

高精度位移传感器线性度标定方法研究^{*}

张德福 葛川 李显凌 倪明阳 郭抗 李朋志

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室 长春 130033)

摘要:针对光学系统中光学元件的高精度位移调节和检测问题,提出一种非接触电容位移传感器的线性度标定方法,搭建了一个运动轴、测量轴和传感轴三轴共线的标定平台,从测量原理上消除阿贝误差。介绍了标定平台的组成和标定方法的原理,采用对称平行四边形机构实现微位移调节,基于柔度矩阵法分析了调节机构的输出柔度和行程。试验结果表明,机构的柔度为 $13.585 \mu\text{m}/\text{N}$,运动行程为 $543.4 \mu\text{m}$,分辨率约为 10 nm 。经过标定补偿计算,传感器的线性度由 0.04714% 提高至 0.00484% 。该线性度标定方法精度高,标定后的传感器满足精密位移调节机构使用要求。

关键词: 传感器; 标定; 线性度; 柔度矩阵

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor

Zhang Defu, Ge Chuan, Li Xianling, Ni Mingyang, Guo Kang, Li Pengzhi

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To address the issue of high-precision displacement adjustment and measurement in optical system, a linearity calibration method of non-contact capacitive displacement sensor is proposed. A calibration platform in which the movement axis, the measurement axis and the sensing axis are collinear is built. The Abbe error is eliminated in the measurement principle. The composition and principle of the calibration method are presented. Symmetrical parallelogram mechanism is used to achieve micro-displacement adjustment. The output compliance and travel stroke of the mechanism are analyzed based on the compliance matrix method (CMM). Results shows that the compliance of the mechanism is $13.585 \mu\text{m}/\text{N}$, and its movement stroke and positioning resolution are $543.4 \mu\text{m}$ and 10 nm respectively. The linearity of the sensor is improved from 0.04714% to 0.00484% after calibration calculation. The linearity calibration method exhibits high-precision, which satisfies the requirement of fine adjustment mechanism of displacement.

Keywords: sensor; calibration; linearity; compliance matrix

1 引言

光学系统装配集成时难免存在位置误差,为了达到理想的补偿效果,需要调节机构调整光学元件的位置^[1]。电容位移传感器(简称传感器)因为具有信噪比大和灵敏度高等优点,在精密位移检测中被广泛应

用。但是,由于加工制造和运输等因素的影响,传感器的实际特性与理论特性间存在一定的差距,使得测量结果存在误差,不能保证光学元件位移补偿量的准确性,从而影响光学系统像质补偿效果。为了减小测量误差,一方面是对传感器制造工艺和运输过程进行更加严格的质量控制;另一方面是对传感器进行标定补偿计算以提高其测量精度^[2]。文献[2]指出,标定

收稿日期: 2014-11 Received Date: 2014-11

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项基金(2009ZX02205)项目资助

补偿计算是在现有硬件条件下提高传感器性能的最为有效手段之一。故传感器在装入调节机构之前必须标定,其标定精度将直接影响传感器的测量精度,从而影响光学系统像质补偿质量。线性度作为传感器的重要指标之一,其标定方法值得深入研究。

文献[2]提出一种预紧式超静定 Stewart 结构六维力传感器标定方法,其 I 类误差最大为 1.05%, II 类误差最大为 2.82%;文献[3]研制了气浮式六维力测量平台,用于柔性触觉传感器标定,该标定平台在 X 轴和 Y 轴方向具有完全对称的结构,不存在维间耦合现象, X 轴和 Z 轴方向上线性度分别达到 0.16% 和 0.01%,重复性误差分别小于 0.2% 和 0.05%。文献[4]提出一种“四步法”分组辨识六维加速度传感器的 25 个解耦参数,结果表明六维加速度解耦最大误差为 7.479%,比参数辨识前的解耦误差降低了 1 个数量级;文献[5]分析了传感器标定时采用不同的数据处理方法对测量精度的影响,指出曲线拟合、数据融合时避免引入人为误差影响测量。以上标定方法主要研究力/力矩传感器标定,针对高精度位移传感器线性度标定方法未见公开报道。

