宏微复合驱动*XY*工作台解耦设计与实验研究

喻曹丰[1,2*] 杨 坤[1] 沈 刚[1] 肖志豪[1] 王 宁[1]
1.安徽理工大学机电工程学院,淮南,232001
2.浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室,杭州,310027

摘要:为满足高端装备制造领域对高性能*XY*工作台的需求,提出了一种具有大行程和高精度特性的宏微复合驱动*XY*工作台设计方案。首先设计了一种新型的串并联混合解耦导向机构,并基于键合图理论建立了工作台的动力学模型;然后将有限元法与响应面法相结合,优化了宏微复合驱动器(MMCA)的输出力和宏动误差补偿量;进而通过静力学和模态分析获得了工作台的有效负载能力和振动特性;最后加工了工作台样机,搭建实验测试平台进行测试。结果显示:优化后的MMCA在电流为4 A时,输出力为135 N,宏动误差补偿量为34 μm,较优化前分别增大了32.61 %和12.1 %;工作台的工作范围为49.94 mm×50.04 mm,*X*方向和*Y*方向的交叉耦合率分别为0.0511 %和0.0549 %;在未采用微动补偿情况下进行1、20、49 mm宏动大行程定位测试,两方向的稳态位移误差均小于20 μm;当采用微动补偿进行49 mm大行程定位时,*X*方向与*Y*方向的最大误差分别为0.25 μm和0.21 μm;在分辨力实验中,*X*方向与*Y*方向的分辨力分别达到59 nm和56 nm。研究结果表明,所提宏微复合驱动*XY*工作台具有大行程、低交叉耦合率和高分辨力等优点,该成果为高端装备制造领域提供高性能*XY*工作台奠定了理论与技术基础。

关键词:宏微复合驱动器;*XY*工作台;混合解耦;键合图;响应面法;精密定位
中图分类号:TH703
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.008 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Decoupling Design and Experimental Research of *XY* Workbenchs Driven by MMCA

YU Caofeng[1,2*] YANG Kun[1] SHEN Gang[1] XIAO Zhihao[1] WANG Ning[1]
1.School of Mechatronics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui, 232001
2.State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: In order to meet the demands of high-end equipment manufacturing for high-performance *XY* worktables, a design scheme was proposed for the *XY* workbench driven by macro-micro composite with long stroke and high precision characteristics. Firstly, a novel series-parallel hybrid decoupling guidance mechanism was designed, and the dynamics model of the workbenchs was established based on bond graph theory. Secondly, the finite element method and response surface methodology were combined to optimize the output forces and macro-motion error compensation of the MMCA. Then, through static and modal analysis, the effective load capacity and vibration characteristics of the worktable were obtained. Finally, a prototype of the worktable was fabricated, and an experimental test platform was set up for testing. The results show that the optimized MMCA achieves an output forces of 135 N and a macro-motion error compensation of 34 μm at a current of 4 A, representing increases of 32.61% and 12.1%, respectively, compared to the pre-optimization values. The worktable's working range is 49.94 mm×50.04 mm, with cross-coupling rates of 0.0511% and 0.0549% in the *X* and *Y* directions, respectively. During macro-motion positioning tests with strokes of 1 mm, 20 mm, and 49 mm without micro-motion compensation, the steady-state displacement errors in both directions are less than 20 μm. When micro-motion compensation is applied for 49 mm stroke positioning, the maximum errors in the *X* and *Y* directions are 0.25 μm and 0.21 μm, respectively. In the resolution experiments, the resolutions in the *X* and *Y* direc-

收稿日期:2025-03-06
基金项目:国家自然科学基金(52105042);国家自然科学基金联合基金重点项目(U21A20125);安徽省自然科学基金(2508085ME134);流体动力基础件与机电系统全国重点实验室开放基金(GZKF-202302)

tions reachs 59 nm and 56 nm, respectively. The results demonstrate that the proposed XY workbench driven by MMCA offers advantages such as large stroke, low cross-coupling rate, and high resolution, providing a theoretical and technical foundation for high-performance XY workbenches in high-end equipment manufacturing.

Key words: macro-micro composite actuator(MMCA); XY workbench; hybrid decoupling; bonding diagram; responsive surface optimization; precision positioning

0 引言

精密定位XY工作台在各类科研和工业应用中发挥着重要作用，如半导体制造领域[1-3]、生物医疗工程[4-5]、光学领域[6]等。目前，为实现高定位精度，现有精密定位XY工作台多采用压电驱动器驱动[7-8]，但随着加工需求的不断提高，压电驱动器因驱动行程较小，难以同时满足大行程、高定位精度的应用场合。因此，设计和开发一款兼具大行程、高定位精度和高载荷能力的精密定位XY工作台具有重要意义。

由于音圈电机(voice coil motor，VCM)[9-10]与压电驱动器[11-12]相比具有更大的行程和更高的加速度等特性，长久以来，将VCM与柔性机构相结合设计精密定位XY工作台，成为解决其定位行程短的有效方式之一。如TIAN等[13]设计了一款新型的摩擦驱动XY工作台，该工作台在X向和Y向的最大位移分别是11.3 μm和10.6 μm，水平负载能力为1.2 N，分辨力为20 nm。ZHANG等[14]设计了一款VCM驱动的新型柔性XY微定位工作台，该工作台可以提供7.0873 mm×7.0873 mm的运动范围。LIN等[15]结合VCM大行程的特点设计了一种结构紧凑、工作范围为0.6 mm×2.0 mm的XY混合运动的高精度定位工作台，X向和Y向的谐振频率分别为125.98 Hz和32.96 Hz，工作台的分辨力为6 μm。CAI等[16]设计了一种基于二自由度弯曲的微纳米定位工作台，该工作台在X向和Y向的有效行程分别为2.13 mm和2.02 mm，分辨力小于250 nm。FAN等[17]基于自身团队设计的VCM研发了一种XY工作台，该工作台的运动范围为20.4 mm×20.6 mm，分辨力为100 nm，X向和Y向的谐振频率分别为22.98 Hz和21.31 Hz。XU等[18]研制了一种并联精密定位工作台，该工作台的定位范围为11 mm×11 mm，分辨力为200 nm，X向和Y向的谐振频率都约为30 Hz。上述精密定位XY工作台均采用了并联机构进行传动，使得X向与Y向之间的机械交叉耦合度较高，需采用复杂的机械结构来进行解耦。

笔者将直线导轨与交叉滚子导轨相结合，设计了一种串并联混合解耦导向机构，并以宏微复合驱动器(macro-micro composite actuator，MMCA)作为驱动装置，提出了一种具有大行程和高精度特性的宏微复合驱动XY工作台设计方案。为验证设计方案的可行性，基于键合图理论，建立了工作台的动力学模型；将有限元法与响应面法相结合，优化了MMCA的输出力和位移补偿量；采用静力学分析和模态分析，获得了工作台的有效负载能力和振动特性；研制工作台样机，搭建实验测试平台，对宏微复合驱动XY工作台的性能进行了测试。

1 XY工作台的结构与原理

宏微复合驱动XY工作台的结构如图1所示，其尺寸为560 mm×560 mm×180 mm，设计运动范围为50 mm×50 mm，主要由2个MMCA、2个连接器、支架、导向机构和载物台组成。采用2个MMCA并联再与载物台串联的设计方式，使得该工作台无论在哪个方向运动，载物台都会随之运动。此设计方案不仅能降低工作台结构的复杂性，还能降低控制难度，增加运动平稳性。

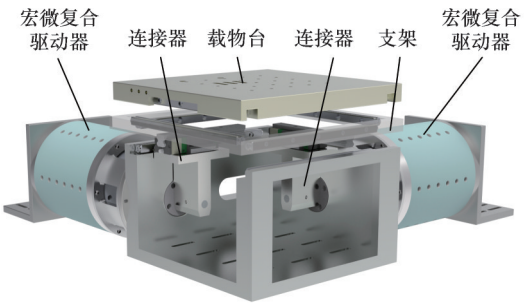


图1 宏微复合驱动XY工作台结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of XY worktable driven by macro-micro composite

导向机构是宏微复合驱动XY工作台实现运动传递与解耦的关键。所提新型串并联混合解耦导向机构结构如图2所示，其尺寸为240 mm×240 mm×180 mm，主要由载物台、支架、底座、直线导轨和交叉滚子导轨组成。MMCA与连接器固接，连接器再通过直线导轨与载物台连接，将MMCA的驱动力通过直线导轨传递给载物台；四对交叉滚子两两对称布置在支架四周，分别与底

座以及载物台上固定的交叉滚子导轨配合。当载物台需要在X方向移动时，载物台上的交叉滚子导轨与支架上的交叉滚子导轨将会产生相对位移；当载物台需要在Y方向移动时，支架与载物台将作为一个整体，支架上的交叉滚子导轨与固定在底座上的交叉滚子导轨产生相对位移，使得XY工作台获得解耦能力。

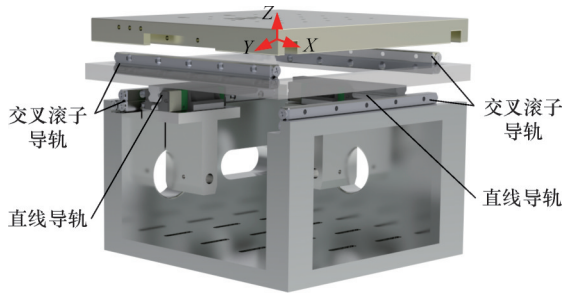


图2　串并联混合解耦导向机构结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of the series-parallel hybrid decoupling guidance mechanism structure

本文提出的串并联混合解耦导向机构使XY工作台整体结构呈对称布置，X方向和Y方向无高度差且负载基本相同，相较于传统柔性铰链、多连杆和弹性元件解耦方式，显著降低了机械复杂度，避免了传统堆叠式布局中重心偏高、惯性大及悬臂效应等问题，使得XY工作台的X方向和Y方向可以独立驱动，且在理论上具备相同的运动特性。

2　XY工作台的建模与分析

宏微复合驱动XY工作台驱动装置的分析详见文献[19]，本文只对传动部分进行分析。由于宏微复合驱动XY工作台为对称布置，X方向和Y方向具有一致性，故仅对工作台在X方向进行动力学建模。宏微复合驱动XY工作台在X方向的动力学模型如图3所示。

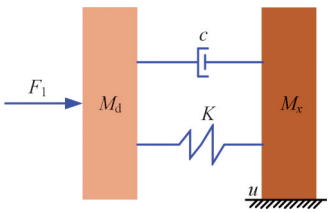


图3　工作台X方向的动力学模型

Fig.3　Dynamic model of the workbench in the X-direction

图3中，F_1为MMCA的输出力，M_d和M_x分别为MMCA运动部件的质量和X方向载物台的质量；K和C分别为MMCA与载物台之间相连部分的刚度和阻尼；u为直线导轨和交叉滚子导轨的黏性摩擦因数。

考虑工作台的响应速度主要受MMCA宏动部分的影响，对MMCA的宏动部分和载物台整体进行分析，建立了图4所示的工作台X方向的全局键合图模型。

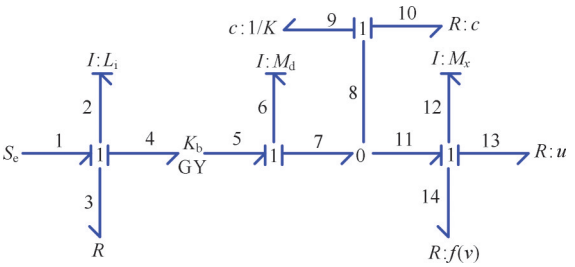


图4　工作台X方向的全局键合图模型

Fig.4　Global bond graph model of the workbench in the X-direction

图4中，I为宏动部分的线圈电流，S_e为宏动部分线圈两端的电压，线圈电感L_i为惯性元件，线圈电阻R为阻性元件，GY为回转器，表示MMCA将电能转换为机械能，K_b为磁场能量转换系数。

为准确分析工作台的动力学特性，需建立系统的状态空间方程。一般取容性元件的广义位移和惯性元件的广义动量作为系统的状态变量[20-21]。在此取工作台X方向的全局键合图的状态变量为$\boldsymbol{x}=[p_2 \quad p_6 \quad q_9 \quad p_{12}]^{\mathrm{T}}$，其中，$p_2$代表MMCA宏动部分线圈磁通量，$p_6$代表MMCA运动部件动量，$q_9$代表MMCA与载物台之间相连部分的变形量，$p_{12}$代表X方向载物台的动量。

MMCA的宏动部分线圈两端的电压e_1为输入变量：

$$\boldsymbol{U}=[e_1] \tag{1}$$

X方向载物台的运动速度f_{12}为输出变量：

$$\boldsymbol{y}=[f_{12}] \tag{2}$$

根据键合图的基本元件定义，状态变量$\boldsymbol{x}$、势变量e、流变量f之间的关系可表示为

$$\boldsymbol{x}=[p_2 \quad p_6 \quad q_9 \quad p_{12}]^{\mathrm{T}}=\left[f_2 L \quad f_6 M_d \quad \frac{e_9}{K} \quad f_{12} M_x\right]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：L为宏动部分线圈的总长度。

工作台X方向的全局键合图模型中，阻性元件的势变量和流变量的关系式为

$$[e_3 \quad e_{10} \quad e_{13} \quad e_{14}]^{\mathrm{T}}=[Rf_3 \quad cf_{10} \quad uf_{13} \quad f(f_{14})]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

由键合图模型的基本元件积分因果可得

$$\dot{\boldsymbol{x}}=[\dot{p}_2 \quad \dot{p}_6 \quad \dot{q}_9 \quad \dot{p}_{12}]^{\mathrm{T}}=[e_2 \quad e_6 \quad f_9 \quad e_{12}]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

根据功率流，可得工作台X方向的全局键合图模型的“0”结和“1”结所对应的势变量与流变量关系，见表1。

由式(3)、式(4)和表1并结合结5的流变量关

表1 各结对应的势变量与流变量的关系

Tab.1 Relationship between effort variables and flow variables for each section

结	势变量	流变量
1	$e_1=e_2+e_3+e_4$	$f_1=f_2=f_3=f_4$
GY	$e_4=K_b f_5$，$e_5=K_b f_4$	⋮
1	$e_5=e_6+e_7$	$f_5=f_6=f_7$
0	$e_7=e_8=e_{11}$	$f_7=f_8+f_{11}$
1	$e_8=e_9+e_{10}$	$f_8=f_9=f_{10}$
1	$e_{11}=e_{12}+e_{13}+e_{14}$	$f_{11}=f_{12}=f_{13}=f_{14}$

系$f_5=f_6$且$p_6=M_d f_6$可得

$$\left.\begin{aligned} e_2&=e_1-e_3-e_4\\ e_3&=f_3R=\frac{p_2}{L}R\\ e_4&=K_b\frac{p_6}{M_d}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

$$\dot{p}_2=e_2=-\frac{R}{L}p_2-\frac{K_b}{M_d}p_6 \tag{7}$$

由结5和结7的势变量关系，$e_6=e_5-e_7$，$e_7=e_8=e_9+e_{10}$，结合表1可得

$$e_5=K_b f_4=K_b\frac{p_2}{L} \tag{8}$$

由容性元件和阻性元件本构关系可得$e_9=Kq_9$，$e_{10}=cf_{10}$，则有

$$e_8=e_9+e_{10}=Kq_9+cf_{10}=Kq_9+c(f_6-f_{11})=$$
$$Kq_9+c\left(\frac{p_6}{M_d}-\frac{p_{12}}{M_x}\right) \tag{9}$$

$$\dot{p}_6=e_6=\frac{K_b}{L}p_2-\frac{c}{M_d}p_6-Kq_9+\frac{c}{M_x}p_{12} \tag{10}$$

同理可推出

$$\dot{p}_9=f_9\qquad \dot{p}_{12}=f_{12} \tag{11}$$

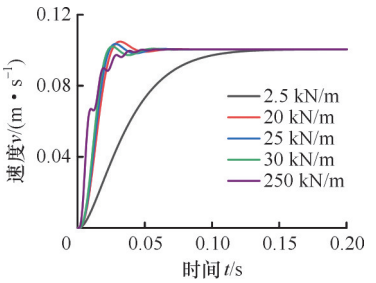
整理可得工作台X方向的状态空间方程：

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}_x\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_x u\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}_x\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}_x u\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

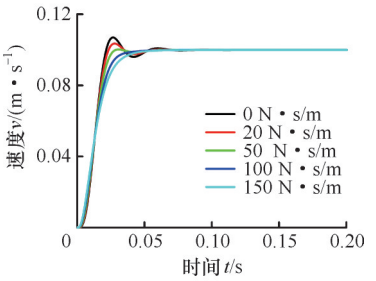
$$\boldsymbol{A}_x=\begin{bmatrix}-\frac{R}{L}&-\frac{K_b}{M_d}&0&0\\ \frac{K_b}{L}&-\frac{c}{M_d}&-K&\frac{c}{M_x}\\ 0&\frac{1}{M_d}&0&-\frac{1}{M_x}\\ 0&\frac{c}{M_d}&K&-\frac{c+u}{M_x}\end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{B}_x&=\begin{bmatrix}1&0&0&0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{C}_x&=\begin{bmatrix}0&0&0&\frac{1}{M_x}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{D}_x&=0\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

因MMCA与载物台连接部分的刚度和阻尼影响整个系统的动力学特性，探究其最优刚度和阻尼对工作台的动力学研究具有重要意义。图5所示为不同刚度和阻尼值时工作台X方向的动态响应特性，仿真时的相关参数见表2。



(a)不同刚度时工作台X方向动态特性



(b)不同阻尼时工作台X方向动态特性

图5 工作台X方向动态特性

Fig.5 Dynamic characteristics of the workbench in the X-direction

表2 工作台X方向相关参数

Tab.2 Parameters related to the X-direction of the workbench

部件	参数	值
MMCA	运动部件质量M_d/kg	2
	电感L_i/H	0.017
	电阻R_i/Ω	6.7
	力常数K_b/(N·A^{-1})	35.16
X方向载物台	质量M_X/kg	1.5
	黏性摩擦因数μ	120

当增大MMCA与载物台连接部分的刚度和阻尼时，系统的响应速度增加，但会出现明显的振荡现象；降低刚度和阻尼又会影响系统的响应速度。因此，MMCA与载物台之间连接部分的刚度和阻尼影响着系统的响应速度与稳定性，在精密定位系统中，阻尼值常根据实际阶跃响应曲线调整至满足超调量(小于10%)和稳定时间要求[22]。综合考虑，选择$K=2.5\times10^4$ N/m，$c=100$ N·s/m，从而进一步指导MMCA与载物台连接部分的设计以及后续实验。

3 XY工作台的仿真与优化

3.1 MMCA的性能优化

由于采用MMCA作为宏微复合驱动XY工作台的驱动装置，故其性能直接影响XY工作台的性能，如MMCA的输出力影响工作台的运动速度和加速度，MMCA的微动磁场影响着XY工作台宏动误差补偿量。而在响应面优化方法中，

Box-Behnke Design方法较Central Composite Design方法具有实验点少、效率高以及灵活性高的优点。因此，根据文献[19]，在不增大MMCA整体体积的情况下，以增大MMCA输出力和宏动误差补偿量作为响应目标，采用Box-Behnke Design方法设计分析数据，构建MMCA的外磁轭厚度(A)、永磁体厚度(B)、宏动磁轭厚度(C)、微动磁轭厚度(D)与响应目标之间的关系，并基于有限元模型进行相关参数的响应分析。图6为MMCA的结构示意图，相关参数设计初始值如表3所示。

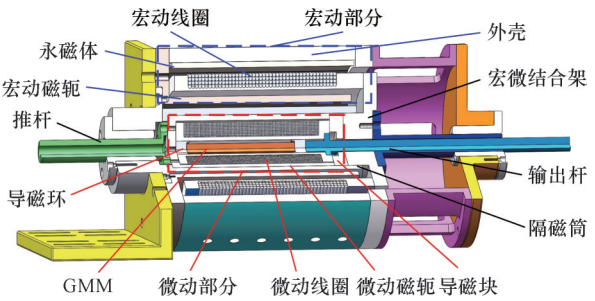


图6　MMCA的结构示意图

Fig6　Schematic diagram of the MMCA structure

表3　相关参数的初始值

Tab.3　Initial values of related parameters　mm

A	B	C	D
10	4	5	4

利用Box-Behnke Design方法得到的输出力(E)和宏动误差补偿量(F)的二次回归模型分别为

$$E=101.77+0.2226A+35.7B+4.54C+0.08D+0.1309AB+0.0239AC+0.0007AD+1.75BC+0.003BD-0.0111CD-0.0281A^2+0.0688B^2+0.081C^2-0.0143D^2 \quad (15)$$

$$F=30.69-0.0012A-0.1776B+0.0317C+2.8D-0.0016AB+0.0005AD+0.0228BC+0.0711BD-0.0143CD+0.0003A^2-0.0022B^2-0.0057C^2-0.4146D^2 \quad (16)$$

对上述两个回归模型分别进行方差分析可知，两方程的$P<0.0001$，表明两方程的拟合水平极好，且校正系数值R^2均大于0.999，说明该模型可以较好地反映输出力、宏动误差补偿量与4个参数之间的关系。图7为MMCA输出力和宏动误差补偿量相对应的正态概率分布图、预测值与实际值的分布图。由图7a、图7c可知，MMCA的输出力和宏动误差补偿量的正态概率分布都趋向于一条直线；由图7b、图7d可知，预测值与实际值都分布在一条直线上，表明利用响应面法拟合模型的适应性较佳。

在不改变原有MMCA尺寸的情况下，以增大MMCA的输出力(E)和宏动误差补偿量(F)为目标进行优化，得到的优化结果见表4。

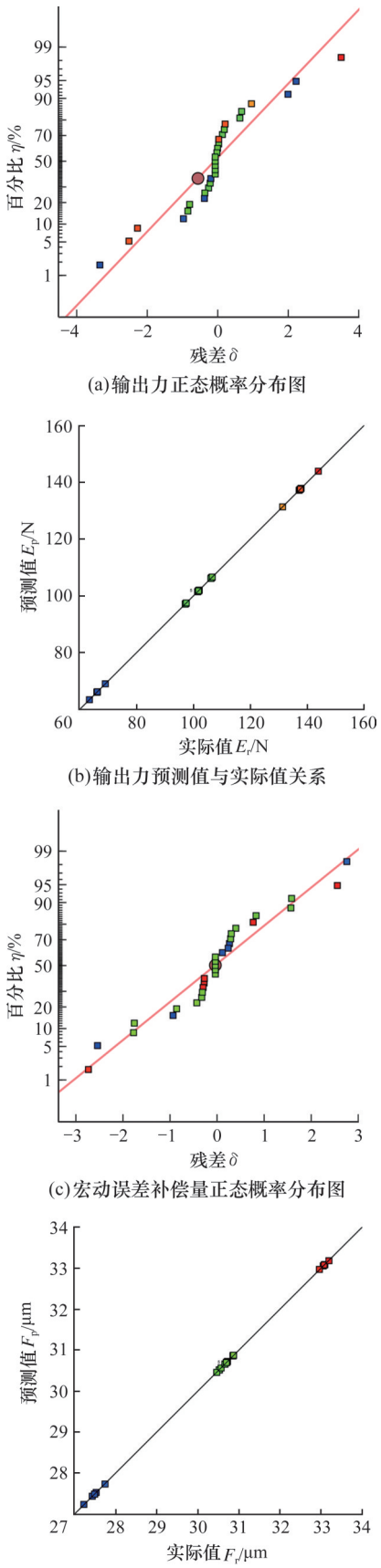


图7　响应面分析图

Fig.7　Response surface analysis plot

表4 Box-Behnke design得出的最优解

Tab.4 Optimal solution derived from Box-Behnken design

	A	B	C	D	E	F	合意性
值	9.96	5.0	5.99	5.0	143.922	33.003	0.984
取整	10.0	5.0	6.0	5.0			
单位	mm	mm	mm	mm	N	μm	

结合表4和图6可知，当外磁轭的厚度(A)不变时，MMCA的整体结构尺寸也不会发生变化。优化前后MMCA的输出力和宏动误差补偿量对比如图8所示。

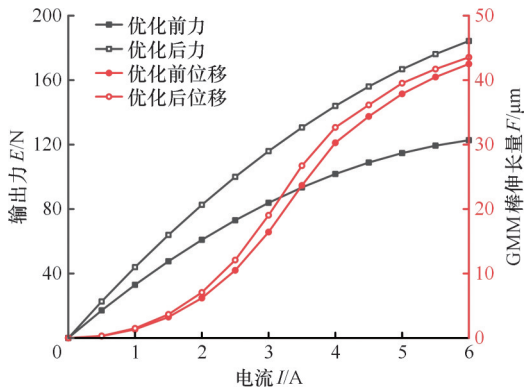


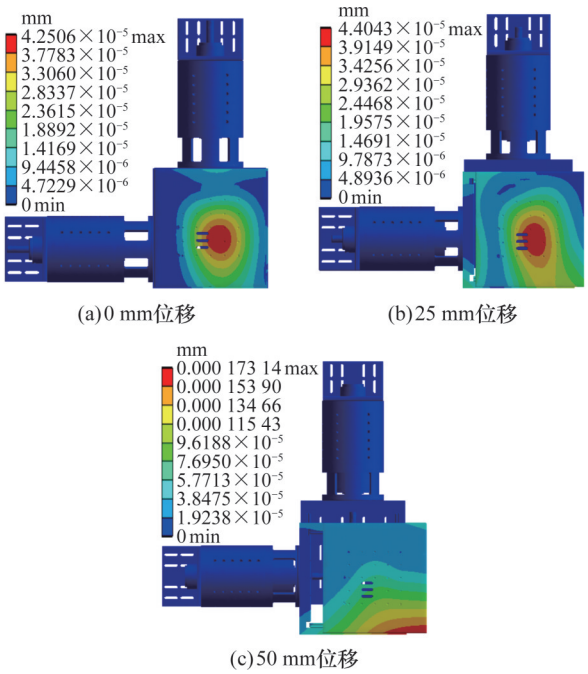
图8 优化前后MMCA性能的对比

Fig.8 Comparison of MMCA performance before and after optimization

由图8可知，优化后的结构比优化前的结构在输出力和宏动误差补偿量方面都有显著增加，尤其是当电流为4 A时，输出力为144 N，宏动误差补偿量为32.66 μm，较优化前输出力增大了41.44 %，宏动误差补偿量增大了7.87 %。

3.2 *XY*工作台的静力学分析

为确保载物台不因负载和位移的变化而在X和Y方向上变形过大，影响宏微复合驱动XY工作台的定位精度，采用静力学仿真分析法，分析了宏微复合驱动XY工作台在不同负载、不同位移下的变形情况，结果如图9和表5所示。



(a)0 mm位移 (b)25 mm位移

(c)50 mm位移

图9 *XY*工作台在50 N负载下不同位移时的变形

Fig.9 Deformation of the *XY* workbench under a 50 N load at different displacements

由图9可知，宏微复合驱动XY工作台在50 N负载下、0～50 mm位移时，工作台的整体变形在向X的正方向和Y的正方向移动，这是由于载物台产生位移时，连接器和支架的位移使载物台下端的支撑情况发生了轻微变化。由图9和表5可知，当工作台的负载由50 N增大到250 N时，载物台在两个方向上的变形都在增加，单个方向上的最大变形值仅为40 nm，可认为对宏微复合驱动XY工作台的定位精度没有影响。

表5 工作台在不同负载下产生位移时的变形

Tab.5 Deformation of the worktable under different loads during displacement

负载	0 mm位移		25 mm位移		50 mm位移	
	X/mm	Y/mm	X/mm	Y/mm	X/mm	Y/mm
50 N	5.48×10^{6}	3.91×10^{6}	8.63×10^{6}	8.38×10^{6}	1.26×10^{5}	1.11×10^{5}
100 N	1.09×10^{5}	7.81×10^{6}	1.72×10^{5}	1.68×10^{5}	2.52×10^{5}	2.21×10^{5}
150 N	1.65×10^{5}	1.17×10^{5}	2.59×10^{5}	2.51×10^{5}	3.78×10^{5}	3.32×10^{5}
200 N	2.19×10^{5}	1.56×10^{5}	3.45×10^{5}	3.35×10^{5}	5.04×10^{5}	4.42×10^{5}
250 N	2.74×10^{5}	1.95×10^{5}	4.31×10^{5}	4.19×10^{5}	6.29×10^{5}	5.23×10^{5}

3.3 *XY*工作台的模态分析

为获得宏微复合驱动XY工作台结构体系的振动特性，对其进行模态分析，以验证设计的可行性。如图10所示，仿真的四种振型为载物台在位移方向上主要的振动，分别为1820、2689、2991、3661 Hz，而宏微复合驱动XY工作台在工作时所受的激励频率远小于该频率，因此，XY工作台设计合理，不会因发生共振现象而影响结构的稳定性。

4 实验研究

为验证仿真结果以及评估宏微复合驱动XY工作台的性能，加工实验样机并搭建了图11和图

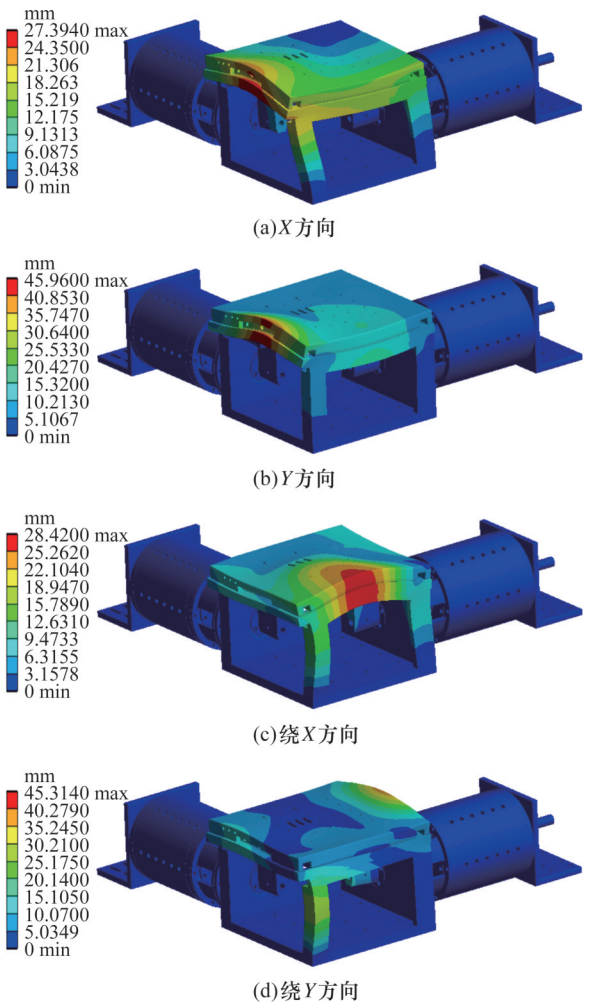


图 10　宏微复合驱动*XY*工作台四种模态振型

Fig.10　Four modal vibration modes of *XY* workbench driven by macro-micro composite

12所示的实验装置。在进行后续实验时，所有实验装置均置于隔振台上，温度、湿度分别为23±0.5℃和50%±3% RH，背景噪声不大于40 dB。图11所示为MMCA输出力测试平台。其中，微小型测力传感器的型号为ZNHBM，传感器的读数显示控制仪的型号为BSCC-N2；笔式位移传感器型号为GT2-P12K，搭配的放大单元为GT2-71MCN。图12a所示为MMCA样机，图12b所示为宏微复合驱动*XY*工作台，图12c所示为实验装置。采用了两个相同的雷尼绍光栅位移传感器（型号为RGH24O30A30A）测量工作台在*X*方向和*Y*方向的性能，其动态分辨力为10 nm。

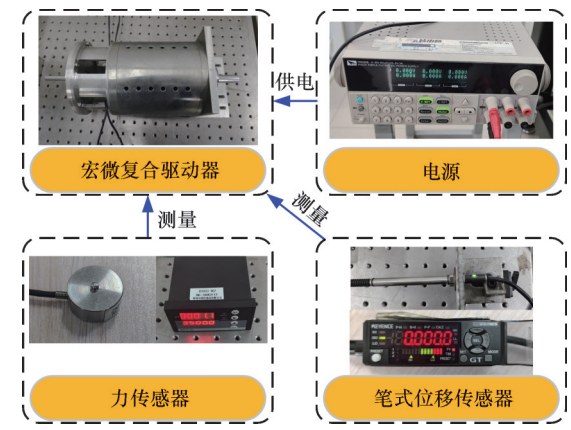


图 11　MMCA输出力测试平台

Fig.11　MMCA output force testing platform

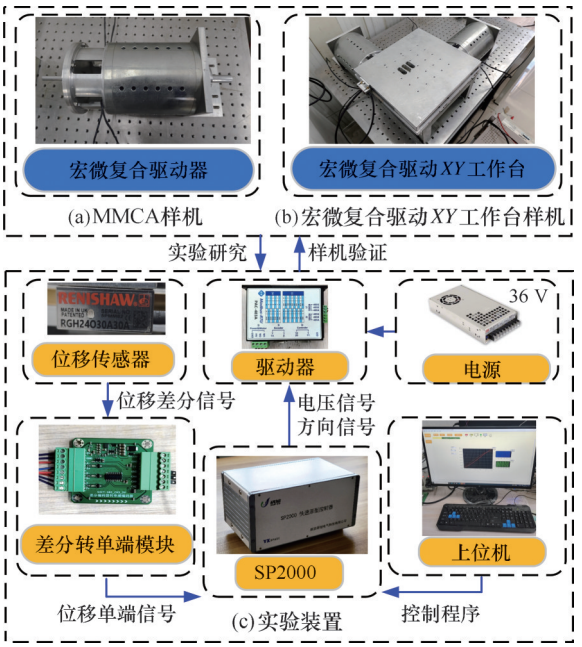


图 12　样机和实验装置

Fig.12　Prototype and experimental setup

4.1　MMCA的性能测试

为验证MMCA优化结果的准确性，进行了MMCA的性能测试，得到图13所示的测试结果。由图13可知，经优化后的MMCA在电流为4 A时，最大输出力达135 N，宏动误差补偿量达34 μm，较优化前分别增加了32.61 %和12.1 %。与仿真结果相比，输出力略小的主要原因可能是线圈缠绕的均匀性、零件加工及装配误差等，而宏动误差补偿量略大的主要原因是在仿真时未考虑温升对GMM棒的影响。

