

世界航改舰船用燃气轮机的发展趋势

Development Trend of World Aero-Derivative Marine Gas Turbines

李孝堂 梁春华 / 沈阳发动机设计研究所

导读: 综述了国外航改舰船燃气轮机的发展历程, 总结了其功率与效率逐步提高、燃料消耗率不断下降、污染排放水平越来越低、可靠性与维护性明显改善和产品系列化等发展趋势。

关键词: 舰船; 燃气轮机; 航改

Keywords: marine; gas turbine; aero-derivative

0 引言

与其他传统动力相比, 由于具有功率大、结构紧凑、重量轻、可靠性高、加速性好、寿命长、操作简单、维护方便、易于更换等突出优势, 航改舰船燃气轮机可以显著提高舰船的战术技术性能, 早已得到舰船工业界的高度重视和大力开发, 并且广泛地应用在大型驱逐舰、护卫舰、气垫船、巡洋舰、巡逻艇、鱼雷快艇、导弹快艇、登陆艇、潜艇支援船、破冰船与轻型航空母舰上, 是世界各国海军大中型水面战舰的主力动力装置。近年来舰船使用燃机的比例达到75%以上。随着航空发动机技术与产品的快速发展, 航改舰船燃气轮机也取得了显著的进展, 正向更经济、更环保、更可靠的方向发展。

1 发展历程及现状

20世纪60年代末, 英国和美国等陆续做出“舰船以燃气轮机做动力”的历史性决策。之后, 英国、美国、俄罗斯等国家开始大力发展舰船燃气轮机。由于与航空发动机同属具有技术难度大、研制周期长、费用投入多等特点, 且与航空发动机同样具有质量轻、功率大、启动快、加速性好、可靠性高等相似的技术要求, 因而舰船燃气轮机大多由发展成熟的航空发动机改型研制, 并且只有英国和美国等为数极少的世界航空发动机强国有实力研制与生产。

目前, 英国罗-罗公司陆续研制了Tyne RM1C、Olympus TM1A、Olympus TM3B、Olympus TM3C、Spey SM1A、Spey SM1C/SM2C、WR-21、MT30等舰

船燃气轮机, 美国通用电气公司舰船和工业发动机(GE M&IE)分公司陆续研制了LM2500、LM1600、LM2500+、LM2500+G4和LM6000PC等舰船燃气轮机, 美国联合技术动力公司陆续研制了FT4A 和FT8等舰船燃气轮机, 美国艾利逊动力系统公司陆续研制了Allison 501KF、Allison 570KF和Allison

表1 典型航改舰船燃气轮机简介

型号	使用时间	航机	功率(kW)	设计用途
Olympus TM3B	1973	Olympus	21500	护卫舰、驱逐舰、巡洋舰、航空母舰
Tyne RM1C	1975	Tyne	3980	驱逐舰、护卫舰、水翼船
Spey SM1C	1987	Spey	18000	驱逐舰、护卫舰
WR-21	2004	RB211	25250	导弹驱逐舰、护卫舰、气垫船、巡逻艇、水翼艇
MT30	2001	Trent800	36000	驱逐舰、LCS濒海战舰、航空母舰和多用途护卫舰
LM2500	1970	CF6-6/TF39	17900	导弹驱逐舰、护卫舰、气垫船、巡逻艇、水翼艇
LM1600	1987	F404	14920	巡逻艇、小型护卫舰
LM2500+	1996	CF6-6/TF39	27600	导弹驱逐舰、护卫舰、气垫船、巡逻艇、水翼船
LM2500+G4	2006	CF6-6/TF39	27600	导弹驱逐舰、护卫舰、气垫船、巡逻艇、水翼船
LM6000PC	1992	CF6-80C2	42750	航母
Allison 501KF	1970	T56	3400	水翼船、快艇
Allison 570KF	1979	XT-701	4740	水翼船、快艇
Allison 571KF	1986	XT-701	5740	水翼船、快艇
TF25	1968	T55-L-7	1860	水翼船、快艇
TF40	1976	T55-L-11	3000	水翼船、快艇
TF80	1983	TF40	6000	气垫船
FT4A	1962	J75	31000	多种舰船推进
NK-12M	1964	NK-12	8800	气垫船、水翼船
NK-12PT	1964	NK-12	6300	气垫船、水翼船
NK-14PT	1993	NK-12	8000	气垫船、水翼船

571KF等舰船燃气轮机;美国莱康明公司陆续研制了TF25、TF40、TF50、TF80和TF100等舰船燃气轮机;前苏联的库兹涅左夫设计局陆续研制了NK-12M、NK-12PT和NK-14PT等舰船燃气轮机。表1示出了这些航改舰船燃气轮机的投入使用时间、母体航机和应用等情况。这些燃机的应用促进了海军舰船现代化的发展。

由美国牵头,美国与欧洲各国共22个部门和公司共同实施了联合开发先进航改燃气轮机(CAGT)研究计划,其目标是将通用电气公司的GE90、普惠公司的PW4084和罗-罗公司的遑达800等大涵道比涡扇发动机改型研制为燃气轮机。第一步,是利用双转子压气机的优势,实施间冷,实现涡轮进口温度达到1426~1482℃,简单循环效率达到45%~47%;第二步,在间冷的基础上,进一步实现更先进的湿空气涡轮循环(HAT),使由像PW4084发动机改型研制的HAT循环燃气轮机的效率达到61%~63%,功率达到200MW。这些新技术的提出和发展,为未来一代高性能舰用燃气轮机的发展奠定了技术基础。

1997至2005年,日本国土交通省组织5个燃气轮机/柴油机制造商联合实施了“超级舰船燃气轮机(SMGT)”研究计划,开发低排放且高热效率的未来一代舰船回热循环燃气轮机,以替换当今的同功率级(2590kW)柴油机。SMGT研制计划的第1阶段,通过开发和验证干低 NO_x 排放燃烧室、板翅式回热器、高效冷却转子叶片、带有可调导向叶片且能够在部分负载状态下提高效率的动力涡轮、适应于舰船环境的防腐涂层等技术,实现以下3个目标: NO_x 排放量低于 $1\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ (相当于高速柴油机的1/10);热效率达到39.1%(与高速柴油机的热效率相当);能使用A型重油。SMGT研制计

划的第2阶段,通过耐久性试验,验证第1阶段技术应用于实际舰船的可靠性,目标是输出功率为2300kW,综合能量效率为50%, CO_2 排放量进一步降低20%,可靠性达到实际应用的标准。

2 发展趋势

2.1 功率与热效率逐步提高,耗油率不断降低

典型的航改舰船燃气轮机的性能参数示于表2。从表中可以清楚地发现,无论是简单循环还是复杂循环,世界舰船燃气轮机的功率与效率逐步提高,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、提高涡轮进口温度、提高部件效率等措施提高功率与热效率并降低耗油率。例如,以CF6-6/TF39发动机为母型机发展的LM2500燃机,其原型机于1970年投入使用时,功率仅为17.9 MW,热效率为35.8%,压比为18左右,通过不断改进并采用在压气机前加零级等技术,使其流量增大20%,压比增大到23.6,功率达到29.8MW,热效率提高到39.1%。在LM2500+的基础上,2005年投入使用的LM2500+G4燃气轮机,采用通用电气公司战斗机发动机和LM6000燃气轮机的先进技术,改进了压气机、高压涡轮与动力涡轮,采用先进的材料与涂层,使空气流量提高6%,压比提高到24.2,涡轮前温度提高,进而使其在不改变发动机外廓尺寸的情况下,额定功率可提高到34.3MW,热效率可达到40%左右。MT30舰船燃气轮机继承了遑达800航

空发动机三维设计的压气机叶片、8级变几何中压压气机静子叶片、高可靠性轴承等诸多先进技术,功率、热效率和耗油率分别达到36MW、40%和 $0.207\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。LM6000PC燃气轮机则继承了CF6-80C2发动机的先进技术,吸收了LM2500、LM5000燃气轮机的技术和经验,功率、热效率和耗油率分别达到42.8MW、42.1%和 $0.200\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。也就是说,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 $0.200\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 级。

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、化学回热、湿空气涡轮(HAT)等复杂循环燃气轮机,主要通过改进热力循环来提高热效率,特别是在部分负荷下的性能,如热效率与耗油率等。英国罗-罗公司与美国西屋公司联合,以RB211发动机为基础研制的WR-21舰船燃气轮机,采用间冷回热技术,降低了压气机的功耗,增加了涡轮的有用功,使热效率提高到42%,油耗降低到 $0.200\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。特别是其油耗曲线特别平坦,在30%工况时,效率可达41.16%,接近中、高速柴油机水平,可以取代柴燃联合动力装置,大大节省了空间、显著减

表2 典型舰船航改燃气轮机的性能参数

型 号	使用 时间	功率 (kW)	效率 (%)	压比
Allison 501KF	1970	4040	28	9.3
LM2500	1970	17900	35.8	18.0
Olympus TM3B	1973	21500	28.7	10.5
Tyne RMIC	1974	3980	29.3	12.5
TF40	1975	2983	27.9	8.4
Allison 570KF	1979	5350	30	12.1
Allison 571KF	1985	5740	30	12.7
Spey SMIC	1988	18000	37.3	21.9
LMI600	1990	14920	37.2	22
NK-14PT	1993	8000	32.0	9.5
LM2500+	1996	29800	39.1	23.6
MT30	2001	36000	39.9	24.0
WR-21	2004	25250	42	16
LM2500+G4	2006	34300	39.5	24.2

轻了重量,明显改善了维修性和可靠性,降低了全寿命期费用。未来,采用化学回热循环或湿空气涡轮(HAT)循环后,热效率有可能达到60%以上。

2.2 环保性不断改善

随着环保意识的增强和国际燃气轮机排放标准的制定,燃气轮机的排放早已得到世界各国的高度重视。世界著名的航空发动机公司,如罗—罗、通用电气、普惠公司等,很早就开始研制低排放燃烧技术,并且陆续成功研制了贫油、预混、串列分级燃烧室、贫油预混燃烧室等低排放燃烧室,并将其应用到工业RB211、工业AVON、工业遑达和WR—21、LM6000、LM2500、LM1600等燃气轮机上,取得了越来越低的排放水平。

目前,燃气轮机主要通过采用贫油直接喷射燃烧系统(LDI)、贫油预混气化燃烧系统(LPW/PY)、富油—猝熄—贫油燃烧系统(RQL)、非绝热燃烧系统以及内置催化稳定燃烧系统(可提供 NO_x 排放低于1ppm的水平)等低污染物排放燃烧技术,即在不对燃烧稳定产生不利影响的情况下,降低燃烧区火焰温度,从而降低氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和未燃烧的碳氢化合物(UHC)等的排放量,并且已经取得明显的效果。典型的先进燃烧技术降低排放效果如表3所示。

相信,这些新型低排放燃烧室的采用,将会大大降低 NO_x 、CO、UHC和颗粒状物等的排放量,随着节能减排要求的提出也将会逐步应用于舰船燃气轮机上。

2.3 可靠性与可维护性不断提高

舰船燃气轮机的可靠性与可维护性也是非常重要的指标。在航改燃机广泛应用的同时,美国、英国、日本等国家又瞄准了更高的目标,例如,美国海军2000年制订的舰船编队燃气轮机的近期、中期和远期使用目标如表4所列。这

表3 典型的先进燃烧技术降低排放效果

公司	燃烧室	燃气轮机	NO_x 排放值(天然气燃料)
GEPS	串列三级燃烧贫油预混燃烧室	Frame7 / 8	$\text{NO}_x < 25\text{ppm}$
GEAE	径向分级贫油预混燃烧室	LM6000、LM2500、LM1600	$\text{NO}_x < 15\text{ppm}$; $\text{CO} < 10\text{ppm}$
RR	二级串列贫油预混燃烧室	RB211、WR21、Trent	$\text{NO}_x < 25\text{ppm}$
Siemens	混合多燃烧器燃烧室	V94.2	$\text{NO}_x < 9\text{ppm}$
ABB	串列贫油预混“EV”燃烧室	GT8/10/11/13	GT8/10; $\text{NO}_x < 15\text{ppm}$; GTL: $\text{NO}_x < 9 \sim 13\text{ppm}$; $\text{CO} < 8\text{ppm}$
Solar	DLE燃烧室	Centaur、Mars	$\text{NO}_x < 42\text{ppm}$; $\text{CO} < 50\text{ppm}$
P&W TP&M	双燃料预混低 NO_x 排放燃烧室	FT4	$\text{NO}_x < 25\text{ppm}$; $\text{CO} < 55\text{ppm}$ 烧液体燃料: $\text{NO}_x < 70\text{ppm}$; $\text{CO} < 90\text{ppm}$ 。

表4 美国海军舰船编队燃气轮机的使用目标

目标	劳动量 (人/天)	可靠性 (MTBF/h)	燃料消耗 (lb/HPh)	功率密度和 单位功率	红外信号 (°F)	环境影响
目前基准 (LM2500)	基准	1000	0.52	0.55 HP/Lb, 180 HPs/lb	1000	基准
近期 (~2005)	-50%/-90	2200	0.44	+10%	< 1000	NO_x , -15%; CO_2 , -15%
中期 (2006~2020)	-75%/-180	4400	0.39	+50%	< 1000	NO_x , -50%; CO_2 , -25%
远期 (2020~)	-98%/-365	5000+	0.34	+100%	< 1000	NO_x , -75%; CO_2 , -50%

些国家通过实施先进技术预研计划开发和验证一些综合的燃气轮机技术方案,使舰船燃气轮机燃料效率与可靠性提高、可维护性改善、环境影响减小、红外/雷达/声学信号降低,进而使目前和未来的海军燃气轮机动力装置的总费用降低,作战有效性增强和易损性降低。

WR—21燃气轮机始终将可靠性与可维护性设计放在重要的位置,通过采取各种措施提高可靠性与可维护性。在从方案设计到详细设计的整个过程中,在满足低耗油率和不超过现有燃气轮机尺寸要求的同时,可靠性和可维护性指标为:1)间冷回热燃气轮机系统两次故障之间的平均时间最少为1000h,回热器为20000h,间冷器为14000h,包括传感器的控制系统为4500h,所有船内部和外部修理为2200h,燃气发生器和动力涡轮的两次大修之间的平均时间(MTBR)最少为10000h;2)对于间冷回热燃气轮机

的所有0—级和I—级维护操作,恢复系统的平均时间最多为24h;3)拆卸、更换一台燃气发生器最多用48h,动力涡轮为72h,间冷器为24h,回热器为120h;4)对于修理的最大平均时间(MTTR),控制系统为2h,滑油系统和其他部件为9.75h;5)0—级保护性维护最多为每周4.5工时,保护性加校正性维护每周6.75工时。

MT30燃气轮机采用简化结构设计(部件数较其他航改燃气轮机的减少50%~60%)、单元体设计、预平衡、视情维护等措施和通过严格的试验考核,使可靠性与可维护性得到大大提高。预计热端部件的大修时间为12500h,整机大修时间为24000h,平均修理时间(冷机时间除外)为4h。

LM2500+G4燃气轮机在LM2500的基础上进一步提高可靠性,可靠性达到了0.986,较非通用电气公司的同等功率燃气轮机的高0.0349;平均可用性达

到了0.9584,较非通用电气公司的同等功率燃气轮机提高0.034。

2.4 产品向系列化、谱系化发展

以基准航空发动机为基础,燃气轮机设计与制造商改型研制不同类型的和不同功率的燃气轮机,充分体现了“一机为本、衍生多型、满足多用、形成谱系”的特点,不仅赋予航空发动机顽强的生命力,达成更新换代的良性发展态势,也保证了燃气轮机的可靠性、先进性、周期短、风险低和成本低。例如,通用电气公司以CF6系列航空发动机为基础,改型研制了LM2500系列、LM6000、LMS100和MS9001G等燃气轮机。

由于研制和生产燃气轮机的难度大,以成功燃气轮机为基础不断升级改进,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。其中以LM2500系列最为典型,如图1所示。

2.5 军民两用,一机多用

几乎所有的舰船用燃气轮机都为军民两用和多用途的。一方面,尽管航改舰船用燃机可以最大限度地继承航机的资源,节省了大量的投入,缩短了研发周期,降低了风险,但将一型航空发动机发展为一型好用、成熟的燃气轮机仍需要不菲的投入和较长的研制周期。同时,相对而言,舰用燃机的批量较少。如何扩大用途,使利益最大化,是所有燃气轮机开发商必须做的一项重要工作;另一方面,由于燃气轮机的特点,使得其易于开发为适应不同领域的动力,如商船、天然气灌输、地面发电等用途。

