

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.05

航空发动机叶片粗糙度测量方法研究

张学仪, 何小妹*, 王一璋, 马鹏谋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 航空发动机叶片表面弯扭大, 加工过程中难以保证表面粗糙度一致。针对现阶段粗糙度测量方法在测量叶片时缺少测量位置和方向的定义, 导致测得的粗糙度值无法判定叶片粗糙度合格性的问题, 开展了叶片粗糙度测量方法研究。基于叶片实测截面数据, 利用坐标测量机上搭载的粗糙度测头, 通过对不同类型的叶片进行多位置多方向的粗糙度测量实验, 分析不同位置、不同方向的粗糙度测量结果差异, 得到了叶片粗糙度测量方法。本方法将叶片粗糙度与叶片型面相关联, 解决了叶片粗糙度的测量位置和测量方向缺乏规范的问题。研究结果对准确、有效、规范地评估叶片表面质量的合格性具有重要意义。

关键词: 计量学; 发动机叶片; 粗糙度; 坐标测量机

中图分类号: TB92; V232.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)02-0035-09

Research on measurement method of aeroengine blade roughness

ZHANG Xueyi, HE Xiaomei*, WANG Yizhang, MA Pengmou

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The surface of aero-engine blades has large bending and torsion, and it is difficult to ensure consistent surface roughness during machining. In view of the lack of definitions of measuring position and direction in the current roughness measurement method when measuring blades, which leads to the problem that the measured roughness value cannot determine the eligibility of blade roughness, the research on blade roughness measurement method is carried out. Based on the measured section data of blades, using the roughness probe carried on the CMM, the blade roughness measurement method is obtained by carrying out multi-position and multi-direction roughness measurement experiments on different types of blades and analyzing the difference of the roughness measurement results in different positions and directions. This method associates the blade roughness with the blade profile, and solves the problem that the measurement position and direction of blade roughness are not standardized. The research results are of great significance to accurately and effectively evaluate the qualification of blade surface quality.

Key words: metrology; engine blade; roughness; coordinate measuring machine

0 引言

叶片是航空发动机中非常关键的一类典型零件, 具有种类多、数量大、型面复杂、几何精度

要求高等特点^[1-2]。叶片的制造品质直接影响发动机的性能、寿命和效率^[3-5], 而表面粗糙度是叶片加工质量的重要评价参数。良好的叶片粗糙度会使叶片表面应力分布更均匀, 减少了应力集中和

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-VII1-0015-0176)

引用格式: 张学仪, 何小妹, 王一璋, 等. 航空发动机叶片粗糙度测量方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 35-43.

Citation: ZHANG X Y, HE X M*, WANG Y Z, et al. Research on measurement method of aeroengine blade roughness[J]. Metrology & measurement technology, 2023, 43(2):35-43.



微裂纹的出现,有效地提高了叶片抗疲劳寿命,还可以使叶片型面更光滑,有利于减少叶片表面风阻,对提升叶片气动性能和工作效率大有益处。而过大的叶片粗糙度会导致压气机的内部流动损失增加,使其性能严重衰退,也会造成积垢的增加,导致压气机各级偏离设计状态,进而改变压气机特性。因此,叶片粗糙度对于叶片的气动性能具有直接影响^[6-8]。国外一些学者和专家也指出了叶片表面不同位置粗糙度的重要性^[9]。

尽管叶片粗糙度对叶片性能十分重要,但目前仍没有较为标准统一的叶片粗糙度测量方法,HB 5647-98《叶片叶型的标注 公差与叶身粗糙度》^[10]规定了叶片粗糙度的设计要求,对于叶片叶身处的检测位置、检测范围和检测方法缺少定义。目前针对航空发动机叶片粗糙度检测主要采用粗糙度样块比较法和轮廓粗糙度仪直接测量方法,受仪器测量范围、被测叶片曲面复杂程度、曲面模型参数限制,这两种方法得到的仅仅是大概的粗糙度范围或几条粗糙度测量线,测量结果不能完整反映叶片表面粗糙度整体信息,也与叶片的叶型位置无关,不能满足叶片粗糙度参数测量需求,同时也造成了叶片表面各位置加工和设计没有对应的粗糙度信息反馈的问题,严重影响了叶片表面质量以及叶片表面质量和气动性能对应关系的准确性评估。

本文基于叶片实测截面数据,采用坐标测量机上搭载的粗糙度测头,对不同类型的叶片进行多方向多位置的粗糙度测量实验,将叶身粗糙度值与叶片叶身特性关联在一起,分析不同位置上的叶片粗糙度差异,得到叶片粗糙度测量方法。

