

引用格式: 袁照路, 徐慧, 王细凤, 等. 低空经济背景下氢能无人机标准体系构建研究[J]. 标准化学报, 2026(9): 72-80.

YUAN Zhaolu, XU Hui, WANG Xifeng, et al. Research on the Construction of a Standards System for Hydrogen-powered UAVs in the Context of the Low-altitude Economy[J]. Journal of Standardization, 2026(9): 72-80.

低空经济背景下氢能无人机标准体系构建研究

袁照路¹ 徐慧¹ 王细凤¹ 孙玲玲¹ 郭朋旭¹ 王正权² 由旦玉¹ 刘文秀³

[1.大连标准认证研究院有限公司; 2.洛源科技(大连)有限公司; 3.大连欧亚直升机有限公司]

摘要:【目的】氢能无人机凭借长航时、零排放的特点,成为推动低空经济向绿色化、高端化迈进的重要力量,但是关键技术环节标准缺失、标准体系不健全等问题较为突出,制约了行业的技术协同和市场拓展。【方法】在梳理国内外政策、标准和产业应用资料的基础上,采用标准文本比对、产业链环节分解、标准图谱和需求分析方法,建立“产业问题—技术需求—标准需求”的分析链条,并从覆盖度、适配性和优先级3个维度识别标准缺口。【结果】构建了涵盖基础通用、氢安全及储供氢系统、燃料电池航空动力系统、整机集成与测试、运行安全与场景服务、地面保障与数字接口共6个特色模块的标准体系框架,形成标准覆盖矩阵和重点标准研制清单。【结论】氢能无人机标准体系建设应突破一般低空经济标准框架的简单套用,重点围绕氢安全、航空级储氢系统、燃料电池动力系统、适航认证、运行许可和加氢保障等特色环节开展标准供给,并通过国际标准跟踪、同步转化和新工作项提案等方式提升我国标准话语权。

关键词: 低空经济; 氢能无人机; 标准体系; 产业化路径

DOI编码: 10.3969/j.issn.2097-857X.2026.09.007

Research on the Construction of a Standards System for Hydrogen-powered UAVs in the Context of the Low-altitude Economy

YUAN Zhaolu¹ XU Hui¹ WANG Xifeng¹ SUN Lingling¹ GUO Pengxu¹
WANG Zhengquan² YOU Danyu¹ LIU Wenxiu³

(1. Dalian Institute of Standardization and Certification Co., Ltd.; 2. Mixwell Technology (Dalian) Co., Ltd.;
3. Dalian Eurasian Helicopter Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] Hydrogen-powered unmanned aerial vehicles (UAVs) have features of long endurance and no emissions, and therefore become a significant player in the green development and high-end of the low-altitude economy. Nevertheless, the absence of standards in main technical connections and the unfinished standards system are the acute problems that hinder technological cooperation and market growth in the industry. [Methods] In light of a survey of both the domestic and international policies, standards, and applications of industries, comparative analysis of standard texts, decomposition of industrial chain segments, standards mapping and demand analysis were used as methods. An analytical chain of industry problems—technical requirements—standard requirements was created, and standard gaps were determined in three areas: coverage, suitability, and priority. [Results] Six different modules of the standards system

基金项目: 本文受辽宁省市场监督管理局2024年科技计划项目“标准化助力氢能产业高质量发展研究及标准制定”(项目编号: 2024ZC002)资助。

作者简介: 袁照路, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工业和农业领域标准化。

framework have been developed, including fundamental principles and general provisions, hydrogen safety and hydrogen storage and supply systems, fuel cell aviation power systems, full-aircraft integration and testing, operation safety and scenario-based services, and ground support and digital interface. A standard coverage matrix and a list of key standards that need to be developed were also produced. [Conclusion] The creation of a hydrogen-powered UAV standards system cannot remain at the level of mere replication of the overall low-altitude economy standards system. The standardization process must focus on specific features like hydrogen safety, aviation-grade hydrogen storage tanks, fuel cell power systems, airworthiness certification, operational permits, and hydrogen refueling assistance. Moreover, the international standards should be tracked, the synchronous conversion should be promoted, and the new work item proposals submitted, in order to enhance China's voice in the international standards.

