

## 高精度长焦距测量系统反射镜安装误差分析

王涌鹏, 罗佳, 白剑, 梁宜勇

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 大口径长焦距测量系统中, 为了缩小测量系统的尺寸, 加入两块反射镜形成折返光路。折返光路中两块反射镜的安装误差是影响测量结果的重要因素。将条纹理解成条纹成像面上的点光源阵列, 通过这一思路分析了反射镜偏转角度对最终检测结果的影响。研究了反射镜偏转角度与反射镜单位法向量的计算公式, 结合反射定律的矩阵形式, 求出入射光矢量到出射光矢量的变换矩阵。基于反射镜的单位法向量、出射光的方向向量, 利用解析几何得到理想接收屏上条纹所在直线的方程, 求出接收屏上测得的条纹的角度。计算了两块反射镜小角度旋转的 49 种组合情况下, 莫尔条纹角度的偏差结果。使用自准直仪分光路的方法调整反射镜, 将反射镜安装误差控制在 1" 以内, 莫尔条纹角度的偏差在  $10^{-4}$  数量级。通过实验验证莫尔条纹的测量精度实际达到  $0.005^\circ$ , 充分说明了反射镜的调整效果。

**关键词:** 光学测量; 莫尔条纹角度偏差; 反射率的矩阵形式; 安装误差; 长焦距  
**中图分类号:** TH741      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0562-07

## Analysis on mirrors installation error of high-accuracy long focal length measurement system

Wang Yongpeng, Luo Jia, Bai Jian, Liang Yiyong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** As to minimize size of the measurement system of large size and ultra-long focal length lens, two mirrors are used to change light path. In this case, installation error of the two mirrors added may be a large obstacle to accurate measurement of ultra-long focal length lens. For the sake of analyzing how installation error of two mirrors infect the angle of Moiré stripes on receiver, Moiré stripes are understood as parallel lines which composed of point light source with certain light-path vector. This approach proposed uses the calculation formula from mirror deflection angle to the reflector unit normal vector, and the matrix form of the law of reflection, to calculate the relationship matrix from vector of incident light to vector of exit light. Based on unit normal vector of two mirrors, incident light-path vector, exit light-path vector, and analytic geometry, equation of line on which image of point light source place can be presented, so we can get the angle of Moiré stripes on receiver and so is the angle error caused by installation error of the two mirrors added into light path. In addition, the angle error of Moiré stripes is calculated theoretically in 49 different situations of small mirrors deflection smaller than 1 degree. The

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-07-23

作者简介: 王涌鹏(1987-), 男, 硕士生, 主要从事光学检测方面的研究。Email: zju21130085@gmail.com

导师简介: 白剑(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。Email: bai@zju.edu.cn

results indicate that the installation error of the two mirrors should be taken into consideration. A new method by using autocollimator to adjust the installation error of the two mirrors is proposed, installation error of the two mirrors can be controlled to lower than  $1''$  through this method. Moiré stripes angle error should be better than  $(10^{-4})$  order of magnitude in this situation. Experimental results show that Moiré stripes angle measurement error is 0.005 degree, which fully illustrates the effect of mirrors adjustment when this system is used for the measurement of ultra-long focal length.

**Key words:** optical measurement; Moiré stripes angle error; law of reflection in matrix form; installation error; long focal length

## 0 引言

焦距大于 10 m 的大口径长焦距透镜在大型大功率激光系统中具有重要作用,如国内惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器、美国国家点火装置(NIF)等。我国的神光 III 系统中仅 400 mm×500 mm 以上的各类口径光学组件就有 8 000 件。焦距是透镜最重要的参数之一,测量长焦距的方法有很多种,基于 Ronchi 光栅和 Talbot 效应的长焦距测量方法是一种测量大口径长焦距透镜焦距的有效方法<sup>[1-2]</sup>。通过对 Ronchi 光栅的泰伯像与 Ronchi 光栅所产生的莫尔条纹角度的计量来测量长焦距。莫尔条纹角度的测量误差引起的焦距误差占整个误差的 90%。用 1 024×1 024 的 CCD 相机获取的莫尔条纹通过傅里叶变换等方法后,测量精确度极限能达到  $10^{-3\circ}$  数量级<sup>[3]</sup>。

