

文章编号 1004-924X(2026)08-1255-13

## 基于抗磁悬浮的微型平面电机驱控设计

张 鹤<sup>1</sup>, 施至超<sup>2\*</sup>, 朱志伟<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 机械工程学院 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 中法工程师学院 江苏 南京 210094)

**摘要:**针对永磁体式抗磁悬浮微型平面电机连续运动受限、驱动结构复杂等问题,本文提出一种面向永磁体阵列的单面驱动三自由度微型平面电机,实现了结构简化与多自由度解耦控制的统一设计。系统采用超薄印刷电路板蛇形线圈,通过四路独立电流构建可调磁场;基于磁场解析及等效磁偶极子模型,建立了电流与电磁力的数学关系,并形成三自由度开环解耦控制方法。实验结果表明,该执行器可实现稳定三自由度运动:通过调控4路驱动电流相位,在XY平面实现7 mm×7 mm大范围运动,行程内保持良好线性;定位精度为±8.232 μm,重复定位精度为±5.690 μm。通过调控驱动电流幅值,获得了0.95 μm的Z轴分辨率及约23 μm的Z轴位移调节范围。与传统主动磁浮平台相比,该结构体积缩小逾一个数量级,电流需求和制造成本显著降低,展现出良好的高精度微定位应用潜力。

**关键词:**抗磁悬浮技术;微型平面电机;超薄印刷电路板;谐波分析;开环控制

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A

**doi:**10.37188/OPE.20263408.1255 **CSTR:**32169.14.OPE.20263408.1255

## Diamagnetic levitation-based micro planar motor drive design

ZHANG He<sup>1</sup>, SHI Zhichao<sup>2\*</sup>, ZHU Zhiwei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, China;

2. Sino-French Engineer School, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhichao.shi@njust.edu.cn

**Abstract:** To address the limitations of continuous motion and complex drive structures in permanent magnet type diamagnetically levitated micro planar motors, this paper proposed a single-sided driven three-degree-of-freedom (3-DOF) micro-actuator with a PM array. This design achieved a unified approach to structural simplification and multi-DOF decoupled control. The system employed ultra-thin flexible printed circuit (FPC) serpentine coils to generate an adjustable magnetic field via four independent current channels. Based on magnetic field analysis and an equivalent magnetic dipole model, a mathematical model between current and electromagnetic force was established, forming a 3-DOF open-loop decoupling control method. Experimental results demonstrate stable 3-DOF motion covering a wide XY-plane area of 7 mm×7 mm, while maintaining good linearity throughout the range. The positioning accuracy achieves

收稿日期:2026-01-29;修订日期:2026-03-03.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 30924010942)

$\pm 8.232 \mu\text{m}$  and repeatability is  $\pm 5.690 \mu\text{m}$ . By finely adjusting the driving current, the system achieves a Z-axis resolution of  $0.95 \mu\text{m}$  and a displacement adjustment range of approximately  $23 \mu\text{m}$ . Compared to conventional active magnetic levitation platforms, this structure reduces volume by more than an order of magnitude, significantly lowers current requirements and manufacturing costs, and demonstrates excellent potential for high-precision micro-positioning applications.

**Key words:** diamagnetic levitation technology; micro planar motors; ultra-thin FPC; harmonic analysis; open-loop control

## 1 引言

高精度平面电机已成为推动多个前沿领域发展的核心部件,其市场需求潜力巨大。在精密操作<sup>[1-2]</sup>,精密制造<sup>[3-5]</sup>、生命科学领域<sup>[6-8]</sup>等领域更是不可或缺。这类设备需同时满足大范围运动与精密定位的双重要求。前者保障对复杂任务的适配能力,后者则直接决定操作精度与系统可靠性。然而传统平面电机的结构紧凑度与定位能力始终面临难以突破的瓶颈:接触式导向机构产生的摩擦、滞后与间隙误差会引入力信号噪声,不仅增加控制参数优化难度,还大幅降低实际控制效果<sup>[9]</sup>;主动磁浮平台虽能实现亚微米级精度,在光刻<sup>[10-11]</sup>、计量<sup>[12-14]</sup>和显微镜<sup>[15-16]</sup>领域得到了相应的应用,却因依赖复杂的测量与驱动子系统导致体积庞大,结构紧凑度存在瓶颈。传统平面电机的驱动架构因耦合效应、刚度限制及材料本征特性,导致高分辨率常以行程压缩为代价,而拓展行程则易因干扰丧失高精度定位能力,使得分辨率与行程之间存在瓶颈。

