

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508903

纳米级分辨力的六自由度微动工作台及 驱动控制系统设计*

张弛斌 黄强先 郭天武 程荣俊 李红莉 王超群 张连生
(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009)

摘要:针对精密测量及微纳加工领域对微位移台性能逐渐提高的需求,基于一种纳米级分辨力的六自由度微动工作台的结构特点、驱动方式和性能需求设计相应的高精度驱动控制系统,并进行电路输出性能测试和整体驱动控制效果测试。该微动台为内部中空的 3 层结构,可为三维激光干涉测量光路提供空间,以柔性铰链配合压电驱动器,采用串并联混合驱动模式;其基于 ARM 处理器的驱动控制系统包含主控、信号处理、线性放大、供电、保护等模块,具有输出端口多、电压稳定性高、噪声低、分辨力高等优点。实验结果表明,该驱动控制系统输出电压范围为 0~170 V、噪声为 0.2 mV、线性度为 0.12%、带宽为 0~100 Hz (16 μ F 负载),可驱动微动工作台实现 20 μ m 以上位移行程、0.5 nm 位移分辨力及 0.1"角度分辨力。该微动工作台及驱动控制系统适用于超精密加工和高精度测量领域的纳米级甚至亚纳米级精确定位和姿态控制,如跨尺度微纳米三坐标测量机 (cross-scale micro-nano coordinate measuring machine,CMCMM) 系统的测量触发及姿态补偿。

关键词: 微动工作台;驱动控制系统;六自由度;亚纳米分辨力;压电驱动器

中图分类号: TN384;TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

Design of a 6-DOF micro-motion stage with nanometer resolution and motion control system

Zhang Chibin Huang Qiangxian Guo Tianwu Cheng Rongjun Li Hongli Wang Chaoqun Zhang Liansheng
(Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In response to the growing requirements for micro-positioning stages in micro-nano manufacturing and precision metrology, a high-precision motion control system is specially designed based on the structural characteristics, driving mode, and performance requirements of a 6-DOF micro-motion stage with nanometric resolution. Circuit output performance tests and overall drive control effect tests were subsequently conducted. The micro-motion stage features a three-layer structure with hollow interior to facilitate optical paths of 3D laser interferometry. It utilizes flexure hinges in combination with piezoelectric actuators, adopting hybrid serial-parallel driving mode. Its motion control system based on an ARM processor includes main control, signal processing, linear amplification, power supply and protection modules, providing multi-channel output, high voltage stability, low noise, and superior resolution. Experimental characterization demonstrates that the system delivers an output range of 0~170 V, noise of 0.2 mV, linearity error of 0.12%, and an operational bandwidth of 0~100 Hz (with 16 μ F load). The stage achieves a displacement stroke exceeding 20 μ m, a displacement resolution of 0.5 nm, and a rotational resolution of 0.1". The micro-motion stage and its motion control system demonstrate strong applicability for nanometer and sub-nanometer level positioning and orientation control in the areas of ultra-precision machining and high precision measurement, such as the measurement triggering and attitude compensation of a cross-scale micro-nano coordinate measuring machine (CMCMM) system.

Keywords: micro-motion stage; motion control system; 6-DOF; sub-nano resolution; piezoelectric actuator

0 引言

目前,多自由度高精度微动工作台在微纳加工及精密测量领域已获得广泛应用。如光刻机的掩模版制备和晶圆检测环节由微动台的超高精度定位以保障芯片图案的精确转移^[1-3];原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等高精度测量显微镜依赖微动台实现样本的精准扫描^[4-9];生物工程领域的基因操作、细胞显微手术等通过微动台实现微小空间内的稳定运动控制^[10-12];跨尺度微纳米三坐标测量机(cross-scale micro-nano coordinate measuring machine, CMCMM)的测量精度、高精度宏微运动台系统的驱动定位精度,关键在于触发或定位过程中微动台的精密驱动^[13-16];光学系统的自由曲面加工靠微动台动态补偿外界扰动。为满足各领域对微动工作台纳米级乃至亚纳米级的驱动、定位性能需求,合理设计精密控制系统以充分发挥其高精度、高分辨力、多自由度的性能优势至关重要。

近年来,研究人员设计了多种六自由度精密工作台系统。哈尔滨工业大学研究设计了一种同时具有大范围、高分辨率和低耦合特性的六自由度压电平台^[17],可实现 5 mm 行程、20 nm 位移分辨力和 0.40 μrad 角度分辨力;南京航空航天大学开发的六自由度微动台^[18]可以调节超精密机床的姿态,分辨力达 10 nm;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的一种六自由度微动台^[19],具有高分辨力、高重复性和低耦合运动的特性,位移分辨力达 10 nm,角度分辨力达 0.08";Lee 等^[20]提出了针对双伺服运动台的六自由度微动台,分辨力达 10 nm 和 1/3";德国 PI 公司研制的商用六自由度精密压电平台 P-587,位移分辨力为 0.9 nm,角度分辨力为 10",价格昂贵。为满足 CMCMM 的应用需求,上述微动台存在精度不足或造价昂贵的限制,且难以配合三维激光干涉光路进行测量,因此,需要采用一款结构能满足测量需求,兼具高精度与低成本优势,拥有较大位移行程和纳米级驱动分辨力的六自由度微动台。一种实验室自研的定制化结构的高精度六自由度微动工作台^[21]满足 CMCMM 的微动测量模块需求,为充分发挥其性能,必须设计与之适配的具有多通道输出、大可调范围、高分辨力和高稳定性的驱动控制系统,实现高精度驱动与便捷操作。

