

2024年旋翼机动力进展

Progress of Rotorcraft Engine in 2024

■ 张稳 / 中国航空发动机研究院

美国空军敏捷至上（Agility Prime）项目在电动垂直起降（eVTOL）飞行器领域探索4年后，明确表态纯电形式目前尚无法满足军事需求，将全面转向混合电推进技术。这掀起了一波混合电推进垂直起降技术研发的小高潮，也为传统涡轴动力“老树开新花”奠定了基础。

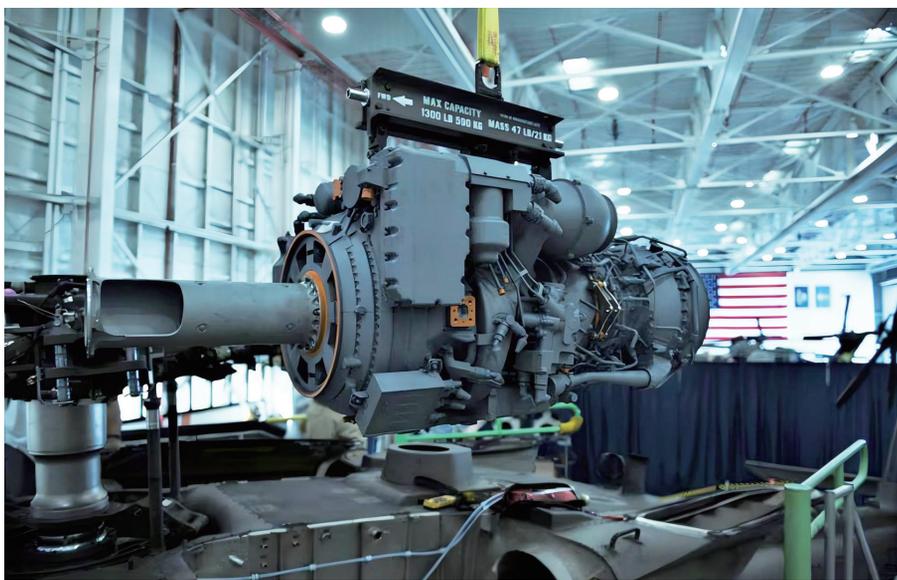
旋翼机动力目前呈现出两条较为明显的技术分支：一是传统涡轴形式，由于新研直升机型号需求不足，其总体研发节奏趋于放缓，只有倾转旋翼机还受到一定的青睐；二是eVTOL形式，在军用和民用两个领域都有着广阔的应用前景，尤其是混合电推进的eVTOL飞行器，是当前各国研发的重点，适航当局也在积极探索新的监管规定。

传统涡轴动力研发趋缓

2024年，世界各国传统涡轴动力的研发节奏趋于放缓。美国T901发动机虽然技术先进且进展顺利，但装机对象突遭下马，得益于前期项目论证时兼顾了老机型换发，才避免一同下马的命运。美国和欧洲在研发新一代倾转旋翼机时，也采用了成熟发动机型号，以可靠性为优先指标。德国和法国、印度和法国都分别成立合资企业，专注于新型涡轴发动机的研发，但开花结果尚需时日。

FARA项目下马，T901发动机优先用于“黑鹰”直升机换发

2024年2月，美国陆军宣布取消未来攻击侦察机（FARA）项目，并推迟该直升机原计划配装的T901



T901 涡轴发动机

涡轴发动机的生产，将发动机从匹配FARA新机平台调整到现役直升机换发上。据统计，美国陆军现役“黑鹰”和“阿帕奇”直升机总数超过3000架，全部是T901发动机的潜在换装对象。

为FARA项目提供配套动力的改进涡轮发动机计划（ITEP）立项时，极具前瞻性地统一了新研直升机和现役直升机换发的动力需求，使得该计划衍生出的T901发动机能够兼顾为美国陆军庞大的现役直升机机队进行发动机原位换装，因此FARA项目下马后才没有被连带取消。

2024年4月，西科斯基公司首次在FARA原型机上进行了T901发动机的装机地面测试，为后续的“黑鹰”直升机换装T901发动机积累经验并降低了技术风险。2024年6月，首批2台T901发动机安装在1架美国陆军“黑鹰”直升机上，开展地面运行和飞行测试，并预计在2025年完成相关测试。与“黑鹰”直升机目前配装的T700发动机相比，T901发动机在保持外廓尺寸基本不变的同时，输出功率提高了50%，耗油率降低了25%，功重比提高了65%，设计寿命提高了20%，生产和



