

舰用航改燃气轮机技术应用及发展思路

Application and Development of Aero Derivative Marine Gas Turbine

■ 李敏 / 中国航发 吴赛峰 / 中国航发动力所

燃气轮机是继蒸汽机和内燃机之后的舰用动力装置，具有质量轻、尺寸小、功率大、起动快等诸多优点。航空发动机技术的进步带动了舰用航改燃气轮机的迅速发展，目前已广泛应用于航空母舰、驱逐舰、护卫舰、两栖攻击舰和气垫登陆艇等水面舰船，成为舰船的主要动力装置。

航空发动机和工业燃气轮机是20世纪40年代在同一起跑线上各自独立并行向前发展的。由于政治、军事和经济等方面的原因，航空发动机技术率先获得飞速发展，利用航空发动机技术改进改型的燃气轮机具有投资少、周期短、见效快、效率高、经济性好、可靠性高、使用维护方便等特点。20世纪90年代以来，以大型涡扇发动机CF6-80C2/E1、RB211和遛达800等为基础改型研制出的

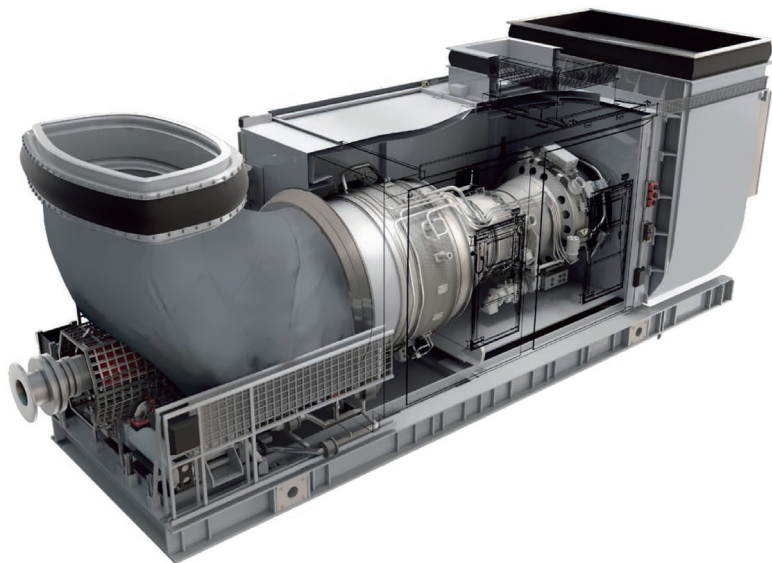
第4代航改燃气轮机，取得了“可靠性更高、维修性更好、污染更低、功率范围更宽、应用前景更广”的效果，其中航改简单循环燃气轮机的总压比最高已达40:1以上，热效率已达40%以上，耗油率已经降到0.2kg/(kW·h)级。

舰用航改燃气轮机的技术特点

舰用航改燃气轮机主要有以下几个技术特点。

一是采用成熟的航空发动机作为母型机进行改装设计。航改燃气轮机大多由发展成熟的航空发动机（尤其是民用航空发动机）改型研制，尽可能地继承了航空发动机母型机的技术和硬件（尤其核心机部分，基本保持不变），在满足舰用燃气轮机的工作环境和任务要求的前提下，实现高性能、高可靠性、长寿命和低成本的目标。

二是开展了适海性等改进设计。舰用航改燃气轮机要求在严苛的高



美国朱姆沃尔特级驱逐舰及其动力MT30舰用航改燃气轮机

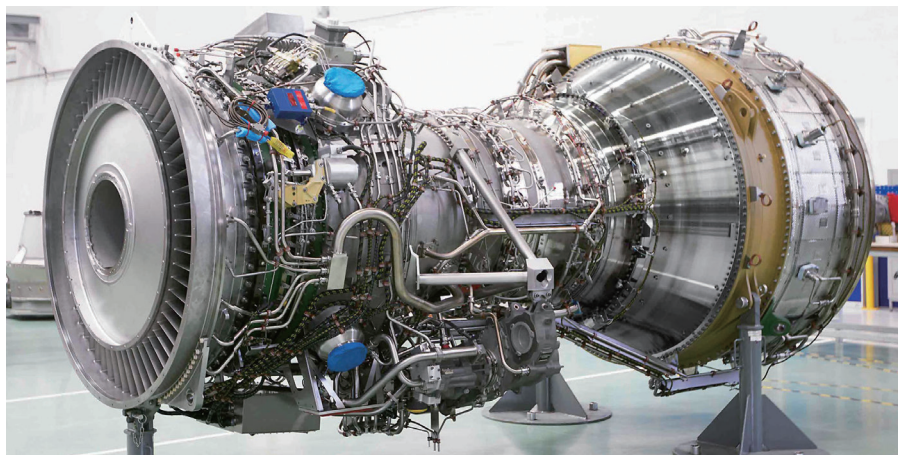
温、高湿、高盐雾海洋环境下能长期安全可靠地工作，因此需要采用抗腐蚀/疲劳材料、耐腐蚀防护涂层等先进的材料和工艺，以提升零部件抗高温腐蚀和抗氧化腐蚀的能力，确保不出现性能过早衰减或效率明显降低等问题。