除了机械结构与安装稳定性、可靠性的影响,微动台控制精度的上限取决于控制器的精度,其位移分辨力与噪声取决于控制器输出端的电压分辨力和纹波。以其目标分辨力 0.5 nm,行程 20 μm 计算,二者比值为 2.5×10^{-5} ,驱动控制系统的输出电压纹波与电压范围比值需

要远小于该值。国内的高精度压电驱动控制器如芯明天的 E80.D3S-O1 控制器,输出电压范围为 0~120 V,输出电压纹波 5 mV;纳动纳米的 PCS211S 控制器,输出电压范围为 0~120 V,输出电压纹波 3.5 mV;迈客荣的 PPC-CR2R0150 控制器,输出电压范围为 -15~150 V,输出电压纹波在 30 mV 内。计算可知这些驱动控制器的精度不满足要求。国外的压电驱动控制器有德国 PI 的 E-625 控制器,其输出电压范围为 -30~130V,输出电压纹波 0.8 mV,精度满足要求,但价格昂贵;澳大利亚 PiezoDrive 的 PX200 控制器,最大输出电压为 200 V_{pp},输出电压纹波 <0.15 mV,精度高,但通道数较少,无法灵活实现多自由度的驱动。

本文基于文献[21]所述的自研微动工作台,设计相应的精密驱动控制系统,可用于 CMCMM 的二次精密触发及宏动台的姿态补偿。

1 六自由度微动台结构

本文提出的驱动控制系统所应用的六自由度微动工作台采用“压电驱动器+柔性铰链”组合与“串并联混合驱动”模式,将六个自由度的运动合理分布在 3 层结构中,如图 1 所示。其中,固定于底座的支撑板控制 Z 、 θ_x 、 θ_y 3 个自由度,由 3 个压电陶瓷共同实现;位于中间的转动层控制 θ_z 单个自由度,由两对压电陶瓷共同实现;顶部的平动层控制 X 、 Y 两个自由度,由两个压电陶瓷分别实现。

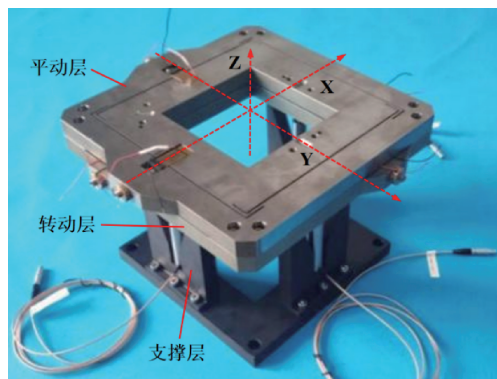


图 1 六自由度微动台

Fig. 1 6-DOF micro-motion stage

各运动层结构如图 2~4 所示,各自由度具体实现方式为驱动平动层 PZT_X、PZT_Y,作用于内框分别产生平动 X 、 Y ;驱动转动层 PZT_X₁、PZT_X₂ 或 PZT_Y₁、PZT_Y₂,作用于外框分别产生逆时针或顺时针偏摆 θ_z ;驱动支撑层 PZT_A、PZT_B、PZT_C 同步运动,工作台产生 Z 平动;驱动对称分布的 PZT_B、PZT_C 同步反向运动, PZT_A 保持静止时,工作台产生滚转 θ_y ;驱动 PZT_B 和

