

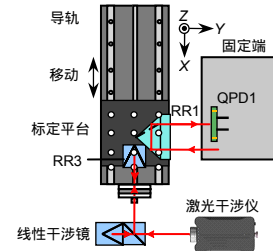


DOI: 10.12086/oe.2020.190451

五自由度测量中直线度现场标定方法研究

苏宇浩, 段发阶, 蒋佳佳*, 傅 骁, 张 聪, 刘文正

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: 直线度现场标定是保证其在线测量精度的重要方法。在收发一体式激光五自由度测量结构的基础上, 针对直线度现场标定中标定平台引入的阿贝误差和角锥棱镜成像误差, 建立了直线度现场标定模型。根据该标定模型并结合五自由度测量装置的角度测量结果, 提出一种直线度现场标定误差补偿方法。实验表明, 该标定方法使标定系数误差减小到 0.2% 以内, 有效提高了直线度现场标定精度。

关键词: 五自由度测量; 直线度现场标定; 阿贝误差; 角锥棱镜成像误差

中图分类号: TH741

文献标志码: A

引用格式: 苏宇浩, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 五自由度测量中直线度现场标定方法研究[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190451

Research on field calibration method of straightness in five-degree-of-freedom measurement

Su Yuhao, Duan Fajie, Jiang Jiajia*, Fu Xiao, Zhang Cong, Liu Wenzheng

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

Abstract: The field calibration of straightness is an important method to ensure the accuracy of on-line measurement. Based on the transceiver integrated laser five-degree-of-freedom measurement structure, the field calibration model was established aiming at the Abbe error, and the imaging error of retroreflector caused by the calibration platform. According to the calibration model and the angle measurement results of the five-degree-of-freedom measuring device, a compensation method of straightness calibration errors was proposed. Experimental results showed that the calibration coefficient error was within 0.2% when using the calibration method, and the calibration errors of straightness were effectively reduced. The calibration method made the error of calibration coefficient reduce to less than 0.2%, and effectively improved the accuracy of straightness field calibration.

Keywords: five-degree-of-freedom measurement; field calibration of straightness; Abbe error; imaging error of retroreflector

Citation: Su Y H, Duan F J, Jiang J J, *et al.* Research on field calibration method of straightness in five-degree-of-freedom measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190451

收稿日期: 2019-07-30; 收到修改稿日期: 2019-11-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0204800); 天津市自然科学基金资助项目(17JCQNJC01100); 水下信息与控制重点实验室开放研究资助项目(6142218081811); 装备预研领域基金资助项目(61405180505, 61400040303); 国家自然科学基金资助项目(51775377, 61505140); 中国科协“青年人才托举工程”资助项目(2016QNRC001)

作者简介: 苏宇浩(1996-), 男, 硕士, 主要从事光电检测的研究。E-mail: suyuhao@tju.edu.cn

通信作者: 蒋佳佳(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光及光电测试技术、水生检测等的研究。E-mail: jiajiajiang@tju.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

1 引言

多自由度的测量是实现快速、高精度检测机床几何误差的重要手段之一^[1]。直线度测量作为多自由度测量中的关键环节,直接影响机床空间误差测量^[2-4],因此研究直线度测量及标定方法具有重要意义。

目前,基于激光准直的直线度测量方法^[5]已被广泛应用到多自由度测量系统中^[6-9]。Ni 等人^[10]在多自由度测量系统中采用了激光偏振和激光准直相结合的方法,实现了直线度误差测量,在±50 μm 标定范围内标定残差为±1.0 μm。冯其波教授等人^[11-15]在激光准直的基础上提出激光光束漂移共路补偿的方法,在±100 μm 标定范围内直线度标定标准差为 0.5 μm。以上研究中的直线度标定均在实验室条件下使用高精度标定平台完成,未分析标定过程中的误差。为实现机床几何误差的现场在线测量,保证测量装置在现场环境中的测量精度尤其重要。现场标定可以有效消除现场应用中测量装置安装与调节、环境参数改变、应力与磨损等引入的系统误差,保证系统测量精度。但现场标定时受工业环境影响,标定平台的精度及稳定性无法保证,引入的标定误差不可忽略。

本文在激光收发一体式五自由度测量结构的基础上,分析了直线度现场标定中激光干涉仪测量点与直线度测量点不重合产生的阿贝误差与角锥棱镜产生的成像误差,建立了直线度现场标定模型。根据该标定模型并结合五自由度测量装置的角度测量结果,提出了一种直线度标定误差补偿方法,在不增加测量复杂度的同时,提高现场标定精度,并进行了实验验证。

2 五自由度测量结构中直线度测量原理

五自由度测量结构采用激光器发射与探测器接收一体化设计,如图 1 所示。激光器射出的激光经分光镜 BS1 (beam splitter) 反射与分光镜 BS2 透射到平面镜 M3 (mirror) 上。回射的激光经 BS2 反射后,通过透镜 L1 (lens) 聚焦到位置敏感探测器 PSD1 (position sensitive device) 上,构成激光自准直模块,测量俯仰角和偏摆角。从 BS1 透射的激光经平面镜 M1 反射后,被分光镜 BS3 分成两束。一束激光经过平面镜 M2 反射到角锥棱镜 RR1 (retro-reflector),由于角锥棱镜特有的逆向反射特性,使光线平行回射到四象限光电探测器 QPD1 (quadrant photodiode detector) 上。另一束激光直接经角锥棱镜 RR2 回射到四象限光电探测器 QPD2 上,构成两个激光准直模块。利用任意一个激光准直模块测量二维直线度,两个激光准直模块配合使用时,测量滚转角。

