

利用弦长不变特征的叶片截面轮廓匹配算法

李兵, 丁建军, 蒋庄德, 张飞, 陈磊

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对大型燃气轮机叶片型面形状加工质量高精度检测分析评价中的无基准坐标匹配问题, 提出了一种利用截面轮廓曲线弦长几何不变特征的精确坐标匹配算法. 该算法在获取对应截面轮廓数据后, 基于叶片截面轮廓曲线对应弦长不变特征建立目标函数, 并依此计算出理论轮廓曲线中与测量数据对应的坐标点, 构造出坐标变换超静定方程组, 然后通过豪斯荷尔德矩阵变换方法计算出该坐标变换的最小二乘最优解. 采用该算法计算出叶片截面轮廓曲线的模拟测量数据与理论数据之间的坐标变换矩阵, 得出了该变换矩阵下的截面轮廓评价结果, 其偏差小于 $1.5 \mu\text{m}$, 表明该算法对于自由曲面的大型燃气轮机叶片型面形状加工质量的检测评价具有较好的应用效果.

关键词: 叶片截面轮廓; 弦长; 最小二乘; 坐标匹配

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0081-04

Novel Sectional Profile Matching Algorithm for Gas Turbine Blades Based on Curve Chord-Length Invariant Feature

LI Bing, DING Jianjun, JIANG Zhuangde, ZHANG Fei, CHEN Lei

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the non-datum coordinate matching for large-scale gas turbine blade profile in high-precision detection and evaluation, an accurate coordinate matching algorithm is proposed based on the chord-length invariant feature of sectional profile. After acquiring the point data of corresponding sectional profile, the objective function is established according to the corresponding chord-length invariant feature of blade sectional profile curve. The points corresponding to the measured ones in the theoretical profile curve are calculated with the proposed algorithm. Moreover, the indeterminate equations for coordinate transformation can also be constructed. The least-square optimal solution of coordinate transformation of sectional profile can be calculated by Householder matrix transformation. As the coordinate transformations of multiple sectional profiles are calculated, the optimal coordinate transformation matrix can be obtained by linearly averaging the transformation relationships. Then, the coordinate system can be unified. The coordinate transformation matrix between simulatively measured data and theoretical data of a blade sectional profile curve is calculated with the proposed algorithm to obtain the evaluation result of sectional profile. The deviation of evaluation result gets within the acceptable range (less than $1.5 \mu\text{m}$).

Keywords: blade profile; chord length; least square principle; coordinate matching

叶片是燃气轮机非常重要的零部件之一, 随着大型燃气轮机应用水平的日益提高, 设备对叶片表

面形貌特征的精确性要求也日益严格^[1-2]. 由于空气动力学方面的原因, 叶片的型面往往是由复杂的自

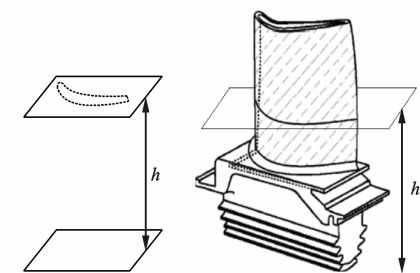
由曲面所组成,其整体形貌特性将直接决定设备的转速、冷却以及工作效率等多项综合实用性能指标。因此,如何实现不同类型燃气轮机多级叶片形貌特性的有效分析与评价,具有非常重要的研究价值和现实的工程应用需求。目前,对于复杂曲面形貌分析的主要研究方法是通过建立工件坐标系来实现曲面测量数据的匹配分析评价^[3-4]。传统方法实现大型燃气轮机叶片型面形貌特征的精确分析评价非常困难^[5-6],因此研究中选用高精度的非接触激光点扫描测量来实现叶片表面密集点云的快速准确获取。

