

# 美国下一代可持续航空技术研发计划概述

## FAA Developing Next Generation of Sustainable Aviation Technology

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

持续降低能耗、排放和噪声（CLEEN）计划是美国联邦航空局（FAA）为顺应全球气候变化目标、实现航空业可持续发展所做出的最重要的努力。该计划的核心在于研发能够降低能耗、排放和噪声的下一代飞机和发动机技术，并使其能够尽快集成到当前和未来的机队上。

美国联邦航空局（FAA）于2021年9月公布了持续降低能耗、排放和噪声（CLEEN）计划第三阶段的主要合作伙伴和初步实施方案。作为FAA应对全球气候变化挑战和降低航空业对环境负面影响总体战略的关键部分，CLEEN计划从2010年开始启动，以5年为周期分步实施，通过美国政府、飞机和发动机制造商、航空公司和燃料供应商的紧密协作，旨

在开发消耗更少燃料、产生更少排放和具有更低噪声的下一代航空技术，从而支撑航空业朝着高效、清洁和安静的方向实现可持续发展，尽可能地消除环境保护对未来航空业增长的限制。

### CLEEN计划第一阶段和第二阶段

CLEEN计划第一阶段于2010—2015年实施，根据FAA与波音公司、GE

公司、霍尼韦尔公司、普惠公司、罗罗公司签署的合作协议，这5家公司自筹的配套资金不少于FAA的拨款，使总的投资金额超过了2.5亿美元。在第一阶段CLEEN计划取得理想预期的基础上，2015年后FAA又新增了极光飞行科学公司（Aurora）、美国菲尼克斯公司/达美航空技术公司/MDS涂层公司和柯林斯宇航公司作为合作伙伴，并为CLEEN计划第

CLEEN计划第一阶段飞机和发动机技术项目

类别	名称	概述	预期收益
机翼技术	自适应机翼后缘（ATE）	根据飞行状态实现机翼后缘的自适应调整，该技术已于CLEEN计划第一阶段成熟并在波音公司的军用和民用产品中得到了应用	油耗下降2%，噪声下降1.7dB
发动机短舱、风扇和喷管技术	超高涵道比发动机设计技术	2017年普惠公司完成超高涵道比齿轮传动风扇发动机测试工作，展示了先进风扇系统的气动、机械和声学特性	油耗下降20%，噪声下降2dB，氮氧化物排放减少60%
	陶瓷基复合材料喷管	2014年波音公司在787飞机上测试了陶瓷基复合材料（CMC）声学喷管，结构质量更轻并能够承受更高的温度	与787相比油耗下降1%，噪声下降2.3dB
	开式转子发动机	GE公司和NASA合作进行了开式转子发动机缩比模型风洞试验，困扰已久的噪声问题较20世纪80年代的飞行测试结果有极大改善	油耗下降26%，可感噪声较适航标准低15~17dB
发动机核心机技术	轻质核心机设计技术	利用高温叶轮、低泄漏空气密封系统和先进复合材料，霍尼韦尔公司展示了提高发动机效率的关键技术，并对替代燃料进行了测试	与发动机其他部件整合后油耗下降15.7%
	双层壁涡轮叶型	自2013年起，罗罗公司对双壁涡轮叶片翼型进行了系统的测试，结果显示冷却速度大幅提升，结构质量减轻了50%	油耗下降不低于0.3%
燃烧室设计技术	第二代双环预混旋流（TAPS II）	通过在燃烧前预混合空气和燃料，TAPS能够比传统燃烧系统更加稀薄，排放更少，GE公司始终在对相关技术进行改进升级	较CAEP/6标准氮氧化物排放量减少60%
飞行管理技术	飞行管理系统（FMS）	GE公司开发了一套发动机控制和管理技术，利用飞机和发动机的各种状态信息来优化飞行轨迹，提升燃油效率	油耗下降2.5%

二阶段提供了1亿美元的经费支持，事实上10年的时间里工业界已经为CLEEN计划共计投入了3.88亿美元的资金，远远超过了FAA的2.25亿美元的贡献。当然，为了获取更高的研发收益，CLEEN计划下的研究项目普遍具有相对较大的技术风险，通过与FAA分担开发成本，航空业愿意接受这种风险并能够更好更快地促进这些技术的成熟应用。

