

# 基于激光干涉的电容位移传感器非线性误差标定方法

王大鹏, 金星, 周伟静, 李南雷

装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416

**摘要** 针对微推力测量中电容位移传感器需要频繁标定非线性误差的问题,提出了一种基于激光干涉的现场标定方法。标定原理为:在直线位移台上同时调节可动角隅棱镜与测量目标的位置,进而改变干涉光路光程差及电容位移传感器极板间距,以激光干涉测量结果为基准,采用线性拟合方法,对传感器非线性误差进行标定。搭建了基于常用光学元件的干涉光路,对应用于微推力测量中不同量程的传感器进行标定。在分析干涉光强变化特点的基础上,确定了干涉条纹数计算方法,得到干涉光路的位移测量精度为 66.5 nm。实验验证了该校准装置的实用性和准确性,最后对标定结果、传感器输出非线性误差以及影响激光干涉测量精度的主要因素进行了分析,得到激光干涉测量总误差为 67.2 nm。

**关键词** 测量; 标定; 激光干涉; 电容位移传感器; 非线性误差; 微推力测量

**中图分类号** TP212.13; V439.7 **文献标识码** A

**doi**: 10.3788/LOP54.101203

## Nonlinear Error Calibration Method for Capacitive Displacement Sensor Based on Laser Interferometry

Wang Dapeng, Jin Xing, Zhou Weijing, Li Nanlei

State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China

**Abstract** In order to solve the problem of frequent calibration of nonlinear error for capacitive displacement sensors in micro-thrust measurement, an *in-situ* calibration method based on laser interferometry is studied. The calibration principle is that the optical path difference and capacitive displacement sensor plate spacing are changed simultaneously by adjustment and measurement of the positions of movable corner prism and object through the linear displacement, and the nonlinear error of sensor is calibrated by the linear fitting method based on the measuring results of laser interference. The interferometric optical path based on common optical elements is built and sensors with different measuring ranges are calibrated in micro-thrust measurement. Based on the analysis of characteristics of the interference intensity, the calculation method of interference fringe number is determined. The measuring accuracy of interference light path displacement is 66.5 nm. The practicability and accuracy of the calibration device are verified by experiment. Finally, the results of calibration, the nonlinear sensor output relative error and the main factors affecting the laser interference measurement accuracy are analyzed. The total error is 67.2 nm.

**Key words** measurement; calibration; laser interferometry; capacitive displacement sensor; nonlinear error; micro-thrust measurement

**OCIS codes** 120.3180; 120.2650; 140.2020

## 1 引言

星载微推力器在进入工程应用之前,需要精确测量其推力,以保证航天器空间任务的有效完成<sup>[1]</sup>。满足

收稿日期: 2017-06-11; 收到修改稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(11602304)

作者简介: 王大鹏(1989—),男,博士研究生,主要从事微推力测量方面的研究。E-mail: ajwzajwz@163.com

导师简介: 金星(1962—),男,博士,研究员,主要从事激光与物质相互作用力学特性方面的研究。

E-mail: jinxing\_beijing@sina.com

微小卫星指向与定位精度的推力通常在微牛到毫牛量级<sup>[2-4]</sup>,目前国内外较为通用的微推力测量方法是基于力的动力效应,将推力转化为推力测量台架的力学行为,如振动幅值或转动位移,间接地测量推力。在已有的测量结构中,扭摆系统可消除推进器重力影响,承重能力强,测量精度高,是普遍采用的测量系统<sup>[5]</sup>。横梁是扭摆的执行部件,通过弹性元件与支撑部件相连。推进器与配重在横梁两端保持静平衡,推力作用于横梁上时,横梁在水平面内转动,推力转化为横梁的位移,由力与位移的函数关系计算稳态推力大小。位移测量误差越小,微推力测量精度越高。因此,高精度位移测量是保证微推力测量精度的基础和前提<sup>[6]</sup>。

