

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0243-05

径向哈特曼检测系统的光轴对准

何玉梅^{1,2} 汤国茂¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对径向哈特曼像质检测系统(RHTS)与被检测光学系统的光轴对准问题进行了分析研究,提出了一种新的在安装和检测过程中的光轴对准方法,用于径向哈特曼检测系统与被检测光学系统的对准。该方法根据镜面反射原理,利用安装在扫描旋转机构上的细光束发射和接收装置,从 CCD 摄像机采集到的图像中分析计算出光轴调整所需要的偏移量,通过简明直观的步骤进行光轴校准。对该方法进行了原理推导、仿真实验及系统实验。实验结果表明,这种调整方法简单快速且精度高,能满足径向哈特曼像质检测中光轴对准的要求。该方法还可用于大型望远镜光学系统主次镜对准。

关键词 测量; 光学检测; 径向哈特曼; 光学对准

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0243

Alignment for Radial Hartmann Test System

He Yumei^{1,2} Tang Guomao¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Alignment for radial Hartmann test system (RHTS) and optical testing system is analyzed. A new method of alignment based on the law of refraction, is proposed. A laser is installed on a rotary arm of RHTS emitting beamlet to the measured optical system, while a CCD camera is used to record the tracing for reflected spots. In this way, the offset between optic axis and slewing axis can be figured out. The experimental results show that the proposed method is simple and efficient. This algorithm can also be used in the alignment of large telescope.

Key words measurement; optical testing; radial Hartmann; alignment

1 引言

径向哈特曼像质检测(RHTS)方法是一种适用于大口径光学系统和大口径光学元件像质检测的新方法,其最突出的优点是不必采用高面形精度高成本的大口径标准平面镜,它利用双五角棱镜的旋转平移实现用小口径平行光束对被测全口径的二维扫描,通过测量光斑质心位置计算出各采样子孔径的径向斜率,经波前复原算法求出被测波前误差。

在这种方法的检测过程中需要使扫描机构的旋转轴与被检测对象的光轴对准,否则会影响最终的波前检测精度,严重时会使扫描子孔径成像光斑偏

出探测器靶面,使检测无法顺利进行^[1,2]。目前采用的五角棱镜扫描对准方法虽然精度高,但耗时长、难度大。针对这个问题,本文提出了一种新的光轴对准方法。

2 工作原理

2.1 五角棱镜扫描对准方法

径向哈特曼像质检测系统原理如图 1 所示。为解决安装与调试中的光轴对准问题,目前一直采用的方法是通过对于孔径光斑扫描轨迹进行记录和分析,根据经验用尝试的方法调整使得扫描机构的旋

作者简介: 何玉梅(1982—),女,博士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: lingzi2876@sina.com

导师简介: 汤国茂(1962—),男,硕士,研究员,主要从事自适应光学、光学设计和光学检测等方面的研究。

E-mail: gmtang@ioe.ac.cn

转轴与被检测对象光轴对准。在实际情况下,由于双五角棱镜加工和装配时不可避免地存在偏角误差、塔差以及五棱镜的主截面共面误差等^[3],扫描机构工作时也不可避免地存在导轨非直线性误差和定位误差,再加上光轴对准误差,检测系统的光路又是空间光路,因此子孔径光斑扫描轨迹会受到上述诸多因素的综合影响,所记录的扫描轨迹形状比较复杂,如图 2(a)所示,很难将光轴对准误差从中提取出来,只能根据经验不断反复多次尝试调整转轴或被检测对象光轴,直到得到比较理想的子孔径光斑扫描轨迹形状,如图 2(b)所示。图 3(a)和图 3(b)所示分别为在上述两种情况下测量的被测

