

# 滚转角测量方法综述

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

**摘要** 精密直线运动系统在高端加工制造等领域具有重要地位,六自由度误差的高精度测量方法与技术是提高其精度的必要手段,而滚转角误差是其中最难测量的一个参数。总结并介绍了目前国内外的多种滚转角测量方法,给出了每种测量方法的原理和发展现状,比较了各种方法的优缺点,讨论了其发展趋势。

**关键词** 测量;滚转角;激光技术

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.040002

## Survey of Rolling Angle Measurement Methods

Zhai Yusheng<sup>1</sup> Zhang Zhifeng<sup>1</sup> Su Yuling<sup>1</sup> Wang Xinjie<sup>2</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*

**Abstract** Precision moving tables are playing an important role in machine tools and measuring machines. In order to achieve higher motion accuracy, it is necessary to measure the motion errors of the moving table and feed back them to control the motion. In the six motion errors, rolling error is the most difficult one to measure. Several developed methods of rolling angle measurement are described in detail. The principle, the status of development and the application situations of each method are displayed. The advantages and disadvantages of them are compared. The trends in the fields are discussed.

**Key words** measurement; rolling angle; laser technology

**OCIS codes** 120.1880; 120.4640; 140.3460

## 1 引言

在高精密机械加工检测等领域,六自由度误差的高精度测量方法与技术的研究一直是重要课题,其中,滚转角误差是六自由度误差中最难测量的一个参数。尽管国内外对滚转角测量的研究进行了几十年,但目前仍处于探索阶段。

传统的滚转角测量方法主要是以重力方向为基准的电子水平仪及以四方铁的位置为基准的组合测量法,电子水平仪的缺点是无法测量竖直轴方向的几何误差,而且不方便同其他误差测量系统集成,组合测量法属于接触式测量,而且测量过程比较繁杂,测量的轴向行程受限,精度也不高。

光学测量由于其非接触及设计灵活等特点成为现代高精度测量的主要手段之一。目前国内外提出的测量滚转角的光学方法有很多,从最终获得滚转角信息的技术手段来看,可以归纳为干涉法、偏振法和几何光学法等几类。本文对各类方法分别进行概述。

## 2 干涉法

干涉技术在高精度测量领域被广泛应用,对滚转角测量来说,从待测信息转化为干涉测量中的参量类

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-11; 网络出版日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金联合项目-河南人才培养(U1304507)、郑州市科技攻关项目(131PPTGG411-1)、校博士基金、河南省高校科技创新团队支持计划(2012IRTSTHN013)

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

型来看又可以分为如下两类。

### 2.1 基于双光路程差的干涉法

该方法通过特定的光学器件或结构使滚转角变化转变成光程差变化。陶卫等<sup>[1]</sup>提出一种双光束干涉测量方法,利用特制的楔形反射光栅作为敏感器件,其原理如图1所示。特制光栅的参数经过设定,使光楔角 $\delta$ 恰好等于光栅的闪耀角,其对应衍射级次为 $m$ ,在此条件下,入射测量光经反射光栅衍射后将沿原路返回。当光栅发生滚转时,返回的双光束产生相应的光程差,通过干涉条纹的变化可以测得滚转角。

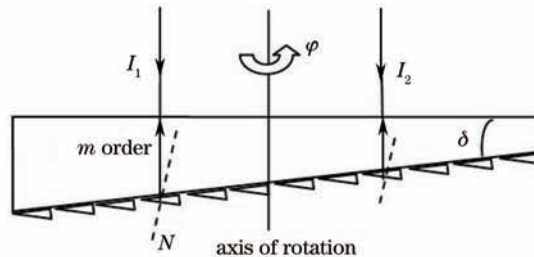


图1 基于光栅楔型平板的滚转角干涉测量法

Fig.1 Interferometry based on the grating-wedge plate

上海理工大学侯文攻等<sup>[2]</sup>利用特殊的偏振分光棱镜及特定的楔型棱镜和反射装置,将滚转角转化成光程差,进而实现干涉测量。此类方法小角度测量分辨率可以达到 $0.1''$ ,但特定光学元件的加工、定位、误差混叠以及同其他自由度测量的集成等问题仍需要进一步解决。

