

控制与决策

Control and Decision

基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制

路平立, 骆文城, 杜长坤

引用本文:

路平立, 骆文城, 杜长坤. 基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 3981–3988.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1208>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于观测器的网络化多智能体预测控制

Observer-based networked multi-agent predictive control

控制与决策. 2021, 36(9): 2290–2296 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1801>

基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

控制与决策. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制

Guaranteed cost bipartite formation problem of multi-agent systems with impulse control

控制与决策. 2021, 36(1): 180–186 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0854>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

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>

基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制

路平立^{1†}, 骆文城¹, 杜长坤²

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 航天科工集团智能科技研究院有限公司, 北京 100143)

摘要: 针对一类具有时变时延和非周期性拒绝服务 (denial-of-service, DoS) 攻击的离散时间线性多智能体系统, 提出一种基于动态事件驱动的预测控制方案. 通过引入网络化预测控制方法, 该方案可有效降低时变时延和非周期性 DoS 攻击对系统性能造成的负面影响. 此外, 各智能体的传感器侧均设计动态事件驱动控制机制, 以减少各智能体反向通道的数据传输频率, 从而节约系统的网络资源消耗. 随后给出闭环多智能体系统渐近稳定且输出实现一致的充要条件. 最后通过数值仿真结果验证所提出方案的有效性和正确性.

关键词: 多智能体系统; 事件驱动控制; 预测控制; 时延; 拒绝服务攻击; 渐近稳定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1208

引用格式: 路平立, 骆文城, 杜长坤. 基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 3981-3988.

Dynamic event-triggered-based predictive control of multi-agent systems

LU Ping-li^{1†}, LUO Wen-cheng¹, DU Chang-kun²

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Intelligent Science & Technology Academy Limited of CASIC, Beijing 100143, China)

Abstract: For a class of discrete-time linear multi-agent systems subject to time-varying delays and aperiodic denial-of-service (DoS) attacks, a dynamic event-triggered-based predictive control scheme is proposed. The proposed scheme can effectively reduce the adverse impacts of time-varying delays and aperiodic DoS attacks on system performance by introducing the networked predictive control approach. Moreover, the dynamic event-triggered control mechanism is designed on the sensor side of each agent to reduce the data transmission frequency in the feedback channel of each agent, thereby saving the network resource consumption of the system. Subsequently, the sufficient and necessary conditions to guarantee asymptotic stability and to achieve output consensus of closed-loop multi-agent system are given. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed scheme are verified by the numerical simulation results.

Keywords: multi-agent systems; event-triggered control; predictive control; delays; DoS attacks; asymptotic stability

0 引言

近些年,随着自动控制理论和物联网技术的迅速发展,越来越多的学者开始关注于多智能体系统一致性控制相关的理论分析和实际应用. 多智能体系统由多个同/异构的智能体组成,其中各智能体均具备独立的感知、计算和通信能力. 相比于一般的控制系统,多智能体系统中各智能体之间通过互相协调可以快速、高效地完成预期任务,从而获得更优的控制性能. 目前,多智能体系统的一致性控制理论已广泛应用于无人机、网联车、机器人等实际工程领域^[1-3]. 由于多智能体系统中数据的传输一般采用网

络,这将容易遭受网络环境带来的负面影响: 1) 数据在传输过程中不可避免地存在由网络被动引起的时延问题; 2) 网络将时刻面临着恶意攻击者带来的主动攻击问题. 由于上述存在的问题可能会降低系统的控制性能,甚至导致系统无法实现一致,研究网络时延和网络攻击场景下多智能体系统的一致性控制方法具有重要的理论和实际意义.

网络时延是多智能体系统中最常见的通信约束之一,也是目前影响系统控制性能的最主要因素之一. 针对具有网络时延的多智能体系统一致性控制问题,一些学者对其展开深入研究. 文献[4-5]分别研

收稿日期: 2023-08-25; 录用日期: 2024-01-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61433003, 60904003, 11602019); 国防科技重点实验室基金项目 (6142208200308).

责任编辑: 王燕舞.

[†]通讯作者. E-mail: pinglilu@bit.edu.cn.

究了具有时变输入时延和时变状态时延的多智能体系统一致性控制问题. 文献[6]研究了具有已知状态、输入和通信时延的多智能体系统一致性控制问题. 由于网络的开放性, 多智能体系统在实际应用中极易遭受攻击者发动的恶意网络攻击, 其中最常见的攻击方式为DoS攻击. DoS攻击的本质是通过某种方式中断服务请求的响应, 进而阻止数据的正常传输, 从而导致数据发生丢包. 针对这一问题, 文献[7-8]分别研究了周期性和非周期性DoS攻击下多智能体系统的事件驱动安全一致性控制问题. 在非周期性DoS攻击下, 文献[9]引入切换系统理论, 提出一种多智能体系统的安全一致性控制协议. 此外, 一些国内外学者研究了同时具有网络时延和非周期性DoS攻击下多智能体系统的安全一致性控制问题. 文献[10]通过引入缓存机制和自适应分布式弹性观测器, 利用李亚普诺夫稳定性理论给出了多智能体系统在网络时延和非周期性DoS攻击下实现状态一致的充分条件. 针对一类利用服从Bernoulli分布的独立随机变量来描述非周期性DoS攻击现象, 文献[11]通过将闭环多智能体系统建模为离散时间切换随机时滞系统, 提出了一种分布式输出反馈控制策略. 通过引入平均DoS攻击比的概念, 文献[12]设计一种分布式控制器, 解决了多智能体系统在网络时延和非周期性DoS攻击下的一致性控制问题. 虽然文献[10-12]能够保证多智能体系统在网络时延和非周期性DoS攻击下的稳定性和一致性, 但这些方法均是通过被动的方式抑制通信受限, 从而导致更保守的系统稳定性条件.

