

基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形快速检测方法

肖 君^{1,2} 魏秀东^{1*} 卢振武¹ 任兰旭^{1,2} 申振锋¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对槽式太阳能热发电对聚光器面形检测的需求,在详细调研了太阳能聚光器面形检测现状的基础上,提出了一种基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形快速检测方法。采用一种自迭代算法进行曲面重建并且引入摄影法对被测镜位置进行快速定位,使操作更简单,测量速度更快,以适用于在线检测。详细阐述了该方法的测量原理,搭建了相应的实验平台,测量了一面槽式抛物镜的面形。实验结果表明该方法能快速、定性地给出被测镜的面形数据,验证了该方法的正确性和可行性。

关键词 测量; 太阳能热发电; 太阳能聚光器; 面形检测; 偏折法

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1208006

A Fast Surface Shape Measurement Method for the Parabolic Trough Solar Concentrator Based on Deflectometry

Xiao Jun^{1,2} Wei Xiudong¹ Lu Zhenwu¹ Ren Lanxu^{1,2} Shen Zhenfeng¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to meet the demands of surface shape measurement in trough solar thermal power generation, a fast surface shape measurement technique for trough solar concentrators based on deflectometry principle is proposed after investigating the current research situation in detail. A self-iterative algorithm is used to reconstruct the surface shape and the photogrammetry method is adopted to calibrate the position of the measured concentrators. It makes this measurement system simpler and faster to operate and suitable for online test. The measurement principle of this technique is introduced and the testing platform is built. A piece of parabolic trough solar concentrator is measured. The experimental results indicate that the qualitative surface shape data of the measured mirror can be worked out quickly by using this method. And the feasibility and correctness of this method are verified.

Key words measurement; solar thermal power; solar concentrator; surface shape measurement; deflectometry

OCIS codes 100.2000; 120.6660; 350.6050

1 引 言

随着石油、煤炭等化石能源的日益枯竭,太阳能热发电作为太阳能利用的一个重要分支,被认为是未来能源市场中最有前途的发电方式之一^[1]。根据

聚光方式的不同,太阳能热发电通常分为槽式、塔式、碟式和菲涅耳式等,其中槽式太阳能热发电的技术最为成熟,在国外已经商业化。在槽式太阳能热发电中,槽式聚光器是热发电站的关键部件,它将太

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-08-05

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227101)、国家自然科学基金(11174275)

作者简介: 肖 君(1986—),男,博士研究生,主要从事太阳能聚光方面的研究。E-mail: xiaojun_nk@163.com

导师简介: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzu@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: weixiudong211@163.com

阳辐射聚集到吸热装置上的能量聚集装置,起到对太阳辐射进行高密度聚集的作用。电站的发电效率很大程度上取决于槽式聚光器的聚光效率,所以在电站建设或运行过程中需要保证槽式抛物镜的面形精度符合设计要求。因此,寻找一种快速、精确、经济的槽式聚光镜面形误差检测方法显得十分重要。

