

# 不断升级改进的 LM2500 燃气轮机

王 冲<sup>1</sup>, 金洁敏<sup>1</sup>, 田 广<sup>2</sup>, 吉桂明<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2 哈尔滨·第七〇三研究所军代表室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘要:** 凭借其优越的性能、高可靠性和利用率, LM2500 系列是其所在功率等级中, 得到最广泛应用的一型燃气轮机。文中介绍了 LM2500 的发展历程; 描述了 LM2500 升级改进的情况和 LM2500 主要的结构特点; 展示了它依据航空技术的优秀设计及其主要性能。还对 LM2500+、LM2500+G4 升级改进的基本策略、技术途径和设计变化及其主要性能进行分析, 指出增加空气质量流量是升级改进最常用、保守、低风险而有效的方法。通常是给压气机增加零级并调整相应级的叶片设计(开大出口面积)。

**关键词:** LM2500 燃气轮机; 性能; 结构特点

中图分类号: TK47 文献标识码: B

## 前 言

为满足 20 世纪 60 年代美国海军对驱动护卫舰以上大型战舰的高性能大功率燃气轮机的要求, GE 公司于 60 年代末研制并推出的 LM2500 燃气轮机至今已经历了 30 多年的发展历程。

30 多年来, 为了适应船用/陆用燃气轮机市场对更大功率、更高效燃气轮机的需要, LM2500 始终不断地在升级改进。在保持自己原有的已经过运行证实的先进设计、高可靠性和利用率的基础上, LM2500 一直在引入当代最先进的技术进行升级改进, 达到加大功率提高效率的目的。

通常, 一型燃气轮机研制成功投放市场后的生产寿命约为 20 年。然而, 不断升级改进的 LM2500、LM2500+ 和今年推出的 LM2500+G4 使 LM2500 系列燃气轮机性能不断提高。

自 LM2500 投放市场以来, 已销售了 2000 多台机组, LM2500 已被证明是以工业/船用装置形式应用于机械驱动或电力生产的高性能燃气轮机。在工业应用中, LM2500 总的运行时间已超过 4 千万小时, 在船舶应用中 LM2500 加上 LM2500+ 总的运行时间已超过 5 千万小时, 这一切都得益于 LM2500 的高性能、高可靠性和利用率, 也得益于 LM2500 不断的升级改进, LM2500 是燃气轮机不断升级改进的典

范。

## 1 LM2500 燃气轮机<sup>[1-2]</sup>

LM2500 燃气轮机是 GE 公司于 20 世纪 60 年代末研制的高效大功率船用燃气轮机, 其性能先进, 是第一型第二代船用燃气轮机。

### 1.1 研制途径

LM2500 是由先进可靠的 TF39 航空涡轮风扇发动机(民用型为 CF6)改装而成。它与母型机的对照图示于图 1。

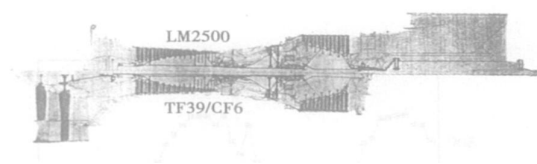


图 1 LM2500 与其航空母型机 TF39/CF6 的对照

### 1.2 主要结构特点

#### 1.2.1 总体结构

整个发动机为双转子结构, 由单转子燃气发生器和自由动力涡轮转子组成。燃气发生器由压气机、燃烧室和压气机涡轮组成。

#### 1.2.2 压气机

压气机共 16 级, 进口导叶和 1~6 级静叶可调, 压气机转子为鼓形结构。

#### 1.2.3 燃烧室

燃烧室为 SAC(单环燃烧室), 装有 30 个燃油喷嘴和 2 个点火器。内、外壁采用气膜冷却。燃烧室环形壁由层叠的环组成(见图 2)。

#### 1.2.4 压气机涡轮

压气机涡轮为二级轴流式。两级动叶和静叶均采用空气冷却。第一级和第二级静叶为冲击和气膜冷却, 第二级动叶为冲击和对流冷却。由于采用了冷

却, 虽然燃气初温为  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 金属表面的温度仍不超过  $846\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了减少动叶顶部径向间隙的漏泄损失, 涡轮机匣上有蜂窝状密封结构, 允许叶片和机匣发生接触和摩擦, 从而使压气机涡轮效率达到  $90\%$ 。

