

英国零碳飞行发展愿景分析

Analysis to the Development Vision of FlyZero

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

2022年3月17日，英国航空航天技术研究院（ATI）发布了“零碳飞行”（FlyZero）项目研究报告，明确了绿色液氢是未来零碳飞行最为可行的燃料选项，给出了在2050年前氢动力支线飞机、窄体飞机和中型宽体飞机的设计概念，确立了6项关键基础技术和7项横向交叉技术的发展路径，从设计挑战、制造要求、运营标准和市场机会等维度对航空业零碳飞行发展愿景进行了详尽的阐述。

作为第一个将2050年温室气体排放总量降至净零目标进行国内立法的主要经济体，英国在推动航空业绿色转型上表现得非常积极。基于尽快将零碳排放从通用短途飞行扩展到大规模航空客货运输的考量，2021年年初英国发起了“零碳飞行”（FlyZero）项目，探寻实现完全零碳排放大型民用飞行的可行性。这一为期12个月的研究项目对潜在的零碳排放飞机及其动力系统概念的设计挑战、制造要求、运营标准和市场机遇进行了详细和全面的阐述，通过独立公允地评估各种先进航空技术应用方案，最终形成了以绿色液氢能源为基础的新一代民用航空产业零碳排放发展愿景。

零碳排放燃料

在技术层面、操作层面和经济层面切实可行的前提下，为了能够更快速、更显著地实现碳中和预期，确定未来绿色飞行的最佳燃料来源是至关重要的第一步。无论是氢、氨，或者电池等任何一种备选零碳能源，衡量其市场应用能力（最大航程和有效载荷）的核心指标就是能量密度。

虽然电池不会在飞行中产生任何排放、产生每单位推进功率的可



英国零碳飞行项目研究总报告

再生电力需求也比制备液氢要少得多，但过低的能量密度是制约其在民用航空市场应用的最大瓶颈。按照较为乐观的技术攻关进度，电池的质量能量密度到2030年约为2 MJ/kg，相当于航空煤油的1/20，若假设飞机起飞质量的20%为燃料，则全电池飞行的最大航程在400km以内。另外，由于钴、锂和镍等电池原材料的循环回收工艺还有待进一步的成熟和商业化，在强大完整的回收

供应链建立之前过分依赖电池系统可能会导致新的环境污染问题。

氢的质量能量密度约为航空煤油的3倍，这也意味着当燃料载荷的占比为20%时，氢动力飞行的理论航程在10000km以上。氢燃料以气态方式储存能够降低隔热以及低温燃料管理系统设计的复杂性，但700atm的高压环境意味着燃料箱的厚度和质量大大增加，其应用场景主要是中短途飞行。相比之下，液态氢的存储难点不在于高压（略高于大气压）而在于低温（-253℃），为尽可能减少表面积并起到更好的隔热效果，液氢燃料箱一般被设计为球体，同时由于较低的密度，同等航程液氢燃料的体积大约是航空煤油的4倍。尽管如此，FlyZero项目经测算后认为，就算在机翼外挂单独的燃料箱、较大的存储空间需求以及额外隔热设计等三重不利影响下，液态氢的质量效率仍旧相当于气态氢的6倍，在飞行航程上比航空煤油有优势。

与液态氢相比，液态氨的存储温度要高得多，对隔热燃料箱的要求远低于液态氢，基于现有技术在机翼内直接储存氨气是可能的，较氢气和

电池具有更好的运输承载能力。但必须注意到氨的毒性和腐蚀性，一旦泄漏可能酿成重大安全事故，而直接燃烧氨不但会有未参与反应的组分排放出来，氮氧化物的生成也远超过氢燃烧。工业界正在积极开发高效轻量化的裂解技术，将氨分解为氢和氮后再用于燃气涡轮（30%裂解）或燃料电池（100%裂解），此时的氨更像是氢燃料的一个中间媒介。

FlyZero项目的研究表明，液氢燃料有潜力为绝大部分飞行活动（100%的短途航线和93%的远程航线）提供动力支持。同时，FlyZero也认可渐进式碳中和的发展路径，中短期内以可持续航空燃料（SAF）为代表的全生命周期低碳/净零碳方案对航空业的可持续发展具有重大的现实价值。SAF可以直接掺混到航空煤油中，机场基础设施以及在役的民用飞机/发动机所需适应性改动很少，但在具备如此高可操作性的同时，困扰SAF应用的供应问题也始终存在，主要生产原料（生物质或废品）有限、也无法通过大规模投资改观（这与建设可再生发电厂和制氢厂迅速提升产能不同），预计到2040年只能提供全球机队所需SAF的20%，剩余的缺口只能通过从

