红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

基于离散化路径与拼接的高精度光学检测方法

沈正祥　王旭　余俊

High-precision optical measurement method based on discrete path and splicing

Shen Zhengxiang, Wang Xu, Yu Jun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210144

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学偏折子孔径拼接面形检测技术

Sub-aperture stitching deflectometric testing technology for optical surfaces

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210105　https://doi.org/10.3788/IRLA20210105

两种透明介质微小折射率差高精度测量的新方法

Novel approach for high-precision measurement of micre refractive index difference of two transparent mediums

红外与激光工程. 2017, 46(4): 417005　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0417005

深孔内表面检测点云拼接技术研究

Research on point cloud splicing for inner surface inspection of deep hole

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210210　https://doi.org/10.3788/IRLA20210210

双光路互参考高精度AOTF衍射效率测试方法及装置

High-precision measurement method and device on diffraction efficiency of Acousto-Optic Tunable Filter based on double-optical-path and cross-references

红外与激光工程. 2017, 46(4): 417001　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0417001

平面镜子孔径加权拼接检测算法(特邀)

Subaperture stitching testing to flat mirror based on weighting algorithm (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210520　https://doi.org/10.3788/IRLA20210520

夏克哈特曼扫描拼接检测平面镜(特邀)

Shack-Hartmann scanning and stiching detection plane mirror (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210527　https://doi.org/10.3788/IRLA20210527

基于离散化路径与拼接的高精度光学检测方法

沈正祥[1,2*], 王 旭[1,2], 余 俊[1,2]

(1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室，上海 200092；
2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所，上海 200092)

摘 要：在超精密光学元件制造中,高精度光学检测技术是进一步提升光学加工精度和表征评价光学表面形貌的基础关键。非接触式光学检测方法凭借高效和无损伤检测的特点,取得广泛应用。但外界环境扰动容易对光学检测探针产生影响,降低检测精度。为此,文中提出了一种离散化检测路径与拼接方法,将传统螺旋线路径离散为多圆周和多径向路径,并通过路径间数据的相互拼接,减小了环境扰动误差。分析了离散化检测路径的参数设置,给出了一种均匀化的圆周路径分布策略。最后,基于自行搭建的光学检测平台,进行了环境误差抑制方法的验证实验。相较于抑制前的面形,抑制后的测量相对误差从 24.3% 降到了 4.3%。

关键词：光学检测； 环境误差； 路径规划； 数据拼接
中图分类号：O439 **文献标志码：**A **DOI：**10.3788/IRLA20210144

High-precision optical measurement method based on discrete path and splicing

Shen Zhengxiang[1,2*], Wang Xu[1,2], Yu Jun[1,2]

(1. Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the manufacturing of ultra-precision optical elements, high-precision optical detection technology is the key to further improve the optical processing accuracy and to characterize and evaluate the optical surface morphology. Non-contact optical detection method has been widely used because of its high efficiency and no damage detection. But the external environment disturbance can easily affect the optical probe and reduce the detection accuracy. Therefore, a method of discrete detection path and splicing is proposed in this paper. The traditional spiral path is divided into multi-circular and multi-path paths. The compensation of environmental disturbance error is realized by the data splicing between paths. The parameter setting of discrete detection path is analyzed, and a uniform distribution strategy of circular path is given. Finally, based on the optical detection platform, the verification experiment of the compensation method of environmental error is carried out. Compared with the uncompensated results, the measurement relative error is reduced from 24.3% to 4.3%.

Key words: optical measurement; environmental error; path generation; data splicing

收稿日期:2021-03-09; **修订日期:**2022-06-10
基金项目:国家自然科学基金 (11873004, 61621001)
作者简介:王旭, 男, 硕士生, 主要从事光学在线检测方面的研究。
导师(通讯作者)简介:沈正祥, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进光学制造技术、光学仪器研制等方面的研究。

0 引 言

随着非球面、自由曲面等各类复杂光学元件广泛应用在航天航空、成像、照明和能源等领域[1−4]，对元件面形精度的检测和评价提出了更高的要求。近年来，数控抛光和单点金刚石车削为代表的超精密光学加工技术可以直接获得亚微米级形状精度和纳米级粗糙度的表面[5−8]，但实际加工表面不可避免地会与理想表面产生偏差[9−10]，需要在加工过程中对元件表面进行高精度检测，并根据测量结果优化加工参数[11−12]。可以说，先进的光学检测技术是进一步提升光学加工精度和表征评价光学表面形貌的基础。

光学检测是目前常用的检测方法之一[13−14]，根据检测原理不同主要分为干涉式、激光式、共焦式等[15−17]。相比于接触式检测，光学检测具备更快的检测速度和更高的检测精度，且不会损伤被测表面，但抗环境干扰能力还较为薄弱[18−19]。外界环境因素的波动容易导致检测结果出现偏差，即环境误差[20]。2012 年，巴黎大学使用彩色共焦探针搭建了在线检测系统，分析了机床和环境热效应对检测结果的影响，实验结果表明温度与检测误差存在明显的相关性[21]。

为了减小环境误差对检测结果的影响，一种解决思路是通过控制检测环境来减小环境漂移的大小，但是通常需要耗费较大的成本，且不适用于一些环境波动大的检测场合，例如车间在线检测。另一种思路是测量出检测过程中的环境扰动误差，后续通过数值算法消除扰动影响，例如 2018 年同济大学基于超精密金刚石车削后的在线检测过程，设计了一种抑制环境扰动的方法，以径向轮廓检测数据为基准对螺旋形检测数据进行校正，最终加工后的离轴抛物面轮廓精度为 0.345 μm[22]。2020 年，美国北卡罗来纳大学 Hopper 等人分析了彩色共焦探针用于在线检测系统时所受到的热误差影响，并提出了一种抑制热误差的探针检测路径优化的思想，但没有具体的实施细节[23]。为此，文中基于误差抑制的思路，提出了一种可以抑制长时间检测过程中的环境误差的路径规划方法。

