

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.09

低空飞行器导航系统测试技术发展现状与趋势

樊哲, 于丰源, 赵剑波

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了低空飞行器导航的关键技术, 包括基础导航技术和综合增强技术; 分析了低空飞行器导航系统测试技术的发展现状; 梳理了各类导航参数的测试方法, 包括位置与速度测试、航向测试、姿态测试、以及综合增强技术测试方法。指出了测试技术面临复杂场景适应性与抗干扰能力验证、标准化与监管滞后、测试成本与规模化矛盾等挑战, 并呈现出智能化、标准化与全球化、场景化、低碳与可持续等走向, 为低空飞行器导航系统测试技术的进一步发展提供了参考。

关键词: 低空飞行器; 导航系统; 测试技术; 综合测试; 标准化

中图分类号: TB9; V216; V241

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 03-0100-11

State of the art and perspectives of metrology technologies for low-altitude aircraft navigation systems

FAN Zhe, YU Fengyuan, ZHAO Jianbo

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The key technologies of low-altitude aircraft navigation are introduced, encompassing fundamental navigation techniques and comprehensive augmentation methodologies. A thorough analysis is conducted regarding the present state of navigation system testing technologies, with particular emphasis on the categorization and evaluation of various testing methodologies for critical navigation parameters. These include position-velocity measurement, heading determination, attitude assessment, and verification approaches for integrated enhancement technologies. It is pointed out that the test technology faces the deficiency in verification capabilities in two aspects: adaptability to complex scenarios and anti-interference ability, the lag between standardization and supervision, and the contradiction between test cost and scale, and it presents the trends of intelligence, standardization and globalization, scenario diversification, low-carbon and sustainability, which provides a reference for the further development of low-altitude aircraft navigation system test technology.

Key words: low-altitude aircraft; navigation systems; metrology technologies; comprehensive test; standardization

0 引言

低空经济作为新兴战略产业, 其核心载体——低空飞行器的导航系统是安全运行的核心保障。随着低空飞行活动场景的多样化, 导航系统需应对

复杂环境(如城市遮蔽、电磁干扰等)^[1], 测试技术的重要性日益凸显。2022—2024年中国低空经济市场规模数据呈现上升趋势, 2025年中国低空经济市场规模预计达8 591.7亿元^[2], 预测2035将突破3.5万亿元^[3], 导航系统测试需求随之激增。

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2022205A-002)

引用格式: 樊哲, 于丰源, 赵剑波. 低空飞行器导航系统测试技术发展现状与趋势[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 100-110.

Citation: FAN Z, YU F Y, ZHAO J B. State of the art and perspectives of metrology technologies for low-altitude aircraft navigation systems[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(3): 100-110.



1 低空飞行器导航关键技术

低空飞行器在城市物流、应急救援、农林作业及军事侦察等应用场景中所面临的环境复杂度较高,要求导航系统具备较高的精度、鲁棒性和实时响应能力。导航系统技术体系可分为基础导航技术与综合增强技术。基础导航技术涵盖卫星导航、惯性导航、视觉导航等独立定位手段^[4];而综合增强技术则通过多源导航信息融合、通导感一体化架构^[5]与低空空域数字化管理,突破单一技术的局限性,形成适应低空复杂场景的协同导航能力。

1.1 基础导航技术

1.1.1 卫星导航

如图1所示,卫星导航系统(如北斗卫星导航系统或全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS))通过接收多颗导航卫星信号实现全局定位,具有覆盖范围广、绝对精度高的优势^[6]。北斗三号系统通过星间链路与全球增强服务,可将定位精度提升至动态厘米级^[7]。然而,城市峡谷、电磁干扰等环境易导致信号衰减或失锁,需依赖抗欺骗攻击与抗干扰算法保障可靠性。



图1 卫星导航系统

Fig.1 Satellite navigation system

1.1.2 惯性导航

如图2所示,惯性导航基于陀螺仪^[8]与加速度计^[9]测量载体角速度与线加速度,通过积分运算推算载体位置、速度与姿态。其核心优势在于自主性与短时高精度,不依赖于外部信号,适用于卫星拒止环境。微机电系统技术的进步使低成本、小型化惯性测量单元成为可能,但其误差随时间累积^[10],需结合温度补偿与非线性滤波抑制漂移。



图2 惯性导航系统

Fig.2 Inertial navigation system

1.1.3 视觉导航

视觉导航通过摄像头、激光雷达等传感器获取环境特征^[11],结合同步定位与建图算法实现相对定位与场景重构。深度学习同步定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)可识别动态障碍物,提升复杂场景下的避障能力。但视觉导航受光照变化、纹理缺失影响显著,需通过多光谱融合与边缘计算优化实时性。

1.2 综合增强技术

1.2.1 多源导航信息融合

多源导航信息融合技术是指将来自不同导航传感器的信息通过特定的算法进行整合,以实现更高精度和可靠性的导航定位^[12]。这种技术的核心在于信息融合方法,典型架构包括松耦合融合和紧耦合融合。多源导航信息融合技术能够提高导航系统的自主性、可靠性和导航精度,尤其是在复杂或动态变化的环境中。此外,多源信息融合可以克服单一导航系统在精度和可靠性上的局限,通过各导航系统的优势互补,实现对飞行器导航参数更精确的测量。

