

# 基于时间序列模型的燃气轮机气路性能退化预测

王伟影<sup>1</sup>, 王建丰<sup>3</sup>, 崔宝<sup>2</sup>, 李淑英<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国船舶重工集团公司第703研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078; 3. 中海石油(中国)有限公司 北京 100000)

**摘要:** 针对燃气轮机实际运行过程中压气机积垢导致的性能退化与定期清洗维护问题, 提出一种基于时间序列模型的燃气轮机气路性能退化预测方法。并在燃气轮机建模仿真基础上, 以燃气轮机排气温度为例, 对时间序列模型在燃气轮机气路性能退化预测中的应用进行了有效性评估。研究结果表明, 使用该方法可将燃气轮机气路性能参数随压气机积垢程度的变化转化为时间序列趋势预测问题, 可以有效地实现燃气轮机气路性能退化趋势预测, 进而实现压气机的视情清洗维护。该方法为燃气轮机在线健康状态监测与诊断提供了一种思路, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 燃气轮机; 性能退化; 压气机积垢; 时间序列模型

中图分类号: TK477 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.008

## 引言

为了提高燃气轮机的运行健康管理水平, 采用先进的事前维护方式代替传统的事后方式与定期维护方式已成为未来燃气轮机的重要发展方向<sup>[1]</sup>。

作为事前维护的重要组成部分, 开展燃气轮机气路性能退化趋势预测方面的研究具有重要意义<sup>[2]</sup>; 压气机叶片积垢是导致燃气轮机性能退化的主要原因<sup>[3]</sup>。此外, 相比其它退化类型而言, 压气机叶片积垢所导致的燃气轮机性能退化属于可恢复的软退化, 即其退化过程存在明显的时间退化轨迹特征。近年来, 有关压气机积垢方面的研究工作已经陆续展开。文献[3]对影响工业燃气轮机性能退化的因素进行了分析, 认为空气流量是衡量压气机污染退化的重要影响参数; 文献[4]基于改进的解析模型研究了轴流压气机的叶片积垢特性, 研究结果表明, 压气机级的几何形状、流动特性及进口流

量、速率对压气机叶片的积垢具有重要影响, 且颗粒物的大小是影响压气机积垢程度的重要因素; 文献[5]分析了压气机叶片的积垢机理, 在此基础上推导出了表征压气机叶片积垢特性的指标; 通过对16级压气机的积垢模型研究, 文献[6]发现压气机叶片积垢所导致的压气机效率与质量流量减少量高度依赖于压气机叶片积垢的分布特性(即前几级积垢, 后几级积垢或所有级均匀积垢); 文献[7]对压气机第一、二、三级叶片积垢的研究结果表明, 积垢导致压气机流量降低并且前几级积垢对流量的影响较大。此外, 文献[8~9]分别研究了燃气轮机气路部件退化程度对整机性能的影响。

从上述文献可以看出, 有关压气机叶片积垢方面的研究还相对较少, 并且已有的研究工作主要集中于压气机叶片积垢机理以及其对燃气轮机性能的影响, 少有文献深入研究压气机叶片积垢导致的燃气轮机气路性能退化预测问题。针对这一现状, 本研究在已建立的压气机叶片积垢性能退化模型基础上, 通过仿真模拟得到压气机叶片积垢过程中燃气轮机排气温度的退化规律, 继而采用时间序列模型实现燃气轮机气路性能退化的有效预测。

## 1 时间序列模型

对于燃气轮机气路性能参数的趋势预测而言, 其本质属于时间序列预测问题。时间序列预测是处理动态数据的一种行之有效的参数化时域分析方法<sup>[10]</sup>。

### 1.1 时间序列模型基本原理

作为一种基于数据的建模方法, 时间序列模型

收稿日期: 2015-03-18; 修订日期: 2015-06-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCFZ1005)

