

双光纤点衍射干涉投影系统误差校正及优化

朱其幸¹, 王道档^{1,2*}, 卢毅伟¹, 孔 明¹, 许新科¹

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江大学温州研究院, 浙江 温州 325006)

摘要: 条纹投影测量技术为复杂曲面提供了一种大动态范围的非接触式三维形貌检测方式。在基于双光纤点衍射干涉的条纹投影检测系统中, 系统结构参数对最终面形检测精度影响较大。通过建立系统结构几何分析模型, 对系统结构参数进行了优化。针对双光纤点衍射探头投射角标定误差的影响, 传统基于零级亮条纹定位的投射端投射角标定方法由于临近级次条纹光强较为接近难以区分而导致存在较大误差, 为此提出了一种基于基准平面的投射角迭代校正方法, 在原标定方法的基础上进一步提高了其标定精度, 进而有效提高了面形检测精度。为验证所提出方法的可行性, 搭建实验系统对不同斜率动态范围的待测物测量比对, 结果表明校正前后的测量系统与三坐标测量机的测量结果偏差从 0.418 2 mm 减小至 0.021 1 mm, 实现了微米级的检测精度, 为各类复杂曲面的高精度检测提供了一种可行的方法。

关键词: 轮廓测量; 光纤点衍射干涉; 条纹投影; 几何误差校正; 复杂曲面

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210140

Optimization and error correction of dual-path fiber point-diffraction interference projection system

Zhu Qixing¹, Wang Daodang^{1,2*}, Lu Yiwei¹, Kong Ming¹, Xu Xinke¹

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Wenzhou Research Institute of Zhejiang University, Wenzhou 325006, China)

Abstract: The fringe projection testing technology provides a non-contact three-dimensional profile measurement method with large dynamic range for various complex surfaces. In the dual-path point-diffraction interference projection testing system, the system structure parameters could significantly influence the surface testing accuracy. The system structural parameters were optimized based on the geometric model of testing system. In view of the projection angle calibration error in dual-fiber point-diffraction probe, the traditional method based on location of zero-order bright fringe could lead to obvious measurement error, due to the fact that the light intensity of the neighboring-order fringes was too close to distinguish from each other. To address this issue, an iterative correction method based on reference plane was proposed for the projection angel calibration, and it could effectively improve the testing accuracy. To demonstrate the feasibility of the proposed method, an experimental testing system was built to test the samples with various slopes dynamic ranges. The results show

收稿日期:2021-03-05; 修订日期:2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金(51775528); 浙江省自然科学基金(LY21E050016, LY17E050014)

作者简介:朱其幸,男,硕士生,主要从事光电检测技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介:王道档,男,教授,博士,主要从事光电精密检测技术方面的研究。

that the measurement deviation between the testing system after error correction and high-precision coordinate measuring machine is reduced from 0.418 2 mm to 0.021 1 mm, and the testing accuracy in the order of microns is achieved, providing a feasible way for the high-precision testing of various complex surfaces.

Key words: profilometry; fiber-diffraction interferometry; fringe projection; geometrical error calibration; complex surface

0 引言

三维形貌检测技术在机械加工、零部件自动组装和逆向工程等应用中发挥着重要作用,尤其是随着工业零件表面的面形复杂程度以及加工精度要求的不断提高,对于三维形貌测量技术的精度和动态测量范围等提出了更高的要求。目前常用的三维形貌检测方法有三坐标测量机、光学干涉技术、多目视觉三维测量技术、结构光投影测量技术以及光纤干涉投影测量技术等^[1-5]。三坐标测量机多采用接触式单点采样方式,可实现微米级测量,但单点采样导致测量过程耗时、工作效率低下,且接触过程中易划伤被测表面。干涉技术是目前公认的高精度光学面形检测方式^[6-8],其测量精度可达到纳米甚至亚纳米量级,但是其测量动态范围较小,难以满足复杂曲面的检测需求。多目视觉三维测量技术的测量范围较大,但其测量精度仅能达到毫米级,对摄像机的标定精度要求高,所需的匹配算法也较为复杂。结构光投影测量技术的系统装置简单,但测量精度较低,仅能达到亚毫米级,且受限于投影仪分辨率和标定精度。

