

退化涡轮叶片形变对气动参数偏离的影响研究

何庆富,夏硕成,迟重然,臧述升

(上海交通大学机械与动力工程学院动力机械及工程教育部重点实验室,上海200240)

摘要: 涡轮叶片服役过程中的形状变化会造成涡轮气动参数的偏离,研究造成涡轮性能退化的主要形变因素是实现涡轮精准维护的重要环节。本文分析了真实涡轮叶片在长时间服役后的具体形变特征及形变特征与气动参数偏离值的关系;通过光学扫描获得了退化涡轮全周叶片的形状数据,重构得到叶片特征几何参数;以几何参数为基础生成退化的涡轮流道,通过CFD仿真得到了燃气轮机在退化前后的详细气动参数;采用神经网络模型建立涡轮几何数据与气动数据之间的映射关系,并分析了模型中影响气动参数偏离的主要几何参数。结果表明:磨损烧蚀导致弦长变短是第一级涡轮静叶气动参数变化的主要诱因,而第一级动叶的气动参数则主要受喉道宽度的影响。

关键词: 燃气轮机;涡轮;叶片形变;气动参数

中图分类号:TK14 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.010

[引用本文格式]何庆富,夏硕成,迟重然,等.退化涡轮叶片形变对气动参数偏离的影响研究[J].热能动力工程,2021,36(9):79-85. HE Qing-fu, XIA Shuo-cheng, CHI Zhong-ran, et al. Research on the influence of the deformation of degradation turbine blades on the deviation of aerodynamic parameters [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 79-85.

Research on the Influence of the Deformation of Degradation Turbine Blades on the Deviation of Aerodynamic Parameters

HE Qing-fu, XIA Shuo-cheng, CHI Zhong-ran, ZANG Shu-sheng

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of the Education Ministry of China, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: The in-service deformation of the turbine blade will cause the deviation of the turbine aerodynamic parameters. Exploring the main deformation factors that cause turbine performance degradation is an important part of accurate turbine maintenance. The specific deformation characteristics of real turbine blades after long-term service and the relationship between the turbine blade deformation characteristics and the deviation of aerodynamic parameters are analyzed. The geometric data of the circumferential blades of degraded gas turbine are obtained through optical scanning, and the characteristic geometric parameters of the blades are reconstructed. The degraded turbine flow passage is generated based on the geometric parameters, and the detailed aerodynamic parameters of the gas turbine before and after degradation are obtained through CFD simulations. The mapping relation between turbine geometric data and aerodynamic data is established by neural network model, and the main geometric parameters that affect the deviation of aerodynamic parameters in the model are analyzed. The results show that the shortening of chord length caused by wear and thermal erosion is the main cause of the aerodynamic parameters variation of the first-stage turbine stator vane, while the aerodynamic parameters of the first-stage turbine rotor blade are mainly affected by the width of the throat.

Key words: gas turbine, turbine, blade deformation, aerodynamic parameters

引言

燃气轮机涡轮叶片需要在高温、高应力、高转速的恶劣环境下长期运行,在这种极端工作环境下,燃气轮机的退化随着运行时长的增加将变得越发显著。燃气轮机的退化可以分为两个方面:材料的退化和性能的退化。目前有许多机理来评估材料的退化,例如蠕变、疲劳、氧化和腐蚀等,在此基础上能够对燃气轮机部件的寿命进行预测。在现代燃气轮机的设计中,部件寿命的预测评估已经成为必不可少的一部分^[1]。关于燃气轮机性能退化的研究起步相对要晚一些,并且大部分的工作着眼于整体或者部件层面。文献[2-3]针对燃气轮机的整体或部件提出了不同的模型以评估整体或部件性能的退化。Kurz等人^[4]介绍了燃气轮机退化的机理,并且分析了部件之间的相互作用。

近些年来,针对燃气轮机性能退化的研究逐渐深入到了零件层面,包括了涡轮叶片的几何形状及粗糙度变化等对燃气轮机性能的影响。文献[5]介绍了成熟的阿尔斯通GT13DM涡轮性能恢复评估方法,分析了叶片长度缩短、弦长缩短、尾缘厚度和形状的变化以及叶片安装角的变化对燃气轮机性能的影响。Granovskiy等人^[6]还发现在跨音速工况下高压涡轮叶片尾缘形状和出口气流角的变化对型面损失的影响是显著的。

