

文章编号 1004-924X(2026)03-0393-10

超高精度平面度误差的混合优化评定及应用

谭陆洋¹, 齐天飞¹, 武智渊¹, 张弘治^{1,2}, 贾学志¹, 张 雷^{1*}

(1. 长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对传统智能优化算法在评定平面度误差时存在计算精度不足、收敛速度慢等问题,提出一种兼具高精度与高效率的平面度误差评定方法。通过设计一种以序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)算法为主、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法为辅的混合算法(PSO-SQP),以满足自研 1 200 mm 口径非接触式平面度检测仪对评定算法的严格要求。利用 PSO 算法的全局搜索能力进行初步粗搜索,快速获得一个接近全局最优的解作为 SQP 算法的优质初始点;针对精搜索阶段,利用自适应步长策略替代传统固定步长,从而在局部搜索中实现快速稳定收敛。实验结果表明,PSO-SQP 混合算法对初始点偏差、采样规模及测量噪声具有良好的稳定性,与高精度三坐标测量机相比,评定结果差异小于 7 nm。在实际工程应用中,对直径 280 mm 的平面镜进行评定,平面度评定结果与平面镜面形精度指标相符,验证了其工程实用性。PSO-SQP 混合算法具有计算精度高、收敛速度快和稳定性好等优点,特别适用于超高精度、大数据量的平面度检测。

关键词:精密测量;平面度误差;序列二次规划;粒子群优化;非接触式平面度检测仪

中图分类号:TH701;TP391 文献标识码:A

doi:10. 37188/OPE. 20263403. 0393

CSTR:32169. 14. OPE. 20263403. 0393

Hybrid optimization evaluation and application of ultra-high precision flatness error

TAN Luyang¹, QI Tianfei¹, WU Zhiyuan¹, ZHANG Hongzhi^{1,2}, JIA Xuezhi¹, ZHANG Lei^{1*}

(1. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd, Changchun 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 1847468190@163. com

Abstract: To overcome the limited computational accuracy and slow convergence of conventional intelligent optimization algorithms in flatness error evaluation, a high-precision and high-efficiency evaluation method is developed to satisfy the stringent algorithmic requirements of a self-developed 1 200 mm-aperture non-contact flatness measurement instrument. A hybrid PSO-SQP algorithm is proposed, in which Sequential Quadratic Programming (SQP) is employed as the primary framework and Particle Swarm Optimization (PSO) is incorporated as an auxiliary global search strategy. The global exploration capability of PSO is leveraged to perform a coarse search and rapidly identify a near-global optimum, which is used

收稿日期:2025-11-04;修订日期:2025-12-08.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20220201007GX)

as a high-quality initial point for SQP. An adaptive step-size strategy is introduced in the refinement stage to replace the conventional fixed step size, enabling rapid and stable convergence during local optimization. Experimental results indicate that the proposed PSO-SQP algorithm exhibits strong robustness to initial-point deviations, sampling scale variations, and measurement noise. Relative to a high-precision coordinate measuring machine (CMM), the deviation of the evaluation results is below 7 nm. Engineering applicability is further validated through the evaluation of a 280 mm-diameter flat mirror in a practical measurement scenario, where the obtained flatness is consistent with the specified surface form accuracy. Overall, the proposed algorithm provides high computational accuracy, fast convergence, and strong robustness, offering a reliable and efficient solution for flatness error evaluation in precision manufacturing.

Key words: precision measurement; flatness error; sequential quadratic programming; particle swarm optimization; non-contact flatness measuring instrument

1 引言

平面是零件最重要和最常用的几何形状之一,经常被作为其他几何形状的检测基准,其精度影响着零部件和产品的装配精度^[1]。随着精密和超精密加工技术的快速发展,零件的平面精度越来越高,如何对平面精度进行精确、快速地检测和评定,对产品的制造、装配及使用都有着重要的意义^[2]。平面度误差作为评价零件平面精度的重要指标,其评定方法主要有:最小包容区域法、最小二乘法、对角线平面法和三远点平面法^[3-6]。其中,最小包容区域法最符合国家标准《平面度误差检测标准》(GB/T 11337-2004)中对平面度误差的定义。常用的基于最小包容区域法评定平面度误差的算法可以分为两大类:寻找特征点法和优化求极值算法^[7]。寻找特征点法主要通过从所有测量点中遍历选取 3 或 4 个特征点(高点、低点)来确定两个最小包容平面^[8],当测量点较多时,其计算量大、计算耗时长,因此该方法只适合测量点数量不多的情况。近年来,随着仿生智能算法的研究深入,有研究人员将遗传算法^[9]、粒子群算法^[10]和麻雀搜索算法^[11]等成功应用于平面度误差评定方法中,这些就是最小包容区域法中的优化求极值算法。温秀兰^[12]等提出了基于实数编码的进化策略评定平面度误差。刘超^[13]等基于天牛须改进粒子群算法对平面度误差进行了评定研究。罗钧^[14]等将改进人工蜂群算法用于平面度误差的评定。这些算法将寻

