

## 五棱镜扫描技术检测大口径平面镜的误差分析

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

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 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, 可以实现大口径平面镜低阶像差的高精度检测, 是指导大口径平面镜光学加工过程的一种有效途径。为使大口径平面镜检测系统中的五棱镜扫描技术更加完善, 通过理论分析和计算模拟, 对五棱镜检测系统中的主要误差源, 包括五棱镜制造误差、温度梯度的影响、元件位置误差、光束定位误差、自准直仪测量误差等进行研究, 形成了比较完善的误差分析的数理结果。计算结果表明, 在当前实验室技术条件下, 五棱镜扫描检测系统在单个测量点处的测量不确定度达到 230 nrad, 其中影响五棱镜检测系统测量精度的主要因素为自准直仪的测量精度与温度的影响。研究结果给出了工程实际中提高五棱镜扫描系统检测精度与减小测量误差的注意事项, 并可用于指导系统设计时的误差分析及精度分配。

**关键词:** 测量; 光学检测; 五棱镜扫描系统; 光线矢量追迹; 误差分析

**中图分类号:** O439; TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0639-08

## Error analysis of scanning pentaprism system in optical testing on large aperture flat mirror

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

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The scanning pentaprism system has advantage of simple structure, quick optical testing and providing precise measurement of low order aberrations, it is an effective method for guiding optical manufacturing of large aperture flat mirror. In order to improve the scanning pentaprism technology, this letter makes detailed analysis on the error sources include pentaprism manufacturing error, thermal effect, components' position motion, mapping error, autocollimator measurement uncertainty in the scanning pentaprism system, and derives their exact influence on the system. The analysis results show that the system's measurement uncertainty on single testing point can be about 230 nrad under current laboratory environment, and the accuracy of scanning pentaprism system is mainly limited by the measurement uncertainty of the autocollimator and the thermal effect, which providing the proceedings that should be

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 戚二辉(1989-), 男, 博士生, 主要从事五棱镜扫描技术在大口径平面镜检测中的应用方面的研究。

Email: qierhui@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑立功(1969-), 男, 研究员, 主要研究方向为光学加工及检测技术。Email: lgzheng@ciomp.ac.cn

care for improving the system performance. This study also gives an important reference for the error analysis and precision distribution in design of the scanning pentaprism system.

**Key words:** testing; optical testing; pentaprism scanning system; vectorial ray tracing; error analysis

## 0 引言

随着超大口径望远技术的发展,望远镜光学系统的口径越来越大,规划中的 E-ELT、TMT 等未来巨型望远镜的主镜的口径都达到了 30~40 m 量级, E-ELT 的主镜直径阔达 42 m,其中的平面折返镜的口径为 1.3 m; TMT 主镜口径达到 30 m,三镜是一个 2.5 m×3.5 m 的椭圆形平面镜,大口径的平面镜作为望远镜系统的折返镜,其加工和检测是光学人员面临的巨大难题。在大口径光学平面的加工过程中,用于指导加工的光学检测不需要很高的面形分辨率,但对测量速度及低阶像差的测量精度要求较高。对于 TMT 三镜这样的大口径平面镜,传统的 Fizeau 干涉检测以及 Ritchey-Common 检测具有结构复杂、检测光路难以搭建、需要进行多次拼接、对低阶像差不敏感等缺点,不适于用来指导加工过程<sup>[1]</sup>。

五棱镜扫描检测是一种不同于传统干涉检测的斜率检测方法,利用五棱镜可以精确偏转光线 90°且光束偏转对五棱镜位置偏差 insensitive 的特点,实现对平面镜面形的扫描检测。利用平面镜自身作为参考,避免了大尺寸的标准镜的使用,检测系统的结构简单,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。