PZT_C 同步运动,PZT_A 按一定比例同步反向运动,工作台产生俯仰 θ_x 。驱动控制系统要保证各运动层分别独立驱动,并具有同步驱动功能。

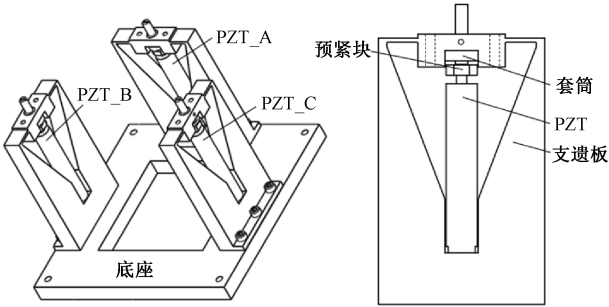


图 2 支撑层结构
Fig. 2 Structure of the supporting layer

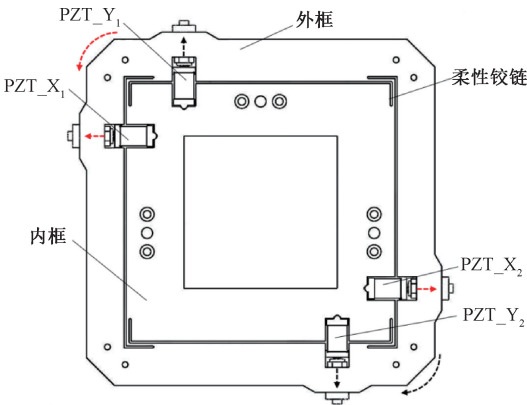


图 3 转动层结构
Fig. 3 Structure of the rotation layer

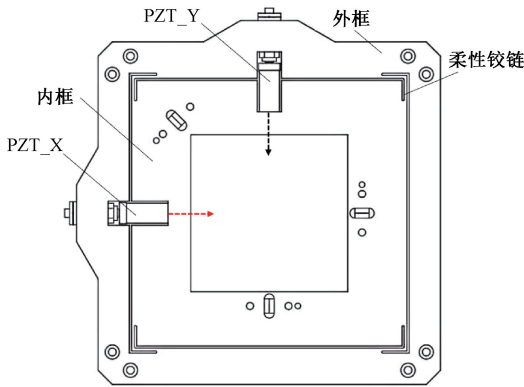


图 4 平动层结构
Fig. 4 Structure of the translation layer

2 驱动控制系统设计

上述六自由度微动台主要用于 CMM 测量时的二次逼近触发,并补偿三维宏动台的角运动误差。为实现 CMM 的跨尺度测量性能,驱动控制系统需要使其达到 1 nm 位移分辨率与 0.1° 角度分辨率。基于该微动台运动层结构所需的输出通道数量与分辨率指标,设计了具有多路通道和高分辨力、高稳定性、低噪声电压的精密驱动控制系统。该驱动控制系统基于 ARM Cortex-M4 内核的 STM32 芯片主控,内置 7 路数模转化通道,可由 7 个输出端口控制 9 个压电驱动器。

控制系统内部电路主要由主控、信号处理、线性放大、供电、保护 5 个模块构成,能提供稳定、低噪、高分辨力的驱动电压,其基本结构如图 5 所示。其中,主控模块

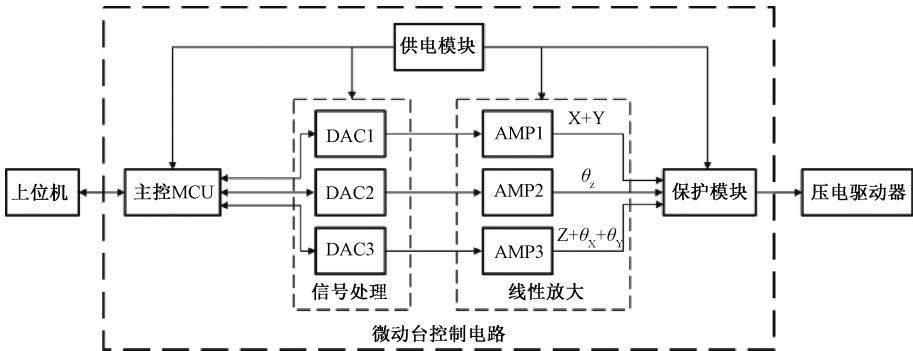


图 5 控制系统电路结构
Fig. 5 Structure of control system circuit

核心部件为主控单片机 (microcontroller unit, MCU), 信号处理与线性放大模块的核心部件分别为数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 和放大器 (amplifier, AMP), 以下各模块名称由其核心部件简称代指。

MCU 模块使用基于 ARM 的 STM32F407ZGT6 芯片,

实现控制箱与上位机的通信,接收上位机的指令,将其发送给 DAC 模块,随后接收其反馈信号,并向上位机反馈执行结果异常与否。

DAC 模块包含两个双输出端口电路板 (DAC1、DAC2) 和一个三输出端口电路板 (DAC3), 采用

上位机、MCU 模块与 DAC 模块间的通信流程如图 8 所示。

Fig. 6 Circuit diagram of MCU and DAC parts

Fig. 7 Circuit diagram of AMP part

Fig. 8 Communication flow of motion control system

- 1) 包头 0xff (1 byte)。
- 2) 控制类型 c_type (1 byte), 包括以下几种参数: 初始化 (运动到工作零点)、归零 (运动到电压零点)、运动控制 (正常运动)、连接。
- 3) 运动类型 m_type (1 byte), 参数包括开环、闭环。
- 4) 运动参数 m_parameter (4 byte), 6 自由度共 6 个运动参数, 参数内容为使能 (0x00 \ 0x01, 1 byte) + 方向 (0x01 为正向 \ 顺时针, 0x02 为负向 \ 逆时针, 1 byte) + 运动量 (2 byte)。位移运动参数的运动量数值单位为 nm, 角度运动参数的运动量数值单位为 °。2 byte 运动量最