为解决上述矛盾,抗磁悬浮技术<sup>[17]</sup>凭借无摩擦、低能耗的固有特性,为突破传统执行器的性能局限提供了新思路<sup>[18-21]</sup>。早期研究已预测该类系统可理论上实现极高精度的悬浮子开环与闭环控制<sup>[22]</sup>,随着近年稀土永磁体(Permanent Magnet, PM)与印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)技术的进步<sup>[23-24]</sup>,进一步推动了抗磁悬浮在微型平面电机领域的应用<sup>[25-27]</sup>,其方法是将PM阵列作为悬浮子,水平向PCB载流线路构建电磁保守势场,垂直向抗磁材料形成抗磁悬浮势场,双场协同实现稳定悬浮;调控电流相位,可在空气或真空环境中实现毫米级运动与亚微米级定位精度。

然而,现有抗磁悬浮微型平面电机在运动控

制与结构设计上仍存在明显缺陷:一方面,动子多采用类似步进电机的数字式运动模式<sup>[28]</sup>,依赖方波驱动信号与定位逻辑实现位移,难以满足精密操作场景中对连续、平滑运动的需求;另一方面,驱动结构设计复杂,常用的多层线路布局易导致磁场在空间中衰减过快,不仅限制了动子的运动范围与灵活性,还增加了系统调试与集成的难度,这些不足制约了抗磁悬浮技术在多自由度精密中的进一步应用。

针对上述问题,本文提出一种基于抗磁悬浮的三自由度微型平面电机设计方案,从结构与运动控制两方面实现优化:采用双层柔性印刷电路(Flexible Printed Circuit, FPC)载流线路板作为单面驱动核心,其轻薄特性不仅使整体结构更紧凑,更有效针对磁场在空间中的衰减问题,为动子提供更稳定均匀的大行程驱动环境;同时,在每层FPC线路板上设计两条独立电流通路,通过调控两路电流的相位与幅值,可直接驱动动子实现连续、平滑的多方向运动,无需依赖复杂的数字式离散控制逻辑。该方案既解决了现有抗磁悬浮动子运动不连续、结构复杂的问题,又通过磁场调控优化保障了三自由度运动的稳定性与灵活性,为精密制造、显微操作等领域提供了更适配的微型执行器技术路径。

## 2 抗磁悬浮微型平面电机工作原理

该微型平面电机采用“悬浮动子-抗磁材料-定子”的三层结构如图1所示。自上而下依次为动子PM阵列、抗磁材料热解石墨(Pyrolytic Graphite, PG)以FPC定子,其中特制FPC的上表面与PG抗磁层紧密贴合。动子部分由方形PM构成棋盘格阵列,磁化方向沿垂直于阵列平面的方向交替分布,由此形成 $N \times N (N \geq 2)$ 的基

本阵列单元。定子采用双面正交蛇形布线,上、下两层导线分别对应 X 轴与 Y 轴驱动通道。基于 PM 与 PG 之间的抗磁排斥效应<sup>[29]</sup>,实现 PM 阵列在 PG 表面的无接触悬浮。向定子线圈施加设定幅值与相位角的电流后,将产生可控电磁力,用以维持动子在指定空间位置的稳定,同时驱动其沿预设轨迹实现 X, Y, Z 三个自由度的精密运动。

