文章编号 1004-924X(2016)09-2134-08

纳米精度二维工作台测量镜的面形误差在线检测

刘兆武^{1,2},李文昊¹,王敬开³,姜 珊¹,宋 莹¹,潘明忠¹,巴音贺希格^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学,北京 101408;

3. 北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:针对二维工作台测量镜本身的面形误差以及装调等因素引起面形变化对二维工作台定位精度的影响,提出了一种 用于纳米精度二维工作台测量镜面形误差的在线检测方法。利用两路激光干涉仪检测面形微分数据的基本原理,分析 了零点误差和积分累计误差对测量镜面形误差检测的影响并提出了改进方法。利用三路激光干涉仪组成两组不等跨度 的检测机构,得到两组工作台测量镜面形的原始数据,通过这两组数据之间的关系修正跨度间的面形细节误差,得到了 精确的测量镜面形误差量。对此方法进行了理论推导、仿真计算和实验验证,并将结果与 Zygo 干涉仪测量得到的离线 检测结果进行了对比,结果显示其差异在±10 nm 之间,且趋势有较好的一致性。得到的结果验证了提出的方法可正确 测量和真实地还原测量镜的面形误差。

关 键 词:激光干涉仪;纳米二维工作台;测量镜;面形误差;在线检测 中图分类号:TN247;TH744.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162409.2134

Online detection of profile deviation for nano precision 2-D stage mirror

LIU Zhao-wu^{1,2}, LI Wen-hao¹, WANG Jing-kai³, JIANG Shan¹, SONG Ying¹, PAN Ming-zhong¹, Bayanheshig^{1*}

 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
 Beihang University, Beijing 100191, China)
 * Corresponding author, E-mail :bayin888 @sina.com

Abstract: For the profile deviation of a stage mirror itself and the profile change caused by the alignment of 2D stage position, an online detection method for the profile deviation of a nano precision 2-D stage mirror was presented. The basic principle of detecting profile differential data with two interferometers was proposed. The influences of zero error and integral error on the measurement were analyzed and a method to improve the measuring precision was put forward. Two sets of original data of the mirror profile were obtained by two sets of detectors with different spans composed by three interferometers. Through the relationship between the two sets of data, the detail profile deviation between the spans was modified. The theoretical calculation, simulation and experiments for the proposed method were performed, and obtained results were compared with that of off-line

收稿日期:2016-01-06;修订日期:2016-02-06.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 61227901)

measurement with a Zygo interferometer. The results show that the most difference in test results is between ± 10 nm, and the trend has better consistency, which verify that this measuring method could measure the profile deviation of stage mirrors correctly and could restore its surface errors truly. **Key words:** laser interferometer; nano-2D stage; stage mirror; profile deviation; online detection

1 引 言

二维工作台在精密工程领域的应用越来越广 泛^[1-3]。目前,纳米精度二维工作台通常采用双频 激光干涉仪定位系统^[4-6]。在工作台运动过程中, 参考镜静止不动,测量镜随工作台运动,由多普勒 原理计算出测量镜与参考镜之间的相对位移,从 而得到工作台的精确位置。在测量镜装调过程 中,测量镜可能产生面形形变,而当工作台沿平行 于测量镜镜面的方向运动时,测量镜的面形误差不 可避免地会引入到工作台测量中^[7],因此必须对工 作台测量镜的面形误差进行精密的在线检测。