用发散光作为光源测量大口径长焦距透镜时,莫尔条纹图像面积很大,为了获得均匀图像,CCD 相机的视场角要小一些,为了获得全口径图像,CCD 相机与莫尔条纹面之间的距离约为 4 m。为了缩小测量系统的尺寸,需要加入两块反射镜形成折返光路。高精度大口径长焦距测量系统为保证 0.005% 的测量精度,莫尔条纹角度的测量精度要高于  $0.02^\circ$ 。

反射镜的加入将对莫尔条纹角度的精确测量带来一定影响,需要对其安装误差的影响进行评估和消除。计算机仿真技术使复杂场景模拟成为可能<sup>[4-5]</sup>。近年来计算机仿真技术被引入反射光路,可以分析两个反射镜之间的空间位置关系,为指导装调提供理论依据,取得很好的效果<sup>[6]</sup>。相机自定标通过图像处理的方法得到二维图像与世界坐标的映射关系矩阵,可以从软件上对图像进行校正<sup>[7]</sup>。为了分析折返光路中反射镜的安装误差是否会对条纹角度

的测量产生影响,文中研究了反射定律的矩阵计算、反射镜偏转角度与反射镜单位法向量的计算公式,用点光源阵列模拟条纹进行分析,导出了由反射镜偏转角度到条纹角度偏差的计算方法,定量评估了反射镜安装误差对莫尔条纹角度测量的影响。并采用自准直仪分光路的方法对折返光路中两块反射镜进行调整,安装误差控制在  $1''$  以内,对莫尔条纹的影响在  $10^{-4\circ}$  数量级,超越了计算机条纹角度计算精度,从而排除了反射镜安装误差的影响。

## 1 原理

毛玻璃上的莫尔条纹可以看作是平行的线光源。为了分析折返光路中反射镜的安装误差是否会对条纹角度测量产生影响,采用在一条直线上的点光源阵列模拟一条条纹,结合空间坐标变换公式求出平面旋转后的单位法向量,用矩阵形式的反射定律求解出射光的方向向量,再用平面几何方法求出点光源阵列在理想接收面上的直线方程,可以得到直线与坐标轴的夹角,以此求出条纹在接收面上的角度。原理如图 1 所示。

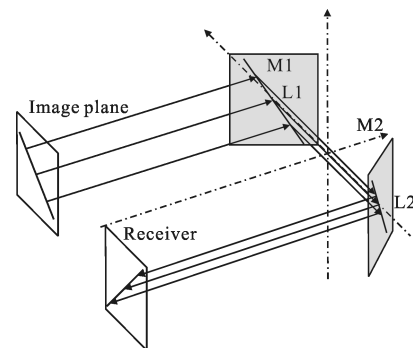


图 1 原理图

Fig.1 Schematic diagram

### 1.1 反射定律的矩阵形式

设  $\vec{A}$ 、 $\vec{A}'$  和  $\vec{N}$  分别为入射光矢量、反射光矢量和法线单位矢量。则由几何关系有

$$\vec{A}' = \vec{A} - 2\vec{N}(\vec{N} \cdot \vec{A}) \quad (1)$$

这就是反射定律的矢量表达形式<sup>[6]</sup>。

矢量形式的反射定律物理意义清晰,但不便于计算。若一平行光束在  $x, y, z$  直角坐标系中的矢量为:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k} \\ \vec{A}' &= A_x' \vec{i} + A_y' \vec{j} + A_z' \vec{k} \\ \vec{N} &= N_x \vec{i} + N_y \vec{j} + N_z \vec{k} \end{aligned}$$

代入公式(1)并转换成矩阵表达式<sup>[9]</sup>, 即有

$$\begin{bmatrix} A_x' \\ A_y' \\ A_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_y N_x & -2N_z N_x \\ -2N_x N_y & 1-2N_y^2 & -2N_z N_y \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

为书写简化, 令

$$\gamma = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_y N_x & -2N_z N_x \\ -2N_x N_y & 1-2N_y^2 & -2N_z N_y \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix}$$

