

商用飞机新能源动力发展路径分析与展望^{*}

杨志刚, 王 曼, 张志雄, 张 炯, 王兆兵, 张亚伟, 张新替

(中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘 要: 围绕全球航空运输业碳减排背景, 初步探讨了新能源商用飞机发展路径的问题, 以期为我国未来商用飞机低碳化发展提供参考。分析世界航空产业碳减排形势, 总结了欧美等商用飞机新能源发展现状与趋势; 从可持续航空燃料(SAF)应用、混合动力推进技术、氢动力推进技术三个方向分析了新能源动力发展路径及相关探索工作; 针对未来新能源商用飞机产品研究, 提出了新能源动力及主要关键技术等需求; 总结了商用飞机新能源产品发展方向和重点技术发展方向, 提出了系统策划商用飞机减排体系等初步思考。

关键词: 商用飞机; 可持续航空燃料; 混合动力; 氢动力; 发展路径; 综述

中图分类号: V31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 03-2210087-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2210087

1 引 言

2016年, 国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)建立国际航空碳抵消与减排机制(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA)^[1], 并于2021年进入试验实施阶段, 目标是力争实现全球航空业2050年前二氧化碳(CO₂)排放要比2005年减少50%。2020年9月, 中国正式宣布力争2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和(“双碳”目标)。鉴于碳减排任务日趋紧迫, 我国航空业碳减排进程也需加快推进。

在新冠疫情暴发之前的近30年中, 全球交通运

输业碳排放量已经超过工业碳排放量, 其中航空运输业的碳排放量约占全球排放总量的2%, 如图1所示^[2]。根据国际能源协会(IEA)的统计数据, 2019年全球CO₂排放总量达到了380亿吨, 航空运输业碳排放量约9.2亿吨, 约占交通运输行业碳排放量的10%^[2]。ICAO表示, 2013—2019年间的全球民航业碳排放量超过其之前预测数值的70%, 如果不加控制, 到2050年全世界可能将有25%的碳排放来自于航空业^[2]。

根据BNP Paribas Bank的调研^[2], 航空碳排放主要来源有:(1)飞机航空燃油燃烧, 约占79%; (2)与飞机相关的地面排放约占20%, 包括燃油运输、维修与回收, 及服务配套地面交通; (3)航空用电间接产生

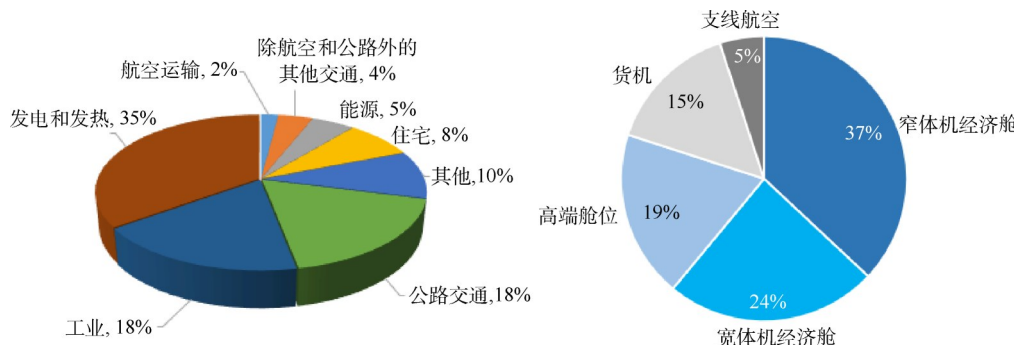


图1 全球航空运输CO₂排放占比及2019年航空运输CO₂排放情况

^{*} 收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2023-11-08。

基金项目: 中国工程院咨询项目“航空制造‘双碳’发展战略研究”(2022-HYZD-03-02)。

作者简介: 杨志刚, 博士, 研究员, 研究领域为民机总体与气动。

通讯作者: 王 曼, 博士, 研究员, 研究领域为航空发动机及飞机动力技术。E-mail: wangman2@comac.cc

引用格式: 杨志刚, 王 曼, 张志雄, 等. 商用飞机新能源动力发展路径分析与展望[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 2210087.

(YANG Z G, WANG M, ZHANG Z X, et al. Analysis and prospect of new energy power development path of commercial aircraft[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 2210087.)

