# 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

任兰旭<sup>1,2</sup> 魏秀东<sup>1\*</sup> 牛文达<sup>1</sup> 肖 君<sup>1,2</sup> 卢振武<sup>1</sup>

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

**摘要** 为提高抛物槽式太阳能聚光器的聚光效率,需要对聚光器的整体面形进行检测和调整。提出采用吸热管反 射成像法检测槽式聚光器各子镜的安装位置及倾斜角度,进而获得聚光器的整体面形信息。通过测量相机与被测 聚光器的相对位置,可计算吸热管在待检测子镜中的成像位置及形状,并推导了吸热管在聚光器中的理论成像位 置计算公式。进行了吸热管反射成像法检测槽式聚光器面形的实验。通过调整聚光器子镜的安装位置和倾斜角 度,使吸热管在子镜中的实际成像位置与理论位置重合,验证了检测方法的正确性和可行性。

关键词 光学器件;聚光效率;聚光器面形;吸热管反射成像法;抛物槽式聚光器

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0412001

## Surface Error of Parabolic Trough Solar Concentrators Based on the Theoretical Overlay Photographic Method

Ren Lanxu<sup>1,2</sup> Wei Xiudong<sup>1</sup> Niu Wenda<sup>1</sup> Xiao Jun<sup>1,2</sup> Lu Zhenwu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To improve the concentrate efficiency of the parabolic trough concentrator, the measurement and adjustment of overall surface are needed. The theoretical overlay photographic method is used to measure the installation position and tilt angle of facet mirrors, and then the concentrator surface information is obtained. It can calculate the theoretical shape and position of the receiver in image by measuring the relative position of concentrator and cameras, while the theory position formula of receiver is deduced in concentrator. The experiment of the theoretical overlay photographic method measuring the concentrator surface is done. This method can match the actual position of receiver to theoretical position in image by adjusting installation position of facet mirrors, which verifies the feasibility and correctness of this method.

Key words optical devices; concentrate efficiency; concentrator surface; theoretical overlay photographic method; parabolic trough concentrator

OCIS codes 350.6050; 120.4800; 100.2000

1 引 言

抛物槽式太阳能系统是现今最经济的商业性太 阳能发电技术<sup>[1-2]</sup>。聚光器是槽式太阳能电站的光 能收集单元,聚光器面形的好坏直接影响电站发电 效率。然而绝大多数的聚光器都是由大量的子镜拼 接而成,并将太阳光聚焦到吸热管上<sup>[3]</sup>。将聚光器 各子镜精确地安装,能将太阳光最大化地反射到吸 热管上,通过减少反射光能的损失可以提高吸热管 的截断效率,而截断效率可以用于评价检测方法的 精度。抛物槽式聚光器的焦距相对较短,商业性电

收稿日期: 2013-09-11; 收到修改稿日期: 2013-10-11

基金项目:国家 973 计划(2010CB227101)、国家 863 计划(2012AA050602)、国家自然基金(11174275)

作者简介:任兰旭(1987—),男,博士研究生,主要从事太阳能聚光方面的研究。E-mail: ren\_lanxu@126.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: luzw@ciomp.an.cn

<sup>\*</sup> 通信联系人。E-mail: weixiudong211@163.com

站一直采用精度相对低的检测方法,高精度的面形 检测技术一直处于缓慢发展的阶段。

1996 年, Jones 等<sup>[4]</sup> 提出激光扫描技术 (VSHOT)检测聚光镜的面形,利用激光器发射一条 细光束,经过待检测聚光镜的反射,通过相机记录反 射细光束与接收靶相交位置,聚光镜反射点的法向方 向可以被计算出,通过改变激光器细光束的发射方向 可以检测聚光镜面形。在 2005 年, SunLab 将 VSHOT应用于聚光器的面形检测[5-6]。1996年, Shortis 等<sup>[7-8]</sup>提出基于多部相机的近景摄影法测量 碟式聚光器面形,通过多部不同视角的相机对聚光器 上的标志点空间立体重建,进而拟合出聚光器面形, 2005 年,Pottler 等<sup>[9]</sup> 将该方法应用于抛物槽式电站 子镜安装位置的测量,评价聚光器的面形。2005年, Sandia National Laboratories 采用远距离观测技术检 测和调节 LS-2 槽式聚光器<sup>[10]</sup>,该方法能快速方便地 检测聚光器面形。激光扫描技术和近景摄影法,系统 结构比较复杂,检测时间较长,针对成千上万面子镜 构成的大型商业槽式电站,不能满足实际的需求;远 距离观测技术需要在远距离观测聚光器的成像情况, 受实际商业槽式电站空间排布影响,远距离观测技术 不能有效地应用于实际电站的聚光器面形检测。

理想的聚光器面形检测技术有以下几个特点:1) 系统简单且容易实现;2)需要较少的硬件实施;3)不 需要移动吸热管;4)不需要太阳或者其他特定天气; 5)不需要外部光源;6)允许聚光器子镜调节<sup>[11]</sup>。1995 年,Diver<sup>[11]</sup>首次提出利用接收靶反射成像法检测 CPG-460碟式聚光器的面形。而吸热管反射成像法 源于接收靶反射成像法,通过比较吸热管在子镜中的 实际成像位置与理论成像位置,检测聚光器面形。实 验结果表明,吸热管反射成像法能快速检测出各子镜 的安装位置偏差,进而改进聚光器的面形。

本文通过检测和调整抛物槽式太阳能聚光器的 整体面形,提高聚光器的聚光效率。提出了采用吸 热管反射成像法能检测槽式聚光器各子镜的安装位 置及倾斜角度,进而获得聚光器的整体面形信息。 基于相机与被测聚光器的相对位置,计算了吸热管 在待检测子镜中的成像位置及形状,并推导了吸热 管在聚光器中的理论成像位置计算公式,进而设计 了吸热管反射成像系统。采用图像处理可以精确、 快速地检测到子镜的安装位置变化,验证了检测方 法的正确性和可行性。

## 2 吸热管反射成像法测试理论

### 2.1 反射点计算

吸热管反射成像法利用光线反射定律和光线可 逆原理,可以计算吸热管经过待测子镜反射到相机 CCD像面上的位置<sup>[12-13]</sup>,吸热管反射成像法的原 理示意图如图1所示。假设以相机主点位置P点



#### 图 1 吸热管反射成像法原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the theoretical overlay photographic method

为发光点,其发出的光线,经过待检测聚光器子镜反射,其中两条光线 EH 和BA 经过吸热管的边缘。根据光线反射定律可以计算这两条光线在待测子镜上的反射点位置,记做上端反射点 E 位置和下端反射点 B 位置。利用针孔相机成像特性可以快速计算上下两反射点在图像中的位置,即确定吸热管在图像中的理论位置。

O为抛物柱面聚光器单元的几何中心,且为抛物线的顶点,以O为原点建立右手直角坐标系O-XYZ。假设聚光器开口方向与地面平行,Z轴为 聚光器光轴方向,Y轴竖直向上,X轴为水平方向。 在YOZ截面内,计算B(y<sub>b</sub>,z<sub>b</sub>)点的位置,入射光线 PB 经过B点反射,反射光线BA 与吸热管相切,并 与Z轴相交于M点。

点 B 满足抛物线方程,则有

$$z_b = \frac{y_b^2}{4f},\tag{1}$$

 $BB_1 // OG \perp BG 为 B 点的法线方向, 即 | <math>\overrightarrow{BF} | = |\overrightarrow{FG}|, 则有$ 

$$z_g = \sqrt{y_b^2 + (z_b - f)^2} + f.$$
 (2)

由光线反射定理可知,入射角与出射角相等,即

$$\angle PBG = \angle ABG, \frac{\overrightarrow{BP} \cdot \overrightarrow{BG}}{|\overrightarrow{BP}| |\overrightarrow{BG}|} = \frac{\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BG}}{|\overrightarrow{BA}| |\overrightarrow{BG}|}, \quad M \notin$$
$$\frac{(y_p - y_b)y_b + (z_p - z_b)(z_g - z_b)}{\sqrt{(y_p - y_b)^2 + (z_p - z_b)^2}} =$$
$$\frac{(y_a - y_b)y_b + (z_g - z_b)(z_g - z_b)}{\sqrt{(y_a - y_b)^2 + (z_g - z_b)^2}}.$$
(3)

