

文章编号 1004-924X(2019)08-1774-09

高带宽两自由度并联柔顺精密定位平台的 优化设计与实验

林盛隆, 张宪民, 朱本亮*

(华南理工大学 广东省精密装备与制造技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:针对目前用于原子力显微镜的扫描定位平台带宽低、行程小、耦合性能差等问题,提出了一种基于柔性梁的高带宽两自由度精密定位平台并对该平台进行了优化设计、仿真验证与实验分析。首先,提出了以双端固定梁与平行杂交梁为基础的并联柔顺平台,分别运用卡式第二定理和拉格朗日方程建立了平台刚度和固有频率的数学模型;然后,通过最优化理论获取了平台的最高固有频率及最优设计尺寸,并运用有限元方法验证了优化结果的可靠性;最后,搭建了实验系统,对平台进行了实验研究。实验结果表明:所设计平台的最大行程为 $12.950\ \mu\text{m} \times 13.517\ \mu\text{m}$,耦合误差小于 1.77%, X, Y 方向的固有频率分别为 12.21 和 13.50 kHz,在开环条件下可良好地追踪频率小于 1 kHz 的三角波,有效改善了传统扫描定位平台响应慢、行程小、耦合性能差等问题。

关键词:精密定位平台;高带宽;优化设计;固有频率

中图分类号: TH132; TH122 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1774

Optimal design and experiment of a high-bandwidth two-degree-of-freedom parallel nanopositioning stage

LIN Sheng-long, ZHANG Xian-min, ZHU Ben-liang*

(Guangdong Province Key Laboratory of Precision Equipment and Manufacturing Technology,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: meblzhu@scut.edu.cn

Abstract: A high-bandwidth, two-degree-of-freedom nanopositioning stage based on the optimization of a flexible beam is proposed with the aim of improving the low-bandwidth performance, relative low-travel range, and poor coupling performance of the scanning positioning stage of Atomic Force Microscopy. Design optimization, simulation verification, and experimental analysis of the proposed stage are conducted as part of this process. Firstly, a parallel compliant moving stage composed of a doubly clamped beam and parallel hybrid beam is presented, while Castigliano's second theorem and Lagrange's equation are applied to establish the mathematical model of its stiffness and natural frequency. Then, the maximum natural frequency and optimal size of the stage are obtained using optimization theory, while the optimization result reliability is verified using finite element method software. Finally, an experimental system is built and experiments are conducted on the developed stage. The experimental results indicate that the travel range of the proposed stage is $12.950\ \mu\text{m} \times 13.517\ \mu\text{m}$,

收稿日期:2019-01-02;修订日期:2019-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51820105007);广州市珠江科技新星项目(No. 201906010061)

with a coupling error of less than 1.77%. The natural frequencies in the X and Y directions are 12.21 kHz and 13.50 kHz, respectively. In open loop, triangular waves with frequencies less than 1 kHz can be tracked well, effectively addressing the problems of slow response, small stroke, and poor coupling performance of the traditional scanning nanopositioning stage.

Key words: compliant nanopositioning stage; high-bandwidth; optimization design; resonant frequency

1 引言

柔顺精密定位平台^[1-2]已经在扫描探针显微镜^[3]、生物分子科学^[4]、纳米测量^[5]、微纳加工^[6]以及微纳操作^[7]等诸多研究领域得到了广泛应用。该平台利用柔顺单元的弹性变形来传递运动,能够实现纳米级位移并且拥有无摩擦、无间隙以及结构紧凑等优点^[8-9]。随着近年来各领域研究的不断深入,人们对精密定位平台的带宽要求不断提高。响应速度快的精密定位平台有利于诸多研究领域突破相应的瓶颈,例如在生物研究领域中,高带宽的生物样本精密定位平台可以大幅度地提高扫描探针显微镜的成像速度,由此得到生物样本在纳米尺度下的动态变化,而能否观测到生物微观结构的动态变化过程是生命与生物科学研究能否取得突破的一大瓶颈^[4]。

平台的带宽主要取决于平台的固有频率和控制策略,合理紧凑的平台结构以及良好的控制策略有益于获得高带宽的精密定位平台。近年来,由于压电陶瓷驱动器具有精度高、响应快、刚度大等优点,压电陶瓷驱动式柔顺精密定位平台成为解决纳米定位中响应慢、带宽不足、耦合性能差等问题的有效途径。目前,高带宽柔顺精密定位平台在结构上可分为并联式和串联式两大类。串联式柔顺平台将 X 方向驱动结构嵌入到 Y 方向驱动结构中,导致 Y 轴的等效质量远大于 X 轴的等效质量,因此 Y 方向的固有频率会比 X 方向小得多。例如,Brian 等人^[10]设计了一种 X、Y 轴固有频率分别为 24.2 和 6.0 kHz,行程为 $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ 的高带宽串联式微动台,它在 100 Hz 的三角波追踪下可达到较好的精度;在正弦波追踪下实现 7 kHz 的扫描频率,耦合误差为 1.83%。Kam^[11]等人设计了一款慢轴与快轴的固有频率分别为 4.5 和 20 kHz,行程为 $8.5\ \mu\text{m} \times 8.5\ \mu\text{m}$ 的串联柔顺定位平台,该平台通过采用锥形梁降