选取 RR1 与 QPD1 作为测量二维直线度的激光准直模块,并按照高斯分布的圆形光斑建立了 QPD 测量模型^[16]。光斑质心相对 QPD1 中心产生偏移时,四个象限产生相应光强大小的光电流 I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_D , 光斑在 QPD1 的 X 向位移和 Z 向位移 Δx_{LQ1} 和 Δz_{LQ1} 为

$$\begin{cases} \Delta x_{LQ1} = k_x \Delta x_{Q1} = k_x \frac{I_A + I_D - I_B - I_C}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \Delta z_{LQ1} = k_z \Delta z_{Q1} = k_z \frac{I_A + I_B - I_C - I_D}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: Δx_{Q1} 和 Δz_{Q1} 分别定义为 QPD1 的 X 向输出和 Z

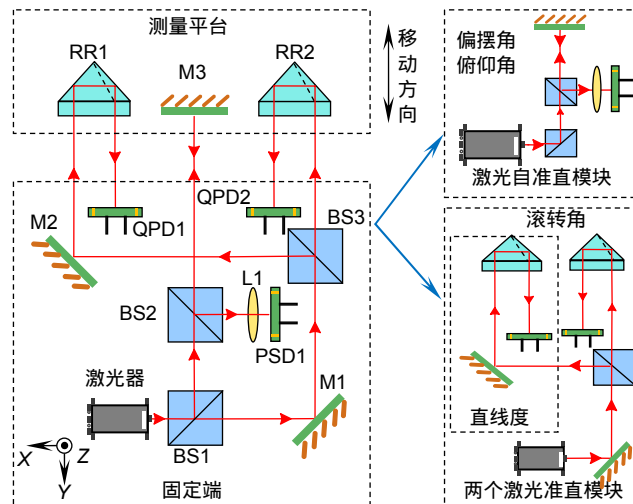


图 1 五自由度测量结构

Fig. 1 The five-degree-of-freedom measurement structure

向输出, k_x 和 k_z 为待标定的系数。

当测量平台移动时, X 轴方向的直线度误差 δ_x 和 Z 轴方向的直线度误差 δ_z 可以表示为

$$\delta_x = \Delta x_{RR1} = \frac{\Delta x_{LQ1}}{2} = \frac{k_x \Delta x_{Q1}}{2}, \quad (2)$$

$$\delta_z = \Delta z_{RR1} = \frac{\Delta z_{LQ1}}{2} = \frac{k_z \Delta z_{Q1}}{2}, \quad (3)$$

其中: Δx_{RR1} 和 Δz_{RR1} 分别为 RR1 在 X 向和 Z 向的位移。

3 现场标定误差分析

3.1 直线度标定方法

直线度标定过程中需要对 QPD1 的 X 向输出和 Z 向输出分别标定。QPD1 的 X 向输出标定原理图如图 2 所示, RR1 与激光干涉仪角锥棱镜 RR3 放置在标定平台上, 同时对标定平台 X 向位移进行测量, 从而实现激光干涉仪对 QPD1 的 X 向输出的标定。当标定平台在 X 向移动时, 激光干涉仪测量值 Δd_x 可以表示为

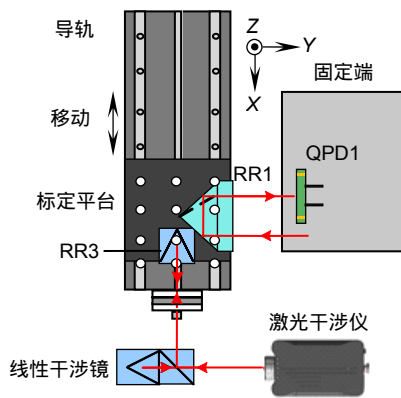


图 2 QPD1 的 X 向输出标定原理图
Fig. 2 Schematic diagram of X-direction output calibration of QPD1

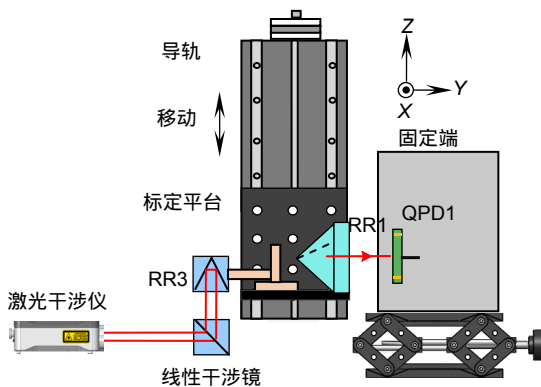


图 3 QPD1 的 Z 向输出标定原理图
Fig. 3 Schematic diagram of Z-direction output calibration of QPD1

$$\Delta d_x = \Delta x_{RR1} = \frac{\Delta x_{LQ1}}{2} = \frac{k_x \Delta x_{Q1}}{2}. \quad (4)$$