### 2.2 基于拍频信号相位检测的外差干涉法

前苏联 Coronkevich 等<sup>[3]</sup>利用双频纵向塞曼激光器实现滚转角测量,由纵向塞曼激光器输出低频差的两正交圆偏振光,检偏器作为滚转角敏感元件,在光电探测器上得到的合光强信号为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos^2[2\pi(f_1 - f_2)t + \Delta\phi + \Delta\psi], \quad (1)$$

式中 $f_1, f_2$ 为入射光的频率, $\Delta\phi$ 为初始相位差, $\Delta\psi$ 为由检偏器旋转引入的相位差,其与旋转角 $\theta$ 的关系为 $\psi = 2\theta$ 。通过对拍频信号的相位进行测量便能得到转角的大小。此方法结构简单,但测量精度低,测量不确定度在 $10''$ 以上。

为了解决在纵向塞曼效应下测量灵敏度低的问题,清华大学蒋弘等<sup>[4]</sup>提出一种基于横向塞曼激光器的非线性滚转角测量方法。在此基础上,Liu<sup>[5]</sup>提出改进后的方案,将灵敏度提高了4倍,其原理如图2所示。采用 $1/4$ 波片将塞曼激光器的双频线偏振激光变成椭圆偏振光(微椭圆偏化), $1/2$ 波片作为角度敏感器件,通过检测干涉拍频信号的相位变化得到滚转角大小。在滚转角 $\theta$ 很小的情况下,拍频信号相位变化可表示为

$$\Delta\psi = (\tan \delta + \cot \delta)\theta, \quad (2)$$

式中 $\delta$ 为 $1/4$ 波片的快轴与出射正交偏振激光中的某一线偏振光的夹角。当 $\delta$ 趋于零时,可获得无穷大的角放大率,但同时信号的幅值将趋于零,使得信噪比变差。当选择 $\delta$ 为 $1^\circ$ 时,在 $0.5^\circ$ 的测量范围内,使用分辨率为 $0.01^\circ$ 的相位计,转角的测量分辨率理论上可达到 $0.16''$ 。

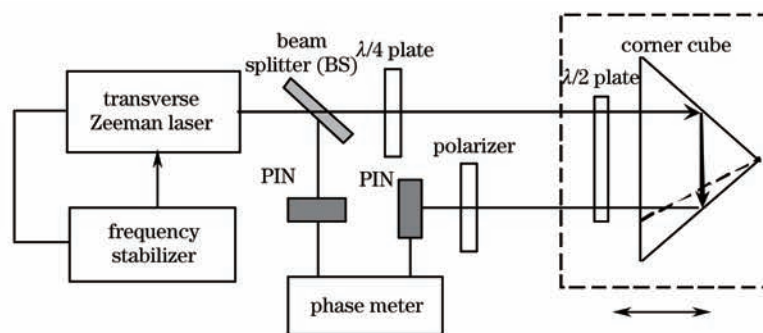


图2 基于横向塞曼激光的相位检测法

Fig.2 A phase detection method based on transverse Zeeman laser

虽然上述方法测角分辨率得到大大提高,但灵敏度的提高是以牺牲信噪比为代价的,且控制电路十分复杂,整体价格昂贵。

Wu<sup>[6]</sup>提出了一种类似的通过检测干涉拍频信号的相位变化实现滚转角测量的外差干涉法,如图3所示。采用声光调制器移频的方法产生频差为60 kHz的低频差正交偏振激光,采用锁相放大器测量两路光之间的相位差。此装置中检偏器固定不动,检偏方向与两正交偏振激光方向呈45°,利用 $\delta$ 波片作为角度敏感元件,这样通过调整 $\delta$ 波片的相位延迟量来提高灵敏度,避免了灵敏度与信噪比之间的矛盾。当系统选用178°的 $\delta$ 波片相位延迟时,在0.5°范围内,放大倍数达到了142,测相精度为0.01°,因此测角分辨率可达到0.25"。此方法避免了使用双频激光器,但是需要利用两个声光调制器,增加了系统的复杂性

