

引文格式: 张学仪, 何小妹, 刘峻峰, 等. 基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度分析 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 94-101.

ZHANG Xueyi, HE Xiaomei, LIU Junfeng, et al. Evaluation of uncertainty in blade parameter measurement based on Monte Carlo method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 94-101.

## 基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度分析

张学仪, 何小妹, 刘峻峰, 王卓然, 王一璋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**[摘要]** 叶片型面参数对发动机气动性能具有重要影响。基于坐标测量机的叶片质量检测贯穿于叶片制造全过程。但由于叶片测量过程的复杂性和参数评定的多样性, 叶片型面参数测量结果的不确定度评估存在难度。采用蒙特卡洛法, 对叶片 4 类典型型面参数进行测量不确定度建模和仿真分析, 并与传统的 GUM 法进行了不确定度比对验证。分析和比对结果验证了叶片测量不确定度分析方法的正确性, 有利于实现叶片型面参数测量结果不确定度的在线评定, 值得推广和应用。

**关键词:** 几何量计量; 蒙特卡洛法; 发动机叶片; 不确定度测量; 坐标测量机

### Evaluation of Uncertainty in Blade Parameter Measurement Based on Monte Carlo Method

ZHANG Xueyi, HE Xiaomei, LIU Junfeng, WANG Zhuoran, WANG Yizhang

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

**[ABSTRACT]** To study the uncertainty evaluation of various parameter errors in the actual measurement results of blades is necessary, due to the blade profile parameters have an important influence on the aerodynamic performance of the engine. Blade quality inspection based on CMM runs through the whole process of blade manufacturing. However, due to the complexity of blade measurement evaluation process and the diversity of parameter evaluation, it is difficult to evaluate the uncertainty of blade measurement results. In this paper, Monte Carlo method is used to build the model and simulate the measurement uncertainty of four typical blade profile parameters, and the uncertainty is compared with the traditional GUM method. The analysis and comparison results verify the correctness of the uncertainty analysis method of blade measurement in this paper, which is conducive to realize the on-line evaluation of measurement uncertainty of blade profile parameters, and is worthy of promotion and application.

**Keywords:** Geometric measurement; Monte Carlo method; Engine blade; Uncertainty measurement; Coordinate measuring machine

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2021.12.094

叶片是航空发动机的关键零件, 具有种类多、数量大、曲面形状多样、加工工艺复杂、加工难度大等特点, 其质量直接影响到发动机的气动性能与寿命<sup>[1-2]</sup>。随着新型号发动机叶片型面在弯、扭和掠的增强以及前后缘曲率半径的小型化, 对叶片的几何尺寸和形状测量精度要求也越来越严格。由于叶片的尺寸、形状、物理和力学等因素决定了叶片的整体性能<sup>[3-5]</sup>, 叶片生产的不同阶段均需要对叶片的几何尺寸和形状进行检测<sup>[6]</sup>。

叶片型面参数描述了叶身几何尺寸和各部分相互

位置关系, 参数种类主要包括叶型形状、位置、扭转、前后缘、长度等。总体来说叶片型面参数可以分为 4 类: 尺寸类、位置类、角度类和轮廓度类。

航空发动机叶片型面的测量精度要求较高<sup>[5]</sup>, 在对坐标测量机的叶片测量结果的准确性上有需求, 这就需要对检测结果进行不确定度评定<sup>[7-10]</sup>。现阶段对于航空发动机叶片型面测量不确定度评定尚未有统一的评定标准。一方面, 由于坐标测量机在测量过程中影响测量结果不确定度的误差来源复杂多样, 导致分析困难,

各误差源对测量结果的影响难以量化<sup>[11]</sup>,误差模型建立难度大<sup>[12]</sup>。另一方面,对叶片这类自由曲面的复杂测量任务,叶片点云数据处理方法、参数评定算法的不同,都会对测量不确定度评定产生影响<sup>[13-15]</sup>。

而在现阶段的研究中各国学者对于坐标测量机对特定测量任务的不确定度方面的研究,选择采用了蒙特卡洛法,如 Miura 等<sup>[16]</sup>用蒙特卡罗模拟法估算基于坐标测量机的阶梯规测量不确定度;宋爱国等<sup>[17]</sup>提出基于一种种群优化的微分进化算法评定了圆度测量误差,并采用蒙特卡洛法评定出圆度测量的测量不确定度;意大利 Ruffa 等<sup>[18]</sup>研究了 CMM 进行圆度测量时,采样点数和测量不确定度之间的关系;埃及 Ali<sup>[19]</sup>讨论了扫描式 CMM 在不同扫描速度和拟合算法的条件下,对直径和圆度测量的影响;美国 Ramaswami 等<sup>[20]</sup>建立了圆柱度测量时测量精度和测量策略之间的双向估计模型。

可以看出,国内外对坐标测量机一些常规形位参数的不确定度测量研究成果较多且研究更有深度,在测量点数、测量策略等对形位测量不确定度的影响上做了大量的研究,但对于叶片这种自由曲面尚未有太多的不确定度评定方法。

