DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.019

氢能飞机研制进展及产业化前景分析

宋薇薇[1,2]，杨凤田[1]，项松[1*]，韩成业[1]，康桂文[1]，樊馨月[1]

（1. 北京锐翔氢能飞行器科技研究院有限公司，北京 102433；2. 沈阳航空航天大学民用航空学院，沈阳 110136）

摘要：在航空碳减排引发各国广泛关注、航空运输业低碳化发展渐成趋势的背景下，突出氢能“高效、清洁、可持续”，可作为未来航空器最佳能源载体的特征，拓展氢能飞机研制与应用，具有重大的价值和广阔的前景。本文结合航空领域“双碳”目标研判了氢能飞机的发展背景，系统梳理了国外氢能飞机的前沿规划、我国氢能飞机总体研究及飞行试验的最新进展；详细分析了氢能飞机研制与应用关键技术体系，涵盖氢能飞机总体设计、液态储氢罐、氢燃料电池、氢燃料涡轮发动机、氢燃料航空内燃机、氢能飞机安全与适航技术、氢燃料加注基础设施。着眼未来氢能飞机的产业化发展需求，针对通勤/短氢能飞机构建了相应的总拥有成本（TCO）模型，测算结果表明2045年前后通勤/短程氢能飞机将与纯电动飞机、燃油飞机的TCO基本持平。进一步提出了采取多技术路线同步发展、坚持动力先行、科学有序地开展研发、推进适航标准体系建设等发展建议，以期为航空科技革新、航空运输业高质量发展等研究提供参考。

关键词：氢能航空；氢能飞机；技术体系；总拥有成本；产业化

中图分类号：V221　　**文献标识码：**A

Development Progress and Industrialization Prospect of Hydrogen-Powered Aircraft

Song Weiwei[1,2], Yang Fengtian[1], Xiang Song[1*], Han Chengye[1], Kang Guiwen[1], Fan Xinyue[1]

(1. Beijing Ruixiang Hydrogen Aircraft Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102433, China;
2. Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The hydrogen energy serves as the best energy source for future aircraft owing to its efficiency, cleanness, and sustainability. In the context of widespread attention paid to aviation carbon reduction and the trend of low-carbon development of the aviation transportation industry, it is of great value to promote the development and application of hydrogen-powered aircraft. This study analyzes the development background of hydrogen-powered aircraft considering the carbon peaking and carbon neutrality goals for the aviation industry, and reviews the cutting-edge planning of hydrogen-powered aircraft in other countries as well as the latest progress in overall research and flight testing of hydrogen-powered aircraft in China. A detailed analysis is conducted on the key technology system for the development and application of hydrogen-powered aircraft, covering the overall design, liquid hydrogen storage tanks, hydrogen fuel cells, hydrogen-fueled turbine engines, hydrogen-fueled aviation internal combustion engines, safety and airworthiness technologies, and hydrogen refueling infrastructure. Focusing on the industrial application needs of future hydrogen-powered aircraft, corresponding total cost of ownership (TCO) models are constructed for commuting/short-range hydrogen-powered aircraft. The calculation results indicate that the TCO of commuting/short-range hydrogen-powered aircraft will be on par with that of pure electric aircraft and fuel-powered aircraft around 2045. Further suggestions are proposed, including adhering to the synchronous

收稿日期：2023-08-16；**修回日期：**2023-10-05

通讯作者：*项松，北京锐翔氢能飞行器科技研究院有限公司教授，研究方向为氢能飞机研究和飞行器设计；E-mail: 41002329@qq.com

资助项目：中国工程院咨询项目“氢能航空创新发展战略研究”(2023-XY-03)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

development of multiple technological routes, prioritizing the development of power systems, conducting scientific and orderly research and development, and promoting the construction of airworthiness standards systems, thus to provide a basic reference for research on aviation technology innovation and high-quality development of the aviation transportation industry.
Keywords: hydrogen-powered aviation; hydrogen-powered aircraft; technology system; total cost of ownership; industrialization

一、前言

当前，航空产业依然保持迅猛发展态势，航空器的数量和飞行小时数也在逐年增加；但产生的CO_2排放量约占全球总量的3%，引起了各国广泛关注。氢是宇宙中最丰富的元素[1]，氢能源是未来实现零碳排放、可持续发展的战略能源[2]，以氢燃料作为能源的氢能飞机是推动实现航空领域碳达峰、碳中和（“双碳”）目标的重要形式之一。

氢能飞机研究具有较长的历史，早在1991年即有专著对发展史、应用潜力、基础设施需求、技术要点、飞行验证程序等进行了梳理[3]。研究指出，将氢用于航空燃气涡轮发动机，需要重新设计燃烧室、燃料控制系统、液氢气化部件[4]；氢燃料消耗率较煤油降低超过60%，氢燃料发动机的涡轮进口温度降低约40 K，发动机结构的改动程度不大[5]；氢作为燃料增加了发动机的净推力输出、降低了燃料消耗率，应用燃料散热器能够有效提高发动机性能[6]；氢燃料电池在航空领域的应用潜力较大，既可作为轻型飞机的能源，也可用于辅助动力装置、地面支持设备[7]；使用氢能可降低机翼面积和翼展的设计值，使远程运输飞机的能耗降低约11%[8]。此外，以ATR72飞机为对象进行了氢燃料改型的方案验证[9]，微混合燃烧室能够显著降低氮氧化物的排放水平[10]。