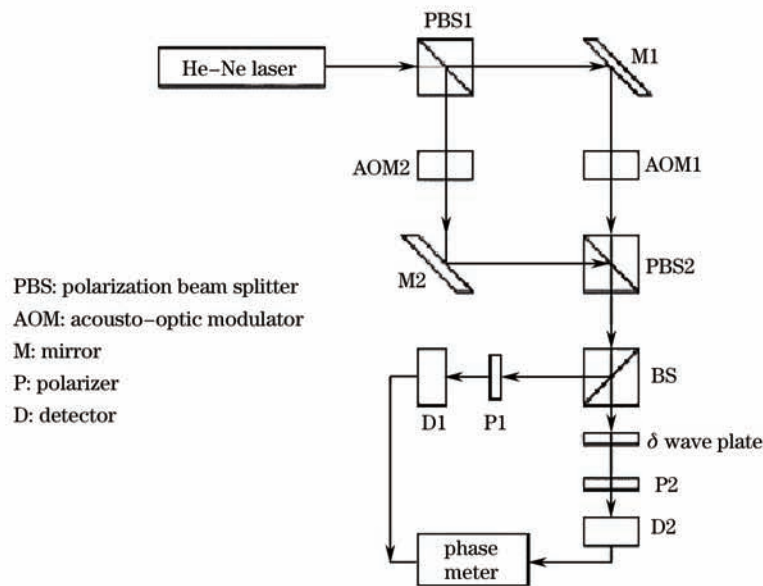


图3 基于 $\delta$ 波片的位相检测法

Fig.3 A method based on  $\delta$  wave plate

上述几种方法均采用相位测量,容易受机械振动以及空气扰动影响,测量精度难以保证。

### 3 偏振法

由于激光偏振面对旋转的敏感性,使得以偏振面作为基准的滚转角测量方法成为一个研究的热点。偏振法又可分为如下几类。

#### 3.1 基于光强变化的非调制测量方法

基于偏振光强变化的滚转角测量法<sup>[7-8]</sup>以渥拉斯顿棱镜、起偏器、格兰泰勒偏振棱镜等偏振器件为测量的敏感器件,其发生滚转使透射测量光的偏振方向产生相应偏转,通过检偏器后,探测光强变化,进而实现滚转角测量。这种方法对光源稳定性要求很高,易受杂散光等因素干扰,滚转角测量灵敏度不高。

匡翠方等<sup>[9]</sup>提出一种以1/4波片作为敏感单元的偏振差分测量方法,线偏振光两次经过作为敏感元件的1/4波片后由渥拉斯顿棱镜分束成两束光,入射到二象限探测器上不同的象限,得到电压差的信号。在初始1/4波片未发生滚转时,两光强相等,电压差值为0,发生滚转后产生相应的电压差值,经计算后得到滚转角大小,由其正负值可以判断其滚转方向。

此类方法结构简单,但是由于光强稳定性及偏振器件精度的制约和影响,测量分辨率不高,约2.5"。而且由于采用的是直接对光强的测量,背景光等的影响不可避免,给测量带来较大误差。

#### 3.2 磁光调制及电光调制法

利用检偏器作为敏感器件的磁光调制法<sup>[10]</sup>可以减少光强稳定性及杂散光对测量带来的影响。

如图4所示,光源发出的激光经起偏器出射后为一束线偏振光,经磁光调制后入射到检偏器时,根据马吕斯定律,出射光强可表示为 $I_{out} = I_0 \cos^2 \theta$ , $\theta$ 为光束偏振方向和检偏器光轴的夹角。设滚转角为 $\theta_z$ ,当起偏

