

控制与决策

Control and Decision

网络攻击下多智能体系统动态事件触发一致性

王柳, 胡爱花, 江正仙

引用本文:

王柳, 胡爱花, 江正仙. 网络攻击下多智能体系统动态事件触发一致性[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1295–1302.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0725>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于事件触发的非线性多智能体系统的固定时间分群一致性](#)

Fixed-time group consensus control for nonlinear multi-agent systems based on event-triggered mechanism

控制与决策. 2023, 38(5): 1278–1285 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0406>

[事件触发间歇通讯下多智能体系统的固定时间分布式优化](#)

Distributed fixed-time optimization for multi-agent systems via event-triggered intermittent communication

控制与决策. 2023, 38(5): 1412–1419 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0369>

[多智能体系统的事件触发无模型迭代学习双向一致性](#)

Event-triggered model-free adaptive iterative learning bipartite consensus control for multi-agent systems

控制与决策. 2022, 37(10): 2552–2558 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0401>

[基于事件驱动的多智能体有限时间分群一致控制](#)

Finite-time group consensus for second-order multi-agent systems with event-triggered control

控制与决策. 2022, 37(11): 2925–2933 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0162>

[自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性](#)

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

网络攻击下多智能体系统动态事件触发一致性

王柳, 胡爱花[†], 江正仙

(江南大学理学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 研究网络攻击下一般线性多智能体系统的动态事件触发一致性问题. 考虑多智能体系统在受到网络攻击后, 被攻击节点的状态会改变, 导致与其相应的连接无法工作, 设计修复策略恢复被攻击节点及其相应的连接, 给出网络攻击下分布式事件触发控制协议. 在静态事件触发机制基础上, 通过引入动态阈值参数, 提出动态事件触发机制. 进一步, 利用图论、线性矩阵不等式和李雅普诺夫函数方法, 给出网络攻击下实现多智能体系统一致性的充分条件, 并证明在所提出的动态事件触发条件下, 能够有效避免芝诺行为. 最后, 通过仿真例子来验证理论结果的有效性.

关键词: 多智能体系统; 网络攻击; 动态事件触发机制; 一致性; 芝诺行为

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0725

引用格式: 王柳, 胡爱花, 江正仙. 网络攻击下多智能体系统动态事件触发一致性 [J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1295-1302.

Dynamic event-triggered consensus of multi-agent systems under cyber-attacks

WANG Liu, HU Ai-hua[†], JIANG Zheng-xian

(School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This paper studies the dynamic event-triggered consensus of general linear multi-agent systems under cyber-attacks. Considering that the states of the attacked nodes will change after multi-agent systems are affected by cyber-attacks, which results in the failure of their corresponding connections, some repair strategies are designed to restore the attacked nodes and their corresponding connections, and a distributed event-triggered control protocol is given. Based on the static event-triggered mechanism, a dynamic event-triggered mechanism is proposed by introducing dynamic threshold parameters. Furthermore, using the graph theory, linear matrix inequality and Lyapunov function method, sufficient conditions for realizing the consensus of multi-agent systems under cyber-attacks are given, and it is proved that Zeno behavior can be effectively avoided under the proposed dynamic event-triggered conditions. Finally, a simulation example is supplied to verify the effectiveness of the theoretical results.

Keywords: multi-agent systems; cyber-attacks; dynamic event-triggered mechanism; consensus; Zeno behavior

0 引言

多智能体系统由多个相互作用的智能体组成, 通过智能体之间的信息交换与合作完成特定的任务. 多智能体系统有着广泛的应用, 例如无人机、传感器网络、智能电网等^[1-3]. 一致性问题一直是研究多智能体系统的核心问题之一, 也是多智能体系统协同控制的基础^[4-5]. 一般而言, 多智能体一致性可分为两类, 即无领导者一致性和领导跟随者一致性^[6-9]. 在无领导者一致性中, 事先难以确定智能体最终到达的状态; 而对于领导跟随者一致性, 所有跟随者最终会收

敛到领导者的状态.

为了节省智能体之间的通信资源, 现有结果研究了采样控制^[10-11]. 与传统时间采样控制相比, 事件触发控制可以更好地降低控制更新频率. 在事件触发控制中, 触发时刻由特定条件决定, 更新间隔不固定, 可以避免不必要的更新. 因此, 应用事件触发控制研究多智能体一致性受到了广泛的关注. 例如, 文献 [12] 研究了具有固定/切换拓扑的多智能体系统事件触发一致性, 文献 [13] 研究了基于事件触发策略的切换随机非线性多智能体系统一致性, 文献 [14] 研究了

收稿日期: 2022-04-30; 录用日期: 2022-09-19.

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20181342); 国家自然科学基金项目 (61807016).

责任编辑: 杨涛.

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

混合事件触发下具有扰动的多智能体系统一致性.

值得注意的是,事件触发机制可能会导致芝诺行为,这意味着受控系统在规定时间内无限次触发而不稳定.因此,在考虑具有事件触发机制的控制协议中,应排除芝诺行为,即事件触发最小间隔必须严格为正,部分相关结果给出了排除芝诺行为的事件触发条件^[15-17].另一方面,与静态事件触发机制相比,动态事件触发机制可以进一步节省相关资源,并能够满足更为灵活的系统设计要求,因此动态事件触发机制受到越来越多的关注.最近,已有学者讨论了动态事件触发机制下一致性问题.文献[18-19]研究了具有动态事件触发的多智能体系统领导跟随一致性,文献[20]研究了有向图连接下非线性多智能体系统的动态事件触发一致性,文献[21]研究了动态事件触发策略下的控制问题.

近年来,随着通信科学技术的飞速发展,多智能体系统得到了越来越广泛的应用.然而由于通信环境的不稳定,多智能系统受到大量干扰,例如丢包、网络攻击等,其中网络攻击是众多学者的研究热点之一.文献[22]研究了拒绝服务攻击下网络的领导跟随一致性控制问题,文献[23]研究了拒绝服务攻击下的分布式安全协作控制问题,文献[24]研究了混合网络攻击下的分布式事件控制问题,文献[25]研究了缺失测量和网络攻击下网络物理系统的动态事件触发安全控制问题.

