

ISSN 2096-5915  
CN 10-1565/TJ

# 无人系统技术

## UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY



主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所

本期专栏 群体智能专栏



中国学术期刊网络出版总库 (CNKI) 收录

万方数据—数字化期刊群收录

超星数字期刊数据库收录

维普网数据库收录

ISSN 2096-5915



2021.3  
第4卷 NO.



# 顾问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈杰 魏毅寅 王飞跃

## 第一届编委会

**主任** 李风雷

**副主任** 王长青 宋斌 谷满仓 张涛 符文星

**委员** (按姓氏拼音排序)

昂海松 蔡顺才 陈斌 陈家斌 戴江勇 邓宏彬 都基焱 方浩 符小卫 郭继峰  
黄强 黄长强 李必军 李东光 李贻斌 林平 刘莉 刘培志 罗均 马洪忠  
孟红 孟凡彬 潘泉 齐俊桐 时兆峰 孙富春 田大新 王宏伦 韦锦峰 吴向阳  
夏元清 向锦武 徐昕 徐海刚 薛建儒 颜国正 杨宁 杨宏晖 于进勇 于林宇  
赵杰 张梅 张宁 张山 张冬青 张卫平 朱枫 朱小燕 Simon X.YANG  
Wei REN Yang SHI Yaotao SHEN

## Consultant

LI Deyi

FENG Xisheng

LI Bohu

XU Demin

LIU Yongcai

FEI Aiguo

FAN Bangkui

CHEN Jie

WEI Yiyin

WANG Feiyue

## The First Editorial Board for Unmanned Systems Technology

**Director:** LI Fenglei

**Vice-director:** WANG Changqing SONG Bin GU Mancang ZHANG Tao FU Wenxing

**Committee member:**

ANG Haisong

CAI Shunca

CHEN Bin

CHEN Jiabin

DAI Jiangyong

DENG Hongbin

DU Jiyan

FANG Hao

FU Xiaowei

GUO Jifeng

HUANG Qiang

HUANG Changqiang

LI Bijun

LI Dongguang

LI Yibin

LIN Ping

LIU Li

LIU Peizhi

LUO Jun

MA Hongzhong

MENG Hong

MENG Fanbin

PAN Quan

QI Juntong

SHI Zhaofeng

SUN Fuchun

TIAN Daxin

WANG Honglun

WEI Jinfeng

WU Xiangyang

XIA Yuanqing

XIANG Jinwu

XU Xin

XU Haigang

XUE Jianru

YAN Guozheng

YANG Ning

YANG Honghui

YU Jinyong

YU Linyu

ZHAO Jie

ZHANG Mei

ZHANG Ning

ZHANG Shan

ZHANG Dongqing

ZHANG Weiping

ZHU Feng

ZHU Xiaoyan

Simon X. YANG

Wei REN

Yang SHI

Yantao SHEN



# 无人系统技术

第4卷第3期 2021年5月

## 目次

### 群体智能专栏

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 集群智能算法综述 .....                   | 01 |
| 秦小林, 罗刚, 李文博, 张国华                |    |
| 基于联盟的无人机集群避障方法 .....             | 11 |
| 符小卫, 张嘉平, 魏可                     |    |
| 多智能体系统指定时间双向编队控制 .....           | 18 |
| 周媛, 刘永芳, 马生昌, 赵宇                 |    |
| 二阶非线性多智能体系统的分布式编队控制 .....        | 26 |
| 王平, 刘畅                           |    |
| 引领式空中汉字展示无人机集群的仿真研究 .....        | 32 |
| 贾宜霖, 岳训                          |    |
| 面向水下目标搜索的 USV&UUV 编队协同队形规划 ..... | 40 |
| 邹佳运, 张文清, 曲泓玥, 孙巍                |    |

### 技术研究

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 适用于城市作战的柔性充气式侦察系统设计 .....  | 47 |
| 李沫宁, 肖致行, 李文光, 孟军辉, 刘莉     |    |
| 基于自抗扰控制的高超声速飞行器再入制导律 ..... | 54 |
| 邵星灵, 刘俊, 李东光               |    |

### 前沿动态

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 变形机翼飞行器发展综述 .....            | 65 |
| 孙杨, 昌敏, 白俊强                  |    |
| 美国“海洋物联网”项目发展现状与关键技术分析 ..... | 78 |
| 王彤                           |    |

未来的人工智能将是人、计算机和互联网融合在一起运行的智能系统。数据驱动学习、多种非结构化数据深度整合、人机和脑机交互, 成为群体智能系统。群体智能是新一代人工智能的重要方向。在此背景下, 本刊特组织推出“群体智能”专栏。专栏收录文章6篇, 内容涉及算法综述以及无人机集群编队/避障控制策略、多智能体系统编队控制、无人水面/水下航行器编队队形规划等研究。希望借助本次专栏, 能够为相关专家学者的研究工作、企业和有关部门决策提供学术和技术参考, 推动智能前沿技术进一步发展。



# Unmanned Systems Technology

Vol.4 No.3 2021

## Contents

### Swarm Intelligence Column

|   |  |
|---|--|
| A Review of Swarm Intelligence Algorithms .....   |  |
| .....   | QIN Xiaolin, LUO Gang, LI Wenbo, ZHANG Guohua ( 01 )   |
| Obstacle Avoidance Method for UAV Swarm based on Alliance.....                              |  |
| .....   | FU Xiaowei, ZHANG Jiaping, WEI Ke ( 11 )               |
| Appointed-time Bipartite Formation Control for Multi-agent System.....                      |  |
| .....   | ZHOU Yuan, LIU Yongfang, MA Shengchang, ZHAO Yu ( 18 ) |
| Distributed Formation Control for Second-order Nonlinear Multi-agent Systems.....           |  |
| .....   | WANG Ping, LIU Chang ( 26 )                            |
| Simulation Study of Leader Following UAVs for Air Dot Matrix Chinese Character Display..... |  |
| .....   | JIA Yilin, YUE Xun ( 32 )                              |
| Cooperative Formation Planning of UUV&USV Formations for Underwater Target Search.....      |  |
| .....   | ZOU Jiayun, ZHANG Wenqing, QU Hongyue, SUN Wei ( 40 )  |

### Technical Study

|   |  |
|---|--|
| The Design of Flexible Inflatable Unmanned Reconnaissance System for Urban Operations ..... |  |
| .....   | LI Moning, XIAO Zhixing, LI Wenguang, MENG Junhui, LIU Li ( 47 ) |
| Reentry Guidance Law of Hypersonic Vehicle Based on ADRC .....                              |  |
| .....   | SHAO Xingling, LIU Jun, LI Dongguang ( 54 )                      |

### Frontier Dynamic

|  |  |
|--|--|
| Review of Morphing Wing Aircraft .....   | SUN Yang, CHANG Min, BAI Junqiang ( 65 ) |
| Analysis of The Development Status and Key Technologies of The ‘Marine Internet of Things’ Project in The United States..... | WANG Tong ( 78 )                         |



[引用格式] 秦小林, 罗刚, 李文博, 等. 集群智能算法综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 1-10

# 集群智能算法综述

秦小林<sup>1,2</sup>, 罗刚<sup>1,2</sup>, 李文博<sup>1,2</sup>, 张国华<sup>3</sup>

(1. 中国科学院成都计算机应用研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国航天科工航天技术研究院磁悬浮与电磁推进技术总体部, 北京 100074)

**摘要:** 集群智能领域的研究正呈爆炸趋势增长, 每年都有无数新的集群智能算法以及改进算法被提出, 这些算法在各自的领域内都扮演着相当重要的角色。从集群智能算法的特点与待解决问题出发, 首先介绍集群智能算法的概念及部分经典算法, 重点介绍粒子群算法与蚁群优化算法的主要思想; 然后根据不同集群智能算法在不同应用问题的差异表现, 对当下的几个热点问题如 Ad Hoc 网络、大数据与机器学习、智能电网与智慧交通等领域的集群智能算法作了简单介绍; 其次是关于集群智能算法领域理论研究的讨论, 主要针对集群智能算法智能行为的产生机制、不同集群智能算法在面对同一问题的性能表现不同的原因、场景选定后集群智能算法性能最优的设计方法等问题展开, 并给出了这些研究具有代表性的工作及未来的研究方向; 最后对集群智能算法研究尤其是基础理论研究的发展方向进行了展望。

**关键词:** 启发式算法; 自然启发式计算; 集群智能; 粒子群算法; 蚁群优化算法

中图分类号: TP202 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)03-01-10

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.021

## A Review of Swarm Intelligence Algorithms

QIN Xiaolin<sup>1,2</sup>, LUO Gang<sup>1,2</sup>, LI Wenbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Guohua<sup>3</sup>

(1. Chengdu Institute of Computer Applications, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Magnetic Levitation and Electromagnetic Propulsion, China Aerospace Institute of Science and Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The research of swarm intelligence is growing explosively. Countless new swarm intelligence algorithms and their improved algorithms are proposed every year. These algorithms play a very important role in their respective fields. Starting from the characteristics of swarm intelligence algorithm and the problems to be solved, this article first introduces the concept of swarm intelligence and some classic algorithms, and focuses on the main ideas of particle swarm optimization and ant colony optimization algorithms. Then, according to the performance differences of different swarm intelligence algorithms in different application problems, a brief introduction of swarm intelligence algorithms in several current hot issues such as Ad Hoc networks, big data and machine learning, smart grids and smart transportation is given. Followed by the discussion on the theoretical research of swarm intelligence algorithms mainly focuses on the generation mechanism of intelligence behavior in swarm intelligence algorithms, the reason why different swarm intelligence algorithms perform differently in the same problem, and the method to optimize the performance of the swarm intelligent algorithm in certain problem. The representative work and future research directions of these studies are given. Finally, the development direction of swarm intelligence algorithm research, especially basic theory research, is

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(61402537), 中国科学院“西部青年学者”项目和四川省委组织部人才资助项目

prospected.

**Key words:** Heuristics; Nature-inspired Computation; Swarm Intelligence; Particle Swarm Optimization; Ant Colony Optimization

## 1 引言

针对工程技术领域中复杂的优化问题，众多学者选择从自然界的现实模型中寻求解决方法，由此开启了自然启发式计算（Nature-inspired computation）的研究。在过去几十年里，自然启发式计算是最受研究者关注的人工智能研究分支之一，平均每年有数百个优秀的新算法提出，且这一增长趋势仍在继续。这些算法在适应性、自学习能力、鲁棒性及高效性等方面都有很好的表现。自然启发式计算中有一类关注简单行为个体组成的集群通过自组织完成复杂任务的工作，称作集群智能(Swarm Intelligence)，如图 1。

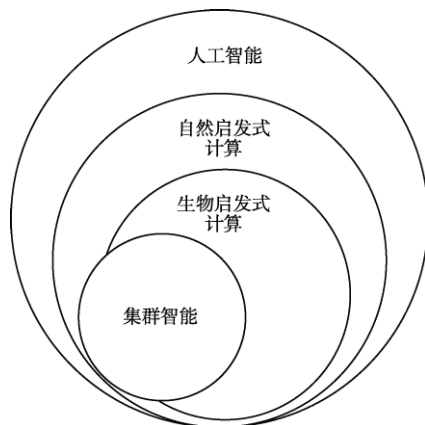


图 1 集群智能与人工智能的关系

Fig. 1 The relationship between Swarm Intelligence and Artificial Intelligence

1993 年，Dario 等研究了移动机器人系统，并提出了集群智能的概念<sup>[1]</sup>，指出简单的有序系统即可产生非平凡的智能行为。Kordon<sup>[2]</sup>将集群智能定义为基于无中心、自组织群体行为的智能计算技术。而 Bonabeau<sup>[3]</sup>为群体智能给出了更简单的定义，即由简单的个体组成的群体所产生的集体智慧。一个典型的集群智能系统由若干个可以相互通信的、只能完成简单行为的代理(agent)

组成，这些代理没有控制中心，行为简单，但往往可以通过相互之间的简单交互完成十分复杂的任务，整体上表现出智能。集群智能系统表现出智能的现象常称为“涌现”<sup>[4]</sup>。集群智能发挥了集群的所有优势，自组织、无中心控制、高鲁棒性、灵活且低消耗，面对大规模的复杂问题时仍能给出最优解。

最早的集群智能算法包括如蚁群优化算法<sup>[4]</sup>（Ant Colony Optimization, ACO）和粒子群优化算法<sup>[5]</sup>（Particle Swarm Optimization, PSO）等都受到了广泛的关注和应用，在很多领域都大获成功，如经典的旅行商问题等。它们普遍具有结构简单、参数少、实现容易等特点。如今已广泛应用于函数优化、多目标优化、求解整数约束和混合整数约束优化、神经网络训练、信号处理、路由算法等实际问题，实践结果证明了这些算法的可行性和高效性<sup>[6]</sup>。这些年来，学界对解决复杂计算任务的集群智能算法研究呈爆炸趋势增长，如图 2 所示。

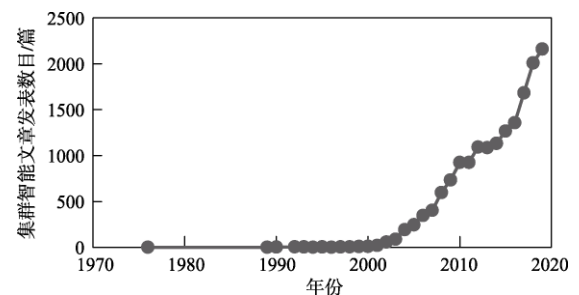


图 2 集群智能算法文章趋势（数据来自 Scopus）  
Fig. 2 Tendency of Swarm Intelligence algorithm articles (data from Scopus)

上述研究大多与优化问题相关，主要集中在健康卫生、社交网络、交通运输、能源气候、工业 4.0 等领域，都取得了很好的效果<sup>[7-11]</sup>。除了应用研究，针对集群智能算法本身性质的理论研究也同样引人关注。集群的简单交互如何涌现出智



能; 面对同一个问题, 不同的集群智能算法却表现千差万别, 如何从理论上分析这种区别; 问题的建模方法与算法求解效率关系; 算法搜索的精度和广度的平衡等。某些问题已取得了一些喜人的进展, 然而更多的理论研究则收效甚微, 仍极具挑战性。

本文接下来安排如下: 第2节简单回顾最重要的两个集群智能算法——粒子群优化算法和蚁群优化算法; 第3节介绍部分集群智能表现优异的应用场景; 第4节讨论集群智能的理论研究及发展方向; 第5节为总结。

## 2 集群智能算法介绍

### 2.1 粒子群算法

1995年, 社会心理学家 Kennedy 与电气工程师 Eberhart 受鸟群或鱼群觅食行为的启发, 进而提出了粒子群优化算法用于解决日益复杂的优化问题<sup>[5]</sup>。他们将族群中的个体(粒子)当作给定优化问题的一个解, 粒子在解空间中按照某种策略移动或游走, 试图找到问题的最优解。粒子群优化中粒子的移动策略参考的是鸟群觅食行为, 并非完全漫无目的地在区域内“碰运气”, 而是会向群体分享自己的知识, 并参考种群中最好的经验和自己记忆中最好的地点, 综合决定下一步去寻找食物的位置。粒子群优化中这两个参考因素分别是种群最优(gbest)及个体最优(pbest), 粒子根据这两个因素来更新自己的移动速度向量。假设待解决问题在  $D$  维搜索空间, 在  $t$  时间下群体中的第  $i$  个粒子的当前位置由  $D$  维向量  $\mathbf{x}_i^t = (x_{i1}^t, \dots, x_{iD}^t)^T$  来表示, 其速度由另一个  $D$  维向量  $\mathbf{v}_i^t = (v_{i1}^t, \dots, v_{iD}^t)^T$  表示, 第  $i$  个粒子访问过的最优解位置用  $\mathbf{p}_i^t = (p_{i1}^t, \dots, p_{iD}^t)^T$  表示, 群体中最优粒子的索引为“g”, 则在每次搜索迭代中, 第  $i$  个粒子的速度和位置分别由下式进行更新:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \omega \mathbf{v}_i^t + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_g^t - \mathbf{x}_i^t) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (2)$$

原始的粒子群优化算法的流程如下:

```

创建一个大小为  $S$  的  $D$  维群体, 并初始化速度向量;
for  $t=1$  to 最大迭代次数 do
  for  $i=1$  to  $S$  do
    应用速度更新等式 (1);
    应用位置更新等式 (2);
    计算位置更新后的适应度值;
    如果需要, 更新 pbest 和 gbest 的历史信息;
  end
  如果 gbest 满足问题需求, 则终止算法;
end

```

其中:  $i=1, 2, \dots, S$  为粒子索引,  $S$  是群体大小,  $\omega$  是惯性权重;  $c_1$  和  $c_2$  为加速系数, 用于调整粒子向全局最优及自身最优运动的最大步长, 也可称为学习因子, 表示粒子“自我学习”和“社会学习”的能力;  $r_1$  和  $r_2$  是满足均匀分布(0,1)的随机数。可以看到, 速度更新时考虑了三部分的内容: 第一部分是自身运动的惯性, 记录自己原本的运动方向, 其目的是防止粒子剧烈地改变方向; 第二部分是认知或自我部分, 通过这一项, 粒子的当前位置会向其自己的最好位置移动, 这样在整个搜索过程中, 粒子会记住自己的最佳位置, 从而避免自己四处游荡; 第三部分是社交部分, 负责通过群体共享信息, 为保证粒子向群体中最优的个体移动, 即每个个体向群体中的其他个体学习。

公式(1)与公式(2)描述的是粒子群优化算法的原始形式, 其在多个数据集上都取得了十分不错的效果, 但是算法本身还存在诸多问题。例如, 粒子群算法易陷入局部最优; 算法的收敛速度会逐渐变得缓慢; 算法的参数选择随机, 需要经过多次调整才能取得好的效果。针对这些问题, 众学者提出了很多改进方案, 例如 Clerc 等<sup>[12]</sup>在粒子群优化算法中引入压缩因子用于控制算法收敛; Bergh 等<sup>[13]</sup>将搜索空间按维度进行分割, 分别使用粒子群优化算法得到最优解后合并成完整的解; 除算法本身的改进外, 还有很多研究者将粒子群优化算法与其他算法结合, 提出性能更优的混合算法<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 蚁群优化算法

蚁群优化算法模仿蚂蚁的合作行为来解决复

杂的组合优化问题<sup>[4]</sup>。蚂蚁是一种高度社会化的生物，它们觅食时可快速越过障碍物，找到蚁巢与食物之间的最短路径。如图 3，蚁群觅食过程中，如果蚁巢到食物源已存在最短路径，则蚂蚁会按此路径搬运食物；当前路径如被障碍物阻隔，需要寻找新的路径，蚁群会按照所有可能的方向出发寻找新的路径，最后的路径就是最优路径。Dorigo 等<sup>[4]</sup>经过研究后将这一过程分为路径构建与信息素更新两步，进而提出了蚁群优化算法。初始化时，蚂蚁会漫无目的地按照随机选取的方向搜索食物，并在搜索过程中释放信息素；沿途的信息素会随时间挥发，因此较短的路径相比于

较长的路径会残留更多的信息素；后续的蚂蚁根据信息素的指引选择路径，因此会有更多的蚂蚁选择信息素残留较多也就是较短的路径。这些蚂蚁在搜索过程中同样也会释放信息素，使较短的路径又会累计更多信息素进而吸引更多蚂蚁。这样的正反馈机制下，最终蚁群会找到最短路径也就是问题的最优解。蚁群优化算法用于搜索最优路径在旅行商问题上取得了非常好的效果。因其分布式并行、强鲁棒性、易与其他算法结合等特点受到学界的广泛关注，并针对性地提出了很多的改进算法和混合算法，用于无线网络、作业调度、路径规划、数据挖掘等领域。

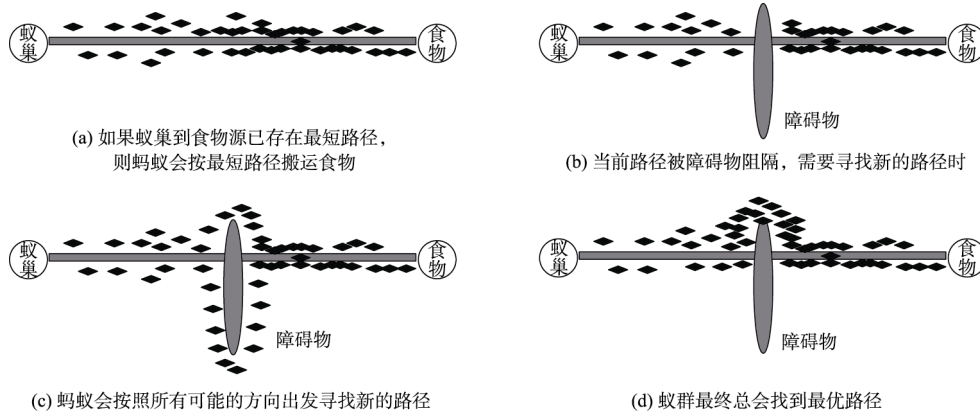


图 3 蚁群觅食图例

Fig. 3 Figure of ant colony foraging

除了粒子群优化算法与蚁群优化算法外，集群智能领域还有很多非常优秀的优化算法。文献[16]提出了一种模拟蜜蜂觅食行为的人工蜂群优化 (Artificial Bee Colony, ABC) 算法，ABC 算法中除了蜜蜂的基础选择机制与蜜蜂间的简单交互外，还引入了一些局部与全局搜索机制，在人工神经网络训练、组合优化、电力系统优化、系统和工程设计等多个领域得到广泛应用；蜘蛛猴优化<sup>[17]</sup>灵感来自蜘蛛猴在觅食过程中的裂变融合社会(Fission-Fusion Social)结构，巧妙地描述了群体智能最重要的两个基本概念：自组织和分工；还有其他的集群智能算法，如细菌算法、布谷鸟搜索、萤火虫算法、蝙蝠算法、细菌觅食优化、烟花算法等都在很多领域取得了良好效果。在

此，我们总结了一些经典的集群智能算法，如表 1 所示。

### 3 集群智能应用

集群智能作为优化算法，涉及的应用领域极其广泛。本部分仅选取近年来的部分热门领域作简单介绍。需要了解的是不同的集群智能算法面对不同的应用问题有不同的性能表现，如粒子群优化算法在分布式资源管理、定位、资源分配、最大化/最小化、全局优化自适应学习等领域表现优异，而蚁群优化算法则擅长网络分析、旅行商问题、路由算法、聚类问题、博弈论等。

Ad Hoc 网络是集群智能算法尤其是蚁群优化算法应用最成功的领域之一。我们知道，集群



表 1 主要集群智能算法  
Table 1 Main Swarm Intelligence algorithms

| 算法                        | 灵感来源          | 作者                    | 年份   | 算法                       | 灵感来源                   | 作者                  | 年份   |
|---------------------------|---------------|-----------------------|------|--------------------------|------------------------|---------------------|------|
| 蚁群优化算法 <sup>[4]</sup>     | 生物蚁群觅食行为      | Dorigo                | 1992 | 花授粉算法 <sup>[37]</sup>    | 花授粉                    | Yang                | 2012 |
| 粒子群优化 <sup>[5]</sup>      | 生物鸟群觅食行为      | Kennedy and Eberhart  | 1995 | 磷虾群算法 <sup>[38]</sup>    | 磷虾                     | Gandomi and Alavi   | 2012 |
| 人工鱼群算法 <sup>[18]</sup>    | 鱼群的集群行为       | Li, et al.            | 2002 | 大马哈鱼洄游算法 <sup>[39]</sup> | 大马哈鱼洄游                 | Mozaffari           | 2012 |
| 细菌觅食算法 <sup>[19]</sup>    | 细菌的觅食增殖行为     | Passino               | 2002 | 狼群搜索算法 <sup>[40]</sup>   | 狼群                     | Tang, et al.        | 2012 |
| 混合蛙跳算法 <sup>[20]</sup>    | 蛙跳            | Eusuff and Lansey     | 2003 | 海豚回声定位算法 <sup>[41]</sup> | 海豚在捕食过程中利用回声定位的策略      | Kaveh and Farhoudi  | 2013 |
| 萤火虫群优化 <sup>[21]</sup>    | 萤火虫发光和聚集行为    | Krishnanand and Ghose | 2005 | 燕群优化算法 <sup>[42]</sup>   | 燕群                     | Neshat, et al.      | 2013 |
| 蜂群优化算法 <sup>[22]</sup>    | 蜜蜂种群的觅食行为     | Karaboga              | 2005 | 动物迁徙算法 <sup>[43]</sup>   | 动物迁徙模型                 | Li, et al.          | 2014 |
| 蜜蜂算法 <sup>[23]</sup>      | 蜜蜂觅食          | Pham, et al.          | 2006 | 鸡群优化算法 <sup>[44]</sup>   | 鸡群的层次结构和鸡群觅食行为         | Meng, et al.        | 2014 |
| 猫群优化 <sup>[24]</sup>      | 猫的种群行为        | Chu, et al.           | 2006 | 灰狼优化算法 <sup>[45]</sup>   | 灰狼觅食                   | Mirjalili, et al.   | 2014 |
| 入侵杂草优化算法 <sup>[25]</sup>  | 自然界杂草殖民过程     | Mehrabian and Lucas   | 2006 | 蜘蛛猴优化算法 <sup>[17]</sup>  | 蜘蛛猴在觅食过程中的裂变融合社会结构     | Bansal, et al.      | 2014 |
| 白蚁群算法 <sup>[26]</sup>     | 白蚁种群          | Roth and Wicker       | 2006 | 蚁狮优化算法 <sup>[46]</sup>   | 蚁狮捕猎蚂蚁的狩猎机制            | Mirjalili           | 2015 |
| 虚拟蚂蚁算法 <sup>[27]</sup>    | 蚂蚁觅食          | Yang, et al.          | 2006 | 人工海藻算法 <sup>[47]</sup>   | 海藻繁殖                   | Uymaza, et al.      | 2015 |
| 人工蜂群算法 <sup>[16]</sup>    | 蜂群觅食          | Karaboga and Basturk  | 2007 | 蜻蜓优化算法 <sup>[48]</sup>   | 自然界中蜻蜓的静态和动态群集行为       | Mirjalili           | 2015 |
| 生物地理学优化算法 <sup>[28]</sup> | 生物地理学原理, 生物迁移 | Simon                 | 2008 | 细菌菌落优化算法 <sup>[49]</sup> | 细菌菌落生长演化的基本规律          | 李明和杨成梧              | 2015 |
| 鱼群搜索 <sup>[29]</sup>      | 鱼群游动          | Filho, et al.         | 2008 | 乌鸦搜索算法 <sup>[50]</sup>   | 乌鸦的智能行为                | Askarzadeh          | 2016 |
| 布谷鸟搜索 <sup>[30]</sup>     | 布谷鸟           | Yang and Deb          | 2009 | 海豚群优化算法 <sup>[51]</sup>  | 海豚群觅食行为                | Yong, et al.        | 2016 |
| 群搜索优化算法 <sup>[31]</sup>   | 动物搜索行为        | He, et al.            | 2009 | 鲨鱼优化算法 <sup>[52]</sup>   | 鲨鱼觅食行为                 | Oveis, et al.       | 2016 |
| 蝙蝠算法 <sup>[32]</sup>      | 蝙蝠回声定位        | Yang                  | 2010 | 鲸群优化算法 <sup>[53]</sup>   | 鲸群觅食                   | Mirjalili and Lewis | 2016 |
| 萤火虫算法 <sup>[33]</sup>     | 生物萤火虫         | Yang                  | 2010 | 蝗虫优化算法 <sup>[54]</sup>   | 自然界蝗虫种群捕食行为            | Saremi, et al.      | 2017 |
| 白蚁群优化 <sup>[34]</sup>     | 白蚁群           | Hedayatzadeh, et al.  | 2010 | 樽海鞘群优化算法 <sup>[55]</sup> | 樽海鞘链的群体行为              | Mirjalili, et al.   | 2017 |
| 烟花算法 <sup>[35]</sup>      | 夜空中烟花爆炸       | 谭营,等                  | 2010 | 花斑鬣狗算法 <sup>[56]</sup>   | 花斑鬣狗通过合作和自身能力进行狩猎的社会行为 | Dhiman and Kumar    | 2017 |
| 果蝇优化算法 <sup>[36]</sup>    | 果蝇            | Pan                   | 2011 | 松鼠搜索算法 <sup>[57]</sup>   | 飞行松鼠的滑翔行为              | Jain, et al.        | 2018 |

智能的一个非常重要的特性就是无中心、自组织, 这是 Ad Hoc 网络区别于传统网络最鲜明的特点, 因此集群智能算法在 Ad Hoc 网络中得到了极为广泛的应用。以路由协议为例, 自 20 世纪 90 年代开始, 有大量的基于蚁群优化算法的 Ad Hoc 路由协议开发出来, 包括基本网络通信路由协议, 如 AntNet(2018)<sup>[58]</sup>、ARA<sup>[59]</sup>、PERA<sup>[60]</sup>、

AntHocNet<sup>[61]</sup>等, 以及满足特定应用需求的路由算法, 如 ACO-EEAODR<sup>[62]</sup>、AntHocMMP<sup>[63]</sup>、POSANT<sup>[64]</sup>等。

大数据技术与机器学习作为近些年的研究热点, 同样有许多集群智能算法的身影。以特征提取过程为例, 粒子群优化算法、蚁群优化算法、萤火虫算法、布谷鸟搜索等都取得了很不错的效

果, Abdi 等<sup>[65]</sup>于 2013 年提出的用于红皮病的诊断模型, 便是利用基于粒子群优化算法与支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 的方法作特征提取。Chen 等<sup>[66]</sup>利用蚁群优化算法结合粗糙集理论提取最小特征集, 并得到了很好的结果。Huang<sup>[67]</sup>则结合蚁群优化算法和 SVM 方法提取小而优的特征集, 所提出的基于蚁群优化算法的分类器极大地提高了分类精度。Kadri 等<sup>[68]</sup>提出的基于二进制编码的蚁群优化算法通过消除噪声特征的方法提取最优特征集。

集群智能算法在智能电网中也得到了广泛的应用<sup>[69-70]</sup>, 文献[71]将粒子群优化算法用于分布式发电机系统来减少系统的能量损失, 文献[72]应用粒子群算法优化分布式能源系统中的效益成本比, 同样粒子群优化算法还用于实现智能电网的需求侧管理系统<sup>[73]</sup>, 类似的工作还有文献[74-75]。这些工作都成功地减少了系统的能源损耗, 展现了集群智能算法在能源系统与智能电网领域的应用潜力。集群智能算法同样促进了城市智能交通领域的发展, 文献[76]将车辆的燃料损耗加入算法的评估函数中, 使用蚁群优化算法做路径规划, 在得到最优路径的同时有效地节省了车辆的整体燃料消耗。文献[77-78]使用粒子群优化算法来优化电池使用, 以延长电动车辆的电池使用寿命。文献[79]将粒子群优化用于车辆避碰, 所提出的 PID 控制器, 不仅可使 CCAS 实现基本功能, 还可实现车辆动态稳定性、行驶舒适性和燃油经济性的改善。粒子群优化在文献[80]中用于交通流量预测, 同样的任务, 文献[81]则采用了人工神经网络与蚁群优化算法的混合算法。关于智能交通中集群智能算法的应用, 更多可参考文献[82-83], 而文献[84]与文献[85-86]分别是应用智能算法解决智慧交通系统的信号灯控制问题与交通拥塞问题的综述性文章。近些年其他的研究热点, 如社交网络分析<sup>[87-88]</sup>、医疗与卫生系统<sup>[89-91]</sup>、网络空间安全<sup>[92-93]</sup>、游戏 AI<sup>[94-95]</sup>等同样具有集群智能算法的身影。

#### 4 集群智能理论研究

集群智能自诞生以来就广受工业与学术界关

注, 一个重要的原因是其神秘的运行机制。其在很多问题上都能取得极优秀的结果, 但是学界始终不能揭示出这其中的理论基础, 这些困惑始终激励着研究者对其进行更深入的研究。这些研究可以总结为三个主要问题: 集群智能算法智能行为的产生机制; 不同集群智能算法面对同一问题的性能表现不同的原因; 在选定场景后, 使集群智能算法性能最优的设计方法。这些问题的任何一点进展都是集群智能优化领域的极大突破, 吸引研究者的持续投入。

研究者首先想要弄清楚, 智能从何而来? 已经被学术界所知的是, 集群智能这一特性并非所有种群都具有, 它只存在于具有社会性特征的群居个体之间进行交互的活动中。研究者普遍从生物界出发研究这一问题, Bonabeau<sup>[3]</sup>研究了生物蚁群的觅食、运输、分工等行为, 并在分析后建模构造了集群智能算法。更普遍的结论是由 Kennedy 等<sup>[96]</sup>给出的, 他们研究了鸟群的协同运动后认为: 集群智能产生于社会交往, 文化和认知也是人类社交的结果。

智能产生于交互, 那为什么在同一个问题中不同的集群智能算法性能差距如此巨大, 即为什么一个集群智能算法在某些问题中要比其他集群智能算法好那么多? 这一问题在宏观上可以用“没有免费的午餐 (No Free Lunch)”原理解释<sup>[97]</sup>, 它表明了不存在任何一个优化算法可以在所有场景中都优于其他所有的算法。所以研究者转而对算法特性做更深入的研究, 首先就是对集群智能比传统算法最大的优势特性——收敛性和计算复杂性的分析。其中最重要的研究之一就是对集群智能算法收敛性的分析, 即研究在给定条件下算法能够保证的收敛速度, 包括马尔可夫模型、不动点理论、变量分析、动态系统等模型都已用于这方面的研究<sup>[98]</sup>, 如文献[99-100]利用动态系统和 Logistic 映射等方法研究了粒子群优化, 萤火虫算法中保证算法收敛的参数值的范围; 文献[101]则采用马尔可夫链蒙特卡罗方法对集群智能算法内部代理之间的交互建模进而研究其收敛性。



在理解不同算法对同一问题的性能差异后, 还需要知道面对特定问题集群智能算法求解性能与问题建模方式之间有什么关系, 或者说给定应用场景后如何选择设计策略使集群智能算法的性能最优? 有学者引入适应度曲面分析<sup>[102]</sup>的方法, 分析解空间与集群智能算法设计之间的关系, 例如文献[103]使用带随机游走的适应度曲面分析方法选择合适的启发式算法用于解决蛋白质结构预测问题。然而, 目前这些工作都是针对特定问题, 难以用于推广解决更一般的问题。

集群智能算法的搜索效率同样是值得关心的问题, 这一问题通常是研究算法搜索的收敛性和多样性的平衡<sup>[104-105]</sup>。搜索候选解集的多样性通常是算法成功找到最优解的前提, 但是多样性的增加会导致收敛性降低并直接影响搜索效率。根据这一原则, 目前的研究者主要是根据自己特定的问题需求调节参数<sup>[106]</sup>实现算法的高效率搜索。

## 5 结束语

近年来, 关于集群智能算法的研究增长迅速, 但是这一领域所遗留下的问题同样很多。首先, 学术界仍缺乏一个适用于所有算法的收敛性分析框架, 虽然研究者提出了很多针对某些经典集群算法, 如粒子群优化或蚁群优化算法的收敛性分析方法, 但是却很难将之推广到其他算法上。其次, 针对特定问题, 算法的参数选择如种群大小、学习率等仍然只能依靠经验与实验测试, 而没有确定性的理论指导。更重要的是, 在集群智能算法性能对比中, 还没有一个研究工作是公认的很好的方法, 多数研究者在做性能测试时都只能对比给定计算结果所需的迭代次数或给定迭代次数下的计算结果, 这样的结果受算法参数和评估函数选取的影响极大, 不具有推广价值, 还需要找到一个通用可推广的集群智能算法性能评估方法。

未来针对集群智能算法的研究仍然以优化应用为主, 但是理论研究所占的比重也将会逐步增加。没有免费的午餐原理告诉我们, 没有单一的

算法可以被指定为最佳算法, 只要它经过足够多的问题的测试, 总是会激励研究人员开发新的计算智能算法。

总体而言, 目前对集群智能的了解十分有限, 任何一项微小的理论成果都是这一领域的巨大突破。虽然困难重重, 但是需要相信不管未来如何发展, 集群智能算法与集群智能研究都会在各领域扮演更加重要的角色。

## 参考文献

- [1] Dario P, Sandini G, Aebischer P. Robots and biological systems: Towards a new bionics?[J]. *Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems*, 1993(38): 703-712.
- [2] Kordon A K. *Swarm intelligence: The benefits of swarms[M]. Applying Computational Intelligence*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 145-174.
- [3] Bonabeau E. *Swarm intelligence: From natural to artificial systems[J]. Santa Fe Institute Studies on The Enances of Complexity*, 1999: 1-24.
- [4] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, 1996, 26(1): 29-41.
- [5] Kennedy J. Particle swarm optimization[C]. *Proceeding of 1995 IEEE International Conference. Neural Networks, Perth, Australia, Nov. 27-Dec. 2011*, 4(8): 1942-1948.
- [6] Arpan K K. Bio inspired computing - a review of algorithms and scope of applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 59: 20-32.
- [7] Del Ser J, Osaba E, Molina D, et al. Bio-inspired computation: Where we stand and what's next[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019(48): 220-250.
- [8] 武坤琳, 葛悦涛. 俄罗斯《2030年前国家人工智能发展战略》浅析[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(2): 63-66.
- [9] 王雅琳, 杨依然, 王彤, 等. 2019年无人系统领域发展综述[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(6): 53-57.
- [10] 张肇聿, 王一琳, 李志. 基于人工智能技术的25个行业发展趋势[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(1): 17-22.
- [11] 张思齐, 沈钧戈, 郭行, 等. 智能无人系统改变未来[J]. *无人系统技术*, 2018, 1(3): 1-7.
- [12] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1): 58-73.
- [13] Bergh F V D, Engelbrecht A P. Training product unit networks using cooperative particle swarm optimisers[C]. *International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings (Cat. No.01CH37222)*, Washington, DC, USA, 2001.
- [14] 高鹰, 谢胜利. 基于模拟退火的粒子群优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2004(1): 47-50.

- [15] 刘元, 阳春华, 李勇刚, 等. 粒子群算法在锌电解优化调度中的应用[J]. 自动化与仪表, 2006(4): 11-14.
- [16] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Kluwer Academic Publishers, 2007, 39(3): 459-471.
- [17] Bansal J C, Sharma H, Jadon S S, et al. Spider monkey optimization algorithm for numerical optimization[J]. Memetic Computing, 2014, 6(1): 31-47.
- [18] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38.
- [19] Liu Y, Passino K M. Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: Models, principles, and emergent behaviors[J]. Journal of Optimization Theory & Applications, 2002, 115(3): 603-628.
- [20] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(3): 210-225.
- [21] Krishnanand K N, Ghose D. Detection of multiple source locations using a glowworm metaphor with applications to collective robotics[M]. Proceedings - 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium. Pasadena, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005(2005): 84-91.
- [22] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[J]. Technical Report TR06, Erciyes University, 2005(6): 10.
- [23] Pham D T, Ghanbarzadeh A, Ko E, et al. The bees algorithm - a novel tool for complex optimisation problems[M]. The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Ltd, 2006: 454-459.
- [24] Pan J, Tsai P, Chu S. Cat swarm optimization[C]. Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [25] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [26] Martin R, Stephen W, Ajith A, et al. Termite: A swarm intelligent routing algorithm for mobile wireless ad-hoc networks[M]. New York, USA: Cornell University, 2005: 155-184.
- [27] Yang X S, Lees J M, Morley C T. Application of virtual ant algorithms in the optimization of CFRP shear strengthened pre-cracked structures[C]. Computational Science - ICCS 2006, 6th International Conference, Reading, UK, May 28-31, 2006, Proceedings, Part I.
- [28] Simon D. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702-713.
- [29] Filho C J A B, Neto F B D L, Lins A J C C, et al. A novel search algorithm based on fish school behavior[C]. 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Singapore, 2008.
- [30] Yang X S, Deb S. Cuckoo Search via Lévy flights[C]. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), Coimbatore, India, 2009.
- [31] He S, Wu Q H, Saunders J R. Group search optimizer: An optimization algorithm inspired by animal searching behavior[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(5): 973-990.
- [32] 黎成. 新型元启发式蝙蝠算法[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(23): 6569-6572.
- [33] Yang, She X. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation[J]. International Journal of Bio Inspired Computation, 2010, 2(2): 78-84.
- [34] Hedayatzadeh R, Salmasi F A, Keshtgari M, et al. Termite colony optimization: A novel approach for optimizing continuous problems[C]. 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, Isfahan, Iran, 2010.
- [35] 谭莹, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 515-528.
- [36] 潘文超. 应用果蝇优化算法优化广义回归神经网络进行企业经营绩效评估[J]. 太原理工大学学报(社会科学版), 2011, 29(4): 1-5.
- [37] Yang X S. Flower pollination algorithm for global optimization[J]. Unconventional Computation and Natural Computation, 2012(7445): 240-249.
- [38] Gandomi A H, Alavi A H. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2012, 17(12): 4831-4845.
- [39] Mozaffari A, Fathi A, Behzadipour S. The great salmon run: A novel bio-inspired algorithm for artificial system design and optimisation[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2012, 4(5): 286-301.
- [40] Rui T, Simon F, Xin-She Y, et al. Wolf search algorithm with ephemeral memory[C]. Seventh International Conference on Digital Information Management (ICDIM 2012), Macau, Macao, 2012.
- [41] Kaveh A, Farhoudi N. A new optimization method: Dolphin echolocation[J]. Advances in Engineering Software, 2013(59): 53-70.
- [42] Neshat M, Sepidnam G, Sargolzaei M. Swallow swarm optimization algorithm: A new method to optimization[J]. Neural Computing & Applications, 2013, 23(2): 429-454.
- [43] Li X, Zhang J, Yin M. Animal migration optimization: An optimization algorithm inspired by animal migration behavior[J]. Neural Computing & Applications, 2014(24): 7-8.
- [44] Meng X, Liu Y, Gao X, et al. A new bio-inspired algorithm: Chicken swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014(8794): 86-94.
- [45] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014: 46-61.
- [46] Seyedali M. The ant lion optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2015(83): 80-98.
- [47] Uymaz S A, Tezel G, Yel E. Artificial algae algorithm (AAA) for nonlinear global optimization[J]. Applied Soft Computing, 2015(31): 153-171.
- [48] Mirjalili S. Dragonfly algorithm: A new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(4): 1053-1073.
- [49] Li M D, Zhao H, Weng X W, et al. A novel nature-inspired algo-

- rithm for optimization: Virus colony search[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016(92): 65-88.
- [50] Alireza A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm[J]. *Computers and Structures*, 2016(169): 1-12.
- [51] Yong W, Tao W, Cheng Z Z, et al. A new stochastic optimization approach: Dolphin swarm optimization algorithm[J]. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 2016(15): 1650011.
- [52] Abedinia O, Amjady N, Ghasemi A. A new metaheuristic algorithm based on shark smell optimization[J]. *Complexity*, 2016(21): 97-116.
- [53] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016(95): 51-67.
- [54] Saremi, Shahrzad, Mirjalili, et al. Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017(105): 30-47.
- [55] Mirjalili S, Gandomi A H, Mirjalili S Z, et al. Salp swarm algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017(114): 163-191.
- [56] Dhiman G, Kumar V. Spotted hyena optimizer: A novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017(114): 48-70.
- [57] Jain M, Singh V, Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018(44): 148-175.
- [58] Di Caro G. Antnet: Distributed stigmergetic control for communications networks[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1998(9): 317-365.
- [59] Mesut G, Sorges U, Bouazizi I. ARA - the ant-colony based routing algorithm for manets[C]. *Proceedings of International Conference on Parallel Processing Workshop*, Vancouver, BC, Canada, 2002.
- [60] Baras, J, Harsh M. A probabilistic emergent routing algorithm for mobile ad hoc networks[J]. *Proceedings of Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, 2003(8): 1-10.
- [61] Gianni D C, Frederick D, Luca M G. Anthocnet: An adaptive nature - inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 2005(5): 443-455.
- [62] Woungang I, Dhurandher S K, Obaidat M S, et al. An ant-swarm inspired energy-efficient ad hoc on-demand routing protocol for mobile ad hoc networks[C]. *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapest, Hungary, 2013.
- [63] Vijayalakshmi P, Francis S A J, Dinakaran J A. A robust energy efficient ant colony optimization routing algorithm for multi-hop ad hoc networks in manets[J]. *Wireless Networks*, 2016 (6): 2081-2100.
- [64] Kamali S, Opatrny J. POSANT: A position based ant colony routing algorithm for mobile ad-hoc networks[C]. *2007 Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07)*, Guadeloupe, French Caribbean, 2007.
- [65] Abdi M J, Giveki D. Automatic detection of erythematous-squamous diseases using PSO-SVM based on association rules[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013(1): 603-608.
- [66] Chen Y, Miao D, Wang R. A rough set approach to feature selection based on ant colony optimization - sciencedirect[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(3): 226-233.
- [67] Huang C L. ACO-based hybrid classification system with feature subset selection and model parameters optimization[J]. *Neurocomputing*, 2009, 73(1-3): 438-448.
- [68] Kadri O, Mouss L H, Mouss M D. Fault diagnosis of rotary kiln using SVM and binary ACO[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2012, 26(2): 601-608.
- [69] Verma P, Sanyal K, Srinivasan D, et al. Computational intelligence techniques in smart grid planning and operation: A survey[J]. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 2018: 891-896.
- [70] Gamarra, C, Guerrero J M. Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015(48): 413-424.
- [71] Ramirez-Rosado I J, Dominguez-Navarro J A. Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(4): 1801-1810.
- [72] Basu A K, Chowdhury S. Strategic deployment of CHP-based distributed energy resources in microgrids[C]. *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, Canada, 2009.
- [73] Logenthiran T, Srinivasan D, Phyu E. Particle swarm optimization for demand side management in smart grid[C]. *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, Bangkok, Thailand, 2015.
- [74] Zhou Y, Xu G. Demand side energy management with PSO and regulated electric vehicles behaviours[C]. *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Hong Kong, China, 2014.
- [75] Nayak S K, Sahoo N, Panda G. Demand side management of residential loads in a smart grid using 2d particle swarm optimization technique[C]. *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, Bhubaneswar, India, 2015.
- [76] Jabbarpour M R, Zarrabi H, Jung J J, et al. A green ant-based method for path planning of unmanned ground vehicles[J]. *IEEE Access*, 2017: 1-1.
- [77] Mesbahi T, Rizoug N, Patrick B, et al. Optimal energy management for a Li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on a particle swarm optimization incorporating nelder-mead simplex approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017(2): 1-1.
- [78] Guo L, Lin X, Ge P, et al. Torque distribution for electric vehicle with four in-wheel motors by considering energy optimization and dynamics performance[C]. *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Los Angeles, CA, 2017.
- [79] Wu X C, Qin G H, Sun M H, et al. Using improved particle swarm optimization to tune PID controllers in cooperative collision avoidance systems[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(9): 1385-1396.



