

文章编号 1004-924X(2016)05-1065-07

大行程纳米级定位工作台的结构设计

陈 琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:考虑采用静态三步拼接曝光法的扫描干涉场曝光系统的性能与工作台的定位精度及稳定性相关,设计了一种大行程、高精度二维工作台以提高其定位精度。采用摩擦驱动和压电陶瓷微位移机构组合的方式构成宏、微进给机构,由闭式气体静压导轨带动工作台实现沿 X、Y 两个方向的光栅分度与扫描运动。优化设计了摩擦驱动机构和气体静压导轨结构,并对工作台整体结构固有频率进行了有限元分析。使用自准直仪检测了导轨在 X、Y 方向的直线性,结果显示其两方向偏航和俯仰精度均在 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 以内。使用激光干涉仪检测了导轨在 X 方向的定位精度和定位噪声,结果表明,对 X 向行程为 220 mm、Y 向行程为 300 mm 的工作台,其 X 方向的定位精度优于 $\pm 5 \text{ nm}$,定位稳定性可达 $\pm 25 \text{ nm}$ 。得到的结果满足扫描干涉场曝光系统工作台纳米级定位精度的要求。

关键词:扫描干涉光刻系统;高精度工作台;气体静压导轨;摩擦驱动;纳米级定位

中图分类号:TH703;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1065

Structure design of nanometer positioning stage with a large stroke

CHEN Qi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: chenqi@ciomp.ac.cn

Abstract: As the performance of a scanning interference field lithographic system using static three-step splicing exposure method is related to the positioning accuracy and stability, this paper designs a 2D positioning stage with a large stroke to achieve high positioning accuracy. The friction drive and piezoelectric ceramic micro displacement mechanism were combined to form a macro-micro feed mechanism. A closed gas hydrostatic guideway was used to drive the stage to implement the raster indexing and scanning movement along X, Y directions. The friction driving mechanism and aerostatic bearing structure were optimally designed in detail, and the natural frequency of overall structure of the stage was calculated by finite element analysis. An autocollimator was used to test the linearity of the guideways in X, Y directions, and results show that yaw and pitch accuracy in both directions are within $\pm 0.04 \mu\text{m}$. A laser interferometer was taken to detect the positioning accuracy and positioning noise of the guideway in X direction and the result shows that for the stage with a stroke of 220 mm in X direction and 300 mm in Y direction, the positioning accuracy of X direction is better than $\pm 5 \text{ nm}$, and the positional stability is better than $\pm 25 \text{ nm}$, meeting the requirements of scanning interference field exposure system stage for nanometer positioning precision.

Key words: scanning interference lithographic system; high-precision stage; gas hydrostatic guideway; friction drive; nanometer positioning

收稿日期:2015-10-21;修订日期:2015-12-05.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 61227901)

1 引言

在现代先进装备制造业和科学研究领域,大行程与高精度的超精密工作台起着重要的作用。其技术指标是各国精密、超精密领域发展水平的重要体现^[1-2]。

近年来国内外研究机构在大行程与高精度超精密工作台结构设计方面进行了大量的研究。法国 Compiègne 工业大学的 Samir Mckid 等人研制了摩擦驱动工作台,工作台自重为 100 kg,行程为 220 mm,定位精度达到 16 nm^[3];上海大学李鸣鸣等人采用滚动导轨做支撑组成宏定位工作台,压电陶瓷结合柔性铰链组成微动工作台,实现了行程为 100 mm、定位精度为 10 nm 的大行程纳米定位工作台^[4];以上研究均在较大行程基础上实现了较高的定位精度。为了达到更高的定位精度,东京工业大学的 Shinno 等人采用直线电机进行粗定位,音圈电机精密定位,成功研制了混合直线电机驱动的两级驱动大行程超精密平台,该平台行程为 80 mm,定位精度为 5 nm^[5]。东京工业大学的 Mao J 等采用直线电机和空气静压丝杠结合的方式研制了超精密二维工作台,其定位精度可达 2 nm,但是两方向行程仅为 18 mm^[6-7]。从以上文献可以看出,同时实现大行程与高精度的超精密工作台设计仍存在以下技术难度:工作台导轨要具有较高直线运行精度、运动平稳性及良好的动态特性;驱动机构要求具有较高的分辨力,且宏、微进给运动的行程及精度要匹配;在较大负载状态下,系统惯性质量会对高精度定位带来不利影响,系统启动、停止段也会对工作台带来振动和冲击。

