

一种基于图像的燃气轮机叶型参数测量方法

崔则阳^{1,2,3,4}, 孔祥玲^{2*}, 付经伦^{1,2,3,4}, 施佳君²

(1. 中国科学院工程热物理研究所先进燃气轮机实验室, 北京市海淀区 100190; 2. 中科院南京未来能源系统研究院燃气轮机数字化中心, 江苏省南京市 210000; 3. 中国科学院大学, 北京市海淀区 100000; 4. 中国科学院大学南京学院, 江苏省南京市 210000)

An Image-Based Turbine Blade Parameter Inspection Method

CUI Zeyang^{1,2,3,4}, KONG Xiangling^{2*}, FU Jinglun^{1,2,3,4}, SHI Jiajun²

(1. Advanced Gas Turbine Laboratory, IET, CAS, Haidian District, Beijing 100190, China; 2. Gas Turbine Digitalization Research Center, Nanjing Institute of Future Energy System, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China)

摘要: 叶型参数的准确测量是实现叶片性能诊断和逆向建模的关键步骤。为了提高叶型参数的测量效率, 提出了一种基于图像的参数提取方法。首先, 采用骨架提取算法对叶片中弧线进行定位; 然后, 通过拟合计算获得中弧线函数及叶型厚度分布; 最后, 采用优化算法提高叶型参数辨识精度。实验结果表明, 所提出的基于图像的叶型测量方法具有较高的准确性, 测量相对误差小于1.5%, 且应用方便、灵活, 为叶片几何参数的快速、准确测量提供了新的解决方法。

关键词: 燃气轮机; 叶型参数测量; 图像处理; 骨架提取

ABSTRACT: Accurate inspection of the feature parameters of the blade is a pivotal step to conduct the performance diagnosis and reverse modeling. To improve the inspection efficiency, an image-based parameter inspection method was proposed. First, the skeleton extraction algorithm was used to locate the middle arc of the blade. Then, the middle arc function and the blade thickness distribution function were obtained by the 3-order polynomial curve fitting algorithms. Finally, an optimization algorithm was derived to improve the inspection accuracy. Experimental results show that the proposed image-based feature parameter inspection method has high accuracy, and the relative measurement error is less than 1.5%. It provides a new solution for the rapid and accurate measurement of blade geometric parameters.

KEY WORDS: gas turbine; blade parameter inspection;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377011).

image processing; skeleton extraction

0 引言

以燃气轮机为代表的叶轮机是能源动力领域的重要设备, 是大电网发电和调峰的最佳选择, 在国家能源安全中扮演着无可替代的角色, 是关系到国民经济发展的高端核心装备^[1-7]。叶片是叶轮机机械的关键零件, 是实现工质能量转换的重要载体, 其造型质量直接影响叶轮机机械工作效率和性能。叶片加工过程复杂, 精度要求高, 必须通过精确的测量手段进行误差评定, 以保证叶片制造质量^[8-9]。另外, 叶片制造通常采用批量生产, 且种类繁多, 需要快捷高效的检测方式。

当前国内常用的测量方法分为接触式和非接触式。其中, 接触式测量包括标准样板测量、电感量仪测量、三坐标测量机测量, 非接触式测量包括激光测量和机器视觉测量。标准样板法^[10]操作简单、成本低, 适用于生产现场, 但是测量精度和自动化程度低, 需要大量的标准样板进行匹配。电感量仪^[10]采用传感器感应截面坐标信息, 测量精度较高, 环境要求低, 但是成本高、通用性差, 需要利用标准叶片对仪器进行校准。三坐标测量机^[10-12]选用高精度测头获取叶片轮廓坐标值, 测量精度高, 但是测量效率低、价格昂贵, 需要专业的测量场所。以光学测量为主的非接触

测量具有自动化程度高、测量效率高的特点。激光^[13]和机器视觉^[14]测量是目前2种主要方式,二者相比,激光测量设备成本和对操作人员的要求都比较高;机器视觉测量操作简单、成本低,是实现叶片快速测量的理想方法。