基于双光纤点衍射干涉投影测量技术^[9-10]为复杂曲面的三维形貌检测提供了一种较高精度、测量过程简便的非接触式测量方式。不同于传统的结构光投影测量技术,该方法是将点衍射干涉条纹投影至被测物体表面,通过相干光程差分析来实现曲面面形的重构测量。测量中需对系统结构参数进行标定,而标定过程所引入的结构几何误差会影响最后的三维形貌检测精度。尤其是在投射端投射角的标定中,现有的方法是基于零级亮条纹定位实现的^[11],但在实际测量中所获取的零级条纹与邻近级次条纹的光强较为接近,以致难以明显区分,进而会导致标定结果的精度不高,是影响面形检测精度的一个主要结构参数因素。

针对双光纤点衍射干涉投影检测系统中结构几何误差的影响,文中在建立结构误差几何分析模型的

基础上,对系统的光纤点衍射探头纤芯距等主要结构参数进行了优化。同时,针对投射端投射的高精度标定需要,在传统标定方法的基础上,提出了一种基于基准平面的投射角的迭代校正方法,以此实现系统检测精度的提高。最后对所提出的校正方法进行实验验证,对多种不同斜率动态范围的待测样品进行检测,并与三坐标测量机和结构光投影测量法的测量结果进行比对分析。实验结果证明,文中所提出的校正方法有效地提高了双光纤点衍射干涉投影检测精度,可为各类复杂曲面的高精度检测提供一种可行方法。

1 原理

1.1 系统光路布局

基于双光纤点衍射干涉投影的三维形貌测量系统光路布局如图 1 所示。单纵模激光器发出 532 nm 波长的激光光束,经过偏振片、二分之一波片(HWP)后得到线偏振光,随后入射至偏振分光棱镜(PBS)分成两路相干光,其中 p 分量透射, s 分量反射。透射 p 偏振光由光纤耦合器耦合进入单模保偏光纤 SF₁。反射 s 偏振光经过另一快轴方向与 x 轴方向的夹角为 45°的四分之一波片(QWP)后,垂直入射到安装于压电陶瓷(PZT)装置上的反射镜,经其反射后沿原路返回并再次通过四分之一波片 QWP 和偏振分光棱镜 PBS,随后被另一个光纤耦合器耦合进入单模保偏光纤 SF₂。

单模保偏光纤 SF₁ 与 SF₂ 的出射端分别作为点衍射源,将二者相平行且共面安装于一个测量探头内,使得两点光源在三维空间内产生干涉^[12-13]。将双光纤点衍射探头出射端的点衍射干涉条纹投射至被测物表面,由此解调得到被测表面的面形信息。计算机(PC)连接控制压电陶瓷(PZT)产生微米位移改变光程差以实现多步移相干涉,另一端连接工业 CCD 相机,控制相机实时采集包含被测物表面形貌信息的干涉条纹图案。

