

文章编号 1004-924X(2015)09-2546-07

# 电容式位移传感器的线性度标定与不确定度评定

葛川\*, 张德福, 李朋志, 郭抗, 李佩玥, 杨怀江

(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  
超精密光学工程研究中心, 吉林长春 130033)

**摘要:** 由于光刻投影物镜装调中电容传感器的线性度指标不能够满足位移调节精度的需求, 本文提出了一种提高电容传感器测量线性度的方法。该方法采用压电驱动器提供位移进给; 采用高精度激光测长干涉仪校准电容传感器的线性度, 提供位移反馈以保证运动控制精度。采用高阶曲线拟合方法得到拟合系数对传感器线性度进行在线标定; 对标定实验中的环境、安装、机构以及控制等进行不确定度分析与评定以保证电容传感器的线性度测量精度; 最后进行电容传感器线性度的标定实验。实验结果表明: 本文提出的线性度标定方法能够减小各误差项对于测量结果的影响, 标定后传感器线性度由 0.047 14% 提高至 0.004 84%, 近一个数量级, 并且线性度重复性较高, 重复性偏差为 0.38 nm, 全行程内线性度的合成不确定度为 5.70 nm, 能够满足光刻物镜中位移控制精度的需求。

**关键词:** 电容传感器; 位移传感器; 标定; 线性度; 不确定度; 光刻投影物镜

**中图分类号:** TP212.13 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2546

## Linearity calibration and uncertainty evaluation for capacitance displacement sensor

GE Chuan\*, ZHANG De-fu, LI Peng-zhi, GUO Kang, LI Pei-yue, YANG Huai-jiang

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

\* Corresponding author, E-mail: gechmail@163.com

**Abstract:** As the linearity of capacitance sensor in adjusting a lithographic projection objective could not meet the requirement of the adjustment mechanism for accuracy standard, a method to improve the measuring linearity of the capacitance sensor was proposed. A piezoelectric actuator was used to provide displacement feeding and a higher precise laser length interferometer was used to provide displacement feedback to ensure the accuracy of moving control. The fitting factors getting from the high order curve fitting were used to calibrate the linearity of the capacitance sensor online. Then, the uncertainties of the environment, installation mechanism and control were analyzed and evaluated to meet the accuracy of the linearity measurement. Finally, calibration experiments for the sensor were carried out. The experiment results indicate that the calibration method of the linearity proposed reduces the influence of the error on the measurement results. After calibration, the linearity of capacitance sensor increases from 0.047 14% to 0.004 84%, nearly an order of magnitude. Moreover, the capacitance sensor has high linearity repeatability, the deviation of repeatability is 0.38 nm, and

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-02-07.

基金项目: 02 重大专项资助项目 (No. 2009ZX02205)

the combined uncertainty of the linearity in the whole stroke is 5.70 nm, which meets the displacement control accuracy of the lithographic projection objective.

**Key words:** capacitance sensor; displacement sensor; calibration; linearity; uncertainty; lithographic projection objective

## 1 引言

随着集成电路特征线宽的不断减小,对极大规模集成电路制造所需的光刻物镜的精度要求越来越高。目前国内已经开展了光刻投影物镜的研制工作,在光刻投影物镜的装调和使用过程中,为了获得更好的光学性能需要通过多种调节机构对光学系统的各种像差进行补偿。机构的调节量一般为微米级,而其调节精度往往小于百纳米级<sup>[1]</sup>。调节机构中一般使用压电陶瓷驱动器(PZT)和电容传感器构成闭环控制系统以保证控制精度,其中微位移检测系统的精度决定了控制系统的精度<sup>[2]</sup>。