20世纪 60 年代, Schulz 和 Schwider^[8] 等提 出的三面互检法得到广泛应用,在此后的半个世 纪里,三面互检法不断进步[9-11],其理论逐渐成 熟,目前能够实现 RMS 值为 λ/10 000^[12] 以上的 检测精度,但是检测设备昂贵并且复杂。 Schulz^[13-14]等提出可追踪多传感器检测法,通过 传感器沿被测方向扫描的方式检测大口径高精度 平面面形,但是装调可能引起额外的面形变化,无 法准确反映工作台工作过程中的镜面面形。 Saburo Kamiya^[15]提出离线检测与在线检测相结 合的方法,以工作状态下的面形获得离散曲线作 为在线状态基准,将离线测得的连续面形偏离值 附加到在线状态基准上获得测量镜工作状态下的 最终面形。这种方法在线检测面形时的采样数据 点少,忽略了测量镜安装前后面形的高频变化,不 能精确地表示测量镜在工作状态下的面形。何 乐^[16]等采用多序列法测量工件台的位置和旋转 量,通过样条插值与最小二乘原理平滑连接所有 测量序列,并计算出精确的测量镜面形。该方法 弥补了 Kamiya 的不足,但是在测量过程中工作 台要具有旋转功能,对工作台的结构和控制要求 较高。Montoya^[17]等提出由采样数据解析出测 量镜不平度的方法,然而受到干涉仪检测系统的 约束,建立稳定的逆传递函数比较困难,同时来自 工件台自身非正交性和基底不平度的影响也难以 消除,在长期的运作中稳定性较差。

本文提出了一种纳米精度工作台测量镜面形

检测方法,以不等跨度的两组检测机构获取两组 测量镜的面形数据,利用两组数据之间的关系修 正面形细节误差,从而得到精确的测量镜面形误 差。该方法简单,并具有较高的精度和稳定性。

2 测量镜面形检测原理

2.1 基本原理

θ

图 1 为工作台位移测量系统示意图,其中 x_a, x_b 为 x 轴干涉仪两组测量光束的测量结果, y_a, y_b 为 y 轴干涉仪两组测量光束的测量结果, d_x, d_y 分别为 x 轴干涉仪和 y 轴干涉仪两组测量 光束的中心间距,则工作台的实际位置(x, y)为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_a - E_{xa} + x_b - E_{xb}}{2}, \\ y = \frac{y_a - E_{ya} + y_b - E_{yb}}{2}, \end{cases}$$
(1)

其中: E_x 为 x 轴测量镜的面形误差, E_x 为 y 轴测 量镜的面形误差, $\tau = a$ 或 b。由于工作台为刚体, x 轴测量镜上的工作台偏航信息与 y 轴测量镜上 的一致。由于工作台在运动过程中的偏航角度较 小,其实际偏航角为:

$$(y) = \frac{(x_{b} - E_{xb}) - (x_{a} - E_{xa})}{d_{x}} = \frac{(y_{b} - E_{yb}) - (y_{a} - E_{ya})}{d_{y}}.$$
 (2)





图 2 *x* 轴测量镜面形误差检测示意图 Fig. 2 Schematic of profile deviation measurement for *x* axis stage mirror

如图 2 所示,以 x 轴测量镜面形检测为例,测 量镜被检测长度为 l,工作台沿 y 轴运动,获取 x轴测量镜的面形位移误差 $E_x(y)$ 。实际工作台在 运行过程中存在平移 $\Delta(y)$ 和偏航 $\theta(y)$,当工作 台运行到 y_i 位置时,由式(1)可知,x 轴干涉仪两 组测量光束检测的测量镜面形误差为:

$$\begin{cases} E_{x}(y_{i}) = x_{a}(y_{i}) - x - \Delta_{x}(y_{i}) \\ E_{x}(y_{i} + d_{x}) = x_{b}(y_{i}) - x - \Delta_{x}(y_{i}) - d_{x}\theta(y_{i}) \end{cases}$$
(3)

由于精密加工的测量镜面形曲线变化小、空间 频率低,所以面形曲线测量点的导数可以近似为:

$$E'_{x}(y_{i}) \approx \frac{E_{x}(y_{i}+d_{x})-E_{x}(y_{i})}{d_{x}} = \frac{x_{b}(y_{i})-x_{a}(y_{i})}{d_{x}} - \theta(y_{i}).$$
(4)

由式(2)可知:

$$\theta_{(y_i)} = \frac{y_b(y_i) - y_a(y_i)}{d_y} - \frac{E_{y_b}(y_i) - E_{y_a}(y_i)}{d_y}.$$
(5)