1 航空发动机叶片粗糙度测量方法研究

1.1 航空发动机叶片粗糙度测量

叶片压力面和吸力面的粗糙度作为叶片表面参数,对于叶片加工过程中加工纹理、材料成分和表面硬度的变化十分敏感,在加工链的最后反映了加工的好坏,因此明确叶身各部位的粗糙度对叶片加工的控制十分重要。叶片粗糙度过大或过小都会影响叶片的气动性能,同时叶片粗糙度也用于验证叶片能否满足使用要求。叶片的压力面、吸力面如图1所示。

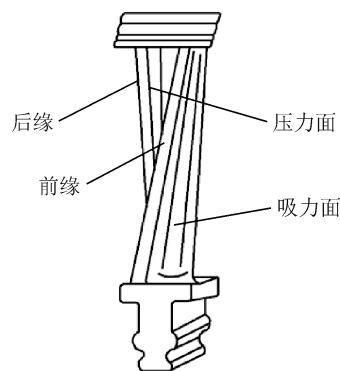


图1 叶片吸力面压力面示意图

Fig.1 Schematic diagram of blade suction surface and pressure surface

HB 5647-98《叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度》中对叶身粗糙度的数值做出明确要求,规定叶身粗糙度包含叶身与转接圆弧的粗糙度,如表1所示。

表1 叶身与转接圆弧粗糙度要求

Tab.1 Roughness requirements of blade body and transition arc

类别		粗糙度 $Ra / \mu m$
压气机	转子叶片	0.4
	整流叶片	0.8 ~ 1.6
涡轮	转子叶片	0.8 ~ 3.2
	导向器叶片	

叶片粗糙度的检测主要由评定轮廓的算术平均偏差 Ra 、轮廓的最大高度 Rz 、评定轮廓的均方根偏差 Rq 等组成^[11-12]。其中,评定轮廓的算术平均偏差定义为在取样长度 l 内轮廓的纵坐标值 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

轮廓的最大高度定义为最大波峰 $Z(x)_{\max}$ 和波谷 $Z(x)_{\min}$ 的和,为

$$Rz = Z(x)_{\max} - Z(x)_{\min} \quad (2)$$

评定轮廓的均方根偏差定义为取样长度内纵坐标的均方根值,为

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (3)$$

由粗糙度参数定义可以得到,测量位置和方向的选取会直接影响粗糙度测量的精度。待测表

面上不同方向的轮廓线有很多组,任何一组的测量数据都会有差别,因此选取一个比较恰当的法向截面是关键。若测量方向不同,得到的轮廓线型不同,最后得到的粗糙度会有很大差别^[13-15]。

研究叶片叶身粗糙度值大小,从测量的角度将粗糙度数值与叶片型面信息相关联,通过多组测量数据,分析不同种类叶片表面能够反映吸力面和压力面粗糙度的测量位置。依据不同的加工表面,选取垂直于加工表面的方向为测量方向,此时的粗糙度测量结果最接近实际值,但叶片加工工艺不同,无明显纹理方向,因此,以叶片弦线方向为基准旋转不同角度,进行多个方向的粗糙度测量,取最大值作为最终粗糙度值。

1.2 基于四轴坐标测量机对发动机叶片粗糙度测量

四轴联动坐标测量机^[16-17]通过坐标测量机的三维直线运动和一维旋转同步运动控制,实现对叶片表面的精密测量,实验选取的坐标机最大允许示值误差为 $\pm(0.9\text{ }\mu\text{m} + 2 \times 10^{-6} L)$ 。坐标测量机上搭载粗糙度测头,测头包括1个沿测量方向线性运动的测针和3个旋转范围为 180° 的旋转轴。粗糙度测量过程中,坐标机三轴运动到相应位置时停止运动,测头旋转轴旋转到特定角度,测针在叶片表面探测,实现对叶片表面不同位置的粗糙度测量。坐标测量机及粗糙度测头如图2所示。



图2 粗糙度测量设备

Fig.2 Roughness measuring equipment

首先建立叶片整体坐标系,对叶身进行测量,得到叶身各等高截面的实测数据。由于粗糙度测头通过在被测对象的表面进行较短行程的线性运

动完成粗糙度测量,因此测量开始前,基于四轴坐标测量机测得的叶片截面数据,在叶片模型的理论值上细化测量起始点并明确测量方向,完成叶片粗糙度测量位置与叶片型面位置的关联。在叶片压力面和吸力面上,均匀设置不同高度的等高截面,选择截线上区域面积相同,位置分布均匀的各个粗糙度待测位置,进行不同方向的粗糙度测量,测得叶片各位置的粗糙度值。粗糙度测量过程中,采用了高斯滤波法^[18]进行滤波,长波滤波器截止波长 λ_c 为 0.8 mm ,短波滤波器截止波长 λ_s 为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。输出粗糙度测量结果的点云数据和滤波后得到的粗糙度数据,分析压力面和吸力面上主要的粗糙度测量区域。

