

第六届 全国航空航天类专业 本科毕业设计成果交流会

题目：复复杂约束下多智能体系统快速
协同控制研究

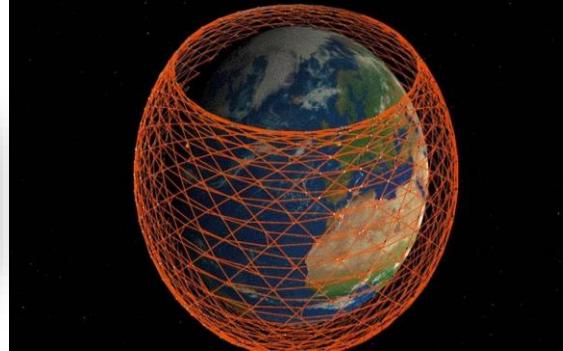
编号：080507

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

1.1 研究背景：集群协同控制技术应用广泛

国防军事



星链计划



空军集群



海军编队

社会民生



智慧交通



低空经济



智能仓储

➤ 协同控制技术与国家安全、社会发展、人民幸福息息相关！

1.1 研究背景：编队是集群协同的重要研究方向

➤ 具体军事任务场景



协同监视



目标追踪

➤ 编队在协同监视、目标追踪等具体任务场景有重要应用

1.2 研究意义：复杂约束集群快速协同方案设计与优化

- 集群任务的重要性：突破个体性能瓶颈，大幅度**提高执行上限**
- 快速协同的重要性：协同所需时间直接影响到集群任务的**成功率和完成度**
- 适应复杂约束的重要性：现代化约束是集群任务**直面的大环境**
- 现代化控制技术的重要性：为新型控制算法提供新的**思路与方法**

➤ 面向多智能体系统（无人机/机器人等）在复杂约束下的快速协同控制问题，是顺应集群协同领域的研究趋势，具有重要的科学意义，有不少工作有待开展！

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

2.1.1 研究问题分析

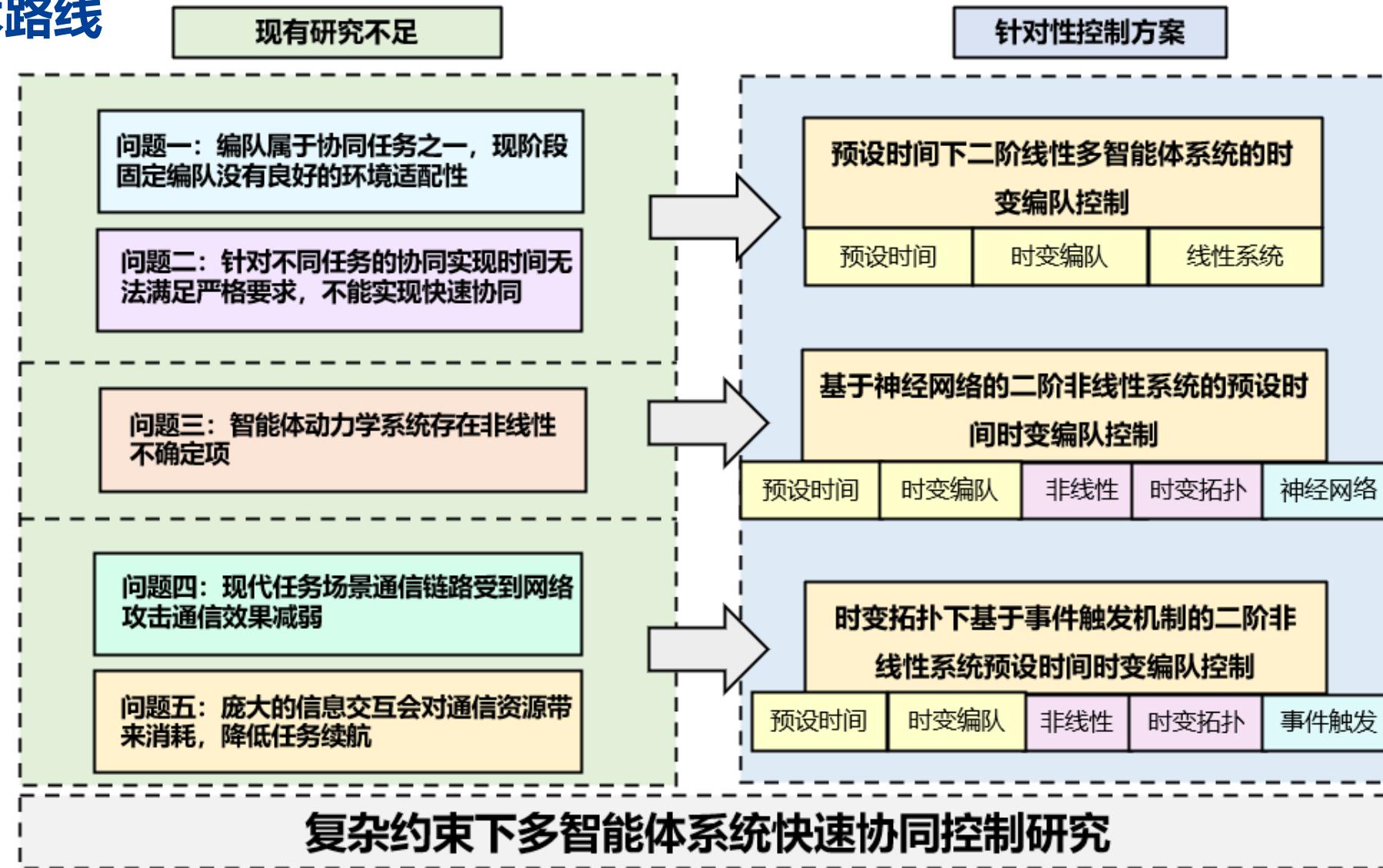
研究目的：在收敛时间、非线性、通信链路受限等复杂约束下多智能体系统实现满足任务要求的快速协同

为实现核心研究目标，本研究还需解决以下关键问题：

- 问题一：编队属于协同任务之一，现阶段固定编队没有良好的**环境适配性**；
- 问题二：任务的协同形成时间无法满足严格要求，**不能实现快速协同**；
- 问题三：智能体动力学系统存在**非线性不确定项**；
- 问题四：现代任务场景通信链路受到网络攻击**通信效果减弱**；
- 问题五：庞大的信息交互会对**通信资源**带来消耗，降低任务续航。

