

氢动力飞行发展展望

Outlook of Hydrogen Powered Flight

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

在以清洁高效为核心愿景的航空“第三时代”，氢动力飞行的优势与潜力正在逐渐显现，很可能成为航空业低碳发展的关键。

近年来，虽然飞行效率在以每年1.5%左右的速度提升，但机队规模以每年4%的扩张预期意味着到2050年航空碳排放的数值仍将翻番。事实上，不仅是二氧化碳，传统航空燃气涡轮发动机工作时产生的氮氧化物、烟尘以及水蒸气也会对环境造成不利影响。面对这一严峻的形势，氢动力飞行的优势与潜力正在逐渐显现。与航空煤油和可持续航空燃料（SAF）相比，氢动力可以完全消除二氧化碳以及其他温室气体的排放；与常规电池相比，液态氢无论是在质量上还是体积上都具有更高的能量密度。



德国航空航天中心研制的HY4氢动力飞机

氢动力飞行研发计划纷纷出现

早在2015年，德国航空航天中心（DLR）就推出了全球首架4座氢燃料电池飞机HY4的研制计划，其设计基于斯洛文尼亚蝙蝠公司的电动飞机“金牛座”G4，为单螺旋桨双机体、每侧机体并列双座布局。机体间的螺旋桨由一台85kW的电动机驱动，在起飞和爬升等需要高峰值功率时由锂离子电池组供电，巡航阶段则切换为短舱内的4个质子交换膜氢燃料电池，可产生45kW的电力，从而确保HY4能够以145km/h的巡航速度连续飞行5h以上。



“元素1号”氢动力飞机概念图

2018年10月，新加坡HES能源系统公司也发布了一款4座新概念飞行器“元素1号”，采用了全新的氢燃料电池和分布式电推进结合的设计方案，机翼上安装了14台功率为5~8kW的电动机且每台电动机后

面都有一个氢燃料罐，这种分布式储能可有效增加燃料携带量。HES能源系统公司宣称“元素1号”可选用气态氢或液态氢作为燃料，后者有可能将续航时间增加到15~20h，航程可达5000km。

2020年9月，总部位于美国加州的ZeroAvia公司试飞了全球首架氢动力商用飞机。改造后的6座派珀飞机仅依靠氢燃料电池飞行了8min，飞行速度达到185km/h，功率约为230kW，接近飞机原装活塞式发动机，相当于“元素1号”的两倍。作为一家氢动力总成公司，ZeroAvia通过与现有航空制造商和运营商合作，将涉及的氢动力系统无缝配装到现有飞机上而非打造全新的氢动力飞行器，有望在2023年年底为航程为800km的10~20座飞机加装氢动力系统，赛斯纳208、DHC-6和多尼尔228等机型均有可能进行类似的改装，到2030年则可为“冲锋”8和ATR42等50~100座支线飞机提供氢动力。

几乎就在ZeroAvia公司试飞的同时，空客公司发布了号称能改变游戏规则的未来氢动力飞机概念ZEROe，甚至将之称为“航空业有史以来最重要的转型”。与那些初创公司单纯的氢燃料电池动力不同，ZEROe概念机均为氢混合动力，既将氢气引入改进过的燃气涡轮发动机直接燃烧产生推力，又通过氢燃料电池产生电力与燃气涡轮发动机形成互补，具体包括涡扇氢混合动力、涡桨氢混合动力以及翼身融合混合动力3种构型。其中，第一种由两台氢燃料涡扇发动机提供动力，液氢储存和分配系统位于后增压舱，预计能搭载120~200名乘客，航程在3700km左右；第二种的液氢储存和分配系统设计与第一种类似，只是换成了两台氢燃料涡桨发动机驱动六叶螺旋桨前进，搭载乘客100名左右，瞄准短程飞行市场；第三种液氢储罐位于机翼下方，内部空间