1.2.2 通导感一体化

通信-导航-感知一体化通过共享频谱与硬件资源,实现低空飞行器的高效协同^[13]。5G新空口(5G New Radio, 5G NR)与北斗的深度融合是典型代表。一方面,高精度定位增强,即利用5G基站播发差分修正信号,结合北斗精密单点定位-实时动态定位(Precise Point Positioning-Real Time Kinematic, PPP-RTK)技术,实现厘米级定位;另一方面,感知信息辅助导航,即通过5G网络实时获取

周边飞行器状态与空域动态,支持冲突预测与协同避让。但网络和带宽受环境影响大,通信、导航、感知模块的协同机制和协议标准尚不完善。

1.2.3 低空数字化空域

低空数字化空域通过数字化手段实现对空域资源的精细化管理^[14]。基于地理信息系统、高分辨力遥感数据及激光雷达测绘,对建筑物、地形地貌等进行精细化建模。结合飞行器位置与轨迹预测,实现空中交通流量动态优化,避免低空飞行器之间(空对空)及飞行器与地面障碍物(空对地)的碰撞风险。通过物联网与边缘计算平台,将环境感知信息与导航数据进行实时共享,为飞行器提供更为完善的空间信息支撑。

在此基础上,低空数字化空域可进一步与多源导航信息融合及通导感一体化技术紧密结合^[15],为低空飞行器提供高可信度的外部信息支持,增强其在复杂环境下的定位与路径规划能力。

2 低空飞行器导航系统测试技术发展现状

低空飞行器导航系统的测试技术正朝着多模式融合、高精度动态验证和环境适应性增强等方向发展。随着国家北斗+低轨通导一体化网络、精密单点定位等技术的推广,测试方法需与导航关键技术深度结合,覆盖从传感器级到系统级的全链条验证,并融入实时性、抗干扰性等评价维度。

2.1 基础导航技术测试方法

随着低空飞行器在多种应用场景中的广泛使用,导航的系统级测试技术也在不断发展,以满足低空飞行器在不同环境下的导航需求^[16]。如图3所示,针对导航系统的位置、速度、航向和姿态

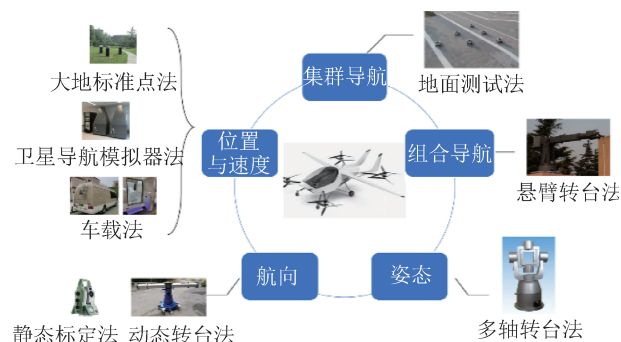


图3 低空飞行器导航系统级测试技术

Fig.3 Low-altitude aircraft navigation system-level metrology techniques

等关键参数,测试技术的发展呈现出多样化和专业化的趋势,目前已形成了较为完善的测试体系。

如图4、图5所示,仪表级测试技术主要关注导航系统内部组件的性能,包括对接收机、陀螺仪、加速度计、摄像头等模块的测试。通过在特定条件下对这些模块进行测试,可以评估其在实际应用中的性能。

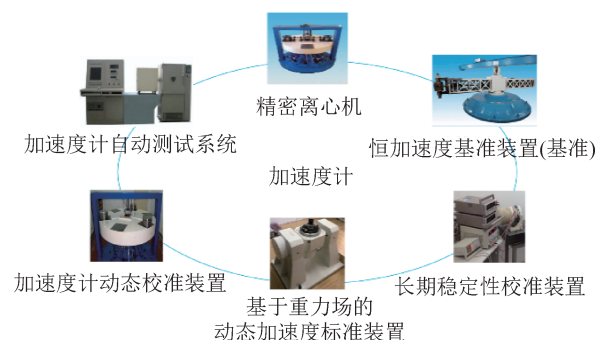


图4 低空飞行器导航仪表级测试技术之加速度计

Fig.4 Low-altitude aircraft navigation instrument-level metrology techniques: accelerometer

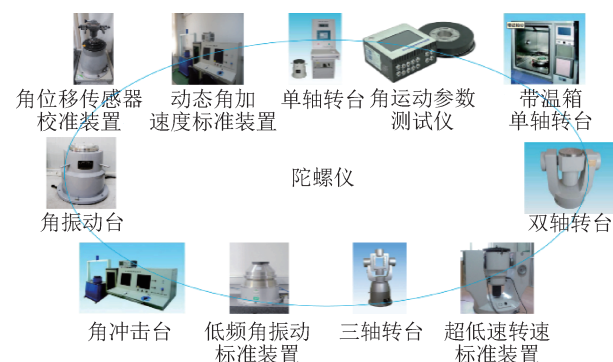


图5 低空飞行器导航仪表级测试技术之陀螺仪

Fig.5 Low-altitude aircraft navigation instrument-level metrology techniques: gyroscope

如图6所示,环境适应性测试技术侧重于评估导航系统在不同环境条件下的性能。通过模拟各种环境条件,可以评估导航系统在实际飞行中可能遇到的各种挑战。环境适应性测试对于确保飞行器在复杂多变的环境中保持导航精度和可靠性至关重要。