由 
$$\Delta BDM \circ \circ \Delta FAM$$
,  $\frac{|\overrightarrow{BM}|}{|\overrightarrow{BD}|} = \frac{|\overrightarrow{FM}|}{|\overrightarrow{FA}|}$ 则有

$$\frac{\sqrt{y_b^2 + |\overline{DM}^2|}}{y_b} = \frac{f - z_b - |\overline{DM}|}{r}, \quad (4)$$

在 ΔBDM 中, sin 
$$\alpha = \frac{|\overline{MD}|}{|\overline{BM}|}$$
, 则有  
sin  $\alpha = \frac{|\overline{DM}|}{|\overline{DM}|}$ . (5)

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{|\overline{DM}^2| + y_b}},$$
 (5)

在 
$$\Delta BDM$$
 中,  $\cos \alpha = \frac{|\overrightarrow{BD}|}{|\overrightarrow{BM}|}$ , 则有

$$\cos \alpha = \frac{y_b}{\sqrt{|\overline{DM^2}| + y_b}},\tag{6}$$

由 
$$\Delta BDM \circ \Delta FAM$$
,  $\angle MFA = \alpha$ , 则有  
 $y_a = -r\sin \alpha$ , (7)  
 $z_a = f - r\cos \alpha$ , (8)

式中 $A(y_a, z_a)$ 点为反射光线 BA 与吸热管的切点,  $P(y_p, z_p)$ 点为相机主点, $G(y_s, z_s)$ 点为法线 BG 与 Z 轴的交点,聚光器焦距 f = 1710 mm,吸热管内半径 r = 35 mm。(4) 式是实际工程问题求解,可以求得 DM 的两个关于  $y_b$  和  $z_b$  的实数解,根据图 1 几何关系舍去其中一个根。将 DM 的解代入(5),(6) 式,去除中间变量 DM。通过(1),(2),(3),(5),(6),(7),(8)式可以快速求解 B 点坐标。

同理,可以求解  $E(y_e, z_e)$ 点坐标。只是将(7), (8)式改变:

$$y_e = r \sin \alpha, \qquad (9)$$

$$z_e = f + r \cos \alpha. \tag{10}$$

采用同样的方法,可以求解 E 点坐标,即可以 计算出上下端点在 YOZ 坐标系下的位置。由于聚光 器为抛物柱面镜,吸热管沿 X 轴方向排布,已知吸 热管两端的空间位置和相机的主点位置,根据反射 定律可以快速确定吸热管两端经过聚光器反射,入 射到相机的主点,即确定了上下反射点 B 和 E 在 X 轴方向的范围。最后利用针孔相机成像特性快速计 算吸热管在图像中的位置。

## 2.2 相机标定

利用标定块和吸热管可以标定中心相机主点的 位置,如图 2 所示。采用"三点一线"方法标定相机, 而相机标定过程由中心相机姿态和位置两部分构 成。中心相机主点  $P_e$ 点与标定块的上下分界线 ( $HP_e$ , $LP_e$ )的连线与吸热管的边缘相切,当且仅当 中心相机光轴与 Z 轴重合、以  $P_e$ 点为旋转点,绕 X 轴的旋转角度为 0°和相机处于合理的位置  $OP_e$ 满 足要求。根据吸热管的半径 r,标定块的有效尺寸 HL(d)以及聚光器的焦距 f,可以快速计算出中心 相机的主点位置  $P_e(0, z_{P_e})$ 。

由图 2 可知,  $\Delta P_c HM \odot \Delta P_c CA$ ,  $\frac{|\overline{HM}|}{|\overline{AC}|} = \frac{|\overline{P_cM}|}{|\overline{P_cA}|}$ , 可得  $\frac{d/2}{r} \approx \frac{f + |\overline{CP_c}|}{\sqrt{|\overline{CP_c}| - r^2}}$ , (11)

式中  $|\overrightarrow{HM}| = d/2$ ,  $|\overrightarrow{AC}| = r$ ,  $|\overrightarrow{P_cA}| = \sqrt{|\overrightarrow{CP_c}| - r^2}$ 。由于  $\frac{|\overrightarrow{OM}|}{|\overrightarrow{OP_c}|}$ 的比值较小,故  $|\overrightarrow{PM_c}| \approx |\overrightarrow{OP_c}|, |\overrightarrow{OP_c}| \approx f + |\overrightarrow{CP_c}|, 根据(11) 式$ 可以快速计算出  $OP_c$ 的大小。