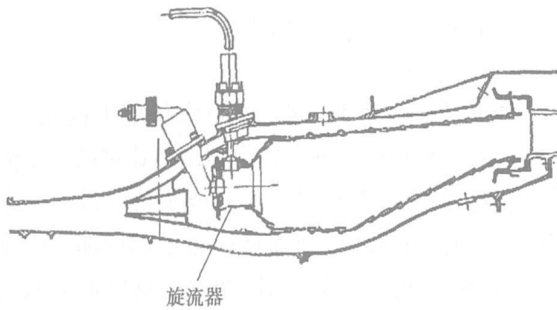


图 2 LM2500 燃烧室的剖面图

### 1.2.5 动力涡轮

动力涡轮原为 TF39 中驱动风扇的涡轮, 采用了低负荷设计, 级数多达 6 级。动叶都带冠(见图 3)以增加耐久性, 并且各级动叶顶部机匣内壁衬有蜂窝密封结构的可磨损材料(见图 4), 以增强密封、减少漏泄损失。这些措施使动力涡轮设计工况效率高达  $92.5\%$ , 而且变工况性能良好。动力涡轮叶片采用抗腐蚀材料, 前三级有涂层, 后三级没有涂层。

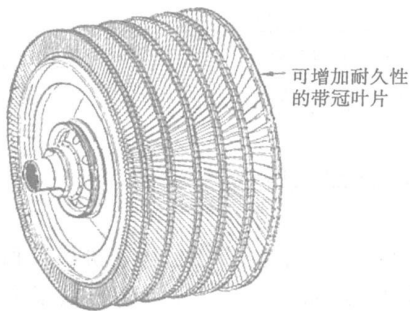


图 3 LM2500 的动力涡轮转子

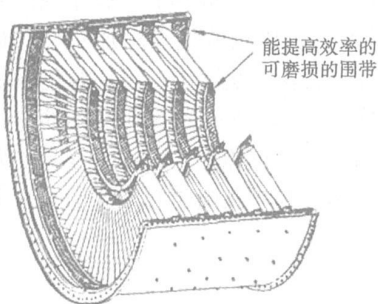


图 4 LM2500 的动力涡轮静子

### 1.3 LM2500 的主要性能

LM2500 在不断改进, 其输出功率从初期的  $20\,226\text{ kW}$  增加到目前的  $24\,272\text{ kW}$ , 效率从初期的  $35.5\%$  增加到  $36.2\%$ 。当前它在 ISO 条件下的性能为: 额定连续功率  $24\,272\text{ kW}$ ; 在上述功率下的效率  $36.2\%$ 。

### 2 LM2500+ 燃气轮机<sup>[3]</sup>

LM2500+ 实际上是给 LM2500 增加零级压气机的功率加大的改进型机组(见图 5)。与 LM2500 比较, 燃气初温从  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$  增加到  $1205\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压比从  $18.8$  增加到  $23.3$ , 空气流量从  $70.3\text{ kg/s}$  增加到  $85.7\text{ kg/s}$ 。

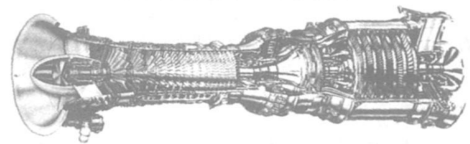


图 5 LM2500+ 的剖视图

### 2.1 升级改进的推动力

LM2500 的发展历程反映了用户对提高功率的期望。CODAG/CODOG 推进系统的发展以及大型旅游船对更大功率燃气轮机的需求都期望提高燃气轮机的功率。

在工业燃气轮机市场上 RR RB211、Z-M UGT-25000、PW FT8-3 和 RR RB211 6562 等燃气轮机都已步入  $26\,700\sim 29\,125\text{ kW}$  的领域。此外, GE 公司也需要有一型燃气轮机来很好地填补 GE 航改型产品序列中在当时的  $23\text{ MW}$  功率的 LM2500 和  $35\text{ MW}$  功率的 LM5000 之间的市场份额。

### 2.2 升级改进的基本策略

基本策略是保留并利用 LM2500 的先进设计、结构、高性能的材料和涂层, 基于 LM2500 的可靠性和利用率并采用十分保守、很低风险的设计途径来升级改进加大功率到 LM2500+。

