

## 激光与光电子学进展

## 基于偏振的双准直光束测量滚转角的自校准方法

马凤瑞, 段发阶\*, 刘文正, 傅晓, 张聪

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 应用双准直光束测量滚转角时, 双准直光束夹角易受环境变化、机械形变等因素的干扰, 严重影响测量精度。双准直光束测量滚转角对光斑位置敏感, 而偏振测量滚转角取决于入射光的偏振态, 受激光角漂的影响相对较小。因此, 为提升长距离下五自由度测量中滚转角的误差测量精度, 提出了一种基于偏振的双准直光束测量滚转角的自校准方法, 在导轨的不同位置使用双准直光束和偏振分别测量接收端的滚转角姿态, 计算出双准直光束夹角, 进而校准双准直光束测量结果, 提升测量精度。实验结果表明: 在测量范围为 0.75~2.00 m 内, 校准后滚转角测量误差减小 88.97%, 满足长距离实时滚转角测量对高精度、易装调的要求。

**关键词** 滚转角测量; 双准直光束; 偏振; 自校准; 长距离

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223032

## Self-Calibration Method for Roll Angle Measurements of Dual Beams Based on Polarization

Ma Fengrui, Duan Fajie\*, Liu Wenzheng, Fu Xiao, Zhang Cong

State Key Lab of Precision Measuring Technology &amp; Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** When dual beams are used to measure the roll angle, the angle between the double-collimated beams is easily disturbed by environmental changes, mechanical deformation, and other factors, which seriously affect measurement accuracy. The roll angle measured by the dual beam is sensitive to the spot position. By contrast, the roll angle measured by polarization depends on the polarization state of the incident light and is relatively less affected by laser angle drift. Therefore, to improve the accuracy of the roll error in five-degree-of-freedom measurements at long distances, a polarization-based roll angle optical path is proposed. The path is used to measure the roll angle of the sensor at different positions, calculate the angle between the dual beams, and perform calibrations, thus improving measurement accuracy. The test results show that in the measurement range of 0.75–2.00 m, the roll angle measurement error after compensation is reduced by 88.97%. This meets the long-distance roll angle measurement requirements for high precision and easy installation.

**Key words** roll angle measurement; dual beam; polarization; self-calibration; long distance

## 1 引言

数控机床是高端装备制造的基础设备, 其几何误差的测量及校准是提升机床产品加工精度的重要途径和有效手段<sup>[1-2]</sup>。机床部件在导轨上移动时包括 3 项移动误差和 3 项转角误差<sup>[3]</sup>。多自由度测量方法能同时测量机床单轴的多项误差, 具有测量快速、成本低廉、

便于集成等优点。这使得在线测量机床几何误差变得可行, 已广泛应用于航空航天<sup>[4-5]</sup>、机械加工制造<sup>[6]</sup>等领域。使用多自由度测量方法时, 滚转角的测量精度较低且难以集成<sup>[7]</sup>, 因此研究一种长距离高精度的滚转角在线测量方法具有重要的意义。

匡翠方等<sup>[8]</sup>提出一种基于偏振的滚转角测量方法, 令正交双偏振光经过检偏器并获得其光强差值的

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2022-12-26; 录用日期: 2023-01-04; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010800)、国家自然科学基金(61905175, 61971307)、国家重点实验室探索性课题(Pilt2103)、霍英东教育基金会(171055)、青年人才托举工程(2021QNRC001)、广东省重点研发计划(2020B0404030001)、国防科技重点实验室基金(6142212210304)

通信作者: \*fjduan@tju.edu.cn

幅度,从而解算滚转角,其分辨力可达 2.5",也易于集成,但对偏振器件与光源稳定性要求较高。杨振堃等<sup>[9]</sup>提出一种能够同步测量线性位移机构的滚转角和运动直线度的激光外差干涉系统,该系统的测量精度高,稳定性较好,但成本较高,结构复杂。于雪等<sup>[10]</sup>提出了一种基于泰伯莫尔效应的滚转角测量方法,通过照射在 CCD 上的泰伯莫尔条纹的倾角和宽度测算滚转角,该系统分辨力为 0.78",且易于搭建,但图像的处理速度相对较慢,且测量距离受限,难以实现长距离的实时测量。李娟等<sup>[11]</sup>提出一种基于五角棱镜的滚转角测量方法,通过双平行准直光束所测垂直度误差间接测量滚转角,该系统分辨力优于 0.15",且易于集成、精度较高,但引入双准直光束夹角后,测量结果存在误差。为了减弱空气扰动及系统误差造成的激光漂移影响<sup>[12-13]</sup>,匡翠方等<sup>[14]</sup>针对长距离测量提出一种基于共光路校准原理的滚转角测量方法,用以减少环境干扰,提高测量精度,但在长时间使用后双准直光束间依然会产生夹角,这会影响滚转角的测量。基于偏振的滚转角测量方法精度较低,基于激光外差干涉的滚

转角测量方法成本较高、不易集成,基于泰伯莫尔条纹的滚转角测量方法数据处理较慢,经过对比,基于双准直光束的滚转角测量方法具有精度高、成本低、易集成等优势,广泛应用于数控机床的实时测量<sup>[15]</sup>,但因双准直光束不平行引入的误差会严重影响测量精度,该方法需要通过校准或补偿的方式来提升测量精度。

综上,为了校准误差并实现实时测量,提高滚转角测量精度,本文提出一种操作简单、实时性强的自校准方法,研究了滚转角测量及自校准原理,改进滚转角测量光路,搭建滚转角测量装置并完成滚转角的标定与对比实验,最后通过实验证明该自校准方法的有效性。

## 2 基本原理

### 2.1 滚转角测量光路结构

基于偏振的滚转角自校准测量结构由发射端和接收端组成,如图 1 所示。发射端固定并出射两条平行光束和一条具有特定偏振方向的线偏振光;接收端放置传感器,其随机床加工平台移动并进行测量。

