文章编号　1004-924X(2016)01-0143-09

电容传感器线性度标定平台

张德福*，葛　川，李显凌，倪明阳，郭　抗
（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：设计了一种电容位移传感器在线标定平台，用于位移的高精度调节和检测。该平台的运动对称中心轴、测量光路的对称中心轴和传感器的传感轴共轴，故从测量原理上减小了阿贝误差。标定平台具有 z/tip/tilt 调节功能，保证了传感器的传感面和被测面板的被测面之间的装调对准。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了微位移调节，基于柔度矩阵法（CMM）分析了导向机构的输出柔度和行程。试验测得动平台行程为 735.162 μm，和有限元法（FEM）、CMM 计算结果的误差分别为 7.410%和 4.633%，满足行程误差要求。经过标定补偿后，传感器的线性度由 0.014 21%提高至 0.006 231%。实验结果显示，该线性度标定方法精度高，标定后的传感器满足位移精密调节机构使用要求。

关　键　词：电容传感器；线性度标定；标定平台；柔度矩阵
中图分类号：TP212.12　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162401.0143

Linearity calibration platform of capacitive sensors

ZHANG De-fu*, GE Chuan, LI Xian-ling, NI Ming-yang, GUO Kang

(*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: zhangdf@sklao.ac.cn*

Abstract: An on-line linearity calibration platform for capacitive displacement sensors is proposed to implement the high-precision adjustment and the measurement of displacement. The symmetry axis for movement, the measuring axis of an interferometer and the measuring axis of a sensor are collinear in the platform, so that the Abbe error is decreased in principle. For the z/tip/tilt adjustment function in the platform, the alignment between the sensor and the target surface is realized. The composition and principle of the calibration method are introduced and the micro-displacement is adjusted by a symmetrical parallelogram mechanism. Then, the output compliance and stroke of the guiding mechanism are analyzed based on Compliance Matrix Method(CMM). The experiment result demonstrates that the stroke of the calibration platform is 735.162 μm and the errors are 7.410% and 4.633% comparing with that of the Finite Element Method(FEM) and CMM, respectively, which meet the requirement of the stroke. Moreover, the sensor linearity is improved from 0.014 21% to

收稿日期：2015-04-03；**修订日期**：2015-05-15.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 61504142）；国家科技重大专项基金资助项目（No. 2009ZX02205）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.006 231% after calibration calculation. The linearity calibration method has high-precision and it satisfies the requirement of fine displacement adjustment of the mechanism.

Key words: capacitive sensor; linearity calibration; calibration platform; compliance matrix

1 引 言

高精度光学系统装配集成时会出现位置误差，为了达到理想的补偿效果，需要位移精密调节机构调节光学元件的位置[1]，并应用高精度的电容位移传感器(简称传感器)检测调节位移量。为了减小传感器测量误差，一方面应对其制造、运输和装调过程进行严格控制；另一方面可对传感器进行标定补偿计算以提高其测量精度[2]。前者成本高，难度大，后者是在现有条件下提高传感器性能的最为有效的手段之一[2]。传感器在装入位移调节机构前必须经过标定，标定精度直接影响传感器的测量精度，从而影响位移调节精度。线性度作为传感器的重要指标之一，其标定方式值得深入研究。

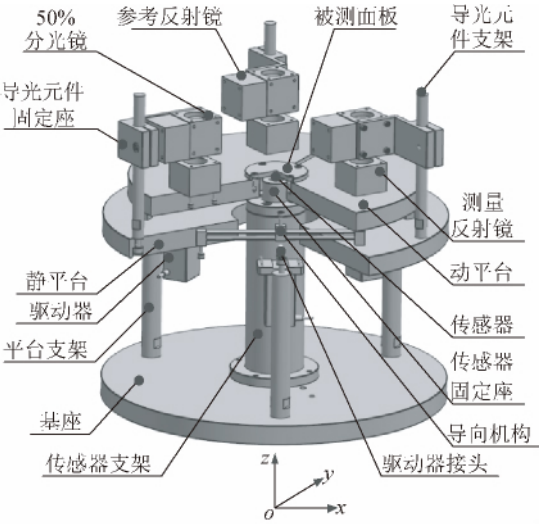
文献[3]提出一种“四步法”分组辨识并联式六维加速度传感器的25个解耦参数，设计了基于双曲柄滑块机构的标定平台提供外部激励，得到六维加速度解耦最大误差为7.479%，比参数辨识前的解耦误差降低了1个数量级。文献[4]提出了一种新型平板式压电六维力/力矩传感器，对传感器进行了静态和动态标定，维间耦合误差达到3%水平。文献[5]提出一种具有分载测量功能的预紧式Stewart结构六维力/力矩传感器，标定实验得到了传感器的解耦矩阵，当测力量程为0～3 000 N或测力矩量程为0～300 Nm时，标定后的测量精度优于实际加载值的7.5%。文献[6]设计了一种纳米级位移传感器标定装置，其行程为300 μm，分辨率和不确定度分别为0.05 nm和1.2 nm。文献[7]指出位移传感器作为精密成像和加工设备的重要元件之一，其自身特性决定了设备整机的线性度、分辨率和产率。定义了传感器性能评价标准，并给出包括非线性度、漂移和噪声的误差源表达形式。

