

航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法

张现东¹, 卜 昆¹, 董一巍²

- (1. 西北工业大学 机电学院 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;
2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 针对航空发动机叶片三坐标检测测量效率低的问题,提出了一种适用于翼型曲面三坐标测量优化采样算法。基于杠杆平衡系统,对现有采样算法做了统一的数学描述;并通过引入挠率信息,使得曲率-弧长采样算法适用于空间曲线,并在此基础上研究了基于前、后缘线选取叶片被测截面的算法;研究了弧长分量与曲率分量的比例系数的优化方法。最后,对多个叶片模型进行采样实验,计算重构误差并与等参数采样、等弧长采样、曲率采样、等弦公差采样、加权曲率采样算法对比,结果表明优化采样算法精度提高 11.2% 以上,与等步长采样方法对比,测点数减少 92.3%。

关 键 词: 三坐标测量; 叶片; 优化采样; 曲率; 弧长

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Optimal sampling strategy for aero-engine blade inspection with coordinate measuring machine

ZHANG Xiandong¹, BU Kun¹, DONG Yiwei²

- (1. Key Lab of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: In view of the inefficiency of inspecting aero-engine blades with coordinates measuring machine, unified mathematical descriptions of common sampling algorithms were proposed based on lever system, meanwhile, an optimal sampling algorithm for airfoil surfaces inspection with coordinate measuring machine was presented. By introducing torsion information, the curvature-arc sampling algorithm was appropriate to space curves, and based on this, the algorithm for sampling cross sections on the blade surface through the leading and the trailing edge curves was proposed. And the optimization method of weights in curvature-arc sampling was researched also. Finally, several experiments for different blades were implemented, and the comparisons of optimal sampling points' reconstruction errors with those of equal-parameter sampling, equal-arc sampling, curvature-based sampling,

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51371152)

作者简介: 张现东(1986—),男,博士生,主要从事精密测量、CAD/CAM、精铸模具设计的研究。

通讯作者: 卜昆(1965—),女,教授、博士生导师,博士,主要从事航空宇航制造工程领域中的制造过程仿真与优化设计、逆向工程等。E-mail: pukun89@nwpu.edu.cn

引用格式: 张现东, 卜昆, 董一巍. 航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 168-176. ZHANG Xiandong, BU Kun, DONG Yiwei. Optimal sampling strategy for aero-engine blade inspection with coordinate measuring machine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 168-176.

equal-deviation sampling and weighted curvature-based sampling were made. The results indicate that the accuracy of optimal sampling is 11.2% higher at least. And the number of optimal sampling points is 92.3% less than equal-step sampling which is used widely in practice.

Key words: coordinates measuring machine; blade; optimal sampling; curvature; arc-length

叶片是航空发动机最重要的零件,具有很高的制造精度与装配精度要求^[1-2],叶片的成形误差会降低发动机的性能、效率,甚至会导致叶片与机罩碰撞而损坏发动机。随着高性能发动机的发展,叶片的形状变得更加复杂,精确度要求越来越高。传统的叶片测量方法,如样板、光学投影等,测量精度低、依赖经验、非定量,已不能满足叶片检测自动化要求。随着数字化测量技术的发展,出现测量效率和精度更高的测量设备,如三坐标测量(CMM)、激光测量、计算机断层扫描(CT)等。目前,接触式三坐标测量机是精度最高的测量设备,而被广泛地用于叶片的尺寸检测^[3]。三坐标测量是将几何特征的测量转换为对几何特征离散点的测量,因此测点的采样策略是三坐标测量不可缺少的主要步骤。采样策略的好坏直接关系到测量的难易程度、测量准确度以及测量效率。叶片类复杂自由曲面的采样一直是难点,虽然很多学者投入大量精力做了研究,提出了很多采样算法,但并没有普及到生产中,叶片的三坐标测量效率仍然很低,而测量是为智能制造技术提供数据,是智能分析的依据和根本,与制造质量的提高密切相关,因此有必要对叶片三坐标测量采样做进一步研究。

叶片是典型的自由曲面零件,常用的自由曲面采样做法是定义一个二维平面网格,投影到被测曲面上,以投影线与被测曲面的交点作为测量点,但是这种采样方法并不适用于叶片等曲率变化大的复杂曲面^[4]。针对投影法的不足,很多学者研究了测点随自由曲面几何特征自适应分布的采样算法。Li^[5]研究了一种加权曲率采样法,以曲率变化比和一个权重系数的和作为曲面网格化度量,通过调整权重系数实现曲面测点的不同分布,但并没有对权值系数的取值进行优化。来新民等^[6]在 Li 的基础上提出以主曲率几何平均值为曲率测度实现采样网格的自适应规划。Elkott 等^[7]研究了一种优化的采样方法,建立曲面面片曲率变化率与面积变化率矩阵,通过遗传算法决定使用均匀采样、基于面片大小的采样、基于面片曲率的采样、还是基于面片大小和曲率的混合采

