

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.04

面向低空装备的计量测试技术现状及展望

姜延欢¹, 张学涛^{1*}, 秦琦², 尹依伊¹, 辛露¹, 王鑫¹, 吕弘焱¹

(1. 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; 2. 廊坊武警支队, 河北 廊坊 065000)

摘要: 计量测试是保障低空装备运行安全、可靠与效能的核心技术基础, 也是推动低空经济高质量发展的关键支撑, 然而现有的计量测试技术无法适应低空装备场景规模化、复杂化和智能化的发展趋势。本文系统阐述了国家及行业对低空安全计量测试的新要求, 归纳了低空计量测试技术体系的框架, 分析了低空装备计量测试标准的研究情况, 介绍了国内外低空计量测试技术的现状, 从低空产业发展的角度分析了现有计量测试技术的不足和短板。展望低空装备安全计量测试技术的发展趋势, 指出需建立完善的低空装备计量测试体系、研究面向低空装备的专用计量测试平台与解决方案、完善低空计量测试场景, 为低空产业高质、高效、可持续发展提供技术支撑。

关键词: 低空经济; 计量测试; 无人机; 测试场; 标准规范; 规模化; 智能化; 可持续发展

中图分类号: TB9; V21

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0060-10

Current status and prospects of metrology and measurement technologies for low-altitude equipment

JIANG Yanhuan¹, ZHANG Xuetao^{1*}, QIN Qi², YIN Yiyi¹, XIN Lu¹, WANG Xin¹, LYU Honglang¹

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China;

2. Langfang Armed Police Brigade, Langfang 065000, China)

Abstract: Metrology and measurement serve as a fundamental technical basis for ensuring the safe, reliable, and efficient operation of low-altitude equipment, and play a key supportive role in promoting the high-quality development of the low-altitude economy. However, existing metrology and measurement technologies are unable to keep pace with the large-scale, complex, and intelligent evolution of low-altitude equipment application scenarios. This paper systematically outlines the new requirements for low-altitude safety metrology and measurement at the national and industry levels, summarizes the framework of the low-altitude metrology and measurement technology system, analyzes the current status of research on metrology and measurement standards for low-altitude equipment, and reviews domestic and international developments in low-altitude metrology and measurement. From the perspective of low-altitude industry growth, it identifies shortcomings and gaps in existing metrology and measurement technologies. This article looks forward to the development trend of low altitude equipment safety measurement and testing techniques, pointing out the need to establish a sound low-altitude equipment measurement and testing system, research specialized measurement and testing platforms and solutions for low-altitude equipment, improve low-altitude measurement and testing scenarios, and provide technical support for the high-quality, effi-

收稿日期: 2026-03-16; 修回日期: 2026-03-27; 录用日期: 2026-03-29; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 航空工业集团自主投入项目(KJH82601020)

引用格式: 姜延欢, 张学涛, 秦琦, 等. 面向低空装备的计量测试技术现状及展望[J]. 计测技术, 2026, 46(2):60-69.

Citation: JIANG Y H, ZHANG X T, QIN Q, et al. Current status and prospects of metrology and measurement technologies for low-altitude equipment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2):60-69.



cient, and sustainable development of the low-altitude industry.

Key words: low-altitude economy; metrology and measurement; unmanned aerial vehicle; test field; standard specification; scale up; intelligentization; sustainable development

0 引言

低空经济是指以低空飞行为核心, 辐射带动航空器制造、低空基础设施、飞行服务保障、低空应用场景等领域融合发展的综合性经济形态, 目前已上升到我国的国家战略层面^[1]。2021年1月, 中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》, “低空经济”概念首次被写入国家规划。2024年3月, “低空经济”首次被写入政府工作报告。在国家顶层设计与地方政府的积极推动下, 中国低空经济已从概念导入期迈向产业化落地加速期。低空经济的高质量发展对安全验证体系提出了新的要求。于2024年3月印发的《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》指出, 鼓励推动通用航空、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)等第三方检测、测试、试验基地的建设。于2025年6月发布的《计量支撑产业新质生产力发展行动方案(2025—2030年)》中明确强调“攻克低空航空器智能感知、定位导航、能源动力等关键参数测量校准技术。

国家部委先后从不同层面出台相关政策及法规为低空经济保驾护航^[2], 这为计量测试技术的发展带来新的机遇。计量测试需求从静态、单一参数, 向动态、综合、智能化系统级转变。然而, 现阶段面向低空经济的计量测试存在规范体系不健全^[3]、计量测试能力不完善等诸多问题。由于低空装备的运行场景、结构模式与既有航空装备的理念、模式存在较大的差异, 仍需健全带有其特色的规范^[4-5]。本文分析低空装备计量测试标准的现状, 介绍国内外低空计量测试技术研究情况, 从低空产业发展的角度分析现有计量测试技术的不足之处, 展望低空装备安全计量测试技术未来的发展趋势, 为后续低空经济计量测试技术的高质量发展提供指引。

