

基于激光成像的面形误差检测方法

李艳 李浩 高峰 朱延安

西安理工大学教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 针对在制造装配过程中,由于太阳能聚光反射镜的子镜结构尺寸过大导致面形检测效率低、精度差、检测难度高等问题,提出了一种基于激光成像的镜面面形误差检测方法。该方法利用图像处理技术对激光点阵的成像进行分析,通过分辨不同的激光束反射成像阵列点在像平面坐标系中的位置,反推出所对应的入射光阵列发生镜面反射时在反射镜坐标系中的坐标值,将上述入射点阵列坐标值代入标准抛物面方程进行拟合,采用最速下降迭代法计算获得整个反射面的面形误差值。通过与三坐标测量机对反射面的测量结果进行比较,表明该方法的测量精度可达到 0.8 mrad。

关键词 测量; 面形检测; 图像处理; 激光成像; 抛物碟式聚光器

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091202

Detection Method of Surface Error Based on Laser Imaging

Li Yan Li Hao Gao Feng Zhu Yanyan

Key Laboratory of NC Machine Tools and Integrated Manufacturing Equipment, Ministry of Education,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In order to solve the problems of low checking efficiency, low precision and high checking difficulty of surface caused by the oversize of sub-lens structure of solar energy concentrating mirror in the process of manufacture and assembly, a detection method of mirror surface shape error based on laser imaging is proposed. In this method, image processing technologies are employed to analyze the imaging of laser dot matrix. The coordinate values of the mirror coordinate system are deduced when the corresponding incident light array occurs specular reflection by distinguishing the position of reflection imaging array points with different laser beams at the image plane coordinate system. The shape error of the whole reflecting surface is obtained by substituting the above incident point array coordinate values into standard paraboloidal equation to fit and calculating with the steepest descent iterative method. By comparing the measurement results of reflector with coordinate measurement machine, the result shows that the measurement accuracy of the proposed method can reach 0.8 mrad.

Key words measurement; surface detection; image processing; laser imaging; parabolic dish concentrator

OCIS codes 120.4630; 110.2970; 120.6650

1 引言

太阳能是一种清洁无污染的能源,利用其发电已成为开发新能源的一种重要手段。目前,太阳能热发电在国家大能源战略中占重要地位。碟式太阳能热发电系统利用大规模阵列碟形镜面收集太阳热能,通过相应发电技术将其转换成电能。它具有光电转换效率高、耗水量低、跟踪精度高,误差小,启动损失小等特点,是近几年令世界瞩目的太阳能发电技术。碟式太阳能热发电系统由碟式抛物面聚光镜、接收器、斯特林发动机、发电机组成^[1]。为了有效地收集太阳辐射能量,需要采用大型太阳能聚光镜,但随之会引起加工时面形精度难以保证等问题,而面形误差对镜面的聚光性能、系统的太阳能利用率影响显著。传统的镜面面形误差检测及调整主要采用弧板卡量镜面方法,依靠人工操作来实现,费力费时。Malacara^[2]提出的刀口阴影法检

收稿日期: 2016-04-07; 收到修改稿日期: 2016-05-20; 网络出版日期: 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51375382)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(12JS070)

作者简介: 李艳(1970—),女,博士,副教授,主要从事数控装备设计及检测等方面的研究。E-mail: liyangf@xaut.edu.cn

测速度快、但刀口测量依赖于测试人员的主观经验,无法定量检测且不易检测凸面等缺点。哈特曼常数法^[3]是一种非接触定量检测方法,虽然检测方法简单且应用方便,但其精度和分辨率还有待提高,且随着镜面口径的增大,哈特曼板亦需增大,制作工艺困难。