在上述关于网络攻击的研究成果中,大多数侧重于网络攻击对节点之间连接的影响,例如文献[22-23,25].考虑到实际通信环境,一些被攻击的智能体节点的状态在网络攻击发生的瞬间会突然改变,同时将相应的连接断开,使得仅讨论网络攻击对节点间连接的影响存在一定局限性.

基于以上讨论,本文进一步研究网络攻击下多智能体系统的动态事件触发一致性.本文主要创新点在于:

1) 考虑了多智能体系统模型受到网络攻击后,被攻击节点的状态发生瞬时改变,导致与其相应的连接无法工作.

2) 将状态的瞬时改变刻画为系统受到脉冲扰动,系统模型贴合实际.

3) 针对所建立的模型,通过估计被攻击节点状态及修复其相应的连接,给出了网络攻击下分布式动态事件触发控制协议,既有效避免了芝诺行为,也节省了通信与控制资源.

4) 基于图论、线性矩阵不等式和李雅普诺夫函数方法,推导出了网络攻击下实现多智能体系统一致

性的充分条件.

1 预备知识和问题描述

1.1 预备知识

用 $\mathcal{G} = (\mathcal{W}, \mathcal{E}, A)$ 表示具有 N 个节点的有向拓扑图,其中节点集为 $\mathcal{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$,边集合表示为 $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{W} \times \mathcal{W}$.节点 i 的邻居节点集为 $N_i = \{j \in \mathcal{W} \mid (j, i) \in \mathcal{E}\}$. $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 为 \mathcal{G} 的邻接矩阵,其中 $a_{ij} > 0$ 当且仅当 $(j, i) \in \mathcal{E}$,否则 $a_{ij} = 0$.度矩阵表示为 $W = \text{diag}\{w_1, w_2, \dots, w_N\}$,其中元素 $w_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$.定义 $L = (l_{ij})_{N \times N} = W - A$ 为拉普拉斯矩阵.对角矩阵定义为 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$,其中 $d_i > 0$ 当且仅当存在领导者 0 到节点 i 的有向边,否则 $d_i = 0$.定义矩阵 $H = L + D$,如果 \mathcal{G} 中包含以领导者 0 为根节点的生成树,则 H 是非奇异的,且 H 中的所有特征值均有正实部.

引理 1^[26] 如果非奇异矩阵 $H = (h_{ij})_{N \times N}$ 满足 $h_{ij} \leq 0 (i \neq j)$,且所有特征值都有正实部,则称其为 M 矩阵.

引理 2^[27] 如果 $H = (h_{ij})_{N \times N}$ 是 M 矩阵,存在向量 $(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N)^T$,使得 $\Omega H + H^T \Omega > 0$,其中 $\psi_i > 0, \Omega = \text{diag}\{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\}$.

1.2 问题描述

考虑领导跟随多智能体系统模型,跟随者系统模型如下:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t). \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, x_i(t) \in R^n$ 是 t 时刻跟随者 i 的状态向量, $u_i(t) \in R^m$ 是第 i 个跟随者的控制协议.领导者动力学模型如下:

$$\dot{x}_0(t) = Ax_0(t), \quad (2)$$

$x_0(t) \in R^n$ 是 t 时刻领导者 0 的状态向量.

考虑多智能体系统的节点受到网络攻击,令 $A_m = [t_m, t_m + \tau_m)$ 作为第 m 次攻击间隔, $\Xi_a(t_0, t) = \bigcup A_m \cap [t_0, t]$ 作为总的攻击时间, $\Xi_s(t_0, t) = [t_0, t] \setminus \Xi_a(t_0, t)$ 表示没有攻击的总时间.

图 1 中,对节点的网络攻击发生在 $t_m (m = 1, 2, \dots)$ 处,在 $t_m + \tau_m$ 处结束,系统在 $\tilde{t}_m (\tilde{t}_m \geq t_m)$ 处检测到网络攻击.一段时间后,受到网络攻击的节点和节点相应的通信链路将在 $t_m + \tau_r$ 处修复.在理论分析中,假设 $\tilde{t}_m = t_m$.被攻击的节点在时间间隔 $(t_m, t_m + \tau_r]$ 内不与任何其他节点通信,因此为每个节点设置一个状态修复系统,节点受到网络攻击时,该修复系统将被激活.本文中,对每个受攻击的节点 $i \in \mathcal{W}_m^{\text{att}}$,采取以下状态修复策略:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t), t \in (t_m, t_m + \tau_r],$$

其中 $\mathcal{W}_m^{\text{att}}$ 表示在 t_m 时刻受到网络攻击的节点集. 令 $T^r(t)$ 和 $T^n(t)$ 分别为 $[t_0, t]$ 期间的总检测修复时间和正常工作时间.

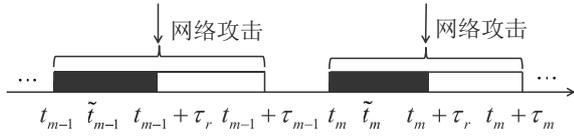


图1 网络攻击时间间隔

假设1 对于任何 $t > t_0 \geq 0$, 存在常数 $\rho_r > 0$, 满足 $T^n(t) \geq \rho_r T^r(t)$.

假设2 对于任何 $t > t_0 \geq 0$, 令 $N_a(t_0, t)$ 表示在 $[t_0, t]$ 上发生网络攻击的总数量, 则存在正整数 v 和 $\rho_D > 0$ 满足 $\frac{t-t_0}{\rho_D} - v \leq N_a(t_0, t) \leq \frac{t-t_0}{\rho_D} + v$.

考虑被攻击节点状态修复后, 连接恢复策略将被激活, 通过补充合适的备用通信链路, 使通信拓扑图可以包含以领导者0为根节点的有向生成树. 本文受文献[28]的启发, 采用如图2所示的连接恢复策略.