针对以上技术难点,本文对大行程、高精度二维工作台进行结构设计,用于扫描干涉场曝光系统中光栅基底的 X、Y 两维运动。采用摩擦驱动结合 PI 压电陶瓷构成宏、微驱动机构,并合理匹配宏、微运动行程及精度,实现工作台大行程运动及较高的定位精度;采用高精度直线运动的封闭式气体静压导轨副,实现工作台良好的运行平稳性及较好的动态特性,以提高其定位精度。工作台 X 向和 Y 向行程分别为 220 mm 和 300 mm,且要求在负载 120 kg 情况下定位精度优于 ± 5 nm、定位稳定性优于 ± 25 nm。实验表明,此工作台

满足设计要求。

2 工作台结构设计

2.1 工作台整体结构

干涉场扫描曝光工作台采用上、下双层式二维结构,其结构如图 1 所示,主要由扫描工作台组件和驱动机构组成。其中,工作台组件主要由 X、Y 向封闭式气体静压导轨副和 Y 向工作台组成;X 向驱动机构由摩擦驱动机构和压电微位移机构组成,与 X 向导轨副组合实现沿光栅分度方向的高精密进给运动;Y 向驱动采用摩擦驱动机构,Y 导轨副及工作台组合实现干涉场曝光扫描运动。X、Y 向平晶用于激光干涉仪对工作台实时位置及状态的监测,是为光栅扫描曝光工作过程提供实际位置及姿态反馈数据,工作台的实际进给位置数据的监测是相对平晶上的固定点利用工作台的停止换向间歇过程中进行的。

2.2 摩擦驱动结构设计

相比于传统的精密进给丝杠和直线电机驱动机构,采用摩擦驱动机构在实现超精密进给运动和获得更高的速度平稳性等方面具有较大的优越性。其传动结构简单,运动平稳,无回程误差,定位精度高,能够较好地解决大行程和高分辨力问题^[8-10]。

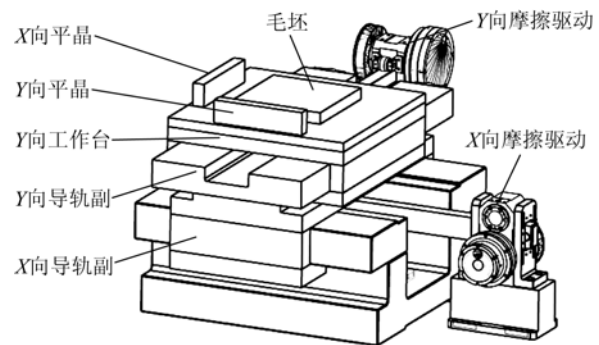


图 1 工作台整体结构

Fig. 1 Overall structure of stage

为保证干涉场扫描曝光工作台具有较高的运动平稳性及超精密精确定位,X、Y 向驱动方式均采用摩擦驱动。为保证 X 向进给驱动实现超精密精确定位,并在其周期测量过程实现超调量补偿运动,所以在 X 摩擦驱动的基础上增加压电陶瓷微位移机构,形成宏、微复合式驱动机构。

X 向驱动机构基本组成如图 2 所示。在实际应用过程中,摩擦驱动宏运动位置达到后停止运动,再进行压电陶瓷微运动实现超精密定位。整个运动过程中通过激光干涉仪实时监测工作台位置信息。