低空飞行器在执行任务时高度依赖导航系统。无论采用何种基础导航技术,其主要功能都是为飞行器提供精确的导航参数,包括位置、速度、航向、姿态等。这些参数直接影响飞行器的安全

性、稳定性与任务执行效果。因此,对导航系统进行全面、科学的测试尤为重要。

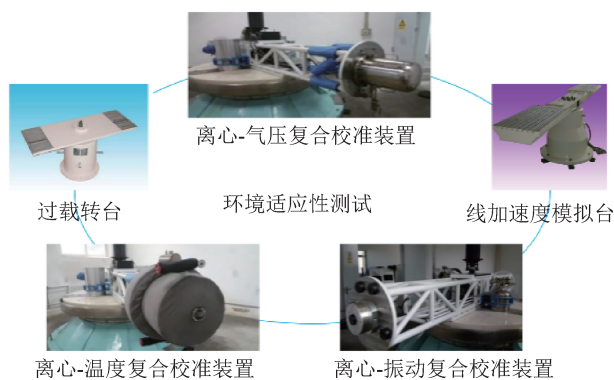


图6 低空飞行器导航环境适应性测试技术

Fig.6 Low-altitude aircraft navigation environmental adaptability metrology techniques

2.1.1 导航系统位置与速度测试

低空飞行器的导航系统位置与速度测试是确保其飞行安全与精确控制的关键环节^[17],主要包括静态测试与动态测试。

在静态位置速度测试方面,一般采用大地标准点法,导航系统位置速度静态测试装置如图7所示,由多个大地标准点组成。大地标准点的位置坐标(经度、纬度、高程)已知,将导航系统位置中心安装在大地标准点上,通过对比导航系统测量的位置坐标和大地标准点的位置坐标,实现对导航系统的位置参数测试。静态速度误差,即在静止时的零速误差,将导航系统放置在具有地基的稳定平台上,通过测量其速度波动得出静态速度误差。误差评价指标主要包括均方根误差和圆概率误差,均方根误差能够显示导航系统位置误差的整体水平,而圆概率误差则通过统计分布描述了系统的精度,即误差在一定概率水平下的分



图7 导航系统位置速度静态测试装置

Fig.7 Static position and velocity testing device for navigation systems

布范围。上述指标能够直观地反映导航系统在静态环境下的定位性能,为系统校正和优化提供依据。

在动态位置速度测试方面,主要采用跑车法,跑车法利用车载标准测试装置对低空飞行器导航系统进行测试。车载标准测试装置如图8所示,包括标准导航参数测量系统、双轴转台角运动系统及车辆运动系统。将被测导航系统安装在车载标准测试装置中的双轴转台角运动系统上,并将天线架设在车顶;车辆沿预定路线行驶,实时记录标准导航参数测量系统的位置速度数据以及被测导航系统的位置速度数据,通过数据对比,进行被测导航系统的性能评估。跑车法能够模拟低空飞行器在实际应用中的运动状态,提供真实的动态测试数据。此外,利用标准高精度导航系统也可以实现对低精度导航系统的性能测试,即将2个系统同时安装在同一车载平台上,通过双系统数据对比,可以准确量化低精度系统的误差特性,并指导其改进和优化。



图8 车载标准测试装置

Fig.8 Vehicle-mounted standard testing device

在位置速度测试方面,还可以采用仿真法,仿真法既可以进行静态测试,也可以进行动态测试。导航系统位置速度仿真测试装置如图9所示,主要由卫星导航模拟器与微波暗箱组成,卫星导航模拟器输出标准轨迹的卫星信号,将信号转发到微波暗箱中,微波暗箱内部具有能够仿真姿态运动的转台,被测导航系统安装在转台上。整个测试装置能够搭配卫星信号的变化,模拟导航系统各类的运动状态,从而评估导航系统在不同运动模式下的性能指标^[18]。此方法的优势在于可以在实验室环境中复现复杂的动态条件,进行全面的系统测试和验证,提前发现并解决系统潜在问题,提升导航系统的稳定性和可靠性。



图9 导航系统位置速度仿真测试装置

Fig.9 Simulation testing device for position and velocity of navigation systems

通过上述测试方法的综合应用,可以有效评估低空飞行器导航系统的位置与速度精度,确保其在各种飞行条件下的稳定性和可靠性。

2.1.2 导航系统航向测试

低空飞行器的导航系统航向测试同样包括静态测试与动态测试。静态测试主要评估导航系统精度和稳定性,航向静态测试系统如图10所示,主要包括陀螺经纬仪(或经纬仪与北向镜)以及数据处理系统。将陀螺经纬仪(或经纬仪)对齐导航系统的航向方向,可以直接测量出导航系统航向方向与真北的夹角,北向镜法线与真北夹角可以通过北极星引入;通过航向静态测试系统得出的航向角与导航系统输出的航向角对比,即可实现航向的静态测试。该方法能为动态测试提供可靠的初始条件,并为系统航向稳定性提供依据。

