

基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量

王华荣¹ 李 彬² 王志峰¹ 朱会宾¹

(¹ 中国科学院电工研究所中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 北京 100190)
² 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要 针对太阳能热发电槽式抛物面聚光器单元镜面形测量的问题, 采用条纹反射技术和时域相移解包裹技术相结合的方法, 在三维轮廓测量系统模型的基础上, 建立了一个结构简单、易操作的测量系统。在对系统设备无任何严格要求的前提下, 利用投影仪向投影屏幕上投射正弦条纹, 由相机拍摄记录单元镜反射产生的条纹, 根据标定的系统参数及三维轮廓测量系统模型来计算单元镜表面面形。通过现场实验, 获取了单元镜的面形分布情况, 结论证明该测量方法的可行性。该测量系统的建立为以后的测量工作提供了一定的参考, 并在太阳能热发电领域有很好的应用前景。

关键词 测量; 面形测量; 条纹反射; 相移; 解包裹

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0112007

Surface Measurement of Parabolic Trough Unit Mirror Based on Fringe Reflection

Wang Huarong¹ Li Bin² Wang Zhifeng¹ Zhu Huibin¹

(¹ Key Laboratory of Solar Thermal Utilization and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(² College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A measurement system is established for the parabolic trough unit mirror in concentrating solar power (CSP). The system applies the fringe reflection technique and the temporal phase unwrapping technique. Based on three-dimensional profilometry system model, the measurement system has less equipments and simpler operation. Without any strict requirements to the system equipment, a sinusoidal fringe is projected with projector, and the images are recorded by a camera after reflected by the unit mirror. Then the surface is computed by the parameters of the system. Experimental results verify that the measurement method is reliable. The system is helpful to the measurement work, and has a very good application prospect in the solar thermal power field.

Key words measurement; surface measurement; fringe reflection; phase shift; unwrapping

OCIS codes 120.2650; 120.4820; 120.6650

1 引 言

太阳能热发电主要包括塔式、槽式、碟式和菲涅耳式, 其中槽式太阳能热发电被认为是当前应用最广、造价最便宜并可以大规模应用的一种热发电技术。槽式太阳能热发电中, 聚光器的成本占整个电站成本的 50% 左右, 而槽式聚光器主要呈抛物面形状, 由许多单元镜面拼接而成, 将太阳光聚焦到集热

管上, 并将管内传热功质加热, 通过热交换产生蒸汽, 驱动汽轮机发电机组发电。单元镜面的面形直接影响聚光器的工作精度, 为了提高系统的光学效率, 提高电站的运行效率, 需要对抛物面单元镜面形的测量方法进行研究^[1]。

国内对于聚光器面形的检测起步比较晚, 目前还没有一套简便的检测设备。中国科学院长春光学

收稿日期: 2012-07-12; 收到修改稿日期: 2012-09-11

作者简介: 王华荣(1981—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事太阳能热发电聚光器面形检测方面的研究。

E-mail: wanghrong@126.com

精密机械与物理研究所已经开发出了基于激光束偏转法的单元镜面形检测的三维检测设备^[2],但其检测时间较长,硬件设备也比较复杂。针对单元镜面积比较大的特点,本文利用条纹反射技术,采用三维空间的相位法测量模型,建立了一套适用于槽式热发电电站的单元镜面形测量系统,通过投射变频条纹结合时域相位解包裹技术来得到单元镜的面形。该测量系统具有硬件结构简单、易操作、测量速度快等优点。

2 测量原理

2.1 测量系统模型

传统的相位法对系统的光路结构,即投影装置、相机和参考平面的相对位置关系要求严格。近年来,许多学者在降低系统要求上做了很多工作,取得了一定进展,其中盖绍彦等^[3]提出的基于三维空间的系统模型尤为突出,对测量系统的设备无任何严格要求,对标定时标定平面的位置也无严格要求等,将传统二维模型中的相位-高度关系推广到三维空间中。

