

DOI: 10.13382/j.jemi.B2408074

# 二维运动台系统辨识与精密驱动控制\*

黄强先<sup>1,2</sup> 秦贤智<sup>1,2</sup> 张星月<sup>1,2</sup> 程荣俊<sup>1,2</sup> 张连生<sup>1,2</sup> 李红莉<sup>1,2</sup> 王超群<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009)

**摘要:** 为了满足精密测量和精密加工领域对定位系统高定位精度的要求,设计了一种基于系统辨识与精密驱动控制的亚微米精度 XY 二维运动台系统。该系统包括机械结构和控制系统,其中机械部分采用堆叠结构, X 轴运动台位于 Y 轴运动台之上,其运动由直线电机驱动,光栅传感器进行位置测量。为提高运动台精度和稳定能力,提出了一种基于频域法系统辨识的大行程二维运动台系统控制设计方法,通过在伺服系统中输入正弦激励信号,改变输入信号频率获取频率特性和传递函数,优化了  $K_{vi}$ -积分增益、 $K_{vp}$ -比例增益和  $K_{vf}$ -前馈增益等控制参数,进而实现了二维运动台的高精度运动。通过一系列验证实验对定位系统的性能进行了评估,二维运动台定位系统行程可达 240 mm×240 mm,重复定位精度优于 1.5  $\mu\text{m}$ ,驱动分辨率可达 40 nm。实验结果表明,所开发的亚微米级精度二维运动台系统表现出良好的重复性、稳定性,可应用于精密加工和精密测量等高端装备领域。

**关键词:** 二维运动台;驱动控制;系统辨识;直线电机;高精度

**中图分类号:** TP273; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.10

## System identification and precise drive control of two-dimensional motion stage

Huang Qiangxian<sup>1,2</sup> Qin Xianzhi<sup>1,2</sup> Zhang Xingyue<sup>1,2</sup> Cheng Rongjun<sup>1,2</sup>Zhang Liansheng<sup>1,2</sup> Li Hongli<sup>1,2</sup> Wang Chaoqun<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To meet the high positioning accuracy requirements of precision measurement and machining, a novel sub-micrometer precision XY two-dimensional motion stage system based on system identification and precision drive control method was designed. The system consists of a mechanical structure and a control system. The mechanical part adopts a stacked structure, with the X-axis motion stage located above the Y-axis motion stage, driven by a linear motor and positioned by a grating sensor. To improve the accuracy and stability of the motion stage, a control design method based on frequency domain system identification for large-stroke two-dimensional motion stage systems was proposed. By inputting sinusoidal excitation signals into the servo system and changing the input signal frequency to obtain frequency characteristics and transfer functions, the control parameters such as  $K_{vi}$ -integral gain,  $K_{vp}$ -proportional gain and  $K_{vf}$ -feedforward gain were optimized. Thus, the high-precision motion of the two-dimensional motion stage was realized. A series of verification experiments were conducted to evaluate the performance of the positioning system. The results show that the two-dimensional motion stage positioning system has a travel range of 240 mm×240 mm, a repeat positioning accuracy better than 1.5  $\mu\text{m}$ , and a drive resolution of up to 40 nm. The developed submicron two-dimensional motion stage system shows good repeatability and stability, can be applied to high-end equipment fields such as precision machining and precision measurement.

**Keywords:** 2D motion stage; drive control; system identification; linear motor; high precision

收稿日期: 2024-12-28 Received Date: 2024-12-28

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2004901)、国家自然科学基金(52305575)、安徽省自然科学基金(2208085ME137)、中央高校基本科研业务费(JZ2024HGTO196)项目资助

## 0 引言

随着现代科技的高速发展,对高精度运动控制的需求在不断增长,特别是在精密制造和半导体等领域,作为核心部件的大行程二维运动台,其定位精度和动态性能直接影响系统的加工质量与生产效率。精密运动系统集成了位置检测、驱动、导向与控制技术,是高精度运动控制的关键<sup>[1-4]</sup>。作为运动台的驱动元件之一,直线电机由于速度和加速度大、定位精度高、运动行程不受限制等优点,逐渐取代传统旋转电机。因此,研究直线电机驱动的运动台是精密加工和测量领域的热点<sup>[5-6]</sup>。

