

# 低空无人机技术研究现状与展望

张军<sup>1\*</sup>, 陈磊<sup>2</sup>, 高智杰<sup>1</sup>, 朵英贤<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081;  
3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 低空经济是新质生产力的典型代表, 发展前景广阔的战略性新兴产业; 低空无人机是多样化技术设备的优良载体, 高性能、智能化的低空无人机将成为支撑低空经济发展的中坚力量。本文将低空无人机的模态、飞行、自主能力对应其结构材料与飞行控制、定位导航、自主智能技术, 并从这3个方面深入分析了低空无人机技术的发展现状和研究趋势, 提出了低空无人机仿生构型与复合材料、多源融合定位、混合智能算法等低空无人机技术发展方向。为推动低空无人机技术的创新发展, 研究建议, 加强政策引导与基础建设、推动技术创新与产业布局、拓展应用场景与实施示范工程、构建全面安全的防护体系, 实现我国无人机产业和低空经济的高质量发展。

**关键词:** 无人机; 低空/超低空; 结构材料; 飞行控制; 定位导航; 自主决策; 人机交互

**中图分类号:** TD67; TD82 **文献标识码:** A

## Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Technology: Current Status and Prospects

Zhang Jun<sup>1\*</sup>, Chen Lei<sup>2</sup>, Gao Zhijie<sup>1</sup>, Duo Yingxian<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The low-altitude economy is a new productivity booster and a strategic emerging industry with broad development prospects. Low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs), as superior platforms for diversified technological equipment, are poised to become the backbone of this economic sector through their high-performance and intelligent capabilities. This study correlates the modal, flight, and autonomous capabilities of low-altitude UAVs with their structural materials and flight control systems, positioning and navigation technologies, and autonomous intelligence systems. Through in-depth analysis of the current status and research trends across these three domains, the study proposes future technical directions focusing on bionic configurations, composite materials, multi-source fusion positioning, and hybrid intelligent algorithms. To advance the innovative development of low-altitude UAV technologies, the research recommends four strategic measures: (1) strengthening policy guidance and infrastructure development, (2) promoting technological innovation and optimizing industrial layout, (3) expanding application scenarios through demonstration projects, and (4) establishing comprehensive security protection systems. These initiatives aim to facilitate the high-quality development of China's UAV industry and low-altitude economy.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles; low altitude/ultra-low altitude; structural material; flight control; positioning and navigation; autonomous intelligence; human-vehicle interaction

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-03-16

通讯作者: \*张军, 北京理工大学教授, 中国工程院院士, 研究方向为空地一体化导航技术; E-mail: zhjun@bit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“多空域多模态无人机新兴关键技术发展战略研究”(2023-HZ-20)

本刊网址: [sscae.engineering.org.cn](http://sscae.engineering.org.cn)

### 一、前言

近年来，无人机凭借高效、灵活、成本低等特点，被广泛应用于国防安全、交通物流、应急救援等领域。世界主要国家对无人机技术的发展均给予高度重视，相继发布了一系列发展规划和政策措施以推动该技术的研究。美国致力于构建无人机融入国家空域系统的实施步骤和战略方案，发布了《小型无人机系统操作规则》，明确了无人机的操作规范、操作员资格和飞行限制等内容；俄罗斯成立了无人驾驶航空系统发展政府委员会，制定了《2030年及未来2035年前的无人航空发展战略》，通过刺激市场需求、建设基础设施与安全体系、培养专业人才、推动关键技术研究等措施来提升自主无人机产业的竞争力，使2035年俄罗斯国产民用无人机在国内市场占比达到80%；欧盟在低空无人机管理方面采取了统一的监管措施，欧洲航空安全局于2019年发布了相关法规，明确了无人机在欧洲单一空域内的飞行规定<sup>[1]</sup>，对无人机操作类别及对应风险等级、操作员操作资格等级等作出了详细要求。

我国积极推动商业航天、低空经济等新增长引擎的发展。低空经济是以各种有人、无人驾驶航空器的低空飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的战略性新兴产业<sup>[2,3]</sup>。作为典型的低空无人设备，无人机是多样化技术设备的优秀载体，具有广泛的应用场景，包括城市物流、农林植保和电网巡检等。根据中国民用航空局的数据预估，2035年，我国低空经济市场规模有望达到3.5万亿元<sup>[4]</sup>。其中，无人机市场发展持续增长，是支撑低空经济发展的中坚力量，2024年我国无人机行业市场规模为1737亿元，无人机运营企业有近1.9万家，注册无人机数量有215.8万架<sup>[5,6]</sup>。

低空无人机通常指在1000 m（含）以下低空和超低空空域中飞行的无人机<sup>[7]</sup>，在低空环境中易受到恶劣天气、障碍物遮挡、信号干扰等因素的影响，因此对无人机的抗干扰能力和操控性能提出了较高的需求。结构材料与飞行控制、定位导航、自主智能分别是低空无人机提升模态、飞行、自主能力的核心技术。结构材料技术通过轻量化、高强度设计和先进复合材料的应用，优化机体性能，提升飞行效率、耐久性和环境适应性，是无人机自身能力的重要基础。通过结构与材料设计并结合无人机

飞行控制算法，无人机能够初步实现遥控飞行。若要进一步完成复杂任务，则需要无人机具备精确的定位导航技术，以在复杂干扰环境中依靠定位技术获取其在空间和时间中的位置，顺利到达指定航迹点。随着人工智能技术的快速发展，无人机逐渐朝着智能化的方向迈进。无人机自主智能技术指面向高动态、强实时、不透明的任务环境，无人机能够按照任务要求自主规划飞行路径、自主识别目标以进行信息推理、并用自然语言与人交互等。加强低空无人机关键技术体系研究，完成从遥控飞行向复杂环境中自主飞行转型，对低空无人机创新应用和低空经济高质量发展具有重要战略意义。

为深入探析低空无人机技术的现有应用及研究趋势，本文将低空无人机的模态、飞行、自主等能力对应于结构材料、定位导航、自主智能技术（见图1），梳理这3类技术在低空无人机领域的应用和研究现状，分析国内外低空无人机技术的研究趋势，研判低空无人机技术的未来重点发展方向，提出推动低空无人机技术快速且稳健发展的对策建议，以促进我国低空无人机技术应用能力的提升。

### 二、低空无人机结构材料与飞行控制技术

#### （一）应用现状

低空无人机在未来空域资源拓展和智慧城市建设中扮演着日益重要的角色，其操作环境的复杂性远超高空平台。低空环境具有气候多变、地形复杂、气流扰动强烈等特点，对无人机的稳定性、抗干扰能力和环境适应性提出了更高要求。当前，世界先进国家纷纷围绕结构设计创新、材料技术突破以及飞控系统优化等方面，开展系统性研究与实践。苏黎世联邦理工学院研发了具备多种变形模式的无人机以适应不同的飞行环境<sup>[8]</sup>。法国国防部的“生物飞行”（BioFly）无人机项目基于仿生学原理，提升了扑翼无人机的隐蔽性和任务效率<sup>[9]</sup>。深圳市大疆创新科技有限公司、美国Zipline无人机公司等企业采用复合材料结合模块化设计，实现了高强度、轻量化结构，显著提升了无人机的耐用性和抗风性能。尽管现阶段结构材料技术取得了显著进展，但其设计精度与可靠性仍高度依赖于结构理论和先进材料性能的科学研究所。