低平台质量从而提高固有频率并结合了前馈反馈的控制方法,其扫描频率达到 640 Hz,耦合误差为 1.3%。对于传统的三角波扫描方式,串联式的柔顺定位平台简单有效,成本较低,但它也有耦合误差难检测、难补偿且易受温度环境影响等缺点。相应地,并联结构的柔顺定位平台为对称结构,不仅具有高精度、高刚度的特性,而且两轴同时具有高带宽、不易受温度环境等影响的优点。此外,并联结构的通用性较强,适于多种扫描方式,如螺旋型^[12]、摆线型^[13]以及李萨如曲线型^[14]等。Yong 等人^[15]设计了一种 X、Y 固有频率分别为 8.8 和 8.9 kHz,行程为 $6.5\ \mu\text{m} \times 6.6\ \mu\text{m}$,耦合误差为 2.5%,3.1%,可实现 200 Hz 的线扫描速度;Yong 等人^[3]设计了一种 X、Y 轴均为 2.7 kHz 的并联平台,其行程为 $25\ \mu\text{m}$,运用抑振及前馈控制器可达 400 Hz 的扫描频率,耦合误差小于 2%。Cai 等人^[16]设计了一种并联结构的柔顺扫描台,其中 X、Y 轴的固有频率均为 5.6 kHz,行程接近 $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$,耦合误差为 2%左右,扫描频率为 25 Hz。

综上所述,大多数柔顺平台难以同时实现高带宽、大行程、低耦合误差等参数指标。本文针对上述问题,设计了一款带宽高、行程大、耦合误差低的并联式柔顺定位平台。首先对柔顺平台的结构进行设计,建立了平台的刚度模型以及固有频率模型;然后根据平台设计目标量化各项指标,建立了相关约束关系,以平台固有频率为优化目标对平台进行了尺寸优化,最后对平台进行了实验验证。

2 结构设计与分析

2.1 平台的结构设计

在结构上,精密定位平台的带宽主要由平台的一阶固有频率决定,对于开环系统而言,平台的带宽通常为固有频率的 $1/100 \sim 1/10$ ^[17]。为了获

得高带宽、相对大行程、低耦合误差的平台,设计了如图 1 所示的并联对称式微动平台,该结构由压电叠堆驱动器、双端固定直梁、平行杂交梁和末端移动平台组成。以 X 方向运动为例,压电叠堆驱动器左端预紧固定,右端驱动双端固定直梁,使其产生弹性变形,为末端移动平台提供输出位移。由于平行杂交梁的轴向刚度远大于其横向刚度,因此可将轴线与 X 方向平行的平行杂交梁视作为刚体,而轴线与 X 方向垂直的平行杂交梁作为 X 轴运动时的导向梁,其作用为补偿平台 X 方向上的运动给 Y 轴引来的寄生运动,从而降低平台的耦合误差。由图 1 局部放大图可知,平行杂交梁的主要组成从左至右依次为加厚梁、等直梁以及集中柔度铰链,这里采用的集中柔度铰链为直圆缺口型铰链。此梁与传统等宽直梁相比,主要的优点包括:在驱动方向上,增强了导向梁的轴向刚度,减小导向梁的弯曲;在垂直于驱动方向上,增加垂直方向上的双端固定梁与平行杂交梁连接部分的刚度,减小寄生运动;右端直圆缺口型铰链的引入将增大杂交梁与末端移动平台的柔度,从而增大移动平台的行程。图 2 表示柔性梁的变形示意图,实线表示梁未变形时的示意图,虚线表示梁变形后的示意图,其中图 2(a)表示导向梁为等宽直梁时柔性单元的变形,图 2(b)表示采用本文平行杂交梁时柔性单元的变形。由图 2 可知,该结构可以有效提高柔顺平台的性能,但如何合理地设计平台柔性梁的尺寸成为首要问题。为了优化梁的相关尺寸,获得平台的最高固有频率,建立平台的刚度模型及模态模型便显得十分必要。

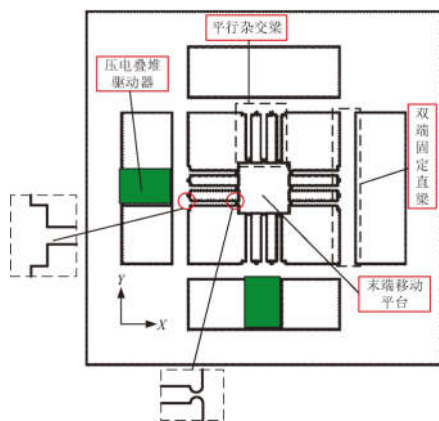
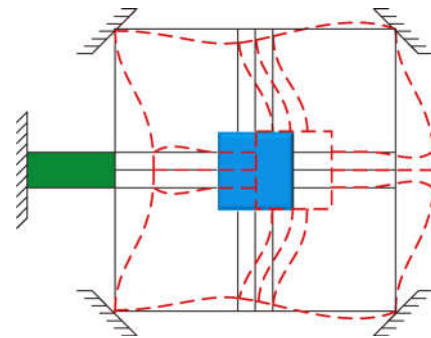


