

共光路多自由度运动误差测量及补偿技术研究*

徐 兵^{1,2}, 宋 涛², 周 畅², 李喜峰¹, 张建华^{1**}

(1.上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200444; 2.上海微电子装备(集团)股份有限公司,上海 201203)

摘 要:工件台是TFT阵列基板长寸测量设备中最为核心的技术单元之一,其定位精度将直接决定最终长寸测量设备的测量精度。在运动过程中由于运动导轨加工和装配误差会使工件台产生运动误差,而这些运动误差会影响TFT阵列基板长寸测量精度。为解决上述工件台运动误差对长寸测量精度的影响,文中基于桥式结构的长寸测量设备研究分析了工件台运动误差对长寸测量精度的影响机理,设计了一种共光路多自由度激光干涉仪测量系统,给出了激光干涉仪测量系统光束结构布局及测量补偿方案。通过搭建测试平台,基于4.5代基板对比测试了工件台运动误差补偿前后的重复性及最终长寸测量重复性。试验结果表明,研究的工件台运动误差测量及补偿技术可以满足100 nm高精度运动台定位精度技术要求。

关键词:薄膜晶体管;长寸;工件台;运动误差;激光干涉仪;测量补偿

中图分类号: TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)01-0001-10

Research on Measurement and Compensation Technology of Multi-degree Freedom Motion Error in Common Optical Path

XU Bing^{1,2}, SONG Tao², ZHOU Chang², LI Xifeng¹, ZHANG Jianhua^{1**}

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, CHN; 2.Shanghai Micro-electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, CHN)

Abstract: The workpiece table is one of the most core technical units in the TFT array substrate long-inch measurement equipment, and its positioning accuracy would directly determine the final measurement accuracy. During the movement of the workpiece table, it would produce movement errors due to the processing and assembly errors of the moving guide rail, which could affect the measurement accuracy of the TFT array substrate. In order to solve the above-mentioned influence of the movement error of the workpiece table, the mechanism of the influence of workpiece table movement error on the measurement accuracy of long inches was analyzed based on the bridge structure of the long measuring equipment, and a common optical path with multiple degrees of freedom was designed. The laser interferometer measurement system could provide the beam structure layout and

收稿日期:2020-11-30

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51725505)

作者简介:徐 兵(1974—),男,高级工程师,主要研究方向为微纳测量技术;(E-mail:xub@smee.com.cn)

宋 涛(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为微纳系统方案与集成;

周 畅(1975—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为微纳制造装备。

** 通讯作者:张建华(1972—),女,研究员,主要研究方向为微纳制造与装备,半导体显示等。(E-mail:jhzhang@shu.edu.cn)

measurement compensation scheme of the laser interferometer measurement system. By building a test platform, the repeatability before and after compensation of the motion error of the workpiece stage and the repeatability of the final long-inch measurement were tested based on the 4.5-generation substrate. The test results show that the workpiece table movement error measurement and the compensation technology studied above could meet the technical requirements of 100 nm high-precision positioning accuracy of the movement table.

Key words: TFT; total pitch; plate stage; moving error; laser interferometer; measurement of compensation

引 言

随着高分辨率显示需求及面板工艺的不断发展,对 TFT-LCD 和 AM-OLED 显示器件所需的 TFT 阵列基板的长寸(TP, Total Pitch)精度需求也不断提高。长寸测量设备(TPM, Total Pitch Measurement)是 TFT 阵列基板 TP 指标测量的关键设备,其测量精度及稳定性直接决定了面板产线对 TFT 基板产品是否合格的判断,因此 TFT 面板生产商对 TPM 的测量精度及稳定性提出了近乎苛刻的要求,一旦 TPM 测量精度不满足指标需求或设备故障,则整个面板生产线 TFT 阵列制程制造将终止。如何确保 TPM 测量精度及稳定性满足高分辨率 TFT 基板制程工艺的需求,则是设备厂商急需解决的技术难题。

工件台是 TPM 最为核心的技术单元之一,其定位精度将直接决定 TPM 的测量精度。工件台运动导轨由于加工和装配所导致的平面度和直线度误差会使工件台在运动过程中产生俯仰(Pitch)、侧摆(Yaw)及绕运动轴旋转(Roller)等姿态形式的运动误差,而这些运动误差会影响 TFT 阵列基板长寸测量精度^[1]。为解决上述工件台运动误差对长寸测量精度的影响,基于桥式结构提出了一种工件台结构方案,研究分析了工件台运动误差对 TP 测量精度的影响机理,设计了一种共光路多自由度激光干涉仪测量系统,并对激光干涉仪测量光束结构布局及工件台运动误差测量补偿方案进行了研究。

1 工件台总体方案

1.1 技术指标

工件台定位精度及稳定时间是衡量工件台运动定位性能最为关键的指标,也是长寸测量设备 TP 测量精度及测量效率是否满足技术指标的关键

因素之一。由于不同世代玻璃基板大小不一样,其对工件台定位精度及稳定时间需求也不一样,文中以 4.5 代基板玻璃为例,工件台关键技术指标如表 1 所示。

表 1 工件台关键技术指标

Tab.1 Key technical indicators of workpiece table

指标项	关键指标
X 向定位精度	100 nm@3sigma
Y 向定位精度	100 nm@3sigma
TP 测量精度	300 nm@3sigma
X 向 TP 测量重复性	280 nm@3sigma
Y 向 TP 测量重复性	280 nm@3sigma
X 向稳定时间	150 ms
Y 向稳定时间	150 ms

1.2 结构方案

对于 TFT 基板长寸测量设备,工件台结构形式有桥式结构和龙门结构两大类。由于桥式结构相对龙门结构具有结构简单、驱动重心低、运动定位精度高等优势,因此文中基于桥式结构形式对 4.5 代 TPM 进行了研究。工件台结构如图 1 所示,主要包括减振器、大理石基座、桥式立柱、X 向光学测量载台和 Y 向基板载台。减振器采用被动减振方式,用于隔离外部振动及工件台运动反力对工件台定位性能的影响。大理石基座固定于减振器上方,用于支撑 X 向光学测量载台和 Y 向基板载台。X 向光学测量载台由 X 向运动导轨、直线电机、运动滑块及光学测头组成,由于光学测头是 TPM 测量的基准,为保证其测量精度,X 向运动导轨采用结构变形小、热膨胀系数更低的陶瓷气浮导轨^[2],其固定在两侧桥式立柱上,通过直线电机进行驱动;光学测头上配置有不同倍率的光学测量传感器,用于精确测量 TFT 基板上的标记信息;光学测头固定在运动滑块上,随着 X 向运动滑块沿 X 轴运动,可以实现

