

矢量拟合方法在燃气轮机涡轮叶片故障监测中的应用

高山¹, 王立欣¹, 冯驰², 肖易寒²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 减少燃气轮机系统故障的发生是实现燃气轮机安全运行的前提。涡轮叶片是燃机的重要部件, 长期工作在恶劣的环境中极易出现故障。涡轮叶片发生的故障通常可通过温度表现出来。本研究对不同工况下燃气轮机涡轮叶片上的温度信号分布进行了研究, 重点分析温度信号的特征, 对数据进行相应的处理, 并且通过矢量拟合的方法, 得出叶片在不同的工作环境下的温度数据方程, 从而达到检测故障的作用, 为涡轮叶片故障的在线监测奠定了基础。

关键词: 涡轮叶片; 温度分布; 矢量拟合; 故障监测

中图分类号: TK474.7⁺1 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.007

引言

燃气轮机是继蒸汽轮机和内燃机之后的新一代动力装置。因其具有重量轻、体积小、起动快、建设周期短、运行维护方便、便于集中控制、少用或不用水、适宜燃用多种燃料及污染排放量小等优点, 在航空、舰船、发电、石油化工、天然汽输送等工业交通运输部门以及国防部门得到了普遍的应用^[1-3]。现代燃气轮机由压气机、燃烧室和涡轮3部份组成。涡轮叶片作为燃气轮机的重要组成部分, 能否正常运转是决定燃气轮机能否正常工作的重要因素。由于其长期工作在高温高压高转速条件下, 极易发生故障, 而故障时通常表现为叶片的局部温度升高。因此监测叶片温度, 准确对叶片故障进行判断就显得尤为重要^[4-6]。

运用矢量拟合的方法对涡轮叶片的温度数据、位置数据以及对应工况关系进行拟合, 得到相应的数学模型^[7-9]。通过工况得出温度数据曲线, 并通过对比发现温度异常的点以及所对应叶片, 就可以最终达到对叶片故障的预测和检测目的^[10]。

本研究通过实验测量的数据, 观察不同工况下

叶片温度分布特征, 找出变化趋势和分布规律。同时, 引入工况的特征参量, 结合数学模型, 进行二次拟合处理。进而通过一个二元方程就可以在知道工况的前提下, 得出温度分布的情况。最后, 运用其他的叶片数据验证所得模型的准确性。

1 燃气轮机涡轮叶片温度测量

燃气轮机涡轮叶片由于其工作环境的限制, 直接进行接触式温度测量难度很大, 因此通常选用的方法为非接触式的辐射测温^[11]。辐射测温不会对目标温度场产生干扰, 同时具有很多优点, 例如: 响应时间短、可测量快速变化的温度场; 测量旋转物体和高速运动物体的温度、测温范围宽、测量距离可远可近、测量目标面积可以很小, 灵敏度高、可靠性强等。

在涡轮叶片温度测量时, 高温计探头透过燃气轮机机匣, 将目标处的辐射能量传递到探测器中^[12-13], 如图1所示。

依据测量所得到的辐射能量, 通过普朗克公式, 即可得到测量目标处的温度:

$$M_{\lambda, T} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1)$$

式中, $C_1 = 3.7418 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{cm}^2$ —第一普朗克系数; $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ —第二普朗克系数; $M_{\lambda, T}$ —光谱在温度为 T 时波长 λ 的单色光的辐射出射度。

2 温度数据分析

通过对某型燃气轮机涡轮叶片温度数据的整理, 实验的数据主要分为 0.6、0.8 和 1.0 等 3 种工

收稿日期: 2014-09-19; 修订日期: 2014-12-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HEUCF140811)

作者简介: 高山(1986-), 男, 黑龙江伊春人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

况。(0.6 表示当前燃机输出功率为设计最大功率的 60%)

