

欧盟清洁航空联合行动中的氢动力飞机分析

Hydrogen Powered Aircraft Projects in European Union's CAJU

■ 韩玉琪 刘英杰 / 中国航发研究院

氢能的零碳属性为航空业脱碳带来巨大希望，但在航空领域还面临着大量关键技术成熟度过低的现状。氢动力飞机是欧盟清洁航空联合行动（CAJU）的三大重点研发领域之一，CAJU将成熟并验证所有相关系统（机载液氢储存、燃料分配系统、氢燃料电池动力和氢涡轮动力等），以便集成到未来的飞机中。

氢燃料具有清洁低碳、应用场景丰富、来源丰富、高效储能等战略性优点，未来将成为世界能源体系的重要组成部分。但氢能同时也存在极难储存、易泄漏、易燃易爆、相变引发参数动态变化、管路阀门调节迟滞等缺点，由此使得氢能航空的研发面临着燃烧、计量控制、热管理、机载储存和燃料分配系统等方面的技术挑战。

CAJU的氢动力飞机相关项目

针对氢动力飞机，CAJU在首批项目

中设置了6个项目，总经费达2.1亿欧元，其中欧盟资助1.5亿欧元，如表1所示，主要开展氢涡轮动力、兆瓦级氢电力、大型轻质液氢集成储存方案的研发，以及液氢储罐飞行验证、氢电力地面验证等工作。

CAVENDISH项目

氢涡轮动力验证及与飞机集成战略联盟（CAVENDISH）项目由罗罗德国公司牵头，总经费2915万欧元，其中欧盟资助2167万欧元，研究周期为2023年1月—2026年12月。CAVENDISH项目将改造一台

“珍珠”（Pearl）15涡扇发动机（推力为67kN，涵道比为4.8）进行贫氢燃烧，并与氢燃料电池系统集成。项目计划2024年年底开始地面测试，并开展飞发集成工作以确定取证途径。

该项目参与方包含来自巴西、法国、德国、荷兰、葡萄牙、西班牙和英国的20个学术界和工业界的合作伙伴，汇集了航空、能源和推进、燃烧、燃料和控制系统，以及飞机领域的欧洲领先组织的专业知识，开发与液氢燃烧系统相关的突破性技术。该项目建立在英国、德国、法国、荷兰宣布的多个国家技

表1 CAJU中的氢动力飞机项目情况

项目名称	牵头单位	项目周期	项目经费/万欧元		项目主题
			总经费	欧盟资助	
CAVENDISH	罗罗德国公司	2023年1月—2026年12月	2915	2167	氢涡轮动力
HYDEA	Avio Aero公司	2023年1月—2026年12月	11671	8050	
NEWBORN	霍尼韦尔公司	2023年1月—2026年6月	4398	3332	兆瓦级氢电力
H2ELIOS	Aciturri公司	2023年1月—2025年12月	1206	996	大型轻质液氢集成储存方案
fLHYing tank	蝙蝠飞机公司	2023年1月—2025年12月	395	300	液氢储罐飞行验证
HyPoTraDe	蝙蝠飞机公司	2023年1月—2025年12月	450	400	氢电力地面验证

术计划的基础上，实际上是将这些技术途径结合，加速形成首个可供验证用的氢涡轮动力技术验证机。该项目还将探索双燃料燃烧室（能够在100%氢燃料或100%可持续航空燃料下运行）和低温高压储罐等替代性的使能技术，以提供灵活性，并简化氢能在航空中的应用条件。该项目还与CAJU中的其他项目相关，特别是中短程飞机及其认证活动。

此外，罗罗公司于2022年11月使用改装的AE2100-A涡桨发动机完成了液氢燃料运行的地面测试，2023年9月在“珍珠”700发动机的全环燃烧室中开展了100%氢燃烧测试，测试结果可为罗罗公司关于氢燃烧的下一步研究提供参考。同时，罗罗公司还承担了英国航空航天技术研究院（ATI）资助的总计8280万英镑的3个氢涡轮动力相关项目：氢动力系统技术（HYEST），项目经费1480万英镑，研发液氢涡轮动力的燃烧室零部件及子系统结构；氢涡轮动力设计的鲁棒性实现（RACHEL），项目经费3660万英镑，研发短舱、发动机外部及动力系统本身相关的氢能先进技术，着眼于完整集成的动力系统和储氢问题；液氢涡轮动力（LH2GT），项目经费3140万英镑，研发从储罐到燃烧室的氢输送和控制技术，解决与低温泵送、燃料计量、热管理和控制系统相关的挑战。