本文设计了一种高精度位移传感器在线标定平台，其平台运动对称中心轴、测量光路的对称中心轴和传感器的传感轴共轴，从测量原理上减小了阿贝误差，提高了标定精度。经过标定补偿计算后的传感器满足位移精密调节机构使用要求。

2 标定平台的组成及工作原理

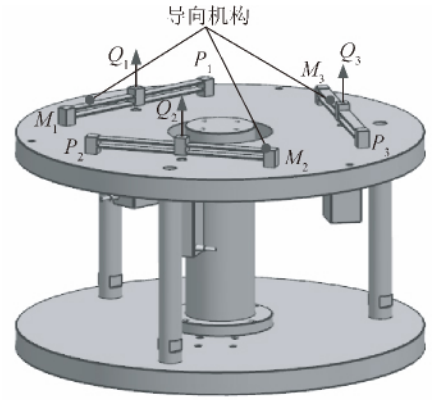
标定平台如图1(a)所示。平台支架和传感器支架均固定在基座上，传感器固定座安装于传感器支架上。电容传感器固定在传感器固定座上，测量其与被测面板之间的位移变化量。静平台安装在平台支架的顶端，传感器支架从静平台中间的导向孔穿过。3个导向机构的底端安装在静平台上表面，顶端安装在动平台的下表面，导向机构沿圆周均布，如图1(b)所示。传感器固定座穿过动平台中间的导向孔。通过更换传感器固定座，可以标定不同类型的传感器，互换性好。3个驱动器均布在静平台的底面上，通过其顶端的推杆穿过静平台驱动相应的导向机构 Q_1、Q_2、Q_3 运动，3个导向机构并联带动动平台运动，具有 z/tip/tilt 调节功能，即可以实现 z 向平动、绕着 x 轴和 y 轴的转动调节，保证了传感器的传感面和被测面板的被测面之间的装调对准。测量反射镜固定在动平台的顶面上，且沿圆周均布，其光轴和传感器的传感轴平行。被测面板固定在动平台的顶面中心，且位于传感器的正上方。导光元件支架、导光元件固定座的数量均与测量反射镜的数量相同，且配对使用。导光元件支架的底端均固定在静平台的顶面上，50%分光镜和参考反射镜安装在导光元件固定座上，且分光镜与测量反射镜同光轴。三路单轴激光干涉仪(未在图中表示)分别对应3个分光镜，干涉仪发出的入射光经分光镜分成2束，一束经参考反射镜返回干涉仪；另一束经测量反射镜返回干涉仪，测量光路的中心轴和传感器的传感轴共线。当驱动器推动导向机构运动时，被测面板和测量反射镜随着动平台一起运动，参考光路和测量光路的光程差发生变化，传感器和被测面板之间的距离也发生变化，以激光干涉仪为基准标定传感器。该标定方法从测量原理上减小阿贝误差，标定精度高。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)标定平台剖视