2 叶片粗糙度测量位置的测量实验

为研究叶片粗糙度的测量方法,选择参考球体和标准多刻线样板验证测头准确性;选择大小、弯扭形状不同的压气机叶片和风扇叶片进行不同位置的粗糙度测量实验。

2.1 验证粗糙度测头测量的准确性

在进行叶片粗糙度测量实验前,需要完成测头的几何自标定和粗糙度自校准。几何自标定通过测头测量直径为 8 mm 的参考球体,完成各个角度的触碰,实现对测头运动的自标定,如图3所示。

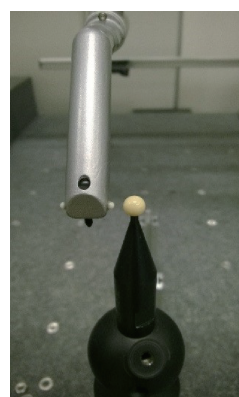


图3 粗糙度测头几何自标定

Fig.3 Geometric self-calibration of roughness probe

粗糙度自校准是对测头粗糙度测量功能的校准,通过对 Ra 标称值 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 标准多刻线样板进行测量,验证测头针尖是否磨损;通过对 Ra 标称值在 $0.05 \sim 6.5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的4块标准多刻线样板进

行测量,验证测头对于叶片粗糙度测量的准确性;通过粗糙度测头对 Ra 标称值 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的标准多刻线样板在中间位置进行重复测量,验证测头重复性,如图4所示。

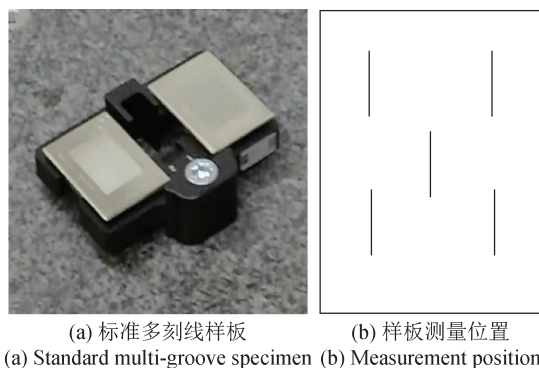


图4 粗糙度测头粗糙度自校准

Fig.4 Roughness self-calibration of roughness probe

2.2 对多种叶片不同位置进行粗糙度测量

实验选择的压气机叶片和风扇叶片符合JJF(军工)282-2021《航空发动机叶片型面参数校准规范》,实验中选择了07号、16号叶片和20号叶片,基本涵盖了发动机叶片类型和大小,选择的叶片种类、叶高、弦长、材料等参数等如表2所示。

表2 叶片种类及参数

Tab.2 Blade types and parameters

叶片编号	种类	叶片高度/mm	材料	扭转角/(°)
07号	压气机叶片	53.0	TC4	18.078 0
16号	风扇叶片	139.4	TC4	19.846 5
20号	风扇叶片	266.0	TC4	16.382 0

为了保证选择的叶片粗糙度位置能代表叶片整体的粗糙度信息,对3种大小不同的叶片选取压力面和吸力面,以叶片榫头为底面基准,按照高度均匀分布的等高截面,设置沿等高截面均匀分布的测量位置 S_{xy} 和 P_{xy} , S 为压力面, P 为吸力面, X 为测量的截面编号, Y 为弦向测量位置编号,如图5所示。在规定的测量位置上,由于叶片表面无明显加工痕迹,因此以展向和弦向为参考,选取多个方向进行测量,大致方向选择如图6所示,根据粗糙度定义选取该测量位置上最大粗糙度测量值作为该测量位置粗糙度。

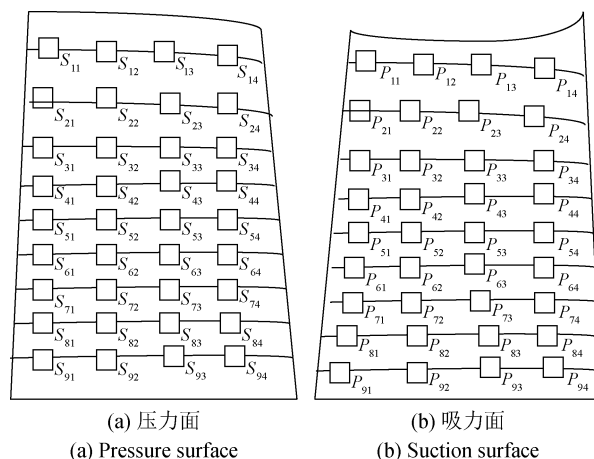


图5 叶片粗糙度实验测量位置

Fig.5 Measuring position of blade roughness experiment

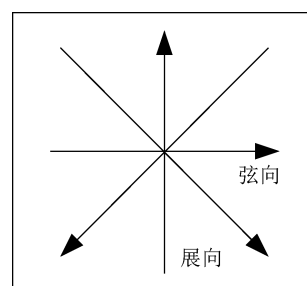


图6 测量实验中测量方向示意图

Fig.6 Schematic diagram of measurement direction in measurement experiment

GB/T 1031-2009《产品几何技术规范(GPS)表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值》中规定,取样长度 l_r 按表3选择 0.8 mm 。由于加工表面不均匀,在评定表面粗糙度时,评定长度根据不同的加工方法和相应的取样长度来确定。当被测表面均匀性较好,测量时可选用小于 $5 l_r$ 的评定长度;均匀性较差的表面可选用大于 $5 l_r$ 的评定长度。为

