

# 航空制造业绿色低碳化发展研究

吴光辉<sup>1</sup>, 张志雄<sup>2</sup>, 王兆兵<sup>2\*</sup>, 苗强<sup>1</sup>, 王宁<sup>2</sup>, 张亚伟<sup>2</sup>, 常硕<sup>2</sup>, 贾康<sup>2</sup>

(1. 中国商用飞机有限责任公司, 上海 200126; 2. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 在各国共同应对气候变化的大背景下, 航空业面临的碳减排任务压力极大; 民机产品设计及制造过程中的碳减排是实现航空净零排放的核心途径, 及时开展航空制造业绿色低碳化发展研究对支撑实现民航业“双碳”战略目标具有重要意义。本文从满足未来碳排放强制标准、布局新能源技术发展、推动可持续发展方面分析了航空制造业绿色低碳化的发展需求, 梳理了国内外民机产品设计、材料应用、生产制造的发展现状, 凝练了我国航空制造业面临的主要问题, 着眼于民机产品环保竞争力提升、民机生产制造能耗降低, 研究提出了航空制造业主要技术方向的降碳潜力和阶段性发展目标, 阐述了绿色飞机设计、绿色飞机材料、绿色飞机制造3个技术维度的发展路线。从加强顶层政策约束及规划、开展先进技术研发、促进产业链协同、布局碳补偿与交易等方面提出了管理性举措建议, 以期全面推动航空制造业绿色低碳化发展。

**关键词:** 航空制造业; 绿色; 低碳化; 飞机设计; 材料; 飞机制造

**中图分类号:** V1 **文献标识码:** A

## Green and Low-Carbon Development of Aviation Manufacturing Industry

Wu Guanghui<sup>1</sup>, Zhang Zhixiong<sup>2</sup>, Wang Zhaobing<sup>2\*</sup>, Miao Qiang<sup>1</sup>, Wang Ning<sup>2</sup>,  
Zhang Yawei<sup>2</sup>, Chang Shuo<sup>2</sup>, Jia Kang<sup>2</sup>

(1. Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200126, China;  
2. COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** In the context of a global joint response to climate change, the air transport industry faces great pressure on carbon emission reduction. Carbon reduction in the design and manufacturing of civil aircraft products is the core approach to realizing net zero emissions in the aviation industry. Conducting research on green and low-carbon development of the aviation manufacturing industry is crucial for the carbon peaking and carbon neutralization of China's air transport industry. This study analyzes the demand for low-carbon development from three aspects: satisfying the future mandatory standards for carbon emissions, developing new energy technologies, and promoting sustainable development of the aviation industry. The current status of design, material application, and manufacturing of civil aircraft products in China and abroad is investigated. Major problems faced by the industry are examined. This study focuses on improving the environmental protection competitiveness of civil aircraft products and reducing energy consumption during manufacturing, and proposes the carbon reduction potentials and staged goals for major technologies in the aviation manufacturing industry. The development routes are proposed from three technical aspects: green design, materials, and manufacturing of aircrafts. Furthermore, regulatory measures are proposed from the aspects of top-level planning, advanced technology research and development, industrial chain coordination, and carbon compensation and trading.

**收稿日期:** 2023-03-24; **修回日期:** 2023-06-02

**通讯作者:** \*王兆兵, 中国商飞北京民用飞机技术研究中心高级工程师, 研究方向为民机产品研究与策划; E-mail: wangzhaobing@comac.cn

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

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

**Keywords:** aviation manufacturing; green; low-carbon; aircraft design; materials; aircraft manufacturing

### 一、前言

世界经济的持续发展、航空科技的不断创新推动了航空运输业的稳步增长，但也使航空业发展面临能耗增加、环境污染加剧等挑战，亟需采取更高的环境保护要求、节能降碳目标以满足可持续发展的现实需要。民航业产业链长、涉及面广，覆盖民航全领域、全主体、全要素、全周期，与民航的上/下游产业、其他行业紧密相关，还与数字经济、先进制造、绿色产业等深度融合，因此，实现民航业“双碳”战略目标是一项系统工程。