文中首先分析了环境因素对检测结果产生影响的原理。在此基础上提出了离散化的检测方法，将传统螺旋线路径离散为圆周和径向路径，利用离散化的圆周路径采集面形信息，并通过快速径向路径检测获得准确的径向面形数据。随后通过二者重合点数据的偏差来标定环境误差，并校正原始面形数据。进一步，分析圆周和径向检测时影响检测精度和效率的关键参数，例如圆周采样点数、圆环间隔等，并给出了一种均匀化的圆周路径分布策略。最后，基于所搭建的光学检测平台，进行了环境误差抑制方法的验证实验。

1 光学检测中环境误差的抑制方法

逐点扫描法是光学检测中一种常用的检测方法，依靠探针与表面的相对位移来获取表面特征数据。相比于全场扫描设备，逐点扫描设备通常更为小巧，且易于安装和集成，已被广泛应用于各类检测设备中。由于逐点扫描检测需要获得足够多的表面信息，通常需要更长的检测时间。因此，当外界环境扰动程度较大时，探针在检测过程中会受到环境因素的持续影响，成为检测误差的主要来源之一。

1.1 环境因素对检测结果的影响

光学检测的结果与光波长有关，波长会被介质的折射率所影响：$\lambda_0=n\lambda$(λ_0 为真空中的光波长，λ 为介质中的光波长，n 为介质折射率)。通常检测探针放置在空气当中，因而需要考虑空气折射率的变化对检测结果的影响。

空气折射率的大小与空气中的湿度以及温度等因素有关，根据 1966 年 Edlén 以及 1994 年科学家 K.P.Birch 和 M.J.Downs 的研究成果，空气折射率可以通过以下经验公式计算得到[20]：

$$\begin{cases}(n-1)_{tp}=\dfrac{p(n-1)_s}{96\,095.43}\times\dfrac{1+p(0.601-0.009\,72t)\times10^{-8}}{1+0.003\,661\,0t}\\(n-1)_s\times10^8=8\,342.54+\dfrac{2\,406\,147}{130-\sigma^2}+\dfrac{1\,599\,8}{38.9-\sigma^2}\\n_{tpf}-n_{tp}=-f(3.734\,5-0.040\,1\sigma^2)\times10^{-10}\\\cdots\end{cases}\tag{1}$$

式中：t 为环境温度；p 为环境压强；$(n-1)_{tp}$ 为标准状态 (干燥空气环境，压强 p 为 100 000 Pa，温度 t 为 20 ℃，CO_2 含量为 0.04%) 的空气折射率减 1；$(n-1)_s$ 为空气折射率色散系数；σ 为波数；n_{tpf} 为考虑湿度时的空气折射率修正值；n_{tp} 为干燥空气的折射率；f 为环境中水蒸气的分压。

为了方便说明，通常以检测环境来表示各种空气折射率影响因素的集合，而环境误差则为检测过程中各种外界环境因素所引起的实测值与理论值的偏差。对于安装在超精密车削加工机床上的在线检测系统来说，环境条件更为复杂和多变，其中温度和湿度的变化很容易引起检测结果的波动。

1.2 离散化检测路径和数据拼接方法

对于非接触式光学检测，通常需要针对被测表面生成相应的检测路径。常见的检测路径有螺旋线型路径、圆周路径以及径向路径等。其中螺旋线路径是一种连续型的检测方式，当考虑环境扰动影响时，误差将持续作用于检测数据中，难以对环境误差进行有效的分离和处理。而圆周和径向路径都是分散型的路径，将整体的面形划分为独立的数据段，在处理时可以对单个圆环或径向路径中的环境误差进行分析和抑制，降低了数据处理的难度。

1.2.1 检测路径规划

如图 1(a) 所示，圆周路径为一系列同心圆环。在线检测过程中，通过旋转轴控制光学元件进行匀速转动，然后通过 X 运动轴控制探针依次在不同半径的圆环位置进行停留，实现探针在每一个测量点的定位，最终完成整个表面形貌信息的获取。

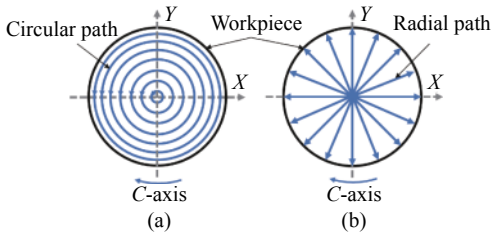
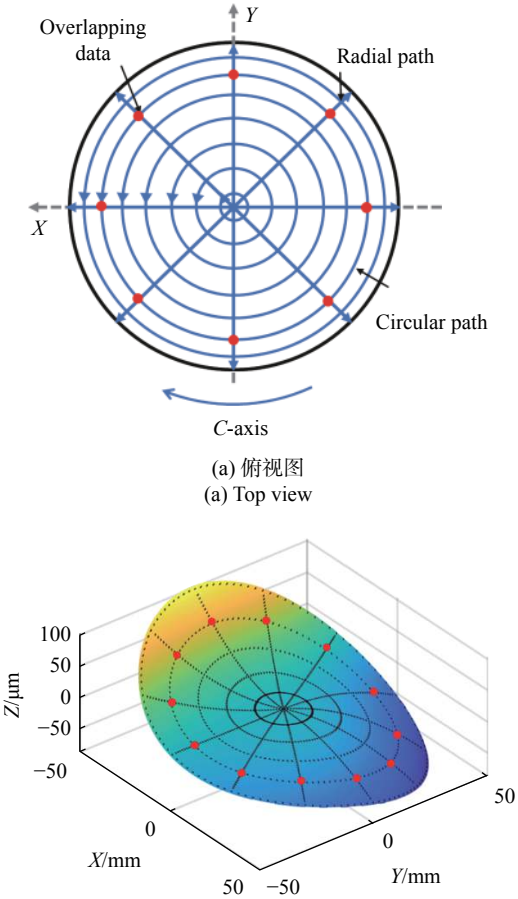


