

doi:10.3788/gzxb20154405.0523006

五角棱镜光学平行差的理论分析

王秋实, 李明, 廖可梁, 杨福桂, 盛伟繁

(中国科学院高能物理研究所, X 射线光学与技术实验室, 北京 100049)

摘 要: 利用矩阵光学方法, 计算得出五角棱镜两种光学平行差的解析表达式, 分析五角棱镜光学平行差与工作面向矢量夹角的矩阵关系. 基于 Agilent 激光干涉仪角度测量系统和 DHC 三维转台搭建实验装置, 测量了 Thorlabs 五角棱镜的两种光学平行差. 实验和解析式计算结果偏离度不超过 4%. 五角棱镜滚动角、偏摆角的变化等效于五角棱镜光学平行差的变化. 通过坐标系变换, 五角棱镜的自身误差和系统在线测量误差可以被同时标定. 该研究对五角棱镜的实际加工、测量系统标定, 以及高准确度面形检测提供了参考.

关键词: 光学器件; 五角棱镜; 误差分析; 矩阵光学; 系统校准

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0523006-5

Theoretical Analysis on Optical Parallelism of Pentaprism

WANG Qiu-shi, LI Ming, LIAO Ke-liang, YANG Fu-gui, SHENG Wei-fan

(Laboratory of X-ray Optics and Technologies, Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By using matrix optics method, expressions of two types of optical parallelism in pentaprism were obtained. An relationship between optical parallelism and normal vector of working surface was analysed. An experiment device based on Agilent laser interferometer and DHC 3D rotation platform was established. With angular measurement function provided by the device, optical parallelism of a pentaprism made by Thorlabs were measured. The experimental results are consisten with the calculation of analytical expressions, whose deviation is no more than 4%. Conclusion indicates that changes of roll angle and yaw angle in practical application are equivalent to alteration of optical parallelism. It means that the jitter errors of online measurement and fabrication errors can be in-situ calibrated simultaneously by coordinates transformation. The study is useful for manufacturing, adjusting and pre-calibrating a pentaprism in optical system, and the conclusions above can be a good help in high-precision optical surface profiler metrology in practice.

Key words: Optical devices; Pentaprism; Tolerance analysis; Matrix optics; System calibration

OCIS Codes: 080.1010; 080.2730; 220.1010; 230.5480

0 引言

在精密光学检测和成像系统中, 经常会用到五角棱镜这一光束转向器, 将入射光偏转 90° 的同时, 所成的像既没有旋转也无镜面变换^[1]. 因此, 五角棱镜广泛应用于测量行业, 如配合精密导轨进行大口径平面和非球面光学表面的测量^[2-5], 用于航天遥感的 Sagnac 剪切干涉仪^[6]等. 然而, 五角棱镜光学元件受其加工能

力限制, 加工准确度多在 $\pm 1''$; 在改变光路的同时, 不可避免地引入新的系统误差, 需用实测数据进行数值补偿^[7-8]. 因此, 找出各种误差的产生原因并得到其精确表达式, 对光学系统的标定和准确度提升很有必要. 在棱镜误差分析中, 多采用光学平行差来表示棱镜误差的大小^[1-2, 6-8]. 五角棱镜光学平行差分析主要有三种方法: 一是采用光线追迹法仿真, 通过编写矢量追迹函数, 给出多个数值解^[2, 7-8]; 二是结合实际扫描应用中导

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. Y11139005C)资助

第一作者: 王秋实(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高精度面形检测设备. Email: wangqs@ihep.ac.cn

导师(通讯作者): 盛伟繁(1962-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为同步辐射光学. Email: shengwf@ihep.ac.cn

收稿日期: 2014-11-21; **录用日期:** 2015-01-23

<http://www.photon.ac.cn>

轨的抖动误差,实测五角棱镜的滚角、偏摆角、俯仰角数据,然后通过高阶小量近似或拟合得到经验公式,来表征三维抖动对于五角棱镜扫描方向偏差的影响^[2,5];三是直接给出五角棱镜误差的解析解^[7].目前在五角棱镜的研究中,由于工程性较强,常见各种误差的数值解,较少见五角棱镜光学平行差的解析解;已有的解析解^[7]很好地表征了五角棱镜的加工误差,但在实际扫描测量应用中有一定限制,仍需求助于光线追迹方法.