调节机构由执行器和控制器组成,受噪声和分辨率等影响,执行器为非理想机构。因此调节机构的精度由电容传感器的零漂、电容传感器的精度和控制策略的稳态误差等构成。其中电容传感器的零漂和控制系统的稳态误差能够保证10 nm等级。为保证调节机构的精度小于100 nm,机构中所使用的电容式位移传感器的精度需低于机构精度的一个数量级<sup>[3]</sup>,达到10 nm级。而对于测量系统,测量精度是无法获取的,只能利用传感器的线性度近似表征其精度水平。目前,国际知名的电容传感器供应商(如 Micro-Epsilon、Physik Instrument)的电容传感器产品的线性度仅能达到0.05%/200  $\mu\text{m}$ ,其精度水平仅为100 nm,无法满足调节机构控制精度的需求<sup>[4]</sup>。另外,由于电容传感器的测量范围极小,在安装过程中会引入较大误差,而且无法保证各次安装的误差同相性。因此在实际应用中无法得到电容传感器的标称线性度。

本文对电容传感器线性度标定进行了研究,利用激光测长干涉仪校准电容传感器的线性度。采用可以实现X向单自由度调节的过约束对称平行四边形机构作为测试机构;采用PZT提供微位移进给,并与激光干涉仪构成闭环控制保证位移精度;对电容传感器的位移曲线进行在线标定提高其线性度。实验中解决了安装过程中引入的

非平行误差,同时在提供位移基准的测量光路中采用自动反射法减小激光干涉仪引入的测量误差。最后对实验进行合成不确定度评定,从而保证线性度测量精度。

## 2 电容传感器线性度标定方法

线性度是度量测试系统输出、输入线性程度的指标。实验中将电容传感器安装在可提供纳米级分辨率的测试机构上,利用激光干涉仪提供位移基准作为测试系统输入,传感器采集位移值作为测试系统输出。以固定的步进量使测试机构在电容传感器的测量全行程内运动,运动至指定位置采集传感器读数值。位移控制精度采用PID控制策略保证,P(比例)调节运动速度,I(积分)调节控制精度。根据测试系统输入输出关系,计算电容传感器的线性增益、偏移与线性度。

采用最小二乘算法对测试系统输入输出进行处理。以电容传感器位移数据为输入、激光干涉仪位移为输出,使各个点偏差的平方和最小以得到拟合系数并写入寄存器。以此对电容传感器的输出值进行在线标定,提高测量精度。

电容传感器在线标定步骤为:

Step1:控制测试工装使其运动至电容传感器测量负行程;

Step2:以固定步进量单向运动,采用PID控制策略,其中控制参数通过在线整定得到,实验中 $P=0.08$ , $I=0.000\ 05$ ,稳态误差设置为 $\pm 4$  nm;

Step3: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;

Step4:重复Step2、Step3,直至电容传感器测量正行程;

Step5:以传感器位移为输入,干涉仪位移为输出,采用4阶多项式拟合得到拟合系数,并将系数值写入寄存器。

## 3 线性度标定不确定度评定

电容传感器线性度标定过程中,由于测量误

差的存在,使测量结果具有不确定性。线性度标定中的不确定度主要由环境误差;安装误差和机构及控制系统误差等构成。

### 3.1 环境不确定度

电容传感器标定过程中采用激光干涉仪作为位移基准,测量基准的不确定度会耦合到测量合成不确定度之中。根据干涉测量的基本原理,空气折射率会随着温度、压力和相对湿度而变化,而折射率的变化引起光程发生变化导致干涉条纹的变化,从而引入测量误差<sup>[5]</sup>。根据 Edlen 公式<sup>[6]</sup>,空气折射率是温度和压强的函数,为:

$$(n-1)_{t,p} = \frac{p(n-1)_s}{96\,095.43} \times \frac{1+10^{-8}(0.613-0.009\,98t)p}{(1+0.003\,661\,0t)}, \quad (1)$$

其中: $p, t$  分别为空气压强和温度,  $(n-1)_s$  为标准空气折射率,表示在一个大气压、温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时的标准空气折射率。根据 Edlen 公式,温度为  $15\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$  时,空气折射率可以写成:

$$(n-1)_{t,p} = \frac{2.879\,3p}{1+0.003\,671t} 10^{-9}. \quad (2)$$

由式(2)可以得到空气折射率随温度和压强的变化关系:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{p \times 10^{-11}}{(1+0.003\,671t)^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial p} = \frac{2.879\,3 \times 10^{-9}}{1+0.003\,671t}. \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可以看出温度对空气折射率的影响比气压的影响大  $2\sim 3$  个数量级,因此实验仅考虑温度的影响。电容传感器线性度标定实验于精密温控实验室中进行,温度测试采用 Fluke 高精度电阻测温仪 1594(精度为  $0.8 \times 10^{-6}$ ),温度测试结果如图 1 所示。温度控制系统具有较大惯性环节<sup>[7]</sup>,故稳定时间较长。