电容式位移传感器由于其线性度高、非接触、分辨率高、信噪比大等优点<sup>[7]</sup>,是微推力测量中常用的位移传感器之一。由于生产加工及运输等因素的影响,电容位移传感器实际特性与理论特性会存在一定偏差,产生非线性误差,导致位移测量精度下降<sup>[8]</sup>。为保证推力测量精度,需要在每次推力测量前对位移传感器进行现场标定。Karadag等<sup>[9]</sup>利用机械标定仪提供位移基准,对应用于微脉冲等离子体推进器(mPPT)推力测量中位移传感器进行了标定。该机械标定仪采用手动旋转螺杆调节测量对象位置,操作简单,容易实现。但微牛量级推力对应位移通常在微米量级,标定精度至少应在微米量级以下,而该方法中机械标定仪调节精度为2.54 mm,且未考虑手动调节误差,故标定误差较大。葛川等<sup>[10-11]</sup>设计了一种基于柔性平行四边形结构的测试机构,该机构采用压电陶瓷驱动位移进给,以激光干涉仪提供位移基准,通过比例-积分-微分(PID)法保证位移控制精度在纳米量级水平,测量合成不确定度为5.7 nm。标定精度高的同时也伴随着结构复杂,对标定环境要求较高。而在推力测量中,受探头磨损、推进器工质污染等因素的影响,电容位移传感器需要频繁的现场标定以保证测量精度,所以需要研究一种结构简单、可应用于常规实验条件下、精度在微米量级以下的快速标定方法。

基于已有的研究成果,本文提出一种基于激光干涉法的非线性误差现场标定方法。基于电容位移传感器的工作原理,确定了标定原理及数据处理方法;基于常用光学元件的干涉光路,对应用于微推力测量中不同量程的传感器进行标定实验,最后对标定结果及传感器输出非线性误差进行分析。

## 2 标定原理

激光干涉法具有测量速度快、精度高、非接触等优点<sup>[12]</sup>,是普遍采用的长度度量标准<sup>[13-14]</sup>。标定时,以直线位移台实现测量目标及干涉镜的位置进给,基于激光干涉法,采用电容位移传感器来测量目标位置的变化,以激光干涉结果作为基准,对电容位移传感器非线性误差进行标定。

### 2.1 电容式位移传感器测量原理

电容式位移传感器依据理想化平板式变极距原理设计,示意图如图1所示<sup>[15]</sup>,工作时探头作为一个电极,被测导电对象作为一个相对电极,测量对象移动引起极板间距变化,进而引起电容值大小的变化。

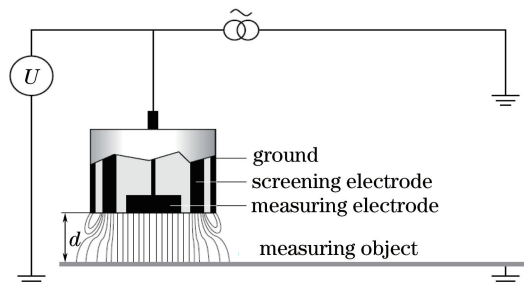


图1 电容位移传感器结构图

Fig. 1 Schematic of capacitance displacement sensor

电场屏蔽环电极克服了电容边缘效应的影 响,保证了测量电场具有较高的均匀稳定性。电容上施加一个周期为  $f$  的交流电压时,电容的容抗  $X_C$  为

$$X_C = 1/(2\pi fC) = d/(2\pi\epsilon fS), \quad (1)$$

式中  $d$  为极板间距,  $\epsilon$  为极板间电介质的介电常数,  $S$  为两极板重合的有效面积。此时,电容上电流与电压关系为

$$U = X_C I = Id / (2\pi\epsilon fS)。 \quad (2)$$

稳压电路保持  $I$  恒定时, (2) 式中  $I / (2\pi\epsilon fS)$  为恒定不变值,  $U$  与  $d$  呈线性关系, 测量  $U$  即可获得  $d$ 。传感器处理元件对  $U$  进行放大处理, 直接输出位移  $d$  的数字量形式。