由于燃气轮机叶片的形变具有很大的不确定性,这导致物理层面建模困难,而基于数据驱动的预测模型则在实时性和复杂度方面都具有优势。综上所述,尽管燃气轮机涡轮零件层面的退化关系到燃气轮机性能的退化,但此问题的复杂性和不确定性使得研究的进展缓慢。随着大数据等新兴技术的发展,数据驱动模型给出了研究涡轮零件层面退化的新方向。

本文研究了实际退化涡轮叶片的形变数据对气动参数偏离的影响。首先,根据光学扫描的结果对退化的WJ6G1型2 MW级航改燃气轮机的3级涡轮叶片进行了几何重构,计算得到了每只叶片在展向截面上的几何参数,将重构结果与该型燃气轮机涡轮叶片的设计值进行对比,得到涡轮叶片的退化特征。其次,以每排叶片几何重构参数的平均值为

基准生成了退化的涡轮流道,通过CFD仿真得到了燃气轮机在退化前后多个工况下流道内的详细气动参数。采用神经网络模型建立了涡轮几何数据与气动数据之间的映射关系,并在此基础上对模型进行了敏感性分析,得到了影响气动参数的主要几何特征。

1 叶片形变特征分析

1.1 研究对象

对某型2 MW级航改燃气轮机退化的涡轮动静叶全周进行蓝光扫描,得到以离散点和三角面形式表示的退化涡轮的详细几何参数。三维扫描的不确定度在20~40 μm内,对6排叶片组件分6次扫描,一共采集到了1 900万个离散点以及3 300万个三角面,图1为涡轮第1级静叶的三维扫描结果。从6排叶片扫描结果中提取得到了涡轮全周型线,如图2所示。

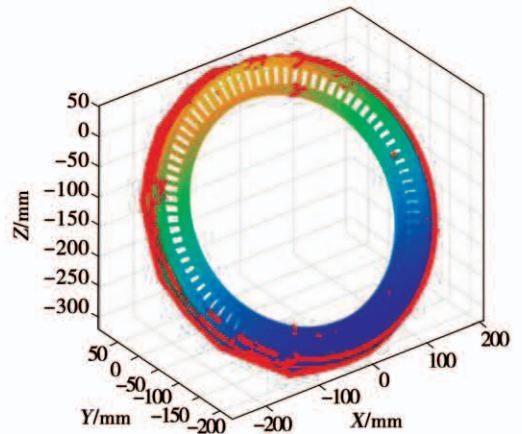


图1 涡轮第1级静叶的三维扫描结果

Fig. 1 Optical scanning result of the 1st stage stator vane

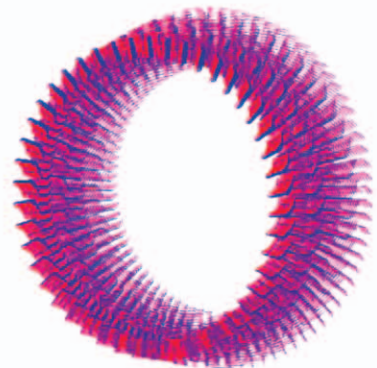


图2 涡轮动静叶型线

Fig. 2 Extracted profiles of rotor blade and stator vane

进一步的将各排叶片做周向平均处理,通过迟重然等人^[7-8]开发的叶片参数化方法,从叶片的型线上得到了不同展向位置上叶片的进口几何角、出口几何角、安装角、弦长、前缘直径、尾缘直径、最大厚度和喉道宽度等几何特征参数。

1.2 涡轮叶片几何变形特征

6排叶片弦长的扫描结果和设计值在不同展向

位置的对比如图3所示。从蓝色的虚线可以发现,不同叶片的形变有明显区别,但是从退化的涡轮叶片扫描得到的平均弦长都呈现出了缩小的变化趋势。其他叶片几何参数的变化特点与弦长数据类似,为简化计算,主要从叶片几何变化的平均量进行分析。