矩阵光学采用矩阵代数方法研究光学问题,具有处理问题简单和便于计算机求解的优点,易于获得解析解.刘宏展^[9]利用矩阵光学分析旋转抛物透镜的反射矩阵,卢进军等^[10]用同样方法分析了 Schmidt 棱镜的工作特性.本文用矩阵光学方法,给出了五角棱镜光学平行差解析表达式;并通过分析五角棱镜工作面法向矢量与实验室坐标系夹角的变化,将加工误差、扫描测量结合研究,提供了一种新的标定思路.

1 五角棱镜加工误差分析

前人对五角棱镜的加工误差进行了较多的分析^[2,5-8],这里简单介绍一下.如图1,五角棱镜

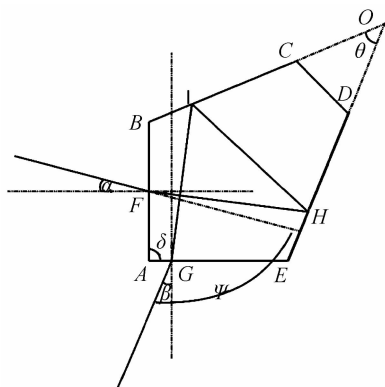


图1 五角棱镜出射与入射光线

Fig.1 Schematic showing incidence and deflection rays of pentaprism

ABCDE,材料折射率为 n ,对应五角棱镜的顶角 θ ,底角 δ .光线自 F 点入射,入射角 α ;从 G 点出射,出射角 β ;出射光偏转角 ψ 的解析式为^[7]

$$\psi = \delta - \alpha + \arcsin \left\{ n \sin \left[2\theta - \delta + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

一般地,五角棱镜存在顶角误差 $\Delta\theta$ 和底角误差 $\Delta\delta$.在入射光线为准垂直入射,即入射角 $\alpha \approx 0$ 时,表示入射光线和出射光线的夹角 ψ 的式(1)写成

$$\psi = \delta + \arcsin [n \sin (2\theta - \delta)], \text{ 微分可得}$$

$$\frac{d\psi}{d\alpha} \approx \frac{\cos (2\theta - \delta)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 (2\theta - \delta)}} - 1 \quad (2)$$

当加工误差 $2\theta - \delta$ 很小时, $\frac{d\psi}{d\alpha} \approx 0$,此时五角棱镜的偏转角 ψ 受影响很小.

研究表明^[2,7]:当光线垂直入射时,加工误差对五

角棱镜主截面上的出射光线方向产生很小的影响;沿扫描方向的偏转角 ψ 与角度误差 $\Delta\theta, \Delta\delta$ 成线性关系,而垂直于扫描方向的偏转角为 0° .在误差 $\Delta\theta, \Delta\delta$ 确定的条件下,偏转角 ψ 和入射角 α 的关系可以用二次式进行拟合,其高次项对于入射角 α 较大的情况,具有明显的影响.然而,当五角棱镜处于扫描测量状态时,式(1)、(2)并不适用,需要采用光线追迹法等重新进行数值计算.这需要采用新的思路,来分析五角棱镜工作状态下转角误差和光学平行差的关系.

2 五角棱镜的光学平行差分析

棱镜沿光路展开后可以形成光学平板,光路主截面内,该展开平板与理想光学平板的楔形角度误差称为第一光学平行差;垂直于主截面的角度误差称为第二光学平行差,又称尖塔差.对于五角棱镜来说,若入射光不垂直于入射面,则展开光路的对称性很低,会产生复杂的像倾斜和畸变像差,一般是难以完全消除的,可用矩阵光学或者光线追迹法进行具体计算.由于光线传播问题都可以归结为光线在各种介质及界面的光学系统中的连续变换,采用矩阵光学方法,就可以得到光轴偏和像倾斜的系统解析表达式,并且求解中无需考虑传统的顶角误差 $\Delta\theta$ 和底角误差 $\Delta\delta$.毛文炜证明了全视场的平均像倾斜近似等于零视场下的切线像倾斜^[11],分析垂直入射光的工作状态并校准,就完成了全视场工作状态的校准.故可用垂直入射光来进行全视场的五角棱镜光学平行差分析.