## (二) 结构设计

结构设计是低空无人机技术发展的基础之一，对提高无人机的适应性、可靠性和经济性具有重要意义。在低空环境中，无人机面临多样化载荷和复杂动态工况，传统的结构设计方法在此情境下适应性有限，无法满足实际需求。目前低空无人机的主要分类及特点如表1所示。

拓扑优化技术<sup>[10,11]</sup>通过精准控制材料空间分布，显著提高结构效率与性能。近年来，拓扑优化技术已经逐渐应用到无人机结构设计中，尤其在机翼、机身等关键承力构件上表现出色。然而，目前拓扑优化技术的应用主要集中在静态载荷条件下，对于复杂的动态载荷、多工况优化仍缺乏系统性研究。与此同时，拓扑优化设计的结果通常呈现复杂结构，对现有制造工艺提出了较高要求，进一步实现优化结构的精确制造与经济性成为研究难点之一。

仿生设计<sup>[12-14]</sup>在低空无人机结构领域具有重要

发展意义，其研究目的主要有两大类：一类是以轻量化、高强度为目标，通过仿生手段实现结构优化；另一类则是侧重于提升飞行效率与机动性，借鉴自然界生物在动态适应与变形方面的独特机制。前者通常聚焦于材料和结构的优化，如采用蜂窝结构设计来降低重量、提高刚度和抗冲击性能，从而满足无人机在机翼和蒙皮等部件上的使用要求；后者则着眼于实现结构的主动或被动变形，以模仿鸟类翼型在不同飞行状态下的自适应特性，从而提高飞行效率和机动能力。需要指出的是，无论是以轻量化为目标的结构仿生还是以提升动态性能为目的的动力仿生，在尺度效应、动态响应特性、长期疲劳性能以及可靠性理论方面均存在诸多未解问题，亟需建立完善的理论模型和实验验证体系，实现从仿生原理到实际工程应用的有效转化。

模块化设计<sup>[15,16]</sup>通过将无人机关键部件模块化，使无人机具备快速部署和维护的优势。这种设计方

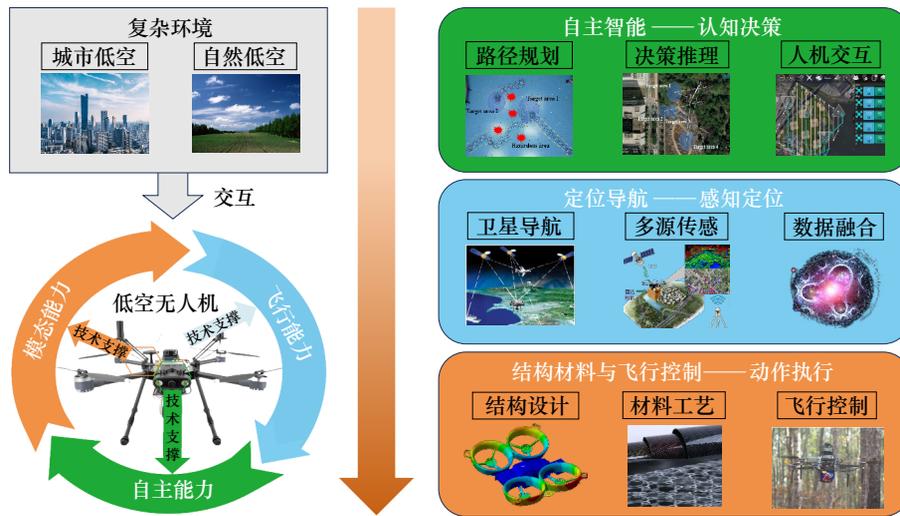


图1 低空无人机技术框架

表1 低空无人机分类及特点

分类	飞行机制	机械结构	典型应用
微型飞行器	旋翼或固定翼	轻质框架、紧凑布局	室内侦察、近距离监测
纳米飞行器	旋翼或扑翼仿生	微型电机、极小尺寸	室内探测、隐蔽侦察
固定翼无人机	机翼升力、螺旋桨或喷气推力	刚性机身、固定机翼	长航时巡逻、测绘、环境监测等
旋翼无人机	旋翼提供升力	多旋翼结构	城市物流、救援等
复合翼无人机	结合固定翼和旋翼 倾转旋翼或双模飞行	旋翼与固定翼结合	侦察、货运等垂直起降以及长航时任务
仿生无人机	受鸟类、昆虫、蝙蝠等飞行动力学启发	软翼、可变形翼或扑翼机构	微型探测、生物研究等

法适用于不同任务需求的无人机系统，如侦察、物流、测绘等领域，显著提高了系统灵活性和经济效益。但模块化设计也存在连接强度不足、动力学性能分析复杂、接口可靠性不稳定等问题，这些技术挑战严重影响了模块化无人机的进一步推广与应用。在此背景下，应加速推进模块接口的标准制定、引入智能化模块管理算法，以提升模块的兼容性、扩展性和可靠性。

### （三）材料设计

低空无人机的材料选择是影响其飞行性能、任务适应能力和长期可靠性的重要因素<sup>[17,18]</sup>。随着无人机在复杂低空环境中的广泛应用，材料不再只是单纯的“构件基础”，还是提升性能和适应新任务的关键推动力。

碳纤维增强复合材料（CFRP）<sup>[19-21]</sup>因其卓越的强度重量比和出色的抗疲劳性能，成为低空无人机机身、机翼、桨叶等关键部位的首选材料。CFRP不仅能够显著降低无人机整体重量，还能有效提高结构刚度和抗冲击能力，在实际飞行中应用后表现出较低的能耗和优异的动态响应能力。与此同时，玻璃纤维增强复合材料（GFRP）<sup>[22,23]</sup>以其成本相对较低、抗腐蚀性好的优势，在无人机结构中广泛应用，尤其适用于对强度要求相对适中的部件。除复合材料外，金属材料在部分结构部位依然发挥着不可替代的作用。例如，铝合金因其良好的成型性、较高的比强度和良好的抗振性能，常用于无人机的框架、支撑结构和连接件；钛合金则以其高强度、耐高温以及出色的抗腐蚀性能，在需要承受高应力和复杂载荷的部件上得到应用。然而，金属材料普遍存在密度较大、重量较高的问题，这在追求极致轻量化的无人机设计中尤为不利，因此如何在保证强度和可靠性的前提下，降低金属结构的重量仍是一项重要研究任务。

近年来，智能材料<sup>[24]</sup>的引入为无人机材料设计带来了全新的突破。形状记忆合金在某些变形结构中已显示出自适应调节能力，可用于实现翼型调整或应急变形功能，从而提升飞行效率和任务适应性。自修复聚合物则通过内置的微胶囊或动态交联结构，在发生微损伤时实现局部修复，延长结构的服役寿命。这类材料在实验室阶段已经展现出较好的自修复性能，但如何在实际飞行环境中实现大面

积、长周期的自修复仍是未来研究重点。

### （四）飞行控制

低空、超低空无人机的运动学和动力学建模是实现精确飞行控制的基础<sup>[25-27]</sup>。牛顿拉格朗日方法和系统辨识是推导无人机非线性动力学模型的两种主要动力学建模方法。基于物理定律的建模方法可解释性强，但也存在精确模型参数难获取和强非线性系统难表达等问题。现有研究通过引入不确定性分析方法，评估不同物理参数对动力学模型的影响，提高建模精度<sup>[28,29]</sup>。相比之下，基于实验数据提取系统动力学特性的建模方法存在建模过程简单、参数调节灵活等优点。

