

doi:10.3788/gzxb20174611.1128002

一种基于激光传感器快速检测透平叶片的方法

李兵, 闫潇, 陈磊, 辛美婷, 魏翔

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要:以标准球作为测量基准,以线扫描激光传感器作为测量手段获取透平叶片的全数据测量点云.测量设备采用四坐标测量机搭载激光线扫描传感器的方式,以保证叶片的测量效率,并兼顾测量机的控制准确度.通过测量机获得透平叶片的点云数据,并对获得的截面点云数据进行误差补偿、去噪、简化等预处理操作,利用非均匀有理 B 样条曲线拟合算法得到叶片特征曲线.实验结果证明该方法可以有效地提高叶片前后缘的重构准确度,并为叶片的三维建模提供更为准确的原始数据.

关键词:线扫描激光传感器;全数据测量;快速检测;透平叶片;误差补偿;拟合;叶片前后缘

中图分类号:TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1128002-11

Rapid Method to Measure Turbine Blade Based on Laser Sensor

LI Bing, YAN Xiao, CHEN Lei, XIN Mei-ting, WEI Xiang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel method was proposed based on laser line-scanning sensor to obtain point clouds of turbine blade. Due to the geometrical invariability, the standard sphere was used as measuring basis. The surface data of blades were measured by four-coordinate measuring machine with line-scanning laser sensor, which can ensure the measuring efficiency of blades and take the control accuracy of the measuring machine into account. Firstly, the point cloud data of the turbine blade were obtained. Then some pre-processing operations, such as error compensation, de-noising and data reduction, were performed before the matching operations. Finally, the Non-Uniform Rational B-Splines curve fitting algorithm was utilized to get the characteristic curve of blade surface. The experimental results indicated that the method can effectively improve the reconstruction accuracy of the blade leading and trailing edge and provide more accurate raw data for the 3D modeling of the blade.

Key words: Laser line-scanning sensor; Total data measurement; Rapid measurement; Turbine blade; Error compensation; Fitting; The leading and trailing edge of the blade

OCIS Codes: 280.3420; 120.6650; 220.4840; 120.4630

0 引言

叶片是航空发动机、汽轮机、燃气轮机等设备中的关键零件,其承担着将蒸汽热能转化为机械能的重要任务,叶片的质量是整机质量的保证,叶片的形状误差直接影响着整机的能量转化效率^[1-2].叶片型面一般为变截面扭转曲面并且尺度跨度大、受力强、承载大^[3-4].叶片的前后缘是叶片设计的关键参数,其加工制造准确度直接决定叶片气动性能的优劣.通常把前后缘设计成圆弧,为了检测叶片的误差,需要得到前后缘的参数信息.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2013CB035704-3)、国家自然科学基金(No.51421004)和中央高校基本科研业务费专项资金(No.xjj2017016)资助

第一作者:李兵(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测及精密测试技术. Email:lb@xjtu.edu.cn.

通讯作者:陈磊(1983—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光电检测及精密测试技术. Email:raychen@xjtu.edu.cn.

收稿日期:2017-05-05; **录用日期:**2017-07-14

<http://www.photon.ac.cn>

国外发达国家对于叶片型面检测研究起步比较早,技术相对完善,有相对成熟的产品.接触式测量领域,如瑞典海克斯康 Global 系列三坐标测量机^[5],非接触测量领域,如德国 GOM 公司 ATOS 光学扫描仪^[6],但都价格昂贵且技术封锁.国内研究起步比较晚,主要采用的是三坐标机与光学检测技术相结合的方法,检测效率低且测量准确度低.基于非接触式测量优点,国内众多学者进行了大量研究,相继研发出了相对应的产品,如西安交通大学四坐标复合式叶片型面轮廓测量仪^[7].测量叶片型面的方法有很多种,如标准模板法^[8]、三坐标机测量法^[9-10]、机器视觉法^[11]、CT 扫描法^[12-13]、激光点测量法^[14-15]等.标准模板法将被测物件与标准模板进行对比,借助外界光,通过物件与模板之间的透光量去评估物件误差,这种方法准确性差,且不能定量分析;三坐标机测量法,是接触式测量,采用逐点扫描方式,成本高,易受到测球半径和型面曲率影响,进而造成失真;机器视觉法,是一种非接触式测量方法,测量准确度低,不能满足准确度叶片的测量要求;CT 扫描法,其特点是能测量内部结构信息,但准确度低,对周围环境和操作人员有辐射伤害;四坐标测量机激光点测量法,是非接触式测量,利用激光三角法原理,通过点扫描对叶片进行扫描,但测量中检测到的数据太少,对于提取的特征曲线准确度会有较大的影响.通过对上述方法优缺点的分析,本文提出了一种新的叶片型面测量方法,采用激光束对叶片进行全数据扫描,可以获得更多的前后缘数据.通过对点云数据进行处理分析,求出叶片的型面数据及前后缘形状参数,为曲面重构提供了更为精确的原始数据.