如图2所示,在右手系 XYZ 中,选定入射基准面和基准棱,考虑五角棱镜用于面形检测系统时最常见的工作情况:光束入射后经过五角棱镜偏转,再经过待测平面 SUT 反射,回到原光路进行对比检测,总计经过了5次反射.

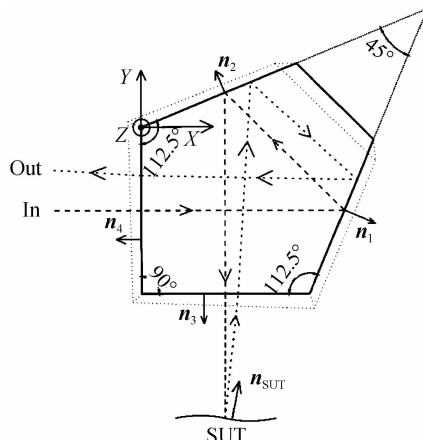


图2 五角棱镜光学平行差的计算

Fig.2 Optical parallelisms calculating in pentaprism system

定义五角棱镜工作面法向矢量与 X, Y, Z 轴的夹角分别为 α, β, γ ,则对应夹角的变化量分别为 $d\alpha, d\beta,$

$d\gamma$,其下标按照光束经过工作面的顺序依次递增.此时,存在尖塔差的五角棱镜两个工作面,外加待测平面SUT的法向矢量分别为

$$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} \cos(22.5^\circ + d\alpha_1) \\ \cos(112.5^\circ + d\beta_1) \\ \cos(90^\circ + d\gamma_1) \end{bmatrix}, \mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} \cos(112.5^\circ + d\alpha_2) \\ \cos(22.5^\circ + d\beta_2) \\ \cos(90^\circ + d\gamma_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{n}_{\text{SUT}} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + d\alpha_{\text{SUT}}) \\ \cos(0^\circ + d\beta_{\text{SUT}}) \\ \cos(90^\circ + d\gamma_{\text{SUT}}) \end{bmatrix},$$

$$\text{入射光束方向矢量 } \mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 \\ \cos(90^\circ + \beta_0) \\ \cos(90^\circ + \gamma_0) \end{bmatrix},$$

$$\text{理想出射光束方向矢量 } \mathbf{n}_4 = \begin{bmatrix} \cos 180^\circ \\ \cos 90^\circ \\ \cos 90^\circ \end{bmatrix},$$

$$\text{对应的增量 } \Delta \mathbf{n}_4 = \begin{bmatrix} -\sin 180^\circ d\alpha_4 \\ -\sin 90^\circ d\beta_4 \\ -\sin 90^\circ d\gamma_4 \end{bmatrix},$$

反射矩阵 \mathbf{R} 表示反射光线的三个方向余弦与入射光线的三个方向余弦之间的关系,则对应工作面 i ,有

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2 \alpha_i & -2\cos \alpha_i \cos \beta_i & -2\cos \alpha_i \cos \gamma_i \\ -2\cos \alpha_i \cos \beta_i & 1 - 2\cos^2 \beta_i & -2\cos \beta_i \cos \gamma_i \\ -2\cos \alpha_i \cos \gamma_i & -2\cos \beta_i \cos \gamma_i & 1 - 2\cos^2 \gamma_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

误差矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i$ 是反射矩阵 \mathbf{R}_i 的微分

$$\Delta \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 2\sin 2\alpha_i d\alpha_i & 2\sin \alpha_i \cos \beta_i d\alpha_i + 2\cos \alpha_i \sin \beta_i d\beta_i & 2\sin \alpha_i \cos \gamma_i d\alpha_i + 2\cos \alpha_i \sin \gamma_i d\gamma_i \\ 2\sin \alpha_i \cos \beta_i d\alpha_i + 2\cos \alpha_i \sin \beta_i d\beta_i & 2\sin 2\beta_i d\beta_i & 2\sin \beta_i \cos \gamma_i d\beta_i + 2\cos \beta_i \sin \gamma_i d\gamma_i \\ 2\sin \alpha_i \cos \gamma_i d\alpha_i + 2\cos \alpha_i \sin \gamma_i d\gamma_i & 2\sin \beta_i \cos \gamma_i d\beta_i + 2\cos \beta_i \sin \gamma_i d\gamma_i & 2\sin 2\gamma_i d\gamma_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

