

# 俄罗斯混合电推进技术发展浅析

## The Development of Hybrid Electric Propulsion Technology in Russia

■ 王乐 高海红 王鹏 / 中国航发涡轮院

近年来，国际上对环保和污染排放的要求不断提高，国际民航组织（ICAO）计划，到2050年将CO<sub>2</sub>排放降低75%。采用传统的航空发动机设计方法已无法满足发动机高效、节能、环保和长寿命的需求，因此需要开始探索新的推进技术，混合电推进系统便是其中之一。由于采用了部分电推进，这种装置在节能、环保方面的优势突出，是当前世界各国先进航空动力研究的重要方向，其中也包括俄罗斯。

**混**合电推进系统主要是指由传统燃气涡轮发动机带动发电机发电，结合机载电池组提供电力，驱动电动机带动分布在机翼或机体的多个涵道风扇/螺旋桨提供全部或大部分推力（燃气涡轮发动机不提供或只提供部分推力）的系统。起飞时使用传统燃气涡轮发动机；爬升到一定高度时，电动机开始工作，燃气涡轮发动机可以给电动机的电池充电，或者完全关闭；降落时再次起动机燃气涡轮发动机，完成着陆。这种系统结合了燃气涡轮发动机和电力推进两种动力的优点，电池不会一直持续工作，而且在工作中燃气涡轮发动机还可以给电池充电，所以对电池的质量、尺寸和技术要求并没有那么高。与此同时，这种系统也降低了对燃气涡轮发动机的要求，可以采用结构简单、经济性和环保性更高的燃气涡轮发动机，从而延长巡航飞行航程，提高动力系统寿命，提高飞机整体环保性和经济性。理论上讲，采用涡扇发动机和涡桨发动机的军民运输类飞机、无人机都可以采用混合电推进系统。混合电推进技术具备较大的发展潜力，被列为未来航空发动机发展的主要方向之一，各国都投入大量资源开展研究，俄罗斯也不例外。

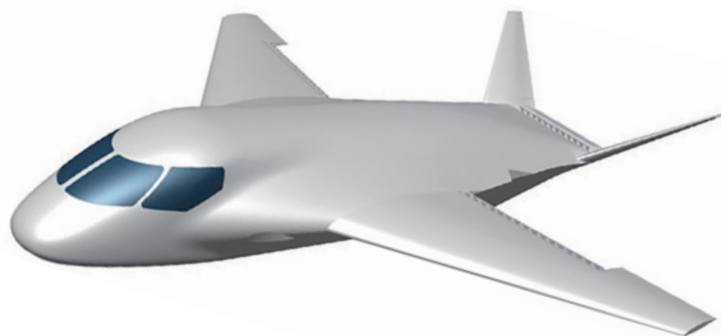


图1 TsAGI 轻型短距起降支线飞机气动结构方案

俄罗斯是最早从事电推进飞行器基础研究的国家之一，但在20世纪90年代初，由于苏联解体、经济衰退，整个航空工业发展停滞不前，在电推进领域的研究也被迫中断。经历十多年的沉寂，直到2004年左右才开始恢复。之后，俄罗斯从国家层面制定了多个航空工业发展规划，并从国家预算拨款来刺激和鼓励飞机和发动机新技术研究，其中也包括混合电推进技术。

目前，俄罗斯有许多科研机构着手混合电推进的应用研究。中央航空发动机研究院（CIAM）早在20世纪初期就开始了该项技术的探索研究，在混合电推进技术方面积累了一定的基础研究经验。俄罗斯

未来研究基金会宣布正在进行功率为500kW混合电推进发动机的研制工作，原型机预计将于2020年开展试验。中央空气流体动力学研究院（TsAGI）也提出了轻型短距起降支线飞机分布式混合电推进发动机的方案（如图1所示）。俄罗斯多家航空科研院所、企业和高校纷纷参与到了这些项目研制中，各单位在项目中分工明确，在各自的优势领域发挥了重要作用。

### 中央空气流体动力学研究院的混合电推进研究

TsAGI是俄罗斯从事飞行器空气动力学和结构强度方面基础研究和应用研究以及相关流体力学研究的科学院

所。该研究院提出了轻型短距起降支线飞机分布式混合电推进发动机的方案。该飞机的特点是：采用安装在机翼前端的几个螺旋桨对机翼吹风来提高低速状态下飞机的升力。巡航时，其中一些螺旋桨收起，以提高飞行速度，减小气动阻力、降低燃油流量。与同类产品相比，采用这种飞机结构方案可以使飞行速度从300~350km/h增大至650~700km/h，航程从700~1000km延长至2000km，起降距离从600~700m缩短至300~400m。在设计方案中，采用1台涡轴发动机和20~30台电驱动风扇、1台发电机和备用电源来提高气动品质、增大巡航速度和解决低速起降的问题。此外，飞机还采用了小展弦比襟翼来提高升力，提高载油量来加大航程；采用飞发集成结构，降低迎面阻力。采用上述措施后，飞机完全可以达到规定速度。截至2019年9月，该项目还处于计算机模拟阶段，正在进行初步评审，预计2020年将开展模型试验研究。

