

基于光纤复合测量技术的涡轮叶片气膜孔检测

高继昆¹, 闫峰¹, 何小妹², 德晓薇¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要:为了解决航空发动机涡轮叶片气膜孔几何特征参数有效检测手段缺乏、测量结果一致性差的问题,设计并搭建了基于光纤复合测量技术的涡轮叶片气膜孔检测系统,提出了利用该系统对涡轮叶片气膜孔进行测量的方法,通过试验进行了方法验证。搭建的系统为多传感器测量系统,具备叶片接触与非接触测量、空间姿态定位及3D投影能力,实现了涡轮叶片全范围气膜孔的测量。在试验中,选取高压涡轮叶片作为被测物体,应用该测量系统对叶片上的气膜孔进行了测量,计算得到了气膜孔直径、轴线角度及位置度的准确信息。结果表明:通过测量不确定度的分析评定可知,该系统对气膜孔直径、位置度的测量不确定度均小于0.01 mm,完全满足设计公差对测量仪器的精度要求,可以用于涡轮叶片气膜孔工程化测量。

关键词:涡轮叶片;气膜孔;几何特征参数;光纤复合测量技术;接触测量;非接触测量;航空发动机

中图分类号:V232.4

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.02.019

Inspection of Turbine Blade Film Cooling Holes Based on Fiber Optic Multi-sensor Measurement Technique

GAO Ji-kun¹, YAN Feng¹, HE Xiao-mei², DE Xiao-wei¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problems of lacking effective inspection means and poor consistency of measurement results for aeroengine turbine blade film cooling hole geometrical feature parameters, an inspection system for turbine blade film cooling holes was designed and established based on fiber optic-based multi-sensor measurement technique. The measurement method of the film cooling holes using the system was proposed, and verified by measurement practices. The system is a multi-sensor measurement system with the ability of contact and non-contact measurement, spatial attitude positioning, and 3D projection, realizing measurement of film cooling holes over the entire turbine blade. A high-pressure turbine blade was selected for conducting the film cooling hole measurement by using the measurement system. Accurate geometrical feature parameters of the film cooling holes were calculated, including their diameters, axis angles, and position. The results show that through measurement uncertainty analysis and evaluation, uncertainties of the diameters and the positions are both less than 0.01mm, which fully meets the accuracy requirements of the measuring instrument derived from the design tolerances, and the system can be used for the inspection of the film cooling hole of the turbine blade.

Key words: turbine blade; film cooling hole; geometrical feature parameter; fiber optic multi-sensor measurement technique; contact measurement; non-contact measurement; aeroengine

0 引言

涡轮叶片作为航空发动机关键部件之一,其气膜孔测量技术的精度和效率对于提高发动机性能和稳定性具有重要意义^[1]。涡轮叶片外部冷却即为气膜冷却,由位置对应的单排或多排气膜冷却孔来实现,气

膜冷却效率是材料、几何参数及其耦合作用在高温、高压3维非定流场的响应,与气膜孔的形状与位置参数息息相关^[2-4]。叶片气膜孔孔径非常小且结构复杂,一般的检测设备无法满足气膜孔几何参数检测要求,目前还没有专用的、成熟的气膜孔检测设备^[5],也没有统一的检测方法和相应的校准规范。

收稿日期:2023-10-08 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:高继昆(1967),男,高级工程师。

引用格式:高继昆,闫峰,何小妹,等.基于光纤复合测量技术的涡轮叶片气膜孔检测[J].航空发动机,2024,50(2):139-146.GAO Jikun,YAN Feng,HE Xiaomei,et al.Inspection of turbine blade film cooling holes based on fiber optic multi-sensor measurement technique[J].Aeroengine,2024,50(2):139-146.