(a)Cutview of calibration platform

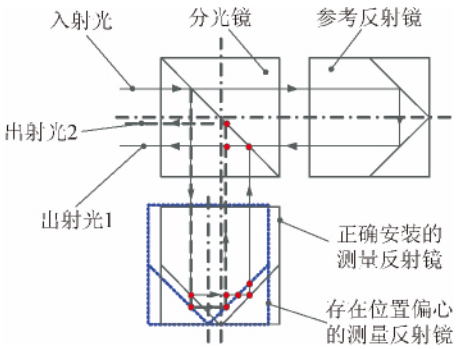


(b)导向机构

(b)Guiding mechanism

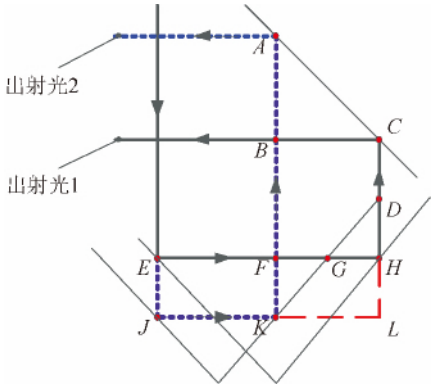
图 1　标定平台

Fig. 1　Calibration platform



(a)测量轴和运动轴存在偏心

(a)Eccentricity between movement axis and measuring axis



(b)测量光路放大

(b)Magnification of measuring optical path

图 2　存在偏心的光路准直

Fig. 2　Collimating of eccentricity optical path

当平台的运动对称中心轴和测量光路的对称中心轴之间存在偏心时，如图 2(a)所示(2(b)是 2(a) 中测量光路的放大图)。因为 $AB=BC$，$EJ=FK=HL=DH=HG=FG$，所以出射光 1 和出射光 2 的光程仍然相等。测量光路的对称中心轴和传感器的传感轴之间的偏心通过装调消除，该安装在 1 000 级环控实验室内的三坐标测量机上完成。

3　基于柔度矩阵法的动平台柔度建模

考虑已有驱动器的最大驱动力为 40 N，为了动平台实现 500 μm 以上的行程，必须合理设计导向机构的输出柔度。为了实现大行程和小运动误差，采用由倒角形柔性铰链构成的对称平行四边形机构，如图 3 所示。通过分析单个铰链变形与外载荷之间的关系，进而推导导向机构的输出柔度，从而计算动平台的行程。

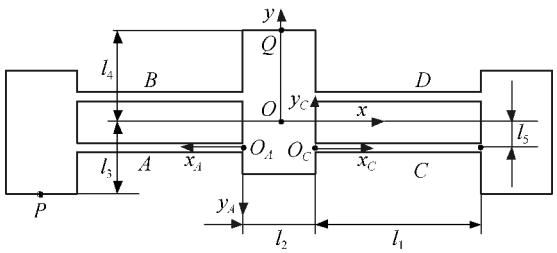


图 3　导向机构的结构参数

Fig. 3　Structure parameters of guiding mechanism

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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[8-9]。假设铰链具有 $O\text{-}xy$ 平面内的 3 个自由度，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 $O\text{-}xy$ 平面内。图中，F_{x1}、F_{y1}、M_{z1} 为外载荷，y 和 θ 是对应的变形量。

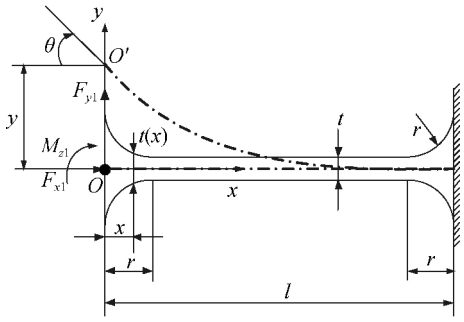


图 4　铰链参数

Fig. 4　Parameters of hinge

根据文献[10]，$t(x)$ 的分段表达式为：

$$t(x)=\begin{cases} t+2\left[r-\sqrt{x(2r-x)}\right], x\in[0,r] \\ t, x\in[r,l-r] \\ t+2\left\{r-\sqrt{(l-x)\left[2r-(l-x)\right]}\right\} \\ x\in[l-r,l] \end{cases}. \tag{1}$$

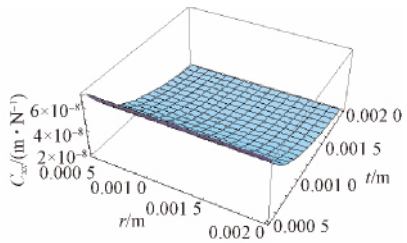
变形量和外载荷之间的关系为：

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} C_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{yy} & C_{y\theta} \\ 0 & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{z1} \end{Bmatrix}, \tag{2}$$

