

# 2024年民用航空动力发展

## Progress of Civil Aero Engine in 2024

■ 廖忠权 / 中国航空发动机研究院

2024年，世界民用航空发动机行业呈现日益繁荣的发展态势，主要航空发动机制造商在努力提高发动机产能和升级现有产品的同时，都在开发面向下一代干线客机动力的新技术，以获取未来动力制高点。

**净**零碳排放是全球航空运输业实现绿色航空的重要牵引目标，在大型干线客机暂时难以实现氢动力和全电推进的技术条件下，对于未来下一代干线客机动力，主要航空发动机制造商的选择是在挖掘燃气涡轮发动机潜力的同时融合电能，并提出了不同的动力方案；对现有干线客机动力，则是通过升级改进提升产品耐久性、经济性和安全性。随着全球宏观经济的复苏，航空运输呈现明显增长势头，对新飞机和发动机的需求也随之增加，主要航空发动机制造商纷纷提升产能；此前因疫情而导致的供应链脆弱问题并未完全解决，影响供应链的情况不时发生，航空发动机制造商正竭力增加供应链的弹性和可靠性，以解决日益增长的航空动力需求与产能不足、质量问题之间的矛盾。此外，GE航空航天公司被拆分成独立的公司为其注入了新的活力；俄罗斯的航空国产化替代战略执行颇为艰难。

### 发动机制造商选择不同的技术路线

对下一代单通道干线客机动力，GE航空航天公司和赛峰集团倾向选择开式转子发动机，普惠公司选择的



RISE项目开式转子风洞试验

是第二代齿轮传动涡扇（GTF）发动机，罗罗公司选择的则是“超扇”（UltraFan）发动机。

### GE航空航天公司和赛峰集团推动RISE项目验证机开发

2024年1月，赛峰集团和法国航空航天研究院（ONERA）开始对可持续发动机革命性验证（RISE）项目的开式转子5：1缩比验证模型Ecoengine进行风洞试验，以促进开式转子空气动力学和声学性能技术的成熟，开式转子的试验将持续至2028年。ONERA借鉴了过去7年在

清洁天空1（Clean Sky 1）和清洁天空2（Clean Sky 2）计划下对开式转子架构的研究和开发，并对中短程飞机发动机进行了多次大规模技术验证，其中包括赛峰集团在2017—2018年进行的对转开式转子验证机测试，2020—2021年的一系列低压涡轮试验台测试，以及2020—2022年的一系列轴承、托架、润滑和扫气测试。

与此同时，针对RISE项目，GE航空航天公司在美国国家航空航天局（NASA）的混合热效率核心机（HyTEC）项目下，与NASA合作开

发面向下一代单通道飞机发动机的高压气机、高压涡轮和燃烧室技术，最终将用于RISE项目的紧凑型核心机，目前已经完成高压涡轮演示验证。与目前的先进涡扇发动机相比，RISE项目开式转子构架将减少20%的燃油消耗和排放。GE航空航天公司和赛峰集团都致力于在21世纪30年代对RISE项目验证机进行飞行测试。

2024年5月，RISE项目验证机已完成100多项颠覆性创新技术的开发和验证测试，包括开式转子架构、紧凑型核心机、先进燃烧技术、热管理、混合电推进、100%兼容可持续航空燃料（SAF）等。目前已从概念设计发展到功能组件和系统测试，CFM国际公司计划于2025年前后利用氢动力进行地面和飞行测试。

2024年7月，GE航空航天公司与美国能源部橡树岭国家实验室就超级计算达成一项新的合作研究与开发协议（CRADA），以增强GE航空航天公司设计应用于RISE项目验证机开式转子这类先进航空发动机技术的能力。

此外，作为飞机制造商，空客公司认为开式转子架构非常有前景，公司将于2026—2030年在A380飞行试验台上测试CFM国际公司的RISE项目验证机。空客公司一般会为其单通道干线客机要求两种动力选型，如A320neo的动力是LEAP-1A和PW1100G发动机。如果RISE项目发动机被空客公司选为其未来单通道干线客机动力，由于开式转子设计和传统涡扇发动机之间的安装方式存在显著差异，因此需要另一种开式转子发动机作为备选动力。为此，空客公司敦促除GE航空航天公司和赛峰集团以外的其他发动机制造商研究开