为了更好地弥补网络时延和数据丢包对多智能体系统性能造成的负面影响, 文献[13]提出一种主动的控制方法, 称为网络化预测控制方法, 该方法通过在每个采样周期预测未来时刻的控制输入信号, 从而获得与理想通信情形几乎相同的控制性能. 鉴于此, 该方法已被广泛地应用于具有网络时延和(或)数据丢包的多智能体系统^[14-17]. 然而, 文献[14-17]采用时间驱动通信策略, 这将消耗大量的网络资源, 不利于实际工程应用, 特别是对于依靠电池供电的多智能体系统. 为解决这一缺陷, 一些学者将注意力集中于事件驱动控制机制^[18]. 其特征就在于, 当预设的事件触发条件满足时发送端才会向接收端发送数据, 从而可有效缓解系统的网络负担. 事件驱动控制机制一般可分为静态型和动态型, 文献[19]研究了基于静态事件驱动的多智能体系统一致性控制问题, 文献[20]通过引入内部动态变量, 提出了一种基于动态事件驱动的多智能体系统一致性控制协议.

目前, 由于具有时变时延和非周期性DoS攻击的多智能体系统在动态事件驱动控制策略下实现一致性控制的相关研究成果较少且其具有重要的研究价值, 本文针对一类具有时变时延和非周期性DoS攻击的多智能体系统, 提出一种基于动态事件驱动的预测控制方案. 本文主要贡献如下: 1) 不同于文献[10-12], 运用预测控制思想主动补偿了时变时延和非周期性DoS攻击对系统性能造成的负面影响; 2) 相比于文献[14-17], 通过引入动态事件驱动控制机制, 避免了各智能体反向通道中由于频繁通信导致的网络资源浪费, 更符合实际工程需求.

1 预备知识和问题描述

1.1 预备知识

本文采用图论法对多智能体系统进行分析. 带有 n 个智能体的通信拓扑结构可以建模为一个有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$. 其中: 各智能体均视为一个节点, $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示所有节点的集合; $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示所有边的集合; $\mathcal{A} = [a_{ij}]$ 表示图 \mathcal{G} 的非负加权邻接矩阵. 从节点 i 指向节点 j 的有向边记为 $(i, j) \in \mathcal{E}$. 若 $(j, i) \in \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$. 假设各节点均无自环, 即 $a_{ii} = 0$. 节点 i 的邻居节点集合可记为 $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} | (j, i) \in \mathcal{E}\}$.

1.2 问题描述

考虑一类由 n 个同构智能体组成的多智能体系统, 其中第 i 个智能体的离散时间状态空间方程为

$$\begin{aligned} w_i(k+1) &= Aw_i(k) + Bu_i(k), \\ v_i(k) &= Cw_i(k), \quad i \in \mathcal{V}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $w_i(k) \in \mathbb{R}^p$ 、 $v_i(k) \in \mathbb{R}^q$ 和 $u_i(k) \in \mathbb{R}^l$ 分别为智能体 i 的系统状态、系统输出和控制输入; A 、 B 和 C 为智能体 i 适合维数的常数矩阵.

本文研究的基于动态事件驱动的预测控制方案框架如图1所示, 其中各智能体的预测控制器在当前时刻基于收到邻居智能体预测控制器发送的实时状态预测数据和自身传感器发送的滞后输出数据或存

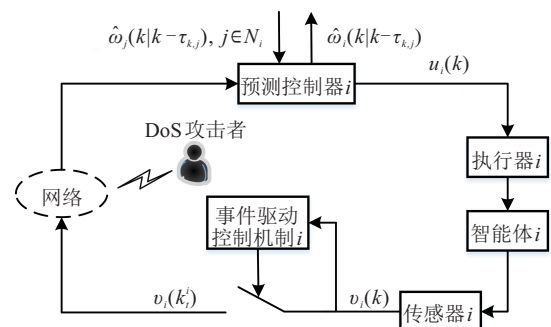


图1 基于动态事件驱动的预测控制方案框架

储在自身预测控制器中的历史状态预测数据,运用网络化预测控制方法计算出自身当前的控制输入数据,随后将其发送到相应的执行器以驱动各智能体。

本文的目标是针对多智能体系统中具有的时变时延和非周期性DoS攻击问题,设计一种基于动态事件驱动的预测控制方案,使系统的输出实现一致。

为完成上述目标,给出如下假设和定义。

假设1^[21] 由于存在能量约束,通信网络中非周期性DoS攻击持续时间的上界为 D 。

假设2 多智能体系统的通信拓扑 \mathcal{G} 至少包含一条有向生成树。

定义1 假设智能体 i 的事件驱动控制机制中触发时刻的序列可表示为 $\{k_t^i\}_{t=0}^{t=+\infty}$ ($k_0^i = 0$),则该机制下一次的触发时刻可表示为

$$k_{t+1}^i = \begin{cases} \min\{k|f_i(k) \geq 0\}, & k < k_t^i + M_i; \\ k_t^i + M_i, & k \geq k_t^i + M_i. \end{cases}$$

