

重型直升机及其动力的发展分析

The Development of the Heavy Helicopters and Power plants

■ 李炎 王旭 / 中国航发动研所 李明 / 中国航发研究院

由于具备垂直起降、空中悬停、载重极大等特点，重型直升机成为关系国防安全、经济发展的战略性装备，是体现国家综合实力的标志之一。

重型直升机一般是指起飞质量大于20t，内载和外吊挂能力大于8t，运输能力超过50人的直升机。作为国之重器，重型直升机在军、民领域发挥了无可替代的作用：军事方面，可遂行武器装备的突击运输，兵力物资的垂直补给以及医疗后送等多种重载、快速、远程投送任务；民用方面，在自然灾害应急救援、大型/超长设备定点运输、海洋/海岛开发等机动任务中不可或缺，如图1所示。



图1 米-26吊运图-134客机机体

重型直升机现状

受需求、技术等因素的综合影响，当前拥有重型直升机完全自主研发能力的国家只有美国和俄罗斯。相比大型和中小型直升机，重型直升机的批产型号较少，主要有苏联/俄罗斯的米-6、米-10和米-26，美国的CH-53A/D（“海种马”）、CH-54（“空中大吊车”）、CH-53E（“超种马”）、CH-47（支奴干）和V-22（“鱼鹰”）等，见表1。

其中，现役的重型直升机主要包括米-26、CH-47、CH-53系列和倾转旋翼机V-22，虽然是典型的军、民两用产品，但军用的数量远远超过民用。据不完全统计，截至2019年，全球现役军用重型直升机1487架，

表1 世界重型直升机和倾转旋翼机主要参数

国家	型号	构型	最大起飞质量/t	载荷/t	动力系统	生产周期	生产数量/架
苏联/俄罗斯	米-6	单旋翼带尾桨	42.5	8-12	D-25V	1959—1981年	约925
	卡-22	复合式（横列双旋翼+机翼+推进螺旋桨）	31.7	16.5	D-25VK	1959年首飞	未批产
	米-10	单旋翼带尾桨	43.7	14	D-25VF	1961—1982年	约80
	米-12	横列双旋翼	105	25-30	D-25VF	1973年首飞	未批产
	米-26	单旋翼带尾桨	56	20	D-136	1980年至今	约310
	米-26T2		56	20	D-136-2	2018年至今	
美国	CH-47	纵列双旋翼	24.5	12.9	T55	1962年至今	约1200
	CH-54	单旋翼带尾桨	21.3	11.3	T73	1964—1977年	约200
	CH-53A/D		19	5.4	T64	1966—1976年	约524
	CH-53E		33.3	16.3	T64	1976—2001年	约236
	CH-53K		39.9	16.3	T408	2018年至今	
	V-22		倾转旋翼	27.4	9.1	T406	1986年至今

