

方差分析在电厂燃气轮机性能监测系统中的应用

夏 迪¹, 韩 刚², 王永泓¹

(1 上海交通大学 叶轮机械研究所, 上海 200030; 2 上海闸电燃气轮机发电厂, 上海 200438)

摘 要:应用方差分析和时间序列模型建立了一套新的燃气轮机性能监测方法。该方法能够规避大气温度、功率因素的影响,只反映燃气轮机运行性能的变化;用该方法得到的方差基准线可用于对机组性能进行实时监控。为了克服大气温度等因素对燃气轮机各参数的影响,做到全年都能采用一个方差标准,本方法应用了时间序列模型来求取运行数据的方差。而为了消除不同工况对参数监测的影响,文中采用只监控典型工况的方法。

关 键 词:时间序列; 燃气轮机; 监测标准; 方差分析

中图分类号: TK39; TK477 文献标识码: A

引 言

随着机组运行时间的增加,由于热通道部件结垢、腐蚀等原因,机组的性能会越来越差,安全隐患也逐年递增。目前大多数电厂用燃气轮机的热力参数保护项目很少,很难全面反映出机组性能的恶化程度。而能直接反映机组性能的各个热参数(例如透平排气温度、压气机压比、供油量等)都随大气温度、输出负荷等因素的变化而变化^[1],这就要求我们找出一种方法,该方法能比较简便地根据热力参数判别机组目前运行状况。本文提出用时间序列求出的方差对燃气轮机热参数进行实时监控。利用机组头两年的运行数据建立起时间序列模型,然后对每 15 天取均方值,再用方差分析就可得到方差基准线。在实际应用中每一个实测点都有相对应的模型点,该模型点是用时序模型与该点之前的一系列实测数据建立起来的,故可以消除季节变化的影响。得到模型点后,可得出模型点和实测值的偏差,然后用方差分析得出偏差数组的统计特征值。将该特征值与已得的方差基准线比较,即可起到监测作用。通过分析比较表明,在所分析电厂的各典型工况(40、80 和 100 MW)中,100 MW 工况的监测数据是最容易达到警戒值的,在实际运行中我们只要对

100 MW 工况进行监控,保证其安全运行,那么机组切换到其它工况时也不会有任何安全问题。这样,通过应用时间序列模型和选取适当的监控工况,就能找到一个可以在任何时间都能应用的监控标准。文中只分析了排气温度的监测标准建立,其它各种参数的监控也可应用相同的方法获得。首先介绍如何建立排气温度的时间序列模型,其次介绍如何利用方差分析获得基准线,最后通过实例证明该方法的有效性。

1 方差提取模型的选择及建立

之所以选择热参数方差作为分析对象是因为:作为一个复杂的系统,燃气轮机运行时受各种因素影响,很难对某个参数选取某个固定区域作为正常运行范围,而方差的形式 $DX = E[(X - EX)^2]$ 表明的是一个随机过程中随机变量在均值附近的集中程度,其大小与均值关系不大,即与机组运行工况等因素无关。选择方差作为分析对象的初始假设是设备运行越不安全,各热参数的离散程度越大。研究结果表明,该假设是正确的。

1.1 方差提取模型的选择

选择好的方差提取模型是方差分析的关键。该模型要能排除各种无关因素(如大气温度,运行工况等),在测量参数中分离出直接与机组性能相关的因素。时间序列就是某一系统在不同时间(相同时间间隔)的响应。对不同的热力参数应用不同的时间序列模型,就可以将燃气轮机的各种影响因素融入到所建立的时间序列模型中^[2-3]。然后再对时间序列模型所产生的方差进行分析,这样就能比较好地了解机组性能的变化。

在选择好方差提取模型后,利用无故障运行工况下的监测参数求取燃气轮机热参数的时间序列自

回归模型, 并且计算出相应的标准特征值或称基线值。燃气轮机在任意情况下所采集的监测参数经过处理后只要与基线值相比, 就可以区分燃气轮机的技术状态是否出于正常状态。这样的分析方法, 可称之为基线趋势分析法。