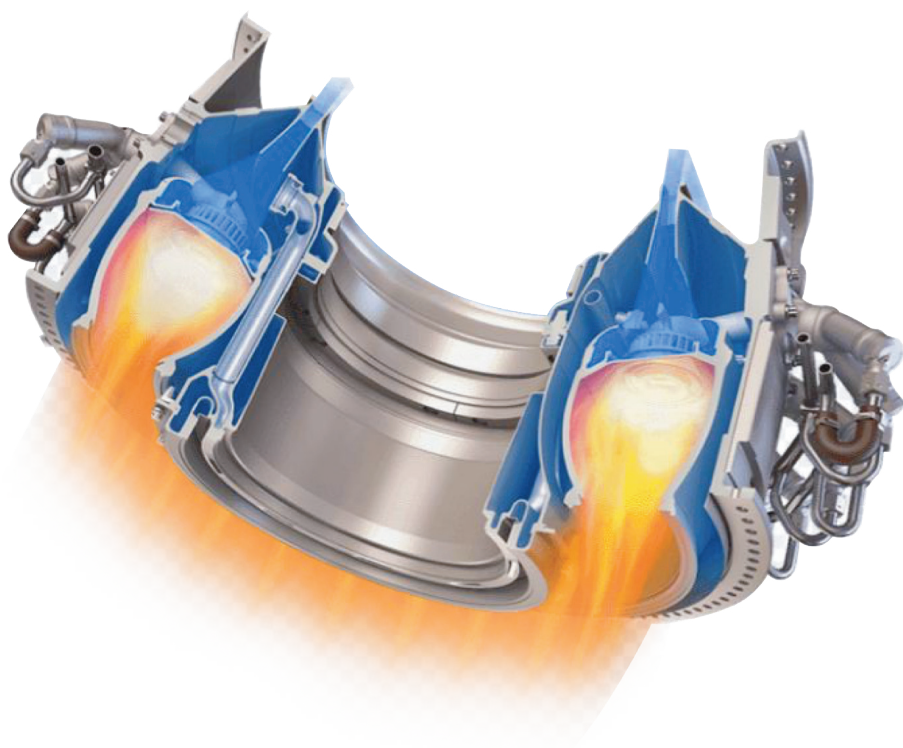


D8双气泡飞机总体布局概念图

经历了CLEEN计划的前两个阶

### CLEEN计划第二阶段飞机和发动机技术项目

类别	名称	概述	预期收益
机翼技术	高效机翼结构(SEW)	新的制造技术以及大量先进复合材料的采用使机翼质量大大减轻，2019年波音公司已完成全尺寸部件地面测试	油耗下降3.5%
机体技术	非常规双气泡机体构架	双气泡机体构架有望实现阶跃性气动效率提升，Aurora公司已经完成了全复合材料双气泡机体的制造与测试，并能与发动机更好地集成	油耗下降29%，可感噪声下降16dB
发动机短舱、风扇和喷管技术	紧凑型短舱	2018年波音公司和罗罗公司合作为超高涵道比发动机进行了紧凑型短舱进气道和反推器的设计和地面测试工作，机体质量大幅减轻	油耗下降1%
	综合推进系统短舱技术	柯林斯宇航公司的创新声学处理技术和风扇涵道反推装置技术有望使下一代超高涵道比发动机变得更安静高效	到2025年油耗下降0.46%，可感噪声下降2dB
	低压比风扇声学设计技术	2019年NASA兰利中心的测试结果显示，GE公司全新设计的声衬结构能够有效降低风扇噪声源强度	对燃烧无不利影响的情况下可感噪声下降3dB
	先进声学风扇和声衬	霍尼韦尔公司开发了轻质风扇转子，并将其与短舱壳体和新型降噪声衬有效结合，预计到2022年技术成熟度将达到6级	油耗下降1.5%，可感噪声减少12.5dB
发动机核心机技术	高压压气机和涡轮效率提升技术	在CLEEN计划第二阶段，普惠公司开发并通过台架试验，验证了新的高压压气机和涡轮设计技术，发动机热效率得以提升	油耗下降1.4%
	涡轮叶片外部空气密封技术(BOAS)	2020年霍尼韦尔公司启动了BOAS系统的涡轮壳体地面测试工作，高压涡轮效率有效提升，针对高温合金叶片的测试预计在2022年进行	与其他技术整合后油耗降低22%
