

# 菱形压电电机在并联精密定位平台中的应用\*

卢倩<sup>1</sup>, 陈西府<sup>1</sup>, 黄卫清<sup>2</sup>, 郑雷<sup>1</sup>, 许宁<sup>1</sup>, 曾勇<sup>1</sup>

(1. 盐城工学院机械工程学院 盐城, 224051) (2. 广州大学机械电气工程学院 广州, 510006)

**摘要** 为了解决传统压电陶瓷驱动器固有的高精度与大行程的矛盾,提出了利用非共振式压电电机的两种不同运动模式来实现精密定位平台的定位高精度与工作大行程的方案。设计了一种新型菱形压电电机,分析其工作原理,给出了定子结构及夹持预紧结构的设计方案。菱形压电电机的实验结果表明,其步进作动模式下定位分辨率为 $1.0\ \mu\text{m}$ ,连续运动模式下最大空载速度为 $0.932\ \text{mm/s}$ 。在此基础上,利用3台菱形压电电机同步驱动并联精密定位平台,实验结果表明,并联平台平动定位分辨率为 $1.0\ \mu\text{m}$ ,转动定位分辨率分别为 $8.6, 11$ 和 $10\ \mu\text{rad}$ 。实验重复进行10次,动平台定位分辨率的波动率均低于5%,表明了该并联平台具有良好的同步性与重复性。另一方面,利用菱形压电电机的连续运动模式可实现大行程空间定位,其平动工作行程为 $3.54\ \text{mm}$ ,转动工作行程分别为 $3.92^\circ, 4.16^\circ$ 和 $4.05^\circ$ 。借助于菱形压电电机的不同工作模式实现了并联平台的精密定位和大行程工作空间两个关键指标,为进一步研究精密定位平台的动态性能、控制规律提供了理论价值和实践基础。

**关键词** 压电电机; 菱形机构; 并联平台; 精密定位

**中图分类号** TH122

## 引言

随着高新技术的飞速发展,对操作平台或定位平台提出了更为苛刻的要求<sup>[1-2]</sup>。目前,各种高精度操作平台或定位平台机构的驱动元件基本都是采用压电陶瓷来实现的,虽然压电陶瓷驱动器具有较高的定位精度,但是其行程一般只有几十微米,难以满足大行程运动工作的需求。为了弥补压电陶瓷驱动器行程较小的缺陷,目前绝大多数微定位平台均在压电陶瓷驱动器与微定位平台主体机构之间增设了位移放大机构,例如杠杠放大机构<sup>[3]</sup>、差动式放大机构<sup>[4]</sup>及桥式放大机构<sup>[5]</sup>等,但位移放大机构在放大压电陶瓷驱动器行程的同时,降低了自身定位精度。此外,有学者提出了基于串并混联结构的多自由度定位平台<sup>[6]</sup>,或设计了大行程柔性铰链或新型驱动器<sup>[7-8]</sup>,但基本都存在空间结构过大和控制模型复杂等问题,限制了其进一步应用。

近年来,压电直线电机以其定位精度高、结构简单及设计灵活等优点引起了学者的关注<sup>[9-10]</sup>。压电

直线电机主要有共振式和非共振式两大类。虽然共振的引入提高了压电直线电机的能量利用率,但其输入输出间的强非线性和时变性给高精度平稳控制带来困难,其中定位抖动等现象的存在使压电直线电机的高位移分辨率难以转化为高定位精度<sup>[11]</sup>。非共振压电直线电机采用叠层压电陶瓷作为振动激励源,不利用共振定子就可以获得较大的位移输出,避免了因共振引起的性能不稳定<sup>[12]</sup>。因此,学者们普遍采用非共振式压电直线电机驱动精密定位平台。陈西府等<sup>[13]</sup>设计了一种非共振式压电叠堆直线电机,将其应用在高精度串联定位平台。龙涛元等<sup>[14]</sup>提出了宏微运动一体化压电直线电机,设计了其驱动电路。Scuor等<sup>[15]</sup>利用基于惯性原理的压电直线作动器设计了紧凑型5自由度精密定位平台,通过优化设计将其应用在微定位摄像平台系统。Salton等<sup>[16]</sup>采用两台压电直线作动机构串联的方法,实现对定位平台的双级精密定位。上述研究普遍存在定位平台系统体积过大、不便于控制,或控制系统/算法过于复杂等问题,因而限制了其进一步应用。

\* 国家自然科学基金资助项目(51805465, 51405420, 51575470);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703202);江苏省高等学校自然科学研究面上资助项目(18KJB460030);江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(JXQC-029);江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师[2016]15号, [2018]12号)

收稿日期:2018-09-22;修回日期:2018-12-21

本研究课题以光纤波导精密封装为应用背景,设计具有高精度定位特性的菱形压电电机,给出其完整的机构设计方案,并将其应用于并联精密定位平台中,利用非共振式压电电机的两种运动模式实现并联平台的高分辨率和大行程指标。

## 1 菱形压电电机设计

### 1.1 定子结构设计

菱形压电直线电机定子结构简图如图 1 所示。预紧机构依靠左端面的预紧螺钉和预紧垫块实现对预紧陶瓷球和压电叠堆的预紧。预紧机构右端面 and 一体化基体实现固定装配,确保压电叠堆只能向左侧输出变形位移。当压电叠堆受到电压激励之后,会产生单向伸缩位移,进而实现菱形框架的变形,使驱动足发生位移,利用驱动足和输出动件(动子机构)之间的摩擦力,实现对动子机构的驱动。

