

文章编号 1004-924X(2017)07-1874-08

# 并联自解耦二自由度微位移平台的研制与测量

齐克奇<sup>1,3</sup>, 向阳<sup>1\*</sup>, 丁亚林<sup>2</sup>, 方超<sup>1,3</sup>, 周振平<sup>4</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**针对传统串联式微位移机构具有的结构不紧凑和刚度较低等问题, 本文设计了一种结构紧凑、具有高分辨率和高刚度的并联式自解耦二自由度微位移平台。该平台采用了 4 个对称布置的嵌套式平行导向机构, 使得平台具有刚度对称和自解耦等特点。本文还对嵌套式平行导向机构的工作原理进行了分析。通过有限元方法仿真分析了微位移平台在不同受力状态下的变形情况, 并对其进行了模态分析。经实验测量, 证实了该平台具有自解耦功能, 并得出了微位移平台的实际行程, 且其输出位移也被证实具有较为良好的线性度。

**关键词:** 并联式; 自解耦; 微位移平台; 嵌套式平行导向机构; 有限元方法

**中图分类号:** TH112.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1874

## Development and measurement of a parallel-type self-decoupling 2-dimension micro-motion stage

QI Ke-qi<sup>1,3</sup>, XIANG Yang<sup>1\*</sup>, DING Ya-lin<sup>2</sup>, FANG Chao<sup>1,3</sup>, ZHOU Zhen-ping<sup>4</sup>

- (1. State key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. College of Mechanical Sciences and Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiangy@sklao.ac.cn

**Abstract:** Due to traditional serial-type micro-motion stage has disadvantages of incompact structure and low stiffness, a parallel-type self-decoupling 2-dimension micro-motion stage was designed with the advantage of compact structure, high-resolution and high stiffness. Four symmetrical nested parallel guide mechanisms were adopted in this platform to confer it has the features of symmetrical stiffness and self-decoupling. Operation principle of nested parallel guide mechanism was analyzed in

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-03-31.

基金项目: 国家重大科技专项 (No. 2009ZX02202-005)

this thesis. Simulation of deformation situation of micro-displacement platform on condition of different stresses was conducted via finite element method, and modal analysis was conducted on it. It is verified that this platform has the function of self decoupling, and the actual travel range of micro-displacement platform obtained through experimental measuring, and it is also verified that its output displacement has good linearity.

**Key words:** parallel type; self decoupling; micro-displacement platform; nested parallel guide mechanism; method of finite elements

## 1 引言

随着技术的进步,在先进制造、微电子加工、超精密光学仪器和生物医学等方面对高精度定位的要求越来越高,有的达到纳米级甚至亚纳米级,因此需要一个具有高分辨率的微位移装置来实现该功能<sup>[1-7]</sup>。目前最为常见的纳米级微位移平台主要采用压电陶瓷(PZT)作为驱动器,并通过柔性铰链进行导向。这是由于压电陶瓷具有高刚性、高分辨率和响应速度快等优点,而柔性铰链具有无间隙、无摩擦、无需润滑和较好的位置重复性的<sup>[8-11]</sup>。对于多自由度位移的情况,就需要通过柔性导向机构的串联或并联来实现多个自由度的导向。串联型柔性导向机构具有构造简单直观的优点,一般来说没有自由度耦合。但由于结构不紧凑和结构刚度较低且不对称的缺点,使其应用性有所降低。此外,串联机构存在误差累积的现象,也会使整个机构的精度降低。而并联型柔性导向机构通常结构都比较紧凑且刚度较高,但自由度之间可能会有耦合,需要通过运动合成或自由度解耦才能实现各个所需自由度上的独立运动<sup>[12,13]</sup>。

为了解决上述问题,本文设计了一种具有自解耦功能的并联二自由度超精密微位移台。该微位移平台采用压电陶瓷作为驱动装置,并通过电火花加工的方法一体式制造出柔性导向机构。该柔性导向机构包含4个对称布置的嵌套式平行导向机构。本文对该微位移平台进行了有限元分析,并通过实验进行了验证。