国内外很多学者在曲面的高精度测量及误差评定方面做了大量研究工作。郭震宇等^[4]为解决自由曲面光学透镜光学表面面形的高精度测量问题,研发了一种可用于自由光学透镜曲面测量的图像变换光学曲面面形测量系统,并通过误差分析和精度建模,证明了该测量系统是一种高精度、高稳定性的光学测量系统。Xiao等^[5]提出的扫描偏转测量法用于测量非球面光学表面,通过测量随机误差的重复性分析,表明在一定条件下其重复性测量误差可以达到 10 nm,该测量方法可用于测量非球面表面,且具有很高的精度。李东等^[6]提出了基于最小二乘迭代的随机移相面形检测方法,通过模拟仿真和最小二乘迭代随机移相算法,高精度地勾勒出了原始面形。上述几种方法主要用于小型曲面的测量。为获得槽式聚光器大尺寸子镜的安装误差,任兰旭等^[7]提出采用吸热管反射成像检测方法获取聚光器的整体面形信息,通过实验验证了其可行性。但该方法测量精度较低,无法对碟式太阳能镜面面形误差进行高精度测量。在镜面面形误差评定方面,Zhang等^[8]提出了一种基于最小区域拟合法对自由曲面面形误差进行评定,通过合理约束将极大极小优化不可微问题转化为可微可优化的问题,实验结果表明相比于普通的最小二乘法拟合,最小区域拟合法能够获得全局最优结果。高栋等^[9]针对光学自由曲面面形误差的评定问题,提出了一组基于给定容差 μ 的 μ -系列光学自由曲面误差评定参数,用于面形误差的评定,通过实验验证了评定算法的准确性。李荣彬等^[10]针对连续性自由曲面的测量,开发了综合自由误差评定、稳健自由曲面评定以及参考点协助自由误差曲面评定等一系列自由曲面评定方法,其中稳健自由曲面评定方法可以对测量数据中的异常点进行处理,消除异常点对评定结果的影响。

本文提出了一种激光成像图像处理的镜面面形误差检测方法,利用图像处理辨识激光束投射成像阵列点在图像坐标系中的位置,反推出相应入射点在反射镜坐标系中的坐标值,将其代入标准抛物面方程进行拟合,经分析后得到面形误差值。

2 镜面的面形误差测量原理

碟式太阳能镜面的面形误差检测系统由直线运动组件、点激光光源、可移动式安装调节支架、投影幕布、视频扫描设备、clipper 轴控制器、计算机等组成,如图 1 所示。投影幕布由铝合金板经机械加工后表面进行发黑处理而成,其表面具有很高的光洁度和平整性,可以满足反射激光光斑的成像采集要求。

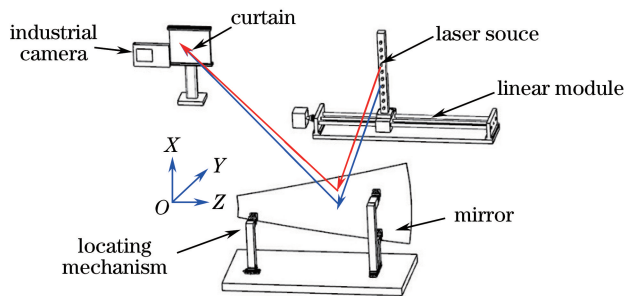


图 1 镜面面形误差检测系统构成

Fig. 1 Construction of mirror's surface error detecting system

检测系统中激光器以平行于镜面光轴的方向朝镜面发射激光束,激光束通过镜面反射到投影幕布上形成反射光斑,工业电荷耦合器件(CCD)相机采集幕布上的图像并发送至计算机控制系统,对反射光斑点图像进行预处理以及分析计算,辨识出激光束投射成像阵列点在图像坐标系的位置,反推出相应入射点在镜面坐标系中的坐标值,代入标准抛物面方程进行拟合,经分析后得到面形误差值并判断镜面是否满足要求。

