

基于无序点云的叶片截面特征参数提取

刘书桂, 毛晨丽, 张海涛

(天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 针对提取航空发动机叶片截面特征参数的实用性要求,研究了基于无序点云数据的叶片截面特征参数提取方法.综合距离法和二分法的优点,采用基于矩形腐蚀法的距离-二分法对点云数据排序,基于最小包容区域直线和最小二乘圆拟合,提出了将整条叶片截面点云数据分割成前缘、后缘、叶盆和叶背 4 部分的自动分区方法,对特征参数提取方法做了研究并用 VC++ 进行算法实现,使用 UG/OpenGrip 生成 UG 中叶片截面上的点云数据进行实验运算,计算精度达到 10^{-4} mm,表明在实际测量和参数提取中算法误差可以忽略.

关 键 词: 叶片截面; 特征参数; 无序点云; 数据排序; 数据分区

中图分类号: V232.4; TP391.7

文献标志码: A

Cross-sectional feature parameters extraction of blade based on unorganized point cloud

LIU Shu-gui, MAO Chen-li, ZHANG Hai-tao

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the practical requirements for extracting the cross-sectional feature parameters of aircraft engine blade, algorithms based on unorganized point cloud were studied. For the point cloud sorting, the distance-dichotomy based on rectangular corrosion was presented in consideration of the advantages of distance method and dichotomy. The approach based on minimum contain regional linear fitting and least square circle approximation was proposed for partitioning automatically the cross-sectional data of blade into four parts of leading edge, trailing edge, pressure face and suction face. The algorithms of feature parameters extraction were studied as well, and realized with VC++ and simulated using the unorganized point data generated by UG/OpenGrip. The experiments show that the precision of the calculation can reach 10^{-4} mm, indicating that algorithm calculation error can be ignored in the practical measurement and parameter extraction.

Key words: cross-section of blade; feature parameters; unorganized point cloud; data sorting; data partitioning

近年来航空工业不断发展,对飞机发动机的性能和质量提出了更高的要求.叶片是高性能航空发动机的核心工作部件,精确地获取叶片截面检验参数及修复数据,对叶片进行二次加工及修补是航空发动机加工、维修中的重要工作.目前对

航空发动机叶片截面参数提取研究大多基于有序的点云数据,在无序点云和轮廓分割方面研究较少.基于实用性和精确性的要求,如何将无序点云进行排序,如何将叶片截面点云数据分割为叶片前缘、后缘、叶盆和叶背 4 个部分是实现截面特征

收稿日期:2015-01-19

基金项目:中航创新基金(2009B41030);天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCZDJC34500)

作者简介:刘书桂(1954—),男,湖南华容人,教授、博士生导师,博士,主要从事智能坐标测量技术、自动测量与控制技术研究.

参数精确提取的前提。

本文提出一种叶片截面参数提取算法,对于同一叶片截面上无序的测量点云数据,首先自动进行数据排序和分区处理,然后提取叶片截面特征参数。

1 叶片截面数据排序

测量过程中,由于相邻叶片的干涉,叶片的扭转程度影响,叶片间通道狭窄,探针无法一次性有序采集到整个截面线数据。为保证足够的测量精度,在测量之前需要进行分段分区域的路径设置,最后将每段采集的数据统一到同一个数据文件中。目前在三坐标测量机路径优化方面也有一些研究,比如将路径粗略分成前缘、后缘、叶盆、叶背 4 个部分,为测量方便对每部分可分段测量,测量方向也可不同。为了保证完整性,段与段之间会有路径重合,每段路径采集的数据可能是有序的,但各段收集的点云数据合成在一起后难免是无序的。

针对叶片的形状特点,常规的测量数据排序主要有距离法^[1]、极坐标法和二分法^[2]。本文对上述方法做了实验,距离法易出现折回现象,极坐标法不适合叶片截面的排序,二分法利用横坐标大小进行二分和排序,在点集二分时易出错,并对叶片摆放姿势有要求。综合二分法和距离法优点,本文提出基于矩形腐蚀法的距离-二分排序方法。

1.1 矩形腐蚀法

步骤 1 确定 4 个边角点, x, y 表示点的横纵坐标。A 点($x+y$ 值最小的点), B 点($x-y$ 值最大的点), C 点($x+y$ 值最大的点), D 点($y-x$ 值最大的点)。 x_A, x_B, x_C, x_D 分别表示 A, B, C, D 点的横轴坐标值, y_A, y_B, y_C, y_D 分别表示 A, B, C, D 点的纵轴坐标值。

