

浅谈国外舰载机发动机发展现状及特点

Development Status and Characteristics of Carrier Aircraft Engines

■ 卜振鹏 吴雄 / 海军研究院

相较于陆基飞机，舰载机的发展与海军舰艇的建设发展密切相关，而舰载机的发动机除需考虑电磁兼容、油料和防腐等特点外，还需要考虑更大的推力/功率和更好的加速性，同时还要做好质量、耗油率、结构尺寸与上述因素之间的平衡。

选取或研制舰载机发动机时，除了考虑与陆基飞机发动机共有的因素外，还须针对舰载机的使用需求和使用环境等因素进行综合考虑。舰载机对发动机的需求通常包括更大的推力/功率和更好的加速性（以获得更好的起飞性能），同时还要做好质量、耗油率、结构尺寸与上述因素之间的平衡。另外，在舰载使用条件下，发动机对电磁兼容、油料和维护保障资源的要求更为严格，海洋环境下的腐蚀防护工作也尤为重要。

现状

固定翼飞机发动机

美国海军现役的固定翼舰载机主要包括 AV-8B 舰载攻击机、F/A-18E/F 舰载战斗攻击机、F-35B/C 舰载机和 T-45 舰载教练机等。

AV-8B 舰载攻击机是在 AV-8 攻击机基础上改进而来，是一型可在舰上垂直起飞/短距降落的舰载攻击机，配套动力沿用罗罗公司的“飞马”推力换向涡扇发动机（编号为 F402 涡扇发动机）。推进系统是垂直起飞/短距降落飞机的核心，其原理、构型决定了飞机的特点。AV-8

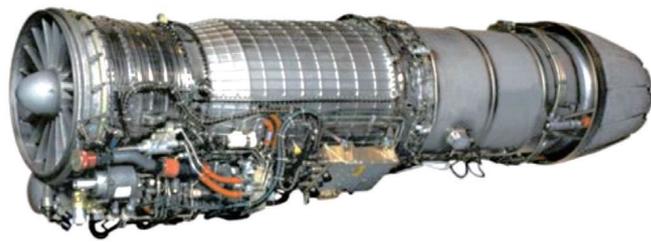
飞机的发展史在某种程度上就是“飞马”发动机的发展史，甚至可以说，飞机机体就是为了“包住”“飞马”发动机而设计的。“飞马”发动机于 1957 年开始研制，1968 年完成，只装配于 AV-8 系列飞机。AV-8B 舰载攻击机早期装配 F402-RR-406 涡扇发动机，后期换装了性能更好的 F402-RR-408 涡扇发动机。

F/A-18E/F 舰载战斗攻击机的配套动力为两台 GE 航空集团的 F414 涡扇发动机。F414 涡扇发动机是针对飞机使用需求，以 F404 和 F412 涡扇发动机为基础，采用经验证的技术

美国舰载机配套发动机



F404 涡扇发动机



F414 涡扇发动机

表1 F404 涡扇发动机和 F414 涡扇发动机主要参数

型号	最大加力推力/kN	最大状态推力/kN	空气流量/(kg/m)	总增压比	涵道比	长度/mm	直径/mm	质量/kg
F404-402	78.7	48.9	66.2	26 : 1	0.34 : 1	3900	890	1035
F414-400	97.9	57.8	77.1	30 : 1	0.25 : 1	3910	890	1100
F414-EPE	116	-	85	30 : 1	0.25 : 1	3910	890	1100

改型研制的一型发动机，主要配装于F/A-18E/F舰载战斗攻击机。在研制过程中，美国海军要求F414涡扇发动机的长度和喷管直径与F404发动机（F/A-18A/B/C/D舰载攻击机配套动力）保持一致，以满足将F414涡扇发动机装入F404涡扇发动机舱的要求，并要求F414涡扇发动机的性能、可靠性、维修性和环境适应性等必须等于或优于F404涡扇发动机。F414涡扇发动机研制成功后，GE航空集团采用新的策略不断对发动机进行改进升级，进而发展出两种型号，即延长使用寿命的F414-EDE和提高性能的F414-EPE，两型发动机的硬件完全相同，只是控制系统软件不同。F414-EDE的推力不变，显著提高了耐久性和维修间隔，热端部件寿命提高3倍，耗油率降低3%~4%；F414-EPE寿命不变，推力提高20%以上，耗油率降低1%~2%，推重比达到了10:1。