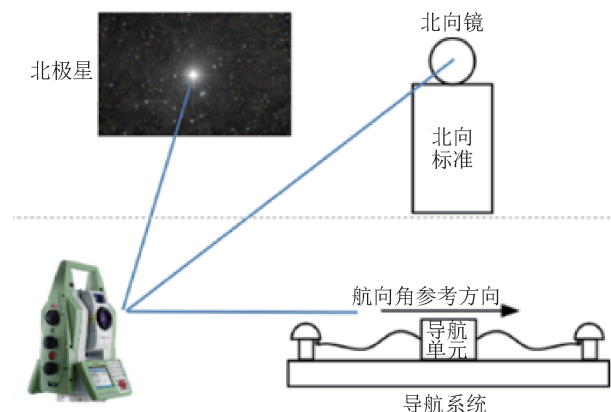


图10 航向静态测试系统

Fig.10 Heading static testing system

动态测试主要采用转台法,航向角动态测试装置如图11所示,由长臂转台与角运动测量系统组成。将导航系统安装在长臂转台上,双天线系统可以分别架设在长臂的两头,初始航向角可以由航向静态测试系统标定出,转台可以模拟航向的动态变化;实时标准的航向角由初始航向角和转台内部光学测角系统(如圆光栅测量系统)综合提供;同步采集标准航向角与导航系统输出的航向角,通过数据对比,可实现对导航系统航向角的动态测试。动态测试的优势在于其不仅可以模拟导航系统在实际飞行中可能遇到的各种航向变化,还可以通过正弦角运动测试计量出导航系统航向的频域特性,反映出导航系统航向测量的响应能力。



图11 航向角动态测试装置

Fig.11 Heading angle dynamic testing device

2.1.3 导航系统姿态测试

如图12所示,导航系统姿态角测试装置主要由多轴转台和角运动测量系统组成,将导航系统安装在转台内框台面上,转台模拟出导航系统不同的姿态变换^[19],通过角运动测量系统得到标准的姿态信息,通过将导航系统的输出数据与标准姿态角信息进行对比,计算出姿态测量误差。姿态角测试装置不仅能对姿态角的静态特性进行标定(如姿态角的测量稳定性、姿态角在不同角度时的误差);还能模拟出导航系统在实际飞行中的不同姿态角,实现动态测试;并且能评估导航系统姿态角在不同频率下的动态响应特性。

姿态角动态测试通过模拟实际飞行中的动态姿态变化,全面评估导航系统的动态姿态测量性能。测试过程中,导航系统同样被安装在标准多轴转台上,但转台按照预定的正弦角振动轨迹进行运动,模拟飞行器在各种复杂飞行状态下的姿态变化。测试时同步采集转台的标准姿态角信号



图12 导航系统姿态角测试装置

Fig.12 Attitude angle testing device for navigation systems

和导航系统的姿态输出信号，通过频域分析，评估导航系统在不同频率下的动态响应特性。

2.2 综合增强技术测试方法

2.2.1 多源导航信息融合测试

多源导航系统的综合测试装置一般有两种：一种为五轴角运动测试装置，如图13所示，该装置固定在户外，通过多轴联动，能够实现位置、速度、航向、俯仰、横滚等多种导航参数的变化，综合测试各项参数性能。通过横轴上的驱动机构带动长旋转臂转动，实现位置、速度、航向的变化；旋转臂顶端的测试台能够进行多轴角运动实现俯仰和横滚方向上的角度变化。在对多源导航系统进行测试时，将待测系统安装于测试台面上，完成初始对准后，通过操作垂直轴改变系统的方向，水平轴调整系统的高度，而俯仰轴和横滚轴则用于调整系统的姿态角。此方法能够全面评估导航系统在不同方向和姿态下的性能。

另一种为轨道装置，利用类似过山车的方式，将导航系统安装在轨道上，在轨道上驱动导航系统经历位置、速度、姿态角等参数的动态变化，通过标定轨道上各点的信息，组成标准参数网络，导航系统经过不同标准已知点，可以实现其导航参数与已知点标准导航参数的对比，从而实现各导航参数的测试。多源导航信息融合技术测试方法旨在验证多传感器数据的协同优化能力，测试中需关注多源数据的时空同步性。



图13 五轴角运动测试装置

Fig.13 Five-axis angular motion testing device

2.2.2 通导感一体化测试

通导感一体化测试旨在验证通信、导航与感知系统的协同能力，以满足低空飞行器在复杂空域中的实时决策需求。测试重点包括通信链路稳定性、导航信号抗干扰性及感知数据融合精度。

测试方法涵盖实验室测试与感知数据融合测试。实验室测试常采用信道模拟器生成多普勒频移和多径干扰信号，评估导航系统的抗干扰能力；感知数据融合测试则通过激光雷达与视觉传感器的同步标定，量化目标识别与避障算法的响应时间与准确率。然而，现有测试标准尚未统一，不同厂商的通信协议兼容性不足，导致跨平台数据交互测试存在障碍。

2.2.3 低空数字化空域适应性测试

低空数字化空域适应性测试关注导航系统在动态空域管理中的兼容性与响应能力，涉及空域数据交互、航路规划及冲突解脱等环节。测试核心在于验证系统与数字化空域基础设施(如低空智联网、动态三维航图)的协同效能。