美国、德国和日本都已经设计出具有各自特点的五棱镜扫描系统<sup>[2-5]</sup>,并将之应用于光学系统的检测。相比于国际上对于五棱镜扫描技术的成熟运用,国内对于五棱镜扫描技术的研究起步较晚,郝群等人研究了五棱镜在建立大尺寸基准中的应用,分析了五棱镜加工角差等误差对平面基准的影响<sup>[6]</sup>;马冬梅等人对五棱镜扫描系统在检测大口径平面镜中的应用进行了分析,并模拟了五棱镜扫描系统对平面镜进行最终检测的过程<sup>[7]</sup>。目前国内对五棱镜扫描在光学检测中的应用还处于理论探索阶段,迄今为止尚未有用于指导光学加工的报道。

文中建立了针对复杂光学检测系统的光线矢量数学模型,将复杂的检测系统简化为简单的矢量计

算。通过光线矢量追迹、Zemax 建模等方式,对五棱镜扫描检测系统的误差源,包括五棱镜制造误差、元件位置误差、光束定位误差、温度梯度的影响、自准直仪测量误差等进行了理论分析和计算模拟,找出了制约五棱镜扫描检测系统检测精度的主要因素。通过精确装调减小和控制外部环境的影响,可极大地提高五棱镜扫描系统的检测精度,从而满足大口径平面镜的检测需要。

## 1 五棱镜系统工作原理

### 1.1 五棱镜工作原理

五棱镜的工作原理如图 1 所示。五棱镜精确地偏转光束 90°至被测面,经反射后返回,其本身 pitch 方向的旋转不会影响光线偏转角度的变化。利用五棱镜的这种一维不变性实现对光学表面斜率的测量,若被测点处的斜率为  $\theta$ ,则其出射光束与入射光束的夹角为  $2\theta$ 。

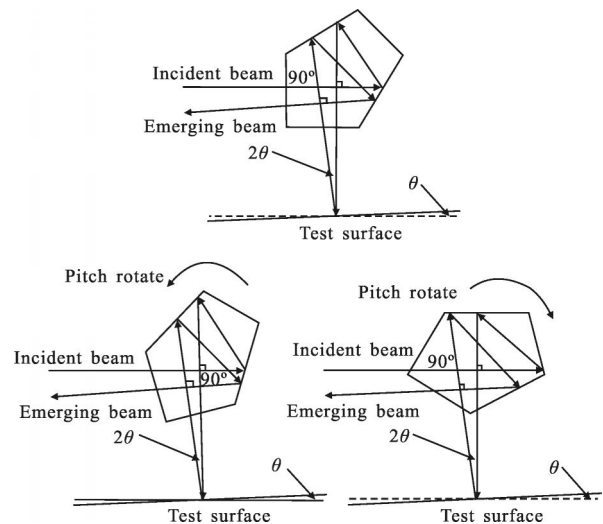


图 1 五棱镜的工作原理示意图

Fig.1 Principle of a pentaprism

### 2.2 五棱镜扫描检测系统工作原理

五棱镜扫描系统采用以反射镜自身作为参考的方式,工作原理如图 2 所示,所有测量以第一个测量点 A 为基准,扫描棱镜沿着一条母线对被测平面进

行扫描测量,测量其他测量点  $B$  相对  $A$  的角度变化,进而获取被测平面完整的面形信息。

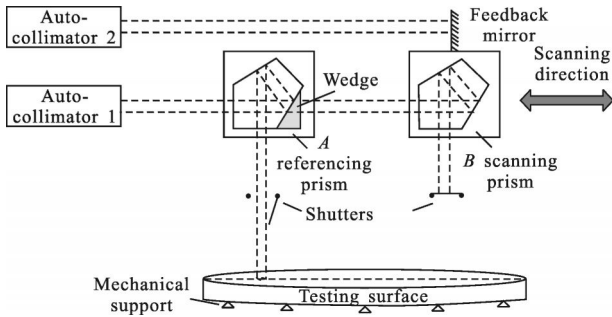


图2 扫描五棱镜系统检测原理示意图

Fig.2 Principle of the pentaprism scanning system

两个五棱镜与一个高分辨率的电子自准直仪精确校准,自准直仪发出的光束经五棱镜偏转  $90^\circ$  入射至被测平面镜,被平面镜反射回的光束经过五棱镜的偏转返回自准直仪。自准直仪每次只能检测一个返回信号,因此利用电子遮板的关闭与打开实现参考信号与扫描信号的交替选择。从扫描棱镜和参考棱镜返回的信号在扫描方向的角度差反映了被测平面镜在扫描方向上的斜率变化,如公式(1)所示:

$$\theta = \frac{1}{2} (V_{\text{scan}} - V_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{scan}}$  为扫描棱镜返回的斜率信息;  $V_{\text{ref}}$  为参考棱镜返回的斜率信息。通过这种参考测量的方式可以有效地降低系统装调以及初始校准引起的一阶误差。