因此针对三坐标测量机的叶片测量过程,本文提出一种基于蒙特卡洛法评定叶片型面参数测量结果不确定度的方法,并将本文的研究成果与基于 GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) 法的部分参数评定结果进行了比较,证明了蒙特卡洛法叶片型面参数测量不确定度评定方法的准确性和有效性。

## 1 基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度评定理论

应用蒙特卡洛法的测量不确定度评定方法是基于概率理论。利用蒙特卡洛法评定叶片型面参数的不确定度计算过程如图 1 所示,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为影响叶片参数误差的主要因素,蒙特卡洛法首先要分析这些误差源的测量估计值和测量不确定度,产生符合各参数分布状态的随机数;然后代入各参数误差模型,构成  $f$  的概率分布;最后根据  $f$  的概率分布,求出其期望值和标准差,即为所求的叶片参数值和测量标准不确定度。

针对坐标测量机测量叶片的过程,应用模型模拟测量任务并估计坐标测量机测量叶片的不确定度。模型的建立需要考虑测量点的分布、测头的选择和配置、测量系统所在环境等在模型中的影响表现。首先需要实际测量得到的点云数据,考虑在仿真过程中各误差源不确定度和采用的其分布参数<sup>[12]</sup>,为所有测量点指定了 1 组仿真三坐标测量机的误差特性<sup>[16]</sup>,通过选择各误差

源的分布对实际测量数据的每个点进行扰动,生成多组测量值,并输入到如尺寸参数(长度、厚度、角度等)、轮廓参数等实际参数数学模型计算表示,得到多组模拟测量参数值,并且由于选择算法不同,通过对特定算法进行仿真可以得到同一参数不同算法产生的不确定度。

坐标测量机空间测量数学模型为:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

根据误差传播定律,空间长度  $d$  的测量误差可表达为:

$$\Delta d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial x}\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial z}\right)^2 \Delta z^2} = \sqrt{\cos^2 \alpha_x \Delta x^2 + \cos^2 \alpha_y \Delta y^2 + \cos^2 \alpha_z \Delta z^2} \quad (2)$$

其中,测量时,坐标测量系统返回的数据格式为  $(x, y, z, \alpha, \beta, I, J, K)$ ,其中  $(x, y, z)$  为被测点的坐标值; $\alpha, \beta$  分别为测量时  $A$  轴与  $B$  轴的角度; $(I, J, K)$  为测量时的探测矢量。坐标测量系统返回的是合成后的数据,并不能从控制系统中获得各主轴的光栅值、测杆变形量以及测头  $A, B$  轴运动产生的位移量。

通过对坐标测量机测量叶片测量精度的评估与坐标测量机精度的评估问题的分析,假设坐标测量系统模型的实质是分量误差相互重叠,因此可以通过分析提取出测量过程中每个点的相互独立的各分量误差矢量。以试验采用的测量范围为  $2000\text{mm} \times 1200\text{mm} \times 1000\text{mm}$  的坐标测量机对某发动机叶片的测量过程为例,通过分析测量设备的不确定度、探触形状误差引入的测量不确定度、重复性、温度影响的特性指标,反映了叶片测量过程中不确定性的特征,反映各种误差对于测量结果不确定度的影响,进行以下分析。

### 1.1 测量设备的不确定度

通过分析坐标测量机单轴测量不确定度、坐标垂直度误差、坐标直线度误差和旋转误差,最终合成得到测量设备的不确定度,最大示值误差  $U_{\text{MPE}} = (1.2 + l/350) \mu\text{m}$ 。假设在这个范围内测量设备不确定度任何结果都

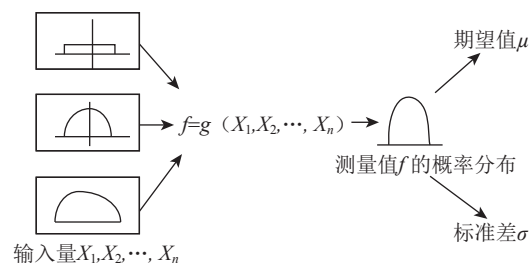


图 1 蒙特卡洛法评定参数不确定度

Fig.1 Monte Carlo method for parameter uncertainty evaluation

是可能的,那么测量设备的不确定度服从矩形分布。

### 1.2 温度变化对测量结果的影响

环境条件影响的估算在模拟测量模型中很重要。对于几何量,机械零件的热梯度会显著影响后续的测量,影响测量尺寸的其中一个因素即为温度变化。温度的变化对测量结果的影响主要考虑三坐标测量机与工件之间的膨胀系数的差异及三坐标测量机标尺膨胀系数不确定度,因此有必要在考虑热膨胀系数的情况下提供热补偿。根据 ISO 标准,几何测量的参考温度为 20℃。与该温度的任何偏差均应根据以下公式进行校正:

$$l_c = l \times (1 - (20 - t) \times \alpha) \quad (3)$$

其中,  $l_c$  为校正后长度;  $l$  为测得的长度;  $t$  为温度;  $\alpha$  为对于给定的校准元件材料采取的热膨胀系数。

被测件和设备的膨胀系数差在半宽为  $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  的区间内温度  $\Delta t = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 服从矩形分布,

$$u_2 = 2 \times 10^{-6} \div \sqrt{3} \times l \times 10^3 \times \Delta t = 1.15 \times 10^{-3} \times l \times \Delta t (\mu\text{m}) \quad (4)$$

