

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.02

一种叶片前后缘削边形状计算方法

曹斌, 何小妹, 王一璋, 刘峻峰

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 目前主要采用依据标准图样目视判断的方法分析加工后的叶片前后缘形状, 存在测量效率低、重复性差、评价结果不一致等问题。本文提出基于厚度偏差趋势判断前后缘形状的方法, 利用叶片截面中弧线分割叶片边缘厚度, 根据评价区域最大厚度偏差、最大厚度偏差比和厚度偏差变化率系数, 自动分析叶片前后缘削边形状。该方法具有快速、准确的特性, 为发动机叶片加工质量的评价提供了重要保障。

关键词: 叶片; 前后缘; 削边形状; 中弧线; 边缘厚度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)02-0006-05

Method for Calculating Cutting Shape of Leading and Trailing Edges of Blade

CAO Bin, HE Xiaomei, WANG Yizhang, LIU Junfeng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: At present, the method of visual judgment based on standard pattern is mainly used to analyze the shape of the leading and trailing edges of the processed blades. There are some problems such as low measuring efficiency, poor repeatability and inconsistent evaluation results. In this paper, a method for judging the shape of the leading and trailing edges based on the trend of thickness deviation is presented. The blade edge thickness is divided by the arc of the blade section. According to the maximum thickness deviation, the maximum thickness deviation ratio and the variation coefficient of thickness deviation in the evaluation area, the shape of the cutting edge of the leading and trailing edges of the blade is automatically analyzed. This method has fast and accurate characteristics and provides an important guarantee for the evaluation of engine blade processing quality.

Key words: blade; leading and trailing edges; cutting shape; mid camber line; edge thickness

0 引言

叶片是航空发动机的重要零部件之一, 设计上呈现强扭曲、薄壁、曲面复杂等特点。特别是叶片前后缘处, 一般设计为圆弧或椭圆形状, 某些型号发动机叶片所要求的圆弧半径需达到 0.1 mm, 前后缘轮廓度公差需小于 ± 0.03 mm^[1]。不断提升的实际应用要求使叶片加工制造及质量检测的难度也越来越高。例如压气机叶片, 在经过数控铣削、抛光和振动光饰等加工工序后, 都需要分别对其参数进行质量检测, 以确保其轮廓度、最大厚度、弦长等满足设计要求^[2]。

目前, 国内应用的叶片参数专用评价软件有 PC-DMIS Blade, GEOMAGIC Blade 等。这些软件仅可对叶片前后缘圆弧半径、前后缘点、指定位置边缘厚度等做出评定, 而对于前后缘非理想的圆弧或者椭圆弧形状(如削边、尖边、缩颈和平头等缺陷形状)无法进行有效辨识。目前叶片前后缘不合格工艺形状的检测主

要依赖人工, 检测人员参照前后缘不合格工艺形状标准图样, 利用叶片前后缘轮廓放大图像, 通过目视比较法完成判断。该检测方法存在图像放大倍数无标准、判断结果主观性强等弊端, 易出现不同人员检测结果不一致的问题; 同时, 由于叶片批量生产、检测截面多, 人工判定工作量大、耗时久, 严重影响了叶片质量的综合评定效率。针对现阶段叶片前后缘不合格加工工艺的典型形状之一——削边问题, 本文提出一种基于厚度的叶片前后缘削边形状自动判断方法, 以提高叶片前后缘处形状检测的效率和可靠性。

1 叶片前后缘削边形状评价的理论基础

HB 5647-98《叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度》对叶片参数进行了定义, 规定了叶片前后缘不允许存在的工艺形状包括削边、尖边、缩颈和平头, 如图 1 所示^[3]。与叶片前后缘削边形状判断密切相关的叶片参数涉及中弧线、前后缘点、叶片厚度等。

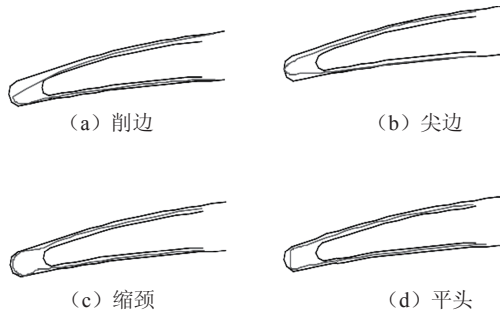


图1 叶片前后缘的四种缺陷工艺形状

中弧线：叶型内切圆圆心的连线，并在前后缘圆心按照切线方向延伸到同前后缘相交的线；前后缘点：叶型中弧线在前后缘圆心处的切线与前缘圆弧（后缘圆弧）相交，交点即为前（后）缘点；叶片厚度：被叶型限制的垂直于中弧线的线段，分为最大厚度、边缘厚度和指定位置厚度；边缘厚度：指前缘厚度和后缘厚度，通过前、后缘点作圆与叶型中弧线相交，圆的半径由设计图中给出的前缘、后缘偏置距离确定，过该交点作叶型中弧线的垂线，再分别与叶盆型线和叶背型线相交，计算两交点间的距离；前缘、后缘指定位置的叶型厚度：按照指定的偏置距离评价的叶片厚度，可指定多个位置。