的碳排放最少,占比小于1%。由此可见,解决航空运输业碳排放的最主要切入点在于如何减少航空燃油相关的碳排放。

本文通过对商用飞机新能源动力发展路径的分析,为我国商用飞机减碳发展方向提供参考,主要分析了商用飞机的碳减排路径,包括支线飞机、窄体干线飞机和宽体干线飞机的新能源技术路径,综合不同新能源动力形式特点,研判目前商用飞机新能源发力方向;识别商用飞机不同能源动力关键技术,分析新能源动力重点发展技术方向;最后创新性地从整个商用飞机全生命周期、全行业的考量,对商用飞机碳减排体系进行系统策划,为国内商用飞机的减碳发展形成目标明确、层次明晰、逻辑清楚的体系性指引。

2 商用飞机新能源发展路径分析

2.1 全球商用飞机新能源发展现状与趋势

在全球碳减排和绿色航空发展的大背景下,美国、欧洲等国家、地区和国际组织持续开展了低碳技术创新研究,积极为推出新一代新能源商用飞机做准备。

(1) 美国商用飞机新能源主要进展

美国波音长期致力于可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)的开发和利用,成立了“可持续航空生物燃油用户组”,开展生物燃料研究及试飞,2011年获得了使用SAF的批准^[3]。2018年,波音“环保验证机”777F首次使用100%SAF进行了航线飞行。2021年,波音用一架阿拉斯加航空公司的737-9作为“环保验证机”进行20项安全和环保技术的试飞^[4]。2022年—2023年,波音采用777-200ER作为“环保验证机”,开展了约50项可持续性和安全性的技术测试。目前,波音“环保验证机”项目(如图2所示)已开展10年,承诺其商用飞机到2030年将能够并获得认证使用100%的SAF进行飞行^[5]。



图2 2021年波音环保验证机^[5]

NASA针对不同座级、航程的应用场景,依次开展全电池推进、混合电推进、部分涡轮电推进、全涡轮电推进概念研究^[6],部分飞机概念如图3所示。其中,Sugar Volt飞机(150座级、900海里),采用能量密度为750 Wh/kg的电池,配备1.3 MW或5.3 MW电机,预计可降低60%燃油消耗;N3-X飞机(300座级、7000海里),采用翼身融合布局,翼尖安装两个大功率涡轴发动机,机身尾部安装多个分布式电涵道风扇,预计可降低70%燃油消耗^[6]。

(2) 欧洲商用飞机新能源主要进展

2020年9月,空客公司公布了ZEROe氢能概念飞机^[7],如图4所示,皆采用液氢作为飞机一次能源。第一型为涡桨支线飞机,100座级,航程约1 800 km;第二型为翼身融合飞机,200座级,航程约3 500 km;第三型为单通道喷气客机,120~200座,航程超过3 500 km;以及之后公布的第四型分布式氢燃料电池飞机。空客计划2023年开展以轻型飞机为基础的氢燃料技术验证机首飞,2024年确定氢燃料飞机构型技术路线,2025年实现氢燃料支线验证机首飞,2035年实现氢燃料商用飞机产品交付。

2022年4月,英国航空研究院(ATI)发布《ATI技术战略2022-零碳目标》^[8],提出了氢能源飞机概念方案,如图5所示。支线客机概念以ATR72-600为原型,采用氢燃料电池推进系统驱动6个翼吊式螺旋桨,航程约1 482 km,巡航速度为648 km/h,可搭载

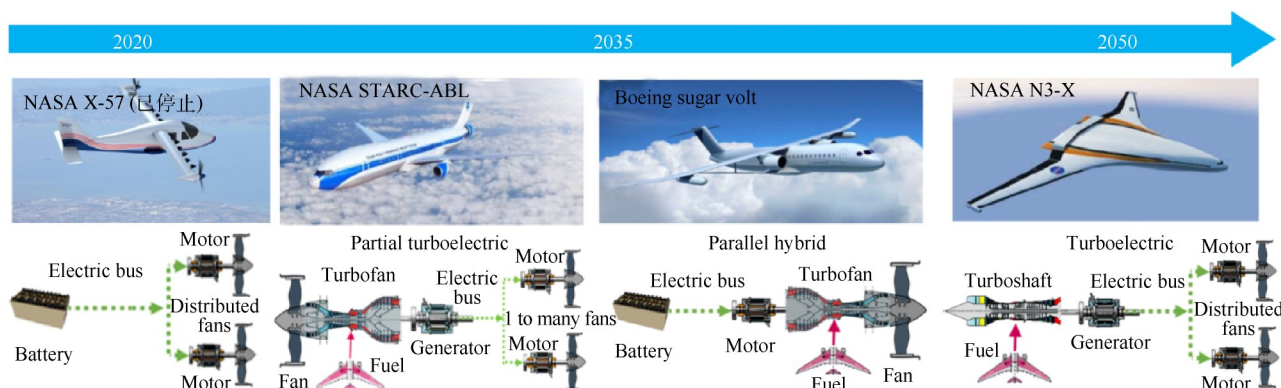


图3 美国混合/电推进飞机研发^[6]



图 4 空客氢能概念飞机^[7]



图 5 ATI 氢能飞机概念方案^[8]

75 名乘客。窄体客机概念以 A320neo 为原型,航程约 4 445 km,经济舱可容纳 180 个座位,采用两台布置于机尾的燃氢涡扇发动机,储氢罐置于机舱后部。宽体客机概念以波音 767-200ER 为原型,可搭乘 280 名乘客,设计最大航程为 10 649 km,采用两台翼吊式布局的燃氢涡扇发动机。