1 测量原理及仪器

测量采用四坐标测量系统(见图 1),包括 X 轴横臂、Y 轴滑座、Z 轴立柱、W 轴回转台及底座等等,通过各运动轴的协同运动,可实现叶片型面的全数据测量.通过对接触式测量和非接触式测量方法的对比,选用一种基于激光三角法的非接触测量方法.随着光学测量的发展,其准确度可满足叶片型面测量的要求,并且具有检测效率高,与叶片非接触的特点,可保证叶片在测量过程中不被传感器划伤.在测量过程中,由于测量场地的限制,需在不同角度对物体进行多视角测量,由于各个视角的测量数据所在坐标系不同,需对测量数据进行坐标转换,即多视点云拼接.本文采用标准球(见图 2)作为测量基准,在测量叶片型面前分别获得标准球坐标数据,根据其几何特征不变的特点利用三点法计算坐标转换矩阵,进而实现各个坐标系的统一.叶片测量设备选用日本基恩士 LJ-V7060 激光轮廓传感器,光源为蓝色半导体激光,发射光束属于直射式,具有测量准确度高、扫描范围广、性能稳定的优点.测量原理是:激光发生器产生的光束,经过柱面物镜后扩大为条状;激光到达被测物体表面后产生漫反射,其反射光束被 2D 接收透镜组接收,并将其投影在 CD 面阵上形成测物体的剖面图像;处理器通过检测位置、形状的变化来测量被测物体的位移和形状.图 3 为激光轮廓测量传感器原理图,主要技术参数如表 1.本文选用数据采集卡的是北京阿尔泰公司的 PCI-2300,它是一种基于 PCI 总线结构的数据采集卡,12 位 A/D 转换准确度,稳定可靠,能够实现自动配置,即插即用,方便使用.数据采集系统能实时采集测量过



图 1 四坐标测量机

Fig.1 Four-coordinate measuring machine

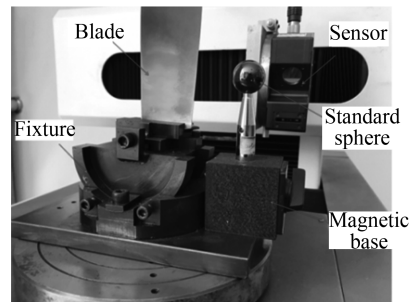


图 2 测量设备实物

Fig.2 Measuring machine physical structure

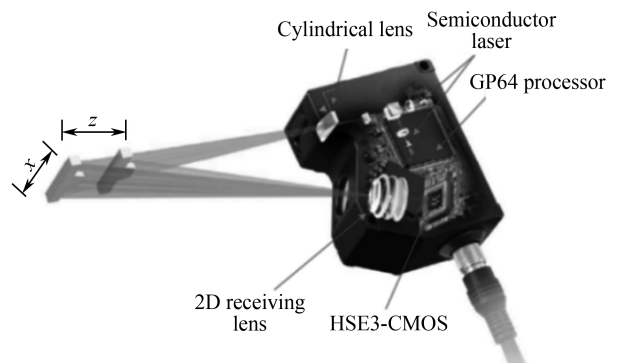


图 3 基恩士 LJ-V7060 激光传感器

Fig.3 KEYENCE LJ-V7060 Laser sensor

程中的线性激光传感器的测量值、获取 X、Y、Z 三个直线轴的光栅尺和 W 轴回转平台的圆光栅尺的读数,然后将其上传给主控计算机,主控计算机根据控制指令对数据进行保存、处理等操作。

表 1 基恩士 LJ-V7060 激光传感器主要参数

Table 1 Main parameters KEYENCE LJ-V7060 of laser sensor

Project name	Parameters/specifications
Model	LJ-V7060
Size	110 mm×80 mm×42 mm
Light types	Blue semiconductor laser(405 nm)
Spot diameter	About 21 mm×45 μm
Reference range	60 mm
Height measurement range	-8 mm~8 mm
Width measurement range	16 mm
Width contour data interval	20 μm
Height repetition accuracy	0.4 μm
Width repetition accuracy	5 μm
Sample frequency	32 μs
Temperature characteristic	0.01% of F.S./°C
weight	About 450 g

2 测量方案设计

2.1 测量方法分析

实验检测的对象是航空发动机四级叶片(图 4、5),其型面最大宽度为 52.8 mm、最大高度为 137±0.1 mm。叶片型面具有形状复杂,前后缘半径小(≤ 0.25 mm)且薄、曲率变化大的特点。在叶片型面测量中,叶片前后缘数据的获取一直是难点问题。对于前后缘测量,标准模板法测量准确度低,无法得到有效的测量数据,而且不同截面的前后缘形状不同,因此需多个样板,成本较高;三坐标机测量法易受到测球半径和前后缘曲率影响出现跳点、重叠点和尖边点等,造成轮廓失真或轮廓偏离;机器视觉法和 CT 扫描法,对于测量前后缘这种微小的几何尺寸,测量准确度较低,产生误差过大;由于前后缘曲率变化大,激光点测量法很难保证光点始终与被测物体垂直,因此会产生倾角误差使得测量准确度差。

