

基于 PMD 的反射镜面检测实验分析

赵文川¹ 范斌¹ 伍凡¹ 苏显渝² 陈文静²

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(² 四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065)

摘要 将相位测量偏折术应用于非球面反射镜面形检测, 并对实验检测结果的中高频误差进行了分析研究。计算机产生正弦性条纹图, 并且显示在薄膜场效应晶体管显示屏上。摄像机通过被测反射镜观察并拍摄显示屏上的条纹图。利用相移技术和相位展开技术计算得到相位分布。以相位信息为载体对光线进行追迹, 并根据反射定律得到面形梯度分布, 由数值积分重建面形分布。最后使用泽尼克多项式拟合分析了其中高频误差。

关键词 测量; 面形测量; 非球面镜; 条纹分析

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0112002

Experimental Analysis of Reflector Test Based on Phase Measuring Deflectometry

Zhao Wenchuan¹ Fan Bin¹ Wu Fan¹ Su Xianyu² Chen Wenjing²

(¹ Institute of Optics and Electronic, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract The aspherical reflector surface is tested based on basic phase measuring deflectometry, and the mid-high frequency error of result is studied. The intensity-modulated patterns are displayed on the thin film transistor screens. The camera observes and records the fringe pattern reflected by the tested reflector. The phase distribution is obtained by the phase-shifting and phase unwrapping technique. The surface normal is obtained through ray trace, the surface profile gradient distribution is obtained according to reflection law. And the surface is reconstructed by numerical integration. The mid-high frequency error is studied by the Zernike polynomial fitting.

Key words measurement; surface measurements; nonspherical mirror surfaces; fringe analysis

OCIS codes 120.6650; 080.4228; 100.2650

1 引 言

非球面镜能够减少系统中光学元件的数量或能提高成像质量, 随着光学精密加工的发展, 被越来越广泛地应用于各种光学系统中, 相适应的检验方法和仪器已成为当前研究的热点^[1,2]。传统的测量方法中, 通常采用干涉测量技术, 将镜面反射波与标准波前进行比较测量。而多数干涉仪要求相干照明以及精确设计的光学系统, 其测量动态范围很小, 并需要制造辅助元件。三维坐标测量仪可以用来进行检测, 但是需用测头对被测面进行接触式测量, 操作复杂。

近年来, 提出了一种相位测量偏折术(PMD)方法

实现对光学反射表面的测量^[3,4]。其原理是根据条纹的相位信息确定光线偏折, 利用待测镜面物体的梯度信息, 积分重建镜面的三维面形。该方法具有结构简单、测量范围大、无需辅助光学元件、灵敏度高、能一次完成全场测量和效率高等特点。国内外已经开展了系统的研究, 并取得明显进展。法国的 VISUOL 技术公司^[5]、德国的 3Dshape 公司^[6]和不来梅应用光学研究所^[7]等已开发了较为成熟的产品, 可以实现对眼镜、汽车车体喷漆表面等镜面及类镜面的表面检测。而如何利用 PMD 的大动态范围特点, 实现对光学非球面表面面形的高精度检测, 成为当前

收稿日期: 2012-07-17; **收到修改稿日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)和中科院西部之光博士资助课题。

作者简介: 赵文川(1983—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光学检测和光学信息等方面的研究。

E-mail: zhaowc168-98@163.com

的一个研究热点。美国亚利桑那光学中心使用该原理结合激光跟踪仪测量了太阳能聚光镜和 8.4 m 大口径巨型麦哲伦望远镜(GMT)分块镜^[8],国内四川大学等也开展了基于该原理的镜面反射物体检测方法研究,并结合摄影测量理论进行了小口径(口径小于 40 mm)的非球面镜面面形及其法线向量的检测实验^[9,10]。泽尼克多项式与初级像差有着一定的对应关系,且具有单位正交性、旋转对称性等特点。因此,在光学加工检测过程中,常以泽尼克多项式作为基底函数对测量得到的离散数据拟合表示为泽尼克多项式各项的线性组合,用拟合曲面来反映被测面形的误差,根据误差的大小指导整个非球面的实际加工过程,以提高加工的效率^[11]。

本文将 PMD 应用于反射抛物镜面检测,利用该原理和反射镜面形的理想方程,实现了 205 mm 口径的抛物面镜的实测实验,并泽尼克多项式对中高频误差进行了对比分析。

