

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903057

面向小型舰船的固定翼无人机海上回收方法综述

谭立国¹,杨小艳²,宋申民²,霍建文³

(1. 哈尔滨工业大学 大科学工程专项建设指挥部暨空间基础科学研究中心, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 150001; 3. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 随着现代海战向立体化、多层次的发展,舰/船载无人机着舰技术得到广泛的研究与应用. 为研究舰/船载无人机着舰技术的发展现状及其亟需解决的关键技术难题,对目前该领域的文献进行了分析与总结. 无人机着舰技术是指无人机借助舰/船及机载导引系统,以飞行控制系统为依托,按照着舰/船流程,通过舰/船及无人机拦阻装备实现满足精度要求的着舰技术. 首先,概述了固定翼无人机在小型舰/船上回收技术发展历程,比较分析各种回收技术的优缺点. 其次,重点阐述“飞行中制动回收”和“定点高精度回收”方式的关键技术;最后,总结了固定翼无人机小型舰船着陆技术的发展过程中亟需解决的关键技术难题,包括无人机导航系统、控制系统等技术. 研究表明,舰/船载无人机着舰技术研究尚未形成成熟的解决方案,仍有许多技术难题亟需解决. 本研究为中国固定翼无人机海上回收系统的方案设计提供参考.

关键词: 固定翼无人机;小型舰船;着舰;回收技术;分析与总结

中图分类号: V249.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0001-10

An overview of marine recovery methods of UAV for small ships

TAN Ligu¹, YANG Xiaoyan², SONG Shenmin², HUO Jianwen³

(1. Major Science Engineering Special Construction Headquarters and Space Basic Science Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: With the three-dimensional and multi-level development of modern naval warfare, ship/shipborne Unmanned Aerial Vehicle(UAV) landing technology has been widely studied and applied. In order to study the development status of ship/shipborne UAV landing technology and solve the key technical problems, the current literature in this field is analyzed and summarized. UAV landing technology refers to the landing technology that meets the precision requirements through ship/shipborne and UAV arresting equipment according to the process of ship/shipborne landing and the flight control system relying on the ship/shipborne and airborne guidance system. First, the development history of fixed-wing UAV recovery technology in small ships/shipborne is summarized, and the advantages and disadvantages of various recovery technologies are compared and analyzed. Second, the key technologies are expounded with emphasis on “in-flight braking recovery” and “fixed-point high-precision recovery”. Finally, the key technical problems that need to be solved in the development of fixed-wing UAV small ship landing technology are summarized, including UAV navigation system design, control system design, and other technologies. The research shows that the ship/shipborne UAV landing technology research has not formed a mature solution. There are still many technical problems to be solved. This paper provides a reference for the design of China’s fixed wing UAV maritime recovery system.

Keywords: fixed-wing UAV; Small ships; ship landing; recovery technology; analysis and summary

近年来,南海争端问题不断,国土安全是国家安全和稳定的基石,中国国土安全面临严峻挑战. 随着航空母舰、战列舰、驱逐舰、护卫舰和两栖舰等军舰装备舰载无人机日益增加,无人机在信息化武

器和智能化武器为主导的“非接触战争”中发挥着重要作用^[1-3]. 利用小排水量的舰船搭载固定翼无人机,到达某些特殊作战区域执行战场侦察、反潜反舰、两栖突击、空中预警等危险任务变得日益广泛,掌握未来战争中的制海权、制空权,从而增强国家国防实力. 因此,研究面向小型舰船的固定翼无人机着舰回收技术,对掌握海上制空权,维护海洋权益,保障领海安全具有重要意义,也是国际普遍关注的重要问题.

收稿日期: 2019-03-12
基金项目: 国家自然科学基金(61703126);中央高校基本科研业务费专项资金资助(HIT.NSRIF.2019017)
作者简介: 谭立国(1984—),男,博士,助理研究员;
宋申民(1968—),男,教授,博士生导师
通信作者: 宋申民, songshenmin@hit.edu.cn

无人机着舰回收以安全可靠、机动性好、使用次数多、机体及机载设备损伤小、操作简便和维修方便来满足其经济效益要求。从 1911 年凭借飞行员飞行技术飞机首次在舰船上降落,到经历降落伞/翼伞回收、撞网回收、撞线回收、定点高精度回收的发展历程。无人机着舰关键技术^[4-7]主要分为回收装置与方法、无人机着舰/回收制导与控制系统与方法两部分。

本文结合军民领域中的固定翼无人机应用需求,系统地对传统跑道回收、撞网回收、降落伞回收、挂线回收和定点精确回收等各类固定翼无人机海上回收技术的现状、优缺点、应用领域和发展趋势进行介绍和分析^[8],旨在为固定翼无人机海上回收装置的设计和选择提供有价值参考。

1 传统跑道回收法

传统跑道无人机海上回收技术类似于舰载机着陆技术,由于小型无人机着舰速度远小于舰载机的着陆速度,因此在风浪较小条件下不需要制动装置进行制动减速。传统跑道回收法对舰船的甲板、尾钩和拦阻索等设施设备要求高^[9]。此外,舰船甲板振荡角度对无人机着舰下滑角、着舰轨迹影响较大^[10-11]。如:无人机着舰时下滑角须大于甲板振荡的允许角度,否则会导致无人机与船体的碰撞(如图 1(a)、(b)所示)。图 1(c)为无人机在甲板处于振荡幅值内顺利完成着舰任务示意图。因此,传统跑道回收方法^[12-13]主要用于配有飞行操作大型甲板的大型舰船,并且该类舰船具有较大的质量和尺寸而不易受波浪的影响。当今,大型无人机“捕食者”已成功在航母上起降。

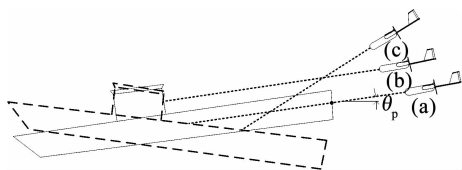


图 1 下滑角与船舶振荡幅度的关系

Fig. 1 Relationship between glideslope and ship pitch amplitude (not to scale)

2 网回收法

基于弹性网回收技术^[14]是固定翼无人机在小型舰船回收领域较为可行和广泛应用的回收技术。该方法所需安装设备简单、舰船甲板空间小,可根据需求进行部署和卸载,并且无需无人机像传统跑道回收法保持精确速率着舰,只需着陆速度尽量小。因此,网辅助回收方法有效、简单适合于具有高强度比的轻型和超轻型无人机^[15]。该方法于 1986 年首次

