

文章编号 1004-924X(2013)09-2244-08

数字横向剪切干涉仪相移技术

何 煦, 向 阳*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 由于相移式横向剪切干涉仪相移单元的分辨率、精度等参数直接影响其测试物镜波像差的精度, 本文根据相移式横向剪切干涉测试原理, 设计了采用宏微复合运动模式的相移组件, 该相移组件可在 25 mm 行程内实现纳米级的相移运动。重点分析了柔性铰链复合四杆结构微动单元初始设计参数间的数学规律, 计算了铰链刚度与弱截面应力, 并给出了具体的设计实例。采用有限元分析方法, 对设计实例中微动单元的相移量与压电陶瓷 (PZT) 出力之间的作用规律进行仿真, 并分析了相移精度。结果显示, PZT 在促动力输出范围内可促动 0.1 mm~1 nm 的一维相移运动, 理论精度优于 3.5 nm。微动单元的开环标定测试结果表明, 相移微动单元的实际精度优于 5 nm。

关键词: 光学测量; 波像差; 相移式干涉仪; 剪切干涉仪; 柔性铰链

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2244

Phase-shifting technology of digital lateral shearing interferometer

HE Xu, XIANG Yang*

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

* Corresponding author, E-mail: y. xiang@sklao.ac.cn

Abstract: As the resolution, accuracy and other parameters of the phase-shifting unit in a phase-shifting lateral shearing interferometer will directly affect the test accuracy of wavefront aberration for a lithograph objective, a phase-shifting component with macro and micro compound motion modes was designed based on the principle of phase-shifting test for wavefront aberration. It could achieve a phase-shifting resolution of 3 nm in a 25 mm travel range. Moreover, the mathematical relation of initial parameters was analyzed for the micro unit with a flexure hinge composited four linkage structure. The stiffness and weak interfacial stress of the flexure hinge were calculated, and a design example was given. The finite element analysis method was used to simulate the relation between phase-shifting value and the output of piezoelectric ceramic (PZT) and to analyze the phase-shifting accuracy. The results show that the PZT can actuate one-dimensional phase-shifting motion in 0.1 mm—1 nm within its output range, and the theoretical accuracy is better than 3.5 nm. The open-loop calibration test shows that the actual accuracy of micro-motion unit in the phase-shifting component is better than 5 nm.

Key words: optical testing; wavefront aberration; phase-shifting interferometer; shearing interferometer; flexure hinge

1 引言

波像差是定量评价光刻投影物镜性能的关键指标。光刻物镜波像差的精确测量,能够客观反映物镜制造过程中各种综合误差对系统指标的影响、指导装调,是研制 193 nm 光刻投影物镜的关键技术之一。

在众多基于干涉测量的波面复原方法中,相移技术可以快速、准确地实现干涉图的识别与自动处理,是较为有效的相位检测方法之一^[1-4]。1966年, Carr^[5]提出了时间相移显微干涉的基本思想,其中的四步等步长算法是目前最常用的相移算法之一^[6]。1974年, Bruning 等^[7]详细描述了相移干涉的具体方法,并采用压电陶瓷(PZT)作为相移元件改造了 Twyman-Green 干涉仪,测试了一系列光学透镜与平面。王利娟、刘立人等^[8]介绍了一种相移式雅满剪切干涉仪,采用 $\lambda/4$ 波片绕光轴旋转的方法来实现偏振合束相移。孔梅梅、高志山等^[9]使用偏振方向依照一定角度分布的偏振片实现了环路径向剪切干涉,并介绍了其数学原理及实验验证。目前,已报道的工作在极紫外波段的相移式横向剪切干涉仪的系统波像差检测精度达已到 0.6~0.8 nm^[10],故该仪器是 193 nm 光刻物镜波像差测试的主要方法之一。

相移式横向剪切干涉仪利用光束通过衍射光栅后形成的 ± 1 级衍射光,携带光刻物镜引入的波面畸变信息,并采用矩形窗口代替针孔实现空间滤波^[11]。仪器在工作过程中需要控制衍射光栅沿垂直光轴方向进行连续的高精度、高分辨率平移运动,以实现相移。

目前,大部分相移式剪切干涉仪的相移方式多针对偏振光束的相位调制,无法适用于光刻物镜波像差的测试。因此,本文提出一种宏微复合运动机构,并对其中微动单元的实际性能进行了仿真计算与测试,其结果表明该相移机构的相关指标能够满足光刻物镜系统波像差的测试需求。