TFT基板X向TP标记的测量。Y向基板载台由Y向运动导轨、直线电机及承板台组成,由于Y向基板载台重心低、结构更加稳定,为降低设计成本,采用了双侧直线钢导轨加直线电机的驱动方式;基板固定于承板台上方,会随着承板载台沿Y轴运动,实现TFT基板Y向TP标记的测量。

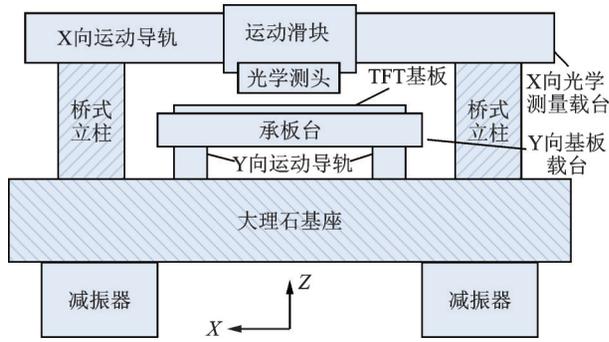


图1 4.5代桥式结构TPM工件台结构示意图

Fig.1 Schematic of G4.5 bridge structure TPM work table structure

桥式结构的X向光学测量载台和Y向基板载台在实际运动过程中,其运动定位误差包含沿运动方向的自由度位置误差和非运动方向的自由度位置误差,运动方向自由度误差(简称“自由度误差”)为运动轴沿运动方向的定位精度,该误差由工件台测量系统和运动执行系统共同决定;非运动方向自由度误差(简称“非自由度误差”)为运动轴方向之外的运动姿态导致的定位误差,主要由工件台运动导轨加工和安装误差所引起。文中以下章节重点探讨和研究非运动方向自由度误差的产生机理及影响分析,同时提出了其测量与补偿方案,并给出了相关测试数据。

2 运动误差产生及影响分析

2.1 光学测量载台运动误差

如图2所示,光学测头在随运动滑块沿X向导轨运动过程中,非运动方向自由度误差主要有光学测头在X导轨上的俯仰(Pitch)运动误差 Ry_a 、侧摆(Yaw)运动误差 Rz_a 和旋转(Roller)运动误差 Rx_a ^[3]。

非自由度方向的运动误差将直接影响光学测头的位置姿态及最终TP标记的测量精度。如图3(a)所示,当运动滑块发生 Ry_a 的俯仰角度偏转时,会引起光学测头光轴跟着发生 Ry_a 角度的旋转,

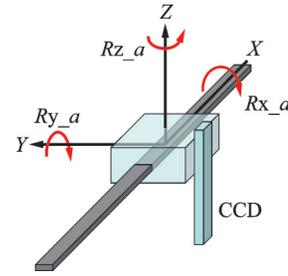


图2 光学测量载台运动误差示意图

Fig.2 Schematic of optical measurement stage movement error

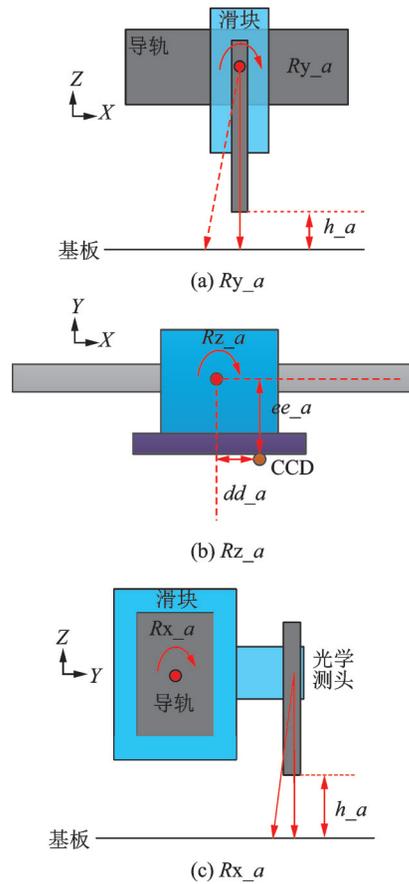


图3 光学测量载台运动误差影响示意图

Fig.3 Schematic of the influence of the movement error of the optical measurement stage

对TP测量标记位置X的影响为 $\Delta x = Ry_a \times h_a$,其中 h_a 为光学测头成像镜头的工作距离;如图3(b)所示,当运动滑块发生 Rz_a 的水平向旋转时,会引起光学测头在X、Y水平上的位置发生偏移,对TP测量标记位置x的影响为 $\Delta x = Rz_a \times ee_a$,对TP测量标记位置y的影响为 $\Delta y = Rz_a \times dd_a$,其中 ee_a 和 dd_a 分别是测头距离滑块中心在Y和X向的偏差距离;如图3(c)所示,当运动滑块发生绕运动轴X旋转的 Rx_a 角度偏转时,会引起光学测头光轴跟着发生 Rx_a 角度的旋转,对TP测量标记位置y的

影响为 $\Delta y = R_{x_a} \times h_a$ 。

另外如图 4 所示, X 向运动导轨由于制造和装配误差会使导轨产生直线度误差, 当运动滑块沿 X 轴运动时光学测头会在 Y 向上产生 dy_a 平移误差, 该误差对 TP 测量标记位置 y 的影响为 dy_a 。

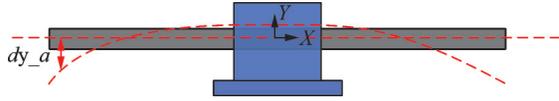


图 4 光学测量载台 X 向运动导轨直线度误差示意图

Fig.4 Schematic of the straightness error of the X-direction motion rail of the optical measurement stage

通过以上分析, 总结光学测量载台非自由度误差对 TP 测量标记位置精度影响如表 2 所示。

表 2 光学测量载台非自由度误差影响一览表

Tab.2 List of influences of non-degree of freedom error of optical measurement stage

光学测量载台运动误差类型	对 X 向影响	对 Y 向影响
俯仰(Pitch)运动误差 R_{y_a}	$R_{y_a} \times h_a$	0
侧摆(Yaw)运动误差 R_{z_a}	$R_{z_a} \times ee_a$	$R_{z_a} \times dd_a$
旋转(Roller)运动误差 R_{x_a}	0	$R_{x_a} \times h_a$
X 向运动导轨直线度误差 dy_a	0	dy_a

2.2 基板载台运动误差

如图 5 所示, 基板载台在沿 Y 向运动导轨运动过程中, 非自由度方向的误差主要有基板载台在 Y 向导轨上的俯仰(Pitch)运动误差 R_{x_w} 、侧摆(Yaw)运动误差 R_{z_w} 和旋转(Roller)运动误差 R_{y_w} ^[4]。

