

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.014

中小型舰载无人机上舰应用发展研究

赵启兵, 朱晨帆, 钱帆, 杨中源, 何巍
(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 针对目前舰载无人机上舰技术发展现状中存在的关键技术难题, 对中小型舰载无人机上舰应用发展进行分析。概述舰载无人机当前使命任务, 对无人机构型、着舰引导技术、出动及回收方式进行详细分析与总结; 剖析舰载无人机上舰关键技术的原理并阐述其发展趋势, 引申出舰载无人机未来海战场的应用场景。结果表明, 可为海军舰载无人机的体系化建设和战术层面运用提供参考。

关键词: 中小型舰载无人机; 无人机出动; 无人机回收; 着舰引导; 舰机适配
中图分类号: V11 **文献标志码:** A

Research on Application Development of Small and Medium-sized Shipborne UAVs on Ships

Zhao Qibing, Zhu Chenfan, Qian Fan, Yang Zhongyuan, He Wei
(Design and Research Institute of China Ship and Marine Engineering, Shanghai 200011, China)

Abstract: In view of the key technical problems existing in the current development status of shipboard UAV technology, the application and development of small and medium-sized shipboard UAV are analyzed. The current mission of shipborne unmanned aerial vehicle (UAV) is summarized, and the UAV configuration, landing guidance technology, sorties and recovery mode are analyzed and summarized in detail. The principle of key technology of shipborne UAV on board is analyzed and its development trend is expounded, and the application scenarios of carrier-based UAV in the future sea battlefield are extended. The results show that it can provide a reference for the systematic construction and tactical application of naval shipborne UAV.

Keywords: small and medium-sized shipborne UAV; UAV sortie; UAV recovery; landing guidance; adaptability of ship and shipborne UAV

0 引言

舰载机作为航母、两栖舰、驱护舰等舰船搭载的重要装备, 可伴随母舰深入海洋的各个角落执行各类作战任务, 为海上作战提供实时、灵活、相对准确的战场感知信息, 提升单舰/舰船编队的作战能力, 进一步丰富和优化舰船作战模式。面对现代海上局部冲突目标不明确、不定因素多、活动范围广等特点, 舰载无人机与传统有人机相比, 具有低风险、易部署、易伴随、高机动、效费比高等突出优势, 可执行战场感知、目标锁定、中继通信、毁伤评估等重要任务, 在强化海上空中力量的过程中正在扮演愈发重要的角色。因此, 舰载无人机装备上舰极为必要, 是各国海军争先发展的热门领域。

笔者列举舰载无人机的不同构型和装舰要求, 对比分析其出动回收方式的优缺点以及关键技术发展路线, 并展望了中小型舰载无人机在未来海战场的应用前景。

1 中小型舰载无人机现状

1.1 使命任务

舰艇平台自身能够通过所搭载的航空器为舰艇编队提高作战范围、作战能力等。其中舰载无人机航空器能够为舰船提高以下作战能力:

1) 侦察与监视: 舰载无人机系统可搭载光电或雷达探测设备, 执行战术侦察与监视任务, 对海面目标及低空目标进行探测, 同时利用无人机无人员伤亡的特点, 可前出抵近执行侦察任务^[1], 在警戒探测信息的引导下获取更加丰富的战场信息。

2) 电子对抗: 舰载无人机系统能够搭载不同的电子战任务载荷, 执行电子侦察、电子干扰^[2]等任务, 保持制电磁权。

3) 通信中继: 舰载无人机通过装载通信转发设备, 从而将舰艇间的超视距通信转化为视距通信, 实现舰载战术电台的中继通信。

4) 打击效果评估: 舰载无人机可随时改变飞行

收稿日期: 2022-09-29; 修回日期: 2022-10-28

作者简介: 赵启兵(1991—), 男, 安徽人, 硕士, 工程师, 从事作战系统、航空保障系统设计研究。E-mail: zhaqb@nuaa.edu.cn。

航迹并实时传输打击目标各个角度的毁伤情况及有无人员伤亡之忧,增强海战场打击效果评估能力^[3]。

5) 反潜(支援)作战:根据无人机搭载的有效载荷大小,可配置安装声学或非声学探测设备,实现对目标探测、跟踪、打击的反潜作战能力。

6) 火力打击及低烈度打击:舰载无人作战飞机集合巡航导弹与战术飞机精确打击武器系统二者的优势,将成为未来主要的武器投送方式;同时,通过小型无人机搭载战斗部以及无人机精确制导方式,能够定点清除战斗人员、车辆等小型目标。

