

# 船用燃气轮机技术的发展方向及我国发展途径的思考

王世安<sup>1</sup> 吴 穷<sup>2</sup> 王 军<sup>2</sup> 吉桂明<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻沈阳地区军事代表局 辽宁 沈阳 110031;

2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘 要:**介绍了船用燃气轮机技术在应用领域中取得的进展,对其技术发展和应用的趋势作了分析。论述了当前船用燃气轮机的主要发展途径,对我国船用燃气轮机的发展途径提出了一些设想和建议。指出,作为轻型燃气轮机,船用燃气轮机的设计开发应该遵循高起点、一机多用、一机广用的开发方针。少量引进几型先进的机组,采用通用性设计(比例放大/比例缩小、压气机模块化设计、压气机加级/压气机减级等)开发出功率加大型和功率减小型机组,形成我国所需要功率档次的船用燃气轮机系列。

**关 键 词:**船用燃气轮机;技术;简单循环;复杂循环;联合循环

中图分类号:TK471 文献标识码:A

## 引 言

由于具有功率密度高、单机功率大、振动噪声低、机动性好等特点,燃气轮机在舰船中得到了广泛的应用。燃气轮机特别适用于作为以下 3 类舰船的主机:常规排水型舰艇,包括轻型航空母舰、巡洋舰、驱逐舰、护卫舰、两栖攻击舰、高速导弹艇等;特种高性能舰船,包括水翼艇、气垫船、小水线面双体船;快速军辅船,包括快速运输舰、快速支援舰等。目前,在各国的航空母舰、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动力装置。美国 GE 公司、英国 Rolls-Royce 公司和乌克兰“机器设计”科研生产联合体是世界上最主要的船用燃气轮机研制单位。对这些公司开发、设计、研制船用燃气轮机情况的分析,有助于我们了解船用燃气轮机技术发展的途径、技术发展方向及其趋势,以便更好地推进我国船用燃气轮机的设计、研制和制造。

## 1 船用燃气轮机的发展方向

近 20 年来,随着燃气轮机技术的发展、高性能航空发动机的改装以及在燃气轮机热力循环方面的开发研究,船用燃气轮机的性能日益先进,技术日臻完善。船用燃气轮机技术发展方向主要有以下几个方面。

### 1.1 提高燃气轮机参数,改进部件设计,提高简单循环机组性能

由于舰船对高性能燃气轮机的需求,近 20 年来推出了多型大功率高效燃气轮机,其典型机组的性能如表 1 所示。通过提高初温和压比、改进部件性能等措施,在简单循环下机组效率超过 40%,如 GE 公司的 LM6000PC、R-R 公司的 MT30 等。

在推出新机组的同时,各大公司不断提高原有机组的性能。LM2500 燃气轮机的发展堪称典范。LM2500 燃气轮机是 GE 公司研制发展最为成功的一型船用燃气轮机。从 1969 年问世以来,LM2500 燃气轮机不断升级改进,从最初的功率 16.54 MW、效率 36%,发展到最新的 35.34 MW、效率 39.4%,形成了 LM2500/LM2500 + /LM2500 + G4 系列燃气轮机。

### 1.2 采用先进的复杂循环,提高机组性能

采用回热循环、间冷-回热循环等复杂循环,是提高燃气轮机性能的另一条途径。对于低压比小功率船用燃气轮机,通过增加回热器形成回热循环来提高效率;对于高压比、三转子大功率船用燃气轮机,增加中间冷却器和回热器形成间冷回热循环,可增大功率、提高效率。

英国 Rolls-Royce 公司研制的 WR-21 是一型间冷回热循环燃气轮机,其循环线图如图 1 所示。与简单循环相比,WR-21 不仅输出功率增加,额定功率下具有高效率(42%),而且在大部分功率范围内具有平坦的耗油率曲线,在 30% 额定负荷下也有接近额定负荷的效率,非常符合舰

船燃气轮机的运行特点。据分析,采用 WR-21 发动机的舰艇年燃油消耗量较美国海军现役的

LM2500 燃气轮机舰船减少约 30%。中间冷却器、回热器、动力涡轮第一级导向叶片可调是 WR

-21 燃气轮机降低耗油率、增大功率的关键。

表 1 典型的船用燃气轮机(ISO 条件下)