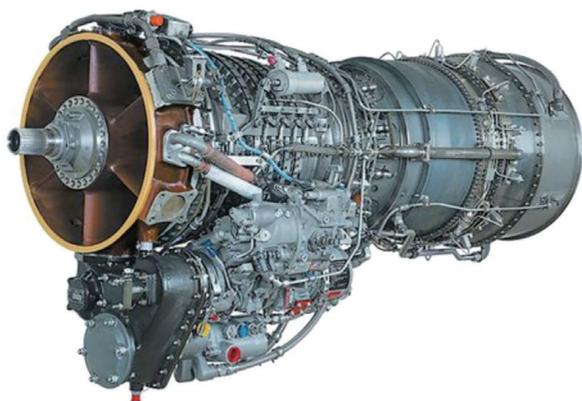
F-35B/C舰载机属于F-35战斗机系列（包括空军的F-35A、海军陆战队的F-35B和海军的F-35C）。为满足飞机多种功能要求，推进系统采用“主发动机+升力系统”的组合推进方案。主发动机为F135涡扇发动机，由普惠公司研制；升力风扇由罗罗公司研制，目前只配装于F-35系列飞机。针对飞机使用需求，为降低研制难度和风险，F135涡扇发动机由F119涡扇发动机（F-22战斗机配套动力）改进而来，采用了F119涡扇发动机核心机，重新设计了风扇和低压涡轮，改进了加力燃烧室、喷管和控制系统。在推进系统研制之初，就强调不再遵循性能驱动原则，而是将经济可承受性作为重要设计指标。据报道，与现役的F110和F100涡扇发动机相比，研制F135推进系统的费用节省35%，硬件和软件的可靠性提高2倍，维护人员数量减少30%~50%，故障判断

和修理的时间减少94%。此后，美国海军又安排普惠公司开展了F135发动机的压气机改进，使F135发动机的耗油率降低5%~7%，推力提高10%。

T-45“苍鹰”舰载教练机是BAE系统公司在陆基“鹰”高级教练机基础上的改型。T-45配装1台英国和法国联合研制的MK871涡扇发动机。MK系列涡扇发动机于1965年开始研制，1972年完成，后经不断改进，衍生发展多个型号，配装多型陆基飞机。为满足T-45舰载教练机的使用需求，MK871发动机采用了防腐措施，增加了备份控制系统，并提高抗电磁干扰能力。此外，为解决T-45舰载教练机着舰过程中发动机响应慢的问题，对燃油控制系统也做了相应调整。

旋翼机发动机

CH-53E舰载直升机是在双发构型的CH-53D舰载直升机基础上改进研制的，配套动力沿用了3台



T64 涡轴发动机



T408 涡轴发动机

表2 T64 涡轴发动机和T408 涡轴发动机主要参数

型号	起飞功率/kW	耗油率/(kg/(kW·h))	质量/kg	长度/mm	直径/mm	输出轴
T64	3270	0.29	326	2006	508	前输出轴
T408	5600	—	501	1460	690	前输出轴

T64 涡轴发动机。T64 涡轴发动机是 GE 航空集团根据美国海军要求，为地面支援和战术飞机设计的涡轴/涡桨发动机，军用型为 T64，民用型为 CT64。T64 涡轴发动机于 1955 年开始研制，1963 年定型，主要配装于 CH-53 系列直升机。该型发动机不断改型，衍生发展，功率等性能大幅提升。CH-53K 是该系列直升机的最新发展型号，目前正在研制中。CH-53K 舰载直升机配装 3 台 T408 涡轴发动机，该型发动机为 GE 航空集团针对飞机使用需求，在 CFE73B 民用涡扇发动机和 T407 涡桨发动机基础上改进研制，相比 T64 涡轴发动机，其功率提高 57%，油耗降低 18%，从而使 CH-53K 的有效载荷是 CH-53E 的 3 倍。