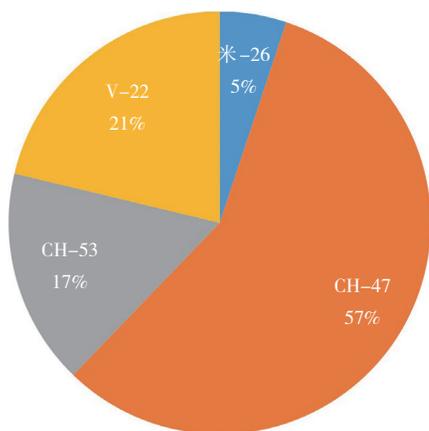


图2 世界军用重型直升机种类对比

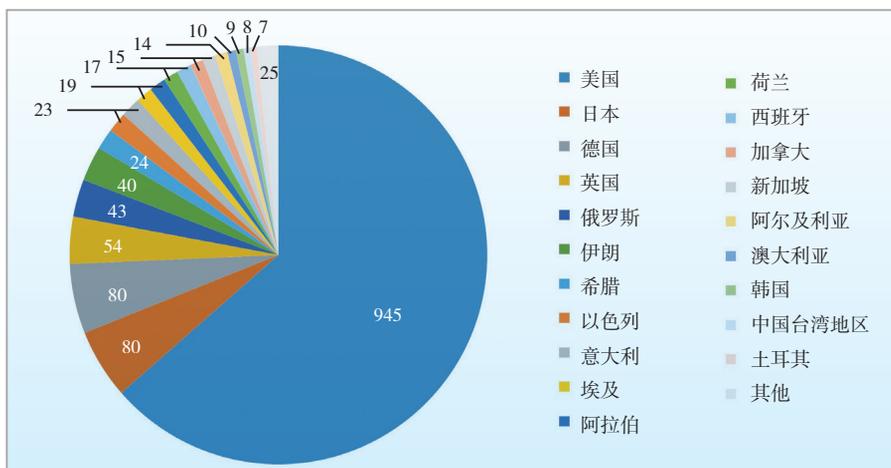


图3 世界军用重型直升机分布

以美国的CH-47为主（接近总量的3/5），CH-53系列其次（接近总量的1/5），如图2所示。31个国家（地区）装备了军用重型直升机，其中，美国有945架，占总数的64%，日本、德国均为80架，英国、俄罗斯、伊朗分别为54、43、40架，如图3所示。

除现役的之外，在研或即将投产服役的型号主要有两个——美国的CH-53K和俄罗斯的米-26T2。

CH-53K是美国海军陆战队根据提高运输能力的要求，以CH-53E

为基础改进改型的新型重型直升机，如图4所示。该机型于21世纪初开始研制，2015年首飞，2018年首架交付，现已接近拥有初始作战能力。该机型最大起飞质量高达39.9t，单点挂钩额定载荷16.3t，双点挂钩最多承载11.4t，能在204km的任务半径内，承担约12t外部载荷，该能力是CH-53E的3倍。美国海军陆战队计划采购200架CH-53K，接近290亿美元，从2020年开始批量交付，将主要部署在8个现役队、2个预备

队、2个发展/实操测试中队，以及1个舰队的替换。

米-26T2是米-26的改进升级型，2010年开始研制，2018年首飞，2019年完成初步飞行试验，并进入国家测试，如图5所示。该机型升级了航电系统，对旋翼和传动系统也进行了改进，使其成为一型全天候直升机，能够在复杂的物理、地理和恶劣气候条件的地区执行任务，并能适应火力或信息对抗环境。米-26T2的最大起飞质量为56t，有效载荷为20t，



图4 CH-53K起吊联合轻型战术车



图5 米-26T2V完成初步飞行试验

可搭载80名全副武装的伞兵。俄罗斯空军计划采购26架米-26T2，将在2025年前后进入服役。

重型直升机动力现状

当前在役的直升机动力装置主要有4类型号，包括CH-47的T55系列、CH-53D/E的T64系列、V-22的T406和米-26的D-136发动机。即将服役的CH-53K采用了全新的T408发动机，米-26T2采用了D-136的发展型D-136-2发动机。这些重型直升机发动机主要由美国和苏联/乌克兰的几家公司研制，单台起飞功率大约在3000 ~ 8000kW，除CH-53E/K外，一般是双发配装，总功率大小直接