2 基于厚度的叶片前后缘削边形状的判断方法

本文提出的叶片前后缘削边形状判断方法分析步骤为：①对获取的叶片等高截面原始点云数据进行前缘、后缘、叶盆和叶背的分割和分段参数建模；②对分段的前缘、后缘、叶盆和叶背进行叶片中弧线的计算；③对叶片前后缘叶盆和叶背方向的边缘厚度进行计算；④利用确定的叶片边缘厚度偏差变化率系数等特征指标进行叶片形状的自动判定^[4]。

2.1 叶片叶盆、叶背、前缘和后缘的分割和分段参数建模

叶片测量数据通常是等高截面上离散的点云数据，分析时首先将叶片点云数据粗分割成前缘、后缘、叶盆和叶背四部分，之后对粗分割获取到的叶片前后缘数据进行精确提取。以叶片前缘为例，其数据精确提取方法步骤如下^[5]：

- 1) 提取叶片截面的前缘极值点。
- 2) 从初始前缘点出发，分别往叶盆、叶背方向各延伸数点。
- 3) 对选取的点基于最小二乘法拟合圆，该圆的半

径作为初始前（后）缘半径。

设数据点为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$)，圆公式为 $x^2 + y^2 + ax + by + c = 0$ ，则根据最小二乘法可得

$$\begin{cases} C = n \sum x_i^2 + \sum x_i \sum x_i \\ D = n \sum x_i y_i + \sum y_i \sum x_i \\ E = n \sum x_i y_i^2 + n \sum x_i^3 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum x_i \\ G = n \sum y_i^2 + \sum y_i \sum y_i \\ H = n \sum x_i^2 y_i + n \sum y_i^3 - \sum (x_i^2 + y_i^2) \sum y_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} a = \frac{HD - EG}{CG - D^2} \\ b = \frac{HC - ED}{D^2 - GC} \\ c = -\frac{\sum (x_i^2 + y_i^2) + a \sum x_i + b \sum y_i}{n} \end{cases} \quad (2)$$

4) 计算半径误差，设待拟合的数据点为 (x_i, y_i) ，拟合的圆心坐标为 (x_c, y_c) ，拟合圆半径为 R ，则半径误差

$$R_{\text{error}} = \max \left\{ \left| \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R \right| \right\} - \min \left\{ \left| \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R \right| \right\} \quad (3)$$

5) 基于初始拟合点，向叶盆叶背方向逐步增加数据点，当半径误差超过阈值时，到达前缘与叶盆叶背连接处。

6) 获取叶盆叶背与前缘的连接点，实现叶盆叶背和前缘的分割，并拟合出前缘圆弧对应圆，计算出前缘圆弧半径和圆心。

7) 参照前缘圆弧提取方法，实现叶盆叶背和后缘的分割，并拟合出后缘圆弧对应圆，计算出后缘圆弧半径和圆心。

利用精确分割得到的叶盆、叶背、前缘和后缘点云数据重构叶片截面型线。由于B样条插值具有几何不变性、保凸性、局部支撑性、变差缩减性等优点，而且B样条曲线的一阶、二阶导数平滑，所以选择B样条曲线对叶盆叶背部分点云进行插值^[6]。

给定 $n+1$ 个顶点 $V_0, V_1, V_2, \dots, V_n$ ，确定的B样条曲线方程

$$r(x) = \sum_{i=0}^n N_{i,M}(x) V_i \quad (4)$$

式中： $N_{i,M}(x)$ 为B样条基函数，是次数为 $M-1$ 的多项式。三次B样条基函数为

$$\begin{cases} |N_{0,3}(t) = \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ N_{1,3}(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ N_{2,3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ N_{3,3}(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (5)$$

