DOI:10.11721/cqnuj20180414

基于无衍射光的三自由度误差测量方法*

别业广[1,2]，吕清花[1,2]，商逸远[1,2]，翟中生[3]，黄孝川[1,2]，成纯富[1,2]，吕　辉[1,2]

(1. 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心；2. 湖北工业大学 理学院；
3. 湖北工业大学 机械工程学院，武汉 430068)

摘要:【目的】采用轴锥镜产生无衍射光作为光源，提出了一种基于无衍射光的 3 自由度误差测量方法。【方法】测量部分由 1 面反射镜和 2 面分光镜组成，并固定于可以在 3 个自由度上转动的工作台上。工作台转动产生的 3 种角度偏差(偏摆角、俯仰角和滚转角)将造成 2 个不同位置处 CCD 接收到的光斑中心位置发生变化。【结果】通过理论分析得出了 3 种角度误差对应的变化量，并给出了模拟和实验结果。【结论】实验结果和模拟得到的理论值相一致，表明该方法能准确测量 3 自由度误差。

关键词:多自由度误差测量；无衍射光；角度误差

中图分类号:O436；TP391　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2018)04-0081-07

随着科学技术的发展，大行程超精密工作台被广泛应用于工业生产和科学研究。在工作台的工作过程中，存在来自直线度、角度等 6 个自由度的几何误差。为了提高加工精度，测量并补偿这种误差成为了精密制造领域的热点[1-2]。目前，对工作台运动误差的测量方法有多种，如基于光强重心法[3-4]和基于激光干涉法[5-6]；但这些方法都会受到激光光束漂移、传播过程中衍射的影响，使测量精确度受到限制。

无衍射光由 Durnin 首次提出[7-9]。它具有径向光强分布不随传播距离变化的特点，因此抗干扰能力强，在光电瞄准跟踪、测量物体表面形貌及多自由度运动误差等方面有着重要的应用前景[10-12]。文献[13]还指出了 2 束无衍射光产生的干涉条纹对中心距的变化十分敏感。本研究提出了一种基于无衍射光的三自由度测量方法，该方法能够对工作台三自由度误差(偏摆角、俯仰角和滚转角)进行准确测量。

1 测量理论

1.1 测量方案

如图 1 所示，He-Ne 激光器发出的激光经准直扩束镜后入射到轴锥镜中产生无衍射光，到达分光镜 1 后分成两束：一束经反射镜 1、半透半反镜和分光镜 2 后被 CCD1 接收；另一束光经半透半反镜后，将和由分光镜 1 透过的另一束光共同入射到 CCD2 并干涉形成莫尔条纹。

轴锥镜因具有稳定的线焦特性，常作为无衍射光产生元件，它产生的无衍射光束横截面光强分布服从第一类零阶贝塞尔函数形式[12]。图 2 给出了两处 CCD 中的模拟现象。

