

氢能航空的关键技术与挑战

航空业的快速增长使其成为未来交通运输领域温室气体排放的主要来源之一，对气候和环境的影响越来越显著。与此同时，氢能航空被认为是航空业未来实现污染物零排放和可持续发展的关键。虽然氢能具有绿色环保、能量密度高等优点，但发展氢能航空还需要突破氢燃烧、氢燃料加注和储存等一系列关键技术瓶颈。

根据国际民航组织（ICAO）的预测，基于现有传统航空技术的进步，航空业可持续发展以及2050年碳排放量减少至2005年50%的目标将无法实现（如图1所示）。因此，发展可持续航空技术，开发包括太阳能、生物燃料和氢燃料等石化燃料以外的替代能源，将成为航空业实现碳减排目标的重要任务之一。

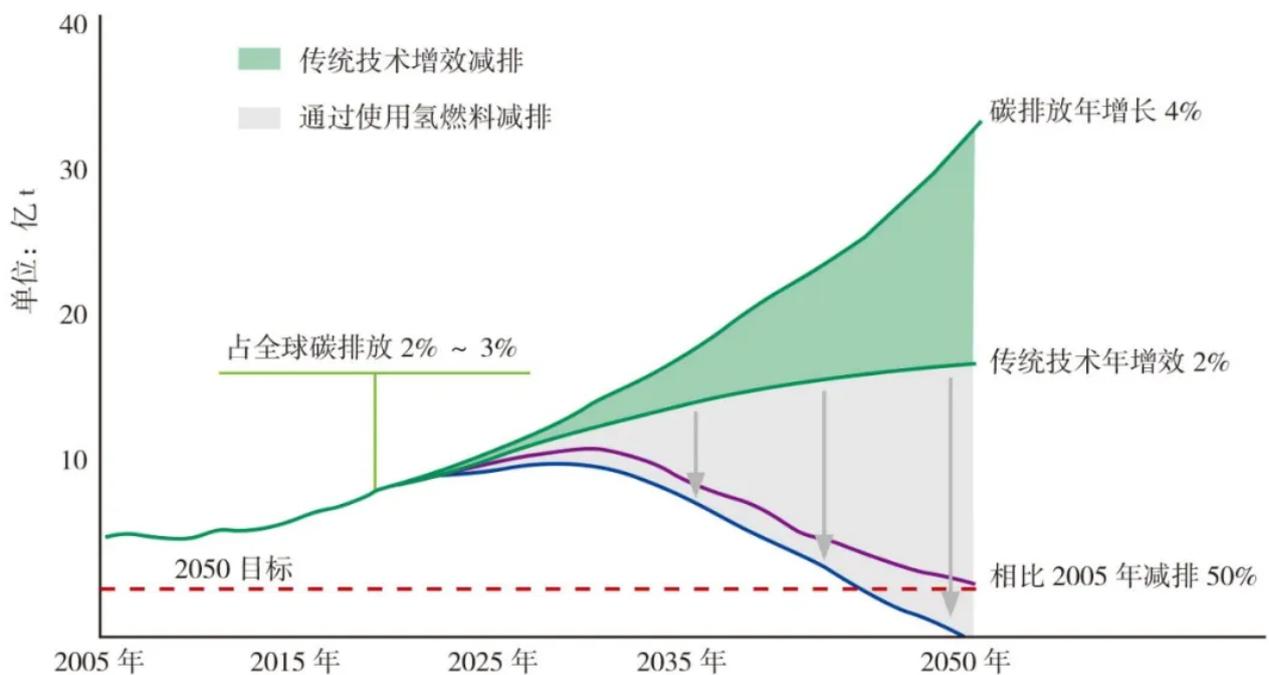


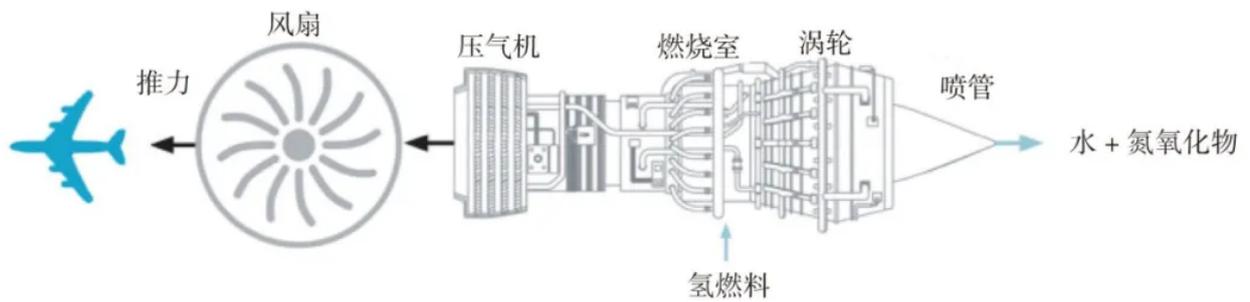