式转子结构，以与CFM国际公司的RISE项目发动机竞争，目前尚未可知另有哪家动力制造商可能研究另一型开式转子发动机。

### 普惠公司关注第二代GTF发动机

2024年7月，普惠公司宣布正在推进第二代GTF发动机的开发，将根据飞机制造商需求推出时间表。与第一代GTF发动机相比，第二代GTF发动机将进行大幅改进，改进计划包括：优化低压轴和高压轴工作载荷；采用更轻的耐热材料，如陶瓷基复合材料；缩小核心机尺寸，提高齿轮箱传动比，从目前的3：1提高至4：1及更高，可能还需要从目前的星形设计转向行星齿轮设计；更高的总增压比；更大的涵道比、更大的风扇，风扇直径从PW1100G的205.74cm增加至215.9 ~ 228.6cm。普惠公司还参与了MTU公司牵头的包含混合电推进的可持续喷水涡扇（SWITCH）项目，目的是借助该项目验证第二代GTF发动机架构。

### 罗罗公司重启“超扇”发动机飞行测试计划

2024年7月，罗罗公司重启“超扇”发动机飞行测试计划，该计划可能会与空客公司合作，并将于2025年开始组装第二台“超扇”验证机，同时意欲证明其也适用于单通道干线客机。第一台“超扇”验证机于2023年在英国德比工厂进行地面测试，累计运行了约70h。第二台“超扇”验证机包含对第一台的改进，其零部件已经采购完毕，将在2025年组装，并计划未来开展飞行测试。

### 发动机制造商提升产能

世界经济的增长带来航空运输业日

益繁荣的需求，航空发动机订单也随之增加，航空发动机制造商为此采取多种方式提升产能，以满足市场需求。

### GE航空航天公司和赛峰集团加强生产投资提升产能

全球航空发动机供应链紧张导致2024年LEAP发动机交付量同比减少6%，订单积压已超过1万台。为缓解紧张的局面，2024年GE航空航天公司在供应链和生产设施等方面投资了6.5亿美元以扩充产能，其中近4.5亿美元投资GE航空航天公司位于美国的22家制造厂，主要用于采购生产设备、升级设施及增强安全措施；其余投资用在北美洲、欧洲和印度的一些国际工厂以提高整个供应链的产能。赛峰集团预计2025年LEAP发动机产量将增加15% ~ 20%，从2024年交付量的约1400台提升到2025年的1625 ~ 1700台，但主要风险仍是供应链的产能不足问题。

2024年2月，赛峰集团在法国西部的雷恩开始新建一座涡轮叶片精铸工厂——赛峰涡轮叶片工厂，生产应用于M88和LEAP发动机的涡轮叶片，该工厂将从2027年开始生产M88和LEAP发动机的涡轮叶片，以降低对美国供应商豪梅特宇航（Howmet Aerospace）公司和Precision Castparts公司的依赖，当前LEAP发动机的产能受这两家公司的生产速率影响较大。2024年，LEAP发动机交付量比2023年减少了约10%，一个主要原因就是豪梅特宇航公司的LEAP发动机高压涡轮叶片生产率下降，影响了发动机的产量。

### 罗罗公司在英国和德国两地投资以提升遑达发动机产能

2024年3月，罗罗公司计划为

其英国和德国的工厂提供5500万英镑（约7010万美元）的投资，提升发动机组装、测试和返厂维修能力，以满足对遛达发动机不断增长的服务需求。主要投资地区包括位于英国东米德兰兹地区的德比总部和位于德国柏林南部的达勒维茨工厂。对德比总部，罗罗公司的目标是提高其发动机生产能力，从2025年起每年交付新发动机比过去10年平均量增加40%以上。对达勒维茨工厂，罗罗公司的目标是利用其现有大型民用发动机测试能力支持近期服务需求，从2026年起，将恢复A350-900飞机动力遛达XWB-84发动机的组装和测试。由于新冠疫情，该生产线一度被暂停。

