

doi: 10.7690/bgzd.2025.09.018

USV 自主航行控制系统设计及典型应用

王 激¹, 陈 霄², 罗 荣¹, 唐嘉钰¹, 完颜娟¹

(1. 中国人民解放军 91054 部队, 北京 102442; 2. 中国人民解放军信息支援部队, 北京 315172)

摘要: 为顺利实现水面无人艇(unmanned surface vehicle, USV)作业任务, 对 USV 航行控制系统的设计及典型应用展开研究。基于脑基本功能联合区理论实现了 USV 智能控制系统体系结构的设计; 在该体系结构下, 以“海鲟”系列 USV 为研究对象, 研究 USV 航行控制系统的软件和硬件设计实现问题, 探讨无人艇的典型应用场景。结果表明, 该研究可为现阶段我国无人艇自主航行控制系统的研究和无人艇装备建设提供参考。

关键词: 无人艇; 自主航行; 控制系统; 体系结构; 典型应用

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Design and Typical Application of USV Autonomous Navigation Control System

Wang Lian¹, Chen Xiao², Luo Rong¹, Tang Jiayu¹, Wan Yanjuan¹

(1. No. 91054 Unit of PLA, Beijing 102442, China; 2. Information Support Force Unit of PLA, Beijing 315172, China)

Abstract: In order to successfully realize the task of unmanned surface vehicle (USV), the design and typical application of USV navigation control system are studied. The architecture of USV intelligent control system is designed based on the theory of basic functional areas of the brain. Under this architecture, the software and hardware design of USV navigation control system is studied, and the typical application scenarios of USV are discussed, taking the “sea sturgeon” series USV as the research object. The results show that the research can provide a reference for the research of autonomous navigation control system and the equipment construction of unmanned boat in our country at present.

Keywords: USV; autonomous navigation; control system; architecture; typical application

0 引言

水面无人艇(USV)为了能够在非结构、非线性的复杂海洋环境下履行使命任务, 必须具备自规划、自管理、自协调以及群体合作能力, 是一项离散事件和连续实时运动并存的复杂系统工程^[1-5]。系统组成包括任务规划模块、目标识别模块、导航与信息处理模块、全局规划模块、局部规划模块、通信管理模块、载体控制模块、信息融合模块、信息存储管理模块等^[6-8]。USV 还应具有使命分析、任务规划和推理决策等多种智能功能模块, 为使它们组成一个性能良好的 USV 系统, 多种功能模块必须在不同层面下协调工作^[9-12]; 因此, 有必要研究 USV 控制系统的体系结构以使这些功能各异的模块为统一目标和总体服务。笔者基于脑基本功能联合区理论实现了 USV 智能控制系统体系结构的设计; 深入研究了 USV 航行控制系统的软件和硬件设计实现问题, 针对当前无人艇的发展现状, 阐述了无人艇在民用领域和军事领域的典型应用。

1 水面无人艇智能控制系统的体系结构

图 1 为“海鲟”系列 USV 的系统组成, 根据不

同模块和功能将控制系统划分为智能规划与决策、航行控制、目标探测与模式识别 3 部分, USV 艇体上搭载的各子系统密切配合, 实现自主功能。

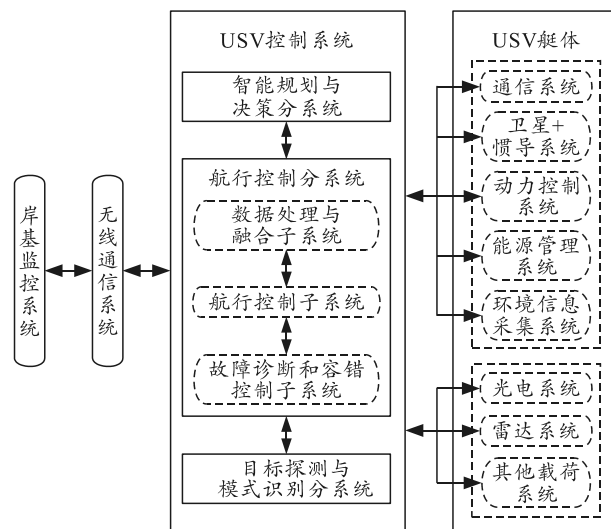


图 1 USV 控制系统组成

借鉴移动机器人控制系统的体系结构可将 USV 系统的体系结构分为: 分层递阶、行为响应和 2 种结构混合 3 种典型的结构类型^[13-14]。近年来, 仿人脑智能控制在适应环境变化中表现出出色的控