2 横向剪切相移干涉方法

2.1 横向剪切干涉原理

投影物镜系统波像差的测量原理如图 1 所

示。照明光源发出的光束经整形与姿态调整后,进入由物镜与针孔组成的理想球面波发生单元,再通过待测光刻物镜本体,经光栅衍射后由像面空间滤波器选取 ± 1 级衍射光来实现剪切干涉,最终由成像与数据处理单元采集干涉条纹并进行波面复原处理。

以相移方式工作的横向剪切干涉仪采用时域相移的方法有规律地加入相移来生成不同的干涉图;如果在整数周期内相移是等间隔的,则可以通过不同相移处干涉条纹图的光强积分值的代数运算得到相位差,并复原、提取相位差。

图 1 中,执行相移功能的是相位光栅,剪切元件主要利用相位光栅衍射的 ± 1 级衍射光产生的剪切波面进行干涉,形成剪切干涉条纹。所得的剪切干涉图是沿剪切方向的相位梯度图,对相移后的相位梯度图进行处理就可以复原系统的波像差。

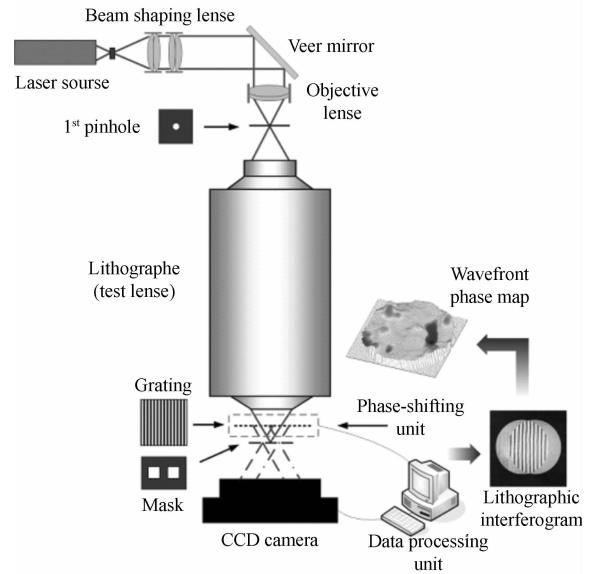


图 1 相移式横向剪切干涉原理

Fig. 1 Principle of phase-shifting lateral interferometer

2.1 相移及相位提取方法

光栅衍射光束经掩模板后由 ± 1 级衍射光干涉形成干涉条纹,设波前相位为 $\Phi(x, y)$,二维的波面剪切量分别为 x_0, y_0 ,则波面相位差表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_x &= \Phi(x + x_0, y) - \Phi(x, y) \\ \Delta\Phi_y &= \Phi(x, y + y_0) - \Phi(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

干涉条纹经光栅相移调制后可用式(2)描述:

$$I'(x, y) = I'_0(x, y) + I_0(x, y) \cos[\Delta\Phi(x, y) + \psi], \quad (2)$$

式中: I'_0 为背景光强, I_0 为相移后的调制光强, ψ 为调制位相, 等于波数与光程差的乘积。

在一个相移周期内由 CCD 积分后的条纹光

$$\Delta\Phi(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}. \quad (4)$$

根据公式(4)以及波像差测试系统的工作原理, 需要高精度地控制衍射光栅在一个周期内沿垂直于光轴方向的 n 步相移量, 才可以准确地获取系统波像差。此外, 光栅相移台还需要兼具微调对准功能, 以便实现干涉仪自身的装调与对准。

3 初始参数计算及相移器设计

3.1 相移组件设计

根据待测物镜波像差的测试精度需求, 光栅单次相移量达到 $12.5 \mu\text{m}$, 相移精度应优于 10 nm , 行程大于 $100 \mu\text{m}$ 。为实现干涉仪自身光路对准, 相移单元需要具备多维微调功能, 其直线位移的分辨率需优于 10 nm , 行程大于 10 mm , 角位移分辨率优于 $0.1''$, 行程大于 0.2° 。也就是说, 相移组件要具备 10 mm 范围内, 优于 10 nm 精度的一维直线位移功能, 以及二维的角位移微调功能。