低空无人机通常具有强非线性、高动态等特性且飞行环境多变，这种情况下线性控制算法的性能与鲁棒性存在较大局限性，难以满足复杂任务需求。近年来，非线性控制方法<sup>[30,31]</sup>如滑模控制、反馈线性化控制逐渐得到关注。这些方法能够处理非线性系统的强扰动和不确定性，具有良好的控制性能，但其控制参数的调优过程复杂、计算量较大、实时实现困难。此外，滑模控制易存在抖振问题，虽然通过设计更为复杂的滑模面和控制率能够减小这种效应，但也相应提高了控制算法的计算复杂性和实施难度。

近年来，智能控制方法<sup>[32,33]</sup>如强化学习逐渐受到无人机控制领域的关注。强化学习算法可以在与环境的交互中不断优化控制策略，尤其是在动态复杂环境或未知扰动环境中的优越性明显。目前，深度强化学习算法被广泛应用于无人机飞行控制领域，通过高维状态空间的直接学习能够获得更好的控制性能，但强化学习算法需要大量的训练数据，存在学习效率低、泛化能力弱等问题，难以确保控制策略的安全性及稳定性。在保证无人机稳定性的前提下，进一步提高强化学习的训练效率和策略鲁棒性，是当前研究面临的重要难题。

## 三、低空无人机定位导航技术

### （一）应用现状

近年来，低空无人机被广泛应用于民用和军事领域，包括搜索、救援、消防和监测任务等。这类任务往往要求无人机能够可靠地飞行到指定航迹

点, 因此, 高精度的定位与导航技术是提升无人机自主飞行稳定性的关键。全球卫星导航系统 (GNSS) 能够在卫星信号良好的空旷户外环境中实现无人机的定位和导航<sup>[34]</sup>。深圳市大疆创新科技有限公司等企业采用 RTK GNSS 定位方案来提升无人机定位精度, 但在低空飞行过程中, 无人机周围的山脉、建筑物等地形与地物会对定位信号形成遮挡、反射和散射等影响。例如, 反射和散射信号会与来自卫星的定位信号相互叠加, 影响定位精度, 因此, 需要依靠惯性导航、视觉相机和激光雷达等其他传感器信息, 在卫星导航信号受到干扰时进行定位和导航。此外, 低空飞行环境易受到恶劣天气的影响, 单一导航系统由于自身局限性往往无法满足实际需求。例如, 雨雪、雾霾天气会导致能见度降低、图像质量变差, 严重降低视觉定位精度和可靠性。基于 GNSS 与惯性导航系统, 融合其他机载传感器的组合导航系统已成为目前低空无人机导航的主流选择<sup>[35]</sup>。为提升低空无人机定位与导航技术的精度, 需要在定位与导航关键技术方向进行突破。

## (二) 卫星与惯性导航

近年来, GNSS 接收器被广泛应用于低空无人机定位和导航, 但其定位精度高度依赖多个不同导航卫星的空间信号。隧道和地下通道等城市基础设施的增加使 GNSS 接收器难以高效工作。当无人机进入复杂地形或遮挡区域时, 其卫星信号的接收程度会降低, 甚至完全消失。在这种情况下, 通过 GNSS 接收器获取无人机准确位置和导航信息将面临巨大的挑战性<sup>[36,37]</sup>, 因此, 高度依赖 GNSS 的服务是极具风险的。

利用机会信号来辅助低空无人机导航的方法可以减少无人机对 GNSS 的依赖。该方法是在隧道、室内等复杂地形或遮挡环境中安装能够传输和接收机会信号的设备<sup>[38]</sup>; 当进入这些区域时, 无人机可以利用该类设备提供的机会信号估计自身位置。机会信号具有不同类型, 包括长期演进信号 (LTE)、调幅 / 调频无线电信号、Wi-Fi、近地轨道卫星信号等<sup>[39,40]</sup>。然而, 利用机会信号辅助低空无人机导航面临的主要难点为: ① 非常依赖机会信号的精度, 因为无人机对时钟和状态信息等机会信号的先验估计, 通常都是不可用的。② 非常依赖配套的系

统, 因为现阶段在许多地区都未建立完善和规范的机会信号体系。

在此背景下, GNSS 与惯性导航系统的融合方法逐渐受到重视。随着时间推移, 惯性导航系统的误差会不断累积, 最终导致定位信息发散; 而利用 GNSS 提供的定位信息能够对惯性导航系统的定位进行修正, 以消除不断累积的误差。当短时间内 GNSS 信号不可用时, 使用惯性导航信息进行航位推算, 能够补充定位和导航信息<sup>[41]</sup>。许多研究是利用卡尔曼滤波算法进行 GNSS 与惯性导航的信息融合, 但该算法只是基于一阶高斯-马尔可夫模型, 并没有利用过去的测量结果<sup>[42]</sup>。因此, 目前主流方法为扩展卡尔曼滤波方法, 即在测量模型中使用过去的测量值作为延迟元素, 通过映射函数将过去的测量值映射到当前状态。基于扩展卡尔曼滤波框架的方法还包括因子图优化技术, 使用历史测量值进行非线性优化, 但该方法对算力要求较高<sup>[42,43]</sup>。

## (三) 视觉与惯性导航

随着定位技术的不断发展, 基于视觉、惯性测量的低空无人机导航方法引起了国内外的高度重视, 视觉传感器能够纠正惯性测量传感器的累积误差, 惯性测量传感器可以为视觉传感器提供准确的姿态信息和尺度恢复。其中, 单目视觉惯性导航技术因其低成本、低功耗优势得到了广泛的应用。然而, 单目视觉导航技术对光照变化十分敏感, 导致在弱纹理、复杂环境中难以实现高精度可靠的定位和导航。在受雾霾等恶劣天气影响时, 视觉相机获取的图像质量变差, 特征提取和匹配难度增加, 导致视觉定位的精度和可靠性下降。目前, 无人机结合视觉与惯性进行导航的主要问题是精度低和鲁棒性不足。

光照、噪声会对特征提取和匹配产生重要影响, 因此在进行特征提取与匹配之前, 需要对视觉相机获取到的原始图像进行预处理。① ORB-SLAM3 方法<sup>[44]</sup>在比例金字塔构建过程中使用高斯模糊对图像进行预处理, 以降低高频噪声。② VINS-MONO 方法<sup>[45]</sup>使用直方图均衡来纠正图像, 通过增强对比度以改进点和线的特征检测; 然而, 在大多数情况下, 直方图均衡容易导致图像过度校正和灰度合并。③ 基于伽马参数的图像校正算法能够对图像进行非线性拉伸, 但缺点为需要用户

根据经验和具体需求手动调整伽马参数。④具有加权分布的自适应伽马校正技术在一定程度上解决了图像过校正和强饱和度等问题，但是基于神经网络的伽马校正算法较难应用于实时的视觉惯性导航系统<sup>[46]</sup>。

在视觉和惯性融合定位前端，进行特征提取与数据关联等操作，利用二维或三维特征匹配计算相机姿态进行定位。具体有：①VINS-MONO算法利用点特征和惯性测量预积分进行非线性优化，但是基于点特征的视觉惯性系统在弱纹理变化和光照变化的复杂环境中存在鲁棒性、准确性不足的问题。②PL-VIO算法<sup>[47]</sup>采用点和线特征，具有计算简单、紧致性的优点。与点特征相比线特征提供了更丰富的几何结构信息，因此，具有点线特征融合的视觉惯性系统会更具优势。③PLD-VINS方法<sup>[48]</sup>将短线合并，采用光流方法跟踪检测到的线段。④PLC-VIO方法采用改进的EDLines线特征提取方法，提取的线特征可分为结构线和非结构线，采用帧间匹配方法构建视觉惯性系统<sup>[49]</sup>。