其中: $f_i(k)$ 为智能体 i 的事件驱动控制机制中待设计的事件触发函数; M_i 为智能体 i 的事件驱动控制机制中两相邻触发时刻 k_t^i 与 k_{t+1}^i 之间的最大触发间隔。

定义2 当且仅当如下的条件满足,则称多智能体系统(1)是渐近稳定的且其输出实现一致:

- 1) $\lim_{k \rightarrow +\infty} \|v_i(k)\| < \infty, \forall i \in \mathcal{V}$;
- 2) $\lim_{k \rightarrow +\infty} \|v_j(k) - v_i(k)\| = 0, \forall i, j \in \mathcal{V}$;
- 3) $\lim_{k \rightarrow +\infty} \|w_i(k) - \hat{w}_i(k|k-1)\| = 0, \forall i \in \mathcal{V}$ 。

其中: $\hat{w}_i(k|k-1)$ 为智能体 i 中状态观测器在 k 时刻的状态估计值;条件1)表示多智能体系统是渐近稳定的;条件2)表示多智能体系统的输出达到一致;条件3)表示智能体 i 中状态观测器的状态估计误差为零; $\|\cdot\|$ 表示向量的欧几里得范数。

为避免频繁通信导致的网络资源浪费,本文在各智能体的传感器侧均设计事件驱动控制机制。需指出,由事件驱动控制机制导致的触发间隔可视为连续的主动随机数据丢包。本文中,变量 $c_{k,i}$ 表示 k 时刻智能体 i 反向通道中由网络被动引起的时变时延大小,其中 $c_{k,i} \in [0, \bar{c}_i]$;变量 $h_{k,i}$ 表示 k 时刻智能体 i 反向通道中由DoS攻击导致的连续随机数据丢包数;变量 $d_{k,i}$ 表示 k 时刻智能体 i 反向通道中由DoS攻击和事件驱动控制机制导致的连续随机数据丢包总数,其中变量 $c_{k,i}$ 、 $h_{k,i}$ 和 $d_{k,i}$ 均为非负整数。为便于下文描述,定义变量 $\tau_{k,i} = c_{k,i} + d_{k,i}$ 为 k 时刻智能体 i 反向通道中由网络被动引起的时变时延大小以及由DoS攻击和事件驱动控制机制导致的连续随机数据丢包之和。

2 基于动态事件驱动的预测控制方案设计

为降低智能体 i 反向通道的数据传输频率,设计如下动态事件触发函数:

$$f_i(k) = \tilde{v}_i^T(k)\tilde{v}_i(k) - \phi_i v_i^T(k)v_i(k) - \varphi_i \xi_i(k). \quad (2)$$

其中: $\phi_i > 0$ 和 $\varphi_i > 0$ 为触发参数, $\tilde{v}_i(k) = v_i(k) - v_i(k_t^i)$ 为智能体 i 的事件驱动控制机制中的触发误差; k_t^i 和 $v_i(k_t^i)$ 分别为智能体 i 的事件驱动控制机制中最近一次的触发时刻以及相应的系统输出; $\xi_i(k)$ 为式(2)中待设计的内部动态变量且满足

$$\xi_i(k+1) = \mu_i \xi_i(k) + \phi_i v_i^T(k)v_i(k) - \tilde{v}_i^T(k)\tilde{v}_i(k). \quad (3)$$

这里: $\mu_i \in (0, 1)$, $\xi_i(0) = \delta_i$ 且 $\delta_i \geq 0$ 。因此,当动态事件触发函数 $f_i(k) \geq 0$ 时,智能体 i 的输出 $v_i(k)$ 将与时间戳 k 打包发往预测控制器 i ;否则该数据包将被主动丢弃。

注1 事实上,如果式(2)中 $\varphi_i = 0$,则智能体 i 的动态事件触发函数将转化为如下静态形式:

$$f_i(k) = \tilde{v}_i^T(k)\tilde{v}_i(k) - \phi_i v_i^T(k)v_i(k). \quad (4)$$

根据式(2)、(4)和定义1可知,若 $\varphi_i > 0$ 且 $\xi_i(k) > 0$,则智能体 i 中采用式(2)所示的动态事件触发函数可以比式(4)中的静态形式降低更多的事件发生频率。由定义1和式(2)可得到如下事件触发条件:

$$\tilde{v}_i^T(k)\tilde{v}_i(k) \geq \phi_i v_i^T(k)v_i(k) + \varphi_i \xi_i(k). \quad (5)$$

从式(3)和(5)可以看出,随着参数 ϕ_i 、 φ_i 和 μ_i 的增大,式(5)中不等号右侧的值随之增大,从而降低了事件发生频率。然而,若参数 ϕ_i 、 φ_i 和(或) μ_i 的值选取过大,则不等式(5)成立的次数降低,即传输的数据包较少,这将损伤系统性能甚至使系统失稳。因此,在工程应用中需要通过权衡实际需求和较少网络资源来选择合适的参数 ϕ_i 、 φ_i 和 μ_i 。此外,由于多智能体系统(1)是离散时间系统,可避免发生芝诺现象^[22]。