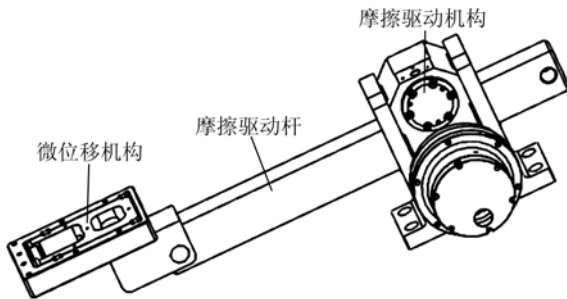


图 2 X 向驱动机构

Fig. 2 Driving mechanism in X direction

力矩电机通过 1 : 100 谐波减速器带动驱动轴转动,由驱动轴、辅助轴和摩擦杆之间的预压力产生摩擦牵引力,从而将回转运动转化为直线运动,该摩擦驱动机构可实现 0.1 μm 稳定的步进进给,其驱动机构如图 3 所示。

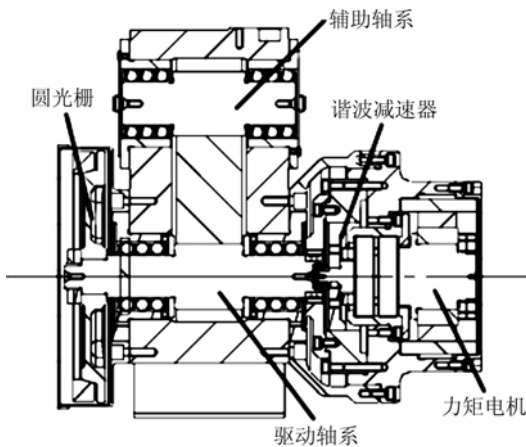


图 3 摩擦驱动机构

Fig. 3 Friction driving mechanism

压电陶瓷与柔性铰接机构构成微位移驱动系统,实现超调量的动态补偿及工作台 ±5 nm 的精确定位。柔性铰链机构通过联接轴及对置钢球与摩擦驱动杆联接,即可保证足够的进给刚度,又可减少摩擦驱动机构对静压工作台的扰动,提高工作台运行的平稳性及较高的直线运动精度。具体结构如图 4 所示。

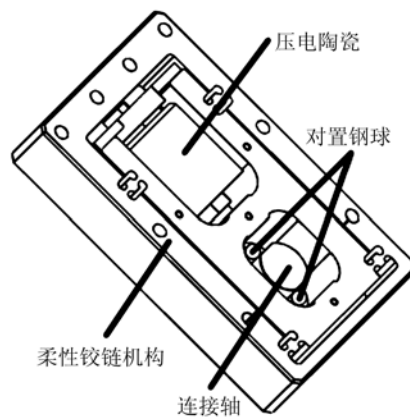


图 4 柔性铰接微位移机构

Fig. 4 Flexibility hinge joint micro displacement mechanism

为简化系统结构,驱动轮、辅助轮与摩擦杆之间采用了过盈配合的方式形成恒定的预压力,以保证摩擦牵引力的稳定、可靠,减少由于牵引力的波动为系统稳定性带来的不利影响。由摩擦驱动牵引力与预压力之间的关系^[13]为:

$$T = C \times P, \quad (1)$$

其中: T 为牵引力, P 为预压力, C 为牵引力系数 ($C \approx 0.15$)。

在考虑驱动轴系各部件的摩擦阻尼及摩擦驱动系统稳定工作的前提条件下,预压力 $P = 300 \text{ N}$ 。根据计算与实验结果,当过盈量约为 0.028 mm 时,正压力为 300 N,在实际设计中选取过盈量选为 0.025 ~ 0.03 mm。

2.3 气体静压导轨副结构设计

为保证二维工作台具有较高的精度, X、Y 向气体静压导轨副均采用闭式结构。闭式气体静压导轨具有运行平稳、振动小、系统响应高及摩擦力矩小等诸多优势,且在工作过程中热平衡性好、微位移定位过程无爬行现象、具有较高的抗倾覆的能力。气体静压的均化效应能较好提高元件刚度,并在相同工艺条件下可大幅度地提高导轨副的直线运行精度。定导轨采用花岗岩材料,其具有振动衰减性好,尺寸稳定性高、对温度变化的敏感性差等优点。