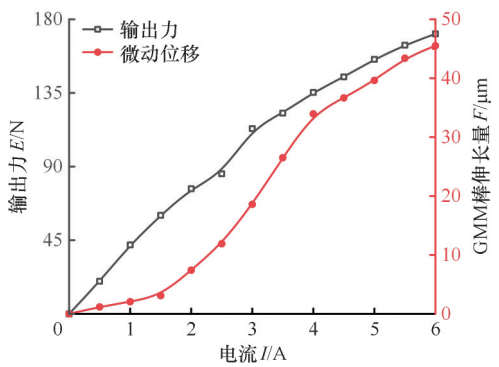


图 13　MMCA的优化结果测试

Fig.13　Optimization result testing of the MMCA

4.2　*XY*工作台的性能测试

4.2.1　位移耦合测试

分别在*X*向和*Y*向的MMCA上通入频率为

1 Hz、大小为18 V的正弦电压，得到宏微复合驱动XY工作台在两个方向的最大行程以及交叉耦合，如图14所示。

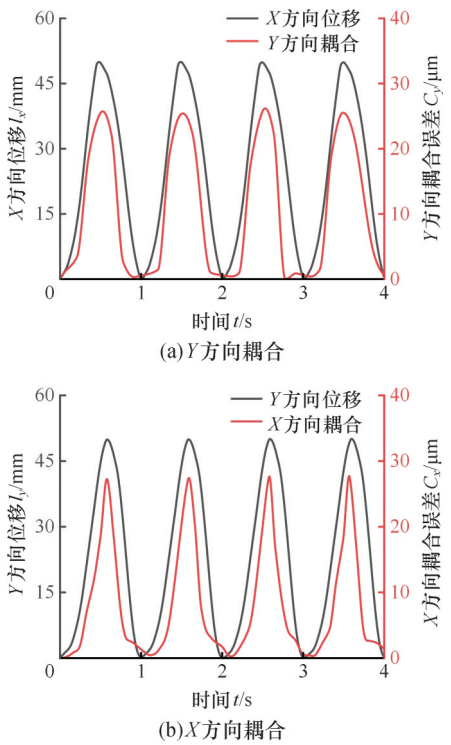


图14 位移耦合测试

Fig.14 Displacement coupling test

由图14可知，在通入正弦电压后，宏微复合驱动XY工作台在X方向和Y方向的最大位移分别为49.94 mm和50.04 mm，与50 mm的初始设计目标值相差仅0.06 mm。当X方向达到最大位移时，Y方向的交叉耦合值为25.525 μm，交叉耦合率为0.0511 %；当Y方向达到最大位移时，X方向的交叉耦合值为27.500 μm，交叉耦合率为0.0549 %。这些微小差异主要归因于制造、装配以及材料的参数误差，从而验证了结构设计的正确性与合理性。

上述分析只考虑了宏微复合驱动XY工作台单方向驱动时的位移曲线，但在实际应用中，宏微复合驱动XY工作台通常在两个方向上同时驱动，因此需要研究宏微复合驱动XY工作台在两个方向同时驱动时的位移曲线。将频率为1 Hz、大小为18 V的正弦电压同时施加到X向和Y向的MMCA上，得到宏微复合驱动XY工作台的位移曲线，如图15所示。由图15可知，位移曲线在两个方向上均保持了较好的正弦运动模式，表明XY工作台在两个方向同时驱动时耦合运动的影响很小。

4.2.2 轨迹测试

为进一步验证宏微复合驱动XY工作台的性能，对其进行正方形轨迹测试，结果如图16所示。由图16可知，实际轨迹与目标轨迹之间存在一些偏差，这主要是因为X方向与Y方向的性能差异和耦合误差的存在，以及在该测试中没有执行更加优异的控制策略。尽管存在这些偏差，但该工作台在无优异控制策略的情况下仍可执行一些简单轨迹，更加增强了该工作台在轨迹跟踪应用中的潜力。后续将开展更加优异的控制策略研究，进一步提高该XY工作台的定位和跟踪性能。

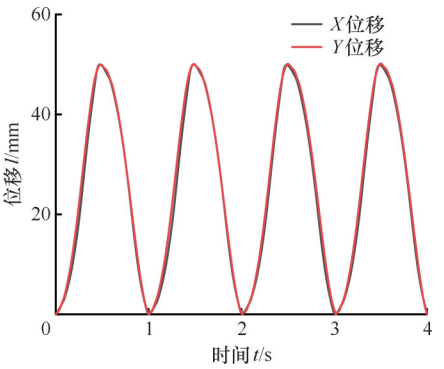


图15 X方向和Y方向同时驱动时的位移曲线

Fig.15 Displacement curves when driving simultaneously in the X and Y directions

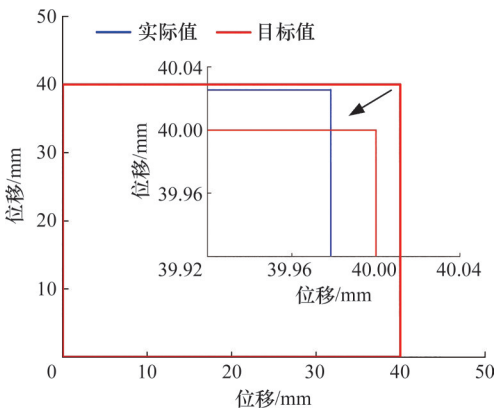


图16 正方形轨迹测试

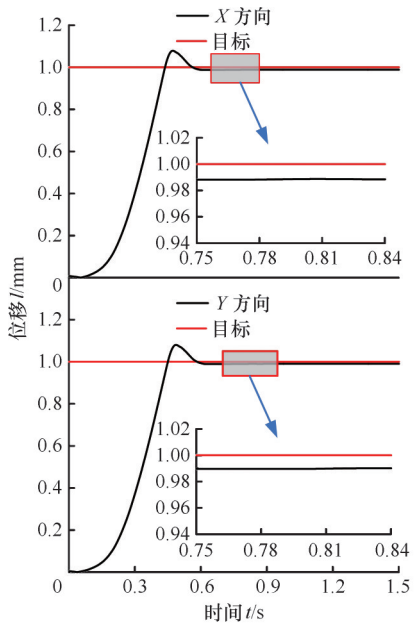
Fig.16 Square trajectory test

4.2.3 宏动定位误差测试

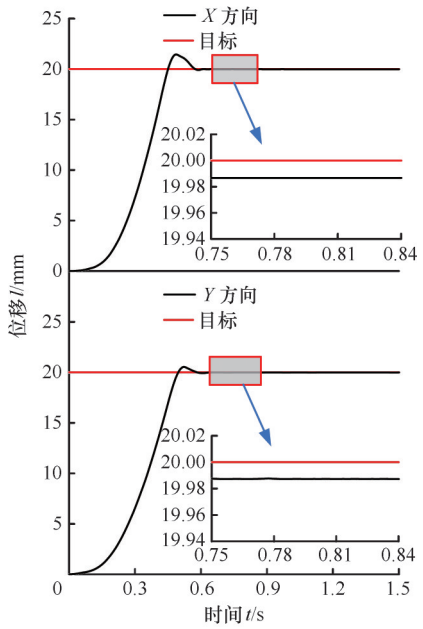
为测量宏微复合驱动XY工作台宏动部分的定位误差，采用了PID进行闭环控制。点对点实验分别在两个方向上进行，目标值分别设为1 mm与20 mm，测试结果如图17所示。由图17可知，XY工作台的两个方向在1 mm、20 mm的定位行程上，宏动最大稳态定位误差均在20 μm以内，小于宏动误差补偿量数值的一半，由此该宏动定位误差可继续由微动进行补偿，以实现更高的定位精度。

4.2.4 宏微复合定位误差测试

为进一步探究宏微复合驱动XY工作台的定



(a)1 mm定位行程



(b)20 mm定位行程

图17　宏动定位误差的测试结果

Fig.17　Test results of macro-motion positioning errors

位性能，对MMCA最大行程时的定位精度进行了测试。所采用的控制策略框图见图18，本文采用PSO-LQR控制器进行宏动部分的控制，采用基于双曲正切函数的滑模控制器进行微动部分的控制，将宏动最大稳态误差的0.7倍作为切换阈

