

混合网络攻击下基于边的动态事件触发多智能体系统一致性

贾新春^{1*}, 谢云飞¹, 李宏鹏², 范晓宇¹

(1. 山西大学 自动化与软件学院, 山西 太原 030031;

2. 山西大学 数学科学学院, 山西 太原 030006)

摘要: 本文研究无向拓扑和混合网络攻击下线性多智能体系统的安全一致性问题。首先, 建立一种新的数学模型, 来表征由拒绝服务(Denial-of-Service, DoS)攻击和虚假数据注入(False Data Injection, FDI)攻击组成且发生在每条边上的混合网络攻击。为了减少网络带宽的占用并节省通信资源, 开发一种基于边的动态事件触发机制。其次, 为每个智能体设计其邻居的预测估计器, 来匹配由基于边的动态事件触发机制生成的异步信息。然后, 结合所提出的预测估计器和基于边的动态事件触发机制, 为混合网络攻击下的多智能体系统提出一种分布式的一致性控制协议。进一步, 利用李雅普诺夫稳定性理论, 得到保证多智能体系统实现均方一致性的充分条件。最后, 通过仿真验证理论结果的有效性。

关键词: 多智能体系统; 拒绝服务攻击; 虚假数据注入攻击; 事件触发机制; 预测估计器; 安全一致性

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2395(2026)01-0078-14

Edge-based Dynamic Event-triggered Consensus of Multi-Agent Systems with Hybrid Cyber-Attacks

JIA Xinchun^{1*}, XIE Yunfei¹, LI Hongpeng², FAN Xiaoyu¹

(1. School of Automation and Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030031, China;

2. School of Mathematical Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this article, the secure consensus problem is investigated for linear multi-agent systems under an undirected topology and hybrid cyber-attacks. Firstly, a novel mathematical model is established to characterize a hybrid cyber-attacks consisting of denial-of-service (DoS) attacks and false data injection (FDI) attacks that occur on each edge. In order to reduce the occupation of network bandwidth load and save communication resources, an edge-based dynamic event-triggered mechanism is developed. Secondly, the prediction estimators of its neighbors are designed for each agent to match the asynchronous information generated by the edge-based dynamic event-triggered mechanism. Then, a distributed consensus control protocol is proposed for multi-agent systems under the hybrid cyber-attacks by using the proposed prediction estimators and edge-based dynamic event-triggered mechanism. Furthermore, a sufficient criteria is derived to ensure the mean square consensus of multi-agent systems by using Lyapunov stability theory. Finally, the usefulness of the theoretic results presented is demonstrated via a numerical example.

Key words: multi-agent systems; denial-of-service attacks; false data injection attacks; event-triggered mechanism; prediction estimators; secure consensus

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61973201; 62373231)

* 通信作者: 贾新春(1964-), 男, 山西大同人, 博士, 教授, 研究方向为多智能体系统, 网络化控制。E-mail: xchjia@sxu.edu.cn

引文格式: 贾新春, 谢云飞, 李宏鹏, 等. 混合网络攻击下基于边的动态事件触发多智能体系统一致性[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2026, 49(1): 78-91. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2024020.

0 引言

近年来,作为多智能体系统(Multi-Agent Systems, MASs)协同控制的基本问题,一致性的研究由于其在卫星姿态校准^[1]、多机器人编队^[2-4]、传感器网络估计^[5-7]、微电网控制^[8-9]和分布式优化^[10-12]等多个领域的广泛应用,引起了众多研究学者的关注。在文献[13-14]中已经展示了许多关于多智能体系统一致性控制的重要结果,其中所采用的方法通常分为集中式以及分布式。与集中式方法相比,分布式方法在执行协同的群体任务方面具有成本低、需求少和可扩展性强等优点。因此,针对多智能体系统的分布式一致性问题进行了几个方面的研究^[15-17]。针对多智能体系统设计了一种有效的分布式自适应一致性控制方案^[15]。在文献[17]中,提出了一种新的分布式控制方案,解决了拒绝服务(Denial-of-Service, DoS)攻击下多智能体系统的安全控制问题。

由于网络中的通信资源和带宽有限,如何在保证多智能体系统一致性的同时,提高网络资源的利用率以缓解网络通信负担成为了一个重要的研究课题。为了节省智能体之间的通信资源,大量研究采用了采样机制^[18]和事件触发机制^[19-20]。文献[21-23]研究了异步周期采样的多智能体系统一致性跟踪问题。文献[24]基于多率采样机制,研究了DoS攻击下多智能体系统的安全一致性问题。文献[25]在细节平衡的拓扑结构下,研究了基于多率采样机制下的多智能体系统二分一致性。采样机制在一定程度上节约了通信资源,但当采样周期充分小时,会有大量冗余数据的传输,从而造成通信资源的浪费。因此,大量的事件触发机制被开发出来,包括静态事件触发机制、动态事件触发机制、混合事件触发机制以及基于边的事件触发机制^[26-30]。其中文献[26]研究了信息物理系统在静态事件触发机制以及DoS攻击下的状态估计问题。文献[27]提出了一种包含内部动态变量的动态事件触发通信协议,实现了多智能体系统领导跟随一致性。文献[28]提出了一种混合动态事件触发机制,运用混杂系统的方法解决了带干扰的多智能体系统一致性问题。文献[29]在有向切换拓扑下,提出了一种新的事件触发机制,通过一个触发函数同时减少智能体与邻居的信息交换次数和智能体中控制器与执行器的信息传递次数。文献[30]针对多智能体系统中的平均一致性问题,提出了基于边的事件触发策略。然而,上述的文献大多考虑的是安全的或者受到单一攻击的网络环境。在实际中,攻击者从能量、攻击方式和破坏性上考虑,会发起在空间或时间形式上多种不同类型的网络攻击组成的混合网络攻击,使得多智能体系统性能下降甚至瘫痪。这也激发了本文的研究。

此外,随着互联网技术的飞速发展,网络安全已成为当今信息时代的主题,而网络攻击是影响网络安全的重要因素。由于通信网络的开放性,严重依赖通信网络进行信息交互且呈空间分布的多智能体系统极易受到网络攻击的影响。网络攻击会导致多智能体系统性能衰减,稳定性下降,甚至完全瘫痪。因此,在多智能体系统一致性研究中,考虑网络攻击的影响是极其重要的。近年来,各种多智能体系统在遭受网络攻击情形下的安全问题得到了广泛的研究,比如欺骗攻击^[31-32]、重放攻击^[33]和DoS攻击^[34-37]。其中文献[32]研究了脉冲控制框架下多智能体系统在欺骗攻击下的安全同步问题。文献[34]考虑了多率采样机制和DoS攻击下多智能体系统一致性问题。文献[35-36]分别研究了多模式DoS攻击下和分布式DoS攻击下多智能体系统安全事件触发控制问题。相较于文献[34],文献[36]所考虑的DoS攻击对多智能体系统的影响更为复杂。但是上述文献仅考虑了一种攻击对多智能体系统的影响。文献[37]虽然研究了DoS攻击和欺骗攻击对多智能体系统的影响,但是所考虑的攻击是同步发生的且所考虑的系统是离散多智能体系统。目前针对线性多智能体系统在由多种网络攻击组成的混合网络攻击下的安全一致性的研究结果还较少。这也成为了本文的另一个动机。