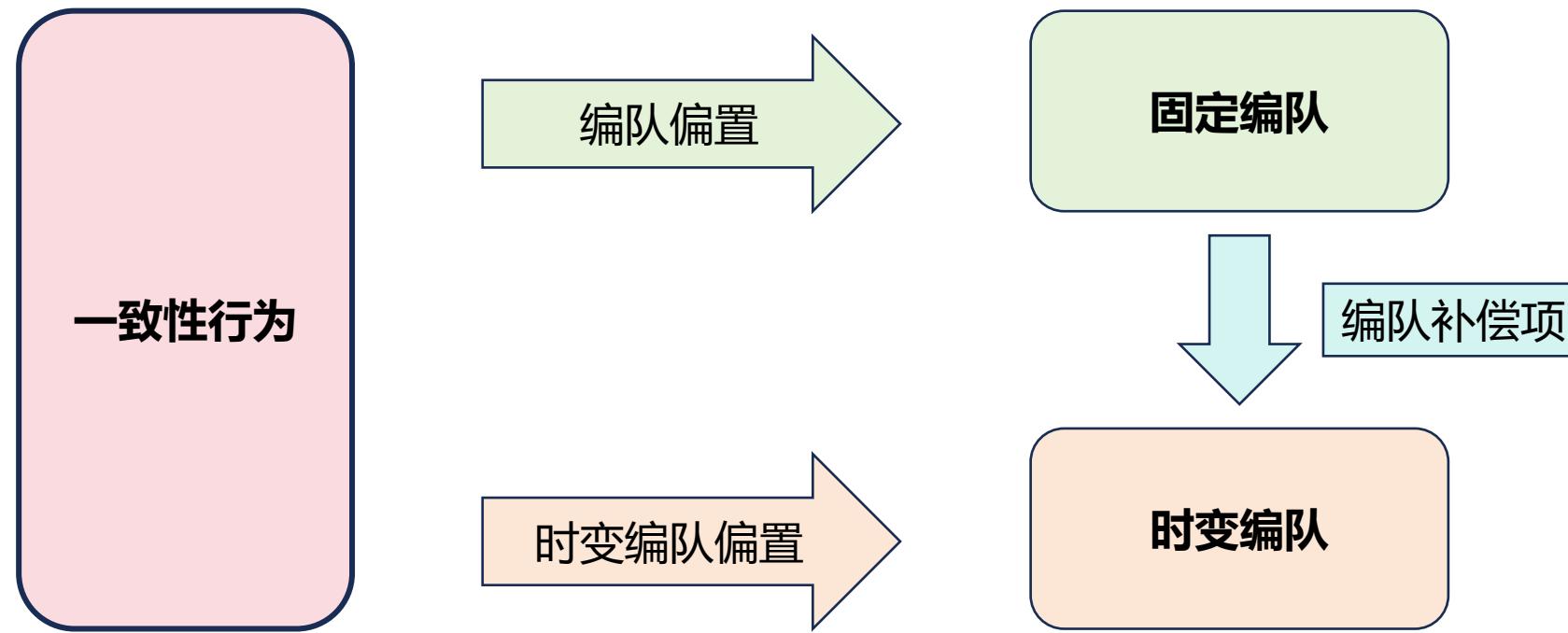
三、内容设计与实验验证

2.1.2 技术路线



2.2.1 研究方法：多智能体系统时变编队方法

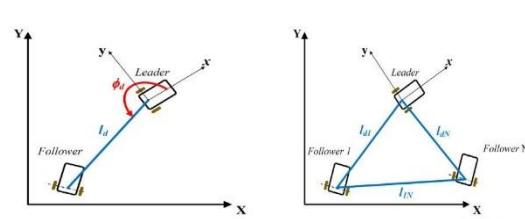
- 问题一：编队属于协同任务之一，现阶段固定编队没有良好的环境适配性



- 时变编队能够根据任务需求来变换编队队形，相较于固定编队具有良好的环境适配性，是解决问题一的可行方法

2.2.1 研究方法：多智能体系统时变编队方法

领导跟随法



方法

设定一个领导者，其余跟随行动

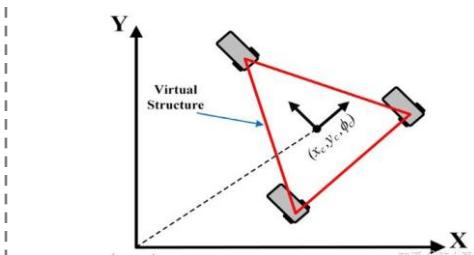
优点

- 便于可视化进行理解
- 被控量就是状态量

缺点

- 需要领导者动态明晰

虚拟结构法



方法

预先设定某一队形，将其视为一个刚体，随后按照既定轨迹运动

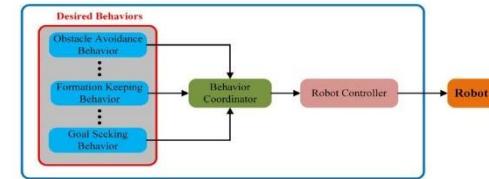
优点

- 实施简单

缺点

- 需要集中式架构，通信负荷较大
- 频繁变换的场景不适用

基于行为法



方法

针对特定行为设计特定的控制函数

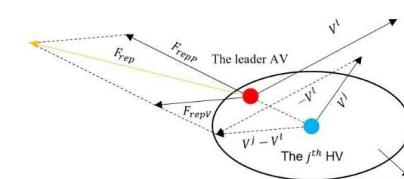
优点

- 采用分布式架构；对通信要求较低

缺点

- 难以进行稳定性与鲁棒性分析
- 无法保证编队形状收敛

人工势场法



方法

构建不同的引力函数，根据引力与斥力的和来判断智能体的运动倾向

优点

- 易于处理避障问题
- 实时性高

缺点

- 合适的势场函数设计困难
- 结果常为局部最优

➤ 编队控制属于协同控制的重要研究领域，多智能体系统的编队形成方法很多，且各有优势，本研究采用领导跟随法实现多智能体系统的时变编队跟踪控制。

2.2.2 研究方法：多智能体系统快速协同方法

- 问题二：针对不同任务的协同实现时间无法满足严格要求，不能实现快速协同

□ 有限时间收敛理论

可以在有限时间内追求收敛，但对稳定时间的估计**依赖于系统的初始条件**，当多智能体系统的**初始状态信息未知或先验不可用**时，会限制该理论在有限时间协作控制中的**应用范围**。

□ 固定时间收敛理论

固定时间稳定性提供了**与初始条件无关**的保证收敛（稳定）时间。因此，多智能体系统的定时协同控制研究已成为热点。

□ 预设时间收敛理论

上述理论最终收敛时间受收敛参数的限制，无法任意给定，在智能体作动器性能范围内，预设时间理论可以满足设计者**任意选择（预设）的正常数**的需求。



多弹协同打击（同时到达目标点）



多机协同编队（固定时间完成编队）

- 这三类收敛时间理论均属于快速收敛的范畴，而**有限时间**无法确认收敛时间上界，**固定时间**的收敛时间上界过于保守，因此本研究采用**预设时间**收敛方式来实现多智能体系统的快速协同。

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

3.1 第三章：二阶线性多智能体系统预设时间时变编队控制研究

□ 基于预设时间的时变编队跟踪研究

➤ 问题建模

■ 被控对象：二阶线性领导跟随系统，存在N个智能体

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases}, i = 1, 2 \dots N \quad \begin{cases} \dot{x}_0(t) = v_0(t) \\ \dot{v}_0(t) = u_0(t) \end{cases}$$

■ 控制目标：实现在预设时间内到达时变编队队形的同时保持对领导者的位姿和速度状态跟踪。

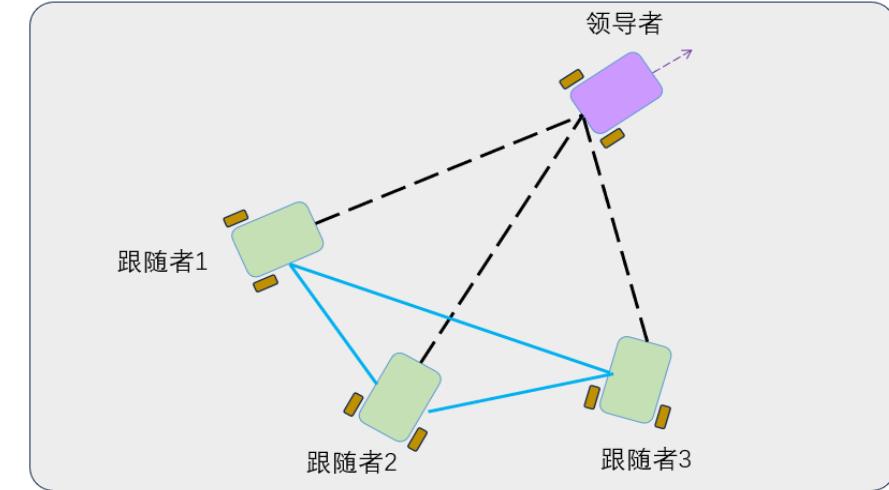


图1 领导跟随法示意图

➤ 控制输入设计

■ 预设时间调节函数：通过引入一个连续的时变函数，该函数随着时间的推移，取值变大。

$$\psi(t, t_0) = \begin{cases} \frac{\dot{\eta}(t)}{\eta(t)}, & t_0 \leq t < t_0 + T_u, \\ \frac{\rho}{T_u}, & t \geq t_0 + T_u. \end{cases} \quad \eta(t, t_0) = \frac{T_u}{\rho - 1} \left[\left(\frac{T_u}{T_u + t_0 - t} \right)^{\rho - 1} - 1 \right]. \quad (1)$$

3.1.1 基于预设时间的时变编队跟踪控制协议设计

■ 预设时间时变编队控制器设计

$$u_i = -k_1 \psi^2(t) \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} w_{ij} (x_i - o_i - (x_j - o_j)) + b_i (x_i - x_0 - o_i) \right) + u_0 \\ - k_2 \psi(t, t_0) \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} w_{ij} (v_i - \dot{o}_i - (v_j - \dot{o}_j)) + b_i (v_i - v_0 - \dot{o}_i) \right) + \boxed{\ddot{o}_i} \quad (2)$$

补偿项

其中 k_1 和 k_2 是控制输入参数, o_i 和 \dot{o}_i 以及 \ddot{o}_i 分别表示跟随者与领导者之间的位置状态偏置, 速度偏置和加速度偏置

