

文章编号: 0253-2239(2008)12-2344-05

多自由度误差同时测量中的滚转角测量方法

曹 睿^{1,2} 张 斌¹ 冯其波¹ 方恒楚¹ 由凤玲¹

(¹ 北京交通大学理学院, 北京 100044; ² 中国科学院电工研究所, 北京 100080)

摘要 提出了一种滚转角误差测量的新方法, 该测量方法能够实现与其他自由度误差测量相集成, 构成多自由度同时测量系统。系统采用带温控的半导体激光器单模光纤组件作为光源, 有效降低了激光器本身的光线漂移, 为测量提供高精度高稳定性的基准光线; 采用特殊棱镜作为测量的敏感单元, 通过此棱镜出射光线的直线度测量, 间接实现滚转角误差测量。实验过程和数据表明, 测量系统具有很好的稳定性和重复性, 通过与电子水平仪的对比实验, 验证了该方法的可行性, 测量精度约为 2"。

关键词 光学测量; 滚转角误差; 直线度误差; 特殊棱镜; 五自由度误差

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2344

A Method for Roll-Angle Measurement in Multi-Degree-of-Freedom Measuring System

Cao Rui^{1,2} Zhang Bin¹ Feng Qibo¹ Fang Hengchu¹ You Fengling¹

(¹ School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)
(² Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A roll-angle error measurement method which can be integrated with other parameters measurement system is proposed. The light source, single-mode fiber-coupled laser module with thermo-electric cooler (TEC) is used to decrease the laser beam drift, and provide reference beam for accurate and stable measurement. A special prism is used as a sensitive part, and the roll-angle error is obtained through straightness error of the two beams from the special prism. The experimental procedures and results are presented. The results indicate that the system has good repetition and stability. Compared with electronic gradienter, the method for roll-angle error measurement is available, and the accuracy is about 2".

Key words optical measurement; roll-angle error; straightness error; special prism; five-degree-of-freedom errors

1 引 言

数控机床和加工中心的几何位置精度的快速、高精度检测是保证加工精度、产品质量及提高生产率的重要手段。单轴运动的数控机床, 有 6 个误差分量^[1~3]需要检测, 而对于一台典型的三轴加工中心, 加上 3 个坐标轴之间的垂直度误差, 有 21 项几何误差参数需要检测。目前检测这些参数的最常用手段是使用激光干涉仪^[4,5], 但激光干涉仪是单参数测量, 每种误差分量测量都需使用不同附件进行不同的安装调整。在 6 项误差分量中, 滚转角误差测量^[6,7]相对较难。目前利用偏振法进行滚转角误

差测量的研究较多^[8~12], 但测量方法都为独立的测量单元, 不易于或根本无法与其他自由度测量相集成进行多自由度误差同时检测。

本文采用带温控的半导体激光器单模光纤组件作为光源, 采用特殊棱镜作为敏感单元, 通过直线度测量间接实现滚转角误差测量, 从而实现结构简单的多自由度同时测量。

2 测量原理与系统

为易于与其他自由度误差测量相集成, 滚转角误差通过直线度测量间接实现。如图 1 所示, 带温

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(50675017)资助项目。

作者简介: 曹 睿(1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: ruicao2005@163.com

导师简介: 张 斌(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学系统与仪器、光电检测与信息处理、光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: bzhang@bjtu.edu.cn

控的半导体激光器^[13]单模光纤组件作为光源,其出射的光束被准直,经角锥棱镜后向反射,再通过特殊棱镜被分成两束平行光,分别入射到两个四象限探测器 QD1、QD2 上,用来测量导轨同一水平位置上两个不同点处竖直方向的直线度误差。当可移动靶镜随导轨运动副移动时,滚转角的大小