部署在爱荷华号战列舰的 USN RQ-2 先锋无人机回收(如图 2 所示)。



图 2 先锋无人机网辅助回收

Fig. 2 Pioneer UAV net-assisted recovery

至今国内外无人机撞网回收典型结构有单网三杆、双网双杆、单网单杆和单网双杆 4 种方案^[16]。前两者需要吸能缓冲装置,而单网单杆需要旋转驱动装置和阻尼器,单网双杆结构主要靠网体和支架的弹性变形对无人机进行吸能缓冲,不需额外的阻尼缓冲装置。如美国海军的 USS 依阿华战舰上的“先锋”无人机使用了尺寸约为 $7.6 \text{ m} \times 14.3 \text{ m}$ (高 $\times$ 宽) 的单网三杆撞网回收系统^[17]。

由于无人机吸能缓冲技术与无人机末端精确引导技术等关键技术发展的限制,无人机撞网回收系统需要飞机进场速度保持 $40 \sim 60 \text{ m/s}$,飞机降落速度在 3 m/s 内,且制导精度在 2 m 范围内。目前无人机回收质量未超过 170 kg ,而南京航空航天大学研制的某型无人机拦阻网成功回收了质量 120 kg 、入网速度 28 m/s 的无人机^[18]。

此外,该回收技术的缺点有:1) 着陆时回收网与螺旋桨、天线以及机翼间的缠绕^[19]增加无人机损坏风险与维修成本,从而影响回收装置准备时间和工作效率;2) 无人机未成功飞入回收网,容易与舰船上层建筑发生碰撞^[20-21];3) 与传统跑道回收类似,在逼近着陆高度太低时无人机易与船体发生碰撞;4) 该回收方法手动操作量高,难实现机械化。

3 降落伞回收法

目前,降落伞回收法可辅助维持无人机着陆时最低速度,而广泛用于常规跑道的陆基无人机回收。降落伞回收法具有重量轻,包装后体积小、成本相对低等优点^[22-23]。但伞自动回收难度大、对风敏感性高^[24-26]。降落伞回收法主要分为不可控降落伞回收、滑翔降落伞回收和动态降落伞回收 3 个方面,以下详细展开分析。

3.1 不可控降落伞回收

不可控降落伞回收技术通常使用非导向拖曳圆形或十字形降落伞,用于无风环境下无人机稳定垂直或近乎垂直着陆。因此,风和环境模型是影响着陆精度的主要因素^[27-28],若无人机回收开伞高度为 2500 m ,下落速度为 3 m/s ,回收落地精度半径为

2 km. 如无人机从 70 ~ 100 m 的高度下降时(假设典型的下降速率为 4 m/s)仅以 1 m/s 的风速误差将导致地面位置偏差^[29]为 15 ~ 20 m. 因而对于不可控制的降落伞回收技术,需要高精度估计风速与风向. 其次,当无人机靠近船舶时,会出现船舶空气动力学问题,进而会显著改变风的速度、方向和扰动,因此需精确建立空气尾流的环境模型^[30-31]. 需要注意的是,随着船舶向前运动,无人机在下降过程中将会与高于甲板的船舶上层建筑发生碰撞^[32],且着陆失败后无法进行二次着陆^[33].

综上所述,对于靠近舰船的无人机采取水上迫降是不可控降落伞回收的可行方式,从而消除着陆精度和碰撞冲击的影响,真正达到简化回收的目的. 但是,必须解决无人机的浮力和水上保护以及如何回收等问题. 目前,不可控降落伞法回收技术主要用于目标无人机和类似的军用无人机. 如澳大利亚海军和空军用于机组训练和武器系统性能评估^[34]的 Kalkara 无人机及 Teledyne-Ryan BQM-34 Firebee 目标无人机(如图 3 所示).



图 3 DRS 无人驾驶技术下的 BQM-34 Firebee 目标无人机降落伞回收

Fig. 3 The parachute recovery of BQM-34 Firebee UAV with unmanned operating technologies

3.2 滑翔降落伞回收

滑翔降落伞回收方式^[35]可解决在低空速下无人机的空气动力学表面效率下降问题. 因为,滑翔伞伞篷通常采用翼伞形式^[36-37];当用冲压空气充气时,降落伞横截面呈翼型形状,可通过下拉制动线使后缘变形^[38]来控制翼面从而在有限时间内降低前进速度和下沉率.

翼伞系统的运动形式有 4 种:滑翔、转弯、减速和雀降^[39]如图 4 所示. 具体流程如下:

- 1) 无人机定位设备完成自身定位;
- 2) 翼伞携带无人机向目标落点定向飞行;
- 3) 进入目标落点附近,翼伞携带助无人机进行盘旋消高;
- 4) 为了降低水平着陆速度,通过控制使翼伞携

带无人机进入逆风飞行状态;

5) 在特定高度,翼伞进行“雀降”操作,使无人机的下降速度进一步迅速降低;

6) 无人机最终安全降落在指定的着陆区域内,可进一步收缩翼伞操纵绳,以减小地面风对翼伞的影响.

上述流程可反映,翼伞系统的位置、速度方向控制及转弯性能对是否精确回收至关重要. 目前国内外对翼伞的滑翔、转弯、稳定等特性进行了数字仿真与实验研究,确定该回收方式由于受翼伞结构、展开机制、展开控制的影响需精准计算翼伞展开点^[40-43]. 如对于质量 300 kg 的无人机,若着陆速度和开伞力峰值限制在 7 m/s 和 5 kN 以下,那么降落伞总阻力面积可选取在 103 ~ 163 m² 范围内.

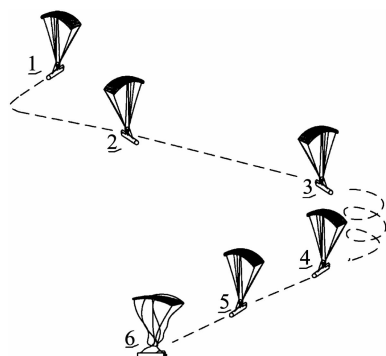


图 4 翼伞归航工作程序示意

Fig. 4 Sketch map of the returning process of the booster parafoil system

此外,滑翔降落伞回收方式可在没有冲击衰减器情况下实现无人机软着陆^[44],但船舶由于海浪引起的甲板运动对该回收方式设备配置更高,如需要采用某种捕获装置或配备缓冲器. 目前,使用翼伞进行回收的无人机包括 Skyeeye (BAE)、Eyeview (IAI Malat)、Sentry (S-TEC)、Poisk-1/2 (KhAI) 等. 尽管对于其中无人机而言,翼伞回收是可选择的一种方式或仅用于紧急着陆.

