

文章编号 1004-924X(2007)11-1712-09

基于像差修正的同轴度测量方法

吴国俊^{1,2}, 闫亚东^{1,2}, 仓玉萍^{1,2}, 吴玲玲^{1,2}, 陈良益¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了实现在同轴度测量中平行偏差(平偏)和倾斜偏差(角偏)两个量的同时测量,建立了基于激光准直性的光斑接收系统。该系统由接收物镜、分光棱镜和 CCD 构成。以物镜光轴、准直光束几何中心线和两个 CCD 接收面构成的三角关系进行两个偏差量的计算;并通过对系统像差的分析,提出了显著降低物镜像差对测量结果影响的算法。理论和实验数据表明,对于平偏测量范围为 ± 10 mm、角偏测量范围为 $\pm 2^\circ$ 、接收物镜焦距为 50 mm、CCD 尺寸为 1.6 cm 的系统,平偏测量精度可达 0.02 mm,角偏测量精度可达 9.5"。因此,该系统可以满足较大范围内的旋转机械同轴度测量的需要。

关键词:激光准直;接收物镜;光线追迹;平行偏差(平偏);倾斜偏差(角偏)

中图分类号:TH741;TN247 文献标识码:A

Coaxiality measurement method based on revising aberration

WU Guo-jun^{1,2}, YAN Ya-dong^{1,2}, CANG Yu-ping^{1,2}, WU Ling-ling^{1,2}, CHEN Liang-yi¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to realize synthetic coaxiality measurement for position deviations and angle deviations simultaneously, a laser beam-spot receiver system consisting of a receiver lens, beam splitter prisms, and CCD based on laser collimation was established. The triangular relationship among the lens optical axis, laser beam axis, and CCD was used to calculate those two deviations. In addition, a calculation method for obviously reducing the effect of lens' error on optical aberration was presented. The theoretical and experimental data indicate that, for a system with position measurement range of ± 10 mm, angle measurement range of $\pm 2^\circ$, the receiver lens' focal length of 50 mm, and the CCD's size is 1.6 cm, the position measurement accuracy is 0.02 mm and the angle measurement accuracy is 9.5". As a result, this system can meet the requirement of coaxiality measurement in lots of mechanical devices.

Key words: laser collimation; receiver lens; ray trace; position deviation; angle deviation

1 引言

同轴度测量技术也称轴对中技术,主要用于测量大型旋转机械两联结轴轴线的平行偏差(平偏)和倾斜偏差(角偏)。机械加工、电力、石化、航空等行业的众多设备都离不开使用旋转机械,这些机械轴系是否对中对设备正常运行有着至关重要的影响。因此在设备安装、日常维护和维修中都要进行同轴度测量^[1-3]。

在同轴度的测量中,首先必须建立测量基准。自激光问世以来,由于其方向性好,能量集中,一直被认为是同轴度测量,尤其是长距离同轴度测量的理想基准^[4]。由于激光器本身存在着温度漂移,同时激光束还要受到光线弯曲、大气抖动的影响,因此激光束的准直精度受到了很大的影响^[5-6]。为提高准直精度,克服上述影响,人们做了大量的工作,并提出了很多有效的方案,如零级衍射同心圆法、不对称位相板法、海定格非定位干涉条纹法、激光光纤准直法、温漂量反馈控制法、共路补偿法等^[7-12]。

然而,对于测量中的另一重要组成部分—光斑接收器的功能和精度问题,却并未引起足够的重视。

本文提出了一种由接收物镜、分光棱镜和 CCD 构成的光斑接收器,与其他方法相比,该接收器具有如下优点:

(1)系统可以同时测量出平偏量和角偏量。

(2)通过对光学系统的分析,提出了一种光线追迹算法,显著地降低了像差带来的测量误差。理论模拟表明,在两套光路中,光斑采集位置处(即 CCD 位置处)的像差对最终光斑计算的误差都可以限制在 $1\ \mu\text{m}$ 内。误差分析和实验数据表明,对于平偏测量范围 $D = \pm 10\ \text{mm}$ 、角偏测量范围 $\alpha_{\text{max}} = \pm 2^\circ$ 、接收物镜焦距为 $50\ \text{mm}$ 、CCD 尺寸为 $1.6\ \text{cm}$ (像素尺寸为: $7.4\ \mu\text{m} \times 7.4\ \mu\text{m}$) 的系统,平偏测量精度可达 $0.02\ \text{mm}$,角偏测量精度可达 $9.5''$ 。