标准镜面满足抛物面方程,且将抛物面聚光反射镜的顶点定义为检测系统原点。抛物面方程为

$$x^2 + z^2 = 2py, \quad (1)$$

式中,抛物面的焦点坐标为 $\left(0, \frac{p}{2}, 0\right)$,理想情况下抛物面光线反射原理如图 2 所示。

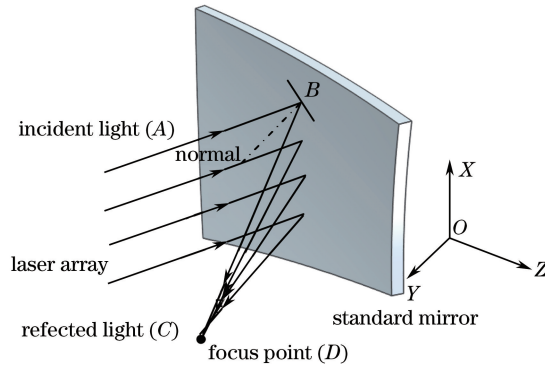


图 2 理论光线反射原理

Fig. 2 Principle of theoretical light reflection

光源点坐标记作 $A(x_1, y_1, z_1)$, 入射点坐标记作 $B(x_2, y_2, z_2)$, 则光源点坐标与激光入射点坐标关系为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \\ y_2 = \frac{x_1^2 + z_1^2}{2p} \\ z_2 = z_1 \end{cases} \quad (2)$$

激光入射点 $B(x_2, y_2, z_2)$ 的法向量为 $(d_{x_2}, d_{y_2}, d_{z_2})$, 有

$$\begin{cases} d_{x_2} = 2 \cdot x_2 \\ d_{y_2} = -2 \cdot p \\ d_{z_2} = 2 \cdot z_2 \end{cases} \quad (3)$$

光学系统中入射光线与反射光线关于入射点的法线对称, 则激光光源点 A 关于点 B 法线的对称点 $C(x_3, y_3, z_3)$ 满足

$$\begin{cases} \frac{x_1 + x_3}{2} - x_2 = \frac{y_1 + y_3}{2} - y_2 = \frac{z_1 + z_3}{2} - z_2 \\ \frac{x_1 + x_3}{2} - x_2 = \frac{y_1 + y_3}{2} - y_2 = \frac{z_1 + z_3}{2} - z_2 \\ (x_3 - x_1) \cdot d_{x_2} + (y_3 - y_1) \cdot d_{y_2} + (z_3 - z_1) \cdot d_{z_2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

计算结果为

$$\begin{cases} x_3 = \frac{2x_1^3 + 2x_1z_1^2 + x_1p^2 - 2y_1x_1p}{x_1^2 + z_1^2 + p^2} \\ y_3 = \frac{x_1^2 + z_1^2}{p} - \frac{x_1^2p + z_1^2p - 2y_1p^2}{x_1^2 + z_1^2 + p^2} - y_1 \\ z_3 = \frac{2z_1^3 + 2z_1x_1^2 + z_1p^2 - 2y_1z_1p}{x_1^2 + z_1^2 + p^2} \end{cases} \quad (5)$$

利用两点式直线方程及 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ 坐标得出反射光线在焦平面上的成像点坐标 $D(x_4, y_4, z_4)$ 满足

$$\frac{x_4 - x_2}{x_3 - x_2} = \frac{y_4 - y_2}{y_3 - y_2} = \frac{z_4 - z_2}{z_3 - z_2} = u, \quad (6)$$

则成像坐标点 $D(x_4, y_4, z_4)$ 计算结果为

$$\begin{cases} x_4 = \frac{(x_1^3 + x_1 z_1^2 - 2x_1 y_1 p)(p^2 - x_1^2 - z_1^2)}{(x_1^2 + z_1^2 - 2y_1 p)(x_1^2 + z_1^2 + p^2) - 2p(x_1^2 p + z_1^2 p - 2y_1 p^2)} + x_1 \\ y_4 = \frac{p}{2} \\ z_4 = \frac{(z_1^3 + z_1 x_1^2 - 2z_1 y_1 p)(p^2 - x_1^2 - z_1^2)}{(x_1^2 + z_1^2 - 2y_1 p)(x_1^2 + z_1^2 + p^2) - 2p(x_1^2 p + z_1^2 p - 2y_1 p^2)} + z_1 \end{cases} \quad (7)$$