### 1.3 算法误差

叶片的评价结果是由坐标测量机测得的点云数据通过叶片参数评价算法给出。就叶片来说,其最终测量结果的误差源势必包括了测量设备硬件系统本身误差和测量软件处理算法带入的误差因素,因此这部分主要研究对软件评价算法的误差估计。在算法误差中,不考虑算法数学模型建立不同的影响,主要来源有方法误差(截断误差),即算法中包含的计算公式(如泰勒公式等)本身是一种求解的近似(连续的离散化处理,无穷的有限话处理);舍入误差,即计算机中的数(机器数)是具有有限精度的实数的有限子集,由于计算时的四舍五入,或者因计算机的字长有限而使原始数据只能用有限位数表示,由此产生的误差。通过合成,算法误差可以记为  $0.05 \mu\text{m}$ ,服从矩形分布。

### 1.4 探测误差

探测误差是使用坐标测量机测量标准球半径的示值变化范围而确定的误差,主要反映了测头的各向异性、瞄准误差和作用直径的影响,属于坐标测量机的方向特性参数。探测误差是影响测量不确定度的重要因素,对于不同的测头,探测误差也不同。对叶片测量过程中采用的测头,通过坐标测量机对标准球进行测量,得到探测误差为  $2 \mu\text{m}$ ,服从均匀分布。

通过以上分析,论文中对 MCM 模型是基于以下参数的试验计算和估计的:三坐标测量机运动误差、系统的和随机的三坐标测量机探头误差、算法的误差分析以及环境条件的变化。对于叶片各参数相应的数学模型,为每个输入量分配适当的概率密度函数。由于蒙特卡

罗方法(MCM)是基于对与参考对象的校准值有关的测量误差的统计评估,因此试验次数需要足够多才能正确确定输出量的分布,因此对于概率  $p=0.95$ ,确定了  $M=10^6$  的试验次数。最终得到  $M$  个模拟参数值,构成了输出量的分布,可以确定期望值和标准偏差。

应用蒙特卡洛法对坐标测量机测量叶片型面参数不确定度评定的具体步骤如下:

(1)分析叶片型面参数测量不确定度的来源,对坐标测量机叶片测量过程中的不确定因素进行定量评估,判断其分布类型及分布区间。通常不确定度来源主要有坐标点测量不确定度、示值误差引起的不确定度、环境因素等引起的不确定度<sup>[15]</sup>;

(2)针对叶片型面不同类型的参数,模拟坐标测量机对点云数据进行处理运算,确定误差模型中输入变量的范围和分布;

(3)考虑到点云数据中每个测量点相互独立,对点云数据中的每个点,都随机加入按各个输入量的分布生成的误差,来模拟叶片测量中得到的点云数据。通过采用大样本来进行叶片型面参数测量不确定度评定,样本容量越大,越能真实地模拟出实际测量值;

(4)根据以上得到的模拟测量数据,代入叶片各参数数学模型中,求得试验结果值。根据该组值,构造一个概率分布,判断其分布类型,计算其期望值、标准差和 95% 置信区间,期望值即为叶片型面参数值,标准差即为所要求的各叶片型面参数测量的标准不确定度,置信区间上下限值表示叶片型面参数的变化范围。

## 2 基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度评定试验

为了更全面地表示叶片型面测量过程的不确定度,综合评价叶片型面的测量结果,选取了叶片型面 4 类参数中的典型参数,分别为叶型最大厚度、弦长、位置度、扭转角和轮廓度。

### 2.1 最大厚度

最大厚度是指叶片截面的最大厚度值<sup>[16]</sup>,是对叶型轮廓度的补充,为控制叶片的最大厚度分布,通常是对封闭叶型进行内切圆计算,得到内切圆的最大半径,将最大内切圆的直径作为叶型的最大厚度值。

叶片测量数据通常是等高截面上离散的点云数据,首先将叶片点云数据粗分割成前缘、后缘、叶盆和叶背 4 部分,然后对粗分割获取到的叶片前后缘数据进一步精确提取。

(1)计算叶片点云数据中距离最远的两点,分别为叶片截面的前缘极值点和后缘极值点。

(2)从前后缘极值点分别向叶盆、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。

(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  $R$ 。

$$\text{error} = \max \left\{ \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R \right\} - \min \left\{ \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R \right\} \quad (5)$$

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

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

(7) 对精确分割得到的叶盆、叶背、前缘和后缘点云数据重新排序、加密来重构叶片截面型线。由于叶盆叶背处点云较稀疏, 而且分布疏密不均, 利用 B 样条曲线插值对叶盆叶背上点进行加密。

(8) 求取加密后的叶盆点  $A_i$  到叶背  $B_j$  之间距离最小值的合集, 对叶盆上点  $A_i$ ,

$$l_j = \sqrt{(x_{A_i} - x_{B_j})^2 + (y_{A_i} - y_{B_j})^2}, l_i = \min \{l_j\}$$

