

叶片截面线特征点的快速提取及其实验研究

刘佳, 赵继, 杨旭, 张良
(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要: 针对叶片加工过程中的测量效率问题, 从叶片截面线的曲率突变性出发提出一种提取截面线特征点的方法. 根据截面线离散点积分曲线的单调性将截面线划分为曲率平滑区域与曲率突变区域, 综合离散点曲率与区域性质选取基本特征点. 构造 B 样条曲线逼近原始曲线, 直到两曲线之间的 Hausdorff 距离满足预设阈值, 完成特征点提取. 计算及实验结果表明, 特征点分布疏密程度与截面线曲率变化相关. 在阈值为 0.05 mm 的条件下, 算法平均压缩率达到 98%, 平均计算时间为 103 s. 相比传统方法, 该方法能快速收敛到设定误差, 对提高叶片测量效率有一定指导意义.

关键词: 叶片截面线; 离散曲率; 本特征点; 曲线逼近; Hausdorff 距离

中图分类号: TH 124 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)07-0996-05

Rapid Extraction of Feature Points and Experimental Research on Blade Section Curve

LIU Jia, ZHAO Ji, YANG Xu, ZHANG Liang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China. Corresponding author: ZHAO Ji, professor, E-mail: jzhao@jlu.edu.cn)

Abstract: For the problem of improving the measuring efficiency in blade machining process, a new method was proposed for extracting feature points, which was based on the curvature mutation of blade section curve. According to the monotonicity of discrete points integral curve, section curve was classified into the curvature smooth region and curvature mutation region. The basis feature points were selected by the curvature of discrete points and the character of region. B-spline was structured to approximate the original curve. The extraction of feature points was completed when the Hausdorff distance between the constructed B-spline and original curve met preset error value. Calculations and experimental results showed that the density of feature points are related to curvature variation of section curve. When error is set as 0.05 mm, the average compression rate can reach 98% and average computation time is 103 seconds. Comparing to the traditional method, it can convergence to preset error value quickly. The proposed method is potentially useful for improving measuring efficiency of blade.

Key words: blade section curve; discrete curvature; basis feature points; curve approximation; Hausdorff distance

叶片是航空发动机中的关键零部件, 其制造水平对发动机性能有着至关重要的影响, 它的加工技术一直都是研究重点. 叶片的制造一般无法一次成型, 为获得高精度的叶片表面质量, 需要反复磨抛加工. 磨抛加工的前提是磨抛加工余量的获取. 加工余量的测量计算是必不可少的. 在整个

叶片制造周期中, 叶片测量占相当大的比例, 如何提高叶片测量效率是缩短整个叶片制造周期的核心问题.

测量点的选择可以被提炼为一个优化选择曲线特征点的问题. 目前特征点的检测大致分为两类: 一类是逼近法 (多边形逼近^[1]、曲线逼

收稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51135006).

作者简介: 刘佳(1987-), 女, 山西大同人, 吉林大学博士研究生; 赵继(1959-), 男, 吉林蛟河人, 吉林大学教授, 博士生导师.

近^[2-8])；另一类是曲率法。多边形逼近法具有全局最优性,无法保证零件的细节特征。Cheng^[3]依据曲率极值点、支撑域端点选择初始特征点,容易丢失曲率平缓处的信息。Gálvez 等^[4]利用全局优化的算法实现点简化,缺点是计算时间长。Li 等^[5]考虑曲率的正负变化提取节点,没有考虑逼近误差。Park 等^[6]依据曲率对特征点进行提取,曲率的估算准确度不高。周红梅等^[7]通过弧长、曲率信息选取主特征点,根据误差及曲率特性不断增加节点,噪声点对曲线误差影响较大。刘德平等^[8]按照曲率将数据点分不同区域,各区域采用不同的最小距离实现点的精简,保留了细节特征,但是对于点云密度变化过大的数据效果较差。

本文利用叶片截面线的曲率突变性,将其简化为直线和二次曲线,针对性地实现特征点提取。对叶片离散点进行积分运算,根据积分曲线性质,划分叶片离散点曲率平滑(直线)区域与曲率突变(曲线)区域,解决了选取曲率支撑域以及根据曲率与区域性质提取基本特征点的问题。以插值基本特征点 B 样条曲线逼近原始曲线为手段,以曲线段之间的 Hausdorff 距离达到预设误差值为目标实现特征点提取。

1 离散数据点预处理

叶片截面线由叶盆、叶背截线和前、后缘圆弧组成(见图 1)。利用三坐标测量机测量一条叶片截面线得到离散点 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$, 采用 B 样条曲线拟合离散点,