在过去的二三十年中,人们提出了各种各样的测量太阳能槽式聚光镜面形精度的方法,主要有三类。第一类是基于激光扫描技术的方法,如 Jones 等^[2]在 1996 年提出的视频扫描 Hartmann 光学测量法(VSHOT)。通过激光束扫描镜面,由反射光线的位置求得法线方向。这种方法精度很高,能达到 0.1 mrad,但这种逐点的数据采集方式非常费时,并且它要求被测镜面尽量垂直放置,这在镜场中很难做到。第二类是摄影法,由 Shortis 等^[3-4]在 1996 年首次提出。2005 年, Pottler 等^[5]首先把这种方法应用到槽式聚光器上。这种方法是在被测镜面贴上特殊的标志点,然后用相机在不同角度对镜面拍照,通过共线性原理确定被测点的空间三维坐标。这种方法适合任意面形的检测且精度较高,在测量槽式聚光器曲面精度时应用较多,但是数量庞大的标志点的安装和标定是一项十分费时的的工作,所以它并不适合快速检测,也不适合大面积检测。第三类方法是偏折法或者称为条纹反射法,由 Bothe 等^[6]在 2006 年提出。它是在光屏上投射黑白相间的条纹,用相机拍摄条纹经被测镜反射后的图像,条纹会被待测镜面形调制,经过相移算法和图像处理即可得到曲面面形。该方法与前面两种方法相比最大的优点是极大地缩短了测量时间,适合大面积高精度的测量。该方法是太阳能槽式聚光镜面形检测的发展趋势和方向。近几年人们对这种方法进行了很多改进,如用液晶显示屏代替原先的投影仪^[7],从而简化系统。2010 年 Scott 等^[8]提出了彩色条纹偏折法。通过彩色条纹的颜色编码,不必运用相移算法就能得知目标屏上点和像素面上点的对应关系,从而可以打印一张彩色条纹的纸来代替液晶显示屏,这将极大地简化系统和降低成本。当然由于运用的是颜色编码技术而非相移算法,彩色条纹法对环境光强比较敏感,而且彩色条纹靶必须是活动的,以满足横条纹和竖条纹之间的变换,所以系统的稳定性也大打折扣,因此彩色条纹法在实际中的应用并不常见。我国太阳能热发电技术还在商业化起步阶段,对太阳能槽式聚光器面形检测缺乏有效研究。许文斌等^[9]开发出了应用于定日镜面形检测的三维测量设

备,该设备精度很高,但检测时间较长,且不适用于较大曲率的镜面检测。王华荣等^[10]提出了一种基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量方法,该方法原理上应用的是盖绍彦等^[11]提出的三维轮廓测量模型,测量过程简单,但现阶段该测量系统只可恢复出单元镜的基本面形,测量误差较大。

本文在偏折法的基础上,提出了一种太阳能槽式聚光器面形快速检测方法,该方法引入摄影法对被测镜位置进行快速定位,使操作更简单,测量速度更快,有望适用于在线检测。

2 系统原理

2.1 原理叙述

系统基本测量原理如图 1 所示。在光屏上投射黑白相间的正弦条纹,条纹由被测镜反射后被相机捕捉。如果知道光屏上 T 点、对应的被测镜上 M 点和像素面上 P 点这三点的坐标,就可以得到入射光线 MT 的单位方向向量 i 和反射光线 PM 的单位方向向量 r ,则可求得被测镜 M 点法向单位向量 n :

$$n = \frac{r - i}{|r - i|}. \quad (1)$$

光屏、相机和被测镜的位置都是经过严格标定的。 O' 点是相机的透视中心,在相机的线性模型中, P 点、 O' 点和 M 点三点共线,则 M 点的坐标可以通过直线 PO' 的方程与被测镜方程联立得到。而光屏上 T 点的坐标则是经过四步相移算法和图像处理得到的。在求解被测镜面形方程时运用迭代算法求得与实际情形比较吻合的被测镜方程。

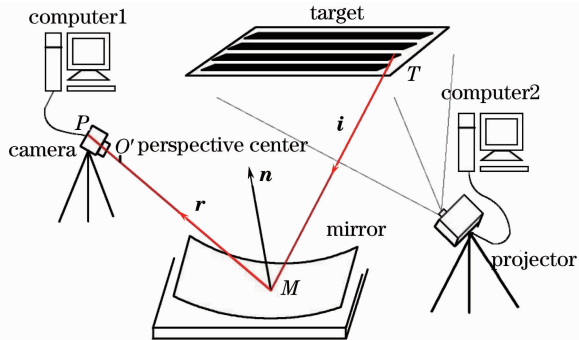


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic of the system

2.2 相移算法与时域位相展开

光屏上的标准正弦条纹可以表示为

$$I = A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right), \quad (2)$$

式中 A_0 为光强幅值, p 为条纹间距, x 为横向坐标。正弦条纹经被测镜反射后,亮条纹还是亮条纹,暗条

纹还是暗条纹。反映在图 1 上,即像素平面上的 $P(m,n)$ 点与对应的光屏上的 $T(x,y)$ 点的位相等。为了求出与点 $P(m,n)$ 对应的光屏上的点 T 的坐标,应先求出 P 点位相 $\phi(m,n)$ 。采用四步相移算法,令正弦条纹的位相每次改变 $\pi/2$,则有

$$\tan\phi(m,n) = (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3). \quad (3)$$