图 1 (a) 圆周路径; (b) 径向路径

Fig.1 (a) The circular scanning path; (b) The radial scanning path

同时，为了对圆周检测数据进行校正，设计了与之相配合的离散化径向路径，如图 1(b) 所示。径向路径整体为一系列过旋转中心的射线。检测过程中探针从工件旋转中心沿着 X 轴进给到边缘位置，获得该半径所对应的的径向形貌数据，通过旋转被测表面，可以改变径向采样的角度。

为了抑制检测数据中的环境误差，需要将圆周和径向路径进行拼接。图 2 为拼接检测的原理图，圆周和径向路径的数据相互交织呈网格状分布，每一个单独的圆环路径都与所有径向检测路径有重叠数据点，如图中红点所示。



(a) 俯视图
(a) Top view

(b) 路径在表面上的投影
(b) The projection of the path on the surface

图 2 拼接检测原理图

Fig.2 Schematic diagram of splicing measurement

图 2(b) 为路径在三维表面的投影图像，检测探针可以被视为一个虚拟刀具，整个检测过程可以被视为通过虚拟刀具对光学表面进行“车削”的过程。因此，该方法可以对任意形状表面进行检测，只需要像生成车削路径一样生成检测路径，并在后续数据处理时提取有效面形数据即可。

1.2.2 数据拼接方法

在规划的离散化检测路径中，圆周检测用于获取表面形貌信息，与螺旋线路径检测相同，其检测结果会受到环境因素的影响。而径向检测可以提供径向参考数据，在保证取样点足够的前提下，径向检测可以通过加快探针的进给速度，使每段径向数据中的环境误差 ΔZ_e 小于探针的检测精度 A:

$$\Delta Z_e \leqslant A \tag{2}$$

满足该条件的径向检测数据可以被视为理想面形数据。同时，考虑到不同角度的径向路径都相交于旋转中心点 O，因而可以令 O 点为参考点，将其他所有数据进行平移，直到所有路径的中心点数据重合，即让所有径向数据拼接在一起，由此可以消除各个径向路径间的环境误差。

随后以径向检测数据为参考，对圆周数据进行校正，原理如图 3 所示。蓝色线条数据为某一半径所对应的圆周数据，而红色点数据为该圆环与各径向路径交点处的径向数据。两者的偏差 Δz_i 即代表了环境误差的大小。通过对多组偏差值进行平均来评估整体圆环数据的偏移程度，并修正原始检测数据，即可获得更为准确的圆环数据，公式如下：

$$Z' = Z - \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta z_i}{N} \tag{3}$$

式中：Z 为实测圆环数据；Δz_i 代表各个角度所对应的径向数据与圆周数据的偏差；N 为径向路径的数量；Z'为修正后的圆环数据。

通过径向数据校正圆周数据的过程可以被视为又一次拼接的过程。不同于传统的子孔径拼接法将被测表面划分为多个区域，再对三维面形进行拼接，此处所提出的拼接方法是针对二维检测数据的拼接，即以径向数据为基准，将各个圆环的数据进行重新编排并组合在一起，得到更为准确的整体面形数据。