目前, 实现纳米级运动的较好方法是使用压电陶瓷(PZT)作为促动元件, 柔性铰链作为导轨的位移机构^[12]。但受 PZT 晶体的制造工艺以及柔性铰链导轨的驱动原理的限制, 压电陶瓷在大行程范围内难以实现纳米级平移运动。因此, 本文提出了宏微复合式相移工作台, 其基本原理如图 2 所示。其中, 微动平台采用 PZT 作为促动器, 柔性铰链导轨作为导向机构, 实现一维方向的小行程高精度平移运动; 采用差动微分鼓轮作为宏动单元促动器, 双“V”型滚动导轨作为导向部件, 实现一维方向的大行程中等精度平移运动。

滚动导轨是在两导轨面之间放入滚动体, 使导轨运动处于滚动摩擦状态。由于滚动摩擦阻力小, 从而使工作台移动灵敏, 低速时不易产生爬行现象^[13]。由于宏动台负载较小(约为 0.5 kg), 因此采用双“V”型滚动导轨, 其钢球直径为

强可表示为:

$$I(x, y) = \int_{(n-3)\Delta l}^{(n-2)\Delta l} [I'(x, y) + I_0(x, y)] \cos[\Delta\Phi(x, y) + \psi] d\psi, \quad (3)$$

式中: Δl 为一个周期内每步的相移量, n 为相移次数。根据公式(3)即可求解 $\Delta\Phi(x, y)$, 以四步相移方式为例, 当 $n=4$ 时:

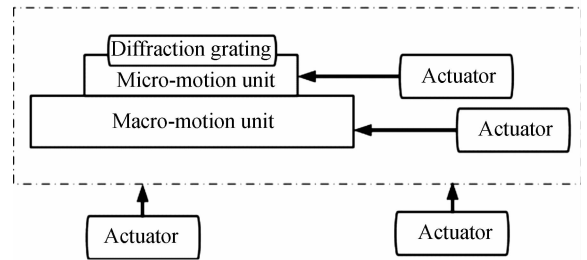
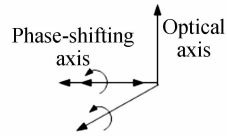


图 2 相移组件工作原理

Fig. 2 Working principle of phase-shifting components

8 mm , “V”形角为 90° 。上述结构可提高运动灵敏度, 并在满足负载要求的前提下降低倾覆力矩。使用差动螺纹微分鼓轮作为宏动平台促动元件, 差动螺纹模数分别为 $1, 0.1$, 与双“V”形滚动导轨配合后可以实现 25 mm 行程范围内, $3 \mu\text{m}$ 分辨率的直线进给, 仿真设计结果如图 3 所示。

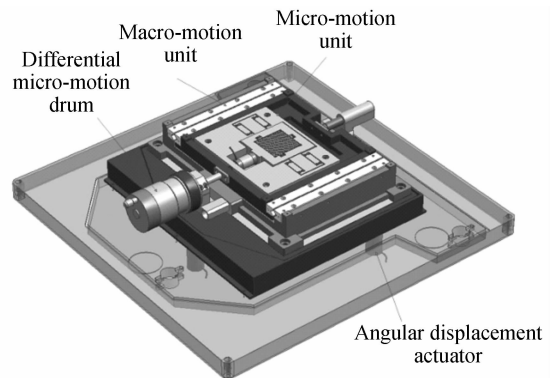


图 3 相移组件设计实例

Fig. 3 Example of phase-shifting component

3.2 相移微动单元初始参数计算

柔性铰链绕轴做有限角位移运动,它的特点是灵敏度高,无机械摩擦、无间隙,近年来广泛应用在精密微位移系统中。微位移系统的单个柔性铰链的等效模型如图 4 所示。其切口为半圆弧形, R 为柔性铰链的切割半径, t 为柔性铰链的最小厚度, b 为柔性铰链宽度, h 为柔性铰链高度。由原理模型可知,柔性铰链实际上是一个变截面杆,当 $h \gg t$ 时,发生在圆弧形切口以外部分的变形可忽略不计,认为形变仅发生在圆弧形切口处。