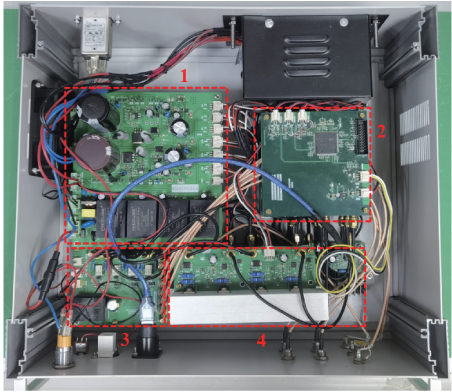
大能表示 65 535 nm,满足微动台最大行程范围。

- 5) 校验位 check_code(1 byte)。
- 6) 包长 p_length(1 字节,数据包长度为 31 byte)。
- 7) 包尾 0x0d 0x0a(2 byte)。

最终搭建的微动台驱动控制系统如图 9 所示。其内部硬件电路如图 9(a) 所示,区域 1、2、3、4 依次为供电模块、MCU+DAC 模块、保护模块与 AMP 模块。

外部机箱面板如图 9(b) 所示,左侧为电源开关、保险开关(对应内部电路保护模块)与通信传输接口,右侧为施加至各压电驱动器的输出电压端口。

上位机控制界面如图 9(c) 所示,在与下位机,即驱动控制系统连接并确认通信正常后,可选择单独或多个



(a) 内部硬件电路
(a) Internal hardware circuits



(b) 外部机箱面板
(b) External chassis panel



(c) 上位机控制界面
(c) Host computer control interface

图 9 微动台驱动控制系统

Fig. 9 Motion control system of micro-motion stage

任意自由度同时运动。初始化与复位操作无需运动参数,而选择开环/闭环运动时,可在每个自由度后面输入相应的带符号运动参数,发送给下位机的数据包会将符号自动转化成通信协议中的两种方向参数。而在需要系统自动运行,如 CMM 整机的测量触发过程中,运动参数则由后台根据控制算法自动设置并发送给下位机。

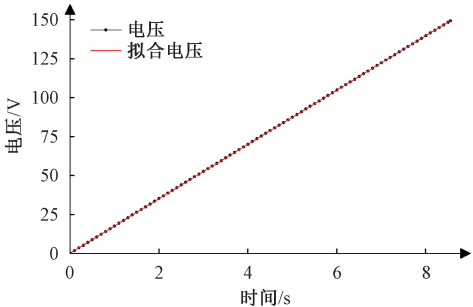
3 驱动控制系统性能测试

3.1 线性度测试

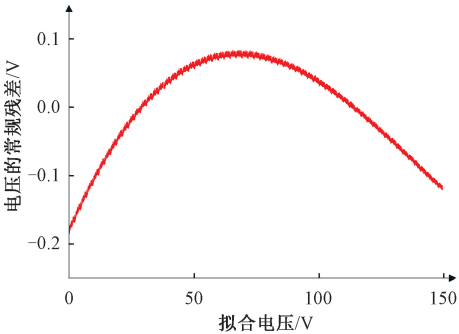
使用 USB-6000 系列高分辨率数据采集卡对控制系统输出端电压进行线性度测试。该采集卡具有 24 bit 模拟输入分辨率和极低底噪,量程为 $\pm 10\text{ V}$,采样率达 50 kHz。

由于控制器最大输出电压超出采集卡量程,因此以分压法对其进行测量。控制系统输出端电压由 0 ~ 150 V 随时间均匀增加并施加至 160 k Ω 串联电阻,采集卡测量其中 10 k Ω 分压电阻两端的电压,按比例放大后,计算其线性度。

所测得的控制系统输出端电压如图 10 所示,经线性拟合并计算可得,其非线性误差小于 0.12%,且该误差包含 AD5791 自身的线性度误差。



(a) 所测电压及其线性拟合
(a) Measured voltage and its linear fitting



(b) 电压残差
(b) Voltage Residual

图 10 控制系统输出端电压

Fig. 10 Output terminal voltage of control box

3.2 纹波测试

利用 USB-6000 数据采集卡对控制系统输出端电压的纹波进行测试。控制系统在采集卡量程范围内输出幅值为 2.5 mV、间隔为 1 s 的阶梯电压,采集卡直接测量控制器输出端电压。测量结果如图 11 所示。

图 11(a)所示为幅值 2.5 mV 的阶梯电压,对应的压电驱动器位移 <1 nm。对其中一个台阶进行局部放大,如图 11(b)所示,可以看出纹波噪声约为 0.2 mV,满足控制系统的设计需求。