为了满足超精密加工要求,Kumar 等<sup>[7]</sup>提出了一种具有长行程运动的新型超精密运动台设计,采用 H 型配置,并通过空气轴承支撑以及光学线性编码器进行运动反馈,行程范围达 300 mm×300 mm。Lee 等<sup>[8]</sup>研制出一种混合型超声波直线电机用于长行程定位及连续运动控制的超精密 XY 工作台,X 轴行程±150 mm,载重 6 kg,Y 轴行程±50 mm,载重 3 kg,系统通过外部电感匹配方式调节谐振频率,以在低噪声和低发热条件下获得最佳运行状态。现有研究表明直线电机在二维运动台工程应用中以其直接驱动方式具备显著优势,但也面临着诸多电气控制层面的技术挑战<sup>[9-10]</sup>。直线电机某些控制器参数难以在理论的指导下进行设置,使其短时间内无法达到高定位精度要求,影响了运动平台的快速精密定位性能<sup>[11-12]</sup>。

为了获得电机的最佳控制参数,文献[13]提出基于辅助变量的辨识方法,但该方法得到的系统模型在较低的频带与实际系统并不匹配;文献[14]提出基于自适应同步参数辨识方法,但需要进行大量实时计算,对系统硬件要求高;文献[15]提出基于模型参数自适应参数辨识方法,该方法可以深入分析系统机理,但过程复杂,且难以准确反映实际动态特性。上述方法均在一定程度上提高了直线电机控制精度以及简便性<sup>[16-18]</sup>,然而这些方法在对大行程、高精度运动台控制需求时仍存在不足。

针对二维运动台高精度控制精度需求,本文提出了基于频域法系统辨识的大行程二维运动台系统高精度驱动控制设计方法。该方法不依赖先验模型信息,通过在伺服系统中将一系列正弦激励信号按照特定频率变化顺序先后作为输入信号,对系统的各个模态进行逐一激发,获取频率特性和传递函数,以此再对控制器的参数进行优化,从而提高运动台控制精度,最终设计并实现一种紧凑型、高性能的二维运动台,以满足现代精密加工和精密测量对运动控制系统的需求。

## 1 结构设计

大行程微米级二维运动台采用模块化设计,运动范围为 240 mm×240 mm。运动台整体结构示意图如图 1 所示,包括 X 轴导轨、Y 轴导轨及载物台,X 轴和 Y 轴运动台由直线电机直接驱动,无需中间传动机构,减少了累积误差,可提升定位的准确性。运动台结构采用上下堆叠的设计,Y 轴运动台置于下层。X 轴和 Y 轴导轨采用 THK 公司的高精度线性直线导轨,通过循环滚珠和合理的预紧力可提高传动的重复性和精度。导轨平行安装于花岗岩底座上,花岗岩材料具有低热膨胀系数和优良的热稳定性及抗振性能,保障了系统的整体稳定性和精度。滑块对称安装在导轨两侧,为两轴运动提供可靠的支撑和导向。

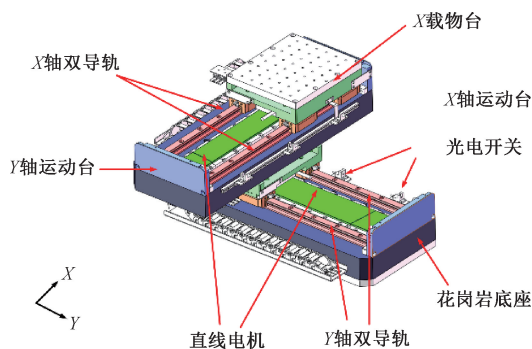


图 1 二维运动台整体结构

Fig. 1 Overall structure of the two-dimensional motion stage

X 轴上的载物台位置由光栅实时监测,直线电机根据光栅反馈的位置信息进行驱动,从而实现全闭环控制。同理,Y 轴结构采用了与 X 轴相似的设计方案。此外,在 X 和 Y 轴末端均设计了光电限位开关,防止电机过冲,确保运动台的安全运行。

## 2 控制系统设计

二维运动台直线电机控制系统框图如图 2 所示。主要由上位机、控制模块、反馈模块和驱动模块组成。上位机负责与运动控制器的通信,完成控制指令的发送以及系统状态数据的采集、存储和显示。上位机作为系统的管理中心,通过串口或网络接口向控制模块发送运动控制指令,同时实时监控系统状态。控制模块采用 ACS 公司型号为 SP 的运动控制器,其主要功能包括与上位机通信,接收控制指令并反馈系统运行状态、零点和限位判断、光栅尺信号的解码、直线电机运动模式的控制与转换、电机控制算法的实现。运动控制器根据预设的控制算法,结合反馈信息,对电机的运行进行精确调节,保证