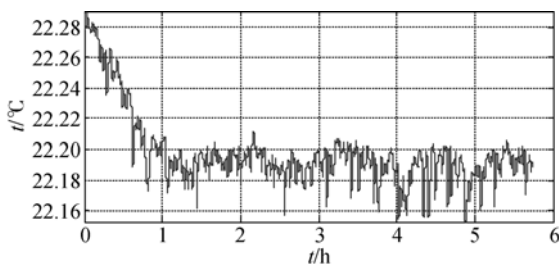


图 1 精密温控

Fig. 1 Precise temperature control

在温度稳定后(3 h 以后),每小时温度变化  $P-P$  值优于  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据空气折射率变化引入的相位变化,可以得出温度整体变化引入的测量误差为  $5\text{ nm}$ 。认为温度变化服从均匀分布<sup>[8]</sup>,且已知区间宽度  $a=2.5\text{ nm}$ ,则温度引入的标准不确定度为:

$$u_a = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{2.5}{\sqrt{3}} = 1.44\text{ nm}. \quad (5)$$

### 3.2 安装不确定度

电容传感器标定过程中的安装不确定度主要由干涉仪余弦误差、传感器安装面平行度误差组成。

#### (1) 余弦误差

激光光束路径与运动轴之间的角度偏差将导致测量距离小于实际距离。当准直偏差角度增加时,误差将随之明显增加,通常采用准直的方法来减小余弦误差<sup>[9]</sup>。传感器标定实验中采用三菱镜组,分光镜与反射镜组之间的位移变化量小,无法采用准直方法减小余弦误差,如图 2 所示。

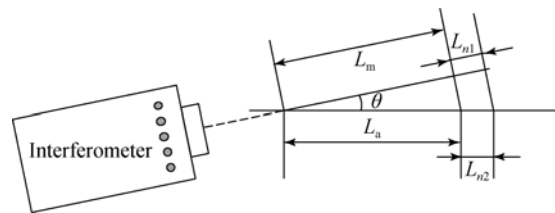


图 2 光路余弦误差

Fig. 2 Cosine error in optical path

图 2 中,  $L_m$  为激光干涉仪测量距离,  $L_a$  为运动轴真实距离,  $L_{n1}$  为测量运动增量,  $L_{n2}$  为真实运动增量,  $\theta$  为余弦角。实验中为减小温度对差模光程的影响,取  $L_m = 50\text{ mm}$ ,人眼分辨率为  $1\text{ mm}$ 。由于电容传感器标定中运动范围极小,  $L_{n1}$  为  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,真实运动增量  $L_{n2}$  为:

$$L_{n2} = \frac{L_{n1}}{\cos\left[\arctan\left(\frac{1 \times 2}{L_m}\right)\right]} = 200.160\text{ }\mu\text{m}, \quad (6)$$

式中:光路产生的余弦误差  $L_c$  为  $160\text{ nm}$ ,不满足传感器线性度精度需求,在此采用自动反射法减小余弦误差,如图 3 所示。

将运动方向的正交角镜更换为平面反射镜,并固定于运动轴之上。根据几何光学理论,当分光镜的光线垂直入射平面镜时,光路能够原路返

回;而当入射激光与分光镜之间存在偏角时,分光镜光线与平面镜之间也存在偏角使得光线不能原路返回。自动反射法对于平面镜的垂直安装位置不受电容传感器测量行程的限制,仅与激光头与分光镜之间的距离有关。而激光头与分光镜之间的距离属于共光路部分,受温度的影响较小,可延长。实验中取该距离为 1 m,任取人眼分辨率为 1 mm,则余弦误差  $L_c$  为 0.9 nm。余弦误差引起的不确定度  $u_0$  为 0.52 nm。