(3)对误差的分析表明,在设计系统时可以轻易地做到减小测量范围以增大测量精度或适当降低精度以增加测量范围。

2 测量原理

系统利用几何光学原理进行测量。如图 1 所示,激光发射器发出一束准平行细光束,接收物镜对这束光进行偏折,并利用分光棱镜(半透半反)将光束分为两束,两个 CCD 分别位于透镜后焦面处和与后焦面相距为 t 处采集光斑,再进行相应的图像处理和计算。

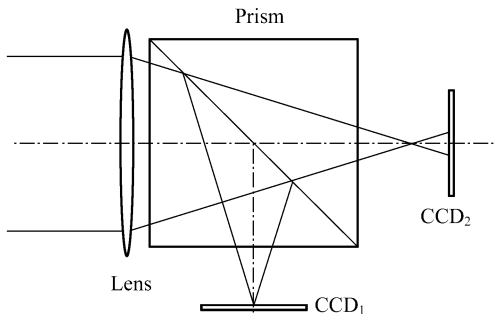


图 1 接收器示意图

Fig. 1 Sketch of the receiver

为了后续计算方便,上述光路可以等效为图 2 所示光路。利用 CCD 采集被棱镜分成两路光束的光斑等效为图 2 中只存在水平方向的一束光,CCD 先后在透镜后焦面处和与后焦面相距为 t 处采集两幅光斑图像。同时,透镜和棱镜组成的光学系统由其两个主面代替,由于后续计算不涉及两个主面之间的光路,因而又可以两个主面合并。

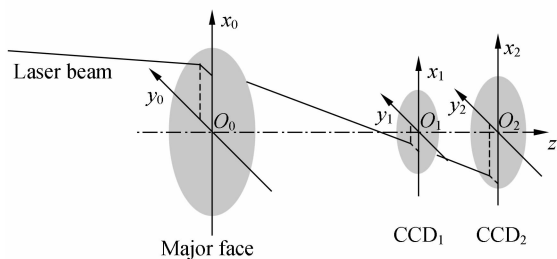


图 2 接收器等效图

Fig. 2 Equivalent sketch of receiver

实际测量的角偏量和平偏量都是二维空间矢量(如图 2 所示),这二维矢量可分解为两个一维偏差矢量。其中一维如图 3 所示,为光学系统的一个过光轴的截面(即图 2 中 x_0O_0z 面, x_1, x_2 也在这个面内),图中的光束为空间光束在此面的

投影,通过如下所述的方法,可以得到光束在 x_0 方向的一维平偏量 L' ,角偏量 α' ;另一维为垂直于该截面的另一截面(即图 2 中 y_0O_0z 面, y_1, y_2 也在这个面内)。光束在二维空间的偏差量直接通过两个分量表示。下面先描述一维矢量的测量原理。

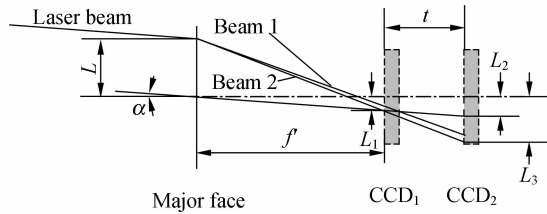


图 3 接收器一维原理图

Fig. 3 One dimension skeleton drawing of receiver

2.1 角度测量

利用处于焦面位置处的 CCD_1 所采集的光斑中心位置便可计算基准光束对应的主光线与接收物镜主光轴夹角 α ,计算公式为:

$$\alpha = \arctan \frac{L_1}{f'} \quad (1)$$

其中夹角 α 正负规定为:由光线以锐角转至与光轴(图中点划线)平行,顺时针为正,逆时针为负; L_1 (以及后述的 L, L_2, L_3)正负规定为:以光轴为基准,在光轴以上为正,在光轴以下为负。

2.2 位置测量

在角度测量后,再利用 CCD_2 采集光斑的中心位置,通过三角关系可得出:

$$L_2 = (f' + t) \tan \alpha \quad (2)$$

$$L = \frac{f'}{t} (L_2 + L_3) \quad (3)$$

2.3 消除像差对测量的方法

2.3.1 平偏量测量

像差对平偏测量的影响可以简化为两种模型

(a) 模型 1 仅存在一根光线。由于像差的存在,光线通过透镜后,将由理想的光线 1(无像差状态)变为光线 2,如图 3 所示,因此必然与焦面的交点出现在另一处。这时,以新的交点计算角度值,必然会与真实的角偏量存在偏差,但就此存在偏差的角度值代入式(3)得出的位置值则无疑与实际的平偏量完全一样。

