

# 一种多自由度误差同时测量方法

翟玉生<sup>1</sup> 张志峰<sup>1</sup> 苏玉玲<sup>1</sup> 王新杰<sup>2</sup> 冯其波<sup>3</sup>

<sup>1</sup>郑州轻工业学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450002

<sup>2</sup>郑州轻工业学院机电工程学院, 河南 郑州 450002

<sup>3</sup>北京交通大学理学院, 北京 100044

**摘要** 提出一种基于激光准直技术的多自由度误差同时测量方法。采用半导体激光单模光纤组件为光源, 分别以角锥棱镜和分光直角棱镜作为二维直线度误差和三维角度误差的敏感器件, 实现了直线导轨五自由度误差的同时测量, 且测量移动部分无电缆连接。通过理论分析及实验, 验证了方法的可行性和可靠性。在设定参数下, 直线度、俯仰偏摆角和滚转角误差的测量分辨率可分别达到  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.1''$  和  $0.3''$ 。

**关键词** 测量; 多自由度; 误差; 激光准直

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081203

## A Multi-Degree-of-Freedom Geometric Errors Measurement Method

Zhai Yusheng<sup>1</sup> Zhang Zhifeng<sup>1</sup> Su Yuling<sup>1</sup> Wang Xinjie<sup>2</sup> Feng Qibo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China*

<sup>2</sup>*Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China*

<sup>3</sup>*School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

**Abstract** A novel method for simultaneous measurement of multi-degree-of-freedom geometric errors is presented based on laser collimation technique. A single-mode fiber-coupled laser module is used as source and a corner-cube prism and a splitting rectangular prism are adopted in the moving target to sense the straightness errors and angular errors, respectively. In this way, the horizontal and vertical straightness errors as well as pitch, yaw and roll angle errors can be measured simultaneously. Meanwhile, the moving part is wireless. The theoretical analysis and experimental results show that the method is feasible. With the supposed system parameters, the resolution the straightness, pitch, yaw and roll angle error, can reach to  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.1''$  and  $0.3''$ , respectively.

**Key words** measurement; multi-degree-of-freedom; errors; laser collimation

**OCIS codes** 120.1880; 120.4640; 120.1680

## 1 引言

采用多自由度误差同时测量系统测量数控机床及三坐标测量机等大型高精度机械加工设备已成为一个重要的研究热点。近年来有很多采用不同测量技术的多自由度误差同时测量方法的研究, 主要有基于光栅分束<sup>[1]</sup>、基于全反射测角法<sup>[2]</sup>、基于激光动态跟踪定位<sup>[3-4]</sup>以及基于激光干涉和准直相结合的技术<sup>[5-7]</sup>。众多的方法仍存在各自的不足, 尤其是几乎均不能实现对滚转角误差的高精度测量, 而可实现滚转角高精度测量的方法<sup>[8-12]</sup>在多自由度测量集成上又存在不足。

本文提出一种基于激光准直技术的多自由度误差同时测量方法。可实现二维直线度及三维转角误差的同时测量。

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-25; 网络出版日期: 2014-00-00

基金项目: 国家自然科学基金联合项目——南人才培养(U1304507)、河南省高校科技创新团队支持计划(2012IRT-STHN013); 郑州市科技攻关项目(131PPTGG411-1)、校博士基金

作者简介: 翟玉生(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电测试技术方面的研究。E-mail: zhaiyusheng@gmail.com

## 2 测量原理

在多自由度误差同时测量系统中,对于不同的自由度误差,分别采用了各自不同的测量原理。

### 2.1 二维直线度测量原理

直线度误差的测量是以角锥棱镜作为敏感元件,原理如图1所示。测量准直光束入射到沿被测直线导轨移动的角锥棱镜,经其反向返回后,由四象限探测器(QD)接收。当角锥棱镜沿被测导轨移动时,被测导轨的直线度误差  $\Delta x$  ( $\Delta y$ ) 将使角锥棱镜发生相应位移  $\Delta x$  ( $\Delta y$ )。由角锥棱镜特性可知,经其反向返回的准直光束在 QD 上的光斑位移为  $2\Delta x$  ( $2\Delta y$ )。若 QD 的位置分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ , 则直线度误差的理论分辨率可达到  $0.05 \mu\text{m}$ 。