“勇士”倾转旋翼机



AW609倾转旋翼机

维修成本均降低35%，可全面提升“黑鹰”直升机的载重、升限、航程等性能。

美国和欧洲新型倾转旋翼机项目稳步推进，均搭载成熟涡轴发动机

美国陆军未来远程攻击机（FLRAA）项目于2024年8月获准进入工程和制造开发（EMD）阶段，作为“鱼鹰”倾转旋翼机的后继型号，FLRAA项目选择了贝尔公司“勇士”倾转旋翼机的构型，发动机也是“鱼鹰”倾转旋翼机AE 1107C发动机的小幅改进型，即罗罗公司的AE 1107F涡轴发动机，动力方面的主要变化是飞机螺旋桨进行换向时，只有变速箱一同转向，主发动机不转向。

意大利莱昂纳多公司与美国贝尔公司联合研制的AW609倾转旋翼机原型机于2024年6月完成首次舰

上起降试验，该机配装2台成熟的普惠公司PT6C-67A发动机，单台功率为1490kW。PT6系列发动机诞生60余年来，总计交付64000多台，累计飞行5亿h，具有较高的可靠性水平。

虽然AW609倾转旋翼机尚未定型，但莱昂纳多公司已将该机改装为下一代民用倾转旋翼（NGCTR）技术验证机，于2024年7月完成首次地面运行试验，开始按照意大利民用航空局（ENAC）和欧洲航空安全局（EASA）的要求开展密集测试并收集相关数据。NGCTR技术验证机采用了和“勇士”倾转旋翼机类似的动力构型，旋翼转向时主发动机固定不动，配装2台GE航空航空公司的CT7涡轴发动机，单台功率为1490kW。CT7发动机是“黑鹰”直升机目前配装的T700发动机的民

用版，除可靠性外，其维修性也十分突出。

法国分别与德国和印度成立合资企业，共同研发新型旋翼机动力

2024年6月，赛峰直升机发动机公司与MTU公司签署合作协议，双方各出资50%成立合资公司——欧洲军用旋翼机发动机联盟（EURA），准备为下一代欧洲军用直升机联合开发欧洲自己的先进发动机。新发动机将在提高效率的同时，降低使用维护成本，预计2040年后投入使用。

2024年8月，赛峰直升机发动机公司与印度斯坦航空有限公司成立合资企业SAFHAL直升机发动机公司，为正在开发的印度13t级多用途直升机（IMRH）和舰载12.5t级海军型甲板多用途直升机（DBMRH）研发新型涡轴发动机。该新型发动机被命名为阿拉瓦利（Aravalli），原指印度西北部的一条山脉。



NGCTR技术验证机

电动垂直起降动力方兴未艾

通过对各种eVTOL技术路线进行创新性资助研究，美国空军认为纯电动目前实用性不足，将全面转向发展混合电推进技术。基于eVTOL飞行器广阔的军用和民用前景，以及日趋成熟的产业链，美国和欧洲的多家公司纷纷投身于混合电推进



VerdeGo Aero 公司混合电推进系统

eVTOL 飞行器的研发，其适航当局也在抓紧制定相关监管条款。

美国空军敏捷至上项目调整思路，将从纯电 eVTOL 转向混合电推进形式

由美国空军作战试验和创新中心（AFWERX）发起的敏捷至上项目致力于探索 eVTOL 技术的军事应用。从2020年项目发起开始，在历经4年的纯电 eVTOL 飞行器探索后，相关负责人公开表示，由于纯电 eVTOL 飞行器航程不足，缺乏

在广阔战区飞行的航程和载荷能力，该项目将转向探索混合电推进 eVTOL 形式。

2024年4月，VerdeGo Aero 公司获得AFWERX授予的一份价值124万美元的合同，开发和测试用于 eVTOL 飞行器的混合电推进系统。该系统本质上是一个基于涡轴发动机的机载发电系统，额定功率为380kW，发电部分使用的是普惠公司PW206/207系列涡轴发动机，整个系统具有比纯电形式更高的功率密度。

多家企业开始探索 eVTOL 混合电推进系统

加拿地平线飞机公司正在开发Cavorite X7验证机，该机采用机翼内嵌风扇技术，由混合电推进系统提供电力，功率约为100kW，最大飞行速度为400km/h，航程超过800km，适合执行医疗护送、小股部队渗透/撤离、情报监视侦察等军事任务。

美国初创公司Elroy Air正在研发混合电推进的Chaparral系列 eVTOL 飞行器。该飞行器的动力系统包含涡轴发动机、发电机和电池，能使整机在负荷136kg的基础上达到483km的航程，正在与美国空军、海军和海军陆战队合作探索其自主空中后勤能力。其中，涡轴发动机采用捷克PBS公司的TS100，功率为180kW，干质量为56.7kg。