2.2 商用飞机可采用的新能源技术路径

在中国民航业未来仍将快速发展的预期下,为支持实现“双碳”目标,采用 SAF、电能、氢能是航空领域应对气候变化、实现碳减排的最可行途径,也是全球航空业主要的趋势性选择。

2.2.1 可持续航空燃料

SAF 指由各种可持续重复获得的原料(生物原料或合成原料)经过化学反应生成的航空煤油替代品。在航空碳减排新型能源选项中,短期内应用 SAF 是最现实、最经济的方式,SAF 整个寿命周期内可降低碳排放达到 80%,有望达到 100%。据不完全统计,全球已经有超过 40 家航空公司的 45 万次航班使用了 SAF。欧盟《ReFuel EU Aviation》^[9]支持增加 SAF 的生产和使用,该立法草案规定航空燃油供应商在欧盟内机场提供的航空燃料掺混 SAF 的最低比例如表 1 所示。

为确保 SAF 的安全应用,其原料和生产工艺要通过美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)的认证,以符合在现有机队中使用的资格。截至 2021 年年初,有八种转换工艺被认证可用于商用航空,所有符合 ASTM D7566 的燃料都

表 1 欧盟规划的 SAF 掺混最低比例^[9]

时间期限	SAF 最低份额(其中合成航空燃油的最低份额)
2025 年 1 月 1 日—2029 年 12 月 31 日	2% (0%)
2030 年 1 月 1 日—2034 年 12 月 31 日	5% (0.7%)
2035 年 1 月 1 日—2039 年 12 月 31 日	20% (5%)
2040 年 1 月 1 日—2044 年 12 月 31 日	32% (8%)
2045 年 1 月 1 日—2049 年 12 月 31 日	38% (11%)
2050 年 1 月 1 日起	63% (28%)

被认证为最高混合上限,范围在 10%~50%^[10]。中国民航局借鉴 ASTM D4054 已发布《含合成烃的民用航空喷气燃料》(CTSO-2C701),对 SAF 进行性能验证^[3]。2022 年 9 月,中石化镇海炼化公司获中国民航局审定的生物航煤适航证书,其以餐饮废油为原料生产的 3 号生物航煤将在空客(中国)天津工厂试用。

中国商飞(COMAC)-波音节能减排中心与杭州能源技术公司合作开展了可再生航空燃料研究,如图 6 所示,验证以地沟油等废弃动植物油脂为原料制备航空生物燃油的工程技术(HRC)工艺路线。该项研究以飞机需求为牵引,完成利用废弃油脂制成航空生物燃油全过程,并通过油品比对试验、燃烧试验等,初步探索了技术和产业可行性。

2.2.2 混合电推进技术

混合电推进技术,是指通过电能驱动的推进器与传统发动机共同为飞机提供推力,辅以能量管理优化,从而降低油耗、减少噪声和排放。根据文献[11-12]分析,混合/全电推进系统架构分为以下几

种:(1)纯电池驱动架构,适用于小功率、短程飞机,优势是系统简单、效率高,劣势是电池能量密度低;(2)串联驱动架构,适用于推进器解耦方案,优势是系统解耦、架构简单,劣势是质量大、可靠性低;(3)并联驱动架构,适用于部分解耦、电机复用情形,优势是质量轻、效率较高,劣势是集成复杂度大。

2.2.3 氢动力推进技术

氢能拥有洁净能源的优越潜质,正受到航空界高度关注。氢能源应用主要有两种方式,一种将氢燃料电池作为动力来源,另一种是直接以氢作为发动机燃料。无论何种形式的氢能源飞机,其存储和使用都给大型商用飞机设计带来技术挑战。

氢能源应用面临的技术瓶颈有^[13]:(1)氢的储存问题,气态氢储运体积过大,会引起飞机可用容积降低,液态氢需要增加大量的隔热材料以保持低温,会额外增加飞机质量;(2)氢泄漏,氢气可以在适当的条件下与空气混合而爆炸,氢泄漏所引起安全风险较大;(3)氢脆,氢脆会引起金属材料失效,使金属失去延展性、开裂并最终破坏其结构完整性形式;(4)热管理,在较大的燃料电池堆中,放热反应使热量会积聚,导致热管理系统质量增加,对燃氢涡轮发动机而言,氢燃料在燃烧前需要热交换器来蒸发液态氢。

如图7所示,初步设想了氢能源窄体干线飞机概念,其座级为150座,标准航程为5 000 km,巡航高度

为31 000 ft,巡航 Ma 为0.75。依据储氢罐布置形式初步设想两种外形,分别以增加机身长度和机身截面高度的方式提高机身容积以容纳储氢罐,其效果如图7所示。由于液氢燃料存储结构质量较大,导致其飞机空机质量、着陆质量增加较多,但是得益于液氢燃料的高热值,仅需要传统航煤1/3质量的氢燃料即可完成相同航段飞行。另外由于储氢及管道等系统的增加,总体气动布局需重新设计,且燃氢涡轮发动机的进展需考虑发动机供应商的研制进展,氢能源窄体干线飞机的设计实现还存在较大难度。