3.3 动态降落伞回收

动态降落伞回收技术与跑道着陆或弹性网回收,以及降落伞回收等传统回收方式^[45]结合,从而降低了回收过程对风的敏感程度. 该方法的回收示意图如图 5 所示,根据无人机的质量和降落伞的大小,滑行路径会在指定着陆点之前 0.5 ~ 3.0 m 高度处结束,然后关闭发动机并进入无引导降落伞滑翔模式^[46](如图 5(a)所示).

回收之初如制动降落伞,当前进速度降低且无人机开始下降时,降落伞逐渐向上转动,此时像传统着陆降落伞(如图 5(b)、(c)所示). 该回收方式为了避免着陆冲击造成的无人机损伤,须设计船/舰机载的缓冲器,如图 5(c)所示.

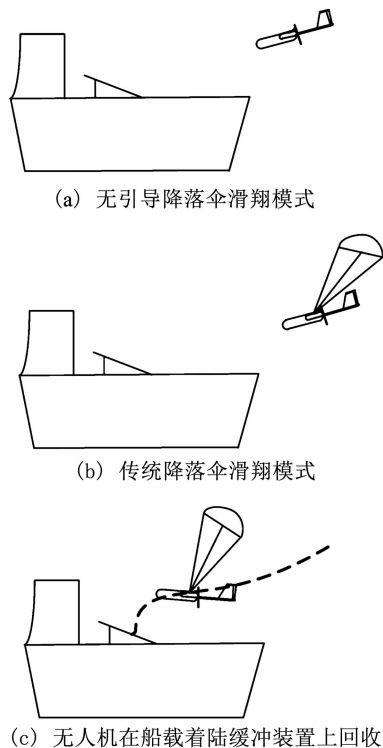


图 5 动态降落伞回收

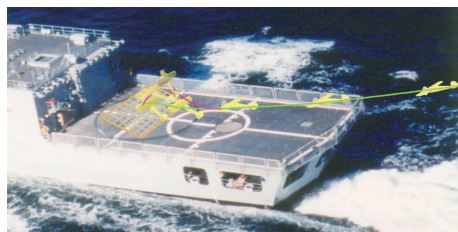
Fig. 5 Recovery using dynamic parachute deployment

动态降落伞回收技术存在以下两个主要问题:首先,须以极高精度测量着陆点与无人机间的距离及相对速度,以确定展开时刻,否则几分之一秒的延迟将导致几米的过靶,因此须安装专用的跟踪定位设备;其次,降落伞展开的过程须具备快速性和稳定性,从而导致辅助展开系统^[47]的复杂性.从工程的角度来看,该技术难用于模拟和研发,须设计一个精确的降落伞展开动态模型和在过失速攻角和侧滑角下的无人机模型.目前,该方法尚未成功用于固定翼无人机在小型舰船上的回收.

4 深度失速回收法

基于深度失速技术^[48]的固定翼无人机在小型舰船上回收的示例,如图 6 所示.在无人机与船舶间靠近的最后时间段,无人机通过上拉升降舵,使攻角提升至相对较高的后失速值^[49-50],从而使机翼失去部分升力且阻力增加,导致无人机速度迅速降低,实现安全回收.与降落伞辅助回收方法类似,该方法需在舰船上安装水平/倾斜弹性网作为冲击衰减器.

此外,另一种基于深度失速技术^[51]的固定翼无人机在小型舰船上回收方法是‘栖息着陆’(如图 7 所示).该方法无人机在正常(预失速)攻角下以陡峭的上升拉平机动发生失速,在轨迹的最高点速度达到最小,无人机失速并下降至预先设置好的着陆点.理论上可实现零速下降,但须提供较高且无阻碍的着陆点.

图 6 基于深度失速技术的无人机海上回收^[52]Fig. 6 Deep stall recovery^[52]

基于深度失速技术的固定翼无人机回收方法主要面临以下问题:1)在所需攻角和速度下,飞机具有有限的可控性,且无人机飞行状况常比降落伞的飞行状况复杂如轻微的水平不对称(空气动力学或质量)可在达到失速攻角时产生快速滚转响应^[52];2)需特定高度的最佳轨迹,从而需要无人机不同控制器的设计方法.

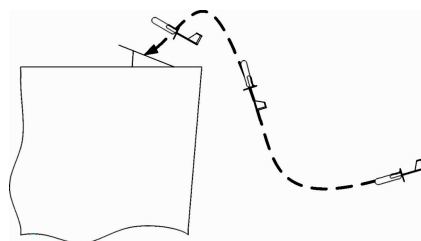


图 7 栖息着陆

Fig. 7 Perched landing

目前,AeroVironment 的 FQM-151 指针微型无人机采用深度失速机动实现在平坦的地面上自主着陆,然而该回收方法无法达到船舶回收所需的精确的点着陆要求.

5 “变结构”回收法

“变结构”回收法的无人机能够在飞行中改变其空气动力学配置,以提供足够的巡航和起飞/着陆性能.本文不考虑悬停的可转换设计(即垂直起降无人机^[53]).变结构设计主要有两个分支:1)柔软机翼无人机^[54],实现方式之一为可折叠三角形(Rogallo)机翼^[55],类似于蝙蝠翅膀的网状翼尖;该结构可提供良好的可控性、大速度范围、低风敏感性及高稳定、方便的机翼展开,但结构设计复杂、难度高.2)倾转旋翼^[56]、倾转机体和自由翼^[57-59]的概念.该结构采用有限角度转换设计来提高短距着陆能力,倾转旋翼设计需要复杂机构来控制旋翼(或整个发动机组)的旋转.

该类飞行器在飞行过程中有 3 种模式:垂直起降模式、转换模式、前飞模式.通常情况下,垂直起降状态时,该类飞行器类似多旋翼飞行器,升力、俯仰、滚转和偏航力矩均由旋翼提供.但倾转旋翼的气

动外形设计需要对其在直升机模式和飞机模式下的不同要求进行综合考虑, 对其气动外形相关参数进行优化以使倾转旋翼同时具有较高的悬停效率和巡航效率. 文献[60]建立了倾转旋翼的气动特性分析模型, 研究了倾转旋翼机倾转过渡状态旋翼尾迹和气动干扰特性, 从理论上给操纵导数在倾转过渡过程中变化情况、操纵分配策略奠定了基础. 总体上, 倾转旋翼过渡阶段动态复杂、开发成本高、对无人机的整体设计影响大.