采用上述方法可以确定相机主点的空间位置, 而相机的空间姿态包括绕三个坐标轴的旋转角度, 通过单个标定块可以确定绕 X 轴和绕 Z 轴的角度, 无法确定绕 Y轴的角度,采用多个相同的对称式分



#### 图 2 中心相机标定原理

Fig. 2 Calibration priciple of boresight camera

布的标定块可以调节绕 Y 轴的角度为 0°。

3 检测系统与实验过程

## 3.1 检测系统

吸热管反射成像法系统主要由5部工业相机、 调整支架和一台用于数据处理的笔记本电脑构成, 如图3所示。将吸热管反射成像系统放置在待测聚 光器单元前的一定距离 OP。处,以便用于检测聚光 器单元所有子镜的安装位置偏差。实际检测的聚光 器单元由4行7列,28个子镜组成,聚光器单元开 口5774mm,长度为12m,每一行由7个子镜组成。 吸热管反射成像系统利用4部相机检测聚光器面 形,每个相机检测一行子镜,即同时检测7个子镜的 安装位置偏差。检测过程中,首先调节聚光器单元 开口方向与地面平行,聚光器单元的开口方向通过 开环跟踪控制程序实现。



#### 图 3 吸热管反射法系统构成图

Fig. 3 Component of the theoretical overlay photographic system

在吸热管反射成像系统中,由于其他4部相机 采用与中心相机同型号,且与中心相机平行排列,当 确定中心相机的空间位置和姿态,如图3所示,其他 4部相机的空间位置和姿态可以快速计算得到。由 于标定中心相机的标定块,采用普通的硬质塑料材 料,在其表面喷漆,形成颜色鲜明的标靶,同时采用 激光技术确定两颜色的边界,标定块制作精度高。 在标定块安装过程中,在距离标定块中心线位置处 印有2条特殊的直线,这2条直线的距离与聚光器 两内子镜的间隙相同,可以快速准确地粘贴标定块。

#### 3.2 实验过程

基于吸热管反射法测试理论,设计和制作了吸 热管反射成像系统原理样机,如图4所示。原理样 机采用两部精度高、稳定性好的工业相机,基于 Matlab软件的图像处理和分析程序以及用于支撑、 调节系统的大型三脚架。



图 4 吸热管反射成像法原理样机 Fig. 4 Experimental prototype of theoretical overlay photographic system

实际聚光器单元被旋转平台支撑,通过聚光器 开环控制跟踪程序实现旋转,控制精度高达 0.3°。 当聚光器开口方向与地面平行时,聚光镜底端与地 面有一定的距离,因此吸热管反射成像系统的最底 部相机需要有一定的离地高度。系统利用大型的三 脚架支撑系统,采用 PHOB-2 型光学直角块将铝型 材与三脚架固定,并采用 PHOB-8 型的光学直角块 将相机固定在铝型材上。通过调节三脚架的姿态调 节系统的整体倾斜,对于单个相机的倾斜和相距中 心相机的位置调节可以通过调节 PHOB-2 型光学 直角块实现。

在吸热管反射成像系统中,用于检测内层子镜的 相机距离中心相机的距离为831 mm,用于检测两行 外行子镜的相机距离中心相机的距离为2263 mm。 在实验过程中,吸热管反射成像系统放置在距离聚光 器10 m处,采用两部相同型号的相机,一部中心标定 相机和一部检测相机,采用200万像素1/1.8 inch (1 inch=0.0254 m)CCD工业相机,搭载焦距为 8 mm的低畸变定焦镜头。受镜头视场角影响,实验 过程中仅检测4个子镜的安装偏差。中心标定相机 的空间位置以及姿态利用标定块和吸热管确定,标 定块如图5所示。检测相机的位置基本处于待检测 子镜的中间位置,且利用中心相机标定。在系统调 节过程中,标定块的安装精度小于1 mm,聚光器单 元开口方向与地面的平行度高达0.3°,从而保证了 中心相机较高的标定精度。