作者简介: 王伟影(1983-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工程大学博士研究生。

通讯作者: 崔宝(1986-), 男, 中船重工集团第七〇三研究所工程师。

通过分析变量参数自身的变化规律,采用外推原理描述变量参数随时间的变化,主要包括确定型时间序列模型和随机型时间序列模型两类<sup>[11]</sup>。相比确定型时间序列模型而言,随机型时间序列模型所预测的时间序列由随机过程产生,一般分为自回归过程、滑动平均过程、自回归滑动平均混合过程以及非平稳求和自回归滑动平均过程 4 种类型<sup>[11]</sup>。

对于如下所给出的线性随机过程而言,记作  $AR(p)$ ,即为  $p$  阶自回归过程。

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t \quad (1)$$

式中:  $X$ —时间序列变量参数;  $t$ —时间;  $\varphi_i$ —回归参数 ( $i = 1, \dots, p$ );  $a_t$ —白噪声。

假设线性随机过程可表示为式 (2) 形式,则该过程为  $q$  阶滑动平均过程,记为  $MA(q)$ 。

$$X_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (2)$$

式中:  $\theta_i$  ( $i = 1, \dots, q$ )—回归参数。

自回归滑动平均混合过程,是由自回归和滑动平均两部分共同构造的随机过程,可表示为:

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (3)$$

式 (3) 称为  $p$  阶自回归  $q$  阶滑动平均模型,记为  $ARMA(p, q)$ 。显然,  $ARMA(p, q)$  模型是  $AR(p)$  和  $MA(q)$  的混合模型。

对于非平稳时间序列而言,假如通过  $d$  次差分可使序列平稳,采用的模型称作  $ARIMA(p, d, q)$  模型,它包括了  $AR(p)$ ,  $MA(q)$  以及  $ARMA(p, q)$  过程,可表示为:

$$(1 - B)^d X_t = \varphi_1 (1 - B)^d X_{t-1} + \dots + \varphi_p (1 - B)^d X_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (4)$$

式中:  $B$ —后移算子,即:

$$B_p X_t = X_{t-p} \quad (5)$$

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p \quad (6)$$

$$B_q a_t = a_t - p \quad (7)$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_p B^p \quad (8)$$

### 1.2 时间序列模型预测步骤

时间序列模型的基本思想是将预测参数随时间推移而形成的数据序列视为一个随机序列,用一定的数学模型来近似描述这个序列<sup>[12]</sup>。图 1 给出了基于时间序列模型的时间序列趋势预测流程图,其具体的步骤为:

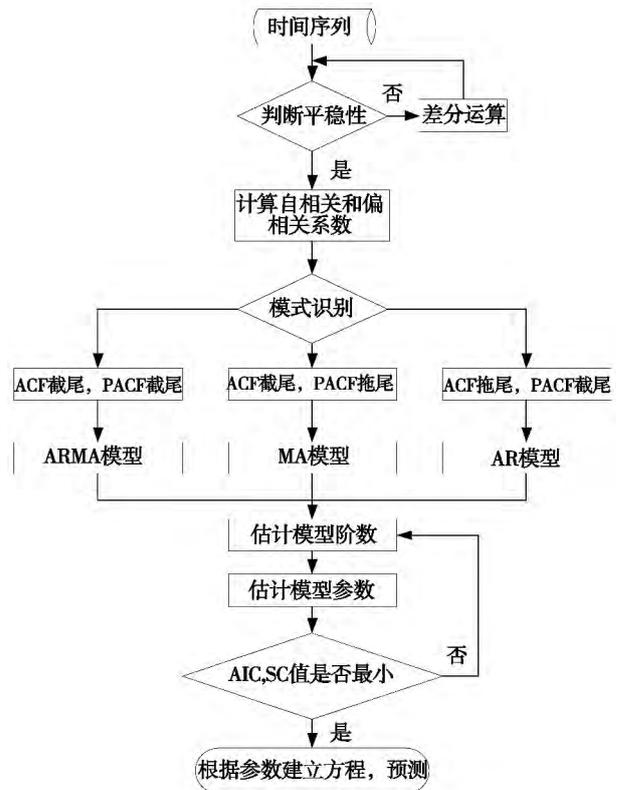


图 1 时间序列预测模型建模流程

Fig. 1 Flow chart for establishing a time series prediction model

(1) 判断时间序列的平稳性。首先采用自相关图检验法对时间序列平稳性做初步的判断,若该序列的自相关系数能够快速的向零衰减,则该时间序列可初步认为是平稳的。反之,称该序列为非平稳时间序列,此时需要采用 ADF(单位根检验法)检验对时间序列的平稳性作进一步判断验证。