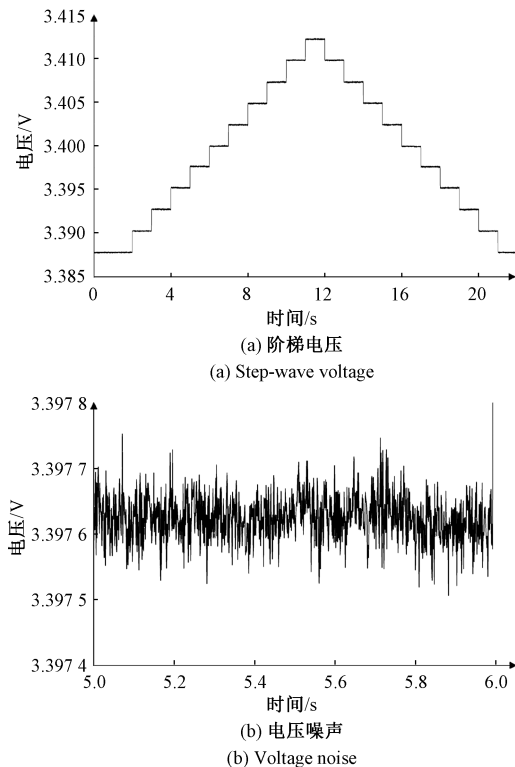


图 11 电压纹波测试结果

Fig. 11 Voltage ripple test result

3.3 带宽测试

利用 USB-6000 数据采集卡对控制系统输出端电压进行带宽测试,以确定其工作范围。测试分别在空载和负载条件下进行,空载条件的电路连接方式与 3.1 节中所述相同,控制系统输出端电压施加至串联电阻,采集卡测量分压电阻两端的电压;负载条件的电路连接方式即在空载的基础上,控制系统输出端额外并联 $16\ \mu\text{F}$ 的 CBB 电容充当负载,用于模拟微动台的压电驱动元件。输出端电压幅值固定设置为 150 V,在 0~5 kHz 范围进行扫频。将所测电压的幅值归一化处理后,得到的幅频特性曲线如图 12 所示。以幅值衰减至 70%为限,由图可知,控制系统的空载带宽约为 0~800 Hz; $16\ \mu\text{F}$ 负载的带宽约为 0~100 Hz。负载带宽被针对性限制在较窄范围,

可以降低噪声的影响,更贴合前文所述六自由度微动工作台的应用需求。

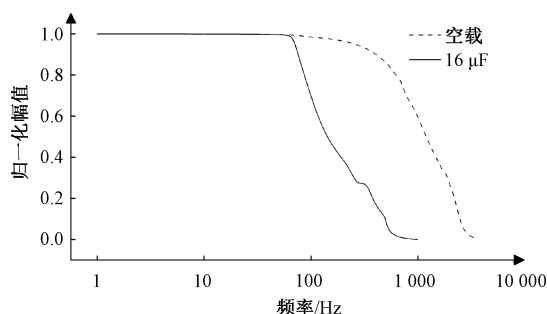


图 12 控制系统幅频特性曲线

Fig. 12 Amplitude frequency characteristic curve of control system

3.4 稳定性测试

使控制系统在高负荷状态下长时间连续工作,利用示波器和红外线测温仪 EDKORS DS400 检测控制系统输出端电压的稳定性和其内部温度的稳定性。

以 $16\ \mu\text{F}$ 的 CBB 电容模拟压电驱动器负载,驱动控制系统施加频率为 10 Hz、幅值为 165 V 的正弦波信号,连续测试 48 h。观察其输出波形,并每隔 0.5 h 打开机箱盖板,观察内部温度分布情况。

经过初步观察发现,功率电阻、三极管以及高压运放这 3 类器件温度较高。因此,主要观测并记录负载最大的线性放大电路板 (AMP2) 的功率电阻、三极管以及高压运放的温度,其测试结果如图 13 所示。

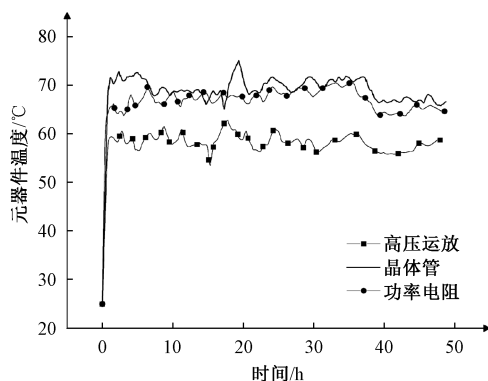


图 13 稳定性测试结果

Fig. 13 Stability test result

测试期间,控制系统输出电压并未出现幅值衰减、波形失真现象,且机箱内部的工作温度较稳定,关键电子元件的最高温度都在安全范围内,表明其输出电压稳定性与内部温度稳定性较高。

4 整体系统测试

为验证本文的驱动控制系统性能,对六自由度微动台进行行程和分辨力测试。选用 C202 电容位移传感器(见行科技,合肥)以 100 Hz 采样率测试其平动性能,选用 ULTRA-5050HR 自准直仪(奥特梅尔,天津)以 50 Hz 采样率测试其转动性能,测试环境温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,湿度约为 55%RH。平动与转动性能测试的实验装置搭建分别如图 14、15 所示。在图 14 中,微动台顶部额外安装了载物台与 L 型金属座,以提供被测表面。