步骤 2 $y=\max(y_A, y_B), y=\min(y_C, y_D)$ 。
 $x=\max(x_A, x_D), x=\min(x_B, x_C)$ 。4 条直线围成矩形区域,删除矩形区域内的点,剩下凸包边界区域及以外的点^[3]。

如图 1 所示,利用腐蚀法,删除冗余点剩下矩形区域外点,叶片截面数据点会只剩前后缘及附近的点,删除大部分点。用在数据排序时搜索最远的两点时,能够提高提取效率。

本文以 4 个不同的叶片截面为例,每个截面取 400 个点进行删除冗余点实验,如表 1 所示,可以达到 80% 以上的删除率。此方法并不是对所有

情况都通用,对于弦线角很小或很大的叶片截面数据,效果不太明显,不建议使用。如表 2,给出比较数据。可以看出弦线越靠近横、纵坐标轴时,腐蚀效率低。其他情况下删除腐蚀率都能达到 80% 以上。

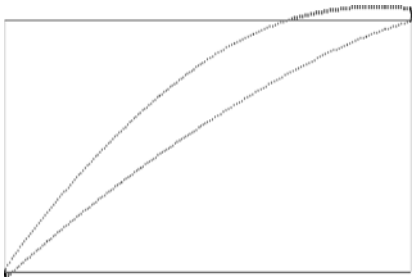


图 1 腐蚀叶片截面点
Fig. 1 Corroding blade section points

表 1 点云腐蚀率
Table 1 Point cloud corrosion rate

原点数	腐蚀后点数	腐蚀率/%
400	66	84
400	79	80
400	70	83
400	60	85

表 2 腐蚀率变化规律
Table 2 Change rule of corrosion rate

弦线角/(°)	原点数	腐蚀后点数	腐蚀率/%
89.583	400	349	13
81.583	400	73	82
43.583	400	36	91
7.583	400	80	80
6.583	400	92	77
4.583	400	120	70
1.583	400	261	35
0	400	356	11
-1.417	400	305	24
-5.417	400	129	68
-8.417	400	73	82
-68.417	400	37	91
-78.417	400	41	90
-82.417	400	80	80
-88.417	400	261	35

1.2 排序原理

将点云数据分成凹弧和凸弧两部分称为二分,如图2所示,将点集分成 $C_1 C_3 C_2$ 凸弧和 $C_1 C_2$ 凹弧,可以避免距离法排序的折回现象;距离法可以避免二分法根据坐标大小进行二分和排序的局限性。