器光轴与检偏器光轴正交时,  $\theta$  可用下式表达:

$$\theta = \pi/2 + \theta_z + A \sin \omega t. \quad (3)$$

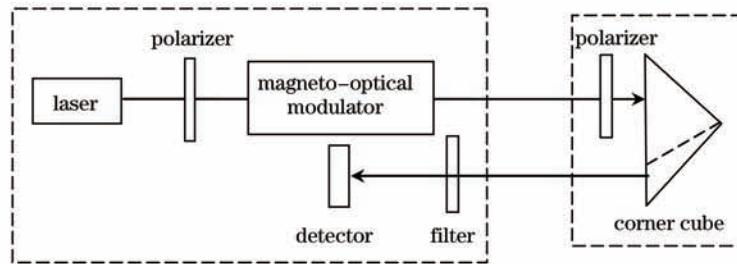


图4 磁光调制法

Fig.4 A method based on magneto-optical modulation

通过滤除直流和低频成分, 光强信号可以表示为

$$I_{out} = \sin(2\theta_z)J_1(2A)\sin \omega t - \cos(2\theta_z)J_2(2A)\cos 2\omega t. \quad (4)$$

当滚转角  $\theta_z = 0$  时, 即光束偏振方向和检偏器光轴处于正交时, 系统工作在极小位置, 接收到的信号为调制频率的二倍频信号。当系统偏离极小位置时, 随着滚转角  $\theta_z$  的增大, 二倍频信号减弱, 基频信号增加, 并根据基频信号的相位来进行辨向。利用锁相放大器对输出信号进行相敏整流和积分运算, 其输出的直流电压与滚转角大小成比例, 根据所测得的直流电压就可以得到滚转角信息。

殷纯永等<sup>[11]</sup>提出一种类似的磁光调制法, 增加了一个  $1/2$  波片代替检偏器作为敏感器件, 在提高测量灵敏度的同时, 可以避免其他角度误差的混叠。

此类方法的主要问题是存在旋光热漂移, 测量精度不高, 为了提高测量精度, 需要复杂的反馈电路, 且对工作环境要求苛刻。

盛秋琴等<sup>[12]</sup>提出一种类似于磁光调制法的基于电光调制的角度测量方法。该系统测量精度受器件间定位精度影响较大, 分辨率较低, 为弧秒量级, 移动部分带电缆。

### 3.3 基于正交双偏振光的方法

陈蕾等<sup>[13]</sup>提出了一种基于正交双偏振光的滚转角光电检测方法, 如图5所示。

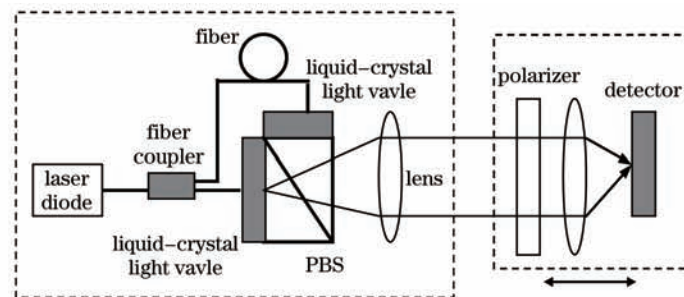


图5 基于液晶光阀的正交偏振法

Fig.5 A method based on orthogonal polarization using liquid crystal light vavle

利用相位差为  $180^\circ$  的两列方波分别调制光路中的两个偏振方向正交的液晶光阀, 两液晶光阀交替导通(透光)和关闭(遮光), 使发射端在同一条光路上输出两束分时交替工作的正交双偏振光, 在接收端放置一初始偏振方向与入射正交偏振光互成  $45^\circ$  的检偏器, 其后用光电探测器接收。当检偏器处于角度零位时, 正交双偏振光通过检偏器投射到光强探测器上的光强相等。当被测物有转角时, 得到分时通过检偏器的光强差为

$$\Delta I = I_0 \cos^2(\pi/4 - \theta) - I_0 \cos^2(\pi/4 + \theta) = I_0 \sin 2\theta. \quad (5)$$

当转角  $\theta$  很小时, 由探测器接收到的光强差  $\Delta I$  与转角  $\theta$  呈线性关系。分时调制法在小角度测量时具有良好的线性, 且光路结构简单。但分辨率较低, 为  $2''$ , 光强探测易受到光源稳定性、耦合器质量、分时电路精度等因素的影响, 测量精度很难得到提高。