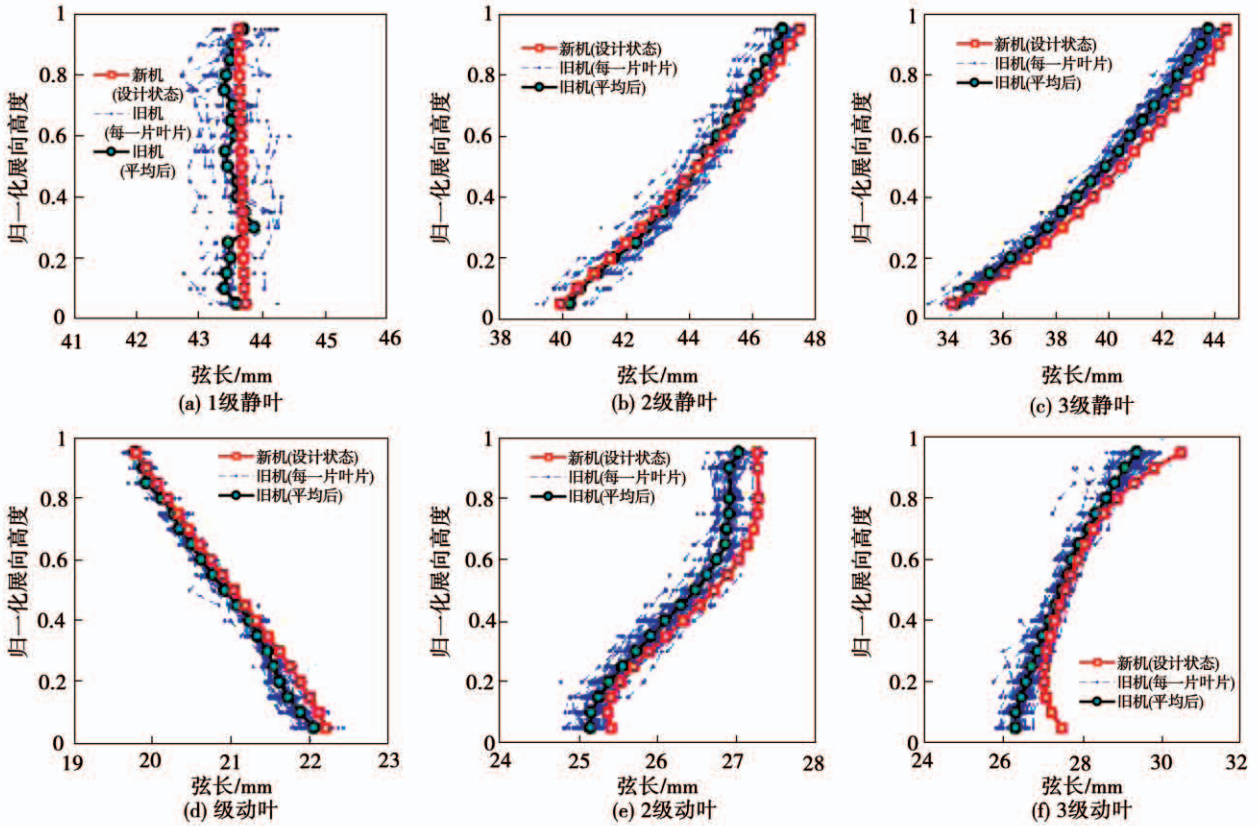


图3 新旧涡轮动静叶片弦长对比

Fig. 3 Comparison of blade chord lengths between the new and degraded turbines

图4为第1级涡轮静叶平均几何退化参数以及与设计值在展向上的对比。可以看出,退化叶片的进口几何角从叶根到叶顶都出现了增大,而出口几何角则呈现减小的趋势。尽管重构得到的退化叶片的安装角在不同的波动展向高度较大,但与设计值的偏离程度是微小的。叶片的弦长出现了一定程度的缩短,对于某些弦长超出设计值的点,可能是由于扫描和重构过程中的误差造成的。叶片的前缘直径和尾缘直径都出现了减小,其中尾缘直径的变化幅度更大,达到了10%左右。与此同时,在靠近叶顶

的位置尾缘直径的减小程度较小。退化叶片的喉道宽度出现了相对均匀的增加,而最大厚度在除叶根与叶顶的位置外都出现了下降,这说明在叶片退化的过程中叶片表面由于冲蚀等因素而变薄,导致流道面积增大。值得注意的是,在叶根与叶顶处退化叶片的最大厚度出现了增加,这可能是由于污垢在叶根与叶顶处的堆积造成的。

