



第八届控制科学与工程前沿论坛暨复杂系统与控制学术研讨会

网络化系统协同控制理论及其应用

报告人：陈杰

北京理工大学

2016-05-06



提 纲

1 研究背景

2 协同行为多指标优化与决策

3 陆用多智能体系统分布式协同控制

4 网络化火控系统的分析与控制

5 致谢

提 纲

1

研究背景

2

协同行为多指标优化与决策

3

陆用多智能体系统分布式协同控制

4

网络化火控系统分析与控制

5

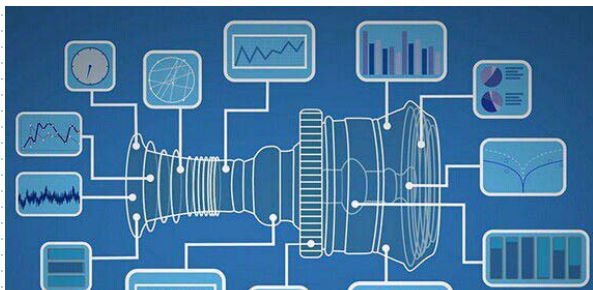
致谢

研究背景



2015年3月，李克强总理在政府工作报告中提出，“制定‘互联网+’行动计划，推动移动互联网、云计算、大数据、物联网等与现代制造业结合，促进电子商务、工业互联网和互联网金融健康发展，引导互联网企业拓展国际市场。”

研究背景



通俗来说，“互联网+”就是“互联网+各个传统行业”，但并不是简单的相加，而是利用信息通信技术以及互联网平台，让互联网与传统行业进行深度融合，创造新的发展生态。



研究背景

互联网+

陆用武器火力指挥与控制



陆用武器网络化火力指挥与控制系统

网络中心战、数字化部队。。。。

研究背景

陆用武器网络化火力指挥与控制系统

在未来信息化条件下，陆用武器装备的作战形式是**网络化条件下的联合作战**。以**网络**为中心，通过多维信息的快速交互，将分布的作战单元有序连接起来，形成一个**分布式**作战体系和武器系统，实现战场感知、指挥控制、火力控制的一**体化**。

全域机动、快速反应、精确打击的分布式协同火力打击是**网络化联合作战**对陆用武器提出的要求。

研究背景

研究挑战

- 1 要求分布式指挥决策的**智能化与实时化**；
- 2 要求多异构平台自主协同控制的**一致性与快速性**；
- 3 要求平台控制的**精确性与抗干扰能力**。

研究背景

科学问题

系统
层面

协同行为多指标优化与决策

行为
层面

陆用多智能体系统分布式协同控制

控制
层面

网络化火控系统分析与控制

提 纲

1

研究背景

2

协同行为多指标优化与决策

3

陆用多智能体系统分布式协同控制

4

网络化火控系统分析与控制

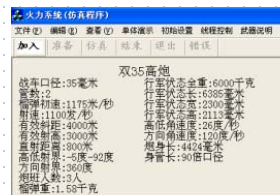
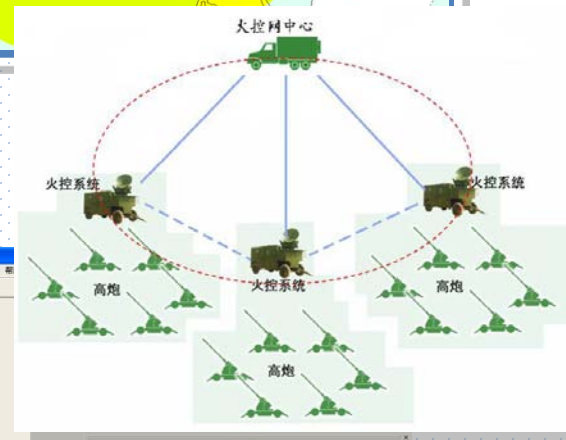
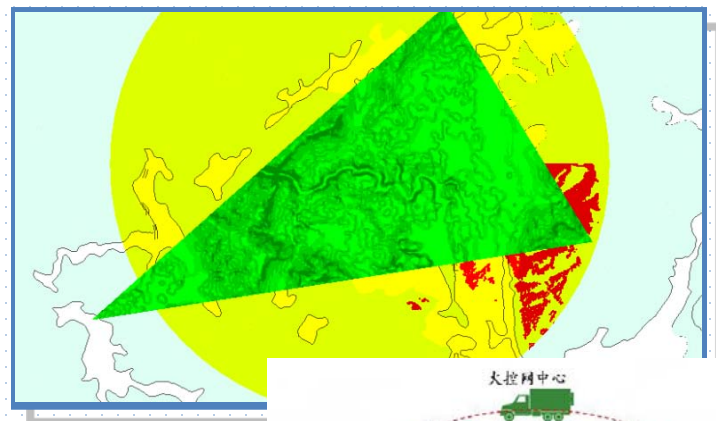
5

