

氢能飞机蓄势待发

Hydrogen Aircraft is Ready to Fly

■ 罗彧 / 中国航发研究院

氢是实现净零碳排放目标最具前景的动力能源和技术创新点，与氢能飞机相关的技术和产品的发展与应用已引起广泛关注，航空业面临的不是发不发展，而是如何发展以及如何快速发展的问題。

氢具有良好的燃烧特性，拓展了贫油燃烧边界，在消耗同等空气量时，所需要的氢燃料少于其他燃料，还可以降低燃烧温度，减少氮氧化物排放。氢的自燃温度高，与碳氢发动机相比，氢燃料发动机的高自燃温度使其具有更高的压缩比，而压缩比越高，热效率越高，损失的能量越小。鉴于氢能的优良特性，航空业对氢能的关注度也越来越高。为了达成2050年净零碳排放目标，获取零碳飞行技术和市场的制高点和先发优势，近年来业界正积极谋划氢能动力系统及飞机的发展。

氢能动力的发展

美国HyPoint公司推出创新的涡轮冷却氢燃料电池

2021年3月，美国初创公司HyPoint推出了一型涡轮空冷（TAC）氢燃料电池动力系统原型机，既可为包括支线飞机在内的电动飞机提供动力，也可替换现有支线飞机的涡桨发动机。

HyPoint公司推出的TAC氢燃料电池的功率密度是现有液冷燃料电池的3倍，能量密度是现有锂离子电池的5倍。动力系统融合了高温质子交换膜（HTPEM）燃料电池、



HyPoint公司的涡轮冷却氢燃料电池

空气冷却及涡轮增压等3种技术以改善性能。TAC氢燃料电池较液体冷却系统质量更轻、结构更简单，通过燃料电池组循环高压空气并重复循环排气提高了功率输出。公司对400W的原型机开展了大量试验，在此基础上，预计TAC HTPEM燃料电池动力系统初始原型机的能量密度可达 $1000\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，而锂电池的能量密度为 $200\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，功率密度为 $2000\text{W}/\text{kg}$ ，液体冷却的低温质子交换膜（LTPEM）功率密度仅为 $700\text{W}/\text{kg}$ 。HyPoint公司预计从2022年开始向开发电动飞机的客户交付全尺寸动力系统。

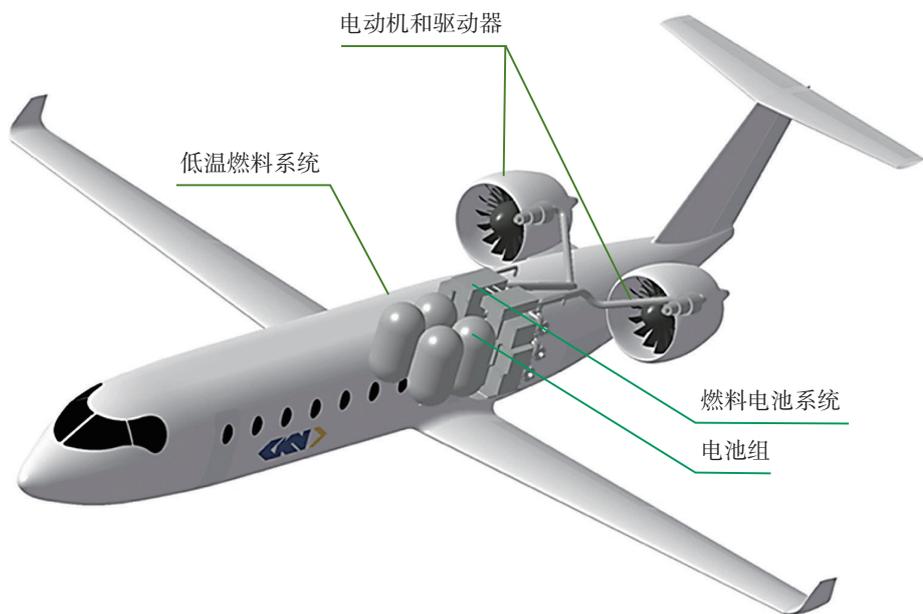
2021年10月，HyPoint公司与德国巴斯夫（BASF）公司开展合作，开发下一代TAC HTPEM燃料电池，采用增强力学性能的新型质子交换膜，可以在更高的温度和压差环境下运行。两家公司还将共同开发一种新的膜电极组件（MEA），将TAC HTPEM燃料电池的功率密度提高到 $3000\text{W}/\text{kg}$ ，进而减轻33%的质量。下一代TAC HTPEM燃料电池计划于2024年中期向顾客交付。