本文提出的基于图像的叶型几何参数测量方法以计算机视觉为基础^[15],操作简单且测量精度较高,可广泛应用于叶片检测中。

1 基于图像的叶型参数测量方法

1.1 基于图像的叶型参数测量方法步骤

基于图像的叶型参数测量方法由图像获取、图像预处理、叶型参数初步识别及准确获取4个步骤组成,如图1所示。

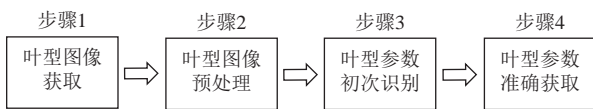


图1 基于图像的叶型参数测量方法步骤

Fig. 1 Steps of the proposed image-based blade parameter inspection method

1.2 叶型图像获取

叶型图像的获取需要综合考虑测量精度和运算效率的要求。假设叶型参数的测量精度要求为 λ ,所选相机的图像分辨率为 $u \times v$,其单位像素 p_i 在目标视距 d 的图像测量精度 σ 由计算得出,其中视距 d 为目标到相机的距离。

$$\sigma = d/\min(u, v) \quad (1)$$

若 $\sigma \leq \lambda$,那么所选相机是合适的;若 $\sigma > \lambda$,则需要选用具有更高分辨率的相机。在一定视距下,测量精度要求越高,图像所需的分辨率越高、运算时间越长。

1.3 叶型图像预处理

为了获取高质量的叶型图像,在进行参数测量之前需对图像进行预处理,具体包括噪声处理和特征增强,以分辨率 $u \times v$ 的图像为例进行说明。原始图像表示为 $f_0(i, j)$,其中 (i, j) 为图像 f_0 中第 i 行第 j 列像素点的坐标。采用高斯滤波器^[16-17] $G(i, j)$ 进行图像噪声处理,降噪后的图像 $f_G(i, j)$ 通过式(2)对边缘进行增强,以获得准确、清晰的叶型图像 $f(i, j)$ ^[13]。

$$f(i, j) = af_G(i, j) + b \quad (2)$$

式中 a 和 b 分别为对比度调节因子和亮度调节因子,本文取 $a=1.2$, $b=30$ 。

1.4 叶型参数测量

1.4.1 叶型轮廓提取

叶型轮廓的准确提取是叶型参数精确测量的重要保证。本文首先采用Canny算子^[18]对叶片图像内的边缘信息进行提取。通过应用形态学图像处理^[19]的腐蚀和膨胀操作,对边缘提取后的孔洞进行填充^[20-22],以获得叶片图像中所有的边缘信息。之后,采用最大外缘轮廓法^[23-24]对已提取出的所有边缘信息进行筛选,最终获得叶片外形轮廓信息,记为 f_c ,且 $f_c \in \mathbf{R}^{m \times 2}$,其中 m 为轮廓点的总数。

本文采用的最大外缘轮廓法的具体实施方法为:假设经过形态学图像处理后的叶片图像为 $f(i, j)$,定义 $f(i, j)$ 中目标叶型及背景所在区域的像素值分别为1和0。最大外缘轮廓法采用图2所示的 3×3 窗口对 $f(i, j)$ 进行扫描,根据像素点 (i, j) 和其邻域的8个像素点 $N_8(i, j)$ 内的值对轮廓进行提取。

若像素点 (i, j) 和其邻域的8个像素点 $N_8(i, j)$ 的值均为0,则判断像素点 (i, j) 为背景点,如图2(a)所示。反之,则判断像素点 (i, j) 为内部点,如图2(b)所示。若像素点 (i, j) 和其邻域8个像素点 $N_8(i, j)$ 内的值既有1也有0时,则判读像素点 (i, j) 为轮廓点,如图2(c)所示。

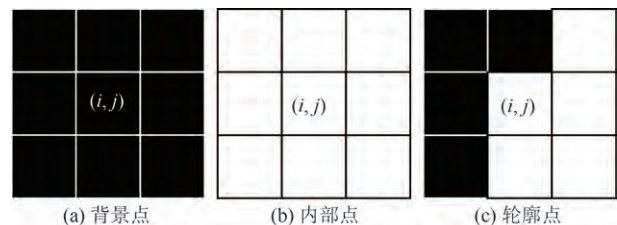


图2 背景点、内部点和轮廓点定义

Fig. 2 Definitions of background point, internal point and contour point

1.4.2 测量参照物选择

以 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 大小的正方形作为尺寸参考,通过正方形在图像中所占的像素数,计算出单位像素的长度,从而推算出叶型关键参数。