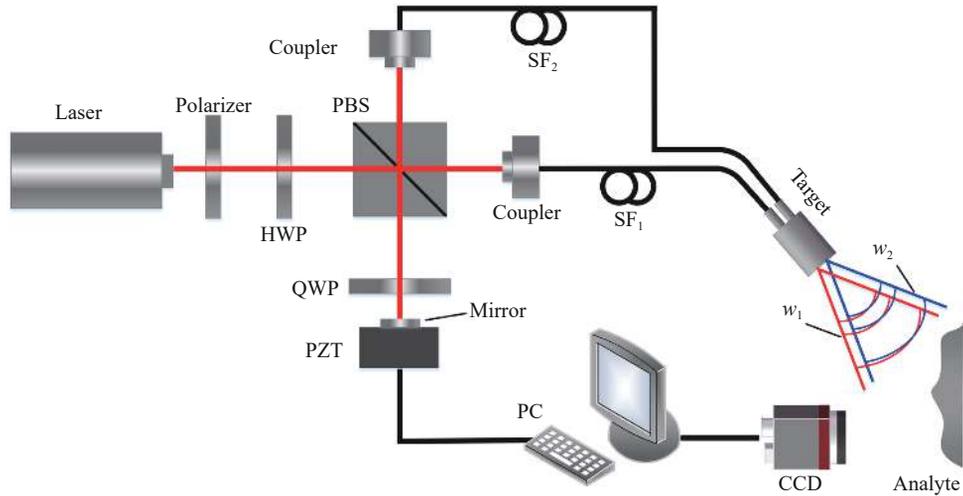


图 1 双光纤点衍射干涉投影检测系统光路分布图

Fig.1 System layout for dual-path point-diffraction interference projection testing system

1.2 测量原理

以相机成像平面、参考屏与光纤投射端建立双光纤点衍射干涉投影检测系统模型,如图 2 所示。设 CCD 相机光轴方向为 Z 轴,参考屏所在的面为 XY 平面,Z 轴与参考屏的交点为坐标原点 O;以相机成像平

面的中心 O_i 建立像平面坐标系,像素点的水平和竖直方向分别为 m 、 n 轴,用于表示像平面纵横坐标信息。点 O_i 与相机镜头中心 A 之间的距离为 d ;点 A 与坐标原点 O 之间的距离为 D ;投射端中心 C 与镜头中心 A 之间的距离为 L 。

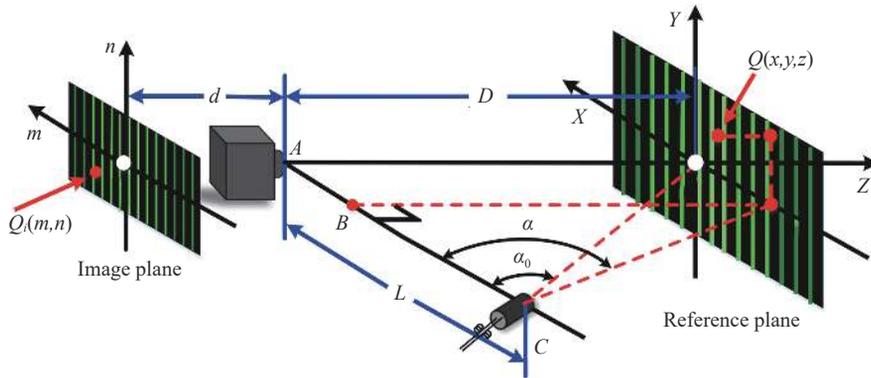


图 2 光纤点衍射干涉投影原理图

Fig.2 Schematic diagram of fiber-diffraction interference projection

取空间内任意一点 $Q(x,y,z)$, 其在 X 轴上的映射点 Q_x 的坐标信息与投射端的投射角度 α 之间关系可表示为:

$$\tan\alpha = (D-z)/(L-x) \tag{1}$$

通过相机成像原理可得点 $Q(x,y,z)$ 与像平面坐标系内点 $Q_i(m,n)$ 之间的关系,即:

$$\frac{x}{-m} = \frac{y}{-n} = \frac{D-z}{d} \tag{2}$$

最后结合公式 (1)、(2) 可得点 $Q(x,y,z)$ 的坐标信息,可表示为:

$$\begin{cases} x = mL/(m - d \cot\alpha) \\ y = nL/(m - d \cot\alpha) \\ z = dL/(m - d \cot\alpha) + D \end{cases} \tag{3}$$

式中: m, n 为点 $Q(x,y,z)$ 对应的像平面坐标信息,可通过 CCD 相机采图后直接获得。投射角 α 则可通过对干涉图进行解调后得到的相位信息 $\varphi(x,y,z)$ 来获得,

具体表示如下:

$$\varphi(x, y, z) = (2\pi a \tan(\alpha - \alpha_0)) / \lambda \quad (4)$$

式中: a 为光纤的纤芯距; α_0 为投射端中心 C 点对应的零级条纹光面内 \overline{OC} 与 \overline{CA} 之间的夹角, 即投射端初始投射角。