目前, 倾转旋翼设计常用于有人驾驶或无人驾驶的短距起降/垂直起降飞机^[61-62] (如图 8 所示, 贝尔 XV-15、V-22、鹰眼).

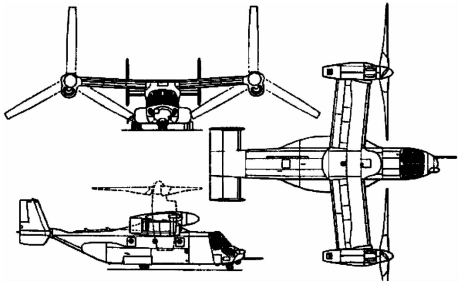


图 8 贝尔-波音 V-22 倾转旋翼机三维图

Fig. 8 3-D view of the Bell-Boeing V-22 tilting rotor aircraft

6 挂线回收法

至今, 本文讨论回收技术都致力于降低进近速度, 以便使无人机降落在舰船甲板有限区域内. 挂线回收法^[63-64]是在正常靠近速度下捕获无人机, 并实现对无人机安全减速. 该回收技术借鉴航空母舰上拦截索回收经验^[65-67], 但航母拦截索不同的是回收拦截索^[68-71]可水平, 也可垂直. 挂线回收系统由无人机翼尖小钩或拦阻绳组成的捕获装置、吸能缓冲装置和末端引导装置组成. 可分为对准撞绳、滑行锁定和回旋摆动 3 个阶段.

6.1 天 钩

天钩为垂直悬挂线技术, 该回收系统利用一根垂直悬挂在吊杆上的拦阻绳捕获无人机翼尖锁钩来实现精确定点回收的先进回收方式, 其具有良好的研究应用价值和开发前景. 该技术主要对无人机回收轨迹及速度响应、回收系统吸能特性、回收系统缓冲特性, 以及回收过程中拦阻力峰值载荷下的机翼应力和应变需求较高. 机翼触绳后拦阻绳沿机翼前缘滑行到前缘翼尖, 滑行过程较短暂, 大约只有 0.08 s. 此后无人机翼尖小钩钩住并锁定拦阻绳, 吸能缓冲装置吸收无人机动能, 无人机做半径和速度均减小的回旋运动. 回旋约 1.75 圈后速度即降至 2.5 m/s 以下, 回旋两圈后无人机在平衡位置微幅摆动, 此时可安全取下无人机.

目前, Insitu Group 开发的小型 SeaScan 和 ScanEagle 无人机均采用了垂直悬挂线的天钩技术^[72]. 在接近舰船时, 无人机直接飞入悬挂线, 使悬挂线撞击其中半翼前缘, 而后向翼尖滑动并将自身锁定在钩子中 (如图 9 所示). 该方法已成功实验测试, 但强风下回收率低. 此外, 该技术对无人机设计有着严格的要求, 如需要无人机拥有后掠翼^[73]、加强前翼、长翼展.



图 9 天钩回收

Fig. 9 Skyhook recovery

6.2 拦截钩

拦截钩回收技术可分水平拦截索和机载尾钩. 与航母拦截索回收系统^[74-75]不同, 该技术的拦截索安装在延伸至甲板外侧的吊杆、凸起的杆或类似设施上. 此外, 钩长度不受起落架高度限制, 因此, 尾钩线不限长度, 从而为无人机位置提供大的容差: 允许的垂直误差很大程度上取决于拦截索钩的长度, 允许的水平误差由制动线的长度决定.

该类回收示例如图 10 所示, 无人机尾端伸出带有自锁钩的长拦截索^[76-77], 并从吊杆上方飞过, 吊钩滑过拦截索并锁定拦截索进行着陆. 成功捕获后, 无人机被提升至载机上或船体绞盘处. 当然该回收方式需要在 300 m 外确定回收着陆点, 即最终进场开始的位置, 并预测无人机回收点的位置, 从而无人机不断调整姿态来补偿船舶行驶和风力影响, 跟踪回收臂位置. 无人机回收时间主要取决定位精度、橡胶绳阻尼器参数等因素. 文献[78]对无人机绳钩回收系统建立多目标优化模型, 对吸能缓冲系统参数进行优化分析确定无人机回收时间、速度与橡胶绳阻尼器有关.

该技术尚未成功应用于固定翼无人机在小型舰船上的回收, 但具有对准精度要求低、无复杂机械结构设计、着陆失败与舰船无碰撞等^[79].

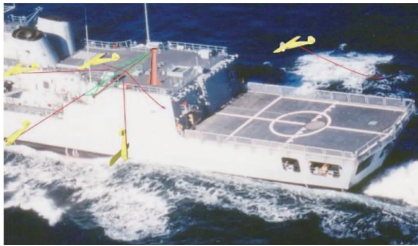


图 10 空中抓钩过程^[52]

Fig. 10 Cable hook in-flight arresting sequence^[52]

7 定点高精度着陆法

一般而言,在海洋环境下应用固定翼无人机时都会直接降落于大型舰船,但对于小型舰船易受甲板空间所限,难以寻到无人机所需着陆空间.美国国防高级研究计划局(DARPA)公布了 SideArm 系统原型旨在解决 500 kg 下固定翼无人机在小型船舶上回收的问题,从而降低了无人机在小型舰船上着陆的风险.

SideArm 系统由起重机、滑轨和制动装置 3 部分组成.在回收过程中,机载飞控系统根据接收到的 SideArm 信号控制无人机减速,从而通过滑轨降落到 SideArm 的制动装置中(如图 11 所示).

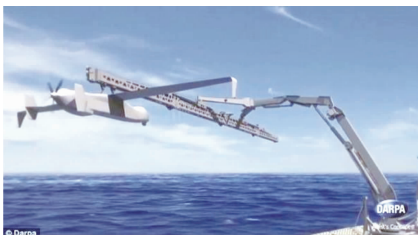


图 11 SideArm 无人机海上回收

Fig. 11 SideArm UAV maritime recovery

SideArm 系统的主要优点为通过低成本的便携模块化设计,让飞机能够安全地实现快速设置和受控减速;布放/回收非常灵活,不受舰船上的基础设施干扰;体积小,可放在 6.096 m 集装箱内,便于交通运输;着陆装置被延伸至船体外侧,因而在着陆失败的情况下无人机与船体或船上建筑不会发生碰撞,在载机燃料充足的情况下可进行二次着陆^[80]. SideArm 系统的缺点为要求无人机配备高精度导航和制导系统,保证无人机与着陆装置间的精确对接;从控制无人机减速到无人机与着陆装置对接间只有 2~3 s 的时间,这对无人机的控制系统设计提出了很高的要求;着陆的成功率受风浪引起的舰船摇晃和天气影响严重^[81].