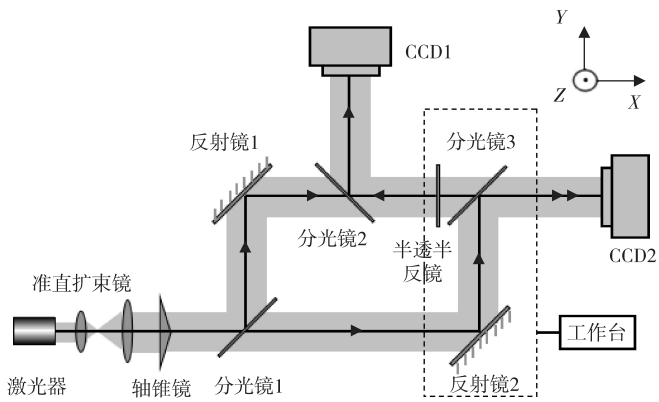


图 1　基于无衍射光的三自由度误差测量光路

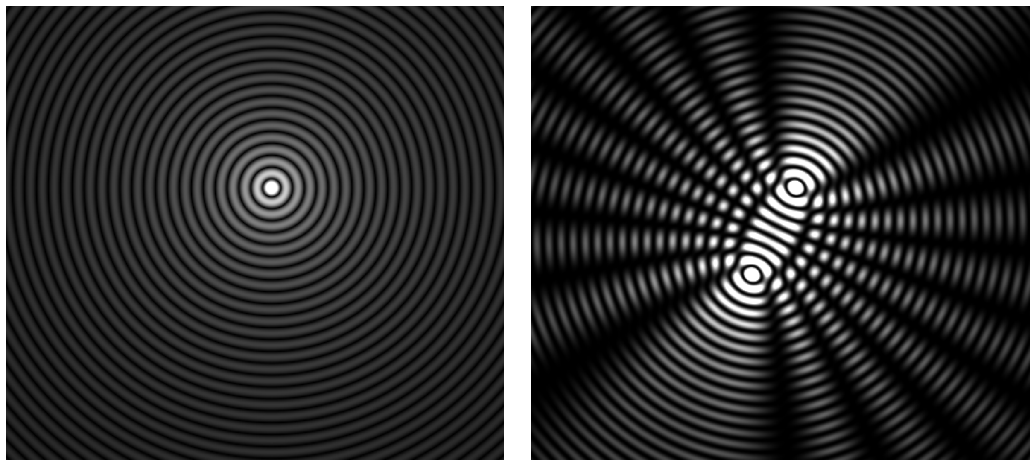
Fig. 1　Three-degree-of-freedom measurement error based on non-diffracting beams

*　**收稿日期**:2017-03-20　**修回日期**:2018-05-29　**网络出版时间**:2018-07-26 16:50

资助项目:国家自然科学基金(No. 51405143；No. 51575164；No. 61475044)；湖北省教育厅重点项目(No. D20161406)；光纤光缆制备技术国家重点实验室基金(No. SKLD103)；湖北省大学生创新创业项目(No. 201510500023)；湖北省太阳能高效利用开放基金(No. HBSKFZD2014007)；湖北工业大学博士启动基金(No. BSQD13048)

第一作者简介:别业广，男，副教授，研究方向为理论物理教学与研究，E-mail:bieyygg@126.com；**通信作者**:吕清花，女，副教授，博士，E-mail:linsa080@126.com

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180726.1650.026.html



a 单束无衍射光 b 无衍射光莫尔条纹

图2 两处CCD中的模拟现象

Fig. 2 Simulated images of two CCDs

两束无衍射光的叠加可看做两个不同位置的贝塞尔函数的叠加。贝塞尔函数在较大的外环处可以近似认为周期函数,进一步可看做等间距同心圆环光栅的叠加。根据文献[13]可知栅距 d 为:

$$d=\frac{2\pi}{k(n-1)\varphi}。\tag{1}$$

式中:k 为波数;n 为轴锥镜折射率;φ 为轴锥镜锥角。

针对莫尔条纹数量,文献[14]推导出无论两光栅原来的中心距为多少,中心距每增减 d,相应的总莫尔条纹数将增减4,即莫尔条纹的数量变化 ΔN 与两光栅中心距变化 Δl 的关系为:

$$\Delta N=4\frac{\Delta l}{d}。\tag{2}$$

对于CCD1,可以根据算法直接确定中心;对于CCD2,其中一束光的中心位置是不变的,另一束光的中心位置可经过图像处理程序得到莫尔条纹的数量和斜率,再根据(1),(2)式得出位移量。

1.2 误差矢量公式推导

在CCD1处,工作台的俯仰角、偏摆角误差会造成半透半反镜的镜面法向量改变,最终导致CCD1中光斑中心位置发生变化。图3给出了在垂直于光轴平面,光线随角度误差偏转的示意图。当工作台不发生偏转时,光线沿虚线所示光路依次经过 A,B,A,D,最终到达CCD1。若工作台存在角度误差(俯仰角 α、偏摆角 β),则半透半反镜将发生偏转,设偏转中心为点 B,则此时反射光路径变为 $ABCD'$,CCD1接收到的光斑位置也因此偏移到 D'。

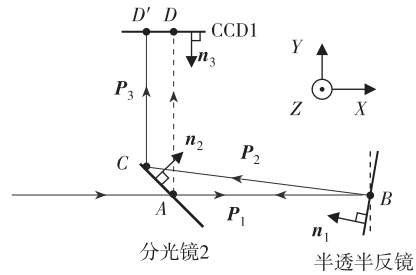


图3 CCD1处角度误差测量原理

Fig. 3 Measuring principle of angle error of CCD 1

设 B 为半透半反镜的偏转中心,$AB=L_1$,$AD=L_2$,则各个点的初始坐标分别为:$\boldsymbol{A}(0,0,0)$,$\boldsymbol{B}(L_1,0,0)$,$\boldsymbol{D}(0,L_2,0)$。令 $\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{P}_2,\boldsymbol{P}_3$ 分别为反射光的方向矢量,$\boldsymbol{n}_1,\boldsymbol{n}_2,\boldsymbol{n}_3$ 分别为分光镜2、半透半反镜和CCD1的法向量,其余各点及向量的计算公式由空间向量计算法则推导如下:

$$\boldsymbol{P}_2=\boldsymbol{P}_1-2(\boldsymbol{P}_1\cdot\boldsymbol{n}_1)\boldsymbol{n}_1,\tag{3}$$