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-10-27

第一作者: 王 激(1992—), 女, 湖南人, 博士。

通信作者: 陈 霄(1990—), 男, 山东人, 博士。

制能力,其通过多层递阶的结构,对人的学习、直觉推力、特征识别和记忆等行为和功能进行综合性模仿。

笔者基于人脑基本功能联合区理论,将 USV 系统高度抽象和概括,建立了智能 USV 的神经-心理结构模型,将智能 USV 系统分为 USV 载体和 USV 神经子系统,前者包括:执行机构——由动力系统、推进系统和倒车控制系统等组成;通信系统——由短波电台、卫星通信设备、北斗短报文收发一体机等设备组成;导航系统——由卫星+惯性导航设备等组成;环境信息采集系统——各类传感器、图像及视频采集设备等组成;载荷控制系统以及嵌入式工控机系统等组成。

借鉴人脑基本功能联合区理论,如图 2 所示,可将 USV 神经分系统分为感知区、认知区和慎思区,每个分区包括 3 级皮层。

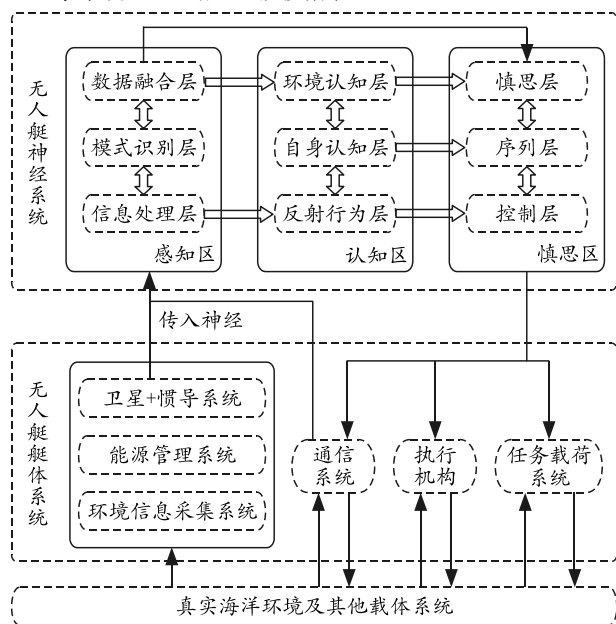


图 2 USV 的神经心理结构模型

每个分区的具体功能如下:

1) 感知区包括信息处理、模式识别和数据融合 3 个层阶。信息处理层接收来自 USV 通信和感知系统的数据,并对接收到的数据信息进行预处理、滤波、异常监测等,之后将其传入模式识别层和反射行为层;模式识别层将接收到的数据(雷达、光电及其他载荷设备的数据)进行分类并选择不同的模式识别模块进行处理,经过模式识别层处理后的数据在数据融合层进行融合处理,并传递给慎思层和环境认知层。

2) 认知区包括反射行为、自体认知和环境认知

3 个层阶。反射行为层由预先构建的 USV 行为数据库组成,该数据库是 USV 从各种特殊状态到基本生存规则的映射,USV 依据数据库中存储的映射关系来采取规定的反射行为,具体包括加速、减速、熄火、倒车、转向等行为,对实时出现的紧急情况迅速地做出反应,并传递至控制层和自体认知层。自体认知层主要负责依据不同的环境和反射行为随时调整 USV 自身的认知模型,环境认知层则主要负责维护海洋环境模型。