找特征点确定最小包容平面来计算平面度误差转化为对平面度误差的非线性优化问题进行极小值计算,虽具备较高计算精度、较快计算速度,但是存在参数设置敏感性高、初值敏感性高和计算成本高等问题。若参数设置不当,则会导致搜索效率大大下降,甚至计算结果相差较大;若初值选取不当,则容易导致陷入局部最优解,模型较大时所需的计算机资源过多。为了解决这些问题,序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)算法作为一种高效的有约束非线性优化算法逐渐崛起。SQP 算法通过将复杂的约束条件转换为二次规划问题,在有限迭代内快速找到最优解^[15-16]。

作者团队研制的 1 200 mm 口径的超高精度非接触式平面度检测仪测量准确度优于 300 nm,采样频率高于 3 kHz,该仪器在超精密制造领域具有极高的应用价值,其测量精度远高于现阶段最高精度的三坐标测量机,测量数据量也远超三坐标测量数据,对平面度误差评定方法的精度和效率提出了更高的要求。为克服现有方法在计算精度和计算效率方面的不足,本文提出了以序列二次规划算法为主、粒子群算法为辅的平面度误差评定方法。两种方法相互结合,弥补了粒子群算法计算精度不足、计算效率低的缺点和 SQP 算法局部收敛的缺点,通过优化计算模型,提升了平面度误差评定的精度和效率。在自研超高精度非接触式平面度检测仪中得到了工程应用,并取得了很好的实际效果。

2 平面度误差评定

2.1 平面度误差评定模型

平面度误差为实际平面对其理想平面的变动量,理想平面的位置应符合最小条件^[17]。即用平面度最小包容区域的宽度 f 表示的数值,如图1所示。

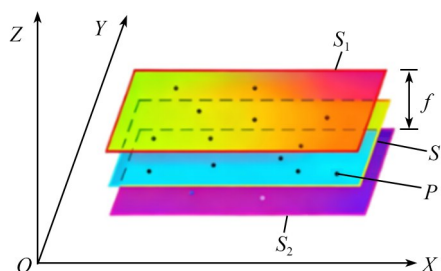


图1 平面度误差评定原理

Fig. 1 Principle for flatness error evaluation

图1中的点 P 为平面度测量仪器实际测得的点,假设平面 S 为评定平面度误差的理想平面,其平面方程为:

$$z = ax + by + c. \quad (1)$$

则任一实测点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 与理想平面 S 之间的 Z 坐标差值 ΔZ_i 为:

$$\Delta Z_i = z_i - ax_i - by_i - c \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

平面 S_1 为实测点相对于理想平面的上包容平面,其平面方程为:

$$z_1 = ax + by + c + \Delta z_1. \quad (3)$$

平面 S_2 为实测点相对于理想平面的下包容平面,其平面方程为:

$$z_2 = ax + by + c + \Delta z_2. \quad (4)$$

则被测平面的平面度误差为:

$$f = \min_{a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2} f(a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2) = \min_{a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2} \frac{\Delta z_1 - \Delta z_2}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}. \quad (5)$$

约束条件为所有点的偏差介于两包容平面之间:

$$\Delta z_2 \leq \Delta Z_i \leq \Delta z_1. \quad (6)$$

寻找最小包容区域的两个包容平面评定平面度误差即是寻找 $f(a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2)$ 的最小值。通过优化算法不断调整 a, b, c 的值,使得

$f(a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2)$ 取得最小值,即可将平面度误差评定时不容易寻找两最小包容平面的难题转化为相对容易的优化求极值问题,为SQP算法在平面度误差评定中的应用奠定了基础。

2.2 平面度误差评定问题的凸性分析

根据式(5)和式(6)可知,平面度误差评定问题是一个有约束非线性优化问题。其目标函数和约束的复杂性决定了优化问题的性质(凸或非凸),而这一性质直接依赖于测量点集 $\{P_i(x_i, y_i, z_i)\}$ 的空间分布。

根据优化理论,一个优化问题为凸问题的充要条件是:其目标函数为凸函数,且可行域为凸集^[18]。对于式(5),当固定平面参数 (a, b, c) 时,函数 f 是 $\Delta z_1, \Delta z_2$ 的线性函数;但 f 作为 $(a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2)$ 的多元函数,由于其分母项 $\sqrt{a^2 + b^2 + 1}$ 以及约束条件中 $\Delta z_1, \Delta z_2$ 与 (a, b, c) 的复杂耦合关系,使得问题在一般情况下难以保证整体凸性。