对象(这里为光学反射镜)的波面图,从图 3(a)中可明显观察到 Schiefspiegler 彗差的存在,显然是由光轴对准误差产生的^[4~6]。

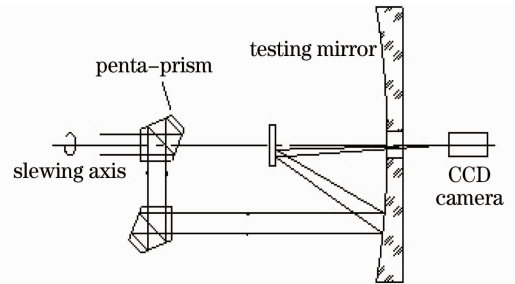


图 1 径向哈特曼像质检测方法原理图

Fig. 1 Scheme for RHTS

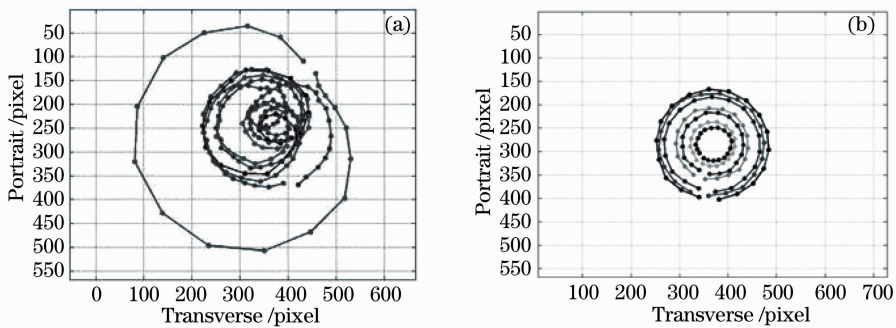


图 2 子孔径光斑扫描轨迹。(a)未对准;(b)对准

Fig. 2 Tracing scan of the subaperture centroid. (a) disalignment; (b) alignment

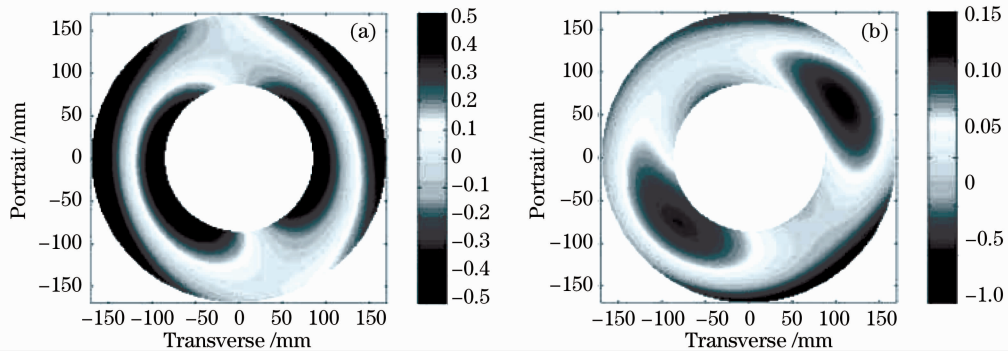


图 3 被测对象波面图。(a)未对准;(b)对准

Fig. 3 Wavefront error of the testing object. (a) disalignment; (b) alignment

采用基于子孔径光斑扫描轨迹的对准方法,可以实现径向哈特曼像质检测系统与被检测光学系统或光学元件的对准,但该方法工作过程中依靠经验的成分较多,偶然性大,不易操作,不易推广,而且完成对准通常需要 0.5 h 或更长的时间,从而在很大程度上限制了径向哈特曼像质检测方法的应用。

为解决这个问题,下面将介绍一种新的在安装和检测过程中的光轴对准方法,用于径向哈特曼检测系统与被检测光学系统的对准,并给出了该方法的实验结果。

2.2 细光束扫描对准方法

光学系统中绝大部分光学表面都是旋转对称表面,细光束扫描对准方法正是利用了光学表面的这一特性^[7,8]。下面具体针对旋转抛物面反射镜来阐述细光束扫描对准方法的工作原理。利用径向哈特曼系统扫描机构的旋转轴作为装调对准基准,并放置在抛物面反射镜前方,如图 4 所示,在旋转臂杆上装一输出细光束的激光器(可调整出射方向),并在旋转臂杆的适当位置安装细光束接收装置(可以是白屏,也可以是 CCD 相机),调整使细激光束经旋转