- [80] Chan K Y, Dillon T, Chang E, et al. Prediction of short-term traffic variables using intelligent swarm-based neural networks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 263-274.
- [81] Song L. Improved intelligent method for traffic flow prediction based on artificial neural networks and ant colony optimization[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 7(8): 272-280.
- [82] Ser J D, Osaba E, Sanchez-Medina J J, et al. Bioinspired computational intelligence and transportation systems: A long road ahead[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(2): 466-495.
- [83] 吴琦, 于海靖, 谢勇, 等. 人工智能在自动驾驶领域的应用及启示[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 23-28.
- [84] Zhao D, Dai Y, Zhang Z. Computational intelligence in urban traffic signal control: A survey[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2012, 42(4): 485-494.
- [85] Jabbarpour M R, Zarrabi H, Khokhar R H, et al. Applications of computational intelligence in vehicle traffic congestion problem: A survey[J]. Soft Computing, 2017(22): 2299-2320.
- [86] 张丹, 吴陈炜, 谢安桓. 城市交通问题的空中解决方案——自主载人飞行器研究综述[J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 1-13.
- [87] Mazzara M, Biselli L, Greco P P, et al. Social networks and collective intelligence: A return to the Agora[J]. Computer Science, 2013, 39(1): 51-64.
- [88] Gao C, Lan X, Zhang X, et al. A bio-inspired methodology of identifying influential nodes in complex networks[J]. Plos One, 2013(8): e66732.
- [89] Karnan M, Logheshwari T. Improved implementation of brain MRI image segmentation using Ant Colony System[C]. 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Coimbatore, India, 2010.
- [90] Logeswari T, Karnan M. An improved implementation of brain tumor detection using segmentation based on hierarchical self organizing map[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2010: 591-595.
- [91] Soleimani V, Vincheh F H. Improving ant colony optimization for brain MRI image segmentation and brain tumor diagnosis[C]. 2013 First Iranian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA), Birjand, Iran, 2013.
- [92] Firdaus A, Badrul A N, Shahabuddin S, et al. Dyhap: Dynamic Hybrid ANFIS-PSO Approach for Predicting Mobile Malware[J]. Plos One, 2016, 11(9): e0162627.
- [93] Cui Z, Xue F, Cai X, et al. Detection of malicious code variants based on deep learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018: 1-1.
- [94] Nogueira-Collazo M, Porras C C, Fernandez-Leiva A. Competitive algorithms for coevolving both game content and AI. A case study: Planet wars[J]. IEEE Transactions on Computational Intelligence & Ai in Games, 2016(4): 325-337.
- [95] Recio G, Martin E, Estebanez C, et al. Antbot: Ant colonies for video games[J]. IEEE Transactions on Computational Intelligence & Ai in Games, 2012(4): 295-308.
- [96] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y H. Swarm intelligence[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [97] Wolpert D H, Macready W G. No free lunch theorems for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997(1): 67-82.
- [98] Yang X S, Deb S, Zhao Y, et al. Swarm intelligence: Past, present and future[J]. Soft Computing. 2018(22): 5923-5933.
- [99] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [100] Yang X S. Metaheuristic optimization: Algorithm analysis and open problems[J]. International Symposium on Experimental Algorithms, 2012(6630): 21-32.
- [101] Yang X S. Nature-inspired algorithms and applied optimization[J]. Studies in Computational Intelligence, 2018: 1-25.
- [102] Pitzer E, Affenzeller M. A comprehensive survey on fitness landscape analysis[J]. Recent Advances in Intelligent Engineering Systems, 2012: 161-191.
- [103] Jana N D, Sil J, Das S. Selection of appropriate metaheuristic algorithms for protein structure prediction in AB off-lattice model: A perspective from fitness landscape analysis[J]. Information Sciences, 2017, s391-392: 28-64.
- [104] Yang X S. Efficiency analysis of swarm intelligence and randomization techniques[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2013, 9(2): 189-198.
- [105] Crepinsek M, Liu S H, Mernik M. Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 2013, 45(3): Article 35.
- [106] Phan H D, Ellis K, Barca J C, et al. A survey of dynamic parameter setting methods for nature-inspired swarm intelligence algorithms[J]. Neural Computing and Applications, 2019(8): 567-588.

#### 作者简介：



秦小林 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为自动推理、集群智能、大数据智能分析。



罗刚 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机集群控制。



李文博 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机集群控制。



张国华 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为人工智能及其应用。

[引用格式] 符小卫, 张嘉平, 魏可. 基于联盟的无人机集群避障方法[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 11-17.

# 基于联盟的无人机集群避障方法

符小卫, 张嘉平, 魏可

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

**摘要:** 无人机集群的避障行为作为群体行为的一种, 在国内外得到了广泛的研究和应用。针对切换拓扑结构下的集群避障控制问题, 设计了仅需个别无人机获取虚拟长机信息的集群避障方法。通过对无人机集群划分联盟, 选出集群子网中的导航信息无人机来获取虚拟长机的信息, 在避障时可保证集群的连通性。在此基础上, 通过对集群中各导航信息无人机施加一个垂直于虚拟长机运动轨迹的额外排斥力, 并将虚拟长机对导航信息无人机的引导力权值因子进行设计, 使其成为与虚拟长机和导航信息无人机距离相关的自适应因子。不但保证集群在面对较大障碍物时能有效地进行避障, 而且解决了传统人工势场避障方法中存在的局部极小值问题。仿真结果表明了所建模型的合理性和求解方法的有效性。

**关键词:** 无人机集群; 拓扑切换; 信息浓度; 联盟; 改进 BFS; 避障控制

中图分类号: V249, V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)03-11-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.022

## Obstacle Avoidance Method for UAV Swarm based on Alliance

FU Xiaowei, ZHANG Jiaping, WEI Ke

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** As a kind of swarm behavior, the obstacle avoidance behavior of UAV swarm has been widely studied and applied. Aiming at UAV swarm obstacle avoidance control problem under the switching topology, a swarm obstacle avoidance method when only individual UAVs are required to obtain virtual leader's information is used. The Navigation Information UAV (NIU) in the cluster subnet is selected by dividing the UAV cluster into alliances, and the NIU obtains the information of the virtual long-term aircraft, which can ensure the connectivity of the cluster when avoiding obstacles. On this basis, an additional repulsive force perpendicular to the motion trajectory of the virtual flight is applied to each NIU in the cluster, and the guiding force weight factor of the virtual flight to the NIU as an adaptive factor related to the distance between the virtual flight and the NIU is designed. This method not only ensures that the cluster can effectively avoid obstacles when facing larger obstacles, but also solves the local minimum problem in the traditional artificial potential field obstacle avoidance method. The simulation results show the rationality of model and the validity of the solution method.

**Key words:** UAV Swarm; Topology Switching; Information Density; Alliance; Improve BFS(Breadth-First Search); Obstacle Avoidance Control

## 1 引言

近年来,无人机集群在军事和民用领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>,得到了科研和工程领域的重点关注。无人机集群指通过自组织机制,使具备有限自主能力的多架无人机在没有集中指挥控制的情况下,通过相互间信息通信产生整体效应,实现较高度度的自主协作,从而在尽量少的人员干预下完成预期的任务目标。本文重点研究无人机集群避障控制方法。针对无人机集群避障问题,国内外学者进行了大量研究,常用的防碰撞控制方法包括人工势场、神经网络、最优化理论等。其中人工势场原理简单、易于理解、计算量小,在避障控制策略中成为首选方法<sup>[2]</sup>。

文献[3]用势能场方法模拟了群聚行为和凝聚力,并使用结构势函数来实现集群间的防碰撞,当两机之间的距离偏小时,排斥因子起主要作用,两机分离,避免碰撞,该方法并不能保证相对距离大于最小安全距离。文献[4]提出了一种多agent动态系统的快速避障算法,提高了系统速度一致性的快速性,并且减少了能量消耗。文献[5]提出一种复合矢量人工势场,有效实现了无人机编队避障并追踪目标,但当无人机速度过大或障碍物周围产生的球形人工势场强度较弱时,算法可能会失效导致发生碰撞现象。文献[6]针对无人机编队避障问题,提出了领航法和改进人工势能相结合的编队方法,其缺点有:(1)对集群中leader的安全性要求很高,leader的行为直接关系到队形控制的成败;(2)集群中的leader是孤立存在的,即leader无法获取follower的状态信息,如果基于链式思想,当follower状态误差随着累加达到上界时,将直接导致整个集群队形失控。文献[7]采用动态人工势场法,结合动态战场环境,给出了无人机避障解决方案。Dai等<sup>[8]</sup>将文献[1]中的算法扩展到了三维空间,并给出了对不规则立体障碍物的避障算法,但其要求集群中每架无人机都能获取虚拟长机的信息。文献[9]提出一种新的无须获得相邻无人机速度的六自由度固定翼无人

机群的集群和避障控制方法,其同样要求集群中每架无人机都必须获取虚拟长机信息。

虽然现有的许多文献都可以从各种角度去设计基于人工势场的无人机集群避障方法,但存在的问题是:在切换拓扑结构的集群避障控制中,要求集群中每架无人机都能获取虚拟长机信息。虽然人工势场法是最常用的避障方法,但依然存在的共性问题是无机、障碍物以及目标之间存在局部极小值,即无人机容易陷入引力与斥力的平衡点处,从而无法继续前进。此外虚拟长机的导航引导作用力会随无人机与虚拟长机的距离增大而增大,会导致无人机不断逼近虚拟长机,虽然无人机受到的排斥力会随障碍物距离缩小而增大,但由于所采用的排斥力势能函数是有界的,即排斥作用力也是有界的,所以可能会出现无人机与障碍物距离过近而小于最小安全距离甚至出现碰撞现象。

本文在网络拓扑变换的情况下,以划分联盟的方式,灵活地确定与虚拟长机进行通信的无人机数量,具有通信结构灵活与鲁棒性高的特点。另外从全局角度看,集群中获得虚拟长机信息的无人机数量越少越好,有利于节省计算资源。随着集群的连通程度不断增大,获得虚拟长机信息的无人机数量也不断减少,当整个集群恢复连通时,只需一架无人机获取虚拟长机信息,就能保证集群的连通性和稳定性。满足全局通信资源消耗率低的要求。另外,通过对集群中部分无人机施加额外的排斥力,不但在避障过程中降低了无人机对虚拟长机的跟踪趋势,而且解决了当导航引导力与排斥力大小相等方向相反时产生的局部极小值问题。

## 2 备用知识和运动模型

### 2.1 图论

代数图论<sup>[10]</sup>是解决复杂网络一致性问题的重要理论基础与研究工具,其中图论是离散数学的一个研究分支,它以图为研究基础。本文无人机间的通信方式是双向通信。假设无人机具有相



同的通信距离  $r$ , 第  $i$  架无人机的邻域可定义为:

$$N_i = \{j \mid \|q_i - q_j\| < r, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

有限节点集:

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (2)$$

和边集:

$$E \subseteq V \times V \quad (3)$$

组成的网络  $G = V(V, E(q))$  为无向图。无向图节点无序, 可用如下方式表示:

$$(i, j) \in E(q) \Leftrightarrow (j, i) \in E(q) \quad (4)$$

无人机  $v_i$  和无人机  $v_j$  之间的连接权重为:

$$A = [\alpha_{ij}]_{N \times N} \quad (5)$$

其中:  $\alpha_{ij} = 1$  表示无人机  $v_i$  可以与无人机  $v_j$  进行通信, 否则  $\alpha_{ij} = 0$ 。

图的拉普拉斯矩阵:

$$L = [l_{ij}] \in R^{N \times N} (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

定义为:  $l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ ,  $l_{ij} = -a_{ij}$ ,  $i \neq j$ 。

## 2.2 无人机运动模型

一阶系统仅考虑单一物理状态量, 但由于现实无人机个体动态性能的复杂性, 需要考虑多种物理量且物理量之间相互依赖, 而二阶系统主要将位移和速度作为物理状态量, 符合实际无人机编队飞行模型需求, 因此本文采用二阶一致性算法进行无人机集群编队控制研究。

考虑到由  $N$  架无人机组成的集群系统, 假设二维空间中分布  $N$  架可自由运动的无人机, 不考虑无人机内环动态, 将单个无人机视为质点, 每个质点的动力学系统抽象化为二阶积分系统<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

无人机速度和输入控制量需满足:

$$v_i = \begin{cases} v_i, & \|v_i\| \leq v_{\max} \\ v_{\max} \frac{v_i}{\|v_i\|}, & \|v_i\| \geq v_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

$$u_i = \begin{cases} u_i, & \|u_i\| \leq A_{\max} \\ A_{\max} \frac{u_i}{\|u_i\|}, & \|u_i\| \geq A_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\|\cdot\|$  表示欧氏范数; 式(7)中  $x$  代表无人机位置,  $v$  代表无人机速度,  $u$  代表无人机输入控制量; 式(8)中  $v_{\max}$  代表无人机最大速度; 式(9)中  $A_{\max}$  代表无人机最大加速度。

## 3 集群避障方法

文献[11]针对无人机集群拓扑切换的情况设计了一种以距离为原则的联盟划分方法。当无人机集群子网间的距离大于通信距离时, 该集群可以划分为一个联盟。与此同时, 联盟内部无人机成员以信息浓度大小为标准彼此间竞争, 决策出信息浓度最大的无人机作为导航信息无人机获取虚拟长机的信息; 联盟内其他成员无人机作为非导航信息无人机通过与导航信息无人机通信间接获取虚拟长机信息。

通过划分联盟的方式可以灵活地确定与虚拟长机进行通信的无人机数量, 使通信结构更加灵活, 减少了控制开销、增加了鲁棒性。从全局角度看, 集群中获取虚拟长机信息的无人机数量越少越好, 有利于节省计算资源。随着集群的连通程度不断增大, 获得虚拟长机的信息的无人机数量不断减少, 当整个集群恢复连通时, 只需要一架无人机获取虚拟长机信息, 就能保证集群的连通性和稳定性。满足全局通信资源消耗率低的特点。另外通过对预期队形进行离线分层和设计相应的修复规则, 可以解决无人机损伤时的编队自修复问题。无人机集群联盟划分的具体方法可以参考文献[11]。

### 3.1 避障方法设计

首先对无人机探测到的障碍物作外接圆处理, 并将其视为  $\alpha$  无人机, 联盟划分完成后, 通过构造有界的排斥力势能函数, 当集群拓扑结构发生变换时, 如果自身邻域内的无人机 (包括  $\alpha$  无人机) 与此无人机的距离小于安全阈值  $\text{dis}_{\text{safe}}$ , 则认为此无人机受到排斥力  $F_s$  作用, 以防止发生碰撞。此外, 当遇到障碍物或威胁范围较大时, 如图1所示, 图中红色区域为障碍区, 黄色五角星为虚拟长机, 绿色区域为障碍物危险区, 由于

虚拟长机的运动轨迹位于障碍物中间时，虚拟长机的导航引导作用力  $G_s$  会随联盟中的导航信息——无人机与虚拟无人机长机的距离增大而增大，导致导航信息无人机不断逼近虚拟长机，虽然导航信息无人机受到的排斥力  $F_s$  会随障碍物距离缩小而增大，但由于所采用的排斥力势能函数是有界的，即排斥作用力也是有界的<sup>[12]</sup>，所以可能会出现无人机与障碍物距离过近而小于最小安全距离甚至出现碰撞现象。

一方面，以虚拟长机运动轨迹为基准，作导航信息无人机对该轨迹的垂线，并从垂线交点到导航信息无人机方向对导航信息无人机施加一个额外的排斥作用力，即导航信息无人机也受到来自虚拟无人机轨迹方向的排斥力，所以现在的排斥力是原先的排斥力和虚拟长机轨迹对导航信息无人机的排斥力的合力，这样不但在避障过程中降低了导航信息无人机对虚拟长机的跟踪趋势，而且解决了当导航引导力与排斥力大小相等方向相反时产生的局部极小值问题。

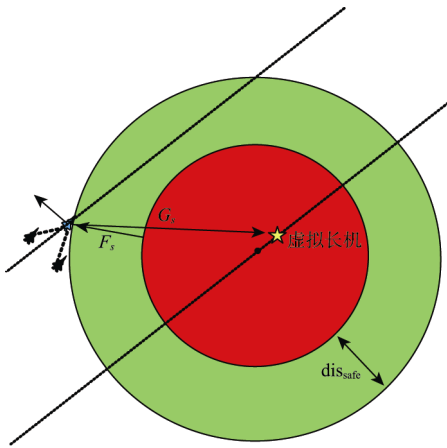


图1 受力分析图

Fig. 1 Force analysis diagram

另一方面，考虑到在避障过程中联盟中的导航信息无人机主要受到障碍物排斥力、虚拟长机对其的导航引导力及邻域内非导航信息无人机的排斥吸引力，此时将导航引导力的权值因子由固定的常数项改变为自适应因子  $k_1$ ，自适应因子的建立规则以无人机与障碍物的距离为标准，当距离减小时，导航引导力权值因子  $k_1$  减小，距离增

大时反之。

引用无人机间的人工势能函数  $\psi_\alpha(z)$ <sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} \psi_\alpha(z) = \int_{d_a}^z \phi_\alpha(s) ds \\ \phi_\alpha(z) = \rho_h(z/R_a)\phi(z-d_a) \\ \phi(z) = \frac{1}{2}[(a+b)\sigma_1(z+c) + a-b] \\ \sigma_1(z) = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \end{cases} \quad (10)$$

其中， $\phi(z)$  是一个 S 型函数， $a, b, c$  满足  $0 < a < b$ ， $c = \frac{|a-b|}{4ab}$ ，其中：

$$\rho_h(z) = \begin{cases} 1, & z \in (0, h) \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\pi \frac{z-h}{1-h}\right) \right], & z \in (h, 1) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (11)$$

$\|\bullet\|_\sigma$  定义为  $\sigma$  范数：

$$\|z\|_\sigma = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \sqrt{1 + \varepsilon \|z\|^2} - 1 \right] \quad (12)$$

$\|\bullet\|$  是欧氏范数， $\varepsilon > 0$ ， $\sigma$  范数用来描述无人机间的距离； $d_a$  为无人机间的期望距离； $R_a$  为无人机间的通信半径；设  $x_{ij}$  为无人机  $i$  和无人机  $j$  的距离，当  $\|x_{ij}\| > d_a$  时，构造函数才能产生吸引力。当  $\|x_{ij}\| = d_a$  时， $\psi_\alpha(z)$  应该接近于 0，即吸引力最小；当  $d_a < \|x_{ij}\| < R_a$  时， $\psi_\alpha(z)$  应随  $\|x_{ij}\|$  增大而增大，即吸引力随距离的增大而减小；当  $\|x_{ij}\| = R_a$  时， $\psi_\alpha(z) \rightarrow \infty$ ，即吸引力最大。

定义无人机与障碍物间的排斥力势能函数  $\psi_\beta(z)$  为

$$\begin{cases} \psi_\beta(z) = \int_{\text{dis}_{\text{safe}}}^z \phi_\beta(s) ds \\ \phi_\beta(z) = \rho_h(z/\text{dis}_{\text{safe}})(\sigma_1(z - \text{dis}_{\text{safe}}) - 1) \end{cases} \quad (13)$$

当无人机与障碍物间的距离小于  $\text{dis}_{\text{safe}}$  时，障碍物对无人机产生排斥力，使无人机远离障碍物<sup>[12]</sup>。假设  $T$  时刻虚拟长机的位置矢量为  $\mathbf{x}_v = [x_{vx} \ x_{vy}]$ ，速度矢量为  $\mathbf{v}_v = [v_{vx} \ v_{vy}]$ ，导航信息无人机的位置矢量  $\mathbf{x}_d = [x_{dx} \ x_{dy}]$ ，对导航信息无

人机施加一个垂直于虚拟长机轨迹方向上的排斥力, 取该排斥力的大小等于障碍物对无人机排斥力, 计算求出该斥力的矢量方向  $\mathbf{m}_f$  为

$$\mathbf{m}_f = [m_{fx} \quad m_{fy}] \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} m_{fx} &= x_{iy} - x_{ix} - x_{iy} + \frac{v_{vy} \cdot x_{ix}}{v_{vx}} - \frac{x_{ix} \cdot v_{vx}}{v_{vy}} \\ m_{fy} &= \frac{x_{iy} \cdot v_{vy} \cdot v_{\Delta x}^2 - x_{ix} \cdot v_{\Delta x}^3 - x_{vy} \cdot v_{vy} \cdot v_{\Delta x}^2}{v_{\Delta y}^3 - v_{vx} \cdot v_{vy}} \\ &\quad - \frac{-v_{vx} \cdot v_{vy} \cdot x_{ix}}{v_{\Delta y}^3 - v_{vx} \cdot v_{vy}} + \frac{v_{vx} \cdot x_{ix}}{v_{vy}} \end{aligned} \quad (15)$$

在传统人工势场法中, 当导航引导力与排斥力大小相等方向相反时易导致避障失败, 产生局部极小值问题。此时, 通过对导航信息无人机施加方向为  $\mathbf{m}_f$  的额外排斥力, 可避免局部极小值问题带来的避障失败现象。

### 3.2 控制律设计

集群进行联盟划分后, 主要分为两类无人机, 即导航信息无人机和非导航信息无人机, 此时集群中仅有导航信息无人机可与虚拟长机进行通信。将集群中导航信息无人机控制律设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^d &= -\beta_1 \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{x}_j} \psi_{\alpha} (\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_{\sigma}) \\ &\quad - \beta_2 \sum_{k \in N_{\beta i}} \nabla_{\mathbf{x}_k} \psi_{\beta} (\|\mathbf{x}_{ok} - \mathbf{x}_i - \mathbf{R}_{ok}\|_{\sigma}) \\ &\quad + \beta_3 \sum_{k \in N_{\beta i}} \phi_{\beta} (\|\mathbf{x}_{ok} - \mathbf{x}_i - \mathbf{R}_{ok}\|_{\sigma}) \mathbf{m}_f \\ &\quad + \beta_4 \sum_{j \in N_i} a_j(p) (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \\ &\quad + k_1 (\mathbf{x}_{\nabla} - \mathbf{x}_i) + k_2 (\mathbf{v}_{\nabla} - \mathbf{v}_i) + \dot{\mathbf{v}}_{\nabla} \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$  都是正常数;  $\mathbf{u}_i^d$  表示导航信息无人机的控制输入量;  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{x}$  分别表示导航信息无人机速度、位置矢量;  $\dot{\mathbf{v}}_{\nabla}$  表示虚拟长机的控制输入。 $k_1 = c_1 \cos[\arctan((\mathbf{x}_{\nabla} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{\nabla} - \mathbf{x}_i))]$ ;  $c_1, k_2$  为正常数。

由于集群中非导航信息无人机仅与自身邻域内其他无人机进行通信, 所以将非导航信息无人机控制律设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^f &= -\alpha_1 \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{x}_j} \psi_{\alpha} (\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_{\sigma}) \\ &\quad - \alpha_2 \sum_{k \in N_{\beta i}} \nabla_{\mathbf{x}_k} \psi_{\beta} (\|\mathbf{x}_{ok} - \mathbf{x}_i - \mathbf{R}_{ok}\|_{\sigma}) \\ &\quad + \alpha_3 \sum_{j \in N_i} a_j(p) (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \end{aligned} \quad (17)$$

其中:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  都是正常数;  $\mathbf{u}_i^f$  表示非导航信息无人机的控制输入量;  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{x}$  分别表示非导航信息无人机速度、位置矢量。

## 4 仿真验证与分析

考虑包含 5 架无人机的集群系统, 设无人机最大速度为 80 m/s, 最大加速度为 10 m/s<sup>2</sup>, 通信半径为 300 m, 无人机期望速度为 56 m/s, 期望偏航角为 45°, 设相邻无人机间的期望距离为 200 m, 仿真步长为 0.1 s, 无人机的初始位置和初始速度基于高斯白噪声随机产生于区间[-1000 m, 1000 m]×[-1000 m, 1000 m] 和 [0 m/s, 30 m/s]×[0 m/s, 30 m/s]。在虚拟无人机的预期航迹周围设置障碍物, 障碍物位置分别为[2500, 2500]、[3000, 6900]、[5800, 5800], 其半径分别对应为 220 m、300 m 和 500 m, 具体仿真结果如图 2~7 所示。图 2 为无人机集群的运动轨迹图, 无人机集群在面对障碍物时, 能快速地进行规避。图 3 表示仿真过程中集群中每时刻联盟的数量变化, 集群在避障过程中联盟数量变换幅度比较大, 当完成避障后联盟数量渐渐趋于稳定。图 4 的纵坐标表示

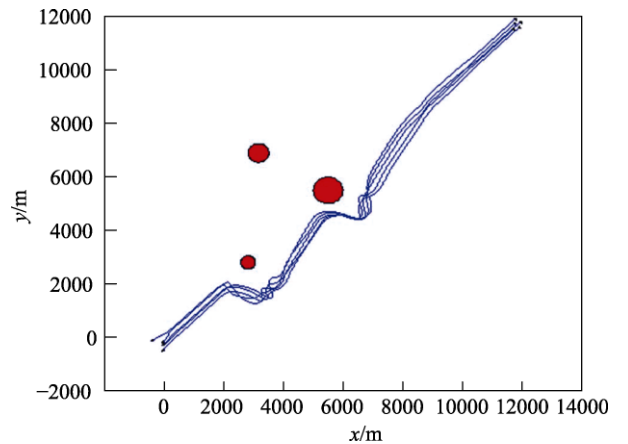


图 2 无人机集群运动轨迹

Fig. 2 The trajectory of the UAV cluster



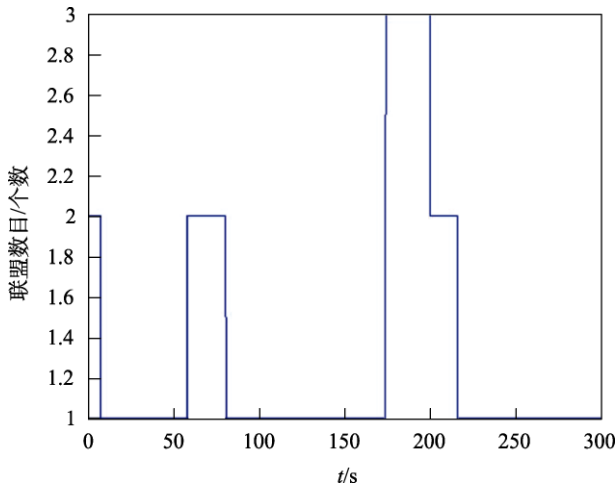


图 3 联盟数目变化曲线  
Fig. 3 Curve of alliance number

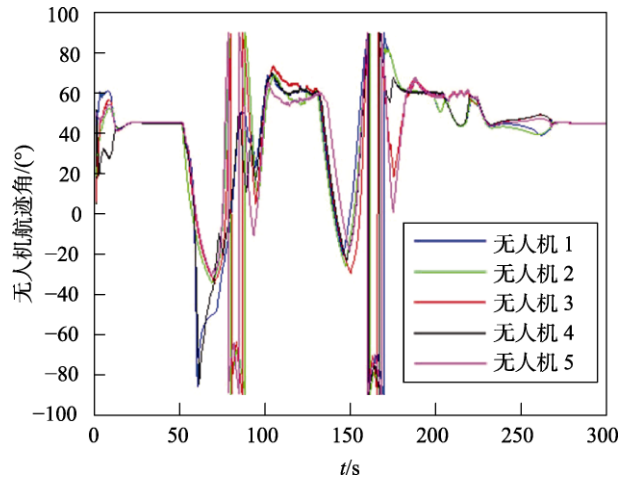


图 6 无人机偏航角变化曲线  
Fig. 6 Change curve of UAV yaw angle

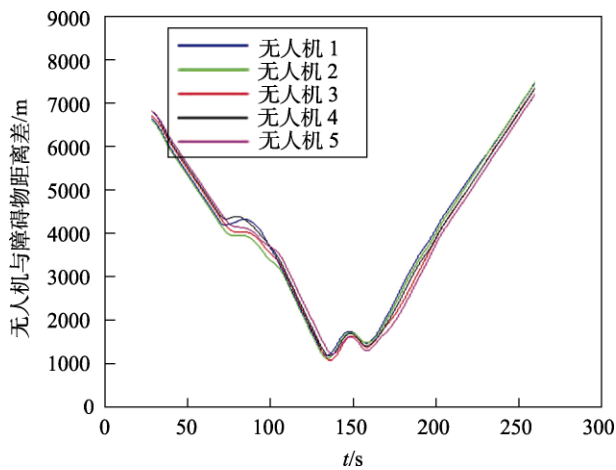


图 4 无人机与障碍物距离变化曲线  
Fig. 4 Change curve of distance between UAV and obstacle

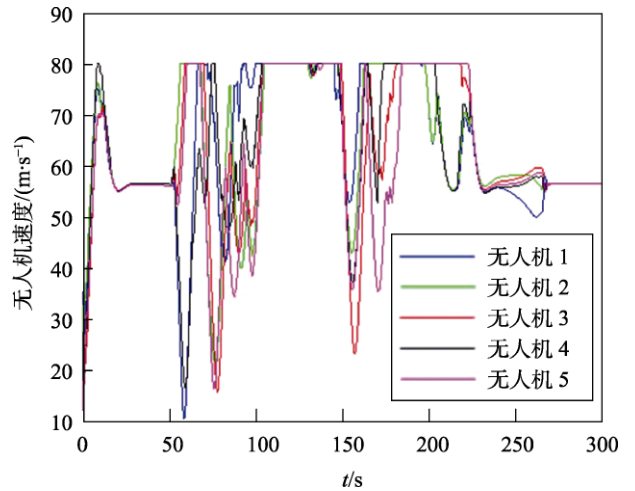


图 7 无人机速度变化曲线  
Fig. 7 Curve of UAV speed

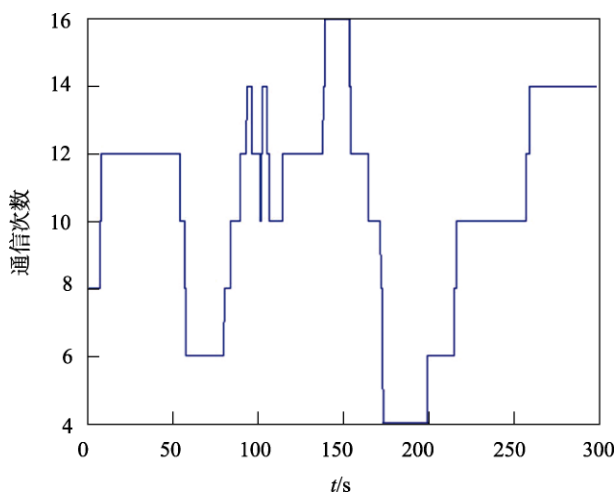


图 5 集群通信次数变化曲线  
Fig. 5 Change curve of cluster communication times

无人机与障碍物的距离，集群在避障过程中，无碰撞现象发生。图 5 表示无人机间的通信总次数，每时刻无人机接收一次邻域无人机信息为一次通信，当队形趋于稳定时，无人机间通信次数也趋于稳定。从图 6 可以看出，在避障完成后，无人机集群能够有效地跟踪到预期的偏航角并保持偏航角一致性。从图 7 可以看出，在避障完成后，无人机集群能够有效地跟踪到预期的速度并保持速度一致性。

### 5 结 论

本文对切换拓扑网络下的无人机集群系统进

行避障控制研究, 提出一种基于联盟的无人机集群避障控制算法。首先以距离为标准对集群进行联盟划分, 并以竞争的方式从各联盟中选择导航信息无人机去获取虚拟长机信息。在避障时, 保证了无人机集群切换拓扑下仅有部分无人机能获取虚拟长机信息也能保证集群的连通性。在此基础上通过对集群中各联盟内的导航信息无人机施加一个垂直于虚拟长机运动轨迹的额外排斥力, 并且将虚拟长机对导航信息无人机的引导力权重因子设计为虚拟长机与导航信息无人机距离相关的自适应因子, 不但保证集群在面对范围较大障碍物时也能有效地进行避障, 而且解决了人工势场法中存在的局部极小值的问题。最后通过仿真验证了算法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 1-9.
- [2] 方洋旺, 欧阳楚月, 符文星, 等. 无人机编队避障与控制技术研究现状及发展趋势[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 32-38.
- [3] Olfati S R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [4] Wang J L, Zhao H, Bi Y G, et al. An improved fast flocking algorithm with obstacle avoidance for multi-agent dynamic systems[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014: 659805.
- [5] Zhang J L, Yan J G, Zhang P. Study on the collision avoidance of UAV cooperative formation with improved artificial potential field[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 112-119.
- [6] 刘艳, 阳周明, 冯运铎, 等. 基于改进人工势能的无人机编队与避障[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 116-120.
- [7] 杨秀霞, 张毅, 刘小伟. 动态人工势场法在无人飞行器避碰飞行中的应用研究[J]. 战术导弹控制技术, 2014, 31(1): 1-5.
- [8] Dai B X, Li W. Flocking of multi-agents with arbitrary shape obstacle[C]. Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, 2014: 1311-1316.
- [9] 伍友利, 叶圣涛, 方洋旺, 等. 固定翼无人机群的集群和避障控制[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 103-110.
- [10] Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [11] 符小卫, 魏可, 李斌, 等. 基于联盟的无人机集群编队控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2559-2572.
- [12] 娄柯, 齐斌, 穆文英, 等. 基于反馈控制策略的多智能体蜂拥控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1758-1763.

### 作者简介:



符小卫(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人机协同控制与效能评估。



张嘉平(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机集群队形控制。



魏可(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机集群队形控制。

[引用格式] 周媛, 刘永芳, 马生昌, 等. 多智能体系统指定时间双向编队控制[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 18-25.

# 多智能体系统指定时间双向编队控制

周媛, 刘永芳, 马生昌, 赵宇

(西北工业大学自动化学院, 西安 710129)

**摘要:** 多智能体系统协同控制的收敛速率问题是当前系统与控制领域一个热点研究问题。结合指定时间控制思想, 以一般线性动力学系统为控制对象, 对多智能体系统双向编队问题进行研究。首先, 利用庞特里亚金极大值原理, 设计了指定时间双向编队控制器, 双向编队指的是被分成两组的智能体最终以指定的编队队形、相反的方向进行运动; 其次, 通过运动规划算法, 分析了控制器的指定时间收敛性, 即智能体实现期望几何形态所需的时间可由用户任意指定。需要注意的是, 控制器仅取决于采样时刻智能体及其邻居的状态, 而非实时反馈, 这将极大地减少网络通信成本和负担; 最后通过仿真实验, 实现了多智能体系统在指定时间达成指定的编队构型。所提算法为无人系统的编队飞行提供了潜在的应用。

**关键词:** 多智能体系统; 指定时间控制; 双向编队; 运动规划; 离散采样; 有符号图中图分类号: TP13 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)03-18-08  
**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.023

## Appointed-time Bipartite Formation Control for Multi-agent System

ZHOU Yuan, LIU Yongfang, MA Shengchang, ZHAO Yu

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The convergence rate of cooperative control for multi-agent systems is a hot research issue in the field of systems and control. With regard to the bipartite formation control problems for general linear dynamics, the appointed-time control algorithm is introduced to solve such problems. Firstly, by using the Pontryagin's maximum principle, a class of appointed-time bipartite formation controller is designed. Here, the bipartite formation means that the agents divided into two groups can finally achieve the specified formation configuration and move in an opposite direction to others in another group. Secondly, under the application of the proposed controller, the appointed-time effectiveness of the proposed controller is analyzed through the motion planning algorithm. Compared with existing works on this issue, a main contribution of this paper lies in that the time required for the agent to achieve the desired formation configuration can be specified according to task demands, which is independent of the initial state. It should be noted that the controller in this paper only depends on the states of the agent and its neighbors at the sampling instant, rather than the whole time interval, which greatly reduces the burden of network communication. Finally, by numerical simulation, the multi-agent system achieves the desired formation configuration at an appointed-time. The proposed controller provides a potential application for formation flight of unmanned systems.