致谢

协同行为多指标优化与决策

■ 需解决的基础关键问题

- 在局部信息获取条件下，
分布式协调规划中的广度
搜索与深度搜索**最佳权衡**；
- 多平台协同在状态量、控
制量受约束条件下的**资源
竞争与动态任务指派**。

[illegible]

协同行为多指标优化与决策

揭示了探索-开发权衡机理

- 完善的分布式协调规划算法应同时具有探索性与开发性，并使二者达到一定的平衡；
- 用局部信息建立群体分布熵来描述弥散和集聚现象；
- 控制群体分布熵实质就是控制个体之间的相互作用。

群体分布熵

$$H(p_1, p_2, \dots, p_N) = -\sum_{i=1}^N p_i \cdot \ln(p_i)$$

群体分布熵的极限

$$\lim_{p_1 \rightarrow 1} H = \lim_{p_1 \rightarrow 1} [-p_1 \cdot \ln(p_1) - \sum_{i=2}^N p_i \ln(p_i)] = 0$$

协同行为多指标优化与决策

IEEE Trans. SMC-B, 2009

提出了最优压缩定理

- 协调规划问题求解难度决定了最佳的探索-开发权衡方式;
- 随着问题难度的增加, 最佳权衡将倾向于探索;
- 等比等代价均匀压缩是理想的解空间压缩模式。

压缩比

$$M_1^* = M_2^* = \cdots = M_{k^*}^* = (1/\eta)^{1/k^*}$$

难度指示因子

采样计算次数

$$T_1^* = T_2^* = \cdots = T_{k^*}^* = \ln(1 - P^{1/k^*}) / \ln(1 - \eta^{1/k^*})$$

定位最优解的概率

协同行为多指标优化与决策

不确定性条件下的动态决策的通用决策模型

$$\max J_l(\mathbf{X}^l) = \sum_{k=1}^{K(t)} v_k \prod_{j=1}^{T(t)} \left[1 - q_{jk} \prod_{h=t}^S \prod_{i=1}^{W(t)} (1 - p_{ij}(t))^{x_{ij}(h)} \right]$$

剩余设施价值

$$\sum_{j=1}^T x_{ij}(t) \leq n_i, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, S\}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, W\}$$

武器并发打击能力约束

$$\sum_{i=1}^W x_{ij}(t) \leq m_j, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, S\}, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, T\}$$

策略约束

$$\sum_{t=1}^S \sum_{j=1}^T x_{ij}(t) \leq N_i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, W\}$$

弹药约束

$$x_{ij}(t) \leq f_{ij}(t), \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, S\}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, W\}, \\ \forall j \in \{1, 2, \dots, T\}$$

交火可行性约束（时窗、安全射界等）

协同行为多指标优化与决策

在最优压缩定理指导下，对优化难度的充分理解便于选择或构造高效的优化算法。通过分析，建立了不同演化机理的**混合智能优化机制**：**TS**(禁忌算法)、**TS-DS1**（带有多多样化策略的禁忌算法）、**EDA-CRI**（带有构造性修复改进算子的分布估计算法）、**MEDA**（文化基因型分布估计算法）、**RCH**（基于规则的构造性启发式算法）、**EDA-CRI-RCH**、**MEDA-RCH**

决策质量

决策时间

统计特性

算法	目标函数值			s_Q	计算时间(秒)	s_T
	最佳值	最差值	均值±标准差		均值±标准差	
RCH	169.504	169.504	169.504 ± 0	0	0.0010 ± 0.0039	6
TS-DS1	171.104	171.104	171.104 ± 0	1	0.0728 ± 0.0102	0
EDA-CRI	171.104	170.636	171.095 ± 0.066	1	0.0637 ± 0.0044	5
MEDA	171.104	171.104	171.104 ± 0	1	0.0734 ± 0.0190	0
TS-DS1-RCH	171.104	170.996	171.085 ± 0.042	1	0.0737 ± 0.0132	0
EDA-CRI-RCH	171.104	171.104	171.104 ± 0	1	0.0744 ± 0.0252	0
MEDA-RCH	171.104	171.104	171.104 ± 0	1	0.0752 ± 0.0224	0

11
5
11, 2012
3
0

二、协同行为多指标优化与决策

针对12次地基防空作战想定

算法/指标	RCH	TS-DS1	EDA-CRI	MEDA	TS-DS1-RCH	EDA-CRI-RCH	MEDA-RCH
S_O	19	10	26	18	30	53	59
S_T	72	28	38	8	24	39	8

- RCH是一种简洁、快速有效的DWT A决策算法，计算代价和计算复杂性低，适合大规模DWT A问题的快速求解。
 - EDA-CRI-RCH和MEDA-RCH在决策质量方面的优势明显，二者以不同方式实现了搜索空间压缩，降低了问题的优化难度，可以得到高质量的DWT A决策方案。
- 视作战需求，选择相应优化方案。