样方法,通过实例证明优化的采样算法能提高自由曲面测量效率和精度。Edgeworth 等^[8]提出了一种自适应迭代采样算法,在该算法中,测量点的数目和分布是通过一个逐渐增加采样点的迭代插值过程确定的。Ascione 等^[9]提出了一种基于 Kriging 模型的自适应采样方法,在该算法中,通过预先测量点和拟合偏差建立 Kriging 预测模型,通过 Kriging 模型预测的偏差确定新加入点。Chen 等^[10]提出了一种基于高斯模型的采样方法,在该算法中,通过预先测量点训练高斯模型,以高斯模型推理的最大不确定度点作为新加入点,重复此过程直至最大不确定度在给定阈值内。Yu 等^[11]用一个包含误差的模型替代名义 CAD 模型,通过与 Edgeworth 算法类似的迭代过程实现自由曲面测点的自适应分布。Ainsworth 等^[4]对已知 CAD 模型的自由曲面提出了一种自适应细分采样方法。Xu 等^[12]通过建立一个定位不确定性模型确定测量点的数量和位置。Obeidat 等^[13]研究了一种自由曲面智能采样方法,该方法通过两步确定点的分布:①根据面片的最大最小高斯曲率采样关键点;②根据关键点的分布确定新加入点。Ren 等^[14]提出了一种基于网格曲线的自由曲面自适应采样方法。

对自由曲面直接采样,算法较复杂,而且容易导致采样点分布散乱,对后续测量路径规划增加困难。基于“曲面-曲线-测点”思想,将自由曲面的测量转化为一组自由曲线的测量是自由曲面测量的研究热点。Elkott 等^[15]提出一种复杂加工曲面的等参数线采样方法,给出了两种确定等参数线的方法:基于曲率变化的方法和等平面法。何改云等^[16]通过平行于 v 向或 u 向的曲面边界线获得所需测量的截交线,用 Li 的算法对各截交线采样测量点,最终实现自由曲面测点的自适应分布;之后又对曲线采用算法做了改进^[17],通过建立曲线段的 n 次曲率质量矩模型,以质量矩的等分实现曲线采样点的自适应分布。Jiang 等^[18]通过建立叶片的前后缘线,用弦公差准则确定叶片被测截面线数目和位置、截面线上测点的数目

和位置。程云勇等^[19]研究了针对叶片弯扭变形的叶片截面线采样方法。通过两种叶片截面线计算,证明等弦高采样的弯扭变形计算精度高于等弧长采样和等参数采样。Magdziak^[20]根据叶型参数估算精度给出了叶片截面线采样点数和采样间距的建议值,该建议值仅限于等步长采样。张现东等^[21]针对叶型截面线提出了一种分段曲率采样算法,通过实例计算证明分段曲率采样算法优于等参数采样和混合采样。

叶片的CAD模型是通过大量平行截面沿积叠轴叠加放样设计而成,因此,等高线测量法是复合叶片设计知识的测量方法,也是主流的测量方法;而且等高线测量法也便于测量叶型轮廓度误差、估算叶型参数和叶片逆向建模等。叶片等高线测量主要涉及两个问题:

- 1) 被测截面数目和位置的选取;
- 2) 截面采样点数目和位置的选取。

针对这两个问题,本文研究了基于反应叶片弯曲扭转变形、截面弦长变化的前缘线和后缘线的被测截面优化选取算法和截面采样点的优化选取算法,并通过多个叶片模型的测量实验证明本文优化算法的高精度和效率。

1 采样算法

1.1 杠杆平衡系统

杠杆平衡系统在自由曲线曲面采样中有广泛的应用,如图1所示,杠杆平衡条件满足 $m_i = m_{i+1}$ ($i = 0, 1, \dots, n-2$),其中 m_i 是点 i 和点 $i+1$ 之间曲线段的“质量”。

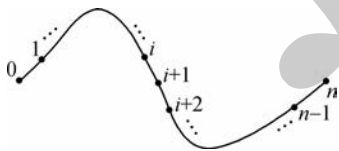


图1 自由曲线采样点

Fig.1 Sample points of a freeform curves

根据 m_i 的不同计算方式,可实现不同的采样方法:

等参数采样

$$m_i = t_{i+1} - t_i \quad (1)$$

等弧长采样

$$m_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \|C'(t)\|_2 dt \quad (2)$$

等弦公差采样

$$m_i \approx \frac{2 - \sqrt{4 - \kappa(t_i)^2 l_i^2}}{2\kappa(t_i)} \quad (3)$$