ZeroAvia公司研发的氢燃料电池飞机

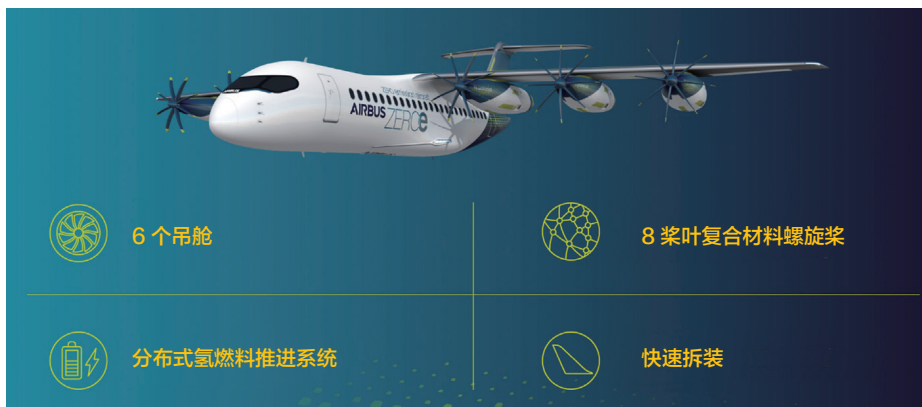


ZEROe概念机示意（来源：空客公司）

较为宽敞，主动力仍为两台氢燃料涡扇发动机。

虽然ZEROe概念机目前还停留在演示文稿（PPT）阶段，不过空客公司有信心在2035年实现零排放民用飞机的商业运营，甚至不排除届时将氢动力飞机作为下一代主打窄体飞机产品的可能。当然，目前的混合动力方案并不意味着空客公司对氢燃料电池的忽视，而是与德国汽车燃料电池供应商ElringKlinger成立了合资公司开发相关技术。

ElringKlinger公司表示采用金属双极板和特殊设计的膜电组件密封设计后，可以更好地分配参与反应的氢氧组分，消除活性区域的过高热量并防止气体和冷却剂的泄漏，这样燃料电池的质量、体积和成本会大大降低，其功率密度超过了预期的15%以上。2020年12月，空客公司又公布了一种以6个推进吊舱为主要特征的全新氢动力飞机构型，每个吊舱由各自独立的液氢储罐、冷却系统、燃料电池、电力电子装置、电动



吊舱式氢动力飞机概念（来源：空客公司）

机、八叶螺旋桨以及其他必要的辅助设备组成。显然吊舱构型本质上就是一种分布式燃料电池推进系统，即使个别推进吊舱出现故障无法正常运转，也不会影响其余吊舱重新平衡推力，飞行动力冗余度得以大大提升。此外，相比之前的氢动力飞机设计概念，吊舱构型不但更易于实现对氢动力单元的快速拆卸维护，还能够释放更大的机舱空间从而搭载更多的旅客和货物。

航空发动机制造商也纷纷开始在氢动力推进领域发力布局。罗罗公司已积极参与了多个制氢项目，通过小型模块化反应堆产生零碳电力，可直接为电网供电从而驱动电解槽产生绿色氢；利用与最近成立的戴姆勒/沃尔沃合资公司的合作关系，将氢燃料电池用作其数据中心等安全关键设施供能的应急发电机。GE航空集团已经在全球安装了70多台可燃烧氢气混合燃料发电的燃气轮机，拟将在燃烧启停、燃料喷射、燃烧防回火以及氮氧化物排放等方面积累的丰富经验推广到航空动力领域；普惠公司计划探索改造PW1000G发动机，采用氢燃料的可行性，同时希望开发更多的发动

机集成热循环设计，以充分利用液氢中储存的能量和液氢汽化时的吸热能力。不过也要注意，在技术、安全、取证、操作乃至社会认可等方面的障碍被攻克之前，航空动力制造商关于未来氢动力飞行投放时间的表态普遍较为慎重，目前并未提出独立的氢动力飞行器整机设计验证计划，这一点与空客公司雄心勃勃的概念构想形成了明显的差异。