测试技术面临的挑战包括异构数据接口整合与高并发场景下的系统稳定性。当前，多数测试平台采用分层架构，从传感器级到系统级逐级验证完好性指标。例如，多源定位、导航与授时(Positioning、Navigation and Timing, PNT)信息弹性融合导航系统通过多级故障检测模型(系统级、子系统级、传感器级)实现异常数据的快速隔离。此外，政策驱动的适航认证测试要求导航系统通过严格的实验室试验、地面试验及飞行试验，涵盖电磁兼容性、环境可靠性与功能安全性等多维度评估。

3 低空飞行器导航系统测试技术的挑战

3.1 复杂场景适应性与抗干扰能力验证

低空飞行器导航系统测试面临的核心技术瓶颈集中体现在复杂场景适应性验证不足与抗干扰能力验证的局限性。

1) 复杂场景适应性验证不足

低空飞行场景(如城市峡谷、密集电磁干扰区域)对导航系统提出了极高的鲁棒性要求^[20]。城市环境中建筑物遮蔽导致的卫星信号丢失,可能造成导航定位误差超过10 m,而现有测试技术难以完全模拟此类复杂场景的动态变化特性。

尽管地面仿真测试已采用数字孪生技术构建虚拟环境,但其对多障碍物遮蔽、气象突变(如强风切变)的模拟精度仍不足,导致测试结果与实际飞行数据存在偏差。此外,多传感器融合技术的测试验证尚未形成统一框架,不同传感器的协同纠偏能力在极端条件下的有效性仍待验证。

2) 抗干扰能力验证的局限性

城市电磁环境中的多频段干扰对导航系统的抗噪性能构成严峻考验。现有测试技术虽能模拟单一频段干扰,但对多源叠加干扰场景的复现能力不足。例如,北斗L1频段(1.561 GHz)与5G通信频段(2.6 GHz)的交叉干扰可能导致导航接收机信号失锁^[21],而现有测试设备缺乏动态调整干扰强度的能力,难以量化评估系统的抗干扰阈值。

3.2 标准化与监管滞后

低空飞行器导航测试的标准化进程滞后于技术发展,制约了行业规模化应用。

1) 标准体系碎片化

当前测试标准分散于无人机、通用航空等不同领域,缺乏针对低空场景的专用规范。传统航空适航标准主要针对固定翼飞机,难以适配电动垂直起降(electric Vertical Take-Off and Landing, eVTOL)飞行器新型飞行器的多旋翼构型与电力推进特点,导致测试项目冗余或遗漏^[22]。多源融合导航的测试方法尚未形成统一的技术标准,不同检测机构的测试结果可比性差,影响适航认证效率。

2) 监管体系协同性不足

低空经济管理涉及民航、工信、地方政府等多部门,存在“多头管理”与“监管空白”并存

的问题。飞行试验审批流程复杂,部分地区需军民航双重报备,导致测试周期延长;城市低空空域的分类划设、准入规则等仍缺乏全国统一标准,限制了跨区域测试验证的开展。第三方检测机构的资质认证体系尚未完善,部分企业被迫依赖自建设施测试,加剧了行业资源分散。

3) 国际标准接轨滞后

中国低空导航测试标准与国际体系的兼容性不足,制约了企业全球化布局。欧美已针对eVTOL飞行器提出专项适航要求^[23],而国内相关标准仍处于草案阶段^[24],导致出口产品需重复测试,成本增加。

3.3 测试成本与规模化矛盾

高测试成本与规模化应用需求之间的矛盾,成为低空导航技术商业化落地的核心障碍。

1) 单机测试费用高

eVTOL飞行器等新型飞行器的单次导航系统测试成本较高^[25],主要源于高精度测试设备的购置与维护,以及复杂场景测试所需的高能耗与人力投入^[26]。

2) 规模化测试能力不足

传统实验室测试依赖人工操作,效率低下。以多源融合导航算法验证为例^[27],单次测试需手动配置数十组参数组合,耗时长达数周,难以满足企业快速迭代需求。此外,飞行试验受空域管制与气象条件限制,实际有效测试时间不足规划周期的30%,进一步提高了综合成本。

3) 自动化与智能化转型滞后

尽管人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术已逐步应用于测试数据分析和用例生成,但全流程自动化测试平台尚未普及^[28]。低成本测试工具的生态建设滞后,中小企业难以承担定制化测试解决方案的开发费用。

4 低空飞行器导航系统测试技术的趋势

4.1 智能化测试技术

未来低空飞行器导航系统测试将深度融入人工智能、边缘计算与数字孪生技术,形成“感知-决策-验证”闭环的智能化测试体系。

1) AI驱动的自动化测试平台

基于机器学习的测试用例生成技术可显著提

升测试覆盖率和效率^[29]。通过强化学习算法对历史测试数据的多维度分析,动态优化测试参数组合,自动识别导航系统的潜在失效模式。例如,联邦学习技术可突破数据孤岛限制^[30],允许跨机构共享测试模型参数,提升全行业测试能力。

2) 高保真数字孪生与虚拟现实集成

数字孪生技术将向高精度、实时化方向发展。通过融合激光雷达点云、气象遥感数据与5G实时通信网络^[31],构建毫米级精度的低空环境动态模型,实现导航系统从设计到运维的全生命周期测试。

3) 边缘计算与实时性突破

边缘计算设备的微型化与算力提升将解决实时性瓶颈^[32]。同时,分布式边缘节点(如路侧单元、无人机基站)的协同计算能力^[33],支持在飞行试验中实时验证大规模机群导航的协同避让逻辑。