1 低空装备计量测试标准规范现状

低空经济是新兴产业, 虽然国家政策支持力

度很大, 但是由于空域的诸多限制, 尚未形成以运营为牵引的产业规模。相较传统民用航空, 低空装备计量测试规范体系尚不完整, 且其对应的标准规范从数量和质量上也无法与传统航空相媲美。

1.1 低空装备国内计量测试标准规范现状

基于对现行低空计量测试规范的梳理, 我国已初步构建起覆盖多类型、多尺度的民用无人系统计量测试标准体系。在环境适应性方面, 相关规范系统规定了低温、高温、湿热、振动、冲击、沙尘、盐雾、霉菌、防水以及温度与高度复合等典型自然与力学环境下的试验方法, 形成了较为完整的轻小型无人机环境测试框架。在关键性能计量方面, 针对系统抗风性、电磁兼容性等专项指标提出了明确的测试要求, 此外, 与大中型固定翼无人机相关的计量测试规范也逐渐增加, 涵盖飞行性能、试飞风险科目实施以及自主能力飞行试验等方向。整体而言, 现有规范重点聚焦于环境适应性、飞行性能与基础电磁兼容性的计量测试, 为低空无人机产品研制与适航验证提供了重要依据。然而, 面向低空复杂运行场景下的动态计量校准、低空通导监、多机协同测试以及低空气象环境精细化表征等诸多方面仍存在空白, 尚需后续研究加以完善。国标低空计量测试标准规范如表1所示。

国标低空计量测试标准规范分类如图1所示。现有的计量测试规范主要以环境试验为主, 其占比达到57.89%, 这主要是因为相较传统有人机, 低空飞行器对环境变化更为敏感, 且环境试验是航空器获得官方适航许可的必要前提。其次为低空飞行器关键性能参数的飞行试验规范, 其占比为26.32%, 这主要是因为低空飞行器的成本更加低廉, 飞行测试是对其关键性能参数进行评估的重要手段。

1.2 低空装备国内计量测试标准规范现状

在国外计量测试标准方面, 重点分析ISO的相关标准, 低空相关的标准主要集中在ISO/TC 20/

表1 国标低空计量测试标准规范

Tab.1 National low altitude metrology testing standard specifications

序号	编号	名称
1	GB/T 38058-2019	民用多旋翼无人机系统试验方法
2	GB/T 38930-2020	民用轻小型无人机系统抗风性要求及试验方法
3	GB/T 38909-2020	民用轻小型无人机系统电磁兼容性要求与试验方法
4	GB/T 38924.1-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第1部分: 总则
5	GB/T 38924.2-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第2部分: 低温试验
6	GB/T 38924.3-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第3部分: 高温试验
7	GB/T 38924.4-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第4部分: 温度和高度试验
8	GB/T 38924.5-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第5部分: 冲击试验
9	GB/T 38924.6-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第6部分: 振动试验
10	GB/T 38924.7-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第7部分: 湿热试验
11	GB/T 38924.8-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第8部分: 盐雾试验
12	GB/T 38924.9-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第9部分: 防水性试验
13	GB/T 38924.10-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第10部分: 沙尘试验
14	GB/T 41450-2022	无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测技术规范
15	GB/T 38924.11-2023	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第11部分: 霉菌试验
16	GB/T 43504-2023	民用大中型固定翼无人机飞行性能飞行试验要求
17	GB/T 44717-2024	民用无人机可靠性飞行试验要求与方法
18	GB/T 44168-2024	民用大中型固定翼无人机系统试飞风险科目实施要求
19	GB/T 44166-2024	民用大中型固定翼无人机系统自主能力飞行试验要求

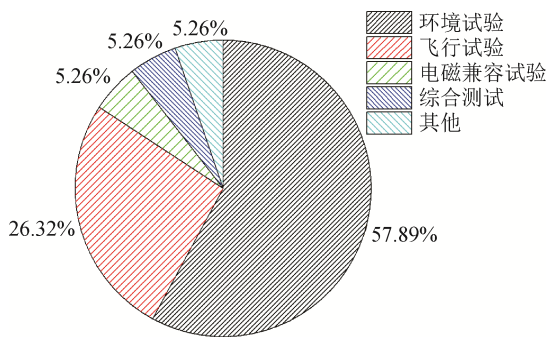


图1 国标低空计量测试标准规范分类

Fig.1 Classification of national low altitude metrology testing standards and specifications

SC 16(由无人驾驶航空器系统技术委员会建立), 目前已发布多项国际标准。ISO低空计量测试标准规范见表2。

从低空飞行器种类维度分析, 现行低空计量测试标准主要面向多旋翼和固定翼两类民用轻小型无人驾驶航空器。

从计量测试参数维度分析, 标准覆盖了飞行性能参数(如飞行速度、续航时间、飞行稳定性等)、环境适应性参数(如低气压环境下操作能力等)、系统可靠性参数(如电动能源系统的充放电性能等)以及安全性参数(如旋翼叶片对人体锐性伤害评估)。如ISO 4358: 2023为多旋翼无人机提供了涵盖各子系统功能测试的通用试验方法; ISO 5286: 2023为固定翼无人机的起飞、爬升、巡航、着陆等全流程飞行性能指标提供了统一的试验方法。上述标准构建了覆盖从整机性能到核心分系统的测试方法体系, 为低空飞行器的适航认证与计量测试提供了重要依据。