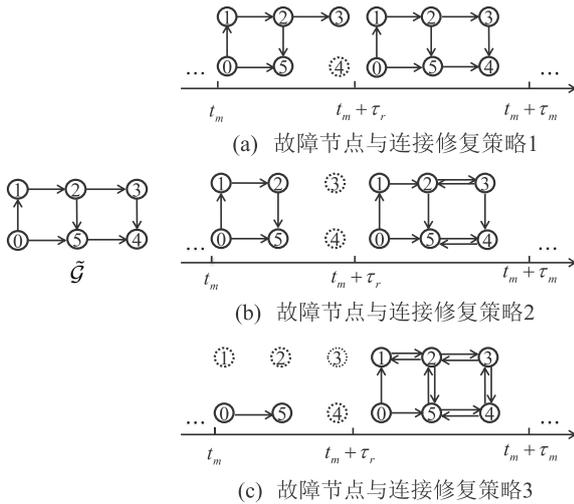


图2 故障节点与链路的不同连接恢复策略

连接恢复策略具体如下:

1) 当极个别点受攻击, 如图2(a)中的节点4, 此时节点的状态发生改变, 考虑刻画为系统受到脉冲扰动, 同时边(3,4)、(5,4)无法工作. 经过一段时间, 系统激活故障节点的状态修复策略和原连接, 选择恢复原始通信拓扑.

2) 当少数节点受到网络攻击时, 这些智能体将成为孤立的节点, 无法直接或间接访问领导者0的信息. 如图2(b)所示, 节点3和4受到网络攻击时, 节点的状态发生改变, 系统受到的脉冲扰动增强, 同时边(2,3)、(3,4)、(5,4)无法工作. 为了尽快实现一致, 激活故障节点状态修复策略, 恢复时选择与原有相邻未受攻击节点之间添加双向连接实现修复策略, 即边(2,3)与(5,4)双向, 从而修复系统.

3) 当多数节点受到网络攻击时, 如图2(c)所示, 节点1~节点4受到网络攻击时, 节点的状态发生改变, 系统受到的脉冲扰动进一步增强, 同时边(1,2)、(2,3)、(2,5)、(3,4)、(5,4)无法工作. 为了尽快实现一致, 激活故障节点的状态恢复策略, 在原有通信拓扑基础上全部添加双向连接, 从而修复系统.

将 N 个跟随者组成的通信拓扑表示为 \mathcal{G} , N 个跟随者和领导者0组成的通信拓扑表示为 $\tilde{\mathcal{G}}$. 考虑系统在网络攻击中会采取不同的连接恢复策略, 恢复的通信拓扑与原始拓扑可能不同, 引入切换信号 $\sigma(t) : [0, +\infty) \rightarrow \{1, 2, \dots, m+q+1\}$, 用 $\tilde{\mathcal{G}}^{\sigma(t)}$ 描述领导者与跟随者的切换通信拓扑, 修复之前和修复之后的通信拓扑集描述为 $\{\tilde{\mathcal{G}}^{a_1}, \dots, \tilde{\mathcal{G}}^{a_m}\}$ 和 $\{\tilde{\mathcal{G}}^{r_1}, \dots, \tilde{\mathcal{G}}^{r_q}\}$, 假设初始时刻通信拓扑满足 $\tilde{\mathcal{G}}^{\sigma(0)} = \tilde{\mathcal{G}}$, 含有以领导者0为根节点的生成树.

定义1 由式(1)给出的跟随者模型和式(2)给出的领导者模型所组成的多智能体系统, 对于任意初始条件, 如果满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0,$$

则称多智能体系统实现一致性, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$.

2 主要结果

2.1 控制协议设计

定义 $t_0^i, t_1^i, \dots, t_{k_i}^i, \dots$ 为事件触发的时间控制序列. 当 $t \in [t_{k_i}^i, t_{k_i+1}^i)$ 时, 网络攻击下的分布式控制协议设计为

$$\begin{cases} u_i(t) = K\xi_i(t), \\ \xi_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}^{\sigma(t)}(q_j(t) - q_i(t)) + d_i^{\sigma(t)}(q_0(t) - q_i(t)). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $q_i(t)$ 是智能体 i 的最新估计状态, $K \in R^{m \times n}$ 为反馈矩阵, $d_i^{\sigma(t)} \geq 0$ 表示领导者0对第 i 个跟随者的控制增益. 本文考虑仅有一小部分跟随者被领导者0牵制. $t_{k_i}^i(t)$ 的下标 $k_i(t)$ 表示最新一次成功更新, 其描述为

$$k_i(t) = \begin{cases} -1, & \Xi_s(t_0, t) = \emptyset; \\ \sup\{k_i \in \mathbf{R} | t_{k_i}^i \in \Xi_s(t_0, t)\}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

假设 $u_i(t_0) = 0$ 和 $x_i(t_{-1}^i) = 0$. 估计器 $q_i(t)$ 设计为

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = Aq_i(t), & t_{k_i}^i < t < t_{k_i+1}^i; \\ q_i(t) = x_i(t_{k_i}^i), & t = t_{k_i}^i. \end{cases} \quad (4)$$

对于领导者0, 满足 $q_0(t) = x_0(t)$.

为了通过动态事件触发方案确定采样瞬间 $t_{k_i}^i$,

定义测量误差为

$$e_i(t) = q_i(t) - x_i(t).$$

本文设计触发条件为

$$\|e_i(t)\|^2 \leq \beta_i \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t), \quad (5)$$

其中 $\beta_i > 0$ 是事件触发参数. 阈值参数 $\eta_i(t)$ 是动态的, 其自适应律如下:

$$\dot{\eta}_i(t) = -\alpha_i \eta_i(t). \quad (6)$$

其中: α_i 是一个正常数, 且 $\eta_i(0) > 0$.