美国安杜里尔（Anduril）公司和阿彻（Archer）公司宣布将合作开发混合电推进的 eVTOL 飞行器，通过整合双方的技术和资源，试图为该型飞行器的国防应用带来全新解决方案，还可能引领未来航空技术的发展方向。其中，安杜里尔公司更擅长开发人工智能、军事任务执



Cavorite X7 验证机



Chaparral 系列 eVTOL 飞行器



Skai 氢动力旋翼机

行和系统集成等，而阿彻公司在利用商业供应链开发先进垂直起降飞行器方面有丰富经验。

在美国陆军研究实验室（ARL）资助下，GE 航空航天公司将 CT7 涡轴发动机与功率 1MW 的电气化动力装置组合形成混合电推进系统，进行了研究、开发、测试和评估，验证了适用于未来陆军航空飞行器推进的相关技术。

氢电力 eVTOL 飞行器崭露头角，弥补纯电力航程短板

2024 年 6 月，美国乔比（Joby）公司完成了氢电力改装版 eVTOL 飞行器的试飞，试飞距离达到 841km，着陆时氢燃料尚有 10% 剩余。该改装版 eVTOL 飞行器采用与原机型相同的机身和整体架构，配备的液氢储罐可储存 40kg 液氢，同时减轻了电池质量。氢燃料电池产生的电力为 6 个电动机供电，电池则主要在起飞和着陆时提供额外电力。受锂电池能量密度制约，纯电动力的 eVTOL 飞行器最大航程在 250km 左右，改装氢电力后将显著拓展航程，从而将 eVTOL 飞行器的应用领域从城市空中交通拓展至区域空

中交通。

美国 Alaka'i 公司完成了 Skai 氢动力旋翼机试飞，该机有 6 个按圆周均匀分布的旋翼，可携带 1 名驾驶员和 4 名乘客以 160km/h 速度巡航飞行，最大速度可达 190km/h。以电池为储能装置时，该机最大航程为 240km，如果以液氢储能，整机最大航程可超过 640km。

派西奇飞机公司（PiAC）的一项研究再次揭示了当前纯电 eVTOL 飞行器的困境，该公司在评估了 40 多种最先进的电池化学成分后表示，采用纯电形式的 eVTOL 飞行器，超高放电和再充电率的动力循环将急剧缩短电池的循环寿命。正常可循环使用 4000 次的电池，在用于垂直起飞和降落运行时，其寿命或将缩短 90%，这将极大地增加纯电 eVTOL 飞行器的预期运营成本。

FAA 和 EASA 均在研究制定 eVTOL 飞行器的监管条款

作为世界上首屈一指的航空监管机构，针对 eVTOL 飞行器的独特动力构型与飞行操纵特性，美国联邦航空局（FAA）和 EASA 均在研究制定全新的监管条款。

2024 年 7 月，EASA 发布咨询文件并提出，带或不带储能系统的完整纯电/混合电推进系统（EHPS）既可以与 eVTOL 飞行器一起进行适航认证，也可以作为动力系统单独进行适航认证。

2024 年 6—10 月，FAA 陆续发布了多份针对动力升降类（Powered Lift）航空器的文件，主要针对 eVTOL 飞行器的适航认证流程提出了具体要求。这是自 20 世纪 40 年代把直升机纳入监管以来，FAA 再次定义一种全新类型的航空器。为了区分传统直升机和 eVTOL 飞行器，FAA 给出了两者在飞行动力方面的主要区别：直升机通过改变旋翼桨叶的桨距实现水平飞行，失去动力后可通过旋翼“自转下滑”安全着陆；eVTOL 飞行器则是通过调节多个旋翼的功率实现水平飞行，无法实现传统直升机的自转下滑，需要提供动力/功率损失时的安全着陆替代方法。

结束语

2024 年，旋翼机动力的发展可谓“冰火两重天”。传统涡轴动力研发趋缓，FARA 项目突遭下马，即使是新研的倾转旋翼机，也求稳使用成熟涡轴动力；eVTOL 飞行器方兴未艾，氢燃料电池动力已经证明比纯电力有着巨大的航程优势，混合电推进更是受到多方重视，各家公司强强联合开展研发希望占领先机。与此同时，eVTOL 飞行器相关的适航监管也在同步完善，相信混合电推进的垂直起降飞行器定能在未来低空经济的大潮中大放异彩。 **航空动力**

（张稳，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）