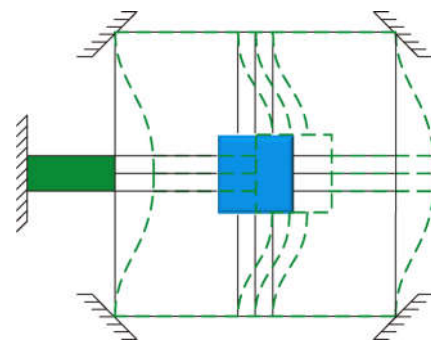
图 1 柔顺平台结构示意图

Fig. 1 Structural representation of compliant stage



(a) 导向梁为等宽直梁

(a) Guided beam is constant-width beam



(b) 导向梁为平行杂交梁

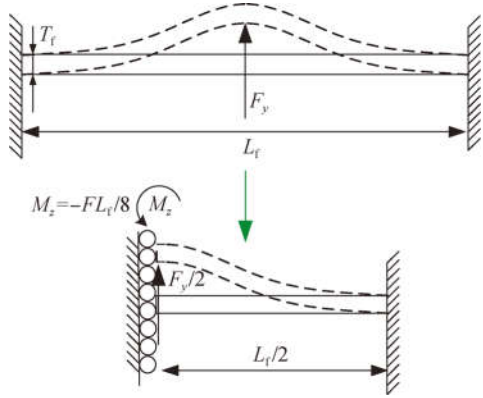
(b) Guided beam is parallelogram hybrid beam

图 2 柔性梁变形示意图

Fig. 2 Deformation of flexible beams

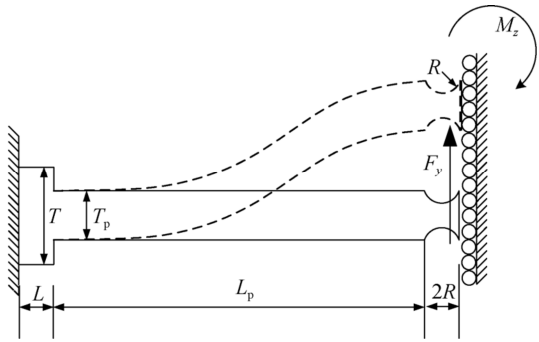
2.2 平台的刚度分析

平台的刚度由柔性单元决定,柔顺单元由双端固定直梁与平行杂交梁组成,详细结构如图 3 所示,实线为变形前的梁,虚线为变形后的梁。如图 3(a)所示,双端固定直梁为两端固定的纯直梁,设受驱动力为 F_y 、梁长度为 L_f 、宽度为 T_f ,其力模型可等效为图 3(a)下图,其中 M_e 表示等效弯矩。与直圆等铰链相比,直梁具有变形大、机构紧凑、易于加工等优点。如图 3(b)所示,平行杂交梁的中间部分为直梁,两端为增宽梁和直圆铰链,设驱动力为 F_y ,直梁部分的长度与宽度分别为 L_p , T_p ,增宽梁的长度与宽度为 $L=0.5$ mm, $T=T_p+1.6$ mm,直圆缺口型的半径为 $R=0.25$ mm。通过多种变形理论方法可求得梁型铰链的变形,本文采用卡式第二定理^[18],该方法对于计算外部载荷引起的梁变形方便有效,但仅限于遵循胡克定律的梁的弹性变形范围内。图 3 所示为平行杂交梁受外部载荷的示意图。



(a) 双端固定梁受外载荷模型

(a) Model of doubly clamped beam subjected to external load



(b) 平行杂交梁受外载荷模型

(b) Model of parallelogram hybrid beam subjected to external load

图 3 柔性梁受外载荷的模型

Fig. 3 Model of flexible beam subjected to external load

对于矩形截面的悬臂梁而言,根据卡氏第二定理,梁在 i 方向的位移变形为:

$$u_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (1)$$

其中: F_i 为 i 方向的力, U 为梁的总应变能,总应变能由弯曲应变能、剪切应变能、轴向应变能和扭转应变能组成。平台涉及的梁仅存在 y 方向的运动,受力 F_y 和弯矩 M_z 的作用,分别关于 F_y, M_z 求偏导,可得柔度 $C_{y F_y}, C_{y M_z}$ 分别为:

$$C_{y F_y} = \frac{12}{Eh} \int_0^L \frac{x^2}{t(x)^3} dx + \frac{\alpha}{Gh} \int_0^L \frac{1}{t(x)} dx, \quad (2)$$