## 2 嵌套式平行导向机构

图1为嵌套式平行导向机构的示意图,其由运动台、刚性过渡板、驱动器作用台和柔性导向簧

片组成。柔性导向簧片又分为轴向柔性导向簧片和切向柔性导向簧片。其中, $a$ 和 $b$ 为切向柔性导向簧片, $c$ 为轴向柔性导向簧片。

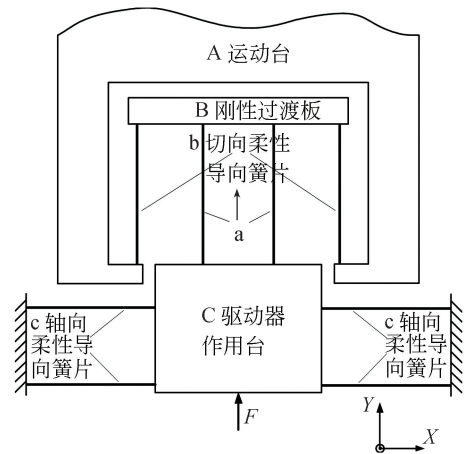


图1 嵌套式平行导向机构示意图

Fig. 1 Schematic of nested parallel guiding mechanism

由图1可以看出,当驱动器沿 $Y$ 轴方向以力 $F$ 作用在驱动器作用台 $C$ 上时,对称分布的柔性簧片 $c$ 使驱动器作用台 $C$ 沿 $Y$ 方向移动。虽然柔性簧片的切向刚度较小,但轴向刚度较大,因此该位移又被柔性簧片 $a$ 传递到刚性过渡板 $B$ 上,然后又通过柔性簧片 $b$ 将位移传递到运动台 $A$ 上,由此来实现运动台 $A$ 的运动。

而当运动台 $A$ 有 $X$ 方向的位移时,由于切向力的作用会使柔性簧片 $a$ 和 $b$ 发生形变,实现对运动台 $A$ 的导向作用。同时,又将切向力传递到驱动器作用台 $C$ 上,然而由于柔性簧片 $c$ 的轴向刚度较大,因此约束了驱动器作用台 $C$ 在 $X$ 向的位移。由此可以看出,柔性簧片 $a$ 和 $b$ 具有导向和传递轴向力两个作用,而柔性簧片 $c$ 则具有导向和限制轴向位移的作用。但是,一般来说这种平行簧片机构在导向的过程中会产生耦合位

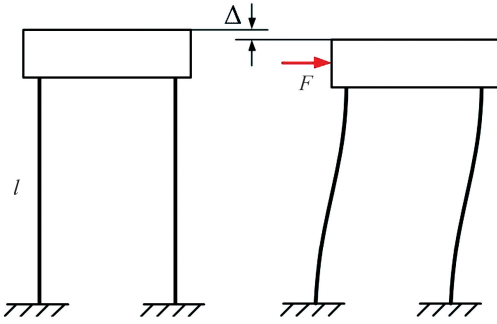


图 2 平行簧片机构工作原理图

Fig. 2 Diagram of working principle of parallel spring mechanism

移<sup>[14-15]</sup>,如图 2 所示。文献[15]给出了该耦合位移的计算公式如下:

$$\Delta = l \cdot (1 - 2\sqrt{\frac{\sin\theta_N}{\lambda}}), \quad (1)$$

其中  $\theta_N$  为柔性簧片变形后中点处的转角,同时也为簧片变形后所产生的最大转角, $\lambda$  为一量纲参数:

$$\theta_N = \frac{\lambda}{2} - \frac{77\lambda^3}{1920} - \frac{193\lambda^5}{483840}; \lambda = \frac{Fl^2}{8EI}. \quad (2)$$

其中  $E$  为簧片材料的弹性模量, $I$  为簧片的截面惯性矩。

由式(1)和(2)可以看出耦合位移的大小只与力的大小、柔性簧片的长度、材料以及簧片的截面惯性矩有关。则对于图 3(a)和 3(b)中的两个平行簧片机构而言,当  $l_1 = l_2 = l$  且材料及簧片截面都相同时,可以得出