以 X 向导轨副详细结构为例,如图 5 所示。X 向气体静压导轨副由基座、定导轨、动导轨及工作台组成。X 向定导轨通过螺钉连接方式固定在基座上,动导轨由 1 块上板、2 块侧板及 2 块下板通过螺钉相互紧固,与定导轨组成闭式气体静压导轨副, X 向定导轨中 B、C 两面与 D、E 两面构成闭式气体静压腔工作表面,其中 B 面为主

要承载工作表面, D、E 两面为导轨导向工作表面。由于铅垂载荷特性, B、C 两面的平面度、平行度对导轨俯仰的运动精度起决定性作用。D、E 两工作表面的平面度、平行度对导轨水平方向直线精度起主导性作用。

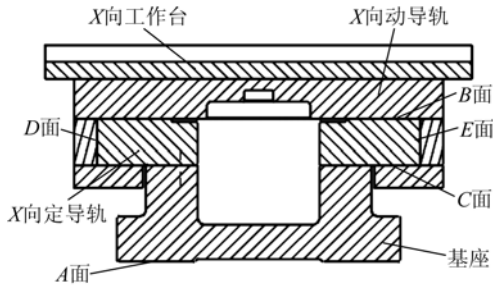


图 5 X 向气体静压导轨副
Fig. 5 X gas hydrostatic guideway

X、Y 导轨各静压腔均采用直径为 0.15 mm 小孔节流方式, 静压间隙选择均在 0.014 ~ 0.018 mm。X 导轨的承载能力为 1 506 N, 承载方向气膜刚度 267 N/ μm , 侧向气膜刚度为

148 N/ μm ; Y 导轨承载能力为 1 142 N, 承载方向气膜刚度为 282 N/ μm , 侧向气膜刚度 157 N/ μm 。

使用 Ansys 软件对工作台整体结构进行模态分析, 得到 X 向动导轨带动整体结构绕 Z 轴扭转振动的谐振频率为 107.2 Hz, 如图 6(a) 所示, X 向动导轨带动整体结构横滚振动的谐振频率为 282.5 Hz, 如图 6(b) 所示; Y 向动导轨带动台面绕 Z 轴的扭转振动的谐振频率为 392.8 Hz, 如图 6(c) 所示, Y 向动导轨的横滚的谐振频率为 560.0 Hz, 如图 6(d) 所示。模态分析表明该工作台具有良好的动态特性。

使用自准直仪对工作台 X、Y 向的直线性进行检测, 测得导轨 X 向偏航运动精度曲线如图 7(a) 所示, 在 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 以内, 俯仰运动精度曲线如图 7(b) 所示, 在 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 以内; Y 向偏航运动精度曲线如图 7(c) 所示, 在 $\pm 0.025 \mu\text{m}$ 以内, 俯仰运动精度如图 7(d) 所示, 在 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内。从实测结果中看到 X、Y 向导轨具有较好的直线性。导轨直线精度及其稳定性是对导轨定位精度的基本保障。