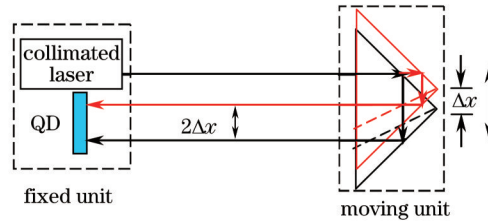


图1 直线度误差测量原理图

Fig.1 Diagram of measuring principle of straightness

### 2.2 俯仰及偏摆角测量原理

俯仰及偏摆角的测量是以平面反射镜为敏感元件,原理如图2所示。测量准直光束入射到沿被测直线导轨移动的平面反射镜,经其反射返回,经聚焦透镜后,由位于透镜焦平面的位置敏感探测器(PSD)接收。当沿被测导轨移动的平面反射镜发生俯仰( $\alpha$ )或偏摆( $\beta$ ),则经其反射的光束将发生其2倍的角度偏向,经透镜聚焦于 PSD 上的像点发生相应的位移,有

$$d_y \approx 2f\alpha, \quad d_x \approx 2f\beta, \quad (1)$$

式中  $f$  为透镜焦距,  $d_x$ 、 $d_y$  分别为像点在 PSD 上  $x$  轴和  $y$  轴方向的位移。则

$$\alpha \approx d_y / (2f), \quad \beta \approx d_x / (2f), \quad (2)$$

若选择透镜焦距  $f = 250 \text{ mm}$ , PSD 的位置分辨率  $0.1 \mu\text{m}$ , 则俯仰偏摆角误差的理论分辨率可达到  $0.04''$ 。

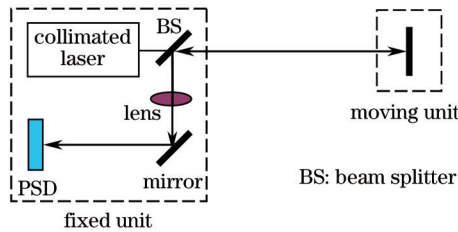


图2 俯仰及偏摆角误差测量原理图

Fig.2 Diagram of measuring principle of pitch and yaw

### 2.3 滚转角测量原理

滚转角误差的测量是以单个直角棱镜作为敏感元件,原理如图3所示。直角棱镜沿待测导轨移动,其斜边面的一部分镀有分束膜(BS coating),垂直入射的测量准直光束经其分束。其中透射光束进入直角棱镜(RP)后返回,包含了滚转角及俯仰角信息,由  $\text{QD}_1$  接收;反射光束包含俯仰角信息,由  $\text{QD}_2$  接收。通过对  $\text{QD}_1$  和  $\text{QD}_2$  上接收的信息差分处理后可实现滚转角测量。

由矢量矩阵法,设入射光方向矢量为  $I_0 = [0 \quad 0 \quad -1]^T$ , RP 初始静止时,经 RP 反射和透射后光束的方向矢量分别为

$$I_1 = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad (3)$$

$$I_2 = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad (4)$$

当 RP 沿  $z$  轴移动时,设 RP 绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三维转角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 在  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  均很小的情况下,旋转顺序的影响可忽略,略去高阶小量后有

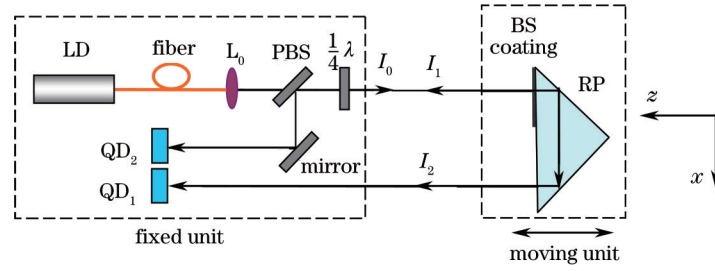


图3 滚转角测量原理图

Fig.3 Diagram of measuring principle of roll

$$R = R_{\alpha} R_{\beta} R_{\gamma} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