燃烧室设计技术	第三代双环预混旋流(TAPS III)	GE公司已经对TAPS III相关技术进行了大量的台架测试，配备TAPS III燃烧器的GE9X发动机于2020年成功通过认证	较CAEP/8标准氮氧化物排放量减少35%
	低氮氧化物排放燃烧技术	罗罗公司的富油燃烧-猝熄-贫油燃烧(RQL)采用先进的燃油喷射和混合技术，可显著降低排放并提高涡轮入口温度	较CAEP/8标准氮氧化物排放量减少40%~65%
发动机防护技术	叶片前缘保护涂层	菲尼克斯公司/达美航空技术公司/MDS涂层公司开发并测试了一种风扇叶片前缘保护涂层，可减少侵蚀并提升发动机燃油效率	巡航阶段油耗降低0.4%，最大功率状态下降低1%以上
飞发一体化技术	飞发多电集成技术	GE公司开发的综合电力系统MESTANG可将飞机和发动机更好地多电集成，飞机整机架构朝着电气化方向迈出了一大步	窄体机短途飞行任务可降低油耗6%
飞行管理技术	飞行管理系统(FMS)	在第一阶段工作的基础上，GE公司开发了新的软件控制策略，将在飞机的巡航和降落阶段进一步优化飞行轨迹	油耗下降3.5%



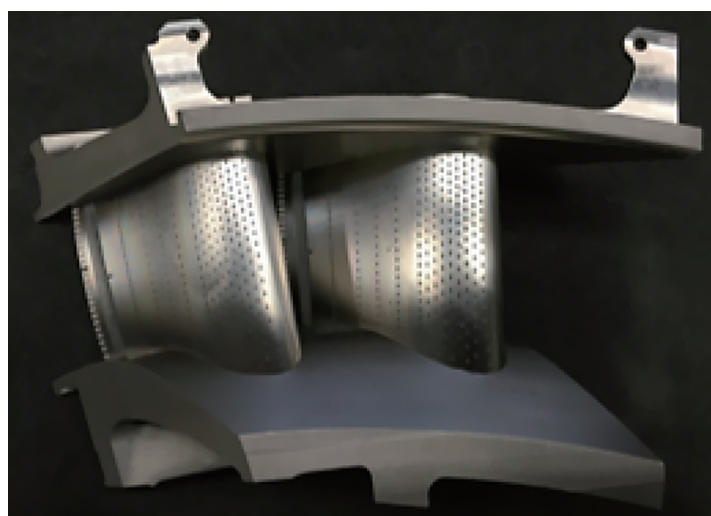
第二代双环预混旋流燃烧系统概念图

段，越来越多的针对能耗、排放和噪声的先进航空技术开始出现在飞机和发动机设计中。如GE公司独特的贫油燃烧系统——双环预混合旋流（TAPS）在CLEEN计划第一阶段实现了性能大幅升级，由此产生的第二代TAPS燃烧室已经在LEAP发

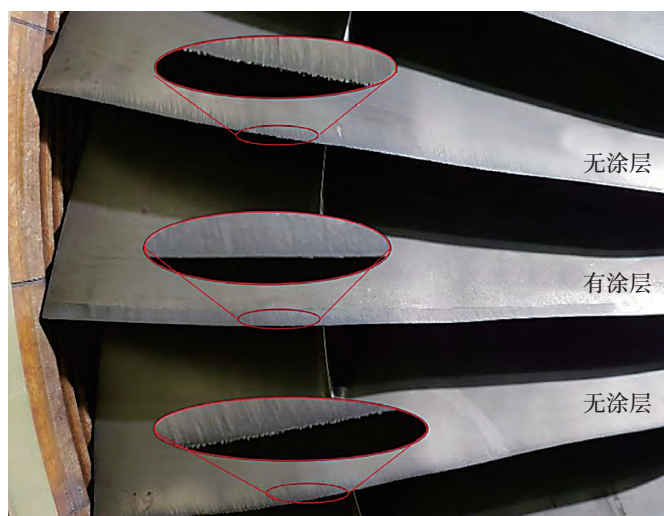
动机中普遍应用，受到市场的广泛认可。CLEEN计划第二阶段GE公司进一步开发了第三代TAPS燃烧室并应用于GE9X发动机，氮氧化物排放量有望较航空环境保护委员会（CAEP）的标准低30%。同期，GE公司还借助CLEEN计划开发了飞行