2.3 新能源动力形式对比分析

SAF,电能和氢能等能源特点不同,适用的动力形式也不同,相关定性对比分析如表2所示^[14-17]。氢燃料能量密度最高,约为传统航煤和SAF的三倍;SAF体积密度最高,氢能、电能次之;锂电池+电推进功率密度最高。从CO₂和有害气体排放角度看,氢燃料电池和锂电池最优;从技术成熟度角度看,SAF最高,电推进技术次之,氢涡轮技术最低。

通过对不同能源形式可适用的飞机产品进行分析研判^[14-15,18],结果如图8所示。支线以下量级的小型飞机,动力架构上采用纯电动、电-电混合比较可行,储能方式可采用锂电池、高压存储氢燃料系统、液氢燃料系统等。在支线以上量级的商用飞机,未来碳减排除依赖既有传统动力改进及应用SAF外,主要是混合电推进技术和氢能源技术,重点包括氢燃

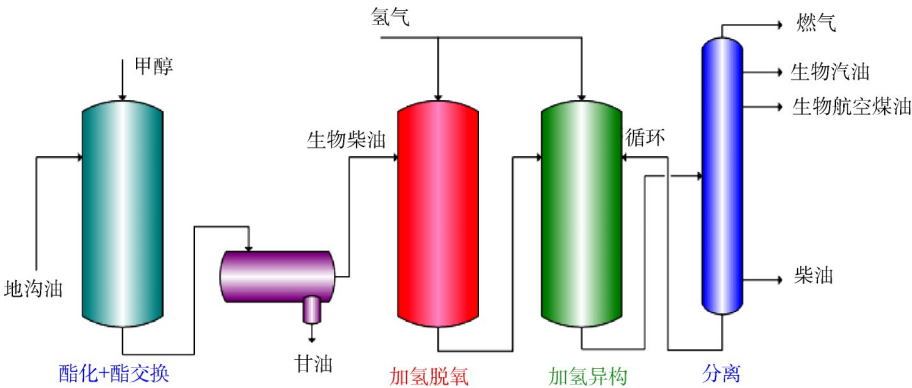


图6 可持续燃料应用探索

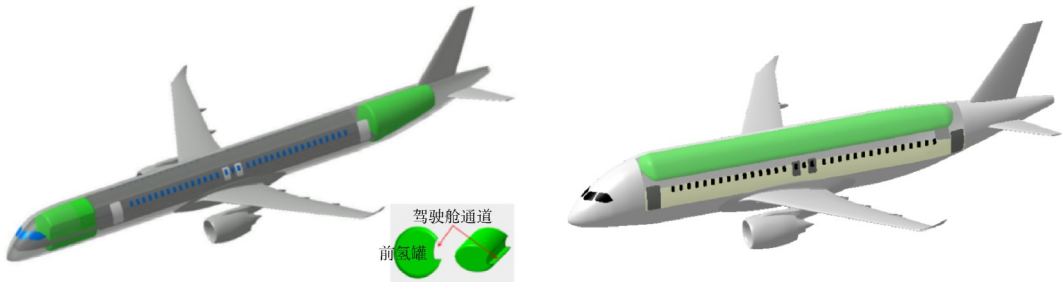


图7 氢能源窄体干线飞机设想示意图

料电池、氢涡轮、涡轮电+超导技术等。

对于商用飞机采用不同能源形式的效益分析,综合国内外行业机构的研究^[14-15,18],基本结论如下:SAF 应用方面,其 CO₂减排潜力可达到 80%,飞机和发动机只需做适应性改进;油电混动方面,应用串联混动和并联混动等不同形式动力,CO₂可减排 20%~70%;氢能应用方面,可实现 100% 碳减排,污染物降低 40%~90%,对环境影响和成本分析如表 3 所示。

通过对新能源动力形式、适用民机产品范围、不同能源效益等方面的对比分析可见,与 SAF 和电能相比,氢能源具有能量密度高、减碳效果好、污染低等优点,是实现零碳飞行的最终途径,但由于目前氢能

源应用技术成熟度较低,尤其是氢储存技术、氢传输技术以及氢涡轮发动机设计技术仍处于技术开发阶段,因此近期新能源的焦点依然是 SAF 的应用以及混电技术的研发,逐步开展氢燃料电池与氢涡轮飞机的应用研究。

3 商用飞机对新能源动力的需求分析

3.1 商用飞机对新能源动力的需求

世界经济论坛、麦肯锡和多家气候转型组织对 2050 年航空燃料占比进行了预测^[19],如图 9 所示,生物质 SAF 将占到总燃料比的 24%,人工合成 SAF 将占 48%,氢能的占比大致为 25%,电能的占比大致为 3%。

表 2 不同能源动力形式对比分析^[14-17]