更重要的是,从几何角度考虑:平面度误差评定的本质,是寻找一个方向,使得该方向上点云投影的“宽度”(最高点与最低点之差)最小。对于一个任意的、非理想的点云集合,可能存在多个不同的平面方向,使得该方向上的投影宽度取得不同的局部极小值。这意味着目标函数可能呈现“多峰”特性,即存在多个局部最优解,这是非凸优化问题的典型特征。

例如,采样点取 $P = \{(0, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 1, 1), (0, 0, 1), (1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1), (1, 0, 1)\}$,如图2所示。此时根据几何意义以及对称性, $a = 1, b = 1; a = -1, b = 1; a = 1, b = -1; a = -1, b = -1$,这4组解都是平面度误差评定的孤立极小值。这种多个局部极值的存在,正是问题非凸性的直观体现。

总之,平面度误差评定问题是否为凸性取决于测量点集。理论上对于某些特殊构造的点集,问题可能具有凸性,但对于实际工程测量中获取的、包含随机误差和复杂面形特征的离散点云数据而言,平面度误差评定问题在绝大多数情况下呈现为非凸优化问题。

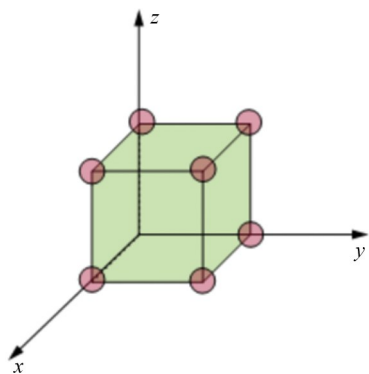


图2 平面度误差的一组采样点

Fig. 2 A group of sampling points for flatness error

3 改进序列二次规划算法及其在平面度误差评定中的应用

SQP算法是一种广泛应用于有约束非线性优化问题的高效算法。其核心思想是将复杂的非线性约束转换为二次型形式,从而利用二次规划方法求解。

3.1 SQP算法的基本原理

SQP算法通过迭代求解一系列二次规划子问题来逼近原非线性规划(Nonlinear Programming, NLP)问题的最优解。

对于一般非线性约束优化问题,有:

$$\begin{cases} \min_x f(x) \\ \text{s. t. } g_i(x)=0, \quad i \in \mathcal{E} \\ h_j(x) \leq 0, \quad j \in \mathcal{I} \end{cases} \quad (7)$$

构造拉格朗日函数:

$$\mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i \in \mathcal{E}} \lambda_i g_i(x) + \sum_{j \in \mathcal{I}} \mu_j h_j(x). \quad (8)$$

对于凸优化问题,最优解需满足KKT条件:

$$\begin{cases} \nabla_x \mathcal{L} = 0 \\ g_i(x) = 0, \quad i \in \mathcal{E} \\ h_j(x) \leq 0, \quad \mu_j \geq 0, \quad \mu_j h_j(x) = 0, \quad j \in \mathcal{I} \end{cases} \quad (9)$$

在第 k 次迭代点 x_k 处,对目标函数和约束进行泰勒展开:

$$\begin{cases} f(x_k + d) \approx f_k + \nabla f_k^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla_{xx}^2 \mathcal{L}_k d \\ \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0 \\ \nabla h_i(x_k)^T d + h_i(x_k) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

得到二次规划子问题:

$$\begin{cases} \min_d \nabla f_k^T d + \frac{1}{2} d^T H_k d \\ \text{s. t. } \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, \quad i \in \mathcal{E} \\ \nabla h_i(x_k)^T d + h_i(x_k) \leq 0, \quad j \in \mathcal{I} \end{cases} \quad (11)$$

其中: H_k 为拉格朗日函数的Hessian矩阵或其近似, d 为下降的搜索方向。

使用SQP算法评定平面度误差的计算模型如下:

$$\begin{cases} \min_{a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2} \frac{\Delta z_1 - \Delta z_2}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \\ \text{s. t. } z_i - ax_i - by_i - c \geq \Delta z_1 \\ z_i - ax_i - by_i - c \leq \Delta z_2 \\ (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (12)$$

目标函数为平面度误差 $f(a, b, c, \Delta z_1, \Delta z_2)$,优化变量为理想平面的参数 (a, b, c) 和包容平面的参数 $(\Delta z_1, \Delta z_2)$,约束条件为实测点 P_i 与理想平面 S 之间的 Z 坐标差值在 Δz_1 和 Δz_2 之间。

3.2 SQP算法的优势与不足

与其他优化算法相比,SQP算法的收敛精度及效率高,算法搜索轨迹平滑且单调,且在平坦区域的稳定性高。

在结果附近,SQP算法收敛速度接近二次收敛(误差按平方速率下降),而智能优化算法多数为线性收敛。对于连续可微函数,SQP算法达到 10^{-10} 精度的迭代次数比粒子群算法少90%^[19]。

SQP算法通过二阶近似构建局部二次模型,搜索方向由目标函数梯度和Hessian矩阵精确计算,迭代路径平滑。在Rosenbrock函数优化中,SQP算法的搜索轨迹呈连续曲线,而标准遗传算法(Genetic Algorithm, GA)或粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的路径存在随机跳跃。