### 俄罗斯加大投资以促进航空发动机产能提升

2024年1月，俄罗斯联邦政府批准了一项针对飞行器、发动机、仪器及附件扩大生产的综合发展计划，对航空航天企业进行技术改造，改造试验设施，提升工厂产能。俄罗斯国家技术集团（Rostec）计划总投资超过1万亿卢布（约102亿美元），包括福利基金拨款、银行融资、航空工业企业自有资金等，其中，将从国家福利基金拨款2838亿卢布（约29亿美元）支持该项目，旨在确保到2030年能生产600余架俄制民用客机，到2040年生产超过1800架飞机，包括SSJ-100、MC-21-310、伊尔-114、图-214和伊尔-96-300等。

### 发动机制造商加强供应链管理以保证产品质量

供应链管理是产品质量和安全的重要保障之一，鉴于近年供应链问题屡屡对美国和欧洲的航空航天工业

造成困扰，航空航天制造商愈发重视供应链的管理优化。

### 美国和欧洲的航空航天行业成立航空航天联盟

2024年2月，美国和欧洲航空航天行业的领先供应商空客公司、美国航空公司、波音公司、达美航空公司、GE航空航天公司、赛峰集团和美国联合航空公司等成立了一个航空航天联盟，以防止未经批准的零部件进入航空供应链，并提高供应链的完整性。2023年CFM国际公司曾审查发现AOG技术公司销售带有伪造文件的LEAP发动机零部件，虽然涉及的大多数零件都是非序列化的零件，如螺栓、垫圈和衬套，但仍需杜绝此类事件，因此美国和欧洲成立航空航天联盟。

### 普惠公司优化供应链管理

2024年12月，普惠公司已经召回并检查约1200台GTF系列发动机，该发动机面临多项重大问题，尤其是用于制造部分发动机部件的金属粉末出现了严重质量问题，导致高压涡轮盘出现微小裂纹，可能引发不受控制的涡轮盘失效。这一问题对航空公司造成重大影响，波及全球超40家航空公司和租赁公司，导致大量空客A320neo飞机停飞并接受检查，并且该问题在未来2年内可能无法得到彻底解决。对此，普惠公司采取了加速检查、更换受影响零件和优化工艺等措施，尤其是优化供应链管理，对关键供应商制造适配性专属方案，以保证产品质量。

### 发动机制造商提升发动机耐久性和经济性

发动机的耐久性直接影响产品使用性和经济性，对主流产品尤为重要。

CFM国际公司正在改善其畅销产品LEAP发动机的耐久性，罗罗公司则是针对遛达系列发动机全面提升耐久性。

### CFM国际公司对LEAP发动机进行耐久性改装

2024年7月，CFM国际公司宣布将为LEAP-1A发动机提供反向引气系统（RBS）改装套件，以防止喷嘴周围的未燃烧燃料结焦，保持燃烧室内部温度均匀分布，从而提高发动机的在翼时间。LEAP-1A发动机运营商将获得RBS改装套件。与此同时，CFM国际公司也在为LEAP-1B发动机开发一个类似的耐久性改进套件，计划于2025年推入市场应用。

### 罗罗公司全面提高遛达系列发动机的耐久性

2024年7月，罗罗公司披露了其拳头产品遛达系列宽体客机发动机遛达XWB-84、遛达XWB-97、遛达7000、遛达1000进行热端部件改进的更多细节，将在“超扇”发动机验证机开发中获得的新技术应用在遛达系列发动机上，旨在提高发动机耐久性和在翼时间，特别是针对炎热和多沙的运行环境。罗罗公司还计划在遛达发动机上采用新型超级合金制成的涡轮盘，该超级合金最初应用对象是“超扇”发动机验证机。这种新型超级合金涡轮盘已完成制造，将于2025年引入到遛达XWB-84和遛达XWB-97发动机，能承受比目前RR1000材料高约50K的温度，耐久性也将随之提高。罗罗公司这些举措是为了提高其在宽体客机动力市场日渐下滑的份额。以波音787飞机的动力市场为例，罗罗公司远远落后于GE航空航天公