有制造误差的棱镜,经过 i 次反射后,出射光线偏转方向 $\Delta \mathbf{a}_i$ 的矢量表达式为^[1]

$$\Delta \mathbf{a}_i = (\mathbf{R}_i + \Delta \mathbf{R}_i)(\mathbf{R}_{i-1} + \Delta \mathbf{R}_{i-1}) \cdots (\mathbf{R}_1 + \Delta \mathbf{R}_1) \mathbf{a}_0 - (\prod_{j=1}^i \mathbf{R}_j) \mathbf{a}_0 = (\Delta \mathbf{R}_i \prod_{j=1}^{i-1} \mathbf{R}_j + \cdots + \prod_{j=2}^i \mathbf{R}_j \Delta \mathbf{R}_1) \mathbf{a}_0 \quad (5)$$

总偏转角

$$\psi = \mathbf{n}_4^T \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{k} & -\mathbf{j} \\ -\mathbf{k} & 0 & \mathbf{i} \\ \mathbf{j} & -\mathbf{i} & 0 \end{bmatrix} (\Delta \mathbf{n}_4 - \Delta \mathbf{a}_i) \quad (6)$$

这里, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 满足右手系矢量关系式

$$\cos^2 \alpha_i + \cos^2 \beta_i + \cos^2 \gamma_i = 1 \quad (7)$$

微分式(7),代入已有的角度值,简化各矢量表达式的参量,可得

$$d\alpha_i = d\beta_i \quad (8)$$

式(8)结合式(3)、(4)进行简化,分别求出每个反射面的反射矩阵 \mathbf{R}_i 和误差矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i$,进而将 \mathbf{R}_i 和 $\Delta \mathbf{R}_i$ 代入式(5)、(6),求解 $\Delta \mathbf{a}_i$ 和总偏转角 ψ .这里因篇幅所限,仅给出最后的结果,即

$$\psi = \mathbf{k} [4\cos \alpha_0 d\alpha_1 + 4\cos \alpha_0 d\alpha_2 - 2\cos \alpha_0 d\alpha_{\text{SUT}} - d\alpha_4 - \sin \beta_0] - \mathbf{j} [2\sqrt{2+\sqrt{2}} \cos \alpha_0 d\gamma_1 + 2\sqrt{2+\sqrt{2}} \cdot \cos \alpha_0 d\gamma_2 - 2\cos \alpha_0 d\gamma_{\text{SUT}} - d\gamma_4 + \sin \gamma_0] \quad (9)$$

对于准垂直入射光, $\cos \alpha_0 \approx 1, \sin \beta_0 = \sin \gamma_0 \approx 0$,式(9)可以简化为

$$\psi = \mathbf{k} (4d\alpha_1 + 4d\alpha_2 - 2d\alpha_{\text{SUT}} - d\alpha_4) - \mathbf{j} (2\sqrt{2+\sqrt{2}} d\gamma_1 + 2\sqrt{2+\sqrt{2}} d\gamma_2 - 2d\gamma_{\text{SUT}} - d\gamma_4) \quad (10)$$

按照定义,第一光学平行差是 \mathbf{k} 方向分量

$$\psi_k = 4d\alpha_1 + 4d\alpha_2 - 2d\alpha_{\text{SUT}} - d\alpha_4 \quad (11)$$

第二光学平行差是 \mathbf{j} 方向分量

$$\psi_{11} = -2\sqrt{2+\sqrt{2}} d\gamma_1 - 2\sqrt{2+\sqrt{2}} d\gamma_2 + 2d\gamma_{\text{SUT}} + d\gamma_4 \quad (12)$$

式(10)说明,对于不完美的五角棱镜,第一光学平行差只同各工作面法向矢量与 X 轴夹角 α 相关;第二光学平行差只同各工作面法向矢量与 Z 轴夹角 γ 相关,光学平行差的增量同对应夹角的变化量成线性关系.通过直接或间接测定 $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$ 的数值,就可求出光线偏转角 ψ_k, ψ_{11} ,这一结果可以用来标定五角棱镜的自身加工误差.