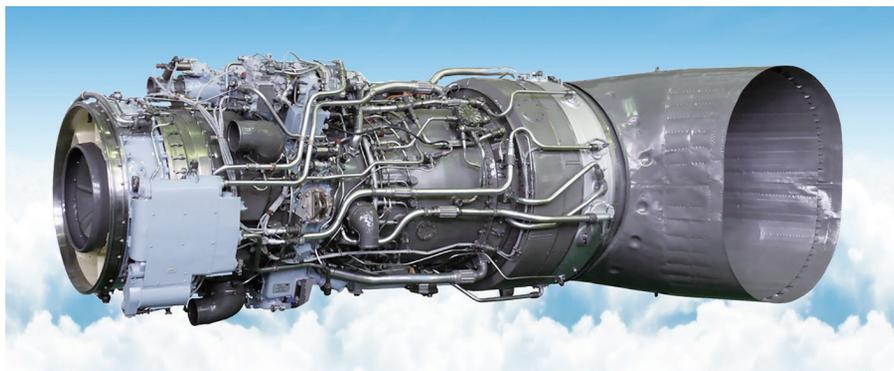


图6 D-136-2两轴发动机

与飞机载荷相关，见表2。

T-55系列发动机

T-55是美国莱康明公司（现霍尼韦尔公司）在20世纪五六十年代研制的自由涡轮式单转子涡轴发

动机，原型机于1958年首次运转，生产型于1961年开始交付。随着CH-47的质量和载荷要求的不断提升，T55不断改进发展，目前的功率范围约为1700 ~ 3600kW，详见表3。

在2019年，霍尼韦尔公司表示已开发出T55的改进型，在海平时功率增加20%，在高海拔和炎热地区功率增加近10%，耗油率降低9%，可靠性与维修性大幅提升，综合使用和维修成本降低25%，大修时间间隔增至3000h。2019年，新的改进型仍在开展优化和风险减低试验。

D-136发动机

D-136是苏联伊夫琴科设计局（现乌克兰进步设计局）于20世纪70年代研制的自由涡轮式双转子涡轴发动机，1982年开始批生产，最大应急功率高达8460kW，是迄今功率最大的涡轴发动机。

D-136-2主要针对高温环境和山区地形，基于D-136涡轴发动机和D-436涡扇发动机发展而来，在2012年形成初始能力，采用全权限数字式电子控制（FADEC）系统，尺寸、安装节等与D-136一致，如图6所示。

T64系列发动机

T64是美国GE公司在20世纪50

表2 世界在役/即将服役重型直升机用动力装置

动力装置	起飞功率/kW	耗油率/(kg/(kW·h))	研制年代	配装飞机
T55-L-712	2796 × 2	0.323 (起飞)	1978年	CH-47D
T55-GA-714A	3629 × 2	0.312 (起飞)	1998年	MH-47G
D-136	7457 × 2	0.282 (起飞)	1978年	米-26
T64-GE-413A	2927 × 2	0.286 (巡航)	—	CH-53D
T64-GE-419	3542 × 3	0.286 (巡航)	1995年	MH-53E
T406	4586 × 2 (海平面)	0.259 (最大连续状态)	2000年	V-22
D-136-2	7457 × 2	0.282 (起飞)	2012年	米-26T2
T408	5600 × 3	0.248 (起飞)	2019年	CH-53K

表3 T55系列涡轴发动机特点

型号	功率/kW	耗油率/(kg/(kW·h))	飞机	改进/特点
T55-L-7C	2125	0.365	CH-47A/B	—
T55-L-11	2796	0.323	CH-47C	可调进口导叶取代固定叶片 1级涡轮、导向器气冷 增加第2级涡轮
T55-L-712	2796	0.323	CH-47D	无进口导叶 改进燃油控制、涡轮叶片冷却
T55-L-714	3643	0.306	CH-47F	增加FADEC系统
T55-GA-714A	3629	0.312	MH-47G	新的隔热涂层 改进的FADEC系统

表4 T64系列涡轴发动机特点

型号	功率/kW	耗油率/(kg/(kw·h))	飞机	改进/特点
T64-GE-6	2130	-	CH-53A	
T64-GE-7	2926	0.286	CH-53B/C	改进冷却技术与部件
T64-GE-413	2927	0.286	CH-53D	
T64-GE-419	3542	0.286	MH-53E	新的材料和先进制造工艺、整体燃滑油散热器

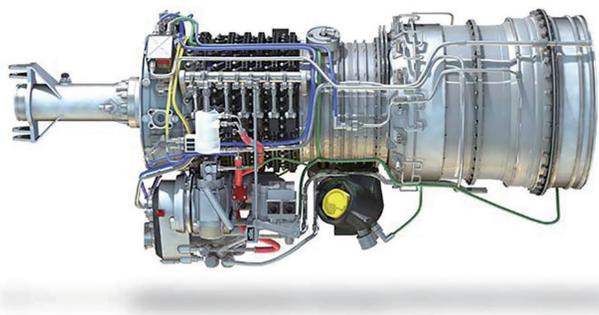


图7 T406发动机

年代后期设计的自由涡轮单转子涡轴发动机。该发动机于1961年首飞，1963年投入使用，此后随着要求的变化而不断改进和升级，功率范围大概为2200 ~ 3500kW，详见表4。