目前，国际民航组织（ICAO）大力推动绿色航空发展，制定了更为严苛的污染物排放和噪声标准，力争在2050年实现全球航空运输业的净零排放。国外主要航空发展国家和地区也提出了一系列航空业零碳排放技术规划，如欧洲的“2050年目标——欧洲航空零排放路线图”、美国的“地平线2050：可持续航空未来的飞行规划”、英国的“ATI技术战略2022——零碳目标”。在世界碳减排形势趋紧的背景下，我国民航业碳减排工作稳步推进，发布《“十四五”民航绿色发展专项规划》（2022年）<sup>[1]</sup>，通过顶层规划和任务部署，推动民航业绿色、低碳、循环发展。我国航空制造企业也制定了“双碳”目标，如中国航空工业集团公司计划在2025年初步构建绿色航空体系，到实现碳达峰时基本建成绿色生产体系，到实现碳中和时完全建成零碳排放的工业体系，最终实现能源利用率达到国际先进水平；中国商用飞机有限责任公司力争尽快实现碳达峰、碳中和，实现绿色低碳化发展。航空制造业处于民航产业链的前端，包括飞机产品的设计研发、生产制造等。已有研究多是从航空产品设计角度提出未来新能源应用的路径<sup>[1]</sup>，而围绕航空制造业核心环节系统策划绿色低碳化发展路径的研究较少。为有效应对气候变化和航空业碳减排任务压力，及时开展航空制造业绿色低碳化发展研究，对支撑航空业高质量发展具有重要意义。

本文围绕民机产品的设计研发与制造过程，从产品设计、材料应用、制造技术等方面梳理航空制造业的发展现状与存在的问题，分析主要技术方向的降碳潜力，明确航空制造业的绿色低碳化发展目标、重点任务、发展路径，以期对航空业绿色可持

续发展的技术和管理研究提供参考。

### 二、航空制造业绿色低碳化发展的需求

从民航业主制造商的发展历史以及航空科技创新的发展趋势来看，民机创新主要有两种途径，一是在既有产品基础上，逐步升级换代发展新产品；二是大跨度、颠覆式的全新产品创新。未来20年，以安全高效、绿色环保、经济舒适、智能互联为特征的“新构型、超声速、新能源、智能化”全新民机产品将推向市场。绿色低碳化是未来航空制造业的重要发展方向之一。

#### （一）满足适航碳排放强制标准的需要

2016年，ICAO建立了国际航空碳抵消与减排机制<sup>[2]</sup>，并于2017年审议通过了关于飞机二氧化碳排放的新国际标准——附件16《环境保护》第III卷《飞机二氧化碳排放》<sup>[3]</sup>。为满足新的适航碳排放标准，我国民用航空局修订了《涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定》（CCAR-34），明确了民用飞机碳减排的指标要求，推动民机产品从设计研发端就要满足低碳、降噪和绿色发展的要求。

#### （二）适应更加广泛的新型能源应用的需要

当前，我国正在积极推进能源革命，可持续航空燃料（SAF）、氢能、电力等多种新型的非化石能源发展迅速，为航空业实现“双碳”战略目标提供了新的路径。为提高国际竞争力，未来民机发展需要提前储备SAF、氢能、全电/混合电推进等新能源新动力技术，不断提升绿色环保水平。

#### （三）推动先进设计制造技术持续发展的需要

新一代信息技术为民机的数字化、智能化发展创造了良好机遇，而新一代能源技术为民机绿色低碳化发展带来了契机。推进更多新兴跨界技术与传统民机技术融合创新，是民机创新和可持续发展的重要途径之一。未来民机制造业需要考虑新能源、新材料、智能化、数字化等前沿技术的复合创新与融合应用，推动先进设计、制造技术持续发展，不断提升产业竞争力。

### 三、航空制造业绿色低碳化发展的现状与问题

#### (一) 航空制造业绿色低碳化发展现状

##### 1. 绿色飞机设计

为提升飞行运行效率、满足减碳要求,主要航空制造业国家和地区围绕新型气动布局和新能源推进技术,开展了一系列探索和研究,飞机设计的主要方向有桁架支撑翼、翼身融合、尾部边界层抽吸布局,分布式推进,纯电、混合电、氢涡轮推进等。以波音公司、空客公司为代表的制造商,在美国航空航天局(NASA)亚声速超绿色飞机研究(SUGAR)<sup>[4-10]</sup>和可持续飞行国家合作伙伴关系<sup>[11]</sup>、欧盟“洁净天空”<sup>[12]</sup>等项目的支持下开展了系统深入的探索性研究。