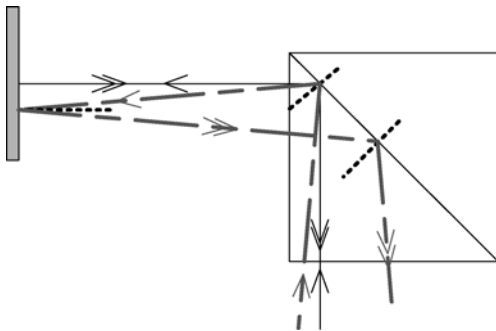


图 3 自动反射法  
Fig. 3 Automatic reflection

(2) 平行度误差

根据变间隙式电容传感器的测量原理,传感器的测量量是电极面和被测面之间电场的变化,并将电场的变化转换为位移的变化<sup>[10]</sup>。当传感器的电极面和被测面之间不平时,电场分布将发生改变,从而产生平行度误差。根据经验公式,1 mrad 的非平行度产生 0.006% 线性度误差<sup>[11]</sup>。电容传感器的初始安装距离为 200  $\mu\text{m}$ ,实现平行度装调难度较大。

实验利用平行度可调机构、Zeiss 三坐标机 (Zeiss UPMC Ultra, 精度 0.3  $\mu\text{m}$  + 测量长度/1 000), 采用相对平行方法实现电容传感器在线装调以减小电容传感器安装平行度误差。装配如图 4 所示, 电容传感器的安装面为固定面; 被测表面为运动面。通过三坐标机检测电极面与安装面的平行度  $\beta_1$ 、安装面与被测面的平行度  $\beta_2$ 。电极面与被测面平行度  $\beta = \beta_1 + \beta_2$ 。电容传感器电极面直径是 3.8 mm, 为达到  $\beta < 1$  mrad, 需保证平行度检测值小于 3.79  $\mu\text{m}$ 。实验中, 三坐标机测得  $\beta_1 = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $\beta_2 = 2.2 \mu\text{m}$ , 满足  $\beta < 1$  mrad。当  $\beta < 1$  mrad, 平行度误差为 10 nm。认为平行度误

差服从正态分布, 故由安装不确定度引起测量不确定度  $u_c$  为 3.33 nm。

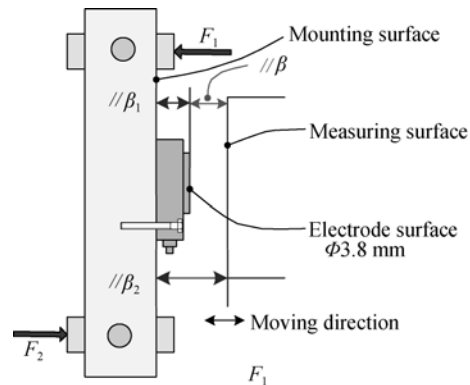


图 4 减小平行度误差  
Fig. 4 Reducing the parallelism error

3.3 机构、控制不确定度分析

测试机构的分辨率是机构设计的重要指标之一, 在定位控制应用中, 机构的分辨率影响其定位精度<sup>[12]</sup>。经实验验证, 电容传感器标定机构的位移分辨率小于 8 nm, 其不确定度  $u_d$  为 2.67 nm。

电容传感器的零漂反映了传感器位移测量的稳定性<sup>[13]</sup>。实验用传感器的零漂为 6.22 nm, 认为零漂服从正态分布, 零漂引入的测量不确定度  $u_e$  为 2.07 nm。

控制系统稳态误差影响位移检测精度。通过控制策略设置, 可将稳态误差控制为  $\pm 4$  nm, 故稳态误差引起的测量不确定度  $u_f$  为 2.67 nm。

4 实验结果分析

为了验证电容传感器的线性度标定性能和各个误差项对于测量的影响, 采用实验方法对德国 Physik Instrument (PI) 公司的 D-E30K001 电容传感器进行验证, 其测量范围为 200  $\mu\text{m}$ , 线性度为 0.05%。标定实验于精密温控实验室内进行; 采用含 8 个圆弧形柔性铰链机构实现微位移调节和平稳导向; 采用 PI 公司 NEXLINE 压电驱动器提供位移进给 (行程 10 mm, 开环分辨率 0.025 nm); 采用英国 Renishaw XL80 激光干涉仪提供位移基准 (精度  $\pm 0.5$  ppm, 分辨率 1 nm), 进行标定实验, 实验实物如图 5 所示, 实验环境参数如表 1 所示。