本文提出一种高精度位移传感器在线标定方法,搭建了一种运动轴、测量轴和传感轴三轴共线的标定平台,从测量原理上消除阿贝误差。标定补偿计算后传感器的线性度由 0.047 14% 提高至 0.004 84%,标定后的传感器满足高精度光学系统调节机构使用要求。

2 标定平台的组成及工作原理

设计的标定平台如图 1 所示,单轴激光干涉仪(简称干涉仪)发出的入射光通过微位移调节机构(简称机构,见图 2)上的通光孔入射到 50% 分光镜处,然后经过分光镜分成 2 路,一路入射光经过参考角反射镜后返回,光程为 Δ_1 ;其中,参考角反射镜和分光镜连接,并且与干涉仪光轴在同一直线上;另一路入射光经过测量角反射镜后返回,光程为 Δ_2 ;其中,测量角反射镜与支撑座连接到机构的左端,且测量角反射镜和分光镜所在直线与干涉仪光轴方向垂直;两路反射光最后经过通光孔再回到干涉仪;当驱动器穿过导向孔顶推导向机构作水平方向的直线运动时, Δ_2 的读数改变;同时,传感器与被测面之间的距离 d 也随之改变;以激光干涉仪的读数为基准,对传感器在线标定补偿计算。该标定方法从测量原理上消除阿贝误差,标定后的传感器线性度好^[1]。

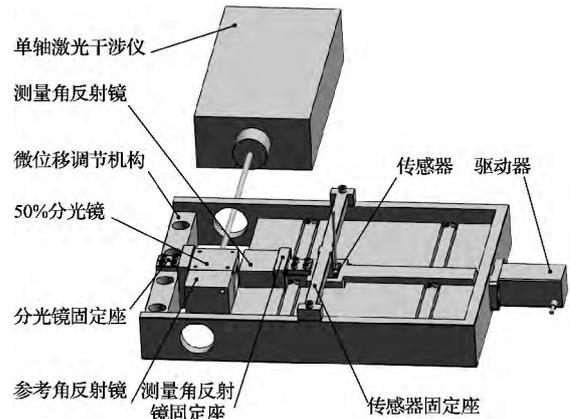


图 1 标定平台的组成

Fig. 1 The composition of the calibration platform

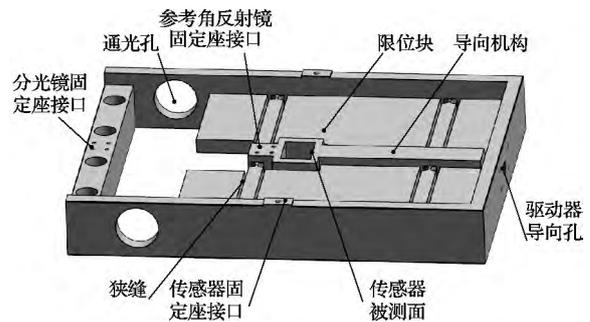


图 2 微位移调节机构

Fig. 2 Micro-displacement adjustment mechanism

3 基于柔度矩阵法的微位移调节机构设计

考虑现有驱动器的最大驱动力为 40 N,为了实现 500 μm 以上的行程,必须合理设计机构的输出柔度。为减小运动误差,采用了由连杆和圆弧柔性铰链构成的对称平行四边形机构,如图 3 所示。下面通过分析单个铰链变形与外载荷之间的关系,推导铰链的柔度系数,然后合成柔度矩阵,进而推导机构的输出柔度。

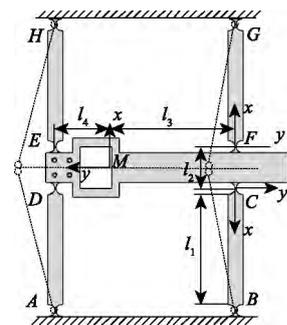


图 3 导向机构的结构参数

Fig. 3 Structure parameters of the guiding mechanism

3.1 铰链的柔度系数

铰链参数如图4所示,假设铰链的长度足够,计算其变形时可忽略剪切作用的影响^[6-7];铰链具有 $O-xy$ 平面内的三自由度 2 个平移和 1 个旋转,转轴沿着 Oz 方向,并且输入和输出都在 $O-xy$ 平面内。

