

# 用于大口径平面镜检测的五棱镜扫描检测系统装调技术研究

戚二辉<sup>1,2</sup> 罗霄<sup>2,3</sup> 刘泉<sup>1,2</sup> 郑立功<sup>2,3</sup> 张学军<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>2</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>3</sup>中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 五棱镜扫描检测具有结构简单、检测周期短等优点, 可实现低阶像差的高精度检测, 是指导大口径、超大口径平面镜光学加工的有效途径。基于光线矢量追迹理论, 建立五棱镜扫描检测系统数学模型, 并采用最小二乘法推导出系统测量精度与系统主要光学元件角度变化量之间的解析表达式。在此基础上, 分析了系统测量精度对元件装调精度的灵敏度, 给出了系统精确装调的实施方案, 并进行了系统装调试验, 探索出适合大口径平面镜检测的五棱镜扫描检测系统装调流程。实验结果表明, 由装调过程引起的系统测量误差可控制在 40 nrad 以内。通过理论分析和装调试验, 验证了使用五棱镜扫描检测技术进行大口径平面检测的可行性。

**关键词** 光学设计; 五棱镜; 系统装调; 光线矢量追迹

中图分类号 O439; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.062202

## Study on Alignment Technology of Scanning Pentaprism System for Testing Large Flat Mirrors

Qi Erhui<sup>1,2</sup> Luo Xiao<sup>2,3</sup> Liu Quan<sup>1,2</sup> Zheng Ligong<sup>2,3</sup> Zhang Xuejun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The scanning pentaprism system (PPS) is an effective method for guiding large flat optical processing, due to its advantages such as simple structure, high testing efficiency and precise measurement of low order aberrations. This paper established PPS's mathematical model according to vectorial ray tracing theory, the analytical relationship between PPS's performance and its components' angular motion is obtained by least square fitting, which is useful for analyzing PPS's sensitivity to components' alignment errors. Afterward a fine alignment procedure is proposed. Experimental results show that PPS's measurement error caused by alignment is better than 40 nrad after fine alignment. The result shows that PPS is practical for large flat testing.

**Key words** optical design; pentaprism; optical alignment; vectorial ray tracing

**OCIS codes** 220.4840; 230.5480; 200.4560; 220.1010

## 1 引言

随着望远技术的发展, 大口径、超大口径的望远系统也越来越多, 规划中的欧洲极大望远镜(E-ELT)、30 m 望远镜(TMT)等未来巨型望远镜主镜的口径都超过了 30 m, E-ELT 的主镜直径达 42 m, 其中的平面折返镜的口径 1.3 m; TMT 主镜口径达到 30 m, 其三镜是一个 2.5 m×3.5 m 超大口径椭圆形平面镜。大口径的

收稿日期: 2014-12-27; 收到修改稿日期: 2015-01-29; 网络出版日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 戚二辉(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事大口径平面镜加工技术方面的研究。

E-mail: qierhui@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑立功(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: zhenglg@ciomp.ac.cn

平面镜作为望远镜系统的折返镜,同时也是部分光学系统的检测基准,传统的 Ritchey-Common 检测、Fizeau 干涉检测<sup>[1-3]</sup>等方法已经不再适合指导如此大口径平面的加工过程。五棱镜扫描检测技术利用五棱镜可以将光束准确偏转 90°的特性,以反射镜自身作为参考,通过检测面形斜率信息实现大口径平面镜低阶像差的高精度检测,是对面形没有高分辨率要求时的一种较为理想的测量方法<sup>[4-6]</sup>。

日本、德国和美国都已经设计出各具特点的五棱镜扫描系统<sup>[4-5,7]</sup>,并将之应用于光学元件的检测,其中 Arizona 大学将五棱镜扫描技术成功用于 1.6 m、2 m 平面镜的加工检测。国内对于五棱镜扫描技术的研究起步较晚,对五棱镜在光学检测中的应用还处于理论探索阶段<sup>[8-10]</sup>,迄今为止尚未有用于指导光学加工的报道。