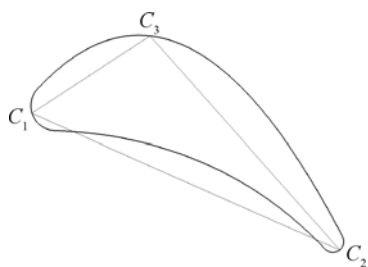


图2 距离-二分法

Fig. 2 Distance-dichotomy

步骤1 利用矩形腐蚀法删除冗余点,搜索剩余数据点集中距离最远的两点 C_1, C_2 ,由于叶片形状特点这两点应分布于前后缘上。

步骤2 在原始数据点云中寻找距离直线 $C_1 C_2$ 最远的一点 C_3 ,此点应为叶背上的点。

步骤3 将位于直线 $C_1 C_3$ 左侧和 $C_2 C_3$ 右侧的点及两直线上的数据点放入数组 Q_1 中,其余点放入数组 Q_2 中。

步骤4 将数组 Q_1, Q_2 中的数据分别利用链表结构,根据相邻点距离最近插入排序。

步骤5 将两链表数据按顺序合并。

如图3所示,将点用直线按顺序连接,图3(a)为排序前的无序数据点连线,图3(b)为排序后的数据点连线。

此方法完全适合叶片截面的数据排序,无论型面薄厚、点集密集或稀疏以及如何摆放,都能够得到准确的排序结果。

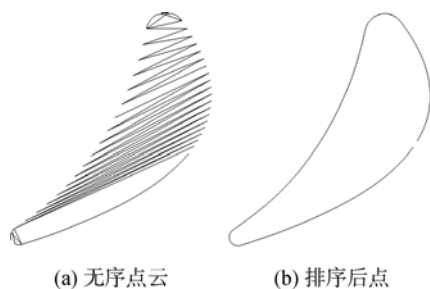


图3 数据排序

Fig. 3 Data sorting

2 叶片截面数据分区

叶片截面特征参数有前/后缘参数、弦线、弦长、弦倾角、中弧线提取、最大厚度等,它们都跟前/后缘圆心有直接或间接关系,前、后缘中心点坐标精确性影响其他参数的提取效果。本文提出一种方法,能精确地把截面点云数据自动分割成叶片前缘、后缘、叶盆和叶背4个部分。

基本思路是:对截面整个轮廓数据进行最小包容区域直线逼近法,获得最小包容区域逼近直线与截面轮廓线的两个切点 T_a, T_b ,亦可得弦线垂线与轮廓线切点 T_1, T_2 ,4个点为前、后缘上的点,以 T_a, T_1 之间的点为前缘点初始范围, T_b, T_2 间的点为后缘点初始范围,如图4。依次向两侧扩充点,利用圆度判定,直到前后缘切点处,即分割出4个部分点。

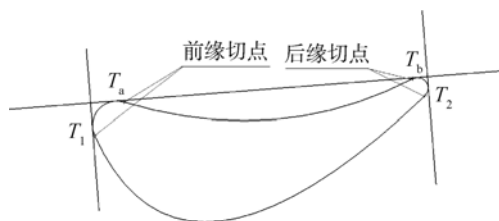


图4 数据分区原理

Fig. 4 Principle of data partition

本文对最小包容区域^[4-6]直线逼近法进行了研究并根据叶片的特殊形状特征,提出基于最小包容区域法提取弦线。

给定平面内,由两条平行直线包容目标,成高-低-高或低-高-低相间的形式之一时,这两条平行直线就是最小包容区域逼近直线。

2.1 最小包容区域直线逼近法提取弦线

2.1.1 初步确定两点

步骤1 对所有点云数据进行最小二乘直线拟合,方程为 $y = ax + c$;

步骤2 计算各点对最小二乘直线的纵坐标偏移量 $\Delta y_i = y_i - ax_i - c$, $\Delta y_i \geq 0$ 为高点,放入数组 G 中; $\Delta y_i < 0$ 为低点,放入数组 D 中;找到最大偏移点和最小偏移点并定义为 $A_{\max}, B_{\min}$,如图5所示。

2.1.2 搜索第3点

步骤1 通过 $A_{\max}, B_{\min}$ 作最小二乘直线的平行线 $A_1 A_2, B_1 B_2$; 将 $A_1 A_2$ 与 $A_{\max} B_{\min}$ 所夹锐角区域中的所有高点(数组 G 中的点)放入数组 P_g

步骤3 叶背弧上每一段确定一个给定点M,与叶盆上每一弧段所在的圆,求内切圆^[18],找到切点T,利用T与这一段弧上的两端点的圆心角之和应等于这段弧的圆心角,判断切点T是否在弧段上,直到找到真正的内切圆为止。

步骤4 循环步骤3,遍历叶背上每一段弧,内切圆圆心即为中弧线上的点,如图8。

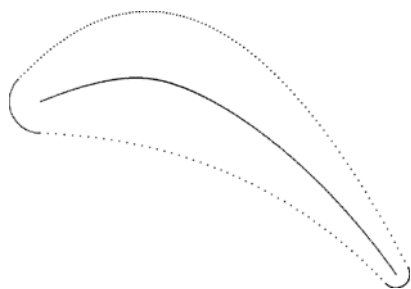


图8 内切圆圆心

Fig. 8 Incenter

步骤5 将内切圆圆心和前后缘中心点用NURBS曲线拟合,并在前后缘中心点处沿切线方向画直线与前后缘相交,即能得到中弧线。

3.4 叶型厚度

中弧线等弧长取新节点,在新节点处做中弧线的垂线,与叶背、叶盆交于两点,两点间的距离即为此处的叶型厚度。叶型厚度与在中弧线上的位置呈现抛物线趋势,解析得到最大叶型厚度。