综上所述,本文考虑在混合网络攻击下,研究基于边的动态事件触发机制多智能体系统的安全一致性问题。本文主要贡献如下:首先考虑了更一般的攻击情形,即一种基于边的混合网络攻

击,其不仅体现在同一条边在不同时刻遭受的攻击可以不同,而且体现在同一时刻不同边遭受的攻击类型也可以不同;其次,为了便于分析和避免通讯资源的浪费,引入基于边的动态事件触发机制;最后,设计分布式控制协议,利用预测估计器的估计状态实现了多智能体系统的安全一致性,并且排除了芝诺行为。

1 预备知识和问题建模

1.1 图论

本文所考虑的拓扑图为无向通信拓扑图 $G = \{V, E, W\}$, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 代表节点集, $E \subseteq V \times V$ 代表边集, $W = [w_{ij}] \subseteq \mathbb{R}^{N \times N}$ 称为邻接矩阵。在图 G 中, 如果节点和节点之间存在通信链路, 则存在以节点 i 和节点 j 为端点的边, 那么称节点 i 和节点 j 是彼此的邻居。 $w_{ij} = 1$ 表示智能体 i 和智能体 j 可以进行信息交互, 否则, $w_{ij} = 0$ 。 N_i 表示智能体 i 的邻居集。在无向图中, 定义 $w_{ij} = w_{ji}$ 。定义拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] \subseteq \mathbb{R}^{N \times N}$, 其中 $l_{ij} = -w_{ij}, \forall i \neq j; l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}$ 。0 是无向拓扑图 G 中拉普拉斯矩阵的一个特征值, 并且拉普拉斯矩阵所有非零特征值都是正常数且满足 $0 = \lambda_1(L) < \lambda_2(L) < \dots < \lambda_N(L)$ 。

1.2 系统建模

考虑一个由 N 个智能体组成的多智能体系统, 其中第 i 个智能体的动力学描述如下:

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

其中 $x_i(t) \in \mathbb{R}^n, u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 分别表示系统的状态和控制输入。 A 和 B 分别表示具有相应维数的系统矩阵和输入矩阵。

假设1 多智能体系统(1)的通信拓扑图 G 是连通的。

假设2 式(1)中的矩阵对 (A, B) 是可镇定的。

1.3 攻击模型

在本部分中, 将介绍由多个攻击者针对每条边发起的混合网络攻击策略。每个攻击者瞄准一个通信通道, 其任务是中断或破坏在其目标通道上的信息传输。在这种混合网络攻击策略中, 每个对手都独立地遵循一个攻击策略。在这种情况下, 这种多重的混合网络攻击策略对整个网络通信产生了联合作用。

为了降低多智能体系统的一致性能, 首先考虑攻击者会针对边发动难以检测的虚假数据注入(False Data Injection, FDI)攻击, 即攻击者会通过智能体 i 与其邻居 j 的通信通道, 向传输信号中注入虚假信号。

$$\hat{x}_i(t_k^j) = x_i(t_k^j) + \beta_{ij}(t_k^j)q_{ij}(t_k^j), \quad (2)$$

其中 $x_i(t_k^j) \in \mathbb{R}^n$ 是智能体 i 在触发时刻 t_k^j 发送给邻居智能体 j 未被注入虚假信号的状态。 $\hat{x}_i(t_k^j) \in \mathbb{R}^n$ 表示智能体 j 在触发时刻 t_k^j 收到的邻居智能体 i 被注入了虚假信号的状态。 $q_{ij}(t_k^j) \in \mathbb{R}^n$ 是智能体 i 和邻居智能体 j 通道中 t_k^j 时刻的虚假信号, 并且所考虑的攻击信号是能量有限的, 满足 $\|q_{ij}(t)\|^2 \leq \|\varphi_i(t)\|^2, \beta_{ij}(t)$ 在 $S = \{0, 1\}$ 中取值, 服从伯努利分布。 $\bar{\beta}$ 为 $\beta_{ij}(t)$ 的均值。

假设3 随机变量 $\beta_{ij}(t), (i, j) \in E$ 是相互独立的, 且 $\beta_{ij}(t) = \beta_{ji}(t)$ 。

为了对系统网络造成最大损害, 在考虑 FDI 攻击的基础上, 还考虑攻击者会针对边发动 DoS 攻击。DoS 攻击通过向网络中发送大量无用数据来占用网络资源, 以实现使网络瘫痪的攻击目的。当攻击者对智能体 i 和邻居智能体 j 这条边成功地发起 DoS 攻击后, 智能体 i 和邻居智能体 j 不能进行信息交互。所以混合网络攻击建模为:

$$\tilde{x}_i(t_k^j) = \alpha_{ij}(t_k^j)\hat{x}_i(t_k^j) = \alpha_{ij}(t_k^j)(x_i(t_k^j) + \beta_{ij}(t_k^j)q_{ij}(t_k^j)), \quad (3)$$

其中 $\tilde{x}_i(t_k^j) \in \mathbb{R}^n$ 表示智能体 i 在与邻居智能体 j 通道发生混合网络攻击后, 智能体 j 收到的邻居智

能体 i 的状态。 $\alpha_{ij}(t_k^j)$ 在 $S = \{0, 1\}$ 中取值。

从混合网络攻击模型可以看出, 每组 $\alpha_{ij}(t)$ 和 $\beta_{ij}(t)$ 的值都代表一种攻击。可分为以下三种情形: (1) 当 $\alpha_{ij}(t) = 1$ 和 $\beta_{ij}(t) = 1$ 时, 智能体 i 和邻居智能体 j 之间的链路受到了 FDI 攻击; (2) 当 $\alpha_{ij}(t) = 1$ 和 $\beta_{ij}(t) = 0$ 时, 智能体 i 和邻居智能体 j 之间的链路正常; (3) 当 $\alpha_{ij}(t) = 0$, 智能体 i 和邻居智能体 j 之间的链路发生了 DoS 攻击或 DoS 攻击与 FDI 攻击的混合网络攻击。上述三种情形均按照 $\alpha_{ij}(t)$ 和 $\beta_{ij}(t)$ 的取值发生。在这种情况下, 混合网络攻击模型在统一框架下表示每条边随机出现 DoS 攻击、FDI 攻击和没有攻击的现象, 因此更能反映现实情况。本文的混合网络攻击不仅体现在同一条边在不同时刻遭受的攻击可以不同, 而且体现在同一时刻不同边遭受的攻击类型也可以不同, 如图 1 所示。