2 低空经济计量测试技术研究现状

2.1 国外低空经济计量测试技术研究现状

面向低空经济的计量测试可获取精准的测量数据, 是确保产品质量、安全和性能的关键环节,

表2 ISO低空计量测试标准规范

Tab.2 ISO low altitude metrology testing standard specifications

序号	编号	名称
1	ISO 21895: 2020 (修订中 ISO/DIS 21895: 2025)	Categorization and classification of civil unmanned aircraft systems
2	ISO 4358: 2023	Test methods for civil multi-copter unmanned aircraft system
3	ISO 5110: 2023	Test method for flight stability of a multi-copter UAS under wind and rain conditions
4	ISO 5286: 2023	Flight performance of civil small and light fixed-wing UAS — test methods
5	ISO 5312: 2023	Civil small and light unmanned aircraft — sharp injury to human body by rotor blades — evaluation and test method
6	ISO 5332: 2023	Civil small and light UAS under low-pressure conditions — test methods
7	ISO 24352: 2023	Technical requirements for small unmanned aircraft electric energy systems
8	ISO 24355: 2023	Civil small and light multi-copter UAS flight control system — general requirements
9	(在编)	Civil small and light UAS — vibration test methods
10	(在编)	Noise measurements for UAS

也是获得适航认证和市场准入的必要条件^[6-8]。目前，以美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)、欧洲国家计量机构协会(European Association of National Metrology Institutes, EURAMET)、德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)等为核心的国外计量测试机构在低空飞行器制造、低空基础设施和低空应用场景等方面开展大量的计量测试技术研究，但是低空飞行服务保障相关

的介绍相对较少。

在低空飞行器制造计量测试方面，NIST起步较早，针对不同类型的无人机开展了大量的研究，目前的研究重点为垂直起降系统和手动固定翼系统测量，具备无人机机动性、有效负载功能等方面的计量测试能力。作为美国的国家计量机构，NIST还致力于建立和推广低空飞行相关计量标准，涵盖噪声、通讯以及传感器计量测试等多个方面。NIST开展UAV计量测试示意图如图2所示。



图2 NIST开展UAV计量测试
Fig.2 UAV metrology and measurement conducted at NIST

此外,随着人工智能技术的高质量发展,低空装备的智能化水平不断提升,视觉智能感知、自主避障等人工智能技术逐渐成为低空飞行器的标配,对人工智能的计量测试提出新要求。法国国家计量测试实验室(Laboratoire national de métrologie et d'essais, LNE)开发通用计量测试平台,可提供多种环境和大气等条件,生成动态逼真的复杂测试场景,并评估系统在受控环境中的反应,以便为其客户提供可靠的基准并验证自主系统的性能。LNE开发的LEIA平台如图3所示。NIST聚焦人工智能领域测量指标和测量方法的研究,开发人工智能数据标准和案例,形成人工智能测试评估方法和标准,进而推进人工智能技术的发展。目前,NIST已实现对数千个人工智能系统(音频、视频、图像等)的测量和评估,重点关注的属性是人工智能系统的可信度,包括准确性、偏差缓解、可解释性、隐私性、弹性、可靠性、稳健性和安全性等。



图3 LNE开发的LEIA平台

Fig.3 LEIA platform developed by LNE

在低空基础设施计量测试方面, EURAMET开发和整合支持氢气整个供应链(包括生产、储存、最终使用)所需的计量技术。此外, EURAMET还开展了储能材料的原位计量研究,为适用于电池系统的储能材料建立可追溯、可验证和定量的原位操作方法。PTB加速推进能源和存储计量基础设施的建设,为低空经济涉及的锂电池、氢动力等新型动力系统的量值溯源提供重要技术保障。日本国家计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)在计量标准方面也开展了相关的研究工作,虽然其研究重点并非专门针对低空飞行器,但其在测量标准的建立和传播方面的工作为低空飞行器计

量测试提供了基础支持。

目前,主要通过构建测试场实现低空应用场景相关的计量测试,美国依据《美国联邦航空管理局现代化与改革法案》(FMRA 2012)、《2016年联邦航空管理局延期、安全与安保法案》(FESSA 2016)、《联邦航空管理局授权法案》等法规要求,按照分批建设的原则,已形成9个无人机系统测试场,支撑联邦航空管理局在探测与避让技术、指挥与控制技术、适航认证技术、超视距飞行运营、城市空中交通技术、多无人机协同运行技术、反无人机技术等方向的研究、测试与评估,推动无人机系统安全融入国家空域系统。美国无人机测试场分布情况如图4所示。