对于前后缘部分及与叶盆叶背连接的部分,由于离散点密度大,前后缘部分可能出现斜率无穷大、多值曲线等情况,导致样条插值不易处理。在本文中,由于这部分曲线参与叶盆叶背方向厚度计算,对导数连续无要求,故采用线性插值进行建模。 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) 两点间线性插值的公式为

$$y = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}y_1 \quad (6)$$

2.2 叶片中弧线的计算

由于中弧线上的点到叶盆叶背距离相等,即中弧线上的点就是叶盆叶背等距线的交点,因此利用等距线计算叶盆叶背部分对应中弧线,步骤如下^[7]:

1) 由于叶盆叶背处点云较稀疏,且分布疏密不均,因此利用样条曲线插值对叶盆叶背上的点进行加密。

2) 计算加密后各点的法矢方向,在各点法向方向上平移距离 $N \times h$ (h 为设定的偏置步长, $N=1, 2, 3, 4, \dots, n$)。

3) 对叶盆叶背离散点分别进 B 样条插值,得到叶盆和叶背的等距线。

4) 计算两条曲线的交点,即为等距线交点。

5) 对于计算所得交点进行排序,之后进行样条插值处理,得到叶盆叶背部分对应的中弧线曲线。依据等距线求得的中弧线点如图 2 所示。

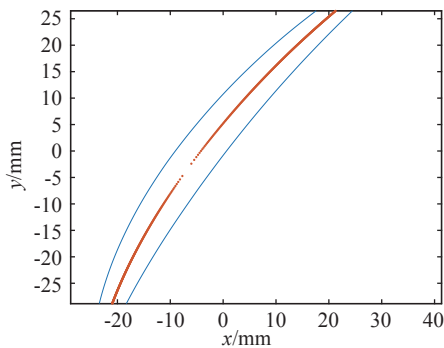
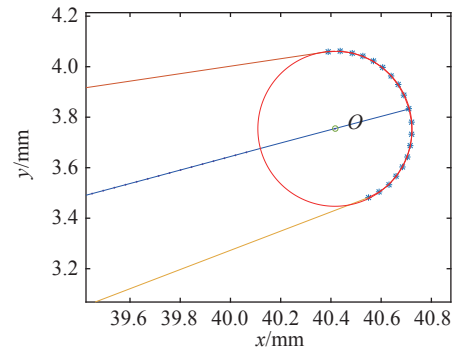


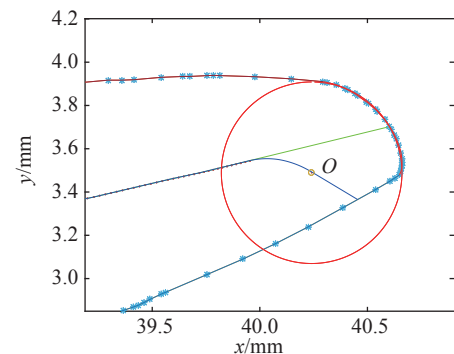
图 2 依据等距线求得中弧线点

叶片前后缘处中弧线的计算有其特殊性。根据中弧线定义,中弧线在前后缘圆心处是按切线方向延长

并与前后缘相交的线。该定义是针对理想的圆弧形状的前后缘。对应非理想圆弧形状的前后缘中弧线的计算,需要进行修正处理^[8]。修正处理时,首先对前后缘圆心与叶盆叶背中弧线偏置情况进行判断,计算叶盆叶背中弧线端点处切线与前后缘圆心处切线的夹角 β ,计算前后缘及叶盆叶背与前后缘连接处曲线是否包络前后缘处对应圆,即将圆心与前后缘及叶盆叶背与前后缘连接处曲线的最小距离 $d_{\min}$ 与拟合圆半径 R 比较。若 $\beta < \beta_0$, $R - d_{\min} < \Delta d_0$, 则说明前缘处中弧线连接前后缘圆心并在圆心处按切线方向与前后缘相交,如图 3(a)所示;若 $\beta > \beta_0$, $R - d_{\min} > \Delta d_0$, 则说明前后缘圆心与叶盆叶背中弧线偏置较大,对前后缘处理理想中弧线进行修正,前后缘处实际中弧线是在叶盆叶背中弧线端点处按切线方向延长与前后缘相交的线,如图 3(b)所示。



