

氢燃料电池支线飞机关键技术与 发展展望



纪宇晗, 吴佳茜, 曾凡苍

中国航空工业发展研究中心, 北京 100029

摘要:氢燃料电池支线飞机是全球航空运输业实现绿色低碳目标的重要发展方向。本文分析了氢燃料电池支线飞机的发展现状和关键技术,包括液氢存储系统、氢燃料电池、电动机、氢燃料生产和储运加注等,预测了我国氢能航空技术发展趋势,并提出了包含各类新能源航空器产品的技术方案图谱,为我国氢能航空的发展提供理论支撑和方向指引。研究认为,我国将在2025—2035年逐步具备发展支线到窄体干线氢能飞机的技术条件,基于成熟国产飞机平台进行氢动力改装,以新能源技术变革推动航空制造业“换道超车”。

关键词:涡桨支线飞机; 氢燃料电池; 液氢存储罐; 氢燃料运输网络

中图分类号: V272

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.01.002

氢能航空是贯彻绿色航空发展理念的重要选择,也是解决国产民机发动机“卡脖子”问题、实现航空产业发展“换道超车”的重要趋势。当前,全球范围内掀起了氢能航空发展浪潮,欧美国家已率先完成两款氢燃料电池混动涡桨支线飞机的试飞验证,我国虽然在氢燃料电池、氢涡轮发动机、储氢系统等方面开展了一定的研究,但整机型号发展较为缓慢,与世界先进水平的差距逐渐增大。

本文分析了氢燃料电池支线飞机的发展现状和关键技术,讨论了目前面临的主要问题,并提出了2025—2035年的技术发展预测和产品技术方案图谱,以期为我国氢燃料电池支线飞机的研制提供参考和借鉴。

1 背景介绍

自第一架飞机诞生的120年以来,全球航空业的快速发展在给人类社会带来便利的同时也造成了越来越多的环境污染。为了减少航空运输业对环境造成的负面影响,国际民航组织(ICAO)提出了“国际航空业碳抵消与削减机制”(CORSIA)计划^[1],目标是2050年将二氧化碳排放量降至2005年同期的一半水平。2021年,中国民用航空局(CAAC)发布《“十四五”民用航空发展规划》,建设将“绿色

航空”作为中国航空运输业发展的主要目标之一^[2]。

全球航空业正在通过多种技术途径实现这一目标,其中第一种途径是持续推动航空技术的进步,空客、波音、美国国家航空航天局(NASA)等企业和机构持续优化飞机设计和采用新型复合材料,降低飞机油耗,从而提高飞行效率^[3-4]。另一种途径是使用电推进技术,但锂电池能量密度限制了飞机的有效载荷和航程,一般用于20座以下的飞机^[5]。此外,还可以选择使用可持续航空燃料(SAF),波音、空客、德事隆等航空企业已经开展了SAF的探索应用,但现阶段SAF的生产成本远高于传统航空煤油,而且产能受限严重^[6]。

与上述三种技术途径相比,氢动力飞机是航空运输业实现低碳目标的另一选择。相比于使用锂电池或者SAF,使用氢能作为飞机的动力来源有诸多优势:首先,采用绿电制绿氢的氢动力航空器可以实现全生命周期零排放,氢燃料燃烧只产生水,有效杜绝了使用航空煤油和部分SAF时产生的二氧化碳^[7-8]。其次,不同于SAF的高成本、低供给能力,中国绿电绿氢资源丰富,在产量和生产成本方面具有一定的优势^[9]。最后,氢燃料的大规模使用可以摆脱航空运输业对化石燃料的依赖。

收稿日期: 2023-07-19; 退修日期: 2023-10-24; 录用日期: 2023-12-07

引用格式: Ji Yuhang, Wu Jiaxi, Zeng Fancang. Key technologies and development outlook of hydrogen fuel cell regional aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(01): 15-24. 纪宇晗, 吴佳茜, 曾凡苍. 氢燃料电池支线飞机关键技术与发展展望[J]. 航空科学技术, 2024, 35(01): 15-24.

氢动力飞机有两种动力方案:一是通过氢燃料电池给电动机供电产生动力,二是氢直接在氢涡轮发动机中燃烧产生动力。前者实现的难度相对较低,现阶段发展速度较快,预计投入商用时间更短,是100座以下支线飞机的主要选择。但受限于氢燃料电池和电动机的功率密度,100座以上的飞机更可能选择氢涡轮发动机作为动力。

2 氢燃料电池支线飞机发展现状

2.1 国外发展情况

当前,全球范围内掀起氢能航空发展热潮,零航空(ZeroAvia)和环球氢能(Universal Hydrogen)两家公司率先实现了两款氢燃料电池混合动力涡桨支线飞机的首飞。

ZeroAvia公司正在开发以多尼尔228为平台的氢燃料电池混合动力涡桨支线飞机,如图1所示。该项目将多尼尔228机翼一侧的TPE331涡轮螺旋桨发动机更换为电动机,使用氢燃料电池和锂电池组合供电,氢燃料采用气态存储。2023年1月19日,改装后的多尼尔228飞机在英国成功首飞^[10]。本次试飞中氢气存储罐、燃料电池和锂电池组被安置在机身内部。ZeroAvia正在开发两套氢燃料电池动力系统总成,分别是面向9~19座飞机的ZA600动力总成,预计2025年投入使用,以及面向40~80座飞机(如ATR-72系列)的ZA2000动力总成,预计2027年投入使用。