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{Fl^2}{8EI}, \quad (3)$$

$$\theta_{N1} = \theta_{N2} = \frac{\lambda}{2} - \frac{77\lambda^3}{1920} - \frac{193\lambda^5}{483840}, \quad (4)$$

其中, $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为图 3(a)和 3(b)中两个平行簧片机构的量纲参数, $\theta_{N1}$ 和 $\theta_{N2}$ 分别为图 3(a)和 3(b)中两个平行簧片机构中点处的转角。则由式(1)、(3)和(4)可以得出:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = l \cdot (1 - 2\sqrt{\frac{\sin\theta_N}{\lambda}}), \quad (5)$$

其中, $\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 分别为图 3(a)和 3(b)中两个平行簧片机构在力  $F$  作用下所产生的耦合位移。由式(5)可以看出,簧片长度相同的两个平行簧片机构在相同大小的力作用下,产生的耦合位移相同。

因此,如果将两对平行簧片机构采用嵌套式反向布置可以将耦合位移全部消除<sup>[13,16]</sup>,如图 3

(c)所示。由图 3(c)可以看出,连接刚体 M 和 N 的柔性簧片在受力变形后所产生的耦合位移与连接刚体 N 与固定端的柔性簧片受力变形后产生的耦合位移大小相等且方向相反,恰好可以相互抵消。图 1 中嵌套式平行导向机构的柔性簧片 a 和 b 就是按这种方式来布置的。

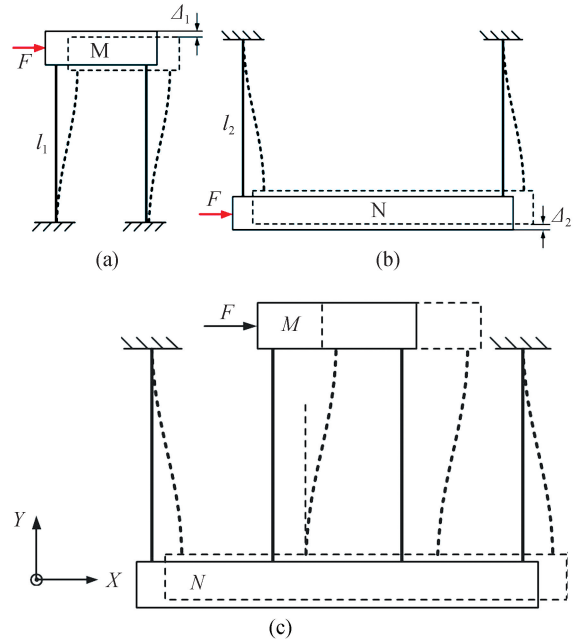


图 3 嵌套式双平行簧片机构

Fig. 3 Nested double parallel spring mechanism

但是,作用在运动台 M 上的力  $F$  在通过簧片传递到运动台 N 上时,会产生一个附加力矩  $M_q$ ,如图 4(a)所示。该力矩会分别对两个簧片产生拉和压的作用,这一组拉力和压力的大小相等,其绝对值表示为  $F$ ,其值可由下式求得:

$$F' = \frac{Fl}{L}. \quad (6)$$

这使得运动台 N 产生一个微小的角位移  $\theta$ ,如图 4(b)所示,其中  $M_O$  为力  $F$  引起的派生力矩。该角位移大小可通过公式(7)求得。

$$\theta = \arctan\left(\frac{2F'l}{EAL}\right) = \arctan\left(\frac{2Fl^2}{EAL^2}\right) \approx \frac{2Fl^2}{EAL^2}. \quad (7)$$