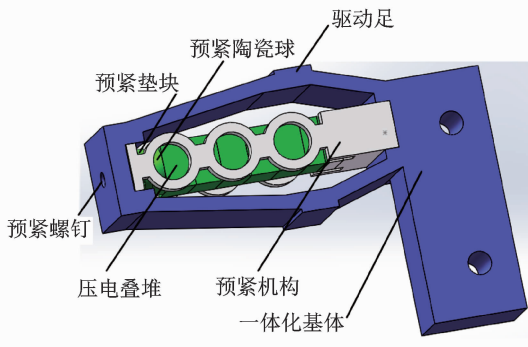


图 1 菱形压电直线电机定子结构简图

Fig. 1 Diagram of stator structure of the rhombic piezoelectric linear actuator

### 1.2 夹持预紧结构设计

夹持预紧机构除了菱形压电电机定子结构的预紧部件外,还包括菱形压电电机的其他预紧结构,主要由滑块、预紧弹簧、预紧支撑板和调节测微仪等部件组成。菱形压电电机的定子机构通过夹持预紧机构接触直线导轨(动子)的表面,依靠预紧摩擦力实现驱动足对直线导轨的摩擦驱动。菱形压电直线电机夹持预紧机构简图如图 2 所示。

### 1.3 工作原理分析

菱形放大机构被广泛应用于精密定位领域,其本质上是两个三角形放大机构的串联组合。菱形压

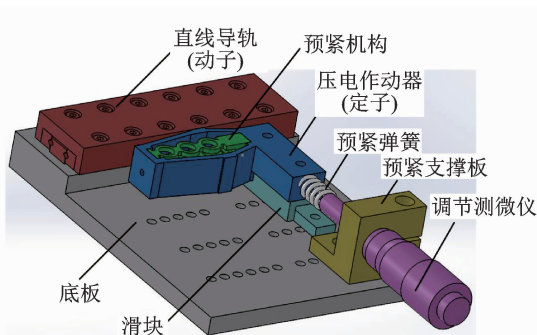


图 2 菱形压电直线电机夹持预紧机构简图

Fig. 2 Diagram of clamping pretightening structure of the rhombic piezoelectric linear actuator

电电机驱动原理如图 3 所示。在 I 阶段(开始阶段),受预紧机构作用,菱形压电电机驱动足压紧动子表面;当菱形压电电机内部压电叠堆受到锯齿波信号激励后开始向右伸长,此时进入 II 阶段(驱动阶段),依靠驱动足和动子间的静摩擦力带动动子向右运动;到了 III 阶段(回程阶段),锯齿波信号快速下降,压电叠堆迅速收缩,驱动足处于回程阶段,动子由于惯性继续向右运动,但由于驱动足与动子间产生滑动摩擦力,在该摩擦力作用下动子速度有所下降,或者出现少量反方向位移,从宏观上看动子仍然向一个方向持续运动。从菱形压电电机的整个工作运动周期来看,利用锯齿波信号和自身惯性原理能够实现对动子的宏观驱动。

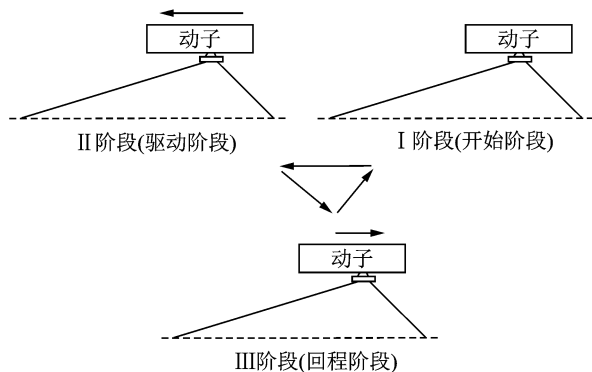


图 3 菱形压电电机驱动原理简图

Fig. 3 Principle diagram of the driving of the rhombic piezoelectric linear actuator

图 4 为柔性菱形压电电机定子变形示意图。如图 4 所示,设菱形机构右杆长度为  $l_1$ ,左杆长度为  $l_2$ ,右杆端点  $P$  在  $x$  方向的位移为  $a$ ,在  $y$  方向的位移为  $b$ ,左杆端点  $P$  在  $x$  方向的位移为  $a'$ ,在  $y$  方向的位移为  $b'$ ,其中  $b=b'$ , $a+a'=c$ 。由三角函数知识可得

$$a = l_1 \cos(\alpha - \beta) - l_1 \cos\alpha \quad (1)$$

$$b = l_1 \sin\alpha - l_1 \sin(\alpha - \beta) \quad (2)$$

$$a' = l_2 \cos(\alpha' - \beta') - l_2 \cos\alpha' \quad (3)$$

$$b' = l_2 \sin\alpha' - l_2 \sin(\alpha' - \beta') \quad (4)$$

$$A = \frac{b}{a} = \frac{l_1 \sin\alpha - l_1 \sin(\alpha - \beta)}{l_1 \cos(\alpha - \beta) - l_1 \cos\alpha} = \frac{\tan\alpha(1 - \cos\beta) + \sin\beta}{(\cos\beta - 1) + \tan\alpha \sin\beta} \quad (5)$$

$$A' = \frac{b'}{a'} = \frac{l_2 \sin\alpha' - l_2 \sin(\alpha' - \beta')}{l_2 \cos(\alpha' - \beta') - l_2 \cos\alpha'} = \frac{\tan\alpha'(1 - \cos\beta') + \sin\beta'}{(\cos\beta' - 1) + \tan\alpha' \sin\beta'} \quad (6)$$

因为转角  $\beta, \beta'$  均非常小, 所以有  $\sin\beta \rightarrow \beta$ ;  $\sin\beta' \rightarrow \beta'$ ;  $1 - \cos\beta \rightarrow \beta^2/2$ ;  $1 - \cos\beta' \rightarrow \beta'^2/2$ 。将此关系式代入式(5)和式(6)中, 得到

$$A = \frac{b}{a} \approx \frac{1}{\tan\alpha} \quad (7)$$

$$A' = \frac{b'}{a'} \approx \frac{1}{\tan\alpha'} \quad (8)$$

整个菱形机构在  $y$  方向上的放大系数为

$$K = \frac{b}{c} = \frac{b}{a + a'} \approx \frac{1}{\tan\alpha + \tan\alpha'} \quad (9)$$