通过夹具来建立坐标系不易实现基准转换,并且会带来非常大的坐标转换误差,因此无法满足高精度(整体型面测量精度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$)的叶片型面分析评价要求。本文在不建立叶片测量工件坐标系的前提下,利用曲线弦长不变这一特征对测量数据与理论数据的精确匹配方法进行研究,不仅减小了测量数据处理带来的评价误差,而且实现了叶片型面形状加工质量的准确评价。

1 算法的基本思想

截取平面平行于叶片底部基准的叶片,并形成叶片截面轮廓,如图1所示。这些截面轮廓较完整地描述了叶片的形状,按照截面的轮廓就可以有效地重构出叶片模型,使获取截面轮廓点云的测量也比较容易实现,并且通过对比分析截面轮廓上的测量结果与对应的理论数据,就可以实现叶片型面特性的分析与评价。根据测量结果,从与之校对的标准数据(一般是理论模型数据,也可以是通过其他设备获得的更精确的测量数据)中准确地得到与之对应的理论数据,通过坐标变换就可以实现测量结果的匹配与评价分析。

如图1所示,确定测量截面轮廓的位置从而确定对应的标准截面轮廓曲线,在不存在叶片制造误

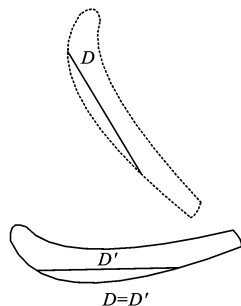


(a) 截面测量轮廓 (b) 叶片理论截面

h : 以叶根底面为基准设定的高度值

图1 叶片理论截面轮廓的确定

差以及测量误差的条件下,其测量结果(测量时滤除了冷却孔处的测量点数据)应该和标准截面轮廓具有一致的几何形状。通过坐标变换可以将叶片截面轮廓对应的测量数据与标准数据吻合起来,吻合后轮廓曲线对应的弦长应相等,如图2所示。



D' : 理论曲线中与 D 对应的弦长

图2 叶片截面测量轮廓与理论轮廓对应的弦长

曲线弦长不变特征的叶片截面轮廓匹配算法需要解决2个核心问题:①从标准数据中根据曲线弦长不变的特征求取与测量结果对应的理论数据;②通过对应数据点建立坐标变换关系,并完成测量结果与标准数据的坐标匹配与分析评价。

2 算法的描述及实现

2.1 算法描述与分析

依据算法的基本思想,设极坐标系下,叶片截面轮廓的测量结果为

$$P = \{p_i(\rho, \theta) \mid 0 \leq i < n\} \quad (1)$$

式中: ρ, θ 分别是极径和极角; n 为该截面轮廓的测量点数。该截面的理论曲线为 $c=f(u)$ (若理论数据为离散数据,可以通过拟合具有几何不变性特征的B样条曲线得到), u 为曲线参数。

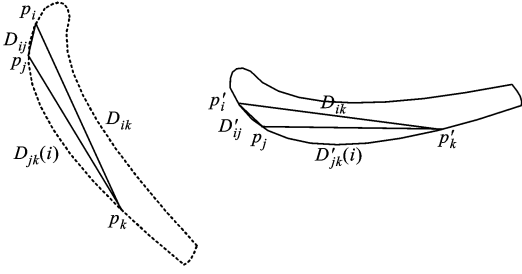
对于测量结果中的任意弦长可以表示为

$$D_{ij} = |p_i p_j|, 0 \leq i < n, 0 \leq j < n \quad (2)$$

且 $i \neq j$

为避免出现多义性,沿着 u 增长的方向搜索测量点 p_i 对应的理论点 p_i' 。假设 p_j, p_k 为异于 p_i 且彼此相异的2个测量点,采用图3所示的方法,根据叶片截面轮廓假设对应点,从而获取该截面的对应弦长。在理论曲线 c 上以 p_i' 为圆心,分别以 D_{ij} 和 D_{ik} 为半径进行截取,分别得到对应的交点 p_j' 与 p_k' 。 $D'_{jk}(i)$ 是理论数据中根据 p_i 建立的与 $D_{jk}(i)$ 对应的弦长。为了更好地确定 p_j' 与 p_k' ,防止计算过程中出现二义性,将叶片型面的截面轮廓曲线依曲率

变化分为前后两条,并分别进行坐标匹配处理,即 $c_1=f_1(u)$, $c_2=f_2(u)$. 按照参数 u 的增长方向,就可以根据长度很容易地确定 p'_j 与 p'_k 的位置.



