致性性能指标.

智能体 i 的观测器和状态反馈PID控制器设计如下:

$$\xi_i(k+1) = A\xi_i(k) + Bu_i(k) + K_O(\bar{y}_i(k) - C\xi_i(k - d_i(k))), \quad (4)$$

$$u_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} h_{ij} K_P (\xi_j(k) - \xi_i(k)) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} h_{ij} K_I \sum_{l=k-s}^{k-1} (\xi_j(l) - \xi_i(l)) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} h_{ij} (K_D ((\xi_j(k) - \xi_i(k)) - (\xi_j(k-1) - \xi_i(k-1))), \quad (5)$$

其中: $\xi_i(k)$ 表示状态 $x_i(k)$ 的估计; K_O 为观测器增益; K_P, K_I, K_D 为控制器增益; s 表示积分项的时间长度, 可根据工程实际需要设定.

定义状态观测误差 $\delta_i(k) \triangleq \xi_i(k) - x_i(k)$. 为方便后续处理, 定义如下变量:

$$\begin{aligned} u(k) &\triangleq [u_1^T(k) \ u_2^T(k) \ \dots \ u_N^T(k)]^T, \\ x(k) &\triangleq [x_1^T(k) \ x_2^T(k) \ \dots \ x_N^T(k)]^T, \\ \xi(k) &\triangleq [\xi_1^T(k) \ \xi_2^T(k) \ \dots \ \xi_N^T(k)]^T, \\ z(k) &\triangleq [z_1^T(k) \ z_2^T(k) \ \dots \ z_N^T(k)]^T, \\ v(k) &\triangleq [v_1^T(k) \ v_2^T(k) \ \dots \ v_N^T(k)]^T, \\ \delta(k) &\triangleq [\delta_1^T(k) \ \delta_2^T(k) \ \dots \ \delta_N^T(k)]^T, \\ \hat{x}(k) &\triangleq [x^T(k-s) \ x^T(k-s+1) \ \dots \ x^T(k-1)]^T, \\ \hat{\xi}(k) &\triangleq [\xi^T(k-s) \ \xi^T(k-s+1) \ \dots \ \xi^T(k-1)]^T, \\ \hat{\delta}(k) &\triangleq [\delta^T(k-s) \ \delta^T(k-s+1) \ \dots \ \delta^T(k-1)]^T, \\ \bar{x}(k-d(k)) &\triangleq \sum_{i=1}^N \Phi_i x(k-d_i(k)), \\ \bar{\delta}(k-d(k)) &\triangleq \sum_{i=1}^N \Phi_i \delta(k-d_i(k)), \\ \Phi_i &\triangleq \text{diag}\{0, \dots, \underbrace{0, 1, 0, \dots, 0}_{i-1}\}_{N \times N}. \end{aligned}$$

观测器和控制器的增广形式如下:

$$\xi(k+1) = (I_N \otimes A)\xi(k) + (I_N \otimes B)u(k) - (I_N \otimes K_O C)\bar{\delta}(k-d(k)), \quad (6)$$

$$u(k) = (-L \otimes K_P - L \otimes K_D)\xi(k) + K_{ID}\hat{\xi}(k), \quad (7)$$

其中: $K_{ID} \triangleq [K \ -L \otimes K_I + L \otimes K_D]$,

$$\mathcal{K} \triangleq [-L \otimes K_I \ \cdots \ -L \otimes K_I]_{1 \times (s-1)}.$$

系统的状态方程增广形式如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) = & (I_N \otimes A - L \otimes BK_P)x(k) - \\ & (L \otimes BK_D)x(k) + \hat{K}_{ID}\hat{\delta}(k) - \\ & (L \otimes BK_P + L \otimes BK_D)\delta(k) + \\ & \hat{K}_{ID}\hat{x}(k) + (I_N \otimes D)x(k)\omega(k) + \\ & (I_N \otimes E)v(k), \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \hat{K}_{ID} & \triangleq [\hat{K} \ (-L \otimes BK_I + L \otimes BK_D)], \\ \hat{K} & \triangleq [-L \otimes BK_I \ \cdots \ -L \otimes BK_I]_{1 \times (s-1)}. \end{aligned}$$

由式(1)(4)得出估计误差的增广形式

$$\begin{aligned} \delta(k+1) = & \xi(k+1) - x(k+1) = \\ & (I_N \otimes A)\delta(k) - (I_N \otimes E)v(k) - \\ & (I_N \otimes K_O C)\bar{\delta}(k-d(k)) - \\ & (I_N \otimes D)x(k)\omega(k). \end{aligned} \quad (9)$$

令智能体 i 的控制输出一致性误差为

$$\bar{z}_i(k) \triangleq z_i(k) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j(k),$$