图1 ZeroAvia基于多尼尔228改装的氢燃料电池——锂电池混合动力涡桨飞机

Fig.1 Dornier 228 hydrogen hybrid turboprop aircraft from ZeroAvia

环球氢能公司正在研发氢动力商业飞机和模块化的氢燃料运输网络。2023年3月3日,环球氢能的冲-8混合动力涡桨支线飞机成功首飞^[11],如图2所示。该架飞机一侧的涡桨发动机被替换成一个兆瓦级氢燃料电池动力系统,电机部分采用Magni650,液氢存储罐被安置在机身内部后方。本次试飞的飞行高度为3500m,飞行时间为15min,巡

航过程中常规发动机几乎停转,由电动机提供大部分动力。环球氢能另一个改装对象是ATR-72,计划在2025年前使ATR-72成为首架投入使用的氢能支线飞机,采用完全氢动力的ATR-72载客量从68人减少到56人,航程降低到800km。环球氢能将会提供全套改装方案,帮助飞机运营商将现有的ATR-72改装成氢动力。截至试飞前,环球氢能已经收到来自全球16个客户的247架飞机改装订单。



图2 Universal Hydrogen基于Dash-8改装的氢燃料电池混合动力涡桨飞机

Fig.2 Dash-8 hydrogen hybrid turboprop aircraft from Universal Hydrogen

以空客、赛峰、巴航工业为代表的欧美航空企业正在推进各种氢能航空发展计划,并取得了阶段性进展。2020年,空客的ZEROe项目提出在2035年之前推出第一架完全使用氢动力的商用飞机^[12];2021年,ZeroAvia和环球氢能公司宣布要在2025年将氢动力飞机投入商用。据统计^[13],与氢动力支线飞机有关的项目在2020年的全球投资额(不包括中国)超过了之前10年的总和,2021年和2022年快速增加。2020—2022年立项的新能源航空器项目有1/3是氢动力飞机^[14],后者已经占到所有在研新能源航空器项目的7%、20座以上机型的33%。上述结果仅统计完全使用氢动力的机型,如果将混合动力机型包含在内,20座以上机型中的占比将超过70%。欧美国家的氢能航空发展整体上呈加速趋势,相关配套产业和核心技术将很快满足飞机投入商用的条件,尤其是氢燃料电池支线飞机。新能源航空器在研项目数量和类型分别如图3和图4所示。

2.2 国内发展情况

在以城市空运和通航为主要应用场景的电动航空器领域,我国整体发展水平与欧美国家基本持平,典型型号有亿航EH216、峰飞“盛世龙”、锐翔RX4E等。但在氢动力飞机领域,我国正逐渐被欧美国家拉开差距。我国现有的氢动力飞机项目大多属于通航飞机,航程和高载较小,支线及以上型号的氢动力飞机项目涉及较少。航空工业、航发、商

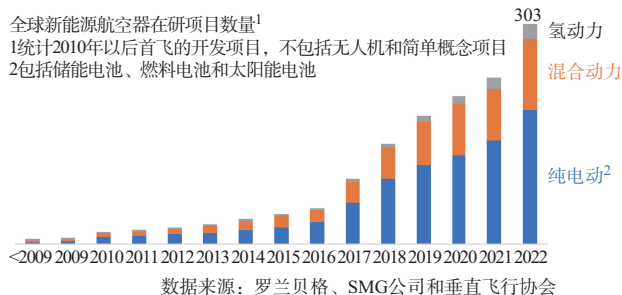


图3 新能源航空器在研项目数量

Fig.3 Statistics on new energy aircraft projects

飞、北航、西工大等企业和高校在支线及以上氢动力飞机领域开展了部分研究工作，航发研研所开展了80kW串联混合电推进验证机研制和兆瓦级分布式混合电推进系统研制^[15]，如图5所示。但受限于行业整体发展水平和投入力度的不足，相关研究主要停留在概念设计、技术预研、仿真验证等阶段，尚未有支线级别的整机研发项目出现。

3 氢燃料电池支线飞机关键技术

100座以下、航程1500km以下的氢动力支线飞机宜采用“液氢罐+氢燃料电池+电动机”的动力系统方案，即可完全满足飞机的性能需求。然而，对于载荷和航程更大的氢动力干线飞机，氢燃料电池和电动机的功率密度“瓶颈”已无法满足其需求，需要使用氢涡轮发动机作为动力来源。本节主要关注氢燃料电池支线飞机的6个核心技术，分别是：(1)液氢储罐；(2)储氢配套系统；(3)氢燃料电池；(4)电动机；(5)氢燃料生产；(6)氢燃料储运加注。其中，前4个

技术属于整机层面，后两个技术属于基础设施配套层面。在整机层面，液氢储罐和储氢配套系统是氢燃料电池飞机与氢涡轮飞机的共用技术，后文也会介绍相关技术中涉及氢涡轮飞机的部分内容。

3.1 液氢储罐设计与布局

尽管氢的低热值(120MJ/kg)是常用航空煤油(Jet A-1型, 38MJ/kg)的3倍，但由于氢的密度极低，液氢的能量体积密度仅是航空煤油的1/3^[16]。飞机所携带的氢燃料体积大幅增加，并且要以液氢的形式存储，必须重新设计储氢罐和其配套系统。

根据液氢的物理特性，液氢存储罐宜采用球形或柱形设计，不宜储存在传统的机翼油箱中。放置液氢存储罐会导致机体尺寸增大和舱室空间减小，进而增加空气阻力和飞行成本。未来可能的氢燃料存储罐布局方案如图6~图8所示，分为机内集成式和外挂式两种^[17]。图6所示的^[18-20]集成式设计方案可以直接在现有机型的基础上进行改装，但缺点是占用了机内空间并导致有效载荷降低。图7的集成式方案在翼身融合布局的基础上设计，最大化利用了机内空间^[21-22]。图8属于外挂式方案，优点是不占用机内空间，但可能对飞机的气动布局造成影响^[23]。