其中：柔度系数 C_{xx}、C_{yy}、$C_{y\theta}$、$C_{\theta\theta}$ 分别为[10]：

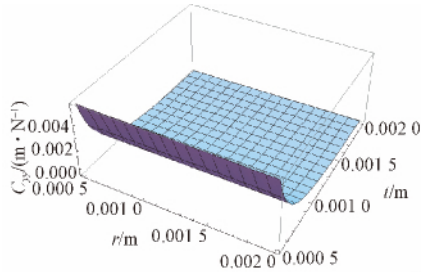
$$\begin{cases} C_{xx}=\dfrac{1}{Ew}I_1=\dfrac{1}{Ew}\displaystyle\int_0^l\dfrac{\mathrm{d}x}{t(x)} \\ C_{yy}=\dfrac{12}{Ew}I_2=\dfrac{12}{Ew}\displaystyle\int_0^l\dfrac{x^2\mathrm{d}x}{t(x)^3} \\ C_{y\theta}=\dfrac{12}{Ew}I_3=\dfrac{12}{Ew}\displaystyle\int_0^l\dfrac{x\mathrm{d}x}{t(x)^3} \\ C_{\theta\theta}=\dfrac{12}{Ew}I_4=\dfrac{12}{Ew}\displaystyle\int_0^l\dfrac{\mathrm{d}x}{t(x)^3} \end{cases}, \tag{3}$$

柔度系数与 w（厚度）、r、t、l 之间的关系如图 5 所示。



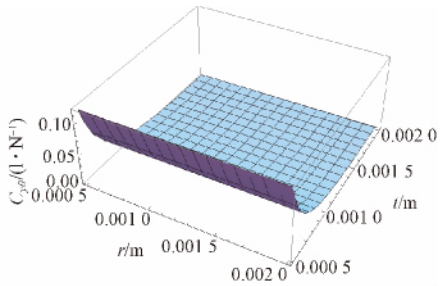
(a) C_{xx} 与 r、t 的关系

(a) Relation between C_{xx} and r, t



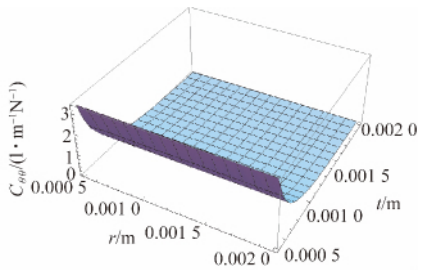
(b) C_{yy} 与 r、t 的关系

(b) Relation between C_{yy} and r, t



(c) $C_{y\theta}$ 与 r、t 的关系

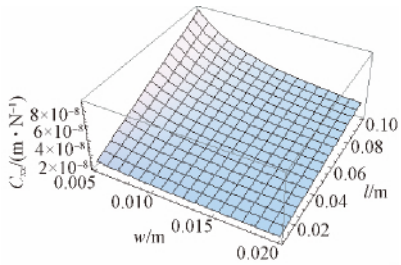
(c) Relation between $C_{y\theta}$ and r, t



(d) $C_{\theta\theta}$ 与 r、t 的关系

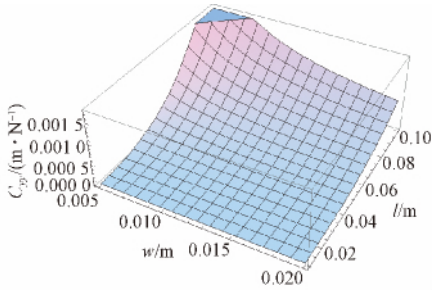
(d) Relation between $C_{\theta\theta}$ and r, t

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



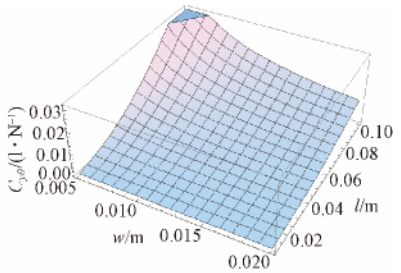
(e)C_{xx} 与 w、l 的关系

(e)Relation between C_{xx} and w, l



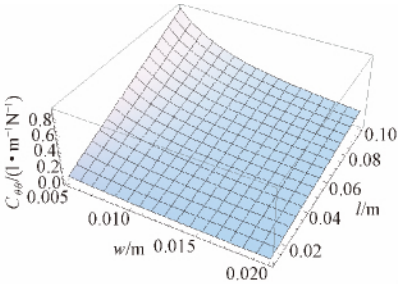
(f)C_{yy} 与 w、l 的关系

(f)Relation between C_{yy} and w, t



(g)$C_{y\theta}$ 与 w、l 的关系

(g)Relation between $C_{y\theta}$ and w, t



(h)$C_{\theta\theta}$ 与 w、l 的关系

(h)Relation between $C_{\theta\theta}$ and w, t

图 5　铰链柔度与结构尺寸的关系

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

3.2　导向机构柔度建模

图 3 中，设铰链 A 在局部坐标系 O_A-xy 下的柔度为 C_A，根据柔度矩阵法[11-12]，将 C_A 从坐标系 O_A-xy 转化到坐标系 O-xy 中的柔度为：

