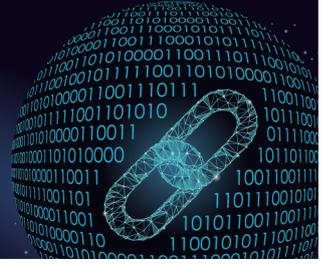




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 复杂通信约束下网络化多智能体系统的时变编队控制

郑长兵, 庞中华, 董燕飞, 司文杰

引用本文:

郑长兵, 庞中华, 董燕飞, 司文杰. 复杂通信约束下网络化多智能体系统的时变编队控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3513–3520.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0449>

## 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>

#### 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

#### 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>

#### 基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 $H_\infty$ 控制

Non-fragile  $H_\infty$  control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

#### 事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 $H_\infty$ 故障检测

Event-triggered  $H_\infty$  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>

# 复杂通信约束下网络化多智能体系统的时变编队控制

郑长兵<sup>1</sup>, 庞中华<sup>2†</sup>, 董燕飞<sup>1</sup>, 司文杰<sup>1</sup>

(1. 河南城建学院 电气与控制工程学院, 河南 平顶山 467000;

2. 北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 针对二阶网络化多智能体系统中前向通道、反馈通道和智能体之间通道同时存在通信约束(网络诱导时延和丢包)问题,提出一种基于网络化预测控制方法和时滞系统方法的新型解决方案. 首先,基于智能体自身滞后的位置和速度信息,通过迭代预测得到智能体当前时刻的位置和速度预测值;然后,考虑到智能体之间通道的通信约束,设计基于邻居智能体滞后信息的时变编队控制协议;进而,推导出包含前向通道和智能体之间通道通信约束的闭环时滞系统,并利用李雅普诺夫方法给出闭环系统稳定的充分条件;最后,通过对比仿真验证所提出方法的有效性,以及网络化预测控制方法在主动补偿通信约束方面的优势.

**关键词:** 网络化多智能体系统; 通信约束; 网络化预测控制; 时滞系统; 时变编队; 李雅普诺夫方法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0449

**引用格式:** 郑长兵, 庞中华, 董燕飞, 等. 复杂通信约束下网络化多智能体系统的时变编队控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3513-3520.

## Time-varying formation control of networked multi-agent systems with complex communication constraints

ZHENG Chang-bing<sup>1</sup>, PANG Zhong-hua<sup>2†</sup>, DONG Yan-fei<sup>1</sup>, SI Wen-jie<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** For the communication constraints (i.e., network-induced delay and packet loss) of the forward channel, the feedback channel and the channel between agents of second-order networked multi-agent systems, a novel solution is proposed, which is based on the networked predictive control method and the time-delay system method. First, with the delayed informations in terms of position and velocity, the predicted position and velocity of the current moment is obtained by iterative prediction. Consider the time delay between agents, a time-varying formation control protocol based on the delayed informations of neighbours is designed. Furthermore, a closed-loop system including the delay of the forward channel and the delay between the agent is derived, and the sufficient conditions for the stability of the closed-loop system are given using the Lyapunov method. Finally, the contrastive simulation results verify the feasibility of the proposed method as well as the advantages of networked predictive control in compensating communication constraints.

**Keywords:** networked multi-agent systems; communication constraints; networked predictive control; time-delay system; time-varying formation; Lyapunov method

## 0 引言

网络化控制系统以其易扩展、便维护、灵活性强、资源共享等优点,在无人驾驶、卫星编队、智能交通、分布式能源管理及多机器人协作等领域得到了广泛的应用. 然而,将网络引入控制系统带来便捷的同时,也不可避免地导致了诸如网络诱导时延、数据包丢

失、网络攻击、量化等通信约束问题. 大量研究表明,时延和丢包会直接导致控制闭环内的信息不能全部或及时到达目的地,进而不同程度地影响着控制系统性能. 如何通过控制方法的设计保证通信约束下系统的控制性能,已成为网络化控制的一个重要研究方向<sup>[1-2]</sup>.

收稿日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173002, 62303251); 北京市自然科学基金项目(4222045); 河南省高等学校重点科研项目(24A120001); 河南省科技攻关计划项目(232102320053).

†通讯作者. E-mail: zhonghua.pang@ia.ac.cn.

近年来,由于系统规模扩大、任务复杂度增加等原因,由多个网络化系统组成的网络化多智能体系统成为重点研究对象<sup>[3-4]</sup>. 相对于单个网络化系统,网络化多智能体系统呈现出通信信道多、数据交换量大等特点,这些因素的交叉耦合给控制器设计带来了更大的挑战<sup>[5]</sup>. 针对常见的网络诱导时延和数据包丢失问题,许多学者提出了行之有效的方法,并给出了理论证明和物理实验. 目前,较为常用的有时滞系统方法、随机系统方法、切换系统方法、马尔科夫跳变系统方法和网络化预测控制方法等<sup>[6]</sup>. 在上述方法中,大都以被动的形式处理通信约束,会造成当多个通信信道同时存在通信约束时,控制器设计具有较大的保守性,控制器参数可选择范围大大减小. 而网络化预测控制利用预测的思想,可以主动补偿通信约束,有效地规避了上述问题<sup>[7]</sup>. 文献[8]和文献[9]在云控制框架下考虑前向通道和反馈通道存在网络时延,分别研究了网络化多智能体的一致性控制问题和时变编队跟踪控制问题. 值得注意的是,上述成果考虑到云上各个节点的计算能力和网络资源相对较好,忽略了智能体之间的网络时延. 但在一般情形下,智能体之间的网络时延是不可忽视的,且会给多智能体系统的协调带来新的挑战. 文献[10]利用预测的思想,对领导者和邻居智能体的状态进行预测估计,以实现智能体之间存在网络时延时的一致性控制. 利用基于模型和数据的网络化预测控制方法,文献[11]和文献[12]解决了智能体之间的时延问题. 然而,如文献[13]所指出,当智能体之间存在网络时延时,由于代数环问题,常规的网络化预测控制不能实施. 为此,文献[13]提出了一种不依赖于邻居智能体预测信息的虚拟控制律,但如果存在不直接与领导者连接的跟随者时,该跟随者会有稳态跟踪误差. 文献[14]通过引入校正项消除预测过程带来的误差,最终实现了一致性控制. 此外,在诸多文献中,模型预测控制也常被用于解决网络环境下的状态估计问题及控制器设计问题<sup>[15]</sup>.