用于航空的氢燃料存储罐一般分为整体燃料罐和非整体燃料罐，前者与机身主体结构直接接触并形成一个整体，后者与机身主体结构相互独立^[15]。整体燃料罐可以利用机身结构存储氢燃料，这种方案在飞机设计层面是有利的，因为布局合理的燃料罐可以更好地利用机身空间。但整体燃料罐作为机身结构的一部分必须承受机身应力和载荷，包

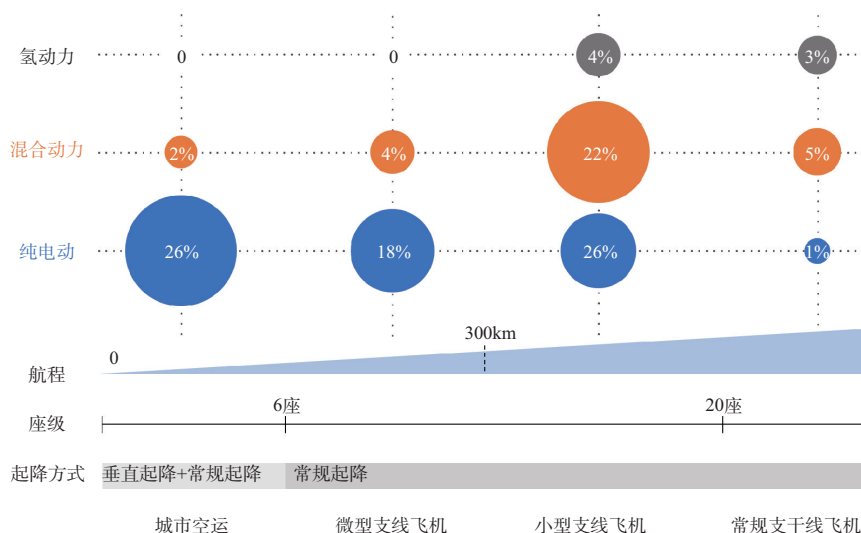


图4 全球新能源航空器在研项目类型

Fig.4 Global new energy aircraft types



图5 航发研所80kW串联混合电推进验证机(左)和兆瓦级分布式混合电推进系统(右)

Fig.5 80kW series hybrid electric propulsion demonstrator (left) and distributed hybrid electric propulsion system (right)

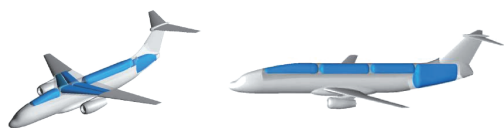


图6 传统布局的集成式储氢方案

Fig.6 Traditional integrated hydrogen storage configuration

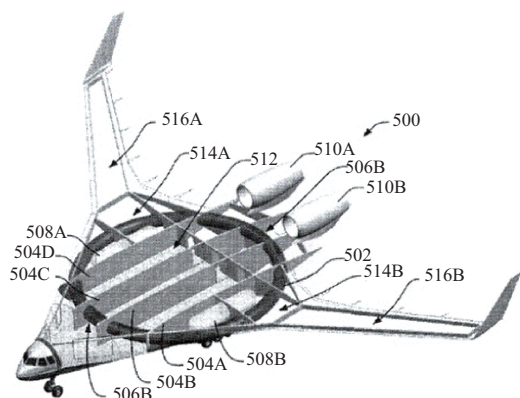


图7 翼身融合集成式储氢方案

Fig.7 Blended wing body integrated hydrogen storage configuration

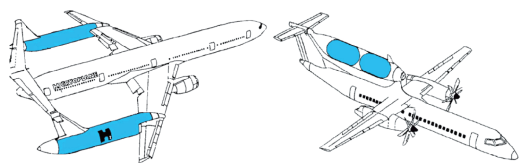


图8 外挂式储氢方案

Fig.8 External hydrogen storage configuration

括氢燃料自身产生的载荷。整体燃料罐相比非整体燃料罐需要更复杂的应力设计,而后者只需要应对燃料载荷。但与之相对,整体燃料罐可以减轻总重量,因为燃料罐本身可以承担部分机身应力。此外,整体燃料罐相比非整体燃料罐具有更多的气动外形优化空间,后者可能需要大幅改变

机身结构。

3.2 储氢配套系统

储氢配套系统包括热管理系统、氢燃料输送系统和氢燃料计量系统。一种典型的氢燃料电池飞机储氢系统架构如图9所示。该系统为每个燃料电池电堆配备一个液氢罐,总共有两个液氢罐,使用基于氢气的氢燃料加压系统,液氢泵下一端安装有一个换热器,能使氢燃料以 $-20\sim 120^{\circ}\text{C}$ 的温度范围输送到燃料电池电堆。