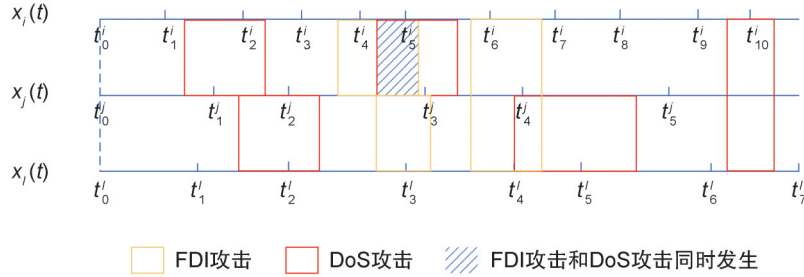


图 1 混合网络攻击模型

Fig. 1 The model of hybrid cyber-attacks

注1 图 1 中红色边框代表发生在某条边上的 DoS 攻击, 黄色边框代表发生在某条边上的 FDI 攻击, 阴影部分表示在某条边上同时发生 DoS 攻击和 FDI 攻击。从时间的维度上来看, 边 (i, j) 在从 t_0^i 时刻到 t_{10}^i 时刻不仅有 DoS 攻击的发生 (例如 t_2^i 时刻) 而且有 FDI 攻击的发生 (例如 t_4^i 时刻) 还有 DoS 攻击与 FDI 攻击的同时发生 (例如 t_5^i 时刻); 从空间的维度上来分析, 对于整个多智能系统而言, 在同一时刻不同的边遭受的攻击类型可以是不同的, 例如 t_4^i 时刻边 (i, j) 遭受的是 FDI 攻击而边 (j, l) 遭受的是 DoS 攻击。

DoS 攻击的发生与休眠会持续一段时间。假设边 (i, j) 第 m 次 DoS 攻击的起始时间为 $t_m^{D_j}$, 持续时间为 $\Delta_m^{D_j}$, 那么 DoS 攻击活跃期为 $[t_m^{D_j}, t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j})$, 休眠期为 $[t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j}, t_{m+1}^{D_j})$, 则 $\alpha_{ij}(t)$ 在对应区间的取值为:

$$\alpha_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [t_m^{D_j}, t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j}) \\ 1, & t \in [t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j}, t_{m+1}^{D_j}) \end{cases} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}, j \in N_i. \quad (4)$$

对于 $t \geq t_0$, 边 (i, j) 的通信被拒绝的区间集合为 $\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t) = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} [t_m^{D_j}, t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j}) \cap [t_0, t]$, 未被拒绝的区间集合定义为 $\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t) = [t_0, t] \setminus \Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)$ 。

注2 当边 (i, j) 受到 FDI 攻击时, 该边传输的数据会被篡改。但是, 由于 DoS 攻击能够阻塞通信链路, 所以在同一条边上同时发生两种攻击时, DoS 攻击的优先级更高, 最终是以 DoS 攻击的形式表现出来的, 也就是说, 后续分析时是以 DoS 攻击的影响来处理的。

为了下一步的分析, 给出下列假设^[34]:

假设4 DoS 攻击频率: 对于 $t > t_0$, 设 N_{Dos}^{ij} 是边 (i, j) 在区间 $[t_0, t)$ 上 DoS 攻击发生的总次数, 存在一个常数 F_{Dos}^{ij} 使得 $N_{Dos}^{ij}(t_0, t) \leq F_{Dos}^{ij}(t - t_0)$ 。

假设5 DoS 攻击驻留时间: 对于 $t > t_0$, 设 $\Xi_{Dos}^{ij}(t_0, t)$ 是边 (i, j) 在区间 $[t_0, t)$ 上 DoS 攻击发生的总时长, 存在正常数 T_0^{ij} 和 $0 < 1/\tau_d^{ij} < 1$ 使得 $\Xi_{Dos}^{ij}(t_0, t) \leq T_0^{ij} + (t - t_0)/\tau_d^{ij}$ 。其中 τ_d^{ij} 是攻击强度, 它是 DoS 攻击强弱的度量; T_0^{ij} 用于限制 $t = t_0$ 时 DoS 攻击的存在。

$$g_{ij}(t) = \xi_{ij} \left\{ \frac{1}{4} \mathbf{z}_{ij}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{z}_{ij}(t) - \mathbf{e}_{x_i}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{e}_{x_i}(t) \right\} + \eta_{ij}(t), \quad (9)$$

$$g_{ji}(t) = \xi_{ji} \left\{ \frac{1}{4} \mathbf{z}_{ji}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{z}_{ji}(t) - \mathbf{e}_{x_j}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{e}_{x_j}(t) \right\} + \eta_{ji}(t), \quad (10)$$

$$\dot{\eta}_{ij}(t) = \begin{cases} -\gamma_{ij} \eta_{ij}(t) - \mu_{ij} \left\{ \mathbf{e}_{x_i}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{e}_{x_i}(t) - \frac{1}{4} \mathbf{z}_{ij}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{z}_{ij}(t) \right\}, & t \in \Xi_{\text{D-s}}^{ij}(t_0, t), \\ 0, & t \in \Xi_{\text{D-a}}^{ij}(t_0, t) \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $\eta_{ij}(t) \in \mathbb{R}$ 是动态阈值, 且 $\eta_{ij}(t_0) > 0$, ξ_{ij} 、 μ_{ij} 和 γ_{ij} 是正常数。

注3 事件触发机制中引入式(7b)和式(7d)的主要目的是防止实现一致性后退化为周期通信。达成一致后, 边 (i, j) 将在没有式(7b)和式(7d)的情况下以 $\min(\tau_{ij}, \tau_{ji})$ 周期性触发。引入式(7b)和式(7d)可以减少网络中所有智能体达成一致后不必要的通信。

引理1^[36] 在基于边的动态事件触发机制(6)下, 且 $\eta_{ij}(t_0) > 0$, 那么式(11)中的函数 $\eta_{ij}(t)$ 始终为正, 即对于所有的 $(i, j) \in E$, $\eta_{ij}(t) > 0$ 。

证明 在基于边的动态事件触发机制(6)下, 可以生成传输尝试 $\{t_k^{ij}\}_{k \in \mathbb{N}^+}$, 然后可以进一步分为由 $\{t_k^{ij,s}\}_{k \in \mathbb{N}^+}$ 表示的成功传输尝试和被攻击(不成功)的传输尝试 $\{t_k^{ij,a}\}_{k \in \mathbb{N}^+}$ 。

当 $t \in [t_k^{ij}, t_{k+1}^{ij}) \subseteq \Xi_{\text{D-s-a}}^{ij}(t_0, t)$ 由事件触发条件得

$$\mathbf{e}_{x_j}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{e}_{x_j}(t) - \frac{1}{4} \mathbf{z}_{ij}(t)^T \mathbf{M} \mathbf{z}_{ij}(t) \leq \frac{\eta_{ij}(t)}{\xi_{ij}(t)}. \quad (12)$$

因此

$$\dot{\eta}_{ij}(t) \begin{cases} \geq -\gamma_{ij} \eta_{ij}(t) - \mu_{ij} \eta_{ij}(t) / \xi_{ij}, & t \in \Xi_{\text{D-s-s}}^{ij}(t_0, t) \\ = 0, & t \in \Xi_{\text{D-s-a}}^{ij}(t_0, t) \end{cases} \quad (13)$$

那么对于 $t \in [t_{k-1}^{ij,s}, t_k^{ij,a}) \subseteq \Xi_{\text{D-s-s}}^{ij}(t_0, t)$, $\eta_{ij}(t) \geq \eta_{ij}(t_{k-1}^{ij,s}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-1}^{ij,s})\right\}$; 当 $t \in [t_k^{ij,a}, t_k^{ij,s}) \subseteq \Xi_{\text{D-s-a}}^{ij}(t_0, t)$, $\eta_{ij}(t) = \eta_{ij}(t_k^{ij,a})$ 。