在视觉里程计后端，主要方法可分为基于滤波的方法和基于优化的方法两大类，相关优化方法包括卡尔曼滤波和图优化等。①基于卡尔曼滤波的视觉惯性算法在复杂的环境中表现不佳，随着状态变量和时间的增加，计算复杂度显著上升。②基于粒子滤波的方法由于粒子退化问题和计算量大，难以满足实时性需求，而基于优化的方法通过构建目标函数利用数值优化算法，在大规模场景中表现优异。③ORB-SLAM3方法假设视觉约束协方差矩阵在每个金字塔水平上是固定的，在图像质量变化很大时，优化效果就会变差。④VINS-MONO方法的局限性在于将视觉传感器的信息矩阵设定成一个预先估计的固定值，但在实际的视觉惯性系统中，这种设定方式难以准确反映真实情况。

### （四）激光雷达导航

随着半导体光电器件的发展，激光雷达逐渐用来增强GNSS/惯性导航定位。激光雷达具有高精度、方向性强等优点，受光照条件变化的影响较小，在强光、弱光环境下都能正常工作，具有较好的抗干扰能力。传感器技术的发展推动了激光雷达感知从二维到三维、从稀疏点云到相对稠密点云的发展<sup>[50,51]</sup>。基于激光雷达的低空无人机导航方法通

过关键帧在地图中检索地点来解决定位问题，最具挑战性的部分为全局描述子提取。与视觉图像相比，来自激光雷达的原始点云是无纹理且形式不规则的；全局描述子通过对点云数据进行特征提取和概括；在保留关键信息进行地点区分的同时，大大减少了数据量。

近年来，三维点云的深度学习算法逐渐成熟，PointNet<sup>[52]</sup>被提出用于学习局部和全局特征。随着Transformer在各种任务中的应用，注意力机制逐渐被用于识别重要的局部特征地点。PCAN<sup>[53]</sup>通过注意力图来计算每个特征的重要性，还可以通过注意力机制聚合的压缩点云表示进行地点识别<sup>[54]</sup>。同时，部分研究工作发现，体素化过程可以使原始点云更加规则，使三维点云接近于三维图像的表达<sup>[55]</sup>，因此选择先对三维点云进行体素化，再提取全局描述子用于地点识别。MinkLoc3D可以提取稀疏体素化点云中的局部特征，并在随后提出的MinkLoc3Dv2中改进了网络架构和训练过程<sup>[56]</sup>。

基于分割方法接近于人类思考地点识别的过程，即使用高级表示而不使用低级几何。例如，将原始点云分割为目标，然后将目标的拓扑信息编码为描述子<sup>[57]</sup>，但该方法依赖分割质量和额外的语义信息，耗时多且资源消耗大。基于投影的方法首先将三维点云投影到二维平面上，然后进行全局描述子提取，如运用多层球面投影，用于学习地点识别的全局描述子<sup>[58]</sup>。

激光雷达在约束减少时，如在狭长的走廊或隧道环境中，会出现定位退化的问题，导致在处理具有相似特征的多个目标时，可能会出现目标跟踪困难、数据关联错误等问题，影响定位精度和导航决策的准确性。因此，需要利用视觉、激光雷达和惯性传感器的互补特性，形成组合导航方案以应对低光、无特征和无结构等复杂环境。

## 四、低空无人机自主智能技术

### （一）应用现状

随着人工智能技术的蓬勃发展，智能化无人系统的应用日益增多。无人机作为一种适应能力强、机动能力高的无人系统，其自主智能化引起了国内外的高度重视。深圳市大疆创新科技有限公司、北京三快在线科技有限公司等企业努力探索智能算法

在低空无人机上的部署，并成功应用于农业植保、物流运输、应急救援等领域。国内高校如北京航空航天大学、北京理工大学等积极推动低空无人机自主智能技术的发展，成立了多个与智能无人机相关的重点实验室。飞行智能指面向高动态、强实时、不透明的任务环境，无人机能够做到按照任务要求自主规划飞行路径、自主识别目标并进行信息推理、能够用自然语言与人交流等。实现飞行智能的低空无人机应当具备智能的路径规划<sup>[59]</sup>、决策推理<sup>[60]</sup>、人机交互<sup>[61]</sup>等能力。

## （二）路径规划

目前，无人机在低空环境中与行业应用相结合，在航拍摄影、农业植保、物流运输、航空测量等领域获得了广阔发展前景。无人机路径规划是无人机开展任务执行的重要基础。智能路径规划指低空无人机在给定约束和目标终点的情况下，在空间环境中规划安全且可行路径的过程。为了实现不同的任务，最优路径的约束可能体现在时间最短或路径最短等。相比于传统的平面路径规划问题，无人机可以在三维空间中进行探索，其潜在的可行路径解数目会呈指数级增长，使最优路径的求解成为一大难题。此外，低空无人机的飞行环境中会存在多种不确定性因素（如鸟类和其他无人机等），这些动态物体的运动通常具有不可预测性，因此克服复杂环境中存在的高度不确定性也是无人机路径规划的一大挑战。同时，在低空无人机计算资源有限的情况下，动态环境中的实时路径规划对算法的计算效率也提出了更高要求。

目前，无人机路径规划采用的主要算法有图搜索算法、启发式算法、强化学习算法等（见表2）。

① 图搜索算法是图论中应用最广泛的算法。为权衡

搜索效率和路线质量，图搜索算法基于启发函数会找到一个相对较优解<sup>[62]</sup>。然而，反复的迭代循环导致算法计算成本昂贵，在无人机有限的机载计算能力下，很难满足实时性要求。② 启发式算法是通过模拟或揭示某些自然界的现象、过程或生物群体的智能行为而发展得到的智能优化算法，如受蚂蚁觅食行为的启发，启发式算法<sup>[63]</sup>通过信息浓度来优化问题的求解。然而，无人机的数据管理和处理能力往往较弱，该方法复杂的参数设置极大限制了调优的过程。目前，大疆无人机主要采用全局路径规划和局部路径规划相结合的路径寻优方式。全局规划主要采用启发式算法，根据地形信息和障碍物信息，预先规划出一条可行路径；局部路径规划则是在全局路径的基础上，根据无人机的实时位置和姿态，动态调整飞行轨迹，以应对环境变化和突发情况。③ 通过直接与环境交互，强化学习算法<sup>[64]</sup>利用反馈信息来优化路径，而不依赖于先验知识。近年来，强化学习算法在动态环境中表现出色，低空无人机进一步使用深度强化学习等方法可以直接学习高维空间中的规划策略以生成路径。

目前，结合传统优化算法和强化学习的混合规划算法为解决复杂的路径规划问题提供了更有效的途径。传统优化算法在路径规划中具有成熟的理论基础，但在复杂环境中可能面临计算复杂度高、适应性差等问题；而机器学习方法能够通过数据驱动的方式学习环境特征和优化策略，具有较强的适应性和灵活性。因此将两者结合，可以充分发挥各自的优势，提升路径规划的效率，如使用神经网络学习启发式函数，以提升传统优化算法的搜索效率。

