

# 氢能航空发展现状分析

## Development Status of Hydrogen in Aviation

曹冠杰 王业辉 / 中国航发 孙小金 / 中国航发商发

氢作为零碳清洁能源，因具备能量密度高（相当于航空煤油的3倍）且燃烧产物为水等低碳、绿色的优势，有望将碳排放量减少50%以上，是航空业实现“脱碳”的重要手段，受到各国政府、相关机构和航空企业的高度重视。

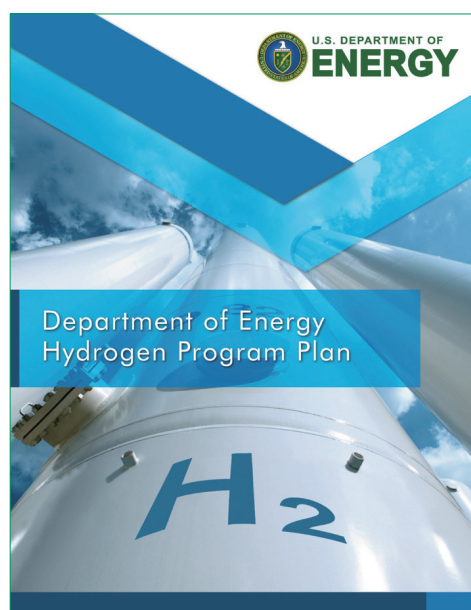
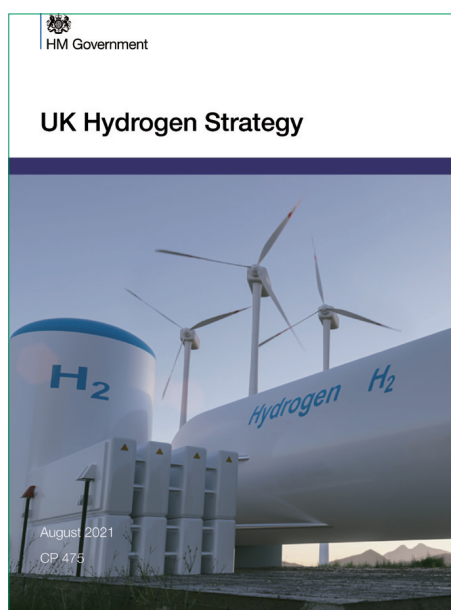
随着世界能源结构加速向低碳化、无碳化方向演变，航空业面临全球能源体系深刻变革带来的新挑战。在此背景下，近年来被广泛称为“21世纪的终极能源”的氢能备受青睐，诸多涉及氢能航空发展的顶层战略规划相继出炉。与此同时，传统航空企业和初创公司在前期积累的基础上，纷纷加大了对氢涡轮发动机和氢燃料电池等相关技术的投入力度，以求在氢能航空的赛道上占得先机。

### 顶层规划推动氢能航空动力发展

#### 欧盟发布《氢能航空》研究报告

欧盟于2020年5月发布了《氢能航空》(Hydrogen-Powered Aviation)研究报告。该报告作为欧盟清洁天空航空减排总体规划的一部分，指出氢能驱动在降低航空业对气候的影响和实现脱碳目标方面具有重大却被低估的潜力，必须要采取相关行动，如制定航空路线图指导行业过渡，大幅增加长期的研究与创新

活动和资金，长期的政策框架为该行业制定保障措施等。报告基于对氢能技术的可行性分析、关键的成本驱动因素、不确定性以及引入壁垒，形成了氢能动力研发与创新活动的路线图。路线图分为核心氢能组件的开发、氢能飞机系统的开发（包括新飞机设计）、明确基础设施壁垒和建立治理框架4个领域。其关键研究活动分3个阶段开展，分别是：2020—2028年，发展基础性技术，促使通勤飞机通过认证，实现



各国关于推动氢能航空发展的顶层规划

支线 and 短途氢能飞机成功试飞，并制定路线图和基础工作体系，从安全和市场激活机制等方面提供保障；2028—2035年，集中扩大核心氢能组件等应用规模，将其应用于中程飞机，同时也为氢能航空的再次发展做好准备；2035—2050年，为中远程开发概念机和原型机，包括新的革命性飞机设计以及用于大规模燃料供应和快速加注的新技术。

