

考虑区域公差约束的叶片几何形状分析方法<sup>\*</sup>

## Analysis Method for Blade Geometric Considering Regional Tolerance Constrained

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 江泽鹏 陈志同

**[摘要]** 机床误差与加工误差易造成叶片型面位置整体偏离叶片基准,若采用基于叶片基准测量的传统六点定位法会造成叶片实际测量截面线不同于理论截面线,同时带来法矢补偿误差。因此在六点定位基础上提出基于叶片特征线测量的精确定位方法以得到较优的测量基准,以此基准进行叶片测量并将所得数据再近似转化为原始六点定位坐标系下的数据用于叶片评价。考虑叶片叶身与边缘区域设计公差不一致,运用奇异值分解法与遗传算法相结合进行最优化匹配求解以使超差点数最小,最终得到叶片各参数用于几何形状评价。利用测量试验验证了该方法的正确性与有效性。

**关键词:** 叶片定位 数据处理 区域公差 遗传算法 几何形状分析

**[ABSTRACT]** The position of blade body deviates from the blade datum as machine tool error and machining error. The method of six points location will result in the actual measurement section curve differ from the theoretical. Therefore, a method of exact location based on blade feature curves measurement is provide to obtain better blade datum. Then the measurement data should be transformed in the coordinate system established by six points location principle. And the data will be used for blade evaluation. Generally, the design tolerance of blade edge region is different from blade body, therefore, the singular value decomposition (SVD) and genetic algorithm are used for best fitting and blade evaluation. Accurate experimental results of engine blade have demonstrated the feasibility and validity of the proposed method.

**Keywords:** Blade localization Data processing Regional tolerance Genetic algorithm Geometric analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.157

接触式三坐标测量机由于其精度高而被广泛应用于叶片类曲面检测<sup>[1-2]</sup>。叶片数字化检测的关键在于如何获取精确的测量数据以及正确的评价分析方法。叶

片检测通常以叶片榫头作为基准面,采用六点法进行定位。但机床误差与加工误差会造成叶片型面位置整体偏离叶片基准,若直接采用六点定位所得基准进行叶片测量会造成实际测量曲线与理论曲线形状不一致,实际测量点与理论点也不一致,同时还可能带来测头半径补偿误差,影响测量过程的精确性。因此,通常需要借助叶片自身型面进行精确定位。而对于叶片实际装机或后续工艺而言,仍需要以叶片基准面作为后续参考,即叶片几何形状评价也需要在六点定位所得的叶片基准坐标系下进行,以此获得的叶片分析结果才能满足要求。另一方面,叶片的前后缘与叶盆叶背曲线的设计公差并不一致,通过简单的最小二乘拟合得到的轮廓度与位置度和扭角偏差并非最佳结果,极易造成公差要求高的区域局部点超差<sup>[3]</sup>。

目前, Tao-Hsien Hsu 等<sup>[4]</sup>对叶片的检测与评价进行了较为详细的研究,但它直接利用六点定位获得的基准进行测量,且利用测量后的截面数据与理论曲线进行匹配以用于叶片几何形状分析的方法存在较大的误差。文献[5-7]对叶片以及曲面的检测定位进行了大量研究,但都是基于大量数据点的配准及其算法研究,在效率与可行性上存在不足。针对叶片设计截面区域公差不一致,国内外叶片分析软件还没有集成考虑。而遗传算法作为一种全局优化算法,已被广泛应用于制造行业的优化<sup>[8]</sup>,对于小数据计算而言,其效率较高,结果准确。

针对上述情况,本文提出了六点法粗定位-特征线精定位-截面线测量-测量数据反算-叶片评价的策略。首先,通过传统的六点定位方法进行粗定位以获得叶片实际装机下的基准坐标系,然后在此坐标系下测量六条叶片特征曲线,获得测量数据之后通过迭代最近点算法(ICP)<sup>[9]</sup>得到叶片最佳的空间位姿并据此进行叶片截面线测量。将获得的截面测量数据再近似转换为六点定位所得基准坐标系下,以用于叶片几何形状分析。最后,利用奇异值分解法(SVD)与遗传算法相结合对叶片每组截面线数据点与理论曲线进行最优化匹配,以此得到叶片截面的轮廓度偏差、位置度和扭角偏差。