## 中央航空发动机研究院的混合电推进研究

CIAM是俄罗斯航空发动机领域最权威的综合性、系统性研究机构。在混合电推进动力装置方面，CIAM更多的是承担基础性研究工作，包括高转速发电机和功率质量比大于2~5kW/kg的电驱动装置研究等。

### 高转速发电机

目前，CIAM正在研制转速可达50000r/min、直流电压为27~540V、功率为300kW以上的高转速发电机。为了提高发电机的功率，CIAM与超级奥克斯公司（SuperOx）合作研制高温超导体，并基于超导体发电机开展混合电推进动力装置研究。预

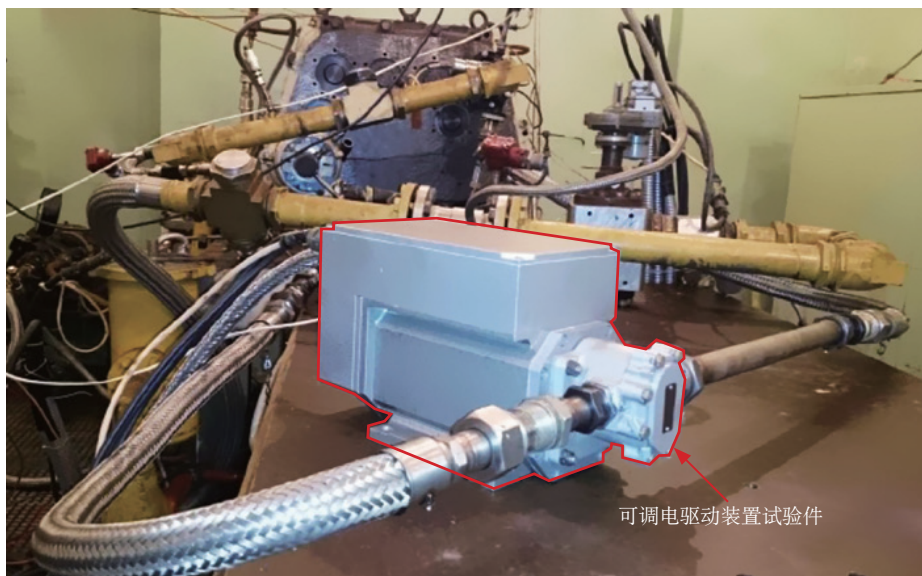


图2 可调电驱动装置试验件在CIAM GU-212试车台上的装配情况

计到2030年，该超导体发电机功率将不低于2MW，2035年发电机功率会达到5MW。

### 功率质量比大于2~5kW/kg的电驱动装置

电驱动装置基于电磁激励的非接触式闸流管式电机开展研制，电动机不采用转子旋转线圈和刷式集电器组件。这种设备不需要经常进行维护，具有很强的抗力矩过载能力（瞬时增加5倍多），效率超过90%，而且质量轻，尺寸小，寿命长和可靠性高。

CIAM正在联合电驱动装置设计局、鄂木斯克设计局、ERGUARD公司（专门生产和分析永久性稀土磁铁和专用磁铁系统）研制功率质量比大于2~5kW/kg的电驱动装置试验件（如图2所示）。目前，试验件已完成高速性、转速变化范围为400~12000r/min的高温试验验证。该电驱动装置为燃油系统的一部分，用于调节泵的功率，还可以极大地降低飞行中燃油的温升程度，改善

滑油系统的温度情况，进而提高发动机使用的可靠性和安全性，改善其环保特性。

## 联合团队的混合电推进研究

2017年莫斯科航展上，茹科夫斯基国家研究院的国家研究中心展出了一台功率为500kW的混合电推进动力装置验证机（如图3所示）。项目的研究工作是在“建立未来全电飞机研究先进科技基础”的构架下开展的，牵头单位为CIAM，参与项目研制的单位有CIAM、西伯利亚航空研究所、中央空气流体动力学研究院（TsAGI）、超级奥克斯公司、茹科夫斯基国家研究院国家研究中心、乌法国立航空技术大学和莫斯科航空大学等。其中，CIAM负责总体和制定部件要求，西伯利亚航空研究所负责飞行平台建设和飞行试验，超级奥克斯公司负责高温超导电气设备研制，TsAGI负责制定总体要求和全电飞机打样图设计。

