

水上智能无人救援装备设计与工程验证研究

刘泽华 韩志勇 苏博宇 霍昱冰 章润霖

山东英才学院, 山东济南, 250104;

摘要: 针对复杂水域救援中“抛投不准、够不着、进不去”和救援人员近身作业风险高等问题, 本文面向小型化、快速部署与复杂环境适应需求, 设计并研制了一种水陆两栖智能无人救援装备。系统采用分层模块化思路, 将运动驱动、控制通信与任务执行解耦设计, 集成矢量推进、轮式两栖机构、折叠式快速充气救生单元与远程视频操控功能。为避免概念化论证, 本文以样机为对象开展工程验证: 在人工静水水域与浅滩环境下完成航速、转向、制动、跨介质切换、充气展开与连续运行测试, 并在水草与漂浮物干扰条件下评估通过性与故障模式。结果显示, 样机最大航速 3.1m/s、稳定巡航 2.3m/s; 原地姿态调整约 1.4s; 救生单元平均展开 2.5s, 额定承载 100kg; 累计连续运行超过 30h 未出现壳体渗水与结构性损伤。受限于推进器防护与能量密度, 高密度漂浮物区域仍存在短时阻滞与能耗上升现象。研究表明, 该装备可在保障操作者安全的前提下提升水域救援响应效率, 为小型无人救援装备工程化应用提供设计参考与验证依据。

关键词: 水域应急救援; 无人救援装备; 水陆两栖; 矢量推进; 快速充气; 工程验证

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.044

引言

水域突发事件具有突发性强、处置窗口短、环境不确定性高等特点。传统救援方式以人工抛投救生圈、救生绳/救生杆与有人舟艇接近为主。在急流、夜间、桥洞/涵洞遮挡、岸线破碎或水草漂浮物密集等条件下, 人工抛投精度受限且救援人员往往需要近距离进入危险区域, 存在二次伤亡风险。同时, 在城市内涝或浅滩交界地带, 有人舟艇机动受限, 救援“最后几十米”常成为瓶颈。^[5]

水面无人艇 (USV) 在测绘巡航、水文监测等领域已形成较成熟的技术路线,^[2]但救援任务对平台提出不同要求: 一是强调“快速部署”, 需要单兵或少人数携行与快速下水; 二是强调“精确接近与即时支撑”, 装备必须具备近距离机动能力并能迅速向落水者提供可靠浮力载体; 三是强调“复杂环境适应”, 包括水草缠绕风险、浅滩跨介质通行与遮挡环境下操控可靠性。现有救援型无人艇多偏向载荷/航程, 体积较大且功能侧重拖带, 难以覆盖上述需求。王磊等^[6]针对复杂水域应急救援场景开展了无人救援平台的设计与试验研究, 进一步验证了无人化装备在提升救援安全性与响应效率方面的优势。

基于此, 本文围绕小型化水陆两栖无人救援装备开展设计与工程验证, 重点在于: 以可实现的结构与系统集成方式满足“快、准、稳、安全”的救援目标, 并通过样机试验给出可复现的性能数据与问题边界, 从工程角度评估其应用价值与改进方向。^[6]

1 需求分析与总体方案

1.1 典型场景与指标提取

综合常见水域事故处置流程, 可将任务简化为: 快速抵近—建立浮力支撑—辅助牵引/等待后续转运。对应的关键需求包括:

- (1) 部署效率: 单兵可搬运、下水准备流程短;
- (2) 机动性: 狭窄水域可快速转向与精确靠近;
- (3) 近岸适应: 浅滩、积水路面可跨介质移动;
- (4) 安全性: 救援人员远离危险水域完成操控;
- (5) 可靠性: 在水草、漂浮物等干扰下保持可控与可恢复。

在可制造与可维护约束下, 本文将整机质量控制在于约 20kg 量级, 功能上优先保证“接近能力与救生单元可靠展开”, 并将侦察与环境感知扩展作为可选模块处理, 以避免系统复杂度失控。

1.2 系统分层与模块化思路

为提高工程可实现性与后续迭代效率, 系统采用三层划分:

- (1) 运动驱动层: 船体结构、推进系统、两栖机构;
- (2) 控制通信层: 主控、遥控链路、视频链路与状态监测;
- (3) 任务执行层: 快速充气救生单元与载荷舱 (可选)。