## 1 精确定位与数据处理

### 1.1 3-2-1 六点定位

<sup>\*</sup> 国家重大科技专项(2013ZX04001051)资助。

叶片基准通常为叶片榫头面,需以此作为粗定位基准。如图1所示,以方块榫头叶片为例,面A、B、C为叶片基准面,其中测点分布为A面3点,B面2点,C面1点。通过手动测量6点,即可完全确定叶片空间姿态,即叶片粗定位基准坐标系。

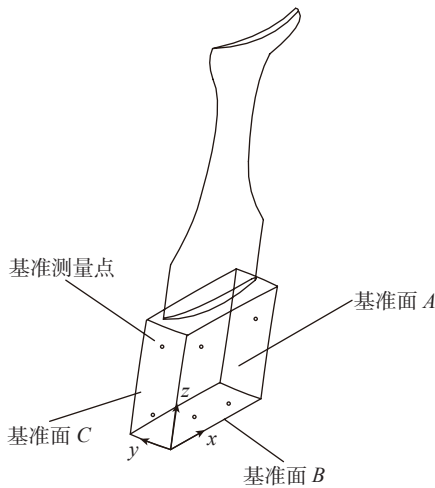


图1 3-2-1定位原理图

Fig.1 Principle of blade localization by 3-2-1 method

### 1.2 基于特征线测量的精定位

如图2所示,选取叶片6条特征曲线(顶部截面线 $C_s$ 、底部截面线 $C'_s$ 、前缘点连线 $C_e$ 、后缘点连线 $C'_e$ 、中轴线于叶盆投影线 $C_a$ 、中轴线于叶背投影线 $C'_a$ )进行测量。设测量点集为:

$$P_i^k = \{p_i^k | k = 1, \dots, 6, i = 1, \dots, N^k\}$$

理论点集为:

$$Q_i^k = \{q_i^k | k = 1, \dots, 6, i = 1, \dots, N^k\}$$

$Q_i^k$ 为 $P_i^k$ 到理论截面线的最短距离点对。定位变换矩阵为 $R$ 、 $T$ ,其变换参数为 $x = (\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。则:

$$F(R, T) = \sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^{N^k} ((R \cdot \text{PreTran}(p_i^k) + T) - q_i^k)^2 \quad (1)$$

其中,  $\text{PreTran}(p_i^k)$ 表示测量点预处理,包括剔除坏点等。该数学模型可以通过奇异值分解法求解<sup>[10]</sup>。该6条特征曲线能够在空间上较好地反映叶片6个自由度的变换,其求解结果相对精确。

### 1.3 测量数据处理

精确定位产生的叶片空间姿态变化量为3个旋转量和3个平移量 $(\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ,而对于叶片截面线测量数据点而言,其刚性变换只能基于平面变换,即两个平移量一个旋转量。因此,需要将6个定位变化量近似转换为数据点3个变化量。设叶片每条截面线沿叶高方向高度为 $l_j (j = 1, \dots, n)$ , $n$ 为测量截面线条数。假设叶片测量截面线位于等 $Z$ 平面,则每条叶片测量数据点变换公式为:

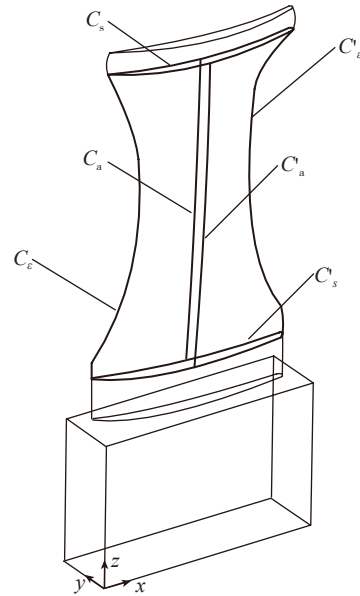


图2 测量特征线示意图

Fig.2 Measurement path of blade localization

$$p'_i = p_i \cdot R + T \quad (2)$$

其中,

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} \Delta x + l_j \cdot \sin\beta & \Delta y + l_j \cdot \sin\alpha & 0 \end{bmatrix}$$