英国吉凯恩公司开展的氢能推进项目

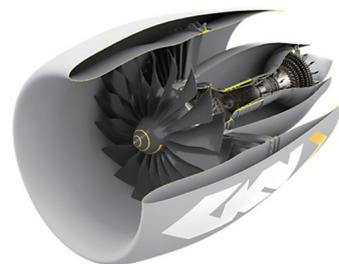
2021年年初，英国启动了氢电混合动力系统（H2GEAR）项目，周期为5年，由吉凯恩（GKN）公司牵头，开发一种新的氢燃料电池动力系统，初期目标是用于19座通勤飞机，最终将扩展到70~90座支线客机。

2021年7月，瑞典国家合作项目氢燃料发动机（H2JET）项目启动，周期为2年，由GKN公司牵头，目的是为氢燃料中程民用飞机推进系统的3个重要发动机子系统开发技术解决方案，研究用于单通道客机的氢燃料涡桨发动机和涡扇发动机。

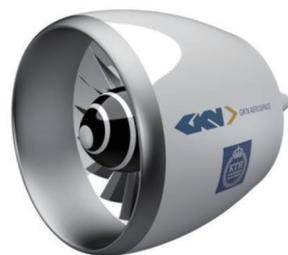
2021年10月，GKN公司和瑞典皇家理工学院（KTH）又启动了为期18个月的EleFanT项目，研究可用于