表3 Ra 参数值与取样长度 l_r 值的对应关系

Tab.3 Correspondence between parameter Ra and sampling length l_r

$Ra / \mu\text{m}$	l_r / mm
$\geq 0.008 \sim 0.02$	0.08
$> 0.02 \sim 0.10$	0.25
$> 0.1 \sim 2.0$	0.80
$> 2 \sim 10$	2.50
$> 10 \sim 80$	8.00

保证测量范围足够涵盖叶片粗糙度的信息，评定长度 l_n 选用 $5\ l_r$ ，但考虑到测头开始测量和结束测量时，测力变化对测点存在影响，因此开始测量后的 $0.5\ l_r$ 和结束测量前的 $0.5\ l_r$ 作为预测量，评定长度 l_n 设置为 $6\ l_r$ ，为 $4.8\ \text{mm}$ 。

3 测量实验结果

3.1 粗糙度样板测量

在使用标准球标定了粗糙度测头后，测量 Ra 标称值为 $0.4\ \mu\text{m}$ 的粗糙度样板验证粗糙度测头的针尖无磨损情况。测量 Ra 标称值在 $0.05\sim 6.5\ \mu\text{m}$ 范围内4块标准多刻线样板的规定位置，得到表4所示数据，验证粗糙度测头的准确度。重复测量 Ra 标称值为 $3.0\ \mu\text{m}$ 标准多刻线样板中间位置10次，得到表5所示数据，验证粗糙度测头的重复性。

表4 标准多刻线样板测量结果
Tab.4 Measurement results of standard multi-groove specimens μm

Ra 标准值	Ra 测量值
6.47	6.23
1.65	1.69
0.40	0.40
0.05	0.06

表5 相同位置重复测量结果
Tab.5 Repeated measurement results at the same position μm

中间位置重复测量 Ra	标准差
2.93	0.07
3.00	
2.91	
2.89	
3.00	
3.05	
3.01	
2.85	
2.95	
3.05	

根据粗糙度测头的最大允许误差 $\pm 5\%Ra+15\ \text{nm}$ 和标准多刻线样板标准值计算上、下限值，表5中测量值满足要求，验证了粗糙度测头的准确性。表4中由重复测量结果计算得到的标准差在测量结果范围内，因此粗糙度测头的重复性也满足要求。

3.2 07号叶片测量结果

07号叶片属于压气机叶片，高度较小，在叶片吸力面和压力面上，分别以叶片榫头底部平面为高度起始，选择 $25\sim 60\ \text{mm}$ 的叶身范围，以 $5\ \text{mm}$ 为高度间隔设置不同高度，如图7(a)和7(b)所示，在各等高截面上沿曲线方向，按照弦长大小均匀设置3个测量区域，设置弦向、展向和2个对角线4个测量方向如图7(c)所示，进行粗糙度测量。

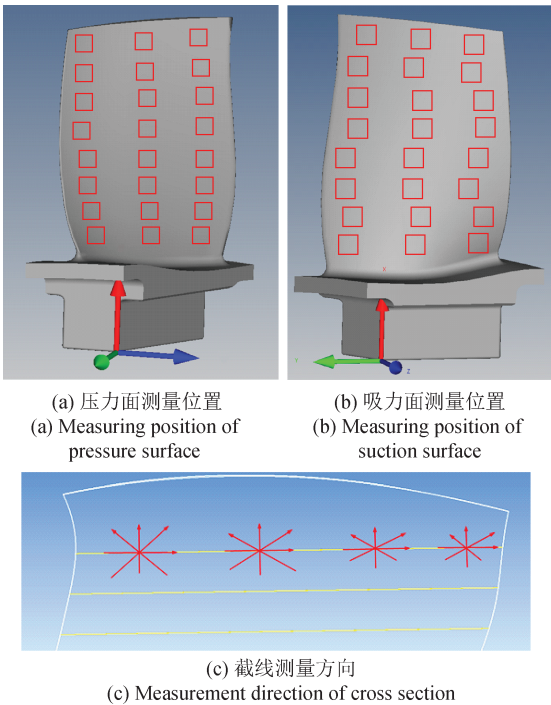


图7 07号叶片粗糙度测量实验
Fig.7 Roughness measurement experiment of No.07 blade

对吸力面和压力面，每个面24个测量位置得到的两组96个测量值进行分析，选取每个位置上4个方向测得的最大值作为该位置上的粗糙度值，对不同截面高度不同位置的粗糙度进行分析，横坐标为同一截线上不同测量位置，图例表示不同高度的等高截线，结果如图8所示。