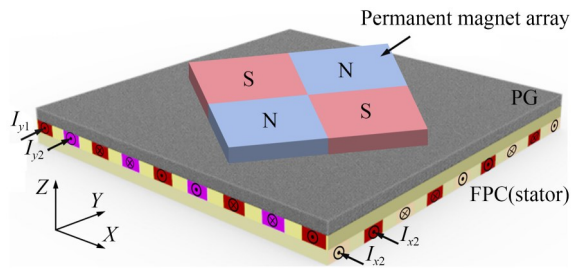


图 1 抗磁悬浮平面电机示意图  
Fig. 1 Diamagnetic levitation planar motor

图 2 给出了三自由度抗磁悬浮微型平面电机的原理图。双层 FPC 定子中,每层布置两组正交蛇形导线,沿 X 轴方向的绕组 ( $I_{x1}, I_{x2}$ ) 与沿 Y 轴方向的绕组 ( $I_{y1}, I_{y2}$ ) 共同实现 PM 在 X, Y, Z 轴三个自由度上的驱动控制。两组导线的空间相位间隔为  $p/4$ , 同组相邻导线中心距为  $p/2$ 。PM 阵列中同极性 PM 的中心距设置为  $p$ , 与定子磁场周期一致。工作时,电机定子每层的两路导线通入相位差为  $90^\circ$  的交流电,通过 4 路独立控制电流实现阵列的平面运动与悬浮调控。

图 3 为抗磁悬浮微型平面电机的实物图,当 4 路导线皆通入等幅值直流电时,PM 阵列一方

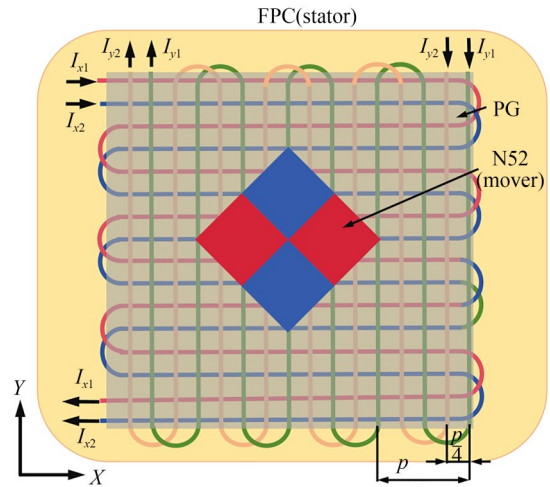


图 2 抗磁悬浮微型平面电机原理图  
Fig. 2 Diamagnetic levitation micro planar motor's working principle

面受 FPC 的磁场分量  $B_z$  影响,锁定于 XY 平面某平衡坐标  $(x_e, y_e)$ , 其侧边与 FPC 侧边呈  $45^\circ$  夹角;另一方面受 FPC 的磁场分量  $B_x$  与  $B_y$ 、抗磁力、重力共同影响悬浮于 Z 轴平衡坐标  $z_e$ 。平衡坐标与各物理量的关系请参见 4.1 小节与 4.2 小节。

抗磁悬浮微型平面电机关键参数如表 1 所

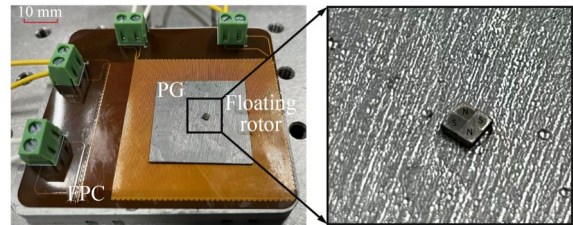


图 3 抗磁悬浮微型平面电机实物图  
Fig. 3 Diamagnetic levitation micro planar motor prototype

表 1 抗磁悬浮微型平面电机关键参数

Tab. 1 Key parameters of the diamagnetic levitation micro planar motor

| 部件       | 参数                                       | 数值                                     |
|----------|--|--|
| PM       | Size $l_m \times l_m \times t_m$         | 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 0.5 mm     |
|          | Magnetization strength                   | $1.1 \times 10^6$ A/m                  |
|          | Mass                                     | 3.6 mg                                 |
| PG sheet | Size $l_p \times l_p \times t_p$         | 30 mm $\times$ 30 mm $\times$ 0.5 mm   |
| Stator   | Overall size $l_s \times l_s \times t_s$ | 48 mm $\times$ 48 mm $\times$ 0.250 mm |
|          | Conductor spacing                        | 1.414 mm                               |
|          | Conductor width                          | 0.154 mm                               |
|          | Conductor thickness                      | 0.012 mm                               |

