

“S”形检测试件测量结果可视化研究 及其软件开发*

刘福民 高 诚 冯长征

(中国航空制造技术研究院智能制造装备中心, 北京 100024)

摘 要: “S”形检测试件已成为国内航空主机厂商检验五轴联动数控机床加工性能的一项必要环节, 为方便机床调试人员分析数控机床误差, 提高调试效率, 对 S 形试件测量结果可视化进行研究。分析了 S 形试件的几何特性及现有测量方法, 通过获取 S 形试件的点云数据, 对点云数据进行预处理, 为 S 形试件测量结果的可视化奠定了基础。利用克里金插值法将试件测量点的点位误差映射到整个形面的点云上, 得到了密化的形面误差数据, 利用色谱图和分层显示的方式实现了 S 形试件测量结果的可视化显示, 并对可视化结果进行了实验验证。基于上述处理流程及相关算法, 基于 Python 语言, 开发了 S 形试件测量结果可视化软件。此种方法开发的可视化软件小巧、轻量化且可移植性强, 适合工程应用。

关键词: “S”形检测试件; 可视化; 点云; 克里金插值法; Python; 工程应用

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.08.023

Study on visualization of the measurement results for “S” shape specimen and its software development

LIU Fumin, GAO Cheng, FENG Changzheng

(Intelligent Manufacturing Innovation Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, CHN)

Abstract: The “S” shaped specimen has become a necessary step for Chinese factories to inspect the machining performance of five-axis CNC machine tools. Visualization of measurement results of the “S” shaped specimen was studied to facilitate the analysis of CNC machine tool errors and improve debugging efficiency. First, the geometric characteristics and existing measurement methods of the specimen are analyzed, the point cloud data of the specimen is obtained and preprocessed which lay the foundation for visualizing the measurement results of the specimen. Then, The Kriging interpolation method was used to map the positional errors of the measurement points onto the point cloud of the entire surface, obtaining dense surface error data. The visualization of the measurement results of the specimen was achieved using chromatograms and layered display, and then the visualization results were experimentally validated. Finally, based on the above processing flow and related algorithms, a measurement result visualization software for “S” shape specimen was developed using Python, this software is compact, lightweight, and highly portable, making it suitable for engineering applications.

Keywords: “S” shape specimen; visualization; point cloud; Kriging; Python; engineering applications

“S”形检测试件(以下简称“S形试件”)是一种用于检验五轴数控机床加工精度的试切件, 由航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司(以下简称“成飞”)提出的^[1]。该试件的提出

源于成飞的生产实践^[2], S形试件包含了大量的航空结构件的结构特征, 对数控机床的加工精度要求较高, 所以能够有效地反映出数控机床的加工精度。该试件于2020年正式发布成为国际标准^[3]。目前,

* 中国航空制造技术研究院航空智能制造创新工场“数控机床智能化研究”(KS912244121)

该试件已经被国内的航空航天厂商采用,成为数控机床安装、调试、生产及维修等过程中检验五轴联动机床加工性能的一项重要环节。

S形试件的精度一般采用三坐标测量机测量,测量结果是由测量点的点位理论坐标值、点位测量坐标值及误差构成。由于测量点较多^[3],在实际机床生产和调试等过程中,这样的测量结果很不直观,不利于判断S形试件的误差分布情况,不利于查找和分析机床误差产生的原因,进而调试机床精度。现阶段判断S形试件的加工误差分布多采用手动绘制误差点,并与理想模型进行逐一比对实现,其操作繁琐、耗时、效率低下且容易出错。

在S形试件测量结果可视化方面,天津大学^[4]、吉林大学^[5]和电子科技大学^[6]等都有研究,但这些研究都是辅助其他理论研究的可视化结果显示及对比,都是基于强大且重量级的数学分析软件 Matlab 实现,不利于工程化应用。关于复杂空间曲面重建及其可视化方面,文献^[7]提出了基于数据融合的插值方法,通过该方法模拟出了更高的插值精度,并在三维地形可视化方面获得了较好的结果。文献^[8]将像素最近邻插值重建算法与贝塞尔插值算法相结合,实现了实时三维图像重建与可视化,并开发了实时交互式三维成像系统。

本文介绍了一种S形试件测量结果可视化方法,该方法可以使S形试件测量结果显性化,有利于相关人员快速地观察出S形试件的误差分布,方便相关人员分析机床误差来源,提高效率。另外,本方法适合利用免费、开源和轻量化的编程语言进行编程开发,有利于实现相关软件的工程化应用。

1 S形试件的几何特性

S形试件由多个控制点生成上下两组样条曲线形成基线,如图1所示。基于该基线生成直纹面,之后填充端部并创建基座,完成S形试件的三维造型,如图2所示。S形试件具有航空结构件的薄壁特性,其几何特性主要表现为曲率、开闭角和扭曲角等^[1]。

S形试件的两形面为直纹面,其平面曲率是变化的。平面曲率与截线的函数表达式 $r(t)$ 有关。由式(1)计算S形试件A面不同高度截线处的曲率^[9],其变化情况如图3所示。

$$k = \frac{|r' \times r''|}{|r'|^{3/2}} \quad (1)$$

式中: k 为曲率; r 为不同高度截面曲线三维向量函数。

根据参考文献^[10],S形试件的A面由加工方向起始的开闭角变化情况如图4所示。S形试件的形面是非可展直纹面^[10],存在扭曲角,其A面扭曲角如图5所示。

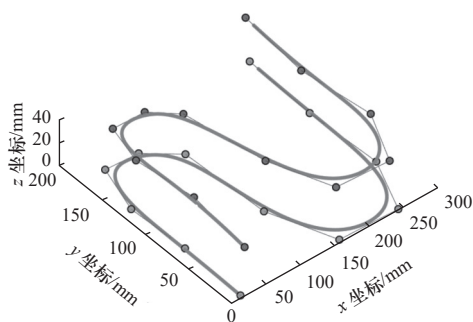


图1 S形试件控制点生成样条曲线

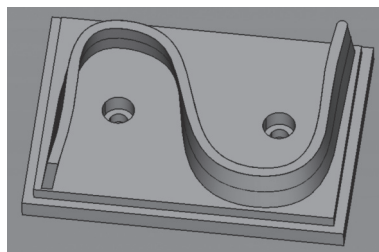


图2 S形试件三维模型

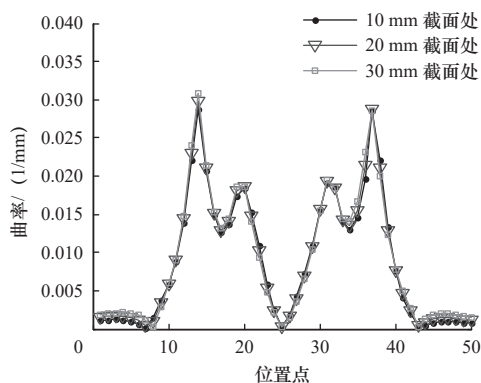


图3 S形试件平面曲率变化

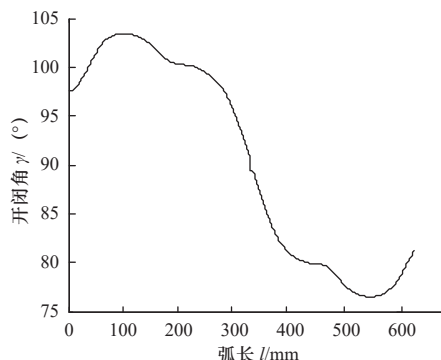


图4 S形试件A面开闭角

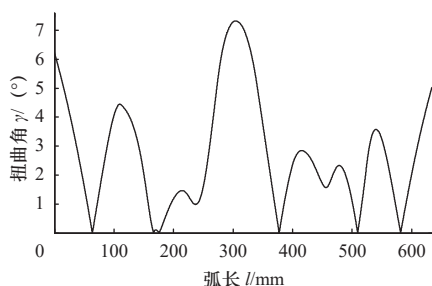


图5 S形试件A面扭曲角

由以上分析可知S形试件的几何结构复杂，故数控机床在试切该试件时容易暴露其自身存在的问题。另外，由于S形试件复杂的几何特性，很难利用编程的方式将其形面进行参数化表达，通过构建S形试件的理论形面并进行形面可视化较为困难。

2 S形试件测量方法介绍

S形试件加工精度的最终评价标准为两直纹面相对于测量基准的轮廓度误差（允许值为 ± 0.05 mm），采用三坐标测量机进行测量。

国际标准中规定通过测量100个点位坐标值及基面的轮廓误差^[3]，来对S形试件进行测量。而在国内主要航空主机厂的实际应用中，对于S形试件的测量相对国际标准可能会有些许区别，如成飞的测量标准为：在“S”缘条的 $Z=11$ mm、 $Z=23$ mm和 $Z=35$ mm高度处选取3条截面线，各截面线上等距取25个测量点，两面共取150个测量点，测量点的位置、坐标及法向量见文献^[2]。另外，成飞提供给中国航空制造技术研究院的测量方案中，也会以相同方式，在12、24和36 mm高度处取测量点，共测量150个点。

为了节省材料并提高效率，在实际的生产实践中，成飞等也会采取留余量的方式进行切削：即对于经半精加工之后的零件，精加工时每次切掉0.5 mm余量（指单边余量，下同）并进行测量，直至余量为0，如图6所示。此种留余量试切的点位理论坐标可根据标准试切时的点位理论坐标和法向量计算得出。

三坐标测量机测量S形试件得到的初始文件为txt格式，内容如图7所示。左数第1列为测量点位的索引号，第2、3、4列为测量点的X向、Y向和Z向的实际坐标，最右侧三列数据为测量点的理论法向量。该文件结合测量点的理论坐标便可以得到图8所示的S形试件测量报告。

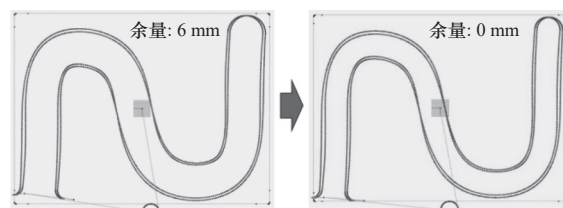


图6 采用留余量的方式切削S形试件

点06 HITS, -124.643911, -48.069009, 36.466471, -0.971845, 0.040592, 0.232099
点07 HITS, -124.294764, -23.887883, 36.466202, -0.972139, -0.009991, 0.234193
点08 HITS, -127.196717, -22.560675, 24.465987, -0.972328, -0.004746, 0.233570
点09 HITS, -130.085947, -21.226175, 12.471579, -0.972501, 0.002081, 0.232889
点10 HITS, -129.905163, 3.928127, 12.411468, -0.978797, 0.024298, 0.203384
点11 HITS, -127.410189, 2.156694, 24.414985, -0.978697, 0.000300, 0.205311
点12 HITS, -124.851375, 0.378957, 36.413411, -0.978035, -0.022743, 0.207195
点13 HITS, -124.463163, 24.879595, 36.330251, -0.983075, 0.078823, 0.165379
点14 HITS, -126.273312, 27.039984, 24.328007, -0.980206, 0.110753, 0.164101

图7 三坐标测量机测量得到的S形试件测量结果原始txt文件

轴	标称值	正公差	负公差	测定	偏差	超差
X	-128.159	0.050	-0.050	-128.134	0.025	0.000
Y	-22.558	0.050	-0.050	-22.559	-0.001	0.000
Z	24.701	0.050	-0.050	24.695	-0.006	0.000
T	0.000	0.050	-0.050	-0.026	-0.026	0.000

轴	标称值	正公差	负公差	测定	偏差	超差
X	-131.041	0.050	-0.050	-131.026	0.015	0.000
Y	-21.224	0.050	-0.050	-21.225	-0.001	0.000
Z	12.699	0.050	-0.050	12.696	-0.003	0.000
T	0.000	0.050	-0.050	-0.015	-0.015	0.000

图8 S形试件测量结果报告

3 S形试件测量结果可视化预处理

在进行S形试件测量结果可视化之前需要进行一系列的预处理。将S形试件的理论模型转换成利于程序处理的数据。

3.1 S形试件点云数据获取

作者先提取S形试件理论模型的点云数据，通过对点云数据进行进一步处理，利用Python编程来重构S形曲面。首先利用Ansys软件强大的网格划分功能^[11]，来对S形试件的形面划分网格，如图9所示。同时，软件可以输出各网格点的坐标，如图10所示。

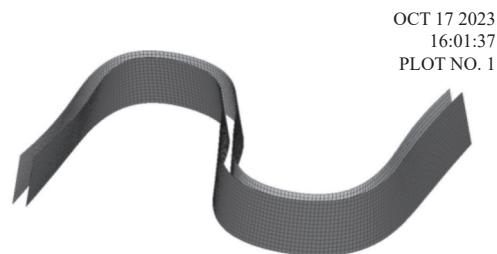


图9 S形试件形面网格划分

3.2 S形试件点云数据排序

基于点云数据，利用OpenGL等三维图形接口进行曲面可视化构建时，需要知道顶点的索引值，

并将顶点索引按照一定的顺序连接才能构建出正确的曲面^[12]。

NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX
3307	-46.095	-80.048	11.425	0.00	0.00	0.00
2176	53.732	21.351	11.425	0.00	0.00	0.00
3099	-44.266	-33.414	11.425	0.00	0.00	0.00
2254	48.108	37.896	11.425	0.00	0.00	0.00
2163	54.474	18.532	11.425	0.00	0.00	0.00
3320	-46.277	-82.959	11.426	0.00	0.00	0.00
2150	55.184	15.706	11.426	0.00	0.00	0.00
2267	46.858	40.533	11.426	0.00	0.00	0.00
3333	-46.465	-85.868	11.426	0.00	0.00	0.00
3086	-44.222	-30.496	11.426	0.00	0.00	0.00
2137	55.867	12.874	11.426	0.00	0.00	0.00
2280	45.486	43.107	11.427	0.00	0.00	0.00
3346	-46.660	-88.777	11.427	0.00	0.00	0.00
2124	56.529	10.036	11.427	0.00	0.00	0.00
642	204.83	54.316	11.427	0.00	0.00	0.00
629	204.94	57.235	11.427	0.00	0.00	0.00
655	204.72	51.397	11.427	0.00	0.00	0.00
616	205.07	60.153	11.427	0.00	0.00	0.00

图 10 S 形试件形面网格划分后得到网格点的坐标

由图 10 中数据可以看出, 网格划分之后的点云数据是乱序的, 无法实现 S 形试件形面的构建, 故需对其进行排序, 排序之后方能知道每个点在进行曲面构建时所处的位置。

对于网格划分之后得到的点云数据而言, 可视其为沿 Z 向分布的多层点云, 每一层的 Z 坐标大致相同, 故对于层之间的点排序, 只需按照每个层的 Z 坐标大小进行排序。而对于每层内部的点而言, 需要采取一定的策略才能实现排序。本文采用分段排序的方法进行层内点云排序, 如图 11 所示, 在第①⑤段按照 Y 坐标从小到大排序, 在③段按 Y 坐标从大到小排序, 在第②④段按照 X 坐标从小到大排序, 最后按照①②③④⑤的顺序进行整体排序。

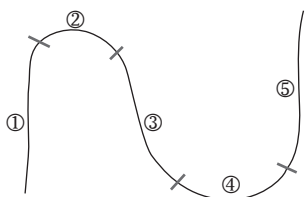


图 11 S 形试件分段排序

3.3 留余量切削方式时的点云数据生成

第 2 节介绍, 当采用留余量的方式切削 S 形试件时, 需要获得余量从 0 到每增加 0.5 mm 余量的点云数据, 即需要得到余量为 0、0.5、1 mm……时的形面点云数据。此时如果仍选择利用 Ansys 划分网格的方式获取点云数据, 就需要创建多种余量下的 S 形试件三维模型, 比较繁琐。本文采用沿法向量偏移的方式得到各余量下的点云数据。

其他余量的点云数据只需将余量为 0 的每个点, 沿着该点的法向量进行偏移得到, 例如要得到余量为 1 mm 的点云数据, 只需将余量为 0 的点沿着点的法向量偏移 1 mm 即可得。

3.3.1 法向量的计算

采用基于局部表面拟合的方法实现 S 形试件点云法向量的估计, 由于 S 形面处处光滑, 故 3.1 节获得的每个点的局部邻域都可以用平面进行较好的拟合^[13]。因此, 对于每个点 p , 通过搜索其最近邻的 K 个相邻点, 然后利用最小二乘法计算这些点的局部平面 P , 即:

$$P(\vec{n}, d) = \operatorname{argmin}_{(\vec{n}, d)} \sum_{i=1}^k (\vec{n} \cdot p_i - d)^2 \quad (2)$$

式中: $\vec{n}$ 为平面 P 的法向量; d 为 P 到原点的距离。

可以认为由 K 个最近邻点拟合出的平面的法向量即为当前点的法向量。平面 P 的法向量可以由主成分分析得到, 由运算知 P 经过其 K 邻域点的质心 P_0 , 且法向量 $\vec{n}$ 满足 $\|\vec{n}\|=1$, 对式 (3) 中的协方差矩阵 M 进行特征值分解, 求得 M 的各特征值, M 的最小特征值所对应的特征向量即 P 的法向量。

$$M = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - p_0)(p_i - p_0)^T \quad (3)$$

3.3.2 法向量的定向

3.3.1 节的计算只是得到了法向量所在的直线, 仍无法确定法向量的方向。通过事先确定 3 个向量 $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$, 并将 S 形试件的形面分为①②③段, 如图 12 所示, 第①②③段每段点云的法向量分别与向量 $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ 的夹角应小于 90° , 即内积应为正, 从而能够确定法向量的方向。

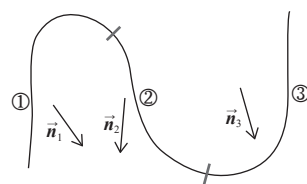


图 12 确定法向量的方向

最终得到的形面点云的法向量如图 13 所示。利用此点云及其法向量, 可以计算出 S 形试件不同余量下的点云。

4 基于克里金法的 S 形试件形面误差插值

4.1 克里金法插值法

通过测量, 可以得到 S 形试件形面上 150 个点^[2]

或 100 个点^[3]的误差,将测量点的误差映射到整个 S 形面上,则可以清晰地看出整个 S 形试件的误差分布情况。采用空间插值法可实现该目的。

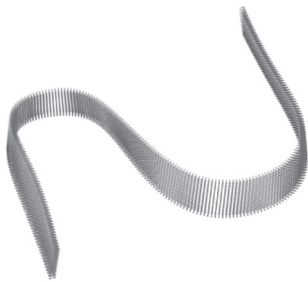


图 13 最终得到的各点法向量

空间插值是用少量采样点的数据来估算空间中其他点的过程。设在某三维曲面上采样 n 个点 $v_i (i=1,2,\dots,n)$, 空间插值就是基于采样点 $v_i(x_i, y_i, z_i) (i=1,2,\dots,n)$, 计算该区域空间变量 v 分布的某种关系式 $v=f(x,y,z)$, 从而计算出曲面上其他点 (x,y,z) 处 $v(x,y,z)$ 的值。

克里金 (Kriging) 插值法是一种依据协方差函数对空间建模和预测的相关性很强的, 且以变异函数理论和结构分析为基础的最优、无偏估算方法^[4], 克里金插值法考虑采样点间的相互关系和空间分布位置等几何特征, 对每个采样点赋予一定的权重系数, 最后用加权平均法来估计未知的变量值。

克里金插值法的基本公式为

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(X_i) \quad (4)$$

变异函数是克里金插值法的基础, 变异函数常用的模型有 Gaussian 模型、指数模型和球形模型^[16], 分别为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right], & h>0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right], & h>0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} + \frac{1}{2} \times \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h < a \\ C_0 + C, & a \leq h \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\gamma(h)$ 为变异函数; C_0 为偏基台值; C 为拱高; h 为区域化变量到待估测点的距离; a 为变程。

用拉格朗日乘数法得到克里金方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(X_i, X_j) + u = \gamma(X_i, X_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\gamma(X_i, X_j)$ 为第 i 个与第 j 个已知测点的半方差值, $\gamma(X_i, X_0)$ 为估算点与已知点 i 的实验变异函数值; u 为拉格朗日乘数; λ_i 为域内各测点对估算点的权重系数。

利用克里金插值法将三坐标测量机测得的各点坐标误差, 映射到 S 形试件形面的点云数据上, 从而能够得到密化的形面误差数据。

由于克里金插值的基本思想是根据已有的时空观测数据, 建立适当模型来预测和插值未知的时空数据^[15]。通过分析数据的空间和时间相关性, 并利用样本点之间的空间和时间距离来计算权重, 达到预测未知点的目的。所以第 3 节中 S 形试件的网格划分越密集、划分精度越高, 相同未知点与已知点的空间相关性就会越强, 插值精度就会越高。

4.2 克里金法插值法精度校验

为了使计算结果更加准确, 需对克里金法插值法得到的插值数据进行精度校验, 可利用交叉验证来验证克里金插值法的插值效果^[16]。

交叉验证的原理是首先假定某一采样点的属性值未知, 用周围采样点的值通过插值来估算, 然后计算所有数据点的实际观测值与估计值之间的误差值。一般情况下采用平均误差、均方误差、平均绝对误差, 以及均方根误差等来评价空间插值方法。

设点 p 为采样点, 圆 S 代表采样点搜索方法, 在圆 S 内的数据点都将被搜索到, 并参与交叉验证的插值计算。交叉验证时, 利用相同的方法, 在点 p 周围搜索其他采样点, 并估算 p 点的值, 以同样的方式计算其他所有的采样点, 并将所有采样点的已知值和估算值代入交叉验证公式, 从而求得精度验证结果, 如图 14 所示。

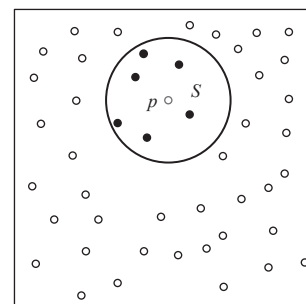


图 14 交叉验证原理图

5 S形试件测量结果可视化

5.1 色谱图显示 S 形试件测量误差

通过测量，可以得到 S 形试件形面多个点的误差，由于合格的形面点位误差为 ± 0.05 mm 之内，即使试切 S 形试件超差，也很难通过肉眼观察到区别。通过用颜色代表误差值的大小，并绘制 S 形试件形面的色谱图，形面各区域的颜色会根据该区域误差的正负和误差大小情况变化。通过色谱图可以比较直观地观察到 S 形试件形面误差的分布情况。

采用 Python 语言的 matplotlib 库，利用上述方法，绘制 S 形试件的形面误差色谱图如图 15 所示。从图中的色谱可以观察出该 S 形试件的误差范围，并可以清晰地看出误差在整个形面的分布情况。由图 7 所示 S 形试件测量结果可知，每个测量点在 X 向、Y 向和 Z 向的误差，可以以同样的方式计算误差并绘制每个方向的误差色谱图。

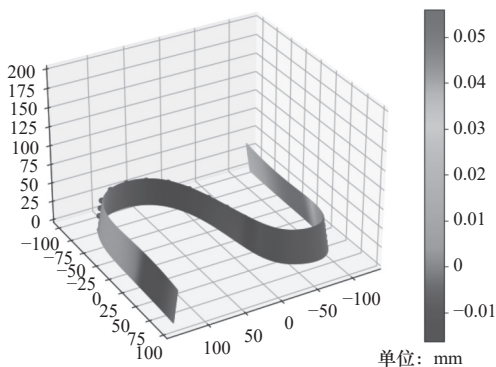


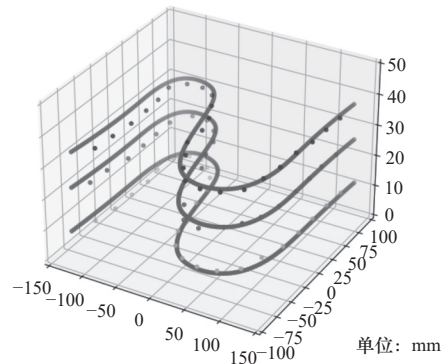
图 15 Python 绘制的 S 形试件形面误差色谱图

5.2 分层显示 S 形试件测量误差

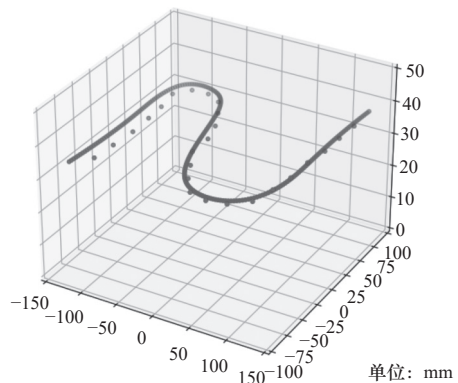
在对 S 形试件测量结果进行分析时，相关人员也比较倾向于在 S 形试件 Z 向取不同高度的截面线，并观察不同截面线上的误差分布情况。从第 2 节中的 S 形试件测量方法可知，S 形试件的测量也是集中在 Z 为定值的 2 层或 3 层。

所以可以通过分层显示的方式将 S 形试件测量误差可视化。以相同 Z 坐标的同层理论点云为基准，通过将测量误差放大，便可以清晰地观察出 S 形试

件测量误差，如图 16 所示。



(a) S 形试件误差分层显示



(b) S 形试件误差单层显示

图 16 S 形试件误差分层显示

6 实验验证

6.1 实验设计

为了验证文章所述方法的准确性，设计了 S 形试件的切削实验，实验共包含 3 个 S 形试件的试切，切削方式均为第 2 节介绍的留余量方式，具体实验方案见表 1。

实验的切削过程如图 17 所示，实验机床为中国航空制造技术研究院自研五轴卧式加工中心，三坐标测量机为蔡司 accura122410，NC 程序及表 1 中的 300 个测量点位的理论值和法向量值均由成飞提供。

6.2 实验结果及分析

将每个 S 形面划分为 40×40 个四边形网格，

表 1 试验方案

试件编号	测试点	验证点	切削方式	误差情况	误差引入方式
试件 1	高度 11 mm、23 mm、35 mm 处 共取 150 个测量点	高度 12 mm、24 mm、36 mm 处 共取 150 个测量点	余量 2.5 mm 切至 余量 2 mm	机床原有误差	无
试件 2				存在欠切	更改 NC 程序
试件 3				增大机床误差	更改机床原有误差补偿值

得到点云数据。将上述各试切件高度为 11、23、35 mm 处的测量误差按照文章方法映射到整个 S 形面的点云数据,并利用 12、24、36 mm 高度处的实际误差测量结果与本文方法计算结果进行对比,来验证方法的准确性。实验结果如图 18~图 23 所示。

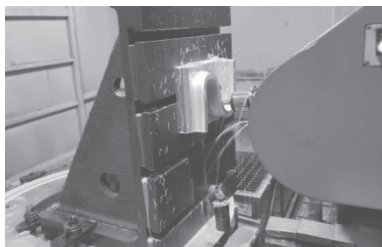


图 17 S 形试件切削实验

由实验结果可知,在 S 形试件合格(试件 1)、不合格(试件 3)和存在较大欠切误差(试件 2)的情况下,本文介绍的插值方法都能够较好地展现出误差在整个 S 形面的分布情况,虽然有些点的插值结果与实际的测量结果有些许差异,但在可接受的范围之内,不会对误差的分布造成较大影响。总之,该方法能够将测得的各点位坐标误差,较为准确地映射到 S 形试件的整个形面上,形

象生动地将测量结果误差分布情况展示给相关人员,方便相关人员快速分析 S 形试件的误差,提高效率。

7 S 形试件测量结果可视化软件开发

基于上文流程及算法,采用 Python 语言编程,利用 PyQt5 开发图形用户界面,实现了 S 形试件测量结果可视化软件的编程开发。该软件小巧、轻量化、可移植性强且操作方便,应用程序只占用约 80 MB 存储空间,适合工程应用。

软件主界面如图 24 所示,总体来说, S 形试件测量结果可视化软件主要包括测量结果可视化和测量结果统计 2 个模块。

(1) 测量结果可视化模块主要实现测量结果文件导入与分析,根据第 2 节介绍的留余量切削方式选择不同余量查看 S 形试件测量结果,并实现色谱图显示和分层显示,能够选择 A、B 形面查看对应结果,能够选择误差在 X 向、Y 向或法向量方向的大小及分布情况。分层显示时,能够自行设置放大倍数和阈值(即误差大于多少的时候将误差放大一定倍数)。能够查看色谱图和分层显示时的详细

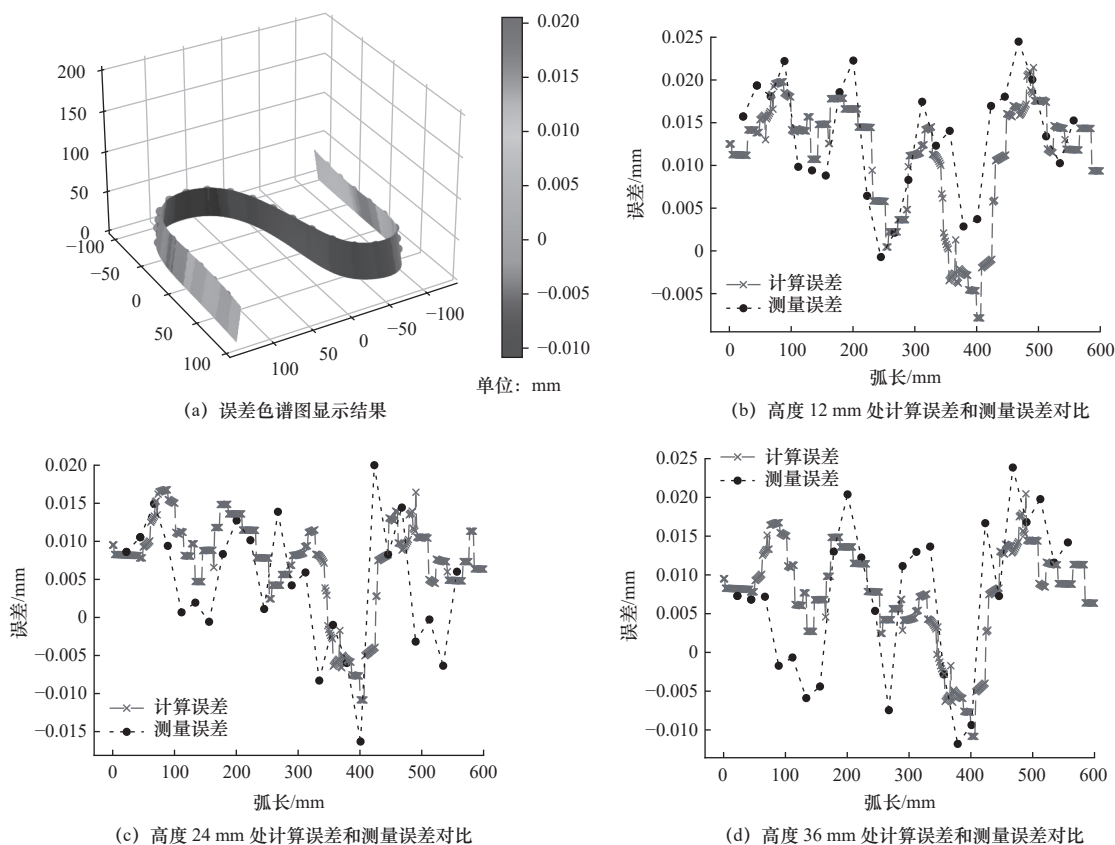


图 18 试件 1.4 面实验结果

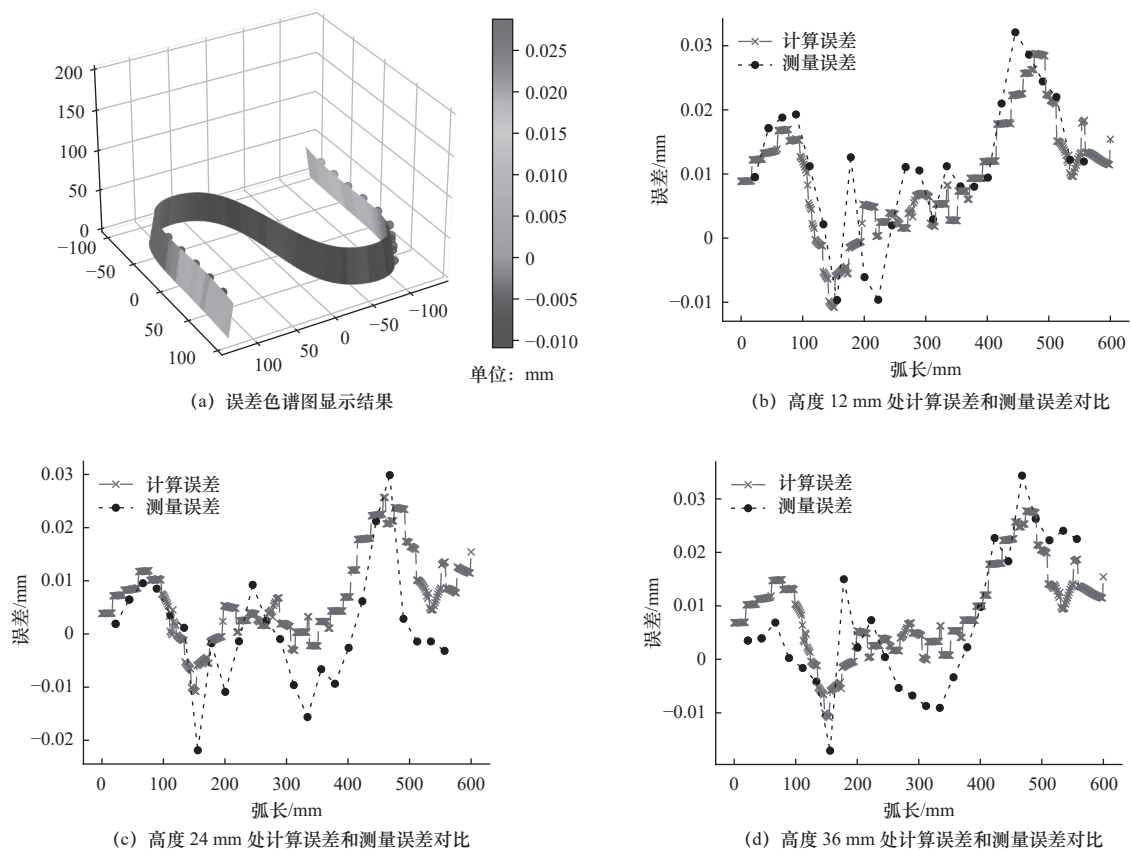


图 19 试件 1 B 面实验结果

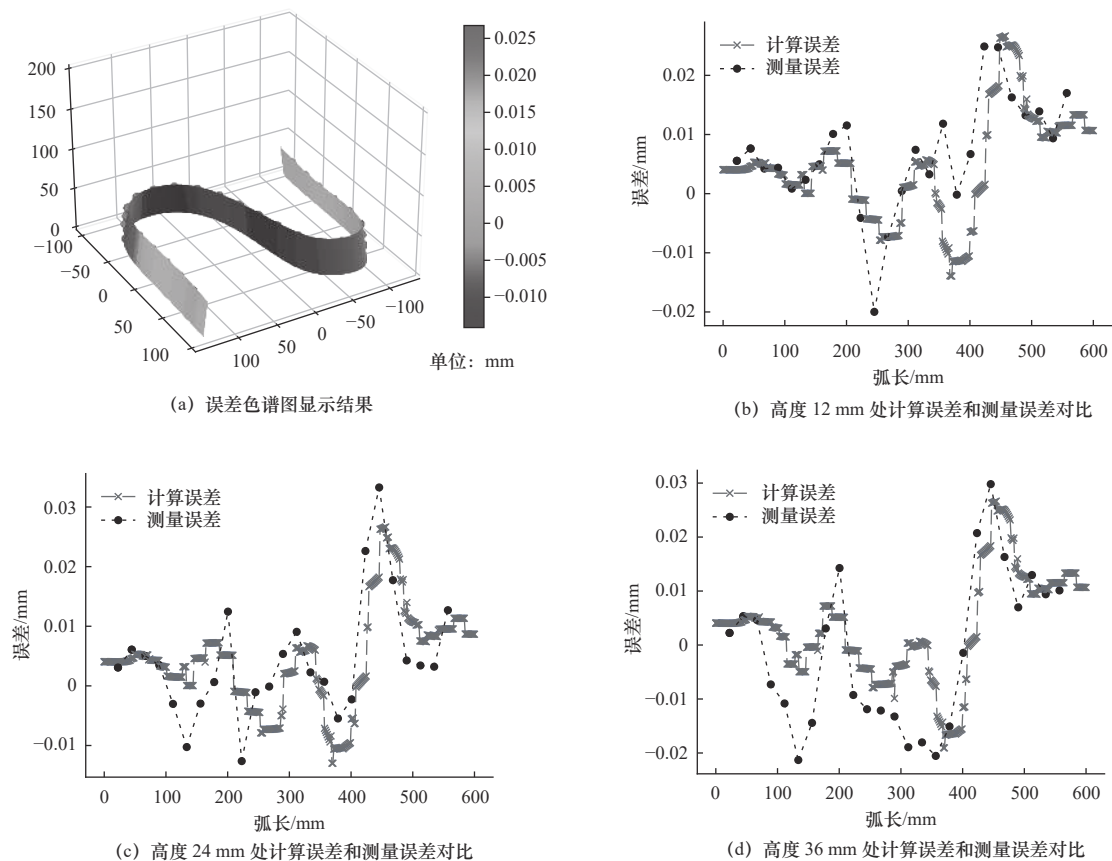


图 20 试件 2 A 面实验结果

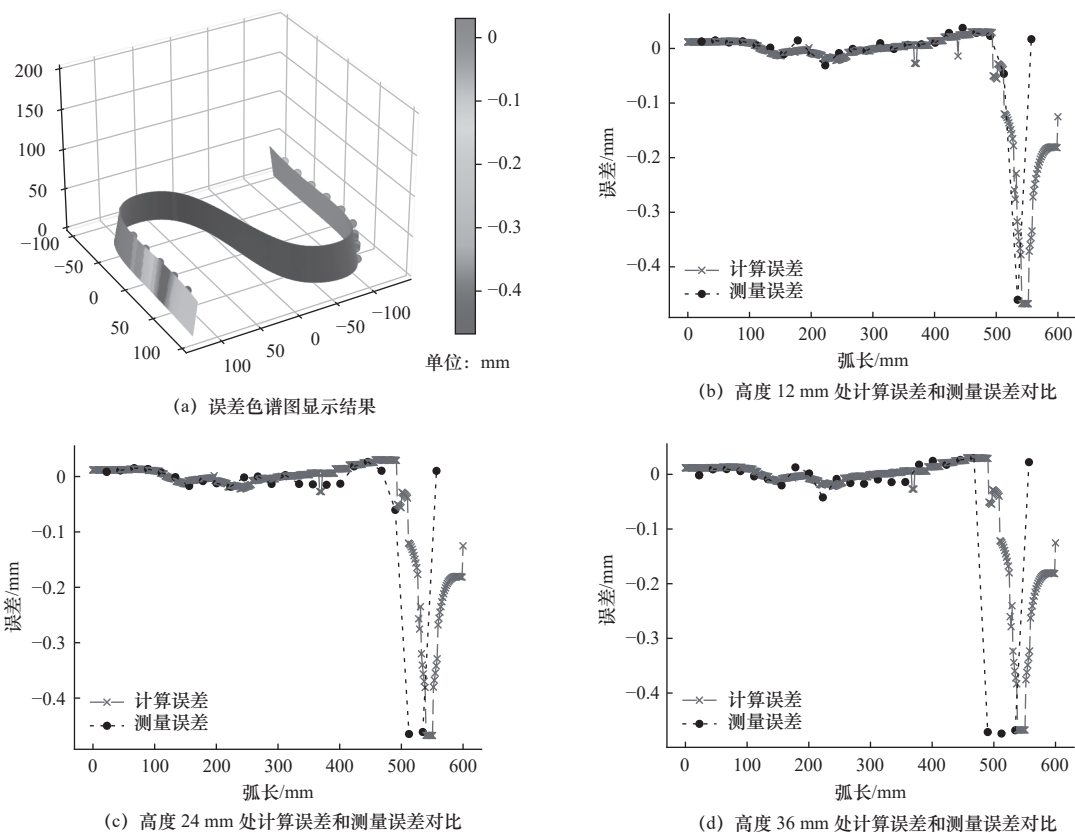


图 21 试件 2B 面实验结果

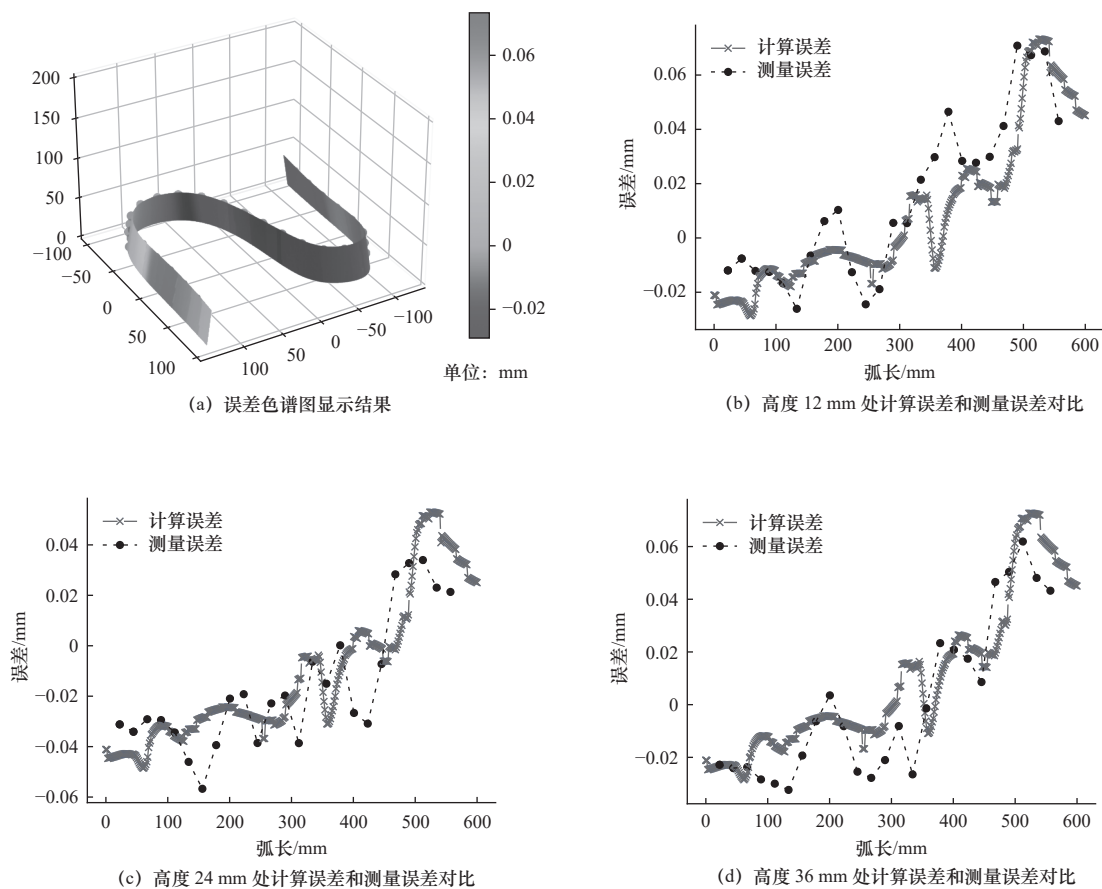


图 22 试件 3A 面实验结果

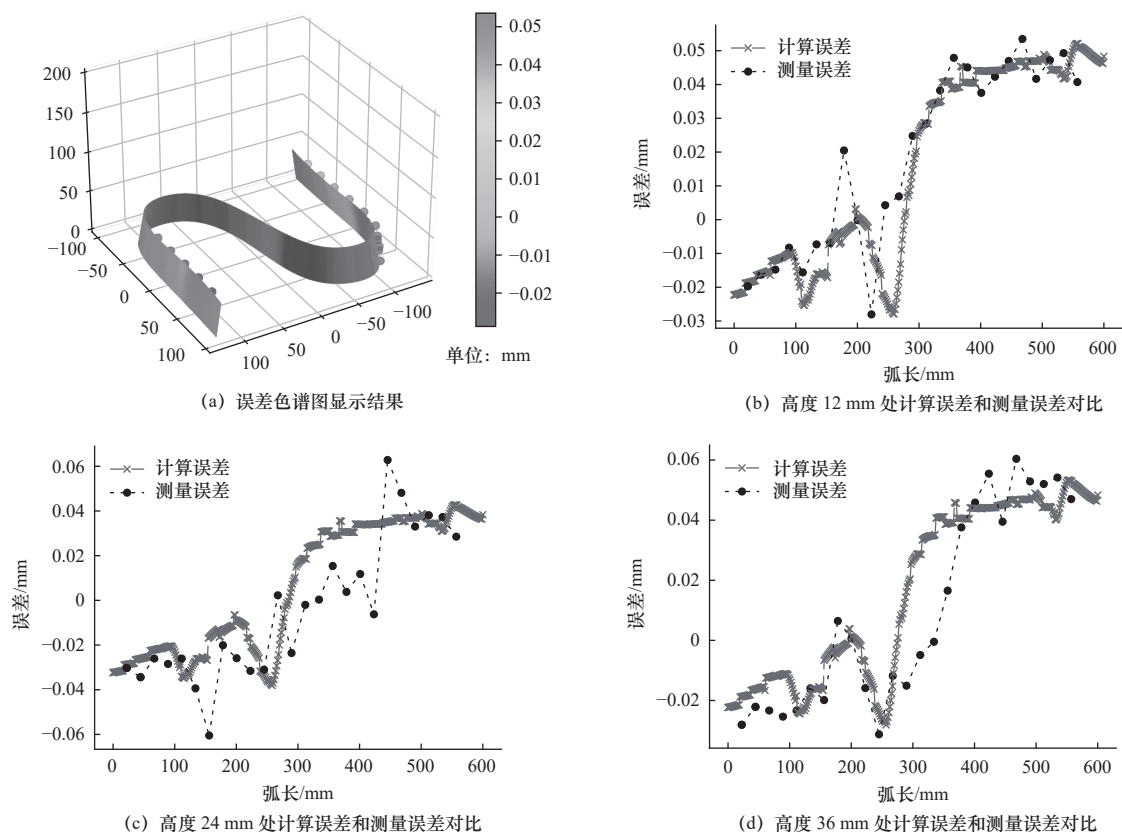


图 23 试件 3 B 面实验结果

界面，详细界面能够利用鼠标将可视化结果放大、缩小、旋转和移动，全方位详细查看测量结果，分层显示时可在测量点标记误差的具体数值，如图 25 和图 26 所示。

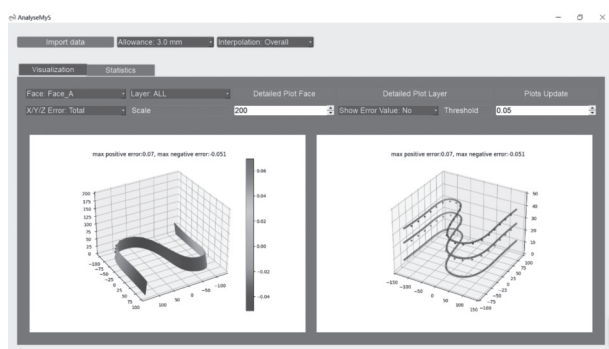


图 24 软件主界面

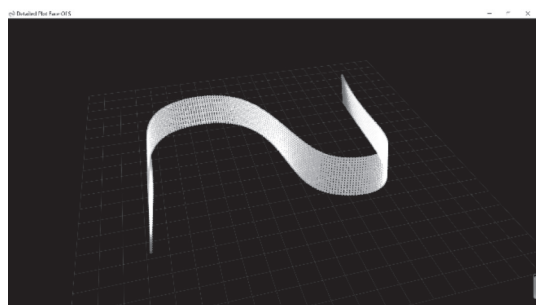


图 25 色谱图详细显示

(2) 测量结果统计模块主要实现测量结果统计信息的显示与报告生成等。

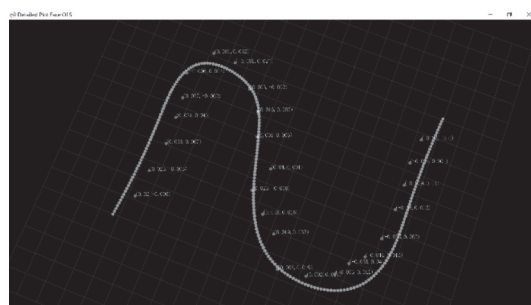


图 26 分层图详细显示 (标记误差具体数值)

8 结语

试切 S 形试件已成为国内各制造厂商检验五轴联动数控机床加工性能的一项必要环节，在五轴数控机床的安装、调试和维修等过程中，相关人员只获得 S 形试件测量点位的坐标信息，不利于分析试切 S 形试件误差产生的原因进而调试机床精度。

本文分析了 S 形试件的几何特性及 S 形试件测量方法，获取了标准切削方法及留余量的切削方法时，S 形试件的各层点云数据，并对点云数据进行了预处理。接着利用克里金插值法将 S 形试件的测

量点误差映射到整个形面上,得到了密化的形面误差数据,并利用色谱图和分层显示的方式实现了S形试件测量结果的可视化显示,进行了切削实验,验证了方法的准确性。最后基于上述处理流程及算法,利用Python语言,开发了适合工程化应用的S形试件测量结果可视化软件。

参考文献

- [1] Song Z, Cui Y. S-shape detection test piece and a detection method for detecting the precision of the numerical control milling machine: US 20100004777 A1[P]. 2010-01-07.