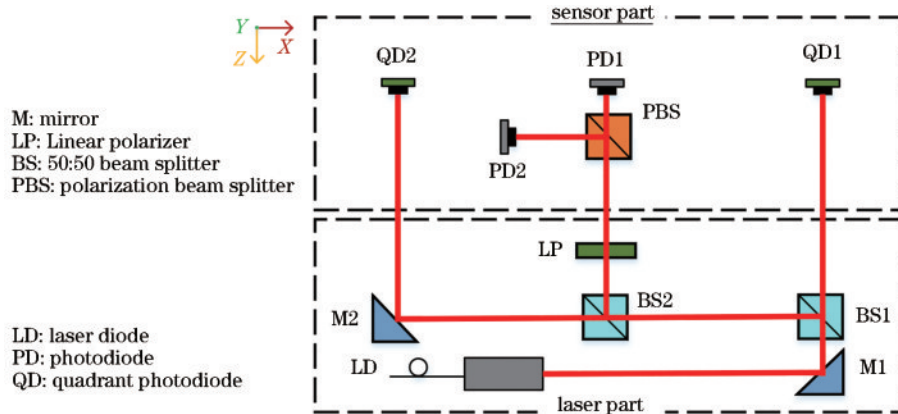


图 1 基于偏振的滚转角自校准测量结构图

Fig. 1 Structure diagram of self-calibration roll angle measurement based on polarization splitting

由激光器发射的激光被反射镜 M1 反射,透射分光镜 BS1 的激光照射在 QD1 上,该过程可以测量出二维直线度。被 BS1 反射的光束再经 BS2 分成两束光,透射的光束被反射镜 M2 反射后照射在 QD2 上,该过程也能测量二维直线度,利用两光束之间的距离以及 QD1、QD2 所测垂直直线度可以解算滚转角误差,此时测量结果包含因双准直光束不平行引入的误差,该误差与测量距离成正比,这对长测量距离的影响十分严重。

经 BS2 反射的光束经过线性偏振片 LP 后得到特定偏振方向的线偏振光,该光束经过接收端的偏振镜后由于双折射效应分成 P 光和 S 光并分别照射在 PD1 和 PD2 上,从而将光强转换为电信号,再通过测量 PD1 和 PD2 电压变化,得到当前装置的滚转角误差。

### 2.2 基于双准直光束的滚转角测量原理

基于双准直光束的滚转角测量原理如图 2 所示,

两束激光分别照射在 QD1 和 QD2 上,当接收端产生滚转角  $\epsilon_{dz}$  时,QD1 和 QD2 分别在 Y 轴方向上产生垂直直线度  $\delta_{yr}$  和  $\delta_{yl}$ ,光斑分别在 QD1、QD2 的 Y 轴方向上产生偏移  $-\Delta y_{QD1}$  和  $-\Delta y_{QD2}$ 。双准直光束在 X 轴方向的间距为  $L$ ,该方法可测得滚转角  $\epsilon_{droll}, \epsilon_{droll}$  可表示为

$$\epsilon_{droll} = \epsilon_{dz} = \frac{\delta_{yr} - \delta_{yl}}{L} = \frac{\Delta y_{QD2} - \Delta y_{QD1}}{L} \quad (1)$$

将测量装置固定在电动角位台上,控制电动角位台产生滚转角,并由激光干涉仪得到该值,同时记录双准直光束在 QD1 和 QD2 上产生的直线度变化量  $-\Delta y_{QD1}$  和  $-\Delta y_{QD2}$ ,代入式(1)即可计算出双光束间距,经实验测定  $L$  为 275.23 mm。

基于双准直光束的滚转角测量方法的测量精度较高,但当激光产生漂移,双准直光束间的夹角也会变化,从而引入滚转角测量误差  $\Delta\epsilon_{droll}$ ,如图 3 所示。

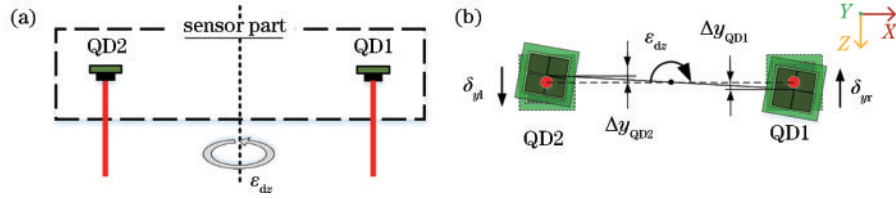


图 2 基于双准直光束的滚转角测量原理。(a)光路结构;(b)滚转角与 QD1 和 QD2 上光斑位置的关系

Fig. 2 Measuring principle of roll angle based on dual beam. (a) Optical configuration; (b) relationship between roll angle and light spot positions of QD1 and QD2

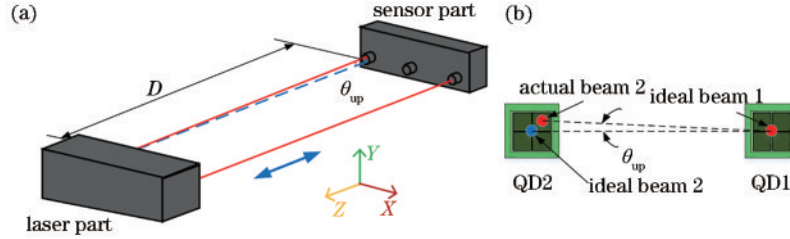


图 3 双准直光束夹角引起的滚转角测量误差。(a)光路结构;(b) QD1 和 QD2 上光斑的位置

Fig. 3 Roll error measurement caused by non-parallelism. (a) Optical configuration; (b) position of light spot on QD1 and QD2

假设 Beam 1 相对 Beam 2 存在角度漂移  $\theta_{up}$ , 这会在 QD1 的 Y 轴方向产生偏移  $\Delta\epsilon_{droll}, \Delta\epsilon_{droll}$  可表示为

$$\Delta\epsilon_{droll} = \frac{\theta_{up} D}{L}, \quad (2)$$

式中:  $D$  为测量距离。  $\Delta\epsilon_{droll}$  随  $D$  呈线性变化, 其在长距离测量中引入的误差难以忽视, 如: 当  $L$  为 100 mm、  $D$  为 1000 mm 时, 双准直光束夹角每变化  $1''$ , 会引入  $10''$  的  $\Delta\epsilon_{droll}$ 。

