

基于局部轮廓特征的航空叶片综合误差评定方法

刘泽涛, 吕彦明, 王帆

江苏省食品先进制造装备技术重点实验室

摘要: 针对航空叶片综合误差评定方法效率不高和建模过程数据量大等问题, 提出一种基于局部轮廓特征的评定方法。考虑到叶型轮廓的曲线形状因素, 在 polygon 逼近方法的基础上做出改进, 利用极值的局部性分析曲线曲率, 以此分割曲线并提取轮廓特征点; 采用最近点配准算法使被测轮廓与理论轮廓达到精确配准, 建立误差评定模型, 从而实现对航空叶片综合误差的评定; 使用测量数据对评定方法进行试验验证, 试验结果与三坐标测量机的评价结果一致, 表明该方法有效可行。

关键词: 轮廓特征; 航空叶片; 综合误差评定

中图分类号: TG806; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.029

Aeronautical Blade Comprehensive Error Evaluation Method Based on Partial Contour Feature

Liu Zetao, Lv Yanming, Wang Fan

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency in aeronautical blade comprehensive error evaluation and large amount of data in the modeling process, an evaluation method based on partial contour features is proposed. Considering the curve shape factor of the blade profile, the improvement is made on the basis of the polygon approximation method by using the locality of the extremum to analyze the curvature of the curve and in this way to split the curve and extract the contour feature points. By using the nearest point registration algorithm to achieve accurate registration of the measured contour and the theoretical contour, an error assessment model is established to assessment of the integrated error of the aviation blade. The measurement method is used to verify the evaluation method, and the experimental results are consistent with the evaluation results of the CMM, which indicates that the data is feasible and effective.

Keywords: contour feature; aeronautical blade; comprehensive error evaluation

1 引言

叶片作为航空发动机中型面复杂、尺寸跨度大、受力恶劣、承载最大的零件^[1], 其几何形状及表面完整性直接影响叶片工作气流和气动性能, 因此对叶片复杂曲面的检测尤为重要。

目前, 航空发动机叶片的检测主要通过叶片与三坐标测量机测量头的相对转动和移动, 测量不同位置的截面形状(用不同位置的平面自由曲线来表征), 得到叶片表面轮廓上一系列三维点的几何坐标(称为实测点)。叶片的理论形状由 CAD 模型给出, 通常为三维模型。可以用轮廓提取算法提取出相应的理论点或理论曲线, 然后再将实测要素与理论要素进行评定。评定要素主要为叶型的形位误差, 包括轮廓度和截面厚度等形状误差以及扭转和位置度等位姿误差, 统称为叶片的综合误差。

在实际生产中, 用坐标法测量叶片型面轮廓时,

测量基准与设计基准不可能完全重合, 这种位置误差会对误差评定结果产生影响, 从而降低评定准确度^[2]。为了降低误差, 需要对实测要素与理论要素进行配准。蔺小军等^[3]将测量点与叶片理论模型整体一次精确匹配, 建立了匹配目标函数, 给出了匹配方法; Yifei He 等^[4]提出一种构建线轮廓度公差 T-Map 图的新方法, 使零件在设计阶段实现了公差自动分配; 王东霞等^[5]提出用拟粒子群优化算法来实现曲面配准问题, 采用轮廓峰谷误差和轮廓均方根误差综合评定轮廓度误差; 易建^[6]利用差分进化算法求解应用坐标变换法建立了评定椭圆轮廓度误差的 5 变量鞍点规划模型。

本文在总结已有研究的基础上, 提出一种基于局部轮廓特征的评定方法。考虑到叶型轮廓的曲线形状因素, 分析曲线曲率, 在 polygon 逼近方法的基础上做出改进。利用极值的局部性质分割曲线并提取轮廓特征点。建立误差评定模型, 采用最近点配准算法使被测轮廓与理论轮廓达到精确配准, 从而实现对航空叶片综合误差的评定。

2 综合误差评定方法

航空叶片综合误差的评定对象主要是叶片的型面轮廓,包括叶型的线轮廓度、轮廓曲线厚度、扭转和位置平移等,在实际中,会通过对叶型的截面轮廓进行相应的评定来完成对叶片综合误差的评定。