系统的稳定性和响应速度。驱动模块主要采用直线电机驱动器,通过调节前馈伪微分反馈(pseudo derivative feedback with feed-forward,PDFF)控制参数,将控制信号输入到电机驱动器,驱动直线电机运动。反馈模块主要由直线光栅尺和光电开关组成,其中光栅尺用于获取直线电机的位置信息,光电开关则负责零点定位、左右限位以及方向判断等功能。运动台采用栅距为  $20\text{ }\mu\text{m}$  的直线光栅尺,结合读数头将光栅尺输出的正余弦模拟信号细分,转化为标准的 AB 相数字信号,并接入驱动模块。读数头内置真高速模拟数字转换器(analog to digital converter,ADC)细分电路,能够进行高精度信号细分,并具有较高的带宽能力,可有效降低细分过程中的噪声和误差。经过滤波处理后,系统在保持低位置噪声和平滑速度控制的同时,得出直线电机的相对位移量。通过零点定位和相对位移量,系统可以计算出直线电机的绝对位移量,为闭环控制提供精准反馈。

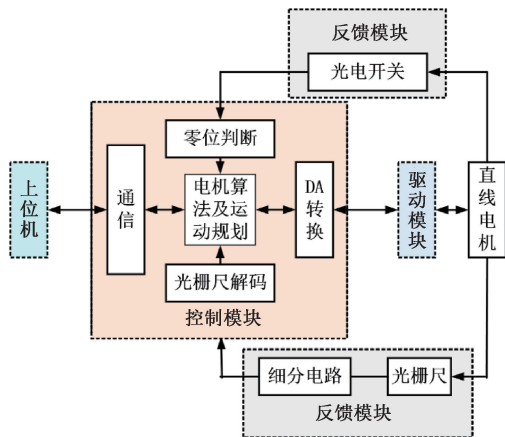


图2 二维运动台直线电机控制系统框图

Fig. 2 Two-dimensional motion stage linear motor control system block diagram

运动控制器根据上位机发送的控制指令,采集电机 I/O 输入及光栅尺等反馈信号,通过控制算法并按照相应的规划发送指令至驱动器控制电机运动,实现直线电机运动台的精准速度和位置控制,最终构成二维运动台的闭环控制系统。整个系统通过各模块的高效协作,确保运动台的定位精度满足实际要求。

### 3 系统辨识与 PDFF 控制

本文基于系统辨识出的运动台模型对 PDFF 控制参数进行调节,从而使二维运动台达到运行稳定、控制精度高等优点。在控制系统设计过程中,为了获取当前电机和控制系统的最佳参数,提出了通过频域法系统辨识来获取运动台的传递函数模型,以此为依据对 PDFF 控制

器的积分增益、比例增益和前馈增益等控制参数进行优化,达到高精度控制的效果。运动台的传递函数通过测量该系统的频率特性来求取。具体方法是利用电机驱动器产生相同幅值、不同频率的正弦信号输入,通过串口下发至驱动器中以控制电机运动,采集系统得到电机一组输入-输出数据后,得到各频率下的幅值和相位变化趋势曲线。结合这些数据,可得到电机运动台在不同频率下的速度响应曲线。通过对这些响应曲线进行频域分析,即可获得系统的频率特性曲线。

电机速度环的系统控制框图如图 3 所示,其中,  $r(t)$  表示参考输入,即电机的期望速度;  $C(s)$  是控制器的传递函数,为 PDFF 控制器的传递函数;  $G(s)$  是被控对象(二维运动台)的传递函数,即从电机电流到电机速度的传递函数;  $H(s)$  为反馈的传递函数;  $y(t)$  为输出,即电机实际的速度输出;  $u$  是被控对象的输入,对应于电机的电流。通过采集不同频率下参考输入  $r(t)$  与实际输出  $y(t)$ ,计算系统的增益和时间常数,确定闭环传递函数:

$$\Phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)} \quad (1)$$

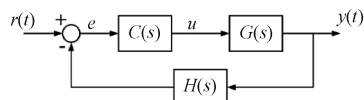


图3 系统控制框图

Fig. 3 System control block diagram

系统数据的接收、发送、曲线绘制及数据拟合均由上位机完成。上位机通过串口与下位机通信,能够发送不同的控制指令并实时接收下位机返回的数据。上位机接收数据,通过传递函数模型进行数据拟合,从而获取电机传递函数的关键参数。由于直线电机理论模型与实际系统存在误差,造成控制效果不佳,甚至不稳定,因此,本文采用 PDFF 电机控制方案,如图 4 所示。