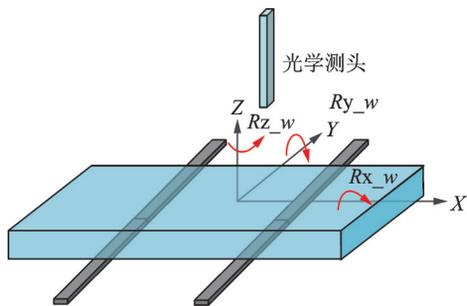


图 5 基板载台运动误差示意图

Fig.5 Schematic of substrate stage movement error

非自由度方向的运动误差将直接影响基板载台的位置姿态及最终 TP 标记的测量精度。如图 6 (a)所示, 当基板载台发生 R_{x_w} 的俯仰角度偏转时, 会引起基板上待测 TP 标记沿 Y 向发生一定位移偏差^[5], 所以对测量标记位置 y 的影响为 $\Delta y = R_{x_w} \times h_w$, 其中 h_w 为标记距离基板台倾斜中心的距离

偏差; 如图 6(b)所示, 当基板载台发生 R_{z_w} 的水平向侧摆旋转时, 会引起基板上待测 TP 标记产生位置偏差, 其中 TP 标记 x 的位置变化为 $\Delta x = R_{z_w} \times ee_w$, y 的位置变化为 $\Delta y = R_{z_w} \times dd_w$, 其中 ee_w 和 dd_w 分别是标记距离基板旋转中心在 Y 向和 X 向的偏差距离。如图 6(c)所示, 基板载台发生 R_{y_w} 的角度旋转时, 也会引起基板上待测 TP 标记的位移偏差, 对测量标记位置 x 的影响为 $\Delta x = R_{y_w} \times h_w$ 。

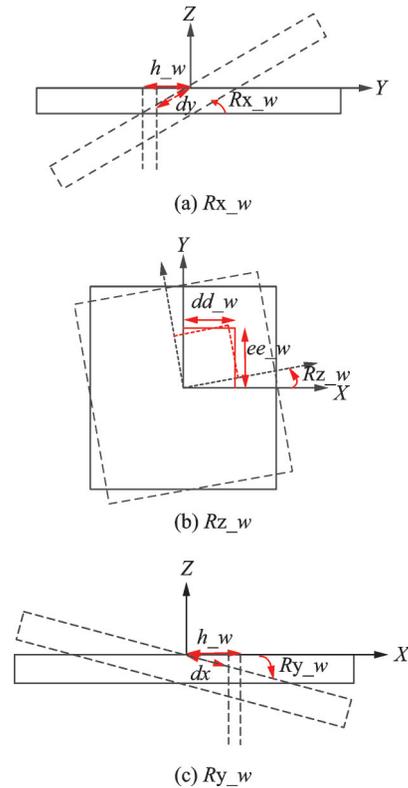


图 6 基板载台对测量的影响示意图

Fig.6 Schematic of the influence of the substrate stage on the measurement

另外如图 7 所示, Y 向运动导轨由于制造和装配误差会使导轨产生直线度误差, 当承板台沿 Y 轴运动时会使得待测基板在 X 向上产生 dx_w 平移误差, 该误差对 TP 测量标记位置 x 的影响为 dx_w 。通过以上分析, 总结基板载台非自由度方向运动误差对 TP 测量标记位置精度影响如表 3 所示。

3 运动误差测量与补偿

根据上一章节分析, 桥式结构上下两个运动载台非自由度方向的运动误差都会对最终的 TP 测量结果产生影响。以光学测量载台的 R_{x_a} 为例, 假

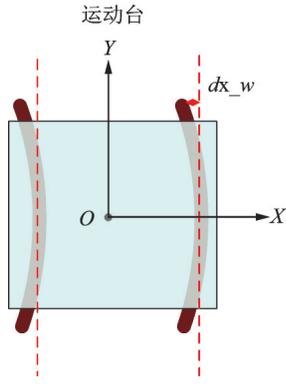


图7 Y向导轨不平整度误差

Fig.7 Y-direction rail unevenness error

表3 基板载台非自由度误差影响一览表

Tab.3 List of influences of non-freedom errors of substrate stage

基板载台运动误差类型	对X向影响	对Y向影响
俯仰(Pitch)运动误差 Rx_w	0	$Rx_w \times h_w$
侧摆(Yaw)运动误差 Rz_w	$Rz_w \times ee_w$	$Rz_w \times dd_w$
旋转(Roller)运动误差 Ry_w	$Ry_w \times h_w$	0
Y运动导轨直线度误差 dx_w	dx_w	0

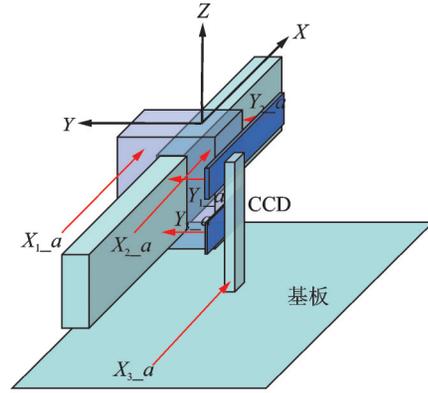
设光学测头成像镜头的工作距离 h_a 为 100 mm, 此时绕 X 轴旋转的角度偏差 Rx_a 有 $10 \mu\text{rad}$, 那么产生的 $\Delta y = Rx_a \times h_a = 100 \text{ mm} \times 10 \mu\text{rad} = 1000 \text{ nm}$, 这个量级远远超出 TPM 对工件台 100 nm 的定位精度需求。因此为满足大尺寸基板高精度 TP 测量需求, 需设计一定的测量方案, 对以上非自由度方向的运动误差进行实时测量和补偿, 以保证 TP 标记位置测量的准确性。激光干涉仪作为高精度测量系统, 常用于高精度运动台的位置测量与控制^[6-7]。文中采用激光干涉仪测量系统对非自由度方向的运动误差进行测量和补偿。