4 实验

本文用UG软件设计叶片截面,利用UG/OpenGrip中的弦高公差法提取点云,将点云用本文算法进行排序、分区、参数提取。表3~表6为根据无序的叶片截面点云所提取的特征参数的误差结果。其中表3、表4、表5前后缘都是圆弧型缘头,各组中前缘弧的圆心角 $\theta=100^\circ$,后缘弧的圆心角 β 依次增大,分别为 $80^\circ, 90^\circ, 100^\circ$ 。表6前缘是椭圆型缘头,后缘为圆弧型缘头。名义值表示设

表3 参数提取结果($\theta=100^\circ$ 和 $\beta=80^\circ$)

Table 3 Parameter extraction results ($\theta=100^\circ$ 和 $\beta=80^\circ$)

参数	名义值	计算值	误差
中心 坐标/ mm	前缘	x -1.0682	-1.0682 0
		y 4.2827	4.2826 -0.0001
	后缘	x 8.1343	8.1342 -0.0001
		y 6.6615	6.6616 0.0001

续表

参数	名义值	计算值	误差
半径/ mm	前缘	0.2912	0.2912 0
	后缘	0.4617	0.4618 0.0001
b/mm	10.2564	10.2564	0
$\alpha/^\circ$	13.4659	13.4658	-0.0001
$C_{\max}/\text{mm}$	2.5534	2.5533	-0.0001

表4 参数提取结果($\theta=100^\circ$ 和 $\beta=90^\circ$)

Table 4 Parameter extraction results ($\theta=100^\circ, \beta=90^\circ$)

参数	名义值	计算值	误差
中心 坐标/ mm	前缘	x -5.5391	-5.5391 0
		y -3.7197	-3.7197 0
	后缘	x 5.6548	5.6548 0
		y -1.3174	-1.3174 0
半径/ mm	前缘	0.2656	0.2656 0
	后缘	0.4988	0.4988 0
b/mm	12.2113	12.2112	-0.0001
$\alpha/^\circ$	10.9455	10.9454	-0.0001
$C_{\max}/\text{mm}$	2.2501	2.2500	-0.0001

表5 参数提取结果($\theta=100^\circ$ 和 $\beta=100^\circ$)

Table 5 Parameter extraction results ($\theta=100^\circ, \beta=100^\circ$)

参数	名义值	计算值	误差
中心 坐标/ mm	前缘	x -12.4200	-12.4200 0
		y 14.7029	14.7029 0
	后缘	x 19.4369	19.4369 0
		y 9.2581	9.2581 0
半径/ mm	前缘	0.7716	0.7716 0
	后缘	0.3343	0.3343 0
b/mm	33.4218	33.4218	0
$\alpha/^\circ$	-8.9237	-8.9237	0
$C_{\max}/\text{mm}$	4.6130	4.6129	-0.0001

表6 参数提取结果(椭圆弧型)

Table 6 Parameter extraction results (ellipse arc)

参数	名义值	计算值	误差
中心 坐标/ mm	前缘	x -8.8585	-8.8585 0
		y 5.7258	5.7259 -0.0001
	后缘	x 6.7919	6.7919 0
		y 8.8803	8.8803 0

续表

参数	名义值	计算值	误差
半径/ mm	长轴	0.5000	0.5001
	前缘短轴	0.2500	0.2500
	后缘	0.4496	0.4496
b/mm	16.9087	16.9086	-0.0001
$\alpha/(\circ)$	10.7141	10.7142	0.0001
$C_{\max}/\text{mm}$	2.1107	2.1108	0.0001

计时的名义参数值,计算值表示经过本文算法计算的参数值, x 表示横轴坐标值, y 表示纵轴坐标, b 表示弦长, α 表示弦线角, $C_{\max}$ 表示最大叶型厚度。

对于圆弧型和椭圆弧型前后缘的叶片截面点云数据,本文排序、分区算法能够得到准确结果,参数提取算法计算误差达到 10^{-4} mm,前后缘圆心角角度越大,其相关参数误差越小。

5 结 论

本文提出了距离-二分排序法和基于最小包容区域直线的近似弦线提取方法,详细介绍了算法的原理步骤,算法对于叶片截面数据都能准确排序并获得缘头的初始数据点集,并通过UG设计叶片。