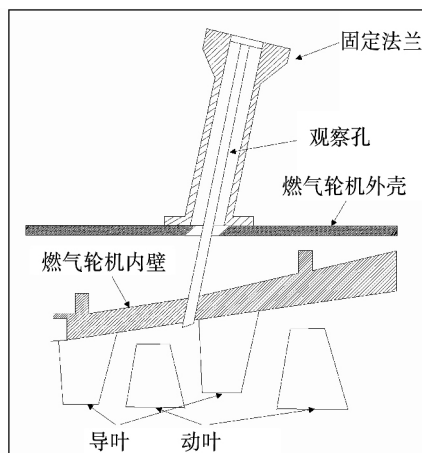


图 1 涡轮叶片温度测量时内部结构示意图

Fig. 1 Turbine blade temperature measurement structure diagram

在了解叶片 3 种工况下工作的温度数据后,需要分析在不同的工况下温度数据的分布特征。在采集得到的温度信号中,采用电压来表示温度,可以方便后面的分析。在进行叶片温度采集中,一共有 16 384 个信号采集点,其中包含多个叶片旋转周期。取其中一段温度数据的采样点,波形如图 2 所示。横坐标为温度信号采样点以采样点的顺序来表示数据在温度信号上的位置。

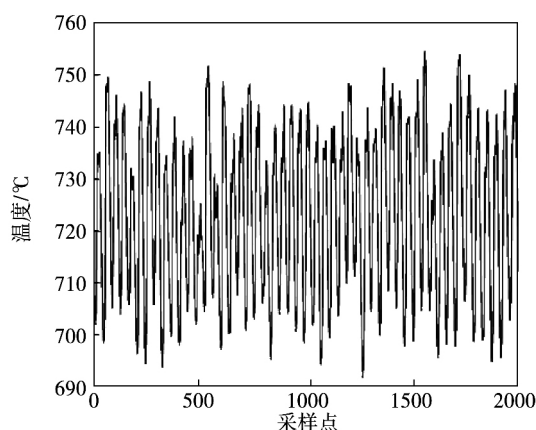


图 2 温度监测时某高压涡轮叶片温度变化曲线图

Fig. 2 A high-pressure turbine blade temperature waveform

从图 2 中可以看出对高压涡轮叶片进行温度监测时温度变化的趋势。叶片在这个连续的采样时间

所旋转的圈数与叶片旋转的速度和温度采样率有关。在总采样点中,包含很多个旋转周期,虽然旋转周期不同但是温度分布的趋势是相同的,以 0.8 工况为例 3 个周期的温度分布曲线如图 3 所示。

图 3 显示波形特征出现了重复的变化,这就说明叶片旋转了一个周期,进入了下一个周期的采样。因此,此叶片在 0.8 的工况下 3 个旋转周期采样点的长度分别为 3 286、3 287 和 3 287。同理,同一个叶片的材质不变,它的导热特性也就不发生改变,那么虽然转速工况发生变化,叶片的温度分布特征应该是相似的。在观察了不同工况下涡轮叶片的温度数据曲线后,可得出彼此特征相似的部分,其对比如图 4 所示。

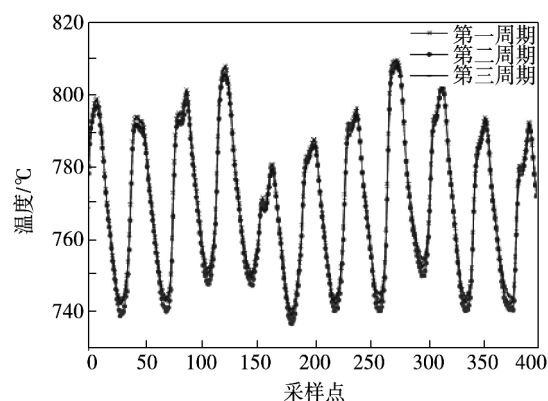


图 3 0.8 工况下 3 个旋转周期的温度曲线图

Fig. 3 Comparison of the three rotation cycles in 0.8 working condition

图 4 中的波形由下至上分别是在工况 0.4、0.6、0.8、1.0 下叶片的温度曲线,可以看出其相似的部分。叶片上温度最高部分与温度最低部分在不同工况下基本保持一致,所不同的是由于工况以及叶片温度不同,探测器的响应不同,因此叶片温度的变化幅值不同。4 种工况下所选取的采样点是在同一块叶片上,这样对下面的矢量拟合提供了前提条件。

通过对叶片的结构及其故障类型进行分析可知,当叶片的局部损伤,如叶片裂纹、涂层脱落等,叶片温度是局部变化的,叶片在某一小范围内出现温度曲线突变。当叶片气道堵塞时,叶片整体温度升高,长期在此状态下工作叶片容易出现故障。当叶片出现故障时,温度分部整体特征基本不变,个别特征发生变化,以此作为依据对叶片故障进行判断^[14-15],故障情况如图 5 所示。