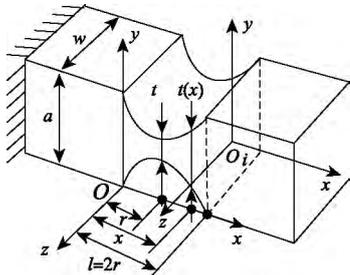


图4 圆形柔性铰链参数

Fig.4 The parameters of a circular flexure hinge

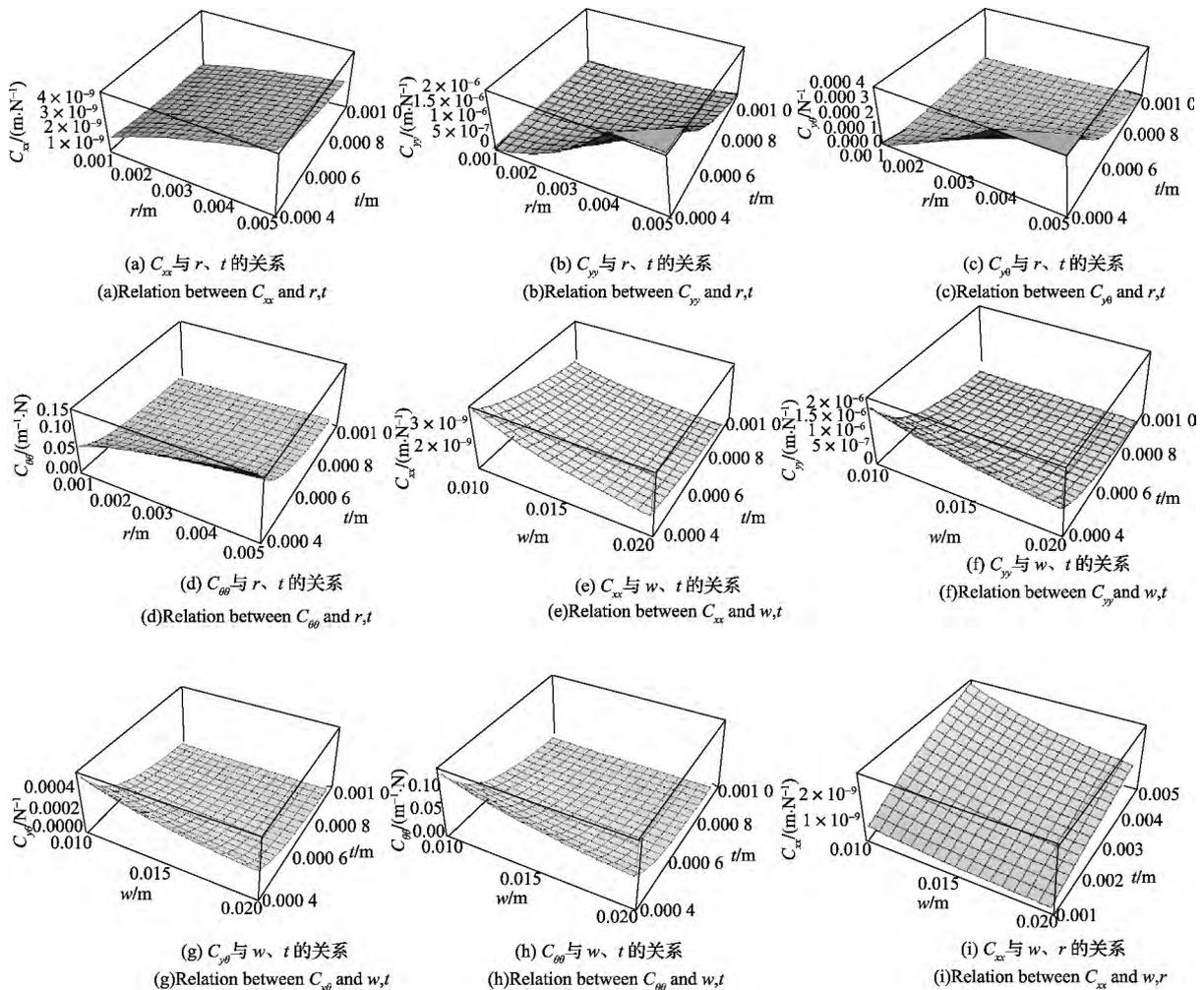
根据文献[8],变形量和外载荷之间的关系为:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{yy} & C_{y\theta} \\ 0 & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: F_{x1}, F_{y1}, M_{z1} 为外载荷 x, y, θ 是对应的变形量,柔度系数 $C_{xx}, C_{yy}, C_{y\theta}, C_{\theta\theta}$ 分别为^[8-10]:

$$\begin{cases} C_{xx} = \frac{1}{Ew} I_1 = \frac{1}{Ew} \int_0^l \frac{dx}{t(x)} \\ C_{yy} = \frac{12}{Ew} I_2 = \frac{12}{Ew} \int_0^l \frac{x^2 dx}{t(x)^3} \\ C_{y\theta} = \frac{12}{Ew} I_3 = \frac{12}{Ew} \int_0^l \frac{x dx}{t(x)^3} \\ C_{\theta\theta} = \frac{12}{Ew} I_4 = \frac{12}{Ew} \int_0^l \frac{dx}{t(x)^3} \end{cases} \quad (2)$$

柔度系数与 w, r, t 之间的关系如图5所示。



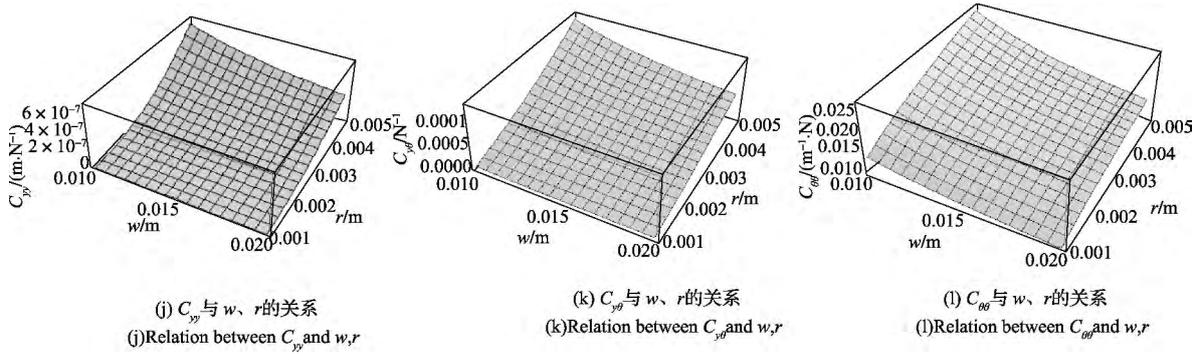


图 5 铰链柔度与结构尺寸的关系

Fig. 5 Relationship between compliance and structure size of circular flexure hinge

3.2 机构的输出柔度

图 3 中对于支链 AD 根据柔度矩阵法^[11-13]分别求得铰链 A 和 D 在各自局部坐标系 A-xy D-xy 下的柔度 C_i 铰链 A 和 D 串联到 D 则 D-xy 坐标系下的支链 AD 的柔度为:

$$C_D = \sum_{i=1}^2 T_i^D C_i (T_i^D)^T \quad (3)$$

式中: C_i 是铰链 i 在其局部坐标系中的柔度, T_i^D 是从铰链 i 的局部坐标系到坐标系 D 的柔度变换矩阵。

将柔度从坐标系 D-xy 变换到 M-xy 后的柔度为:

$$C_D^M = T_D^M C_D (T_D^M)^T \quad (4)$$

同理 得到 BC 支链在 C-xy 下的柔度为:

$$C_C = \sum_{i=1}^2 T_i^C C_i (T_i^C)^T \quad (5)$$

将柔度从坐标系 C-xy 变换到 M-xy 后的柔度为:

$$C_C^M = T_C^M C_C (T_C^M)^T \quad (6)$$

根据对称性 支链 EH 和 FG 的柔度通过旋转支链 AD 和 BC 的柔度得到:

$$C_E^M = R_x(\pi) \cdot C_D^M \cdot (R_x(\pi))^T \quad (7)$$

$$C_F^M = R_x(\pi) \cdot C_C^M \cdot (R_x(\pi))^T \quad (8)$$

4 个支链并联到 M 点 在坐标系 M-xy 的输出柔度为:

$$C_M = ((C_D^M)^{-1} + (C_C^M)^{-1} + (C_E^M)^{-1} + (C_F^M)^{-1})^{-1} = \sum_{x=C}^F ((C_x^M)^{-1})^{-1} \quad (9)$$

4 实验与讨论

为了检验所建模型的正确性 进行机构试验 实验装置如图 6 所示。机构的材料为 65 Mn 其杨氏模量为 198.6 GPa 泊松比为 0.23 密度为 7 850 kg/m³^[14-15]。图 3 中机构的尺寸参数为: l₁ = 82 mm, l₂ = 28 mm, l₃ = 82.5 mm, l₄ = 37.6 mm, r = 4.0 mm, t = 0.8 mm, w = 10 mm。实验中 将机构置于环控实验室的气浮光学平台上 以便消除外界振动干扰对测试的影响。利用 Renishaw XL80 激光干涉仪测量机构的行程。该激光干涉仪的精度为

± 0.5 × 10⁻⁶ 最小位移分辨率为 1 nm。采用 PI 公司 N-111 压电驱动器提供位移进给 其驱动行程 10 mm 开环分辨率为 0.025 nm。所要标定的传感器为 PI 公司的 D-E30K001 电容传感器 其标称测量行程为 200 μm 线性度为 0.05%。由于该传感器并非新品 其线性度有所下降 需要进行标定补偿计算以提高其测量精度。

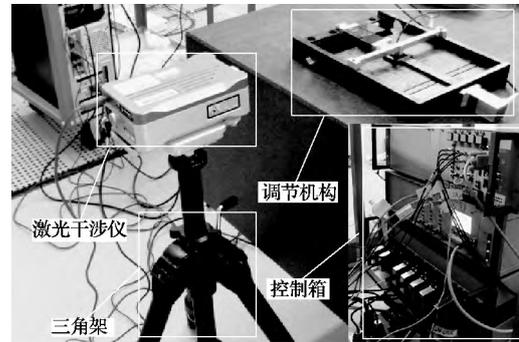


图 6 标定试验平台

Fig. 6 Calibration platform in experiment

4.1 机构性能测试

为了测试微位移调节机构的柔度 利用力新宝 FGJ-5 型数字式测力仪代替驱动器顶推机构 范围为 [0 40 N], 增量为 5 N 同时通过激光干涉仪测量输出位移 得到机构的运动行程。另一方面 根据虎克定律得到机构的静态刚度 进而求得柔度。试验测得机构的运动行程为 543.4 μm 柔度为 13.585 μm/N 并且处于线性区域。由 CMM 计算得到的机构运动行程和输出柔度分别为 815.08 μm 和 20.377 μm/N 由有限元 (FEM) 分析得到的行程和输出柔度为 789.4 μm 和 19.735 μm/N。试验结果和 CMM 计算、FEM 结果存在偏差的原因主要来自三方面: 1) CMM 中的柔度系数的精度并非百分之百精确; 2) FEM 分析中单元选择和网格尺度的影响; 3) 机构表面经过除锈和发黑处理后 表面产生局部硬化 特别是铰链部分尺寸变厚 导致实测行程小于理论计算和有限元仿真值。所以 设计时行程和输出柔度应该留有余量。

根据 CMM 计算,当结构尺寸参数中 r 和 t 取不同值时,输出柔度和运动行程的变化关系如表 1 和表 2 所示。

表 1 输出柔度、行程和结构参数 t 之间的关系($r=4.0$ mm)

