

# 欧洲航空业净零排放发展战略分析

## Analysis to the Net Zero Strategy of European Aviation

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

根据《目标2050》战略构想，通过改进飞机和发动机技术、使用可持续航空燃料（SAF）、实施经济刺激政策，以及改善空中交通管理（ATM）等4项关键举措，预计到2030年CO<sub>2</sub>净排放量将比假设的参考情景减少45%，到2050年可实现欧洲航空业CO<sub>2</sub>的净零排放。

欧洲航空联盟（A4E）、欧洲民航导航服务组织（CANSO）、欧洲区域航空公司协会（ERA）、欧洲国际机场理事会（ACI）和欧洲航空航天与防务工业协会（ASD）于2021年2月11日，共同发布了名为《目标2050》（*Destination 2050*）的可持续发展新战略，详细阐述了未来30年欧洲航空业的脱碳发展路径。该战略是在《巴黎协定》和《欧洲绿色协议》的基础上制定并与欧洲气候目标相契合，通过航空业与各国政府的协调努力，欧盟、英国和欧洲自由贸易联盟（即“欧盟+”地区）境内以及离境的所有航班到2050年要真正实现CO<sub>2</sub>净零排放。所谓的净零排放并不意味着完全的无碳飞行，而是要在绝对排放量下降92%后其余的CO<sub>2</sub>可通过各种碳清除手段实现中和。为了实现这一雄心勃勃的宏伟愿景，改进飞机和发动机技术、使用可持续航空燃料（SAF）、实施经济刺激政策以及改善空中交通管理将是欧洲航空业后续发展的关键举措。

### 改进飞机和发动机技术

尽管不同的细分市场有所差异，但民航飞行的燃油效率在过去10多年的时间里总体上以接近2%的年化增



如此的减排进度显然无法满足人们对航空业尽快实现脱碳发展的迫切诉求，通过常规技术路线对飞机及其动力系统进行能效潜力挖掘也变得越来越困难，这一点在运力和排放量占比均过半的窄体机市场表现得尤为突出。在未来窄体机、中小型宽体机和大型宽体机的各个细分领域的技术发展路线可能会出现一定差异性的同时，以电能、氢能为代表的所谓“非滴入式能源”正在逐渐成为最热门的飞机和发动机技术革新领域，也为净零排放愿景成真带来最大的希望。

长率实现了稳步提升，这种势头大概率将会延续到2035年，即航空业预期的下一代革命性飞机和发动机产品问世之际。从飞机部件设计的角度看，翼面层流主动控制以及可折叠桁架式机翼有望大幅降低飞行阻力，碳纤维增强塑料在机体上的普及应用也可以在强度不变的前提下显著减轻其质量。而超高涵道比、开式转子构型和更激进的循环方式（如自适应循环、间冷回热循环和组合循环）则是未来燃气涡轮发动机降低碳排放的重要发展方向。不过

限制当前电推进系统广泛应用的一个主要原因就是过低的电池质量能量密度，0.2kW·h/kg甚至仅相当于航空煤油的1/60。体积能量密度和功率能量密度的问题也带来了很大的困扰，不仅意味着需要比当前油箱大得多的电池存放空间，而且在某些飞行阶段（如起飞）可能要依赖更多的电动机同时工作以提供足够的推力。即便是混合电推进系统，当飞机的尺寸和推力需求增大时额外产生的质量也会无法承受，同时更高的输出功率也意味着更大更沉的冷却装置。正是考虑到了电推进

相关技术在中短期内实现跨越式发展还存在着较大困难,《目标2050》认为未来20~25年可能只有通航飞行能够达成全电化发展,而对于那些再下一代的民用飞机及发动机,除了支线市场可能会采用混合电推进系统外,窄体机和宽体机大概率仍旧会处于从多电到混电/全电的过渡阶段。特别值得一提的是,虽然大型宽体机及其动力技术发展与其他细分市场有所不同,但由于其产品进入市场的时间一般比窄体机和中小型宽体机晚5年左右,可吸收后二者发展的经验教训从而进一步开展有针对性的研发,因此在《目标2050》中100座以上各细分市场的长期效率提升目标被整合在了一起。

虽然氢燃料电池将在未来电推进系统中扮演重要角色,但改进燃气涡轮发动机使之直接燃烧氢气似乎更加接近现实。与燃烧航空煤油相比还可减少硫酸盐、颗粒物质和NO<sub>x</sub>的排放,在减少CO<sub>2</sub>排放的同时对改善机场周围空气质量也有很大益处。欧洲雄心勃勃的氢能发展战略是实现氢动力飞行的一个关键因素,力度空前的氢能源推广普及将有助于其在基础设施和标准化方面快速成熟,可再生电技术的进一步发展也会让可再生氢与化石能源相

比具有成本竞争力。援引2020年麦肯锡公司咨询报告的若干结论,《目标2050》认为航程2000km、载客量165人的氢能窄体机将在2035年投入使用,到2050年氢能飞机对应的CO<sub>2</sub>减排量将达到6000万吨,减排成本为225欧元/t,甚至超过了常规飞机和发动机技术改进(含混合电推进)带来的成果。不过对于更大座级的飞机,随着起飞质量的增加,每可用座千米(ASK)的氢燃料成本费用将会呈倍数增加,更远的航程也带来了在“欧盟+”区域以外的氢气供应和相关基础设施支持上的问题,当然这一点也同样存在于主要连接较小的机场、城镇和城市的支线飞机。

### 使用可持续航空燃料

在过去的15年中,航空业一直致力于开发替代传统航空煤油的SAF,以减少对环境的不利影响。注意到这里的SAF是从燃料全生命周期排放量的角度考虑的,即在原料生产和运输、转化为燃料、燃料运输和分配过程中排放的全部CO<sub>2</sub>,当然也包括在飞机和发动机使用时产生的。通过对森林物质、农业剩余物、能源作物和已经加工过的其他物质(如污水污泥和城市固体废物)进行

一系列工艺处理,在和航空煤油按照一定比例进行混合并经过适航认证后,SAF能够直接在现有机队中使用,不需要对飞机、发动机或基础设施进行任何改动,这也是其与氢能飞行的一大根本性区别。与航空煤油相比,使用SAF可获得的全生命周期CO<sub>2</sub>减排量大多在25%~95%,同时也会显著降低CO、硫化物和可吸入颗粒物的排放量。

预计到2030年,欧洲SAF产量达到320万吨,占全球总产量的一半,约等于欧洲航空业燃料消耗量的6%。其中生物燃料为200万吨,有70%是通过HEFA法生产的,市场价格约为同期航空煤油的1.95倍,而利用其他方法得到的生物燃料价格还会再翻番。另外的120万吨主要是以可再生氢为原料的合成液体燃料,虽然成本同样较高,但其全生命周期排放量却下降了85%。到2050年,生物燃料产量增长到1300万吨,整个生物燃料供应链在欧盟循环经济战略下会得到进一步优化,全生命周期CO<sub>2</sub>减排量超过95%。同时,70%的可再生氢将会为氢动力飞机提供燃料,按照7%的含氢量计算剩余的可制备1900万吨碳氢液体燃料,市场价格也将低于生物燃料。这样,合计3200万吨的可持续航空燃料已相当于同期航空燃料消费总量的83%,而该数字已经超过了目前适航标准规定的50%混合比例的上限。虽然在2030年后将这一限制提升到100%应当不存在技术上的瓶颈,但从安全性考虑,会对飞机和发动机进行额外的改装和测试。

### 实施经济刺激政策

经济刺激政策已被普遍认为是实现

改进飞机和发动机技术对应的CO<sub>2</sub>减排预期

类别	再下一代产品进入市场时间	飞机能效提升	发动机能效提升	能效提升合计	CO <sub>2</sub> 减排量	
支线	2035年	15%	41%	50%	50%	
窄体	2035年	常规	15%	18%	30%	30%
		氢动力	-	-	35%	100%
中小型宽体	2035年	15%	18%	30%	30%	
大型宽体	2040年	15%	18%	30%	30%	

使用可持续航空燃料对应的CO<sub>2</sub>减排预期

时间	SAF类型		产量/万吨	平均市场价格 / (欧元/t)	CO <sub>2</sub> 减排量	平均减排成本 / (欧元/t)
2030年	生物燃料	2035年	140	1170	65%	280
		2035年	60	2765	65%	1050
	合成液体燃料		120	2900	85%	860
	合计/平均		320	2274	72%	640
2050年	生物燃料		1300	1790	95%	366
	合成液体燃料		1900	1557	100%	274

航空业低碳化发展的一个关键机制，其核心在于确定CO<sub>2</sub>排放的价格，从而让生产者在商业决策中明确考虑碳排放产生的气候成本。欧洲应对气候变化的政策基石就是欧盟排放交易体系（ETS），最初只是针对电力和能源行业，在2012年第三阶段开始实施后航空业被纳入其中，也是目前该计划唯一涵盖的交通领域。从结果上看，自2013年以来欧盟排放交易体系下CO<sub>2</sub>排放量平均每年下降了2.3%，不过航空排放量的年化增长量却为4.5%，这表明航空业成了这种排放交易体系下的配额净购买者，2017年购买的排放配额甚至占到了排放量的41%。考虑到在ETS第四阶段（2021—2030年）航空排放配额上限将以每年2.2%的速度递减，欧洲各个航空公司将承担更大的排放经济压力。虽然航空业分得的配额占比会上升一些，但CO<sub>2</sub>排放配额的市场价格也在水涨船高，已经从2013年的每吨不足5欧元提高了2019年的30欧元以上。

目前，ETS还只是针对欧洲内部航班执行。为了更好地解决国际飞行的碳排放问题，2016年国际民航组织（ICAO）商定了国际航空

碳抵消和减少方案（CORSIA），要求航空公司通过购买其他部门减排项目产生的碳信用额来抵消任何超过2019年的排放量。显然以“抵消”为核心、排放总量上不封顶的CORSIA比欧洲“总量递减、配额交易”ETS碳排放政策要温和很多，相应的2020年2月初碳信用额的交易价格仅为0.23欧元，约为欧盟排放交易系统配额单价的百分之一，这也有助于获得欧盟外特别是很多发展中国家的认可与支持。不过随着CORSIA在全球航空业的推广普及并

像欧盟排放交易体系那样具有强制性，未来碳信用价格存在大幅上涨的可能性。《目标2050》战略假设ETS与CORSIA会在不同地区共存发展，加速能源过渡并弥合差距直到突破性的飞机发动机技术和SAF得到广泛应用。到2030年经济措施预计将使CO<sub>2</sub>净排放量比参考情景减少27%，到2050年剩余的排放量都可以通过碳清除项目加以平衡，此时欧洲航空公司的政策合规成本约为36亿欧元。

### 改善空中交通管理

为了更好地与高度复杂且相互依存的航空运输环境相适应，改善空中交通管理也将是中短期内减少CO<sub>2</sub>排放的重要途径。例如，通过考虑尽可能全面的因素（有效载荷、天气情况、空中交通管制以及燃料价格等）从而确定更具运营效率的航班计划，航空公司在降低燃油消耗、获取更多商业利益的同时也变相地达到了减排的目的。近3年的统计数据显示，依托相关专业软件来规划航班，已为

欧盟ETS与国际民航组织CORSIA比较

	ETS	CORSIA
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

航空公司节约了2.6% ~ 3%的燃料，随着2024年后新一代飞行管理系统（FMS）投入使用，这一收益还能进一步提升到3% ~ 4%。除了优化飞行计划和执行方式外，航空公司还在努力减轻飞行质量：一方面，复合材料应用范围得以扩大，客舱座椅、推车和各种工作设备都变得更加轻便；另一方面，电子系统开始快速取代纸质报刊以及相对笨重的机上娱乐系统。改善机体状况对油耗也有有益的影响，经常性清洗发动机估计可以减少0.5% ~ 1.2%的CO<sub>2</sub>排放，而飞机外部蒙皮凹痕或污