航空涡轮叶片气膜孔测量主要采用接触式和非接触式2种方法。接触式测量方法具有测量精度高、稳定性好等特点,但效率不高,易受到测头尺寸等因素影响;非接触式测量方法具有测量速度快、效率高等优点,但测量精度和稳定性较接触式测量方法有一定差距。随着精密微小孔测量技术应用的日益广泛,国内外学者对此进行了深入研究。在接触式测量方面,Masuzawa等^[6]于20世纪90年代提出振荡扫描法,利用探针接触、断开时产生的电信号占空比计算微孔轮廓;Muralikrishnan等^[7-9]发明了一种光纤偏转测头、Sajima等^[10]采用带有压电元件驱动的振动机构的光纤测头用于微小孔径尺寸测量;Elfurjani等^[11-12]使用基于旋转丝探头和声发射触摸检测系统来测量微尺寸孔的内部尺寸;崔继文等^[13]设计了基于双光纤耦合原理的微深孔测量方法实现了微小孔径测量。在非接触测量方面,Shetty等^[14]使用视觉测量系统加激光束和准直仪来捕获叶片气膜孔的尺寸参数;Robert等^[15]采用红外成像技术判断气膜孔的质量;Bogovic Ivanic等^[16]应用数字化ATOS测量系统实现对叶片气膜孔的测量;Munkelt等^[17]通过基于条纹投影和无标记多视图拼接的光学3D扫描仪扫描涡轮叶片气膜孔;Ramamurthy等^[18]提出一种坐标测量与光学扫描结合的测量系统来获取气膜孔3维点云数据。在中国应用的非接触测量方法主要有光学小景深测量法、激光扫描法、结构光法等。如王呈等^[19]采用双轴转台加三坐标光学镜头五轴光学测量系统、张敏等^[20]采用基于激光传感器的气膜孔检测方案用于气膜孔测量;赵圆圆等^[21-22]基于机器视觉和图像分析法用于微小孔径的测量。由于叶片气膜孔设计结构复杂、测量难度高,单一的测量手段和测量方法无法实现对气膜孔的完整测量。

本文着重分析了涡轮叶片气膜孔特征参数测量方法,开展了气膜孔特征参数接触与非接触复合式测量试验,形成基于光纤的多传感器气膜孔测量系统,讨论了气膜孔孔间距、排间距计算方式并应用于气膜孔测量实践。

1 测量原理及系统构成

1.1 系统结构设计

涡轮叶片气膜孔的设计特点为:设计结构复杂,通常分布于叶片的叶身、叶尖及缘板等部位;气膜孔

沿着叶身方向呈线性排列,每排孔的轴线方向都不尽相同,有些气膜孔的轴线与叶片表面夹角较小,形成斜孔,给测量带来了很大难度。因此,设计搭建气膜孔检测装置时,在满足气膜孔检测精度的同时,要充分考虑气膜孔测量的可达性,以保证涡轮叶片气膜孔的全方位测量。

根据涡轮叶片气膜孔分布特点与测量需求,搭建一种基于光纤复合坐标测量技术的涡轮叶片气膜孔检测装置。该测量系统以光学复合坐标测量系统为基本框架,集成高精度双轴转台、待测涡轮叶片组件(叶片专用夹具、待测涡轮叶片)、接触及非接触测量传感器,组成五轴测量系统,如图1所示。

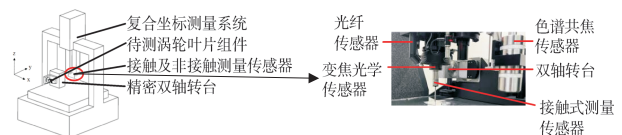


图1 测量系统

叶片气膜孔检测装置测量系统的运动机构由 x 、 y 和 z 3个直线轴和回转轴构成。其中, x 、 y 和 z 轴集成在一起,由坐标测量系统框架实现;回转轴布置在仪器工作台上,可随 y 轴移动,回转轴由高精度双轴转台构成,被测高压涡轮叶片通过专用夹具固定在双轴转台上,可随双轴转台移动和旋转。气膜孔测量用传感器(光学测量传感器、光纤测量传感器、接触式测量传感器及色谱共焦传感器)安装在坐标测量系统的 z 轴末端并行排列。测量用传感器可以沿着相互垂直的 x 、 y 和 z 轴进行单独运动或者联动,实现由 x 、 y 和 z 轴构成的直角坐标系内任意一点的精确定位。

气膜孔精密测量系统的内涵为多传感器测量系统^[23-24],是集光纤、光学、探针、精密双轴转台、图像处理、自动聚焦和3D投影为一身的多功能测量设备,可实现接触与非接触测量。基于光纤复合坐标测量技术的涡轮叶片气膜孔检测装置可以实现涡轮叶片型面、气膜孔形貌特征的3维重构,从而得出气膜孔的孔径、空间位置与轴线角度等形位参数。由于采用多传感器系统安装在同一测量机中对叶片气膜孔进行测量,提高了测量的精度和效率。

1.2 测量原理

将待测高压涡轮工作叶片固定在气膜孔精密测量系统的双轴转台上。使用光学传感器、探针传感器建立待测高压涡轮工作叶片测量坐标系,导入待测高

压涡轮工作叶片的 3 维模型进行拟合。使用光学传感器对待测气膜孔的具体位置进行初始测量,并根据测量结果建立待测气膜孔的子坐标系。调用光纤传感器,设置气膜孔测量策略,在已建立的坐标系上对气膜孔进行测量。重复上述步骤,依次测量所有待测气膜孔。