QPD1 的 Z 向输出标定原理图如图 3 所示, 当标定平台在 Z 向移动时, 激光干涉仪测量值为 Δd_z , QPD1 的 Z 向输出标定模型为

$$\Delta d_z = \Delta z_{RR1} = \frac{\Delta z_{LQ1}}{2} = \frac{k_z \Delta z_{Q1}}{2}. \quad (5)$$

但在现场标定时, 受工业环境影响, 标定平台的精度及稳定性无法保证, 其角度变化引入的标定误差是影响标定精度的重要因素。

3.2 现场标定中的阿贝误差

QPD1 的 X 向输出标定时, 设标定平台移动时产生偏摆角 ε_{zx} 、俯仰角 ε_{yx} 和滚转角 ε_{xx} , 如图 4 所示。设激光干涉仪测量点为 RR3 前表面中点 $A_2(x_2, y_2, z_2)$, 直线度测量点为 RR1 前表面中点 $A_1(x_1, y_1, z_1)$, 由于激光干涉仪测量点与直线度测量点不重合, 标定过程中存在三个方向的阿贝偏位 L_{xx} 、 L_{yx} 和 L_{zx} , 即:

$$\begin{bmatrix} L_{xx} \\ L_{yx} \\ L_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

考虑角度和阿贝偏位的影响, 并忽略二阶小量, QPD1 的 X 向输出标定中的阿贝误差为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta_{xx1} \\ \delta_{yx1} \\ \delta_{zx1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} \\ \varepsilon_{zx} & 0 & -\varepsilon_{xx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{xx} \\ L_{yx} \\ L_{zx} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\varepsilon_{zx} L_{yx} + \varepsilon_{yx} L_{zx} \\ \varepsilon_{zx} L_{xx} - \varepsilon_{xx} L_{zx} \\ -\varepsilon_{yx} L_{xx} + \varepsilon_{xx} L_{yx} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: δ_{xx1} 、 δ_{yx1} 、 δ_{zx1} 分别为 X 向、Y 向和 Z 向的阿

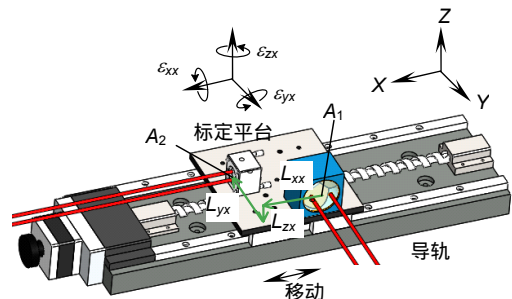


图 4 阿贝偏位示意图
Fig. 4 Diagram of Abbe deviation

贝误差。

对于 QPD1 的 X 向输出标定,影响标定精度的阿贝误差为 δ_{xx1} , 表示为

$$\delta_{xx1} = -\varepsilon_{zx}L_{yx} + \varepsilon_{yx}L_{zx} \quad (8)$$

QPD1 的 Z 向输出标定中,设标定平台产生偏摆角 ε_{zx} 、俯仰角 ε_{yz} 和滚转角 ε_{zz} , 标定过程中激光干涉仪测量点与直线度测量点在三个方向上的阿贝偏位为 L_{xz} 、 L_{yz} 和 L_{zz} , 考虑角度和阿贝偏位的影响,并忽略二阶小量, QPD1 的 Z 向输出标定中的阿贝误差 δ_{zz1} 为

$$\delta_{zz1} = -\varepsilon_{yz}L_{xz} + \varepsilon_{xz}L_{yz} \quad (9)$$

3.3 现场标定中的角锥棱镜成像误差

光线经过 RR1 时,根据棱镜展开原理,RR1 的等效平行平板展开图如图 5 所示。

QPD1 的 X 向输出标定时,偏摆角 ε_{zx} 造成角锥棱镜的出射激光 X 向偏移,影响 QPD1 的 X 向输出,如图 6 所示。直线度测量点 A_1 的阿贝误差已考虑,故认为此点为 RR1 的旋转中心,未旋转前平行平板中心线为 A_1A_1' , 激光从 L_1 点入射后从 L_1' 点出射,旋转后平行平板中心线为 A_1A_1'' , 激光出射点偏移至 L_1'' , 考虑 RR1 的成像误差,光斑在 QPD1 的 X 向位移变化量 Δx_1 为

$$\Delta x_1 = |A_1'A_1''| - |L_1'L_1''| = \frac{h \cdot \varepsilon_{zx}}{n} \quad (10)$$