由于亮暗条纹有多个周期,需要对得到的 ϕ 值进行时域位相展开^[12]。实际的 ϕ 值应该在用四步相移算法求得 ϕ 值的基础上加上 2π 的整数倍,即:

$$\phi_{\text{real}} = \phi_{\text{measured}} + 2N\pi \quad (N = 1, 2, 3, 4, \dots, K), \quad (4)$$

式中 K 为条纹总的周期数。这样由位相等就得到 $T(x,y)$ 点坐标的一系列可能值。为了确定 N 值,从而得到实际的位相值,进而得到确切的 x 坐标,先用只有一个周期的条纹进行四步相移和位相展开,并由位相等得到一个相对精确的 x 坐标 x_0 ,如图 2 所示,它有一个较大的不确定度 u_x 。

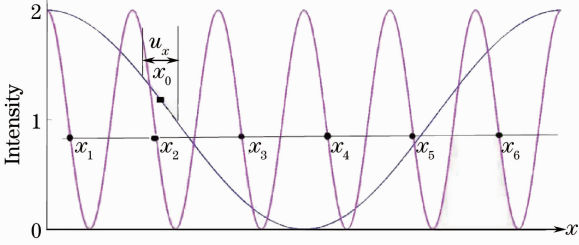


图 2 时域位相展开示意图

Fig. 2 Schematic of the temporal phase unwrapping

然后用多个周期的条纹重复上述操作,会得到一系列可能的 x 值 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dots$, 然后对这些值进行比较,离 x_0 值最近的 x 值即为所求值,在图 2 中即为 x_2 。这样就求得了较精确的 T 点的 x

坐标,同时也确定了 N 值。应注意多周期条纹的周期数 K 的选择应使条纹间距 p 大于运用一个周期条纹时产生的不确定度 u_x 。依此类推,将竖条纹变成横条纹,重复上述操作就可得到 $T(x,y)$ 点的 y 坐标。至此就得到了与像素平面上的 $P(m,n)$ 点相对应的光屏上的 $T(x,y)$ 点的位置坐标。

2.3 迭代算法与曲面重建

如图 1,将像素平面上 P 点、相机入瞳中心 O' 点以及对应光屏上的 T 点的坐标变换到镜面坐标系中进行计算。在镜面坐标系中,被测的槽式抛物镜的方程为

$$x^2 = 2pz, \quad (5)$$

式中 $p/2$ 为焦距。(5) 式与直线 PO' 的方程联立即可得到被测镜 M 点的坐标 (x_m, y_m, z_m) 。再结合 P 点和 T 点的坐标就可以得到入射光线 MT 的单位方向向量 i 和反射光线 PM 的单位方向向量 r ,则由 (1) 式求得被测镜 M 点法向单位向量 n :

$$n = \frac{1}{\sqrt{(r_x - i_x)^2 + (r_y - i_y)^2 + (r_z - i_z)^2}} \cdot (r_x - i_x, r_y - i_y, r_z - i_z). \quad (6)$$

但由于实际的加工和标定误差,实际的被测镜方程会偏离标准抛物柱面方程。对于在镜面坐标系中实际的被测镜面形,用多项式表示为

$$z(x,y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i B_{i,j} (x)^i (y)^j, \quad (7)$$

式中 k 为多项式的阶数,对于点聚焦或者线聚焦的太阳能聚光器,二阶拟合就能很好地满足要求^[13]:

$$z(x,y) = B_{0,0} + B_{1,0}x + B_{1,1}y + B_{2,0}x^2 + B_{2,1}xy + B_{2,2}y^2, \quad (8)$$