垢会降低空气动力学效率，可能使飞行阻力增加多达2%。

进一步开放空域也是未来改善空中交通管理的重要方向。根据单一欧洲天空（SES）框架构想，欧洲内部各国破碎零散的空域有望被整合，允许根据航空业务需要而不是国家边界管理空域，航空公司可以有更多的机会去选择更具经济性的飞行路线，预期可降低3.5%（从欧洲出发的洲际航班）到7.1%（欧洲区域内航班）的碳排放。但想要各国政府在空域组织方面作出必要的政治妥协并不容易，对于欧盟外

的国家来说则更加困难。此外，合理正确的机场地面作业也能在节约燃料上发挥一定的作用，将一台或者更多发动机关闭可以使得起飞和着陆滑行阶段油耗降低20% ~ 40%，而类似的引入基于地面电力系统的拖曳系统、减少辅助动力装置（APU）的使用同样可带来0.3%左右的节能潜力。总的来看，改善空中交通管理涉及到方方面面的内容，而为了让这些零碎繁多的举措真正起到减少CO<sub>2</sub>排放的效果，各国政府、航空公司、飞机/发动机制造商、空中导航服务商、机场运营商以及地勤代理商之间的协作配合至关重要。

实施经济刺激政策对应的CO<sub>2</sub>减排预期

时间	措施类型		CO <sub>2</sub> 排放量 / 万t	市场价格 / (t / 欧元)	CO <sub>2</sub> 减排量
2030年	ETS	航空业内部拍卖额度	2830	60	50%
		从其他行业交易额度	4070	60	100%
	CORSIA 碳信用额度		0	60	100%
2050年	ETS从其他行业交易额度		70	315	100%
	CORSIA 碳信用额度		2120	160	100%

实施经济刺激政策对应的CO<sub>2</sub>减排预期

类别	具体措施		CO <sub>2</sub> 减排量	实现时间
航空公司	优化航班设置		1.5%	2020—2025年
	飞行规划系统更新		1%	2025—2035年
	减轻飞行质量		10kg/座	2020—2030年
	改善机体状况		0.2%	2020—2050年
空域	单一欧洲天空	欧洲内部航班	7.1%	2020—2040年
		离境洲际航班	3.5%	2025—2040年
	利用前机尾流能量加密航班间隔		3%	2025—2040年
机场	滑行时关闭发动机		1%	2020—2035年
	采用电动拖车		3.2%	2025—2035年
	减少APU使用		0.3%	2020—2025年

## 《目标2050》发展愿景

根据《目标2050》的战略预期，到2030年“欧盟+”地区航班的CO<sub>2</sub>排放量为1.13亿t，较假设的参考情景（航班量和客运量年化增长率分别为1.4%和2.0%，CO<sub>2</sub>排放量每年增加1.6%）减少45%，且其中超过88%的排放是由飞往“欧盟+”地区以外目的地的航班产生的。飞机和发动机技术的改进使得CO<sub>2</sub>减排了1400万t（7%），由于更多革命性的技术（特别是氢动力）是在2030年后才能成熟并进入市场，因此在未来10年周期内其对民航减排贡献较为有限。同期的可持续航空燃料可能仍会面临较大的产能问题，预计在2030年CO<sub>2</sub>的减排量约为700万t（3%），当然这一数字较目前水平也是一个巨大的进步。2030年时大部分改善空中交通管理的措施都已经实施或者至少部分实施，相应带来1100万t（5%）的碳减排收益，而各种经济刺激政策有望降低CO<sub>2</sub>排放量5500

万t (27%), 成为了对“欧盟+”地区内部和离境航班减排最重要的渠道。当然也要注意, SAF和经济刺激政策必然导致航空公司成本上升, 最终的结果是机票价格上涨从而抑制了民航需求。这种负面影响也会使CO<sub>2</sub>排放量减少700万t (3%)。