### 英国发布《国家氢能战略》

英国商业能源与产业战略部于2021年8月发布《国家氢能战略》(UK Hydrogen Strategy)，提出到2030年要成为氢能的全球领导者，拥有5GW的低碳氢产能。该战略将氢能经济路线图分为4个阶段，其中与航空相关的氢能部分分别是：2022—2024年，实现小规模电解制氢，开展航空试验；2025—2027年，试点采用碳捕获、利用与封存(CCUS)技术的氢能项目并不断扩大电解氢产能，采用小规模集群管网并扩展卡车运输和小型存储，开展航空试验；2028—2030年，大规模采用CCUS技术的制氢及大规模电解制氢，实现大规模存储及与天然气网络整合，同时在航空方面实现应用；21世纪30年代中期以后，不断扩大生产规模与范围，形成区域或国家网络，在航空领域实现更大规模的应用。

### 美国发布《氢能计划发展规划》

2020年11月，美国能源部发布《氢能计划发展规划》(Department of Energy Hydrogen Program Plan)，该计划以解决机构和市场壁垒，跨应用领域的广泛部署，最终实现清洁环保、成本低廉、安全可靠的氢能广泛应用于各类场景为目标，提出

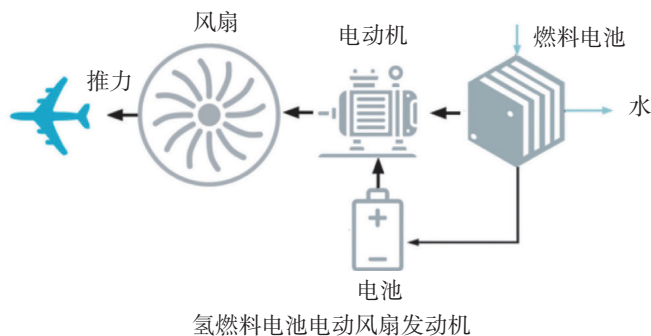
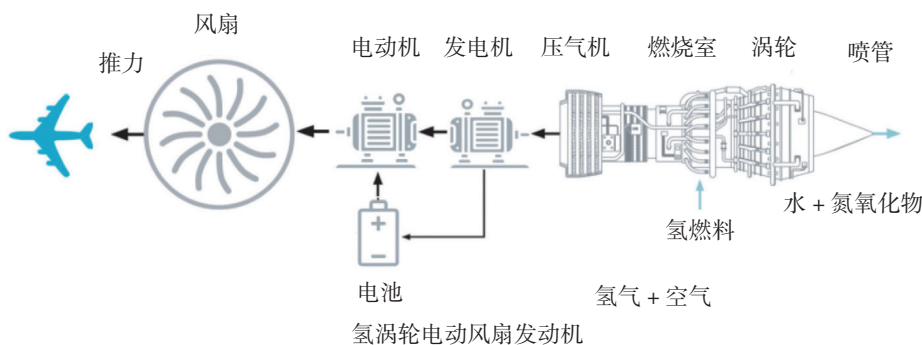
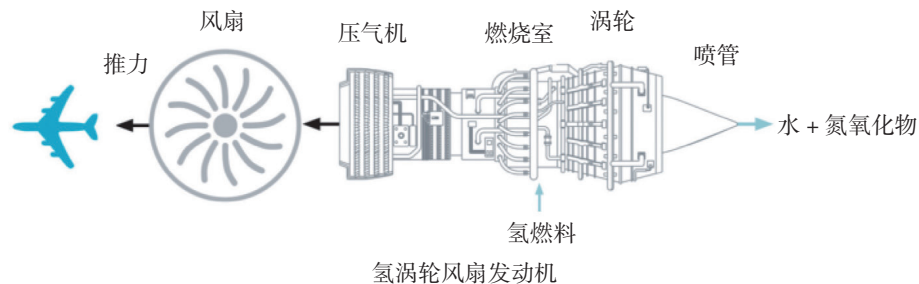
未来10年及更长时间氢能研究、开发和示范的总体战略框架，研究燃料电池和燃气轮机等氢能转化技术，明确了氢能发展技术和经济指标，主要包括3个方面：一是设定氢能全链条中应重点发展的技术和经济指标，期望通过技术创新，提高技术稳定性和效率，降低成本，加快一批氢能技术或产品的商业化应用；二是加大对氢能相关的其他技术的攻关，期望进一步为美国氢能经济提供更多元化的选择；三是开展氢能标准的研究和制定。美国能源部