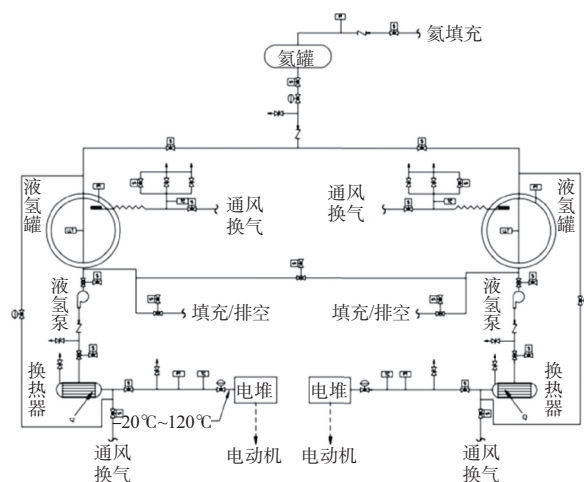


图9 一种典型的飞机储氢系统架构设计^[24]

Fig.9 A typical hydrogen storage system architecture^[24]

(1) 热管理系统

热管理系统是氢燃料存储系统的重要组成部分。液氢存储的压力需要维持在 $0.1\sim 0.35\text{MPa}$ 之间,温度维持在 $20\sim 30\text{K}$ 之间,尽量减少液氢气化导致的渗透泄漏问题^[23]。环境温度的维持主要通过对燃料罐进行隔热来实现。隔热可以是内部的,即隔热材料与氢燃料直接接触(氢—热材料—罐体),也可以是外部的,即隔热材料包裹燃料罐外壁(氢—罐体—隔热材料)。

热管理系统的另一个重要功能是将发动机燃烧室或燃料电池电堆中的氢加热到合适的工作温度。氢燃料电池热管理系统的实现难度要低于氢涡轮发动机。首先,氢燃料电池对加热液氢的温度要求更低。液氢的温度在 30K 以下,而氢的自燃温度约为 770K ^[23],氢和空气混合物进入发动机燃烧室的最佳温度为 $400\sim 500\text{K}$ ^[26]。与之相比,质子交换膜燃料电池电堆中氢的工作温度为 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ ^[27]($330\sim 350\text{K}$)。其次,由于氢涡轮飞机需要更频繁的热交换和状态控制,其热管理系统复杂度也高于氢燃料电池飞机。常见的氢燃料电池热管理系统一般包括多个换热器,用于实

现氢燃料、液压油和空气之间的热交换。

(2) 氢燃料输送系统

氢燃料输送系统最核心的功能是将氢燃料供应到发动机燃烧室或燃料电池电堆。氢燃料输送系统必须考虑处理低温液氢时可能出现的各种问题,通常选择多级压缩泵作为动力,还会使用低温截止阀或低温球阀来控制氢燃料的流通和切断^[23]。

氢燃料输送系统的另一个功能是多余氢燃料的循环利用。发动机燃烧室和燃料电池电堆中没有完全反应的氢可以通过引射器的被动循环回路或者循环泵的主动循环回路重新进入输送系统^[28]。还有一部分研究建议将多余的氢循环收集到液氢罐中,或者在独立的燃料箱中以气态形式存储^[29]。

(3) 氢燃料计量系统

计量阀是氢燃料系统中至关重要的组件,它们能够为发动机或燃料电池电堆提供快速响应的精确燃料调节和计量。飞机上的计量阀必须重量低、尺寸小,一般采用两级伺服阀^[30]。计量阀可以安装在液氢汽化装置之前或之后,前一种情况下液氢在前端换热器中汽化后再通过计量阀,后一种情况下液氢通过计量阀后再汽化。

氢燃料计量阀的材料问题同样值得关注,主要指的是“氢脆”现象,即由于氢渗入金属而导致裂纹产生的有害现象。“氢脆”同样存在于飞机上所有可能与氢接触的系统中。对于不锈钢材料,随着温度的升高,“氢脆”会导致氢燃料的逸散。氢燃料计量阀材料的选择必须能够实现全密封。

3.3 氢燃料电池

制约氢燃料电池发展的主要技术短板是功率密度,近年来随着材料和制造技术的进步,氢燃料电池的功率密度已经大幅度提升,在系统层面已经接近1kW/kg,但与传统航空煤油涡扇发动机的功率密度(3.7kW/kg)相比仍有一定差距^[31]。满足40~80座涡桨支线飞机动力需求的氢燃料电池功率密度至少要有1~1.5kW/kg,大部分项目选择使用氢质子交换膜燃料电池(PEMFC),ZeroAvia和环球氢能公司均采用该方案。此外,还可以选择固体氧化物(SOFC)燃料电池。ZeroAvia宣称其正在研发的质子交换膜燃料电池已经实现2kW/kg以上的能量密度,但这一结果是在实验室环境下实现的,并且可能不包括电池单元以外的配套系统,距离实际应用仍有一段距离。

飞机上的氢燃料电池面临的另一个问题是热管理。前文已提到,氢质子交换膜燃料电池的理想工作温度是60~80℃^[25],过高的温度会导致能量转换效率下降甚至是

系统故障。使用燃料电池的地面车辆一般选择强制对流换热器,这种被动换热器的外置散热片面积较大,安装在飞机上会对空气动力性能造成负面影响。一些研究提出了航空用的主动换热器技术,也可以选择与储氢系统共用一套热管理系统^[32]。

3.4 电动机

电动机的功重比直接决定了使用氢燃料电池的涡桨支线飞机的动力、效率等关键性能指标。目前的高功重比电动机主要有永磁同步电机(PMSM)和超导电机两种。永磁同步电机是现阶段大部分飞机的选择,环球氢能的Dash-8和ATR-72采用了MagniX公司开发的Magni650系列永磁同步电机。