显然,上述文献仅考虑了网络化多智能体系统的一类或两类通道,而同时考虑三类通道(前向通道、反馈通道和智能体之间通道)均存在通信约束的相关成果却鲜有报道. 实际上,三通道通信约束问题广泛存在于云控制系统、空天地无人系统协同作战、车车协同编队等场景,并制约着相关领域技术的发展<sup>[16]</sup>. 为此,本文针对二阶网络化多智能体系统,在智能体的前向通道、反馈通道以及智能体之间通道均存在网络时延或者丢包的情形下,研究时变编队跟

踪控制问题. 本文的贡献及创新如下:

- 1) 相比于文献[10-14],考虑了更具有实际应用价值和挑战性的三通道通信约束问题;
- 2) 联合运用网络化预测控制方法和时滞系统方法,设计三通道通信约束下的时变编队控制协议;
- 3) 将编队跟踪控制问题转化为闭环时滞系统的稳定性问题,推导出二阶网络化多智能体系统实现零稳态跟踪误差的充分条件,并通过与时滞系统方法进行仿真对比验证了本文所提出方法的优势.

## 1 基础知识

在本文中,时变编队控制采用主从式结构,用不含自闭环的图  $G = (\mathcal{W}, \xi, \mathcal{A})$  表示由  $N$  个跟随者智能体组成的连接图. 其中:  $\mathcal{W} = \{\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_N\}$  为顶点集,  $\xi \subseteq \mathcal{W} \times \mathcal{W}$  为边集,  $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$  为邻接矩阵.  $\{\varpi_i, \varpi_j\} \in \xi$  表示存在从顶点  $\varpi_j$  出发到顶点  $\varpi_i$  的有向连接边,即智能体  $i$  可以接收到智能体  $j$  的信息,记为  $a_{ij} = 1$ .  $\mathcal{N}_i = \{j : (i, j) \in \xi\}$  为智能体  $i$  的所有邻居智能体集合. 拉普拉斯矩阵定义为  $L = D - A$ . 其中:  $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$  为度矩阵,  $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ . 针对跟随者与主智能体的连接情况,用矩阵  $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_N)$  进行描述. 如果  $b_i = 1$ ,则说明跟随者  $i$  可以接收到主智能体信息;否则,跟随者  $i$  不可以接收到主智能体信息. 为了实现编队跟踪控制,假设至少存在一个跟随者智能体与主智能体直接连接,且多智能体系统组成的通信拓扑存在一个有向生成树.

## 2 问题描述及控制方案设计

### 2.1 问题描述

考虑由一个自治的虚拟主智能体和  $N$  个跟随者组成的网络化多智能体系统,动态模型可描述为

$$\begin{cases} p_r(k+1) = p_r(k) + \sigma v_r(k), \\ v_r(k+1) = v_r(k); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_i(k+1) = p_i(k) + \sigma v_i(k), \\ v_i(k+1) = v_i(k) + \sigma u_i(k), \quad i = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $p_i(k) \in \mathbb{R}^m$  为跟随者  $i$  的位置向量,  $v_i(k) \in \mathbb{R}^m$  为跟随者  $i$  的速度向量,  $u_i(k) \in \mathbb{R}^m$  为跟随者  $i$  的控制输入向量;  $p_r(k) \in \mathbb{R}^m$  和  $v_r(k) \in \mathbb{R}^m$  分别为虚拟主智能体的位置和速度向量;  $\sigma$  为采样间隔.

定义时变编队的位置和速度跟踪误差如下:

$$\begin{cases} e_{p_i}(k) = p_i(k) - p_r(k) - \delta_{p_i}(k), \\ e_{v_i}(k) = v_i(k) - v_r(k) - \delta_{v_i}(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\delta_{p_i}(k) \in \mathbb{R}^m$  和  $\delta_{v_i}(k) \in \mathbb{R}^m$  分别为跟随者  $i$  与主智能体期望的偏置位置和偏置速度, 且满足如下可实现条件:

$$\delta_{p_i}(k+1) = \delta_{p_i}(k) + \sigma \delta_{v_i}(k). \quad (4)$$

可以看出,  $\delta_{p_i}(k)$  和  $\delta_{v_i}(k)$  两者满足约束关系, 在初始状态确定的情形下, 由其中任何一个的值可以推出另一个的值. 此外, 本文的目标是设计时变编队控制协议, 保证多智能体系统的位置和速度跟踪误差最终趋近于 0.