在区间 $[t_0, t]$ 上考虑 $\eta_{ij}(t)$, 如果 $t \in [t_{k-1}^{ij,s}, t_k^{ij,a})$, 得

$$\begin{aligned} \eta_{ij}(t) &\geq \eta_{ij}(t_{k-1}^{ij,s}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-1}^{ij,s})\right\} = \\ &\eta_{ij}(t_{k-1}^{ij,a}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-1}^{ij,s})\right\} \geq \\ &\eta_{ij}(t_{k-2}^{ij,s}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-2}^{ij,s})\right\} \geq \\ &\quad \dots \\ &\eta_{ij}(t_0) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_0)\right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

如果 $t \in [t_k^{ij,a}, t_k^{ij,s})$, 得

$$\begin{aligned} \eta_{ij}(t) &= \eta_{ij}(t_k^{ij,a}) \geq \\ \eta_{ij}(t_{k-1}^{ij,s}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-1}^{ij,s})\right\} &= \eta_{ij}(t_{k-1}^{ij,a}) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_{k-1}^{ij,s})\right\} \geq \\ \quad \dots \\ \eta_{ij}(t_0) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_0)\right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 对于 $\forall t \geq t_0$, 可以得到

$$\eta_{ij}(t) \geq \eta_{ij}(t_0) \exp\left\{(-\gamma_{ij} - \mu_{ij}/\xi_{ij})(t - t_0)\right\}. \quad (16)$$

由于 $\eta_{ij}(t_0) > 0$, 则证明了 $\eta_{ij}(t) > 0$ 。

2.2 一致性证明

由式(1)和式(5)可得 $x_i(t)$ 的闭环动力学如下式:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + cBK \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} [x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j) - \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_k^j)]. \quad (17)$$

一致性误差定义为 $\varphi(t) = \text{col}\{\varphi_1(t), \dots, \varphi_N(t)\}$, 其中

$$\varphi_i(t) = x_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t). \quad (18)$$

$$\varphi_j(t) = x_j(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t). \quad (19)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\varphi(t) \rightarrow 0$ 很容易能得到多智能体系统实现一致性的结论。结合式(17)和式(18), 可以推导出一致性误差的动力学, 等式如下:

$$\dot{\varphi}_i(t) = A\varphi_i(t) + cBK \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} [x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j) + \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_k^j)]. \quad (20)$$

定理 1 若假设 1—假设 5 成立, 如果存在正定对称矩阵 $Q > 0$, 控制增益矩阵 $K = -B^T Q$ 以及 $M = QBB^T Q$ 和常数 $\alpha > 0, \rho > 0$ 满足下列条件:

$$QA + A^T Q + 4\bar{\beta}cM - c\lambda_{\min}(L)M \leq -\alpha Q, \quad (21)$$

$$QA + A^T Q + 4\bar{\beta}cM - c\lambda_{\min}(\tilde{L})M \leq \rho Q, \quad (22)$$

$$\frac{N_{\text{DoS}}^j(t_0, t)}{t - t_0} \leq \frac{\eta_{ij}^*}{(\alpha + \rho)\tau_B^j}, \quad (23)$$

$$\frac{1}{\tau_d^j} < \frac{\alpha - \eta_{ij}^*}{\alpha + \rho}. \quad (24)$$

那么, 遭受混合网络攻击的多智能体系统(1)在基于边的动态事件触发机制(6)和控制协议(5)下, 可以实现一致性。

证明 首先, 构造下列李雅普诺夫函数:

$$V(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \varphi_i(t)^T Q \varphi_i(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \eta_{ij}(t), \quad (25)$$

其中 $\varphi_i(t)$ 和 $\eta_{ij}(t)$ 分别定义在(18)式和(11)式中。证明过程依据在 t_k^j 时刻是否遭受到攻击划分为两种情况。

情形 1 如果 $t \in \Xi_{\text{DoS-s}}^j(t_0, t)$, 这说明智能体 i 和智能体 j 之间的通信信道没有遭受到 DoS 攻击, 信息可以及时传输, 可以推导得出 $V(t)$ 的导数:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T QA \varphi_i(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \dot{\eta}_{ij}(t) + c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T QBK \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} (x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j)) + \\ & c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T QBK \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_k^j). \end{aligned} \quad (26)$$

根据(18)和(19)式中 $\varphi_i(t)$ 和 $\varphi_j(t)$ 的定义, 可以很容易得到 $\varphi_i(t) - \varphi_j(t) = x_i(t) - x_j(t)$, 根据(8)式中 $e_{x_i}(t)$ 的定义, 可得:

$$e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t) = e^{A(t-t_k^j)} (x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j)) - (x_i(t) - x_j(t)). \quad (27)$$

设 $K = -B^T Q$ 并且 $M = QBB^T Q$, 可以推导出:

$$\begin{aligned} & c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T QBK \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} [x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j) + \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_k^j)] = \\ & -\frac{c}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} e^{A(t-t_k^j)} (x_i(t_k^j) - x_j(t_k^j)) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{c}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} e^{A(t-t_{ij}^j)} \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_{ij}^j) = -\frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} z_{ij}(t)^T M \omega_{ij} z_{ij}(t) + \\
 & \quad \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t))^T M \omega_{ij} z_{ij}(t) - \\
 & \quad \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} [(\varphi_i(t) - \varphi_j(t)) + (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t))] - \\
 & \quad \frac{c}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} e^{A(t-t_{ij}^j)} \beta_{ij}(t) q_{ij}(t_{ij}^j). \tag{28}
 \end{aligned}$$

由此可得

$$\begin{aligned}
 E[\dot{V}(t)] &= \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T Q A \varphi_i(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \dot{\eta}_{ij}(t) - \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} z_{ij}(t)^T M \omega_{ij} z_{ij}(t) + \\
 & \quad \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t))^T M \omega_{ij} (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t)) - \\
 & \quad \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t)) - \bar{\beta} c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T M \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_{ij}^j)} q_{ij}(t_{ij}^j). \tag{29}
 \end{aligned}$$

令 $q_{ij}(t) = e^{A(t-t_{ij}^j)} q_{ij}(t_{ij}^j)$, 通过使用杨氏不等式, 可得

$$\frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t))^T M \omega_{ij} (e_{x_i}(t) - e_{x_j}(t)) \leq c \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \omega_{ij} e_{x_i}(t)^T M e_{x_i}(t), \tag{30}$$

$$-\bar{\beta} c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T M \sum_{j=1}^N \omega_{ij} e^{A(t-t_{ij}^j)} q_{ij}(t_{ij}^j) \leq \tag{31}$$

$$\bar{\beta} c \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \varphi_i(t)^T M \varphi_i(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} q_{ij}(t)^T M q_{ij}(t) \right) \leq 2\bar{\beta} c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T M \varphi_i(t).$$