SQP算法通过梯度识别曲率,在平坦区域仍能有效搜索,而智能优化算法可能停滞。在Plateau函数(平坦区域占比50%)的优化中,SQP算法的成功率为95%,而GA算法或PSO算法因缺乏梯度信息,成功率仅为60%~70%^[20]。

然而,SQP算法存在对初始点非常敏感的问题,当初始点远离最优解时,可能收敛到局部最优解。因此,在处理非凸问题时,需要结合全局优化算法生成初始点后再用SQP算法处理。

3.3 改进SQP算法在平面度误差评定中的应用

3.3.1 改进的初始点选择策略

对于平面度误差的评定问题,本文采用PSO算法对SQP算法的初始点选择策略进行了改进。平面度误差评定是一个连续参数优化问题,且搜索空间通常较为平滑。PSO算法能够快速、高效地完成初步定位,且在该问题领域,PSO算法足以可靠地找到全局最优区域,为SQP算法提供优质起点。对于自研非接触式平面度检测仪,每次处理上万个点计算量巨大,PSO+SQP在速度上的显著优势是决定性的。

PSO算法参数设置如下:粒子数取20~40,迭代50~100次。此参数配置是基于大量前期试验^[10,13]的综合考虑,能在计算成本与搜索效果间取得良好平衡。在此参数范围内,PSO能以高概率定位到全局最优解附近区域(与最终最优解误差通常在20%以内),满足为SQP提供优质起点的要求。

因此,本文评定平面度误差分为两个阶段:阶段一采用PSO算法进行粗搜索,从全部点云中随机抽取5%~10%的样本点,以大幅降低计算量,运行PSO算法,快速获得一个接近最小包容区域的平面参数解($a_0, b_0, c_0, \Delta z_{10}, \Delta z_{20}$);阶段二采用SQP算法进行精搜索,将PSO算法找到的解作为SQP算法的初始值,将SQP算法使用全部数据点,进行精确的局部搜索,从优质起点出发,快速收敛到高精度的最终解。

3.3.2 改进的步长选择策略

在利用PSO算法对平面度误差进行初步评定,并获得接近最优解的初始点后,SQP算法的任务从“全局探索”转变为“局部精搜索”。在此阶段,传统固定步长策略因其灵活性不足,难以在收敛速度和最终精度间达到最佳平衡。为此,本文提出了一种面向精搜索的自适应步长策略,旨在实现对最优解的快速、稳定与高精度定位。

在精搜索阶段,根据局部二次模型的可信度来动态调整步长。该可信度通过比较目标函数的实际下降量与模型的预测下降量的比值 k 来评估。

步长动态调整规则如下:

(1)当 $k > 0.9$ (模型高度可靠)时,局部模型与实际函数高度吻合,适度放大步长,以加速向最优解逼近;

(2)当 $0.3 < k \leq 0.9$ (模型可靠)时,搜索方向正确,但模型预测存在一定偏差,保持当前步长以稳定推进;

(3)当 $k \leq 0.3$ (模型不可靠)时,当前局部模型质量较差,可能已接近复杂区域或受数值误差影响,果断减小步长,以提高搜索精度与稳定性,避免震荡。

此方法确保了算法在精搜索初期能快速前进,而在临近最优解时能自动转换为精细模式,实现“稳定、准确、快速”的收敛效果。

本文评定平面度误差的算法流程如图3所示。

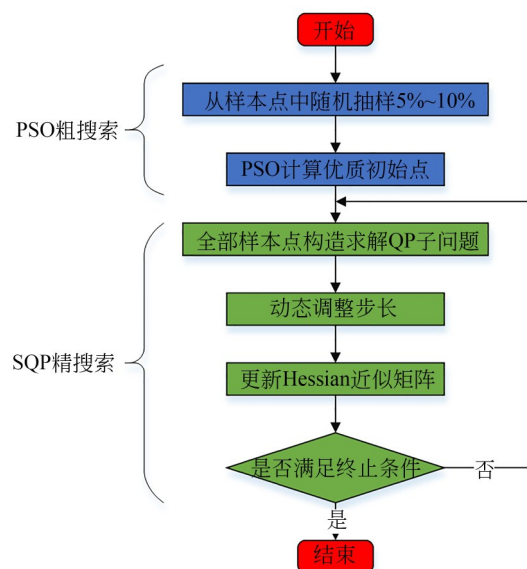


图3 评定平面度误差的算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart of flatness error evaluation

4 实验

4.1 参数敏感性测试

为全面评估本文提出的PSO-SQP混合算法在实际工程应用中的性能,系统性地分析了3个关键参数对平面度误差评定结果的影响:初始点选择策略、采样点数量以及测量噪声水平。通过定量分析这些因素的影响程度,验证了算法在不同工况下的稳定性与适用性。