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{B}+\boldsymbol{P}_2\frac{\boldsymbol{n}_2\cdot(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B})}{\boldsymbol{n}_2\cdot\boldsymbol{P}_2},\tag{4}$$

$$\boldsymbol{P}_3=\boldsymbol{P}_2-2(\boldsymbol{P}_2\cdot\boldsymbol{n}_2)\boldsymbol{n}_2,\tag{5}$$

$$\boldsymbol{D}'=\boldsymbol{C}+\boldsymbol{P}_3\frac{\boldsymbol{n}_3\cdot(\boldsymbol{D}-\boldsymbol{C})}{\boldsymbol{n}_3\cdot\boldsymbol{P}_3}。\tag{6}$$

$\boldsymbol{n}_1,\boldsymbol{n}_2,\boldsymbol{n}_3$ 的初始值分别为$(-1,0,0)$,$\left(\frac{\sqrt{2}}{2},\frac{\sqrt{2}}{2},0\right)$和$(0,-1,0)$,其中 $\boldsymbol{n}_1$ 将随工作台的转动(俯仰角 α、偏摆角 β)

而变化，不同旋转轴下的 $\boldsymbol{n}_1$ 可根据矢量旋转法则进行计算：

$$\boldsymbol{n}'=(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{V})\boldsymbol{V}+(\boldsymbol{n}-(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{V})\boldsymbol{V})\times\boldsymbol{V}\sin\theta+(\boldsymbol{n}-(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{V})\boldsymbol{V})\cos\theta。\tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{n}$ 为初始向量；$\boldsymbol{V}$ 为旋转轴向量；θ 为旋转角度；$\boldsymbol{n}'$ 为旋转后的向量。

对于俯仰角 α，有：

$$\boldsymbol{n}_1(\alpha)=\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\alpha,0,-\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\alpha\right)。\tag{8}$$

根据(3)～(7)式可求得点 D' 的坐标为：

$$\boldsymbol{D}'=(0,L_2,-(L_1+L_2)\tan\alpha)。\tag{9}$$

与初始点 D 相比较，可得 CCD1 处接收到的一束光斑中心位置在俯仰角 α 下的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta x_1(\alpha)=0\\ \Delta z_1(\alpha)=-(L_1+L_2)\tan\alpha\end{cases}。\tag{10}$$

对于偏摆角 β，有：

$$\boldsymbol{n}_1(\beta)=\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\beta,\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta,0\right)。\tag{11}$$

根据(3)～(7)式可求得点 D' 的坐标为：

$$\boldsymbol{D}'=(-(L_1+L_2)\tan\beta,L_2,0)。\tag{12}$$

与初始点 D 相比较，可得 CCD1 处接收到的一束光斑中心位置在偏摆角 β 下的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta x_1(\beta)=-(L_1+L_2)\tan\beta\\ \Delta z_1(\beta)=0\end{cases}。\tag{13}$$

CCD2 接收到 2 束无衍射光，并干涉产生莫尔条纹。其中一束光位置不变，可作为参考光；另一束光的中心位置受到工作台俯仰角 α、偏摆角 β 和滚转角 γ 的影响发生改变，同时也会改变莫尔条纹的数目。以偏摆角为例，图 4 给出了角度误差测量原理。如虚线光路所示，当工作台不存在任何偏转时，通过分光镜 1(点 E)的一束光将依次经过反射镜 2(点 F)、分光镜 3(点 G)，最终入射在 CCD2 上(点 H)。