图1 航空业碳排放及减排趋势

相关研究显示，氢燃料的能量密度约为120MJ/kg，是标准航空燃料的3倍。航空业使用氢能源不但可以实现二氧化碳零排放，同时还能有效减少其他污染物的排放量，具有非常明显的优势。因此，发展氢能航空技术是航空运输业实现碳中和的主要途径，将成为航空技术的重要发展趋势。

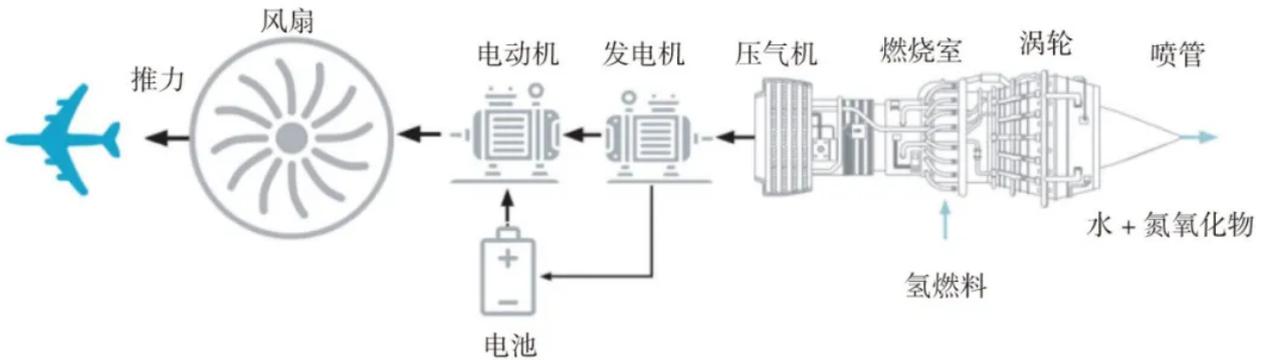
近年来，美国、日本和欧洲等发达国家和地区纷纷加大氢能研发的投入，重点支持乘用车、加氢站、公共汽车、电解水制氢装置、中重型运输（包括中型到大型乘用车、商用车、重载卡车、火车、海运、航空）等领域。未来氢能在航空业要完全替代传统石化燃料还须面临动力推进系统、机载氢燃料储存、机场基础设施建设以及氢燃料生产等一系列关键技术的挑战和突破。