3.3 16号叶片不同位置测量

16号叶片属于风扇叶片，选择的3个叶片大小适中，选择 $70\sim 150\ \text{mm}$ 的叶身范围，以 $10\ \text{mm}$ 为

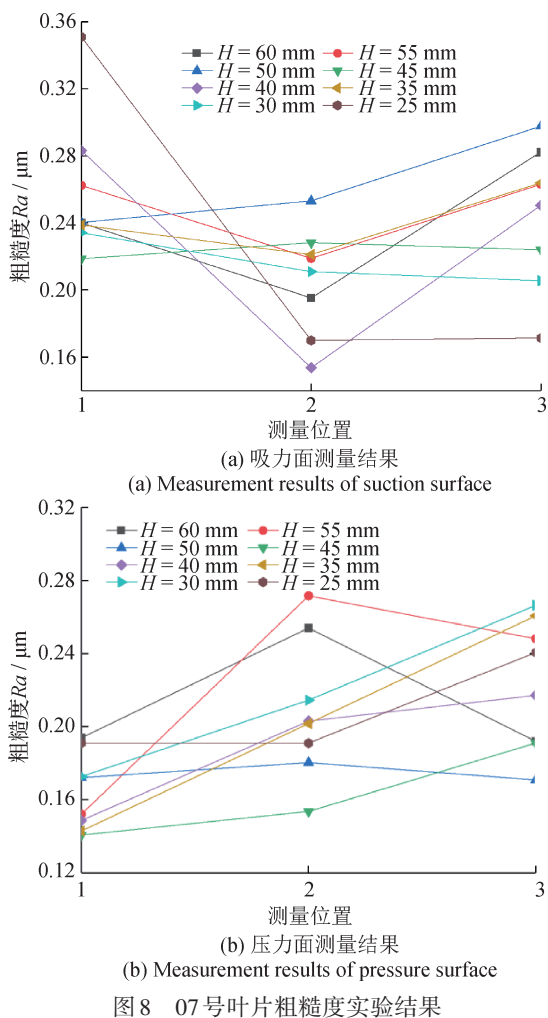


图8 07号叶片粗糙度实验结果

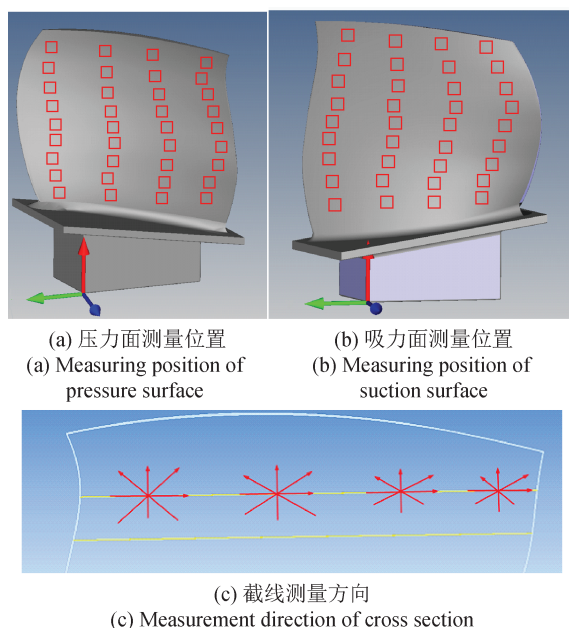


图9 16号叶片粗糙度测量实验

Fig.9 Roughness measurement experiment of No.16 blade

高度间隔设置不同高度,如图9(a)和9(b)所示,在各等高截面上,沿曲线方向按照弦长大小均匀设置三个测量区域,设置弦向、展向和两个对角线4个测量方向(和07号叶片类似),由于弦长比07号叶片大,因此在截面上选择了4个测量位置,如图9(c)所示,进行粗糙度测量。