司。2018—2023年，配装 GEnx-1B 发动机的波音 787 飞机订单为 677 架，占 90.5% 的份额；而配装遛达 1000 发动机的波音 787 飞机订单仅为 71 架，占 9.5% 的份额。

### 两型发动机获得适航认证

2024 年 12 月，罗罗公司遛达 XWB-84 发动机性能增强型遛达 XWB-84 EP 发动机获得欧洲航空安全局（EASA）认证，将于 2025 年进入市场运营。与遛达 XWB-84 发动机相比，该发动机的耗油率降低了 1%，二氧化碳排放也更低，可兼容 50% SAF，并经过了 100% SAF 测试。

2024 年 12 月，空客公司 A321XLR 飞机的动力 PW1100G-JM 发动机获美国联邦航空局（FAA）的认证。普惠公司 GTF Advantage 发动机也将于 2025 年年初通过 FAA 认证并交付首台发动机。与 GTF 发动机相比，该发动机的起飞推力提高了 4% ~ 8%，燃油效率提高了 1%，在翼时间更长，还可与目前的 GTF 发动机混装和互换。

## GE 航空航天公司正在快速扩张

长久以来，GE 公司都是世界排名第一的发动机制造商。GE 公司完成拆分并将 GE 航空航天公司独立上市，其专业化发展战略及随之而来的频频扩张将进一步增强 GE 航空航天公司的全球竞争力。

### 成为独立公司

2024 年 4 月，GE 航空航天公司在纽约证券交易所挂牌上市，这标志着 GE 公司拆分成 3 个独立公司的计划完成，3 个公司都向着专业化的方向发展。GE 航空航天公司主要负责 GE 公司的航空航天业务，在全球

拥有约 44000 台商用航空发动机和约 26000 台军用航空发动机，是航空航天推进系统、服务和集成系统的全球领先企业。GE 航空航天公司实现独立运营标志着 GE 公司完成了持续多年的财务和经营转型。

### 增加在印度的投资

2024 年 4 月，GE 航空航天公司投资超过 24 亿卢比（约 3000 万美元）扩大并升级其在印度浦那的制造工厂，以提升产能。这既是 GE 航空航天公司增强产业链的一部分，也是公司扩大在印度投资的一部分。自进入 21 世纪以来，GE 公司日渐增加在印度的投资。2000 年，在印度班加罗尔成立了一家全球研发中心；2015 年，GE 公司在印度的浦那建立工厂，成为 GE 公司发动机零部件供应链中的重要一环，生产的零部件应用于 GE90、GEnx、GE9X 和 LEAP 发动机，而且还是印度重要的航空航天人才培养中心，迄今已培训超过 5000 名航空航天精密制造工艺技术人才。印度浦那工厂在印度的 13 个合作伙伴也是 GE 航空航天公司全球供应链的一部分。

### 扩建在土耳其的技术中心

2024 年 6 月，GE 航空航天公司位于伊斯坦布尔的土耳其技术中心（TTC）新园区落成启用。土耳其一直是 GE 航空航天公司航空发动机和燃气轮机全球供应链的重要组成部分，早在 40 年前 GE 公司就与土耳其航空航天工业公司成立了合资公司土耳其航空发动机公司（TEI），TEI 为 GE 公司及其合作伙伴制造数百种发动机部件，包括 LEAP、GEnx 和 GE9X 发动机的涡轮和压气机等，还参与 RISE 项目验证机的制造。2000 年，GE 公司在伊斯坦布尔建立了

TTC，TTC 先后参与了 GEnx、LEAP、GE9X 和“催化剂”（Catalyst）发动机的开发，并对现役发动机持续改进，支持软件服务（SaaS）解决方案的开发和持续升级；TTC 还研究航空衍生技术，参与航改燃气轮机的开发；目前 TTC 正在参研 RISE 项目，参与开式转子设计、紧凑型核心机、混合电推进和氢燃烧技术等研究。2024 年 6 月启用的 TTC 新园区可容纳近 400 名工程技术人员，将进一步提升 GE 航空航天公司在土耳其现有的工程、创新、研发、软件和 3D 打印能力。