(9) 在最小值合集中找到最大的值, 即为求得的最大厚度距离。

对叶盆上所有点  $A$ , 求得的  $l_i$  对应的合集  $L$ , 最大厚度  $h = \max \{l_i\}$ 。

选取基于三坐标测量机对叶片截面实测的点云数据, 对测得的 1836 个点, 每个点随机加入服从均匀分布空间坐标测量不确定度  $(1.2 + l/350) \mu\text{m}$ ; 服从等概率分布的环境因素对测量结果的影响  $(1.15 \times 10^{-3} l \Delta t) \mu\text{m}$ , 其中假设  $\Delta t = 0.3^\circ\text{C}$ ; 服从均匀分布的校准装置探触形状误差引入的不确定度  $2 \mu\text{m}$ 。输入最大厚度的数学模型中模拟  $10^6$  次, 得到对应截面最大厚度的期望值, 标准差及置信区间为 95% 的区间范围, 最大厚度直方图如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 数据在  $[30.358\text{mm}, 30.372\text{mm}]$  区间内变化, 且在中间值区域集中, 计算出的数组的期望值作为测量值为  $30.365\text{mm}$ , 标准差作为标准不确定度值为  $1.76 \mu\text{m}$ , 95% 置信区间为  $[30.362\text{mm}, 30.369\text{mm}]$ , 上下限差值计算得到  $3.43 \mu\text{m}$ 。

## 2.2 弦长

叶型的弦线是将叶型投影在叶盆的公切线上, 叶型弦长即为投影点最小值与最大值之间的距离。弦线定义如图 3 所示。

叶型弦线的计算方法包括前后缘点法、公切线法和最大值法等。试验中选择前后缘点法计算弦长, 选取基于三坐标测量机对叶片 5 个不同截面高度的实测的点云数据, 对每个截面测得的点云数据, 每个点随机加入服从均匀分布最大示值误差  $(1.2 + l/350) \mu\text{m}$ ; 服从等概率分布的环境因素对测量结果的影响  $(1.15 \times 10^{-3} l \Delta t) \mu\text{m}$ , 其中假设  $\Delta t = 0.3^\circ\text{C}$ ; 服从均匀分布的测量设备探触形状误差引入的不确定度  $2 \mu\text{m}$ ; 服从矩形分布的算法误差  $0.05 \mu\text{m}$ 。由 2.1 节中最大厚度数学模型中前后缘点的求取, 通过计算前、后缘两点连线的长度, 模拟  $10^6$  次, 对得到的多组数据应用蒙特卡洛法评定测量不确定度, 结果如表 1 所示。

通过表 1 中数据可以看到, 对不同高度的不确定度评定, 不同高度的测量不确定度差值在  $1 \mu\text{m}$  以内。

最大厚度和弦长参数的评定证明了叶片尺寸类参数的测量不确定度是基本一致的。

## 2.3 位置度

叶型位置度是叶片实测数据相对于理论叶型坐标点进行最佳拟合时的平移量。叶型在轴向与周向上的平移量分别称为轴向位置度和周向位置度。

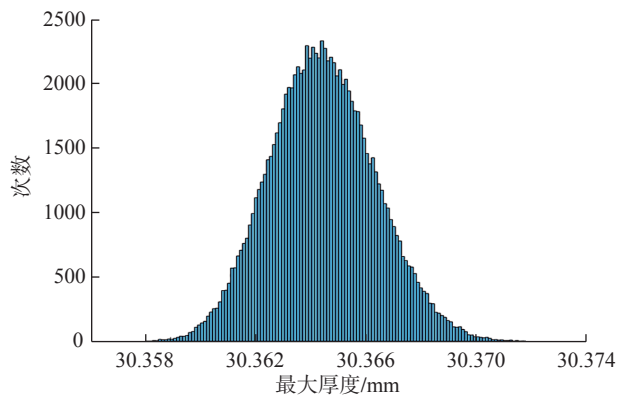


图 2 蒙特卡洛法最大厚度直方图

Fig.2 Monte Carlo method maximum thickness histogram

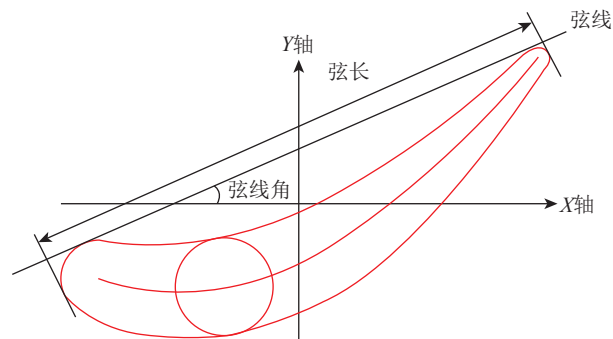


图 3 弦线定义

Fig.3 Definition of chord

在采用最小二乘法进行叶型拟合时,除了最小化理论数据与检测数据的方差,也最小化两者的均方差。在这个过程中,叶型在轴向与周向上的平移量分别称为轴向位置度( $x\_offset$ )和周向位置度( $y\_offset$ ),叶型在平面内绕积迭点旋转的角度称为扭转角,通常情况下,以检测截面平面内以逆时针方向为负。