1.2 中小型舰载无人机构型分类

无人机的迅速发展应用,带动了类型多样的无人机生产链。按大小和质量分类^[4],无人机可分为大、中、小、微型。一般将起飞重量不超过 500 kg,活动半径在 150~350 km 内的类型,称之为中小型无人机。目前,中小型舰载无人机主要包括直升机式、多旋翼、系留式、复合翼式、弹射绳钩回收式、尾座式、手抛式和共架发射等多种构型。

1) 无人直升机。

如图 1 所示,由于具有起降条件简单、可定点悬停、低速机动等特点,舰载无人直升机具备有效载荷大、续航时间长、全天候执行任务等优势。



图 1 无人直升机

2) 多旋翼无人机。

多旋翼无人机由多个螺旋桨提供升力,通过控制各轴螺旋桨转速进行飞行姿态控制,如图 2 所示。多旋翼无人机具有体积小、重量轻、结构简单和飞行机动能力强等优势。



图 2 多旋翼无人机

3) 系留无人机。

将多旋翼无人机技术和有线供电技术相结合,

机上无储能设备,由机下进行能源供给。系留无人机如图 3 所示,可以克服多旋翼无人机飞行时间短、载荷能力弱的缺点,形成可垂直起降、超长航时留空飞行、伴随飞行的空中应用平台,适用于高空通信中继、定点观测、跟随载船高空巡查等工作。



图 3 典型系留式无人机

4) 复合翼无人机。

复合翼无人机如图 4 所示,是一种通过在固定翼飞行平台上加装多旋翼系统,获得垂直起降及悬停能力的无人机。在固定翼基础上增加四旋翼构型,起飞降落阶段由旋翼提供升力,任务飞行阶段使用固定翼机翼提供升力,在固定翼模式时旋翼能够抵消部分翼面升力。复合翼无人机具有结构简单、成本低的优点,同时兼备旋翼无人机垂直起降和固定翼无人机续航时间长的优势。



图 4 复合翼无人机

5) 弹射固定翼无人机。

弹射固定翼无人机如图 5 所示,通常采用大展弦比固定翼构型,通过在机翼末端安装拦阻钩与舰面的拦阻装置进行配合完成无人机的回收。该无人机不配置起落装置,通过弹射架以设定的速度发射,并按照预先设定的程序或操作员的指令飞行,再通过天钩/撞网等方式完成回收。

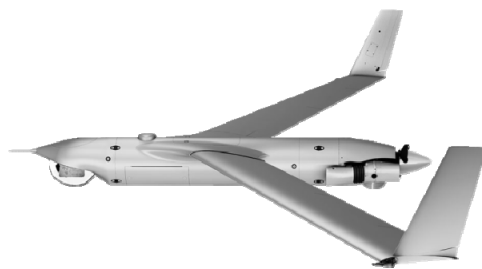


图 5 弹射固定翼无人机

6) 尾座式无人机。

如图 6 所示，尾座式无人机与固定翼无人机的构型相似，在固定翼无人机上加装尾部起落架，改变控制翼面，采用推力更大的发动机改造成尾座式无人机。



图 6 尾座式无人机

尾座式无人机垂直安置在地面，发动机推动无人机完成垂直起飞，到达一定高度后逐渐改为水平飞行；降落时通过尾舵翼将机头朝上，然后缓慢降落至着舰点。它不仅具有垂直起降的特点，可以部署在各种受限环境中，还具有水平高速巡航功能，增加了续航时间，扩大了航程。

7) 手抛固顶翼无人机。

手抛固定翼无人机如图 7 所示，依靠单兵助跑、手抛起飞。该机型重量轻、体型小，由士兵携行上舰，在战场中可快速部署形成战斗力。



图 7 手抛固顶翼无人机

8) 共架发射无人机。

共架发射是指发射架同时具备多联装能力和通用化能力。共架发射源于导弹发射方式，而共架发射无人机外观跟导弹类似，如图 8 所示，装载于导弹/火箭弹的共架发射架中，通过导弹发射的形式，在空中展开机翼、尾翼等结构，实现由弹状过渡到机状。共架发射无人机由于形状特征使得飞行速度快、突防能力强、作战灵活，能够如火箭弹一样密集出动。