$p'_i$ 为变化后的测量点, $p_i$ 为实际测量点, $i$ 为每条截面线测量点数。通常,叶片定位得到的沿叶高方向的平移量无法在叶片评价中体现,对于曲率变化大的叶片而言,对叶片形状影响较大,在实际加工测量中应尽量使 $Z$ 方向的平移量接近于零。实际上,该方法保证了叶片测量截面的轮廓形状与理论保持一致,测量数据真实准确,将定位值反映到了截面位置度和扭角误差上。

## 2 基于遗传算法的几何形状评价

获得截面线测量数据后,需要通过拟合以获得准确的轮廓度、位置度和扭角偏差。通常,叶片前后缘公差要求要高于叶背,叶盆,基于设计者意图,只要叶片满足轮廓度公差和位置度与扭角公差即为合格,因此叶片几何形状分析为以数据点平移和旋转为变量的最优化问题,在公差范围内使得叶片边缘区域数据点偏差尽可能小于叶盆叶背区域。据此建立如下数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^m \|d_i^j(x)\|^2 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^m ((\text{PreTran}(p_i^j) \cdot R' + T') - q_i^j) \\ \text{s.t. } x \in D = \{x | \mu_j \leq d_i^j(x) \leq \varepsilon_j, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, s\} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\min f(x)$ 为定位目标函数, $s$ 为不同的特征区域, $m$

为每个区域的测量点数,  $d_i^j(x)$  表示最短距离,  $p_i^j, q_i^j$  分别为不同区域内的变化之后的测量点和与之对应的最短距离点对。变化矩阵为  $[R', T']$ , 变量为  $x = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$ 。

该数学模型为带不等式约束的非线性优化问题, 其变量与约束条件较多, 求解难度大, 综合考虑求解的效率与精度, 本文采用 SVD 法与遗传算法相结合的方法进行求解。首先, 利用 SVD 法求取无约束条件下的最佳解  $\phi(x) = [x_0, y_0, z_0]$ , 以此大致确定目标函数寻优的可行解空间为  $x^* = [\Delta x_0 \pm x', \Delta y_0 \pm y', \Delta z_0 \pm z']$ , 其中  $x', y', z'$  可以根据  $x^*$  大小设定, 即假设变量的约束空间为  $\phi(x)$ , 然后修改目标函数如下:

$$F(x) = N + f(x)/M \quad (4)$$

其中,  $N$  为超差点数, 由公差约束进行判断,  $M$  为一较大的数, 一般可以设置为点数。  $F(x)$  的意义在于超差点数变小, 目标函数将快速减小; 超差点数相同时, 则距离平方和越小的越优。

在遗传算法求解过程中, 首先在可行解空间  $\phi(x)$  内产生初始种群, 并进行二进制编码, 以  $F(x)$  值的顺序衡量个体的优劣。遗传算法的参数设置以及交叉变异方法的选择将直接影响求解的精度。通过多次测试与反复试验, 本文得出了比较合理的设置值: 采用二进制编码, 根据目标函数值的比例评价个体优劣, 利用旋转赌轮法选择父本, 多位交叉, 均匀变异, 其中交叉因子 0.4, 变异因子 0.2, 迭代次数 300 次。求解流程如图 3 所示。