为保证五棱镜扫描检测系统的测量精度,系统装调引起的测量误差应控制在几十纳弧度量级<sup>[6]</sup>。本文基于光线矢量追迹理论,建立五棱镜扫描检测系统数学模型,分析系统测量精度对装调误差的敏感度;结合现有条件提出五棱镜扫描检测系统装调方法;以 300 mm 标准平面镜为检测对象,开展了五棱镜扫描检测系统的装调试验,对理论分析结果进行了验证。

## 2 五棱镜扫描系统工作原理

五棱镜扫描系统的工作原理如图 1 所示,两个五棱镜与测量自准直仪精确校准后,将自准直仪发出的测量光束偏转 90°,对被测镜面的面形斜率进行母线扫描测量。自准直仪 1 是系统的主要测量仪器,其测量值表征了被测平面的面形信息。自准直仪 2 用来进行闭环反馈,保证系统的工作精度。电子遮板则实现参考-扫描测量转换。

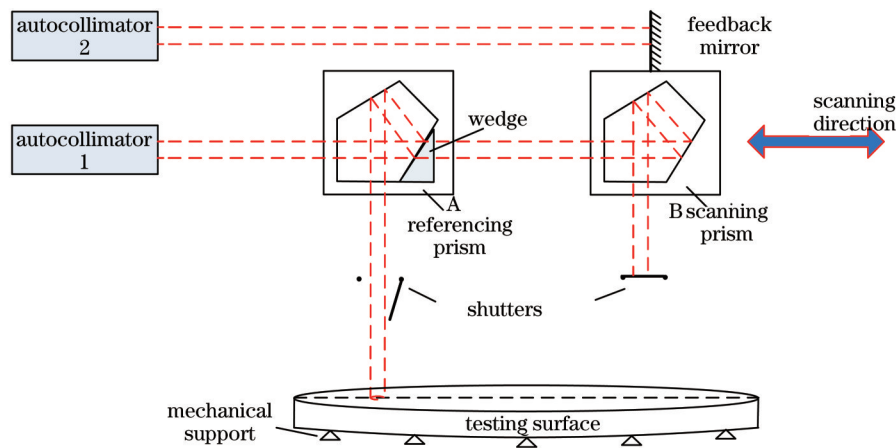


图 1 扫描五棱镜系统检测原理示意图

Fig.1 Principle of the pentaprism scanning system

五棱镜扫描检测系统的直接测量量为面形斜率信息,单条扫描路径只能检测低阶像差中的 power 等回转对称的像差,为获取整个镜面的面形斜率信息,往往需要扫描多条母线,然后对测量数据进行 Zernike 梯度多项式拟合,进而获取被测平面的低阶面形信息。沿着如图 2 所示的三条母线扫描,即可实现对被测平面大部分低阶像差(通常为  $Z_4 \sim Z_9$ )的高精度测量<sup>[4-6]</sup>。

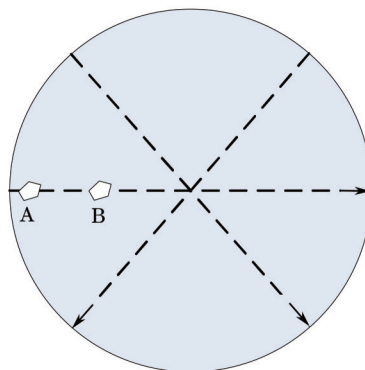


图 2 检测低阶像差的扫描路径示意图

Fig.2 Scanning lines diagram for measuring low order aberrations

### 3 系统装调分析

#### 3.1 光线矢量追迹模型

五棱镜扫描检测系统工作过程中,光路中的主要光学元件(如自准直仪、五角棱镜、被测平面)沿任意方向的角度偏差都会对测量精度造成一定的影响。为便于在同一个空间坐标系下进行分析,基于光线矢量追迹理论建立如图3所示的数学模型。以自准直仪的光束出射方向为X轴正方向,从被测平面返回的光束方向为Y轴正方向,建立如图3所示的空间坐标系<sup>[11]</sup>。