3) 慎思区由控制层、序列层和慎思层组成。慎思层是 USV 认知活动的核心,通常由愿望、信念、能力等心智模块组成。愿望主要指的是 USV 的使命任务;信念包括自体 and 群体中不同成员的状态信息以及海洋环境等;能力则是 USV 能够执行的动作。序列层根据慎思层产生的行为意图,规划得到对应的一系列动作序列并传递给控制层。控制层则依据接收到的动作序列,直接控制 USV 的执行机构完成相应的动作。

基于上述可以看出:USV 控制系统的不同分系统是由神经系统中不同层组成、抽象而来的有机整体。笔者主要对 USV 航行控制系统展开研究,其作为 USV 控制系统最为核心的组成之一,是实现 USV 无人化和智能自主化的基础。

2 水面无人艇航行控制系统硬件设计

“海鲟”系列 USV 航行控制系统的硬件设计如图 3 和 4 所示,艇载部分:中央处理器选用某品牌 AR3500 工控机,结合 16 通道串口板卡、68 通道 A/D、D/A、I/O 多功能采集板卡、16 通道继电器板等各类板卡,完成艇载信息实时处理、控制指令发送和实时数据接收等功能。USV 搭载某型双天线高精度 GPS/GLONASS/BD+MEMOS 惯导模块,用于获取 USV 的实时位置、艏向、航速、纵横摇等信息。USV 的转向和倒车功能采用推杆等机械结构实现。配有通信智能网关管理:港口内近距离通信采用无线 WIFI 完成;15 km 内通信采用 300 MHz 数传电台实现;远距离的超视距通信采用北斗短报文收发一体机完成。此外,还搭载有航行灯、状态指示灯、各类天线以及多组蓄电池等。岸基(母船)部分的硬件设备包括加固计算机、无线 WIFI 设备、300 MHz 数传电台、北斗短报文收发一体机以及各类天线等。USV 和岸基通过无线通信连接,岸基部分可实现对 USV 状态的实时监控。

