

# 叶片型面快速测量方法及系统研究

曲兴田, 刘继明, 杨旭, 刘孝龙

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 获取叶片型面数据主要有接触式与非接触式两种方法, 在非接触式等步长测量方法的基础上, 提出一种叶片型面快速测量的新方法, 并通过实验验证其测量效率和测量精度. 在获取理论模型数据点的基础上, 用改进的直线夹角法提取叶片截面曲线的特征点, 将其与原数据进行比对, 计算 Hausdroff 距离; 在保证曲线拟合精度的前提下减少测点数目. 搭建测量硬件系统, 开发自动测量软件, 实现获取叶片型面数据的非接触式等步长测量和按截面曲线特征点的快速测量. 最后进行等步长式与快速测量式两组实验, 对测量数据进行数据处理并对比测量误差, 验证了快速测量方法的可行性.

**关 键 词:** 叶片曲面; 快速测量; 型值点提取; 非接触式测量; Hausdroff 距离

中图分类号: TP 391.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0237-06

## Research on Method and System for Quick Measurement of Blade Surface

QU Xing-tian, LIU Ji-ming, YANG Xu, LIU Xiao-long

(School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. Corresponding author: YANG Xu, E-mail: yangxu@jlu.edu.cn)

**Abstract:** 3D data from blade surfaces can be measured using contact or non-contact methods. A new fast measurement method was proposed based on the non-contact method of equidistance measurement. On the basis of the theoretical model data, feature points were extracted from the blade feature section curve with the improved method of straight angle and were compared with original data, thus the Hausdroff distance was calculated. On the premise of the fitting accuracy, the number of measurement points was reduced. A hardware system and software were developed to realize the non-contact equidistance measurement and feature point fast measurement. Finally, two sets of experiments for measuring complex blade were carried out. The results of data processing and error analyzing confirm the feasibility of fast measurement method.

**Key words:** blade surface; quick measurement; feature point extraction; non-contact measurement; Hausdroff distance

叶片零件作为涡轮机、燃气轮机、航空发动机等设备的重要零件, 其表面质量与尺寸精度对整机性能的影响不容忽视. 在实际生产中, 叶片零件往往根据实际工况下的强度、刚度等要求先确定大体尺寸, 再借助大型 CAD/CAM 软件, 结合空气动力学理论、曲线曲面等理论进行优化<sup>[1-2]</sup>, 从而获得理想型面.

叶片型面数据的获取一直是其设计制造的研究热点. 得益于计算机技术的进步, 检测技术的发

展经历了由公差控制到几何测量再到在线检测控制等三个阶段<sup>[3]</sup>. 目前, 自由曲面检测主要有接触式(如三坐标测量机)和非接触式(如激光和光学扫描)两种方式<sup>[4]</sup>. 接触式测量时探针与工件发生直接接触, 势必引起工件表面的变形, 影响测量精度. Ascione 等研究了非刚性件的测量及误差评价方法, 通过对工件部分变形的分析确定了探针与工件间的交互作用力<sup>[5]</sup>; Lee 等提出应用交叉曲线的移动掩模法来计算单位法向量的方法,

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51135006, 51505185).

作者简介: 曲兴田(1963-), 男, 吉林德惠人, 吉林大学教授.

用于测头探针半径的补偿,以期减少接触式测量的时间<sup>[6]</sup>. 接触式测量精度高,但较低的测量效率一直影响其发展和应用. 非接触式测量方法具有效率高、适应范围广和无接触应力等优点,Newman 等详细介绍了非接触式检测技术的发展,作为视觉探测的一部分,在过去几十年里非接触式扫描受到广泛的关注<sup>[7]</sup>;Lin 等通过计算测点的几何方向回避重叠干扰区,拓宽了非接触式检测方法的适用范围<sup>[8]</sup>. 但是非接触式测量一般精度不高,难以满足例如叶片等精密零件型面检测的要求.

为实现叶片等复杂型面的快速精确测量,综合考虑测量精度与测量效率两个指标,本文提出一种按特征截面型线上少量型值点进行测量的高效非接触式测量方法,以三坐标测量机搭载激光测头,对叶片型面数据进行测量,并与等步长测量法进行比较,证明了此方法的快速性和精确性.

