

# 无人艇集群协同及编队问题研究

刘升<sup>1</sup>, 杜鹏<sup>2</sup>, 郑婷婷<sup>1</sup>, 周健<sup>2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司, 中国 北京 100097; 2. 天津大学海洋科学与技术学院, 中国 天津 300072)

**摘要:** 随着近年来智能技术和机器人技术的发展, 水面无人艇的研究取得了较大的进步。无人艇集群的协同与编队技术是其能够高效完成任务的关键, 也是当前研究中的难点问题。无人艇集群的协同与编队并不仅指无人艇数量上的简单增加, 而是一个涵盖控制、导航、通信等问题的复杂概念。因此, 本文针对无人艇集群协同及编队问题展开研究。首先, 本文介绍了无人艇的优势、特点及今后的发展方向。其次, 本文梳理了无人艇集群协同技术的关键问题, 包括协同导航、路径规划和任务分配。最后, 本文分析了无人艇编队技术当前存在的问题, 包括通信保障、队形控制和环境适应策略。

**关键词:** 水面无人艇; 集群协同; 编队控制; 智能体

中图分类号: U692 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 05—0139—04

随着自动化技术及通信水平的快速提高, 推动了水面无人艇智能化水平的不断进步。目前, 国内外众多学者已经针对无人艇开展了多样化的研究工作<sup>[1-3]</sup>。总的来说, 单个无人艇智能体的自主化水平已经相对较高, 能自主执行避障、环境感知、路径跟踪等任务。但是针对大范围搜救、军事巡航护航、协同编队等问题, 单艇通常难以满足工作要求, 因此需要多艘无人艇的协同配合来共同完成任务。相对于无人艇单体而言, 无人艇集群具有工作空间上的分布性、执行任务的并行性、较高的可靠性、较强的容错能力及更高的执行效率等优点; 同时对无人艇集群协同的研究能进一步提高无人艇的智能化水平。本文首先分析了无人艇的优势、特点以及当前不足, 在此基础上提出了无人艇集群协同的关键问题, 最后针对集群协同中的编队问题作出了详细探讨。

## 1 无人艇的发展现状分析

水面无人艇是能够在海洋、河流、湖泊等环境中自主完成任务的平台, 是无人驾驶技术在水面环境中应用的最主要体现之一<sup>[4]</sup>。无人艇可通过搭载如IMU (Inertial Measurement Unit)、激光雷达、红外相机、探测雷达、声呐等传感器来实现特定类型的任务, 无人艇的功能结构如图1所示。目前在海洋测绘、环境调查、海事搜救等领域, 无人艇已经发挥出了重要的作用。由于非载人的特点以及隐蔽性好、机动性强等优势, 无人艇在军事方面同样有着良好的应用前景, 可用于反潜作战、护航巡逻、抵近侦察等用途。

作为实现无人艇集群编队的前提和基础, 无人艇单

体需要具备环境感知功能、自主避障功能和路径规划功能。环境感知功能即利用自身携带传感器对海上的目标及自身的状态进行感知并作为决策的依据<sup>[5]</sup>。自主避障功能即根据无人艇的位置、运动信息以及环境感知的结果来判断无人艇与障碍物之间有无碰撞风险并自主采取避障措施的能力。路径规划功能是指根据自身所处位置和给定的目标点位置能够自主规划最优航线的能力<sup>[6]</sup>。以上几项为无人艇单体应具备的基础功能, 也是实现集群协同的保障。

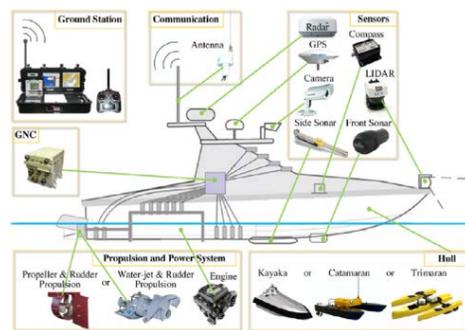


图1 无人艇的功能结构

相比于陆地环境, 海洋环境更加复杂多变, 这给无人艇的应用带来了很大的挑战。与此同时, 无人艇在发展过程中也遇到了各种各样的问题有待解决。在无人艇的控制问题上, 由于无人艇运动学模型具有高度的非线性和不确定性, 同时无人艇系统欠驱动、船体本身执行机构具有时滞性等问题, 都直接影响到无人艇应用过程中的操纵性和安全性。由于海洋环境中高湿高雾、通信距离有限的特点, 给无人艇的通信也带来了不小的困难。上述这些问题在无人艇集群编队的研究中同样存在。