	能量密度	体积密度	功率密度	减碳	减有害气体	技术成熟度
氢燃料+热机			★★★★	★★★★★	★★★★	★★★
氢燃料电池+电推进	★★★★	★★	★	★★★★★	★★★★★	★★★★
氢燃料+涡轮电			★★★	★★★★★	★★★★	★★
锂电池+电推进	★	★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★
可持续燃料+热机	★★★	★★★★★	★★★★	★★	★★	★★★★★
可持续燃料+涡轮电			★★★	★★★	★★	★★

注:★表示该能源动力形式在对应特征下的大致水平

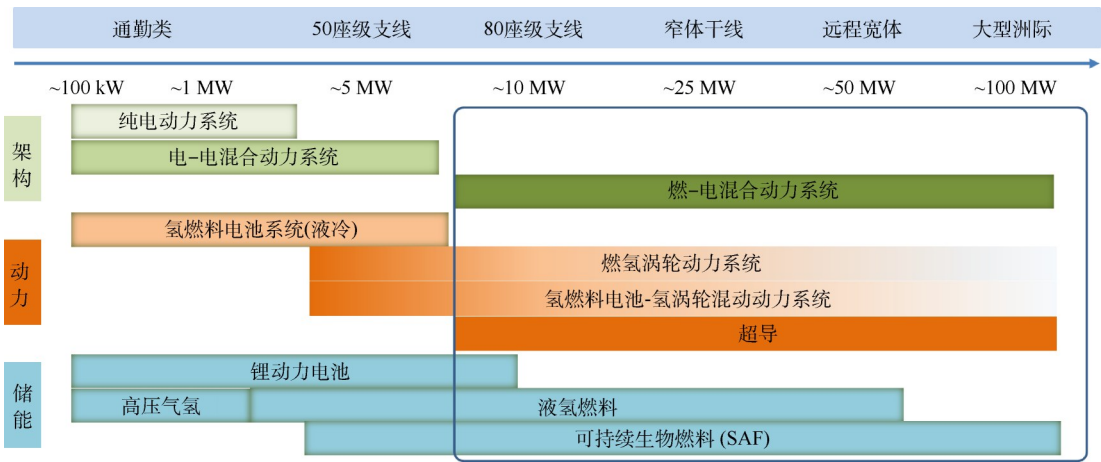
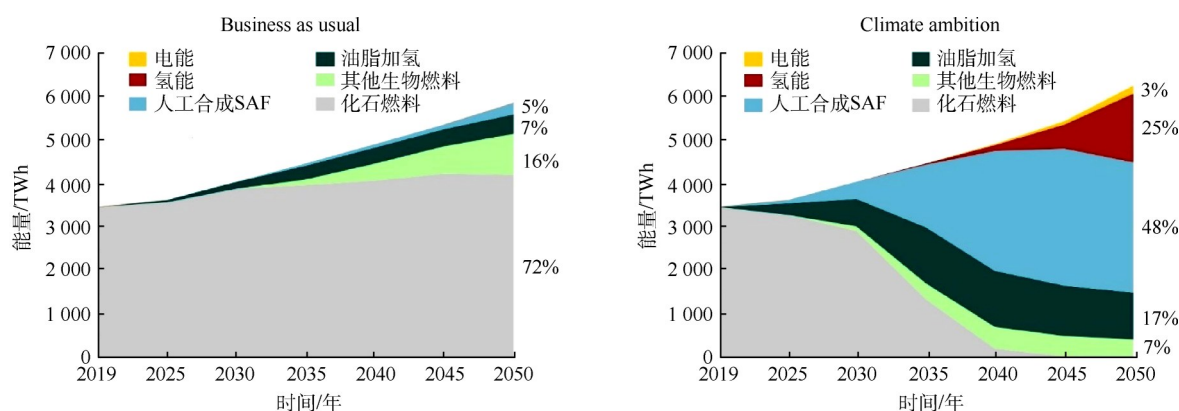


图 8 商用飞机减排技术的产品适用范围^[14-15,18]

表 3 氢能源飞机应用环境及成本收益^[14]

类型	座级/航程	动力	环境影响	成本
支线飞机	35~80座 1 000 km	氢燃料电池	碳减排 100%, 污染物降低 80%~90%	CASK (Cost per Available Seat Kilometer, 单位可提供客公里成本) 增加 5%~15%, 单机售价低 10%
短程飞机	81~165座 2 000 km	氢燃料电池+氢涡轮机混合推进	碳减排 100%, 污染物降低 70%~80%	CASK 增加 20%~30%, 单机售价低 5%~10%
中程飞机	166~250座 7 000 km	氢燃料涡轮机	碳减排 100%, 污染物潜在降低 50%~60%	CASK 增加 30%~40%, 单机售价低 0~5%
远程飞机	>250座 10 000 km	氢燃料涡轮机	碳减排 100%, 污染物潜在降低 40%~50%	CASK 增加 40%~50%, 技术取得重大突破才有竞争力

图9 世界经济论坛、麦肯锡等机构对2050年航空燃料组成的预测^[19]

