

舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术^{*}

闻雪友, 任兰学, 祁 龙, 洪青松

(中国船舶集团有限公司第703研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要: 舰船燃气轮机在大中型水面舰艇动力中占主导地位, 是海军现代化的一个重要标志。本文回顾了国内外舰船燃气轮机的发展历程, 介绍了舰船燃气轮机发展走航改舰用和独立发展道路的状况。分析了典型舰船燃气轮机LM2500系列、MT30和UGT25000的技术特点和性能, 从提高功率与热效率、提高可靠性与可维护性、发展产品系列化与谱系化等方面展望了舰船燃气轮机的发展方向, 并提出了在材料及制造工艺、金属增材制造、气动设计、低排放、冷却及热障涂层、双燃料、智能化和混合动力等方面需要发展的关键技术。

关键词: 舰船燃气轮机; 技术指标; 发展方向; 结构; 性能

中图分类号: U664.131 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 11-2401-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200406

Development and Key Technologies in Marine Gas Turbine

WEN Xue-you, REN Lan-xue, QI Long, HONG Qing-song

(No.703 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Harbin 150078, China)

Abstract: Marine gas turbines dominate the power of large and medium-sized surface warships, which is an important symbol of naval modernization. This paper reviewed the development history of marine gas turbines in the world, and introduced the development of marine gas turbines from Aero-Derivative and independent development. The technical characteristics and performance of typical marine gas turbines LM2500 series, MT30 and UGT25000 were analyzed. Then, the development direction of marine gas turbines in terms of improving power and thermal efficiency, improving reliability and maintainability, developing product serialization and pedigree, etc. are prospected. And, the key technologies that need to be developed in the aspects of materials and manufacturing processes, metal additive manufacturing, aerodynamic design, low emissions, cooling and thermal barrier coatings, dual-fuel, intelligent and hybrid power, etc. are put forward.

Key words: Marine gas turbine; Technical parameters; Development direction; Structure; Performance

1 引 言

舰船燃气轮机具有功率大、尺寸小、质量轻、启动迅速、加速性和机动性好等优点,可以有效改善舰船的战术技术性能,使舰船的速度大大提高。世界

各国海军在役的舰船普遍采用了全燃动力或柴燃联合动力装置,装舰范围包括舰空母舰、巡洋舰、护卫舰、导弹快艇、猎潜艇、鱼雷快艇、登陆艇、潜艇支援船、破冰船和测量船等^[1]。燃气轮机在大中型水面舰艇动力中已处于主导地位,其应用已成为海军现代

^{*} 收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-09-11。

基金项目: 中国工程院重大咨询项目 (2018-ZD-04); 国家科技重大专项 (2017-II-0006-0019); 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室-海洋工程燃气轮机实验室资助。

作者简介: 闻雪友, 博士, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究领域为舰船燃气轮机。E-mail: ruiqun313@163.com

通讯作者: 任兰学, 博士, 高级工程师, 研究领域为燃气轮机压气机设计。E-mail: 767490926@qq.com

引用格式: 闻雪友, 任兰学, 祁 龙, 等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术[J]. 推进技术, 2020, 41(11):2401-2407.
(WEN Xue-you, REN Lan-xue, QI Long, et al. Development and Key Technologies in Marine Gas Turbine [J].
Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(11):2401-2407.)

化的一个重要标志^[2]。

发达国家舰船燃气轮机研制生产已经系列化,在航空母舰、巡洋舰、驱逐舰以及护卫舰中约有 3/4 的舰船采用了燃气轮机。美国通用电气公司(GE)、英国罗尔斯-罗伊斯公司(RR)生产的舰船燃气轮机大多由航空发动机改型而来,而乌克兰“曙光”联合体则是为海军专门研制的。典型舰船燃气轮机有 GE 的 LM2500 型、乌克兰的 UGT15000 型和 RR 的 SMIC 型。我国舰船燃气轮机使用数量较少,国产舰船燃气轮机成熟度较低,落后于世界海军强国。随着我国海军的快速发展,舰船燃气轮机需求量增大,除了引进 LM2500 舰船燃气轮机和 GT25000 舰船燃气轮机外,国产舰船燃气轮机研制成功,并批量生产,国产舰船燃气轮机的发展已经迈出了关键一步。