Li等<sup>[14]</sup>提出利用分时调制磁铁石榴石, 使出射偏振光分时偏转  $\pm 45^\circ$ , 从而替代了双液晶光阀或两个半导体激光器。该系统测量范围较大, 利用磁光调制器较高的调制频率, 使得测量周期远远小于光强波动周期,



消除了探测器响应周期等影响,使测量精度得到很大提高,但分辨率仍较低,测量系统仍然要采用分时调制电路,磁铁石榴石比较昂贵,且测量移动头带电缆,不方便应用于长导轨现场测量。

## 4 几何法

该方法利用激光良好的空间稳定性,以空间坐标为基准,对多个考察点的坐标变化进行同步的分析计算,从而得到待测量。

马军山等<sup>[15]</sup>提出在移动平台上固定一个长平面反射镜,当移动平台沿  $z$  轴移动时,利用两个固定间距的精密角度传感器测量对应反射光线的角度变化,其包含了平面反射镜的面形误差和滚转角信息,通过  $z$  轴方向的连续扫描采样后对数据进行分析处理,可以测得滚转角,结构原理如图 6 所示。此方法尽管采用了两点法消除反射镜自身面形带来的误差,从而实现对滚转角的高精度测量,测量精度约  $0.1''$ ,但由于需要一块和导轨一样长的平面镜,只能应用于短行程导轨的滚转角测量。在此基础上发展出的方法<sup>[16]</sup>仍存在误差混叠等影响测量精度的问题。

张之江等<sup>[17]</sup>提出一种利用反射 V 型镜作为测量敏感器件的三维小角度测量系统。透镜焦平面上一点经透镜及 V 型镜反射后,在位于焦平面的 CCD 上成两点像,通过探测两像点位移变化计算得出滚转角的大小。该方法测量范围较大,但滚转角分辨率仅为  $1.4''$ ,且测量精度受反射面平面度等影响难以提高。

在几何法中,平行双光束法是最为简洁的滚转角测量方法,通过测量移动平台上两个不同点的直线度,经过计算得到滚转角大小。

Baldwin<sup>[18]</sup>提出一种基于平行双光路实现滚转角测量的方法,如图 7 所示。Wollaston 棱镜将入射的偏振方向互相垂直的双频激光彼此分离,经 V 型反射镜反射后原路返回。当 V 型反射镜发生平移时,两反射光产生光程差变化,通过干涉条纹变化可以测得此位移,即直线度误差。通过采用平行双光束,利用两路测量系统对 V 型反射镜的不同位置同时进行测量,计算后可得滚转角误差。