Keywords: low-altitude economy; hydrogen-powered UAV; standards system; industrialization path

0 引言

低空经济指利用1 000 m以下空域资源开展各类经济活动的新兴形态,已成为培育新质生产力的重要领域之一^[1]。自2021年《国家综合立体交通网规划纲要》将低空经济列入国家规划以来,低空经济地位得到不断提高,并在2024年首次写入国务院《政府工作报告》,充分说明了它对于促进经济社会发展的重要作用^[2]。而无人机技术是低空经济重要组成部分,也是其发展最重要的动力源,在一定程度上决定了整个低空经济的发展速度与规模。但传统的锂电池受限于能量密度,在续航时间、承载重量以及作业范围方面无法达到大规模商用、远距离飞行、高频率使用的要求,成为阻碍无人机行业发展的一大障碍。

氢能具有很高的质量能量密度和零碳排放的环保特性,为无人机性能突破提供了新的可能^[2-3]。氢能无人机并非简单的能源替换,而是新材料、先进动力、智能控制、安全管理及基础设施等多领域技术系统集成创新的平台。从美国“全球观察者”(Global Observer)、“幻影之眼”(Phantom Eye)等验证机^[3],到国内“飞跃一号”“天目山一号”等机型的成功试飞^[4],均已证明氢能无人机在长航时任务中具有巨大潜力。

目前,氢能无人机产业发展正处在由研发到市场化的过渡时期。在这个过程中,技术创新和商业模式创新紧密结合,但又存在诸多需要解决的

问题。如果缺少科学、合理、规范的引导,那么技术创新与市场需求对接就可能出现市场割裂、安全问题突出、设备匹配困难及产业链上下游资源配置不合理等问题。标准体系不健全已成为比单项技术突破更为紧迫的产业化障碍。因此,制定完善的相应标准是影响我国氢能无人机产业能否实现健康可持续发展的关键因素。本文从氢能无人机自身特点、应用场景及标准化发展过程出发,同时考虑低空经济发展战略和行业发展现状,构建涵盖基础通用、氢安全及储供氢系统、燃料电池航空动力系统、整机集成与测试、运行安全与场景服务、地面保障与数字接口6个模块的标准体系框架,并对标准制修订、贯彻执行及不断完善提出建议,对我国氢能无人机标准化起到一定参考作用。

1 氢能无人机技术及应用现状

1.1 氢能无人机技术特征与安全风险

氢能无人机具有良好的负载能力、较高的能量转化率和优异的环境适应性,在临近空间长航时飞行及低空经济应用等方面表现出极大的优越性,因此受到国内外各大科研单位和企业的广泛关注^[3-4]。目前,美国等一些国家已经开展了一系列有关核心技术的研究工作。“全球观察者”“幻影之眼”“离子虎”等都是其典型案例,相关研究均取得一定成果。“全球观察者-1”在2011年用液氢做燃料进行了动力飞行试验,并对发动机进行改进使续

航时间增加约85%，证明了氢能的应用价值^[3-4]。而在我国，从2012年开始，“飞跃一号”的1 kW质子交换膜燃料电池动力系统已经能够实现两小时飞行；2014年“天行者”的最长飞行时间为36 h；2024年“天目山一号”百千米级多旋翼氢动力无人机首飞，关键性能指标逐步提升^[4]。就技术路径而言，对临近空间平台的设计一般都采用大展弦比翼布局，但面临低雷诺数气动与大变形结构耦合问题，需进行气动/结构一体化设计，推进系统以液氢燃料活塞发动机和质子交换膜燃料电池2种方案为主^[5]；多旋翼平台则普遍采用燃料电池与锂电池并联的混合动力架构，以燃料电池提供巡航功率、锂电池满足起飞和爬升阶段的高功率需求^[5]。