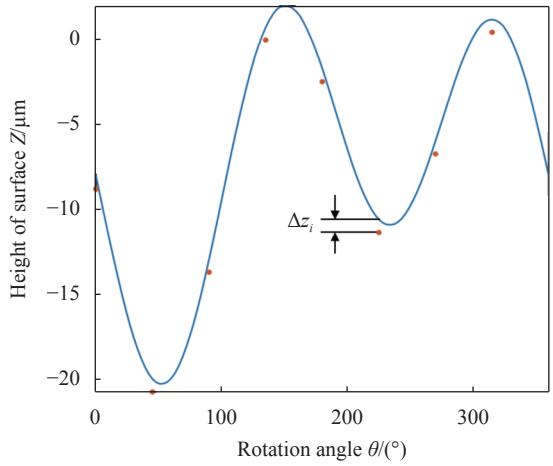


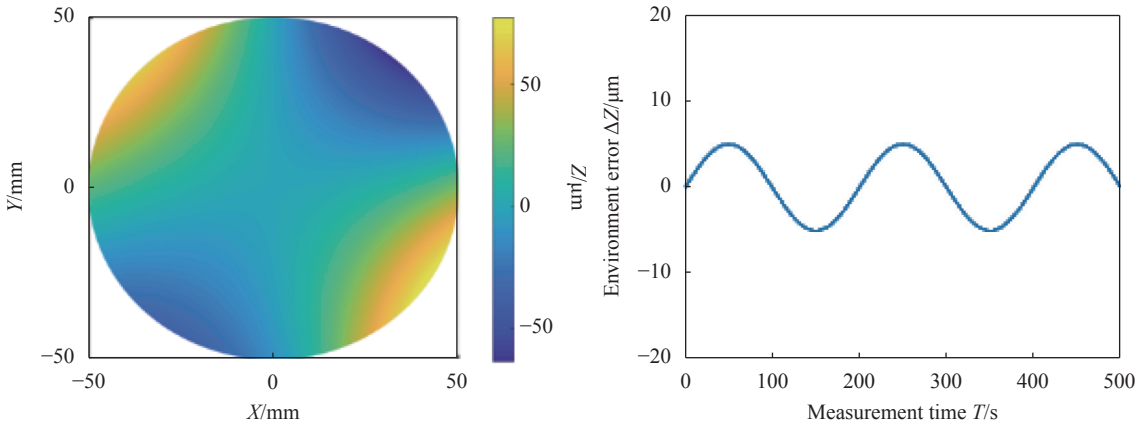
图 3 数据校正原理示意图

Fig.3 The principle of data compensation

1.2.3 仿真分析

为了验证所提出方法的有效性，进行了仿真检测实验。图 4(a) 为一个通过泽尼克多项式随机生成的理想表面，检测过程中的环境误差以正弦曲线表示，在 500 s 的测量时间内，环境误差的幅值为 5 μm，如图 4(b) 所示。环境误差抑制前后的面形分别如图 4(c) 和 4(d) 所示。将检测的面形减去理想面形得到面形误差的图像依次如图 4(e) 和 4(f) 所示。

从仿真结果可以看出未抑制环境误差的表面出现了明显的变形，其面形误差的 PV 值为 10 μm，而抑制环境误差后的面形误差 PV 值降低到 0.053 μm，说明抑制方法能有效降低光学检测过程中的环境扰动。



(a) (b)

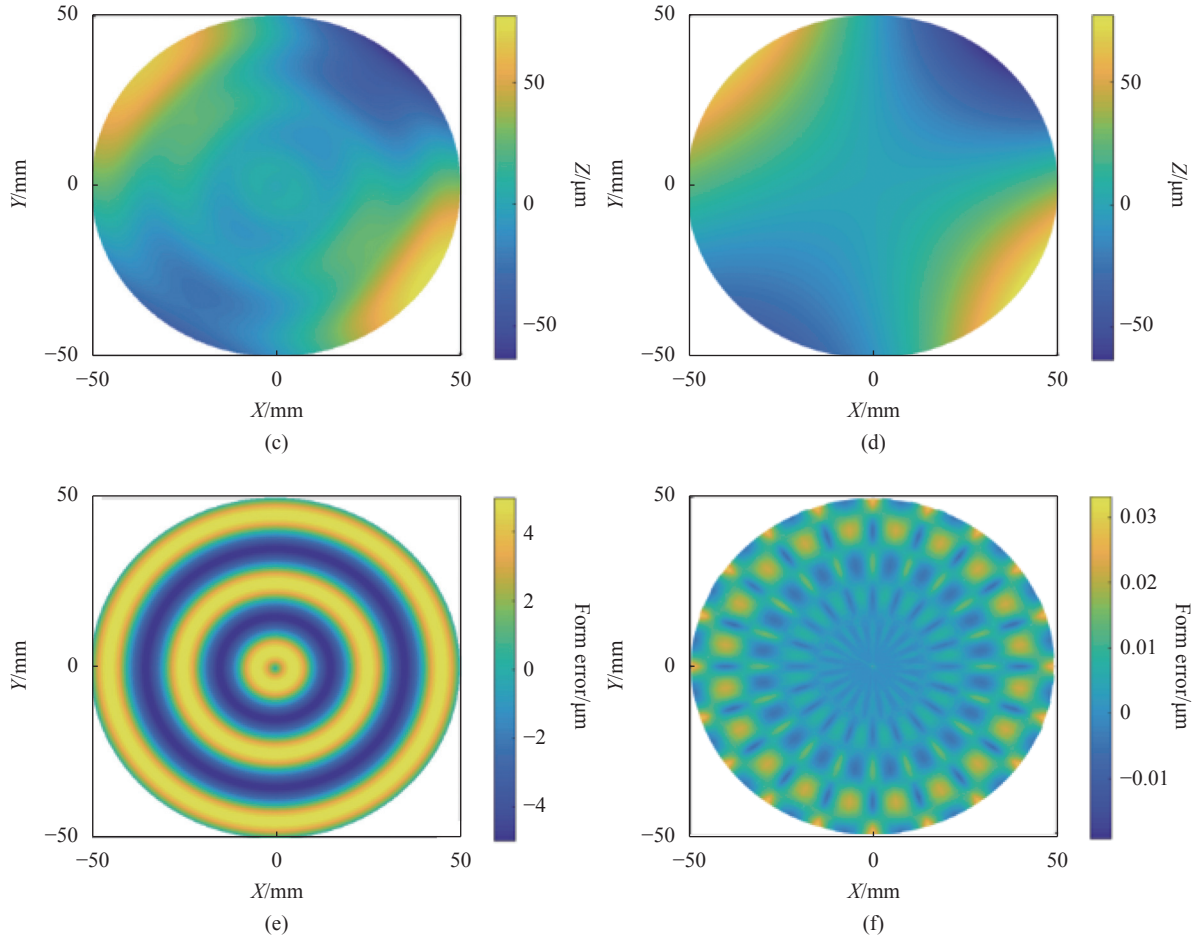


图 4 环境误差抑制方法的仿真结果

Fig.4 Simulation results of environmental error suppression method

2 离散化检测路径的参数设置

在实际检测时，检测参数与光学检测精度以及检测效率密切相关，例如采样密度、采样时间等。在检测过程中一方面需要确保采集足够多的面形信息，另一方面还需要考虑检测时间的长短，避免过长的检测周期引入更大的环境误差。因此，需要对检测路径的参数进行合理的规划。