Table 1 Relationship between output compliance, travel stroke and t ($r=4.0$ mm)

t /mm	输出柔度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	行程/ μm
0.5	66.632	2 665.28
0.6	42.104	1 684.16
0.7	28.546	1 141.84
0.8	20.377	815.08
0.9	15.130	605.2
1.0	11.588	463.52
1.0	9.101	364.04
1.2	7.298	291.92
1.3	5.955	238.2
1.4	4.931	197.24
1.5	4.136	165.44

表 2 输出柔度、行程和结构参数 r 之间的关系($t=0.8$ mm)

Table 2 Relationship between output compliance, travel stroke and r ($t=0.8$ mm)

r /mm	输出柔度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	行程/ μm
2	14.025	561
2.5	15.850	634
3	17.488	699.52
3.5	18.987	759.48
4	20.377	815.08
4.5	21.679	867.16
5	22.907	916.28
5.5	24.073	962.92
6	25.186	1 007.44

测量机构的分辨率时,应用驱动器推动机构产生 130 组位移,并通过激光干涉仪记录位移数据,结果如图 7 所示。可知,机构的分辨率约为 10 nm。如果能够进一步控制测试中的噪声水平,则该机构的最小分辨率还可以提高。

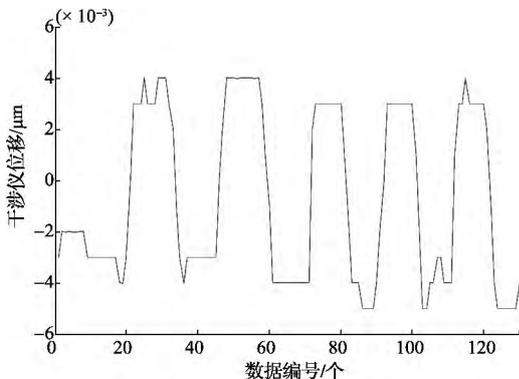


图 7 机构的分辨率曲线

Fig. 7 Resolution of the mechanism

4.2 传感器线性度标定

在标定之前,首先进行传感器全行程线性度测试,采

用单向运动的方式统计数据。具体步骤如下:1) 在坐标测量机上安装传感器,使平行度小于 1 mrad; 2) 控制驱动器使机构至传感器的测量负行程; 3) 采用 PID 控制策略令机构以固定步增量单向运动; 4) 运动至指定位置时,采集传感器数据,取平均值以减小噪声的影响; 5) 重复步骤 3 和 4,直至传感器测量至正行程; 6) 以干涉仪位移为输入,传感器位移为输出得到线性度测试数据; 7) 采用最小二乘法处理线性度测试数据,使各个点的偏差的平方和最小,得到拟合多项式系数; 8) 控制机构全行程运动,即得到标定后的传感器线性度。将该拟合参数用于机构中,提高了传感器的测试精度。

传感器的测量重复性是指对于同一位移测量值的一致性,该值越集中说明重复性越好,传感器的性能越优。良好的重复性是获得优越的线性度标定结果的前提。通过实验测试电容传感器的线性度测量重复性,结果如图 8 所示。可知,对于 200 μm 的 20 次测量,传感器的线性度测量值在 0.041 8% ~ 0.053 7%,重复性较好,为传感器标定提供保证。

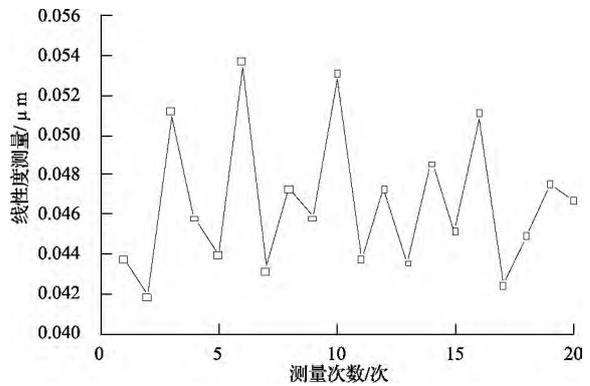


图 8 线性度测试重复性

Fig. 8 Linearity measurement repeatability

在传感器线性度测试过程中,发现传感器的安装平行度误差和激光干涉仪测量光路的余弦误差对测试结果影响很大。当传感器安装平行度误差达 5 mrad、干涉仪测量光路包含较大余弦误差和传感器安装平行度误差小于 1 mrad 并且干涉仪测量光路余弦误差基本消除时的测试结果如图 9 所示。