该型动力装置电动机的动力来

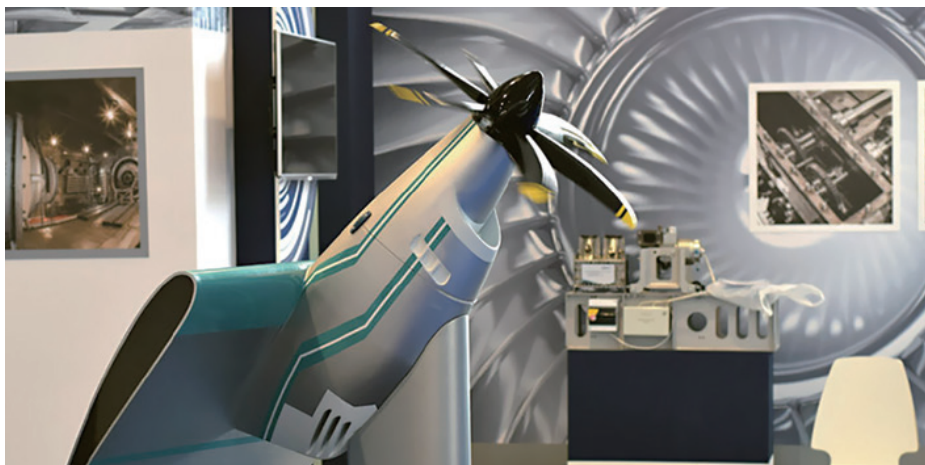


图3 2017年莫斯科航展上展出的装配混合电推进动力装置的飞机模型

源为蓄电池或/和发电机，发电机通过燃气涡轮发动机轴传动。电动机的最高转速为2500r/min，额定电压为800V，发动机质量为95kg，直径为0.45m，长0.4m，液氮流量为6L/h。该发动机在研制时采用了许多新技术和新方案。例如，采用了液氮和俄罗斯自研的高温超导体，当温度为 $-196^{\circ}\text{C}$ 时，导体的电阻效应为零，从而输出很高的效率（通常情况下，提高电动机功率的同时，其质量也会相应增加，但采用这种高温超导体就

可以很好地解决这个问题）；发电机由CIAM和乌法国立航空技术大学联合研制，这是俄罗斯首个功率超过150kW的航空发电机，可以使效率达到96%。

项目分两步实施：先研制出混合电推进动力装置，然后基于验证的技术着手开展载客量9~19人的批生产电驱动飞机研制。预计将在2020年年底或2021年年初实现试飞。

2019年9月，该项目的首个结

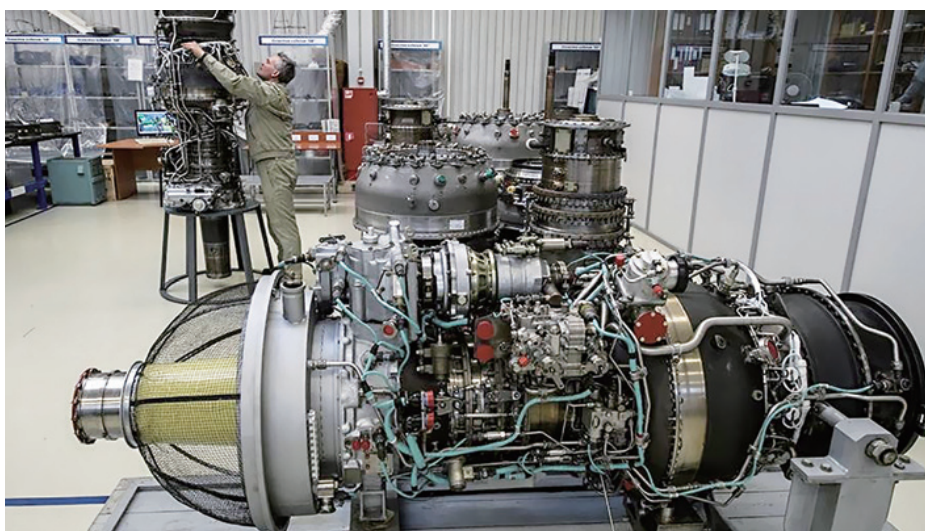


图4 莫斯科航空大学研制的混合电推进发动机

构方案验证机在CIAM试车台上开展地面试验，2020年将在西伯利亚科学研究院的雅克-40飞行平台上开展飞行试验。试验时将装备4台这种电动机，试验过程中可以根据情况对飞行要求进行调节，检查其效率和所有系统的工作情况。

## 莫斯科航空大学的混合电推进研究

2019年莫斯科航空大学的专家们将俄罗斯国内自主研发的超导材料首次用于大功率电动机（如图4所示）。该电动机可以极大地降低电阻，电功率比磁阻电动机更高，完全可以为发动机提供足够的动力，保证飞机的电力需求。因为超导体只有在极低温条件下才能保持电阻很低，要保证电动机正常工作，需要在动力装置上安装一个低温保护系统。目前，该方案拟采用机载低温保护系统，装载温度为 $-196^{\circ}\text{C}$ 的液氮冷却。采用这种冷却方式还可以避免导线短路引起失火，从而提高了飞机机载的安全性。

## 结束语

俄罗斯将航空电推进技术作为未来航空领域革新的方向，其技术研究水平也走在了世界前列，部分设计方案已经进入了地面试验阶段。尤其是CIAM和TsAGI，不仅具有深厚的混合电推进发动机科学技术储备，设计方案也正在走向验证和应用。此外，俄罗斯其他科研院所、高校和企业也均参与到了混合电推进发动机技术研究中，并取得了不菲的成绩。

航空动力

（王乐，中国航发涡轮院，工程师，从事航空发动机科技情报研究）