

doi: 10.7690/bgzd.2025.05.022

基于 ABMS 的无人两栖作战车系统需求分析与仿真

孙 雪^{1,2}, 王东辉^{1,2}, 占正勇^{1,2}, 刘文金^{1,2}, 崔玉伟^{1,2}

(1. 航空工业西安飞行自动控制研究所飞行控制系统部, 西安 710065;

2. 飞行控制航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 针对未来战争对无人系统的需求不断增加, 提出一种适用于狭小空间和复杂环境的新型无人系统——两栖无人作战车系统, 同时具备地面行驶、墙面爬行、空中飞行和协同作战能力。采用基于 Agent 的建模与仿真(agent-based modeling and simulation, ABMS)方法, 在分析其应用任务场景的基础上, 通过构造任务场景、桌面模型、仿真验证, 深入分析两栖无人作战车系统应具备的功能, 并根据分析结果提出所需解决的关键技术。结果表明: 该系统对扩展无人系统任务环境、提升自主作战能力有着重要意义。

关键词: 无人系统; 任务场景; ABMS 方法; 仿真推演

中图分类号: V279+.2 **文献标志码:** A

System Requirements Analysis and Simulation of Unmanned Amphibious Combat Vehicle Based on ABMS

Sun Xue^{1,2}, Wang Donghui^{1,2}, Zhan Zhengyong^{1,2}, Liu Wenjin^{1,2}, Cui Yuwei^{1,2}

(1. Flight Control Systems Division, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the increasing demand for unmanned systems in future wars, a new type of unmanned system suitable for narrow space and complex environment, amphibious unmanned combat vehicle system is proposed, which has the capabilities of ground driving, wall crawling, air flight and cooperative combat. The Agent-based modeling and simulation (ABMS) method is used to analyze the functions of the amphibious unmanned combat vehicle system by constructing the task scenario, desktop model and simulation verification based on the analysis of its application task scenario. According to the analysis results, the key technologies needed to be solved are put forward. The results show that the system is of great significance to expand the unmanned system mission environment and enhance the autonomous combat capability.

Keywords: unmanned system; mission scenario; ABMS method; simulation deduction

0 引言

在未来战争中, 无人地面车辆可以代替人在危险区域进行侦查、巡逻^[1]。最初研制无人车的目的是帮助士兵进行爆炸物清除, 在城市作战中, 士兵进入环境复杂的建筑物中时, 常会遭到武装分子和隐蔽炸弹的攻击^[2]; 因此, 在作战部队行动之前, 使无人车预先进入作战区域, 能有效避免人员伤亡, 提高执行任务的效率和安全性。

随着无人技术的快速发展, 未来战争对无人系统的要求越来越高, 特别是对于城市这种环境复杂的战场, 障碍物多, 无人机难以有效避障, 且在空间较小的环境内, 无人机在空中飞行易被发现。无人车在地面行驶速度较慢, 且对复杂环境内的一些障碍物难以越过^[3]。未来陆军很可能面临城市作战、边境山地丛林作战等。而在城市作战以及反恐作战中, 能够及时获取战场信息、争取信息主动权尤为

重要; 因此, 需要一种体积小、功能强大, 能够搭载侦察设备、炸药等物品的小型无人系统, 能够在建筑群中穿梭往来, 能够长期栖息在目标区域, 执行作战任务。这类无人系统强调的是低空、低速性能以及具备垂直起降和悬停的功能, 且能够长时间工作。

针对上述问题, 笔者提出一种具有地面行驶、墙面爬行和空中飞行功能的两栖无人作战车, 它具有以下功能特点:

1) 既能近距离战术侦察, 又能大范围阵地侦查和路线侦察;

2) 既能在城市街道执行任务, 又能在地下、室内等狭小空间执行任务;

3) 可爬越、飞越障碍物, 体积小, 机动性强, 起飞和降落所需空间较少, 在障碍物密集环境下仍具有较高可操作性, 具备良好避障功能;

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-09-26

第一作者: 孙 雪(1999—), 女, 陕西人, 硕士。

4) 克服了无人机巡航耗电量大、无人车运动易受限制的缺点^[4], 能穿越不同地形, 适用于多种复杂环境下的侦查探测;