曲率采样

$$m_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \kappa(t) dt \quad (4)$$

加权曲率采样 1

$$m_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\kappa(t) + \lambda] dt \quad \lambda \geq 0 \quad (5)$$

加权曲率采样 2

$$m_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[\frac{\kappa(t) - \kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}} + \lambda \right] dt \quad \lambda \geq 0 \quad (6)$$

曲率-弧长采样

$$m_i = (1 - \lambda) \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \kappa(t) dt}{\int_0^1 \kappa(t) dt} + \lambda \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \|C'(t)\|_2 dt}{\int_0^1 \|C'(t)\|_2 dt} \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (7)$$

式(1)~式(7)中, $C(t)$ 是曲线方程; t 为曲线参数, $t \in [0, 1]$; $\kappa(t)$ 为参数 t 处曲线的曲率, $\kappa(t) = \frac{|C'(t) \times C''(t)|}{|C'(t)|^3}$; l_i 为点 i 和点 $i+1$ 间弧线的长度; $\kappa_{\max}$ 和 $\kappa_{\min}$ 分别为曲线 $C(t)$ 的最大曲率和最小曲率;权重系数 λ 为实数, λ 值越大,越接近于等弧长采样, λ 值越小,越接近于曲率采样。式(3)~式(7)可通过 $t=t(s)$ (s 为弧长)将曲率在参数域的积分转化为曲率沿弧长的积分,采样结果近似。式(3)~式(7)通过曲面高斯曲率或平均曲率代替 $\kappa(t)$, 曲面面积积分代替曲线弧长积分,可扩展为曲面采样算法。

Pagani 等^[22]通过自由曲线曲面采样证明曲率-弧长采样优于等参数、等弧长和曲率采样,但没有对权重系数优化;加权曲率采样 1 算法适用性不强,因为不同曲线曲率差别很大。因此,本文主要对比其余 6 种算法。

1.2 优化采样算法

上述采样算法,由于没有考虑曲线挠率信息,对空间自由曲线采样效果并不理想;而且,对权重系数 λ 的优化算法鲜有学者研究。针对上述算法的不足,本文提出如下采样算法,并给出了权重系数 λ 的优化算法。

$$m_i = (1 - \lambda) \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \sqrt{\kappa(t)^2 + \tau(t)^2} dt}{\int_0^1 \sqrt{\kappa(t)^2 + \tau(t)^2} dt} + \lambda \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \sqrt{\kappa(t)^2 + \tau(t)^2} dt}{\int_0^1 \sqrt{\kappa(t)^2 + \tau(t)^2} dt}$$

$$\lambda \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} \|C'(t)\|_2 dt}{\int_0^1 \|C'(t)\|_2 dt} \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (8)$$

式中 $\tau(t)$ 是曲线 $C(t)$ 在参数 t 的挠率, $\tau(t) = \frac{[C'(t), C''(t), C'''(t)]}{[C'(t) \times C''(t)]^2}$ 。

B 样条插值精度是比较公认的采样精度评价指标,由于 B 样条插值误差与插值节点矢量的数学关系式未知,B 样条插值误差与 λ 的映射关系的连续性无法证明,本文采用如下流程对 λ 进行优化,见图 2。

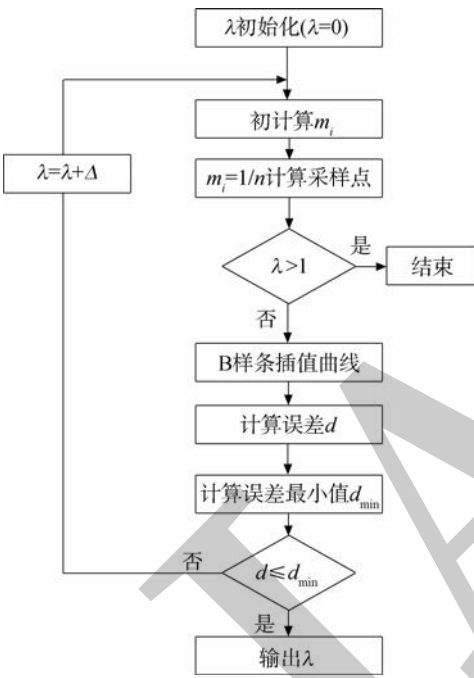
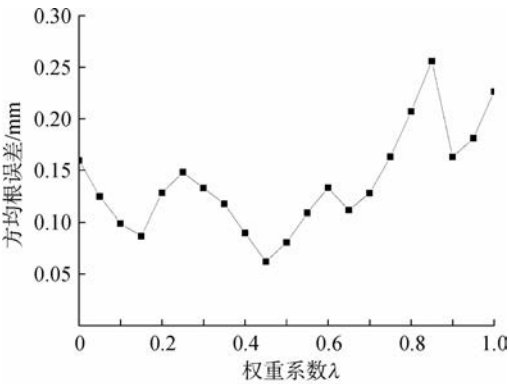