有些情况下,也采用  $T\_offset$  对位置度进行控制。 $T\_offset$  的计算如下:

$$T\_offset = 2 \cdot \sqrt{x\_offset^2 + y\_offset^2}$$

将实测的数据值与理论数据 ICP 配准后,获得最优旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ 。其中最优旋转矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \text{可以计算得到 } \theta; \text{通过平移向量}$$

$$T = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \text{可以求得位置度参数。叶片位置度和扭转度}$$

评价算法流程图如图 4 所示。

选取基于三坐标测量机对叶片中间高度的截面实测点云数据,对这 1832 个点,每个点随机加入服从均匀最大示值误差 ( $1.2+l/350$ )  $\mu\text{m}$ ; 服从等概率分布

的环境因素对测量结果的影响 ( $1.15 \times 10^{-3} l \Delta t$ )  $\mu\text{m}$ , 其中假设  $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$ ; 服从均匀分布的校准装置探触形状误差引入的不确定度  $2\mu\text{m}$ ; 服从矩形分布的算法误差  $0.05\mu\text{m}$ 。将模拟受到扰动生成的  $10^6$  组数据输入到位置度数学模型中,通过试验结果计算这组值的平均值、标准差及 95% 置信区间,可以得到轴向位置度测量值为  $-0.1013\text{mm}$ ,标准不确定度为  $0.089\mu\text{m}$ ; 周向位置度测量值为  $0.0538\text{mm}$ ,标准不确定度为  $0.045\mu\text{m}$ 。结合图 5 的直方图可以看出,不确定度分布上和叶片面尺寸类参数类似,但由于评定过程中还需要与理论数据进行对齐,因此必须单独分析。

### 2.4 扭转角

叶型扭转角是叶片实测数据相对于理论叶型坐标点进行最佳拟合时,叶型在平面内绕积叠点旋转的角度。

通过对 2.3 节中计算位置度及扭转角的数学模型和试验,对计算得到的模拟参数值进行分析,可得扭转角测量值为  $0.0512^\circ$ ,标准不确定度值为  $0.00031^\circ$ ,其中 95% 的置信区间对应的不确定度为  $0.00021^\circ$ ,由图 6 扭转角的直方图可以看出,叶片型面角度类参数受误差变化影响较大,导致数据集中偏左。

表 1 不同高度的弦长不确定度及测量值  
Table 1 Uncertainty and measurement value of chord length at different heights

截面高度 / mm	弦长测量值 / mm	标准不确定度 / $\mu\text{m}$	95% 的置信区间对应 $U/\mu\text{m}$
672.23	285.271	1.95	3.80
741.75	280.902	1.61	3.13
867.89	280.250	1.57	3.03
939.97	282.725	1.67	3.28
1012.03	288.037	1.52	3.00

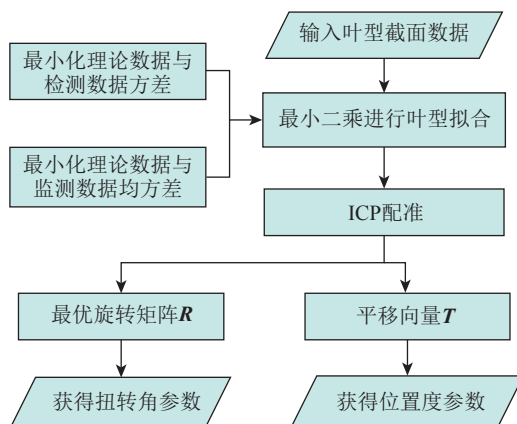
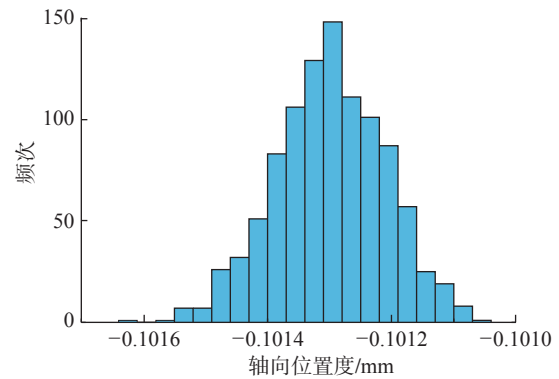
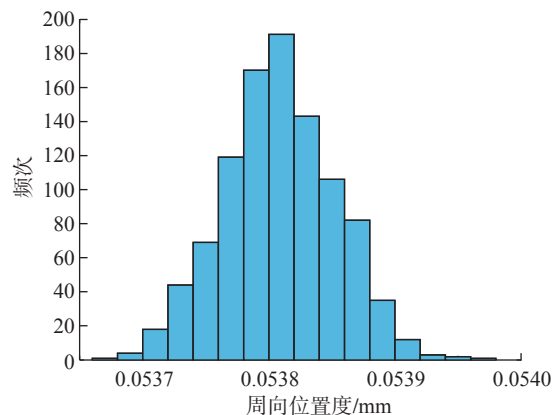