## 1 快速测量系统

### 1.1 系统硬件

硬件系统主要由三坐标测量机和激光测微仪两部分组成,硬件系统框图如图 1 所示. 三坐标测量机三轴运动由光栅尺闭环反馈数据,可根据实测要求实现运动补偿以提高其运动精度. 在对精度要求较高的叶片型面变化方向,采用高分辨率激光位移传感器进行测量,其静态分辨率最高可达 10nm.

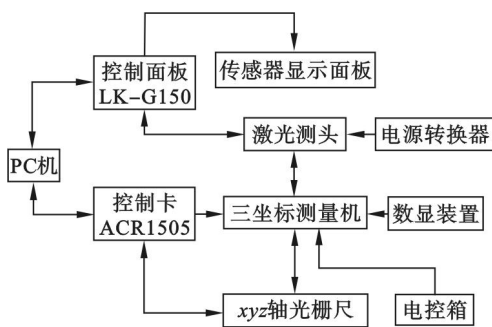


图 1 系统硬件组成

Fig. 1 Composition of hardware system

### 1.2 系统软件

在机床控制卡和激光测微仪控制软件包的基础上进行二次开发,借助 VC++ 的 MFC 模块编写测量软件. 本软件可读取测量数据点文件,实现按给定点的快速自动测量. 测量软件流程图如图 2 所示.

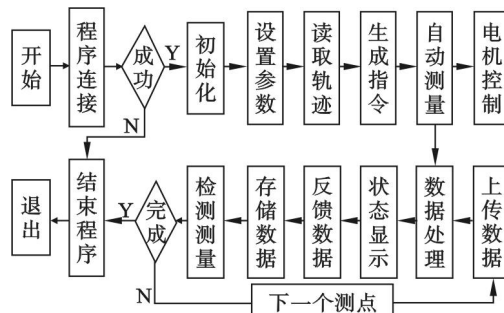


图 2 软件工作流程

Fig. 2 Workflow of software system

## 2 测量方法

为提高测量精度,本文采用点激光测头以悬停式测量方式进行测量. 与传统的非接触扫描测量方法不同,激光器在反馈数据时保持测头与工件间静止,获得反馈数据后运动至下一测点继续测量,这样大大减少由于相对运动引起的测量误差. 但悬停式测量增加了单个测点的测量时间,为解决这一问题,本文基于微分几何理论实现对实测点的缩减,以期实现快速精确的测量.

### 2.1 测量原理

非接触式点激光测量法的主要原理为激光三角法<sup>[9-10]</sup>,如图 3 所示. 激光信号从激光测头发射,照射到被测物体表面,光探测器通过透镜  $O'$  聚焦接收反射光线,得到  $\Delta$  与  $\Delta'$  两个距离值. 利用光线反射原理,对反射光线及入射点与反射点所组成的三角形进行几何运算,得到激光发射点到被测点间的距离.

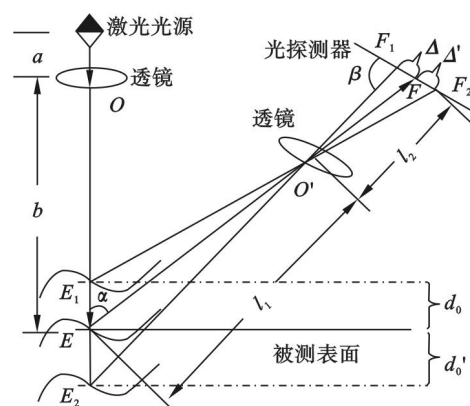


图 3 激光三角法原理

Fig. 3 Laser triangulation measurement principle

为保证完全聚焦和测量准确,采用斜射式的接收方式,接收光线与光探测器平面成  $\beta$  角. 在测量之前需要先设定基准距离  $b$ ,当叶片型面被测点与激光光源间距离发生变化时,激光传感器会