示,其中  $L_m, t_m$  分别为单个 PM 的宽度与厚度,  $l_p, t_p$  分别为 PG 的宽度与厚度,  $L_s, t_s$  分别为 FPC 的总体宽度与厚度。为了达到良好的悬浮效果,选取 N52 级烧结钕铁硼 PM 组成定子,其他抗磁悬浮系统参数数值确认方法请参见 3.1 小节。依照图 2 的定子尺寸设计,导线空间距由 PM 的中心距决定,因此表 1 的参数数值取 1.414 mm,其他定子参数由现有 FPC 技术确定。

### 3 抗磁悬浮微型平面电机数学建模

#### 3.1 抗磁悬浮模型

PM 受到抗磁材料产生的反作用力,即抗磁力:

$$F_d = \int_V \nabla(M \cdot B) dV, \quad (1)$$

式(1)在  $x, y, z$  轴三个方向的分量为:

$$F_{dx} = \frac{\chi_x}{\mu_0} \iiint_V \left( B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + B_y \frac{\partial B_y}{\partial x} + B_z \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) dV, \quad (2)$$

$$F_{dy} = \frac{\chi_y}{\mu_0} \iiint_V \left( B_x \frac{\partial B_x}{\partial y} + B_y \frac{\partial B_y}{\partial y} + B_z \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) dV, \quad (3)$$

$$F_{dz} = \frac{\chi_z}{\mu_0} \iiint_V \left( B_x \frac{\partial B_x}{\partial z} + B_y \frac{\partial B_y}{\partial z} + B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) dV, \quad (4)$$

其中:  $\chi_x = \chi_y = -450 \times 10^{-6}$  为 PG 在水平方向上的磁化率,  $\chi_z = -85 \times 10^{-6}$  为相应垂直方向上的磁化率<sup>[30]</sup>。

由式(2)~式(4)可知,抗磁力由磁场场强及其梯度共同决定,呈明显非线性;其同时依赖三方向场分量,但在低悬浮高度条件下,  $B_x$  与  $B_y$  对  $F_{dz}$  的影响可忽略。基于以上假设与公式(4),可得到悬浮于 PG 上方的 PM 所受到的抗磁力<sup>[31]</sup>:

$$F_d = \frac{1}{2} \frac{\chi_z}{\mu_0} \iint_A [B_{z,up}^2 - B_{z,low}^2] dx dy, \quad (5)$$

其中:  $B_{z,up}$  和  $B_{z,low}$  分别表示 PG 顶面和底面的磁场分量,  $A$  为 PG 片顶面与底面的面积。可见抗磁力  $F_d$  与垂直于 PG 顶面和底面的磁通密度  $B_z$  分量平方差在有效作用面积  $A$  上的积分成正比。

本文采用 COMSOL 有限元计算 PG 与 PM 之间抗磁力随间距的变化。由于网格划分的随机性,插值过程会引入约  $10^{-3}$  N 的计算误差,而依据式(5)计算的抗磁力数量级仅为  $10^{-5}$  N,远

低于该误差。为此,本文采用文献<sup>[32]</sup>中的方法对仿真结果进行误差消除。

图 4 给出在 PM 尺寸固定的条件下,不同 PG 厚度下抗磁力与 PM-PG 间距的关系,基于表 1 中 PM 参数以及 PG 尺寸,对不同 PG 厚度  $t_p$  的情况下抗磁力  $Z$  向分量与重力之差  $F_d - G$  进行了仿真分析,在  $F_d - G = 0$  处获得 PM 阵列的悬浮高度。结果表明,PG 厚度增大可提升 PM 的悬浮高度,但当  $t_p > 0.5$  mm 时,其提升效果趋于饱和,对悬浮高度影响不再显著。因此,本研究选用厚度为 0.5 mm 的 PG 片。