2016 年 12 月,SideArm 系统顺利通过了 181 kg 的 Lockheed Martin Fury 无人机系统测试.为了增加测试难度,Aurora Flight Sciences 加快了无人机的飞行速度,但 SideArm 还是成功地将 Lockheed Martin Fury 无人机“捕获”.

在过去的几十年里,美国、俄罗斯以及欧盟在无人机海上应用领域^[82]取得了一系列成绩,中国在相关领域的基础理论研究和技術储备相比之下还有较大的差距.对于无人机海上应用来说,舰/船载无人机的海上回收是不可获取的技术.本文对舰/船载固定翼无人机系统的关键技术以及国外发展现状与趋势进行综合分析^[83-85],并归纳总结小型舰载固定翼无人机回收技术如下(各回收方法的各项性能特点见表 1).

表 1 各回收方法的各项性能特点
Tab. 1 Performance characteristics of each recycling method

回收方法	回收场地/m	舰改造程度	飞机进场速度/ (m·s ⁻¹)	飞机降落速度/ (m·s ⁻¹)	近场导航 精度	可预见损失 程度	技术难点
传统跑道回收方法	跑道 ≥20 * 10	较小	40 ~ 60	≤3	较低	较小	高精度落点
网回收法	网 ≤20 * 8	较大	40 ~ 60	≤3	高	较大	回收网阻尼系统; 近场高精度导航
降落伞回收法	跑道 20 * 10	较小	≤15	≤6	高	较小	高精度落点
深度失速回收法	网 ≤20 * 8; 跑道 2 * 2	较小	30 ~ 60	≤3	较低	较小	高精度落点
变结构回收法	无	较小	30 ~ 60	≤3	较低	较小	结构设计复杂性
挂线回收法	无	较大	30 ~ 60	≤3	较高	较小	高精度控制
定点高精度着陆法	无	较大	20 ~ 50	≤3	较高	较大	高精度控制

8 结 论

1)传统跑道回收法主要用于长距离且速度较大的无人机回收,对跑道要求高,典型于航母的无人机回收。

2)拦截网回收和伞降回收是近年来无人机常用的回收方法,前者需要能量吸收设备、自动导引设备,所以成本高;而伞降回收适用范围广、性价比高,无需复杂昂贵的自动导航着陆系统和宽阔平坦的专用着陆场地,但需求定位精度高,飞机进场速度小。

3)无人机深度失速回收法、挂线回收法、定点高精度着陆法对近场导航精度要求、飞机降落速度高,实际回收困难。

4)“变结构”回收法虽结构设计难度大,但对回收设备、回收场地、回收速度、进场导航精度的需求低,是小型舰载固定翼无人机舰上回收方式的首选。舰/船载无人机系统作为未来信息化作战和海洋环境监测的重要组成部分,中国应加大投入力度,重视发展。

参考文献

- [1]赵涛. 舰载无人机的发展[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 21
ZHAO Tao. Development of shipborne UAV[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(4): 21. DOI: 10.3969/j. issn. 1627 - 9730. 2010. 04. 006
- [2]高嘉景. 海军舰载无人机的现状及其发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(3): 16
GAO Jiajing. Current situation and development trend of naval shipboard Unmanned Aerial Vehicle [J]. Ship Electronic Engineering, 2004, 24(3): 16. DOI: 10.3969/j. issn. 1627 - 9730. 2004. 03. 004
- [3]尚燕丽. 海军发展无人作战平台的需求、现状与展望[J]. 国防技术基础, 2009(1): 40
SHANG Yanli. Requirement current situation and prospect of developing unmanned combat platform for navy[J]. Foundation of National Defense Technology, 2009(1): 40
- [4]FERRIER B, DUNCAN J D, LUDWIG F, et al. UAV all weather autonomous ship board operations [C]//International Specialists Meeting-Unmanned Rotorcraft: Design, Control and Testing. [S. l.]: [s. n.], 2007
- [5]GERHART M, PEITZMEIER K, VANN W. MQ-8B fire scout program support analysis for commander helicopter maritime strike wing Atlantic fleet [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School Theses and Dissertations, 2009
- [6]FERRIER B, SEHGAL A, ERNST R. Fire scout UAV launch and recovery system performance improvement [C]//AUVSI Unmanned Systems. Orlando, Florida: Association for Unmanned Vehicle Systems International, 2014: 1106
- [7]ZHANG Daibing, WANG Xun. Autonomous landing control of fixed-wing UAVs: From theory to field experiment [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 88(2/3/4): 619. DOI: 10.1007/s10846 - 017 - 0512 - y
- [8]杜聪聪, 李武军, 陈朝浪, 等. 固定翼无人机回收与发射系统发展综述[J]. 科技传播, 2016, 8(7): 113
DU Congcong, LI Wujun, CHEN Zhaolang, et al. Review on the development of fixed-wing UAV recovery and launch system [J]. Science and Technology Communication, 2016, 8(7): 113
- [9]SARIGUL-KLIJN N, SARIGULKLIJN M. A novel sea launch and recovery concept for fixed wing UAVs [C]//Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California: AIAA, 2016. DOI: 10.2514/6.2016 - 1527
- [10]MA Chengjing, LIU Xing'an, ZHANG Caiwen, et al. Parameter research of UAV vertical rope-type recovery system [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 179: 03001. DOI: 10.1051/mateconf/201817903001
- [11]张永花. 舰载机着舰过程甲板运动建模及补偿技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012
ZHANG Yonghua. Research on deck motion modeling and deck motion compensation for carrier landing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012
- [12]季丽丽. 轮式无人机自主着陆控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012
JI Lili. Research on control system design of auto landing for Unmanned Aerial Vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012
- [13]张勇, 徐贵力, 章凤翎, 等. 无人机自主着陆过程中合作目标特征点的提取方法研究[J]. 航空兵器, 2010(1): 25
ZHANG Yong, XU Guili, ZHANG Fengling, et al. Research on feature point extraction of cooperative object for UAV autonomous landing [J]. Aero Weaponry, 2010(1): 25. DOI: 10.3969/j. issn. 1673 - 5048. 2010. 01. 006
- [14]KLAUSEN K, FOSSEN T I, JOHANSEN T A. Autonomous recovery of a fixed-wing UAV using a net suspended by two multirotor UAVs [J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(5): 717. DOI: 10.1002/rob.21772
- [15]蒋毅, 孙春贞, 王凯. 舰载无人机撞网回收自适应制导技术[J]. 飞行力学, 2015, 33(1): 43
JIANG Yi, SUN Chunzhen, WANG Kai. Ship-board UAV net recovery adaptive guidance technology [J]. Flight mechanics, 2015, 33(1): 43. DOI: 10.13645/j. cnki. f. d. 20141104. 008
- [16]裴锦华. 无人机撞网回收的技术发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(s1): 6
PEI Jinhua. Technology development of UAV net recovery system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(s1): 6. DOI: 10.16356/j. 1005 - 2615. 2009. s1. 004
- [17]法斯多姆. 无人机系统导论[M]. 吴汉平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003
Fahlstrom P G. Introduction to unmanned aerial systems [M]. 2nd Ed. Wu Hanping, trans. Beijing: Electronic Industry Press, 2003
- [18]李悦, 周同礼, 董立敏. 某型无人机拦阻网回收系统设计[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2004, 18(1): 82
LI Yue, ZHOU Tongli, DONG Limin. Design of arresting net recovery system for certain unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science Edition), 2004, 18(1): 82. DOI: 10.3969/j. issn. 1001 - 4926. 2004. 01. 018
- [19]范嘉芳. 船舶预防螺旋桨缠绕异物的技术探讨[J]. 中国水运, 2010(6): 26
FAN Jiafang. Technical discussion on the prevention of propeller winding foreign body [J]. China Water Transport, 2010(6): 26.