$$C_A^O = T_A^O C_A (T_A^O)^{\mathrm{T}}. \tag{4}$$

铰链 B 和铰链 A 关于 x 轴对称，铰链 C 和铰链 A 关于 y 轴对称，并且 D 和 C 关于 x 轴对称，于是有：

$$C_B^O = R_x(\pi) \cdot C_A^O \cdot (R_x(\pi))^{\mathrm{T}}, \tag{5}$$

$$C_C^O = R_y(\pi) \cdot C_A^O \cdot (R_y(\pi))^{\mathrm{T}}, \tag{6}$$

$$C_D^O = R_x(\pi) \cdot C_C^O \cdot (R_x(\pi))^{\mathrm{T}}. \tag{7}$$

4 个铰链在 O 处并联，柔度为：

$$C_O = \left(\sum_{i=A}^{D} (C_i^O)^{-1}\right)^{-1}. \tag{8}$$

将 C_O 转化到输出点 Q 所在的坐标系，得到导向机构的输出柔度 C_Q 为：

$$C_Q = T_O^Q C_O (T_O^Q)^{\mathrm{T}}. \tag{9}$$

3.3　动平台柔度建模

动平台 $Q_1Q_2Q_3$ 通过 3 个导向机构 P_iQ_i (i=1,2,3)连接到静平台 $P_1P_2P_3$，如图 6 所示。

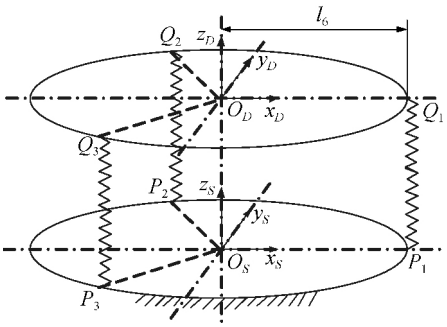


图 6　动平台示意图

Fig. 6　Moving platform

以 P_1Q_1 为例，将其绕着 x 轴旋转 $\pi/2$，沿着 y 轴平移到 O_D，得到 P_1Q_1 在 O_D-xy 的柔度为：

$$C_{Q_1}^{O_D} = T_{Q_1}^{O_D} (R_x(\pi) \cdot C_Q \cdot (R_x(\pi))^{\mathrm{T}}) (T_{Q_1}^{O_D})^{\mathrm{T}}. \tag{10}$$

P_2Q_2 和 P_3Q_3 可通过 P_1Q_1 绕着 z 轴分别旋转 $2\pi/3$ 和 $4\pi/3$ 后得到，分别为：

$$C_{Q_2}^{O_D} = R_z\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot C_{Q_1}^{O_D} \cdot \left(R_z\left(\frac{2\pi}{3}\right)\right)^{\mathrm{T}}, \tag{11}$$

$$C_{Q_2}^{O_D} = R_z\left(\frac{4\pi}{3}\right) \cdot C_{Q_1}^{O_D} \cdot \left(R_z\left(\frac{4\pi}{3}\right)\right)^{\mathrm{T}}. \tag{12}$$

3 个 P_iQ_i 支链并联到动平台，于是得到动平台 O_D 的输出柔度为：

$$C_D = \left(\sum_{i=1}^{3} (C_{Q_i}^{O_D})^{-1}\right)^{-1}. \tag{13}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.4 动平台的运动行程

当不考虑动平台自身和安装在它上面的测量反射镜的质量(设为 m)时,动平台的运动行程为:

$$Z_D = C_D \cdot F_{\mathrm{Actu}}, \tag{14}$$

式中:F_{Actu}为驱动器的输入力。当考虑动平台和测量反射镜的质量时,其受到重力作用而损失的行程为:

$$Z_{\mathrm{Grav}} = C_D \cdot mg, \tag{15}$$

因此,动平台的运动行程为:

$$Z_{D_\mathrm{Stage}} = Z_D - Z_{\mathrm{Grav}} = C_D(3F_{\mathrm{Actu}} - mg). \tag{16}$$