则在该方程下 M 点的单位法线向量 n' 为

$$\begin{cases} n'_x = \frac{-2B_{2,0}x_m - B_{1,0} - B_{2,1}y_m}{\sqrt{(-2B_{2,0}x_m - B_{1,0} - B_{2,1}y_m)^2 + (-2B_{2,2}y_m - B_{1,1} - B_{2,1}x_m)^2 + 1}} \\ n'_y = \frac{-2B_{2,2}y_m - B_{1,1} - B_{2,1}x_m}{\sqrt{(-2B_{2,0}x_m - B_{1,0} - B_{2,1}y_m)^2 + (-2B_{2,2}y_m - B_{1,1} - B_{2,1}x_m)^2 + 1}} \\ n'_z = \frac{1}{\sqrt{(-2B_{2,0}x_m - B_{1,0} - B_{2,1}y_m)^2 + (-2B_{2,2}y_m - B_{1,1} - B_{2,1}x_m)^2 + 1}} \end{cases} \quad (9)$$

运用法线方向相一致来拟合实际的被测镜方程。即:

$$n = n'. \quad (10)$$

则得到

$$\begin{cases} -2B_{2,0}x_m - B_{1,0} - B_{2,1}y_m = \frac{r_x - i_x}{r_z - i_z} \\ -2B_{2,2}y_m - B_{1,1} - B_{2,1}x_m = \frac{r_y - i_y}{r_z - i_z} \end{cases} \quad (11)$$

为求得(11)式中的未知系数,在光屏上和像素面上选择另外的点重复上述操作,则对于 N 个点得到以下 $2N$ 个方程组。

$$\begin{cases} -\frac{r_x(k) - i_x(k)}{r_z(k) - i_z(k)} - [2B_{2,0}x_m(k) + B_{2,1}y_m(k) + B_{1,0}] = 0 \\ -\frac{r_y(k) - i_y(k)}{r_z(k) - i_z(k)} - [2B_{2,2}y_m(k) + B_{2,1}x_m(k) + B_{1,1}] = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $k=1,2,3,\dots,N$ 。

对于(12)式,运用最小二乘法得到系数 $B_{1,0}$, $B_{1,1}$, $B_{2,0}$, $B_{2,1}$, $B_{2,2}$ 的值,然后在被测镜上找一已知坐标的特殊点(比如原点、角点等)将其代入(8)式来确定常数项 $B_{0,0}$ 的值。这样就求得了(8)式中的全部系数。以(8)式作为新的被测镜方程代替(5)式,重复上述过程,即可求得另一个新的被测镜方程。经过上述的反复迭代,直到被测镜方程的系数变化不大(收敛)为止,这样就得到了与实际情形比较吻合的被测镜方程,以及在镜面上各个计算点的实测的法线方向。

3 系统标定

3.1 被测镜位置标定

方案中用三部相机对被测镜进行定位,如图3所示。摄影定位的原理是共线性原理,即在相机线性模型中,物点、像点和相机的透视中心在一条直线上。设在地面坐标系中被测镜某一角点 W 在三个相机像面上的像点的坐标依次为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1,2,3$,三个相机透视中心的坐标依次为 $O_i(a_i, b_i, c_i)$,则角点坐标满足方程组:

$$\begin{cases} \frac{x - a_1}{x_1 - a_1} = \frac{y - b_1}{y_1 - b_1} = \frac{z - c_1}{z_1 - c_1} \\ \frac{x - a_2}{x_2 - a_2} = \frac{y - b_2}{y_2 - b_2} = \frac{z - c_2}{z_2 - c_2} \\ \frac{x - a_3}{x_3 - a_3} = \frac{y - b_3}{y_3 - b_3} = \frac{z - c_3}{z_3 - c_3} \end{cases}. \quad (13)$$