现有的初始投射角 α_0 的实际测量标定是通过确定零级亮条纹的位置求得的。而测量中由于所获取的零级条纹与邻近级次条纹的不同级条纹光强都较为接近以致难以明显区分, 进而会导致该方法得到的标定结果难以达到较高的精度, 所引入的标定误差极大地影响了系统检测精度。此外, 根据曲面重构公式可知, 光纤纤芯距 a 也会直接影响系统的曲面检测精度。因此有必要对上述系统主要的误差因素分析与校正, 以实现高精度的三维重构测量。

2 系统仿真误差分析

为分析双光纤点衍射干涉投影检测系统结构参数对测量精度的影响, 可建立相应的系统结构误差几何分析模型。仿真分析中, 设置两光纤的纤芯距 a 为 0.125 mm, 初始投射角 α_0 为 56.3°; 随机生成待测面形 (如图 3(a) 所示, 其峰谷 (PV) 值为 9.16 μm), 并设置其口径为 40 mm×40 mm; 利用光线追迹方法模拟理想点衍射干涉过程^[14], 投射至被测表面调制后得到相应的变形干涉条纹 (如图 3(b) 所示), 并利用相机成像

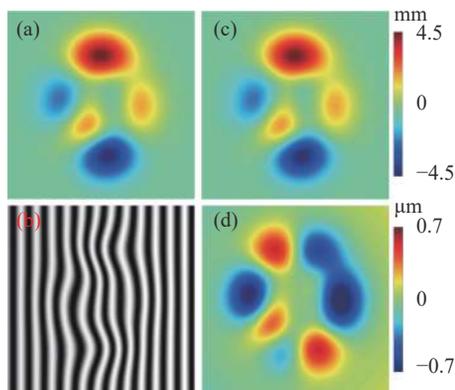


图 3 仿真中面形重构原理性误差分布。(a) 真实待测面形; (b) 经待测面调制后变形干涉条纹; (c) 重构面形; (d) 重构面形残差

Fig.3 Systematic error distribution in surface reconstruction in simulation. (a) True tested surface; (b) Fringe pattern modulated by tested surface; (c) Reconstructed surface; (d) Residual surface error

原理得到在像平面上所成的像。利用解包裹算法得到干涉条纹对应相位信息, 最后由相位分布与被测物表面三维信息之间的映射关系可重构得到待测面形, 如图 3(c) 所示。图 3(d) 为最后重构面形 (图 3(c)) 与其真实面形 (图 3(a)) 之间的残差分布, 该残差的均方根 (RMS) 值为 0.22 μm , PV 值为 1.38 μm 。在该测量系统中, 光纤纤芯距 a 的取值以及投射端的投射角度 α_0 的标定精度都对面形检测精度有着不可忽视的影响。

2.1 纤芯距 a 的影响

根据公式 (4) 可知, 纤芯距 a 会直接影响被测表面对应的相位信息分布提取以及面形重构精度, 因而系统结构参数设计中需要对双光纤点衍射探头的纤芯距 a 进行优化设计。在系统结构误差几何分析数值仿真中, 不同纤芯距 a 所对应的面形重构误差分布如图 4 所示。由图 4 可知, 随着纤芯距 a 不断增大, 对应的面形重构误差会不断减小; 并且当纤芯距 a 大于 0.115 mm 时, 重构误差趋于收敛稳定。为此, 系统中将纤芯距 a 取为 0.135 mm, 其对应的面形重构结果残差的 RMS 值和 PV 值分别为 6.47 μm 和 24.51 μm , 在此情况下可忽略其影响。