管理系统（FMS），实现了多种飞行任务的自动化处理，在综合考虑交通管制、气候变化、飞机性能和飞行时间等因素的基础上优化飞机控制系统的操作指令，更好地引导飞机按照批准的飞行计划飞行，预期能够降低2.5%左右的燃料消耗，未来可能会降低到3.5%以上。

航空业还以CLEEN计划为契机开发了具有普适应用潜力的分析工具，这些工具正在改进提升目前生产制造的飞机和发动机产品，相应的设计规范和制造方法得以完善，在降低能耗、排放和噪声方面取得的收益甚至超过了某些单独技术的突破。普惠公司在CLEEN计划第一阶段风扇开发工作中获取的试验数据已被其用来校核改进第二代齿轮传动风扇（GTF）发动机；GE公司、霍尼韦尔公司和罗罗公司进行的低排放燃烧研究，不仅减少了在该计划支持下特定燃烧系统项目的污染排放，还大大增强了每个公司为低排放目标设计和优化未来所有发动机燃烧系统的能力；柯林斯宇航公司在突破低阻力声学风扇涵道技术的同时，针对全新的声学结构形



双层壁涡轮叶型



叶片前缘保护涂层防护效果对比图

成了低阻力噪声表面和材料性能的数据库，可用于后续超高涵道比发动机的短舱设计。

此外，过去的10年里，CLEEN计划对未来可持续航空燃料（SAF）的相容性、燃烧性能和加入可持续航空燃料后发动机相应的操作变化进行了大量的评估和测试，在其规范标准与适航认证方面发挥了重要作用。2011年，霍尼韦尔公司顺利完成了加氢处理酯和脂肪酸（HEFA）

燃料的测试工作，随后该燃料被添加到ASTM国际燃料规范中，与常规航空煤油的混合比例达到了50%。两年后，波音公司评估了HEFA对燃油系统密封件的影响，进一步了解了其关键燃油特性，普惠公司同期也对不少于5种的替代燃料方案进行了系统测试，截至2021年4月，已有7种替代燃料得以批准。CLEEN计划第二阶段开始对全合成燃料的可行性进行探索，GE公司的测试数

据已经显示2018年批准使用的酒精喷射合成石蜡煤油（ATJ-SPK）可以达到更高的混合水平，同时还支持对过去的可持续航空燃料适航认证进行简化。罗罗公司也在进行一系列燃烧系统试验测试，确保合成燃料不会对目前的发动机安全性、耐久性和使用性能产生负面影响。

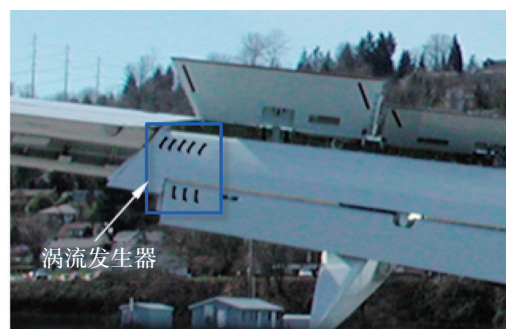
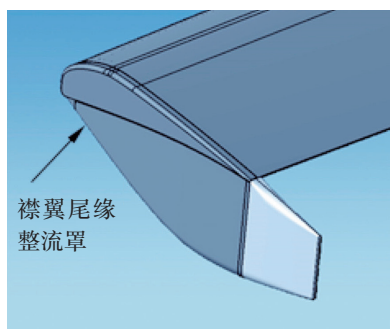
**CLEEN计划第三阶段**  
在CLEEN计划第三阶段，FAA和6