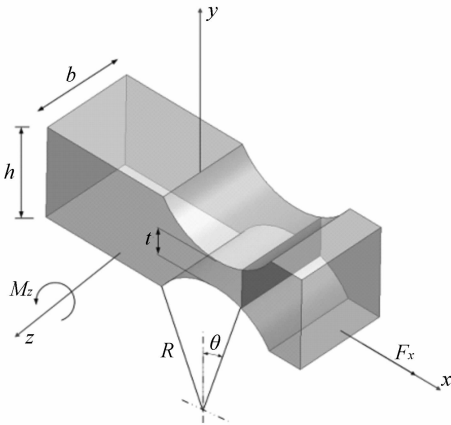


图 4 单个柔性铰链原理模型

Fig. 4 Principle model of single flexure hinge

根据柔性铰链的工作原理,首先计算在外力矩 M_z 作用下柔性铰链的转角 α_z 及转角刚度 $K_{\alpha z}$ 。如图 4 所示,铰链内任意截面对 z 轴的惯性矩可表示为:

$$I_z(\theta) = [b(2R + t - 2R\cos\theta)^3]/12. \quad (5)$$

设铰链圆弧 θ 处横截面在外力矩 $M(\theta)$ 作用下产生的绕中性面的角变形量为 α 。根据材料力学公式^[14], θ 角对应的微弧 $R\cos\theta d\theta$ 在弯曲时中性面的曲率 ρ 为:

$$\rho = \frac{dS}{d\alpha} = \frac{R\cos\theta d\theta}{\cos\alpha d\alpha} = \frac{EI(\theta)}{M(\theta)}, \quad (6)$$

式中: E 为材料的弹性模量。柔性铰链的角变形极小,有 $\cos\alpha \approx 1$ 。当 $2R \ll L$ 时, $M(\theta)$ 可视为常数,因此对公式(6)积分可得:

$$\alpha \approx \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{MR\cos\theta}{EI(\theta)} d\theta. \quad (7)$$

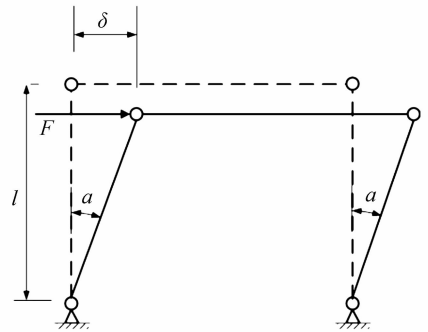
代入式(5),绕 z 轴的转角及转角刚度可表示为:

$$\alpha_z = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{12M_z R \cos\theta}{Eb(2R + t - 2R\cos\theta)^3} d\theta$$

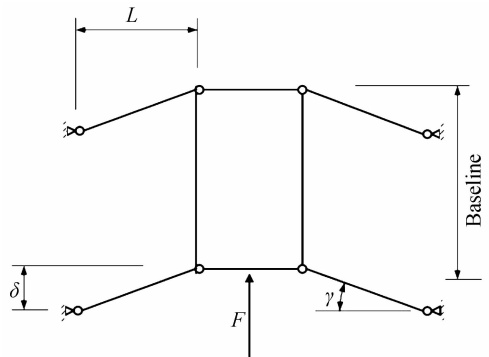
$$K_{\alpha z} = Eb / \left[12 \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{R \cos\theta}{(2R + t - 2R\cos\theta)^3} d\theta \right]. \quad (8)$$

对于正圆切口: $\theta_{\max} = \pi/2, \theta_{\min} = -\pi/2$ 。

平行四边形结构具有良好的导向精度,是位移机构中经常选择的结构形式。使用柔性铰链代替普通的机械铰链结构,并增加两个连杆构成复合四杆结构,可以有效消除寄生运动,提高导向精度与分辨率,降低加工精度。同时上述结构无需装配、无间隙,可以实现较高的运动精度。常规的平行四边形结构与复合四杆结构如图 5 所示。



(a) 常规平行四边形结构
(a) Traditional quadrilateral



(b) 新型柔性铰链复合四杆结构
(b) Compound quadrilateral

图 5 微动单元运动原理图

Fig. 5 Motion principle of micro-motion unit

选择柔性铰链复合四杆结构作为相移组件中微动单元的初始结构形式,根据图 5(b)所示的几何关系: $\gamma = \frac{\delta}{L}$,每个铰链的伸长量可表示为:

$$\Delta L = \frac{L(1 - \cos\gamma)}{2\cos\gamma} \approx \frac{\delta^2}{4L}. \quad (9)$$

由 8 个柔性铰链节点在弯曲和拉伸变形所存

储的总弹性能与总驱动力做功相等,得:

$$W = [K_{az}\gamma^2/2] + [K_{ax}(\Delta L)^2/2] = \frac{1}{8}(F\delta/2). \quad (10)$$