则其增广形式为

$$\bar{z}(k) = (\mathcal{F} \otimes I_{n_z})z(k),$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{z}(k) & \triangleq [\bar{z}_1^T(k) \ \bar{z}_2^T(k) \ \cdots \ \bar{z}_N^T(k)]^T, \\ \mathcal{F} & \triangleq I_N - \frac{1}{N} \mathbf{1}_{N \times N}. \end{aligned}$$

定义

$$\begin{aligned} \eta(k) & \triangleq [x^T(k) \ \delta^T(k)]^T, \\ \hat{\eta}(k) & \triangleq [\hat{x}^T(k) \ \hat{\delta}^T(k)]^T, \\ \bar{\eta}(k-d(k)) & \triangleq [\bar{x}^T(k-d(k)) \ \bar{\delta}^T(k-d(k))]^T. \end{aligned}$$

根据式(8)–(9)可以推导出以下的增广系统:

$$\begin{cases} \eta(k+1) = \bar{A}\eta(k) + \bar{B}\hat{\eta}(k) + \bar{D}\eta(k)\omega(k) + \\ \quad \bar{C}\bar{\eta}(k-d(k)) + \bar{E}v(k), \\ \bar{z}(k) = \bar{M}\eta(k), \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{A} & \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes A - L_{kpd} & -L_{kpd} \\ 0 & I_N \otimes A \end{bmatrix}, \\ L_{kpd} & \triangleq L \otimes BK_P + L \otimes BK_D, \\ \bar{B} & \triangleq \begin{bmatrix} \hat{K}_{ID} & \hat{K}_{ID} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -(I_N \otimes K_O C) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{E} & \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes E \\ -I_N \otimes E \end{bmatrix}, \quad \bar{D} \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes D & 0 \\ -I_N \otimes D & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{M} & \triangleq [\mathcal{F} \otimes M \ 0]. \end{aligned}$$

定义 1 对于给定的扰动衰减参数 $\gamma > 0$, 如果

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{\|\bar{z}(k)\|^2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|v(k)\|^2 \quad (11)$$

成立, 那么称多智能体系统(1)满足 H_∞ 一致性性能指标.

本文研究的目的是对离散多智能体系统(1), 在重放攻击情况下设计控制器(5), 同时满足如下要求:

- 1) $v(k) = 0$ 时, 闭环系统(10)是稳定的;
- 2) 零初始条件下, $v(k) \neq 0$ 时, 在给定扰动衰减水平 $\gamma > 0$ 情况下, $\bar{z}(k)$ 满足式(11)所示的性能指标约束.

4 主要结果

4.1 系统性能分析

定理 1 考虑多智能体系统(1)及测量输出遭到网络重放攻击(3). 对于给定观测器和控制器增益 $K_O, K_P, K_I, K_D, H_\infty$ 指标 $\gamma > 0$, 系统(10)渐近稳定且满足 H_∞ 性能要求的充分条件是: 存在正定矩阵 P, Q, R , 使得以下矩阵不等式成立:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & * & * & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} & * & * \\ \Pi_{31} & \Pi_{32} & \Pi_{33} & * \\ \Pi_{41} & \Pi_{42} & \Pi_{43} & \Pi_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} & \triangleq \bar{A}^T \bar{P} \bar{A} + \bar{D}^T \bar{P} \bar{D} - \bar{P} + s\bar{Q} + \bar{R} + \bar{M}^T \bar{M}, \\ \Pi_{21} & \triangleq \bar{B}^T \bar{P} \bar{A}, \quad \Pi_{22} \triangleq \bar{B}^T \bar{P} \bar{B} - I_s \otimes \bar{Q}, \\ \Pi_{31} & \triangleq \bar{C}^T \bar{P} \bar{A}, \quad \Pi_{32} \triangleq \bar{C}^T \bar{P} \bar{B}, \quad \Pi_{33} \triangleq \bar{C}^T \bar{P} \bar{C} - \bar{R}, \\ \Pi_{41} & \triangleq \bar{E}^T \bar{P} \bar{A}, \quad \Pi_{42} \triangleq \bar{E}^T \bar{P} \bar{B}, \quad \Pi_{43} \triangleq \bar{E}^T \bar{P} \bar{C}, \\ \Pi_{44} & \triangleq \bar{E}^T \bar{P} \bar{E} - \gamma^2 I, \quad \bar{P} \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes P & 0 \\ 0 & I_N \otimes P \end{bmatrix}, \\ \bar{Q} & \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes Q & 0 \\ 0 & I_N \otimes Q \end{bmatrix}, \quad \bar{R} \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes R & 0 \\ 0 & I_N \otimes R \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

证 选取Lyapunov泛函

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k) + V_3(k),$$

其中:

$$\begin{aligned} V_1(k) & = \eta^T(k) \bar{P} \eta(k), \quad V_2(k) = \sum_{j=1}^s \sum_{i=k-j}^{k-1} \eta^T(i) \bar{Q} \eta(i), \\ V_3(k) & = \sum_{i=1}^N \sum_{j=k-d_i(k)}^k (\eta^T(j) (I_2 \otimes \Phi_i)^T) \bar{R} \times \\ & \quad ((I_2 \otimes \Phi_i) \eta(j)). \end{aligned}$$

步骤 1 系统稳定性证明.