## 2 无人艇集群协同关键问题

随着无人机“蜂群”技术的逐渐成熟,无人艇集群也开始引起业界的关注。在无人艇集群问题上需要关注的特征主要有无人艇集群大小,即集群中无人艇的数量,是有限数量还是无限数量;无人艇集群合作是有意识合作还是无意识合作;集群中每艘无人艇的关系是分散式还是集中式或是二者混合;无人艇通信类型是显式通信还是隐式通信;群体组成是同类构成还是异类构成等<sup>[7]</sup>。从上述方面看,当前无人艇集群协同技术仍存在较多亟待解决的问题,包括如何实现更加高效稳定的多艇通信、更加简洁可靠的编队结构、更加完善的集群协同策略等。因此,本节将针对无人艇集群协同中的关键问题进行探讨。

### 2.1 协同导航

无人艇在执行任务时,通常需要精确的导航信息,也就是目标点的坐标、方位等数据。这些信息一方面需要岸基系统提供,另一方面还需要无人艇通过自身环境感知并实时计算得到。由于单艘无人艇搭载传感器的种类、感知范围和信​​息处理能力限制,因此需要无人艇集群进行协同导航<sup>[8]</sup>。首先每艘无人艇均要对自身的位置进行定位,定位方式可分为绝对定位和相对定位。绝对定位方式包括基于无线电的定位如GNSS、WIFI定位;声波定位如超声定位、水声定位;环境辅助导航如地形匹配、环境图像特征匹配。相对定位方式具体可分为本地测量及外感测量。其中本地测量是指根据初始状态和历史信息,估算当前位置,通常分为惯性导航、舵机推算、多普勒导航等。外感测量即借助某种技术估算自身相对于多机器人团队中其他机器人的位置,一般能够获得到相对距离、相对方位、相对航向等参数。

在每艘无人艇获取到自身位置数据后则可以进行协同导航,协同导航一般分为主从式和并行式。主从式即各无人艇上搭载的传感器精度有差异,主无人艇定位精度较高,从无人艇定位精度低。从属无人艇通过与主无人艇通信从而数据交换的方式来获取高精度的定位数据。这种协同导航方式拓扑结构简单,系统成本低,但对主无人艇的定位数据依赖程度较高,当主无人艇发生故障时,容易导致整个团队定位精度下降甚至定位失败。并行式导航即无人艇搭载设备的定位精度没有差异,因此不依赖某艘无人艇的定位数据。当一处通信节点发生故障或通信失败时,仍可保证其余无人艇的准确定位,

具有更好的鲁棒性。但去中心化的并行网络结构拓扑相对复杂,对传感器的精度要求更高。

### 2.2 路径规划

目前关于水面无人艇路径规划的研究较为成熟,无论是在算法仿真还是在实船验证方面。但是当无人艇集群进行路径规划时,则会出现一些问题。其中比较重要的是集群内部容易出现的规划冲突问题,即在路径规划过程中多艘无人艇可能在同一时刻到达同一位置导致碰撞。解决该问题的方法一般分为耦合式和解耦式路径规划方法<sup>[7]</sup>。耦合式路径规划方法即将多个无人艇视为一个整体,将多个无人艇中所有的自由度整合成一个自由度,对其进行搜索和规划,常用的方法有人工势场法(APF)、概率路线图法(PRM)、快速搜索随机数(RRT)。这种方法忽略了各无人艇自身的姿态变化和运动情况,通常具有较高的计算效率。解耦式路径规划方法则是对每个机器人进行独立路径规划,之后再通过冲突点协调的方式对多个独立路径进行调整和修改以解决路径间存在的冲突问题,常用的方法包括启发式算法、基于冲突的搜索算法、基于预留区域的方法。这种算法的计算量和复杂程度较高,但是所规划出的路径对解决编队内部冲突具有更好的效果。