计划5年内投资1亿美元，支持由美国国家实验室主导的氢能和燃料电池的关键技术研究，将促进航空氢能动力的发展。

## 氢能航空动力技术发展现状

目前氢燃料发动机和氢燃料电池推进系统是氢能航空最受关注的两个方向。

氢燃气涡轮一般包括氢燃料涡轮扇发动机和氢燃料电动风扇发动机两种形式。前者结构与现役航空发动机基本相同，氢燃料在燃烧室内



氢涡轮和氢燃料电池在航空上的应用<sup>[1]</sup>





空客与CFM国际公司改装A380飞机作为氢燃料发动机飞行测试平台

燃烧，推动涡轮并带动风扇产生推力；后者则是通过涡轮带动发电机发电，由电动机带动风扇产生推力。相比较使用化石燃料，燃氢仅产生水蒸气和部分氮氧化物，不会产生一氧化碳、二氧化碳、硫化物等温室气体和烟尘等污染物，飞行过程对气候的影响可降低50%~75%。为适应氢能使用特性，需对传统航空发动机燃烧室、燃料喷射与混合装置、热循环和管理系统等进行改进或重新设计，并开发针对氢燃料的低氮氧化物排放技术。

空客公司早在2016年就启动了氢动力相关试验设备研究，2020年9月发布名为ZEROe的三种氢能飞机方案，分别采用涡桨氢混合动力、涡扇氢混合动力和翼身融合混合动力；同年12月，公布了以6个推进吊舱为主要特征的全新氢动力飞机构型，并表示将于2024—2025年完成氢动力相关技术方案的选择。2022年2月22日，空客与CFM国际公司签署合作协议，将于2025年左右共同启动氢示范项目，旨在对氢

燃料发动机进行地面和飞行测试，为2035年前将一款零排放飞机投入使用做好准备。

英国航空航天技术研究院(ATI)于2021年12月发布了FlyZero液氢动力远程中型飞机概念，提供了详细的方案预览，如无燃料箱机翼、储氢罐、低温燃料系统和氢燃料发动机等，并在2022年年初公布了方案细节。FlyZero飞机采用两台氢燃

料涡扇发动机，航程9723km。燃料将储存在后机身的一对低温液氢罐和机身前部两侧的两个较小的液氢罐中，飞行时通过液氢消耗量来调整飞机的平衡，并减少对整机气动结构的设计需求。

俄罗斯目前正计划对VK2500发动机进行改造，将采用氢燃料、低温储罐、恒温调节系统和液氢供给系统，飞行试验将在雅克-40LL飞行试验平台上开展，计划5年内研制成功。

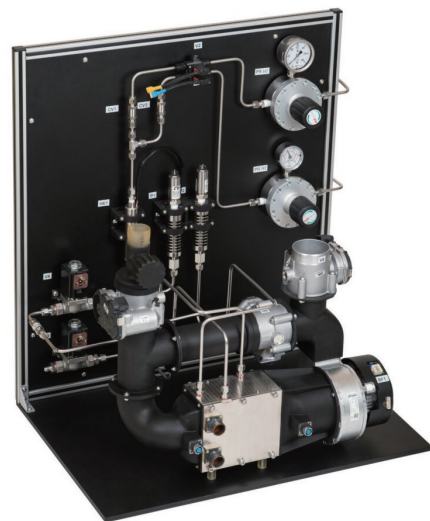
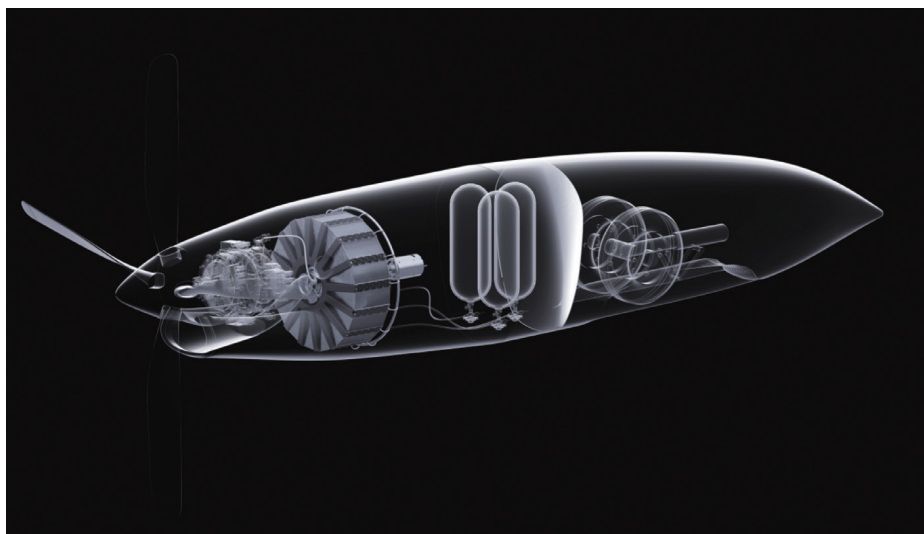
普惠公司于2022年2月获美国能源部支持，开发新型高效氢燃料推进技术，启动了氢-蒸汽喷射、间冷涡轮发动机(HySITE)项目，将使用液氢燃料和水蒸气回收来实现飞行中的零碳排放，并可将下一代单通道飞机的氮氧化物排放量减少高达80%，燃料消耗减少高达35%。同时，HySITE项目的半封闭式系统架构将实现比燃料电池更高的热效率，并降低总运营成本。