三是经过了长寿命、高可靠性、维修性等改进设计。舰用燃气轮机作为水面舰船的核心动力，要求与舰船同寿，一般为30年，翻修期为25000h。因此与航空发动机相比，舰用燃气轮机具有更高的寿命和可靠性要求。为此，在航改燃机设计改进时，除降低母型机涡轮前温度、工作转速外，还需进行优化冷却设计、对传力路线、主要承力框架改进设计，同时采用简化结构、减少零件数目、采用易维护设计（单元体、对开机匣、孔探口）、采用视情维修、通用性设计等措施使整机可靠性与维修性得到大大提高。为保证整机的可靠性，所有改进设计需通过严格、全面的整机/部件的鉴定试验进行验证，同时在舰用燃气轮机实际使用过程中，还要进行寿命管理。

四是采用紧凑型箱装体设计。为保证舰用燃气轮机及其附件系统在舰船航行条件下的工作可靠性、维修性，以及减振、隔声、通风、防火等要求，一般需新研制紧凑型箱装体来满足舰船的安装要求，包括进排气与舰船进排气装置连接、底座与船体承力结构相连接，船舱空间限制等要求。箱装体强调空间整体概念，需开展人机工程设计，在保证箱体尺寸最小的同时，留有足够的现场维修空间。

表1 水面舰船燃机装备情况

燃机型号	国家	舰级
LM2500	美国	<ul style="list-style-type: none"> · 提康德罗加级导弹巡洋舰（满载排水量9590t） · 阿利·伯克级导弹驱逐舰Flight III型（满载排水量9500t） · 斯普鲁恩斯级导弹驱逐舰（满载排水量8040t）
	德国	<ul style="list-style-type: none"> · 不来梅级（122型）（满载排水量3600t） · 勃兰登堡级（123）型（满载排水量4700t）
	以色列	· 埃拉特（SAAR5）级护卫舰（满载排水量1227t）
	澳大利亚	· 安扎克级（MEKO200）护卫舰（满载排水量3600t）
	日本	· “金刚”级驱逐舰（满载排水量9485t）
	韩国	<ul style="list-style-type: none"> · “蔚山”级（满载排水量2300t） · “浦项”级轻型导弹护卫舰（满载排水量1220t） · “玉浦”级驱逐舰（满载排水量3900t）
奥林普斯 TM3B	英国	<ul style="list-style-type: none"> · “无敌”级轻型航空母舰（满载排水量20600t） · 42型导弹驱逐舰（满载排水量4675t）
	法国	· 乔治·莱格级F70型（满载排水量4580t）
	阿根廷	<ul style="list-style-type: none"> · “布朗海军上将”级驱逐舰（满载排水量3360t） · “大力士”级护卫舰驱逐舰（满载排水量4100t）
	日本	· “初雪”级驱逐舰（满载排水量3800t）
斯贝 SMIA	英国	· “大刀”22型（满载排水量4900t）
	意大利	· 卡雷尔·多尔曼级护卫舰（满载排水量3320t）
	日本	<ul style="list-style-type: none"> · “朝暮”级驱逐舰（满载排水量4200t） · “阿武隈”级护卫舰（满载排水量2550t）
MT30	美国	<ul style="list-style-type: none"> · “自由”级滨海战斗舰（满载排水量3089t） · 朱姆沃尔特级驱逐舰（满载排水量14564t）
	意大利	· 海军两栖攻击舰（满载排水量33000t）
	日本	· 30-FFM护卫舰（满载排水量5500t）
	韩国	· “大邱”级护卫舰（满载排水量3650t）



MT30舰用航改燃气轮机的母型机高达800

表2 常见舰用燃气轮机参数

型号	首台生产时间	功率/kW (连续运行条件下)	耗油率/(kg/ (hp·h))	增压比	空气流量/ (kg/s)	输出轴转速/ (r/min)	排气温度/ °C	近似质量/ kg	长×宽×高/ m×m×m
LM2500	1969年	24000	0.227	19.3 : 1	70.3	3600	569.4	4672	6.4×2.1×2.1
LM2500+	1998年	30200	0.216	22.2 : 1	85.7	3600	518.3	5237	6.7×2.1×2.1
MT30	2001年	36000	0.213	24.0 : 1	116.6	3300 / 3600	473.9	—	—
TF40	1976年	2980	0.299	8.4 : 1	12.3	16000	570.0	601	1.2×0.9×0.9

舰用航改燃气轮机的发展趋势

随着先进航空发动机和燃气轮机技术的不断发展，航改燃气轮机的性能、环保性、可靠性、维修性和经济性等不断提升，在产业方面已经实现谱系化和系列化发展，在舰船动力领域得到广泛应用，整体呈现以下发展特点。

一机多用

目前，各国海军装舰使用的燃气轮机主要集中在少数几个型号，如TF40B、LM2500、MT30等。这些燃机既可用作机械推进，也可用于发电，通过不同的搭配组合，适用于不同舰船的动力需求，见表1。

性能不断提高

从近20多年来世界新研舰用燃气轮机情况分析可见，舰用燃气轮机的发展主要集中在大功率级（20MW及以上）和小功率级（10MW及以下）机组上，其中装舰最多、应用最广泛的是大功率舰用燃气轮机。由此可以预见，功率10~50MW、效率39%~42%（标准条件下）的舰用燃气轮机是未来15~20年内世界各国海军舰船采用的主流动力。

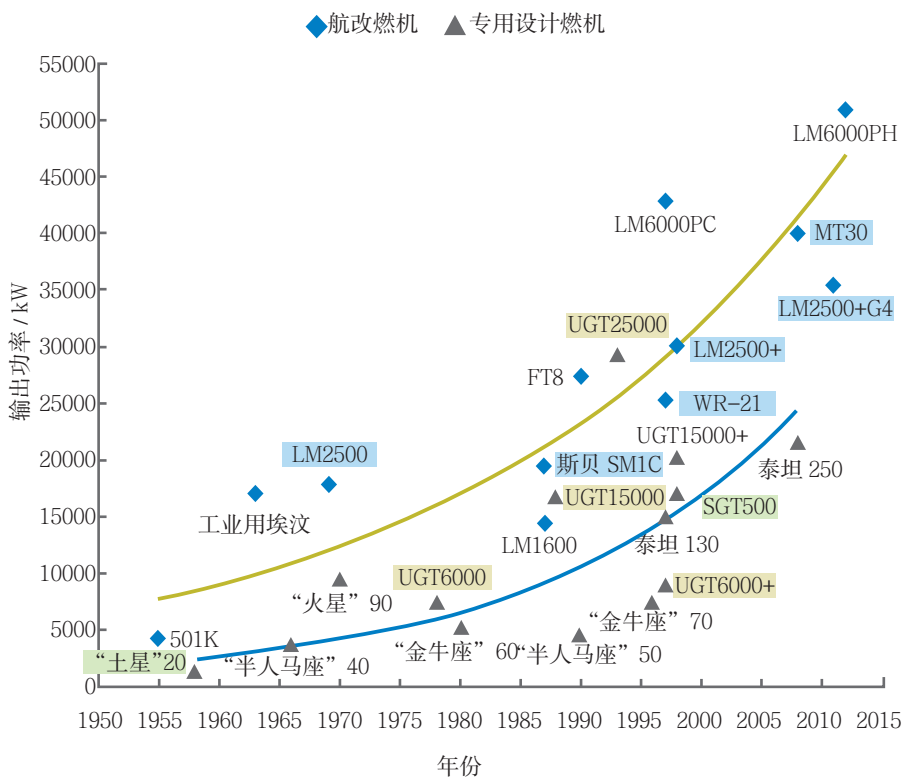
现役MT30舰用燃气轮机的单机功率达到40MW，效率达到40%以

上，功率密度达1.2kW/kg，该机是由英国罗罗公司以20世纪90年代末研发的遛达800发动机为母型机衍生发展而来，2008年进行了局部优化。MT30得到广泛应用的原因，除效率高外，很重要的一点是在标准天气下，发电型能够保持36MW的输出功率、推进型能保持40MW的输出功率，与LM2500系列拉开了功率级

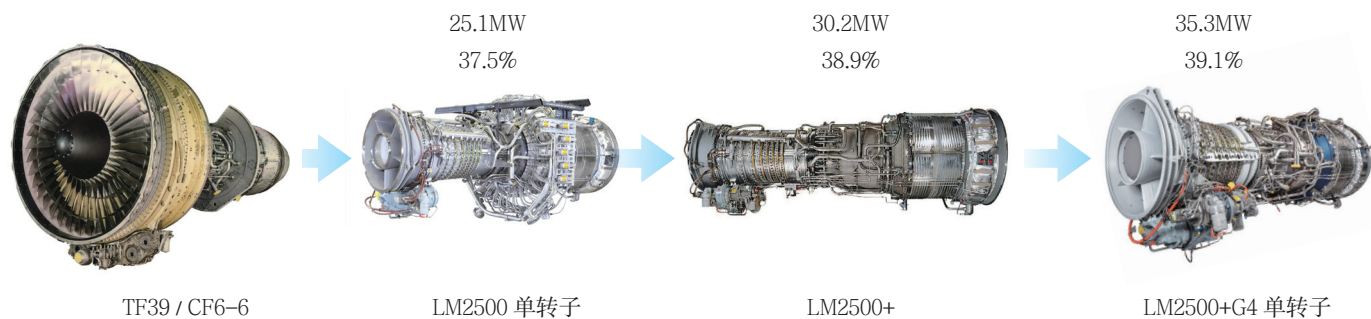
次（几型常见舰用燃气轮机参数见表2）。

系列化发展

由于研制和生产舰用燃气轮机的技术门槛高，难度大，世界上真正能设计、制造舰用燃气轮机的厂商为数极少，逐步形成了TF40系列、斯贝系列、LM2500系列、UGT系列等舰用燃气轮机。



舰用燃气轮机发展图谱



LM2500舰用燃气轮机的系列化发展

这些燃气轮机基本都是在原型发动机基础上，依托航空发动机材料、冷却和涂层等基础技术的发展，以及压气机与涡轮部件性能的提高，进一步提升涡轮初温，提高整机性能，且朝着高度集中、系列化的方向发展。其中，美国GE公司的LM2500燃气轮机最为典型，已发展成3个型号的产品，广泛应用于舰船、工业领域。

航改燃气轮机发展思路

21世纪以来，随着我国工业技术体系的大幅完善，航空发动机技术和产品得到快速发展，为航改燃气轮机的研制奠定了良好的技术基础和工业基础。我国根据需求、结合国情、拓展航空发动机技术，坚持自主创新研发燃气轮机产品，走出了一条系列化自主发展的道路。结合航改燃气轮机技术特点和发展道路，未来应在以下几个方面继续加强投入力度。

核心机是基础

航改燃气轮机的技术和硬件继承自航空发动机母型机，尤其是核心机部分尽量保持不变，因此选用一款在一定时期内具有竞争力的高性能航空发动机核心机非常重要。高性能的核心机具有较低的燃油消

耗率、较低的比空气流量、较长的寿命以及合适的功率等级等优点，能保证航改燃气轮机研制成功后10年或更长时间仍具有竞争力；同时高性能核心机的高温耐久强度储备和抗腐蚀能力，可以在改装过程中减少关键部件的改动，以保持较高的通用性。

可靠性是关键

舰用燃气轮机的可靠性是动力系统顶用、好用的关键，是近年来舰用燃气轮机的关键指标。目前我国的舰用燃气轮机基本满足了海军对燃气动力的急需，但在可靠性及其长时间的运行能力方面与国际领先的舰用燃气轮机仍有差距。在未来一段时间内的可靠性提升将是我国舰用燃气轮机研制的重点工作。

系列化是趋势

由于研制和生产燃气轮机的难度大，以成功的燃气轮机为基础，通过升级改造实现舰用航改燃气轮机产品系列化发展，可以降低舰用航改燃气轮机的研制费用、缩短研制周期，是舰用燃气轮机发展的趋势。

智能化是方向

随着信息技术的不断发展，数字化逐渐应用到航改燃气轮机研发中，创造了越来越多的价值，因此

必须加快舰用燃气轮机研发向数字化转型。借助信息化的力量，“智能发动机”概念应运而生。在发动机领域，以智能故障诊断、智能制造、智能控制、虚拟现实培训、机器人检修等为代表的智能化正在重塑设计、测试、生产和服务等各项工作，国际先进航空发动机和燃气轮机制造商已经着手开始“智能发动机”的研制，并在一些关键项目中取得一定效果。我国在此领域尚处于起步阶段，必须加快人工智能在舰用燃气轮机上的工程化应用，奋力直追。

结束语

目前我国正在大力研制CJ1000、CJ2000等先进大涵道比航空发动机，其推力、耗油率等性能指标可与世界先进水平的LEAP-1C、GEnx发动机相当。随着这些先进航空发动机技术成熟度的提高及大量应用，以航空发动机为母型机，可研制出多型先进可靠的舰用航改燃气轮机，改进现役舰用燃气轮机产品的性能，提高现役舰用燃气轮机的适装性，使其达到世界先进水平，从而满足我国未来舰船发展的动力需求。

航空动力

(李敏，中国航发，高级工程师，主要从事航空发动机总体论证研究)