4 试验与讨论

4.1 柔度模型的有限元和试验验证

为了验证导向机构和动平台的柔度模型,采用限元法(FEM)和柔度矩阵法分别对导向机构和动平台的运动行程、耦合误差及最大应力进行分析计算,结果如表1和表2所示。

表1 导向机构FEM和CMM分析

Tab.1 FEM and CMM of guiding mechanism

Input force/N	The stroke in FEM/mm			The coupling error in FEM/%		The Max stress in FEM/MPa	The stroke in CMM/mm			z stroke comparison in FEM and CMM/%
	x_1	y_1	z_1	x_1/z_1	y_1/z_1		x_2	y_2	z_2	$(z_1-z_2)/z_2$
10	3.73×10^{-3}	2.044×10^{-4}	3.13×10^{-1}	1.192	0.065 3	7.604	0	0	3.02×10^{-1}	3.642
20	7.50×10^{-3}	4.087×10^{-4}	6.26×10^{-1}	1.198	0.065 3	15.21	0	0	6.05×10^{-1}	3.471
30	1.12×10^{-2}	6.131×10^{-4}	9.39×10^{-1}	1.193	0.065 3	22.81	0	0	9.07×10^{-1}	3.528
40	1.49×10^{-2}	8.174×10^{-4}	1.252	1.190	0.065 3	30.42	0	0	1.210	3.471

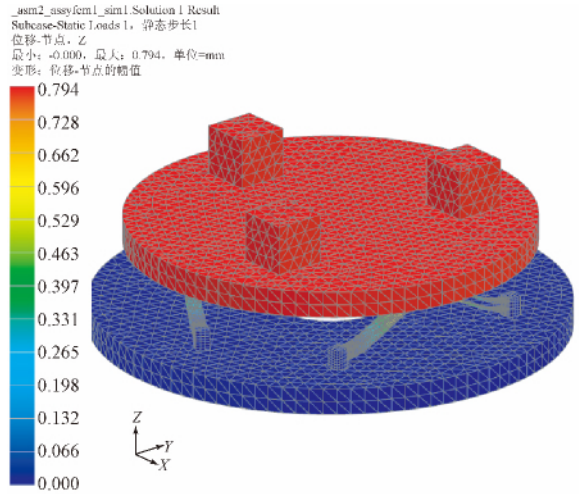
表2 动平台FEM和CMM分析

Tab.2 FEM and CMM of moving platform

Input force/N	The stroke in FEM/mm			The coupling error in FEM/%		The Max stress in FEM/MPa	The stroke in CMM/mm			z stroke comparison in FEM and CMM/%
	x_1	y_1	z_1	x_1/z_1	y_1/z_1		x_2	y_2	z_2	$(z_1-z_2)/z_2$
10	-1.495×10^{-3}	-1.723×10^{-3}	-1.44×10^{-1}	1.038	1.197	2.985	0	0	-1.364×10^{-1}	5.572
20	1.746×10^{-3}	2.022×10^{-3}	1.69×10^{-1}	1.033	1.196	3.450	0	0	1.660×10^{-1}	1.807
30	4.985×10^{-3}	5.764×10^{-3}	4.82×10^{-1}	1.034	1.196	9.884	0	0	4.685×10^{-1}	2.882
40	8.2×10^{-3}	9.5×10^{-3}	7.94×10^{-1}	1.033	1.196	16.320	0	0	7.709×10^{-1}	2.996

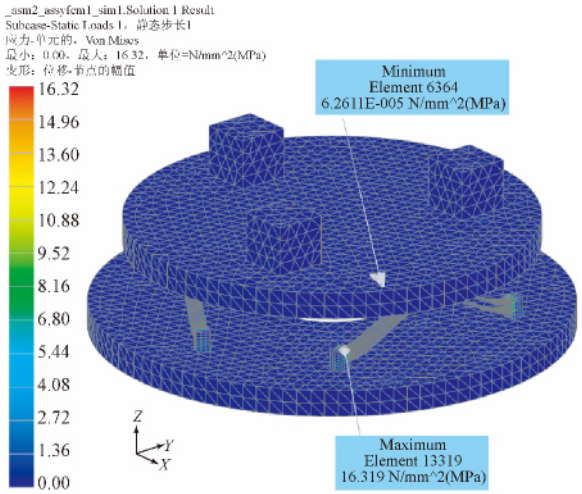
从表1可见,FEM计算得到导向机构的 x 向和 y 向耦合误差最大值分别为1.198%和0.065 3%,当驱动器输入力为40 N时,导向机构输出 z 向行程为1.252 mm,此时机构上最大应力为30.42 MPa,位于铰链根部。FEM分析与CMM计算得到的行程误差最大值为3.642%。在驱动器输入力10~40 N内,导向机构 x 向、y 向耦合误差和 z 向行程线性变化。从表2可知,当考虑动平台和负载的重量时,FEM计算得到的动平台的 x 向和 y 向耦合误差最大值分别为1.038%和1.197%,当驱动器输入力为40 N时,动平台行程为0.794 mm,此时动平台上最大应力为16.32 MPa,位于铰链根部,如图7所示。FEM分析与CMM计算得到的行程误差最大值为5.572%。在驱动器输入力10~40 N内,动平台 x 向、y 向耦合误差和 z 向行程线性变化。由于驱动器的一部分推力用于平衡动平台和负载的重力,故导致动平台损失了0.439 mm的行程。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)运动行程