1.3 测量系统各部分作用

测量系统各部分的作用如下。

1.3.1 光学测量系统作用

采用 ZOOM 光学变焦镜头,空间测量精度为 $(1.7+L/300)\mu\text{m}$ 。光学变焦镜头对光纤起到测量引导和数值确定作用。

1.3.2 光纤测量系统作用

光纤测量传感器为 2D 测量传感器,常用测头直径为 0.10 mm、0.15 mm,探测精度为 1.5 μm 。光纤测头系统工作基本原理为:当光纤测头系统工作时,机器自动到光纤探针架更换光纤探针,将光纤探针安装在光学变焦镜头下面,通过光学变焦镜头跟踪采集光纤探针球头的位置信息。在未开始测量时,探针球头位于镜头中心位置;当光纤探针测量气膜孔时,采用打点法测量,探针球头与孔内壁接触受力,从而与中心位置产生位移,当达到一定量的位移时,变焦镜头采集到相应的位置信息,反馈到系统中,通过换算得到被测点相对于光栅尺的实际位置,然后以此类推得到该孔所有被测点的实际位置;最终将所有被测点拟合成圆柱,得到气膜孔孔径和位置度等参数的实际值,光纤测头系统工作原理如图 2 所示。

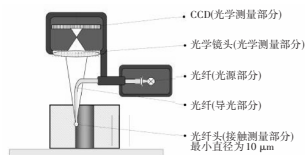


图 2 光纤测头系统工作原理

1.3.3 精密双轴转台作用

测量系统配置双轴转台的目的是实现涡轮叶片气膜孔全方位的测量。气膜孔的结构特点为位置分布广,分布于叶片不同部位,形状及轴线角度复杂多变,单一测量方向无法完成全方位测量。因此只有通过配置高精度双轴转台才能扩大光纤测头的可达性,实现涡轮叶片全部气膜孔的测量。精密双轴转台的测量范围为:A 轴 $-15^{\circ} \sim +90^{\circ}$,B 轴 $\pm 360^{\circ}$ 。

1.3.4 色谱共焦测头系统作用

利用共焦成像原理和光轴色谱编码来确定目标表面的位置和厚度。光轴色谱编码利用色谱将宽带

光源聚焦到测量范围内的多个点上。被聚集的反射光通过空间滤波器反射到分光仪上。分光仪的光谱响应决定反射发生表面的位置。色谱共焦测头的原理如图 3 所示,技术参数见表 1。

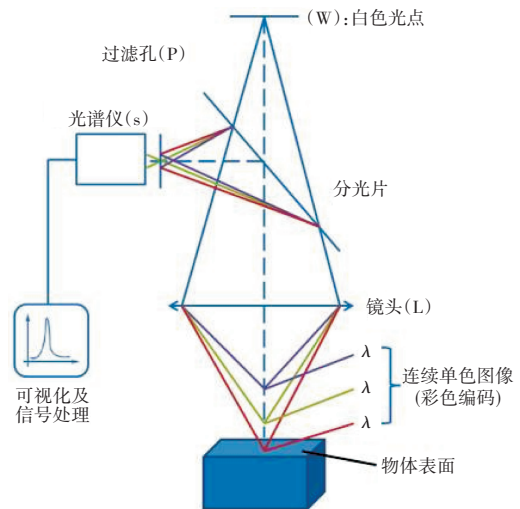


图 3 色谱共焦测头工作原理

光源聚焦到测量范围内的多个点上。被聚集的反射光通过空间滤波器反射到分光仪上。分光仪的光谱响应决定反射发生表面的位置。色谱共焦测头的原理如图 3 所示,技术参数见表 1。

表 1 色谱共焦测头参数

色谱共焦测头	CFP1000
测量范围/ μm	1000
工作距离/mm	19.1
分辨率/nm	35
最大爬坡角度/ $^{\circ}$	± 45
光斑大小/ μm	3.5

膜孔测量具有 3 方面作用:(1)用于被测涡轮叶片测量坐标系基准要素的测量,因基准要素一般设计在叶片榫头部位,相应的测量区域比较小,色谱共焦测头的光斑直径只有 3.5 μm ,可以测量更多的要素点,保证基准要素提取的准确性;(2)实际被测涡轮叶片与给定的理论模型有较大差异,则可通过色谱共焦测头对实际叶片型面进行扫描测量,根据实测叶型轮廓重构出 3 维模型,用于气膜孔位置度准确计算、评价;(3)如被测涡轮叶片没有理论模型,则应用色谱共焦测头对叶型轮廓进行扫描,建立叶片的 3 维测量模型,用于气膜孔位置度的计算和评价。色谱共焦测头测量叶型轮廓的扫描曲线如图 4 所示。

