

通向碳中和的航空新能源动力发展路径分析

Analysis to the Development Path of New Aerospace Power Leading to Carbon Neutrality

■ 韩玉琪 王则皓 刘英杰 王永梅 / 中国航发研究院

当前基于传统石化燃料的航空动力，燃油效率平均每年提高不足2%，未来采用新能源的航空动力可显著降低航空业的碳排放。

航空运输业的碳排放主要源于航空煤油的燃烧，约占其总排放量的79%。而与20世纪50年代投入使用的早期喷气发动机相比，目前的燃油效率已提升了80%以上，在此基础上继续提升效率的技术难度极大，采用低碳排放的新能源航空动力可助力航空运输业奔向零碳。航空运输业在2050年前实现净零碳排放的新能源动力主要有3个发展方向：可持续航空燃料（SAF）、氢燃料和电推进。需要说明的是，在未来的航空动力产品中，这3种新能源动力可能会以要素组合的形式出现，如混合电推进航空发动机同时采用了可持续航空燃料或者氢燃料。

航空新能源动力的主要方向 可持续航空燃料

国际民航组织（ICAO）在国际航空碳抵消和减排（CORSIA）计划中，定义可持续航空燃料为“满足可持续性标准的来自生物质或废弃物的航空燃料”。作为新型航空燃料，可持续航空燃料需要满足适航审定的要求，美国对新燃料的性能验证主要按照美国材料与试验协会（ASTM）的ASTM D4054标准进行（分为全流程审批和快速审批，全流



航空碳中和

程审批所需时间一般为3年以上，快速审批所需时间为1年左右），ASTM D7566标准对通过审批的技术途径进行说明，中国民航局前期已发布《含合成烃的喷气燃料》（CTSO-2C701），对可持续航空燃料的性能验证，也主要借鉴ASTM D4054的方式进行。

SAF仍属于航油，适用于绝大部分现役飞机和发动机，无须对发动机做出结构设计上的改变，只需替换油品即可且可与航空煤油混合使用。当前制约SAF大范围使用的主要挑战是成本和产能问题，目前

SAF成本为航空煤油的2.5 ~ 8倍，产量仅占全球商用航空燃料的0.1%。航空油料占航空公司营业成本的30%左右，加氢脂和脂肪酸（HEFA）因其可以较早实现较低的生产成本，将是SAF早期主要的生产方式，当前阶段HEFA的成本为1400 ~ 1500美元/t。

氢燃料

氢的能量密度约为120MJ/kg，大约是传统航空煤油的3倍，但由于液氢的密度仅为煤油的1/11，储存同等能量的燃料箱体积约为常规飞机油箱的4倍。航空氢动力主要有两



HY4 氢燃料电池飞机



空客 ZEROe 飞机

氢燃料电池飞机及氢涡轮飞机概念

种基本技术路径：氢燃料电池，利用氢化学能发电，电机驱动风扇/螺旋桨/旋翼产生动力；氢燃料发动机，用氢燃料替代发动机现用的航空煤油，还可以进一步与电池（锂电池、氢燃料电池等）组成混合动力。除航空发动机外，氢燃料也可用于其他类型的内燃机。

氢燃料电池动力和氢燃料涡轮发动机两种技术路径都在积极推进。美国20世纪60年代即开展了氢燃料电池研究并应用于阿波罗飞船，近些年各国的氢燃料电池飞机研发更是风生水起；美国和苏联在20世纪50年代就开始了氢燃料涡轮发动机相关研究，近些年各国的研发活动加强，重点是在发动机更换氢燃料和采用氢燃料进气预冷等方面。

氢是一种极难储存的物质，且其分子穿透力极强，很容易发生泄漏且对金属还有一定的腐蚀性，对氢储罐与运输管道（特别是接缝位置）的材料提出了很高的要求，同时氢易燃易爆，自燃浓度范围非常宽（4%~75%）。航空氢燃料电池还面临低成本、长寿命、高环境适应性、高功重比、大功率等挑战。氢动力飞机的机体结构、动力系统以及燃料储存方式均与传统的航空燃料飞机存在显著差异，未来的氢动力飞机需通过更高的适航标准后

才能投入实际运营。

电推进

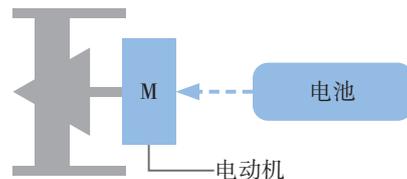
电推进是以电动机带动螺旋桨/风扇/旋翼等推进器产生动力的推进方式，包括纯电推进和混合电推进。以能量来源区分，仅采用电能作为能源时为纯电推进，同时采用燃气涡轮机和电能作为能量来源时为混合电推进。在纯电推进系统中，电池是飞机的唯一动力来源，电池给电机供电以驱动风扇/螺旋桨/旋翼转动，通过电动机将电能转换成机械能。混合电推进系统主要包含5种构型，根据构型不同还包括燃气涡轮发动机、电池、发电机、转换器、电动机等部件，同时还需要控制系统进行能量的分配与管理。

当前纯电推进系统主要用于10座以下的小型飞行器，已有产品进入市场，混合电推进系统还处于技术攻关阶段，未来的大范围应用还需要攻克高能量密度电池、高效高功率密度电机、高效高功率密度转换器、高功率小尺寸的燃气涡轮核心机、飞发一体化和热管理等关键技术。