自准直仪、五棱镜和被测面间的角度失调量和偏移量间的耦合将引入二阶误差到被检信号中,为了减少这些误差,必须精确校准测量装置。引入另一个电子自准直仪(图2中所示自准直仪2)作为反馈控制系统的一部分,与固定在扫描棱镜上的反馈平面镜对准,接收从平面镜返回的光线,确定扫描棱镜的偏转角度,通过反馈控制系统主动调整,使扫描棱镜在每次测量时精确校准于高分辨率电子自准直仪<sup>[8-9]</sup>(图2中所示自准直仪1)。

五棱镜扫描检测测得的数据为斜率信息,单条扫描路径只能检测低阶像差中的 power 等圆对称的像差,为检测整个面形,需要进行数条路径的扫描,如图3所示的三条路径扫描可以获得大部分的低阶像差信息。在生成测量面形时需要利用从 Zernike 多项式推导出的梯度函数进行系数拟合,利用拟合出

的低阶 Zernike 梯度函数的系数重构面形,获得被测平面的面形信息<sup>[4]</sup>。

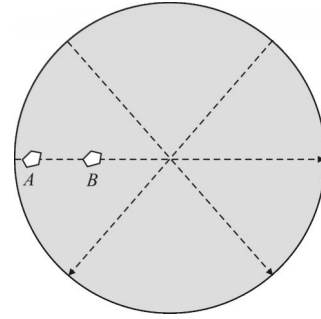


图3 扫描路径示意图

Fig.3 Scanning lines for measuring low order aberrations

## 2 五棱镜扫描检测系统误差分析

在五棱镜扫描系统工作过程中,系统元器件的制造误差、五棱镜移动过程中的位置变化、自准直仪本身的测量误差、环境的振动以及温度的变化都会对系统的测量精度产生影响。根据误差性质的不同,五棱镜扫描检测系统的误差可以分为系统误差和随机误差两大类。系统误差主要包括五棱镜的制造误差、自准直仪的测量误差;随机误差主要包括五棱镜、自准直仪与被测面的角度变化引起的误差、光束定位误差、温度梯度的影响、五棱镜横向移动的误差等。五棱镜扫描检测系统是一个复杂的光学检测系统,文中通过建立光线矢量追迹模型,将复杂的光学检测系统简化为简单的数学计算,进而完成对五棱镜扫描系统的误差分析。

### 2.1 光线矢量追迹模型

由于五棱镜的结构不具有一般光学元件的轴对称性,不能像普通的共轴光学系统那样将三维空间的问题简化为二维空间问题来处理,用传统的反射、折射定律来分析五棱镜扫描系统的工作过程比较困难。文中采用矢量分析的方法来对扫描五棱镜系统的扫描检测过程进行分析。

五棱镜扫描系统工作过程如图4所示。光束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。其中光线从自准直仪出发至被测镜面的过程称为正向光路,光线从被测镜面反射至出五棱镜称为逆向光路。自准直仪的出射光线矢量为:  $A_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ ,正向光路中五棱镜的四个表面法