为保证对每个智能体 $i (i = 1, 2, \dots, N)$ 无芝诺行为, 采用一种混合触发方法确定事件触发瞬间, 即

$$t_{k_i+1}^i = \begin{cases} t_{k_i}^i + \vartheta_i, & k_i \in \Sigma; \\ t_{k_i}^i + \varphi_{k_i}^i(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\vartheta_i > 0$ 是网络攻击时控制更新尝试时间间隔; Σ 表示网络攻击时控制更新尝试后形成的数集; θ_i 是待给定的正实数; $\varphi_{k_i}^i(t) = \max\{\Pi_{k_i}^i, \theta_i\}$ 是事件触发执行间隔, 并且

$$\Pi_{k_i}^i = \inf_{t > t_{k_i}^i} \{t - t_{k_i}^i \mid \|e_i(t)\|^2 > \beta_i \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t)\}.$$

注1 严格正的事件触发间隔 $t_{k_i+1}^i - t_{k_i}^i$ 可以保证避免芝诺行为. 本文采用了无芝诺行为机制, 如式(7)所示, 相应参数的选择将在下节给出.

2.2 一致性分析

定义状态误差为

$$z_i(t) = x_i(t) - x_0(t). \quad (8)$$

当 $t \in (t_m, t_m + \tau_r]$ 时, 由于网络攻击, $x_i(t)$ 在 t_m 处可能会发生变化, 状态误差 $z_i(t)$ 可能受到瞬时干扰, 将这种现象数学地表述为系统受脉冲扰动, 此时没有控制输入, 从而得到误差系统的动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_i(t) = Az_i(t), & t \in (t_m, t_m + \tau_r]; \\ z_i(t_m^+) = \mu_m z_i(t_m). \end{cases} \quad (9)$$

其中常数 μ_m 表示第 m 次攻击所引起的脉冲强度.

注2 本文考虑网络攻击对相关节点引起的脉冲扰动, 模型贴合实际. 进一步, 脉冲强度分为两种情况^[29]: 1) $|\mu_m| = 1$; 2) $|\mu_m| > 1$.

当 $t \in (t_m + \tau_r, t_{m+1}]$ 时, 在进行修复工作后, 通信拓扑将在 $t_m + \tau_r$ 时恢复为 $\tilde{\mathcal{G}}^{r_i}$, $i = 1, 2, \dots, q$. 进一步, 令 $H^{\sigma(t)} = L^{\sigma(t)} + D^{\sigma(t)}$, $D^{\sigma(t)} = \text{diag}\{d_1^{\sigma(t)}, d_2^{\sigma(t)}, \dots, d_N^{\sigma(t)}\}$, 此时控制输入恢复, 得到误差系统的动力学模型为

$$\dot{z}_i(t) = Az_i(t) - BK \sum_{j \in N_i} h_{ij}^{\sigma(t)} (z_j(t) + e_j(t)), \quad (10)$$

其中 $H^{\sigma(t)} = [h_{ij}^{\sigma(t)}]_{N \times N}$.

令 $z(t) = (z_1^T(t), z_2^T(t), \dots, z_N^T(t))^T$, 下面给出模型(9)和(10)的紧凑形式

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = (I_N \otimes A)z(t), \\ z(t_m^+) = \mu_m z(t_m); \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{z}(t) = (I_N \otimes A)z(t) - (H^{\sigma(t)} \otimes BK)(z(t) + e(t)). \quad (12)$$

为便于后续一致性分析, 引入如下符号:

$$\lambda_1 = \lambda_{\min}(\Omega H^{\sigma(t)} + (H^{\sigma(t)})^T \Omega),$$

$$\lambda_2 = \lambda_{\min}(\Omega \otimes Q^{-1}),$$

$$\lambda_3 = \lambda_{\min}(((H^{\sigma(t)})^{-1})^T (H^{\sigma(t)})^{-1} \otimes I_n),$$

$$\lambda_4 = 2\lambda_{\max}(\Omega H^{\sigma(t)} \otimes Q^{-1} BK) - \hat{\rho}_1,$$

$$\lambda_5 = \lambda_{\max}(((H^{\sigma(t)})^{-1})^T \Omega H^{\sigma(t)} \otimes Q^{-1} BK) - \hat{\rho}_1(((H^{\sigma(t)})^{-1})^T \otimes I_n).$$

同时考虑存在1个正定矩阵 Q 和3个正常数 ϖ, ρ_1, ρ_2 , 对于矩阵 A 和 B , 使得以下两个矩阵不等式成立:

$$AQ + QA^T - \varpi BB^T + \rho_1 Q < 0, \quad (13)$$

$$AQ + QA^T - \rho_2 Q < 0. \quad (14)$$

定理1 考虑由式(1)给出的跟随者模型和式(2)给出的领导者模型所组成的多智能体系统, 假设1和假设2成立, 如果满足以下条件, 则可以实现网络攻击下多智能体一致性.

1) 选取 $K = \tilde{\tau} B^T Q^{-1}$. 其中: $\tilde{\tau} \geq \varpi \phi \lambda_1^{-1}$, $\phi = \max\{\psi_i\}$.

2) 令 $\rho_1 = \tilde{\rho}_1 + \bar{\rho}_1$, $\tilde{\rho}_1 > 0$, $\bar{\rho}_1 > 0$, $\hat{\rho}_1 = \bar{\rho}_1 \lambda_2$. 存在常数 $\rho^* \in (0, \hat{\rho}_1)$, 使得 $\rho_r \geq \frac{\rho_2 - \rho^*}{\hat{\rho}_1 - \rho^*}$, $\rho_D > \frac{2 \ln |\mu|}{\rho^*}$, 其中 $|\mu| = \max\{|\mu_m|\}$, $m = 1, 2, \dots$

3) 参数 α_i 满足 $\alpha_i \geq \lambda_4 + \gamma \lambda_5$, $i = 1, 2, \dots, N$.

4) 事件触发控制参数 β_i 满足 $\beta_i \leq \delta_i \leq \delta$, 其中 $\delta \leq \kappa \frac{\gamma \hat{\rho}_1 \lambda_3 - \lambda_5}{\gamma(\lambda_4 + \gamma \lambda_5)}$, $\kappa \in (0, 1)$.