### 2.3 主要的设计变化

#### 2.3.1 零级

加上新的装有宽弦叶片的轮盘作为第一级压气机前的零级, 以便形成总的 17 级轴流压气机。

零级装有叶片的整体轮盘(见图 6)是基于已用在航空涡轮风扇发动机(GE F414)上 20 多年的现有技术, 是通过电化学加工得到的单件不锈钢铸件, 非

常结实、可靠和耐外来物损坏。由于排除了纵树形叶根结构,消除了叶根内一个主要的潜在磨损区域,从而增加了它的使用寿命。改进了轮盘的材料,以便提高耐氧化寿命。新的具有可变几何的进口导叶列后面跟着 7 级可变几何的静叶,从而能保证良好的部分负荷性能,并扩大了压气机的喘振边界和提高了喘振裕度。

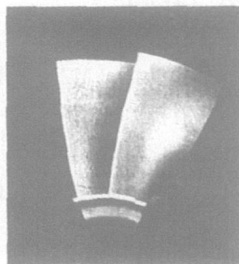


图 6 LM2500+ 零级装有宽弦叶片轮盘的片段

### 2.3.2 压气机转子

第一级动叶被重新设计成基于 CF6-80C2 叶型的高效、更结实的宽弦叶片(见图 7)。去除了在常规的 LM2500 第一级动叶叶高中部的阻尼凸台。第二级和第三级压气机动叶也采用 CF6-80C2/LM6000 叶型设计。

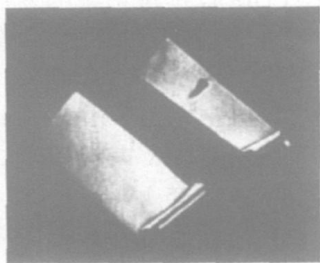


图 7 LM2500+ 第一级压气机的宽弦动叶及其对照物

### 2.3.3 压气机静子

零级静叶是新设计的,如同 1~6 级那样,都做成可调的。零级一直到 11 级均采用了 CF6-80C2/LM6000 的叶型。

### 2.3.4 压气机性能

新增的零级和修改的压气机设计使 ISO 基本负荷的空气流量增加 23%,达到 85.7 kg/s,压比从 18.8 增加到 23.3:1,并使压气机效率增加 0.5%。

### 2.3.5 压气机涡轮

第二级空气冷却的涡轮驱动压气机。第一级和

第二级动叶叶型被优化到更高的流量。第一级动叶材料从铸造的 Rene 80 改变成 N5 单晶。第一级静叶从 X-40 改变成 N5 单晶。第二级动叶仍然是铸造的 Rene 80,静叶材料从铸造的 Rene 80 改变到 Rene 125。较小的冷却改进,修改了热力密封设计,使用了 CF6-80E 式样的密封体。

### 2.3.6 动力涡轮

加强了 6 级动力涡轮,以便应付更大的扭矩。加强动力涡轮机匣并增加输出传动轴花键的承扭能力。轮盘做得更厚、更结实。修改了第一级动叶和静叶叶型的气动设计,以便适应流量的增加。修改了第六级叶片的气动设计,以便保持有效地流入涡轮后机匣。进入动力涡轮的喉部面积已被开大约 11%,以便适应更大的质量流量。

LM2500+与 LM2500 的对照图示于图 8。

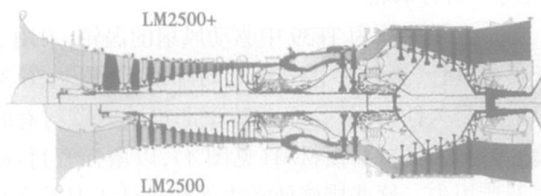


图 8 LM2500+与 LM2500 的对照

## 2.4 LM2500+的主要性能

在 ISO 条件下的性能为:额定连续功率 29 788 kW;在上述功率下的效率 37.8%。

## 3 LM2500+G4 燃气轮机<sup>[4]</sup>

LM2500+G4 具有增加压气机、压气机涡轮和动力涡轮流动能力的 LM2500+。升级改进基于适度的增加燃气初温和压比,空气质量流量增加 5%。

### 3.1 升级改进的考虑

根据设计的简单性、计划的时间表、技术风险和开发费用,认为增加空气质量流量是增加功率的最容易做到和最保守的方法。更高的空气流量能最好地满足使用已证实的技术,使风险减到最小的这一目标。它也允许简化产品保障并匹配或改变目前发动机高温部分 25 000 h 的检修间隔和 50 000 h 的大修寿命。