为满足未来商用飞机碳减排目标,SAF、全电/混合电推进、氢动力等需要满足以下发展需求:

(1)对于SAF,需降低生产成本,提升人工合成SAF生产比例。

(2)对于全电/混合电推进动力,2030年固态锂电池能量密度需大于700 Wh/kg,燃料电池系统功率密度大于1 kW/kg,具备支撑1~2 MW等级电推进系统能力,以满足未来支线飞机需求;2040年,电力电子、电机功率密度需达到15 kW/kg,燃料电池系统功率密度大于2 kW/kg,锂电池能量密度需大于1 000 Wh/kg,以支撑在未来中远程飞机中提前布局燃料电池APU、多电、电推进等技术。

(3)对于氢动力,预计2045年左右,氢涡轮发动机、大功率涡轮发电和电推进等技术的产业应用将取得突破,液氢和超导等技术逐渐成熟,氢能存储质量分数不低于50%,电力电子和电机系统功率密度大于20 kW/kg,相关技术可用于混合电推进/氢动力干线飞机。预计到2040年初期,航空业对液氢的需求将达到约1 000万吨,到2050年后期,将达到约4 000万吨,因此氢的产能及配套设施建设需同步发展。

3.2 不同能源动力关键技术分析

3.2.1 可持续航空燃料应用主要关键技术

针对SAF应用,从产业和技术角度需要解决以下问题^[20]:

(1)降低制备成本,提升供应能力。目前SAF的生产成本约为航空煤油的2~8倍,即便是当前相对成熟的HEFA(加氢酯和脂肪酸)工艺,生产成本也相当于航空煤油的1.9~2.8倍。尽快将SAF的成本降到与航空煤油基本相同是当下的关键之一。此外,在全球范围内支持SAF生产、运输和应用的基础设施体系也远未成形,因此SAF的供应保障系统也是当前需要关注的重点。

(2)明确组分及特性,简化认证流程。业界对

SAF的性能特性还缺乏全面系统的研究,尽管100%SAF已试飞成功,但根据ASTM要求SAF实际应用混合体积仍被限制在了50%。因此,对SAF的组分和特性开展全面、系统的研究十分必要。ASTM D4054是适航认证过程中评估新型航空燃料和燃料添加剂的核心标准操作规程,其认证过程需反复迭代且异常严格,因此,优化认证技术,简化认证程序,可以有效减少认证时间并降低认证成本,对SAF的推广应用可起到积极促进作用。

3.2.2 混合电推进系统应用关键技术

针对混合电推进系统,从飞机设计角度需要重点解决以下问题:

(1)飞机-推进系统一体化设计技术^[21]:混合电推进的应用涉及飞机气动布局的优化设计,需要分析飞机与推进系统一体化集成的综合气动收益机理及关键参数影响规律,突破飞机-推进系统内外流耦合气动仿真及动力、气动特性等综合性能评估等技术难点。

(2)电涵道风扇与推进电机一体化设计技术:混合电推进技术应用需要建立电涵道风扇技术参数与电机技术参数之间的数学物理关系,关键在于尽可能提高系统效率,降低系统质量,从而实现电涵道风扇和推进电机的全工况高效稳定运行。

3.2.3 氢动力系统应用关键技术

针对氢动力系统应用,从飞机设计角度需要重点解决以下问题^[22-23]:

(1)氢能飞机动力架构设计与气动布局技术:氢能应用相关的动力架构包括传统燃氢涡轮、氢涡轮电推进、氢燃料电池推进等多种形式,需从能量效率、质量代价以及气动收益等维度开展架构权衡,还需探索氢能飞机支撑翼、盒式翼、多机身等非常规布局,论证BLI、分布式推进等先进布局的气动、噪声综合收益,以支撑氢能飞机总体设计优化。

(2)机载液氢储运与结构一体化设计技术:由于液氢储存条件苛刻,氢能飞机必须突破低温、高循环寿命和高安全性的液氢储罐设计与制造难题,为提高液氢飞机结构质量效率,还需考虑与机体结构一体化的设计技术,提升安全性且优化飞机质量^[22]。

(3)液氢动力系统飞行验证与适航影响分析:相比国外,国内尚无机载液氢储运和氢动力装置的飞行验证基础平台和飞行经验,氢燃料对飞机安全性、气体排放、航迹云的影响尚不明确,只有解决飞行验证和适航问题才能实现装机应用。

4 总结与展望

4.1 商用飞机新能源产品方向

基于我国商用飞机研发现状和低碳发展需求,综合考虑技术实现的难易程度,未来新能源商用飞机发展初步构想如图 10 所示。一是加快实现 SAF 的替代使用,研发油(SAF)电混合或氢能源动力的支线商用飞机,二是推动研发燃氢涡轮动力、氢燃料电池和氢涡轮混合动力的窄体干线客机,三是研发基于 SAF 或氢涡轮推进的大型宽体客机。在此过程中,需要进行多种飞发布局形式及多种能源动力组合方案的权衡比较,逐步提升技术成熟度。