抛物面反射镜后反射到接收靶面上,旋转扫描机构并记录细激光束在接收靶面上的轨迹。当抛物镜的光轴与旋转轴不重合时,可观察到反射细激光束在接收靶面上划圈,于是可得到扫描轨迹的中心位置,再调整抛物面反射镜倾斜和平移(也可调整旋转轴的倾斜和平移)使细激光束反射到接收靶面上扫描轨迹的中心位置。如此反复几次,直至在接收靶面上观察不到反射激光束划圈,说明径向哈特曼像质检测系统的旋转轴与旋转抛物面反射镜的光轴对准。

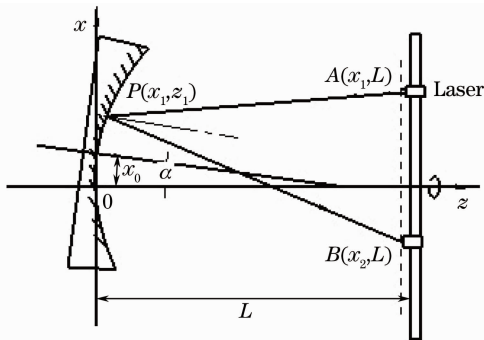


图4 细光束扫描对准方法的工作原理

Fig. 4 Scheme of thin beam scanning method for alignment

为简化计算,选取子午面作为讨论对象。顶点位于坐标原点的抛物线方程为 $x^2 = 2Rz$, R 为顶点曲率半径^[9,10]。由于实际情况下抛物镜主轴的倾斜角度通常为一个很小的量,当抛物面光轴与旋转轴存在角度为 α 的倾斜,且沿垂直于主轴方向偏移 x_0 时,原方程可近似化简为

$$z \cong \frac{(x - x_0)^2}{2R} + \alpha x. \quad (1)$$

从距抛物面顶点为 L 的旋转臂上光源点 $A(x_1, L)$ 处发出斜率为 k_1 的细光束,被抛物面反射后,在 CCD 上的 $B(x_2, L)$ 点处成像。已知入射光方程 $x = k_1z + b$, 其中 $b = x_1 - k_1L$ 。代入(1)式可求出入射光在抛物面上反射点 $P(x_i, z_i)$ 。对(1)式求偏导可得 P 点的切线斜率 k , 则 P 点的法线斜率

$$k' = -1/k = R/(x_0 - x_i - \alpha R). \quad (2)$$

设反射光斜率为 k_2 , 由于法线是入射光与反射光夹角的角平分线, 则

$$\frac{k' - k_1}{1 + k'k_1} = \frac{k_2 - k'}{1 + k_2k'}$$

将 k_1 与 k' 代入, 可求得反射光斜率

$$k_2 = \frac{k - 2k' - k'k_1}{2kk_1 - k'^2 + 1}, \quad (3)$$

由反射光方程

$$k_2 = (x_2 - x_i)/(L - z_i),$$

则

$$x_2 = k_2(L - z_i) + x_i, \quad (4)$$

将求得的 x_i, z_i, k_2 代入(4)式, 即可求得像点 B 的位置。

当旋转臂转过 180° , 光源位置变为 $A'(-x_1, L)$, 入射光方程

$$x = -k_1z + b,$$

其中

$$b = k_1L - x_1.$$

同理可求得像点 $B'(x'_2, L)$ 。 $|l_{AB} - l_{AB'}|$ 即为像点 B 运动轨迹的直径。当 $x_0 = 0, \alpha = 0$ 时, 即抛物镜光轴与旋转轴重合, $|l_{AB} - l_{AB'}| = 0$, 仿真得到如图 5 所示的结果。当 $x_0 \neq 0, \alpha \neq 0$, 抛物镜发生偏移时, 仿真得到如图 6 所示的结果。