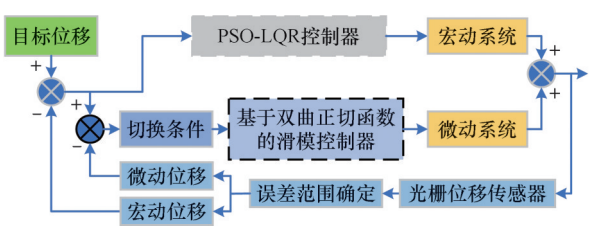
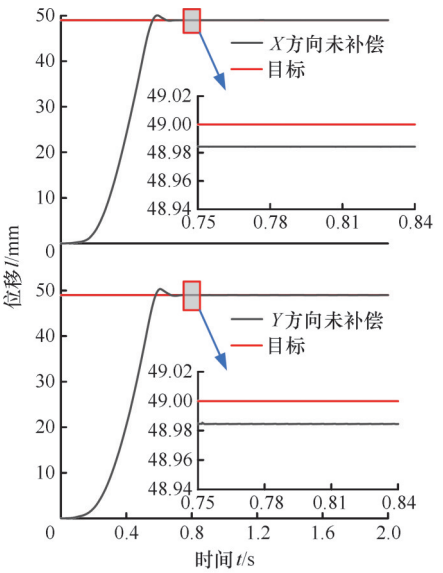


图18　控制策略框图

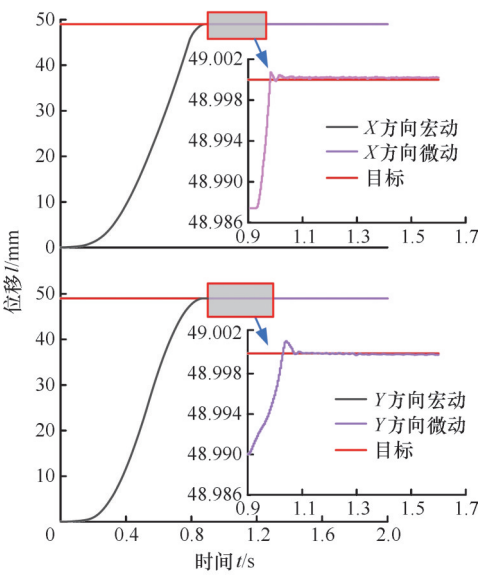
Fig.18　Control strategy block diagram

值。当宏动部分定位结束后，将与目标位置的误差反馈到微动部分，并将其作为微动部分控制系统的目标位移值，进而实现高精度定位。

因宏微复合驱动XY工作台在X、Y方向的最大行程分别为49.94 mm和50.04 mm，故选取49 mm作为两方向上最大距离的定位目标，并对比微动补偿前后的定位精度，对比结果如图19所示。



(a)补偿前



(b)补偿后

图19　最大行程时的定位误差

Fig.19　Positioning errors at maximum travel

由图19可知，当宏微复合驱动XY工作台工作在最大行程49 mm时，X方向与Y方向未采用微动补偿情况下的定位精度均小于20 μm，而采用微动补偿后，其X方向与Y方向最大定位误差分别减小到0.25 μm和0.21 μm。这表明宏微复合驱动XY工作台在进行宏微复合的大行程定位

时具有良好的定位性能。

4.2.5 定位分辨力测试

为获得宏微复合驱动XY工作台的定位分辨力，分别向X方向和Y方向的MMCA施加连续的频率为10 Hz、变化幅值为0.36 V的正弦信号进行激励，并将得到的测量值进行滤波，测试结果如图20所示。

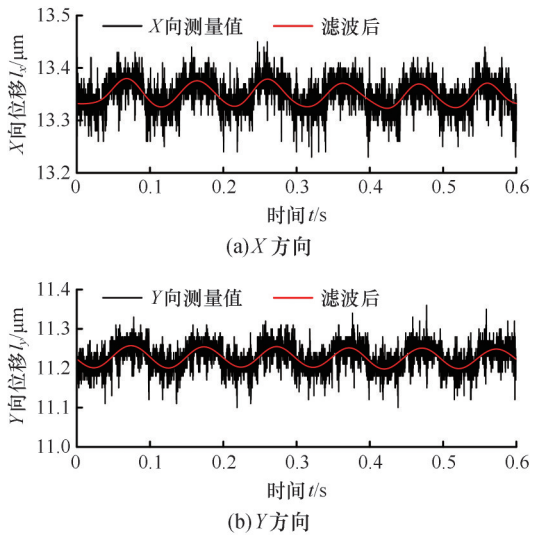


图20 定位分辨力测试

Fig.20 Positioning resolution test

由图20可知，宏微复合驱动XY工作台X方向和Y方向的分辨力分别达到59 nm和56 nm。考虑到零件加工误差以及装配问题，两个方向上的分辨力不可能完全相同，但测试结果显示两个方向的分辨力仅相差3 nm，表明所设计的宏微复合驱动XY工作台在两方向上具有一致性。

4.3 性能对比

为更好地展示设计的宏微复合驱动XY工作台的性能，选取以往几种高精度XY工作台进行了对比，结果见表6。

表6 XY工作台性能比较

Tab.6 Performance comparison of the XY workbench

参数	工作范围	分辨力	交叉耦合率/%	负载能力/N
本文	49.94 mm×50.04 mm	56 nm	0.05	250
文献[7]	30.76 μm×29.79 μm	29.3 nm	2.02	10
文献[13]	11.3 μm×10.6 μm	20 nm	0.07	1.2
文献[17]	20.4 mm×20.6 mm	100 nm	无	196
文献[18]	11.75 mm×11.66 mm	200 nm	1.3	196
文献[23]	15 mm×15 mm	0.4 μm	11.06	196

通过上述对比可发现，与应用在紫外线纳米压印光刻灯的毫米级XY工作平台相比，所提的宏微复合驱动XY工作台拥有更小的分辨力和更低的交叉耦合率；与应用在原子力显微镜等的微米级XY工作台相比，所提工作台拥有更低的交叉耦合率和更大的有效负载能力。因此，本文所提XY工作台具有大行程、低交叉耦合率和高分辨力等优点，在高端装备制造领域具有广阔的应用前景，但对XY工作台有结构尺寸要求的微型化、集成化高端设备还需进一步优化。

5 结论

1)本文利用交叉滚子导轨和直线导轨大行程和高精度的特点设计了一种新型的串并联混合解耦导向机构，并以MMCA作为驱动装置，提出了一种具有大行程和高精度特性的宏微复合驱动XY工作台设计方案，理论分析表明XY工作台具有整体结构呈对称布置、X方向和Y方向无高度差等优点，在X方向和Y方向上具备相同的运动特性。

2)将有限元法与响应面法相结合，以增大输出力和宏动误差补偿量为目标，对宏微复合驱动XY工作台的驱动装置进行优化。结果显示，优化后的MMCA在电流为4 A时，输出力为135 N，宏动误差补偿量为34 μm，较优化前分别增加了32.61 %和12.1 %。

3)开展位移耦合、宏动定位误差、最大行程定位误差、定位分辨力和轨迹测试等实验，测试了宏微复合驱动XY工作台的性能。结果表明，该工作台的工作范围为49.94 mm×50.04 mm，X方向和Y方向上的位移耦合分别为0.0511 %和0.0549 %，且具有良好的轨迹跟踪能力；在未采用微动补偿情况下进行1、20、49 mm宏动大行程定位测试，两个方向的稳态位移误差均小于20 μm；在采用微动补偿情况下进行49 mm大行程定位测试，X方向与Y方向的最大误差分别为0.25 μm和0.21 μm；在分辨力实验中，X方向与Y方向的分辨力分别达到59 nm和56 nm。

研究结果表明，所提的宏微复合驱动XY工作台具有大行程、低交叉耦合率和高分辨力等优点，后续将开展XY工作台的控制策略研究，为高端装备制造领域提供高性能XY工作台奠定理论与技术基础。

参考文献：

[1] ZHANG Lanyu, GAO Jian, HE Yunbo, et al. A VCM Active Actuation Method for Bonding Time Reduction in Chip Packaging Process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7252-7262.