设 $EF=L_3$，$FG=L_4$，$GH=L_5$，则各个点的初始坐标分别为：$\boldsymbol{E}(0,0,0)$，$\boldsymbol{F}(L_3,0,0)$，$\boldsymbol{G}(L_3,L_4,0)$，$\boldsymbol{H}(L_3+L_5,L_4,0)$。假设工作台的偏转中心为 O_2(O_2 为 FG 中点)，当角度误差存在时，光线将沿实线所示光路传播，依次经过 E,F',G',H'。令 $\boldsymbol{P}_4,\boldsymbol{P}_5,\boldsymbol{P}_6$ 分别为光束的方向矢量，$\boldsymbol{n}_4,\boldsymbol{n}_5,\boldsymbol{n}_6$ 分别为反射镜 2、分光镜 3 和 CCD2 的法向量，R_F,R_G 分别为工作台旋转后反射镜 2 和分光镜 3 的中心位置。根据空间向量运算法则，各个点与向量的计算公式如下：

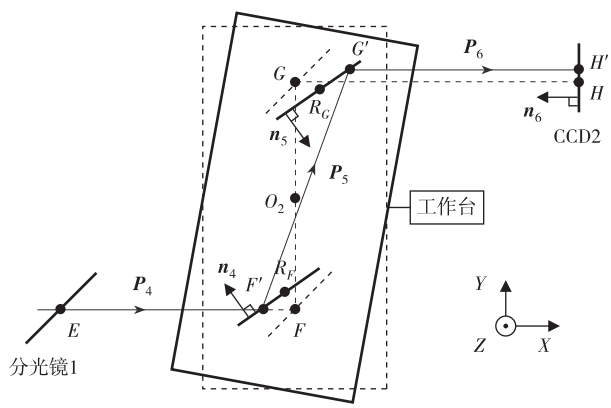


图 4　CCD2 处角度误差测量原理

Fig. 4　Measuring principle of angle error of CCD 2

$$\boldsymbol{F}'=\boldsymbol{E}+\boldsymbol{P}_4\frac{\boldsymbol{n}_4\cdot(\boldsymbol{R}_F-\boldsymbol{E})}{\boldsymbol{n}_4\cdot\boldsymbol{P}_4},\tag{14}$$

$$\boldsymbol{P}_5=\boldsymbol{P}_4-2(\boldsymbol{P}_4\cdot\boldsymbol{n}_4)\boldsymbol{n}_4,\tag{15}$$

$$\boldsymbol{G}'=\boldsymbol{F}'+\boldsymbol{P}_5\frac{\boldsymbol{n}_5\cdot(\boldsymbol{R}_G-\boldsymbol{F}')}{\boldsymbol{n}_5\cdot\boldsymbol{P}_5},\tag{16}$$

$$\boldsymbol{P}_6=\boldsymbol{P}_5-2(\boldsymbol{P}_5\cdot\boldsymbol{n}_5)\boldsymbol{n}_5,\tag{17}$$

$$\boldsymbol{H}'=\boldsymbol{G}'+\boldsymbol{P}_6\frac{\boldsymbol{n}_6\cdot(\boldsymbol{H}-\boldsymbol{G}')}{\boldsymbol{n}_6\cdot\boldsymbol{P}_6}。\tag{18}$$

$\boldsymbol{n}_4,\boldsymbol{n}_5,\boldsymbol{n}_6$ 的初始值分别为 $\left(-\frac{\sqrt{2}}{2},\frac{\sqrt{2}}{2},0\right)$，$\left(\frac{\sqrt{2}}{2},-\frac{\sqrt{2}}{2},0\right)$，$(1,0,0)$。其中 $\boldsymbol{n}_4,\boldsymbol{n}_5$ 将随工作台的转动而变化，不同旋转轴下的 $\boldsymbol{n}_4,\boldsymbol{n}_5$ 可根据(7)式计算。

对于俯仰角 α，有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{n}_4(\alpha)=\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\alpha,\frac{\sqrt{2}}{2},-\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\alpha\right)\\ \boldsymbol{n}_5(\alpha)=\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\alpha,-\frac{\sqrt{2}}{2},\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\alpha\right)\\ \boldsymbol{R}_F(\alpha)=(L_3,0,0)\\ \boldsymbol{R}_G(\alpha)=(L_3,L_4,0)\end{cases}。\tag{19}$$

根据(14)～(18)式可求得点 H' 的坐标为：

$$\boldsymbol{H}'=(L_3+L_5,L_4,-L_4\sin\alpha)。\tag{20}$$

与初始点 H 相比较，可得 CCD2 处接收到的一束光斑中心位置在俯仰角 α 下的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta y_2(\alpha)=0\\ \Delta z_2(\alpha)=-L_4\sin\alpha\end{cases}。\tag{21}$$