$$\theta_z = (\Delta Y_2 - \Delta Y_1)/h, \quad (1)$$

式中 ΔY_1 、 ΔY_2 为测量导轨沿 Y 方向的直线度误差, h 为两平行光束之间的距离。滚转角测量原理如图 2 所示。

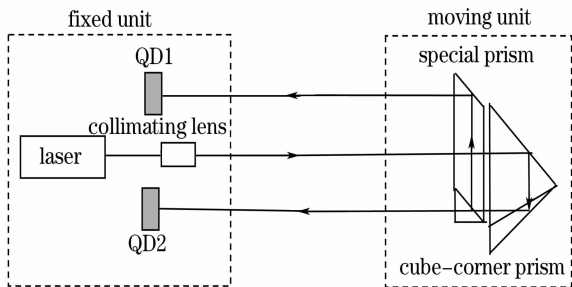


图 1 滚转角测量装置图

Fig. 1 Experimental setup of roll-angle error measurement system

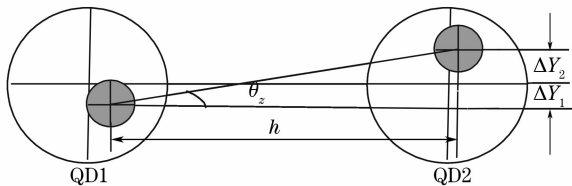


图 2 滚转角测量原理

Fig. 2 Measurement principle of roll angle

特殊棱镜是滚转角测量的敏感单元,由斜方棱镜和分光棱镜胶合而成,严格控制加工过程,保证两出射光束在空间平行。

滚转角测量是通过直线度测量间接实现,角锥棱镜是直线度测量的敏感单元。使用角锥棱镜不但使系统靶镜无电缆连接,方便远距离测量,而且角锥棱镜的后向反射特性可以使直线度测量精度提高一倍。直线度测量精度为 $0.7 \mu\text{m}$, 设特殊棱镜出射两平行光束之间的距离 $h=80 \text{ mm}$, 利用(1)式可以得到滚转角测量精度为 $1.8''$ 。

图 3 所示为集成了滚转角误差、直线度误差、偏摆角及俯仰角误差测量的五自由度误差同时测量系统结构图。系统由测头(固定部分)和靶镜(活动部分)组成。测头部分集成了光学系统、探测器(包括两个四象限探测器 QD1、QD2 和两个位置敏感探测器 PSD1、PSD2)以及信号处理电路;靶镜部分集成了直线度测量的敏感单元角锥棱镜、滚转角测量的敏感单元特殊棱镜和偏摆角及俯仰角测量的敏感单元半反半透镜。测量基准为激光器发射的平行于导轨的准直光束。准直光束经过半反半透镜、特殊棱镜,由角锥棱镜后向反射,此反射光束再次通过特殊棱镜被分成光束 1 和光束 2,用来测量导轨滚转角误差;光束 2 还用来测量导轨水平和竖直方向的直线度误差;由半反半透镜反射的光束 3 用来测量导轨的偏摆角和俯仰角误差。当靶镜随导轨运动副移动时,由四象限探测器和位置敏感探测器接收到的信号经处理后,导轨的五个误差分量即可同时得到。

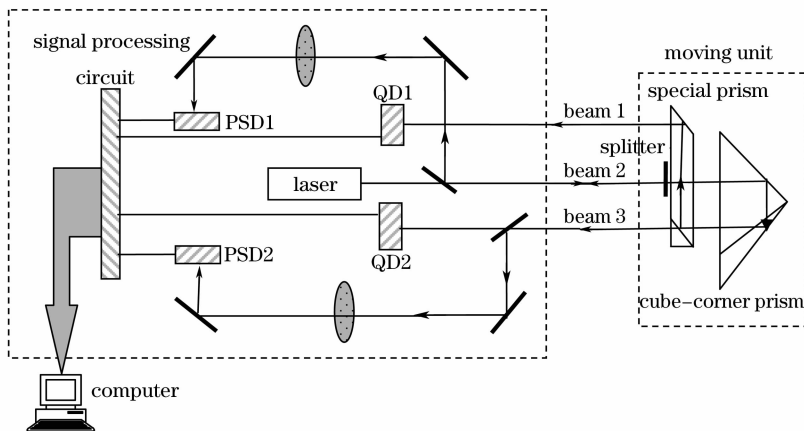


图 3 五自由度误差同时测量系统装置图

Fig. 3 Experimental setup of simultaneous five-degree-of-freedom error measurement

3 实验与分析

为验证测量方法的可行性以及系统的稳定性,在

实验室条件下,进行了稳定性、重复性和测量精度对比实验。

3.1 光源稳定性

滚转角测量以稳定的准直光束为基准,因此需对光源稳定性进行测量。稳定性实验从系统开机开始,利用自动采集功能,连续采集 2 h,测量结果如图 4 所

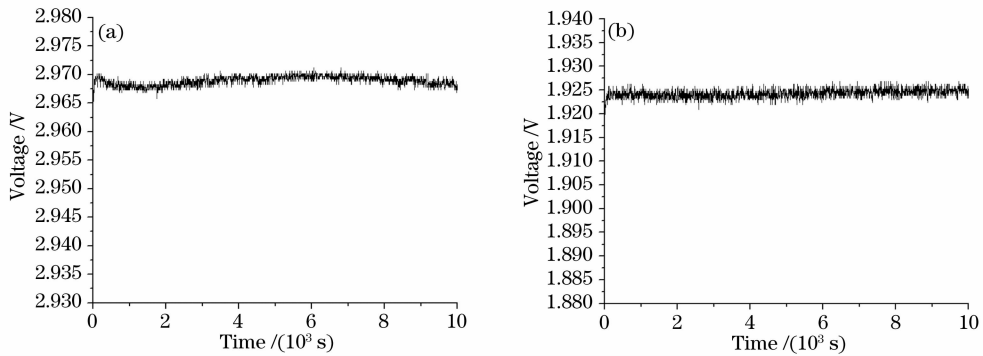


图 4 光束 1(a),光束 2(b)的稳定性

Fig. 4 Stability of laser beam 1 (a), laser beam 2 (b)