(a) 理想圆弧前后缘中弧线



(b) 圆心偏置前后缘中弧线

图 3 前缘部分的中弧线

2.3 叶片前后缘削边形状特征评价指标的定义

1) 前缘点、后缘点的计算

叶型中弧线与前缘圆弧(或后缘圆弧)相交,交点即为前(或后)缘点,如图 4 中点 O 所示。

2) 指定偏置距离的前(后)缘单向厚度的计算

以前(后)缘点为圆心,指定偏置距离 d_i 为半径的圆与中弧线的交点为 P_i ,过交点 P_i 做中弧线的垂线与

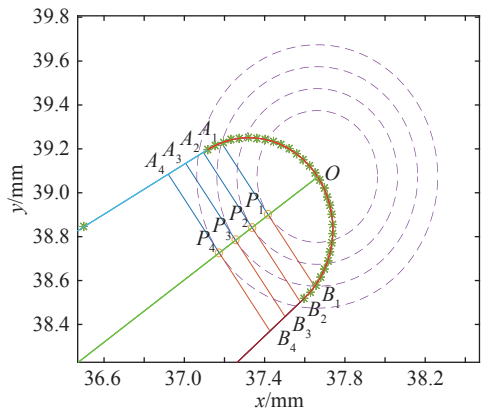


图4 前缘处单向厚度

叶片盆背边缘的交点为 A_i , B_i , 交点 P_i 与 A_i , B_i 的距离即为单向厚度。

$$P_i A_i = \sqrt{(x_{A_i} - x_{P_i})^2 + (y_{A_i} - y_{P_i})^2} \quad (7)$$

$$P_i B_i = \sqrt{(x_{B_i} - x_{P_i})^2 + (y_{B_i} - y_{P_i})^2} \quad (8)$$

3) 评价比对区域厚度偏差和最大厚度偏差

以前(后)缘点为圆心, 得到数个偏置距离 d_i 以及对应叶盆叶背厚度偏差 Δh_i , 记录下其中最大厚度偏差 $\Delta h_{\max}$ 。

$$\Delta h_i = |P_i A_i - P_i B_i| \quad (9)$$

$$\Delta h_{\max} = \max\{\Delta h_i\} \quad (10)$$

4) 评价比对区域厚度偏差比和最大厚度偏差比^[9]

以前(后)缘点为圆心, 得到数个偏置距离 d_i 以及对应叶盆叶背厚度偏差比 δ_i , 记录下其中最大厚度偏差比 $\delta_{\max}$ 。

$$\delta_i = \frac{|P_i A_i - P_i B_i|}{(P_i A_i + P_i B_i)} \quad (11)$$

$$\Delta \delta_{\max} = \max\{\Delta \delta_i\} \quad (12)$$

5) 评价比对区域厚度偏差变化率系数

对评价比对区域偏置距离和厚度偏差比(d_i , δ_i)进行指数拟合 $\delta = ae^{kd}$, 得到厚度偏差变化率系数 a 。

2.4 叶片前后缘削边形状的自动判定准则

叶片前后缘评价比对区域范围通常由叶片前后缘半径范围和前后缘轮廓度公差范围共同确定。当在叶片前后缘评价比对区域范围内, 同时满足条件 $\Delta h_{\max} > \Delta h_0$, $\delta_{\max} > \delta_0$ 和 $a > a_0$ 时, 自动判定叶片前后缘形状为削边。

3 叶片实测数据实验验证

基于前述叶片前后缘削边形状的评价方法, 对 50

组由三坐标测量得到的叶片(共计 100 个前后缘形状)进行了判断和统计分析, 并对数据结果进行了整理分类, 如图 5 所示。

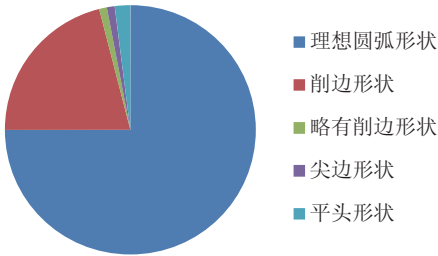


图5 100 个前后缘形状统计分布图

将叶片前后缘的最大厚度偏差、最大厚度偏差比和厚度偏差变化率系数进行的统计分析, 结果如图 6 所示。

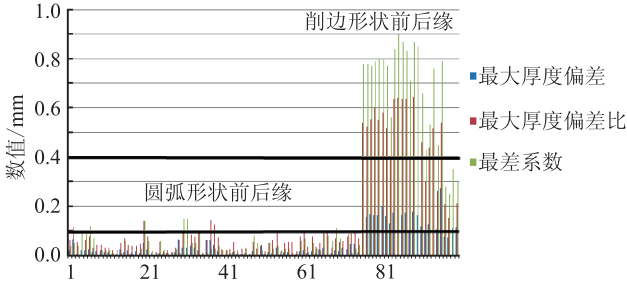


图6 叶片前后缘形状厚度特征参数统计图

由图 6 可以看出, 削边形状的前后缘的最大厚度偏差、最大厚度偏差比和厚度偏差变化率系数三项指标都远远高于理想圆弧形和其它非理想非削边圆弧形形状的叶片前后缘。利用上述三项指标, 可以准确地判断出叶片前后缘的削边形状。该项结果与目视判断结果具有明显一致性。叶片前后缘削边和圆弧形对比如图 7 所示。