氢能无人机实现长时间续航的核心技术有两方面：一是轻量化设计、二是高效储氢技术。其中，燃料电池是主要的动力源，在燃料电池中，双极板由于占总质量的比例高达80%而受到广泛关注。目前，金属双极板因为良好的导电性和易加工的特点被大量使用，如韩国斗山开发的一款超薄不锈钢双极板（厚度仅为50 μm ），大大减轻了传统材料的质量负担。而在储氢方面，IV型复合材料储氢瓶由于高的单位质量储氢量（2.5%~5.7%）而被广泛采用；虽然液态或者固态储氢方式有很大的优势，但是低温储存问题以及催化剂稳定性的问题使其无法大规模商用。从能源管理系统来看，模糊逻辑控制、等效功耗调度算法以及模型预测控制的方法可以有效提高系统的能源利用效率，有的甚至可以节约3%~5%的能量消耗^[3]。而对于热管理来说，大多数多旋翼无人机都采取开式阴极空冷方案。该方式简单并且不需要额外增加设备，应用均温板之后可以使电堆的工作效率提高大约10%，并且使得单个电池之间的温差小于5.3 $^{\circ}\text{C}$ ^[5]。关于燃料电池寿命的研究表明，催化剂团聚、质子交换膜的老化及气体扩散层疏水性下降等因素都会影响燃料电池的使用寿命。目前，轻量化电堆的设计、新的储氢材料的研究、智能功率控制策略开发以及高效的冷却系统的开发都已经取得了很大的进步并且逐渐进入工程化测试阶段。但是液氢的存储技术和

固体燃料电池仍然存在一系列的问题需要解决，也需要建立一套完整的评价标准并对它们在整个生命周期内的成本进行计算，以促进整个行业的健康发展并加快它们的应用步伐^[3-5]。

结合以上技术特征分析，氢能无人机的安全风险主要集中在以下方面：一是机载高压气态氢或液氢带来的泄漏、材料相容性、低温安全等问题；二是燃料电池电堆在极端条件或负荷变化较大下的可靠性问题；三是供氢系统、动力系统与飞控系统耦合后可能形成的故障传播和冗余设计问题；四是地面加氢、维护和应急处置与飞行运行之间的边界管理问题。以上风险表明，氢能无人机标准体系不能简单套用普通无人机标准或地面氢能标准，而应建立以氢安全贯穿全过程的标准体系。

1.2 应用场景及标准化需求

氢能无人机具有远航程、大载重及快充等特性，推动低空作业方式由短时间单点式向长时间网络化发展，催生低空经济新业态。

在军事应用方面，临近空间长航时无人机主要用于长时间侦察、中继通信等任务。据有关资料介绍，这类设备一般可在20 km以上高空进行工作，一次飞行时间可达几天甚至更长。优异性能使它具有“准卫星”的特点，适用于恶劣环境下长时间监视。美国“全球观察者”等项目即围绕上述技术目标开展技术验证研究。而在民用通信上，临近空间平台可以作为空中基站，解决一些偏远或者灾区通信不足的问题，相比于传统的卫星通信系统更加灵活且经济实用，具有良好的市场前景和发展潜力。

在物流行业中，氢能无人机具有高效节能、经济的特点，正在成为连接两座城市的一种新型交通工具。据有关资料，使用氢燃料电池动力的多轴飞行器可以飞行5~10 h，在这方面它非常适合用于高价值货物或者紧急医疗物品短距离快速运输工作^[6]。

“天目山一号”是我国自主研发的一种专门为区域内100 km以内运输设计的产品并且已经过实践检验其能够胜任远距离物流业务^[2]。基于上述特点，氢能无人机有望在未来形成长时间飞行模式下的低空物流网络并进入智能化物流系统，同时配合地面

仓库和“最后一公里”送货进行合作。

在大规模巡检情况下,氢能源无人机具有明显优势,在电力巡检、油气管道巡检、环保等领域广泛应用。这主要源于巡检任务对于高精度检测的需求,通过搭载光电、红外、多光谱及气体传感器等多种感知手段,配合地理信息系统以及机器学习等技术的应用,可以做到从数据获取到数据分析的一体化操作^[7]。而伴随着电动垂直起降飞行器(eVTOL)技术的发展,使用氢燃料电池或者混合动力的新一代飞行器能够解决目前主流eVTOL存在的航程短、噪声大等问题,可用于短途通勤和个人出行,有利于推动未来城市空中出行的发展^[8]。

根据上述代表性应用实例,标准化的需求主要集中在以下方面:物流及应急领域重视飞行许可证、航线风险评估、载荷固定、远程识别以及应急措施;巡检监测领域重视长时间悬停或者巡航的动力平稳性、数据接口及环境适应性;海岛、山区和灾害地区重视便携式加氢补给站、运输安全