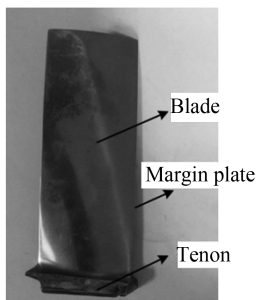


图 4 四级航空发动机叶片
Fig.4 Four level Aero-engine blade

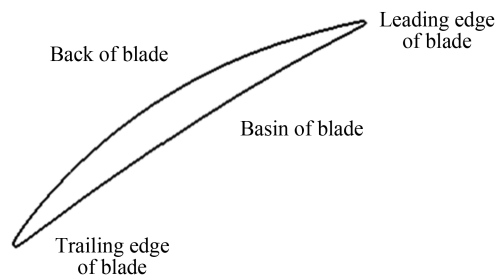


图 5 叶片截面图
Fig.5 Blade cross-section

由于叶片前后缘特点的限制,测量过程中容易出现跳点或者漏测的现象,要改善这种现象,则需更多的光点入射到叶片前后缘。对于此问题,本文提出一种基于激光线扫描的测量方法,采用激光束对叶片进行全数据扫描,获得更多前后缘的有效数据。选用的线扫描激光传感器,可发射一条带状光束,一次能够采集密集的 800 个数据点,将激光束方向调整到与叶片截面平行,当一条光束完全入射到叶片型面时可获得叶片截面上 800 个数据点,采用此测量方法,通过使光束入射到前后缘位置可测得更多的前后缘数据点。此测量方法在保证叶片测量效率的前提下,能够测得更多的叶片型面数据,且能得到更为精确的叶片特征截面点。

2.2 测量前准备

首先,调整激光传感器姿态,使其发射出的激光束与 XY 平面平行。然后,将专用夹具和标准球竖直放置在可水平旋转测量台上,再将被测叶片夹在专用夹具上。该专用夹具由底座、旋转体、叶片夹持部位组成,不

仅能将叶片完全装夹固定,且可调整叶片姿态调整,根据叶榫倾角,通过旋转体上已标刻好的角度示值调整到叶片正确的测量姿态,使用简单方便,易于完成.此实验中,调整叶片姿态确保叶片积叠轴与 X 轴方向平行,并使光束于叶片表面法线夹角尽可能小.接着,调整激光传感器与叶片距离,让测量距离保持在激光传感器景深范围内,保证尽可能多的采集到数据.

2.3 测量路径规划

测量过程中,由于传感器发射的光束长度为 16 mm,因此设定光束平行方向(即 X 轴)的位置偏移量为 16 mm,确保传感器光束不重叠.Y 轴移动距离需保证传感器与叶片型面距离始终在景深范围内.传感器测量叶片型面,是沿测量机的 Z 轴移动,其移动距离须大于叶片高度.目的是保证传感器光束完全从叶根测至叶顶,且满足一次 Z 轴方向扫描结束后,传感器在 X 轴方向移动 16 mm 位移量过程中,不会采集到数据,避免产生数据冗余.但 Z 轴方向移动距离不能过多大于叶片高度,会降低测量效率.因此,Z 轴方向移动距离取 150 mm.

测量路径:先将传感器置于叶根下方且满足至少有一半光打在叶片上→沿着 Z 轴方向向上移动 150 mm→沿着 X 轴方向向前移动 16 mm→沿着 Z 轴方向向下移动 150 mm→沿着 X 轴方向向前移动 16 mm→沿着 Z 轴方向向上移动 150 mm→沿着 X 轴方向向前移动 16 mm→沿着 Z 轴方向向下移动 150 mm→沿着 X 轴方向向前移动 16 mm→沿着 Z 轴方向向上移动 150 mm(此时旋转台为 0° 传感器与叶片位置关系,如图 6 所示,扫描路径如图 7 中实线所示)→转台旋转 90° →沿着 Y 轴方向向后移动 20 mm→沿着 Z 轴方向向下移动 150 mm→沿着 Y 轴方向向前移动 20 mm(此时为旋转台旋转 90° 后传感器与叶片位置关系,如图 8 所示,扫描路径如图 9 中实线所示)→转台旋转 90° →以上述方式扫描叶片另外一侧型面(旋转台旋转 180° 后传感器与叶片位置关系和 0° 时位置关系相似,扫描路径如图 7 虚线所示,旋转台旋转 270° 后传感器与叶片位置关系和 90° 时位置关系相似,扫描路径与旋转 90° 的扫描路径相同,如图 9 中实线所示).



图 6 0° 叶片测量位置关系图
Fig.6 0° measuring position of blade



图 8 90° 叶片测量位置关系图
Fig.8 90° measuring position of blade

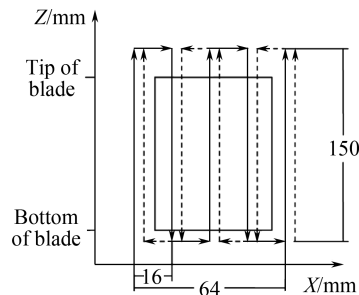


图 7 0° 和 180° 扫描路径
Fig.7 0° and 180° scanning path

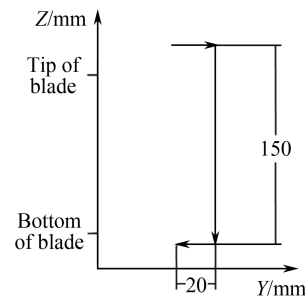


图 9 90° 和 270° 扫描路径
Fig.9 90° and 270° scanning path

2.4 测量数据处理

叶片型面测量后的目的是反求出被测量叶片型面的三维模型,得到被测叶片的各项特征参数.先对得到的点云数据进行去噪处理,选取多条叶片特征数据点拟合特征曲线,并通过特征曲线拟合出叶片特征型面,最后得到叶片的三维模型,点云数据处理流程如图 10 所示.