由式(9)可知, 菱形压电电机的放大系数  $K$  与  $\alpha$  及  $\alpha'$  有关。为了保证菱形压电电机的作动高分辨率, 有必要对柔性菱形作动机构的结构参数进行优化设计, 确定最佳的结构参数, 进而获取最佳的作动性能。

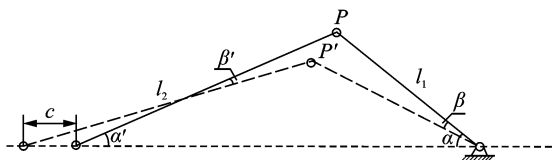


图4 柔性菱形压电电机定子变形示意图

Fig. 4 Diagram of the deformation of the rhombic piezoelectric linear actuator

本研究课题采用 ANSYS 有限元优化设计菱形压电电机的相关结构参数, 如表 1 所示。

表 1 基于 ANSYS 有限元优化设计的菱形压电电机结构参数  
Tab. 1 Structural parameters of rhombus piezoelectric motor based on ANSYS finite element optimization design

序号	结构参数	数值
1	$\alpha'/(^{\circ})$	10
2	$\alpha(^{\circ})$	19
3	$l_1/\text{mm}$	8
4	$t/\text{mm}$	1.6

## 2 菱形压电电机实验研究

### 2.1 实验平台

实验平台系统主要目的是为了测量菱形压电作动机构的运动性能, 包括菱形压电作动机构的最小位移步长和连续运动速度等参数。图 5 为实验平台系统框图, 主要设备仪器包括: 气浮隔振平台(型号为 ZDT10-08)、信号发生器(型号为 MHS-2300A)、功率放大器(型号为 XE500-A4)、示波器(型号为 Tektronix DPO2014)以及激光位移测量仪(型号为 KEYENCE LK-HD500)。

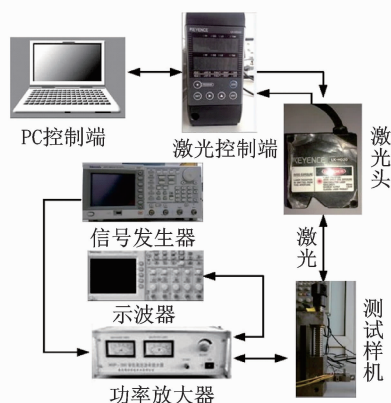


图 5 实验平台系统框图

Fig. 5 System diagram of experimental platform

### 2.2 步进作动实验研究

压电叠堆在受到电源电压激励驱动后, 其变形量输出与所施加的电压呈近似线性关系。笔者将能够激励压电叠堆伸缩作动的最小激励电压对应的位移步长作为压电叠堆驱动下柔性电机的最高分辨率精度。

图 6 为柔性菱形压电电机步进作动位移曲线。当采用激励电压峰峰值电压为 60 V、频率为 10 Hz 的锯齿波时, 柔性菱形压电电机输出的步距稳定, 分析数据可得单步步长约为  $1.0 \mu\text{m}$ ; 当激励电压低于 60 V 时, 柔性菱形压电电机的输出步距稳定性会急剧恶化。因此, 可以认为柔性菱形压电电机的步进分辨率为  $1.0 \mu\text{m}$ 。

### 2.3 连续作动实验研究

图 7 为柔性菱形压电电机连续作动速度曲线。激励电压采用峰峰值为 120 V 的锯齿波电压信号, 对定子机构施加 30 N 预紧力, 在电机空载情况下改变激励电压的频率, 采用激光位移传感器测量定子导轨的输出位移, 进而获取该频率激励电压下的动

子导轨输出的平均速度曲线。

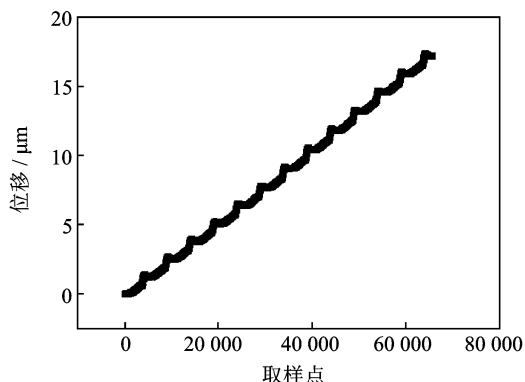


图6 柔性菱形压电电机步进作动位移曲线

Fig. 6 Step motion displacement curve of rhombic piezoelectric linear actuator

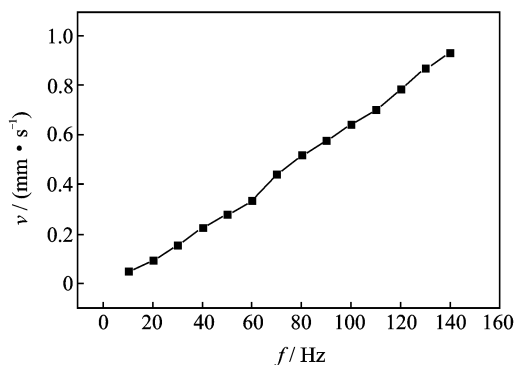


图7 柔性菱形压电电机连续作动速度曲线

Fig. 7 Continues motion displacement curve of rhombic piezoelectric linear actuator

由图7可见,随着激励电压频率的增大,动子导轨的输出速度成近似线性变化规律。在激励电压频率为140 Hz时,测得柔性菱形压电电机驱动足的最大空载速度为0.932 mm/s。在10~70 Hz频率范围内,菱形电机的输出速度有一定波动;当激励电压频率在70~140 Hz范围内,菱形电机的输出速度线性度较好;当激励电压的频率高于140 Hz时,菱形电机驱动动子导轨输出的速度呈现出稳定性下降的趋势。造成这种现象的主要原因是由于随着激励电压频率的提高,菱形电机受压电迟滞效应及结构响应时间的影响也更为明显,导致驱动足输出的运动速度稳定性下降。