其中: n 为角锥棱镜 RR1 材料的折射率, h 为等效平行平板长度。

角锥棱镜 RR3 角度变化对激光干涉仪 X 向位移测量值影响为二阶小量,可以忽略。

QPD1 的 Z 向输出标定时,考虑 RR1 的成像误差,光斑在 QPD1 的 Z 向位移变化量 Δz_1 为

$$\Delta z_1 = h \cdot \varepsilon_{zx} / n \quad (11)$$

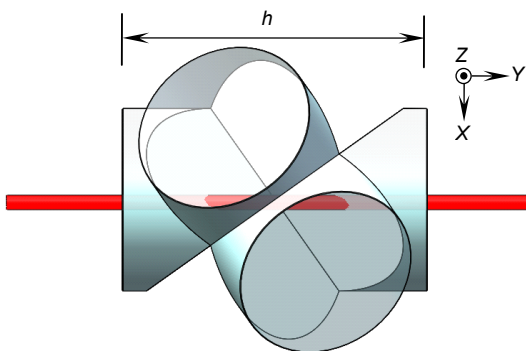


图 5 RR1 展开图

Fig. 5 Diagram of RR1 expansion

3.4 二维直线度现场标定模型

综合阿贝误差与角锥棱镜的成像误差, QPD1 的 X 向输出和 Z 向输出标定模型为

$$\begin{cases} \Delta d'_x = \frac{k_x \Delta x_{Q1}}{2} + \varepsilon_{zx} \cdot \left(\frac{h}{2n} - L_{yx} \right) + \varepsilon_{yx} L_{zx} \\ \Delta d'_z = \frac{k_z \Delta z_{Q1}}{2} + \varepsilon_{xz} \cdot \left(\frac{h}{2n} - L_{yz} \right) + \varepsilon_{yz} L_{xz} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\Delta d'_x$ 和 $\Delta d'_z$ 分别为 QPD1 X 向输出和 Z 向输出标定时激光干涉仪测量值。

对于 QPD1 X 向输出标定或 Z 向输出标定,为补偿标定过程中的阿贝误差与角锥棱镜成像误差,使用五自由度测量装置的自准直模块测量标定平台的偏摆角 ε_{zx} 或 ε_{xz} , 作为标定的参数之一。但对于标定平台的俯仰角 ε_{yx} 或 ε_{yz} , 在直线度标定过程中无法用五自由度测量装置测量,为了在不增加测量复杂度的同时消除阿贝误差,需保证阿贝偏位 L_{zx} 或 L_{xz} 为 0。

4 实验验证与分析

4.1 X 向直线度标定实验

对 QPD1 的 X 向输出进行标定实验,首先采用角度变化可以忽略的高精度标定平台进行标定实验,然后采用精度较差的标定平台模拟现场标定环境,进行标定实验。对比两次标定实验,验证标定模型和补偿方法的有效性。

QPD1 的 X 向输出标定系统如图 7,激光干涉仪作为位移测量标准,导轨控制器控制标定平台移动,角锥棱镜 RR1、RR3 和反射镜 M3 放在标定平台上,其中 M3 用于测量导轨偏摆角,RR1 的制造材料为 N-BK7 玻璃,折射率 $n=1.515$,等效平行平板长 $h=84$ mm。

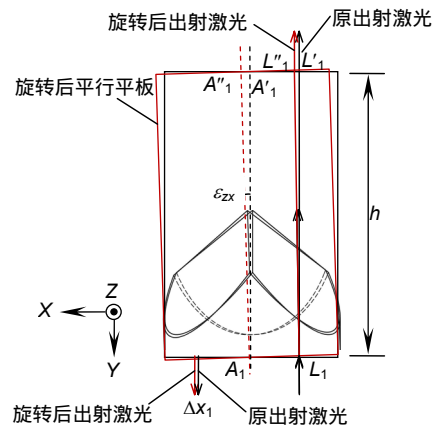


图 6 RR1 的成像误差

Fig. 6 Imaging error of RR1

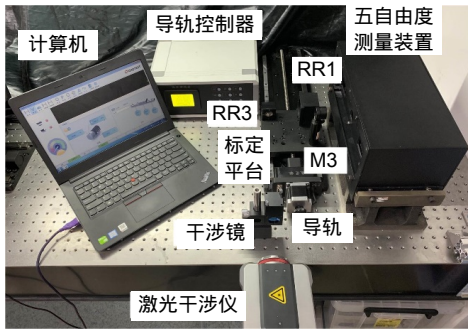


图7 QPD1的X向输出标定系统

Fig. 7 Calibration system of X-direction output of QPD1

4.1.1 高精度标定平台标定实验

采用高精度标定平台，用激光干涉仪对五自由度测量装置中QPD1的X向输出进行标定，标定范围为 $\pm 125 \mu\text{m}$ 。高精度标定平台角度变化不超过 $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$ ，保证 L_{zx} 和 $h/2n - L_{yx}$ 在 $\pm 10 \text{mm}$ 以内，引入的直线度

表1 高精度标定平台标定数据

Table 1 Calibration data of high precision calibration platform

激光干涉仪测量值 $\Delta d_x'/\mu\text{m}$	QPD1 X向输出测量值 Δx_Q
-125.1	-109.192
-99.48	-86.972
-74.77	-65.187
-49.36	-42.669
-24.95	-21.426
0.00	0.000
25.58	21.682
49.99	42.886
75.41	65.364
100.15	87.189
125.23	109.037

标定误差不超过 $0.1 \mu\text{m}$ ，可以忽略。标定数据和标定结果如表1和图8所示，系数 k_x 的标定值为1.1488，标定残差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内。

4.1.2 低精度标定平台标定实验

采用低精度标定平台模拟现场标定环境，进行标定实验。标定平台偏摆角 ε_{zx} 在 $\pm 125 \mu\text{m}$ 标定范围内变化超过 $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ 。实验在保证阿贝偏位 L_{zx} 为 0mm ， L_{yx} 固定的条件下用激光干涉仪对五自由度测量装置中QPD1的X向输出进行标定，同时用五自由度测量装置测量标定平台的偏摆角 ε_{zx} 。标定数据如表2所示。图9(a)为未补偿偏摆角引入的阿贝误差和角锥棱镜成像误差时的标定结果，对测量结果进行二元线性回归，得到补偿后的标定结果，如图9(b)所示。