5) 两栖无人作战车系统具有信息融合和协同作战能力。

两栖无人作战车功能齐全, 应用场景较多, 笔者将基于 Anylogic 软件, 针对 Multi-Agent 进行作战任务场景建模与仿真, 并分析其所需关键技术。

1 作战场景分析

2022 年 2 月 24 日俄乌冲突爆发, 其中乌东的马里乌波尔是俄方动用兵力、武器装备最多, 攻防对抗时间最久的地区。俄方在马里乌波尔作战主要分为 2 阶段: 1) 城市围攻作战。城市作战的特点是街巷纵横, 建筑物高大、密集, 军民混杂, 障碍物较多, 容量有限, 不适宜大规模机械化装备展开, 寻找目标困难, 给作战带来诸多不便, 利“守”不利“攻”。2) 亚速营钢铁厂攻坚战。亚速营钢铁厂内部设施复杂, 防御设施完备, 可储存大量物资与人员, 易守难攻。俄方作战条件恶劣, 导致在第 1 阶段的城市围攻中, 出现大量的装备损失、人员伤亡。为避免更多损失, 第 2 阶段的“堡垒攻坚”战中, 只围而不打。现有装备, 如各类无人机、无人车等, 能够通过空地联合火力攻击, 无死角清除地面目标, 但在亚速营钢铁厂这种“堡垒”内无有效手段清除目标, 特别是隐蔽武装力量难以清除, 容易造成重大伤害。

笔者提出的两栖无人作战车系统适用于以上场景, 可在恶劣环境下执行任务, 它的典型作战场景包括大范围立体式侦察、情报搜集、隐蔽武装力量侦察与杀伤等。

1.1 大范围立体式侦察、情报搜集

笔者所提两栖无人作战车系统具备两栖作战能力, 能携带侦察设备(摄像头), 进行侦察任务。同时具备通信中继功能, 可向外传递信息, 并且多个 Agent 之间可以进行信息交互, 为协同作战提供决策所需信息, 创造作战优势条件。

两栖无人作战车长度、宽度均不超过 80 cm, 体积小, 与单一的地面车辆、爬墙机器人以及无人飞行器相比, 其机动能力和隐蔽能力更强, 不易被地形所困并且机动速度更快。双旋翼的结构使得两栖无人作战车续航时间更长、工作效率更高。

两栖无人作战车具备地面行驶、墙面爬行和空

中飞行功能, 凭借其隐蔽能力强、续航时间长、机动速度快、协同作战等特点以及自身所携带的侦察设备, 可实现复杂狭小空间内的大范围立体式侦察和情报搜集, 侦察场景如图 1 所示, 为实现后续爆破杀伤任务创造了优势条件。

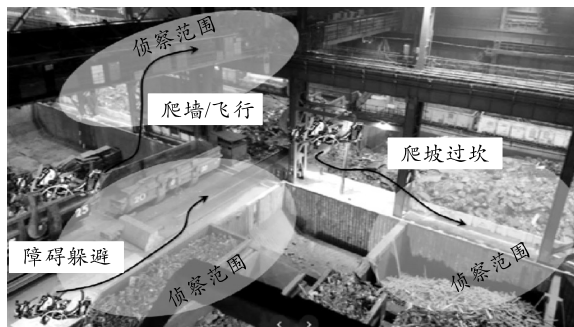


图 1 两栖无人作战车侦察作战场景

1.2 隐蔽武装力量侦察与杀伤

两栖无人作战车可进行大范围侦察和情报搜集, 也能携带自杀式弹药, 通过导航、制导和控制技术, 能实现隐蔽侦察、自杀式袭击和击毁目标功能。

前文提到的亚速营钢铁厂地下环境复杂, 存在隐蔽士兵、隐蔽炸弹等目标, 贸然进入只会造成大量装备损失和人员伤亡。俄方为避免更多损失, 只围而不打, 这种作战方式时效性极低, 消耗大量的时间成本。

