

# SWITCH加速水增强涡扇和混合电推进技术研发

## SWITCH Progress Water-Enhanced Turbofan and Hybrid-Electric Technology

■ 韩玉琪 李明 廖忠权 刘英杰 / 中国航发研究院

德国MTU航空发动机公司于2022年11月29日宣布，其牵头开展的包含混合电推进的可持续喷水涡扇（SWITCH）项目获得欧盟清洁航空（Clean Aviation）计划资助。SWITCH项目的研发目标是显著提高发动机效率，并大幅降低飞机在整个运行包线内的排放，将中短程（航程4000km以内）飞机的二氧化碳排放降低25%，氮氧化物排放降低80%，尾迹生成降低50%。

欧盟清洁航空是清洁天空（Clean Sky）的后续计划，研发重点包含3个领域：混合电推进支线飞机、超高效中短程飞机和氢动力飞机。目标是2030年时将飞机的温室气体排放量与2020年最先进的技术相比降低不少于30%。该计划在第一阶段中，首批拨款6.54亿欧元，资助20个航空研究和创新项目，其中包括SWITCH项目。

### 项目背景

在SWITCH项目中，德国MTU航空发动机公司将主导水增强涡扇（WET）系统和并联混合电推进系统与普惠公司的齿轮传动涡扇（GTF）发动机架构相结合。此外，SWITCH项目的动力系统将能够使用可持续航空燃料（SAF），并为未来使用氢燃料做好准备。

SWITCH项目同时得到了清洁航空计划和英国研究与创新（UKRI）机构的支持，项目总经费6789万欧元，其中欧盟资助4850万欧元。项



图1 配备SWITCH项目发动机的飞机示意

目获批资金涵盖第一阶段（至2025年年底）工作，包括测试GTF发动机的混合电推进系统改进型版本，以及设计和测试WET系统，并将其与其他动力系统集成。项目的目标是在第一阶段结束时，WET系统达到技术成熟度（TRL）4级，混合电推进系统达到TRL5；后续视情寻求资金开展第二阶段（2026—2030年）工作，包括该技术的地面和飞行试验验证，计划提升SWITCH项目发

动机至TRL6，如图1所示。

### 项目分工

SWITCH项目由MTU公司主导，普惠公司、柯林斯航宇公司、空客公司、吉凯恩（GKN）公司等航空航天企业，以及来自11个欧美国家的大学和研究机构（包括希腊塞萨洛尼亚基亚里士多德大学、瑞典查尔默斯理工大学、德国斯图加特大学和德国航空航天中心等）参与。

MTU公司主要负责研发WET系统。该系统从发动机排气中回收高温水蒸气，并将其重新注入燃烧室，并通过冲洗发动机中积累的碳烟来减少尾迹云的形成。目前，MTU公司正在开发WET系统的蒸汽涡轮和水回收装置。

普惠公司主要负责将并联混合电推进系统和WET系统集成到GTF发动机中，并提供蒸汽喷射燃烧室。普惠公司通过由美国能源部预先研究计划局（ARPA-E）资助的氢蒸汽喷射间冷涡轮发动机（HySITE）项目，积累了在氢涡轮动力中集成并使用蒸汽注入-回收系统的经验。

柯林斯宇航公司主要负责提供兆瓦级电动发电机（包括高压轴上的500kW机组和低压轴上的1MW机组），以及电力电子设备、高压直流配电和保护系统、冷凝器等热管理组件和容纳这些组件的新型短舱架构，并寻求最大程度地优化反推装置。柯林斯宇航公司计划将在伊利诺伊州罗克福德市投入使用的新设施验证SWITCH的集成电力系统，同时合作伙伴准备在柯林斯宇航公司的“电网”（The Grid）实验室验证集成动力系统。