其中, $A$  为柔性簧片的截面积。

由公式(7)可以看出,随着驱动力  $F$  的增大而增大  $\theta$ ,也就是说该角位移会随着导向位移的增大而增大。为避免这种现象的发生,可以将两个

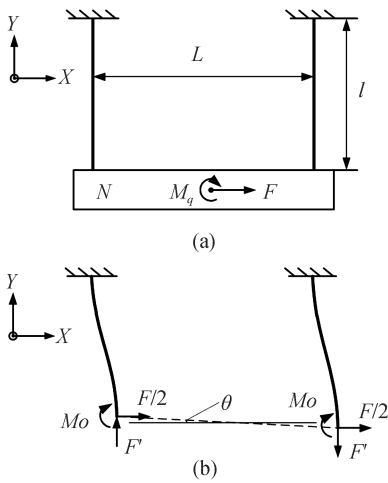


图 4 外部平行簧片机构的受力状态图  
Fig. 4 Force status of external parallel spring mechanism

嵌套式双平行簧片机构采用对称式布局,这样的设计会使角位移相互抵消,进而实现更高的导向精度。

### 3 微位移平台的设计

本文采用了 4 个对称布置的嵌套式平行导向机构,它们构成一个并联式的 2 自由度微位移平台,如图 5 所示。两个压电陶瓷垂直布置,由于嵌套式平行导向机构的存在,使得两个驱动器之间

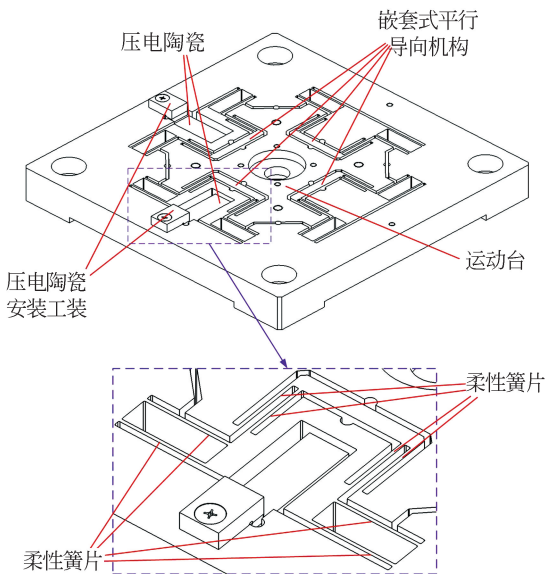


图 5 微位移平台的总体结构图  
Fig. 5 Structure of micro-motion stage

没有相互影响。为了便于压电陶瓷的安装和固定,本文还设计了压电陶瓷安装工装,见图 5。由图 5 可以看出,该结构形式具有刚度对称、结构紧凑等优点。

该微位移平台所用的材料是 AL7075-T6 航空铝,其由低速电火花线切割一体加工而成,使得该平台具有良好的加工精度。柔性簧片的厚度为 0.6 mm,整个微位移平台的尺寸为 110 mm×110 mm×12 mm。

### 4 微位移平台的有限元分析

为了评估该微位移平台的运动效果,同时也为了检验嵌套式平行导向机构是否能够实现两个自由度的自解耦,本文借助有限元软件 ANSYS 对该平台进行有限元分析。

#### 4.1 微位移平台的变形分析

图 6 和图 7(彩图见期刊电子版)分别为微位移平台在不同驱动方式下的变形图。其中,图 6 为微位移平台在 X 向驱动器输出 10 N 驱动力时的变形图,图 7 为微位移平台在 Y 向驱动器输出 10 N 驱动力时的变形图。分析结果见表 1。

从表 1 可以看出,该微位移平台两个方向的相互影响非常小。这说明嵌套式平行导向机构可以很好地实现两个并联自由度的自解耦。根据公式(8)可得该微位移平台在两个运动方向上的理

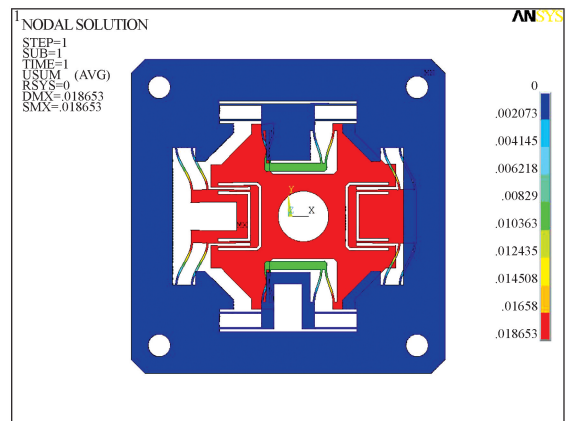


图 6 X 向压电陶瓷输出 10 N 驱动力  
Fig. 6 10 N driving force by X-axis PZT

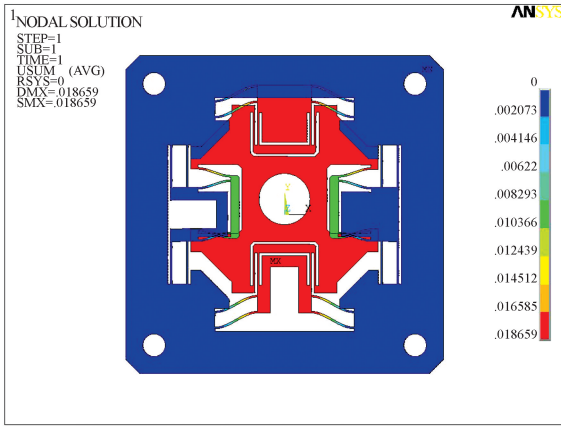


图 7 Y 向压电陶瓷输出 10 N 驱动力  
Fig. 7 10 N driving force by Y-axis PZT

论运动线性度均小于 0.02%，这也证实了上面的结论。其中， $X$  为微位移平台在  $X$  轴上的行程， $\Delta Y$  为  $X$  向驱动器在满行程的情况下运动台在  $Y$  轴所产生的位移， $Y$  为微位移平台在  $Y$  轴上的行程， $\Delta X$  为  $Y$  向驱动器在满行程的情况下运动台在  $X$  轴所产生的位移。

表 1 有限元静力分析结果

Tab. 1 Results of finite element statics analysis

	最大应力/ MPa	$X$ 向位移/ $\mu\text{m}$	$Y$ 向位移/ $\mu\text{m}$
$X$ 向 10 N	9.547	18.183	0.003
$Y$ 向 10 N	9.557	0.003	18.201

$$\begin{cases} L_X = \Delta Y / X \\ L_Y = \Delta X / Y \end{cases} \quad (8)$$

同时，从表 1 可以看出微位移平台发生 18  $\mu\text{m}$  位移时，所引起的最大应力不超过 10 MPa，远小于材料的屈服强度。由此说明有限元计算结果验证了该结构的合理性。