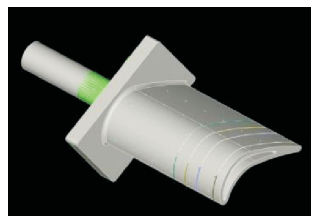


图 4 气膜孔标准件叶型轮廓扫描曲线

1.3.5 待测涡轮叶片组件作用

待测涡轮工作叶片组件结构如图 5 所示。从图中可见,待测涡轮工作叶片组件由测量工装夹具主体、紧定螺钉、标准圆棒、待测涡轮工作叶片组成。其

中测量工装用于待测叶片的固定及与双轴转台连接,标准圆棒用于涡轮叶片气膜孔测量坐标系的建立。

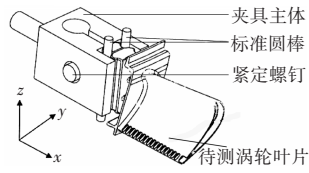


图5 待测涡轮工作叶片组件结构

2 光纤复合气膜孔测量系统校准

光纤复合气膜孔测量系统集成并安装调试完成后,对测量系统的各测量传感器进行校准,验证各传感器精度指标是否满足初始设计要求。

2.1 校准项目及校准用标准器

参考《坐标测量机校准规范》(JJF 1064-2010),分别对测量装置的光学测量系统、光纤测量传感器、精密双轴转台、接触式测量传感器及色谱共焦传感器进行校准。校准项目见表2,校准使用的计量标准器见表3。

表2 校准项目

传感器名称	校准项目	标准器
光学系统	尺寸测量示值误差	标准线纹尺
	探测误差	靶标
光纤传感器	探测误差	标准陶瓷球
接触传感器	探测误差	标准陶瓷球
色谱传感器	探测误差	标准陶瓷球
双轴转台	4轴误差(FR、FT、FA)	标准陶瓷球

表3 校准用计量标准器

标准名称	型号/规格	不确定度误差
标准线纹尺	2等/0~400 mm	$U=(0.15+0.5L) \mu\text{m}, k=2$
标准陶瓷球	$\varphi=25 \text{ mm}$	$U=0.03 \mu\text{m}, k=2$
		位置度: $U=0.5 \mu\text{m}, k=2$
靶标	63.5 mm×63.5 mm	圆的位置: $U=0.5 \mu\text{m}, k=2$
		圆的直径: $U=0.25 \mu\text{m}, k=2$

2.2 校准结果

校准结果见表4。

表4 校准结果

传感器名称	校准项目	最大允许误差/ μm	校准结果/ μm
光学系统	尺寸测量示值误差	MPE: $(1.7+L/300)$	0.7(满足要求)
	探测误差	1.1	
光纤传感器	探测误差	1.5	1.2
接触传感器	探测误差	1.5	1.3
色谱传感器	探测误差	1.5	1.0
双轴转台	4轴误差	FR: 3	FR: 1.1
		FT: 5	FT: 2.6
		FA: 15	FA: 2.9

经校准,光纤复合气膜孔测量系统各技术参数满足初始设计要求,可用于叶片气膜孔测量。

2.3 测量系统精度验证

为验证测量系统的测量精度,以标准环规(规格为 $\varphi 3$)为例,对环规孔径进行测量试验,共测量5次,测量结果见表5,其中标准值由第3方计量机构溯源。标准环规最大测量误差为 $0.7 \mu\text{m}$,测量结果表明光纤复合气膜孔测量系统能够满足叶片气膜孔检测精度要求。

表5 测量结果

序号	标准值/mm	实测值/mm	误差/mm
1	3.0005	2.9998	-0.0007
2	3.0005	3.0001	-0.0004
3	3.0005	3.0006	0.0001
4	3.0005	3.0007	0.0002
5	3.0005	3.0000	-0.0005

