DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2008.10.024
2008年 10月 北京航空航天大学学报 October 2008
第34卷 第10期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol 34 No.10

基于CAD模型的涡轮叶片误差检测系统

席 平 孙肖霞

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：涡轮叶片型面误差检测是其制造过程中的重要环节.研究了涡轮叶片型面误差检测关键技术的实现方法，提出了基于测量数据的叶片截面关键参数的自动提取方法以及测量数据与计算机辅助设计(CAD)模型的坐标配准方法，制定了衡量叶片截面轮廓度、倾斜度、弯曲度和扭曲度的评估指标，并基于UG平台开发了叶片型面误差检测系统.应用实例表明，该系统可显著提高叶片的误差检测速度和分析质量.

关 键 词：涡轮叶片；误差评估；特征提取；坐标配准

中图分类号：TP 391.7

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)10-1159-04

Error analysis system of turbine blade based on CAD model

Xi Ping Sun Xiaoxia

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The error analysis of blade surface is very important during the process of turbine blade manufacture. Firstly, key technologies of surface inspection were studied, and the crucial parameters automation extraction algorithm for blade section from measured data was proposed. Next, the registration method between measured data and computer aided design (CAD) model was given. Meanwhile, several indexes of evaluation for blade were put forward, such as profile error, angularity error, camber error and twist error. Finally, the error analysis system of turbine blade was developed based on UG. Successful experimental results show that this system can improve the efficiency and quality of blade surface inspection.

Key words: turbine blade; error analysis; feature extraction; coordinate registration

涡轮叶片是关系到发动机性能和安全的高负荷零件，严格控制叶片的制造质量是叶片制造中的关键问题，因此叶片检测是叶片制造技术中的重要内容，在叶片制造总工作量中叶片检测工作量占相当大的比例[1].叶片型面误差检测具有形状复杂、工作量大、技术条件和尺寸精度要求严格等特点.叶身是叶片的核心部分，是根据空气动力学和流体力学理论通过复杂的数值计算并经试验修正而设计的复杂空间型面，传统的样板检测、光学投影检测等方法检测精度低，已经不能满足工程需求[2].近年来，通过先进的激光扫描设备或工业CT可以快速获取叶片截面的三维坐标值[3]，因此，本文研究了基于CAD模型的涡轮叶型尺寸检测系统，不仅能检测规定的剖面型线及其他截面特征参数的误差值，而且还可用于检测决定叶片气动、强度、振动及叶栅通道流动性能的弯曲度、扭转度和偏斜度.

1 数据预处理

在数据采集中，为保证检测精度，通常采用密集的采样方式，而在误差分析时通常需要分布较为均匀且数量不多的点，应该根据特定的精简原则去除冗余数据.另外，测量数据的初始排列顺序可能是杂乱无章的，因此在数据精简之前，需要将测量数据按照相邻的拓扑关系进行重新排列.

1.1 测量点排序

对测量点按最近邻顺序排序可以归结为组合最优化中的旅行商问题(TSP).现今可以解决该

收稿日期：2007-10-19

作者简介：席 平(1954－)，女，陕西西安人，教授，xiping@buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

问题的算法有很多，本文采用最小增量算法[4]，首先由距离之和最大的 3个点组成初始回路，然后每次将节点插入到当前回路的最佳位置上，即新节点与回路每条边的两端点组成三角形，使得回路新增的长度最短，当所有节点插入完毕时测量点的排序结束.

1.2 数据精简

对于截面线点集中的 n个有序数据点 $\{(x_i, y_i, z_i) \mid i=0, 1, \cdots, n-1\}$，假设 P_{i-1}，P_i 和 P_{i+1}是相邻三点，见图 1，α表示 $P_{i-1}P_i$与 $P_{i-1}P_{i+1}$的夹角，$d=|P_{i-1}P_i|\sin\alpha$，本文通过给定角度限值 $\Delta\alpha$和弦高限值 Δd，将处在这两个阈值内的点过滤掉. $\Delta\alpha$通常取 0°～10°，可根据实际情况赋值，取值越小，保留点数越多；Δd值则按式 (1)确定：

$$\Delta d = \frac{N_a}{N_b}\mu \sin\Delta\alpha \tag{1}$$

其中，N_b表示初始点数；N_a表示简化后的点数；$\mu=\dfrac{\sum_{i=1}^{n-1}|P_{i-1}P_i|}{n-1}$，表示相邻点距离的均值.