### CLEEN计划第三阶段飞机和发动机技术项目

类别	名称	概述	预期收益
机翼技术	静音高升力机翼系统	波音公司正在开发一种安静的高升力机翼系统，利用襟翼尾缘整流罩和涡流发生器来降低飞行噪声	可感噪声下降0.5dB
飞机系统技术	静音起落架	经过先进声学技术重新设计的起落架和用于相关结构的气动防护罩能够起到降噪的作用，波音公司已于近期启动飞行演示验证工作	可感噪声下降0.5dB
	智能飞行操作	利用机载和地面通信系统的信息输入，波音公司正在开发实时的、噪声优化的飞行路径算法，并将其集成到空中交通管理系统中	起飞阶段油耗下降2%，噪声下降3dB以上
发动机短舱、风扇和喷管技术	下一代进气道设计技术	波音公司正在开发一种全新架构的发动机进气道，与现有的“短”进气道相比，其质量、阻力和噪声都将有明显改善	油耗下降2%，可感噪声下降1.5dB
	高效风扇模块设计技术	霍尼韦尔公司联合NASA正在改进风扇出口导向叶片和静子部件，设计更效率的增压级并对转子部件进行降噪优化	油耗下降1.5%，可感噪声下降1.5dB
	超静音低损耗风扇级	普惠公司正在开发一种更安静更高效的风扇，包括全新设计的低损耗声衬和高柔韧性低噪风扇出口导向叶片	结合燃烧技术油耗下降0.8%，可感噪声下降3dB
	开式风扇设计	GE公司在CLEEN计划的第三阶段专注于克服开式风扇在复杂性、质量和飞行速度方面的历史问题，实现高保真风洞测试验证	相较于LEAP发动机油耗下降10%，可感噪声下降13dB
发动机核心机技术	高效绿色核心机部件设计	霍尼韦尔公司正在持续优化高压压气机、燃烧室和高压涡轮的气动效率和噪声特性，降低氮氧化物的排放水平	油耗下降8.3%，可感噪声下降3dB
	紧凑核心机—低排放燃烧系统	GE公司正在开发新一代燃烧室技术，以减少氮氧化物和非挥发性颗粒物的排放，能够与未来飞机的操作性、巡航效率和部件耐久性目标适应	氮氧化物排放降低70%
发动机防护技术	抗冲击抗腐蚀风扇叶片涂层	菲尼克斯公司/达美航空技术公司/MDS涂层公司在前期研究的基础上将涂层扩展应用到各种新/旧叶片、高/低展弦比叶片以及实心/空心叶片	油耗降低1%以上
飞发一体化技术	下一代飞发多电集成技术	GE公司努力的目标是将电力系统取代气动系统，通过减少对发动机的引气需求来减少燃料消耗	油耗降低3% ~ 6%
	混合动力集成发电技术	GE公司正在开发集成在发动机内部的发电系统，可提升发动机性能、操作性以及非设计点运行的灵活性	油耗降低3% ~ 4%
	先进热管理技术	GE公司正在开发热管理和余热回收系统，包括燃料除氧系统、热交换器、热输运总线以及相关控制子系统，进一步提升压气机和涡轮温度	油耗降低3%

个行业合作伙伴仍将以过去两个阶段的成果为基础，围绕降低能耗、排放和噪声展开下一步的工作。从公开的报道来看，GE公司将以开式风扇发动机、混合动力系统、先进低排放燃烧和热管理系统为主要技术研发领域；普惠公司将开发超静音发动机风扇和先进的燃烧系统以减少噪声和排放；波音公司侧重于机翼、起落架和发动机进气道降噪技术的攻关，并开发飞行控制算法使飞机能够更安静地飞行、自主选择更省油的航线；霍尼韦尔公司将针对更高效的发动机风扇、燃烧系统、压气机和涡轮开展研究；柯林斯宇航公司旗下的勒尔（Rohr）公司将利用最新的声学技术对发动机喷管进行设计；达美航空技术公司、吉凯恩（GKN）公司、MDS涂层公司以及菲尼克斯公司继续联合开发耐腐蚀的风扇叶片涂层，降低发动机全生命周期的燃油消耗。此外，FAA还正在寻求与罗罗公司和赛峰集团达成合作协议。