分析当前光路中器件摆放精度的影响, 基于双准直光束的滚转角测量光路如图 4 所示, 理想情况下准直器出射的激光方向矢量  $I_1$  可表示为

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

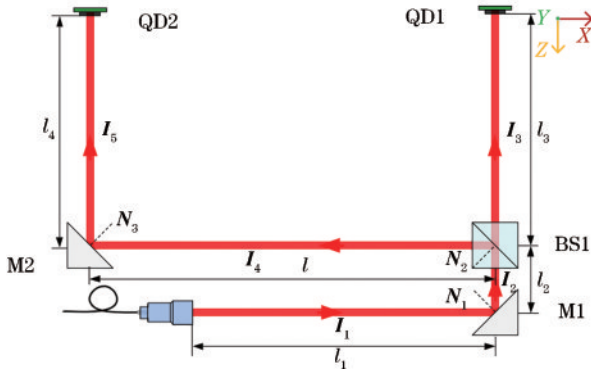


图 4 基于双准直光束的滚转角测量光路图

Fig. 4 Light path of roll angle based on dual beam

当准直器存在角度误差  $[\epsilon_{xc}, \epsilon_{yc}, \epsilon_{zc}]$  时, 旋转矩阵为  $S_C$ , 此时出射的激光方向矢量  $I_1'$  可表示为

$$I_1' = S_C I_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zc} & \epsilon_{yc} \\ \epsilon_{zc} & 1 & -\epsilon_{xc} \\ -\epsilon_{yc} & \epsilon_{xc} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \epsilon_{zc} \\ -\epsilon_{yc} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在理想情况下, M1 法线为  $N_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T$ , 当其存在角度误差  $[\epsilon_{xm1}, \epsilon_{ym1}, \epsilon_{zm1}]$  时, 旋转矩阵为  $S_{M1}$ , 法线为  $N_1'$ , 反射作用矩阵为  $R_1'$ , 此时反射的激光方向矢量  $I_2'$  可表示为

在理想情况下, M1 法线为  $N_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T$ , 当其存在角度误差  $[\epsilon_{xm1}, \epsilon_{ym1}, \epsilon_{zm1}]$  时, 旋转矩阵为  $S_{M1}$ , 法线为  $N_1'$ , 反射作用矩阵为  $R_1'$ , 此时反射的激光方向矢量  $I_2'$  可表示为

$$N_1' = S_{M1} N_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zm1} & \epsilon_{ym1} \\ \epsilon_{zm1} & 1 & -\epsilon_{xm1} \\ -\epsilon_{ym1} & \epsilon_{xm1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{ym1} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{zm1} + \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{xm1} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{ym1} - \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$I_2' = R_1' I_1' = \begin{bmatrix} -2\epsilon_{ym1} & \epsilon_{xm1} - \epsilon_{zm1} & -1 \\ \epsilon_{xm1} - \epsilon_{zm1} & 1 & \epsilon_{xm1} - \epsilon_{zm1} \\ -1 & \epsilon_{xm1} - \epsilon_{zm1} & 2\epsilon_{ym1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \epsilon_{zc} \\ -\epsilon_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{yc} - 2\epsilon_{ym1} \\ \epsilon_{zc} + \epsilon_{xm1} - \epsilon_{zm1} \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在理想情况下, BS1 法线为  $N_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T$ , 当其存在角度误差  $[\epsilon_{xBS1}, \epsilon_{yBS1}, \epsilon_{zBS1}]$  时, 透射的激光不受影响, 方向矢量为  $I_3' = I_2'$ ; 旋转矩阵为  $S_{BS1}$ , 法线为  $N_2'$ , 反射作用矩阵为  $R_2'$ , 此时反射的激光方向

在理想情况下, BS1 法线为  $N_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T$ , 当其存在角度误差  $[\epsilon_{xBS1}, \epsilon_{yBS1}, \epsilon_{zBS1}]$  时, 透射的激光不受影响, 方向矢量为  $I_3' = I_2'$ ; 旋转矩阵为  $S_{BS1}$ , 法线为  $N_2'$ , 反射作用矩阵为  $R_2'$ , 此时反射的激光方向

矢量  $I_4$  可表示为

$$N'_2 = S_{BS1} N_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zBS1} & \epsilon_{yBS1} \\ \epsilon_{zBS1} & 1 & -\epsilon_{xBS1} \\ -\epsilon_{yBS1} & \epsilon_{xBS1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{yBS1} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{zBS1} - \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{xBS1} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{yBS1} + \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$I'_4 = R'_2 I'_2 = \begin{bmatrix} 2\epsilon_{yBS1} & -\epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} & 1 \\ -\epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} & 1 & \epsilon_{xBS1} + \epsilon_{zBS1} \\ 1 & \epsilon_{xBS1} + \epsilon_{zBS1} & -2\epsilon_{yBS1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{yC} - 2\epsilon_{yM1} \\ \epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ \epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} - \epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} \\ \epsilon_{yC} - 2\epsilon_{yM1} + 2\epsilon_{yBS1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在理想情况下, M2 法线为  $N_3 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{2}, 0, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right]^T$ , 当其存在角度误差  $[\epsilon_{xM2}, \epsilon_{yM2}, \epsilon_{zM2}]$  时, 旋转矩阵为  $S_{M2}$ , 法线为  $N'_3$ , 反射作用矩阵为  $R'_3$ , 此时反射的激光方向矢量  $I'_5$  可表示为

$$N'_3 = S_{M2} N_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zM2} & \epsilon_{yM2} \\ \epsilon_{zM2} & 1 & -\epsilon_{xM2} \\ -\epsilon_{yM2} & \epsilon_{xM2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{yM2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{zM2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{xM2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_{yM2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$I'_5 = R'_3 I'_4 = \begin{bmatrix} 2\epsilon_{yM2} & -\epsilon_{xM2} - \epsilon_{zM2} & 1 \\ -\epsilon_{xM2} - \epsilon_{zM2} & 1 & \epsilon_{xM2} + \epsilon_{zM2} \\ 1 & \epsilon_{xM2} + \epsilon_{zM2} & -2\epsilon_{yM2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ \epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} - \epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} \\ \epsilon_{yC} - 2\epsilon_{yM1} + 2\epsilon_{yBS1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{yC} - 2\epsilon_{yM1} + 2\epsilon_{yBS1} - 2\epsilon_{yM2} \\ \epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} - \epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} + \epsilon_{xM2} + \epsilon_{zM2} \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过上述计算, 可得考虑摆放精度情况下的误差