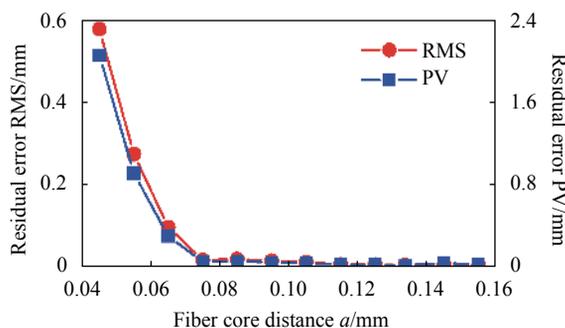


图 4 纤芯距对面形重构精度的影响

Fig.4 Influence of fiber core distance on surface reconstruction accuracy

随后在系统结构误差几何分析数值仿真中, 进一步分析确定纤芯距 a 的标定误差 Δa 对系统测量精度的影响。目前常用于光纤纤芯距标定的仪器为海克斯康影像测量仪 (型号: Viewmax L), 检测分辨率为 0.4 μm , 满足纤芯距标定精度要求。对于 $a=0.135$ mm 的纤芯距, 得到在 ± 10 μm 标定误差范围对应的曲面重构误差 RMS 值分布, 如图 5 所示。由图 5 可知, 随着纤芯距标定误差 Δa 的不断增大, 对应的面形重构误差也不断增大, 但最大与最小残差 RMS 差值仅为 0.83 μm , 由此可知纤芯距标定误差 Δa 对系统测量精

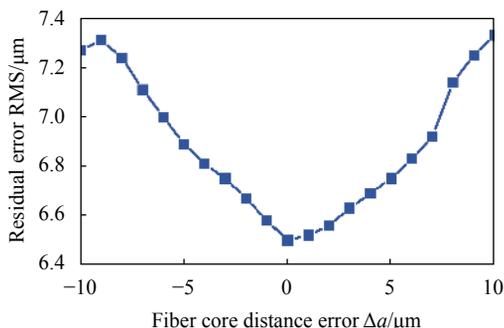


图 5 纤芯距标定误差对测量精度的影响

Fig.5 Influence of calibration error of fiber core distance on measurement accuracy

度的影响可以忽略不计。

2.2 初始投射角 α_0 标定误差的影响及其校正方法

在实际测量中需要对初始投射角 α_0 进行标定, 以实现相位信息分布的有效提取。由于双缝干涉中的零级亮条纹强度大于其他级的亮条纹, 根据该特征, 现有的初始投射角 α_0 的标定方法通常是基于零级亮条纹定位来实现的。但实际测量中由于双光纤点衍射干涉临近级次条纹时强度较为接近, 会导致在条纹处理中引入一定的零级条纹定位误差, 进而会影响出射端初始投射角的标定精度。图 6 所示为不同零级条纹定位误差所对应的面形重构结构残差 RMS 值和 PV 值分布。由图 6 可知, 零级条纹定位精度对于最后的面形重构精度有较为明显的影响, 0.5 级次的条纹定位误差会使得曲面重构误差 RMS 值和 PV 值从 6.47 μm 和 24.51 μm 增加到 13.01 μm 和 91.53 μm , 二者对应的 RMS 和 PV 值偏差达到 6.54 μm 和 67.02 μm 。为了提高面形检测精度, 有必要对初始投射角 α_0 的标定误差进行进一步校正。

为此, 可采用一种基于基准平面的初始投射角的

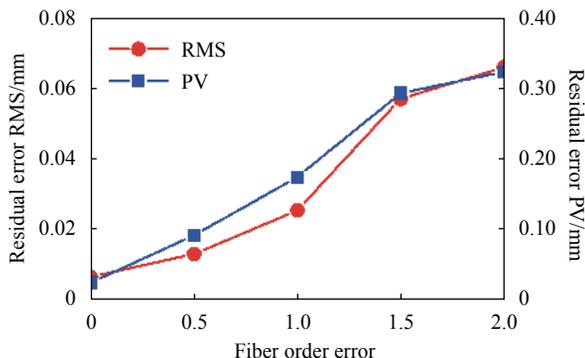


图 6 条纹级数偏差对测量精度的影响

Fig.6 Influence of fringe locating error on measurement accuracy

迭代校正方法。利用一个具有高精度面形的基准平面作为待测表面, 根据公式 (3)、(4) 可知, 初始投射角 α_0 与重构面形信息中的高度值存在如下关系:

$$z' = \frac{dL}{m - d \cot \left[\arctan \left(\frac{\lambda \cdot \varphi_0}{2\pi a} \right) + \alpha_0 \right]} + D \quad (5)$$

