

民航业实现“双碳”目标路径研究

张含弛 胡梦阳 方怡 胡蕊 张昊

中国民航大学

摘要：在“双碳”目标背景下，民航业绿色发展意义重大。本文立足于国际航空碳抵消和减排机制，分析发达国家和中国航空业的双碳政策和技术，对2060年我国民航业如期实现碳中和，全面形成绿色低碳的发展格局进行路径研究与细化。通过不断改善航路、飞机结构材料、动力系统、燃油及其他技术，降低和消除航空活动的碳排放，同时完善碳交易市场，实现远期行业碳减排目标。

关键词：民用航空；政策方针；技术路线；低碳发展

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2023.09.193

一、民航业碳排放现状和发展趋势

我国交通运输业是主要的能源消耗行业和碳排放行业之一，交通运输行业的碳排放占全国总排放的10%，主要由道路、铁路、民航、水路运输构成，在以上几种交通运输方式中，民航运输业占比11%，碳排放增长最快，2010年后年均增幅在近10%，民航受安全、技术、燃料影响，实现净零排放最为艰难。

二、双碳目标下各国政策方针

（一）美国《国家航空科技优先事项》

据美国《国家航空科技优先事项》要求，为应对全球气候变化、减少航空业对环境的影响，美国民航制定了一系列减排方案。这些方案旨在推动航空业的可持续发展，减少温室气体排放，提高能源效率，并促进航空业的创新和技术进步。

美国民航减排方案主要包括以下几个方面：1. 提高燃油效率：通过改进飞机设计和制造技术，优化发动机性能，减少飞机燃油消耗。同时，推动使用更环保的燃料，如可持续航空燃料（SAF），无铅燃料。2. 改造国家空域系统：政府优先考虑国家空域系统现代化改造，优先发展小型无人机和先进空中交通航空器3. 支持实施先进空中交通服务所需的飞机和技术认证监管框架、基础设施、培训和认证流程的更新。4. 提升连通性和速度。着力探索新技术，加强航空运输的全球连通性，包括可持续超声速技术、高超声速技术等。

此政策还提出航空科技优先事项研发应遵循的7大原则：1. 促进安全；2. 环境保护；3. 提升经济竞争力；4. 加速创新；5. 加强国家安全；6. 培养人才；7. 保障航空运输公平。同时，《优先事项》明确了美国联邦政府7个主要相关部门或组织的职责。

（二）欧盟《目标2050》

欧盟《目标2050》是欧洲应对气候变化的战略框架，其中包括了航空业低碳化发展路径。经济刺激政策被视为航空业低碳化发展的关键，核心在于确定碳排放价格，使生产者在商业决策中考虑气候成本。欧盟排放交易体系（ETS）是欧洲应对气候变化的基石，2012年后涵盖航空业。自2013年，ETS下CO₂排放量年均下降2.3%，但航空排放量年均增长4.5%。在ETS第四阶段，航空排放配额上限以2.2%的速度递减，航空公司将面临更大经济压力。

欧盟ETS与国际民航组织CORSA比较

	ETS	CORSA
核心特点	碳排放限额、配额可交易	碳排放抵消
适用范围	2023年前只适用欧洲内部航班	2021—2026年自愿，2027—2035年强制。为缔约国之间的国际航班
预期目标	与2005年相比，2030年排放减少43%，2021—2030年航空碳排放配额每年减少2.2%	从2020年起实现碳中和增长
达到目标的确定性	限额与目标相匹配，确保在完全遵守的情况下可以实现目标	取决于碳信用额的质量和履约水平
强制性	对不遵守规定的航空公司进行处罚	只有在国内法中实施时才具有法律约束力

（三）国际民航组织《航空业碳排放抵消计划》（CORSA机制）

1) CORSA概述

CORSA碳抵消与减排机制一种基于市场的机制，主要有两种措施：

1. 航空公司自愿进行碳抵消和强制减排。航空公司自愿进行碳抵消的原理是通过资金支持具有环境价值的项目，以抵消其在飞行中排放的碳排放量。

2. 典型的抵消方法是购买碳资产。强制减排的原理是通过技术更新和管理，降低飞机燃油消耗，减少温室气体排放。

2018年国际民航组织理事会颁布了CORSA机制相关文件，明确了航空公司国际航线碳排放基准线，若超出基准线则需进行补偿。国际航空运输协会、国际能源署等都对航空业减碳工作进行了具体要求，详见表1。