2 基本原理

如图 1 所示为实验装置图,系统主要是由 CCD 摄像机、薄膜场效应晶体管(TFT)显示屏、反射镜。以反射坐标系为世界坐标系,通过系统标定将摄像机坐标系和 TFT 显示屏坐标系统一到世界坐标系中。CCD 摄像机和 TFT 显示屏放置于中心曲率半径附近,并保证 CCD 通过反射镜能观察到条纹图。测量时,TFT 上显示由计算机生成的正弦性条纹图,CCD 摄像机经反射镜观察条纹图,也就是 TFT 发出的光线经反射镜面反射入射到 CCD。CCD 记录下条纹图样分布。使用相移技术和相位展开技术,可以得到记录条纹图的相位分布^[12]。测量原理如图 2 所示,TFT 上点 S 发出的光线经被测镜面上点 M 反射后,通过摄像机光心 O 点入射到摄像机像素平面上的点 P。反射光线(MP)的方向向量(r_r)可

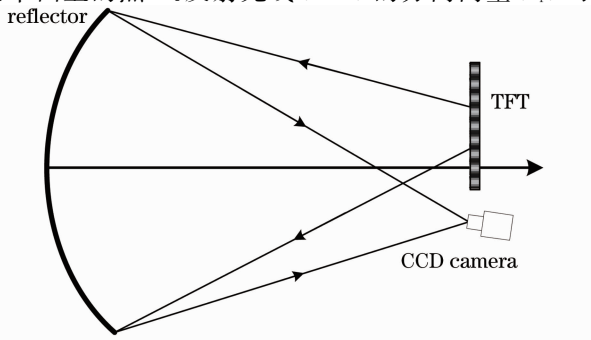


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

以通过摄像机标定得到。S 点的位置(x_S, y_S, z_S)可根据相位信息计算得到,M 点的位置(x_M, y_M, z_M)可以由该反射镜面的理想方程 $z_M = f(x_M, y_M)$ 近似得到。这样由 S 与 M 两点就可以得到入射光线的方向向量 r_i :

$$r_i = (x_M - x_S, y_M - y_S, z_M - z_S). \quad (1)$$

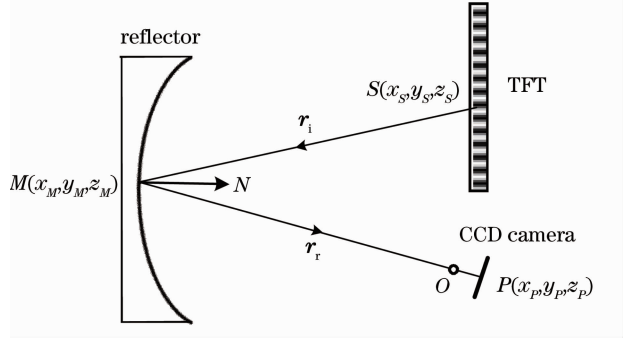


图 2 测量原理图

Fig. 2 Schematic of the measurement principle

根据光线反射定律,由入射光线和反射光线方向向量计算得到被测镜面形法线向量值 N :

$$N = (n_x, n_y, n_z) = \frac{r_r - r_i}{|r_r - r_i|}. \quad (2)$$

最后由法线向量得到面形梯度分布,积分重建面形^[13,14] :

$$z = - \int \left(\frac{n_x}{n_z} dx + \frac{n_y}{n_z} dy \right). \quad (3)$$

3 实验结果及分析

该方法的的误差主要来自于系统标定,也就是将摄像机坐标系和显示屏坐标系统一到世界坐标系的精度。通过计算机模拟及泽尼克拟合分析了系统标定对测量结果的影响,分析结果表明其引入的面形误差主要是低频面形误差。下面进行实验对其中高频误差检测结果进行对比分析。

实验中,被测反射镜是一个抛物面镜,口径为 205 mm,中心曲率半径为 1035 mm,如图 3 所示。采用的 CCD 摄像像素为 1392 pixel×1024 pixel,镜头焦距为 23 mm。CCD 摄像机和 TFT 显示屏放置于中心曲率半径附近,CCD 距离被测镜 1088 mm,距离光轴 110 mm。TFT 位于 CCD 旁边,CCD 通过反射镜能观察到 TFT 上显示的条纹图。TFT 显示器显示条纹的周期 $p=8.448$ mm,采用由五步相移法求解相位分布。条纹分布图和截断相位图分别如图 4 和图 5 所示。从图 4、5 可知,被测反射镜在中心部分部分区域的条纹发生了显著的变形,这表