分布式控制中, 领导者只与部分跟随者有信息交互

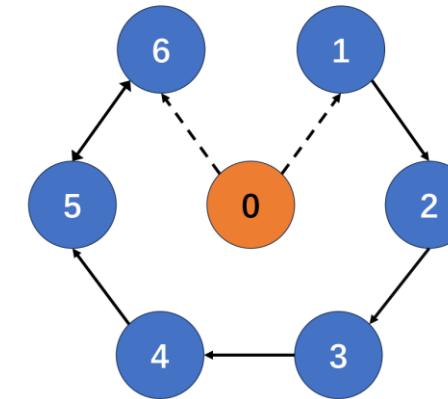


图2：领导者—跟随者系统通信拓扑图

➤ 收敛性分析

■ 李雅普诺夫稳定性定理：

设计李雅普诺夫函数如下

$$V = \frac{1}{2} Y^T (\Phi \otimes I_r) Y \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} k_1 \tilde{x}^T (Q \otimes I_r) \tilde{x} + \frac{1}{2} \frac{k_1}{k_2} \tilde{x}^T (\Xi \otimes I_V) \tilde{v} + \frac{1}{2} \frac{k_1}{k_2} \tilde{v}^T (\Xi \otimes I_r) \tilde{x} + \frac{1}{2} \tilde{v}^T (\Xi \otimes I_r) \tilde{v}$$

■ 定义辅助变量：

$$\begin{cases} \bar{x}_i = x_i - x_0 - o_i, \\ \bar{v}_i = v_i - v_0 - \dot{o}_i, \\ \tilde{x}_i = \psi(t, t_0) \bar{x}_i, \\ \tilde{v}_i = \bar{v}_i. \end{cases}$$

3.1.2 实验验证

➤ 仿真结果分析：设置的预设时间为3.01s

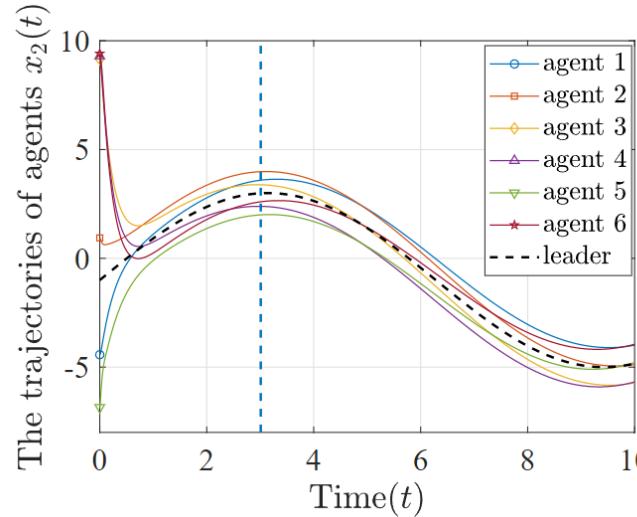


图3 智能体的位置状态收敛曲线

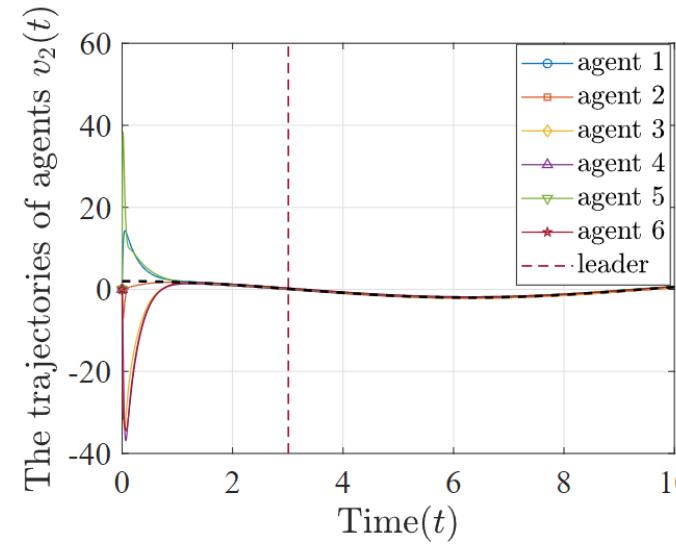


图4 智能体速度状态的收敛曲线

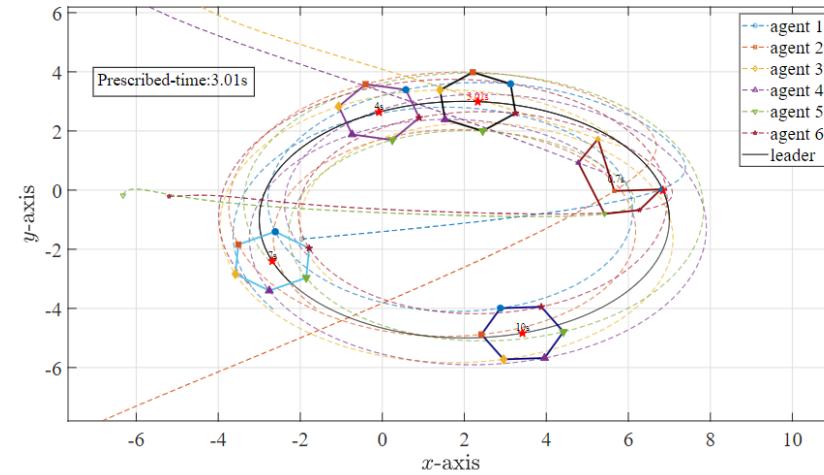


图5 不同时刻下多智能体所在位置坐标图

- 图3和图4展示了多智能体系统中所有智能体的真实状态轨迹，所有跟随者智能体最终在预设时间3.01s内收敛到与领导者状态的有界范围内，与常规编队的分钟级时耗相比，**大幅提升了协同速度**。
- 图5为二维坐标系下不同时刻下多智能体所在位置坐标图，展示了系统编队形成的全过程。

3.2.0 问题分析

➤ 问题三：智能体动力学系统存在非线性不确定项

➤ 利普希茨条件 (Lipschitz condition)

$$||f(t, x) - f(t, y)|| \leq L ||x - y||$$

- 区间的选择是关键性因素
- 区间选择不易
- 线性化近似效果不佳

➤ 神经网络拟合

$$\hat{f}(x) = W^\top \phi(x) + \varepsilon$$

- 具有普适性
- 逼近误差数值小
- 实时精确拟合

➤ 常规解决非线性项的方法-利普希茨条件不易满足复杂约束条件，因此本研究采用神经网络对动力学中存在的非线性项进行拟合。

3.2 第四章：基于神经网络的二阶非线性系统预设时间时变编队控制

➤ 问题建模

■ 被控对象：二阶非线性领导跟随系统，存在N个智能体

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) + g_i(x_i, t). \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_0(t) = v_0(t) \\ \dot{v}_0(t) = u_0(t) \end{cases}$$

■ 控制目标：神经网络拟合非线性项，实现预设时间时变编队跟踪

➤ 神经网络拟合非线性项

■ 神经网络架构：由基函数和权重乘积加上逼近误差组成

$$g_i(x, t) = \underline{\phi}_{g_i}^T(x, t) \underline{\theta}_{g_i} + e_{g_i}$$

■ 神经网络拟合误差：

$$\begin{cases} \tilde{g}_i(x, t) \triangleq \phi_{g_i}^T(x, t) \tilde{\theta}_{g_i} \\ \tilde{\theta}_{g_i} = \hat{\theta}_{g_i} - \theta_{g_i} \end{cases} \quad (4)$$

神经网络可以将非线性的不确定项拟合为线性

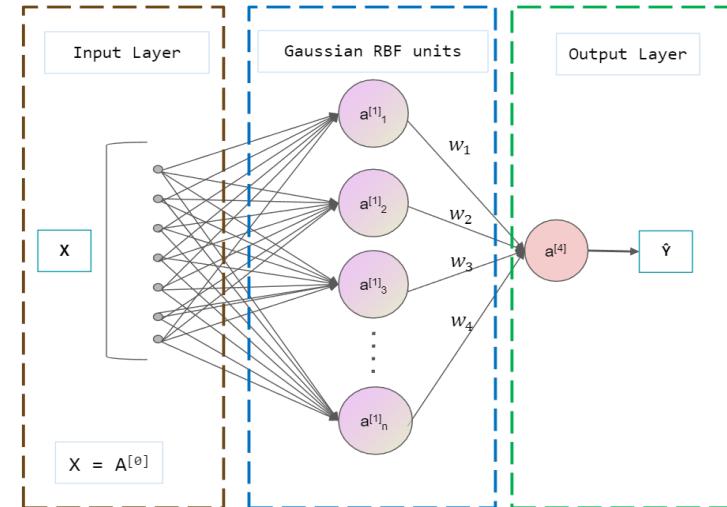


图6 径向基神经网络内部结构图

■ 基函数：高斯基函数

$$\phi_{g_i, m}(x, t) = e^{-\frac{(x - \mu_{g_i, m})^2 + (t - \mu_{g_i, m})^2}{\eta_{g_i, m}^2}}$$