则公式(2)可简化为

$$\vec{A}' = \gamma \vec{A} \quad (3)$$

$\gamma$  取决于反射面的单位法向量  $\vec{N}$ , 如果系统的反射面有  $k$  个, 有

$$\vec{A}_k' = \left( \prod_{j=1}^k \gamma_j \right) \vec{A}_1 \quad (4)$$

对于复杂的折返光路, 只要给定  $\vec{A}_1$  就可以借助计算机进行连续运算而求得对应的反射光矢量  $\vec{A}_k'$ <sup>[10]</sup>。

### 1.2 反射镜偏转角度与反射镜单位法向量的关系

反射镜的空间变换可以分解为沿直角坐标系三坐标轴平移和绕直角坐标系三坐标轴旋转, 平面的旋转等效于其单位法向量的旋转, 平移不改变单位法向量, 单位法向量  $N'(x', y', z')$  可以由原单位法向量  $N(x, y, z)$  经旋转坐标变换求得。

三维空间中的旋转变换规定在右手坐标系中, 角度的正负值按右手规则确定, 即右手拇指代表旋转轴的方向, 其他四指代表旋转方向, 符合右手规则时为正, 否则为负。

(1) 绕  $x$  轴旋转  $\alpha$  角

坐标变换表达式为:

$$x' = x \quad y' = y \cos \alpha - z \sin \alpha \quad z' = y \sin \alpha + z \cos \alpha \quad (5)$$

(2) 绕  $y$  轴旋转  $\beta$  角

坐标变换表达式为:

$$x' = x \cos \beta + z \sin \beta \quad y' = y \quad z' = -x \sin \beta + z \cos \beta \quad (6)$$

(3) 绕  $z$  轴旋转  $\gamma$  角

坐标变换表达式为:

$$x' = x \cos \gamma - y \sin \gamma \quad y' = y \sin \gamma + x \cos \gamma \quad z' = z \quad (7)$$

反射镜单位法向量可以由以上 3 组旋转变换公式求得。

### 1.3 平面镜旋转时入射光到出射光的变换矩阵求解

入射光线光轴为  $z$  轴正向, 反射镜 M1 的单位法向量为  $(\cos 135^\circ, \cos 90^\circ, \cos 135^\circ)$ , 反射镜 M2 的单位法向量为  $(\cos 45^\circ, \cos 90^\circ, \cos 135^\circ)$ , 接收屏垂直于  $z$  轴放置。光路如图 2 所示。

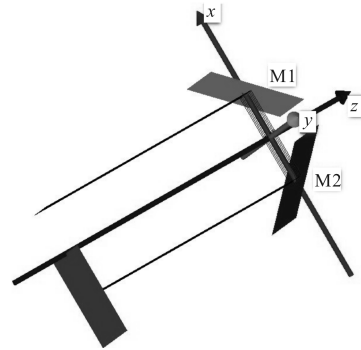


图 2 理想折返光路图

Fig.2 Ideal light path

入射光矢  $\vec{A}_1$  为  $(0, 0, 1)$ , 由公式(4)得出射光矢  $\vec{A}'$  为:

$$\begin{bmatrix} A_x' \\ A_y' \\ A_z' \end{bmatrix} = \gamma_2 \gamma_1 \vec{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

入射光经理想折返光路, 出射光与入射光平行, 矢量方向相反。

若入射光矢量仍为  $\vec{A}_1 (0, 0, 1)$ , M1 的单位法向量  $(\cos 135^\circ, \cos 90^\circ, \cos 135^\circ)$  绕  $x$  轴旋转  $10^\circ$ , 由公式(5)可得 M1 的单位法向量变为:

$$N_1' = \left( -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 10^\circ, -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos 10^\circ \right)$$

M2 的单位法向量  $(\cos 135^\circ, \cos 90^\circ, \cos 135^\circ)$  绕  $z$  轴旋转  $10^\circ$ , 由公式(7)可得 M2 的单位法向量变为:

$$N_2' = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \cos 10^\circ, \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 10^\circ, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

由公式(4)可得出射光单位法向量

$$\vec{A}_2' = \gamma_2' \gamma_1' \vec{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.03015 & -0.17101 & 0.98481 \\ -0.17101 & 0.96985 & 0.17365 \\ 0.98481 & 0.17365 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.02924 \\ 0.33950 \\ -0.94015 \end{bmatrix}$$