### 2.3 任务分配

任务分配是集群协同问题中的最关键的步骤之一,上述的协同导航以及路径规划是实现任务分配的基础。任务分配是指将无人艇与任务之间以最佳的分配方式联系起来,实现集群队形变化次数最少、集群的移动路径最平滑、整体消耗的能量最低等优化目标。目前无人集群任务分配的主要方法有基于行为的分配方法、基于市场机制的分配方法以及基于群体智能的分配方法。基于行为的分配方法是通过不断搜索具有最大效益的无人艇与任务间的集合对,从而找到最佳的任务分配方法。该方法的优点是实时性、容错性和鲁棒性好;不足是只能得到局部最优解,无法实现全局最优解求取<sup>[9]</sup>。基于市场机制的分配方法是指集群中的各个无人艇之间通过信息交流从而完成任务的协商分配,因此这种方法对通信资源的要求较高且要求任务和无人艇状态已知。这种任务分配方法适合在任务和机器人状态值可知的中小规模异构集群中进行分布式问题的协作求解,从而实现全局最优任务分配。基于群体智能的分配方法包括近些年兴起的蚁群算法、细菌觅食法等,此类方法仿照生物群体

协作的特性, 同样取得了较好的效果。

### 3 无人艇的编队问题研究

编队协同控制是指无人艇编队按照特定的几何构型执行动作, 控制的重点包括编队构成、重构、队形保持以及自主变换。对无人集群编队问题的研究主要通过三个方面展开, 分别是通信问题、队形控制以及环境适应。

#### 3.1 编队中的通信问题

编队中通信是实现群体感知和信息共享的有效途径, 高效稳定的通信更加有利于指令的交互和队形的控制。通信一般可分为集中式通信、分布式通信和分散式通信。集中式通信是系统存在控制中心, 所有无人艇的指令均发送至中心并接受控制指令, 进而达到高效的控制效果。这种通信方式精度较高, 但对控制中心的要求多、鲁棒性相对较差。分布式通信是每艘无人艇只需要和邻近的无人艇通信进而协作完成编队。这种通信方式降低了对控制中心的依赖, 鲁棒性好。但是通信系统的结构较为复杂, 控制精度也相对较差。分散式通信方法是无人艇集群中不存上述两种通信方式, 只是通过编队中特定的相对关系来保持队形<sup>[10]</sup>。目前在无人艇编队通信中使用比较多且技术成熟的是集中式通信, 但是从鲁棒性和拓展能力看, 分布式通信具有更好的应用前景。

#### 3.2 编队队形控制

队形控制是无人集群编队中的一项重点研究内容, 目前常用的编队控制方法包括领导者-跟随者法、虚拟结构法和基于行为法等<sup>[11]</sup>。领导者-跟随者法是将编队内一个或多个成员定义为领航者, 其余成员定义为跟随者。领航者沿着指定的规划路径航行, 跟随者在航行过程中始终要与领航者保持一定的角度的距离<sup>[12]</sup>, 如图2所示。这种编队方式的控制精度较高, 但对领航者的依赖性较强, 因此整体的鲁棒性较差。虚拟结构法是将编队虚拟为一个刚性结构体, 根据各成员相对于结构参考点的位置进行个体控制律的设计, 从而将各无人艇的运动控制转化为虚拟结构体的控制, 使无人艇编队整体保持刚性运动。这种编队方法脱离了对领导者的高度依赖性, 但是由于需要对编队中的每一个成员进行单独的控制律设计, 导致系统整体的复杂度提高、实用性较低。基于行为法的编队方式是通过为编队中所有的成员规定各种行为, 通过执行规定的行为来保持期望的编队队形。

这种行为可能包括轨迹跟踪或临近船只跟踪、避碰或避障、队形保持等。目前在实际应用中采用的大多数还是固定队形, 尚未能做到对队形的任意变换。

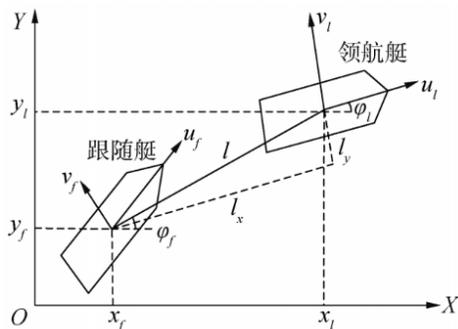


图2 领导-跟随者法相对运动示意图

#### 3.3 环境适应策略

环境适应即是航行环境中的不确定性以及与环境交互, 如通信故障、路径规划中遇到障碍物。目前在集群航行中遇到通信故障时默认的方法还是在不做任何处理, 但怎么能更好地解决故障目前尚未获得有效的方法。另一个重要的环境适应策略研究即是对避障控制的研究, 指在规划好的路径中遇到障碍物时, 如何根据原始路径信息和障碍物信息计算得到有效的避障路径<sup>[13]</sup>。目前无人艇单艇避障中常使用人工势场法计算, 但无人艇集群编队问题中要确定编队任务的优先级是否大于障碍物的优先级, 即是要确定避障时解除编队队形, 还是以编队的形式绕开障碍物。事实上, 环境适应问题是无人集群在应用中存在的重要问题, 目前绝大多数集群协同的研究仍停留在理论阶段, 对环境适应性的研究还相对较少。