3.1 光学测量载台运动误差测量

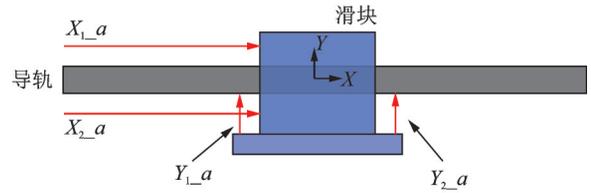
图8为光学测量载台运动位置测量的激光干涉仪光路布局示意图, 共布置6轴干涉仪测量光束, 实现了光学测量载台自由度运动误差和非自由度运动误差的测量^[8]。其中 X_{3_a} 用于光学测量载台 X 轴运动位置测量与闭环控制, X_{2_a} 和 X_{3_a} 组合用于光学测量载台俯仰运动误差 Ry_a 的测量, X_{1_a} 和 X_{2_a} 组合用于光学测量载台侧摆运动误差 Rzx_a 的测量; Y_{1_a} 和 Y_{3_a} 组合用于光学测量载台旋转运动误差 Rx_a 的测量, Y_{1_a} 和 Y_{2_a} 组合用于测量 X 向运动导轨直线度误差 dy_a 和侧摆运动误差 Rzy_a ^[1]。上述运动误差测量值用式(1)表示, 式中 Cx_{23} 为干涉仪 X_{2_a} 测量轴和 X_{3_a} 测量轴之间的间距, Cx_{12} 为干涉仪 X_{1_a} 测量轴和 X_{2_a} 测量轴之间的间距, Cy_{12} 为干涉仪 Y_{1_a} 测量轴和 Y_{2_a} 测量轴之间的间距。

干涉仪 Y_{1_a} 测量轴和 Y_{3_a} 测量轴之间的间距, Cy_{12} 为干涉仪 Y_{1_a} 测量轴和 Y_{2_a} 测量轴之间的间距。

$$\begin{aligned}
 x_a &= X_{3_a} \\
 Ry_a &= (X_{2_a} - X_{3_a}) / Cx_{23} \\
 Rzx_a &= (X_{1_a} - X_{2_a}) / Cx_{12} \\
 Rx_a &= (Y_{1_a} - Y_{3_a}) / Cy_{13} \\
 Rzy_a &= (Y_{1_a} - Y_{2_a}) / Cy_{12} \\
 dy_a &= (Y_{1_a} + Y_{2_a}) / 2
 \end{aligned} \quad (1)$$



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图8 光学测量载台激光干涉仪测量光束布局示意图

Fig.8 Schematic of optical measurement stage laser interferometer measurement beam layout

3.2 光学测量载台运动误差补偿

基于3.1节中光学测量载台激光干涉仪测量光束布局及运动误差测量原理, 公式(2)给出了光学测量载台在 X、Y 向的运动位置数学表达式^[9-10], 该表达式对光学测量载台在非自由度方向的运动误差对其在 X、Y 向的运动位置影响进行补偿修正, 减小光学测量载台由于非自由度运动误差对 TP 测量精度的影响。

$$\begin{aligned}
 X_{om} &= -X_{3a} - \frac{1}{2} (2Kx_a - \frac{1}{2} \cdot kx_a - X_{om-}) \times \\
 &\quad (Ry_a^2 + Rzx_a^2) - Rx_a \times Ry_a \times ee_a + \\
 &\quad ax_a \times Ry_a - ee_a \times Rzx_a \\
 Y_{om} &= \frac{1}{2} (Y_{1a} + Y_{2a}) - Rx_a \times Ry_a \times X_{om-} + \\
 &\quad Rzy_a \times (dd_a - X_{om-}) + Rx_a \times (Z_{om-} - ay_a) + dy_a
 \end{aligned} \quad (2)$$

如图 9 所示, X_{3a} 为光学测量载台 X_{3a} 轴干涉仪实际测量值, 该轴为光学测量载台实际运动控制轴; Kx_a 为光学测量载台 X 向干涉仪 X_{1a} 和 X_{2a} 检波面到光学测量载台运动零位(光学测量载台 $x=0$ 时刻的位置)的 X 向距离, kx_a 为光学测量载台 X 向 X_{1a} 和 X_{2a} 反射镜工作面到光学测量载台物理中心的 X 向距离的两倍; Ry_a 、 Rzx_a 、 Rzy_a 、 Rxa 和 dy_a 分别为表 1 所述的运动误差; ee_a 为光学测量载台 X 向干涉仪 X_{3a} 光束中心线与光学测量载台旋转中心在 Y 方向上的偏移, 由于 X_{3a} 光束中心线与零位坐标的 X 轴不重合, 使得光学测量载台的旋转中心不是零位坐标系的原点, 当台子产生俯仰 Ry_a 、侧摆 Rzx_a 或旋转 Rxa 后, 由于干涉仪测得的光学测量载台位置实际也发生变化。式(2)中 X_{om} 、 Y_{om} 、 Z_{om} 为当前时刻光学测量载台的运动位置, X_{om-} 为上一周期时台子的位置, $Rxa \times Ry_a \times ee_a$ 和 $Rzx_a \times ee_a$ 两项就是用于补偿 ee_a 机器常数对台子位置的影响; ax_a 为光学测量载台 X 向干涉仪 X_{1a} 与 X_{2a} 安装位置中心到测量基板上表面位置在 Z 向的距离, ax_a 对 X 向测量位置的影响与 ee_a 类似, 由于在 X-Z 平面内, 干涉仪光束不与零位坐标系的 X 轴重合, 导致旋转产生偏心, 台子位置由于此偏心距离 ax_a 的存在而产生变化, 式(2)中的 $ax_a \times Ry_a$ 用于补偿 ax_a 机器常数对台子位置的影响。

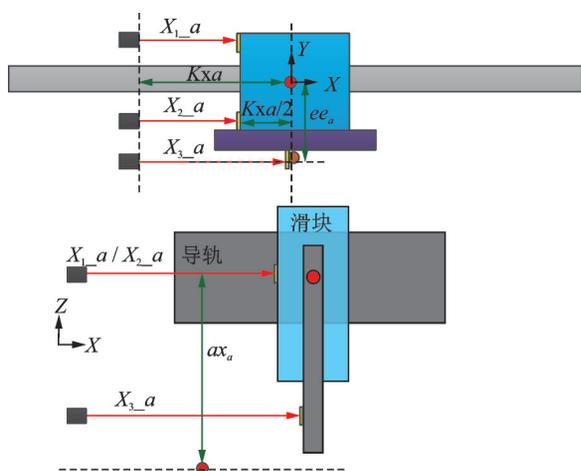


图 9 光学测量载台 X 向机器常数示意图

Fig.9 Schematic of X-direction machine constant of optical measurement stage

虽然光学测量载台无 Y 向的运动自由度, 但正如文中 2.1 节中分析, 由于运动中旋转、侧摆和导轨不平整度的存在, 光学测量载台在沿 X 向运动时会使光学测头产生沿 Y 向的位置误差, 从而影响 Y 向 TP 标记的测量精度^[11]。如图 10 所示, dd_a 为光学测