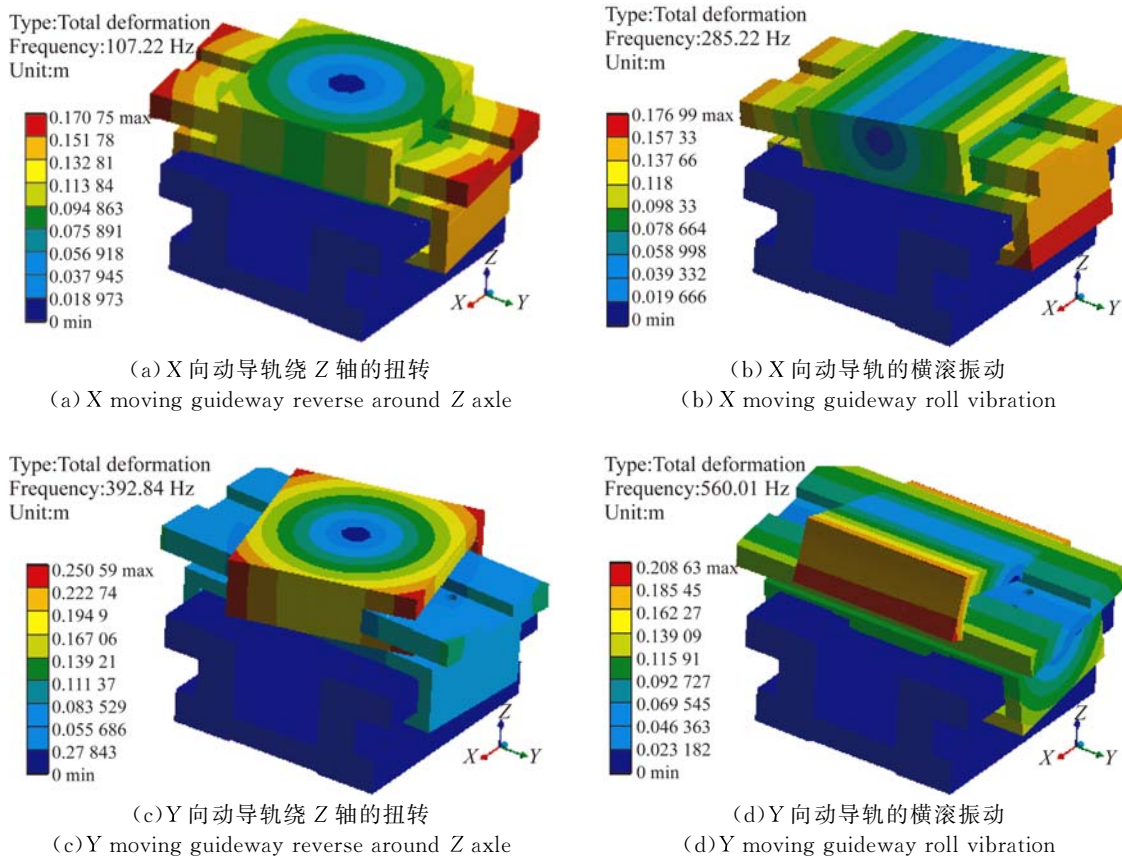


图 6 工作台固有频率及振型

Fig. 6 Natural frequencies and shapes of stage

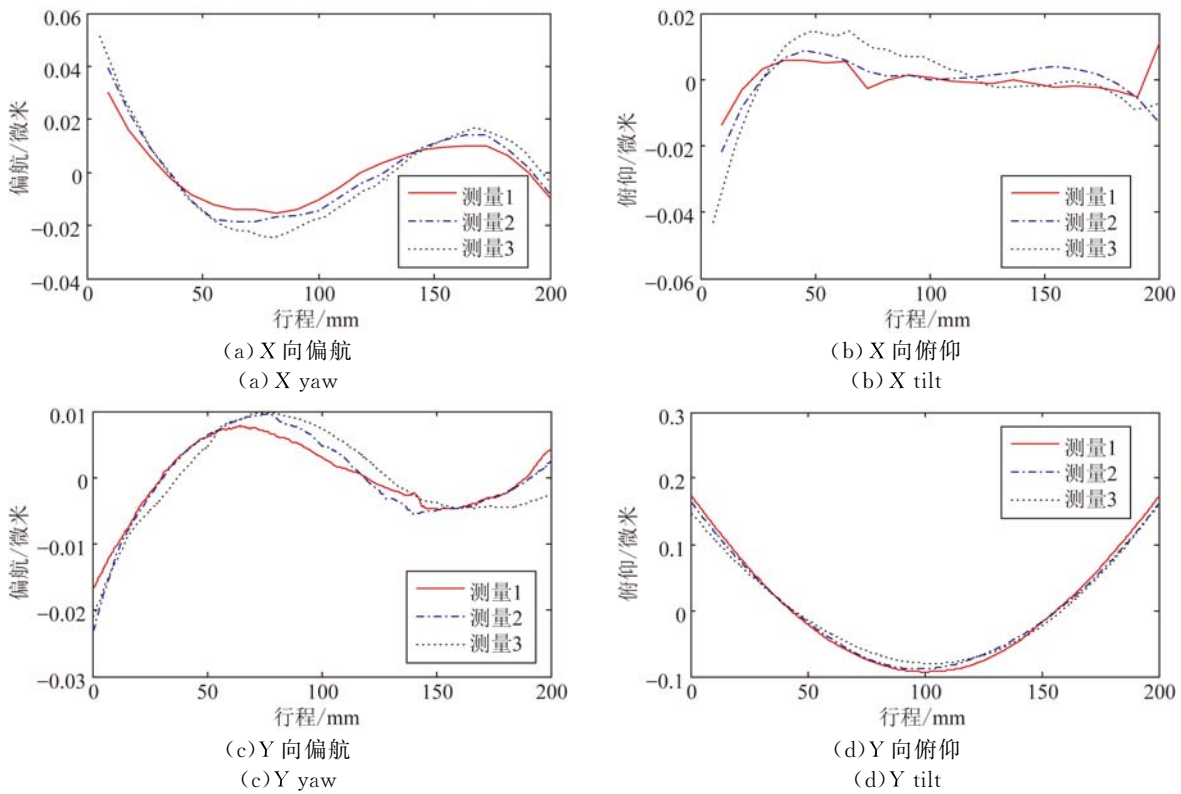


图 7 导轨直线性

Fig. 7 Linearity of guideways

3 工作台定位精度及噪声实验

3.1 X 向定位精度实验

工作台 X 向定位精度及噪声实验设备及对象如图 8 所示。实验中力矩电机驱动工作台沿 X 向导轨做步进进给运动,每步进给量为 1 mm。用安捷伦公司生产的型号为 5517D 的双频激光干涉仪对工作台 X 向进给运动进行实时位置监测,其测量分辨率可达 0.15 nm。