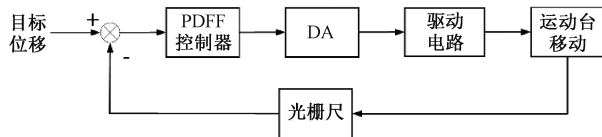


图4 电机控制方案框图

Fig. 4 Motor control scheme block diagram

PDFF 调节结构如图 5 所示,PDFF 控制引入前馈增益  $K_{ifr}$ , 当  $K_{ifr} = 1$  时 PDFF 控制为典型的比例积分(proportional-integral, PI)控制。

$$I_{cmd} = (K_{vi} \int_0^t (V_{cmd} - V_{fb}) dt + K_{vfr} V_{cmd} - V_{fb}) K_{vp} \quad (2)$$

式中:  $K_{vi}$  为积分增益;  $K_{vp}$  为比例增益;  $K_{vfr}$  为前馈增益。PI 控制可以通过增大  $K_{vi}$  积分增益提高电机稳态误差的



消除能力,但  $K_{vi}$  过大会导致系统的超调量过大而引起系统振荡。相比之下,PDFF 控制通过调整  $K_{vfr}$  前馈增益就可以在加大积分增益的情况下不会产生过大的超调,同时可以将许多低频干扰信号被积分环节过滤,使系统在低频段具有很好的抗干扰性能,同时还可以保证系统的稳态精度。因此,针对具体应用场景,需要通过实验对 PDFF 控制器的参数进行整定,以获得最佳控制性能。

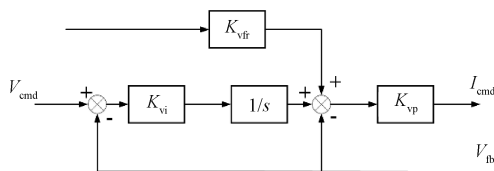


图 5 PDFF 调节结构

Fig. 5 PDFF adjustment structure diagram

## 4 实验测试与分析

### 4.1 实验设备与环境

本文使用英国 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪测试平台的运动性能。该仪器提供  $\pm 0.5 \times 10^{-6}$  的精度和 1 nm 的线性分辨率。整个实验装置固定在光学平台上,二维运动台实验系统如图 6 所示。

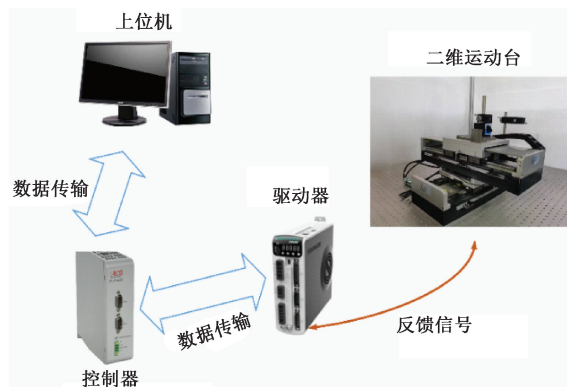


图 6 二维运动台实验系统

Fig. 6 Two-dimensional motion stage experiment system

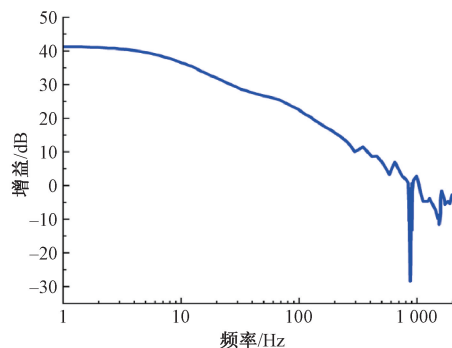
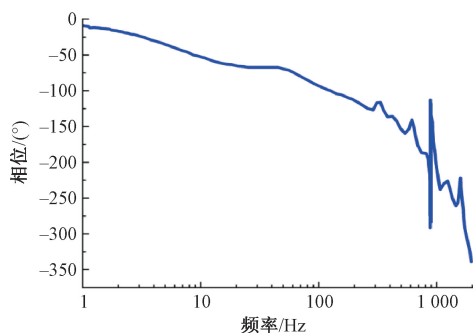
### 4.2 系统辨识实验测试