证明 考虑序列 $\{t_{k_i}^i\}_{k_i \in N}$ 和 $\{t_m\}_{m \in N}$. 从时间 $t_m + \tau_r$ 到智能体成功采样和传输会经过一个时间间隔, 其上界为 $\tau = \sup \varphi_{k_i}^i(t)$. 设 $\Gamma_m = (t_m, t_m + \tau_r + \tau]$, $\tilde{\Xi}_a^r(t_0, t) = \bigcup \Gamma_m \cap [t_0, t]$, $\tilde{\Xi}_s^r(t_0, t) = [t_0, t] \setminus \tilde{\Xi}_a^r(t_0, t)$. 选择李雅普诺夫函数为

$$V(t) = z^T(t) [\Omega \otimes Q^{-1}] z(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t). \quad (15)$$

首先, 考虑时间间隔 $\tilde{\Xi}_s^r(t_0, t)$ 内式(5)始终成立, 此时通信拓扑已修复至 $\tilde{\mathcal{G}}^{r_i}$, $i = 1, 2, \dots, q$, 则 $V(t)$ 沿系统(12)的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & z^T(t) [\Omega \otimes (Q^{-1} A + A^T Q^{-1})] z(t) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& z^T(t)[\Omega H^{\sigma(t)} \otimes Q^{-1}BK]z(t) - \\
& z^T(t)[(H^{\sigma(t)})^T \Omega \otimes Q^{-1}BK]z(t) - \\
& 2z^T(t)(\Omega \otimes Q^{-1})(H^{\sigma(t)} \otimes BK)e(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t).
\end{aligned}$$

根据矩阵不等式(13)和定理1中条件1)可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) \leq & z^T(t)[\Omega \otimes (Q^{-1}A + A^T Q^{-1})]z(t) - \\
& z^T(t)[\Omega \otimes \varpi Q^{-1}BB^T Q^{-1}]z(t) - \\
& 2z^T(t)(\Omega H^{\sigma(t)} \otimes Q^{-1}BK)e(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t) \leq \\
& -\rho_1 z^T(t)[\Omega \otimes Q^{-1}]z(t) - \\
& 2z^T(t)(\Omega H^{\sigma(t)} \otimes Q^{-1}BK)e(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t). \quad (16)
\end{aligned}$$

又因 $\dot{q}(t) = (I_N \otimes A)q(t)$, $z(t) = q(t) - e(t) - (1_N \otimes x_0(t))$, $\xi(t) = (H^{\sigma(t)} \otimes I_n)[(1_N \otimes x_0(t)) - q(t)]$, 其中 $\xi(t) = (\xi_1^T(t), \xi_2^T(t), \dots, \xi_N^T(t))^T$, 于是

$$z(t) = -((H^{\sigma(t)})^{-1} \otimes I_n)\xi(t) - e(t). \quad (17)$$

根据定理1中条件2), 将式(17)代入(16)可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) \leq & -\tilde{\rho}_1 z^T(t)[\Omega \otimes Q^{-1}]z(t) - \\
& \hat{\rho}_1 \lambda_3 \xi^T(t)\xi(t) + \lambda_4 e^T(t)e(t) + \\
& \lambda_5 \left[\gamma e^T(t)e(t) + \frac{1}{\gamma} \xi^T(t)\xi(t) \right] - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t) = \\
& -\tilde{\rho}_1 z^T(t)[\Omega \otimes Q^{-1}]z(t) + \left(\frac{\lambda_5}{\gamma} - \hat{\rho}_1 \lambda_3 \right) \xi^T(t)\xi(t) + \\
& (\lambda_4 + \gamma \lambda_5) e^T(t)e(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t).
\end{aligned}$$

令 $\gamma > \lambda_5 / (\hat{\rho}_1 \lambda_3)$, 由 $e^T(t)e(t) \leq \delta \xi^T(t)\xi(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t)$, 再由定理1中条件3)和条件4)进一步可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) \leq & -\tilde{\rho}_1 z^T(t)[\Omega \otimes Q^{-1}]z(t) - (1 - \kappa) \xi^T(t)\xi(t) + \\
& (\lambda_4 + \gamma \lambda_5) \sum_{i=1}^N \eta_i(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t) \leq \\
& -\tilde{\rho}_1 z^T(t)[\Omega \otimes Q^{-1}]z(t) + (\lambda_4 + \gamma \lambda_5 - \alpha_i) \sum_{i=1}^N \eta_i(t) \leq \\
& -\hat{\rho}_1 V(t),
\end{aligned}$$

其中 $-\hat{\rho}_1 = \max_{i=1, \dots, N} \{-\tilde{\rho}_1, \lambda_4 + \gamma \lambda_5 - \alpha_i\}$.

其次, 考虑在时间间隔 $\tilde{\Xi}_a^r(t_0, t)$ 内, 式(5)不一定成立, 结合不等式(14)可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) = & z^T(t)[\Omega \otimes (Q^{-1}A + A^T Q^{-1})]z(t) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \eta_i(t) \leq \\
& \rho_2 \left[z^T(t)(\Omega \otimes Q^{-1})z(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t) \right] = \rho_2 V(t).
\end{aligned}$$

当 $t \in (t_m + \tau_r + \tau, t_{m+1}]$ 时, 有

$$\begin{aligned}
V(t) \leq & e^{-\hat{\rho}_1(t-t_m-\tau_r-\tau)} V((t_m + \tau_r + \tau)^+) = \\
& e^{-\hat{\rho}_1(t-t_m-\tau_r-\tau)} V(t_m + \tau_r + \tau),
\end{aligned}$$

其中 $V((t_m + \tau_r + \tau)^+) = \lim_{t \rightarrow t_m + \tau_r + \tau} V(t)$.