由于柔性铰链的实际伸长量远小于杆长,即 $\delta \ll L$, 根据几何关系, 将公式(9)代入公式(10)中, 可得运动方向的静态刚度为:

$$K = 8K_{az}/L^2. \quad (11)$$

式(11)中的参数 K 是柔性铰链位移台设计过程中的关键参数, 它需要满足使 PZT 刚度大于铰链运动方向静态刚度的阈值条件。

光刻物镜波像差测试系统中衍射光栅的外形尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 根据轴向边界尺寸首先确定参数 $b=10 \text{ mm}$, $h=6 \text{ mm}$ 。同时为降低温度变化引起的轴向尺寸变化, 选择线胀系数较低的殷钢材料(因瓦合金), 其弹性模量 $E=14 \ 100 \text{ kg/mm}^2$ 。将上述初始参数代入式(8)、(11)中, 仿真计算不同切割圆半径时, 铰链厚度与刚度间的函数关系(如图 6 所示), 以及连杆长度对铰链厚度与刚度函数曲线的作用关系(如图 7 所示)。

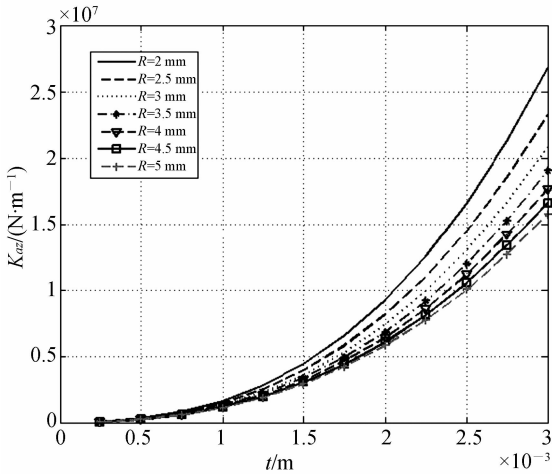


图 6 不同切割半径下静态刚度与铰链厚度的函数曲线
Fig. 6 Function curves of angle stiffness and flexure thickness with different cut-radii

图 6 表明, 当切割圆半径确定时, 随着铰链厚度的增加, 静态转角刚度增加。切圆半径越大, 静态转角刚度增加越慢。图 7 表明, 杆长越短, 转角刚度随铰链厚度变化越显著。

综合考虑各项因素, 选取铰链杆长 $L=18.5 \text{ mm}$, 铰链厚度 $t=1 \text{ mm}$, 切圆半径 $R=3 \text{ mm}$, 计算得静态转角刚度 $K_{az}=1.76 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。所选 PZT

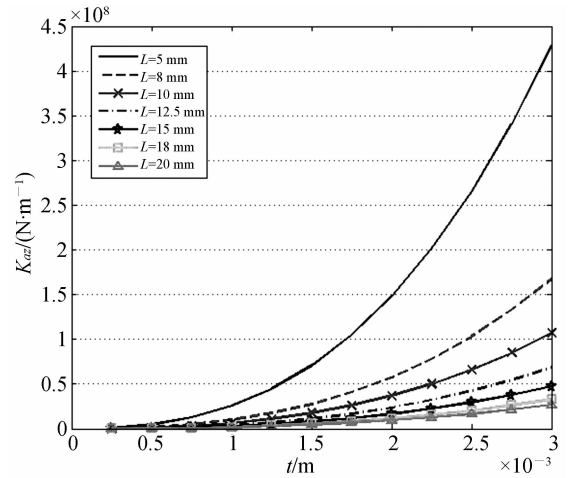


图 7 不同连杆长度下静态刚度与铰链厚度的函数曲线
Fig. 7 Function curves of angle stiffness and flexure thickness with different linkage lengths

器件在最大位移处的刚度最小为 $2.3 \times 10^6 \text{ N/m}$, 大于 K 值, 满足铰链设计的阈值条件。

然后, 根据上述设计参数计算铰链弱界面处的最大应力。在力 F_x 作用下, 产生的 x 轴位移可表示为:

$$\Delta x = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{F_x R \cos \theta}{Eb(2R+t-2R\cos \theta)} d\theta, \quad (12)$$

则对应铰链——连杆最大行程为 δ 时, 铰链所受拉力可表示为:

$$F_x = \frac{Eb\delta^2}{4L} \cdot \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{R \cos \theta}{(2R+t-2R\cos \theta)} d\theta \right]. \quad (13)$$

柔性铰链所受的拉应力为:

$$\xi_1 = \frac{F_x}{bt}. \quad (14)$$

同理, 在弯矩 M_z 作用下, 柔性铰链弱界面处的最大弯矩应力可表示为:

$$\xi_2 = \frac{\delta E}{2Lt^2} \cdot \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{R \cos \theta}{(2R+t-2R\cos \theta)^3} d\theta}. \quad (15)$$

