

航空氢能产业发展配套计量检测体系完善路径研究

王胜超

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 100000

摘要: 本文系统剖析了航空氢能产业对计量检测体系的独特需求,梳理了当前国内外在液氢物性参数、燃料加注、流量计量、安全监测、适航审定等关键环节存在的计量技术短板与标准规范空白。在此基础上,借鉴国际先进经验,并结合我国《氢能产业标准体系建设指南(2023版)》及《计量支撑产业新质生产力发展行动方案(2025—2030年)》等顶层政策导向,提出了构建覆盖“全链条、全溯源链、全生命周期”的航空氢能计量检测体系的顶层设计框架。最后,本文从强化国家战略科技力量、突破核心计量技术、构建协同创新生态、构建高可靠机载检测系统四个维度,系统阐述了该体系的完善路径,旨在为我国抢占全球航空氢能产业制高点、保障国家能源与空天安全提供坚实的计量技术支撑。

关键词: 航空氢能; 计量检测体系; 液氢; 适航审定; 量值溯源

引言

航空产业贡献全球约2.6%的二氧化碳排放,若干预,2050年占比或达25%。国际社会已设定2050年净零碳目标,亟需兼具高能量密度与零碳特性的替代能源。氢能因其燃烧仅产水、质量能量密度(120–142 MJ/kg)远超航油(约43 MJ/kg),被视作航空脱碳的“唯一可信路径”,可通过燃料电池或液氢燃烧实现动力转型。然而,航空氢能应用面临严峻计量挑战:液氢超低温(-253℃)、易燃易爆、易致氢脆,在狭小机载空间中风险倍增,对测量精度与可靠性要求极高。精准、可溯源的计量体系是产业发展的“隐形基石”——既是安全“守门人”(监测纯度、泄漏、温压等),又是贸易“公平秤”(保障液氢交易计量公正),更是创新“标尺”(支撑材料、装备研发验证)。当前计量体系多基于地面氢能或传统工业气体,难以满足航空场景对极端工况、高精度、快响应和全周期溯源的需求,存在参数不清、准确度不足、标准缺失等瓶颈。因此,构建适配航空氢能的新型计量检测体系,具有重大战略意义与紧迫现实需求。

1 航空氢能产业对计量检测体系的核心需求分析

1.1 上游:绿色制氢与品质控制的计量需求

航空用氢对纯度要求极高,微量的杂质(如硫化物、氨、一氧化碳、水分等)都可能毒化燃料电池催化剂或腐蚀发动机部件。因此,需要建立覆盖从制氢源头到终端用户的全流程氢气品质计量体系。这包括:(1)痕量杂质检测:开发针对ppb(十亿分之一)甚至ppt(万亿分之一)级别杂质的高灵敏度、高选择性在线/离线检测方法,并建立相应的国家/国际标准物质和量值溯源体

系。(2)同位素组成分析:不同来源的氢(如水电解、天然气重整)其同位素比例(D/H)存在差异,精确测定同位素组成对于追踪氢源、验证绿氢属性具有重要意义。(3)能量计量:传统的体积或质量计量无法反映氢气的实际做功能力,需建立基于热值(高位/低位发热量)的能量计量体系,这对于航空器的航程规划和经济性评估至关重要。

1.2 中游:液氢储运与加注过程的动态计量需求

液氢是航空应用的首选形态,因其体积能量密度远高于气态氢。然而,液氢的超低温特性给计量带来了巨大挑战。(1)液氢物性参数计量:液氢的密度、粘度、饱和蒸气压等物性参数随温度、压力变化极为敏感。必须建立高精度的液氢PVT(压力-体积-温度)状态方程和物性数据库,这是所有后续计量计算的基础。(2)动态加注计量:飞机加注过程是一个高速、非稳态的流动过程,伴随剧烈的相变(闪蒸)和热交换。传统的静态质量称重法无法满足机场快速周转的需求。亟需研发适用于液氢的高精度、高稳定性、耐低温的科里奥利质量流量计、超声波流量计等,并解决其在动态工况下的校准与误差修正问题^[1]。(3)蒸发率(Boil-off Rate, BOR)计量:液氢在储罐和管路中不可避免地会发生蒸发损失。精确计量BOR对于评估储运效率、进行成本核算和安全预警至关重要。

1.3 下游:航空器运行与适航审定的安全计量需求

在航空器上,氢能系统的安全是重中之重,计量检测系统必须具备极高的可靠性和冗余度。(1)燃料系统状态监测:对机载液氢储罐的压力、液位、温度、蒸发气体浓度等关键参数进行毫秒级的实时、连续监测,并