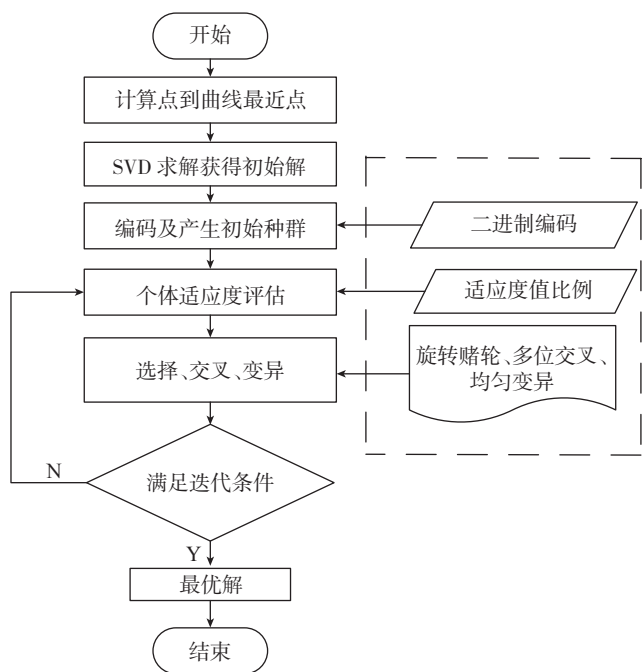


图3 遗传算法求解流程图

Fig.3 Flow chart of genetic algorithm

经过最优化匹配后, 测量数据点到理论截面线的最短距离即可定义为叶片截面的轮廓度偏差, 而叶片截面的位置度偏差为  $\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ , 扭角偏差为  $\Delta \varphi = \Delta \gamma$ 。通过每条截面线的位置度与扭角偏差即可反映出叶片的变形情况。在叶片加工制造领域, 通常只给出了叶片的截面线位置度与扭角公差和轮廓度公差要求, 对其整体变形以及截面数据点的光顺性并没有给出明确的要求。事实上, 这两点会对叶片的气动性能产生一定的影响。因此, 本文引入 4 个变量以分别反映叶片变形情况与截面光顺性情况。如图 4 所示, 假设  $X$  轴为叶厚方向,  $Y$  轴为叶宽方向,  $Z$  轴为叶高方向, 定义  $S(\Delta x)$ 、 $S(\Delta y)$ 、 $S(\Delta \varphi)$  分别表示弯变形、掠变形、扭变形。其中,  $f(\Delta x)$ 、 $f(\Delta y)$ 、 $f(\Delta \varphi)$  为三次拟合曲线,  $S(\Delta x)$ 、 $S(\Delta y)$ 、 $S(\Delta \varphi)$  为阴影部分面积, 为了便于比较, 将  $Z$  标准化为 0~1 范围。另外, 考虑到截面数据点的光顺性, 希望每个数据点偏差相差尽量小, 因此引入每组截面数据点偏差的标准差, 即:  $S(\delta)$ ,  $\delta = \delta(i=1, \dots, n)$  为测量点数。该 4 个变量可以作为衡量叶片加工形状的指标, 其值越小, 几何形状越好。虽然目前在叶片形状分析领域并没有将这 4 个变量纳入评价指标, 但对于衡量叶片加工工艺的优劣以及叶片质量的评价而言, 具有一定的指导意义, 可以作为叶片加工领域的参考指标。

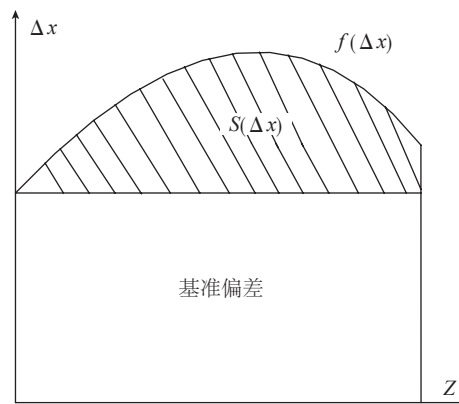


图4 变形衡量指标示意图

Fig.4 Deformation measure schematic

### 3 试验验证

选取某型号航空发动机叶片进行试验, 测量设备为三坐标接触式测量机, 测头半径为 1mm, 如图 5 所示。其中叶片设计公差要求为: 边缘公差要求  $-0.04 \sim 0.04 \text{mm}$ , 叶身公差要求为  $-0.06 \sim 0.06 \text{mm}$ , 位置度公差为  $\phi 0.3$ , 扭角公差  $\pm 0.5^\circ$ 。叶片测量路径为 4 条等  $Z$  值截面线, 每条截面线按等参数取点共 200 个。首先, 利用 3-2-1 方法进行叶片粗定位, 然后选取叶片 6 条特征曲线进行测量并求解, 得到叶片空间姿态变换量