性及维护能力等。所以标准体系还需涵盖从整机的设计到核心零部件的质量保证再到运营和服务设施配合的整体标准链。

1.3 “产业问题—技术需求—标准需求”分析

本文采用“产业问题—技术需求—标准需求”分析链条,将产业问题归结为6个方面,即储氢安全风险高、燃料电池可靠性不足、整机集成缺少认证依据、运行许可管理不清晰、加氢设施与无人机不匹配及标准国际衔接不足;再由这些具体问题提炼相应的技术需求,并归纳为标准需求,见表1。

2 国内外标准化现状

2.1 国际标准组织工作进展

目前,国际上有关氢能无人机的标准较少,而且比较零散,大部分都集中在零部件上。例如:国际电工委员会燃料电池技术委员会(IEC/TC 105)已经制定了IEC 62282-4-202:2023,对于无人机

表1 氢能无人机标准需求逻辑链条

产业问题	技术需求	标准需求	优先级
储氢安全风险高	航空级储氢容器、供氢管路、阀门、密封与泄漏监测需适应振动、冲击、温差和压力循环	航空级高压/液氢储氢系统通用要求;氢燃料管路与阀门试验方法;氢泄漏监测与安全释放要求	近期
燃料电池可靠性不足	电堆、空压/增湿、热管理和功率控制需满足低温、低压、快速负荷变化和长时间运行	无人机用燃料电池航空动力系统可靠性评价;高低温低压环境适应性试验;混合动力能量管理接口	近期
整机集成缺少认证依据	需明确氢系统与飞控、供电、结构、防火、数据链之间的安全边界和故障安全要求	氢能无人机整机安全要求;系统安全评估方法;适航符合性验证指南;整机环境适应性试验规范	近期—中期
运行许可管理不清晰	需要面向氢能动力的运行风险评估、人员资质、维护检查和应急处置程序	氢能无人机运行许可要求;驾驶员和加氢操作人员资质;运行前检查与维护规程;应急处置指南	中期
加氢设施与无人机不匹配	无人机专用加氢接口、移动加氢、氢气品质、起降场安全间距和运维记录需统一	无人机专用加氢接口;航空级氢气品质;低空起降场氢安全要求;移动加氢保障规范	中期
标准国际衔接不足	需要跟踪ISO、IEC、FAA、EASA、ASTM、SAE/EUROCAE等工作,并形成国内技术贡献	国际标准跟踪与转化机制;中国技术提案储备;国际标准验证数据集;标准互认与符合性评价规则	持续

用燃料电池发电系统性能测试的方法进行了说明,主要包括启动和停止、功率输出、持续工作时间、电效率、通信能力及环境适应性等内容,为系统的性能评估提供参考。但是就其适用范围而言,此标准更多针对燃料电池发电系统自身,而对于氢气储存容器、供氢管道、全机适航性和飞行许可等问题涉及较少。

在氢能无人机标准化方面,国际标准化组织航空航天器技术委员会无人驾驶航空器系统分技术委员会(ISO/TC 20/SC 16)正在制定2项国际标准草案,一项是ISO/DIS 25009,主要针对氢燃料管路提出要求及测试方法,另一项是ISO/DIS 25013,主要针对可拆卸氢气瓶提出要求及测试方法,这2项标准都还在国际标准草案询证阶段;而在国际标准化组织氢技术委员会规模化氢能及横向能源系统分技术委员会(ISO/TC 197/SC 1)也有一项标准草案ISO/AWI 19888-1正在制定中,其主要涵盖液氢储罐、供气系统、传感器、阀门及管道等内容。

从不同国家和地区情况看,各国关注点各有侧重。美国基于美国联邦航空管理局(FAA)氢燃料航空器安全及认证路径图、ASTM F38委员会制定的无人驾驶航空器系统标准及美国国家标准学会(ANSI)氢标准协调机制,着重开展氢能航空安全性研究、探索适航符合性实现路径和推动标准协调工作。欧洲利用欧盟航空安全局(EASA)氢技术航空认证路径图,不断审查当前所有认证规则的有效性和局限性并提出改进意见,在推动技术机构与标准机构间协同及开展国际合作方面发挥重要作用。韩国发布KGS AH373,针对无人机燃料电池生产、技术及检测提出技术要求,积极参与ISO/TC 20/SC 16氢能无人机标准化工作。而日本长期参与ISO/TC 20/SC 16无人机标准化工作,已经制定无人机飞行员培训方面的国际标准,在灾害救援、无人机飞行等方面也有许多经验。