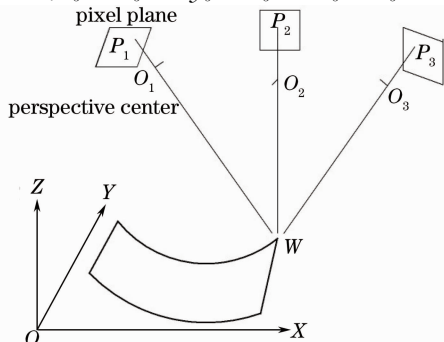


图3 摄影定位原理图

Fig. 3 Schematic of the photogrammetry method

这是一个超定方程,运用最小二乘原理即可求得被测镜角点 W 在地面坐标系中的坐标 (x, y, z) 。同理,可以求得被测镜其他三个角点在地面坐标系中的坐标,这样就可以确定被测镜的位置。

3.2 相机标定

对于相机的内部和外部参数的标定,运用 Matlab 软件相机标定工具箱^[14]进行标定。Matlab 软件相机标定工具箱基于二维平面靶标的摄像机标定方法。它拍摄一系列的黑白棋盘方格标定板的图像,不失一般性假设标定板平面是在地面坐标系中 $Z_w = 0$ 的平面上。黑白方格的长和宽是事先测定的,则当选择了地面坐标系的起始点和 X_w, Y_w 轴的方向时,就可以得到黑白格的每个角点在地面坐标系中的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) ,如图4所示。经过图像角点提取,可以得到对应的每个黑白方格角点在像素坐标系中的坐标 (u, v) 。依据摄像机的畸变模型,知道目标点在地面坐标系中的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与在像素坐标系中的坐标 (u, v) 的变换关系,这些变换关系中包含着相机的内外参数。则每一个测量的黑白方格的角点对应着一个方程。拍摄一系列标定图像后就可以求得相机的内外参数,包括焦距 f 、像素面主点 (u_0, v_0) 、倾斜因子 s' 、畸变系数 kc 、旋转矩阵 R 与平移向量 t 。在标定完相机内参数后,还可以运用 Matlab 软件相机标定工具箱对图像进行去畸变处理。

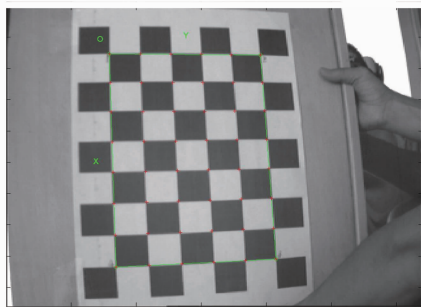


图4 标定靶图像

Fig. 4 Photo of the calibration board

3.3 活跃像素的标定

由于在拍摄时,被测镜不可能恰好完全充满相机视场,所以 CCD 有一部分像素是没有用到的,在

数据处理时这部分像素需要略去。具体的标定方法是：采集两幅图，一幅是全黑屏图，另一幅是全白屏图，在两幅图中如果某一像素的响应值的改变超过了一个设定的阈值，则该像素被认为是“活跃的”，即其对应的是被测镜面区域。所有的操作都是在活跃像素上进行的。

4 实 验

4.1 实验装置

基于上述原理，在实验室对东莞隆泰美东镜业有限公司生产的一面太阳能槽式抛物镜进行了测量。该槽式抛物镜参数为：焦距 $f = 2000$ mm；长 $l = 1291$ mm；宽 $d = 820$ mm。实验装置如图 5 所示。