模型为

$$\begin{cases} \Delta\delta_{yr} = -\epsilon_{zC} l_1 - (\epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1})(l_2 + l_3) \\ \Delta\delta_{yl} = -\epsilon_{zC} l_1 - (\epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1}) l_2 - \\ \quad (\epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} - \epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1}) l - \\ \quad (\epsilon_{zC} + \epsilon_{xM1} - \epsilon_{zM1} - \epsilon_{xBS1} - \epsilon_{zBS1} + \epsilon_{xM2} + \epsilon_{zM2}) l_4, \\ \Delta\epsilon_z = \frac{\Delta\delta_{yr} - \Delta\delta_{yl}}{l} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $\Delta\delta_{yr}$ 、 $\Delta\delta_{yl}$ 、 $\Delta\epsilon_z$  分别为 QD1 所测垂直直线度、QD2 所测垂直直线度、滚转角由摆放精度引入的误差, 由式(11)可知, 三者与测量距离有关, 可以通过标定进行修正。

### 2.3 基于偏振的滚转角测量原理

激光光束的漂移以及测量装置的形变都会引起激光角漂, 进而在双准直光束间产生夹角, 激光束漂移的成因主要有激光器的热漂移、空气折射率变化引起的漂移<sup>[16]</sup>、大气湍流引起的漂移等<sup>[17]</sup>; 测量装置形变的成因有金属蠕变、热变形等。基于双准直光束的滚转角测量方法对光斑位置敏感, 因此在长距离测量中测量结果受角漂影响较大; 而基于偏振的滚转角测量则对光斑位置不敏感, 其测量结果只取决于 P 光和 S 光的分光。

基于偏振的滚转角测量原理如图 5 所示, 首先在 PBS 上建立坐标系  $XOY$ , 通过调整 LP 设定入射光的振动方向。当接收端产生滚转角时, 入射光的偏振矢量相对转动后的  $X'OY'$  产生变化, 经过 PBS 分光后, 照射在 PD1 和 PD2 上的光强随之变化, 因此通过电信号能够测得滚转角。

经过 LP 调整后, 入射光的琼斯矢量  $E_i$  可表示为

$$E_i = [E_x \ E_y]^T = [E \ 0]^T, \quad (12)$$

式中:  $E_x$  为偏振光在 X 轴方向的分量;  $E_y$  为偏振光在 Y 轴方向的分量;  $E$  为偏振光振幅。

当接收端产生滚转角  $\epsilon_{pc}$  时, 入射光从  $XOY$  转换到  $X'OY'$  的琼斯矩阵  $M_T$  可表示为

$$M_T = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_{pc} & -\sin \epsilon_{pc} \\ \sin \epsilon_{pc} & \cos \epsilon_{pc} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

PBS 的琼斯矩阵  $M_{PBS}$  可表示为

$$M_{PBS} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & -\sin \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

则经过 PBS 后偏振光的琼斯矢量  $E_o$  可表示为



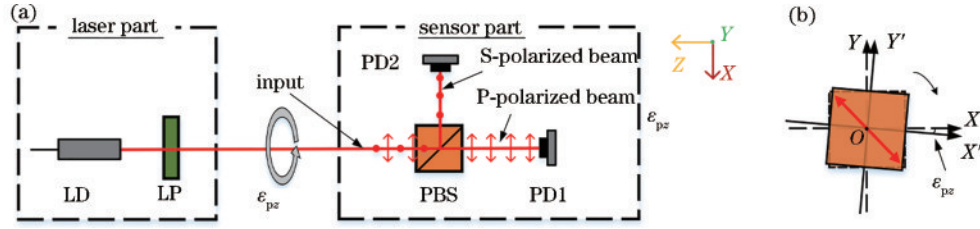


图 5 基于偏振的滚转角测量原理。(a)光路结构;(b)偏振方向与PBS姿态的关系

Fig. 5 Principle of roll angle measurement based on polarization splitting. (a) Optical configuration; (b) relationship between polarization direction and PBS attitude

$$E_o = M_{\text{PBS}} M_{\text{T}} E_i = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & -\sin \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \epsilon_{\text{pz}} & -\sin \epsilon_{\text{pz}} \\ \sin \epsilon_{\text{pz}} & \cos \epsilon_{\text{pz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) \\ E \sin \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

因此, PD1 和 PD2 所测的光强分别为

$$\begin{cases} I_{\text{R}}^{\text{r}} = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) \\ I_{\text{T}}^{\text{r}} = I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) \end{cases}, \quad (16)$$

式中:  $I_{\text{T}}^{\text{r}}$  为 PD1 所测透射通道的光强;  $I_{\text{R}}^{\text{r}}$  为 PD2 所测反射通道的光强;  $I_0$  为两束光的总强度, 探测器上得到两光束光强差为  $\Delta I$ ,  $\Delta I$  可表示为

$$\Delta I = I_{\text{T}}^{\text{r}} - I_{\text{R}}^{\text{r}} = I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) - I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \epsilon_{\text{pz}} \right) = I_0 \sin(2\epsilon_{\text{pz}}), \quad (17)$$

因滚转角较小, 根据等价无穷小原则, 得到由 PD1 和 PD2 所测算的滚转角  $\epsilon_{\text{proll}}$  为

$$\epsilon_{\text{proll}} = \epsilon_{\text{pz}} = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{\Delta I}{I_0} \right) \approx \frac{\Delta I}{2I_0}. \quad (18)$$

基于偏振的滚转角测量方法通过照射在 PD1 和 PD2 上的 P 光与 S 光光强计算滚转角, PBS 和 LP 的摆放精度会影响入射光的偏振态, 需要确定其对测量精度的影响。当 LP 存在滚转角摆放误差时, 与理想情况相比其起偏方向相对 PBS 存在夹角  $\epsilon_{\text{pl}}$ , 则此时由 PD1 和 PD2 所测算的滚转角  $\epsilon_{\text{proll}}$  为

$$\epsilon_{\text{proll}} = \epsilon_{\text{pz}} + \epsilon_{\text{pl}}, \quad (19)$$

式中:  $\epsilon_{\text{pl}}$  为常量, 可以通过标定修正。

PBS 基于布儒斯特定律实现偏振分光, 当一束光经过 PBS 后其透射通道的光强  $I_{\text{T}}^{\text{r}}$  与反射通道  $I_{\text{R}}^{\text{r}}$  的光强为

$$\begin{cases} I_{\text{T}}^{\text{r}} = I_{\text{p}} T_{\text{p}} + I_{\text{s}} T_{\text{s}} \\ I_{\text{R}}^{\text{r}} = I_{\text{p}} R_{\text{p}} + I_{\text{s}} R_{\text{s}} \end{cases}. \quad (20)$$