槽式抛物面单元镜面形测量系统采用盖绍彦等提出的三维轮廓测量系统模型,图1为三维轮廓测量系统模型图。与经典相位法模型相同, Ω_w 、 Ω_c 、 O_p 、 O_c 分别为参考坐标系、相机坐标系、投影中心以及光心, o_1mm 为相机成像面坐标系。参考坐标系OXYZ中,OXY平面平行于投影面,Y轴平行于条纹,Z轴经过投影中心 O_p 。其中相机坐标系 Ω_c 与参考坐标系 Ω_w 的相对位置关系是任意的。 P 为待测物点, P' 为物点 P 在OXY平面上的投影, D 点为 O_pP 与OXY平面的交点, P'' 、 D'' 分别为 P' 、 D 点在OXY平面X轴上的投影, P 点在相机成像面上的坐标为

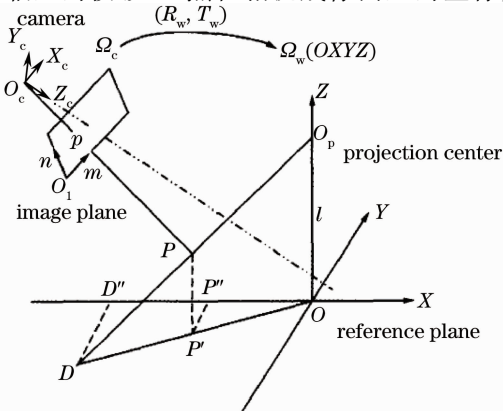


图1 系统模型图

Fig. 1 System optical geometry

$p(m, n)$ 。系统标定采用标准的棋盘标定板,结合Camera Calibration Toolbox for Matlab^[4]对测量系统进行内外参数标定,从而确定测量系统中的系统参量。由此建立了在相机坐标系中的相位和物点三维坐标之间的关系。

2.2 时域相位解包裹算法

待测单元镜的表面起伏引起投影条纹的变形,其表达式为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos \Phi(x, y), \quad (1)$$

式中 A 和 B 分别为与背景光强和受物体面形反射率影响分布的光场调制强度,为未知常数; Φ 为物面引起的相位调制,即条纹的变形,与物体的三维面形的深度有关。

相对于传统的空间相位展开方法,时间相位展开方法是沿着时间轴分别对每一个像素进行相位展开,并不在二维相位图中寻找展开路径,从而实现了各像素点相互独立的相位展开。因此,利用时间相位展开方法得到物体表面的相位分布^[5~11],可以抑制背景光干扰、噪声干扰等引起的相位误差,从算法上避免误差的路径传播。这里采用传统的四步相移算法,相位移动的增量为 $\pi/2$ 。算法的相位展开过程如下:

1) 解出每套条纹测量后的截断相位图

$$\Phi_w(m, n, K, t) = \arctan \left[\frac{I(m, n, 4, t) - I(m, n, 2, t)}{I(m, n, 1, t) - I(m, n, 3, t)} \right], \quad (2)$$

式中 (m, n) 为图像像素点坐标, m 取值从1到 N ; t 为条纹改变频率的次数,取值从1到 M , M 值依据测量的灵敏度和精度来确定; K 为相移步数,取值为1~4。

2) 求相邻两幅条纹图同一点的展开相位差及 2π 的不连续数

$$\nu(m, n, s) = \sum_{t=1}^s f_{\text{NINT}} \{ [(\Phi_w(m, n, t) - \Phi_w(m, n, t-1)) / (2\pi)] \}, \quad (3)$$

式中 $f_{\text{NINT}}(\cdot)$ 表示求最接近的整数值。

3) 总的展开相位为

$$\Phi_u(m, n, s) - \Phi_u(m, n, 0) = \Phi_w(m, n, s) - \Phi_w(m, n, 0) - 2\pi \times \nu(m, n, t). \quad (4)$$

3 系统实现

系统的测量原理如图2所示。硬件由数字光处理(DLP)投影仪、投影幕、数码照相机、待测槽式抛物面单元镜和计算机组成。在室内环境进行测量,

用计算机控制投影仪产生正弦特性的条纹,这样可以进行精确的相移,也可以任意改变条纹的频率,测量方便,还可以最大程度地消除由于投影仪的伽玛非线性对条纹正弦特性的影响,以提高测量的精度。

