

2023年民用航空动力进展

Progress of Civil Aero Engine in 2023

■ 廖忠权 / 中国航空发动机研究院

2023年是世界民用航空发动机行业自新冠疫情结束后复苏的一年，在研产品、技术以及正在运营中的发动机都取得了不同程度的新进展。

为实现2050年净零排放目标，目前航空业界对电能和氢能都高度关注；但在较长时期内，民用航空运输特别是远程运输动力仍将以燃气涡轮发动机为主，这既是当前技术所限，也是航空运输发展的惯性使然。对此，以GE公司、普惠公司、罗罗公司和赛峰集团为代表的传统发动机制造商都在积极通过开发新技术、验证新型核心机、采取新工艺、升级在役产品、发展可持续航空燃料（SAF）等措施，巩固自身在燃气涡轮发动机领域的领先地位。

技术创新历久弥新

航空发动机制造商对技术创新的追逐从未停歇，2023年也推出了一些革新性的前沿技术和产品，既有创新的动力设计，又有创新的设计工具和制造工艺。

MT公司开发新型螺旋桨

2023年1月，德国MT螺旋桨公司推出首型11叶螺旋桨。飞行测试结果表明，11叶螺旋桨比公司已认证的5叶螺旋桨的静推力提升了15%，同时噪声显著降低；使螺旋桨飞机的速度达到740~750km/h，接近喷气飞机的800~900km/h；比喷气飞机燃油效率高30%。从而使螺旋桨飞机具有替代喷气飞机的潜



11叶螺旋桨与5叶螺旋桨在飞行试验台上进行对比测试

在可能性。

罗罗公司和波音公司合作开发短进气道

发动机短舱的性能会影响动力系统效率，罗罗公司和波音公司在美国联邦航空局（FAA）的持续降低能耗、排放和噪声（CLEEN）环境研究计划的第二阶段合作中，开发和测试了一种直径仅2.8m的短进气道，比传统发动机短舱进气道缩短了约50%，浸润面积更小，短舱质量减轻超过159kg，使油耗降低约0.5%。

MTU公司推进创新推进概念

在混合电推进的可持续喷水涡扇（SWITCH）项目的基础上，2023年11月，MTU公司在迪拜航展上展示了面向未来的创新推进概念——基于齿轮传动的水增强涡扇（WET）发动机和飞行燃料电池（FFC）。

WET发动机是一型结合了能量回收和湿式燃烧的发动机，可燃烧SAF或氢燃料；FFC只排放水，对大气的碳排放可以减少95%，MTU公司的目标是到2050年将其运用到中程飞机上。这是MTU公司针对零排放飞行开发的清洁航空发动机（Claire）技术解决方案。

UEC降低涡轮叶片制造成本

俄罗斯联合发动机制造集团（UEC）旗下土星科研生产联合体的综合零件加工技术，采用公司开发的现代研磨工具，取代传统的车削、铣削、磨削与电火花加工工艺，提高了加工效率及精度，涡轮叶片制造成本下降了35%。

在研产品取得新进展

2023年，发动机制造商对先进燃气涡



水增强涡扇发动机模型

轮发动机的研究始终没有松懈，各自在研的产品都取得不同程度的进展。

“超扇”发动机技术验证机试车取得成功

2023年5月，罗罗公司在位于德比工厂的80号试车台上完成了“超扇”（UltraFan）发动机技术验证机的首次试车，且使用了100% SAF。发动机采用了Advance3核心机、碳钛风扇叶片、复合材料机匣和齿轮传动风扇，其动力齿轮箱运行功率曾达64MW，创下世界纪录。11月初，验证机完成最大推力试车，推力达到了377.85kN，比设计时的目标推力高22.23kN。

普惠加拿大公司将推出新型PW545D发动机

2023年5月，普惠加拿大公司宣布将为德事隆航空公司的赛斯纳“奖状”系列新机型——雅晟（Ascend）公务机推出新型PW545D涡扇发动机。PW545D发动机是PW500系列的最新改型，基于PW545C发动机开发，采用了新材料和新技术，主要包括更高效的高压压气机、升级的

单级高压涡轮模块，以及先进的排气混合器。

“珍珠”700发动机获得FAA适航认证

2023年8月，FAA向罗罗公司的“珍珠”700发动机颁发了型号合格证，该发动机于一年前已获得欧洲航空安全局（EASA）的型号合格证。发动机将配装湾流公司的G700和G800大型公务机，推力为81.2kN，比罗罗公司上一代公务机动力BR725发动机的推力提高了8%。