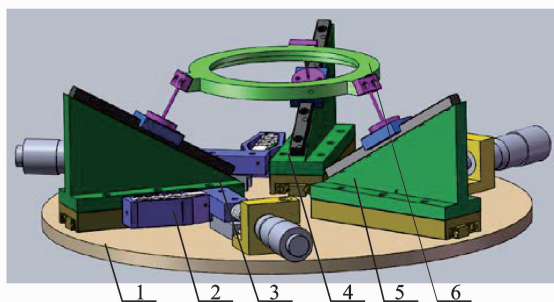
## 3 并联精密定位平台应用研究

### 3.1 并联精密定位平台设计

#### 3.1.1 总体设计

并联精密平台基于并联机构设计,该并联定位平

台可实现1个平移自由度(degree of freedom,简称DOF)和2个转动自由度,由3条并联支路构成,每条并联支路由2个平移副和1个一体化、大行程圆柱形柔性铰链组成。利用所设计的3条并联支路协同运动,能够实现绕 $x$ 轴、 $y$ 轴的旋转运动和沿 $z$ 轴的直线平动。3-DOF并联精密定位平台由3台菱形压电电机、3条并联支路、静平台及动平台等构成。3条并联支路在静平台上互成 $120^\circ$ 布置。该并联定位平台具有体积小、结构简单、承载力强及易于实现控制等优点。图8为3-DOF并联精密定位平台结构图。



1-静平台;2-菱形电机;3-并联支路 1;4-并联支路 2;5-并联支路 3;6-动平台

图8 3-DOF 并联精密定位平台结构图

Fig. 8 3-DOF parallel precision positioning platform

#### 3.1.2 并联支路设计

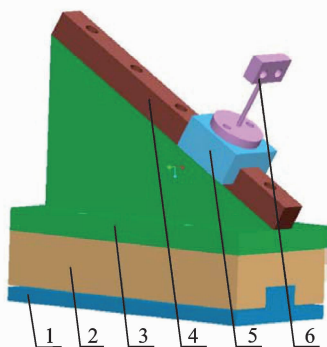
图9为并联支路结构图。由图可知,水平滑块在外力驱动作用下,在水平导轨上作直线平动,三角斜架由于与水平滑块固定而同步运动,斜面导轨由于与三角斜架固定而作斜面直线移动,使得斜面滑块在斜面导轨上做斜面直线移动。由于大行程圆柱柔性铰链同时与斜面滑块和动平台固定,故斜面滑块的斜面直线移动会引起动平台作倾斜运动。只要3条并联支路协同运动,即可实现动平台绕 $x$ 轴、 $y$ 轴的旋转运动,以及沿 $z$ 轴的直线升降运动。

### 3.2 同步性与重复性实验

将所设计的菱形压电电机应用于并联精密定位平台中,用其直接驱动每条并联支路上的水平导轨。实验测量系统仍采用上述实验平台系统。

#### 3.2.1 运动同步性验证

3-DOF并联精密定位平台样机如图10所示,将动平台与大行程圆柱柔性铰链的交界点分别标记为A点、B点和C点,当3台菱形压电电机同步驱动水平导轨时,采用高分辨率激光位移传感器同步测量3点的位移曲线,只有当这3点的位移曲线完全重合,才能够说明动平台的确是沿着 $z$ 轴做铅垂方向的升降运动,才能证明3台菱形压电电机是同



1-水平导轨;2-水平滑块;3-三角斜架;4-斜面导轨;5-斜面滑块;6-圆柱柔性铰链

图9 并联支路结构图

Fig. 9 Structure diagram of parallel branch

步驱动 3-DOF 并联平台的 3 个水平导轨。

图 11 为动平台标记点位移图。当 3 台菱形压电电机同步驱动水平导轨时,在位移初始阶段,3 个标记点的位移曲线几乎完全重合;在采样后段,随着采样数据样本容量的逐渐增大,3 个标记点的位移误差不断的累积,最终导致 3 个点的位移出现了偏差,最大位移偏差达到了  $3.14 \mu\text{m}$ 。但是图 11 仍然足以说明 3-DOF 并联平台具有良好的运动同步性。

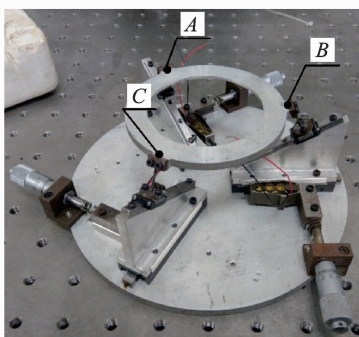


图 10 3-DOF 并联精密定位平台样机

Fig. 10 Prototype of the 3-DOF parallel positioning platform

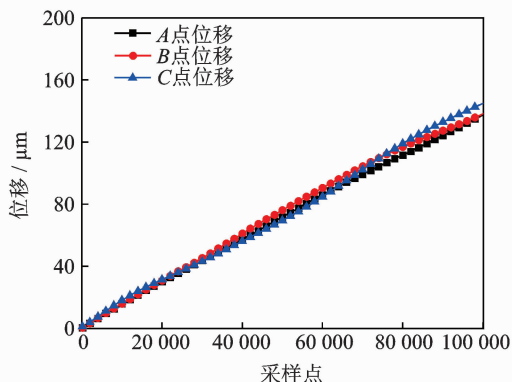


图 11 动平台标记点位移图

Fig. 11 Marked point displacement curve of moving platform

### 3.2.2 运动重复性验证

激励脉冲信号电压峰峰值分别设定为 60, 80 和 100 V, 脉冲信号频率设定为 20~100 Hz, 分别测量 3-DOF 并联平台的动平台在上升和下降运动中的平均运动速度, 图 12 为动平台标记点运动速度曲线。可以发现, 当激励脉冲信号电压峰峰值分别为 60, 80 和 100 V 时, 随着脉冲信号频率的提高, 动平台的平均运动速度呈线性缓慢提高, 且上升和下降运动的平均速度具有较好的重合性。综上所述, 3-DOF 并联平台具有良好的运动重复特性。