本实验数据来源于自研非接触式平面度检测仪测试外径450 mm、内径300 mm的铝合金圆环所得数据集A(19 980点),在普通计算机(2.11 GHz CPU,32 GB RAM)上进行分析。

4. 1. 1 初始点选择策略

尽管 PSO 算法已提供高质量的初始解,但其精度水平仍会显著影响 SQP 精搜索阶段的收敛效率。为量化这种影响,在 PSO 提供的初始点基础上人为添加偏差,测试 SQP 精搜索阶段性能。结果如表 1 所示。结果表明,当初始偏差在 $\pm 0.010\text{ mm}$ 内时, SQP 迭代次数与计算时间变化不大;偏差增大,迭代次数增加,但最终评定结果完全一致。这表明本文算法对初始点具有一定容错能力,但为提升效率,应控制 PSO 初始解与最终值误差在 20% 以内。

表 1 初始点对 SQP 算法性能的影响

Tab. 1 Impact of initial points on SQP algorithm performance

初始点偏差 /mm	SQP 迭代 次数	最终平面度 误差/mm	计算时间/s
0	4	0.045 798	3.528
± 0.005	4	0.045 798	3.675
± 0.010	4	0.045 798	3.836
± 0.020	6	0.045 798	5.714
± 0.050	10	0.045 798	10.267

4. 1. 2 采样点数量

采样点数量直接影响平面度误差评定的准确性和计算成本。从数据集 A 中随机选取测试点,数量从 256 点至 16 384 点,按 2 的倍数递增,分析了不同点数下的性能表现,结果如表 2 和图 4 所示。结果表明,随着采样点增加,平面度误差

表 2 不同采样规模下的算法性能

Tab. 2 Algorithm performance at different sampling levels

采样点数	最终平面度 误差/mm	计算时间 /s	电脑内存 占用/GB
256	0.040 283	0.006	2.1
512	0.043 377	0.021	2.1
1 024	0.043 925	0.066	2.2
2 048	0.045 675	0.221	2.4
4 096	0.045 742	0.955	3.8
8 192	0.045 814	3.731	9.2
16 384	0.045 949	23.989	23.3

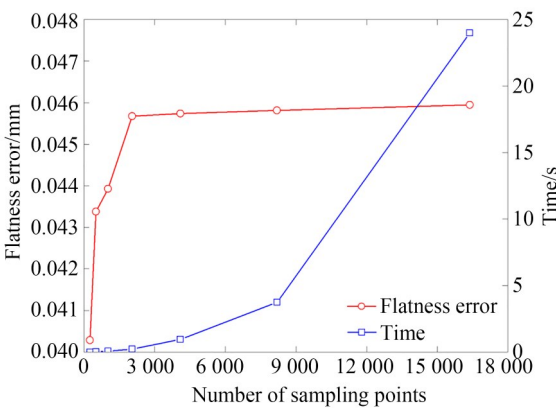


图 4 平面度误差/计算时间与采样点数之间的关系

Fig. 4 Relationship between flatness error, computation time, and number of sampling points

评定结果趋于稳定($>2\ 048$ 点后变化平缓),但计算时间增长。综合精度与效率,推荐采样点数为 2 048~8 192。

4. 1. 3 测量噪声水平

实际测量中不可避免存在噪声,为验证算法抗干扰能力,从数据集 A 中随机选取 8 000 个点,并在原始数据中注入不同水平的高斯噪声 $N(0, \sigma^2)$,噪声水平从 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 到 $5\text{ }\mu\text{m}$,覆盖典型测量环境,重复 50 次实验,结果如表 3 所示。结果表明,没有噪声干扰时, SQP 算法作为一种确定性算法,其重复性非常高,标准差可达 10^{-18} 量级。算法能够应对大多数工业现场(噪声 $\leq 1.0\text{ }\mu\text{m}$)的测量条件,在恶劣环境(噪声 $> 1.0\text{ }\mu\text{m}$)下需要配合滤波算法进行预处理。

综上,本文提出的 PSO-SQP 混合算法在初始点选择、采样点数量和噪声水平 3 个维度均展现出良好的稳定性。特别是在初始点存在一定

表 3 噪声水平对评定结果的影响

Tab. 3 Noise level impact on evaluation results

噪声水平 / μm	平均平面度 误差/mm	标准差/mm	结果异常 率/%
0	0.045 740	7.009×10^{-18}	0
0.1	0.045 740	2.150×10^{-5}	0
0.5	0.045 774	9.385×10^{-5}	0
1.0	0.045 790	1.639×10^{-4}	0
2.0	0.045 899	3.451×10^{-4}	0
5.0	0.046 696	6.487×10^{-4}	0