量载台 Y 向干涉仪 Y_{1a} 和 Y_{2a} 安装位置决定的中心与光学测量载台旋转中心在 X 方向上的偏移, ay_a 为光学测量载台 Y 向干涉仪 Y_{1a} 与 Y_{2a} 安装位置中心到测量基板上表面位置在 Z 向的距离, 公式(2)中 $Rzy_a \times dd_a$ 用于补偿侧摆产生的位置影响, $Rxa \times ay_a$ 用于补偿运动台旋转产生的位置误差, 另外 $(Y_{1a} + Y_{2a})/2$ 补偿由于 X 向运动导轨的不平整度而产生的 Y 向运动位置误差。

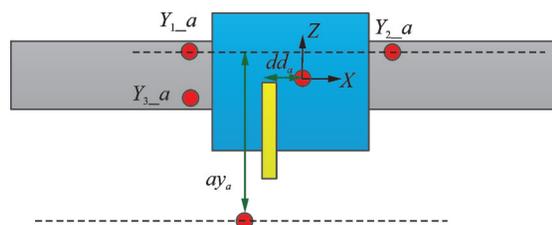


图 10 光学测量载台 Y 向机器常数示意图

Fig.10 Schematic of the Y-direction machine constant of the optical measurement stage

3.3 基板载台运动误差测量

图 11 为基板载台位置测量的激光干涉仪光路布局示意图, 共布置 6 轴干涉仪测量光束, 实现了基板载台自由度运动误差和非自由度运动误差的测

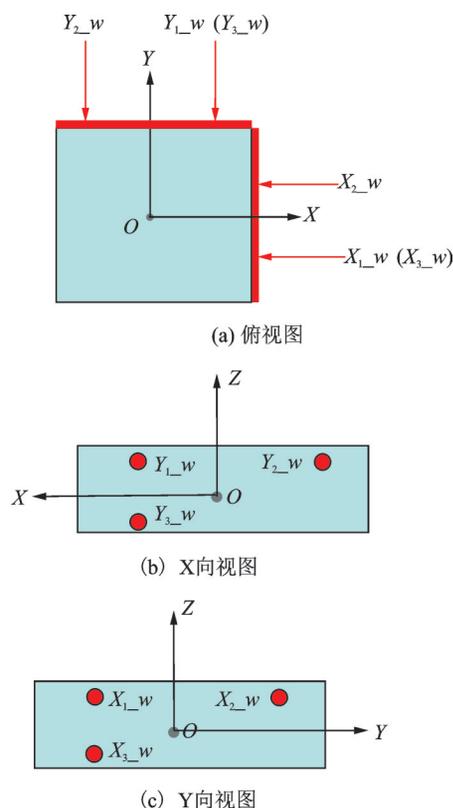


图 11 基板载台激光干涉仪测量光束布局示意图

Fig.11 Schematic of the measurement beam layout of the substrate stage laser interferometer

量^[12]。其中测量光束 Y_{1_w} 和 Y_{2_w} 联合进行基板载台 Y 方向的位置测量及闭环运动控制,同时 Y_{1_w} 和 Y_{2_w} 组合也用于基板载台侧摆运动误差 Rzy_w 的测量;测量光束 Y_{1_w} 和 Y_{3_w} 组合进行基板载台俯仰运动误差 Rx_w 的测量;测量光束 X_{1_w} 和 X_{3_w} 组合进行基板载台旋转运动误差 Ry_w 的测量, X_{1_w} 和 X_{2_w} 组合测量 Y 运动导轨的不平整度误差 dx_w 及侧摆运动误差 Rzx_w 。上述运动误差测量值用式(3)表示,式中 Cy_{12} 为干涉仪 Y_{1_w} 测量轴和 Y_{2_w} 测量轴之间的间距, Cy_{13} 为干涉仪 Y_{1_w} 测量轴和 Y_{3_w} 测量轴之间的间距, Cx_{13} 为干涉仪 X_{1_w} 测量轴和 X_{3_w} 测量轴之间的间距, Cx_{12} 为干涉仪 X_{1_w} 测量轴和 X_{2_w} 测量轴之间的间距。

$$\begin{aligned} Y_w &= (Y_{1_w} + Y_{2_w})/2 \\ Rzx_w &= (X_{1_w} - X_{2_w})/Cx_{12} \\ Rzy_w &= (Y_{1_w} - Y_{2_w})/Cy_{12} \\ Rx_w &= (Y_{1_w} - Y_{3_w})/Cy_{13} \\ Ry_w &= (X_{1_w} - X_{3_w})/Cx_{13} \\ dx_w &= (X_{1_w} + X_{2_w})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

3.4 基板载台运动误差补偿

基于 3.3 节基板载台干涉仪布局及运动误差测量原理^[13],公式(4)给出了基板载台 Y 向和 X 向测量位置的数学表达式,该表达式对基板载台在非自由度方向的运动误差对其在 Y 向和 X 向的测量位置影响进行了补偿修正,减小基板载台由于非自由度运动误差对 TP 测量精度产生的影响^[14]。

$$\begin{aligned} Y_{ws} &= \frac{1}{2} (Y_{1w} + Y_{2w}) + \frac{1}{2} (2Ly_w - \frac{1}{2} \times ly_w + Y_{ws-}) \times \\ & \quad (Rx_w^2 + Rzy_w^2) + ay_w \times Rx_w + dd_w \times Rzy_w \\ X_{ws} &= -\frac{1}{2} (X_{1w} + X_{2w}) - (Kx_w - \frac{1}{4} \times kx_w) \times \\ & \quad (Ry_w^2 + Rzx_w^2) - Rx_w \times Ry_w \times ee_w - ax_w \times Ry_w - \\ & \quad ee_w \times Rzx_w + dx_w \end{aligned} \quad (4)$$

如图 12 所示, Y_{1_w} 和 Y_{2_w} 为基板载台沿 Y 向运动的主控测量轴,式中 $\frac{1}{2}(Y_{1w} + Y_{2w})$ 为基板载台实际闭环运动测量位置; Ly_w 为基板载台 Y 向干涉仪 Y_{1_w} 和 Y_{2_w} 检波面到基板载台运动原点(基板载台 $y=0$ 时刻的位置)的 Y 向距离, ly_w 为基板载台 Y 向测量反射镜到基板载台中心 y 向距离的两倍; dd_w 为基板载台 Y 向干涉仪 Y_{1_w} 与 Y_{2_w} 安装位置的中心与基板载台运动原点在 X 方向上的偏移,由于 Y_1 、 Y_2 光束的中心线与零位坐标系存在间距 dd_w ,使得台子的旋转中心不与零位原点重合,当台子发生