对吸力面和压力面,每个面36个测量位置得到的两组144个测量值进行分析,通过和7号叶片相同的处理方式,得到结果如图10所示。

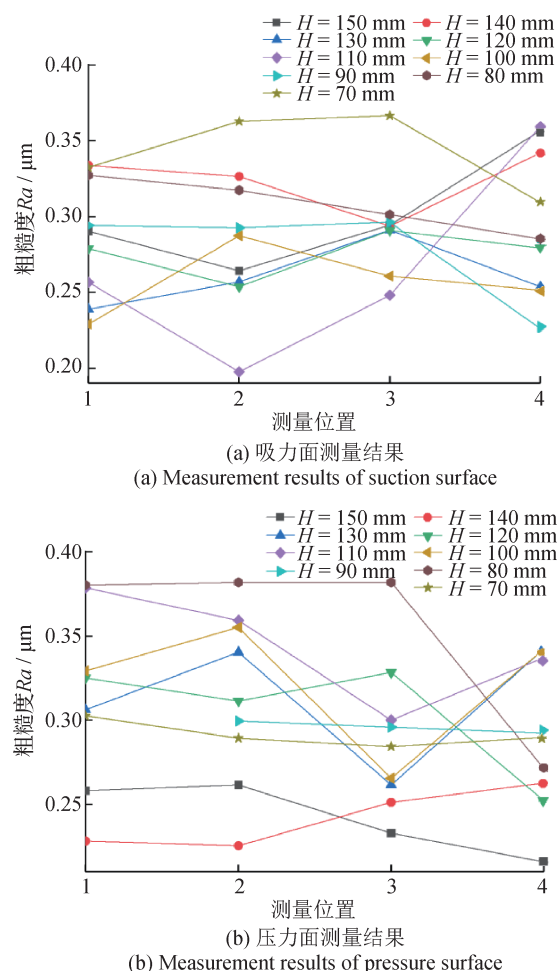


图10 16号叶片粗糙度测量实验结果

Fig.10 Test results of roughness of No. 16 blade

3.4 20号叶片测量结果

20号叶片属于风扇叶片,是三个叶片中最大的叶片,选择70~250 mm的叶身范围,以20 mm为高度间隔设置不同高度如图11所示,在设置的等高截面上,均匀设置4个测量位置,按16号叶片选择相同的测量方向,进行粗糙度测量。

对吸力面和压力面, 每个面的 37 个测量位置得到的两组 148 个测量值进行分析, 结果如图 12 所示。

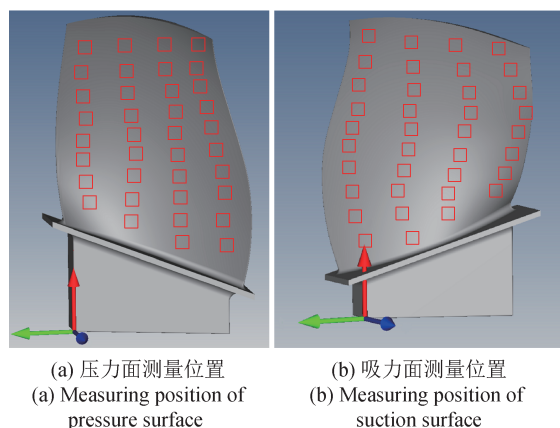
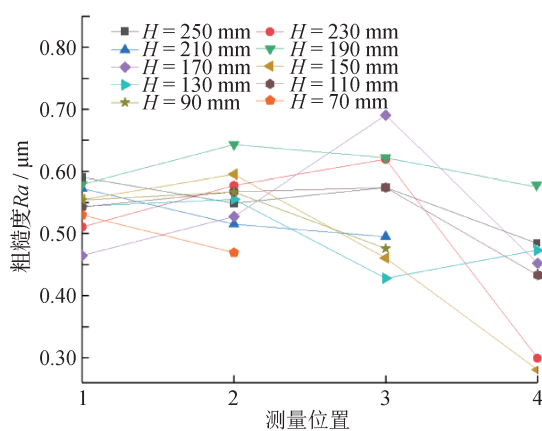
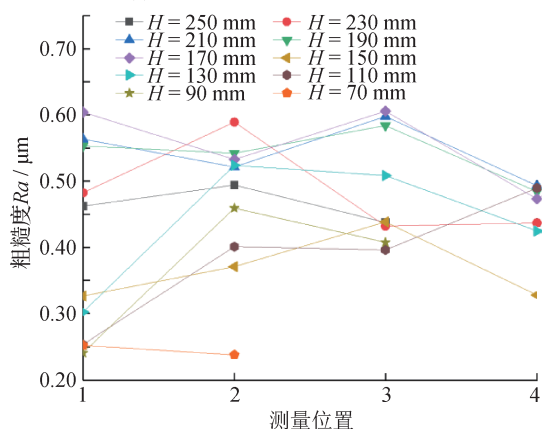


图 11 20 号叶片粗糙度测量实验
Fig.11 Roughness measurement experiment of No.20 blade



(a) 吸力面测量结果
(a) Measurement results of suction surface



(b) 压力面测量结果
(b) Measurement results of pressure surface

图 12 20 号叶片粗糙度测量实验结果

Fig.12 Test results of roughness of No.20 blade

4 实验结论

由 07 号、16 号和 20 号叶片的测量实验结果可知, 叶片粗糙度变化范围分别为 $0.14 \sim 0.35 \mu\text{m}$, $0.13 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 和 $0.23 \sim 0.69 \mu\text{m}$, 表明了随着叶片变大, 粗糙度变化范围也随之变大。由于叶片变大, 叶身面积变大, 此时加工差异表现的更加明显, 同时弯扭表现也更明显。因此针对大小不同的叶片, 需要设置不同数目和不同位置的粗糙度待测区域, 才能正确反映叶片粗糙度的变化。