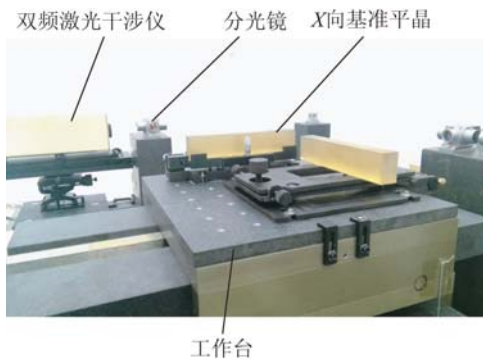


图 8 双频激光干涉仪测量

Fig. 8 Frequency laser interferometer measurement

步距进给量为 1 mm,共 20 步进给。双频激光干涉仪采得数据如图 9 所示。

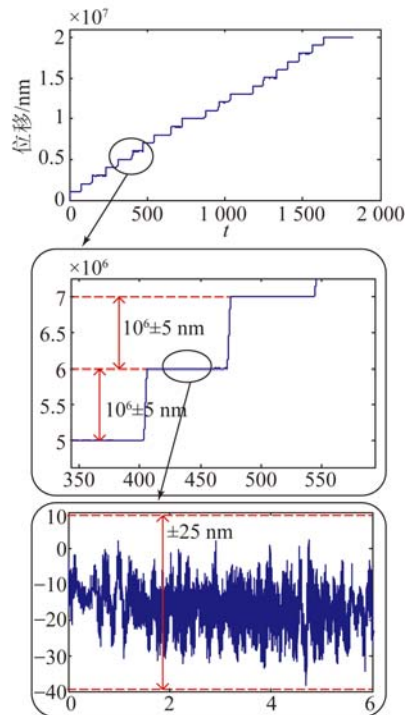


图 9 X 向工作台 1 mm 步进

Fig. 9 X stage of 1 mm stepping

3.2 X 向定位噪声及稳定性检测

应用双频激光干涉仪对 X 向工作台测量,以 60 Hz 采样频率进行数据采集,并对时域数据进

行傅里叶变换,表 1 所示为随机取 3 组激光干涉仪测量结果。

表 1 X 向定位噪声及稳定性检测曲线

Tab. 1 X locate noise and stability testing curve

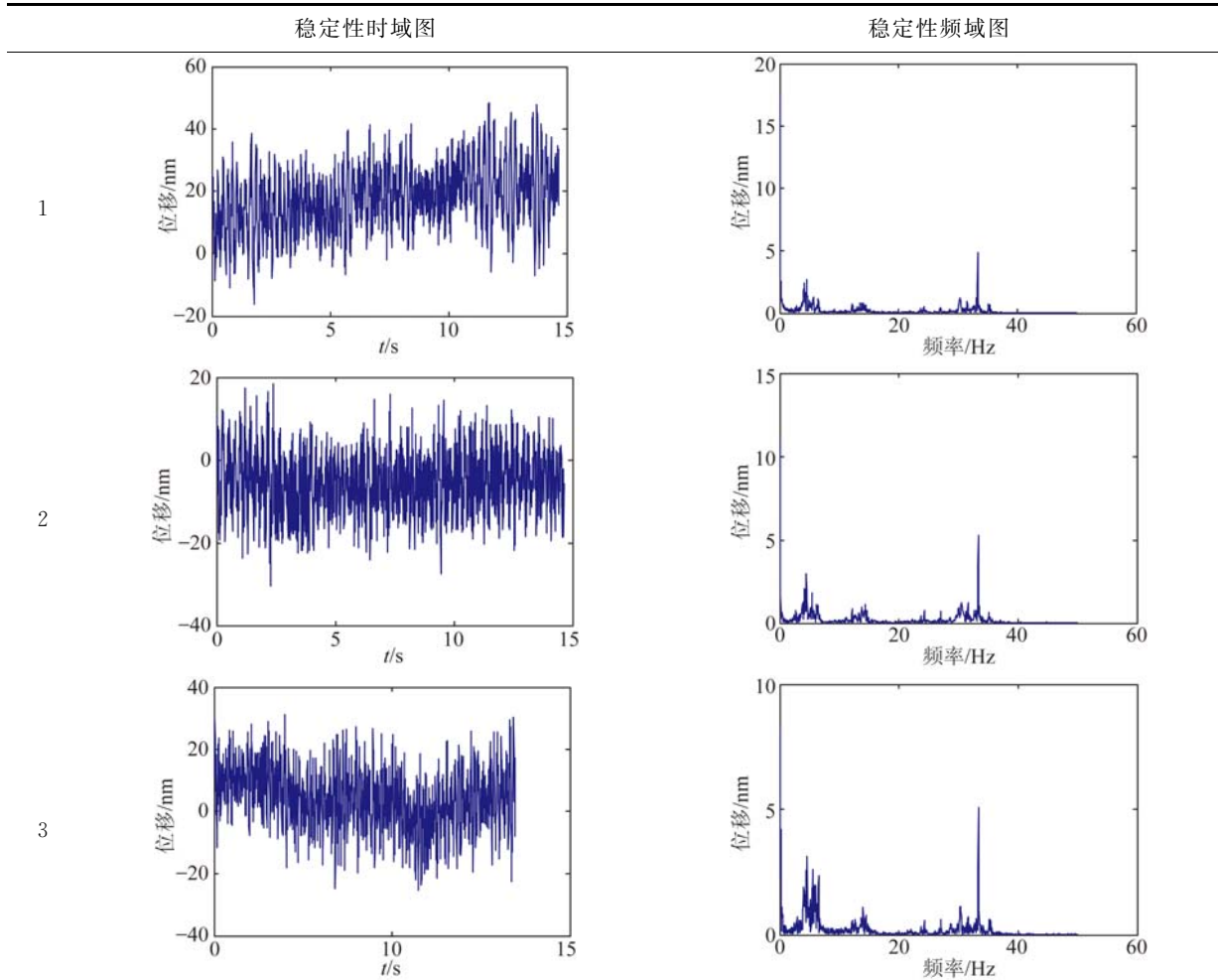


图 10 振动分析仪测量数据

Fig. 10 Vibration analyzer measurement data

从曲线中看出有 2 处主要的频率噪声,振动幅值约为小于 ± 25 nm。采用振动分析仪对工作

台周围环境进行测量如图 10 所示,环境存在 5.13 Hz 的噪声干扰,所以可以判断 5 Hz 的噪声主要源于环境因素。

4 结 论

本文采用摩擦驱动及压电微位移机构和气体静压导轨组合方式设计了一种大行程、高精度的扫描干涉场曝光系统工作台结构,将摩擦驱动的优点与气体静压导轨的优点得到了充分的利用。对摩擦驱动结构中的过盈量和气体静压导轨静压腔的设计满足了驱动牵引力和工作台承载的要

求。有限元分析和直线性测量结果表明该工作台结构具有良好的动态特性和导轨直线精度。实验结果表明,对 X 向行程为 220 mm、Y 向行程为

300 mm 的工作台, X 方向定位精度优于 ± 5 nm, 定位稳定性可达 ± 25 nm。满足扫描干涉场曝光系统工作台纳米级定位精度的要求。

参考文献:

- [1] 张晓峰,林彬. 大行程纳米级分辨率超精密工作台的发展方向[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(B11):179-183.
ZHANG X F, LIN B. Direction of ultraprecision stage with large travel and nanometer resolution [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(B11): 179-183. (in Chinese)
- [2] 谢卫东. 精密微位移工作台系统综述[J]. 自动化与仪器仪表, 1991, (1): 8-9.
XIE W D. Systematic reviews of precise micro-displacement working table [J]. *Automation & Instrumentation*, 1991, (1): 8-9. (in Chinese)
- [3] MEKID S. High precision linear slide. Part I: design and construction [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 243-246.
- [4] 李鸣鸣. 大行程纳米定位系统若干关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.
LI M M. *The Research on Some Key Techniques of Long stroke Nano-positioning System* [D]. Shanghai: Shanghai University, 2007. (in Chinese)