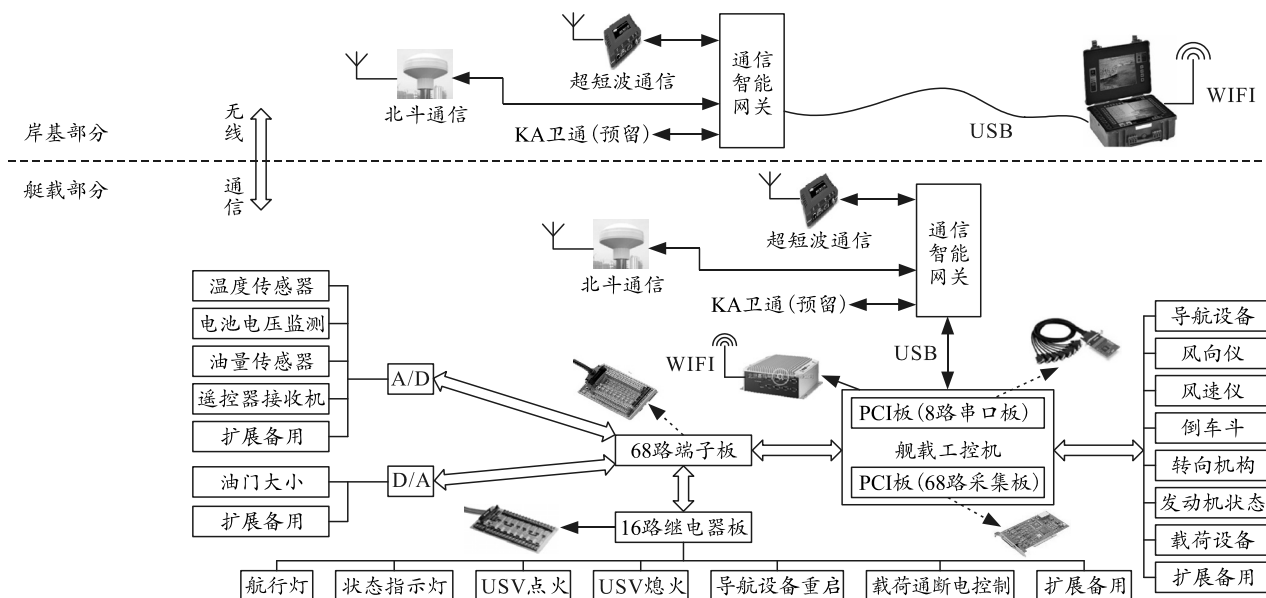


图3 USV 航行控制系统的硬件组成



图4 USV 航行控制系统的硬件组成

3 水面无人艇航行控制系统软件设计

USV 航行控制系统的软件结构采用模块化设计思想,包括环境感知、航行控制、通信链路、仿真模拟、任务载荷和系统配置6大模块,各个模块通过相互配合和交互,保证USV能够顺利自主的完成任务。借鉴前述的分层结构思想,将航行控制软件结构的6大模块分为感知层、通信层、控制层和执行层,各层之间按照USV神经心理结构模型有机组成和协调工作。

1) 感知层:即环境感知模块,由A/D采集板卡、串口板等采集模块、各类传感器以及雷达、光电等设备接口程序组成,负责对USV艇体内关键部位的温度、震动等以及USV所在航行环境进行各类数据的采集,具体包括风向、风速、周边环境及障碍物信息等。

2) 通信层:包括串口通信、TCP/IP协议网络通信、超短波通信、北斗短报文通信等,负责整个航行控制系统内部以及与其他各系统间的通信任务。

3) 控制层:分为智能决策和航行控制2个子

层,其中智能决策子层是USV的“中枢”,负责维护环境和自体认知模型,包括任务规划器、路径规划器等,受具体任务驱动并综合考虑USV当前所处环境和自身状态,进行决策并规划出动作序列,生成目标指令。航行控制子层负责处理实时获取的环境和USV位姿信息,并依据目标指令生成必要的控制指令,包括点火/熄火控制、航速和艏向控制、航行灯控制、雷达、光电等载荷控制、数据处理与融合以及故障诊断与容错控制、航行安全控制等子模块。此外,该层还包括仿真USV等模型,当系统运行在仿真模式时,所有数据均由仿真模型模拟产生。

4) 执行层:负责所有控制指令的接收理解和下达,最终实现对执行机构和各类任务载荷的控制,主要包括D/A板卡和I/O板卡以及各类相关设备的控制程序组成。为便于USV航行控制软件的编写,对以上各层进行有机结合,分为人机界面、航行控制、航行数据、硬件设备类、公共基础类等,如图5所示,软件界面如图6、7所示。

4 USV 典型应用研究

1) 侦察与监视。准确、及时、可靠的情报信息是拨开战争迷雾、明于知彼、料敌在先的前提,也是打赢信息化战争的有力支撑。利用无人艇雷达反射面积小、不易被发现的特点潜入敌方活动区域,自动布放监听和图像采集设备展开情报获取工作,从而持续监视某危险海域。此外,我方有人作战舰艇或舰艇编队航行至情况不明的海域时,通过在舰艇或舰艇编队周围一定距离和方位上布放多艘