图 5 标定块图像 Fig. 5 Boresight gauge image



图 6 吸热管反射成像法的成像情况。(a)无形变;(b)有形变 Fig. 6 Imaging situation theoretical overlay photographic method. (a) Non-deformation;(b) deformation

吸热管反射成像系统的每部相机检测一行子镜, 且沿Y轴方向每部相机处于待检测行的中间位置处, 能有效地减少由于聚光器焦距和镜头畸变校正引起 的误差。吸热管在图像中理论位置边缘与实际位置 边缘的不同,可以用于定性估计待检测抛物子镜的 安装位置偏差。图 6(a)显示待测子镜在无外力形 变情况下,吸热管在图像中的重合情况;图 6(b)显 示其中一个待测子镜受外力形变,吸热管在图像中 重合的情况。

从图 6 中可知吸热管反射成像系统可以精确地 检测到变形子镜,大量的实验表明吸热管反射成像 法检测速度快、检测精确高、重复性好。例如采用垫 片调节子镜时,子镜的支撑点高度变化 5 mm,能清 楚地检测到吸热管在图像中位置发生变化。提高吸 热管反射成像法的检测精度,可以通过减小系统误 差和提高图像处理精度来实现。

## 4 结 论

吸热管反射成像法通过比较吸热管在实际图像 中的位置与理论图像中的位置,利用吸热管边缘在 图像中的偏差,定性地检测聚光器的面形。采用吸 热管反射成像法成功研制了吸热管反射成像系统的 原理样机。精确的聚光器面形检测技术能有效地减 少能量的损失,提高聚光器的聚光效率,提高光能利 用率。经过实验验证,吸热管反射成像法能快速有 效地检测聚光器各子镜的安装位置是否处于正确的 位置,且适用于绝大多数类型的抛物槽式聚光器。 吸热管反射成像系统采用相对简单的装置,调节聚 光器各子镜的安装位置,可以用于检测大型的商业 性抛物槽式电站聚光器面形。

#### 参考文献

- D Kearney, H Price. Recent Advances in Parabolic Trough Solar Power Plant Technology [M]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory Golden Co, 2005.
- 2 Gong Guanjie, Huang Xinyan, Wang Jun, et al.. An optimized model and test of the China's first high temperature parabolic trough solar receiver [J]. Solar Energy, 2010, 84(12): 2230-2245.
- 3 Liu Qibin, Yang Minlin, Lei Jing, *et al.*. Modeling and optimizing parabolic trough solar collector systems using the least squares support vector machine method [J]. Solar Energy, 2012, 86(7): 1973-1980.
- 4 S A Jones, D R Neal, J K Gruetzner, *et al.*. VSHOT: a tool for characterizing large, imprecise reflectors [C]. Conference on Space Processing of Materials, 1996, CONF-960848-29.
- 5 T Wendelin. Parabolic trough optical characterization at the national renewable energy laboratory [C]. Proceedings of the DOE Solar Energy Technologies Program Review Meeting, 2004: 2005-2067.
- 6 B L Butler, R B Pettit. Optical evaluation techniques for reflecting solar concentrators [C]. SPIE, 1977, 144: 43-49.
- 7 E Lupfurt, K Pottler, S Ulmer, *et al.*. Parabolic trough analysis and enhancement techniques [C]. International Solar Energy Conference, 2005.
- 8 M R Shortis, G Johnston. Photogrammetry: an available surface characterization tool for solar concentrators, part 2: assessment of surfaces [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1997, 119 (4): 281-291.
- 9 K Pottler, E Lupfert, G H G Johnston, *et al.*. Photogrammetry: a powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(1): 94-101.
- 10 T A Moss, D A Brosseau. Final test result of a Schott HCE on a LS-2 collector [C]. International Solar Energy Conference, 2005, 6-12.
- 11 R B Diver. Mirror alignment and focus of point-focus concentrators [C]. Proceedings of the 1995 ASME/JSES International Solar Energy Conference, 1995. 1-8.
- 12 B Richard, T A Diver. Moss practical field alignment of parabolic trough solar concentrators [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2007, 129(2): 153-159.
- 13 B D Richard, A M Timothy. Test results and status of the TOP alignment system for parabolic trough solar collectors [C]. ASME, 2010.

栏目编辑:韩 峰