(2) 非平稳时间序列平稳化处理。如果时间序列存在一定的增长或下降趋势,经步骤 (1),判断时间序列是非平稳的,需对时间序列进行  $d$  次差分处理,直至时间序列平稳。

(3) 模型粗选。通过 ACF(自相关函数), PACF(偏相关函数)系数进行模型识别和定阶,对模型进行粗选。由图 1 可以看出,若 ACF 和 PACF 系数都截尾,则为 ARMA 模型;若 ACF 系数截尾, PACF 系数拖尾,则为 MA 模型;若 ACF 系数拖尾, PACF 系数截尾,则为 AR 模型。

(4) 参数估计。参数估计是对步骤 (3) 所提供的粗模型进行参数估计与假设检验,检验是否具有统计意义。参数估计方法包括最大似然估计、最小

二乘估计、最大熵估计和矩估计等方法,本研究采用最小二乘估计进行参数估计,并进行显著性检验,对相关参数进行取舍。

(5) 模型精选。经过步骤(3)和步骤(4)可以确定多个粗模型,需通过相关准则选出最佳模型,本研究选取 AIC 值和 SC 值最小的模型为最佳模型,并检验模型是否有 ARCH 效应,若有则进行 ARCH 建模,若无将所选模型为最终模型。

## 2 基于时间序列模型的排气温度预测

### 2.1 排气温度样本数据获取

根据文献[13]所述基于小偏差线性化法的压气机叶片积垢特性仿真方法和燃气轮机气路部件的热力学参数关系式,应用小偏差线性化法建立测量参数偏差和性能参数偏差的数学模型,并且在已经建立的模型中植入压气机叶片积垢过程典型退化性能曲线,通过计算即可求出其它测量参数的变化趋势,具体仿真建模过程如图 2 所示。

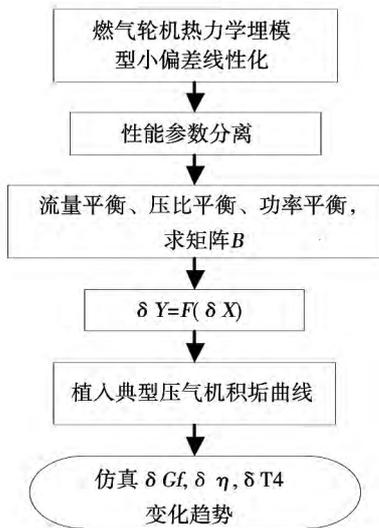


图 2 压气机积垢仿真流程图

Fig. 2 Flow chart for simulating the fouling process of a compressor

压气机叶片积垢对燃气轮机性能退化的影响主要表现为流量与效率的降低,可采用下式进行定量描述。

$$\delta G_{LCO} = -0.05(1 - e^{0.001073t}) \quad (9)$$

$$\delta \eta_{LCO} = -0.0025(1 - e^{0.001073t}) \quad (10)$$

式中:  $\delta G_{LCO}$  — 低压压气机折合流量的相对变化量;