提 纲

1

研究背景

2

协同行为多指标优化与决策

3

陆用多智能体系统分布式协同控制

4

网络化火控系统分析与控制

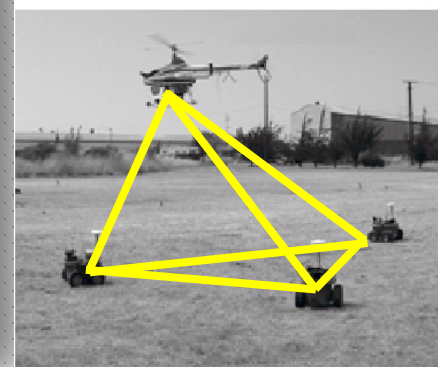
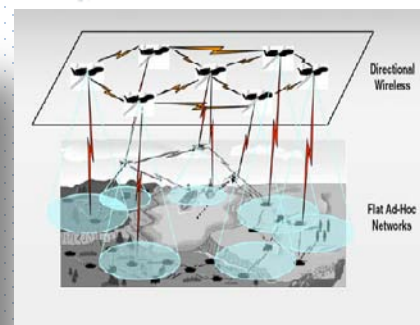
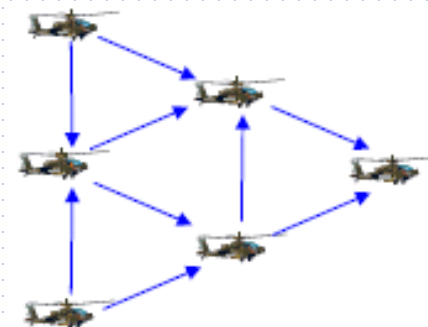
5

致谢

陆用多智能体系统分布式协同控制

■ 需解决的基础关键问题

- 复杂多约束条件下分布式系统跨层协同控制；
- 连通性保持下基于骨干网络的群集控制；
- 弱化拓扑结构条件下分布式行为的有限时间一致性。

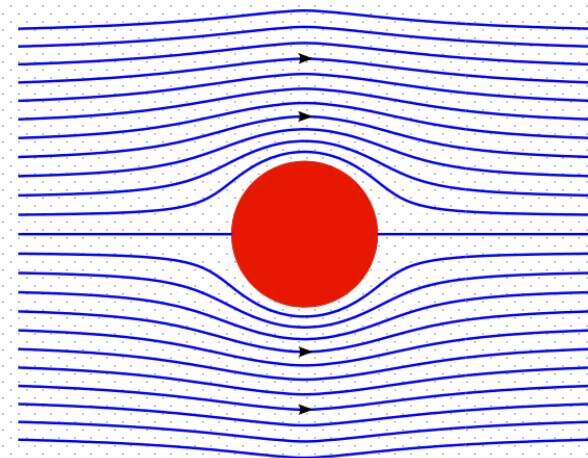
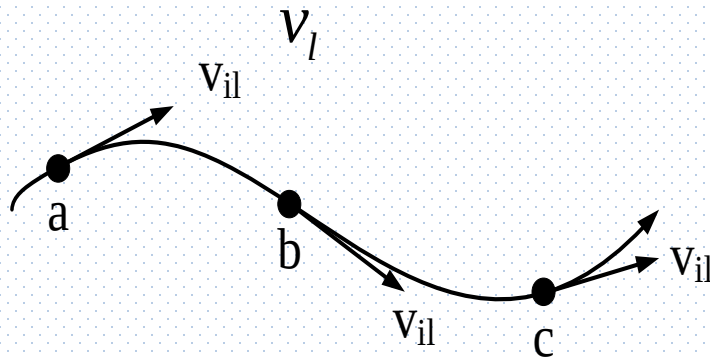


陆用多智能体系统分布式协同控制

基于流函数的避障控制

Nonlinear Dynamics, 2015

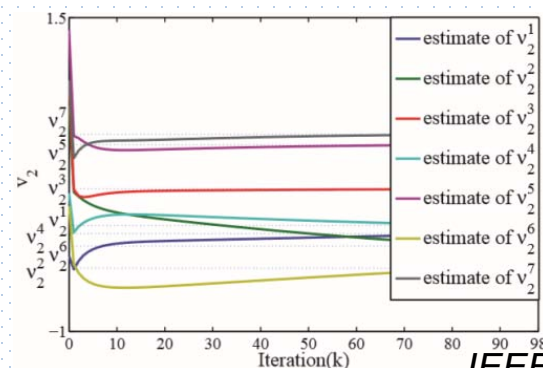
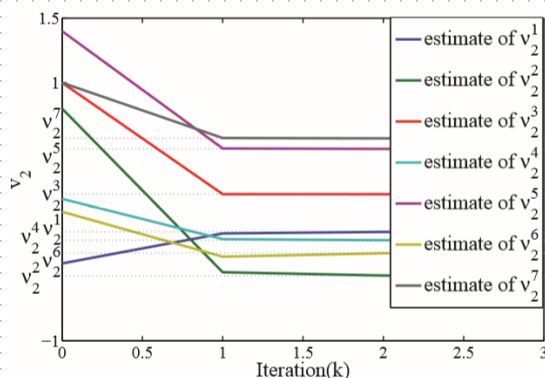
- 当节点检测到障碍物时，其立即成为骨干节点，并选择跟踪其当前位置在瞬时流线上的投影点（**虚拟领航者**）
- 采用领航跟随群集控制思想，每个非骨干节点通过对其所附属的骨干节点的**群集跟踪实现避障控制**