T406发动机

T406是艾利逊公司（现罗罗北美公司）在20世纪80年代为满足V-22动力需求，在T56涡桨发动机基础上衍生发展的自由涡轮式单转子涡轴发动机，如图7所示。该发动机于1989年首飞，2000年获美国海军陆战队陆上飞行合格证。

T408发动机

T408是GE公司针对CH-53K需求在2006年开始研发的自由涡轮式单转子涡轴发动机，2011年首台交付海军陆战队，2014年被海军授予

生产合同。

2019年，在霍尼韦尔公司T55改进型发动机一再推迟交付的情况下，美国陆军一度考虑替换CH-47F的发动机制造商。波音公司、美国陆军和GE公司在CH-47F上测试了T408，如图8所示，以在飞机的第二批原型升级计划中增加升级发动机的计划。

T408以GE27先进技术验证机、T407涡桨发动机为基础发展而来，融合了新的三维气动设计、冷却方案和先进材料；同时采用了整体叶盘压气机、无螺栓转子、高功率涡轮等，减少了发动机零件数，如图9所示。由于是针对海军陆战队特定作战环境设计，T408还具有出色抗风沙侵蚀和海水腐蚀能力。

未来重型直升机动力发展

随着对军用直升机需求的不变化、要求的不断提高，涡轴发动机经历了持久的改进改型发展，综合性能提升潜力也逐步降低，因此美国安排了不同功率量级发动机的预研或研制计划。针对重型直升机，美国主要开展了未来经济可承受涡轮发动机（FATE）计划，属于科学与技术类（S&T），旨在开展大功率涡轴发动机先进技术的开发与验证，预计在2020年启动型号验证项目。