$\delta \eta_{LCO}$  — 低压压气机折合效率的相对变化量。

图 3 给出了相同燃气轮机输出功率条件下,压气机叶片积垢所导致的燃气轮机气路性能退化对排气温度的影响。

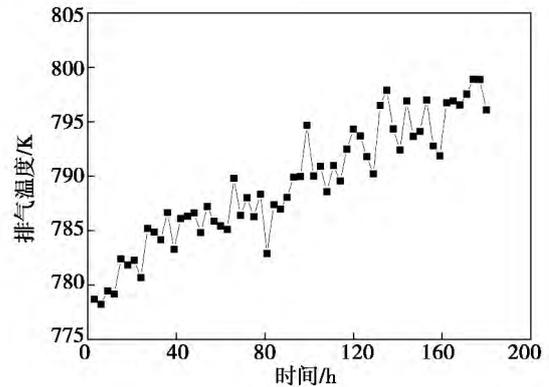


图 3 燃气轮机排气温度时间序列

Fig. 3 Timeseries of the exhaust gas temperature of a gas turbine

由图 3 可以看出,随着运行时间的增加,机组排气温度不断升高。这主要是因为压气机叶片积垢程度逐渐增加导致压气机性能下降,使得燃气轮机的做功能力降低,若要保持相同的输出功率,控制系统提高了输入的燃料流量;另外,从图 3 显示的结果还可以发现,燃气轮机排气温度随时间的变化呈现出较为明显的随机波动特征。

### 2.2 燃气轮机排气温度序列平稳性检验

AR( $p$ ) 模型、MA( $q$ ) 模型和 ARMA( $p, q$ ) 模型只适用于平稳时间序列模型,若时间序列为非平稳时间序列模型,则选择 ARIMA( $p, d, q$ ) 模型,并且需要对原始序列进行差分处理为平稳时间序列。因此,在对燃气轮机排气温度进行时间序列预测建模之前,需要对其进行平稳性检验。

目前,平稳性检验常用的方法是自相关图检验法和单位根检验法(包括 ADF 检验、DF 检验和 PP 检验等)。考虑到所研究燃气轮机排气温度随时间的变化特征,选取仿真流程的前 60 组数据样本构建原始样本时间序列如图 2 所示,并采用 Eviews6.0 软件对燃气轮机时间序列进行平稳性检验。为提高平稳性检验的可靠性,首先采用自相关图检验法对原始样本时间序列做初步的平稳性检验,然后再采用基于数学统计量的单位根检验法对原始样本时间序列做进一步的平稳性检验。

图 4 给出了排气温度原始样本时间序列的自相关图检验结果,由图 4 可知,原始样本时间序列的自相关系数下降速度异常缓慢,而且始终位于置信区间以外,可初步判断原始样本时间序列不符合平稳时间序列特征。原始样本时间序列的单位根检验结果如表 1 所示,其中,  $t$  统计量值为  $-1.3196$ ,大于显著性水平 10% 的临界值  $-2.5950$ 。因此,原始样本时间序列存在单位根的原假设成立,即进一步证实了原始样本时间序列的不平稳性。

表 1 原始样本时间序列 ADF 单位根检验结果  
Tab. 1 Augmented Dickey - fuller ( ADF) test results of the time series of the original sample

参数	$t$ 统计量	概率
ADF 检验统计量	$-1.3196$	$0.6145$
1% 显著性水平	$3.553$	
临界值	5% 显著性水平	$-2.9145$
10% 显著性水平	$-2.5950$	

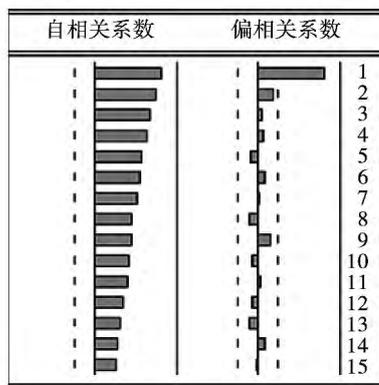


图 4 原始样本时间序列的自相关图检验结果  
Fig. 4 Inspection and check results of the time series of the original sample according to the self-correlogram

由于原始样本时间序列的平稳性较差,需要对原始样本时间序列进行一阶差分处理,得到新样本时间序列。图 5 与表 2 分别给出了原始样本时间序列一阶差分处理之后的自相关图和单位根检验结果。由图 5 可知,新样本时间序列的自相关系数下降速较快,可初步判断新样本时间序列为平稳时间序列。同时,根据表 2 的检验结果可知,原始样本时间序列经过一阶差分处理之后,  $t$  统计量值为  $-7.5819$ ,小于显著性水平 1% 的临界值,概率为