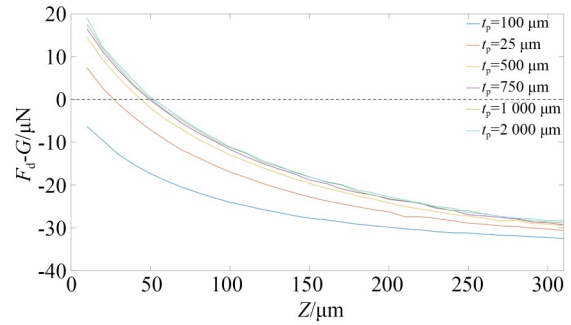


图 4 不同 PG 厚度下 PM 所受抗磁力与悬浮高度的关系  
Fig. 4 Simulation data of diamagnetic force vs. PM levitation height with different PG thicknesses

在 PG 片尺寸固定的条件下,单个 PM 的悬浮高度与 PM 尺寸的映射关系如图 5 所示,减小 PM 的宽度和厚度可获得更高的悬浮高度。然而,烧结钕铁硼 PM 在实际加工中受制于现有工艺,综合加工可行性与系统性能需求,最终选用

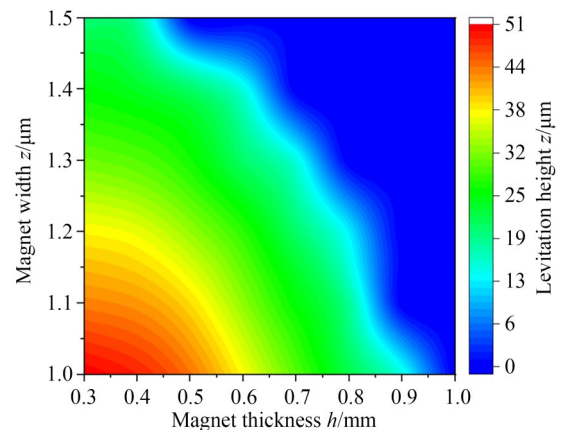


图 5 不同磁体尺寸悬浮映射图  
Fig. 5 Mapping graph of varying-size PM's levitation height

表 1 所列的 PM 尺寸作为本设计方案。

### 3.2 电磁力模型

由于双层 FPC 中各层的两路导线具有相同的布置方式,本文首先对单路导线在悬浮平面内的磁场分布进行分析,并在此基础上推导同层两条导线的合成磁场表达式;将 PM 等效为点磁偶极子,计算线圈作用于 PM 的电磁力<sup>[33-35]</sup>:

$$F = (m_d \times \nabla) \times B_c, \quad (6)$$

其中: $m_d$ 是磁偶极子, $B_c$ 是线圈产生的磁场。

PM 阵列中单个 PM, PG 及 FPC 三者的空间位置关系截面图如图 6 所示。以图 1 中沿 Y 轴布置的导线为例进行说明。在 XZ 平面内,沿 Y 轴方向的单条蛇形导线由 2N 段直导线构成,其中 N 段电流方向沿 Y 轴正向,另外 N 段电流方向沿 Y 轴负向。由于这些沿 Y 轴平行排列的直导线在 XZ 平面内仅产生磁场的 X, Z 分量,所以沿 Y 轴方向的蛇形导线所产生的磁场分量  $B_x, B_z$  可近似等效为多根无限长直导线电流磁场的叠加。

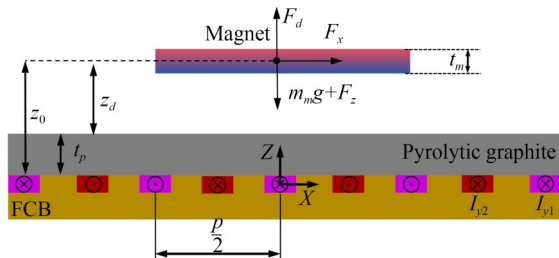


图 6 单个 PM 的电磁力方向和驱动电流方向示意图

Fig. 6 Electromagnetic force on a single PM and driving current directions

在 PM 悬浮高度与尺寸远小于导线长度前提下,从基于 Biot-Savart 定律的单根无限长通电导线磁场表达式出发,可推导得到 XZ 平面内任意第  $k$  段通电导线对空间目标点  $(x, z)$  处的单位电流磁场  $b_{kx}$  与  $b_{kz}$ :

$$b_{kz}(x, z) = (-1)^{k+1} \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{x + \frac{kp}{2}}{\left[ \left( x + \frac{kp}{2} \right)^2 + z^2 \right]}, \quad (7)$$

$$b_{kx}(x, z) = (-1)^k \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{z}{\left[ \left( x + \frac{kp}{2} \right)^2 + z^2 \right]}. \quad (8)$$