4.2 新能源动力重点发展技术方向

为支撑上述新能源商用飞机产品的发展构想,需重点关注 SAF、多电、全电/混合电推进以及氢能源动力等技术方向。一是促进飞机与发动机共同推进 SAF 装机应用,实现减碳发展;二是以飞机需求为牵引,引领高功率、高密度发配电、多电系统集成等关键核心技术攻关,提升电能使用比例及效率,拓展减碳渠道;三是探索发展全电/混合电推进技术,提高分

布式电推进等技术的成熟度,优化飞机能源动力架构,提升减碳力度;四是预先研究氢动力技术,为氢能飞机夯实技术基础,最终实现飞机净零排放。

4.3 国产商用飞机碳减排体系思考

为了支撑未来新能源商用飞机产品和技术的发展,需要进行全生命周期、全行业考量,对商用飞机碳减排体系进行系统策划,涵盖先进方案设计、安全适航、绿色制造、高效运营、绿色回收等重要环节,形成目标明确、层次明晰、逻辑清楚的体系性指引,如图 11 所示。

(1)基于国家“双碳”目标和航空业减碳目标分解情况,结合国际航空行业碳减排约束,明确我国商用飞机新能源绿色发展的顶层要求,通过自上而下和自下而上的迭代,形成具体目标和指标作为牵引。

(2)根据未来商用飞机的战略需求、市场需求等因素,确定我国航空碳排放基线,构建绿色商用飞机低碳化发展评估指标体系,确定新能源商用飞机产品发展方向,兼顾技术发展状态,论证收敛可行产品定位。

(3)开展新布局、新能源、新动力、新系统相关关键技术研究,针对 SAF、混合动力和氢能源等不同能源模式,厘清相关技术低碳化潜力评估结果、参考技术方案、难点技术问题清单,组织跨学科跨多领域协同攻关,提升技术成熟度。

(4)从商用飞机产品全生命周期发展、全产业链协同的角度,对绿色制造/绿色回收、安全运行与适航方面的应对措施和技术研发需求进行研究,对基础设施、商业运营、市场机制(如碳交易、碳抵消等)和政策支持方面的应对措施和发展需求重点关注,从而系统化地构建起未来新能源商用飞机支撑体系。