3 气膜孔测量试验与数据处理

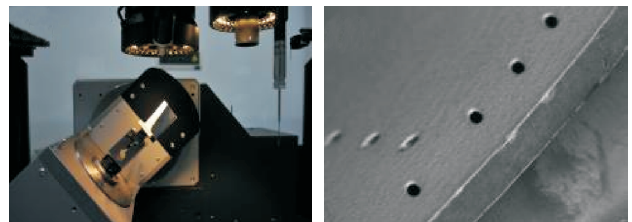
3.1 气膜孔测量

应用基于光纤复合式坐标测量法对涡轮叶片气膜孔进行检测,气膜孔位置如图6所示。



图6 气膜孔位置

根据叶片模型中气膜孔参数提取结果,待测叶片的气膜孔径在 $0.4 \sim 0.5 \text{ mm}$ 之间,为使测量过程更加安全精确,选择探头直径为 0.15 mm 的光纤对孔径进行测量。模型的气膜孔与实际加工出的气膜孔方向较为一致,而位置度往往有一定差异。在方向上,为使光纤垂直进入待测气膜孔中,在已导入的3D模型中选择要测量的气膜孔,获取气膜孔的法向量,根据法向量转动转台直至气膜孔轴线竖直向上。此时使用变焦光学传感器观察气膜孔(如图7所示),可以观



(a) 传感器观测位置 (b) 传感器观察到的画面

图7 使用变焦光学传感器观测气膜孔

察到气膜孔的形状为圆形。在位置上,使用大倍率镜头定位气膜孔的位置并保存为子坐标系,以消除孔位的加工偏差。确认具备测量条件后,即可切换光纤传感器,在深度为 0.8~1.2 mm 的位置对目标气膜孔进行测量,获取气膜孔的轴线位置、轴线方向、孔径及圆柱度值。单个气膜孔的测量点分布如图 8 所示。重复上述步骤,即可完成对所有目标气膜孔的测量。

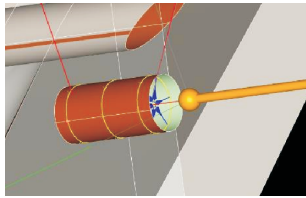


图 8 单个气膜孔测量点分布

3.2 涡轮叶片气膜孔与模型交点计算方法

成排的气膜孔位置度是通过气膜孔的孔间距和排间距来表征的。而孔间距和排间距最直观的表现就是气膜孔轴线与叶身的交点。

使用光纤测量气膜孔内部时,每个气膜孔测得的数据为圆柱的中点坐标、轴线角度与半径。而每个叶片气膜孔中包含数个圆柱,圆柱在气膜孔中的位置(即相对测量深度)根据手动选择的孔周最低点确定,具有较大的不确定性,无法根据所测数据直接得出被测孔的具体方位,利用轴线求位置度的计算方法误差也相对较大。为了获取被

测孔的具体方位并消除这一误差,使用测得的轴线与叶片 3 维模型表面相交,求出交点值,再对比计算各交点的位置,求出间距与位置度等信息,实测的轴线与模型交点如图 9 所示,从图中可以清晰比较出气膜孔理论位置与实测位置的差异。

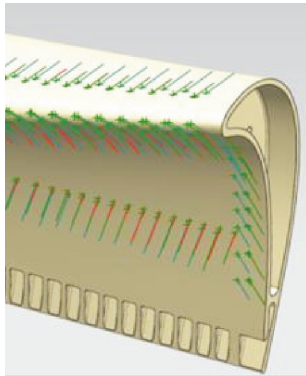


图 9 实测的轴线与模型交点

以涡轮叶片气膜孔前 4 排为例,各气膜孔理论位置与实测位置的距离见表 6。

表 6 孔位置测量结果

孔位置	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
距离/mm	0.29	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31
孔位置	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
距离/mm	0.60	0.58	0.59	0.58	0.58	0.59
孔位置	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
距离/mm	0.56	0.57	0.56	0.55	0.56	0.54
孔位置	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
距离/mm	0.62	0.61	0.59	0.58	0.55	0.53

3.3 测量结果分析

在测量过程中,能够直接获取的测量数据包括轴线位置、轴线方向、孔径、圆柱度,根据这些数据,可以计算出轴线表面交点、位置度、孔径均值等。除上述数据外,由于气膜孔的孔排间距会直接影响冷却气流的冷却效率,故孔排间距也是需要体现的因素。

为验证气膜孔的实际孔排间距是否与理论设计模型相同,设计评价参数 S ,对某排孔所有孔间距与理论间距之间的差距进行评价。已知各孔间距与理论间距的差值 c_1, c_2, \dots, c_{n-1} ,则孔间距评价参数 S 为

$$S = \sqrt{\frac{c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_n^2}{n}} \quad (1)$$

当 S 越大时,该排孔的孔间距分布情况与理论设计值相差越大。

以涡轮叶片气膜孔第 1 排为例,各相邻孔间的理论孔间距、实际孔间距及差值见表 7,计算出 $S=0.005$ 。

表 7 孔间距测量值与理论值的差值

孔位置	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	S
理论/mm	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	0.005
实际/mm	8.00	7.99	8.00	7.99	8.01	0.005
差值/mm	0	0.01	0	0.01	0.01	0.005