3 实验结果分析

3.1 测量数据拼接

三个线性无关点可表示一个完整的坐标系,因此对于坐标系转换,可用三对基准点进行匹配,通过将三对基准点移动对齐,求出它们之间的平移矩阵和旋转矩阵,从而将两个坐标系下的数据变换到同一个坐标系下。

试验中,选择标准球的球心、顶点和离传感器距离最近点作为测量基准点.第一次测量中,激光传感器竖直扫描标准球,获得标准球表面上大量数据点,通过 MATLAB 软件分析获得离传感器最近点 $p_1(x, y, z)$,根据几何关系获得球心坐标为 $p_2(x, y+R, z)$,顶点坐标为 $p_3(x, y+R, z+R)$,其中, R 为标准球半径.同理,获得第二次测量中这三个基准点坐标为 q_1, q_2, q_3 .具体算法为^[16]:

- 1) 变换 p_1 到 q_1 ;
- 2) 设矢量 $\mathbf{V}_1 = p_2 - p_1, \mathbf{W}_1 = q_2 - q_1$, 计算矢量

$$\begin{cases} \mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_1 \times (p_3 - p_1) \\ \mathbf{W}_3 = \mathbf{W}_1 \times (q_3 - q_1) \\ \mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_3 \\ \mathbf{W}_2 = \mathbf{W}_1 \times \mathbf{W}_3 \end{cases} \quad (1)$$

- 3) 单位正交化

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = \frac{\mathbf{V}_i}{|\mathbf{V}_i|} \\ \mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{W}_i}{|\mathbf{W}_i|} \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \quad \begin{cases} \mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3) \\ \mathbf{w} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3) \end{cases} \quad (2)$$

- 4) 根据变换公式

$$p'_i = p_i R + T \quad (3)$$

式中, p'_i 是坐标转换后的点云坐标; p_i 是坐标转换前的点云坐标; \mathbf{R} 是旋转矩阵; \mathbf{T} 是平移矩阵.

- 5) 因为 \mathbf{v}, \mathbf{w} 为单位矩阵, 可得到 $\mathbf{R} = [\mathbf{v}]^{-1}[\mathbf{w}], \mathbf{T} = q_1 - p_1[\mathbf{v}]^{-1}[\mathbf{w}]$, 那么变化矩阵为

$$p' = p[\mathbf{v}]^{-1}[\mathbf{w}] - p_1[\mathbf{v}]^{-1}[\mathbf{w}] + q_1 \quad (4)$$

利用两次测量中这三点的位置坐标, 求出旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} , 再通过式(4)对点云数据进行坐标转换. 图 11、12 分别是拼接后的叶片型面数据的正视图和侧视图.



图 11 叶片型面正视图
Fig.11 Front view of blade profile



图 12 叶片型面侧视图
Fig.12 Side view of blade profile

3.2 截面特征分析

叶片特征截面参数是叶片型面造型的至关因素, 故特征参数的提取就显得尤为重要. 从获取的大量点云

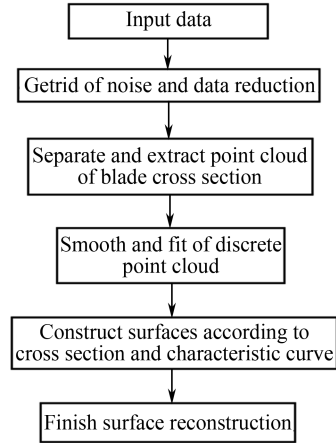


图 10 叶片点云数据处理流程
Fig.10 Flow chart of point cloud data procession

数据中,选取一个叶片截面的点云数据,计算每个点的曲率,在前缘与叶盆部分,曲率变化最大的点,即取为前缘与叶盆分割点;在前缘与叶背部分,曲率变化最大的点,即为前缘与叶背分割点,同理,可得到后缘与叶盆叶背的分割点.叶片截面的主要特征参数包括:1)弦线:又称为方位线,常用定义是与前后缘相切的直线;2)弦长:叶片截面轮廓曲线在弦线上的投影的长度;3)前、后缘半径:叶片型线两狭窄端的圆弧半径;4)最大厚度:叶片型线中最大内切圆的直径.

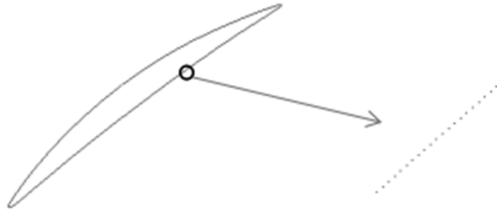


图 13 叶片截面点云数据图及放大图
Fig.13 Point cloud data of blade cross-section

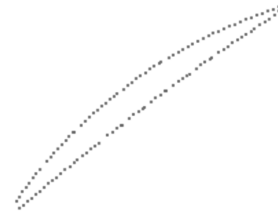


图 14 文献 15 叶片截面点云数据图
Fig.14 Point cloud data of blade cross-section of the 15th references

文献[15]选用的是日本松下公司的 HL-C211BE-MK 型点扫描激光位移传感器,垂直入射点扫描的测量方式,测量路径采用等高法,即一次只能测量一个叶片截面,获得的数据点很少.本文选取的是日本基恩士 LJ-V7060 激光轮廓传感器,扫描范围广,可获得密集叶片点云数据,操作简单,效率高.文献[15]选用厚度为 H 的标准量块为测量基准,先获得传感器离标准量块一侧面的距离,接着旋转 W 轴 180° ,获取传感器离标准量块另一侧面的距离;同理扫描叶片型面获得等间距数据点序列及旋转 180° 另一侧边的等间距数据点序列;通过坐标变换将数据转换到一个坐标系下.且此测量方法只在 0° 、 180° 两个方向进行测量,无法获得叶片前后缘数据信息,需采用插值拟合的方法,会产生误差,很难保证前后缘数据的有效性.本文选取的传感器是线扫描测量方式,从 0° 、 180° 、 90° 、 270° 四个方向扫描叶片,可获得叶片型面的全数据,为后续处理提供原始数据.图 13 是用本文测量方法获得的叶片截面点云图,虚线是局部点云数据放大图,可以发现,所获得的叶片截面数据点密集且又完整的.图 14 是文献[15]得到的同一截面数据点,从图中看出其截面数据点少且前后缘部分无数据点.从表 2 中数据对比可得到,本文方法得到的实验数据优于文献[15]中的实验数据.