旋转($Rzy_w \neq 0$)时,台位置会发生变化。式(4)中, Y_{ws} 、 X_{ws} 为当前时刻基板载台在 Y 向和 X 向的位置, Y_{ws-} 为上一周期时台子的 Y 向位置,模型中 $dd_w \times Rzy_w$ 项用于补偿基板载台侧摆对位置的影响。 ay_w 为基板载台 Y 向干涉仪 Y_1 与 Y_2 安装位置中心到测量基板上表面的 Z 向距离,与 dd_w 的影响相类似,由于 ay_w 的存在,在零位坐标系的 Y-Z 平面内,干涉仪光束与 Y 轴不重合,存在长度为 ay_w 的偏移;当台子绕 X 轴旋转一个角度 Rx_w 时,会导致台位置在 Y 向产生变化,模型中 $ay_w \times Rx_w$ 项就是为了补偿此影响所导致的测量误差。

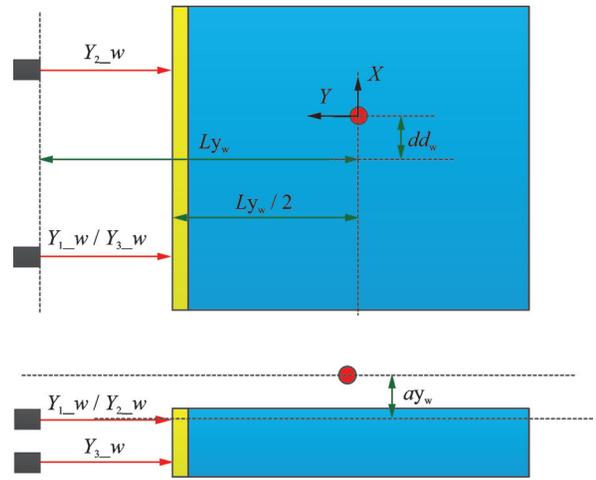


图 12 基板载台 Y 向机器常数示意图

Fig.12 Schematic of substrate stage Y-direction machine constant

与光学测量载台类似,虽然基板载台无 X 向的运动自由度,但正如文中第 2.2 节中分析,由于运动中旋转、侧摆和导轨不平整度的存在,基板载台在沿 Y 向运动时会使 TP 测量标记产生沿 X 向的位置误差。如图 13 所示, ee_w 为基板载台 X 向干涉仪 X_{1_w} 和 X_{2_w} 安装位置决定的中心与基板量载台旋转中心在 Y 方向上的偏移, ax_w 为光学测量载台 X 向干涉仪 X_{1_w} 与 X_{2_w} 安装位置中心到被测基板上表面位置在 Z 向的距离,公式(4)中, $Rzx_w \times ee_w$ 用于补偿侧摆产生的 X 向位置影响, $Rx_w \times Ry_w \times ee_w$ 和 $Ry_w \times ax_w$ 用于补偿基板载台旋转产生的 X 向位置误差,另外 $(X_{1w} + X_{2w})/2$ 补偿 Y 导轨的不平整度产生的 X 向位置误差。

4 运动误差试验测试数据及结果分析

基于 3.1 节和 3.3 节所述激光干涉仪测量系统,

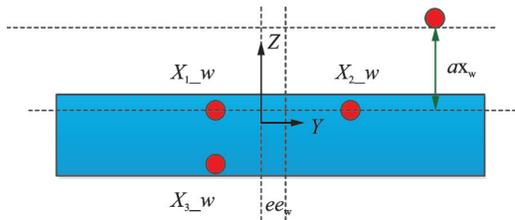


图 13 基板载台 X 向机器常数示意图

Fig.13 Schematic of the X-direction machine constants of the substrate stage

可以实时得到光学测量载台和基板载台运动自由度方向和非自由度方向的运动误差,然后对基板上 TP 测量点的测量结果进行修正,最终实现了高精度 TP 测量的需求。

4.1 运动误差测量

以 4.5 代尺寸玻璃基板为例,对于光学测量载台,在 X 向运动导轨 $-400\text{ mm}\sim+500\text{ mm}$ 行程范围内,以固定步距 60 mm 均匀选取 15 个测量点;对于基板载台,在 Y 向运动导轨 $-480\text{ mm}\sim+720\text{ mm}$ 行程范围内,以 100 mm 步距均匀选取 15 个测量点,基于表达式(1)和表达式(3),分别得到 X、Y 运动轴在各个测量点位置处的非自由度误差。

图 14 为光学测量载台非自由度误差测量结果,

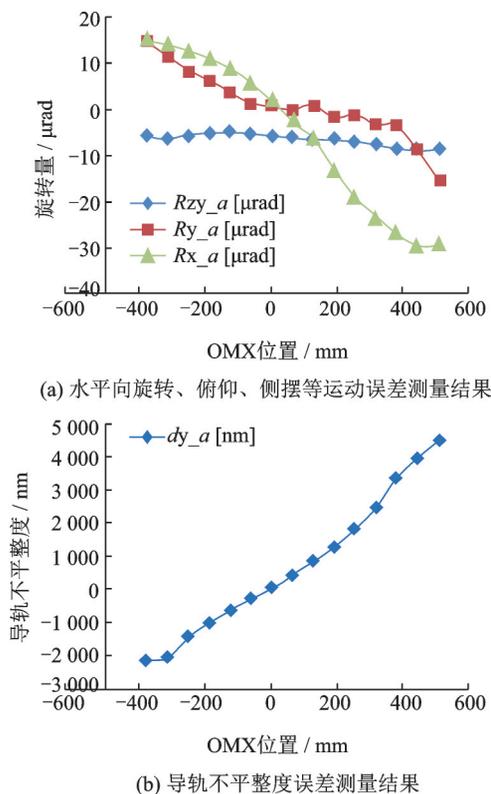


图 14 光学测量载台非自由度误差测量结果

Fig.14 Measurement results of non-freedom error of optical measurement stage

其中横轴为 X 向运动位置,纵轴为非自由度误差大小,从图可以看出俯仰运动误差 Ry_a 达到 $-15\text{ }\mu\text{rad}$,侧摆运动误差 Rx_a 达到 $-9\text{ }\mu\text{rad}$,水平向旋转误差 Rzy_a 达到 $-30\text{ }\mu\text{rad}$,导轨不平度 dy_a 达到 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上,基于表 1 所列数学表达式和表 2 光学测量载台非自由度误差对 X、Y 向 TP 测量结果影响,如果不对非自由度误差进行校正,将不满足当前的高精度测量需求。

图 15 为基板载台非自由度方向的运动误差,可以看出俯仰运动误差 Rx_w 达到 $-105\text{ }\mu\text{rad}$,侧摆运动误差 Ry_w 达到 $-317\text{ }\mu\text{rad}$,水平向旋转误差 Rzx_w 达到 $28\text{ }\mu\text{rad}$,Y 运动导轨直线度误差 dx_w 接近 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。可见,非自由度误差对测量结果的准确性影响量级在几十 μm 级。