陆用多智能体系统分布式协同控制

基于反幂法和PI均值一致估计器的分布式代数连通度估计

- 将反幂法迭代求解拉普拉斯矩阵特征根（代数连通度）的问题转化为一个分布式求解非齐次线性方程组的问题
- 利用共轭梯度法求解非齐次线性方程组
- 利用PI均值一致估计器确保共轭梯度法可以实现完全的分布化



IEEE Trans. Cyber., 2016

陆用多智能体系统分布式协同控制

骨干子系统势函数

连通性保持及群集跟踪混合势函数

$$V_{ij}^c = \begin{cases} \left\| \frac{1}{\|q_{ij}\|} - \frac{1}{s} \right\|^{k_1} \frac{1}{(\hat{\lambda}_2^i - \tilde{\varepsilon})^{k_2}} & \|q_{ij}\| \in (0, s) \\ \frac{k_3}{2} \frac{1 - \cos\left(\pi \frac{\|q_{ij}\| - s}{R - s}\right)}{(\hat{\lambda}_2^i - \tilde{\varepsilon})^{k_2}} & \|q_{ij}\| \in [s, R) \\ \frac{k_3}{(\hat{\lambda}_2^i - \tilde{\varepsilon})^{k_2}} & \|q_{ij}\| \in [R, \infty) \end{cases}$$

若初始条件适当，则可以保证代数连通度始终大于某个阈值，同时期望队形得以保持。

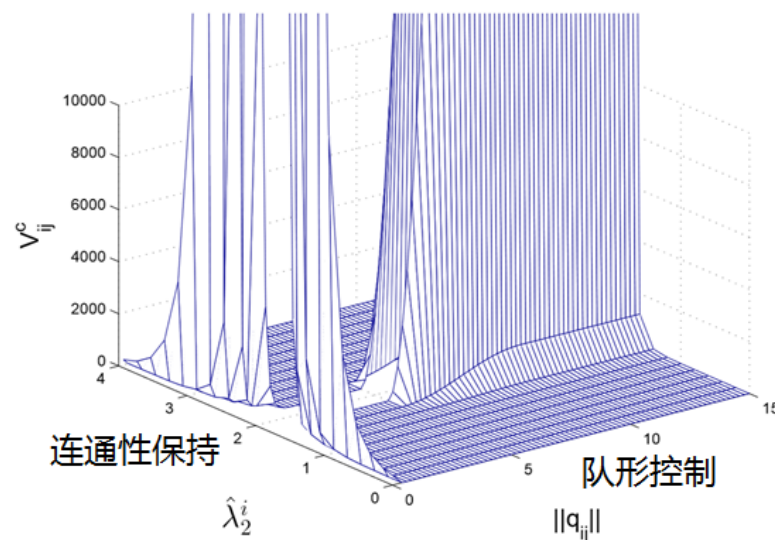


Figure 1: Candidate generalized potential field V_{ij}^c

陆用多智能体系统分布式协同控制

非骨干子系统势函数

避碰势函数

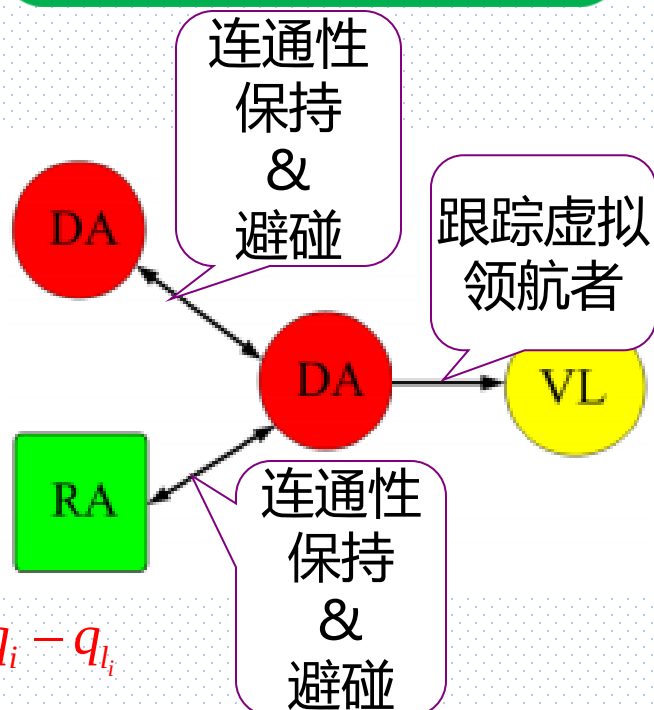
$$V_{ij}^a(\|q_{ij}\|) = \begin{cases} \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\|q_{ij}\|} - \frac{1}{r} \right)^3, & \|q_{ij}\| \in [0, r) \\ 0, & \|q_{ij}\| \in [r, \infty) \end{cases}$$