重构得到的叶片形变参数在展向上的分布波动较大,这是由于退化涡轮内叶片的形状并不规则,一些复杂的形变难以通过扫描和重构的方式进行高精

度的复原,但是重构得到的几何参数仍然能够反映大部分的变形特征。

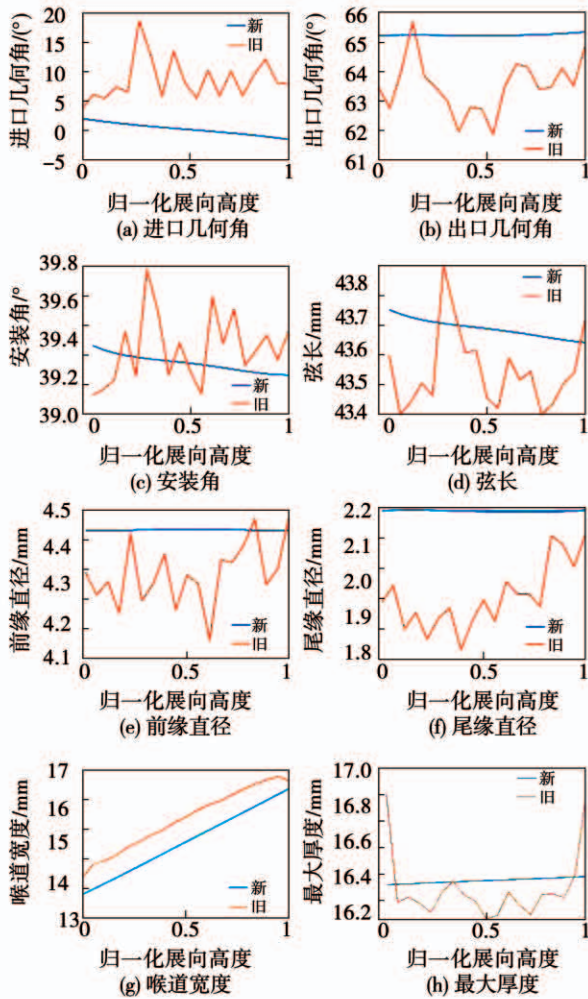


图 4 第 1 级静叶几何退化参数

Fig. 4 Geometric degradation parameters of 1st stage stator vane

第 1 级动叶与第 1 级静叶的形变特征相比有很大的不同,图 5 为第 1 级涡轮动叶平均几何退化参数以及与设计值在展向上的对比。动叶的进口几何角在退化后出现了减小,而出口几何角出现了不同程度地增大。安装角几乎没有发生变化,弦长则出现了比较轻微地减小,在中径处退化叶片的前缘直径和尾缘直径与设计值几乎相同。从中径至叶根处,叶片的前缘直径小于设计值,而尾缘直径大于设计值。从中径至叶顶处,叶片的前缘直径出现了大于设计值的现象,而尾缘直径则明显小于设计值。这很可能是由于动叶不同叶高处所受的载荷差异造

成的,尤其是在离心载荷的长期作用下导致在展向出现了接近于线性变化的尾缘直径的偏离。而与第 1 级静叶类似,第 1 级动叶在退化之后喉道宽度出现了增加,但最大厚度除了在尾缘处出现了减小之外几乎与设计值相同。