在检测 x 轴测量镜面形时,工作台沿 y 轴运动,y 轴测量镜的测量位置几乎没有变化,并且由 于干涉仪测距为相对位移测量,初始测量位置处 读数为 0,y 轴测量镜的面形误差包含在干涉仪 读数中,可视为 $(E_{yb}(y_i) - E_{ya}(y_i))/d_y = 0$ 。则 式(4)可写为:

$$E'_{x}(y_{i}) \approx \frac{E_{x}(y_{i}+d_{x})-E(y_{i})}{d_{x}} = \frac{x_{b}(y_{i})-x_{a}(y_{i})}{d_{x}} - \frac{y_{b}(y_{i})-y_{a}(y_{i})}{d_{y}}.$$
 (6)

积分可得 x 轴测量镜的面形误差为:

$$E_{x}(y_{i}) = E_{x}(y_{0}) + \sum_{k=0}^{i-1} (E'_{x}(y_{k})\delta), i = 1, 2, \cdots, n,$$
(7)

其中: δ 为数据采集周期, $n = fix(l/\delta)$ 。fix表示 向下取整。

2.2 误差分析 干涉仪测距为相对位移测量,测量初始位置 为干涉仪零点,这意味着干涉仪零点未必是测量 面的绝对零点,如图 3(a)所示。设 *x* 轴两个干涉 仪的零点偏差分别为 *e_a*,*e_b*,则式(3)改写为:

$$E_{x}(y_{i}) = x_{1}(y_{i}) - x - \Delta_{x}(y_{i}) - e_{a}$$

$$E_{x}(y_{i} + d_{x}) = x_{2}(y_{i}) - x - \Delta_{x}(y_{i}) - d_{x}\theta(y_{i}) - e_{b}$$
(8)

因此,测量镜的面形误差改写为:

$$E_{x}(y_{i}) = E_{x}(y_{0}) + \sum_{i=0}^{i-1} (E'_{x}(y_{k})\delta) - \frac{e_{ab}}{d_{x}}y_{i}, i = 1, 2, \cdots, n, \quad (9)$$

其中: $e_{ab} = e_a - e_b$ 为干涉仪零点差异,可以看出 e_{ab} 将在测量镜面形计算中引入一个线性误差 $e_{ab}y_i/d_x$,这里称之为零点误差,如图 3(b)所示。



Fig. 3 Zero-difference of interferometer and its influence

此外,上述数据处理过程中,采用离散导数进 行积分处理,离散采样与实际斜率的差异将引入 一个累计误差,称作积分累计误差。积分累计误 差是测量光束的中心间距 d_x 与采样周期 δ 的函 数,同时也与被检表面面形误差的空间频率有关。 图 4 所示为在不同采样周期下积分累计误差的变 化情况,可以看出,采样周期与测量光束的中心间 距越接近,积分累计误差越小。当 $\delta = d_x$ 时,积分 累计误差为零。



Fig. 4 Cumulative error owing to integral

2.3 测量镜面形检测算法改进

为不引入积分累计误差,又不减少数据测量 点,在 x 轴测量镜C 点设置第 3 个测量计,如图 5 所示。假设测量镜的被检测长度为 l,采样周期 为 δ ,使 $d_{ab} = m_1 \delta$, $d_{ac} = m_2 \delta$, $m_1 < m_2 < 2m_1$ 。将 AB 得到的测量镜面形数据 $E_{xab}(y_i)$ 分为 m_1 组采 样周期为 d_{x1} 的数据 $E_{xab}(t_1+1,r_1+1)$,将 AC 得 到的测量镜面形数据 $E_{xac}(y_i)$ 分为 m_2 组采样周 期为 d_{x2} 的测量镜面形数据 $E_{xac}(t_2+1,r_2+1)$ 。 $t_j = rem(i,m_j)$,表示 i/m_j 取余; $r_j = fix(i/m_j)$, 表示小于 i/m_j 的最大整数,因此有 $i = r_j m_j + t_j$, j = 1 或 2。设每组数据的起始值均为零,则得到:

$$\begin{cases} E_{xab} (t_{1}+1, r_{1}+1) = \sum_{k=0}^{r_{1}-1} (E'_{xab} (y_{t_{1}+km_{1}}) d_{ab}) \\ E_{xac} (t_{2}+1, r_{2}+1) = \sum_{k=0}^{r_{2}-1} (E'_{xac} (y_{t_{2}+km_{2}}) d_{ac}) \end{cases}$$
(10)



Fig. 5 Schematic of improved method for profile deviation measurement

当 $i=r_1m_1+t_1=r_2m_2+t_2$ 时,测量数据与真实值之间的关系为:

$$\begin{cases} E_{xab} (t_{1}+1, r_{1}+1) = E_{x} (y_{i}) - E_{x} (y_{t_{1}}) + \frac{e_{ab}}{d_{ab}} r_{1} m_{1} \delta \\ E_{xac} (t_{2}+1, r_{2}+1) = E_{x} (y_{i}) - E_{x} (y_{t_{2}}) + \frac{e_{ac}}{d_{ac}} r_{2} m_{2} \delta \end{cases}$$
(11)

- 2.3.1 **改进算法步骤**
 - (1)**匹配** AB、AC 数据斜率

当 $i = r_1 m_1 + t_1 + m_1 m_2 = r_2 m_2 + t_2 + m_1 m_2$ 时,式(11)变化为:

$$\begin{cases} E_{xab}(t_{1}+1,r_{1}+m_{2}+1) = E_{x}(y_{i+m_{1}m_{2}}) - E_{x}(y_{i_{1}}) + \frac{e_{ab}}{d_{ab}}(r_{1}+m_{2})m_{1}\delta \\ E_{xac}(t_{2}+1,r_{2}+m_{1}+1) = E_{x}(y_{i+m_{1}m_{2}}) - E_{x}(y_{i_{2}}) + \frac{e_{ac}}{d_{ac}}(r_{2}+m_{1})m_{2}\delta \end{cases}$$
(12)

由式(12)和式(13)计算 *AB*、*AC* 数据零点的 误差差异:

$$\Delta e = \frac{e_{ac}}{d_{ac}} - \frac{e_{ab}}{d_{ab}} = \frac{E_{xac} (t_2 + 1, r_2 + m_1 + 1)}{m_1 m_2 \delta} - \frac{E_{xab} (t_1 + 1, r_1 + m_2 + 1)}{m_1 m_2 \delta} - \frac{E_{xac} (t_2 + 1, r_2 + 1) - E_{xab} (t_1 + 1, r_1 + 1)}{m_1 m_2 \delta}.$$
(13)

式(13)的意义在于在 AB 所得的同一组数据 中寻找两点,这两点在 AC 所得的数据中也处于 同一组,对比 AB、AC 中这两点的数据即可计算 AB、AC 数据的零点误差差异,可知 $i \ge m_1 m_2$ 的 所有点均符合要求,这些数据计算的零点误差差 异理论上相等,利用这些数据求平均值可以减少 零点误差差异的系统误差。将式(13)带入式(11) 第二式中得到:

$$E_{xac} (t_{2}+1, r_{2}+1) = E_{x} (y_{i}) - E_{x} (y_{t_{2}}) + \left(\frac{e_{ab}}{d_{ab}} + \Delta e\right) r_{2} m_{2} \delta.$$

$$(14)$$

(2)利用 *AB*、*AC* 数据之间的关系调整各组 数据的起始点

当 $i = km_2$ 时, $t_2 = 0$, $r_2 = k$, $r_1 = km_2 - t_1$, 式(11)变化为:

$$\begin{cases} E_{xab}\left(t_{1}+1,\frac{km_{2}-t_{1}}{m_{1}}+1\right)=E_{x}\left(y_{i}\right)-E_{x}\left(y_{t_{1}}\right)+\frac{e_{ab}}{d_{ab}}\frac{km_{2}-t_{1}}{m_{1}}m_{1}\delta\\ E_{xac}\left(1,k+1\right)=E_{x}\left(y_{i}\right)-E_{x}\left(y_{0}\right)+\left(\frac{e_{ab}}{d_{ab}}+\Delta e\right)km_{2}\delta \end{cases}$$
(15)