标定结果表明，补偿前系数 k_x 的标定值为1.1074，与采用高精度标定平台时系数 k_x 的标定值相差0.0414，即标定系数误差在3.5%左右，则在 $\pm 125 \mu\text{m}$

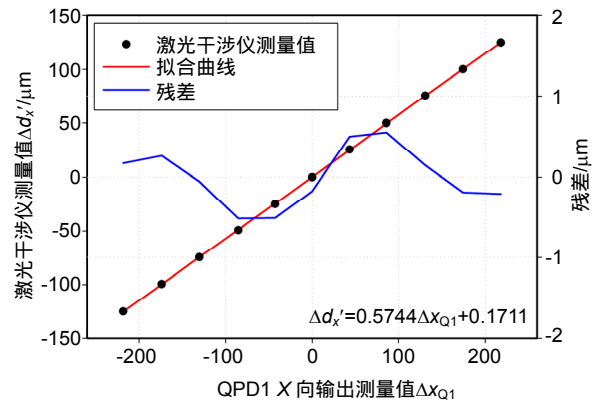


图8 高精度标定平台标定结果

Fig. 8 Calibration results of high precision calibration platform

表2 低精度标定平台标定数据

Table 2 Calibration data of low precision calibration platform

激光干涉仪测量值 $\Delta d_x'/\mu\text{m}$	QPD1 X向输出测量值 Δx_Q	偏摆角测量值 $\varepsilon_{zx}/(\mu\text{m}/\text{m})$
-123.85	-112.824	-658
-99.4	-90.429	-525
-74.05	-67.054	-380
-49.66	-44.541	-260
-24.02	-21.265	-129
0.00	0.000	0
24.98	22.105	107
50.17	44.647	223
76.21	68.135	336
101.08	90.835	452
126.08	113.493	518

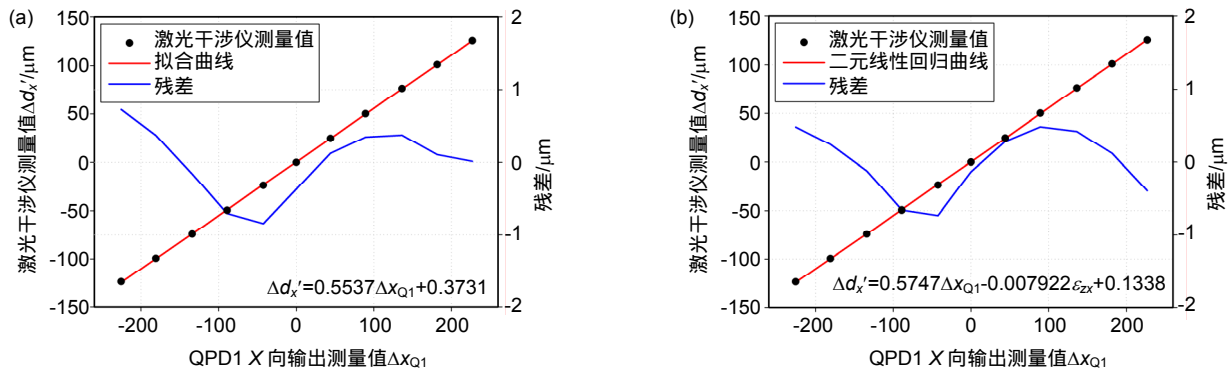


图9 低精度标定平台标定结果。(a) 补偿前; (b) 补偿后

Fig. 9 Calibration results of low precision calibration platform. (a) Before compensation; (b) After compensation

范围内, 由系数 k_x 引入的标定误差最大为 $10 \mu\text{m}$, 严重影响标定精度。补偿后系数 k_x 的标定值为 1.1494 , 与采用高精度标定平台时系数 k_x 的标定值相差 0.0006 , 即标定系数误差在 0.1% 以内, 则在 $\pm 125 \mu\text{m}$ 范围内, 由系数 k_x 引入的标定误差最大为 $0.15 \mu\text{m}$, 可以忽略。补偿阿贝误差和角锥棱镜成像误差后, 标定系数误差从 3.5% 减少到 0.1% 以内, 有效提高了标定精度。

4.2 Z向直线度标定实验

对 QPD1 的 Z 向输出进行标定实验, 标定过程与 X 向直线度标定实验相同, QPD1 的 Z 向输出标定系统如图 10 所示。

4.2.1 高精度标定平台标定实验

采用高精度标定平台, 用激光干涉仪对五自由度测量装置中 QPD1 的 Z 向输出进行标定, 标定范围为 $\pm 125 \mu\text{m}$ 。标定数据和标定结果如表 3 和图 11 所示, 系数 k_z 的标定值为 1.1060 , 直线度标定残差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内。