显示其距离变化,即测得叶片型面各测点间的相对位移,经过坐标转换可得其相对位置关系.图中 $d_0$ 表示被测物表面距离变化( $d_0'$ 表示向负方向变化), $\Delta$ 为测量值变化引起的光探测器上聚焦点位移变化量.在 $\triangle EO'E_1$ 和 $\triangle FO'F_1$ 中,设 $\angle EO'E_1 = \angle FO'F_1 = \theta$ ,根据三角形正弦定理得

$$d_0/\sin\alpha = l_1/\sin(\alpha + \theta), \quad (1)$$

$$\Delta/\sin\alpha = l_2/\sin(\beta - \theta). \quad (2)$$

由两三角形的 $\sin\alpha$ 相等可得

$$d_0 = \frac{l_2 \cdot \Delta \cdot \sin\beta}{l_2 \cdot \sin\alpha + \Delta \cdot \sin(\alpha + \beta)}. \quad (3)$$

当测量点在基准面下方时,有

$$d_0' = \frac{l_1 \cdot \Delta \cdot \sin\beta}{l_2 \cdot \sin\alpha + \Delta \cdot \sin(\alpha - \beta)}. \quad (4)$$

## 2.2 型值点提取方法

为提高测量效率,测量前需要提取叶片曲面的特征曲线上的型值点以减少实测点.在已知模型及其特征曲线的基础上,本文采用一种基于测点线性夹角最小误差的改进算法对自由曲线进行特征点提取<sup>[11]</sup>,该算法不仅提取效率高,而且通过引入偏差参数 $d_i$ 可以实现对弦高误差的控制,对于给定误差或给定测点数目的情况可以实现快速精确提取.

如图4所示, $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$  ( $1 \leq i \leq n$ )为自由曲线上相邻三点,其中 $n$ 为提取前测点总数,定义夹角 $\theta_i = \pi - \angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$ .考虑提取特征点后相邻两测点间的距离,保证最大弦高在允许测量误差范围内,引入偏差参数 $d_i$ .令 $d_i = |P_iP_{i+a}| \times \sin\theta_i$ ,通过判定 $d_i$ 与 $d_T$ 的大小来决定测点 $P_i$ 是否保留, $d_T$ 为给定的公差值.由几何关系可得,当 $\theta_i$ 足够小时,有 $\theta_i \approx \tan\theta_i \approx \left| \frac{k_{i+1} - k_i}{1 - k_{i+1}k_i} \right|$ ,其中 $k_{i+1}, k_i$ 分别为直线 $P_{i-1}P_i$ 和直线 $P_iP_{i+1}$ 的斜率.

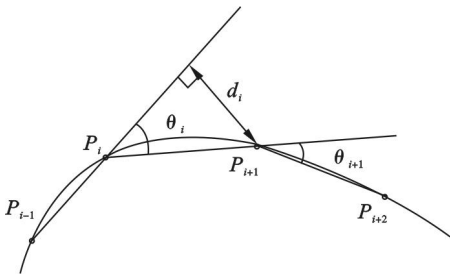


图4 特征点提取算法

Fig. 4 Extraction algorithm of feature points

对于给定最终保留测点数 $m$ 时的情况,利用迭代法近似逼近公差值 $d_T$ ,直至剩余测点数 $k=m$ .取 $d_T$ 的初始量为 $d_T = \frac{d_s + d_p}{2}$ ,其中

$d_s = d_{\min}, d_p = d_{\max} \cdot d_{\min}, d_{\max}$ 分别为所有相邻测点中偏差参数的最大值和最小值.该算法的具体流程如图5所示.

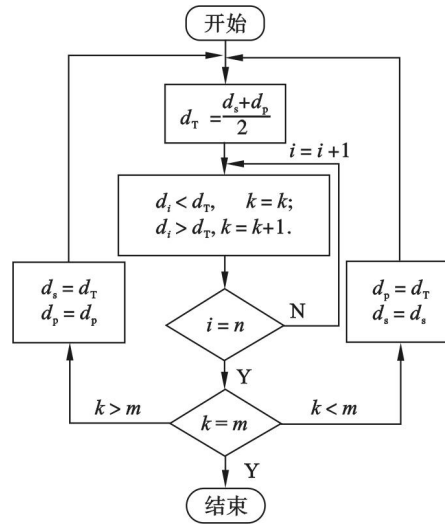


图5 特征点提取流程

Fig. 5 Workflow of feature point extraction

由于各种测量误差的干扰,导致实测点与所提取原模型的特征点间存在差异,利用提取后的特征点重构的截面曲线与原模型截面曲线间也有一定误差,需要对两曲线的相似度进行计算.相似度的度量函数多涉及欧氏距离,其中描述两点集间相似程度的 Hausdorff 距离,作为一种平面曲线间匹配程度的评价标准多被采用<sup>[12]</sup>.