经分析可知,理想情况下平行于镜面光轴的激光光束经镜面反射到抛物面的焦点处,镜面则符合碟式太阳能发电系统的设计要求。

当镜面由于制造误差为非理想抛物面时,利用激光打点镜面后移法获得镜面测点的实际三维坐标,测量方法如图3所示(其中抛物面焦距为 L),入射激光经放置在镜面初始位置碟片上的点 B 反射至幕布的点 D ;将镜面沿 Y 轴负方向平移 Δy 后,入射激光经放置在镜面后移位置碟片上的点 C 反射至幕布的点 E ,点 D 和点 E 之间的距离为 Δz 。

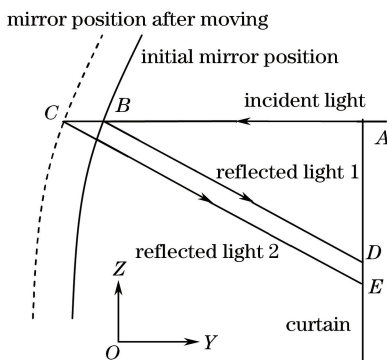


图3 激光测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of laser measurement

根据运动结构的几何关系有

$$\frac{L_{AB}}{L_{AC}} = \frac{L_{AD}}{L_{AE}}, \quad (8)$$

即

$$L_{AB} = \frac{\Delta y \cdot L_{AD}}{\Delta z}, \quad (9)$$

则激光所测点点 B 的 Z 坐标为 $(L - L_{AB})$,其中 X 、 Y 坐标由测量系统已规划好的测点分布确定。

3 成像位置辨识算法

视频扫描设备采集激光束阵列经镜面反射的光线在幕布上的成像点,并发送至计算机,检测系统提取成像光斑在幕布上的位置,反推出相应入射点在反射镜坐标系中的坐标值,判断镜面是否满足设计要求。为保证镜面面形误差检测的高精度,在光斑位置辨识之前需对图像进行预处理,主要包括中值滤波、阈值分割。

检测系统采用波长为 532 nm 的激光束阵列照射待检测镜面,反射光线投影在焦平面处的幕布上成像。通过图像去噪处理,减小由于激光光晕及环境等因素导致的噪声所造成的图像边缘粗糙程度。中值滤波法是一种非线性平滑技术,它将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内所有像素点灰度值的中值^[11],以控制脉冲噪声,使其能够彻底滤除尖波性干扰噪声。固定阈值分割法是基于区域的图像分割技术,通过把每个像素的灰度值与给定的阈值进行比较,根据像素点的灰度值是否超过该阈值而将像素归于物体点、背景点中的一类^[12]。图像矩是对特征进行参数描述的一种算法,其计算公式为

$$M_{pq} = \int_{a_1}^{a_2} \int_{b_1}^{b_2} x^p y^q f(x, y) dx dy. \quad (10)$$

图像的质心表示为

$$\begin{cases} x = M_{10}/M_{00} \\ y = M_{01}/M_{00} \end{cases} \quad (11)$$

激光束由激光发射器发出,经镜面反射至幕布成像,由于成像光晕的存在,图像处理过程中若不将其剔除掉,将严重影响入射光斑的检测精度。激光成像如图4所示,其中图4(a)为图3中镜面在初始位置时的反射光斑成像,图4(b)为镜面移动前后两位置处的光斑叠加图。利用激光成像的灰度统计直方图(如图5所示)确定灰度分割阈值为150,对图像进行阈值分割(如图6所示),将激光光斑提取出来,利用质心法获取激光光斑中心的位置坐标,记为入射点成像位置。

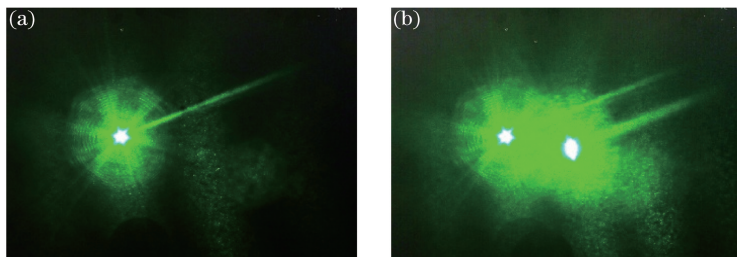


图4 激光成像光斑。(a)反射光斑的初始位置;(b)两光斑叠加图

Fig. 4 Laser imaging spot. (a) Initial position of reflection spot; (b) image of two spots overlaid