在传统能源高效亚声速飞机方面,主要的航空业制造国家聚焦气动布局、机体结构和动力装置的升级改进,以进一步提升燃油经济性,减少碳排放。2023年,NASA与波音公司合作开展全尺寸跨声速桁架机翼演示飞机研究,为2030年以后推出新一代绿色单通道客机提供技术支撑,预期燃油消耗和排放值将下降30%。我国ARJ21支线飞机持续推进减重、减阻和降噪等研究,包括座椅地板、液压管路减重优化,舱门密封、襟翼展向间隙密封等减阻方式,液压系统元件发动机驱动泵(EDP)管路降噪。C919飞机采用了新一代超临界机翼、新型鲨鳍小翼、双曲面承载风挡机头和低阻后体气动等布局设计,使用的第三代铝锂合金材料、先进复合材料用量分别达到8.8%、12%,实现了CO<sub>2</sub>排放量比现役同座级飞机低12%的良好目标<sup>[13]</sup>。

在新能源飞机推进技术方面,已有多种发展路径。①在电推进方面,基于锂电池、涡轮发电、氢电推进支线飞机的研究验证不断推进,如法国Aura Aero公司电动支线飞机ERA、荷兰MAEVE公司分布式电推进设计,部分氢燃料电池支线项目已经成功首飞(如美国Zeroavia公司的道尼尔228氢燃料电池改装验证机、环球氢能公司的DHC-8氢燃料电池动力系统项目)。受限于电池能源密度和功率密度,纯电池电推进在大型客机上的应用还需进一步研究。②在混合电推进方面,大型客机混合电推进项目推出如NASA的STARC-ABL、波音公司SUGAR Freeze和SUGAR Volt等概念产品;在动力

系统上,通用电气航空公司和赛峰公司合作的开式转子发动机RISE项目考虑应用混动技术,罗罗公司持续推动涡轮发电混动推进系统研发。③在燃氢涡轮方面,空客公司推出ZEROe项目,大力推进氢能飞机预先研究和产业链建设;普惠公司开展氢蒸汽喷射间冷涡轮发动机(HySIITE)研究。

在核能航空发动机方面,核能作为已知能量密度最大的能源,有利于大幅增加飞机航程,也是未来航空交通领域潜在的新型能源形式。通用电气公司提出了直接循环式航空推进喷气发动机的概念,普惠公司提出了间接循环式航空推进喷气发动机的设想<sup>[14]</sup>。然而,目前新型核能航空发动机的研究仍处于起步阶段,未来走向实用化需解决核反应堆小型化、核辐射屏蔽以及有效控制核污染等关键问题。

##### 2. 绿色飞机制造

世界主要航空制造商积极推进绿色飞机制造,并取得了初步的进展。波音公司连续三年发布《可持续发展报告》,承诺到2030年在制造和基础设施领域实现碳净零排放,温室气体排放与2017年相比减少55%,可再生能源利用率达到100%。在生产阶段,波音公司在位于华盛顿州伦顿、南卡罗来纳州查尔斯顿和得克萨斯州的工厂已实现100%使用可再生能源,并通过回收过剩复合材料生产电脑外壳和汽车零部件,每年将减少450 t固体废物的排放;在使用阶段,提供数据分析服务,协助航空公司优化飞行计划和燃油效率;在退役阶段,重复使用和认证飞机部件,减少资源浪费。

空客公司在碳减排方面力争到2050年实现净零排放,积极参与环保组织和航空脱碳计划,如航空运输行动组、国际航空航天环境组织、“洁净天空”计划等。2019年,空客公司推出“High5+”计划,以在整个供应链中减少全球活动碳足迹。在生产阶段,位于图卢兹的A350总装厂建设了辐射光电板,为飞机生产制造提供所需电能的55%;采用基于钛合金的增材制造技术生产零部件,在减少研制时间的同时使飞机减重30%;采用激光熔融工艺减少了原材料浪费,并在飞机喷涂时采用低聚氨酯油漆和低挥发性的有机物溶剂,显著降低了有害物质的用量和挥发量。在运行阶段,升级空中交通管理以适应碳减排需要。在退役阶段,推出飞机使用寿命终结的高级管理流程项目,实现老旧飞机的退役、拆解和循环利用产业化发展。