图 8 共架发射无人机

以上 8 种中小型无人机按照其装舰条件、国内技术成熟度和有效载荷分析，结果如表 1 所示。

表 1 多构型无人机装舰条件分析

平台构型	装舰条件	国外
无人直升机	1) 飞行甲板起降 2) 适装测控链路和控制站	S-100、火力侦察兵
多旋翼无人机	1) 飞行甲板起降 2) 适装测控链路和控制站	T150
系留无人机	1) 甲板适装收纳功能方舱 2) 适装测控链路和控制站	—
复合翼无人机	1) 飞行甲板起降 2) 适装测控链路和控制站	—
弹射回收固定翼无人机	1) 适装弹射架，天钩 2) 适装测控链路和控制站	扫描鹰、RQ-21A 黑杰克
尾座式无人机	1) 飞行甲板起降 2) 适装测控链路和控制站	V-Bat
手抛固定翼无人机	便携式控制站和测控链路	美洲豹
共架发射无人机	1) 火箭弹或导弹发射架共架设计 2) 适装测控链路和控制站	—

2 无人机上舰难点分析

无论是现役舰船加装中小型无人机的临时任务，还是新型舰船设计考虑中小型无人机上舰需求，第一要务是考虑无人机与母船的舰机适配性^[5]。舰机适配性的设计主要围绕 5 点开展设计：1) 典型作战样式和任务周期是设计输入；2) 舰船的舱室及飞行甲板是基本条件；3) 高效出动是无人机波次循环的重要环节；4) 安全回收是无人机波次循环的坚实基础；5) 最大化发挥无人机效能是最终目标。

各国军队在训练、实战中发现：舰载无人机执行任务的整个过程中，起飞和回收阶段是非常危险的阶段，也是最容易发生故障的阶段，说明这 2 个阶段是影响无人机上舰的关键要素。在出动与回收过程中，需要克服环境干扰影响、飞机自身控制系统误差以及舰船引导系统的误差；因此，需要针对舰船上空间狭小、情况复杂等特定条件下，采用特定方式来保障舰载无人机在舰船上实现顺利起降。

2.1 无人机出动/回收方式分析

舰载无人机的出动方式主要包含气动弹射^[6]、液压弹射、橡皮筋弹射、电磁弹射和火箭助推等 5 种出动方式，分别对应的优缺点及典型应用如表 2 所示。回收方式主要包含伞降回收、阻拦索钩、撞网回收^[7]等，分别对应的优缺点及典型应用如表 3

所示。

2.2 引导方式分析

目前国内外引导方式多种多样，主要有光电雷达、着舰引导雷达、卫星差分定位引导、伪卫星精密着舰引导和机器视觉识别辅助引导等方式。

表 2 无人机的出动方式比对

出动方式	优点	缺点	国外典型应用案例
气动弹射	1) 安全性高 2) 隐蔽性好 3) 机动灵活 4) 可适应于不同弹射速度不同型号的无人机	1) 弹射器输出不稳定 2) 气体的比能量较低，弹射能力弱 3) 维护成本高	扫描鹰、RQ21
液压弹射	1) 安全性高 2) 隐蔽性好 3) 机动灵活 4) 液体比的密度高，能弹射的无人机质量大 5) 液压元件成熟，成本较低 6) 适应于不同弹射速度多型号无人机	1) 耗能和噪声较大，机动隐蔽性差 2) 可弹射的最大重量有限	影子 200、天鹰、不死鸟、巡逻兵
橡皮筋弹射	1) 重量轻、便于便携式操作 2) 价格便宜	1) 弹射能力小，适合 40 kg 以下无人机 2) 橡皮筋的使用寿命短，需要定期更换 3) 橡皮筋耐海洋环境、阳光照射性能差，且弹性随着高低温的变化变化较大 4) 与多类型无人机兼容性差	多用于航模或试验
电磁弹射	1) 效率高且易维护 2) 通用性强、机动灵活	1) 体积大 2) 技术门槛较高	X-47B
火箭助推	受外部环境的影响小，可快速、机动发射	1) 火工品的贮存、运输和使用要求很高 2) 发射时伴随声、光、烟，易暴露	CL289 爱生 ASN209