- DOI:10.3969/j.issn.1006-7973-B.2010.06.014
- [20] 洪达, 周磊, 郑震山. 国外小型舰载固定翼无人机装备回收技术发展研究[J]. 飞航导弹, 2014(4): 50
- [21] 余心诚. 舰载固定翼无人机起降方式探寻[J]. 电光系统, 2006(1): 54
- YU Xincheng. Exploration of take-off and landing mode of shipborne fixed-wing UAV [J]. Electronic and Electro-optical System, 2006(1): 54
- [22] 郑浩奕. 无人机伞降系统关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015
- ZHENG Haoyi. Research on key technologies of UAV parachute landing system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [23] 傅淑娟, 钱荣华, 顾余铨. 降落伞开伞系统[J]. 火箭技术, 1997(4): 37
- FU Shujuan, QIAN Ronghua, GU Yuquan. Parachute opening system [J]. Rocket Technology, 1997(4): 37
- [24] 刘志强. 小型无人机伞降回收运动分析[J]. 宇航计测技术, 2013, 33(6): 54
- LIU Zhiqiang. Parachute landing recovery motion analysis for a small Unmanned Aerial Vehicle [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2013, 33(6): 54. DOI:10.3969/j.issn.1000-7202.2013.06.013
- [25] 安佳宁, 严辉. 某型无人机伞降回收过程分析及回收策略研究[J]. 航空计算技术, 2014, 44(5): 104
- AN Jianing, YAN Hui. Analysis on a certain type of UAV parachute recycling process and recycling strategy[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(5): 104
- [26] 赵云辉. 无人机伞降回收系统建模与控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012
- ZHAO Yunhui. Research on modeling and control strategy of parachute recycling system for the UAV [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012
- [27] 许东松, 刘星宇, 王立新. 变化风场对舰载飞机着舰安全性影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 77
- XU Dongsong, LIU Xingyu, WANG Lixin. Influence of changeful wind on landing safety of carrier-based airplane [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 77
- [28] 黄华, 陆汉城, 徐幼平. 大气扰动及其对无人机自动着陆影响仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6821
- HUANG Hua, LU Hancheng, XU Youping. Simulation research of the atmosphere disturbance and its influence on UAV automatic landing[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(21): 6821
- [29] 吴成富, 邵朋院, 马松辉, 等. 无人机伞降定点回收技术研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(6): 104
- WU Chengfu, SHAO Pengyuan, MA Songhui, et al. Study on assigned point parachute recovery of UAV [J]. Computer Simulation, 2012, 29(6): 104. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2012.06.027
- [30] 胡国才, 王奇, 刘湘一, 等. 舰尾流对舰载机着舰轨迹和动态响应的影响研究[J]. 飞行力学, 2009, 27(6): 18
- HU Guocai, WANG Qi, LIU Xiangyi, et al. Influence of carrier air wake on carrier-based aircraft landing trajectory and dynamic response [J]. Influence of Carrier Air Wake on Carrier-Based Aircraft Landing Trajectory and Dynamic Response, 2009, 27(6): 18. DOI:10.13645/j.cnki.f.d.2009.06.019
- [31] 柳昌龄, 孟鑫, 苟立俊, 等. 尾流干扰下舰载机的着舰控制研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(5A): 208
- LIU Changling, MENG Xin, GOU Lijun, et al. Research on ship landing control of shipborne aircraft under wake disturbance [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(5A): 208. DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2018.5A.070
- [32] 许东松, 刘星宇, 王立新. 航母运动对舰载飞机着舰安全性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3): 289
- XU Dongsong, LIU Xingyu, WANG Lixin. Influence of carrier motion on landing safety for carrier-based airplanes [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 289. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2011.03.016
- [33] 杨广, 李泰安, 马经忠, 等. 舰尾流对舰载机复飞边界影响分析[J]. 飞行力学, 2017, 35(3): 16
- YANG Guang, LI Taian, MA Jingzhong, et al. Analysis of the influence of carrier air wake on carrier-based aircraft wave-off boundary [J]. Flight Dynamics, 2017, 35(3): 16. DOI:10.13645/j.cnki.f.d.20170220.003
- [34] 赵红艳. 武器系统作战性能评估[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2000(10): 3
- ZHAO Hongyan. Operational performance evaluation of weapon system [J]. Information Command and Control System and Simulation Technology, 2000(10): 3
- [35] 郭鹏. 大型降落伞开伞过程研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012
- GUO Peng. Research on the Opening Process of Large Parachute System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012
- [36] 熊菁. 翼伞系统动力学与归航方案研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- XIONG Jing. Research on the dynamics and homing of parafoil system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005
- [37] 王帝, 滕海山, 吴世通. 用于无人机精确着舰的翼伞归航控制方法[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(3): 43
- WANG Di, TENG Haishan, WU Shitong. Homing method of controllable parafoil for landing of UAV on deck [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(3): 43. DOI:10.3969/j.issn.1009-8518.2017.03.005
- [38] YU J, HUA Y, YANG P, et al. Robust adaptive attitude control for carrier based aircrafts in the landing process under the carrier air wake disturbance [C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE Computer Society, 2017: 3248
- [39] 蒲志刚, 李良春, 唐波, 等. 翼伞系统分段归航方向控制方法[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(10): 117
- PU Zhigang, LI Liangchun, TANG Bo, et al. Phased homing direction control method for wing umbrella system [J]. Sichuan Ordnance Engineering Journal, 2009, 30(10): 117. DOI:10.3969/j.issn.1006-0707.2009.10.040
- [40] 施亮. 各扰动对舰载机着舰过程的影响分析[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12): 46
- SHI Liang. Influence of disturbances on ship-based aircraft's landing process [J]. Computer Simulation, 2009, 26(12): 46. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2009.12.014
- [41] 郭亮, 张红英, 童明波. 无人机伞回收动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 14
- GUO Liang, ZHANG Hongying, TONG Mingbo. Dynamics analysis on parachute recovery of Unmanned Aerial Vehicle [J]. Journal of