2030—2050年, 伴随着民航运营成本的进一步提高, 因需求影响减少的CO<sub>2</sub>排放量达到了4300万t (15%)。在各种可持续发展措施中, 飞机和发动机技术的改进产生了最大的减排效果, 常规动力(含混合动力推进)和氢动力分别贡献了5100万t和6000万t。得益于各种生产工艺的升级, SAF的用量接近航空煤油的5倍, 与参考情景相比减少了34%的CO<sub>2</sub>排放。考虑到“欧盟+”地区内部航班以氢能为主, SAF主要用于“欧盟+”地区以外的洲际飞行。改善空中交通管理也能够减少1800万t的CO<sub>2</sub>排放, 其占比从2030年的5%增加到2050年的6%。在这一时期经济刺激政策主要应用到了“欧盟+”地区以外的洲际航班, 对应的CO<sub>2</sub>减排量为2200万t。最终在《目标2050》战略构想下, 2050年的减排总量达到2.93亿t, 在“欧盟+”区域内和离境的所有航班均实现了CO<sub>2</sub>净零排放。

为了真正实现《目标2050》发展愿景, 整个欧洲航空运输生态系统必须果断一致共同行动。航空业应持之以恒地在航空低碳化发展领域投资布局, 在开发更高效的飞机和发动机产品、通过不断更新机队使其尽快投入运营的同时, 发力氢动力和混合动力飞机及相关配套基础设施建设, 并扩大SAF的生产和使用、持续优化空中交通管理。各

国政府也应出台相关政策加大对创新型脱碳技术的资助力度, 降低航空业在新技术研发领域的投资风险, 支持SAF产业的发展并推进以“欧洲单一天空”为代表的开放空域政策。

## 《目标2050》评述

《目标2050》既突出了未来航空业低碳发展愿景的重要性与迫切性, 也表现出了航空装备制造、航空公司、机场运营商和空中导航服务商各个利益攸关方之间的协作承诺。

以2030年和2050年为主要时间节点, 《目标2050》中的净零排放发展路线延续了欧洲在应对气候变化时一贯的宏大激进的思路, 而这种思路能在多大程度上被欧洲以外的国家、特别是发展中国家所接受仍然存在着很大的未知。预计2022年ICAO将发布全球航空业脱碳发展目标, 从目前的情况看其与《目标2050》的一致性很难被过高期待。

《目标2050》给出了实现净零排放的4类主要措施, 并对每一类措施下各种具体做法带来的减排预期进行了定量分析。中短期内可能更多地要依赖经济刺激政策, 碳排放配额价格会随着技术的进步与时间的推移而逐渐增加, 最终使得脱碳项目会具备足够的经济吸引力, 这样到2050年任何剩余的排放量都可以通过碳吸存、碳捕获和碳储存加以平衡。

从长远看, 飞机和发动机技术革新更能够在提升效率上发挥主导作用, 特别是瞄准欧洲内部航线的氢动力飞行被《目标2050》寄予厚望。然而到了2021年6月, 曾经发布多个氢动力概念的空客公司却表示尚

未决定第一架零排放飞机将瞄准哪个细分市场, 从2035年起氢动力将主要应用于支线和短途飞机。未来航空技术发展大趋势到底在哪, 至少目前还没有一个确切的结论。

各种减排措施带来了航空公司运营成本上升的问题, 这必然会以票价的形式转嫁给旅客, 《目标2050》认为到2050年前客运量年化增速大概会下降30%左右。尽管这已经是一个非常积极乐观的数字, 但对于后疫情时代亟待恢复的航空业来说可能难以承受。显然, 如何将市场发展与环境保护更好地统一起来, 仍然有很多工作需要做。

## 结束语

2021年3月中央财经委员会第九次会议强调, “我国力求2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”, 是党中央经过深思熟虑作出的严峻战略决策, 事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。根据国家战略部署, 针对行业特点和面临的挑战, 我国航空业应尽早谋篇布局, 统一规划, 制定符合中国航空业发展的碳排放指导方针。无论是统筹碳市场机制、完善绿色航空配套法规, 还是推动SAF与飞机发动机新技术发展, 还是加速出台关于能源结构和产业布局调整的指导意见, 欧洲航空业《目标2050》的净零排放发展战略都是一个很好的参考借鉴。从相对减排到绝对减排, 再到零排放, 这将是推动我国传统航空业转型升级、从新的方向实现弯道超车的一个难得的历史机遇。 **航空动力** (王翔宇, 中国航发研究院, 高级工程师, 主要从事航空发动机发展战略研究)