图 5 实验实物图

Fig. 5 Experiment equipment

表 1 环境参数

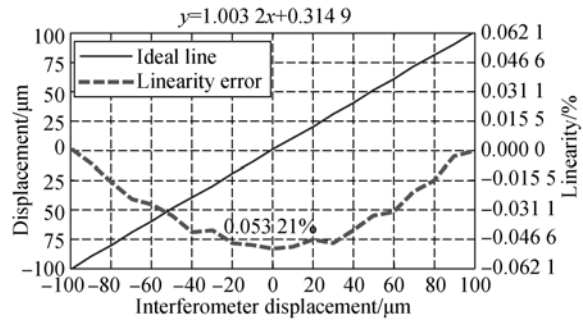
Tab. 1 Environment parameters

参数	指标
温度/°C	22.1±0.02
相对湿度	(50±2)%
气压稳定性/Pa	±5
振动水平	VC-D

4.1 线性度标定结果

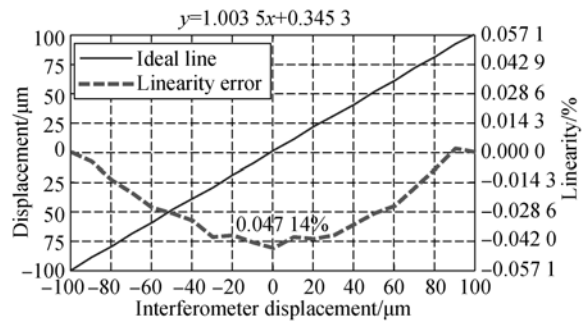
对电容传感器的线性度进行测试,在线性度测试过程中,激光干涉仪光路的余弦误差以及电容传感器的安装平行度对线性度测试有重要影响。实验分别测量未调节光路余弦误差、以及传感器平行度误差达到 5 mrad 和传感器正确安装时的平行度测试结果,测试结果如图 6 所示。

从图 6 中可看出,在未调节测量基准激光干涉仪的余弦误差但调节安装平行度后的线性度测试结果为 0.053 21%;在调整干涉仪余弦误差后改变电容传感器安装平行度时的线性度为 0.052 12%;同时调节余弦误差和平行度误差时的线性度为 0.047 14%。



(b) 包含平行度误差

(b) Parallelism error included



(c) 传感器正确安装

(c) Sensor correctly installed

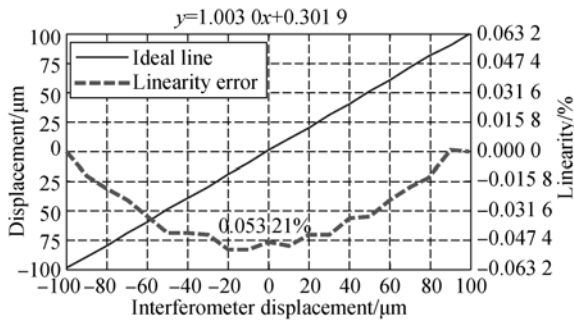
图 6 电容传感器线性度测试

Fig. 6 Linearity measurement of capacitance sensor

实验对电容传感器线性度进行在线标定以提高线性度,满足机构应用需求。采用 PID 控制策略和最小二乘拟合方法得到线性度在线标定结果。其中控制参数通过在线整定得到,实验中取  $P=0.08, I=0.00005$ ; 曲线拟合阶数为 4 阶,拟合系数为:

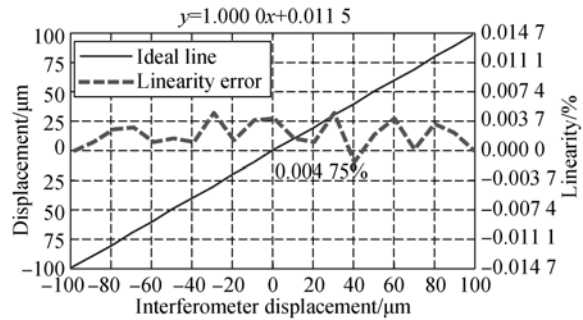
$$[a_4, \dots, a_1, a_0] = [4.60e^{-10}, 1.05e^{-8}, -1.28e^{-5}, 0.99, -0.26]. \quad (7)$$