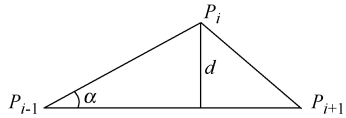

图 1 角度和弦高

2 叶片截面参数提取

叶片截面的主要参数：形心坐标 $P_o(x, y)$；前、后缘圆心坐标 $P_q(x, y)$，$P_h(x, y)$及半径 R_q，R_h；前、后缘切点坐标 $T_{q1}(x, y)$，$T_{q2}(x, y)$，$T_{h1}(x, y)$，$T_{h2}(x, y)$；最大厚度 C_{max}；弦长 b[5]，见图 2.

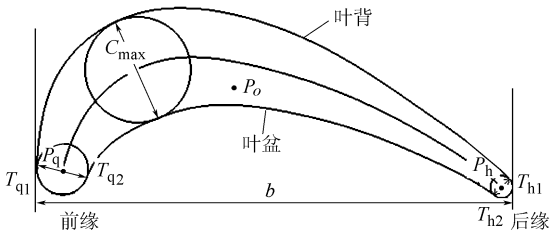

图 2 叶片截面参数

2.1 叶片截面形心

在叶片截面参数中，形心是封闭曲线所包围面域的质心，决定叶身重心的位置，是影响叶片倾斜度误差和弯曲度误差的重要因素.

在几何学中，形心就是对形状积分的均值. 在平面直角坐标系中，对于数据点列 $P_i(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, \cdots, k$)，形心 P_o坐标的计算公式如下：

$$(P_{ox}, P_{oy}) = \frac{1}{W_i}\left(\sum_{i=1}^{k} x_i, \sum_{i=1}^{k} y_i\right) \tag{2}$$

其中，w_i为加权系数，若测量点在其理想拟合曲线上的分布基本均匀，可令 $w_i=\dfrac{1}{k}$，否则要考虑数据点间的密集程度. 此方法计算简单，计算量较小，在短时间内就可以输出形心坐标值.

2.2 叶片截面前、后缘切点和圆心

叶片的缘头在截面上对应两段与叶盆、叶背曲线相切的圆弧，对叶片的气动性能有着重要的影响，因此在叶片检测过程中，对该区域的形状和位置误差的评定要求十分严格. 叶盆、叶背曲线为两条自由曲线，因此，确定叶片缘头的准确位置和范围比较困难，本文的求解算法描述如下：

1) 初步判断前缘点和后缘点. 由截面测量点中距离最大的两点 A和 B构成平行于弦线的直线 AB，如图 3所示，弦长 $b=|AB|$，且距离 AB最大的点必为叶背上的一点 C. 由叶片的结构特点可知，如果 $|AC|<|BC|$，则点 A位于前缘端，点 B位于后缘端.