线轮廓度用以描述非圆曲线的形状误差,指被测曲线轮廓对其理论曲线轮廓的实际变动量。按照形位公差在线轮廓度定义^[7],线轮廓度公差带是包络一系列直径为公差值 t 的圆两包络线之间的区域,诸圆圆心应位于理想轮廓线上,因此,可以用双向等距最小包容区域的宽度来表示线轮廓度误差(见图1)。

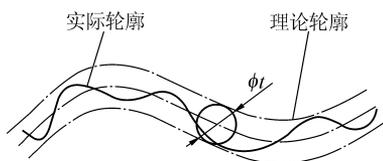


图1 线轮廓度公差

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,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,顶部扭曲变形量最大,因此必须对各个截面的扭曲进行量化分析。

位置度是指形体轴线允许自身位置变动的范围,即形体轴线的实际位置相对理论位置的允许变动范围。位置度公差带是以理论位置为中心的对称区域,以及直径为公差值 t 的圆柱面内区域,其轴线位置由理论正确尺寸确定,一般是 X 、 Y 两个值的偏差量。

评定线轮廓度误差常用最小区域法和最小二乘法。最小区域法是指与形状公差带形状相同、包容被测实际要素且具有最小宽度或直径的区域,评定对象是实际要素与理论要素;最小二乘法评定对象是实际要素上的点与理论要素,其核心是找到合适的平移和旋转矩阵,使实测点到理论要素的距离的平方和最小。显然,最小二乘法能够更精确地评定航空叶片的扭转误差和位置度误差。

3 误差模型的建立

3.1 叶型轮廓曲率分析

叶型轮廓(即叶身截面线)是一种复杂的自由曲线,一般常规的初等曲线无法描述,而是采用拟合技术方法对曲线轮廓进行描述。常用拟合技术方法

有小波分析^[8]、局部多项式回归^[9]和样条函数插值^[10]等。

目前,航空叶片叶型轮廓大多采用 NURBS(非均匀有理 B 样条)曲线插值分段构造而成。一条 k 次 NURBS 曲线常见的有理分式为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)} \quad (1)$$

式中, ω_i ($i=0,1,\dots,n$) 为权因子,首末权因子 $\omega_0, \omega_n > 0$,其余均不小于零; d_i ($i=0,1,\dots,n$) 为控制顶点,按顺序用直线连接起来就是控制多边形; $N_{i,k}(u)$ 为 k 次规范 B 样条基函数。

$$\begin{cases} N_{i,0} = \begin{cases} 1 & u \in (u_i, u_{i+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k} = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (2)$$

NURBS 曲线曲率的计算公式为

$$k_{(u)} = \frac{p'(u) \times p''(u)}{|p'(u)|^3} = \frac{\sqrt{\begin{vmatrix} y' & z' \\ y'' & z'' \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} z' & x' \\ z'' & x'' \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x' & y' \\ x'' & y'' \end{vmatrix}^2}}{[(x')^2 + (y')^2 + (z')^2]^{3/2}} \quad (3)$$

式中, $k_{(u)}$ 为曲线的曲率; $p'(u)$ 和 $p''(u)$ 为曲线参数 u 所确定点的一阶和二阶导数。

一般的求解极值的思路是对函数求一阶导数,有

$$\begin{aligned} k'(u) &= \frac{|p'(u)|^2 [p'(u) \times p'''(u)]}{|p'(u)|^5} - \\ & \frac{3 \times [p'(u)p''(u)][p'(u) \times p''(u)]}{|p'(u)|^5} = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

从上述公式可以看出,曲率的计算涉及函数的三阶导数和五次幂,计算相对繁琐复杂,且叶型轮廓比较复杂,很难保证得到全部的极值。按照数学定义,极值点为曲线某个区域内曲率最大或最小的点,由此可以将曲线合理地分成 N 个区域,逐个区域搜索极值点,为下一步的轮廓特征点提取策略提供帮助。

3.2 建立轮廓特征模型

对叶片模型进行数字化分析时,每个位置的轮廓可以提取多达上千个轮廓点。利用三坐标测量机对零件测量时,得到的是点云数据,每一个位置轮廓的数据点也非常多。在后续模型配准中,并不需要对所有的轮廓数据点进行变换,只需要一部分的关键点就可以确定变换关系。为了更精确地描述零件的外形轮廓和提高后续模型配准的精度和速度,需要对数据进行精简,从中提取出能有效表征轮廓