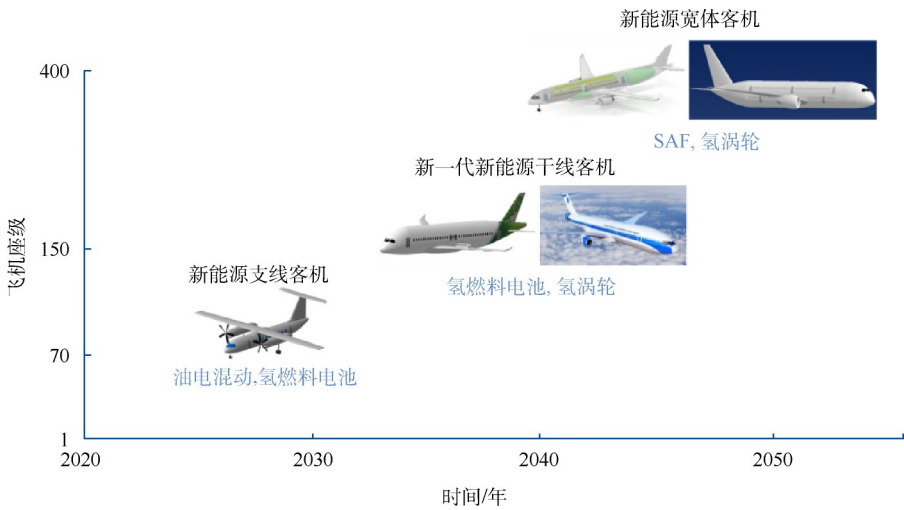


图 10 未来新能源商用飞机产品发展初步构想

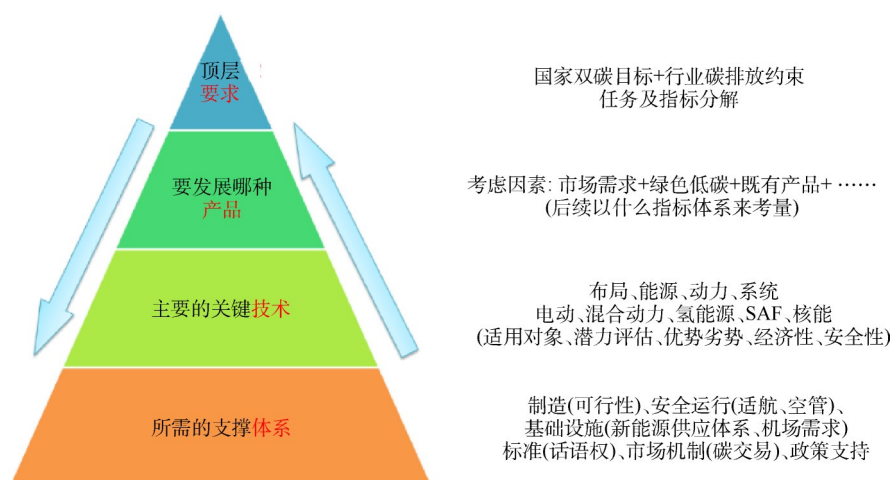


图11 关于策划商用飞机碳减排体系的思考

致谢:感谢中国工程院咨询项目“航空制造‘双碳’发展战略研究”的资助。

参考文献

- [1] MONVOISIH M. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA) first editon [R]. USA: ICAO, 2018.
- [2] 于占福. 航空产业碳中和之路全方位解析[EB/OL]. (2021-08-24) [2023-09-08]. <https://www.ccaonline.cn/yunshu/yshot/667761.html>.
- [3] 波音. 可持续发展的民航业是什么样的?[EB/OL]. (2023-09-27) [2023-09-28]. <https://new.qq.com/rain/a/20230927A03V2800>.
- [4] 陈培儒. 波音的“环保工程”[J]. 大飞机, 2021(11): 50-53.
- [5] 李悦霖. 波音开始常规使用 SAF[J]. 国际航空, 2022(5): 74-75.
- [6] ALRASHED M, NIKOLAIDIS T, PILIDIS P, et al. Utilization of turboelectric distribution propulsion in commercial aviation: a review on NASA's TeDP concept[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(11).
- [7] Zeroe: Towards the world's first zero-emission commercial aircraft [EB/OL]. (2020-09-21) [2023-09-08]. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>.
- [8] DEBNEY D. Zero-carbon emission aircraft concepts [R]. UK: ATI FlyZero, 2022.
- [9] ReFuel EU Aviation. European Economic and Social Committee [EB/OL]. (2021-03-21) [2023-09-08]. <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/refueleu-aviation>.
- [10] CHIARAMONTI D. Sustainable aviation fuels: the challenge of decarbonization [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 1202-1207.
- [11] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1).
- [12] 李龙, 王鹏. 混合电推进系统关键技术研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021(3): 49-53.
- [13] 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.
- [14] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered aviation – A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 [EB/OL]. (2020-07-22) [2023-09-08]. <https://data.europa.eu/doi/10.2843/471510>.
- [15] 韩玉琪, 王则皓, 刘英杰, 等. 通向碳中和的航空新能源动力发展路径分析[J]. 航空动力, 2022(3): 13-15.
- [16] 王翔宇. 欧洲航空业净零排放发展战略分析[J]. 航空动力, 2021(4): 14-18.
- [17] THOMSON R. Hydrogen: A future fuel for aviation [R]. Germany: Roland Berger, 2020.
- [18] GREWE V. Towards a sustainable air transport system [R]. Netherlands: TU Delft & NLR, 2021.
- [19] GERASIMOVA E. Ten critical insights on the path to a net-zero aviation sector [R]. New York: Mckinsey & Company, 2022.
- [20] 王翔宇. 可持续航空燃料发展展望[J]. 航空动力, 2022(2): 24-28.
- [21] 杨栋华, 唐智礼. 分布式混合电推进的布局设计与优化[J]. 航空动力, 2019(5): 68-70.
- [22] 张扬军, 彭杰, 钱煜平, 等. 氢能航空的关键技术与挑战[J]. 航空动力, 2021(1): 20-23.
- [23] 苗安康, 袁越, 吴涵, 等. “双碳”目标下绿色氢能技术发展现状与趋势研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(4).

(编辑:朱立影)

Analysis and prospect of new energy power development path of commercial aircraft

YANG Zhigang, WANG Man, ZHANG Zhixiong, ZHANG Jiong, WANG Zhaobing,
ZHANG Yawei, ZHANG Xintan

(COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Focusing on the background of carbon emission reduction in the global air transport industry, this paper discusses how to develop green commercial aircraft in order to provide a reference for the low-carbon development of commercial aircraft in China. Firstly, it analyzes carbon emission reduction situation of world aviation industry and summarizes the current situation and trend of low/zero carbon development in Europe and the United States. Secondly, it analyzes the development path of new energy propulsion and related exploration work from three directions: sustainable aviation fuel (SAF), hybrid electric propulsion, and hydrogen propulsion. Thirdly, for the future development of green commercial aircraft products, the demand analysis and the main key technologies are presented. Finally, the product development and key technology development direction of green commercial aircraft are summarized with a proposed carbon emission reduction system for commercial aircraft.

Key words: Commercial aircraft; Sustainable aviation fuel; Hybrid electric propulsion; Hydrogen propulsion; Development path; Review

Received: 2022-10-25; **Revised:** 2023-11-08.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2210087

Foundation item: Chinese Academy of Engineering Project "Research on the 'Dual Carbon' Development Strategy of Aviation Manufacturing" (2022-HYZD-03-02).

Corresponding author: WANG Man, E-mail: wangman2@comac.cc