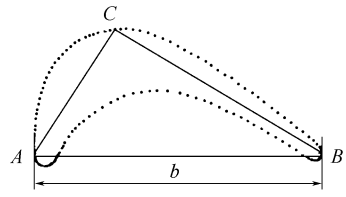

图 3 前、后缘位置判断示意图

2) 用步进搜索法确定前、后缘切点. 具体步骤为：①首先将前缘端的点 A作为 1#点，依次在数据点列中选取 4#点和 7#点，由三点估算圆半径 r_1，然后由 2#点、5#点和 8#点获得 r_2，半径 r_3，…，r_n的计算方法依次类推，计算半径增量 $\Delta r_n=r_n-r_{n-1}$并比较 Δr_n与增量阈值 Δr_{max}的大小；②如图 4所示，如果半径增量 $\Delta r_n>\Delta r_{max}$且 r_n，r_{n-1}和 r_{n-2}满足 $r_n>r_{n-1}>r_{n-2}$，则表示 (n+6)#点不是前缘点，标记 (n+5)#点为前缘切点 T_{q1}；③重复步骤①和②，沿反方向搜索另一个前缘切点 T_{q2}；④重复步骤①、②和③以点 B为起始点，搜索后缘切点 T_{h1}和 T_{h2}；⑤分别计算前缘切点 T_{q1}与后缘切点 T_{h1}和 T_{h2}的距离，如果 $|T_{q1}T_{h1}|>|T_{q1}T_{h2}|$，则 T_{h1}为后缘与叶背的切点，反之，T_{h2}为后缘与叶背的切点；采用同样的方法确定前缘与叶盆、叶背的切点.

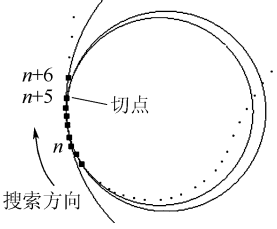

图 4 切点判断示意图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3) 拟合前、后缘圆心和半径. 在数据点列中提取前缘两切点之间的数据点 $Q_j(x_i, y_i)(j=0, n)$, n为前缘点数,采用拟合最小二乘圆法求解前缘的圆心 $Q_0(x_0, y_0)$和半径 r_q. 圆的方程可写为

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r_q^2 \tag{3}$$

设 $\varepsilon_i=(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-r_q^2$,则要求 ε_i 的平方和最小,则

$$\min F(x_0, y_0, r_q)=\sum_{i=0}^{n}\varepsilon_i^2 \tag{4}$$

由极值法可知,式 (4)满足:

$$\frac{\partial F}{\partial x_0}=\frac{\partial F}{\partial y_0}=\frac{\partial F}{\partial r_q}=0 \tag{5}$$

求解式 (5),可得圆心 $Q_0(x_0, y_0)$和半径 r_q,同样方法拟合后缘圆心 $H_0(x_0, y_0)$和半径 r_h.

2.3　叶片截面最大厚度

在数据点列中提取叶背与前、后缘切点之间的数据点 $B_i(i=0, m)$及叶盆与前、后缘切点之间的数据点 $P_j(j=0, n)$,假设任意叶背点 B_i 与任意叶盆点 P_j 之间的距离为 $D(B_i, P_j)$,则 $\max_{i=0, m}(\min_{j=0, n}(D(B_i, P_j)))$即为叶片截面的最大厚度[6].

3　坐标匹配

坐标匹配就是实现测量点和 CAD模型的坐标配准,其匹配精度直接影响后续误差结果的可靠性[7]. 目前,常用的坐标配准方法有遗传算法、力矩主轴法和三点对齐法. 前 2种方法配准时间较长. 第 3种方法优点是原理简单,能够较快实现初始配准,缺点是必须准确地确定出 3对基准点的对应关系. 综上所述,根据配准时间的要求和测量数据的特点,本文采用 3点对齐法的变换形式. 对于多个截面数据与三维 CAD模型的配准,通常以 CAD模型的中截面为配准参照对象,因此,三维坐标配准转化为二维数据匹配问题,分析叶片截面特征:①最大内切圆圆心 P_C是叶片精铸过程中的最后凝固点,即凝固收缩中心;②前、后缘圆心连线的矢量方向影响了弦线角的大小,是叶片截面的重要特征参数. 因此,采用以下配准原则:①最大内切圆圆心重合;②前、后缘圆心连线平行. 假设平移量和旋转角度分别为 $(\Delta T_x, \Delta T_y)$和 $\Delta\theta$,具体的配准方法如下:

1) 如图 5所示,$P_C'(x_{P_C}', y_{P_C}')$和 $P_C(x_{P_C}, y_{P_C})$分别表示 CAD模型和测量数据的最大内切圆圆心,则平移量为:$(\Delta T_x, \Delta T_y)=(x_{P_C}'-x_{P_C}, y_{P_C}'-y_{P_C})$. 对每个截面测量数据点进行平移变换,平移后的测量点坐标值为