#### 4.2 微位移平台的模态分析

模态是结构的一个重要属性，决定了结构对振动的响应程度。一般来说，结构的模态频率越高说明其动态性能越好。要想得到该微位移平台的模态特性，就需要对其进行模态分析。

图 8 和图 9 分别为微位移平台的一阶模态和二阶模态。表 2 为微位移平台的前 4 阶模态频率。

由表 2 可以看出：该微位移平台具有较高的模态频率，且其结构的对称性使其刚度也是对称的。

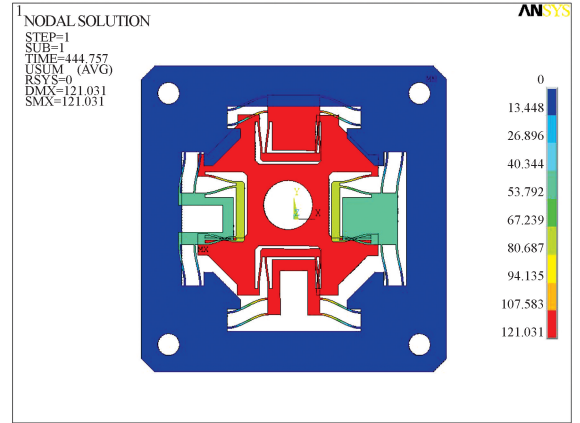


图 8 微位移平台的一阶模态

Fig. 8 Diagram of first-order modal shape of micro-motion stage

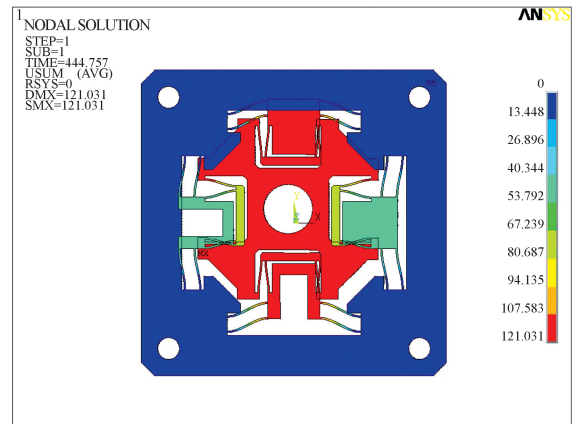


图 9 微位移平台的二阶模态

Fig. 9 Diagram of second-order modal shape of micro-motion stage

表 2 微位移平台的前 4 阶模态频率

Tab. 2 The first 4 model frequencies of micro-motion stage (Hz)

模态阶数	模态频率
1	444.76
2	444.87
3	1 226.55
4	1 416.52

### 5 测量实验

为了得到该微位移平台的真实行程以及各轴的位移线性度,搭建了实验测量装置。实验装置布局如图 10 所示。其中采用电容传感器作为位移反馈元件。

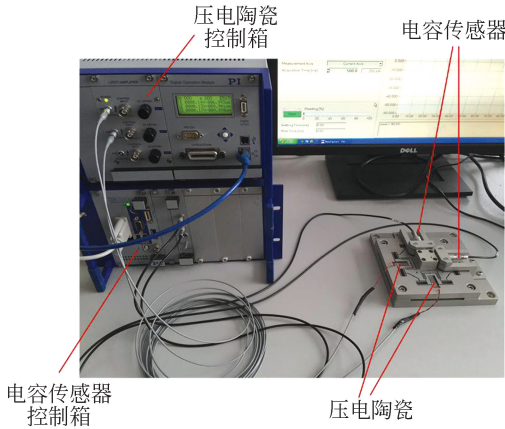


图 10 实验装置图

Fig. 10 Diagram of experiment system

该微位移平台所采用的驱动器为德国 PI 公司生产的 P-887.51 型压电陶瓷,该压电陶瓷的性能指标见表 3。采用的压电控制放大模块为 E-503,在开环控制情况下其可以达到亚纳米级分辨率。电容传感器选择的是德国 PI 公司生产的 D.E20.200,量程为 200  $\mu\text{m}$ ,分辨率为 1.5 nm。

表 3 压电陶瓷性能参数

Tab. 3 Performance parameters of PZT

标称行程 ( $\mu\text{m}$ @100V)	最大行程 ( $\mu\text{m}$ @120V)	最大驱动力 (N @120V)
15 $\pm$ 10%	18 $\pm$ 10%	1 750

为了测得微位移平台的行程和运动线性度,分别对两个轴的压电驱动器施加了 0 V 到 100 V 的线性电压,并测量了两个轴的位移。图 11 和图 12 分别为对 X 向驱动器输出 0 V 到 100 V 的线性电压后,X 轴和 Y 轴传感器的测量曲线。图 13 和图 14 分别为向 Y 向驱动器输出 0 V 到 100 V 的线性电压后,Y 轴和 X 轴传感器的测量曲线。

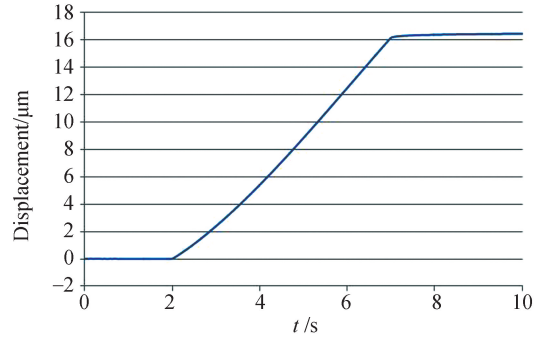


图 11 X 向驱动器的电压由 0 增加 100V 时的 X 轴位移

Fig. 11 X-axis displacement when the voltage of X-axis actuator increased from 0 V to 100 V