明其在该处具有明显的高度起伏。本文中采用了区域重构积分方法重建面形。将重建面形减去理想面形得到面形误差分布,并对面形误差进行圆域泽尼克拟合分析。由于采用干涉仪测量该抛物面时,受到光路结构的限制,其中心半径约22 mm圆形区域无法测量,并且,中心部分误差较大。为了显示更好的对比度,将该方法检测结果与干涉仪检测结果进行清晰的对比,图4、5中没有显示中心部分数据。面形误差去掉泽尼克前9项低阶项后的中高频误差分布如图6(a)所示,峰谷值(PV)为611 nm,均方根为95 nm。将被测镜旋转 25° 后进行再测量,结果如图6(b)所示,峰谷值为669 nm,均方根为98 nm。图6(a)、6(b)可知对比,两次检测结果是一致的。

然后采用 Zygo 干涉仪对该抛物面进行了检测,对检测结果进行圆域泽尼克拟合,结果去掉泽尼克前9项低阶项后的中高频误差分布如图7所示,PV值为644 nm,均方根为89 nm。比较图6和图7可知,两种方法测量结果是一致的。

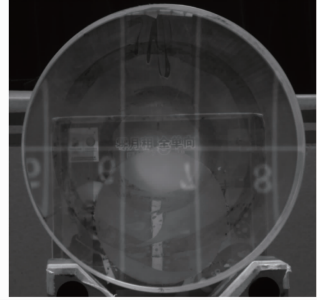


图3 被测反射镜

Fig. 3 Tested reflector

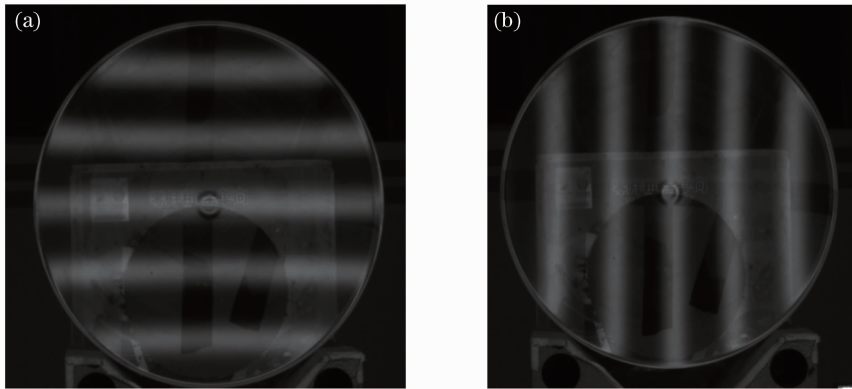


图4 记录条纹图。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 4 Fringe pattern obtained. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

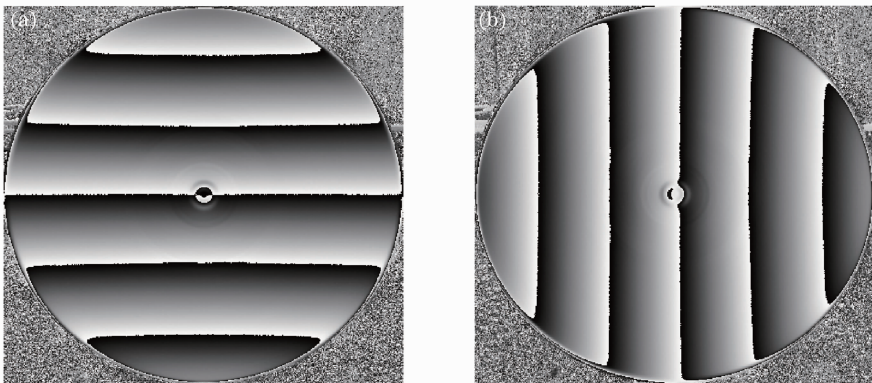


图5 截断相位。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 5 Wrap phase. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