(a)Traveling stroke



(b)最大应力

(b) The max stress

图 7　动平台 FEM 仿真结果

Fig. 7　Simulation result of moving platform

为了验证建立柔度模型的正确性，对动平台的行程进行了测试，试验装置如图 8 所示。当驱动器输入力为 40 N 时，激光干涉仪检测的动平台行程为 735.162 μm，实测行程和 FEM 分析结果比较误差为 7.410%，与 CMM 计算结果比较误差为 4.633%，处于可接受范围内，验证了本文方法的可行性。试验结果与 FEM 分析结果、CMM 计算结果存在误差的原因主要来自以下方面：(1)FEM 模型单元选择和网格尺度的影响；(2)CMM 中的柔度系数的精度并非百分之百精确；(3)CMM 忽略了铰链之间连杆的柔度，认为连杆属于刚性杆，无变形，实际上连杆存在微小变形；(4)导向机构加工后经过表面除锈和发黑处理，表面可能产生局部硬化。

4.2　传感器线性度标定试验

传感器标定试验装置如图 8 所示。导向机构的材料为 65 Mn，其杨氏模量为 198.6 GPa，泊松比为 0.23，密度为 7 850 kg/m^3。动平台材料为 2A12，其杨氏模量为 65.724 GPa，泊松比为 0.33，密度为 2 794 kg/m^3。导光元件为不锈钢和光学玻璃材质。

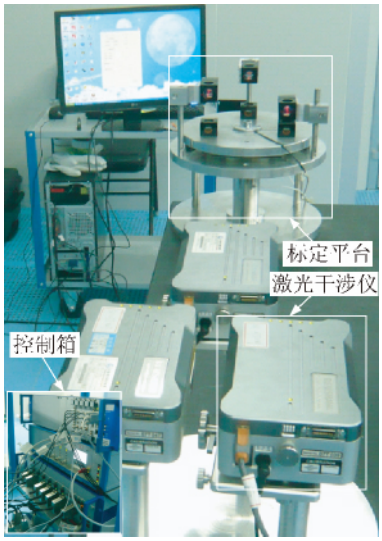
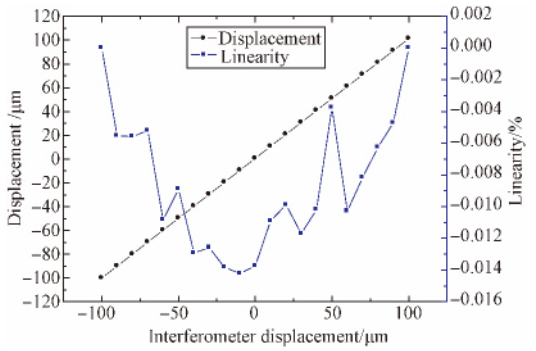


图 8　标定试验平台

Fig. 8　Calibration platform in experiment

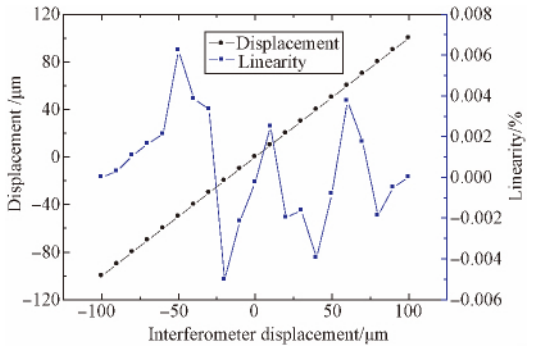
图 3 中机构的尺寸参数为：$l_1=70$ mm，$l_2=10$ mm，$l_3=10.05$ mm，$l_4=9.95$ mm，$l_5=3.3$ mm，$l_6=107$ mm，$r=1.5$ mm，$t=1.1$ mm，$w=10$ mm。试验中，将标定平台置于环控实验室的气浮光学平台上，以便消除外界振动干扰对测试的影响。利用 Renishaw XL80 激光干涉仪测量动平台的输出位移。该干涉仪的精度为 ±0.5 ppm，最小位移分辨率为 1 nm。采用 PI 公司 N-111 压电驱动器提供位移进给，其驱动行程为 10 mm，开环分辨率为 0.025 nm。所要标定的传感器为 PI 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。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)线性度测试结果