设二维平面中的封闭曲线点集 $S_1$ 和 $S_2$ ,定义两曲线间的 Hausdorff 距离为

$$d_H(S_1, S_2) = \max \{ \max_{x_1 \in S_1} d_1, \max_{x_2 \in S_2} d_2 \}, \quad (5)$$

式中, $d_1 = \min_{x_2 \in S_2} |x_1 - x_2|, d_2 = \min_{x_1 \in S_1} |x_2 - x_1|$ .

$x_1, x_2$ 分别为曲线点集 $S_1, S_2$ 上的点.本文中已知叶片原模型表面特征点的理论数据,以离散点集形式存储为 $A$ ,测量数据经过处理后存储为点集 $B$ ,通过计算两点集 $A$ 和 $B$ 的 Hausdorff 距离可以实现对测量数据与原模型数据匹配度的评价.同理,也可实现不同测量方法所获数据点与理论曲线间相似度的计算与比较.

## 3 数据处理

测量系统所测量的两组数据 $A_1$ 和 $A_2$ 是激光位移传感器直接返回的距离值,需要与光栅尺反馈的机床坐标数值进行整合,再经过坐标变换得到叶片坐标系下数据点的坐标值.其中位移传感器距离值和 $x, y$ 轴光栅尺反馈数据组成三坐标测量系下的坐标数据.为方便说明,建立如图6所示



三组坐标系.

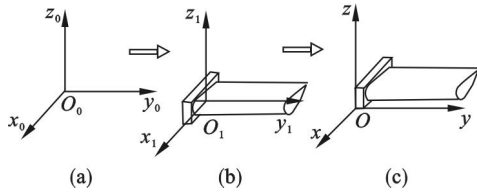


图 6 坐标变换示意图

Fig. 6 Schematic of coordinate transformation

(a)—机床坐标系; (b)—测量坐标系; (c)—工件坐标系.

1) 机床坐标系  $O_0x_0y_0z_0$ . 以三坐标测量机的机床原点为坐标原点,  $x_0, y_0, z_0$  三轴的坐标值分别对应三轴光栅尺反馈的示数, 三坐标轴分别与测量机的三个直线导轨方向平行.

2) 测量坐标系  $O_1x_1y_1z_1$ . 以实际测量的起始点为坐标原点, 三坐标轴分别与  $x_0, y_0, z_0$  轴平行. 在测头标定时设定的测量基准面即为  $x_1O_1y_1$  平面.

3) 工件坐标系  $Oxyz$ , 即所要获得的基于叶片自身的坐标系. 以叶柄的侧边端点为坐标原点, 三坐标轴分别与  $x_0, y_0, z_0$  轴平行. 此时测头所测得的位移偏量即为工件坐标系的  $z$  轴坐标值.

各坐标系间的转换关系如下所示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m \\ 0 & 1 & 0 & n \\ 0 & 0 & 1 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_0 \\ 0 & 1 & 0 & -b_0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 - (z_0 + p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式中:  $m, n, p$  由测头与工件相对位置关系决定, 在标定后给出, 即  $m, n, p$  分别对应激光传感器反馈示数第一次进入设定误差所允许的范围内时  $x, y, z$  三轴光栅尺的反馈数值; 坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  的值为光栅尺反馈数值,  $d_0$  为激光测微仪显示数值; 当测量叶背曲面时,  $a_0$  为测量坐标原点到叶片进气端的距离; 当测量叶盆曲面时,  $a_0$  为测量坐标原点到出气端底座部分最远点的距离;  $b_0$  为测量坐标原到底座底平面的距离. 这样可以得到所测点在工件坐标系的坐标值:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + m + a_0 \\ y_0 + n - b_0 \\ d_0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

测量所得数据按式(8)转换后, 即得到工件

坐标系下的测量坐标值. 应用第 2 节型值点提取理论计算快速测量方法所得数据的拟合误差, 并借助 Matlab 软件绘制误差分布图; 计算两种测量方法的 Hausdorff 距离, 对测量数据的相似度进行评价, 并比对测量精度; 应用非均匀有理 B 样条 (NURBS) 理论对数据点进行曲线拟合, 并计算特征点的提取误差与拟合误差.