## 2.2 激光干涉位移测量原理

干涉光路依据迈克耳孙干涉原理, 如图 2 所示。从激光器发出的准直激光经光阑减小光斑面积后, 垂直入射到分光镜上, 分成强度几乎相等的反射光束  $L_1$  和透射光束  $L_2$ 。反射光束经过可动角隅棱镜反射后, 透过分光镜, 仍记为  $L_1$ 。透射光束经参考角隅棱镜反射后, 经分光镜反射, 仍记为  $L_2$ 。 $L_1$ 、 $L_2$  在分光镜会合后, 垂直入射到光电探测二极管。  $L_1$ 、 $L_2$  振动方向相同, 频率相同, 在任意时刻都有相同的初始相位, 满足干涉条件<sup>[16]</sup>。沿激光入射方向调节可动角隅棱镜位置时,  $L_1$  光程发生变化, 引起相干光光程差发生改变, 从而导致相干光光强发生相应的变化。光电探测二极管感应到干涉光光强的变化时, 将两束相干光光强转化为电压信号, 数据采集卡记录处理电压信号。

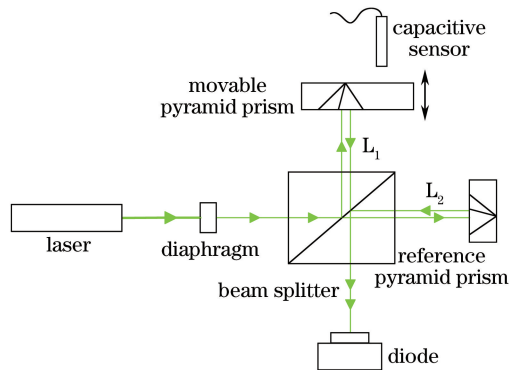


图 2 激光干涉光路结构图

Fig. 2 Schematic of laser interference optical path

可动角隅棱镜位置改变  $\Delta d$  时, 两束相干光的光程差变化  $\delta = 2\Delta d$ , 对应相位差变化为

$$\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为激光波长。两束相干光相互叠加后  $\Delta\varphi$  对应光强变化为

$$I = 2KA^2(1 + \cos\Delta\varphi) = 2KA^2[1 + \cos(4\pi\Delta d/\lambda)], \quad (4)$$

式中  $K$  为比例系数。 $\Delta d$  变化  $\lambda/2$  时, 光程差变化一个波长  $\lambda$ , 相位差变化  $2\pi$ , 光强  $I$  变化一个周期。光强变化引起干涉条纹移动, 当数据采集卡采集到一条正弦(余弦)波条纹时, 代表  $\Delta d$  变化  $\lambda/2$ 。若测得干涉条纹移动的数目为  $\Delta N$ , 可计算得到

$$\Delta d = \Delta N \cdot \lambda/2。 \quad (5)$$

## 2.3 标定原理及数据处理方法

以德国 Mico-Epsilon 公司的 CS5 传感器为标定对象, 其量程为 5 mm, 分辨率为 100 nm, 理论非线性误差值不大于  $5 \times 10^{-4}$ 。

标定前, 调节可动角隅棱镜固定块(以下简称固定块), 使其与传感器平行。调节依据是: 极板间距为  $d$ , 测量有效半径为  $R$ , 极板夹角为  $\alpha$  时, 电容  $C_d(\alpha)$  与极板平行时电容  $C_d(0)$  的关系为

$$C_d(\alpha) = C_d(0) [1 + R^2 \tan^2 \alpha / (4d^2)]。 \quad (6)$$

由(6)式可知,  $C_d(\alpha)$  相对于  $C_d(0)$  的减小量与  $\alpha$  方向无关。在  $d$  一定时, 根据  $C_d(\alpha)$  关于  $\alpha$  的对称性, 分别沿顺时针、逆时针转动传感器探头相同角度, 当传感器在不同方向的输出值相等时, 初始位置即为  $\alpha$  的零位置, 此时传感器探头与固定块表面平行。