偏差或中等噪声水平下,算法仍能保持较高的评定精度和稳定性,证明了其在实际工程应用的价值和可靠性。

4.2 实测数据对比实验

为了验证本文算法的实际效果,使用测量精度为 $(0.9+2.8L/1000)\text{ }\mu\text{m}$ 的海克斯康三坐标测量机实际测试了两种样品,测试装置如图 5 所示。

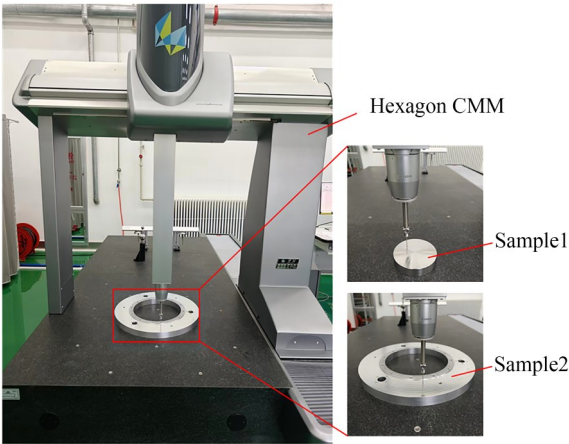


图 5 海克斯康三坐标测量机实测
Fig. 5 Measurement with Hexagon CMM

得到的实测数据集 B,C 如表 4 和表 5 所示,本文算法与海克斯康三坐标测量机软件的计算结果如表 6 所示。从表中可以看出,本文算法与

表 4 样品 1 平面度误差实际测量数据集 B
Tab. 4 Flatness error measurement dataset B of sample 1

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	0.006 108	2.005 692	−0.000 139
2	−1.994 049	0.005 055	0.000 246
3	0.006 343	−1.994 858	−0.000 162
4	2.006 256	0.005 138	−0.000 974
5	0.006 015	30.006 966	0.025 841
6	−29.993 469	0.007 010	0.028 201
7	0.006 070	−29.993 206	0.017 439
8	30.006 012	0.006 674	0.014 773
9	0.006 437	56.007 507	0.046 834
10	−55.993 591	0.006 491	0.053 714
11	0.006 259	−55.993 244	0.032 335
12	56.006 439	0.006 753	0.022 830

表 5 样品 2 平面度误差实际测量数据集 C
Tab. 5 Flatness error measurement dataset C of sample 2

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	32.553 547	180.827 194	4.177 588
2	32.553 062	167.526 810	4.169 164
3	142.728 638	87.655 151	4.142 634
4	125.549 988	84.672 737	4.136 872
5	111.840 454	−58.471 733	4.026 722
6	100.006 889	−45.585 796	4.034 363
7	−40.787 724	−101.376 396	3.952 220
8	−25.836 092	−86.443 459	3.969 200
9	−121.412 163	5.335 134	4.007 356
10	−139.708 221	0.491 411	3.996 971
11	−104.017 159	138.852 112	4.107 136
12	−88.571 373	133.807 846	4.109 851

表 6 不同方法的计算结果对比
Tab. 6 Comparison of calculations results of different methods

方法	样品 1 平面度 误差/mm	样品 2 平面度 误差/mm
海克斯康	0.039 989	0.002 558
本文算法	0.039 982	0.002 554
相差	0.000 007	0.000 004

成熟的商业软件计算结果相差最大仅 7 nm,证明了本文算法的精度在工程应用上的准确性。

5 算法应用

通过实测数据集 B,C 的计算结果对比,验证了本文 PSO-SQP 混合算法的精度和有效性。将其应用于自主研发的 1 200 mm 口径的非接触式平面度检测仪中,并对一块直径 280 mm 的高精度平面镜(标称面形精度 $PV<53\text{ nm}$,该结果来源于 ZYGO 干涉仪,其测量误差小于 20 nm)进行实测,测试现场如图 6 所示。

该平面度检测仪的运动轴采用了高精度光栅尺加激光干涉仪在线补偿的测量方式,补偿后水平运动轴(X轴)测量误差小于 $0.5\text{ }\mu\text{m/m}$,竖直运动轴(Z轴)测量误差小于 $0.2\text{ }\mu\text{m/m}$,旋转轴