表 3 无人机的回收方式比对

回收方式	优点	缺点	典型应用
伞降回收	对无人机损伤较小	1) 落水后机载设备易受到海水侵蚀 2) 自带的回收伞降低无人机可搭载的有效载荷质量	英国的“小鹰”、加拉大 CL 289
阻拦索钩回收	精确定点回收方式 对场地的要求低，适用于狭小空间回收	1) 重量尺寸较大 2) 对导航精度有较高的要求	扫描鹰、RQ21
撞网回收	1) 可实现无距回收 2) 不受场地的限制，布设方便	1) 网的面积有限，在天气和海况不好的情况下 2) 无人机不易对准拦阻网 3) 只适用于推进式的固定翼无人机 4) 对末端引导要求很高 5) 有允许设立阻拦网的足够场	美国的“银狐”“杀人鹰”，以色列的“先锋”“侦察兵”等

2.2.1 光电雷达

光电引导采用高分辨率电视、红外摄像机和激光跟踪等复合方法完成对无人机相对舰船理想着舰点的误差测量。该手段精度高，自 20 世纪 80 年代以来多国一直使用，但对能见度高低和高海况等因素耐受度低，仅适合在近距离使用。

2.2.2 着舰引导雷达

引导系统由机载设备和舰面设备组合而成，系统组成如图 9 所示，机载设备包括卫星导航接收机、雷达应答机、天线；舰面设备包括着舰引导控制设备、卫星导航接收机、引导雷达。工作状态下受天气影响小，但易被电磁干扰，精度将大幅下降。

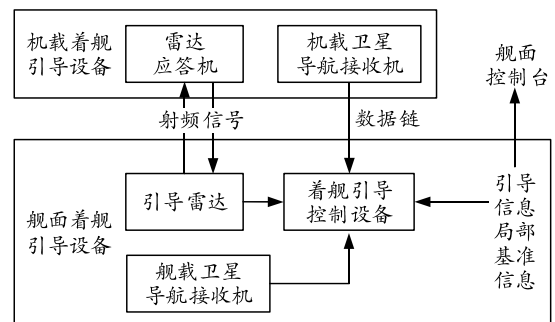


图 9 着舰引导雷达系统组成

2.2.3 差分卫星定位引导

如图 10 所示，差分卫导定位引导^[8]采用的是载波相位差分技术。标准的测量模式为：先以舰载卫星接收机定义为基准站，开展静态观测；然后，舰载无人机的机载卫星接收机与舰载端同时观测同一

颗卫星，经融合结算后，得出机载卫星接收机相对舰载端的定位信息。目前美军联合精密进近与着陆引导系统(JPALS)便是基于此原理实现引导飞机自动着舰，但作用距离有限。

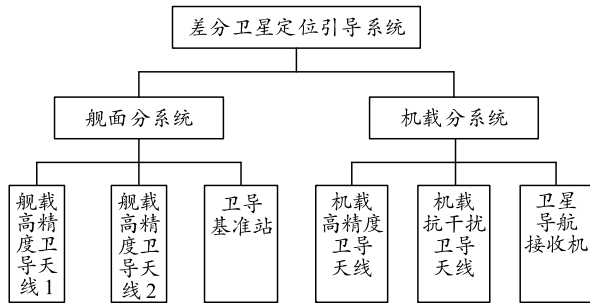


图 10 差分卫星定位引导系统组成

2.2.4 伪卫星差分定位引导

2 个机载天线在接收对 6 个舰载站单元发出的无线电位置信号后，自动发送至机载接收单元。结合无人直升机输入的高度信息，机载接收单元使用特有算法进行解算，得出 3 维坐标相对位置数据和无人直升机轴向信息后发送给无人机飞控系统，从而为无人机自主着舰提供精确定位引导。如图 11 所示，伪卫星差分定位引导相比卫星差分定位引导，能够提升整个系统的可用性、稳定性、可靠性以及测量精度，是目前引导方式最有效的途径之一。