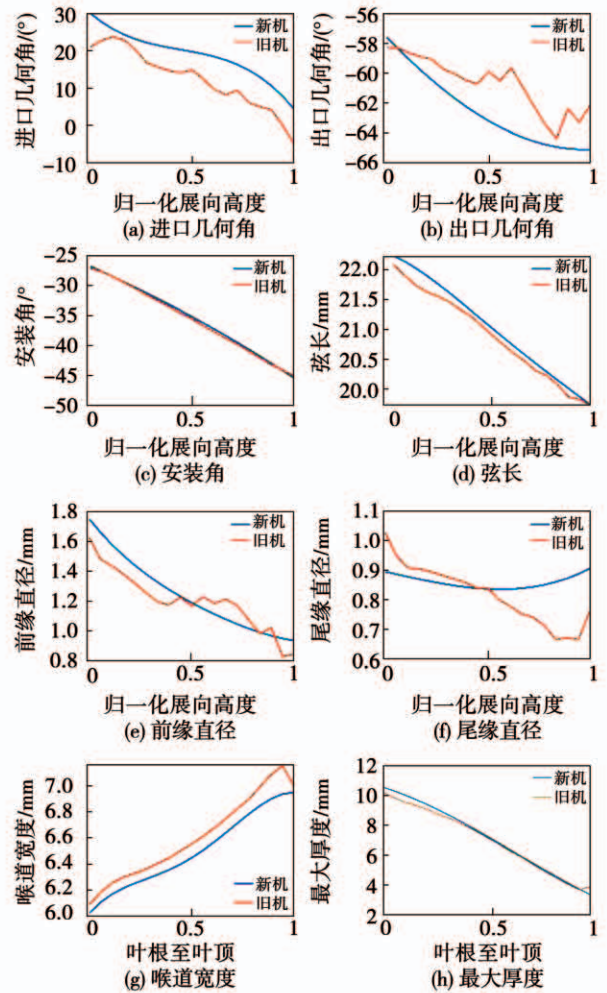


图 5 第 1 级动叶几何退化参数

Fig. 5 Geometric degradation parameters of 1st stage rotor blade

退化涡轮的 6 排叶片与设计值的对比如表 1 所示,表格中的“↑”和“↓”分别表示与设计值相比出现了增大和减小,“↑↓”表示增大和减小在不同展向位置同时出现,而“-”表示基本与设计值相同。

不同级叶片的几何参数退化呈现出明显差异性,其中变化比较一致的参数有弦长、尾缘直径和最大厚度。所有叶片的弦长和尾缘直径都出现了一定程度的减小,这主要是由叶片尾缘处的损伤和退化

造成的。而最大厚度的减小是由于叶片长期在高温燃气中工作,受到燃气的冲刷和腐蚀作用使得叶片变薄,导致最大厚度减小。叶片的前缘直径总体而言是在减小的,但是在部分级的部分展向位置上仍然出现了前缘直径增加的现象。

表1 叶片退化几何参数与设计值对比

Tab. 1 Comparison of geometric parameters and design values of blade degradation

参数	静叶			动叶		
	第1级	第2级	第3级	第1级	第2级	第3级
进口几何角	↑	↑↓	↓	↓	↓	↑
出口几何角	↓	↑↓	↑↓	↓	↑↓	↑↓
安装角	↑↓	↓	↑↓	-	-	-
弦长	↑↓	↑↓	↓	↓	↓	↓
前缘直径	↓	↑↓	↑↓	↑↓	↓	↓
尾缘直径	↓	↓	↓	↑↓	↓	↓
喉道宽度	↑	↓	↓	↑	-	↓
最大厚度	↑↓	↓	↓	↓	↓	↓

第1级静叶和动叶的喉道宽度均出现增大,而除了第2级动叶的喉道宽度未明显变化外,第2级静叶和第3级动静叶的喉道宽度均出现了减小。这一特征出现的原因很可能与不同级叶片的工作状态有关。在高压级,燃气的温度压力更高,喉道处的叶片型面在高载荷下被冲蚀,变得更宽。而在第2级和第3级中叶片的载荷减小,气流中的污垢开始在叶片表面沉积,造成喉道宽度减小。动叶的安装角几乎没有发生变化,而静叶的安装角出现了不确定的变化。

2 叶片形变对气动参数偏离的影响

2.1 气动参数的数值计算

每排叶栅中叶片的几何退化都不尽相同,但是根据型线生成涡轮的全周计算网格对计算资源的消耗很大,因此将每排叶片的型线在相同展向位置处进行了平均处理,并根据文献[7-8]中的网格生成算法得到了退化涡轮的单通道计算网格。设计状态下涡轮的计算网格也是由相同的方法生成的,如图6所示。



图6 全新涡轮结构化网格

Fig. 6 Structured grid of the new turbine

计算设置和边界条件如表2所示。边界条件类型包括入口总温总压、出口静压以及转速,工质为由氧气、氮气、二氧化碳和水蒸气组成的混合燃气。数值方法为雷诺时均法 RANS;湍流模型为 RNG k-Epsilon,其中各组分的质量分数均设置为燃气轮机在额定工况试验测得的数据。通过调整入口总压和入口总温的范围,分别给定5个入口总压的值和5个入口总温的值,共覆盖了25个工况。新旧涡轮模型分别在25个工况下进行了模拟仿真,经过处理后得到了新旧涡轮在不同工况下的详细气动数据。

表2 仿真设置与边界条件

Tab. 2 Simulation settings and boundary conditions

边界条件	数值
入口总压/kPa	$(5.0 \sim 8.7) \times 101$
入口总温/K	762.74 ~ 1139.4
出口静压/kPa	101
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	12 150