H2GEAR项目氢动力系统



H2JET项目氢燃料涡扇发动机



EleFanT项目兆瓦级电动涵道风扇

电池、氢燃料电池或更传统的混合电推进系统。与传统螺旋桨推进相比，涵道风扇安全性更高、噪声更低、安装发动机更便捷。

H2GEAR项目将在2022年进入详细设计阶段，最早将于2026年投入使用。H2JET项目的目标是2035年在欧洲航线上投入使用。

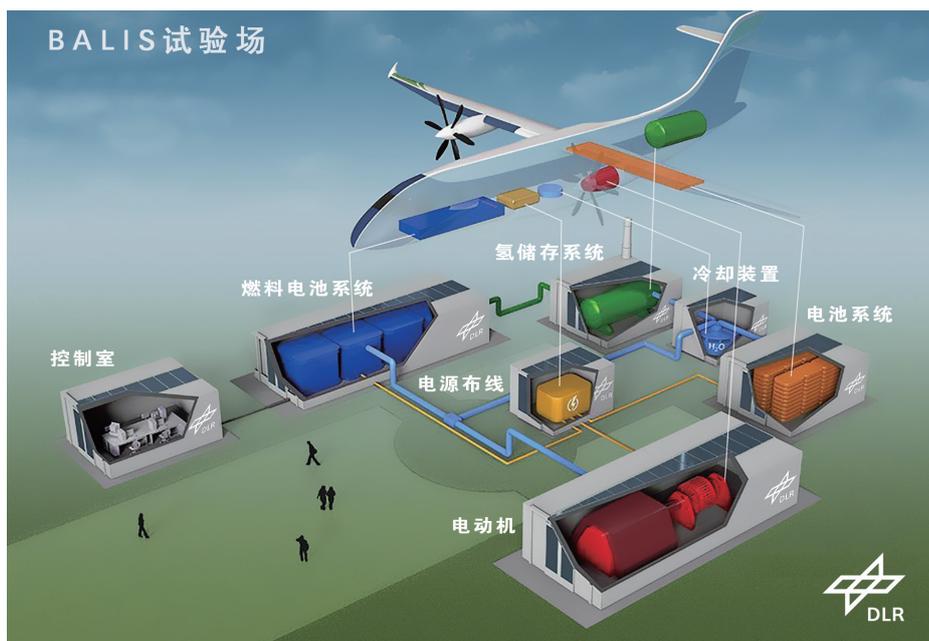
德国开发兆瓦级氢燃料电池推进系统

德国政府为了发展氢动力技术，建立了国家氢燃料电池技术组织（NOW），由德国联邦交通部投资开展国家氢燃料电池创新技术（NIP）项目。2021年1月，德国航空航天中心（DLR）启动氢燃料电池推进系统项目（BALIS），项目将持续到2023年7月，目标是将燃料电池功率提高到1.5MW，为40~60座、航程为1000km的支线飞机提供动力，也可用于大型车辆、火车、船舶等平台。

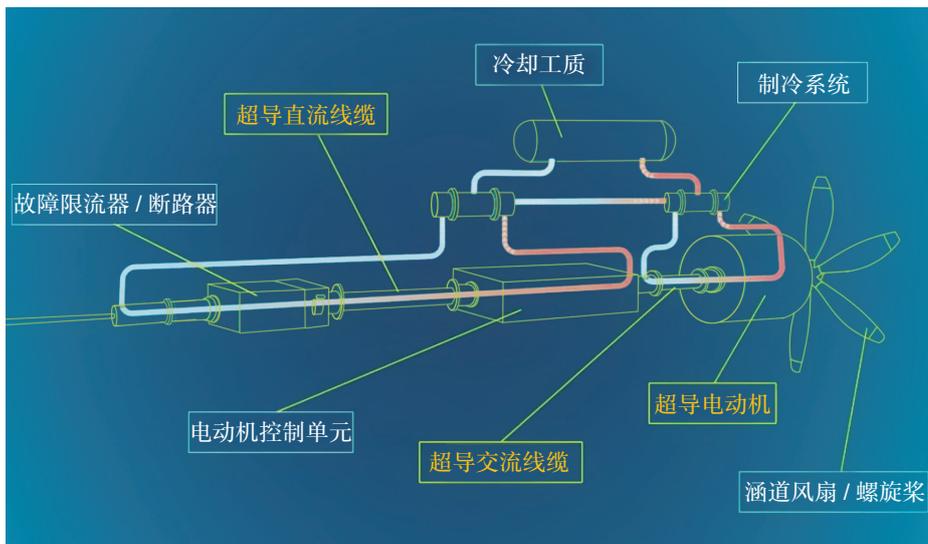
2021年10月，DLR在德国南部

恩普芬根动工建设氢燃料电池推进系统试验场，用于支线客机1.5MW的氢燃料电池推进系统进行地面测试，并将展示完整的动力系统及其配套基础设施，包括氢罐、燃料电

池、电动机、控制和调节系统。试验场的调试计划于2022年秋季开始，其中燃料电池和电动机计划最早于2023年年初做好准备，DLR预计在2024—2025年进行完整系统的测试。



DLR氢动力系统在飞机上的布局和氢动力试验场布局



空客超导电动总成系统架构

空客启动先进超导和低温电驱验证项目

2021年4月，空客公司启动了先进超导和低温动力总成系统演示器（ASCEND）项目，计划在3年内研制一套500kW通用超导航空电驱总成验证系统。

ASCEND项目开发的超导电驱系统将结合液氢冷却和超导技术演示纯电/混合电推进，探索超导材料和低温系统对飞机电力系统性能的影响。其中，液氢只用于冷却，而不作为燃料。项目开发的超导系统不是服务于某个特定机型，而是证明超导电驱技术应用的可行性和潜力，其开发的动力模块可以从千瓦级放大到兆瓦级的功率水平，供空客公司在不同的飞机研究中使用。

ASCEND项目第一阶段动力总成系统测试预计在2023年年底完成；在2024—2025年的第二阶段将开发针对飞机的技术和目标飞机的动力总成；2026—2028年的第三阶段将进行动力总成的飞行测试。

