

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0223-04

基于望远系统的直线导轨四自由度检测

张浩 吴青林 段世媛 雷张源 王克逸

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要 提出了一种基于望远光学系统的同时测量直线导轨四自由度误差的新方法。首先利用望远系统对角度误差和平移误差高倍放大,再利位置敏感探测器(PSD)分别采集放大后的角度误差和直线度误差,实现了水平和垂直方向直线度及俯仰角、偏摆角四个自由度误差的高精度实时测量。搭建了系统实验平台,分析了系统的测量原理,进行了测量的校正、稳定性和重复性实验。理论分析和实验结果表明,系统测量直线度的分辨率小于 $0.2 \mu\text{m}$,角度的分辨率小于 $0.3''$,在测量距离为 10 cm 的条件下,直线度、角度测量精度分别为 $\pm 0.7 \mu\text{m}/\text{cm}$, $\pm 0.3''/\text{cm}$ 。测量方法具有精度高、结构简单、实时快速的特点。

关键词 测量;四自由度;直线度误差;角度误差;直线导轨;望远光学系统

中图分类号 TN 247 ; TH 741 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0223

Measurement of Four-Degree-of-Freedom Geometric Errors of a Linear Stage Based on Telescope System

Zhang Hao Wu Qinglin Duan Shiyuan Lei Zhangyuan Wang Keyi

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract A novel method for measuring four-degree-of-freedom geometric errors of a linear stage is put forward. A telescope is used to magnify the straightness errors and angular errors in many times. Position sensitive detector (PSD) is used to sense the errors very fast. So the horizontal and vertical straightness errors as well as yaw and pitch errors can be measured simultaneously with high precision. The four-degree-of-freedom measuring system has been developed, and the theory of measurement has been analyzed. The calibration, stability and repeatability experiments are completed. Experimental results and theoretical analyses show that the system has the resolution of less than $0.2 \mu\text{m}$ for straightness error measurement and $0.3''$ for angular error measurement, and the measurement accuracies of straightness error and angular errors are about $\pm 0.7 \mu\text{m}/\text{cm}$ and $\pm 0.3''/\text{cm}$ respectively within the measurement range of 10 cm .

Key words measurement; four-degree-of-freedom; straightness error; angular errors; linear stage; telescope system

1 引言

直线导轨精度检测是制造业的关键环节,尤其对于提升产品质量,提高加工精度具有重要意义。以前普遍使用双频激光干涉仪测量^[1,2],但是这种方法每次只能测一维误差,给测量带来不便。后来相继出现了应用激光同时测量多自由度误差的多种方法^[3~7],但是这些方法均存在着成本高、系统复杂的缺点。本文将望远光学系统应用于直线导轨四自由度检测,利

用其光学特性对直线度、俯仰、偏摆角度四个自由度误差高倍放大,再结合位置敏感探测器(PSD)实现一维直线导轨的四自由度误差实时测量。测量系统具有结构简单、方便、快捷等特点。

2 平台四自由度检测原理

2.1 望远系统

望远系统如图 1 所示,是由双透镜组成的共轴

光学系统,由于其光学特性,望远系统的垂轴放大率和角度放大率分别为: $\frac{y'}{y} = \frac{f_2}{f_1}$, $\frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{f_1}{f_2}$ 。合理地选择焦距比和光线入射方向,可在角度测量和平移测量中实现高倍放大。

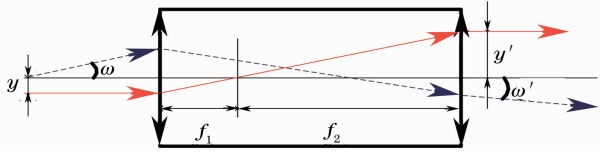


图 1 望远系统

Fig. 1 Telescope system

2.2 系统结构及测量原理

基于望远系统的测量平台如图 2 所示,将望远系统固定在一维直线运动导轨上,激光器 1 发射的激光 I_1 经过两次反射通过望远系统后再通过透镜照射到 PSD 1(Position Sensitive Detector)上,透镜可以屏蔽平移对角度测量的影响,该路测量一维导轨的转角误差。当平台产生俯仰角误差 α 和偏摆角误差 β 时,出射光线与入射光线 I_1 相比角度分别变化了 $\alpha + \alpha'$ 、 $\beta + \beta'$,则相应的在凸透镜的焦平面上的 PSD 1 探测平面光斑位置变化了 $\Delta X_1, \Delta Y_1$,结合望远系统角度放大公式并采用近似计算后

$$\alpha = \frac{\Delta Y_1 \cdot f_1}{f \cdot (f_1 + f_2)}, \beta = \frac{\Delta X_1 \cdot f_1}{f \cdot (f_1 + f_2)}. \quad (1)$$