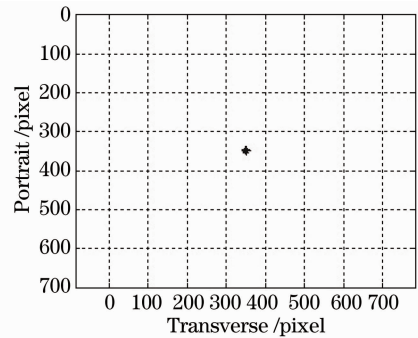


图5 旋转轴与被测光轴重合时的光斑轨迹

Fig. 5 Spots tracing of subaperture centroid when optic axis aligns with slewing axis

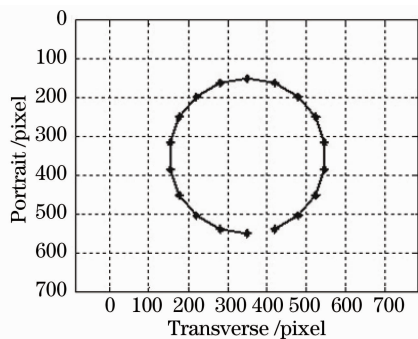


图6 旋转轴与被测光轴有夹角的光斑轨迹

Fig. 6 Spots tracing of subaperture centroid when optic axis deviation from slewing axis

由上述分析可知, 只有当抛物镜光轴与旋转轴重合时, 扫描轨迹才会是固定不动的一点, 所以选取扫描轨迹的中心位置为调整目标。使旋转臂转动一周, 将得到的光斑位置拟合为曲线并计算出中心位置。调整抛物镜倾斜使光斑移动到中心处, 在调整过程中使扫描轨迹不断缩小到最后消除, 使抛物镜

光轴与旋转轴完全重合,达到对准的目的。

3 检测实验

利用径向哈特曼系统扫描机构,建立了细光束扫描对准实验,如图7所示,它由精密旋转台、旋转臂、输出细光束的半导体激光器及 CCD 相机等部分组成,激光器和 CCD 相机分别安装在旋转臂两端,激光器发出的细光束经过被测镜面反射后在 CCD 靶面上成像。激光器固定在二维调整架上,出射光束的方向可以调整,CCD 相机在旋转臂上的位置可根据需要作适当调整。为了检验对准的效果,还在被测对象焦面上记录双五角棱镜扫描时子孔径光斑的轨迹。

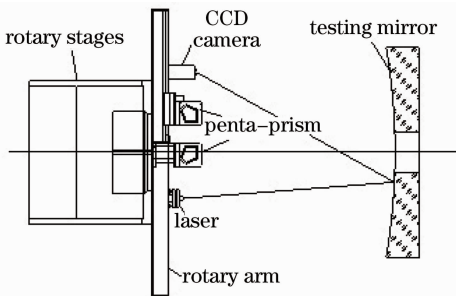


图7 实验装置图

Fig.7 Scheme for measurement system

实验中,当旋转轴与被测对象光轴偏离太大时,反射细光束可能会落到 CCD 靶面之外,所以需要进行粗对准,这时用安装在 CCD 相机附近的白板作接收器。粗对准的目的是将细激光束引导到 CCD 的探测范围内。

精对准时采用 CCD 相机作接收器,旋转扫描机构与被测镜面之间的距离 $L=485$ mm。实验所用 CCD 为 MTV-1881,像素 795×596 ,成像区 7.95 mm \times 6.45 mm。工作时控制精密旋转台转动一周,每隔一定角度,记录下反射细激光束在 CCD 靶