在士兵进入复杂作战环境之前, 让多个两栖无人作战车进入作战空间, 单体自主作战与多体协同作战并行, 可对敌方隐蔽士兵、隐蔽炸弹等武装力量进行侦察和打击。两栖无人作战车系统主要作战方式有侦察、杀伤多平台协同和侦察、杀伤一体化, 侦察到敌方目标后, 使用携带的高能弹药对目标进行自杀式袭击, 完成作战任务, 如图 2 所示。

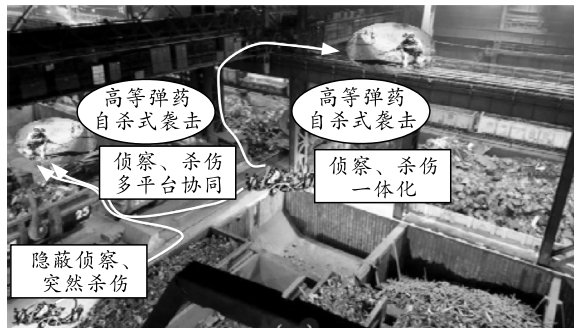


图 2 针对隐蔽武装力量的侦察和杀伤场景

2 无人作战车系统功能设计

无人作战是未来战争的主要模式, 目前国内外相关机构和学校已研制出各种类型的无人系统, 但

针对障碍物多的城市环境以及室内狭小空间的侦察与打击缺乏有效手段。

2.1 方案设想

根据前文的作战场景分析,提出作战场景:以多辆两栖无人作战车为例,多辆无人作战车搭载在同一个母舰上形成组合体,分别携带不同载荷进入地下狭小空间执行作战任务。无人作战车所携带载荷有武器载荷(炸药、枪弹等)、光电载荷、通信载荷等,多辆作战车协同作战,搜寻并击毙敌方目标。整个任务执行过程如图3所示。

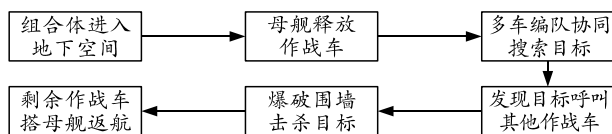


图3 无人作战车任务执行过程

根据作战场景可分析得出无人作战车应具备的基本功能:

- 1) 两栖无人作战车,既能在地面行驶,又能在空中飞行,机动性和隐蔽能力强;
- 2) 多车协同,提高整个系统的作战能力,降低执行任务的时间和能量消耗;
- 3) 多种载荷,多个无人作战车携带通信、光电、武器等载荷,实现不同作战功能;
- 4) 一定的续航能力,体积小,质量轻,耗电量低。

为验证无人作战车系统的设计方案是否适用于作战场景,笔者采用 ABMS 方法对无人作战车系统在场景下的运行进行仿真验证,为实际产品开发奠定基础。ABMS 是一种采用许多相互之间具有复杂交互行为的自治 Agent 对系统进行描述和抽象的建模仿真方法^[5-6]。ABMS 方法通过多智能体行为、相互关系、智能体与环境的交互关系来描述复杂系统行为,被认为是研究复杂系统最具活力的仿真方法。

一个基于 Agent 的模型由个体 Agent 组成,Agent 概念最早源于分布式人工智能,融合了计算机科学领域中多种学科的理论和技术,包括人工智能、面向对象技术、分布式计算、计算机安全技术等^[7]。同时,Agent 建模与仿真广泛应用于应急救援、信息传播、交通等多个领域^[8]。

2.2 体系建模

2.2.1 两栖无人作战车 Agent 模型

建立两栖无人作战车 Agent 的模型结构如图4所示。两栖无人作战车 Agent 的模型主要包括传感

器模块(视觉传感器)、通信模块、路径融合模块、任务分配模块、控制模块、运动模块、任务状态管理模块等,其中任务状态管理模块为核心控制模块。

作为核心控制模块的任务状态管理模块的内部为状态机模型,根据预先设定的作战策略构建状态和状态转移。其中状态转移是由各个功能模块的模式和参数激发,改变其他功能模块的模式或参数,即可改变 Agent 的行动。

