

# 基于自适应采样的叶型曲面在机测量方法

袁 布, 陈光胜

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年12月30日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

## 摘 要

采样策略是影响航空发动机叶片复杂曲面在机测量效率的关键因素, 本文以航发涡轮叶片为研究对象, 针对五轴在机测量平台在测量叶片的曲面形状特性问题提出了一种基于模拟退火算法的等 $r$ 次距最优自适应采样, 根据曲面的几何特征, 自适应确定检测点的分布。仿真分析了曲率采样法和均匀采样法的采样结果, 对比表明, 本文自适应采样方法在相同采样点数的情况下, 测量误差小, 重构表面精度高, 满足在机测量的精度和效率要求。通过对加工叶片进行在机测量实验, 验证了本文方法对叶型曲面轮廓采样的有效性和可行性。

## 关键词

涡轮叶片, 在机测量实验, 模拟退火算法, 自适应采样

# On-Machine Measurement Method of Profile Surface Based on Adaptive Sampling

Bu Yuan, Guangsheng Chen

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 30<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Sampling strategy is a key factor affecting the efficiency of complex surface of aero-engine blade's on-machine measuring. In this paper, taking aero-engine turbine blade as the research object, an optimal adaptive sampling with equal  $r$  intervals based on simulated annealing algorithm was proposed for the surface shape characteristics of the five-axis on-machine measurement platform. The distribution of detection points was determined adaptively according to the geometric characteristics of the surface. The results of curvature sampling method and uniform sampling method are simulated and analyzed. The comparison shows that the adaptive sampling method in this pa-

per has small measurement error and high surface reconstruction accuracy under the condition of the same number of sampling points, which meets the requirements of accuracy and efficiency of on-machine measurement. The effectiveness and feasibility of the proposed method for sampling the profile of the blade surface were verified by measuring the blade in machine.

## Keywords

Turbine Blade, On-Machine Measurement Experiment, Simulated Annealing Algorithm, Adaptive Sampling

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着航空航天工业的飞速发展,大推力涡扇发动机已成为研究的热点[1]。发动机的涡轮叶片作为核心部件之一,其气动性能、尺寸精度以及表面精度,叶片的加工设计和测量都有比较高的要求,所以在叶片工序间进行测量,完成工步切削余量获取及加工路径的修正是必要的[2]。在机测量是加工过程中验证工件形状质量关键技术,在不拆卸夹具的条件下能够检测零件测量点得到几何轮廓,不引入装夹误差的情况下又能增加效率[3]。对于曲面较为复杂,曲率变化明显的曲面,能准确地反映曲面几何型特征并进行高效高精度测量是评价在机测量方法的标准。

目前工程上广泛应用的采样方法有等参数法、等弧长法以及等弦高法[4] [5]。在一些简单的曲面上这些采样方法可以有很好的效果,但对于较为复杂、曲率变化大的曲面,这些方法不能较好的反映曲面特征。为了解决曲面测量测点布置的合理性与测量精度和效率以及叶片重构模型的准确度,国内外学者在采样策略及其应用方面进行了研究。

高峰等人[6]提出了一种基于弯矩理论的自适应曲面采样方法。与不同方法的采样结果比较表明,该方法可以实现采样点的精确调整。赖金涛等[7]利用样条曲线敏感点,根据机床中测量的曲面坐标数据,控制实际加工面的拟合。阎述学等[8]提出了一种基于高斯过程回归的自适应采样方法,并通过比较高斯过程回归中回归推理的特点确定了合适的采样间隔。国外学者 Guo 等人[9]在研究三坐标测量机叶片的自适应采样方法时,定义了叶片的主要特征点,然后根据这些主要特征点计算了采样点在叶片截面上的位置。Suleiman 等人[10]通过区域划分对高斯曲率特征参数进行自适应采样,由质心结构及其质心密度函数提出的自适应算法提供了一种新的思路。Zahmati J 等人[11]提出了一种基于粒子群算法的自适应采样方法,与均匀采样方法作对比,结果表明能显著降低被测表面及其重建模型的偏差。