所以弱界面处所受的最大应力 ξ 可表示为:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2. \quad (16)$$

将主要设计参数代入式(16)中, 计算得到柔性铰链弱界面处所受的最大应力为 $3.12 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$, 小于 4J32 材料对应的最大抗拉强度 $4.7 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$, 满足设计阈值。

所设计的衍射光栅相移台微动单元如图 8 所示。其中, 由柔性铰链与复合四连杆组成的位移系

统由殷钢材料在电火花线切割机上直接加工而成;再精密研磨光栅座内的各接触端面,保证光栅的光轴方向与位移矢量方向正交。

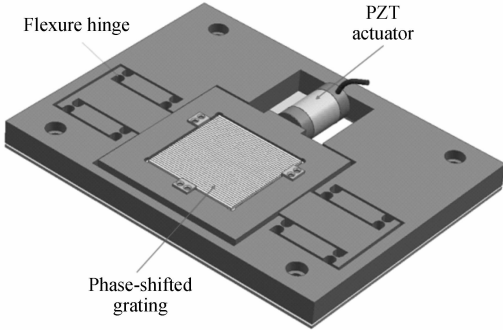


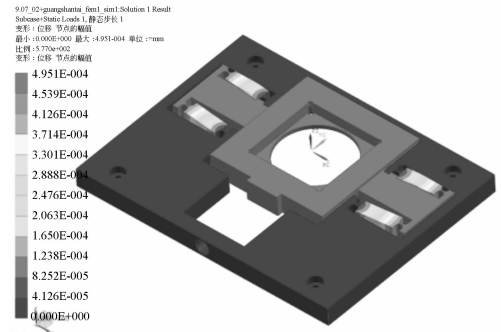
图 8 相移台微动单元设计实例

Fig. 8 Micro-motion unit of phase-shifting component

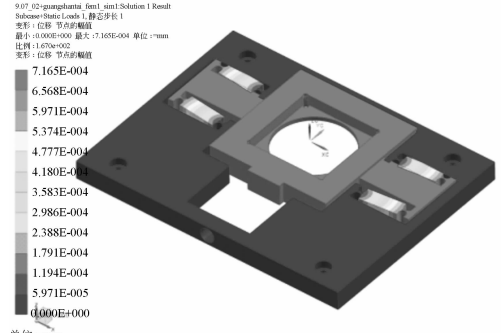
4 微动台相移精度分析

4.1 微动台运动仿真

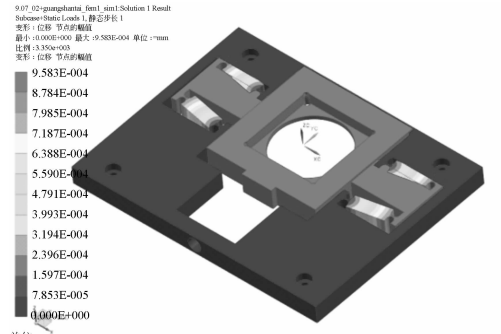
以图 8 中的三维设计实例为基础,建立有限元模型,并代入相关的设计参数对 PZT 出力与相移台位移量之间的关系进行有限元仿真计算,结果如图 9 所示。



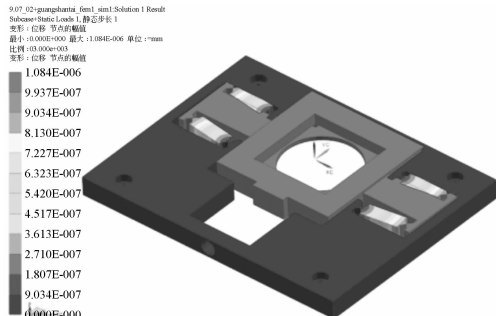
(c)F=145 N, $\delta=495$ nm



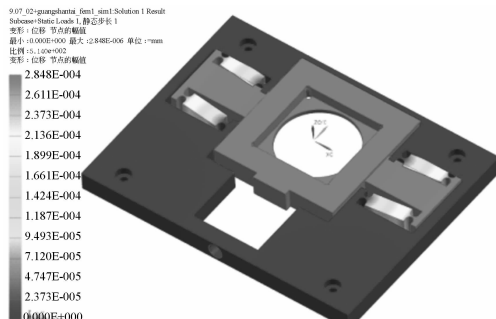
(d)F=200 N, $\delta=710$ nm



(e)F=280 N, $\delta=950$ nm



(a)F=5 N, $\delta=1.1$ nm



(b)F=75 N, $\delta=285$ nm

图 9 相移台位移量与 PZT 出力有限元分析结果
Fig. 9 Results of finite element analysis on PZT output and displacement of phase-shifting component