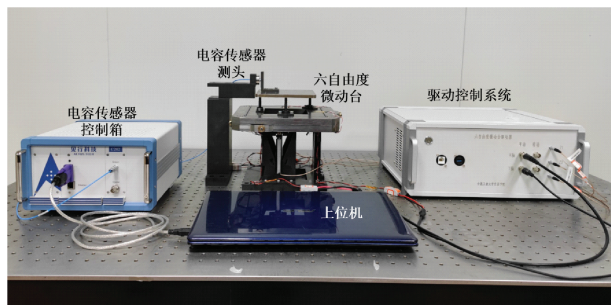


图 14 平动性能测试

Fig. 14 Translation performance test

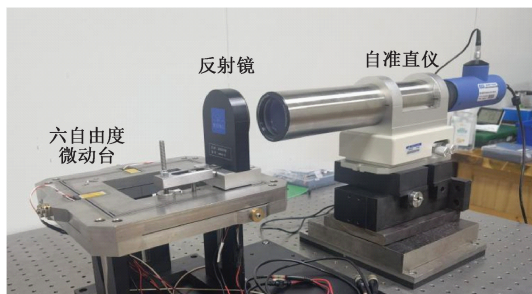


图 15 转动性能测试

Fig. 15 Rotation performance test

实验结果表明, X 、 Y 、 Z 轴行程超过 $20\ \mu\text{m}$,分辨力可达 $0.5\ \text{nm}$; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分辨力可达 $0.1''$ 。 X 轴行程和分辨力测试结果如图 16、17 所示, Y 轴测试结果相近, Z 轴与之分辨力相近,但行程可达 $37\ \mu\text{m}$ 。 θ_x 分辨力测试结果如图 18 所示, θ_y 、 θ_z 测试结果相近。

根据 X 轴位移行程进行线性拟合与迟滞计算可得,升压与降压的线性度分别为 7.52%、4.29%,迟滞误差为 14.7%。该部分误差主要为微动台开环控制模式下压电驱动器的自身特性,而非驱动控制系统导致。

由于 CMCMM 整机系统集成了三维测长和三维测角模块,负责测量逼近和姿态补偿校正的六自由度微动台可以采用闭环控制模式,根据测量模块的反馈量进行补

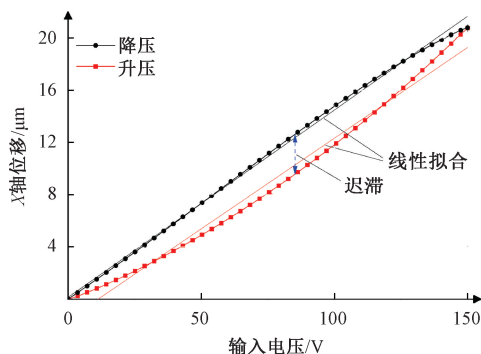


图 16 X 轴位移行程

Fig. 16 X -axis displacement stroke

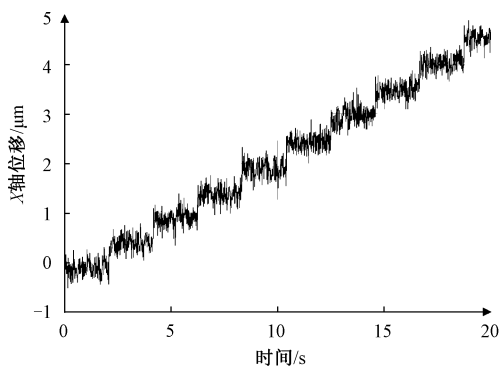


图 17 X 轴位移分辨力

Fig. 17 X -axis displacement resolution

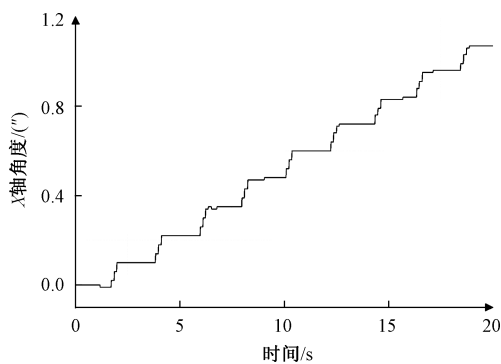
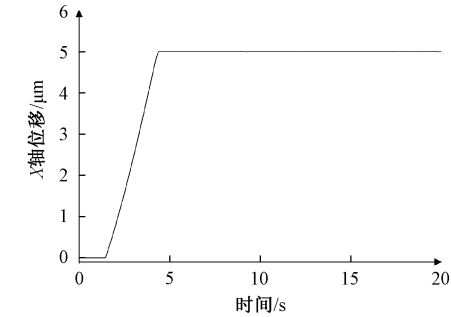