对于偏摆角 β，有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{n}_4(\beta)=\left(\frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\beta-\cos\beta),\frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\beta+\cos\beta),0\right)\\ \boldsymbol{n}_5(\beta)=\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\beta-\cos\beta),-\frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\beta+\cos\beta),0\right)\\ \boldsymbol{R}_F(\beta)=\left(L_3-\frac{L_4}{2}\sin\beta,\frac{L_4}{2}(1-\cos\beta),0\right)\\ \boldsymbol{R}_G(\beta)=\left(L_3+\frac{L_4}{2}\sin\beta,\frac{L_4}{2}(1+\cos\beta),0\right)\end{cases}。\tag{22}$$

根据(14)～(18)式可求得点 H' 的坐标为：

$$\boldsymbol{H}'=\left(L_3+L_5,\frac{L_4}{(\sin\beta-\cos\beta)\tan2\beta+\sin\beta+\cos\beta},0\right)。\tag{23}$$

与初始点 H 相比较，可得 CCD2 处接收到的一束光斑中心位置在偏摆角 β 下的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta y_2(\beta)=L_4\left[\frac{1}{(\sin\beta-\cos\beta)tan2\beta+\sin\beta+\cos\beta}-1\right]\\ \Delta z_2(\beta)=0\end{cases}。\tag{24}$$

对于滚转角 γ，有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{n}_4(\gamma)=\left(-\frac{\sqrt{2}}{2},\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\gamma,-\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\gamma\right)\\ \boldsymbol{n}_5(\gamma)=\left(\frac{\sqrt{2}}{2},-\frac{\sqrt{2}}{2}\cos\gamma,\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\gamma\right)\\ \boldsymbol{R}_F(\gamma)=\left(L_3,\frac{L_4}{2}(1-\cos\gamma),\frac{L_4}{2}\sin\gamma\right)\\ \boldsymbol{R}_G(\gamma)=\left(L_3,\frac{L_4}{2}(1+\cos\gamma),-\frac{L_4}{2}\sin\gamma\right)\end{cases}。\tag{25}$$

根据(14)～(18)式可求得点 H' 的坐标为：

$$\boldsymbol{H}'=(L_3+L_5,L_4\cos\gamma,-L_4\sin\gamma)。\tag{26}$$

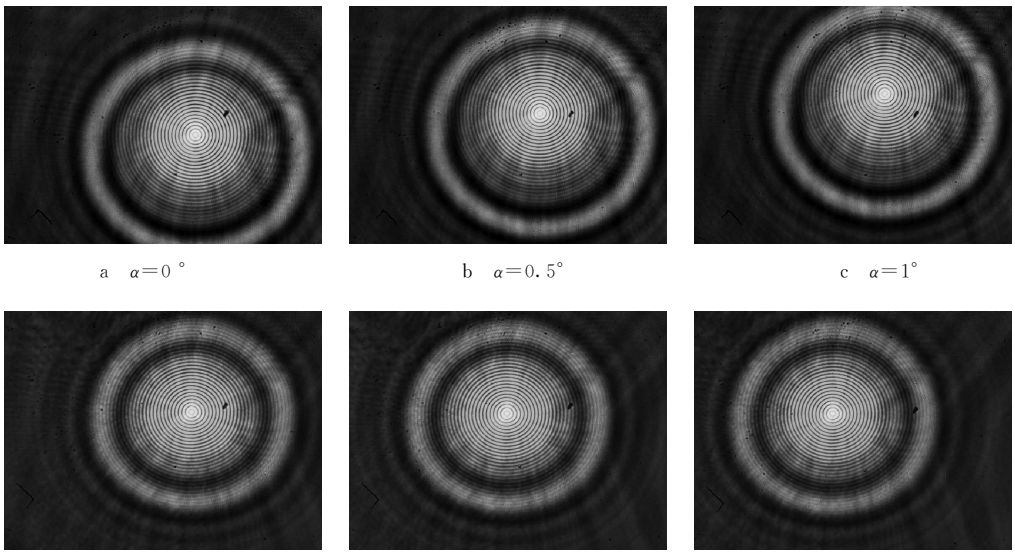
与初始点 H 相比较，可得 CCD2 处接收到的一束光斑中心位置在滚转角 γ 下的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta y_2(\gamma)=L_4(\cos\gamma-1)\\ \Delta z_2(\gamma)=-L_4\sin\gamma\end{cases}。\tag{27}$$