### 2.2 时变编队控制策略设计

如图 1 所示, 考虑三类通道均存在网络时延的复杂通信约束情形. 其中, 记传感器至控制器通道时延为  $\tau_{sc}$ , 控制器到执行器通道时延为  $\tau_{ca}$ , 智能体之间通道时延为  $\tau_{ba}$ . 此外,  $\tau_{sc}$ 、 $\tau_{ca}$  和  $\tau_{ba}$  均为大于等于 0 的有界整数, 且假设各个智能组件是时钟同步的.

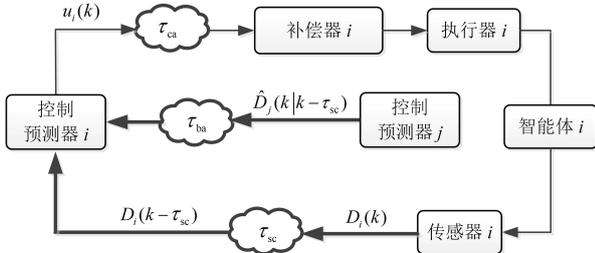


图 1 控制方案原理图

**注 1** 由文献[9]和文献[13]可知, 通过基于目的地集总时延的计算机制, 可将网络诱导时延和数据丢包统一描述为时延并进行处理, 故后续不再区别描述.

首先, 采用网络化预测控制方法对反馈通道的网络时延进行主动补偿. 在每个时刻  $k$ , 数据包  $D_i(k) = \{p_i(k), v_i(k)\}$  和当前时刻的时间戳  $k$  被发送至控制预测器. 预测器接收到滞后的位置和速度信息后, 根据系统模型执行以下预测过程:

$$\begin{cases} \hat{p}_i(k - \tau_{sc} + g_i | k - \tau_{sc}) = \\ \hat{p}_i(k - \tau_{sc} + g_i - 1 | k - \tau_{sc}) + \\ \sigma \hat{v}_i(k - \tau_{sc} + g_i - 1 | k - \tau_{sc}), \\ \hat{v}_i(k - \tau_{sc} + g_i | k - \tau_{sc}) = \\ \hat{v}_i(k - \tau_{sc} + g_i - 1 | k - \tau_{sc}) + \\ \sigma u_i(k - \tau_{sc} + g_i - 1), \quad i \in \kappa, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $g_i = 1, 2, \dots, \tau_{sc}$ . 由式(5)易知, 通过运用网络化预测控制方法已完成对反馈通道网络时延的主动补偿, 消除了其对控制系统的不利影响. 接下来, 分析前向通道和智能体之间通道网络时延不能用常规网络化预测控制方法进行补偿的原因.

假设利用式(5)计算时刻  $k+1$  到  $k+\tau_{ca}+\tau_{ba}$  的智能体状态. 注意到, 当智能体  $i$  进行控制量预测序列计算时, 控制量  $u_i(k+\tau_{ca}+\tau_{ba})$  需要邻居智能体  $j$  的预测状态, 而由于智能体之间通道网络时延的存在, 在  $k$  时刻智能体  $i$  不能接收到智能体  $j$  相应的预测状态信息 ( $\hat{p}_j(k+\tau_{ca}+\tau_{ba}|k-\tau_{sc})$  和  $\hat{v}_j(k+\tau_{ca}+\tau_{ba}|k-\tau_{sc})$ ). 同理, 智能体  $j$  也执行类似的预测过程. 显然, 由于智能体  $i$  与  $j$  之间相互需要对方的预测信息才能进行控制量计算, 形成典型的代数环现象, 导致式(5)从时刻  $k+1$  到  $k+\tau_{ca}+\tau_{ba}$  的预测过程无法执行. 因此, 利用智能体  $i$  已有的信息, 设计如下的时变编队控制协议:

$$\begin{aligned} u_i(k) = & \lambda_1 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{e}_{pj}(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc}) - \\ & \hat{e}_{pi}(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc})) + \\ & \lambda_2 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{e}_{vj}(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc}) - \\ & \hat{e}_{vi}(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc})) - \\ & b_i (\varphi_1 \hat{e}_{pi}(k | k - \tau_{sc}) + \varphi_2 \hat{e}_{vi}(k | k - \tau_{sc})) + \\ & \frac{\delta_{v_i}(k + \tau_{ca} + 1) - \delta_{v_i}(k + \tau_{ca})}{\sigma}, \quad i \in \kappa. \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $\tau_{ba+sc} = \tau_{ba} + \tau_{sc}$ ,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为待设计的控制器参数. 此外,

$$\begin{cases} \hat{e}_{xi}(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc}) = \\ \hat{x}_i(k - \tau_{ba} | k - \tau_{ba+sc}) - x_r(k - \tau_{ba}) - \delta_{xi}(k - \tau_{ba}), \\ \hat{e}_{xi}(k | k - \tau_{sc}) = \\ \hat{x}_i(k | k - \tau_{sc}) - x_r(k) - \delta_{xi}(k), \quad i \in \kappa. \end{cases} \quad (7)$$

其中符号  $x$  可代表位置标识  $p$  和速度标识  $v$ .