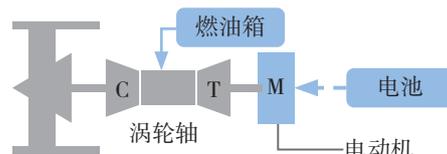
航空新能源动力的减碳潜力对比分析

能量密度对比

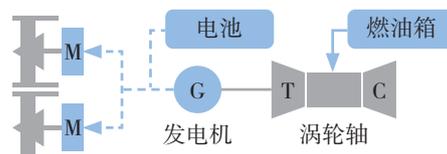
从能量密度角度对3种航空新能源途径的对比分析，详见表1。由



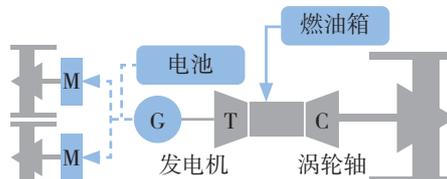
纯电推进系统构型



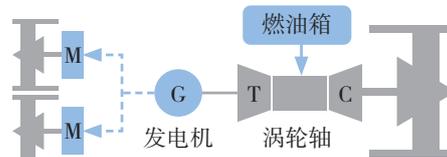
并联电推进系统



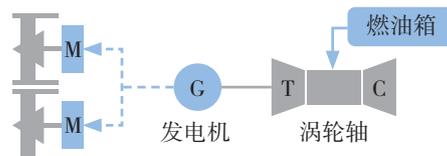
串联电推进系统



混联电推进系统



涡轮混合电推进系统



涡轮全电推进系统

混合电推进系统构型

表可以看出：可持续航空燃料与当前的航空煤油相当；氢燃料的质量能量密度是航空煤油的3倍，但体积能量密度为航空煤油的1/4且氢燃料的储罐更大，未来的飞机设计需要提升液氢的体积储量；当前电池的能量密度仅为航空煤油的1/40，且电能使用后电池的质量并不会减轻，其技术发展水平直接决定了纯电动和混合电动飞机的未来。

气候影响及技术创新对比

从气候影响及技术创新的角度，对上述3种航空新能源途径的对比分析，详见表2。由表中可以看出，与传统的航空煤油相比：可持续航空燃料在全生命周期内可减少80%的二氧化碳排放，减少30%~60%的温室气体（包括二氧化碳、氮氧化物、水蒸气等）排放，且无须对飞机、发动机做出结构设计上的改变，只需替换油品即可，因此在更换使用上具有一定的便捷性，根据实际操作，SAF在能源效能、驾驶、操控性等方面均不逊色于传统的航空煤油；氢燃料完全消除了二氧化碳排放，氢燃料发动机可减少50%~75%的温室气体（水蒸气和氮氧化物）排放，氢燃料电池可减少75%~90%的温室气体（水蒸气）排放，飞机和发动机需要进行结构设计上的改变，机场基础设施方面需要液氢燃料的运输、储存和加注等设备；纯电推进没有温室气体排放，混合电推进系统可减少20%~70%的二氧化碳排放，减少10%~50%的温室气体排放，飞机和发动机需要进行结构设计上的改变，机场基础设施方面需要快充或换电系统。

新能源动力投入使用的时间及适用飞机对比

综合考虑当前的技术成熟度、

表1 新能源的能量密度比较

类型	质量能量密度 / (kW · h / kg)	体积能量密度 / (kW · h / L)
航空煤油	12.0	10.4
航空煤油+储存系统	约8.9	约9.5
SAF	与航空煤油相当	与航空煤油相当
电池	约0.3	约0.8
液氢	约33	约2.4
液氢+储罐（包括发展中的储罐）	10 ~ 21	1.6 ~ 2.1

表2 新能源的气候影响及技术创新对比

与传统航空煤油相比	SAF	氢动力		电推进	
		氢燃料发动机	氢燃料电池	电推进	混合电推进
二氧化碳减排潜力	80%	100%	100%	100%	20% ~ 70%
温室气体减排潜力	30% ~ 60%	50% ~ 75%	75% ~ 90%	100%	10% ~ 50%
发动机设计	无须改变	改进设计	全新设计	全新设计	改进设计
飞机设计	无须改变	改进设计	改进设计	改进设计	改进设计
机场基础设施	无须改变	需要液氢燃料的运输、储存和加注等设备		需要快充或换电系统	

表3 新能源动力投入使用的时间及适用飞机对比

飞机类型	2025年	2030年	2035年	2040年	2045年	2050年
通勤飞机	纯电/SAF	纯电/氢燃料电池/SAF				
支线飞机	SAF	氢燃料电池/SAF	氢燃料电池/氢燃料发动机/混合电推进/SAF			
短途飞机	SAF	SAF	SAF	氢燃料发动机/混合电推进/SAF		
中程飞机	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	氢燃料发动机/混合电推进/SAF
远程飞机	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

能量密度及未来技术发展，新能源动力投入使用的时间及适用飞机对比见表3：SAF目前已投入使用，且未来适用于所有飞机；受到能量密度的限制，纯电推进系统仅适用于通勤飞机；氢燃料电池动力适用于通勤、支线飞机，最早可于2030年进入市场；氢燃料发动机、混合电推进系统将竞争支线、近程和中程飞机市场，可能于2035年左右进入市场（混合电推进系统可能早于氢燃料发动机进入市场）；由于氢动力和电推进系统的能量密度限制，

2050年前远程飞机可能依赖于SAF。

结束语

面对我国的2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和的“双碳”目标，采用低碳排放的新型能源，包括SAF、氢燃料和电推进，可显著减少燃油燃烧产生的碳排放，助力未来航空业的低碳发展和国家“双碳”目标的实现。

航空动力

（韩玉琪，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机综合技术论证）