本文针对叶片在机测量的采样方法问题进行了研究,使用了基于模拟退火算法的等  $r$  次距最优采样。通过仿真对理论曲线点集中的待测点进行了全局优化求解和提取,最终以实际叶片的在机测量为例,算法能满足采样精度并提高了测量效率,证明了其有效性和可行性。

## 2. 基于弯矩理论的自适应采样

涡扇叶片表面具有大的曲率变化和扭角变化的特点,在叶片前缘和后缘曲率较大,叶盆和叶背曲率较小且叶片各处弯曲度不同,对于叶片曲面上曲线如果采样点过于密集的分布在曲率较高的区域,则会大大降低采样点的利用率,因此需要有这样一个采样算法,既要能保证曲线的自适应度,也要能保证采

样点的利用率。本文利用弯矩理论在全局内均衡曲面特征, 研究能够匹配弯曲度变化的涡扇叶片曲面轮廓的自适应采样方法。

## 2.1. 基于 $r$ 次等矩法的曲线采样

对于分成  $n$  段的曲线, 等矩法采样要求对于曲线上任意相邻的三点  $P_{j-1}$ 、 $P_j$ 、 $P_{j+1}$  组成的曲线段,  $P_{j-1}P_j$  曲线段对  $P_j$  的质量矩应该等于  $P_jP_{j+1}$  曲线段对  $P_j$  的质量矩:

$$M_{P_j}(P_{j-1}P_j) = M_{P_j}(P_jP_{j+1}) \quad (j = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

若一些自由曲线在采样时既需要对该曲线按照曲率自适应采样, 又需要该曲线上采样点的分布能保证一定的间距, 那么就需要在算法中添加一个参数来调节曲率自适应度, 因此普通等矩法可以推广为等  $r$  次矩采样法, 即:

$$M_O^r(AB) = \left| \int_A^B k(x) S_O^r dS \right| = \left| \int_{x(A)}^{x(B)} k(x) [S(x) - S(O)]^r \dot{S}(x) dx \right| \quad (2)$$

为了有效表达轮廓信息, 将曲线离散化成大量的点云, 点云之间的弧长近似为两点直线距离。如图 1 所示为三个相邻采样点  $P_{j-1}P_jP_{j+1}$  曲线段上的离散点云, 采样点之间的等效质量距由点云累加质量距获得, 则算法的数学面模型可表示为:

$$M = \sum_{i=P_{j-1}}^{P_j} k_i d_{iP_j}^r = \sum_{i=P_j}^{P_{j+1}} k_i d_{iP_j}^r \quad (3)$$

式中  $k_i$  为个离散点的曲率;  $d_{iP_j}$  为离散点到  $P_j$  采样点的离散弧长。

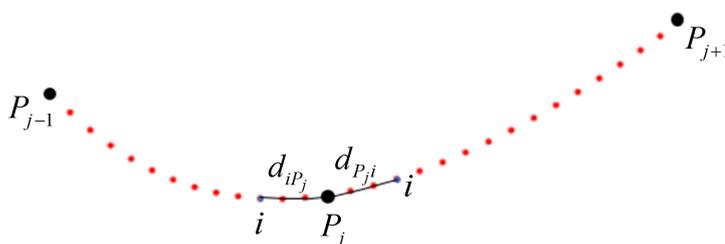


Figure 1. Discrete point cloud isometric sampling diagram  
图 1. 离散点云等矩采样示意图

在等  $r$  次矩采样算法中, 指数  $r$  的作用是调节算法对曲线采样的自适应程度, 可以看出, 指数  $r$  越大, 采样算法的自适应程度越低, 曲线上采样点的分布越趋近于均匀采样分布, 指数  $r$  越小, 采样算法自适应程度越高, 曲线上采样点的分布越趋近于曲率采样分布。