设直角棱镜各反射面的法线方向矢量为  $\mathbf{N}$ , 反射矩阵为  $\mathbf{M}$ 。RP 移动后, 有  $\mathbf{N}^R = \mathbf{R}\mathbf{N}$ , 则反射光的方向矢量为

$$\mathbf{I}_1^R = \mathbf{M}_1^R \mathbf{I}_1 = [2\beta \quad -2\alpha \quad 1]^T, \quad (6)$$

入射光  $\mathbf{I}_0$  进入折射率为  $n$  的直角棱镜后, 其方向矢量为

$$\mathbf{I}_0^R = [-(1 - 1/n)\beta \quad (1 - 1/n)\alpha \quad -1]^T, \quad (7)$$

在 RP 内经一次反射后的方向矢量为

$$\mathbf{I}_{01}^R = [1 \quad \gamma - \alpha + (1 - 1/n)\alpha \quad (1 - 1/n)\beta - 2\beta]^T, \quad (8)$$

在 RP 内经两次反射后的方向矢量为

$$\mathbf{I}_{02}^R = [(1 - 1/n)\beta \quad (1 - 1/n)\alpha - 2\alpha \quad 1]^T, \quad (9)$$

经 RP 返回的光束  $\mathbf{I}_2^R$  的方向矢量为

$$\mathbf{I}_2^R = [0 \quad -2\alpha \quad 1]^T. \quad (10)$$

设直角棱镜斜边长为  $L$ , 入射光  $\mathbf{I}_0$  与出射光  $\mathbf{I}_2$  之间距离为  $d$ 。由 (7)~(9) 式可知 RP 移动后, 光束  $\mathbf{I}_2^R$  射出棱镜时在  $y$  方向位移量为

$$\Delta y = d\gamma - L\alpha/n. \quad (11)$$

设直角棱镜到  $\text{QD}_1$  的初始距离为  $z_0$ , 沿  $z$  轴移动距离为  $\Delta z$ , 对比 (3) 式和 (6) 式以及 (4) 式和 (10) 式可知, RP 移动后, 光束  $\mathbf{I}_2^R$  同光束  $\mathbf{I}_1^R$  一样发生了 2 倍俯仰角度的变化 ( $-2\alpha$ ), 其到达  $\text{QD}_1$  时在  $y$  轴方向的位移量为

$$\Delta y_1 = d\gamma - L\alpha/n + (z_0 + \Delta z)\tan(-2\alpha), \quad (12)$$

可写成

$$\Delta y_1 = d\gamma + \Delta y_2, \quad (13)$$

其中

$$\Delta y_2 = (z_0 + \Delta z + L/2n)(-2\alpha), \quad (14)$$

由 (3)、(6) 式可知,  $\Delta y_2$  等于光束  $\mathbf{I}_1^R$  在与 RP 相距  $z_0 + \Delta z + L/2n$  的  $\text{QD}_2$  上的位移。

则

$$\gamma = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{d}. \quad (15)$$

若选择  $d = 60.0 \text{ mm}$ , QD 的位置分辨率  $0.1 \mu\text{m}$ , 滚转角测量的理论分辨率可达到  $0.3''$ 。

## 2.4 多自由度误差同时测量原理

在以上测量原理基础上, 通过对滚转角测量敏感元件直角棱镜适当加工后, 形成的一种多自由度误差同时测量光路结构, 如图 4 所示。光线 1 为经直角棱镜内部反向返回的光束, 光线 2 为棱镜 RP 表面半透半反射膜的反射光束, 光线 3 是经角锥棱镜 RR 反向返回的光束。光线 2 经分束镜  $\text{BS}_1$  的透射光与聚焦透镜  $L_1$ 、PSD 构成激光自准直系统, 实现对俯仰角和偏摆角的测量; 光线 2 经  $\text{BS}_1$  的反射光和光线 1 分别到达  $\text{QD}_2$  和  $\text{QD}_1$ , 两者差分后实现滚转角测量; 光线 3 到达  $\text{QD}_3$ , 实现直线度误差的测量。