受铝块表面不平整的影响, 传感器理论零值在铝块内部, 最小输出值无法达到零。初始时刻, 调节固定块位置, 使得传感器输出读数  $d_s$  为  $50 \mu\text{m}$ 。以  $50 \mu\text{m}$  为步长, 采用回进程方式, 在传感器量程内, 逐步增大和减小  $d$ , 在  $d_s = 50k \mu\text{m}$  位置处记录数据(其中  $k = 1, 2, \dots, 20$ ), 每调节一次固定块位置, 记录传感器读数  $d_s$  和激光干涉测量结果  $d_r$ , 可得到一组  $(d_r, d_s)$ 。每个位置在回进程过程中重复测量 5 次, 这样共可得到

100 组样本值( $d_r, d_s$ )。

采用最小二乘法,对 100 组数据进行整体线性拟合,得到线性方程

$$d_s = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 d_r + \gamma, \quad (7)$$

式中“ $\hat{\cdot}$ ”表示估计值。 $\gamma$  为拟合残差,服从正态分布  $\gamma \sim N(0, \sigma^2)$ 。 $\gamma$  最大绝对值为  $|\gamma|_{\max}$ ,传感器量程记为  $D_s$ ,则传感器非线性误差  $\tau$  大小为

$$\tau = \frac{|\gamma|_{\max}}{D_s}, \quad (8)$$

式中  $\tau$  表示传感器实际特性偏离理论特性的程度。 $\tau$  越大,偏离程度越大,引起的推力测量误差也越大。

### 3 标定实验及结果

由于激光干涉测量的是相对位移量,干涉光强变化反映了固定块位置变化的过程信息。初始采用电动直线位移台调节固定块位置,结果发现电位移台振动噪声引起的光强条纹不能形成连续的正弦波条纹,无法完成测量,所以选择手动调节。

#### 3.1 标定实验装置

对应图 2,干涉光路在隔震气浮光学平台上搭建,如图 3 所示。光学器件通过光学连杆固定在可调位移台上。选用激光二极管作为激光源,其  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,为可见绿光,方便光路调节。

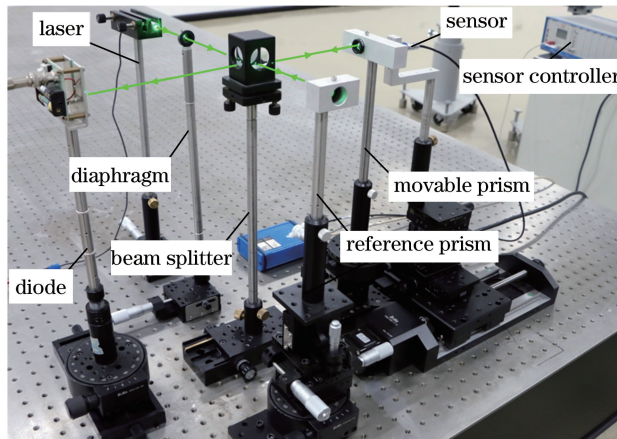


图 3 标定实验装置

Fig. 3 Calibration experimental device

位移传感器控制器、激光二极管电源、探测二极管数据采集卡及计算机置于光学平台之外,以减小测量环境噪声。探测二极管输出电压范围为  $-0.5 \sim 0.5 \text{ V}$ 。直线位移台调节分辨率为  $10 \mu\text{m}$ 。微推力测量中扭摆最大通常不超过  $10 \text{ mm}$ ,设计的标定装置可调  $\Delta d$  最大值为  $30 \text{ mm}$ ,满足对标定量程的要求。为了减小调节时手接触位移台调节螺杆时带来的噪声的影响,在调节螺杆上固定塑料锁带,通过拨动锁带转动调节螺杆。

#### 3.2 结果分析

传感器记录的位移  $d_s$  为数字量,可从计算机直接读取。固定块沿激光入射方向移动  $\Delta d$  时,对应的传感器输出曲线如图 4 所示,传感器输出值  $d_s$  由  $50.031 \mu\text{m}$  增大到  $101.783 \mu\text{m}$ 。由图 4 可知,位移增大量为  $\Delta d_s = 51.832 \mu\text{m}$ ,加速度先增大后减小。