实验中, 以叶片榫头底面为基准, 对不同高度的等高截面进行测量, 由测量结果可看出, 叶片底部和顶部的粗糙度变化较大, 而在叶片高度中间区域的粗糙度值大小接近。结合叶片形状可以看到, 较大的粗糙度值出现在叶片弯扭较大的位置。表明了确定叶片粗糙度大小的过程中, 粗糙度要与叶片型面位置、叶片高度相联系, 且同时选择高度较高和较低的位置; 而对于叶身中间位置, 需要粗糙度测量设置在弯扭较大的位置。

对比 3 个叶片的吸力面和压力面的测量结果可知, 压力面比吸力面的测量结果更为分散, 表明了对叶身粗糙度测量时, 压力面需要设置更多的测量位置才能完整反映叶片粗糙度。

为了保证叶片粗糙度涵盖叶片整体的粗糙度信息, 不同大小的叶片选取不同数目的测量位置时, 参考实验得到的测量结果, 综合考虑国外厂商测量叶片位置的相关要求, 对弦长小于或等于 100 mm 的叶片, 取 10 个测量位置, 如图 13 所示,

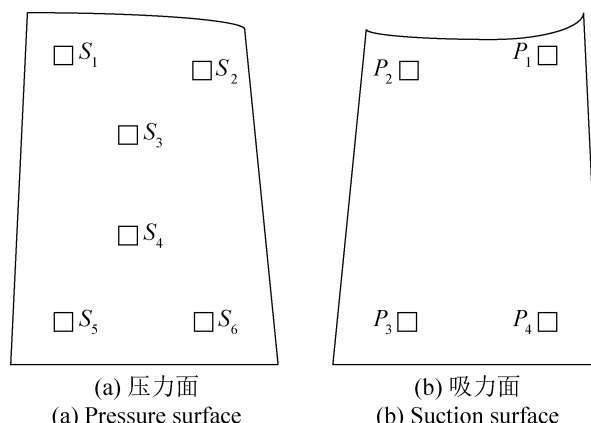


图 13 弦长小于或等于 100 mm 的叶片粗糙度测量位置示意图

Fig.13 Sketch map of roughness measurement position of blades with chord length less than or equal to 100 mm

对弦长大于 100 mm 的叶片, 取 20 个测量位置, 如图 14 所示。在规定的测量位置上, 由于叶片表面没有明显加工痕迹, 因此沿展向和弦向多个方向进行测量 (如图 6 所示), 根据粗糙度定义, 选取该测量位置上最大粗糙度测量值作为该测量位置粗糙度值。

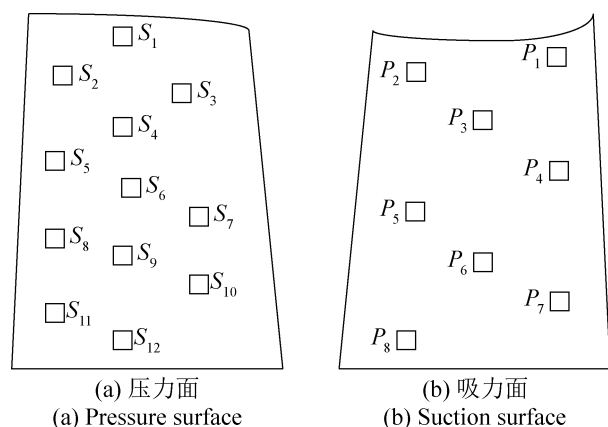


图 14 弦长大于 100 mm 的叶片粗糙度测量位置示意图

Fig.14 Sketch map of roughness measurement position of blades with chord length greater than 100 mm

5 结论

航空发动机叶片粗糙度的测量主要是基于坐标测量机充分利用叶片实测点云数据和理论模型, 应用多种叶片完成粗糙度测量位置测量方向的实验, 完成叶片粗糙度测量方法的研究。利用该方法进行的叶片粗糙度测量, 初步掌握了叶片表面型面参数中粗糙度测量部分。同现阶段利用粗糙度测量仪的叶片粗糙度测量方法相比, 基于坐标测量机的叶片粗糙度测量方法得到的粗糙度数据更符合粗糙度定义, 在理论上具有优势性和可靠性。

尽管现阶段叶片类自由曲面的材料和加工工艺多样化, 但由于叶片表面弯扭大, 目前的加工技术仍无法保证加工得到各位置粗糙度相同的叶片。本研究关联了测量得到的叶片粗糙度和叶片型面数据, 对叶片加工设计起到了反馈作用, 值得在叶片表面形貌参数的测量及评价领域进行推广应用。

参考文献

[1] 陆佳艳, 熊昌友, 何小妹, 等. 航空发动机叶片型面

测量方法评述[J]. 计测技术, 2009, 29(3): 1-3, 36.