当外部干扰 $v(k) = 0$ 时, 根据系统方程(10)及Lyapunov泛函的选取, 泛函 $V(k)$ 的差分的数学期望为

$$E\{\Delta V(k)\} = E\{\Delta V_1(k)\} + E\{\Delta V_2(k)\} + E\{\Delta V_3(k)\},$$

其中

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_1(k)\} &= E\{\eta^T(k+1)\bar{P}\eta(k+1)\} - \\ &E\{\eta^T(k)\bar{P}\eta(k)\} = \\ &E\{[\bar{A}\eta(k) + \bar{B}\hat{\eta}(k) + \bar{D}\eta(k)\omega(k) + \\ &\bar{C}\bar{\eta}(k-d(k))]^T \bar{P}[\bar{A}\eta(k) + \bar{B}\hat{\eta}(k) + \\ &\bar{D}\eta(k)\omega(k) + \bar{C}\bar{\eta}(k-d(k))]\} - \\ &E\{\eta^T(k)\bar{P}\eta(k)\}. \end{aligned}$$

因为 $\omega(k)$ 是具有零均值和单位方差的乘性噪声, 因此, 整理可得 $E\{\Delta V_1(k)\}$ 如下:

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_1(k)\} &= \eta^T(k)(\bar{A}^T \bar{P} \bar{A} + \bar{D}^T \bar{P} \bar{D} - \bar{P})\eta(k) + \\ &\eta^T(k)\bar{A}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{A} \eta(k) + \\ &\eta^T(k)\bar{A}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{A} \eta(k) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_2(k)\} &= E\left\{\sum_{j=1}^s \sum_{i=k+1-j}^k \eta^T(i)\bar{Q}\eta(i)\right\} - \\ &E\left\{\sum_{j=1}^s \sum_{i=k-j}^{k-1} \eta^T(i)\bar{Q}\eta(i)\right\} = \\ &s\eta^T(k)\bar{Q}\eta(k) - \\ &\sum_{j=1}^s \eta^T(k-j)\bar{Q}\eta(k-j) = \\ &s\eta^T(k)\bar{Q}\eta(k) - \hat{\eta}^T(k)(I_s \otimes \bar{Q})\hat{\eta}(k), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_3(k)\} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=k-d_i(k)}^k (\eta^T(j)(I_2 \otimes \Phi_i)^T) \bar{R} \times \\ &((I_2 \otimes \Phi_i)\eta(j)) - \\ &\sum_{i=1}^N \sum_{j=k-d_i(k)-1}^{k-1} (\eta^T(j)(I_2 \otimes \Phi_i)^T) \times \\ &\bar{R}((I_2 \otimes \Phi_i)\eta(j)) = \\ &\eta^T(k)\bar{R}\eta(k) - \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{R}\bar{\eta}(k-d(k)), \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(13)–(15)可得

$$E\{\Delta V(k)\} = E\{\Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) + \Delta V_3(k)\} \leq \bar{\Phi}^T(k)\hat{I}\bar{\Phi}(k), \quad (16)$$

其中:

$$\bar{\Phi}(k) \triangleq [\eta^T(k) \quad \hat{\eta}^T(k) \quad \bar{\eta}^T(k-d(k))]^T,$$

$$\hat{I} \triangleq \begin{bmatrix} \hat{I}_{11} & * & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} & * \\ \Pi_{31} & \Pi_{32} & \Pi_{33} \end{bmatrix},$$

$$\hat{I}_{11} \triangleq \bar{A}^T \bar{P} \bar{A} + \bar{D}^T \bar{P} \bar{D} + s\bar{Q} + \bar{R} - \bar{P}.$$

根据Schur补引理及式(12)可知, $\hat{I} < 0$, 证明系统在无外部干扰情况下是稳定的.

步骤2 系统 H_∞ 性能证明.