出射光单位法向量为  $\vec{A}_2'(-0.02924, 0.33950, -0.94015)$ 。因此,可以通过反射镜旋转角度计算反射镜的单位法向量,结合反射律的矩阵形式计算出入射光矢量到出射光矢量的变换矩阵。

### 1.4 反射镜偏转角度对被测条纹角度的影响计算

高精度大口径长焦距测量系统中,一般将条纹角度调至与坐标轴成  $\alpha=45^\circ$ ,如图3所示。

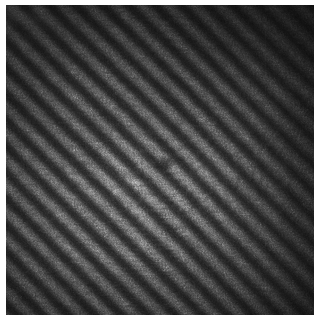


图3 莫尔条纹图像  
Fig.3 Moiré stripes

用分布在  $z=-20$  平面与平面  $\frac{1}{\sqrt{2}}(X-20)+\frac{1}{\sqrt{2}}Y=0$  相交直线上的11个点光源组成的点列替代长焦距系统中毛玻璃上的条纹图像,在  $x=-20$  平面上的分布如图4所示,点光源的方向向量为  $(0,0,1)$ 。

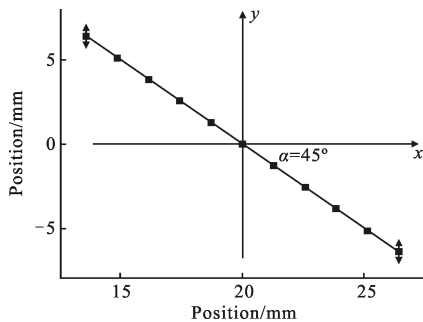


图4 光源点列  
Fig.4 Point light source in a line

光线与 M1 的交点在平面  $\frac{1}{\sqrt{2}}(X-20)+\frac{1}{\sqrt{2}}Y=0$  与 M1 的交线上。绕  $x$  轴旋转  $\alpha_1$  度后, M1 的平面方程为  $-\frac{1}{\sqrt{2}}(X-20)+\frac{1}{\sqrt{2}}\sin\alpha_1 \times Y - \frac{1}{\sqrt{2}}\cos\alpha_1 \times Z=0$ ,可以求得交线  $l_1$  的方程为:

$$\frac{x-20}{-1} = \frac{y}{1} = \frac{z}{\frac{\sin\alpha_1+1}{\cos\alpha_1}}$$

直线向量为  $(-1, 1, \frac{\sin\alpha_1+1}{\cos\alpha_1})$ ,若取  $\alpha_1=10^\circ$ ,则直线  $l_1$  的向量为  $(-1, 1, \frac{\sin 10^\circ+1}{\cos 10^\circ})$ 。由公式(3)求得反射镜 M1 的出射光线单位法向量  $A_1' = (-0.98481, 0.17101, 0.03015)$ ,结合交线  $l_1$  经过点  $(20, 0, 0)$ 。可以求出 M1 出射光所在平面的方程为:

$$0.1737x + 1.1435y - 0.8138z - 3.4730 = 0$$

光线与 M2 的交点在该平面与 M2 的交线上。绕  $z$  轴旋转  $\gamma$  度后, M2 的平面方程为  $\frac{1}{\sqrt{2}}\cos\gamma \times (x+20) + \frac{1}{\sqrt{2}}\sin\gamma \times y - \frac{1}{\sqrt{2}}z = 0$ 。若  $\gamma$  取  $10^\circ$ , M2 的平面方程为  $\frac{1}{\sqrt{2}}\cos 10^\circ \times (x+20) + \frac{1}{\sqrt{2}}\sin 10^\circ \times y - \frac{1}{\sqrt{2}}z = 0$ 。可以求得交线  $l_2$  的方程为:

$$\frac{x+19.9811}{-1.0022} = \frac{y-6.94265}{-0.6277} = \frac{z-1.22418}{-1.0960}$$