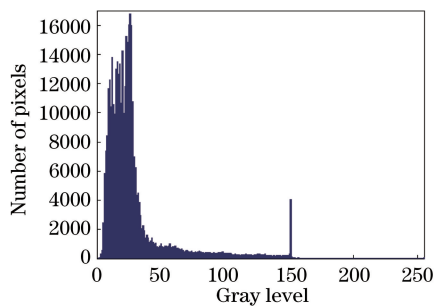


图5 成像图灰度统计直方图

Fig. 5 Gray level statistical histogram of image

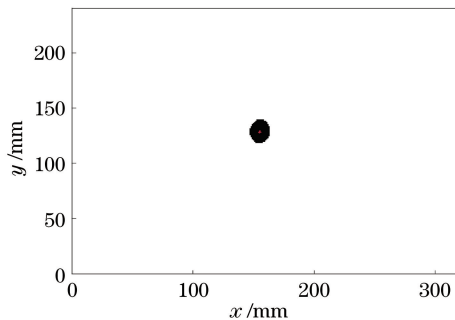


图6 阈值分割后光斑位置

Fig. 6 Spot position after threshold segmentation

4 面形误差检测实验及分析

实验测试的样件为镜面内圈,测试温度为室温,故不考虑镜面由于温度变化而引起的镜面面形误差。碟片安装方式采用三点式固定,确保与其实际工况一致,检测仪所有组成模块安装误差均已校准至合理误差范围内,检测系统如图7所示。

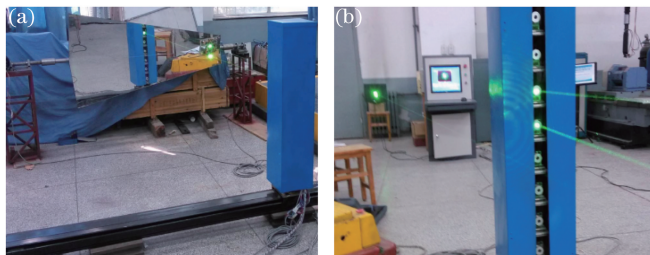


图7 镜面面形误差检测系统。(a)待检测镜片;(b)检测系统硬件

Fig. 7 Mirror surface shape error detection system. (a) Mirror to be detected; (b) hardware of detection system

镜面上的激光测点分布如图8所示,每个测点之间间隔100 mm,在该片子镜上共分布有70个测点,表1为激光图像反解出的测点三维坐标。表2为激光测量仪实测镜面测点处的法线偏差。

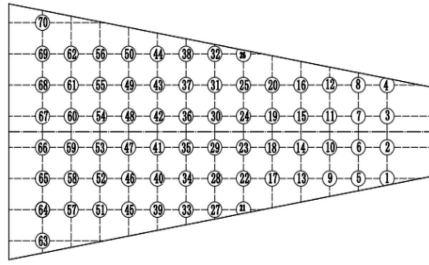


图 8 激光测点分布图

Fig. 8 Distribution map of laser measuring point

表 1 激光测量仪测点坐标值

Table 1 Measurement points coordinate value of laser measuring instrument

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x /mm	150	50	-50	-150	-150	-50	50	150	-150	-50
y /mm	125.8	125.2	125.2	125.8	132.9	132.5	132.4	132.9	140.6	140.2
z /mm	1002	1002	1002	1002	1101	1101	1101	1101	1201	1201

表 2 激光测量仪测量结果

Table 2 Measurement results of laser measuring instrument

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Normal error /mrad	4.58	1.87	1.57	4.27	4.20	1.40	2.03	3.58	3.83	2.64

利用最小二乘法拟合镜面抛物面方程,采用最速下降法对测量数据进行处理,其流程图如图 9 所示,分析结果如图 10、11 所示。

采用基于一定误差允许值的曲面评定参数可以更加直观地展现曲面误差,通过实验验证了算法的正确性,误差评定参数如表 3 所示。

表 3 曲面误差评定参数

Table 3 Evaluation parameters of surface error

Parameter	K_b	D_a /mm	D_q /mm	D_p /mm	D_v /mm	D_t /mm
Value	0.87	0.0047	0.0227	3.03	0.0051	3.03