零,即新样本时间序列不存在单位根,进一步证实原始样本时间序列进行一阶差分处理之后所得到的新样本时间序列是平稳的。

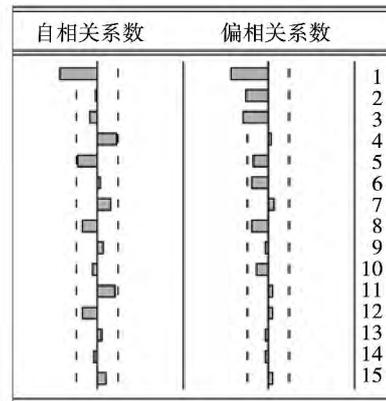


图 5 新样本时间序列的自相关图检验结果  
Fig. 5 Inspection and check results of the time series of the new sample according to the self-correlogram

### 2.3 时间序列模型识别和参数估计

选择合适的时间序列模型是实现燃气轮机排气温度预测的关键,根据 AIC 准则和 SC 准则对时间序列模型进行选择。

表 2 新样本时间序列的 ADF 单位根检验结果  
Tab. 2 Augmented Dickey - fuller ( ADF) test results of the time series of the new sample

参数	$t$ 统计量	概率
ADF 检验统计量	$-7.5819$	$0$
1% 显著性水平	$-3.5527$	
临界值	5% 显著性水平	$-2.9145$
10% 显著性水平	$-2.5950$	

在模型的初步识别中,利用 ACF 和 PACF,可以确定差分后序列的  $ARIMA(p, d, q)$  模型的  $p, q$  值。根据图 5 AR 模型和 MA 模型的滞后阶数,建立 16 个模型。

模型 1: AR 模型滞后阶数为 1、2、3, MA 模型的滞后阶为 1;

模型 2: AR 模型滞后阶数为 0, MA 模型的滞后阶为 1;

模型 3: AR 模型滞后阶数为 1, MA 模型的滞后阶为 1;

模型 4: AR 模型滞后阶数为 2 ,MA 模型的滞后阶为 1;

模型 5: AR 模型滞后阶数为 3 ,MA 模型的滞后阶为 1;

模型 6: AR 模型滞后阶数为 1、2 ,MA 模型的滞后阶为 1;

模型 7: AR 模型滞后阶数为 1、3 ,MA 模型的滞后阶为 1;

模型 8: AR 模型滞后阶数为 2、3 ,MA 模型的滞后阶为 1;

模型 9: AR 模型滞后阶数为 1、2、3 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 10: AR 模型滞后阶数为 0 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 11: AR 模型滞后阶数为 1 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 12: AR 模型滞后阶数为 2 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 13: AR 模型滞后阶数为 3 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 14: AR 模型滞后阶数为 1、2 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 15: AR 模型滞后阶数为 1、3 ,MA 模型的滞后阶为 0;

模型 16: AR 模型滞后阶数为 2、3 ,MA 模型的滞后阶为 0。

表 3 给出了不同模型的 AIC 和 SC 对比分析结果 ,由表 3 可知 ,ARIMA(0 ,1 ,1) 模型的 AIC 与 SC 最小。因此 选择 ARIMA(0 ,1 ,1) 模型对燃气轮机排气温度进行时间序列趋势预测。

### 2.4 预测结果分析与讨论

基于 ARIMA(0 ,1 ,1) 模型对排气温度一阶差分之后的新样本时间序列进行预测 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出 ,ARIMA(0 ,1 ,1) 模型的预测结果总体上能够有效的反映出燃气轮机排气温度随时间的变化趋势 ,即基于 ARIMA( p ,d ,q) 模型实现排气温度的趋势预测是可行的。