**Key words:** Multi-agent System; Appointed-time Control; Bipartite Formation; Motion Planning Algorithm; Sampled-data Communication; Signed Graph

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61973252, 61973251)

## 1 引言

随着计算机、互联网、微电子等新技术在军事方面的不断发展,现代战争形态逐渐从“机械化”向“信息化、智能化”转变,无人系统作战技术已成为各国争相发展的关键技术。而传统的单机作战由于其探测能力、抗扰能力、打击能力等方面的局限性导致其无法适应现代化战争环境的复杂性、作战任务的艰巨性,因此,无人系统集群作战将成为未来战争的主要作战方式<sup>[1-3]</sup>。在此背景下,对基于多智能体的无人系统进行协调控制这一关键技术就显得尤为重要。

多智能体系统是近年来新兴的一个比较热门的研究方向,它是指由一系列信息交互的智能体组成的群体系统,其内部的各智能体可通过相互感知、相互通信等方式,完成单个智能体所不能完成的大规模的复杂的特定任务。分布式控制是多智能体系统协调控制的主要方式,其仅依赖每个智能体与其邻居智能体间的状态信息交互对系统实行控制。分布式控制的优势在于完成任务的同时也克服了集中式控制产生的计算量与能耗较大的缺陷,具有更高的应用价值。作为多智能体系统协同控制的热点研究问题,编队控制要求系统中的每个个体在执行任务过程中能保持一定的几何形态,以适应其所处的环境约束。比如在大型物资运输过程中,对运输车辆所处的位置有一定的要求,以满足运输过程的稳定和负载平衡等<sup>[4-5]</sup>。

近年来,大量的国内外学者对多智能体系统分布式编队控制进行了深入的研究,并且取得了丰硕的研究成果。文献[6]基于人工势场,对轮式机器人模型系统领航—跟踪问题进行了深入研究,提出了一种新型的“行星—卫星”式避障算法。但该算法仅能保证系统渐近收敛,即当时间接近正无穷大时,跟踪者才能收敛到其领航者的轨迹。然而,在实际应用时,对任务时间总是有着一定的要求,人们期望系统能在给定的时间限制之前达到控制目标。因此,Cortés<sup>[7]</sup>基于一阶积分器系统提出了有限时间控制,并将其应用于梯度系统实现多智能体系统有限时间一致性控制。自此,

出现了多种多样的有关多智能体有限时间控制问题,如有限时间跟踪问题<sup>[8-9]</sup>,多卫星有限时间编队问题<sup>[10-13]</sup>和自适应有限时间同步问题<sup>[14]</sup>。但是,有限时间控制所得到的收敛时间常与初始状态相关,如果不能预先获得系统的初始状态,那么控制器将会失去其效用。于是又提出了固定时间算法<sup>[15-17]</sup>来解决这个问题。该算法主要依赖控制器的参数,计算出其收敛时间的上界,所以,固定时间算法的收敛时间通常具有一定的保守性。为克服以上算法的缺陷,本文提出了一种指定时间控制算法,使系统的收敛时间仅取决于用户的设定值。

需要指出的是,上述文献的研究均是基于智能体之间为协同合作关系假设得出的,而实际中不同个体间既存在合作关系又存在竞争关系,这样的考虑更为普遍。文献[18]正是基于这样的想法,将智能体间的信息交互用图论进行描述,其中正的边权重可以表示个体间为合作关系,负的权重可表示智能体间的竞争关系。基于这样的模型,Altafini<sup>[18]</sup>提出了“双向一致性”的概念,并给出了多智能体系统实现双向一致性的充要条件。于是,文献[19-20]分别研究了一阶积分器和二阶积分器多智能体系统双向一致性编队问题,其要求智能体能以分组的形式实现各组的编队构型,并且每组智能体能以特定的队形、相反的方向进行运动。除此之外,文献[21]针对二阶非线性多智能体系统双向编队问题,设计了脉冲控制器及状态反馈控制器,实现脉冲控制机制下系统双向编队目标。但目前,在多智能体系统双向编队控制这一问题上的研究成果还远远不足,还需从不同的控制算法、不同的控制系统对多智能体系统双向编队控制进行较为深入的探讨。

因此,本文研究了具有一般线性动力学的多智能体系统的指定时间双向编队问题。利用庞特里亚金极大值原理和运动规划技术,提出了双向编队控制算法,使系统能够在指定时间内实现双向编队。与现有的多智能体系统分布式控制结果相比,本文的贡献主要体现在以下三个方面:首先,提出了一种变增益的指定时间控制律,系统



的收敛时间可由用户任意指定,克服了传统的有限时间控制对初始状态的依赖性和固定时间控制导致的保守性的缺点<sup>[7-17]</sup>。其次,与现有的基于完全协同拓扑<sup>[6-17]</sup>的文献不同,本文研究的拓扑结构同时含有协同和竞争作用。但本文提出的控制算法同样适用于解决传统的非负图的指定时间一致性编队问题。最后,值得注意的是,本文提出的控制器仅依赖离散的采样时刻多智能体的状态,也就是说该算法并不需要系统实时通信,仅要求系统在采样点处满足一定的通信条件。因此,该算法能够减轻网络的通信负担,降低其对网络通信能力的要求。

## 2 背景知识

### 2.1 记号说明

本文使用标准符号。文中,用  $\mathbf{R}$  表示实数集,  $\mathbf{R}^n$  表示  $n$  维的实列向量集,  $\mathbf{R}^{m \times n}$  表示  $m \times n$  的实矩阵集。那么,  $\mathbf{1}_n \in \mathbf{R}^n$  表示元素为1的  $n$  维列向量,  $\mathbf{I}_n \in \mathbf{R}^{n \times n}$  表示单位矩阵。 $\text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  表示以  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为对角元素的对角矩阵。 $\otimes$  表示克罗内克积,  $\|\cdot\|$  表示欧几里得范数,  $\det(\cdot)$  表示行列式,  $\text{sgn}(\cdot)$  表示符号函数,  $|\cdot|$  表示绝对值符号。对于一个矩阵  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  来说,  $\mathbf{M} \succ 0$  意味着  $\mathbf{M}$  的所有元素均非负,若其同时满足  $\mathbf{M}\mathbf{1}_n = \mathbf{1}_n$ , 则称  $\mathbf{M}$  为随机矩阵。

**引理 1.** 对于随机矩阵  $\mathbf{M}$ , 若其所有特征值满足  $1 = |\lambda_1| > |\lambda_2| \geq |\lambda_3| \geq \dots \geq |\lambda_n|$ , 则称其为 SIA (Stochastic, Indecomposable, Aperiodic) 矩阵。并且  $\mathbf{M}$  具有如下性质:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{M}^k = \mathbf{1}_n \mathbf{y}^T$ , 其中  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$  表示元素均非负的  $n$  维列向量<sup>[22]</sup>。

### 2.2 图论知识

基于图论知识,本文使用带符号的有向图  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$  来表示智能体间通信拓扑结构,其中点集  $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$  表示  $N$  个智能体,边集  $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{ij} = (i, j)\}$  表示智能体之间的信息流,  $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$  表示图  $\mathcal{G}$  的加权邻接矩阵。边集

元素  $\mathcal{E}_{ij} = (i, j)$  表示从有信息流从  $j$  节点传递给  $i$  节点,从而  $\mathcal{A}$  中相应的元素  $a_{ij} \neq 0$ , 反之,  $a_{ij} = 0$ ; 如果  $a_{ij} < 0$  表示  $j$  节点和  $i$  节点之间为竞争关系,  $a_{ij} > 0$  表示  $j$  节点和  $i$  节点之间为合作关系。本文不考虑带有自环的拓扑结构,因此,  $a_{ii} = 0$ 。符号  $\text{adj}(i)$  表示智能体  $i$  的邻居集合。那么,图的拉普拉斯矩阵可以定义为  $\mathbf{L} = [l_{ij}]$ , 其中  $l_{ii} = \sum_{j \in \text{adj}(i)} |a_{ij}|$ ,  $l_{ij} = -a_{ij}$ 。若图  $\mathcal{G}$  中存在一个点  $i$  可以向图中其他所有的点传送信息,那么称  $i$  节点为根节点,称图  $\mathcal{G}$  含有生成树。

图  $\mathcal{G}$  称为结构平衡图当且仅当点集  $\mathcal{V}$  分为完全没有交集的两个子集  $\{\mathcal{V}^1, \mathcal{V}^2\}$ , 并且同时满足以下条件: (1)  $\mathcal{V}^1 \cup \mathcal{V}^2 = \mathcal{V}$ ,  $\mathcal{V}^1 \cap \mathcal{V}^2 = \emptyset$ ; (2)  $a_{ij} < 0, \forall i, j \in \mathcal{V}^k$ ;  $a_{ij} > 0, \forall i \in \mathcal{V}^k, j \in \mathcal{V}^{3-k}$ , 其中  $k \in \{1, 2\}$ 。

**引理 2.** 如果图  $\mathcal{G}$  为结构平衡图,  $\mathbf{L}$  为其相应的拉普拉斯矩阵,那么,一定存在对角矩阵  $\mathbf{Y} = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ , 使  $\mathbf{Y}\mathbf{L}\mathbf{Y} \succ 0$ , 其中  $\gamma_i \in \{1, -1\}$ <sup>[18]</sup>。

### 2.3 系统模型

考虑由  $N$  个一般线性动力学组成的多智能体系统,其动力学方程可以描述为

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_i(t) \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbf{R}^m$  分别表示系统的状态向量和输入向量;  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  和  $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$  为系统矩阵。

定义编队误差  $\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{h}_i$ , 其中  $\mathbf{h}_i \in \mathbf{R}^n$  为第  $i$  个智能体的编队向量,那么,系统(1)的指定时间双向编队目标可以表述如下。

**定义 1.** 对多智能体系统(1), 如果对于任意的初始状态  $\mathbf{x}_i(t_0)$  及人为指定的时间  $T$ , 都有

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} \|\mathbf{e}_i(t) - \text{sgn}(a_{ij})\mathbf{e}_j(t)\| = 0, & t < T \\ \|\mathbf{e}_i(t) - \text{sgn}(a_{ij})\mathbf{e}_j(t)\| = 0, & t \geq T \end{cases} \quad (2)$$

则称系统(1)实现了指定时间双向编队。

**注 1.** 式(2)所表述的指定时间双向编队问题要求不同组的智能体的状态分别实现自己的编队构型,并以不同的方向分别运动。具体来讲,当

智能体  $i$  和智能体  $j$  属于同一子集时,  $\alpha_{ij} > 0$ , 那么  $\lim_{t \rightarrow T} \mathbf{e}_i(t) = \mathbf{e}_j(t)$ , 即  $i$  和  $j$  运动方向相同; 当  $i$  和  $j$  属于不同子集时,  $\lim_{t \rightarrow T} \mathbf{e}_i(t) = -\mathbf{e}_j(t)$ , 即  $i$  和  $j$  运动方向相反。显然, 当  $\mathbf{h}_i = \mathbf{h}_j = 0$  时, 式(2)描述的控制目标可以重新表述为“指定时间双向一致性”。因此, 得出结论: “双向一致性”是“双向编队”的特例。

为了实现系统“指定时间双向编队”的控制目标, 本文做出如下假设。

**假设 1.** 多智能体系统(1)能控;

**假设 2.** 带符号的有向拓扑结构  $\mathcal{G}$  为含有一棵生成树的结构平衡图。

**注 2.** 本文考虑两个组的智能体分别实现各自的编队构型, 因此系统(1)满足能控条件仅是对线性系统一个比较基本的条件。另外, 假设 2 要求拓扑结构中有足够的信息流, 其能从网络中的某个节点流向其他节点; 此外, 智能体实现双向编队还需满足分组条件。综上所述, 本文所给的假设 1 和假设 2 是必要且可行的。

**引理 3.** 若多智能体系统(1)满足假设 1, 那么当  $t \neq t_0$  时, 有<sup>[10]</sup>

$$\det \left( \sum_{z=1}^{\infty} \frac{(t-t_0)^z \sum_{w=0}^{z-1} \mathbf{A}^{z-1-w} \mathbf{B} \mathbf{B}^T (-\mathbf{A}^T)^z}{z!} \right) \neq 0 \quad (3)$$

**引理 4.** 记  $\mathbf{D} = \text{diag}\{l_{11}, l_{22}, \dots, l_{NN}\}$ 。若拓扑结构  $\mathcal{G}$  满足假设 2, 那么图  $\mathcal{G}$  的拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left( \mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{L} \right)^k = \mathbf{Y} \mathbf{1}_N \mathbf{y}^T \mathbf{Y} \quad (4)$$

其中:  $l_{ii}$  为拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  的对角元素。

**证.** 根据引理 2, 有  $\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{Y} \mathbf{L} \mathbf{Y} > 0$ ; 根据引理 1, 有  $\lim_{k \rightarrow \infty} \left( \mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \bar{\mathbf{L}} \right)^k = \mathbf{1}_N \mathbf{y}^T$ , 所以:

$$\begin{aligned} & \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \bar{\mathbf{L}} \right)^k \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \mathbf{Y} \left( \mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{L} \right) \mathbf{Y} \right)^k \\ &= \mathbf{Y} \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{L} \right)^k \mathbf{Y} \\ &= \mathbf{1}_N \mathbf{y}^T \end{aligned}$$

因此, 式(4)成立。

### 3 指定时间双向编队控制算法

#### 3.1 指定时间双向编队控制器设计

基于非周期采样算法, 本文提出非周期采样时间序列为

$$t_k = \begin{cases} t_0, & k=0 \\ t_{k-1} + \sigma_k, & k=1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\sigma_k = \frac{\tau_k}{\sum_{k=1}^{\infty} \tau_k} T$ ,  $\tau_k$  为任意正常数。显然

$$\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = T。$$

对于区间  $[t_k, t_{k+1})$ , 考虑如下所示的代价函数:

$$\mathcal{J}_k(U) = \frac{1}{2} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i^T(t) \mathbf{u}_i(t) dt \quad (6)$$

另外, 在运动规划技术和  $\mathbf{SIA}$  矩阵的性质下, 第  $i$  个智能体在第  $k+1$  步的终端状态约束为

$$\mathbf{e}_i(t_{k+1}) = \frac{e^{\mathbf{A}(t_{k+1}-t_k)}}{\sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| + 1} \left[ \sum_{j \in \text{adj}(i)} \alpha_{ij} \mathbf{e}_j(t_k) + \mathbf{e}_i(t_k) \right] \quad (7)$$

因此, 对式(1)、(6)应用庞特里亚金极大值原理, 构造式(6)的哈密顿函数:

$$\mathcal{H}_k(t) = \sum_{i=1}^N \left( -\frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T(t) \mathbf{u}_i(t) + \dot{\mathbf{h}}_i^T(t) (\mathbf{A} \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_i(t)) \right) \quad (8)$$

其中:  $\dot{\mathbf{h}}_i(t)$  为协态变量。继而, 式(8)分别对  $\mathbf{h}_i$ ,  $\mathbf{x}_i$  和  $\mathbf{u}_i$  求偏导, 有

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \frac{\partial \mathcal{H}_k(t)}{\partial \mathbf{h}_i(t)} = \mathbf{A} \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_i(t) \quad (9a)$$

$$\dot{\mathbf{h}}_i(t) = -\frac{\partial \mathcal{H}_k(t)}{\partial \mathbf{x}_i(t)} = -\mathbf{A}^T \dot{\mathbf{h}}_i(t) \quad (9b)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}_k(t)}{\partial \mathbf{u}_i(t)} = -\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{h}}_i(t) = 0 \quad (9c)$$

其中, 式(9c)为式(8)存在极值的必要条件。联立式(9a)、(9b), 可发现其为一线性矩阵方程组。对其从  $t_k$  至  $t_{k+1}$  进行积分, 有

$$\mathbf{x}_i(t_{k+1}) = \Xi_1 \mathbf{x}_i(t_k) + \Xi_2 \dot{\mathbf{h}}_i(t_k) \quad (10a)$$

$$\dot{\mathbf{h}}_i(t_{k+1}) = \Xi_3 \mathbf{x}_i(t_k) + \Xi_4 \dot{\mathbf{h}}_i(t_k) \quad (10b)$$

其中:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Xi_1 = \sum_{z=0}^{\infty} \frac{\mathbf{A}^z (t_{k+1} - t_k)^z}{z!} = e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)} \\ \Xi_2 = \frac{\sum_{z=1}^{\infty} \frac{(t_{k+1} - t_k)^z \sum_{w=0}^{z-1} \mathbf{A}^{z-1-w} \mathbf{B} \mathbf{B}^T (-\mathbf{A}^T)^w}{z!}}{z!} \\ = [\mathbf{I}_n \quad \mathbf{0}_n] e^{\mathcal{M}(t_{k+1} - t_k)} [\mathbf{0}_n \quad \mathbf{I}_n]^T \\ \Xi_3 = \mathbf{0} \\ \Xi_4 = \sum_{z=0}^{\infty} \frac{(-\mathbf{A}^T)^z (t_{k+1} - t_k)^z}{z!} = e^{-\mathbf{A}^T(t_{k+1} - t_k)} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \mathbf{x}_i(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_k)} \mathbf{x}_i(t_k) - \boldsymbol{\delta}_i(t) \quad (13a) \\ \boldsymbol{\delta}_i(t) = \frac{\int_{t_k}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{B}^T e^{-\mathbf{A}^T(\tau-t_k)} d\tau}{\sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| + 1} \Xi_2^{-1}(t_{k+1}) \\ \cdot e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)} \sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| (e_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) e_j(t_k)) \end{array} \quad (13b)$$

联立式(7)与式(10a), 根据引理 3,  $\Xi_2^{-1}$  存在, 所以:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{h}}_i(t_k) &= \frac{\Xi_2^{-1} \Xi_1}{\sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| + 1} \sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| \begin{pmatrix} \text{sgn}(\alpha_{ij}) e_j(t_k) \\ -e_i(t_k) \end{pmatrix} \\ &\quad + \Xi_2^{-1} (\mathbf{I}_N - \Xi_1) \tilde{\mathbf{h}}_i \end{aligned} \quad (11)$$

此外, 结合式(9c)及  $\tilde{\mathbf{h}}_i(t) = e^{-\mathbf{A}^T(t-t_k)} \tilde{\mathbf{h}}_i(t_k)$ , 有指定时间双向编队控制器:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) &= -\mathbf{B}^T e^{-\mathbf{A}^T(t-t_k)} \left( [\mathbf{I}_n \quad \mathbf{0}_n] e^{\mathcal{M}(t_{k+1} - t_k)} [\mathbf{0}_n \quad \mathbf{I}_n]^T \right)^{-1} \\ &\quad \cdot \left( (\mathbf{I}_n - e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)}) \tilde{\mathbf{h}}_i + e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)} \frac{1}{\sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| + 1} \right. \\ &\quad \left. \cdot \sum_{j \in \text{adj}(i)} |\alpha_{ij}| \begin{pmatrix} \mathbf{x}_i(t_k) - \mathbf{h}_i - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \\ (\mathbf{x}_j(t_k) - \mathbf{h}_j) \end{pmatrix} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\mathcal{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \mathbf{B}^T \\ \mathbf{0}_{n \times n} & -\mathbf{A}^T \end{bmatrix}$ .

### 3.2 指定时间双向编队收敛性分析

**定理 1.** 若系统(1)满足假设 1 且拓扑结构  $\mathcal{G}$  满足假设 2, 那么, 控制器(12)按照时间序列式(5)进行采样, 能够保证系统(1)实现指定时间双向编队。

**证.** 首先, 证明在控制器(12)作用下, 多智能体系统(1)的采样状态收敛, 即

$$\lim_{t_k \rightarrow T} \|\mathbf{e}_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t_k)\| = 0$$

将式(12)代入系统, 并对其从  $t$  至  $t_{k+1}$  进行积分, 有

令  $\mathbf{E}(t) = [\mathbf{e}_1^T(t) \quad \mathbf{e}_2^T(t) \quad \cdots \quad \mathbf{e}_N^T(t)]^T$ , 则所有智能体在第  $k+1$  步时编队误差  $\mathbf{E}(t_{k+1})$  的矩阵形式可表述为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t_{k+1}) &= \mathbf{I}_N \otimes e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)} \mathbf{E}(t_k) \\ &\quad - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \otimes e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)} (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{E}(t_k) \\ &= ((\mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{L}) \otimes e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)}) \mathbf{E}(t_k) \\ &= ((\mathbf{I}_N - (\mathbf{D} + \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{L})^{k+1} \otimes e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_0)}) \mathbf{E}(t_0) \end{aligned}$$

根据引理 4 中 **SIA** 矩阵的性质, 有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E}(t_{k+1}) = ((\mathbf{Y} \mathbf{1}_N \mathbf{y}^T \mathbf{Y}) \otimes e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_0)}) \mathbf{E}(t_0)$$

即  $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{e}_i(t_{k+1}) = \sum_{j=1}^N \gamma_i y_j \gamma_j e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_0)} \mathbf{e}_j(t_0)$ 。又因为

$\gamma_i \in \{1, -1\}$ , 所以,  $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t_k)\| = 0$ 。依据式(1)中  $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = T$ , 所以,  $\lim_{t_k \rightarrow T} \|\mathbf{e}_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t_k)\| = 0$ 。

接下来, 证明系统(1)的连续状态收敛, 即

$$\lim_{t \rightarrow T} \|\mathbf{e}_i(t) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t)\| = 0$$

定义  $\mathbf{e}_{ij}(t) = \mathbf{e}_i(t) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t)$ , 有

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}_{ij}(t)\| &\leq \|e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)}\| \|\mathbf{e}_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) \mathbf{e}_j(t_k)\| \\ &\quad + \|\boldsymbol{\delta}_i(t)\| + \|\boldsymbol{\delta}_j(t)\| \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} \|\boldsymbol{\delta}_i(t)\| &\leq \left\| \frac{e^{\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k)}}{\sum_{s \in \text{adj}(i)} |\alpha_{is}| + 1} \right\| \left\| \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{B} \mathbf{B}^T e^{-\mathbf{A}^T(\tau - t_k)} d\tau \right\| \\ &\quad \cdot \|\Xi_2^{-1}(t_{k+1})\| \sum_{s \in \text{adj}(i)} |\alpha_{is}| \|\mathbf{e}_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{is}) \mathbf{e}_s(t_k)\| \end{aligned} \quad (14b)$$

根据引理 3, 有  $\Xi_2^{-1}(t_{k+1}) = \frac{\boldsymbol{\Xi}_2^*(t_{k+1})}{\det(\boldsymbol{\Xi}_2(t_{k+1}))}$  存在,

其中  $\boldsymbol{\Xi}_2^*(t_{k+1})$  为其伴随矩阵; 又因为采样状态的收

敛性, 所以:  $\lim_{t_k \rightarrow T} \frac{\Xi_2^*(t_{k+1}) \|e_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{is}) e_s(t_k)\|}{\det(\Xi_2(t_{k+1}))} = 0$ 。

即  $\lim_{t_k \rightarrow T} \|\Xi_2^{-1}(t_{k+1})\| \sum_{s \in \text{adj}(i)} |\alpha_{is}| \|e_i(t_k) - \text{sgn}(\alpha_{is}) e_s(t_k)\| = 0$ 。

又因为  $\left\| \frac{e^{A(t_{k+1}-t_k)}}{\sum_{s \in \text{adj}(i)} |\alpha_{is}| + 1} \right\|$  和  $\left\| \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{B}\mathbf{B}^T e^{-A^T(\tau-t_k)} d\tau \right\|$

有界, 所以,  $\lim_{t_k \rightarrow T} \|e_i(t) - \text{sgn}(\alpha_{ij}) e_j(t)\| = \lim_{t_k \rightarrow T} \|e_{ij}(t)\| = 0$ 。

综上所述, 控制器(12)能够使系统(1)实现指定时间双向编队。

**注 3.** 文中设计的控制器(12)取决于时间序列间隔  $t_{k+1} - t_k$  的大小, 由于采样时间序列是非周期的, 因此控制器(12)的增益是时变的。另外, 控制器的大小仅取决于离散的采样时刻状态大小, 而不需系统满足实时通信, 从而减轻网络的通信负担, 降低其对网络通信能力的要求。

**注 4.** 控制器(12)可实现多智能体系统(1)实现指定时间双向编队控制。与文献[7-17]相比, 本文设计的控制器主要优势在于系统的收敛时间可事先人为指定, 而不依赖系统的初始状态, 同时也不具有保守性。

**注 5.** 由于文中提出的控制器适用于结构平衡的拓扑结构, 而传统的无符号拓扑结构是一类特殊的结构平衡图, 其中一个子集为空。因此, 将本文的控制器应用于传统的拓扑结构上时可实现一般的指定时间编队控制。

**注 6.** 显然, 采样序列(1)的收敛性在控制系统实现指定时间编队的过程中发挥着重要作用, 在此, 可选取采样时间间隔为  $\{\sigma_k | \sigma_k = \frac{6}{(\pi k)^2} T, k=1, 2, \dots\}$ , 其以多项式速率收敛至  $T$ 。另一个可选取的采样时间间隔为  $\{\sigma_k | \sigma_k = \frac{1}{(2)^k} T, k=1, 2, \dots\}$ , 其以指数速率收敛到  $T$ 。

但是, 注意到在以上采样序列作用下, 控制器(12)会在有限时间内产生无数次采样, 即产生了芝诺效应。为解决这一问题, 通常会采取一个误差上界来避免此现象, 即: 当  $\lim_{t \rightarrow T} \|e_{ij}(t)\| < \varepsilon$

时, 认为其已经实现了指定时间双向编队。由此, 可以推导出采样频率的上界:

$$k_\varepsilon \geq \log_{|\lambda_2|} \frac{\varepsilon}{\|(\mathbf{I}_N \otimes e^{A^T}) \mathbf{X}(t_0)\|}$$

因此, 修正后的采样间隔序列为

$$\sigma_k = \begin{cases} \frac{6}{(\pi k)^2} T, & k \leq k_\varepsilon \\ \varepsilon, & k > k_\varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

### 4 仿真结果及分析

在这一部分, 我们考虑 6 个动力学为二阶积分器类型的智能体的指定时间二分编队控制问题的数值仿真。为便于刻画其在指定时间的收敛性, 本文仅考虑  $x$ - $y$  平面内智能体实现编队, 即  $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}_i(t) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}_i(t)$ 。则系统的动力学可如式(16)所示:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}_i(t) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}_i(t) \quad (16)$$

其中:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i(t) = \begin{bmatrix} p_{xi}(t) \\ p_{yi}(t) \\ v_{xi}(t) \\ v_{yi}(t) \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

显然, 式(16)描述的系统一定为能控系统, 即满足假设 1。智能体间的通信拓扑结构可由图 1 来描述, 其满足假设 2, 其中  $V_1 = \{1, 2, 3\}$ ,  $V_2 = \{4, 5, 6\}$ 。

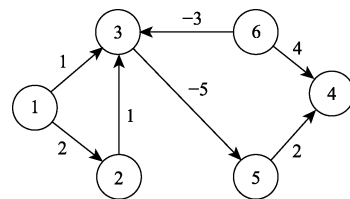


图 1 6 个智能体的通信拓扑结构  
Fig. 1 The communication topology with 6 agents

为了能够以一个三维视图(时间-二维平面)的方式显示指定时间算法的有效性, 假设智能体在高度方向上保持一致, 则相应的编队队形为二维平面图形。指定智能体最后的编队队形为两正



三角形，则相应的编队向量可以给定为  $\mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_4 = [0, 0, 0, 0]^T$ ， $\mathbf{h}_2 = \mathbf{h}_5 = [10, 0, 0, 0]^T$ ， $\mathbf{h}_3 = \mathbf{h}_6 = [5, 5\sqrt{3}, 0, 0]^T$ 。指定系统的收敛时间为  $T = 8$  以及编队误差界限  $\varepsilon = 10^{-3}$ ，对其进行仿真，结果如下所示。

取  $\mathbf{e}_i(t) = [\mathbf{e}_{x_i}(t) \ \mathbf{e}_{y_i}(t) \ \mathbf{v}_{x_i}(t) \ \mathbf{v}_{y_i}(t)]^T = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{h}_i$ ，图2绘制了6个智能体的位置和速度在x轴和y轴方向的编队误差。由位置误差图(a)、(c)和速度误差图(b)、(d)得出系统的在误差界限作用下，在  $t = 8$  时实现了指定的编队队形，并且不同组的智能体以不同的方向进行运动。从(b)、(d)中也可得出，当  $\mathbf{h}_i$  对应的分量均为0时，系统实现指定时间双向一致性。

图3刻画了6个智能体的运动轨迹，并绘制了系统在  $t = 8$  和  $t = 15$  时两组智能体的编队队形。显然，属于不同子集的智能体实现各自编队队形之后便朝着相反的方向进行运动，即实现了双向编队。

## 5 结论

计算机及网络技术的发展，推动了现代战争向集群作战方式转变，同时也为多智能体系统技术的应用提供了一个广阔的平台。本文针对作战过程中无人系统的编队问题，利用庞特里亚金极大值原理，设计了一类分布式双向编队控制器，解决了一般线性动力学多智能体系统指定时间双向编队问题，并且通过数值仿真证明了控制器的有效性，为无人系统的编队飞行提供了潜在的应用前景。

后续还可围绕文中所提算法进行以下研究：

(1) 针对领航者—跟随者网络编队问题，设计相应的分布式控制器使系统实现指定时间收敛。

(2) 本文控制器依靠状态反馈来实现多智能体系统指定时间双向编队，但当网络受到攻击时，智能体间的通信会受到干扰，因此，可以考虑基于输出反馈来实现系统指定时间双向编队控制。

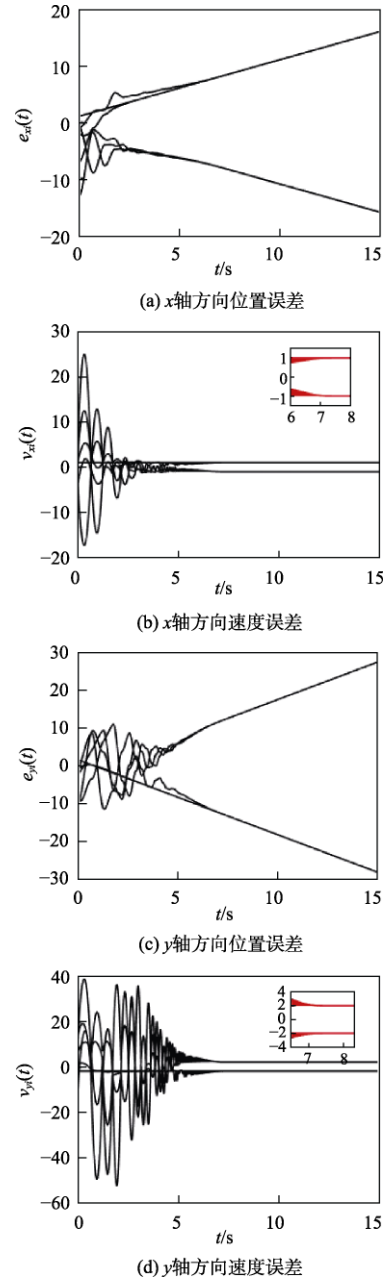


图2 智能体位置误差和速度误差

Fig. 2 The position errors and velocity errors of agents

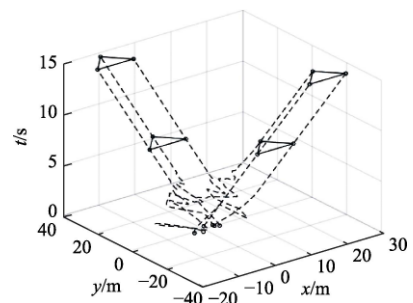


图3 6个智能体的飞行轨迹

Fig. 3 The real flight trajectories of 6 agents

## 参 考 文 献

- [1] 史志富. 智能无人系统集群作战技术发展分析[C]. 中国指挥控制大会, 北京, 2017年7月22-26日.
- [2] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.
- [3] 丁达理, 谢磊, 王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 1-9.
- [4] 王荣浩, 邢建春, 王平, 等. 地面无人系统的多智能体协同控制研究综述[J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(2): 97-108.
- [5] Alighanbari M, How J P. Decentralized task assignment for Unmanned Aerial Vehicles[C]. European Control Conference CDC-ECC 05 IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, Seville, Spain, 10-19 December, 2005.
- [6] 林敏, 夏元清, 吴爽. 多智能体领航跟随一致性和轨迹跟踪问题研究[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 25-32.
- [7] Cortés J. Finite-time convergent gradient flows with applications to network consensus[J]. Automatica, 2006, 42(11): 1993-2000.
- [8] Lu X, Lu R, Chen S, et al. Finite-Time distributed tracking control for multi-agent systems with a virtual leader[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2013, 60(2): 352-362.
- [9] Zhao Y, Duan Z, Wen G, et al. Distributed finite time tracking control for multi-agent systems: An observer based approach[J]. Systems & Control Letters, 2013, 62(1): 22-28.
- [10] Liu Y, Geng Z. Finite-time formation control for linear multi-agent systems: A motion planning approach[J]. Systems & Control Letters, 2015, 85: 54-60.
- [11] 刘国庆, 赵林. 多飞行器的有限时间姿态一致性编队控制[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 22-29.
- [12] 王晨曦, 张勃, 白俊强. 基于 Twistor 的航天器领航-跟随编队有限时间姿轨耦合控制[J]. 无人系统技术, 2020, 3(5): 30-38.
- [13] Xiao F, Wang L, Chen J, et al. Finite-time formation control for multi-agent systems[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2605-2611.
- [14] Yu H, Shen Y, Xia X. Adaptive finite-time consensus in multi-agent networks[J]. Systems & Control Letters, 2013, 62(10): 880-889.
- [15] Ning B, Han Q, Zuo Z. Distributed optimization for multiagent systems: An edge-based fixed-time consensus approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 49: 1-11.
- [16] Zuo Z, Tian B, Defoort M, et al. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 63(2): 563-570.
- [17] Hong H, Yu W, Wen G, et al. Distributed robust fixed-time consensus for nonlinear and disturbed multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2016, 47(7): 1464-1473.
- [18] Altafini C. Consensus problems on networks with antagonistic interactions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 58(4): 935-946.
- [19] Hu J P, Xiao Z H, Zhou Y L, et al. Formation control over antagonistic networks[C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference Xi'an: IEEE, 2013: 6879-6884.
- [20] Zou W L, Li G. Formation behaviors of networks with antagonistic interactions of agents[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(8): 1550147717726296.
- [21] 王未, 王莉, 黄迟. 脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 180-186.
- [22] Wei R, Beard R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.

## 作者简介:



周媛(1996-),女,博士研究生,主要研究方向为多智能体系统协调控制。



刘永芳(1986-),女,博士,副教授,主要研究方向为多智能体协调控制、无人机飞行控制与建模。



马生昌(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为多智能体系统协调控制。



赵宇(1986-),男,博士,副教授,主要研究方向为多智能体系统协调控制、无人机编队控制。本文通讯作者。

[引用格式] 王平, 刘畅. 二阶非线性多智能体系统的分布式编队控制[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 26-31.

## 二阶非线性多智能体系统的分布式编队控制

王平<sup>1</sup>, 刘畅<sup>2</sup>

(1. 海鹰航空通用装备有限责任公司, 北京 100074; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:** 面向多智能体系统编队协同完成既定任务, 针对具有非线性动态的二阶多智能体系统的编队控制问题, 开展分布式编队控制协议设计。考虑到集群运动过程中, 各智能体只需调整自身与相邻智能体的相对位置即可维持整体队形。基于邻居智能体之间的相对状态信息, 提出了具有时变增益的自适应控制协议, 证明了多智能体系统在该控制协议作用下能够实现编队控制。最后, 仿真实例表明该控制协议可确保二阶非线性多智能体系统形成并保持预先给定的编队构型。与静态控制协议相比, 提出的自适应控制协议无须借助智能体自身的非线性动态特性以及通信拓扑图等全局信息, 显著提升了协同编队的智能性, 可支撑未来大规模多智能体系统协同编队。

**关键词:** 编队控制; 非线性动态; 二阶多智能体系统; 时变控制增益; 自适应控制; 一致性问题

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)03-26-06

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.024

## Distributed Formation Control for Second-order Nonlinear Multi-agent Systems

WANG Ping<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>

(1. HiWing General Aviation Equipment co. LTD., Beijing 100074, China;  
2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Aiming at the formation control problem of second-order multi-agent system with nonlinear dynamics, a distributed control protocol was designed to complete the assigned task cooperatively. Considering that during the movement of the cluster, each agent only need to adjust the relative position between itself and the neighboring agents to maintain the overall formation, an adaptive control protocol with time-varying control gains is proposed based on the relative states between neighboring agents. It is proved that the system can achieve formation control under the proposed protocol. Finally, a numerical example is provided to demonstrate the effectiveness of our proposed protocol, which can ensure that the multi-agent systems reach and maintain a pre-specified structure. Compared with the static control protocol, the adaptive control protocol proposed in this paper doesn't require any global information of the nonlinear agent dynamics and the communication graph, which significantly improves the intelligence of cooperative formation and supports the cooperative formation of large-scale multi-agent systems in the future.

**Key words:** Formation Control; Nonlinear Dynamics; Second-order Multi-agent Systems; Time-varying Gains; Adaptive Control; Consensus Problem

## 1 引言

近年来,多智能体系统的编队控制引起各个领域研究人员的广泛关注。智能体之间通过编队协同工作充分发挥单个智能体的优势,提高任务的完成率、拓宽其使用范围等,在民生、军事等领域均有巨大的应用潜力<sup>[1-5]</sup>。例如,在执行侦察任务时,单架无人机受到传感器的角度限制,不能从多个方位对目标区域进行观测,多架无人机编队飞行,通过分工协作可实现目标区域的多方位观测,缩短任务完成时间,提高任务完成效率<sup>[6]</sup>。编队保持作为编队控制的基本问题,是编队有效执行任务的基本保障。编队保持的核心问题是通过设计恰当的控制协议,借助邻居智能体之间的局部交互形成并保持期望的队形。目前编队保持和控制的方法主要包括领航—跟随法<sup>[7]</sup>、虚拟结构法<sup>[8]</sup>、行为控制法<sup>[9]</sup>及一致性控制方法<sup>[10]</sup>。Ren<sup>[11]</sup>论证了领航—跟随法、虚拟结构法及行为控制法都可以归入一致性的统一框架内。

许多物理系统,特别是机械系统,通常表示为二阶积分器模型。然而工程实践中的物理系统往往具有非线性特性,导致系统模型无法简化为线性积分系统的形式。针对有向网络拓扑情形,Yu等<sup>[12]</sup>研究了具有非线性动态的二阶多智能体系统的一致性,得到了系统达到一致的条件。在此基础上,Song等<sup>[13]</sup>考虑了带有领航者的情形,利用牵引控制方法研究了二阶非线性多智能体系统的协调跟踪问题。针对跟随者之间的通信拓扑图为无向图和有向图两种情形,Wen等<sup>[14]</sup>给出了控制增益满足的条件,确保系统实现目标跟踪。然而上述控制增益均依赖智能体的非线性特性以及通信拓扑图等全局信息,并没有实现真正意义上的分布式。注意到鸟群、鱼群、羊群等在集群运动过程中,只需调整自身与相邻智能体的相对位置即可维持整体队形。为此,设计仅依赖自身与邻居智能体之间相对状态的控制协议实现群体分布式控制更符合实际且更具有挑战性。

基于以上分析,本文研究二阶非线性多智能体系统的分布式编队控制问题。利用邻居智能体之间的相对状态信息,提出了具有时变增益的自适应控制协议,确保实现多智能体系统编队控制。本文的创新主要体现在以下两个方面:(1)考虑了智能体自身的非线性动态特性,更符合工程实际;(2)设计的自适应编队控制协议不依赖智能体的非线性动态及通信拓扑图信息,实现了真正意义上的分布式,可满足大规模的多智能体编队控制需求。

## 2 代数图论

本节简要介绍代数图论的相关概念(详细内容参考文献[15]),采用拓扑图 $\mathcal{G}(v, \varepsilon, \mathbf{A})$ 表示智能体之间的通信关系,其中 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示参与编队的 $N$ 个智能体, $\varepsilon = \{(v_i, v_j) \in v \times v\}$ 表示编队中各有向信息路径组成的集合。连接权重表示智能体之间的通信状态,当智能体 $i$ 收到智能体 $j$ 的信息时, $a_{ij} > 0$ ,否则 $a_{ij} = 0$ ,并且规定 $a_{ii} = 0$ ,对应邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 。如果对任意的 $(v_i, v_j) \in \varepsilon$ 均有 $(v_j, v_i) \in \varepsilon$ ,则图 $\mathcal{G}$ 为无向图,反之则图 $\mathcal{G}$ 为有向图。图 $\mathcal{G}$ 的一条有向路径是指一组有限的节点序列 $v_1, v_2, \dots, v_l$ ,满足 $(v_{i-1}, v_i) \in \varepsilon, i = 1, 2, \dots, l$ 。定义拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij}, & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

采用 $\bar{\mathcal{G}}$ 表示有领航者的通信拓扑图,节点 $v_0$ 表示领航者, $v_1, v_2, \dots, v_N$ 为跟随者。对角矩阵 $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_N]$ 表示领航者的邻接矩阵,若 $v_0$ 是 $v_i$ 的邻居时, $b_i = a_{i0} > 0$ ,否则 $b_i = 0$ 。

**假设 1.** 对于每一个跟随者,均存在一条由领航者到跟随者的有向路径。此外,跟随者之间的通信拓扑图为无向图。

**引理 1**<sup>[16]</sup>. 在假设 1 成立的条件下,矩阵 $\mathbf{M} =$

$L+B$  正定。

### 3 系统模型

考虑包含  $N$  个跟随者和 1 个领航者的多智能体系统, 其通信拓扑图为  $\bar{\mathcal{G}}$ , 节点  $u_0$  表示领航者,  $u_1, u_2, \dots, u_N$  为跟随者。第  $i$  个智能体的动态方程表示如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_i(t), \mathbf{v}_i(t)) + \mathbf{u}_i(t), \quad i = 0, 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{x}_i(t), \mathbf{v}_i(t), \mathbf{u}_i(t) \in \mathbf{R}^m$  分别表示第  $i$  个智能体的位置、速度和控制输入 (或者控制协议),  $\mathbf{u}_0 = 0$ 。  $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}_i(t), \mathbf{v}_i(t))$  表示第  $i$  个智能体的非线性动态, 为一致连续可微的向量函数并且满足利普希茨条件:

$$\|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}_1, \mathbf{v}_1) - \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_2, \mathbf{v}_2)\| \leq \rho_1 \|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\| + \rho_2 \|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2\| \quad (3)$$

$\forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \in \mathbf{R}^m, t \geq 0$  成立, 其中  $\rho_1 \geq 0, \rho_2 \geq 0$  为利普希茨常数。

**定义 1.** 称控制协议  $\mathbf{u}_i$  能够解决系统的编队控制问题, 当且仅当对于任意的初始状态, 所有智能体渐近形成期望的编队, 即

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{A}_i - \mathbf{x}_0(t)) &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_0(t)) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1^T, \mathbf{A}_2^T, \dots, \mathbf{A}_N^T]^T$  为期望的几何队形,  $\mathbf{A}_i$  表示第  $i$  个跟随者相对于领航者的距离差向量。

本文的目标是设计分布式控制协议  $\mathbf{u}_i$  以解决多智能体系统 (2) 的编队控制问题。

### 4 自适应控制协议设计

注意到文献[11-13]控制协议中的控制增益均为常值, 且依赖智能体的非线性特性及通信拓扑图等全局信息。然而集群运动过程中, 各智能体只需调整自身与相邻智能体的相对位置即可维持整体队形。为进一步提升系统的智能程度, 本文基于相邻智能体之间的相对状态信息, 提出了如

下具有时变增益的自适应控制协议:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i &= -\alpha_i(t) \sum_{j=0}^N a_{ij} \left[ k_1 (\mathbf{x}_i - \mathbf{A}_i - \mathbf{x}_j + \mathbf{A}_j) + k_2 (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \right], \\ \dot{\alpha}_i(t) &= \tau_i \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} \left[ k_1 (\mathbf{x}_i - \mathbf{A}_i - \mathbf{x}_j + \mathbf{A}_j) + k_2 (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \right] \right)^T \\ &\quad \times \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} \left[ k_1 (\mathbf{x}_i - \mathbf{A}_i - \mathbf{x}_j + \mathbf{A}_j) + k_2 (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \right] \right) \\ &\quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $k_1, k_2, \tau_i$  均为正数,  $\alpha_i(t)$  为对应于第  $i$  个跟随者的时变控制增益。

定义编队误差:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \mathbf{x}_i - \mathbf{A}_i - \mathbf{x}_0, \\ \zeta_i &= \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_0 \end{aligned}$$

记  $\alpha(t) = \text{diag}(\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_N(t))$ , 在控制协议 (5) 作用下, 编队误差满足:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \zeta_i \\ \dot{\zeta}_i &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) - \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0) \\ &\quad - \alpha_i(t) \sum_{j=0}^N a_{ij} \left[ k_1 (\xi_i - \xi_j) + k_2 (\zeta_i - \zeta_j) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

记:

$$\begin{aligned} \xi &= [\xi_1^T, \xi_2^T, \dots, \xi_N^T]^T, \\ \zeta &= [\zeta_1^T, \zeta_2^T, \dots, \zeta_N^T]^T, \\ \mathbf{F}(t, \xi, \zeta) &= [\mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_1, \mathbf{v}_1) - \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0), \\ &\quad \dots, \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_N, \mathbf{v}_N) - \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)]^T \end{aligned}$$

编队误差系统 (6) 可描述为如下矩阵形式:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \zeta \\ \dot{\zeta} &= \mathbf{F}(t, \xi, \zeta) - (\alpha(t) \mathbf{M} \otimes \mathbf{I}_m) (k_1 \xi + k_2 \zeta) \end{aligned} \quad (7)$$

**定理 1.** 在假设 1 成立的条件下, 自适应控制协议 (5) 无须借助任何全局信息即可解决多智能体系统 (2) 的编队控制问题。此外, 控制增益  $\alpha_i(t)$  收敛于有限值。

**证.** 考虑如下的李雅普诺夫函数:

$$V(t) = [k_1 \xi^T \quad k_2 \zeta^T] (\bar{\mathbf{H}} \otimes \mathbf{I}_m) \begin{bmatrix} k_1 \xi \\ k_2 \zeta \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^N \frac{(\alpha_i(t) - \hat{\alpha})^2}{2\tau_i} \quad (8)$$



其中  $\bar{H} = \begin{bmatrix} \frac{k_2}{k_1} \hat{\alpha} M^2 & \frac{1}{2k_2} M \\ \frac{1}{2k_2} M & \frac{1}{2k_2} M \end{bmatrix}$ ,  $\hat{\alpha} > 0$  待定。

$V(t)$  沿着系统 (7) 对时间  $t$  求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & 2k_1^2 \xi^T \left( \frac{k_2}{k_1} \hat{\alpha} M^2 \otimes \mathbf{I}_m \right) \zeta(t) + k_1 \zeta^T (M \otimes \mathbf{I}_m) \zeta + (k_1 \xi^T + k_2 \zeta^T) (M \otimes \mathbf{I}_m) [F(t, \xi, \zeta) - (\alpha(t) M \otimes \mathbf{I}_m) \\ & (k_1 \xi + k_2 \zeta)] + \sum_{i=1}^N (\alpha_i(t) - \hat{\alpha}) \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} [k_1 (\xi_i - \xi_j) + k_2 (\zeta_i - \zeta_j)] \right)^T \times \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} [k_1 (\xi_i - \xi_j) + k_2 (\zeta_i - \zeta_j)] \right) \end{aligned} \quad (9)$$

注意到非线性动态  $F(t, \xi, \zeta)$  满足利普希茨条件 (3), 则有

$$\begin{aligned} & \|F(t, \xi, \zeta)\| \\ & = \|\mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_1, \mathbf{v}_1) - \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0), \dots, \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_N, \mathbf{v}_N) - \mathbf{f}^T(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)\|^T \\ & = \|\|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}_1, \mathbf{v}_1) - \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)\|, \dots, \|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}_N, \mathbf{v}_N) - \mathbf{f}(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)\|\|^T \\ & = \rho_1 \|\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0\|, \dots, \|\mathbf{x}_N - \mathbf{x}_0\|\|^T + \rho_2 \|\|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0\|, \dots, \|\mathbf{v}_N - \mathbf{v}_0\|\|^T \leq \rho_1 \|\xi\| + \rho_2 \|\zeta\| \end{aligned} \quad (10)$$