该架构将“机动平台能力”与“救生任务载荷”解

耦,便于在不重做整机的前提下替换救生单元或扩展功能载荷,也便于把测试结果映射到具体模块进行针对性改进。

2 关键结构与系统设计

2.1 船体与抗干扰设计

船体采用封闭式流线型结构设计,边缘圆滑过渡以降低漂浮物附着概率。样机迭代过程中发现,底部局部开口在细长水草环境下易形成“吸入—缠绕—阻滞”的耦合问题。为降低该风险,在进水与进线区域增设格栅防护并优化开口方向,使干扰物更易随流体带离而非卷入推进区域^[1]。尽管该改进在一定程度上增加了水阻,但在救援任务场景中系统可靠性优先级高于极限速度性能,综合权衡后予以采用。

2.2 矢量推进与低速机动

相较于传统固定桨推进方式,低速工况下固定桨转向效率明显下降,易产生较大转弯半径与“外摆”现象。本文采用双推进器布置并引入推力矢量调节机制,通过差速控制与角度调节组合实现姿态快速修正。工程实现中对推进角度进行限幅控制,以避免偏转过大导致有效推力分量下降而引发操控迟滞。靠近目标阶段采用小角度、高频微调策略,提高低速稳定性与控制精度。^[4]

2.2.1 矢量推进运动学模型分析

为定量分析矢量推进对平台姿态控制能力的影响,建立水面二维平面运动模型。设装备质心为O,纵向为x轴,横向为y轴,航向角为 θ 。双推进器推力分别为 F_1 、 F_2 ,推力偏转角为 α_1 、 α_2 ,推进器距质心横向距离为d。

系统在水平面内的动力学方程可表示为:

$$\begin{aligned} m\dot{v}_x &= F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 - D_x \\ m\dot{v}_y &= F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 - D_y \\ I_z \dot{\omega} &= d(F_2 \cos \alpha_2 - F_1 \cos \alpha_1) \end{aligned}$$

其中:

m为整机质量;

I_z 为绕垂直轴转动惯量;

D_x, D_y 为水动力阻尼项;

ω 为角速度。

由式可见,推进角度 α 的调节不仅影响纵向推力分量,同时直接影响横向分量及转矩输出。相比固定桨结构,矢量推进在低速区可通过小角度调节实现较大姿态修正力矩,从理论上解释了样机在低速靠近阶段表现出的快速姿态响应能力。

2.3 快速充气救生单元

救生单元采用折叠收纳与高压气体瞬时释放方式,目标是在接近落水者后尽快提供稳定浮力平台。为避免

夸张论断,本文将承载能力定义为“在静水条件下,目标质量加载后平台保持稳定浮姿且无持续泄漏的能力”。样机在高载荷测试中出现轻微侧倾,说明浮力布局与重心匹配仍需优化。基于安全冗余原则,本文将额定承载设定为100kg,并在结论中明确其适用边界。

2.4 控制通信与远程操控

水面无人救援平台在复杂水域环境中的核心挑战在于抗干扰能力与精细机动控制能力^[7]。救援强调人员安全,远程操控是核心能力之一。系统采用无线链路传输控制指令与视频回传。实际测试显示:无遮挡环境下链路稳定性较好,而桥洞、涵洞等遮挡条件下信号衰减明显,操控体验受天线方向与高度影响。本文在工程实现上采用“可用即可”的策略:通过提升天线位置与优化摆放姿态提高稳定性,并在操作流程中规定“遮挡环境下以低速接近”为原则,减少短时丢包对安全的影响。

2.5 能源系统与功耗管理

系统使用锂电池组供能,并在软件层面按工况控制功耗:巡航阶段限制推进输出,靠近阶段提供短时较高功率。^[3]测试发现高速运行能耗显著增加,续航下降明显,这与推进效率、水阻增加及电机工作点有关。本文将“救援任务的典型续航”定义为巡航为主的工况续航,并将高速续航作为边界条件记录,以避免不切实际的宣传式表达。

3 工程验证与结果分析

3.1 试验条件与方法

测试在面积约2000m²的人工静水水域与浅滩交界区域开展。为保证数据可解释性,测试按“同一电量区间、同一载荷配置、相近风况”原则进行。关键指标采用多次重复取均值方式记录,异常样本单独标注并分析原因。水草与漂浮物干扰测试采用人工布置方式形成不同覆盖度区域,以观察故障模式与可恢复性。

3.2 水面机动性能

样机在静水条件下最大航速达到3.1m/s,稳定巡航速度约2.3m/s。姿态调整(原地转向/快速转向)响应时间约1.4s,紧急制动距离约1.2m。实际操控体验表明,矢量推进在低速靠近阶段的优势更为明显:通过微调可实现“贴近目标后保持相对位置”,减少反复修正带来的时间损失。