面上的位置数据,然后通过拟合得到扫描轨迹、扫描轨迹等效直径($\Delta x, \Delta y$)及扫描轨迹的中心位置 T ,并在监视屏上给出标记,实验中从 0° 开始旋转台每转过 22.5° 由 CCD 进行一次采样。调整径向哈特曼检测系统二维倾斜和二维平移,使监视屏上的光斑移到扫描轨迹的中心标记 T 处,完成一次对准过程。精对准过程通常需要 2 至 3 次逼近,才能对准得比较好。表 1 和图 8 所示为细光束扫描对准实验结果,粗对准前光轴对准误差超过 $26'$,粗对准后光轴对准误差约为 $3'$,第一次精对准后光轴对准误差约为 $36''$,第二次精对准后光轴对准误差约为 $5''$ 。为了验证细光束扫描对准方法的重复性,进行了多组实验,如表 2 所示。另外,完成整个光轴对准过程耗时约为 4~5 min,比以前的五角棱镜扫描对准方法效率大大提高。

表1 细光束扫描对准实验结果

Table 1 Testing results

Alignment steps	Diameter of scanning track		Alignment precision	
	$\Delta x / \text{mm}$	$\Delta y / \text{mm}$	$\delta_x / (')$	$\delta_y / (')$
Before alignment	14.6	17.4	25.88	30.84
Coarse alignment	1.914	1.648	3.394	2.921
1st accurate alignment	0.341	0.382	0.608	0.667
2nd accurate alignment	0.055	0.042	0.095	0.076

表2 细光束扫描对准重复性实验结果

Table 2 Comparison of input data and data after alignment

	Tesing 1	Tesing 2	Tesing 3	Tesing 4
Before alignment $\delta_x / (')$	13.6	18.3	12.9	15.5
Before alignment $\delta_y / (')$	15.0	16.2	14.7	16.9
After alignment $\delta_x / (')$	3.64	3.95	3.13	5.29
After alignment $\delta_y / (')$	2.81	4.74	4.62	3.67

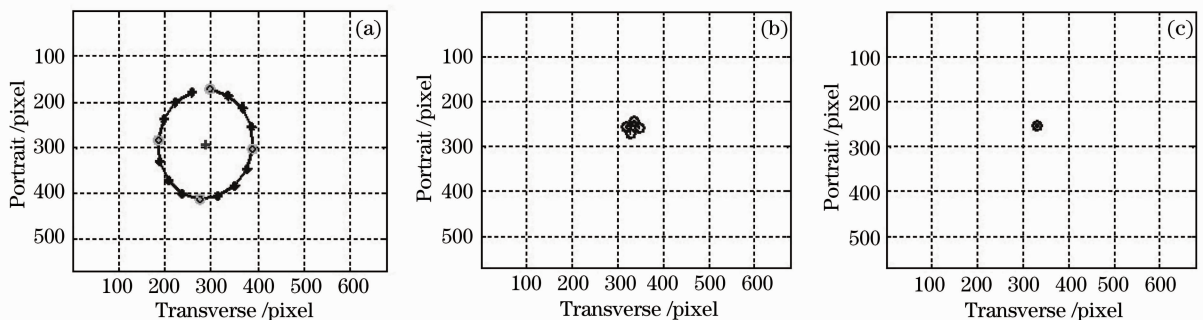


图8 细光束扫描轨迹。(a)粗对准后;(b)第一次精对准;(c)第二次精对准

Fig.8 Tracing scan of subaperture centroid for beamlet. (a) coarse alignment; (b) 1st accurate alignment; (c) 2nd accurate alignment

为了同基于子孔径光斑扫描轨迹的对准方法比较,并评价细光束扫描对准方法的效果,每完成一个对准过程均记录下双五角棱镜扫描时子孔径光斑的轨迹,如图9所示。粗对准后,子孔径光斑的轨迹为不规则心形线,光轴的对准误差较大,第一次精对

准后,发现光斑轨迹变得较为规整,但仍有部分轨迹呈心形线,还未达到对准要求,第二次精对准后,子孔径光斑轨迹的心形线已完全消除,光轴对准比较理想,这时光轴对准误差约为 $5''$ 。