依次计算气膜孔标准件各排的 S 值,计算结果见表 8,在气膜孔标准件中,第 1 排的 S 值最小,其孔间距分布情况与理论设计值最为接近。

表 8 S 值计算结果

排数	1	2	3	4	5
S	0.005	0.011	0.016	0.025	0.026
排数	6	7	8	9	
S	0.031	0.028	0.019	0.023	

同理,设置 1 个排间距评价参数 P ,能够评价 2 排孔之间实测距离与理论距离之间的差距,已知一排各孔与另一排孔间距与理论间距的差值 e_1, e_2, \dots, e_{n-1} ,则孔间距评价参数 P 为

$$P = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2}{n}} \quad (2)$$

当 P 越大时,2 排孔之间的距离与理论设计值相差越大。

以涡轮叶片气膜孔第 1、2 排为例,第 2 排各孔与第 1 排的理论间距、实际间距及差值见表 9,计算出 $P=0.963$ 。

依次计算气膜孔标准件各排的 P 值,计算结果见

表10。在气膜孔标准件中,第1排的 P 值最小,其排间距与理论设计值最为接近。

表9 孔排间距测量值与理论值的差值

位置	1	2	3	4	5	6	P
理论/mm	9.26	9.26	9.26	9.26	9.26	9.26	
实际/mm	9.50	9.48	9.49	9.49	9.49	9.49	0.963
差值/mm	0.24	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	

表10 P 值计算结果

排数	1	2	3	4	5
P	0.963	0.999	0.998	0.983	0.979
排数	6	7	8	9	
P	0.102	0.991	0.988	0.987	

4 叶片气膜孔测量不确定度评定

目前绝大多数涡轮叶片气膜孔为圆柱孔,由于设计要求不同,叶片气膜孔的孔径和位置度要求也各不相同。经梳理,一般涡轮工作叶片气膜孔直径设计公差带范围 ≤ 0.1 mm,位置度公差带范围为 $\Phi=0.2 \sim 0.3$ mm。分别对叶片气膜孔的直径和位置度测量结果的不确定度进行评定,以验证测量结果是否满足要求。

4.1 气膜孔直径测量不确定度

气膜孔直径测量不确定度为直接输出结果,没有不确定度模型,不确定度分量包括:

- (1)测量系统示值误差引起的不确定度分量 u_1 ;
- (2)测量重复性引起的不确定度分量 u_2 ;
- (3)光纤测头系统探测误差引起的不确定度分量 u_3 。

合成标准不确定度的评定为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.38 \mu\text{m} \quad (3)$$

扩展不确定度评定:按正态分布,取置信概率 $p=95\%$,包含因子 $k=2$,则扩展不确定度为

$$U = k \cdot u_c = 2.8 \mu\text{m} \quad (4)$$

经评定,气膜孔直径测量不确定度为 $2.8 \mu\text{m}$,满足气膜孔直径测量对测量设备的要求。

4.2 气膜孔位置度测量不确定度

气膜孔位置度测量不确定度模型为

$$f = 2\delta_i \quad (5)$$

不确定度分量包括:

- (1)测量系统示值误差引起的不确定度分量 u_1 ;
- (2)测量重复性引起的不确定度分量 u_2 ;

(3)光纤测头系统探测误差引起的不确定度分量 u_3 ;

(4)探针测头探测误差引起的不确定度分量 u_4 ;

(5)转台误差引起的不确定度分量 u_5 ;

(6)涡轮叶片温度与标准温度(20°C)的差值引起的不确定度分量 u_6 。

合成标准不确定度的评定为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 2.21 \mu\text{m} \quad (6)$$

扩展不确定度评定:按正态分布,取置信概率 $p=95\%$,包含因子 $k=2$,因为位置度误差 f 为被测孔圆心与理论圆心最大偏差的2倍,则扩展不确定度为

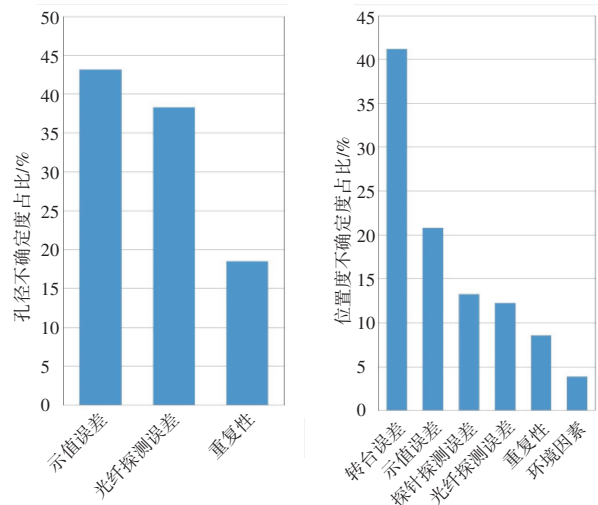
$$U = 2 \times k \cdot u_c = 8.8 \mu\text{m} \quad (7)$$