2.2 国内标准化与政策基础

我国在民用无人驾驶航空器、氢燃料电池动力系统及氢能相关基础设施方面已出台一系列相关

标准。例如,GB 42590—2023《民用无人驾驶航空器系统安全要求》对整个民用无人驾驶航空器系统安全性提出具体要求,在整机安全、远程识别、应急处置等方面作出详细规定,为我国民用无人驾驶航空器管理提供参考;GB/T 38954—2020《无人机用氢燃料电池发电系统》规定了适用于无人机燃料电池发电系统的各项基本技术指标等。

另外一些团体标准,如T/CEEIA 264—2017、T/CEEIA 265—2017,还有T/CIET 1159—2025、T/CIET 1243—2025、T/CIET 1244—2025等,都涉及到燃料电池发电系统、燃料系统、飞控系统、散热系统及液氢储供系统相关的要求。

在顶层设计上,2026年2月,国家市场监督管理总局等10部门联合发布《低空经济标准体系建设指南(2025年版)》,从低空飞行器、基础设施建设、空中交通管制、安全管理与应用等方面作出规定,构建技术标准和管理规范相结合的低空经济发展标准体系,有利于促进氢能无人机专业化发展。同时,氢能无人机开发、制造与运行离不开2个既有标准体系的支持:一是通用型无人机技术标准,如实名制管理、适航性认证、飞行安全管理及空域使用等;二是氢能与燃料电池领域相关标准,主要是针对地面交通工具或固定设施制定,对氢气纯度、燃料电池测试方法及储运容器的安全性能等均有所要求。

目前的适航管理在满足氢能无人机特殊安全要求方面存在很大缺陷。用于传统航空发动机的标准法规(如CCAR、FAR)还不能很好地涵盖氢能动力装置所涉及的燃料泄漏、着火爆炸及氢脆等问题。此外,美国联邦航空局已经识别出氢动力飞机存在的9个主要问题(如氢气火灾爆炸、材料氢脆、低温危害等)并开始进行相关的研究工作,但成熟的适航标准仍有待建立^[9]。国内外主要相关标准与标准化活动见表2。

2.3 标准图谱与关键缺口识别

结合目前氢能无人机的技术特征和应用场景,将氢能无人机产业链分为基础通用、材料与零部件、储氢供氢、燃料电池动力、整机集成、检测认证、运行服务和基础设施共8个部分,并将现有标准映射到

表2 国内外主要相关标准与标准化活动

类别	标准/活动	主要覆盖内容	不足
国际/IEC	IEC 62282-4-202:2023	无人机用燃料电池动力系统性能试验	对储氢、整机适航和运行安全覆盖不足
国际/ISO	ISO/DIS 25009	氢燃料管路一般要求和试验方法	需与国内材料、阀门、安装验证标准进行衔接
国际/ISO	ISO/DIS 25013	可拆卸氢气瓶要求和试验方法	需对不同机型维护周期和互换性等细化补充
国际/ISO	ISO/AWI 19888-1	液氢航空器燃料储存系统	国内液氢无人机应用缺少设计和验证基础
国际/ISO	ISO 21384-3:2026、ISO 23665:2026等	UAS运行程序和人员培训等	缺少氢能动力运行和应急专项要求
美国	FAA《氢燃料航空器安全与认证路线图》、ASTM F38委员会制定的UAS标准	适航认证、安全研究、无人机系统设计与运行标准	无人机氢动力专项符合性方法尚未形成
欧盟	EASA H2 Certification Roadmap、EUROCAE/SAE相关活动	氢航空认证缺口、技术模块和标准组织协同	尚需要与无人机运行和地面保障细化衔接
韩国	KGS AH373等	移动式燃料电池（无人机用）制造的设施、技术及检查要求	可为产品认证和型式试验规则提供借鉴
中国/国标	GB 42590—2023、GB/T 38954—2020	无人机系统安全、无人机用氢燃料电池发电系统	氢安全、适航验证和基础设施等标准不足
中国/团标	T/CEEIA 264、T/CEEIA 265、T/CIET 1159、T/CIET 1243、T/CIET 1244等	燃料电池发电系统、飞控、散热、液氢储供等	层级较分散，需上升为行业或国家层面的协调体系