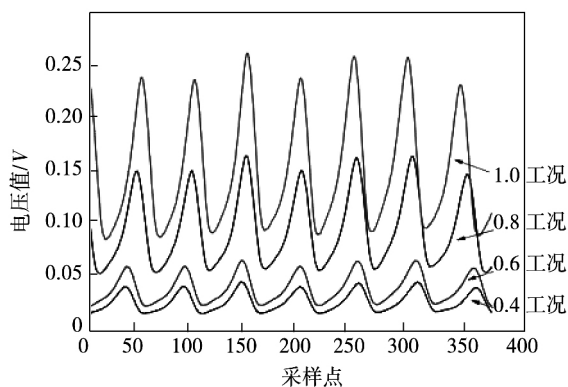


图4 4种工况下的温度波形对比图

Fig. 4 Waveform comparison of the four working conditions

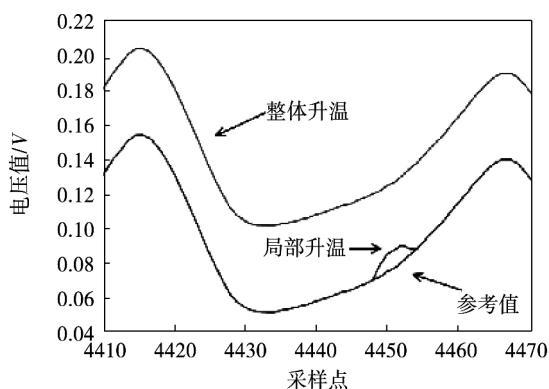


图5 故障温度分布特征

Fig. 5 The fault characteristics of temperature distribution

3 燃机叶片温度数据拟合分析

在确定温度数据的特征后, 可以开始对数据进行拟合分析, 由于测量的数据中含有噪声, 数据的起始位置也不确定。因此, 在拟合之前, 需要对数据进行必要的处理。首先对数据进行一个2阶的巴特沃兹滤波处理, 对分割后的数据进行分割, 划分出每个叶片上面的采样点数, 最后叶片温度采样数据的分割结果, 如图6所示。图中显示的数据中选择6个叶片进行编号, 不同叶片数据以虚线进行区分。

编号后, 可以选择一个叶片在不同工况下的温度分布情况, 进行适当的数据拟合分析。

以叶片2为例, 随着工况的增加对应采样点的温度也在升高, 但是温度曲线的变化趋势是相同的, 根据检测获得温度和工况的数据, 可以看出不同工况下不同采样点、不同位置的对应关系, 如图7

所示。

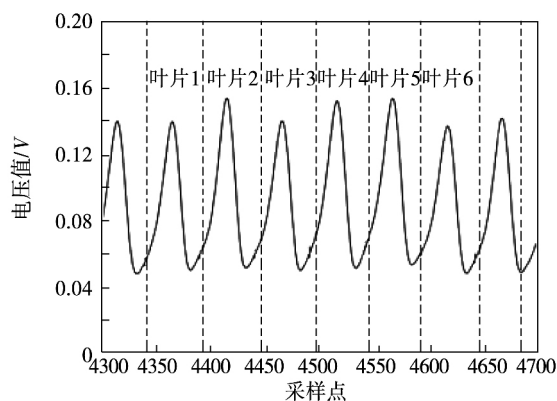


图6 0.8 工况下叶片数据分割

Fig. 6 Segmentation of 0.8 working condition blades data

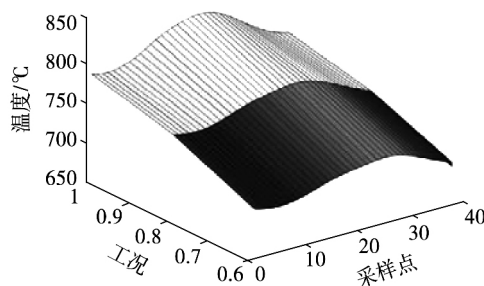


图7 不同工况下不同采样点的温度变化图

Fig. 7 Relationship of temperature - sampling location-working conditions

叶片温度随工况的升高明显升高, 在不出现故障的情况下, 温度分布是光滑的曲面, 采样点指示的是叶片上位置, 图中数据每个叶片采样点有40个左右。

4 数据拟合分析

首先, 以叶片2为例, 对温度数据进行拟合, 其中, 拟合的优化算法和迭代次数以及收敛条件等参数设置如表1所示。

通过搜索公式样本找出合适的数学公式模型, 然后进一步进行详细的拟合操作。对多组数据的拟合尝试, 最终选择的公式模型为:

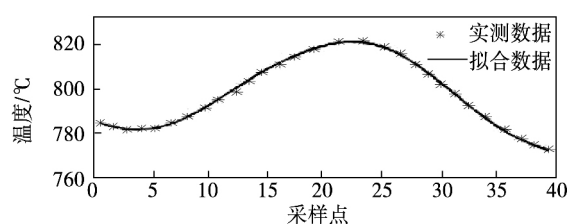
$$T = p_1 + p_2 \cdot x^{0.5} + p_3 \cdot x + p_4 \cdot x^{1.5} + p_5 \cdot x^2 + p_6 \cdot x^{2.5} + p_7 \cdot x^3 + p_8 \cdot x^{3.5} + p_9 \cdot x^4 + p_{10} \cdot x^{4.5} + p_{11} \cdot x^5 \quad (2)$$

式中: T —叶片温度; p —拟合公式系数; x —采样点位置。这样在 1.0 工况下,对序号 2 叶片温度采样数据进行拟合,如图 8 所示。

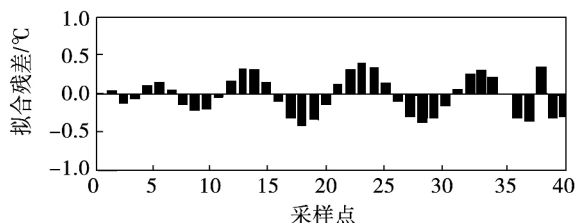
表 1 拟合算法中参数设置

Tab. 1 The parameter settings for fitting algorithm

优化算法	LM
收敛判断指标	100E-10
最大迭代数	2 000
实时输出控制数	20
模式	LM + 通用全局优化法
重复数	30
控制迭代数	20
收敛判断迭代数	15



(a) 拟合后的曲线



(b) 拟合结果残差图

图 8 2 号叶片温度数据拟合结果

Fig. 8 Fitting result for No. 2 blade temperature data

图 8(a) 为拟合数据与实测数据对比图 8(b) 为实测数据与拟合数据对应温度点残差图,从图中可知最大残差不超过 0.5 °C。

为了验证拟合的准确性,还需要知道拟合所得的数值与实际的差距,以及其他的一些参数来判断是否达到收敛判断标准。具体的数值如表 2 所示。

表 2 拟合收敛

Tab. 2 Criteria for fitting convergence

参 数	数 值
均方差	0.000 128 5
残差平方和	9.086 617 6
相关系数	0.999 906 5
相关系数之平方	0.999 813 0

从表中可以看出该公式的拟合结果满足收敛标准。为了证明公式的准确性,同样对其他工况下的温度数据进行拟合操作,所得到的结果如表 3 所示。

表 3 其它 3 种工况拟合收敛标准

Tab. 3 Three working conditions fitting convergence criteria

工况	均方差	残差平方和	相关系数	相关数之平方
0.6	0.000 19	1.934 59	0.999 89	0.999 79
0.8	0.000 34	5.907 74	0.999 95	0.999 90
1.0	0.000 65	2.095 11	0.999 92	0.999 85

这样就可以将上面的多项式(2)作为序号 2 叶片在正常工作时的温度分布数学模型。将同样的数学模型应用于 0.6 和 0.8 工况,可以得到相同的效果,但彼此的方程系数不同。

在确定了数学模型后,可以将该温度模型应用于每个叶片在任意工况下不同的周期中,可以发现虽然方程形式相同,但是同种工况下一组数据的不同周期方程的系数都互不相同,但是变化趋势(也就是参数的正负形式)是一样的,因此可以将每个周期所求得系数相加取平均的方式来求出最终能代表该叶片在该工况下的温度变化的数学模型。上文对于 1.0 工况下的拟合系数平均值如表 4 所示。

表 4 1.0 工况下拟合系数平均值

Tab. 4 The average coefficient values in 1.0 working conditions

参 数	平均值
p_1	420.845 098 726 842 6
p_2	1 596.056 363 952 000 8
p_3	-2 996.292 798 147 222 8
p_4	3 164.997 056 130 756
p_5	-2 088.042 535 333 223 8
p_6	899.838 687 409 063
p_7	-257.061 621 532 105 4
p_8	48.245 612 466 246 56
p_9	-5.714 997 535 196 704
p_{10}	0.387 057 583 204 826 2
p_{11}	-0.011 409 742 489 953 38