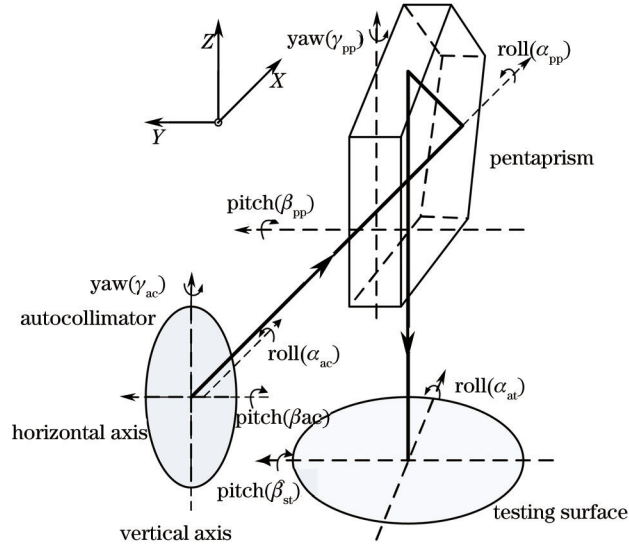


图3 五棱镜扫描系统工作示意图

Fig.3 Performance of scanning pentaprism system

光线从自准直仪射出之后,先后经过五次反射,四次折射,最终返回自准直仪,自准直仪的读数为出射光束与返回光束的角度偏差,表征了被测平面的面形斜率。定义光线从自准直仪出发至被测镜面的过程称为正向光路,从被测镜面返回至自准直仪称为逆向光路。自准直仪的出射光线矢量为: $\mathbf{A}_1=[1\ 0\ 0]^T$ ,正向光路中五棱镜的4个表面法线矢量用列向量组成矩阵的形式<sup>[9]</sup>为:

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\pi/8) & -\sin(\pi/8) & 0 \\ 0 & -\sin(\pi/8) & \cos(\pi/8) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

被测面的法线矢量为: $\mathbf{N}_2=[0\ -1\ 0]^T$ ,逆向光路中五棱镜各表面的法线矢量矩阵为:

$$\mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(\pi/8) & \cos(\pi/8) & -1 \\ 1 & \cos(\pi/8) & -\sin(\pi/8) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

系统元器件绕X、Y、Z三个轴的角度偏差定义为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,其下标ac,pp,st分别表示自准直仪、五棱镜与被测平面。则相应的变换矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_z &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

则自准直仪实际出射光线矢量为 $\mathbf{A}'_1=\mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_z \cdot \mathbf{A}_1$ ,五棱镜各表面实际法线矢量矩阵可表示为

$N'_i = R_x \cdot R_y \cdot R_z \cdot N_i$ 。根据光线矢量追迹理论<sup>[9-12]</sup>,反射定律的矢量表达式为:

$$A' = A - 2(A \cdot N)N, \quad (4)$$

式中  $N$  为反射面的法线矢量,  $A$  为入射光线矢量,  $A'$  为反射光线矢量。折射定律的矢量表达式为:

$$A'' - A = pN, \quad (5)$$

式中  $p = \sqrt{(n')^2 - n^2 + (N \cdot A)^2} - (N \cdot A)$ ,  $N$  为折射面的法线矢量,  $A$ 、 $A''$  为入射、折射光线矢量,  $n$ 、 $n''$  为入射、折射介质的折射率。