从而:

$$\begin{aligned} & (k_1 \xi^T + k_2 \zeta^T) (M \otimes \mathbf{I}_m) F(t, \xi, \zeta) \leq \lambda_{\max}(M) (k_1 \|\xi\| + k_2 \|\zeta\|) (\rho_1 \|\xi\| + \rho_2 \|\zeta\|) \\ & \leq \lambda_{\max}(M) \left( \left[ \frac{\rho_1}{k_1} + \frac{k_1 \rho_2 + k_2 \rho_1}{2k_1^2} \right] \|k_1 \xi\|^2 + \left[ \frac{\rho_2}{k_2} + \frac{k_1 \rho_2 + k_2 \rho_1}{2k_2^2} \right] \|k_2 \zeta\|^2 \right) \leq \mu \lambda_{\max}(M) (\|k_1 \xi\|^2 + \|k_2 \zeta\|^2) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\mu = \max \left\{ \frac{\rho_1}{k_1} + \frac{k_1 \rho_2 + k_2 \rho_1}{2k_1^2}, \frac{\rho_2}{k_2} + \frac{k_1 \rho_2 + k_2 \rho_1}{2k_2^2} \right\}$ 。

此外:

$$\begin{aligned} & -(k_1 \xi^T + k_2 \zeta^T) (\alpha(t) M^2 \otimes \mathbf{I}_m) (k_1 \xi + k_2 \zeta) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} [k_1 (\xi_i - \xi_j) + k_2 (\zeta_i - \zeta_j)] \right)^T \\ & \times \left( \sum_{j=0}^N a_{ij} [k_1 (\xi_i - \xi_j) + k_2 (\zeta_i - \zeta_j)] \right) \end{aligned} \quad (12)$$

将式 (11)、式 (12) 代入式 (9) 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & k_1 \zeta^T (M \otimes \mathbf{I}_m) \zeta - \hat{\alpha} k_1^2 \xi^T (M^2 \otimes \mathbf{I}_m) \xi - \hat{\alpha} k_2^2 \zeta^T (M^2 \otimes \mathbf{I}_m) \zeta + \mu \lambda_{\max}(M) [\|k_1 \xi\|^2 + \|k_2 \zeta\|^2] \\ & = -\begin{bmatrix} k_1 \xi^T & k_2 \zeta^T \end{bmatrix} \left[ \begin{array}{cc} \hat{\alpha} M^2 & 0 \\ 0 & \hat{\alpha} M^2 - \frac{k_1}{k_2^2} M \end{array} \right] \otimes \mathbf{I}_m \begin{bmatrix} k_1 \xi \\ k_2 \zeta \end{bmatrix} + \mu \lambda_{\max}(M) [\|k_1 \xi\|^2 + \|k_2 \zeta\|^2] \\ & \triangleq -\begin{bmatrix} k_1 \xi^T & k_2 \zeta^T \end{bmatrix} (\bar{Q} \otimes \mathbf{I}_m) \begin{bmatrix} k_1 \xi \\ k_2 \zeta \end{bmatrix} + \mu \lambda_{\max}(M) [\|k_1 \xi\|^2 + \|k_2 \zeta\|^2] \leq -(\lambda_{\min}(\bar{Q}) - \mu \lambda_{\max}(M)) [\|k_1 \xi\|^2 + \|k_2 \zeta\|^2] \end{aligned} \quad (13)$$

选取充分大的  $\hat{\alpha}$  确保  $\hat{\alpha} > \frac{k_1}{k_2^2 \lambda_{\min}(M)} + \frac{2\lambda_{\max}(M)}{\lambda_{\min}^2(M)}$ , 从而使  $\bar{H} > 0$  和  $\lambda_{\min}(\bar{Q}) - \mu \lambda_{\max}(M) >$

0 同时成立, 即  $V(t) \geq 0$  和  $\dot{V}(t) < 0$  同时成立, 进而  $V(t) \leq V(0)$ , 且  $\xi_i, \zeta_i$  和  $\alpha_i(t)$  均有界。此外, 由系统 (7) 可知  $\dot{\xi}, \dot{\zeta}$  均有界; 又  $f(t, \xi, \zeta)$  一致连续, 从而  $\dot{V}(t)$  一致连续。基于 Barbalat 引理,

$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}(t) = 0$ 。则有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi = 0$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \zeta = 0$ 。注意到  $\tau_i > 0$ , 由自适应控制协议 (5) 知  $\alpha_i(t)$  单调增加, 基于单调有界数列必有极限这一事实可知,  $\alpha_i(t)$  收敛于有限值。

注. 文献[12-14]中确定静态控制增益需要事先知道通信拓扑图的拉普拉斯矩阵及智能体自身的非线性特性, 然后根据系统稳定性理论确定静态控制增益的取值范围。本文提出的自适应控制协议 (5) 的参数自主调节, 不依赖智能体自身的非线性动态及通信拓扑图信息, 可满足大规模的多智能体编队控制需求。然而, 控制协议 (5) 中的控制增益需要不断更新, 相比于静态控制协议更复杂, 对硬件设备计算性能提出更高的要求。

## 5 仿真结果

本节通过仿真实例验证自适应控制协议的有效性。考虑包含 6 个跟随者和 1 个领航者的多智能体系统, 节点  $v_0$  表示领航者,  $v_1, v_2, \dots, v_6$  表示跟随者, 其通信拓扑图  $\bar{\mathcal{G}}$  如图 1 所示。显然该通信拓扑图满足假设 1。假设所有的非零权重均为 1。

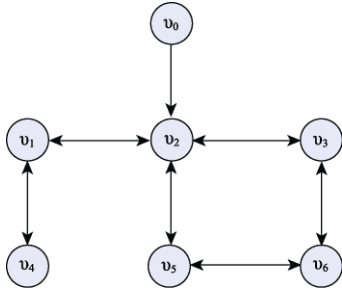


图 1 通信拓扑图  $\bar{\mathcal{G}}$

Fig.1 The communication graph  $\bar{\mathcal{G}}$

所有智能体的动态方程均由系统 (2) 给出, 非线性动态由下列 Chua's 电路<sup>[17]</sup>给出:

$$f(t, \mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) = \begin{bmatrix} p(\mathbf{v}_{i2} - \mathbf{v}_{i1} - \mathbf{h}(\mathbf{v}_{i1})) \\ \mathbf{v}_{i1} - \mathbf{v}_{i2} + \mathbf{v}_{i3} \\ -q\mathbf{v}_{i2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:  $\mathbf{h}(\mathbf{v}_{i1}) = b\mathbf{v}_{i1} + 0.5(a-b)(|\mathbf{v}_{i1} + 1| - |\mathbf{v}_{i1} - 1|)$ 。

当  $p=10, q=18, a=4/3, b=-3/4$  时, 系统呈现

混沌状态。选取  $k_1 = 3, k_2 = 2$ 。

6 个跟随者的初始位置和速度状态分别从  $[0, 10] \times [-6, 6] \times [-10, 0]$  和  $[-4, 4] \times [-4, 4] \times [-4, 4]$  中随机选取, 领航者的初始位置和速度分别为  $[1, 2, 3]^T$  和  $[0.6, -0.2, 0.3]^T$ 。此外, 时变控制增益的初值设置为  $\alpha_i(0) = 0$  和  $\tau_i = 0.01, i=1, 2, \dots, 6$ 。假设期望的一字队形为  $\Delta = [\Delta_1^T, \Delta_2^T, \dots, \Delta_6^T]^T$ , 其中:

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -10 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -20 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -30 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \Delta_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -40 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ -50 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ -60 \\ 0 \end{bmatrix}$$

在自适应控制协议 (5) 作用下多智能体系统的位置和速度曲线分别如图 2~3 所示, 可以看出多智能体系统形成并保持期望的一字队形, 且速度渐近达到一致。图 4 描述了自适应控制协议 (5) 中时变增益  $\alpha_i(t), i=1, 2, \dots, 6$  的轨迹曲线。显然,  $\alpha_i(t), i=1, 2, \dots, 6$  渐近趋于某个有限值。

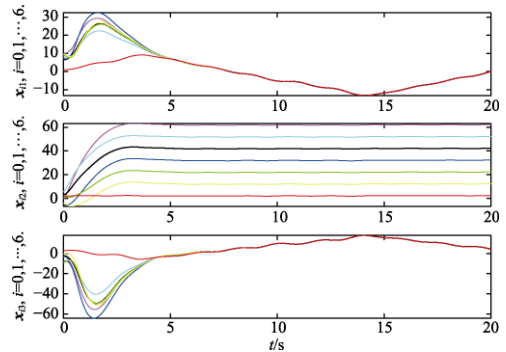


图 2 自适应控制协议 (5) 作用下的位置曲线  
Fig. 2 Position trajectories of the network under the adaptive control protocol (5)

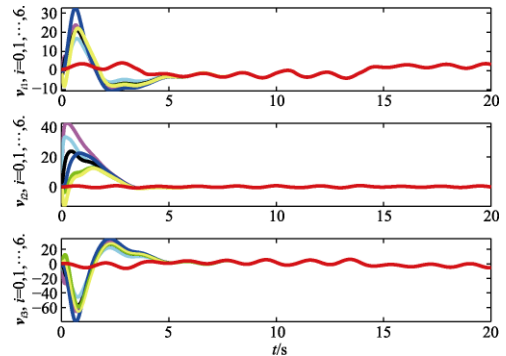
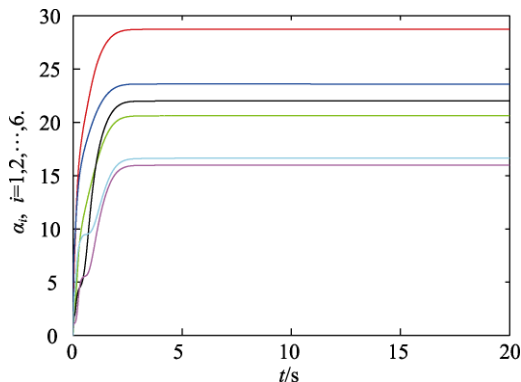


图 3 自适应控制协议 (5) 作用下的速度曲线  
Fig. 3 Velocity trajectories of the network under the adaptive control protocol (5)

图4 时变控制增益  $\alpha_i(t), i=1, 2, \dots, 6$ Fig. 4 Time-varying control gains  $\alpha_i(t), i=1, 2, \dots, 6$ 

## 6 结论

本文针对二阶非线性多智能体系统的编队控制问题,设计了具有时变增益的自适应控制协议。该控制协议仅依赖邻居智能体之间的相对状态信息,无须知道智能体自身的非线性动态特性或通信拓扑图的特征值等全局信息,从而实现了真正意义上的分布式。通过对包含6个跟随者和1个领航者的多智能体系统的编队控制进行数值仿真,证实了该控制协议的有效性。值得注意的是,本文假设跟随者之间的通信拓扑图为无向图,未来将持续研究跟随者之间的通信拓扑图为有向图的情形。

## 参考文献

- [1] 郭行. 智能无人系统发展战略研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 1-11.
- [2] 王平, 罗阳, 于均杰. 基于鲁棒  $H_\infty$  控制的多机协同编队[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 134-140.
- [3] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
- [4] 邵星灵, 刘俊, 李东光. 面向目标对峙跟踪的四旋翼协同编队控制方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1): 11-18.
- [5] 刘惟桓, 罗阳, 于均杰, 等. 新概念多无人机协同探潜技术发展趋势分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 9-13.
- [6] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [7] Loria A, Dasdemir J, Jarquin N A. Leader-follower formation and tracking control of mobile robots along straight paths[J]. IEEE Transactions on Control Technology, 2016, 24(2): 727-732.
- [8] Ren W, Beard R W. A decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach[C]. Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, USA, June 4-6, 2003.
- [9] Lawton J, Beard R W. Synchronized multiple spacecraft rotations[J]. Automatica, 2002, 38(6): 1359-1364.
- [10] Fax J A, Murray R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1465-1476.
- [11] Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 505-512.
- [12] Yu W W, Chen G R, Cao M, et al. Second-order consensus for multiagent systems with directed topologies and nonlinear dynamics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2010, 40(3): 881-891.
- [13] Song Q, Cao J D, Yu W W. Second-order leader-following consensus of nonlinear multi-agent systems via pinning control[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(9): 553-562.
- [14] Wen G G, Peng Z X, Rahmani A, et al. Distributed leader-following consensus for second-order multi-agent systems with nonlinear inherent dynamics[J]. International Journal of Systems Science, 2014, 45(7-9): 1892-1901.
- [15] Godsil C, Royle G. Algebraic Graph Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [16] Hu J P, Hong Y G. Leader-following coordination of multi-agent systems with coupling time delays[J]. Physica A, 2007, 374(2): 853-863.
- [17] Chua L O. The genesis of chua's circuit[J]. Archiv Elektronik Ubertragung, 1992, 46(3): 250-257.

### 作者简介:



王平(1978-),女,博士,工程师,主要研究方向为多智能体系统分布式、编队控制及鲁棒  $H_\infty$  控制研究。



刘畅(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向为卫星定位导航、无线传感器网络、路径规划。

[引用格式] 贾宜霖, 岳训. 引领式空中汉字展示无人机集群的仿真研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 32-39.

# 引领式空中汉字展示无人机集群的仿真研究

贾宜霖, 岳训

(山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018)

**摘要:** 基于无人机集群的空中展示技术是新一代传媒娱乐的热点, 针对目前无人机集群编队存在受限于通信资源的规模瓶颈的问题, 在基于5G通信的假设理想状态下, 给出一种引领式空中汉字展示无人机集群控制策略。首先, 探析引领式空中汉字展示无人机集群编队聚合和解体的全局系统演化过程。然后, 在实现无人机集群编队目标位置分配、路径规划、避撞要求、姿态轨迹跟踪控制等技术基础上, 设计了引领式空中汉字展示无人机集群编队聚合和解体的双向控制信息模式。最后, 在MATLAB环境下实现了256单元的引领式16×16点阵空中汉字动态展示无人机集群虚拟仿真。引领式空中汉字展示无人机集群控制策略, 为空中展示传媒领域提供了新型可行性应用方案。

**关键词:** 无人机; 集群编队; 字符展示; 5G移动通信; 虚拟仿真

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)03-32-08

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.025

## Simulation Study of Leader Following UAVs for Air Dot Matrix Chinese Character Display

JIA Yilin, YUE Xun

(College of Information Sciences and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** Air display basing on unmanned aerial vehicles (UAVs) is the hotspot of media and entertainment industry. In view of the bottleneck of the communication resource allocation between UAVs, the control strategies of leader following UAVs for air dot matrix Chinese character display, which benefits from the near-ideal state of 5G communication, is proposed. First, the evolutionary cycle of formation control of leader following UAVs for air dot matrix Chinese character display is given. Then, the formation control and dynamic task assignment models under the bi-directional information flow, which based on formation control, formation tracking control of UAVs, is proposed. Last, simulation examples of air 16×16 dot-matrix Chinese-character display of 256 UAVs under MATLAB environment are given to show the effectiveness. Leader following UAVs for air dot matrix Chinese character display provides a feasible solution scheme for media and entertainment industries.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicles; Formation Control; Air Dot-matrix Chinese-character Display; 5G Communication; Simulation

## 1 引言

无人机集群 (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) 以单平台和信息协同交互体系为支撑, 根据外部加载任务需求和感知环境, 自主进行编队形成 (聚合) 和协同任务分配 (解体)<sup>[1]</sup>。近年来, 随着新兴数字化信息技术 (智能芯片、物联网、大数据、云计算和人工智能等领域) 之间的深度融合, 无人机装备相关的平台技术、传感器技术、指挥控制技术等均有较大进展, 各种新型结构设计和动力储能技术的进步极大地提高了无人机效率<sup>[2-3]</sup>。众所周知, 无人机集群之间控制命令和数据传输的通信技术, 决定无人机自身的感知定位与无人机集群之间协同信息通信可靠性。目前大规模、远航程的无人机集群编队普遍采用惯性导航、卫星导航、多普勒导航、地形辅助导航以及地磁导航等技术进行编队协同导航定位; 短距离的集群编队多采用基于 Wi-Fi 传感器技术。由于无人机嵌入式微处理器性能、通信带宽和通信时延的技术缺陷, 目前实际应用领域的无人机集群存在通信资源限制造成的集群规模受限瓶颈<sup>[4]</sup>。

新一代 5G 移动通信技术具有超高速率 (峰值速率大于每秒 20 GB, 相当于 4G 的 20 倍)、低时延 (网络时延从 4G 的 50 ms 缩减到 1 ms) 和低功耗等特点<sup>[5]</sup>, 为解决目前无人机系统大规模应用的集群规模受限问题带来技术突破机遇。一方面, 5G 技术能最大限度为无人机集群提供高速率的智能化数据传输服务和超可靠的低延迟通信; 另一方面, 5G 技术通过云服务的接口和工具访问并管理第三方的基础设施服务, 可实现集群编队智能服务, 保障了大规模集群节点之间的近实时信息交换能力<sup>[6-7]</sup>。无人机集群编队控制技术与新一代 5G 移动通信技术融合分为以下三个范式<sup>[8-10]</sup>:

(1) UAV 可以智能地定位为飞行基站、中继站或定位锚, 满足 5G 系统中无人机集群动态和不断增长的数据需求。

(2) 空中飞行的 UAV 通过访问 5G 无线网络地面基础设施, 实现 UAV 集群之间通信。

(3) 无人机集群彼此之间与地面用户共享蜂窝频谱直接通信。

目前, 视觉锐化、极致体验、云端一体、现场增强的新一代传媒娱乐, 将是民用商业市场创业和投资的焦点 (如图 1)。本文面向低空空域 (500 m 以内) 飞行需求, 借助无人机集群与 5G 无线网络的结合潜力, 在信号强度和覆盖范围上可保证有限通信信道带宽内连续交换信息的理想状态。探析引领式空中汉字展示无人机集群编队形成 (聚合) 和协同任务分配 (解体) 的全局系统演化过程, 实现 256 单元的引领式 16 × 16 点阵空中汉字的动态展示无人机集群仿真。



图 1 2020 年 6 月 15 日晚, 第 127 届广交会 500 架无人机编队展示图案

Fig. 1 Air display of 500 UAVs in 2020.6.15

## 2 引领式空中汉字展示无人机集群编队控制模型

如何将具有自主能力的 256 无人机单元在空间形成特定的 16 × 16 点阵层次正方块稳定队形, 同时又能根据外部情况和任务需求实时进行队形动态调整, 是引领式空中汉字展示无人机集群编队控制设计中的关键性问题。目前无人机集群编队飞行队形控制技术有虚拟结构法、人工势场法、领导-跟随法、基于行为法和一致性等编队控制方法<sup>[11]</sup>。其中, 以领导-跟随法为代表的引领式无人机集群系统, 凭借成熟的集群控制算法、通信



网络设计、编队控制技术已广泛应用<sup>[12]</sup>。引领式无人机集群编队将首先对集群编队拓扑网络队形进行层级划分，然后在集群编队拓扑网络中选择领导者；通过领导者与跟随者之间的信号反馈，获得领导者与跟随者之间的距离和相对方位信息，对队形进行建模并定义保持编队行为控制策略。但是，由于引领式智能体集群控制通常采用微分方程动力系统稳定性分析的集群控制策略，面对智能体集群规模和复杂多变的智能体集群外部环境，迫切需要由简单规则生成复杂行为的智能体集群通用模型控制策略。

## 2.1 引领式空中汉字展示无人机集群编队聚合和解体的全局系统演化

### 2.1.1 引领式空中汉字展示无人机集群空间组织的拓扑结构有序性

引领式空中汉字展示无人机集群在内部纵向维度，遵循分层、分类、分节的层级引领式拓扑交互结构。每个层次的无人机单元可以有自己独特的概念、特征和法则。

### 2.1.2 引领式空中汉字展示无人机集群内部控制信息流动的有序性

在引领式空中汉字展示无人机集群内部层级引领式拓扑交互结构，存在两种集群控制信息流动路径或运动方式。一是“自上而下”的正态路径信息，解释为高层级引领式的中心节点，通过个体感知作业环境以及外部任务载荷指挥控制平台，“自上而下”地整体约束、驱动底层无人机的拓扑结构，决定引领式空中汉字展示无人机集群外在表现的聚集过程。二是“自下而上”的逆态路径信息，意为在具有多模态感知功能的单个无人机感知周围态势环境后，将“自下而上”反馈到引领式空中汉字展示无人机集群相邻的上层结构无人机单元。

### 2.1.3 引领式空中汉字展示无人机集群经历编队形成（聚合）和任务分配（解体）的全局系统演化周期

引领式空中汉字展示无人机集群内部“自上而下”的正态和“自下而上”逆态流动之间的动态平衡和有序博弈，是一个相互依存、互为根基

的辩证关系。一是“自上而下”正态和“自下而上”逆态双向调控是具有主导结构、不平衡的对立统一体，即对立双方的地位是不均等的，其中必有一方占据主导地位，另一方处于从属地位。二是双方在一定条件下相互转化，经过双方的平衡态，主导地位可以转化成从属地位，从属地位在一定条件下亦有可能占据主导地位。三是正态和逆态两种调控方向的有序博弈，驱动着引领式空中汉字展示无人机集群控制信息流动时序态势的演化顺序和规则，决定了无人机集群协同行为和集群稳定性。

引领式空中汉字展示无人机集群经历编队形成（聚合）、集群编队优化（调整优化）和集群编队解体（任务分配）的有界时空演化周期详细阐述如下。

#### 阶段 1：无人机集群编队形成（聚合）

【引领式空中汉字展示无人机集群的初始态】：一定规模、松散的单个自主无人机存在于可控范围的有界时间和空间中。

【正态路径信息开始增益，无逆态路径信息】：处于主导地位的中心节点无人机，通过个体感知作业环境以及外部任务载荷指挥控制平台，采用基于数据链的信息共享全局式信息交互，逐步分批“自上而下”地整体约束、驱动下层无人机，开始引领式空中汉字展示无人机集群层级引领式拓扑交互结构的聚集动态配置。

【正态路径信息增长到极大数，无逆态路径信息】：集群控制的“自上而下”正态路径信息增长达到极值，引领式空中汉字展示无人机集群聚合过程按照一定层级引领式拓扑交互结构形式，形成二维/三维空间特定排列的集群系统编队。

#### 阶段 2：无人机集群编队优化（调整优化）

【正态路径信息保持极大数，逆态路径信息开始从极小值逐步增益】：具有多模态感知功能的下层无人机，感知周围态势环境的变化，集群系统内部集群控制的“自下而上”的逆态路径信息传递反馈开始增强。

【逆态路径信息与正态路径信息达到平衡】：集群控制“自上而下”的正态路径信息流动方式

开始减弱。集群系统编队进行队形动态调整。集群内部“自上而下”正态与“自下而上”的逆态路径信息流动方式达到平衡, 维持集群系统编队相对稳定的平衡。

**阶段 3: 无人机集群编队解体 (任务分配)**

【正态路径信息保持, 逆态路径信息逐步增益】: 集群内部“自下而上”逆态路径传递反馈信息流动方式占据主流。

【正态路径信息消弱到极小值, 逆态路径信息逐步增益到极大值】: 引领式空中汉字展示无人机集群编队依据多目标分组、分配, 引领式空中汉字展示无人机集群从底向上, 在引领式空中汉字展示无人机集群层级引领式拓扑交互结构, 逐层解体开始, 任务分配每个 (层) 智能体都有自己的任务或者子目标。

**2.2 引领式空中汉字展示无人机集群编队的双向控制信息控制模式**

从整体系统演化角度, 引领式空中汉字展示无人机集群编队呈现出来的空间性、组织结构稳定性和有序性取决于如下关键要素。

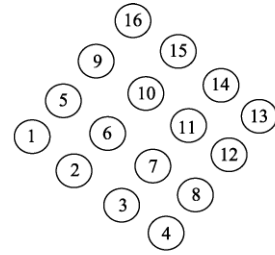
**2.2.1 引领式空中汉字展示无人机集群具备的  $N \times N$  点阵层级结构**

图 2 (a) 为 16 个无人机单元的  $4 \times 4$  点阵层级正方形引领式集群结构。根据各无人机单元在队形中位置差异, 依照层级划分规则, 对集群进行编队层级划分。其中, 第 16 无人机单元指定为当前队形的顶层中心引领单元, 沿通信链路向下, 依照相邻关系和标号依次递减原则确定引领关系。

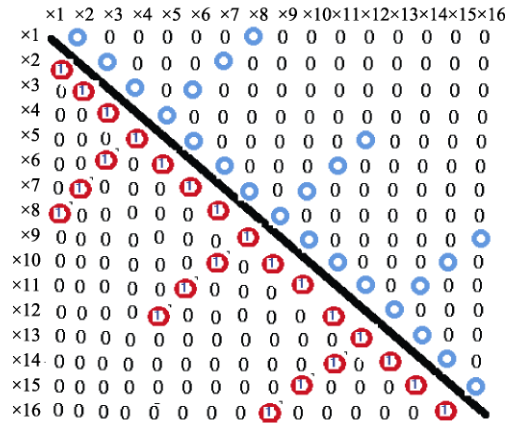
**2.2.2 基于双向控制信息的引领式空中汉字展示无人机集群控制信息流动全局时序态势**

在信号强度和覆盖范围上可保证有限通信信道带宽内连续交换信息的理想状态, 引领式无人机单元在层级引领式垂直整合下的内部组织结构之间, 体现在系统内部层级引领式组织结构“自上而下”和“自下而上”的路径的信息流动正反馈和负反馈:

正态路径信息: 引领式空中汉字展示无人机集群上层无人机单元, “自上而下”地整体约束、驱动下层无人机单元。



(a) 16个无人机单元构成的 $4 \times 4$ 层次引领式组织结构



(b)  $4 \times 4$ 层次引领式组织结构的全局邻接矩阵

图 2 16 个无人机单元构成的  $4 \times 4$  层次引领式组织结构和全局邻接矩阵

Fig. 2 The  $4 \times 4$  leader-follower structure and adjacency matrix of 16 UAVs

逆态路径信息: 单个自主无人机单元将被周围态势环境的突显目标“刺激”, “自下而上”反馈到引领式空中汉字展示无人机集群相邻的上层结构无人机单元。

基于双向控制信息的引领式空中汉字展示无人机集群控制信息流动全局时序态势可用如下全局邻接矩阵描述:

$$A = [\psi_{ij}]_{N \times N} \quad (1)$$

式(1)表示引领式空中汉字展示无人机集群的单元数目。其中:

$$\psi = (v, \omega) \quad (2)$$

$v = (v_1, v_2, \dots, v_N)$  引领式空中汉字展示无人机集群中无人机单元点集合;  $\omega(i, k)$  表示引领式层级垂直整合下相邻智能体之间信号传输,  $(i, k) \in v$ 。

“自上而下”和“自下而上”的正态、逆态两种信息路径在引领式空中汉字展示无人机集群纵向层级结构的流动状态细化为 2 个状态:

$$\omega(i, k) = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个单元约束驱动下层 } j \text{ 智能体单元} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega(k, i) = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个单元被刺激反馈到 } j \text{ 智能体单元} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

图 2 (b) 为 16 个无人机单元的 4 × 4 点阵层次正方块引领式集群结构全局邻接矩阵。

如图 3 所示，以 4 个无人机单元 (x1、x2、x3、x4) 的一字长蛇阵引领式集群结构为例，按标号依次递减。“自上而下”和“自下而上”两种集群控制信息，将呈现 3 个级别的流动状 (1~2 层、2~3 层和 3~4 层)。引领式空中汉字展示无人机集群编队形成 (聚合)、能体集群编队优化 (调整优化) 和能体集群编队解体 (任务分配) 时序态势的全局系统演化法则如图 3 所示。

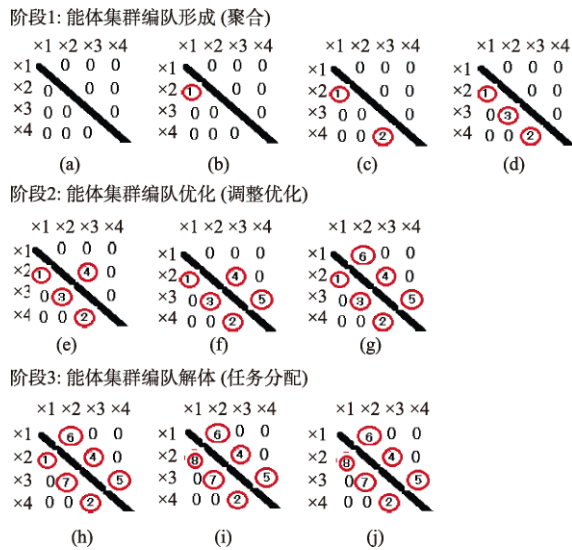


图 3 一字长蛇阵引领式 4 单元集群编队形成和任务分配逐步演化规则(a-j)

Fig. 3 Global system evolution rules of the 4 leader-follower horizontal formation and dynamic task assignment (a-j)

### 3 引领式空中汉字展示无人机集群编队仿真及算法时效性分析

#### 3.1 256 架无人机单元的 16 × 16 正方块集群编队

引领式空中汉字展示无人机集群采用 HZK16 汉字 16 × 16 点阵空中汉字字符展示方案, HZK16

字库里的 16 × 16 汉字一共需要 256 个点来显示, 需要 256 架无人机空中编队组成各种字幕和图案。本文在实现无人机集群编队目标位置分配、路径规划、避撞要求、姿态轨迹跟踪控制等技术基础上<sup>[13]</sup>, 设计了无人机集群编队聚合和解体的全局系统演化以及双向控制信息控制模式, 在 MATLAB 环境下实现了 256 单元的引领式 16 × 16 点阵空中汉字的动态展示无人机集群虚拟仿真。

假设在一定时间区间内, 引领式空中汉字展示无人机集群初始位置随机分布, 通过引领式集群编队的基于双向控制信息演化控制机制, 队形变换至 256 无人机单元的 16 × 16 点阵层次正方块引领式集群队形, 如图 4(a)~(c)所示。

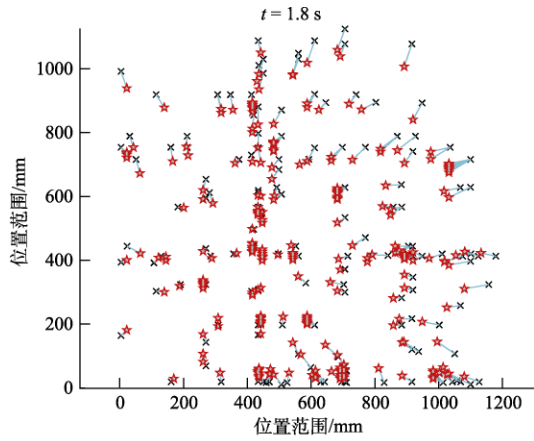
#### 3.2 16 × 16 的 FED 点阵汉字字幕和图案展示

16 × 16 点阵显示汉字点阵地址段以十六进制的方式, 预存在静态数组当中方便调用。如图 5 所示, 通过控制无人机的外显光源即可得到所需的 FED 点阵汉字字幕和图案展示。

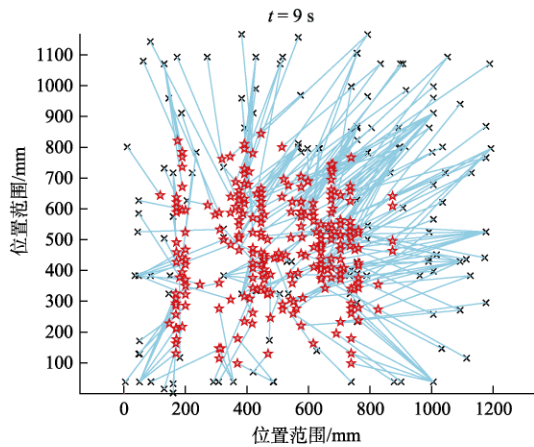
#### 3.3 时效性分析

为了验证引领式空中汉字展示无人机集群编队虚拟仿真算法的时效性, 本文在确定虚拟仿真实验的相关参数 (运行速度等) 的前提下, 主要从集群编队的规模、集群编队初始目标位置分配范围, 验证所建模型的合理性和稳定性。

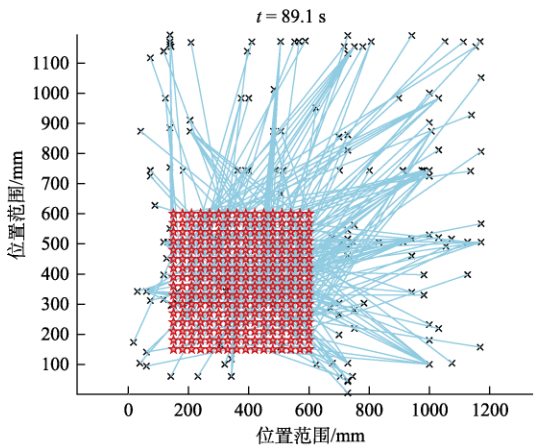
如图 6 所示, 集群编队的规模采用 16 个无人机单元的 4 × 4 点阵层次正方块引领式集群编队聚合和解体过程为例, 假设在一定时间区间内, 集群初始位置随机分布, 聚合为一字长蛇阵引领式集群的队形如图 6(a)所示, 然后, 针对 3 个突显目标, 根据外部情况和任务需求进行队形动态调整为 3 个小队形如图 6(b)所示; 任务完成后, 编队任务再次发生改变, 集群期望队形变换至 16 个无人机单元的 4 × 4 层次正方块引领式集群队形, 如图 6(c)所示, 针对 2 个突显目标, 根据外部情况和任务需求进行队形动态调整为 3 个小 2 × 2 小方块队形, 集群解体, 如图 6(d)所示, 16 个无人机单元用 x1、x2、x3、x4、x5、x6、x7、



(a) 无人机单元初始位置随机分布, 开始无人机集群编队形成(聚合)



(b) 无人机集群编队动态调整, 逐步形成正方形集群队形



(c) 256架无人机单元的16×16正方形集群队形

图 4 256架无人机单元的16×16正方形集群队形的切换轨迹图

Fig. 4 Trajectory of 16×16 cluster formation of 256 UAVs

x8、x9、x10、x11、x12、x13、x14、x15、x16 表示, x17、x18、x19 代表周围态势环境的“刺激”突显目标。

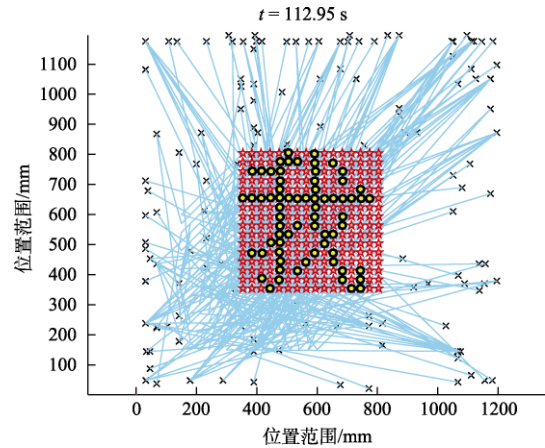


图 5 256 单元的引领式无人机集群空中 16×16 点阵空中汉字

Fig. 5 16×16 air dot-matrix Chinese-character display of 256 leader-follower UAVs

再以 16 个无人机单元的 4×4 点阵层次正方形引领式集群结构和 256 个无人机单元的 16×16 点阵层次正方形引领式集群队形为对比, 两种集群编队初始目标位置分配范围从[200, 200]到[1600, 1600]变化, 验证算法的合理性和时效性。如图 7 所示, 本文算法的时效满足无人机集群的空中汉字展示的规划需求。但是, 仿真结果显示, 初始目标位置分配范围越大, 相应的算法收敛时间越长。且无人机数量较少时, 时效性较高, 故无人机的数量对模型算法的时效性影响较大, 因而需要选取合理方案。

### 4 结 论

随着数字 5G 通信基础设施建设和产业应用场景的拓展, 5G 无线网络将满足无人机集群为核心的计算基础服务体系, 应用于各产业和行业领域的智能经济应用场景<sup>[14-15]</sup>。本文工作在保证有限的通信信道带宽内连续交换信息的理想状态上, 主要工作如下:

(1) 针对目前引领式智能体集群编队控制主流研究都是基于传统优化方法的微分方程动力系统稳定性分析控制方案, 体现出不适于大规模集群的局限性。本文从整体的、系统演化角度, 将无人机智能体集群内部要素(智能体或子系统)、



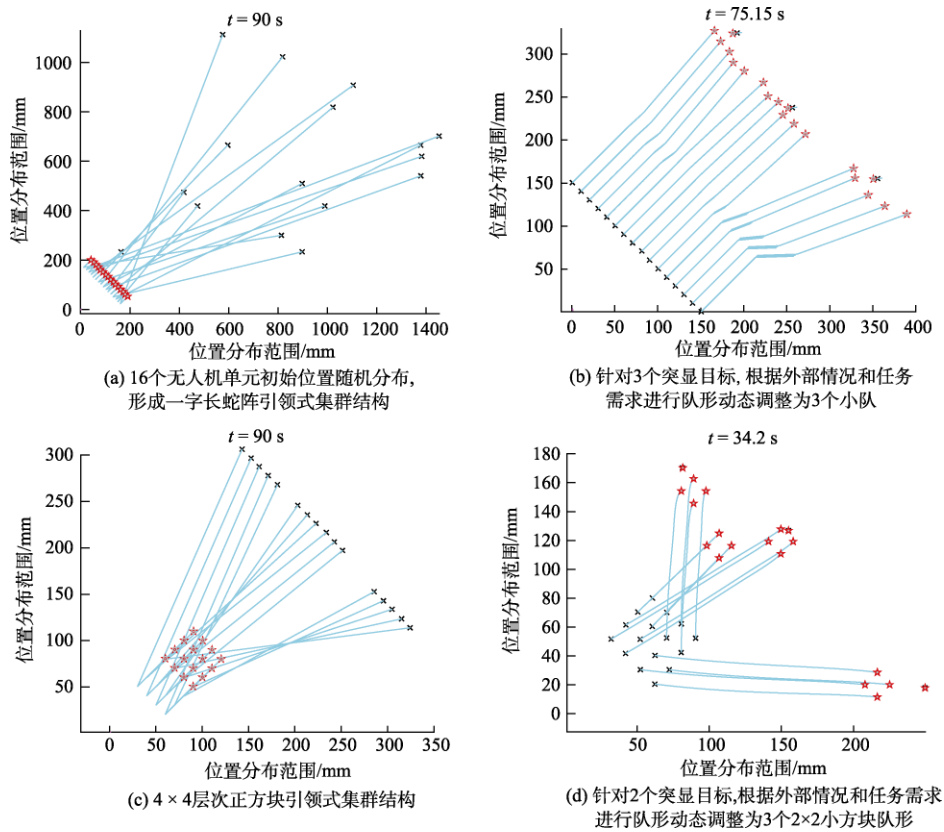


图 6 16 个无人机单元的 4 × 4 点阵层次正方形引领式集群编队聚合和解体过程的切换轨迹图  
 Fig. 6 Trajectory of the aggregation and dissolution for 4 × 4 cluster formation of 16 leader–follower UAVs

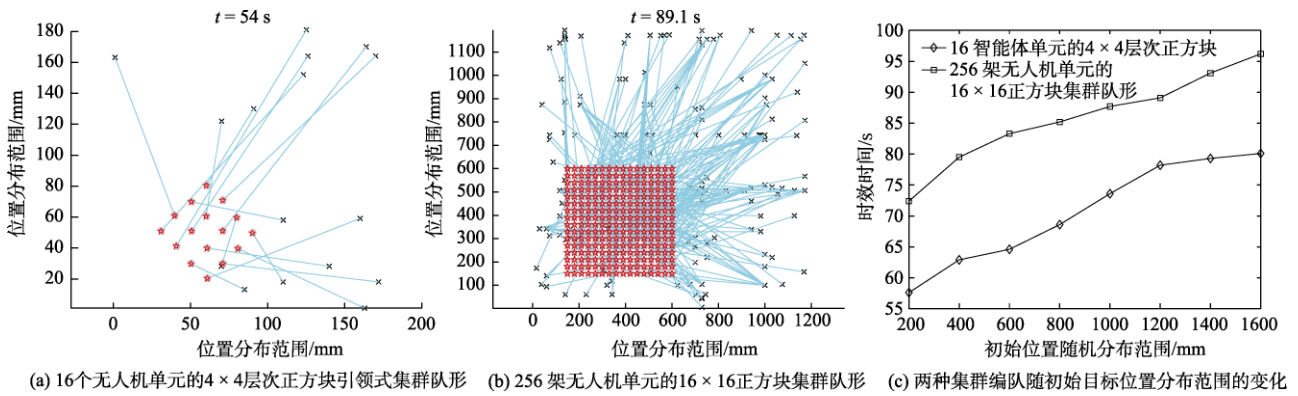


图 7 16 单元和 256 单元集群编队的时效差异

Fig. 7 Time effect for leader–follower formation structure between 16 UAVs and 256 UAVs

与其相关联的外部环境要素，组合成一个由外部环境和内部机制的具有整体多层次嵌套结构、多元维度调控联合驱动、全局系统演化的自适应复杂系统，提出了引领式空中汉字展示无人机集群编队形成（聚合）和协同任务分配（解体）的全局系统演化认知框架。

(2) 从引领式空中汉字展示无人机集群具备

的垂直整合下的动态层级结构、集群层级结构存在“自上而下”和“自下而上”内部协同信息流动路径或方式的有序性等要素入手，着重解析了无人机集群编队的控制信息流动时序态势演化周期机制。

(3) 给出一种全局邻接矩阵形式化定义，描述基于双向控制信息的引领式空中汉字展示无人



机集群控制信息流动全局时序态势。

(4) 在 MATLAB 环境下实现了空中汉字展示的无人机集群虚拟仿真实验, 验证了方案的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 郭行. 智能无人系统发展战略研究[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 1-11.
- [2] Naqvi S A R, Hassan S A, Pervaiz H, et al. Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 36-42.
- [3] Zeng Y, Wu Q, Zhang R. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[C]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [4] Qin J, Ma Q, Shi Y, et al. Recent advances in consensus of multi-agent systems: A brief survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4972-4983.
- [5] Ma T D, Zhang Z L, Cui B. Variable impulsive consensus of nonlinear multi-agent systems [J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2019, 31: 1-18.
- [6] Ding L, Han Q L, Ge X H, et al. An overview of recent advances in event-triggered consensus of multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48: 1110-1123.
- [7] Oh K, Park M, Ahn H. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53: 424-440.
- [8] Li B, Fei Z, Zhang Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 2241-2263.
- [9] Bor-Yaliniz I, Salem M, Senerath G, et al. Is 5G ready for drones: A look into contemporary and prospective wireless networks from a standardization perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 18-27.
- [10] Vinogradov E, Sallouha H, De Bast S, et al. Tutorial on UAVs: A blue sky view on wireless communication[J]. Journal of Mobile Multimedia, 2019, 14(4): 395-468.
- [11] Chen F, Dimarogonas D V. Consensus control for leader-follower multi-agent systems under prescribed performance guarantees[C]. 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2020.
- [12] Franhi A, Giordano P R. Online leader selection for improved collective tracking and formation maintenance[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5(1): 3-13.
- [13] Wjxjmj. A research and simulation library for multi-agentsystems. [EB/OL]. 2020. [2021] <https://github.com/wjxjmj/openMAS>
- [14] 张朝阳, 李星宏. 5G 在无人驾驶汽车中的应用前景分析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 65-68.
- [15] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.