表 3 中, K_b 为误差系数; D_a 为误差均值; D_q 为误差均方差; D_p 为正误差最大值; D_v 为负误差最大值;

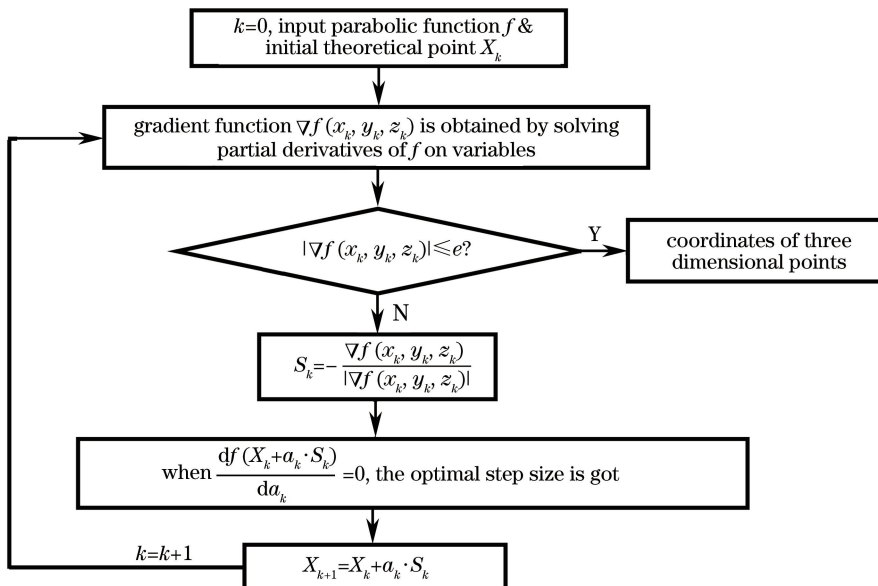


图 9 最速下降迭代法计算面形误差流程图

Fig. 9 Flow chart of steepest descent iterative method to calculate the surface error

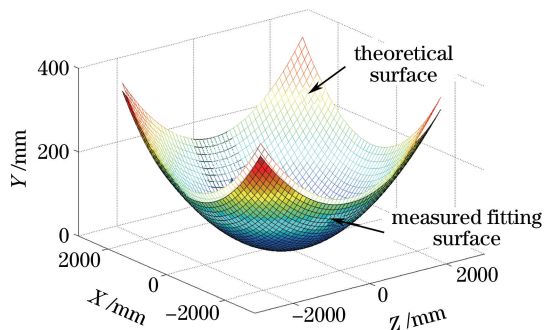


图 10 理论曲面与实测拟合曲面

Fig. 10 Theoretical surface and measured fitting surface

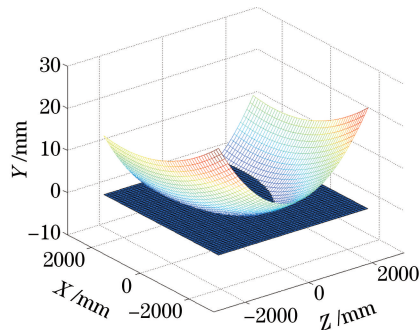


图 11 实测抛物面误差曲面

Fig. 11 Measured parabolic error surface

D_1 为误差峰谷值。

为验证激光测量仪测量结果的准确性,将其与三坐标测量机(CMM)对同一片碟片相同测点测量后计算的测点误差结果相比较,如图 12 所示,二者测量结果的差值比较如表 4 所示。由均值为 0.83 mrad 和均方差为 0.71 mrad 可以判定激光测量与 CMM 测量数据基本吻合,由此其检测精度可达 0.8 mrad,从而验证了激光测量仪测量结果的准确性。