对于直线度测量,水平方向和竖直方向是类似的,首先在 XZ 平面内分析,PSD 2 探测的信号为 I_2 出射激光,在 PSD 2 上输出的坐标变化 ΔX_2 为平移变换 $\Delta X'_2$ 和旋转变换 $\Delta X''_2$ 的耦合,即:

$$\Delta X_2 = \Delta X'_2 + \Delta X''_2.$$

当扩束镜产生沿 X 轴的平移 ΔX 时,根据望远系统的垂轴放大率公式,入射光线 I_2 的出射光线在 PSD 2 上产生了同向的平移 $\Delta X'_2$,表示为

$$\Delta X'_2 = \frac{f_2}{f_1} \cdot \Delta X + \Delta X = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \cdot \Delta X. \quad (2)$$

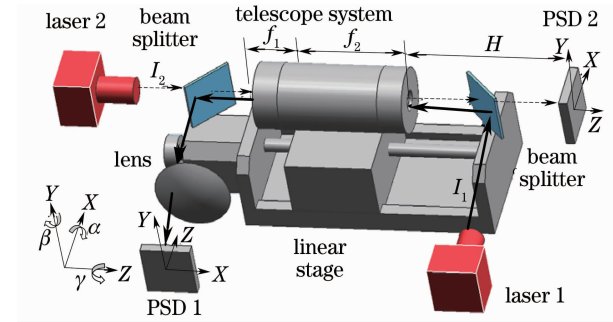
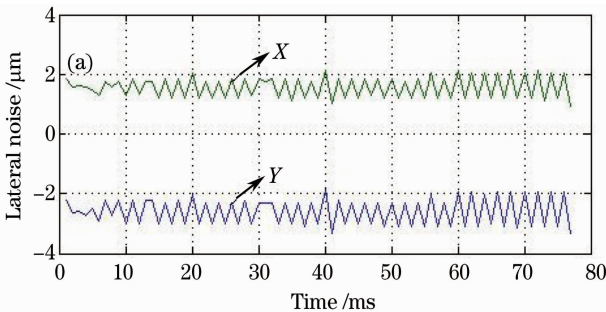


图 2 四自由度测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the four-degree of freedom measuring system

而与此同时偏转角 β 也会对平移测量产生影响,对于入射光线 I_2 ,由于望远系统偏转在二维 PSD 2 上将贡献 $\Delta X''_2$ 的变化,其中

$$\Delta X''_2 = H \cdot \beta \cdot \frac{f_1 + f_2}{f_2}. \quad (3)$$

综合上式平台 X 方向平移表示为

$$\Delta X = \Delta X_2 \cdot \frac{f_1}{f_1 + f_2} - H \cdot \beta \cdot \frac{f_1}{f_2}. \quad (4)$$

同理 Y 方向平移表示为

$$\Delta Y = \Delta Y_2 \cdot \frac{f_1}{f_1 + f_2} - H \cdot \alpha \cdot \frac{f_1}{f_2}. \quad (5)$$

3 实验结果与分析

3.1 稳定性实验

背景环境中的电磁噪声会使 PSD 的输出坐标值产生波动,因此在测量之前系统静止不动,开启激光光源,观察在固定位置的平移和角度波动。图 3 (a),(b) 分别为直线度、角度测量结果的漂移。由图 3 所示在水平、竖直方向直线度测量的不确定度分别为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$, $\pm 0.6 \mu\text{m}$;偏摆角、俯仰角不确定度为 $\pm 0.2''$, $\pm 0.3''$ 。因此在测量中需要对同一位置的坐标多次测量取平均值。

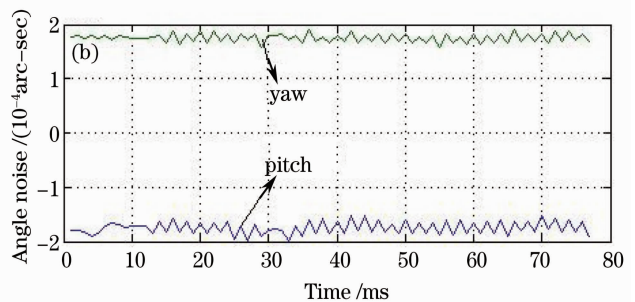


图 3 (a)直线度稳定性实验;(b)角度稳定性实验

Fig. 3 Experimental results of the straightness stability (a) and the angular stability (b)