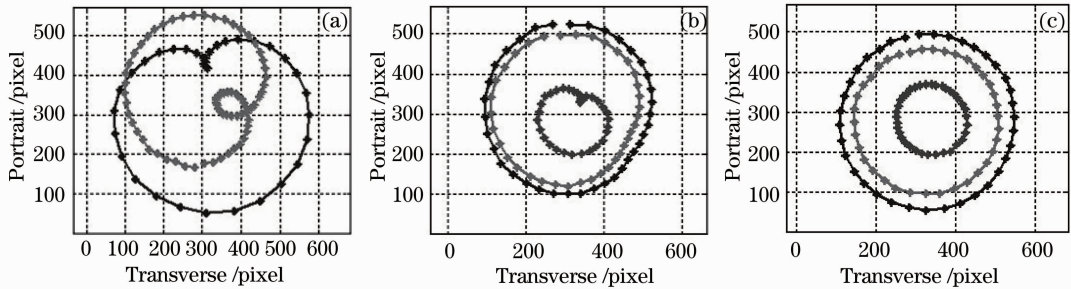


图9 子孔径焦面光斑扫描轨迹。(a)粗对准后;(b)第一次精对准;(c)第二次精对准

Fig. 9 Tracing scan for sub-aperture spots. (a) coarse alignment; (b) 1st accurate alignment; (c) 2nd accurate alignment

4 结 论

通过对径向哈特曼像质检测系统与被检测光学系统光轴对准问题的分析研究,提出了一种新的光轴对准方法,在保持对准精度的同时,大大提高了工作效率,简化了对准步骤,能较好地满足径向哈特曼像质检测系统安装和调试中涉及到的光轴对准要求。

参 考 文 献

- Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Chu *et al.*. The summary of aspheric optical design technology [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(3): 1~2
勾志勇,王江,王楚等.非球面光学设计技术综述[J].*激光杂志*,2006,**27**(3):1~2
- Shang Chunmin, Yang Jiandong, Zhang Dongmei *et al.*. Effecting of inclining error in installing to the optical aspheric surface work-piece in the lapping [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 111~114
尚春民,杨建东,张东梅等.非球面光学零件研磨中安装倾斜误差的影响[J].*光电工程*,2006,**33**(4):111~114
- Hao Qun, Zhao Yang, Cao Mang *et al.*. Application of penta prism in establishing the datum plane for measuring flatness in large scale dimension [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1134~1137

郝群,赵洋,曹芒等.五角棱镜在建立大尺寸平面基准中的应用[J].*光学学报*,1998,**18**(8):1134~1137

- J. R. Zeidler, R. B. Kohles, N. M. Bashara *et al.*. High precision alignment procedure for an ellipsometer [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(5): 1115~1120
- M. R. Steel. Method for azimuthal alignment in ellipsometry [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2370~2371
- R. N. Wilson. *Reflecting Telescope Optics II* [M]. Springer, 2001
- Zhang Bangji. The standard equation and critical angle of the focus core of the rotational paraboloid mirror [J]. *J. Mathematics for Technology*, 1995, **11**(2): 33~34
章邦基.旋转抛物面焦核的标准方程和临界角[J].*工科数学*,1995,**11**(2):33~34
- Han Chengshun, Dong Shen, Tang Yuyong. Study on geometric model of ultra-precision grinding optical axisymmetric aspheric surface [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, **25**(6): 741~745
韩成顺,董申,唐余勇.大型光学非球面超精密磨削的几何模型研究[J].*兵工学报*,2004,**25**(6):741~745
- Chen Qinfang, Xu Changjie, Wang Qingsong. Alignment for optical axis of parabolic mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(2): 225~229
陈钦芳,徐昌杰,王青松.抛物面反射镜光轴的确定[J].*应用光学*,2008,**29**(2):225~229
- M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 172~176, 182~190
M. 玻恩, E. 沃尔夫. *光学原理* [M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 172~176, 182~190