跟踪势函数

$$V_{i,L_i}^t(\|q_{il_i}\|) = \begin{cases} \frac{1}{3} \left(\frac{1}{R - \|q_i - q_{L_i}\|} - \frac{1}{R - q_{th}} \right)^3, & \|q_{i,L_i}\| \in [q_c, R) \\ 0, & \|q_{i,L_i}\| \in [0, q_c) \end{cases}$$

陆用多智能体系统分布式协同控制

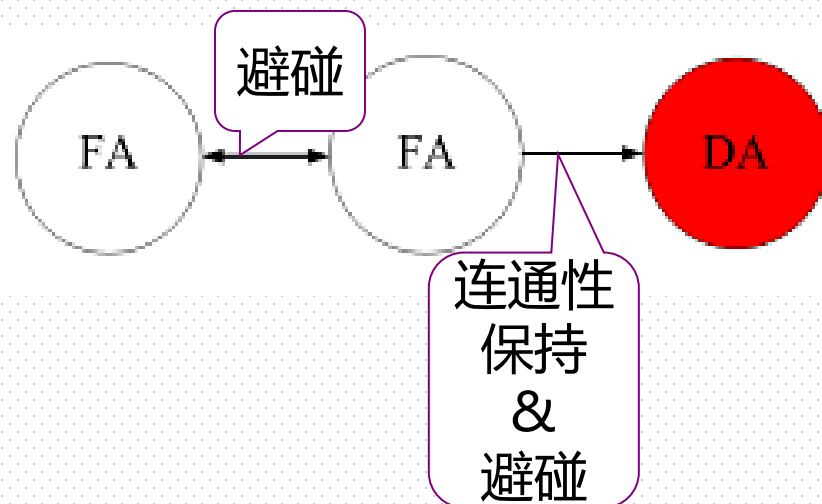
骨干节点控制律



$$\hat{q}_i = q_i - q_{l_i}$$

$$u_i = - \sum_{j \in \tilde{N}_i^{\text{MST}}(t)} \nabla_{\tilde{q}_i} V_{ij}^c(\|\tilde{q}_i - q_j\|) - \sum_{j \in \tilde{N}_i^{\text{MST}}(t)} \nabla_{q_i} V_{i,l_i}(\|q_i - q_{l_i}\|) - \sum_{j \in \tilde{N}_i^{\text{MST}}(t)} a_{ij}(t)(\tilde{p}_i - p_j) - k_1 p_i + \dot{p}_i \quad (1)$$

非骨干节点控制律



$$\tilde{q}_i = q_i - q_{L_i}$$

$$u_i = - \sum_{j \in N_i(G) \setminus L_i} \nabla_{\tilde{q}_i} V_{ij}^a(\|\tilde{q}_i - \tilde{q}_j\|) - \sum_{j \in N_i(G) \setminus L_i} a_{ij}(t)(\tilde{p}_i - \tilde{p}_j) - \nabla_{\tilde{q}_i} V_{i,L_i}^a(\|\tilde{q}_i - q_{L_i}\|) - k_2 \tilde{p}_i + \dot{p}_{L_i} \quad (2)$$

陆用多智能体系统分布式协同控制

稳定性分析

考虑满足双积分器运动学的N1个骨干智能体和N2个非骨干智能体所组成的多智能体系统. 若 $G(0)$ 连通且初始能量 $H(0)$ 有限, 则在控制律 (1) 和 (2)的作用下, $G(t)$ 时刻保持连通, 并且所有智能体能够实现速度同步, 智能体间以及智能体与障碍物间可以实现碰撞规避.

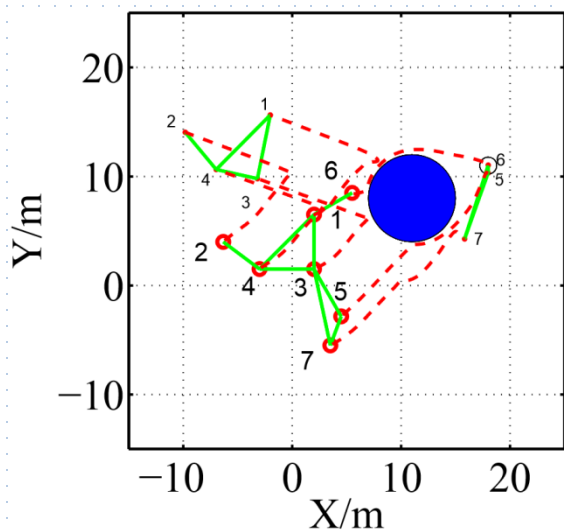
$$H_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_1} V_{ij}^c (\| \tilde{q}_i - \tilde{q}_j \|) + \sum_{i=1}^{N_1} V_{i,L_i} (q_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_1} p_i^T p_i$$

$$H_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j \in N_i(G) \setminus L_i} V_{ij}^a (\| \tilde{q}_i - \tilde{q}_j \|) + \sum_{i=1}^{N_2} V_{i,L_i}^t (\| \tilde{q}_i \|) \\ + \sum_{i=1}^{N_2} V_{i,L_i}^a (\| \tilde{q}_i \|) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_2} \tilde{p}_i^T \tilde{p}_i$$