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 14. DOI: 10.3969/j. issn. 1005 - 2615. 2012. 01. 003

[42] 陈瑞明. 翼伞精确定点着陆归航方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(1): 18

CHEN Ruiming. Homing method research of precision landing of parafoil system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(1): 18

[43] 李春, 吕智慧, 黄伟, 等. 精确定点归航翼伞控制系统的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1331

LI Chun, LV Zhihui, HUANG Wei, et al. Guidance navigation & control system for precision fix-point homing parafoil [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1331

[44] 蔡文, 李斌, 温金鹏, 等. 无人机软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1867

CAI Wen, LI Bin, WEN Jinpeng, et al. Research on cushioning characteristics of UAV soft landing airbags[J]. Acta Armamentari, 2014, 35(11): 1867. DOI: 10.3969/j. issn. 1000 - 1093. 2014. 11. 019

[45] 崔克进. 飞翼舰载无人机着舰控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015

CUI Kejin. The Research of carrier landing control of the flying-wing UAV [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, 2015

[46] 朱炳杰. 无人机风梯度动态滑翔机理与航迹优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016

ZHU Bingjie. Research on mechanism and trajectory optimization for unmanned aerial vehicles by dynamic soaring in gradient wind [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016

[47] 孙鹏, 陈晨, 李凤鸣, 等. 基于 SPH 方法的降落伞展开过程数值研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(8): 89

SUN Peng, CHEN Chen, LI Fengming, et al. Numerical study of parachute spreading process based on SPH method[J]. Computer simulation, 2017, 34(8): 89. DOI: 10.3969/j. issn. 1006 - 9348. 2017. 08. 019

[48] 陈李萍, 殷虹娇. 小型无人机深失速降落回收的试验研究[J]. 中国科技纵横, 2016(14): 49

CHEN Liping, YIN Hongjiao. Experimental research on recovery of small UAV after deep stall landing [J]. China Science & Technology Overview, 2016(14): 49. DOI: 10.3969/j. issn. 1671 - 2064. 2016. 14. 039

[49] 谢凯, ABBAS L K, 陈东阳, 等. 翼型非定常来流下复合运动动态失速仿真[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 2019(5): 1 [2019-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20181218.1553.009.html>

XIE Kai, ABBAS L K, CHEN Dongyang, et al. Numerical investigations on dynamic stall of a complex of airfoil under unsteady freestream velocity [J/OL]. Journal of Harbin Engineering University, 2019(5): 1 [2019-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20181218.1553.009.html>

[50] 饶秋磊, 韩意新. 大迎角气动力建模与失速/尾旋模态仿真[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 472

RAO Qiulei, HAN Yixin. High angle of attack aerodynamic modeling and simulation and analysis of stall/spin mode [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(3): 472. DOI: 10.11776/cjam.35.03.A041

[51] 杨从新, 李寿图. 一种 H 型垂直轴风力机翼型的深度失速研究[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(1): 51

YANG Congxin, LI Shoutu. Study of post-stalled airfoil of a H-type vertical axis wind turbine [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(1): 51. DOI: 10.3969/j. issn. 1673 - 5196. 2015. 01. 012

[52] KHANTSIS S. Control system design using evolutionary algorithms for autonomous shipboard recovery of unmanned aerial vehicles [D]. Melbourne: RMIT University, 2006

[53] 何小九, 李彦彬, 朱枫, 等. 国外垂直起降无人机发展现状及设计制造关键技术[J]. 飞航导弹, 2016(6): 22. DOI: 10.16338/j. issn. 1009 - 1319. 2016. 06. 05

[54] 侯鹏. 采用摆振柔软式旋翼的倾转旋翼机动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013

HOU Peng. Research on dynamics of soft-inplane tiltrotor model [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013

[55] 韩俊毫. 可折叠动力三角翼机翼设计分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015

HAN Junhao. Design and analysis on foldable wing of powered air trike[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015

[56] WANG Zhanqing, LI Lihua, LIU Xin, et al. Transfer alignment of shipborne aircraft with large misalignment based on rotation vector error model [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(6): 723. DOI: 10.13695/j. cnki. 12 - 1222/o3. 2016. 06. 005

[57] RO K, RAGHU K, BARLOW J B. Aerodynamic characteristics of a free-wing tilt-body unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(5): 1619. DOI: 10.2514/1.27989

[58] 程川. 自由翼气动特性实验研究及初步应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013

CHENG Chuan. The research and application of aerodynamic characteristics of free-wing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013

[59] 何小亮, 明晓. 自由翼的空气动力特性研究[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(2): 190

HE Xiaoliang, MING Xiao. The aerodynamic characteristics of freewing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(2): 190

[60] 薛立鹏, 张呈林. 倾转旋翼气动优化设计[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 453

XUE Lipeng, ZHANG Chenglin. The aerodynamic optimization design to tilt-rotor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(4): 453. DOI: 10.3969/j. issn. 0258 - 1825. 2011. 04. 009

[61] 唐亮, 徐庆九. 海军倾转旋翼无人机技术和发展优势综述[J]. 科技资讯, 2012(28): 73

TANG Liang, XU Qingjiu. Overview of the technology and development advantages of naval tiltrotor UAV [J]. Science & Technology Information, 2012(28): 73. DOI: 10.16661/j. cnki. 1672 - 3791. 2012. 28. 057