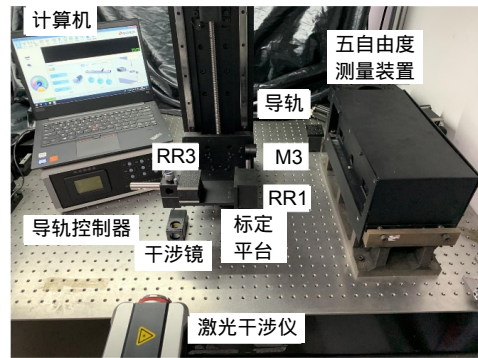


图10 QPD1的Z向输出标定系统

Fig. 10 Calibration system of Z-direction output of QPD1

4.2.2 低精度标定平台标定实验

采用低精度标定平台模拟现场标定环境, 进行标定实验。保证阿贝偏位 L_{xz} 为 0 mm , L_{yz} 固定的条件下用激光干涉仪对五自由度测量装置中 QPD1 的 Z 向输出进行标定, 同时用五自由度测量装置测量标定平台的偏摆角 ϵ_{xz} 。标定数据如表 4 所示。图 12(a) 为未补偿偏摆角引入的阿贝误差和角锥棱镜成像误差时的标

表3 高精度标定平台标定数据

Table 3 Calibration data of high precision calibration platform

激光干涉仪测量值 $\Delta d_z' / \mu\text{m}$	QPD1 Z向输出测量值 Δz_{Q1}
-124.65	-112.888
-100.2	-90.493
-74.85	-67.118
-50.46	-44.305
-24.82	-21.329
-0.8	-0.064
24.18	22.041
49.37	44.583
75.41	68.071
100.28	91.171
125.28	113.929

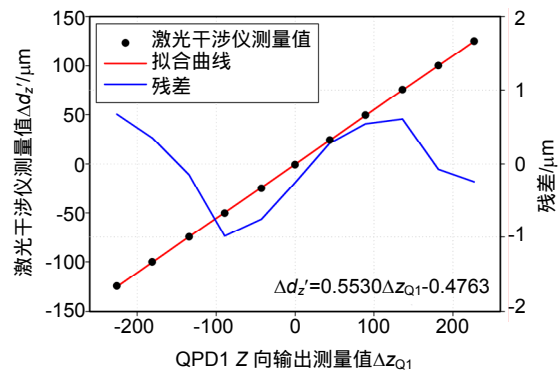


图11 高精度标定平台标定结果

Fig. 11 Calibration results of high precision calibration platform

表 4 低精度标定平台标定数据

Table 4 Calibration data of low precision calibration platform

激光干涉仪测量值 $\Delta d_z'/\mu\text{m}$	QPD1 Z 向输出测量值 Δz_{Q1}	偏摆角测量值 $\varepsilon_{xz}/(\mu\text{m}/\text{m})$
-125.07	-118.527	-203
-100.21	-94.950	-207
-74.75	-70.262	-153
-50.16	-46.593	-108
-25.01	-22.453	-58
-0.2	1.161	-3
24.99	24.487	27
50.41	47.717	58
75.29	70.558	86
100.41	93.942	111
124.89	117.077	134

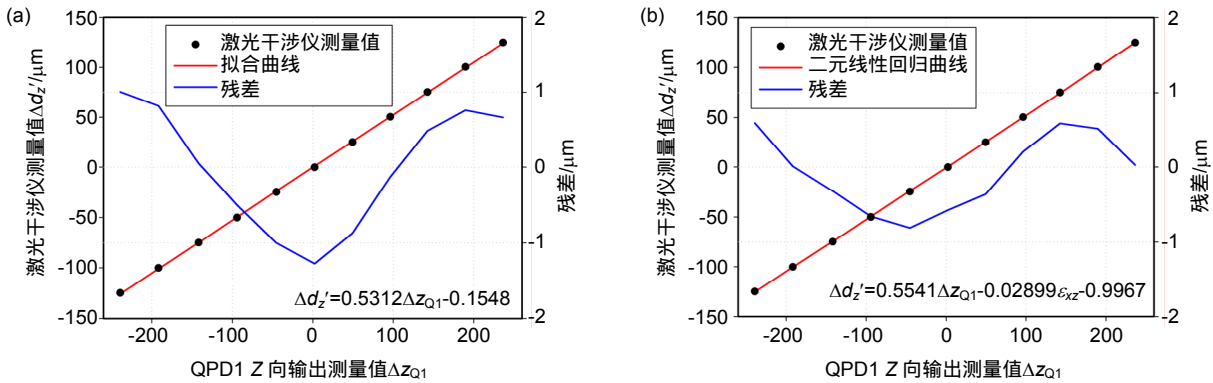


图 12 低精度标定平台标定结果。(a) 补偿前; (b) 补偿后

Fig. 12 Calibration results of low precision calibration platform. (a) Before compensation; (b) After compensation

定结果，对测量结果进行二元线性回归，得到补偿后的标定结果，如图 12(b)所示。

标定结果表明，补偿前系数 k_z 的标定值为 1.0624，与采用高精度标定平台时系数 k_z 的标定值相差 0.0436，即标定系数误差在 4% 左右，则在 $\pm 125 \mu\text{m}$ 范围内，由系数 k_z 引入的标定误差最大为 $10 \mu\text{m}$ 以上，严重影响标定精度。补偿后系数 k_z 的标定值为 1.1082，与采用高精度标定平台时系数 k_z 的标定值相差 0.0022，即标定系数误差在 0.2% 以内，则在 $\pm 125 \mu\text{m}$ 范围内，由系数 k_z 引入的标定误差最大为 $0.5 \mu\text{m}$ 。补偿阿贝误差和角锥棱镜成像误差后，标定误差从 4% 减少到 0.2% 以内，有效提高了标定精度。