4.2 标准化与全球化协作

低空经济的全球化属性要求测试标准与技术认证体系突破地域限制,形成互联互通的国际框架^[34]。

1) 国际标准互认机制建设

在国际民航组织、欧洲航空安全局和美国联邦航空管理局的主导下,低空导航测试标准的统一化进程正在加速推进。中国相关机构(如民航局适航司)正通过双边协议推动标准互认,以减少重复认证成本^[35]。

2) 跨行业技术融合标准

低空导航测试需与通信、地理信息、能源等领域深度协同。第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)已启动“5G+北斗”联合测试标准制定工作,以明确导航信号与通信频段的干扰抑制指标^[36];国际电工委员会正在起草《低空飞行器电池-导航系统协同测试规范》,确保高能耗导航设备(如激光雷达)的电力供应稳定性。此类标准将形成跨行业的“大测试”生态的推动。

3) 全球测试资源共享平台

基于区块链技术的测试数据共享平台正成为趋势。国际低空经济联盟主导的“OpenSky”平台允许企业上传匿名化测试数据,通过智能合约实现数据使用权交易,该平台已积累超过10万h的低空飞行测试数据,这些数据可支持AI模型的快

速训练与验证^[37]。

4.3 场景化测试方案

低空飞行器应用场景的多元化要求测试技术从通用型向专业化、场景适配型演进。

1) 城市空中交通专项测试

针对城市密集环境,需开发“端-边-云”协同的测试协议。美国Joby Aviation在其eVTOL飞行器测试中模拟建筑物、电缆、飞鸟等移动障碍物,验证了导航系统在10 m以下超低空区域的实时路径规划能力^[38]。

2) 物流无人机极端条件测试

物流无人机需在山区、海岛等偏远地区运行,测试方案需强化抗风性能与自主返航能力验证。在无人机测试中,构建涵盖8级阵风、-30℃低温、强电磁干扰的复合测试场景,通过强化学习算法优化导航系统的环境适应策略。

3) 应急救援场景快速验证

针对地震、洪水等灾害场景,测试技术需支持快速部署与自适应调整。“应急导航测试箱”集成便携式干扰模拟器与微型仿真平台,可在灾区现场1 h内完成导航系统可靠性验证,确保救援无人机在通信中断条件下的自主作业能力。

4.4 低碳与可持续测试

碳中和目标驱动下,低空导航测试技术将向低碳化、可循环方向转型。

1) 低功耗导航设备测试方法

新型导航芯片(如光子惯性测量单元)的能效测试成为重点。国际民航组织正在制定低空飞行器导航系统能效测试相关文件,要求测试平台量化评估导航设备在典型任务剖面(如30 min悬停+10 km巡航)中的能耗指标,并设定单位里程碳排放上限^[39]。

2) 测试设施的绿色化改造

传统实验室测试的高能耗问题亟待解决。德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)的航空研究中心将风洞测试与光伏发电系统结合,实现了测试过程中80%的能源自给^[40];“智慧节能测试舱”通过AI动态调节温湿度控制参数,降低了30%以上的能耗。

3) 测试数据的碳足迹追踪

基于生命周期评价方法的测试碳足迹核算体系正在建立。欧盟“清洁天空2.0”计划要求企业

提交导航系统测试全过程的碳排放报告(包括设备制造、电力消耗、废弃物处理等),并将其纳入产品环境绩效评级^[41]。

低空飞行器导航系统测试技术正经历从“被动验证”到“主动赋能”的范式转变。智能化技术将重构测试流程,全球化标准体系推动资源高效配置,场景化方案满足多元应用需求,低碳理念则引领可持续发展。未来,随着量子导航、空地一体化网络等颠覆性技术的成熟,测试技术需持续创新方法论与工具链,为低空经济的万亿级市场提供坚实技术支持。

5 发展建议

低空飞行器导航系统测试技术作为保障低空经济安全发展的核心支撑,已形成涵盖实验室测试、仿真验证与实飞检验的多层级技术体系,并在多源融合导航、抗干扰能力测试等领域取得了显著进展。为突破当前制约并把握未来机遇,提出以下系统性建议:

1) 强化政策引导与基础设施投入

设立国家级低空导航测试中心,整合现有检测资源,建设覆盖实验室仿真、外场试验与空域管理的综合性测试基地,重点突破城市等复杂环境模拟、多机协同测试等关键技术。

通过财政专项支持测试设备购置与人才引进。完善低空经济立法框架,明确空域开放边界,规范测试审批流程,明确责任划分,降低企业合规成本。

2) 加速技术创新与产学研协同

攻关智能化测试核心技术,开发AI驱动的自动化测试平台,实现跨机构数据共享,提升测试用例生成效率与覆盖率。推动量子惯性导航、光子芯片等前沿技术的测试方法研究,抢占下一代导航技术制高点。支持高校、科研院所与头部检测机构共建联合实验室。

3) 推进标准化与国际化协同

建立低空专用测试标准体系,统一多传感器协同性能评估指标。深化国际标准互认合作,积极参与国际组织的标准制定,推动中国标准纳入全球适航认证互认清单。建立“一带一路”低空测试联盟,共享测试数据与认证经验,助力国产导航设备出海。