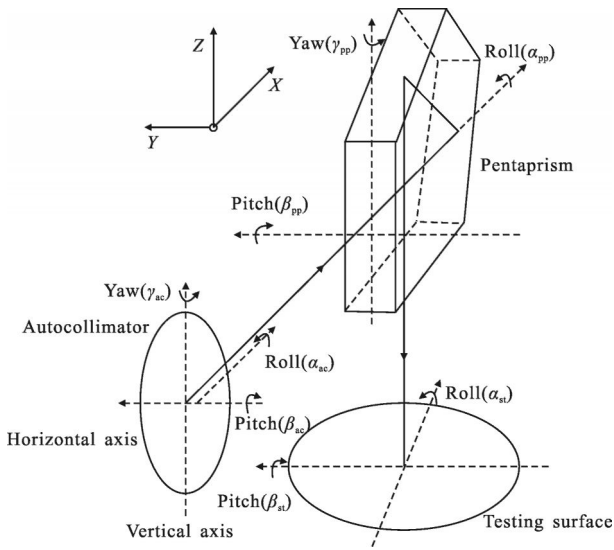


图 4 五棱镜扫描系统工作示意图

Fig.4 Performance of scanning pentaprism system

线矢量用列向量组成矩阵的形式为:

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\pi/8) & -\sin(\pi/8) & 0 \\ 0 & -\sin(\pi/8) & \cos(\pi/8) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

被测面的法线矢量为:  $N_2 = [0 \ -1 \ 0]^T$ , 逆向光路中五棱镜各表面的法线矢量矩阵为:

$$N_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(\pi/8) & \cos(\pi/8) & -1 \\ 1 & \cos(\pi/8) & -\sin(\pi/8) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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:  $A, A''$  为入射、折射光线矢量;  $p = \sqrt{(n')^2 - n^2 + (N \cdot A)^2} - (N \cdot A)$ ,  $N$  为折射面的法线矢量,  $n, n'$  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四个面之后的光线矢量, 则

$$\varphi_1 = \arctan(A_5(3)/A_5(1)) \quad (6)$$

表示正向光路中五棱镜出射光线的偏角。以  $A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$  表示逆向光路中经过各个面之后的光线矢量, 则自准直仪  $V$  轴的读数

$$V = \arctan(A_{10}(3)/A_{10}(1)) - \arctan(A_1(3)/A_1(1)) \quad (7)$$

就可以表示五棱镜扫描系统在被测面扫描方向上的斜率检测值。

光线矢量追迹的方法采用矢量计算的方式, 避免了几何光学中的复杂计算, 且完全按照光线行进的过程进行精确追迹, 实现了对五棱镜扫描系统工作过程中的光线运行轨迹跟踪, 为分析系统工作精度提供了理论模型及计算依据。下文将对五棱镜扫描系统工作过程中的各主要误差源进行详细分析。

### 2.2 五棱镜制造误差

理想的五棱镜对任意方向入射的光线都可以偏转  $90^\circ$ , 实际制造的五棱镜由于自身加工尺寸的偏差、面形精度以及材料的不均匀性等因素的影响, 偏转角度与  $90^\circ$  有一定的偏离。

#### 2.2.1 五棱镜加工尺寸偏差的影响

如图 5 所示, 五棱镜内部的折射率为  $n_2$ , 外部空气的折射率为  $n_1$ 。五棱镜的制造尺寸偏差表述为:  $90^\circ$  直角边的夹角偏差为  $\psi$ ,  $45^\circ$  边的夹角偏差为  $\delta$ , 对最终光线转角的偏差的影响量为  $\varphi$ , 则由反射定律及折射定律, 得到:

$$\sin(\varphi + \psi + \theta) = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \sin\left\{(\psi - 2\delta) + \sin^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin\theta\right]\right\} \quad (8)$$

对公式(2)进行多项式 Taylor 展开并取到入射角度  $\theta$  的二阶项, 得到:

$$\varphi \approx -\psi + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)(\psi - 2\delta) + \frac{1}{2}\left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{n_1}{n_2}\right)(\psi - 2\delta) \cdot \theta^2 \quad (9)$$

对于不同的入射角  $\theta$ , 光线经过五棱镜之后的偏转角度不同, 表示为:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{n_1}{n_2}\right)(\psi - 2\delta) \cdot \theta \cdot \Delta\theta \quad (10)$$