**注 2** 为了书写方便, 文中的网络时延被统一表示为定常时延. 如果智能体反馈通道的网络时延是时变和非均匀的, 同样可以利用式(5)进行补偿, 且对后续控制协议的设计和最终的稳定性结果没有影响. 可以看出, 本文利用网络化预测控制方法主动补偿反馈通道的网络时延, 消除了其对控制系统的不利影响, 与纯时滞系统方法处理 3 个通道网络时延的方式对比, 尽可能地降低了控制协议设计的保守性.

**注 3** 控制协议(6)包含 4 项: 前两项分别为位置和速度的协调项, 利用了邻居和自身滞后的预测信息, 不需要主智能体的信息; 第 3 项为位置和速度的跟踪项, 利用了自身的预测信息; 最后一项为补偿项, 包含了前向通道的时延信息. 与文献[11-14]不同的是, 本文考虑了三通道通信约束问题, 并综合运用了网络化预测控制方法和时滞系统方法.

### 3 主要结果

本节主要针对系统(2),基于所设计的编队控制协议(6),给出实现时变编队跟踪控制的充分条件.

**定理1** 如果存在参数 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 及正定矩阵 $P$ 满足如下线性矩阵不等式,则可以实现期望的时变编队,且满足零稳态位置和速度跟踪误差:

$$\begin{bmatrix} \Omega^T P + P\Omega + \tau_\Delta \Omega^T P \Omega + \tau_{ca} \Phi^T P \Phi & \Psi \\ \Psi^T & -(\tau_{ca+ba} P)^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

其中

$$\Omega = \Theta - I_{2Nm} + \Phi + \Psi, \quad \Theta = \begin{bmatrix} I_{Nm} & \sigma I_{Nm} \\ 0 & I_{Nm} \end{bmatrix},$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{11} = \Phi_{12} = 0, \quad \Phi_{21} = -\sigma\varphi_1(B \otimes I_m),$$

$$\Phi_{22} = -\sigma\varphi_2(B \otimes I_m), \quad \Psi_{11} = \Psi_{12} = 0,$$

$$\Psi_{21} = -\sigma\lambda_1(L \otimes I_m), \quad \Psi_{22} = -\sigma\lambda_2(L \otimes I_m),$$

$$\tau_\Delta = 1 + \tau_{ca+ba} + \tau_{ca}, \quad \tau_{ca+ba} = \tau_{ca} + \tau_{ba}.$$

**证明** 由式(1)~(3)可得

$$e_{pi}(k+1) = e_{pi}(k) + \sigma e_{vi}(k). \quad (9)$$

进一步,根据式(1)和(4)可得

$$\begin{bmatrix} \hat{p}_i(k|k - \tau_{sc}) \\ \hat{v}_i(k|k - \tau_{sc}) \end{bmatrix} = A^{\tau_{sc}} \begin{bmatrix} p_i(k - \tau_{sc}) \\ v_i(k - \tau_{sc}) \end{bmatrix} + \sum_{t=0}^{\tau_{sc}-1} A^t B u_i(k-t-1) = \begin{bmatrix} p_i(k) \\ v_i(k) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中

$$A^{\tau_{sc}} = \begin{bmatrix} I_m & \tau_{sc}\sigma I_m \\ 0 & I_m \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} I_m & \sigma I_m \\ 0 & I_m \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}.$$

由式(3)和(10)易得

$$\begin{cases} \hat{e}_{pi}(k|k - \tau_{sc}) = e_{pi}(k), \\ \hat{e}_{pi}(k - \tau_{ba}|k - \tau_{ba+sc}) = e_{pi}(k - \tau_{ba}), \\ \hat{e}_{vi}(k|k - \tau_{sc}) = e_{vi}(k), \\ \hat{e}_{vi}(k - \tau_{ba}|k - \tau_{ba+sc}) = e_{vi}(k - \tau_{ba}). \end{cases} \quad (11)$$

进而,联立式(4)、(6)和(11),并考虑前向通道的网络时延 $\tau_{ca}$ ,可得

$$\begin{aligned} e_{vi}(k+1) &= \\ v_i(k) + \sigma u_i(k - \tau_{ca}) - v_r(k) - \delta_{vi}(k+1) &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{vi}(k) + \sigma \left( \lambda_1 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (e_{pj}(k - \tau_{ca+ba}) - \right. \\ \left. e_{pi}(k - \tau_{ca+ba})) + \lambda_2 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (e_{vj}(k - \tau_{ca+ba}) - \right. \\ \left. e_{vi}(k - \tau_{ca+ba})) - b_i (\varphi_1 e_{pi}(k - \tau_{ca}) + \right. \\ \left. \varphi_2 e_{vi}(k - \tau_{ca})) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

将式(9)和(12)重写为向量紧凑形式,即

$$e_p(k+1) = e_p(k) + \sigma e_v(k), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} e_v(k+1) &= e_v(k) - \sigma\lambda_2(L \otimes I_m)e_v(k - \tau_{ca+ba}) - \\ &\quad \sigma\varphi_2(B \otimes I_m)e_v(k - \tau_{ca}) - \\ &\quad \sigma\lambda_1(L \otimes I_m)e_p(k - \tau_{ca+ba}) - \\ &\quad \sigma\varphi_1(B \otimes I_m)e_p(k - \tau_{ca}). \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} e_p(k) = [e_{p1}^T(k) \ e_{p2}^T(k) \ \dots \ e_{pN}^T(k)]^T, \\ e_v(k) = [e_{v1}^T(k) \ e_{v2}^T(k) \ \dots \ e_{vN}^T(k)]^T. \end{cases}$$

然后,联立式(13)和(14),可得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= \\ \Theta e(k) + \Phi e(k - \tau_{ca}) + \Psi e(k - \tau_{ca+ba}), \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $e(k) = [e_p^T(k) \ e_v^T(k)]^T$ . 接下来,给出闭环时滞系统(15)稳定的充分条件.