通过基于边的事件触发条件(6), 可以进一步得到

$$\begin{aligned}
 E[\dot{V}(t)] &\leq \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T Q A \varphi_i(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \dot{\eta}_{ij}(t) - \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} z_{ij}(t)^T M \omega_{ij} z_{ij}(t) + c \sum_{i=1}^N e_{x_i}(t)^T M e_{x_i}(t) - \\
 & \quad \frac{c}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t))^T M \omega_{ij} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t)) + 2\bar{\beta} c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T M \varphi_i(t) \leq \\
 & \quad \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T Q A \varphi_i(t) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\gamma_{ij} + \frac{\mu_{ij} - c}{\xi_{ij}}) \omega_{ij} \eta_{ij}(t) - \tag{32}
 \end{aligned}$$

$$\frac{c}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \varphi_i(t)^T M \omega_{ij} (\varphi_i(t) - \varphi_j(t)) + 2\bar{\beta} c \sum_{i=1}^N \varphi_i(t)^T M \varphi_i(t) \leq$$

$$\frac{1}{2} \varphi_i(t)^T [I_N \otimes (Q A + A^T Q) + 4\bar{\beta} c M - c \lambda_{\min}(L) M] \varphi_i(t) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\gamma_{ij} + \frac{\mu_{ij} - c}{\xi_{ij}}) \omega_{ij} \eta_{ij}(t).$$

如果条件(21)成立, 那么很容易推导出

$$E[\dot{V}(t)] \leq -\alpha E[V(t)]. \tag{33}$$

由于 $\gamma_{ij} > \frac{c - \mu_{ij}}{\xi_{ij}}$, 这意味着对于所有的 $t \in [t_{m-1}^{D_{ij}} + \Delta_{m-1}^{D_{ij}}, t_m^{D_{ij}}]$ 都可得

$$E[V(t)] \leq e^{-\alpha(t - t_{m-1}^{D_{ij}} - \Delta_{m-1}^{D_{ij}})} E[V(t_{m-1}^{D_{ij}} + \Delta_{m-1}^{D_{ij}})]. \tag{34}$$

情形 2 当多智能体系统中边 (i, j) 的信道受到 DoS 攻击时, MAS 的通信拓扑将被破坏, 即 $\lambda_{\min}(L)$ 将被改变。定义使 $Q A + A^T Q + 4\bar{\beta} c M - \lambda_{\min}(\tilde{L}) c M = \rho Q$ 且 $\rho > 0$ 成立的攻击为有效攻击, 那么在攻击发生时

$$E[\dot{V}(t)] \leq \frac{1}{2} \varphi_i(t)^T [I_N \otimes (QA + A^T Q)] \varphi_i(t) + \frac{1}{2} \varphi_i(t)^T (4\bar{\beta}cM - c\lambda_{\min}(\tilde{L})M) \varphi_i(t) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\gamma_{ij} + \frac{\mu_{ij} - c}{\xi_{ij}}) \omega_{ij} \eta_{ij}(t). \quad (35)$$

因此

$$E[\dot{V}(t)] \leq \rho E[V(t)]. \quad (36)$$

这意味着对于所有的 $t \in [t_m^{D_j}, t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j})$ 都可得

$$E[V(t)] \leq e^{\rho(t-t_m^{D_j})} E[V(t_m^{D_j})]. \quad (37)$$

结合式(34)和式(37),可得 $t \in [t_{m-1}^{D_j} + \Delta_{m-1}^{D_j}, t_m^{D_j})$

$$E[V(t)] \leq e^{-\alpha(t-t_{m-1}^{D_j} - \Delta_{m-1}^{D_j})} E[V(t_{m-1}^{D_j} + \Delta_{m-1}^{D_j})] \leq e^{-\alpha(t-t_{m-2}^{D_j} - \Delta_{m-2}^{D_j})} e^{\rho(t-t_{m-2}^{D_j} - \Delta_{m-2}^{D_j})} E[V(t_{m-2}^{D_j} + \Delta_{m-2}^{D_j})] \leq \vdots \leq e^{-\alpha|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)|} e^{\rho|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)|} E[V(t_0)]. \quad (38)$$

对于 $t \in [t_m^{D_j}, t_m^{D_j} + \Delta_m^{D_j})$

$$E[V(t)] \leq e^{\rho(t-t_m^{D_j})} E[V(t_m^{D_j})] \leq e^{\rho(t-t_m^{D_j})} e^{-\alpha(t-t_{m-1}^{D_j} - \Delta_{m-1}^{D_j})} E[V(t_{m-1}^{D_j} + \Delta_{m-1}^{D_j})] \leq \vdots \leq e^{-\alpha|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)|} e^{\rho|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)|} E[V(t_0)]. \quad (39)$$

显然, $|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)| = t - t_0 - |\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)|$, 由此可得

$$-\alpha|\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)| + \rho|\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)| = -\alpha(t - t_0 - |\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)|) + \rho|\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)| \leq -\alpha(t - t_0) + (\alpha + \rho) \left[T_0^{ij} + \frac{t - t_0}{\tau_d^{ij}} + N_{\text{DoS}}^{ij} \tau_B^{ij} \right]. \quad (40)$$

进一步可得

$$E[V(t)] \leq e^{-\alpha(t-t_0 - |\Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)|)} e^{\rho|\Xi_{D-a}^{ij}(t_0, t)|} E[V(t_0)] \leq e^{(\alpha+\rho)(T_0^{ij} + N_{\text{DoS}}^{ij} \tau_B^{ij})} e^{(t-t_0)[- \alpha + (\alpha+\rho)/\tau_d^{ij}]} E[V(t_0)]. \quad (41)$$

根据条件(23)和(24), 设 $\eta_{ij} = \alpha - (\alpha + \rho)/\tau_d^{ij} - \eta_{ij}^* > 0$. 那么, 下列不等式成立:

$$E[V(t)] \leq e^{(\alpha+\rho)T_0^{ij}} e^{-\eta_{ij}(t-t_0)} E[V(t_0)]. \quad (42)$$

这意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = 0$, 进一步可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_i(t) = 0$ 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \left(x_i(t) - \sum_{j=1}^N x_j(t) \right) = 0, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 这

说明多智能体系统(1)实现了安全一致性。

2.3 芝诺行为的排除

定理2 在基于边的事件触发机制(6)下, 遭受混合网络攻击的多智能体系统(1)不会发生芝诺行为。根据基于边的事件触发机制(6)和式(7a)和(7c)中 $\tau_{ij} \in (0, 1), \tau_{ji} \in (0, 1)$. 事件间的下界给定为

$$t_{k+1}^{ij} - t_k^{ij} \geq \min\{\tau_{ij}, \tau_{ji}\} > 0. \quad (43)$$

由于任意事件间的最小时间间隔是严格正的, 所以可以避免芝诺行为。

证明 根据多智能体系统(1)是否遭受 DoS 攻击分析芝诺行为的发生。如果 $t \in \Xi_{D-s}^{ij}(t_0, t)$, 根据基于边的事件触发机制(6), $\rho_1 \cap \rho_2$ 意味着时间 t 需要同时满足 ρ_1 和 ρ_2 , 那么

$$t_1 = \{t | t \in \rho_1 \cap \rho_2\}, \quad (44)$$

$$t_1 \geq t_k^{ij} + \tau_{ij}. \quad (45)$$

同理可得

$$t_2 = \{t | t \in \rho_3 \cap \rho_4\}, \quad (46)$$

$$t_2 \geq t_k^j + \tau_{j0} \quad (47)$$

此外, $(\rho_1 \cap \rho_2) \cup (\rho_3 \cap \rho_4)$ 意味着时间 t 需要包含 $\rho_1 \cap \rho_2$ 或 $\rho_3 \cap \rho_4$, 那么可得

$$t_{k+1}^j = \min\{t_1, t_2\} \geq t_k^j + \min\{\tau_{ij}, \tau_{ji}\}, \quad (48)$$