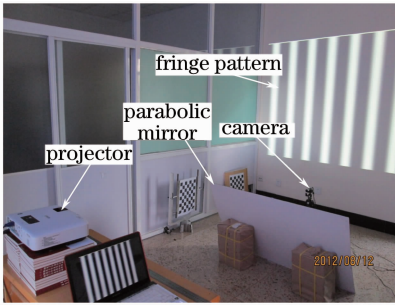


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

用一台计算机产生黑白相间的正弦条纹，然后用投影仪将正弦条纹投射到光屏上（实验室用墙壁代替），CCD 相机用来拍摄经由槽式聚光镜反射的条纹图像。调整投影仪、被测镜和相机的相对位置使被测镜处在相机的视场中，而且投射的条纹图像能够覆盖被测镜并在相机中清晰成像。为了保证实验效果，实际的操作应在暗室中进行。图像采集完毕后经过图像处理和迭代算法进行曲面重建，就可以求得被测槽式抛物镜的面形和各个计算点的实测的法线偏差。

4.2 实验结果

实验中对 x 方向和 y 方向的单个周期和 8 个周期的正弦条纹各采 4 幅图，每幅图之间位相相差 $\pi/2$ 。所采集的测试图像如图 6 所示。

图 7 是计算得到的被测抛物镜面形的点列图，其中每一个小黑点对应着镜面上的一个测量点，当然为了使点列图不至于太密集，对数据点进行了简化。该图能给出一个直观的镜面面形分布情况，但通过图 7 并不能定量地看出被测镜面形的好坏。

在图 8 中，将实测的抛物镜面形与理想的抛物镜面形进行了比较，给出了被测抛物镜的法线偏差

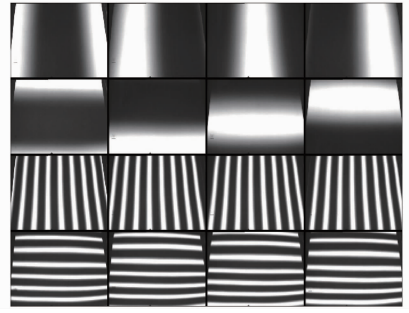


图 6 实验中拍摄的测试图像

Fig. 6 Image captured in the experiment

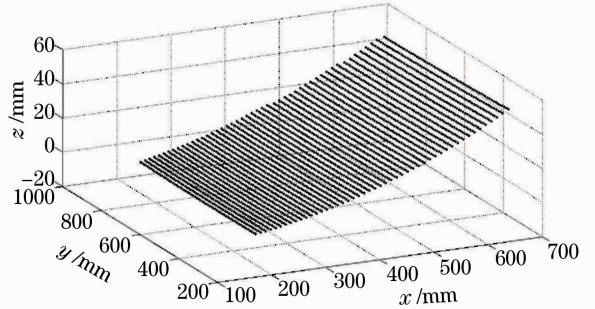


图 7 被测镜的面形图(点列图)

Fig. 7 Surface shape of the measured mirror

(spots diagram)

图，也即是斜率偏差。图 8(a)表示的是沿 x 方向的法线偏差，其中负值表示被测点的法向量沿 x 轴负方向倾斜。图 8(b)表示的是沿 y 方向的法线偏差，其中负值表示被测点的法向量沿 y 轴负方向倾斜。计算得被测镜的法线偏差的均方根 (RMS) 值为 12.5 mrad，其中 x 方向的偏差 (RMS 值) 为 9.0 mrad， y 方向的偏差 (RMS 值) 为 8.7 mrad。合格的太阳能聚光器的面形法线误差要求小于 2 mrad，所测的被测抛物镜的面形与之相差甚远。由图 8 可以看出所测的法线偏差并没有呈现离散分布，显然测量数据中含有较大的系统误差，这主要是由于现阶段在实验室搭建的测量系统比较简陋，而在具体设备研制时，需要搭建更精密的平台，系统误差也有待精确标定。

基于法线偏差，可以进一步求得被测镜的焦点偏差，它表示的是当入射光线以零角度入射时，反射光线与理想焦线的偏差。焦点偏差是反映被测镜聚光性能的重要参数，特别是沿 x 方向的焦点偏差（径向焦点偏差），它是评价太阳能聚光器面形好坏的重要评判指标。一般说来，对于吸热管直径为 70 mm 的槽式抛物聚光镜，沿 x 方向的焦点偏差值应小于 12 mm 才是可接受的。当沿 x 方向的焦点偏差值小于 10 mm 时，就认为聚光镜面形很好，当