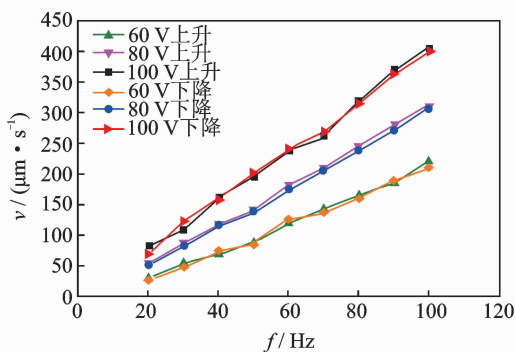


图 12 动平台标记点运动速度曲线

Fig. 12 Marked point velocity curve of moving platform

### 3.3 步进运动定位精度实验

#### 3.3.1 z 轴升降运动分辨率

动平台沿 z 轴升降运动步进分辨率如图 13 所示。当激励电压峰峰值为 60 V、频率为 30 Hz 时, A, B 和 C 点的步进位移分别约为  $0.86, 1.13$  和  $1.02 \mu\text{m}$ 。继续降低脉冲信号的电压幅值, 3 个标记点的步进运动都呈现出了不稳定现象。考虑到 3-DOF 并联平台的装配误差及同步性误差, 将 A, B 和 C 点的步进运动分辨率取其平均值, 经计算为  $1.0 \mu\text{m}$ 。因此, 3-DOF 并联平台动平台沿 z 轴做升降运动的步进分辨率为  $1.0 \mu\text{m}$ 。

为了验证 3 台菱形压电电机驱动具有良好的同步性和重复定位特性, 将并联平台沿 z 轴升降运动定位分辨率实验重复进行 10 次, 得到了 A, B 和 C 点的重复分辨率数据。经计算, A, B 和 C 点的定位分辨率平均值分别为  $0.86, 1.13$  和  $1.02 \mu\text{m}$ , 重复定位数据最大波动率分别为  $4.14\%, 3.22\%$  和  $3.51\%$ , 均低于  $5\%$ , 这表明菱形压电电机驱动下的并联平台具有良好的同步特性和重复定位特性。

#### 3.3.2 x 轴、y 轴旋转运动分辨率

动平台在空间旋转时, 由于缺乏基准参考平面,

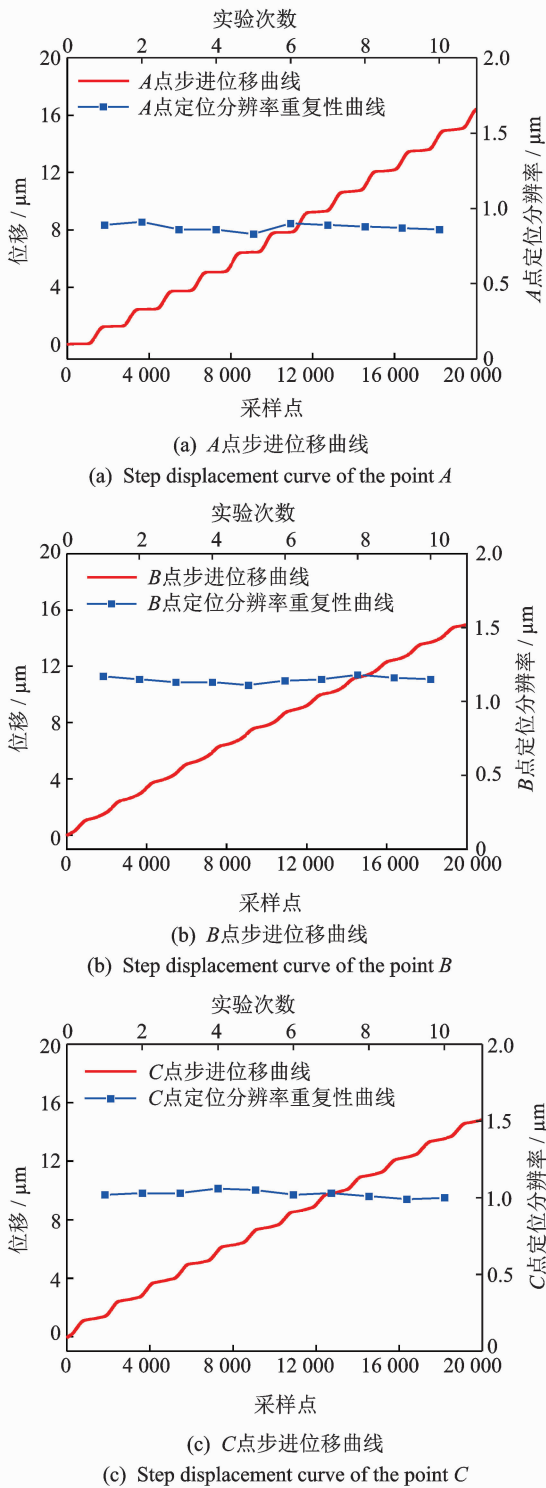


图 13 动平台沿  $z$  轴升降运动步进分辨率

Fig. 13 Step resolution of moving platform along  $z$  axis

故无法采用测量仪器实现转动角度的实时测量。为此采用如下实验测量方案:给 A 点所在并联支路的菱形电机施加脉冲信号,而动平台上 B 点和 C 点所在并联支路的菱形电机不施加脉冲信号,通过预紧机构将 B 点和 C 点所在并联支路的水平导轨滑块预紧,使其不产生运动,此时动平台即实现围绕  $x$