图 18 θ_x 角度分辨力

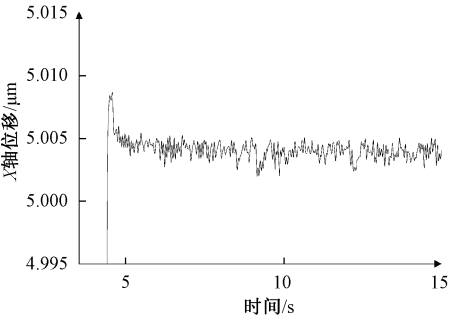
Fig. 18 θ_x angle resolution

偿,达到所需精度。以 X 轴为例,其闭环控制效果如图 19 所示,图 19(a)为整体的 X 轴闭环位移曲线,而根据图 19(b)可知,驱动其闭环运动 $5\ \mu\text{m}$,实时动态调整下的位移精度可控制在 $5\ \text{nm}$ 内。因此,在闭环控制模式下,压电驱动器非线性与迟滞误差几乎不影响位移精度。

微动台的线位移及角位移性能分别如表 1、2 所示,其中位移、角位移的分辨力为分辨力测试曲线各阶梯的



(a) X轴闭环位移
(a) X-axis closed-loop displacement



(b) X轴位移局部放大曲线
(b) Local amplification curve of X-axis displacement

图 19 X 轴闭环控制效果

Fig. 19 Closed-loop control effect of X-axis

RMS 值,因而比阶梯幅值更小。受外部环境及微动工作台自身振动等影响,在未对微动台施加电压时,其静止状态噪声远大于驱动控制系统输出电压纹波噪声对应位移。因此,若能改善传感器测头装夹与微动台安装稳定性,可进一步降低位移信号噪声,有潜力实现更高分辨力。

表 1 微动台平移性能

Table 1 Translation performance of micro-motion stage

指标	X	Y	Z
行程/ μm	20.72	20.02	37.60
分辨力/nm	0.51	0.49	0.35

表 2 微动台转动性能

Table 2 Rotation performance of micro-motion stage

指标	θ_x	θ_y	θ_z
行程/($^\circ$)	39.0	33.8	27.9
分辨力/($^\circ$)	0.067	0.063	0.084

根据实验结果进行分析与对比可知,该驱动控制系统的电压驱动精度优于引言中提到的国内高精度压电驱动控制器,能驱动六自由度微动台实现纳米级位移驱动分辨力,满足跨尺度 CMM 的应用需求,整体系统的驱动

分辨力超过文献[18-21]中微动台的驱动分辨力,可与 PI 公司的同类型产品媲美,达到国际领先水平。

5 结 论

本文基于一种适用于 CMCM 的六自由度微动台,设计了相应的高精度驱动控制系统。该微动台结构独特、稳定性高、成本低,将压电驱动器与柔性铰链结合,采用串并联混合驱动形式;其驱动控制系统具有输出端口多、电压稳定性高、噪声低、分辨力高的优点,可操作性强,可充分发挥微动台的性能优势。实验结果表明,该驱动控制系统输出电压范围为 0~170 V、噪声为 0.25 mV、线性度为 0.12%、带宽 0~100 Hz (16 μF 负载),可驱动微动工作台实现 20 μm 位移行程、0.5 nm 位移分辨力和 0.1 $^\circ$ 角度分辨力。

本文所述微动台及其驱动控制系统能实现六自由度的高精度运动,从而满足纳米级甚至亚纳米级精密定位和姿态控制需求,有望在 MEMS 制造、超精密加工及微纳检测等领域中获得广泛的应用。

参考文献

[1] 饶裕,刘杨,齐彪,等. 基于宏微驱动的光刻机掩模台控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(10): 61-64.
Rao Yu, Liu Yang, Qi Biao, et al. Control system design of lithography mask stage based on macro-micro drive[J]. Techniques of Automation and Applications, 2017, 36(10): 61-64.
[2] 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 Jiubin. Ultra-precision measurement is the cornerstone of the development of lithography technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 1-7.
[3] 黄春霞. 晶圆高精度检测与预对准技术的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
Huang Chunxia. Research on wafer high-precision detection and pre-alignment technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
[4] 黄强先,张蕤,张连生,等. 动态原子力显微镜悬臂高阶谐振相位特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1411-1417.
Huang Qiangxian, Zhang Rui, Zhang Liansheng, et al. Study on the high-order resonant phase characteristics of the cantilever of the dynamic atomic force microscope [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1411-1417.