(a)测量数据 (b)理论模型
图 3 叶片截面轮廓对应弦长的获取

建立以下目标优化函数

$$F = \min \sum (D'_{jk}(i) - D_{jk}(i))^2 \quad \left. \begin{array}{l} 0 \leq j < n, 0 \leq k < n, j \neq k, j \neq i, k \neq i \end{array} \right\} \quad (3)$$

即对应弦长的偏差之和为最小.

对理论数据中的曲线参数进行优化计算,即可计算出测量点对应的理论点. 有了对应点数据,利用最小二乘法就可以很容易地建立坐标变换关系. 由于燃气轮机的叶片是金属材质,因此研究中可以视为刚体,这样只要综合考虑所有截面轮廓测量结果与理论数据的坐标变换关系,就可以得到叶片测量工件坐标与理论模型数据之间的整体坐标变换关系. 通过相应的坐标变换,就可以完成叶片轮廓坐标数据的匹配,并进行分析评价.

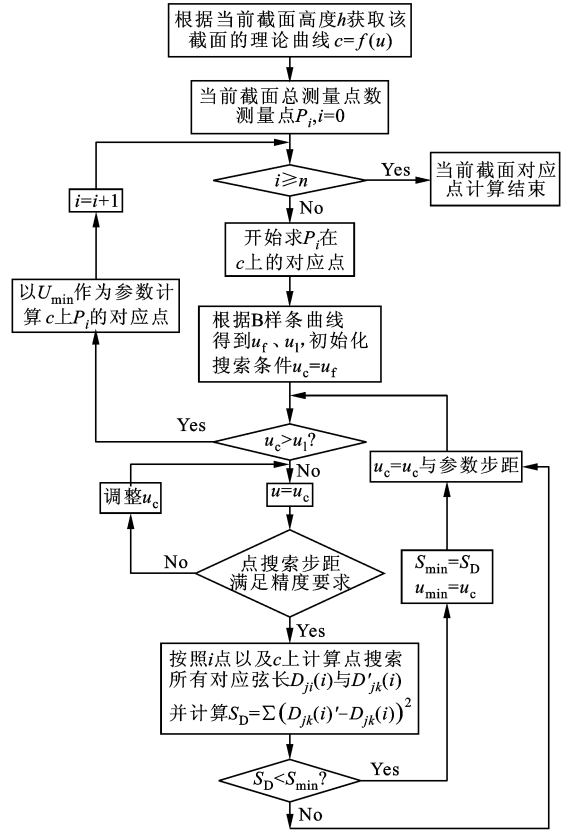
2.2 算法实现

2.2.1 精确匹配算法 根据图 1 中的 h ,可以得到对应的标准数据截面轮廓(见图 4),具体计算时可以按照曲率分布的特点,将该曲线分为前后段轮廓分别处理.