直线方向向量为  $(-1.0022, -0.6277, -1.0960)$ , M2 出射光方向矢量为  $(-0.02924, 0.33950, -0.94015)$ ,结合交线经过点  $(-19.9811, 6.94265, 1.22418)$ 。可以求出 M2 出射光所在平面的方程为:

$$-0.9622x + 0.9102y + 0.3586z - 25.9846 = 0$$

该平面与接收屏的交线表示 CCD 接收面上的条纹。11 点光源在接收屏上成像的点列表征接收到的条纹,如图5所示,点列所在的直线与  $x$  轴所成的角度表征条纹与  $x$  轴的夹角  $\alpha'$ 。

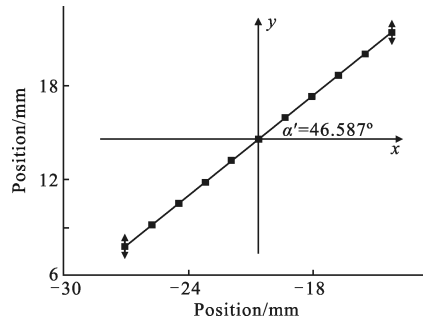


图5 接收屏上的点列  
Fig.5 Point image on receiver

条纹角度与接收屏位置  $z$  无关,与平面方程  $x, y$  项的系数有关。

$$\text{条纹与 } x \text{ 轴的夹角 } \alpha' \text{ 的正切值 } \tan \alpha' = \frac{0.9622}{0.9102} =$$

1.057,  $\alpha' = 46.587^\circ$

测量角度  $\alpha'$  与条纹实际角度  $\alpha$  偏差  $1.587^\circ$ 。

## 2 反射镜安装误差引起的莫尔条纹角度测量偏差计算结果

大口径长焦距测量系统折返光路中,采用可调镜框装夹反射镜,安装精度在  $1^\circ$  以内。若控制 M1 和 M2 的旋转轴与旋转量,分别选择反射镜 M1 不旋转、绕  $x$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $y$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $z$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ ,反射镜也分别选择 M2 不旋转、绕  $x$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $y$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $z$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ ,每个反射镜每次只转一次。组合后,可能的情况有 49 种,分别以反射镜 M1 不旋转、M1 绕  $x$  轴旋转  $1^\circ$ 、M1 绕  $x$  轴旋转  $-1^\circ$ 、M1 绕  $y$  轴旋转  $1^\circ$ 、M1 绕  $y$  轴旋转  $-1^\circ$ 、M1 绕  $z$  轴旋转  $1^\circ$ 、M1 绕  $z$  轴旋转  $-1^\circ$ ,为依据分为 7 组,表 1 至表 7 分别显示了每组 M1 在固定转角的前提下,M2 不旋转、绕  $x$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $y$  轴旋转  $\pm 1^\circ$ 、绕  $z$  轴旋转  $\pm 1^\circ$  7 种情况下, $\alpha$  角的偏差值。M1( $\alpha, \beta, \gamma$ )表示 M1 绕  $x$  轴旋转  $\alpha^\circ$ ,绕  $y$  轴旋转  $\beta$  度,绕  $z$  轴旋转  $\gamma$  度。

表 1 M1 不旋转, M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.1 Moiré stripes angle error while M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	0	1.005	-0.997	-0.017	-0.017	1.005	-0.997

表 2 M1 绕  $x$  轴旋转  $1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.2 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $1^\circ$  around  $x$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	-0.997	0.017	-2.001	-1.029	-0.994	0.017	-2.001

表 3 M1 绕  $x$  轴旋转  $-1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.3 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $-1^\circ$  around  $x$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	1.005	2.001	0.017	1.005	0.969	2.001	0.017

表 4 M1 绕  $y$  轴旋转  $1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.4 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $1^\circ$  around  $y$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	-0.017	0.969	-0.997	0	-0.069	0.969	-0.997

表 5 M1 绕  $y$  轴旋转  $-1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.5 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $-1^\circ$  around  $y$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	-0.017	1.005	-1.029	-0.069	0	1.005	-1.029

表 6 M1 绕  $z$  轴旋转  $1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.6 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $1^\circ$  around  $z$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	1.005	2.001	0.017	1.005	0.972	2.001	0.017

表 7 M1 绕  $z$  轴旋转  $-1^\circ$ , M2 不同旋转变换, 条纹角度  $\alpha$  的偏差

Tab.7 Moiré stripes angle error while M1 rotate  $-1^\circ$  around  $z$ -axis and M2 in different rotation situation