智能体 i 和智能体 j 之间的基于边的事件直到事件 t_k^j 之后至少 $\min\{\tau_{ij}, \tau_{ji}\}$ 才会触发, 因此, $t_{k+1}^j - t_k^j \geq \min\{\tau_{ij}, \tau_{ji}\}$ 。

如果 $t \in \Xi_{B-a}^j(t_0, t)$, 基于边的动态事件触发机制(6), 由于 DoS 攻击的发生, 无信息传递, $t_{k+1}^j - t_k^j \geq \tau_B^j$, τ_B^j 为 DoS 攻击下的最小正传输尝试。因此, 芝诺行为可以被排除, 证明完毕。

3 数值仿真

本节通过数值仿真来验证本文所提出方案的有效性。考虑图3所示的拓扑结构, 其中包含五个智能体。式(1)中的系统矩阵由下式给出:

$$A = \begin{bmatrix} -2.9 & 0.3 & 0.4 & 1.2 \\ -0.1 & -0.2 & 0.6 & 1.5 \\ 1.2 & 2.1 & -2.8 & 3.4 \\ 1 & -2 & -2.5 & -2.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0.5 \\ -0.1 & 0.2 \end{bmatrix}。$$

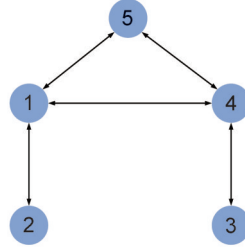


图3 5个智能体的拓扑图G

Fig. 3 Networks topology G with five agents

然后, 根据定理1, 选择参数 $\alpha = 0.5$ 和 $\rho = 2$ 并结合攻击频率和驻留时间计算得出基于边的网络攻击下的最小正传输尝试, $\tau_D^{12} = 0.07$, $\tau_D^{14} = 0.04$, $\tau_D^{15} = 0.05$, $\tau_D^{34} = 0.07$ 和 $\tau_D^{45} = 0.05$ 。通过求解(21)和(22)中的线性矩阵不等式条件, 得到控制增益 K 如下:

$$K = \begin{bmatrix} 0.0521 & 0.0071 & 0.1729 & 0.0094 \\ -0.0266 & 0.0171 & -0.0847 & -0.0362 \end{bmatrix}。$$

为了更好地平衡通信资源和系统性能之间的关系, 选择(9)、(10)和(11)式中的触发参数如表1所示。此外, MASs的初始状态值如表2所示。

表1 基于边的动态事件触发机制的每条边的触发参数

Table 1 Triggered parameters on each edge of the edge-based dynamic event-triggered mechanism

参数	取值	参数	取值	参数	取值
μ_{12}	1.45	γ_{12}	0.39	ξ_{12}	3 402
μ_{21}	1.80	γ_{21}	0.44	ξ_{21}	997
μ_{14}	1.22	γ_{14}	0.25	ξ_{14}	5 900
μ_{41}	1.35	γ_{41}	0.36	ξ_{41}	3 570
μ_{15}	1.38	γ_{15}	0.47	ξ_{15}	890
μ_{51}	1.55	γ_{51}	0.27	ξ_{51}	5 419
μ_{34}	1.42	γ_{34}	0.43	ξ_{34}	1 307
μ_{43}	1.77	γ_{43}	0.45	ξ_{43}	1 100
μ_{45}	1.63	γ_{45}	0.35	ξ_{45}	4 200
μ_{54}	1.54	γ_{54}	0.38	ξ_{54}	3 301

表2 5个智能体的初始状态
Table 2 The initial states of five agents

初始值	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}
智能体1	-2	-1.5	-2	-1.5
智能体2	-2	-1.5	-1.5	-2
智能体3	1	1	1	1
智能体4	1.5	1.5	1.5	1
智能体5	1.5	0.5	1	1.5

图4给出了混合网络攻击下 DoS 攻击发生的区间, 欺骗攻击信号选择为 $q_{ij}(t) = [0.2\|Z_{ij}(t)\|\sin(t) \ 0.5\|Z_{ij}(t)\|\cos(t) \ 1.2\|Z_{ij}(t)\|\sin(t) \ 0.7\|Z_{ij}(t)\|\cos(t)]^T$ 。重叠区域代表有多条边同时受到攻击的影响。通过使用设计的方法, 五个智能体的状态轨迹如图5所示, 这意味着每个智能体的状态趋于相同的值, 也就是说, 达成了安全一致性。动态内部变量 η_{ij} 随时间变化的趋势如图6所示。需要指出的是, 动态变量 η_{ij} 始终为正, 这已在引理1中得到证明。而且图5可以看