共提取出 1000 个轮廓特征点,然后规划测量路径,在三坐标测量机上测出 1000 个数据点。经过测头半径补偿排除坏点(见图 6),得出如图 7 所示的同一坐标系下的二维轮廓。

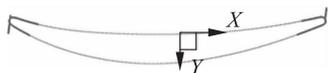


图 6 实测数据坏点

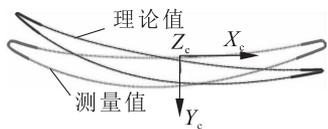


图 7 SECTION AB 轮廓点对比

由图 7 可以看出,实测点轮廓与理论轮廓有很大的位姿变换,所以需要实测点集进行配准,获得离理论点最近的轮廓点,才能对测量数据进行评定(见图 8)。

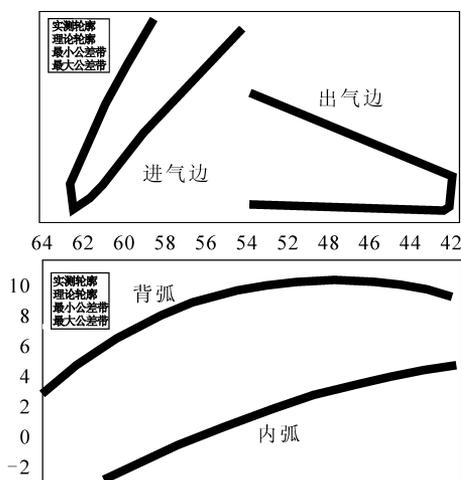


图 8 拟合轮廓

根据误差模型,通过对配准后的拟合轮廓与理论轮廓进行相关量的计算得出表 1 所示的结果。试验结果与三坐标测量机所得出的结果大致相同,均在内弧、背弧、出气边和最大厚度处有所超差。在其它方面也有相同结论,表明本文所提出的方法有效可行。

表 1 模态频率与振幅

类别	最大误差	最小误差	误差公差带	超差	
内弧(mm)	0.121	0.081	(-0.055,0.095)	0.026	
背弧(mm)	0.117	0.088	(-0.055,0.095)	0.022	
进气边(mm)	0.112	0.083	-	否	
出气边(mm)	0.106	-0.051	(-0.065,0.095)	0.011	
最大厚度(mm)	9.050	正常值 8.813	(-0.130,0.190)	0.047	
位置度(mm)	X	0.054	-	(-0.200,0.200)	否
	Y	0.018	-	(-0.200,0.200)	否
扭转角度(°)	0.025	-	(-0.400,0.400)	否	

5 结语

针对航空叶片综合误差评定方式效率不高和建模过程数据量大等问题,提出一种基于局部轮廓特征的评定方法。首先在多边形逼近方法的基础上做出改进,考虑到叶型轮廓的曲线形状因素,分析曲线曲率,利用极值的局部性质分割曲线并提取轮廓特征点。

通过建立误差评定模型,采用最近点配准算法使被测轮廓与理论轮廓达到精确配准,从而实现航空叶片综合误差的评定。提出的方法可以从图形中快速直观地获得叶身型面偏差趋势,可为计算壁厚、结构形状偏差并识别出内部缺陷以及尺寸测量等后续工作做准备。

参考文献

- [1]张斌,房建国,毕超. 发动机叶片的光学扫描测量技术与评价方法研究[C]. 2016 航空试验测试技术学术交流会论文集,2016:4.
- [2]李新,秦洁,刘辉. 基于最近点配准的精密零件线轮廓度误差评定[J]. 上海计量测试,2014,41(4):41-44.
- [3]蔺小军,单晨伟,王增强,等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(1):125-131.
- [4]Yifei He, Joseph K Davidson, Jami J Shah. Research on method of obtaining line profile T-Map by arc segment T-Map Boolean intersection[J]. Journal of Zhejiang University - ScienceA (Applied Physics & Engineering), 2015, 16(5):341-352.
- [5]王东霞,温秀兰,赵艺兵. 基于 CAD 模型引导测量的自由曲面定位及轮廓度误差评定[J]. 光学精密工程,2012,20(12):2720-2727.
- [6]易建. 应用差分进化算法评定椭圆轮廓度误差[J]. 机械设计与制造,2016(9):61-63,68.
- [7]计量测试技术编辑委员会. 计量测试技术手册(第 2 卷几何量)[M]. 北京:中国计量出版社,1997:476-526.
- [8]Lada E K, Lu J C, Wilson J R. A wavelet-based procedure for process fault detection[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2002, 15:79-90.
- [9]Zou C L, Tsung F, Wang Z J. Monitoring profiles based on nonparametric regression methods[J]. Technometrics, 2008, 50(4):512-526.
- [10]Winistorfer P M, Young T M, Walker E. Modeling and comparing vertical density profiles[J]. Wood and Fiber Science, 1996, 28:133-141.
- [11]U Ramer. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curve [J]. Comput. Graphics Image Process, 1972, 1(3):244-256.