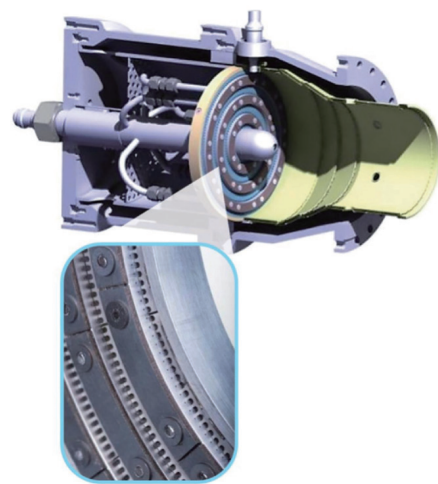
氢动力飞行发展路线选择

氢动力飞行方式有燃气涡轮发动机直接燃烧氢气（氢燃料飞机）和氢燃料电池电推进（氢电池飞机）两种。用氢燃料替换航空煤油主要改变了燃气涡轮发动机的燃烧室以及燃料储存和输送部件，这样可充分利用燃气涡轮发动机的固有优势，看似对飞机和发动机的重新改动量似乎并不大。虽然氢的能量密度是航空煤油的3倍，但是同样的能量即便将氢压缩到液态，其所占的体积也是航空煤油的4倍多，这就涉及到在尽可能不改变飞机总体设计的基础上如何开发轻质、隔热的高强度燃料箱的问题。此外，由于是自然界存在的最小分子，高压下的氢非常

容易扩散到周围金属材料中使之脆化，相应地带来了阀门计量和燃料泄漏的新问题。事实上，氢燃料在燃气涡轮发动机中是以液态还是以气态的方式进行管理，目前仍没有一个明确的答案。

尽管氢氧燃烧反应简单迅速，但如果不能实现氢气和空气的“完美”混合，比航空煤油更高的燃烧温度和更快的火焰传播速度会导致过量的氮氧化物产生。目前考虑的解决方案是将燃气涡轮发动机中少量大型的喷嘴改造为数千个非常小的燃料喷口，在保留火焰扩散性的同时加强了氢气和空气的混合程度、降低了驻留时间，可大幅度消除燃烧反应的局部过热点，从而有效减少氮氧化物的排放。从环境保护的角度看，氢气直接燃烧生成的水并不能像燃料电池那样大部分被储存起来，过量水蒸气可能诱导出烟尘和云雾阻碍热辐射，有分析认为这种影响在大气平流层会更加剧烈，而这也正是直接燃烧氢气的涡轮发动机所装配的商用飞机的主要飞行区域。

相比之下，氢燃料电池有可



微混合氢燃烧器（来源：航空周刊）

能成为真正的温室气体零排放解决方案。氢燃料电池电解反应中产生杂质的可能性微乎其微，而产生的水蒸气除了被储存外也主要释放到了通航飞机活动的对流层，对环境的危害要小得多。不仅如此，氢燃料电池与电动机结合后的效率仍有60%左右，较氢气直接燃烧40%的效率有优势，同时在分布式推进总体设计下引入边界层摄取和流量控制等技术，还可额外降低20%~30%的燃料消耗，飞行过程中也会变得更加安静。当然电池、电动机和电力电子设备组成的电动系统意味着飞机总体结构设计发生了根本性变化，依靠螺旋桨旋转产生推力也限制了其在高空高速飞行上的应用。而即便是通用航空领域，氢燃料电池在面对同样清洁高效的锂离子电池时也难以占到上风，虽然有能量密度和使用寿命优势，但后者在功率密度、动态响应特性和综合成本上表现更佳。

目前，航空界关于氢动力发展

路线的讨论还在进行之中。《航空周刊》认为，燃气涡轮发动机采用氢燃料之路更加漫长和艰难，而稍早时候罗兰贝格公司发布的咨询报告则鲜明地给出了氢燃料电池飞机会稍晚出现的结论。有一点可以确定，无论是氢气直接燃烧还是氢燃料电池，氢动力飞行将主要聚焦在当前由支线飞机和窄体飞机承担的中短途民用航空市场，考虑到能量密度与功率密度的限制，那些长距离大型航班仍将选用可持续航空燃料，而在以城市空中交通为代表的通用航空领域将由锂电池驱动的eVTOL飞行器主导。可见，在未来低碳环保的发展大趋势下，由燃气涡轮发动机带动发电机运转的混合电推进系统会成为氢动力系统在民用航空市场的主要竞争对手。