(b) 模型 2 以细光束入射。受像差的影响,细光束中每一根光线透过透镜后都将偏离理想的光线(如(a)所述),而且几乎每一根光线的偏

离程度都不一样。然而,在细光束中一定能追迹出或定义出一条光线,如图 4 中加黑的光线,这根光线如模型 1 所示,可能会偏离理想值,但依据它利用公式(1)~(3)得出的 L 无疑就是基准光束的实际平偏量 L' 。

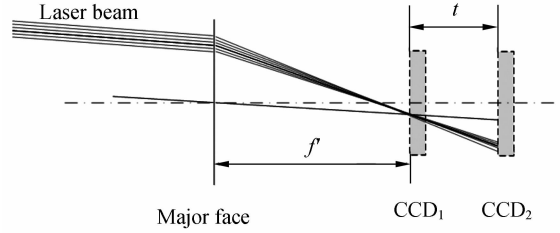


图 4 细光束模型图

Fig. 4 Illustration of a thin beam model

2.3.2 角偏量测量

光束中每一根光线都受到像差的影响,像差将导致平行光束在焦面位置汇聚为一个具有一定面积的弥散斑(以本文设计的接收物镜为例,当 x, y 方向视场角均为 2° 时,焦面弥散斑 RMS 半径 $6.06 \mu\text{m}$),但是,对于确定视场、孔径的光线,像差的影响也是确定的,因而光线经过 CCD_1 位置处的坐标也是确定的。这就表明,在有像差的光学系统中,某一光线的视场角、孔径值和 CCD_1 位置处该光线的坐标值这三个量中任意两个量构成的组合和剩余的第三个量存在一一对应关系。这样,对于设计好的透镜组,可以通过光线追迹计算得出某一视场角、孔径值的光线对应的 CCD_1 位置处坐标值,并按如下方法将这三个量组织成一个查找表: x_0 正方向上,位置在 $[0, 10 \text{ mm}]$ 内每隔 0.01 mm , x_0O_0z 面内角度在 $[-2^\circ, 2^\circ]$ 每隔 $2''$, y_0O_0z 面内角度在 $[0, 2^\circ]$ 每隔 $2''$ 计算一次对应的 CCD_1 位置处光线坐标,并将这四个量(其中视场角被分解为两个量)按照对应关系列表。由于透镜组的对称性,其他任意位置都可以采用坐标旋转的方法计算得到。实际测量中,通过平偏量的测量可得到光线孔径值,对 CCD_1 采集的光斑图像计算处理,可得到 CCD_1 位置处追迹光线坐标,再利用查找表便可得出排除像差影响的视场角,也即为角偏量 α' 。

由上述可知,只要能够在细光束中成功地追迹出一根光线,就可以准确地计算角偏量或平偏量。为了减小激光束发散角、温漂等的影响,系统

中所选用的激光束为将光束扩束后再用一个 $\Phi 2 \text{ mm}$ 圆孔光阑从中截取出的基准光束。由物理学可知基准光束的能量分布如图 5 所示。这样,可以选取基准光束的能量中心(同时也是几何中心)进行光线追迹、计算。因此,只要能够计算出基准光束几何中心(即所选取得追迹光线)经过 CCD_1 和 CCD_2 位置处的坐标,就可以进行偏差量计算。

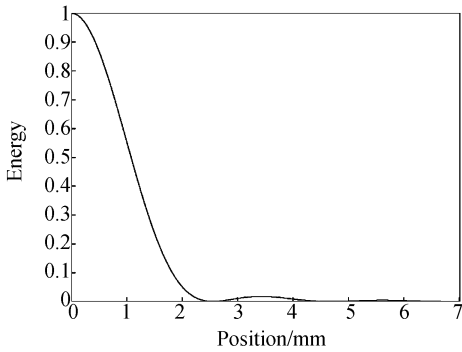


图 5 圆孔衍射一维能量图

Fig. 5 One dimension intensity distribution of circular aperture diffraction

3 系统设计

3.1 误差分析及参数计算

光学系统的参数主要由系统的测量范围和测量精度决定。

公式(1)~(3)中,只有 L_1, L_3 为使用现场测量量,其他量或者是通过这两个量计算得出,或者是系统的固定值。因此系统的精度主要由这两个量的测量误差决定。这两个量的测量误差可认为由如下两个相互独立的因素引起:

(1)透镜像差的存在必然引起光束偏离理想位置,从而引起误差;

(2)由于 L_1, L_3 为通过 CCD 测量得到,由公式(1)~(3)可知 CCD 中每个像元的积分效应必将引起测量误差。

基于上述分析,由公式(1)~(3)可得出如下误差公式:

$$\epsilon_L = \frac{f'}{t} \sqrt{\epsilon_{\text{CCD}}^2 + \left(\frac{f'+t}{f'} \cdot \epsilon_{L_1} \right)^2}, \quad (4)$$

其中:

$$\epsilon_{L_1} = \sqrt{\epsilon_{\text{CCD}}^2 + \epsilon_{\text{aber}_1}^2}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{L_2} = \sqrt{\epsilon_{\text{CCD}}^2 + \epsilon_{\text{aber}_2}^2}. \quad (6)$$

CCD 像元的积分效应无疑会引起测量误差,这里采用 CCD 亚像元技术,可以使这个误差减低至 $\epsilon_{\text{CCD}} = 1 \mu\text{m}^{[13-16]}$ 。

后面的光束追迹模拟表明 $\epsilon_{\text{aber}_1} = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon_{\text{aber}_2} = 1 \mu\text{m}$ 。

从图 2 中的几何关系可知,系统的平偏测量范围 $\pm D/2$ 、角偏测量范围 $\pm \alpha_{\text{max}}$ 、CCD 短边长 b 与 f', t 存在如下关系:

$$\frac{f'}{t} = \frac{D + 2f' \cdot \tan \alpha_{\text{max}}}{b - 2f' \cdot \tan \alpha_{\text{max}}}. \quad (7)$$

因此,在确定了平偏测量范围、平偏测量精度、角偏测量范围、CCD 尺寸后,便可通过式(6)~(7)计算出镜头焦距 f' 和间距 t 。假定参数要求为:平偏量范围为 $\pm 10 \text{ mm}$,误差 $\epsilon_L = 0.02 \text{ mm}$,角偏量范围为 $\pm 2^\circ$,选用 1.6 cm CCD (像素尺寸为: $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$)。根据公式(4)~(7)计算可得镜头焦距 f' 为 50 mm ;间距 t 为 4.9 mm 。

由于实际角偏量并不是通过公式(1)计算出,而是由平偏量和所追迹光线经过位置 1 的坐标值所确定的,因而角偏量的误差有两个来源:平偏量误差、位置 1 处光斑几何中心和所追迹光线的坐标的偏差。相对于本文所设计的透镜,这两个误差所导致的角偏量误差分别为: $8''$ 和 $5''$,这样,角偏量误差即为 $9.5''$ 。

上述公式同时表明,可以通过减小测量范围来增大测量精度,或适当降低精度以增加测量范围。

3.2 镜头设计及参数评价

由上可知光学系统的参数为:视场角 $2\omega = 4^\circ$,焦距 f' 为 50 mm ,相对孔径为 $20/50$ 。另外此处的光源为 $\lambda = 625 \text{ nm}$ 的单色光。

光学系统的设计思想是:基准光束几何中心光线在通过透镜组后到达 $\text{CCD}_1, \text{CCD}_2$ 位置处,仍然位于光斑的几何中心位置。这就要求基准光束在视场、孔径范围内的任意位置通过透镜组所产生的像差在 $\text{CCD}_1, \text{CCD}_2$ 位置处都是中心对称的。因此,光学系统需要满足如下两个要求:

(1) 光学系统首先要尽可能减小彗差,因为彗差是唯一使点列图失对称的像差。

(2) 在要求 1 的基础上还要使垂轴像差与孔径成线性关系。这样,对于无穷远一点的,在高斯

像面及其后面的任意位置处,其像斑为紧密排列的同心圆,各圆的直径与对应光线的孔径值成正比。同样对于一束直径远小于光学系统孔径的基准光束,其中的每一根光线在 CCD₁、CCD₂ 位置处的相对位置关系将与在透镜组前的相对位置关