假设燃气轮机刚清洗之后时间记为 0 h ,当排气温度达到 800 K 时对压气机进行清洗维护。采用本研究所述的时间序列预测模型( ARIMA( p ,d ,q) 模型) 分别对燃气轮机运行 90、120、150 和 180 h 后的

排气温度进行时间序列趋势预测 ,其结果如图 7 所示。由图 7 可知 ,采用 ARIMA( p ,d ,q) 模型能够较好的预测得到压气机积垢条件下燃气轮机排气温度随时间的变化趋势 ,并且随着燃气轮机运行时间的增加 ,数据样本的逐渐累加 ,对未来清洗时间的预测结果也会逐渐变化 ,上述 4 种条件下的预测清洗时间依次为 216、198、198 和 201 h。

表 3 不同时间序列模型的 AIC 和 SC 对比

Tab.3 AIC and SC contrast of various time series models

模型类型	AIC	SC
模型 1	4.335 8	4.516 6
模型 2	4.257 7	4.328 2
模型 3	4.274 6	4.381 1
模型 4	4.280 3	4.387 8
模型 5	4.266 6	4.375 1
模型 6	4.311 8	4.455 1
模型 7	4.300 9	4.445 6
模型 8	4.301 6	4.446 3
模型 9	4.490 3	4.635 0
模型 10	4.768 5	4.803 7
模型 11	4.585 1	4.656 1
模型 12	4.835 4	4.907 1
模型 13	4.845 1	4.917 4
模型 14	4.548 6	4.656 1
模型 15	4.645 2	4.753 7
模型 16	4.875 8	4.984 3

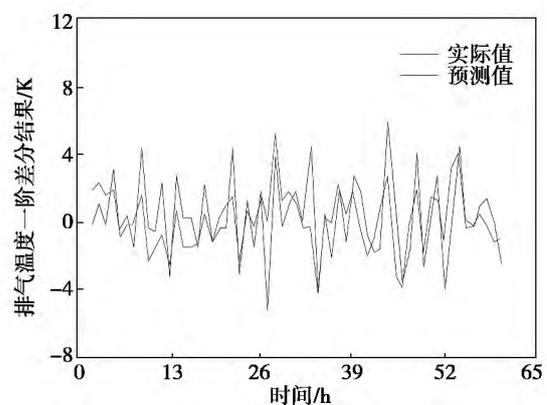
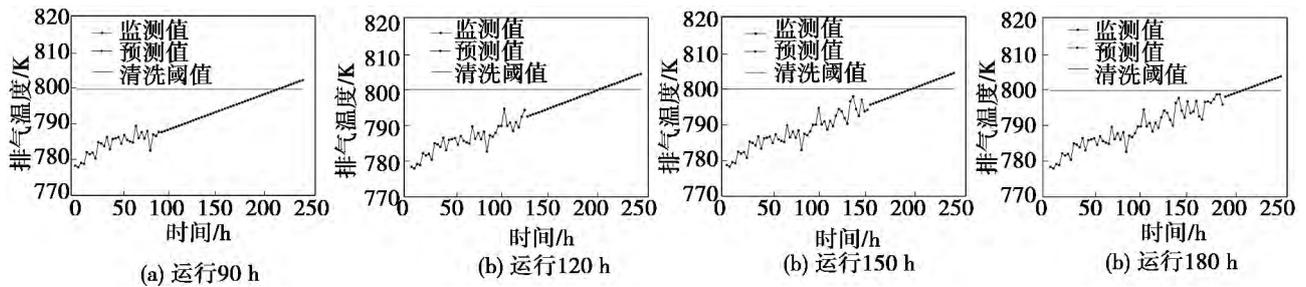


图 6 基于 ARIMA(0 ,1 ,1) 模型的新样本时间序列预测结果

Fig. 6 Prediction results of the time series of the new sample based on the ARIMA(0 ,1 ,1) model

图7 基于 ARIMA( $p d q$ ) 模型的燃气轮机排气温度趋势预测Fig.7 Predictions of the tendency of the exhaust gas temperature of the gas turbine based on the ARIMA( $p d q$ ) model