USV 伴随有人舰艇编队航行, 实现防御纵深和防御层次的拓展, 有效拉长对来袭武器的防御准备时间。

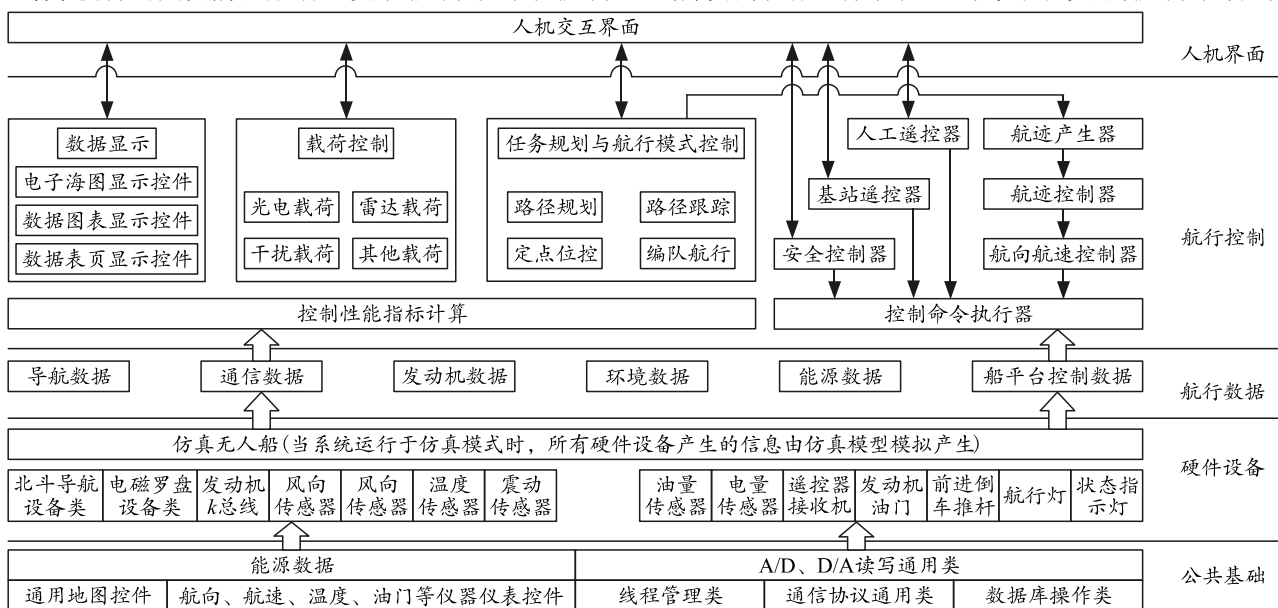


图 5 USV 航行控制系统的软件体系结构

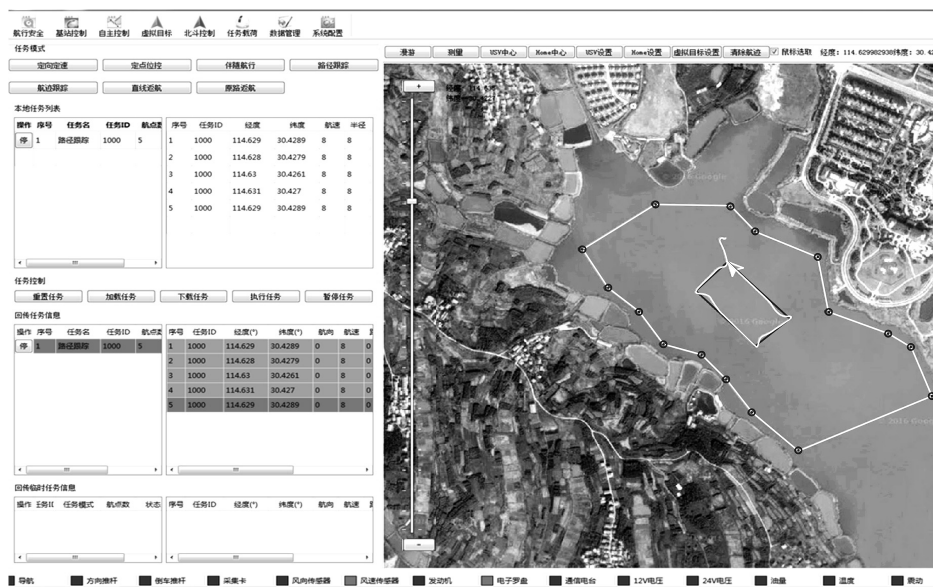


图 6 USV 航行控制系统的软件界面 1



图 7 USV 航行控制系统的软件界面 2

2) 反水雷战。目前猎扫雷舰艇是海军单位吨位最昂贵的水面舰艇,且海军装备量较少;因此,当面临大面积海域扫雷任务时,仅仅依靠猎扫雷舰完成,成本高且耗时长。USV 机动灵活且造价低,可通过搭载猎扫雷模块与猎扫雷舰艇展开协同作业。猎扫雷 USV 可由任意舰艇在任意可能存在水雷的区域释放,通过遥控或完全自主的方式完成扫雷任务,提高扫雷效率且降低作业成本。