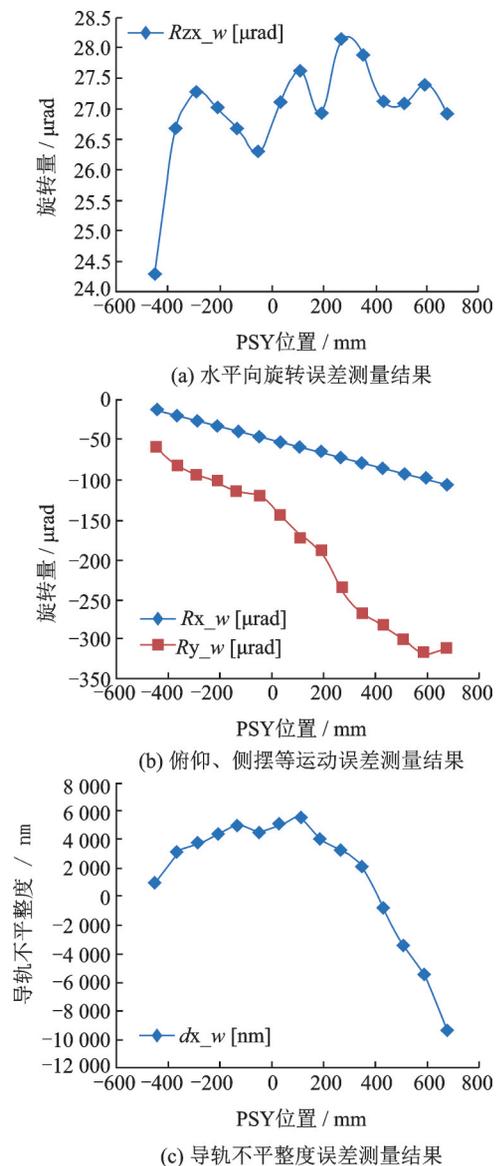


图 15 基板载台非自由度误差测量结果

Fig.15 Measurement results of non-freedom error of substrate stage

4.2 运动误差测量重复性

运动误差测量的重复性决定了运动误差补偿的精度,运动误差测量的重复性越差,运动误差补偿后的残差就越大,对TP测量精度的影响也就越大;相反如果运动误差测量的重复性越好,则运动误差补偿后的残差就越小,对TP测量精度的影响也就越小。

图16给出了光学测量载台在自由度和非自由度方向的测量重复性,其中X向运动定位控制精度20 nm,俯仰运动误差 Ry_a 最大0.6 μrad ,侧摆运动误差 Rzx_a 最大0.15 μrad ,旋转运动误差 Rx_a 最大0.1 μrad ,X导轨不平整度 dy_a 最大55 nm;将测得的非自由度误差测量重复性数值带入到数学表达式(2)中,得到光学测量载台X向运动定位精度在70 nm,Y向运动定位精度在90 nm(ax_a, ay_a 量级100 mm, ee_a 量级120 mm)。

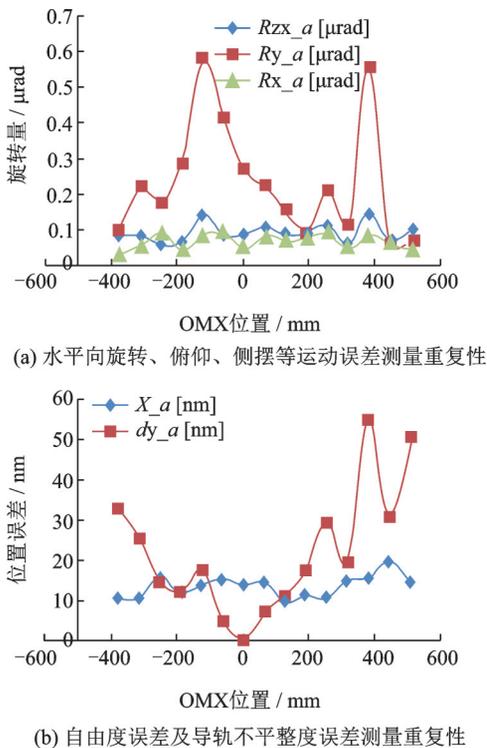
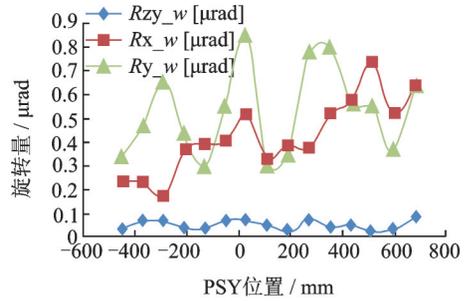


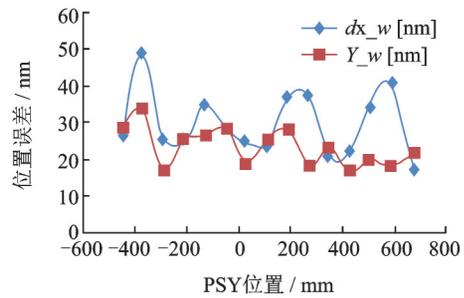
图16 光学测量载台在自由度和非自由度方向的测量重复性
Fig.16 The measurement repeatability of the optical measurement stage in the degrees of freedom and non-degree of freedom directions

图17给出了基板载台在自由度和非自由度方向的测量重复性,其中Y向运动重复定位精度33 nm,俯仰运动误差 Rx_w 最大0.73 μrad ,侧摆运动误差 Rzy_w 最大不超过0.1 μrad ,旋转运动误差 Ry_w 最大0.85 μrad ,Y导轨不平整度 dx_w 最大50 nm;将测得的非自由度误差测量重复性数值带入到

数学表达式(4)模型计算公式中,得到光学测量载台Y向运动定位精度在35 nm,X向运动定位精度在60 nm(ax_w, ay_w 量级10 mm, dd_w, ee_w 量级10 mm)。



(a) 水平向旋转、俯仰、侧摆等运动误差测量重复性



(b) 自由度误差及导轨不平整度误差测量重复性

图17 基板载台在自由度和非自由度方向的测量重复性
Fig.17 The measurement repeatability of the substrate stage in the degrees of freedom and non-degree of freedom directions