2.2 几何参数与气动参数映射关系的建立

基于扫描重构获得的叶片几何数据和 CFD 获得的气动数据,采用神经网络建立了叶片几何数据与流道内的气动数据之间的映射关系,在建模过程遵循以下假设:

(1) 某展向位置的气动参数仅受同展向位置几何参数和气动参数的影响。

(2) 叶栅出口的气动参数仅受叶栅入口气动参数和叶栅内几何参数的影响。

此外,由于不同排叶片之间的形状变化特征并不相同,需要针对每排叶片分别进行建模。模型的输入参数包括8个几何参数:进口几何角、出口几何角、安装角、弦长、前缘直径、尾缘直径、最大厚度、喉

道宽度。额外添加了8个常用的流动参数:马赫数、压力、温度、总压、总温、轴向速度、周向速度和气流角。目标参数分别选取了以上8个流动参数,因此每排叶片对应8个神经网络模型,每个模型输入参数的个数为16,输出参数的个数为1。

每片叶片包含19个展向位置的几何数据,气动参数分布的计算域分别为退化的涡轮与全新的涡轮,每个计算域各覆盖25个工况,因此每排叶片共有950组训练数据。选择单隐含层的神经网络为模型,隐含层神经元的个数根据经验公式确定为16个。取70%数据为训练集,15%数据为测试集,15%数据为验证集。

神经网络对第1级静叶出口总压和轴向速度的预测结果如图7所示。从预测值和原始数据之间的对应关系来看,预测模型具有很高的精度。

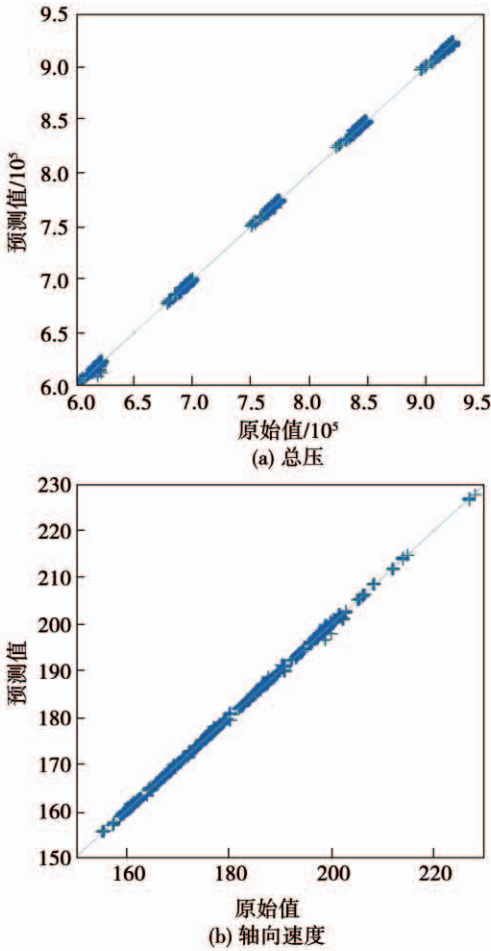


图7 神经网络预测结果

Fig. 7 Neural network prediction results

2.3 模型敏感性分析

在建立几何参数与气动参数之间的神经网络模

型后,仍需要确定在模型中各个气动参数主要受到哪些几何参数的影响,即需要确定模型输入参数的敏感性。在输入变量施加的扰动很小的情况下,可以将几何参数与气动参数之间的关联模型近似为一个超线性方程:

$$\Delta G\xi = \delta a \tag{1}$$

式中: ΔG —各个几何参数相比设计状态的改变量; δa —气动参数相较于设计状态的改变值; ξ —几何参数影响气动参数的敏感性向量,可以通过最小二乘法获得:

$$\xi = (\Delta G^T \Delta G)^{-1} \Delta G^T \delta a \tag{2}$$

以第1级动静叶模型为例,以设计状态参数为基准生成100 000组几何参数数据,在每个几何参数上施加 $\pm 5\%$ 幅度内的随机扰动。通过神经网络模型计算出100 000组气动参数,最后利用最小二乘法计算输入参数的权重向量,从而表征气动参数对几何参数的敏感性。敏感性热力图如图8所示,部分参数因敏感性过低而没有展示。