大气或工业烟气中收集的碳与氢气合成，不仅效率低，与直接制氢相比，此时生产出具有相同能量的SAF要多花费45%的电能和22%的氢气。FlyZero项目预计，到2035年左右，液氢的单位能量成本将低于SAF。

氢动力飞机

在确定低温液态氢作为最适宜的零碳飞行燃料后，有必要针对不同的飞行场景选用不同的推进方式使其应用价值最大化。基于研发进度和经济成本考量，到2050年前全球航空业只能承受一次大规模的机队更新，因此目前的零碳飞机/发动机设计方案可能会对未来30年航空业的走势产生深远影响。FlyZero项目的基本观点是：常规电池驱动是通航飞行的重要潜在选择；受限于能量密度等因素，氢燃料电池主要针对航程较短的小型民用飞机的动力需求；氢燃料发动机在中远程航空运输上更有优势；而SAF则很可能是航程10000km以上大型宽体飞机的首选。

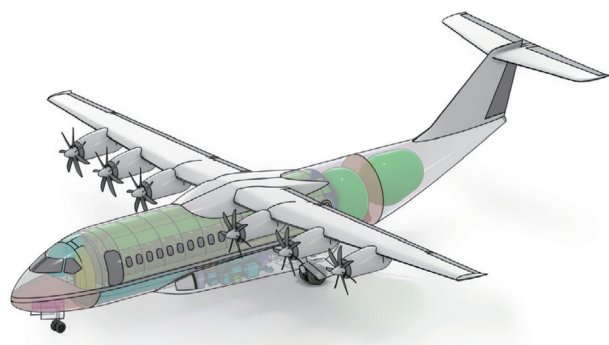
支线飞机

为了评估氢燃料电池飞行的最大潜力，FlyZero项目在认可以氢燃料发动机为动力的支线飞行的可行

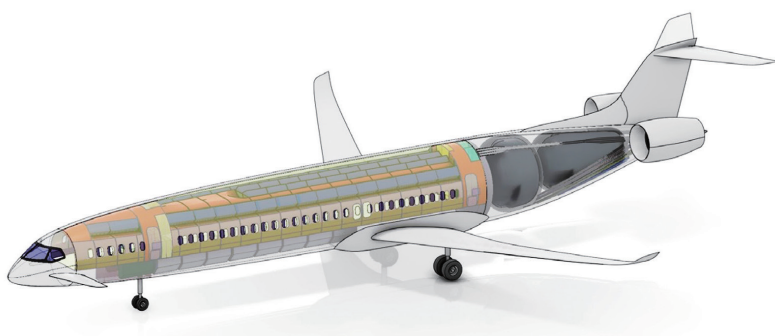
性的同时，还是选择了以氢燃料电池为动力的支线飞机设计方案。这种判断的依据是：随着未来质子交换膜（PEM）技术的进一步发展，到2030年氢燃料电池推进系统在保持55%~60%效率（氢燃气涡轮约为44%）的同时，其功率能量密度有望达到2kW/kg左右，相当于CFM56发动机的一半。此时结合6个独立的兆瓦级电推进装置的分布式设计，该方案能够搭载75名乘客以600km/h的巡航速度飞行1500km，超过了当前支线市场主流的ATR72涡桨飞机的运输能力，由于液氢储存在机体后部的燃料箱中，飞机机体看起来比ATR72更宽，分布式架构下的机翼也要长15%左右。

窄体飞机

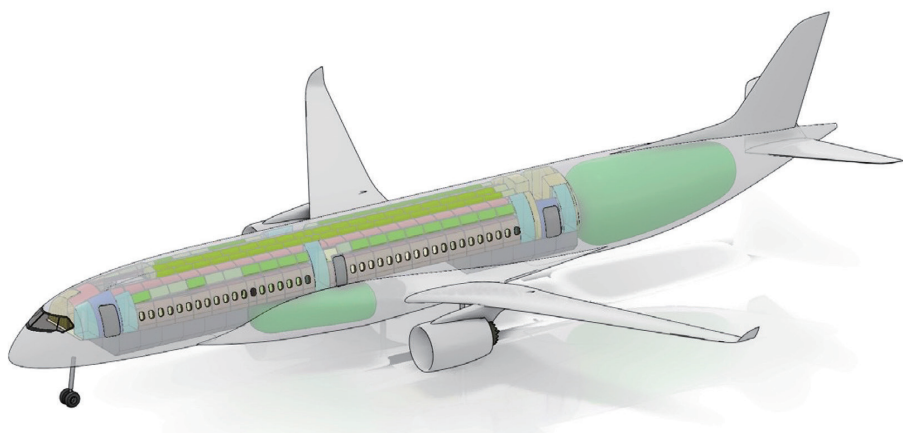
根据FlyZero项目的预测，2030—2050年窄体飞机的交付量达到航空运输市场总量的2/3，也是未来航空业实现零碳发展最为关键的一个细分市场。不过面对如此广阔的市场空间，贸然启动过于激烈的产品变革会带来很大的商业风险，这也意味着窄体飞机不太可能成为氢动力飞行走向市场的最初切入点。FlyZero项目设计的氢动力窄体飞机概念可搭载179名旅客，航程约