## （三）决策推理

智能决策推理技术是低空无人机智能化和自主无人化作业的核心技术，要求其能够根据自身的状态、环境信息和任务要求，选择最优的行动方案。由于低空环境的高动态、多约束以及多任务的自然特性，智能决策推理技术需满足快时变、最优性、强抗扰的任务需求<sup>[65]</sup>。此外，受通信资源的限制，多无人机作业时可能缺乏集中式的规划器为无人机统一进行决策，这就要求该技术能够分布式地部署于单个无人机上。

针对低空无人机的智能决策推理技术，目前主要有专家系统方法、基于博弈的方法、启发式方法

表2 自主智能技术主要方法对比

技术	方法	优点	缺点
路径规划	图搜索	搜索效率高	计算成本昂贵
	启发式	易于扩展	参数设置复杂
	强化学习	通用性强	可解释性弱
决策推理	专家系统	操作简单	适应能力弱
	博弈论	精确解析解	环境建模困难
	启发式	可解释性强	泛化能力弱
	强化学习	动态适应性	可解释性差

以及深度强化学习方法，如表2所示。①专家系统方法<sup>[66]</sup>利用人类的先验知识对系统进行建模，并通过模糊匹配方法选择知识库中的策略。在进行智能决策时，推理系统感知环境信息，并与知识库中的决策规则相匹配，进而找到相应的策略执行任务。该方法在决策推理时具有简单、高效、速度较快的优势，但由于依赖大量的先验知识，使处于复杂环境中的无人机难以获取完整准确的环境信息，自适应能力比较弱。②基于博弈的方法<sup>[67]</sup>通常将任务场景建模为微分博弈问题，然后通过博弈论的数学知识为问题找到解析解。但由于低空无人机的飞行环境有多种动态影响因素，如鸟类或其他飞行器突然闯入等，该方法在高动态环境下难以构建理论模型，进而无法提供精细的解析解。③与智能路径规划类似，目前已经针对实际任务需求、基于启发式算法的决策推理方法。在低空无人机的任务环境中，优化目标丰富多样，给启发式算法的搜索效率带来巨大的挑战。另外，对于容易陷入局部最优解的原始算法，还需进行相应改进以实现既定任务目标，满足实际任务决策的需要。④面对复杂多变的低空飞行环境，深度强化学习方法<sup>[68]</sup>凭借端到端的优势满足了无人机决策推理的实时性要求，并且通过与环境的交互进行策略学习，适合在复杂、动态不确定的环境中完成既定任务。近年来，分层强化学习方法<sup>[69]</sup>的引入为提升低空无人机的智能决策推理能力提供了很好的研究思路。该方法针对任务场景中的决策空间混杂问题，将指令、行动分别映射为离散的分配空间、连续的规划空间，并自适应改变上、下层之间的交互频率，实现高动态环境下的自主决策推理。然而，由于分层强化学习方法需要同时训练两层决策网络，在复杂、不确定性环境中无法保证较好的鲁棒性。因此，如何基于分层强化学习方法的自然特性，建立更好的交互机制以提升其鲁棒性，是分层强化学习能够泛化到更加复杂的空战场景的必要前提。

### （四）人机交互

低空无人机能够通过传感器对周围态势进行环境探测和数据采集，在应急救援、电力巡检等场景中得到广泛应用。在执行复杂任务时，复杂的任务指令输入会导致用户操作负担过重、交互效率低下，甚至任务失败。在动态环境中，传统的交互方

式（如地面站指令）可能无法满足实时性需求，增加任务风险。现有的无人机智能交互方法大致可分为基于模型框架的方法和基于自然语言接口的方法，前者旨在认知框架中融入更多的语义知识来更具体地表征物理环境实体<sup>[70]</sup>，而后者主要集中在建立空间实体和逻辑语言之间的转换关系以实现无人机的语义理解<sup>[71,72]</sup>。当低空无人机的周围态势比较复杂时，需要人类通过经验，作出合理的指令用于交互<sup>[73]</sup>。另外，与地面机器人相比，低空无人机需要在保证安全的同时，实现更加稳定且精准的复杂动作。

目前，在复杂环境中的低空无人机自然交互方式仍存在一定的局限性，如语音识别在噪声环境中的准确性较低、手势识别在复杂背景中的鲁棒性不足等。因此，在不同的环境态势中进一步调整与低空无人机交互的方式，是实现智能人机交互所面临的挑战。主流的人机交互方式是采用地面站软件，将复杂任务分解为多个子任务，使用智能任务规划算法进行人机交互，可以有效减少用户操作。西北工业大学在2023年基于国产大模型研发了“群聊式”无人机控制框架，实现了开放环境下人机、多机的对话交互。结合多模态交互技术（如语音+手势+触摸），能够有效提升复杂环境中人机交互的自然性和效率，如深圳市大疆创新科技有限公司的DJI GS PRO、Mavic Pro无人机，SenseFly公司的eMotion无人机凭借基于先进的机器视觉技术的飞行系统，实现了多种方式的手势操作。

## 五、低空无人机技术发展方向

### （一）结构材料与飞行控制技术

结构材料技术是低空无人机技术体系的底层硬件支撑，包括低空无人机的结构设计技术、材料设计技术和飞行控制方法，其共同决定了低空无人机的续航能力、飞行性能和安全性能。未来3~5年内，仿生构型和模块化设计是无人机结构设计的重要研究方向。基于鸟类、昆虫等仿生学原理的无人机构型能够有效提高续航时间和飞行隐蔽性。根据环境和任务需求，自适应调整机身结构和载荷分布，也能够提升无人机在受限空间飞行的安全性和任务效率。目前，普渡大学的研究团队已开发出仿生蜂鸟机器人，能够自主学习飞

行并躲避障碍物，展示了仿生结构在实际环境中的应用潜力。

材料设计技术旨在采用新型材料提升低空无人机的能源效率、耐腐蚀性和抗疲劳性。目前，采用具有高强度、低密度的复合材料，使用先进的成型、连接工艺是低空无人机轻量化、增加材料利用率的重要趋势，如碳纤维复合材料和增材制造技术等。未来，自修复材料在低空无人机中的应用是材料技术的重要发展趋势。形状记忆合金和聚合物基自修复复合材料将逐步走向应用，维护频率减少幅度可超过 50%，减少人为维修成本和任务中断概率。德国宇航中心的自修复复合材料项目已在实验阶段取得明显成效。

飞行控制算法是低空无人机能够实现飞行的基础，也是保障其在动态环境中稳定飞行的关键。随着人工智能技术的发展，针对系统辨识建模泛化能力弱、鲁棒性差等问题，将深度学习与传统辨识算法结合，利用数据驱动技术补偿传统模型的不足是系统建模领域重要的研究方向。神经网络等智能控制算法可以通过自主学习，适应环境并优化控制策略，使低空无人机可以在不确定性高、动态变化快的场景中完成任务。然而，目前智能控制仍面临着计算复杂度高、对训练数据依赖性强等挑战，在实际应用中，其实时性和安全性仍有待进一步提升。未来，从“小回路”智能检测到“全回路”优化控制是实现低空无人机抗干扰和自愈、提升无人机安全性能的重要方向。