式中:  $I_{\text{s}}$ 、 $I_{\text{p}}$  分别为入射光中 S 光和 P 光光强;  $R_{\text{s}}$ 、 $R_{\text{p}}$  为 PBS 对 S 光和 P 光的反射系数;  $T_{\text{s}}$ 、 $T_{\text{p}}$  为 PBS 对 S 光和

P 光的透射系数。当入射角  $\rho$  产生变化, PBS 的消光比随之变化, 从而增加偏振串扰, 影响测量精度, 但考虑到角漂通常较小, 此时 PBS 仍能保持高消光比<sup>[18]</sup>, 如图 6 所示。当消光比由  $7 \times 10^{-3}$  降至  $5 \times 10^{-3}$  时, 将 PBS 的相关参数代入式 (20), 可得在  $\pm 50''$  的测量范围内所引入误差约为  $\pm 0.2''$ , 该结果可以接受。

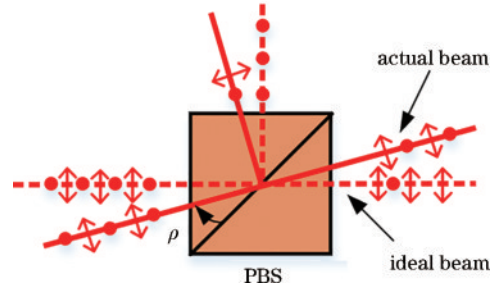


图 6 入射角偏离布儒斯特角

Fig. 6 Incident angle deviates from the Brewster angle

#### 2.4 滚转角自校准算法

开始校准后, 双准直光束结构的滚转角测量值为  $\epsilon_{\text{droll}}$ , 偏振结构的滚转角测量值为  $\epsilon_{\text{proll}}$ , 将测量装置移动至特定位置, 在时间  $t$  内持续测量  $\epsilon_{\text{proll}}$ , 得到一组测量结果  $\epsilon_{\text{proll}} = [\epsilon_{\text{proll}, 1}, \epsilon_{\text{proll}, 2}, \dots, \epsilon_{\text{proll}, t}]^{\text{T}}$ , 对其取均值以消除随机误差, 从而提高测量的精度, 得到  $\bar{\epsilon}_{\text{proll}}$ ,  $\bar{\epsilon}_{\text{proll}}$  可表示为

$$\bar{\epsilon}_{\text{proll}} = \frac{1}{10t} \sum_{i=1}^{10t} \epsilon_{\text{proll}, i}, \quad (21)$$

在导轨不同位置点 A 和点 B 分别进行测量, 得到  $\epsilon_{\text{droll}, A}$ 、 $\bar{\epsilon}_{\text{proll}, A}$  和  $\epsilon_{\text{droll}, B}$ 、 $\bar{\epsilon}_{\text{proll}, B}$ , 差分后计算出双准直光束夹角  $\theta_{\text{up}}$  为

$$\theta_{\text{up}} = L \frac{(\bar{\epsilon}_{\text{proll}, B} - \bar{\epsilon}_{\text{proll}, A}) - (\epsilon_{\text{droll}, B} - \epsilon_{\text{droll}, A})}{D_{\text{AB}}}, \quad (22)$$

式中:  $D_{\text{AB}}$  为点 A 和点 B 间的距离。由于  $\theta_{\text{up}}$  引入的滚转角测量误差随测量距离增加而增加, 在量程范围内, A 与 B 的间距越大, 则相对误差越小, 测量结果越精确。后续实验中选择距离发射端 0.5 m 处为点 A, 1 m 处为点 B。校准后的滚转角测量值  $\epsilon_{\text{cdroll}}$  为

$$\epsilon_{\text{cdroll}} = \frac{\delta_{\text{yr}} - \delta_{\text{yl}} + \theta_{\text{up}} D}{L}. \quad (23)$$

自校准过程的实现步骤如图 7 所示。

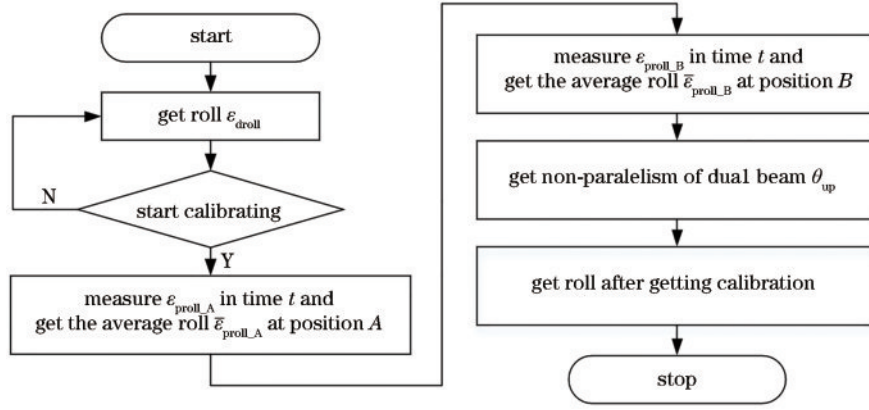


图7 滚转角自校准测量系统流程图

Fig. 7 Flow chart of the self-calibration roll angle measurement

### 3 实验与分析

#### 3.1 软硬件搭建

滚转角测量系统如图8所示,移动端及发射端的底座采用410不锈钢加工。PD和QD是测量光路的终点,其决定光强和光斑的位置测量精度,PD选择

Hamamatsu公司的S1337-1010BR,QD选取S5107,二者感光区域尺寸均为10 mm×10 mm,满足测量要求。为提高信噪比,传感器信号调理采集电路选择低噪声、低温漂、高精度器件,如运算放大器选用AD8630,模数转换器选用AD7177等。使用C++和QT4实现数据的采集、显示和处理。