中国商用飞机有限责任公司积极响应国家战略和低碳发展需求，提出了“绿色商飞”的建设构想，明确了绿色飞机、绿色家园、绿色产业链“三位一体”的发展方向。在制造环节，开展了无铬阳极氧化、环保化铣保护胶等多项绿色工艺攻关，大幅减少铬酸废液和化学铣切废碱液的排放；推进燃气锅炉低氮改造、喷漆喷胶废气改造等设备升级，大幅减少氮氧化物和挥发性有机物的排放量；搭建了制造园区智慧环保管理平台，实现主要污染物排放数据、环境指标和重点能耗数据等的实时监控；关注产业链发展，积极推进绿色材料采购、复合材料回收利用、供应链绿色指标体系建立等工作。

### 3. 绿色飞机新材料

“一代飞机、一代材料”，新材料的应用是航空技术发展和进步的最重要推动力之一。未来材料的发展集中在结构材料和功能材料方面，通过减阻、减重、增加新型功能等方式提升飞机低碳化发展水平。

在新型结构材料方面，主要应用复合材料、新型合金材料等进行机体减重。从国外大型商用飞机材料应用的情况看，传统的铝合金及结构钢在飞机上的用量逐渐减少，而复合材料和钛合金的占比快速提升。波音787飞机首次将复合材料用量提高至50%，空客A350 XWB飞机的复合材料用量提高至52%。同时，钛合金在具有可以减轻结构重量、与复合材料易搭配应用等优势，其用量比例也逐步提升至10%以上。此外，第三代铝锂合金性能优越，是当前最具竞争力的先进材料，可使飞机铝合金零部件的质量减轻14%~30%。目前，行业内已经着手开发第四代铝锂合金，有望进一步提升相关性能指标。

在新型功能材料方面，主要通过增加或提升飞机功能来实现减阻设计、材料减重等，目前这些方向多数处于技术探索研究阶段，尚未在商用飞机产品中大规模应用。例如，基于石墨烯的柔性传感器和柔性电子印刷技术研制的智能蒙皮，可以感知飞行器流场特性，为飞机结构外形优化、气动载荷减缓、升阻力测量、飞行状态预测和结构健康监测等方面提供关键信息。此外，石墨烯具有低密度和高导电率，采用石墨烯改性铜、铝等电缆导体材料，能有效提高电缆导体的强度和导电性能，降低飞机电缆重量。以镍钛合金为代表的形状记忆合金在一定载荷或温度条件下具有记忆和恢复其初始形状的能力，其驱动飞机结构变形可以避免传统飞机设计

需要的折中点，可应用到发动机排气装置的可变锯齿、面积可变喷气发动机风扇喷管、自适应后缘和可变曲面的连续后缘襟翼等，提升飞机在不同状态下的性能，降低碳排放。

### (二) 航空制造业绿色低碳化发展面临的问题

民机的全生命周期主要分为设计、制造、运营和退役4个阶段。目前，我国在飞机全生命周期碳排放定量评估方面尚处于探索研究阶段，国外已应用生命周期评估模型<sup>[15,16]</sup>以典型窄体飞机A320ceo和宽体飞机A330、波音777为例，开展了飞机全生命周期碳排放评估。相关评估结果表明，飞机制造阶段的碳排放比例与材料种类、重量紧密相关，但是飞机碳排放主要集中在运营阶段。以窄体飞机为例，每架飞机在制造阶段的总碳排放量仅是飞机平均机龄20年运营期间碳排放量的0.1%<sup>[15,16]</sup>；但如果考虑飞机产能问题，飞机制造过程中的碳排放总量也不容小觑。随着我国ARJ21、C919等机型逐渐推向市场，生产交付的飞机数量将逐年增加，航空制造业低碳化发展的压力会不断增大，存在的不足和制约集中在以下两个方面。

(1) 在民机产品设计上，飞机燃油效率决定了运营阶段的碳排放量，是航空业碳减排的根本途径，亟需从气动布局、动力系统等方面开展相关研究及论证。我国民机先进气动布局、结构材料和动力装置等技术先进国家相比尚有差距，需要不断进行技术攻关和品质提升。目前，我国航空制造业虽然稳步推进，ARJ21等市场化运营的机型产品需要不断优化升级，C919等新进入市场运行的机型产品需要保持市场竞争力，但也应注重未来新能源飞机等技术研发的知识储备和技术攻关。