2 舰船燃气轮机的发展状况

2.1 国外舰船燃气轮机的发展历程

20 世纪 40 年代国外开始进行舰船燃气轮机的研制,起步阶段同时采用舰船燃机独立研发和航机改装两种技术路线。1947 年,英国完成了 G1 燃气轮机的研制,并在皇家海军 MGB2009 高速炮艇上试装成功,引领了世界舰船燃气轮机的发展。前苏联在 1954 年启动了舰船燃气轮机的研制工作,并率先发展了全燃动力装置、燃气轮机直接倒车、横向交叉传动等技术。

20 世纪 60 年代末,英国、美国、俄罗斯等国家加速舰船燃气轮机的研发,并在各类舰船上实现了广泛应用。英国罗尔斯-罗伊斯公司(RR)陆续研制了 Tyne RM1、Olympus 系列、SPEY 系列、WR-21、MT30 等舰船燃气轮机,其中带有中间冷却器和回热器的 WR-21 燃气轮机被认为是新一代船用燃气轮机的象征^[3],并被考虑作为综合全电力推进系统的主要设备^[4];美国通用电气公司(GE)研制了 LM 系列舰船燃气轮机;美国普拉特·惠特尼集团公司公司研制了 FT 系列舰船燃气轮机;美国艾里逊公司(Allison)研制了 Allison-KF 系列舰船燃气轮机;美国莱康明发动机公司(Lycoming)研制了 TF 系列舰船燃气轮机;前苏联库兹涅佐夫设计局(Kuznetsov)(现乌克兰“曙光”机械科研联合体)研制了 NK-12MNK-12PT, NK-14PT 和 UGT15000 系列舰船燃气轮机^[5],以及适用于气垫船与排水型水面舰船的 M70 系列燃气轮机^[6]。国外舰船燃气轮机的应用情况详见表 1。

2.2 我国舰船燃气轮机的发展历程

我国舰船燃气轮机起步并不晚,1958 年就纳入国家发展规划,1959 年从前苏联引进 M-1 型燃气轮机,生产了首型舰用燃气轮机,作为加速主机列装于某国产护卫艇。1961 年,上海汽轮机厂成功试制首台国产燃气轮机,并在我国自行设计研制的 062 型高速护卫艇上列装,开展了舰船燃气轮机测试与试用,这也是我国第一次尝试在水面舰艇上正式采用燃气

Table 1 List of marine gas turbine applications ^[7]

Type	Using time	Manufacturer	Power/MW	Application
Olympus TM3B	1973	RR	21.5	Frigate, Destroyer, Cruiser , Aircraft Carrier
SPEY SM1C	1987	RR	18	Frigate , Destroyer
WR-21	2004	RR	25.25	Frigate, Destroyer, Patrol Ship
MT30		RR	36	Frigate, Destroyer, Aircraft Carrier
LM2500	1969	GE	24.32	Frigate, Destroyer, Patrol Ship
LM1600	1987	GE	14.92	Frigate, Patrol Ship
LM2500+	1996	GE	27.6	Frigate, Destroyer, Hydrofoil
LM2500+G4	2006	GE	27.6	Frigate, Destroyer, Hydrofoil
LM6000PC	1992	GE	42.75	Aircraft Carrier
FT4A	1962	PW	8.8	Hydrofoil, Torpedo Boat
Allison 570KF	1979	Allison	4.74	Hydrofoil, Torpedo Boat
Allison 571KF	1986	Allison	5.74	Hydrofoil, Torpedo Boat
TF40	1976	Lycoming	3	Hydrofoil, Torpedo Boat
TF80	1983	Lycoming	6	Hydrofoil, Torpedo Boat
NK-12MNK-12PT	1964	Soviet Union Kuznetsov	6.3	Hydrofoil, Torpedo Boat
NK-14PT	1993	Ukraine	8	Hydrofoil, Torpedo Boat
UGT15000	1971	Soviet Union Kuznetsov	18	Frigate, Destroyer
UGT25000	1991	Ukraine	25	Frigate, Destroyer