HYDEA 项目

航空氢涡轮动力验证机（HYDEA）项目由GE子公司Avio Aero牵头，项目总经费11671万欧元，其中欧盟资助8050万欧元，研究周期为2023年

1月—2026年12月。HYDEA项目将全面展示氢涡轮动力的可行性，计划于2026年前进行地面测试。该项目致力于解决氢作为航空燃料的基本问题，包括排放研究及相关技术攻关，并为集成氢涡轮动力的新飞机的开发和认证铺平道路。

HYDEA的项目团队包含32家单位，分布在意大利、法国、德国、土耳其、波兰、荷兰、比利时、芬兰、瑞士和乌克兰等10个国家。HYDEA项目将改进GE公司的“通行证”（Passport）20涡扇发动机（推力为73kN，涵道比为5.6），重新设计低温氢燃料系统以及燃烧所涉及的部件，后续将采用空客公司的A380飞行试验平台进行飞行测试。空客公司于2020年启动了“零排放”（ZEROe）概念飞机项目，HYDEA项目的研发成果将成为ZEROe项目的核心。由于验证机可能无法完全反映未来的产品，项目将通过一系列研发活动来帮助了解简化措施对验证机的影响，以及如何缩小与未来潜在产品的差距，如减少NO_x排放、潜在的航迹排放，以及所有子系统与推进系统和飞机集成的进一步优化等。

NEWBORN 项目

航空用下一代高功率燃料电池（NEWBORN）项目，由霍尼韦尔公司牵头，项目总经费4398万欧元，其中欧盟资助3332万欧元，研究周期为2023年1月—2026年6月。NEWBORN项目计划在安全可行的情况下，尽快将以液氢为燃料的航空级燃料电池推向支线飞机市场。项目还将解决高功率密度高压能量转换、推进系统和下一代微管换热器的问题，目标是在2026年项

目结束时推进系统的整体效率达到50%。

该项目由位于捷克布尔诺的霍尼韦尔技术解决方案研发中心主导，来自10个欧洲国家的18个合作伙伴参与。德事隆（Textron）集团下属的蝙蝠飞机公司参与了系统总体需求的制定、动力总成的电池和系统工程师工作，霍尼韦尔公司计划在CAJU的下一阶段试飞该系统；西班牙航空结构公司Acituri正在建造该系统的低温储罐；瑞典PowerCell公司将负责开发一种在更高温度下运行的高效、高质量的300kW氢燃料电池组；德国Fraunhofer研究所提供高功率密度电气系统；英国诺丁汉大学将提供一台高功率密度电动机，验证一种创新的电力传动系统，与目前最先进的解决方案相比，其电机和电子电力技术在功率密度和效率方面产生了实质性变化；英国反应发动机（RE）公司将提供换热器技术。

使用液氢而非氢气，是因为液氢具有更好的体积能量密度。虽然低温储存增加了复杂性，但液氢具有更好的有效载荷和航程特性，而且储存在-253℃的液氢还可以用作热沉。NEWBORN项目将为支线飞机应用提供兆瓦级氢燃料电池动力系统，2025年年底将验证可广泛扩展的氢燃料电池动力技术（功率质量密度大于1.2 kW/kg），其中，电堆的功率质量密度大于5kW/kg。1MW推进系统（包括电动机）的地面测试将于2026年进行，尽管该系统的技术成熟度仅为4级（TRL4），或大多数组件达到TRL5，但该项目的目标是实现最终的商业应用。NEWBORN项目正在开发的测试系

统可提供1MW的起飞功率，其系统设计可扩展，未来可能起飞功率达到2×4MW，以满足支线飞机的动力需求。项目所提出的架构还包括锂电池作为能量缓冲器，在起飞等高峰需求时提供额外功率，从而在大多数飞行阶段优化燃料电池系统。NEWBORN项目将测试整个动力系统，以确保发现系统中的薄弱环节或子系统之间的集成问题，从而确保将其集成到飞机上时只需进行少量修改。