(a)Linearity measurement result



(b)线性度标定结果

(b) Linearity calibration result

图9 传感器线性度测试和标定结果

Fig. 9 Linearity measurement and calibration result

标定前，首先进行传感器线性度测试，(1)在坐标测量机上安装传感器并调节其平行度；(2)控制驱动器使被测面板至于传感器的测量负行程；(3)采用PID控制策略令动平台以固定步进量运动；(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(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)控制动平台全行程运动，即得到标定后的传感器线性度。传感器线性度测试结果为0.014 21%，如图9(a)所示。然后，对传感器在线标定以提高线性度。其中，PID参数设置为：$k_p=0.45$，$k_i=5\times10^{-5}$，$k_d=0$，标定结果如图9(b)所示。对比图9(a)可知传感器线性度由0.014 21%提高至0.006 231%，测量精度明显提高。

5 结 论

本文设计了一种高精度位移传感器在线标定平台，其平台运动对称中心轴、测量光路的对称中心轴和传感器的传感轴共轴，从测量原理上减小阿贝误差。动平台具有z/tip/tilt调节功能，保证传感器的传感面和被测面板的被测面之间的装调对准，提高了标定精度。基于柔度矩阵法分析了导向机构和动平台的输出柔度和行程。试验测得动平台行程为735.162 μm，和有限元法、柔度矩阵法计算结果比较误差分别为7.410%和4.633%，行程误差满足要求。经过标定补偿计算，传感器的线性度由0.014 21%提高至0.006 231%。该线性度标定方法精度高，标定后的传感器满足位移精密调节机构使用要求。此外，该标定平台也可以标定传感器的其他指标(如测量重复性)，同时也为其他类型位移传感器的标定提供参考。后续工作将着重研究标定算法，进一步提高传感器线性度标定精度。

参考文献：

[1] 赵磊，巩岩，赵阳. 光刻投影物镜中的透镜X-Y柔性微动调整机构[J]. 光学 精密工程，2013，21(6)：1425-1433.
ZHAO L, GONG Y, ZHAO Y. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1425-1433. (in Chinese)

[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. (in Chinese)

[3] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2627-2638. (in Chinese)

[4] 刘俊，秦岚，李敏，等. 平板式压电六维力/力矩传感器的研制[J]. 光学 精密工程，2011，19(7)：1569-1579.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LIU J, QIN L, LI M, *et al*.. Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1569-1579. (in Chinese)

[5] 赵磊，刘巍，巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2954-2962.
ZHAO L, LIU W, GONG Y. Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2954-2962. (in Chinese)

[6] HAITJEMA H, SCHELLEKENS P H J, WETZELS. Calibration of displacement sensors up to 300μm with nanometer accuracy and direct traceability to a primary standard of length [J]. *Metrologia*, 2000, 37: 25-33.

[7] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance [J]. *Sensor and Actuators A*, 2013, 190: 106-126.

[8] BEER F P, JOHNSTON E R, DEWOLF J T, *et al*.. *Mechanics of materials* [M]. New York: McGraw-Hill, 2012.

[9] YOUNG W C, BUDYNAS R G. *Roark's formulas for stress and strain* [M]. New York: McGraw-Hill, 2002.

[10] LOBONTIU N. *Compliant mechanisms: design of flexure hinges* [M]. Florida: CRC Press, 2003.

[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, 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.

作者简介：

张德福(1983－)，**男，吉林长春人，博士，助理研究员，2007 年、2012 年于哈尔滨工程大学分别获得学士、博士学位，主要从事光学元件位移调节机构设计和精密检测方面的研究**。E-mail: zhangdf@sklao.ac.cn

葛　川(1985－)，**男，辽宁丹东人，硕士，助理研究员，2008 年、2011 年于西安电子科技大学分别获得学士、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

(版权所有　未经许可　不得转载)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net