图 4 叶片位置度和扭转度评价算法流程图

Fig.4 Flow chart of blade position and torsion evaluation algorithm



(a) 轴向位置度



(b) 周向位置度

图 5 轴向和周向位置度直方图

Fig.5 Histograms of axial and circumferential position

## 2.5 轮廓度

轮廓度一般指叶片型面上不同部位轮廓上最大值与最小值的差,包括前缘轮廓度、后缘轮廓度、叶盆轮廓度及叶背轮廓度。轮廓度定义如图7所示。

叶型参数评价最基本的形状误差是轮廓度,而轮廓度的评价又需要在曲线曲面测量数据与理论模型的最佳拟合这一前提下实现,因此叶型轮廓度的计算涉及实测数据与理论数据的对齐,有以下计算流程。

(1)对叶型截面的测量数据和截面对应的理论数据进行ICP算法配准。

(2)按照2.1节中最大厚度数学模型中叶盆、叶背、前后缘分割,对叶型测量点集进行分割,得到4个区域的点集。

(3)对理论叶型型值点进行NURBS曲线插值拟合,形成理论型线。

(4)基于圆裁剪和牛顿迭代算法实现点到NURBS曲线距离计算。

(5)最后根据向量叉积法解决轮廓偏差方向的判

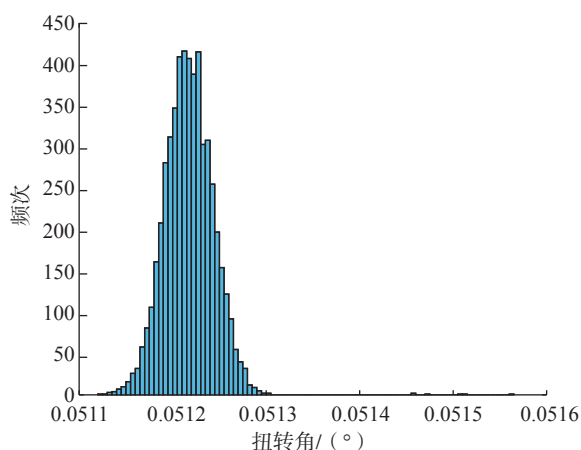


图6 扭转角直方图

Fig.6 Torsion angle histogram

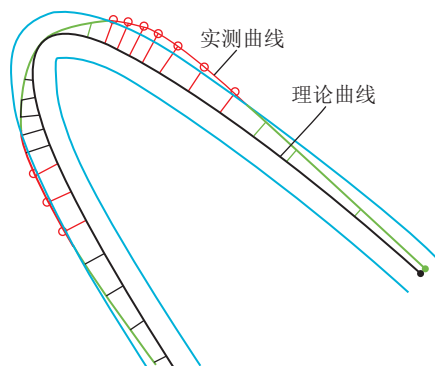


图7 轮廓度定义

Fig.7 Definition of profile

定问题。

选取基于三坐标测量机对叶片中间高度的截面实测点云数据,对这1832个点,每个点随机加入服从均匀分布最大示值误差 $(1.2+l/350)\mu\text{m}$ ;服从等概率分布的环境因素对测量结果的影响 $(1.15 \times 10^{-3} l \Delta t)\mu\text{m}$ ,其中假设 $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$ ;服从均匀分布的校准装置探触形状误差引入的不确定度 $2\mu\text{m}$ ;服从矩形分布的算法误差 $0.05\mu\text{m}$ 。基于蒙特卡洛法对测量得到的点云数据进行模拟 $10^6$ 次,输入到轮廓度测量的数学模型中,得到多组轮廓度模拟测量值,通过模拟测量值计算各位置轮廓度的平均值、标准差及95%置信区间,得到测量值和标准不确定度。轮廓度的评定涉及叶片截面区域分割的问题,因此各个位置的轮廓度在不确定度评估中也得到了不同的值,如表2所示。叶背的最小轮廓度分布如图8所示。

结合表2和图8可以分析得到前、后缘部分的轮廓度比叶盆、叶背轮廓度不确定度评定结果大,这符合前后缘部分曲率变化大的实际测量情况。叶背轮廓度概率分布与弦长、最大厚度这类仅需要实测数据计算的尺寸类参数的相比,中间区域出现明显下降和上升,这是由于轮廓度的计算涉及到与理论数据的对齐算法的影

表2 轮廓度不确定度

Table 2 Uncertainty of profile

轮廓度	测量值 / mm	标准不确定度 / $\mu\text{m}$	95%的置信区间对应 $U/\mu\text{m}$
叶盆	0.166	0.844	1.578
叶背	0.180	0.954	1.751
前缘	0.138	1.025	2.037
后缘	0.125	1.096	2.150