能进行故障诊断和预警。(2) 泄漏检测与定位: 在复杂的机舱环境中, 部署高灵敏度、抗干扰的氢气传感器网络, 实现对微小泄漏的早期发现和精确定位。(3) 适航符合性验证: 民用航空器的适航审定是一个极其严格的过程。氢能系统的设计、制造、测试必须满足特定的适航规章(如EASA的SC-VTOL或FAA的相关咨询通告)。这要求所有的测试数据, 特别是涉及安全临界值的数据, 必须由经过认证的、可溯源的计量设备获取, 并有完整的计量不确定度评估报告。计量是连接技术方案与法规要求的桥梁。

2 当前航空氢能计量检测体系的主要短板与瓶颈

2.1 基础研究薄弱, 关键参数量值溯源链不完整

我国在液氢基础物性测量、痕量杂质分析等领域的原始创新能力仍有待加强。许多关键参数的国家基准或标准物质尚属空白, 导致量值无法有效溯源至国际单位制(SI), 影响了测量结果的国际互认。例如, 液氢在极低温下的密度、热导率等参数的高精度测量方法和标准装置仍处于探索阶段。

2.2 核心计量装备依赖进口, 自主可控能力不足

适用于液氢环境的高精度流量计、压力传感器、温度传感器、氢气分析仪等核心计量装备, 其高端市场长期被欧美企业垄断。国内产品在精度、稳定性、可靠性, 尤其是在极端低温下的长期服役性能方面, 与国际先进水平存在差距^[2]。这种“卡脖子”风险严重制约了我国航空氢能产业链的自主安全。

2.3 标准规范体系滞后, 缺乏系统性顶层设计

虽然我国已发布《氢能产业标准体系建设指南(2023版)》, 初步构建了覆盖“制储输用”的标准框架, 但针对航空这一特殊应用场景的细分标准严重不足。在液氢加注接口、机载储氢系统测试方法、氢能航空器适航符合性验证程序等方面, 缺乏统一、权威的技术规范和计量规程, 导致各研发主体各自为战, 难以形成合力。

2.4 计量-测试-检验-认证(MTTC)一体化服务能力欠缺

航空氢能产品的研发、生产、运营需要一个集计量校准、性能测试、安全检验、合规认证于一体的综合服务体系。目前, 国内相关机构多专注于某一环节, 缺乏能够提供“一站式”解决方案的国家级平台, 难以满足航空器全生命周期的质量与安全管控需求。

3 航空氢能计量检测体系的框架构建

建议构建“国家基准与标准物质+核心计量装备与方法+应用服务与标准规范”三位一体的体系架构。(1)

国家基准与标准物质层: 依托国家级计量技术机构等国家战略科技力量, 加快建立液氢物性、氢气纯度、痕量杂质等关键参数的国家计量基准、副基准和系列标准物质, 打通量值溯源至SI的“最后一公里”。(2) 核心计量装备与方法层: 支持产学研联合攻关, 突破高精度液氢流量计、超低温传感器、在线氢气分析仪等核心装备的研制瓶颈, 开发适用于航空场景的动态计量、原位校准等新方法。(3) 应用服务与标准规范层: 建设国家级航空氢能产业计量测试中心, 提供从研发设计、生产制造到运营维护的全链条MTTC服务。同步加快制定和完善液氢加注、机载系统、适航审定等领域的国家/行业标准、计量技术规范和检定规程。

4 航空氢能计量检测体系的完善路径



图1：航空氢能计量检测体系“需求-能力-服务”三层架构图

4.1 强化国家战略科技力量, 夯实计量基础

将航空氢能计量基础研究纳入国家重大科技专项和重点研发计划。根据《计量支撑产业新质生产力发展行动方案(2025—2030年)》的部署, 应聚焦航空氢能领域“测不了、测不全、测不准”的突出问题, 集中优势资源进行攻坚。具体而言, 需加大对液氢PVT性质、低温流体力学、痕量分析化学等基础学科的支持力度, 特别是在液氢在近临界区的物性参数、氢气中ppb级杂质的分离与检测机理等方向取得原创性突破。建设若干个高水平的国家实验室或国家重点实验室, 例如在现有“低温科学与技术全国重点实验室”的基础上, 设立航空氢能计量专项, 集中优势力量攻克共性、基础性计量难题^[3]。同时, 设立专项资金, 用于研制和维护国家计量基准与标准物质, 确保国家量值的准确、一致和稳定, 并积极