随着全球范围内对氢能飞机关注度的持续提升，我国氢能航空领域兴起了新一轮研究热潮，相关工作集中在氢能航空和氢能飞机发展态势[11~14]、低碳减排[15]、商业化运行探讨[16~19]等方面。氢能未来将以替代燃油的方式率先在交通运输系统中获得规模化应用，航空业将是代表性领域，但以氢能为动力源实现航空领域绿色发展仍面临诸多挑战[20]。一方面，氢能技术产业链长、难点多，现有技术成果的经济性还不能满足氢能航空的商业化需求；另一方面，针对氢能飞机总拥有成本（TCO）的研究稀缺，发展氢能飞机涉及的燃料费用、维修费用、加氢/充电设施建设费用等运营成本不甚清晰。

得益于“双碳”目标的推动，氢能作为一种清洁能源，将在能源供给侧和消费侧助力深度脱碳，促进航空业变革转型。本文结合氢能飞机发展背景，梳理国内外研制进展，提炼关键技术体系，构建TCO模型并分析产业化前景，进一步提出我国氢能飞机发展建议，以期为氢能飞机技术探索、应用布局、产业发展等研究提供基础参考。

二、氢能飞机的发展背景及国内外研制进展

（一）氢能飞机将为航空领域实现“双碳”目标提供重要支撑

地球是人类共同且唯一的家园。随着工业化程度的提升，煤炭、石油、天然气等化石燃料大量使用并排放出以CO_2为主的温室气体；温室气体包裹着地球，持续捕获来自太阳辐射的能量，导致全球变暖和气候变化，破坏了原有的自然界平衡。为了减缓全球变暖趋势，《巴黎协定》（2015年）制定了长期目标，将全球平均气温较工业化时期上升幅度控制在2 ℃以内（努力追求限制在1.5 ℃以内）[21]。在此背景下，有超过20个国家和地区宣布了碳中和目标，如美国和欧盟设定2050年实现“碳中和”[22]。

航空领域碳减排同样受到国际组织和各国政府的高度重视[23]。国际民航组织（ICAO）提出的国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）（2016年）是首个全球性的行业减排市场机制[24]，要求全球航空业2035年的CO_2排放量不超过2020年的水平（即碳达峰），2050年的CO_2排放量应达到2005年水平的50%以下（即碳中和）[25,26]。我国“双碳”战略目标的正式提出，为民航运输业的绿色低碳发展指明了发展方向，需要采取一系列的技术与管理变革。

对于航空运输业而言，氢能飞机的研制和应用将是重要的转折点，因为使用氢能源能够显著降低航空活动对气候的影响。氢能飞机作为新兴事物，需要动力系统、燃料存储系统、地面基础设施等的适应性改进，将影响飞机的运营成本。然而，氢能

飞机将会带来航空技术及应用的颠覆性变化，有望创造氢能航空产业并形成丰厚的市场回报，起到加速“双碳”进程的积极作用。可以认为，氢能飞机是提升我国航空业技术基础的重要方向。加快发展氢能飞机，对于超前布局先导产业、抢占新能源航空技术制高点、发挥航空制造综合优势具有重要意义。2023年3月，我国首款氢燃料内燃机飞机验证机完成首飞，标志着我国航空领域在氢能应用方面迈出坚实步伐。

（二）国外氢能飞机的研制进展

氢能航空的先驱者德国科学家Von Ohain早在1937年即将氢气用作燃气涡轮发动机的替代燃料（实现了有效推力）[27]。20世纪50年代，美国普惠公司研究了航空发动机使用液氢燃料的可行性，对J-57、J-47、J-65B-3、J71-A-11等航空发动机进行了氢燃料喷射改造，完成了相应地面测试；1956年，B-57轰炸机换装了1台J-65氢燃料涡喷发动机并进行了飞行测试（高度约为15 km、速度为Ma0.75）[28]。1988年，苏联将图-154飞机中的1台发动机换用氢气作为燃料，以研究氢能推进的技术可行性[29]。

2000年，受欧盟委员会资助，空中客车公司牵头、34家航空企业及研究机构参与开展了“低温航线”项目，系统分析了以液氢为燃料的飞机方案。2005年，美国航空环境公司制造并测试了世界首架液氢动力无人机。日本发布了《氢基本战略》（2017年）、《氢能利用进度表》（2019年），鼓励相关企业发展氢能飞机。2020年，欧盟委员会支持开展“洁净天空计划”项目，计划2028年完成氢动力通勤飞机认证和支线飞机试飞、2035年完成中程氢动力飞机开发、2050年完成中远程氢动力飞机开发[30]。美国能源部发布《氢能计划发展规划》（2020年），将氢燃料电池、氢涡轮机、氢气“制储输用”技术作为未来的重要研发方向。