为补偿时变时延和DoS攻击对多智能体系统性能造成的负面影响,本文考虑如下两类情形。

情形1 当预测控制器 i 在 k 时刻收到传感器 i 发送的新数据包时,为了在预测控制器 i 中获得智能体 i 在 $k - \tau_{k,i} + 1$ 时刻的状态估计值,设计如下状态观测器:

$$\begin{aligned} \hat{w}_i(k - \tau_{k,i} + 1|k - \tau_{k,i}) = & A\hat{w}_i(k - \tau_{k,i}|k - \tau_{k,i} - 1) + Bu_i(k - \tau_{k,i}) + \\ & L(v_i(k - \tau_{k,i}) - C\hat{w}_i(k - \tau_{k,i}|k - \tau_{k,i} - 1)), \quad i \in \mathcal{V}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $\hat{w}_i(k - \tau_{k,i}|k - \tau_{k,i} - 1)$ 为实际状态 $w_i(k - \tau_{k,i})$ 的估计值; $v_i(k - \tau_{k,i}) = v_i(k_t^i - \tau_{k_t^i, i})$; $L \in \mathbb{R}^{p \times q}$ 为待设计的状态观测器参数。

由式(1)和(6)可得智能体 i 在 $k - \tau_{k,i} + 2$ 时刻到 k 时刻的状态预测值为

$$\begin{aligned} \hat{w}_i(k - \tau_{k,i} + \alpha_i | k - \tau_{k,i}) = \\ A\hat{w}_i(k - \tau_{k,i} + \alpha_i - 1 | k - \tau_{k,i}) + \\ Bu_i(k - \tau_{k,i} + \alpha_i - 1), \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\alpha_i = 2, 3, \dots, \tau_{k,i}$.

情形2 当预测控制器 i 在 k 时刻未收到传感器 i 发送的新数据包时,更新如下状态预测值:

$$\begin{aligned} \hat{w}_i(k - 1 | k - \tau_{k,i}) = \hat{w}_i(k - 1 | k - \tau_{k-1,i} - 1), \\ i \in \mathcal{V}. \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可得智能体 i 在 k 时刻的状态预测值为

$$\begin{aligned} \hat{w}_i(k | k - \tau_{k,i}) = A\hat{w}_i(k - 1 | k - \tau_{k,i}) + Bu_i(k - 1), \\ i \in \mathcal{V}. \end{aligned} \quad (9)$$

为实现多智能体系统的一致性控制,基于式(6)~(9),设计如下分布式控制协议:

$$\begin{aligned} u_i(k) = \\ -Q_a \hat{w}_i(k | k - \tau_{k,i}) + Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{w}_j(k | k - \tau_{k,j}) - \\ \hat{w}_i(k | k - \tau_{k,i})), \quad i \in \mathcal{V}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $Q_a \in \mathbb{R}^{l \times p}$ 和 $Q_b \in \mathbb{R}^{l \times p}$ 为待设计的控制器参数.

$$\begin{aligned} \Omega_{11} = & \begin{bmatrix} A - B(Q_a + l_{11}Q_b) & a_{12}BQ_b & \dots & a_{1n}BQ_b \\ a_{21}BQ_b & A - B(Q_a + l_{22}Q_b) & \dots & a_{2n}BQ_b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}BQ_b & a_{n2}BQ_b & \dots & A - B(Q_a + l_{nn}Q_b) \end{bmatrix}, \\ \Omega_{22} = & \begin{bmatrix} A - B(Q_a + l_{22}Q_b) & (a_{23} - a_{13})BQ_b & \dots & (a_{2n} - a_{1n})BQ_b \\ (a_{32} - a_{12})BQ_b & A - B(Q_a + l_{33}Q_b) & \dots & (a_{3n} - a_{1n})BQ_b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n2} - a_{12})BQ_b & (a_{n3} - a_{13})BQ_b & \dots & A - B(Q_a + l_{nn}Q_b) \end{bmatrix}, \\ \Omega_{33} = & \text{diag}\{\underbrace{A - LC, \dots, A - LC}_{\bar{\tau}_1}, \underbrace{A - LC, \dots, A - LC}_{\bar{\tau}_2}, \dots, \underbrace{A - LC, \dots, A - LC}_{\bar{\tau}_n}\}. \end{aligned}$$

证明 由式(1)和(6)可得如下形式:

$$\begin{aligned} w_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \hat{w}_i(k - \tau_{k,i} + 1 | k - \tau_{k,i}) = \\ (A - LC)(w_i(k - \tau_{k,i}) - \hat{w}_i(k - \tau_{k,i} | k - \tau_{k,i} - 1)). \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可得如下迭代形式:

$$e_i(k - \tau_{k,i} + 1) = (A - LC)e_i(k - \tau_{k,i}), \quad (14)$$

其中 $e_i(k - \tau_{k,i}) = w_i(k - \tau_{k,i}) - \hat{w}_i(k - \tau_{k,i} | k - \tau_{k,i} - 1)$ 为智能体 i 在 $k - \tau_{k,i}$ 时刻的状态估计误差.

由式(1)、(6)~(9)可得

$$w_i(k) - \hat{w}_i(k | k - \tau_{k,i}) =$$

3 闭环系统稳定性分析

首先针对内部动态变量 $\xi_i(k)$ 给出一个引理;随后推导保证多智能体系统(1)在控制协议(10)的作用下渐近稳定且其输出实现一致的充要条件.

引理1 针对初值为 $\delta_i \geq 0$ 的动态事件触发函数(2),如果参数 μ_i 和 φ_i 满足 $0 < \eta_i < 1, \mu_i - \varphi_i \geq 0$ 且 $\varphi_i > 0$,则对于 $\forall k \geq 0$,内部动态变量 $\xi_i(k)$ 的值恒大于0.