氢能推进技术

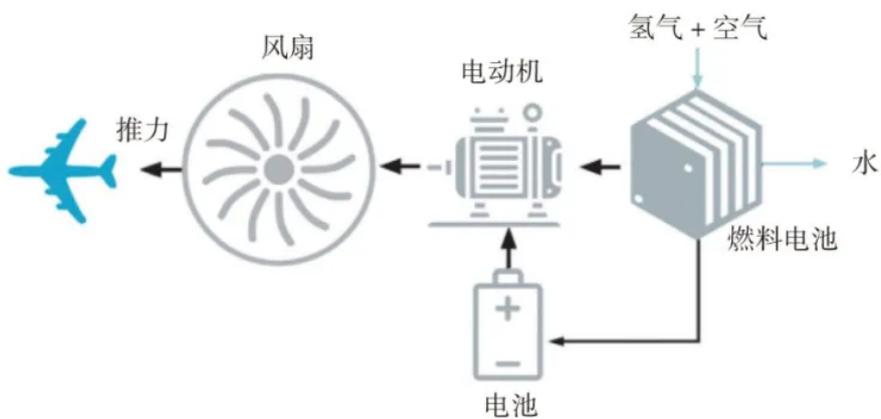
目前，氢涡轮和氢燃料电池是氢能飞机推进系统最受关注的两个方向（如图2所示）。



(a) 氢涡轮风扇发动机



(b) 氢涡轮电动风扇发动机



(c) 氢燃料电池电动风扇发动机

图2 氢涡轮和氢燃料电池在航空上的应用

氢涡轮一般包含氢涡轮风扇发动机和氢涡轮电动风扇发动机两种形式。前者的结构与现役航空涡轮发动机基本相同，氢燃料在燃烧室内燃烧，然后推动涡轮并带动风扇产生推力，后者则是通过涡轮带动发电机发电，电驱动电机带动风扇产生推力。使用氢燃料代替石化燃料，不会产生一氧化碳、二氧化碳、硫化物等温室气体和烟尘等污染物，仅有水蒸气及部分氮氧化物。研究显示，尽管水蒸气凝结形成的尾迹云也会对气候造成影响，但采用氢燃料仍可以将飞行过程对气候的影响降低50%~75%。

氢燃料与传统石化燃料具有完全不同的物理化学属性。在传统航空发动机中使用氢燃料时，其效果往往不如常规石化燃料。这主要是因为传统航空发动机的燃烧室几何形状、结构和尺寸不利于氢燃料和空气进行有效混合，从而导致氢燃料燃烧不充分或在燃烧过程中出现局部高温并产生氮氧化物。因此，为了提高氢燃料发动机的效率，需要对传统航空发动机的燃烧室、燃料喷射与混合装置、热循环和管理系统进行改进或重新设计，以满足氢燃料的使用要求。与此同时，为进一步降低污染物的排放量，还应开发针对氢燃料发动机的低氮氧化物排放技术，如贫油直喷（lean direct injection, LDI）和微混合燃烧室（micro mix combustor, MMC）等技术。

氢燃料电池推进系统是一种能够实现零污染物排放的动力装置。氢在燃料电池中通过电化学反应直接产生电并排出水，电动机带动风扇产生推力。与氢涡轮风扇发动机相比，氢燃料电池内部氢与氧电化学反应环境纯净，极少产生水蒸气凝结核，因此能够大大削弱尾迹云的形成，使飞行过程对气候的影响降低75%~90%（详见表1）。