当前，航空强国的相关企业都在积极开展氢能飞机及动力系统研究，主流的动力方案有氢燃料发动机、氢燃料电池、氢燃料电池混合电推进系统等[14]，加快了氢能飞机研制进程。① ZeroAvia公司主推氢–电航空解决方案，近期发展目标是航程约800 km的10~20座飞机，用于客运、快递、农业等；2020年9月，改装的6座燃料电池飞机首飞，由2台电机驱动可变距螺旋桨，能源包括16.25 kW·h的锂电池、100 kW的氢燃料电池；2023年1月，改装的19座燃料电池飞机完成10 min试飞，后续将采用2台600 kW氢–电动力系统并携带100 kg气态氢，拟于2025年开始商业飞行。② 空中客车公司正在论证涡桨氢混合动力、涡扇氢混合动力、翼身融合混合动力等构型的氢能飞机方案，拟于2035年前研制零排放商用飞机；明确新一代单通道客机需求，牵引发展更高效率、清洁排放的航空动力系统[31]。③ 美国Universal Hydrogen公司完成了50座飞机的氢燃料电池验证机改装并于2023年3月首飞。

（三）我国氢能飞机的研制进展

与国际上氢能飞机发展趋势同步，我国氢能飞机研发工作正在展开，形成了辽宁通用航空研究院（氢燃料电池与锂电池混合动力飞机技术攻关）、北京航空航天大学（燃油涡桨发动机PT6的氢燃料改型论证）、中国航天科技集团有限公司第六研究院第一〇一研究所（氢制取/液氢生产和存储、轻质高效液氢燃料储装置）、哈尔滨工业大学和佛吉亚斯林达安全科技（沈阳）有限公司（高压气态储氢）等优势研究机构，综合技术水平接近国际先进。

2010年，沈阳航空航天大学组建了通用航空重点实验室，开始试制氢燃料电池无人机。2012年，“雷鸟”氢燃料电池无人机完成首飞，成为我国首款氢燃料电池无人机（见图1）。2017年，沈阳航空航天大学、中国科学院大连化学物理研究所联合研制了我国首架2座氢燃料电池试验机并完成试飞（见图2）。2023年，沈阳航空航天大学研制的4座氢燃料内燃机飞机（搭载了2 L氢燃料内燃机）完成首飞，成为我国首架以氢内燃机为动力的通航飞机；飞机采用上单翼、低平尾、前置螺旋桨、前三点式不可收放起落架的总体布局，翼展为13.5 m，机长为8.2 m，巡航速度为180 km/h，留空时间>1 h；携带的高压气态储氢为4.5 kg，氢内燃机最大热效率>43%、综合热效率>40%（见图3）。

2019年，中国商飞北京民用飞机技术研究中心研制的“灵雀H”燃料电池验证机完成首飞，标志着民机主制造商在新能源飞机探索方面的实质性进展。验证机采用氢燃料电混合动力，旨在验证以氢燃料电池为主、锂电池为辅的混合动力技术在飞机上应用的适当性（见图4）。

2023年，浙江氢航科技有限公司研制的氢动力

图1 “雷鸟”氢燃料电池无人机

图2 2座氢燃料电池试验机

图3 4座氢内燃机飞机验证机

图4 “灵雀H”燃料电池验证机

多旋翼无人机通过了中国电力科学研究院有限公司的检测认证，主要性能指标均符合电力巡检的使用要求。

三、氢能飞机关键技术分析

（一）氢能飞机总体设计

氢能飞机与传统燃油飞机的主要区别是：① 传统飞机多采用机翼油箱以充分利用机翼空间并降低翼载荷，但氢能飞机氢燃料的储氢装置（高压气态或液态）是压力容器或绝热容器，加之氢密度低、储氢装置占用体积大，无法采用机翼油箱布局；② 液氢必须气化后才能用于航空发动机，而发动机自身、压气机引气及滑油有着冷却需求，需要进行有效的能量管理。因此，热管理系统、氢储装置需要与飞机结构及功能进行一体化设计，主要有改进型、创新型两种技术路径：前者简单调整机身以容纳储氢装置，利于氢能飞机尽快投入使用；后者采用全新构型，需要进行大量的数值分析和风洞试验，以实现优化的飞机总体方案与结构布局。

（二）液态储氢罐

液态储氢罐的绝热结构应具有轻质结构、低传热特性，才能适应长时飞行中的增压要求，相应绝热系统方案分为主动和被动两种。大气成分中的所有气体都会在液氢温度下冻结，应抽尽绝热系统中的空气。主动系统需要利用惰性气体或者泵装置以保持真空状态。

对于整体式、非整体式液态储氢罐设计，均采用一体式结构以尽量减少潜在的泄漏源。液态储氢罐的主体结构设计主要考虑绝热方式、支撑结构、安全附件等因素，制造工艺主要涉及焊接、探伤、套管等；相应试验主要从气密、耐压、低温冲击等角度考虑，以确保液态储氢罐从设计、制造到出厂检验的全过程安全。