系完全一样。

基于上述要求,从一种典型的小视场角照相机物镜出发,利用 ZEMAX 光学设计软件进行优化,得到如图 6 所示光学系统。

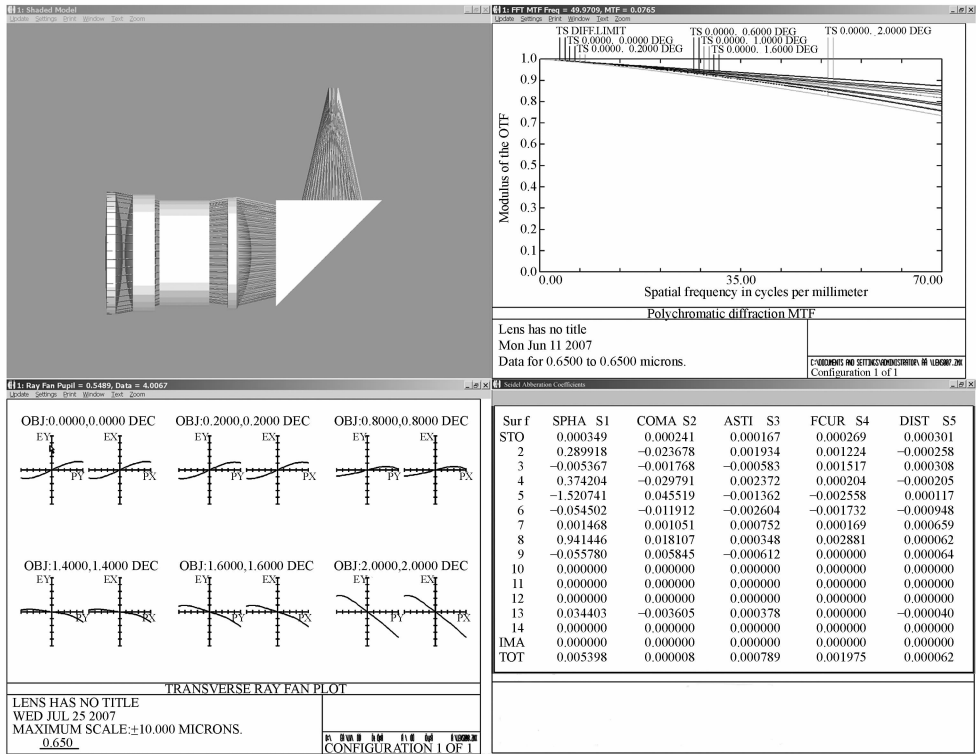
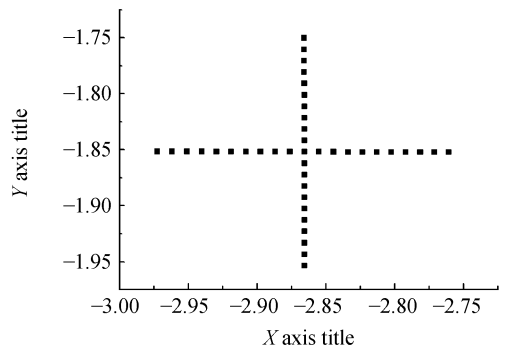


图 6 光学镜头及参数

Fig. 6 Optical lens and its parameters

3.3 追迹光线在 CCD₁、CCD₂ 位置处坐标的计算

由上述镜头参数可知,对于直径为 2 mm 的基准光束,当视场、孔径均为测量极限时,像差对测量结果的影响最大。这里以基准光束几何中心刚好与 x_0 轴相交,且距离 O_0 点 10 mm, x_0 方向

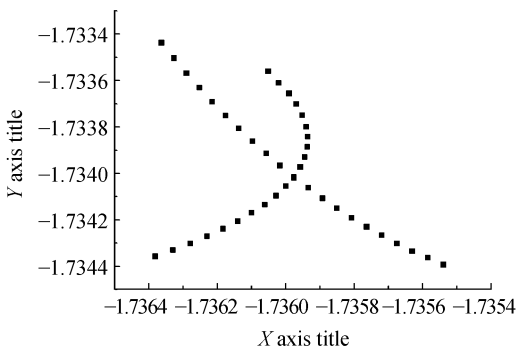


(b) CCD₂ 位置处

(b) Position of CCD₂

图 7 光线追迹坐标点图(单位: mm)

Fig. 7 Coordinates of ray-trace (Unit: mm)