表 2 叶片截面特征参数对比

Table 2 Characteristic parameters comparison of blade cross-section

	Maximum thickness/mm	Front edge radius/mm	Back edge radius/mm	Chord length/mm
Original parameters	3.86	0.13	0.14	49.2
This method	3.857 8	0.1316	0.141 5	49.196 3
Method of the 15th references	3.851 7	0.132 4	0.142 6	49.189 4

3.3 截面测量数据处理

3.3.1 点云去噪

在测量过程中,由于测量环境或者人为因素会产生噪声点或坏点,为提高叶片型面拟合准确度需对点云进行去噪处理.本文采用双边滤波算法,具体算法如下^[17]为

$$p' = p + a \times n \quad (5)$$

式中, p' 为滤波后得到的数据点, p 为初始的点云数据, n 为数据点 p 的法向量, a 为双边滤波因子,其计算公式为

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_1(\|p - p_i\|) \omega_2(\langle p - p_i, n \rangle) \langle p - p_i, n \rangle}{\sum_{i=1}^k \omega_1(\|p - p_i\|) \omega_2(\langle p - p_i, n \rangle)} \quad (6)$$

式中, k 为离采样点最近的领域内的采样点数, ω_1, ω_2 为

$$\omega_1(x) = e^{-x^2/(2\sigma_1^2)} \quad (7)$$

$$\omega_2(y) = e^{-y^2/(2\sigma_2^2)} \quad (8)$$

σ_1 取点的邻域半径, σ_2 取邻域点的标准偏差

$$\sigma_1 = \max \|p - p_i\|, i \in [1, k] \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\xi_i - \bar{\xi})^2}, x = \langle p - p_i, n \rangle \quad (10)$$

对于处理叶片点云数据滤波算法的具体步骤为:

- 1) 对每个数据点 p , 搜寻其 k 个近邻点 p_i , 计算该点与其所有近邻点 $p_i (i=1, 2 \dots k)$ 之间的欧式距离 $D_i = \| p - p_i \|$;
- 2) 计算对应的平均欧式距离 \bar{D}_i , 即 $\bar{D}_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_i$;
- 3) 计算出距离标准偏差 $S(p_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (D_i - \bar{D}_i)^2}$;
- 4) 设置阈值 S_0 , 判断 $S(p_i)$ 是否大于给定阈值 S_0 , 如果 $S(p_i) > S_0$ 则该点视为噪声点, 删除该点, 反之保留。
- 5) 对每个保留下的近邻点 p_i , 求出 $\omega_1(x)$ 中 $x = \| p - p_i \|$ 的值, 其代表 p 到 p' 的距离; 计算 $\omega_2(y)$ 中 $y = \langle p - p_i, n \rangle$; 表示 $p - p_i$ 与 p 法向量 n 的内积;
- 6) 根据式(7)、(8) 计算得到 $\omega_1(x)$ 与 $\omega_2(y)$ 的值; 根据式(6) 求出双边滤波因子 a ;
- 7) 通过式(5) 得到滤波后的新数据点;
- 8) 通过对每个数据点的计算, 就会得到新的点云数据。

此滤波算法能够很好的对三维空间中的点云数据进行去噪处理, 不仅能保持数据模型的特征, 还能够避免点云数据过渡光滑处理, 丢失有用的信息. 图 15 是原始数据局部放大图, 图 16 是滤波后数据局部放大图, 结果表明, 此滤波算法能够有效去除点云数据噪声点, 避免影响叶片型面参数提取的准确性。

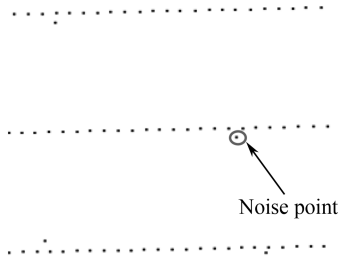


图 15 初始点云数据
Fig.15 Initial point cloud data

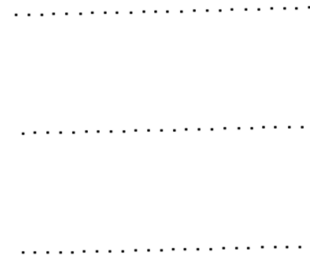


图 16 滤波后点云数据
Fig.16 Filtered Point cloud data

3.3.2 倾角误差

对于自由曲面测量, 激光束入射到其表面, 很难满足垂直入射, 故会产生倾角误差. 在自由曲面选取五个点 $P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3), P_4(x_4, y_4)$, 且五点满足图 17 中的位置关系, P_w, P_u 为 P_1 点的两个切向量, 根据二次 Bezier 曲线方程, 有