证明 由定义1和动态事件触发函数(2)可知,对于 $\forall k \in [k_t^i, k_{t+1}^i)$,满足如下形式:

$$\tilde{v}_i^T(k) \tilde{v}_i(k) - \phi_i v_i^T(k) v_i(k) - \varphi_i \xi_i(k) < 0. \quad (11)$$

将式(11)代入(3),可得

$$\begin{aligned} \xi_i(k + 1) > (\mu_i - \varphi_i) \xi_i(k) > \dots > \\ (\mu_i - \varphi_i)^{k+1} \xi_i(0) = (\mu_i - \varphi_i)^{k+1} \delta_i \geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)的推导结果可知,当 $\delta_i \geq 0$ 且 $\mu_i - \varphi_i \geq 0$ 时,对于 $\forall k \geq 0$,不等式 $\xi_i(k) > 0$ 恒成立. □

综合上述控制方案设计,给出如下定理.

定理1 多智能体系统(1)在控制协议(10)下渐近稳定且其输出实现一致的充要条件是矩阵 Ω_{11} 、 Ω_{22} 和 Ω_{33} 的所有特征值均在单位圆内. 其中

$$\begin{aligned}
 & Q_a A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) + \\
 & Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)), \tag{16}
 \end{aligned}$$

其中 $l_{ii} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$.

将式(16)代入(1)可得智能体 i 在 $k + 1$ 时刻的系统实际状态为

$$\begin{aligned}
 w_i(k + 1) &= A w_i(k) + B u_i(k) = \\
 & (A - B(Q_a + l_{ii} Q_b)) w_i(k) + B Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} w_j(k) + \\
 & B Q_a A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) + \\
 & B Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)). \tag{17}
 \end{aligned}$$

定义智能体 i 在 k 时刻的状态一致性误差为 $\eta_i(k) = w_i(k) - w_1(k), i \neq 1$. 由式(16)可得

$$\begin{aligned}
 & u_i(k) - u_1(k) = \\
 & - (Q_a + l_{ii} Q_b) \eta_i(k) + Q_b \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} \right) \eta_j(k) + \\
 & Q_a (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,1}-1} e_1(k - \tau_{k,1} + 1)) + \\
 & Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)) - \\
 & Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} (A^{\tau_{k,1}-1} e_1(k - \tau_{k,1} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)), \quad i \neq 1. \tag{18}
 \end{aligned}$$

由式(1)和(18)可得智能体 i 在 $k + 1$ 时刻的状态一致性误差为

$$\begin{aligned}
 \eta_i(k + 1) &= A(w_i(k) - w_1(k)) + B(u_i(k) - u_1(k)) = \\
 & (A - B(Q_a + l_{ii} Q_b)) \eta_i(k) + \\
 & B Q_b \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} \right) \eta_j(k) + \\
 & B Q_a (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,1}-1} e_1(k - \tau_{k,1} + 1)) + \\
 & B Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (A^{\tau_{k,i}-1} e_i(k - \tau_{k,i} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)) - \\
 & B Q_b \sum_{j \in \mathcal{N}_1} a_{1j} (A^{\tau_{k,1}-1} e_1(k - \tau_{k,1} + 1) - \\
 & A^{\tau_{k,j}-1} e_j(k - \tau_{k,j} + 1)), \quad i \neq 1. \tag{19}
 \end{aligned}$$

由此,基于式(14)、(17)和(19),闭环多智能体系统可以表示为如下紧凑形式:

$$X(k + 1) = \Lambda(k) X(k). \tag{20}$$

其中

$$X(k) = \begin{bmatrix} W(k) \\ \eta(k) \\ E(k) \end{bmatrix}, \quad \Lambda(k) = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \mathbf{0} & \Omega_{13}(k) \\ \mathbf{0} & \Omega_{22} & \Omega_{23}(k) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Omega_{33} \end{bmatrix},$$

$$W(k) = [w_1^T(k), w_2^T(k), \dots, w_i^T(k), \dots, w_n^T(k)]^T,$$

$$\eta(k) = [\eta_2^T(k), \eta_3^T(k), \dots, \eta_i^T(k), \dots, \eta_n^T(k)]^T,$$

$$E(k) = [E_1^T(k), E_2^T(k), \dots, E_i^T(k), \dots, E_n^T(k)]^T,$$

$$E_i(k) = [e_i^T(k), e_i^T(k - 1), \dots, e_i^T(k - \bar{\tau}_i + 1)]^T,$$

$$\bar{\tau}_i = \max\{\tau_{k,i}\},$$

$\mathbf{0}$ 表示适合维数的零矩阵.

由式(20)可知,若时变矩阵 $\Lambda(k)$ 的所有特征值均在单位圆内,则闭环多智能体系统是渐近稳定的.由式(20)可以看出 $\Lambda(k)$ 是一个上三角矩阵,因此系统的稳定性仅取决于定常矩阵 Ω_{11} 、 Ω_{22} 和 Ω_{33} ,而与时变矩阵 $\Omega_{13}(k)$ 和 $\Omega_{23}(k)$ 不相关,此略.