- [2] 宋智勇. 基于直纹曲面试件的五轴机床精度检验方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [3] International organization for standardization. ISO 10791-7: 2020 test condition for machining centers part 7: accuracy for finished test piece [S]. 2020-01.
- [4] 桑一村. “S”形试件几何质量综合测评方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [5] 赫巍巍. 基于S形试件的五轴联动数控机床动态精度检测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [6] 姜忠. 影响工作精度的五轴数控机床联动性能测试方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [7] Zhao K, Hu D B, Xiao J B. Research on DEM interpolation and visualization based on data fusion[J]. Computer Simulation, 2012(7): 144-146, 213.
- [8] LYU Yifei, Shen Y, Zhang M B, et al. Real-time 3D ultrasound imaging system based on a hybrid reconstruction algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2024, 33(1): 245-255.
- [9] 李晴朝. 基于“S”形检验试件的机床动态特性与加工精度关系分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [10] 陶文坚. 五轴数控机床动态精度检验试件曲面作用机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [11] CAD/CAM/CAE技术联盟. Ansys 2022有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- [12] Kessenich J, Sellers G, Shreiner D. OpenGL programming guide: the official guide to learning OpenGL version 4.5 with SPIR-V [M]. New York: Addison Wesley Profession, 2017.
- [13] 王飞, 刘如飞, 任红伟, 等. 利用道路目标特征的多期车载激光点云配准[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(5): 496-502.
- [14] 任洋, 吴岳华, 李天斌. 深埋长隧道纵剖面初始地应力插值计算方法及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(11): 1908.
- [15] 张涛. 变异函数模型的对比优选研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [16] 张靖. GIS空间内插方法与应用研究[D]. 内蒙古: 内蒙古师范大学, 2008.

第一作者/通信作者: 刘福民, 男, 1989年生, 硕士, 工程师, 研究方向为智能制造及缺陷检测。E-mail: lfm107655@sina.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2023-03-18)

文章编号: 20240824

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

论文推荐

石楠楠, 赵梓伊, 杨敏, 等. 磁流变夹具的薄壁件加工装夹性能分析与优化[J]. 制造技术与机床, 2022(5): 159-163.



扫码获取全文

磁流变夹具的薄壁件加工装夹性能分析与优化

石楠楠 赵梓伊 杨敏 朱海华 骆立巍 江小辉

上海理工大学

摘要 针对航空航天等领域薄壁件难装夹所引起的加工精度问题, 设计了一套磁流变液柔性夹具, 结合磁流变液固化特性, 通过提高弱刚度结构辅助支撑的强度, 考虑磁场强度及位置等对工件刚度影响的关键要素, 采用Maxwell进行磁场仿真并进行案例实验验证。实验测试了磁场大小、剪切应力和铣削力等关键数据, 研究与分析了三者之间的作用关系, 发现磁场强度越大, 剪切应力越大而铣削力越小。通过与传统夹具对比, 发现磁流变液夹可提高装夹性能, 其中有MRF时加速度值为0.29g, 与无MRF对比降低了82.4%, 加工时振动明显减小; 无MRF与有MRF对比同心度值降低38.5%。相关成果为航空航天领域薄壁件加工装夹技术提供支撑。

关键词 磁流变液; 夹具; 剪切应力; 薄壁件