令

$$z(k) = e(k) + \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) + \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho),$$

可得

$$\begin{aligned} z(k+1) &= e(k) + \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) + \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho) + \\ &\quad (\Theta - I_{2Nm})e(k) + \Phi e(k - \tau_{ca}) + \\ &\quad \Psi e(k - \tau_{ca+ba}) + \sum_{\varsigma=k+1-\tau_{ca}}^k \Phi e(\varsigma) - \\ &\quad \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) + \sum_{\varrho=k+1-\tau_{ca+ba}}^k \Psi e(\varrho) - \\ &\quad \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho) = z(k) + \Omega e(k). \end{aligned} \quad (16)$$

类似于文献[17],考虑如下李雅普诺夫函数:

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k) + V_3(k), \quad (17)$$

$$\begin{cases} V_1(k) = z^T(k) P z(k), \\ V_2(k) = \sum_{s=-\tau_{ca}}^{-1} \sum_{\varsigma=k+s}^{k-1} e^T(\varsigma) \Phi^T P \Phi e(\varsigma), \\ V_3(k) = \sum_{s=-\tau_{ca+ba}}^{-1} \sum_{\varrho=k+s}^{k-1} e^T(\varrho) \Psi^T P \Psi e(\varrho). \end{cases}$$

针对  $V_1(k)$  利用式(16)可得

$$V_1(k+1) = e^T(k)(\Omega^T P + P\Omega + \Omega^T P\Omega)e(k) + V_1(k) + 2e^T(k)\Omega^T P \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) + 2e^T(k)\Omega^T P \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho). \quad (18)$$

类似于式(18),可得

$$V_2(k+1) = V_2(k) + \tau_{ca}e^T(k)\Phi^T P\Phi e(k) - \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} e^T(\varsigma)\Phi^T P\Phi e(\varsigma), \quad (19)$$

$$V_3(k+1) = V_3(k) + \tau_{ca+ba}e^T(k)\Psi^T P\Psi e(k) - \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} e^T(\varrho)\Psi^T P\Psi e(\varrho). \quad (20)$$

已知

$$\left( \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) \right)^T P \left( \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) \right) \leq \tau_{ca} \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} e^T(\varsigma)\Phi^T P\Phi e(\varsigma), \quad (21)$$

$$\left( \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho) \right)^T P \left( \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho) \right) \leq \tau_{ca+ba} \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} e^T(\varrho)\Psi^T P\Psi e(\varrho), \quad (22)$$

利用不等式  $2x^T y \leq \varepsilon \|x\|^2 + \frac{1}{\varepsilon} \|y\|^2, \varepsilon > 0$ , 并结合式(21)和(22),可得

$$2e^T(k)\Omega^T P \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} \Phi e(\varsigma) \leq \tau_{ca}e^T(k)\Omega^T P\Omega e(k) + \sum_{\varsigma=k-\tau_{ca}}^{k-1} e^T(\varsigma)\Phi^T P\Phi e(\varsigma), \quad (23)$$

$$2e^T(k)\Omega^T P \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} \Psi e(\varrho) \leq \tau_{ca+ba}e^T(k)\Omega^T P\Omega e(k) + \sum_{\varrho=k-\tau_{ca+ba}}^{k-1} e^T(\varrho)\Psi^T P\Psi e(\varrho). \quad (24)$$

进一步,将式(18)~(20)代入(17),可得

$$V(k+1) \leq V(k) + e^T(k)Qe(k), \quad (25)$$

其中  $Q = \Omega^T P + P\Omega + (1 + \tau_{ca+ba} + \tau_{ca})\Omega^T P\Omega + \tau_{ca}\Phi^T P\Phi + \tau_{ca+ba}\Psi^T P\Psi$ .

由Schur补引理可知,当不等式(8)满足时,  $Q < 0$  成立,即

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) \leq 0. \quad (26)$$

值得注意的是,当且仅当  $e(k) = 0$  时  $\Delta V(k) = 0$ . 因此可知,在控制协议(6)作用下实现了时变编队零稳态误差跟踪控制.  $\square$

**注4** 从式(8)和(15)可以看出,由于反馈通道时延被完全补偿,闭环系统稳定性与前向通道时延  $\tau_{ca}$  和智能体之间通道时延  $\tau_{ba}$  有关,而与反馈通道时延  $\tau_{sc}$  无关. 此外,由定理1可知,对于一个给定的网络化多智能体系统,可以选择合适的控制协议参数  $\lambda_1, \lambda_2, \varphi_1$  和  $\varphi_2$  使不等式(8)成立,进而实现时变编队跟踪控制.