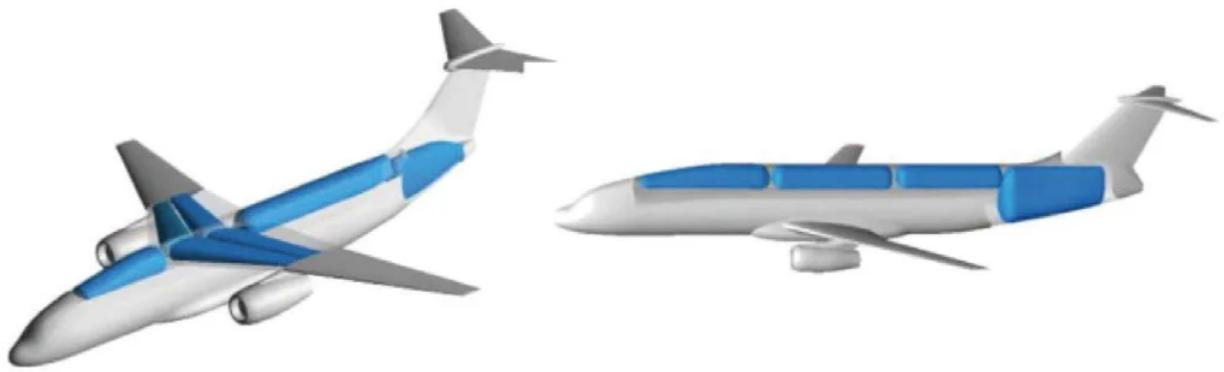
表1 氢涡轮风扇发动机和氢燃料电池动力系统对比

	氢涡轮风扇发动机	氢燃料电池动力系统
工作方式	使用氢燃料的涡扇发动机，通过风扇提供推力	使用氢燃料电池提供电力，通过电动风扇或者涵道风扇提供推力
效率	40%	45%~50%
环境影响	无一氧化碳、二氧化碳、硫化物和碳氢化合物排放；有水蒸气和氮氧化物排放	无一氧化碳、二氧化碳、硫化物、碳氢化合物和氮氧化物排放；有水蒸气排放
技术难点	现有航空涡轮机需改进或重新设计以适用氢燃料；提高飞机结构和安全性要求，满足液氢储存需求	开发高效、高功率密度、快速启动燃料电池；开发满足适航标准的电机、电子电力设备、电缆和其他电气元件；提高飞机结构和安全性要求，满足液氢储存需求
优势	零碳排放、少量污染物排放；可在传统航空涡轮风扇发动机基础上开展氢燃料适用性改进，形成氢燃料涡扇发动机；易于实现大功率	零碳排放、零污染物排放；动力系统更易与分布式电推进技术结合能量利用效率高
劣势	改进现役飞机结构设计以适应液氢燃料储存；排放水蒸气和氮氧化物；能量利用效率略低	对飞机结构进行重新设计以适应液态氢燃料储存和全新的氢燃料电池动力系统；排放水蒸气；功率密度低，目前还无法实现大功率

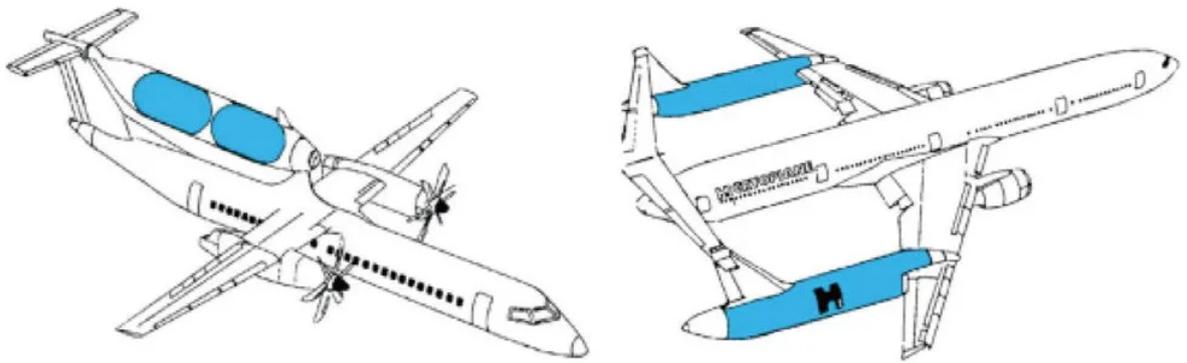
近年来，由于在材料和制造领域取得不断发展，氢燃料电池的能量密度相比于21世纪之初已获得了大幅提升，但氢燃料电池仍面临能量密度低（仅达航空涡扇发动机能量密度3.7kW/kg的一半左右）、使用寿命短和单体输出功率低等问题。未来需要通过采用新型电极材料、电池一体化结构设计，高效水、热管理和运行控制等方法，进一步提高电池功率密度、延长寿命（超过25000h）。同时，还需要通过提高电池工作温度和模块化设计，进一步扩大系统输出功率，满足中、大型客机动力需求。

飞机氢燃料储存技术

当前航空业已掌握的储存技术中，高压气体或低温液体储罐技术可以用于氢能飞机机载氢燃料的存贮。若以压缩气体形式储氢，将对飞机质量和体积要求提出巨大挑战。相比之下，液态氢储存具有较高的质量能量储存密度，成为了最有前途的技术途径之一。液态氢燃料需要以极低温度（低于 -253°C ）储存，同时为了减少液氢沸腾导致的损失，需要在储罐中维持 1.429atm 的恒定压强，这将导致液氢储罐结构和配套冷却系统异常复杂，进而大大降低整体系统的质量能量密度和安全性。相关研究显示，液氢储罐应采用球形或柱状，而传统机翼油箱不适宜储存液氢燃料。因此，对于中、短程客机而言，需要对现有机体结构进行调整或重新设计，以增加液氢储罐（如图3所示）。储罐大小因机身形状、尺寸以及飞行任务和航程长短而定。增加液氢储罐后，会导致机体尺寸增加或客舱空间减小，进而增加飞行阻力或飞行成本。对于载客量超过250人，飞行距离超过 10000km 的远程客机，由于机载液态氢储罐的附加质量已使传统客机结构无法满足设计要求，因此需要引入全新的、革命性的机体设计思路，如翼身融合设计、箱式机翼结构等，以达到提高飞机内部空间结构利用率的目的。