从图 9 中可知:1) 尽管调节测量光路使余弦误差基本消除,但是由于传感器安装平行度误差超差,线性度测量结果仅为 0.052 12%; 2) 当传感器安装平行度满足要求,但是由于干涉仪测量光路存在较大余弦误差,导致线性度测量结果为 0.053 21%; 3) 当传感器平行度安装满足要求,并且测量光路余弦误差基本消除时,线性度测试结果可达 0.047 14%。实验可知,安装平行度和余弦误差对线性度测试结果都有影响,线性度通常对余弦误差更加敏感。

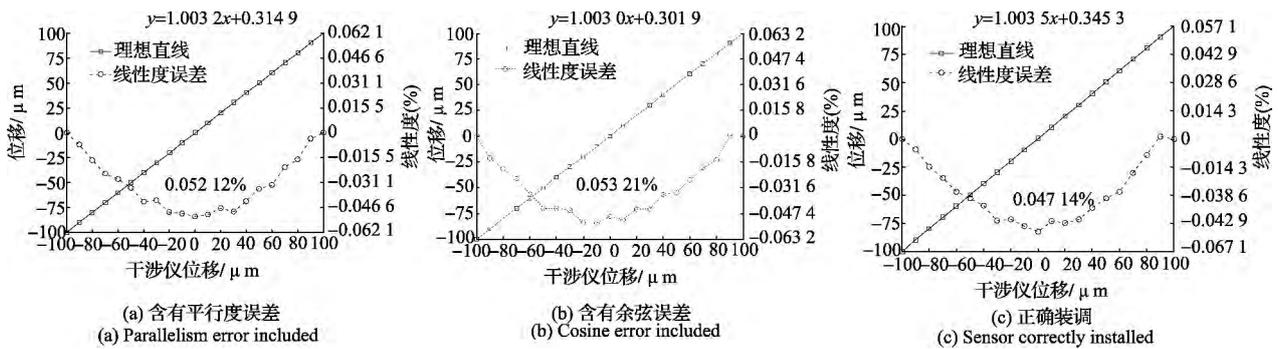


图 9 传感器线性度测试

Fig. 9 Sensor linearity measurement

为了满足光学系统高精度位移调节,对传感器在线标定以提高线性度。实验采用 PID 控制策略和最小二乘法得到线性度在线标定结果。PID 参数设置为: $P = 0.008$ $I = 0.00005$ 。最小二乘拟合系数为 $[a_4, a_3, a_2, a_1, a_0] = [4.60 \times 10^{-10}, 1.05 \times 10^{-8}, -1.28 \times 10^{-5}, 0.99, -0.26]$ 标定结果如图 10 所示。对比图 9 可知,线性度由 0.04714% 提高至 0.00484%,改善水平接近一个量级。如果对拟合算法和拟合系数进一步优化,线性度标定精度还有提升空间。

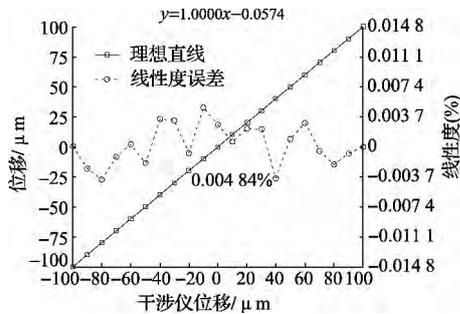


图 10 传感器线性度标定

Fig. 10 Sensor linearity calibration

5 结 论

本文提出了一种高精度电容位移传感器的在线标定方法,搭建了一个运动轴、测量轴和传感轴三轴共线的标定平台,从测量原理上消除了阿贝误差。基于柔度矩阵法设计的微位移调节机构的柔度为 $13.585 \mu\text{m}/\text{N}$,运动行程达到 $543.4 \mu\text{m}$,分辨率约为 10 nm 。传感器经过标定补偿计算后,其线性度指标由原来的 0.04714% 提高至 0.00484%,测量精度明显改善。该线性度标定方法精度高,标定平台易于制造,标定后的传感器能够满足光学系统位移调节机构使用要求。此外,该标定方法也可以为传感器其他参数(如重复性等)的测试或标定提供参考。