$$C_{y M_z} = \frac{12}{Eh} \int_0^L \frac{x}{t(x)^3} dx. \quad (3)$$

将式(2)、式(3)带入下式,即可得到梁的柔度:

$$u_y = C_{y F_y} F_y + C_{y M_z} M_z, \quad (4)$$

其中: E 为材料的弹性模量, $t(x)$ 为截面尺寸, h 为平台高度。对于双端固定直梁,其 $t(x) = T_f$ 为定值,考虑边界条件后,柔度可表示为:

$$C_f = \frac{3L_f^3}{16EhT_f^3} + \frac{\alpha L_f}{4GhT_f}. \quad (5)$$

以平行杂交梁为例,其截面宽度可表示为:

$$t(x) = \begin{cases} T_p - 2\sqrt{x(2R-x)}, & x \in [0, 2R] \\ T_p, & x \in [2R, 2R+L_p] \\ T, & x \in [2R+L_p, 2R+L_p+L] \end{cases}. \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)即可得单个平行杂交梁的柔度为 C_p 。

2.3 平台的固有频率分析

平台的固有频率通常包含平台自身的固有频率以及考虑压电叠堆驱动器平台时的固有频率。首先考虑平台自身的固有频率时,平台系统可看成两自由度系统的自由振动,由拉格朗日方程^[19]可表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = 0, \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x^e & 0 \\ 0 & M_y^e \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: $\mathbf{q} = [x, y]^T$, M_x^e, M_y^e 分别表示平台在 x, y 方向的等效质量, K_x, K_y 为平台在 x, y 方向的等效刚度。令 $\mathbf{q} = \mathbf{A}\sin(\omega t + \theta)$, $\mathbf{A} = [A_x, A_y]^T$, 可得广义本征值问题 $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{A} = 0$, 则 \mathbf{A} 有非零解的充要条件为 $|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0$, 可得系统本征值 ω_1, ω_2 , 即角固有频率,那么平台的固有频率为:

$$f_{res} = \frac{\min[\omega_1, \omega_2]}{2\pi}, \quad (9)$$

式中 ω_1, ω_2 为系统的本征值,即固有角频率。同理,考虑压电叠堆驱动器,根据平台的结构,以 X 方向为例,此时平台可等效为图 4 所示的一阶无阻尼系统, M_p^e, M_s^e 分别表示压电叠堆驱动器的质量和平台的等效质量, K_p, K_s 分别表示压电叠堆驱动器的刚度和平台的方向刚度,则可得此时平台的固有频率为:

$$f_{1st} = \frac{\sqrt{(K_p + K_s)/(M_p^e + M_s^e)}}{2\pi}. \quad (10)$$

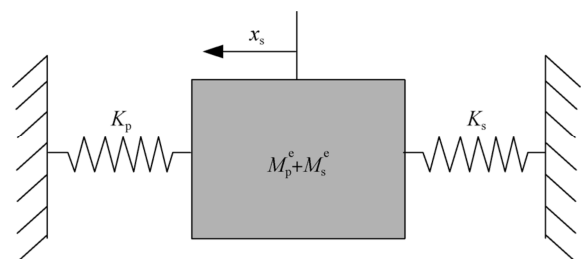


图 4 二阶无阻尼系统

Fig. 4 Second order undamped system

3 结构优化与仿真实验

3.1 尺寸优化设计

考虑现有的高带宽平台的研究现状,本文设计一个高固有频率(10 kHz 左右)的平台,并且拥有相对较大行程范围(15 μm 左右)及良好解耦性能的微纳定位平台。为了满足上述要求,需要量化平台的各项指标,除在上章节已得出的平台固有频率模型外,还应表征平台的工作空间,平台的最大应力以及梁柔度的约束关系,作为优化的约束方程。

3.1.1 工作空间

平台的行程作为平台系统的重要性能指标,主要受压电叠堆驱动器的名义行程和刚度以及平台刚度的影响,平台的行程可以表示为:

$$R = \frac{K_p R_{\text{nom}} - F_{\text{pre}}}{K_s + K_p}, \quad (11)$$

其中: R 为平台理论行程; K_p 为压电叠堆驱动器刚度, R_{nom} 为压电叠堆的名义行程; K_s 为平台方向刚度; F_{pre} 为预紧力,设定为 150 N。

3.1.2 平台的最大应力

通常采用最大应力来表征平台的强度,在本文平台的最大应力应出现在双端固定梁与平行杂交梁中。对于双端固定梁最大应力为梁的中点;对于平行杂交梁而言,主要变形集中于直圆缺口型铰链,远大于直梁部分的变形,因此计算该梁时,假设直梁部分为刚体。具体表达式如下:

$$\sigma_{\text{max}}^f = \frac{3L_f R}{2T_f^2 h C_f}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{max}}^p \leq \frac{6K_\theta K_t \arcsin(R/(R+L_p))}{(T_p - 2R)^2}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{max}} = \max[\sigma_{\text{max}}^f, \sigma_{\text{max}}^p], \quad (14)$$