### 氢燃料电池技术发展

氢在燃料电池中通过电化学反应



FlyZero液氢动力远程中型飞机概念



HyPoint公司的涡轮空冷燃料电池概念及试验验证原型

应直接产生电并排出水，电动机带动风扇产生推力。与氢燃料发动机相比，氢燃料电池内部氢与氧电化学反应环境纯净，极少产生水蒸气凝结核，使飞行对气候的影响可降低75%~90%。目前氢燃料电池技术还存在能量密度低、使用寿命短和单体输出功率低等问题，需要通过采用新型电极材料、电池一体化结构设计，高效的水和热管理和运行控制等方法，进一步提高电池功率密度、延长寿命（超过25000h）。

罗罗公司在600kW氢燃料电池研究的基础上，开展用于全尺寸支线飞机的2MW氢动力系统的开发，预计2023年实现动力系统集成到微电网中的示范验证，2024年将在19座氢燃料电池电动飞机上投入使用，2050年成为一家净零碳排放公司。

吉凯恩（GKN）公司于2020年12月启动了氢燃料电池开发项目H2GEAR，为期5年，目标为开发首个可应用于支线飞机的氢能电驱动系统，将在2022年进入详细设计阶段，2026年投入使用。H2GEAR项目将开

发整个动力系统，包括储氢、燃料电池、动力管理系统和电动机，目标是证明“功率密度的阶跃变化”，足以使液氢燃料电池为商用飞机提供动力，系统功率输出至少为1MW，初期目标是用于19座通勤飞机，但最终目标是扩展到为70~90座支线客机提供动力。

美国初创公司HyPoint推出了一型涡轮空冷（TAC）氢燃料电池系统原型机。该燃料电池系统融合了高温质子交换膜（HTPEM）燃料电池、空气冷却及涡轮增压等3种技术。HTPEM技术与现有液冷低温质子交换膜（LTPEM）燃料电池相比，单位功率提高3倍，能量密度是现有锂离子电池的5倍，并能提供更高的热稳定性和化学稳定性、简化的水和热管理，以及对杂质的高抵抗力。HyPoint公司预计2022年开始交付用于飞行测试全尺寸动力系统，目标平台包括电垂直起降飞行器（eVTOL）和货运无人机。HyPoint公司还与德国化工巨头巴斯夫（BASF）公司合作，开发下一代TAC HTPEM

燃料电池，旨在减轻燃料电池的质量并提高耐用性，计划于2024年中期向顾客提供。

波音公司计划2050年前生产不需改变现有航空基础设施的“过渡”燃料，2050年后氢燃料完全替代传统航空燃料，目前其氢燃料电池飞机研究项目（theator airplane）和氢动力无人机“鬼眼”（Phantom Eye）都进行了试飞。

德国航空航天中心（DLR）启动氢燃料电池航空电驱动总成（BALIS）项目，目标是将燃料电池功率提高到1.5MW，为40~60座、航程1000km的支线飞机提供动力。DLR已与德国MTU航空发动机公司合作开发500kW的燃料电池动力系统，于2026年开始试飞。同时，DLR开展氢燃料电池推进系统试验场建设，将对1.5MW的氢燃料电池推进系统进行地面测试。

## 氢能源动力发展面临的挑战

作为新兴产业，氢能与未来航空产业发展关系密切，但以氢能为动力



实现航空业脱碳仍要面对诸多挑战。

一是氢能产业规模和经济性有待提升。目前，氢能作为建筑和交通运输业的燃料仍在试验阶段，未能形成大规模商业化应用。在生产成本上，可再生能源制氢也难以和化石能源制氢相匹敌。2018年，天然气制氢、采用碳捕捉和封存技术的天然气制氢、煤炭制氢的成本分别为0.9 ~ 3.2美元/kg、1.5 ~ 2.9美元/kg、1.2 ~ 2.2美元/kg，而可再生能源制氢成本的最低值接近化石能源制氢成本的最高值。