小波去噪处理是常用的相干光强变化处理方法<sup>[17]</sup>,图 5 为图 4 中对应相干光强变化曲线做小波去噪处理的结果。条纹紧密程度代表了  $\Delta d$  变换快慢,条纹越紧密,说明  $\Delta d$  变换越快。条纹变化过程可分为 3 个阶段。I 阶段为噪声作用,此时固定块位置不变。噪声包括环境噪声及光电探测器本身噪声,噪声幅值相对较小,引起光程差双向小幅变化,因而未有连续条纹出现。II 阶段为固定块移动  $\Delta d$  对应的光强变化,条纹幅值增大,并有连续条纹出现,且相对 I 阶段,条纹明显变得紧密,说明此时光程差发生快速单向变化。从 II

阶段整个过程来看,条纹紧密程度先增大后减小,与图 5 中对应的  $d_s$  变化趋势一致,对应手动调节时启动、停止动作。III 阶段与 I 阶段相同,为噪声作用,条纹幅值较小,且相对稀疏。调节前后, I、III 阶段的噪声均值大小并不相同,这是因为 I、III 阶段光程差  $\Delta\varphi$  对应的光强并不相同。确定图 5 中 II 阶段条纹数目  $\Delta N$ ,再乘以  $\lambda/2$ ,即可计算得到  $d_r$ 。标定时,激光波长一定,测量精度仅取决于  $\Delta N$  的计算精度。要得到  $\Delta N$ ,首先要确定 II 阶段对应的起始、结束位置。

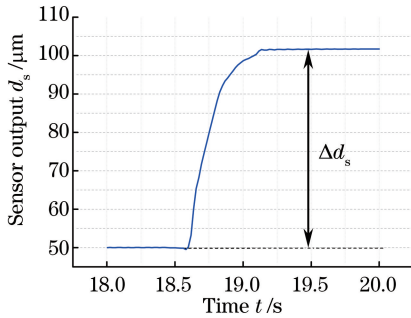


图 4 调节固定块对应的传感器输出值随时间变化

Fig. 4 Relationship between time and sensor output value corresponding to adjusting the fixed block

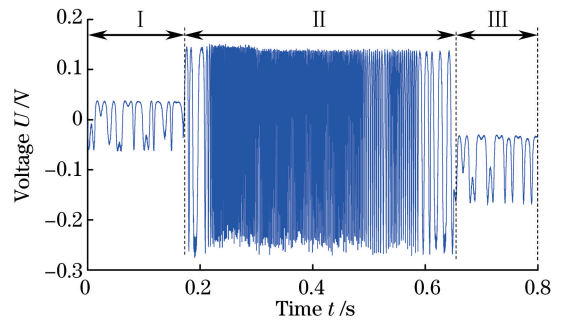


图 5 干涉光强变化曲线

Fig. 5 Interference intensity curve

图 6 为调节  $\Delta d$  前后光强的变化曲线。从 A 点开始光强曲线振幅增大,出现连续正弦条纹,表明  $\Delta d$  开始连续单向变化。但受 I 阶段噪声影响,干涉条纹相位出现偏差,故 A 点并不一定是调节起始点,调节起始点在 A 点与干涉条纹第一个极值点 B 之间,具体相位难以确定。相位确定一直是激光干涉测量的研究重点<sup>[18-20]</sup>,此处选择 B 点作为计算干涉条纹数目  $\Delta N$  的起始点,以简化具体起始点的相位识别,这样  $\Delta N$  的起始点的选择可精确到 1/4 条纹周期,对应位移分辨率为  $\lambda/8=66.5$  nm,小于传感器分辨率 100 nm,满足标定精度要求。C 点为 B 点之后的第一个极点,从振幅上已经明显冲出噪声,干涉光光程差出现较大变化,表明此时  $\Delta d$  调节已经开始。采用同样方法,以干涉条纹最后一个极值点作为计算  $\Delta N$  的结束点。