系统辨识实验测试硬件包括计算机、控制器、驱动器、电源、直线电机、运动台等。上位机依照规定的串口

$$G(s) = \frac{4.17e6s^4 + 2.23e8s^3 + 2.513e10s^2 + 2.443e11s + 2.475e13}{s^6 + 926.3s^5 + 1.23e5s^4 + 6.11e6s^3 + 3.321e8s^2 + 5.4e9s + 2.018e11} \quad (3)$$

通过系统辨识方法,从驱动器采集输入输出数据得到的  $X$  轴传递函数模型与图 7 实际系统的频率响应拟合程度达到了 87.5%,表明辨识结果与实际系统具有较好的吻合度。根据初始速度环的控制参数,结合频域法系统辨识方法及多次参数调整实验,整定位置环 PDFF 控制器参数,保证级联控制器的稳定性和鲁棒性。优化整

协议进行配置,进行数据的传输。采用不同频率的正弦波信号作为驱动器的输入激励信号,通过分析系统在各频率下的稳态响应,获得运动台的幅频特性曲线和相频特性曲线。在 0~2 000 Hz 频率范围内电流,上位机向下位机发送频率递增的正弦波指令信号,驱动电机产生相应的激励。通过安装在运动台上的光栅尺实时采集运动台的速度和位置信息,并将其反馈至上位机。上位机记录每个频率下输入正弦波信号的幅值、频率以及输出速度正弦波信号的幅值和相位。以  $X$  轴为例,根据记录的输入信号频率及其对应的输出信号幅值和相位,绘制运动台系统的频率特性曲线,如图 7 所示。

(a) 幅频曲线  
(a) Amplitude-frequency curve(b) 相频曲线  
(b) Phase-frequency curve图 7  $X$  轴频率特性曲线Fig. 7  $X$ -axis Frequency characteristic curve

通过使用 MATLAB 系统辨识工具箱,根据图 7 的频率特性曲线,计算获得二维运动台  $X$  轴速度环传递函数为:

定后的  $X$  轴频率特性曲线如图 8 所示,优化前后  $X$  轴控制参数如表 1 所示。同理, $Y$  轴优化过程采用了与  $X$  轴相似的设计方案。

### 4.3 驱动分辨率测试

对二维运动台进行分辨率测试,位移监测采用 C202 系列电容式传感器,其在 100  $\mu\text{m}$  的量程范围内分辨率可

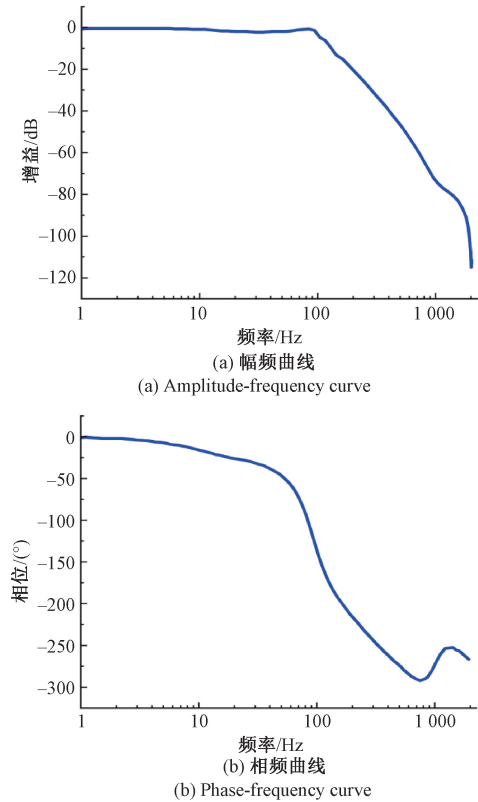


图 8 优化后 X 轴频率特性曲线

Fig. 8 Optimized X-axis frequency characteristic curve

表 1 X 轴控制参数优化对比

Table 1 X-axis control parameter optimization comparison

参数	初始参数值	优化后参数值
$K_{vi}$	10.00	80.00
$K_{vp}$	10.00	20.00
$K_{vfr}$	1.00	0.82

达 0.1 nm。首先载物台与电容传感器刚性固定,避免固定不可靠引入振动误差,然后选取合适的位置,分别调整量块与电容传感器距离,保证在电容传感器信号有效范围内。以 X 轴为例沿正向小位移连续步进 10 次,同步记录电容传感器示值变化。