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i N_{i,k}(t) \quad (1)$$

式中: B_i 为控制顶点; $N_{i,k}$ 为标准 B 样条基函数; k 为 B 样条次数。

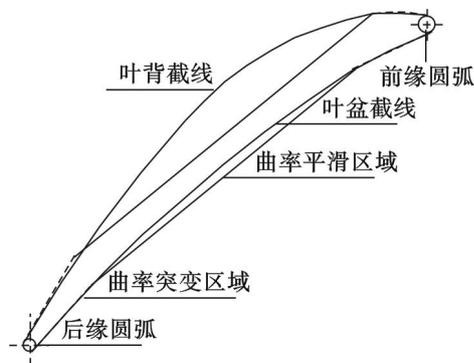


图 1 叶片截面线组成
Fig. 1 The consist of the blade section curve

将式(1)表达为矩阵形式:

$$P = N \cdot B \quad (2)$$

那么,离散数据点与拟合数据点之间的误差为

$$r = N \cdot B - P \quad (3)$$

误差平方和为

$$E = \frac{1}{2} (r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2) = \frac{1}{2} r^T r \quad (4)$$

离散点拟合问题转化为寻求参数值 t , 使误差平方和 E 最小的无约束优化问题。

采用 Gauss - Newton^[9] 算法求解该优化问题。设定拟合曲线的收敛条件为

$$\frac{|\Delta E_{h+1} - \Delta E_h|}{\Delta E_h} \leq \varepsilon \quad (5)$$

式中: h 为迭代次数; ε 为设定误差值。

当迭代所求的 B 样条曲线满足式(5)时,完成测量点预处理。

2 基本特征点的选取

离散点 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 做平移变换,使得所有离散点位于第一象限内,进行积分运算:

$$S = \int f(x) \cdot dx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} [f(x_i) + f(x_{i+1})] \cdot \Delta x_{i+1} \quad (6)$$

如图 2 所示,对积分曲线 S 进行单调性划分,分割为弧线段 $S(i) (i=1, 2, \dots, m)$ 。每一弧线段 $S(i)$ 利用直线逼近,逼近直线为 $L(i) (i=1, 2, \dots, m)$, 相邻逼近直线的交点为 $O_{(i,i+1)} (i=1, 2, \dots, m-1)$ 。计算每一弧线段上各点 $S(i)_{(j)} (j=1, 2, \dots, l)$ 到其逼近直线 $L(i)$ 的距离 $H(i)_{(j)}$, 若点 $S(i)_{(k)}$ 满足:

$$\left. \begin{aligned} H(i)_{(k)} &= \min_{j=1,2,\dots,l} H(i)_{(j)}, \\ \min |S(i)_{(k)} - O_{(i,i+1)}| &\geq \min |S(i+1)_{(k)} - O_{(i,i+1)}|. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则以 $O_{(i,i+1)}$ 为圆心,以 $|S(i)_{(k)} - O_{(i,i+1)}|$ 为半径作弧,交直线 $L(i), L(i+1)$ 于点 $Y_{O_{(i,i+1)}i}$, $Y_{O_{(i+1,i+1)}i+1}$ 。

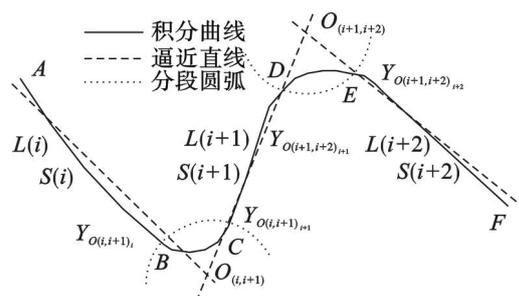


图 2 积分曲线区域划分
Fig. 2 The division of integral curves

积分曲线被重新划分 AB, BC, CD, DE, EF 所标识的弧线段. 新弧线段形成求解曲率的支撑域, 依据式(8)求解离散点曲率.

$$K_i = \|C(t_i)'C(t_i)''\| / \|C(t_i)'\|^3. \quad (8)$$

式中: $C(t_i)', C(t_i)''$ 分别是多项式曲线 $C(t_i)$ 的一阶、二阶导数; t_i 为多项式曲线参数.