表 4 实验结果与仿真结果的对比

Tab. 4 Comparison of experiment results and simulation results

	实验测量结果 (%)	仿真计算结果 (%)
X 轴线性度 $L_X$	0.17	0.016
Y 轴线性度 $L_Y$	0.16	0.016

由实验结果可以看出,微位移平台在 X 轴和 Y 轴的实际输出位移分别为 16.48  $\mu\text{m}$  和 16.76  $\mu\text{m}$ 。通过公式(5)可得,X 轴和 Y 轴的实际运动线性度  $L_X$  和  $L_Y$  分别为 0.17% 和 0.16%。实验结果与仿真结果的对比见表 4。

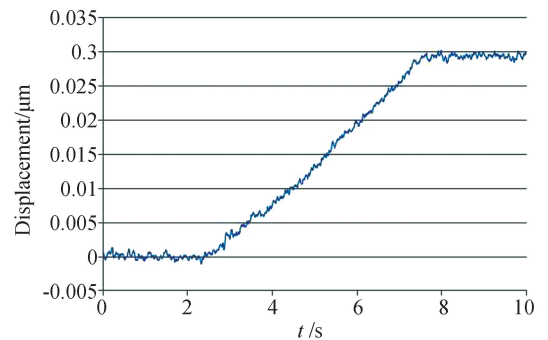


图 12 X 向驱动器的电压由 0 增加 100V 时的 Y 轴位移

Fig. 12 Y-axis displacement when the voltage of X-axis actuator increased from 0 V to 100 V

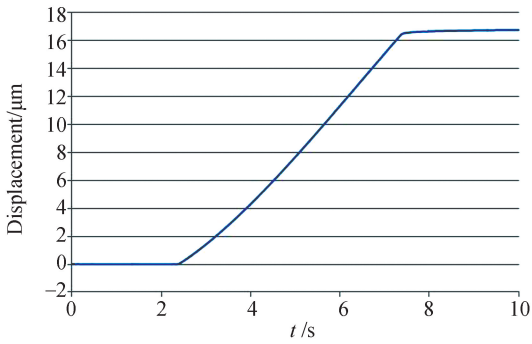


图 13 Y 向驱动器的电压由 0 增加 100V 时的 Y 轴位移

Fig. 13 Y-axis displacement when voltage of Y-axis actuator increased from 0 V to 100 V

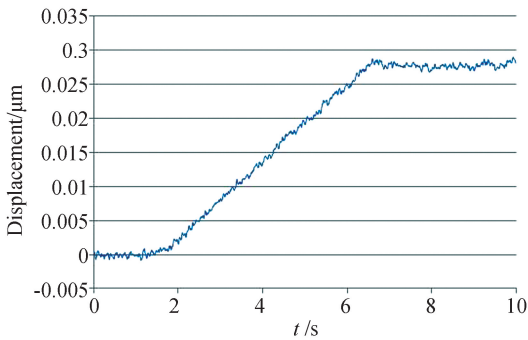


图 14 Y 向驱动器的电压由 0 增加 100V 时的 X 轴位移

Fig. 14 X-axis displacement when the voltage of Y-axis actuator increased from 0 V to 100 V

由表 4 可以看出,上述实验测得的线性度并没有仿真分析所得到的线性度那么好。导致这个现象出现的原因主要有:微位移平台的加工误差,电容传感器及其工装的安装误差和压电陶瓷的安装误差等。总体来说,实验结果表明本文所研制的微位移平台具有较好的线性度,基本实现了自解耦功能。

## 6 结 论

本文设计了一种并联式自解耦二自由度微位移平台。该平台具有结构紧凑、分辨率高、刚度高且对称等特点。该平台采用了 4 个对称布置的嵌套式平行导向机构,实现了二自由度并联机构的自解耦,并通过有限元仿真计算得到验证。同时,通过有限元模态分析证实该平台具有良好的模态特征。经实验测量,该微位移平台具有 16  $\mu\text{m}$  以上的行程,且两个轴的运动直线度分别为 0.17% 和 0.16%,证实了该并联式微位移平台的两个自由度之间具有自解耦的功能。