### 3.2 设计变化

设计变化的范围被限于对动叶和静叶叶型做较小的调整,提供所要求的用于更高输出功率的质

量流量。在两级全部空气冷却的压气机涡轮内, 第一级动叶叶型被优化到 LM2500+G4 更高的流量水准。压气机涡轮修改包括根据目前的航空技术对叶片冷却做一些较小的改进并对一些材料做升级改进, 以便提高改进的承受更高温度的能力。

### 3.3 LM2500+G4 的主要性能

2006 年第二季度投放市场的具有 6 级动力涡轮的 LM2500+G4 在 ISO 条件下的性能为: 额定连续功率 33 650 kW; 上述功率下的效率 38.1%。

## 4 结束语

(1) 燃气轮机升级改进实质上是广义的通用性设计, 即保留原有已得到证实的先进技术, 经过少量改动得到加大功率、提高效率的新机组;

(2) 升级改进的途径主要是两个方面, 一是提高初参数(燃气的初温和压比); 二是增加空气的质量流量。辅之以采取改进冷却, 采用更好的材料、涂层和密封结构等措施;

(3) 增加空气质量流量是升级改进最常用、保守、低风险而有效的方法。常常采用给压气机增加零级并调整相应级叶片设计的方法;

(4) LM2500 动力涡轮的低负荷设计给升级改进留有充分的余地。

期望 LM2500 系列燃气轮机的发展历程能对我国船用/工业燃气轮机的开发、研制和发展起到一些启示作用。

### 参考文献:

- [1] 吉桂明. 论燃气轮机重要的市场[J]. 燃气轮机技术, 1993(2): 7-14.
- [2] FARMER R. 2005 GTW marine propulsion index[J]. Gas Turbine World, 2005, 34(6): 44-47.
- [3] FARMER R. GE launches LM2500+ rated at 29 MW and 38% thermal efficiency [J]. Gas Turbine World, 1994, 24(3): 24-32.
- [4] FARMER R. LM2500 upgrade nominally rated at 46000 shp and 41% efficiency [J]. Gas Turbine World, 2005, 35(5): 10-14.

(编辑 渠 源)

(上接第 137 页)

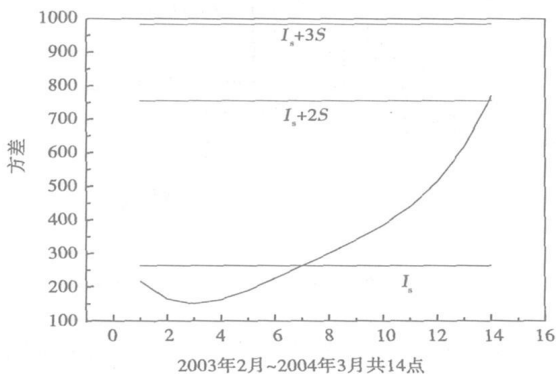


图 9 2003 年 2 月 ~ 2004 年 3 月透平排气温度月均值方差趋势拟合图

## 3 结 论

(1) 虽然只对排气温度进行了分析, 但从分析结果看出, 1998 年 ~ 2005 年间, 机组性能逐步恶化, 因而导致  $\sigma_i^2$  的分布已经开始围绕  $I_s + 2S$  并且逐步逼近  $I_s + 3S$ ; 这说明逐步发生的故障已经影响到机组运行, 需要采取保护措施防止进一步恶化。在以后的工作中可以加入对压气机排气温度, 压气机排气压力等热参数的分析, 以达到更全面的监测。

(2) 建立了一种与目前普遍采用的监测方法相比更能细致地监测出燃气轮机的异常运行状况的燃气轮机运行监测方法。该方法由于是以方差为基础的, 故可以不受工况和季节的影响, 任何时候都可以将运行数据处理得到的监测量与基准线比较, 简单易行。