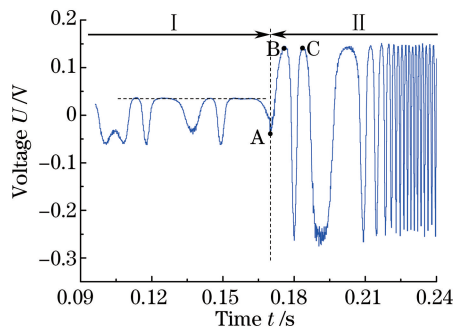


图 6 确定干涉光起始点示意图

Fig. 6 Diagram of the starting point of interference light

确定  $\Delta N$  的起始、结束位置后,根据干涉条纹与零点相交个数的方法计算得到  $\Delta N = 194.5$ ,则  $d_r = 51.737 \mu\text{m}$ 。需要说明的是,每次调节过程中  $\Delta d$  接近  $50 \mu\text{m}$  时结束调节。若反复双向细调  $\Delta d$  到  $50 \mu\text{m}$ , II 阶段干涉条纹中将会出现多个反向点,使得  $\Delta N$  计算误差增大,因而数据记录点并不是严格等间距的。为了保持调节的单向性,调节量通常小于  $50 \mu\text{m}$ ,以避免出现大于  $50 \mu\text{m}$  过多再反向调节,这是由激光干涉法测量的相对位移量的特征决定的。

激光干涉法测量的只是相对位移变化值,在 5 次进程、回程调节中,  $d_r$  初始值以位移传感器的初始读数为基准。如图 3 中位移传感器初始读数为  $50.031 \mu\text{m}$ ,调节后稳定读数为  $101.783 \mu\text{m}$ ,则第 1 组数据  $(d_r, d_s)$  记为  $(50.031 \mu\text{m}, 50.031 \mu\text{m})$ 。计算得到  $d_r = 51.737 \mu\text{m}$ ,则第 2 组数据  $(d_r, d_s)$  记为  $(101.783 \mu\text{m}, 102.768 \mu\text{m})$ 。对 100 组数据进行整体拟合,得到相关系数为 1,拟合方程为

$$d_s = -0.022 + 1.000d_r + \gamma, \quad (9)$$

式中各点处标准差  $\sigma$  较大, 最大值  $\sigma_{\max} = 0.2447 \mu\text{m}$ , 表明测量点实际值与理论值的偏离量较为分散。拟合曲线如图 7 所示, 全量程后半段的残差相对较小, 说明后半段非线性误差较前半段的非线性误差小。5 次回进程对应残差具有随机性, 并没有明显的跳跃值, 表明迟滞性、重复性对调节位移的影响较小。

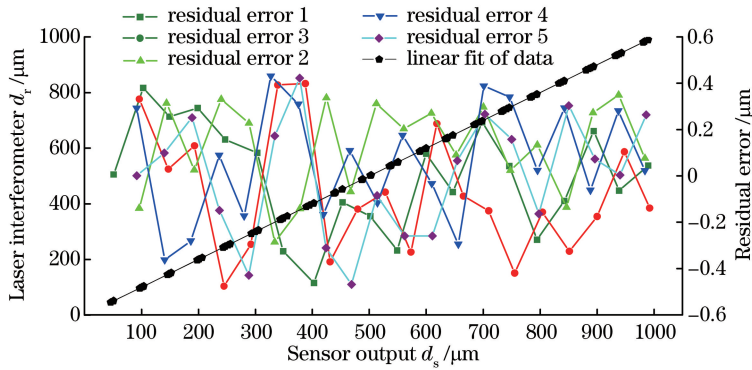


图 7 数据拟合曲线及残差分布

Fig. 7 Data fitting curve and residual distribution

图 7 中  $|\gamma|_{\max} = 0.475 \mu\text{m}$ ,  $D_s = 1 \text{ mm}$ , 则可得到非线性误差大小为  $4.75 \times 10^{-4}$ , 小于传感器非线性误差理论值  $5 \times 10^{-4}$ 。推力测量中, 稳态推力大小与横梁位移大小呈线性关系, 非线性误差大小为  $4.75 \times 10^{-4}$ , 表明由传感器非线性误差引起的推力测量误差大小为  $4.75 \times 10^{-4}$ 。