从测试数据可以看出,基于激光干涉仪对光学测量载台及基板载台的非自由度误差进行测量的重复性非常高,因此由非自由度误差的测量重复性而引入的TP测量误差非常小。

4.3 长寸测量精度

为了比较非自由度误差补偿与否对TP测量精度的影响,试验用4.5代标准玻璃基板测试了非自由度误差补偿关闭和打开两种工况下的TP测量精度,以进一步测试验证非自由度误差对TP测量精度的影响;标准玻璃基板指玻璃基板上任意一个TP标记的实际位置相对其名义位置偏差都很小,可认为标准玻璃基板TP标记的实际位置就是其名义位置;如图18(a)所示,TP精度测量时在标准玻璃基板上均匀选取6行4列24个TP测量标记,两种工况下每个点的位置依次测量,得到每个TP标记实际位置相对名义位置的偏差。

从图18(b)可以看出,非自由度误差补偿关闭的情况下,X向最大误差-1.608 μm ,Y向最大误差0.507 μm ;非自由度误差补偿打开的情况下,如图18(c),X向最大误差-0.187 μm ,Y向最大误差

0.211 μm ;从数据不难看出,只有在非自由度误差补偿打开的情况下,TP测量精度才能满足指标需求。

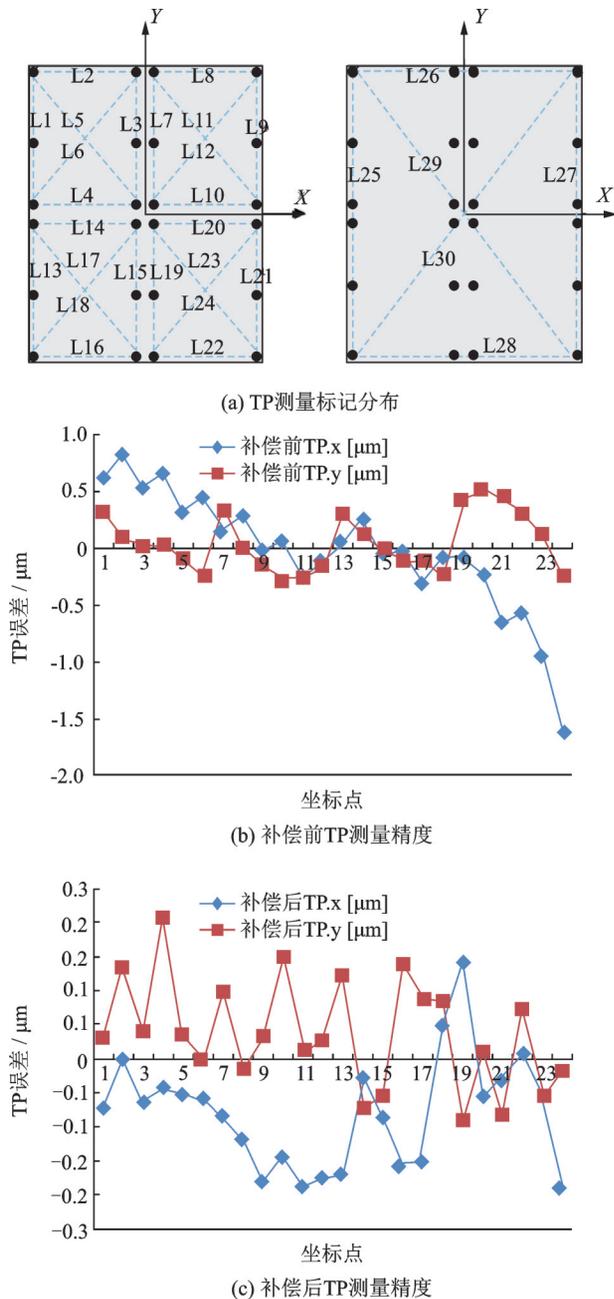


图 18 TP 标记位置测量精度结果

Fig.18 Measurement accuracy results of TP mark position

5 结束语

文中研究分析了高精度平板长寸测量设备中工件台运动误差对TP测量精度的影响机理,基于桥式结构设计了一种共光路可多自由测量的激光干涉仪测量系统,给出了激光干涉仪测量光束结构布局及工件台非自由度误差测量原理及补偿模型,通过激光仪实时测量运动台在运动过程中产生的

非自由度误差并将其补偿到TP标记测量位置中,从而进一步提高长寸测量设备的TP测量精度。通过搭建测试平台,基于4.5代TFT基板测试了工件台非自由度误差大小及其测量的重复性,进一步分析了非自由度误差对TP测量结果的影响,并对测试了相同测试条件、相同测试对象下,在非自由度误差补偿关闭和打开两种工况下,对TP测量精度的影响。测试数据表明,对于大尺寸高精度长寸测量设备,工件台非自由度误差对TP测量精度影响很大,只有利用高精度激光仪对工件台运动过程中所产生的非自由度误差进行实时测量且补偿到当前工件台运动位置中,才能满足平板长寸测量设备对高TP测量精度的工艺需求。

参 考 文 献

- [1] 卢林林. 高速高精度运动平台误差分析与精度补偿方法研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2019.
- [2] Zhang L F, Long Z L, Cai J D, et al. Active vibration isolation of macro-micro motion stage disturbances using a floating stator platform[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 354: 13-33.
- [3] 缪东晶, 李建双, 李连福, 等. 大长度激光测量中阿贝误差消除方法的研究[J]. *计量学报*, 2015, 36(6): 570-574.
- [4] 黄 欢. 三维超精密运动平台性能分析及误差补偿的研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [5] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64(2): 773-796.
- [6] Hu C, Hu Z, Zhu Y, et al. Advanced GTCF-LARC contouring motion controller design for an industrial X-Y linear motor stage with experimental investigation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3308-3318.
- [7] Du S, Hu J, Zhu Y, et al. Analysis and compensation of synchronous measurement error for multi-channel laser interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 055201.
- [8] 张国雄, 李杏华, 林永兵. 多路法激光跟踪干涉测量系统的研究[J]. *天津大学学报*, 2003, 36(1), 23-27.
- [9] 滕启伟, 周云飞, 穆海华, 等. 超精密运动台激光测量模型及误差补偿算法[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(2), 1492-1497.
- [10] 程吉水. 工件台激光干涉仪测量误差模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [11] Li C, Chen Z, Yao B. Adaptive robust synchronization control of a dual-linear-motor-driven gantry with rotational dynamics and accurate online parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(7): 3013-3022.
- [12] Lu Linlin, Sun Peng, Xu Linsen, et al. Adaptive robust motion control for linear induction motor with electromagnetic nonlinearity compensation [J]. *Asian Journal of Control*, 2019, 21(5): 1-10.
- [13] 宋 磊. 光刻机工件台六自由度测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] Gao Zhenyu, Hu Jinchun, Zhu Yu. A new 6-degree-of-freedom measurement method of X-Y stages based on additional information[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3), 606-620.