(a) CCD₁ 位置处

(a) Position of CCD₁

视场角分量为 -2° , y_0 方向视场角分量为 -2° 为例,过其几何中心在 $x_0O_0y_0$ 面内做一条垂直于 x_0 轴的线(这里命名为 y_0'),对光束经过轴 y_0' 和

x_0 的光线各等间隔追迹 20 条光线。各追迹光线在位置 1、位置 2 处坐标如图 7 所示。

从上述光线追迹可知,位置 1 处,光斑图像的几何中心与基准光束几何中心追迹点的位置偏差远 $< 0.5 \mu\text{m}$; 位置 2 处,光斑图像与基准光束截面非常相似,此处几何中心与基准光束几何中心追迹点的位置偏差 $< 1 \mu\text{m}$ 。因此,在进行位置偏差计算时,可以用几何中心来近似代替追迹点坐标,进行偏差量的计算。

从光线追迹很容易得出对于基准光束在其他任意视场、孔径处,上述结论都成立。

4 实 验

4.1 实验构成

单模尾纤半导体激光器、准直透镜调焦筒与 $\Phi 2.0 \text{ mm}$ 圆孔光阑一起构成光源,将接收器放在码盘上(精度为: $1''$),并将码盘放在精密平移台上(精确到 0.003 mm),如图 8 所示。

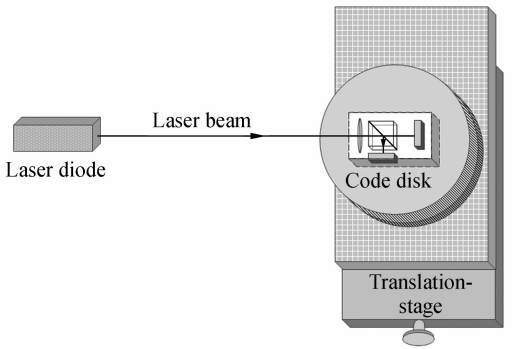


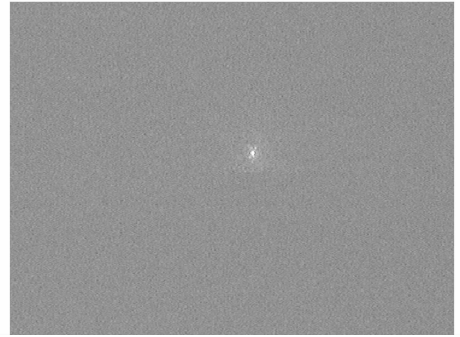
图 8 实验示意图
Fig. 8 Experiment setup

为了避免或减小激光器本身漂移以及大气抖动对精度的影响,采取以下措施:

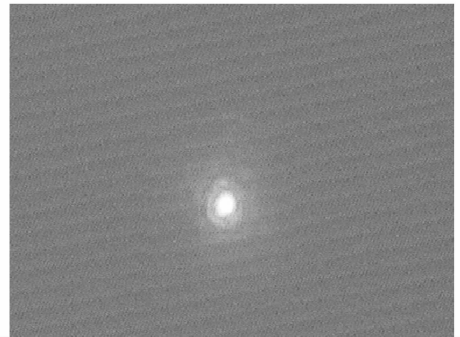
- (1)减小发射器、接收器间距,两者间距为 2 m ;
- (2)实验在常温常压的封闭环境中进行,激光器稳定出光 1 h 后进行测量实验。

4.2 实验结果

实验中一次测量得到的两幅光斑图像如图 9 所示。



(a) CCD₁



(b) CCD₂

图 9 激光光斑

Fig. 9 Laser beam spots

图 5 和图 9 均表明,中心亮斑与周围区域存在较大的灰度变化,因此可以利用亚像元超细分技术,通过灰度梯度算法检测边界,并计算几何中心。

这里将角度、位置偏差测量分成两组实验来做。第一组中只转动码盘,每隔 $30'$ 测量一次,测量数据如表 1 所示。第二组中通过转动码盘将角偏量调为零,然后只移动平移台,每隔 2 mm 测量一次,测量数据如表 2 所示(接收器中心定义为零点)。

表 1 角偏测量实验数据

Tab. 1 Experimental data of angle deviation measurements

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	
码盘	10°	10.5°	11°	11.5°	12°	12.5°	13°	13.5°	
接收器	x	$-1.956 1^\circ$	$-1.458 4^\circ$	$-0.955 3^\circ$	$-0.454 2^\circ$	$0.043 7^\circ$	$0.546 0^\circ$	$1.044 8^\circ$	$1.545 6^\circ$
	y	$0.000 4^\circ$	$0.000 2^\circ$	$-0.000 1^\circ$	$-0.000 2^\circ$	$-0.000 4^\circ$	$0.000 3^\circ$	$0.000 5^\circ$	$0.000 2^\circ$