首先,利用理论模型数据或是通过三坐标测量机等更为精密的检测设备(在没有理论数据模型的情况下),可以得到当前检测截面的理论轮廓曲线. 然后,逐个计算在精度允许范围内与各测量点对应的理论截面轮廓点. 在搜索 p_i 对应点时,通过以一定的步距变化理论曲线参数进行搜索,计算在理论曲线上与 i 点相关的所有对应弦长,并计算

$$S_D = \sum (D'_{jk}(i) - D_{jk}(i))^2 \quad (4)$$

以其最小值 $S_{\min}$ 所对应的理论曲线参数值 u_c 进行



u_f, u_l : 拟合理论 B 样条曲线首、末点的参数; u_c : 搜索点参数;
 S_D : 对应弦长的偏差之和; $S_{\min}$: 已搜索点中 S_D 的最小记录值; $u_{\min}$: 已搜索点中的最小记录值对应的参数值

图 4 叶片截面轮廓对应点匹配算法

计算,得到理论轮廓上的点 p'_i 即为 p_i 的对应点. 为了减少算法的复杂程度,在搜索计算对应弦长时还可以加入新的约束条件:如限定对应弦长之差 $|D'_{jk}(i) - D_{jk}(i)|$ 的最大超差值,超差即进入下一点搜索;同时,只选取部分测量点参与某具体对应点的搜索计算,就可以在很大程度上减少冗余运算,提高算法的计算效率.

2.2.2 坐标变换关系的建立 设测量数据点 p_i 的坐标为 $P_i=[x_i, y_i, 1]$, 计算得到所对应的理论数据点 p'_i 的坐标为 $P'_i=[x'_i, y'_i, 1]$. 依据刚性坐标变换矩阵,则

$$P_i \begin{bmatrix} \mathbf{R}' & \mathbf{O} \\ \mathbf{T}' & 1 \end{bmatrix} = P'_i; \mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}; \mathbf{T}' = [m, l] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}'$ 为旋转变换矩阵; $\mathbf{T}'$ 为平移变换矩阵. 通过 n 组对应点对可建立一个超静定方程组,其求解过程需要将式(5)转换为标准方程组的形式 $\mathbf{AX}=\mathbf{B}$, 展开即为

$$\begin{bmatrix} x_0 & 0 & y_0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_0 & 0 & y_0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & 0 & y_i & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_i & 0 & y_i & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & 0 & y_{n-1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_{n-1} & 0 & y_{n-1} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ m \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ \vdots \\ x'_i \\ y'_i \\ \vdots \\ x'_{n-1} \\ y'_{n-1} \end{bmatrix}$$

然后利用豪斯荷尔德方法对矩阵 A 进行 QR 分解^[7], 分别通过 $R = \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 与 $Q^T B = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$ 分离出矩阵 R_1 与 C , 并建立新的方程组 $R_1 X = C$. 通过回代法求出新方程组的解, 即为原来超静定方程组的最小二乘优化解. 算法流程如图 5 所示.

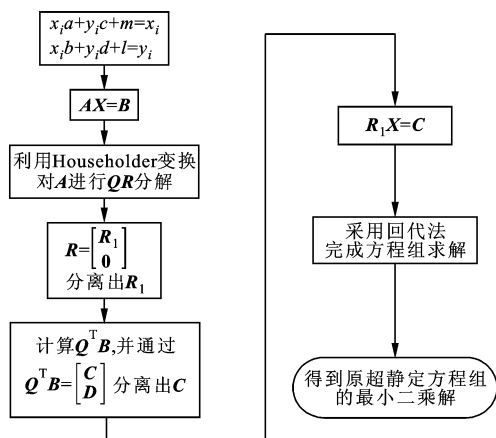


图5 叶片截面坐标变换矩阵计算流程图

为了减少运算量,可以适当减少对对应点搜索数量,只要计算部分对应数据就可以完成坐标变换计算.按照此方法可计算出所有叶片截面的坐标变换关系,通过综合考虑,将各截面的坐标变换矩阵进行均值计算,即

$$T = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{i=N} a_i & \sum_{i=1}^{i=N} b_i & 0 \\ \sum_{i=1}^{i=N} c_i & \sum_{i=1}^{i=N} d_i & 0 \\ \sum_{i=1}^{i=N} m_i & \sum_{i=1}^{i=N} l_i & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

就可得到测量结果与理论模型数据的坐标变换关系,进而可进行相应的匹配计算及评价分析.