其中: σ_{max}^f , σ_{max}^p 分别为固定梁、平行梁的最大应力, σ_{max} 为平台所受的最大应力; K_θ , K_t 是关于直圆缺口型铰链材料和尺寸的系数^[20]。 $[\sigma]$ 为许用应力,取材料屈服应力极限 σ 的 1/2。

3.1.3 梁柔度的约束关系

为了让平台达到高固有频率、低耦合误差的效果,需要双端固定直梁的方向刚度远远大于平行杂交梁的刚度。这里将双端固定直梁与平行杂交梁的刚度比约束在一定范围内,因为较大的刚度比使得平台得到较好的解耦效果,同时又不能

使平行杂交梁的刚度太低,以致于无法补偿寄生位移。因此,梁的柔度关系约束如下:

$$15 \leq \frac{C_p}{C_f} \leq 30, \quad (15)$$

其中 C_f , C_p 分别表示双端固定梁与平行杂交梁的柔度。

为了实现目标平台,可将工作空间、耦合程度等要求通过约束方程来实现,并将固有频率作为单一的优化目标函数,以期获得尽可能高的固有频率。根据优化目标,可将优化模型描述为:

$$f_{\text{obj}} = \min\{-f_{\text{res}}\},$$

$$\text{s. t. } -R \leq -15 \mu\text{m},$$

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma],$$

$$15 \leq \frac{C_p}{C_f} \leq 30,$$

$$x_{\text{min}} \leq x \leq x_{\text{max}}, \quad (16)$$

其中: f_{obj} 为优化的目标函数, f_{res} 为平台的固有频率。 $[\sigma]$ 为许用应力,取 250 MPa,为屈服应力极限 σ 的 1/2。设优化变量为双端固定直梁的长度与宽度以及平行杂交梁直梁段的长度与宽度,即 $x = [L_f, T_f, L_p, T_p]$ 。设置优化变量下限,使优化尺寸不至于过小从而影响平台的装配并增大加工难度,取 $x_{\text{min}} = [20, 1.5, 5, 0.8]$ mm;设置优化变量的上限避免平台不够紧凑,取 $x_{\text{max}} = [45, 5, 15, 1.5]$ mm。取初始变量为 $x_0 = [35.00, 3.00, 11.50, 1.20]$ mm,此时初始固有频率为 6.02 kHz。为了保证 Z 轴方向上的刚度及 Z 轴的固有频率大于平面方向的固有频率,将平台的厚度 h 设为 10 mm。平台选取 NALIAIC 型号为 NAC2014-H14 的压电叠堆驱动器,其名义行程为 19.8 μm ,刚度为 104 N/ μm 。平台采用的材料为航空铝 7075,其杨氏模量 E 、密度 ρ 和屈服应力极限 σ 分别为 71.7 GPa, 2 810 kg/ m^3 和 500 MPa。

针对该类有约束非线性多元函数的最值优化问题,本文采用 MATLAB R2016a 优化工具箱提供的“fmincon”优化函数来求解该优化问题,得出仅考虑平台自身时,平台的固有频率最高为 9.95 kHz,考虑压电陶瓷时平台的固有频率最高为 15.61 kHz,最优变量为 $x^* = [26.10, 2.50, 7.05, 0.80]$ mm。

3.2 有限元仿真分析

将理论的优化结果在 solidwork 2016 上进行

三维建模,在 ANSYS WORKBENCH 16.0 中导入平台的三维模型,对平台的静态性能和动态性能进行仿真分析,主要的性能指标如表 1 所示。由表 1 可知,理论分析与仿真分析的刚度误差、行程误差以及固有频率误差分别为 1.25%,0.20% 以及 3.21%,误差均在可接受的范围内。

表 1 柔顺平台性能的理论结果与仿真结果对比

Tab. 1 Contrast of theoretical results with finite element analysis results for characteristics of compliant stage

	刚度/(N·μm ⁻²)	行程/μm ²	固有频率/kHz
理论结果	22.57	15.09×15.09	9.95
仿真结果	22.28	15.13×15.13	9.62
误差/%	1.28	0.20	3.21

图 5 呈现了本文优化平台的前三阶模态(如图 5(a))和等尺度下导向梁为等宽直梁的传统平台(如图 5(b))。将两平台进行对比可知,在不损失固有频率的条件下,本文的优化平台在高频下其寄生方向的双端固定梁不会产生弯曲,弯曲刚度更大,有显著降低寄生运动的效果。经 ANSYS 分析,优化平台与传统平台在 1 阶模态下寄生方向的位移比例约为 1:15。