2.2 国内低空经济计量测试技术研究现状

为了支撑低空经济的高质量发展,国内大量研究机构和企业加大在低空计量测试领域的布局 and 投入,整体呈现出综合性计量测试能力的建设和专项计量测试能力的建设两种趋势。在低空经济综合性计量测试能力方面,基于建设单位自身的业务能力和基础呈现出三种不同的类型,具体如下:

1) 传统低空飞行器研制及试验试飞机构

航空工业试飞院、航天彩虹无人机股份有限公司等属于传统低空飞行器研制及试验试飞机构。此类机构以无人机产业“三全一前”计量测试需求为牵引,围绕微型、轻型、小型及中型的固定翼、单旋翼和多旋翼无人机等低空飞行器的计量测试需求,构建无人机综合试飞平台、综合航电半实物仿真平台、动力系统综合试验平台、综合电磁试验平台等无人机系统/分系统级综合试验能力,能够提供各型无人机试飞、各专业系统技术验证、无人机系统集成质量检测等一系列应用测试服务。

2) 传统航空器计量测试专业技术机构

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所等属于传统航空器计量测试专业技术机构。这类专业技术机构长期从事传统航空器研制生产、试验试飞等全生命周期关键参数的计量测试技术研究,形成较为完善的计量测试技术体系和规范体系,具备关键参数的极值量、动态量及复杂环境的计量测试能力,涵盖低空飞行器导航

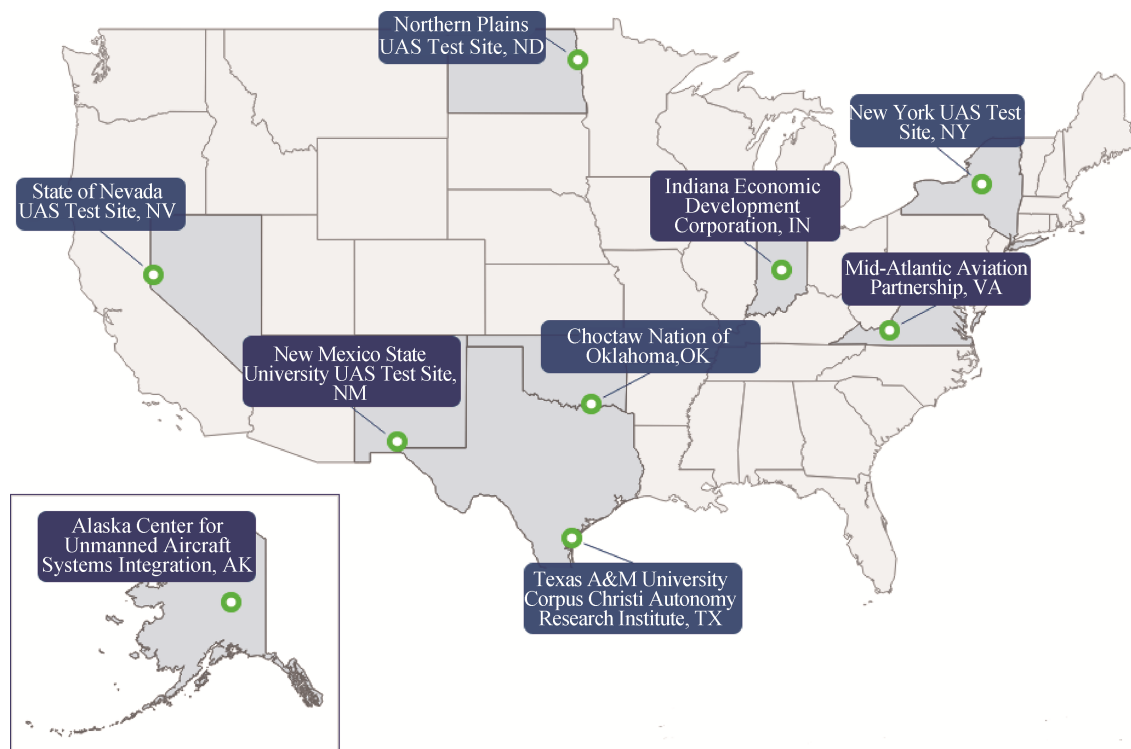


图4 美国无人机测试场分布情况

Fig.4 Distribution of UAV test sites in the United States

系统、动力系统、通讯系统、结构性能、飞行性能等领域绝大多数参数的计量测试能力。

3) 低空飞行器新兴计量测试机构

在低空飞行器全生命周期内需要计量测试的参数非常多,若要全部关注,相关的平台建设规模极大,而低空飞行器成本低,开发人员往往关注的是低空飞行器的飞行性能参数(无人机定位精度、飞行速度等)、监视与气象设备性能参数及场景适应性的计量测试。深圳市计量质量检测研究院筹建的国家民用无人机产品质量检验检测中心(广东)属于低空飞行器新兴计量测试机构,主要开展低空飞行器飞行质量领域共性问题计量测试。某电子五所在广州、深圳、珠海等地布局低空飞行器测试服务基地可对微小轻型无人机、中大型无人机和电动垂直起降飞行器(electric Vertical Take-Off and Landing, eVTOL)进行整机及关键零部件在内的检验检测,还可对监视、气象等信息设备开展相应的检验检测,此基地亦属于这类新兴计量测试机构。