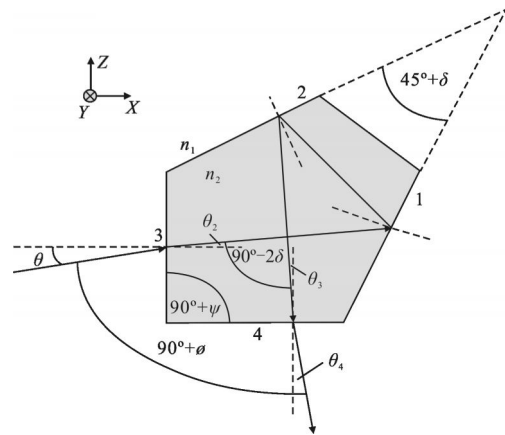


图 5 五棱镜内部光路示意图

Fig.5 Ray route inner of a pentaprism

经过精确装调与位置反馈控制, 实际五棱镜扫

描系统中可以实现扫描光线的入射角  $\theta < 5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ , 不确定度  $\Delta\theta < 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。五棱镜制作材料选为 BK7 玻璃,  $n_2=1.517, n_1=1$ , 目前五棱镜制作精度可以达到  $\psi=1.5 \times 10^{-5} \text{ rad}, \delta=1.5 \times 10^{-5} \text{ rad}$ , 代入公式(4), 得出  $\Delta\varphi < 3.86 \times 10^{-5} \text{ nrad}$ 。由此可以得出, 五棱镜加工角度偏差引入的测量误差为微小误差, 可以忽略不计。

2.2.2 五棱镜加工面形误差

五棱镜加工后的残差会引入面形误差, 使其各个面不是完美的平面, 如图 6 所示。在 Zemax 中对五棱镜测量系统进行建模分析, 如图 7 所示, 将五棱镜展开为平行平板, 并将自准直仪测量原理简化为检测返回光束焦平面处光斑质心的位置变化。五棱镜的加工方法决定了面形偏差主要为低阶像差, 因此在 Zemax 中在平行平板的光束经过面 I、II、III、IV 上加入一定的低阶像差, 即可分析五棱镜面形误差对最终测量结果的影响。

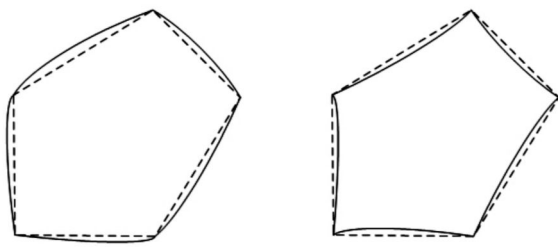


图 6 五棱镜面型误差示意图

Fig.6 Surface error of a pentaprism

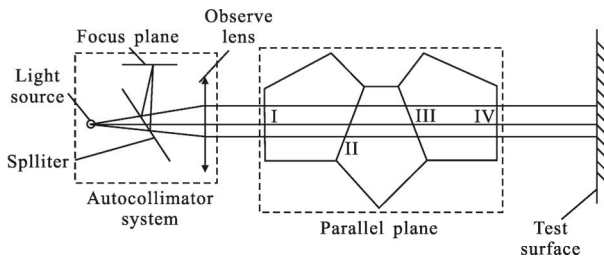


图 7 Zemax 模拟原理示意图

Fig.7 Sketch map of Zemax simulation

模拟结果显示: 当施加 RMS 为  $\lambda/10$  的低阶像差时, 从五棱镜发出的光束角度偏差会达到  $0.5''$ , 但是由于低阶像差具有一定的对称性, 自准直仪物镜焦平面处光斑的质心位置变化量很小, 仅为  $e^{-11} \text{ mm}$  量级。

Zemax 建模分析结果显示, 五棱镜面形制造误差对五棱镜扫描系统检测精度的影响可以忽略。

2.2.3 材料不均匀性的影响

五棱镜制作材料为 BK7 玻璃, 材料的不均匀性

将会引起五棱镜内部折射率的不均匀, 进而改变光线传播的方向。

使用 Matlab 进行有限元建模, 利用 2.1 节中介绍的光线矢量追迹模型来分析材料不均匀性对于测量结果的影响。将五棱镜内部视为折射率不均匀, 如图 8 所示, 沿垂直于光线传播方向将五棱镜内部分为很多折射率不同的介质的叠加, 光线在不同的介质之间按照折射定律产生折射, 每两个步长之间的折射率施加一个随机的变化量  $\Delta n$ , 以此分析材料不均匀性对系统检测精度的影响。