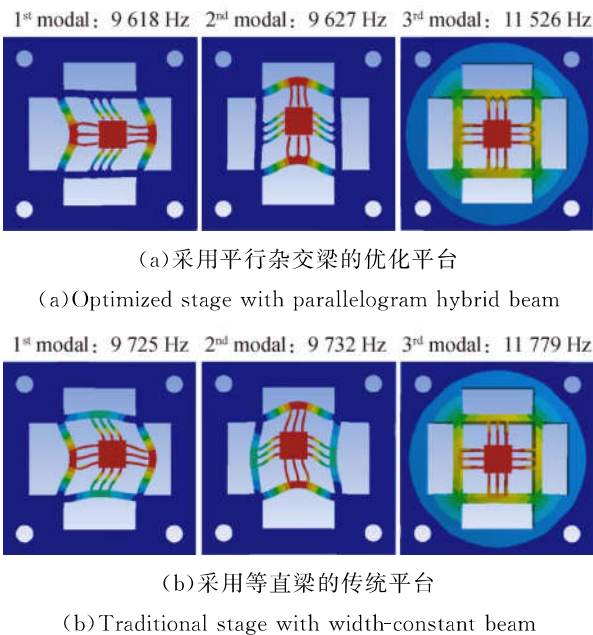


图 5 优化平台和同尺度下的传统平台的前三阶模态
Fig. 5 First three order modal of proposed stage and conventional stage in identical size

4 系统搭建与实验分析

4.1 系统搭建

根据参数优化结果,采用慢走丝线切割的加工方法加工了优化平台并搭建了实验系统(见图 6),实验系统配置包括:Gwinstek 型号为 AFG-2225 的信号发生器;DATA TRANSLATION 型号为 DT9857E 的动态信号分析仪;芯明天公司带宽为 10 kHz 的压电控制器;Dspace1104 实时仿真系统;工控机;微动台;两个 Microusense 型号为通道模块 8810+探头 2823、带宽为 20 kHz 的电容器传感器以及两个 NALIAC 型号为 NAC2014-H14 的压电叠堆驱动器。

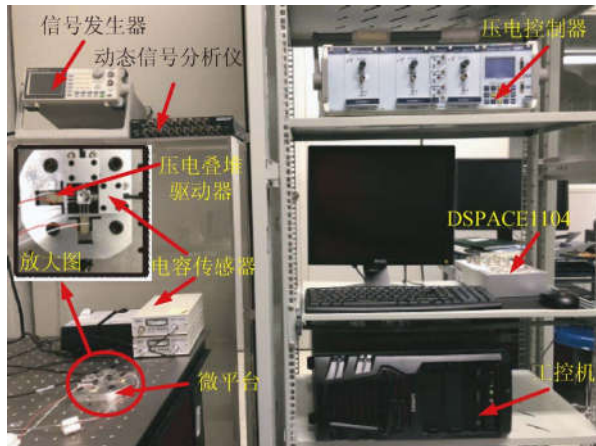


图 6 高带宽柔顺平台实验系统

Fig. 6 Experiment setup of high-bandwidth compliant stage

图 7 所示为实验系统的控制流程图,实线表示的控制线路主要进行微动台的行程实验、耦合实验以及三角波追踪实验;虚线表示的控制线路主要进行微动台的动态实验,以期获得实验台的频域响应函数。实线控制线路的工作流程大致包括:工控机在 Matlab Simulink 建立控制模型,发送数字信号到 DSPACE1104,随后通过 DAC 接口将数字信号处理成压电控制器可识别的模拟信号对压电叠堆驱动器进行控制,电容传感器获得微动台的位移信息后通过 ADC 接口经 DSPACE1104 传递至工控机进行相关处理。虚线控制线路的工作流程如下:信号发生器分别传递扫频信号至压电驱动器和动态信号分析仪中,前者对压电叠堆控制器进行控制,后者作为频域响应函数的参考信号;此外,动态信号分析仪还接

收电容传感器采集的位移信息,作为微动平台频响函数的响应信号。

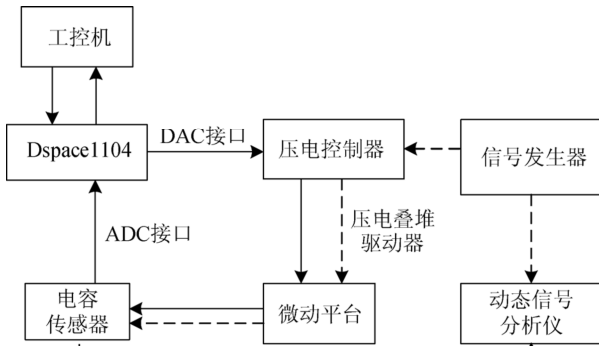


图 7 高带宽柔顺平台实验系统的控制流程

Fig. 7 Control flow-chart of high-bandwidth compliant stage system

4.2 实验分析

根据上述的实验系统及控制流程图,对平台进行行程实验、耦合实验、频率响应实验以及三角波追踪实验。其中,微动台的静动态实验结果如图 8 所示,图 8(a)和图 8(b)分别为平台 X 轴和 Y 轴行程及对应的耦合误差实验结果,实验的输入信号为周期 240 s,幅值 0~150 V 的三角波,系统的采样频率为 1 kHz;图 8(c)和图 8(d)分别对应平台 X 轴和 Y 轴的开环对数幅频特性图,实验的输入信号为周期 2 s,幅值 150 mV, 100 Hz~20 kHz 的正弦扫频信号,采用低幅值信号是为了避免压电陶瓷产生迟滞效应,窗函数选择汉宁窗,数据采样频率为 50 kHz。