当外部干扰 $v(k) \neq 0$ 时, 根据系统方程(10)及Lyapunov泛函定义, 泛函 $V(k)$ 的差分的数学期望为

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_1(k)\} &= \eta^T(k)(\bar{A}^T \bar{P} \bar{A} + \bar{D}^T \bar{P} \bar{D} - P)\eta(k) + \\ &\eta^T(k)\bar{A}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{A} \eta(k) + \\ &\eta^T(k)\bar{A}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{A} \eta(k) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &\eta^T(k)\bar{A}^T \bar{P} \bar{E} v(k) + \\ &\hat{\eta}^T(k)\bar{B}^T \bar{P} \bar{E} v(k) + \\ &\bar{\eta}^T(k-d(k))\bar{C}^T \bar{P} \bar{E} v(k) + \\ &v^T(k)\bar{E}^T \bar{P} \bar{C} \bar{\eta}(k-d(k)) + \\ &v^T(k)\bar{E}^T \bar{P} \bar{A} \eta(k) + \\ &v^T(k)\bar{E}^T \bar{P} \bar{B} \hat{\eta}(k) + \\ &v^T(k)\bar{E}^T \bar{P} \bar{E} v(k). \end{aligned} \quad (17)$$

根据式(14)–(15)(17), 则

$$E\{\Delta V(k)\} = E\{\Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) + \Delta V_3(k)\} \leq \bar{\Phi}^T(k)\tilde{I}\bar{\Phi}(k), \quad (18)$$

其中:

$$\bar{\Phi}(k) \triangleq [\eta^T(k) \quad \hat{\eta}^T(k) \quad \bar{\eta}^T(k-d(k)) \quad v^T(k)]^T,$$

$$\tilde{I} \triangleq \begin{bmatrix} \hat{I}_{11} & * & * & * \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} & * & * \\ \Pi_{31} & \Pi_{32} & \Pi_{33} & * \\ \Pi_{41} & \Pi_{42} & \Pi_{43} & \tilde{I}_{44} \end{bmatrix}, \quad \tilde{I}_{44} \triangleq \bar{E}^T \bar{P} \bar{E}.$$

将式(18)加入零项 $\bar{z}^T(k)\bar{z}(k) - \gamma^2 v^T(k)v(k) - \bar{z}^T(k)\bar{z}(k) + \gamma^2 v^T(k)v(k)$ 可以得到

$$E\{\Delta V(k)\} + E\{\bar{z}^T(k)\bar{z}(k)\} - \gamma^2 v^T(k)v(k) - E\{\bar{z}^T(k)\bar{z}(k)\} + \gamma^2 v^T(k)v(k) =$$

$$\Phi^T(k) \Pi \Phi(k) - E\{\bar{z}^T(k) \bar{z}(k)\} + \gamma^2 v^T(k) v(k), \quad (19)$$

所以有

$$E\{\Delta V(k)\} + E\{\bar{z}^T(k) \bar{z}(k)\} - \gamma^2 v^T(k) v(k) = \Phi^T(k) \Pi \Phi(k). \quad (20)$$

将式(20)左右两端 k 从0到 ∞ 累加, 可得

$$E\{V(\infty) - V(0)\} + \sum_{k=0}^{\infty} E\{\bar{z}^T(k) \bar{z}(k)\} - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} v^T(k) v(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi^T(k) \Pi \Phi(k). \quad (21)$$

考虑到零初始条件及 $E\{V(\infty)\} > 0$, 式(21)可转换为

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{\bar{z}^T(k) \bar{z}(k)\} - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} v^T(k) v(k) \leq \sum_{k=0}^{\infty} \Phi^T(k) \Pi \Phi(k). \quad (22)$$

根据式(12), $\Pi < 0$, 所以得到

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{\bar{z}^T(k) \bar{z}(k)\} < \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} v^T(k) v(k).$$

证毕.

4.2 观测器及控制器参数求取

根据定理1, 观测器及控制器参数可由以下定理求取.

定理 2 考虑多智能体系统(1)及测量输出遭到网络重放攻击(3). 对于给定的抗干扰 H_∞ 指标 $\gamma > 0$, 如果存在矩阵 $P > 0, Q > 0, R > 0, \tilde{K}_O, \tilde{K}_P, \tilde{K}_I, \tilde{K}_D$ 及 \mathfrak{J} 满足以下线性矩阵不等式, 则闭环系统 (10) 满足 H_∞ 性能约束.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & * \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (23)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &\triangleq \begin{bmatrix} \tilde{\Gamma}_{11} & * & * & * \\ 0 & -I_s \otimes \bar{Q} & * & * \\ 0 & 0 & -\bar{R} & * \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \\ \tilde{\Gamma}_{11} &\triangleq -\bar{P} + s\bar{Q} + \bar{R} + \bar{M}^T \bar{M} + \bar{D}^T \bar{P} \bar{D}, \\ \Gamma_{21} &\triangleq [\bar{A}_{\mathfrak{J}} \quad \bar{B}_{\mathfrak{J}} \quad \bar{C}_{\mathfrak{J}} \quad \bar{E}_{\mathfrak{J}}], \\ \Gamma_{22} &\triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes (P - \mathfrak{J}W - W^T \mathfrak{J}^T) & 0 \\ 0 & -I_N \otimes P \end{bmatrix}, \\ W &\triangleq [B(B^T B)^{-1} (B^T)^{\perp}]^T, \quad \tilde{\mathfrak{J}} \triangleq \mathfrak{J}W, \\ \mathfrak{J} &\triangleq \begin{bmatrix} \mathfrak{J}_{11} & \mathfrak{J}_{12} \\ 0 & \mathfrak{J}_{22} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathfrak{J}} \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes \tilde{\mathfrak{J}} & 0 \\ 0 & I_N \otimes P \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\bar{A}_{\mathfrak{J}} \triangleq \begin{bmatrix} \bar{A}_{\mathfrak{J}11} & -L \otimes \tilde{K}_P - L \otimes \tilde{K}_D \\ 0 & I_N \otimes PA \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{\mathfrak{J}11} \triangleq I_N \otimes \tilde{\mathfrak{J}}A - L \otimes \tilde{K}_P - L \otimes \tilde{K}_D,$$