### 作者简介:



贾宜霖 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 5G 数字农业经济新模式。



岳训 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为整体系统研究范式的机器认知理论、生态系统的全局系统演化调控机理。

[引用格式] 邹佳运, 张文清, 曲泓玥, 等. 面向水下目标搜索的 USV&UUV 编队协同队形规划[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 40-46.

# 面向水下目标搜索的 USV&UUV 编队协同队形规划

邹佳运<sup>1,2</sup>, 张文清<sup>1,2</sup>, 曲泓玥<sup>2</sup>, 孙巍<sup>1,2</sup>

(1. 中国人民解放军海军潜艇学院, 青岛 266199; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237)

**摘要:** 针对异构 USV&UUV 编队的水下目标搜索效能最大化问题, 开展了编队队形规划方法研究。为满足多样化的水下目标探测任务需求, 依托 USV 和 UUV 各自在通信与水下目标探测方面的特长, 将其编组成以 USV 为中心通信平台、以多 UUV 为水下目标探测子平台的异构水下目标探测编队。根据声呐方程建立了基于多声呐探测性能评估的概率感知模型, 根据水声环境及探测系统参数定量地给出系统对区域内各处目标的探测能力; 为应对复杂的水下目标搜索任务需求, 提出以搜索正面宽度及编队覆盖面积为优化准则, 利用层次分析法的思想, 实现了多准则的融合统一; 进而, 利用粒子群算法, 对评估模型中的队形参数寻优。算例结果表明, 该方法有效地实现了异构编队多优化准则下的搜索队形的最优规划。该方法可为 USV&UUV 编队的水下目标搜索队形提供指导。

**关键词:** USV; UUV; 声呐探测; 编队队形; 多准则; 编队优化

**中图分类号:** N945.15; TB566      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)03-40-07

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.026

## Cooperative Formation Planning of UUV&USV Formations for Underwater Target Search

ZOU Jiayun<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenqing<sup>1,2</sup>, QU Hongyue<sup>2</sup>, SUN Wei<sup>1,2</sup>

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of maximizing the search efficiency of underwater target in heterogeneous USV&UUV formation, the formation planning method is studied. In order to meet the requirements of various underwater detection tasks, according to the characteristics of USV and UUV, a heterogeneous underwater target detection formation with USV as the center communication platform and multiple UUVs as the underwater target detection sub platform can be formed. According to the sonar equation, the probability perception model based on the detection performance evaluation of multi sonar is established, which can quantitatively give the detection ability of the system to the targets in the area according to the underwater acoustic environment and the detection system parameters. In order to meet the requirements of complex underwater target search task, the optimization criteria are proposed, which are the search front width and formation coverage area, and the idea of analytic hierarchy process is used to implement the

收稿日期: 2021-03-13; 修回日期: 2021-04-18

基金项目: 国防科技创新特区项目(2019); 国家重点研发计划项目(2019YFC0311700); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室问海计划项目(2017WHZZB0601)

model. Then, particle swarm optimization algorithm is used to optimize the formation parameters in the evaluation model. The results show that the method can effectively realize the optimal planning of search formation. This method can provide guidance for underwater target search formation of USV & UUV formation.

**Key words:** USV; UUV; Sonar Detection; Formation Pattern; Multiple Criteria; Formation Optimization

## 1 引言

无人探测技术具有隐蔽性好、配置灵活、成本低廉、无人员损失、可在恶劣偏僻地区长时间工作等优势。在水下目标的无人探测中,较常见的为无人水面航行器(Unmanned Surface Vehicle, USV)系统及无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)系统,其中 USV 工作于水面,其搭载能力较强,能源方面可搭载大量的蓄电池甚至内燃机系统,可支撑先进的实时通信系统和高性能数据处理系统;UUV 工作于水下,其搭载量的限制使其在能源方面只能依赖于搭载的蓄电池,故其航速慢、通信能力差、数据处理能力低,但在水下工作时,由于不受海面波浪影响,声学传感器的工作平台更为稳定,同时受海面风成噪声及雨噪声的影响更小且可利用可靠声路径进行探测,其水下目标探测能力更强。

以往的无人编队问题研究大多集中于同构编队<sup>[1-2]</sup>,同构编队虽然可有效提高探测效能,但编队中平台类型和功能单一,限制了其应用的灵活性。异构编队探测是目前集群探测研究的热门方向,根据各种类平台的特点,合理分配各平台任务,扬长避短,提高整体探测效能<sup>[3]</sup>。USV 和 UUV 作为主要的海洋无人装备,可根据各自特点构建 USV&UUV 系统,UUV 以其优秀的探测能力,承担水声信号的收集任务;USV 则以其优秀的通信、数据处理能力<sup>[4]</sup>,承担与岸基或有人母船的数据传输和对编队中各 UUV 的指挥控制、信息融合任务,由此构成以 USV 为中心的集中式搜索编队。

在无人编队探测系统中,各平台的阵位是决定系统效能的重要因素,在上述的异构编队中,各 UUV 如何围绕 USV 构成编队决定了搜索的效能。以往针对编队的研究一般主要集中在避碰及编队控制上<sup>[5-6]</sup>,而对编队队形的研究大多只限于

几种常见队形的性能比较<sup>[7-8]</sup>,其队形来源于直观经验,缺乏理论支撑,无法自证最优。针对此问题,本文通过理论建模,构建可信的编队探测效能评估方法,并给出适应复杂任务需求的优化准则设立方法,最后通过粒子群优化算法给出 USV&UUV 编队的最优搜索队形,以期切实解决异构编队的最优队形规划。

## 2 编队探测效能评估方法

为直观、定量评估编队的探测能力,需要建立编队区域探测能力的评估模型,针对多传感器的覆盖问题,现已有体系化的研究<sup>[9]</sup>,但评估方法大多以划定探测范围圆的方式建立二元感知模型。为直观、定量评估编队的探测能力,并简单体现平台协同特性,建立基于栅格法的编队区域探测能力概率感知模型。将目标海区栅格化,人为编队对各栅格中心点处目标的探测能力即对栅格内各处目标的探测能力,通过水声环境构建及探测系统仿真,计算编队对目标的检测概率。

### 2.1 水声环境构建

为体现探测系统的协同探测效能,需要建立描述系统探测能力的概率感知模型。UUV 受能源约束,一般以被动方式进行声学探测,对其性能评估利用被动声呐方程:

$$\text{SNR} = \text{SL} - \text{TL} - \text{NL} + \text{DI} \quad (1)$$

其中,SNR 为声呐接收端信噪比;SL 为被动声源级;TL 为传播损失;NL 为海洋环境噪声;DI 为接收指向性指数。

传播损失 TL 定量地描述了声波在传播一定距离后声强度的衰减变化,其大小主要与传播距离有关,若声波以球面波扩展,则传播损失可表示为

$$\text{TL} = 20 \lg r \quad (2)$$

其中,  $r$  为目标到声呐接收端的距离,单位为 m。

在声呐方程的各声呐参数中,只有 TL 会受平台位置的影响,定义声呐的品质因数为<sup>[10]</sup>

$$FOQ = SL - (NL - DI) \quad (3)$$

在相同的声呐及海洋环境下,组成品质因数的各声呐参数值是不变的,故在同一仿真场景下, FOQ 为固定值。

声呐方程可改写为

$$SNR = FOQ - TL \quad (4)$$

## 2.2 探测系统仿真

通过式(4)可获得仿真场景中已知目标距离下的声呐接收端信噪比,为便于衡量编队的协同探测能力,需要计算各平台及编队系统的目标检测概率,接收端信噪比 SNR 与目标检测概率间的换算则需要通过 ROC 曲线实现。

高斯噪声中的无起伏信号,其幅度分布服从莱斯分布:

$$f_{s+n}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[-\left(R + \frac{x^2}{2\sigma^2}\right)\right] J_0\left(\sqrt{2R} \frac{x}{\sigma}\right) \quad (5)$$

其中,  $\sigma$  为噪声标准差;  $R$  为信噪比;  $J_0$  为第一类零阶贝塞尔函数。

定义马库姆  $Q$  函数:

$$Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + \alpha^2}{2}\right) J_0(\alpha x) dx \quad (6)$$

由此,检测概率  $p_d$  可表示为

$$\begin{aligned} p_d &= \int_{\sigma\sqrt{-2\ln p_f}}^{\infty} f_{s+n}(x) dx \\ &= Q\left(\sqrt{2R}, \sqrt{-2\ln p_f}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $p_f$  为虚警概率。

虚警概率  $p_f$  可由检测阈 DT 估算<sup>[11]</sup>:

$$DT \approx 10 \lg\left(\log_2 \frac{1}{2p_f}\right) - 0.8 \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)即可计算声呐系统对应信噪比下的检测概率。

遍历各网格中心点,即可获得单平台对区域内目标的探测能力结果。当多平台协同探测时,利用取或的方式计算编队系统的总检测概率,若 UUV 数量为  $N$ , 则总检测概率  $P$  为

$$P = 1 - \prod_{i=1}^N p_i \quad (9)$$

其中,  $p_i$  为第  $i$  个平台的目标检测概率。

## 2.3 评估示例

编队中存在 4 个可进行声学探测的 UUV, 若令 USV 所在位置为 (0,0) 点, 编队前进方向为  $y$  轴正方向, USV 的通信范围为 5 km, 4 个通信范围内的 UUV 坐标为 (0, 5)、(-4, -2)、(-4, 0)、(4, 0), UUV 搭载声呐系统的品质因数为 70 dB, 检测阈为 1 dB。

评估过程中, 首先应划定评估海区, 要求该海区完全包含探测系统的探测范围, 为保证评估结果的准确性, 可在计算能力允许的条件下, 尽量大地划定评估海区。在对评估海区栅格化的过程中, 划分的步长越小则评估结果越精细, 但计算量也随之明显增大, 其选取原则为在保证探测能力分布平滑的基础上, 选择最大步长。

在该示例中, 选取 20 km × 20 km 评估海区, 栅格步长 200 m。图 1 为该探测编队在区域内的目标探测能力分布, “+” 处为 USV 位置, 4 台 UUV 围绕在 USV 周围并以 “\*” 标注, 虚线表示 USV 通信范围, 图中各处的颜色代表了编队探测系统对该处目标的检测概率, 该评估结果可直观地显示探测系统对区域目标探测的能力。

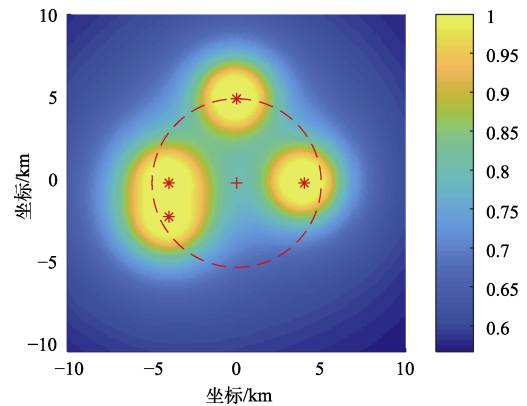


图1 编队检测概率分布

Fig.1 Detection probability distribution of formation

## 3 优化准则

为准确描述探测系统的效能, 需要对其性能量化描述, 并以之为准则对参数进行优化。

### 3.1 多准则优化问题

#### 3.1.1 正面探测宽度

异构编队中, 各 UUV 在通信距离的限制条件下组成编队队形。在移动编队的目标搜索任务中, 编队的正面搜索宽度十分重要, 在编队航速一定的条件下, 正面宽度越大, 单位时间搜索面积越大, 搜索效率越高。

在垂直于编队前进方向上, 在编队的前方建立一条检测线, 编队经过检测线的过程中, 线上各点处目标的最大检测概率作为编队的正面检测能力。在程序上可如下实现:

(1) 以  $y$  轴为编队的前进方向建立直角坐标系并划分栅格;

(2) 通过评估模型计算各栅格内目标的检测概率, 形成区域检测概率矩阵;

(3) 取每个横坐标下的检测概率最大值构成正面检测概率曲线。

以 2.3 节的示例为例, 规定该编队的航向为  $y$  轴正方向, 则正面检测概率曲线即区域检测概率矩阵各列最大值。

如图 2 所示, 正面检测概率曲线右侧的两个峰主要由单个平台贡献, 左侧的峰则由两个相互靠近的平台协同贡献, 故左侧峰宽于右侧两个。若认为检测概率大于 0.7 为有效覆盖, 则有效正面探测宽度为 15.9 km。

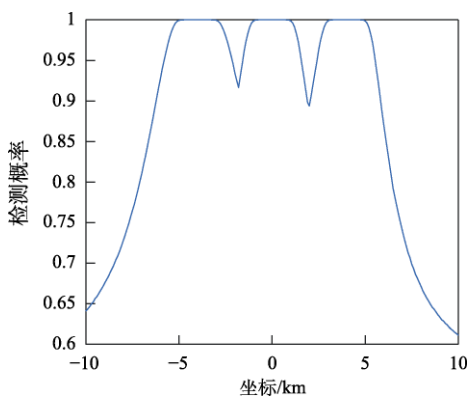


图 2 正面检测概率曲线

Fig.2 Probability curve of frontal detection

#### 3.1.2 区域覆盖面积

平台间距离过近会导致各平台的覆盖区域重

叠, 降低覆盖效率; 而平台间过远则会影响协同效果, 亦会降低覆盖效率。故合理地规划阵位能够提高探测系统的区域覆盖能力。

在计算编队的区域覆盖面积时, 以有效覆盖的栅格数乘以栅格面积计算。在 2.3 节的示例中, 若认为检测概率大于 0.7 的栅格为有效覆盖, 栅格宽度为 200 m 时, 有效覆盖的栅格为 3945 个, 有效区域覆盖面积为 157.8 km<sup>2</sup>。

#### 3.1.3 多准则融合方法

若单纯地追求正面宽度最大, 各平台会聚集在垂直于搜索航向的通信范围圆的直径上, 当 UUV 平台数量较多时, 过于聚集的队形对正面宽度的提升贡献减小, 并造成资源浪费。为解决此问题, 要求在正面宽度最大的前提下各平台同时覆盖的总面积最大, 在此涉及多准则优化问题。

一般的优化算法要求优化准则单一, 对于多准则优化问题, 则需要将多准则融合为单一准则。

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种实用的多准则判决方法<sup>[12]</sup>, 该方法通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 对两两指标之间的重要程度作出比较判断, 建立判断矩阵, 通过计算判断矩阵的最大特征值以及对特征向量, 得出不同方案重要性程度的权重, 为最佳方案的选择提供依据。

如图 3 所示, 利用层次分析法的思想将优化问题分为两层: 目标层和指标层, 其权重向量为  $u = [u_1 \quad u_2]$ 。

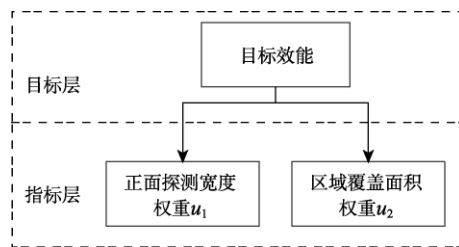


图 3 层次示意图

Fig.3 Structure of the hierarchy

对两个指标设定分数集, 若探测半径为  $r$ , USV 通信距离为  $R$ , 在正面探测宽度方面, 规定探测宽度为  $2r$  时给予 0 分, 探测宽度为  $(2R + 2r)$

时给予 10 分,其余探测宽度值对应的分数根据此两点插值计算;在区域覆盖面积方面,规定覆盖面积为  $\pi r^2$  时给予 0 分,覆盖面积为  $\pi(R+r)^2$  时给予 10 分,其余覆盖面积对应的分数根据此两点插值计算。值得注意的是,这里的 10 分并不是分数上限,由于平台间协同探测带来的探测增益,探测能力的极值可能超过 10 分所对应的值,且其实际极值不易估计,故在这里不对分数上限作出约束。若正面探测宽度的分值为  $a$ , 区域覆盖面积的分值为  $b$ , 则其综合分数 score 可表示为

$$\text{score} = u_1 \cdot a + u_2 \cdot b \quad (10)$$

由此将两个准则融合为一,利用该单一参数表示编队的目标探测效能。

### 3.2 平台避碰约束

海洋环境下,海流情况复杂,且 UUV 大多处于欠驱动状态,其所在位置难以精准控制,为避免平台相撞,应限制平台间的距离,以免平台间过近。

将平台避碰因素加入优化准则,规定平台间的最小安全距离  $r_{\min}$ ,遍历所有两两平台间距离,若存在距离大于  $r_{\min}$  者,则规定其综合分数为 0,使该组队形解在优化中被淘汰。

## 4 编队队形优化方法

针对复杂的性能函数模型,需要利用群智能算法计算最优解。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[13]</sup>是一种经典的群智能优化算法,它通过模仿鸟群的觅食行为实现优化。

针对该队形优化问题,假设粒子群规模为  $M$ , UUV 数量为  $N$ 。由于 UUV 位置受 USV 通信范围约束,故以 USV 所在位置为极点,以编队前进方向为极轴建立极坐标系,各 UUV 以极径和极角确定其位置,则解空间的维度为  $2N$ ,第  $t$  次迭代时,粒子  $i$  的位置可表示为

$$X_i(t) = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN}, \theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{iN}] \quad (11)$$

其中,  $r_{i1}, \dots, r_{iN}$  为各 UUV 的极径;  $\theta_{i1}, \dots, \theta_{iN}$  为各 UUV 的极角,  $i=1,2,\dots,N$ 。

相应地,粒子的运动速度可表示为

$$V_i(t) = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}, \omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{iN}] \quad (12)$$

其中,  $v_{i1}, \dots, v_{iN}$  为径向速度;  $\omega_{i1}, \dots, \omega_{iN}$  为角速度,粒子的运动速度可根据式(13)进行更新:

$$\begin{aligned} V_i(t) = & [(\omega_1 - \omega_2)(T - t) / T] \cdot V_i(t-1) \\ & + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_i - X_i(t-1)) \\ & + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g - X_i(t-1)) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $T$  为最大迭代次数;  $p_i$  为粒子  $i$  的历史最优解;  $g$  为全局最优解。

粒子的位置则由式(14)计算得到:

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (14)$$

粒子位置更新后,计算粒子的性能函数值。首先计算两两平台间的距离,若存在平台间距小于安全距离的情况,则直接将性能函数值置零;对于平台间距均大于安全距离的粒子,则通过 3.1 节的方法,计算其正面探测宽度及区域覆盖面积的综合评分作为性能函数值。

优化过程通过不断地更新粒子运动速度和位置实现,随着迭代的进行,各粒子会渐渐向性能函数值最佳的最优解靠近,直至达到迭代停止条件后输出最优粒子对应的解。优化算法流程如图 4 所示。

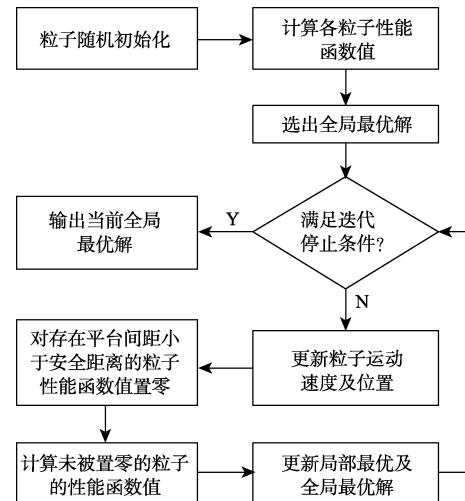


图4 优化算法流程

Fig.4 Flow chart of optimization algorithm

## 5 编队队形优化示例

水下目标探测编队包含 1 个 USV 和 4 个



UUV, USV 的通信距离为 5 km, UUV 搭载声呐系统的品质因数为 70 dB, 检测阈为 1 dB, 以 USV 所在位置为原点, 以编队前进方向为 y 轴建立坐标系, 规定编队平台间的安全距离为 100 m, 正面探测宽度与覆盖面积的权向量为 [0.7, 0.3], 认为检测概率大于 0.8 即为有效覆盖, 粒子群优化算法参数为  $T = 250$ ,  $M = 8$ ,  $c_1 = c_2 = 1.5$ ,  $\omega_1 = 0.9$ ,  $\omega_2 = 0.5$ 。

如图 5 所示为队形优化前后的探测态势对比。其中图(a)为优化前各粒子随机初始化后, 评分最高的粒子所对应的阵位解, 该随机队形的正面宽度为 16.8 km, 探测覆盖面积为 189.76 km<sup>2</sup>, 综合评分为 11.53; 图(b)为经过优化后的最优队形, UUV 坐标为(4.89, -1.0429), (4.9155, 0.9155), (-4.8736, -1.1170), (-4.9268, 0.8527), 该异构编队的探测覆盖面积达到 208.88 km<sup>2</sup>, 正面探测宽度达到 20.4 km, 综合评分达到 14.57。图 6 为该优化过程的进化曲线, 可见随迭代进行, 综合评分提高, 且 250 次迭代足以使寻优过程收敛。

该示例中, 由于正面探测宽度的比重较重, 故优化结果倾向于更大的正面探测宽度。优化结果的正面探测能力如图 7 所示, 平台分布在垂直

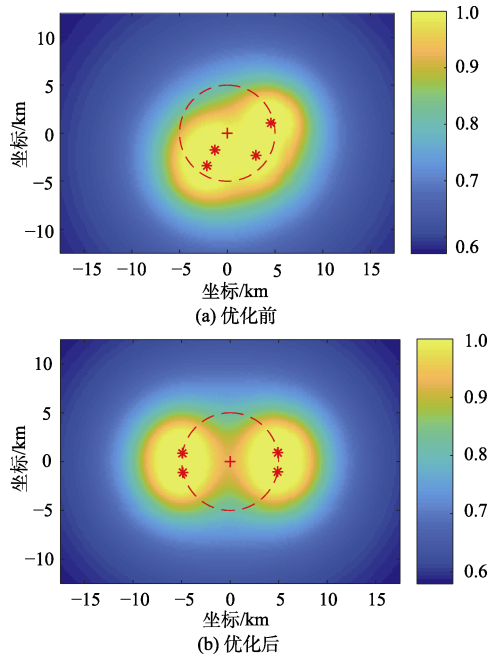


图 5 队形优化前后检测概率分布对比  
Fig.5 Comparison of detection probability distribution before and after formation optimization

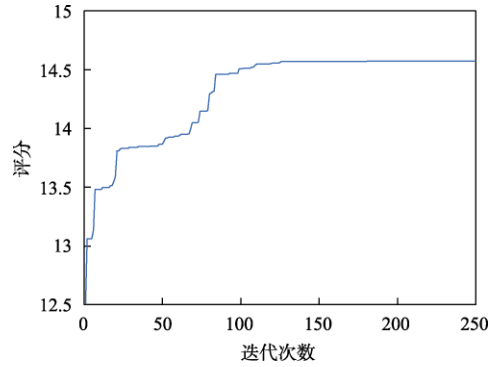


图 6 队形优化过程进化曲线  
Fig.6 Evolution curve of formation optimization

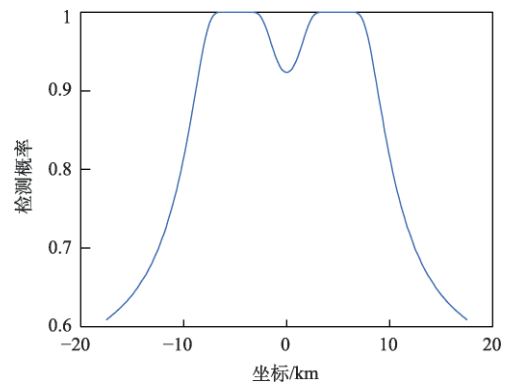


图 7 正面探测能力分布  
Fig.7 Distribution of frontal detection capability

于前进方向的通信范围的远端, 能有效扩大对两侧的探测距离, 编队的中心区域距离各平台较远, 故目标探测能力有所减弱, 但其目标检测概率仍高于有效阈值。

重复进行 10 次队形优化计算, 平均用时 17.89 s, 所用计算机处理器为 Intel Xeon, 主频 3 GHz。无人航行器的航速一般较低, 该量级的运算时长一般能够满足海上作业要求。

若正面探测宽度与覆盖面积的权向量为 [0.3, 0.7], 其他参数不变, 则优化结果如图 8 所示。

优化后, 各 UUV 的坐标为(4.9994, -0.0762), (-4.9961, -0.1970), (0, 5), (0.2040, -4.9958), 该示例中由于覆盖面积的权重较高, 故各平台分散分布于通信范围圆上, 由于要兼顾正面宽度, 故在垂直于前进方向上规划有两个平台。正面探测能力分布如图 9 所示, 左、右两个峰各由一个平台贡献, 中间峰由两个平台贡献, 但由于中间两个平台前后分布且距离较远, 协同增益弱, 故三个

峰宽度相当。在该准则下，编队的覆盖面积为  $237.72 \text{ km}^2$ ，正面探测宽度为  $18.8 \text{ km}$ 。

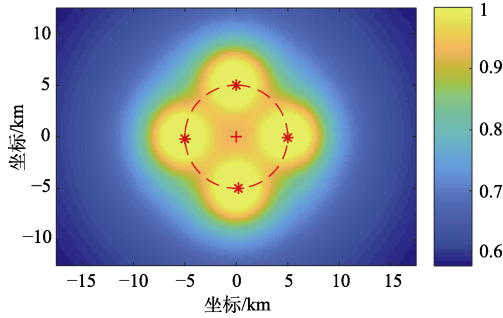


图8 优化后检测概率分布

Fig.8 Distribution of detection probability after optimization

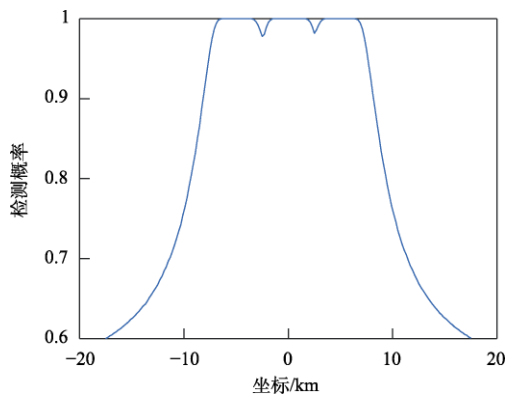


图9 正面探测能力分布

Fig.9 Distribution of frontal detection capability

## 6 结论

USV&UUV 异构编队的队形影响编队对目标的搜索效能。本文依据声呐方程，建立了 UUV 声学目标探测的概率感知模型，依据该模型，可为以单 USV 为通信节点的 UUV 编队的探测性能提供评估结果，并可提供正面探测宽度及区域覆盖面积数据。在复杂任务需求条件下，为获得单一的优化准则，采用层次分析法的思想将多优化准则合一，并可通过权向量调整各指标的权重，进而借助粒子群算法求得该优化准则条件下的最优队形解。

算例结果表明，该方法可有效地给出异构编队的队形规划建议，明显提升探测搜索效能，且可根据各指标的权值，给出针对性规划建议。

## 参考文献

- [1] 生雪莉, 李鹏飞, 郭龙祥, 等. 基于概率感知模型的无人集群探测范围优化[C]. 2018 年全国声学大会论文集 B 水声物理, 北京, 2018.
- [2] 李磊, 姚申茂, 杜度. 基于协同探测的 UUV 集群低能耗动态优化控制策略[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(23): 80-85.
- [3] 张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 847-857.
- [4] 唐杭斌. 水面无人艇研究现状与发展趋势[J]. 船舶物资与市场, 2020(3): 13-14.
- [5] 严浙平, 邓力榕, 侯恕萍, 等. 多 UUV 探测 CTD 过程中的编队控制[C]. 第三十二届中国控制会议论文集 (D 卷), 西安, 2013.
- [6] He S, Wang M, Dai S L, et al. Leader-follower formation control of USVs with prescribed performance and collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018: 572-581.
- [7] 刘生学, 王公宝. 同时面临防空和防潜的水面舰艇编队队形评估研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(7): 79-82.
- [8] 周宏坤, 葛锡云, 邱中梁, 等. UUV 集群协同探测与数据融合技术研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(12): 70-75.
- [9] 贾杰. 无线传感器网络覆盖控制与节点部署技术[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2013.
- [10] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [11] Ainslie M. Principles of Sonar Performance Modeling[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [12] 张杰. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Icn95-International Conference on Neural Networks. IEEE, Perth, Australia, 2002: 1942-1948.

作者简介:



邹佳运 (1994-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为水下无人集群任务规划。



张文清 (1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为无人集群编队控制。



曲泓玥 (1995-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为声呐系统仿真。



孙巍 (1993-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为数据采集与存储、嵌入式控制系统设计。

[引用格式] 李沫宁, 肖致行, 李文光, 等. 适用于城市作战的柔性充气式侦察系统设计[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 47-53.

# 适用于城市作战的柔性充气式侦察系统设计

李沫宁<sup>1</sup>, 肖致行<sup>1</sup>, 李文光<sup>1</sup>, 孟军辉<sup>1,2</sup>, 刘莉<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 城市战场建筑林立、明暗分明, 且作战要避免对基础设施和平民造成伤害, 对建筑内部的隐藏目标进行快速打击、定点摘除。需发展能克服室内空间及地下空间侦察通信难点、可深入建筑与废墟内部进行侦察的小型无人侦察系统。利用有线实现信息传输, 设计仿植物生长尖端外翻柔性充气式侦察系统。首先阐述了柔性充气式侦察平台的设计方案及气囊转向装置的原理; 然后建立气囊的有限元模型, 利用控制体积法进行气囊充气生长过程中的动力学性能仿真, 分析了所设计柔性充气式无人系统完成自生长、避障、穿越缝隙等设计目标的可行性, 研究了各气室的充气速率对行进过程中速度、囊体表面所受压力的影响; 最后做实物实验进行直行、转向测试, 验证了该柔性充气侦察系统的实际工作性能。研究可为后续自生长气囊设计提供支撑, 并为城市战场的侦察提供新思路。

**关键词:** 城市作战; 仿生设计; 柔性气囊; 控制体积法; 充气展开

中图分类号: TJ99

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2021)03-47-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.027

## The Design of Flexible Inflatable Unmanned Reconnaissance System for Urban Operations

LI Moning<sup>1</sup>, XIAO Zhixing<sup>1</sup>, LI Wenguang<sup>1</sup>, MENG Junhui<sup>1,2</sup>, LIU Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Urban battlefield is full of architecture and easy to defend and difficult to attack. Flight need pay attention to avoiding damaging infrastructure and civilians. It is necessary to develop a new small-scale unmanned reconnaissance system overcoming the difficulties of reconnaissance and communication in indoor space and underground space, realizing the reconnaissance in the interior space of the building. In this paper, a tip valgus soft pneumatic mobile platform is designed. Firstly the principle of air bag and steering device is described. Then the finite element model of the airbag is established. Simulation of the dynamic performance of the airbag during the growth process is realized by control volume method. The feasibility of the software design is studied. The influence of the inflation speed of each chamber on the velocity and the pressure of the bladder material is analyzed. At last, the real experiment is done for the straight and steering test. The actual performance of the flexible inflatable reconnaissance system is verified. This study can provide support for the subsequent design of self-growing airbag, and provide a new idea for the reconnaissance of urban battlefield.

**Key words:** Urban Operations; Bionic Design; Flexible Airbag; Control Volume Method; Inflatable Deployment

收稿日期: 2021-03-06; 修回日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(11902029)

## 1 引言

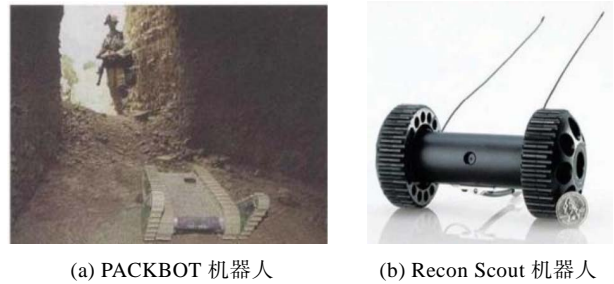
随着人类文明进程的推进,世界人口将进一步向城市集中,根据联合国统计,到2030年将有2/3的人口生活在城市地区<sup>[1]</sup>。城市越来越成为战争的重心和局部战争的焦点。城市是由人造自然地形、相当数量和密度的人口以及大量的基础设施互相融合构成的综合体。战时需要的地下防空设施、制高点建筑、有线无线通信都会纳入新城市的规划建设,因此新型城市也是易守难攻、明暗分明的军事防御城堡<sup>[2]</sup>。

城市高层建筑物林立,装甲车、坦克等重武器难以机动,顶甲易受到来自上方的攻击。城市军民目标混杂,作战时也要考虑避免伤害居民和基础设施,因此传统地毯式轰炸难以为继,攻方兵力和技术装备优势难以发挥,易于守方保存隐蔽有生力量。掌握己方与敌方分布及在阵地之间转移情况,提高对战场的感知能力,获取信息优势实现精确作战和快速打击是未来城市作战的基础和关键<sup>[1]</sup>。

在城市作战中,行动编队在空间上常被房屋墙体分割成数个独立的作战单位,空间狭小、视野受限,不利于侦查,因此封闭空间和地下空间是城市作战的重点及难点。封闭空间内的通信无论是无线电通信还是卫星通信都会受到墙壁、建筑物的影响<sup>[3]</sup>。因此需要一种能克服通信困难,加强电子战防护,确保信息完整性、安全性<sup>[4]</sup>,更加小型化、灵活性更高的可深入封闭空间内部的侦察系统,与无人机等外部侦察系统配合,多平台协同交互<sup>[5]</sup>,进行精确侦查打击,实现外科手术式的定点摘除。

近年来出现的具有代表性的侦查机器人有以色列 ODF 光学有限公司的“眼球”R1 监视侦察器、美国机器人公司 IROBOT 生产投入实战取得理想效果的 PACKBOT 机器人<sup>[6]</sup>、明尼苏达大学研制的 Recon Scout 侦查机器人等<sup>[7]</sup>。PACKBOT 与 Recon Scout 侦查机器人都具有抗摔打能力,从窗口投入室内仍可正常工作,Recon Scout 甚至可以用迫击炮或无人机发送落地进行侦察,如图 1

所示。但也都存在隐蔽性不强、能源不持久、通信系统易被屏蔽、行进路径易被阻隔等问题。



(a) PACKBOT 机器人

(b) Recon Scout 机器人

图 1 小型侦查机器人

Fig.1 The small-sized scout robot

因此,亟需设计新型无人移动平台,在街区道路、建筑物台阶、地下隧道等易于行进的路径被敌军设置障碍或被战争废墟阻隔后,充分利用建筑物门窗缝隙、通风管道、地下排污口等厘米级尺寸范围内的微小狭窄通道,真正实现“无孔不入”的全方位渗透,同时兼顾通信的有效性。

自然界的生物经过数亿年的发展演化,其结构、行为、原理,具有完美的生物合理性和对外界环境的适应性,可为科学技术创新提供灵感<sup>[8]</sup>。藤蔓及菌丝等生物根据环境刺激从它们身体顶端向前生长,长度可以增加数百倍,生长时已伸展部分不会与外界环境产生相对滑动<sup>[9]</sup>。斯坦福大学将其应用于天线<sup>[10]</sup>、手术内窥镜的设计中<sup>[11]</sup>。

基于类似的仿生原理,本文将侦察平台与尖端自生长概念相结合,开展可单兵携带的气压驱动柔性仿生尖端生长移动侦察平台的设计论证,拟利用气囊的顶端生长通过排水通风管道、门窗缝隙或废墟深入建筑内部,且顶部搭载相机等传感器与平台有线连接解决通信障碍及供电问题,实现长时精确侦察。

## 2 柔性充气式无人侦察系统设计

本文设计的柔性充气式无人侦查移动平台由平台本体、尖端外翻生长气囊、尖端载荷三部分协同实现通过地面建筑物门窗缝隙、通风管道、地下排污口等狭窄通道对敌方进行全方位渗透侦查、破坏打击,如图 2 所示。



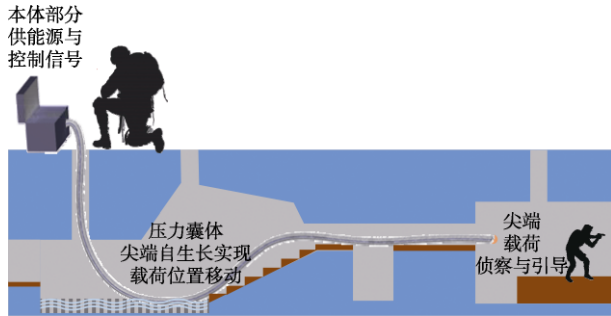


图 2 可尖端自生长压力驱动软体运动平台示意图  
 Fig.2 Schematic diagram of the airbag movement platform driven by self-growing pressure at the tip

移动平台本体是可生长软体的收纳空间, 也为该装置提供能源、气压、控制信号, 在气囊尖端快速生长过程中始终保持位置固定。尖端载荷可根据任务需求, 装载微型摄像机、红外探测器、电子干扰器等。以微型摄像机为例, 软体移动装置尖端自生长过程中, 连接尖端载荷和本体部分的光电缆随之不断伸长, 保证侦察探测到的信息可实时传输至本体部分, 亦可得到持续供给的能源, 实现信息的有线传输及长时监测, 并通过图像识别和自主导航控制气囊转向。

尖端外翻生长气囊未充气前整体缠绕于卷轴上, 置于移动平台内部, 外翻后通过夹持装置固定在本体前端, 与本体气室形成压力控制回路, 气囊端部随着气体充入不断外翻, 实现尖端向前生长, 同时已展开部分与外界无相对滑动, 避免摩擦、刮伤损毁。为实现气囊空间上的转向, 沿气囊周向布置了 4 个小气室用于方向控制, 通过电磁阀控制小气室进气口开关, 差动控制 4 个小气室的充气速率实现转向。通过步进电机进行软体前行、收回, 如图 3 所示。

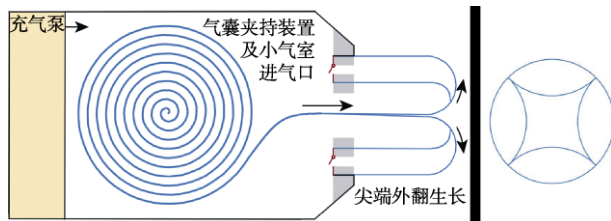


图 3 含方向控制气室气囊示意图  
 Fig.3 Schematic diagram of the airbag with directional control chamber

### 3 无人侦察系统动力学建模与仿真

气囊充气过程涉及气体高速流动、气体与气囊相互作用、气囊与外界物体相互作用等复杂物理现象, 描述气囊充气展开的方法经过了长时间的发展, 正逐渐完善。主要方法有控制体积法、ALE 法、粒子法。控制体积法将气囊视为一个可控制的体积, 充气过程为绝热过程, 充气气体视为具有恒定比热的理想气体, 在控制体积内温度和压强是均匀一致的, 能很好地描述展开后期与环境相互作用的效果, 计算效率高。因此选用控制体积法进行本文描述的尖端生长气囊前进时的仿真, 在概念设计阶段为设计及实验提供参考。

选用 Belytschko-Tsay 薄膜单元算法, 适合织物大变形分析的 fabric 气囊材料模型。气囊数值模拟分析中接触问题主要集中在气囊折叠展开这一部分上, 折叠后气囊的面与面之间会产生重叠, 展开时需要处理其相互之间的接触。罚函数法已发展为一种常用的接触界面算法, 在数值计算中广泛应用。展开时的接触算法选择气囊单面接触。通过设置黏性阻尼系数, 降低气囊展开速度, 用以减小由于气体充入气囊时强大的动能引起的过大变形<sup>[12]</sup>, 设置从面罚刚度比例因子, 防止柔软的囊体材料展开过程中发生穿透。当气囊与外界环境接触时, 材料刚度差距较大, 选择基于段的罚函数接触算法获得更好的稳定性。

为验证气囊尖端外翻生长、通过障碍、主被动转向的能力, 建立含 4 个小气室平铺且内部含尚未展开平铺折叠状态的如图 4 所示气囊模型, 进行充气及前进过程的动力学仿真分析。气囊外部长 5200 mm, 内部未展开气囊长度为 4200 mm, 单个小气囊平铺宽度为 400 mm。

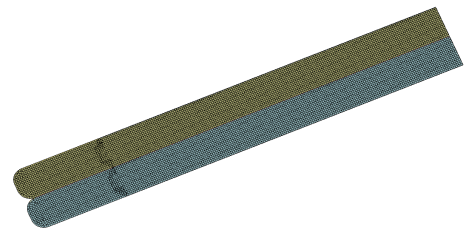


图 4 气囊有限元仿真模型  
 Fig.4 Finite element simulation model of the airbag

#### 4 仿真结果及分析

通过给主气室和4个小气室不同的充气速率,验证尖端外翻生长气囊设计及完成越障、转向等任务的可行性并研究充气速率对行进过程的影响。尖端生长气囊行进时的状态及剖视图如图5所示,所设计气囊布局能按照设计思路实现前进。

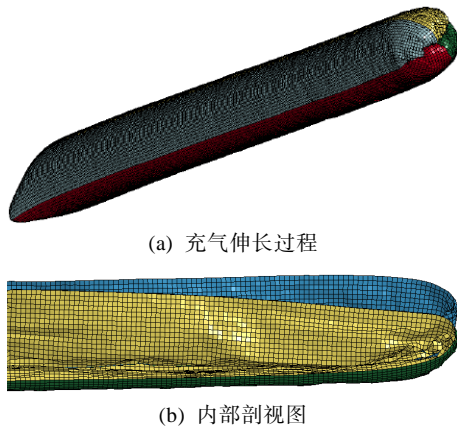


图5 尖端外翻生长气囊生长过程示意图  
Fig.5 The growth process of the tip valgus airbag

在气囊前进方向前端放置迫使气囊改变方向的外部障碍,由图6可见,气囊在与挡板接触后,可自行改变前进方向。因此该尖端生长气囊在封闭管道内部可在外界的位移约束下被动改变方向。



图6 软体被动改变方向  
Fig.6 Airbag passively changes direction

在气囊前行方向放置两个间距为气囊直径三分之一的刚性挡板,验证气囊在狭小缝隙中前进的能力。图7显示气囊也具有改变自身截面形状的柔性,能顺利通行,所设计的气囊具有穿越废墟瓦砾、门窗缝隙实现前进的能力。

通过改变各气室充气气体质量、流量,研究充气速率对腔体生长速度、膜面压力的影响,以及气室不同步充气对腔体行进方向的影响。首先

进行三组仿真,研究小气室充气速率对行进的影响。主气室充气速率相同均为 $V$ ,改变小气室充气个数与充气速率进行对比,仿真1:4个小气室充气速率 $V/10$ ;仿真2:4个小气室充气速率 $V/5$ ;仿真3:只有一个小气室充气,充气速率为 $V/10$ 。所充入的混合气体摩尔质量为 $0.0225\text{ kg/mol}$ ,速率 $V$ 对应的气体质量流量为 $0.005\text{ kg/ms}$ 。



图7 软体通过缝隙的仿真结果  
Fig.7 Simulation results of airbag passing through the gap

继而进行两种仿真,研究主气室充气速率对气囊行进的影响。4个小气室充气速率均为 $V/10$ ,分别改变主气室充气速率,仿真4主气室 $2V$ ;仿真5主气室 $V/2$ 。