在专项计量测试能力建设方面,低空专用计量测试风洞是低空飞行器设计及研制过程中重要

的基础保障装置。广东空天科技研究院将传统航空风洞与无人机风墙测试系统相结合,构建面向低空飞行器的复合型风洞,所设计的风墙采用48个风机模拟低空飞行器运行过程中的复杂风场,可满足7级风抗风性试验的持续风、阵风、切向风要求,该风洞的应用可直接降低低空飞行器的试验研制周期。电子科技大学(深圳)高等研究院深思实验室建立了低空三维多物理场耦合引导风洞,如图5所示。与常规风洞不同,该风洞可模拟雨雪等不同气象环境因素及城市典型风场,支撑低空飞行器的高质量研发。

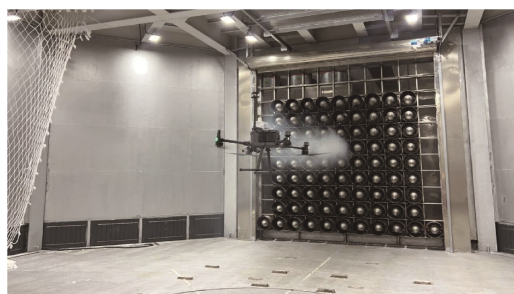


图5 低空三维多物理场耦合引导风洞

Fig.5 Low-altitude three-dimensional multi-physics field coupling guided wind tunnel

3 低空装备计量测试技术体系及现存问题

3.1 既有航空装备的计量测试体系

既有航空装备按照产品层次，形成了相对固化的专业活动分工(如图6所示)。由总体、试验、试飞等单位完成飞机一级到三级产品的设计及性能评估，由机体结构、机载成品、试验等单位完成三级、四级及四级以下产品的研制及性能评估，计量测试作为基础技术单位参与到各级活动中。

既有航空装备通过顶层机构引领、关键技术攻关和全链条覆盖，形成完善的计量测试技术体系，支撑既有航空技术的可靠性与安全性提升。

既有航空装备通过顶层机构引领、关键技术攻关和全链条覆盖，形成完善的计量测试技术体系，支撑既有航空技术的可靠性与安全性提升。

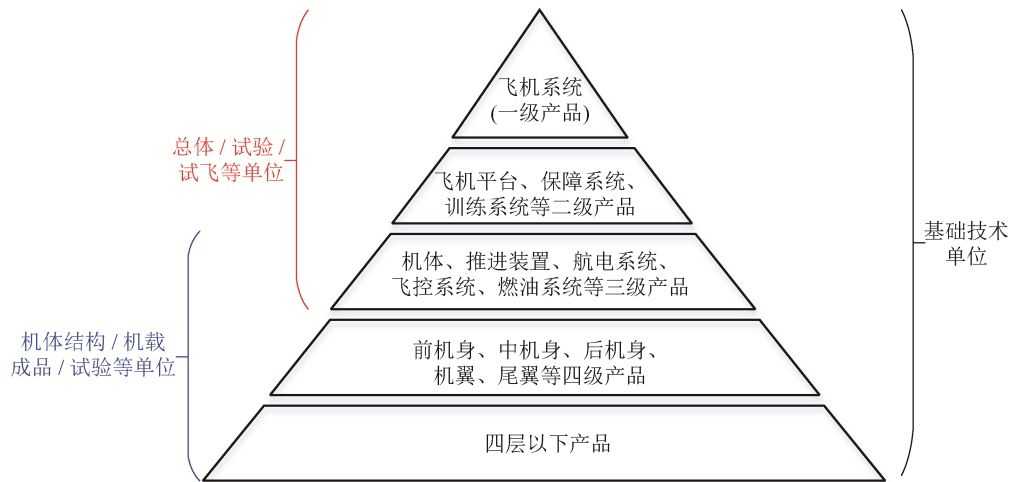


图6 既有航空装备的产品层次与专业活动分工

Fig.6 Product hierarchy and professional activity division of existing aviation equipment

3.2 低空装备计量测试技术体系

低空经济计量测试标准是产业高质量发展的技术底座和安全基石，建立统一、科学的技术标尺是确保低空经济产业从试点示范走向规模化成熟商业发展的核心支撑力量。

由于低空经济产业服务范围主要聚焦低空飞行器制造、低空基础设施、低空飞行服务保障和低空应用场景4个领域，与其相对应的计量测试技术也应以此为出发点进行重点考虑。以低空飞行器制造过程中的计量测试技术为例进行说明：