$$\bar{B}_{\mathfrak{J}} \triangleq \begin{bmatrix} \tilde{K}_{ID} & \tilde{K}_{ID} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_{\mathfrak{J}} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -I_N \otimes \tilde{K}_O C \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathcal{K}} \triangleq [-L \otimes \tilde{K}_I \quad \cdots \quad -L \otimes \tilde{K}_I]_{1 \times (s-1)},$$

$$\tilde{K}_{ID} \triangleq [\bar{\mathcal{K}} \quad -L \otimes \tilde{K}_I + L \otimes \tilde{K}_D],$$

$$\bar{E}_{\mathfrak{J}} \triangleq \begin{bmatrix} I_N \otimes \tilde{\mathfrak{J}}E \\ -I_N \otimes PE \end{bmatrix}, \quad \tilde{K}_P = \begin{bmatrix} \tilde{K}_P \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_I = \begin{bmatrix} \tilde{K}_I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{K}_D = \begin{bmatrix} \tilde{K}_D \\ 0 \end{bmatrix}.$$

此时观测器和控制器参数可以通过以下公式求解:

$$\begin{cases} K_O = P^{-1} \tilde{K}_O, & K_P = \mathfrak{J}_{11}^{-1} \tilde{K}_P, \\ K_I = \mathfrak{J}_{11}^{-1} \tilde{K}_I, & K_D = \mathfrak{J}_{11}^{-1} \tilde{K}_D. \end{cases} \quad (24)$$

证 根据Schur补引理, 式(12)成立, 当且仅当下列式成立:

$$\bar{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & * \\ \bar{\Gamma}_{21} & -\bar{P}^{-1} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

其中

$$\bar{\Gamma}_{21} \triangleq [\bar{A} \quad \bar{B} \quad \bar{C} \quad \bar{E}],$$

将式(25)分别左乘 $\text{diag}\{I, I, I, I, \hat{\mathfrak{J}}\}$ 和右乘 $\text{diag}\{I, I, I, I, \hat{\mathfrak{J}}^T\}$, 并定义 $\tilde{K}_O \triangleq PK_O, \tilde{K}_P \triangleq \tilde{\mathfrak{J}}BK_P, \tilde{K}_I \triangleq \tilde{\mathfrak{J}}BK_I, \tilde{K}_D \triangleq \tilde{\mathfrak{J}}BK_D$.

注意到

$$\begin{aligned} \mathfrak{J}W + W^T \mathfrak{J}^T - \mathfrak{J}WP^{-1}W^T \mathfrak{J}^T - P = \\ -(\mathfrak{J}W - P)P^{-1}(\mathfrak{J}W - P)^T \leq 0, \end{aligned}$$

即可得到式(23). 证毕.

5 仿真分析

选取由5个智能体组成的智能体系统, 其邻接矩阵为

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

系统(1)参数选取如下:

$$\begin{aligned} A = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.02 \\ 0.01 & -0.3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.005 \end{bmatrix}$$

外部干扰设置为 $v_i(k) = 0.1 \sin k, i = 1, 2, \dots, 5$. H_∞ 性能指标选取为 $\gamma = 0.1$. 按照上述参数设置, 利用 MATLAB 软件根据式(23)–(24), 求得观测器增益和控制器增益如下:

$$K_P = [0.0013 \quad -0.2172], K_I = [0.0340 \quad 0.0511],$$

$$K_D = [0.0340 \quad 0.0511],$$

$$K_O = \begin{bmatrix} -0.0006 & -0.0110 \\ 0.0012 & 0.0354 \end{bmatrix}$$

仿真中网络攻击发生概率 $\bar{\alpha}_i = 0.25, i = 1, 2, \dots, 5$. 以智能体1为例, 具体的发生时刻如图1所示, 图中横坐标为时间, 纵坐标表示发生重放攻击的累计次数. 从图1中可以看出, 仿真中连续攻击次数最大为3次. 在这样的重放攻击存在情况下, 对智能体系统进行观测器和控制器的设计, 使系统仍旧能够满足预期的 H_∞ 一致性能.