任务开始时,两栖无人作战车系统按照初始任务规划到达指定区域,状态机开始工作,使用视觉传感器对作战环境进行搜索与侦察,识别到敌方目标时,通过通信设备告知其他 Agent,任务规划模块开始工作,对每个 Agent 进行任务分配和路线规划,实现击毁目标的目的。

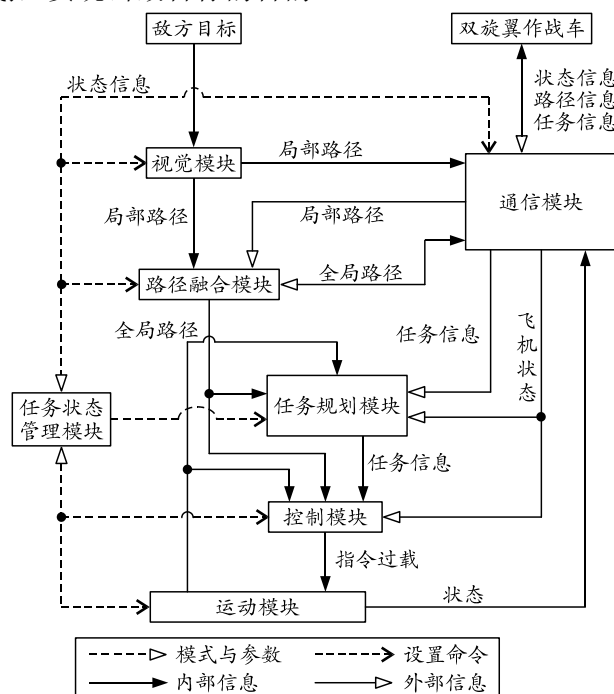


图4 两栖无人作战车系统 Agent 模型结构

2.2.2 母舰 Agent 模型

母舰 Agent 位置固定,根据初始任务规划到达指定位置后,不再移动,释放无人作战车后原地等待,完成作战任务的无人作战车返回搭载母舰,根据任务规划返回初始地点,不再建立母舰 Agent 模型。

2.2.3 多 Agent 场景模型

根据上文描述的作战场景,其中移动 Agent 包括两栖无人作战车 Agent 和母舰 Agent 2 个主要类别,文献[9]提出一种基于信息过程的 Agent 模型结构,文献[10]将信息的运动过程简称为信息过程,

归纳为获取、传递、认知和决策 4 个主要环节。根据此方法构建 Agent 模型, 可以更加充分地反映信息在作战过程中的变化, 以便于后续分析 Agent 功能实现所需的关键技术。

根据作战任务场景和作战策略, 两栖无人作战车系统的任务执行流程如图 5 所示, 母舰的任务执行流程如图 6 所示。

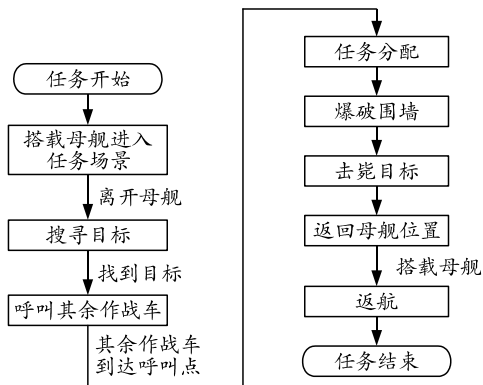


图 5 无人作战车系统 Agent 任务执行流程

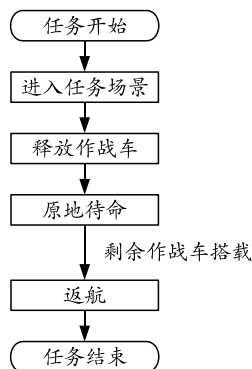


图 6 母舰 Agent 任务执行流程

以 4 辆无人作战车为例构造仿真任务场景, 作战开始时, 4 辆两栖无人作战车搭载母舰飞行潜入地下空间, 落地后母舰释放无人作战车, 母舰在原地待命, 4 辆无人作战车使用视觉传感器搜寻敌方目标, 其中某一辆无人作战车发现目标后, 呼叫其他 3 辆无人作战车, 通过任务规划模块进行路径规划和任务分配, 找到用时最短路径和自主避障前往敌方目标所在地, 之后指挥携带炸药载荷的无人作战车炸毁墙壁, 便于携带枪弹载荷的无人作战车进入房间击毙敌方士兵。完成作战任务后, 剩余无人作战车返回母舰所在位置, 搭载母舰返回。