由式(15)计算可知:

$$E_{x}(y_{t_{1}}) = \Delta c(t_{1}) - \frac{e_{ab}}{d_{ab}} t_{1} \delta - \Delta ekm_{2} \delta, \quad (16)$$

其中:

式(17)的意义在于在 AB 各组数据中找到在

(17)

 $E_{xab}\left(t_{1}+1,\frac{km_{2}-t_{1}}{m_{1}}+1\right).$

AC 第一组数据中的测量点,因 AC 第一组数据中 的起始值是明确的,通过 AB、AC 数据之间的关 系确定 AB 各组数据的起始点位置。将式(16)带 入式(11)第一式中得到:

$$E_{x}(y_{i}) + \frac{e_{ab}}{d_{ab}} \delta i = E_{xab}(t_{1}+1, r_{1}+1) + \Delta c(t_{1}) - \Delta ekm_{2}\delta.$$

$$(18)$$

对式(18)等号两边进行去斜率处理,得到测 量镜面形为。

$$E_{x}(y_{i}) = \operatorname{detrend}[E_{xab}(t_{1}+1,r_{1}+1) + \Delta c(t_{1}) - \Delta ekm_{2}\delta].$$
(19)

2.4 模拟仿真

为体现改进算法的普遍性,设置被检测函数 为一个非周期、有阶跃、有畸变并且无斜率的函 数,设:

$$f(y) = 500 \left(\frac{y}{l}\right)^2 + 30 \left(\frac{y}{l}\right)^3 - 920 \left(\frac{y}{l}\right)^4 + 480 \left(\frac{y}{l}\right)^6.$$
(20)

设置阶跃和畸变点如下:

$$g_{(y)} = \begin{cases} f_{(y)} + 5, y = 17 \\ f_{(y)} - 10, y = 27 \\ f_{(y)} - 3, y \ge 44 \\ f_{(y)}, \mathbf{\sharp} \mathbf{\ell} \mathbf{\ell} \end{cases}$$
(21)

去斜率,被检测函数为:

$$E_{(y)} = \operatorname{detrend}_{\lceil f(y) \rceil}.$$
 (22)

被检测曲线如图 6 所示,被检测面形长度 l =70 mm,面形误差约为 $-20 \sim 20$ nm。假设空间采 样周期 $\delta = 1 \text{ mm}, d_{ab} = m_1 \delta = 5 \text{ mm}, d_{ac} = m_2 \delta =$ 7 mm,零点差异 $e_{ab} = -5 \text{ nm}, e_{ac} = 3 \text{ nm}$ 。应用 式(13)将 AC 各组数据与 AB 各组数据进行斜率 匹配,结果如图 6 所示,图中曲线 AB 与曲线 AC 有相同的斜率趋势。然后应用式(18),根据 AC 第一组数据的位置调整 AB 数据的起始点,结果 如图 7 所示,得到的连续曲线与被测曲线形状相 同,但倾角不同。对调整后的 AB 数据进行去斜 率处理得到检测结果,图中可以看出被检测曲线 与去斜率后的 AB 曲线完全重合,从而在理论上 证明了本文所论述的方法能够精确还原测量镜 面形。