这个值小于 8 mm 时,就说明聚光镜面形非常好。所测量的槽式抛物镜沿 x 方向和 y 方向的焦点偏差如图 9 所示。其中沿 x 方向的焦点偏差的均方根值为 39.6 mm,沿 y 方向的焦点偏差的均方根值为

35.4 mm。对比图 8 和图 9 可以看出,焦点偏差的分布情况和法线偏差的分布情况十分吻合。当然从图 9 中也能直观地看出测量结果中包含着较大的系统误差。

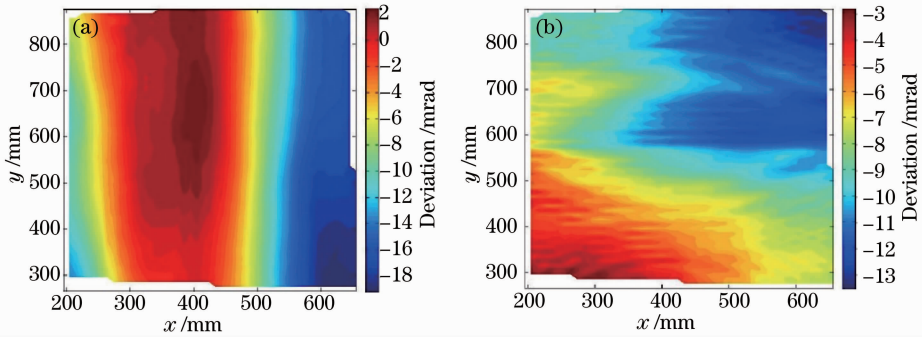


图 8 法线偏差图。(a) 沿 x 方向;(b) 沿 y 方向

Fig. 8 Normal deviation. (a) In x -direction; (b) in y -direction

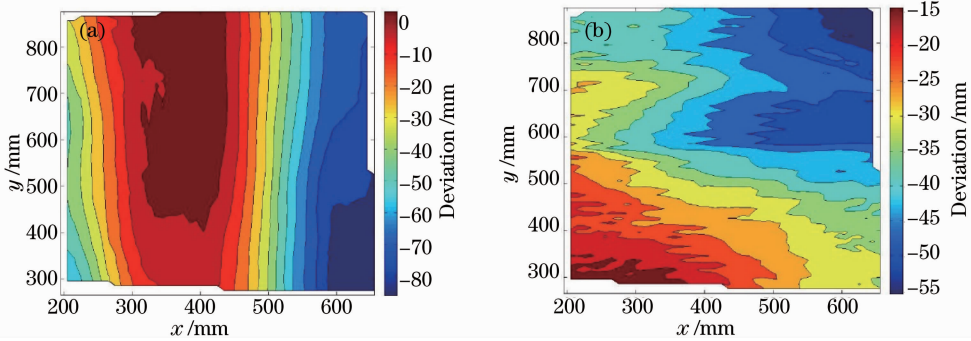


图 9 焦点偏差。(a) 沿 x 方向;(b) 沿 y 方向

Fig. 9 Focus deviation. (a) In x -direction; (b) in y -direction

基于上述的测量数据,计算了被测槽式抛物镜的截断效率。在计算时,严格按照实际情况进行模拟,太阳发散角(半角)为 4.65 mrad,吸热管直径为 70 mm。图 10 反映的是被测槽式抛物镜的局部截断效率的分布情况。计算得到总的截断效率为 64.4%。

性给出被测镜的面形数据,验证了该方法的正确性和可行性。当然由测量结果也不难看出,现今在实验室搭建的测量系统存在较大的系统误差。这主要是由系统标定残差引起的,包括相机标定残差、被测镜和光屏位置的定位误差等。在实际测量时应搭建更精密的测量平台,减小测量系统的系统误差,并运用“标准镜”或其他独立的检测设备对测量系统的系统误差进行标定,从而提高测量精度。