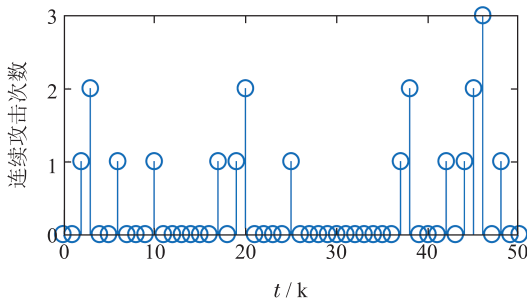


图1 重放攻击发生时刻

Fig. 1 The occurrence time of replay attack

仿真中选取智能体的一个状态分量绘制仿真曲线如图2–8所示. 图2为每个智能体的状态变化曲线, 图3为根据测量输出通过观测器得到的智能体估计状态, 图4为估计误差曲线. 从图2可以看到系统的状态趋于一致, 从图3和图2对比可见智能体的观测状态与实际状态相似, 且从图4中可以看出估计误差渐近收敛到零, 说明所设计的估计器能够准确地估计出智能体的状态信息.

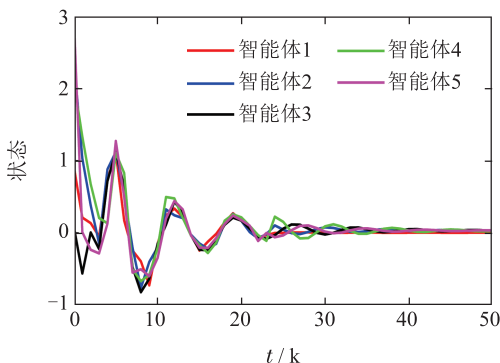


图2 智能体状态

Fig. 2 The states of the agents

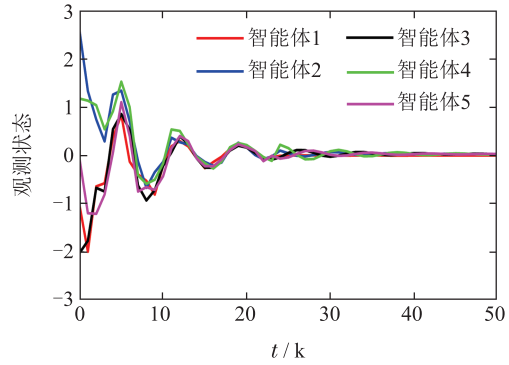


图3 智能体观测状态

Fig. 3 The observation states of the agents

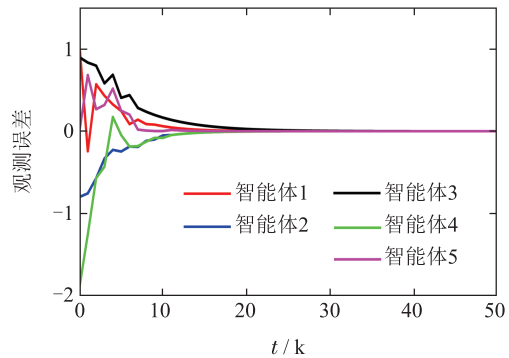


图4 观测误差

Fig. 4 The observation errors

图5为未发生重放攻击情形下智能体在PID控制下的控制输出一致性误差曲线. 图6为发生重放攻击时多智能体系统在PID控制下的控制输出一致性误差曲线, 此时积分项 $s = 3$, 图7为积分项 $s = 6$ 时系统的控制输出一致性误差曲线, 图8为随机发生重放攻击情形下智能体在只有比例控制(P控制)情况下的控制输出一致性误差曲线.

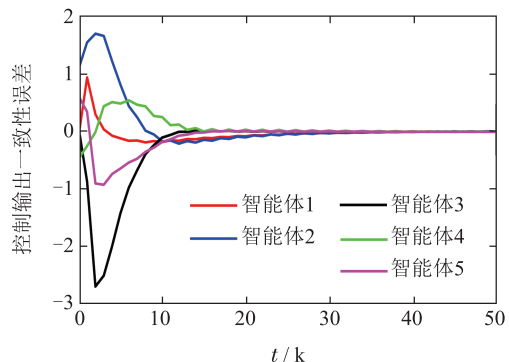


图5 控制输出一致性误差(未发生重放攻击)

Fig. 5 The controlled output consensus errors (without replay attack)

对比图5和图6可以发现, 在未发生重放攻击情况下, 智能体控制输出一致性误差曲线收敛更快, 也即控制输出更快达到一致; 同样, 在随机发生重放攻击的情形下, 在积分项选择不同时, 对比图6和图7可以