标定结果如图 7 所示。



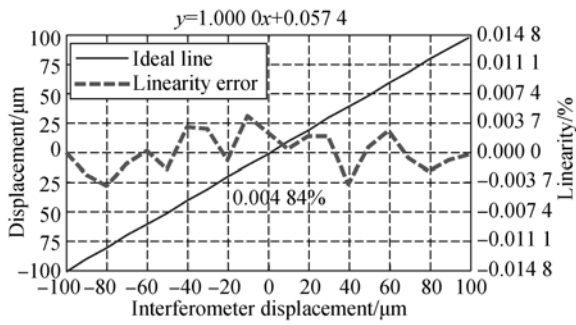
(a) 包含余弦误差

(a) Cosine error included



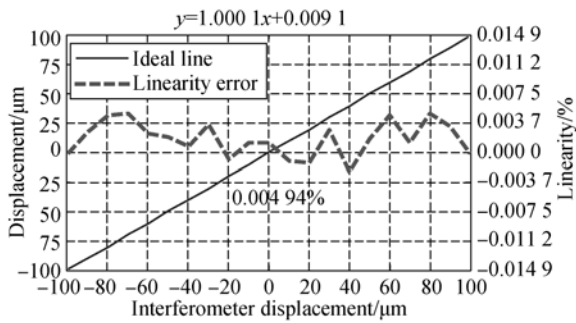
(a) 标定结果 1

(a) Calibration result 1



(b) 标定结果 2

(b) Calibration result 2



(c) 标定结果 3

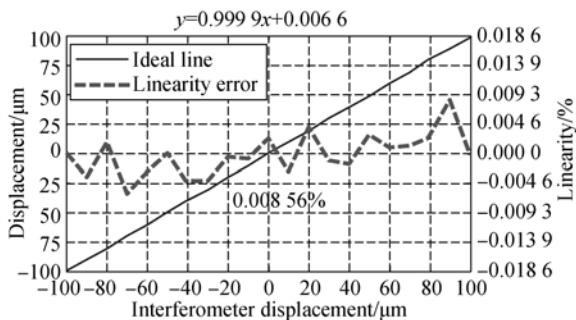
(c) Calibration result 3

图 7 线性度标定结果

Fig. 7 Results of linearity calibration

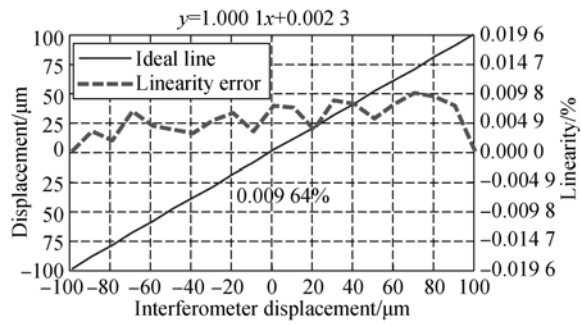
对比标定前的线性度数据,线性度由 0.047 14% 提高至 0.004 84%(9.68 nm)(平均值)、线性增益  $G$  由 1.003 5 提高至 1.000 05(平均值)、线性偏移  $B$  由 0.345 3 提高至 0.025 99(平均值)。同时,通过图 10 也可得到线性度测量的重复性较高,重复性偏差仅为 0.38 nm。

同时实验验证了环境对于电容传感器线性度标定的影响。实验在非环控间进行,温控由中央空调提供,温控精度为  $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,无相对湿度、气压以及振动控制。标定结果如图 8 所示。



(a) 标定结果 1

(a) Calibration result 1



(b) 标定结果 2

(b) Calibration result 2

图 8 无环境控制的线性度标定结果

Fig. 8 Results of linearity calibration without environment control

从图 8 中可看出,环境参数(主要是温度)对于电容传感器线性度标定影响较大。线性度标定仅可提高至 0.009% 等级,并且波动较大,线性度标定的重复性差,重复性偏差大于 2 nm。