2 实验结果

实验采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器，轴锥镜半径为 12.5 mm，锥角约为 0.008 rad，用可控角度的三维电旋台代替工作台，CCD1 和 CCD2 像元尺寸为 5.2 μm，分辨率为 1 024×1 280，实际测得光路中 L_1=26 mm，L_2=28 mm，L_3=160 mm，L_4=76 mm，L_5=145 mm。

用角度旋转台代替工作台，控制旋转台在三自由度角度上变化，俯仰角 α、偏摆角 β 和滚转角 γ 分别选取 0°，0.5°和 1°进行实验，同时记录双 CCD 中的光斑图像。CCD1 采集的图像如图 5 所示，CCD2 采集的图像如图 6 所示。因滚转角 γ 对 CCD1 中光斑图像没有影响，所以图 5 只给出了俯仰角 α 和偏摆角 β 的变化图像。

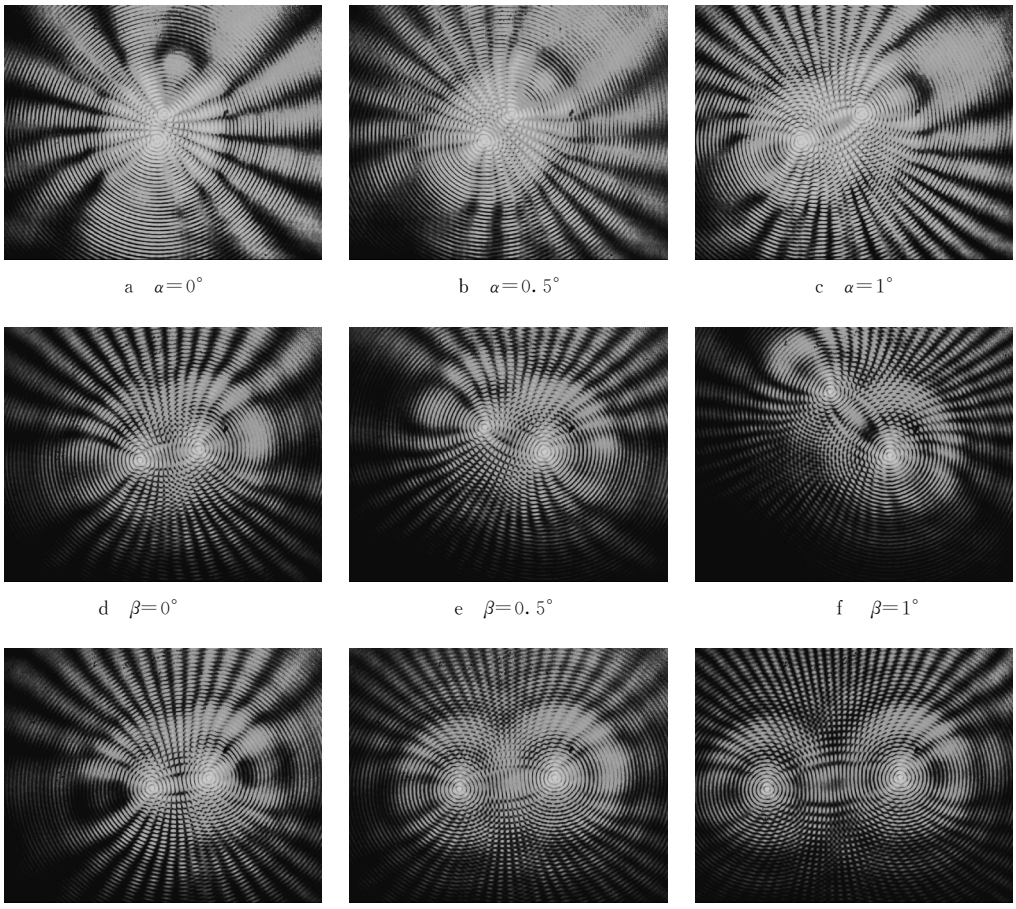


a　α=0°　　b　α=0.5°　　c　α=1°

d　β=0°　　e　β=0.5°　　f　β=1°

图 5　CCD1 中的无衍射光图像

Fig. 5　Images of non-diffracting beams captured by CCD1



a　α=0°　　b　α=0.5°　　c　α=1°

d　β=0°　　e　β=0.5°　　f　β=1°

g　γ=0°　　h　γ=0.5°　　i　γ=1°

图 6　CCD2 中的无衍射光图像

Fig. 6　Images of non-diffracting beams captured by CCD2

通过CCD的相关参数求得CCD1上光斑的实际位置。而且从(1),(2)式可以看出,只要给出了轴锥镜和光束波长的相关参数,就能确定贝塞尔环的间距d,进一步通过莫尔条纹的数量得到测量光束中心与参考光束中心的间距Δl,相应的莫尔条纹对应的位移量在水平方向和竖直方向上的分量Δl_x和Δl_y可用下式计算:

$$\begin{cases}\Delta l_x=\dfrac{1}{k}\Delta l\\ \Delta l_y=k\Delta l\end{cases}。\tag{28}$$

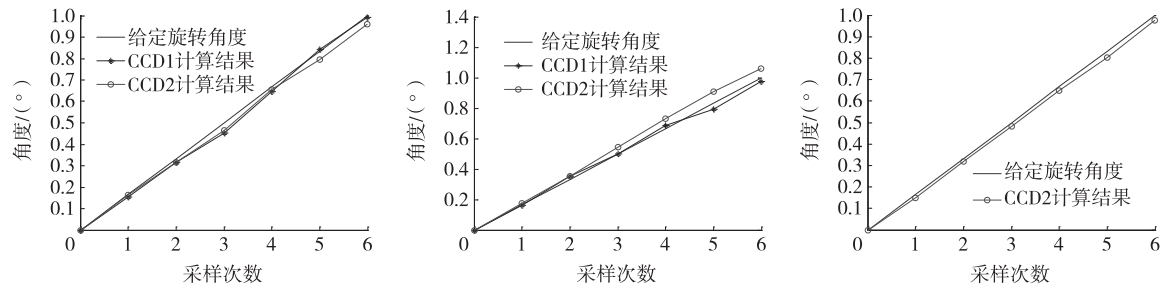
实际测量中,由于参考光的位置不变,所以只需将每次计算的Δl_x和Δl_y与前1组计算结果相减,就能确定CCD2处测量光斑位置的位移量。通过轴锥镜的参数求得CCD2中光斑的实际位置,结果如表1所示。

再根据(10),(13),(21),(24),(27)式反推出CCD1与CCD2各自对应的角度误差,计算出实际角度如图7所示。

表1　实验结果

Tab.1　Experimental results

类型	角度/(°)	CCD1中光斑位移量		CCD2中光斑位移量	