经评定,孔位置度校准不确定度为 $8.8 \mu\text{m}$,满足气膜孔位置度测量对测量设备的精度要求。

4.3 不确定度分量占比分析

由各测量不确定度分量计算出各不确定度所占百分比,形成Pareto图。运用Pareto分析法对不确定度分量的占比进行分析,可找出误差产生的关键原因,并加以控制,以满足气膜孔检测的误差要求。

直径和位置度测量不确定度分量占比如图10所示。从图中可见,气膜孔直径测量不确定度的关键致因是示值误差和光纤探测误差引入的不确定度分量;位置度测量不确定度的关键致因是转台误差和示值误差引入的不确定度分量。对此类误差要进行控制,避免不确定度超差,使测量结果不可信。



(a) 直径测量不确定度占比

(b) 位置度测量不确定度占比

图10 气膜孔直径和位置度测量不确定度分量占比

5 总结

基于光纤复合技术测量涡轮叶片气膜孔具有以下优点:

(1)测量精度高。光纤传感器具有高的灵敏度和测量精度。光纤通过对气膜孔接触的测量,能真实地反映气膜孔孔径的结构特征。该方法的测量功能及准确度较原高精度塞规测量法、三坐标探针接触式测量法及光学非接触式测量法等单一测量法均有显著提升。

(2)测量可达性好,不受叶片空间结构的约束。叶片气膜孔结构复杂,分布在叶身、叶尖及缘板上各个部位,且角度多变,测头单一测量方向不能解决所有气膜孔的测量问题。采用光纤复合测量技术测量气膜孔,光纤在双轴转台、光学变焦传感器配合下可以找到气膜孔的轴线并完成气膜孔孔径、孔轴线空间角度的精确测量,对于包括孔位置度、孔间距及排间距等参数也设计了分析评定方法。