4.3 直线度测量对比实验

为验证标定结果，使用激光干涉仪和五自由度测量装置同时测量导轨的直线度，如图 13 所示。导轨移动距离为 200 mm，每隔 20 mm 测量一组数据，实验结果如图 14 所示。

实验结果表明，残差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内，验证了标定方法的有效性。

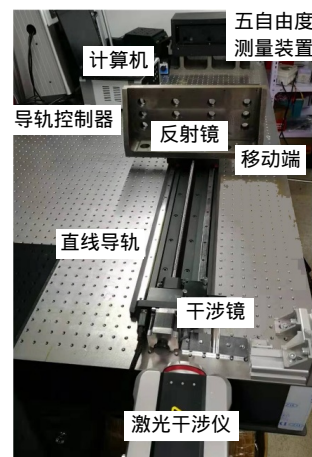


图 13 二维直线度测量对比实验系统

Fig. 13 Measurement and comparison experiment system of two-dimension straightness

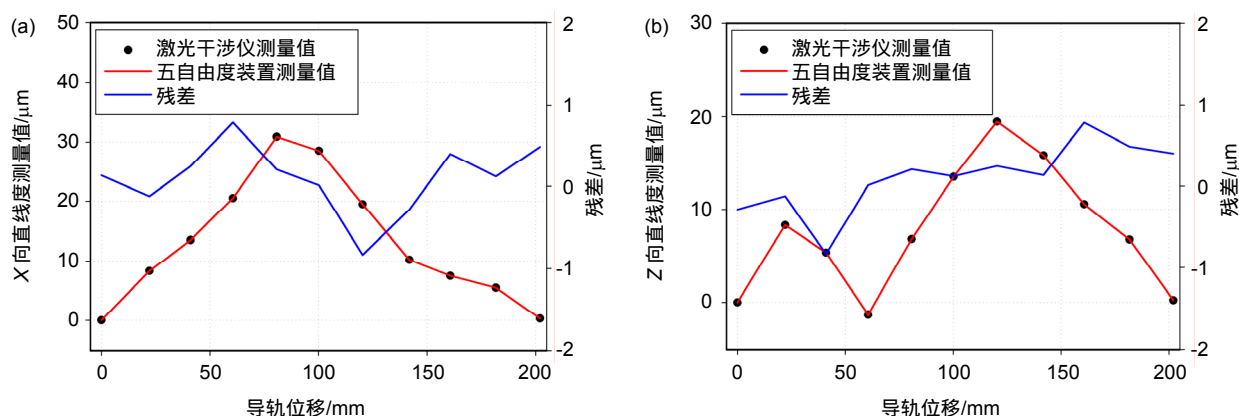


图 14 二维直线度测量对比实验结果。(a) X 向直线度; (b) Z 向直线度
Fig.14 Measurement and comparison experiment results of two-dimension straightness.
(a) Straightness along X axis; (b) Straightness along Z axis

5 结论

理论分析和实验结果表明,利用该标定方法可以基本消除标定平台自身角度变化引入的阿贝误差与角锥棱镜成像误差,有效提高了直线度标定精度。利用五自由度测量装置本身的角度测量结果补偿直线度标定误差,在不增加测量复杂度的同时,提高了标定精度。实验中利用低精度的标定平台模拟现场标定环境,实现了高精度标定,在一定程度上证明了该现场标定方法的有效性,但仍存在一定局限性,需在工业现场做进一步验证,实现此标定方法的推广应用。