MH-60R/S 舰载直升机是美国陆军“黑鹰”直升机衍生发展型，配装两台 T700-GE-401C 涡轴发动机。T700 涡轴发动机是 GE 航空集团针对美国陆军的“黑鹰”直升机发展需求而研制的。T700-GE-401C 在 T700 涡轴发动机基础上，主要对海洋环境适应性、功率提升等进行了改进设计。该型发动机通过不断衍生发展，功率等性能大幅提升，并衍生发展了民用型。

V-22 倾转旋翼机配装两台 T406 涡轴发动机。在 V-22 倾转旋翼机研制时，经评估认为需要 1 台功率范围 3680 ~ 4420kW、可靠性高、维修性好、使用费用低和耗油率低的涡轴发动机。针对飞机使用需求，设计人员在 T56 涡桨发动机（E-2D 预警机配套动力）基础上进行改进，将单转子的涡桨发动机改为自由涡轮式的涡轴发动机，发展出 T406 发动机。该型发动机仅用于 V-22 倾转

旋翼机，同时与 T56 涡桨发动机具有较大的通用性。

俄罗斯舰载机配套发动机现状

固定翼飞机发动机

米格-29 舰载战斗机是在米格-29 战斗机基础上改进研制的，配装两台 RD-33 涡扇发动机。为满足舰载使用需求，RD-33 发动机提升了发动机推力和腐蚀防护能力。为满足在航母上起飞需求，RD-33 涡扇发动机的早期型号设置了应急工作状态，可短时提高发动机推力。RD-33 发动机于 1981 年开始研制，1984 年完成，主要配装于米格-29 系列飞机，研制时对标美国 F-18 舰载机配装的 F404 涡扇发动机（米格-29 战斗机针对美国空军的 F-16/F-18 飞机而研制），两型发动机的加力推力相当。该型发动机经过改型，性能不断提升，其中配装米格-29 舰载战斗机的 RD-33MK 发动机，通过采用新技术，进一步提高了推力，已不再设置应急工作状态。

苏-33 舰载战斗机配装两台 AL-31F 系列涡扇发动机。同 RD-33 涡扇发动机一样，为满足在航母上起飞需求，该发动机的早期型号也设置了应急工作状态，可短时提高推力。AL-31F 涡扇发动机于 1973 年开始研制，1985 年完成，主要配装于苏-27 等飞机，研制时对标美国 F-15 战斗机配装的 F100 涡扇发动机（苏-27 战斗机针对美国空军的 F-15 战斗机而研制），两型发动机的加力推力相当。

旋翼机发动机

卡-29 和卡-31 分别是俄罗斯卡莫夫公司研制的双发中型共轴式反转旋翼战斗运输直升机和雷达预警直升

机，均配装两台 TV3-117 涡轴发动机或 VK2500 涡轴发动机。TV3-117 涡轴发动机为克里莫夫-伊索托夫设计局为米-24 武装运输直升机和米-14 反潜直升机研制的，由乌克兰马达西奇生产，共有 20 多种改型，广泛用于米-14/17/28/35 以及卡-29/31/50 等直升机。由于俄罗斯和乌克兰关系趋于紧张，俄罗斯已开始研制替换 TV3-117 涡轴发动机的 VK2500 涡轴发动机，以达到“原位”替换的目标。

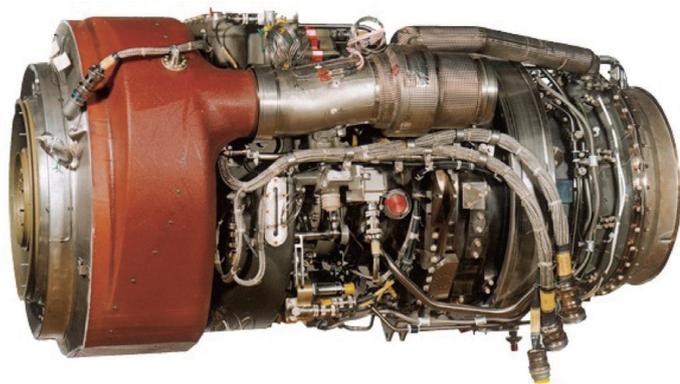
英法舰载机配套发动机现状

固定翼飞机发动机

“阵风”系列是法国达索公司为法国空军和海军研制的多功能战斗机，最初的动力装置是两台 GE 航空集团的 F404 涡扇发动机，后续被两台法国斯奈克玛公司的 M88 涡扇发动机所替换。在 M88 涡扇发动机研制过程中，为减少对飞机平台的改动，其总体性能、外廓尺寸与安装接口等被要求与 F404 涡扇发动机尽量保持一致。M88 涡扇发动机于 1996 年完成研制，之后主要配装于“阵风”战斗机。