超导电机将电机中的普通导电材料替换为超导材料,具有效率高、体积小、重量轻、同步电抗小等特点,功率密度和能量转换效率远超传统电动机(传统电动机效率为92%~95%,超导电机效率可以达到98%以上)^[33-34]。一些团队开展了航空超导电机的研究,如俄罗斯超级奥克斯(SuperOx)公司研制的高温超导电机(工作温度69K),已经安装在雅克-40飞机上实现首飞,如图10所示。

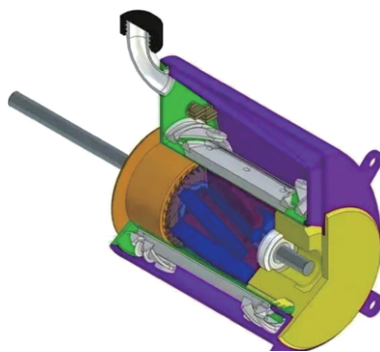


图10 雅克-40飞机上使用的高温超导电机

Fig.10 High temperature superconducting motor used in the Yak-40 aircraft

得益于电机的相对尺度近似无关性^[35],总功率相同时单个大功率电机和多个小功率电机系统的功率密度和效率基本一致,采用多个小功率电机驱动较小直径风扇的分布式电驱动系统可以在保证总功率不变的前提下有效增大涵道比、提高动力装置的控制和容错性能。同时,小体积的电驱动系统能够更方便地融入机身,提高飞机气动效率。面向城市空运市场的电动垂直起降(eVTOL)航空器已经广泛采用分布式布局设计,未来使用氢燃料电池的支线飞机也可能采用4~6个甚至更多电机的分布式布局。

3.5 氢燃料生产

氢燃料的生产环节按照碳排放量的不同可分为“绿氢”和“灰氢”，前者的主要生产途径是水电解，电力来源是太阳能、风能、水能等可持续能源，不产生额外的污染；后者的主要生产途径是蒸气甲烷重整和煤气化，生产过程中释放大量的二氧化碳。在我国2020年总计 $7000 \times 10^4 \text{t}$ 的氢气生产总量中，绿氢只有 $100 \times 10^4 \text{t}$ ，占1.4%，其余98.6%都是灰氢。

按照提供1kWh能量所需的成本计算，2023年2月，中石油航空煤油出厂价为7465元/t，折合0.6元/kWh，而灰氢的生产成本约为0.3元/kWh，绿氢的生产成本约为0.9元/kWh。绿氢的生产成本低于SAF，高于航空煤油。如何进一步降低绿氢的生产成本是我国航空运输业和能源行业必须思考的问题。

3.6 氢燃料存储、运输与加注

与传统的化石燃料相比，氢燃料的物理和化学特性更加不稳定，实现高效、快速、低成本的氢燃料存储、运输与加注是氢动力飞机投入大规模商业运营的关键。尤其是加注环节的时间将极大影响氢动力飞机的运营效率。

氢气的储运加注环节需要对基础设施进行改造。输送氢气的一个选择是通过现有的天然气管道网络，但对天然气管道的改造不仅需要投入大量的资金并进行全面的安全性评估，而且需要考虑氢气的生产地（产能过剩的可再生能源工厂和氢气生产基地）与使用地（机场）之间长距离运输带来的成本和安全问题，因此应尽可能在机场附近制氢。

氢燃料加注过程中的安全性问题同样极其重要，必须对可能发生的氢燃料泄漏、燃烧和爆炸等情况进行预防和检测，包括预留安全距离、设置防护墙、车载氢罐温度监测、氢气预冷、分段加注等方式^[36]。

以环球氢能公司为代表的端到端氢燃料运输网络是另一种解决方案，在氢生产基地将氢燃料加注并封装在氢燃料胶囊存储罐中，通过公路或铁路运输到机场，然后直接把胶囊存储罐安装到飞机上，用完的胶囊存储罐被送回氢生产基地实现闭环，如图11所示。这种氢燃料运输网络与新能源汽车企业蔚来的“换电”方案类似，飞机“换氢”方案的优点是极大简化了氢燃料的储运加注过程，降低了运输管道、机场储氢和加注设施的建设成本，加快了飞机补氢速度。但缺点也和汽车“换电”方案类似，可拆卸的胶囊储氢罐占用了机上空间并增大了重量，环球氢能ATR-72改装方案的载客量减少18%，航程减少50%。另外，“换氢”方案的边际成本较高，在氢燃料需求量达到一定规模后的效

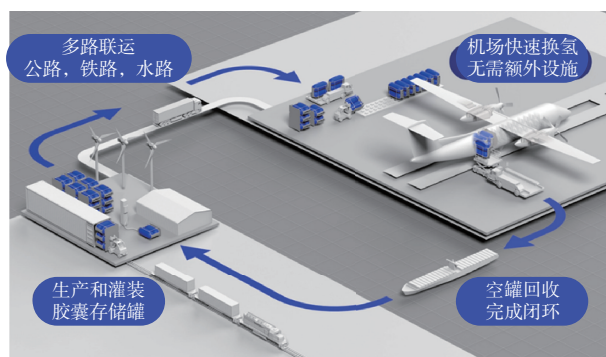


图11 环球氢能模块化氢燃料运输网络

Fig.11 Modular hydrogen fuel transport network

率和经济性落后于管道运输方案，运输网络承载力上限也低于后者。因此，飞机“换氢”方案主要适用于氢燃料需求量较少并且基础设施建设不完善的前期发展阶段。

4 氢燃料电池支线飞机发展展望

本文对氢燃料电池支线飞机未来可能达到的技术水平进行预测。首先给出影响飞机有效载荷和航程的核心技术参数，即氢燃料质量比。氢燃料质量比定义为液氢燃料质量与装满燃料的存储系统质量的比值。目前，航空液氢燃料存储罐的氢燃料质量比为15%~20%，存储量小于1t。根据英国剑桥大学的预测^[37]，优化现有储氢技术可以将质量比提高到60%，而开发新技术可以将质量比提高到75%甚至更高，这意味着同等能量的液氢和存储系统总质量可以降低到航空煤油和油箱的一半。