二是内部市场环境条件有待改善。在能源市场运行和监管制度方面，各国缺乏统一的规范，需要打破各国内部市场障碍和壁垒。2020年8月，欧盟能源监管合作署(ACER)发布报告指出，当前欧盟为氢能另行建造管道并不现实，将氢气混合在天然气管道中使用是一种可行选择，但仅有少数成员国允许将氢气注入天然气管道实行混合运输。

三是氢燃料难以在飞机上大量且安全储存。虽然氢燃料能量密度高，但体积能量密度很低，产生相同能量需要5倍于航空煤油的体积。在航空业已掌握的储存技术中，只有高压气体或低温液体储罐技术可以用于氢燃料的存储。若以高压气体形式储氢，将占飞机较大的机体空间。相比之下，低温液体形式储氢具有较高的质量能量储存密度，但存储条件很高，即极低温度(-253℃)和恒定压强(1.429atm)，这将导致液氢罐结构和配套冷却系统异常复杂，进而大大降低整个系统的质量能量密度。同时，氢在高浓度下，容易被极小的火花或空气

中的多种混合物引发燃烧，并且因氢燃烧时具有不可见、无热量释放(能量通过紫外线辐射释放)的特点，泄漏时很难被检测，这些都给飞行安全带来了严重隐患。

四是现有航空动力技术及研发设备需进一步完善提升。现有航空发动机结构不适合燃氢，氢燃料燃烧时与氧发生化学反应迅速，燃烧温度更高、火焰传播速度更快，容易产生过量氮氧化物且容易发生回火现象，导致现有航空发动机燃烧室结构无法实现氢的稳定燃烧。设备设施不完善也是严重制约氢能应用的关键因素。氢能作为一种未在航空业正式投入使用的新能源，相关氢能航空动力试验设备及安全试验条件建设相当匮乏，如果无法安全进行氢能源航空动力试验、低成本实现氢燃料的运输与储存，将会直接影响到氢能飞机的商业运营。

## 对我国氢能航空动力发展的启示

2019年，我国首次将氢能源写入政府工作报告中并正式纳入能源体系，氢能在其中的占比将进一步提升，同时氢能产业链中制氢、储运、加氢站、氢燃料电池应用各环节也将获大幅发展，为氢能航空动力的发展奠定了一定的基础，可进一步在核心技术、基础设施、商业化等方面加大推进力度。

一是建立健全顶层规划、法规与政策体系。可加强顶层牵引，坚持政府引导，制定适应国情的氢能发展的中长期目标，将氢能放在生态绿色生产和消费体系中进行立法，积极发挥国家规划引导和政策激励作用，鼓励地方政府和企业结合自

身优势，科学制定政策和规划，并给予相应政策和资源支持。

二是加大氢能航空动力核心技术研发支持。研究制定航空氢动力顶层发展战略，明确航空氢动力发展目标、重点任务和技术发展路线图，为我国航空氢动力发展提供顶层指导。同时，通过国家相关政策支持、创新管理机制保障，吸引全球优秀人才，集中优势力量持续、深入地开展基础研究，突破航空氢动力技术瓶颈。

三是重视氢源供应及储运的发展。可靠低廉的氢源供应、储运及加氢站运维是氢能产业大规模发展的限制环节。为实现与氢能下游应用的协同发展，应根据各地区氢源及制氢方式的不同，因地制宜地发展多元化氢源供应及储运，健全加氢站建设、规范审批机制，积极探索盈利模式。

四是整合优势力量。目前，氢能已在汽车和能源行业得到一定程度的应用，具备了较为实用化的技术基础，其底层共性技术与航空氢动力技术可实现互通、互用。我国可利用在新能源汽车等产业形成的相关技术基础，扶持一批具有发展潜力的专业化企业，培育创新链、产业链，加强对国内优势研发资源和产业资源的整合，加快氢能航空动力技术发展。

**航空动力**

(曹冠杰，中国航发，工程师，主要从事航空动力信息工作以及航空发动机结构强度研究)

参考文献

- [1] 张扬军, 彭杰, 钱煜平, 等. 氢能航空的关键技术与挑战[J]. 航空动力, 2021(1).