3 算法实践及应用分析

采用一组有相对坐标变换关系的叶片截面轮廓

数据对文中描述的算法进行验证,由于测量数据与理论数据的坐标变换关系是已知的,因此可以很容易计算出测量截面曲线的轮廓误差.通过比较,采用本文描述的算法获得的计算结果和已知结果就可验证出算法的有效性.

图 6a 为同一坐标系下加 0.005 mm 噪声处理后的模拟测量数据,图 6b 为叶片截面的理论模型,通过叶片基准,建立对应于工件测量坐标系的变换矩阵为

$$T'_c = \begin{bmatrix} 0.886\ 954\ 7 & 0.461\ 856\ 4 & 0 \\ -0.461\ 856\ 4 & 0.886\ 954\ 7 & 0 \\ 177.715\ 9 & 346.518\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

利用理论变换矩阵对测量数据进行坐标变换后,求得相对于理论模型数据的截面轮廓误差值为 0.004 976 mm.应用文中提出的算法,得到测量数据相对于理论数据的坐标变换矩阵为

$$T_c = \begin{bmatrix} 0.886\ 955 & 0.461\ 862 & 0 \\ -0.461\ 862 & 0.886\ 955 & 0 \\ 177.716\ 041 & 346.517\ 707 & 1 \end{bmatrix}$$

匹配结果如图 6c 所示.利用该矩阵对同一测量数据进行坐标变换后,计算其相对于理论模型数据的误差值为 0.003 739 mm(算法直接通过形状匹配,没有考虑基准加工误差以及叶片截面加工位置误差).验证结果表明,本文描述的算法可以满足精密加工条件下,燃气轮机叶片自由型面的无基准型面形状检测分析评价的要求.



(a)测量数据 (b)理论模型 (c)坐标匹配结果

图6 匹配算法验证结果

4 结 论

本文针对燃气轮机叶片型面测量与分析评价中基准不易确定的特点,提出了一种对叶片型面测量结果与理论模型进行精确坐标匹配的算法,以实现在建立工件测量坐标系困难的条件下,测量数据与理论数据的精确匹配.由于采用了弦长变化作为特征量进行目标函数计算,所以该算法重点考虑了形状评价效果,而对于形状(弦长)变化不是很明显的叶片截面效果不会很理想,但是该匹配算法对于形状极不规则的大型燃气轮机的叶片截面轮廓则具有很好的敏感性.计算过程中所有测量数据都参与计

算,较传统匹配算法只通过求取有限对应统计特征点进行计算的做法,可提高匹配精度,能有效保证燃气轮机叶片精密型面测量的应用要求,因此对于高精度测量与分析评价具有重要意义. 如果进一步推广,该算法还可以有效地进行空间自由曲面的精确匹配,对复杂三维曲面测量有一定的参考应用价值.

参考文献:

[1] 古成中,吴新跃. 燃气轮机叶片实体建模 [J]. 船海工程, 2006, 35(3): 69-72.
GU Chengzhong, WU Xinyue. 3D solid modeling of the leaf of gas turbine[J]. Ship and Ocean Engineering, 2006, 35(3): 69-72.

[2] 林汝谋,金红光. 燃气轮机发电动力装置及应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.

[3] ZHANG Guoxiong, LIU Shugui, QIU Zurong, et al. Non-contact measurement of sculptured surface of rotation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering

(English Edition), 2004, 17(4): 571-574.

[4] LI Yadong, GU Peihua. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1395-1417.

[5] 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[6] FAN Kuangchao. A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1997, 10(4): 277-285.

[7] 胡冰新, 李宁, 吕俊. 一种采用 Householder 变换递归实现的复矩阵 QR 分解算法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2432-2434.
HU Bingxin, LI Ning, LV Jun. A complex QR decomposition algorithm using recursive Householder transformation [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(11): 2432-2434

(编辑 管咏梅)