因此,单位电流总磁场公式为:

$$\begin{cases} b_z = \sum_{k=-N}^N b_{kz} \\ b_x = \sum_{k=-N}^N b_{kx} \end{cases}. \quad (9)$$

文献<sup>[36]</sup>表明,特定高度范围内磁场幅值以基波为主导,高阶谐波快速衰减,其对力学结果的影响可忽略。因此,类比 Halbach 阵列的磁场表达式<sup>[37]</sup>,将单位磁场  $b_z$  和  $b_x$  近似为一阶谐波分量。观察式(7)~式(9)发现  $b_x(x)$  为偶函数、 $b_z(x)$  为奇函数,简化的磁场公式在工作区域内可表示为:

$$b_{x1}(x, z_0) = b_{1x}(z_0) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (10)$$

$$b_{z1}(x, z_0) = b_{1z}(z_0) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (11)$$

其中: $b_{1x}(z_0) = b_{1z}(z_0) = \frac{2\mu_0}{p} \exp\left(-\frac{2\pi z_0}{p}\right)$ , 磁场分量  $b_x$  和  $b_z$  幅值相同并随高度  $z_0$  呈指数衰减趋势。

为进一步说明磁场分布的谐波特性,本文以不同高度  $z_0$  为基准引入归一化高度  $\tilde{z}$ , 并计算 2N 段 ( $N=50$ ) 单根导线在单位电流激励下产生的磁场沿空间周期方向的分布情况,如图 7 所示。图中实线表示磁场分量  $b_x$  和  $b_z$ , 虚线为其对应的一阶谐波分量  $b_{x1}$  和  $b_{z1}$ 。结果显示,在  $\tilde{z} \approx p/2$  的工作区间内,一阶谐波能够较好地表征磁场的主要空间变化特征。FPC 磁场采用一阶谐波近似,利用磁场高阶谐波随悬浮高度指数衰减的特性,在磁体悬浮高度与导线阵列周期处于同一数量级时,可忽略高阶谐波影响,仅保留主导的一阶谐波分量,使磁场模型简化为简洁的正弦分布形式,大幅降低后续电磁力计算复杂度。

由式(10)~式(11)可得,在悬浮高度  $z_0$  平面内,沿 Y 轴布置的蛇形导线产生的磁场分量  $B_x, B_{zy}$  为:

$$B_x = b_{1x}(z_0) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) I_{y1} + b_{1z}(z_0) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) I_{y2}, \quad (12)$$

$$B_{zy} = b_{1z}(z_0) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) I_{y1} - b_{1x}(z_0) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) I_{y2}, \quad (13)$$