各部分,形成标准图谱与关键缺口分析,见表3。

3 氢能无人机标准体系构建

3.1 标准体系构建原则

本文根据《低空经济标准体系建设指南》总体要求,对氢能无人机标准体系建设思路及主要内容进行探讨。氢能无人机是低空航空器重要发展方向,在低空航空器、低空基础设施、低空空交通管理、安全监管及应用场景等方面共同标准基础上进行推进。但因为氢气本身的特性,标准体系的建设还需要关注氢气储存、供应、转换和应用中的氢安全问题。

从整体上看,制定标准应注意以下问题。第一,要以安全为前提条件,氢能无人机涉及氢气泄漏、燃烧、低温、材料相容性、压强变化及故障隔离等问题。这些问题都直接影响到产品的质量和使用安

全性,在标准中必须予以重视。第二,要注重系统性,比如储存供给氢气系统、燃料电池系统、飞行控制系统、供电系统、机体结构及温控系统等都会对整个飞机起到决定性的作用,所以要从整个系统的角度来考虑标准的制定问题。第三,要坚持适航导向。相关标准不仅要有技术指标,还要为后续的验证、认证及运营管理提供指导和支持,在此基础上建立从零部件到系统的测试,再到飞机的整体符合性评估,最后到投入使用的整个过程的标准链路。第四,要考虑国际化问题。要持续关注ISO、IEC等国际组织及机构的相关标准化活动情况,使中国的氢能源无人机标准能够与世界接轨。

3.2 标准体系框架

为了适应氢能无人机产业化发展对标准的需求,在现阶段亟须建立较为完善并且具有一定前瞻性的标准体系框架。根据氢能无人机产业发展

表3 氢能无人机标准图谱与关键缺口

产业链环节	现有标准基础	覆盖判断	关键缺口
基础通用	低空经济标准体系指南、无人机术语与分类、氢技术术语	部分覆盖	氢能无人机术语、分级分类、风险分级和标准体系导则缺失
材料与零部件	氢相容性、压力容器、阀门、密封件、燃料电池部件通用标准	部分覆盖	航空轻量化材料、氢脆防护、振动冲击后完整性评价不足
储氢供氢	ISO/DIS 25009、ISO/DIS 25013、ISO/AWI 19888-1、团体液氢储供标准	部分覆盖/在研	Ⅲ/Ⅳ型高压瓶、液氢罐、可拆卸氢瓶、供氢管路的航空级要求需本土化
燃料电池动力	IEC 62282-4-202、GB/T 38954、T/CEEIA 264	较好覆盖	高空低压、低温启动、动态负载、长时可靠性和故障降级标准不足
整机集成	GB 42590、普通无人机设计安全标准	部分覆盖	氢系统与飞控、结构、电源、热管理和数据链集成的安全边界不清
检测认证	燃料电池性能试验、环境试验、无人机安全要求	部分覆盖	面向氢能无人机的整机型式试验、适航符合性验证和认证规则缺失
运行服务	ISO 21384-3、无人机运行管理规则、人员培训标准	部分覆盖	氢能无人机运行许可、运行前检查、加氢人员资质和应急处置标准不足
基础设施	加氢站、氢气品质、压力容器和安全距离等通用标准	需转化	无人机起降场加氢接口、移动补能、航空级氢气品质和运维数据接口缺失

情况、应用场景、已有标准情况及标准缺失情况，标准体系划分为6个有针对性子体系，见图1。

(1) 通用基础子体系：包括术语与分类、风险分级、氢安全通用基础、一致性评价规则等，规定基本概念、要求及方法等。

(2) 氢安全及储供氢系统子体系：包括高压/液氢储存、供氢管路及阀门、泄漏监测、安全泄放

及相关材料相容性等方面内容。这是氢能无人机区别于传统无人机的核心所在，也是未来相关工作的基础。

(3) 燃料电池航空动力系统子体系：针对燃料电池动力系统应用于航空领域所提出的要求而设置，主要包括电堆及辅助系统、混合动力控制系统、热管理系统、可靠性验证与评价等，侧重解