$$P(u) = (1-u)^2 B_0 + 2u(1-u) B_1 + u^2 B_2 \quad (11)$$

式中, B_0, B_1, B_2 为控制点, 令 $B_0 = P_0, B_2 = P_2, u = u_1$, 可得

$$B_1 = \frac{-(1-u_1)^2 P_0 + P_1 - u_1^2 P_2}{2u_1(1-u_1)} \quad (12)$$

则 P_1 的切向量 P_u 可表示为

$$P_u = P'(u) = -2(1-u_1)P_0 + 2(1-2u_1) \frac{-(1-u_1)^2 P_0 + P_1 - u_1^2 P_2}{2u_1(1-u_1)} + 2u_1 P_2 \quad (13)$$

$$u_1 = \frac{\sqrt{(x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2 + (z_1-z_0)^2}}{\sqrt{(x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2 + (z_1-z_0)^2} + \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 + (z_2-z_1)^2}} \quad (14)$$

$$n = \frac{P_u \times P_w}{|P_u \times P_w|} \quad (15)$$

由于激光束测量方向与 Z 轴垂直, 获得的截面数据点都在 XY 平面内, 故只需求出 P_u 即可, 通过求得的切向量 $P_u(x, y)$ 可得到 P_1 倾角 (见图 18)

$$\alpha = \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (16)$$

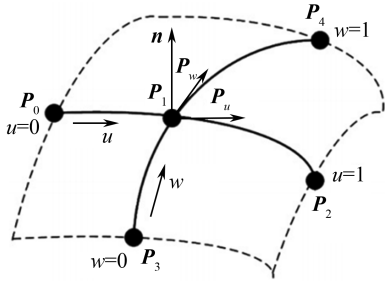


图 17 二次 Bezier 交叉曲线

Fig.17 Quadratic Bezier curve

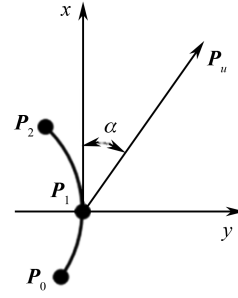


图 18 倾角几何关系图

Fig.18 Geometric relationship of inclination angle

图 19 表示物体倾斜测量原理,通过测量原理分析,可得到倾角误差公式

$$E_\alpha = OC|_{\alpha \neq 0} - OC|_{\alpha=0} = \frac{R^2 L' x \cos \beta}{L^3} \left(1 + 2 \frac{x}{L} \cos \beta \right) \cdot [\tan \beta - \tan(\beta - \alpha)] \quad (17)$$

式中, α 为倾角; x 为被测倾斜物的位移量; β 为被测物体上光点处的法线与入射光束产生偏离角度; R 为接收透镜的有效半径; L 为被测表面点到接收透镜距离; L' 接收透镜到 CCD 上对应点的距离.

图 20 表示叶片截面测量倾角补偿前后和三坐标测量机测量对比图, ‘*’ 代表三坐标测量数据, ‘○’ 代表补偿前激光传感器测量数据, ‘★’ 代表补偿后激光传感器测量数据,从图中可以看出,补偿后的测量数据更加接近三坐标测量数据,所以,通过利用激光传感器倾角误差模型,对测量数据进行倾角补偿,明显提高了叶片型面检测的测量准确度.

3.3.3 特征曲线拟合

叶片型面点云数据去噪处理后,对截面数据点进行曲线拟合.在曲线曲面数学造型领域,非均匀有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS) 法是目前应用最广泛的方法之一,与传统的三次样条方法相比较有着突出的优点,不仅有统一的数学模型构造出平滑连续曲线,精确地描述出曲线局部特征,且可通过调节权因子控制和修改曲线形状,计算速度快且稳定.NURBS 曲线拟合有点云数据插值和点云数据拟合两种方法.由于点云数据自身存在一定的误差,采用直接插值很难满足曲线的光顺性要求,故通常运用最小二乘拟合方法.在 NURBS 曲线拟合中采用移动最小二乘法^[18-19].

k 次 NURBS 曲线矢量函数的数学表达式为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i P_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)} = \sum_{i=0}^n s P_i R_{i,k}(u) \quad u \in [0, 1] \quad (18)$$

$$R_{i,k}(u) = \frac{\omega_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)} \quad (19)$$

式中, $R_{i,k}(u)$ 为 NURBS 的 k 次有理基函数; $N_{i,k}(u)$ 为 k 次 B 样条基函数; P_i 为特征多边形的控制顶点;

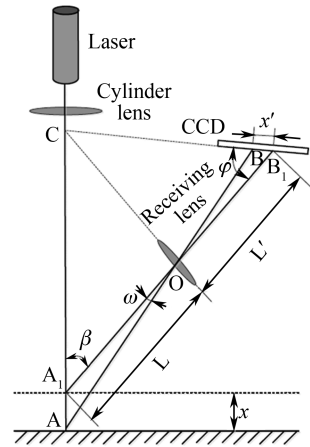


图 19 物面倾斜测量原理

Fig.19 Principle of surface slope measurement

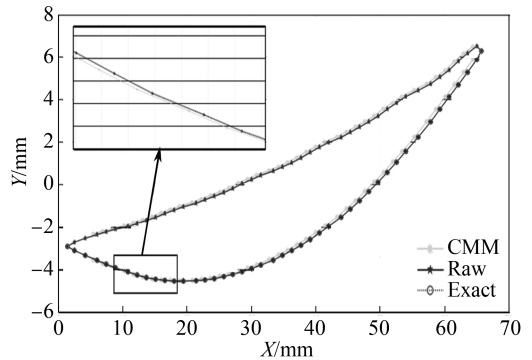


图 20 叶片截面测量对比图

Fig.20 Measuring contrast of blade cross-section

ω_i 为权因子,取值恒为 1; u 为参数值; u_i 为节点序列.