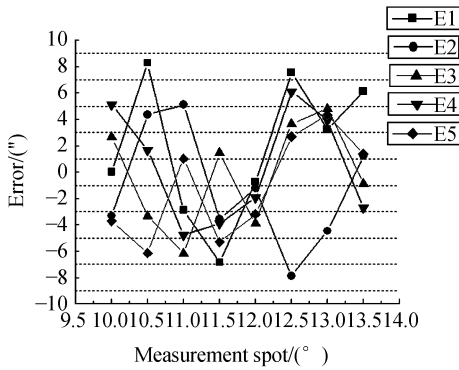
表 2 平偏测量实验数据

Tab. 2 Experimental data of position deviation measurements

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	
平移台(mm)	3.2	5.2	7.2	9.2	11.2	13.2	15.2	17.2	
接收器	x	-9.855	-7.845	-5.861	-3.868	-1.854	0.149	2.155	4.137
(mm)	y	-0.003	0.002	0.001	-0.005	-0.003	0.003	-0.006	-0.002

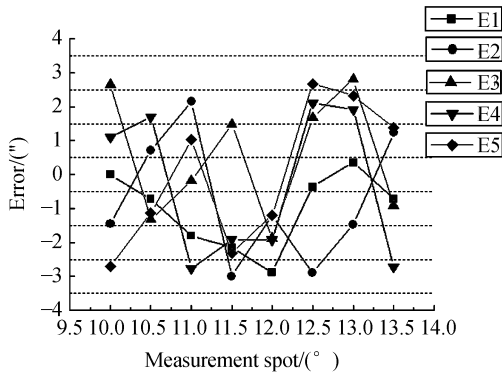
实验数据表明,光斑接收装置和相关算法可以保证测量的精度。

对上述实验,分别选取不同的时间进行了五次重复性实验,实验结果(如图 10 所示)表明测量误差的重复性比较稳定。



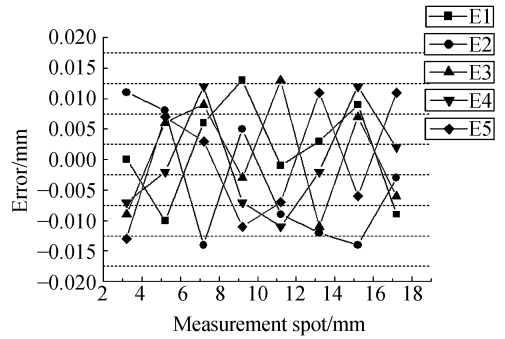
(a) 角偏测量的 x 方向重复性结果

(a) Repeatable experiment results of angle deviations in x direction



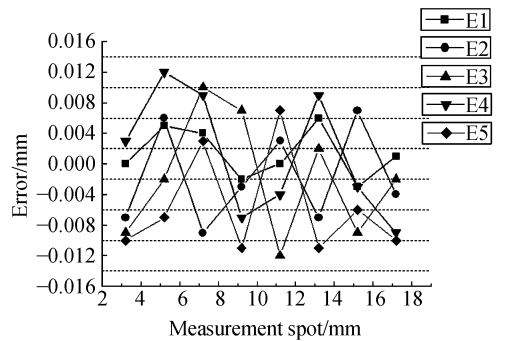
(b) 角偏测量的 y 方向重复性结果

(b) Repeatable experiment results of angle deviations in y direction



(c) 平偏测量的 x 方向重复性结果

(c) Repeatable experiment results of position deviations in x direction



(d) 平偏测量的 y 方向重复性结果

(d) Repeatable experiment results of position deviations in y direction

图 10 重复性实验 (E1, E2, ..., E5 分别代表五次测量实验)

Fig. 10 Repeatable experiment results (E1, E2, ..., E5 represent 5 measurement results respectively)

5 结 论

本文设计了一个简单的光斑接收系统来同时测量位置、角度两个偏差量。通过接收物镜和 CCD 的间距的调整,形成两套光路,并采集两幅光斑图像,再利用有关公式便可计算出两个偏差量。由于结构简单,接收器的外形尺寸具有更大的调整范围。

在光斑接收系统中引入接收物镜可以起到测量角度偏差和扩大位置偏差测量范围的作用,然而物镜自身的像差给测量带来严重的误差。实际

测量中基准光束将会出现在接收物镜的任意孔径、视场处,而光学镜头根本无法保证任意孔径、视场处像差值为零。本文保证了系统既能够测量位置、角度两个偏差量,同时通过对系统光线追迹的分析,提出了新的计算方法,将像差对光斑计算的影响降为 $1\ \mu\text{m}$ 以内。实验结果表明,文中所设计的接收器的精度为:平偏量测量精度可达 $0.02\ \text{mm}$;角偏量测量精度可达 $9.5''$ 。