M2/(°)	(0,0,0)	(1,0,0)	(-1,0,0)	(0,1,0)	(0,-1,0)	(0,0,1)	(0,0,-1)
$\Delta\alpha$ (°)	-0.997	0.017	-2.001	-1.032	-0.994	0.017	-2.001



M1 不旋转,条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $1.005^\circ$ ;

M1 绕  $x$  轴旋转  $1^\circ$ , 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $-2.001^\circ$ ;

M1 绕  $x$  轴旋转  $-1^\circ$ , 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $2.001^\circ$ ;

M1 绕  $y$  轴旋转  $1$  度, 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $-0.997^\circ$ ;

M1 绕  $y$  轴旋转  $-1^\circ$ , 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $1.005^\circ$ ;

M1 绕  $z$  轴旋转  $1^\circ$ , 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $2.001^\circ$ ;

M1 绕  $z$  轴旋转  $-1$  度, 条纹角度  $\alpha$  的偏差最大为  $-2.001^\circ$ ;

综合以上几类情况,反光 M1 和 M2 的角度偏差对被测条纹的角度有一定影响,与  $45^\circ$  的标准值的相对误差最大为 4.45%。因此,在采用折返光路测量条纹的角度是要予以考虑。

使用精度为  $1''$  的自准直仪调整安装误差,可以将安装误差控制在  $1''$  以内,调整光路如图 6 所示。

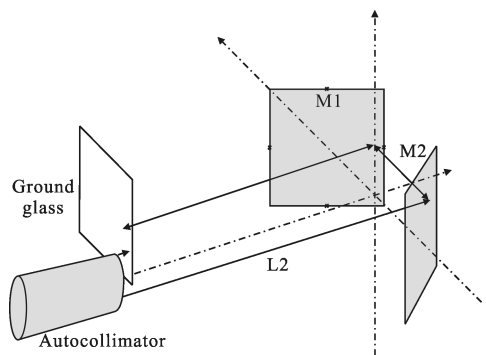


图 6 自准直仪调整反射镜光路图

Fig.6 Optical path diagram of adjusting mirrors by autocollimator

用自准直仪分光路方法校正反射镜安装误差。自准直仪出射光一部分被毛玻璃前表面反射会自准直仪形成一个自准直像,另一部分经过反射镜 M2、M1,被毛玻璃后表面反射后再经 M1、M2 反射回自准直仪形成另一个自准直像,调整 M1、M2 直至两自准直像重合,安装误差在  $1''$  以内。经计算,对莫尔条纹角度的影响最大为  $5.7 \times 10^{-4}$ ,而莫尔条纹计算精度为  $0.001^\circ$ ,排除了反射镜安装误差的影响。

### 3 实验验证

使用高精度摆台验证反射镜调整效果,验证原

理如图 7 和图 8 所示。

将毛玻璃夹持件固定在高精度摆台上,用自准直仪调整好反光镜。CCD 获取莫尔条纹图像后,由计算机软件计算得到莫尔条纹角度。用 Zemax 软件仿真出理想的莫尔条纹,将图打印贴在毛玻璃上,即与实际莫尔条纹同一平面(如图 7 所示)。控制摆台每次转动  $0.3^\circ$ ,软件计算得到理想莫尔条纹图像的转动角度  $\alpha$ ,同时得到摆台转动的实际角度,二者相比较,可验证莫尔条纹计算精度(如图 8 所示)。验证结果如表 8 所示,20 组数据均值为  $0.299^\circ$ ,最大偏差为  $0.005^\circ$ 。因此,莫尔条纹角度的测量精度达到  $0.005^\circ$ ,远高于  $0.02^\circ$  的高精度长焦距测量系统对莫尔条纹角度测量精度要求。