空客与CFM开展氢动力示范项目

2022年2月22日，空客公司与CFM国际公司签署合作协议，双方将于2025年前后共同启动一项氢动力示范项目，将用一架A380作为飞行测试平台，对氢燃料发动机进行地面和飞行测试，为2035年前将一型零排放飞机投入使用做好准备。

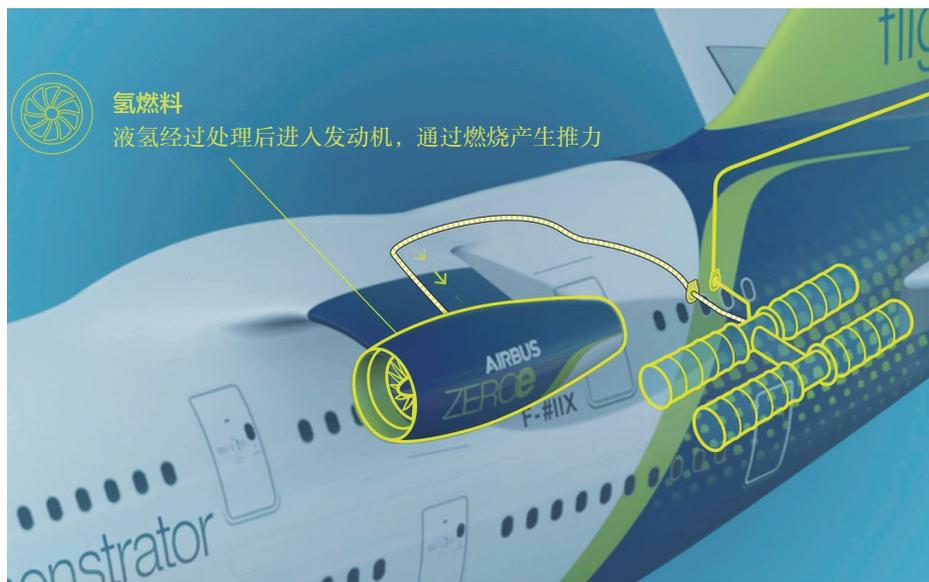
该示范项目选用GE公司的“通行证”（Passport）发动机，由CFM国际公司负责对Passport发动机的燃烧室、燃料系统和控制系统进行改装，并完成一系列的地面测试。空客公司负责对A380飞行平台进行改装，提供液氢罐，提出对氢推进系统的要求，并在A380巡航阶段对氢燃料发动机进行测试。

Passport发动机安装在A380测试飞机后机体尾部，便于将为A380提供动力的发动机和Passport发动机进行分开独立测试，测试用的4个液氢罐也安排在A380后机体中。

氢能飞机发展 空客的ZEROe氢动力概念飞机

2020年9月21日，空客公司发布了3个号称能改变游戏规则的未来飞机概念，称作ZEROe。这些飞机概念均采用氢燃料涡轮发动机和氢燃料电池组合，形成一个高效的混合电推进系统。

其中的涡扇飞机由两台混合氢



A380飞机氢动力示范项目

燃料涡扇发动机提供动力，液态氢燃料的存储和分配系统位于机体后增压舱。涡桨飞机由两台混合氢燃料涡桨发动机驱动6桨叶螺旋桨产生推力，与涡扇飞机类似，液态氢燃料的存储和分配系统也位于机体后增压舱。翼身融合体（BWB）飞机由两台混合氢燃料涡扇发动机提供推力，具有非常宽敞的内部空间，为液态氢燃料的存储和分配提供了多种选择。如果氢燃料技术能以预期的速度发展，空客公司预计首款零污染飞机将于2035年投入商业运营。

ATI推出氢能客机概念

2021年12月6日，英国航空航天技术研究院（ATI）发布了FlyZero液氢动力远程中型飞机概念。2022年1月26日，ATI又发布了FlyZero液氢动力支线飞机概念。2022年3月14日，ATI发布了包括窄体客机在内的3种氢动力概念的详细方案。FlyZero项目的目标是在2030年前成功研制净零碳排放飞机。ATI发布的支线、