在电容传感器输出信号能清晰看出台阶波形的情况下,去除首尾台阶位移数据,分别计算剩余 8 个台阶位移数据的标准偏差值,取其平均值作为该位置测量分辨率  $R_x$ 。

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x}_i)^2}{N}} \tag{4}$$

$$R_x = \frac{\sum_{i=1}^8 RMS_i}{8} \tag{5}$$

式中:  $RMS_i (i = 1, 2, \dots, 8)$  是各台阶位移数据标准偏差

值;  $x_j (j = 1, 2, \dots, N)$  是台阶上个点的位移数据;  $\bar{x}_i$  是台阶位移数据平均值;  $R_x$  是测量分辨率。

驱动分辨率测试结果如图 9 所示,可知测得最小驱动分辨力为 40 nm,表明该二维运动台具有纳米级驱动分辨力,能实现高精度位移控制,验证了二维运动台结构设计和基于系统辨识的 PDFF 控制参数优化方案的可行性和有效性。

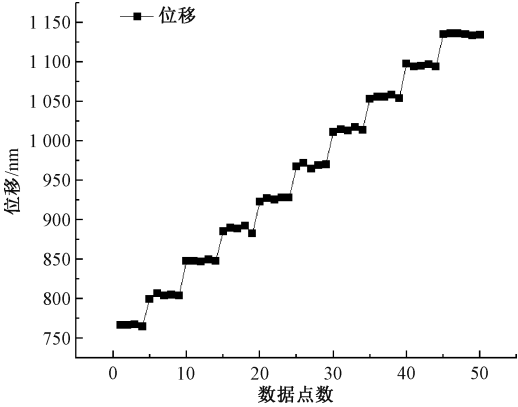


图 9 驱动分辨率测试

Fig. 9 Driving resolution test

4.4 重复定位精度测试

大行程二维运动台常应用于需要频繁往复运动的场合,为确保其在高速运行和高精度定位过程中,每次都能准确到达目标位置,重复定位精度成为衡量其性能的重要指标。因此,对二维运动台进行重复定位精度测试。实验中设置运动台运行速度 10 mm/s,以 20 mm 的步距不间断来回运行 5 次,并记录每一位置的误差值,某一位置数据点的最大差值即为重复定位精度。未使用频域法系统辨识方法改进 PDFF 参数时,优化前 X 轴重复定位精度如图 10 所示,最大重复定位误差为 2.8  $\mu\text{m}$  ( $k=2$ ),  $k$  为包含因子。优化后 X 轴重复定位精度如图 11 所示,行程可达 240 mm,最大重复定位误差为 1.4  $\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。