另外,系统所用的算法可以容易地通过程序实现,这使得系统在实际使用中完全实现了自动测量。

参考文献:

- [1] LU N G, DEN W Y, YAN B X, *et al.*. Laser alignment system used for coaxiality measurement of large scale holes [J]. *SPIE*, 2000,4222: 383-386.
- [2] JIAO G H, LI Y L, ZHANG D B, *et al.*. A laser shaft alignment system with dual PSDs[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2006, 7(10): 1772-1776.
- [3] ZENG A J, WANG X Z, BU Y, *et al.*. Position sensor based on slit imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(9): 520-521.
- [4] EVAN D H, KULWANT S B. Laser aperture integrated with position-sensing detectors [J]. *SPIE*, 2001,4308: 25-34.
- [5] SHAIK K S. Atmospheric propagation effects relevant to optical communication[R]. *Jet Propulsion Lab., California Inst. of Tech., Pasadena.*, 1988.
- [6] 邓代竹,荣健. 大气对近地面无线激光通信链路的影响[J]. *红外与激光工程*,2004,33(3):243-247.
DENG D ZH, RONG J. Atmospheric effects on the link near the earth of optical wireless communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 243-247. (in Chinese)
- [7] 赵维谦,谭久彬,马洪文,等. 漂移量反馈控制式激光准直方法[J]. *光学学报*,2004,24(3):373-377.
ZHAO W Q, TAN J B, MA H W, *et al.*. Laser collimation method based on the drift feedback control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 373-377. (in Chinese)
- [8] FAN K C, ZHAO Y. A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques[J]. *Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(5): 2073-2081.
- [9] HOEKSTRA R, DARNAUD T E, VAN H F. Optical alignment of an X-ray collimator[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(20): 3630-3634.
- [10] 方仲彦,殷纯永,梁晋文. 高精度激光准直技术的研究[J]. *航空计测技术*,1997,17(1):3-8.
FANG ZH Y, YIN CH Y, LIANG J W. Study on high accuracy laser alignment technique[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997,17(1): 3-8. (in Chinese)
- [11] 匡萃方,冯其波,刘斌. 一种共路补偿激光漂移的直线度测量方法[J]. *光电工程*,2005,32(4):25-29.
KUANG C F, FENG Q B, LIU B. Measuring straightness method with common path compensation for laser drift [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(4), 25-29. (in Chinese)

- [12] 赵维谦,谭久彬,邱丽荣,等. 激光光束特定方向准直方法与技术[J]. 光电子·激光,2004,15(1):61-64.
ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R, *et al.*. Laser beam collimation method and technology in given beam direction [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, 15(1): 61-64. (in Chinese)
- [13] 李晓光,王兆楠,王智,等. 一种目标位置解算方法[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1076-1079.
LI X G, WANG ZH N, WANG ZH, *et al.*. Research on location compute method of object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1076-1079. (in Chinese)
- [14] 李佳列,丁国清,颜国正,等. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学精密工程,2002, 10(3): 281-284.
LI J L, DING G Q, YAN G ZH, *et al.*. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 281-284. (in Chinese)
- [15] 纪大山,柴饶军,马彩文,等. 基于 CCD 亚像元细分原理的点目标自动采样算法[J]. 计算机仿真,2005,22(8): 111-114.
JI D SH, CHAI R J, MA C W, *et al.*. An automatic points sampling algorithm based on CCD sub-pixel division [J]. *Computer Emulation*, 2005, 22(8): 111-114. (in Chinese)
- [16] 敖磊,谭久彬,崔继文,等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. 光学精密工程,2005,13(6): 668-671.
AO L, TAN J B, CUI J W, *et al.*. Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis auto-collimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 668-671. (in Chinese)

作者简介:吴国俊(1978—),男,江苏扬州人,中科院西安光学精密机械研究所在读博士,主要从事光学设计、图像处理等方面的研究。E-mail: wuguojun@opt.ac.cn

导师简介:陈良益(1941—),男,浙江义乌人,中科院西安光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事高速摄影、水下光学、光电经纬仪等方面的研究。E-mail: chenly@opt.ac.cn

(本栏目编辑 严寒)