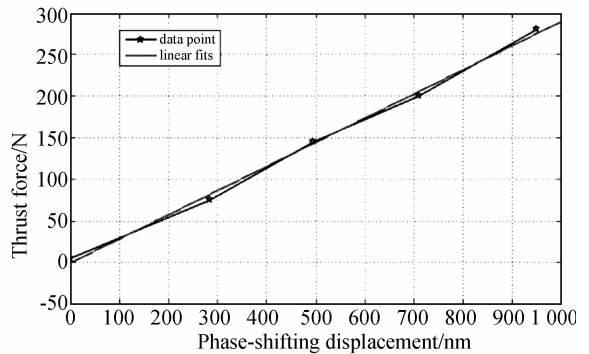


图 10 相移台位移量与 PZT 出力拟合函数曲线
Fig. 10 Fitting function curves of PZT output and displacement of phase-shifting component

根据图 9 中的有限元分析结果,得到相移台位移量与 PZT 出力之间的函数曲线拟合如图 10 所示。函数曲线表明,PZT 出力与平台位移量间的非线性误差小于 5%。

4.2 相移精度分析

首先根据复合平行四杆结构的工作原理,在促动力 F 的作用下,长度为 L 的相移台做基线运动,当连杆 L_1, L_2 存在加工误差 $\Delta L'$ 时,将引起转角误差,根据图 5 中的几何关系有:

$$\Delta\gamma = \frac{L_1 - L_2 - (L_1 \cos \alpha - L_2 \cos \beta)}{L} = \frac{\Delta L'}{L} - \frac{L_1^2 - L_2^2}{L(\sqrt{L_1^2 - \delta^2} + \sqrt{L_2^2 - \delta^2})}. \quad (17)$$

将主要的设计参数代入式(17),并假设加工误差引起的杆长极限误差分别为 $L_1 = (18.5 + 0.01)$ mm, $L_2 = (18.5 - 0.01)$ mm,计算得到的转角误差 $\Delta\gamma = 1.97 \times 10^{-10}$ rad,该误差可以忽略。

根据 4.1 中的仿真分析结果计算由非线性运动误差引起的相移误差。设 κ 为理想的每步 PZT 移动量, κ' 为每步 PZT 的实际移动量,则相移误差可表示为:

$$\kappa' = \kappa(1 + \tau + \tau'\kappa), \quad (18)$$

式中: τ 为归一化的线性误差,由相移台的位移不确定度引起; τ' 表示由 PZT 非线性效应引起的归一化二阶非线性误差。设 I' 为存在相移误差时的光强, I_0 与 I'_0 分别表示背景光强与调制光强, $\kappa_n = \frac{(n-1)\pi}{2}$ 表示第 n 步的相移量,则移项误差可表示为:

$$\Delta_n = \tau(n-4)\pi/2 + \tau'(n-4)^2\pi^2/4. \quad (19)$$

根据式(2),有:

$$I' = I_0(x, y) + I'_0(x, y) \cos[\Delta\Phi(x + x_0, y) - \Delta\Phi(x - x_0, y) + \kappa_n + \Delta_n]. \quad (20)$$

根据式(4)与图 10 中的仿真计算结果,当 $\tau = 5\%$, $\tau' = 0.3\%$ (德国 Piezosystem Jena 公司 PST150 系列压电陶瓷促动器的标称指标)时,相移测量误差为 $5.5 \times 10^{-3}\lambda$ 。若取光刻物镜波像差测试系统原理样机的工作波长 $\lambda = 632.8$ nm,则相移精度优于 3.5 nm。