霍尼韦尔公司试验新一代公务机发动机核心机

自2010年以来，霍尼韦尔公司一直在进行CLEEN计划前两个阶段的研发工作，开展公务机发动机高压核心机研究。2023年，霍尼韦尔公司在CLEEN计划的第三阶段研发中增加了新的项目，包括紧凑型高功率低压涡轮和高效风扇模块等低压系统的研究，并计划在2024年进行高压核心机、风扇和低压涡轮模块试验。

PD-35发动机成功进行首次

核心机试验

2023年10月，UEC对PD-35发动机进行了首次核心机试验，试验在模拟全尺寸发动机工作条件下进行。PD-35发动机是俄罗斯历史上尺寸最大的涡扇发动机，风扇直径达到3.1m，于2016年开始研制，预计于2030年开始批量生产，计划配装安-124大型军用运输机和伊尔-96-400M远程宽体客机。

赛峰集团将领导开式转子发动机项目

在航空环境低影响开式转子（OFELIA）项目下，赛峰集团将与26家欧洲工业关键合作伙伴共同开展新型开式转子发动机技术验证。OFELIA项目为期3年，从2023年1月持续到2025年12月，总投资1亿欧元，目标是验证2035年投入使用的窄体飞机发动机开式转子架构的优势，路线图包含20多项测试，2026年将在一架A380飞行试验台上开始进行飞行测试。赛峰飞机发动机公司、Avio公司和吉凯恩（GKN）公司将合作设计制造开式转子发动机验证机的部件。

RISE发动机通过概念评审里程碑

2023年11月，GE公司和赛峰集团完成可持续发动机革新技术（RISE）项目开式转子发动机的概念设计评审，共进行了100余次测试。RISE项目主要特征包括直径3.96m的开式转子、大功率齿轮传动系统和紧凑型高压核心机。该项目还包括混合电推进和氢能研究，11月在美国国家航空航天局（NASA）电推进飞机试验台进行了测试，已经验证了GE公司的混合电推进系统结构，为RISE项目发展混合电推进涡扇发动机奠定了基础。



开式转子发动机安装在A380上测试构想

在役产品持续升级

GE公司、普惠公司和罗罗公司纷纷开展既有产品的技术升级，专注提升各自主打产品的耐久性、可靠性和在翼时间。

GE公司提升发动机在多尘地区的耐久性

GE公司正在小幅改进并测试LEAP发动机的一些部件，包括燃油喷嘴、高压涡轮叶片和尾喷管，以解决LEAP发动机在印度和中东这些多尘的国家和地区的耐久性。由于沙尘多的环境增加了发动机的维护需求，GE公司此前已经修改了配装波音787飞机的GENx发动机和配装波音777飞机的GE90发动机的一些关键部件，解决了沙尘环境下的耐久性问题。其中，针对GE90发动机改进了机匣、燃油喷嘴、叶片和燃烧室衬套，而这些前期工作为解决LEAP发动机类似的耐久性问题提供了基础。

罗罗公司提高遄达7000和遄达1000发动机在翼时间

高压涡轮叶片是配装空客A330neo飞机的遄达7000发动机和

一些配装波音787飞机的遄达1000发动机上的限寿件。罗罗公司提出开发一个可翻新的升级包，以提高高压涡轮叶片耐用性，进而提高发动机的在翼时间。早在2022年8月，用于遄达7000发动机的耐用性增强包已经获得适航认证，如今科威特航空公司已在使用，延长了发动机

的在翼时间。早于该增强包推出的遄达7000发动机可在其首次大修期间接受升级。同样的升级包也适用于遄达1000TEN发动机，罗罗公司计划在2024年年初应用于该发动机，2025年时将其在翼时间增加一倍。

此外，罗罗公司还计划利用“超扇”发动机的技术改进配装A350-1000飞机的遄达XWB-97发动机，以提高可用性、效率和可靠性，这些计划包括碳钛风扇叶片、低排放燃烧室以及高温材料和部件。

波音公司重新设计737NG飞机发动机短舱

美国西南航空公司波音737-700飞机曾发生了两起因风扇叶片脱落（FBO）引起的非包容性事故，脱落的风扇叶片击穿了发动机短舱进入了机身。2021年8月，波音公司提出了短舱新的设计方案，以保证短舱不再发生非包容性事故。2023年7月，波音公司完成了737NG发动机短舱的重新设计和改进工作。FAA



配装A330neo飞机的遄达7000发动机

要求波音公司于2028年8月前完成对737NG运营商的短舱改造，在2029年年底之前提供与新设计相关的维护补救计划。

GE公司已交付的GE90发动机达3000台

GE90系列发动机专为波音777系列飞机设计，于1995年投入市场，截至2023年9月，GE公司交付了第3000台GE90生产型发动机。其中，408台为GE90-94B，2592台为GE90-115B。GE90发动机创造了许多首次纪录：首型使用碳纤维复合材料风扇叶片的商用发动机；首型推力超过444.5kN的商用发动机；首型通过双发延程飞行（ETOPS）认证的发动机；首型通过增材制造部件认证的商用发动机（T25传感器机匣）；首型使用双环腔燃烧室的商用发动机。