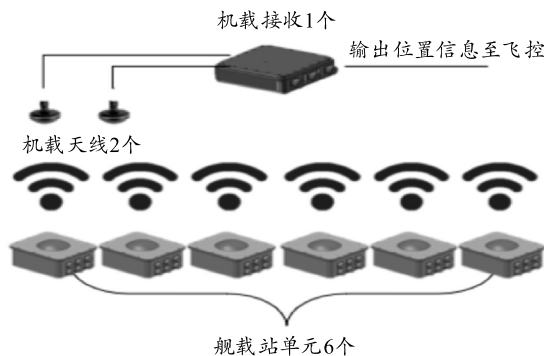


图 11 伪卫星差分定位引导系统组成

2.2.5 机器视觉识别辅助引导

如图 12 所示，视觉测量相机采集着舰标识图像，由视觉测量处理机解算出视觉引导数据，送卫导流动站；卫导流动站给出飞机位置、速度、航向数据，并解算出舰机 RTK 相对位置数据，随后将舰 INS 数据、视觉引导数据、飞机航向数据、舰机 RTK 相对位置数据等组帧发送至飞控计算机。视觉识别辅助引导要求图像中确实存在船舶目标，且视觉精度受低能见度和高海拔海况的影响；因此，很难单独使用。

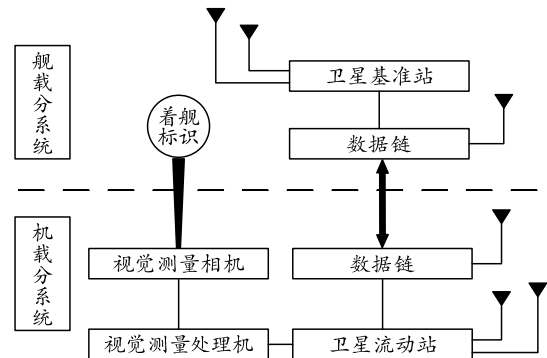


图 12 机器视觉识别辅助引导系统组成

综上，中小型舰载无人机上舰应用必须解决高海况下高精度着舰引导、高效出动、安全回收等关键技术难题，才能实现作战效能最大化。

3 关键技术发展趋势

目前，解决中小型无人机舰机适配性问题的主要手段有舰载无人机平台优化、舰船平台优化、出动回收手段优化。

3.1 舰载无人机平台优化

中小型舰载无人机研发过程中，除满足功能特性之外，更应重视可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性和环境适应性等通用质量特性要求，保证舰载无人机平台长时间稳定运行。

控制系统方面，无人平台将会逐步抛弃基础 PID 控制，更多采用多变量自适应控制、滑膜控制、机器学习等智能控制方法及容错控制策略，不断迭代优化无人机自身性能，确保舰载无人机能够在复杂战场环境中维持控制系统的鲁棒性能，在故障情况下发挥无人平台的容错性能，从而提高起降性能和海战场生存能力。

硬件方面，应继续优化无人机外形尺寸，通过选用通用物理、电气接口，降低对舰船的空间、物资等资源需求，尽可能减少牵连工程规模，使得舰载无人机更易适配更多类型舰船。

3.2 舰船平台优化

1) 极短期预报技术。

如图 13 所示，建立相对准确的甲板运动预测模型是无人机全自主着舰回路中的一个重要环节。然而舰船在航渡过程中，始终受到海风、海浪等环节因素的强干扰，引起舰船纵摇、横摇、上下起伏等剧烈运动，致使飞行甲板上的理想着舰点持续在 3 个自由度方向剧烈运动，从而无法准确计算/估算/测量理想着舰点与无人机两者间的相对运动信息，