发现积分作用太强时($s = 6$), 累积的控制作用与比例系数过大相同, 会使系统的幅值震荡增大; 对比图7和图8, 可以看出系统在PID控制作用下的控制输出一致性误差相对较小, 并且达到一致需要的时间相对较短, 因此, 从图中可以看出PID控制器是有效的。

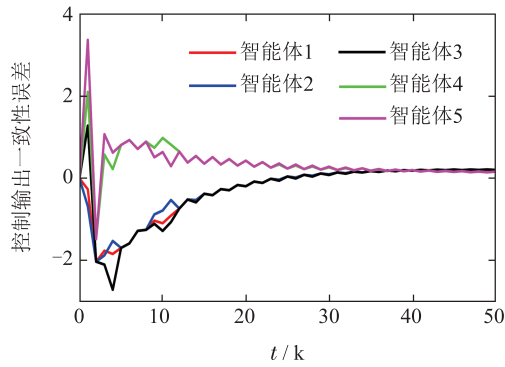


图6 PID控制下控制输出一致性误差($s = 3$)

Fig. 6 The controlled output consensus errors under PID control ($s = 3$)

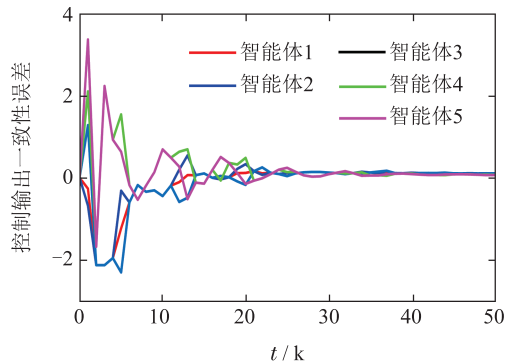


图7 PID控制下控制输出一致性误差($s = 6$)

Fig. 7 The controlled output consensus errors under PID control ($s = 6$)

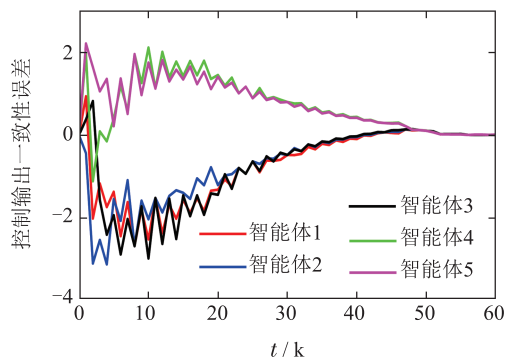


图8 P控制下控制输出一致性误差

Fig. 8 The controlled output consensus errors P control

6 结论

本文针对一类带有乘性噪声和加性过程噪声的离散多智能体系统, 在重放网络攻击随机发生的情况下, 研究了基于观测器的 H_∞ 一致性PID控制问题. 设计观

测器通过测量输出获得智能体的观测状态, 由于网络安全问题, 在测量输出由传感器到观测器的信息传输过程中考虑了随机发生的重放网络攻击情况. 进而根据观测状态设计PID一致性控制器, 实现了多智能体系统满足预设的 H_∞ 性能指标的控制要求. 在控制器设计过程中考虑估计状态变化比例、积分、微分的影响, 并通过求解LMI获得观测器与PID控制器的增益, 使得控制系统更快地达到预期 H_∞ 性能指标. 最后, 给出了一个仿真算例, 验证了所设计控制器的有效性。

参考文献:

- [1] FLORENCE H, EUBEN G, ARTUR G, et al. Decentralized multi-agent path finding for UAV traffic management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 23(2): 997 – 1008.
- [2] LI Zhanjie, MA Yajing, YUE Dong. Secure adaptive consensus control against cyber attacks for nonlinear switched multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1355 – 1362. (李占杰, 马亚静, 岳东. 网络攻击下一类非线性切换多智能体系统的安全自适应控制. *控制理论与应用*, 2022, 39(8): 1355 – 1362.)
- [3] KEN L, RICHARD F. Position and attitude tracking control using CCW and SNI system theory with applications to multi-agent systems. *Automatica*, 2022, 139: 110203 – 110212.
- [4] ZHAO G, LI Y, XU Q. From emotion AI to cognitive AI. *International Journal of Network Dynamics and Intelligence*, 2022, 1(1): 65 – 72.
- [5] BAO G, MA L, YI X. Recent advances on cooperative control of heterogeneous multi-agent systems subject to constraints: A survey. *Systems Science & Control Engineering*, 2022, 10(1): 539 – 551.
- [6] SUN Xinyong, WU Jie, HOU Zhicheng, et al. Finite-time consensus of multi-agent systems with input saturation constraints. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(11): 2391 – 2397. (孙新勇, 吴杰, 侯至丞, 等. 输入饱和约束下多智能体的有限时间一致. *控制理论与应用*, 2020, 37(11): 2391 – 2397.)
- [7] DING D, WANG Z, HAN Q. Neural-network-based consensus control for multiagent systems with input constraints: The event-triggered case. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(8): 3719 – 3730.
- [8] HAN F, HE Q, SONG Y, et al. Outlier-resistant observer-based H_∞ -consensus control for multi-rate multi-agent systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(17): 8914 – 8928.
- [9] YU L, CUI Y, LIU Y, et al. Sampled-based consensus of multi-agent systems with bounded distributed time-delays and dynamic quantisation effects. *International Journal of Systems Science*, 2022, 53(11): 2390 – 2406.
- [10] ZHANG J, SONG J, LI J, et al. Observer-based nonfragile H_∞ -consensus control for multi-agent systems under deception attacks. *International Journal of Systems Science*, 2021, 6(56): 1223 – 1236.
- [11] AQUIB M, HAMIDREZA M, ROHOLLAH M. Resilient synchronization of distributed multi-agent systems under attacks. *Automatica*, 2020, 115: 108869 – 108882.
- [12] DING D, HAN Q, XIANG Y, et al. A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems. *Neurocomputing*, 2018, 275: 1674 – 1683.
- [13] DU S, WANG Y, DONG L, et al. Secure consensus of multiagent systems with DoS attacks via a graph-based approach. *Information Sciences*, 2021, 570(1): 94 – 104.
- [14] YE D, ZHANG T, GUO G. Stochastic coding detection scheme in cyber-physical systems against replay attack. *Information Sciences*, 2019, 481: 432 – 444.