因此, 可在基于零级亮条纹定位获得初始投射角 α_0 的初始值基础上, 以测得的平面面形 PV 值最小化作为优化目标, 通过迭代优化算法对初始投射角标定值进行进一步优化, 以提高其标定精度, 即:

$$O(\alpha_0) = \min \{ z_{\max} - z_{\min} \} \quad (6)$$

3 实验测量和比对

为了验证所提出的双光纤点衍射干涉投影检测系统的误差分析及校正方法的可行性, 搭建了光路布局如图 1 所示的实验系统, 对不同斜率动态范围的待测物进行了测量, 并将测量结果分别与三坐标测量机和结构光投影测量系统的测量结果进行了比对。实验中所使用单纵模激光器波长为 532 nm, 工业 CCD 相机的分辨率为 1 920×1080, 像元尺寸为 5.5 μm ×5.5 μm 。被测物分别为亚光亚克力玻璃材质的圆形台阶和石膏材质蝴蝶模型, 其中圆台阶的直径和台阶高度分别约为 20 mm 和 2 mm, 蝴蝶表面的长宽尺寸约为 40 mm×38 mm。

首先, 利用表面平整的圆台阶对测量系统初始投射角进行标定。根据基于零级亮条纹定位法得到初始投射角 $\alpha_0=20.4^\circ$, 其对应的重构表面 PV 值为 0.054 2 mm。随后将该标定值作为迭代初始值, 将圆台平面作为基准平面, 利用所提出的基于基准平面的迭代优化方法对初始投射角进行进一步优化, 得到在 $\pm 2^\circ$ 迭代范围的重构曲面 PV 值分布如图 7 所示。

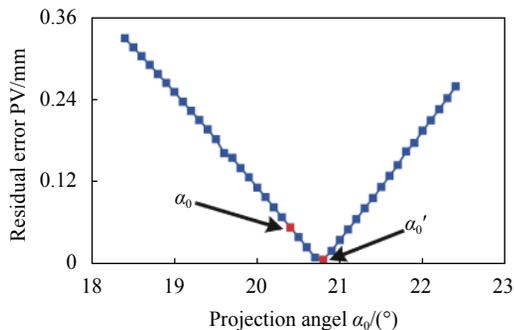


图 7 初始投射角校正结果

Fig.7 Correction result of initial projection angle

由图 7 可知, 迭代后得到的最佳初始投射角为 20.8°, 其对应的重构表面 PV 值为 0.007 4 mm。

在实现初始投射角高精度标定的基础上, 利用所搭建的实验系统对圆台阶的整体三维轮廓进行测量,

得到圆台阶测量结果如图 8(a) 所示, 测得系统校正后重构结果不同位置处对应的台阶高度分布如表 1 所示, 对应的平均高度为 1.971 9 mm。

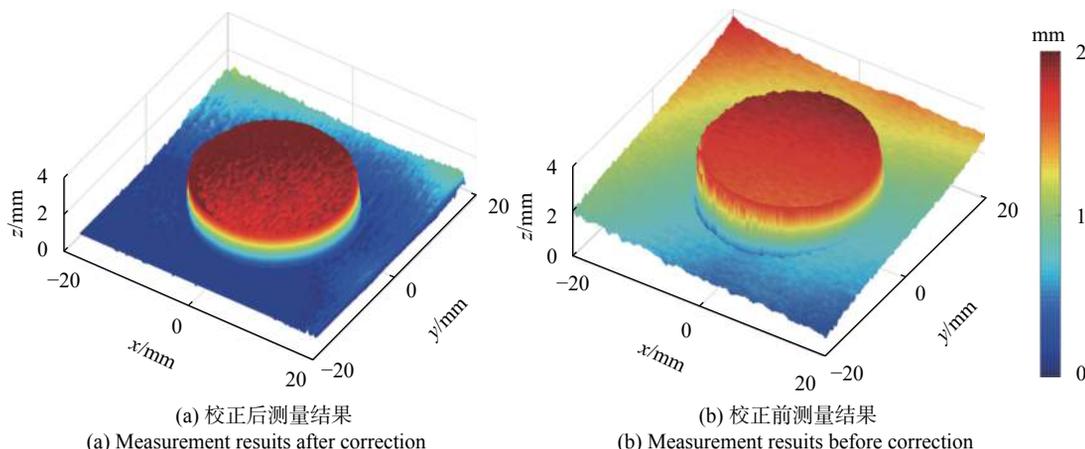


图 8 光纤点衍射干涉投影系统对圆台阶的测量结果

Fig.8 Measurement result of round step with fiber point-diffraction interference projection testing system