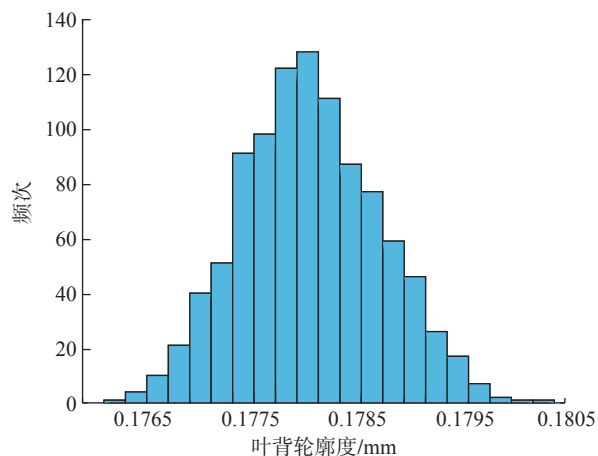


图8 叶背轮廓度直方图

Fig.8 Leaf profile histogram

响,也从不同角度说明了叶片型面参数的测量不确定度各有不同。

### 3 基于 GUM 法的叶片弦线参数测量不确定度评定

通过对某一叶片同一高度的截面在相同条件下重复测量多次,应用 GUM 法对叶片弦长参数的不确定度评定。首先定量分析影响不确定度的各分量。

(1)坐标测量机尺寸最大允许示值误差引入的测量不确定度  $u_1$ 。

坐标测量机尺寸测量的最大允许示值误差为  $(1.2+l/350)\mu\text{m}$ ,按均匀分布, $u_1=(1.2+l/350)/\sqrt{3}=1.163(\mu\text{m})$ 。

(2)被测件和设备的热膨胀系数引入的不确定度分量  $u_2$ 。

被测件和设备的膨胀系数差在半宽为  $2\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  的区间内以等概率分布, $k=\sqrt{3}$ , $\Delta t=0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,

$$u_2=2\times 10^{-6}\div\sqrt{3}\times l\times 10^3\times\Delta t=1.15\times 10^{-3}\times l\times 0.3=0.098(\mu\text{m})$$

(3)叶片测量重复性引入的测量不确定度  $u_3$ 。

对叶片在重复条件下连续测量多次,得到的标准偏差:

$$u_3=2.087(\mu\text{m})$$

最后通过分量合成的方法得到叶片型面弦长的测量不确定度为:

$$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2}=2.391(\mu\text{m})$$

按包含概率  $\rho=95\%$ ,则  $k=1.96$ ,扩展不确定度为  $U_{95}=1.96\times u_c=4.686(\mu\text{m})$

### 4 两种方法的比较和分析

基于 GUM 法计算得到的扩展不确定度和基于蒙特卡洛法的叶片弦长测量不确定度评定结果的范围量级基本一致,同时,基于蒙特卡洛法叶片弦长的分布结果符合概率统计分布规律,充分说明基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度评定模型的正确性。

基于蒙特卡洛法的叶片弦长测量不确定度评定结果与 GUM 法计算得到的测量合成标准不确定度相比,蒙特卡洛法可以给出测量不确定度的包含概率,可以更好地表示测量结果的特征。而计算扩展不确定度时,GUM 法通常假设模型输出量属于正态分布,采用估算的方式,在实际模型不一定是正态分布的情况下,具有一定的局限性;基于蒙特卡洛法评定的不确定度,通过大量模拟测量过程,结果包括了测量值的概率分布图形,没有对输出量分布类型假设所造成的误差影响,更加的合理、准确。

### 5 结论

本文提出了一种基于蒙特卡洛法评定坐标测量机测量叶片型面参数不确定度的计算方法。该方法充分利用叶片实测点云数据和理论模型,基于叶片型面参数评定算法及蒙特卡洛模拟试验,实现对叶片型面参数不确定度的准确评估。基于该方法进行的叶片型面参数测量不确定度评定结果与传统 GUM 法评定处于一个量级范围;利用该方法初步掌握了叶片尺寸类、位置类、角度类和轮廓类典型型面参数的测量不确定度评定规律。同传统 GUM 评定方法相比,基于蒙特卡洛模拟试验统计计算不确定度的方法在理论上具有优势性、可靠性和在线性,值得在叶片型面参数测量及评价领域进行推广应用。

### 参考文献

- [1] 李想.多坐标回转体测量机结构与控制方法研究[D].天津:天津大学,2012.  
LI Xiang. Research of the structure and dominating system of coordinate measuring machine of axisymmetric body[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [2] 蔺小军,陈悦,王志伟,等.面向自适应加工的精锻叶片前后缘模型重构[J].航空学报,2015,36(5):1695-1703.  
LIN Xiaojun, CHEN Yue, WANG Zhiwei, et al. Model restructuring about leading edge and tailing edge of precision forging blade for adaptive machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1695-1703.
- [3] 王军.航空发动机叶片三维轮廓测量方法研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2005.  
WANG Jun. Study on measurement of 3D photography in aero engine vane[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [4] BAO J D, ZHAO R, SUN Y H, et al. Research on the evaluation of plane orientation error based on uncertainty theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 635-637: 932-937.
- [5] SŁADEK J, GAŚKA A. Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method[J]. Measurement, 2012, 45(6): 1564-1575.
- [6] 张宝峰.航空发动机叶片测量现状及新方法分析[J].科技创新导报,2016,13(20):14,16.  
ZHANG Baofeng. Analysis of the current situation and new methods of blade measurement of aeronautical engines[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(20): 14, 16.
- [7] HABIB H, TASLEEM M. Diagnostic of critical factors in uncertainty measurement of coordinate measuring machine in reverse engineering of aerospace products[C]//Proceedings of 2016 International Conference in Aerospace for Young Scientists (ICAYS). Beijing, 2016.
- [8] HOPP T H, LEVENSON M S. Performance-measures for geometric fitting in the NIST algorithm testing and evaluation program for coordinate measurement systems[J]. Journal of Research of the

National Institute of Standards and Technology, 1995, 100(5): 563.