金刚石刀具质量检测装置控制系统的设计

雷艳华,雷大江,蓝河

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所

摘要: 设计了一套刀具质量检测控制系统,实现了系统内各轴系的精密运动控制。通过独特的设计思路,完成了原子力显微镜的Z向位移与旋转轴系统的坐标同步采集功能,最终构建了一套专用控制系统。经试验验证,该系统可以完成典型的金刚石刀具测量任务,具有良好的控制性能。

关键词: 刀具质量;原子力显微镜;精密轴系;控制系统;金刚石刀具

中图分类号: TG661;TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.030

Control System Design of Diamond Tool Measure Equipment

Lei Yanhua, Lei Dajiang, Lan He

Abstract: A control system for diamond tool measurement is designed, and the system can control the precision movement of the axes. With the unique design method, synchronized data acquisition for the data of AFM's axis Z and the data of rotary axis is fulfilled. By the experiment of measuring diamond cutting tools, the control ability of system is proved, and a special control system is constructed.

Keywords: tool quality; AFM; precision axis; control system; diamond tool

1 引言

高精度金刚石刀具是进行单点金刚石超精密切削的基本条件之一,而金刚石刀具的质量是影响产品质量(面形精度和表面质量)和加工效率的重要因素之一。以某光学工程科学装置中大口径 KDP 晶体元件的超精密加工为例,中国工程物理研究院激光聚变研究中心的相关研究表明,刀具的刃口锋利度、刃口微豁、前后刀面的表面粗糙度等,可能是影响 KDP 晶体表面质量的重要因素。

通过开展金刚石刀具质量检测技术与系统的研究,建立了金刚石刀具质量综合评价体系,并研制出相关配套检测设备。本检测设备的研制涉及高精度回转轴系的设计、制造、装配及运动控制、纳米级测量、多传感器数据融合、精密测量系统的软、硬件集

成、纳米级测量的环境控制等多个方面,本文简要介绍检测系统中控制系统的构建。

2 控制系统总体设计

对于利用原子力显微镜进行金刚石刀具测量的工艺来讲,其中典型的参数测量过程需要在刀具回转过程中利用原子力显微镜的扫描管探针进行数据采集。这种特定工艺要求控制系统必须能够实现刀具旋转的低速稳定控制和原子力显微镜数据采集同步。为此,选择具备相关功能并具有二次开发接口的运动控制器作为控制核心,围绕该核心进行控制软件的开发,以此满足金刚石刀具质量检测工艺的控制需求。

基于设计分析,以 Harmonica 运动控制器为核心,工控机为上位机,构建金刚石刀具质量检测装置的控制系統,其总体结构见图 1。

收稿日期:2018年6月

[12]李亮,丰镇平,李国君.叶片出气边形状对叶栅中湿蒸汽凝结流动影响的数值研究[C].中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集,北京:2002:72-77.

[13]席平,孙肖霞.基于CAD模型的涡轮叶片误差检测系统[J].北京航空航天大学学报,2008(10):1159-1162.

第一作者:刘泽涛,硕士研究生,江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,江南大学机械工程学院,214122 江苏省无锡市

First Author: Liu Zetao, Postgraduate, Jiangsu Province Key

Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment of Food, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

通信作者:吕彦明,教授,江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,江南大学机械工程学院,214122 江苏省无锡市

Corresponding Author: Lv Yanming, Professor, Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment of Food, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China