FATE计划的背景

由于作战环境的不断变化，在高温、高原环境下，CH-47运载能力明显不足，严重影响了作战效能，为提高CH-47性能以及为未来垂直起降（FVL）旋翼机动力提供技术储



图8 CH-47F直升机换装两台T408发动机（短舱由圆转方）

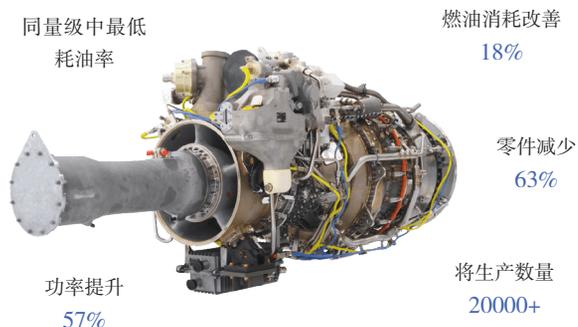


图9 T408相比T64发动机性能提升

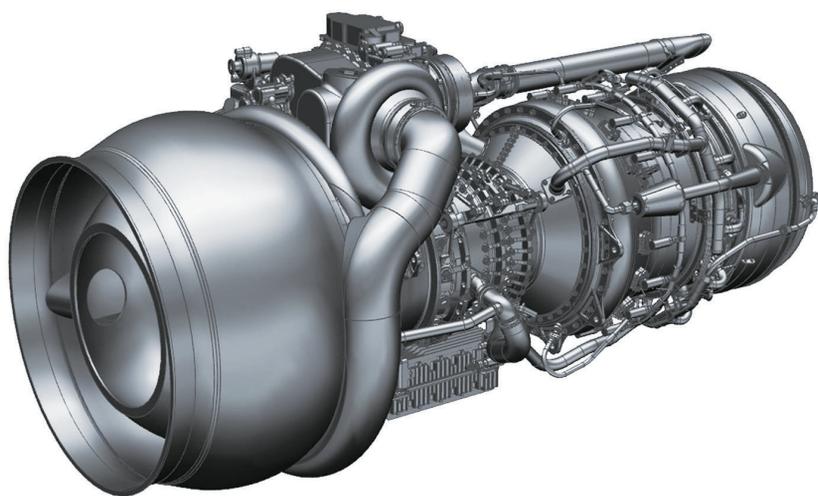


图10 FATE发动机概念图

备，美国陆军在2008年启动了FATE计划。2011年，美国陆军发布FATE计划的征询书，GE公司竞争获得价值超过4500万美元的成本共担合同，为期5年，主要验证用于3700 ~ 7400kW级涡轴发动机的技术，包括先进气动设计、冷却结构、高性能材料等，如图10所示。

FATE计划的目标

除增加功率、提高高温/高原环境的载荷和性能外，美国陆军还强调扩大航程和续航能力，因此FATE计划对耗油率、功率质量比、寿命、研制成本、生产成本和

维修成本等都提出了要求，且目标设置均较为苛刻，如图11所示。其中冷端部件寿命要求不低于15000循环；热端部件寿命不低于7500循环；并且能兼容CH-47，以替换T55发动机。

FATE计划的发展进度

2013年，GE公司通过FATE验证机的详细设计评审。2014年，GE公司完成FATE发动机进口粒子分离器试验。2015年，完成压气机、燃烧室和涡轮关键部件台架试验，包括在GE公司历史上单轴最高压比的压气机验证；通过广泛使用陶瓷

基复合材料（CMC）以减少冷却空气流量的燃烧室验证，CMC头部和火焰筒具备了耐“前所未有”高温的能力且质量减轻；具有领先效率、先进气动设计、优化的冷却特征的涡轮完成验证。2016年，首次开始全尺寸整机技术状态台架试验。2017年，完成所有主要既定目标，发动机运行时间超过40h，运行了近1000个稳态和瞬态数据点。2020年，GE公司将完成所有试验数据分析以及最后评估，并预计将启动型号研制。整个项目过程，大量使用了增材制造技术以加速建设过程和降低研发成本。

FATE计划中的新技术

FATE验证机作为GE公司史上最先进的涡轴发动机，融合了一系列先进技术，包括先进三维气动设计和增材制造技术，采用了新的进气离子分离器、先进控制技术、传感器组件、飞行器高性能和保持所需的算法等。这些先进技术还可在其他发动机项目中应用共享，包括T408、T901等以及T700等发动机升级。

结束语

纵观重型直升机的发展，动力系统是决定其能力的核心，飞机的每次升级换代几乎都依赖动力水平提升作保障。从世界研发能力看，大功率涡轴发动机技术难度大，仍是航空，乃至整个国防领域的尖端科技，目前仅有两个国家能自主研制。在发展大功率涡轴发动机的过程中，既需要改进完善式的继承性发展，也期待厚积薄发式的变革性发展，但具体途径最终还是将由需求决定。

航空动力

（李炎，中国航发研研所，工程师，从事航空发动机总体设计工作）

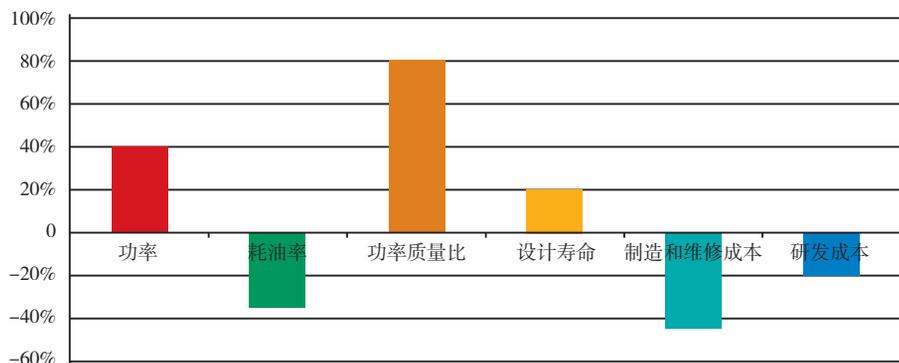


图11 FATE计划目标（2000年技术水平基准）