(2) 在民机产品制造上，随着国产民机交付数量增长，生产制造带来的能源消耗和碳排放随之提高，对于航空制造也是前所未有的挑战，如复合材料制造效率的提升，增材制造、智能制造技术的应用，资源的循环利用等。开发绿色工艺，运用先进制造技术，增加绿色能源使用，合理管控民机制造产业链，才能达到节能减排的综合效果。

## 四、航空制造业绿色低碳化发展的目标论证

作为全球经济活动的重要组成部分和支撑部分，航

空运输业的碳排放总量和占比逐年增加,如2019年航空运输业的碳排放量约占全球交通运输业碳排放总量的10%、全球碳排放总量的2%。根据ICAO预测,如果航空运输业不进行绿色低碳转型,到2050年航空运输业碳排放将增长到全球碳排放总量的25%。2021年,在第77届国际航空运输协会年度大会上,国际航空运输协会(IATA)承诺其成员航空公司到2050年实现净零排放。欧盟提出了名为“减碳55”(Fit for 55)的一揽子计划,承诺到2030年将温室气体净排放量较1990年减少55%。在此背景下,各国纷纷加快了革新的步伐,航空业可持续发展受到业内的普遍关切。

### (一) 降碳潜力分析

航空制造业技术革新是实现民机绿色化、低碳化发展的重要力量,其中,飞机设计、新材料应用等技术至关重要。飞机的绿色设计和材料应用按照发展时间、变化程度主要有两种方案。一是在现有飞机上不断提升设计水平和材料应用水平,挖掘飞机本身的降碳潜力,包括使用更加高效的发动机,优化飞机气动、结构、材料选择等设计方案,降低飞机阻力,减轻飞机重量,实现更加高效的运行;二是进行飞机变革式发展,包括推动采用SAF、电力、氢能等新型能源,摆脱对传统化石能源的依赖。表1列出了航空制造业主要技术方向减碳潜力的结果分析。

表1 航空制造业主要技术方向的减碳潜力

技术分类	技术点	减碳潜力
总体气动	翼身融合、分布式推进、双气泡机身、支撑翼、鸭翼布局、盒式翼布局等颠覆式布局创新技术等	10%~30%
	自然/混合层流控制、大/超大展弦比机翼、边界层抽吸、先进翼梢小翼、表面微肋条、折叠翼尖等渐进式创新技术等	5%~15%
结构材料	自适应机翼后缘、柔性机翼、结构健康监测、结构/功能一体化、载荷减缓、载荷路径定制化结构技术,先进复合材料、柔性材料、高性能合金材料、增材设计制造等技术等	2%~8%
机载系统	先进总线、光传飞控、多电技术、综合热管理、智能驾驶、智慧健康管理、网络安保、飞行监控、数字飞机技术等	1%~8%
动力装置	传统能源动力技术,包括混动技术、开式转子、齿轮传动、新核心机等	10%~30%
	新型能源动力技术,包括全电推进装置、氢涡轮发动机、液氢储运与结构一体化设计、液氢动力系统验证与适航影响分析等	可达100%
	核能航空发动机技术,包括核反应堆,屏蔽设计、重量控制与抗撞击保护,总体结构设计及匹配,以及长寿命、高可靠、低流动损失换热器技术等	可达100%
总装制造	生产制造上下游产业链使用可再生能源,实现生产过程净零排放;全生命周期材料循环使用	可达100%

### (二) 发展目标

对标我国“双碳”战略发展目标与时间节点,从绿色飞机设计、绿色飞机材料、绿色飞机制造三大方向着手,梳理关键技术,在充分考虑技术发展需求与技术实现可能的基础上,未来我国航空制造业绿色低碳化发展目标如下。

到2030年,推动SAF装机验证工作,持续推动轻质材料、高温材料飞机应用;发展绿色工艺,减少原料浪费,实现航空产品设计制造过程的远程协同运行。

到2040年,推动电推进飞机、氢能源飞机关键技术的研究与初步应用,研发相关验证机;完成电动飞机材料研发,实现关键设备或制造单元的数字化智能化控制。

到2050年,开展电推进飞机、氢能源飞机研发并推动进入市场应用;开发新型智能材料、轻质材料并应用;实现资源高效清洁循环利用,建立较成熟的智能制造技术链条,实现制造过程全面智能化。