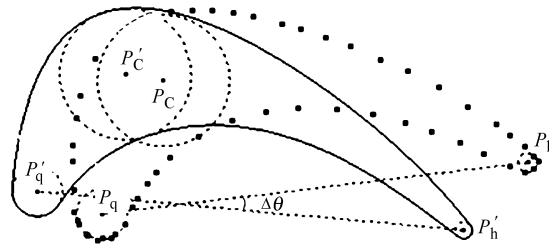

图 5　叶片截面数据匹配参数

$$(x_i', y_i')=(x_i+\Delta T_x, y_i+\Delta T_y) \tag{6}$$

2) 假设测量数据和 CAD模型前、后缘圆心连线 P_qP_h 和 $P_q'P_h'$的矢量分别为 a和 b,两直线夹角为 $\Delta\theta$,则有如下关系:

$$\Delta\theta=\arccos\left(\frac{a\cdot b}{|a|\cdot|b|}\right) \tag{7}$$

其中　　$a=((x_h-x_q), (y_h-y_q))$

$b=((x_h'-x_q'), (y_h'-y_q'))$

3) 以过内切圆圆心的叶片截面法线为旋转轴,$\Delta\theta$为旋转角度,对每个截面测量数据点进行旋转变换,旋转后的测量点坐标值为

$$P_i''=P_C'+f(P_i'-P_C', \theta) \tag{8}$$

其中 $f(P_i'-P_C', \theta)$为矢量差绕内切圆圆心 P_C'旋转 θ角得到的矢量结果.

4　误差评估指标

在叶片型面设计中,一般先设计出 3个最关键的基本特征截面叶型:根部、顶部和平均截面;再由这 3个叶型沿叶高按某种规律插值其他高度的特征截面;叶片截面误差直接影响叶片的气动性能,因此,需要计算截面轮廓度误差以及形心坐标、前后缘切点和圆心坐标、最大厚度、最大内切圆圆心等主要截面参数的误差;另外,还需要计算叶片的倾斜度误差、弯曲度误差和扭曲度误差.

1) 截面型线轮廓度误差. 型线轮廓度误差是指从实测数据点到 CAD模型理论曲线的法线方向上的距离,该值有正有负.

2) 倾斜度误差. 倾斜叶片使叶片力在径向方向上产生分力,造成沿叶高分布且叶尖为正、叶根为负的静压梯度,从而改善气流的流动条件. 该指标主要考察实际生产中叶片上、下截面测量模型形心所在的轴偏离理论叶片形心轴线的角度. 通常选叶片顶部的上截面和根部的下截面,求解两条形心线的空间夹角,即为倾斜度误差.

3) 弯曲度误差. 叶片弯曲能调整叶栅中的涡量场与胀量场,优化二者的匹配,从而获得对应较小损失的流场,因此能降低能量损失. 计算弯曲度误差时,求出上、下截面各自的形心并连接两形心

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点成一条直线，求解从弯曲分析截面的形心到直线的距离，即为弯曲度. 比较测量模型的弯曲度与CAD模型的弯曲度的差值，即为弯曲度误差.

4) 扭曲度误差. 为了降低根部截面的离心拉应力，通常将长叶片设计成大扭曲度变截面叶片，叶片沿叶高按要求扭曲成型以适应沿径向速度的变化. 由于叶型厚度从叶片根部到顶部逐渐减小，因此，其扭曲变形量也沿叶高方向变化，即叶片的根部扭曲变形量最小，顶部扭变量最大，因此必须对各个截面的扭曲进行量化分析. 本文以理论形心为轴心将测量数据点转到与 CAD模型截面线重合度最大所需要的角度即为扭曲度，通常取两前、后缘圆心连线的夹角为扭曲度误差.