1.4.3 叶型参数定义

叶型参数^[25]如图3所示，定义轴线方向为 x 轴，额线方向为 y 轴。图3中， $O_f(O_{f,x}, O_{f,y})$ 和 $O_r(O_{r,x}, O_{r,y})$ 分别为叶片前、后缘圆心； R_f 和 R_r 分别为前、后缘圆弧半径； L 为前、后缘圆心间的 x 轴向距离。叶片中弧线记为 $\overline{O_f O_r}$ ； α_f 和 α_r 分别为中弧线在入口边和出口边切向与 x 轴的夹角，记为几何入口角和几何出口角； O_{max} 、 R_{max} 分别为叶型最大厚度处圆弧圆心和半径； P_{max} 为前缘圆心 O_f 到 O_{max} 的 x 轴向距离； T 为中弧线极大 y 值点位置； T_{max} 为前缘圆心与 T 间的 x 轴向距离。

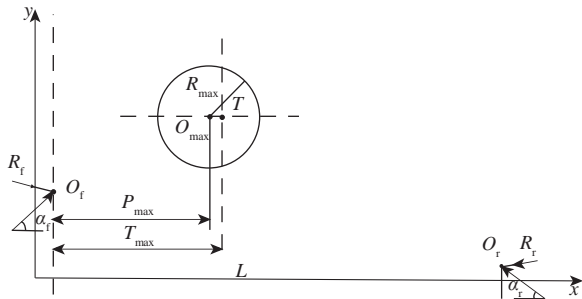


图3 叶片叶型参数

Fig. 3 Feature parameters of the blade

1.4.4 叶型参数初步识别

叶型参数测量的第一步是采用骨架提取的方法确定叶片的中弧线 $C(x) = \overline{O_f O_r}$ 。令 $S(A)$ 表示 $C(x)$ 上点的集合，以不同半径的圆形结构 B_i 对叶型图片进行腐蚀和开的运算，如图4所示。

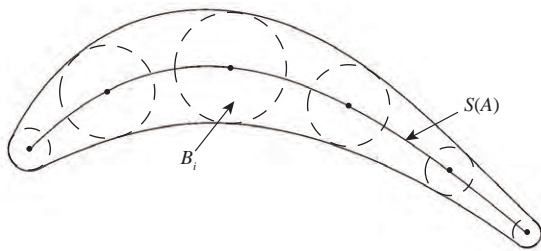


图4 叶片骨架提取

Fig. 4 Skeleton extraction for a blade image

$$S_k(A) = (A \ominus kB_i) - (A \ominus kB_i) \circ B_i \quad (3)$$

式中： k 为迭代次数；符号“ \ominus ”和“ \circ ”分别表示腐蚀和开运算。最大迭代次数 K 为

$$K = \max \{k \mid (A \ominus kB_i) \neq \emptyset\} \quad (4)$$

那么，叶片中弧线上的点 $S(A)$ 表示为

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A) \quad (5)$$

$S(A)$ 两端点为叶片前、后缘圆心 O_f 和 O_r ， L 可由式(6)计算得到：

$$L = O_{r,x} - O_{f,x} \quad (6)$$

式中 $O_{f,x}$ 和 $O_{r,x}$ 分别为前、后缘圆心的 x 轴坐标。

采用三次曲线对 $S(A)$ 进行拟合，则中弧线方程可表示为

$$C(x) = a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_1 \quad (7)$$

式中： $x \in [0, L]$ ； a_0, a_1, a_2 为系数。方程式(7)求解需满足以下约束条件：

$$\begin{cases} C(0) = 0 \\ C'(0) = \tan(\alpha_f) \\ C'(T) = 0 \\ C'(L) = -\tan(\alpha_r) \end{cases} \quad (8)$$