## 五、航空制造业绿色低碳化发展的技术路线

### (一) 绿色飞机设计技术

绿色飞机设计主要围绕传统能源飞机气动、总体、结构、系统设计提升以及新能源飞机设计两个维度提出未来关键技术的发展路线。在传统飞机设计方面,通过实施低碳发展技术,降低阻力,提高

安全性、经济性，降低时间成本，使大型飞机具备远航程、低油耗的气动性能优势，从而提升民机的整体性能。

在新能源飞机方面，重点关注 SAF、多电、全电/混合电推进、氢能源等技术，逐步实现航空业零排放的目标。一是采用 100% SAF 作为过渡方案，实现一定的减碳效果；二是开展电力电子、电机功率密度、系统集成等关键核心技术攻关，提升多电技术的成熟度和应用比例，拓展减碳渠道；三是发展燃料电池辅助动力装置（APU）、全电/混合电推进技术，提升储能系统功率密度和分布式电推进等技术成熟度，优化飞机能源动力结构，提升减碳力度；四是突破液氢储存、氢涡轮和超导技术应用，实现零排放。绿色飞机设计技术路线如图1所示。

### (二) 绿色飞机制造技术

推进制造工艺绿色化、过程智能化、装备数字化以及工厂节能研究，重点发展绿色切削、绿色表面处理工程等核心工艺，以工艺技术革新促进工艺无害化、低毒化发展，减少对人体与环境的污染；扩大增材制造技术的应用范围，提高机体结构增材制造部件装机应用比例；针对复合材料等轻质高效材料的生产制造，研究其绿色工艺规范、智能制造装备，提升制造效率，保障飞机减重；推动数字赋

能航空制造绿色低碳转型，通过制造过程和装备智能化升级促进减碳；积极推进航空制造企业节能增效，打造低碳工厂、工业园区和低碳产业链；大力发展制造产业链循环，通过飞机全生命周期资源高效循环利用降低碳排放，扩大复合材料和铝材的回收再利用。绿色飞机制造技术路线如图2所示。

### (三) 绿色飞机材料技术

开展传统飞机与新能源飞机新型材料开发与应用研究，聚焦推动飞机轻质化发展的材料、提升气动效率的智能材料、提升发动机效率的高温材料等关键方向，储备未来新能源飞机发展所需要的关键新型材料。绿色飞机材料技术路线如图3所示。

## 六、航空制造业绿色低碳化发展建议

### (一) 明确减碳总体目标，加强政策约束指导

航空制造业绿色低碳化发展是我国推动实现碳达峰、碳中和发展的关键环节之一，建议结合航空业特点制定符合绿色飞机设计、绿色飞机材料研发、绿色制造技术发展的航空制造业顶层规划和政策，从中长期规划、资金支持、责任考核以及教育培训等方面设定一套科学、合理、全面的“双碳”行动目标体系和行动指南。建立和健全落实