4 结 论

将相位测量偏折术 PMD 基本原理应用于反射镜的面形检测,并使用泽尼克多项式拟合对其中高

频误差进行了分析。该方法具有结构简单、成本低和灵活性高的特点。将该方法的检测结果与干涉仪检测结果对比可知,该方法检测面形的中高频误差

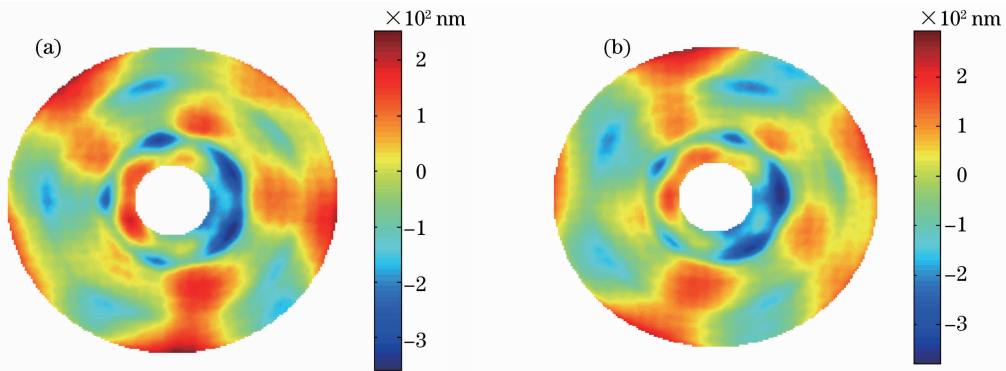


图 6 去掉泽尼克前 9 项低阶项的误差分布。(a)初始位置测量结果；(b)旋转 25°测量结果

Fig. 6 Error map removed the 9 low-order Zernike terms. (a) Original angle; (b) after rotating 25°

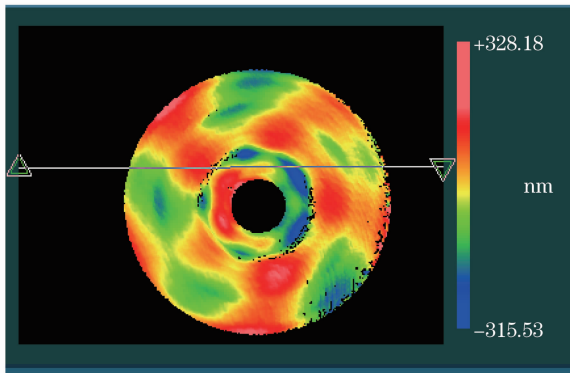


图 7 Zygo 干涉仪检测结果

Fig. 7 Surface results tested by Zygo interferometer

精度很高,均方根误差达到了 9 nm。而对于低阶面形误差,受系统标定精度的限制,检测精度还较低。下一步的研究工作将集中于提高系统标定精度,以提高面形全频段的检测精度。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004
潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004
- 2 Wang Xiaopeng, Zhu Rihong, Wang Lei *et al.*. Digitized foucault tester for quantitative evaluation the surface of aspheric optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112008
王小鹏, 朱日宏, 王雷等. 数字刀口仪定量检验非球面光学元件面形[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112008
- 3 M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Hausler. Phase measuring deflectometry; a new approach to measure specular freeform surfaces[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 366~376
- 4 M. Petz, R. Tutsch. Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings [C]. *SPIE*, 2003, **5144**: 288~294

- 5 P. Rose, Y. Surrel, J. M. Becker. Specific design requirements for a reliable slope and curvature measurement standard [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2009, **20**(9): 095110
- 6 3D-Shape. A New Method to Measure Specular Free-Form Surfaces [OL]. http://www.3d-shape.com/produkte/pmd_e.php. [2012-06-15]
- 7 T. Bothe, W. S. Li, C. von Kopylow *et al.*. High resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 411~422
- 8 P. Su, R. E. Parks, L. Wang *et al.*. Software configurable optical test system; a computerized reverse Hartmann test[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(23): 4404~4412
- 9 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Specular shape measurement with phase measuring deflectometry based on bundle adjustment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1212007
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于光束法平差的相位测量偏折术镜面面形测量 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1212007
- 10 Zhao Wenchuan, Fan Bin, Wu Fan *et al.*. Testing the normal of the aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **31**(6): 0612007
赵文川, 范斌, 伍凡等. 基于相位偏折术的非球面法线向量测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612007
- 11 Tang Jianguan, Wu Fan, Wu shibin. Research on testing techniques for larger aperture aspherical surface in the fine grinding stage[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 509~511
唐健冠, 伍凡, 吴时彬. 大口径非球面精磨表面形状检测技术研究[J]. *光学技术*, 2001, **27**(6): 509~511
- 12 X. Y. Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry; utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(6): 141~150
- 13 Jing Hailong, Su Xianyu, Liu Yuankun. Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 2D shape reconstruction technique [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 37~42
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析[J]. *光电工程*, 2008, **35**(10): 37~42
- 14 W. S. Li, T. Bothe, C. von Kopylow *et al.*. Evaluation methods for gradient measurements techniques[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 300~311

栏目编辑: 何卓铭