其中， α_f 和 α_r 的表达式为

$$\begin{cases} \alpha_f = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=O_{f,x}} \\ \alpha_r = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=O_{r,x}} \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7)，求解得

$$\begin{cases} a_0 = \frac{[L \tan \alpha_f - P_{max} (\tan \alpha_f + \tan \alpha_r)]}{3LP_{max} (L - P_{max})} \\ a_1 = \frac{[-L^2 \tan \alpha_f + P_{max}^2 (\tan \alpha_f + \tan \alpha_r)]}{2LP_{max} (L - P_{max})} \\ a_2 = \tan \alpha_f \\ a_3 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

中弧线极大值点位置 T 为 $\frac{dC}{dx} = 0$ 处。前缘圆心 O_f 到中弧线极大值点位置 T 的轴向距离 T_{max} 由式(11)计算获得

$$T_{max} = T_x - O_{f,x} \quad (11)$$

叶型厚度分布函数 $R(x)$ 采用三次曲线控制：

$$R(x) = b_0 x^3 + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (12)$$

式中 b_0, b_1, b_2, b_3 为常数。 $R(x)$ 满足以下约束条件：

$$\begin{cases} R(0) = R_f \\ R(L) = R_r \\ R(P_{max}) = R_{max} \\ R'(P_{max}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

令 $f_{c,k} \in f_c$ ， $k \in [1, m]$ ， (x_k, y_k) 为 f_c 第 k 个点的坐标，则 R_f, R_r, R_{max} 的表达式^[26]为

$$\begin{cases} R_f = \min_{k \in [1, m]} [(O_{f,x} - x_k)^2 + (O_{f,y} - y_k)^2] \\ R_r = \min_{k \in [1, m]} [(O_{r,x} - x_k)^2 + (O_{r,y} - y_k)^2] \\ R_{max} = \max_{i \in [1, n]} \{ \min_{k \in [1, m]} [(S_{i,x} - x_k)^2 + (S_{i,y} - y_k)^2] \} \end{cases} \quad (14)$$

由式(13)、(14)可求得

$$\begin{cases} b_0 = \frac{L^2(R_f - R_{max}) - 2LT_{max}(R_f - R_{max}) + T_{max}^2(R_f - R_r)}{LT_{max}^2(L^2 - 2LT_{max} + T_{max}^2)} \\ b_1 = \frac{L^3(R_f - P_{max}) - 3LT_{max}^2(R_f - P_{max}) + 2T_{max}^3(R_f - R_r)}{LT_{max}^2(L^2 - 2LT_{max} + T_{max}^2)} \\ b_2 = \frac{2L^3(R_f - P_{max}) - 3L^2T_{max}(R_f - P_{max}) + T_{max}^3(R_f - R_r)}{LT_{max}^2(L^2 - 2LT_{max} + T_{max}^2)} \\ b_3 = R_f \end{cases} \quad (15)$$

最大厚度处圆弧圆心坐标表示为

$$O_{max} = [(S_{i,x}, S_{i,y})]_{R_{max}} \quad (16)$$

P_{max} 表示为

$$P_{max} = O_{max,x} - O_{f,x} \quad (17)$$

1.5 叶型参数准确获取

叶型中弧线 C 、前后缘圆心 x 轴向间距 L 、最大厚度位置 O_{max} 及半径 R_{max} ，前、后缘位置 O_f 、 O_r 及半径 R_f 、 R_r ，几何进、出口角度 α_f 、 α_r 等参数决定了叶片形状。令 $H(i, j)$ 为由叶片参数 P 确定的叶型，其中 P 的表达式为

$$P = (L, R_f, R_r, R_{max}, P_{max}, T_{max}, \alpha_f, \alpha_r)^T \quad (18)$$

叶型参数准确获取的目的是寻找一组参数 P ，使得由 P 确定的叶型 H 与由图像提取出的叶型轮廓 f_c 重合，那么叶型参数准确测量过程可描述为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v [f_c(i, j) - H(i, j)] \\ \text{s.t. } L \leq \max(f_{c,x}) \end{cases} \quad (19)$$

式中初始叶型 H_0 为由参数 P_0 确定的叶型，精确的叶型参数采用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法^[27]迭代求解。