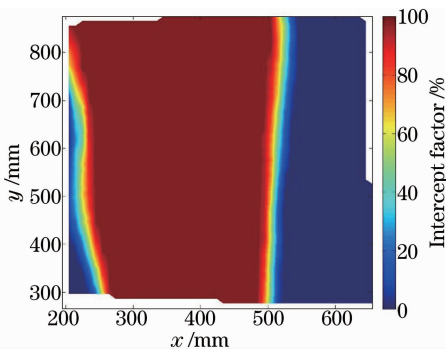


图 10 局部截断因子

Fig. 10 Local intercept factor

由上述的实验结果可以看出所提出的基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形检测方法能快速地对

5 结 论

提出了一种基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形的快速检测方法,详细阐述了该方法的测量原理,搭建了相应的实验平台,测量了东莞隆泰美东镜业有限公司生产的一面太阳能槽式抛物镜的面形,验证了该方法的正确性和可行性。该方法提出运用摄影法对被测镜位置进行定位,将条纹偏折法和摄影测量法结合起来,使操作更简单,测量速度更快,可适用于在线检测。但由于缺少相应的系统误差的

校准方法和设备,该测量系统现阶段存在着较大的系统误差。至于如何标定测量系统的系统误差,从而提高测量精度,这是下一阶段的工作目标。该方法不仅可以用于槽式聚光镜面形的测量,还可以用于塔式、碟式以及其他任意面形的反射镜的面形测量,具有十分广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 L Schnatbaum. Solar thermal power plants[J]. *European Physics Journal Special Topics*, 2009, 176: 127-140.
- 2 S A Jones, D R Neal, J K Gruetzner, *et al.*. VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors[C]. SAND-96-2272C, 1996. 1-11.
- 3 M Shortis, G Johnston. Photogrammetry: an available surface characterization tool for solar concentrators. Part I: measurements and surfaces [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1996, 118(3): 146-150.
- 4 M Shortis, G Johnston. Photogrammetry: an available surface characterization tool for solar concentrators. Part II: assessment of surfaces[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1997, 119(4): 286-291.
- 5 K Pottler, E Lupfert, G H G Johnston, *et al.*. Photogrammetry: a powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(1): 94-101.
- 6 T Bothe, W Li, C Kopylow, *et al.*. Fringe reflection for high resolution topometry and surface description on variable lateral scale[C]. *Proceedings of Fringe 2005 International Workshop*, 2006. 362-371.
- 7 C E Andraka, S Sadlon, B Myer, *et al.*. Rapid reflective facet characterization using fringe reflection techniques [C]. *ASME Conference Proceedings*, 2009. 19-23.
- 8 P M Scott, G Burgess. Measurement of mirror panels using coloured pattern deflectometry[C]. *Proceedings of Solar PACES*, 2010.
- 9 Xu Wenbin, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin, *et al.*. Development of the heliostat shape measuring apparatus of solar tower thermal power plant[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2009, 30(7): 1390-1394.
许文斌, 卢振武, 张红鑫, 等. 塔式太阳能热电站定日镜面形检测专用仪器的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(7): 1390-1394.
- 10 Wang Huarong, Li Bin, Wang Zhifeng, *et al.*. Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112007.
王华荣, 李 彬, 王志峰, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112007.
- 11 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of 3D shape measurement system based on phase measuring profilometry and its calibration[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 902-910.
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的相位法三维轮廓测量系统模型及其标定方法研究[J]. *自动化学报*, 2007, 33(9): 902-910.
- 12 H O Saldner, J M Huntley. Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(2): 610-615.
- 13 S A Jones, J K Gruetzner, R M Houser, *et al.*. VSHOT measurement uncertainty and experimental sensitivity study[C]. *Proceedings of the 32 rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1997, 3: 1877-1882.
- 14 J Y Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab[OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. [2013-6-19].

栏目编辑:韩 峰