ATI发布的3种氢能飞机

窄体和中型客机概念图和信息提供了详细的方案预览，确定研究的技术包括：无燃料箱机翼（干机翼）、液氢罐、低温燃料系统、燃料电池和电力系统，以及氢燃料发动机。

FlyZero中型飞机的翼展为54m，采用两台氢燃料涡扇发动机，可载客279人，航程为9723km。液氢燃

料储存在后机体的一对液氢罐和机体前部两侧的两个较小的液氢罐中，存储温度为-253℃。

FlyZero液氢动力支线飞机可载客75人，巡航速度为325km/h，航程为1482km，可从伦敦飞到罗马，比目前同级别的涡桨支线飞机航程更远。液氢燃料储存在低温燃料箱中，存储温度为-253℃，位于机体尾部燃料电池系统旁边。机翼上有6个短舱（每侧机翼3个），每个短舱里包含电动机、电力电子设备和用作燃料电池热管理系统的热交换器。配电系统将电力输送到机翼上的6个短舱带动电动螺旋桨产生动力。

其他在研氢动力飞机

德国飞机公司正在恢复40座多尼尔D328涡桨支线飞机的生产，复产型号为多尼尔D328eco，动力采用氢燃料电池，并与燃料电池专业公司H2Fly、通用氢能公司合作，探索开发液氢燃料的潜力，该验证机将在2025年开始飞行测试。

DLR已经与德国MTU公司合作



空客的ZEROe氢动力概念飞机



多尼尔D328eco氢燃料电池动力飞机

开发500kW的燃料电池动力系统，以代替19座多尼尔D228飞机一侧的涡桨发动机，将其用作氢能飞行测试平台，计划于2026年首飞。

通用氢能公司还在为加拿大德·哈维兰公司40座“冲”8-300支线飞机开发氢燃料电池推进系统，包括一个1.6MW的推进电动机和一个用于驱动附件的350kW电动机，新推进系统将取代飞机原有的PW123涡桨

发动机。新的氢动力“冲”8计划于2025年投入市场。

初创公司ZeroAvia正在开发600kW级的燃料电池推进系统，并对19座多尼尔D228飞机进行改装。在英国政府的资助下，ZeroAvia公司计划在2023年1月进行560km的演示飞行，并在2023年年底通过系统认证并做好入市准备。



多尼尔D228飞机

氢能技术发展展望

在氢燃料电池技术方面，质子交换膜（PEM）是应该重点关注的技术。目前，锂离子电池的能量密度限制和氢燃料电池的特定功率限制影响了零排放航空的发展，但美国HyPoint公司推出的TAC氢燃料电池概念则突破了传统氢燃料电池的限制，其功率密度和能量密度都远远超过了目前的锂离子电池和传统氢燃料电池，达到了满足商业旅行的水平，这其中的关键就是PEM技术。而ATI将PEM技术确定为可能促进英国航空市场份额和就业机会增长、保持航空领先地位的关键技术之一。

氢能飞机所涉及的众多飞机和动力系统相关的新构型和新技术需要突破，而干机翼、燃料电池技术和氢涡轮发动机则是需要重点突破的纲领性技术，正如ATI在最新的研究报告《英国在零碳飞机技术方面的能力》中强调，干机翼、燃料电池技术和氢燃料发动机是英国应该重点投资的领域，以确保增加全球市场份额和就业机会，相关的研究成果将有助于塑造全球航空业的未来。

结束语

综上所述可以看出，氢能动力和飞机呈现出多样化的发展态势，涉及产业众多。从目前发展态势判断，2025年前后，将迎来氢能飞机投入市场的初始浪潮；之后一直到2035年前后，各种氢能动力系统及氢能飞机将迎来快速发展期，支线、干线和中型飞机将可能有众多机型投入市场。自此，氢能飞机也将进入高速发展期。

航空动力