## （二）定位导航技术

低空无人机的定位导航技术主要包括卫星与惯性导航、视觉导航、激光雷达导航等。目前，利用其他传感器减少低空无人机对 GNSS 的依赖是无人机定位导航技术的重要趋势。结合多源传感器进行信息融合能够实现无人机导航信息的冗余性，浙江大学研究团队研发的多源融合导航系统，在城市峡谷环境中的定位精度已达到亚米级，预计未来可推广到更复杂的干扰环境中。

考虑到恶劣天气对视觉图像质量的影响，能够抑制光照影响的图像预处理方法、高效的点线特征融合方法是目前无人机视觉惯性导航技术的重要研究方向。未来，基于深度学习的图像预处理与特征识别算法将进一步成熟，可有效抑制光照和动态环

境影响，使视觉导航在复杂场景中具备更强的鲁棒性。激光雷达导航方案对光照和目标外观变化更具鲁棒性，但会出现点云失效或者激光退化等情况导致激光雷达导航失败，因此需要其他传感器的信息进行补偿。未来，提高单一传感器定位精度、融合多源传感器应对信号干扰环境、构建星地协同位置感知与服务体系是提升低空无人机在复杂干扰环境定位精度和任务性能的重要研究方向。

## （三）自主智能技术

低空无人机的自主智能技术主要包括路径规划技术、决策推理技术、人机交互技术。基于路径规划算法的研究现状，传统算法通过智能技术改造提升了环境适应性和效率，强化学习已成为无人机适应动态、复杂场景的核心技术。因此，具有更强适用性的混合规划算法是未来无人机路径规划的重要趋势。

决策推理技术根据低空无人机自身的状态、环境信息和任务要求，选择最优的行动方案。目前，无人机决策推理技术的重点从单一目标逐渐转向了多目标优化，如能耗与安全性。针对无人机集群应用的通信瓶颈，去中心化决策架构成为主流。未来，分布式、轻量化、具备在线演进升级能力的决策推理算法是无人机适应高动态、强对抗、通信拒止应用场景的重要研究方向。面向强对抗环境的决策推理技术将在未来几年实现突破，通过分布式轻量化的人工智能算法，实现低空无人机之间的协同自主决策与协同作战，降低数据依赖性并提升实时性与鲁棒性。

人机交互技术通过表征无人机的周围态势，建立空间实体和逻辑语言之间的转换关系，以方便操作人员快速下达合理的指令用于交互。未来，低空无人机的人机交互将进一步朝着多模态的方向发展。多模态交互技术将融合视觉、语音、触觉、手势控制技术，实现人与无人机的快速精准交互。波音公司研发的多模态人机交互平台，目前已在复杂任务场景实现语音与手势协同控制，提升操控效率和安全性，未来将更广泛应用于灾害现场和复杂侦察任务。

## 六、低空无人机技术应用发展建议

### （一）加强政策引导与基础建设

为推动低空无人机产业的健康、有序发展，建

议进一步明确政策引导和行业合作模式，加强基础设施建设。制定并实施国家层面的低空经济发展战略和顶层设计规划，明确产业发展的具体目标、技术标准及监管要求，推动地方政策与国家政策的统一衔接。同时，建立全国统一的低空飞行监管平台，通过实时飞行监控、飞行计划快速审批、动态空域监管等方式，提升监管效率，实现统一、高效的空域管理。此外，积极推动“政策-技术-市场”三轮驱动模式，通过政府引导资金投入、企业参与建设及运营、科研院所提供技术支持，建设低空互联网基础设施，推动信息共享、通信网络完善和地面控制中心建设。

### （二）推动技术创新与产业布局

技术创新与合理产业布局是推动低空无人机产业可持续发展的核心支撑。建议设立低空无人机技术专项基金，支持多模态传感器、传感器融合、飞行控制算法、智能控制系统等关键技术的研发，鼓励企业与科研院所、高校开展联合攻关。建立低空无人机产业联盟，明确产业链上下游企业合作模式，推动核心零部件国产化，建立稳定的上下游合作机制，确保产业链整体自主可控。明确产业布局区域，建设无人机产业示范区，吸引相关企业和科研院所集中入驻，促进产业协同创新发展。此外，鼓励金融机构创新产业链金融服务模式，为低空无人机企业提供专项贷款、融资租赁、保险保障等多样化金融服务，增强产业链抗风险能力。

### （三）拓展应用场景与实施示范工程

低空无人机产业发展需进一步明确具体的应用场景，推动产业落地和规模化实践。在物流领域，借鉴已有的无人机物流配送案例，推动偏远地区规模化应用，完善物流网络。在农业领域，建设无人机示范基地，推进精准农业技术在农药喷洒、病虫害监测、作物管理等方面的应用，提升农业生产效率和环境保护水平。在应急救援领域，开展低空无人机示范应用项目，明确医疗急救、物资运输、灾害现场信息采集与评估等具体应用场景，建设完善的应急响应机制，提升应急救援效率。

### （四）构建全面安全防护体系

安全防护体系建设是低空无人机产业健康发展

的重要保障，建议全面构建安全防护体系，加快自主避障技术研发，如视觉感知、激光雷达融合等技术应用，推动低空无人机在复杂环境中安全运行。明确飞行控制系统安全性与可靠性的技术标准，加强冗余设计建设，确保低空无人机在异常情况下的安全性。完善全国统一的低空无人机空域管理平台建设标准，实现无人机与有人机之间的高效协调管理。加强无人机操作人员培训和资质审核，严格执行飞行许可证制度，加大法律法规宣传力度，提高公众安全意识，形成社会共同监督与安全管理的良好氛围。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** December 16, 2024; **Revised date:** March 16, 2025

**Corresponding author:** Zhang Jun is a professor from Beijing Institute of Technology, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is air-ground integrated navigation technology. E-mail: zhjun@bit.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Emerging Key Technologies of Multi-Airspace And Multi-Modal UAVs” (2023-HZ-20)

#### 参考文献

- [1] 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.  
Wang Y N, An G W, Wang C C, et al. Technology application and development trend of intelligent unmanned system [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 9-26.
- [2] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究 [J]. 中国物价, 2024 (4): 98-103.  
Fan Y J, Li W B. The development stage and application scenarios of China's low-altitude economy [J]. China Price Journal, 2024 (4): 98-103.
- [3] 裘德馨. 低空经济中无人机产业发展概述 [J]. 商业全球化, 2024, 12(3): 117-122.  
Qiu D X. Overview of the development of unmanned aerial vehicle industry in low altitude economy [J]. Business and Globalization, 2024, 12 (3): 117-122.
- [4] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 等. 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年) [EB/OL]. (2024-03-27)[2025-01-20]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content\\_6942115.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm).  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China, et al. Implementation plan for the innovative application of general aviation equipment (2024—2030) [EB/OL]. (2024-03-27)[2025-01-20]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/>