		Δx_1/mm	Δz_1/mm	Δy_2/mm	Δz_2/mm
俯仰角α	0.167	0.000	0.293	0.000	0.212
	0.333	0.000	0.596	0.000	0.412
	0.500	0.000	0.855	0.002	0.608
	0.667	0.000	1.219	0.005	0.858
	0.833	0.003	1.588	0.006	1.043
	1.000	0.003	1.873	0.006	1.255
偏摆角β	0.167	0.305	0.000	0.229	0.000
	0.333	0.665	0.000	0.461	0.000
	0.500	0.939	0.000	0.712	0.000
	0.667	1.291	0.000	0.958	0.003
	0.833	1.495	0.002	1.192	0.005
	1.000	1.843	0.004	1.388	0.007
滚转角γ	0.167	0.000	0.000	0.000	0.196
	0.333	0.000	0.000	0.000	0.416
	0.500	0.000	0.000	0.006	0.628
	0.667	0.000	0.000	0.080	0.844
	0.833	0.000	0.000	0.015	1.044
	1.000	0.000	0.000	0.021	1.265



a　俯仰角α　　b　偏摆角β　　c　滚转角γ

图7　角度计算结果

Fig.7　Angle calculation results

从图7可以看出,实验计算结果与实际角度较为符合,计算出的角度误差在7%以内,且对于俯仰角和偏摆角CCD1的检测效果要好于CCD2。若需要测量一个复合角度,可以通过CCD1计算出俯仰角和偏摆角,再结合它在CCD2中相对应的偏转量解出滚转角。

3 结论

本研究根据无衍射光中心光斑形状不随距离改变的特点和莫尔条纹放大的特性,提出了一种基于无衍射光的三自由度误差测量系统,能够测量运动单元的偏摆角、俯仰角和滚转角的运动误差。该系统由反射镜和分光镜组成测量敏感单元,由2个CCD接收无衍射光或无衍射莫尔条纹,从理论上推导出2个CCD中光斑中心位置与3种角度误差的数学模型。实验结果表明该方法能准确测量3种角度的运动误差,且抗干扰能力强,可以为无衍射光的应用和工作台多自由度误差测量提供参考。

参考文献：

[1] LEE C B, LEE S K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision machine using laser encoder -review[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(1): 141-152.

