

# 零排放航空的技术途径浅析

## Analysis to the Technology Path on Zero-Emission Aviation

■ 王妙香 / 中国航空工业发展研究中心

在2020年11月召开的国际航空研究理事会（IFAR）第11届全球峰会上，中国航空研究院（CAE）、德国航空航天中心（DLR）、法国航空航天实验室（ONERA）、俄罗斯中央空气流体动力学研究院（TsAGI）等13个国家航空研究机构联合发布了《零排放航空（ZEMA）宣言》，承诺将针对绿色航空的关键领域（如电动飞机、城市空运、飞行路径优化等）开展研究，为减少航空碳排放、达成联合国《巴黎协定》目标做出贡献。

为了使航空业真正实现“脱碳”（decarbonization），对飞机进行常规的技术改进已不能满足要求，目前业界正致力于发展颠覆性的技术和方法以大幅降低飞机的排放。可持续航空燃料（SAF）、革命性推进技术和新型飞机气动布局及推进方案对航空脱碳的潜力巨大，此外，飞行航线、地面流程和基础设施等的改进也会起到一定作用。

### 可持续航空燃料

相比传统石化燃料，可持续航空燃料在其全生命周期内，可减少高达80%的二氧化碳排放量。航空运输行动小组（ATAG）在2020年11月举行的全球可持续航空论坛上表示，有必要扩大和加速SAF的生产，这是实现脱碳目标（到2050年将航空业的碳排放量减少到2005年的50%）的唯一的中短期选择。SAF使用便捷灵活，无须改装发动机，且可与传统的航空煤油混合使用。

波音公司认为，包括生物燃料在内的可持续航空燃料，是航空业实现国际民航组织（ICAO）的减排目标的主要手段，波音公司于



波音公司为飞机加注生物燃料

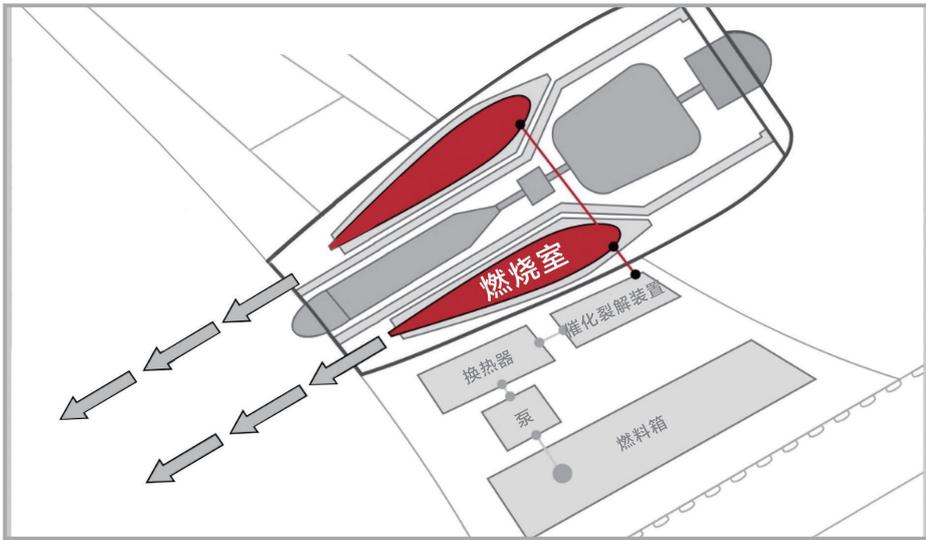
2021年1月22日宣布，在2030年之前交付可使用100%可持续航空燃料的飞机，以实现航空业2050年的减排目标。波音公司同时也宣称将继续研究其他的减少碳排放技术，如混合电推进和氢能动力系统。

与传统航空燃料相比，SAF生产成本高，当前尚不具备广泛应用的竞争力，而且其原料和产量有限，现有的任何一种原料都无法生产出

足够数量的SAF。全球燃料生产商面临艰巨的任务，除了投资基础设施，还需寻找更多的原材料。各国政府也需要在多方面发挥作用，缩小SAF和航空煤油之间的价格差距，提供财政支持开展基础设施建设。

### 革命性推进技术

就当前的研究成果来看，除了SAF外，电能、氢能在零排放航空中的



氨动力飞行原理示意

潜力巨大。

从动力系统方面考虑，实现零排放的可行的推进技术包括全电动、涡轮电推进、氢燃料发动机和燃料电池等。

电推进技术是目前确认的不会在飞行中产生排放的替代方案。由电池、控制器和电机组成的驱动系统架构具有高效率、零污染、结构简单和易维护等优点，是航空业实现零排放的动力系统的重要发展方向之一。但由于电池的能量密度低，限制了当前全电动飞机的尺寸和航程，仅适用于短距离飞行和垂直起降，如城市空中交通运输。