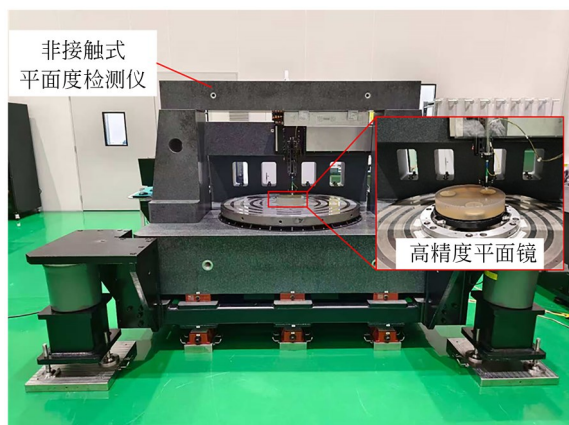


图6 自研非接触式平面度检测仪实测图

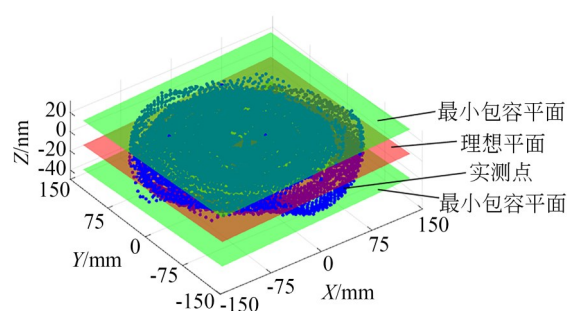
Fig. 6 Measured diagram from self-developed non-contact flatness measurement instrument

(S轴)测量误差小于 $2''$ 。测量300 mm口径内的平面度测量准确度优于50 nm,仪器机械结构、误差建模与补偿方法已通过前期研究及标定验证,确保了测量数据本身的准确性。

仪器采样频率高于3 kHz,一次测量的时间约为5~10 min,因此总采样点数可达上百万。为平衡计算效率与信息完整性,基于奈奎斯特采样定理和点云空间均匀性分析,将数据降采样至10 504个点进行处理。该点数能充分表征表面形貌且计算效率高。在普通计算机(2.11 GHz CPU, 32 GB RAM)上,处理该数据的耗时仅为3.8 s,表明了本文算法在实际应用场景下计算效率较高。

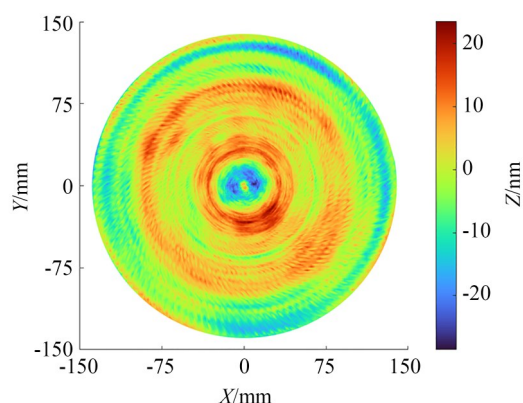
经过本文算法评定,该平面镜平面度测试结果为51 nm,符合面形精度指标。图7所示为被测平面镜的三维点云图和面形。结果表明,该算法不仅具有较高的计算精度和效率,而且在实际应用中表现稳定可靠,能够满足高精度平面度检测需求。

目前,该1 200 mm口径的非接触式平面度检测仪已投入大口径高精度平面面形检测中。基于本文提出的算法,与传统的平面度检测设备(如三坐标测量机)相比,非接触式平面度检测仪具有检测精度高(检测精度提升至纳米级)、检测效率高(检测时间从几十分钟缩短至几分钟)、数据量大(从几十到几百个点提升至上万个点)的特点。



(a) 平面镜平面度误差的三维点云

(a) 3D point cloud of plane mirror for flatness error evaluation



(b) 平面镜平面度误差的面形

(b) Surface shape of plane mirror for flatness error evaluation

图7 直径280 mm平面镜平面度测试结果

Fig. 7 Flatness measurement results of D280 mm plane mirror

6 结 论

本文针对超高精度、大数据量平面度检测任务中对评定算法精度与效率的更高要求,提出了一种以SQP算法为主、PSO算法为辅的混合评定策略。二者优势互补,形成了从“全局粗定位”到“局部精搜索”的高效计算流程,并引入了自适应步长策略以优化收敛过程。通过参数敏感性分析,验证了本文方法对初始点不敏感,即使初始点存在一定的偏差,仍能收敛到同一最优解;在中低等的噪声水平下,评定结果保持稳定,这确保了算法在复杂工业环境下的可靠性;而且与海克斯康三坐标测量机商业软件的计算结果几乎一致。最终,将本方法应用于自研的1 200 mm口径非接触式平面度检测仪中,对高精度平面镜的测量处理时间仅需数秒,评定结果准确可靠,

证明了本方法在超高精度测量领域的工程实用价值。

作者贡献声明:

谭陆洋:方法提出,论文构思与撰写;

齐天飞:实验设计及数据整理与分析;

武智渊:理论证明与数据分析;

张弘治:调查研究与流程管理;

贾学志:实验指导与验证;