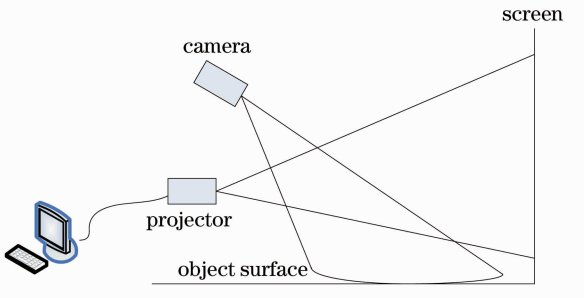


图 2 系统原理图

Fig. 2 System principle diagram

该系统中,投影分辨率采用 1024 pixel×768 pixel,相机采集图片分辨率为 1280 pixel×960 pixel。采用 $t=1,2,4,8,16$ 指数序列生成变频条纹进行投影,待测物体为边长 1183 mm,开口宽度(抛物方向的弦长)为 1044 mm 的槽式抛物面单元镜。

针对槽式抛物面单元镜,搭建了一个简单实验平台。实验照片如图 3 所示。实验步骤如下:

- 1) 利用三维轮廓测量系统模型对相机内外参数及系统参数进行标定;
- 2) 利用投影仪投射变频条纹,同时相机拍摄条纹图;
- 3) 根据条纹图计算解包裹相位;
- 4) 根据标定结果,结合相位分布计算单元镜面形分布。



图 3 实验照片

Fig. 3 Experimental photo

4 实验验证

对测量系统进行标定,根据系统模型中求解系统参数的要求,将标定板(如图 4 所示)先后置于测

量范围内的 2 个不共面位置采集样本点,得到相机内部参数以及旋转、平移矩阵分别为

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 2655.09630 & 0 & 717.08033 \\ 0 & 2659.62680 & 512.47694 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.105600 & 0.914643 & 0.390227 \\ 0.888366 & -0.263102 & 0.376276 \\ 0.446828 & 0.306929 & -0.840321 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} -0.155218 & 0.835954 & -0.526392 \\ 0.861293 & 0.375483 & 0.342327 \\ 0.483821 & -0.400242 & -0.778283 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1 = [-429.076061 \quad 221.010962 \quad 2362.057254],$$

$$\mathbf{T}_2 = [-218.590212 \quad -38.784753 \quad 2654.289014]. \quad (5)$$

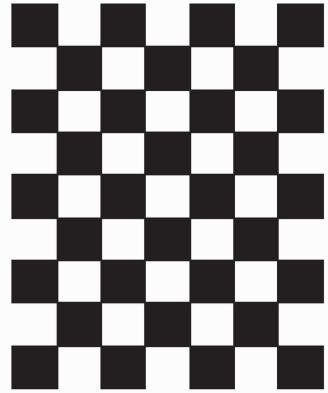


图 4 标定板

Fig. 4 Calibration board

根据系统模型,由采集的样本点,得到待标定的系统参量为

$$\begin{aligned} a_1 &= -0.00003269642641, & a_2 &= 0.00073057197781, \\ a_3 &= 0.00044400405630, & a_4 &= -0.99956952264439, \\ a_5 &= -0.00000128007540, & a_6 &= 0.00000445236673, \\ a_7 &= -0.00000737847214, & a_8 &= 0.02932639392229. \end{aligned} \quad (6)$$

完成标定后,对单元镜进行测量,计算单元镜面形分布。像平面 X 方向为待测物开口宽度方向, Y 方向为待测物边长方向。图 5 为包裹相位图,图 6 为解包裹相位图,图 7 为相机坐标系中单元镜坐标 Z 值分布图。通过实验数据,可以得到恢复出来的单元镜的边长为 1162.8650 mm,开口宽度为 1019.0361 mm,由于实验设备简单,误差稍微偏大,后期可以通过改善实验设备和改进系统模型来提高测量精度。由图 5~7 可以看出该测量系统可以恢复出单元镜的基本面形,说明该测量系统切实可行,且实验设备简单,测量方便快捷。