Fig. 6 Simulation Step 1 of profile deviation detection for stage mirror



Fig. 7 Simulation Step 2 of profile deviation detection for stage mirror

3 实验验证及结果讨论

测量镜面形误差在线检测实验系统光路如图 8 所示。工作台运行在万级洁净间的气浮隔振平 台上,检测光路暂无密封装置,被检测测量镜长为 300 mm,有效可检测长度为 l=279.4 mm。位移 测量采用 3 部 Agilent 10721A 双轴差分干涉仪, 测量分辨率为 0.15 nm, x 轴位移测量用其中两部 干涉仪的 3 路测量轴, y 轴测量用另外一部干涉仪 的2路测量轴,剩余1路测量轴闲置不用。空间采 样频率 $\delta = 6.35 \text{ mm}, d_{ab} = m_1 \delta = 31.75 \text{ mm}, d_{ac} =$ $m_2 \delta = 44.45 \text{ mm}$ 。工作台每运行 6.35 mm 采集 1000个数据,取平均值作为该点面形数据以减 小噪声的影响,每次测量共采集 38 组数据,AB 有43个数据测量点,AC有45个数据测量点。 AB、AC数据点及其轮廓如图 9 所示,将 AB 各组 数据与AC数据进行斜率匹配,根据匹配后AB第 一组数据的位置调整 AC 数据的起始点,最后对调 整后的 AC 数据进行去斜率处理并拟合为平滑曲 线,得到的检测结果如图 10 所示。测量镜的最大 误差跨度约为 48 nm。图 11 给出了同样实验条 **件下** 10 次实验结果的标准差分布,最大标准差为 4.143 1 nm。



图 8 测量镜面形误差在线检测实验系统的光路布局 Fig. 8 Layout of experiment system for online test of stage mirror profile







Fig. 10 Results of online measurement with heterodyne interferometer



为验证此方法的正确性,利用 Zygo 32 英寸 平面激光干涉仪对该表面进行离线检测,检测结 果如图 12 所示,测量镜的最大误差跨度约为 38 nm。两种方法的对比结果如图 13 所示,双频 激光干涉仪的在线检测结果与 Zygo 干涉仪的离 线检测结果的趋势基本一致,对应检测点的测量 差异在±10 nm 之间,这些差异主要是在测量镜 装调过程中引起的面形变化。综上可知,该方法 确实可以获取工作台测量镜的面形误差。









在试验过程中,由于没有严格控制空气扰动, 导致工作台运动过程中气浮平台不稳定,而工作 台运行速度的波动会使双频激光干涉仪的检测数 据存在一定的偏差。受实验条件的限制,该影响 需要进一步的实验验证。

4 结 论

本文提出一种纳米精度二维工作台测量镜面

参考文献:

- [1] 崔继文,刘雪明,谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定[J]. 光学 精密工程,2012,20(9):1960-1966.
 CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage[J]. Opt. Precision Eng., 2012,20(9): 1960-1966. (in Chinese)
- [2] 张昔峰,黄强先,袁钰,等. 具有角度修正功能的大 行程二维纳米工作台[J]. 光学 精密工程,2013,21
 (7):1811-1817.
 ZHANG X F, HUANG Q X, YUAN Y, et al..
 Large stroke 2-DOF nano-positioning stage with angle error correction [J]. Opt. Precision Eng., 2013, 21(7): 1811-1817. (in Chinese)
- [3] GAO Z Y, HU J C, ZHU Y, et al.. A new 6-degree-of-freedom measurement method of X-Y stages based on additional information [J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 606-620.
- [4] GROOT P J D, BADAMI V G. Revelations in the Art of Fringe Counting . The State of the Art in