Anylogic 软件是一种应用广泛的, 对离散、系统动力学、多 Agent 和混合系统建模和仿真的工具^[11]。笔者基于 Agent 模型在 Anylogic 软件中进行仿真验证, 由于仿真过程包含多辆两栖无人作战车 Agent, 以其中模型最复杂的作战车 Agent 为示例进

行展示。根据两栖无人作战车 Agent 模型和母舰 Agent 模型, 在开发平台中构建相应的 Agent, 如图 7 和 8 所示。

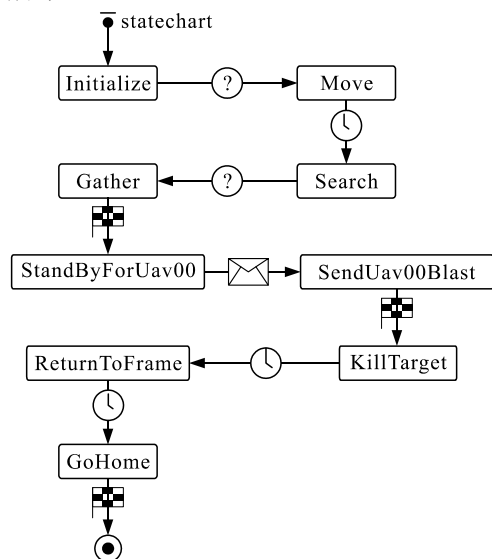


图 7 无人作战车 Agent 模型

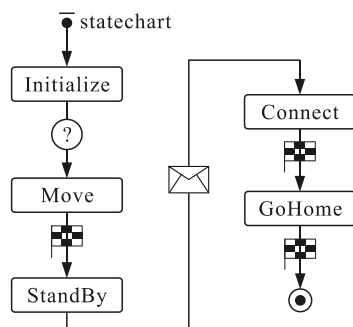
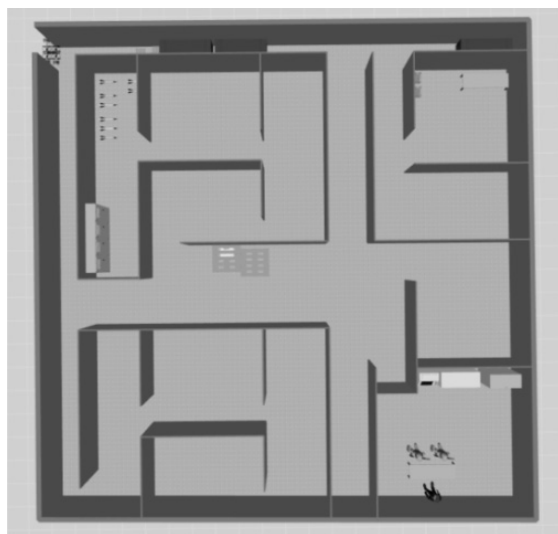


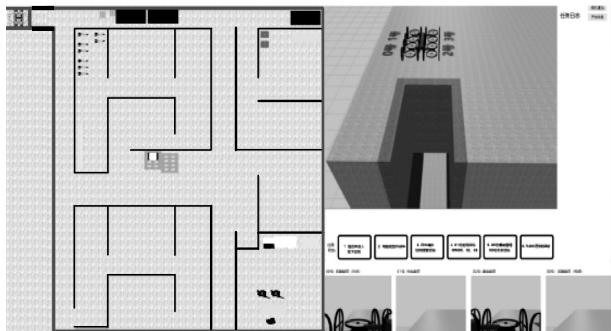
图 8 母舰 Agent 模型

3 任务场景仿真验证

笔者基于 Anylogic 开发的作战任务场景仿真演示界面如图 9 所示。



(a) 任务场景



(b) 仿真界面

图 9 作战任务场景仿真演示

根据仿真演示过程,多辆两栖无人作战车要完成击毁目标的任务,需要先进行侦察并对周围环境进行地图构建,搜寻到目标后,需要与其他无人作战车进行信息通信,每辆无人作战车接到信息后,需进行路径规划和任务分配,协同完成作战任务,击毁敌方目标,演示如图 10 所示。