型号	功率 /kW	耗油率 /kg · (kW · h) <sup>-1</sup>	效率 /%	压比	空气流量 /kg · s <sup>-1</sup>	燃气初温 /℃	比功率 /kW · (kg · s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	尺寸 / (m × m × m)	重量 /kg	开始使用年份
美国 通用电气公司船舶发动机分部 (GE Marine Engines)										
LM2500	24 618	0.226	37.1	19.3	70.3	1 170	350.2	6.7 × 2.1 × 2.1	4 763	1969
LM2500 +	30 213	0.215	39.0	22.2	85.7	1 205	352.5	7.0 × 2.1 × 2.1	5 237	1998
LM2500 + G4	35 338	0.214	39.4	24.0	92.9	—	380	7.0 × 2.1 × 2.1	5 237	2005
LM6000PC	42 768	0.200	42.0	28.5	123.8	1 243	345.5	7.3 × 2.5 × 2.5	7 303	1997
英国 罗尔斯·罗伊斯公司(Rolls-Royce)										
MT-30**	36 000	0.207	40	24.0	113	—	318.6	8.9 × 3.5 × 4.3	26 000*	2004
WR-21	25 252	0.200	42.0	16.2	73.0	—	345.8	—	7 420	1997
乌克兰“曙光—机械设计”科研生产联合体 (Zorya-Mashproekt)										
UGT15000 +	20 515	0.230	36.0	19.4	73.9	1 160	277.6	5.0 × 2.6 × 2.8	9 000	1998
UGT25000	28 670	0.228	36.0	21.0	91	1 250	315.1	6.4 × 2.5 × 2.7	14 000	1993

\* 包括箱体重量; \*\* 在 26℃ 环境空气温度下。

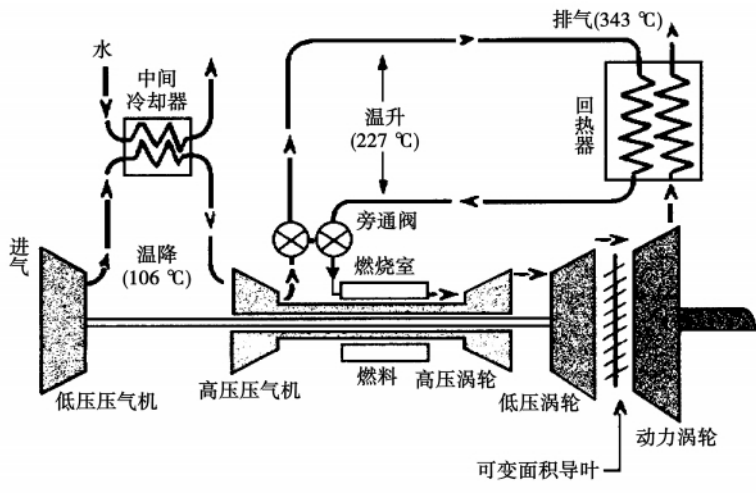


图 1 WR-21 中间冷却和回热循环线图

日本川崎重工与其它 4 个单位合作,于 1997 年开始实施超级船用燃气轮机 (SMGT) 计划。SMGT 研制背景是由于日本近海航运对环保要求日趋严格,力图研制一型高效(与柴油机效率相当)、低排放的小功率船用燃气轮机来取代在近海 100 km 以内航行舰船的柴油机动力装置。“超级船用燃气轮机”计划研制的燃气轮机是低压比(压比为

8.0) 的回热船用燃气轮机,功率为 2 500 kW,效率为 39%,NO<sub>x</sub> 排放为 1.0 g/(kW · h)。由于在回热循环中采用了动力涡轮进口可转导叶,因此,在部分负荷下的性能有明显改进,热效率曲线在整个负荷范围内比较平坦。

1.3 采用燃蒸联合循环,提高装置的功率和效率

在燃气轮机后增加一个利用排气热量的余热利用回路,用来

产生蒸汽并使它在蒸汽轮机中做功,然后蒸汽轮机与燃气轮机并车驱动螺旋桨。这种燃蒸联合装置可明显地提高装置的输出功率和效率。燃蒸联合循环的效率将达到 45% ~ 50%。在使用低压蒸汽时,整个系统的能量利用率高达 80%。燃蒸联合动力装置的系统如图 2 所示。