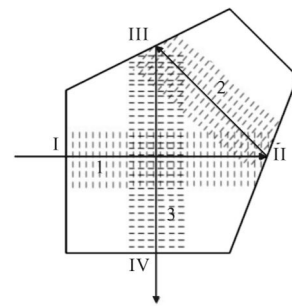


图 8 材料不均匀下的光路示意图

Fig.8 Ray routine sketch with material inhomogeneity

计算中选取步长为  $0.1 \text{ mm}$ , 材料均匀性 ppm ( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ ) 值为 2, 计算结果表明此时光线的额外偏角为  $3.5 \times 10^{-17} \text{ rad}$ 。由此可见, 材料的不均匀性引起的误差可以忽略。

2.3 自准直仪测量误差

光电自准直仪作为五棱镜扫描检测系统中的关键测量部件, 其测量不确定度直接影响到系统的检测精度, 也是限制五棱镜扫描系统检测精度的主要因素之一。目前国际上质量最好的光电自准直仪为德国穆勒公司的 Elcomat 系列, 其中 Elcomat3000 的测量范围为  $20''$ , 分辨率达到  $0.005''$ 。在实验室条件下, 其测量不确定度可以达到  $160 \text{ nrad}^{[10]}$ 。

2.4 五棱镜、自准直仪与被测面的角度变化引起的误差

五棱镜系统在工作时, 由于导轨的制造误差、外界环境振动等因素的存在, 五棱镜在移动时会产生摇摆和偏斜, 被检测平面在运动的过程中也会产生一定的偏斜, 这些因素与校准时的初始失调量耦合, 会给检测系统的测量精度带来高阶影响。

利用第 2.1 节建立的数学模型, 采用光线矢量追迹的方法来进行分析。由于初始装调误差的存在,

实际出射光线矢量以及五棱镜各个表面法线矢量会发生改变。由图 4 可知,自准直仪、五棱镜以及被测面都会产生绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的角度旋转量 Roll( $\alpha$ ), Pitch( $\beta$ ), Yaw( $\gamma$ )。相应的旋转变换矩阵为:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

自准直仪实际出射光线矢量为  $A_1=R_x R_y R_z A_1$ , 五棱镜表面法线矢量矩阵为  $N_1=R_x R_y R_z N_1$ 。

自准直仪、五棱镜以及被测面都具有三个角度自由度,在 Matlab 中同时连续改变两个变量,利用光线矢量追迹精确计算相应的角度值,再对各计算结果进行二维二次多项式拟合。拟合结果如下:

$$V \approx -\alpha_{pp}^2 + \alpha_{ac}(\alpha_{pp} - \gamma_{pp} - \alpha_{st}) + \alpha_{st}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp}) - (\beta_{st} - \beta_{ac}) \quad (14)$$

五棱镜系统在校准时会引入校准失调量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,系统工作时,元件的运动会引起角度的偏移和抖动  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 。校准失调量以及元件角度变化会造成扫描方向的角度改变  $\Delta\alpha_{LOS}$ ,考虑其二阶项:

$$\Delta\alpha_{LOS} = 2\alpha_{pp} \cdot \Delta\alpha_{pp} + \Delta\alpha_{ac}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp} + \alpha_{st}) + \alpha_{ac}(\Delta\alpha_{pp} + \Delta\gamma_{pp} + \Delta\alpha_{st}) + \Delta\alpha_{st}(\alpha_{pp} + \gamma_{pp}) + \alpha_{st}(\Delta\alpha_{pp} + \Delta\gamma_{pp}) \quad (15)$$