3.2 重复性实验

滚转角测量是通过竖直方向直线度测量间接实现的,因此首先对竖直方向直线度误差测量的重复性进行实验。当系统稳定后,在不同时间对导轨进行三次重复性测量,测量点间隔取 62 mm。对测得数据通过首尾相连方法处理后可得结果如图 5 所示,可见,

示。可见,光束 1、2 的稳定性分别为 0.33%,0.22%,表明系统的输出光强较稳定,可作为测量基准,而且系统开机大约 5~10 min 即可稳定工作。

光束 1 竖直方向最大偏差 0.93 μm,光束 2 竖直方向最大偏差 1.1 μm。表明系统在竖直方向直线度误差测量上具有较好重复性。由图中可见,点点对应之间存在一定偏差,其主要原因是导轨运动副与导轨之间存在间隙,使运动副本本身难以达到很高的运动重复测量精度。

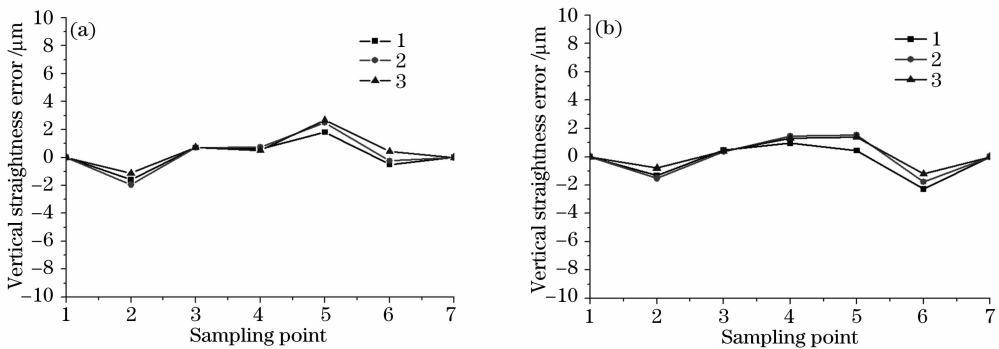


图 5 QD1(a), QD2(b)竖直方向直线度误差测量的重复性

Fig. 5 Repetition of vertical straightness error measurement of QD1 (a), QD2 (b)

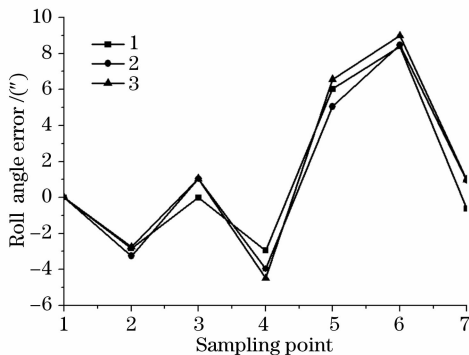


图 6 滚转角误差测量的重复性

Fig. 6 Repetition of roll-angle error measurement

3.3 对比实验

为验证系统测量的有效性和准确性,进行了滚转角测量静态定点对比和导轨滚转角动态测量对比实验。

3.3.1 滚转角测量静态定点对比

静态定点对比是将系统靶镜和水平仪同时固定在滚转平台上,转动角度可以通过驱动电机进行控制。角度值由水平仪和系统同时读出,两者测量角度值对比结果如图 7 所示。

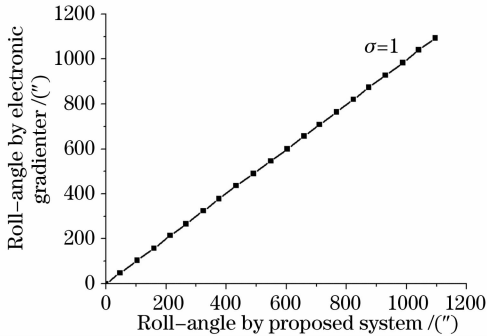


图 7 系统和水平仪滚转角测量静态测量对比

Fig. 7 Static comparison of roll-angle measurement by electronic gradienter and the proposed system

由图 7 可知,系统和水平仪的静态定点对比在 1200"测量范围内,测量数据的线性拟合度为 1,表明系统滚转角误差测量方法有效准确。水平仪的测量精度为 2",可以得到系统测量精度约为 2"。