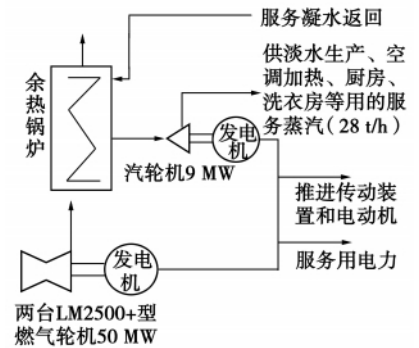


图 2 皇家加勒比旅游船的燃蒸联合动力装置系统图

鉴于它的优良性能,联合循环燃气轮机技术已在许多军舰和商船上得到实际应用。

#### 1.4 燃气轮机发电模块是未来舰船燃气轮机的主要应用方向

综合电力系统是今后舰艇动力的发展方向,其主要特点是将推进动力与电站动力合二为一,为舰船装备高能武器奠定电能基础。综合电力系统对电站总功率的需求大幅度增加,这就要求单台发电机组的功率成倍增长,传统意义上的柴油机发电机组已不能满足这种变化要求。燃气轮机单机功率大、输出转速高,特别适合作为综合电力系统的原动力。

英、美海军正朝向下一代战舰采用全电力推进方案。典型的燃气轮机综合电力推进系统如图3所示。

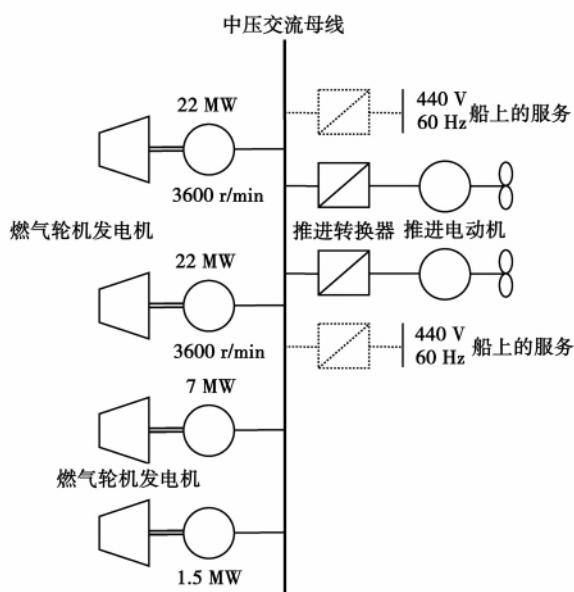


图3 典型的燃气轮机综合电力推进系统

英国海军于2009年服役的45型驱逐舰采用基于WR-21发动机的燃气轮机电力推进装置。NAVSEA(美国海军海上系统指挥部)预计,采用WR-21发动机可使舰船总运行油耗下降23%~25%,再采用综合电力推进系统(IEPS)可使总运行油耗

降低15%~19%,这两种技术结合可使油耗降低36%~38%。

英国正在建造的两艘大型航母也将装用基于MT30燃气轮机的柴燃联合IFEP(综合全电力)推进系统。

#### 1.5 低 $\text{NO}_x$ 排放燃烧室的研制

对陆地和空中推进装置日益严格的排放要求,未来舰船的主动力装置应满足今后的排放法规,以保证舰船在各国港口均能顺利入港。

通常用于陆基燃气轮机的干式低排放系统采用贫预混燃烧室,但是这些装置大多数是以气态燃料运行而不是使用馏出油。英国罗尔斯·罗伊斯公司正承担

一项计划,根据贫预混预气化(LPP)原理生产使用馏出燃油的液体干式低排放系统。此项工作已证明,在高功率下可以使 $\text{NO}_x$ 排放减少到是常规扩散火焰技术的10%。

低排放技术的进展将导致在将来可得到环境污染很小的舰用燃气轮机装置,为Eurodyn研制的低 $\text{NO}_x$ 燃烧器可使 $\text{NO}_x$ 排放减少到 $0.25 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;ABB公司的GT35船用燃气轮机的 $\text{NO}_x$ 排放低于 $2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;而三菱重工的MFT-8的 $\text{NO}_x$ 排放数据为 $0.8 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;装有干式低排放燃烧室的LM1600、LM2500、LM6000燃气轮机可使 $\text{NO}_x$ 排放减少90%。

## 2 燃气轮机发展途径的分析

当今世界上船用燃气轮机主要有3大公司:美国GE公司,英国R-R公司和乌克兰机器设计科研生产联合体。美英等国有着先进的航空发动机技术和设计体系,其舰船燃气轮机的发展基本都是航空改型,在其成熟的航空发动机基础上派生舰船燃气轮机;乌克兰则主要采用舰船燃气轮机专用设计的技术途径。

由于研制和生产舰船燃气轮机的难度大,目前世界上真正能设计、制造舰船燃气轮机的厂商为数极少。各国海军装舰使用的燃气轮机集中在少数几个型号上,正向着高度集中、一机多用、通用化、标准化、系列化的方向发展。

近20年来,简单循环燃气轮机研制和系列发展主要有两条途径:

(1) 以现有的机型为基础,通过压气机模块化设计或增加零级等方式增大空气流量和压比,并根据冷却和材料技术发展不断提高燃气初温,实现提高机组功率、效率及系列化发展的目的。GE公司的LM2500+燃气轮机和乌克兰的UGT25000燃气轮机都是通过此途径研发的。

(2) 以性能先进、可靠的航空发动机为母型机,通过船用化改装得到舰船燃气轮机。如GE公司的LM6000PC燃气轮机和R-R公司的MT30燃气轮机等。

此外,WR21燃气轮机的成功研制及应用,为船用燃气轮机的研制开辟了复杂循环的发展途径。

### 3 我国船用燃气轮机发展的思考

我国从乌克兰引进了某型大功率船用燃气轮机,已经国产化研制成功,提高了我国船用燃气轮机自主研制的起点,为我国船用燃气轮机的系列发展提供了良好的基础机型。以该型燃气轮机为基础机型,通过压气机模块化设计、压气机加级等方式,形成覆盖一定功率范围的系列燃气轮机,可满足我国舰船发展的需求。此外,该型燃气轮机为三转子结构,从结构上适合利用先进的复杂循环提高其性能,通过间冷回热循环或燃蒸联合循环等方式研制更大功率的船用燃气轮机。

船用燃气轮机功率通常不超过 40 MW,属于轻型燃机,为了更好的开发研制和扩大应用,应该宏观考虑到轻型燃气轮机的应用,统筹考虑。

同时,利用引进的先进机组作用母型机,采用通用性设计(比例放大/比例缩小、压气机模块化设计、压气机加级/减级等)开发出功率加大型和功率减小型机

组,形成所需功率范围的系列燃气轮机是一条现实可行的发展途径。

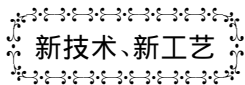
我国正在大力发展航空发动机,随着性能先进的航空发动机逐步成熟、可靠,将为船用燃气轮机的发展提供可改型的母型机,形成我国船用燃气轮机的另一条发展途径。

#### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] SAUDERS C S. Jane's Fighting Ships [J]. World Navies 2008-2009, 2009, 111:1-960.  
 [3] FARMER R. Millennium LM2500 + marine electric drive plant [J]. Gas Turbine World 2003, 33(2):33-34.  
 [4] FARMER R. Marine propulsion OEM design ratings [J]. Gas Turbine World 2010 GTW Handbook, 2010, 28: 111-113.  
 [5] FARMER R. LM6000 rated 45 MW shaft output and 42.6% simple cycle efficiency [J]. Gas Turbine World, 1995, 25(6):12-16.  
 [6] ISLES J. New 60 Hz bid to beat 60% combined cycle efficiency [J]. Gas Turbine World 2010, 40(3):12-16.