（三）氢燃料电池

氢燃料电池具有高效率、高比能的特点，是氢能通用飞机或氢能通勤飞机的良好能源形式。相应系统主要包括：燃料电池堆、氢气供应系统、空气供应系统、水热管理系统、电源管理控制系统。高性能氢燃料电池研发，主要涉及高性能催化剂、增强复合膜、高性能低铂膜电极、耐蚀薄层金属双极板、高比功率电堆、耐低温系统集成、质子交换膜高效电解水制氢等技术环节。

（四）氢燃料涡轮发动机

1. 氢燃料增压泵研发

氢燃料增压泵应具有长寿命、高可靠、可维护、高效率特点，一般设计为可更换单元。增压泵工作温度极低，其轴承需适应低温环境。液氢被增压到3.172×10^5 Pa，后通过燃料管（带阀门）输送到高压泵；即使在最小流量条件下，液氢也应获得足够的升压。考虑到液氢的润滑性很差，具有较低润滑要求的离心泵是最佳的候选方案，工作范围较宽且失速特性良好。增压泵应基于燃料控制能力进行设计，多采用三级变速方式，因而直流电机驱动是优选。增压泵各个零件的平均故障间隔时间>2500 h，大修间隔时间>8000 飞行小时，存放期>5年，具有立即可用的能力。

2. 热交换器研发

液氢发动机的热交换器一般安装在涡轮后支撑支柱来实现热交换，也可放置在喷管的内表面，起到的作用有：进入燃烧室之前的液氢燃料气化、发动机滑油冷却、压气机引气冷却、涡轮叶片冷却。液氢燃料由液氢增压泵加压后送入热交换器，液氢在热交换器中气化，温度和压力迅速升高，故热交换器主要控制温度、压力、流量等参数。

3. 氢燃料燃烧室设计

氢的燃料特性不同于传统燃油，如直接使用传统燃烧室，由于燃料喷射点的数量有限导致氢燃料和空气的混合往往不充分；大规模的氢扩散火焰形成高的局部温度，造成NO_x快速生成，也将阻碍氢气与空气的进一步混合。为此，氢燃料的燃烧室需要重新设计。减少NO_x排放的主要方式有：降低火焰温度、消除反应区的热点、减少火焰区的持续时间与暴露时间。通常采用贫氢预混燃烧室设计方案，以提高燃烧室温度均匀性、减少NO_x的生成。为了避免预混可能的早燃烧、回火危险而导致发动机结构损坏以及可靠性降低，基于微型扩散燃烧理论、具有微混合燃烧特征的非预混合方案也受到关注。

4. 氢脆

氢脆主要是由电镀工艺中携带的金属出现“氢化”现象而导致的，对于铁、镍、钛、钴及其合金能够显著发生，而对于铜、铝、不锈钢不发生。氢脆作为一种通用现象，可能显著降低氢燃料涡轮发动机的的工作寿命。在发动机结构中，需要减少金属中渗氢的数量，采用低氢扩散性、低氢溶解度的镀涂层，在镀前去应力、镀后去氢，以防止氢脆的发生。

（五）氢燃料航空内燃机

1. 燃烧系统高动力及异常燃烧控制

氢气作为燃料燃烧时，具有火焰传播速度快、点火能量低的特点，使得实际做功循环更接近等容循环。等容燃烧使得升功率过高、燃烧“粗暴”且不可控，伴生了振动噪声、热负荷偏高等问题。当发动机需要达到更高的升功率时，通常采用较浓的混合气，则更容易出现回火、早燃、爆震等异常燃烧现象。应针对燃烧系统高动力及异常燃烧控制等，尽快开展深入研究。

2.缸盖结构设计

在内燃机缸内的燃烧速度方面，氢气是汽油的7~8倍。氢气缸内燃烧的最大爆发压力进一步升高且压力升高率剧增。氢燃料内燃机缸盖在交变机械载荷与高热负荷耦合作用下发生变形，面临疲劳寿命问题，给缸盖的强度、冷却、可靠性设计带来挑战。应针对高爆压缸盖结构设计，开展理论、技术与应用研究。

3. 电子控制系统（ECU）开发

ECU控制系统是氢燃料内燃机上各类控制策略的载体，在样机开发到工程应用的过程中都是动力系统的核心零部件。针对氢气的传输和燃烧特点，开发匹配的控制策略，配置可靠的执行机构，支持各类工况下氢燃料内燃机的稳定与高效运行。自主开发氢燃料内燃机ECU较为迫切。

4. 低压大流量喷嘴设计及样件试制技术

动力系统是整机的核心，而喷射装置是动力系统的核心。对于氢燃料内燃机而言，喷射装置能够影响喷氢的开启及结束时刻，约束缸内混合气的质量，从而涉及各缸、各个循环之间的一致性，氢燃料内燃机的动力性、经济性和可靠性。低压大流量喷嘴设计，适应压力较低工况，可更加充分地使用储氢罐中的氢气。需要深入开展氢燃料内燃机的喷嘴设计及试制，实现氢燃料内燃机高功率、高效率、高可靠性等综合性能。