普惠加拿大公司实现重大里程碑

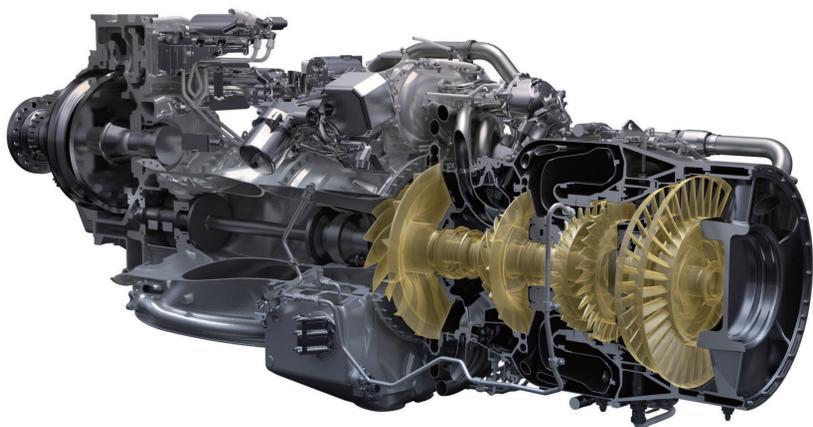
截至2023年10月，普惠加拿大公司达到了一系列里程碑，包括发动机累计飞行10亿h、PT6发动机诞生60周年，以及5月份第6000台PW300系列涡扇发动机的交付。11月，用于ATR42-600S支线客机的PW127XT-L发动机获得加拿大交通部适航认证，这是公司发动机第200次获得认证。

新变化影响未来格局

近年来，在世界民用航空发动机领域发生的重大变化主要有两个：一是罗罗公司希望回到窄体客机动力市场；二是美国和欧洲制裁俄罗斯，迫使俄罗斯不得不采取国产化替代策略，同时民用航空的对外扩展也受到了限制。

罗罗公司希望重返窄体客机市场

罗罗公司自2012年将其在国际



用于ATR42-600S支线客机的PW127XT-L发动机

航空发动机（IAE）公司V2500发动机项目中的股份出售给普惠公司以后，就没再参与生产单通道干线客机发动机。近年来，罗罗公司多次表达了对重返窄体客机发动机市场的乐观态度，认为“超扇”发动机架构可适用于111 ~ 489kN推力范围内的窄体或宽体客机，效率可比遛达XWB发动机提高10%。

俄罗斯用国产化替代应对制裁

俄乌冲突导致美国和欧洲对俄罗斯发起全面制裁。此前，EASA接收了PD-14发动机认证费却仍然中止了对PD-14发动机的认证，限制了该发动机的市场应用。俄罗斯的民用航空产业也不能继续获得美国和欧洲供应的相关配套产品。对此，为了自救图存，俄罗斯发起国产化行动，用国产产品替换进口产品，并开发适用和配装国产产品的改进型客机。

针对MC-21干线客机，俄罗斯伊尔库特公司开发了改进型飞机MC-21-310，用国产复合材料机翼组件替换相应的进口组件；用国产PD-14发动机替换最初采用的普惠PW1400G发动机。俄罗斯预测，到2030年超

过50%的PD-14发动机生产任务将由UEC下属的彼尔姆发动机公司承担，该公司预计将生产450台PD-14发动机。2023年4月初，彼尔姆发动机公司已开始批量生产该发动机。

针对SSJ-100支线客机，苏霍伊航空控股公司改型研制了SSJ-NEW客机，用国产PD-8发动机替换原装的赛峰集团和土星科研生产联合体共同研制的SaM146发动机。2023年8月，SSJ-NEW试验样机完成首飞，为加快试验进度，首台试验样机依然采用了SaM146发动机。10月，PD-8发动机装在伊尔-76LL飞行平台开始飞行试验。目前，SSJ-100客机的部件、附件和系统的国产化替代工作正在全面开展。

UEC还计划建设大型飞机和直升机发动机零件加工综合体，投资总额为350亿卢布（4.7亿美元），其中4个主要生产设施计划于2026年完工，占地总面积7.7万多m²，UEC将在新设施生产TV7-117ST-01/02、PD-14、PD-8飞机发动机和VK-650V、VK-1600V直升机发动机的零件。此外，还将建设增材制造技术中心，生产复杂结构零件。