## 4 实 验

1) 安装叶片工件, 连接传感器测头数据线和控制面板, 并接入 PC 机.

2) 安装 ACR1505 控制卡到 PC 机插口槽, 接通电源, 打开电控箱三轴移动开关和空气继电器.

3) 装载三坐标测量机 ACR1505 驱动程序, 装载测微仪驱动 USB 程序和激光软件 LK - Navigator.

4) 启动自开发测量程序, 点击连接按钮, 建立程序与控制卡和激光位移传感器的连接.

5) 根据  $x, y, z$  轴光栅尺反馈数值确定轴移动量, 移动激光束光斑回到测量原点, 并设定  $z$  轴变量以确保叶片型面在测头最佳范围内, 即激光发射端距基准面距离为  $(148 \pm 0.2)$  mm.

6) 读入测点数据文件, 点击自动测量按钮, 当反馈数据超出设定公差 (即激光束照射到非叶片表面的工作台上) 时停止自动测量, 下载测量数据文件到指定文件夹, 此组数据点设为  $A_1$ .

7) 反转叶片零件并进行重新装夹, 重复上述步骤对叶片叶盆型面数据进行测量, 获得数据记为  $A_2$ .

8) 关闭测量程序, 关闭三轴移动电控开关, 切断电源, 测量结束.

共设计两组对比测量实验: 第一组为等步长的大量数据点的测量, 设定步长为 1 mm, 边界处加密步长为 0.2 mm, 测头移动速度为 2 mm/s, 共测量等间距的 289 条截面线, 测量数据点 70 889 个, 共计用时约为 35 h; 第二组测量是对提取后少量特征点的测量, 测头移动速度同样设定为 2 mm/s, 共测得 7 条截面线上约 700 个点, 共计用时约为 35 min.

应用型值点提取理论提取  $z = 145$  mm 截面上特征点, 提取后的测点分布如图 7 所示.

由图可以看出, 在曲率大的进气端与出气端分布的特征点多, 在曲率小的叶背曲线与叶盆曲线分布点较少. 原截面线上共有 452 个测量点, 经提取后为 93 个, 提取率为 20.6%; 测点提取误差

为测点处与原曲线最近点之间的距离,用相同的方法对实测数据进行拟合,逼近原曲线,拟合误差在测点处应与提取误差相同.以  $z = 145 \text{ mm}$  截面线为例,型值点提取误差分布图如图 8 所示,其中最大偏差为  $+0.040 \text{ mm}$ ,最小偏差为  $-0.036 \text{ mm}$ .