随着节能减排要求的提出,世界船舶组织已提出了“绿色船舶”的概念,并提出了到2016年新船的 NO_x 排放要比2000年约降低80%, SO_x 和 CO_2 都要显著降低。目前以重油为燃料的柴油机将改为采用LNG燃料。对减排的要求和LNG燃料的采用为燃气轮机应用于商船提供

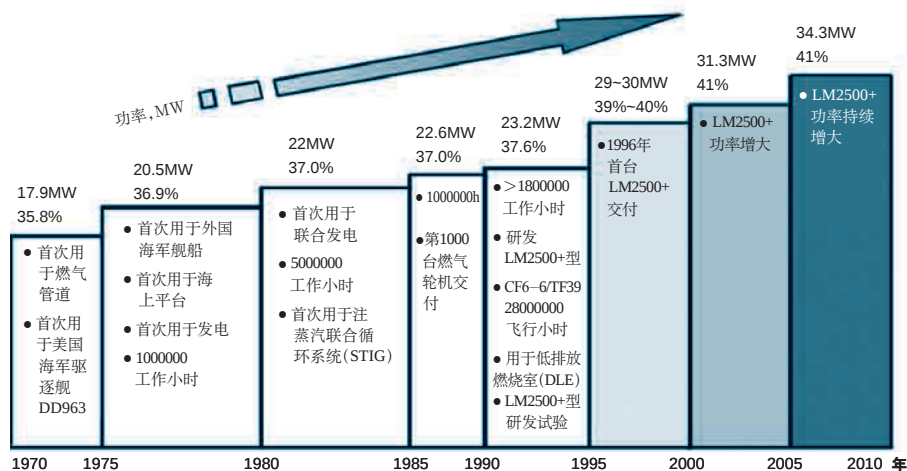


图1 LM2500燃气轮机产品的持续改进

了一个很好的机遇。

3 结束语

欧美日作为同盟已形成了功率、功能谱系完整的舰用燃气轮机,且不断改进升级。

随着航空发动机和燃气轮机技术的飞速发展,随着舰船燃气轮机使用经验的不断丰富,未来舰船燃气轮机产品的性能、可靠性、维修性会有很大提高,污染排放量会更低,全寿命费用会大幅减少,因而应用前景会更加广阔。AST

参考文献

- [1] 李孝堂. 燃气轮机的发展及中国的困局[J]. 航空发动机, 2011(3): 1-7.
- [2] Bonafede A, Russom D, Driscoll M[R]. Common threads for marine gas turbine engines in US Navy applications. ASME GT-2007-28217.
- [3] Bricknell D J. Marine gas turbine propulsion system applications[R]. ASME GT-2006-90751.
- [4] Hatcher S, Batory T, Neff R, et al. US Navy qualification of a GE LM2500+ gas turbine engine[R]. ASME GT-2005-68954.
- [5] Sidenstick D, McAndrews G,

Tanwar R, et al. Development, testing and qualification of the marine LM6000 gas turbine[R]. ASME GT-2006-90709.

[6] MIMechE B D, Wainwright J. Development and qualification of the marine Trent MT30 for next generation Naval platforms. ASME GT-2007-27511.

[7] Tooke R W, Bricknell D. Propulsion systems and the MT30 marine gas turbine: the quest for power[R]. ASME GT-2003-38951.

[8] Takao S, Hiroshi M, Hikaru S. Development of Japanese super marine gas turbine[R]. ASME GT-2005-68447.

[9] Parker M L, MacLead P K, Coulson M. Advances in a gas turbine system for ship propulsion[R]. RTO MP-14.

[10] Casson L R, English C, Newman S, et al. Integrating MT30 into the UK's future aircraft carrier—power at the heart of the electric propulsion system[R]. ASME GT-2008-50206.

作者简介

李孝堂, 中航工业其他动力首席专家, 沈阳发动机设计研究所副所长、研究员, 主要从事燃气轮机研发工作。