3 光学平行差与转动误差验证

五角棱镜在实际扫描测量中,会因为导轨的不平行度受到三维抖动,因而产生一定的转动误差.考虑五角棱镜和导轨的耦合作用,在实际工作中导轨出现抖动时,对于五角棱镜来说,抖动的结果相当于改变了其工作面法向矢量与实验室坐标系的夹角,又或者改变了入射光线的角度.在本文的定义中, α, γ 表征五角棱镜的工作面法向矢量和坐标轴的夹角,是自身的参量;因而实际工作中滚动角、偏摆角、俯仰角引起的转动误差,均可以转化为实验室坐标系下的误差分量,通过式(9)或简化式(10)表达.

如图3,俯仰角位于 XOY 面;偏摆角位于 XOZ 面,对应于光轴偏;滚动角位于 YOZ 面,对应于像倾斜.从式(10)可以明显地发现,沿扫描方向、垂直于扫描方向的指向误差的增量同五角棱镜工作面法向量夹角的增量 $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$ 成线性关系.

图4为利用 HP Agilent 5519A 激光干涉仪的角度测量功能,实现五角棱镜转动误差和光学平行差测量的实验验证装置.激光干涉仪出射的光束通过偏振分光棱镜 PBS 分成两路:P 偏振光做为采样光束,通过 Thorlabs 五角棱镜后,通过反射镜组返回;S 偏振光做为参考光,先通过 45° 反射镜,再通过另一个反射镜组

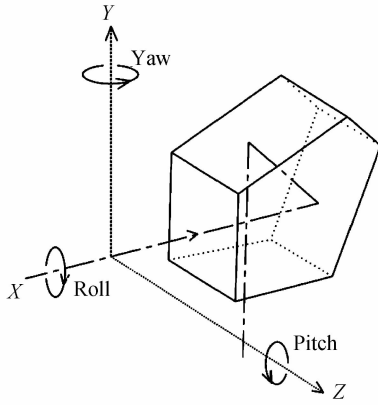


图3 五角棱镜及旋转角示意图

Fig. 3 Schematic showing a pentaprism with degrees of rotation

以通过三维转台绕坐标轴旋转角度 φ 的增量 $d\varphi$ 间接测得. 三维转台绕 Z 轴旋转, 将产生俯仰角, 前人^[2,4] 已经证明: 对于俯仰角的变化, 五角棱镜转动误差不变, 因而此处不再重复验证. 三维转台绕 Y 轴旋转, 将产生偏摆角; 基于图2中给出的工作面, 利用坐标系变换可以得出, 当三维转台绕 Y 轴旋转 φ 角时, 有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \\ \mathbf{n}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{8} \cos \varphi & -\sin \frac{\pi}{8} & \cos \frac{\pi}{8} \sin \varphi \\ -\sin \frac{\pi}{8} \cos \varphi & \cos \frac{\pi}{8} & -\sin \frac{\pi}{8} \sin \varphi \\ -\cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

值得说明的是, 由于 Thorlabs 公司的五角棱镜没有详细的加工误差参量, 这里以 $\pi/8$ 的理论值代替实际值 $\frac{\pi}{8} + \frac{\Delta\theta + \Delta\delta}{2}$, 其中 $\Delta\theta, \Delta\delta$ 为五角棱镜的顶角和底角的加工误差.

由式(13)可知, 对应的角度矩阵为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \left(\cos \frac{\pi}{8} \cos \varphi \right) \\ a \cos \left(-\sin \frac{\pi}{8} \cos \varphi \right) \\ -\varphi \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} d\alpha_1 \\ d\alpha_2 \\ d\alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\cos \frac{\pi}{8} \sin \varphi}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\pi}{8} \cos \varphi \right)^2}} \\ \frac{\sin \frac{\pi}{8} \sin \varphi}{\sqrt{1 - \left(-\sin \frac{\pi}{8} \cos \varphi \right)^2}} \\ -1 \end{bmatrix} d\varphi$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \left(\cos \frac{\pi}{8} \sin \varphi \right) \\ a \cos \left(-\sin \frac{\pi}{8} \sin \varphi \right) \\ -\sin \varphi \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} d\gamma_1 \\ d\gamma_2 \\ d\gamma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \frac{\pi}{8} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\pi}{8} \sin \varphi \right)^2}} \\ \frac{-\sin \frac{\pi}{8} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(-\sin \frac{\pi}{8} \sin \varphi \right)^2}} \\ -\cos \varphi \end{bmatrix} d\varphi \quad (14)$$

利用式(14), 式(11)和(12)中的各参量均可以转化为以 φ 做为自变量, ψ_I, ψ_{II} 关于 φ 的函数. 同理可以求出三维转台绕 X 轴旋转产生的滚角. 实验测量结果及式(11)、(12)计算结果如图5.