(3)无损检测。光纤传感器测量力非常小,不会对叶片气膜孔产生机械应力,避免对叶片造成损伤,保证了叶片的安全性和使用寿命。

基于光纤复合技术的涡轮叶片气膜孔精密检测系统能够满足涡轮叶片设计标准对检测设备的要求,具备先进复杂涡轮叶片冷却气膜孔高精度检测的能力,为后续与涡轮叶片气膜孔的设计改进、试验数据评估奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] 周莉,韦威,蔡元虎.气膜孔孔形对涡轮冷却流场影响的数值研究[J].航空计算技术,2012(1):1-3.
ZHOU Li, WEI Wei, CAI Yuanhu. Numerical investigation of influence for cooling hole shape on turbine flowfield [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012(1):1-3. (in Chinese)
- [2] 孟通,朱惠人,刘存良,等.气膜孔内流动结构对冷却效率的影响[J].工程热物理学报,2019(12):2905-2911.
MENG Tong, ZHU Hui ren, LIU Cun ling, et al. Influence of vortex within film cooling hole on film cooling efficiency[J]. Journal of Engineering Thermophysic, 2019(12):2905-2911. (in Chinese)
- [3] 成锋娜,张靖周.气膜孔角度对突肩叶尖泄漏和冷却特性的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020(11):79-86.
CHENG Fengna, ZHANG Jingzhou. Effect of film hole angle on the tip leakage flow and cooling characteristics of squealer tip[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020(11):79-86. (in Chinese)
- [4] 戴萍,林枫.气膜孔形状对冷却效率影响的数值研究[J].动力工程,2009(2):117-122.
DAI Ping, LIN Feng. Numerical study on the influence of holes shape on filmcooling efficiency[J]. Journal of Power Engineering, 2009(2):117-122. (in Chinese)
- [5] 董一巍,吴宗璞,李效基,等.叶片气膜孔加工与测量技术现状及发展趋势[J].航空制造技术,2018(13):16-25.
DONG Yiwei, WU Zongpu, LI Xiaoji, et al. Current situation and development trend of processing and measurement technology for turbine blade film cooling hole[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018(13):16-25. (in Chinese)
- [6] Masuzawa T, Harnasaki Y, Fujino M. Vibroscanning method for nondestructive measurement of small holes[J]. CIPR Annals-Manufacturing Technology, 1993, 42(1):589-592.
- [7] Muralikrishnan B, Stone J A, Stoup J R. Fiber deflection probe for small hole metrology[J]. Precision Engineering, 2006, 30(2):154-164.
- [8] Stone J A, Muralikrishnan B, Stoup J R. A fiber probe for CMM measurements of small features[C]//Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III. San Diego: SPIE, 2005:1-11.
- [9] Stone J, Muralikrishnan B, Sahay C. Geometric effects when measuring small holes with micro contact probes[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2011(2):573-587.
- [10] Sajima T, Murakami H, Katsuki A, et al. Profile measurement system for microholes using vibrating optical fiber[J]. Sensors and Materials, 2012, 24(7):387-396.
- [11] Elfurjani S, Bayesteh A, Park S S, et al. Dimensional measurement based on rotating wire probe and acoustic emission[J]. Measurement, 2015, 59:329-336.
- [12] Elfurjani S, Junghyuk K, Martin B G Jun. Micro-scale hole profile measurement using rotating wire probe and acoustic emission contact detection[J]. Measurement, 2016, 89:215-222.
- [13] 崔继文,谭久彬,刘洋.基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J].红外与激光工程,2009(2):106-109.
CUI Jiwen, TAN Jiubin, LIU Yang. Measurement of micro-hole with high aspect ratio based on double optical fiber coupling[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009(2):106-109. (in Chinese)
- [14] Shetty D, Eppes T, Campana C, et al. New approach to the inspection of cooling holes in aero-engines[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(6):686-694.
- [15] Robert R D, Nawaz S, Wee W G. Aircraft engine blade cooling holes detection and classification from infrared images[J]. Proceeding of SPIE-The International Society for Optic Engineering, 2009, 3586:85-93.
- [16] Bogovic I N, Barisic B, Katalinic B, et al. Digitizing system ATOS measuring turbo compressor housing[C]//Annals of DAAAM and Proceeding of the International DAAAM Symposium. Vienna: DAAAM International, 2011:1367-1368.
- [17] Munkelt C, Kuhmstedt P, Aschermann L, et al. Automatic complete

- high-precision optical 3D measurement of air cooling-holes of gas turbine vanes for repair[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. Munich: International Society for Optics and Photonics. Munich: SPIE Optical Metrology, 2015, 9525: 952512.
- [18] Ramamurthy R, Harding K G, Liao Y, et al. Method and system for automated shaped cooling hole measurement: US 20170132775A1[P]. 2017-05-11.
- [19] 王呈, 刘涛, 穆轩, 等. 航空发动机叶片气膜孔测量技术研究[J]. 计量技术, 2012, 32(5): 27-30.
WANG Cheng, LIU Tao, MU Xuan, et al. Research on aero engine blade film hole measuring technology[J]. Metrology and Measurement Technology, 2012, 32(5): 27-30. (in Chinese)
- [20] 张敏, 闫晓桑, 奚学程, 等. 基于激光传感器的涡轮叶片气膜孔轴线方向检测算法[J]. 电加工与模具, 2022(4): 24-29.
ZHANG Min, YAN Xiaoshen, XI Xuecheng, et al. Measurement of axial orientation of film cooling holes of turbine blade[J]. Electromachining and Mould, 2022(4): 24-29. (in Chinese)
- [21] 赵圆圆, 曾飞, 李洋, 等. 基于光场成像的快照式气膜孔三维测量技术[J]. 航空学报, 2021(10): 524185-1-11.
ZHAO Yuanyuan, ZENG Fei, LI Yang, et al. 3D measurement technique for film cooling holes based on light-field imaging[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021(10): 524185-1-11. (in Chinese)
- [22] 毕超, 郝雪, 刘孟晨, 等. 气膜孔视觉测量系统的设计与搭建[J]. 计量学报, 2020(7): 775-780.
BI Chao, HAO Xue, LIU Mengchen, et al. Design and establishment of the machine vision measuring system for film cooling holes[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020(7): 775-780. (in Chinese)
- [23] 隋鑫, 徐熙平, 孙健, 等. 应用多传感器技术测量微孔几何参量[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(4): 79-82.
SUI Xin, XU Xiping, SUN Jian, et al. Microhole geometry measurement applying multi-sensor technology[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2009, 7(4): 79-82. (in Chinese)
- [24] 汤晓君, 刘君华. 多传感器技术的现状与展望[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1309-1312.
TANG Xiaojun, LIU Junhua. The actuality and vista about multi-sensor technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(12): 1309-1312. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)