1) 导航系统计量测试技术主要是构建低空飞行器导航定位系统的计量测试能力，实现惯性导航、地磁导航、卫星导航、组合导航、视觉惯性导航系统等导航系统位置、姿态、速度等参数的计量测试。

2) 探测系统计量测试技术主要是构建低空飞行器可见光、红外、激光及多模态融合感知等探测系统感知能力的计量测试能力，实现智能感知系统距离、角度、速度及识别率等关键参数的计量测试。

3) 通讯系统计量测试技术主要是构建低空地

面及机载用电设备、机间及机内通信设备等电子与通信系统的计量测试能力，解决供电特性参数、系统时间延迟及同步等关键参数的计量测试。

4) 电磁兼容计量测试技术主要是构建复杂电磁环境下低空飞行器设备、系统及整机的可靠性计量测试能力，实现静电放电抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度、浪涌(冲击)抗扰度、电压暂降等关键参数的计量测试。

5) 环境试验计量测试技术主要是构建低空飞行器及关键系统微气象环境及应急模式的适应性计量评估能力，实现降雨、云雾、冰雹等气候环境、振动等机械环境及应急环境下关键系统的计量测试。

6) 动力系统计量测试技术主要是构建低空飞行器动力系统的计量测试能力，实现氢动力、混合动力、电推进等不同动力系统推力、流场品质、发热功率、运行状态等关键参数的计量测试。