3.2 角度、平移测量标定

首先进行角度测量校正,将一维导轨做精密的转动,记录系统测量的角度值 α', β' , 并与已知的标准转角 α, β 进行对比(如图 4(a)所示),建立一元线性回归方程,应用最小二乘法求解回归系数,可以得到校正关系

$$\alpha = 1.3352\alpha' + 0.0075, \beta = 1.4486\beta' + 0.0130. \tag{6}$$

为了进行直线度测量校正,将一维导轨放置在

高精度二维平移台上,使激光通过望远系统照射在 PSD 敏感面上,控制平移台按一定步长 D 沿 x, y 方向步进,即可得到一系列网格点阵(如图 4(b)所示)。选取其中任意矩形区域 $A_1 A_2 A_3 A_4$, (x, y) 为矩形中的内点。采用双一次插值即可进行直线度测量的校正, 即: $E_x(x, y) = \sum_{i=1}^4 E_x(A_i) \varphi_i(x, y)$,

$$E_y(x, y) = \sum_{j=1}^4 E_y(A_j) \varphi_j(x, y).$$

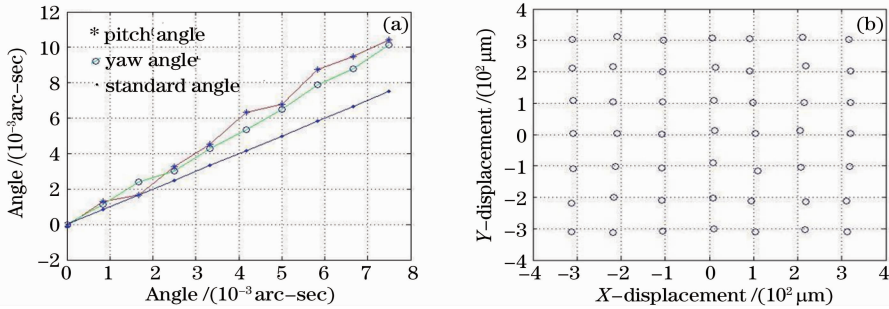


图 4 (a)角度标定;(b)直线度标定

Fig. 4 Calibration results of the angular error (a) and the straightness error (b)

3.3 重复性实验

当系统稳定后,在长度为 10 cm 的导轨上,不同时间进行了两次实验,采样间隔为 5 mm。将第一次零位置状态定为初始值,后续的测量值减去初始值就得到了直线度误差和角度误差。获得的直线度误差和角度误差如图 5 所示。从测量结果来看,导轨绕 Y 轴的偏转角最大为 $37''$, 绕 X 轴的俯仰角最

大为 $43''$, 水平方向的直线度误差最大为 $17 \mu\text{m}$, 竖直方向的直线度误差最大为 $28 \mu\text{m}$, 这说明导轨在制作和装配时存在着间隙。对于两次测量而言,绕 Y 轴的偏转角最大偏差为 $5''$, 绕 X 轴的俯仰角最大偏差为 $7''$, 沿 X 轴的平移最大偏差为 $4 \mu\text{m}$, 沿 Y 轴的平移最大偏差为 $5 \mu\text{m}$, 由此可见,测量的重复性较好。