吉凯恩公司主要负责研发混合电推进GTF发动机所需的架构，包括集成电机、蒸汽发生器和换热器，公司旗下的福克公司负责开发高压配电和布线系统。

空客公司主要负责评估收益并确保从飞机层面的系统架构中实现这些收益，包括SWITCH技术的飞发集成，以及评估包括飞机设计、电池和能源管理系统在内的各种性能优势。

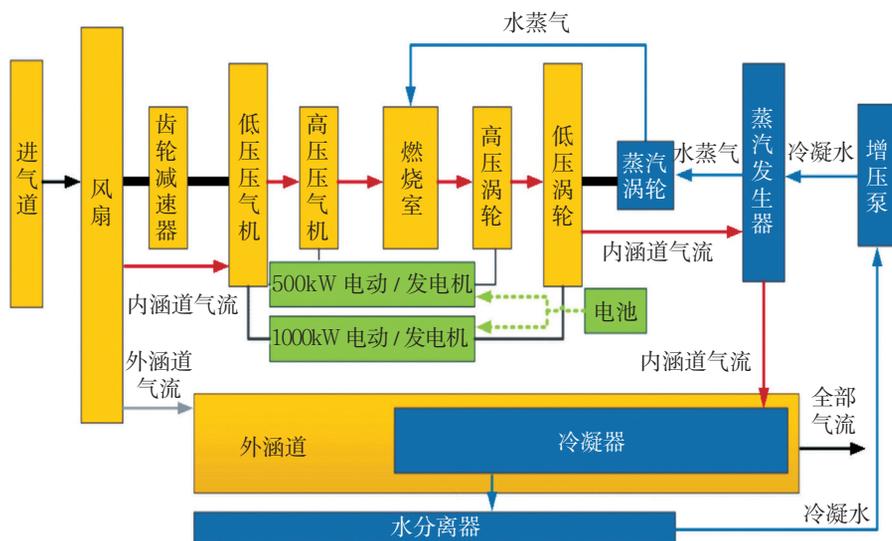


图2 SWITCH项目发动机组成及原理

### 关键技术

SWITCH项目发动机主要由WET系统、并联混合电推进系统与GTF发动机三大部分构成，如图2所示，各部分的关键技术各有侧重。

#### WET系统

WET系统（见图3）可显著改善

巡航阶段对气候的影响，该技术有望减少15%~20%的二氧化碳排放、80%的氮氧化物排放以及约50%的尾迹形成，计划2035年投入市场。

WET系统通过使用蒸汽发生器蒸发水并将其注入燃烧室的“湿燃烧”方式，从发动机排气中回收余

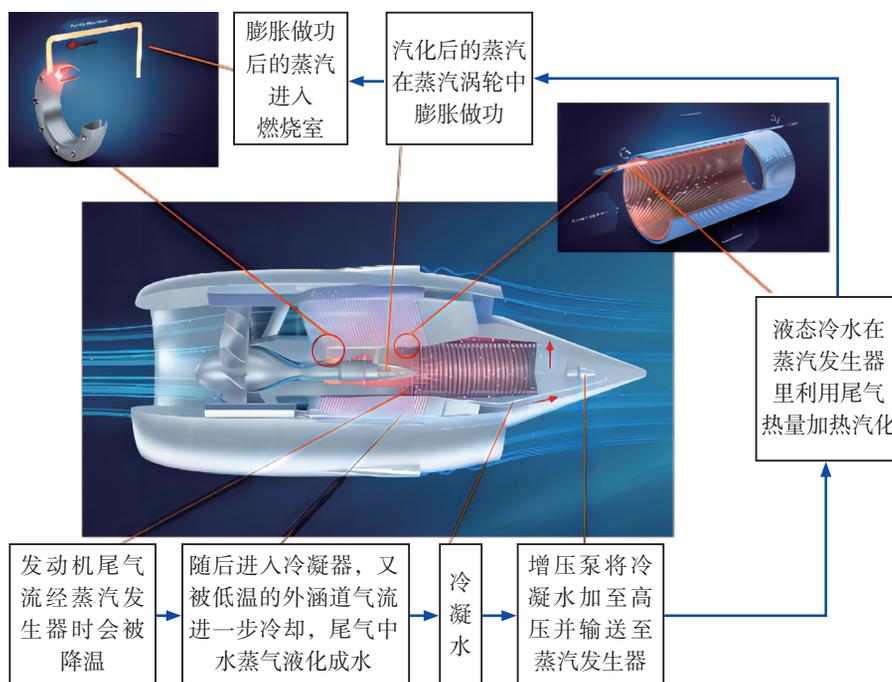


图3 WET系统原理示意

热并加以利用，提高发动机的热效率，从而达到降低油耗的效果；同时，水蒸气的高比热容有助于降低燃烧室高温区温度，从而抑制氮氧化物生成；排气中大多数碳烟颗粒被冲刷也有助于减少尾迹的产生。WET系统在GTF发动机架构的基础上进行研发，其工作循环过程为：蒸汽发生器产生热蒸汽，发动机的排气在此过程中被冷却，当排气在冷凝器中进一步冷却时，所含的水蒸气开始冷凝，冷凝放热被外涵道气流吸收、液态水在水分离器中与排气分离，在此过程中冷凝核也被从排气中冲洗出来，增压泵将水加至高压并输送至蒸汽发生器，热蒸汽在蒸汽涡轮中膨胀做功后进入燃烧室，产生的动力通过低压轴输出。