表 1 光纤点衍射干涉投影系统的台阶高度测量值

Tab.1 Measured values of step height with fiber point-diffraction interference projection testing system

Measuring position	1	2	3	4	5
Height/mm	1.9744	1.9681	1.9786	1.9737	1.9645

为了验证系统的测量精度, 同时使用定位精度为 3.0 μm 的海克斯康三坐标测量机 (型号: Global E) 对圆台阶进行台阶高度测量, 测得平均高度值 1.993 0 mm 作为其名义值。因而, 所搭建实验系统与三坐标测量机的圆台阶高度测量结果偏差为 0.021 1 mm; 而对未进行初始投射角校正前的测量系统测得结果如图 8(b) 所示, 从校正前后系统重构效果对比可以看出, 校正前重构结果的弯曲倾斜情况得到了改善, 且选取系统校正前重构结果多点测得平均高度为 1.574 8 mm, 与三坐标测量机测得结果偏差达到 0.418 2 mm。测量结果表明, 所提出的基于基准平面的初始投射角高精度标定方法有效提高了系统的测量精度。

同时, 利用该测量实验系统对具有复杂表面面形的蝴蝶石膏模型进行测量, 以验证该系统对较大斜率动态范围被测表面的有效重构的可行性, 同时将其测

量结果 (如图 9(a) 所示) 与结构光投影测量法的检测结果 (如图 9(b) 所示) 进行比对。由图 9 可知, 利用双光纤点衍射干涉投影测量系统测得的面形结果能较好地重建出蝴蝶的细节形状且重构表面连续无缺失, 表面的沟壑纹路和凹点起伏都能被清晰分辨; 而结构光投影测量法虽然能重构出被测表面的形状, 但对于细节信息都难以体现, 将蝴蝶重构表面同一躯干位置的高度信息以曲线形式进行直观比较, 该位置如图 9 内黑线所示。图 10 中红点线为结构光投影测量法, 可知对于斜率变化较大的蝴蝶躯干处重构出现较多的缺失, 且高度值起伏变化较大, 而蓝实线所示的文中所提出的系统测量结果高度值变换更为平滑且无缺失。结果表明, 双光纤点衍射干涉投影测量系统在面形分布和量值上的重构相较于结构光投影测量法表现出较高的测量精度。