氢动力飞行面临的挑战

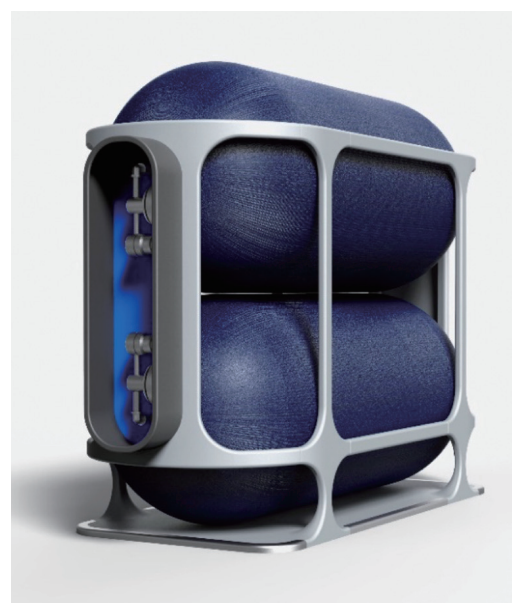
毫无疑问，为了使氢动力飞行真正变成现实，需要对飞行器进行重大革新，这意味着从机体布局到发动

机，再到燃料储存系统，几乎所有的部件都需要重新设计。如前所述，氢燃料飞机仍由改进后的涡轮发动机提供动力，鉴于相对航空煤油的体积能量密度降低，有必要改变机舱布局、增加机体尺寸以加大氢燃料储存能力，这也会带来飞机气动外形的变化。氢电池飞机除了储能方面的考虑外，还要整合电动机、电力电子设备等分布式推进系统，传统飞机的管状和翼状组合结构更会被彻底取代。另外，液态氢的储存需要极低的外界温度，冷却所需的能量甚至相当于燃料自身能量的45%，不但导致了复杂而沉重的隔热壳体设计，从储存到运输的过程中也不可避免地伴随着巨大的能量损失。显然，为了充分发挥液氢的高能量密度，必须在轻量化储罐推进低温冷却系统设计方面取得重大进展。

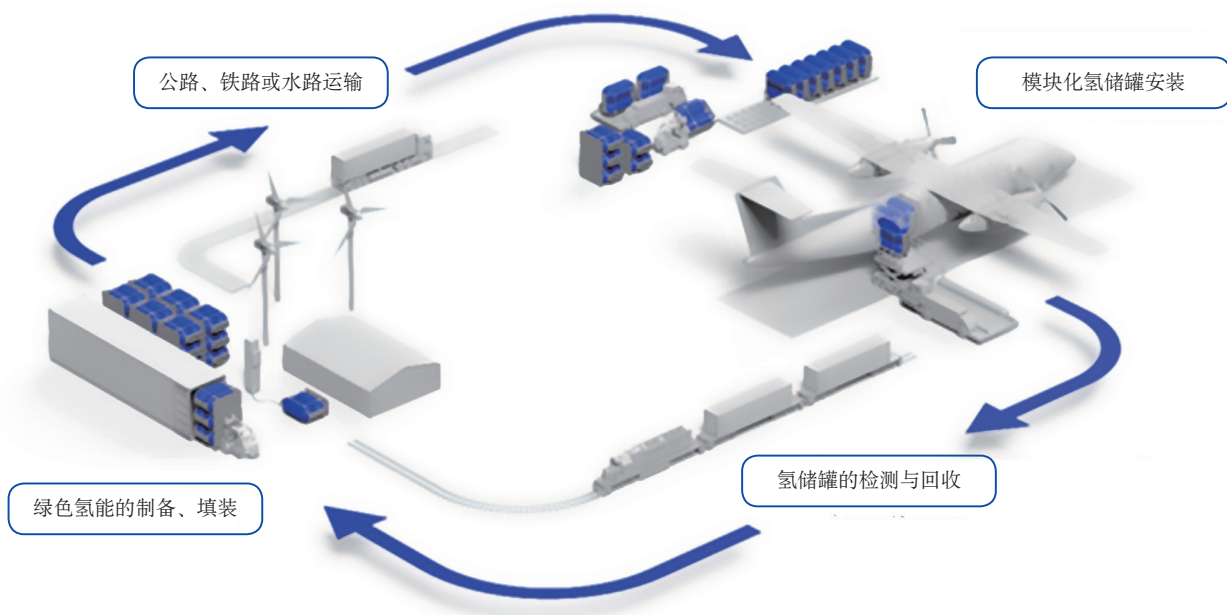
除了航空业自身的努力外，氢动力飞行的发展前景还与氢能源供应链体系的构建有着密切联系。第