## 2.2. 基于模拟退火的优化算法

等  $r$  次矩采样算法可以通过调节  $r$  的大小使得采样点的分布在均匀采样和曲率采样之间滑动, 对于采样精度, 利用三次样条曲线拟合采样点, 通过比较拟合后的样条曲线和原曲线理论点云来评价。样条方程通过以下条件确定: 1) 在两点之间的曲线表达式  $S(x) = S_i(x)$  都是三次多项式。2) 所有离散点都在该段多项式曲线上。3) 函数  $S(x)$ , 导数  $S'(x)$ , 以及二阶导数  $S''(x)$  在  $[a, b]$  区间上连续。选择边界条件为自由边界, 即  $S''(x) = 0$ , 由以上条件可以确定样条方程表达式。曲面测量误差结果以均方根误差(RMSE)作为评价指标。

在给定采样点数目一定的情况下, 由于式中  $r$  值不同, 其采样点的分布也会有所不同, 那么可以通

过对  $r$  进行搜索, 找到给定采样点数在曲线上的最优分布。因此基于上述分析, 对于给定的采样点数  $N$ , 设其最优采样点的集合为  $V_N$ , 结合式, 可以得到关于  $r$  的最优采样的目标评价函数:

$$V_N = \text{RMSE}(r) = \arg \min F(r) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad (4)$$

对于以  $r$  为参数的一维优化求解过程, 常有的优化算法有穷举法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。其中穷举法搜索效率相对低, 对于测量的求解和在机测量的时间有所影响; 而粒子群算法可能会陷入局部解; 本文采用模拟退火算法进行优化求解, 相比之下计算过程简约、算法鲁棒性强, 适合并行处理, 可以求解复杂的非线性优化问题, 对于曲面拟合误差的全局优化有明显优势。其具体步骤为:

1) 设定初始温度  $T_0$ , 利用温度衰减函数  $T = \alpha^t T_0$  表示, 其中  $\alpha$  为温度衰减系数,  $t$  为退火温度迭代次数。

2) 以测量的均方根误差(RMSE)为优化目标函数, 参数  $r$  为解空间。设置初始解  $r_0$ :  
 $r_0 = r_a + (r_b - r_a) \times \text{rand}(1)$ 。其中  $\text{rand}(1)$  为 0~1 内的随机数,  $r_a$ 、 $r_b$  为解空间的下界和上界。

3) 基于蒙特卡罗思想在当前解的基础上增加一个扰动, 并且该扰动与当前温度  $T$  有关:

$$r' = r + \text{rand}(1) \times T, \quad r_a \leq r' \leq r_b \quad (5)$$

然后将新解带入到式(5.17)中计算出目标函数值  $F(r')$ 。规定若  $F(r') < F(r)$ , 则接受新解为当前解, 否则根据 Metropolis 准则来决定是否接受新解, 计算概率  $p$ :

$$p = e^{-\frac{F(r) - F(r')}{T}} \quad (6)$$

将概率  $p$  与随机数  $\text{rand}(1)$  进行比较, 若  $\text{rand}(1) < p$ , 则接受新解为当前解, 反之则拒绝。同时将历史最优解记为  $r_{best}$ , 并记录储存其对应的采样点集合  $V_{best}$ 。

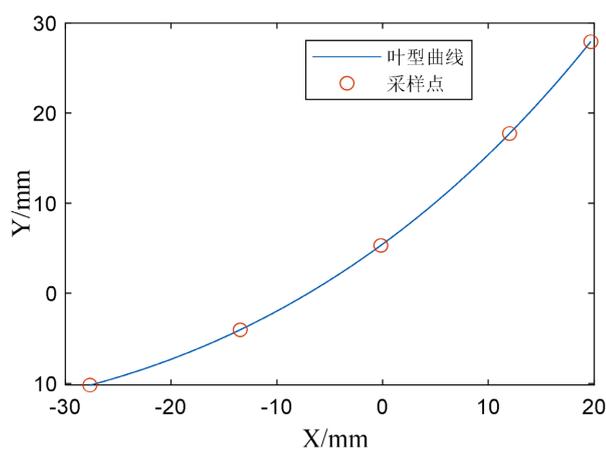
4) 在每一个温度  $T$  下, 根据马尔科夫链的长度  $L_k$  重复步骤(3), 再利用温度衰减函数进行对  $T$  进行更新, 循环直至达到终止温度。

上述模拟退火算法可以实现对曲线的最优采样, 其能够优化出在给定采样点数量下  $r$  的最优解和采样点集合  $V$  的最优分布。由于该算法能够跳出局部最优解, 最终达到全局最优解。

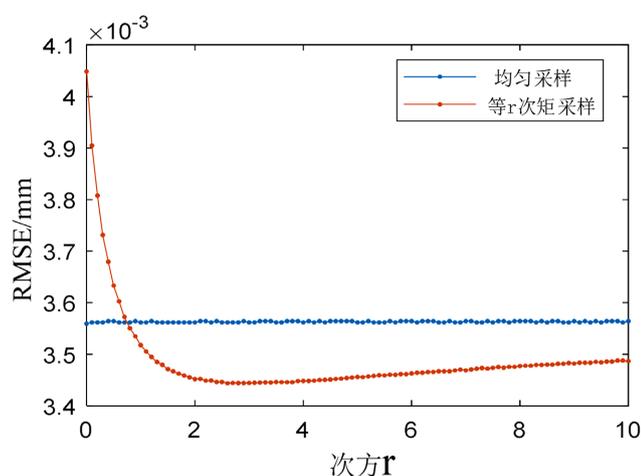
### 3. 采样仿真

使用截平面法对测量结果进行评价, 以叶盆曲线为测量对象, 采用均匀采样算法、等距采样算法及曲率采样法进行采样, 并对这三个算法得到的采样点使用三次样条曲线进行拟合插值。以 5 个采样点为例, 采样点在曲线上的坐标分布如图 2 所示, 曲线为叶片等高截面轮廓的叶盆部分。

采样方法的仿真对比图如图 3 所示, 横坐标为次数  $r$ , 纵坐标是拟合误差方差。其中可以看到均匀采样的均方根误差 RMSE 在区间内微小变化, 这是由于当曲率不起采样调节作用时, 距离的  $r$  次方无论怎么变化都是均匀采样, 因此可近似认为是一条与横坐标轴平行的直线; 而等  $r$  次距采样算法中, 调节算法对曲线采样的自适应程度的指数  $r$ , 其值为 0 时可以看作是曲率采样, 此时其误差大于均匀采样, 但当  $r$  逐渐增大, 其均方根误差值迅速减小, 其值在 3 左右后误差趋近于直线, 也证明了次数越高自适应性越低, 越趋近于均匀采样。等  $r$  次采样的均方根误差最终趋势小于均匀采样的均方根误差, 这证明了该方法对曲线离散点云采样的可行性。之后利用模拟退火算法搜索最优  $r$  值, 考虑到模拟退火算法解的精度, 设定  $\alpha = 0.92$ ,  $T = 100$ ,  $L_k = 50$ , 进行搜索, 结果显示当  $r = 2.8369$ ,  $\text{RMSE} = 0.0034$ , 该搜索结果与仿真图曲线的最小值近似符合, 这证明了模拟退火算法的有效性, 表 1 为三种采样方法的仿真误差对比表, 可以看出经过模拟退火算法优化求解的等  $r$  次距采样法的均方根误差最低, 其次是均匀采样。



**Figure 2.** The distribution of sampling points on the curve  
**图 2.** 曲线上采样点分布图



**Figure 3.** Comparison diagram of sampling method simulation error  
**图 3.** 采样方法仿真误差对比变化图

**Table 1.** Sampling method simulation error comparison

**表 1.** 采样方法仿真误差对比

	叶片采样方法		
	均匀采样	曲率采样	等 $r$ 次矩采样
上偏差/mm	0.0081	0.0086	0.0082
下偏差/mm	-0.0035	-0.0062	-0.0034
均方差(RMSE)/mm	0.0036	0.0040	0.0034

对于算法的鲁棒性, 包括采样点数的选取、待测对象的曲面特性对测量结果的影响, 可以利用曲率变化较大的样条曲线作为叶片曲线进行采样仿真, 在控制采样点数的情况下对比各个采样策略的测量结果。图 4 为不同采样点数下三种采样方法的采样仿真对比图, 从图中可以直观的看到基于模拟退火的等  $r$  次矩采样法结合了曲率采样法和均匀采样法的优点, 达到了最优采样效果。

同样设想以采样效率为考虑因素, 选取 10 个采样点和 20 个采样点为例, 各采样方法对曲线采样的

均方根误差进行整理, 其结果如表 2 所示。结合图 6 和表 2 分析, 模拟退火算法对于最优解的搜索是完全有效的, 该算法搜索到的最优  $r$  值所对应的误差也符合误差变化趋势, 采样精度相对更优。这证明了基于模拟退火的等  $r$  次矩采样方法可在给定的采样点数下搜索到最佳分布的采样点集, 可以很好反映曲线的形状。

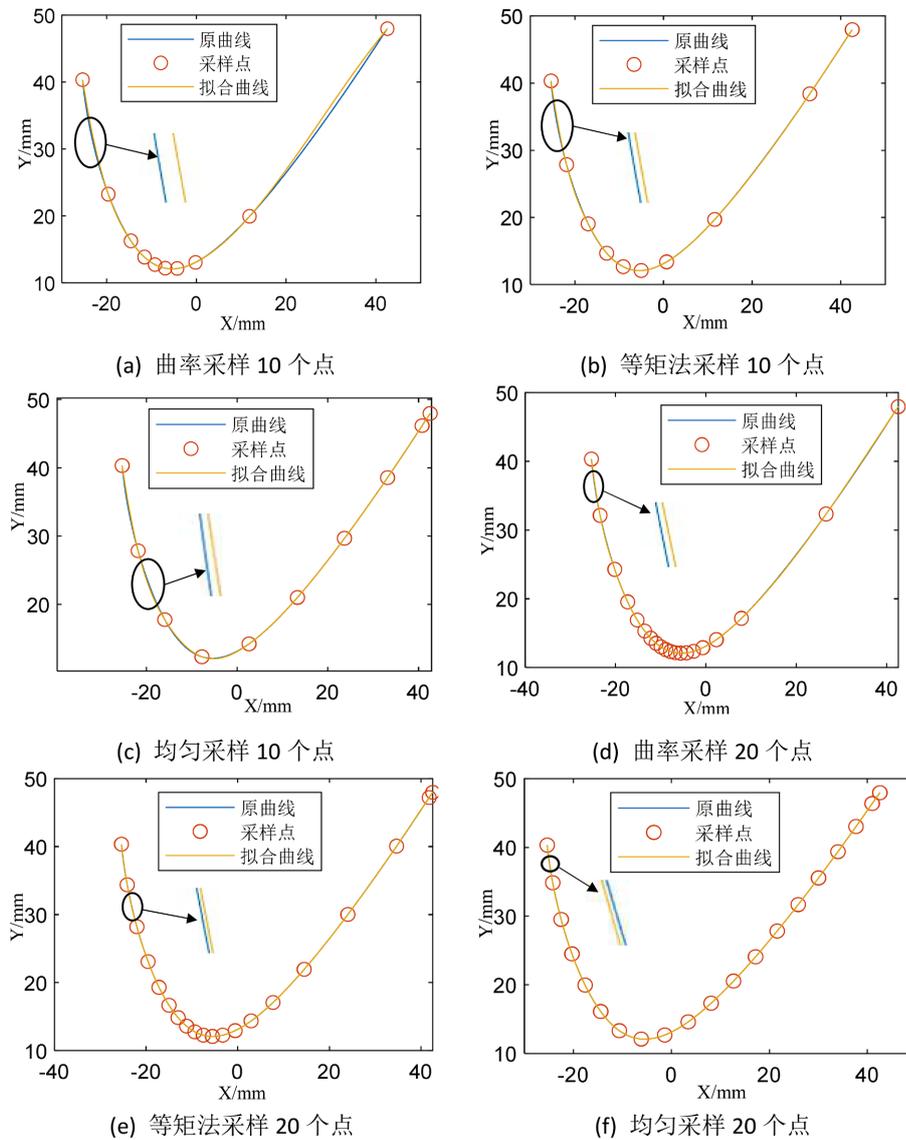


Figure 4. Simulation diagram of sampling method under different sampling  
图 4. 不同采样点数下采样方法仿真图