低空飞行器导航系统测试技术的演进,不仅是技术工具的迭代升级,更是低空经济从“试验探索”迈向“规模商用”的关键跃迁。随着技术的成熟,测试过程将逐步从“事后验证”转向“实时预测”,从“单机检测”扩展至“系统级协同”。未来,以测试技术为纽带,低空经济有望形成“技术研发-标准制定-商业应用-数据反馈”的闭环创新链,为城市空中交通、智慧物流、应急救援等场景提供技术支撑。在这一进程中,政产学研用各主体的深度协同,将成为激发低空万亿级市场潜力的核心动能。

参考文献

- [1] 郭辰阳,敖万忠,吕宜宏. 低空经济与通用航空、无人机、UAM的关系分析[J]. 财经界, 2023(28): 30-32.
GUO C Y, AO W Z, LYU Y H. Analysis of the relationship between low altitude economy and general aviation, drones, and UAM[J]. Money China, 2023(28): 30-32. (in Chinese)
- [2] 赛迪智库. 2025年我国低空经济发展形势展望报告[R]. 赛迪智库, 2024.
China Center for Information Industry Development. Prospect Report on the Development of China's Low-altitude Economy in 2025[R]. China Center for Information Industry Development, 2024. (in Chinese)
- [3] 艾媒咨询. 2025—2026年中国低空经济市场发展趋势洞察报告[R]. 艾媒网, 2024.
iiMedia Research. Insights report on the development trends of China's low-altitude economy market from 2025 to 2026[R]. iiMedia.com, 2024. (in Chinese)
- [4] 秦永元. 惯性导航: 第2版[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
QIN Y Y. Inertial navigation: 2nd edition [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 王莉,魏青,徐连明,等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 1-20.
WANG L, WEI Q, XU L M, et al. Research on low-energy-consumption deployment of emergency UAV network for integrated communication-navigating-sensing[J]. Journal of Communications, 2022, 43(7): 1-20. (in Chinese)
- [6] FERNÁNDEZ T, DE VICENTE J. Metrological control of global navigation satellite system (GNSS) equipment[C]// AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2012, 1431(1): 267-274.

- [7] ZHOU Y, LI S, XIA C, et al. Online visual-inertial extrinsic calibration utilizing GNSS measurements for vehicle applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 4545–4557.
- [8] 孙泽权. 陀螺仪在无人机惯性导航系统中的应用研究[J]. *中国高新科技*, 2024(14): 54–56.
SUN Z Q. Research on the application of gyroscope in UAV inertial navigation system [J]. *China High-Tech*, 2024(14): 54–56. (in Chinese)
- [9] 郑德智, 许宁, 吴中怀, 等. 飞艇惯性导航系统加速度计的应用现状与展望[J]. *空天技术*, 2023(1): 77–83.
ZHENG D Z, XU N, WU Z H, et al. Application status and prospect of accelerometer in airship inertial navigation system [J]. *Aerospace Technology*, 2023(1): 77–83. (in Chinese)
- [10] RU X, GU N, SHANG H, et al. MEMS inertial sensor calibration technology: current status and future trends [J]. *Micromachines*, 2022, 13(6): 879–886.
- [11] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J]. *航空学报*, 2021, 42(11): 18–36.
WANG W, XING C Y, FENG W S. State of the art and perspectives of autonomous navigation technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(11): 18–36. (in Chinese)
- [12] ZHANG H, LIU X, DOU Q, et al. Multi-source error calibration and observability analysis of integrated inertial navigation system/ polarization sensor navigation system [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023.
- [13] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(2): 1–14.
WEI B G, BAO Y C, YANG M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration [J]. *Navigation, Location and Timing*, 2022, 9(2): 1–14. (in Chinese)
- [14] 朱永文, 陈志杰, 蒲钊, 等. 数字化空域系统发展研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(3): 135–143.
ZHU Y W, CHEN Z J, PU F, et al. Development of digital airspace system [J]. *Chinese Engineering Science*, 2021, 23(3): 135–143. (in Chinese)
- [15] 陈志杰, 朱永文, 刘杨. 基于数字化空域系统的城市无人机管理对策研究[J]. *中国民航大学学报*, 2023, 41(3): 8–12, 64.
CHEN Z J, ZHU Y W, LIU Y. Management strategy of the urban UAV based on digital airspace system [J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2023, 41(3): 8–12, 64. (in Chinese)
- [16] 匡锐丹. 飞机导航系统校准技术探讨[J]. *计测技术*, 2009, 29(1): 4–5, 23.
KUANG R D. Exploring of how to calibrate airplane's navigation system [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2009, 29(1): 4–5, 23. (in Chinese)
- [17] 陈倩倩, 魏建雄. 惯性导航测试技术发展现状与展望[J]. *测试与测试技术*, 2024, 51(2): 45–47, 51.
CHEN Q Q, WEI J X. Development status and prospect of inertial navigation metrology technology [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2024, 51(2): 45–47, 51. (in Chinese)
- [18] 彭军, 何群, 孙丰甲, 等. INS/GNSS组合导航系统校准方法[J]. *计测技术*, 2014, 34(4): 1–4, 13.
PENG J, HE Q, SUN F J, et al. Calibration of INS/GNSS integrated navigation system [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(4): 1–4, 13. (in Chinese)
- [19] 王剑平, 潘树国, 高旺, 等. 基于高精度三轴转台的GNSS/INS组合导航姿态性能自动化测试评估方法研究[J]. *全球定位系统*, 2022, 47(3): 79–84.
WANG J P, PAN S G, GAO W, et al. Research on automatic test and evaluation method of GNSS/INS integrated navigation attitude performance based on high-precision three-axis turntable [J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(3): 79–84. (in Chinese)
- [20] 杨卫平. 新一代飞行器导航制导与控制技术发展趋势[J]. *航空学报*, 2024, 45(5): 146–170.
YANG W P. Development trend of navigation guidance and control technology for new generation aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(5): 146–170. (in Chinese)
- [21] 张森豪. 北斗+5G在L频段信号兼容性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
ZHANG S H. Research on signal compatibility of BeiDou + 5G in L-band [D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [22] UGWUEZE O, STATHEROS T, HORRI N, et al. Investigation of a mission-based sizing method for electric VTOL aircraft preliminary design [J]. *AIAA SCITECH 2022 Forum*, 2022. DOI:10.2514/6.2022-1931.
- [23] LU Z, HONG H, HOLZAPFEL F. Multi-phase vertical take-off and landing trajectory optimization with feasible initial guesses [J]. *Aerospace* (MDPI Publishing), 2024, 11(1). DOI:10.3390/aerospace11010039.
- [24] 闫振峰, 马瑞欣. 电动垂直起降飞行器适航管理法律