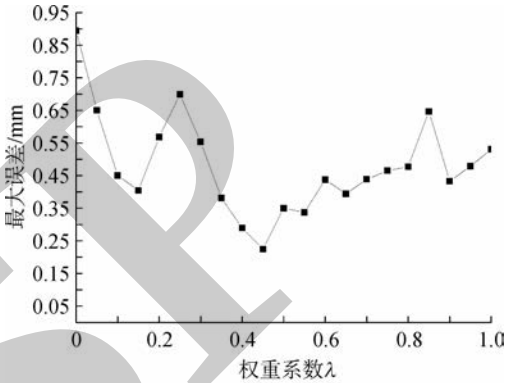
图 2 权重系数优化流程

Fig. 2 Flow chart of weights optimization process

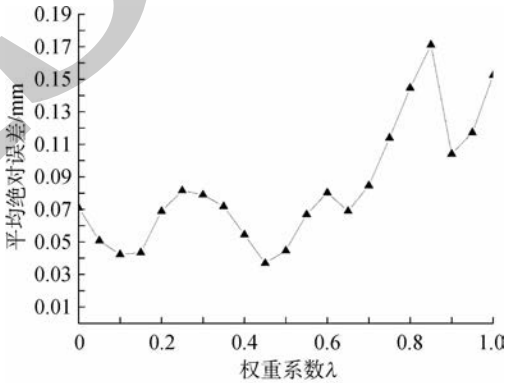
以某型号叶型线为例,取采样点数为 20,增量 $\Delta=0.05$,权重系数优化结果如图 3 所示,优化采样点分布如图 4 所示。



(b) 采样点B样条插值曲线的方均根误差



(c) 采样点B样条插值曲线的最大误差



(d) 采样点B样条插值曲线的平均绝对误差

图 3 权重系数优化示例

Fig. 3 An example of weights optimization

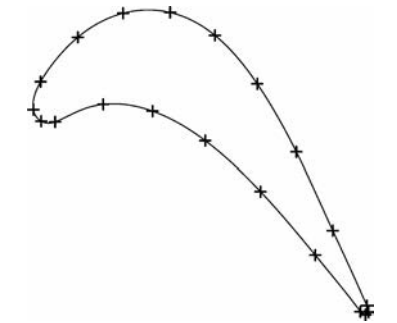
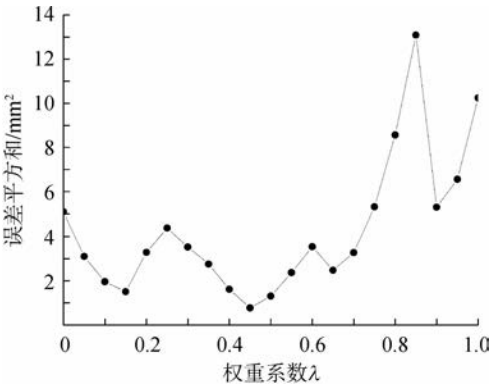


图 4 曲率-弧长采样点分布(λ=0.45)

Fig. 4 Distribution of curvature-arc sampling points

(λ=0.45)



(a) 采样点B样条插值曲线的误差平方和

从图 3 可以看出,采样点 B 样条插值曲线的误差平方和、方均根误差、平均绝对误差随权重系数 λ 的变化趋势一致,在 $\lambda=0.45$ 时取得最小值;最大误差也是在 $\lambda=0.45$ 时达最小值;4 种误差优化结果一致,后文使用方均根误差优化 λ 。从图 4 可以看出,优化后采样点在大曲率处分布密,小曲率处分布相对稀疏,而且没有长距离没有采样点的情况,采样点分布合理。

2 叶片被测截面选取

叶片被测截面的选取应考虑叶片的弯曲、扭转变形和截面变化,前缘线(叶片前缘点组成的曲线)、后缘线(叶片后缘点组成的曲线)及其相对位置可以反映叶片的弯扭变形和截面的变化,因此本文通过前后缘线来计算叶片的被测截面。算法如下:

- 1) 计算叶片前后缘线,给定测点数 n ;
- 2) 通过优化采样算法对前(后)缘线采样点 $z_j(j=0,1,\cdots,n-1)$;
- 3) 将点 z_j 沿水平方向向后(前)缘线投影,投影点为 z'_j ;
- 4) 计算点 z'_j 和 z'_{j+1} 间后(前)缘线质量 m_j 及质量算数平均值 $\bar{m}$ 。
- 5) 如果 $\frac{|m_j-\bar{m}|}{\bar{m}} \geq \delta$ (δ 为正数), z'_j 和 z'_{j+1} 的质量中点作为新采样点插入后(前)缘线采样点集,重新排序并转到步骤 4); 如果 $\frac{|m_j-\bar{m}|}{\bar{m}} < \delta$, 则退出。 z'_j 所在截面为该叶片被测截面。

以某型号叶片为例,取 $n=9, \delta=0.75$, 被测截面计算结果如图 5 所示。

图 5(b)可以看出,优化采样计算的被测截面随着叶片的弯扭变形自适应分布。对被测截面通

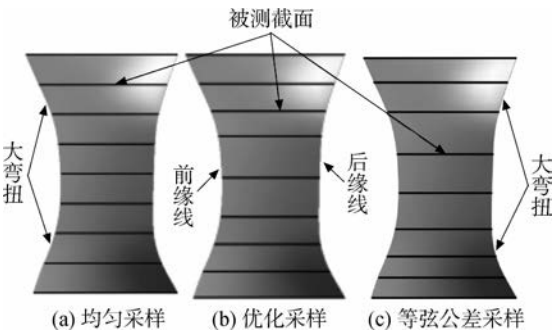


图 5 大弯扭叶片被测截面对比

过曲线组重构叶片模型,与 CAD 模型一起导入 Geomagic 软件计算误差,结果如表 1 所示。优化采样的重构叶片的最大误差、平均绝对误差及标准差均小于等弦公差采样和均匀采样,相比于均匀采样最大重构误差减小 19.9%。

表 1 叶片重构误差对比
Table 1 Comparison of the reconstruction errors for blade

采样方法	最大误差/mm	平均绝对误差/mm	标准差/mm
均匀采样	0.196	0.032	0.027
优化采样	0.157	0.020	0.017
等弦公差	0.182	0.024	0.018

3 叶片截面线采样

优化采样算法对叶型 I 和叶型 II 采样(图 6)测量点以最大拟合误差和平均绝对拟合误差作为评价指标,并与 1.1 节中等参数采样、等弧长采样、等弦公差采样、曲率采样、加权曲率采样 2($\lambda=0.1$)对比。叶型 I 和叶型 II 的最大拟合误差和平均绝对拟合误差分别见表 2、表 3、图 7 和表 4、表 5、图 8。

把等参数采样、等弧长采样、等弦公差采样、曲率采样、加权曲率采样 2 视为现有采样算法,将优化采样算法与现有采样算法中的最好结果进行对比。从表 2、表 3 和图 7 可知,叶型 I 在采样点数为 20~200 时,优化采样算法最大拟合误差减小 13.3%~73.7%,平均绝对拟合误差减小 32.8%~80.1%,采样点数越少,优化采样算法优势越明显。从表 4、表 5 和图 8 可知,叶型 II 在采样点数为 50~200 时,优化采样算法最大拟合误差减小 11.2%~60.9%,平均绝对拟合误差减小 27.3%~96.5%。



图 6 叶型 I、叶型 II 和优化采样点

Fig. 6 Blade profile I, II and their optimal sampling points

Fig. 5 Comparison of measured sections of blade with large torsion

表 2 叶型 I 采样点最大拟合误差

Table 2 Maximal fitting error of blade I sampling points

采样 点数	最大拟合误差/mm					
	等参数采样	等弧长采样	曲率采样	等弦公差采样	加权曲率采样 2	优化采样
20	0.516	0.552	0.450	0.236	0.223	0.102
50	0.301	0.355	0.150	0.038	0.049	0.010
100	0.137	0.151	0.046	0.010	0.010	0.003
150	0.048	0.044	0.026	0.0015	0.002	0.0013
200	0.016	0.020	0.026	0.001	0.0008	0.0006

表 3 叶型 I 采样点平均绝对拟合误差

Table 3 Mean absolute fitting error of blade I sampling points

采样 点数	平均绝对拟合误差/mm					
	等参数采样	等弧长采样	曲率采样	等弦公差采样	加权曲率采样 2	优化采样
20	0.037	0.036	0.103	0.039	0.022	0.015
50	0.0107	0.0106	0.025	0.004	0.003	0.0006
100	0.0023	0.0025	0.014	0.0005	0.0006	0.0002
150	0.00078	0.00072	0.001	0.0001	0.00013	0.00006
200	0.00021	0.00027	0.0009	0.00007	0.00004	0.00002