### 向波音公司交付生产型 GE9X 发动机

2024 年 7 月，GE 航空航天公司将首台生产型 GE9X 发动机交付波音公司，GE9X 发动机将为新型 777-9 飞机提供动力。该发动机已经完成 5000h 和 8000 循环地面测试，在波音 747 试验台上进行了 72 次共计 400h 的飞行测试，生产型 GE9X 发动机的交付是波音 777-9 宽体飞机项目的一个关键里程碑。波音公司计划 2025 年将波音 777-9 飞机推入市场开始商业运行。

### 投资 10 亿美元提升全球 MRO 能力

2024 年 7 月，GE 航空航天公司宣布在 5 年内投资 10 亿美元扩大并升级全球维护、修理和大修（MRO）设施，以满足全球不断增长的宽体和窄体客机需求。目前全球以 LEAP 发动机为动力的客机超过 3300 架，另有发动机储备订单超过 10000 台，未来几年全球商业航空公司机队还将增加数千台订单。在 10 亿美元投资计划中，2024 年投资 2.5 亿美元，用于扩建厂房、购置新机器和工具，



GE 航空航天公司向波音公司交付首台生产型 GE9X 发动机

以及增强安全设施，其中包括美国本土约6500万美元，南美洲约5500万美元，欧洲和中东地区约6000万美元，亚太地区约4500万美元。

## 俄罗斯航空发动机的国产化替代举步维艰

自俄乌冲突以来，美国、欧洲对俄罗斯航空工业的封锁越收越紧，俄罗斯的应对之策是国产化替代，但其相对较弱的民用航空技术基础使这一战略执行并不顺利。MC-21和SSJ-100飞机的大部分零部件来自国外，MC-21飞机有60%~70%的零部件需要替换，而SSJ-100飞机的比例更高，达到80%~90%。缺少进口部件，尤其是来自美国和欧洲的关键零件，使得俄罗斯在飞机制造上面临巨大挑战，同时发动机研制不仅面临技术和生产瓶颈，还存在成本问题。MC-21飞机配装的PD-14发动机的价格几乎是普惠

PW1000G发动机的2倍，约1760万美元；而SSJ-100飞机配装的PD-8发动机也比SaM146发动机贵得多，已达到980万美元。

### SaM146发动机用俄罗斯国产点火电嘴寿命大幅缩短

2024年1月，运营SSJ-100支线飞机的两家俄罗斯航空公司以及飞机制造企业反馈，SaM146发动机采用俄罗斯国产点火电嘴的寿命只有原来进口点火电嘴的1/10。SSJ-100飞机原装动力是法国和俄罗斯联合研制的SaM146发动机，原来使用的是美国Unison Industries公司生产的点火电嘴，使用寿命为1000h。由于执行国产化替代战略，现在SaM146发动机安装的点火电嘴来自乌法发动机制造生产联合体，其寿命只有100h。

### 俄罗斯推迟PD-8发动机进入市场的时间

2024年3月，俄罗斯联合发动

机制造集团（UEC）决定推迟SSJ-100支线飞机的换装动力PD-8涡扇发动机投入使用的时间，目的是保证发动机在所有飞行状态下的可靠性，并确保安全性。不仅如此，Rostec在此之前已宣布推迟根据进口替代计划研发的所有俄制飞机的交付期限。向俄罗斯的航空公司交付SSJ-100、MC-21、图-214和伊尔-114-300飞机的期限现已推迟至2025—2026年。延迟交付不仅与发动机的缺陷有关，还与换装俄制配件导致飞机的质量增加有关。

### 日本对俄罗斯航空工业实施制裁

2024年3月，日本将UEC下属的彼尔姆航空发动机公司列入了新的制裁名单，制裁规定了出口限制与资产冻结。彼尔姆航空发动机公司是UEC旗下重要的民用航空发动机、航改燃气轮机以及发电机组的设计和研制单位，典型产品有PD-14、PD-35和PD-8等干线、支线客机发动机。鉴于俄乌冲突局势，日本对俄罗斯的制裁分为若干阶段，涉及超过1000人、120多个组织。这是继美国和欧洲制裁俄罗斯之后，相关亚洲国家开始制裁俄罗斯，加剧了对俄罗斯航空航天工业的封锁。