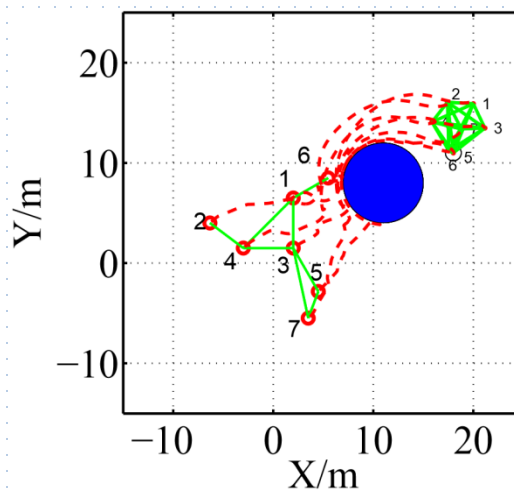
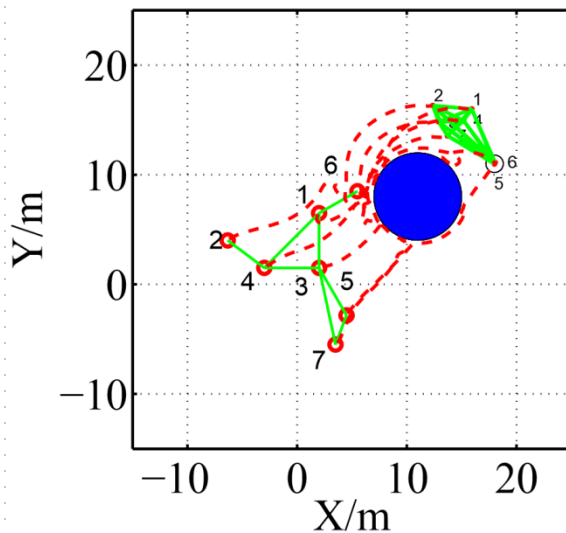
$$\dot{H}(t) = \dot{H}_1(t) + \dot{H}_2(t) \leq 0, \quad \forall t \in [t_{k_q}, t_{k_{q+1}}), q = 1, 2, \dots$$

陆用多智能体系统分布式协同控制

不采用连通性保持时的运动轨迹

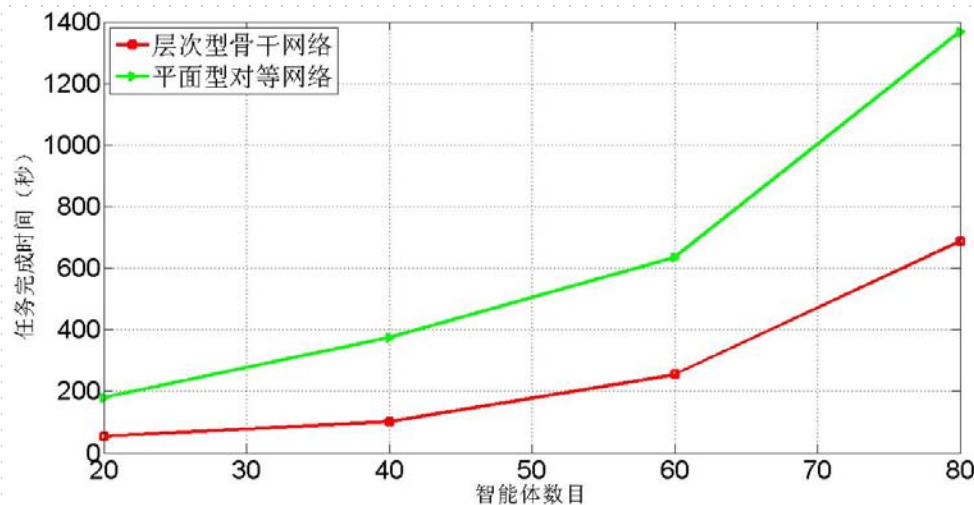


采用保守的连通性保持算法时的运动轨迹



采用本文的连通性保持算法时的运动轨迹

陆用多智能体系统分布式协同控制



任务完成时间对比

针对二阶线性多智能体系统，给出了基于骨干网络的系统**层次型拓扑架构**的分布式构建算法；并将人工势场函数与流函数有机结合，分别为骨干子系统与非骨干子系统设计了连通性保持条件下的**分布式跨层群集运动与避障控制协议**。