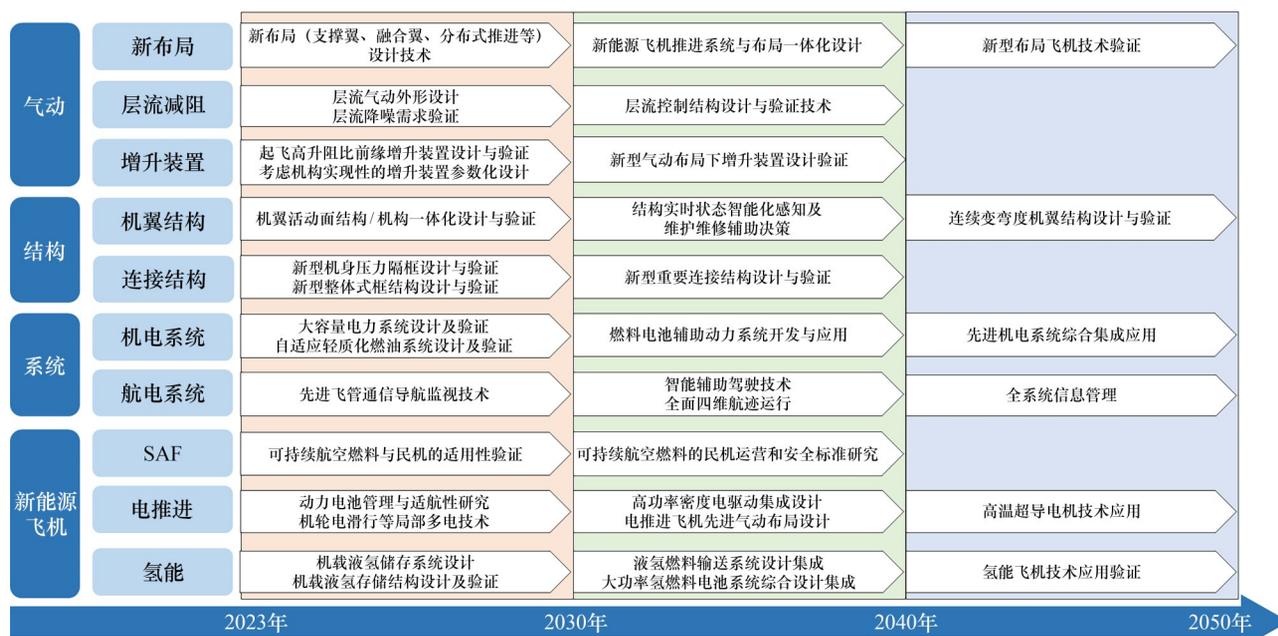


图1 绿色飞机设计技术发展路线图

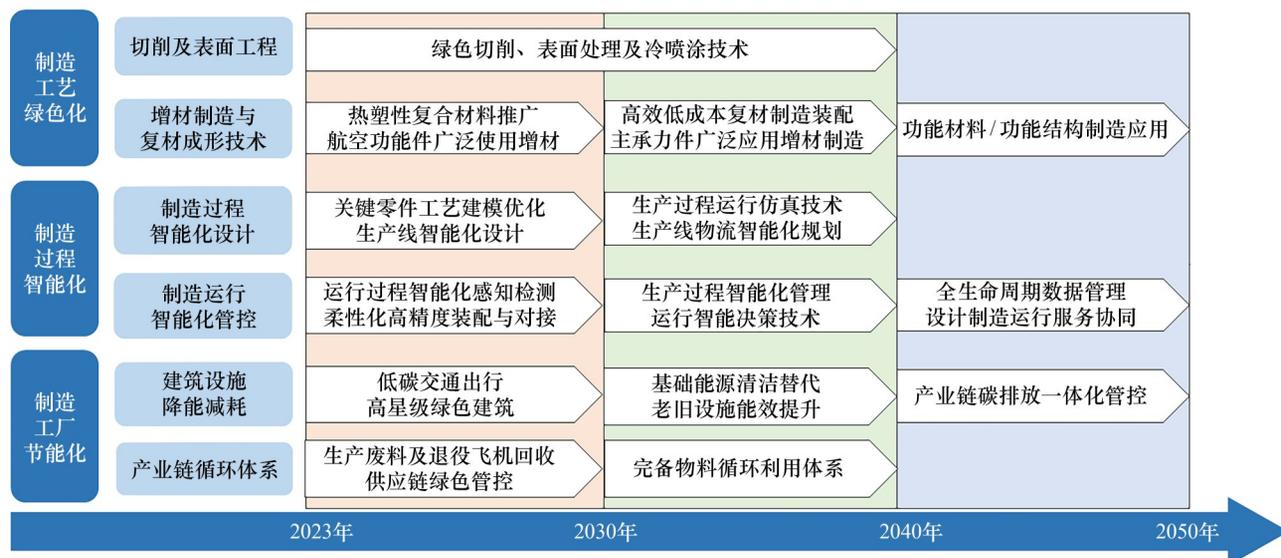


图2 绿色飞机制造技术发展路线图



图3 绿色飞机材料技术发展路线图

“双碳”行动的责任体系，明确主制造商以及供应商的工作协同机制，保障“双碳”行动任务落实落地。

## (二) 扩大资金支持，加强技术研发投入

加强对传统民机减排技术、新能源飞机创新技术等重点方向的资金支持，促进相关产品的研发。一是推动高效飞机技术研发与SAF装机验证，加强我国现有飞机产品与减排技术的适配性，如飞机产

品对各种比例SAF使用的验证；二是推动电动、混动、氢能技术的飞机应用研究，适时启动新能源飞机相关技术的储备研究；三是持续促进航空制造技术升级，包括新材料研发、绿色工艺发展、智能制造以及绿色工厂建设等，统筹全过程精益管理，促进航空制造业绿色低碳化发展。