$(\mu_{*,m})$ 是感受野的中心， $(\eta_{*,m})$ 是高斯函数的宽度

3.2.1 基于神经网络的非线性系统控制研究

➤ 神经网络控制器设计

■ 控制器:

$$u_i = -k_1 \psi^2(t, t_0) \xi_i^x - k_2 \psi(t, t_0) \xi_i^v + u_0 + \ddot{o}_i - \phi_{g_i}^T(x_i, t) \hat{\theta}_{g_i} \quad (5)$$

■ 神经网络更新率:

$$\dot{\hat{\theta}}_{gi} = k_g \Xi_i(t) \left[\frac{k_1}{k_2} \psi(t, t_0) (x_i - x_0 - o_i) + v_i - v_0 - \dot{o}_i \right] \phi_{gi}(x_i, t) - k \psi(t, t_0) \hat{\theta}_{gi}$$

■ 辅助项: 编队轨迹和速度跟踪误差

$$\begin{cases} \xi_i^x = \sum_{j=1}^n w_{ij}^d ((x_i - o_i) - (x_j - o_j)) + b_{i0}^d (x_i - x_0 - o_i) \\ \xi_i^v = \sum_{j=1}^n w_{ij}^d ((v_i - \dot{o}_i) - (v_j - \dot{o}_j)) + b_{i0}^d (v_i - v_0 - \dot{o}_i) \end{cases}$$

➤ 收敛性分析

■ 李雅普诺夫稳定性:

设计李雅普诺夫函数如下

$$\begin{cases} V_1(t) = \frac{1}{2} Y^T (\Phi \otimes I_r) Y, \\ V_2(t) = \frac{1}{2k_g} \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \tilde{\theta}_i. \end{cases} \quad (6)$$

神经网络权重误差

■ 控制输入有界:

$$\|\tilde{x}\|^2 + \|\tilde{v}\|^2 \leq \frac{1}{\sigma_2} V(t) + \sigma_3$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{1}{\sigma_2} V(t_0) e^{\frac{-2C^*T_u}{\rho-1} \left(\left(\frac{T_u}{T_u + t_0 - t} \right)^{\rho-1} - 1 \right)} + \frac{K^*}{2\sigma_2 C^*} + \sigma_3 \\ &= \frac{1}{\sigma_2} V(t_0) e^{\frac{-2C^*T_u}{\rho-1} \left(\left(\frac{T_u}{T_u + t_0 - t} \right)^{\rho-1} - 1 \right)} + \sigma_4 \end{aligned}$$