2022年4月，美国氢燃料电池制造商HyPoint和储氢罐制造商Gloyer-Taylor Laboratories (GTL)联合推出了他们的解决方案^[38]，使用GTL生产的石墨纤维复合材料低温液氢存储罐（长2.4m、直径为1.2m、重量为67kg）存储150kg的液氢燃料，复合材料的使用可以减轻储氢系统的一部分重量，但仍需要对低温冷却装置、泵等配套组件进行持续减重才能有效提高储氢系统的质量比。另外，机上氢燃料存储还要考虑储氢罐体积，同等能量的液氢体积大约是航空煤油的3倍，储氢罐的设计必然会对飞机的有效载荷和气动布局造成影响。因此，主机厂商考虑到上述问题以及安全性、经济性、技术成熟度等因素，在将液氢存储系统集成到飞机上时会采用相对保守的方案，通过牺牲一部分航程以保证有效载荷不会降低过多。

在不考虑整体转换效率的情况下，30%质量比的液氢燃料系统产生的能量已经接近同重量航空煤油燃料系统，50%质量比的液氢燃料系统产生的能量可以达到同重量航

空燃油燃料系统的1.5倍以上。若考虑氢燃料电池、电动机和螺旋桨的效率,假设燃料电池氢电转换效率能达到60%,电动机能量转换效率按照当前技术水平取90%,螺旋桨效率取90%^[39],总转换效率约为48.6%,而目前的大型航空涡轮发动机的总效率在40%左右^[40]。随着技术的发展,氢燃料电池动力系统的总效率在未来将不会低于航空涡轮发动机动力系统。

综合考虑技术成熟度、产业现状、市场供需、政策支持等多种因素,本文对包括氢燃料质量比、氢燃料电池功率密度、电动机系统功率密度在内的多项核心技术指标进行预测,预测区间为2025—2035年,预测结果见表1。

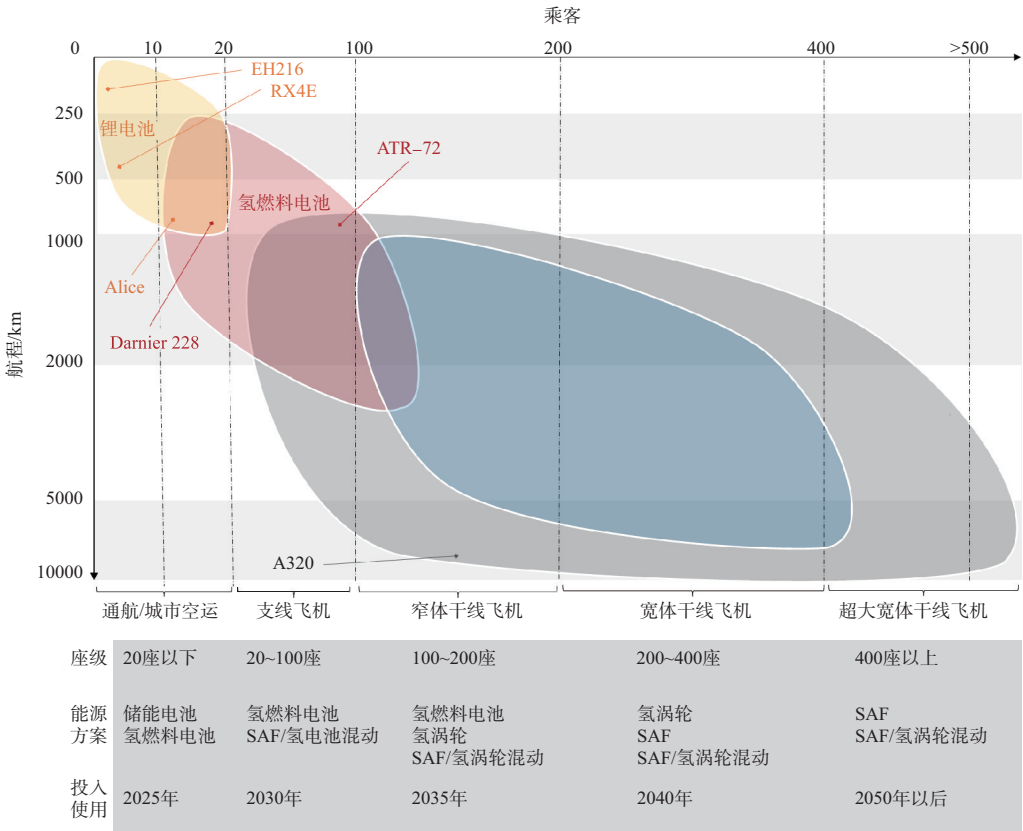
2025年性能指标下,总重量6t(氢燃料1.5t)的储氢系统所提供的能量约为总重量5t的航空燃油燃料系统的90%,基本可以满足新舟700(油箱可携带5t航空燃油)同级别支线飞机的性能需求;2035年性能指标下,总重量18t(氢燃料6.3t)的储氢系统所提供的能量约为总重量20t的航空

表1 2025—2035年氢燃料电池飞机技术指标预测

Table 1 Prediction of technical index of hydrogen fuel cell aircraft in 2025—2035