表 5 系数 p_1 与工况对应关系

Tab. 5 Relationship between coefficient

 p_1 and the working conditions

工 况	参 数 p_1
0.6	-560.877 759
0.8	-282.511 135
1.0	420.845 098

在这里建立的关系是采样点与温度变化的关系, 为了将工况与温度联系在一起, 可以在拟合得出的温度数学模型的参数上面做进一步分析, 以系数 p_1 为例, 如表 5 所示。

通过曲线拟合再建立工况与系数 p_1 之间的数学模型:

$$p_1(k) = a_1 + a_2 \cdot k^{1.5} + \frac{a_3}{k} + \frac{a_4}{k^2} \quad (3)$$

式中: k —工况, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 —公式拟合系数, 函数的曲线, 如图 9 所示:

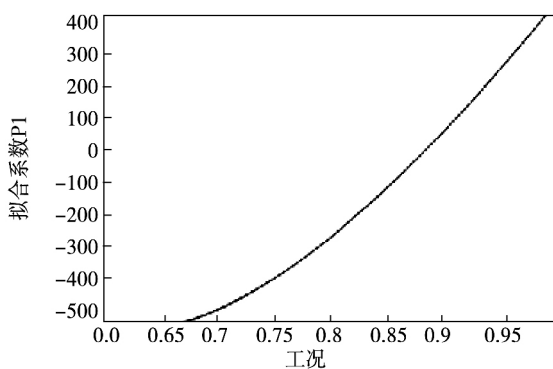


图9 系数与工况的对应关系

Fig. 9 Relations of coefficient and working conditions

在已知工况的条件下就可以推导出系数 p_1 ; 运用相同的方法可以推导出 $p_2 - p_{11}$ 与工况的关系, 那么就可以得出在一种工况下每个叶片的温度分布模型。那么就可以建立方程:

$$t(k, x) = \sum_{i=1}^{11} p_i \cdot g(x_j) \quad (4)$$

式中: $t(k, x)$ —叶片关于工况 k 和采样点 x 的温度的对应关系。

这样就建立起了工况与温度分布的数学关系, 如果给出了工况的大小就能确定温度分布的方程的系数从而得出涡轮叶片温度的分布形式。图 10 为拟合曲线与 4 组原始数据的对比。从图中可以看出, 拟合曲线在趋势上与原始数据相同, 在局部最大值和最小值位置上略有差异, 可通过图 11 中的残差图详细描述差异值。

图 11 通过比较拟合公式与原始数据残差值的大小进一步判断拟合公式的效果。图中误差值较大的采样点位置在采样点 20 点附近, 其中第 2 组数据与第 4 组数据拟合效果较好, 误差小于 1°C 。4 组叶片温度数据存在差异, 主要由于叶片制造时本身存在差异性, 并非故障叶片。