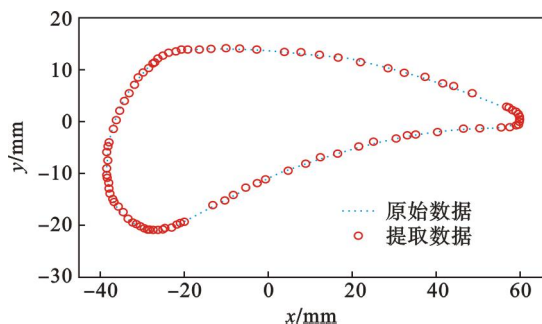


图 7  $z = 145 \text{ mm}$  截面型值点提取

Fig. 7 Point extraction for cross-section  $z = 145 \text{ mm}$

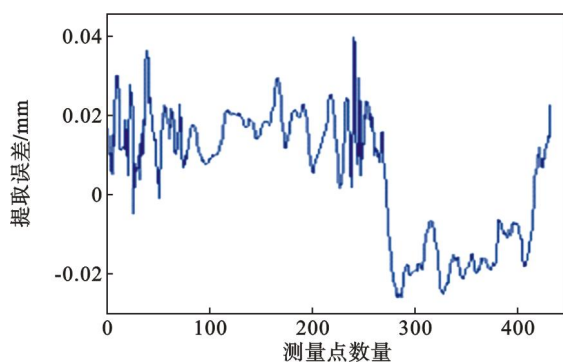


图 8 测点提取误差

Fig. 8 Error of point extraction

快速测量与等步长测量两种测量方法的精度对比通过计算其与理论曲线的相似度实现,两种测量方法所得实验数据与理论模型曲线的 Hausdroff 距离分布图如图 9 所示,每条折线的点表示不同特征截面线的 Hausdroff 距离值.为方便计算与比较,本文实际计算时采用积累弦长参数化法和三次 B-spline 插值法计算两组曲线点集间的 Hausdroff 距离来近似两组自由曲线间的真实值.从图中可以看出,快速测量法在每条截面线上的 Hausdroff 距离值与等步长测量方法基本相等,测量结果与原理论曲线的相似度与等步长方法分布趋势大体相同,测量精度持平.

利用 Geomagic Qualify 软件对本文所采取的两种测量方法进行 2D 分析,以典型截面线  $z = 145 \text{ mm}$  为例,实测数据曲线与模型曲线的 2D 误差色谱图如图 10a 所示,最大正向偏差为  $+0.048 \text{ mm}$ ,最大负向偏差为  $-0.042 \text{ mm}$ ,平均正向偏差为  $+0.021 \text{ mm}$ ,平均负向偏差为  $-0.014 \text{ mm}$ ,标准偏差为  $0.020 \text{ mm}$ ;特征点测量

数据拟合曲线与原模型曲线的 2D 误差色谱图如图 10b 所示,最大偏差为  $\pm 0.048 \text{ mm}$ ,平均正向偏差为  $+0.025 \text{ mm}$ ,平均负向偏差为  $-0.022 \text{ mm}$ ,标准偏差为  $0.027 \text{ mm}$ .由此可以看出,快速测量法与等步长测量法的实测精度在同一级别,即  $0.03 \text{ mm}$  左右的平均误差量.目前三维非接触式扫描仪单个测点分辨率在十微米级,整个模型的测量误差要远大于这个值,本文提出的快速测量法测量精度高于一般的非接触式扫描测量方法.

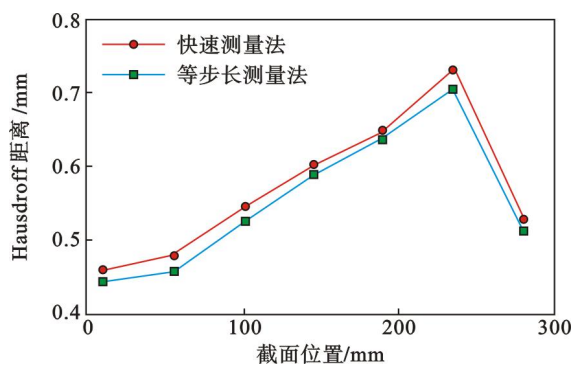


图 9 Hausdroff 距离

Fig. 9 Hausdroff distance

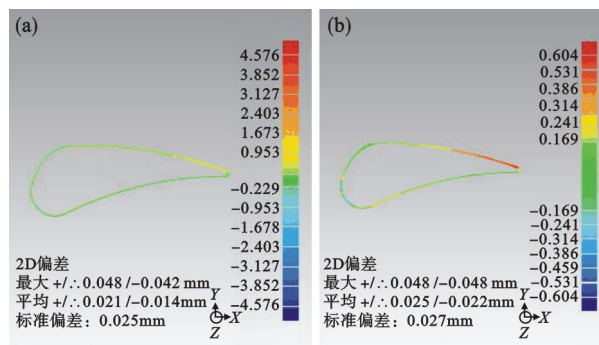


图 10  $z = 145 \text{ mm}$  截面线 2D 偏差色谱图

Fig. 10 2D error chromatograms of cross-section  $z = 145 \text{ mm}$

(a)—等间距测量; (b)—型值点测量.

## 5 结 论

1) 利用使测点线性夹角误差最小的改进算法实现了复杂曲线特征点的提取,通过计算提取测点与理论模型曲线点集的 Hausdroff 距离和 2D 分析,验证了特征点提取算法的可行性.