李雅普诺夫函数的初始状态有界

常数

三、内容设计与实验验证

3.2.2 仿真实验验证

➤ 仿真结果分析：8.01s

1. 神经网络拟合非线性项的同时实现了智能体在**预设时间内的编队形成并**对领导者进行跟踪。

2. 神经网络在编队形成之前就完成了对非线性项的拟合，拟合误差收敛到**接近零的值**；

3. 相对于线性系统，控制输入收敛的结果不是零，而是一个**很小的范围**，实际数值在范围内波动；

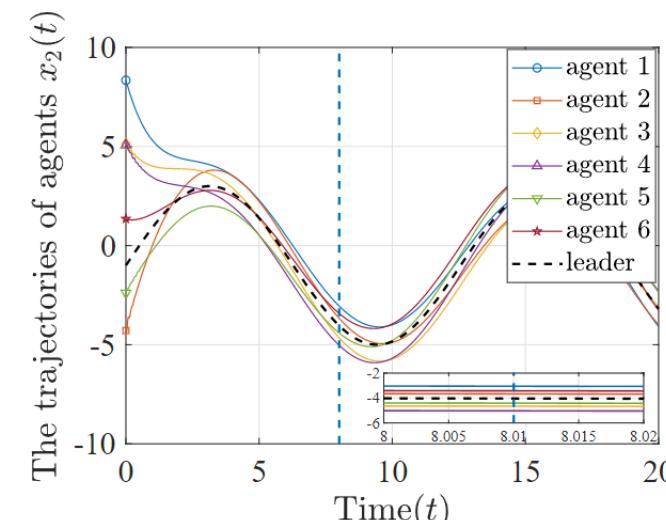


图7 位置状态图

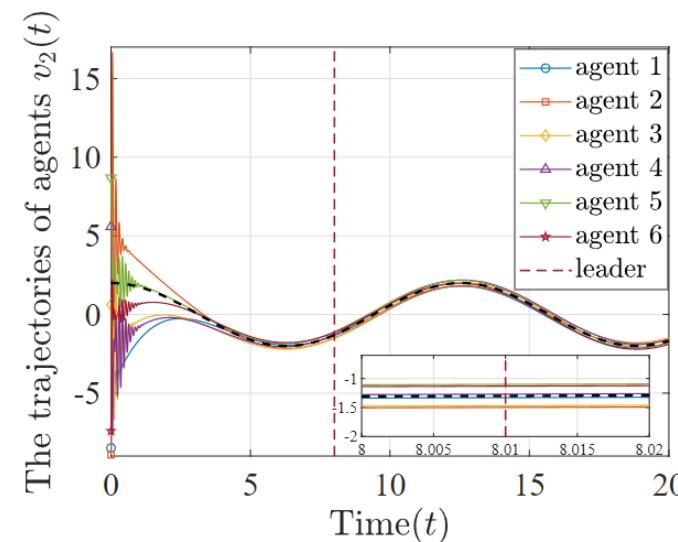


图8 速度状态图

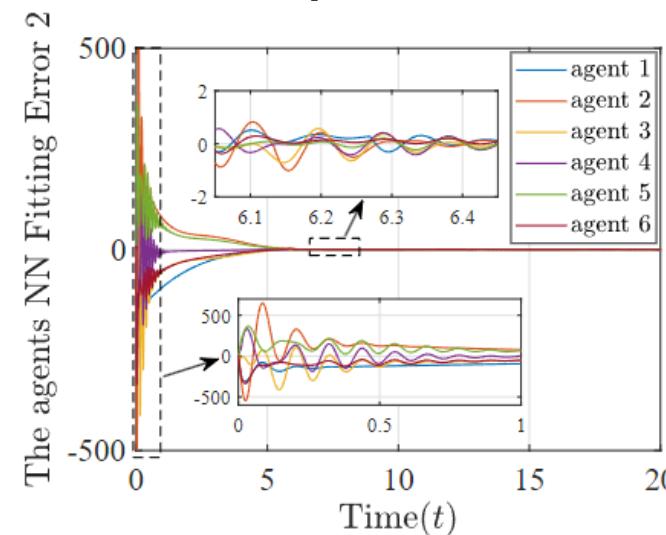


图9 神经网络拟合误差图

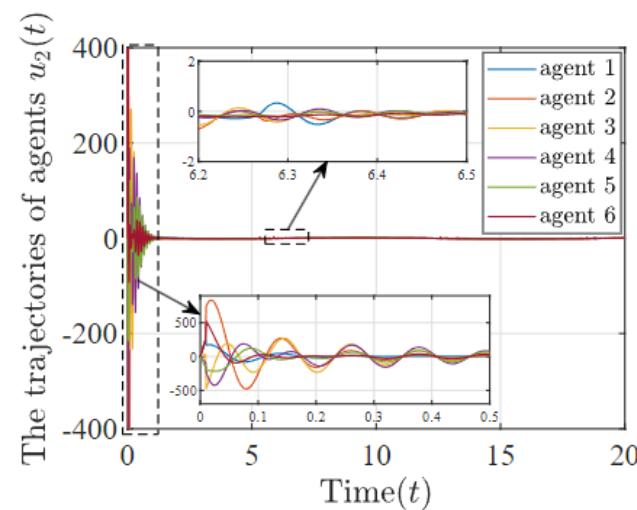
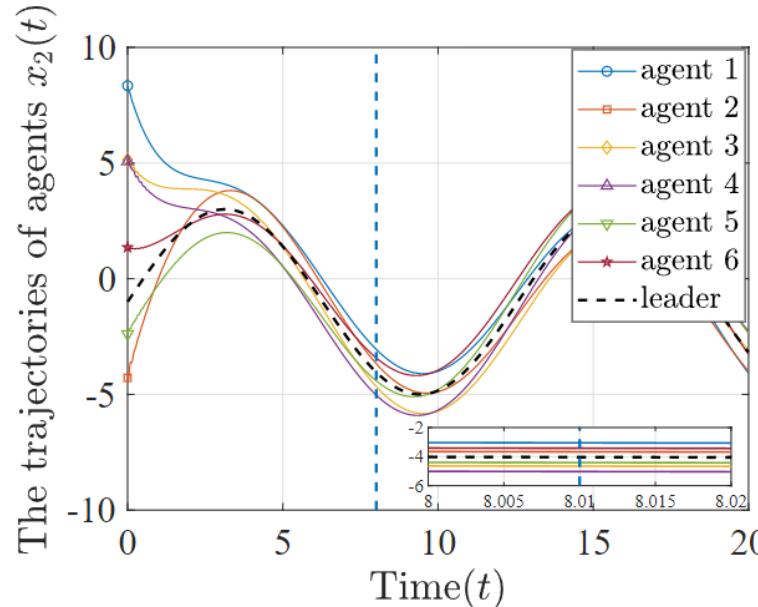


图10 控制输入图

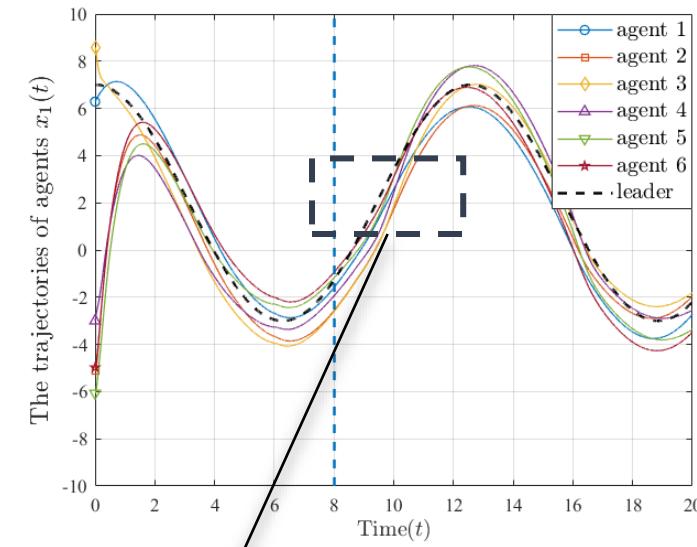
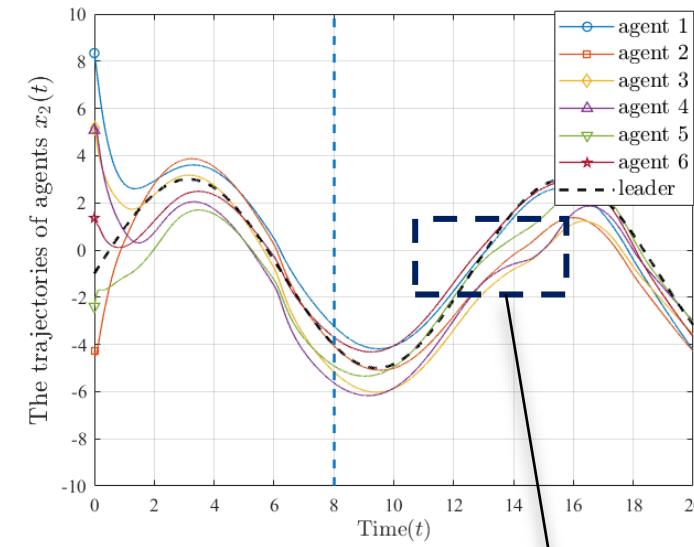
3.2.3 对比实验一：不同神经网络拟合效果

➤ 径向基神经网络



全局拟合效果很好

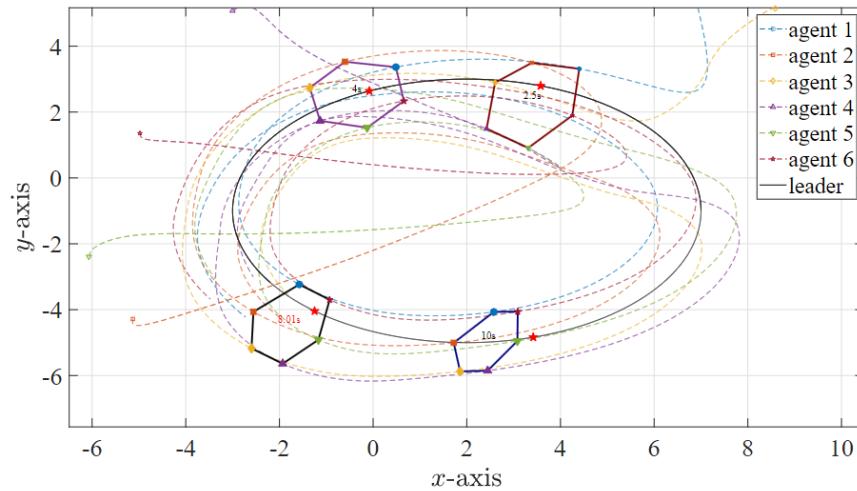
➤ 切比雪夫神经网络等其他神经网络



位置轨迹仿真图可以看出：存在拟合效果不好的地方

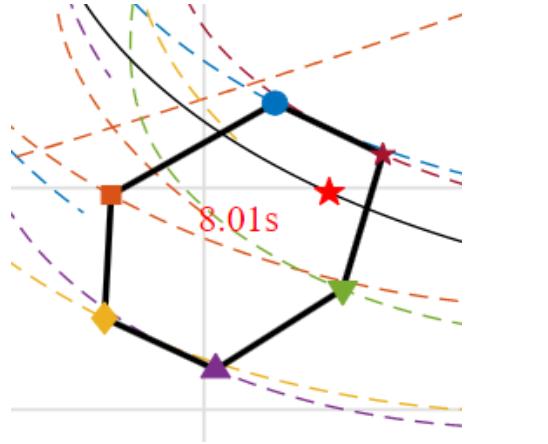
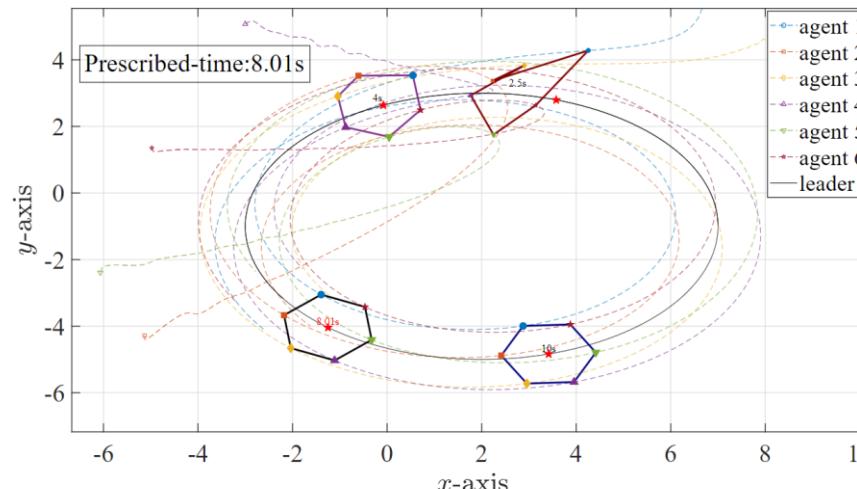
➤ 从不同神经网络的拟合效果对比图可以看出，径向基神经网络对非线性不确定项的全局拟合效果最好，这是本研究采用其作为拟合神经网络的原因。