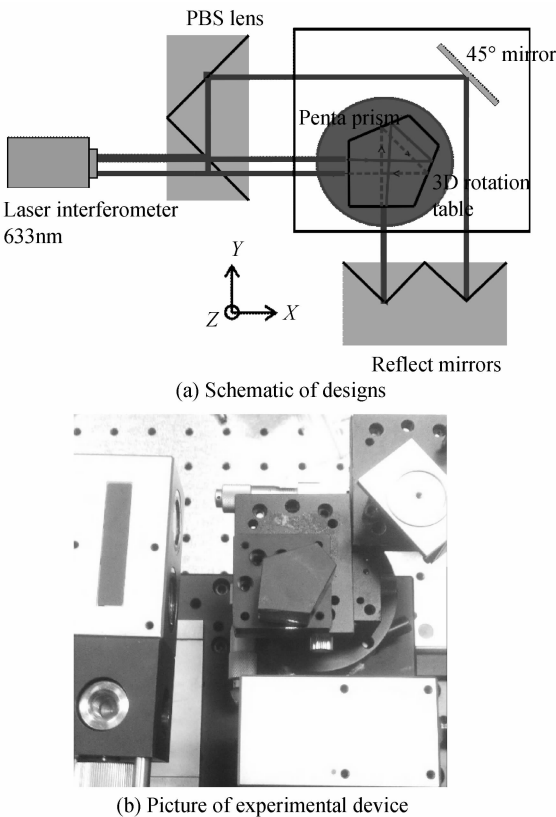


图4 五角棱镜光学平行差实验测量装置

Fig. 4 Measurements of a pentaprism with optical parallelisms

返回, 五角棱镜被固定在大恒光电 GCM-1108M 三维转台上, 该转台具有绕 X 轴、绕 Y 轴和绕 Z 轴旋转 3 个自由度. 转台和 45° 反射镜共同固定在卓立汉光 PSA-300-11-X 一维 X 轴滑台上, 保持相对位置稳定.

图4所示是测量光路主截面内的光学平行差(即第一光学平行差); 测量光路主截面外的第二光学平行差时, 需要将 PBS 和反射镜组均沿 Z 轴放置, 同时使 45° 反射镜在五角棱镜的上方.