## 4 结论

(1) 选择排气温度作为监测参数,基于 ARIMA( $p d q$ ) 模型能够有效地实现压气机叶片积垢所导致的燃气轮机气路性能退化趋势预测,可为制定合理的压气机清洗维护周期提供参考。

(2) 作为一种基于数据的单参数趋势预测方法,基于时间序列模型的燃气轮机气路性能退化预测精度将严重依赖历史数据质量,如果历史数据质量较差,采用该模型得到的预测结果相对较差。

(3) 为了更准确地评估燃气轮机气路性能退化程度以及更准确的制定维护周期,提高燃气轮机机组的使用效率,有必要进一步开展基于多参数建模的趋势预测方法研究。

## 参考文献:

- [1] Li Y G. Performance-analysis-based gas turbine diagnostics: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 2002, 216(5): 363-377.
- [2] Li Y G, Nilkitsaranont P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance[J]. Applied energy 2009, 86(10): 2152-2161.
- [3] Diakunchak I S. Performance deterioration in industrial gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(2): 161-168.
- [4] Song W T, Sohn J L, Kim T S, et al. An improved analytic model to predict fouling phenomena in the axial compressor of gas turbine engines[C]. GTSJ. Proceedings of the International Gas Turbines Congress. Tokyo: Gas Turbine Society of Japan. 2003.
- [5] Tarabrin A P, Schurovsky V A, Bodrov A I, et al. An analysis of ax-

ial compressor fouling and a bladecleaning method[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 256-261.

- [6] Zaba T. Losses in Gas Turbines Due to Deposits on the Blading[J]. Brown Boveri Review 1980, 67(12): 715-722.
- [7] Baker J D. Analysis of the sensitivity of multi-stage axial compressors to fouling at various stages[D]. California: Naval postgraduate school 2002.
- [8] Zwebek A, Pilidis P. Degradation effects on combined cycle power plant performance-part I: gas turbine cycle component degradation effects[J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2003, 125(3): 651-657.
- [9] Ben Hariz H. The optimisation of the usage of gas turbine generation sets for oil and gas production using genetic algorithms[D]. Oxfordshire: Cranfield University 2010.
- [10] Hamilton J D. Time series analysis[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [11] 程茗, 白文飞. 基于 ARIMA 模型的轨道不平顺状态预测研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(5): 1041-1045.
- [12] CHENG Ming, BAI Wen-fei. Research of the prediction of the non-smooth state of a track based on the ARIMA model[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013, 37(5): 1041-1045.
- [12] Zhang G P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model[J]. Neurocomputing, 2003, 50: 159-175.
- [13] 孙跃武, 徐鹏, 曹云鹏, 等. 基于小偏差线性化法的压气机积垢特性仿真[J]. 燃气轮机技术 2014, 27(1): 38-42.
- [13] SUN Yue-wu, XU Peng, CAO Yun-peng, et al. Simulation of the fouling characteristics of a gas turbine based on the small deviation linearization method[J]. Gas Turbine Technology 2014, 27(1): 38-42.

(陈滨 编辑)

Taking the 30KW micro gas turbine of one company as the study object ,adopting the analogue simulation method , the paper discusses the feasibility of using four kinds of biogas including straw gas ,cotton wood gas ,wood chip gas and methane as the fuels of the gas turbine ,and calculates the safety operating conditions of micro gas turbine with the various biogas fired. The study results show that the straw gas and cotton wood gas with low heating value is unable to apply to the gas turbine ,because the gas fails to satisfy simultaneously the requirements of compressor surge margin and those of turbine inlet temperature. The wood chip gas and methane with high heating value can apply to the micro gas turbine. The wood-chip-fired gas turbine can operate safely with the compression ratio of 3.247 ~ 3.251 and the power of 18.13 ~ 32 kW ,and the methane-fired gas turbine can operate safely with the compression ratio of 3.203 ~ 3.207 and the power of 15.9 ~ 32 kW. In order to solve the problem of fuels with low heating value failing to apply to the gas turbine ,this paper proposes a solution on compressor improvement and verifies that the solution can increase the compressor surge margin as well as the turbine inlet temperature when the fuels with low heating value fired and make the gas turbine operate safely. **Key words:** biogas ,micro gas turbine ,surge margin , turbine inlet temperature ,compressor improvement