[62] 段洪伟, 赵长辉, 王琦. 新型垂直起降无人机的发展[C]//第五届中国无人机大会论文集. 北京: 中国航空协会, 2014

DUAN Hongwei, ZHAO Changhui, WANG Qi. Development of new vertical take-off and landing UAV [C]//Proceedings of the 5th China UAV Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2014

[63] 陶琨, 王寅. 视觉导航技术在小型无人机撞线回收中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 80

TAO Kun, WANG Yin. Application of visual navigation technology in cable-hock recovery of small-size unmanned aerial vehicle [J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(7): 80. DOI: 10.7690/bgzdh. 2013. 07. 023

- [64] 陶琨. 基于计算机视觉技术的无人机自动导航研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013
TAO Kun. Research on automatic navigation of unmanned aerial vehicle based on computer vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013
- [65] 孙晓羽. 舰船运动下舰载机阻拦着舰动力学分析与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012
SUN Xiaoyu. The analysis of aircraft arrested landing under the motion of aircraft carrier [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012
- [66] 孙建勇, 张建军. 飞行器拦阻着陆冲击试验分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 5
SUN Jianyong, ZHANG Jianjun. Analysis of shock test for aircraft arrested landing[J]. Equipment Environment Engineering, 2010, 7(6): 5. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9242. 2010. 06. 002
- [67] 陶杨, 贾忠湖, 侯志强. 舰载机拦阻着舰动力学研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(2): 133
TAO Yang, JIA Zhonghu, HOU Zhiqiang. Research on the dynamics of carrier aircraft arrested deck-landing[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(2): 133. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-1522. 2010. 02. 004
- [68] 陆沛文. 舰载机拦阻钩挂拦阻索失效动力学仿真计算与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018
LU Peiwen. Dynamic simulation and analysis for arresting process of carried-based aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018
- [69] 沈文厚, 丁祥, 郭叔伟. 拦阻索应力的仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(14): 224
SHEN Wenhou, DING Xiang, GUO Shuwei. Stress simulation of the purchase cable [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(14): 224. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815. 2015. 14. 04
- [70] 李贯成, 姜志峰, 吴云生. 飞机拦阻系统的现状及其发展[J]. 洪都科技, 2007(3): 7
LI Guancheng, JIANG Zhifeng, WU Yunsheng. Present status and development of aircraft arresting system[J]. Hongdu Science and Technology, 2007(3): 7
- [71] 柳刚. 飞机着陆拦阻装置的设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006
LIU GANG. The research on techniques to design the arresting gear of aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006
- [72] 林一平. 试验中的舰载“天钩”系统[J]. 航海, 1991(1): 32
LIN Yiping. Shipborne “skyhook” system in test[J]. Navigation, 1991(1): 32
- [73] 董彦非, 陈元恺, 彭金京. 可变后掠翼技术发展展望[J]. 飞行力学, 2014, 32(2): 97
DONG Yanfei, CHEN Yuankai, PENG Jinjing. Development and prospect of variable swept wing [J]. Flight Dynamics, 2014, 32(2): 97. DOI: 10.13645/j. cnki. f. d. 2014. 02. 020
- [74] 刘相春, 卢晶, 黄祥钊. 国外航母舰载机出动回收能力指标体系分析[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(4): 1
LIU Xiangchun, LU Jing, HUANG Xiangzhao. Analysis on the index system of sortie generation capacity of embarked aircrafts[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(4): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-3185. 2011. 04. 001
- [75] 朱英富, 熊治国, 胡玉龙. 航空母舰发展的思考[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 1
ZHU Yingfu, XIONG Zhiguo, HU Yulong. On the development trends of aircraft carriers [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-3185. 2016. 01. 001
- [76] 孙林峰, 马晓平, 吴佳凯. 无人机绳钩回收仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(7): 1572
SUN Linfeng, MA Xiaoping, WU Jiakai. Simulation research of rope-hook recovery for unmanned aerial vehicle [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(7): 1572. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815. 2012. 07. 024
- [77] 裴锦华, 何成, 王陶, 等. 小型固定翼无人机绳钩回收过程动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 693
PEI Jinhua, HE Cheng, WANG Tao, et al. Dynamics analysis of rope-hook recovery system for fixed-wing UAV [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 693. DOI: 10.16356/j. 1005-2615. 2017. 05. 013
- [78] 吴佳凯, 马晓平, 孙林峰. 无人机绳钩回收系统参数设计[J]. 航空计算技术, 2012, 42(3): 92
WU Jiakai, MA Xiaoping, SUN Linfeng. Design of parameters for UAV's rope-hook recovery system [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(3): 92. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-654X. 2012. 03. 024
- [79] 韩卫波. 无人机拦阻着舰综合复飞决策[C]//中国自动化大会(CAC2017)暨国际智能制造创新大会(CIMIC2017)论文集. 济南: 中国自动化学会, 2017
HAN Weibo. Unmanned aerial vehicle (UAV) block ship landing comprehensive flyback decision [C]//Proceedings of China Automation Conference (CAC2017) and International Intelligent Manufacturing Innovation Conference (CIMIC2017). Jinan: Chinese Association of Automation, 2017
- [80] 张引跃. 基于单脉冲二次雷达的无人机自主着陆引导系统设计实现[D]. 西安: 电子科技大学, 2015
ZHANG Yinyue. Design and implementation of monopulse-secondary radar based UAV auto-landing guide system[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology, 2015
- [81] 黄昊. 抗纵摇舵对船舶在波浪中减摇效果研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
HUANG Hao. An investigation on the effects of pitching reduction of ships equipped with anti-pitching rudders in waves [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008
- [82] 陈星达. 海上无人机应用与发展综述[J]. 中国战略新兴产业, 2018(3X): 47
- [83] 臧春喜, 褚鹏蛟, 胡琦, 等. 无人机回收技术专利现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2016(3): 39. DOI: 10.16338/j. issn. 1009-1319. 2016. 03. 09
- [84] 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
ZHEN Ziyang. Research development in autonomous carrier-landing/ship-recovery guidance and control of Unmanned Aerial Vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(4): 669. DOI: 10.16383/j. aas. 2018. c170261
- [85] 王宏新, 刘长亮, 成坚. 无人机回收技术及其发展[J]. 飞航导弹, 2016(1): 27. DOI: 10.16338/j. issn. 1009-1319. 2016. 01. 06