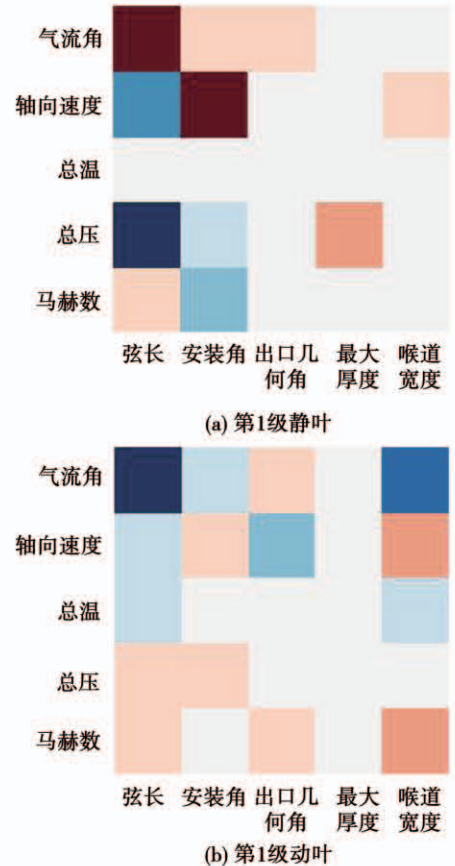


图8 模型敏感性热力图

Fig. 8 Model sensitivity thermodynamic diagram

图中,颜色的深浅表示敏感性的强弱,颜色越浅

敏感性越弱,红色和蓝色分别表示输入扰动对目标变量造成正向影响和反向影响。

弦长的缩短对第1级动静叶气动参数的影响最显著,安装角对第1级静叶具有比较大的影响,第1级动叶的气动参数则受到喉道宽度的影响,其余几何参数的影响均不是非常明显。弦长的缩短是叶片形变参数中的主要因素,并且很多几何参数都与弦长的缩短有关,选择此参数作为影响气动参数的主因合理。动静叶的气流角受到弦长变化的作用相反,这是由于动静叶的气流角的方向相反,气流角在数值上受影响的变化一致。

3 结 论

(1) 退化涡轮叶片的形变是不均匀的,但整体呈现出偏离设计值的特征。部分涡轮叶片几何退化参数呈现出很强的规律性,例如所有叶片普遍出现了弦长变短、尾缘直径减小等特征;部分叶片几何退化参数仍然呈现不确定性,例如前缘直径和进出口几何角的变化。

(2) 采用神经网络模型能够建立叶片形状变化数据与气动数据之间的映射关系,并且神经网络模型对气动参数的预测具有很高的精度。

(3) 在第1级涡轮静叶的模型中,磨损烧蚀导致弦长变短是气动参数变化的主要诱因,第1级静叶的气动参数受安装角的影响也比较显著,第1级动叶的气动参数则受喉道宽度的影响,其他几何参数的影响相对较弱。

参考文献:

- [1] URRY S A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention JA Collins John Wiley, Baffins Lane, Chichester, W. Sussex PO19 1UD. 1993. 654pp. Illustrated. £ 62 [J]. The Aeronautical Journal, 1994, 98 (975): 194 - 194.
- [2] XIA S, CHI Z, ZANG S, et al. Improving gas turbine performance through reassembling degraded components: an experimental and computational study [C] // Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84072; V02BT34A006.
- [3] LEE J H, KIM T S. Novel performance diagnostic logic for industrial gas turbines in consideration of over [firing] [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32 (12): 5947 - 5959.
- [4] KURZ R, BRUN K, WOLLIE M. Degradation effects on industrial gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131 (6): 062401.
- [5] GRANOVSKIY A, MANAEV I, VASSILIEV V, et al. Effects of blade degradation on turbine performance [C] // ASME 2013 Turbine Blade Tip Symposium. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.
- [6] GRANOVSKIY A, KOSTEGE M, VASSILIEV V. Effect of unguided turning angle and trailing edge shape on cooled blade loss [C] // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.
- [7] CHI Z, WANG S, REN J, et al. Multi [dimensional platform for cooling design of air [cooled turbine blades [C] // Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 44700: 207 - 218.
- [8] 迟重然. 气冷涡轮叶片的传热设计 [D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
CHI Zhong [ran. Heat transferring design for air [cooled turbine blades [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.

(姜雪梅 编辑)