为 [0.1219, -0.023, -0.0031, 0.009, -0.013, 0.05]。按照公式对测量数据进行变换,最后利用本文方法进行最优化解。利用本文和 Tao-Hsien Hsu 方法<sup>[4]</sup>求解后的结果如表 1 所示。

由表可知,本文方法检测评价结果中轮廓度偏差更小。对于高精度叶片而言,当检测方法存在不足时,实际测量点与理论点并不一致,会影响测量结果,这种影响往往是带来较大的偏差,几乎不可能带来整体更小的偏差。同时,本文的优化结果为没有超差点,虽然变形量有所增大,但每条截面线的位置度和扭角仍在公差范围以内,满足叶片设计要求。

#### 4 结论

(1)提出了叶片 3-2-1 粗定位—基于特征线精定位—数据处理(反算)—叶片形状分析(优化匹配)的方案,该方法能更好地保证所测叶片截面线接近于理论截面线,获得的轮廓度偏差更加真实可信。

(2)将 SVD 法与遗传算法相结合运用于带区域公

差约束的叶片形状分析上,降低了公差约束要求高的区域出现部分超差点的可能性,并通过试验给出了遗传算法针对此类问题的较优设置参数。

(3)通过对比试验,得出运用本文方法得到的叶片几何形状结果较 Tao-Hsien Hsu 提出的方法而言,其轮廓度偏差更小,超差点变少或者无,变形稍有增大但在设计公差范围以内。对于高精度叶片而言,不正确的测量方法难以得到整体更好的轮廓度偏差,进而表明本文方法更加精确。

#### 参考文献

[1] MALGORZATA P. Parameters for CMM contact measurements of free-form surfaces. *Metrology and Measurement Systems*, 2011(2):199-208.

[2] AINSWORTH I, RISTIC M, BRUJIC D. CAD-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2000,16:23-31.

[3] 敬石开,程云勇,张定华,等.一种区域公差约束的叶片模型配准方法. *计算机集成制造*, 2010,16(4):883-886.

[4] HSU T H, LAI J Y, UENG W D. On the development of airfoil section inspection and analysis technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, 30:129-140.

[5] 张定华,程云勇,卜坤,等.考虑弯扭变形的叶片模型配准方法. *航空学报*, 2009,12:2449-2455.

[6] 刘晶.叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究[D].西安:西北工业大学,2006.

[7] SHEN B, HUANG G Q, MARK K L, et al. A best-fitting algorithm for optimal location of large-scale blanks with free-form surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 139:310-314.

[8] 武殿梁,黄海量,丁玉成.基于遗传算法的三维曲面配准. *航空学报*, 2002, 23(3):285-288.

[9] BESL P J, MAKAY N D. A method of registration of 3D shapes. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2):239-255.

[10] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-d point set. *IEEE T Pattern Anal.*, 1987, 9(5):687-700.

(责编 李丹)



图5 试验现场图

Fig.5 Process of measuring

表1 本文方法与Tao-Hsien Hsu方法检测结果对比

		[ $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ ]	轮廓偏差		[ $S(\Delta x), S(\Delta y), S(\Delta \phi)$ ]	$S^k(\delta^k)$	N	
			max	min			边缘	基体
本文方法	S1	[0.1312,-0.029,0.045]	0.028	0.002	[0.006,0.004,0.01]	0.0052	0	0
	S2	[0.1313,-0.037,0.048]	0.029	0.002		0.0048	0	0
	S3	[0.1415,-0.036,0.058]	0.031	0.005		0.005	0	0
	S4	[0.1458,-0.035,0.075]	0.032	0.002		0.0052	0	0
Tao-Hsien Hsu 方法	S1	[0.132,-0.027,0.048]	0.038	-0.012	[0.005,0.0038,0.008]	0.009	0	0
	S2	[0.138,-0.032,0.048]	0.042	-0.008		0.0092	0	0
	S3	[0.141,-0.034,0.058]	0.050	-0.01		0.0088	0	2
	S4	[0.144,-0.034,0.068]	0.052	-0.008		0.0093	5	3