根据德布尔-考克斯递推公式, $N_{i,k}(u)$ 可表示为

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & (\text{当 } u_i \leq u < u_{i+1}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad (k \geq 1) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

取 $k=3$,选用点云截面上的一组数据点 $\{B_j\}, j=0,1,\dots,m$, 曲线拟合公式为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,k}(u) P_i \quad (u \in [0,1]) \quad (21)$$

式中, $B_0=C(0), B_m=C(1)$,其余数据点 $B_j (j=1,2,\dots,m-1)$ 建立目标函数为

$$f = \sum_{j=1}^{m-1} v(u_j) \left| \sum_{i=0}^n P_i R_{i,k}(u_j) - B_j \right|, u_j \in [0,1] \quad (22)$$

式, $v(u_j)$ 为与节点 u_j 相关的最小二乘权重函数

$$v(u_j) = \begin{cases} (1 - u_j)^4 (1 + u_j) & (\text{当 } 0 \leq u_j \leq 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (23)$$

取控制点 $P_i (i=1,\dots,n-1)$ 的导数为零

$$\frac{\partial f}{\partial P_l} = \sum_{j=1}^{m-1} v(u_j) [R_{l,k}(u_j) \sum_{i=1}^{n-1} R_{i,k}(u_j) P_i - (B_l - R_{0,k}(u_j) B_0 - R_{n,k}(u_j) B_m) R_{l,k}(u_j)] = 0 \quad (24)$$

整理得

$$\sum_{j=1}^{m-1} v(u_j) R_{l,k}(u_j) \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i R_{i,k}(u_j) \right) = \sum_{j=1}^{m-1} v(u_j) R_{l,k}(u_j) [B_j - R_{0,k}(u_j) B_0 - R_{n,k}(u_j) B_m] \quad (25)$$

取 $l=1,2,\dots,m-1$,就得到 P_1, P_2, \dots, P_{n-1} 的 $n-1$ 个方程组.

叶片曲线拟合具体步骤为:

- 1) 取一系列叶片型面的测量点云数据;
- 2) 求出曲线 U 方向的参数值及节点矢量 ($U=[u_0, u_1 \dots u_{n+k+1}]$), 确定最小二乘权重函数;
- 3) 根据每个参数值所在的节点矢量区间, 求解出所有的基函数;
- 4) 以曲线控制点为未知量建立方程组, 通过求解方程组得到控制点的坐标;
- 5) 通过求得的控制顶点 P_i , 带入 NURBS 曲线矢量函数的数学表达式, 得到拟合曲线.

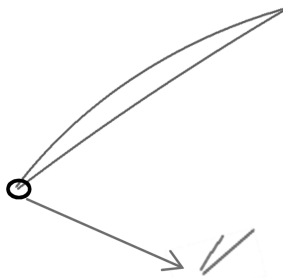


图 21 文献[15]方法的特征曲线及前后缘放大图
Fig.21 Characteristic curve and the enlargement of the leading and trailing edge in the 15th references

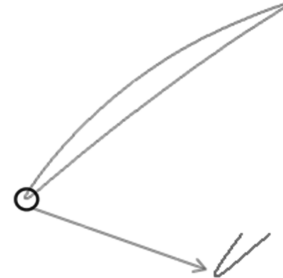


图 22 本文方法的特征曲线及前后缘放大图
Fig.22 Characteristic curve and the enlargement of the leading and trailing edge in this method

在曲线拟合过程中要保证曲线光顺性,即在叶盆、叶背和前后缘连接部分满足曲线二阶几何连续,曲率变化均匀并沿两端逐渐减小,拐点处的曲率为零.图(21)(22)分别是文献[15]中的方法和本文的方法获得点云数据拟合的特征曲线及前后缘放大图,明显看到本文中提出的方法获得更好的前后缘形状,会提供更为精确的叶片型面参数,有利于叶片型面的评价.图 23 和图 24 是拟合曲线与叶片横截面点云数据的误差分析图,从图中得到文献[15]中的方法最大误差是 0.128 mm,本文中提到的方法最大误差是 0.019 6 mm,精确

度明显得到了改善.

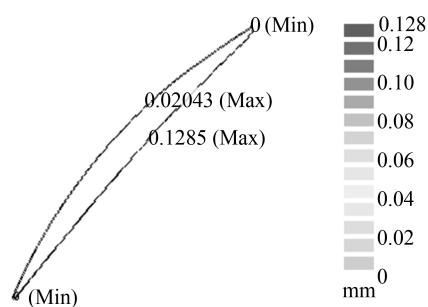


图 23 文献 15 方法的误差分析图

Fig.23 Error analysis diagram of the 15th references

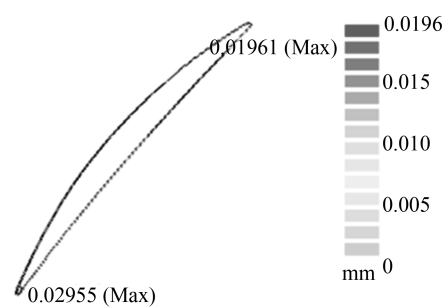


图 24 本文方法的误差分析图

Fig.24 Error analysis diagram of this method

4 结论

本文以四级航空发动机叶片为研究对象,提出了一种基于四坐标测量机和线扫描激光传感器的测量方法,这种方法测量效率高、测量简单、操作方便、且易于完成,可实现透平叶片型面的全数据测量.该方法能够得到更多的前后缘数据,改善了叶片前后缘重构效果,并通过点云数据误差和曲线拟合方法分析,验证了能为透平叶片的三维建模提供更为准确的原始数据.