LU J Y, XIONG C Y, HE X M, et al. Survey of measurement method of aero-engine blade[J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29(3): 1-3, 36. (in Chinese)

[2] 王玉, 刘涛, 单纯利, 等. 航空发动机叶片评价方法[J]. 计测技术, 2011, 31(6): 33-36.

WANG Y, LIU T, SHAN C L, et al. Measurement of aero engine blades in CMM[J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(6): 33-36. (in Chinese)

[3] 何小妹, 刘峻峰, 何学军, 等. 浅谈航空发动机叶片几何参数测试计量保障体系[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 51-55.

HE X M, LIU J F, HE X J, et al. Discussion on measurement and metrology assurance system of aero-engine blade geometry parameters[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 51-55. (in Chinese)

[4] 田森, 吴娅辉, 贾志婷, 等. 基于Campbell理论的航空发动机涡轮叶片共振裕度分析[J]. 计测技术, 2022, 42(4): 42-50.

TIAN S, WU Y H, JIA Z T, et al. Analysis of resonance margin of aero-engine turbine blade based on Campbell theory[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(4): 42-50. (in Chinese).

[5] 曹斌, 何小妹, 王一璋, 等. 一种叶片前后缘削边形状计算方法[J]. 计测技术, 2019, 39(2): 6-10.

CAO B, HE X M, WANG Y Z, et al. Method for calculating cutting shape of leading and trailing edges of blade[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(2): 6-10. (in Chinese).

[6] BAO J D, ZHAO R, SUN Y H, et al. Research on the evaluation of plane orientation error based on uncertainty theory[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 635-637: 932-937.

[7] AL BISHTAWI B, SCRIBANO G, TRAN M V. Numerical analysis on the effect of blade roughness on cavitating flow characteristics in centrifugal pumps[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(7): 1-14.

[8] 李斌, 张江伟, 马清妍. 航空发动机风扇叶片表面粗糙度影响的研究[J]. 机械制造, 2021, 59(10): 9-12.

LI B, ZHANG J W, MA Q Y. Investigation on influence of surface roughness of aero engine fan blade[J]. Machinery, 2021, 59(10): 9-12. (in Chinese)

[9] EGOROV S, KAPITANOV A, LOKTEV D, et al. The

- problems of measuring profile and roughness of turbine blades[J]. Applied Mechanics and Materials, 2018.
- [10] 中国航空工业总公司. 叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度: HB5647-98[S]. 1999.
- Aviation Industry Corporation of China. Marking tolerance of blade profile and blade body roughness of: HB5647-98 [S]. 1999. (in Chinese)
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值: GB/T 1031-2009[S]. 北京: 中国质检出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: profile method - Surface roughness parameters and their values: GB/T 1031-2009[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 表面粗糙度术语表面及其参数: GB/T 3505-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Surface roughness terms surface and its parameters: GB/T 3505-2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese)
- [13] 刘斌, 冯其波, 匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学仪器, 2004, 26(5): 54-58.
- LIU B, FENG Q B, KUANG C F. Survey of measurement methods for surface roughness [J]. Optical Instruments, 2004, 26(5): 54-58. (in Chinese)
- [14] 罗正国, 蒲竞秋. 表面结构与粗糙度测量方法浅析[J]. 工具技术, 2006, 40(3): 123-125.
- LUO Z G, PU J Q. Analysis of surface structure and roughness measurement methods [J]. Tool Engineering, 2006, 40(3): 123-125. (in Chinese)
- [15] 袁长良. 表面粗糙度及其测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- YUAN C L. Surface roughness and its measurement[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [16] 孟书广. 航空发动机复杂零部件的新型测量技术[J]. 航空制造技术, 2014 (13): 32-35.
- MENG S G. New metrology technique for complex components of aero - engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(13): 32-35. (in Chinese)
- [17] 任俊刚. 叶片型面测量原理与技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- REN J G. Research on blade profile measurement principle and technology[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局. 产品几何技术规范 (GPS) 滤波第21部分: 线性轮廓滤波器 高斯滤波器: GB/T 26958.21-2020/ISO 16610-21: 2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration of Market Regulation. Geometrical product specifications (GPS) -Filtration-Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters: GB/T 26958. 21-2020[S]. Beijing: China Standards Press, 2020. (in Chinese)

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 张学仪 (1996—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为航空发动机叶片测量。



通讯作者: 何小妹 (1977—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为复杂曲面测量与校准、线纹参数测量与校准。