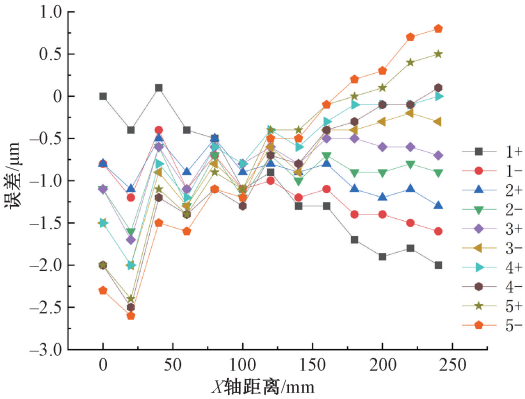


图 10 优化前 X 轴重复定位精度

Fig. 10 Optimize the front X-axis repeated positioning accuracy

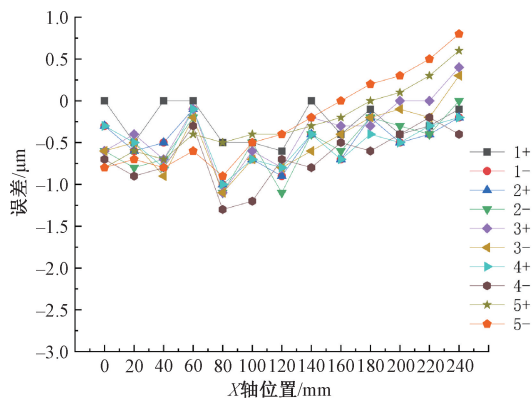


图 11 控制优化后 X 轴重复定位精度

Fig. 11 X-axis repeated positioning accuracy after control optimization

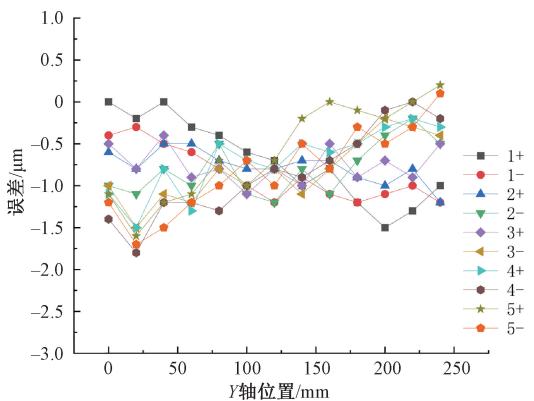


图 13 控制优化后 Y 轴重复定位精度

Fig. 13 Repeated positioning accuracy of Y-axis after control optimization

采用相同方法测量 Y 轴运动台的重复定位精度,优化前实验结果如图 12 所示。Y 轴的最大重复定位误差为  $2.5\text{ }\mu\text{m}(k=2)$ ,运行行程可达  $240\text{ mm}$ 。优化后 Y 轴重复定位精度如图 13 所示,最大重复定位误差为  $1.5\text{ }\mu\text{m}(k=2)$ 。

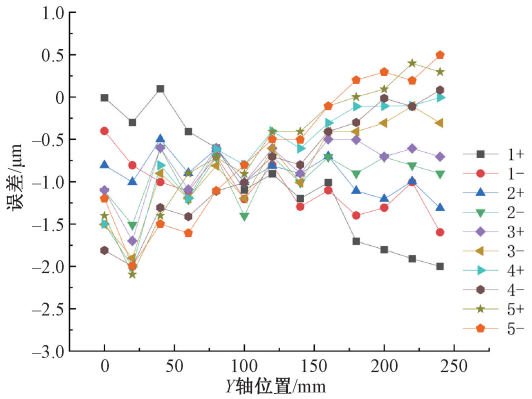


图 12 优化前 Y 轴重复定位精度

Fig. 12 Optimize the front Y-axis repeated positioning accuracy

使用频域法系统辨识优化 PDFF 控制参数后,PDFF 控制中  $K_{ff}$  前馈增益可以根据输入信号提前预测输出,并施加相应的控制作用,从而有效抵抗干扰,使得系统在稳态时能够更准确地跟踪参考输入。应用于二维运动台后,减小了定位误差,两轴的重复定位精度明显提高,如表 2 所示。

表 2 XY 轴重复定位精度

Table 2 XY axis repeated positioning accuracy ( $\mu\text{m}$ )

	X 轴	Y 轴
原始	2.8	2.5
优化后	1.4	1.5

5 结 论

本文设计并实现了基于系统辨识与精密驱动控制的亚微米精度 XY 二维运动台系统,集成了机械结构和控制系统。机械结构采用模块化设计,由直线电机直接驱动,无需中间传动机构,减少了累积误差,提升了定位的准确性。在控制策略方面,提出了一种基于频域法系统辨识方法优化了 PDFF 控制器的前馈增益、积分增益和比例增益等控制参数,进一步提升了二维运动台的控制精度。实验结果表明,运动平台定位系统行程可达  $240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ ,定位重复性优于  $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,驱动分辨率约  $40\text{ nm}$ ,该二维运动台系统具有运行稳定、定位重复性好等优越性能,能够满足精密加工与精密测量等高精度应用需求。本文采用频域系统辨识技术对运动台进行建模与优化,但该过程仍依赖实验和人工调参。未来可探索基于机器学习或自适应优化的自动参数整定方法,提高辨识效率和控制系统的智能化水平。

参考文献

[ 1 ] LI D, WANG B, TONG Z, et al. On-machine surface measurement and applications for ultra-precision machining: A state-of-the-art review [ J ]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1): 831-847.

[ 2 ] XU C, SONG J, LIU X, et al. Precision and ultra-precision machining with elastic polishing tools: A review [ J ]. Surface Science and Technology, 2025, 3(1): 9.

[ 3 ] 张帆,黄强先,程荣俊,等. 一种新的大行程垂直纳米运动工作台设计与控制研究 [ J ]. 计量学报, 2024, 45(3): 318-324.