仅对主气室和某一方向上的控制气室的仿真3结果如图8所示,气囊会有三维空间内的偏转,四周小气室差动充气,会对气囊行进方向起控制作用。



图8 方向控制气室作用效果图  
Fig.8 The effect diagram of directional control chamber

取气囊展开后顶端某点,研究充气速率对该点行进速度的影响,结果如图9所示。

仿真3速度曲线表明只有单一气室充气,对加速度影响不大,因为需要将平铺的气囊充满气之后气囊才会前进,所以开始前行时刻略有延迟。另外,由于控制体积法气囊内部压强一致,体现不出气体流动,外部及内部未展开气囊也会同时充气膨胀,因此仿真2增加小气室充气速率或仿真5降低主气室充气速率,会导致内部与外部小



气囊膨胀过快，留给未展开气囊空间变小，腔体整体伸长困难。在实际方案设计中，需要关注中间直行腔室和周边方向控制腔室的充气速率匹配问题。

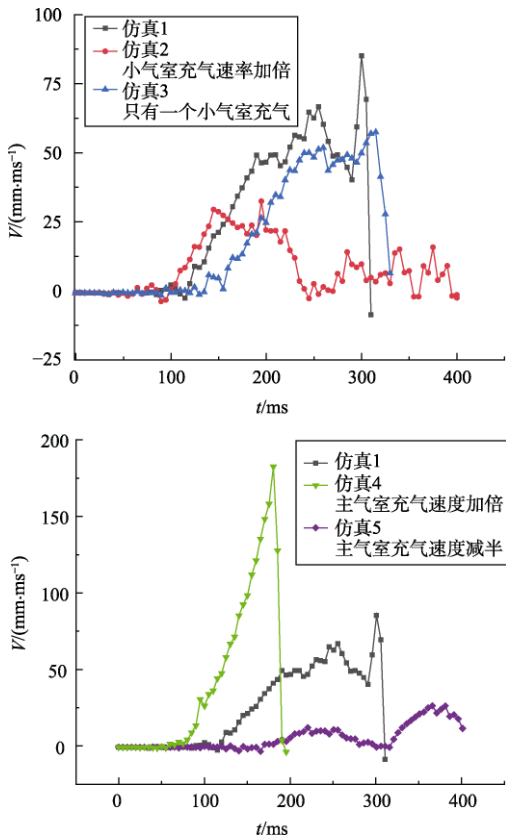


图 9 生长过程气囊某点速度曲线  
Fig.9 Airbag velocity curve during growth

时间在 0~100 ms 气囊处于充气阶段，当主气室蓄气充足后，气体压力将驱动内埋气囊前行。100 ms 后可见主气室充气速率对气囊行进速率的影响。由速度大小及曲线斜率可得，气囊行进速度、加速度主要由主气室充气速率决定，成正相关。

取图 10 所示小气室内外表面两个单元查看所受压力，结果如图 11 所示，在本文算例充气速率关系下，气囊外侧材料所受压力大于气囊内侧。仿真 1、3、4 初始阶段为气囊逐渐蓄气，展开初期所受压力急剧增大，而后保持不变，气囊在此期间顺畅地加速向前生长直至完全展开。仿真 2、5 因为主气室与小气室充气速率之比减小，生长阻塞，所受压力持续增大，生长缓慢。气囊内侧由于与还未展开的气囊接触，压力波动较大。

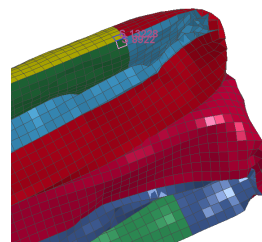
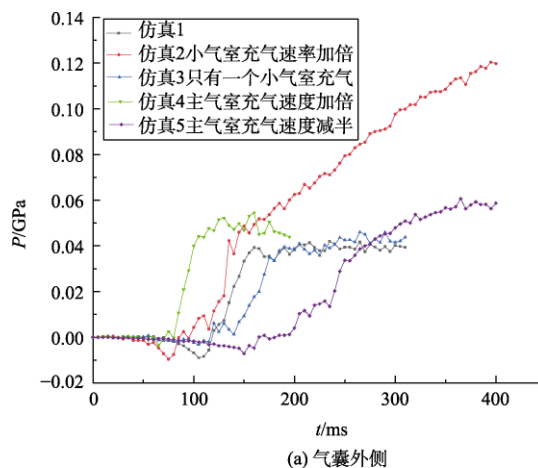
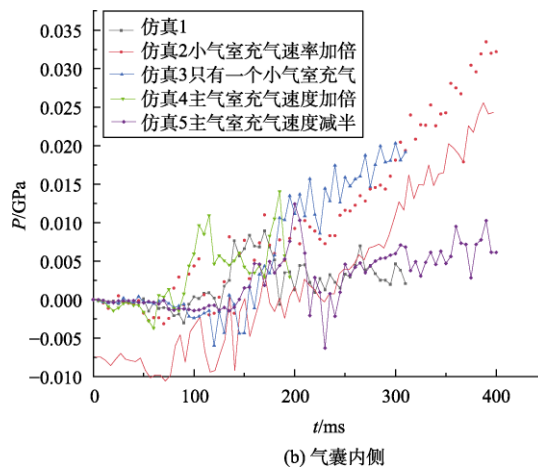


图 10 内外两单元所受压力

Fig.10 The pressure of inner and outer surface



(a) 气囊外侧



(b) 气囊内侧

图 11 气囊内外表面压力曲线

Fig.11 Pressure curve of inner and outer surface of airbag

### 5 柔性充气式侦察平台实验

为验证运动机理，本文对基于相同基本原理的充气装置进行结构设计并对其运动能力进行实验验证。装置包括本体与压力囊体两部分，其中本体主要零件由 PLA 材料通过 3D 打印制成，包括外壳、囊体导向与回卷装置、保持架和囊体夹持装置。压力囊体由 4 条宽 80 mm，双层厚度

0.1 mm 的 PVC 膜管热合制成, 其一端固定于回卷装置的轮轴处, 另一端则通过夹持装置固定于本体末端。工作时, 其外翻部分形成直行腔室, 四周小气室则作为方向控制腔室, 通过蓄气实现对生长方向的调整。其结构示意图如图 12 所示。

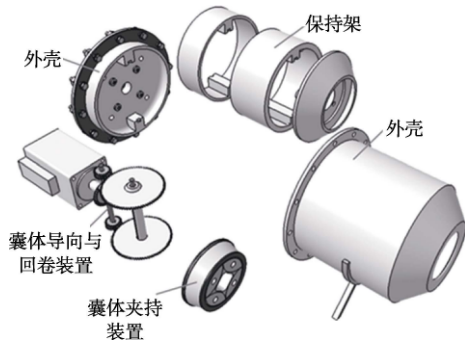


图 12 柔性充气无人系统详细构成示意图  
Fig.12 Detailed composition diagram of flexible inflatable unmanned system

针对该系统运动机能的实验主要分为直行与转向两部分。实验场地为塑胶平地, 驱动气压通过压力可调的空气压缩机提供。直行实验主要分析压力对软体生长速度的影响, 本系统直行效果如图 13 所示, 转向实验则分别对基于方向控制腔室的主动转向与依靠刚性障碍的被动转向, 其实实验效果如图 14 所示。总体而言, 所设计的柔性充

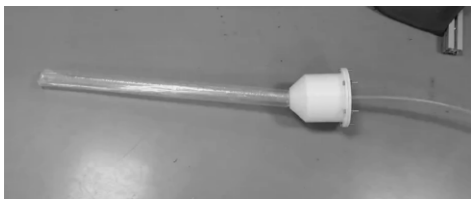


图 13 直行实验效果示意图  
Fig.13 Airbag straight ahead experiment

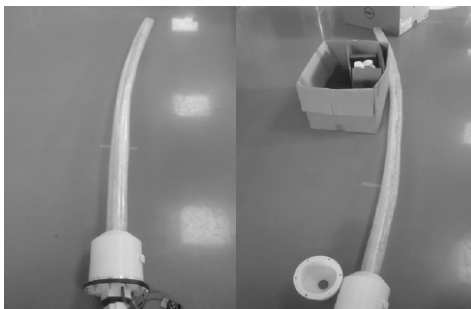


图 14 转向实验效果示意图  
Fig.14 Airbag steering experiment

气无人系统能够实现预期的运动机能, 虽然在本文的实验中尚未搭载对应的尖端载荷与方向控制腔室内的辅助转向机构, 实验结果仍展现了其独特的地形适应能力与较大的实用潜力, 可为后续机型的研发提供参考。

## 6 结 论

城市作战是未来战争的焦点, 克服建筑物、地下空间、废墟带来的侦查通信困难, 获取信息优势实现精确打击是取胜的基础和关键。首先进行了能主被动改变方向的、尖端生长柔性充气式无人侦察移动平台的概念设计, 并对气囊充气前行这一运动过程进行了运动学仿真分析, 证明了其在前行、穿越缝隙、改变方向等方面具有可行性, 通过 4 个气室的差动充气可实现主动控制气囊方向。主气室与 4 个转弯执行气室的充气速率匹配会对行进过程产生影响, 可为后续的实验研究提供参考。在本文主气室与小气室充气速率的关系下, 小气室外侧膜面所受压力大于内侧膜面压力, 可作为软体设计气囊材料选择的依据。亦可期待将尖端自生长软体移动平台应用于未来城市作战, 通过门窗缝隙、通风管道、地下排污口等狭窄通道, 实现对建筑内部隐藏和遮蔽目标的侦察、监视与打击引导, 提高城市战场态势感知能力和作战效能。

## 参 考 文 献

- [1] 李君. 城市作战: 美军瞄准 2025 年[J]. 环球军事, 2004(8): 54-56.
- [2] 王进举. 高技术条件下城市作战管窥[J]. 国防科技, 2002(6): 63-67.
- [3] 吴磊. 城市作战生存宝典——数字化通信[J]. 当代军事文摘, 2006(4): 1-3.
- [4] 李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军 2042 年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向[J]. 无人系统技术, 2018, 1(4): 79-84.
- [5] 王雅琳, 杨依然, 王彤, 等. 2019 年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 53-57.
- [6] Young S H, Martin P. RSTA sensor integration onto PackBot for urban operations[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 5422(1): 238-248.

- [7] Szyrkarczyk P, Czupryniak R, Trojnacki M. Current state and development tendency in mobile robots for special applications[C]. Proceedings of the International Conference WEISIC'08, Bucharest, September 25-26, 2008.
- [8] 李沫宁, 孟军辉, 刘莉. 柔性充气结构在无人系统中的应用[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 48-57.
- [9] Hawkes E W, Blumenschein L H, Greer J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth[J]. Science Robotics, 2017, 2(8): 1-7.
- [10] Blumenschein L, Gan L, Fan J, et al. A tip-extending soft robot enables reconfigurable and deployable antennas[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2018: 949-956.
- [11] Slade P, Gruebele A, Hammond Z, et al. Design of a soft catheter for low-force and constrained surgery[C]. Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, BC, Canada, September 24-28, 2017.
- [12] 代小芳, 宗智, 王喜军, 等. 折叠气囊展开过程 CV 和 ALE 数值模拟方法对比研究[J]. 汽车工程, 2008(8): 39-43.

## 作者简介:



李沫宁(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为充气无人系统设计。



肖致行(2000-), 男, 本科生, 主要研究方向为无人系统设计。



李文光(1969-), 男, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为复杂系统仿真。



孟军辉(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为柔性充气无人系统设计及力学分析。本文通讯作者。



刘莉(1964-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器总体设计。

[引用格式] 邵星灵, 刘俊, 李东光. 基于自抗扰控制的高超声速飞行器再入制导律[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 54-64.

# 基于自抗扰控制的高超声速飞行器再入制导律

邵星灵<sup>1,2</sup>, 刘俊<sup>1,2</sup>, 李东光<sup>3</sup>

(1. 中北大学仪器与电子学院, 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;  
3. 中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:** 鲁棒制导律设计是增强高超声速飞行器再入突防能力、提升飞行安全性的重要保障。针对多约束条件及多种气动参数摄动影响的高超声速飞行器再入轨迹抗干扰跟踪问题, 首先, 在标准轨迹制导的框架下, 结合模型辅助线性自抗扰控制和基于航向角误差走廊的几何制导逻辑, 提出了一种可满足纵向和横侧向平面制导任务需求的自抗扰再入制导律; 其次, 采用反馈线性化技术将纵向平面制导任务转换为对高度和航程增广系统的控制描述, 从而在性能折衷的意义下解决纵向制导的欠驱动跟踪控制问题; 再次, 横侧向则基于航向角误差走廊的几何制导原理设计倾侧角反转逻辑的切换机制, 控制飞行器的侧向运动; 最后, 通过蒙特卡罗仿真实验证明了所提算法在提升再入安全性和制导鲁棒性方面的优势。

**关键词:** 反馈线性化技术; 欠驱动跟踪控制; 几何制导逻辑; 自抗扰控制; 再入制导律

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-5915(2021)03-54-11

**DOI:** 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.028

## Reentry Guidance Law of Hypersonic Vehicle Based on ADRC

SHAO Xingling<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>1,2</sup>, LI Dongguang<sup>3</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The design of robust guidance law is an important guarantee in enhancing the reentry penetration ability and flight safety of hypersonic vehicle. Aiming at the anti-disturbance tracking problem of hypersonic vehicle reentry trajectory with multi-constraint conditions and various aerodynamic parameter perturbations, an active disturbance rejection reentry trajectory guidance law is firstly proposed in this paper, which can meet the requirements of longitudinal and lateral plane guidance tasks within the framework of standard trajectory guidance, combining model-assisted linear ADRC and geometric guidance logic based on heading angle error corridor. Secondly, the longitudinal plane guidance task is transformed into a control description of the altitude and augmented range system using feedback linearization. Subsequently, in order to solve the problem of underactuated tracking control of longitudinal guidance in the sense of performance compromise, the lateral motion is controlled by the switching mechanism of tilt angle inversion logic, which is designed based on the geometric guidance principle of heading angle error corridor. Finally, the effectiveness of the guidance law is verified by Monte Carlo simulations in terms of enhancing reentry safety and guidance robustness.

**Key words:** Feedback Linearization; Underactuated Tracking Control; Geometric Guidance Logic; ADRC; Reentry Guidance Law

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61803348); 中北大学青年学术带头人支持计划(QX201803)

## 1 引言

近空间(也称临近空间)处于传统的空天之间,指的是高于常规航空器飞行范围并且低于轨道飞行器运行空间的空域,国际上将20~100 km的空域定义为近空间。近空间具有特殊的战略位置,上可威胁卫星等天基平台、下可攻击航空器等空基平台甚至地面目标,是未来战争中空天一体化作战的重要战略领域,并将对未来的作战思维产生重大而深远的影响<sup>[1-2]</sup>。

近空间高超声速飞行器是21世纪空天一体化技术飞速发展产生的新的战略制高点。由于飞行高度的优势,可避免目前绝大多数的地面攻击,生存力大大提高;由于飞行速度的巨大优势,可从本土出发在2 h内攻击全球任何目标而不需要海外基地;由于具备高超声速大范围机动能力,可轻易突破弹道导弹防御系统的拦截,突防能力大大提高。作为21世纪航空航天领域最受关注的研究方向,临近空间高超声速飞行器已逐渐成为各军事大国为争夺未来制空天权而竞相发展的热点。20世纪90年代以来,美国、俄罗斯、法国、德国、印度和澳大利亚等国陆续取得了高超声速飞行技术上的重大突破和重要进展,特别是美国已进行了多次相关飞行实验。

再入制导本质上是一个控制变量较少且约束强(包括过程和终端约束),但被控状态多(高度、速度、航程、横程等)的欠驱动时域优化问题,其主要任务是通过设计再入制导律实现纵向、横侧向的制导任务需求,确保再入过程的安全性和稳定性,同时为姿态控制系统提供标称制导指令。目前再入制导设计的思路主要有两类方法:标称轨迹制导和预测校正制导。对于预测校正制导而言,其主要存在预测过程中数值积分计算量大、难以保证数值迭代过程收敛性、无法解决过程约束等局限性<sup>[3]</sup>。对于标称轨迹制导,由于其采用离线轨迹优化与在线精确跟踪的制导策略,因此可较好地解决上述问题。为实现高精度的跟踪制导,已有大量控制方法得到应用,如二次型状态调节器<sup>[4]</sup>、滑模控制<sup>[5]</sup>、自适应<sup>[6]</sup>和鲁棒控制<sup>[7]</sup>,

但已有方法的设计常依赖精确模型,难以抵挡再入过程气动参数摄动的不利影响,将直接导致跟踪精度不佳甚至制导任务失败。

本文研究高超声速飞行器再入制导律设计问题,应用反馈线性化技术将纵向平面制导任务转换为对高度和航程增广系统的控制描述,并设计倾侧角反转逻辑的切换机制以控制飞行器的侧向运动。

## 2 制导策略

高超声速飞行器再入段一般起始于高度70 km、20以上马赫数,结束于高度25 km、4马赫数左右。根据飞行能力可分为初始下滑段、准平衡滑翔段及快速俯冲段<sup>[8]</sup>。再入剖面具有如下特性:再入初期采用最大可用攻角飞行以满足热流约束,利用气动阻力减速,以快速通过高热流区;随高度降低,动压增大,气动升力增大,此时进入准平衡滑翔段,通过固定大攻角下滑以减小高度损失,该阶段持续时间较长;快速俯冲段或称精确打击段,为保证飞行器具有一定的下沉率,攻角指令较小。此外,出于结构热防护和配平的需要,再入攻角常设置为与速度相关的分段函数。因而,对于制导任务而言,再入全程仅需要确定倾侧角的控制规律,依靠改变升力方向进行大范围机动控制以满足纵向和横侧向制导精度的要求。

本文针对多约束条件及多种气动参数摄动影响的高超声速飞行器再入轨迹抗干扰跟踪问题,在标准轨迹制导方法的框架下,结合模型辅助线性自抗扰控制和基于航向角误差走廊的几何制导逻辑,提出了一种可满足纵向和横侧向平面制导任务需求的自抗扰再入制导律,实现三维再入轨迹快速跟踪并兼顾再入过程的安全性及终端控制的精度要求。

其主要思路为:首先,对于纵向制导,在描述高超声速飞行器纵向运动学模型的基础上,为提高再入终端高度和速度误差的可控性,引入航程参数和比例分配因子,将纵向高度和航程的加

权视为被控输出量,把纵向平面制导任务转换为对高度和航程的增广系统的控制描述,从而在性能折衷的意义下解决纵向制导的欠驱动跟踪控制问题。其次,基于反馈线性化技术将增广纵向动力学系统输入输出线性化,将异于输入输出线性化系统标称模型的部分因素视为总不确定项,并构造模型辅助线性扩张状态观测器对总扰动进行

实时观测并补偿,在此基础上,综合PD反馈控制律确定倾侧角幅值的更新规律;横侧向则基于航向角误差走廊的几何制导原理设计倾侧角反转逻辑的切换机制,控制飞行器的侧向运动。最后,通过纵向制导设计的倾侧角幅值指令和侧向生成的倾侧角符号综合形成倾侧角控制规律。相应的,基于自抗扰控制的再入制导律结构框图如图1所示。

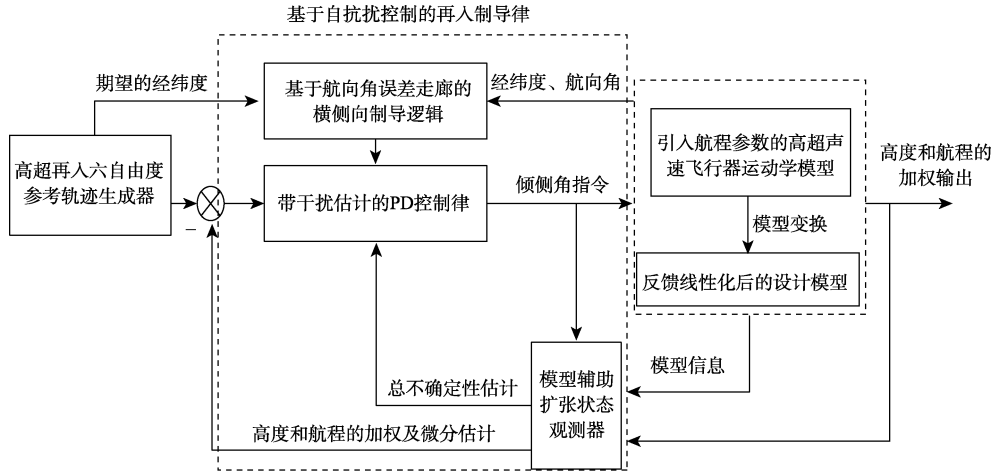


图1 基于自抗扰控制的再入制导律结构框图

Fig.1 Block diagram of Reentry Guide Law based on ADRC

## 2.1 纵向制导律设计

假设侧向轨迹控制可使飞行过程中瞬时平面与目标平面的夹角始终在小角度范围内,则纵向航程  $s$  与再入高度和速度满足:

$$\dot{s} = V \cos \theta \quad (1)$$

引入比例分配因子  $a$  用以协调再入高度和航程跟踪的误差精度,以再入高度和航程的加权为被控输出量,定义  $y = H + a \cdot s$ , 则增广后的纵向运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{H} = V \sin \theta \\ \dot{s} = V \cos \theta \\ \dot{V} = -\frac{D}{m} - g \sin \theta + d_v \\ \dot{\theta} = \frac{L \cos \gamma_s}{mV} - \left( \frac{g}{V} - \frac{V}{R_E + H} \right) \cos \theta + d_\theta \end{cases} \quad (2)$$

其中,速度通道和航迹倾角通道的参数化总不确定项  $d_v$  及  $d_\theta$  分别为

$$\begin{aligned} d_v &= -\frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} c_D}{2m} - \frac{\rho V^2 S_{\text{ref}} \Delta c_D}{2m} \\ &\quad + \Omega^2 (R_E + H) \cos \varphi (\sin \theta \cos \varphi \\ &\quad - \cos \theta \sin \varphi \cos \chi) \\ d_\theta &= \frac{\Delta \rho V^2 S_{\text{ref}} c_L \cos \gamma_s}{2mV} + \frac{\rho V^2 S_{\text{ref}} \Delta c_L \cos \gamma_s}{2mV} \\ &\quad + 2\Omega \cos \varphi \sin \psi + \frac{\Omega^2 (R_E + H)}{V} \cos \varphi (\cos \theta \cos \varphi \\ &\quad + \sin \theta \sin \varphi \cos \psi) \end{aligned}$$

因此,纵向制导的任务可描述为:以  $\cos \gamma_s$  为控制输入,以再入高度和航程的加权为被控输出,实现再入高度和航程的联合控制。

为明确被控输出和控制输入信号的传递动态,采用反馈线性化技术,对增广系统的输出量  $H + a \cdot s$  关于时间求导直至出现控制量  $\cos \gamma_s$ , 从而实现面向控制器设计的被控对象输入输出线性化。具体的求导过程如下:



$$\begin{aligned}
\dot{y} &= \dot{H} + a \cdot \dot{s} = V \sin \theta + a \cdot V \cos \theta \\
\ddot{y} &= \dot{y}^{(1)} = \ddot{H} + a \cdot \ddot{s} = \dot{V} \sin \theta + V \cos \theta \cdot \dot{\theta} + a \cdot \dot{V} \cos \theta - a \cdot V \sin \theta \cdot \dot{\theta} = \left[ -\frac{D}{m} - g \sin \theta + d_v \right] \sin \theta \\
&\quad + V \cos \theta \cdot \left[ \frac{L \cos \gamma_s}{mV} - \left( \frac{g}{V} - \frac{V}{R_E + H} \right) \cos \theta + d_\theta \right] + \left[ -\frac{D}{m} - g \sin \theta + d_v \right] a \cdot \cos \theta - a \cdot V \sin \theta \\
&\quad \cdot \left[ \frac{L \cos \gamma_s}{mV} - \left( \frac{g}{V} - \frac{V}{R_E + H} \right) \cos \theta + d_\theta \right] \\
&= \underbrace{-\frac{D}{m} (\sin \theta + a \cdot \cos \theta) + \frac{V^2}{R_E + H} (\cos^2 \theta - a \cdot \sin \theta \cos \theta)}_{f(H,V,\theta)} - g \\
&\quad + \underbrace{\frac{L}{m} (\cos \theta - a \cdot \sin \theta) \cos \gamma_s}_{b(H,V,\theta)} + \underbrace{d_v (\sin \theta + a \cdot \cos \theta) + d_\theta (V \cos \theta - a \cdot V \sin \theta)}_{d_{\text{total}}}
\end{aligned}$$

其中,  $f(H, V, \theta)$  为描述输入输出线性化系统的标称动态系统项;  $b(H, V, \theta)$  为标称控制增益项;  $d_{\text{total}}$  为影响被控输出的总不确定性动态, 其由速度通道和航迹倾角通道的总不确定项综合构成。不难发现, 增广后的纵向运动学系统通过反馈线性化被转化为分别以  $\cos \gamma_s$  和  $y$  为输入和输出的二阶积分串联型系统。特别地, 当比例分配因子  $a=0$  时, 纵向平面制导任务退化为仅对高度的跟踪控制, 该情况下难以保证再入速度的跟踪精度。因此, 当  $a \neq 0$  时, 通过调节分配因子可实现再入高度和速度误差的均衡控制。

接下来, 为叙述方便, 记  $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2]^T = [y, \dot{y}]^T$ ,  $u = \cos \gamma_s$ , 则上述输入输出线性化后的纵向运动学系统可改写为

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 = f(H, V, \theta) + b(H, V, \theta)u + d_{\text{total}} \quad (3)$$

若式(3)的不确定性动态  $d_{\text{total}}$  可测或已知, 则根据反馈线性化原理可设计如下的闭环控制律:

$$u = b^{-1}(H, V, \theta)(-f(H, V, \theta) - d_{\text{total}} + v) \quad (4)$$

式(4)为不确定性动态  $d_{\text{total}}$  可测情况的逆系统, 因此系统的跟踪控制问题被转化为设计辅助输入  $v$  使得二阶积分串联系统具有较好的控制性能。由于实际工程中不确定性动态难以测量, 因此该逆系统无法工程实现。另外, 考虑自抗扰控制在补偿不确定性和抗扰控制方面的性能优势, 特别是其核心组件扩张状态观测器在不需要获取系统不确定性先验知识的前提下实现总不确

定性的实时精准观测, 与基本控制器综合后可较好地弥补反馈线性化技术依赖于被控对象的精确模型导致鲁棒性不足的缺陷。因此, 下面考虑结合扩张状态观测器技术对控制律(4)进行再设计。

不同于自抗扰控制思想<sup>[9-15]</sup>中将异于积分串联型的动态项视为总不确定项, 这里由于标称动态系统项和控制增益已知, 因此可将异于输入输出线性化系统标称模型的部分因素(即  $d_{\text{total}}$ ) 视为总不确定项并扩展为系统的内部状态, 记  $\dot{d}_{\text{total}} = h$ , 则增广后的纵向运动学系统可写为状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 = f(H, V, \theta) + b(H, V, \theta)u + d_{\text{total}} \\ \dot{\eta}_3 = h \end{cases} \quad (5)$$

针对动态系统(5)可构造如下的模型辅助扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}}_1 = \hat{\eta}_2 + l_1(\eta_1 - \hat{\eta}_1) \\ \dot{\hat{\eta}}_2 = \hat{\eta}_3 + l_2(\eta_2 - \hat{\eta}_2) + f(H, V, \theta) + b(H, V, \theta)u \\ \dot{\hat{\eta}}_3 = l_3(\eta_3 - \hat{\eta}_3) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3$  分别为 LESO 对系统(6)的状态估计, 基于带宽参数化思想, 选取观测器带宽  $w_o > 0$  使由观测器待设计增益构成的特征多项式满足如下条件:

$$\begin{aligned}
\lambda_\eta(s) &= s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3 = s^3 + 3w_o s^2 \\
&\quad + 3w_o^2 s + w_o^3 = (s + w_o)^3
\end{aligned}$$

定义观测器的观测误差  $\tilde{\eta}_i = \eta_i - \hat{\eta}_i (i=1,2,3)$ ，结合被观测系统(5)和扩张状态观测器(6)，相应的观测误差动态可推导为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\eta}}_1 = \tilde{\eta}_2 - 3w_o \tilde{\eta}_1 \\ \dot{\tilde{\eta}}_2 = \tilde{\eta}_3 - 3w_o^2 \tilde{\eta}_1 \\ \dot{\tilde{\eta}}_3 = h - w_o^3 \tilde{\eta}_1 \end{cases} \quad (7)$$

令  $\varepsilon_i = \tilde{\eta}_i / w_o^{i-1} (i=1,2,3)$ ， $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]^T$ ，则观测误差动态可改写为

$$\dot{\varepsilon} = w_o \mathbf{A}_o \varepsilon + \mathbf{B}_o \frac{h}{w_o^2} \quad (8)$$

其中， $\mathbf{A}_o = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{B}_o = [0 \ 0 \ 1]^T$ ，显然  $\mathbf{A}_o$  是

赫尔维茨矩阵。

**定理 1.** 若总不确定性动态导数有界并满足  $|h| \leq \delta$ ，其中  $\delta$  为正常数，则存在有界常数  $\sigma_i$  及有限时间常数  $T_1 > 0$ ，使当  $t \geq T_1 > 0$  和  $w_o > 0$  时观测误差  $|\tilde{\eta}_i| \leq \sigma_i (i=1,2,3)$ ，并且对于适当的正整数  $k$ ，观测误差最终收敛域和观测器带宽具有单调反比的关系并满足：

$$\sigma_i = O\left(\frac{1}{w_o^k}\right)$$

证明：直接求解观测误差动态系统(8)，其相应的解满足：

$$\varepsilon(t) = e^{w_o \mathbf{A}_o t} \varepsilon(0) + \underbrace{\int_0^t e^{w_o \mathbf{A}_o (t-\tau)} \mathbf{B}_o \frac{h}{w_o^2} d\tau}_{\mathbf{p}(t)} \quad (9)$$

由于总不确定性动态导数有界并满足  $|h| \leq \delta$ ，对于  $\mathbf{p}_i(t) (i=1,2,3)$  有

$$\begin{aligned} |\mathbf{p}_i(t)| &\leq \frac{\int_0^t \left[ e^{w_o \mathbf{A}_o (t-\tau)} \mathbf{B}_o \right]_i |h| d\tau}{w_o^2} \\ &\leq \frac{\delta \int_0^t \left[ e^{w_o \mathbf{A}_o (t-\tau)} \mathbf{B}_o \right]_i d\tau}{w_o^2} \\ &\leq \frac{\delta}{w_o^2} \left[ \left| (\mathbf{A}_o^{-1} \mathbf{B}_o)_i \right| + \left| (\mathbf{A}_o^{-1} e^{w_o \mathbf{A}_o t} \mathbf{B}_o)_i \right| \right] \end{aligned}$$

为得到  $\mathbf{p}_i(t) (i=1,2,3)$  的估算上界，需要通过

不等式缩放进一步确定  $\left| (\mathbf{A}_o^{-1} \mathbf{B}_o)_i \right| + \left| (\mathbf{A}_o^{-1} e^{w_o \mathbf{A}_o t} \mathbf{B}_o)_i \right|$  的大小，对于系统(8)中定义的  $\mathbf{A}_o, \mathbf{B}_o$ ，令  $\mathbf{A}_o^{-1} = [s_{ij}]_{3 \times 3}$ ，得到：

$$\left| (\mathbf{A}_o^{-1} \mathbf{B}_o)_i \right| = \left| [-1 \ -3 \ -3]^T \right|_i \leq 3 \quad (10)$$

由于  $\mathbf{A}_o$  为赫尔维茨矩阵，故存在有限时间常数  $T_1 > 0$ ，使当  $t \geq T_1 > 0$  时，有

$$\begin{aligned} \left| \left[ e^{w_o \mathbf{A}_o t} \right]_{ij} \right| &\leq \frac{1}{w_o^3}, \left| \left[ e^{w_o \mathbf{A}_o t} \mathbf{B}_o \right]_{ij} \right| \leq \frac{1}{w_o^3} \\ \left| (\mathbf{A}_o^{-1} e^{w_o \mathbf{A}_o t} \mathbf{B}_o)_i \right| &\leq \frac{|s_{i,1}| + |s_{i,2}| + |s_{i,3}|}{w_o^3} \leq \frac{4}{w_o^3} \end{aligned} \quad (11)$$

基于式(10)和式(11)，令

$$\varepsilon_{\text{sum}}(0) = |\varepsilon_1(0)| + |\varepsilon_2(0)| + |\varepsilon_3(0)|$$

可得

$$|\varepsilon_i(t)| \leq \left| \left[ e^{w_o \mathbf{A}_o t} \varepsilon(0) \right]_i \right| + |\mathbf{p}_i(t)| \leq \frac{\varepsilon_{\text{sum}}(0)}{w_o^3} + \frac{3\delta}{w_o^3} + \frac{4\delta}{w_o^6} \quad (12)$$

令  $\boldsymbol{\eta}_{\text{sum}}(0) = |\boldsymbol{\eta}_1(0)| + |\boldsymbol{\eta}_2(0)| + |\boldsymbol{\eta}_3(0)|$ ，同时注意到  $\varepsilon_i = \tilde{\eta}_i / w_o^{i-1} (i=1,2,3)$  以及不等式(12)，则有下式成立：

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{\eta}_i(t)| &\leq \left| \frac{\varepsilon_{\text{sum}}(0)}{w_o^3} \right| w_o^{i-1} + |\mathbf{p}_i(t)| w_o^{i-1} \\ &\leq \left| \frac{\boldsymbol{\eta}_{\text{sum}}(0)}{w_o^3} \right| + \frac{3\delta}{w_o^{4-i}} + \frac{4\delta}{w_o^{7-i}} = \sigma_i, i=1,2,3 \end{aligned}$$

证毕。

由定理 1 关于模型辅助扩张状态观测器的收敛性证明可知，观测器的估计误差的最终收敛域与带宽成单调反比，与总不确定性动态的导数成正比。因此，可在系统带宽允许的范围内通过增大观测器带宽使观测误差快速收敛到零点附近的小邻域内。

**定理 2.** 假定总不确定性动态导数  $h$  关于  $\eta_i$  满足全局利普希茨条件，对于增广后的纵向运动学系统(5)，结合模型辅助扩张状态观测器(6)所提供的观测值  $\hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3$ ，存在观测器带宽  $w_o > 0$  和控制回路带宽  $w_c > 0$ ，设计的自抗扰再入制导律(13)使闭环系统的输出有界，并且跟踪误差渐近收敛。

$$u = b^{-1}(H, V, \theta)(-f(H, V, \theta) - \tilde{\eta}_3 + k_1(\eta_{1r} - \tilde{\eta}_1) + k_2(\dot{\eta}_{1r} - \tilde{\eta}_2) + \ddot{\eta}_{1r}) \quad (13)$$

其中,  $\eta_{1r}, \dot{\eta}_{1r}, \ddot{\eta}_{1r}$  分别为参考指令信号及其微分,  $k_1, k_2$  为待设计的控制器增益并满足  $k_1 = w_c^2$ ,  $k_2 = 2w_c$ 。

证明: 定义输入输出线性化系统的跟踪误差为  $e_i = \eta_{1r}^{(i-1)} - \eta_i (i=1,2)$ , 并结合 LESO 的观测误差  $\tilde{\eta}_i = \eta_i - \hat{\eta}_i (i=1,2,3)$ , 将闭环制导律(13)改写为带观测和跟踪误差的加权形式:

$$\begin{aligned} u &= b^{-1}(H, V, \theta) \\ &\times \left\{ \begin{array}{l} -f(H, V, \theta) - \tilde{\eta}_3 + k_1[\eta_{1r} - (\eta_1 - \tilde{\eta}_1)] \\ + k_2[\dot{\eta}_{1r} - (\eta_2 - \tilde{\eta}_2)] + \ddot{\eta}_{1r} \end{array} \right\} \\ &= b^{-1}(H, V, \theta) \\ &\times \left\{ \begin{array}{l} -f(H, V, \theta) - \tilde{\eta}_3 + k_1[e_1 + \tilde{\eta}_1] \\ + k_2[e_2 + \tilde{\eta}_2] + \ddot{\eta}_{1r} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

求解跟踪误差  $e_i = \eta_{1r}^{(i-1)} - \eta_i (i=1,2)$  关于时间的导数, 并将上式代入可导出:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{\eta}_{1r} - \dot{\eta}_1 = \eta_{1r}^{(1)} - \eta_2 = e_2 \\ \dot{e}_2 &= \ddot{\eta}_{1r} - \ddot{\eta}_2 = \ddot{\eta}_{1r} - [f(H, V, \theta) + b(H, V, \theta)u + d_{\text{total}}] \\ &= \ddot{\eta}_{1r} - \left[ \begin{array}{l} \tilde{\eta}_3 + k_1[e_1 + \tilde{\eta}_1] \\ + k_2[e_2 + \tilde{\eta}_2] + \ddot{\eta}_{1r} \end{array} \right] \\ &= -k_1(e_1 + \tilde{\eta}_1) - k_2(e_2 + \tilde{\eta}_2) - \tilde{\eta}_3 \end{aligned} \quad (14)$$

将闭环跟踪误差动态(14)进一步简写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 \end{bmatrix}}_{A_c} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & -k_2 & -1 \end{bmatrix}}_{B_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{\eta}_1 \\ \tilde{\eta}_2 \\ \tilde{\eta}_3 \end{bmatrix}}_{\tilde{\eta}} \quad (15)$$

为保证闭环跟踪误差动态渐近收敛, 必须选择控制器增益  $k_1, k_2$  使特征多项式  $s^2 + k_2s + k_1$  满足赫尔维茨条件。此外, 为方便控制器调参, 将该多项式的极点配置在  $-w_c$  处, 即  $k_1 = w_c^2$ ,  $k_2 = 2w_c$ 。由于观测误差最终一致有界, 因此有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|B_c \tilde{\eta}\| = 0$ , 同时借助文献 [10] 中对形如  $\dot{\eta}(t) = N\eta(t) + g(t)$  系统 (其中  $N$  满足赫尔维茨条

件,  $g(t)$  满足有界性假设) 的稳定性证明可推断出: 当总不确定性动态导数  $h$  关于  $\eta_i$  满足全局利普希茨条件, 存在观测器带宽  $w_o > 0$  和控制回路带宽  $w_c > 0$  使  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0 (i=1,2)$ 。证毕。

综上可知, 在所设计的自抗扰再入制导律的作用下可保证再入高度和速度的加权误差渐近稳定。进一步, 通过调节比例分配因子能在性能折衷的意义下实现高度和速度误差的均衡调控, 以满足高超声速飞行器再入过程多约束和终端指标要求。

## 2.2 横侧向制导逻辑设计

借鉴航天器等再入飞行器横侧向几何制导逻辑的设计思路, 即采用航向角偏差走廊进行控制, 以实时调整倾侧角的符号引导再入飞行器横向运动不断逼近目标点, 如图 2 所示。

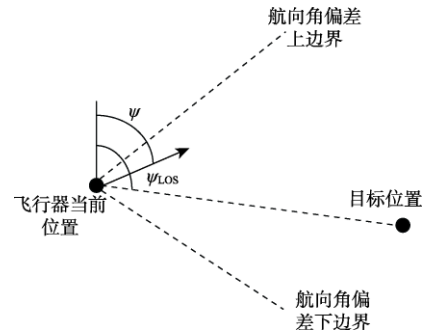


图2 横侧向制导相关参数示意图  
Fig.2 Schematic diagram of relevant parameters of transverse guidance

定义  $\Delta\psi_H$  为航向角偏差门限值, 设计为漏斗形的与速度相关的分段线性函数, 即

$$\Delta\psi_H(V) = \begin{cases} \Delta\psi_2(V), V > V_2 \\ \Delta\psi_1(V) + \frac{\Delta\psi_2(V) - \Delta\psi_1(V)}{V_2 - V_1} \cdot (V - V_1), V_1 < V \leq V_2 \\ \Delta\psi_1(V), V \leq V_1 \end{cases} \quad (16)$$

需要说明的是,  $\Delta\psi_H$  的选取原则是在尽量减少倾侧反转次数的前提下将飞行器引导至目标点, 航向偏差走廊的相关设计参数  $\Delta\psi_2(V)$  和  $\Delta\psi_1(V)$  可由多次仿真实验确定最佳值。若当前再入飞行器的描述速度方向的航向角为  $\psi$ , 定义航向

角偏差为  $\Delta\psi = \psi - \psi_{\text{LOS}}$ ，其中  $\psi_{\text{LOS}}$  表示飞行器当前点至目标点的视线方位角， $0 \leq \psi_{\text{LOS}} \leq \pi$ ，可由下式计算：

$$\psi_{\text{LOS}} = \arctan \left[ \frac{\sin(\phi_T - \phi)}{\cos \varphi \tan \varphi_T - \sin \varphi \cos(\phi_T - \phi)} \right] \quad (17)$$

其中， $\phi_T$  和  $\varphi_T$  分别为目标点的经度和纬度。为确保航向角偏差始终位于所设计的航向角偏差走廊内，再入飞行器速度方向必须在初始时刻就瞄准终端目标点，则初始时刻的倾侧角符号可确定为

$$\text{sign}(\gamma_s(0)) = -\text{sign}(\Delta\psi(0)) \quad (18)$$

再入制导程序启动后，当飞行器的航向偏差角位于航向角偏差指定的区域内，则维持倾侧角符号与上一时刻一致；反之，若航向偏差角超出设定的走廊范围，则控制倾侧角符号反转，该制导逻辑的具体计算公式为

$$\text{sign}(\gamma_s(k)) = \begin{cases} \text{sign}(\gamma_s(k-1)), & |\Delta\psi(V)| \leq \Delta\psi_H(V) \\ -\text{sign}(\Delta\psi(V)), & |\Delta\psi(V)| \geq \Delta\psi_H(V) \end{cases} \quad (19)$$

### 3 仿真验证

为验证所设计的自抗扰再入制导律对再入过程中存在气动参数组合拉偏情况下的适应性及对标准轨迹参数的跟踪能力，主要考虑以下两种仿真情况：

(1) 选取纵向制导律观测器带宽和控制器带宽分别为  $w_o = 20 \text{ rad/s}$ ,  $w_c = 5 \text{ rad/s}$ ，横侧向航向偏差走廊的设计参数为  $\Delta\psi_2 = 10^\circ$ ,  $\Delta\psi_1 = 5^\circ$ ,  $V_2 = 3000 \text{ m/s}$ ,  $V_1 = 500 \text{ m/s}$ ，制导系统的采样时间为  $0.05 \text{ s}$ ，为满足结构热防护和配平的需要，再入攻角剖面选择如下与速度相关的分段函数：

$$\alpha(V) = \begin{cases} 38^\circ, & V > 4000 \text{ m/s} \\ 25^\circ, & 2400 < V \leq 4000 \text{ m/s} \\ 15^\circ, & V \leq 2400 \text{ m/s} \end{cases} \quad (20)$$

此外，于再入初始加入气动参数组合摄动：即升力系数和阻力系数误差均为标称值的 20%，大气密度偏差为标称值的 -10%，设置比例分配因子分别为  $a = 0.5, 1$ ，以考察其对自抗扰再入制导

性能的影响；

(2) 再入制导律选取的控制参数和攻角程序剖面与情况(1)保持一致，令升力系数、阻力系数、大气密度偏差的分布类型服从高斯分布，偏差范围分别为标称值的  $\pm 10\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ，并在上述组合摄动影响下进行蒙特卡罗实验，以充分验证自抗扰再入制导律对各参数偏差情况下的鲁棒性。