2 测试验证

2.1 测试环境介绍

以上基于图像的叶型参数测量方法采用 Python 3.85 在 Pycharm Community 2021.1 中编译，并开发了基于图像的参数测量软件(登记号 2020SR1770966)，集成叶片图像预处理，叶型参数测量和参数检测功能。软件界面如图4所示。

对该软件进行叶型参数测试应用。通过相机

采集到的图像分辨率为 4 032×3 024，相机水平置于固定支架上，如图5所示，相机距离被测物的高度为 380 mm。



图4 基于图像的叶片叶型关键参数测量软件界面
Fig. 4 Software interface of the proposed image-based blade feature parameter inspection method



图5 图像采集环境
Fig. 5 Experimental setting for image acquisition

以某型透平叶片的打印图为测量对象，其主要几何参数如表1所示。在被测对象上侧放置 10 mm×10 mm 正方形块为尺寸参照物。

表1 某型叶片叶型关键参数
Tab. 1 Feature parameters of a blade

参数	L/mm	R_f/mm	R_r/mm	R_{max}/mm	P_{max}/mm	T/mm	$\alpha_f/(^\circ)$	$\alpha_r/(^\circ)$
真实值	70	3	2	8	25	24	45	40

2.2 叶型图像预处理

采用图像预处理程序对目标区域进行截取，截取后图像分辨率为 1 056×780。采用大小为 5×5，标准差为 0 的高斯滤波器对图像进行处理。经过图像预处理后的结果如图6(b)所示。

2.3 叶型参数初步识别

以前缘圆心 O_f 为坐标原点。表2给出采用

1.3.4 所述方法提取的叶型关键参数。可见,初步测量的最大误差分别为前后缘圆心间 x 轴距离 L , 最大厚度 P_{\max} 和几何入口角 α_r 。对比基于测量参数重建叶型和原始叶型(如图7所示),重建叶型有较大误差,需要对测量值进行精确求解。



图6 叶型图像预处理

Fig. 6 Preprocessing for the turbine blade image

表2 叶型参数测量结果与真实值误差分析

Tab. 2 Error analysis between the inspected feature parameters and the standard values

叶型参数	真实值	测量值	绝对误差
L/mm	70	68.41	1.59
R_f/mm	3	3.07	0.07
R_r/mm	2	1.99	0.01
R_{\max}/mm	8	7.84	0.16
P_{\max}/mm	25	23.49	1.51
T/mm	24	24.41	0.41
$\alpha_f/(\circ)$	45	42.10	2.90
$\alpha_r/(\circ)$	40	40.05	0.05

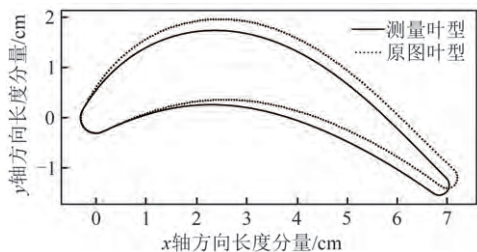


图7 基于测量值重建叶型与原图叶型对比

Fig. 7 Comparison between the original and the turbine blade reconstruction using inspected feature parameters

2.4 叶型参数准确获取

采用LM算法对测量值进行优化,最大迭代数和残差分别设定为 $n \geq 1400$ 和 $\varepsilon \leq e^{-6}$ 。优化过程中的残差曲线如图8所示,优化结果如表3所示。

优化后,测量参数最大误差为 $\delta(P_{\max}) = 0.19 \text{ mm}$,最大角度误差为 $\delta(\alpha_r) = 59^\circ$ 。图9对比了根据最终测量结果重建的叶型与原始叶型,二者吻合效果良好。由于测量精度与图像分辨率有直接关系,通过增大图像分辨率,将进一步提高叶型参数测量精度。

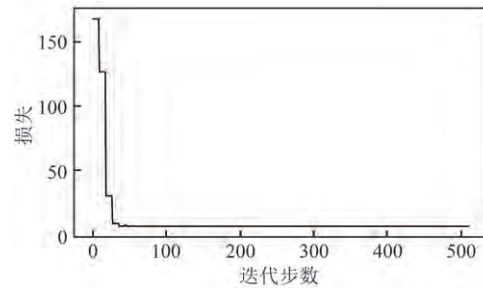


图8 参数优化过程收敛性

Fig. 8 Convergence of the feature parameter optimization

表3 叶型参数优化结果与真实值误差分析

Tab. 3 Error analysis between the optimized feature parameters and the standard values