- [5] SHINNO H, HASHIZUME H. High speed nanometer positioning using a hybrid linear motor [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 243-246.
- [6] MAO J, TACHIKAWA H, SHIMOKOHBE A. Precision positioning of a DC-motor-driven aerostatic slide system [J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 32-41.
- [7] SHINNO H, HASHIZUME H, YOSHIOKA H, et al.. XY-0 nano-positioning table system for a motor machine [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(1): 337-340.
- [8] 张晓峰. 大行程超精密工作台关键技术研究[D]. 天津大学, 2005.
ZHANG X F. *Research on the Key Technology of Ultraprecision Stage with Large Travel* [D]. Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [9] 王国民, 姚正秋, 马礼胜, 等. 大型天文望远镜高精度摩擦传动的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 592-597.
WANG G M, YAO ZH Q, MA L SH, et al.. High precision friction drive of large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 592-597. (in Chinese)
- [10] 胡冰梅. 高刚度大载荷精密二维定位工作台关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
HU B M. *Research on Key Technologies of Precision Two-Dimensional Positioning Stage with High Stiffness & Large Load* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] SAMIR M. Precision design aspects for friction actuation with error compensation [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23: 2873-2884.
- [12] TAKAMASU K, FUJIWARA M, NAOI H, et al.. Friction drive system for nano-cmm [J]. *Proc. Mechatronics*, 2000(9): 21-23.
- [13] 陈琦. 精确可调单簧片式施压机构在摩擦驱动中的应用[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(1): 1-4.
CHEN Q. Research and application on precision adjustable leaf spring pressure mechanism for precision friction drive mechanism [J]. *Machine Design and Research*, 2015, 31(1): 1-4. (in Chinese)

作者简介:



陈琦(1961—),男,山东苍山人,研究员,硕士生导师,1983年于天津轻工业学院获得学士学位,主要从事精密机械、机械电子等研究。E-mail: chenqi@ciomp.ac.cn