1.2 方差提取模型的建立

将时间序列应用于机组运行安全监测系统由两个过程组成: 设计和实现。

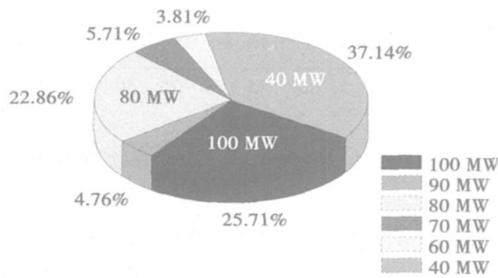


图 1 1998 年~1999 年的数据点分类

设计过程: 获取典型的正常工况时间序列样本, 根据样本集建立机组运行状态的基准时序模型; 本文中, 样本集选取闸电燃气轮机 2 号机组初始运行时, 1998 年~1999 年的无故障运行数据。样本集中收录了各工况下上百个数据点, 按工况进行分类后得出图 1 和图 2。从图 1 中可以看出 100、80 和 40 MW 3 个工况运行次数最多, 最有分析价值。而从图 2 看出 40 MW 工况运行时透平排气温度均处于 641~643 K, 非常安全; 而且 40 MW 时燃气轮机运行

出现故障几率较小, 故障危险性也较小; 而 80 MW 负荷运行时透平排气温度也低于 100 MW 负荷运行时的透平排气温度, 即使出现故障, 危险性也较小。

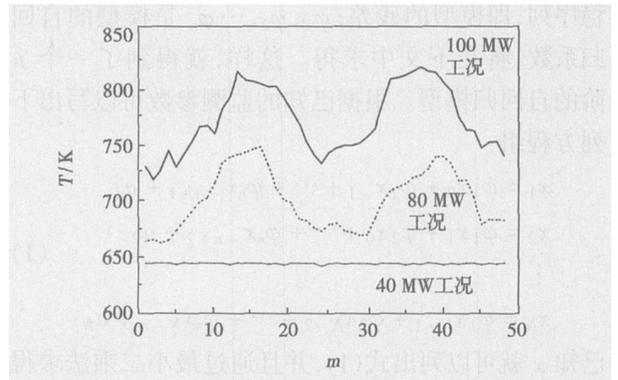


图 2 1998 年~1999 年燃气轮机各工况透平排气温度

实现过程: 获取当前机组运行状态的时间序列样本, 用基准时序模型计算出当前机组运行测量数据的待检数据集 $\{E(\sigma_i^2)\}$, 然后将该数据集与基准时序模型所获得的基准线进行比较。

1.2.1 模型的建立

如图 3 所示, 基准时间序列模型的编写是以 labview 为平台的, 该平台的特点是模块化编程, 在对程序的调试过程中便于单独对某模块进行功能扩充或者改进, 而不会影响到整个程序的运行。而且模块化编程还有利于在程序进行时对其进行监控和调试, 以及将某个模块单独运行调试, 方便了程序的编写。

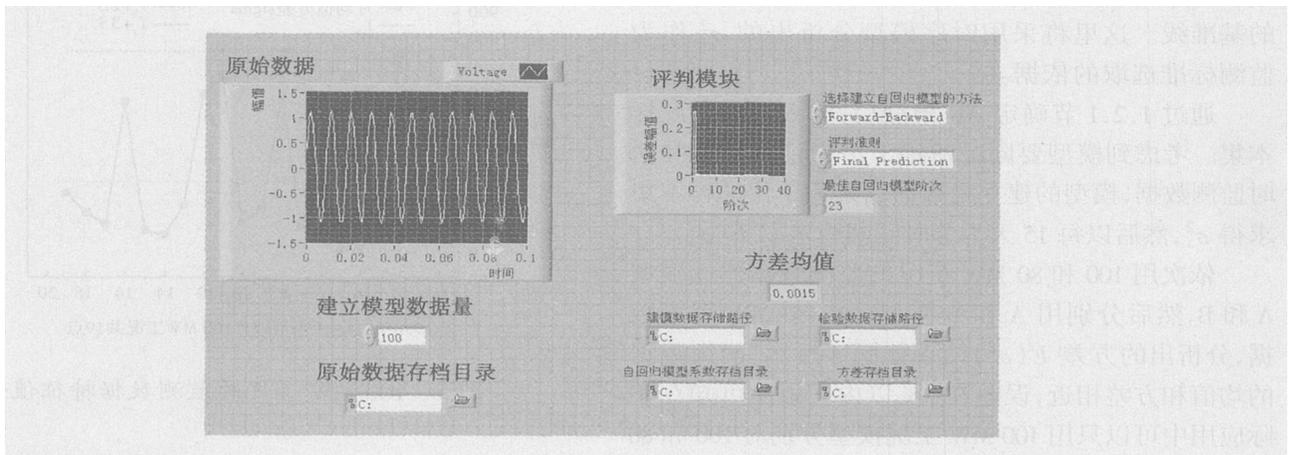


图 3 时序模型计算模块界面

基准时间序列模型的核心是自回归 (AR) 模型, 以下简单介绍自回归模型的原理^[3]:

将样本集按照等时间间隔排序, 获得时间序列 $x = \{x_t, t = (\dots - 3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots)\}$, 其中下标

t 越小说明参数 x_t 获得的时间越早。取定 $n+1$ 个连续 x_t 写成下式: $x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_n x_{t-n} + a_t$; 其中 $a_t \sim \text{NID}(0, \sigma_i^2)$ 为零均值不相关平稳序列, 即模型的残差; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 是模型的自回归系数, 将在下文中求得。这样, 就得到了一个 n 阶的自回归模型。根据已知的监测参数可以写出下列方程组:

$$\begin{aligned} x_1 &= \varphi_1 x_0 + \varphi_2 x_{-1} + \dots + \varphi_n x_{-n+1} + a_1 \\ x_2 &= \varphi_1 x_1 + \varphi_2 x_0 + \dots + \varphi_n x_{-n+2} + a_2 \\ &\vdots \\ x_N &= \varphi_1 x_{N-1} + \varphi_2 x_{N-2} + \dots + \varphi_n x_{N-n} + a_N \end{aligned} \quad (1)$$

已知 x 就可以列出式(1), 并且通过最小二乘法求得使 $\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 最小的系数 $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T$ 。根据已知的样本集, 每取定一个阶数 n 就可以获得一组 Φ 和一组残差 $\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 。阶数 n 的选取在时间序列模型的建立过程中也很重要, 在本程序中根据 final prediction 准则得出阶数 n 为 23 的模型比较适合用来对排气温度时间序列建模。

得到阶次 n 和系数 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 后, 建立一个自回归模型, 每输入一组样本集 x , 都能得到一组偏差 $\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 。每一组偏差都是零均值不相关平稳序列, 即 $a_t \sim \text{NID}(0, \sigma_i^2)$, 其中的 σ_i^2 是要用来分析的数据。

1.2.2 基准值的求取

基准值的求取思路是: 燃气轮机在第一年至第二年的数据可以认为是正常运行数据, 对不同工况下的数据分别处理后, 归纳出一条无热参数故障时的基准线。这里将采用时序模型分析出的 σ_i^2 作为监测标准选取的依据。

通过 1.2.1 节确定 AR 模型后, 输入正常工况样本集。考虑到模型要同时适用于历史记录数据和瞬时监测数据, 模型的建立是根据以天为单位的样本集求得 σ_i^2 , 然后以每 15 天为等时间间距求取 $E(\sigma_i^2)$ 。

依次用 100 和 80 MW 工况的监测数据建立模型 A 和 B, 然后分别用 A 和 B 模型分析 80 MW 工况数据, 分析出的方差 $E(\sigma_i^2)$ 结果如图 4 所示, 两组数据的均值和方差相近, 误差在 5% 以内。由此可知在实际应用中可以只用 100 MW 工况模型分别对 100 和 80 MW 工况监测数据进行分析。上述方差 $E(\sigma_i^2)$ 是以每次采集数据后通过时间序列模型得到的随机过程 $\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_N]$ 为基础的。而 a_t 的分布符合: $a_t \sim \text{NID}(0, \sigma_i^2)$ 。这样以天为单位的每一个样本集都可以求得一个特征值 σ_i^2 。对 15 天内所有的 σ_i^2 取期望

可得 $E(\sigma_i^2)$ 。 $E(\sigma_i^2)$ 定义为复合随机过程, 因为该过程的不可重复性和不可预见性, 以及该过程的每一个事件都包含了多个简单事件 $\{a_i\}$ 。