参与国际关键量比对（CIPM MRA），提升我国计量结果的国际互认度。

4.2 聚焦“卡脖子”技术，实现核心装备自主化

实施“航空氢能核心计量装备国产化”工程，是保障产业链安全的当务之急。液氢流量计是其中的典型代表，其技术难点在于如何在-253℃的超低温下，保证测量管的振动特性稳定、信号检测精准，并克服材料氢脆带来的长期可靠性问题。目前，以成都柯锐斯、安迪生等为代表的国内企业已在科里奥利质量流量计领域取得显著进展，成功研制出可耐受液氢温区的原型机，但其在长期稳定性、抗冲击振动性能等方面与国外顶尖产品仍有差距。为此，应通过“揭榜挂帅”、“赛马”等机制，鼓励国内仪器仪表企业、科研院所与航空主机厂、氢能龙头企业深度合作，联合开展高精度液氢流量计、超低温压力/温度传感器、在线氢气分析仪等核心装备的协同研发。同时，借鉴各省市成功经验，通过研发补贴、首台（套）保险补偿、本地化采购激励等政策工具，降低用户使用国产装备的风险，加速其在氢能示范区的工程化应用和迭代升级，最终实现从“能用”到“好用”再到“必用”的跨越。

4.3 构建协同创新生态，打造一体化服务平台

单一机构难以满足航空氢能全链条、全生命周期的复杂计量需求，必须构建一个协同创新的生态系统。首先，应以京津冀、长三角、粤港澳大湾区等氢能产业集聚区为重点，依托现有国家级平台（如国家航空器产业计量测试中心）的经验，布局建设2-3个专门面向航空氢能的产业计量测试中心。这些中心应整合计量、标准化、检验检测、认证认可（NQI）资源，为企业提供从研发设计（如材料相容性测试、仿真模型验证）、生产制造（如关键部件精密测量、装配精度控制）到运营维护（如加氢站流量计现场校准、机载系统健康状态评估）的“一站式”MTTC解决方案^[4]。其次，推动成立“全国航空氢能计量技术创新联盟”，由行业龙头牵头，联合上下游企业、高校、研究机构，共同制定技术路线图，共享实验设施，协同开展标准预研，促进信息、技术和人才的高效流动。最后，鼓励地方政府出台配套政策，支持计量服务平台与产业园区融合发展，形成“技术研发-标准制定-计量服务-产业应用”的良性循环。

4.4 攻克极端环境计量难题，构建高可靠机载检测系统

航空氢能应用的核心挑战在于超低温（-253℃）、高压、强振动及狭小空间等极端环境，要求计量检测系统兼具高精度、鲁棒性与长期可靠性。未来技术攻关聚焦以下方向：研发适用于液氢温区的新型敏感材料，解决传统传感器灵敏度漂移、信号衰减及氢脆失效问题，重点突破光纤光栅、MEMS等耐低温一体化传感器。针对飞行中动态计量需求，发展基于多物理场耦合模型的在线自诊断与误差修正算法；探索超声波、核磁共振等非接触式计量方法，研究无法拆卸条件下的原位校准技术，确保全寿命周期准确性。构建电化学、催化燃烧、红外光谱融合的分布式氢气传感网络，利用AI算法实现微小泄漏早期精准识别与定位，建立基于风险评估的分级预警机制，提供毫秒级响应。建立国际认可（ICAO、FAA、EASA）的计量验证方法，开发地面模拟测试平台，制定涵盖计量不确定度、环境适应性、电磁兼容性等专项测试规范。

5 结语

航空氢能产业的腾飞高度依赖于一个坚实、精准且可靠的计量检测技术体系。本文系统梳理了从上游制氢纯度控制、中游液氢动态加注到下游机载安全监控的全链条技术需求，并剖析了当前在基础物性参数、核心装备、标准规范及一体化服务等方面存在的瓶颈。未来的完善路径，本质上是一条技术创新之路：它始于对液氢PVT等基础物性的深入认知，依托于高精度、高可靠核心计量装备的自主突破，成型于覆盖“研发-制造-运维”全生命周期的一体化技术服务平台，并最终落脚于能够满足严苛适航要求的系统性验证方法。唯有沿着这条清晰的技术脉络持续深耕，才能为航空氢能这一颠覆性技术筑牢安全与效率的基石，真正释放其零碳飞行的巨大潜能。

参考文献

- [1]张弛,司佳栋,王建臣,等.氢能航空及其动力技术的发展与分析[J].科学技术与工程,2026,26(09):3577-3593.
- [2]向巧.保持战略定力推进氢能航空动力科技创新发展[J].科技导报,2026,44(03):66-75.
- [3]曹俊,李维,郭政言,等.我国氢能航空动力发展研究[J].中国工程科学,2025,27(02):39-48.
- [4]万雄,王鹏,张海龙,等.航空动力领域氢能关键技术研究现状与趋势[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(05):8-15+46.