涡轮电推进系统可以通过内燃机来补偿电池能量密度较低的缺陷，增加飞机航程，为飞机和推进系统设计带来了新的自由度。将涡轮混合动力推进系统与替代燃料相结合，在地面机场可通过电池电力运行实现零排放，在巡航时至少可以实现碳中和运行。对整个飞机而言，由于电缆、电力电子设备和电池的额外质量以及系统冷却的需求，混合

电推进飞机比传统涡轮飞机更复杂且质量更大，需要采用模块化、多功能和集成化的结构，实现飞机整体效率的提高。

对于采用氢能实现航空零排放的推进技术而言，氢燃料电池是实现航空零排放的可行途径，也是短期内实现氢能在航空领域应用的最有效途径。例如，美国初创公司ZeroAvia基于派珀M350飞机改装的氢燃料电池飞机于2020年9月首飞成功。另外，在燃气涡轮发动机中直接燃烧氢，或者氢与二氧化碳结合生产合成燃料也是氢能在航空中可采用的方式。欧盟发布的《氢动力航空》报告称，对于通勤和支线飞机来说，氢燃料电池是最节能、最环保和最经济的选择；对于短途飞机，混合推进方式（采用氢燃料发动机和氢燃料电池）可能最合适；中远程飞机采用氢燃料发动机技术上可行，但成本会更高。氢具有较高的能量密度，相较于传统锂电池可维持更远的航程，并可以配合高效率、低噪声、低维护成本的电传

动系统，从而实现零排放飞行，但会造成系统总质量的增加；此外，氢燃料电池还会产生大量的热，必须对其进行冷却，因此氢燃料电池应用于航空领域还需进一步提高其功率密度、减轻系统质量、优化氢燃料电池与辅助设备的集成等。

雷神技术公司于2021年1月11日宣布，拟研发以液态氨作为燃料和冷却剂的涡轮电推进系统。一方面，液态氨易于吸热、不留残渣，可作为航空发动机冷却剂使用。另一方面，液态氨可在 $-33^{\circ}\text{C}$ 以下储存，在催化剂的作用下可分解为氮气和氢气，为飞机提供动力，且不产生任何碳排放，用氨作为燃料可以解决飞机携带氢燃料所面临的挑战。

## 新型气动布局技术

新的推进技术为飞机设计带来了优势，但同时也带来了额外的质量、系统复杂性和成本高等缺点，因此需要进行飞机机体及推进系统的有效集成，特别是阻力的最小化设计，这也是实现零排放飞行的关键技术之一，具体表现在飞机气动布局型式上，主要有分布式布局、边界层抽吸布局以及更具颠覆性的翼身融合布局等。

分布式布局体现了飞机设计从单一动力研究到飞机总体、动力、机电等技术集成研究的变化，很有可能成为航空业革命性的转折，为科技发展提供新的方向。例如，德国航空航天中心（DLR）研究的分布式电推进支线飞机方案：沿机翼前缘分布的一系列小型螺旋桨有助于增加飞机升力，从而减小机翼面积、减轻飞机质量、降低阻力、减小所需的推进功率。此外，多个推进器



DLR研究的分布式电推进支线飞机



NASA采用尾部边界层抽吸的涡轮电推进飞机



空客公司公布的翼身融合客机概念

可通过冗余设计提高推进系统可靠性和安全性，减少控制面。

边界层抽吸布局在常规飞机的尾部安装嵌入式风扇，为机身尾迹注入能量，延缓机身的气流分离，降低飞机阻力。例如，DLR设计的一款尾部带有电推进装置的中程飞机，机翼下方的发动机产生推力，同时还向飞机尾部的风扇提供电力，尾部风扇对飞机进行边界层抽吸，从而提高飞机的气动效率。美国国家航空航天局（NASA）提出的单通道涡轮电推进飞机(STARC)概念方案，也采用尾部边界层抽吸技术。

为了推进航空业的可持续性发展，减少飞机飞行阻力进而降低飞机油耗是最直接的方式之一，翼身融合布局不失为一款极具潜力及可行性的选择。空客公司于2020年9月公布的3型零排放商用客机概念方案，其中之一采用了翼身融合布局，并以液态氢作为主要燃料。该方案集成了翼身融合与分布式推进系统的优点，其超宽的机体为氢燃料的储存、配送以及客舱布局提供了多种选择。

## 其他措施

为了使航空生态足迹降至最低，不仅仅需要改进动力装置，在飞行航线、地面流程和基础设施等方面也必须适应新的挑战。

一是选择气候友好型飞行路线，通过避开排放影响最大的气候敏感区域来减少航空运输对气候的影响。大气中臭氧和甲烷浓度的变化以及尾迹云的形成是导致全球变暖的原因之一，很大程度上取决于飞行高度以及排放的地理位置和时间，通常可以通过降低飞行高度来减少氮氧