5 实验

加工完成后的相移工作台微动单元如图 11 所示。采用开环控制模式测试出压电陶瓷输出位移后

相移台微动单元的实际运动量,实验数据如表 1 所示。

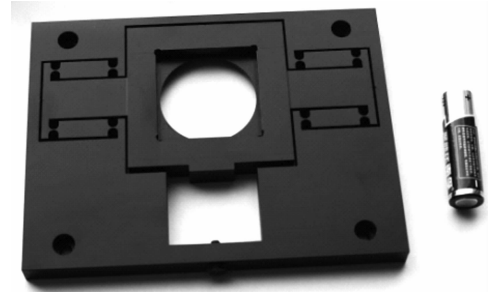


图 11 相移台微动单元实物照片

Fig. 11 Photography of micro-motion unit

表 1 开环控制相移精度测试结果

Tab. 1 Data of phase-shifting test with open-loop control

序号	相移台 输出位移/nm	电容位移传感器 反馈位移量/nm	温度/℃
1	12 500	12 505	22.0
2	12 500	12 505	22.5
3	12 500	12 504	22.5
4	12 500	12 503	23.0
5	12 500	12 505	23.5
6	12 500	12 502	23.0
7	12 500	12 502	23.0

试验结果表明,当单次相移量取 12.5 μm 时,相移误差的算术平均值约为 3.86 nm,接近仿真分析结果。

6 结论

本文依据相移式横向剪切干涉原理,针对光刻物镜波像差的测试需求,并结合相移测试的具体方法与步骤,提出了采用宏微复合结构的相移台设计方法。该方法在实现 25 mm 行程范围内纳米级的位移分辨率的同时,兼顾了波像差测试系统自身装调对准的需求。通过分析微动单元各初始设计参数间的数学规律,计算得到了铰链的静态转角刚度 ($K_{az} = 1.76 \times 10^6$ N/m) 等主要设计参数。以此为基础设计得到了相移台微动单元,并采用有限元分析的方法建立了 PZT 输出力与相移量之间的函数关系曲线。相移精度测试实验表明,相移精度优于 5 nm,与理论分析结果比较吻合。

参考文献:

- [1] KOTHIYAL M P, DELISLE C. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(24):4439-4442.
- [2] SONG J B, LEE Y W, LEE Y H. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(20): 3989-3992.
- [3] ZHU Y C, ODATE S O, SUGAYA A S, *et al.*. Method for designing phase-calculation algorithms for two-dimensional grating phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (18): 2815-2822.
- [4] 郭彤, 胡春光, 陈津平, 等. 时间相移显微干涉术用于微机电系统的尺寸表征[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(1):44-49.
GUO T, HU CH G, CHEN J P, *et al.*. Temporal phase-shifting microscopic interferometry for geometrical characterization of MEMS devices [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(1):44-49. (in Chinese)
- [5] CARR P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferentiel du Bureau international des poids et mesures[J]. *Metrologia*, 1966, 2(11):13-23.
- [6] WYANT J C, CREATH K. Recent advances in interferometric optic testing [J]. *Laser Focus/Electro-Optics*, 1985, 32(11):118-132.
- [7] BRUNING J H, HERRIOT D R, GALLAGER J E, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(8): 2693-2703.
- [8] 王利娟, 刘立人, 栾竹, 等. 相移雅满横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2009, 30(5):1156-1159.
WANG L J, LIU L R, LUAN ZH, *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 30 (5): 1156-1159. (in Chinese)
- [9] 孔梅梅, 高志山, 陈磊, 等. 基于偏振移相的环路径向剪切干涉[J]. *光学学报*, 2010, 30(1):127-131.
KONG M M, GAO ZH SH, CHEN L, *et al.*. Cyclic radia shearing interferometry based on polarization phase-shifting technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1):127-131. (in Chinese)
- [10] GOLDBERG K A, NAULLEAU P, BRESLOFF C, *et al.*. Extreme ultraviolet interferometry: at-wavelength testing of optics for lithography[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47 (2): 025006-1-025006-4.
- [11] ZHU Y C, SUGISAKI K, OKADA M, *et al.*. Wavefront measurement interferometry at the operational wavelength of extreme-ultraviolet lithography [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 6783-6792.
- [12] 卜巾晏, 何广平. 柔性铰链精密定位机构的设计与分析[J]. *机械设计与研究*, 2009, 25(3):44-47.
BU J Y, HE G P. Design and analysis of position complaint mechanisms [J]. *Machine Design and Research*, 2009, 25(3):44-47.
- [13] 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1991.
XUE SH F, LI Q X. *Design of Precision Instrument* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. (in Chinese)
- [14] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
LIU H W. *Material Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. (in Chinese)

作者简介:



何煦(1981—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事光学系统检测、装调技术的研究。E-mail:911max@sina.com



向阳(1963—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事精密光学检测技术、极紫外光刻技术研究。E-mail:y.xiang@sklao.ac.cn