氢动力支线飞机设计概念



氢动力窄体飞机设计概念



氢动力中型宽体飞机设计概念

4500km，巡航速度为833km/h左右，基本上与空客A320和波音737保持一致。从总体布局上看该方案与当前最为常见的翼吊式飞发布局有较大差异，燃料箱和推进器均位于机体后部，好处是燃料运输管道更短更紧凑、氢泄漏的风险得以降低，但是也带来了飞机重心偏后的新问题，为此似乎有必要在机头附近增加一个鸭翼，借助三升力面构型强化俯仰飞行控制能力。

中型宽体飞机

FlyZero项目给出的氢动力宽体飞机方案重点瞄准之前备受业界关注的处于产品换代断档期的中间级市场，可搭载279名旅客、飞行航程在8000km左右，虽然对标的是波音767，但出于质量和平衡方面的考量，除了在机翼附近的机体位置还要有额外的液氢燃料箱，这样一来其机体直径已接近A350或波音777等大型宽体飞机。虽然氢动力宽体飞机的开发成本要高于支线飞机，但一方面由于宽体飞行市场是高度集中化的，只要在那些较大的枢纽机场建设完善的氢燃料加注、储存以及运输基础设施，就能为为洲际航班提供“最小可行”的航空网络；另

一方面氢能宽体飞机和窄体飞机都是基于相同的动力架构，相关技术在宽体飞机上的应用和认证有助于降低后续开发窄体飞机的风险。因此，FlyZero项目更倾向于氢动力中型宽体飞机率先进入市场，在这种情境下乐观预测到2050年，氢动力飞机总交付量接近30000架，市场价

值20000万亿美元左右，可以减少约50%的航空二氧化碳排放。

氢动力关键技术

在对飞机/发动机设计制造、市场运营以及支撑保障等进行广泛调研评估的基础上，FlyZero项目确定了对未来实现零碳飞行至关重要的13个技术领域，包括氢燃料发动机、氢燃料电池、电推进系统、热管理系统、低温液氢储存系统和飞发气动结构设计6个变革性航空基础技术群，以及机载系统、可持续机舱设计、基础设施运营、全生命周期影响分析、快速设计验证以及先进材料和制造7个确保氢动力飞行商业可行并使之持续完善的横向交叉技术。

FlyZero项目确信这13个重点领域的发展将为实现氢动力飞行愿景铺平道路。除单纯的技术因素外，

表1 氢动力飞行横向交叉技术

技术名称	简述
机载系统技术	传统飞机上的一些气动和液压系统可能不会用在氢动力飞机上；由航空煤油驱动的辅助动力装置（APU）需要新的替代方案
机体设计技术	作为最难应用循环经济原则的领域之一，除了强化机体材料的修复、再利用与回收外，机体轻量化设计将是提升未来氢动力飞行航程的一个重要着眼点
氢能源基础设施	加强生产、运输和储存液氢的基础设施建设已经非常急迫，管道供应氢气和机场液化方案较为可行；氢动力飞机和常规飞机如何进行混合空中交通管理
全生命周期影响分析	提高氢动力飞行对气候影响的理解很重要，应重点关注氢燃料发动机形成的航迹云，探索调整飞行路径来避免形成航迹云的可能性
快速设计与验证	为缩短飞机从设计到投产的时间，应制定数字化设计策略，简化团队和组织之间的协作工作，推进关键液氢测试基础设施建设等
先进材料技术	重点关注氢燃料箱轻量化、固态储存、氢燃料发动机用现有材料的再改进、氢燃烧的涂层优化、兆瓦级增强型磁性材料以及多功能复合材料等相关技术
先进制造技术	先进的成形和连接工艺、复合材料加工和增材制造技术都需要取得进展，以及开发适应性强和灵活的自动化装配系统