表 1 列出了影响扫描方向上精度的误差项以及对应的预估值,表中各个误差分量值为参考前人经验及结合实验室现有测量条件所估计。

$$\Delta n = \frac{n^2 - 1}{2 \cdot n(D_0 \cdot \Delta T + D_0 \cdot \Delta T^2 + D_0 \cdot \Delta T^3 + (E_0 \cdot \Delta T + E_1 \cdot \Delta T^2) / (\lambda^2 - \lambda_i^2))} \quad (16)$$

温度的影响对五棱镜尺寸变化的表达式为  $L' = (1 + \alpha \Delta T)$ ,在平面坐标系中表示为:

$$x' = x(1 + \alpha K \times y) \quad (17)$$

$$y' = y + 1/2 \cdot \alpha \cdot K \cdot y^2 \quad (18)$$

式中: $\alpha$ 为热膨胀系数; $K$ 为温度梯度,五棱镜各个表面的法线矢量也会变化。在 Matlab 中利用光线矢量追迹的方式进行模拟,光线在五棱镜内部沿着一定的矢量按定步长传播,相邻步长可视为两种折射率不同的介质,光线在两个步长交界处发生折射,相邻步长的光线矢量方向会略有不同;同时按照公式(17)、

表 1 五棱镜扫描系统的校准误差预估

Tab.1 Budget for alignment errors for the scanning pentaprism system

Items	Descriptions	Budget values
$\alpha_{pp}$	Initial misalignment of the prism roll	<0.13 mrad
$\Delta\alpha_{pp}$	Variation in prism roll	<0.05 mrad rms
$\alpha_{ac}$	Misalignment of the autocollimator roll relative to direction of motion	<0.10 mrad
$\Delta\alpha_{ac}$	Variation in autocollimator roll	<0.05 mrad rms
$\gamma_{pp}$	Initial misalignment of the prism yaw	<0.13 mrad
$\Delta\gamma_{pp}$	Variation in prism yaw	<0.05 mrad rms
$\alpha_{st}$	Misalignment of the test surface roll relative to the direction of motion	<0.10 mrad
$\Delta\alpha_{st}$	Variation in test surface roll	<0.01 mrad rms

将表 1 中的数据带入公式(15),得出五棱镜、自准直仪、被测面的角度变化引起的测量误差为: $\Delta\alpha_{LOS} = 25 \text{ nrad}$ 。

## 2.5 光束定位误差

五棱镜扫描系统工作时,光束在被测面上的位置偏差将引入定位误差。

在实际工程加工过程中,扫描五棱镜系统用于抛光阶段,此时的平面镜面形斜率约为  $2 \text{ nrad/mm rms}$ ,光束在被测面上的位置精度优于  $2 \text{ mm}$ ,因此在系统工作过程中光束定位误差引入的影响约为  $4 \text{ nrad rms}$ 。

## 2.6 温度梯度的影响

五棱镜制作材料选为 BK7 玻璃,热膨胀系数为  $7.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。五棱镜内部的温度梯度将引起其折射率和几何尺寸的变化。

五棱镜内部折射率随温度梯度的变化可以表示为<sup>[11]</sup>:

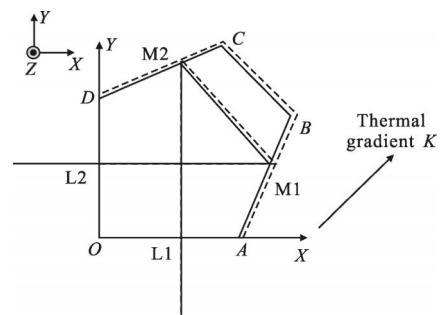


图 9 温度对五棱镜的影响的分析建模

Fig.9 Simulation of the thermal effects

(18)推导A、B、C、D四个点的位置坐标变化,进而得出五棱镜各个表面的实际法线矢量。

结合实验室条件,模拟中五棱镜边长为50 mm,温度梯度为0.05 °C/m,步长为0.1 mm。分析结果显示:0.05 °C/m的温度梯度对最终测量结果的影响为140 nrad。