表1 CORSA实施时间线

阶段	时间	参与形式
试点阶段	2021-2023	自愿（成员国自行决定）
第一阶段	2024-2026	自愿（成员国自行决定）
		强制（2018年单项国际航空活动的RTKs数超过RTKs总数0.5%的成员或RTKs累计数达到RTKs总数90%的成员国强制参加，豁免国家如最不发达国家（LDC）、小岛屿发展中国家（SIDS）、内陆发展中国家（LLDC）和占国际RTKs不到0.5%的国家除外，除非其自愿参与）
第二阶段	2027-2035	自愿（成员国自行决定）

CORSA的覆盖范围按航线定义：

✓如果起点和终点的两个国家都参与CORSA，该航线将被CORSA覆盖；

✓如果至少有一个国家未参与该计划，则该航线不会被覆盖。

2) 我国与CORSA

中国虽未加入CORSA，但其航空减排市场受其影

响。2018年11月，中国民航局颁布《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》，中国虽没有明确参与CORSIA，但在环境规制时间和内容上保持与CORSIA同步，甚至提升了《办法》的法律地位，以便随时加入CORSIA。在“十四五”民航绿色发展专项规划中，中国政府明确提出绿色发展的目标，其中包括了实现航空业碳中和，与中国自愿减排市场的目标不谋而合，两者共同构成了中国航空业实现双碳目标的重要途径。

CORSIA机制也为中国民航业带来了巨大的机遇。首先，CORSIA机制可以推动中国航空业的技术创新和升级。在CORSIA机制下，航空公司需要购买碳排放权，这将增加航空公司的运营成本，促使航空公司寻求更环保、更节能的技术解决方案，推动航空业技术创新和升级。其次，CORSIA机制可促进中国航空业的绿色发展。通过CORSIA机制，航空公司可购买碳排放权来抵消其排放的二氧化碳，这将鼓励航空公司采取更环保的运营方式，如使用生物燃料、提高飞行效率等，从而推动中国民航业绿色发展。同时，CORSIA机制也为中国自愿减排市场的发展提供了新的机遇。中国自愿减排市场可以提供碳排放权，满足航空公司的需求，推动中国自愿减排市场的发展。

但在实施CORSIA机制的过程中，中国将面临一系列挑战，包括如何确保数据的准确性和透明度，如何合理确定碳抵消的价格和数量等。

三、常规技术减排路径

纵观各国减排技术路径，可归纳为：可持续燃油、电推进飞机/氢能源飞机、航空管制优化、机场运行优化、新型结构与材料、气动布局优化、高效飞机发动机等方式。所有技术的发展均需降本增效。

（一）可持续航空燃油（SAF）

未来，最主要的碳减排措施在于应用更大比例的SAF。其优势在于不改变现有机型结构直接使用，也可与传统航空燃油一定比例混用。目前适合我国国情的有以下三种SAF制备路线：酯类和脂肪酸类加氢工艺、费托合成工艺、电转液工艺。强制性使用SAF政策和SAF燃料使用补贴政策将会快速推动SAF的技术升级与应用。

1. SAF应用现状

国家层面还缺乏明确的顶层设计，政策信号尚不明朗，主要的市场参与方多处于准备阶段，尚无明确发展规划；在产能、技术、原料供给和成本等方面目前存在一定障碍和瓶颈，需做好各方利益分配。

2. SAF使用建议

产业链层面：政府机构、运营商、燃料供应商和航空主制造商等通力协作，持续推进SAF的开发、测试、认证和推广应用，积极参与国际认证标准制定，加快生产新工艺研发以及工业生产装置建设，解决原料、技术与产能难题，形成完备的SAF产业体系。

政策制定层面：1. 细化减排指标至各航空公司，可先于国有企业展开试点，如：每固定里程增设一架次绿色航班2. 强制性逐年、逐步提升飞机SAF燃料混用比直至实现双碳目标。3. 对传统航空燃油增收碳税或对SAF