2) 按特征截面型线上少量型值点进行测量的快速测量法的测量精度为  $0.027 \text{ mm}$ ,等步长测量法的测量精度为  $0.020 \text{ mm}$ ,两者测量精度基本持平,但快速测量法测量效率提高 90% 以上,达到了测量系统的设计要求.实验结果表明,本文所提出的测量方法可实现叶片等复杂曲面的快速精确测量.

## 参考文献:

- [1] Veers P S, Ashwill T D, Sutherland H J, et al. Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades [J]. *Wind Energy*, 2003, 6(3): 245 – 259.
- [2] Wang T G, Wang L, Zhong W, et al. Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(5): 466 – 472.
- [3] Zhao F, Xu X, Xie S Q. Computer-aided inspection planning—the state of the art [J]. *Computers in Industry*, 2009, 60(7): 453 – 466.
- [4] Li Y D, Gu P H. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(13): 1395 – 1417.
- [5] Ascione R, Polini W. Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(9/10/11/12): 1055 – 1067.
- [6] Lee R T, Shiou F J. Calculation of the unit normal vector using the cross-curve moving mask method for probe radius compensation of a freeform surface measurement [J]. *Measurement*, 2010, 43(4): 469 – 478.
- [7] Newman T S, Jain A K. A survey of automated visual inspection [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 61(2): 231 – 262.
- [8] Lin A C, Chang H C. Automatic 3D measuring system for optical scanning of axial fan blades [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 57(5/6/7/8): 701 – 717.
- [9] Santolaria J, Aguilar J J, Guillomía D, et al. A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(2): 282 – 291.
- [10] Dong C S. A regression model for analyzing the non-linearity of laser triangulation probes [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(5/6/7/8): 691 – 695.
- [11] 李剑. 基于激光测量的自由曲面数字制造基础技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.  
(Li Jian. Fundamental research of digital manufacturing of freeform surface based on laser measurement [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)
- [12] Ko K I. On the complexity of computing the Hausdorff distance [J]. *Journal of Complexity*, 2013, 29(3/4): 248 – 262.

(上接第 221 页)

## 参考文献:

- [1] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 钠钙玻璃微磨削表面粗糙度实验研究 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(3): 290 – 294.  
(Wen Xue-long, Gong Ya-dong, Cheng Jun, et al. Experimental study on surface roughness in micro-grinding of soda-lime glass [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(3): 290 – 294.)
- [2] Lee P H, Lee S W. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(3): 201 – 209.
- [3] Aurich J C, Ngmann J, Chueler G, et al. Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2009, 58(1): 311 – 314.
- [4] Gong Y D, Wen X L, Cheng J, et al. Experimental study on fabrication and evaluation of a micro-scale shaft grinding tool [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(3): 1027 – 1037.
- [5] Aspinwall D K, Soo S L, Curtis D T, et al. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 335 – 338.
- [6] Balan A S S, Vijayaraghavan L, Krishnamurthy R. Experimental investigation on the influence of oil mist parameters on minimum quantity lubricated grinding of Inconel 751 [J]. *International Journal of Precision Technology*, 2014, 4(1): 96 – 109.
- [7] Guo C, Shi Z, Attia H, et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 343 – 346.
- [8] Chen Z, Tian L, Fu Y, et al. Chip formation of nickel-based superalloy in high speed grinding with single diamond grit [J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2012, 5(2): 93 – 106.
- [9] 黄新春, 张定华, 杨振朝, 等. GH4169 磨削表面粗糙度影响参数的敏感性研究 [J]. *航空制造技术*, 2012, 1(8): 83 – 86.  
(Huang Xin-chun, Zhang Ding-hua, Yang Zhen-chao, et al. Study of sensitivity of parameter affecting surface roughness in grinding superalloy GH4169 [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 1(8): 83 – 86.)
- [10] 黄新春, 张定华, 姚倡锋. 磨削参数对 GH4169 高温合金磨削表面特征影响研究 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(2): 210 – 214.  
(Huang Xin-chun, Zhang Ding-hua, Yao Chang-feng, et al. A study of influence of grinding parameters on surface characteristics during grinding GH4169 superalloy [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(2): 210 – 214.)