(a) 机体集成式



(b) 外挂式

航空动力 期刊

图3 中、短程氢能飞机上氢燃料布置方案

机场氢能基础设施技术

机场的氢能基础设施主要包含液氢燃料的运输、储存和液氢加注等设备。氢燃料与传统石化燃料有很大的不同，如何低成本实现氢燃料的运输和储存，将会直接影响到氢能飞机能否真正投入商业运营。相关研究表明，可通过现有天然气网络管路向机场输送氢气并在到达机场后进行液化处理，然而这需要对现有管路安全性进行全面评估，还需要考虑到氢气产地和机场之间长距离输运带来的附加成本和安全性问题。当然，也可以采用现场制氢的方式，通过使用机场附近的可再生能源为电解池供电来进行水解制氢，从而消除氢燃料长距离输运带来的成本和安全性问题。但这种方式由于产能有限，仅适用于为短程航班提供“绿色”氢燃料。

与传统石化燃料相比，液氢燃料具有温度低、易蒸发、易燃等特点，其加注过程复杂、耗时长且安全风险较高，大大增加了飞机在机场停靠加注燃料的时间，提高了飞机运营的成本。因此，应针对液氢燃料开发高效的加注技术和加注系统，如采用具有自动闭合功能的管路快速接头，确保氢燃料加注系统与液氢储罐之间实现安全、可靠的连接，在保证系统可操作性的同时增大液氢加注流量，提高机场和飞机的使用效率。

氢燃料生产和氢能飞机经济性

当前，全球每年生产7000万t氢，其中96%是通过有二氧化碳排放的“灰色”氢工艺，从石化燃料中提取获得，排放约8.3亿t的二氧化碳，其余4%的氢则通过电解获得，其中有100万t氢是使用可再生能源电解工艺获得的“绿色”氢。未来若要采用氢能完全替代传统石化燃料，则需要大幅增加“绿色”氢或是基于碳捕获与封存（carbon capture and storage, CCS）的“蓝色”氢的生产，这对于氢能生产技术和规模都是一个巨大挑战。比较乐观的是，2014—2019年期间，全球风能发电量增长了1倍，太阳能发电量增长3倍。国际能源机构（IEA）预测，在未来10年，可再生能源（尤其是太阳能和风能）产量将成倍快速增长，进而促进“绿色”氢电解槽的发展。预计到2030年，欧盟国家电解槽容量将达到40GW，这将带动世界其他航空业发达的主要国家和地区增加投入，提高“绿色”氢产量。伴随产量的增加，氢燃料的成本将会逐渐降低。尽管如此，到2040年，氢能飞机的短程飞行成本仍较传统航空石化燃料飞机要高约25%（如图4所示），其中9%来自燃料成本，其余13%来自飞机维护成本，3%来自液氢加注时间延长导致飞机使用效率下降带来的成本。预计到2050年，“绿色”氢使用成本将基本上与传统石化燃料持平，这将为氢能航空业降低成本和增强可持续发展能力奠定基础。