叶型参数	真实值	优化值	绝对误差
L/mm	70	70.02	0.02
R_f/mm	3	3.04	0.04
R_r/mm	2	2.02	0.02
R_{\max}/mm	8	8.01	0.01
P_{\max}/mm	25	24.81	0.19
T/mm	24	23.89	0.11
$\alpha_f/(\circ)$	45	45.42	0.42
$\alpha_r/(\circ)$	40	39.41	0.59

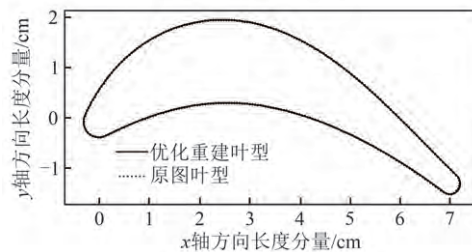


图9 基于优化值重建叶型与原图叶型对比

Fig. 9 Comparison between the original and the turbine blade reconstruction using optimized feature parameters

3 结论

提出了一种基于图像的透平叶片叶型关键参数优化测量方法。该方法可实现透平叶片叶型关键参数的非接触式测量。实验表明,该方法具有较高的测量精度,测量绝对误差不大于 $\pm 0.2 \text{ mm}$,相对误差不大于 1.5%。开发的软件及测量方法具有自动化、流程化和智能化的特点,可应用于工业叶片的批量生产和检测。

参考文献

- [1] 薛晓东,韩巍,王晓东,等. 适合分布式冷热电联供

- 系统的中小型发电装置[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 252-260.
- XUE X D, HAN W, WANG X D, et al. Small and medium-scale power generation devices suiting for distributed combined cooling, heating and power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 252-260.
- [2] 白明亮, 张冬雪, 刘金福, 等. 基于深度自编码器和支向量数据描述的燃气轮机高温部件异常检测[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 422-430.
- BAI M L, ZHANG D X, LIU J F, et al. Anomaly detection of gas turbine hot components based on deep autoencoder and support vector data description[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 422-430.
- [3] 刘志坦, 姚杰, 庄柯, 等. 燃气轮机与燃煤机组SCR脱硝催化剂特性比较[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 145-152.
- LIU Z T, YAO J, ZHUANG K, et al. Comparison of characteristics of SCR-DeNO_x catalyst for gas-turbine units and coal-fired units[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 145-152.
- [4] 和萍, 宫智杰, 靳浩然, 等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 108-121.
- HE P, GONG Z J, JIN H R, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [5] 张程, 匡宇, 刘佳静, 等. 考虑需求侧管理的风光燃储微网两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 13-22.
- ZHANG C, KUANG Y, LIU J J, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 13-22.
- [6] 娄清辉, 高元, 曹威, 等. 分布式能源系统微型燃气轮机气耗特性[J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 77-82.
- LOU Q H, GAO Y, CAO W, et al. Gas consumption characteristics of micro gas turbines in distributed energy systems[J]. Distributed Energy, 2023, 8(5): 77-82.
- [7] 马瑞, 杨汉, 吕振华, 等. 电-气互联下燃气状态对电力系统小干扰稳定的影响[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 3-12.
- MA R, YANG H, LÜ Z H, et al. Research on the impact of gas status on small signal stability of power system for combined electricity and gas system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 3-12.
- [8] 黄智, 李凯, 赵燎, 等. 航空发动机叶片型面轮廓光学测量技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2018, 61(22): 28-35.
- HUANG Z, LI K, ZHAO L, et al. Current technique and development trend of optical measurement of aero-engine blade profile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018(22): 28-35.
- [9] 刘长春, 关淳, 郭魁俊, 等. 汽轮机长叶片颤振预测方法[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 500-508.
- LIU C C, GUAN C, GUO K J, et al. Flutter prediction method for long blade of steam turbine[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 500-508.
- [10] 陈非凡, 强锡富. 汽轮机叶片叶型测量综述[J]. 航空计测技术, 1995, 15(3): 3-4.
- CHEN F F, QIANG X F. Overview on profile measurement of turbine blade[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1995, 15(3): 3-4.
- [11] 王军. 航空发动机叶片三维轮廓测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- WANG J. Study on measurement of 3D photography in aero engine vane[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [12] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 125-131.
- LIN X J, SHAN C W, WANG Z Q, et al. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2012, 18(1): 125-131.
- [13] 陈凯云, 谢晓芹, 叶佩青. 航空压气机叶片型面在线激光测量系统设计[J]. 制造技术与机床, 2004(8): 54-57.
- CHEN K Y, XIE X Q, YE P Q. Design on on-line laser measurement system for vane of aero-engine compressor[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004(8): 54-57.
- [14] 庞国鑫. 基于双目结构光的航空发动机叶片在线测量技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- PANG G X. Research on on-line measurement technology of aero-engine blade based on binocular structure light[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [15] 孔祥玲, 付经伦. 基于计算机视觉的三维重建技术在燃气轮机行业的应用及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 454-463.
- KONG X L, FU J L. Computer-vision based on three-dimensional reconstruction technology and its