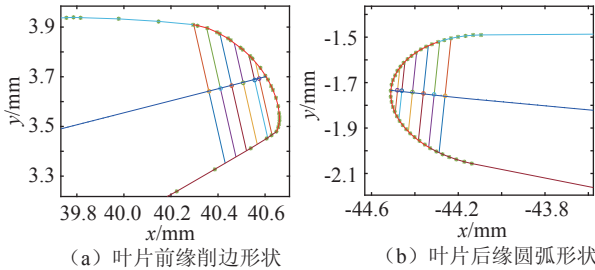


图7 叶片前后缘削边和圆弧形对比

在本方法样本统计数据中, 有 4% 的叶片前后缘形状处于削边和非理想圆弧形状态之间, 如图 8 所示。对于这一类前后缘形状, 未来需要进一步研究其它特征指标以便于进行分类识别。

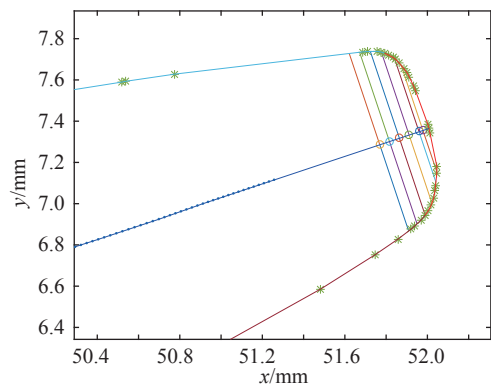


图 8 近近平头的前后缘形状

4 结论

本文提出了根据叶片前后缘厚度类特征参数判断叶片前后缘形状的计算方法。该方法可以实现叶片前后缘削边形状和理想圆弧形形状的分类判断,具有效率高、评价结果唯一的特性。未来可将此评价方法与航空发动机研发单位的大数据样本分析和气动性能设计试验相结合,为航空发动机的设计研发提供重要保障。

参考文献

- [1] 黄智,李超,李凯,等.航空叶片型面三坐标检测技术现状及发展趋势[J].航空制造技术,2017(21):73-79.
- [2] 李勋,于建华,赵鹏.航空发动机叶片加工变形控制技术研究现状[J].航空制造技术,2016,59(21):41-49.

- [3] HB-5647-98 叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度[S].1999.
- [4] 马雯琦,刘书桂.航空发动机叶片截面特征参数提取技术研究[D].天津:天津大学,2013.
- [5] 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.
- [6] 白春蕾,石照耀.发动机叶片截面型线拟合算法比较[J].工具技术,2016,50(5):93-97.
- [7] 张力宁,张定华,陈志强.基于等距线的叶片截面中弧线计算方法[J].机械设计,2006,23(5):39-41.
- [8] 方志阳,骆天舒,徐少杰,等.叶片中弧线的一种混合算法研究[J].机电工程,2018,35(7):717-720.
- [9] 张红影,李启东,李文龙,等.基于MLS的航空叶片中弧线提取方法[J].中国机械工程,2014,25(7):959-964.

收稿日期:2018-12-05

作者简介



曹斌(1992-),男,硕士,主要从事航空发动机叶片前后缘形状数字化评价研究。

第十八届国防系统几何量计量技术交流会顺利召开

本刊讯 为进一步加强几何量技术交流,促进几何量技术的发展,正确理解几何量新规程,保证实验室几何量量值溯源的准确,由国防科技工业第一计量测试研究中心(航空工业计量所)举办的“第十八届国防系统几何量计量技术交流会暨新规程宣贯培训”于2019年03月26日至29日在江苏扬州顺利召开。

本次培训内容主要分为两部分:技术交流和规程宣贯,来自国防计量技术机构、军事计量技术机构、国家和地方计量院所等近200名学员参加了本次培训会。会议旨在通过加强行业内的技术交流,探讨几何量计量技术的发展趋势和热点,以推动几何量计量测试技术的发展;为正确理解几何量新规程保证实验室几何量量值溯源的准确,对最新颁布的几何量技术规程、规范 and 标准进行了宣贯。

会议期间,来自国防计量一中心、中国计量科学研究院、上海理工大学等多家单位的9名专家,还分别就各自工作和关注的领域做了大会报告,内容涉及几何量关键参数校准技术研究与发展,膜厚计量技术,平面平晶绝对测量技术,大尺寸动态测量与校准技术等诸多方面。