- [15] WANG Yue, JIA Xinchun, YOU Xiu, et al. Multi-rate sampled-data secure consensus of multi-agent systems subject to DoS attacks. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(10): 1890 – 1897.
(王悦, 贾新春, 游秀, 等. DoS攻击下基于多率采样的多智能体系统安全一致性. 控制理论与应用, 2022, 39(10): 1890 – 1897.)
- [16] WEN G, ZHAG Y, PENG Z, et al. Observer-based output consensus of leader-following fractional-order heterogeneous nonlinear multi-agent systems. *International Journal of Control*, 2020, 93(10): 2516 – 2524.
- [17] XIE X, YANG Z, MU X. Observer-based consensus control of nonlinear multi-agent systems under semi-Markovian switching topologies and cyber attacks. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, 30: 5510 – 5528.
- [18] HU J, JIA C, LIU H, et al. A survey on state estimation of complex dynamical networks. *International Journal of Systems Science*, 2021, 52(16): 3351 – 3367.
- [19] XU W, WANG Z, HO D. Finite-horizon H_∞ consensus for multi-agent systems with redundant channels via an observer-type event-triggered scheme. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(5): 1567 – 1576.
- [20] DAMIANO R, CHRISTOPHE P, DIDIER T. Gain-scheduled observer-based consensus for linear parameter varying multi-agent systems. *Automatica*, 2022, 135: 109979 – 109986.
- [21] HEONG A, CHONG G, LI Y. PIDcontrol system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 559 – 576.
- [22] ANIRUDDA D, TZU H, SHANKAR B. *Structure and Synthesis of PIDControllers in Advances in Industrial Control*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2000.
- [23] ZHAO D, WANG Z, HO D, et al. Observer-based PIDsecurity control for discrete time-delay systems under cyber-attacks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(6): 3926 – 3938.
- [24] LI Haoliang, YANG Rennong, XI Xi, et al. Consensus of multi-agent systems with time-varying delays based on distributed PID control. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 189 – 197.
(李浩亮, 杨任农, 席茜, 等. 基于分布式PID控制的时变时延多智能体系统的一致性. 控制与决策, 2019, 34(1): 189 – 197.)
- [25] WEN P, HOU N, SHEN Y, et al. Observer-based H_∞ PIDcontrol for discrete-time systems under hybrid cyber attacks. *Systems Science & Control Engineering*, 2021, 9(1): 232 – 242.
- [26] GU H, LIU P, LU J, et al. PIDcontrol for synchronization of complex dynamical networks with directed topologies. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(3): 1334 – 1346.
- [27] LIU L, MA L, WANG Y, et al. Distributed set-membership filtering for time-varying systems under constrained measurements and replay attacks. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(8): 4983 – 5003.
- [28] MAHMOUD M, HAMDAN M, BAROUDI U. Modeling and control of cyber-physical systems subject to cyber attacks: A survey of recent advances and challenges. *Neurocomputing*, 2019, 338: 101 – 115.

作者简介:

宋金波 副教授, 博士研究生, 目前研究方向为多智能体系统控制, E-mail: sjb_nepu@126.com;

董宏丽 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制与滤波, E-mail: shiningdhl@vip.126.com;

申雨轩 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为多速率系统控制与滤波, E-mail: shenyuxuan5973@163.com;

侯男 副教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统控制与滤波, E-mail: bayan2@163.com.