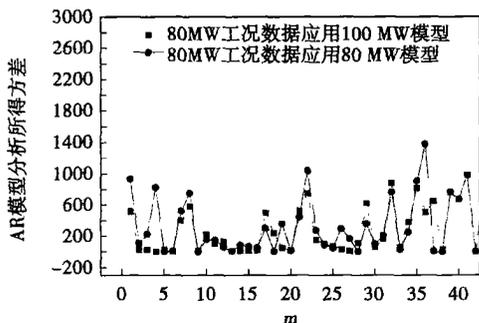


图 4 100 和 80 MW 工况监测数据分析

这样 $E(\sigma_i^2)$ 也能作为监测对象, 以下令 $\bar{x} = E(\sigma_i^2)$ 。而 \bar{x} 的统计特征值可做为监测标准, 即均值 $I_s = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{X}_j$ 和 I_s 的标准差 $S = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (\bar{X}_j - I_s)^2}$ 。由 I_s 和 S 可得置信区间 $[I_s - S, I_s + S]$, \bar{x} 在区间 $[I_s - 2S, I_s + 2S]$ $[I_s - 3S, I_s + 3S]$ 出现的概率分别为 0.954 和 0.997; 如果 \bar{x} 超出或者接近置信区间 $[I_s - 3S, I_s + 3S]$, 则说明机组运行已经出现了故障。由于机组不正常运行时 \bar{x} 只会越来越大, 故以下各图只画出 $I_s + 2S$ 和 $I_s + 3S$ 线。按照上述各式根据其求得的模型 A 分别求出 100 和 80 MW 监测数据的特征值, 绘制出图 5 和图 6。

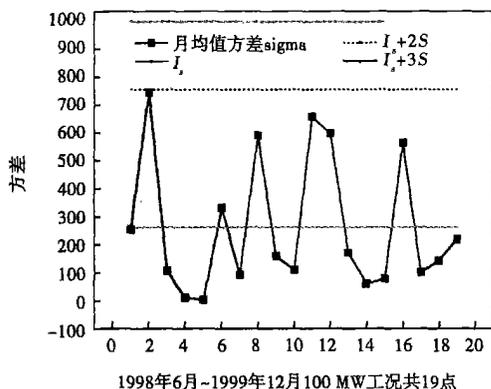


图 5 100 MW 工况的监测数据特征值

从图 6 中可以看出, 应用 100 MW 工况模型 A 所求得的 80 MW 工况 \bar{x} 值均在 $I_s + 2S$ 线以内, 且 80 MW 工况下的特征值 I_s 和 S 均小于 100 MW 各相应特征值, 这说明 80 MW 工况下机组运行比 100 MW 工况更为安全, 故在以后的工作中只需用 100 MW 模型

和特征值分析处理 80 MW 以上工况数据。由于 1998 年~1999 年是 2 号机组刚开始运行的两年, 其燃气轮机性能均处于初始状态, 故由 1998 年~1999 年 100 MW 工况数据所得的 I_s 值可用作基准值; 以后各年的 100 MW 工况数据通过模型 A 处理所得 \bar{x} 可直接和基准值比较, 以分析机组运行状况。