5 应用实例

基于图 6叶片误差检测流程和上述各个环节的相关算法，本文在 UG 4.0平台下开发了涡轮叶片型面误差检测系统. 该系统叶片截面测量数据的表达形式为三维扫描仪输出的. asc文件格式. 如图 7所示，系统包括数据预处理、坐标配准和误差计算 3大模块，其中，误差计算模块分为截面参数误差、轮廓度误差等 5个子模块. 图 8所示为截面参数误差模块的操作界面及分析结果.

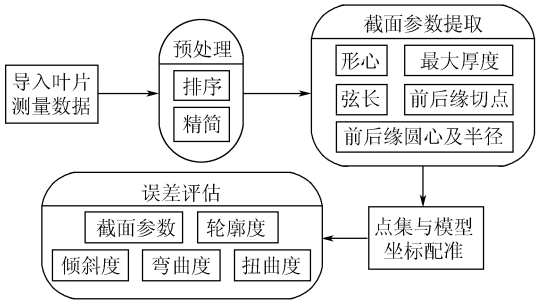

图 6 涡轮叶片型面误差检测系统结构

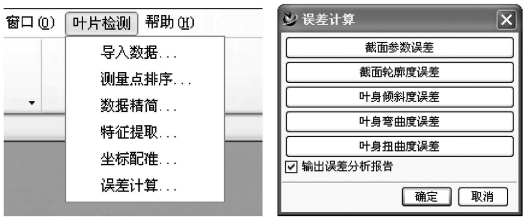

图 7 叶片型面误差检测系统框架

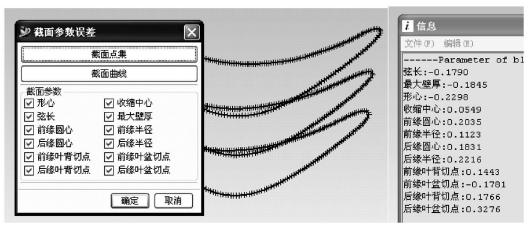

图 8 截面参数误差模块的操作界面及分析结果

6 结 论

1) 在截面参数提取环节中，提出了确定前、后缘切点位置的步进搜索法，有效地利用了切点处的曲线曲率变化规律，提高了截面关键参数的提取效率和自动化程度；

2) 提出了基于收缩中心和弦线角的测量点集与 CAD模型的配准方法，不仅使问题简化，而且符合工程上的检测要求，提高了配准速度；

3) 针对影响叶片气动性能的多个评估指标，实现了叶片型面快速、全方位的误差检测.

参考文献 (References)

[1] Tao H H, Jing Y L, Wen D U. On the development of air-foil section inspection and analysis technique [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006(30): 129—140

[2] 徐骅，张秋菊. 针对叶片型面检测的激光测量系统的规划及相关研究 [J]. 汽轮机技术，2006, 48(1): 76—79
Xu Hua, Zhang Qiuju. Studies on inspection planning of the laser-scanning machine system for inspecting blade surfaces [J]. Turbine Technology, 2006, 48(1): 76—79 (in Chinese)

[3] 程云勇，张定华，王凯，等. 基于 CBVCT图像序列的空心涡轮叶片壁厚检测技术 [J]. 航空制造技术，2005(11): 61—63
Cheng Yunyong, Zhang Dinghua, Wang Kai, et al. Hollow turbine blade wall thickness inspection technology based on CBVCT image sequence [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(11): 61—63 (in Chinese)

[4] 顾大权，徐四林，袁媛，等. 求解旅行商问题的一个有效算法 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版)，2006, 7(2): 130—132
Gu Daquan, Xu Silin, Yuan Yuan, et al. Available algorithm solving traveling salesman problem [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 7(2): 130—132 (in Chinese)

[5] Mohaghegh K, Sadeghi M H, Abdullah A. Reverse engineering of turbine blades based on design intent [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007(32): 1009—1020

[6] 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)

[7] Zhu Liang, Barhak Jacob, Srivatsan Vijay, et al. Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(5): 505—515

(责任编辑：文丽芳)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net