- 研究[C]//《法学前沿》集刊2023年第1卷——航空法研究文集, 2023: 84-91.
- YAN Z F, MA R X. Research on the law of airworthiness management of electric vertical take-off and landing aircraft [C]// *Frontiers of Law*, 2023, Volume 1: Collection of Aeronautical Law Research, 2023: 84-91. (in Chinese)
- [25] 齐宁. 基于真实场景数据库的导航终端测试技术研究与设计[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- QI N. Research and design of navigation terminal testing technology based on real- scene database [D]. Shanghai: Donghua University, 2018. (in Chinese)
- [26] AFONIN A A, SULAKOV A S. Analysis of structure and algorithm features of new type strapdown gravimetric navigation system[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(12): 15115-15126.
- [27] KANG J, XIONG Z, WANG R, et al. Resilient multi-source integrated navigation method for aerospace vehicles based on on-line evaluation of redundant information[J]. *Aerospace*, 2022, 9(7). DOI: 10.3390/aerospace9070333.
- [28] AHMED R, HUSAM Y, BURHAN P. The evolving role of artificial intelligence in software testing: prospects and challenges[J]. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 2024, 6 (2). DOI: 10.36948/ijfmr. 2024. v06i02. 14783.
- [29] KHAN, KHORROM M D. Reinforcement learning-based test case generation with test suite prioritization for android application testing[D]. University of North Texas, 2023.
- [30] KHANKHOJE, ROHIT. AI in test automation: overcoming challenges, embracing imperatives[J]. *International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications*, 2024, 13(1). DOI: 10.5121/ijsc. 2024. 13101
- [31] YU S H, LEI Q Y, LIU C, et al. Application research on digital twins of urban earthquake disasters[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1). DOI: 10.1080/19475705. 2023. 2278274.
- [32] CAO K, LIU Y, MENG G, et al. An overview on edge computing research [J]. *IEEE Access*, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS. 2020. 2991734.
- [33] 季鹏飞, 徐曾春, 胡平. 边缘计算下的多无人机野外协同作业机制研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40 (5): 959-965.
- Ji P F, XU Z C, HU P. Research on Multi-UAV field cooperative operation mechanism under edge computing[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, 40(5): 959-965. (in Chinese)
- [34] NARANG N K. Mentor's musings on standardization landscape & imperatives for the internet of drones [J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2021, 4(4): 64-70.
- [35] 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. Research on the stage characteristics and application scenarios of China's low - altitude economy [J]. *China Price*, 2024(4): 98-103. (in Chinese)
- [36] 李健翔, 贾艺楠, 田晓阳, 等. 5G定位关键技术与标准进展[J]. *电信科学*, 2023, 39(11): 137-144.
- LI J X, JIA Y N, TIAN X Y, et al. Key technologies and standard progress of 5G positioning [J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(11): 137-144. (in Chinese)
- [37] 何勇, 张航宇, 郭智鸿, 等. 基于区块链的分布式无人机数据安全模型[J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31 (10): 153-159.
- HE Y, ZHANG H Y, GUO Z H, et al. Blockchain-based distributed UAV data security model [J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(10): 153-159. (in Chinese)
- [38] UGWUEZE O, STATHEROS T, et al. Trends in eVTOL aircraft development: the concepts, enablers and challenges[C]// *AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023.
- [39] GALKIN B, DASILVA L A. UAVs as mobile infrastructure: addressing battery lifetime [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 4(4): 64-70.
- [40] 李山. 德研发卡诺电池存储可再生资源[N]. *科技日报*, 2022-11-11.
- LI S. Germany develops carnot battery to store renewable energy [N]. *Science and Technology Daily*, 2022-11-11. (in Chinese)
- [41] GELHAUSEN M, GRIMME W, et al. Clean sky 2 technology evaluator — results of the first air transport system level assessments[J]. *Aerospace*, 2022, 9(10): 1-27.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 樊哲(1989—), 高级工程师, 主要研究方向为传感器测试技术及工程应用。