以  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  分别表示正向光路中经过五棱镜 4 个面之后的光线矢量,  $A_6$ 、 $A_7$ 、 $A_8$ 、 $A_9$ 、 $A_{10}$  表示逆向光路中经过各个面之后的光线矢量,则自准直仪  $Y$  轴读数  $V$  与  $X$  轴读数  $H$  可以表示为:

$$\begin{aligned} V &= 0.5 \times \arctan[A_{10}(3)/A_{10}(1)] - \arctan[A_1(3)/A_1(1)] \\ H &= 0.5 \times \arctan[A_{10}(2)/A_{10}(1)] - \arctan[A_1(2)/A_1(1)] \end{aligned} \quad (6)$$

为对系统各元件角度偏差进行具体分析,通过改变单个参数数值,记录自准直仪读数的变化,采用最小二乘法拟合出自准直仪读数与单个变量的解析表达式(推导过程中所有角度值的单位均为弧度)。

以五棱镜绕  $X$  轴的偏摆角  $\alpha_{pp}$  为例,如图 4 所示,自准直仪  $Y$  轴读数  $V$  与  $\alpha_{pp}$  呈二次关系,自准直仪  $X$  轴读数  $H$  与  $\alpha_{pp}$  呈线性关系。需要指出的是,在五棱镜扫描检测系统中,自准直仪  $Y$  轴读数  $V$  记录的是扫描路径方向上的斜率变化,与系统测量直接相关, $X$  轴读数  $H$  记录垂直于扫描路径方向上的斜率变化,因此在拟合中对  $V$  进行二阶近似推导,对  $H$  进行一阶近似推导。

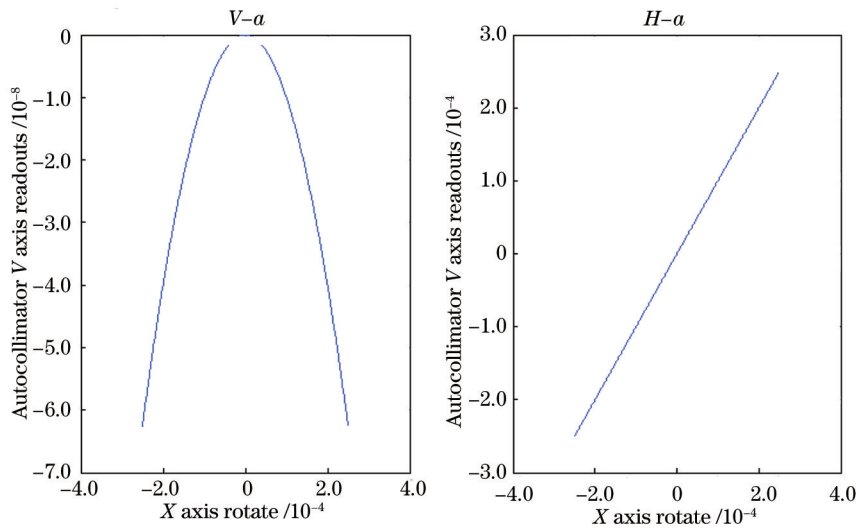


图 4 五棱镜绕  $X$  轴偏摆角与自准直仪读数的关系

Fig.4 Readouts of autocollimator varies with roll rotation of pentaprism

综合所有的参数拟合过程,可得出自准直仪读数与系统元器件角度偏差的二阶近似表达式:

$$\begin{aligned} V &\approx -\alpha_{pp}^2 + \alpha_{ac}(\alpha_{pp} - \gamma_{pp} - \alpha_{st}) + \alpha_{st}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp}) + \beta_{st} - \beta_{ac} \\ H &\approx -\alpha_{st} + \alpha_{pp} - \gamma_{pp} + \gamma_{ac} \end{aligned} \quad (7)$$

### 3.2 模型分析

五棱镜扫描检测系统采用参考测量方式,(7)式中的一阶分量,被测平面、自准直仪 pitch 方向的角度偏差  $\beta_{st}$ 、 $\beta_{ac}$  对于参考棱镜与扫描棱镜是一致的,对系统的实际测量无影响,因此系统各元件角度偏差对系统扫描路径方向上测量精度仅产生二阶影响。