参考文献

- [1] YILMAZ O, GINDY N, GAO J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, **26**(2): 190-201.
- [2] LU Jia-yan, XIONG Chang-you, HE Xiao-mei, et al. Survey of measurement method of aero-engine blade[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2009, **29**(3): 1-3.
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.
- [3] WANG Xin-jian, ZHOU Jun. Motion path planning and inspection realizing of laser inspection machine for blade-surface[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, **32**(11): 1453-1458.
王心坚,周军.叶片型面激光检测专机的运动轨迹规划与检测研究[J].机电工程,2015,**32**(11):1453-1458.
- [4] YU Zhi-jing, SONG Si-tong, WANG Tao. Digital modeling of aircraft engine blade based on reverse engineering[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, **39**(17): 122-125.
于之靖,宋四同,王涛.基于逆向工程的航空发动机叶片数字化建模[J].机床与液压,2011,**39**(17):122-125.
- [5] ZHANG Wen-jian, PENG Yi-nan, ZHANG Qi. Research on reverse engineering in coordinate measuring machine[J]. *Journal of Machine Design and Research*, 2010, **37**(8): 18-20.
张文建,彭一男,张琦.三坐标测量机在反求工程中的研究[J].机械设计与研究,2010,**37**(8):18-20.
- [6] XIE Xue-dong, XIAO Sheng-bing, NIU Shu-guang, et al. Automotive scanning measure based on ATOS[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2009, (8): 94-97.
谢雪冬,肖胜兵,牛曙光,等.ATOS扫描仪对汽车的扫描测量[J].现代制造工程,2009,(8):94-97.
- [7] ZHANG F, JIANG Z D, LI B, et al. Error modeling and compensation for high-precision non-contact four coordinate measuring system[M]. Trans Tech Publications, 2010: 232-236.
- [8] LI Miao-ling, ZHU Chun-xi, YOU Hui-yuan. Design and precise analysis of measuring tool for profiles of an aircraft engine blade working[J]. *Technology and Test*, 2011, (1): 113-116.
李妙玲,朱春熙,尤惠媛.航空发动机叶片叶身型面测具设计及准确度分析[J].制造技术与机床,2011,(1):113-116.
- [9] YE Jian-you, LV Yan-ming, CHEN Lin. Review of research on automatic positioning of turbine blades with CMM[J]. *Tool Engineering*, 2014, **48**(8): 10-12.
叶建友,吕彦明,陈林.汽轮机叶片三坐标自动测量研究综述[J].工具技术,2014,**48**(8):10-12.
- [10] HUANG Qiang-xian, YU Fu-ling, GONG Er-min, et al. Nano-CMM stage with zero Abbe error and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 664-670.
黄强先,余夫领,宫二敏,等.零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J].光学精密工程,2013,**21**(3):664-670.
- [11] HUANG J, WANG Z, GAO J, et al. Overview on the profile measurement of turbine blade and its development[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2010: 76560L-76560L-76511.
- [12] LU Yan-ping, WANG Jue, YU Hong-lin. 3D image processing and analyzing system for industrial computed tomography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **32**(2): 444-448.
卢艳平,王珏,喻洪麟.工业CT图像的三维图像处理与分析系统[J].仪器仪表学报,2009,**32**(2):444-448.

- [13] CARMIGNATO S. Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, **61**(1): 491-494.
- [14] SHEN L, LI D, LUO F. A study on laser speckle correlation method applied in triangulation displacement measurement [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(20): 4544-4548.
- [15] BIN S, BING L. A rapid method to achieve aero-engine blade form detection[J]. *Sensors*, 2015, **15**(6): 12782-12801.
- [16] XIA Ming-xiang, SHI Guang-lin, CHEN Chen, *et al.* Application and research of reverse engineering and laser manufacturing technology in the arts and crafts[J]. *Journal of Guangxi University of Science And Technology*, 2016, **27**(3): 45-49.
夏名祥,石光林,陈晨,等. 逆向工程与激光制造技术在工艺品上的应用研究[J]. 广西科技大学学报,2016,**27**(3):45-49.
- [17] CHAUDHURY K. Acceleration of the shiftable algorithm for bilateral filtering and nonlocal means [J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2013, **22**(4): 1291-1300.
- [18] WU Peng-fei, ZHANG Zan, ZHENG Yi, *et al.* Influence of sampling point distribution in freeform surfaces fitting with radial based function model[10]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(7): 1564-1572.
武鹏飞,张赞,郑义,等. 采样点分布对基于面形斜率径向基模型的自由曲面拟合精度的影响[J]. 光学 精密工程,2016, **24**(7):1564-1572.
- [19] YE Jing, PING Xue-liang, TAO Yu, *et al.* Moving least-square method applied in NURBS curve fitting[J]. *Tool Engineering*, 2011, **45**(1): 34-36.
叶晶,平雪良,陶宇,董宁. 移动最小二乘法在 NURBS 曲线拟合中的应用[J]. 工具技术,2011,**45**(1):34-36.