陆用多智能体系统分布式协同控制

在层次型拓扑基础上，提出了有限时间**一致性协议**：如果拓扑具有有向生成树，则 u_i 可实现有限时间一致。

证明了如果系统拓扑具有生成树的**时间区间总和**大于某个值，则即使在时变拓扑条件下，也可以实现有限时间一致。

$$u_i = \beta \operatorname{sig} \left(\underbrace{\sum_{j \in N_i} W_{ij} (x_j - x_i)}_{\text{非Lipschitz}} \right)^{\alpha} + \gamma \sum_{j \in N_i} W_{ij} (x_j - x_i)$$

$\beta > 1$

$0 < \alpha < 1$

$\gamma \geq 0$

Automatica, 2009

陆用多智能体系统分布式协同控制

针对具有时变拓扑结构和时变时滞的分布式系统，给出了一般形式的控制协议。

证明了离散时间分布式协同控制的状态一致性对于有界时变时滞具有鲁棒性。

$$u_i(t) \in \text{Co}(D_i(t))$$

$D_i(t)$ 满足一种时滞互素性质的可用信息集

$\text{Co}(\cdot)$ 给定的集值函数

Automatica, 2010

提 纲

1 研究背景

2 协同行为多指标优化与决策

3 陆用多智能体系统分布式协同控制

4 网络化火控系统的分析与控制

5 致谢

网络化火控系统的分析与控制

■ 需解决的基础关键问题

- 如何克服火炮的大惯量、振荡、摩擦等非线性，实现稳定随动控制
- 如何精确刻画网络延时与火控系统稳定性的之间关系；
- 如何主动补偿网络约束条件对系统控制性能的影响。



网络化火控系统的分析与控制

提出了**基于辨识器的自适应鲁棒控制**方法：用辨识器加快参数估计的速度；通过对自适应律与辨识器的状态重置，使参数估计能克服参数突变的影响。

一类半严格反馈不确定非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = \varphi_i^T(x_1, \dots, x_i, t)\theta_1 + b_1 x_{i+1} + d_1(x, t) & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = \varphi_n^T(x_1, \dots, x_n, t)\theta_n + b_n u + d_n(x, t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

跳变参数

引入具有状态重置的辨识器，

$$P = \begin{cases} P_0 & t = t_0 \\ \int_{t_i}^t \varphi_f \varphi_f^T dr & t_i < t \leq t_{i+1}, i=0, 1, \dots \end{cases} \quad Q = \begin{cases} Q_0 & t = t_0 \\ \int_{t_i}^t \varphi_f f_{\hat{x}_n} dr & t_i < t \leq t_{i+1}, i=0, 1, \dots \end{cases}$$

辨识器状态重置

$$\hat{\theta}_{ident} = P(t_i)^{-1} Q(t_i) \quad t_i \leq t < t_{i+1}, i = 0, 1, \dots$$