## 4 激光干涉测量误差分析

激光干涉测量误差主要包括干涉光路不稳定误差、标定装置的调整误差、条纹数目计算误差。

1) 干涉光路不稳定误差  $E_1$ : 主要为激光二极管  $\lambda$  不稳定带来的误差。激光二极管选用 ThorLabs 的 CPS532 型号, 其  $\lambda$  在  $-10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  内变化小于  $1 \text{ nm}$ 。标定实验温度在  $-10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  内, 调节量为  $50 \mu\text{m}$  时对应的干涉条纹数为  $\Delta N = 188$ , 则  $E_1 = \Delta N \cdot \Delta \lambda / 2 = 94 \text{ nm}$ 。

2) 标定装置的调整误差  $E_2$ : 主要为装调过程中测量光束与运动轴之间不平行所引起的余弦误差。角隅棱镜选用 ThorLabs 的 PS970M-A, 平行度误差为  $9 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。位移台直线度不大于  $3 \mu\text{m}$ , 在传感器量程  $1 \text{ mm}$  内对应。因而, 调节量在  $50 \mu\text{m}$  内倾斜角也不会超过  $3.9 \times 10^{-3} \text{ rad}$ , 对应余弦误差为  $E_2 = 0.38 \text{ nm}$ 。

3) 条纹数目计算误差  $E_3$ : 主要为起始、结束点位置误差。条纹中出现一条正弦波条纹时,  $\Delta d$  变化  $\lambda/2$ 。本文选择调节过程中第一个极点作为干涉条纹起始点, 起始点位置最大误差为  $1/4$  周期正弦波, 对应  $\lambda/8$ 。加上结束点位置误差, 总的误差最大为  $E_3 = \lambda/4 = 66.5 \text{ nm}$ 。

最终可得激光干涉测量总误差大小为

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} = 67.2 \text{ nm}. \quad (10)$$

## 5 结 论

基于电容位移传感器的工作原理, 确定了标定原理及数据处理方法, 进行了标定实验, 并对传感器非线性误差结果进行了分析。分析如下:

1) 调节光程差开始后, 干涉条纹振幅增大, 冲出噪声, 并形成连续条纹, 这是调节开始的标志。但由于噪声影响, 调节开始点难以精确确定, 引起条纹数目计算误差。干涉条纹起始、结束点选择最小可精确到  $1/4$  周期干涉条纹, 对应位移值  $66.5 \text{ nm}$ , 小于要求的标定精度  $1 \mu\text{m}$ 。直线位移台与测量目标之间  $30 \text{ mm}$  的可调距离满足了不同量程传感器标定要求。整个测量及数据处理可在  $30 \text{ min}$  之内完成, 较好地满足微推力测量中频繁现场标定的需求。

2) 每次调节量接近  $50 \mu\text{m}$  时即结束调节, 因而数据记录点并不是严格等间距的。若反复双向细调到  $50 \mu\text{m}$ , 干涉条纹中将会出现多个反向点, 使得条纹数目计算误差增大, 这是由激光干涉法测量的相对位移

量的特征决定的。

3) 实验中标定传感器非线性误差大小为  $4.75 \times 10^{-4}$ , 小于理论值  $5 \times 10^{-4}$ 。标定误差大小为 67.2 nm, 主要来源于相干光条纹数目的计算误差。