[2] 喻曹丰，王传礼，解甜，等. 基于GMM的高性能微定位工作台驱动系统的研制[J]. 机械工程学报，2019，55(9)：136-143.
YU Caofeng, WANG Chuanli, XIE Tian, et al. Develop-

ment of Drive System of High Performance Micro Positioning Worktable Based on Giant Magnetostrictive Material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 136-143.

[3] 庄健，王志武，廖晓波. 应用于高速离子电导扫描成像的双压电定位平台[J]. 光学精密工程，2020，28(10)：2203-2214.
ZHUANG Jian, WANG Zhiwu, LIAO Xiaobo. Dual-stage Piezo Nanopositioner for High-speed Ion Conductance Microscopy Imaging[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2203-2214.

[4] LI Mi, LIU Lianqing, XI Ning, et al. Applications of Micro/Nano Automation Technology in Detecting Cancer Cells for Personalized Medicine[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2017, 16(2): 217-229.

[5] YANG Xu, ZHU Wule. Design, Analysis, and Control of an XY Parallel Nanomanipulator with Multiple Actuation Modes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7639-7648.

[6] YANG Zhixin, ZHOU Xiaoqin, HUANG Hu, et al. On the Suppression of the Backward Motion of a Piezo-driven Precision Positioning Platform Designed by the Parasitic Motion Principle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3870-3878.

[7] YUAN Lusheng, WANG Liang, QI Rui, et al. A Novel Hollow-type XY Piezoelectric Positioning Platform[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 255: 108496.

[8] GAO Xiang, LIU Yingxiang, ZHANG Shijing, et al. Development of a Novel Flexure-based XY Platform Using Single Bending Hybrid Piezoelectric Actuator[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3977-3987.

[9] LUO Ciyong, LI Xingwang, LIAO Yong, et al. Design of End-iron-free Voice Coil Motor with Appropriate PM Length Ratio[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1139-1146.

[10] 柴嘉伟，贵献国. 音圈电机结构优化及应用综述[J]. 电工技术学报，2021，36(6)：1113-1125.
CHAI Jiawei, GUI Xianguo. Overview of Structure Optimization and Application of Voice Coil Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1113-1125.

[11] 刘鑫，李新阳，杜睿. 压电陶瓷驱动器迟滞非线性建模及逆补偿控制[J]. 光电工程，2019，46(8)：180328.
LIU Xin, LI Xinyang, DU Rui. Hysteresis Nonlinear Modeling and Inverse Compensation of Piezoelectric Actuators[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(8): 180328.

[12] 赵庆旭，王一帆，吴文鹏，等. 压电陶瓷驱动平台的复合控制方法研究[J]. 电光与控制，2019，26(6)：80-84.
ZHAO Qingxu, WANG Yifan, WU Wenpeng, et al. On Composite Control Method for Piezoelectric Ceramic Driving Platform[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6): 80-84.

[13] TIAN Yanling, HUO Zhichen, WANG Fujun, et al. A Novel Friction-actuated 2-DOF High Precision Positioning Stage with Hybrid Decoupling Structure[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104511.

[14] ZHANG Hanlun, WU Zehao, XU Qingsong. Design of a New XY Flexure Micropositioning Stage with a Large Hollow Platform[J]. Actuators, 2020, 9(3): 65.

[15] LIN Rui, LI Yingzi, ZHANG Yingxu, et al. Design of a Flexure-based Mixed-kinematic XY High-precision Positioning Platform with Large Range[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 142: 103609.

[16] CAI Kunhai, TIAN Yanling, LIU Xianping, et al. Development and Control Methodologies for 2-DOF Micro/Nano Positioning Stage with High Out-of-plane Payload Capacity[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 95-105.

[17] FAN Shixun, LIU Hua, FAN Dapeng. Design and Development of a Novel Monolithic Compliant XY Stage with Centimeter Travel Range and High Payload Capacity[J]. Mechanical Sciences, 2018, 9(1): 161-176.

[18] XU Qingsong. Design and Development of a Compact Flexure-based XY Precision Positioning System with Centimeter Range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 893-903.

[19] 喻曹丰，王玉，陈卓，等. 同轴集成式宏微复合驱动器的磁路建模分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：6083-6093.
YU Caofeng, WANG Yu, CHEN Zhuo, et al. Experimental Study and Magnetic Circuit Modeling Analysis of Coaxial Integrated Macro-micro Composite Actuator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(16): 6083-6093.

[20] 孙立宁，李腾，刘延杰. 高加速精密直线电机运动平台键合图建模与分析[J]. 机器人，2011，33(4)：467-474.
SUN Lining, LI Teng, LIU Yanjie. Modelling and Analysis of a High Acceleration and Precision Linear Motor Direct Drive Motion Stage with Bond Graph Approach[J]. Robot, 2011, 33(4): 467-474.

[21] 张云峰，李玲玲，刘威，等. 基于键合图的五轴联动数控机床动态特性分析与能耗建模研究[J]. 机械工程学报，2023，59(7)：241-251.
ZHANG Yunfeng, LI Lingling, LIU Wei, et al. Research on Dynamic Characteristic Analysis and Energy Consumption Modeling of Five-axis CNC Machine Tool Based on Bond Graph[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 241-251.

[22] 马志鹏. 基于音圈电机的高速精密定位系统的动力学行为与控制方法[D]. 天津：天津大学，2012.
MA Zhipeng. Dynamic Behavior and Control of a High-speed Precision Positioning System Driven by Voice Coil Actuators[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[23] DENG Jie, LIU Yingxiang, LI Kai, et al. Design, Modeling, and Experimental Evaluation of a Compact Piezoelectric XY Platform for Large Travel Range[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(4): 863-872.

（编辑　陈　勇）

作者简介：喻曹丰*（通信作者），男，1987年生，副教授、博士。研究方向为超磁致伸缩智能构件研发、精密驱动与控制技术。E-mail：yucaofeng@aust.edu.cn。

本文引用格式：

喻曹丰，杨坤，沈刚，等. 宏微复合驱动XY工作台解耦设计与实验研究[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1889-1899.

YU Caofeng, YANG Kun, SHEN Gang, et al. Decoupling Design and Experimental Research of XY Workbenchs Driven by MMCA[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1889-1899.