FlyZero项目还强调了3个潜在的航空氢能市场风险点：一是确保氢燃料具备一定程度的长期价格确定性，政府部门有责任履行兑现其对扩大氢能生产的承诺，并形成专门的机制限制航空公司在短期氢燃料价格波动中的风险敞口；二是氢动力飞行市场繁荣与否将取决于氢燃料的可用性，航空公司对飞机的需求可能只会集中在那些在航班始发地和目的地都有充足氢燃料供应的航线上；三是原始设备制造商（OEM）及其供应链可能没有兴趣或能力为航空氢动力如此巨大的“赌注”投入全部资金，除了来自政府的支持外，FlyZero项目更看好未来有创纪录的私人资本部署到氢动力飞行领域。

零碳飞行的建议

全球航空业正处于一个转折点，在对当前航空产品和技术产生颠覆性的变化与冲击的同时，氢能航空产业也可能会带来极为丰厚的市场回报。FlyZero项目分析显示，英国如果在航空氢动力领域领先于其他国家或基本与其他国家同步行动，其在全球民航市场的份额将从2019年的12%增加到2050年的19%，对应的产业总增加值（GVA）会由110亿英镑上升到360亿英镑、工作岗位由11.6万个上升到15.4万个。相反，若不采取积极行动，届时英国的航空市场份额将降至5%，行业就业岗位仅剩7.4万个。

在2050年前启动氢动力飞机开发计划的机会窗口很短，可能会在2025年关闭，一旦错过，只能锁定下一代传统动力飞机，而这些飞机很有可能会用到21世纪末。FlyZero项目认为，当下的重中之重就是加

速氢动力飞行技术的发展以及集成验证，到2025年左右将大多数相关技术的成熟度从1~3级提升到6级。在对那些高风险高回报的概念技术探索的同时，来自政府的支持计划应更多偏重于背景需求较为明确的定向研发和试验测试基础设施的建设，并对绿色能源供应链进行紧急追加投资，强化氢燃料的生产保障能力。

根据FlyZero项目的构想，未来航空氢动力的发展，政府机构既是前期资金的重要提供者，又是释放全社会投资潜力的推动者。随着政府和工业界的资本投入并取得阶段性技术成果，可以鼓励私人资本参与该行业并成为技术研发和型号项目之间的纽带。在政府的牵线搭桥下，私人投资者和工业界展开正式对话以评估投资意愿，采取特殊目的载体（SPV）的股权资本化合作形式并达成风险分担协议。这将是崭新的航空研发商业模式，获得私人融资对零碳排放氢动力发展有着前所未有的意义。

为进一步营造零碳排放飞行的有利外部环境，一方面应大力推动全球范围航空碳定价、碳税收政策法规的出台，产生的经济收益将主要用来支持零碳飞行技术的开发，逐步将新的市场需求转化为可持续的航空形式，同时提高飞行碳排放的透明度，鼓励引导乘客做出更理智的市场选择；另一方面要激励对机场氢能基础设施投资，这其中涉及接收、储存和加注氢燃料等多方面内容，据FlyZero项目估算，一个大型机场氢能设施建设将花费8.5亿~14亿英镑，相关成本问题很可能会依托目前较为热门的受监管资产

基础（RAB）融资模式解决。

此外，航空业应与其他行业联合建立氢能技术研究中心，分享市场需求、试验设备和技术成果，加快标准和法规、材料性能和测试规范等共性技术研究。政府机构和整个工业界要形成战略合作伙伴关系，有权根据国家利益的战略优先事项分配研发资金，同时还要积极推动相关国际协作，制定新的全球航空政策、条例、认证和业务要求，尽快在氢动力飞行的国际监管以及航空迹云的气候影响、改善空中交通管理和零碳机场网络建设等问题上达成共识。

结束语

FlyZero项目的研究成果无疑对我国氢能航空产业的发展提供了一个很好的参考与借鉴。整体判断，未来几年将是我国氢能产业开始从上游（生产供应氢燃料）向中游（研发制造氢能产品）延伸拓展的关键时期，航空装备制造制造商投身相关技术研发的外部条件已经基本具备，既不存在未来有产品能力却无市场需求、无运营条件的后顾之忧，也无须为早期产品可能经济性较差所困扰，曾经的新能源汽车补贴政策就是打消行业疑虑的最好例证。当然也必须认识到氢能航空的很多关键技术还不成熟，还有很多瓶颈问题需要解决，FlyZero项目所构想的宏伟愿景能否如期实现存在很多未知，我国在确立氢能航空战略大方向的同时一定要保持细节与节奏调整的灵活性。

航空动力

（王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）