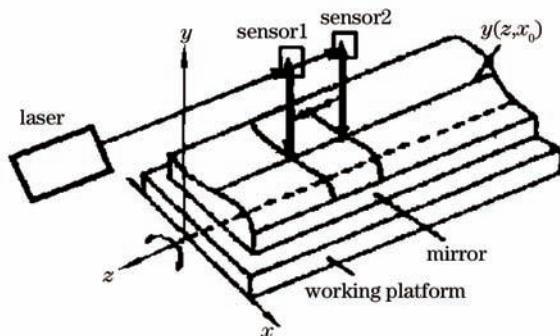


图 6 两点法

Fig.6 A method based on two point method

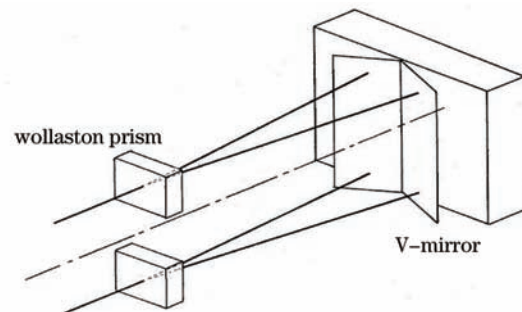


图 7 一种基于干涉测量的平行双光束法

Fig.7 A parallel double-beam method based on interferometry

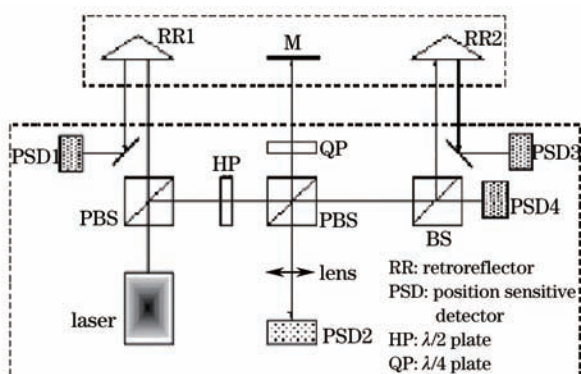


图 8 一种采用角锥棱镜的平行双光束法

Fig.8 A parallel double-beam method based on retroreflector

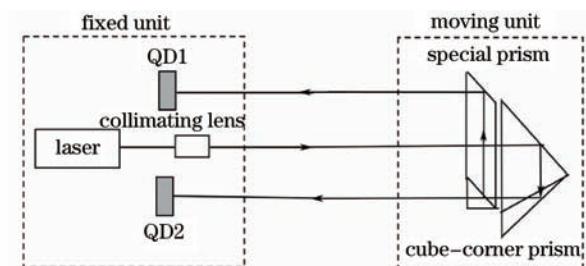


图 9 一种基于特殊斜方棱镜的平行双光束法

Fig.9 A parallel double-beam method based on a special prism

Fan<sup>[19]</sup>和Huang<sup>[20]</sup>分别在各自提出的多自由度误差测量系统中采用了相同的一种平行双光束法来对滚转角进行测量,如图8所示,利用角锥棱镜作为位置敏感器件,使探测器放置在固定单元中,既提高了测量灵敏度,又使测量移动部分不带电缆。

曹睿等<sup>[21]</sup>提出一种采用特殊斜方棱镜作为敏感元件的平行双光束滚转角测量方法,原理如图9所示。准直激光束经移动单元上的角锥棱镜反向,通过特殊的斜方棱镜后分束为两束平行光,分别由固定单元的两个四象限探测器(QD)接收,通过两个探测器上光斑位置的变化可以计算出滚转角的变化。

以上几种方法存在的主要问题是双光束的平行性对测量的影响以及激光光线漂移的影响仍然没有得到很好的控制或消除。

## 5 结束语

通过以上分析可以看出,对于滚转角测量所采用的光学测量方法和技术综合了激光技术、几何光学、干涉、衍射、偏振等众多光学测量手段,各种测量方法各有优势及不足,在具体应用中必须根据实际需要,在测量精度、靶镜移动距离、实时性、集成性、经济性以及系统小型化等多方面权衡考虑。

从机械加工检测等行业需求出发,对于滚转角测量的研究趋势是高精度、利于多自由度误差同时测量集成以及测量系统小型化,以满足现代高端机械加工行业等的在线、实时、多参数同时检测的需要。

基于激光准直技术的几何法由于其原理简单、光路结构灵活,在系统集成及小型化等方面具有优势,因此,在实时在线检测的需求背景下,基于激光准直技术<sup>[22-23]</sup>的方法将会得到更多关注。其主要研究发展方向是实现滚转角测量误差分离及平行性误差的补偿<sup>[24]</sup>,以及对激光准直光线漂移的实时测量和补偿,以进一步提高测量精度。此外,对二元元件及更多角度敏感物理效应的探索研究将是开发新技术手段的一个主要方向。