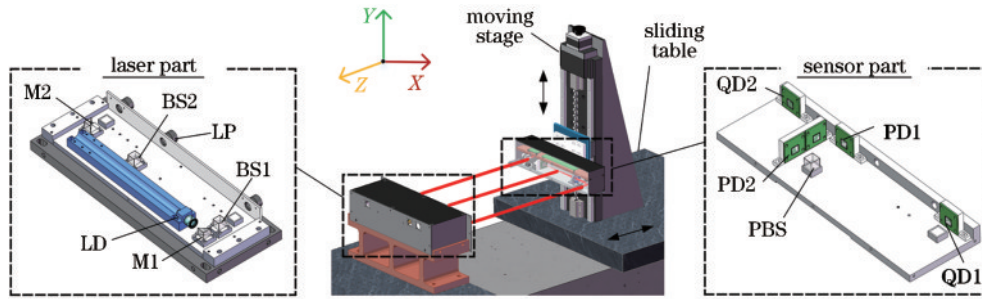


图8 测量装置机械结构

Fig. 8 Mechanical structure of measuring device

为了降低背景噪声的影响,测量装置所有加工件经黑色喷漆处理,且安装风琴防护罩,如图9(a)所示。图9(b)对比激光照射时QD的四象限平均电压与背景噪声,图9(c)对比激光照射时PD的电压与背景噪声,经测试背景噪声远小于激光信号,说明PD和QD对背景噪声不敏感,因此不考虑其对测量结果的影响。

#### 3.2 标定与实验

首先标定QD1和QD2的垂直直线度,如图10(a)所示,将移动端与激光干涉仪的线性反射镜固定在垂直安装的电动位移台上,同时测量垂直直线度,使用运动控制器控制电动位移台从 $-200\ \mu\text{m}$ 移动至 $200\ \mu\text{m}$ ,每次移动 $40\ \mu\text{m}$ ,共 $m=11$ 个测量点,测量装置测量值为 $\delta_{yr}$ 。QD1上光斑质心位置 $\Delta y_{\text{QD1}}$ 与相对位置 $\sigma_{yr} = [\sigma_{yr1}, \sigma_{yr2}, \dots, \sigma_{yrm}]$ 的关系通过四阶多项式拟合:

$$\delta_{yr} = -\Delta y_{\text{QD1}} = -(A_{yr4}\sigma_{yr}^4 + A_{yr3}\sigma_{yr}^3 + A_{yr2}\sigma_{yr}^2 + A_{yr1}\sigma_{yr}), \quad (24)$$

式中: $A_{yr4}$ 、 $A_{yr3}$ 、 $A_{yr2}$ 、 $A_{yr1}$ 为待标定系数,拟合后常数项省略,即认为相对位置为零的位置是测量零点。在测

量距离 $D$ 为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m处分别进行标定后的垂直直线度测量示值误差测试,测试结果如图10(b)所示,垂直直线度测量误差最大值小于 $\pm 0.8\ \mu\text{m}$ ,代入式(1)可得基于双准直光束的滚转角测量误差小于 $\pm 0.6''$ 。

为测得当前系统的分辨力,将接收端移动到距发射端最近处,通过计算滚转角的标准差获得其重复性误差。经计算分辨率为 $0.14''$ ,说明当前系统具有较高的分辨力,滚转角数据如图11所示。

然后标定滚转角,如图12(a)所示,将移动端与激光干涉仪的角度反射镜固定在电动角位台上,同时测量滚转角,使用运动控制器控制电动角位台从 $-50''$ 转动至 $50''$ ,每次转动 $10''$ ,共 $m=11$ 个测量点,偏振结构的测量值为 $\bar{\epsilon}_{\text{proll}} = [\bar{\epsilon}_{\text{proll1}}, \bar{\epsilon}_{\text{proll2}}, \dots, \bar{\epsilon}_{\text{prollm}}]$ ,标定后的滚转角为 $\epsilon_{\text{pr}}$ ,使用四阶多项式拟合, $\epsilon_{\text{pr}}$ 可表示为

$$\epsilon_{\text{pr}} = (A_{pr4}\bar{\epsilon}_{\text{proll}}^4 + A_{pr3}\bar{\epsilon}_{\text{proll}}^3 + A_{pr2}\bar{\epsilon}_{\text{proll}}^2 + A_{pr1}\bar{\epsilon}_{\text{proll}}), \quad (25)$$

式中: $A_{pr4}$ 、 $A_{pr3}$ 、 $A_{pr2}$ 、 $A_{pr1}$ 为待标定系数,拟合后常数项省略,即认为相对位置为零的位置是测量零点。标定