3.2.3 对比实验二：有无神经网络编队效果

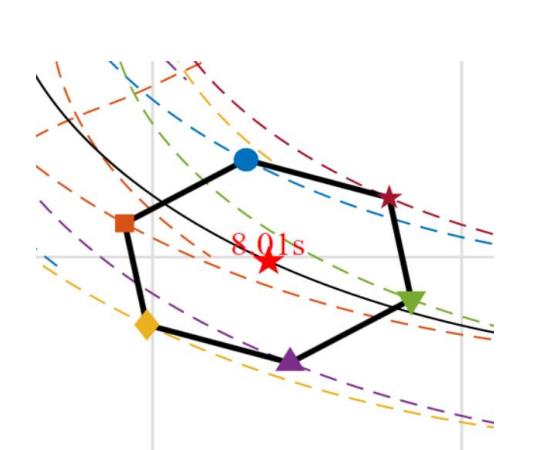


预设时间局部放大

叠加神经网络



队形状态奇
异，无法实
现编队



实现预设队形，
实时跟踪中心
位置领导者

3.3.0 问题分析

➤ 问题四：现代任务场景通信链路受到网络攻击通信效果减弱

22

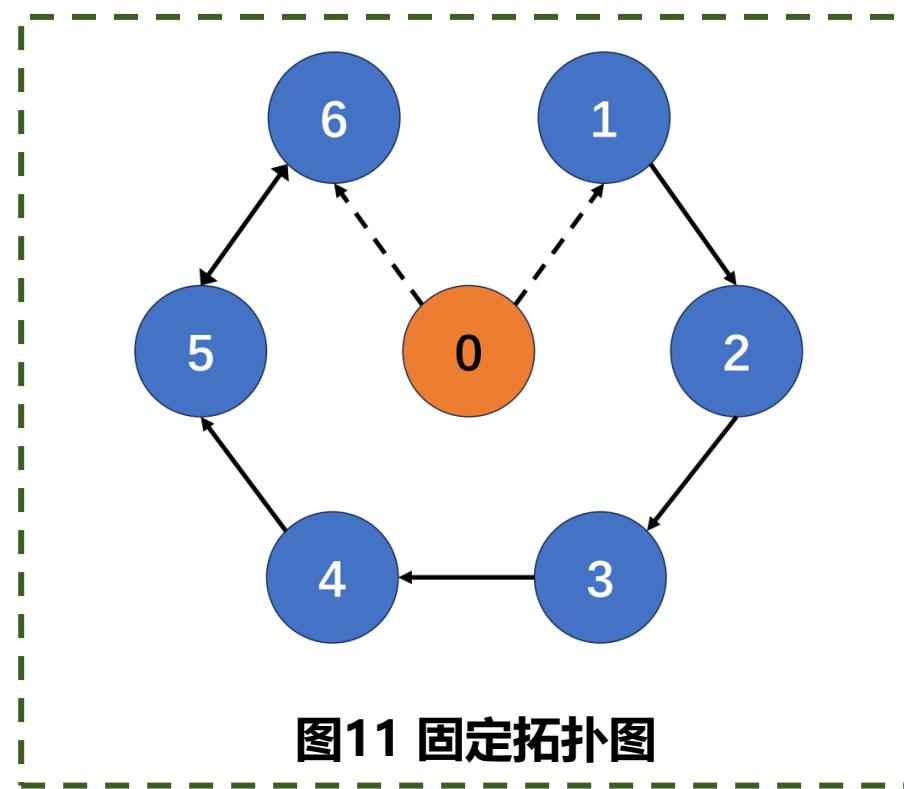


图11 固定拓扑图

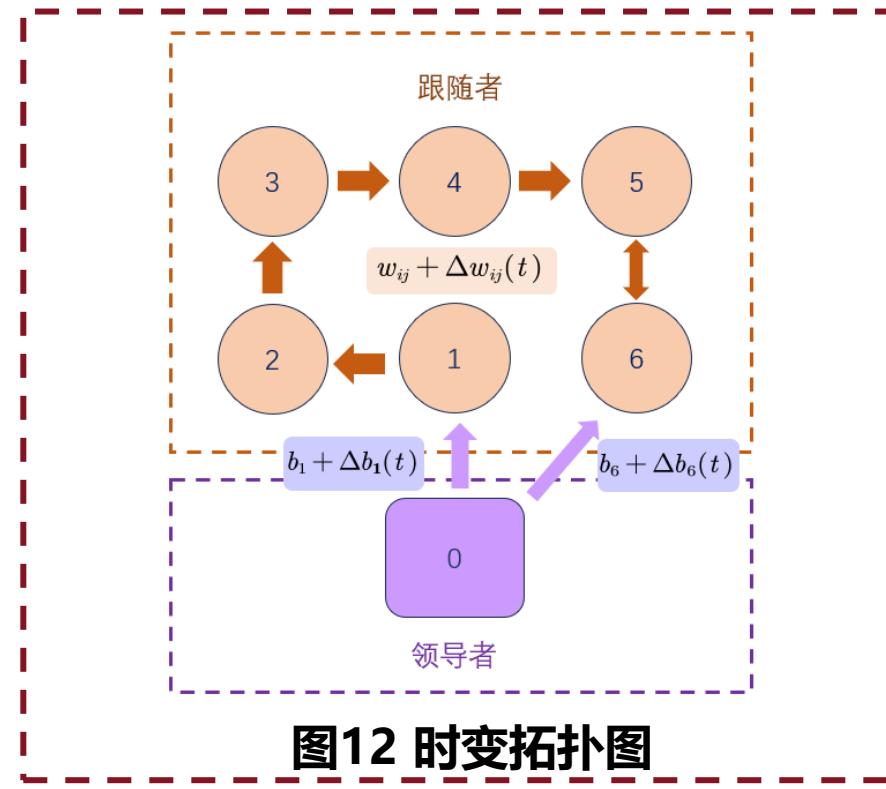
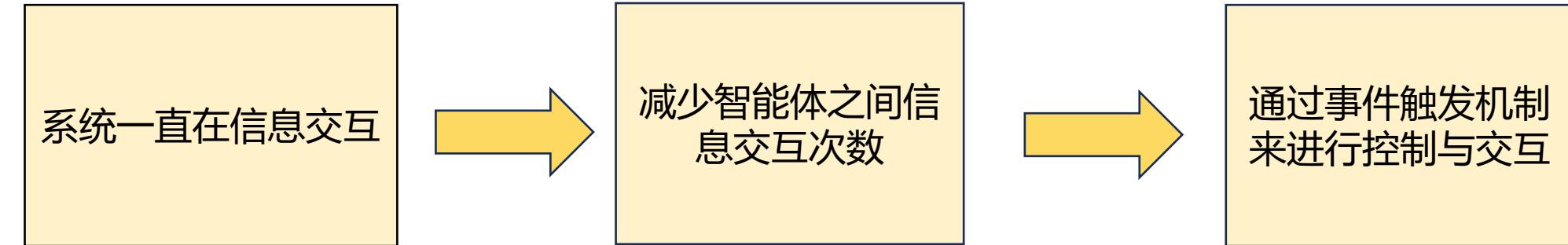


图12 时变拓扑图

- 在通信链路受到如Dos攻击等网络攻击时，系统的通信效果将会减弱甚至在一段时间内失去通信，需要对这种情况的通信链路拓扑的数学模型进行特别建模——时变拓扑。

3.3.0 问题分析

➤ 问题五：庞大的信息交互会对通信资源带来消耗，降低任务续航

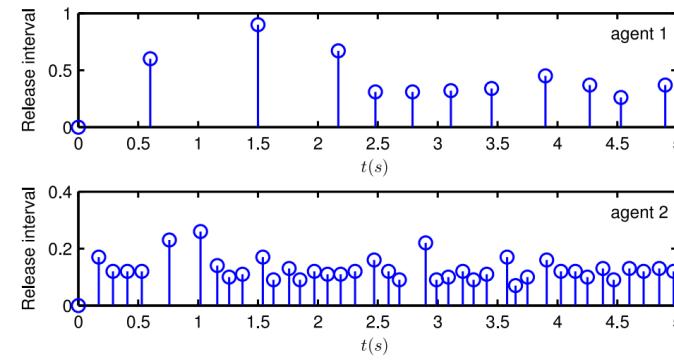


Why event-triggering

起源问题

-> 如何使用数字控制器控制连续时间系统？

- 数字控制器无法精确采样
- 具有非周期性采样的系统的稳定性



只要采样/控制频率大于某个阈值，则保证稳态误差保持小于某个阈值

效率↑

控制系统响应应该多快？ →
控制系统应该在什么时候响应？

- 事件触发下的协同控制为解决通信带宽和资源消耗问题提供了一种行之有效的方法，本研究通过在控制方案里面叠加事件触发机制，为大幅提升系统的续航能力。

3.3 第五章：时变拓扑下基于事件触发的二阶非线性系统预设时间时变编队控制

➤ 时变拓扑建模

■ 拓扑构成：初始拓扑+不确定偏差

$$\begin{cases} w_{ij}^d(t) = w_{ij} + \Delta w_{ij}(t) \\ b_{i0}^d(t) = b_{i0} + \Delta b_{i0}(t) \end{cases}$$