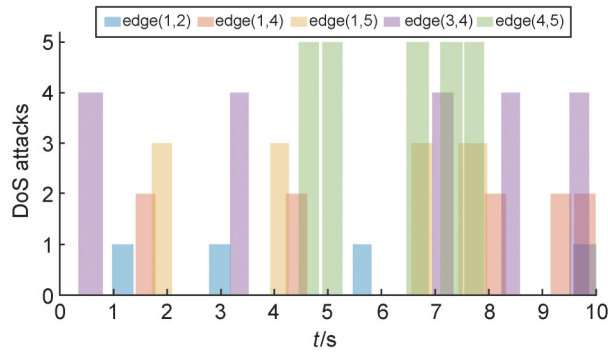


图4 每条边上发生DoS攻击的时间区间

Fig. 4 The time interval of DoS attacks on each edge

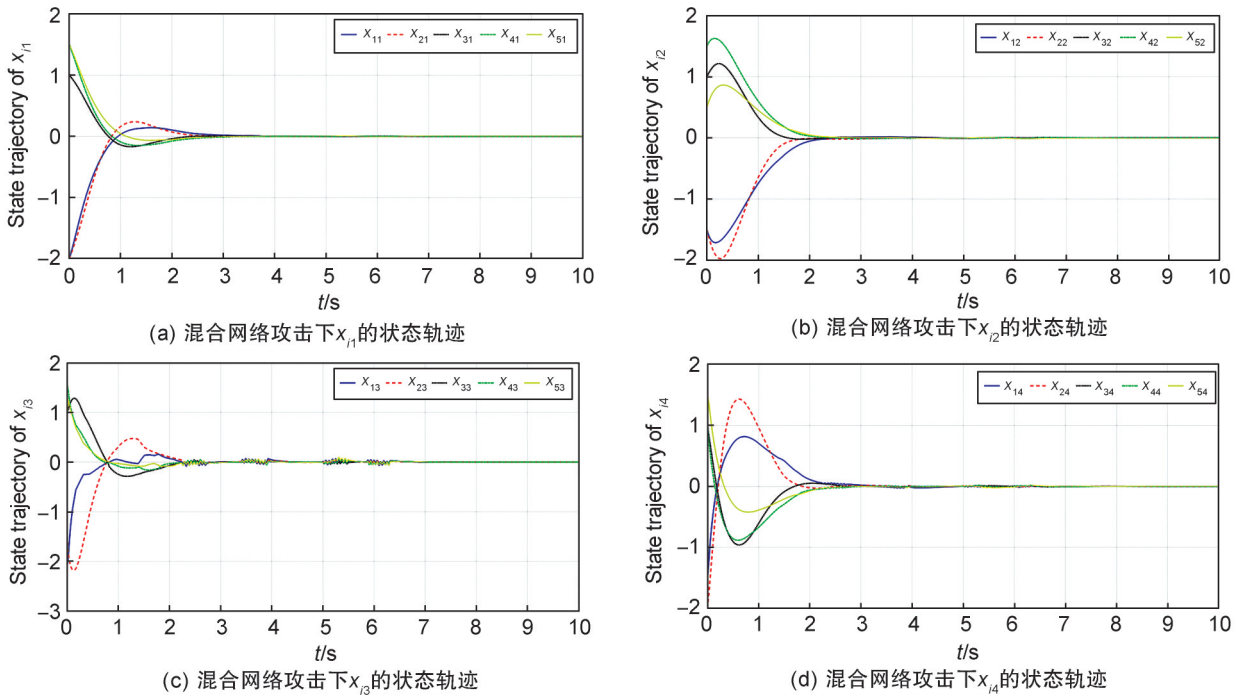


图5 混合网络攻击下5个智能体的状态轨迹

Fig. 5 State trajectories of five agents under the hybrid cyber-attacks

出动态阈值最终趋近于0。图7显示了5个智能体构成的5条边的触发时刻,还显示了每条边遭受DoS攻击的时间区间。

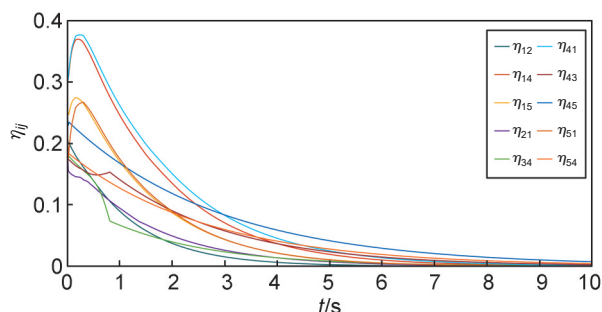


图6 混合网络攻击下基于边的动态事件触发机制的每条边上的动态阈值 η_{ij}

Fig. 6 Dynamic threshold η_{ij} on each edge of the edge-based dynamic event-triggered mechanism under hybrid cyber-attacks

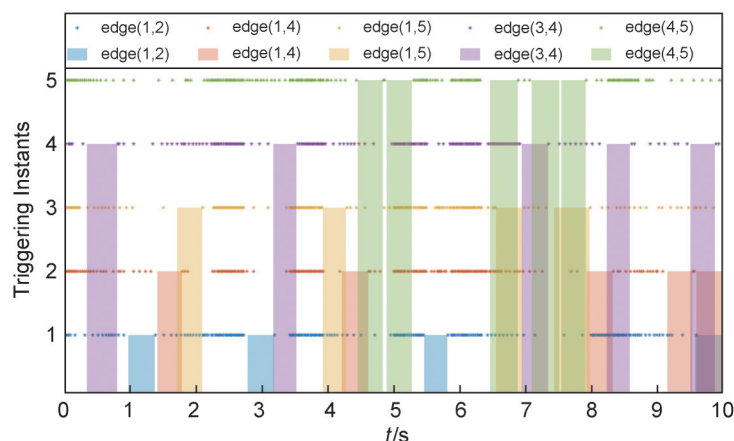


图7 基于边的动态事件触发机制在混合网络攻击下每条边的触发时刻

Fig. 7 Triggered instants of each edge under the hybrid cyber-attacks by the edge-based dynamic event-triggered mechanism

4 结束语

本文研究了混合网络攻击下基于边的动态事件触发机制线性多智能体系统的安全一致性问题。首先,通过在每条边上同时考虑拒绝服务攻击和虚假数据注入攻击,建立了一种更为切合实际的混合网络攻击模型。此外,还开发了基于边的动态事件触发机制,来节省通信资源和缓解网络带宽负载。在此基础上,通过预测估计器利用触发时刻的状态得到智能体连续的估计状态。进一步,提出了一种分布式的一致性控制协议,利用李雅普诺夫稳定性理论,得到了保证多智能体系统实现均方一致性的充分条件。最后,通过仿真验证了理论结果的有效性。未来将探索在不安全的网络环境中,执行器故障对多智能系统性能的影响。

参考文献:

- [1] REN W. Formation Keeping and Attitude Alignment for Multiple Spacecraft through Local Interactions[J]. *J Guid Contr Dyn*, 2007, **30**(2): 633-638. DOI: 10.2514/1.25629.
- [2] GE X H, HAN Q L. Distributed Formation Control of Networked Multi-agent Systems Using a Dynamic Event-triggered Communication Mechanism[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, **64**(10): 8118-8127. DOI: 10.1109/TIE.2017.2701778.
- [3] REN W, ATKINS E. Distributed Multi-vehicle Coordinated Control via Local Information Exchange[J]. *Intl J Robust & Nonlinear*, 2007, **17**(10/11): 1002-1033. DOI: 10.1002/rnc.1147.
- [4] GE X H, HAN Q L, ZHANG X M. Achieving Cluster Formation of Multi-agent Systems Under Aperiodic Sampling and Communication Delays[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, **65**(4): 3417-3426. DOI: 10.1109/