由式(20)可知,若定常矩阵 Ω_{11} 、 Ω_{22} 和 Ω_{33} 的所有特征值均在单位圆内,则可得

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \|e_i(k)\| = 0, \tag{21}$$

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \|\eta_i(k)\| = 0. \tag{22}$$

由式(21)可知,当 $k \rightarrow +\infty$ 时,智能体 i 中状态观测器的状态估计误差为零.此外,由式(22)可得

$$\begin{aligned}
 & \lim_{k \rightarrow +\infty} \|v_j(k) - v_i(k)\| = \\
 & \lim_{k \rightarrow +\infty} \|C(w_j(k) - w_i(k))\| \leq \\
 & \|C\| \cdot \lim_{k \rightarrow +\infty} \|(w_j(k) - w_1(k)) - (w_i(k) - w_1(k))\| \leq \\
 & \|C\| \cdot \lim_{k \rightarrow +\infty} (\|\eta_j(k)\| + \|\eta_i(k)\|) = 0. \tag{23}
 \end{aligned}$$

又因为不等式 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \|v_j(k) - v_i(k)\| \geq 0$ 显然成立,结合式(23)可知, $\lim_{k \rightarrow +\infty} \|v_j(k) - v_i(k)\| = 0$,即在控制协议(10)下,多智能体系统(1)的输出实现一致. \square

4 仿真结果

为验证所提出控制方案的有效性和正确性,考虑文献[23]中GNM5440E型直流电机系统,基本参数如表1所示,相应的微分方程描述如下:

$$\begin{aligned}
 L_a \frac{di_a(t')}{dt'} &= V_a(t') - R_a i_a(t') - k_a c(t'), \\
 J \frac{dc(t')}{dt'} &= -bc(t') + k_b i_a(t'). \tag{24}
 \end{aligned}$$

其中: $i_a(t')$ 、 $V_a(t')$ 、 L_a 和 R_a 分别为电机电枢的电流、电压、电感和电阻; J 为电机的转动惯量; b 为电机的粘性摩擦系数; k_a 为反电动势常数; k_b 为电机转矩常数; $c(t')$ 为角速度.

表1 GNM5440E型直流电机的基本参数^[23]

参数	取值
R_a/Ω	0.965
L_a/H	0.0022
$k_a/(V \cdot s/rad)$	0.1201
$k_b/(N \cdot m/A)$	0.1201
$J/(kg \cdot m^2)$	0.1182
$b/(N/ms)$	0.1296

令

$$w(t') = [w_1(t'), w_2(t')]^T = [i_a(t'), c(t')]^T,$$

$$u(t') = V_a(t'), v(t') = \frac{30}{\pi} w_2(t').$$

由式(24)和表1可得直流电机系统的连续时间状态空间模型为

$$\dot{w}(t') = \hat{A}w(t') + \hat{B}u(t'),$$

$$v(t') = \hat{C}w(t'). \quad (25)$$

其中 \hat{A} 、 \hat{B} 和 \hat{C} 为定常系数矩阵, 有

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -438.6364 & -54.5909 \\ 1.0161 & -1.0964 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 454.5455 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{C} = [0 \ 9.5493].$$

针对直流电机系统的连续时间状态空间模型(25), 运用离散化方法, 选取采样间隔为 0.05 s, 由式(1)和(25)可得到智能体 i (直流电机 i) 的离散时间状态空间模型为

$$w_i(k+1) = Aw_i(k) + Bu_i(k),$$

$$v_i(k) = Cw_i(k), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (26)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -0.0003 & -0.1174 \\ 0.0022 & 0.9409 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.0305 \\ 0.0488 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 9.5493].$$

在仿真中, 多智能体系统的通信拓扑 \mathcal{G} 如图2所示. 各智能体的初始状态分别选取为 $w_1(0) = [2 \ 2]^T$ 、 $w_2(0) = [1 \ 1]^T$ 、 $w_3(0) = [-1 \ -3]^T$ 和 $w_4(0) = [-4 \ -2]^T$. 通信网络中非周期性 DoS 攻击持续时间的上界选取为 $D = 4$. 智能体 i 的事件驱动控制机制中两个相邻触发时刻之间的最大触发间隔选取为 $M_i = 6$. 仿真中选取 101 个连续的采样周期. 智能体 i 反向通道的时变时延见图3. 其中: $c_{k,1} \in [0 \ 5]$, $c_{k,2} \in$

$[0 \ 6]$, $c_{k,3} \in [0 \ 6]$, $c_{k,4} \in [0 \ 5]$. 由 DoS 攻击导致智能体 i 反向通道的连续随机数据丢包见图4.

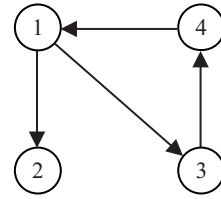


图2 多智能体系统的通信拓扑 \mathcal{G}

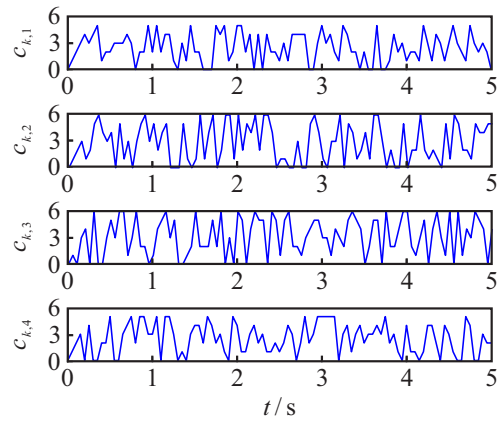


图3 智能体 i 反向通道的时变时延

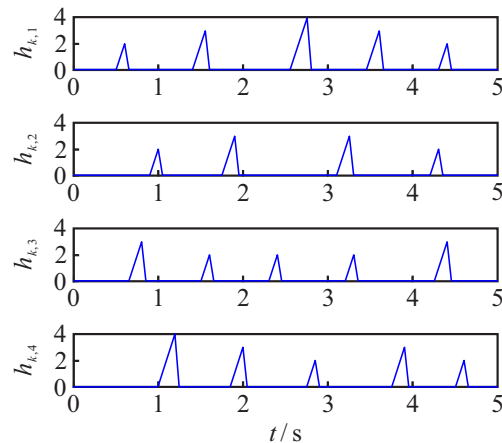


图4 DoS攻击导致智能体 i 反向通道连续随机数据丢包

针对式(26)中的模型参数, 为满足定理1中的条件, 选取如下状态观测器参数和控制器参数:

$$L = [2.3763 \ 0.0357]^T,$$

$$Q_a = [-0.1597 \ 6.2534],$$

$$Q_b = [-0.2568 \ 4.2048].$$

本文在仿真中考虑如下3种情形: 网络化控制方案、基于静态事件驱动的预测控制方案、基于动态事件驱动的预测控制方案.