■ 产生影响：李雅普诺夫函数导数需要对中间矩阵求导

$$\dot{V}_1 = Y^T (\Phi \otimes I_r) \dot{Y} + \frac{1}{2} Y^T (\dot{\Phi} \otimes I_r) Y$$

➤ 事件触发函数设计

■ 触发规则： $t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid E(t) > 0\}, \quad k \in \mathbb{N}$

■ 触发函数： $E(t) = \|e(t)\| - \delta \|\zeta(t)\| \quad (7)$

■ 误差变量： $\begin{cases} \zeta(t) = k_1 \tilde{x}(t) + k_2 \tilde{v}(t) \\ e(t) = \zeta(t_k) - \zeta(t) \end{cases}$

基于触发机制的控制器只影响事件触发时刻的系统状态值

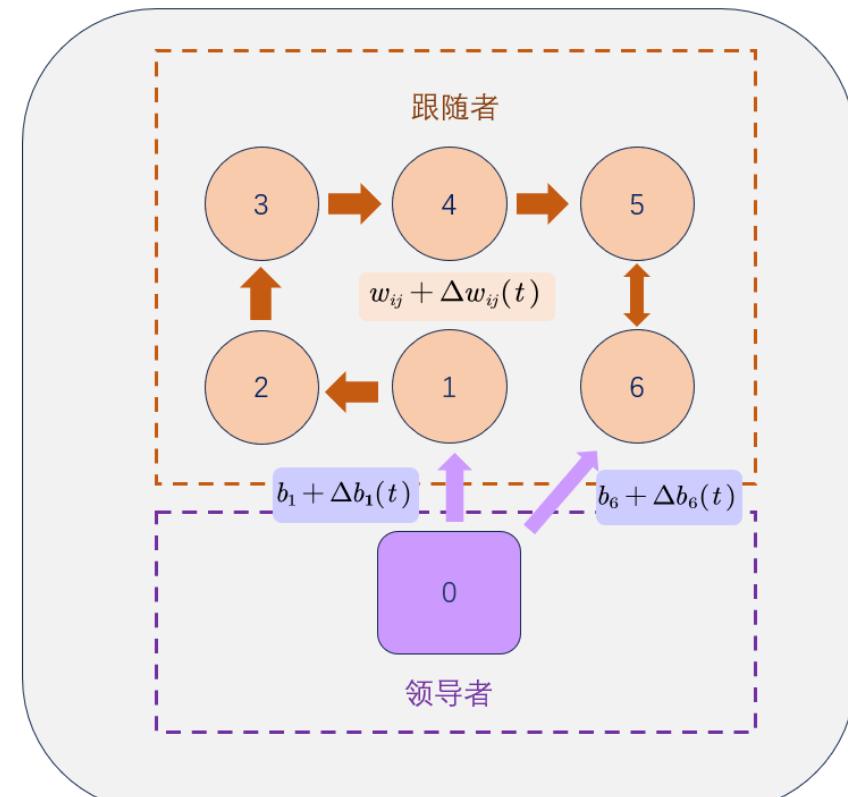


图13 链路受限时变拓扑图

3.3.1 控制方案设计

■ **事件触发控制器:** 只直接作用于事件触发时刻的智能体状态

$$u_i(t) = -k_1 \psi(t, t_0) \psi(t_k) \xi_i^x(t_k) - k_2 \psi(t_k) \xi_i^v(t_k) + u_0(t) + \ddot{o}_i(t) - \phi_{g_i}^T(x_i, t) \hat{\theta}_{g_i} \quad (8)$$

■ **触发函数转化:**

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{k_1}{2k_2}\tilde{x}^T + \frac{1}{2}\tilde{v}^T\right)(Q \otimes I_r)e \\ &= -\frac{k_1}{2k_2}\tilde{x}^T(Q \otimes I_r)e - \frac{1}{2}\tilde{v}^T(Q \otimes I_r)e \\ &\leq \frac{k_1}{2k_2}\lambda_{max}(Q)\left(\frac{1}{2}\tilde{x}^T\tilde{x} + \frac{1}{2}e^Te\right) + \frac{1}{2}\lambda_{max}(Q)\left(\frac{1}{2}\tilde{v}^T\tilde{v} + \frac{1}{2}e^Te\right) \\ &\leq \frac{k_1}{4k_2}\lambda_{max}(Q)\tilde{x}^T\tilde{x} + \frac{1}{4}\lambda_{max}(Q)\tilde{v}^T\tilde{v} + \frac{k_1+k_2}{4k_2}\lambda_{max}(Q)e^Te \\ &\leq \frac{k_1}{4k_2}\lambda_{max}(Q)\tilde{x}^T\tilde{x} + \frac{1}{4}\lambda_{max}(Q)\tilde{v}^T\tilde{v} + \frac{\delta k_1(k_1+k_2)^2}{4k_2}\lambda_{max}(Q)\tilde{x}^T\tilde{x} + \frac{\delta(k_1+k_2)^2}{4}\lambda_{max}(Q)\tilde{v}^T\tilde{v} \\ &\leq \frac{k_1[1+\delta(k_1+k_2)^2]}{4k_2}\lambda_{max}(Q)\tilde{x}^T\tilde{x} + \frac{1+\delta(k_1+k_2)^2}{4}\lambda_{max}(Q)\tilde{v}^T\tilde{v} \end{aligned}$$