### 2.7 五棱镜侧向移动引入的误差<sup>[8-9]</sup>

由于准直光束通过两个五棱镜具有一致性,准直光束的相位或者振幅变化不会对系统带来一阶影响。然而,结合五棱镜的横向移动会在测量结果中引入高阶误差。

与五棱镜横向移动相结合产生二阶误差的三个基本因素分别为:相位误差、衍射影响与亮度变化。

扫描五棱镜系统采用了位置反馈来保证五棱镜的移动精度,因此五棱镜侧向移动精度可以达到0.5 mm,引起的测量误差约为80 nrad。

### 2.8 误差总结

综合上述分析,在目前的实验室控制条件下,扫描五棱镜系统在测量过程中的误差项可以总结为表2。

表2 随机误差综合

Tab.2 Combined random error

Error sources	Values/nrad rms
Dimension errors of prism	$3.86 \times 10^{-5}$
Surface errors of prism	0
Material inhomogeneity effect	$3.5 \times 10^{-17}$
Thermal effect	140
Components' angular motion	25
Mapping error	4
Lateral motion of prism	80
Measurement uncertainty of autocollimator	160
RSS	230

由表2可知,在五棱镜扫描检测系统工作过程中,五棱镜制造误差、光束定位误差、五棱镜、自准直仪与被测面的角度变化引起的误差等因素对系统检测精度都有影响,但在目前的技术条件下不是影响系统检测精度的主要因素。自准直仪的测量精度直接关系到系统的检测精度,是限制系统检测精度的主要因素之一,对其的正确安装及使用是五棱镜检测系统高精度工作的前提。温度的影响是限制五棱

镜扫描系统检测精度的另外一个主要因素,环境控制尤其是温度的控制是保证五棱镜扫描系统检测精度的必要条件。

## 3 结论

从光束在系统检测过程中的运动轨迹出发,建立了五棱镜扫描系统检测大口径平面镜的光学矢量追迹模型。通过理论分析和仿真计算,对系统工作过程中的主要误差源进行了详细分析,分析结果表明,五棱镜扫描系统单个测量点处的测量不确定度为230 nrad rms,其中自准直仪与温度梯度引入的测量误差占整体误差的92.4%,其余五棱镜制造误差、光束定位误差、元件角度变化引起的误差等影响仅占整体误差的7.6%,因此在工程实际中应特别注意自准直仪的使用,并加强对测量环境尤其是温度的控制,以提高系统的检测精度,从而满足大口径平面镜的在线检测需求。文中的研究对于其他同类产品的研制,尤其是设计环节误差的合理分配与精度控制具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Sen Han, Erik Novak, Mike Schurig. Ritchey-common test used for measurement of astronomical optical [C]//SPIE, 2003, 4842: 271-273.
- [2] Senba Y, Kishimoto H, Ohashi H, 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.
- [3] Alcock S G, Sawhney K J S, Scott S, 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.
- [4] Julius Eldon Yellowhair. Advanced technologies for fabrication and testing of large flat mirrors [D]. Arizona: University of Arizona, 2007.
- [5] Martin H M, Allen R G, Burge J H, et al. Production of 8.4 m segments for the giant Magellan telescope [C]//SPIE, 2012, 8450: 84502D.
- [6] 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. (in Chinese)
- 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.
- [7] Ma Dongmei, Han Changyuan. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technology [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(11): 90295. (in Chinese)
- 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): 90295.
- [8] Mallik P, Zhao C, Burge J H. Measurement of a 2-m flat using a pentaprism scanning system [J]. *Opt Eng*, 2007, 46: 023602.
- [9] Mallik P, Zhao C, Burge J H. Measurement of a 2-m flat using a pentaprism scanning system [C]//SPIE, 2005, 5869: 58691A.
- [10] Moeller Wedel Optical Corporation. Elcomat3000 Manual [EB/OL]. (2012-01-01)[2013-03-01] <http://www.moeller-wedel-optical.com/en/produkte/electronic-autocollimators/p-elcomat-3000.html>.
- [11] Zemax Development Corporation. Optical Design Program User's Guide [EB/OL]. (2009-04-01) [2013-03-01] <http://www.zemax.cn.com/support/downloads>.