（六）氢能飞机安全与适航技术

氢燃料以及储氢装置与传统的燃油特性截然不

同，导致氢能飞机的安全与适航面临新的挑战，涉及安全风险识别、安全设计要求、安全性验证、安全性评估等方面。氢燃料的飞机应用可能面临安全风险，需要识别氢能飞机的典型失效风险模式，建立氢能飞机安全性规章要求。发展氢燃料发动机安全性验证技术，支持氢燃料发动机安全工作边界及安全性判据构建。发展氢能飞机系统安全性评估技术，将氢能飞机的安全水平提升至工程应用可接受层次。建立氢燃料发动机、氢能飞机的适航标准与符合性验证方法。

（七）氢燃料加注基础设施

氢能飞机的规模化应用离不开氢燃料基础设施，主要包括氢能的生产、储存、运输、加注等基础设施。其中，加注基础设施是释放氢能航空应用潜力的关键因素，需要解决在尽量短的时间内加注氢燃料、飞机的停场时间、加注过程安全性及经济性等问题。在近期，重点提出新的加注策略并形成配套技术，制定专门的氢能加注安全措施，审查与传统燃油加注并行作业的潜在影响；在中长期，突破机场安装大规模液氢供应及液化装置相关的成套技术[32]。

四、基于 TCO 分析的氢能飞机产业化前景

氢能飞机因其绿色环保、能量密度高等特性而具有良好的发展前景，但作为新型飞机，在产业化之前深入探讨商用可行性极为必要。为此，本研究建立了氢能飞机、纯电动飞机、燃油飞机的 TCO 模型，量化并对比各类飞机的成本，据此测算氢能飞机的经济效益。采用了“自下而上”、极细颗粒度的建模方法，细化至主要组件的成本并构建飞机的总成本[32]；还考虑了燃料成本、维修费用，加氢/充电设施建设费用等运营成本。

（一）TCO 模型及分析框架

TCO 模型主要用于从飞机运营角度开展的技术经济分析，以便明确当前和未来飞机应用中各类组件的成本构成，支持飞机制造和运营决策。在掌握成本结构、关键部件的成本变动后，可将 TCO 模型应用到其他飞机的商业模型中。TCO 模型的分析框架采用了以下两点假设，以便后续应用。① 计算时不考虑各地区的补贴情况，如飞机购买、基础设施建设、燃料供应等方面的补贴，仅在特定的案例分析中计入补贴。② 整机生产商的毛利率恒定，但为氢能飞机、纯电动飞机增加了因缺乏规模效益而带来的额外成本。从整机制造及销售的角度看，氢能飞机、电动飞机因生产数量有限、零部件缺乏规模效应，将造成整机制造成本显著高于燃油飞机；将燃油飞机的制造成本作为比较基准，假设未来 10 年内氢能飞机上动力系统以外的零部件将实现完全规模效应。

TCO 包括购买成本、运营成本，其中的购买成本又细分为毛利、零部件成本加成、动力机、储能组、其他零部件。对于氢能飞机、纯电动飞机，额外计入因缺乏规模效益而带来的成本增量。运营成本由燃料费用、基础设施成本、维修费用、零部件替换成本和其他成本构成。

（二）我国氢能飞机 TCO 分析——以通勤/短程飞机为例

针对通勤/短程氢能飞机，本文建立了 TCO 模型分析框架（见图 5）。应用建立的 TCO 模型，测算了我国当前通勤/短程飞机的成本情况（见图 6）。相比纯电动飞机、燃油飞机，氢能飞机的 TCO 分别高出 47.6%、92.4%，这主要是由氢能飞机仍处研制阶段、发展条件尚不成熟导致的。当前，氢气价格依然较高，燃料成本在氢能飞机的运营成本中占比偏高；电费相对较低，燃料成本在纯电动飞机的运营成本中占比较低。和氢能飞机相比，纯电动飞机的维修费用更低，这是因为电机驱动的飞机，日常维修项目更少、零部件服役时间更长，显著降低了相关成本。此外，氢能飞机的氢罐和锂电池系统替换、纯电动飞机的电池替换，分别带来了额外的运营成本。

随着氢气存储和运输技术的提高、氢气生产规模的扩大化，我国未来氢气价格将持续快速下降，2033 年氢气价格将下降至现在的 50% 以下（见图 7）。以此为前提，测算了 2050 年前我国通勤/短程飞机的成本情况（见图 8）。氢能飞机的先期 TCO 更高，但随着氢气价格的持续下降而快速下降；2045 年前后，通勤/短程氢能飞机与纯电动飞机、燃油飞机的 TCO 将基本持平。也要注意到，实际运营中可能存在更为复杂的情况，很多无法在当前 TCO 模型中被量化的因素将对未来燃油飞机的使用

		氢能飞机	纯电动飞机	燃油飞机
购买成本	毛利	在制造成本基础上的增量成本	在制造成本基础上的增量成本	在制造成本基础上的增量成本
	零部件成本加成	由于缺乏规模效益，氢动力系统部件和燃油车相比多出的额外成本加成	由于缺乏规模效益，非动力系统部件和燃油车相比多出的额外成本加成	无，已实现完全规模效益
	动力机	锂电池、电动机、氢内燃、氢涡桨、氢涡轮及相关组件	电动机及相关组件	内燃机
	储能组	氢罐、锂电池系统	电池、电池管理系统	油箱
	其他零部件	如螺旋桨、起落架、仪表系统		
运营成本	燃料费用	氢气价格×百千米耗气量	电价×百千米耗电量	油价×百千米耗电量
	基础设施	加氢站	充电站及相关设施	假设加油站成本已经体现在油价中
	维修费用	日常维护成本	日常维护成本	日常维护成本
	零部件替换	氢罐系统、锂电池替换成本	电池替换成本	内燃机替换成本
	其他	保险及其他费用		