7) 结构性能计量测试技术主要是构建低空飞行器承载能力、耐久性设计的计量测试能力，实现关键零部件结构强度、气动弹性性能、疲劳性

能、材料硬度等关键参数的计量测试。

8) 飞行性能计量测试技术主要是构建低空飞行器任务执行范围与效率的可靠评估能力, 实现飞行稳定性、飞行精度、最大飞行速度、航程、飞行载荷等关键参数的计量测试。

9) 算法软件计量测试技术主要是构建低空飞行器通用算法、嵌入式算法软件及人工智能算法软件的测评能力, 实现低空飞行器关键系统算法软件功能、性能的计量测试。

低空经济计量测试技术体系如图7所示。

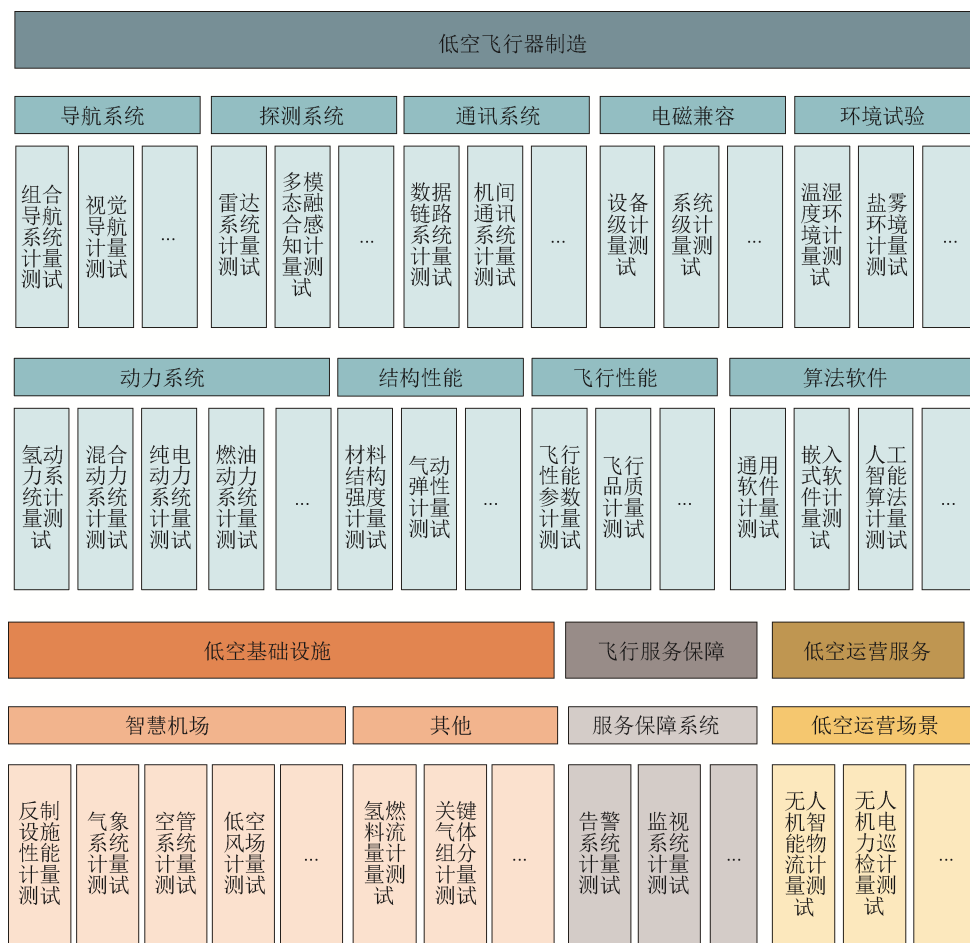


图7 低空经济计量测试技术体系

Fig.7 Low-altitude economy metrology and measurement technology system

3.3 低空经济计量测试技术问题分析

相较以往航空装备发展过程中形成的专业分工、成熟的规范体系, 低空装备的货架产品占比高、通用性强、规模大, 更加追求高集约、高效率、高可靠、低成本的技术资源与服务支撑。而且, 低空装备的运行场景更加复杂(如海上救援、峡谷物流、城市起降等)、智能化水平更高(自主起降、自主避障等), 牵引出一系列传统航空装备计量测试关注度不够的需求(如低空风场、GPS拒止下的导航定位、智能系统的量值溯源等)。整体而言, 既有航空装备建立起的计量测试服务能够

涵盖低空装备的大部分需求, 但是尚无法满足低空新特征、新需求牵引出的计量测试需求。主要问题如下:

1) 低空经济计量测试需求与服务不匹配

低空经济具有技术迭代速度快、应用场景复杂、研发成本低等特点, 现有航空装备发展过程中形成的专业分工无法满足低空经济的高质量发展需求。首先, 传统航空计量测试体系资源分散, 由不同机构或团队独立开展工作, 存在物流、人力、校准设施成本高, 周期长等问题, 生产端和消费端均难以承受。其次, 低空计量测试对场地、

设备的专业性要求极高,且需匹配多元化场景,但当前基础设施存在“重硬件堆砌、轻场景适配”的问题,极易导致“实验室测试合格,实际运行故障频发”的问题。最后,随着低空经济市场爆发,计量测试需求呈指数级增长,但现有资源与技术能力难以匹配。权威试验、检测与计量机构资源有限,多数第三方计量测试机构处于低空业务开拓初期,技术能力和人员水平难以满足低空经济计量测试需求。

2) 低空经济计量评价标准与规范滞后

低空飞行器作为新兴航空载体,在构型设计、运行模式及应用生态等方面呈现出显著的新型特征,导致陷入“传统标准不适配、专项标准未落地”的困境,难以有效支撑产业监管与市场准入。低空飞行器技术路线多元、应用场景分散,在飞行性能、安全阈值等方面的要求与传统航空器差异显著,既有计量测试规范无法根据场景需求精准规范测试项目与标准阈值,且低空特有因素的计量测试需求、参数不明确,导致认证标准与实际风险脱节,适航认证周期冗长,难以支撑产业健康持续发展。此外,不同区域间技术标准、测试方法不统一,跨区域检测结果互认困难,无法进行权威、统一的计量评价与认证,致使形成监管盲区,增大安全飞行风险。

3) 低空经济计量测试关键技术突破及能力不健全

低空装备研制生产及运行使用的新模式对计量测试提出新的要求。低空飞行器核心零部件的关键技术与传统航空器存在差异,导致现有的低空飞行器核心零部件计量测试体系面临“旧框套新物”甚至缺失的现实困境。例如,低空装备的数字化、智能化水平更高,数字航路网^[9]、智能感知^[10]等数智化技术大量应用,但是现阶段尚未打通数字模型、智能算法的量值溯源链路,难以保障数据的准确性与可靠性。在飞行器制造方面,低空装备所采用的货架产品更多、智能化水平更高、动力系统大幅度革新,牵引出新的计量测试需求^[11]。如低空装备以视觉、激光雷达、红外等不同模态为核心的智能感知及自主决策水平大幅提升,但是人工智能的计量基础理论尚不健全。以电能和氢能为核心的新型动力系统,对能源产

生、存储、应用等全链路提出新的计量测试需求,传统以化石燃料为核心的计量测试能力将不再适应。在低空基础设施方面,低空装备安全运行的基础保障与传统航空装备有极大差别,提出了新的计量需求。如低空飞行器的飞行场景风场更加复杂,对机场及航线三维风场的高精度测量提出了新的要求。在飞行服务保障方面,若低空装备大范围推广,低空空域密集程度更高、低空装备数量更多,对空域精细划分、告警及监控系统、电子围栏等的计量测试提出新要求。在低空运营服务方面,低空装备大量应用于电力巡检、低空物流等场景,不同场景对低空装备的智能感知能力、飞行性能提出新的计量测试要求。

4 结论及展望

低空装备的计量测试是确保飞行安全与可靠性的基础,为低空装备的适航认证、空域管理及责任判定提供客观依据,也是提升低空装备运营效率、实现规模化发展的前提。为此,亟须建立完善的低空装备计量测试体系,支撑低空装备的高质量发展,具体如下:

1) 现阶段低空装备的计量测试规范体系尚不健全,呈现出显著的滞后性与碎片化,难以精准匹配无人机、eVTOL等低空装备的特点。亟须加速推动低空计量测试标准的顶层设计和统筹规划,促进法规、标准与检测认证的紧密衔接,为低空经济的发展提供坚实的数据支撑。