对扫描路径方向的测量量取有限增量形式,得到系统扫描方向上的测量对系统元件装调误差的敏感度:

$$\Delta\alpha_{LOS} = 2 \cdot \alpha_{pp} \cdot \Delta\alpha_{pp} + \Delta\alpha_{ac}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp} + \alpha_{st}) + \alpha_{ac}(\Delta\alpha_{pp} + \Delta\gamma_{pp} + \Delta\alpha_{st}) + \Delta\alpha_{st}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp}) + \alpha_{st}(\Delta\alpha_{pp} + \Delta\gamma_{pp}). \quad (8)$$

由表 1 可知,影响五棱镜系统测量精度的装调量分别为五棱镜、自准直仪、被测平面在 roll 方向的失调量与变化量以及五棱镜 yaw 方向的失调量与变化量。因此,在系统装调过程中,需要对上述分量进行精确装调。

表1 影响系统测量精度的参量

Table 1 Items that affect system's measurement

Items	Descriptions
$\alpha_{pp}$	Initial misalignment of the prism roll
$\Delta\alpha_{pp}$	Variation in prism roll
$\alpha_{ac}$	Misalignment of the autocollimator roll relative to direction of motion
$\Delta\alpha_{ac}$	Variation in autocollimator roll
$\gamma_{pp}$	Initial misalignment of the prism yaw
$\Delta\gamma_{pp}$	Variation in prism yaw
$\alpha_{ts}$	Misalignment of the test surface roll relative to the direction of motion
$\Delta\alpha_{ts}$	Variation in test surface roll

对五棱镜进行 yaw 方向扫描, 自准直仪 V 轴与 H 轴读数呈线性关系, 如图 5 所示。

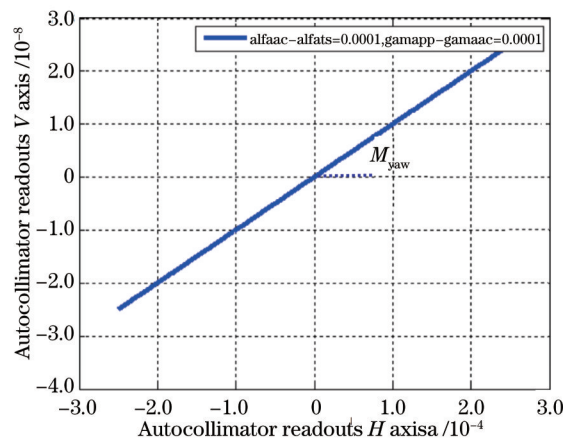


图5 五棱镜 yaw 方向扫描时自准直仪读数

Fig.5 Autocollimator measurement results of pentaprism's yaw scan

将(7)式对  $\gamma_{pp}$  取偏微分, 得出自准直仪 V 轴读数与 H 轴读数的解析表达:

$$M_{yaw} = \frac{\partial V}{\partial \gamma_{pp}} / \frac{\partial H}{\partial \gamma_{pp}} = \frac{\partial V}{\partial H} = \alpha_{ac} - \alpha_{ts}, \quad (9)$$

式中  $M_{yaw}$  为自准直仪 V 轴读数与 H 轴读数的线性斜率, 表示自准直仪与被测平面镜 roll 方向的校准失调量。

对五棱镜进行 roll 方向扫描, 自准直仪 V 轴读数与 H 轴读数呈抛物线关系, 如图 6 所示。

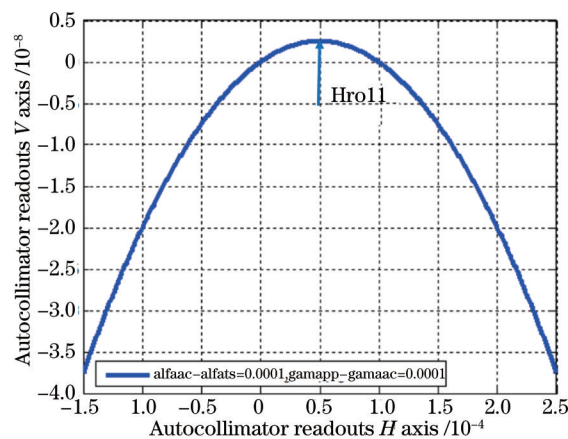


图6 五棱镜 roll 方向扫描时自准直仪读数

Fig.6 Autocollimator measurement results of pentaprism's roll scan

将(7)式对  $\alpha_{pp}$  取偏微分, 得出自准直仪 V 轴读数与 H 轴读数的解析表达:

$$\frac{\partial V}{\partial H} = \frac{\partial V}{\partial \alpha_{pp}} / \frac{\partial H}{\partial \alpha_{pp}} = -2 \times \alpha_{pp} + \alpha_{st} + \alpha_{ac}, \quad (10)$$

此时  $V$  轴读数与  $H$  轴读数呈二阶抛物线关系, 以  $V(H) = a_0 + a_1 \times H + a_2 \times H^2$  进行拟合, 取抛物线的顶点时  $H$  轴读数为  $H_{roll}$ , 此时  $\frac{\partial V}{\partial H} = -2 \times \alpha_{pp} + \alpha_{st} + \alpha_{ac} = 0$ , 代入(7)式, 得

$$H_{roll} = 0.5 \times M_{yaw} + \gamma_{ac} - \gamma_{pp}, \quad (11)$$

$H_{roll}$  为五棱镜 roll 方向扫描时抛物线的顶点处自准直仪  $H$  轴读数, 若  $M_{yaw} = 0$ , 则表示自准直仪与五棱镜 yaw 方向的失调量。

### 3.3 理论装调步骤

根据(9)~(11)式, 结合五棱镜扫描检测系统测量原理, 即可得到系统的精确装调步骤。

#### 1) Roll 方向校准自准直仪与被测平面

根据(9)式, 对五棱镜进行 yaw 方向扫描, 作出自准直仪  $V$  轴读数与  $H$  轴读数的线性图, 在实际测量中, 被测镜面保持固定, 因此 roll 方向反复调整自准直仪, 使  $M_{yaw} = 0$ , 此时可以保证自准直仪与被测平面在 roll 精确校准。

#### 2) Yaw 方向校准自准直仪与五棱镜

根据(11)式, 对五棱镜进行 roll 方向扫描, 作出自准直仪  $V$  轴读数与  $H$  轴读数的相关曲线, 由于在上一步骤中, 已调整自准直仪与被测平面在 roll 方向校准, 即  $M_{yaw} = 0$ , 只需 yaw 方向反复调整五棱镜, 使抛物线顶点值  $H_{roll} = 0.5 \times M_{yaw} + \gamma_{ac} - \gamma_{pp} = 0$ , 此时即可保证五棱镜与自准直仪 yaw 方向精确校准。

#### 3) Roll 方向校准五棱镜

完成前两步骤后, 此时  $M_{yaw} = 0$ ,  $H_{roll} = 0$ , 自准直仪 roll 方向与五棱镜 yaw 方向均已精确校准, 由(7)式, 此时自准直仪  $H$  轴读数  $H \approx -\alpha + \alpha_{pp}$ , 代表五棱镜与被测平面 roll 方向的校准失调量, 因为被测平面镜保持不动, roll 方向调整五棱镜, 使自准直仪  $H$  轴读数为零, 实现五棱镜 roll 方向精确校准。

## 4 系统装调试验

为验证光线矢量追迹模型在五棱镜扫描检测系统中的正确性, 以 300 mm 平面镜为检测样本, 结合实验室现有条件搭建如图 7 所示的实验平台, 系统主要由自准直仪、参考棱镜与扫描棱镜、三维调整架、一维导轨等部分组成。

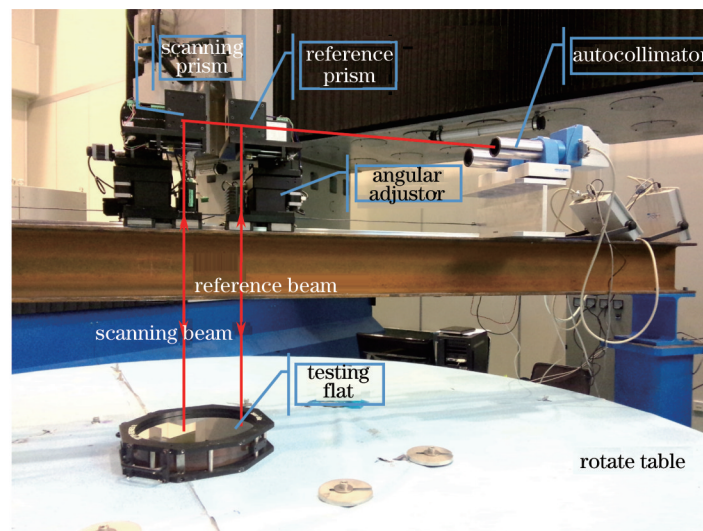


图 7 五棱镜扫描检测系统结构图

Fig.7 Structure of pentaprism scanning system

系统硬件初始装配完成后, 按照 3.3 节所述装调方案, 依次对五棱镜进行 yaw 和 roll 方向扫描, 扫描范围  $\pm 1$  mrad (约  $200''$ ), 实际测量结果如图 8 所示,

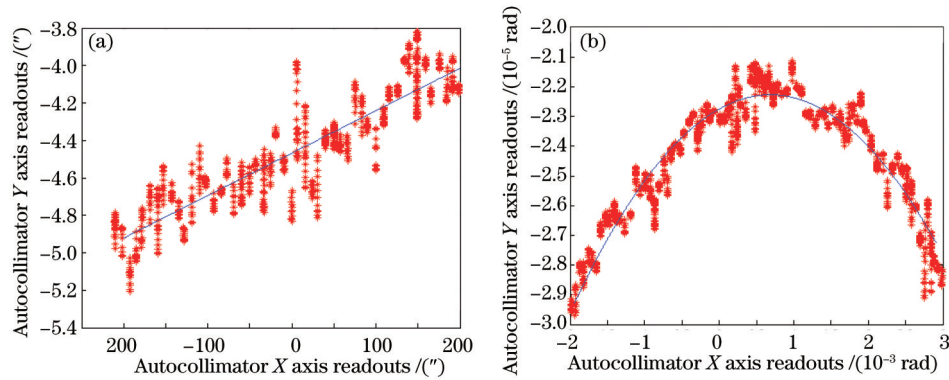


图8 系统精确装调结果。(a) Yaw方向扫描结果; (b) roll方向扫描结果

Fig.8 Fine alignment results of system. (a) Result of yaw scanning; (a) result of roll scanning

完成上述装调步骤后,五棱镜扫描检测系统装调结果如表2所示。将表2中结果代入(8)式,可知经过精确校准后,五棱镜扫描检测系统由装调误差引起的测量误差  $\Delta\alpha_{\text{LOS}} < 39 \text{ nrad}$ ,满足系统装调精度要求,同时验证了理论分析的结果。