技术领域	技术指标	当前	2025	2030	2035
氢燃料电池	功率密度	0.9kW/kg	1.5kW/kg	2kW/kg	2.5kW/kg
	氢电转化效率	50%	55%	60%	65%
氢燃料存储系统	氢燃料质量比	≤20%	25%	30%	35%
	机上总储量	≤1t	1.5t	3t	6t
电动机	单机功率	200kW	500kW	1MW	2MW
	系统功率密度	≤2kW	3kW	4kW	5kW

燃油燃料系统的90%,各项指标基本满足C919(油箱可携带20t航空燃油)同级别窄体干线飞机的性能需求。本文从技术成熟度、性能需求和市场竞争力三个角度进行综合评估^[41],对不同技术方案的新能源航空器型号定位进行划分,如图12所示。



注: 1.包线均为100%新能源,混合动力不在预测范围内; 2.基于未来市场和技术发展趋势进行预测,预测区间为2025—2050年, 3.电推进飞机使用储能电池,以锂电池为主, 4.图中标型号均已试飞,航程取最大设计航程。

图12 新能源航空器技术方案图谱
Fig.12 Scheme of new energy aircraft products

新能源航空器按照动力方案可分为锂电池、氢燃料电池、氢涡轮和可持续航空燃料4种。图12展示了不同动力方案新能源航空器的最佳适用区间,并标注了现有典型型号所处的位置。锂电池受限于能量密度,主要适用于20座以下的城市空运和通航机型。氢燃料电池主要应用在100座以下的支线飞机,而100座以上的干线飞机更适合氢涡轮发动机方案或者使用可持续航空燃料。

5 结束语

本文讨论了未来氢动力飞机的发展,主要聚焦使用氢燃料电池的涡桨支线飞机,影响其发展的关键技术包括氢储罐、储氢配套系统、氢燃料电池、电动机及氢燃料生产、存储、运输和加注等,详细讨论了这些技术相关的问题和解决方案。根据技术预测以及相关产业发展趋势,我国将在2025—2035年逐步具备发展支线到窄体干线氢能飞机的技术条件。我国的航空企业可以利用成熟的国产飞机平台进行氢动力改装,攻克关键技术并开展试点应用。

AST

参考文献

- [1] ICAO. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation[EB/OL]. (2023-03-01). <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA>.
- [2] 中国民用航空局.“十四五”民航绿色发展专项规划[EB/OL]. (2022-01-27). https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220127_211344.html.
Civil Aviation Administration of China. 14th five-year civil aviation green development special plan [EB/OL]. (2022-01-27). https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220127_211344.html.(in Chinese)
- [3] Nesbitt E, Suzuki T, Daneshvar N, et al. Boeing-Safran landing gear noise reduction project on 2020 Boeing ecoDemonstrator program[C].28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference, 2022: 2849.
- [4] Warzocha K, Szura J, Bąk P, et al. Transformative use of additive technology in design and manufacture of hydraulic actuator for fly-by-wire system[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 4772.
- [5] Thapa N, Ram S, Kumar S, et al. All electric aircraft: A reality on its way[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 175-182.
- [6] Detsios N, Theodoraki S, Maragoudaki L, et al. Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: A critical review[J]. Energies, 2023, 16(4): 1904.
- [7] Shahriar M F, Khanal A. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF)[J]. Fuel, 2022, 325: 124905.
- [8] Rap A, Feng W, Forster P, et al. The climate impact of contrails from hydrogen combustion and fuel cell aircraft[R]. Copernicus Meetings -2023-5520, 2023.
- [9] 刘坚,钟财富.我国氢能发展现状与前景展望[J].中国能源, 2019,41(2):5.
Liu Jian, Zhong Caifu. Current situation and prospect of hydrogen energy development in China[J]. Energy of China, 2019, 41(2):5. (in Chinese)
- [10] ZeroAvia.Do228-first-flight[EB/OL].(2023-01-19). <https://www.zeroavia.com/do228-first-flight>.
- [11] Universal Hydrogen. First flight of hydrogen regional airliner [EB/OL]. (2023-03-02). <https://www.businesswire.com/news/home/20230302005768/en/Universal-Hydrogen-Successfully-Completes-First-Flight-of-Hydrogen-Regional-Airliner>.
- [12] Norris G. Airbus reveals refined ZEROe blended wing body concept[J]. Aerospace Daily & Defense Report, 2022, 279(35): 13-14.
- [13] Manfred H, Stephan B. Regional air mobility: How to unlock a new era of aviation[EB/OL]. (2022-06-21). <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Regional-Air-Mobility-How-to-unlock-a-new-era-of-aviation.html>.
- [14] Uwe W, Yvonne R. Clean hydrogen radar[EB/OL]. (2022-10-08). <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Clean-Hydrogen-Radar.html>.
- [15] 中国航发动研所.SA60L航空油电混合动力系统加速成熟[EB/OL]. (2023-03-17). <https://www.ga.cn/2023/0317/12778.html>.
AECC. The SA60L aviation gasoline-electric hybrid system accelerates to maturity[EB/OL]. (2023-03-17). <https://www.ga.cn/2023/0317/12778.html>.(in Chinese)
- [16] Nicolay S, Karpuk S, Liu Y, et al. Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(64): 32676-32694.