#### 4.2 线性度标定不确定度分析

线性度测量的合成不确定度  $u_L$  由实验直接测量量的标准不确定度合成得到。对于相关系数的估计值,认为实验中各直接测量量不确定度的相关系数  $r_{i,j}=0 (i \neq j)$ ,即不同的输入值之间不相关。电容传感器线性度测量合成不确定度  $u_L$  为:

$$u_L = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i)^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} r_{ij} u_i u_j} = \sqrt{u_6^2 + u_6^2 + \dots + u_6^2} = 5.70 \text{ nm.} \quad (8)$$

### 5 结 论

本文研究了微位移机构中使用的电容传感器线性度标定技术,进行实验验证并对线性度标定进行了测量不确定度分析。实验结果表明,通过线性度校准可将传感器的线性度提高至 0.004 84%,近 1 个数量级,同时线性度标定的合成不确定度为 5.70 nm。此线性度等级能够满足光刻物镜中位移调节精度的需求。

## 参考文献:

- [1] FUKAGAWA Y, SHINANNOY J, *et al.*. Optimum adjustment for distortion in semiconductor lithography equipment [J]. *Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2008, 2(3):378-382.
- [2] 李朋志, 葛川, 苏志德, 等. 基于动态模糊系统模型的压电陶瓷驱动器控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):394-399.  
LI P ZH, GE CH, SU ZH D, *et al.*. Open-Closed loop iterative learning control of piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):394-399. (in Chinese)
- [3] 郭抗, 巩岩. 6-PSS 型光学元件精密轴向调节机构[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10):2648-2655.  
GUO K, GONG Y. Precise axial adjustment mechanism with 6-PSS type of optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2648-2655. (in Chinese)
- [4] 许伟才, 黄玮, 杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, 31(11):1122003.  
XU W C, HUANG W, YANG W. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11):1122003. (in Chinese)
- [5] 谷勇强, 苗二龙, 隋永新. 双球面法标定立式参考球面的精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):527-533.  
GU Y Q, MIAO E L, SUI Y X. Accuracy analysis on calibrating vertical spherical reference by two-sphere method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):527-533. (in Chinese)
- [6] BRICH K P, DOWNS M J. Correction to the updated Edlen equation for the refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1994, 31(4):315-316.
- [7] 秦硕, 巩岩, 袁文权, 等. 大时间热响应常数投影物镜的超高精度温度控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1):108-114.  
QIN S, GONG Y, YUAN W Q, *et al.*. High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):108-114. (in Chinese)
- [8] BRDAYS M A, GROCHOWSKI M, GMINSKI, *et al.*. Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(6):751-767.
- [9] SCHMITZ T L, KIMA H S. Monte Carlo evaluation of periodic error uncertainty [J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(3):251-259.
- [10] AVRAMOV Z S, LEE R D. A high-stability capacitance sensor system and its evaluation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2009, 58(4):955-961.
- [11] BAHREYNI B, WIJEWEERA G, SHAFAI C, *et al.*. Analysis and design of a micromachined electric-field sensor [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(1):31-36.
- [12] 赵磊, 巩岩. 光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9):0922001.  
ZHAO L, GONG Y. Design and analysis for the high-precision lens support structure of objective lens for lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9):0922001. (in Chinese)
- [13] 秦伟, 苑伟政, 常洪龙, 等. 基于自适应 UKF 算法的 MEMS 陀螺空中在线标定技术[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(2):170-174.  
QIN W, YUAN W ZH, CHANG H L, *et al.*. In-flight on-line calibration method for MEMS gyroscope based on adaptive unscented Kalman filter algorithm [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(2):170-174. (in Chinese)

## 作者简介:



葛川(1985—),男,辽宁丹东人,助理研究员,2011年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事微位移检测和精密控制方面的研究。E-mail: gechmail@163.com

## 导师简介:



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,博士,研究员,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1993年于长春理工大学获得硕士学位,1996年于北京理工大学获得博士学位,主要从事深紫外光刻技术及光学信息融合的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn