

# 电磁驱动二维精密平面运动平台设计与控制

张威, 周海波, 黄珍里, 孔志平, 段吉安

(中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙, 410083)

**摘要:** 针对由多个单自由度累加而成的多自由度平台存在误差累积精度难提高的局限性, 提出一种基于直线电机驱动的 $X$ - $Y$ 二维平面运动平台。利用1对正交布置的直线轴承进行平面运动解耦, 实现二维平面运动; 基于直线电机的力学模型, 推导平台的基本控制模型; 基于平台的非线性阻力, 提出一种具有非线性阻尼前馈补偿的PI控制器。研究表明: 在全行程( $<19$  mm)运动过程中, 平台在实现平面运动的同时, 达到厘米级运动行程和亚微米级运动精度, 验证了平台的可靠性和控制器的有效性。

**关键词:** 电子封装; 二维精密平台; 前馈补偿

中图分类号: TM921.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2020)05-1221-07

## Design and control for electromagnetically driven two-dimensional precise plane motion platform

ZHANG Wei, ZHOU Haibo, HUANG Zhenli, KONG Zhiping, DUAN Ji'an

(State Key Laboratory of High-Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In view of the limitation of multi-degree-of-freedom platform formed by the accumulation of multiple single-degree-of-freedom platforms, an  $X$ - $Y$  two-dimensional planar motion platform driven by linear motor was proposed. A pair of orthogonal linear bearings were used to decouple plane motion and realize two-dimensional plane motion. Based on the mechanical model of linear motor, the basic control model of the platform was derived. Based on the nonlinear resistance of the platform, a PI controller with nonlinear damping feedforward compensation was proposed. The results show that when the platform is in full travel ( $<19$  mm) motion, it can realize the plane motion and achieve the design goal of centimeter-scale travel and submicron precision, which verifies the reliability of the platform and the effectiveness of the controller.

**Key words:** electronic packaging; two-dimensional precision platform; feedforward compensation

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2020-01-12

**基金项目(Foundation item):** 国家重点研发计划项目(2017YFB1104800); 国家自然科学基金资助项目(51575534, 51975590) (Project(2017YFB1104800) supported by the National Key R&D Program of China; Projects(51575534, 51975590) supported by the National Natural Science Foundation of China)

**通信作者:** 周海波, 博士, 教授, 从事机电系统设计、建模与控制研究; E-mail: zhouhaibo@csu.edu.cn

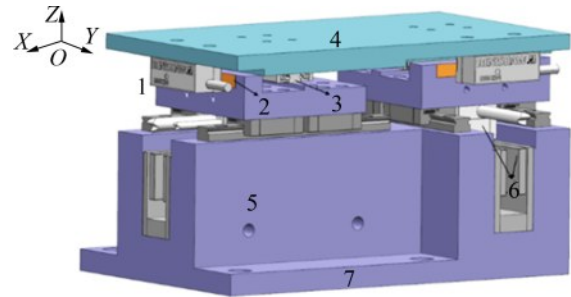
近年来,微纳米定位系统已广泛应用于光电子封装、纳米技术、激光微加工等工程科学领域<sup>[1]</sup>。在这些领域中,大行程和高定位精度是定位系统的关键参数<sup>[2]</sup>。特别是随着大容量、多通道的光电器件的兴起,人们对光电子耦合系统的精度要求越来越高<sup>[3]</sup>。目前,光电子器件耦合系统主要由多个单自由度平台组合而成,而单自由度运动平台可以较容易地实现纳米级的定位精度,但当叠加成所需多自由度系统时,由于存在装配误差、组件对准误差、控制误差等,组合平台难以保持原有定位精度和定位能力<sup>[4-5]</sup>。此外,在实际应用中,高精度测量和加工平台的性能受Abbé原理的限制<sup>[6]</sup>,这些因素制约了组合平台的发展和利用。通过将平台的 $X$ 和 $Y$ 方向运动限制在1个公共平面内,可以完全消除Abbé偏移误差<sup>[7]</sup>,因此,平面运动解耦方式成为近年来国内外研究的热点。AWTAR等<sup>[8-9]</sup>提出利用材料变形原理设计的柔性铰链或采用传统的刚性铰链来实现运动解耦。MO等<sup>[10-11]</sup>提出利用空气轴承或磁力使动平台悬浮,或采用平面电机等非接触式驱动部件,实现同平面内多自由度运动解耦。当运动平台要求达到厘米级的运动行程且同时保持微米或纳米级的运动精度时,电磁力作为驱动力是一种可行的方法<sup>[12-13]</sup>。而新技术的发展降低了永磁线性马达的质量和体积,新的制造工艺和控制策略大大提高了直线电机的性能,给大行程高精度精密运动平台提供了一个新的电机选择<sup>[14-15]</sup>。同时,在实现微/纳米定位时,需要采用高精度传感器来测量工作台的位移。采用激光干涉原理和光栅尺的测量系统为纳米系统的长位移测量提供了更精确的解决方案<sup>[11]</sup>。针对传统组合平台的局限性,本文作者提出一种基于电磁力的二维精密平面运动平台。该平台采用1对正交布置的直线电机作为驱动部件,利用1对正交布置的直线轴承将平台的 $X$ 和 $Y$ 方向运动限制在同一平面内,同时利用高精度光栅尺实时检测运动位移,保证运动精度。

## 1 平面运动平台结构设计和分析

### 1.1 系统结构设计

系统整体结构如图1所示。平台整体采用上下结构,底部为1对正交布置的驱动模组。驱动模组

产生的动作通过1对正交布置的直线轴承传递到动平台,实现平面运动。光栅读数头和标尺构成平台的测量系统,其可检测的最小位移为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

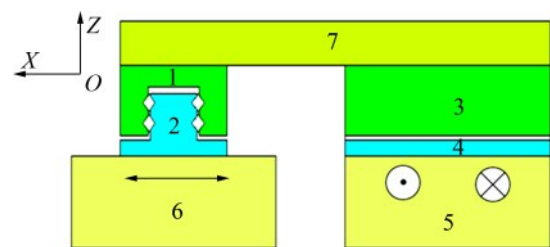


1—光栅尺读数头; 2—标尺; 3—直线轴承; 4—动平台; 5— $X$ 轴直线模组; 6— $Y$ 轴直线模组; 7—底座。

图1 二维精密平面运动平台整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall structure of planar moving platform

图2所示为该平台的解耦原理图。滑块a、滑轨a构成直线轴承a,滑块b和滑轨b构成直线轴承b。滑块a和滑块b通过螺钉与动平台相互连接,导轨a固定在 $X$ 轴向驱动模组上,导轨b固定在 $Y$ 轴向驱动模组上。当平台向 $X$ 方向运动时, $X$ 轴向驱动模组带动直线轴承a、动平台和直线轴承b的滑块b运动。同样,当平台向 $Y$ 方向运动时, $Y$ 轴向驱动模组带动直线轴承b、动平台和直线轴承a的滑块a运动。 $X$ ( $Y$ )轴向驱动模组结构如图3所示,每个轴向驱动模组由永磁体、线圈、直线滑块组和起支撑作用的基板组成。永磁体固定在底座上,直线滑块和线圈通过基板相互连接。当线圈通电时,其在磁场中受到洛伦兹力的作用,带动基板和直线轴承a(b)运动。



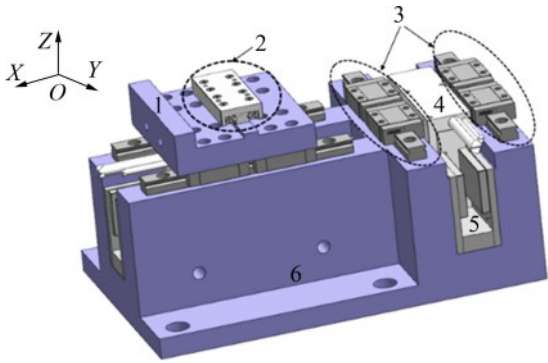
1—滑块a; 2—导轨a; 3—滑块b; 4—导轨b; 5— $Y$ 轴向模组; 6— $X$ 轴向模组; 7—动平台。

图2 解耦原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of decoupling principle

### 1.2 直线电机动子的动力学分析

每个直线电机通过控制线圈中电流来控制电



1—基板; 2—直线轴承; 3—直线滑块; 4—线圈;  
5—线圈; 6—底座。

图3 驱动模组结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of drive module structure

磁力。由文献[16]知, 基于直线电机的运动平台中动子的动力学模型为

$$m\ddot{y} = K(y)I - F_d(y) - F_f(y, \dot{y}) - F_c \quad (1)$$

其中:  $y$ ,  $\dot{y}$ 和 $\ddot{y}$ 分别为动子的位移、速度和加速度;  $m$ 为运动体的质量;  $K(y)$ 为电机的推力系数;  $F_d(y)$ 为直线电机的定位力;  $F_f(y, \dot{y})$ 为直线电机的摩擦力;  $F_c$ 为电机动子受到的外力负载;  $I$ 为动子中线圈的电流。

对式(1)进行积分, 则可以用下面的函数来表示二维平面运动控制系统的被控对象:

$$\dot{y} = f(x, u) + d \quad (2)$$

其中:  $y = [y_1, y_2]^T$ ;  $y_1$ 和 $y_2$ 分别为平台 $X$ 轴和 $Y$ 轴的实际位移;  $x$ 为与位移 $y$ 相关的矩阵,  $x_i = [y_i, \dot{y}_i]^T$ ,  $i = 1, 2$ ;  $u$ 为线圈中电流的输入量,  $u = [I_1, I_2]^T$ ;  $I_1$ 和 $I_2$ 分别为驱动平台沿 $X$ 和 $Y$ 方向移动时对应线圈中电流;  $d$ 为施加外力负载时对系统的干扰向量,  $d = [d_1, d_2]$ ;  $d_1$ 和 $d_2$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 方向上外力负载对系统的干扰值。

## 2 具有非线性阻尼前馈补偿器的PI控制器设计

平台实现的二维平面运动形式分别为沿 $X$ 和 $Y$ 轴向的平移, 因此, 被控对象即平台包括2个输入和2个输出。假定驱动平台沿 $X$ 和 $Y$ 轴向平移的电机线圈中的电流分别为 $I_1$ 和 $I_2$ , 线圈的实际位移 $y_1$

和 $y_2$ 为动平台的输出量。采用具有非线性阻尼前馈补偿的PI控制器进行控制。运动控制主要包括位置环控制部分、速度环控制部分、电流环控制部分和相应的非线性阻尼前馈补偿器。图4所示为控制系统的逻辑框图, 其中, 电流环已经集成到直线电机的驱动器中, 由其自行调整。因此, 控制器的输出可以表示为

$$u_c = u_v + u_f \quad (3)$$

式中:  $u_c = [u_1, u_2]^T$ ;  $u_1$ 和 $u_2$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 轴方向控制器的总输出;  $u_v = [u_{v1}, u_{v2}]^T$ ,  $u_{v1}$ 和 $u_{v2}$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 轴方向控制器未加补偿器时的输出;  $u_f = [u_{f1}, u_{f2}]^T$ ,  $u_{f1}$ 和 $u_{f2}$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 轴方向控制器补偿器的输出。

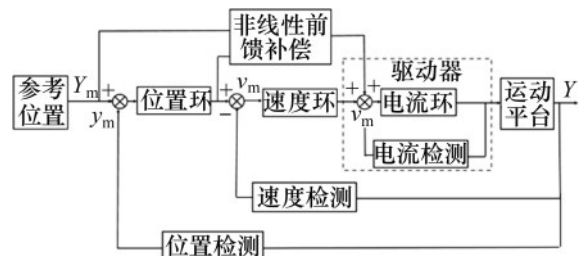


图4 控制系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of control system

### 2.1 位置环设计与速度环设计

位置环采用比例控制, 数学表达式为

$$v = K_p(y_m - y) \quad (4)$$

式中:  $v = [v_1, v_2]^T$ ,  $v_1$ 和 $v_2$ 分别为沿 $X$ 和 $Y$ 轴的运动速度;  $K_p = [K_{p_{y1}}, K_{p_{y2}}]$ ,  $K_{p_{y1}}$ 和 $K_{p_{y2}}$ 分别为控制 $X$ 和 $Y$ 轴控制器位置环的比例系数;  $y_m = [y_{m1}, y_{m2}]^T$ ,  $y_{m1}$ 和 $y_{m2}$ 分别为沿 $X$ 和 $Y$ 轴的目标位置。

速度环采用PI控制, 其数学表达式如下:

$$u_v = K_{pv}(v_m - v) + K_{iv} \int_0^t (v_m - v) dt \quad (5)$$

式中:  $K_{pv} = [K_{pv1}, K_{pv2}]$ ,  $K_{pv1}$ 和 $K_{pv2}$ 分别为控制 $X$ 和 $Y$ 轴控制器速度环比例系数;  $v_m = [v_{m1}, v_{m2}]^T$ ,  $v_{m1}$ 和 $v_{m2}$ 分别为沿 $X$ 和 $Y$ 轴的目标速度;  $K_{iv} = [K_{iv1}, K_{iv2}]$ ,  $K_{iv1}$ 和 $K_{iv2}$ 分别为控制 $X$ 和 $Y$ 轴控制器速度环积分系数。

## 2.2 非线性阻力前馈补偿器设计

由式(1)可知,运动平台非线性阻力主要包括摩擦力和定位力,其中,  $K(y)$ ,  $F_d(y)$ 和  $F_f(y, \dot{y})$ 均可以通过实验获得。

1) 求取  $K(x)$ 。使电机处于匀速运动状态,当外力负载分别为  $F_{e_1}$ 和  $F_{e_2}$ 时,

$$\begin{cases} K(y)I(F_{e_1}, \dot{y}) - F_d(y) - F_f(y, \dot{y}) - F_{e_1} = 0 \\ K(y)I(F_{e_2}, \dot{y}) - F_d(y) - F_f(y, \dot{y}) - F_{e_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可得

$$K(y) = \frac{F_{e_1} - F_{e_2}}{I(F_{e_1}, \dot{y}) - I(F_{e_2}, \dot{y})} \quad (7)$$

式中:  $I(F_{e_1}, \dot{y})$ 和  $I(F_{e_2}, \dot{y})$ 为外力负载分别为  $F_{e_1}$ 和  $F_{e_2}$ 时线圈中电流输入量。

2) 求取  $F_f(y, \dot{y})$ 和  $F_d(y)$ 。根据文献[16],当摩擦单元处于滑动状态时,可以采用GMS摩擦模型中的Stribeck曲线定义:

$$\begin{aligned} F_f(y, \dot{y}) &= \text{sgn}(\dot{y}) \left( F_c + (F_s - F_c) \exp - |\dot{y}/V_s|^{\delta} \right) + \\ &\sigma_2 \dot{y} = \text{sgn}(\dot{y}) F_{cs}(y, |\dot{y}|) + \sigma_2 \dot{y} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\text{sgn}$ 为符号函数。Stribeck曲线随着速度增大而下降,其最大值为静态摩擦力  $F_s$ ,最小值为库仑摩擦力  $F_c$ ;  $V_s$ 为Stribeck速度系数;  $\delta$ 为Stribeck因子;  $\sigma_2$ 为黏性摩擦因数。

由式(8)可知

$$F_f(y, \dot{y}) = -F_f(y, -\dot{y}) \quad (9)$$

根据文献[14],定位力可以表示为

$$\begin{cases} F_d(y) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(2n\pi/\tau) \left( y + \frac{\delta}{2} \right) + \\ \sum_{p=1}^m \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(y(2n\pi/\tau) + \varphi_n) \\ F_n = 2(F_{sn} \cos(n\pi/\tau) + F_{cn} \sin(n\pi/\tau)) \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\delta = k\tau - L_s$ ,  $k$ 为整数;  $L_s$ 为动子长度;  $\tau$ 为极距;  $m$ 为永磁体量,个;  $\varphi_n$ 为各级数相位;  $b_n$ 为第  $p$ 块永磁体单独作用时的齿槽力;  $F_{sn}$ 和  $F_{cn}$ 为傅里叶级数中正余弦分量的各次幅值。

根据式(1),给平台施加的外力负载为  $F_e = 0$ ,在动子运动速度为  $v$ 和  $-v$ 时,有

$$\begin{cases} K(y)I(0, v) - F_d(y) - F_f(y, \dot{y}) = 0 \\ K(y)I(0, -v) - F_d(y) - F_f(y, -\dot{y}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

联立式(9)和(11)得

$$\begin{cases} F_d(y) = \frac{K(y)(I(0, v) + I(0, -v))}{2} \\ F_f(y, \dot{y}) = \frac{K(y)(I(0, v) - I(0, -v))}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $I(0, v)$ 和  $I(0, -v)$ 分别表示动子运动速度大小相同、方向相反而其他条件不变时线圈中电流。因此,本文设计的非线性阻力前馈补偿器  $u_f$ 表示为

$$u_f = \frac{F_d(y) + F_f(y, \dot{y})}{K(y)} \quad (13)$$

## 3 实验结果与讨论

为了验证平台结构和控制系统的性能,利用Matlab/Simulink软件包对二维平面运动平台进行实验测试。实验采用dsPACE数字控制原型系统<sup>[17]</sup>,该系统的控制板为DS1005,还包括ADC, DAC和编码器接口电路;采用雷尼绍XL-80激光干涉系统作为第三方检测工具,其检测精度为1 nm。

### 3.1 重复性定位实验

为了验证平台运动到同一位置的可重复性,对平台进行重复定位精度测试。在平台新行程范围内,从零点以1 mm为间隔取19个目标点,每个目标点采集8组数据,以同一目标点采集的数据平均值为参考位移,分析动平台在各目标位置的重复定位精度。图5所示为从X轴运动到各个目标点时的相对位置误差,可以发现沿X轴全行程运动时,重复定位误差为 $\pm 0.20 \mu\text{m}$ 。图6所示为沿Y轴运动到各个目标点时的相对位置误差,可以发现沿Y轴全行程运动时,重复定位误差为 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 。可以得出平台单轴运动时重复定位精度在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内。

### 3.2 三角响应

为了说明定位阶段平台的跟踪能力,对平台三角形响应进行测试。动平台沿着Y轴移动100  $\mu\text{m}$ ,图7所示为未加前馈控制的轨迹图,图8

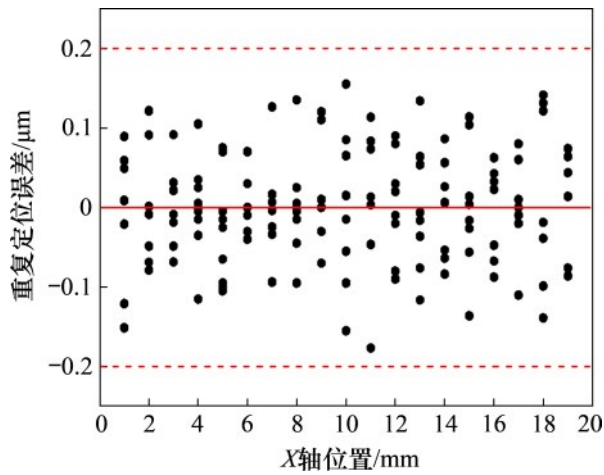


图 5 X轴重复定位精度

Fig. 5 Repeated positioning accuracy of X axis

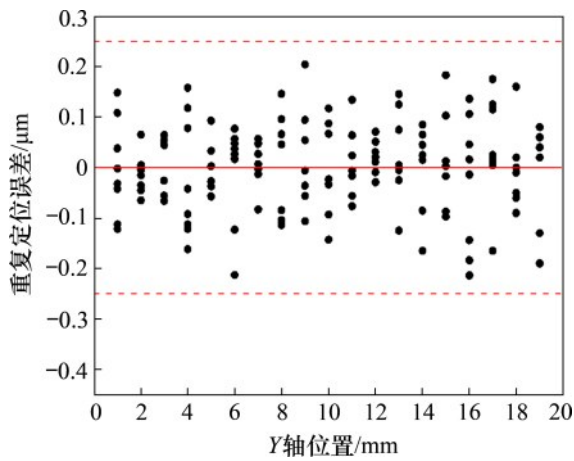


图 6 Y轴重复定位精度

Fig. 6 Repeated positioning accuracy Y axis

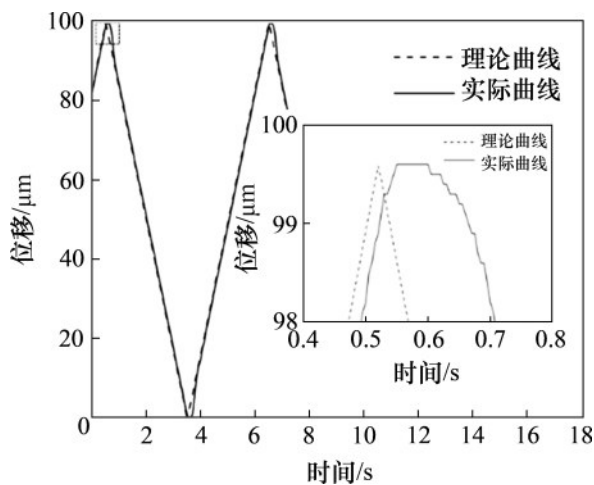


图 7 PI控制器三角响应曲线

Fig. 7 Triangle response curve of PI controller

所示为未加前馈控制的跟随误差曲线, 图9所示为加上前馈控制器的轨迹图, 图10所示为加上前馈

控制器对应的跟随误差曲线。从图7和图8可以看出: 未加前馈控制器时, 平台的跟踪误差在 $\pm 1.00 \mu\text{m}$ 之内, 但当平台突然改变运动方向时, 其跟踪误差突增到 $\pm 5.00 \mu\text{m}$ 之内。从图9和图10可以看出: 平台运动方向未改变时, 其跟踪误差为 $\pm 0.20 \mu\text{m}$ ; 当运动方向发生变换时, 系统跟踪误差为 $\pm 0.60 \mu\text{m}$ 。与未加非线性阻力前馈补偿的PI控制器相比, 当其跟踪误差特别是在平台运动方向发生突变时, 加上前馈补偿后其跟踪性能明显提升。

### 3.3 轨迹圆

由于该平台是将X和Y运动限制在同一平面内, 轨迹圆可以检验运动解耦方式的可行性和平

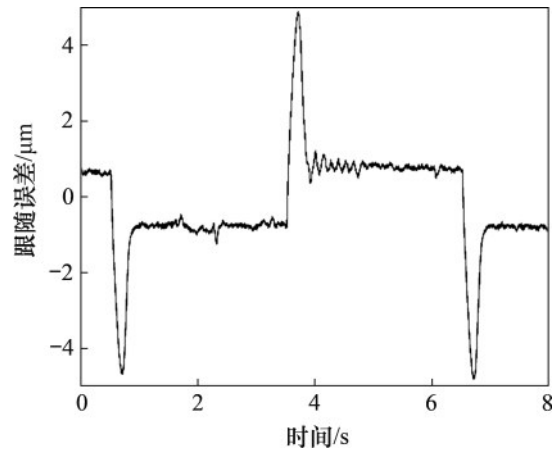


图 8 PI控制器三角响应跟随误差曲线

Fig. 8 Triangular response follows error curve of PI controller

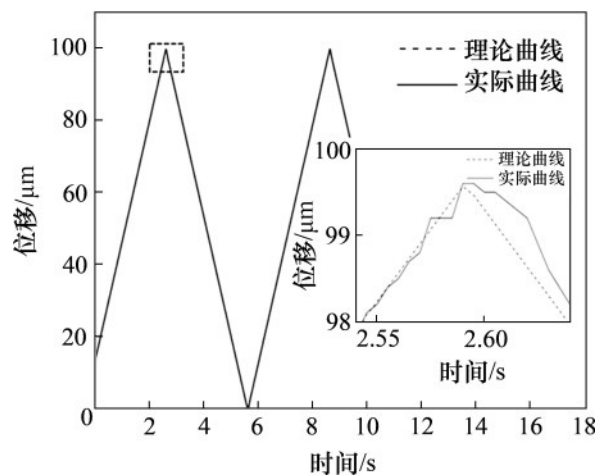


图 9 PI+前馈补偿控制器三角形响应曲线

Fig. 9 Triangle response curve of PI and feedforward compensation controller

台的联动性能,控制  $X$  和  $Y$  轴方向的电机同时运动,在同一平面内画 1 个以半径  $100\ \mu\text{m}$  轨迹圆,如图 11 所示。从图 11 可见:两轴联动时平台跟随误差为  $\pm 2.00\ \mu\text{m}$ ;理论轨迹圆和实际轨迹圆存在沿 1 个固定方向的偏移,其原因可能是用于运动解耦的直线轴承未能正交布置。

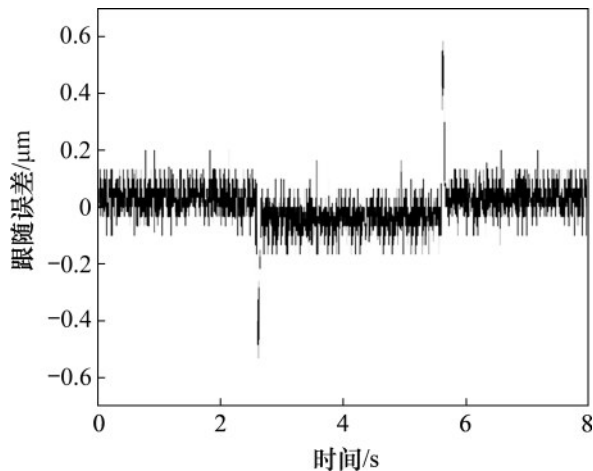


图 10 PI+前馈补偿控制器跟随误差曲线

Fig. 10 Error curve of PI and feedforward compensation controller

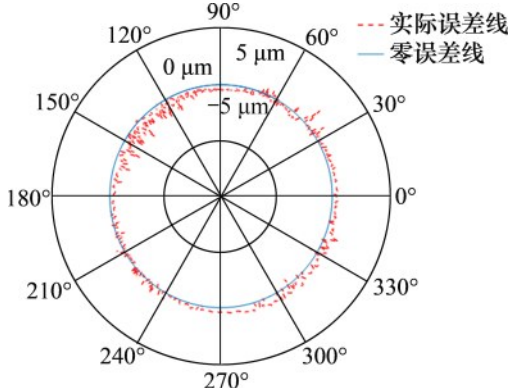


图 11 轨迹圆

Fig. 11 Trajectory round

## 4 结论

1) 使用直线电机直接驱动平台来减少运动传递部件,利用直线轴承刚性解耦方式来减小控制系统复杂程度,同时结合高分辨率的直线光栅尺,动平台可以实现亚微米级二维平面运动平台设计。

2) 采用传统 PI 控制器,平台在运动方向发生改变时,平台不能很好地进行变向跟随。基于直

线电机工作原理,设计具有非线性阻尼前馈补偿的 PI 控制器,平台的跟随精度显著提升且平台的响应速度提高。

## 参考文献:

- [1] TAMADAZTE B, PIAT N F, MARCHAND E. A direct visual servoing scheme for automatic nanopositioning[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 728–736.
- [2] DEVASIA S, ELEFThERIOU E, MOHEIMANI S O R. A survey of control issues in nanopositioning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(5): 802–823.
- [3] 阳波, 段吉安. 光电子封装超精密运动平台末端姿态调整[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(5): 1290–1295.  
YANG Bo, DUAN Jian. Opto-electronics packaging platform for ra-precision position and attitude adjustment[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(5): 1290–1295.
- [4] LI Yangmin, XU Qingsong. A novel piezoactuated  $XY$  stage with parallel, decoupled, and stacked flexure structure for micro-/nanopositioning[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3601–3615.
- [5] POLIT S, DONG Jingyan. Development of a high-bandwidth  $XY$  nanopositioning stage for high-rate micro-/nanomanufacturing[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 724–733.
- [6] BRYAN J B, CARTER D L. Design of a new error-corrected co-ordinate measuring machine[J]. Precision Engineering, 1979, 1(3): 125–128.
- [7] WANG H Y, FAN K C, YE J K, et al. A long-stroke nanopositioning control system of the coplanar stage[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1): 348–356.
- [8] AWATAR S, PARMAR G. Design of a large range  $XY$  nanopositioning system[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(2): 21001–21008.
- [9] 刘知辉, 牛军川, 周一群. 3-CRR 型并联机构运动学与奇异性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1190–1197.  
LIU Zhihui, NIU Junchuan, ZHOU Yiqun. Kinematics and singularity analysis of 3-CRR parallel mechanism[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(5): 1190–1197.
- [10] MO Xixian, ZHANG Bo. Design and driving of a 3-DOF electromagnetic direct-drive nanopositioning stage with long stroke[C]//2017 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale(3M-NANO). Shanghai: IEEE, 2017: 236–241.

- [11] GAO Wei, DEJIMA S, YANAI H, et al. A surface motor-driven planar motion stage integrated with an  $XY\theta Z$  surface encoder for precision positioning[J]. Precision Engineering, 2004, 28(3): 329–337.
- [12] CHEN M Y, HUANG H H, HUNG S K. A new design of a submicropositioner utilizing electromagnetic actuators and flexure mechanism[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 96–106.
- [13] LEI Jin, LUO Xin, CHEN Xuedong, et al. Modeling and analysis of a 3-DOF Lorentz-force-driven planar motion stage for nanopositioning[J]. Mechatronics, 2010, 20(5): 553–565.
- [14] 周振宇, 周海波, 段吉安, 等. 一种采用同型号电机互为负载的直线电机推力波动测试方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2641–2648.  
ZHOU Zhenyu, ZHOU Haibo, DUAN Jian, et al. Thrust fluctuation measurement of PMSLM by the same model motor of mutual load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2641–2648.
- [15] DU Haibo, CHEN Xiuping, WEN Guanghui, et al. Discrete-time fast terminal sliding mode control for permanent magnet linear motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9916–9927.
- [16] VILLEGAS F J, HECKER R L, PEÑA M E, et al. Modeling of a linear motor feed drive including pre-rolling friction and aperiodic cogging and ripple[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1/2/3/4): 267–277.
- [17] 高雅, 刘卫国, 骆光照. 基于 dSPACE 的新型双滑模 PMSM 控制方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2036–2043.  
GAO Ya, LIU Weiguo, LUO Guangzhao. A new dual sliding mode PMSM control method based on dSPACE[J]. Journal of Central South University((Science and Technology), 2015, 46(6): 2036–2043.

(编辑 陈灿华)