弧 BC , 弧 DE 确定了积分曲线的圆弧段, 弧 AB , 弧 CD , 弧 EF 确定了直线段. 位于圆弧段内的离散点, 认为其属于一条二次曲线. 表征一条二次曲线最少需要 3 个特征点. 位于直线段的离散点, 曲线性质近似于直线, 对于直线而言, 最少需要 2 个特征点. 依据曲率信息、最少特征点个数完成基本特征点的选取. 对于前缘和后缘不是圆弧形状的叶片, 由于其形状对积分曲线的单调性没有影响, 所以不影响基本特征点的选择.

3 完整特征点的提取

整体逼近误差 e 为插值基本特征点 B 样条曲线 L_1 与原始测量点拟合曲线 L_2 两曲线区域之间的面积和,

$$e = \sum_{i=1}^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} |L_2(i, i+1) - L_1(i, i+1)| dt. \quad (9)$$

式中: i 为第 i 个逼近弧段; t 为弧段参数.

由式(9)可知两曲线段之间的最大距离越小, 即 $d_i = \max |L_2 - L_1|$ 越小, 逼近误差 e 越小, 两曲线的逼近效果越好.

基本特征点的选择已经能大致反映曲线的形状, 为提高逼近速度, 采用距离法向量最近点对单向 Hausdorff 距离^[10]计算方法进行改进(见图 3).

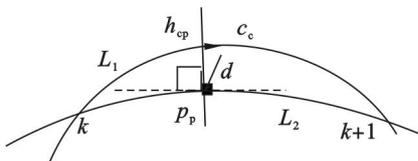


图 3 距离计算
Fig. 3 Calculate the distance

在第 k 个逼近弧段中, 根据原始测量点拟合曲线 L_2 上每一离散数据点 $p_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的切线方向计算其法线 F_i , 计算插值逼近曲线 L_1 上离散数据点 $c_j (j=1, 2, \dots, k)$ 到法线 F_i 的距离 h_{ji} , 满足

$$h_{cp} = \min_{\substack{j=1,2,\dots,k \\ i=1,2,\dots,m}} h_{ji}. \quad (10)$$

选取满足式(10)的点 c_c , 即距离法向量最近点以及与之相对应的点 p_p , 判别

$$d = \max(|c_c p_p|) \leq \varepsilon \quad (11)$$

是否成立, 作为插入节点的条件.

4 仿真分析及实验结果

4.1 仿真分析

叶片两个截面线原始测量点分别为 2 401, 2 211 个. 选用截面线 1 来验证基本特征点选择的合理性. 基本特征点提取见图 4. 图 4a 为基本特征点(JT)和文献[7]主特征点(ZT)示意图; 图 4b 中, 由插值基本特征点 B 样条曲线(JN)和插值主特征点 B 样条曲线(ZN)与原始曲线之间的误差对比可知, 基本特征点的选取更加合理.

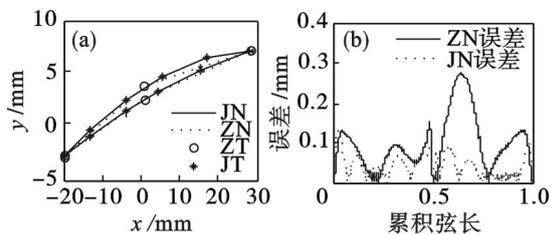


图 4 截面线 1 基本特征点提取

Fig. 4 The extraction of basic feature point in section curve 1

(a)—初始特征点对比图; (b)—误差对比图.

从压缩率、计算时间、精度三方面分析本文方法的性能. 设置误差阈值 $\varepsilon = 0.05$ mm. 表 1 为本文和文献[7]的特征点提取结果比较.

表 1 提取结果比较
Table 1 The comparison of extraction results

提取方法	模型	特征点数	最大误差/mm	平均误差/mm	压缩率/%	计算时间/s
本文	截面线 1	30	0.042 7	0.014 1	98.75	114.49
	截面线 2	27	0.049 6	0.015 9	98.77	93.961
文献 [7]	截面线 1	21	0.062 3	0.021 5	99.12	271.15
	截面线 2	27	0.065 4	0.017 2	98.77	246.21

由表 1 可知, 本文方法的压缩率与文献[7]没有显著差异. 计算时间分别比文献[7]缩短 57.78%, 61.84%. 文献[7]耗时表现在两个方面: ①提取特征点有两个标准, 分别以曲率和最大误差为标准提取特征点, 择优选择所要加入的特征点; ②Hausdorff 距离的计算非常耗时, 尤其在原始测量点非常多的情况下, 耗时更加明显. 本文只根据最大误差进行特征点提取, 并且简化了传统 Hausdorff 距离的计算方法, 实现了特征点的快速提取. 逼近误差相比文献[7], 最大误差分别降低 31.46%, 24.16%; 平均误差降低 34.42%,

7.56% . 文献[7]相比文献[5], 仅曲率是通过分段曲线拟合得到. 文献[2]相比于文献[7], 特征点个数有所减少, 但是在原始测量点非常多的情况下, 整体的压缩率、精度和速度没有显著差异. 通过间接对比, 本文方法在精度与速度方面相比于文献[2,5]中的算法也有所提高.