**注5** 如果3个通道的网络时延被表示为随机时延,记  $\bar{\tau}_{ba}$  为智能体之间时延最大值,  $\bar{\tau}_{ca}$  为智能体前向通道时延最大值,则可以得出新的闭环系统为

$$E(k+1) = \Upsilon E(k). \quad (27)$$

其中

$$E(k) = [E_p^T(k) \ E_v^T(k)]^T, \\ E_p(k) = [E_{p1}^T(k) \ E_{p2}^T(k) \ \dots \ E_{pN}^T(k)]^T, \\ E_{pi}(k) = [e_{pi}^T(k) \ e_{pi}^T(k-1) \ \dots \ e_{pi}^T(k - \bar{\tau}_{ba} - \bar{\tau}_{ca})]^T, \\ E_v(k) = [E_{v1}^T(k) \ E_{v2}^T(k) \ \dots \ E_{vN}^T(k)]^T, \\ E_{vi}(k) = [e_{vi}^T(k) \ e_{vi}^T(k-1) \ \dots \ e_{vi}^T(k - \bar{\tau}_{ba} - \bar{\tau}_{ca})]^T, \\ \Upsilon = \begin{bmatrix} I_{mN(\bar{\tau}_{ca} + \bar{\tau}_{ba} + 1)} & \sigma I_{mN(\bar{\tau}_{ca} + \bar{\tau}_{ba} + 1)} \\ \bar{h}_1 & \bar{h}_2 \end{bmatrix},$$

矩阵  $\bar{h}_1$  和  $\bar{h}_2$  的具体形式在此省略. 值得说明的是,此闭环系统可以利用类似文献[18]的方法进行分析.

### 4 仿真实验

本节通过两个仿真实例来验证所提出方法的可行性和优越性,两个实例的有向通信拓扑如图2所示. 跟随者的初始位置和速度,以及虚拟主智能体的初始位置均为  $-10 \sim 10$  之间的随机数,所有智能体的控制预测器初始状态为0,虚拟主智能体的速度选取为  $v_r = [-1, -1]^T$ . 采样间隔为  $\sigma = 0.05$  s.

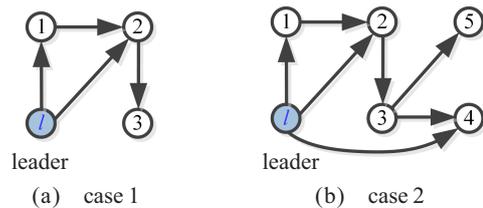


图2 通信拓扑

**例1** 考虑3类通道的时延均为定常时延,参数选取为  $\tau_{sc} = 3, \tau_{ba} = 2, \tau_{ca} = 3$ . 依据定理1选择控制参数  $\lambda_1 = 0.9167, \lambda_2 = 0.3846, \varphi_1 = 1.8269, \varphi_2 =$

2.925 5. 3个跟随者与主智能体的期望位置偏置如下:

$$\begin{cases} \delta_{p1}(k) = \sqrt{2}[-5 - \sin(0.5k), 1 + \sin(0.5k)]^T, \\ \delta_{p2}(k) = \sqrt{2}[1 + \sin(0.5k), -5 - \sin(0.5k)]^T, \\ \delta_{p3}(k) = [-4\sqrt{2}, -4\sqrt{2}]^T. \end{cases}$$

如图3所示,  $t = 20\text{ s}$ 、 $t = 35\text{ s}$ 和 $t = 50\text{ s}$ 时刻智能体的坐标点用黑色虚线连接起来,说明编队形状随时间是不断变化的.

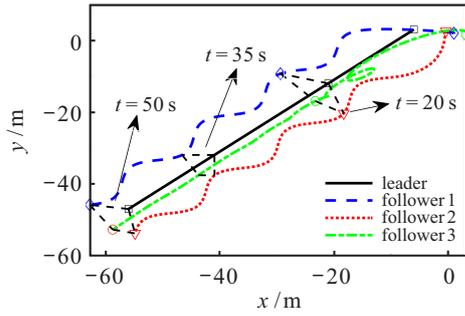
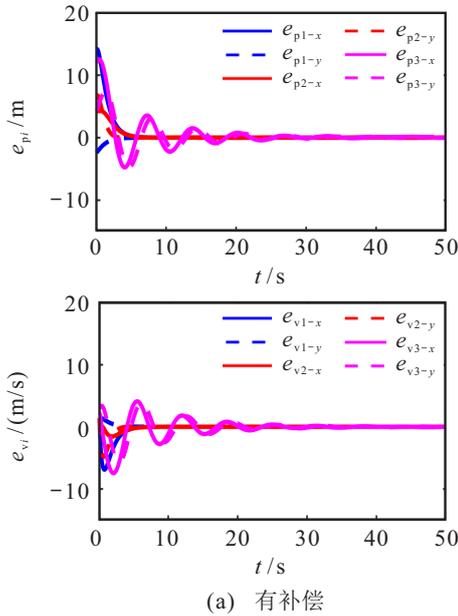