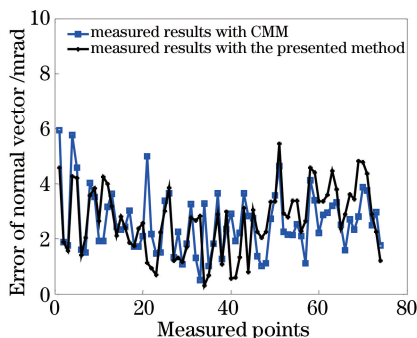


图 12 该方法与三坐标测量机检测结果

Fig. 12 Measurement results with CMM and presented method

表 4 测量结果差值比较

Table 4 Comparison of measuring result difference value

Parameter	Average value	Maximum value	Minimum value	Standard deviation
Value /mrad	0.8271	3.8645	0.0039	0.7094

5 结 论

以碟式太阳能聚光反射镜的面形误差为研究对象,提出了一种基于激光成像的镜面面形误差检测方法。采用图像预处理与质心法相结合的方法实现复杂环境中光斑位置的实时辨识,同时通过实验证明该检测系统能够准确判断镜面面形误差的类型及大小,且在与 CMM 测量结果的对比中证明碟式太阳能聚光反射镜面形误差检测精度能够达到 0.8 mrad,有效提高了镜面面形误差的检测精度和检测效率,能够满足工业实际应用的要求。

参 考 文 献

- Shuai Ou. Investigation on optical and heat transfer characteristic of dish solar concentrate system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 3-5.
帅 鸥. 碟式太阳能聚光系统的聚光与传热特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 3-5.
- Malacara D. Optical shop testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- Yang Zhiwen. Optical measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.

- 杨志文. 光学测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- 4 Guo Zhenyu, Feng Zhijing. Error analyzing and accuracy modeling of figure measuring system of optical lens based on image transforming manipulation[J]. Optical Technique, 2002, 28(3): 195-200.
郭震宇, 冯之敬. 自由曲面光学透镜的图像变换面形测量系统与精度建模[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 195-200.
- 5 Xiao M Z, Takamura T, Takahashi S, *et al.* Random error analysis of profile measurement of large aspheric optical surface using scanning deflectometry with rotation stage[J]. Precis Eng, 2013, 37(3): 599-605.
- 6 Li Dong, Jiang Hongzhen, Liu Yong, *et al.* Research on randomly phase shifting surface measurement based on least-squares iteration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051202.
李东, 姜宏振, 刘勇, 等. 基于最小二乘迭代的随机移相面形检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051202.
- 7 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.* Surface error of parabolic trough solar concentrators based on the theoretical overlay photographic method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412001.
任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 基于吸热管反射成像法测量抛物槽式太阳能聚光器的面形误差[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412001.
- 8 Zhang X C, Zhang H, He X Y, *et al.* Fast evaluation of minimum zone form errors of free form NURBS surfaces[J]. Procedia CIRP, 2015, 27: 23-28.
- 9 Gao Dong, Kong Lingbao, Yao Yingxue, *et al.* An algorithm for evaluating form errors of optical freeform surfaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(10): 1630-1635.
高栋, 孔令豹, 姚英学, 等. 光学自由曲面面形误差评定算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(10): 1630-1635.
- 10 Li Rongbin, Zhang Zhihui, Du Xue, *et al.* Integrated manufacturing technology for design, machining and measurement of freeform optics[J]. J Mech Eng-En, 2010, 46(11): 137-148.
李荣彬, 张志辉, 杜雪, 等. 自由曲面光学元件的设计、加工及面形测量的集成制造技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 137-148.
- 11 Xing Zangju, Wang Shoujue, Deng Haojiang, *et al.* A new filtering algorithm based on extremum and median value[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(6): 533-536.
邢藏菊, 王守觉, 邓浩江, 等. 一种基于极值中值的新型滤波算法[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(6): 533-536.
- 12 Hu Jinrong, Wang Ling. Accurate license plate location for mineral transport vehicle based on threshold segmentation[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(8): 2051-2054.
胡金蓉, 王玲. 基于阈值分割的运矿车辆车牌精确定位[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8): 2051-2054.