## 参考文献:

- [1] 杨超,于海利,糜小涛,等. 大光栅刻划机工作台的摆角矫正机构研制 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (5): 1065-1071.  
YANG CH, YU H L, MI X T, *et al.*. Development of the workbench yaw angle correction mechanism of large grating ruling machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35 (5): 1065-1071. (in Chinese)
- [2] 王志,曹玉岩,周超,等. 柔性压电智能反射面的静态形状控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22 (10): 2715-2724.  
WANG ZH, CAO Y Y, ZHOU CH, *et al.*. Static shape control of flexible piezoelectric smart reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (10): 2715-2724. (in Chinese)
- [3] 陈宇航,郑成,杨春来,等. 原子力声显微镜成像及分析 [J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10 (5): 395-399.

- CHEN Y H, ZHENG CH, YANG CH L, *et al.*. Imaging and analysis of atomic force acoustic microscopy [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10 (5): 395-399. (in Chinese)
- [4] 任斌,佟首峰,宋延嵩,等. 空间激光通信精跟踪单元的高精度快速 PZT 驱动技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (2): 420-425.  
REN B, TONG SH F, SONG Y S, *et al.*. Research on the driving technique of high precision and speedy piezo-electric ceramic transducer in fine tracking system of air laser communication [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32 (2): 420-425. (in Chinese)
- [5] 郭东明,孙玉文,贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (11): 119-134.  
GUO D M, SUN Y W, JIA ZH Y. Methods and research progress of high performance manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (11): 119-134. (in Chinese)

- [6] RYUHEI M, YOUZOU F. Optimization of alignment in semiconductor lithography equipment [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33: 327-332.
- [7] 于长淞, 齐克奇, 张春雷, 等. 基于光栅衍射的横向剪切干涉仪精密相移系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(11): 1099-1104.  
YU CH S, QI K Q, ZHANG CH L, *et al.*. Design of precision phase shifting system for transverse shearing interferometer based on grating diffraction [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(11): 1099-1104. (in Chinese)
- [8] QI K Q, XIANG Y, FANG CH, *et al.*. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87: 45-56.
- [9] 马立, 肖金涛, 周莎莎, 等. 杠杆式尺蠖压电直线驱动器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 184-190.  
MA L, XIAO J T, ZHOU SH SH, *et al.*. Linear lever-type piezoelectric inch worm actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 184-190. (in Chinese)
- [10] KIM J J, CHOI Y M, AHN D, *et al.*. A millimeter-range flexure-based nano-positioning stage using a self-guided displacement amplification mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 50: 109-120.
- [11] 杨满芝, 黄玉美, 任利娟, 等. 一种单自由度对称驱动导向及转换的微动回转机构 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(23): 8-12.  
YANG M ZH, HUANG Y M, REN L J, *et al.*. A micro rotary mechanism with single DOF symmetric driving as well as guiding and transformation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 8-12. (in Chinese)
- [12] 贡远, 徐青松, 李杨民. 并联微操作机器人技术及应用进展 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(12): 12-23.  
YUN Y, XU Q S, LI Y M. Survey on parallel manipulators with micro/nano manipulation technology and applications [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 12-23. (in Chinese)
- [13] LI Y M, XU Q S. Design and analysis of a totally decoupled flexure-based XY Parallel micromanipulator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(3): 645-657.
- [14] 牟新明, 王建华, 杨密. 平行簧片机构力学分析与计算 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2005, 3(4): 278-282.  
MU X M, WANG J H, YANG M. Mechanical analysis and computation of parallel spring [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2005, 3(4): 278-282. (in Chinese)
- [15] 杨雪锋, 李威, 王禹桥, 等. 平行簧片机构输出位移分析 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(4): 391-393.  
YANG X F, LI W, WANG Y Q, *et al.*. Output displacement analysis of a parallel leaf spring [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(4): 391-393. (in Chinese)
- [16] AWTAR S. *Synthesis and analysis of parallel kinematic XY flexure mechanisms* [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

#### 作者简介:



齐克奇(1985—),男,内蒙古锡林郭勒人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学检测设备和精密机械的研制。E-mail: qikeqi1985@126.com