2.1 圆周检测采样点数确定

对于圆周路径检测，其采样密度是关键参数，决定了重构后面形的准确性。在实际检测过程中要求圆周检测能尽可能准确地获得面形数据的同时也能最大程度减小检测时间。

圆周检测过程中，光学表面保持匀速转动，同时探针在各个圆环间进行位移，假设转速为 S，总圆环数为 m，探针的采样频率为 f，则总采样点数 N 可表示为：

$$N=\frac{mf}{S} \tag{4}$$

在实际检测时，采样点数过高会影响检测效率，给数据处理带来困难，而过低则容易忽略一些关键形貌数据，它的确定与所测表面的特征密切相关，通常可以通过以下公式对采样点数进行规范[24]：

$$n=\frac{1}{2}\left[\frac{kz_{1-\delta}-z_{\gamma}}{1-k}\right]^2 \tag{5}$$

式中：$k=D/6\sigma$ 代表工艺能力系数，D 为表面在设计时所给定的公差范围，6σ 为加工时的误差分散范围；$z_{1-\delta}$ 和 z_{γ} 分别为标准正态概率分布的 $1-\delta$ 和 γ 分位数。该公式综合考虑了被测表面的设计以及加工因素对采样点数的影响，可以指导圆周检测时转速和圆环数的确定。

2.2 圆周检测间隔确定

在获得圆周检测的采样点数后，还需对具体圆环

的分布进行确定。一种常用的方法为将圆环按照等间隔进行排列，虽然可以简单快速地生成探针的测量坐标点。但是该方法忽略了面形的曲率对检测的影响，可能造成曲率大的测量点分布稀疏，而曲率小的地方则过于密集。为此，文中提出了一种圆周路径分布方法。

如图 5 所示，以二次曲面作为被测表面，其轮廓线方程为 $z=f(x)$，探针沿 Z 方向的投影与表面的交点 P 即为测量点，为了确保检测的均匀性，测量点需要在法向方向对表面进行均分，即需要确保每相邻两个测量点间的弧长相同。

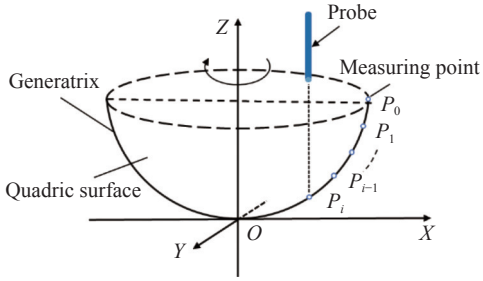


图 5 均匀化圆周路径分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of uniform circular path distribution

以轮廓的边缘点 P_0 为参考点，截线上任意点 $P_i(x_i, z_i)$ 与 $P_0(x_0, z_0)$ 间的弧长 S_i 可以表示为：

$$S_i=\left|\int_{x_0}^{x_i}\sqrt{1+(Z')^2}\mathrm{d}x\right| \tag{6}$$

同时可以通过圆环数 m 求出任意两个相邻点间的弧长 s，并根据实际表面的尺寸以及轮廓方程计算得到 P_0 点的坐标，联立方程即可推导出 P_i 的坐标：

$$\begin{cases} S_i=\left|\int_{x_0}^{x_i}\sqrt{1+(Z')^2}\mathrm{d}x\right|=is \\ s=\left|\int_{0}^{x_0}\sqrt{1+(Z')^2}\mathrm{d}x\right|/m \\ z_i=f(x_i) \end{cases} \tag{7}$$

探针在测量坐标系中的横坐标与 P_i 相同，纵坐标与 P_i 保持恒定的距离，由此可以确定探头的测量坐标为 (x_i, z_i+C)，其中 C 为测量距离。

2.3 径向检测参数确定

径向检测的目的是为了提供准确的径向数据，用于校正周向的面形数据，检测前应当确定单个径向路径的检测周期和整体的径向检测数。首先单个径向方向的采样点需要正确表征径向形貌，同时应具备足够快的检测速度，以确保检测周期内的环境误差小于探针的检测精度。其参数设置可以根据下式确定：

$$\begin{cases} T\cdot f\geqslant m \\ \Delta Z_e\leqslant A \end{cases} \tag{8}$$

式中：T 为一次单独径向检测的时间，f 为探针检测频率；m 为圆环检测数目；ΔZ_e 为该时间内的环境误差，可以通过与检测同步进行的环境监控测得；A 为探针检测精度。根据该公式可以确定检测的时间范围。

另外一个关键参数为径向检测的数目 l，l 的大小影响了径向路径与圆周路径在同一圆环上重叠点的数量。当实际检测时的环境扰动程度较大时，应适当提高 l 值以获得更精确的检测面形，而当环境扰动程度较小时，可以适当减小 l 值以提高检测的整体效率。

3 环境误差抑制实验

基于 Moore Nanotech 450 UPL 超精密单点金刚石车削机床搭建了光学原位检测系统，进行环境误差抑制方法的验证实验。相较于离线检测，原位检测更容易受到环境扰动的影响，因此对其进行实验具有实际的应用价值，图 6 为实验装置的实物图。