需要说明的是，在再入轨迹生成方面，由于高斯伪谱法是目前在航天再入制导和航空器轨迹优化领域应用较为广泛且求解效率较高的一种优化方法，并有大量的应用范例可供参考，故本文采用文献[16]所述的高斯伪谱法生成满足再入动压、热流密度和过载等硬约束和终端高度、速度、经纬度散布误差约束的三维再入轨迹以满足跟踪制导任务需求，具体步骤不再赘述。表 1 给出了上述仿真情况中再入制导任务的飞行参数和指标约束，其中：下标“0”和“f”分别表示初始和终端时刻； $\dot{Q}_{\text{max}}$ ,  $n_{\text{max}}$ ,  $q_{\text{max}}$  分别为再入任务所允许的最大热流密度、过载和动压， $\Delta H_{f \text{ max}}$ ,  $\Delta V_{f \text{ max}}$ ,  $\Delta \phi_{f \text{ max}}$ ,  $\Delta \varphi_{f \text{ max}}$  分别表示再入终端所允许的最大高度、速度、经纬度制导偏差。

表 1 再入制导任务的飞行参数和指标约束  
Table 1 Flight parameters and index constraints of reentry guidance mission

| 初始状态   | 终端状态   | 过程约束  | 允许最大偏差  |
|--|--|---|---|
| $H_0 = 70.5 \text{ km}$ ,<br>$V_0 = 5500 \text{ m/s}$ ,<br>$\phi_0 = \varphi_0 = 0^\circ$ ,<br>$\theta_0 = 0^\circ$ ,<br>$\psi_0 = 55^\circ$ | $H_f = 30 \text{ km}$ ,<br>$V_f = 1758 \text{ m/s}$ ,<br>$\phi_f = 8.9^\circ$ ,<br>$\varphi_f = 5.6^\circ$ | $\dot{Q}_{\text{max}} =$<br>$15000 \text{ kW/m}^2$ ,<br>$n_{\text{max}} = 5 \text{ g}$ ,<br>$q_{\text{max}} = 30 \text{ kPa}$ | $\Delta H_{f \text{ max}} = 1 \text{ km}$ ,<br>$\Delta V_{f \text{ max}} = 50 \text{ m/s}$ ,<br>$\Delta \phi_{f \text{ max}} =$<br>$\Delta \varphi_{f \text{ max}} = 0.1^\circ$ |

图 3~7 分别给出了考虑气动参数扰动情况(1)时的制导效果仿真曲线。不难发现，由于自抗扰制导律中扩张状态观测器可实时对影响被控输出的总干扰动态进行精准估计（见图 3），因此，在气动参数组合摄动及不同比例分配因子条件下均能提供满意的抗扰和制导性能，并较好兼顾了再入过程的安全性和再入终端制导精度。其中，高度和航程的加权误差均稳定维持在零点附近，再

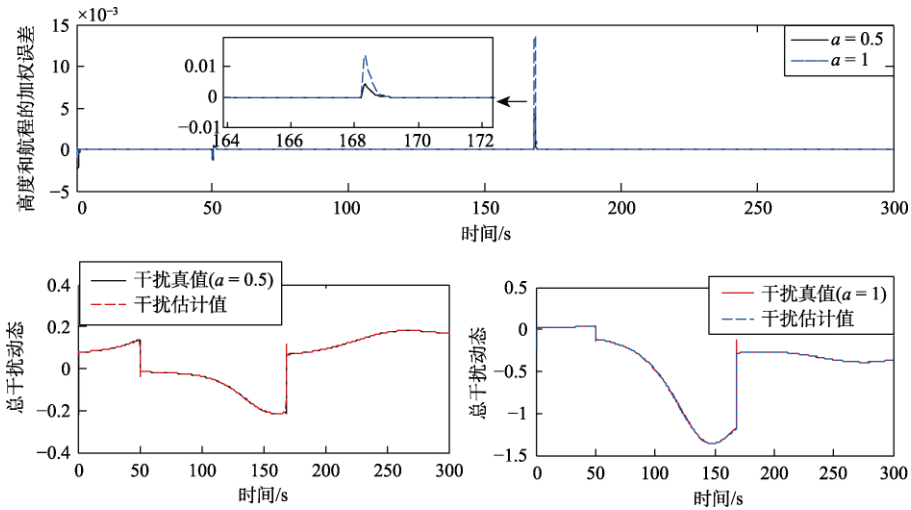


图 3 自抗扰制导律再入跟踪误差及干扰估计曲线

Fig.3 Reentry tracking error and interference estimation curve of ADRC

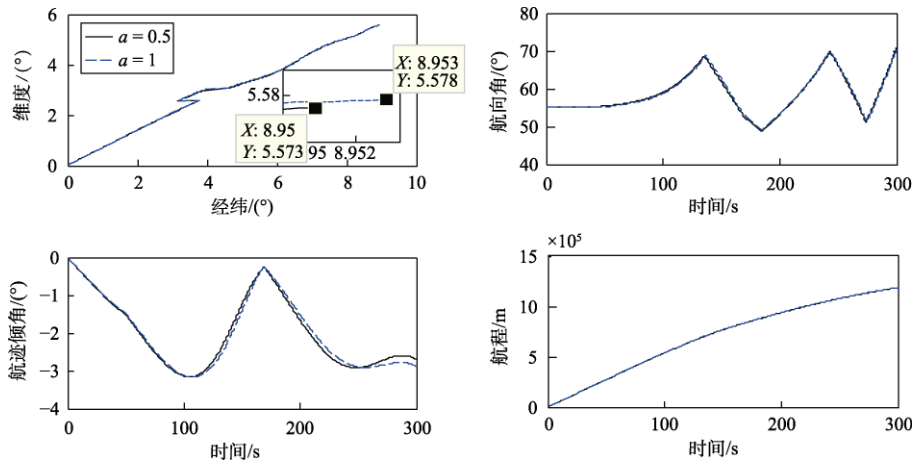


图 4 再入制导相关状态变量的响应曲线

Fig.4 Response curve of state variables related to reentry guidance

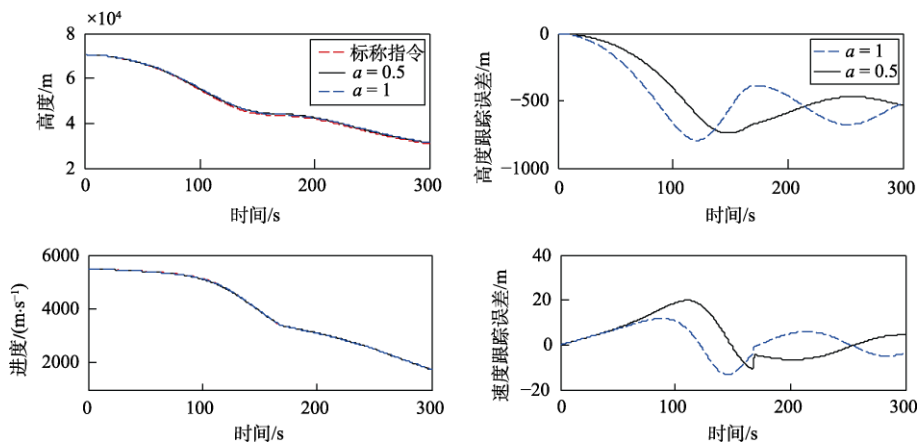


图 5 再入高度和速度的跟踪响应曲线

Fig.5 Response curve of reentry altitude and speed



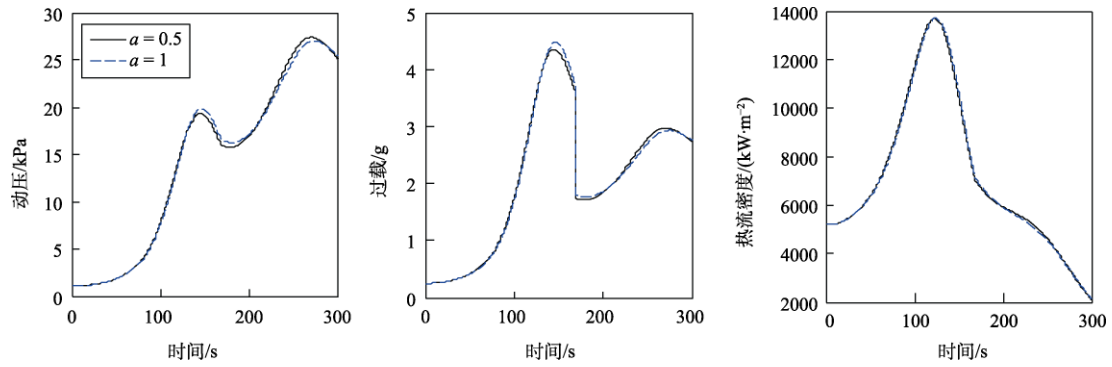


图6 再入动压、过载及热流密度的响应曲线

Fig.6 Response curves of reentry pressure, overload and heat flux density

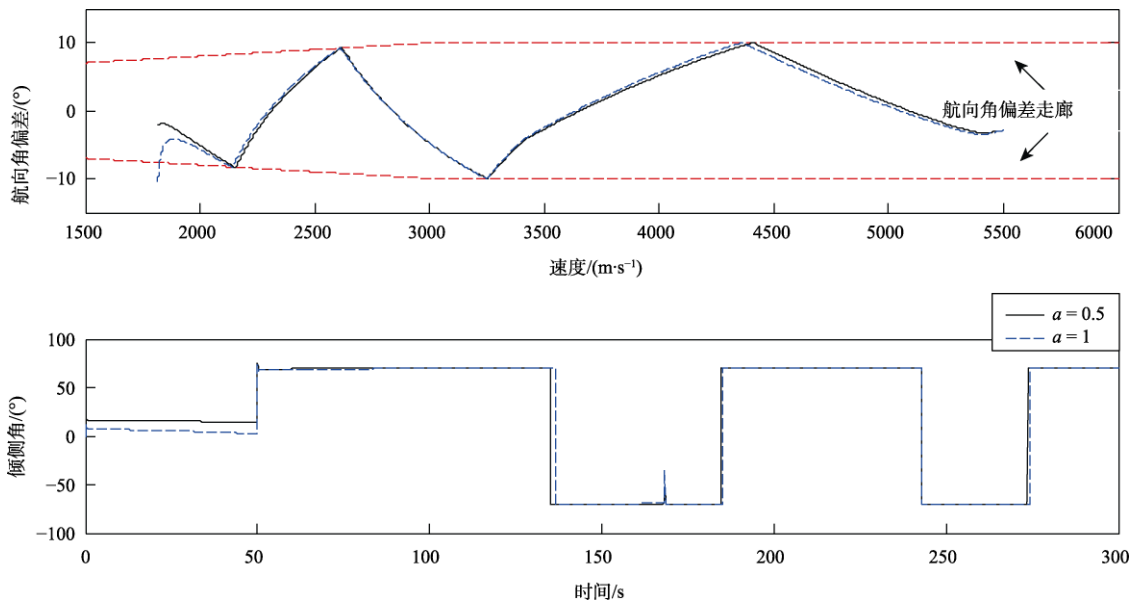


图7 横向制导中航向角偏差和倾侧角变化曲线

Fig.7 Variation curves of directional deviation and angle of bank during transverse guidance

入动压、过载及热流密度等路径约束均满足既定要求，再入终端经纬度偏差均小于  $0.1^\circ$ ，终端高度和速度误差分别控制在  $1\text{ km}$  和  $20\text{ m/s}$  以内，航向角偏差始终位于设计的航向角偏差走廊内。值得提出的是，当比例分配因子提高时，意味着输出控制对航程的控制权重加大，导致再入速度全程的跟踪误差降低，但由于所设计的自抗扰制导律仅能在性能折衷的前提下实现高度和航程的联合控制，在速度控制性能提高的同时不可避免地引起高度跟踪方面的性能损失。因此，应根据具体的再入制导任务需求折衷选取比例分配因子实现高度和速度控制方面的均衡。另外，为实现纵向跟踪制导精度，倾侧角剖面再入全程幅值均

较大（约为  $70^\circ$ ），为满足横侧向制导精度要求，倾侧角指令常伴随着航向角偏差超出既定走廊时进行 2~3 次的同步反转。可以预见，再入过程中倾侧角大幅度急剧滚转所引起的横侧向强耦合和强非线性效应将对姿态控制器的设计与综合提出严峻的挑战，也是后续研究需要重点突破的难点。

图 8~10 进一步给出了考虑气动参数组合摄动时的蒙特卡罗制导效果仿真曲线。蒙特卡罗仿真实验表明，在气动参数组合拉偏情况下的自抗扰再入制导律能满足预定的制导精度和路径约束要求，充分验证了所提出的自抗扰制导律具备较好的可行性和鲁棒性。

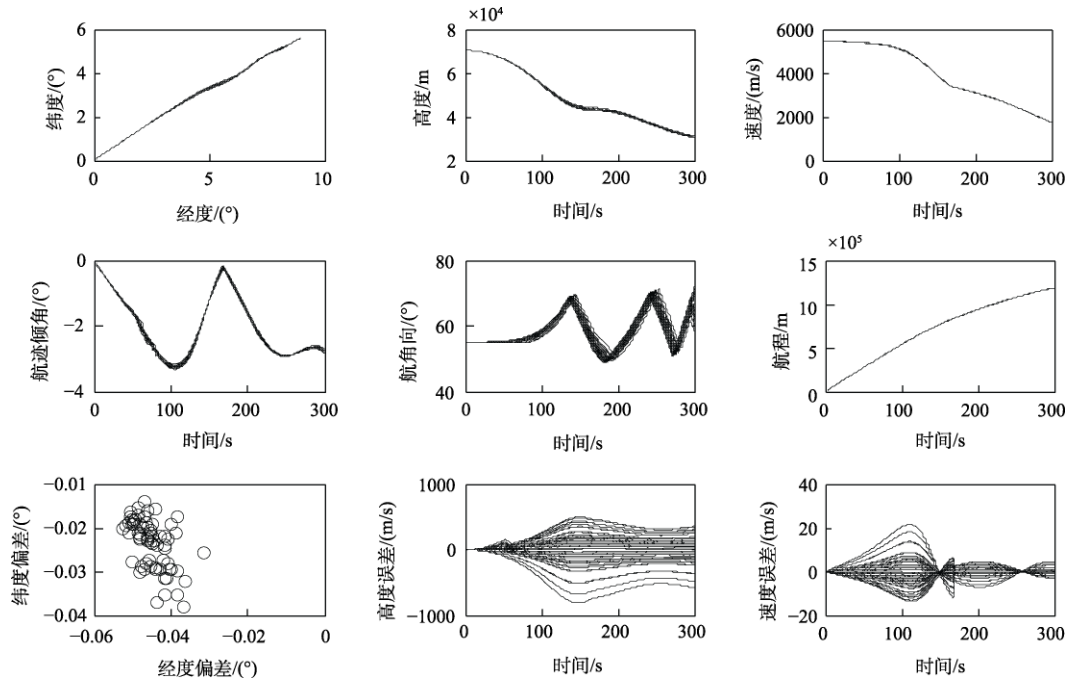


图 8 再入制导相关状态变量的蒙特卡罗仿真曲线

Fig.8 Monte Carlo simulation curve of reentry guidance related state variables

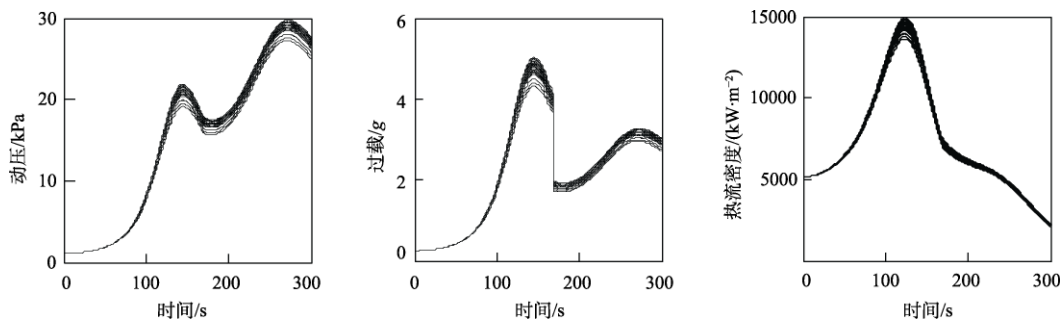


图 9 再入动压、过载及热流密度的蒙特卡罗仿真曲线

Fig.9 Monte Carlo simulation curves of reentry pressure, overload and heat flux density

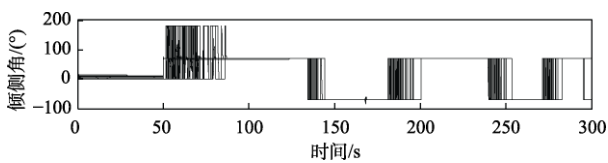


图 10 倾侧角的蒙特卡罗变化曲线

Fig.10 Monte Carlo variation curves of angle of bank

### 4 结 论

本文针对多约束条件及多种气动参数摄动影响的高超声速飞行器再入轨迹抗干扰跟踪问题, 在标准轨迹制导方法的框架下, 结合模型辅助线性自抗扰控制和基于航向角误差走廊的几何制导

逻辑, 提出了一种可满足制导任务需求的自抗扰再入制导律, 通过蒙特卡罗仿真实验验证了该制导律的有效性。未来工作考虑将所提方法拓展至包含再入禁飞区和突发威胁的复杂制导环境, 结合深度学习对非线性、高维函数的优异泛化能力, 设计基于数据驱动与模型辅助的智能再入制导律, 增强高超声速飞行器自主控制水平, 提升面对多样化再入突防任务的适应性。

### 参 考 文 献

[1] Snell S A, Enns D F, Garrard W L. Nonlinear inversion flight

- control for a super maneuverable aircraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(4): 976-986.
- [2] 邵星灵, 刘俊, 李东光. 基于轨迹线性化的高超声速飞行器非线性姿态控制[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(3): 56-66.
- [3] 王大轶, 郭敏文. 航天器大气进入过程制导方法综述[J]. *宇航学报*, 2015, 36(1): 1-8.
- [4] Dukeman G A. Profile-following entry guidance using linear quadratic regulation theory[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Monterey, California, 2002.
- [5] Talole S E, Benito J, Mease K D. Sliding mode observer for drag tracking in entry guidance[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Hilton Head, South Carolina, August 20-23, 2007.
- [6] Restrepo C, Valasek J. Structured adaptive model inversion controller for Mars atmospheric flight[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2008, 31(4): 937-953.
- [7] 张亚博, 姜明, 肖强, 等. 一种欠驱动无人船避障及目标跟踪鲁棒控制方法[J]. *无人系统技术*, 2019, 2(6): 40-45.
- [8] Khalil, H K. *Nonlinear Systems* [M]. 3rd ed. Upper Saddle River of New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [9] Zhu Z, Xu D, Liu J, et al. Missile guidance law based on extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(12): 5882-5891.
- [10] Lu K, Xia Y, Yu C. Finite-time intercept-angle guidance[J]. *International Journal of Control*, 2015, 88(2): 264-275.
- [11] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [12] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(4): 485-492.
- [13] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, New York, USA, 2003, 6: 4989-4996.
- [14] Sun D. Comments on active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3428-3429.
- [15] 赵大海. 无人机横侧向自抗扰飞行控制律设计[J]. *无人系统技术*, 2020, 3(2): 30-36.
- [16] Tian B, Zong Q. Optimal guidance for reentry vehicles based on indirect Legendre pseudospectral method[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7-8): 1176-1184.

#### 作者简介:



邵星灵 (1988-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器导航与控制。本文通讯作者。



刘俊 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为惯性传感与量子精密测量技术、极端环境下动态测试与系统集成技术。



李东光 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微小型武器系统分析与设计、灵巧弹药与引信、动态测控技术。

[引用格式] 孙 杨, 昌 敏, 白俊强. 变形机翼飞行器发展综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 65-77.

# 变形机翼飞行器发展综述

孙 杨<sup>1</sup>, 昌 敏<sup>2</sup>, 白俊强<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学无人系统技术研究院, 西安 710072)

**摘 要:** 现代飞行器面临日益复杂的飞行任务, 但采用固定外形机翼进行多目标优化设计必然带来机翼性能的折中与权衡, 使得飞行器在任何一个设计工况下都很难达到性能最优。变形机翼是解决该问题的有效途径, 通过改变外形来适应不同的飞行环境, 避免了固定外形机翼在多目标设计中的性能折中与权衡问题。首先, 梳理了变形机翼飞行器的发展历程并阐述了各阶段的发展特点, 列举了发展至今较为典型的变形机翼飞行器; 其次, 根据平面形状和翼型剖面是否变化将机翼变形分为平面形状变形、非平面形状变形和翼型剖面变形, 介绍了三种变体类型的具体变形方式与实际工程应用; 然后, 讨论了变形机翼所涉及的气动设计、结构设计、飞行控制等关键技术; 最后, 总结了变形机翼技术对于现代飞行器设计的重要意义与价值, 展望了多学科优化设计在变形机翼中的应用。研究将为变形机翼飞行器的发展提供参考依据。

**关键词:** 变形机翼; 优化设计; 平面形状变形; 非平面形状变形; 翼型剖面变形

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)03-65-13

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.029

## Review of Morphing Wing Aircraft

SUN Yang<sup>1</sup>, CHANG Min<sup>2</sup>, BAI Junqiang<sup>1,2</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, School of Aeronautics, Xi'an 710072, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Unmanned System Research Institute, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Modern aircraft will face more and more complicated flight mission. However, multi-objective design optimization will lead to the compromise of performance for fixed-shape wing, which means the performance would not be the best in each condition. Morphing wing is a good method to negotiate the design conflicts. The aircraft changes its wing shape to adapt to different condition, thus avoiding the collisions in multi-objective design optimization. Job is done to understand the full view of morphing wing aircraft. First, the development history of morphing wing is introduced with features of each stage, and those are listed that the typical morphing wing aircrafts in history. Next, the morphing wing is classified as platform morphing, out of platform morphing and foil morphing. Three manners of morphing are listed with its engineering applications, respectively. Then, the key techniques are discussed such as shape design, structure design, flight control. Finally, conclusions are made about the value for morphing wing aircraft, and multi-disciplinary design is brought up to be a promising and technique for morphing wing design. This paper aims to provide reference for the development of morphing wing.

**Key words:** Morphing Wing; Design Optimization; Platform Morphing; Out of Platform Morphing; Foil Morphing

## 1 引言

无论在民用还是军事领域,飞行器都将面对日益复杂的飞行任务与飞行环境,需要在多个工况下具备优良性能<sup>[1]</sup>。传统固定翼飞行器采用单目标设计,以设计点性能最优为目标。现代固定翼飞行器采用多目标优化设计,能够实现多工况下性能提升,但其设计结果往往是多工况下性能的折中与权衡<sup>[2]</sup>,在任何一个工况下的性能都不是最优的,更难以在所有工况下达到性能最优<sup>[3]</sup>。

与飞机相似,鸟类在飞行过程中也会面临不同的飞行环境以及机动需求,但与固定翼飞机所不同,鸟类可以通过图1所示的鸟翼形状变化来适应不同的飞行需求:(a)在平稳飞行时舒展翅膀;(b)在追捕猎物时将翅膀蜷缩后掠以减小飞行阻力,进行急速俯冲;(c)进入密林时将翅膀向内卷起,减小宽度以便穿越枝杈;(d)降落时将翅膀完全迎向气流来增加阻力,实现栖落机动<sup>[4]</sup>。鸟类在飞行过程中通过改变翅膀形状如展长、后掠角等来满足不同的飞行需求,在多种飞行环境中均能发挥优良性能。受此启发,赋予飞机像鸟类一样的机翼变形能力,将有助于解决多目标设计中的性能权衡问题<sup>[5-6]</sup>,由此催生了变形机翼飞行器。

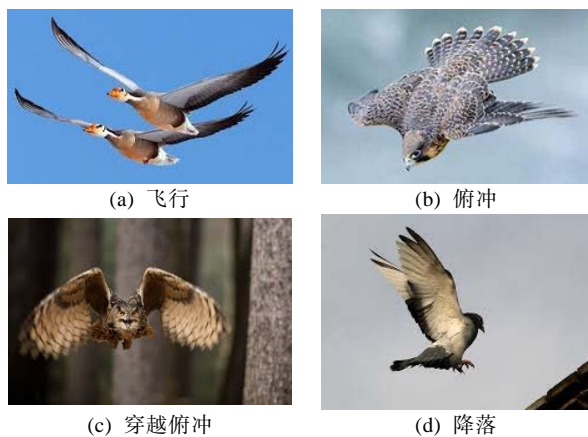


图1 鸟类飞行、俯冲、穿过密林与栖落  
Fig.1 Birds fly, dive, cross the forest and perch

机翼变形技术为飞行器的发展带来了机遇和挑战<sup>[7]</sup>。一方面,机翼变形为进一步提升飞行器性能带来了可能<sup>[8]</sup>;另一方面,变形机构的加入引

起机翼质量增加以及机械结构复杂度上升,增加了子系统设计的难度<sup>[9]</sup>。此外,变形过程中,平面形状发生变化往往牵动内部桁梁结构发生相对运动以及蒙皮面积扩张或者减缩,对结构设计、机械设计、智能材料等领域带来了全新的挑战<sup>[10]</sup>。

本文首先梳理变形机翼飞行器的发展历程,介绍典型的变形机翼飞行器并总结其发展特点。根据平面形状和翼型剖面是否变化将机翼变形分为平面形状变形、非平面形状变形和翼型剖面变形,列举3种变体类型的具体变形方式与实际工程应用。最后,总结变形机翼的关键技术并展望了未来发展趋势。

## 2 发展历程与发展特点

### 2.1 发展历程

变形机翼的概念几乎与飞机同时起源,莱特兄弟在发明飞机之初,就利用飞机机翼的不对称扭转变形来操纵飞机<sup>[6]</sup>。机翼变形技术发展至今产生了众多的变形方式与工程型号,如表1所示。机翼变形技术发展大致经历了三个阶段:萌芽阶段、初步发展阶段与平台无人化阶段。

20世纪30年代初至40年代末是机翼变形技术的萌芽阶段,这个时期的飞行器以活塞-螺旋桨动力为主,机翼载荷高,因此,机翼结构设计偏向刚性机翼。虽然这个阶段仅有少量的变体飞机出现,但是,众多的飞行器平台为变形技术提供了实践基础,X-5验证机的前身正是诞生于20世纪40年代末的德国。

20世纪50年代初至80年代末是变形技术的初步发展阶段,贝尔公司率先在X-5验证机上实现了机翼变后掠技术,证明了该技术的先进性与应用价值。此后,相继出现了变展长机翼、变展向挠度机翼等。但在该阶段,飞行器设计向着高空、高速的设计目标持续发展,高、低速的设计矛盾日益凸显,而变后掠机翼则有效地解决了这一矛盾,因此,得到了持续的研究与发展,衍生出了众多的工程型号。

20世纪90年代至今是变形技术开始应用于无人机平台的阶段。无人机具有设计成本低、设



计周期短、技术集成度高、飞行品质要求低等优势,也因此成为变形技术先进布局验证与应用的首选平台。该时期呈现出多样性与系统性的特点,涌现出多种多样的变形布局,如主动气动弹性机

翼、变扭转角、剖面连续变弯度等,美国和欧洲等地区的研究机构针对机翼变形过程中的气动、结构、材料、机械设计等各方面开展了较为系统与全面的研究<sup>[6]</sup>。

表 1 变形机翼飞行器型号  
Table 1 Morphing wing aircrafts

|         |   |   |   |  |   |   |
|---------|---|---|---|--|---|---|
| 示意图     |    |    |    |    |    |    |
| 名称/研究机构 | 飞行者   | MAK-10  | LIG-7   | MAK-123  | X-5   | XF10F   |
| 时间/年    | 1903  | 1931  | 1937  | 1947   | 1951  | 1952  |
| 变形方式    | 变扭转   | 变展长   | 变弦长   | 变展长  | 变后掠   | 变后掠   |
| 示意图     |    |    |    |    |    |    |
| 名称/研究机构 | F111  | XB-70   | MIG23   | Tu-22M   | F-14  | FS29  |
| 时间/年    | 1964  | 1964  | 1967  | 1969   | 1970  | 1972  |
| 变形方式    | 变后掠   | 变展向挠度   | 变后掠   | 变后掠  | 变后掠   | 变展长   |
| 示意图     |  |  |  |  |  |  |
| 名称/研究机构 | B1  | Tu-160  | F/A-18  | 弗吉尼亚理工   | MFX-1   | 鸥鸟翼   |
| 时间/年    | 1974  | 1981  | 2002  | 2003   | 2006  | 2006  |
| 变形方式    | 变后掠   | 变后掠   | 主动气动弹性  | 变展长  | 变后掠   | 变展向挠度   |
| 示意图     |  |  |  |  |  |  |
| 名称/研究机构 | 康奈尔大学   | 佛罗里达理工  | MFX-2   | 戴尔夫特大学   | Switchblade   | 南洋理工大学  |
| 时间/年    | 2006  | 2007  | 2007  | 2008   | 2010  | 2013  |
| 变形方式    | 变扭转   | 变后掠   | 变后掠   | 变后掠  | 折叠机翼  | 变扭转   |

## 2.2 发展特点

变形机翼技术的发展时间线如图 2 所示,从发展脉络来看,为追求高空、高速性能,刚性机翼普遍采用大后掠角布局以减小高速飞行阻力,但同时这样的布局恶化了低速性能,高、低速协调设计的矛盾日益凸显。因此,变形技术首先应用于技术复杂度较低的无结构相对运动、无蒙皮面积变化的整体变后掠机翼,以增加结构重量和机械复杂度为代价,实现了兼顾高、低速性能的

设计。伴随着智能材料的发展,柔性蒙皮实现了机翼前后缘的连续变弯度设计与主动气动弹性设计,可扩展的蒙皮为进一步实现结构变形提供了可能,也推动了后续对驱动机构、传感器等分系统的研究工作。从发展趋势来看,变形技术向着智能、可控、轻质、低复杂度、高系统可靠性等方面不断发展与完善。智能材料、结构设计、机械设计是变形技术发展的重要动力,总体、气动与控制设计是变形技术走向工程应用的关键基础。

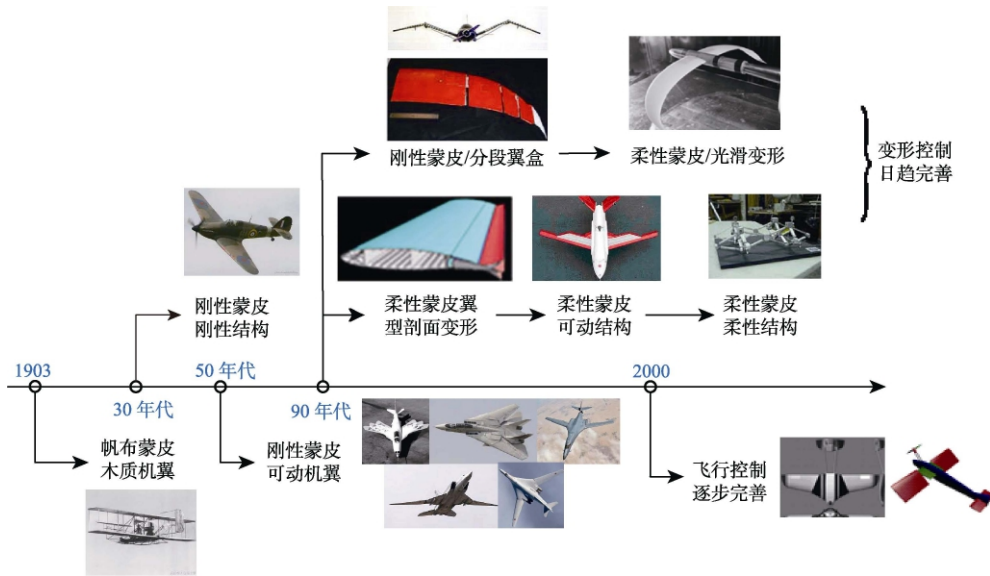


图2 变形技术发展时间线

Fig.2 Timeline of morphing wing technique

### 3 机翼变形技术分类

机翼变形通常分为三类：(1)平面形状变形，包括后掠角、展长、弦长等平面形状参数的变化；(2)非平面形状变形，如扭转、上反等；(3)翼型剖面变形，如翼型后缘弯度、剖面厚度变化等。

#### 3.1 平面形状变形

##### 3.1.1 变后掠机翼

变后掠机翼是一种可随不同飞行情况而改变后掠角的设计。这样的设计可同时利用大后掠角在高速下减小激波阻力以及小后掠角速下改善升力特性的优点，但也会增加飞机结构重量和机械复杂度。飞行器通过改变后掠角来匹配不同的飞行任务与飞行环境，在多个工况下均可达到最优性能，无须在高、低速性能之间进行权衡，有效地解决了飞行器的高、低速协调设计问题。

变后掠机翼在如图3所示的F-14、B-1B、Tu-160、Tu-22M等飞机上有着较为成功的应用。图4所示为Tu-160飞机在不同工况下的机翼后掠角变化。Tu-160主翼全展 $20^\circ$ 时用于起降，主翼展开至 $35^\circ$ 时用于巡航，主翼内收至 $65^\circ$ 时用于高速飞行。变后掠机翼采用小后掠角进行起降，中等后掠角进行巡航，大后掠角用于高速飞行，不仅解决了高、低速性能问题，也减小了对起飞场长度、停泊空间的要求。



图3 变后掠飞机典型代表

Fig.3 Engineering applications of sweep wing aircraft



图4 Tu-160飞机不同场景下采用不同的后掠角

Fig.4 Different configurations for Tu-160 in different flying conditions

##### 3.1.2 变展长机翼

变展长机翼是指机翼展长可变、机翼内包含可动翼段并且可将可动翼段沿轨道推出或收回的机翼。可动翼段通常包含在固定翼段内，依靠电磁作用力或者充气等方式伸出与收回<sup>[11]</sup>。伸缩机

翼改变飞机展弦比和机翼面积的能力较强，机翼展开构型可赋予飞机良好的高升阻比与长时间续航能力，机翼收缩构型则减小了飞行阻力，增强了飞机的加速冲刺性能，非对称伸缩还可用于滚转控制<sup>[12-13]</sup>。

变展长机翼的驱动机构需要占据较大的机翼内部空间，同时考虑外翼段的收纳问题，机翼内翼段的厚度通常较大<sup>[14]</sup>。此外，翼段连接处会造成翼面的不连续，使整个机翼的气动性能下降<sup>[15]</sup>。可见，现阶段变展长机翼存在变形机构复杂、翼面无法光滑变形等缺陷，无法适用于高速飞行的飞机<sup>[16]</sup>。为解决翼段连接处不连续的问题，设计人员通常会在翼段连接处铺设一层高弹性密封材料，保证机翼变形时翼段间不产生缝隙<sup>[17]</sup>。

美国航空先驱伯内利早在 1929 年就提出了这一技术概念<sup>[11]</sup>。图 5 所示的俄裔工程师 Ivan Makhonine 设计的 MAK-10 采用了一种气动可伸缩机构，伸缩机构带动外侧的机翼从内侧机翼中伸出，实现了展长和机翼面积的变化<sup>[14]</sup>。MAK-10 在 1931 年进行了首次飞行，其展长可从 13 m 增加到 21 m，机翼面积可从 21 m<sup>2</sup> 增加到 33 m<sup>2</sup>。

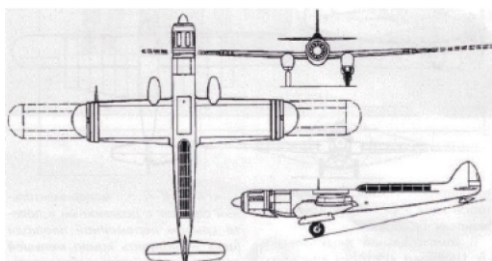


图 5 MAK-10 变展长机翼<sup>[14]</sup>

Fig.5 Illustration of varying wingspan MAK-10<sup>[14]</sup>

### 3.1.3 变弦长机翼

变弦长机翼是指机翼翼段弦长能够发生变化，沿气流方向延长或者收缩的机翼。由于变弦长机翼的驱动机构需要较大的内部空间，设计难度相对较大，研究人员对此类机翼研究相对较少。智能材料和智能驱动器的发展，使得设计出质量轻、复杂度低的变弦长机构成为可能。例如，2005 年，美国基石研究集团的 Reed 设计了如图 6 所示的伸缩翼肋机构，通过控制翼肋滑动，改变机

翼翼弦长<sup>[6]</sup>。覆盖于翼肋表面的柔性蜂窝蒙皮用于保持机翼翼型，刚性翼肋可支撑柔性蒙皮以承载面外的气动载荷，该变弦长机翼最大可增加 80% 的机翼平面面积。



(a) 收缩状态



(b) 展开状态

图 6 伸缩翼肋机构<sup>[6]</sup>

Fig.6 Structure of flexible wing rib<sup>[6]</sup>

### 3.1.4 折叠机翼

折叠机翼是指可绕轴旋转折向机身，能在折叠与展开状态间进行切换的机翼。折叠方式<sup>[7]</sup>主要包含两种：横向折叠与纵向折叠。横向折叠机翼在各段机翼的分离面处设置沿弦向的铰链，通过外部驱动力使分段机翼绕铰链轴转动，如图 7 所示。纵向折叠机翼在机身或机翼上布置有展开机构，机翼绕轴旋转至与机身共线。小展弦比布

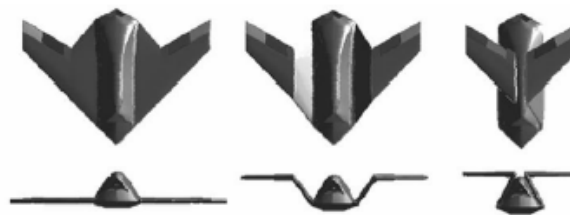


图 7 横向折叠

Fig.7 Illustration of horizontal folding



局可采用图 8 所示的一次折叠方式，机翼绕根部转轴向机体头部或机体尾部折叠。大展弦比布局则采用图 9 所示的二次折叠方式，在机翼上布置第二展开机构来连接分段机翼。折叠机翼可有效减小飞行器所占尺寸和容积，适用于筒发射或潜射的飞行器。

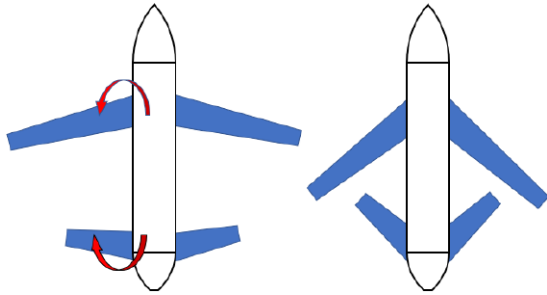


图 8 串列翼布局纵向折叠

Fig.8 Longitudinal folding of tandem-wing

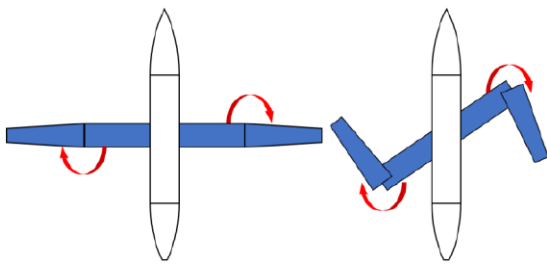


图 9 大展弦比机翼纵向折叠

Fig.9 Longitudinal folding of high aspect ratio wing

“鸬鹚”无人机<sup>[18]</sup>是横向折叠的典型代表，如图 10 所示。无人机机长 5.8 m，翼展 4.86 m，机身总重量不到 4 t，但可携带 453 kg 的载荷。“鸬鹚”无人机的机翼设计成海鸥翅膀的形状，以适应导弹发射井内壁。无人机由类似机械臂的引导装置送出发射井，自行浮出水面后，将起动两部固体燃料发动机，在水面垂直起飞。



图 10 潜射的“鸬鹚”无人机

Fig.10 Submarine-launched cormorant UAV

“弹簧刀”巡飞弹<sup>[19]</sup>是纵向折叠的典型代表，如图 11 所示，飞行器系统由发射器、巡飞弹及地面控制站等部分组成。巡飞弹是其核心，最大重量约 1.36 kg，长度为 360 mm。在下部有前后两对弹翼折叠，可由迫击炮或火炮等身管武器发射，展开后翼展最大 610 mm。



图 11 筒发射“弹簧刀”无人机

Fig.11 Tube-launched switchblade UAV

### 3.2 非平面形状变形

#### 3.2.1 变展向挠度机翼

展向变弯度机翼是指机翼沿展向可发生弯度变化，主要包括分段挠曲变形和柔性挠曲变形，如图 12~13 所示。改变展向弯度可改变飞行器的滚转性能和横向稳定性<sup>[20]</sup>。这类机翼通过记忆合金线连接各翼段，控制记忆合金线的伸缩使机翼产生不同的展向弯度<sup>[21]</sup>。



图 12 分段展向变挠度机翼<sup>[12]</sup>

Fig.12 Aircraft of segmented flexible wing<sup>[12]</sup>

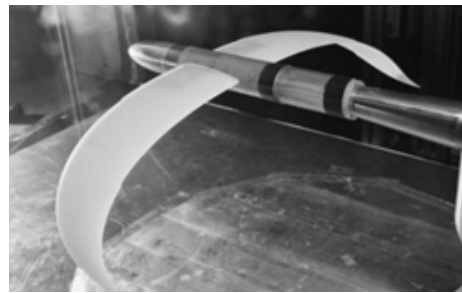


图 13 连续展向变挠度机翼<sup>[12]</sup>

Fig.13 Aircraft of smooth flexible wing<sup>[12]</sup>

### 3.2.2 变扭转机翼

变扭转机翼是指机翼剖面扭转角可发生变化的机翼。通过改变机翼扭转角来实现改变气动力和力矩, 不对称扭转还可用于滚转控制。

变扭转机翼的典型代表是主动气动弹性机翼 (Active Aeroelastic Wing, AAW)<sup>[22]</sup>, 其在原理上与莱特兄弟的机翼扭转控制类似, AAW 共有 4 对控制面, 即内外侧前、后缘控制面各一对, 如图 14 所示。为让飞机向右翻转, 通过向上偏转外侧前缘翼瓣、向下偏转后缘翼瓣, 左侧机翼将产生滚转力矩。如果设计合理, 只需偏转较小角度, 就能提供足够的控制而满足设计要求, 此时机翼扭转变形比传统方法设计的机翼变形还小。AAW 与原有机翼相比, 采用更轻、更具柔韧性的材料, 可完成机翼的弯曲和扭转, 通过主动气动弹性变形提高飞机在跨、超声速的滚转等操纵控制能力。AAW 可使飞机航程更远、有效载荷更高、燃油效率更高, 能获得更优的飞行性能。

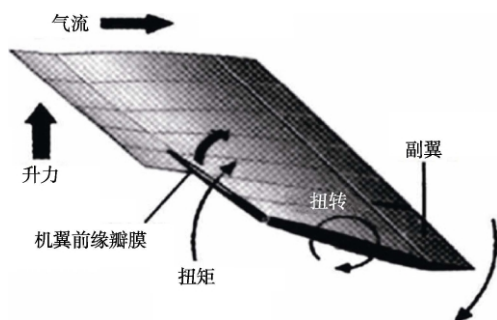


图 14 主动气动弹性机翼<sup>[22]</sup>

Fig.14 Active aeroelastic wing<sup>[22]</sup>

### 3.3 翼型剖面变形

翼型剖面变形指对机翼剖面形状的控制, 主要包括改变厚度和前后缘变弯度。传统机翼的舵面操纵如襟翼、缝翼偏转本质上就是在改变机翼弯度, 但舵面偏转过程中所形成的缝道会破坏机翼型面的连续性, 增加阻力与噪声<sup>[23]</sup>。随着智能材料和智能驱动器的应用, 连续变弯度机翼步入实际应用, 驱动机构驱动机翼结构产生前后缘弯曲变形, 可扩展蒙皮填补了缝道, 使得机翼型面实现连续变化, 改善了气动、噪声与隐身特性。