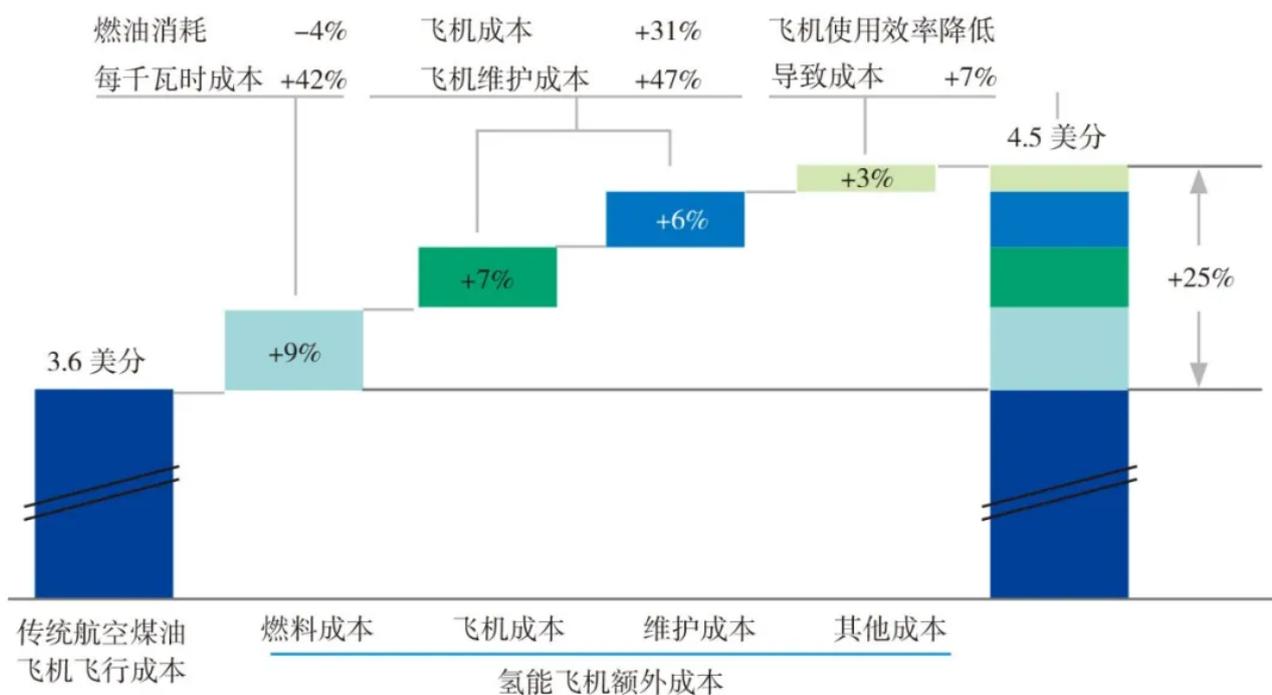


图4 2040年短程2000km、165座氢能客机飞行成本（每位乘客每千米飞行成本）

氢安全

自20世纪中叶开始，随着氢燃料在航天领域的广泛应用，人们对其安全性进行了深入研究，结果表明，相比于汽油、航空煤油等石化燃料，氢燃料的危险性并未明显增加（见表2）。相反，由于氢气密度低，开放空间中泄漏的氢气会迅速上升，从而使得泄漏引起的危险区域较小。此外，氢的燃烧速度快，产生的辐射热非常低，同时燃烧产物基本无毒。因此，在诸如热辐射、毒性等方面，氢燃料的安全性甚至要高于现役的航空煤油等石化燃料。尽管如此，现役石化燃料飞机在设计、制造和飞行操作的各个环节，已经形成了广泛且完整的安全标准和保障措施，从而能够保证飞行的安全性。氢能飞机由于机体结构、动力系统以及燃料储存方式均与现役石化燃料飞机存在显著差异，未来氢能飞机只有在达到同等或甚至更高的适航安全标准之后，才能够真正投入实际运营。

表2 氢燃料与航空煤油安全性对比（●代表该安全性评价指标更好）

对比项目	碰撞爆炸危险	热辐射危险	冻伤危险	泄漏危险	着火温度高低	非明火燃烧危险	毒性危险
氢燃料	●	●	-	●	-	-	●
航空煤油	-	-	●	-	●	●	-

结束语

《2019年国务院政府工作报告》中首次写入了氢能源，自此氢能源被纳入了我国能源体系。预计到2050年，氢能在我国能源体系中的占比约为10%，氢能产业链中制氢、储运、加氢站、氢燃料电池应用等各个环节将会获得大幅发展，并能够满足商业化需求。当前，在国家自上而下政策的大力扶持下，氢能产业链已初具雏形。为了促进我国氢能航空技术的快速发展，一方面需要建立多学科、多领域交叉的战略研究平台，依托我国目前较好的氢能汽车技术基础，形成跨界融合发展模式，提出长远规划战略和超前概念；另一方面，结合我国科研体制，推进以氢能源为代表的研究机构与航空为代表的工业部门及高校之间的产学研合作，以产生协同效应，促进氢能航空技术不断创新和发展。