- [5] 黄强先, 张蕤, 刘凯, 等. 多模态动态原子力显微镜系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 401-407.
Huang Qiangxian, Zhang Rui, Liu Kai, et al. Multimodal dynamic atomic force microscopy system[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 401-407.
- [6] 闫孝姮, 孔繁会, 邵永健, 等. 非共振轻敲模式原子力显微镜的研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 70-77.
Yan Xiaoheng, Kong Fanhui, Shao Yongjian, et al. Nonresonant tapping mode atomic force microscopy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 70-77.
- [7] 殷伯华, 方光荣, 刘俊标, 等. 小型微纳米图形电子束曝光制作系统(英文)[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(4): 290-294.
Yin Bohua, Fang Guangrong, Liu Junbiao, et al. Small-scale micro-nano pattern electron beam lithography fabrication system[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(4): 290-294.
- [8] 天津大学. 基于 SEM 原位在线观测的纳米切削装置: CN201410123818.2[P]. 2016-04-20.
Tianjin University. Nano cutting device based on in-situ online observation of SEM: CN201410123818.2[P]. 2016-04-20.
- [9] Bai J H, Rosa A L. An automated AFM for nanoindentation and force related measurements[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(4): 347-353.
- [10] 谢佳豪. 机器视觉导航下激光切割轨迹控制[D]. 泉州: 华侨大学, 2023.
Xie J H. Laser cutting trajectory control under machine vision navigation[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2023.
- [11] Wang F J, Liang C M, Tian Y L, et al. Design of a piezoelectric-actuated microgripper with a three-stage flexure-based amplification[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2205-2213.
- [12] Wang D H, Yang Q, Dong H M. A monolithic compliant piezoelectric-driven microgripper: Design, modeling, and testing[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 138-147.
- [13] 彭杰, 林华堂, 王刚, 等. 轮盘类零件高精度自动化激光测量技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2025, 61(5): 9-12.
Peng Jie, Lin Huatang, Wang Gang, et al. Research on high-precision automatic laser measurement technology for disc parts[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2025, 61(5): 9-12.
- [14] 王明强, 奚浩, 刘志强, 等. 基于神经网络的宏/微双驱动运动平台误差预测及补偿技术研究[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 261-264.
Wang Mingqiang, Xi Hao, Liu Zhiqiang, et al. Research on error prediction and compensation technology of macro-micro dual-drive motion platform based on neural network[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(11): 261-264.
- [15] 刘定强, 黄玉美, 谢礼, 等. 压电型宏微双驱动精密定位系统点位协调控制[J]. 农业机械学报, 2011, 4: 220-223.
Liu Dingqiang, Huang Yumei, Xie Li, et al. Piezoelectric macro-micro dual-drive precision positioning system point coordinate control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 4: 220-223.
- [16] 于保军, 杨志刚, 齐会良, 等. 基于显微视觉的宏/微双驱动微动台系统[J]. 农业机械学报, 2008(2): 125-129.
Yu Baojun, Yang Zhigang, Qi Huiliang, et al. Macro-micro dual-drive micro stage system based on micro vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008(2): 125-129.
- [17] Chang Q B, Gao X, Liu Y X, et al. Development of a cross-scale 6-DOF piezoelectric stage and its application in assisted puncture[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 174(C): 109072.
- [18] 季瑞南, 金家楣, 张建辉. 六自由度微位移定位平台的设计与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(6): 1264-1270.
Ji Ruinan, Jin Jiamei, Zhang Jianhui. Design and test of 6-DOF micro-displacement positioning platform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(6): 1264-1270.
- [19] Zhang D F, Li P Z, Zhang J G, et al. Design and assessment of a 6-DOF Micro/Nanopositioning system[J]. IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, 24(5): 2097-2107.
- [20] Lee H H, Lee I S, Lee K I, et al. Development and performance evaluation of a fine stage for compensating 6-DOF motion errors of an ultra-precision linear stage[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2021, 38(2): 123-129.
- [21] 黄强先, 程保林, 张弛斌, 等. 亚纳米驱动分辨力的六自由度微动台[J]. 光学精密工程, 2023, 31(13): 1933-1940.
Huang Qiangxian, Cheng Baolin, Zhang Chibin, et al.

Development of 6-DOF micro-driving stage with sub-nano driving resolution[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(13): 1933-1940.

作者简介



张弛斌, 2020 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院博士, 主要研究方向为微纳米测量技术。

E-mail: cbzhang@mail.hfut.edu.cn

Zhang Chibin received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology, in 2020. He is now a Ph. D. candidate from School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering in Hefei University of Technology. His main research interest includes micro-nano measurement technology.



黄强先, 1998 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士生导师, 主持了超过 10 项科研项目(包括国家重点研发计划项目、“863”计划关键项目和国家自然科学基金项目), 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 Ph. D. degree from Hefei

University of Technology, in 1998. He is now a professor of School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering in Hefei University of Technology. He has presided more than ten scientific research projects (including projects from National Key Research and Development Plan, “863” Plan and National Natural Science Foundation of China). His research interests include micro-nano 3D measurement technology and instrument precision theory.



张连生(通信作者), 2015 年于中国科技大学获得博士学位, 现为合肥工业大学仪器科学与光电工程学院副教授, 主持了一项国家重点研发计划项目子项目, 主要研究方向为微纳米测量技术与系统、压电精密驱动与应用等。

E-mail: lszhang@hfut.edu.cn

Zhang Liansheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China, in 2015. He is now an associate professor of School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering in Hefei University of Technology. He has presided one subproject of the National Key Research and Development Project of China. His main research interests include micro-nano measurement technology and systems, and piezoelectric precision drives and applications.