图5　通勤/短程氢能飞机TCO模型分析框架

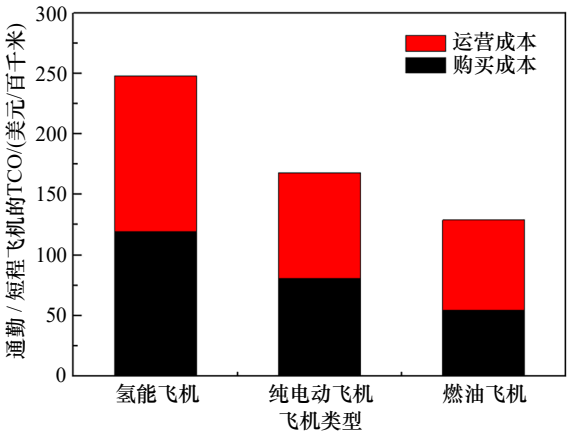

图6　我国当前的通勤/短程飞机的成本情况

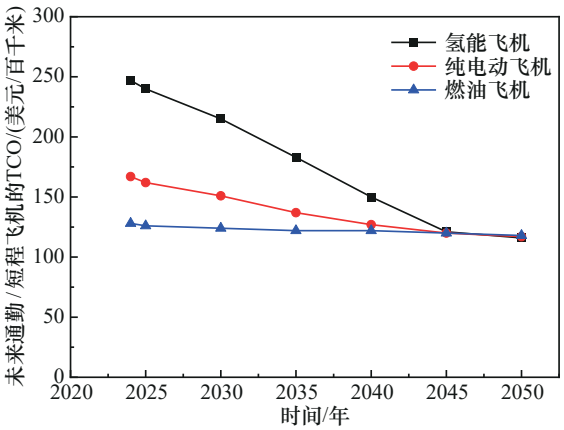

图8　我国未来的通勤/短程飞机的成本情况

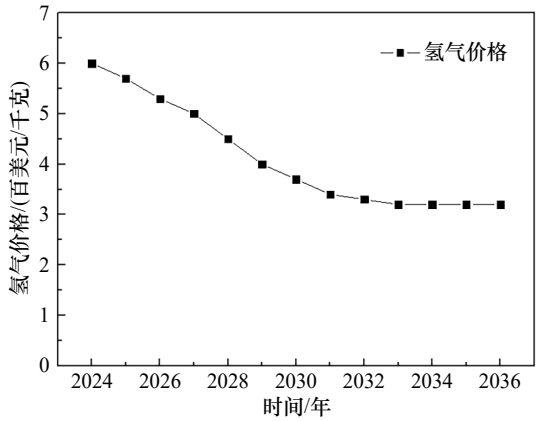

图7　我国氢气价格预测

构成较大影响：针对燃油飞机不断收紧的排放标准将驱动燃油发动机、碳排放水平等的继续提升；政策限制可能影响飞机的采购选型，航空碳中和目标将约束燃油飞机的应用规模。

（三）我国氢能飞机产业化前景

氢能飞机具有绿色、环保、低噪音、零碳排放等突出优点，产业化前景明确且广阔。民用方面主要有初级飞行员培训、私人交通工具、旅游观光、航空摄影、航空测绘、森林消防、体育运动、飞播

造林、医疗救护、电缆巡护等；军用方面主要有海上侦察、巡逻警戒、搜索反潜等。研制氢能飞机，也将攻克总体设计、高压气态储氢、集成测试、适航符合性验证等关键技术，从而推动形成我国氢能飞机的适航标准。随着我国低空空域的逐步开放，氢能飞机将具有广阔的市场空间。

论证提出了我国氢能飞机产业化应用的两类典型场景。① 西部地区地广人稀、居住点分散，交通设施完善度不高。如果采用传统的地面交通方式，道路和加油站基础设施投入大、利用率低，尤其是管道和道路运送燃油到各个加油站的综合成本极高。然而，西部地区拥有丰富的风/光资源，如能充分发挥区域内新能源发电的优势开展风/光联合制氢，可为氢能飞机的规模化应用提供充足的燃料供应；积极发展以氢能飞机为基础的航空运输业，将能以经济、绿色的方式解决西部地区交通运输问题。② 南海海域岛屿众多且多数岛屿远离本土，保障需求突出而实际情况复杂，采用传统船只进行补给和巡逻，反应慢、时效差，不利于有效管控。依托当前海水直接电解技术的发展，利用风、光、潮汐能发电并开展电解水制氢，形成稳定的当地氢能供应，特别适合采用氢能飞机进行空中巡视、岛礁间运输补给，对维护海洋权益和国土安全具有重要意义。