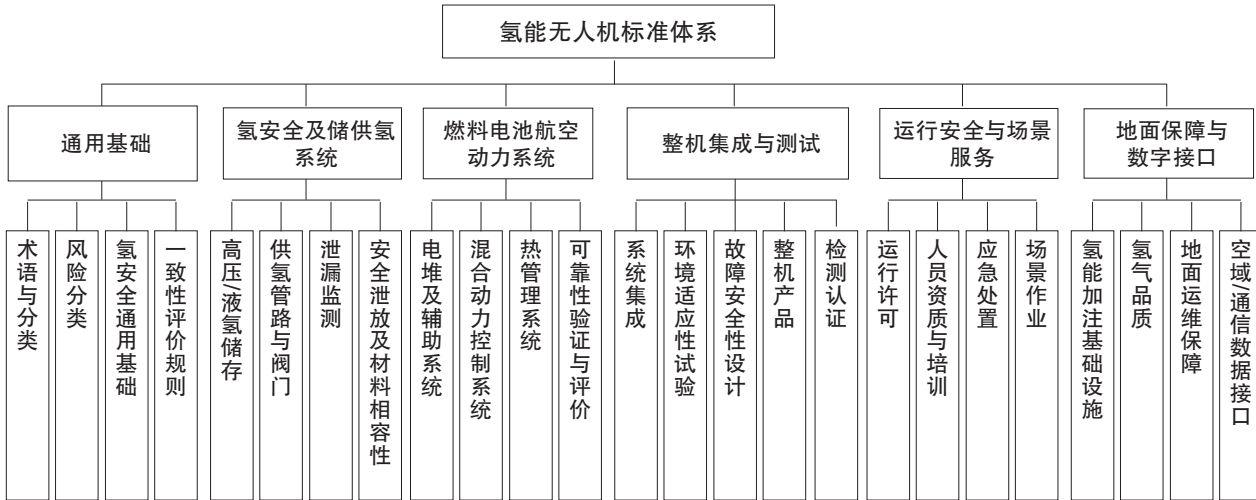


图1 氢能无人机标准体系

决动力系统的性能、可靠性和适用性等问题。

(4) 整机集成与测试子体系：主要包括系统集成、环境适应性试验、故障安全性设计、整机产品、检测认证等内容，用于整个飞机的安全性和符合性的评估。

(5) 运行安全与场景服务子体系：主要针对氢能无人机实际运行及应用场景所涉及相关问题进行规定，如运行许可、人员资质与培训、应急处置、场景作业等内容。该部分主要目的是使产品标准与运行管理相匹配，保证氢能无人机能够在巡检、物流、应急、测绘等工作当中安全、合理使用。

(6) 地面保障与数字接口子体系：主要针对氢能加注基础设施、氢气品质、地面运维保障、空域/通信数据接口等内容进行研究，以促进未来低

空基础设施建设和发展。

3.3 重点领域标准研制建议

基于上述标准体系建设及现有标准缺口分析，建议依据表4所列内容，优先开展以下重点标准的研制工作。

4 实施路径与策略

4.1 国内实施路径

(1) 构建跨界协同工作机制。基于航空、氢能、无人机相关领域技术委员会及骨干企业，成立氢能无人机标准化工作组，遵循“以整机带动、部件配合、验证封闭”的原则，近期重点研究氢安全、航空级储供氢、燃料电池动力系统可靠性和无人机适航性等基本

表4 氢能无人机重点标准研制建议

模块	拟研制标准	主要内容	优先级
基础通用	氢能无人机术语、分类与型号谱系	统一概念边界，区分气态氢、液氢、燃料电池、混合动力等类型	近期
氢安全	氢能无人机氢安全通用要求	规定泄漏监测、通风/安全释放、材料相容性、故障隔离和安全标识等基本要求	近期
储供氢	航空级高压储氢系统技术要求与试验方法	覆盖Ⅲ/Ⅳ型复合材料气瓶、安装固定、压力循环、振动冲击和使用寿命评价	近期
储供氢	无人机用液氢储供系统技术要求	覆盖液氢储箱、低温管路、蒸发气管理、补给接口和低温安全	中期
管路阀门	氢燃料管路、阀门与快速关断装置试验方法	形成密封、耐压、耐振动、耐温差和安全切断等验证规则	近期
动力系统	无人机用燃料电池航空动力系统可靠性评价	覆盖低温启动、低压环境、动态负载、长时运行和故障降级	近期
动力系统	氢燃料电池/电池混合动力能量管理接口规范	统一功率分配、告警、健康状态、冗余供电和数据接口	中期
整机验证	氢能无人机整机安全与适航符合性验证指南	形成系统安全评估、型式试验、飞行试验和认证资料要求	近期—中期
运行管理	氢能无人机运行许可与运行前检查规范	明确运行风险评估、飞行前检查、维护记录和运行数据要求	中期
人员资质	氢能无人机操作与加氢作业人员能力要求	明确驾驶员、维护人员、加氢操作人员的知识、技能和培训要求	中期
基础设施	低空起降场无人机加氢设施安全要求	规定接口、氢气品质、场地布置、运维记录和应急条件	中期
数据接口	氢能无人机运行与健康监测数据接口规范	支撑监管、维护、认证追溯和事故分析的数据互通	中期—远期