旋翼机发动机

英法两国的舰载直升机主要为 EH101 和 NH90 直升机。EH101 直升机是英国韦斯特兰直升机公司和意大利阿古斯塔公司联合研制的多用途直升机，选用 3 台 RTM322 涡轴发动机或者 CT7 涡轴发动机，除能满足两国海军的要求以外，还能执行民用和其他任务。NH90 直升机是由英法等国联合研制的双发单旋翼中型军用多用途直升机，可选用两台 RTM322 涡轴发动机或 CT7 涡轴发动机。EH101 直升机研制早期配装 3 台 GE 航空集团的 CT7 涡轴发动机（T700



RTM322 涡轴发动机



T700 涡轴发动机

表3 RTM322 涡轴发动机和 T700 涡轴发动机主要参数表

型号	起飞功率/kW	耗油率/(kg/(kW·h))	输出轴转速/(r/min)	质量/kg	长度/mm	直径/mm	输出轴
RTM322-1	1566	0.293	20900	232	1171	615 ~ 708	前输出轴
T700-401C	1447	0.279	20900	207	1170	640 ~ 660	前输出轴

涡轴发动机的民用型),但同时,英法两国也开始联合研制RTM322涡轴发动机,因此在RTM322涡轴发动机研制过程中,为减少对平台的改动和替换CT7涡轴发动机,其总体性能、外廓尺寸与安装接口等与CT7涡轴发动机基本一致。

舰载机发动机发展特点

受本国海军的发展战略和工业实力等因素影响,各国舰载机发动机的发展过程总体来看具有以下特点。

一是发展舰载机发动机须立足本国国情。美国海军规模位于世界首位,其舰载机数量也是世界第一,其强大的航空工业体系较好地支撑了舰载机发动机的研制,使其舰载机发动机处于引领地位,进而支撑了舰载机的发展。英法等国舰载机规模小于美国,其舰载机发动机以“跟踪”发展为主,研制的舰载机多先期采用美国军用发动机,但又同步研制具有“原位”替换特性的配

套发动机,以实现动力自主保障。俄罗斯舰载机规模较小,其舰载战斗机多以岸基飞机衍生发展,其配套动力是在岸基飞机基础上进行适用性改进,满足舰载使用需求。

二是相对独立发展,持续改进提升。航空发动机的推力或功率量级由平台需求确定后,美国作为引领者,会根据国内现有技术水平按比当前现役同类发动机有所提升的方式,来确定发动机的耗油率、质量和可靠性等指标;其他国家的发展多对标美国相应型号的发动机,立足国内开展研制。无论美国还是其他国家,航空发动机的研制与平台的研制都相对独立,航空发动机投入使用后,再不断解决使用中暴露的问题和应用新技术来改进改型,提升发动机性能,同时带来飞机平台性能的提升。

三是各军种协同发展,注重军民融合。由于航空发动机研制难度大、研制周期长,即使国力雄厚的

美国也无法实现各军种独自研发航空发动机,在飞机研制中会优先选用成熟发动机,而在需要新研航空发动机时,也注重考虑各军种需求,尽量联合研制。对于军民都有需求的发动机,有的是军方研制并投入使用后,再取得适航认证,投入民用市场;有的是取得适航认证的民用发动机型号,经军方认证后被军方采用。

结束语

舰载机发动机的发展与各国海军的发展需求以及本国技术基础密切相关,加之航空发动机本身就存在研制难度大的因素,短期内各国海军舰载机发动机发展难以有较大变化,因此,识别舰载机发动机发展特点,可为我国舰载机发动机的发展提供一定的参考和借鉴。

航空动力

(卜振鹏,海军研究院,工程师,主要从事海军航空发动机论证研究工作)