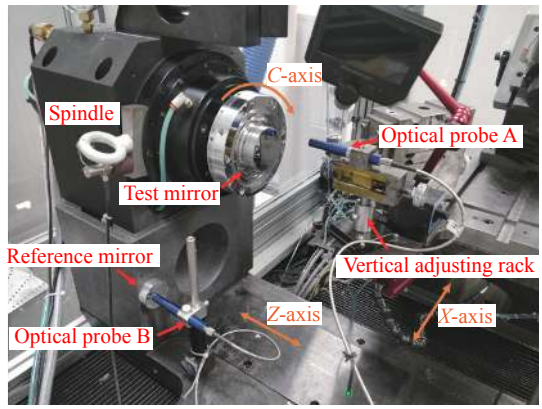


图 6 实验装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental device

机床由一个主轴 (C 轴) 和两个运动轴 (X 轴和 Z 轴) 所组成。如表 1 所示为机床关键性能参数的实测结果，其中 Z 轴的水平直线度为 0.063 μm(总量程为 300 mm)，X 轴的水平直线度为 0.129 μm(总量程为 300 mm)。X 轴和 Z 轴的分辨率为 0.034 nm，定位精度均优于 10 nm，C 轴的定位精度为 0.6″，高精度的位移系统可以对检测点进行精确地定位。

表 1 机床性能测试结果

Tab.1 Performance test of the lathe

Performance test	Result
X-axis horizontal straightness/μm	0.129
X-axis vertical straightness/μm	0.360
Z-axis horizontal straightness/μm	0.063
Z-axis vertical straightness/μm	0.753
X-*Z* axes squareness/(″)	0.486
C-axis motion error (radial)/μm	7.21
C-axis motion error (axial)/nm	6.58
C-axis positioning accuracy/(″)	0.60

检测用的光学探针选用 Precitec 公司的彩色共焦探头，并通过垂直调整架针安装于机床之上，如图 7 所示。调整架和机床轴系的相互配合可以实现探针中心和机床旋转中心的精确对准。表 2 为探针的检测参数，其测量范围为 300 μm，检测精度约为 0.1 μm，重复精度为 30 nm，*Z* 轴分辨率为 3 nm。

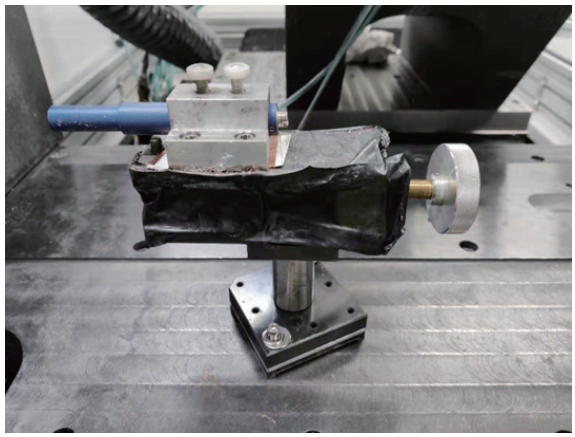


图 7 彩色共焦探头与垂直调整架

Fig.7 Chromatic confocal probe with vertical adjustable mount

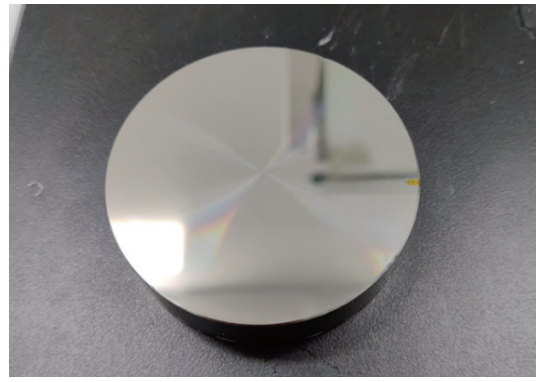
装置搭建完成后，基于所提出的抑制方法，对一个直径为 60 mm 的镍平面进行原位检测。图 8(a) 为平面的实物图，在表面上粘贴了定位标记，用于数据处理时确定数据点的角度。图 8(b) 为表面在离线式 Zygo 干涉仪上的面形检测结果，面形 PV 值为 0.611 μm，RMS 值为 0.140 μm。

首先进行圆周路径检测，工件转速维持 60 r/min，探针沿着 *X* 轴每间隔 0.2 mm 进行一次圆环测量，总体检测时间为 800 s。圆周检测的面形误差如图 9 所示，PV 值为 0.791 μm，RMS 值为 0.173 μm。

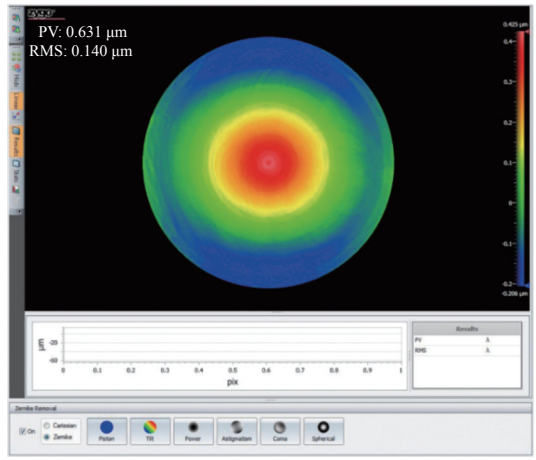
表 2 探针的性能参数

Tab.2 Parameters of the probe

Parameter	Specification
Measuring range/μm	300
Working distance/mm	4.5
Resolution/nm	3
Spot diameter/μm	5
Lateral resolution/μm	2.5
Numerical aperture	0.5
Measurement angle/(°)	90±30
Measuring accuracy/μm	0.1
Reproducibility/nm	30