五、结语

氢燃料是实现绿色低碳的重要能源类型，氢能飞机将带来航空领域的颠覆性技术变革。我国氢能飞机的发展，应立足自身需求和国情实际，以追求系统高性能为目标，尽快攻克飞行器设计、高压储氢、氢燃料电池、氢燃料涡轮发动机、氢燃料航空内燃机、飞行器适航验证等关键技术；通过 TCO 分析，辨明氢能飞机系统与氢燃料基础设施在全面成熟之前的重点突破方向，促成氢能飞机及配套产业的商业化运营，从而探索出氢能航空经济运营体系。建议择机成立创新机制的国家级氢能航空研究院，发挥战略科技力量的关键作用，抢占氢能航空的制高点。为此，提出我国氢能飞机相关发展建议。

一是采取多技术路线同步发展。在通用航空领域，可以氢内燃机、氢涡桨发动机、氢燃料电池为重点发展方向，多路线并举推动氢能源通航飞机发展。在商用航空领域，以氢涡轮机（以涡轮风扇发动机为主）、液氢燃料为重点发展方向，推动氢能源商用飞机研制与规模化应用。

二是坚持动力先行。动力系统是将氢能源转化为氢能飞机驱动力的核心关键装置，直接决定了氢能飞机的总体飞行性能与综合应用成本。应逐步改变国内相关研究分散的格局，适时整合优势科研力量，协同而专向地开展氢能源航空动力研发。

三是科学有序地开展氢能飞机研发。秉持从小到大、由简到繁的原则，按照先支线飞机、后干线飞机的顺序，具体展开氢能飞机总体设计与试制。采取理论研究 – 技术探索 – 攻关与集成验证 – 型号应用的流程，突出重点、以点带面、循序渐进地开展关键技术攻关、验证机验证、型号研发、示范应用、市场化推广。

四是同步推进适航标准体系建设。结合各类氢能飞机的研制进度，及时开展适航标准与符合性验证方法、特殊风险评估、系统安全性分析等研究，固化技术成果以支持规模化应用需求，增强氢能航空产业可持续发展能力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 16, 2023; **Revised date:** October 5, 2023

Corresponding author: Xiang Song is a professor from Beijing Ruixiang Hydrogen Aircraft Technology Research Institute Co., Ltd. His major research fields include hydrogen aircraft research, aircraft design. E-mail: 41002329@qq.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Innovative Development of Hydrogen Energy Aviation” (2023-XY-03)

参考文献

[1] Khandelwal B, Sekaran P, Karakurt A, et al. A review of hydrogen as a fuel for future air transport [C]. Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012.

[2] 董帼雄. 氢能飞机如何从图纸变为现实 [J]. 大飞机, 2021 (9): 50–53.
Dong G X. How hydrogen powered aircraft transforms from drawings to reality [J]. Jetliner, 2021 (9): 50–53.

[3] Brewer G D. Hydrogen aircraft technology [M]. New York: CRC Press, 1991.

[4] Haglind F, Singh R. Design of aero gas turbines using hydrogen [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128 (4): 754–764.

[5] Corchero G, Montanes J L. An approach to the use of hydrogen for commercial aircraft engines [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2005, 219(1): 35–44.

[6] Boggia S, Jackson A. Some unconventional aero gas turbines using hydrogen fuel [C]. Amsterdam: Proceedings of ASME TURBO EXPO, 2002.

[7] Baroutaji A, Wilberforce T, Ramadan M, et al. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 106: 31–40.

[8] Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(34): 14824–14831.

[9] Prewitz M, Bardenhagen A, Beck R. Hydrogen as the fuel of the future in aircrafts—Challenges and opportunities [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(46): 25378–25385.

[10] Murthy P, Khandelwal B, Sethi V, et al. Hydrogen as a fuel for gas turbine engines with novel micromix type combustors [C]. San Diego: 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011.

[11] 曹冠杰, 王业辉, 孙小金. 氢能航空发展现状分析 [J]. 航空动力, 2022 (2): 29–33.
Cao G J, Wang Y H, Sun X J. Development status of hydrogen in aviation [J]. Aerospace Power, 2022 (2): 29–33.

[12] 韩玉琪, 王则皓, 谭米. 2022 航空氢动力研发进展 [J]. 航空动力, 2023 (2): 13–16.
Han Y Q, Wang Z H, Tan M. Development progress of hydrogen powered aviation in 2022 [J]. Aerospace Power, 2023 (2): 13–16.

[13] 王翔宇. 氢动力飞行发展展望 [J]. 航空动力, 2021 (1): 24–28.
Wang X Y. Outlook of hydrogen powered flight [J]. Aerospace Power, 2021 (1): 24–28.

[14] 赖耀胜, 李龙. 氢能飞机发展现状分析 [J]. 航空动力, 2021 (6): 37–40.
Lai Y S, Li L. Hydrogen powered aircraft [J]. Aerospace Power, 2021 (6): 37–40.

[15] 戢时雨, 刘建国, 朱跃中. “双碳”目标下中国民航用能低碳发展路径探讨 [J]. 国际石油经济, 2022, 30(4): 31–39.
Ji S Y, Liu J G, Zhu Y Z. Exploring the low-carbon development path of China’s civil aviation energy use in the context of “dual carbon” goals [J]. International Petroleum Economy, 2022, 30(4): 31–39.