- 202403/content\_6942115.htm.
- [5] 樊轶伦, 陈蕾, 张本科, 等. 基于多传感器的无人机配电网架空线路自主巡检和姿态控制 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 186–194.  
Fan Y L, Chen L, Zhang B K, et al. Autonomous inspection technology of overhead lines of distribution network and attitude control of UAVs based on multi-sensor fusion [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(8): 186–194.
- [6] 许志浩, 周利, 吕伟, 等. 基于无人机激光点云的电力线路树障隐患预测技术分析 [J]. 工程建设与设计, 2024 (1): 159–161.  
Xu Z H, Zhou L, Lyu W, et al. Analysis of hidden danger prediction technology of power line tree obstacle based on UAV laser point cloud [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2024 (1): 159–161.
- [7] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议 [J]. 航空学报, 2020, 41(1): 023238.  
Quan Q, Li G, Bai Y Q, et al. Low altitude UAV traffic management: An introductory overview and proposal [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 023238.
- [8] Shin W D, Phan H V, Daley M A, et al. Fast ground-to-air transition with avian-inspired multifunctional legs [J]. *Nature*, 2024, 636(8041): 86–91.
- [9] Falanga D, Kleber K, Mintchev S, et al. The foldable drone: A morphing quadrotor that can squeeze and fly [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 209–216.
- [10] Lee C, Kim S, Chu B. A survey: Flight mechanism and mechanical structure of the UAV [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(4): 719–743.
- [11] 马航, 宋笔锋, 周志彬, 等. 多段式变形翼技术发展现状分析 [J]. 战术导弹技术, 2024 (1): 75–84, 112.  
Ma H, Song B F, Zhou Z B, et al. Analysis of development status of multi-section morphing wing technology [J]. *Tactical Missile Technology*, 2024 (1): 75–84, 112.
- [12] 朱继宏, 韩嘉诚, 谷小军, 等. 跨域飞行器结构与变构型设计技术进展与挑战 [J/OL]. 航空学报, 1–33[2025-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20250228.1032.010.html>.  
Zhu J H, Han J C, Gu X J, et al. Advances and challenges in cross-domain vehicle structures and morphing configuration design technologies [J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1–33 [2025-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20250228.1032.010.html>.
- [13] Di Luca M, Mintchev S, Heitz G, et al. Bioinspired morphing wings for extended flight envelope and roll control of small drones [J]. *Interface Focus*, 2017, 7(1): 20160092.
- [14] Zhao X, Hu S, Wang Y, et al. Biodrone: A bionic drone-based single object tracking benchmark for robust vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2024, 132(5): 1659–1684.
- [15] 王晓璐, 刘威威, 李卓远, 等. 可重构布局无人机总体概念设计研究进展 [J]. 气动研究与试验, 2024 (2): 36–41.  
Wang X L, Liu W W, Li Z Y, et al. Progress on conceptual design of reconfigurable unmanned aerial vehicles [J]. *Aerodynamic Research & Experiment*, 2024 (2): 36–41.
- [16] 李春鹏, 张铁军, 钱战森, 等. 多用途无人机模块化布局气动设计 [J]. 航空学报, 2022, 43(7): 125411.  
Li C P, Zhang T J, Qian Z S, et al. Aerodynamic design of modular configuration for multi-mission unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(7): 125411.
- [17] Zhang Q S, Jia S, Chen J B, et al. Configuration design and topology optimization of a single wing for the hybrid unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(3): 423–432.
- [18] 葛佳昊, 刘莉, 贺云涛, 等. 无人机先进结构复合材料应用及关键技术研究 [J]. 战术导弹技术, 2019 (2): 67–72.  
Ge J H, Liu L, He Y T, et al. Application and key technology research on advanced structural composite materials for unmanned aerial vehicle [J]. *Tactical Missile Technology*, 2019 (2): 67–72.
- [19] 段国晨, 赵景丽, 赵伟超. 先进复合材料在无人机结构的应用 [J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 105–114.  
Duan G C, Zhao J L, Zhao W C. Application of advanced composite materials in UAV at home and abroad [J]. *Fiber Composites*, 2022, 39(2): 105–114.
- [20] 王磊平. 先进复合材料在无人机上的应用及关键技术 [J]. 信息记录材料, 2025, 26(2): 22–24.  
Wang L P. Application and key technologies of advanced composite materials in UAV [J]. *Information Recording Materials*, 2025, 26(2): 22–24.
- [21] 王文慧, 王胜, 刘帅, 等. 增强抗冲击和热性能的功能防护复合材料(英文) [J]. 中国科学技术大学学报, 2023, 53(4): 49–59, 72.  
Wang W H, Wang S, Liu S, et al. Functional protective composite materials for enhancing impact resistance and thermal performance [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2023, 53(4): 49–59, 72.
- [22] 孔娜, 王增加, 王希杰, 等. 无人机超轻碳纤维复合材料结构件成型技术研究 [J]. 宇航材料工艺, 2024, 54(6): 65–70.  
Kong N, Wang Z J, Wang X J, et al. Research on molding technology of ultra-light carbon fiber composites parts for UAV [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2024, 54(6): 65–70.
- [23] 薛俊昊, 刘金南. 无人机复合材料结构的机械设计与制造工艺研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(11): 85–87.  
Xue J H, Liu J N. Research on mechanical design and manufacturing technology of UAV composite structure [J]. *Papermaking Equipment & Materials*, 2024, 53(11): 85–87.
- [24] 曹鑫, 李聪健, 高川, 等. 智能变体飞行器未来作战关键技术 [J/OL]. 航空工程进展, 1–11[2025-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.20240930.0938.002.html>.  
Cao X, Li C J, Gao C, et al. Key technologies for future combat of intelligent variant aircraft [J/OL]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 1–11[2025-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.20240930.0938.002.html>.
- [25] 付文杰, 马贵春, 杨亚超, 等. 基于数据驱动的四旋翼模型参数辨识 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(9): 83–88.  
Fu W J, Ma G C, Yang Y C, et al. Data-driven parameter identification of quadrotor models [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2024, 53(9): 83–88.
- [26] Wang Y, Liu C, Zhang K T. A novel morphing quadrotor UAV with sarrus-linkage-based reconfigurable frame [R]. Chicago: 2024 6th International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR), 2024.