当 $t \in (t_m, t_m + \tau_r + \tau]$ 时, 有

$$V(t) \leq e^{\rho_2(t-t_m)} V(t_m^+) \leq \mu^2 e^{\rho_2(t-t_m)} V(t_m).$$

结合 $N_a(t_0, t)$ 为 $[t_0, t]$ 内发生的攻击次数, 再根据定理1中条件2)和假设1, 可得

$$\begin{aligned}
V(t) \leq & \mu^{2N_a(t_0, t)} e^{\hat{\rho}_1 \tau + \rho_2 \tau} e^{\rho_2 T^r(t) - \hat{\rho}_1 T^n(t)} V(t_0) \leq \\
& \mu^{2N_a(t_0, t)} e^{\rho_2 \tau + \hat{\rho}_1 \tau} e^{-\rho^*(t-t_0)} V(t_0).
\end{aligned}$$

再根据假设2, 当 $|\mu| = 1$ 时, $\mu^{2N_a(t_0, t)} = 1$, 有

$$\begin{aligned}
V(t) \leq & e^{\rho_2 \tau + \hat{\rho}_1 \tau} e^{\left(\frac{2 \ln |\mu|}{\rho D} - \rho^*\right)(t-t_0)} V(t_0) = \\
& e^{\rho_2 \tau + \hat{\rho}_1 \tau} e^{-\rho^*(t-t_0)} V(t_0).
\end{aligned}$$

当 $|\mu| > 1$ 时, 有

$$V(t) \leq \mu^{2v} e^{\rho_2 \tau + \hat{\rho}_1 \tau} e^{\left(\frac{2 \ln |\mu|}{\rho D} - \rho^*\right)(t-t_0)} V(t_0).$$

这意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|z(t)\| = 0$, 从而有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0$. 结合定义1可知, 实现了网络攻击下的多智能体系统一致性. \square

定理2 根据分布式控制协议(3), 如果事件触发机制(7)中时间参数 θ_i 满足

$$0 < \theta_i \leq \frac{1}{2\|A\|} \ln \left(\frac{2\|A\|}{\|BK\|} \sqrt{\varepsilon} + 1 \right),$$

则可以排除芝诺行为, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $\varepsilon = \delta_2 / N$.

证明 由式(7)可知, 智能体 i 的采样时间 $t_{k_i}^i$ 由参数 θ_i 或 $\Pi_{k_i}^i$ 确定. 将 $W_1(t)$ 和 $W_2(t)$ 表示为智能体集, 并且 $W_1(t) \cup W_2(t) = \{1, 2, \dots, N\}$ 和 $W_1(t) \cap W_2(t) = \emptyset$. 令 $\delta = \delta_1 + \delta_2 < 1$ 保证 $e^T(t)e(t) \leq \delta \xi^T(t)\xi(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t)$ 成立, 于是有

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in W_1(t)} e_i^T(t)e_i(t) \leq & \sum_{i \in W_1(t)} (\delta_1 \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t)) \leq \\
& \sum_{i=1}^N (\delta \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t)).
\end{aligned}$$

对于 $W_1(t)$ 中的智能体, $\beta_i \leq \delta_1$ 可保证 $\|e_i(t)\|^2 \leq \delta \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t)$ 成立. 对于 $W_2(t)$ 中的智能体, 如

果 $\sum_{i \in W_2(t)} e_i^T(t)e_i(t) \leq \delta_2 \sum_{i=1}^N \xi_i^T(t)\xi_i(t)$ 成立, 则可以

保证 $e^T(t)e(t) \leq \delta \xi^T(t)\xi(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t)$ 成立.

令 $\varepsilon = \delta_2/N$, 条件 $\|e_i(t)\| \leq \sqrt{\varepsilon}\|\xi(t)\|$ 可以保证

$\sum_{i \in W_2(t)} e_i^T(t)e_i(t) \leq \delta_2 \sum_{i=1}^N \xi_i^T(t)\xi_i(t)$ 成立, 故参数 θ_i

是对应于 $\|e_i(t)\|/\|\xi(t)\|$ 从0到 $\sqrt{\varepsilon}$ 的时间间隔. 一方面, 有

$$\begin{aligned} \|\dot{\xi}(t)\| &\leq \|A\|\|\xi(t)\|, \\ \|\dot{e}_i(t)\| &\leq \|A\|\|e_i(t)\| + \|BK\|\|\xi(t)\|; \end{aligned}$$

另一方面, 有

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\|e_i(t)\|}{\|\xi(t)\|} \right) &= \frac{e_i^T(t)\dot{e}_i(t)}{\|e_i(t)\|\|\xi(t)\|} - \frac{\|e_i(t)\|\xi^T(t)\dot{\xi}(t)}{\|\xi(t)\|^3} \leq \\ &\frac{\|\dot{e}_i(t)\|}{\|\xi(t)\|} + \frac{\|e_i(t)\|\|\dot{\xi}(t)\|}{\|\xi(t)\|^2}. \end{aligned}$$

进一步可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\|e_i(t)\|}{\|\xi(t)\|} \right) \leq c \left(\frac{1}{2} \frac{\|BK\|}{\|A\|} + \frac{\|e_i(t)\|}{\|\xi(t)\|} \right),$$

其中 $c = 2\|A\|$. 因此 $\frac{\|e_i(t)\|}{\|\xi(t)\|}$ 满足 $\frac{\|e_i(t)\|}{\|\xi(t)\|} \leq y(t)$, $y(t)$

为 $\dot{y} = c \left(\frac{1}{2} \frac{\|BK\|}{\|A\|} + y \right)$ 的解, 且 $y(0) = 0$, 则 $y(t) =$

$\sqrt{\frac{\delta_2}{N}}$ 的值是 $t = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{2\|A\|}{\|BK\|} \sqrt{\varepsilon} + 1 \right)$, 故得 $t > 0$, 即 $\varphi_{k_i(t)}^i > 0$, 此时事件触发时间间隔 $t_{k_i+1}^i - t_{k_i}^i$

严格为正, 从而当 $0 < \theta_i \leq \frac{1}{2\|A\|} \ln \left(\frac{2\|A\|}{\|BK\|} \sqrt{\varepsilon} + 1 \right)$ 时, 芝诺行为不会发生. \square

3 数值仿真

考虑由5个跟随者机器人和1个领导者机器人组成的多智能体系统, 智能体的连接如图3所示.