图3 多智能体运动轨迹

图4(a)给出了3个跟随者的位置和速度跟踪误差在 $x$ 和 $y$ 方向上的时间响应.可以看出,经过振荡后

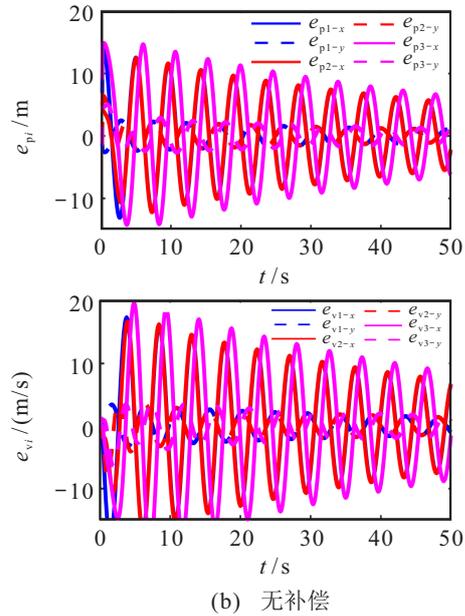


(a) 有补偿

渐近趋近于0. 作为对比,选用如下不包含反馈通道网络时延补偿的编队控制协议:

$$\begin{aligned} u_i^*(k) = & \lambda_1 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(e_{pj}(k - \tau_{ba+sc}) - e_{pi}(k - \tau_{ba+sc})) + \\ & \lambda_2 \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(e_{vj}(k - \tau_{ba+sc}) - e_{vi}(k - \tau_{ba+sc})) - \\ & s_i(\varphi_1 e_{pi}(k - \tau_{sc}) + \varphi_2 e_{vi}(k - \tau_{sc})) + \\ & \frac{\delta_{vi}(k + \tau_{ca} + 1) - \delta_{vi}(k + \tau_{ca})}{\sigma}. \end{aligned} \quad (28)$$

在图4(b)中,由于反馈通道的网络时延没有得到补偿,位置和速度跟踪误差的收敛速度较慢.对比图4的(a)和(b)可知,由于编队协议(6)利用了预测值而非滞后的实际值,在同样的控制器参数作用下,图4(a)的动态性能更好.进而,选取一个更大的 $\tau_{sc}$ ,实验结果如图5所示.可以看出,在没有反馈通道补偿时系统变得不稳定.综上所述,本文所提出的方法可以有效消除反馈通道时延的不利影响.



(b) 无补偿

图4 编队跟踪误差(有/无补偿,  $\tau_{sc} = 3$ )

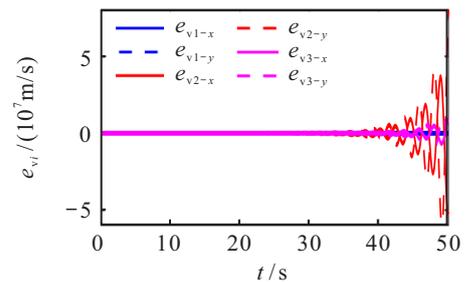
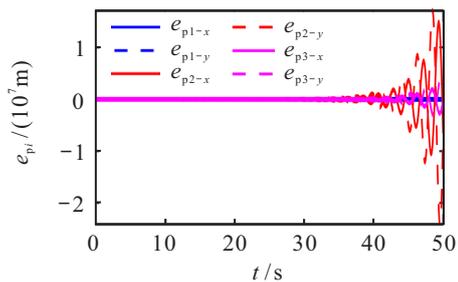


图5 编队跟踪误差(无补偿,  $\tau_{sc} = 5$ )

**例2** 考虑3类通道时延均为时变时延, 即  $\tau_{sc} \in [0, 3], \tau_{ba} \in [0, 2], \tau_{ca} \in [0, 3]$ . 控制协议参数和智能体1~智能3的期望位置偏置同例1. 跟随者智能体4和5的期望位置偏置分别为  $\delta_{p4}(k) = [0, 0]^T$  和  $\delta_{p5}(k) = [4\sqrt{2}, 4\sqrt{2}]^T$ . 图6中的(a)和(b)分别为有无

反馈通道时延补偿时的编队位置和速度跟踪误差曲线. 结果表明, 在随机时延和复杂通信拓扑下, 本文所提出的方法仍然适用. 通过对比图4(a)和图6(a)可知, 由于智能体数量的增多, 多智能体系统通过协调实现了时变编队跟踪控制的时间变长.

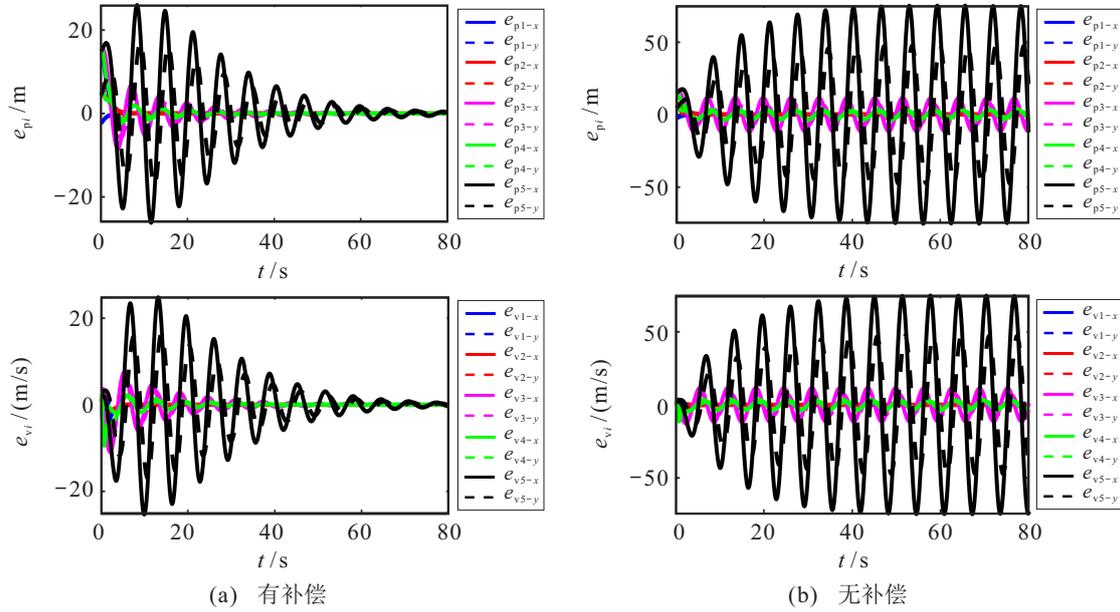


图6 编队跟踪误差(随机时延, 有/无补偿)