事件触发函数转化为位置和速度误差状态

三、内容设计与实验验证

3.3.2 仿真实验验证

► 仿真结果分析

1. 事件触发时刻的位置和速度状态改变为阶梯状；

2. 控制输入变化为阶梯式，神经网络拟合误差收敛；

3. 实现了基于事件触发机制的预设时间下的编队收敛。

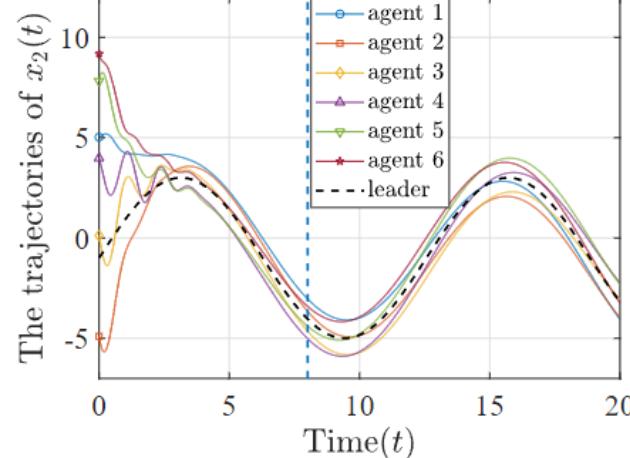


图14 实时位置状态图

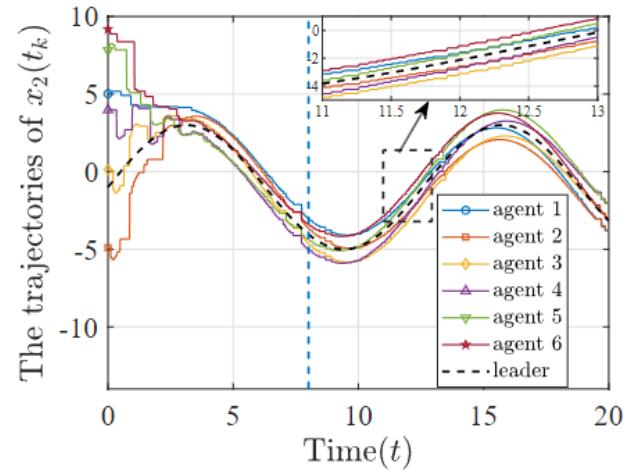


图15 触发时刻位置状态图

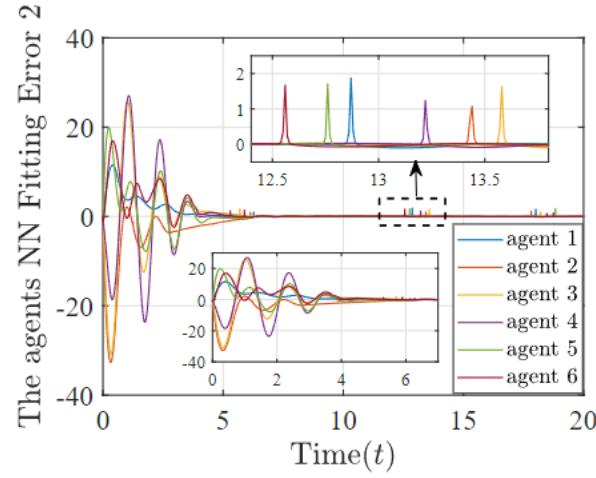


图16 神经网络拟合误差图

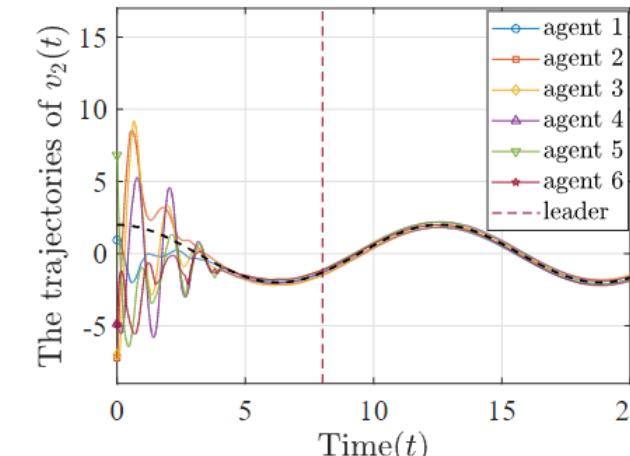


图17 实时速度状态图

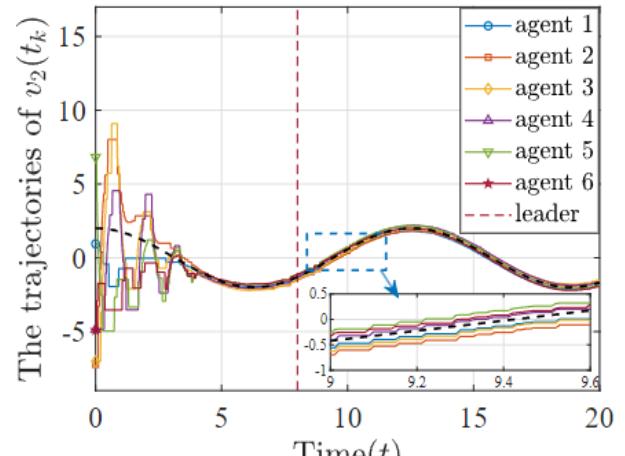


图18 触发时刻速度状态图

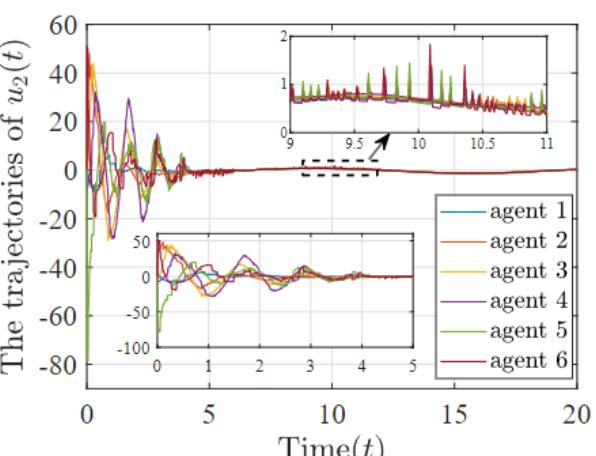


图19 控制输入图

3.3.2 仿真实验验证

➤ 事件触发次数仿真实验

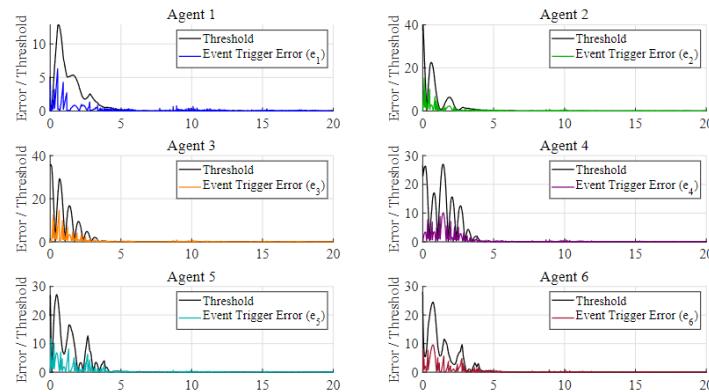


图20 各智能体事件触发边界图



图21 各智能体事件触发时刻打点图

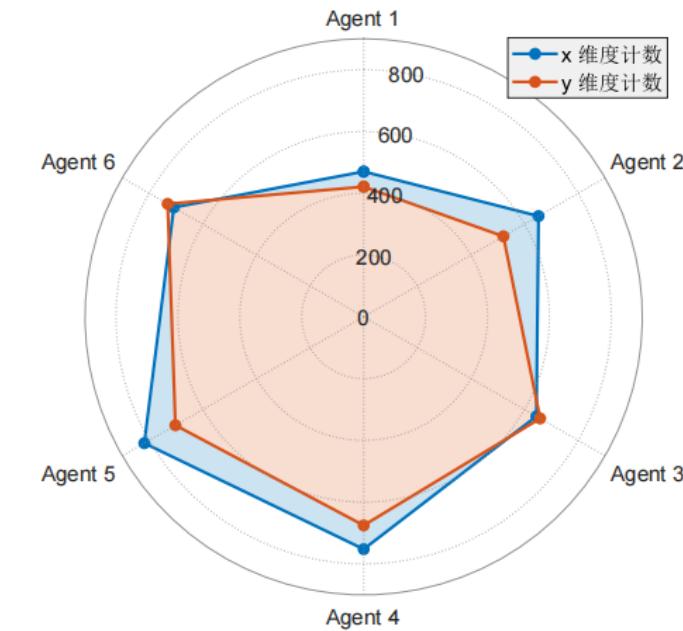


图22 各智能体事件触发次数雷达图

➤ 从打点图和雷达图可以看出，事件触发机制控制下的系统大幅度减少了通信次数，有效地缓解系统中的通信资源的消耗，有利于大型长时间任务的执行

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

4.1 主要创新点

创新点	传统方法局限	本方案改进	效果提升
时变编队控制	固定编队适应性差	动态重构算法	✓ 复杂场景适应
预设时间协同	无时间保证	有界收敛控制	✓ 收敛时间↓88%
神经网络补偿	线性化导致稳态误差	RBF网络实时拟合	✓ 非线性误差收敛
时变拓扑模型	固定拓扑僵化	自适应动态拓扑	✓ 匹配度↑55%
事件触发控制	周期通信资源浪费	智能触发机制	✓ 通信负载↓72%

➤ 创新控制方案较传统方法具有显著的效果提升

- 一. 研究背景及意义**
- 二. 问题分析与方法**
- 三. 内容设计与实验验证**
- 四. 研究创新点**
- 五. 总结及展望**

5.1 毕业论文主体内容总结

- 二阶线性多智能体系统编队控制研究
- 二阶非线性多智能体系统编队控制研究
- 二阶时变拓扑非线性系统编队控制研究

预设时间+时变编队+编队跟踪（线性系统）
神经网络+预设时间+时变编队+编队跟踪（非线性系统）
事件触发+时变拓扑+预设时间+时变编队+编队跟踪

5.2 后续可开展的工作

- 多智能体系统时变编队控制研究，考虑**网络攻击约束**，设计融合网络攻击函数的控制器；
- 多智能体系统时变编队控制研究，融合**强化学习方法**；让智能体自我学习形成编队；
- 扩展编队的应用场景，考虑**高阶动力学**系统，比较不同神经网络拟合效果等；
- 领导者的动力学系统在复杂环境下充满非匹配扰动，构造**领导者非线性模型**。

第六届 全国航空航天类专业 本科毕业设计成果交流会

感谢各位专家批评指正

题目：复杂约束下多智能体系统快速
协同控制研究

编号：080507