表2 系统装调结果

Table 2 Alignment results of system

Items	Descriptions	Budget values
$\alpha_{\text{pp}}$	Initial misalignment of the prism roll	$< 0.1 \text{ mrad}$
$\Delta\alpha_{\text{pp}}$	Variation in prism roll	$< 0.01 \text{ mrad RMS}$
$\alpha_{\text{ac}}$	Misalignment of the autocollimator roll relative to direction of motion	$< 0.55 \text{ mrad}$
$\Delta\alpha_{\text{ac}}$	Variation in autocollimator roll	$< 0.01 \text{ mrad RMS}$
$\gamma_{\text{pp}}$	Initial misalignment of the prism yaw	$< 0.1 \text{ mrad}$
$\Delta\gamma_{\text{pp}}$	Variation in prism yaw	$< 0.01 \text{ mrad RMS}$
$\alpha_{\text{ts}}$	Misalignment of the test surface roll relative to the direction of motion	$< 0.55 \text{ mrad}$
$\Delta\alpha_{\text{ts}}$	Variation in test surface roll	$< 0.01 \text{ mrad RMS}$

## 5 结 论

基于光线矢量追迹理论建立五棱镜扫描检测系统的数学模型,对系统测量精度与系统元件装调误差之间的关系进行了详细分析,提出适用于大口径平面镜检测的五棱镜扫描检测系统装调方案,并结合实验室条件,实现了对该装调方案的工程验证。实验结果表明,经过精确装调后,由系统装调误差引起的测量误差可以控制在  $40 \text{ nrad}$  以内,满足五棱镜扫描检测系统的装调精度需求。研究成果对五棱镜扫描检测系统在实际工程中的应用具有一定的参考价值与指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 C Zhao, R Sprowl, M Bray, *et al.*. Figure measurements of a large optical flat with a Fizeau interferometer and stitching technique[J]. SPIE, 2006, 6293: 62930K.
  - 2 Sen Han, Erik Novak, Mike Schurig. Application of Pitcher-Common test in large flat measurements[J]. SPIE, 2001, 4399: 131-136.
  - 3 Sen Han, Erik Novak, Mike Schurig. Ritchey-Common test used for measurement of astronomical optical[J]. SPIE, 2003, 4842: 271-273.
  - 4 Julius Eldon Yellowhair. Advanced Technologies for Fabrication and Testing of Large Flat Mirrors[D]. Arizona: University of Arizona, 2007.
  - 5 H M Martin, R G Allen, *et al.*. Production of 8.4 m segments for the Giant Magellan Telescope[J]. SPIE, 2012, 8450: 84502D.
  - 6 Qi Erhui, Luo Xiao, Zheng Ligong *et al.*. Optical testing of large flat mirror with non-circular pupil based on scanning pentaprism technology[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 7(25): 1370-1375.
- 戚二辉, 罗 霄, 郑立功, 等. 大口径非圆形光学平面的五棱镜扫描检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 7(25): 1370-1375.

- 7 Y Senba, H Kishimoto, H Ohashi, *et al.*. Upgrade of long trace profiler for characterization of high-precision X-ray mirrors at Spring-8[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 616: 237 - 240.
- 8 S G Alcock, K J S Sawhney, S Scott, *et al.*. The Diamond-NOM: a non-contact profiler capable of characterizing optical figure error with sub-nanometer repeatability[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 616: 224-228.
- 9 Hao Qun, Zhao Yang, Cao Mang, *et al.*. Application of pentaprism 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
- 10 Kuang Cufang, Feng Qibo, Liu Bin, *et al.*. Influences on the deflection angle of the pentagonal prism due to dithering and fabrication angles error[J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 616-618.  
匡萃方, 冯其波, 刘 斌, 等. 五角棱镜制造角差及抖动对其转向角的影响[J]. 光学技术, 2004, 30(5): 616-618.
- 11 Ma Dongmei, Han Changyuan. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technique[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(11): 90-95.  
马冬梅, 韩昌元. 基于五棱镜扫描技术测试大口径平面镜的系统设计[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 90-95
- 12 Ma Dongmei, Liu Zhixiang, Ma Lei, *et al.*. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2517-2523.  
马冬梅, 刘志祥, 马 磊, 等. 五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2517-2523.

栏目编辑: 韩 峰