- applications in gas turbine industry[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 454-463.
- [16] 张丽果. 快速非局部均值滤波图像去噪[J]. 信号处理, 2013, 29(8): 1043-1049.
ZHANG L G. Fast non-local mean for image denoising [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(8): 1043-1049.
- [17] 仇梓峰, 王爽心, 李蒙. 基于无人机图像的风力发电机叶片缺陷识别[J]. 发电技术, 2018, 39(3): 277-285.
QIU Z F, WANG S X, LI M. Defect detection of wind turbine blade based on unmanned aerial vehicle-taken images[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3): 277-285.
- [18] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital imaging processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [19] 张聪聪, 牟莉. 基于机器视觉的图像边缘检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 80-85.
ZHANG C C, MOU L. Research on image edge detection algorithm based on machine[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(12): 80-85.
- [20] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 171-175.
RUAN Q Q, Digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 171-175
- [21] 李建华. 二维条码图像处理算法及其VLSI设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
LI J H. Research on two-dimensional barcode image processing algorithm and its VLSI design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [22] 赵于前. 基于数学形态学的医学图像处理理论与方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
ZHAO Y Q. Research on medical images processing theories and methods based on mathematical morphology [D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [23] SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [24] SAEED K, RYBNIK M, TABEDZKI M. Implementation and advanced results on the non-interrupted skeletonization algorithm[C]//Computer Analysis of Images & Patterns, International Conference. Caip Warsaw, Poland: Springer-Verlag, 2001: 601-609.
- [25] 朱林, 王龙. 一种透平钻具叶片叶型参数化设计方法[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(4): 174-176.
ZHU L, WANG L. A Method of parametric design for turbine drill blade profile[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(4): 174-176.
- [26] 毛晨丽. 航空发动机叶片截面特征参数检测[D]. 天津: 天津大学, 2016.
MAO C L. Inspection of aero engine blade cross-sectional feature parameters[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [27] 王贵峰. 基于凸组合的列文伯格-马夸尔特算法[J]. 商丘师范学院学报, 2019, 35, (3): 18-21.
WANG G F. A Levenberg-Marquardt algorithm based on convex combination[J]. Journal of Shangqiu Normal University, 2019, 35(3): 18-21.

收稿日期: 2022-01-07。

作者简介:



崔则阳

崔则阳(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃气轮机数字化、图像处理, cuizeyang21@mails.ucas.ac.cn;



孔祥玲

孔祥玲(1984), 女, 博士, 副研究员, 从事机器人运动控制、机器视觉、最优化理论及应用、路径优化控制等方面的研究, 本文通信作者, kongxiangling@njiet.cn;



付经纶

付经纶(1979), 女, 博士, 研究员, 研究方向为燃气轮机透平强耦合机理研究及数字化, fuji@iet.cn;



施佳君

施佳君(1990), 女, 硕士, 研究方向为燃气轮机总体性能设计与分析。

(责任编辑 辛培裕)