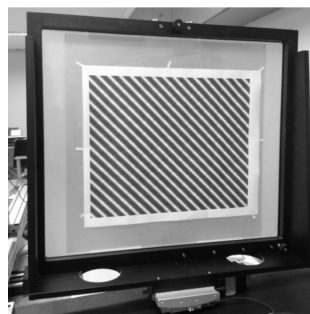


图 7 仿真莫尔条纹图

Fig.7 Simulation of Moiré stripes

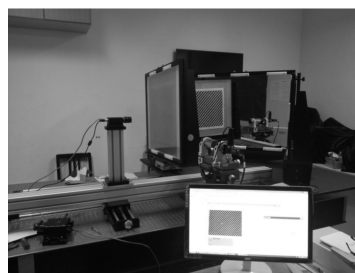


图 8 莫尔条纹计算系统

Fig.8 Moiré stripes calculation system

表 8 莫尔条纹转动角度

Tab.8 Moiré stripes rotation angle

Rotation angle of rotary table/( $^\circ$ )	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Rotation angle of Moiré stripes/( $^\circ$ )	0.302	0.299	0.299	0.297	0.302	0.295	0.300
Rotation angle of rotary table/( $^\circ$ )	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Rotation angle of Moiré stripes/( $^\circ$ )	0.299	0.301	0.300	0.297	0.300	0.299	0.296

## 4 结 论

文中基于反射率的矢量表达和矩阵形式, 结合反射镜旋转角度和反射镜单位法向量的换算公式, 给出了反射镜存在偏转角度的情况下入射光矢量到出射光矢量的变换矩阵。通过用点光源阵列模拟条纹图像这一思路, 用解析几何相交平面求直线方程的方法, 得到了反射镜存在偏转角度的情况下, 接收屏上, 出射光条纹与坐标轴的角度计算方法。

文中的分析计算结果表明, 折返光路中反射镜角度偏差对条纹角度测量结果的影响可以通过反射定律的矩阵形式, 反射镜单位法向量与反射镜的偏转角度的换算公式和平面几何方法定量求出。折返光路中反射镜大角度的偏转会对条纹角度的测量产生一定影响, 使用折返光路时要予以考虑。利用自准直仪分光路的方法调整反射镜, 可以控制安装误差在很小的范围, 在计算机条纹角度计算精度以内, 从而排除了反射镜安装误差的影响。通过高精度转台和 Zemax 仿真莫尔条纹图模拟莫尔条纹的角度变化, CCD 采集莫尔条纹, 软件计算莫尔条纹的转角进行对比验证, 莫尔条纹的测量精度实际达到  $0.005^\circ$ , 充分说明了反光镜安装误差分析以及调整的有益效果。

### 参考文献:

- [1] Jin Xiaorong, Zhang Jinchun, Bai Jian, et al. Calibration method for high-accuracy measurement of long focal length with Talbot interferometry[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13): 2407-2413. (in Chinese)
- [2] Zhao W, Sun R, Qiu L, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20051-20062.
- [3] Sun Chen, Shen Yibing, Bai Jian, et al. The precision limit analysis of long focal length testing based on talbot effect of ronchi grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33 (10): 1214-1217. (in Chinese)
- 孙琛, 沈亦兵, 白剑, 等. Ronchi 光栅 Talbot 效应长焦距测量的准确度极限研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(10): 1214-1217.
- [4] Xu Chuangang, Song Liqun. Design and realization of infrared complicated scene simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 241-242, 252. (in Chinese)
- 徐传刚, 宋利权. 红外复杂场景仿真系统的设计与实现. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 241-242, 252.
- [5] Wu Yaping, Zhang Tianxu. Simulation of infrared image and the simulation software[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 1-3. (in Chinese)
- 吴亚平, 张天序. 红外图像的计算机仿真及仿真软件[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(4): 1-3.
- [6] Shi Yali, Gao Yunguo, Deng Weijie. Model for computer-aided alignment of reflective optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 427-430. (in Chinese)
- 史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 反射光路的计算机辅助装调模型[J]. *激光与红外*, 2009, 39(4): 427-430.
- [7] Faugras O, Luong Q, Maybank S. Camera selfcalibration: theory and experiments[C]//ECCV, 1992: 321-334.
- [8] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 6-7. (in Chinese)
- 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·相差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 6-7.
- [9] Yang Guoguang. Modern Optical Measurement Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997: 85-86. (in Chinese)
- 杨国光. 近代光学测试技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 85-86.
- [10] Ou Jiaming, Wang Ruili, Zhang Shulian, et al. Three forms of expression about reflection law [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2000, 20(1): 57-61. (in Chinese)
- 欧家鸣, 王瑞丽, 张书练, 等. 反射定律的三种表达形式 [J]. *云南师范大学学报*, 2000, 20(1): 57-61.