- TIE.2017.2752148.
- [5] GE X H, HAN Q L. Distributed Sampled-data Asynchronous H_∞ Filtering of Markovian Jump Linear Systems over Sensor Networks[J]. *Signal Process*, 2016, **127**(C): 86–99. DOI: 10.1016/j.sigpro.2016.02.023.
- [6] GE X H, HAN Q L. Distributed Event-triggered H_∞ Filtering over Sensor Networks with Communication Delays[J]. *Inf Sci Int J*, 2015, **291**(C): 128–142. DOI: 10.1016/j.ins.2014.08.047.
- [7] WANG J, ZHANG X M, HAN Q L. Event-triggered Generalized Dissipativity Filtering for Neural Networks with Time-varying Delays[J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2016, **27**(1): 77–88. DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2411734.
- [8] SCHIFFER J, SEEL T, RAISCH J, *et al.* Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-based Microgrids with Consensus-based Distributed Voltage Control[J]. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2016, **24**(1): 96–109. DOI: 10.1109/TCST.2015.2420622.
- [9] FAN Y, HU G Q, EGERSTEDT M. Distributed Reactive Power Sharing Control for Microgrids with Event-triggered Communication[J]. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2017, **25**(1): 118–128. DOI: 10.1109/TCST.2016.2552982.
- [10] YANG S F, LIU Q S, WANG J. A Collaborative Neurodynamic Approach to Multiple-objective Distributed Optimization[J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2018, **29**(4): 981–992. DOI: 10.1109/TNNLS.2017.2652478.
- [11] LIU Q S, YANG S F, WANG J. A Collective Neurodynamic Approach to Distributed Constrained Optimization [J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2017, **28**(8): 1747–1758. DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2549566.
- [12] YANG S F, LIU Q S, WANG J. Distributed Optimization Based on a Multiagent System in the Presence of Communication Delays[J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2017, **47**(5): 717–728. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2531649.
- [13] XIAO W B, CAO L, LI H Y, *et al.* Observer-based Adaptive Consensus Control for Nonlinear Multi-agent Systems with Time-delay[J]. *Sci China Inf Sci*, 2020, **63**(3): 132202. DOI: 10.1007/s11432-019-2678-2.
- [14] WANG J, SHI L R, GUAN X P. Semi-global Leaderless Consensus of Linear Multi-agent Systems with Actuator and Communication Constraints[J]. *J Syst Sci Complex*, 2020, **33**(4): 882–902. DOI: 10.1007/s11424-020-8366-y.
- [15] CHEN C L, WEN G X, LIU Y J, *et al.* Observer-based Adaptive Backstepping Consensus Tracking Control for High-order Nonlinear Semi-strict-feedback Multiagent Systems[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2016, **46**(7): 1591–1601. DOI: 10.1109/TCYB.2015.2452217.
- [16] BAI W W, CHEN G D, ZHOU Q, *et al.* Disturbance-observer-based Event-triggered Control for Multi-agent Systems with Input Saturation[J]. *Sci Sin-Inf*, 2019, **49**(11): 1502–1516. DOI: 10.1360/ssi-2019-0105.
- [17] FENG Z, HU G Q, CASSANDRAS C G. Finite-time Distributed Convex Optimization for Continuous-time Multiagent Systems with Disturbance Rejection[J]. *IEEE Trans Contr Netw Syst*, 2020, **7**(2): 686–698. DOI: 10.1109/TCNS.2019.2939642.
- [18] XIAO F, SHI Y, REN W. Robustness Analysis of Asynchronous Sampled-data Multiagent Networks with Time-varying Delays[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 2018, **63**(7): 2145–2152. DOI: 10.1109/TAC.2017.2756860.
- [19] 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 Trans Syst Man Cybern Syst*, 2020, **50**(9): 3112–3125. DOI: 10.1109/TSMC.2020.3010825.
- [20] ZHAO G L, HUA C C, GUAN X P. A Hybrid Event-triggered Approach to Consensus of Multiagent Systems with Disturbances[J]. *IEEE Trans Contr Netw Syst*, 2020, **7**(3): 1259–1271. DOI: 10.1109/TCNS.2020.2972585.
- [21] JIA X C, MA W W, YANG F W, *et al.* Matching Mechanism for Networked Control Systems with Multirate Sampling[J]. *IET Contr Theory Appl*, 2017, **11**(16): 2848–2857. DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0039.
- [22] LIU W, HUANG J. Leader-following Consensus for Linear Multiagent Systems via Asynchronous Sampled-data Control[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 2020, **65**(7): 3215–3222. DOI: 10.1109/TAC.2019.2948256.
- [23] WANG Z X, HE H B, JIANG G P, *et al.* Distributed Tracking in Heterogeneous Networks with Asynchronous Sampled-data Control[J]. *IEEE Trans Ind Inform*, 2020, **16**(12): 7381–7391. DOI: 10.1109/TII.2019.2958652.
- [24] 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[J]. *控制理论与应用*, 2022, **39**(10): 1890–1897. DOI: 10.7641/CTA.2022.10985. WANG Y, JIA X C, YOU X, *et al.* Multi-rate Sampled-data Secure Consensus of Multi-agent Systems Subject to DoS Attacks[J]. *Contr Theory Appl*, 2022, **39**(10): 1890–1897. DOI: 10.7641/CTA.2022.10985.
- [25] 范晓宇, 贾新春, 李彬, 等. 多率采样下多智能体动态事件触发二分一致性[J]. *计算机工程*, 2023: 1–9. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0067344. FAN X Y, JIA X C, LI B, *et al.* Dynamic Event-triggered Bipartite Consensus of Multi-agent Systems with a Multi-rate Sampling Mechanism[J]. *Comput Eng*,

- 2023: 1–9. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0067344.
- [26] LIU Y, YANG G H. Event-triggered Distributed State Estimation for Cyber-physical Systems Under DoS Attacks[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2022, **52**(5): 3620–3631. DOI: 10.1109/TCYB.2020.3015507.
- [27] HU S W, QIU J L, CHEN X Y, et al. Dynamic Event-Triggered Control for Leader-Following Consensus of Multiagent Systems with the Stimator[J]. *IET Control Theory Appl*, 2022, **16**(4): 475–484. DOI: 10.1049/cth2.12245.
- [28] ZHAO G L, HUA C C. A Hybrid Dynamic Event-triggered Approach to Consensus of Multiagent Systems with External Disturbances[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 2021, **66**(7): 3213–3220. DOI: 10.1109/TAC.2020.3018437.
- [29] ZHANG T Y, YE D, ZHAO X G. Completely Event-triggered Consensus for Multiagent Systems with Directed Switching Topologies[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2022, **52**(8): 7865–7874. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3052988.
- [30] ZHAO H B, MENG X Y, WU S T. Distributed Edge-based Event-triggered Coordination Control for Multiagent Systems[J]. *Automatica*, 2021, **132**: 109797. DOI: 10.1016/j.automatica.2021.109797.
- [31] 贾新春, 吕腾, 王悦, 等. 基于多率采样的MASs在FDI攻击下的安全一致性[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2022, **45**(5): 1186–1194. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2021109.
- JIA X C, LÜ T, WANG Y, et al. Secure Consensus of Multi-agent Systems with a Multi-rate Sampling Mechanism under False Data Injection Attacks[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2022, **45**(5): 1186–1194. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2021109.
- [32] HE W L, GAO X Y, ZHONG W M, et al. Secure Impulsive Synchronization Control of Multi-agent Systems under Deception Attacks[J]. *Inf Sci Int J*, 2018, **459**(C): 354–368. DOI: 10.1016/j.ins.2018.04.020.
- [33] ZHU M H, MARTÍNEZ S. On the Performance Analysis of Resilient Networked Control Systems Under Replay Attacks[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 2014, **59**(3): 804–808. DOI: 10.1109/TAC.2013.2279896.
- [34] LI B, JIA X C, CHI X B, et al. Event-triggered Secure Consensus for MASs Based on a Multi-sensor Multi-rate Sampling Mechanism[J]. *J Frankl Inst*, 2022, **359**(16): 9022–9038. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2022.09.016.
- [35] ZHANG T Y, YE D, GUO G. Distributed Event-triggered Control for Multiagent Systems Under Denial-of-service Attacked Topology: Secure Mode Strategy [J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2022, **52**(10): 6534–6544. DOI: 10.1109/TSMC.2022.3147773.
- [36] 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 Trans Cybern*, 2020, **50**(8): 3458–3467. DOI: 10.1109/TCYB.2019.2896160.
- [37] LI X M, YAO D Y, LI P S, et al. Secure Finite-horizon Consensus Control of Multiagent Systems Against Cyber Attacks[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2022, **52**(9): 9230–9239. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3052467.