2) 面向低空装备的专用计量测试平台与解决方案存在大量空白。亟须加强计量机构与龙头企业的协同创新,构建面向低空装备的专用风洞、轨道撬等专用计量测试平台,形成面向风场精细化测量、智能感知、自主决策等关键场景和对象的解决方案,构建面向低空装备全链条的计量测试能力,为装备安全与性能提升提供坚实基础。

3) 现有低空计量测试场在场景复杂性、空域融合度等方面存在不足,无法满足无人机、eVTOL等低空装备运行的新场景、新模式测量需求。亟须建设低成本、一体化、集约化的计量测试平台,构建标准化、可复现的计量测试流程,获取权威的计量测试数据,推进计量测试数据的广泛互认,支撑低空装备研发定型与准入审定。

参考文献

- [1] 樊邦奎, 李云, 吴陈, 等. 无人机产业高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(6): 261-272.
FAN B K, LI Y, WU C, et al. High-quality development of the unmanned aerial vehicle industry[J]. Engineering, 2025, 27(6): 261-272. (in Chinese)
- [2] 万福军, 周幸窃, 陶赞, 等. 中国低空经济现状及标准化发展探析[J]. 标准科学, 2025(12): 16-22.
WAN F J, ZHOU X Y, TAO Z, et al. Analysis of the current status and standardization development of China's low-altitude economy[J]. Standard Science, 2025(12): 16-22. (in Chinese)
- [3] 李画婧, 丁凡, 李闻宇, 等. 低空经济产业标准化发展现状分析与对策研究[J]. 中国标准化, 2025, 683: 33-39.
LI H J, DING F, LI W Y, et al. Status analysis and countermeasure research of standardization development of low-altitude economy [J]. China Standardization, 2025, 2025, 683: 33-39. (in Chinese)
- [4] 刘光才, 高杨. 低空经济背景下低空产业安全监管体系的重构研究[J]. 西南交通大学学报, 2026, 27(1): 47-57.
LIU G C, GAO Y. Research on the restructuring of industry safety regulatory systems in the context of the low-altitude economy[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (Social Sciences), 2026, 27(1): 47-57. (in Chinese)
- [5] 王凯凯. 低空经济背景下空域管控的风险管理[J]. 中国航务周刊, 2025(50): 55-57.
WANG K K. Risk management of airspace control under the background of low altitude economy[J]. China Aviation Weekly, 2025(50): 55-57. (in Chinese)
- [6] 彭志明. 浅谈计量测试对于产品质量的保证作用[J]. 计测技术, 2017, 37(增刊1): 313-314.
PENG Z M. Discussion on the role of metrological testing in ensuring product quality[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37 (supplement 1): 313-314. (in Chinese)
- [7] 邢馨婷, 宋涛, 龙祖洪, 等. 计量保障在型号工程中的作用[J]. 计测技术, 2008(5): 60-62.
XING X T, SONG T, LONG Z H, et al. The effect of metrology guarantee in the model project [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008(5): 60-62. (in Chinese)
- [8] 梁志国, 周自力, 熊昌友. 计量性与未来制造业[J]. 计测技术, 2017, 37(6): 1-7.
LIANG Z G, ZHOU Z L, XIONG C Y. The relationship between the measure ability and the future of manufacturing [J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37 (6): 1-7. (in Chinese)
- [9] 杨东, 彭前朝, 魏泽龙. 低空经济产业关键核心技术发展潜力预测及竞争态势研究[J]. 统计与信息论坛 2026, 41(1): 51-62.
YANG D, PENG Q Z, WEI Z L. Research on forecasting development potential and competitive landscape of key core technologies in the low-altitude economy industry [J]. Journal of Statistics and Information, 2026, 41(1): 51-62. (in Chinese)
- [10] 张过, 方志斌, 江万寿, 等. 航天遥感低空经济数字航路网构建与初步验证[J]. 中国空间科学技术, 2026, 41(1): 1-13.
ZHANG G, FANG Z B, JIANG W S, et al. Construction and preliminary validation of a spaceborne remote sensing based digital air-route network for low-altitude economy [J]. Chinese Space Science and Technology, 2026, 41(1): 1-13. (in Chinese)
- [11] 钱志鸿, 王义君. 低空经济赋能者: 智能无人机技术体系综述与展[J]. 电子与信息学报, 2026, 48(1): 1-33.
QIAN Z H, WANG Y J. Intelligent unmanned aerial vehicles for advanced air mobility: review of the technology framework and future prospects[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2026, 48(1): 1-33. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 姜延欢(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为智能测量及评价技术。任全国人工智能计量技术委员会、全国智能网联汽车专用计量测试技术委员会、中国标准协会低空经济专委会委员, 曾主持多项科研项目, 牵头起草国家计量技术规范2项。



通信作者: 张学涛(1983—), 男, 研究员, 主要研究方向为数字化计量测试技术。任航空工业计量所副总师、数字化技术部部长, 参与编制十余项计量技术规范, 获奖多项。