参考文献

[1] 张德福,赵磊. 基于柔度矩阵法的整体式 XY 光学微调机构研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 269-275.
ZHANG D F, ZHAO L. Research of monolithic XY micro-motion mechanism based on compliance matrix [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2014, 35(2): 269-275.

[2] 姚建涛,李立建,许允斗,等. 超静定六维力传感器静定测量模型及标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 1927-1933.
YAO J T, LI L J, XU Y D, et al. Statically determinate measurement model and calibration method of statically indeterminate six-axis force sensor [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2013, 34(9): 1927-1933.

[3] 黄斌,余晓芬,黄英,等. 三维柔性触觉传感器静态标定方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2003-2009.
HUANG B, YU X F, HUANG Y, et al. Research on static calibration method of flexible three-dimensional tactile sensor. [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2010, 31(9): 2003-2009.

[4] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛. 并联式六维加速度传感器的参数辨识 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2627-2638.
YOU J J, LI CH G, WU H T. Parameter identification of parallel type six-axis accelerometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2627-2638.

[5] 马锦垠,梁斌. 传感器标定数据处理方法对爆炸压力测量误差的影响 [J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 58-61.
MA J Y, LIANG B. Data processing methods of sensor calibration influence on measurement error of explosion pressure [J]. Electronic Measurement Technology,

- 2012, 35(6): 58-61.
- [6] BEER F P, JOHNSTON E R, DEWOLF J T, et al. Mechanics of materials [M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [7] YOUNG W C, BUDYNAS R G. Roark's formulas for stress and strain [M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [8] LOBONTIU N. Compliant mechanisms: Design of flexure hinges [M]. Florida, USA: CRC Press, 2003.
- [9] LOBONTIU N, PAINE J S N, GARCIA E, et al. Corner-filletted flexure hinges [J]. Transactions of the ASME, 2001, 123(3): 346-352.
- [10] LOBONTIU N, PAINE J S N, GARCIA E, et al. Design of symmetric conic-section flexure hinges based on closed-form compliance equations [J] Mechanism and Machine Theory, 2002, 37: 477-498.
- [11] LI Y M, XU Q S. Design and analysis of a totally decoupled flexure-based XY parallel micromanipulator [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(3): 645-657.
- [12] LI Y M, XU Q S. Development and assessment of a novel decoupled XY parallel micropositioning platform [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(1): 125-135.
- [13] LI Y M, HUANG J M, TANG H. A compliant parallel XY micromotion stage with complete kinematic decoupling [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(3): 538-553.
- [14] YODER JR P R. Opto-mechanical systems design [M]. USA: CRC Press, 2006.
- [15] 师昌绪, 钟群鹏, 李成功. 中国材料工程大典 [M].

北京: 化学工业出版社, 2005.

SHI CH X, ZHONG Q P, LI CH G. China materials engineering canon [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

作者简介



张德福(通讯作者) 2007 和 2012 年于哈尔滨工程大学分别获得学士和博士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员, 主要研究方向为光学精密仪器结构设计。

E-mail: zhangdf@sklao.ac.cn

Zhang Defu (Corresponding author) received his bachelor's degree in 2007 and Ph. D. in 2012 all from Harbin Engineering University (HEU). He is currently an assistant researcher in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include structural design of optical precision instruments.



葛川 2008 年和 2011 年于西安电子科技大学分别获得学士和硕士学位, 为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员, 主要从事微位移检测和精密控制方面的研究。

E-mail: gechmail@163.com

Ge Chuan received his bachelor's degree in 2008 and master's degree in 2011 all from Xidian University. He is currently an assistant researcher in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include micro-displacement testing and fine control.