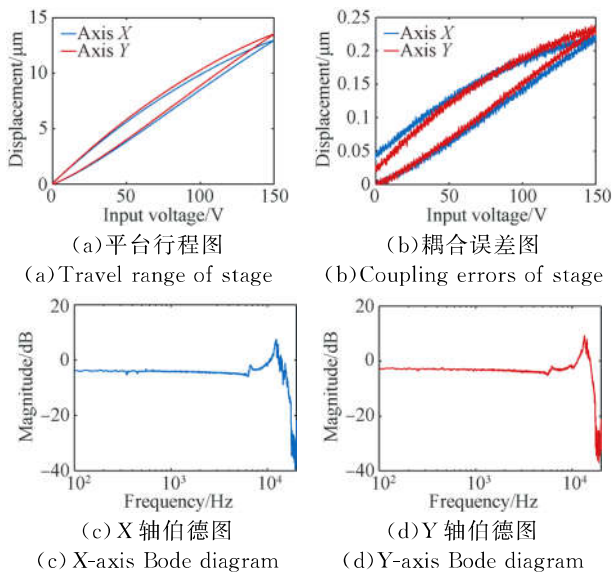


图 8 微动台静态与动态实验分析

Fig. 8 Static and dynamic analysis of nanopositioning stage

静态实验与动态实验的具体参数如表 2 所示; X 轴与 Y 轴的最大行程分别为 12.950 和 13.517 μm ; 最大耦合误差分别为 0.227 和 0.239 μm , 分别占总位移比例的 1.75%, 1.77%; 共振频率分别为 12.21 和 13.50 kHz。对比可知,平台的实验结果与理论结果有一定偏差,但在可接受的范围内;造成偏差的主要原因包括加工误差、装配时造成的预紧力过大及试验中侧向力对于压电陶瓷的损伤;动态实验的误差主要由于加工精度及预紧端刚度的影响。

表 2 静态与动态性能

Tab. 2 Static and dynamic performance

	最大行程/ μm	耦合误差/ μm	固有频率/kHz
X 轴	12.950	0.227(1.75%)	12.21
Y 轴	13.517	0.239(1.77%)	13.50

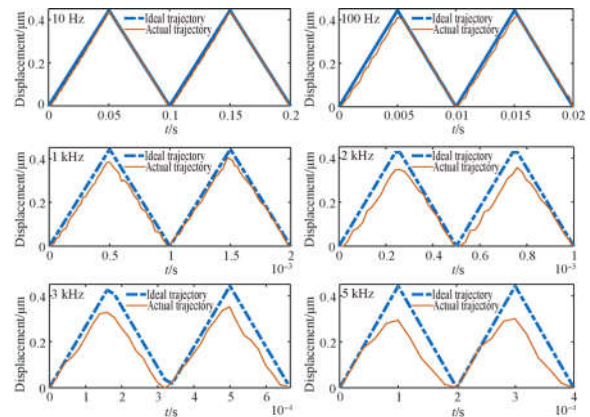


图 9 开环下平台的三角波追踪实验

Fig. 9 Tracking results of triangle wave in open-loop

追踪三角波信号的实验是衡量微动台带宽大小的一种重要方式^[3,9,10,14,15]。在本文的追踪试验中,输入信号采用幅值为 1~9 V, 频率包括 10, 100 Hz 及 1, 2, 3, 5 kHz 的三角波,系统的采样频率为 50 kHz。追踪实验结果如图 9 所示,其中实线为实际轨迹,虚线表示理想轨迹。值得一提的是追踪实验中存在 0.1 ms 的延时,已在系统进行补偿。表 3 列出了系统在不同频率三角波下的追踪性能。由实验结果可知,该平台在 1 kHz 以下的三角波频率拥有较好的追踪性能;在输入三角波频率达 2 kHz 以上,系统的最大误差与均方根误差明显增大,与理想轨迹出现偏差,但仍可追踪得到三角波信号的轨迹。此外,表 3 列出了开环状态下 Yong^[3]、Kenton^[10]平台的追踪误差,可以

看出在最大误差相差不大的情况下,此平台的均方根误差在开环条件下具有一定的优越性。

表3 三角波追踪误差

Tab.3 Triangle wave tracking errors

三角波 频率/Hz	最大误差占比/%		均方根误差占比/%		
	本文	Kenton ^[10]	本文	Yong ^[3]	Kenton ^[10]
10	9.59	*	3.05	*	*
100	11.20	9.7	4.67	3.31	6
200	11.41	*	4.84	5.02	*
300	11.78	*	4.97	16.48	*
400	11.97	*	5.01	18.00	*
1 000	13.20	14.5	6.38	*	10.7
2 000	22.80	20.6	12.06	*	15.7
3 000	24.40	*	13.99	*	*
5 000	33.60	*	19.63	*	*