H2ELIOS项目

零排放飞机用轻质氢储罐(H2ELIOS)项目由西班牙航空结构公司Aciturri牵头，项目总经费1206万欧元，其中欧盟资助996万欧元，研究周期为2023年1月—2025年12月。实现技术和经济上可行的氢动力航空需要新的整体液氢储罐解决方案，该解决方案可以作为机体主结构的一部分，并能够承受相应的载荷。H2ELIOS项目将开发一种可以集成到飞机结构中的轻质液氢储罐，机体可作为储罐外壁，并对150kg容量的储罐开展地面测试，为后续600kg容量储罐的飞行测试奠定基础。

H2ELIOS项目有15个合作伙伴参与，将为飞机开发一种创新有效的基于低压双层复合材料的轻质液氢储存系统。该系统将以两个机体状的圆柱段形态进行验证，圆柱段外部直径约1.9m、长度约2.3m，验证器将在项目完成时进行地面测试，目的是将该概念嵌入并集成到特定的飞机架构中，以便进行飞行验证。这一概念将得到多学科设计开发、制造工艺和合规手段方面的最新技

术支持，并在运行条件下进行证明。项目计划在地面上达到TRL5，在CAJU第二阶段结束时试飞并达到TRL6，预计在2030—2035年期间交付市场。

fLHYing tank项目

基于无人机平台的液氢承载储罐飞行验证(fLHYing tank)项目由蝙蝠飞机公司牵头，项目总经费395万欧元，其中欧盟资助300万欧元，研究周期为2023年1月—2025年12月。该项目主要集中在欧洲航空安全局(EASA)的CS-23部涉及的较小飞机和无人机上，计划2025年在无人机上对1000L的液氢储罐开展飞行测试。

fLHYing tank项目有5个合作伙伴参与，旨在对蝙蝠飞机公司Nuuva V300货运无人机中的1000L液氢储罐进行飞行测试。该项目在几个方面具有颠覆性：相关尺寸的全复合材料飞行载荷承载液氢储罐的要求、设计、制造和鉴定的定义；使用无人机进行低技术成熟度的危险技术的飞行测试，来加速知识的获取；复合材料液氢储罐的热和结构数字孪生体使用飞行测试数据，推进航空技术的数字化认证。fLHYing tank项目的主要影响是，由于使用无人机对相关尺寸的复合材料液氢储存系统进行了突破性的快速飞行测试，使航空业革命性技术的上市时间空前缩短，从而在最短的时间内全面了解了液氢储罐在飞行环境中的行为以及成本。

HyPoTraDe项目

氢燃料电池动力总成验证机(HyPoTraDe)项目由蝙蝠飞机公司牵头，项目总

经费450万欧元，其中欧盟资助400万欧元，研究周期为2023年1月—2025年12月。HyPoTraDe项目开展氢燃料电池电力总成系统验证，计划2025年对全尺寸500kW的模块化氢燃料电池/锂电池混合分布式电动总成系统(包含低温热管理系统)开展地面测试。

HyPoTraDe项目有6个合作伙伴参与，将设计、组装一套500kW模块化燃料电池-分布式混合电推进(DEP)动力系统架构并进行地面测试。地面测试活动将提供最佳系统架构的快速表征、动力系统故障模式缓解的验证、复杂操作要求的演示(例如，在高冷却剂温度下的操作、启动和关闭特性、飞行中重新启动和电池充电等)以及模块化动力系统故障安全能力的评估。此外，该系统还将配备一个数字孪生系统，利用地面测试活动的结果进行验证。HyPoTraDe项目将对具有低温热管理和典型电力负载的不同系统架构进行地面测试，提升氢燃料电池系统用于航空动力领域的适应性和成熟度。

结束语

CAJU对于氢动力飞机的技术研发，有望使基于氢燃料电池动力的零排放通勤或支线飞机在2035年前实现早期部署。在此基础上，受益于机载储氢和供给系统的架构进步，结合氢涡轮动力的技术成熟，基于氢涡轮动力的零排放干线飞机有望稍后问世。

航空动力

(韩玉琪，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报与战略论证研究)