(a)

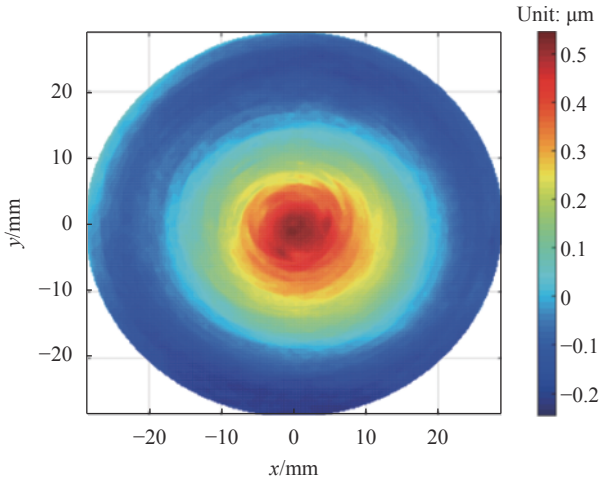


(b)

图 8 被测表面。(a) 直径为 60 mm 的镍平面实物图；(b) 干涉仪检测结果

Fig.8 The measured surface. (a) Nickel flat mirror with diameter of 60 mm; (b) Interferometer test results

随后进行径向路径检测，以 45°为间隔，进行了 8 次径向测量，每一次径向检测的探针速度设置为

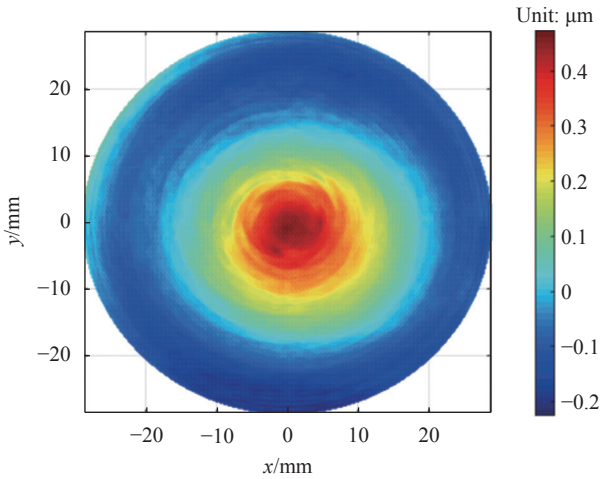


PV: 0.791 μm RMS: 0.173 μm

图 9 圆周路径检测的面形误差

Fig.9 Shape error of circular path measurement

15 mm/min。基于所得到的径向数据校正圆周检测面形，结果如图 10 所示。



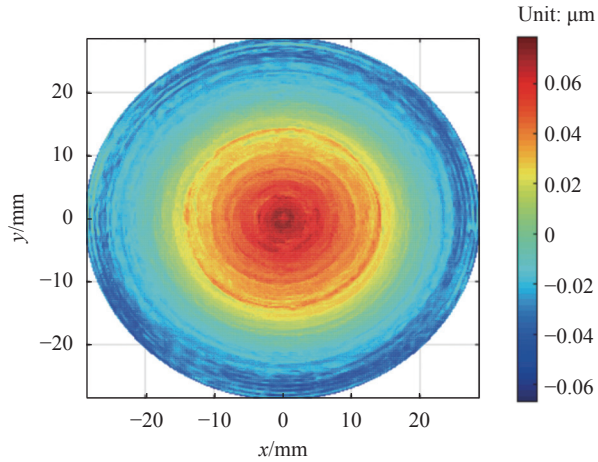
PV: 0.697 μm RMS: 0.146 μm

图 10 抑制环境误差后的面形误差

Fig.10 Shape error after suppress environmental error

抑制后的面形误差 PV 值为 0.697 μm，RMS 值为 0.146 μm。对环境误差抑制前后的表面形貌做差，如图 11 所示，偏差的 PV 值为 0.145 μm，RMS 值为 0.029 μm。由于圆周和径向检测依次进行，且整体测量行程较短，在测量过程中由机床运动所引起的误差可以忽略，二者间检测数据的偏差主要是由环境扰动所引起。

为了验证方法的可重复性，进行了 5 次重复实验，对比抑制环境误差前后的面形 RMS 值如图 12 所



PV: 0.145 μm RMS: 0.029 μm

图 11 抑制前后的面形偏差

Fig.11 Shape deviation before and after suppress

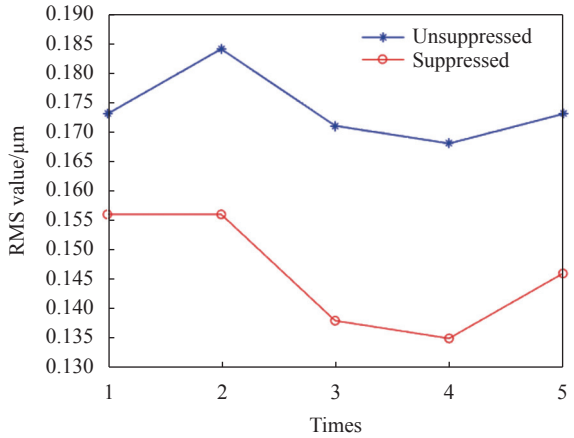


图 12 抑制前后的面形 RMS 值对比

Fig.12 Comparison of the RMS value of the surface shape before and after suppression