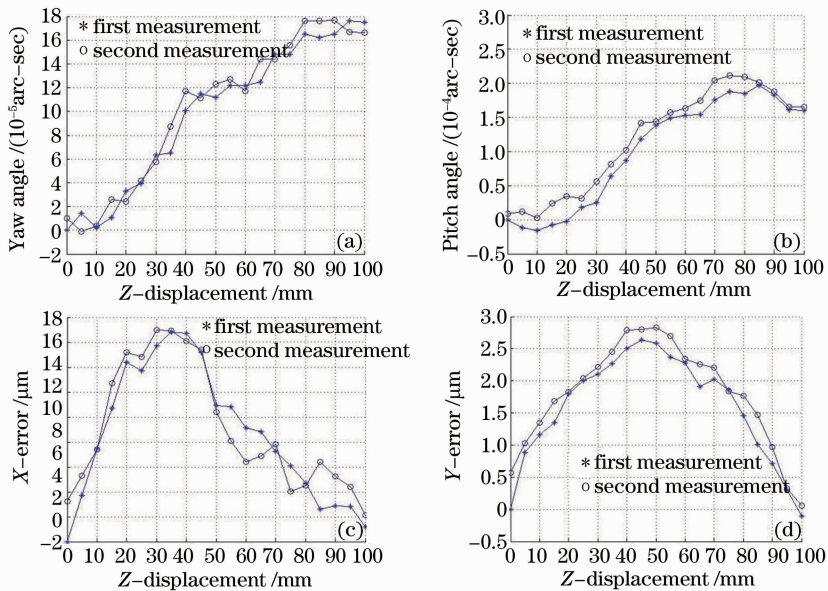


图 5 (a)偏摆角重复实验;(b)俯仰角重复实验;(c)水平方向平移测量;(d)垂直方向平移测量

Fig. 5 Experiments of yaw repeatability (a), pitch repeatability (b), horizontal straightness repeatability (c) and vertical straightness repeatability (d)

4 系统误差分析

引起测量系统误差的主要因素包括:1)光学系统的离轴、离焦和像差 Δ_1 ;2)系统安装造成的误差 Δ_2 ;3)环境中的电磁干扰造成的误差 Δ_3 ;4)各参数误差串扰 Δ_4 。系统的总误差为 $\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2}$ 。在本次测量中, Δ_1, Δ_2 可以通过校正来减小或消除; Δ_3 的影响较大,需要多次测量取平均值处理;对角度测量 Δ_4 的影响很小可以忽略不计,对平移测量 Δ_4 影响较大,直线度误差测量的精度决定于 Δ_3 和 Δ_4 。误差合成之后,角度误差测量精度为 $\pm 0.3''/\text{cm}$,直线度误差测量精度为 $\pm 0.7 \mu\text{m}/\text{cm}$ 。

5 结 论

本实验方法以望远光学系统为基础,利用其光学特点对一维导轨的直线度误差、角度误差实现高倍放大,再结合 PSD 探测器实现了直线导轨四自由度同时测量。通过一系列稳定性、重复性、测点精度比对实验,结果验证了系统的可行性。理论分析和实验结果表明线位移分辨率小于 $0.2 \mu\text{m}$,角分辨率优于 $0.3''$,对一维导轨的测量中直线度和角度测量的精度分别为 $\pm 0.7 \mu\text{m}/\text{cm}$, $\pm 0.3''/\text{cm}$ 。实验充分验证了该方法的可行性。由于尚处在初步探索阶段,实验中难免不足之处,比如受条件限制没有对导轨误差检测采取对比实验,此外屏蔽背景电磁噪声的效果欠佳。在今后的工作中将针对以上问题改

良系统,提高测量的稳定性和精度,将本系统进一步拓展后可用于二维平台 6 自由度检测,采用高精度传感器和高放大倍数的望远系统后,还可以达到更高的分辨率和精度,因此该方法具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Chen Qianghua, Wu Jian, Yin Chunyong. Long range straightness/coaxiality measurement system using dual-frequency laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 625~630
陈强华,吴 健,殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 625~630
- 2 Zhao Hui, Pu Zhaobang, Liu Guodong. High precision straightness device based on double frequency laser interference technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 637~640
赵 辉,浦昭邦,刘国栋. 基于双频激光干涉技术的高精度直线度基准装置[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7): 637~640
- 3 Kam C. Lau, Yuanqen Liu. Five-axis/Six-axis Laser Measuring System[P]. US: 006049377, 2000204211
- 4 Jong-Ahn Kim, E. W. Bae, S. H. Kim *et al.*. Design methods for six-degree-of-freedom displacement measurement systems using cooperative targets [J]. *Precision Engineering*, 2002, **26**(1): 99~104
- 5 Chung Sungchong, Zhou Fuqiang, Ye Shenghua. Six degrees-of-freedom error measuring device for linear motion of slides[C]. *Proc. of ASPE Annual Meeting*, 1998, **18**: 445~449
- 6 He Jin, Zuo Baojun, Fan Zhigang *et al.*. Measurement of four degree-of-freedom displacement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(supplement): 137~139
何 瑾,左保军,范志刚等. 四自由度的位移测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊): 137~139
- 7 J. Kumar Pavuluri, *et al.*. A high precision, six-degree-of-freedom single sided, noncontact, optical sensor suitable for assembly automation[C]. *Proc. of National Science Foundation Design and Manufacturing Conference, Charlotte, NC*, 1993, 1613~1619