导致甲板运动预测模型的误差进一步被放大，无法生成精确的理想下滑航道，结果是无人机自主着舰^[9]的难度被提升若干等级。

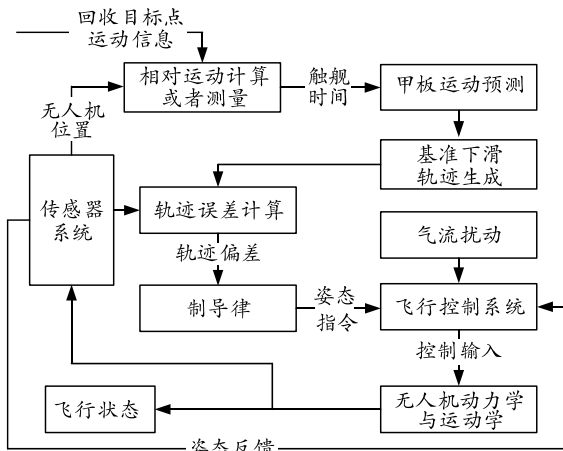


图 13 无人机全自主着舰的控制原理

实时对未来数秒内的舰船运动姿态进行准确、可靠的预报是提高无人机海上起降安全性和提升作业效率的关键，极短期预报技术是船舶运动预报技术的重中之重。

目前国内外舰船普遍使用基于 Kalman Filter、神经网络^[10]、时间序列分析法等时域分析法，预报着舰点未来 3~5 s 范围内横摇、纵摇角度。未来将基于舰载导航系统收集的纵摇、横摇、升沉、航速、航向及舰载气象系统收集的风速、风向等实时信息，进行大数据计算，预测显示理想着舰点在未来 20 s 甚至更长时间范围内的横摇、纵摇及升沉速度的趋势预测包络线。

2) 舰载激光测风雷达技术。

考虑到海洋大气的多变性和船舶运动的不确定性，使用传统的理论仿真手段已经无法满足恶劣海况下无人机着舰需求。激光测风雷达^[11]可对大气风场进行实时精细测量，为无人机全自主着舰的控制系统提供相对准确的气流场，从而保障无人机的起降安全。

3.3 出动回收手段优化

1) 出动与回收装置一体化设计。

当今美军使用独立的发射装置和天钩回收装置在舰船上分别实现无人机的放飞与回收，2 套装置重量大、体型大，占用舰船机库很大一部分空间资源。在准备无人机发射和回收的过程中，飞行甲板上协同作业人员较多，操作步骤繁琐。

美国 DARPA 的侧臂项目 (Tern SideArm Capture System) 已在试验室完成原型系统的演示验

证，正在开展海上相关试验。该系统创新性的将发射和回收功能一体化集成，能收纳在标准 6 m 集装箱内，2 人在数分钟内便可完成单架无人机的出动/回收。

无论是重量优势，还是从简化操作流程、减少人员战位的角度出发，无人机的出动与回收装置开展装备一体化设计已然成为一种趋势。

2) 电磁弹射装置小型化设计。

电磁弹射^[11-12]凭借弹射精度高、峰值过载更低、出动效率高、易操作维护等诸多优势，吸引着众多国家纷纷投入研发。对于中小型舰载无人机，小型化电磁弹射装置无疑是最优选择，支持不同重量的无人机，提升着舰体验，延长无人机使用寿命。

通过减少电磁弹射装置能量链数量及定子数量，以达到弹射能级和重量的大幅降低，从而实现电磁弹射装置的小型化设计。

4 中小型无人机海上应用前景

无人战争将成为未来的主要作战样式。从亚阿冲突中，无人机已然成为战场重要的主导型力量。大规模无人装备作战仍处于初期探索阶段。从中期来看，有人装备和无人装备的联合作战将是发展潮流，最终将直接催生出由大批无人装备相互博弈的战场环境。

4.1 有人机与无人机协同作战

无人机执行多项任务过程中，开展目标识别、海战场态势收集等工作；但无人机在复杂战场环境下易遭遇信号干扰、电子干扰等问题，影响无人机自主决策。此时有人机扮演指挥员角色，发挥人类高效决策的优势，基于无人机生成的态势信息直接支配无人机作战活动，扩展了有人机的作战半径，提高了有人机的生存能力。

4.2 无人机集群作战

受自然界的狼群和蜂群的启发，提出蜂群作战、忠诚的僚机、组队协作、狼群作战等一系列集群作战理念，以高效完成反潜侦察、火力支援、近区自防御等任务。

4.3 无人机跨域协同作战

无人艇作为未来海上新锐武器，具有自主航行、智能避障、续航能力长、载荷能力强等天然优势。通过无人机与无人艇跨域协同^[13]，可达到取长补短、效能最大化的目的。

5 结束语

对于大多数国家而言，无人装备的崛起是赶超世界先进的重要契机，而舰载无人机更是海军空中实力的体现。我国海军需研制性能卓越的舰载无人机，同时放眼体系化建设，开展海陆空天系列无人装备在战术层面运用的探索，以便从容应对无人装备大国的挑战。