4.2 实验结果

采用非接触三坐标测量机测量所提取的特征点, 验证实际测量特征点的有效性(见图 5).



图 5 三坐标测量机

Fig. 5 The three coordinate measuring machine

该实验误差产生的主要原因: 所选模型为实际模型, 会受到叶片表面精度的影响; 测量系统误差的影响; 人工操作、环境等外界因素的影响. 数据预处理阶段存在逼近误差需要调整数据点, 数据点的逼近精度也是影响因素之一. 图 6 中仿真误差曲线 FZ 为插值仿真特征点曲线与原始测量点拟合曲线之间的误差, 实验误差曲线 SY 为插值测量特征点与原始测量点拟合曲线之间的误差. 由图 6c, 图 6d 误差曲线可知: 实验误差最大

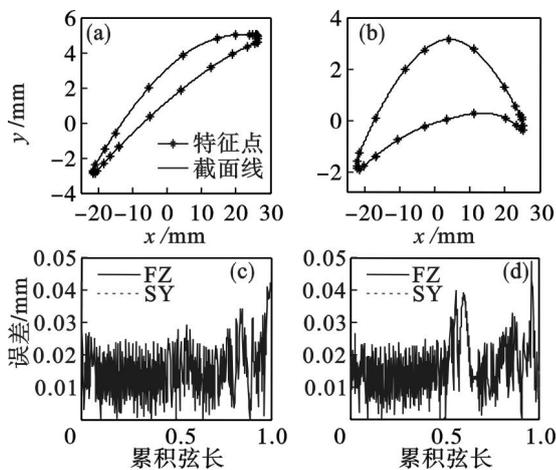


图 6 实验结果

Fig. 6 The experimental results

(a) — 截面线 1 特征点; (b) — 截面线 2 特征点;
(c) — 截面线 1 误差; (d) — 截面线 2 误差.

值发生在仿真误差最大值处; 最大误差集中发生在截面线的前后缘处; 在前后缘处增加特征点个数, 对提高逼近曲线的精度有非常重要的作用; 实验误差仍在设定误差范围内. 这说明所提取的特征点能够表征原始曲线信息, 具有一定的合理性, 为提高叶片测量效率奠定基础.

5 结 论

1) 通过分析叶片截面线构成的特殊性, 从宏观角度将叶片截面线重新划分为曲率平滑区域和曲率突变区域. 基本特征点的提取综合考虑曲率和区域段曲线性质. 这一区域划分使得叶片前、后缘曲线分别向叶片内部延伸, 回避了以往提取前、后缘切点可能导致的叶片涡流损失.

2) 针对基本特征点选取只考虑离散点曲率的问题, 综合离散点曲率和区域曲线性质实现基本特征点的准确提取, 提高基本特征点逼近曲线的精度. 计算结果表明, 本文方法能够更准确地实现基本特征点的提取.

3) 在 Hausdorff 距离求解过程中, 使用距离法向量最近点去计算 Hausdorff 距离, 解决计算耗时的问题. 叶片两个截面线分别从 2 401, 2 211 个离散点降低到 30, 27 个特征点, 实现测量点的大幅度压缩和特征点的快速提取.

参考文献:

[1] Lyu Q, Fang S, Zhang Z. Feature points extraction of different structure for industrial computed tomography image contour [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(22): 5313 - 5317.

[2] 张蓉生, 张伟华, 马凌腾, 等. 基于曲率及误差分布的点云逼近曲线优化算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1017 - 1023.
(Zhang Rong-sheng, Zhang Wei-hua, Ma Ling-teng, et al. Optimization algorithm for approximate curve of point-clouds base on curvature distribution and error distribution [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(5): 1017 - 1023.)

[3] Cheng X G. B-spline curve approximation using feature points [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 397(8): 1093 - 1098.

[4] Gálvez A, Iglesias A. Efficient particle swarm optimization approach for data fitting with free knot B-splines [J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(12): 1683 - 1692.

[5] Li W S, Xu S H, Zhao G, et al. Adaptive knot placement in B-spline curve approximation [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(8): 791 - 797.

(下转第 1009 页)