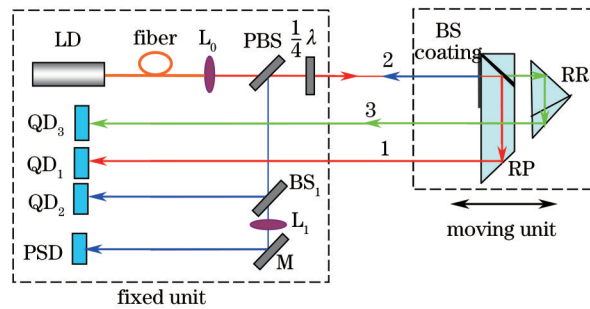


图4 多自由度误差同时测量原理图

Fig.4 Diagram of measuring principle of multi-degree-of-freedom error

### 3 实验结果

为验证方法的可行性,在实验室条件下进行了标定实验。

直线度误差测量的标定采用LG-50型光栅测长仪进行,其线性位移分辨率为 $0.05\ \mu\text{m}$ ,精度 $0.1\ \mu\text{m}$ 。标定结果如图5所示, $x$ 轴和 $y$ 轴方向直线度标定范围均为 $\pm 800\ \mu\text{m}$ ,线性度为0.993,测量分辨率优于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

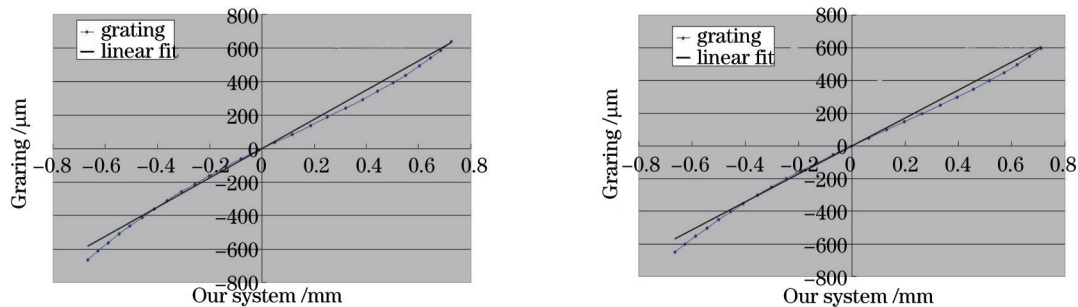


图5 直线度误差标定实验

Fig.5 Calibration results of straightness errors

俯仰、偏摆角测量的标定采用MJS双频激光干涉仪,其测量范围为 $\pm 5^\circ$ ,测量分辨率为 $0.1''$ ,测量精度为 $\pm(0.002D + 0.05L)''$ ,其中 $D$ 是仪器读数, $L$ 是相对移动距离。标定范围设定为 $\pm 400''$ 。标定结果如图6所示,标定点残差分别在 $-3.0\sim 2.5''$ 和 $-2.7\sim 1.5''$ 之间,标准差分别为 $1.3''$ 和 $1.1''$ 。