除了上述飞机和发动机技术项目外，CLEEN计划第三阶段将继续



静音高升力机翼系统

开展新的可持续航空燃料的测试与鉴定相关工作，以期尽快使其突破50%的混合比例限制并实现对航空煤油的100%替代。波音公司将扩大可持续航空燃料方案的筛选范围，在通过燃料兼容性的地面评估和飞行演示来支撑可持续航空燃料的适航认证，其测试数据也可为ASTM国际标准的编制提供依据。GE公司重点对具有独特化学组分的新可持续航空燃料进行分析鉴定，特别是目前备受关注的高环烷烃类燃料，若能够达到与常规航空煤油相近的密封膨胀性能指标，那么困扰多时的石蜡类替代燃料50%掺混体积上限问题将迎刃而解。

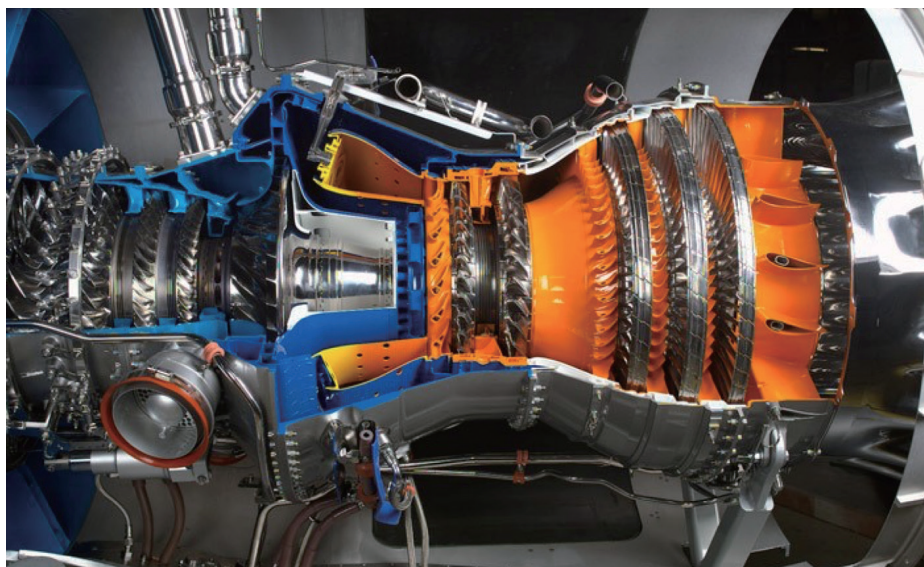
长期以来，CLEEN计划的目标始终与飞机和发动机适航取证所要满足的环境标准密切关联，显然随着时间的推移和技术的进步，在很多标准越发严格的同时也有一些额外的指标开始出现。虽然CLEEN计划第一阶段和第二阶段减排参照的是2000年在役的飞机，不过CLEEN计划第三阶段目标变为相对CAEP于2017年通过的二氧化碳排放标准再降低20%，氮氧化物排放相当于国际民航组织（ICAO）适航要求上限的70%，新增的颗粒物排放目标也要低于ICAO标准，较FAA第五阶段噪声标准实现累计降噪25dB的同时还要进一步减少社区噪声（Community Noise）暴露。FAA预期CLEEN计划第三阶段布局的飞机和发动机技术可在2031年后投入市场应用，而与前两个阶段完全立足于常规亚声速飞行不同的是，现在FAA似乎对民用超声速飞行起飞/着陆阶段降噪以及巡航阶段降低氮氧化物排放技术的突破充满了期待。