张雷:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] MAO Z R, ZHANG C L, GUO B J, *et al.* The flatness error evaluation of metal workpieces based on line laser scanning digital imaging technology[J]. *Photonics*, 2023, 10(12): 1333.
- [2] MIKÓ B. Assessment of flatness error by regression analysis[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108720.
- [3] 朱勇建, 潘敏玲, 朱立新, 等. 基于扇形条纹调制度的光滑平面缺陷检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2112-2121.
ZHU Y J, PAN M L, ZHU L X, *et al.* Detection of mirror defects based on sector fringe reflection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(10): 2112-2121. (in Chinese)
- [4] 陈斌, 陈钊杰, 谢晋. 微孔气流加压对ITO玻璃激光刻蚀平面度的影响[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(13): 1564-1571.
CHEN R, CHEN ZH J, XIE J. Influence of micro-pore airflow pressurization on flatness of laser etched ITO glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(13): 1564-1571. (in Chinese)
- [5] 马一哲, 王世勇, 雷腾, 等. 分焦平面红外偏振微扫描图像超分辨重建[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2418-2429.
MA Y ZH, WANG SH Y, LEI T, *et al.* Super-resolution reconstruction of infrared polarization microscan images in focal plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2418-2429. (in Chinese)
- [6] 黄富贵. 平面度误差各种评定方法的比较[J]. *工具技术*, 2007, 41(8): 107-109.
HUANG F G. Comparison of various evaluating methods for flatness error [J]. *Tool Engineering*, 2007, 41(8): 107-109. (in Chinese)
- [7] 姜建起, 李巍, 付艳华, 等. 不连续平面的平面度误差评定方法研究[J]. *计量学报*, 2022, 43(1): 14-20.
LOU J Q, LI W, FU Y H, *et al.* Study on flatness error evaluation method of discontinuous plane [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(1): 14-20. (in Chinese)
- [8] LI X M, ZHANG X, DU Z H, *et al.* Evaluation of flatness error based on two upper points and two lower points[J]. *Measurement*, 2021, 183: 109901.
- [9] 杨健, 赵宏宇. 浮点数编码改进遗传算法在平面度误差评定中的研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 706-711.
YANG J, ZHAO H Y. The research of floating-point coding improved genetic algorithm in flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 706-711. (in Chinese)
- [10] 夏亚涛. 基于改进粒子群算法的平面度误差评定研究[J]. *工具技术*, 2022, 56(5): 111-116.
XIA Y T. Flatness error evaluation based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(5): 111-116. (in Chinese)
- [11] 姜春英, 张熙然, 王印超, 等. 基于改进麻雀搜索算法的平面度误差评定方法[J]. *计量学报*, 2023, 44(9): 1360-1368.
JIANG CH Y, ZHANG X R, WANG Y CH, *et al.* A flatness error evaluation method based on improved sparrow search algorithm [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(9): 1360-1368. (in Chinese)
- [12] 温秀兰, 赵茜. 基于进化策略的平面度误差评定[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(5): 832-836.
WEN X L, ZHAO Q. Flatness error evaluation based on evolutionary strategy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(5): 832-836. (in Chinese)
- [13] 刘超, 王宸, 钟毓宁. 基于天牛须改进粒子群算法的平面度误差评定研究[J]. *计量学报*, 2021, 42(1): 9-15.
LIU CH, WANG CH, ZHONG Y N. A particle swarm optimization algorithm based on beetle antennae search for flatness error evaluation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(1): 9-15. (in Chinese)
- [14] 罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 422-430.
LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified

- fied artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (2): 422-430. (in Chinese)
- [15] 简金宝, 林惠, 马国栋. 大规模非凸不可分优化问题的分裂序列二次规划算法[J]. 数学物理学报(A 辑), 2023, 43(4): 1284-1296.
JIAN J B, LIN H, MA G D. A splitting sequence quadratic programming algorithm for the large-scale nonconvex nonseparable optimization problems [J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2023, 43 (4): 1284-1296. (in Chinese)
- [16] 卓少木, 王晗, 姚洪辉, 等. 改进序列二次规划算法用于轴对称非球面轮廓度误差评定[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(8): 2676-2684.
ZHUO SH M, WANG H, YAO H H, *et al.* Improved sequential quadratic programming algorithm for axisymmetric aspheric profile error evaluation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(8): 2676-2684. (in Chinese)
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 平面度误差检测: GB/T 11337-2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measurement of departures from flatness: GB/T 11337-2004 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [18] 熊有伦. 精密测量的数学方法[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989.
XIONG Y L. *Mathematical Methods for Precision Measurement* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [19] SHU H, ZOU C L, CHEN J Y, *et al.* Research on micro/nano surface flatness evaluation method based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 775455.
- [20] ZHANG M W, LIU Y M, SUN C Z, *et al.* Precision measurement and evaluation of flatness error for the aero-engine rotor connection surface based on convex hull theory and an improved PSO algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8): 085006.

作者简介:



谭陆洋(1988—),男,河南周口人,博士,研究员,2012年于华中科技大学获得学士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要研究方向为精密仪器设计。E-mail: tanluyang66@163.com

通讯作者:



张雷(1982—),男,山东菏泽人,博士,研究员,2003年于东北大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光学仪器总体技术。E-mail: 1847468190@163.com