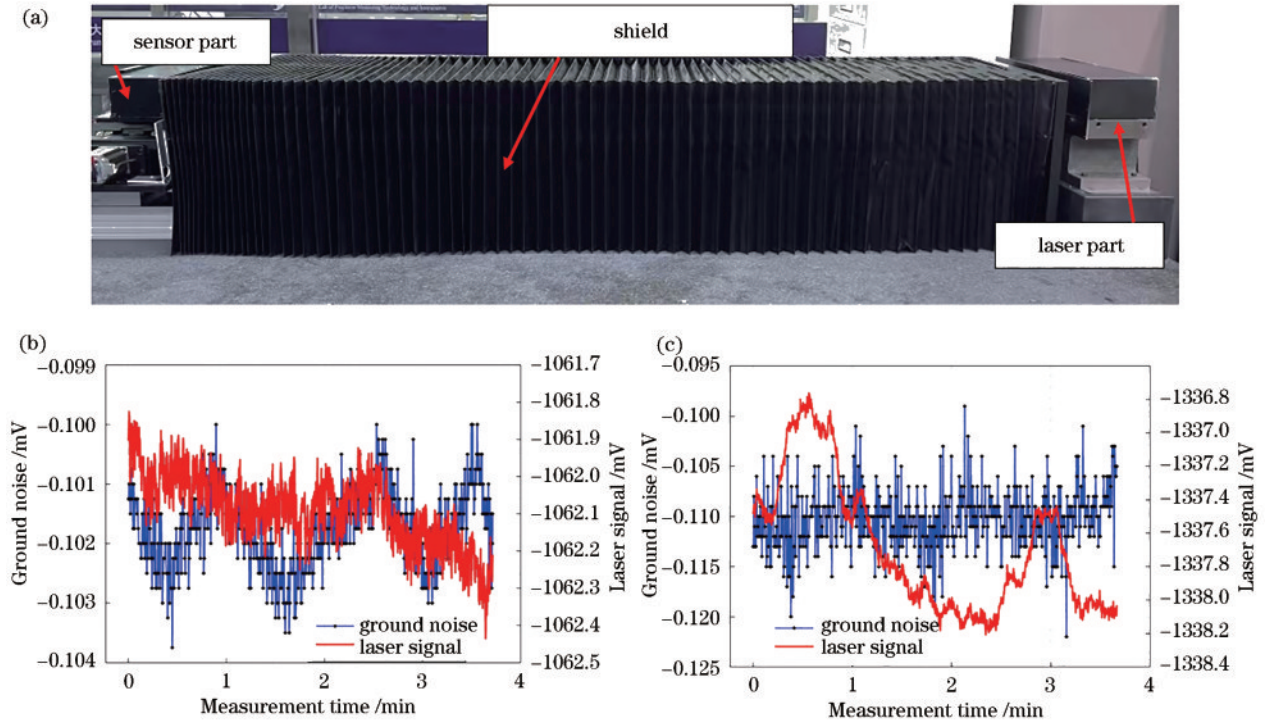


图 9 背景噪声测试实验。(a)风琴防护罩;(b)QD背景噪声测试;(c)PD背景噪声测试

Fig. 9 Ground noise test experiments. (a) Shield; (b) ground noise test of QD; (c) ground noise test of PD

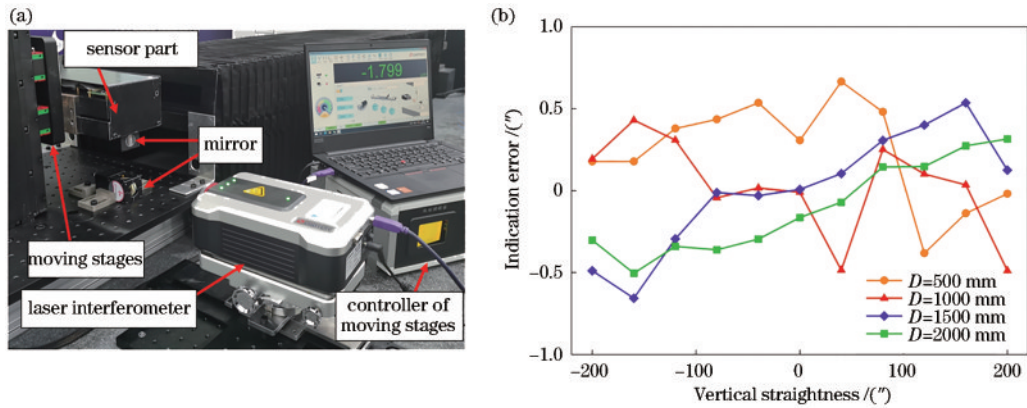


图 10 垂直直线度测量标定实验。(a)实验装置;(b)性能测试。

Fig. 10 Vertical straightness calibration experiment. (a) Experimental device; (b) performance test

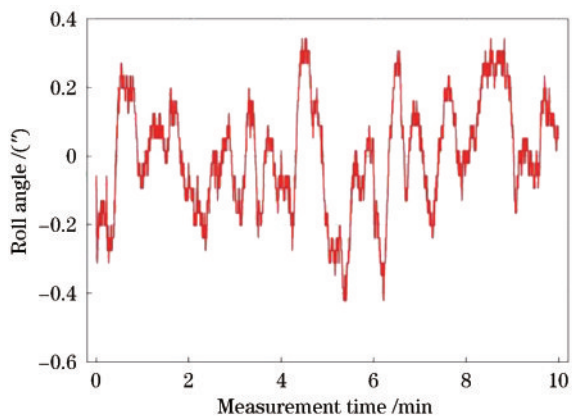


图 11 重复性误差实验

Fig. 11 Repeatability error experiment

后在测量距离  $D$  为 0.5 m、1.0 m 处进行滚转角测量误差测试,测试结果图 12(b)所示,基于偏振的滚转角测量误差小于  $\pm 2''$ 。

随后测量双准直光束夹角,将接收端从 A 点移动至 B 点,移动前后的滚转角测量结果如图 13(a)所示,待装置稳定后计算均值,得到  $\epsilon_{droll\_B} - \epsilon_{droll\_A} = -39.06''$ ,  $\bar{\epsilon}_{proll\_B} - \bar{\epsilon}_{proll\_A} = -16.01''$ ,代入式(22)计算得  $\theta_{up} = 12.68''$ 。

最后验证校准效果,将所计算的双准直光束夹角  $\theta_{up}$  与各测量点的位置  $D$  代入式(23)即可修正滚转角测量结果,得到校准后的滚转角测量值。使用电子水平仪作为标准仪器,校准前后滚转角所测滚转角与电子水平仪示数的对比结果如图 13(b)所示,精度提升



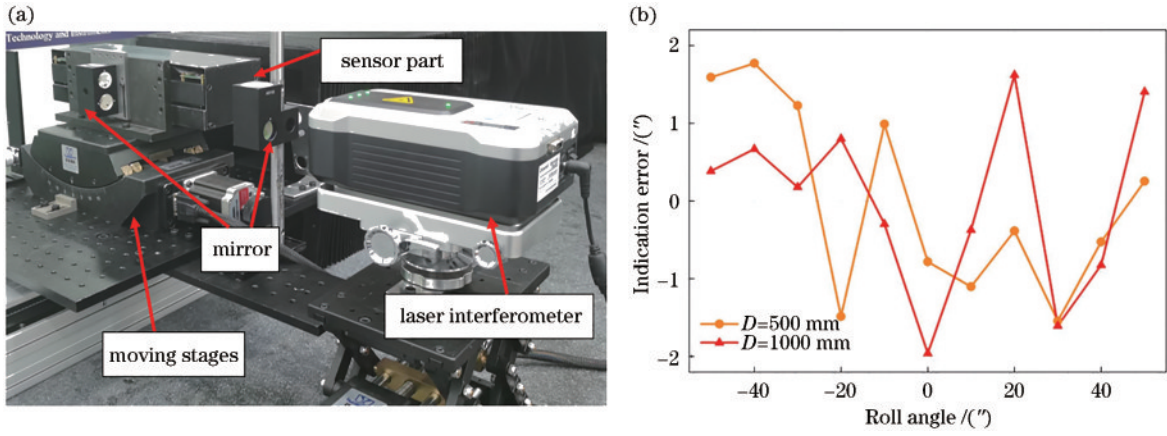


图 12 滚转角测量标定实验。(a)实验装置;(b)性能测试

Fig. 12 Roll angle calibration experiment. (a) Experimental device; (b) performance test