的使用提供补贴以减小两者差距，使航空公司更愿意使用SAF。

航空公司层面：1. 定期提供绿色出行航班。2. 积极进行机队技术更新。3. 紧急商务旅客机票涵盖碳指标购买。

机场层面：国内重点交通枢纽机场建设SAF加注服务设施。

（二）使用新型结构与材料

客机气动效率逼近极限，改变飞机气动布局降碳收效甚微。飞机减阻减重趋势为通过使用新型结构与材料、大量使用复合材料。

1. 涡轮叶片径向倾斜尾缘劈缝减阻

该技术集中于发动机涡轮减阻，通过改变涡轮尾缘劈缝的角度和方向来探究冷气阻力和损失的减少效果，提高发动机的效率，减少内部冷气流动产生的阻力和损失，更好实现涡轮叶片冷却，冷气阻力和损失减少，可降低冷气制造过程中所造成的碳排放。实际测试中对于阻力减少有较明显的效果，却对其他部位造成一定影响，仍需改进和探究。该技术可作为中期发展目标。

2. 积极使用连续SiC纤维增强钛基复合材料

连续SiC纤维增强钛基（SiC_f/Ti）复合材料兼具了陶瓷纤维和钛合金的材料特性，具有耐高温、高比强度、高比刚度、抗蠕变和耐疲劳等特性，适合制作特定取向选择性增强部件。其减重效果优异。GE公司研制的SiC_f/Ti压气机整体叶环可实现减重50%。采用SiC_f/Ti制备活塞杆通过几何尺寸设计最多可以实现40%的减重。

目前，中国相关科研院所已于“十一五”期间开展了钛基复合材料叶环模拟件的制备工作，取得一系列重大成就。但部分制造技术尚不成熟，材料研制成本较高，制约该材料进一步商业化发展。

（三）新能源飞机

新能源飞机以改变飞机能源方式实现碳减排。

1. 电动飞机

现有电池技术因能量密度低，纯电方案仅在小型飞机中应用。若在中大型飞机上应用则需开发锂空气电池以提高能量密度。

油电混合方案为：1. 涡轮发电机提供电力以驱动大功率电机运转、向电池充电，或在必要情况下通过机械驱动螺旋桨。2. 并联混合动力涡扇发动机：在双转子涡扇发动机上的改造，使用并联混合动力，对并联混合动力涡扇发动机，由于能量利用历程不同，外涵道电能利用率远高于内涵道电能利用率和燃油利用率。该模式下，可针对机型、用途、环境等改变混合度，提升能源利用率。两种方法均需改变发动机和机体结构。

全电推进目前仅用于小型飞机，对于大型商用飞机，电池仅被用APU和起动系统等辅助系统。若发展大型电推进飞机，须大幅提高电池/燃料电池的比功率。

2. 氢能源飞机

氢能源飞机主要有两条技术路线：1. 氢气直接燃烧产生动力。2. 发展氢燃料电池，连接电动机为飞行器提供动力。直接使用氢燃料，可将飞机排放气体对气候的影响降低50%-75%；使用氢燃料电池，对气候影响的效

益能提高75%~90%。GKN航空正在努力为H2中程民用飞机推进系统提供技术解决方案。其中，H2JET项目希望通过氢燃料直接燃烧产生动力，H2GEA项目希望使用氢燃料电池产生电力。欧洲相关企业希望利用该研究成果开发单通道客机氢燃料涡桨发动机和涡扇发动机，预计2035年投入航线使用。

四、非常规技术减排路径

(一) 微观沙丘构型减阻

区别于通过改变飞机气动布局实现减阻的传统手段，微观沙丘构型技术通过大幅减少飞行器飞行时的摩擦阻力来降低飞机飞行时的能耗，以此减少碳排放。该技术的基础在于“在湍流边界层中小肋具有较光滑壁面具有较低的摩擦阻力。”在这一基础上设计出了仿沙垄分形微纳结构。该结构减阻率较国际报道最好水平提高了52%，优于汉莎航空技术公司的“鲨鱼皮”材料表面构型。减阻风向扰动角度从35度增加到了60度。

该技术仍处于初期阶段，可作为中长期发展目标。

(二) 核电飞机

核电飞机通过采用核电池组及电驱动风扇发动机的方式实现净零排放。

中国贝塔福特原子能公司的原子能电池BV100体积小，不因恶劣环境和负载而变化，可在-60°至120°温度下正常工作，无自放电现象，预期寿命50年，未来提高核电池能量转换效率及能量密度后可作为飞机动力来源。