轴转动。由于动平台的转动角度  $\alpha$  十分微小,故  $\alpha \approx \tan\alpha$ ,因此动平台绕  $x$  轴旋转运动的步进分辨率实际上就是 A 点步进运动位移曲线上一个“台阶”的高度  $h$  除以动平台的直径  $d$ ,即

$$\alpha \approx \tan\alpha = \frac{h}{d} \quad (10)$$

动平台绕  $x$  轴旋转运动步进分辨率如图 14 所示。由于 B 点和 C 点的位移分别约为  $0.6 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$ ,仅为 A 点步进运动位移的  $1.81\%$  和  $4.54\%$ ,因此可以认为动平台绕  $x$  轴进行旋转运动。A 点的步进运动分辨率为  $0.86 \mu\text{m}$ ,动平台直径为  $100 \text{ mm}$ ,动平台绕  $x$  轴旋转运动的步进分辨率为  $0.86 \mu\text{m}/100 \text{ mm} = 8.6 \mu\text{rad}$ 。

同理,需要验证 3 台菱形压电电机驱动下的并联平台在转动定位中仍具有良好的同步性和重复性。将并联平台绕  $x$  轴旋转运动定位分辨率实验重复进行 10 次,得到了 A 点的重复分辨率数据,如图 14(a) 所示。B 点和 C 点位移可忽略不计。经计算,动平台绕  $x$  轴的定位分辨率平均值为  $0.86 \mu\text{rad}$ ,重复定位数据最大波动率为  $4.14\%$ 。这表明菱形电机驱动下的并联平台在转动时仍具有良好的同步特性和重复定位特性。

动平台绕  $y_U$  轴和  $y_V$  轴的旋转运动分辨率也采用同样的实验方案测量。实验结果如表 2 所示。

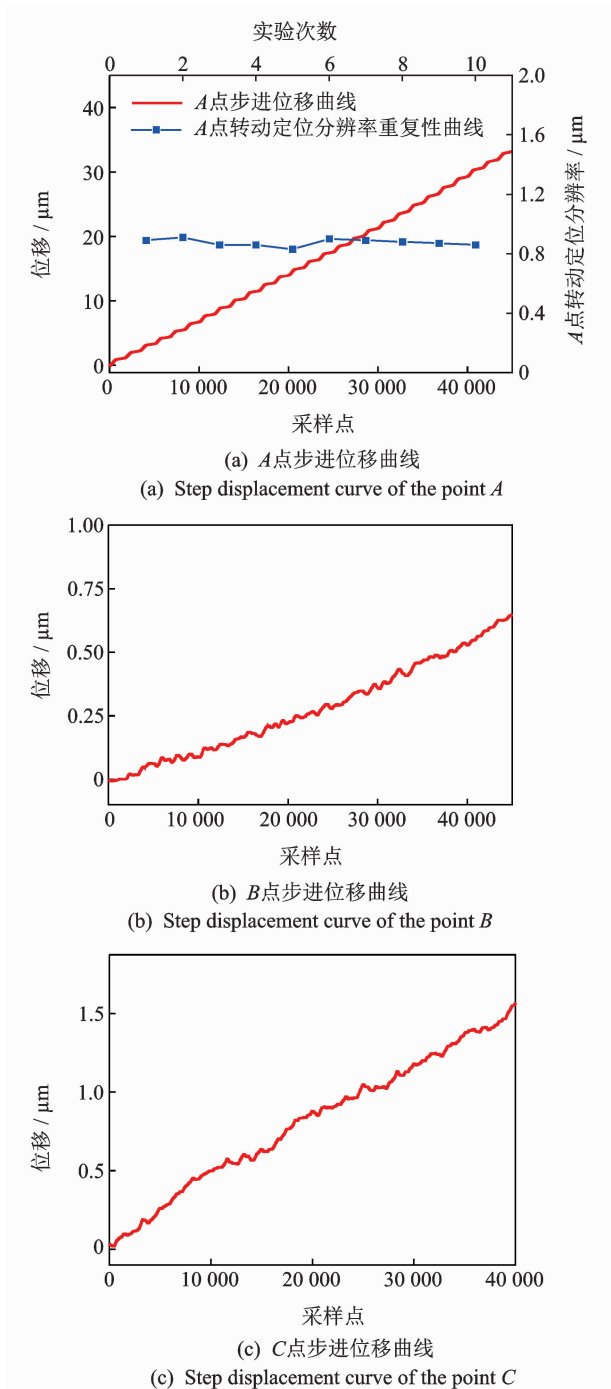
表 2 3-DOF 并联平台旋转运动分辨率数据

项目	绕 $x$ 轴转动	绕 $y_U$ 轴转动	绕 $y_V$ 轴转动
A 点位移/ $\mu\text{m}$	33.1	2.1	2.1
A 点步进位移/ $\mu\text{m}$	0.86	—	—
B 点位移/ $\mu\text{m}$	0.6	30.8	1.38
B 点步进位移/ $\mu\text{m}$	—	1.13	—
C 点位移/ $\mu\text{m}$	1.5	1.13	29.4
C 点步进位移/ $\mu\text{m}$	—	—	1.02
A 点转动分辨率/ $\mu\text{rad}$	8.6	—	—
B 点转动分辨率/ $\mu\text{rad}$	—	11	—
C 点转动分辨率/ $\mu\text{rad}$	—	—	10

### 3.4 连续运动行程测量实验

#### 3.4.1 $z$ 轴连续升降运动

3-DOF 并联平台的动平台在菱形压电电机的连续作动模式下可以沿  $z$  轴做宏观升降运动,该运动实验已经在 3-DOF 并联平台的运动重复性实验中实现,故不再重复。通过对图 12 的分析发现,当激励脉冲信号电压峰值分别为  $60, 80$  和  $100 \text{ V}$  时,随着脉冲信号频率的提高,动平台的平均运动速

图14 动平台绕  $x$  轴旋转运动步进分辨率Fig. 14 Step resolution of moving platform around  $x$  axis