[2] PARK S R, JANG J S, Yang S H. Roll error measurement system for linear moving stages using four capacitance sensors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9): 2579-2587.

[3] LIN S T. A laser interferometer for measuring straightness [J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(3): 195-199.

[4] PAOLINO P, BELLON L. Single beam interferometric angle measurement [J]. Optics Communications, 2007, 280 (1): 1-9.

[5] 由凤玲. 基于共路光束漂移补偿的五自由度误差同时测量方法的研究[D]. 北京：北京交通大学，2010.
YOU F L. Study of five degree of freedom simultaneous measurement method based on common path compensation for beam drift [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[6] FAN K C, ZHAO Y. A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(14): 2073-2081.

[7] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams: i: the scalar theory[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(4): 651-654.

[8] DURNIN J, MICELI Jr J J, EBERLY J H. Diffractive-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.

[9] 邢笑雪，吴逢铁，张建荣. 无衍射 J_0 光束的理论分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2006，27(1)：31-34.
XING X X, WU F T, ZHANG J R. Theoretical analysis of nondiffracting J_0 beam[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2006, 27(1): 31-34.

[10] 王中宇，周聪，张朵. 无衍射光技术在瞄准系统中的理论与原理实验[J]. 北京航空航天大学学报，2006，32(11)：1337-1340.
WANG Z Y, ZHOU C, ZHANG D. Basic theory and its principled experiment of non-diffracting interference in aiming system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1337-1340.

[11] 王中宇，王倩，孟浩，等. 基于无衍射光的表面粗糙度三角测量及其灰色评定方法[J]. 应用光学，2011，32(5)：909-912.
WANG Z Y, WANG Q, MENG H, et al. Surface roughness measurement based on non-diffracting beam triangulation and gray evaluation[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 909-912.

[12] 翟中生，赵斌. 无衍射光束中心光斑的特性研究[J]. 激光技术，2008，32(5)：480-483.
ZHAI Z S, ZHAO B. Study on property of central spot of non-diffracting beams[J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 480-483.

[13] 翟中生，赵斌. 无衍射光的干涉实验与理论分析[J]. 光学学报，2007，27(8)：1503-1507.
ZHAI Z S, ZHAO B. Experiments and theoretical analyses of non-diffracting bearns interference[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1503-1507.

[14] 黄恩令，姚久胜. 同心环形光栅莫尔条纹的机理[J]. 光电子·激光，1992，3(4)：193-200.
HUANG E L, YAO J S. The quantitative analysis of Moire fringes on circular concentric diffraction gratings [J]. Optronics · Lasers, 1992, 3(4): 193-200.

A Method of Three-Degree-of-Freedom Measurement Based on Non-Diffracting Beam

BIE Yeguang[1,2], LÜ Qinghua[1,2], SHANG Yiyuan[1,2], ZHAI Zhongsheng[3],
HUANG Xiaochuan[1,2], CHENG Chunfu[1,2], LÜ Hui[1,2]

(1. Hubei Collaborative Innovation Centre for High-efficient Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology; 2. School of Science, Hubei University of Technology; 3. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: [**Purposes**]A method for three-degree-of-freedom measurement based on non-diffracting beam is put forward. Non-diffracting beam is adopted as light source which is generated by an axicon. [**Methods**]The measuring part is formed by one reflecting mirror and two beam splitters which are fixed on a stage of three-degrees-of-freedom. The rotational errors(pitch, yaw and roll errors) result in the variation of beam center positions in two separate CCDs. [**Findings**]Theoretical analysis about the variation with different rotational errors is made, experimental results and simulated results are given. [**Conclusions**]Experimental results agree well with simulated results, which show that the proposed method is accurate for measuring three-degrees-of-freedom errors.

Keywords: multi-degree-of-freedom error measurement; non-diffracting beam; angle error

(责任编辑 许 甲)