该方法原理简单, 实验光路容易搭建, 方便调节, 数据易于分析处理, 可以满足微推力测量中不同量程的电容位移传感器的非线性误差标定要求。虽然使用可见光方便光路调节, 但 532 nm 的波长也限制了测量精度。若波长不变, 确定更加精细的干涉条纹起始和结束的相位值有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Du B, Zhao Y, Yao W, *et al.* Review of thrust measurement techniques for micro-thrusters [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2013, 4(2): 103-110.
- [2] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W, *et al.* Performance test results for the laser-powered micro thruster [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 830(1): 224-234.
- [3] Markowitz S M, Ahmad A, Hyde T T, *et al.* LISA propulsion module separation study [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10): S413-S419.
- [4] D' Souza B C, Ketsdever A D. Investigation of time dependent forces on a nano-Newton-second impulse balance [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(1): 015105.
- [5] Hong Yanji, Zhou Weijing, Wang Guangyu. Methods of micro thrust measurement and analysis of its key issues [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2287-2299.  
洪延姬, 周伟静, 王广宇. 微推力测量方法及其关键问题分析 [J]. *航空学报*, 2013, 34(10): 2287-2299.
- [6] Zhou W, Hong Y, Chang H. A microNewton thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125115.
- [7] Ge Chuan, Zhang Defu, Li Pengzhi, *et al.* Linearity calibration and uncertainty evaluation for capacitance displacement sensor [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2546-2552.  
葛川, 张德福, 李朋志, 等. 电容式位移传感器的线性度标定与不确定度评定 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2546-2552.
- [8] Yu Yuan, Ding Meiyang, Zhang Liankai. The algorithmic analysis of linear approximation for characteristic region of displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2010, 23(6): 840-843.  
于源, 丁美莹, 张连凯. 位移传感器特性区域直线拟合算法分析 [J]. *传感技术学报*, 2010, 23(6): 840-843.
- [9] Karadag B, Inalhan G. Design, production & testing of a micro-pulsed plasma thruster for nanosatellites [C]. *International Conference on Student Small Satellites*, 2012: 57-63.
- [10] Zhang Defu, Ge Chuan, Li Xianling, *et al.* Linearity calibration platform of capacitive sensors [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(1): 143-151.  
张德福, 葛川, 李显凌, 等. 电容传感器线性度标定平台 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 143-151.
- [11] Zhang Defu, Li Xianling, Ge Chuan, *et al.* Design of compliant micro-motion mechanism for linearity calibration of capacitive displacement sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(6): 1210-1217.  
张德福, 李显凌, 葛川, 等. 面向电容式传感器线性度标定的柔性微动机构设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(6): 1210-1217.
- [12] Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.* Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0408004.  
池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408004.
- [13] Zhang S, Kiyono S. An absolute calibration method for displacement sensors [J]. *Measurement*, 2001, 29(1): 11-20.
- [14] Shi Zhonghua, Yang Baoxi, Hu Xiaobang, *et al.* Lens surface distance measurement with large range and high precision based on low coherence interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612001.  
师中华, 杨宝喜, 胡小邦, 等. 基于低相干干涉技术的大量程高精度镜面间距测量 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612001.
- [15] Zhang Jianxiong, Sun Baoyuan, Dai Hengzhen, *et al.* High linear non-contact displacement capacitive sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(1): 6-7.

- 张建雄, 孙宝元, 戴恒震, 等. 高线性非接触式电容位移传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2006(1): 6-7.
- [16] Ye Jifei, Hong Yanji. Laser interference differential measurement of micro impulse based on torsion balance [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 990-994.  
叶继飞, 洪延姬. 基于扭秤的激光干涉差动测量微小冲量方法[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 990-994.
- [17] Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong, *et al.* Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808002.  
李建欣, 崔艳军, 朱日宏, 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808002.
- [18] Shan Huijie, Yang Hongzhi, Yang Suhui, *et al.* Effects of laser intensity fluctuation and phase noise on dual-frequency laser detection[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212005.  
单慧洁, 杨宏志, 杨苏辉, 等. 激光强度起伏及相位噪声对光学双频探测的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212005.
- [19] He Jiuling, Wei Ling, Yang Jinsheng, *et al.* Phase fitting optimization method to laser beam shaping system based on deformable mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020101.  
何杰铃, 魏凌, 杨金生, 等. 基于变形镜激光束整形系统中的相位拟合优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020101.
- [20] Tong Xiaogang, Wang Guoli, Zhou Xiaoxin, *et al.* Carrier envelope phase determination for few-cycle laser pulses based on asymmetry of ionized high-energy electrons[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0319002.  
仝小刚, 王国利, 周效信, 等. 基于高能光电子非对称性的少周期激光载波包络相位确定[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0319002.