轮机。1964年,我国自行设计、研制成功首型4.4MW舰船用燃气轮机,但由于研制周期过长、预定列装对象037型猎潜艇的调整,未能装备部队。

随后,我国跟踪西方采用航空发动机改进的燃气轮机研制技术路线,基于国产涡喷-8进行大功率燃气轮机的研发和试制。此后,我国又在涡轴-5,涡桨-6,涡喷-6,涡扇-9等基础上研制了多型航改燃气轮机。其中基于涡桨-6航空发动机研制的409型燃气轮机,作为主动力装置成功应用于722型气垫船。20世纪70年代,我国从英国引进了“斯贝”MK202-涡扇发动机,经国产化后定型为涡扇-9^[8]。20世纪80年代,在涡扇-9基础上启动新一代航改燃气轮机GT-1000的研制,于1993年通过了样机性能鉴定,功率为10MW^[9],是我国掌握了新一代燃气轮机技术的标志。1996年开始研制第一型“太行”涡扇发动机改型燃气轮机QD70,船用型为QC70(功率7MW),2006年投入使用。基于“太行”涡扇发动机又开展了QC185燃气轮机的研制,功率达18MW,在2004年完成验证机测试,并于2010年正式投入使用。QC185燃气轮机具有中档功率,适用于作为主动力装载于驱护舰,这也标志着我国在舰用燃气轮机装备自主研制生产道路上取得了重要的进展^[10]。

我国20世纪90年代引进乌克兰UGT-25000燃气轮机,通过对其技术的消化吸收,有力支撑了我国燃气轮机的技术进步,推进了我国燃气轮机的系列化发展。在UGT-25000国产化和深度改进中,有效提升了燃气轮机性能。通过采用4台UGT-25000的组合,不仅可以助力国产驱逐舰突破目前的排量上限,使之达到阿里伯克级驱逐舰排量水平,也可以满足11000~13000t级大型驱逐舰的需求。

总体上看,我国舰船燃气轮机走过了仿制、专用化设计、航机舰改、技术引进、消化吸收自主创新等发展过程,引进的燃气轮机已经完成了国产化研制,正在进行批量生产和列装,大大提高了我国舰用燃气轮机自主研制水平,为我国舰用燃气轮机的系列化发展提供了良好的基础机型^[11]。

3 舰船燃气轮机的技术及性能

3.1 GE公司LM2500系列燃气轮机技术及性能

GE公司的LM-2500系列燃气轮机性能先进,广泛应用于大型水面舰船中。LM2500是在先进可靠的TF39航空涡扇发动机(民用型为CF6)基础上改型研发而成,并进一步升级研发成功LM2500+和LM2500+G4。LM-2500系列燃气轮机在27个国家近400艘舰船上使用,总的装舰量已超过1000台。几款典型的LM-2500燃气轮机的性能参数列于表2^[12]。

3.1.1 LM2500燃气轮机技术性能

LM2500燃气轮机是基于TF39和CF6-6航空发动机改型研制的一款高性能简单循环双轴发动机,于1970年开始进行海试。LM2500燃气轮机有四个主要部件:16级18压比的压气机,配有七级可调静叶和进口导叶;全环形燃烧室,外置燃油喷嘴;两级风冷高压涡轮,其转子叶片和静叶均采用气冷结构,带动压气机和齿轮箱;六级低压涡轮机,进口温度较航机大幅下降,设计工况效率高达92.5%,且性能良好。LM2500采用模块化设计,易于安装和维护,采用海洋耐腐蚀材料,满足舰船动力尺寸、重量和空间要求。通常安装在抗冲击外壳和底座中,配备有弹性减震支架或硬支架,不仅提供机械保护,而且对于吸收机舱噪声和降低舰船噪声也有重要作用,并提供进口结冰和火灾探测的传感器。LM2500的简单模块化设计最大限度地提高了船舶的可维护性,并最大限度地减少了部件更换停机时间。LM2500也在不断发展中,功率由1970年的17.9 MW增加到目前的23.3MW,热效率也由35.5%增至36.6%。

3.1.2 LM2500+燃气轮机技术性能

LM2500+燃气轮机基于LM2500标准升级,在1998年研制成功,其功率达到29.8MW,热效率为38%。与LM2500相比,LM2500+的功率增加了20%,具有同样的高可靠性、使用寿命和更高的效率(更低的SFC)。与LM2500一样,LM2500+简单的模块化设计便于维护,具有分体式压气机机壳和外部燃料喷

Table 2 Performance parameter of LM2500 series marine gas turbines^[12]

Type	Power (ISO)/MW	Efficiency/%	Specific fuel consumption rate (kJ/(kW·h))	Pressure ratio	Air flow (kg/s)	TIT/℃	Exhaust gas temperature/℃	Rotating speed of power turbine/(r/min)	Stating using time
LM2500	23.3	36.6	0.226	19.3	70.3	1170	566	3600	1969
LM2500+	29.8	38.0	0.215	22.2	85.7	1205	518	3600	1998
LM2500+G4	33.4	39.0	0.214	24.0	92.9	—	549	3600	2005

嘴,可以现场叶片更换、现场热部件维护。比较 LM2500+和 LM2500 的设计,两种燃气轮机主要区别是在 LM2500 的第一级叶片前增加了一级压气机叶片,设计工况气流增加了大约 20%。重新设计的 LM2500+的第一级叶片去掉了原 LM2500 燃机第 1 级转子叶片的突肩,LM2500+的 17 级压气机的压力比从 LM2500 的 18 增加到 23.1。为适应输出功率的增加,在 LM2500 动力涡轮基础上,增大了动力涡轮通流面积约 11%,以适应更高的空气流量;为了提高 LM2500+的转矩,对动力涡轮转子进行了强化处理。

3.1.3 LM2500+G4 燃气轮机技术性能

LM2500+G4 燃气轮机是 LM2500 标准的第四代舰船燃气轮机,于 2005 年研制成功,功率比第三代 LM2500+增加了 17%,具有同样的高可靠性、高使用寿命以及高效率(较低的 *SFC*)。与 LM2500+的设计相比,在保持可靠性和可维护性的同时,功率的增加是由于空气流量增加了 6%、燃气初温升高以及压力比增加(24.2, 23.6)的综合结果。第 1 级高压涡轮叶片进行了重新设计,具有更好的冷却和抗氧化涂层,在高压涡轮级两级喷嘴上均涂覆隔热涂层并改进冷却系统。LM2500+G4 燃机的功率高达 33.4MW,热效率高达 39%。

3.1.4 LM6000 燃气轮机技术性能

LM6000 燃气轮机是在 CF6-80C2 涡扇发动机基础上改型研制的新一代舰船燃气轮机,于 2015 年研制成功,并通过了劳埃德船级社 NVR 和 RINA 认证。LM6000 有两种型号:LM6000PC 输出功率为 46MW, LM6000PG 输出功率为 52MW。LM6000 热效率可达 42%。LM6000 将负载直接耦合到低压涡轮轴上,省去了动力涡轮。低压压气机采用独立控制可变进口导叶和可变静叶调节气流,确保快速、方便启动/关机。高压压气机配合高效环形燃烧室,以获得最大的燃油经济性,降低氮氧化物、一氧化碳和未燃碳氢化合物排放。采用先进的气动和冷却技术,LM6000 具有更高的零部件寿命,并提供可靠和高效的动力。

3.2 RR 公司 MT30 燃气轮机技术与性能

3.2.1 MT30 燃气轮机的性能指标

MT30 燃气轮机是基于英国 RR 公司 Trent 三轴航空发动机改型研发的 40MW 级舰用燃气轮机,是一款简单循环燃气轮机,其额定功率为 36MW 或 40MW,热效率可达 40%^[13]。MT30 的动力涡轮额定转速设定为 3600r/min,因此其所带交流发电机可直接发出 60Hz 频率的交流电。Trent 航空发动机系列

可以为 MT30 提供性能优良的高可靠性部件和高可用性备件。采用模块化设计可以简化发动机维修。MT30 燃气轮机通过采用简化结构设计,部件数较其它航改燃气轮机减少 50%~60%、单元体设计、预平衡、视情维护等措施和严格的试验考核,其可靠性与维修性得到了很大提高。预计热端部件的大修时间为 12500h,整机大修时间为 24000h,平均无故障时间为 2000h,平均修理时间(冷机时间除外)为 4h^[5]。MT30 已经被选用于七种以上的舰船类型,成为许多世界先进海军舰船动力的首选燃气轮机。

3.2.2 MT30 燃气轮机的技术优点

(1)先进的设计:MT30 燃气轮机继承了航空 Trent 发动机的诸多先进技术。例如在压气机系统中,动叶片和静叶片的设计使用了三元方法,从而达到较高的效率^[14]。MT30 采用双轴结构,由高压比燃气发生器与自由动力涡轮组成。压气机包括八级变几何中压压气机和六级防腐高压压气机。四级动力涡轮机是从 Trent800 发展而来,由轴承结构支撑。采用了最新的叶片冷却技术,针对海洋环境对关键部件进行保护性涂层,提高可靠性,减少维护和延长使用寿命。正常或紧急停车后,可随时重新启动,具有良好的速度控制特性和负荷变化时频率响应恢复性能。

(2)箱装体构成:具有结构紧凑、重量轻的优点。MT30 的设计整合了所有发动机附件系统,简化了装船安装工作,仅要求提供起动机能量,以及燃料、水和电气连接,能够与船舶进排气配置相结合。燃气轮机采用箱装体结构,具有良好的隔声降噪功能,所有附件均置于箱装体内^[14]。

(3)维护量小:以可靠性为中心的维修服务是该燃气轮机设计的一个特点,再加上固有的低维护设计理念,船上定期维修时间每周不到两小时,这对于满足现代海军精简船员的要求是一个显著的优势。外壳的设计中优化了船上的维护程序,为船员提供了空间和通道,在不拆卸发动机的情况下可以完成复杂的维护任务。

3.2.3 MT30 燃气轮机研制试验

RR 公司研制的 MT30 舰船燃气轮机为完成认证试验,采用 2 台整机先期进行试验,完成的试验有^[15-16]:(1)功能试验总共进行了 132h,109 次启动停车循环,额定功率试验超过 20h;(2)耐久试验先期进行了 126h,757 次耐久循环(相当于约 3000h 的海上实际运行时间),额定功率试验超过 38h;(3)功能和耐久组合试验总共进行了 258h,866 次启动停车循

环;(4)性能和控制系统试验,稳态性能试验包括整机性能试验、部件性能试验、分别驱动螺旋桨和发电机(定转速)调节试验;动态性能试验包括起动试验、螺旋桨规律和定转速调节下加速试验、模拟非正常状态试验(如放气阀开启、掉负荷等);(5)机械性能试验,包括部件和整机振动试验、高低压转子非平衡运行试验、整机振动模态下摇摆试验、热态停机等。

2004年完成美国航运局合格证书认证要求的1500h耐久试验(满足美国海军 MIL 标准),试验于2004年2月开始,2004年7月完成。试验环境温度为38℃,共进行了1500h,试验包括对试制样机进行198次耐久试验,其中一半为驱动螺旋桨方式,另一半为驱动发电机方式(定转速),每次约8h,包括进行最大功率试验和循环试验,对进气温度的试验采用了将进气加热到38℃的方法^[17],耐久试验证明 MT30 舰船燃气轮机能够在高环境温度下取得36MW的功率,试验后对 MT30 燃气轮机的初步检查表明,各部件物理状态良好,可以满足热端部件12500h的大修寿命的要求。这项耐久试验是 MT30 舰船燃气轮机在继早些时候挪威船级社批准其设计之后的另一项成就。

3.3 乌克兰 UGT25000/GT25000 系列燃气轮机技术与性能

乌克兰“曙光”机械设计科研生产联合体成立于1954年,该企业的产品装备了约65%的原苏联海军舰船,并广泛应用于印度、德国、波兰、美国 and 我国等国舰船,占世界燃气轮机舰船数的29%和总装机功率的33%。

3.3.1 UGT15000 燃气轮机技术性能

UGT15000 燃气轮机是轴流式三轴燃气轮机,功率18~20MW,用于大型高速渡船、客轮和海军舰艇、机械推进和发电。

UGT15000 从1971年开始研制,1984年研制成功,1988年开始批产。与上一代燃机相比,这型燃机的涡轮进口温度提高了200~250℃,增压比提高了近一倍。UGT15000 使用喇叭形进气口,轴向进气。低压压气机为9级轴流式,高压压气机为10级轴流式。燃烧室为回流环管型,有16个火焰筒、16个喷油嘴和2个点火器。可使用多种燃油和气体燃料。高压涡轮为单级轴流式,导向叶片和转子叶片均对气流冷。根据动力涡轮类型的差异有 DA90 和 DO90 两种型号,其中 DA90 动力涡轮为4级,可制成左转或右转;DO90 动力涡轮为3级,用于舰船时通过换向机构可直接倒车。正车运行时,所有的排气流经动力涡轮,倒车时,排气中有25%~30%的燃气被分出(由一环形

分流阀控制),流经外部环形通道而使动力涡轮倒转。全正车至全倒车的换向时间共40s。

3.3.2 UGT25000 型燃气轮机技术性能

UGT25000 燃气轮机是在 UGT15000 舰用燃机基础上研制,通过对 UGT15000 燃机的压气机增加了零级,将燃机涡轮进口温度提高到了1250℃。1995年开始研制,2002年用于陆上管路压缩机机械传动。在舰船推进方面,主要用于大型客运船、集装箱船和海军各种舰艇^[3]。

UGT25000 采用轴向进气,9级轴流低压压气机,前3级导向叶片可调,9级轴流高压压气机,压比为20。燃烧室结构为逆流环管干式低排放型,有16个火焰筒,互相连接可交叉点火。其中4个火焰筒装有启动点火器。高压涡轮和低压涡轮机均为单级轴流式,采用空气对流冷却。机组额定功率为26.7MW,效率36.5%。

4 舰船燃气轮机的发展方向

4.1 燃气轮机的发展方向

目前,舰船燃气轮机的发展重点是一大(大功率船用燃气轮机)一小(小档功率船用燃气轮机),尤其是大功率燃气轮机,机型也更集中^[18]。舰船燃气轮机发展方向主要集中在以下几方面:

进一步提高功率与热效率,降低耗油率。世界舰船燃气轮机七十多年的发展表明,随着技术进步,舰船燃气轮机产品更新换代,功率与效率进一步提高,耗油率不断降低。简单循环舰船燃气轮机主要通过提高压比、燃气初温和部件效率等措施提高功率与热效率。目前简单循环的大功率舰船燃气轮机的热效率已经达到40%以上,耗油率已经降低到0.200kg/(kW·h)级。此外,采用先进复杂循环舰船燃气轮机代表了未来的发展方向,有望进一步提高舰船燃气轮机的热效率。复杂循环舰船燃气轮机主要包括间冷、回热、间冷回热(ICR)、蒸汽回注、燃-蒸联合、湿空气涡轮(HAT)、燃料电池混合动力等循环燃气轮机,主要通过改进热力循环来提高热效率,尤其是可以改善部分负荷下的燃气轮机性能^[5]。选取 MGT-33 发动机作母型机进行发展为间冷(IC)循环的 CGT-33 燃气轮机的结构示意图如图1所示^[19]。对实际发动机进行的 IC 循环改造方案分析表明,通过精心匹配,有可能在增大功率的同时提高其效率。但是,间冷循环燃气轮机在国外舰船上也无应用先例,因此可以称之为“有中国特色的大功率船用燃气轮机”^[20]。

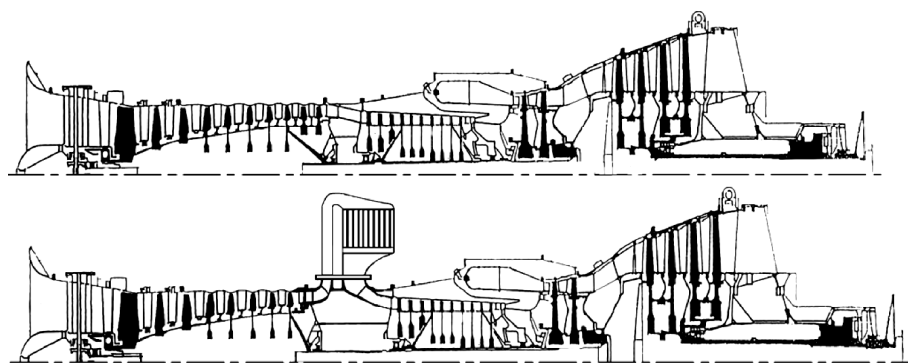


Fig. 1 Schematic drawing of MGT-33 and CGT-33^[19]

可靠性与可维护性不断提高。舰船燃气轮机的可靠性和可维护性是满足海军舰船列装要求、实现成功装船的关键指标。发达国家通过实施先进技术预研和综合的燃气轮机技术方案验证,有力支撑了舰船燃气轮机燃烧效率与可靠性提高,改善了可维护性、减少环境影响,进而降低海军燃气轮机动力装置的总费用。如WR-21燃气轮机在设计全过程中始终将可靠性与可维护性设计放在重要的位置。

产品向系列化、谱系化发展。以基准航空发动机为基础,各国改型研制不同类型和不同功率的舰船燃气轮机,充分体现了“一机为本、衍生多型、满足多用、形成谱系”的特点,不仅有利于促进航空发动机技术衍生发展,实现代际产品更新的良性发展态势,也支撑了舰船燃气轮机的可靠性、先进性,缩短研制周期、降低研制技术风险和成本^[21]。此外,以成功的舰船燃气轮机为基础,通过新技术、新材料的应用创新,进行技术升级改进,提高性能和降低排放,是燃气轮机产品系列化发展的另一发展途径。

4.2 燃气轮机的关键技术

材料及制造工艺技术。提高叶片的耐温等级及综合性能,将制备工艺从传统熔模精密铸造逐步发展到了先进定向结晶及单晶制备工艺,与之对应的涡轮叶片用材发展到等轴晶铸造高温合金、定向结晶高温合金和单晶高温合金。

增材制造技术。金属增材制造技术在国际和国内都取得了飞速的发展,在我国燃气轮机行业尚未进入实际装机应用阶段,但经过近十年的快速发展,目前已具备良好的设备和工艺技术基础,并已初步应用于国产军民型号的燃气轮机机组。

气动设计技术。进一步提高压气机与透平部件性能,研究可控涡设计、自由涡设计、掠弯扭叶片技术、多圆弧叶型、可控扩散叶型、间隙流动控制等技术,减小各类损失。如采用压气机多级可调叶片技

术,压气机附面层抽吸技术、流动稳定性被动与主动控制技术等^[22]。国外已发展到全三维非定常流动分析与优化等精细层次各异的设计方法。我国叶轮机械气动设计领域取得了较大的发展,同西方多年建立的燃气轮机研发平台相比,还存在较大的差距,理论建模及开发方法掌握不足,试验数据积累少,数据库待补充。

低排放技术。国外低排放燃烧技术已经较为成熟,不仅可以实现较低的污染物排放,具有优良的燃烧稳定性,而且低排放工况范围较宽。我国低排放燃烧技术还存在排放水平较高(3.24×10^{-5})、低排放工况范围较窄(0.8~1.0)、燃烧稳定性较差等不足。

冷却及热障涂层技术。多孔层板冷却等先进冷却技术、电子束物理气相沉积热障涂层及工艺等在国外不断应用。我国急需在先进冷却及热障涂层技术方面有所突破,以满足初温提升的需求,确保新机组的性能及可靠性。

双燃料技术。双燃料燃气轮机已成为海洋平台油气开采的核心动力设备,国外对于双燃料燃烧机理、污染物控制、在线稳定切换等技术已经进行了深入的研究。我国双燃料燃烧机理、切换策略、污染物控制及稳定燃烧控制方法等未进行系统深入的研究。

燃气轮机智能化。与国外相比,我国燃气轮机智能化技术起步较晚、落后于国际先进水平。未来的燃气轮机控制系统应该是一个综合智能管理系统,因此应具有基于运行优化、寿命管理、环保要求、投入产出效益、以及运行安全可靠、舰船管理等的一体化控制的特点。

舰船燃气轮机/燃料电池混合动力系统。混合动力系统发电效率高达65%,污染近零排放,在未来综合电力推进等领域具有很好的发展前景。美国海军水面作战中心研究了以JP5航油为燃料的舰船燃气

轮机池/燃料电混合动力系统。我国在这方面有一些研究基础,但是差距较大。

5 结束语

本文回顾了国内外舰船燃气轮机发展情况,分析了舰船燃气轮机发展走航改舰用和独立发展道路的状况。以典型舰船燃气轮机 LM2500 系列、MT30 和 UGT25000 为例,分析了燃气轮机技术特点和性能,并提出了舰船燃气轮机的主要发展方向及关键技术。

完全可以预期,通过约 15 年的持续努力,建成我国完整的燃气轮机自主创新研发体系,为我国舰船燃气轮机从测绘仿制、技术引进到自主创新的战略转变提供有力技术支撑,实现舰船燃气轮机的自主保障和自主发展,跻身世界燃气轮机强国之列。

致谢:感谢中国工程院重大咨询项目和国家科技重大专项的资助。衷心感谢上海交通大学翁一武教授和上海海事大学钟兢军教授对本文提供的帮助。

参考文献

- [1] 张忠文. 舰船燃气轮机技术的发展途径[J]. 航空发动机, 2009, 35(6): 49-52.
- [2] 翁史烈, 王永鸿, 宋华芬, 等. 燃气轮机总体性能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [3] 闻雪友. 舰船燃气和蒸汽动力装置的发展与展望[J]. 船舶工程, 1999, 21(4): 31-34.
- [4] 闻雪友, 李伟. WR-21——新一代的船用燃气轮机[J]. 热能动力工程, 1999, 14(1): 1-6.
- [5] 李孝堂, 梁春华. 世界航改舰船用燃气轮机的发展趋势[J]. 航空科学技术, 2011, 22(6): 4-7.
- [6] 闻雪友. M70 系列燃气轮机的发展与应用[J]. 航空发动机, 2006, 32(4): 1-5.
- [7] 闻雪友, 翁一武. 长三角地区燃气轮机发展战略研究报告[R]. 北京: 中国工程院, 2015.
- [8] 闻雪友, 赵友生. 国产航空斯贝发动机的工业及船用化发展[J]. 热能动力工程, 1988, 3(4): 3-10.
- [9] 闻雪友, 赵友生. 船用燃气轮机 GT1000[J]. 船舶工程, 1997, 19(1): 45-47.
- [10] 佚名. 中国燃气轮机发展史[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/19221009_131990, 2015-06-17.
- [11] 闻雪友, 翁史烈, 翁一武. 燃气轮机发展战略研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016.
- [12] 沈焯. LM2500 系列燃气轮机发展探析[J]. 农业科技与装备, 2012, (10): 36-40.
- [13] 李徐嘉, 刘云生. 舰用燃气轮机发电机组发展概述[J]. 船电技术, 2014, 34(4): 49-52.
- [14] 孙聿峰, 王明为. MT30 型船用燃气轮机性能分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(6).
- [15] Wilmshurst S. Rolls-Royce MT30 Design, Certification, Launch and Growth[C]. Tokyo: *Proceeding of the International Gas Turbine Congress*, 2003.
- [16] 敖晨阳, 吴一红, 张宁, 等. 舰用燃气轮机研制过程中的试验研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(3): 68-71.
- [17] 郑定泰. 横空出世——MT30 燃气轮机[J]. 现代舰船, 2005, (2A): 36-37.
- [18] 闻雪友, 肖东明. 现代舰船燃气轮机发展趋势分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(8): 3-6.
- [19] Wen X Y, Xiao D M. Feasibility Study of an Intercooled-Cycle Marine Gas Turbine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(2): 953-960.
- [20] 闻雪友, 肖东明. 对发展大功率船用燃气轮机的新思考[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(4): 17-21.
- [21] 龚建政, 李伟, 孙丰瑞, 等. 乌克兰 UGT25000 燃气轮机试验运行经验及技术改进措施[J]. 热能动力工程, 2006, 21(6): 648-652.
- [22] 翁一武, 闻雪友, 翁史烈. 燃气轮机技术及发展[J]. 自然杂志, 2017, 39(1): 43-47.

(编辑:朱立影)