SAF 亟待增产降本

SAF作为航空新能源，与氢能、电能颇有不同，是即插即用的航空煤油替代燃料，无需对飞机和发动机设备或基础设施进行任何修改，就可以直接使用，当前SAF面临的主要问题是增加产能和降低成本。

SAF 将长期存在

目前，全球使用的喷气动力燃料中，SAF产量约占0.1%，成本则是化石燃料的2~9倍。GE公司认为，尽管目前SAF占比小、产量少、价格贵，但将长期存在。因为航空运输业为了实现2050年净零排放目标，SAF将是关键一环。目前全球已有超过50万次航班使用SAF，业界已经研究SAF超过15年，如今GE公司、普惠公司、罗罗公司、赛峰集团等都对SAF开展了广泛的研究，以使各自的民用航空发动机可适用经批准的SAF。

SAF 的价格到21世纪中期仍将是煤油的两倍

全球战略咨询公司LEK在一份报告中表示，要实现SAF到2050年65%采用率的目标，全球产能需要从目前的每年不足100万t跃升至每年4亿t以上；但即使到21世纪中期，价格仍将是煤油的两倍多。报告认为18%的机票价格涨幅可涵盖这一额外成本，而不会严重影响销量。

航空业寻求SAF增产

2023年9月，空客公司与美国DG燃料公司建立了SAF战略合作伙伴关系，从纤维废旧料和残留物（木材废料等）中获取原料并利用风能和太阳能等可再生能源生产SAF。10月，汉莎航空公司、德国航空航天中心、空客公司、慕尼黑机场有限公司和MTU公司的代表在柏林签署

了一份技术合作意向书，共同研究被认为是下一代SAF的电转液（PtL）航空燃料，此次技术合作的目的是加快德国PtL航空燃料的技术选择、市场引入和工业规模化。

未来市场需求巨大

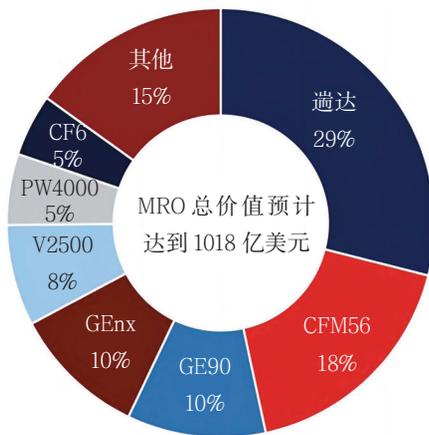
随着新冠疫情的结束，航空运输业逐渐复苏，虽然2023年尚未完全恢复到2019年的水平，但未来10年航空运输业将迎来持续复苏和增长，随之而来的是商用航空发动机交付以及维护、修理和大修（MRO）市场的稳步攀升。

2024—2033年世界商用航空发动机市场持续增长

未来10年全球在役商用航空发动机数量预计将从2024年的67800余台增加到2033年的89700余台，期间年增长率为3.2%。而全球商用航空发动机MRO市场预计将超过5530亿美元，复合年增长率也为3.2%。CFM国际公司将获得发动机MRO市场的最大份额，占全球的32%，其次是GE公司占30%。

亚太地区市场保持稳步增长

2024—2033年亚太地区商用航



2024—2033年亚太地区MRO价值构成预测

空发动机交付的复合年增长率预计将达到4.9%，到2033年将交付超过8400台新发动机，发动机数量从2024年的略多于10000台增加到2033年的超过15400台。其中，CFM国际公司将占有交付量的64%；普惠公司的份额为12%；GE公司的份额为11%（不含CFM份额）。亚太地区商用航空发动机MRO支出预计将以1.7%的复合年增长率增长，总价值达到1018亿美元，占全球市场份额的18%。

结束语

2023年是新冠疫情结束后的第一年，也是世界民用航空产业全面复苏的一年，世界领先的航空发动机制造商都在推动各自产品和技术的发展。本年度民用航空发动机的发展主要有几大趋势和特点：一是技术创新体现在发动机设计、制造的多个环节；二是主要制造商都在开发新型发动机技术和产品，已经取得阶段性成果，为未来竞争做准备；三是目前已经投入运营的新一代航空发动机，例如，LEAP、PW1000G、GEnx、遼达7000等都还在持续臻于完善，制造商都在设法提升拳头产品的性能、可靠性和耐久性；四是俄罗斯被美国和欧洲制裁，其航空业近乎成了孤岛，被迫救亡图存，走国产化替代之路；五是民用航空业对SAF的关注有增无减，力图增产降价；六是未来较长时期，民用航空运输将持续稳步增长，航空发动机需求数量庞大，市场前景依然向好，其中MRO市场价值尤其可观。

航空动力

（廖忠权，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机前沿技术探索和产业发展研究）