此技术可作为“60目标”后下一技术路线，对于核电客机还需开发大型电驱动风扇发动机。该方案可纳入新型飞机设计指标并进行严格适航审定，是否符合适航标准。

五、航空管制优化

航空管制层面则是通过提高交通效率减少空中拥堵达到碳减排目的，该方式作为非技术手段的航空碳减排方式可减少现阶段30%左右的碳排放量。民航局印发的《“十四五”民航绿色发展专项规划》将绿色空管、低碳发展理念作为民航业发展指南。

(一) 合理配置空域资源

空域资源不足加剧航班时刻资源供需矛盾，导致航班拥堵航空碳排放增加。目前，航班时刻资源优化路径主要集中在2个方面：(1)通过调整航空器队列进行优化。基于地面等待策略建立航班时刻优化模型可有效缓解机场空中交通拥堵问题。(2)通过调整航班时刻资源结构进行优化。基于航班波运行的航班时刻指派模型可构建航班频率优化模型，在高效利用空域时保证航司利益最大化。

(二) 飞行LTO阶段优化

飞机在起飞着陆LTO飞行阶段的碳排放占机场碳排放80%~90%，国际民航组织(ICA0)提出了连续爬升(CCO)与连续下降(CDO)，提高空域灵活性的同时减少了飞机的碳排放量。

如图2，飞机起飞时由阶段爬升方式改为CCO，对于中型机，每架次CCO可平均节省20~40kg航油，减少碳排放100kg。

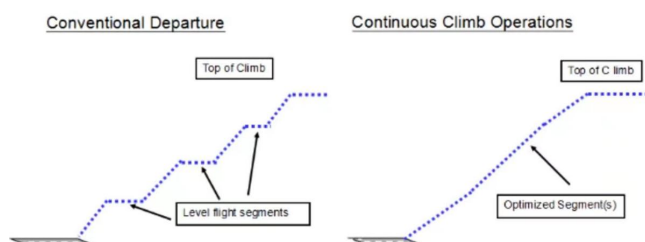


图2-飞机爬升姿态

如图3，飞机进场阶段可由阶梯下降转为连续下降进近(CDA)，目前，国际民航组织将CDA的起始运行区域扩大至巡航高度下降点，充分实现连续下降进近在节油、降噪和减排方面的优势。

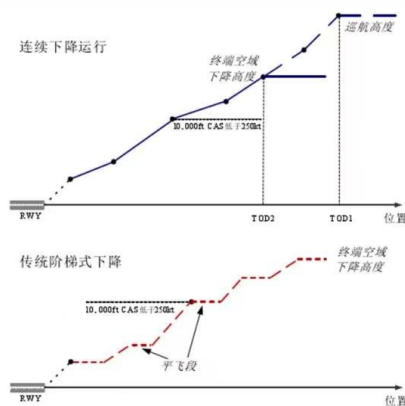


图3-飞机下降姿态

经波音公司在机场对B757-200和B767-300的CDA飞行演示实验测算，试验数据结果与传统阶梯式下降数据对比，CDA每架次节约400至500磅的燃油消耗。

(三) 飞机排班交叉机型飞行

基于碳排放量角度考虑机型排班优化，分别计算起飞着陆阶段和爬升巡航下降阶段的不同碳排放量，基于实际滑行时间的ICAO碳排放计算式，使用运行公式计算航段最小碳排放量，得出最终优化结果表明：在航段上使用两种混合机型比使用单一机型可节约更多的碳排放量，碳排放的减少区间为0.6%~2.9%，证明从碳排放量优化航空公司机型具备一定的合理性。

参考文献

- [1] 吴光辉, 马静华, 刘倩等. 民用航空运输业低碳化发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(05): 165-173.
- [2] 郭超宇, 施向峰. 我国民航业碳中和发展的政策现状分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(02): 69-76.
- [3] 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(04): 17-20.
- [4] 丁奕如, 杨雷, 郑平等. 中国可持续航空燃料发展研究报告. 北京大学能源研究院. 2022
- [5] 孔星傲, 吕东, 王晓放等. 涡轮叶片径向倾斜尾缘劈缝减阻能力数值研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(07): 1740-1748.
- [6] 王敏涓, 黄浩, 王宝等. 连续SiC纤维增强钛基复合材料应用及研究进展[J]. 航空材料学报, 2023, 43(06): 1-19.