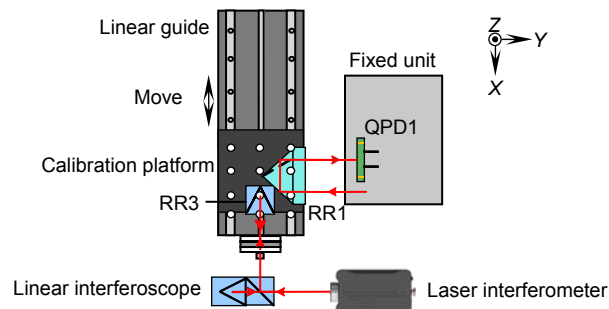
参考文献

- [1] Jao M X, Feng Q B, Wang M, et al. *Sensing and Measuring with Lasers*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
焦明星, 冯其波, 王鸣, 等. 激光传感与测量[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] Wang M H, Lou Z F, Huang Y B, et al. Research and application of a measurement system of the straightness and parallelism for guide rail[J]. *Modern Machinery*, 2018(5): 20–24.
王明海, 娄志峰, 黄余彬, 等. 一种导轨直线度与平行度测量系统的研究与应用[J]. *现代机械*, 2018(5): 20–24.
- [3] Jin T, Liu J L, Yang W, et al. High-precision straightness interferometer for linear moving stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1570–1577.
金涛, 刘景林, 杨卫, 等. 线性位移台直线度高精度外差干涉测量装置[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1570–1577.
- [4] Xu M, Wang X K, Qian L H. A new method for measurement of straightness of ultra-precise guideway with large distance[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(10): 140–143.
徐淼, 王新宽, 钱林弘. 一种超精密大行程导轨直线度检测新方法[J]. *机床与液压*, 2017, 45(10): 140–143.
- [5] Cao Y P, Liu M J, Liu X L, et al. Development of an instrument for measuring large range 2-D straightness[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 57–60.
曹益平, 刘明健, 刘晓丽, 等. 大尺度二维直线度测量仪的研制[J]. *光电工程*, 2004, 31(9): 57–60.
- [6] Huang P S, Ni J. On-line error compensation of coordinate measuring machines[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(5): 725–738.
- [7] 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.
- [8] Kuang C F, Hong E, Ni J. A high-precision five-degree-of-freedom measurement system based on laser collimator and interferometry techniques[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(9): 095105.
- [9] Bao C C, Li J K, Feng Q B, et al. Error-compensation model for simultaneous measurement of five degrees of freedom motion errors of a rotary axis[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 075004.
- [10] Ni J, Huang P S, Wu S M. A multi-degree-of-freedom measuring system for CMM geometric errors[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1992, 114(3): 362–369.
- [11] Kuang C F, Feng Q B, Zhang B, 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(1): 100–108.
- [12] Feng Q B, Zhang B, Cui C X, et al. Development of a simple system for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a linear guide[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25805–25819.
- [13] You F L, Feng Q B, Zhang B. Straightness error measurement based on common-path compensation for laser beam drift[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 515–519.
由凤玲, 冯其波, 张斌. 基于共路光线漂移补偿的直线度测量[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 515–519.
- [14] Lv Y, Feng Q B, Liu L S, et al. Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3597–3602.
吕勇, 冯其波, 刘立双, 等. 基于多准直光的六自由度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3597–3602.
- [15] Kuang C F, Feng Q B, Liu B, et al. Measuring straightness method with common path compensation for laser drift[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(4): 32–34, 38.
匡萃方, 冯其波, 刘斌, 等. 一种共路补偿激光漂移的直线度测量方法[J]. *光电工程*, 2005, 32(4): 32–34, 38.
- [16] Saito Y, Gao W, Kiyono S. A single lens micro-angle sensor[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2007, 8(2): 14–19.

Research on field calibration method of straightness in five-degree-of-freedom measurement

Su Yuhao, Duan Fajie, Jiang Jiajia*, Fu Xiao, Zhang Cong, Liu Wenzheng

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



Schematic diagram of X-direction output calibration of QPD1

Overview: The multi-degree-of-freedom measurement is one of the important methods to realize the rapid and high-precision measurement of geometric errors of machine tools. Straightness measurement, as an important part in the multi-degree-of-freedom measurement, directly affects the accuracy of error measurement of the machine tools. At present, the straightness measurement based on laser collimation has been widely used in multi-degree-of-freedom measurement systems. When the measuring device is applied in the field, the field calibration can effectively eliminate the system error caused by the installation and adjustment of the measuring device, change of environmental parameters, stress, and abrasion in the field application. But the precision and stability of the calibration platform are uncertain in the field calibration of straightness, so the calibration error caused by the calibration platform cannot be ignored.

In the five-degree-of-freedom measuring structure of laser transceiver, the straightness is measured based on the laser collimation principle, and the inverse reflection characteristics of the retroreflector. QPD1 (quadrant photodiode detector) is used to detect the location of the light spot. When using the laser interferometer to calibrate the straightness, the X-direction output and the Z-direction output of QPD1 need to be calibrated. In the field calibration of straightness, the angle of calibration platform would change. The Abbe error caused by the different measuring points of laser interferometer and straightness would affect the calibration accuracy, and it is determined by the Abbe deviation and the angle change of calibration platform. In addition, when the angle of calibration platform changes, the imaging error of retroreflector is part of the calibration errors according to the principle of parallel plate expansion of retroreflector. The field calibration model was established aiming at the calibration errors caused by the calibration platform. According to the calibration model and the angle measurement results of the five-degree-of-freedom measuring device, a compensation method of straightness calibration error was proposed.

In the calibration experiment, the X-direction output and Z-direction output of QPD1 in the five-degree-of-freedom measuring device was calibrated with laser interferometer. A low-precision calibration platform was used to simulate the field calibration environment, and a high-precision calibration platform with negligible angle change was used for comparison experiment. Experimental results showed that the calibration coefficient error of the X-direction straightness was reduced from 3.5% to less than 0.1% and the calibration coefficient error of the Z-direction straightness was reduced from 4% to less than 0.2%. The Abbe error and the imaging error of retroreflector were eliminated and the calibration accuracy of straightness was effectively improved.

Citation: Su Y H, Duan F J, Jiang J J, *et al.* Research on field calibration method of straightness in five-degree-of-freedom measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190451

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFF0204800), the Tianjin Natural Science Foundations of China (17JCQNJC01100), Science and Technology on Underwater Information and Control Laboratory (6142218081811), Equipment Pre-Research Field Fund (61405180505, 61400040303), National Natural Science Foundations of China (51775377, 61505140), Young Elite Scientists Sponsorship Program By China Association for Science and Technology (2016QNRC001)

* E-mail: jjiajjiajiang@tju.edu.cn