[16] 蔡立英. 氢动力飞机载客起飞指日可待 [J]. 世界科学, 2021 (1): 16–18.
Cai L Y. The takeoff of hydrogen powered aircraft carrying passengers is just around the corner [J]. World Science, 2021 (1): 16–18.

[17] 任治潞. 氢能飞机会否成为航空业的新蓝海 [J]. 大飞机, 2022 (8): 45–48.
Ren Z L. Will hydrogen powered aircraft become a new blue ocean for the aviation industry [J]. Jetliner, 2022 (8): 45–48.

[18] 罗彧. 氢能飞机蓄势待发 [J]. 航空动力, 2022 (2): 34–38.
Luo Y. Hydrogen aircraft is ready to fly [J]. Aerospace Power, 2022 (2): 34–38.

[19] 张燕, 李小群, 李彬. 氢能飞机的商业化趋势与启示 [J]. 空运商务, 2022 (8): 22–26.
Zhang Y, Li X Q, Li B. The commercialization trend and inspiration of hydrogen powered aircraft [J]. Air Transport & Business, 2022 (8): 22–26.

[20] 孙敏. 氢能飞机离我们还有多远 [J]. 大飞机, 2020 (9): 45–49.
Sun M. How far is the hydrogen powered plane from us [J]. Jetliner, 2020 (9): 45–49.

[21] 韩玉琪, 袁善虎, 王飒. “碳中和”目标牵引下的航空动力发展分析 [J]. 航空动力, 2021 (6): 28–30.
Han Y Q, Yuan S H, Wang S. Analysis to the development of aero engine to achieve carbon neutrality [J]. Aerospace Power, 2021 (6): 28–30.

[22] 赵姝晗. 法国航空混合电推进系统现状 [J]. 中国科技信息, 2022 (11): 38–39.
Zhao S H. The current status of the hybrid electric propulsion system in air France [J]. China Science and Technology Information, 2022 (11): 38–39.

[23] 郭汀汀, 李华杰. CORSIA 机制和欧盟航空业碳减排政策对生物航油产业发展的影响研究 [J]. 中外能源, 2023, 28(8): 8–14.
Guo T T, Li H J. Research on impact of CORSIA mechanism and EU aviation industry carbon reduction policies on development of SAF industry [J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(8): 8–14.

[24] Bauen A, Bitossi N, German L, et al. Sustainable aviation fuels Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation [J]. Johnson Matthey Technology Review, 2020, 64(3): 263–278.

[25] 黄俊. 新能源航空现状及其关键技术 [J]. 新能源航空, 2023, 1(1): 10–22.
Huang J. Current situation and key technologies of new energy aviation [J]. New Energy Aviation, 2023, 1(1): 10–22.

[26] 牛宇锋. “双碳”战略目标下我国民航业发展路径探析 [J]. 民航管理, 2023 (4): 17–20.
Niu Y F. Analysis of the development path of China’s civil aviation industry under the “dual carbon” strategic goal [J]. Civil Aviation Management, 2023 (4): 17–20.

[27] Meher-Homji C B, Prisell E. Pioneering turbojet developments of Dr. Hans Von Ohain—From the HeS 1 to the HeS 011 [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(2): 191–201.

[28] 李迎春, 郑光华. 航空燃气涡轮发动机氢燃料研究历史和低污染燃烧技术发展 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 572–577.
Li Y C, Zheng G H. Review of study history and low emission combustion technology development on aero gas turbines fuelling hydrogen [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 572–577.

[29] Sosounov V A, Orlov V N. Experimental turbofan using liquid hydrogen and liquid natural gas as fuel [C]. Orlando: AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference, 1990.

[30] European Union. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

[31] 曲小. 欧洲加速氢能飞机研发与布局 [J]. 大飞机, 2022 (5): 38–41.
Qu X. Development and layout of accelerated hydrogen powered aircraft in Europe [J]. Jetliner, 2022 (5): 38–41.

[32] 德勤中国. 未来移动出行的动力源泉 [EB/OL]. (2022-09-15) [2023-09-15]. https: //news.alphalio.cn/PDF/%E6%B0%A2%E8%

83%BD% E6%BA% 90%E5%8F% 8A% E7%87%83%E6%96%99%E7%94%B5%E6%B1%A0%E4%BA%A4%E9%80%9A%E8%A7%A3%E5%86%B3%E6%96%B9%E6%A1%88-%E5%BE%B7%E5%8B%A4-2020.9-102%E9%A1%B5.pdf.

Deloitte. The power source of future mobile travel [EB/OL]. (2022-09-15)[2023-09-15]. https: //news.alphalio.cn/PDF/%E6%B0%A2%E8%83%BD%E6%BA%90%E5%8F%8A%E7%87%83%E6%96%99%E7%94%B5%E6%B1%A0%E4%BA%A4%E9%80%9A%E8%A7%A3%E5%86%B3%E6%96%B9%E6%A1%88-%E5%BE%B7%E5%8B%A4-2020.9-102%E9%A1%B5.pdf.