基于时间序列模型的燃气轮机气路性能退化预测 = **Prediction on Gas path Performance Degradation of Gas Turbine Based on Time Series Model** [刊 汉] WANG Wei-ying ,LI Shu-ying ( College of Power and Energy Engineering ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ,WANG Jian-feng ( CNOOC ( China) Co. ,Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100000) ,CUI Bao ( No.703 Research Institute of CSIC ,Harbin ,China , Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 3) . -50 -55

For the problems of compressor performance degradation and regular cleaning maintenance caused by compressor fouling in the actual operation process of gas turbine ,the paper develops a prediction approach based on time series model for gas path performance degradation of gas turbine. On the basis of gas turbine thermal modeling and simulation ,taking exhaust gas temperature of gas turbine as an example ,the paper conducts the validity evaluation on the application of time series model in the prediction on gas path performance degradation of gas turbine. The study results indicate that by using the approach ,the prediction on the changes of the gas path performance parameters of gas turbine can be transformed into the time series prediction problem. In this way ,the prediction on gas path performance degradation of gas turbine can be realized effectively ,and then cleaning maintenance as appropriate for compressor can also be implemented. The approach provides a new way to online condition monitoring and fault diagnosis for gas turbine ,so it has a certain engineering application value. **Key words:** gas turbine ,performance deg-

radation ,compressor fouling ,time series model

跨音速正弯均匀加载叶片的数值与试验研究 = **Numerical and Experimental Study on Positive-curving & Evenly-loading Blade in Transonic Condition** [刊 汉] KANG Lei ,XU Wei ,ZHANG Yan ( No. 703 Research Institute of CSIC ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) ,ZHOU Rui-jun ( Grand New Power Co. Ltd. Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 3) . -56 -62

The numerical analysis on four kinds of stator blade including evenly-loading blade ,positive-curving & evenly-loading blade ,aft-loading blade and positive-curving aft-loading blade was made under the same boundary conditions , and the air test of the annular cascade test pieces of the positive-curving & evenly-loading blade was carried out on the wind tunnel test bench with outlet Mach number of 0.97. The study results showed that positive-curving blade can control effectively the secondary flow of tip section ,realize the homogenization of the loss at the radial direction and make the Mach number contour orthogonal to the central line of the flow channel. Under the same boundary conditions ,for both the evenly-loading blade and aft-loading blade ,effective positive-curving can make the total pressure recovery coefficient increased by more than 1%. **Key words:** positive-curving blade ,aft-loading ,evenly-loading ,wind tunnel test

基于混料设计的优化配煤方案的研究 = **Research on Optimization of Coal Distribution Based on Mixture Design** [刊 汉] GUAN Hai-ying ,ZHANG Hai-ying ( Key Laboratory on Complex System Control and Intelligent Information Processing ,Xi'an University of Technology ,Xi'an ,Shanxi Province ,China ,Post Code: 710048) ,LIU Yu-ming ( Baqiao Thermal Power plant of Datang Shanxi Power Generation Co. Ltd. Xi'an ,Shanxi Province ,China ,Post Code: 710048) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 3) . -63 -69

Under the preconditions of ensuring the normal operation of coal-fired boiler unit and meeting the needs of the unit load ,in order to improve the composite indicators such as coal distribution cost ,calorific value ,sulfur content ,ash content ,volatiles and so on ,on the principle of mixture test design ,with consideration of three factors including high-calorie & low-sulfur coal ,medium-calorie & medium-sulfur coal and low-calorie & high-sulfur coal ,the extreme vertex method was adopted for coal distribution design. In combination with the enterprise coal distribution status and environmental protection requirements ,the optimal proportion of three factors was obtained by using the multi-index response optimization model which established by analyzing and processing the test data. The results in-