现有条件下, $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$ 的数值无法直接测得, 可

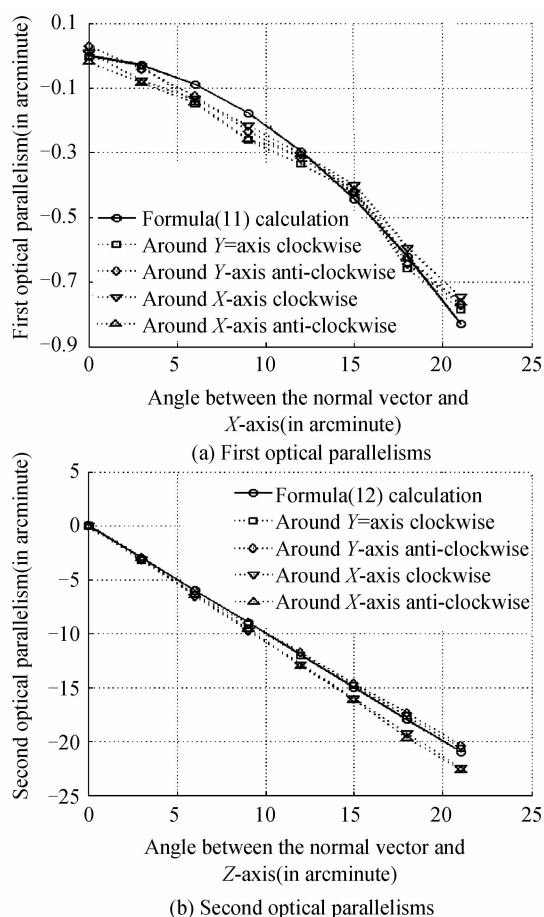


图5 五角棱镜光学平行差实验测量结果
Fig. 5 Measurements of pentaprism

图5所示的实验中,横轴表示三维转台绕X、Y轴旋转的角度 φ ,单位是arcminute;纵轴表示激光干涉仪实测的偏转角度 φ_1 和 φ_2 。四组测量数据均采用3次测量求取均值的方法降低随机测量误差,分别表示绕X轴顺时针旋转、逆时针旋转;绕Y轴顺时针旋转、逆时针旋转。实测结果和公式计算结果的一致性较好,偏离度小于4%,这一结果和常山等人^[8]得到的结果相近。除测量环境引起误差外,由于无法得知Thorlabs公司生产的五角棱镜的顶角和底角加工误差 $\Delta\theta, \Delta\delta$ 的确定值,模拟数值是以完美五角棱镜计算的,这一设定可能会引起一定的偏离。

在实验室坐标系下,如果能直接测定五角棱镜工作面法向矢量变化值 $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$,依据式(11)、(12),就得到了滚动角、偏摆角与五角棱镜光学平行差的数值关系,也就得到了五角棱镜在实际测量工作的转动误差。如果不能直接测定 $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$,通过间接测量转角 $d\varphi$ 的方法,利用式(13)、(14)间接转化成 $d\alpha_i$ 和 $d\gamma_i$,同样可以求解出五角棱镜的光学平行差。上述结论提供了一种新的标定方法,如果应用于五角棱镜实际工作中,可以最大限度地降低由于加工误差和转动误差带来的对测量准确度的影响,从而提升整个系统的准确度。

4 结论

本文利用矩阵光学方法,得到五角棱镜两种光学平行差的解析表达式。分析五角棱镜工作面法向矢量与实验室坐标系夹角的变化,以及实验验证,证明了滚动角和偏摆角的变化等效于五角棱镜光学平行差的变化。上述方法将加工误差、实际测量角度偏转结合研究,提供了一种新的标定思路。这一结论有助于提升五角棱镜的加工准确度、系统标定准确度,从而提高了高准确度面形光学检测的整体准确度。

参考文献

- [1] 毛文炜. 光学工程基础(一)[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. 5:90-92,117-120.
- [2] MA Dong-mei, LIU Zhi-xiang, 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**(12):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**(12):2517-2523.
- [3] GECKELER R D. Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(1): 115-125.
- [4] BARBER S K, GECKELER R D, YASHCHUK V V, *et al.* Optimal alignment of mirror-based pentaprisms for scanning deflectometric devices[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(7): 073602-1-073602-8.
- [5] LIU Zhao-dong, YU Li-na, HAN Zhi-gang, *et al.* Measurement of the wavefront collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 1082-1087. 刘兆栋,于丽娜,韩志刚,等. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4):1082-1087.
- [6] CHEN Li-wu, ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, *et al.* The analysis of the relationship between angle tolerance of sagnac prism and the spectrum differentiation of the interferometer spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1022-1027. 陈立武,赵葆常,杨建峰,等. Sagnac棱镜角公差与干涉光谱仪光谱分辨率的关系分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7):1022-1027.
- [7] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, 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): 616-622. 匡萃方,冯其波,刘斌,等. 五角棱镜制造角差及抖动对其偏转角的影响[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5):616-622.
- [8] CHANG Shan, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan. Effect of processed angle error of pentagonal prism on front wave measurement[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(5): 24-28. 常山,曹益平,陈永权. 五角棱镜的角度制造误差对波前测量的影响[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(5):24-28.
- [9] LIU Hong-zhan. ABCD matrix for parabolic lens of revolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2303-2306. 刘宏展. 旋转抛物透镜的ABCD矩阵[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12):2303-2306.
- [10] LU Jin-jun, SUN Xue-ping, LI Xiang-yang. Characteristics of schmidt prism under the effect of polarization and diffraction of ridge[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 949-955. 卢进军,孙雪平,李向阳. 偏振和衍射双重效应影响的Schmidt棱镜特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8):949-955.
- [11] MAO Wen-wei. Distortion and image lean of prism with second parallelism [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 1999, **39**(4): 46-48. 毛文炜. 棱镜第二光学平行度所致的畸变与像倾斜[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, **39**(4):46-48.