WET系统所包含的冷凝器、蒸汽发生器和水分离器等零部件将使发动机整机质量增加约50%，使发动机的长度更长，也带来了更大的飞行阻力。MTU公司将和空客公司合作，探索一种将发动机集成到机翼中的新方法，并通过降低耗油率使这一劣势获得更多补偿。换热系统也会带来流路的一些总压损失，进而对整机性能带来不利影响，增加了整机系统的设计复杂度。

### 并联混合电推进系统技术

并联混合电推进系统有助于降

低飞机起飞、爬升、降落和滑行阶段的污染物排放和噪声水平，尤其是对中短程飞机而言，这些阶段占整个飞行时间的比例较高，节油降噪的效果更为明显。

并联混合电推进系统原理如图4所示。起飞和爬升阶段飞机需要较大推力，电动系统可以提供一部分助力；巡航和着陆阶段飞机需要的推力较小，涡轮发动机多余的功可以储存在电池中；通过电动系统的“削峰填谷”效用，提升整个飞行过程的燃油效率。

当前电池的能量密度和电机的功率密度较低是该系统的薄弱环节，普惠公司估计该系统将增加1t的质量；高空高压的用电安全是需要重点考虑的因素，高电压可以提高电力系统的效率并减轻质量，但同时也会增加电弧放电的风险，空客公司的目标是达到800V电压。

### GTF发动机架构

GTF发动机通过减速器来降低风扇转速，进而提高涵道比、降低排气速度以提高推进效率，达到降低耗油率和噪声的效果。

受风扇叶片榫根与轮盘强度的限制，风扇叶片的叶尖速度一般不超过400~450m/s，而传统大涵道比涡扇发动机的风扇部件直径又很大，这导致其转速被限制得较低，

也即与其同轴工作的低压转子转速低，导致低压转子效率低、级数多。风扇和低压压气机之间引入齿轮减速器，可使两者可在各自的最佳转速下工作，低压涡轮可采用更高转速从而减少级数，如现役的GTF发动机PW1100G-JM低压涡轮仅为3级，比竞争对手LEAP-1A发动机少了4级。

高速大功率齿轮减速器是GTF发动机的关键，对传动效率、散热、可靠性和耐久性要求极高，需要经过大量的试验验证。PW1100G发动机的齿轮减速器在全功率工作时，传递的功率超过22MW；罗罗公司正在研发的“超扇”(UltraFan)发动机也采用了齿轮减速器，额定功率为50MW，试验测试中达到了64MW。

## 结束语

碳中和目标对航空业提出了艰巨要求，而航空动力的技术创新是实现碳减排目标的关键。对于2035年左右投入使用的下一代商用航空发动机：CFM国际公司通过可持续发动机革命性验证(RISE)项目来加速研发开式转子架构、先进材料和混合电推进系统等技术，以提升20%的燃油效率来实现减排；而随着SWITCH项目的公布和开展，普惠公司和MTU公司的思路也逐渐清晰，即通过研发GTF架构、WET系统和混合电推进系统等技术来应对竞争，以提升25%的燃油效率来实现减排；同时双方都还将探索可持续航空燃料和氢燃料的使用。

航空动力

(韩玉琪，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报与战略论证研究)

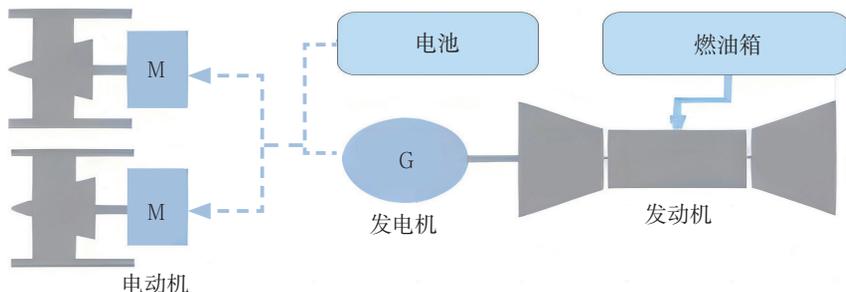


图4 并联混合电推进系统示意