化物对臭氧层的破坏，这在空中交通管制层面仍面临一定技术挑战，同时还需要对飞机进行适当的设计改进。

二是采取新的地面流程支持新型飞机推进系统，减少航空运输对环境的影响。例如，在尽量短的时间内加注氢燃料或为电池充电，使飞机的离场时间尽可能短，或者为电动飞机更换电池，面临的挑战之一是如何确保这些过程的安全性和经济性。

此外，为了运行新型飞机，必须在早期确定并考虑到基础设施的建设。同时，机场的地面交通也可以通过实现电气化减少排放。

## 政策支持

实现航空零排放，不但需要技术研发的支持，也离不开政策的支持。

2020年6月9日，法国政府宣布将为民用航空制造业提供80亿欧元的救助计划，从中专门划拨15亿欧元（部分来自欧盟委员会经济刺激计划）用于为期3年的氢动力客机研发项目，要求主制造商开发一款氢动力窄体客机，实现二氧化碳零排放，并计划在2033—2035年投入商业运营。

德国政府也为“国家氢能战略”投入70亿欧元，该战略将支持在飞机推进和混合动力飞行中使用氢能。

2020年6月30日，英国首相约翰逊提出了“零排放喷气机”（Jet Zero）的口号，号召英国航空业研制世界首架“零排放”远程客机，并承诺英国政府将支持诸如此类的高风险、高回报创新项目。2020年7月，英国政府负责商业能源和工业战略（BEIS）的内阁大臣夏尔马宣布启动为期12个月的零排放航空技术及市

场可行性研究，项目名称为“零排放飞行”（FlyZero），英国政府为此将投资1500万英镑。

## 启示与建议

综合各大研究机构、企业对零排放航空的研究及对相关发展趋势的判断，笔者认为上述内容对我国实现航空零排放的技术发展有如下几点启示。

一是制定零排放航空路线图。面对航空业脱碳的挑战和紧迫性，制定系统性的战略和清晰的绿色航空路线图非常必要。空客公司经过研究，认为氢能是实现航空运输零排放的最快途径，将研究重心转向氢动力飞机，并制定了发展路线图；波音公司也对氢能航空进行研究，认为氢能还存在技术不确定性和监管障碍，短期内氢动力客机难以投入使用，并面临巨大挑战。我国在2020年9月30日的联合国生物多样性峰会上宣布碳中和目标。从目前发展看，航空业在实现碳中和方面非常关键且大有可为，大力发展绿色航空技术不仅非常有利于实现减排目标，促进零排放航空的早日实现，还能带动航空技术系统性创新和改进。为尽快实现我国的绿色航空目标，建议尽快制定相应路线图，加速相关技术研究。

二是加快氢动力航空技术的探索和研究。氢能推进技术的应用潜力令人鼓舞，研究和创新对于实现氢技术在航空脱碳中的潜力至关重要，欧美等国已对氢能飞机技术开展多方面的研究。国内也开展了相关研究，并在部分领域处于领先地位，为继续发挥我们的优势，建议政府部门加强组织，系统性地规划研究氢能推进飞机的设计技术、燃

料供应链技术、基础设施开发等，科学规划氢能在航空业的应用并突破各项关键技术。一方面加强氢能和飞机机体的集成技术研究，另一方面加强轻质安全的液氢容器、机载液氢配送组件和系统、氢燃料电池、氢燃料电池系统等技术的开发和审定，开展氢能源飞机原型概念验证，形成核心自主创新成果，夯实技术基础。

三是加快新型飞机气动布局的探索和研究。为充分发挥新能源推进技术的优势，针对机体和推进系统的有效集成，开展创新性气动布局研究，提高飞机的整体效率。目前，我国所开展的相关研究，在广度、深度和系统性方面，距离工程应用还有一定差距。建议政府部门加强组织，并由国家研究机构牵头，针对新型气动布局等前沿技术开展系统性规划研究，并注重研究成果的可持续性和继承性。

四是加强飞机全生命周期评估基础技术研究。随着新能源及推进系统与飞机机体的集成设计，飞机在综合优化、气动、结构、电气特性、能量管理等方面需要新的计算、分析、建模与仿真等工具支撑，也需要诸如全机能量管理综合试验、变体结构试验、电推进系统试验等全新的试验能力，先期或同步建成民机研制工具体系，支撑关键技术更快更好突破，形成创新且自主可控的民机发展能力。建议加大基础技术及工具体系的论证、研究和建设力度，逐渐建成独立自主的科研生产能力。

**航空动力**

（王妙香，中国航空工业发展研究中心，研究员，从事航空产业发展和政策制定研究）