Table 2. Comparison of simulation results of different sampling methods  
表 2. 不同采样方法仿真结果对比

采样点数量 $N$ /个数	曲率采样法 (RMSE)/mm	均匀采样法 (RMSE)/mm	基于 SA 的等矩法 (RMSE)/mm
10	0.1296	0.0785	0.0696 ( $r = 7.1605$ )
20	0.0676	0.0373	0.0319 ( $r = 9.1551$ )

#### 4. 在机测量实验

为了验证基于模拟退火算法的等  $r$  次距采样策略对于叶片曲面的有效性, 通过对叶片的在机测量进行验证。实验采用的叶片在线检测设备为五轴数控 TC-E650 型号机床, 搭载新代数控控制系统, 接触式探针为哈尔滨先锋机电测头, 红外接触式测头及其配套红外接收器, 可以满足快速反馈的在机测量要求。实际检测过程如图 5 所示。

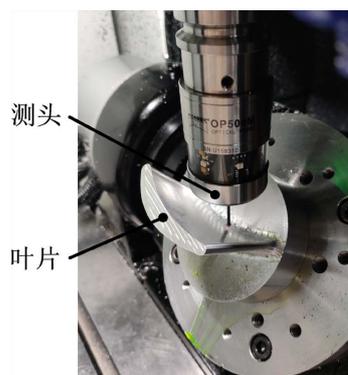


Figure 5. Experimental environment of blade contact in machine measurement  
图 5. 叶片接触式在机测量实验环境

在兼顾测量效率的情况下, 保证被测曲面的测量精度, 更好地反映曲面的轮廓误差, 每条截面轮廓线参照上述的仿真方法, 选择 10 个采样点, 在叶片叶盆曲面选择等距分布的 20 条截面线, 总计 200 个点进行测量。曲面测量点空间分布图和轮廓误差如图 6 所示。

通过实验测量, 将实际测量点与理论点的距离作为误差, 可以直观看出曲面上轮廓误差的分布以及测量的误差数值都在合理范围内, 在曲率变化较大处误差相对明显, 最大偏差为 0.092 mm, 计算得到测量的总体曲面轮廓的均方根误差为  $RMSE = 0.0351$  mm, 与上述基于模拟退火算法的等距法采样的仿真结果基本一致, 验证了截面的自适应采样法对于曲面轮廓误差评估的有效性。