自 1980 年自适应机翼技术项目 (Adaptive

Mission Wing, AMW)<sup>[5]</sup>在改进的 F-111 战斗机上展示了机翼无缝可变形前后缘的优势后, 研究人员将目光集中在可变形机翼的研究上。Ricci 等<sup>[24]</sup>提出了基于可转动翼肋改变机翼后缘弯度的方案及基于线性滑动轴承的变形蒙皮方案, 并进行了初步的方针分析。基于翼肋分段转动的原理, Poonsong<sup>[25]</sup>提出了多段可变弯度机翼的概念, 通过驱动这种翼肋机构运动, 可在全弦长范围内实现翼型弯度的变化。Sofla 等<sup>[26]</sup>研发了一系列形状记忆合金驱动的可弯曲结构, 可用于使机翼段变形。2009 年, Peel 等<sup>[27]</sup>研制的如图 15 所示的变弯度机翼, 采用碳纤维材料作为蒙皮, 通过气动肌肉驱动机翼产生弯曲变形, 其前缘可向下弯曲  $14^\circ$ , 后缘可向下弯曲  $13^\circ$ 。新型驱动器的采用有效地降低了机翼重量和驱动机构的复杂度。



(a) 原始状态



(b) 变弯度状态

图 15 变弯度翼型<sup>[27]</sup>

Fig.15 Variable camber foil<sup>[27]</sup>

## 4 关键技术研究

机翼变形涉及气动、结构、控制、材料、机械等众多领域, 关键技术主要包含以下几个方面: (1) 气动性能计算方法; (2) 飞行力学建模与飞行控制; (3) 变形控制系统技术; (4) 机翼变形结构; (5) 自适应蒙皮; (6) 多学科优化设计。计算方法旨在为变体飞行器的概念设计和详细设计寻找匹配的性能计算手段, 在设计初期使用高效手段进行布局评估, 在详细设计中则采用能反映非定常气动力的高精度方法。动力学方面则是



要建立多体动力学模型,将机翼变形作为控制环节进行控制设计。变形控制系统则包含了驱动机翼变形的全部子系统,这些子系统将与可动机翼结构及变形蒙皮共同实现机翼变形。由于机翼变形常伴随着内部桁梁结构的相对运动及蒙皮面积扩展或减缩,因此,还需研究可变形的承力结构与自适应蒙皮。开展多学科的优化设计才能得出较为满意的变形机翼设计结果。

#### 4.1 气动性能计算方法

机翼变形方式多样且在多个工况下飞行,若直接采用高精度 CFD 方法对变形机翼进行数值模拟,计算工作量较大。由此,在概念设计阶段催生了能快速、准确计算气动力且无须重新生成网格的计算需求。升力线理论<sup>[28-29]</sup>和涡格法<sup>[30-31]</sup>等快速估算手段在该领域取得广泛应用。但是,在详细设计阶段,为了能够细致地研究飞行器变形机翼的动态展开与流动迟滞等现象,则必须采用高精度的 CFD 数值模拟方法,耦合网格变形求解较为复杂的非定常 N-S 方程<sup>[32]</sup>,不同设计需求下所运用的计算方法如图 16 所示。

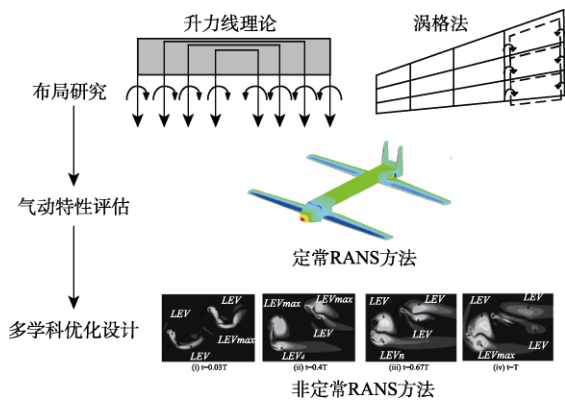


图 16 不同设计需求下气动性能计算方法

Fig.16 Calculation method of aerodynamic performance in different design requirement

#### 4.2 飞行力学建模与飞行控制

机翼变形过程中,机翼与机身存在相对运动或机翼本身产生柔性变形,因此,必须采用多体动力学或柔性体动力学的方法建立动力学模型。此外,变形过程中飞行器的质心、转动惯量、气动力焦点等特征都会发生变化<sup>[33]</sup>,气动力模型具

有较大的非定常性与非线性,无法直接采用小扰动方法进行简化<sup>[34]</sup>。上述特点大大增加了变体飞行器的飞行力学建模、仿真以及控制设计的难度。

变体飞行器的飞行控制系统需要在变形结构按预定程序变形时维持飞行稳定;或者更进一步,将变形机翼(或其他变形结构)作为附加的飞行器操纵机构<sup>[35]</sup>,利用图 17 所示的机翼变形引起的空气动力学效应辅助操纵,甚至完全操纵飞行器,实现飞行器的机动控制。

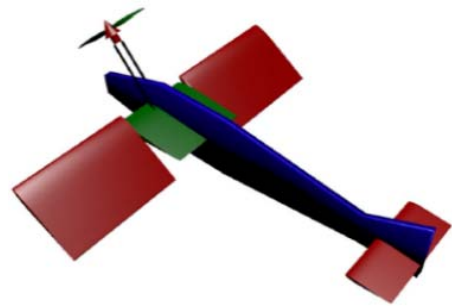


图 17 变形机翼气动力矢量控制<sup>[35]</sup>

Fig.17 Illustration of aerodynamic vectoring morphing wing<sup>[35]</sup>

#### 4.3 变形控制系统技术

变形控制系统是指涉及机翼变形相关的全部系统,主要包括驱动机构、机械传动机构、传感反馈、限位机构、储能系统、变形控制单元 6 个部分。驱动机构是指为机翼变形提供主动作用力或力矩的机构,其本质是将电能、燃料化学能等其他形式能转化为机械能,从而驱动机翼运动。驱动机构主要包含集中式驱动与分布式驱动<sup>[36]</sup>两种结构形式。集中式驱动变形结构制作较简单,但驱动器承受的载荷大,对其强度要求高,导致结构重量大,且变形方式固定单一,如只能改变后掠角,驱动器故障时将导致飞行器失效<sup>[37]</sup>。分布式驱动变形结构中,多个驱动器分担载荷,有助于减轻结构重量,变形形式灵活,鲁棒性强,在部分驱动器发生故障时可保证飞行器具有足够的可控性<sup>[38]</sup>。机械传动机构是指将驱动机构作用力传递至可变形结构上的部件,基本原理是通过杆、滑块、铰链机构所组成的系统传递位移与作用力。

变形控制系统工作流程如图 18 所示,当飞控

系统根据机动或稳定性要求解算出相应的机翼变形运动指令后,将运动指令传达至变形控制单元,变形控制单元根据指令产生驱动控制指令,驱动机构根据控制指令输出作用力,经机械传动将集中作用力传递至各运动部件,传感器实时监测机构运动是否达到指定位移、角度、速率和角速率等要求并向控制单元反馈,变形控制单元接受反馈信号进行指令修正从而消除误差。当到达指定位置时,限位机构将机翼在当前位置锁定,驱动机构解除作用力,储能系统也随之停止供能。

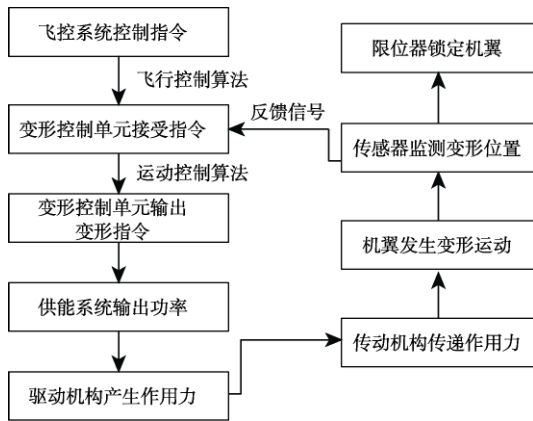


图 18 变形控制系统工作流程  
Fig.18 Workflow of morphing control system

#### 4.4 变形机翼结构设计

不同的变体类型常采用不同的结构设计,主要可以分为两类,非平面形状变化的结构与变平面形状机翼的结构设计<sup>[39]</sup>。非平面形状变化如变扭转、上反、剖面形状等,机翼变化较为单一,结构设计较为简单,每一段可进行单独的结构设计。变平面形状机翼的结构主要针对变后掠、变弦长、变展长三种类型<sup>[40]</sup>。此外,机翼结构发生形状变化时,还会伴随着蒙皮的扩展或收缩,因此,蒙皮必须具备自适应的变形能力。

##### 4.4.1 非平面形状变化的结构设计

洛克希德·马丁公司的 Z 形变形机翼<sup>[41]</sup>与佛罗里达大学的仿鸥鸟机翼<sup>[40]</sup>,均采用分段机翼,如图 19 所示。每段机翼自身不具备变形能力,设计较为简单,仅在连接位置设置旋转机构和蒙皮密封。



图 19 鸥鸟机翼<sup>[40]</sup>  
Fig.19 Gull-wing aircraft<sup>[40]</sup>

后缘连续变弯度设计<sup>[42]</sup>是另一种较常见且易实现的变形方式,如图 20 所示。柔性后缘为依次连接的铰接片,由驱动器和传动机构驱动产生连续弯曲变形,外部自适应蒙皮进行相应的面积扩展与收缩,保持贴附。

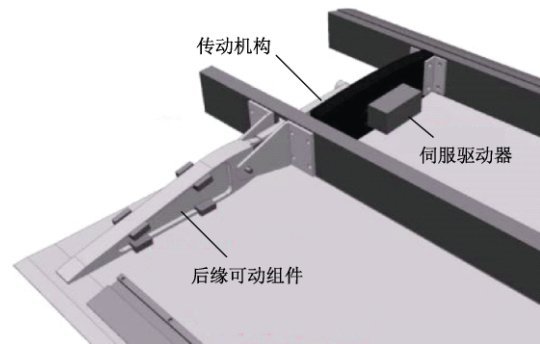


图 20 可变弯度机翼的后缘装置<sup>[42]</sup>  
Fig.20 Rotating rib concept of trailing edge<sup>[42]</sup>

##### 4.4.2 变平面形状的结构设计

新世代航空提出的滑动蒙皮方案<sup>[43]</sup>将机翼结构分为图 21 所示的三个主要部分:桁梁等主承力部件、根部滑动组件、内部结构主动变形单元。变形过程如图 22 所示,结构变形单元利用铰接四

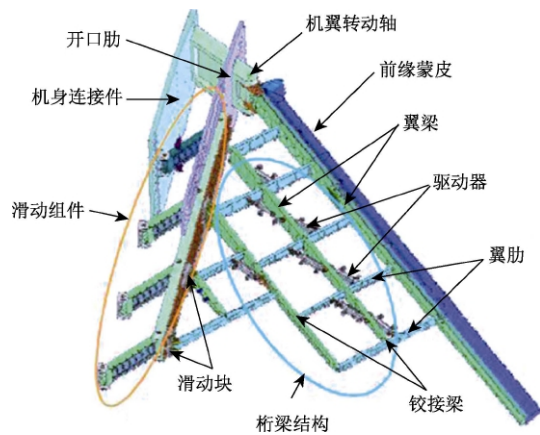


图 21 变后掠机翼结构<sup>[43]</sup>  
Fig.21 Structure of sweep wing<sup>[43]</sup>

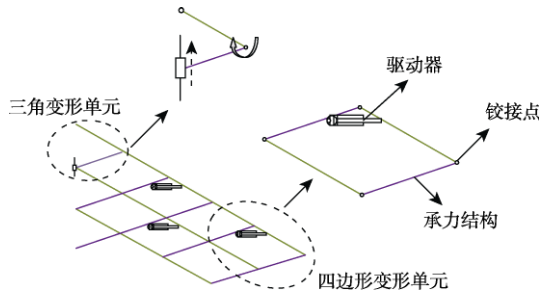


图 22 结构变形单元

Fig.22 Structure unit of morphing wing

边形的一自由度特征,在机翼变后掠过程中能发生相应变形,其内部包含驱动机构、转动轴及四边的分段承力结构。在根部区域,变形单元由三角形构成,由滑动组件提供额外的变形自由度。当机翼产生变形时,驱动器推动四边形发生运动,根部滑动组件也会产生相应变形,从而推动前缘的桁梁等主承力部件发生变后掠运动。

机翼平面形状变化类型较多,不仅有弦长、展长的变化,实际使用中还会受到气动载荷引起气动弹性变形,因此,自适应变形的机翼更具有应用前景,宾夕法尼亚大学采用图 23 所示的蜂窝状结构<sup>[44]</sup>作为微小单元填充机翼,每个单元外部为八根铰接杆,内部有弹性线与驱动机构,能实现主动可控变形及自适应的挠曲变形。

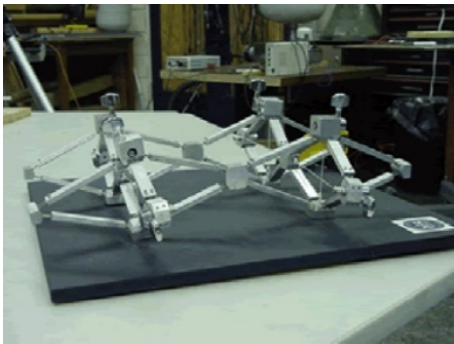


图 23 柔性蜂窝支杆结构

Fig.23 Compliant cellular truss structure

#### 4.4.3 自适应蒙皮

机翼平面形状的变化要求蒙皮材料能进行适当的面积延展,因此,刚性的金属蒙皮不再适用,取而代之的是具有扩展性的压电材料<sup>[45]</sup>、高聚物<sup>[46]</sup>、层压薄膜材料<sup>[47]</sup>与记忆合金<sup>[48]</sup>等。压电材料因其响应特性和调频特性而为变体飞机结构设

计青睐,其可实现电能和机械能之间的转换。具体材料的选取要根据驱动应力、作用力、位移和变形速度、电压及响应速度来决定。形状记忆合金因其变形与电压关联的简便特性在蒙皮选材中受到广泛关注。Cornerstone Research Group<sup>[6]</sup>提出的自适应蒙皮采用记忆合金,如图 24 所示,该材料可在不同温度下呈现出不同的形状。除记忆合金外, Nano Sonic<sup>[6]</sup>提出采用纳米技术制造的全新金属橡胶(Metal Rubber),如图 25 所示,金属橡胶材料具有较好的延展性、耐高温性。此外,宾夕法尼亚大学的学者还提出仿照鱼鳞或机场行李传送带的层叠机构,在机翼蒙皮布置分片的小块重叠蒙皮,实现蒙皮的连续变形<sup>[6]</sup>。

图 24 自适应蒙皮<sup>[6]</sup>Fig.24 Self-deploying polymer material<sup>[6]</sup>图 25 金属橡胶材料<sup>[6]</sup>Fig.25 NanoSonic's Metal Rubber<sup>[6]</sup>

#### 4.5 多学科优化设计

除了流体力学、结构设计、飞行控制等传统领域,变体无人机也搭乘了机器学习、机械设计等领域的发展浪潮,出现了机器学习与自适应动态逆控制方法相结合、强化学习控制策略与轨迹

跟踪相结合的新方法<sup>[49]</sup>。同时, 变体飞行器也带来了设计方法的变革, 依赖历史数据和 CFD 手段的设计流程不再适用, 取而代之的是基于物理学原理的包含高可信度工具的设计方法, 其中, 响应面模型可高效地将物理学原理引入早期的设计之中并实现全局的优化搜索<sup>[50]</sup>。

## 5 结 论

现代飞行器追求多工况下性能提升, 但针对固定外形开展设计, 其设计结果往往是多工况性能的折中与权衡, 为满足某一性能指标需牺牲一定的其他性能。换言之, 固定外形的多工况设计在任何一个工况下性能都不是最优的。鸟类通过变换鸟翼形态适应不同飞行环境, 受此启发, 赋予机翼变形能力能有效解决多目标设计所带来的矛盾。广义来看, 所有机翼都并非绝对刚性, 均具备变形能力, 但速度快、幅度大的变形机翼及其工程应用在近几年才崭露头角。本文总结了变形机翼飞行器的分类方式与关键技术, 列举了平面形状变形、非平面形状变形和翼型剖面变形的具体变形方式并对实际工程应用进行了介绍。机翼变形技术涉及气动、结构设计、飞行控制、机械动力学、材料等众多领域, 在为提升飞行器性能带来无限可能的同时, 也对飞行器设计带来巨大挑战。

传统观点认为, 变形机翼引入驱动器、机械传动等机构, 引起机翼结构重量增加, 机械复杂度上升, 系统可靠性下降, 飞行控制设计增大, 难以走向实际应用。实践表明, 变形机翼虽然给机翼设计带来上述不利影响, 但也带来全局优势, F-4、F-14 等飞行器的成功应用就是有力佐证。换言之, 目前的变形机翼飞行器是以结构重量的代价换取性能提升, 以牺牲本体性能换取全局性能增益。但在未来, 随着结构设计、材料及机械设计等技术的进步, 极有可能实现本体与全局性能的共同提升, 以变形机翼代替传统舵面进行飞行控制, 取消襟翼及襟翼驱动设备, 在较为简单的结构框架下实现功能, 不仅不会引起重量增加

与机械复杂度上升, 甚至可能实现子系统减重和全局性能提升的双收益。

变形机翼飞行器将成为高性能、高智能化、高技术集成度的多用途飞行平台。目前, 变形机翼飞行器进入了多学科优化设计的阶段: 气动外形与变体结构的一体化设计需要进一步强化; 折叠变形展开过程中的非定常气动力与动态过程的模拟手段亟待解决; 机械、电气等设备的小型化与集成化是未来的重要方向; 利用主动气动弹性驱动机翼变形能挖掘变体飞机新的潜力。将拓扑优化、机器学习、先进控制等技术引入变形机翼设计之中, 可激发变形机翼飞机新的生命力。

## 参 考 文 献

- [1] Barbarino S, Bilgen O, Ajaj R M, et al. A review of morphing aircraft[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(9): 823-877.
- [2] Gomez J C, Garcia E. Morphing unmanned aerial vehicles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 103001.
- [3] Weisshaar T A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges[J]. *Journal of Aircraft*, 2013, 50(2): 337-353.
- [4] Ajaj R M, Beaverstock C S, Friswell M I. Morphing aircraft: The need for a new design philosophy[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 49: 154-166.
- [5] Weisshaar T A. Morphing aircraft technology-new shapes for aircraft design[J]. *Multifunctional Structures / Integration of Sensors and Antennas*, 2006(1): 1-20.
- [6] Rodriguez A. Morphing aircraft technology survey[C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, January 8-11, 2007.
- [7] 廖波, 袁昌盛, 李永泽. 折叠机翼无人机的的发展现状和关键技术研究[J]. *机械设计*, 2012, 29(4): 1-5.
- [8] 吕胜利, 刘平, 杨广珺, 等. 折叠机翼展开过程气动特性实验研究[J]. *飞行力学*, 2013, 31(1): 80-83.
- [9] 贺媛媛, 王博甲. 国外变形飞行器的研究现状[J]. *飞航导弹*, 2013(10): 49-55.
- [10] 郭述臻, 郑祥明, 尹崇, 等. 折叠翼飞机的气动特性分析[J]. *航空工程进展*, 2013, 4(3): 358-363.
- [11] 张祖豪. 具有连续机翼表面的伸缩式变形翼研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 金栋平, 赵文梅. 伸缩翼飞机纵向飞行动力学研究[J]. *应用力学学报*, 2014(3): 468-472.



- [13] 陈璐璐, 郭翔鹰, 张伟. 伸缩机翼流固耦合的气动力计算及非线性动力学分析[C]. 第十届动力学与控制学术会议, 成都, 2016年5月6-8日.
- [14] 刘卫东. 变形机翼关键技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [15] 李士途, 艾俊强, 李军府, 等. 伸缩机翼变体飞机气动布局初步研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(1): 25-28.
- [16] 李俊成, 艾俊强, 李士途. 伸缩机翼变体飞机气动特性研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 22-27.
- [17] 郑发明, 袁明川, 魏德宸. 伸缩翼变体飞行器的动态气动特性研究[J]. 科技风, 2014(5): 116.
- [18] 张晓丹, 郝文婷. 未来变体无人飞行器的关键技术[J]. 中国新技术新产品, 2014(12): 15.
- [19] 张建生. 国外巡飞弹发展概述[J]. 飞航导弹, 2015(6): 19-26.
- [20] Chakravarthy A, Paranjape A, Chung S J. Control law design for perching an agile MAV with articulated wings[C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Toronto, Canada, August 2-5, 2010.
- [21] Manzo J, Garcia E. Demonstration of an in situ morphing hyper-elliptical cambered span wing mechanism[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(2): 025012.
- [22] Suleman A, Moniz P. Active aeroelastic aircraft structures[J]. Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems, 2006, 6: 85-106.
- [23] 秦博谦. 柔性后缘可变形机翼的气动特性分析[J]. 中国高科技, 2019(13): 63-65.
- [24] Ricci S, Scotti A, Terraneo M. Design, manufacturing and preliminary test results of an adaptive wing camber model[C]. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th, Newport, USA, May 1-4, 2006.
- [25] Poonsong P. Design and analysis of a multi-section variable camber wing[D]. Maryland: University of Maryland, 2004.
- [26] Sofla A Y N, Elzey D M, Wadley H N G. An antagonistic flexural unit cell for design of shape morphing structures[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, USA, March 24, 2008.
- [27] Peel L D, Mejia J, Narvaez B, et al. Development of a simple morphing wing using elastomeric composites as skins and actuators[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(9): 091003.
- [28] Karali H, Yükselen M A, Inalhan G. A new non-linear lifting line method for 3D analysis of wing/configuration aerodynamic characteristics with application to UAVs[C]. AIAA SciTech 2019 Forum, San Diego, USA, January 7-11, 2019.
- [29] Gamble L L, Pankonien A M, Inman D J. Stall recovery of a morphing wing via extended nonlinear lifting-line theory[J]. AIAA Journal, 2017, 55(9): 2956-2963.
- [30] Paul R C, Murua J, Gopalathnam A. Unsteady and post-stall aerodynamic modeling for flight dynamics simulation[C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, National Harbor, USA, January 13-17, 2014.
- [31] Samuel B A, Mukherjee R. A study of the unsteady aerodynamics of a wing at high angles of attack using decambering to model separated flow[J]. Sādhanā, 2018, 43(8): 121.
- [32] Petrilli J L, Paul R C, Gopalathnam A, et al. A CFD database for airfoils and wings at post-stall angles of attack[C]. 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, San Diego, USA, June 24-27, 2013.
- [33] Shearer C M, Cesnik C E S. Nonlinear flight dynamics of very flexible aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(5): 1528-1545.
- [34] Chen Z J, Fu Z C, Lv J N, et al. Nonlinear flight dynamics of very flexible aircraft[C]. International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences. Springer, Tokyo, Japan, March 25-28, 2019.
- [35] Rao D V, Go T H. Perching trajectory optimization using aerodynamic and thrust vectoring[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 31(1): 1-9.
- [36] Chandra R. Active shape control of composite blades using shape memory actuation[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(5): 10-18.
- [37] Gürses E, Tunçöz İ O, Yang Y, et al. Structural and aerodynamic analyses of a hybrid trailing edge control surface of a fully morphing wing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(8): 979-991.
- [38] Yang S M, Roh J H, Han J H, et al. Experimental studies on active shape control of composite structures using SMA actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(8-9): 767-777.
- [39] Chopra I. Review of state of art of smart structures and integrated systems[J]. AIAA Journal, 2002, 40(11): 2145-2187.
- [40] Abdulrahim M, Lind R. Flight testing and response characteristics of a variable gull-wing morphing aircraft[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference And Exhibit, Providence, USA, August 16-19, 2004.
- [41] Ivanco T, Scott R, Love M, et al. Validation of the Lockheed Martin morphing concept with wind tunnel testing[C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, USA, April 23-26, 2007.
- [42] Barbarino S, Pecora R, Lecce L, et al. A novel SMA-based concept for airfoil structural morphing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5-6): 696-705.
- [43] Flanagan J, Strutzenberg R, Myers R, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the NextGen MFX-1[C].



- 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, USA, April 23-26, 2007.
- [44] Olympio K R, Gandhi F. Zero Poisson's ratio cellular honeycombs for flex skins undergoing one dimensional morphing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(17): 1737-1753.
- [45] Paradies R, Ciresa P. Active wing design with inte-grated flight control using piezoelectric macro fiber composites[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(3): 035010.
- [46] Abdullah E, Bil C, Watkins S. Application of smart materials for adaptive airfoil shape control[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, USA, January 5-8, 2009.
- [47] Bar-Cohen Y. Electroactive polymers: Current capabilities and challenges[C]. Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), International Society for Optics and Photonics, San Diego, USA, July 11, 2002.
- [48] Barbarino S, Dettmer W G, Friswell M I. Morphing trailing edges with shape memory alloy rods[C]. 21st International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Philadelphia, USA, November 2, 2010.
- [49] Vale J, Lau F, Suleman A, et al. Multidisciplinary design optimization of a morphing wing for an experimental UAV[C]. 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, USA, September 6-8, 2006.
- [50] Ricci S, Terraneo M. Application of MDO techniques to the preliminary design of morphed aircraft[C]. 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, USA, September 6-8, 2006.

## 作者简介:



孙 杨 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为仿生飞行器设计。



昌 敏 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为多域无人系统设计理论与方法。



白俊强 (1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器先进设计理论与技术。

[引用格式] 王 彤. 美国“海洋物联网”项目发展现状与关键技术分析[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 78-82.

# 美国“海洋物联网”项目发展现状 与关键技术分析

王 彤

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

**摘要:** 针对目前缺乏广阔海域的实时监测手段, 美国国防预先研究计划局(DARPA)为提升海上分布式态势感知能力, 发展了“海洋物联网”(OoT)项目。通过对相关资料的搜集、整理和分析, 首先给出项目目标、原理、计划等项目概况信息, 然后重点介绍了该项目的两项关键技术——浮标设计/开发和数据分析技术, 接着介绍项目合同授予、实验部署等进展情况, 最后分析该项目对推动海洋科学和军事进步的影响。研究表明, “海洋物联网”具有军民两用的优势, 既可促进海洋经济科学的发展, 又能利用全面态势感知支撑海上作战。

**关键词:** 海洋物联网; 海上态势感知; 分布式传感器网络; 低成本、智能化浮标; 数据分析

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2021)03-78-05

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2021.3.030

## Analysis of The Development Status and Key Technologies of The 'Marine Internet of Things' Project in The United States

WANG Tong

(Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA) has developed Ocean of Things(OoT) program to improve distributed maritime situational awareness in response to the current lack of real-time monitoring over vast ocean areas. Through combining and analyzing the related data of OoT program, firstly, project summary information is given, such as goal, principle, plan. Then, two key technologies of this program are introduced in detail, including float design/development and data analysis technology. After that, the progress of the project is introduced, for example, contract award, experiments and deployment information. Finally, the influence of this program on the advancement of marine science and military is analyzed. The research shows that the OoT has both military and civilian advantages, which could not only promote the development of marine economic and science, but also support maritime operations with comprehensive situational awareness.

**Key words:** Ocean of Things; Maritime Situational Awareness; Distributed Sensor Network; Low-cost, Intelligent Float; Data Analysis

### 1 引言

目前, 美国海洋态势感知主要依靠搭载传感器的舰艇和商船, 以及机载和星载遥感器, 海上雾、雨、云等的遮挡会对海洋态势感知产生不利影响。但由于缺乏对广阔海域的实时监测手段, 制约了海洋科学以及海洋军民事业的发展。为此, 美国国防预先研究计划局(DARPA)开展“海洋物联网”(Ocean of Things, OoT)项目, 计划通过部署大量低成本、环保、智能化海上浮标以组成分布式传感器网络, 实现对大范围海洋区域的持续态势感知<sup>[1]</sup>。

### 2 项目概况

2017年12月, DARPA 战略技术办公室发布“海洋物联网”项目的跨部门公告, 寻求先进的浮标和数据分析技术, 形成海上分布式态势感知系统。设想的整个系统由浮标、卫星通信系统、云端数据分析系统组成, 部署示意图如图1所示, 由这个系统生成并提供的高分辨率海洋观测信息, 一方面用于海洋科学研究, 提高对海洋生态的认知; 另一方面, 为马赛克战<sup>[2]</sup>研究和突破提供关键技术支撑, 从而获取海上军事情报信息, 如识别过往船只的航迹等。浮标部署示意图如图1所示<sup>[3]</sup>。

根据项目跨部门公告, 项目共分两个阶段进行, 第一阶段(2017—2019年)包括最初的浮标和数据处理方法的设计工作; 第二阶段(2019—2021年)将对浮标进行改进和细化, 最终实现1.5

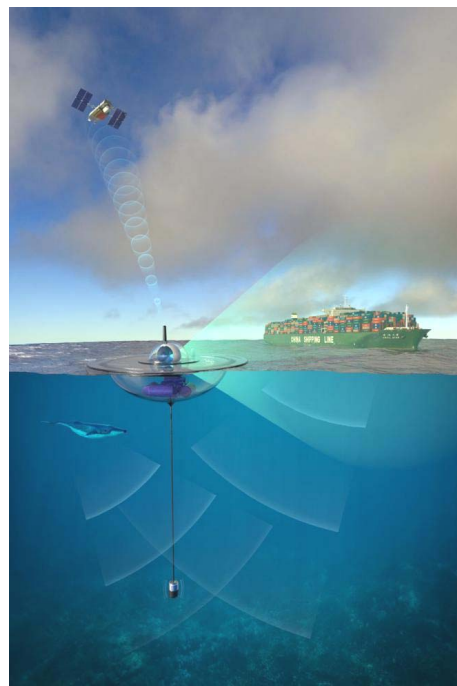


图1 浮标部署示意图

Fig. 1 Float deployment schema

万个浮标的海上演示试验。

### 3 项目关键技术

项目将重点研究两项关键技术, 一是浮标硬件设计, 二是浮标数据处理, 即让浮标上的计算系统将原始数据整理转化为一个个信息包, 通过卫星通信系统发送到岸上云系统中; 数据在云端需要被拆分、汇集, 利用机器学习等数据分析算法, 对采集到的海洋物理特性和海上活动情况进行解析, 分析结果最终纳入图形图像展示系统中演示, 如图2所示<sup>[4]</sup>。



技术领域1: 使用搭载不同传感器的智能浮标进行海洋环境监测

技术领域2: 数据分析处理以获得所需任务信息

图2 “海洋物联网”项目架构图

Fig. 2 Schematic showing Oceans of Things architecture

### 3.1 浮标设计和开发

浮标硬件的设计和开发需求主要包括以下几个方面<sup>[5]</sup>。

(1) 浮标由生物安全材料制成, 配备一系列水上和水下传感器。浮标设计大小约是 A 级声呐标的一半, 体量是 0.0014~0.0032 m<sup>3</sup>, 重 3.2~8.2 kg, 配备低成本全球定位系统 (GPS) 芯块、天线、惯性测量单元 (IMUs) 和各类传感器。摄像机、软件定义无线电、射频探测器和水听器作为任务传感器装在特定的浮标上, 用于探测和跟踪飞机、船只等的航迹。

(2) 浮标通过太阳能电池板和/或碱性电池为传感器和搭载的电子设备提供电力。浮标的间歇、被动采样也可节约电力消耗。

(3) 海洋物联网系统采用鲁棒、相对低带宽的卫星通信系统传输信息。由于在一个集中区域中有大量浮标, 每个浮标在消息长度和消息传递频率上都受到限制, 因此整个系统需要根据优先级对传感器数据进行选择性传输, 保证后续的数据分析工作。

(4) 浮标配有一定高度的沉没机制, 可由内部逻辑触发, 也可由操作员下达的沉没指令触发。每个浮标需要对周围环境进行至少一年的监测, 然后寿命耗尽安全地沉入海底。

(5) 浮标的设计和制造计划需满足大规模生产, 单个浮标的目标成本是 500 美元。海洋物联网项目可使用低成本、异构的智能浮标来完成多

种任务, 实现价格可承受的海洋态势感知。

### 3.2 数据分析技术

数据分析部分开发基于云计算的软件和分析技术来处理浮标的报告数据。云系统通过数据分析可以动态显示浮标的位置、自身状况和任务性能, 处理海洋和气象模型的环境数据, 还可以自动检测、跟踪和识别附近的船只, 并确定海洋活动一些新的指标。与基于岸上或高宽度传感器不同, 浮标传感器只传输必要的信息, 而且在传输前会进行压缩, 如图 3。

海洋物联网项目有三个不同的重点领域需要进行数据分析<sup>[6]</sup>: (1) 直接应用传感器记录值, 如浮标位置和环境/气象测量数据, 用于对浮标本身的指挥和控制, 可视化浮标的当前位置, 并对浮标在未来的位置进行预测; (2) 传感器数据的推断, 如测量和跟踪海洋环境中的物体 (船只、飞机和海洋哺乳动物等); (3) 数据挖掘、异常检测或已知现象的识别。

## 4 项目进展情况

自 2017 年项目启动, DARPA 就全面推进研发工作。

第一阶段中, 帕洛阿尔托研究中心 (PARC)、阿雷特协会和努穆鲁斯三家公司参与浮标竞争, 如图 4 所示, 施乐帕洛阿尔托研究中心 18 kg 的太阳能玻璃浮标获胜, 该浮标可装备大约 20 个传感器。研发团队采集了南加州和墨西哥湾大约 100



图 3 在非常有限的带宽上进行数据传输需要数据压缩

Fig. 3 Data compression during data transmission over very limited bandwidth





图4 “海洋物联网”三家公司浮标设计(浮标③获胜)

Fig. 4 Three companies' float designs of Ocean of Things program (float③ won)

个洋流浮标数据。2019年, 斯克里普斯海洋学研究所的研究人员为项目研制了一个高保真水听器原型, 作为浮标的传感器载荷之一<sup>[7]</sup>。关于后端开发, DARPA 与蕾杜斯、德雷珀实验室合作, 翱翔技术公司和几何数据分析公司帮助构建数据可视化、设备控制和性能预测所需的软件<sup>[8]</sup>。

2020年3月, DARPA 启动“海洋物联网”第二阶段工作。2020年7月, DARPA 授予帕洛阿尔托研究中心项目第二阶段开发合同, 要求在第一阶段开发的1500个浮标基础上, 再开发多达1万个更小更低成本的浮标<sup>[9]</sup>。目前, DARPA 正在南加州海湾和墨西哥湾对此类浮标进行测试。2020年11月, 北约海洋研究和实验中心(CMRE)宣布正在与DARPA 合作, 为项目设计浮标设备网络, 以监测整个海洋的态势。

目前, DARPA 计划第二阶段在南加州和墨西哥湾进行上千个漂浮阵列的测试。最初, 将每3 km 部署一个浮标。在保持覆盖范围的同时, 可以扩大到每20 km 部署一个浮标。未来将争取实现上万个浮标的部署工作。

部署地点在南加州湾地区, 如图5所示。该

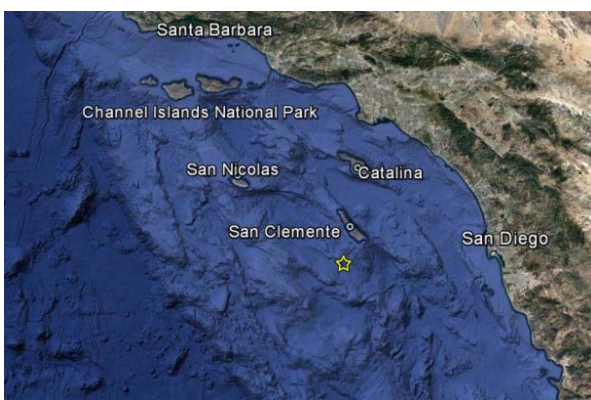


图5 南加州湾的浮标计划部署

Fig. 5 Floats to be deployed in Southern California Bay

地区拥有独特的地理位置、复杂的洋流、多样化的海上交通, 包括商业、军事和游船, 以及附近的相关科研设施。复杂的远洋和近岸洋流是一个主要挑战, 部署区域内的高分辨率洋流和海风预测模型为最初的部署和浮标的定期补充提供了重要位置信息。

## 5 影响分析

海洋物联网通过机器学习、云计算、大数据等高新信息技术, 可以提升海上侦察感知能力。

### (1) 促进海洋经济和科学的快速发展

海洋物联网项目强调在范围很广的海域部署高密度的浮标, 通过对浮标实时传感器数据进行分析和处理, 不但可以预测海洋环流、校准卫星测量数据、跟踪研究海洋动物, 还可以全天候监视船只、舰艇, 获得其航迹等基本情况信息。通过对海洋资源的动态管理, 创新海洋科学技术, 充分利用海洋的隐形优势, 推动海洋科学进步, 以保持美国海洋优势。

### (2) 提升海上战场态势感知能力

英国国防海上力量专家西德哈斯·考沙尔曾表示, 该项目分散部署的浮标传感器可以进行持续24 h 全天候监视, 这是海上巡逻机或合成孔径雷达卫星所不能做到的, 符合马赛克战概念。还将有效支撑 DARPA 跨域海上侦察与瞄准(CdMaST)项目, 通过利用海洋物联网能力在广域、跨域(海下、海面、海洋上空)监视与瞄准敌方舰艇、潜艇, 提升战场态势感知能力, 辅助指挥员快速正确决策, 提高跨域侦察打击能力, 掌控大片有争议海域, 进而支撑“马赛克战”概念的实现。



(3)其军民两用性将带来独特的威胁和挑战。“海洋物联网”项目公开的文献很少提及军事化应用,大部分都是民用方面的好处,如监测非法船只。但 DARPA 明确提出该项目是支撑“马赛克战”的重要组成部分,说明美国很有可能利用项目成果辅助军事行动。若美国以民用的名义在潜在冲突地区的公海海域广泛部署大量浮标,对他国实施长期、隐形的海上监视侦察,则将给对手国家带来极大的威胁,因此应密切跟踪和研究该项目的技术进展、试验和部署情况。

(4)启发我国“海洋物联网”建设和对抗思路

借鉴美“海洋物联网”项目建设思路,积极布局推动我国海洋科学发展并采取有效对抗措施。一方面,重点开发环保、可携带摄像机、水听器等多重载荷且隐蔽的浮标;发展云端数据平台,收集存储浮标数据,并充分利用人工智能、机器学习和大数据对海洋数据进行分析处理,以提供实时海上态势图像;开发先进海上网络通信技术,保证信息在浮标及云端之间的稳定传输。通过构建军民两用的海洋物联网,可更全面地掌控海上态势信息,提升作战效率;还可检测非法船只、跟踪研究海洋动物,促进海洋科学的进步。另一方面,开展海上浮标对抗措施研究,例如利用电子干扰等手段对浮标网络实施压制/欺骗,或利用入侵其网络并触发海上沉没机制。

## 6 结束语

本文通过研究 DARPA 开展的“海洋物联网”项目,分析美国对于构建海上分布式监视侦察网络的思路。项目通过开发低成本浮标对海洋数据进行收集,并开发先进的数据分析技术对数据进

行解析,以掌控广域海洋态势。目前,项目进展顺利,已进入第二阶段。海洋物联网一旦成功部署和构建,将大幅提升美国广域海洋的实时监测和追踪能力。

## 参考文献

- [1] DARPA. DARPA Ocean of Things[EB/OL]. 2017[2021]. <https://oceanofthings.darpa.mil/>.
- [2] 郭行,符文星,闫杰.浅析美军马赛克战作战概念及启示[J].无人系统技术,2020,3(6):92-106.
- [3] DARPA. DARPA awards Xerox Parc a contract for the next phase of the Ocean of Things project[EB/OL].2020[2021]. <https://iotbusinessnews.com/2020/10/22/60216-darpa-awards-xerox-parc-a-contract-for-the-next-phase-of-the-ocean-of-things-project/>.
- [4] John W, Leslie B. Ocean of things-affordable maritime sensors with scalable analysis[C]. Oceans 2019 Conference, Marseille, France, June, 2020.
- [5] DARPA. Broad Agency Announcement Ocean of Things [EB/OL]. 2017[2021]. [https://research-authority.tau.ac.il/sites/research.tau.ac.il/files/DARPA\\_HR0011-18-S-0013\\_Ocean\\_of\\_Things.pdf](https://research-authority.tau.ac.il/sites/research.tau.ac.il/files/DARPA_HR0011-18-S-0013_Ocean_of_Things.pdf).
- [6] DARPA. Broad Agency Announcement Ocean of Things Phase 2 Data Analytics[EB/OL]. 2020[2021].<https://www.darpa.mil/attachments/HR001120S0042.pdf>.
- [7] David H. DARPA progress with Ocean Of Things all-seeing eye on the high seas[EB/OL].2020[2021].<https://www.forbes.com/sites/davidhambling/2020/08/13/darpas-ocean-of-things-is-an-all-seeing-eye-on-the-high-seas/?sh=4197e63f2709>.
- [8] DARPA. “海洋物联网”项目进入第二阶段[EB/OL]. 2020 [2021]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-xRD2CPnePKelPueu-wlybw>.
- [9] Larry D. Darpa awards Xeroxs Parc another oceans of things contract[EB/OL].2020[2021]. <https://www.zdnet.com/article/darpa-awards-xeroxs-parc-another-oceans-of-things-contract/>.

作者简介:



王彤,(1992-),女,硕士,工程师,主要研究方向为无人系统、人工智能和新型作战概念领域情报分析。



# 征稿启事

## 《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、西北工业大学无人系统发展战略研究中心、西北工业大学无人系统技术研究院联合协办的学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

### ◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

### ◆ 投稿方式

通过期刊采编系统进行投稿，网址：<http://umst.cbpt.cnki.net/>，或直接搜索“无人系统技术”。

### ◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学 / 工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论 / 结果的合理可信性和写作质量。

2. 投稿时须提交电子版“保密审查证明”，稿件正式录用后请将“保密审查证明”“版权转让协议”原件邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074，电话：010-68191488。

### ◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要在 250 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。

2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。图、表应提供中英文图题、表题。

3. 参考文献引用应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 20 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。

4. 需提供全部作者简介，内容包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、照片等。

### ◆ 关于稿酬

暂不收取版面费、审稿费，稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

# 无人系统技术

WUREN XITONG JISHU

(双月刊 2018年创刊)

第4卷第3期 2021年5月

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

(Bimonthly)

(Started in 2018)

Vol.4 No.3 May 2021

主管单位：中国航天科工集团有限公司

主办单位：北京海鹰科技情报研究所

协办单位：中国无人系统产业联盟（筹）

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编：张冬青

副 主 编：蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编：王一琳

编辑出版：《无人系统技术》编辑部

地 址：北京7254 信箱4 分箱（100074）

电 话：010-68191488（编辑部）

010-68375084（发行部）

邮 箱：chinauas310@163.com

网 址：<http://umst.cbpt.cnki.net>

国内发行：北京海鹰科技情报研究所

印刷单位：北京博海升彩色印刷有限公司

Administrated by:China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by:Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Co-organized by:Association for Unmanned Vehicle Systems of China  
Research Center for Unmanned System Strategy  
Development, NWPU  
Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief:ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncaï SUN Baiyuan LI Dongguang CHEN Shaochun

Executive Editor:WANG Yilin

Edited&Published by:Editorial Office of Unmanned Systems Technology

Add:P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68191488 (Editorial office)

(8610) 68375084 (Circulation office)

E-mail:chinauas310@163.com

Website:<http://umst.cbpt.cnki.net>

Distributed by:Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co.,Ltd.

本期责任编辑：籍云方

ISSN 2096-5915  
CN 10-1565/TJ

国内定价：30 元 / 期