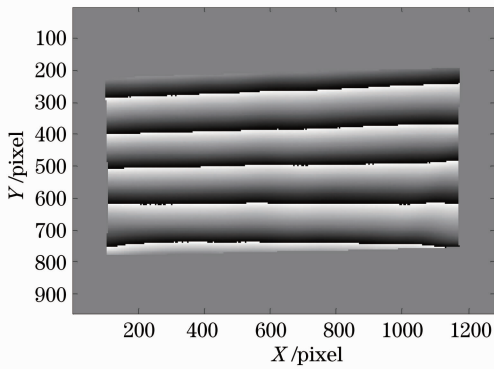


图 5 包裹相位图

Fig. 5 Wrapped phase

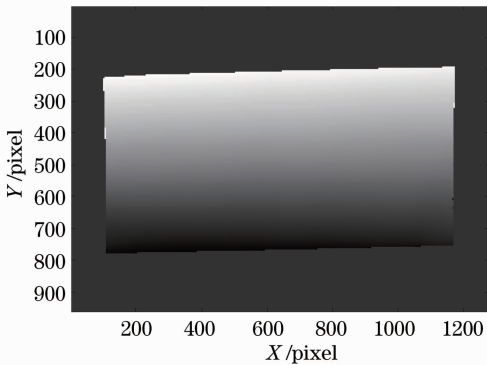


图 6 解包裹相位图

Fig. 6 Unwrapped phase

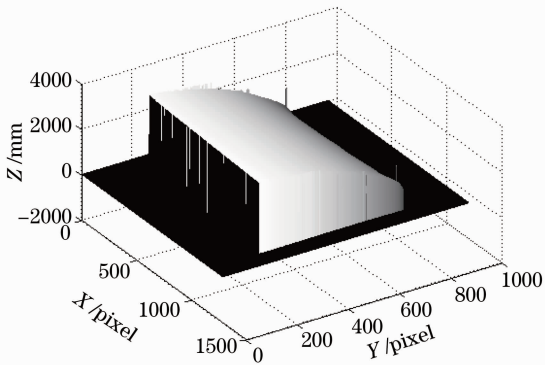


图 7 单元镜坐标 Z 值分布图

Fig. 7 Z coordinate value of unit mirror

5 结 论

本文提出了基于条纹反射术和时域相移技术测量槽式抛物面单元镜的方法,通过简单的实验验证了该测量方法的可行性。采用三维轮廓测量系统模型,使得系统参数获取简单,降低了对硬件设备空间位置的要求;采用时域解包裹算法,克服了路径相关

的误差传播,并在最大程度上抑制了噪声。该方法具有硬件结构简单、成本低、测量过程简单等优点,在太阳能热发电槽式聚光器面形检测中有很好的实际应用价值。

参 考 文 献

- Luo Zhihui, Long Xinfeng. State and trend of solar parabolic trough power generation technology [J]. *Electrical Equipment*, 2006, **7**(11): 29~32
罗智慧, 龙新峰. 槽式太阳能热发电技术研究现状与发展 [J]. *电力设备*, 2006, **7**(11): 29~32
- 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检测专用仪器的研制 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(7): 1390~1394
- 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
- J. Y. Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab [OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. [2012-11-07]
- Li Jiangcheng, Jin Guanchang, Ma Shaopeng. 3-D profilometry system using the temporal phase unwrapping method [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, **44**(11): 1505~1508
李江城, 金观昌, 马少鹏. 应用时域相位解包方法的三维形貌测量系统 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(11): 1505~1508
- J. M. Huntley. Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(23): 3901~3908
- R. Cusack, N. Papadakis. New robust 3-D phase unwrapping algorithms: application to magnetic field mapping and undistorting echoplanar images [J]. *NeuroImage*, 2002, **16**(3): 754~764
- H. O. Saklner, J. M. Huntley. Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(2): 610~615
- Zhao Wenchuan, Fan Bin, Wu Fan *et al.*. Testing of aspheric surface normal vector based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612007
赵文川, 范斌, 伍凡 等. 基于相位测量偏折术的非球面法线向量测量 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612007
- Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe inverse videogrammetry based on global pose estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808003
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808003
- Peng Xiang, Yin Yongkai, Liu Xiaoli *et al.*. Phase-aided three-dimensional imaging and metrology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900120
彭翔, 殷永凯, 刘晓利 等. 基于相位辅助的三维数字成像与测量 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900120

栏目编辑: 何卓铭