3.3 跨介质与浅滩通过

样机可完成水陆切换并在浅滩连续行驶,最大可通过坡度约17°。在硬质湿滑地面上轮式机构表现稳定;在浅泥地条件下出现打滑倾向,说明轮胎附着与重量分

配仍需优化。结合救援流程,本文认为轮式方案更适合作为“近岸补充能力”,而非替代专业越野平台。

3.4 充气展开与承载验证

救生单元展开测试共进行多轮重复,平均展开时间约2.5s,最快2.2s。静水加载实验中,100kg载荷可保持稳定浮姿且未出现持续泄漏;120kg加载出现轻微侧倾,提示极限工况下稳定性不足。基于安全性要求,本文以100kg作为额定承载并建议在工程应用中保留冗余,避免以极限载荷作为宣传指标。

3.5 干扰环境通过性与故障模式

在普通水草覆盖(约30%)区域,样机可稳定通过;在高密度漂浮物区域出现短时阻滞,表现为推进负载上升、速度下降,部分情况下需要倒退脱离再重新规划路径。该现象说明:仅靠外形光滑与格栅防护仍不足以完全覆盖极端漂浮物场景。工程上可从两方面改进:一是提高推进器防护与导流设计,二是增加“阻滞检测—自动退避”的策略以提升可恢复性。

3.6 连续运行可靠性

样机累计连续运行超过30h,未出现壳体渗水与结构性损伤。高速长时间运行存在温升现象但未超过额定范围。救生单元经多次展开后气密保持稳定。总体而言,样机在“可控、可重复”层面达到工程验证要求,但仍需在极端干扰工况下做进一步耐久与冗余设计。

4 讨论:应用价值、边界与改进方向

4.1 应用价值

从救援流程看,该装备的优势集中在“最后几十米”的快速接近与即时支撑:

- (1) 远程操控降低救援人员涉险概率;
- (2) 矢量推进提升狭窄环境机动与靠近精度;
- (3) 快速展开救生单元缩短落水者获得支撑的等待时间;
- (4) 两栖能力拓展近岸与浅滩场景覆盖。

4.2 适用边界

本文结果基于静水与浅滩条件获得,对强风浪、急流与低温结冰环境未做充分验证;高密度漂浮物区域存在阻滞风险;遮挡环境通信稳定性受布设方式影响。工程部署应结合水域特性制定作业规程,并配置应急回收与人工接替方案。

4.3 关键改进方向

- (1) 推进器防护与导流优化,提升抗缠绕与抗漂

浮物能力;

- (2) 能耗优化与电池能量密度提升,增强高功率工况续航;

- (3) 遮挡环境通信增强,例如中继或天线布设优化;

- (4) 两栖轮胎材料与结构优化,提高湿滑泥地通过性;

- (5) 引入基础的阻滞识别与退避逻辑,提升可恢复性与操作稳定性。

5 结论

本文面向复杂水域快速救援需求,完成了一种小型水陆两栖智能无人救援装备的方案设计、样机研制与工程验证。系统采用模块化分层架构,集成矢量推进、两栖轮式机构、快速充气救生单元与远程视频操控。试验结果表明:样机最大航速3.1m/s、巡航2.3m/s;原地姿态调整约1.4s;救生单元平均展开约2.5s;额定承载100kg;连续运行超过30h未出现渗水与结构性损伤。在高密度漂浮物区域仍存在短时阻滞,通信在遮挡环境下稳定性受限。总体而言,该装备可在保障操作者安全的前提下提升水域救援响应效率,具备工程应用潜力。后续将围绕抗干扰能力、能耗与通信稳定性开展迭代优化,并在更复杂水动力条件下完善验证体系。

参考文献

- [1] 应急管理部. 水域救援装备技术规范[S]. 2023.
- [2] 李明,王强. 水面无人救援机器人的关键技术研究与发展趋势[J]. 船舶工程,2022,44(5):12-18.
- [3] 张伟,刘洋. 基于太阳能供电的长续航无人船系统设计[J]. 电源技术,2021,45(8):980-983.
- [4] 陈军,赵伟. 水陆两栖移动机器人的步态规划与控制策略[J]. 机械设计,2023,40(3):45-50.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 水上搜救应急管理办法[Z]. 2020.
- [6] 王磊,刘畅. 面向复杂水域的应急救援无人平台设计与试验研究[J]. 水下无人系统学报,2024,32(2):210-218.
- [7] 刘建国,王鹏. 复杂水域无人救援艇系统设计与性能分析[J]. 中国舰船研究,2023,18(4):45-52.
- [8] 张磊,王强. 基于矢量推进的无人艇姿态控制研究[J]. 控制工程,2023,30(2):275-282.
- [9] 韩超,赵斌. 水面无人艇差速与推力矢量协同控制方法[J]. 自动化学报,2022,48(10):2485-2496.