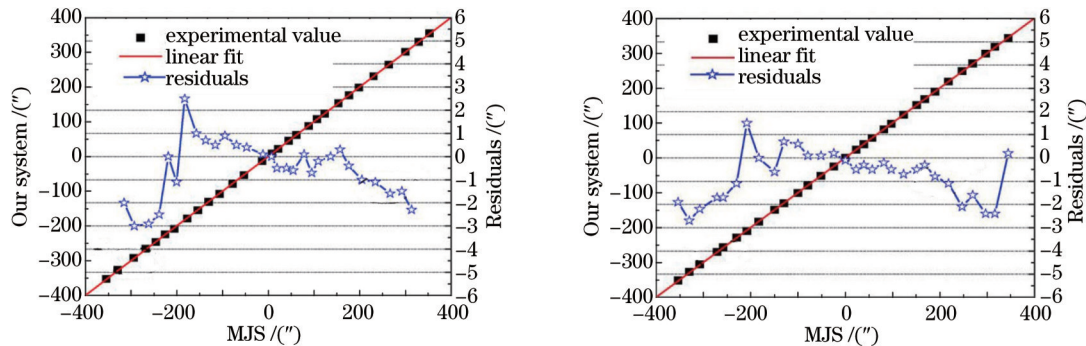


图6 俯仰、偏摆角标定实验

Fig.6 Calibration results of pitch and yaw angle

滚转角测量的标定采用美国API公司的5DLS激光干涉仪,其测量范围为 $\pm 800''$ ,角测量精度为 $(\pm 1.0 + 0.1 S/m)''$ 或1%显示值中较大值,其中 $S$ 为相对移动距离。标定范围设定为 $\pm 100''$ 。标定结果如图7所示,滚转角测量分辨率约 $0.3''$ ,标定点残差在 $-1.5\sim 2.2''$ 之间,标准差为 $1.2''$ 。

综合以上实验结果可以看出,二维直线度、俯仰偏摆角及滚转角误差的测量均具有很好的线性范围,测量分辨率与理论预期值相符。

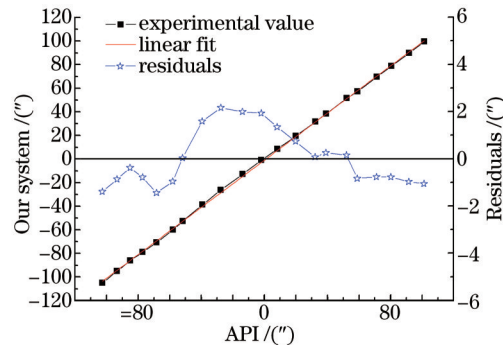


图7 滚转角标定实验

Fig.7 Calibration results of roll angle

## 4 结 论

采用角锥棱镜和直角棱镜作为直线度和角度误差的测量敏感元件,光学结构简单紧凑,利于多自由度误差同时测量系统可以集成并小型化;滚转角测量采用差分结构,可有效抑制外界扰动等因素引起的光线漂移的影响,并避免其他自由度误差的串扰。通过理论分析和实验结果,验证了方法的可行性。在设定参数下,直线度、俯仰偏摆角和滚转角测量分辨率分别可以达到 $0.1\ \mu\text{m}$ , $0.1''$ 和 $0.3''$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Zhigang, He Jin, Zuo Baojun, *et al.*. Research on six-degree-of-freedom calibration system for wind tunnel balances with a collimated laser beam[J]. *Chin Opt Lett*, 2003, 1(2): 82-84.
- 2 Huang P S, Li Y. Laser measurement instrument for fast calibration of machine tools[C]. *Proceedings of ASPE Annual Meeting*, 1996, 14: 644-647.
- 3 Kenta Umetsu, Ryosyu Furutnani, Sonko Osawa *et al.*. Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system[J]. *Meas Sci Technol*, 2005, (16): 2466 - 2472.
- 4 Qi Lin, Zhang Hui, *et al.*. 6 DOF long-range precision tracking system[J]. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004. 5307-5311.
- 5 Jiang Hong, Yin Chunyong. A novel method to measure the roll angle using a transverse zeeman laser[J]. *Chinese J Lasers*, 1999, 26(12): 1085-1089.  
蒋 弘, 殷纯永. 一种测量滚转角的新方法[J]. *中国激光*, 1999, 26(12): 1085-1089.
- 6 Ma Junshan, Wang Xiangzhao, Fang Zujie. Optical precision measurement technique of rolling error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1403-1406.  
马军山, 王向朝, 方祖捷. 滚转角误差的光学精密测量技术研究[J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1403-1406.
- 7 Shiguang Li, Changxi Yang, Enyao Zhang. Compact optical roll-angle sensor with large measurement range and high sensitivity[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(3): 242-244.
- 8 Bruce L Thomas, Henry M Bass, Lloyd K Loftus, *et al.*. Laser aligned five-axis position measurement device[P]. US Patent: 5798828, 1998.
- 9 Liu Chienhung, Jywe Wenyuh, *et al.*. Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(5): 055110.
- 10 Ni J, Wu S M. An on-line measurement technique for machine volumetric error compensation[J]. *ASME Trans Journal of Engineering for Industry*, 1993, 115(1): 85-92.
- 11 Fan K C, Chen M J. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 15-23.
- 12 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin. A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Sensors and Actuators A: Physics*, 2005, 125(1): 100-108.