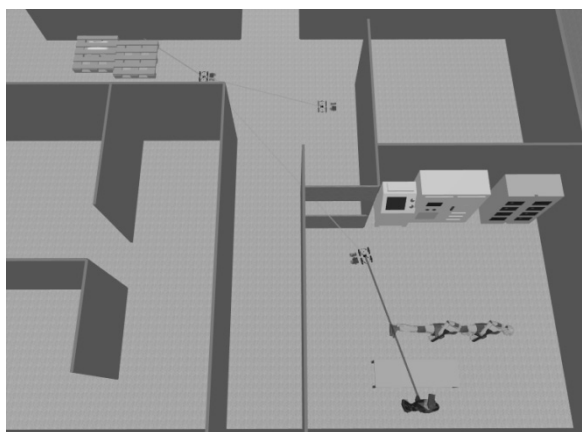


图 10 无人作战车击毙敌方士兵

根据示例任务场景以及两栖无人作战车 Agent 执行任务流程,在方案设想的基础上,分析得出两栖无人作战车还需具备以下功能:

1) 两栖无人作战车,可在地面行驶,也可飞越、爬越障碍物,考虑到多个无人作战车协同任务需求,地面/飞行等各个控制模式下的性能参数必须设计在一定的范围内,如行进/飞行速度,飞行高度,续航能力等;

2) 必须能携带多种载荷,包括光电载荷、通信载荷、武器载荷等,其中携带光电载荷可实现侦察环境,搜寻目标功能,携带通信载荷能与其他无人作战车进行信息通信,实现信息共享,携带武器载荷可执行击毁目标的任务;

3) 高效的任务分配,多个无人作战车协同任务过程中,面向目标任务的分解和决策,将是发挥多车协同战斗力的关键,任务分配方案的优劣直接影

响到作战行动效益的大小;

4) 全局和动态融合的路径规划,是实现无人作战车系统灵活性、机动性的核心,良好的路径规划算法不仅可以减少任务的完成时间,而且可以提高整个系统的鲁棒性和执行任务的灵活性。

仿真验证了两栖无人作战车 Agent 应具备的功能,与前文分析得出的两栖无人作战车应具备的基本功能一致,同时也证实了基于 Agent 的建模与仿真方法的有效性。

上述仿真只是针对一个具体任务场景进行的仿真,如果要完全论证出无人作战车系统的全部功能和性能,需要遍历所有场景。

4 需解决的关键技术

根据前文的作战任务场景仿真演示,能够反映出两栖无人作战车的机动能力和隐蔽能力更强,不易被地形所困。同时,两栖无人作战车小巧灵动,重量不超过 2 kg,长宽不超过 80 cm,适应未来无人作战需求,具有独特的作战优势。与地面机器人相比,增加飞行自由度,可以地面、飞行两栖运动。与四旋翼无人机相比,双旋翼低耗能,续航时间更长,效率更高,起飞和降落所需空间较少,在障碍物密集环境下也具有更大的使用安全性和灵活性。而多个两栖无人作战车协同作战可发挥群体优势,使整个系统有更高的任务执行效率,也可以应对更复杂的任务场景。

由于两栖无人作战车类似无人机与小车的结合体,质量与体积较小,且其系统复杂性较强,因此存在以下技术难点:

1) 由于两栖无人作战车体积小、质量轻,所以机械结构与电控系统研制很难;

2) 两栖无人作战车本体具有多变量、非线性、强耦合、易受干扰等特点,单个无人作战车本体动力学建模较难;

3) 两栖无人作战车本体具有多运动模态的特点,系统耦合严重,实现本体控制输入与控制模态的解耦控制较难;