锂电池和氢燃料电池对比 (来源：飞行汽车eVTOL)

	锂电池	氢燃料电池
成本	较高	高
能源利用效率	高	较低
充电、加氢时间/min	≥ 120	≥ 5
寿命	约1000次充放电周期	大于5000h
安全性	较高	较高
工作温度/℃	-20 ~ 50	-30 ~ -70启动
能量密度	较低	较高
功率密度	较高	低
启动时间/s	<5	>30
动态响应特性	较好	较差



模块化氢储罐概念图 (来源：通用氢能公司)



“换氢”模式下的氢动力飞行市场体系构想（来源：通用氢能公司）

一，工业用氢目前只有4%是通过电解制备的，其余如甲烷蒸气转化法和煤炭气化法等都会产生副产物二氧化碳，这与利用氢能源实现航空业低碳发展的初衷是完全违背的，而即便是电解如果不利用可再生能源发电的话也无法成为“绿色”氢能源。第二，即使不计算储存费用，“绿色”氢气的生产成本接近航空煤油的3倍。第三，氢能源基础设施建设应与技术攻关同步进行，其中的关键就是如何由工厂向机场输送液氢以及如何如何在机场给飞机加氢。目前有研究表明利用现有天然气网络改造实现氢气运输是可能的，只是需要大量的资金支持。

说起基础设施建设，就不得不提到氢燃料电池汽车。就在过去10年，全球电动汽车产业迎来了突破性发展的时候，曾经被业界高度看好的氢燃料电池汽车却始终不温不火。事实上，与氢燃料电池汽车相比，纯电动汽车的最大优势就在于无所

不在的电力基础设施的支持，哪怕只有一个普通的家用插座也可以为电动汽车充电，然而即便是发达国家，例如，美国目前也只有44个加氢站，严重的出行限制打消了市场上绝大部分的购买热情。近一年来，通用汽车、戴姆勒奔驰、日产以及福特等老牌汽车制造商更是纷纷暂停了氢燃料电池汽车研发计划。但是与汽车出行的随心所欲完全不同，氢动力飞行所针对的民用航空市场则是严格按照时刻表点对点的，只要让主要空港枢纽具备氢动力飞行的服务保障能力，就可以盘活整个市场的运转。还是以美国为例，想要建设15万座加氢站、使之达到和加油站相仿的分布密度无疑是异想天开，但在未来将已有的500多个支持民用飞行的机场进行基础设施改造是很有可能逐步实现的。因此，如果用氢燃料电池汽车暗淡的未来去类比氢动力飞行是不合适的，后者需要克服的社会发展惯性比前者

要小得多，当然它也需要更大的技术飞跃去真正走进人们的生活。

结束语

在氢动力飞行的发展前景和市场价值越发得到航空界认可的同时，也要认识到目前氢能源在理论和应用研究上还存在很多未知领域，到2025年氢动力技术成熟度至少达到6级才有可能在2030—2035年形成相关产品进入市场。未来30年内，现有的航空发动机仍将活跃在民航机队中。这期间为了更好地适配现有机队，无论是可持续航空燃料、全电推进系统、混合电推进系统还是更高效环保的燃气涡轮发动机，航空动力系统仍需要尝试采用多种多样的发展路径，为不同的飞行任务提供不同的动力方案，以帮助整个行业逐步实现低碳发展目标。 **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）