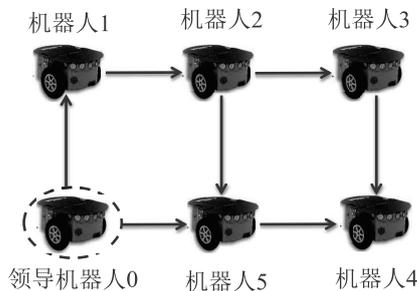


图3 多机器人系统连接

每个智能体的动力学由系统(1)描述, 系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

假设网络攻击时间 $\tau_m = 4$ s, 系统修复时间 $\tau_r = 1.5$ s, 不受攻击时间为2 s, 选取 $\vartheta_i = 0.1$. 将机器人看

作节点, 第1次网络攻击节点4, 如图2(a)所示. 假设引起的脉冲强度 $\mu_m = 1.1$, 同时边(3,4)、(5,4)无法工作, 应用连接修复策略1. 第2次网络攻击节点3和节点4, 如图2(b)所示. 假设引起的脉冲强度 $\mu_m = 1.3$, 同时边(2,3)、(3,4)、(5,4)无法工作, 应用连接修复策略2. 第3次网络攻击节点1~节点4, 如图2(c)所示. 假设引起的脉冲强度 $\mu_m = 1.5$, 同时边(1,2)、(2,3)、(2,5)、(3,4)、(5,4)无法工作, 应用连接修复策略3. 进一步, 考虑3种攻击按顺序发生.

由于系统在每轮网络攻击中应用了不同的连接修复策略(如图2所示), 恢复的通信拓扑与原始拓扑也不一定相同, 修复之后的拉普拉斯矩阵分别为

$$L^{r1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$L^{r2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$L^{r3} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

经计算: $\rho_1 = 0.81$, $\rho_2 = 0.84$, $\tilde{\rho}_1 = 0.11$, $\bar{\rho}_1 = 0.7$, $\varpi = 1.8754$, $Q = \begin{bmatrix} 0.6447 & 0.5358 \\ 0.5358 & 1.5721 \end{bmatrix}$, $K = (-5.9871, 7.2039)$, 参数 α_i 与 β_i 分别满足 $\alpha_i \geq 3.1588$, $\beta_i \leq 0.0016$.

考虑智能体系统状态 $x_i(t)$ 为二维分量, 即 $x_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t))^T (i = 0, 1, \dots, 5)$. 选取参数 $\alpha_i = 3.16$, $\beta_i = 0.0015$, 利用一致性协议(3), 仿真得到智能体的状态轨迹曲线, 以及状态误差轨迹曲线, 分别如图4(a)和4(b)所示. 可以看出, 系统状态及状态误差轨迹随时间变化最终趋于0, 状态误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|z(t)\| = 0$. 据此, 实现了网络攻击下的多智能体系统一致性.

为保证对每个智能体 $i (i = 1, 2, \dots, N)$ 无芝诺行为, 选取 $\theta_i = 0.001$. 对于不同智能体, 事件触发时刻可能不相同. 选取触发条件为 $\|e_i(t)\|^2 \leq \beta_i \|\xi_i(t)\|^2 + \eta_i(t)$, $\eta_i(t)$ 以式(6)进行更新, 取 $\eta_i(0) = 100$, 图5提供了 $[0, 20$ s] 内5个智能体动态事件触发时刻.

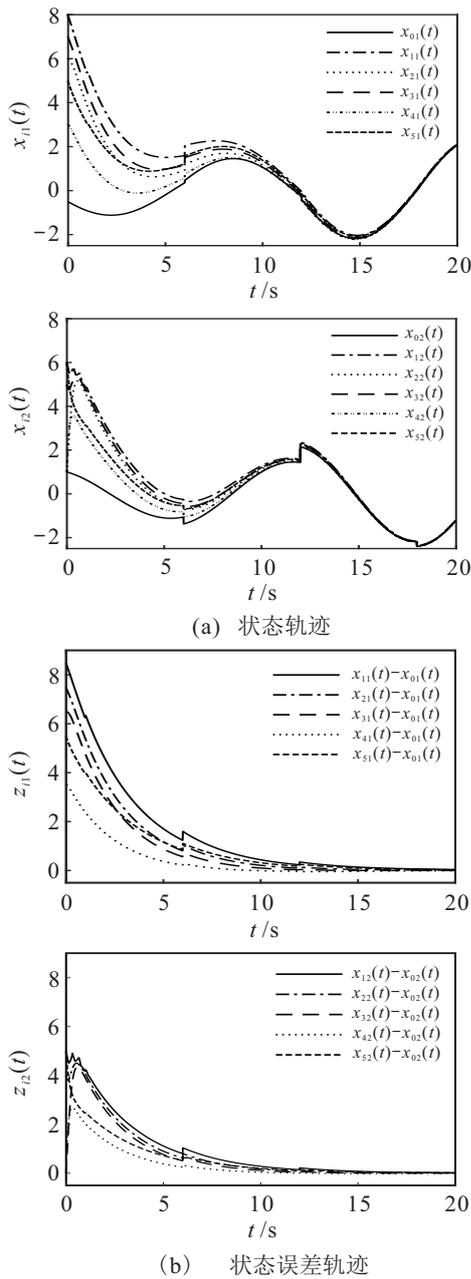


图4 网络攻击下智能体状态及状态误差轨迹

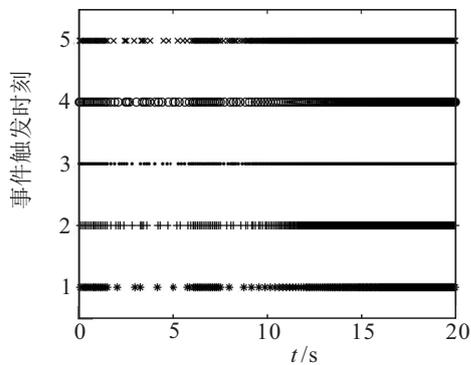


图5 智能体动态事件触发时刻

表1详细给出了静态和动态策略下[0, 20s]的事件触发次数,在保证系统稳定性前提下,可以看出动态事件触发比静态事件触发次数少,能够有效节约网络资源.上述仿真结果表明,受网络攻击的多智能体

系统在所给出的修复策略及动态事件触发控制协议下能够实现一致性.