[9] 李红莉. CMM 尺寸测量不确定度模型与评定方法 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

LI Hongli. Uncertainty models and its evaluation methods of dimension measurement results for CMM[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

[10] 连慧芳. 形位误差测量的不确定度评定 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

LIAN Huifang. Evaluation of measurement uncertainty in result of form and position error[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.

[11] ANGELES HERRADOR M, GONZÁLEZ A G. Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte-Carlo simulation[J]. Talanta, 2004, 64(2): 415-422.

[12] LI H, CHEN X, QIAO Y, et al. Task-oriented measurement uncertainty evaluation of CMM under multi-strategies[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015.

[13] JALID A, HARIRI S, EL GHARAD A, et al. Comparison of the GUM and Monte Carlo methods on the flatness uncertainty estimation in coordinate measuring machine[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2016, 7(3): 302.

[14] 潘俊, 温秀兰. 圆度误差评定与测量不确定度计算 [J]. 南京工程学院学报 (自然科学版), 2015, 13(1): 1-5.

PAN Jun, WEN Xiulan. Evaluation of circularity errors and computation of measurement uncertainty[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2015, 13(1): 1-5.

[15] 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.

LIN Xiaojun, SHAN Chenwei, WANG Zengqiang, et al. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 125-131.

[16] MIURA Y, NAKANISHI S, HIGUCHI E, et al. Comparative evaluation of estimation of hole plate measurement uncertainty via Monte Carlo simulation[J]. Precision Engineering, 2019, 56: 496-505.

[17] 王东霞, 宋爱国. 基于三坐标测量机的圆度误差不确定度评估 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2014, 44(5): 952-956.

WANG Dongxia, SONG Aiguo. Uncertainty assessment of circularity error based on coordinate measuring machine[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(5): 952-956.

[18] RUFFA S, PANCANI G D, RICCI F, et al. Assessing measurement uncertainty in CMM measurements: Comparison of different approaches[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2013, 4(3): 163-168.

[19] ALI S H R. Performance investigation of CMM measurement quality using flick standard[J]. Journal of Quality and Reliability Engineering, 2014, 2014: 1-11.

[20] RAMASWAMI H, KANAGARAJ S, ANAND S. An inspection advisor for form error in cylindrical features[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(1-2): 128-143.

通讯作者: 何小妹, 研究员, 研究方向为复杂曲面测量和几何量计量。

(责编 阳光)

(上接第 93 页)

## 参考文献

[1] 田武刚, 潘孟春, 罗飞路, 等. 航空发动机叶片的内窥涡流集成原位检测 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 101-105.

TIAN Wugang, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. Borescope and eddy current integrative in situ detecting defects in aeroengine laminas[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5): 101-105.

[2] 赵萍, 何清华, 杨治国. 航空发动机叶片疲劳断裂研究领域与方法概述 [J]. 航空发动机, 2009, 35(3): 58-61.

ZHAO Ping, HE Qinghua, YANG Zhiguo. Summarize of investigation and method for blade fatigue fracture of aeroengine[J]. Aeroengine, 2009, 35(3): 58-61.

[3] 于霞. 飞机发动机叶片缺陷的电磁检测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

YU Xia. Research on electromagnetic nondestructive testing of defects in the engine blades of aircraft[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

[4] AMINEH R K, RAVAN M, SADEGHI S H H, et al. Removal of probe liftoff effects on crack detection and sizing in metals by the AC field measurement technique[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(8): 2066-2073.

[5] 任吉林. 电磁检测 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

REN Jilin. Electromagnetic test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

[6] 刘战伟, 朱文颖, 石文雄, 等. 热障涂层无损检测技术进展 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 43-47.

LIU Zhanwei, ZHU Wenying, SHI Wenxiong, et al. Progress in nondestructive testing of thermal barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 43-47.

[7] 邓世均. 高性能陶瓷涂层 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

DENG Shijun. High performance ceramic coatings[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[8] 赵松原, 黄明恪. 模拟退火算法和 POD 降阶模态计算在翼型反设计中的应用 [J]. 空气动力学学报, 2007, 25(2): 236-240.

ZHAO Songyuan, HUANG Mingke. Application of simulated annealing method and reduced order models based on POD to airfoil inverse design problems[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(2): 236-240.

[9] 秦峰. 航空涡轮叶片缺陷的扫查式涡流检测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

QIN Feng. Research of scanning eddy current testing technology for the defects on aircraft turbine blades[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[10] 孙金立. 无损检测及在航空维修中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

SUN Jinli. Non destructive testing and its application in aviation maintenance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.

通讯作者: 张海兵, 副教授, 硕士, 研究方向为飞机无损检测与损伤评价。

(责编 阳光)