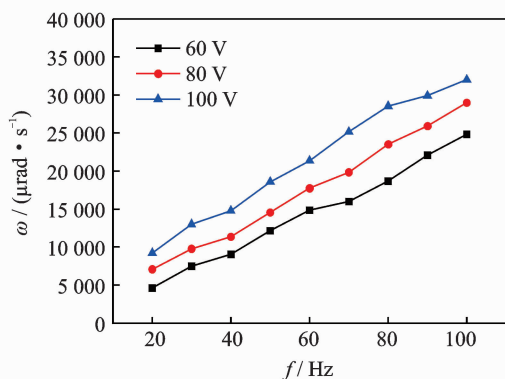
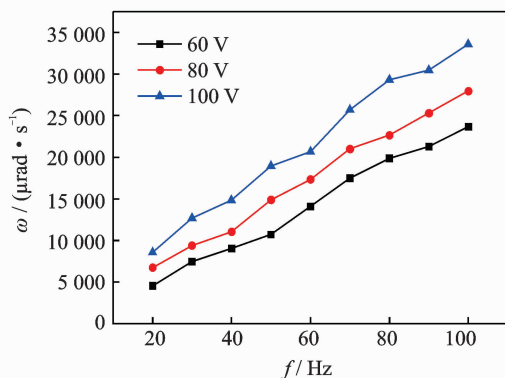
度呈线性缓慢提高,且上升运动和下降运动的平均速度具有较好的重合性。当激励脉冲信号的频率设定为 100 Hz 时,动平台沿  $z$  轴做升降运动的最大运动速度达 312  $\mu\text{m/s}$ 。实验中测得沿  $z$  轴的升降行程约为 3.54 mm,能够满足大行程工作空间的需求。

### 3.4.2 $x$ 轴、 $y$ 轴连续旋转运动

图 15~17 为 3-DOF 并联平台动平台绕  $x$  轴、

$y_U$  轴和  $y_V$  轴旋转的角速度曲线图。动平台绕绕  $x$  轴、 $y_U$  轴和  $y_V$  轴的旋转角速度曲线呈现出了相类似的规律。当激励脉冲电压峰值保持固定时,动平台旋转运动输出的运动角速度随着激励电压信号的频率升高而缓慢线性增大;随着激励电压峰值的逐渐提高,动平台旋转运动输出的角速度也逐渐增大。当激励脉冲信号的电压峰峰值为 80 V、激励电压频率为 100 Hz 时,动平台旋转运动输出的角速度具有较好的线性度,此时动平台绕  $x$  轴、 $y_U$  轴和  $y_V$  轴旋转运动输出的最大角速度分别为 29 000, 29 400 及 28 000  $\mu\text{rad/s}$ 。

通过激光位移传感器对动平台上 3 个标记点的运动位移测量,换算为转动角位移,得到动平台绕  $x$  轴、 $y_U$  轴和  $y_V$  轴的旋转角位移分别为  $3.92^\circ$ ,  $4.16^\circ$  和  $4.05^\circ$ 。相较于传统的并联精密定位平台,其运动行程已经能够满足大行程工作空间的需求。

图15 绕  $x$  轴旋转角速度曲线Fig. 15 Rotation angle velocity around  $x$  axis图16 绕  $y_U$  轴旋转角速度曲线Fig. 16 Rotation angle velocity around  $y_U$  axis

## 3.5 实验结果讨论与分析

### 3.5.1 实验结果讨论

根据对 3-DOF 并联平台的步进作动模式和连续作动模式的实验结果可知,本研究课题将柔性菱

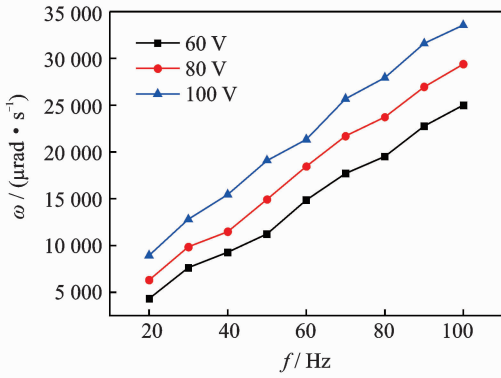


图 17 绕 y<sub>v</sub> 轴旋转角速度曲线

Fig. 17 Rotation angle velocity around y<sub>v</sub> axis

形压电电机直接驱动 3-DOF 并联精密定位平台,能够实现高精度定位和大行程工作空间。实验数据汇总如表 3 所示。可以看出,3-DOF 并联平台借助菱形压电电机的步进运动模式和连续运动模式,能够实现沿 z 轴升降和绕 x 轴、y 轴旋转运动的精密定位和连续宏观运动。其中,沿 z 轴升降运动的定位精度为 1.0 μm,沿 z 轴的升降行程约为 3.54 mm;绕 x 轴转动的定位精度为 8.6 μrad,其工作行程角位移约为 3.92°;绕 y<sub>U</sub> 轴和 y<sub>V</sub> 轴转动的定位精度分别为 11 μrad 和 10 μrad,其宏观连续转动行程分别约为 4.16°和 4.05°。

表 3 3-DOF 并联平台的实验数据汇总表

Tab. 3 Experimental results of 3-DOF parallel platform

运动方式	步进运动分辨率	连续运动速度	连续运动位移
z 轴平动	1.0 μm	312 μm/s	3.54 mm
x 轴转动	8.6 μrad	29 000 μrad/s	3.92°
y <sub>U</sub> 轴转动	11 μrad	29 400 μrad/s	4.16°
y <sub>V</sub> 轴转动	10 μrad	28 000 μrad/s	4.05°

### 3.5.2 误差分析

1) 制造误差。本研究课题所设计的菱形压电电机、并联精密定位平台及其主要零部件,其加工精度要求都较高,但在加工制造方面存在不可避免的误差。

2) 装配误差。菱形压电电机的装配、其定子结构、预紧夹持机构以及 3 条并联支路的装配不可避免地存在误差,影响 3-DOF 并联平台的整体运动精度和运动性能。

3) 实验测量方法。本研究课题面向 3-DOF 并联精密定位平台开展实验研究,各轴转动的运动性

能参数采用激光位移传感器测量直线移动位移,然后换算成转动角位移。上述测量方法没有对干扰数据进行分析,且转动的性能参数测量是通过间接测量获取相关数据,必然会影响转动性能参数的精度。