## 参考文献

- 1 Tao Wei, Pu Zhaobang, Zhang Zhuo. Grating wedge disk and its application in the measurement of rotating angle [J]. *J Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(4): 371-377.  
陶卫, 浦昭邦, 张琢. 光栅楔形平板及其在转角测量中的应用[J]. *光电子·激光*, 2002, 13(4): 371-377.
- 2 Hou Wenmei, Zhao Xianbin, Zhang Yunbo. A Laser Interferometer System for Measuring Micro Roll Angle [P]. Chinese Patent, 101650166B, 2012-04-11.  
侯文玫, 赵宪斌, 张运波. 用于测量微滚转角的激光干涉系统[P]. 中国专利 101650166B, 2012-04-11.
- 3 V P Coronkevich, G G Tarasov, B A Hanov. Roll angle measurement with dual-frequency laser [J]. *Automeasurement*, 1974, (1): 68-71.
- 4 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.
- 5 Liu Zhongyao. Roll angle interferometer by means of wave plates [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 104(2): 127-131.
- 6 Wu Chien-Ming. Roll angular displacement measurement system with microradian accuracy [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 116(1): 145-149.
- 7 Lau K C, Liu Y Q. Five-Axis/Six-Axis Laser Measuring System [P]. US Patent 6049377, 2000-04-11.
- 8 Jeremy John Kroll. Six Degree of Freedom Optical Sensor for Dynamic Measurement of Linear Axes [D]. Charlotte: University of North Carolina at Charlotte, 2003.
- 9 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin, *et al.*. A new 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]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 468-470.
- 10 Sun Changku, Zhou Fuqiang, Liu Yue. A six degree-of-freedom measuring system [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 1998, 19(4): 362-365.  
孙长库, 周富强, 刘越. 六自由度测试系统[J]. *仪器仪表学报*, 1998, 19(4): 362-365.
- 11 Yin Chunyong, Xie Guangping, Cheng Xiangyin, *et al.*. Measurement method of rolling angle [J]. *J Tsinghua University (Science and Technology)*, 1996, 36(10): 86-91.  
殷纯永, 谢广平, 成相印, 等. 滚转角测量方法的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1996, 36(10): 86-91.

- 12 Sheng Qiuqin, Lü Fuyun, Chen Kai, et al.. Second level information transfer device based on electro-optic effect [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2003, 14(12): 1365-1367.  
盛秋琴, 吕福云, 陈凯, 等. 电光秒级角度信息传递装置[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(12): 1365-1367.
- 13 Chen Lei, Zhang Enyao, Guo Hong, et al.. A novel method of rolling angle measurement [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2003, 14(6): 625-628.  
陈蕾, 张恩耀, 郭宏, 等. 一种新的滚转角检测方法[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(6): 625-628.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 Gao Wei, Arai Y, Shibuya A, et al.. Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 96-103.
- 17 Zhang Zhijiang, Yu Yingjie. Modeling of three-dimensional small angle measurement system [J]. *Acta Meterologica 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.
- 18 Richard R Baldwin. Interferometer System for Measurement Straightness and Roll [P]. US Patent, 3790284, 1974-02-05.
- 19 Fan K C. A six-degree-of-freedom measurement system for motion accuracy of linear stages [J]. *International J Mach Tools Manufact*, 1998, 38(3): 155-164.
- 20 P S Huang, J Ni. On-line error compensation of coordinate measuring machines [J]. *J Mach Tools Manufact*, 1995, 35(5): 725-738.
- 21 Cao Rui, Zhang Bin, Feng Qibo, et al.. A method for roll-angle measurement in multi-degree-of-freedom measuring system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2344-2348.  
曹睿, 张斌, 冯其波, 等. 多自由度误差同时测量中的滚转角测量方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2344-2348.
- 22 Li Yao, Wang Ding, Guo Xiaoyang, et al.. Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on CMOS sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0916002.  
李耀, 王丁, 郭晓杨, 等. 基于CMOS传感器的高速高精度激光光束自动准直系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0916002.
- 23 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, et al.. Optic system design of the compact collimator for LED source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022203.  
苏宙平, 阙立志, 朱焯伟, 等. 用于LED光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022203.
- 24 Zhai Yusheng, Feng Qibo, Zhang Bin, et al.. A method of three-dimensional rotation measurement based on rectangular-prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 309-312.  
翟玉生, 冯其波, 张斌, 等. 基于直角棱镜的三维转角测量方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 309-312.