1) 网络化控制方案: 即不采用网络化预测控制方法和事件驱动控制机制的方案, 且系统中存在如图3和图4所示的时变时延和由 DoS 攻击导致的连续随机数据丢包. 网络化控制方案的系统输出如图5所示, 可以看出, 时变时延和 DoS 攻击导致系统发散, 因

此有必要采用网络化预测控制方法以补偿时变时延和DoS攻击对系统性能造成的负面影响。

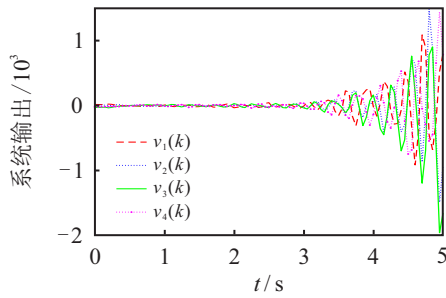


图5 网络化控制方案的系统输出

2) 基于静态事件驱动的预测控制方案: 考虑与情形1)中相同分布的时变时延和由DoS攻击导致的连续随机数据丢包. 该方案采用如式(4)所示的静态事件触发函数, 选取 $\phi_i = 0.45$. 图6为基于静态事件驱动的预测控制方案的系统输出, 可以看出, 该方案下多智能体系统的输出实现了一致且获得了较好的控制性能. 图7为智能体 i 的事件驱动控制机制的触发时刻, 由图7可知, 该方案可以有效降低事件发生频率.

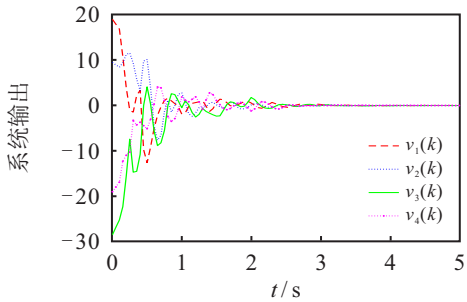


图6 基于静态事件驱动的预测控制方案的系统输出

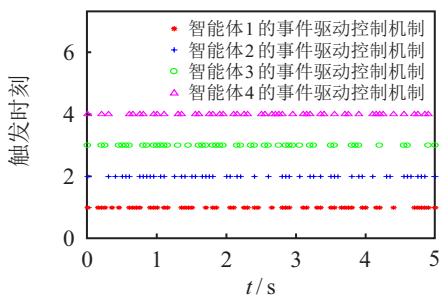


图7 智能体 i 的事件驱动控制机制的触发时刻(静态)

3) 基于动态事件驱动的预测控制方案: 即本文所设计的控制方案, 选取如图3和图4所示的时变时延和由DoS攻击导致的连续数据丢包. 在该方案中, 式(2)和(3)的参数分别选取为 $\phi_i = 0.45, \varphi_i = 0.01, \mu_i = 0.9, \delta_1 = 600, \delta_2 = 100, \delta_3 = 600, \delta_4 = 300$. 图8~图10分别表示基于动态事件驱动的预测控制方案的系统输出、智能体 i 的事件驱动控制机制的触发时刻和智能体 i 的事件驱动控制机制的内部

动态变量. 与情形2)中的图6和图7相比, 通过在智能体 i 的事件驱动控制机制中引入内部动态变量, 本方案在系统性能几乎相同的情形下, 进一步降低了事件发生频率, 从而节省了更多的网络资源, 具体的事件触发次数如表2所示. 基于图3~图10和表2的结果, 验证了本文所设计控制方案的有效性和正确性.

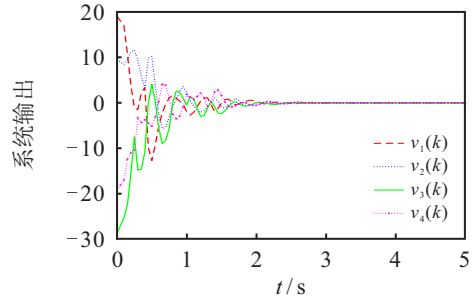


图8 基于动态事件驱动的预测控制方案的系统输出

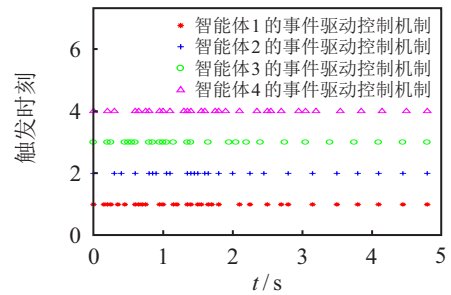


图9 智能体 i 的事件驱动控制机制的触发时刻(动态)