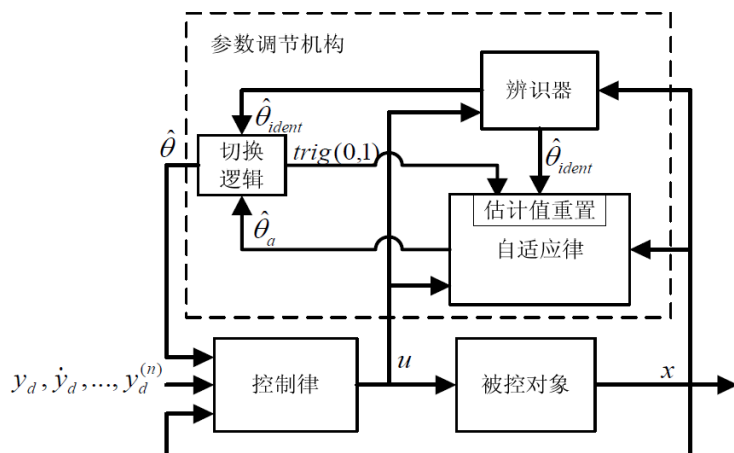
消除**强突变**扰动对稳定性影响，保证良好**瞬态**性能。

IEEE Trans. CST, 2013

IEEE Trans. CST, 2010

IEEE Trans. IE, 2010

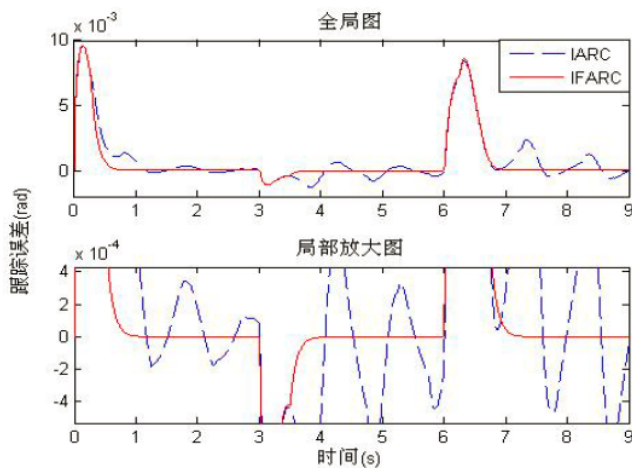
网络化火控系统的分析与控制



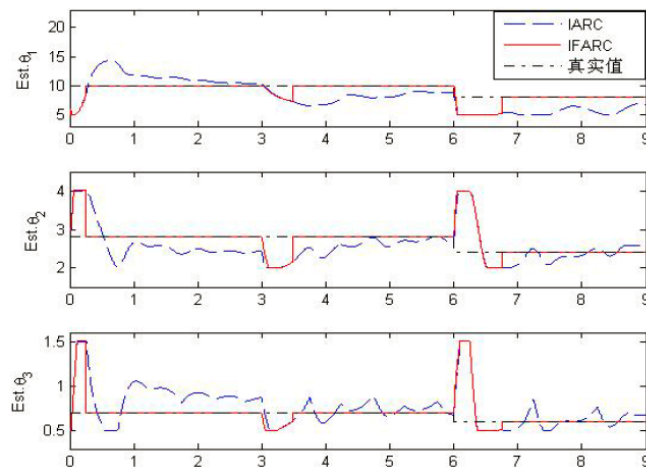
$$\theta = \begin{cases} [10, 2.8, 0.7, 1]^T & 0 \leq t < 3 \\ [10, 2.8, 0.7, 4]^T & 3 \leq t < 6 \\ [8, 2.4, 0.6, -6.4]^T & 6 \leq t \leq 9 \end{cases}$$

参数变化

基于辨识器的自适应鲁棒控制框图



正弦跟踪误差曲线



参数估计

网络化火控系统的分析与控制

发现了利用系统延时的下界信息和变化率可以松弛控制系统稳定性分析的保守性，提出包含三重积分项的Lyapunov泛函构造新方法；

$V(x_t) =$	方法	时滞下界	$\mu=0.3$	$\mu=0.5$	$\mu=0.9$
	Automatica 09	2	2.6972	2.5048	2.5048
	Our Results	2	3.0129	2.5663	2.5663
	Automatica 09	5	---	---	---
	Our Results	5	5.0275	5.0275	5.0275

延时下界信息



IJRNC, 2009
Automatica, 2010
IET CTA, 2011
IJRNC, 2015

网络化火控系统的分析与控制

在网络化预测控制的框架下，提出了新的网络化预测控制方法，**完善与发展**了网络化预测控制理论，实现了对网络约束条件的**主动补偿**。



通过新颖



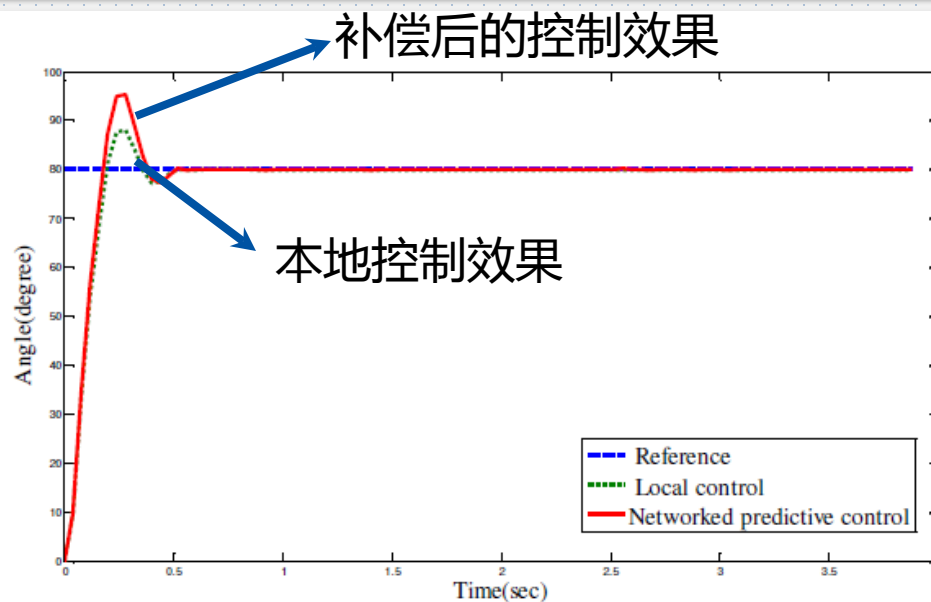
系统稳定



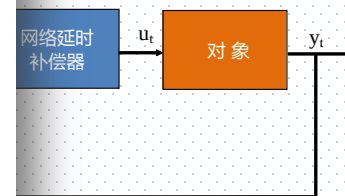
可以处理



Hamme



控制量已知



测控制

CTA, 2014

Science in China-F, 2016
IEEE Trans. CAS-II, 2016

阶跃响应对比曲线

**敬请各位专家
批评指正！**