3.3.2 导轨滚转角测量动态对比

系统与水平仪对同一导轨进行滚转角测量,测量间隔取 62 mm,其对比结果如图 8 所示。

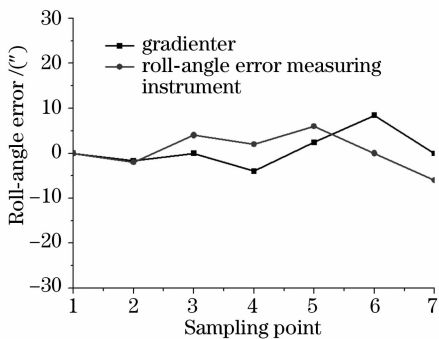


图 8 系统与水平仪滚转角误差测量的动态对比

Fig. 8 Dynamic comparison of roll-angle error measurement by electronic gradienter and the proposed system

由图 8 可见,系统和水平仪的测量趋势比较接近,但点点对应存在一定的偏差。通过分析,造成偏差的主要原因有:

1) 测量系统本身的系统误差,主要是特殊棱镜的加工误差。系统是利用双光束准直实现滚转角的测量,要求两光束严格平行。由于棱镜本身加工误差的存在,使实际的两束光不是真正的平行光,导致测量结果存在偏差。

2) 对比实验时,水平仪、本系统靶镜不能同时

放置于同一测量位置,使得虽然电机驱动导轨运动同样距离,但水平仪、本系统靶镜所测量的却不是相同测点的滚转角度值,从而造成了两者的不重合。

3) 角锥棱镜是直线度测量的敏感器件,当角锥棱镜本身有制造角差时,其出射光线和入射光线不是严格平行,将会给角锥棱镜用于激光准直测量带来系统误差。同时,系统进行测量时,角锥棱镜沿着导轨运动,导轨的偏摆角、俯仰角也会对直线度的测量产生影响^[14],进而影响滚转角的测量结果。

4) 外界环境引起的误差,包括空气环境引起的误差,背景光对四象限探测器的影响和光源及准直系统稳定性引起的误差。

4 结 论

提出了一种滚转角误差测量的方法。实验结果表明,测量系统具有很好的稳定性重复性,系统测量精度约为 2"。与以往的滚转角测量方法相比,系统能够与其他自由度测量系统集成成为多自由度误差同时测量系统。如果保证特殊棱镜的精密加工,尽可能减小加工误差,并且克服参数之间的串扰,减小偏摆角和俯仰角对测量结果的影响,可以进一步提高滚转角误差的测量精度。

参 考 文 献

- Defeng Zheng, Xiangzhao Wang, Feng Tang. An improved method of angle measurement with a position sensitive detector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 403~406
- Zheng Defeng, Wang Xiangzhao, Li Zhongliang et al.. Dynamic measurement of small angle with two prisms [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1255~1259
郑德锋,王向朝,李中梁等.一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1255~1259
- Zheng Defeng, Wang Xiangzhao. Angular displacement measurement based on lateral shearing interferometer using plane-parallel plate[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1125~1129
郑德锋,王向朝.一种基于平板横向剪切干涉的角位移测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1125~1129
- Raymond J. Chaney. Optical apparatus for use with interferometric measuring device[P]. US Patent: 5056921, 1991-10-15
- G. Zhang. Improving the accuracy of angle measurement in machine calibration[J]. *Annals of the CIRP*, 1986, **35**(1): 369~372
- Zhang Zhijiang, Yu Yingjie. Modeling of three dimensional small angle measurement system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2003, **24**(1): 21~25
张之江,于瀛洁.三维小角度测量系统建模[J]. *计量学报*, 2003, **24**(1): 21~25
- 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
- 8 Fang Zhongping. Precision laser roll detector for instrument[D]. Tianjin: Tianjin University, 1993
方仲平. 激光滚转误差测量仪的研究[D]. 天津: 天津大学, 1993
- 9 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Survey of rolling angle measurement methods [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6): 699~702
匡萃芳,冯其波,刘 斌. 滚转角测量方法综述[J]. 光学技术, 2004, **30**(6): 699~702
- 10 Jiang Hong, Yin Chunyong. A novel method to measure the roll angle[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(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, **A26**(12): 1085~1089
- 11 Chen Lei, Zhang Siyao, Guo Hong. A novel method of rolling angle measurement[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(6): 625~628
陈 蕾,章思耀,郭 宏. 一种新的滚转角检测方法[J]. 光子·激光, 2003, **14**(6): 625~628
- 12 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin *et al.*. A novel method for measuring roll[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(4): 468~470
匡萃芳,冯其波,张 斌等. 一种新的滚转角测量方法[J]. 光子·激光, 2006, **17**(4): 468~470
- 13 Dong Hongzhou, Shi Shunxiang, Li Jiali *et al.*. Study on collimation properties of semiconductor laser off-axis beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 851~853
董洪舟,石顺祥,李家立等. 半导体激光器远轴光束的准直特性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 851~853
- 14 Cuifang Kuang, Qibo Feng, Bin Zhang *et al.*. A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **125**:100~108