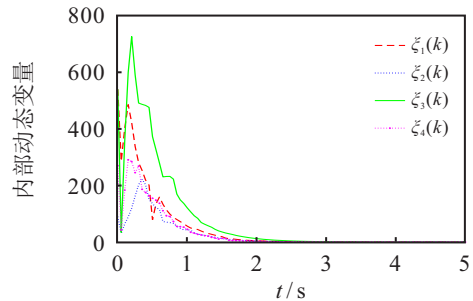


图10 智能体 i 的事件驱动控制机制的内部动态变量

表2 智能体 i 的事件驱动控制机制的事件触发次数

智能体 i 的事件驱动控制机制	1	2	3	4
静态事件驱动控制机制情形	53	51	46	48
动态事件驱动控制机制情形	32	26	27	31

5 结论

本文研究了具有时变时延和非周期性DoS攻击的线性多智能体系统的一致性控制问题. 针对时变时延和非周期性DoS攻击对系统性能带来的负面影响, 提出一种基于动态事件驱动的多智能体系统预测控制方案. 通过引入动态事件驱动控制机制, 该方案可有效降低通信信道阻塞的概率以及避免频繁通信导致的网络资源浪费. 在该方案下, 给出闭环多智能体系统渐近稳定且其输出实现一致的充要条件, 并通

过仿真结果验证了理论分析的正确性。

参考文献(References)

- [1] Gou J Z, Wu Y, Deng J N. Swarm intelligence and consensus theory based trajectory planning for a complete flight of UAV formation[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1464-1472.
- [2] Song X L, Chen Y, Chen X, et al. Joint communication resource allocation and cooperative adaptive cruise delay-feedback control of connected vehicles[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(10): 2888-2896.
- [3] Sun H H, Hu C H, Zhang J G. Cooperative countermeasure strategy based on active risk defense multiagent reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1420-1429.
- [4] Savino H J, dos Santos C R P, Souza F O, et al. Conditions for consensus of multi-agent systems with time-delays and uncertain switching topology[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1258-1267.
- [5] Zhou D D, Hu B, Guan Z H, et al. Consensus tracking control of uncertain multiagent systems with sampled data and time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(12): 5681-5691.
- [6] Liu Q S, Zhou B. Consensus of discrete-time multiagent systems with state, input, and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(11): 4425-4437.
- [7] Xu Y, Fang M, Shi P, et al. Event-based secure consensus of multiagent systems against DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(8): 3468-3476.
- [8] Guo X G, Liu P M, Wang J L, et al. Event-triggered adaptive fault-tolerant pinning control for cluster consensus of heterogeneous nonlinear multi-agent systems under aperiodic DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 8(2): 1941-1956.
- [9] Wang Y, Jia X C, You X, et al. Multi-rate sampled-data secure consensus of multi-agent systems subject to DoS attacks[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(10): 1890-1897.
- [10] Deng C, Wen C Y. MAS-based distributed resilient control for a class of cyber-physical systems with communication delays under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(5): 2347-2358.
- [11] Zhang D, Liu L, Feng G. Consensus of heterogeneous linear multiagent systems subject to aperiodic sampled-data and DoS attack[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(4): 1501-1511.
- [12] Wang X, Park J H, Yang H L. An improved protocol to consensus of delayed MASs with UNMS and aperiodic DoS cyber-attacks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 8(3): 2506-2516.
- [13] Liu G P, Mu J X, Rees D, et al. Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC[J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(4): 288-297.
- [14] Zhang T Y, Liu G P. Master-slave predictive formation control of networked multi-agents[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(10): 1864-1870.
- [15] 庞中华, 骆文城. 基于观测器的网络化多智能体预测控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(9): 2290-2296. (Pang Z H, Luo W C. Observer-based networked multi-agent predictive control[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(9): 2290-2296.)
- [16] Luo W C, Lu P L, Du C K, et al. Cooperative output tracking control of heterogeneous multi-agent systems with random communication constraints: An observer-based predictive control approach[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3): 1139-1143.
- [17] Liu G P. Predictive control of networked nonlinear multiagent systems with communication constraints[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(11): 4447-4457.
- [18] Ge X H, Han Q L, Ding L, et al. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and techniques[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(9): 3112-3125.
- [19] Li X M, Zhou Q, Li P, et al. Event-triggered consensus control for multi-agent systems against false data-injection attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1856-1866.
- [20] Xu C J, Qin Y Y, Su H S. Observer-based dynamic event-triggered bipartite consensus of discrete-time multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(3): 1054-1058.
- [21] 李丽, 王夕娟. 拒绝服务攻击下领导-跟随多智能体系统的均方一致性研究[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2317-2322. (Li L, Wang X J. Mean square consensus for leader-following multi-agent systems under denial-of-service attacks[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2317-2322.)
- [22] Wu Z Y, Wang Z, Wang Y, et al. Dynamic event-triggered networked predictive control for discrete-time NCSs under deception attacks[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2023, 33(4): 2682-2702.
- [23] Silva-Ortigoza R, Hernandez-Guzman V M, Antonio-Cruz M, et al. DC/DC buck power converter as a smooth starter for a DC motor based on a hierarchical control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 1076-1084.

作者简介

路平立(1980—), 女, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为多智能体系统协同控制、飞行器故障诊断与容错控制、鲁棒与非线性控制, E-mail: pinglilu@bit.edu.cn;

骆文城(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为多智能体系统协同控制、事件驱动控制, E-mail: wchluo@126.com;

杜长坤(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为多智能体系统协同控制、事件驱动控制、有限时间控制, E-mail: duchangkun88@gmail.com.