### 5 结论

本文针对一类复杂通信约束下的二阶离散网络化多智能体系统, 同时考虑反馈通道、前向通道以及智能体之间通道的网络时延, 设计了综合网络化预测控制方法和时滞系统方法的时变编队控制协议, 并通过构造Lyapunov函数得出了实现时变编队零稳态跟踪误差的充分条件. 最后, 通过对比仿真实例验证了所提出方法的优越性. 需要说明的是, 本文考虑了模型相对简单的二阶离散网络化多智能体系统, 且仅对反馈通道的网络时延进行了主动补偿. 鉴于此, 针对3类通道的随机网络时延, 为高阶异构网络化多智能体系统设计保守性更小的编队预测控制协议将是本研究的后续工作.

### 参考文献(References)

[1] 崔云芳, 范家璐. 丢包扰动环境下基于强化学习的最优输出调节[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 403-412. (Cui Y F, Fan J L. Optimal output regulation based on reinforcement learning for systems with dropouts and disturbances[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 403-412.)

[2] Zheng C B, Pang Z H, Wang J X, et al. Null-space-based time-varying formation control of uncertain nonlinear second-order multiagent systems with collision

avoidance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10476-10485.

[3] 张天勇, 刘国平. 网络化多智能体主从式预测编队控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(10): 1864-1870. (Zhang T Y, Liu G P. Master-slave predictive formation control of networked multi-agents[J]. Control and Decision, 2017, 32(10): 1864-1870.)

[4] 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.)

[5] Zheng C B, Pang Z H, Wang J X, et al. Time-varying formation prescribed performance control with collision avoidance for multi-agent systems subject to mismatched disturbances[J]. Information Sciences, 2023, 633: 517-530.

[6] Zhang X M, Han Q L, Yu X H. Survey on recent advances in networked control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1740-1752.

[7] Pang Z H, Luo W C, Liu G P, et al. Observer-based incremental predictive control of networked multi-agent systems with random delays and packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(1): 426-430.

- [8] Yang H J, Ju S, Xia Y Q, et al. Predictive cloud control for networked multiagent systems with quantized signals under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 1345-1353.
- [9] Pang Z H, Zheng C B, Li C, et al. Cloud-based time-varying formation predictive control of multi-agent systems with random communication constraints and quantized signals[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(3): 1282-1286.
- [10] Jiang W, Liu K, Charalambous T. Multi-agent consensus with heterogeneous time-varying input and communication delays in digraphs[J]. *Automatica*, 2022, 135: 109950.
- [11] Tan H R, Miao Z Q, Wang Y N, et al. Data-driven distributed coordinated control for cloud-based model-free multiagent systems with communication constraints[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(9): 3187-3198.
- [12] Yin X X, Gao Z W, Yue D, et al. Cloud-based event-triggered predictive control for heterogeneous NMASs under both DoS attacks and transmission delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(12): 7482-7493.
- [13] 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.
- [14] Chen D L, Liu G P. A networked predictive controller for linear multi-agent systems with communication time delays[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(14): 9442-9466.
- [15] Wang M Z, Zhao C C, Xia J H, et al. Periodic event-triggered robust distributed model predictive control for multiagent systems with input and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(11): 11216-11228.
- [16] 夏元清, 谢超, 高寒, 等. 天空地一体化网络环境下多运动体系统跨域协同控制与智能决策[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1176-1199.  
(Xia Y Q, Xie C, Gao H, et al. Cross-domain cooperative control and intelligent decision-making of multi-dynamic agents in space-air-ground integrated network environment[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1176-1199.)
- [17] 宗小峰, 李韬, 张纪峰. 带有时延和乘性量测噪声的离散时间多自主体系统的趋同控制[J]. *中国科学: 数学*, 2016, 46(10): 1617-1636.  
(Zong X F, Li T, Zhang J F. Consensus control of discrete-time multi-agent systems with time-delays and multiplicative measurement noises[J]. *Scientia Sinica: Mathematica*, 2016, 46(10): 1617-1636.)
- [18] Pang Z H, Xia C G, Zhai W F, et al. Networked active fault-tolerant predictive control for systems with random communication constraints and actuator/sensor faults[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(4): 2166-2170.

### 作者简介

郑长兵(1988—), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 从事网络化控制、多智能体集群协同控制等研究, E-mail: cbzheng@mail.ncut.edu.cn;

庞中华(1981—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事网络化控制、数据驱动控制、安全信息物理系统等研究, E-mail: zhonghua.pang@ia.ac.cn;

董燕飞(1978—), 女, 教授, 硕士, 硕士生导师, 从事鲁棒控制、智能控制等研究, E-mail: 873184572@qq.com;

司文杰(1985—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事非线性控制、自适应神经网络控制等研究, E-mail: siwenjie2008@163.com.