形检测方法,首先利用 y 轴工作台测量镜修正工 作台运动的偏摆误差,利用三路双频激光干涉仪 组成两组不等跨度的角检测机构,分别获取两组 x轴工作台测量镜面形的微分数据;然后以各自 的跨度为间隔积分得到两组工作台测量镜面形的 原始数据:最后利用这两组数据之间的关系修正 跨度间的面形细节误差,得到精确的x轴测量镜 的面形误差量。该方法在不减少面形测量数据点 的情况下,避开了零点误差和积分累计误差的影 响,能够更真实地还原测量镜的面形误差,并且测 量镜的有效利用率高,可以检测到镜面边缘的面 形。对该方法进行了理论推导、仿真计算以及在 线检测,并与 Zygo 干涉仪的离线检测结果进行 了对比。实验结果表明,该方法的测量重复精度 优于4.1431 nm, 与采用 Zygo 干涉仪对该表面 的离线检测结果差异在±10 nm 之间,且趋势一 致,由此验证了该方法用于检测纳米级工作台测 量镜面形的可行性。

该方法通过增加数据测量点、改善工作台运 动状态和实验条件、以及对测量光路进行严格密 封可以进一步提高精度,这将是下一步的工作 重点。

Distance Measuring Interferometry [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2014; 785-790.

- [5] 高忠华,陈锡侯,彭东林. 时栅角位移传感器在线自标定系统[J]. 光学 精密工程,2015,23(1):93-101.
 GAO ZH H, CHEN X H, PENG D L. Online self-calibration system for time grating angular displacement sensor [J]. Opt. Precision Eng., 2015, 23 (1): 93-101. (in Chinese)
- [6] 糜小涛,于宏柱,于海利,等. 大型衍射光栅刻划机 拉杆结构的分析与改进[J]. 光学 精密工程,2015, 23(3):745-752.
 MIXT,YUHZH,YUHL, *et al.*. Analysis and

improvement of rod structures for large diffraction grating ruling engines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 745-752. (in Chinese)

- ZHAO Y. Ultra-high Precision Scanning Beam Interference Lithography and Its Applicationspatial Frequency Multiplication [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [8] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement

of planeness [J]. Appl. Optics, 1967, 6(6): 1077-1084.

- [9] KÜCHEL M F. A new approach to solve the three flat problem [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2001, 112(9): 381-391.
- [10] GRIESMANN U, WANG Q, SOONS J. Threeflat tests including mounting-induced deformations
 [J]. Optical Engineering, 2007, 46(9): 093601.
- [11] SU D-Q, TIAN W, MIAO E-L, et al.. Absolute three-flat test in vertical direction with gravity deformation compensation [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11): 1112003.
- [12] 徐洋,唐锋,王向朝,等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. 中国激光,2011,38(10):204-209.
 XU Y, TANG F, WANG X CH, et al.. Measurement error analysis of absolute flatness test [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 204-209. (in Chinese)
- [13] ELSTER C, WEING R I, SCHULZ M. Coupled distance sensor systems for high-accuracy topogra-

作者简介:



刘兆武(1987一),男,黑龙江齐齐哈尔 人,博士研究生,2006 年于哈尔滨工业 大学获得学士学位,主要从事全息曝光 系统制作和精密位移测量等方面的研 究。E-mail;zhaowuliu@hotmail.com phy measurement: Accounting for scanning stage and systematic sensor errors [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 32-38.

- [14] SCHULZ M, ELSTER C. Traceable multiple sensor system for measuring curved surface profiles with high accuracy and high lateral resolution [J]. Optical Engineering, 2006, 45(6): 060503.
- [15] KAMIYA S. Method and apparatus for correcting linearity errors of a moving mirror and stage:United States, 5790253 [P]. 1998.
- [16] 何乐,王向朝,马明英. 一种测量光刻机工件台方 镜不平度的新方法[J]. 中国激光,2007,34(4): 519-524.
 HE L, WANG X CH, MA M Y. Non-flatness measurement of wafer stage mirrors in a step-andscan lithographic tool [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4):519-524. (in Chinese)
- [17] MONTOYA J. Toward Nano-accuracy in Scanning Beam Interference Lithography [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology 2006.

通讯作者:



巴音贺希格(1962-),男,内蒙古鄂尔 多斯人,博士,研究员,博士生导师, 2004年于中国科学院长春光学精密机 械与物理研究所获得博士学位,主要从 事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术 的研究。E-mail:bayin888@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)