(3) 文中的基线趋势分析法是基于时间序列和概率的数学分析方法, 是通过分析监测数据离散程度来监控机组运行的方法, 故该方法经过改进后可以适用于更多的机械实时监控。

### 参考文献:

- [1] 翁史烈, 王永泓. 燃气轮机性能分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [2] 杨位钦, 顾 岚. 时间序列分析与动态数据建模[J]. High Voltage Engineering, 1988, 30(136): 124-128.
- [3] SUDHAKAR M PANDIT, WU SHIEN MING. Time series and system analysis with application[M]. Wiley, c1983.
- [4] MASAHIRO KUROSAKI, TADASHI MORIOKA, KOSUKE EBINA, et al. Fault detection and identification in an IM270 gas turbine using measurements for engine control[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126: 726-732.

(编辑 渠 源)

应用于氦气压气机的相似模化方法验证 = **Verification of an Analog Modeling Method for Helium Compressors** [刊, 汉] / ZHONG Sheng-jun, XU Li-min, JIN Jie-min, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 129 ~ 133

In consideration of an approximate modeling method featuring an equal inlet and outlet specific volume ratio with an axial helium compressor stage serving as a model and to solve an analog modeling problem existing between a helium compressor and an air one, a numerical simulation verification calculation has been conducted by using computational fluid mechanics software NUMECA. The calculation results have been compared with the test ones. It has been known from the numerical simulation verification that the performance curves obtained from formulae calculation differ relatively little with those obtained from the numerical simulation. The air flow angle difference between different working media, i. e. helium and air, is also very small. However, it has been learned from the air test results that the pressure ratio curves obtained from the formulae calculation are basically identical to those obtained from the test results, but there exists a certain difference of their adiabatic efficiency curves. To sum up, it can be shown that for a helium compressor with conventional blade profiles, a mach number lower than 0.4 and pressure ratio below 2, the analog modeling method in disregard of an equal mach number is effective and practical. **Key words:** helium, compressor, analog modeling, numerical simulation, air test

方差分析在电厂燃气轮机性能监测系统中的应用 = **Application of a Variance Analysis for the Performance Monitoring Systems of Power Plant Gas Turbines** [刊, 汉] / XIA Di, WANG Yong-hong (Turbomachine Research Institute under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), HAN Gang (Shanghai Zhadian Gas Turbine Power Plant, Shanghai, China, Post Code: 200438) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 134 ~ 137, 141

A new set of gas turbine performance monitoring methods has been established by using variance analysis and time sequence models. It can eliminate the influence of atmospheric temperatures and power factors and only reflect the change in gas turbine operating performance. The variance reference line thus obtained can be used for the real-time performance monitoring of a gas turbine unit. To overcome the impact of atmospheric temperatures and other factors on various parameters of the gas turbine, only one variance standard has been used the whole year round. The method employs a time sequence model to seek the variance of the operating data. To eliminate the impact of different operating regimes on the monitoring of parameters, a method was adopted to monitor only the typical operating regimes. **Key words:** time sequence, gas turbine, monitoring standard, variance analysis

不断升级改进的 LM2500 燃气轮机 = **Constantly Upgraded and Improved LM 2500 Gas Turbines** [刊, 汉] / WANG Chong, JIN Jie-min (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), TIAN Guang (Naval Representative Office Resident at Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 138 ~ 141

Because of their superior performance, reliability and availability, gas turbines of LM2500 series have become a type of gas turbines most widely used at this range of power ratings. The development course of LM 2500 gas turbines has been given and its upgrading and improvement situation described along with their main structural features. Displayed are the excellent design and main performance derived from aero-derivative engine technologies. In addition, an analysis is performed of the basic strategies and technical approaches for LM2500+, LM2500+G4 upgrading and improvement as well as their design changes and main performance. It is noted that increasing air mass flow rate is a most common, conservative, low risk and effective method for engine upgrading and improvement. Usually, a No.0 stage is added to a compressor and the blade design of corresponding stages is adjusted (broaden the outlet area). **Key words:** gas turbine, upgrading and improvement

汽轮机转子蒸汽冷却计算模型构建研究 = **A Study of the Establishment of Turbine Rotor Steam-cooling Calculation Models** [刊, 汉] / LU Zhi-qiang, HAN Wan-jin (College of Energy Sciences and Engineering under Harbin Insti-