OpenGrip提取无序点云数据,运用本文算法实现特征参数提取,算法能够达到 10^{-4} mm精度,符合实用性、精确性要求。未来笔者将继续对叶片截面特征参数提取的研究。一方面,在特征参数提取的算法中,阈值的选取是经过大量的实验得出的经验值,未来将进一步对阈值选取的方法进行研究;另外本文在实验时数据点没有测量误差,未来将考虑实际采点时的测量误差;另一方面,目前参数的提取研究都需要将测量模型和设计模型置于同一参考坐标系下进行测量,笔者将对点云配准技术进行研究。

参考文献:

- [1] 郭真望,张力宁.一种复杂截面线数据的排序与轮廓分离方法[J].今日科苑,2007(8):94.
GUO Zhenwang,ZHANG Lining. A kind of complex cross section line data sorting and contour separation method[J]. Modern Science,2007(8):94. (in Chinese)
- [2] 谭晓丹.整体叶盘测量特征点提取与数据处理[D].长春:吉林大学,2014.
TAN Xiaodan. Research on sampling distribution and data processing for blisk measurement[D]. Changchun:Jilin University,2014. (in Chinese)
- [3] 彭志光,李文龙.基于改进凸包算法的叶片型面特征参数提取[J].装备制造技术,2012(1):37-43,46.
PENG Zhiguang,LI Wenlong. The blade surface feature parameter extraction based on the improved convex hull algorithm[J]. Equipment Manufacturing Technology,2012(1):37-43,46. (in Chinese)
- [4] 张新宝,张坤.平面内直线度误差最小区域法的完备性研究[J].机械工程学报,2012,48(24):14-18.
ZHANG Xinbao,ZHANG Kun. Research on the completeness of minimum zone method of straightness error in plane[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(24):14-18. (in Chinese)
- [5] ZHU Lingjian,LI Lin,LIU Junhua. A method for measuring the guideway straightness error based on polarized interference principle[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2009,49(3/4):285-290.
- [6] YI Ziqiang,LI Shengyi. High accuracy error separation technique for on-machine measuring straightness[J]. Precision Engineering,2006,30(2):192-200.
- [7] 彭志光.基于改进凸包算法的叶片型面检测[D].武汉:华中科技大学,2012.
PENG Zhiguang. The blade surface inspection based on the improved convex hull algorithm[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012. (in Chinese)
- [8] 陈志强.基于测量数据的叶片截面特征参数提取技术研究[D].西安:西北工业大学,2007.
CHEN Zhiqiang. Research of cross-sectional feature parameter extraction of blade based on measurement data[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2007. (in Chinese)
- [9] 陈志强,张定华,金炎芳,等.基于测量数据的叶片截面特征参数提取[J].科学技术与工程,2007,7(9):1972-1975.
CHEN Zhiqiang,ZHANG Dinghua,JIN Yanfang,et al. Cross-sectional feature parameter extraction of blade based on measurement data[J]. Science Technology and Engineering,2007,7(9):1972-1975. (in Chinese)
- [10] Gander W, Golub G H,Strebel R. Least-squares fitting of circles and ellipses[J]. BIT Numerical Mathematics,1994,34(4):558-578.
- [11] Fitzgibbon A,Pilu M,Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(5):476-480.
- [12] Tiller P A. The NURBS book [M]. 2nd ed. New York: Springer Verlag,1997.
- [13] JIANG Dan,WANG Lancheng. An algorithm of NURBS surface fitting for reverse engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2006,31(1):92-97.
- [14] 贾春阳,杨岳,陈峰.等弧长原则的NURBS曲线离散算法[J].计算机工程与应用,2014,50(3):165-167,189.
JIA Chunyang,YANG Yue,CHEN Feng. NURBS curve

- discrete algorithm based on equal arc-length principle[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(3): 165-167, 189. (in Chinese)
- [15] Tiller P. Biarc approximation of NURBS curves[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(11): 807-814.
- [16] 邓达. 曲线的(广义)圆弧样条逼近[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- DENG Da. The approximation of curves by generalized arc spline[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [17] 何援军. 计算机图形学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [18] 孙钢峰. 叶片中弧线和最大叶型厚度的计算[J]. 汽轮机技术, 1988(2): 36-47, 14.
- SUN Gangfeng. The calculation of mean camber line and maxthickness of blade[J]. Turbine Technology, 1988(2): 36-47, 14. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)