- [27] Luo Y H, Yu H, Zhang H G, et al. A novel Newton-Euler method-based nonlinear anti-swing control for a quadrotor UAV carrying a slung load [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(4): 2266–2275.
- [28] Zhang J Q, Zhou L H, Li C X, et al. Binary observers based control for quadrotor unmanned aerial vehicle with disturbances and measurement delay [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(15): 2807–2820.
- [29] Lu Q, Ren B B, Parameswaran S. Shipboard landing control enabled by an uncertainty and disturbance estimator [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(7): 1502–1520.
- [30] Kangunde V, Jamisola R S Jr, Theophilus E K. A review on drones controlled in real-time [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2021, 9(4): 1832–1846.
- [31] Sonugür G. A review of quadrotor UAV: Control and SLAM methodologies ranging from conventional to innovative approaches [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 161: 104342.
- [32] Yuan Y, Cheng L, Wang Z D, et al. Position tracking and attitude control for quadrotors *via* active disturbance rejection control method [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 62(1): 10201.
- [33] Lyu X M, Zhou J N, Gu H W, et al. Disturbance observer based hovering control of quadrotor tail-sitter VTOL UAVs using  $H_\infty$  synthesis [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 2910–2917.
- [34] Xia Y, Xu Y S, Li S, et al. SOE-net: A self-attention and orientation encoding network for point cloud based place recognition [R]. Nashville: 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021.
- [35] Liu J B, Qiu X L, Ding C B. The first attempt of SAR visual-inertial odometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(1): 287–304.
- [36] Li K, Zhao J X, Wang X Y, et al. Federated ultra-tightly coupled GPS/INS integrated navigation system based on vector tracking for severe jamming environment [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1030–1037.
- [37] Arreola L, Montes de Oca A, Flores A, et al. Improvement in the UAV position estimation with low-cost GPS, INS and vision-based system: Application to a quadrotor UAV [R]. Dallas: 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2018.
- [38] Morales J J, Kassas Z M. Tightly coupled inertial navigation system with signals of opportunity aiding [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(3): 1930–1948.
- [39] Shin B, Jeon S, Lee J, et al. Precise localization technology of mobile phone on a vehicle in tunnel using LTE signal based surface correlation [R]. Miami: The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2018.
- [40] Halili R, BniLam N, Yusuf M, et al. Vehicle localization using Doppler shift and time of arrival measurements in a tunnel environment [J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 847.
- [41] Zhang Y X. A fusion methodology to bridge GPS outages for INS/GPS integrated navigation system [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 61296–61306.
- [42] W W S, Pfeifer T, Bai X W, et al. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter [J]. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 2021, 68 (2): 239–242.
- [43] Saboury J. Multi-tap extended Kalman filter for a periodic waveform with uncertain frequency and waveform shape, and data dropouts [D]. Milwaukee: The University of Wisconsin-Milwaukee (Doctoral dissertation), 2019.
- [44] Campos C, Elvira R, Rodríguez J J G, et al. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual–inertial, and multi-map SLAM [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874–1890.
- [45] Qin T, Li P L, Shen S J. VINS-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 1004–1020.
- [46] Chen L Y, Li S B, Bai Q, et al. Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4712.
- [47] He Y J, Zhao J, Guo Y, et al. PL-VIO: Tightly-coupled monocular visual-inertial odometry using point and line features [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1159.
- [48] Zhao S G, Zhang T, Wei H Y. Fast visual inertial odometry with point–line features using adaptive EDLines algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(10): 105401.
- [49] Liu Z, Shi D X, Li R H, et al. PLC-VIO: Visual–inertial odometry based on point-line constraints [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 1880–1897.
- [50] Yin H, Ding X Q, Tang L, et al. Efficient 3D LIDAR based loop closing using deep neural network [R]. Macao: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2017.
- [51] Cop K P, Borges P V K, Dubé R. Delight: An efficient descriptor for global localisation using LiDAR intensities [R]. Brisbane: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018.
- [52] Charles R Q, Hao S, Mo K C, et al. PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation [R]. Honolulu: 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017.
- [53] Zhang W X, Xiao C X. PCAN: 3D attention map learning using contextual information for point cloud based retrieval [R]. Long Beach: 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019.
- [54] Wiesmann L, Marcuzzi R, Stachniss C, et al. Retriever: Point cloud retrieval in compressed 3D maps [R]. Philadelphia: 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022.
- [55] Zhou Z C, Zhao C, Adolfsson D, et al. NDT-transformer: Large-scale 3D point cloud localisation using the normal distribution transform representation [R]. Xi'an: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021.
- [56] Komorowski J. Improving point cloud based place recognition with ranking-based loss and large batch training [R]. Montreal: 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2022.
- [57] Fan Y F, He Y C, Tan U X. Seed: A segmentation-based egocen-

- tric 3D point cloud descriptor for loop closure detection [R]. Las Vegas: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020.
- [58] Yin P, Wang F Y, Egorov A, et al. Fast sequence-matching enhanced viewpoint-invariant 3-D place recognition [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 2127–2135.
- [59] 刘庆健, 疏利生, 刘刚, 等. 低空无人机路径规划算法综述 [J]. *航空工程进展*, 2023, 14(2): 24–34.  
Liu Q J, Shu L S, Liu G, et al. A survey of low altitude UAV path planning algorithms [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(2): 24–34.
- [60] 程昊宇, 张硕, 刘泰涑, 等. 无人飞行器自主决策与规划技术综述 [J]. *空天防御*, 2024, 7(1): 6–15, 80.  
Cheng H Y, Zhang S, Liu T L, et al. Review of autonomous decision-making and planning techniques for unmanned aerial vehicle [J]. *Air & Space Defense*, 2024, 7(1): 6–15, 80.
- [61] 苏翎菲, 化永朝, 董希旺, 等. 人与无人机集群多模态智能交互方法 [J]. *航空学报*, 2022, 43(S1): 727001.  
Su L F, Hua Y Z, Dong X W, et al. Multi-modal intelligent interaction method between human and UAV cluster [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(S1): 727001.
- [62] 刘君兰, 张文博, 姬红兵, 等. 无人机集群路径规划算法研究综述 [J]. *航天电子对抗*, 2022, 38(1): 9–12.  
Liu J L, Zhang W B, Ji H B, et al. A summary of UAV swarm path planning algorithm research [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2022, 38(1): 9–12.
- [63] 辛建霖, 左家亮, 岳龙飞, 等. 基于改进启发式蚁群算法的无人机自主航迹规划 [J]. *航空工程进展*, 2022, 13(1): 60–67.  
Xin J L, Zuo J L, Yue L F, et al. Autonomous path planning for unmanned aerial vehicle (UAV) based on improved heuristic ant colony algorithm [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2022, 13(1): 60–67.
- [64] Wu Q Z, Liu K X, Chen L. Model predictive control-based value estimation for efficient reinforcement learning [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2024, 39(3): 63–72.
- [65] Zhao R, Li Y, Gao F, et al. Multi-agent constrained policy optimization for conflict-free management of connected autonomous vehicles at unsignalized intersections [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(6): 5374–5388.
- [66] 袁利. 面向不确定环境的航天器智能自主控制技术 [J]. *宇航学报*, 2021, 42(7): 839–849.  
Yuan L. Spacecraft intelligent autonomous control technology toward uncertain environment [J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(7): 839–849.
- [67] 鞠锴, 冒泽慧, 姜斌, 等. 基于势博弈的异构多智能体系统任务分配和重分配 [J]. *自动化学报*, 2022, 48(10): 2416–2428.  
Ju K, Mao Z H, Jiang B, et al. Task allocation and reallocation for heterogeneous multiagent systems based on potential game [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(10): 2416–2428.
- [68] 施伟, 冯昉赫, 程光权, 等. 基于深度强化学习的多机协同空战方法研究 [J]. *自动化学报*, 2021, 47(7): 1610–1623.  
Shi W, Feng Y H, Cheng G Q, et al. Research on multi-aircraft cooperative air combat method based on deep reinforcement learning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(7): 1610–1623.
- [69] 张建东, 王鼎涵, 杨啟明, 等. 基于分层强化学习的无人机空战多维决策 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(6): 1547–1563.  
Zhang J D, Wang D H, Yang Q M, et al. Multi-dimensional decision-making for UAV air combat based on hierarchical reinforcement learning [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(6): 1547–1563.
- [70] 徐巍峰, 徐非非, 王文军, 等. 基于语义本体的无人人机交互控制方法研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(12): 103–109, 148.  
Xu W F, Xu F F, Wang W J, et al. Human-UAV interaction control based on semantic ontology [J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(12): 103–109, 148.
- [71] Kocer B B, Tjahjowidodo T, Seet G G L. Model predictive UAV-tool interaction control enhanced by external forces [J]. *Mechatronics*, 2019, 58: 47–57.
- [72] Sun J, Chen Q D, Sun J N, et al. Graph-structured multitask sparsity model for visual tracking [J]. *Information Sciences*, 2019, 486: 133–147.
- [73] 陶建华, 巫英才, 喻纯, 等. 多模态人机交互综述 [J]. *中国图象图形学报*, 2022, 27(6): 1956–1987.  
Tao J H, Wu Y C, Yu C, et al. A survey on multi-modal human-computer interaction [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2022, 27(6): 1956–1987.