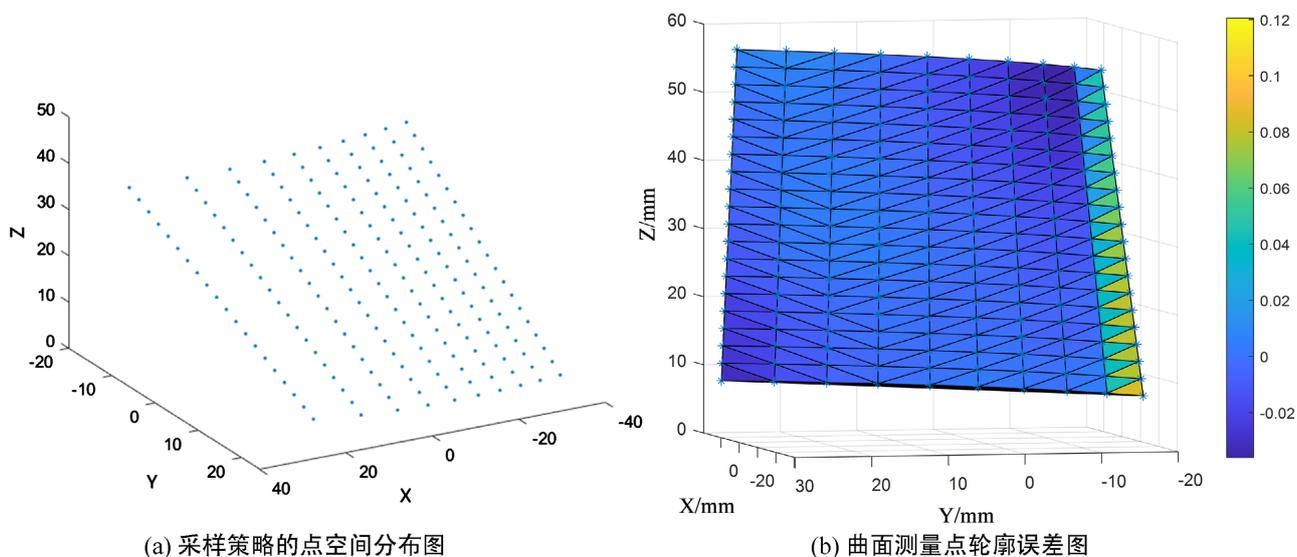


Figure 6. Surface measurement point spatial distribution diagram and contour error diagram  
图 6. 曲面测量点空间分布图和轮廓误差图

## 5. 总结

本文提出了一种基于模拟退火算法的等  $r$  次距自适应采样方法。将对曲线的等距采样方法推广到针对曲线离散点云的等  $r$  次距采样方法, 并且运用模拟退火算法对等  $r$  次距采样方法进行了全局优化求解, 提高自适应性和准确性。

对比均匀采样、曲率采样、基于模拟退火的等  $r$  次距采样, 仿真结果表明, 文中所提出的采样方法在采样点数目相同的情况下, 自适应采样方法可以及时根据曲线曲率的急剧变化以及叶片表面的平滑变化, 使采样点的分布更加合理, 并且具有更高的采样重构精度, 能够更为准确评价加工误差, 实验也验证了仿真结果, 验证了方法的可行性和有效性, 具有较好的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 史小强, 吴宝海, 张定华. 航空发动机叶片加工质量检测技术发展现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2015(12): 80-84.
- [2] 宋金榜, 易海云. 航空发动机涡轮叶片气膜孔加工工艺[J]. 工具技术, 2020, 54(12): 82-86.
- [3] 李文龙, 王刚, 田亚明, 寇猛, 李中伟. 在机测量技术与工程应用研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 14-35. <https://doi.org/10.16080/j.issn1671-833x.2022.05.014>
- [4] 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.
- [5] Zhang, Y., Chen, Z., Zhu, Z., et al. (2020) A Sampling Method for Blade Measurement Based on Statistical Analysis of Profile Deviations. *Measurement*, **163**, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107949>
- [6] 高峰, 潘子月, 张旭涛, 李艳, 张东亚, 魏晓庆. 涡扇叶片在机测量自适应采样方法研究[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20220305.1538.006.html>, 2022-12-17.
- [7] 赖金涛, 傅建中, 沈洪垚, 甘文峰. 基于 NURBS 曲面敏感点的曲面检测测点优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7): 1201-1207.
- [8] 阎述学, 李一平, 封锡盛. 一种基于高斯过程回归的 AUV 自适应采样方法[J]. 机器人, 41(2): 232-241.
- [9] Guo, F., Zhang, X., Zou, F., et al. (2019) An Adaptive Sampling Methodology for Measuring Blades with CMM Based on Dominant Feature Points. *Measurement Science and Technology*, **30**, 045007. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab019d>
- [10] Obeidat, S.M. and Raman, S. (2009) An Intelligent Sampling Method for Inspecting Free-Form Surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **40**, 1125-1136. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1427-3>
- [11] Zahmati, J., Amirabadi, H. and Mehrad, V. (2018) A Hybrid Measurement Sampling Method for Accurate Inspection of Geometric Errors on Freeform Surfaces. *Measurement*, **122**, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.013>