### 4 结束语

无人艇集群协同是一个复杂的科学问题, 涉及到多学科、多领域的知识融合。本文对无人艇集群协同及编队问题展开讨论。首先详细介绍了无人艇的特点以及无人艇发展过程中遇到的瓶颈问题。分析了无人艇集群协同的关键问题, 包括协同导航、路径规划和任务分配。研究了无人艇编队中存在的主要问题, 包括通信问题、队形控制问题以及环境适应策略等。本文对无人艇集群协同中的关键问题进行了梳理, 有利于相关研究学者了解或加深对其的认识。

# 玉京山隧道施工组织动态管控研究

邓明高

(中铁五局集团有限公司, 湖南长沙 410007)

**摘要:** 玉京山隧道是成贵铁路上一座单洞双线客运专线长大隧道, 穿越瓦斯突出煤层、巨型溶洞、岩溶发育、破碎富水及浅埋等多种不良地质, 周边环境复杂, 施工难度大, 安全风险高, 工期紧张。施工中, 通过对施工组织制约因素分析, 实施施工组织方案调整, 开展管控对策研究, 经攻坚克难, 安全完成了该隧道施工任务, 确保了全线按期开通运营, 可为类似工程提供参考。

**关键词:** 铁路隧道; 瓦斯突出; 穿越巨型溶洞; 反坡富水; 施工组织管理

**中图分类号:** U45      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2022) 05—0142—04

随着高速铁路建设纵深推进, 越来越多的长大复杂地质条件隧道不断出现。如何保证隧道安全按期建成, 对参建单位提出更高要求; 若施工组织不当, 将影响隧道如期建成, 甚至制约全线按期开通运营。本文结合玉京山隧道穿越煤系地层、岩溶发育、破碎富水等不良地质情况, 以及复杂的周边环境, 分析制约施工组织的主要因素, 阐述施工组织方案调整与施工组织管控对策, 望为今后类似长大复杂隧道施工组织提供有益参考。

## 1 工程概况

成贵铁路玉京山隧道为客运专线单洞双线隧道,

进口里程 D3K277+860, 出口里程 D1K284+164, 全长 6306m, 30%单面上坡, 最大埋深约 350m。该隧道位于云南省威信县境内, 出口位于县城, 隧址区为中山地貌, 地质条件复杂多变, 穿越煤系地层、巨型溶洞、岩溶发育、破碎富水、浅埋等不良地质段落, 为极高风险隧道, 是全线重难点控制性工程。

为加快施工进度, 兼顾施工通风等问题, 结合地形、地质条件, 隧道采用“进口平导+中部(D3K280+700)横洞”的辅助坑道方案, 采取进口、横洞、出口 3 个工区组织施工, 设计指导性施工组织如下表 1 所示。

## 参考文献:

[1] 金克帆, 王鸿东, 易宏, 等. 海上无人装备关键技术与智能演进展望 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 1-8.

[2] 张晓东, 刘世亮, 刘宇, 等. 无人水面艇收放技术发展趋势探讨 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 50-57.

[3] LIU L, WANG D, PENG Z H. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 625-632.

[4] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望 [J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.

[5] 王伟嘉, 郑雅婷, 林国政, 等. 集群机器人研究综述 [J]. 机器人, 2020, 42(2): 232-256.

[6] 秦梓荷. 水面无人艇运动控制及集群协调规划方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2018.

[7] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述

[J]. 无人系统技术, 2020, 3(02): 1-8.

[8] 胡建章, 唐国元, 王建军, 等. 水面无人艇集群系统研究 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(4): 83-88

[9] 张崙, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展 [J]. 智能系统学报, 2008, 3(2): 115-120.

[10] 郭今戈, 卫鸿婧. 集群无人机通信控制方式 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 122-126.

[11] Gazi V. Swarm aggregations using artificial potentials and sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1208-1214.

[12] 周卫东, 刘一萌, 查羊羊. 抗时滞无人艇编队队形控制及变换 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(11): 1865-1869.

[13] Shen H, Hashimoto H, Matsuda A, et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 268-288.-