要求的标准。

(2) 建设标准验证及应用示范基地。在低空经济示范区、物流、巡检等领域进行标准验证,建立储氢压力循环、动力耐久、飞行试验等相关数据集,通过“草案—验证—反馈—修订”的闭环迭代机制,提高标准实用性。

(3) 促进标准梯次衔接。在技术较为成熟并且市场需求较大的情况下先出台相关团体标准,之后根据需要再发展成为行业甚至国家标准;对于涉及安全红线及产品进入市场等问题,则要及时将其纳入国家(推荐性/强制性)标准中。

4.2 国际标准化参与路径

从“跟踪采用”到“同步参与”乃至“积极参与”。一是在ISO、IEC、ASTM等国际标准化组织中形成定期跟踪的习惯,在ISO/DIS 25009等文件中提出合理的技术建议。二是在长航时物流、移动加氢、低空起降场氢安全等优势领域,形成可推广的标准方案。三是将国内优势的团体标准或企业规范转化为新的国际标准提案,在运行安全、氢气品质、健康监测等方面开展国际标准制定工作。四是要加强国际合作试验及互认,提高产品的国际竞争力。

在话语权提升上,应尽早参与DIS、FDIS及新工作项目提案,在此过程中积极发挥作用。可以设立国际标准预研项目储备库,对关键技术指标、试

验方法和术语等进行研究,将国内试验数据及安全管理经验转化为国际技术成果。

5 结语

氢能无人机是低空经济和绿色能源融合发展的典型装备,它的标准化建设不应局限于一般低空经济的标准体系,亦不能以无人机相关标准或地面氢能标准进行简单叠加。通过对标准文本对比、产业链拆分、标准图谱及需求分析发现,目前氢能无人机标准体系在航空级储氢系统、供氢管路与阀门、燃料电池航空动力可靠性、整机适航认证、运行许可管理、加氢保障等方面存在较大不足。

为了促进产业发展,在标准体系建设上,本文提出建立由基础通用、氢安全及储供氢系统、燃料电池航空动力系统、整机集成与测试、运行安全与场景服务、地面保障与数字接口6个方面构成的标准体系,在时间轴上分为短期的安全底线标准、中期的系统集成及运行标准、长期的国际互认及数字化标准进行推进。依靠完善的国内标准体系及积极参与国际合作,中国可以成为在氢能无人机新赛道上制定更多技术规则的国家,以提高低空经济绿色装备的国际市场竞争力。

参考文献

- [1] 王俊潼,包丹文,周佳怡,等. 低空空域规划研究现状与展望[J]. 航空学报, 2025, 46(11): 75-100.
- [2] 万福军,周幸筠,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.
- [3] 马铁林,郝帅,甘文彪. 氢动力超长航时无人机关键技术及研究进展[C]//2015第二届中国航空科学技术大会论文集. 2015: 66-71.
- [4] 向锦武,马凯,阚梓,等. 氢能源无人机关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2025, 46(5): 233-262.
- [5] Shen Z N, Liu S Q, Zhu W, et al. A Review on key technologies and developments of hydrogen fuel cell multi-rotor drones[J]. Energies, 2024, 17(16): 4193.
- [6] 刘敏,陈炜锋,龚思楚. 氢能物流无人机发展需求及关键技术[J]. 教练机, 2025(3): 46-51, 68.
- [7] 廖勇,覃录智,刘思其. 无人机在低空经济中的应用综述[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(4): 60-72.
- [8] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 47-69.
- [9] 甘晓华,任祝寅,帅石金,等. 氢能航空动力系统安全性研究现状与展望[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 1-11.