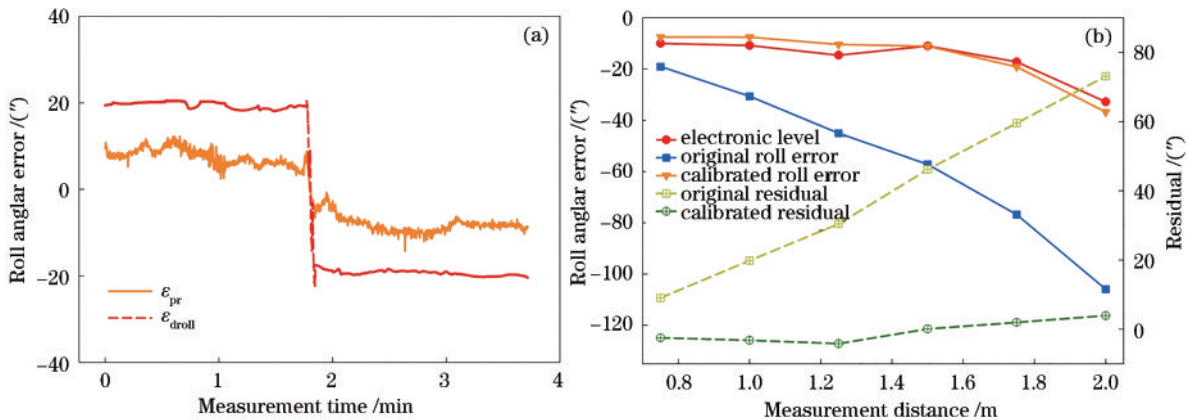


图 13 双准直光束夹角测量及校准效果。(a)夹角测量;(b)校准效果

Fig. 13 Non-parallelism measurement and calibration effect. (a) Non-parallelism measurement; (b) calibration effect

效果如表 1 所示。

该实验结果表明:在 0.75~2.00 m 的测量范围

内,测量误差平均减小 88.97%,自校准方法能有效提升基于双准直光束滚转角的精度。

表 1 双准直光束的滚转角测量精度提升效果

Table 1 Accuracy improvement of roll angle based on dual beam

Distance / m	Residual without calibration / (")	Residual with calibration / (")	Improvement rate / %
0.75	9.05	-2.48	72.59
1.00	19.83	-3.22	83.76
1.25	30.40	-4.18	86.26
1.50	46.16	0.05	99.89
1.75	59.60	1.96	96.71
2.00	73.10	3.94	94.61

## 4 结 论

提出了一种精度高、易装调的滚转角测量误差自校准方法,分析基于双准直光束测量滚转角和基于偏振测量滚转角的原理,将这两种方法结合后设计了滚转角自校准光路,搭建五自由度误差测量装置,完成测量装置滚转角的标定与对比实验,通过实验证明该自校准方法的有效性。实验结果表明:在 0.75~2.00 m 的测量范围内,校准后滚转角的测量误差平均减小

88.97%。所提方法可应用于基于双准直光束的滚转角测量系统,对提升长距离下滚转角的实时测量精度具有显著作用。

## 参 考 文 献

[1] 殷建. 基于两路激光实时跟踪的机床刀具位姿误差测量[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121207.  
Yin J. Pose error measurement based on two path lasers real-time tracking of machine tool[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121207.



- [2] 陈良辉, 赵盛宇, 周泳全, 等. 五轴数控系统的三维曲面激光加工关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071406.  
Chen L H, Zhao S Y, Zhou Y Q, et al. Key technologies of laser machining of 5-axes CNC system for three-dimensional freeform surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071406.
- [3] 杨建国, 范开国, 杜正春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
Yang J G, Fan K G, Du Z C. Real-time compensation technology of NC machine tool error[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] Lin J M, Du Z H, Yu C Y, et al. Machine-vision-based acquisition, pointing, and tracking system for underwater wireless optical communications[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 050604.
- [5] Li Y Z, Chen B S, Na Q X, et al. Wide-steering-angle high-resolution optical phased array[J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2511-2518.
- [6] Li D F, Zhang Y C, Liu C, et al. Review of photoacoustic imaging for microrobots tracking *in vivo*[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 111701.
- [7] 孙闯. 面向精密工程的多自由度测量方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
Sun C. Research on multi-degree-of-freedom measurement method for precision engineering[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.  
Yu X, Liu Q G, Liu C, et al. Talbot-moiré effect-based roll angle measurement and its image processing[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(3): 217-221.
- [8] 匡翠方, 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.  
Kuang C F, Feng Q B, Zhang B, et al. A novel method for measuring roll[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(4): 468-470.
- [9] 杨振堃, 金涛, 韩梦莹, 等. 一种滚转角和直线度同步干涉测量方法的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 12-21.  
Yang Z K, Jin T, Han M Y, et al. A research of roll and motion straightness synchronous measurement based on an interferometer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 12-21.
- [10] 于雪, 刘庆纲, 刘超, 等. 基于泰伯-莫尔效应的滚转角测量方法及其图像处理[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(3): 217-221.
- [11] 李娟. 基于五角棱镜的滚转角误差测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
Li J. Study of roll measurement method based on the pentagonal prism[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] Cui C X, Feng Q B, Zhang B. Compensation for straightness measurement systematic errors in six degree-of-freedom motion error simultaneous measurement system[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3122-3131.
- [13] Alda J. Encyclopedia of optical engineering[M]. New York: Marcel Dekker, 2003: 999-1013.
- [14] Zhu Y W, Liu S C, Kuang C F, et al. Roll angle measurement based on common path compensation principle[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 66-73.
- [15] Cai Y D, Yang B H, Fan K C. Robust roll angular error measurement system for precision machines[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8027-8036.
- [16] Liu W Z, Zhang C, Duan F J, et al. An optimization method of temperature field distribution to improve the accuracy of laser multi-degree-of-freedom measurement system[J]. Optik, 2022, 269: 169721.
- [17] Liu W Z, Zhang C, Duan F J, et al. A method for noise attenuation of straightness measurement based on laser collimation[J]. Measurement, 2021, 182: 109643.
- [18] Yan L P, Chen B Y, Zhang C, et al. Analysis and verification of the nonlinear error resulting from the misalignment of a polarizing beam splitter in a heterodyne interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(8): 085006.