4) 无人两栖作战车系统协同作战的复杂性高,需要将各项单一任务高度集成到益而高信息化系统中,包含多种学科的交叉综合,要实物上实现有很多需攻关的关键技术。

两栖无人作战车系统所需关键技术可总结为:单平台自主控制、多平台协同作战、机械结构与电控设计。

4.1 单个无人作战车自主控制技术

自主控制技术使得单个无人作战车具备自主行动的能力,无人作战车能自主判断作战任务场景内的环境,自主调整和控制自身行为,在通信中断情况下也能完成任务。同时,无人作战车搭载相关任务载荷能实现侦察、通信中继、爆破等功能,使两栖无人作战车成为智能化无人系统。为实现无人作战车自主控制能力,需要研究 3 维地图构建、自主导航、自主避障、目标跟踪、本体控制等技术。

4.2 两栖无人作战车系统协同作战技术

多平台协同作战技术影响了当前的作战体系,在保障自身安全的前提下,提高杀伤概率,最大限度地发挥出整个武器系统的威力。进行协同作战任务时,各个 Agent 要能排除干扰,在复杂条件下完成协同作战任务。为发挥出两栖无人作战车系统协同作战的优势,必须发展协同作战的策略、技术,如任务分配技术、航路规划技术、多 Agent 中继通信技术、数据融合技术等^[12]。

4.3 机械结构与电控设计技术

机械结构与电控设计影响 Agent 的质量、强度和灵活性。两栖无人作战车体积小、质量轻;因此,其机械结构设计要具备轻量化、高灵活的特点,车身需使用强度大、质量轻的材料,舵机、电机等选型需平衡质量、体积、扭矩等参数所占权重。控制系统要集成化、小型化,减轻整体重量。同时,集成电控模块还要搭载高精度灵敏传感器,提升姿态感知精度。

5 结束语

笔者提出一种具备地面行驶、墙面爬行和空中飞行能力的两栖无人作战车。它既适用于城市复杂环境,又适用于室内/地下狭小空间,能够在障碍物多的环境内穿梭往来,续航时间较长,可长期栖息在目标区域。两栖无人作战车系统通过信息共享和

协同作战,能够提高作战效率并发挥出 $1+1>2$ 的作战威力。

同时以设定任务场景为示例,基于 Anylogic 软件,构建示例任务场景,建立多 Agent 模型,进行作战任务场景仿真,根据仿真结果分析笔者提出的两栖无人作战车系统所需关键技术。目前,只针对一个场景进行仿真,随着作战样式和作战体系的多样化,对两栖无人作战车系统全部功能、性能、能源保证和关键技术的论证,还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] DANIEL A K. Robotic and autonomous systems strategy [EB]. US Army, 2018: 1-31.
- [2] 赫然. 无人车将改变城市战轨迹 [N]. 世界报, 2010-06-16(15).
- [3] 屈南, 李洪峰, 李赵建伟. 无人飞行车作战需求浅析[J]. 机器人技术与应用, 2020(5): 16-18.
- [4] 郭磊, 李波. 小型陆空两栖系统控制及模式转换[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1061-1067.
- [5] 李群, 雷永林, 侯洪涛, 等. 仿真模型设计与执行[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 1-40.
- [6] NORTH M. Managing Business Complexity Discovering Strategic Solutions with Agent Based Modeling and Simulation[M]. Oxford Press, 2007: 20-31.
- [7] 王鸽. 基于 Agent 的数据仓库技术[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
- [8] 张一丰, 刘宁, 杨琳, 等. Agent 行为建模与仿真研究的热点与趋势——基于 CiteSpace 图谱量化分析[J]. 电脑与信息技术, 2022, 30(3): 24-29, 40.
- [9] 张睿文, 宋笔锋, 裴扬, 等. 基于 ABMS 的飞机拦截作战效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 322-329.
- [10] 钟义信. 信息科学原理: 第 5 版[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2013: 1-35.
- [11] 周锦锋, 涂继超, 孙世岩. 基于 Anylogic 的舰炮装备保障性综合仿真平台[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(5): 117-123.
- [12] 辛亭. 多无人机协同作战关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.