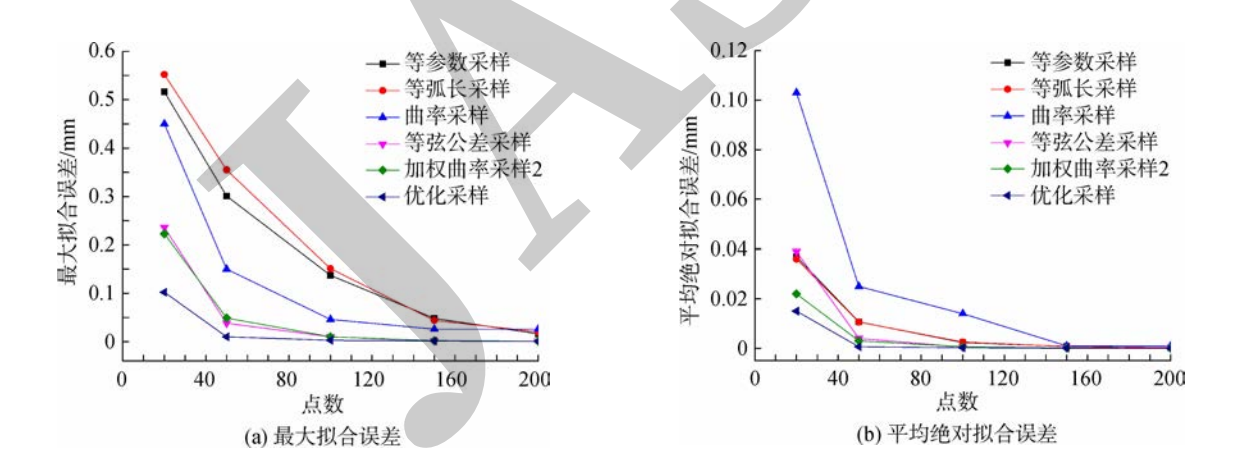


图 7 叶型 I 拟合误差

Fig. 7 Fitting errors of blade I

表 4 叶型 II 采样点最大拟合误差

Table 4 Maximal fitting error of blade II sampling points

采样 点数	最大拟合误差/mm					
	等参数采样	等弧长采样	曲率采样	等弦公差采样	加权曲率采样 2	优化采样
50	0.568	0.566	0.1750	0.0620	0.0410	0.0364
100	0.282	0.279	0.0323	0.0126	0.0069	0.0027
150	0.095	0.094	0.0280	0.0054	0.0051	0.0022
200	0.041	0.040	0.0260	0.0048	0.0046	0.0019

表 5 叶型Ⅱ 采样点平均绝对拟合误差
Table 5 Mean absolute fitting error of blade Ⅱ sampling points

采样点数	平均绝对拟合误差/mm					
	等参数采样	等弧长采样	曲率采样	等弦公差采样	加权曲率采样 2	优化采样
50	0.02900	0.03000	0.0398	0.0048	0.0044	0.0032
100	0.00787	0.00789	0.0053	0.0021	0.0020	0.0002
150	0.00420	0.00420	0.0041	0.0018	0.0019	0.0001
200	0.00240	0.00250	0.0027	0.0017	0.0018	0.0006

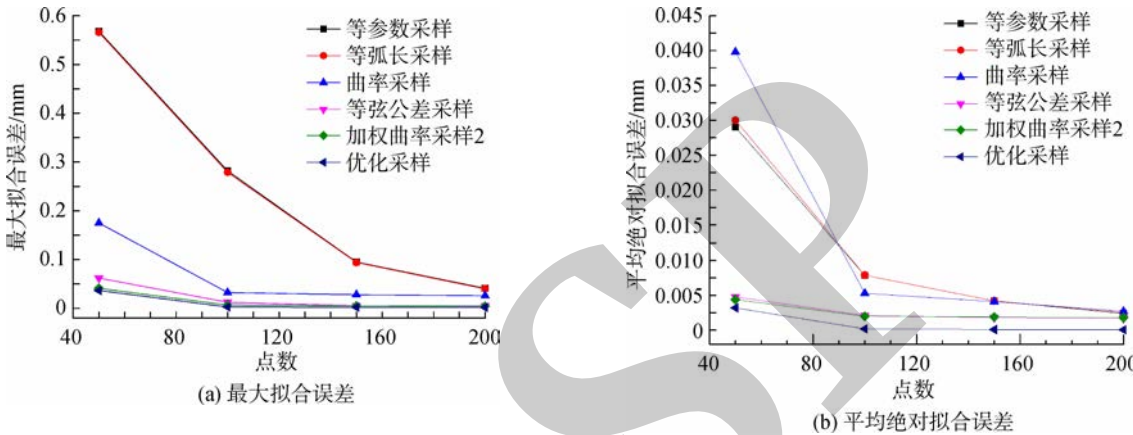


图 8 叶型Ⅱ 拟合误差
Fig. 8 Fitting errors of blade Ⅱ

4 叶片采样实验

本节通过 3 个不同实体叶片模型来验证优化采样算法的准确性。如图 9 所示,其中图 9(a)叶片Ⅲ是压气机叶片部分,图 9(b)是叶片Ⅲ优化采样点,图 9(c)叶片Ⅳ是涡轮动叶部分,图 9(d)是