3) 反潜战。USV 可替代或协同水面舰艇兵力在基地、港湾出入口和近海要域实施常态化巡逻反潜,使敌潜艇无法安全潜伏在对我有威胁的海域;USV 可在我舰艇活动区和敌潜艇可能活动海域实施搜索性反潜,协同固定式水声监视网络、海洋监视卫星等,建立反潜封锁线或封锁区。

4) 电子战。USV 雷达反射面积小,具有较好的隐身性,可通过搭载不同的功能载荷,在不适宜有人舰艇航行的危险海域执行电子干扰、通信中继、战术欺骗等任务。

5) 水上搜寻和救助。USV 通过搭载光电跟踪系统或红外探测仪全天候、全时段自动搜寻水域内的生命迹象,可快速高效、低成本地以集群方式开展联合作业,而且能克服水文气象环境陌生等问题。

6) 其他。此外,USV 还可执行后勤补给、战场评估、执法取证、海上消防、海洋科考等任务,并且多艘搭载相同或不同功能载荷的 USV 协同作业,可在瞬息万变的海洋环境下更好地履行使命。

5 结束语

USV 具有成本低、高速智能、部署机动、隐身性好、无人员伤亡等优势,具备广泛的应用前景。在不久的将来,作为海上无人平台重要组成部分的 USV 必将极大地影响海洋运输、海洋资源开发的格局,而且大量海上无人化智能平台必将对未来海洋战争的形态产生重大影响。为此,应尽快制定并完善海上无人装备发展战略规划,加大对海上无人化智能装备的研发投入,为建设海洋强国提供强大

支撑。

参考文献:

- [1] 程烨. 小型无人艇研究现状及关键技术[J]. 中国造船, 2020, 61(S1): 241-249.
- [2] 金霄, 郑开原, 王得朝, 等. 国外军用无人水面艇发展综述[J]. 中国造船, 2020, 61(S1): 221-227.
- [3] 李伟, 徐轩彬, 郑振宇. 世界无人艇技术研发动态与作战使用分析[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(4): 4-7.
- [4] LIN M Z, ZHANG Z Q, PANG Y D, et al. Underactuated USV path following mechanism based on the cascade method[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 138-151.
- [5] 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.
- [6] 郭睿. 无人艇路径规划与航迹控制技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [7] 孔维玮, 冯伟强, 诸葛文章, 等. 美军大中型水面无人艇发展现状及启示[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(5): 14-18.
- [8] 王耀南, 安果维, 王传成, 等. 智能无人系统技术应用与发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 9-26.
- [9] 徐博, 王朝阳. 基于无人艇跨域异构编队协同导航研究进展与未来趋势[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 1-11, 56.
- [10] FAN Y S, ZOU X P, WANG G F, et al. Robust Adaptive Path Following Control Strategy for Underactuated Unmanned Surface Vehicles with Model Deviation and Actuator Saturation[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2696-2797.
- [11] 陈骊, 刘志坤, 胡生亮, 等. 马赛克战背景下小型无人艇集群作战样式探析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(1): 11-16.
- [12] 谢少荣. 海洋智能无人艇[J]. 世界科学, 2021(11): 33-35.
- [13] KARIMI H R, LIANG B, BASIN M, et al. Adaptive neural formation control of autonomous underactuated surface vessels based on disturbance observer with leader-follower strategy[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(13): 1112-1121.
- [14] HUANG B, SONG S, ZHU C, et al. Finite-time distributed formation control for multiple unmanned surface vehicles with input saturation[J]. Ocean Engineering, 2021, 233(12): 2122-2136.