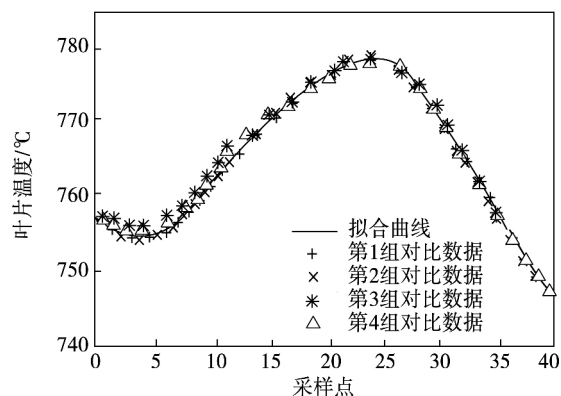


图 10 拟合公式与原始温度数据的对比

Fig. 10 Comparison between for fitting curve and four groups of original data

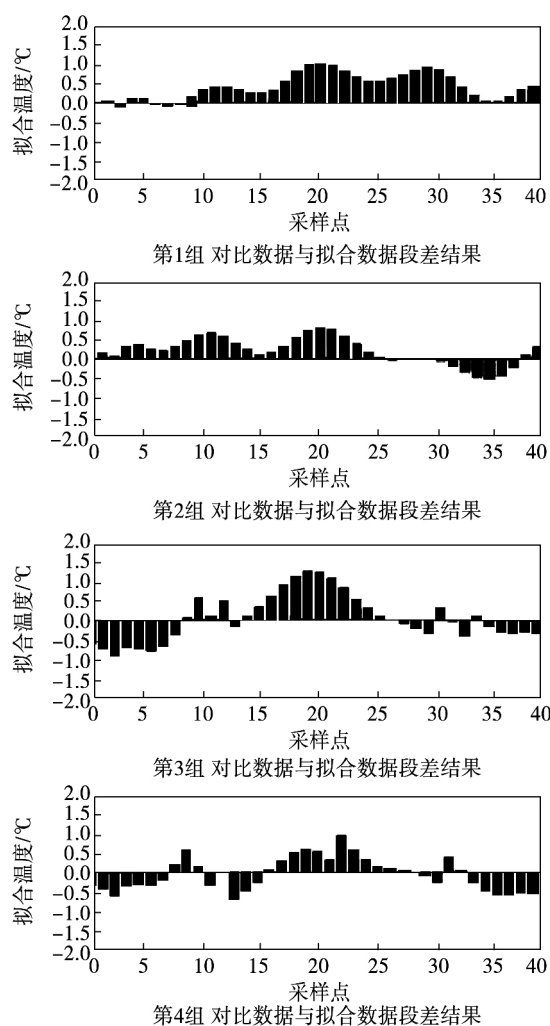


图 11 拟合数据与 4 组对比数据残差图

Fig. 11 Residual plot of fitting data and reference data

计算 0.9 工况时拟合值与真实值的差距, 首先

根据 0.6、0.8、1.0 工况的拟合数据,计算 0.9 工况时方程系数,代入式(4)中得出 0.9 工况下的工况-温度方程。计算结果如图 12 所示。

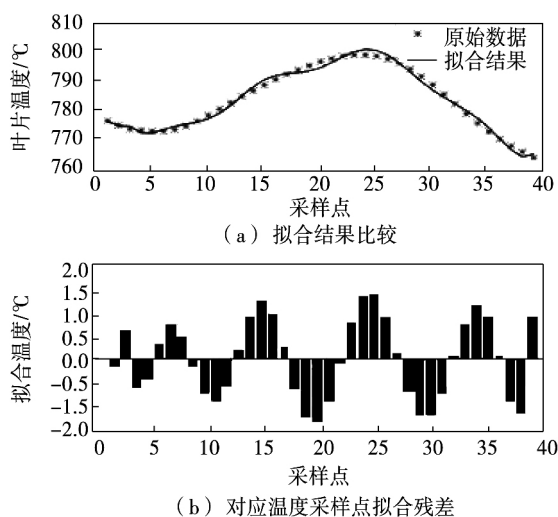


图 12 0.9 工况下拟合结果验证

Fig. 12 fitting results for 0.9 working condition

将叶片温度分布形式作为检测叶片是否正常工作的依据,首先根据工况推导出温度分布模型。如果叶片的某个部位出现故障,那么出现故障的部分的温度一定会偏离正常值,那么可以将故障数据与正常情况下所得到的温度分布公式进行对比,偏离分布曲线的部分就可以认为是故障数据,也就是出现故障的采样点,这样就起到了故障监测的作用。

5 结 论

本研究分析了燃气轮机在正常工作状态下温度采样数据的特征,对比了多种不同工况下数据的共同点,总结了涡轮叶片工作时温度分布的特点,通过数据拟合的方法,计算出叶片温度分布与采样点的方程;在多组数据的实验下,确定一种比较准确的数学模型,进一步可以得出工况-系数的关系,再根据工况导出温度分布模型。在下一步的故障检测中,将其作为一个判断依据,将温度曲线中偏离所求模型的采样点视为发生故障的部分,从而对叶片的温度数据起到检测的作用。

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, 37(3): 1-7.