叶片Ⅳ优化采样点。分别采用优化采样算法和测量实践中传统采样方法规划叶片Ⅲ和叶片Ⅳ的采样点,通过采样点重构叶片三维模型,导入 Geomagic 软件并与 CAD 模型比较,得到重构叶片的最大重构误差和平均绝对重构误差,结果见表 6、表 7。

通过表 6、表 7 可以看出:叶片Ⅲ,传统采样法需要大约 4600 个点,而优化采样法只需 484 个

表 6 叶片Ⅲ 采样点重构误差对比

采样方法	截面数	截面点数	最大误差/mm	平均绝对误差/mm
传统采样	23	200	0.089	0.005
优化采样	11	44	0.092	0.008

表 7 叶片Ⅳ 采样点重构误差对比

采样方法	截面数	截面点数	最大误差/mm	平均绝对误差/mm
传统采样	13	200	0.016	0.002
优化采样	5	40	0.019	0.003

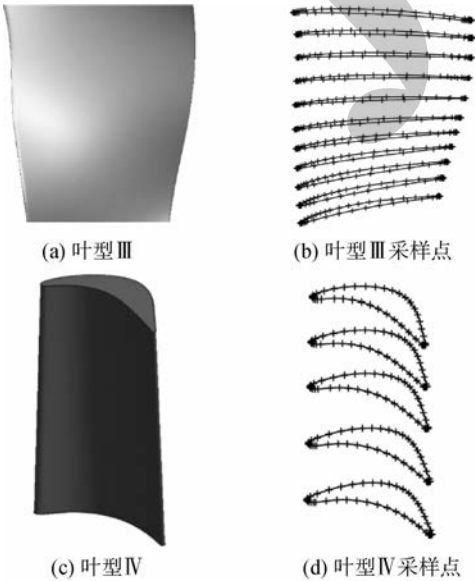


图 9 叶片Ⅲ、Ⅳ及优化采样点

Fig. 9 Blade Ⅲ, Ⅳ and optimal sampling points

点,而且优化采样法的重构误差略大于传统采样法的重构误差,但仍满足叶片Ⅲ的设计要求;对叶片Ⅳ,传统采样法需要大约 2 600 个点,而优化采样法需要 200 个点,优化采样法重构误差与传统采样法重构误差极为接近,满足叶片Ⅳ设计要求。优化采样法能在保证准确度的前提下减少 92.3%的采样点数,因此,优化采样法可以更好地平衡叶片三坐标测量的准确度和效率。

叶片Ⅴ为涡轮导叶,分别采用传统采样法和优化采样法规划采样点(图 10),通过专用夹具对导叶定位,采用青岛前哨朗普测量技术有限公司生产的三坐标测量机(型号:GLOBAL D STATUS 121510),该测量机性能稳定,支持 CAD 模型输入,数据处理方便,对每个规划点测量 3 次,以 3 次测量坐标的算术平均值作为该规划点的坐标。利用测量重构导叶三维模型,重构误差如表 8 所示。传统采样法需测量 3 000 个点,自适应采样法只需测量 366 个点,重构误差极为接近。

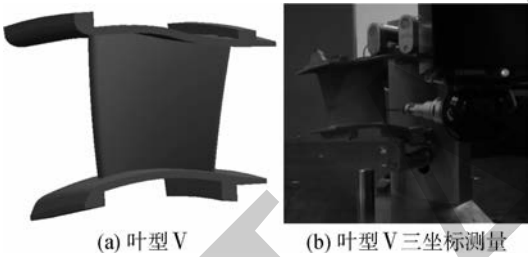


图 10 涡轮导叶三坐标测量实验

Fig. 10 Coordinate measuring machine experiment of turbine guide vane

表 8 叶片Ⅴ采样点重构误差对比

Table 8 Comparison of reconstruction errors for blade Ⅴ

采样方法	截面数	截面点数	最大误差/mm	平均绝对误差/mm
传统方法	15	200	0.128	0.029
优化采样	6	61	0.137	0.031

5 结 论

本文针对叶片大弯扭、变截面的特点,研究了一种适用于叶片三坐标测量的测点优化采样方法,通过对叶片实际模型规划测点并与现有采样方法对比,可得出如下结论:

1) 从杠杆平衡系统角度,对现有曲线采样算法做了统一的数学描述。

2) 引入挠度,使传统曲率-弧长采样方法既适用空间曲线,又适用平面曲线;并研究了曲率与弧长比例权重系数的优化方法。

3) 研究了基于前缘线、后缘线的叶片被测截面选取方法,与均匀离散方法对比,曲面重构误差减小 19.9%。

4) 通过对不同叶型采样测量点,优化采样算法明显优于等参数采样、等弧长采样、曲率采样、等弦公差采样、加权曲率采样算法。

5) 叶片三坐标测量实验表明本文提出的优化采样算法能更好地平衡叶片三坐标测量精度与效率。

参考文献:

[1] LI W,ZHOU L,YAN S J. A case study of blade inspection based on optical scanning method[J]. International Journal of Production Research,2015,53(7):2165-2178.

[2] 魏永超,赵伟. 航空发动机叶片高精度自动测量系统[J]. 航空动力学报,2017,32(3):513-518.
WEI Yongchao,ZHAO Wei. High precision automatic measurement system for aero engine blade[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(3):513-518. (in Chinese)

[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.
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. (in Chinese)

[4] AINSWORTH I,RISTIC M,BRUJIC D. CAD-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2000,16(1):23-31.

[5] LI S Z. Adaptive sampling and mesh generation[J]. Computer-Aided Design,1995,27(3):235-240.

[6] LAI Xinmin,LI Zhongqin,ZHAO Ziping. A study of a reverse engineering system based on vision sensor for free-form surfaces[J]. Computers and Industrial Engineering, 2001,40(3):215-227.

[7] ELKOTT D F,ELMARAGHY H A,ELMARAGHY W H. Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces[J]. International Journal of Production Research,2002,40(11):2653-2676.

[8] EDGEWORTH R,WILHELM R G. Adaptive sampling for coordinate metrology[J]. Precision Engineering,1999,23(3):144-154.

[9] ASCIONE R,MORONI G,PETRO S, et al. Adaptive inspection in coordinate metrology based on Kriging models [J]. Precision Engineering,2013,37(1):44-60.

[10] CHEN Y,PENG C. Intelligent adaptive sampling guided

- by Gaussian process inference[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105005. 1-105055. 11.
- [11] YU Mingrang, ZHANG Yingjie, LI Yunlong, et al. Adaptive sampling method for inspection planning on CMM for free-form surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(9/10/11/12): 1967-1975.
- [12] XU Y, LI Z. Method for determining the probing points for efficient measurement of freeform surface[J]. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 2008, 2(3): 187-192.
- [13] OBEIDAT S M, RAMAN S. An intelligent sampling method for inspecting free-form surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(11/12): 1125-1136.
- [14] REN M, KONG L, SUN L, et al. A curve network sampling strategy for measurement of freeform surfaces on coordinate measuring machines[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(11): 3032-3043.
- [15] ELKOTT D F, VELDHUIS S C. Isoparametric line sampling for the inspection planning of sculptured surfaces[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(2): 189-200.
- [16] HE G Y, JIA H Y, GUO L Z, et al. Adaptive sampling strategy for free-form surface based on CAD model[R]. *Advanced Materials Research*, 2012, 542-543(10): 541-544.
- [17] 何改云, 季彩霞, 郭龙真, 等. 基于等矩策略的自由曲面测量方法误差分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(2): 128-133.
- HE Gaiyun, JI Caixia, GUO Longzhen, et al. Analysis of measurement method error in freeform surface based on equal moment strategy[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(2): 128-133. (in Chinese)
- [18] JIANG Ruisong, WANG Wenhui, ZHANG Dinghua, et al. A practical sampling method for profile measurement of complex blades[J]. *Measurement*, 2016, 81: 57-65.
- [19] 程云勇, 朱真真, 李维亮, 等. 面向叶片弯扭变形分析的测量采样方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(6): 1329-1335.
- CHENG Yunyong, ZHU Zhenzhen, LI Weiliang, et al. Measurement sampling method oriented to blade bending and torsion deformation analysis[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(6): 1329-1335. (in Chinese)
- [20] MAGDZIAK M. The influence of a number of points on results of measurements of a turbine blade[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2017, 89(6): 953-959.
- [21] 张现东, 卜昆, 程云勇, 等. 基于 CMM 的叶片测点采样分布方法研究[J]. *锻压技术*, 2012, 37(4): 137-141.
- ZHANG Xiandong, BU Kun, CHENG Yunyong, et al. Research on CMM-based measuring points' sampling and distribution method of blades[J]. *Forging and Stamping Technology*, 2012, 37(4): 137-141. (in Chinese)
- [22] PAGANI L, SCOTT P J. Curvature based sampling of curves and surfaces[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2018, 59: 32-48.

(编辑: 陈 越)