[7] FARMER R. GE launches LM2500 + rated at 29 MW and 38% thermal efficiency [J]. Gas Turbine World, 1994, 24(3):24-32.  
 [8] FARMER R. LM2500 upgrade nominally rated at 46 000 shp and 41% efficiency [J]. Gas Turbine World, 2005, 35(5):10-14.  
 [9] FARMER R. Ultra-low NO<sub>x</sub> without catalysts or water injection [J]. Gas Turbine World 2009 GTW Handbook, 2009, 27:11.  
 [10] FULTON K. Marine WR-21 succeeds in 500-hour ICR production engine test program [J]. Gas Turbine World, 1997, 27(6):22-26.  
 [11] PLUGNIKOV V. Combined-cycle propulsion plant uprated in ship conversion [J]. Diesel & Gas Turbine Worldwide, 1998, 30(8):20-21.  
 [12] RAND J, WRIGHT N. Royal navy experience of propulsion gas turbines and how and why this experience is being incorporated into future designs [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(4):680-684.  
 [13] MULLINS P. Royal navy chooses advanced propulsion system [J]. Diesel & Gas Turbine Worldwide, 2008, 40(7):10-13.

(陈滨 编辑)



## MAN 推出新型工业燃气轮机

MAN Diesel and Turbo 已经推进新型 GT6 工业燃气轮机,用于机械驱动和发电。该机分双轴配置和单轴配置,额定功率 6.2 MW,可增容到 8 MW。随后提高到 6 到 10 MW 范围。双轴机有 11 级压缩机,压力比 1:15,两级,空冷,高压涡轮驱动。单轴配置时,涡轮段有三级,前两级空冷。进口导叶和前三列静叶为可变几何型。高精度电动伺服电动机,连接到涡轮数字控制系统,驱动四个可变几何列,从起动到额定转速的 75% 时的完全关闭位置到额定转速的 95% 和全负荷时的完全打开位置。两级动力涡轮已经在宽广的转速范围内高效优化,可以在额定转速(12000 r/min)的 45% 和 105% 之间运行。

《柴油机和燃气轮机世界》2011 年 1-2 月刊

船用燃气轮机技术的发展方向及我国发展途径的思考 = **Development Tendency of Marine Gas Turbine Technologies and Ideas for Their Development Approaches in China** [刊, 汉] WANG Shi-an ( Shenyang Bureau of Naval Forces of Chinese People's Liberation Army , Shenyang , China , Post Code: 110031) , WU Qiong , WANG Jun , JI Gui-ming( CSIC Harbin No. 703 Research Institute , Harbin , China , Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -379 ~ 382

Introduced were recent advances of marine gas turbine technologies in relevant application domains and analyzed was their development and application tendency. The main approaches currently available for developing marine gas turbines were described and some imaginations and suggestions concerning the development approaches for marine gas turbines in China were also presented. It is noted that the design and development of light-duty gas turbines should follow the development policies of starting from a high start point and one machine for multiple purposes and wide-ranging applications. A few models of gas turbine unit should be introduced. By adopting a generalization design ( scale up/down , modular design of compressors and increase/decrease the number of stages of a compressor etc. ) , types of units with the power outputs being increased and decreased should be developed , forming a series of marine gas turbines with proper power grades needed by China. **Key words:** marine gas turbine , technology , simple cycle , complex cycle , combined cycle

涡轮盘腔内部流动和换热机理研究 = **Study of the Mechanism Governing the Flow and Heat Exchange Inside a Turbine Wheel Disk-formed Chamber** [刊, 汉] LI Wen , ZHANG Dong-yang , HE Ping , TAN Chun-qing ( Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -383 ~ 387

First analyzed was the influence of such parameters as rotary Reynolds number  $Re_\phi$  , pre-swirling ratio  $\beta_p$  and turbulent flow parameter  $\lambda_T$  on the pre-swirled flow and heat exchange characteristics inside the wheel-disk-formed chamber of a rotor/stator train with an emphasis being put on the influence of  $Re_\phi$  ,  $\beta_p$  and  $\lambda_T$  on the pre-swirling ratio  $\beta_x$  and drag coefficient  $\xi$  at the center of the wheel disk. Furthermore , the flow configuration inside the chamber was also analyzed in detail. It has been found that the inertia and centrifugal force dominate differently is the main cause for forming various flow configurations. In addition , the distribution regularity of and influencing factors on local Nusselt number along the radial direction on the rotary wall surfaces were obtained. Finally , the influence of non-dimensional mass flow rate  $C_w$  on non-dimensional temperature  $\theta$  was studied , finding that  $\theta$  and  $C_w$  basically meet a logarithm relationship. **Key words:** pre-swirling , rotor/stator train , heat exchange , rotary Reynolds number , pre-swirling ratio , turbulent flow parameter