4) 微振动。微振动是指振动幅值小(一般 ≤10 μm)、频带宽(0.1~200 Hz)的微小扰动。微振动的产生原因十分复杂,而微振动却极大影响了并联精密定位平台的定位精度。

## 4 结 论

1) 设计了一种菱形压电直线电机,给出了定子结构和夹持预紧结构的设计方案,分析了其工作原理,采用 ANSYS 有限元优化设计方法确定了菱形压电直线电机的结构参数。

2) 搭建了实验平台系统,对菱形压电直线电机展开了实验研究。实验结果表明,在步进运动模式下,其步进分辨率为 1.0 μm,且重复性较好;在连续运动模式下,柔性菱形电机的最大空载速度为 0.932 mm/s,且其作动输出速度的线性度较好。

3) 利用 3 台菱形压电直线电机直接驱动并联精密定位平台,实验结果表明:并联平台具有良好的同步性和重复性;动平台沿 z 轴升降运动的定位精度为 1.0 μm,其连续运动的升降行程约为 3.54 mm;动平台绕 x 轴转动的定位精度为 8.6 μrad,其宏观连续转动行程约为 3.92°;动平台绕 y<sub>U</sub> 轴和 y<sub>V</sub> 轴转动的定位精度分别为 11 μrad 和 10 μrad,其宏观连续转动行程分别约为 4.16°和 4.05°。

## 参 考 文 献

[1] 李杨民, 汤晖, 徐青松, 等. 面向生物医学应用的微操作机器人技术发展态势[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 1-13.  
LI Yangmin, TANG Hui, XU Qingsong, et al. The development status of micromanipulator technology for biomedical applications[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 1-13. (in Chinese)

[2] 卢倩, 黄卫清, 孙梦馨. 基于柔性铰链的柔性放大机构参数化设计[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 935-943.  
LU Qian, HUANG Weiqing, SUN Mengxin. Parametric design of flexible amplification mechanism based on flexure hinge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 935-943.



(in Chinese)

- [3] BHAGAT U, SHIRINZADEH B, CLARK L, et al. Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74(4): 173-187.
- [4] DO T, TIAHJOWIDODO T. Hysteresis modeling and position control of tendon-sheath mechanism in flexible endoscopic systems[J]. Mechatronics, 2014, 24(1): 12-22.
- [5] KIM J, CHOI Y, AHN D, et al. A millimeter-range flexure-based nano-positioning stage using a self-guided displacement amplification mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 50(2): 109-120.
- [6] VOSE T, TURPIN M, DAMES P, et al. Modeling, design, and control of 6-DOF flexure-based parallel mechanisms for vibratory manipulation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 64(1/2): 111-130.
- [7] 韩路, 黄卫清, 王寅. 两级复合放大箱位步进压电直线电机[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 698-702.
- HAN Lu, HUANG Weiqing, WANG Yin. Clamping stepping piezoelectric linear motor with two-stage composite amplification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 698-702. (in Chinese)
- [8] SHAYYA S, KRUT S, COMPANY O, et al. A novel (3T-2R) parallel mechanism with large operational workspace and rotational capability [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: [s. n.], 2014: 5712-5719.
- [9] 王乐, 王永杰, 芦小龙. 用于微型飞行器的高转速超声电机[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 170-176.
- WANG Le, WANG Yongjie, LU Xiaolong. High speed ultrasound motor for micro air vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 170-176. (in Chinese)
- [10] 牛子杰, 闫锋欣, 孙志峻. 基于并联谐振匹配的超声电机阻抗特性[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 73-80.
- NIU Zijie, YAN Fengxin, SUN Zhijun. Impedance characteristics of ultrasound motor based on parallel resonance matching[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 73-80. (in Chinese)
- [11] 孙梦馨, 王寅, 黄卫清. 非共振式压电直线电机中的防剪切机构[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 1250-1256.
- SUN Mengxin, WANG Yin, HUANG Weiqing. Anti-shearing mechanism in non-resonant piezoelectric linear motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1250-1256. (in Chinese)
- [12] 钟相强, 张本学, 黄卫清. 双足压电直线作动器结构优化与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 1037-1044.
- ZHONG Xiangqiang, ZHANG Benxue, HUANG Weiqing. Structural optimization and experiment of piezoelectric linear actuator with double feet[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 1037-1044. (in Chinese)
- [13] 陈西府, 黄卫清, 王寅. 动摩擦型压电叠堆直线电机定子的振动特性[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 960-966.
- CHEN Xifu, HUANG Weiqing, WANG Yin. Vibration characteristics of stator of piezoelectric stack linear motor with dynamic friction[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 960-966. (in Chinese)
- [14] 龙涛元, 张铁民, 廖贻泳. 宏微运动一体化压电直线电机驱动电路设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 184-189.
- LONG Taoyuan, ZHANG Tiemin, LIAO Yiyong. Design of driving circuit for macro-micro motion integration piezoelectric linear motor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(18): 184-189. (in Chinese)
- [15] SCUOR N, GALLINA P. Design and testing of a 5-degrees-of-freedom, large working range micro-positioning stage[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(4): 620-627.
- [16] SALTON A, GHANIMI A, JEFERSON V. Saturation-aware control design for micro-nano positioning systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2017, 11(15): 2559-2566.



**第一作者简介:**卢倩,男,1983年7月生,博士、副教授。主要研究方向为压电驱动技术、压电致动测试计量技术及仪器。曾发表《基于柔度比优化设计杠杆式柔性铰链放大机构》(《光学精密工程》2016年第24卷第1期)等论文。  
E-mail:jackeylu@126.com

**通信作者简介:**陈西府,男,1979年8月生,博士、副教授。主要研究方向为压电电机及其驱动控制技术。  
E-mail:chenxiforyou@163.com