注:“*”为原论文未给出数据。

参考文献:

- [1] 胡俊峰,陈星星.具有零刚度特性的微动平台优化设计[J].光学精密工程,2018,26(6):1430-1440. HU J F, ZHANG X X. Optimized design of a micro-motion stage with zero stiffness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1430-1440. (in Chinese)
- [2] WANG R Z, ZHANG X M. Parameters optimization and experiment of a planar parallel 3-DOF nanopositioning system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2388-2397.
- [3] YONG Y K, APHALE S S, REZA MOHEIMANI S O. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(1): 46-54.
- [4] ANDO T, KODERA N, TAKAI E, et al.. A high-speed atomic force microscope for studying biological macromolecules [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(22): 12468-12472.
- [5] CHEN K S, TRUMPER D L, SMITH S T. Design and control for an electromagnetically driven X-Y- θ stage [J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(4): 355-369.
- [6] ELMUSTAFA A, LAGALLY M G. Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations [J]. *Precision engineering*, 2001, 25(1): 77-81.
- [7] TIAN Y, SHIRINZADEH B, ZHANG D. Design and dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation [J]. *Micro-electronic Engineering*, 2010, 87(2): 230-241.
- [8] 刘敏,张宪民.基于类V型柔性铰链的微位移放大机构[J].光学精密工程,2017,25(4):999-1008. LIU M, ZHANG X M. Micro-displacement amplifier based on quasi-V-shaped flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 999-1008. (in Chinese)
- [9] 钟相强,黄卫清,张轩,等.二级杠杆柔性铰链复合结构的双足压电直线电机[J].光学精密工程,2018,26(1):86-94. ZHONG X, HUANG W Q, ZHANG X, et al.. Double-foot piezoelectric linear motor with secondary lever and flexure hinge composite structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 86-94. (in Chinese)
- [10] KENTON B J, LEANG K K. Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(2): 356-369.
- [11] WADIKHAYE S P, YONG Y K, REZA MOHEIMANI S O. A serial-kinematic nanopositioner for high-speed atomic force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(10): 105104.
- [12] MAHMOOD I A, MOHEIMANI S O R, BHIKKAJI B. A new scanning method for fast atomic force microscopy [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, 10(2): 203-216.
- [13] YONG Y K, MOHEIMANI S R, PETERSEN I R. High-speed cycloid-scan atomic force microsc-

5 结 论

本文设计了一种带宽高、行程大且耦合误差低的XY柔顺精密定位平台,对平台进行了尺寸优化,得到了最优的固有频率,并在开环下对加工样机进行了静动态实验及三角波追踪实验。实验结果表明,该平台在X,Y轴行程可以达到12.950和13.517 μm ,耦合误差占比为1.75%和1.77%,共振频率为12.21和13.50 kHz;在开环时,对频率小于1 kHz的三角波具有较好的追踪性能。未来考虑结合相关的控制方法,进一步提高平台的追踪性能。

- py[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(36): 365503.
- [14] TUMA T, LYGEROS J, KARTIK V, *et al.*. High-speed multiresolution scanning probe microscopy based on Lissajous scan trajectories [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(18): 185501.
- [15] YONG Y K, BHIKKAJI B, REZA MOHEIMANI S O R. Design, modeling, and FPAA-based control of a high-speed atomic force microscope nanopositioner [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3):1060-1071.
- [16] CAI K H, HE X B, TIAN Y L, *et al.*. Design of a XYZ scanner for home-made high-speed atomic force microscopy [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(7): 3123-3132.
- [17] CLAYTON G M, TIEN S, LEANG K K, *et al.*. A review of feed forward control approaches in nanopositioning for high-speed SPM [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2009, 131(6): 061101.
- [18] LIN R Z, ZHANG X M, LONG X J, *et al.*. Hybrid flexure hinges[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(8):085004.
- [19] 刘延柱,陈立群,陈文良. 振动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- LIU Y ZH, CHEN L Q, CHEN W L. *Mechanics of Vibration* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 吴鹰飞,周兆英. 柔性铰链转动刚度计算公式的推导 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(1): 125-128,137.
- WU Y F, ZHOU ZH Y. Deduction of Design Equation of Flexure Hinge [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(1): 125-128, 137. (in Chinese)

作者简介:



林盛隆(1993—),男,福建泉州人,博士研究生,2016年于中南大学获得学士学位,主要从事柔顺机构方面的研究。E-mail: 294703373@qq.com

导师简介:



张宪民(1964—),男,河北涿州人,教授,博士生导师,1993年于北京航空航天大学获得工学博士学位,主要从事精密柔顺机构、精密定位系统和机器视觉等方面的研究。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

通讯作者:



朱本亮(1986—),男,安徽宿州人,副教授,2014年于华南理工大学获得博士学位,主要从事柔顺机构拓扑优化理论与方法,微纳操作机构及相关设计方法的研究。E-mail: meblzhu@scut.edu.cn