## (三) 促进产业链协同，形成减碳产业联盟

引领并带动供应商和合作伙伴共同推进航空制

造减碳。一是制定可量化、规范化的供应商生产体系和产品碳排放衡量标准，以碳排放指标作为产品招标评估原则之一，推动全产业链减碳；二是建立“双碳”减排绿色文化宣传工作和全员参与的减排责任机制，加强低碳理念教育，群策群力减碳减排，并形成典型案例进行推广；三是将新能源发展视为自主可控的契机，组建新能源、低碳航空新机型产业联盟，更好发挥主制造商的引领作用以及国内动力系统供应商的牵头作用。

#### (四) 布局碳补偿与碳交易，促进航空制造融入减碳体系

航空工业是技术高度密集型行业，持续稳定的资金投入至关重要。航空制造业应积极运用金融工具（如发行绿色债券），引入市场交易机制（如参加碳交易），按照“谁投入、谁受益”的原则，与节能减排专业机构开展提高能源利用效率、降低能源消耗方面的合作，降低前期资金投入，共享降碳成果。研究将航空产品的碳排放水平纳入碳补偿交易，通过设计实现的未来产品碳排放减少量作为企业的碳排放权进入碳排放市场，以此获得技术研发资金和回报，激励低碳、高效的航空新技术研发。

#### 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:** March 24, 2023; **Revised date:** June 2, 2023

**Corresponding author:** Wang Zhaobing is a senior engineer from COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute. Her major research field is civil aircraft product research and planning. E-mail: wangzhaobing@comac.cc

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the ‘Dual Carbon’ Development Strategy of Aviation Manufacturing” (2022-HYZD-03)

#### 参考文献

- [1] 战时雨, 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 consumption under the “dual carbon” goal [J]. International Petroleum Economy, 2022, 30(4): 31–39.
- [2] International Civil Aviation Organization. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA) [EB/OL]. [2023-03-28]. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/pages/default.aspx>.
- [3] International Civil Aviation Organization. Annex 16 to the convention on international civil aviation—environmental protection—Volume II—Aircraft engine emissions [EB/OL]. (2017-07-05)[2023-03-28]. <https://store.icao.int/en/annex-16-environmental-protection-volume-ii-aircraft-engine-emissions>.
- [4] Bradley M K, Droney C K. Subsonic ultra green aircraft research: Phase I final report [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [5] Bradley M K, Droney C K. Subsonic ultra green aircraft research: Phase II: N+4 advanced concept development [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [6] Bradley M K, Allen T J, Droney C. Subsonic ultra green aircraft research: Phase II—Volume III—Truss braced wing aeroelastic test report [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2014.
- [7] Bradley M K, Droney C K, Allen T J. Subsonic ultra green aircraft research: Phase II—Volume I—Truss braced wing design exploration [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2015.
- [8] Bradley M K, Droney C K. Subsonic ultra green aircraft research: Phase II—Volume II—Hybrid electric design exploration [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2015.
- [9] Droney C K, Sclafani A J, Harrison N A, et al. Subsonic ultra green aircraft research: Phase III—Mach 0.75 transonic truss-braced wing design [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2020.
- [10] Jansen R, Bowman C, Jankovsky A, et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion (EAP) research for large subsonic transports [C]. Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference Session: Aircraft Electrical Propulsion I, 2017.
- [11] Richard A W. NASA sustainable flight national partnership [EB/OL]. (2022-11-08)[2023-03-28]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220016902>.
- [12] Clean Aviation. Clean sky2 [EB/OL]. [2023-03-28]. <https://www.clean-aviation.eu/clean-sky-2>.
- [13] 吴光辉. 双碳背景下的绿色民机发展展望 [J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(4): 5–8.  
Wu G H. Green development of civil aircraft under the background of carbon peak and carbon neutralization [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2022, 2(4): 5–8.
- [14] 李小平, 张志伟, 王奉明. 核能航空发动机技术进展 [J]. 航空动力, 2018 (3): 16–20.  
Li X P, Zhang Z W, Wang F M. Technical progress on nuclear power aero engine [J] Aviation Power, 2018 (3): 16–20.
- [15] Howe S, Kolios A J, Brennan F P. Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2013, 19: 34–41.
- [16] Ticiano C J. Life cycle assessment oriented to climate change mitigation by aviation [C]. Prague: 15th International Conference on Environmental Economy, Policy and International Environmental Relations, 2013.