## 未来市场预测

随着全球航空运输的持续复苏，未来干线客机及发动机的交付量及MRO市场将节节攀升，单通道干线客机及其动力将占据各自市场最大的份额。

### 波音公司和空客公司预测未来20年全球客机和货机需求量将超过40000架

2024年7月，波音公司预测，2024—2043年全球干线客机和货机

市场将需要42450架新飞机，而目前全球机队数量26750架中约一半老旧飞机将被新飞机替换。空客公司则预测，2024—2043年全球干线客机和货机市场将需要43370架新飞机，全球航空公司预计将替换约18460架老旧飞机，主要增长动力来源于印度和中国这两个世界上人口最多的国家。根据波音公司和空客公司的机队预测数据，未来20年，全球干线客机和货机发动机需求量将超过88000台，其中单通道干线客机发动机需求量将超过67000台，占总量的76%。

此外，波音公司还预测，2024—2043年全球支线客机市场将需要1525架新飞机。

### 波音公司的飞机和CFM国际公司的发动机引领未来10年航空MRO需求

2024年11月，《航空周刊》期刊发布《商用机队和MRO预测》报告，2025—2034期间，干线客机MRO市场价值为1.4万亿美元，其中，波音公司的飞机占49%的市场份额，价值超6800亿美元；空客公司的飞机占44%的份额，价值6120亿美元。空客A320系列飞机的MRO需求最大，占28%以上份额，波音737和波音777飞机位居第二和第三，分别占比为21.9%和11.1%；

2025—2034年全球干线客机发动机MRO市场价值预测

公司	价值/亿美元	占比
CFM国际公司	2480	36%
GE航空航天公司	1998	29%
罗罗公司	1103	16%
普惠公司	620	9%
其他	689	10%

单通道干线客机（空客A320、波音737）占据49.9%的份额。

未来10年，干线客机发动机MRO需求将以3.3%的复合年增长率增长，MRO市场价值总量为6890亿美元，前3位公司为CFM国际公司、GE航空航天公司和罗罗公司，分别占36%、29%、16%；其中单通道干线客机发动机MRO市场价值所占份额超过40%。

### 结束语

2024年是世界民用航空产业自新冠疫情结束后全面复苏的第二年，航空发动机生产交付和MRO呈现全面向好态势。本年度民用航空发动机的发展趋势主要有：GE航空航天公司、普惠公司、罗罗公司和赛峰集团四大干线客机动力制造商都在快速推进面向下一代干线客机的动力

解决方案，各方案虽然构型各不相同，但都具有相似的基本特点，包括集成电动发动机、GTF架构、更大的涵道比、更大的风扇、更紧凑的核心机以及更高的总压比；主要航空发动机制造商都在着力强化供应链、提升产能，同时提高产品耐久性，在既有市场地位的同时，尽可能争得更多的市场份额；2024年最大的行业变数是GE航空航天公司成为了一家独立公司，这一事件影响深远，随着时间推移，其行业影响力将逐渐呈现；俄罗斯苦心孤诣推进民用航空国产化替代战略，虽已取得一定成就，解决了国产替代产品的有无问题，但其发展并不顺畅，某些关键产品性能呈现大幅降低的问题，而且价格比其替换的国外发动机贵得多；民用航空运输稳步增长，航空发动机交付和MRO市场前景良好，其中单通道干线客机占有最大的市场份额。在可见的未来，干线客机动力仍将以燃气涡轮发动机为基础，市场将持续保持增长态势，其中单通道干线客机动力是市场的焦点。

**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）

2024—2043年全球干线客机和货机市场新飞机需求预测

	波音公司		空客公司	
	数量/架	占新增飞机比例	数量/架	占新增飞机比例
窄体干线客机	33380	79%	33510	77%
宽体干线客机	8065	19%	8920	21%
货机	1005	2%	940	2%
合计	42450	100%	43370	100%