CLEEN计划不同阶段的发展目标

目标	第一阶段	第二阶段	第三阶段
噪声排放	较FAA第五阶段噪声标准实现累计降噪25dB		较FAA第五阶段噪声标准实现累计降噪25dB并减少社区噪声暴露
燃料燃烧	较2000年最佳在役机型降低33%	较2000年最佳在役机型降低40%	较CAEP/10二氧化碳排放标准降低20%
氮氧化物排放	约为CAEP/6标准规定的起飞降落阶段排放量的60%	约为CAEP/8标准规定的起飞降落阶段排放量的70%	
颗粒物排放	—		低于CAEP/11标准
应用时间	2018年	2026年	2031年

CLEEN计划发展特点和展望

回顾过去10多年CLEEN计划的发展历程，延续和稳健是其一路走来的两个核心特点。无论是已有较好基



霍尼韦尔公司正在研发的高效绿色核心机

础的老方案、还是成熟度较低的新构思，无论是涉及到整机架构的巨大改动、还是针对某个部件子系统的局部升级，CLEEN计划对未来航空技术的发展方向进行了全面广泛的布局，而这种布局一旦确定则随之有相对稳定的研究团队和持续的资金投入，从而可以循序渐进地开展工作的，以5年为周期的各个研究阶段之间存在较好的衔接性，如TAPS和抗冲击抗腐蚀叶片涂层就是两个非常明显的例子。这些技术之间也存在一定的独立性，当某种技术达到某一阶段的成熟度预期后可投入实际应用，后续可视情对其进一步迭代升级。

一个不得不承认的事实是，在绿色低碳、清洁高效的发展主题下，整个航空业似乎变得越来越激进，特别是欧洲的一些航空业远景白皮书更是叙事宏大，最快在2030年后才能得到应用的氢动力和电动技术已经成为规划论述的主体，同时涉及的内容已经从单纯的工程技术问题扩展到政策法规和空域管理等方

方面。相比之下，以CLEEN计划为代表的美国航空环境战略依旧步步为营，以传统飞机和发动机的技术革新为基本出发点，在对未来30年进行展望的同时将重心更多放在了短期目标的达成上。可以说大西洋两岸“仰望星空”和“脚踏实地”构成了助推未来航空技术发展的决定性力量，不过这两股力量到底如何汇聚与融合可能还有很大的不确定性。

目前，CLEEN计划取得的成果主要体现在以下4点：更加先进、更低排放的发动机燃烧系统已经开始投入实际应用；用来制造机翼的材料正在变得更加坚固、更加轻盈；全新的飞行管理系统算法使得飞机能够自主选择更省油的航线；几种可部分替代传统航空煤油的可持续航空燃料通过了适航认证（当然这一点只能部分归功于CLEEN计划）。据FAA预计，CLEEN计划第一阶段和第二阶段的工作到2030年能够为全美民航机队降低2%和2.5%的燃料消耗，而到2050年二者对应的二氧

化碳减排量有望达到3.7%和7.9%，合计约为4.24亿t。换言之，未来30年的时间仅CLEEN计划的前两个阶段就将为航空公司节省累计约923.64亿L、价值超过728亿美元的燃料，并减少了相当于305万辆汽车上路所产生的二氧化碳排放，考虑到从2031年开始CLEEN计划第三阶段的技术将引入商业运营，由此带来的进一步经济收益和环保收益值得期待。

## 结束语

为达成2050年实现航空业净零碳排放的宏伟目标，FAA正在借助CLEEN计划的实施全面推进能够降低能耗、排放和噪声的飞机和发动机技术以及可持续航空燃料的研发。CLEEN计划的前两个阶段显示出了巨大的成功，一些成熟的技术已经开始集成到当前机队中，工业界预计随着下一代飞机和发动机设计机会的出现以及CLEEN计划第三阶段任务的展开，更多的技术将在未来几年内投入市场使用，此外从这些技术研发中形成的分析和设计工具也带来了设计规范和制造方法的升级改进，全生命周期各个阶段的航空产品均会因此受益。

**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）

## 参考文献

- [1] FAA. Continuous lower energy, emissions, and noise (CLEEN) program [R/OL]. (2021-9-10)[2021-10-25]. <https://www.faa.gov/newsroom/continuous-lower-energy-emissions-and-noise-cleen-program?newsId=22534>.