- [17] Tamburrano P, Romagnuolo L, Frosina E, et al. Fuels systems and components for future airliners fuelled with liquid hydrogen[J]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2022, 2385(1): 12041.
- [18] Airbus. ZEROe: Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft[EB/OL]. (2021-09-15). <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>.
- [19] EUH2020. Enableh 2[EB/OL]. (2021-09-15). <https://www.enableh2.eu>.
- [20] Huete J, Nalianda D, Pilidis P. Propulsion system integration for a first-generation hydrogen civil airliner? [J]. *The Aeronautical Journal*, 2021, 125(1291): 1654-1665.
- [21] Suewatanakul S, Porcarelli A, Olsson A, et al. Conceptual design of a hybrid hydrogen fuel cell/battery blended-wing-body unmanned aerial vehicle: An overview[J]. *Aerospace*, 2022, 9(5): 275.
- [22] 孙玉凯, 王元元, 程文渊, 等. 民机翼身融合布局发展分析与展望[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(7):1-12.
Sun Yukai, Wang Yuanyuan, Cheng Wenyuan, et al. Analysis and prospect of blended-wing-body configuration technology development of civil aircraft [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(7):1-12. (in Chinese)
- [23] Khandelwal B, Karakurt A, Sekaran P R, et al. Hydrogen powered aircraft: The future of air transport[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, 60: 45-59.
- [24] Millis M G, Tornabene R T, Jurns J M, et al. Hydrogen fuel system design trades for high-altitude long-endurance remotely-operated aircraft[R]. Technical Reports E-16800, 2009.
- [25] Srinath A N, Pena López Á, Miran Fashandi S A, et al. Thermal management system architecture for hydrogen-powered propulsion technologies: Practices, thematic clusters, system architectures, future challenges, and opportunities[J]. *Energies*, 2022, 15(1): 304.
- [26] Sefain M J. Hydrogen aircraft concepts and ground support[J]. *Journal of Cranfield University*, 2005, 1826(2998): 974.
- [27] Watzenig D, Brandstätter B. Comprehensive energy management-safe adaptation, predictive control and thermal management[M]. Austria: Springer International Publishing, 2018.
- [28] 王绍成, 齐济. 临近空间飞行器氢燃料电池电推进关键技术[J]. *空天技术*, 2022(5):58-67.
Wang Shaocheng, Qi Ji. Key technologies of hydrogen fuel cell electric propulsion for near space vehicle[J]. *Aerospace Technology*, 2022(5):58-67. (in Chinese)
- [29] Klug H G, Faass R. Cryoplane: Hydrogen fuelled aircraft: Status and challenges[J]. *Air & Space Europe*, 2001, 3(3-4): 252-254.
- [30] Tamburrano P, Plummer A R, Distaso E, et al. A review of electro-hydraulic servovalve research and development[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2018, 8(9): 1-23.
- [31] Wright S, Aaltonen J. Fuel cells and novel thermal management advancements required for aviation[C]. 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2022.
- [32] Nguyen H Q, Shabani B. Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112328.
- [33] Haran K S, Kalsi S, Arndt T, et al. High power density superconducting rotating machines: Development status and technology roadmap[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2017, 30(12): 123002.
- [34] 孙侠生, 程文渊, 穆作栋, 等. 电动飞机发展白皮书[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(11):7.
Sun Xiasheng, Cheng Wenyuan, Mu Zuodong, et al. White paper on the development of electric aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2019, 30(11):7. (in Chinese)
- [35] Deisenroth D C, Ohadi M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond[J]. *Energies*, 2019, 12(19): 3594.
- [36] Zhang Caizhi, Cao Xiujuan, Bujlo P, et al. Review on the safety analysis and protection strategies of fast filling hydrogen storage system for fuel cell vehicle application[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 1-15.
- [37] World Economic Forum, Cambridge University. Target true zero: Unlocking sustainable battery and hydrogen-powered flight[EB/OL].(2022-07-22). <https://www.weforum.org/reports/target-true-zero-unlocking-sustainable-battery-and-hydrogen-powered-flight>.
- [38] Hypoint. Extends zero-emission hydrogen flight range with new ultralight liquid hydrogen fuel tanks[EB/OL]. (2022-03-

- 29). <https://www.newswire.com/news/hypoint-dramatically-extends-zero-emission-hydrogen-flight-range-with-21669919>.
- [39] Czyż Z, Karpiński P, Skiba K, et al. Wind tunnel performance tests of the propellers with different pitch for the electric propulsion system[J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 2.
- [40] FINN: Are major efficiency gains for the turbofan still in reach? [EB/OL]. (2018-06-19). <https://www.wearefinn.com/topics/posts/are-major-efficiency-gains-for-the-turbofan-still-in-reach/>.
- [41] 纪宇晗, 孙侠生, 俞笑, 等. 双碳战略下的新能源航空发展展望[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(12):11-23.
- Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12):11-23. (in Chinese)

Key Technologies and Development Outlook of Hydrogen Fuel Cell Regional Aircraft

Ji Yuhan, Wu Jiayi, Zeng Fancang

Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China

Abstract: Hydrogen fuel cell regional aircraft is an important development direction for the green aviation. This paper analyzes the development status and key technologies of hydrogen fuel cell regional aircraft, including liquid hydrogen storage system, hydrogen fuel cell, electric motor, hydrogen fuel production, storage, transportation and refueling, etc., predicts the future development of technology, and proposes technical solutions for new energy aircraft. The study believes that China will gradually reach the technological maturity to meet the development needs of hydrogen aircraft during the period of 2025 to 2035. China can carry out hydrogen powered modification of regional aircraft and is expected to achieve overtaking.

Key Words: turboprop regional aircraft; hydrogen fuel cell; liquid hydrogen storage tank; hydrogen fuel transportation network