示。通过将面形误差的 RMS 值于与离线式干涉仪进行了对比，处理后的实验数据如表 3 所示。

表 3 实验数据

Tab.3 Experimental data

	Unsuppressed	Suppressed	Interferometer
RMS value/μm	0.174	0.146	0.140
Standard deviation/μm	0.006	0.009	-
Deviation from interferometer/μm	0.034	0.006	-
Relative error	24.3%	4.3%	-

可以看到，抑制误差前面形 RMS 均值为 0.174 μm，标准差为 0.006 μm。抑制后的 RMS 均值为 0.146 μm，

标准差为 0.09 μm。对比离线式干涉仪的检测结果，抑制前面形的 RMS 值与离线式干涉仪的偏差为 0.034 μm，抑制后 RMS 的偏差降到了 0.006 μm，测量相对误差从 24.3% 降到了 4.3%。证明了提出的离散化路径检测和拼接方法的可靠性，能有效提高环境扰动下的光学检测精度。

4 结 论

文中提出了一种抑制光学检测结果中环境误差的离散化检测路径和数据拼接的方法，通过离散化的圆周路径采集面形信息，并通过快速的径向路径检测获得参考用的径向面形数据，通过二者重合点数据的偏差来标定环境误差，并校正面形数据。进一步，通过仿真验证方法的有效性，并分析了实际检测时影响检测精度的路径参数设置。最后，搭建了光学检测平台，通过所提出的离散化检测路径和拼接方法对面形进行了检测，与未抑制误差的结果相对比，测量相对误差从 24.3% 降到了 4.3%。这证明所提出方法的可靠性，能有效抑制环境因素引入的误差，提高光学检测的精度。

参考文献：

[1] Ye J, Chen L, Li X, et al. Review of optical freeform surface representation technique and its application [J]. ***Optical Engineering***, 2017, 56(11): 1.

[2] Savio E, Chiffre L D, Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts [J]. ***CIRP Annals-Manufacturing Technology***, 2007, 56(2): 810-835.

[3] Thompson K P, Rolland J P. Freeform optical surfaces: A revolution in imaging optical design [J]. ***Optics & Photonics News***, 2012, 23(6): 30-35.

[4] Cheng D, Wang Y, Hua H, et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism [J]. ***Applied Optics***, 2009, 48(14): 2655.

[5] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. ***CIRP Annals-Manufacturing Technology***, 2013, 62(2): 823-846.

[6] Chiffre L D, Kunzmann H, Peggs G N, et al. Surfaces in precision engineering, microengineering and nanotechnology [J]. ***Cirp Annals Manufacturing Technology***, 2003, 52(2): 561-577.

[7] Tohme Yazid E, Lowe Jeff A. Machining of freeform optical surfaces by slow slide servo method[C]//Proceedings of the American Society for Precision Engineering, 2004.

[8] Yin Z Q, Dai Y F, Li S Y, et al. Fabrication of off-axis aspheric surfaces using a slow tool servo [J]. ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 2011, 51(5): 404-410.

[9] Bi Q, Huang N, Sun C, et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement [J]. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 2015, 89: 182-191.

[10] Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E, et al. Thermal issues in machine tools [J]. ***CIRP Annals***, 2012, 61(2): 771-791.

[11] Zhang X D, Zeng Z, Liu X L, et al. Compensation strategy for machining optical freeform surfaces by the combined on- and off-machine measurement [J]. ***Optics Express***, 2015, 23(19): 24800-24810.

[12] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools-a review. Part II: Thermal errors [J]. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 2000, 40(9): 1257-1284.

[13] Zhang Lei, Liu Dong, Shi Tu, et al. Optical free-form surfaces testing technologies [J]. ***Chinese J Optics***, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)

[14] Li Y, Gu P. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. ***Computer-Aided Design***, 2004, 36(13): 1395-1417.

[15] Li D, Tong Z, Jiang X, et al. Calibration of an interferometric on-machine probing system on an ultra-precision turning machine [J]. ***Measurement***, 2018, 118: 96-104.

[16] Burada D R, Pant K K, Mishra V, et al. Development of a metrology technique suitable for in situ measurement and corrective manufacturing of freeform optics [J]. ***Advanced Optical Technologies***, 2019, 8(3-4): 203-215.

[17] Sepp J, Niemel K, Lassila A. Metrological characterization methods for confocal chromatic line sensors and optical topography sensors [J]. ***Measurement Science and Technology***, 2018, 29(5): 054008.

[18] Defisher S, Bechtold M, Mohring D. A non-contact surface measurement system for freeform and conformal optics[C]// Proceedings of SPIE, 2011, 8016: 80160W.

[19] Nouira H, El-Hayek N, Yuan X, et al. Metrological characterization of optical confocal sensors measurements

(20 and 350 travel ranges) [J]. ***Journal of Physics: Conference Series***, 2014, 483: 012015.

[20] Owens J C. Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition [J]. ***Applied Optics***, 1967, 6(1): 51.

[21] Quinsat Y, Tournier C. In situ non-contact measurements of surface roughness [J]. ***Precision Engineering***, 2012, 36(1): 97-103.

[22] Yu Jun, Shen Zhengxiang, Wang Xiaoqiang, et al. In situ noncontact measurement system and two-step compensation strategy for ultra-precision diamond machining [J]. ***Optics Express***, 2018, 26(23): 30724-30739.

[23] Hopper L, Noste T, Miller J, et al. Error sources, compensation, and probe path optimization for on-machine metrology of freeform optics[C]//Optical Manufacturing and Testing XIII, 2020, 11487: 1148709.

[24] Menq C H, Yau H T, Lai G Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection [J]. ***IEEE Transactions on Robotics & Automation***, 1992, 8(2): 268-278.