ZHANG F, HUANG Q X, CHENG R J, et al. Design and control research of a new large-stroke vertical nanomotion working platform [ J ]. Acta Metrologica Sinica,

- 2024, 45(3): 318-324.
- [4] ZHOU L, WU J. Magnetic levitation technology for precision motion systems: A review and future perspectives [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2022, 16(4): 386-402.
- [5] 赵林峰, 凌明祥, 薛立伟, 等. 基于 Zigzag 柔性簧片的大行程 XY 精密运动平台[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(13): 2070-2080.
- ZHAO L F, LING M X, XUE L W, et al. Large-stroke XY precision motion platform based on zigzag flexible spring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(13): 2070-2080.
- [6] 谭久彬. 超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 1-7.
- TAN J B. Ultra-precision measurement as a foundation for the development of lithography machine technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 1-7.
- [7] KUMAR R, JITENDRA P K. Design of XY air bearing stage for ultra-precision [C]. *Machines, Mechanism and Robotics*. Springer, 2022: 1087-1103.
- [8] LEE D J, LEE S K. Ultraprecision XY stage using a hybrid bolt-clamped Langevin-type ultrasonic linear motor for continuous motion [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(1): 015111.
- [9] 付胜华, 韩秋实, 王红军. 高速大行程滚珠丝杠副智能测控平台的伺服控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(11): 1821-1827.
- FU SH H, HAN Q SH, WANG H J, et al. Servo control of intelligent measurement and control platform for high-speed and large-stroke ball screw pair [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1821-1827.
- [10] SHAO K, ZHENG J, WANG H, et al. Tracking control of a linear motor positioner based on barrier function adaptive sliding mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11): 7479-7488.
- [11] ZHU H, PANG C K, TEO T J. Integrated servo-mechanical design of a fine stage for a coarse/fine dual-stage positioning system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 329-338.
- [12] YUAN M, CHEN Z, YAO B, et al. Fast and accurate motion tracking of a linear motor system under kinematic and dynamic constraints: An integrated planning and control approach [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(2): 804-811.
- [13] 梁健强, 吴金洲, 魏巍. 基于辅助变量的永磁同步直线电机系统辨识研究[J]. *微电机*, 2021, 54(11): 52-57, 102.
- LIANG J Q, WU J ZH, WEI W. Research on system identification of permanent magnet synchronous linear motor based on auxiliary variables [J]. *Micromotor*, 2021, 54(11): 52-57, 102.
- [14] QI X, SHENG C, GUO Y, et al. Parameter identification of a permanent magnet synchronous motor based on the model reference adaptive system with improved active disturbance rejection control adaptive law [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 12076.
- [15] PEI G J, LIU J X, LI L Y, et al. MRAS based online parameter identification for PMSM considering VSI nonlinearity [C]. 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2018: 1-7.
- [16] 张鹏, 王文格, 付霞, 等. 基于闭环自适应辨识的速度环 PI 参数自整定[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(5): 639-645.
- ZHANG P, WANG W G, FU X, et al. Self-tuning of speed loop PI parameters based on closed-loop adaptive identification [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(5): 639-645.
- [17] LIU Z, LIN W, YU X, et al. Approximation-free robust synchronization control for dual-linear-motors-driven systems with uncertainties and disturbances [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(10): 10500-10509.
- [18] 杨公德, 陈宇翔, 王朋. 基于信号注入法的永磁同步电机参数辨识对比分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(12): 103-112.
- YANG G D, CHENG Y X, WANG P. Comparative analysis of parameter identification for permanent magnet synchronous motor based on signal injection method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(12): 103-112.

## 作者简介



黄强先, 1990 年于合肥工业大学获得学士学位, 1993 年于合肥工业大学获得硕士学位, 1998 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳米三维测量技术、仪器精度理论等。

E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

**Huang Qiangxian** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1990, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 1993 and 1998, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. His main research interests

include micro/nano three-dimensional measurement technology and instrument precision theory.



**秦贤智**, 2022 年于安徽工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为二维运动台与直线电机控制系统。

E-mail: zhixiangin98@gmail.com

**Qin Xianzhi** received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interests include two-dimensional motion stage and linear motor control system.



**程荣俊** (通信作者), 2016 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为微纳米测量技术与系统、微纳传感器设计、控技术与系统等。

E-mail: chengrj@hfut.edu.cn

**Cheng Rongjun** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2016. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor in Hefei University of Technology. His main research interests include micro/nano measurement technology, micro-sensor design, control technology and system.