- LI Xiao-tang. Gas turbine development and China's dilemma[J]. Aircraft engine 2011, 37(3): 1-7.
- [2] 于欣. 燃气轮机故障诊断技术研究综述与展望[J]. 中国新技术新产品 2013(6): 157-157.
- YU Xin. Gas turbine fault diagnosis Review and Prospect[J]. Chinese New Technology and New Products 2013(6): 157-157.
- [3] 谢志武, 王永泓. 状态监测与诊断用燃气轮机热力模型的构造方法[J]. 热能动力工程 2000, 15(4): 410-412.
- XIE Zhi-we, WANG Yong-hong. Condition monitoring and diagnostic thermodynamic noturbine construction method[J]. Thermal Energy and Power Engineering 2000, 15(4): 410-412.
- [4] 张鹏, 王永泓. 新型燃气轮机热参数故障诊断数学模型的研究和应用[J]. 燃气轮机技术 2004, 17(1): 51-54.
- ZHANG Peng, WANG Yonghong. Research and application of a new gas turbine thermal parameters fault diagnosis mathematical model[J]. Gas Turbine Technology 2004, 17(1): 51-54.
- [5] Boyce M P. Gas turbine engineering handbook[M]. Access Online via Elsevier 2012.
- [6] Khajavi M R, Shariat M H. Failure of first stage gas turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis 2004, 11(4): 589-597.
- [7] Asok Kumar N, Kale S R. Numerical simulation of steady state heat transfer in a ceramic-coated gas turbine blade[J]. International journal of heat and mass transfer 2002, 45(24): 4831-4845.
- [8] Gustavsen B, Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1999, 14(3): 1052-1061.
- [9] Lefteriu S, Antoulas A C. On the convergence of the vector-fitting algorithm[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques 2013, 61(4): 1435-1443.
- [10] Deschrijver D, Knockaert L, Dhaene T. Improving robustness of vector fitting to outliers in data[J]. Electronics letters 2010, 46(17): 1200-1201.
- [11] Curwen K. R. Turbine blade radiation pyrometer system[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 44, 12(1972): 16-21.
- [12] Ugucini Orlando W, Frank G. Pollack. High-resolution surface temperature measurements on rotating turbine blades with an infrared pyrometer[R]. NASA STI/Recon Technical Report N 76(1976): 23542.
- [13] Kerr Clive, Paul Ivey. An overview of the measurement errors associated with gas turbine aeroengine pyrometer systems[J]. Measurement science and technology 13, 6(2002): 873.
- [14] Douglas J., C. A. Smith, S. J. R. Taylor. An integrated approach to the application of high bandwidth optical pyrometry to turbine blade surface temperature mapping[J]. Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 1999. ICIASF 99, 18th International Congress on. IEEE, 1999.
- [15] Eggert, Torsten, Bjoern Schenk, Helmut Pucher. Development and evaluation of a high-resolution turbine pyrometer system[J]. Journal of turbomachinery 124, 3(2002): 439-444.

(刘瑶 编辑)

矢量拟合方法在燃气轮机涡轮叶片故障监测中的应用 = **Applications of the Vector Fitting Method in Monitoring Blade Faults of Gas Turbines** [刊, 汉] GAO Shan, WANG Li-xin (College of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), FENG Chi, XIAO Yi-han (College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(6). - 853 - 858

To reduce the occurrence of any faults in gas turbine systems is regarded as the precondition for realizing safe operation of gas turbines. Turbine blades are important parts and components in gas turbines and also one of parts operating in a stern environment. Any faults of the turbine blades usually reflect in changes of temperature. The distribution of temperature signals on the blades of a gas turbine was studied with an emphasis being placed on the characteristics of the temperature signals and the data being properly processed. By adopting the vector fitting method, a temperature data equation for blades in various operating environments was obtained, thus achieving an objective to detect any faults and offering a basis for an on-line detection of any faults in blades of gas turbines. **Key words:** turbine blade, temperature distribution, vector fitting, application in monitoring of faults

喷嘴雾化特性函数模型的建立及燃烧模拟中的应用 = **Establishment of a Function Model for Atomization Characteristics of a Nozzle and Its Applications in Combustion Simulation** [刊, 汉] CHEN Xiao-ling, GE Bing, ZANG Shu-sheng (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(6). - 859 - 864

By using a phase Doppler anemometer (PDA), experimentally studied were the atomization characteristics of a pressurized atomization nozzle under the typical operating conditions. The Gauss distribution function was employed to represent the radial distribution of the atomization parameters and the exponential attenuation function was used to represent the axial distribution of the extremum values of atomization parameters. On this basis, an atomization characteristic model for the nozzle was established and the relative error between the results obtained by using the model in question and the test data was not in excess of 10%. The atomization function model in question was applied in a dual swirling combustor in a same direction to perform a discrete phase setting of the data of the fuel oil atomization characteristics simulated and on this basis, the flame distribution characteristics inside the combustor were analyzed. Therefore, the feasibility of an application of the self-defined atomization characteristic model in combustion simula-