表1 静态和动态事件触发次数

智能体 i	静态触发次数	动态触发次数
1	486	358
2	524	379
3	504	394
4	519	388
5	489	381

4 结论

本文研究了网络攻击下一般线性多智能体系统动态事件触发一致性问题.给出了网络攻击下分布式动态事件触发控制协议,与传统的静态事件触发相比,动态事件触发意味着更少的触发次数,有效减少了通信资源的占用.利用图论、线性矩阵不等式和李雅普诺夫函数方法,给出了网络攻击下多智能体系统实现一致性的充分条件,同时证明了在所提出的动态事件触发条件下,可有效避免芝诺行为的发生.最后通过仿真例子验证了理论结果的有效性.

参考文献(References)

- [1] 鲜斌, 李宏图. 分布式无人机的时变编队非线性控制设计[J]. 控制与决策, 2021, 36(10): 2490-2496. (Xian B, Li H T. Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs[J]. Control and Decision, 2021, 36(10): 2490-2496.)
- [2] Yan J, Xu Z Q, Wan Y, et al. Consensus estimation-based target localization in underwater acoustic sensor networks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27(9): 1607-1627.
- [3] Wan Y, Long C, Deng R L, et al. Adaptive event-triggered strategy for economic dispatch in uncertain communication networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8(4): 1881-1891.
- [4] Sader M, Wang F Y, Liu Z X, et al. Distributed fuzzy fault-tolerant consensus of leader-follower multi-agent systems with mismatched uncertainties[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(5): 1031-1040.
- [5] Wang G, Wang C L, Ding Z T, et al. Distributed consensus of nonlinear multi-agent systems with mismatched uncertainties and unknown high-frequency gains[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(3): 938-942.
- [6] Li H Q, Liao X F, Lei X Y, et al. Second-order consensus seeking in multi-agent systems with nonlinear dynamics over random switching directed networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(6): 1595-1607.
- [7] Hong H F, Yu W W, Wen G H, et al. Distributed

- robust fixed-time consensus for nonlinear and disturbed multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(7): 1464-1473.
- [8] Ren C G, Shi Z P, Du T. Distributed observer-based leader-following consensus control for second-order stochastic multi-agent systems[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 20077-20084.
- [9] Wei Q L, Wang X, Zhong X N, et al. Consensus control of leader-following multi-agent systems in directed topology with heterogeneous disturbances[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(2): 423-431.
- [10] Wu Y Q, Su H Y, Shi P, et al. Consensus of multiagent systems using aperiodic sampled-data control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(9): 2132-2143.
- [11] Liu W, Huang J. Leader-following consensus for linear multiagent systems via asynchronous sampled-data control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(7): 3215-3222.
- [12] Wu Z G, Xu Y, Lu R Q, et al. Event-triggered control for consensus of multiagent systems with fixed/switching topologies[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(10): 1736-1746.
- [13] Zou W C, Shi P, Xiang Z R, et al. Consensus tracking control of switched stochastic nonlinear multiagent systems via event-triggered strategy[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(3): 1036-1045.
- [14] Zhao G L, Hua C C, Guan X P. A hybrid event-triggered approach to consensus of multiagent systems with disturbances[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2020, 7(3): 1259-1271.
- [15] Fan Y, Liu L, Feng G, et al. Self-triggered consensus for multi-agent systems with zeno-free triggers[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(10): 2779-2784.
- [16] Yu H, Chen X, Chen T W, et al. Event-triggered bipartite consensus for multiagent systems: A zeno-free analysis[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(11): 4866-4873.
- [17] Yu H, Chen T W. On zeno behavior in event-triggered finite-time consensus of multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(10): 4700-4714.
- [18] Liu D, Yang G H. A dynamic event-triggered control approach to leader-following consensus for linear multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(10): 6271-6279.
- [19] Yang R H, Liu L, Feng G. Leader-following output consensus of heterogeneous uncertain linear multiagent systems with dynamic event-triggered strategy[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(3): 1626-1637.
- [20] Ahmed I, Rehan M, Iqbal N. A novel exponential approach for dynamic event-triggered leaderless consensus of nonlinear multi-agent systems over directed graphs[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3): 1782-1786.
- [21] Sang H, Zhao J. Input-output finite-time estimation for complex networks with switching topology under dynamic event-triggered transmission[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(10): 6513-6522.
- [22] Xu W Y, Ho D W C, Zhong J, et al. Event/self-triggered control for leader-following consensus over unreliable network with DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30(10): 3137-3149.
- [23] Xu W Y, Hu G Q, Ho D W C, et al. Distributed secure cooperative control under denial-of-service attacks from multiple adversaries[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(8): 3458-3467.
- [24] Wan Y, Long C, Deng R L, et al. Distributed event-based control for thermostatically controlled loads under hybrid cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(11): 5314-5327.
- [25] Zha L J, Liao R F, Liu J L, et al. Dynamic event-triggered security control of cyber-physical systems against missing measurements and cyber-attacks[J]. *Neurocomputing*, 2022, 500: 405-412.
- [26] Bai Z Z, Pan J Y. *Matrix analysis and computations*[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021: 119-169.
- [27] Song Q, Liu F, Cao J D, et al. M -matrix strategies for pinning-controlled leader-following consensus in multiagent systems with nonlinear dynamics[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, 43(6): 1688-1697.
- [28] Wan Y, Wen G H, Yu X H, et al. Distributed consensus tracking of networked agent systems under denial-of-service attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(10): 6183-6196.
- [29] Wang P J, Wen G H, Yu X H, et al. Synchronization of resilient complex networks under attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 1116-1127.

作者简介

王柳(1999—), 男, 硕士生, 从事多智能体一致性的研究, E-mail: 6211204023@stu.jiangnan.edu.cn;

胡爱花(1982—), 女, 副教授, 博士, 从事非线性系统动力学分析与控制、复杂网络群集行为分析与控制等研究, E-mail: aihuahu@jiangnan.edu.cn;

江正仙(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事传感器执行器网络下分布参数系统的估计与控制的研究, E-mail: zhengxian@jiangnan.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)