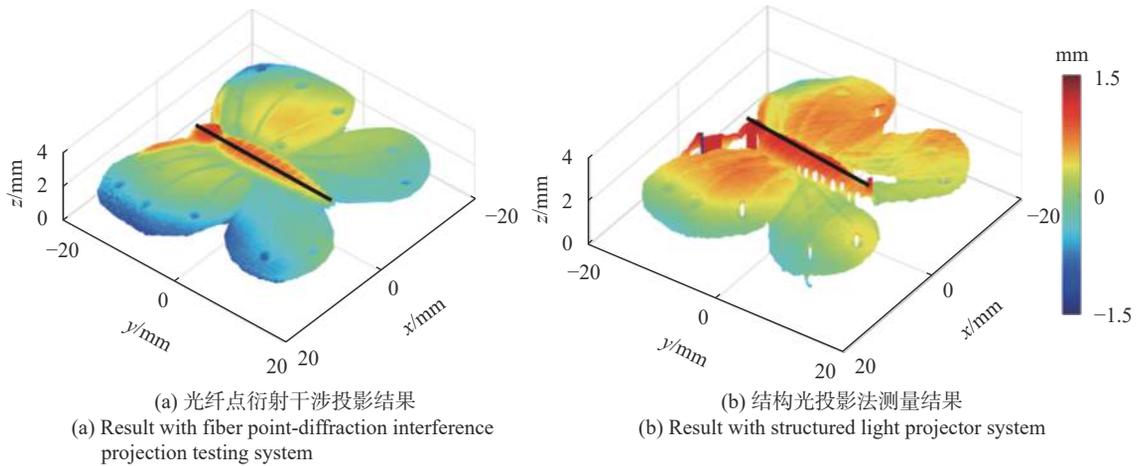


图9 石膏蝴蝶测量结果比对

Fig.9 Comparison of measurement results for plaster butterfly

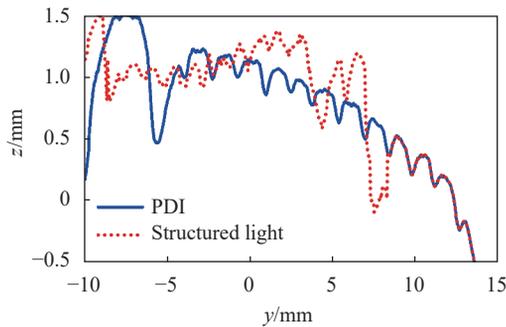


图10 石膏蝴蝶躯干处测量数据比对

Fig.10 Comparison of measurement data at the trunk of the plaster butterfly

4 结论

针对双光纤点衍射干涉投影检测技术中系统结构参数对于面形检测精度的影响问题,建立了相应的测量系统结构几何分析模型,在此基础上,分别分析了系统结构参数纤芯距及其标定误差对系统测量精度的影响,据此对纤芯距参数进行了优化。同时,分析了投射端初始投射角的标定误差对系统面形测量精度的影响,并在现有基于零级亮条纹定位的标定方法基础上,提出了一种基于基准平面的投射角标定误差校正方法,有效地解决了投射端投射角标定精度不足的问题。为验证所提出方法的可行性,对不同斜率动态范围的被测物进行了实验测量,并与三坐标测量机和结构光投影测量系统的测量结果进行了比对,实现了微米量级的检测精度,为各类复杂曲面的高精度检测提供了一种可行的通用化方法。

参考文献:

- [1] Liu Dong, Yan Tianliang, Wang Daodang, et al. Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917001. (in Chinese)
- [2] Shang Wanqi, Zhang Wenxi, Wu Zhou, et al. Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2097-2104. (in Chinese)
- [3] Li M Y, Liu J, Yang H, et al. Structured light 3D reconstruction system based on a stereo calibration plate [J]. *Symmetry*, 2020, 12(5): 772-784.
- [4] Zhao Yang, Qu Xinghua. Multi-vision detection method based on parallel lighting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 339-345. (in Chinese)
- [5] Zhu Xiang, Shao Shuangyun, Song Zhijun. A detection method based on line-structured light method based on line-structured light [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [6] Li Yao, Yang Yongying, Wang Chen, et al. Point diffraction in interference detection technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 391-414. (in Chinese)
- [7] Ma Yun, Chen Lei, Liu Yiming, et al. Reflective shearing point diffraction interferometer for phase defect measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2873-2880. (in Chinese)
- [8] Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [9] Wu F, Zhang H, Michael J L, et al. A novel design for fiber optic

- interferometric fringe projection phase-shifting 3-D profilometry [J]. *Optics Communications*, 2001, 187(4): 347-357.
- [10] Li X J, Duan X J, Li G X, et al. Three-dimensional measurement of small-object surfaces on the basis of fiber optic interferometric fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(9): 094105.
- [11] Zhang Chao, Duan Fajie, Xing Minghao, et al. Fiber-optic interferometer projection of real-time Fourier profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0207001. (in Chinese)
- [12] Wang Z C, Wang D D, Gong Z D, et al. Measurement of absolute displacement based on dual-path submicron-aperture fiber point-diffraction interferometer [J]. *Optik*, 2017, 140: 802-811.
- [13] Wang D D, Xu Y B, Liang R G, et al. High-precision method for submicron-aperture fiber point-diffraction wavefront measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7079-7090.
- [14] Wang D D, Xie Z M, Wang C, et al. Probe misalignment calibration in fiber point-diffraction interferometer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34312-34322.