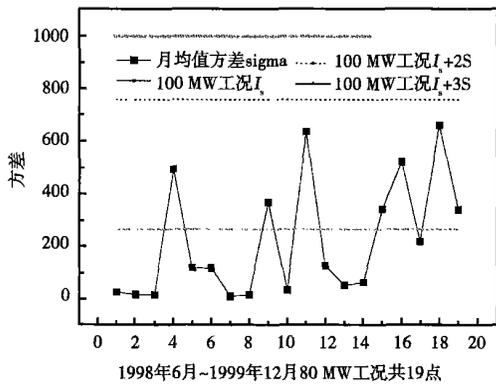


图 6 80 MW 工况的监测数据方差与 100 MW 工况特征值比较

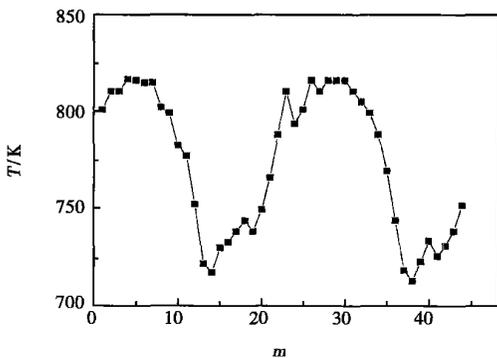


图 7 2003 年 6 月~2005 年 3 月 2 号机组透平排气温度

2 监测模型的实际应用

在获得基准值 I_s 后, 导入 2003 年 6 月~2005 年 3 月机组透平排气温度数据进行分析, 并绘出温度示意图 (见图 7)。由于该机组从 1998 年运行至 2005 年, 在压气机和涡轮叶片中已存在了一定的结垢和腐蚀等现象, 其部件性能已有所下降。从图 7 并不能看出有异常情况发生, 应用已建立的基线趋势分析法求出每个固定时间段的 \bar{x} , 整理得图 8 和图 9。图 8 所应用的 AR 模型仍然是根据 1998 年至 1999 年 100 MW 工况数据所获得的 AR 模型, 因为 1998 年~1999 年间是机组初始运行的时间, 机组运

转正常, 此时获得的 AR 模型的各参数 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 被认为是机组无故障运行模型参数。图 9 是用 2003 年 2 月~2004 年 3 月共 14 点用最小二乘法拟合出来的方差趋势线。从图 9 中可以看出, 在一年多的运行过程中, \bar{x} 的总体趋势是抬高的, 这说明机组的性能在下降, 当数据足够精确时可以通过该趋势图预估出机组需要维修的时间。从图 8 中可以看出与图 5 中的 1998 年数据相比, 2005 年间机组的性能已经出现了明显下降, 2005 年 \bar{x} 的变化范围已经开始偏离 I_s 线, 开始逼近 I_s+2S 线。从图 8 中可以看出 B 部分的 \bar{x} 值均处于基准线附近, 而 A 和 C 部分数据点则几乎是围绕着 I_s+2S 线浮动。从运行报告中可以发现 2004 年 6 月~2004 年 10 月期间电厂对机组的压气机进行了 3 次水洗 (而之前近半年很少水洗), 从而达到提高压气机效率的目的; 2004 年 6 月之前的数据显示由于缺乏清洗, 显示出发动机性能不断恶化, 甚至有出现故障的危险。经过连续 3 次清洗后压气机的月均值 \bar{x} 均下降至基准线附近波动, 说明压气机又回到了正常工作状态。但是在燃气轮机运行中并非仅有压气机结垢单个故障发生, 透平结垢和透平腐蚀等各种故障都会对机组的性能产生影响^[4], 对压气机进行水洗只能暂时提高压气机性能, 对透平的性能提高没有帮助。从 2004 年 10 月后机组的监测参数中看出, 由于透平性能没有得到改善, 压气机停止水洗运行一段时间后性能开始下降, 图 9 中的 \bar{x} 拟合趋势线又开始升高, 向 I_s+2S 逼近。所以在对压气机水洗的同时, 也应该加强对透平和其它部件的维护工作, 以提高机组整体性能。

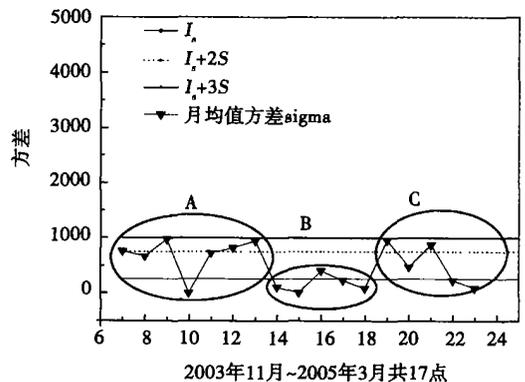


图 8 2003 年 11 月~2005 年 3 月透平排气温度月均值方差

(下转第 141 页)

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)

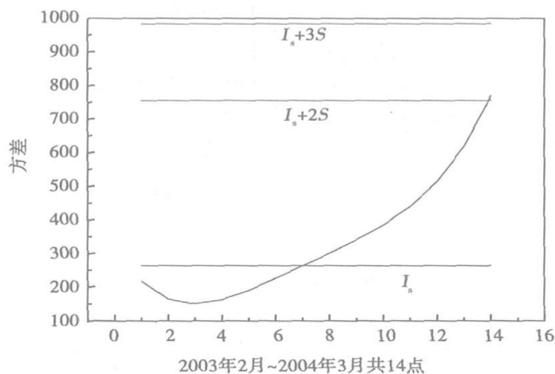


图 9 2003 年 2 月 ~ 2004 年 3 月透平排气温度月均值方差趋势拟合图

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 σ_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-