参考文献：

- [1] 王立磊, 魏启航. 对我军无人机力量建设的几点思考[J]. 兵工自动化, 2020, 39(10): 1-5.
- [2] 胡军, 严德斌, 刘五叶. 无人机在现代电子战中的应用[J]. 现代电子, 1998(1): 58-62.
- [3] 潘潜, 周德云, 俞吉. 基于云模型的无人机作战系统效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(6): 68-71.
- [4] 云超, 李小民, 郑宗贵, 等. 中小型无人机建模分析与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(11): 32-35, 136.
- [5] 马凯, 陈豪, 郝桐, 等. 美国舰载无人机系统研究[J].

(上接第 60 页)

- [3] 樊文欣, 席奇豪, 吕伟, 等. 筒形件强力旋压工艺参数对回弹量的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 119-122.
- [4] 朱怡欣. 基于 XGBoost 和神经网络拟合预测模型的辛烷值损失的预测[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(3): 185-189.
- [5] 周红晓. 基于机器学习算法的股票价格趋势研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [6] 孟杭, 黄细霞, 涂修建. 基于时间序列和 Xgboost 的钢卷仓储吞吐预测[J]. 计算机应用, 2019, 39(S02): 24-28.
- [7] 高洁, 张涛, 程新洲, 等. 一种基于 LightGBM 机器学习算法的用户年龄及性别预测方法[J]. 邮电设计技术, 2019(9): 36-39.
- [8] 蒋薇薇. 基于集成学习的有机物红外光谱定量回归方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [9] 李小龙. 基于心冲击信号的测谎技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [10] 胡枫杰. 基于 LightGBM 网络入侵检测系统的研究[D].

船舶工程, 2020, 42(5): 1-4, 20.

- [6] 黄国勤, 罗莎祁, 于今. 小型无人机气动肌腱式弹射系统动态仿真与优化[J]. 中国机械工程, 2019, 30(4): 448-454.
- [7] 刘强. 无人机自动着舰撞网回收技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [8] 李宇, 邱玉芬, 周学武, 等. 差分卫星定位技术及其在武器系统中的应用[J]. 飞控与探测, 2018, 1(3): 1-6.
- [9] 甄子洋. 舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 669-681.
- [10] 张孝双, 彭秀艳, 赵希人. 基于神经网络方法的船舶姿态运动极短期预报与仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 641-642, 649.
- [11] 梁晓峰, 张振华. 浅析舰船激光测风雷达技术应用及发展趋势[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 768-775.
- [12] 李勇, 李立毅, 程树康, 等. 电磁弹射技术的原理与现状[J]. 微特电机, 2001(5): 3-4, 18.
- [13] 徐小斌, 段海滨, 曾志刚, 等. 无人机/无人艇协同控制研究进展[J]. 航空兵器, 2020, 27(6): 1-6.
- *****
西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [11] 张欣悦, 雷一凡, 刘培培, 等. 可变参数的有理分形插值曲线建模[J]. 图学学报, 2021, 41(2): 245-255.
- [12] 郑文斌. 基于深度学习的推荐算法及其隐私保护研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [13] 万贝利. 移动网络流量特性分析及预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [14] 刘宇轩. 基于后向传播神经网络的典型道路 PM2.5 和臭氧预测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [15] 徐逸之, 彭玲, 林晖, 等. 基于栈式自编码的上海地铁短时流量预测[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(7): 1275-1280.
- [16] 易思齐. 基于混合特征选择和 PSO-KELM 的电力变压器故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [17] 张特, 邓赵红, 王士同. 显隐信息协同的多视角极限学习模糊系统[J]. 计算机科学与探索, 2019, 13(3): 468-480.
- [18] 王晨曦. 面向石化企业的工艺技术管理系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [19] 刘方驰, 钟志农, 雷霖, 等. 基于机器学习的实体关系抽取方法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 57-62.