其中: $I_{y1}, I_{y2}$  是沿 Y 轴同层布置两组导线电流。

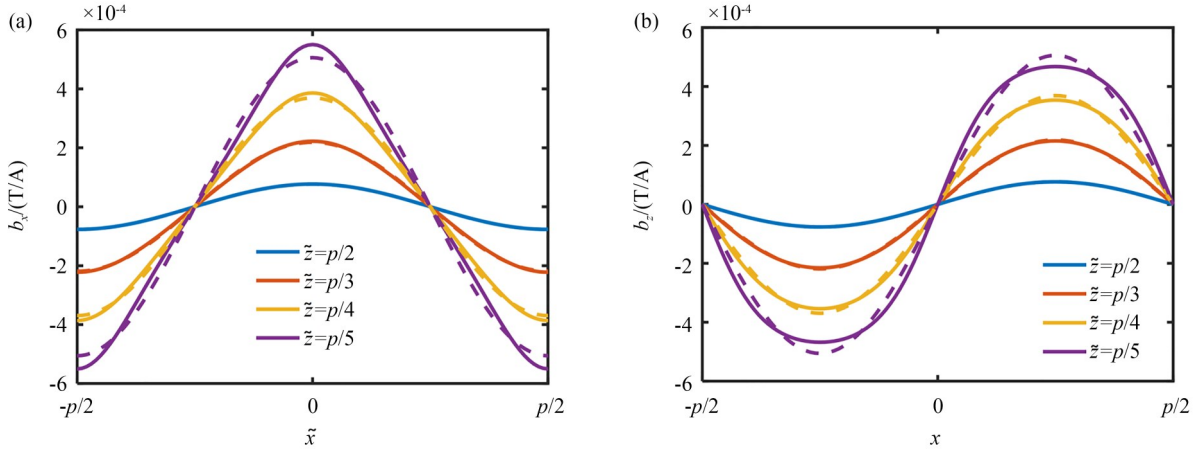


图7 2N段单根导线产生单位电流磁场的周期波形和一阶谐波

Fig. 7 Periodic waveforms and first-order harmonics of unit-current magnetic fields generated by 2N segments of a single wire

在此基础上,本文进一步采用磁偶极子模型来等效磁体阵列,实现其受力模型的简化推导。如图6所示系统截面图,将方形PM等效为一磁偶极子  $m' = 4N_m m / \pi^2$ ,  $N_m$  是PM个数,  $m$  是PM磁矩  $m = M_s A$ ,  $M_s$  是PM磁场强度,  $A$  是PM表面积。PM中心置于  $(x, y, z_0)$ , 并忽略磁场沿磁体厚度方向的变化,即视其平均磁场与悬浮平面处的磁场相等。由式(6)可得:

$$F_x = m' \frac{\partial B_{zy}}{\partial x}, \quad (14)$$

$$F_{zy} = -m' \frac{\partial B_x}{\partial x}. \quad (15)$$

将式(12)、式(13)代入式(14)、式(15):

$$F_x = K_{y1} I_{y1} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) + K_{y1} I_{y2} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (16)$$

$$F_{zy} = K_{y2} I_{y1} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) - K_{y2} I_{y2} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right). \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{y1} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & K_{y1} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{x1} \cos\left(\frac{2\pi y}{p}\right) & K_{x1} \sin\left(\frac{2\pi y}{p}\right) \\ K_{y2} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & -K_{y2} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & K_{x2} \sin\left(\frac{2\pi y}{p}\right) & -K_{x2} \cos\left(\frac{2\pi y}{p}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{x1} \\ I_{x2} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{p} \begin{bmatrix} K_{y1} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & -K_{y1} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{x1} \sin\left(\frac{2\pi y}{p}\right) & K_{x1} \cos\left(\frac{2\pi y}{p}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{x1} \\ I_{x2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

电磁刚度  $k_x$  为:

$$k_x = -\frac{\partial F_x}{\partial x} =$$

$$\frac{2\pi}{p} K_{y1} I_{y1} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) - \frac{2\pi}{p} K_{y1} I_{y2} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (18)$$

其中:  $K_{y1} = \frac{m' b_{1zy}(z_0) 2\pi}{p}$ ,  $K_{y2} = \frac{m' b_{1x}(z_0) 2\pi}{p}$  为沿Y轴导线电流对应的力电机常数。同理可得到沿X轴布置的导线  $I_{x1}, I_{x2}$  对PM阵列产生的电磁力  $F_y, F_z$  和电磁刚度  $k_y, k_z$ 。

基于上述力和刚度的解析关系,可通过调节四路独立电流  $I_{y1}, I_{y2}, I_{x1}, I_{x2}$  分别实现对目标力与等效刚度的独立控制。当悬浮高度为  $z_0$ , 此时,电磁力  $F_x, F_y, F_z$  和电磁刚度  $k_x, k_y$  可由给定的电流  $I_{y1}, I_{y2}, I_{x1}, I_{x2}$  得到:

其中:  $K_{x1} = \frac{m'b_{1xz}(z_0)2\pi}{\rho}$ ,  $K_{x2} = \frac{m'b_{1yz}(z_0)2\pi}{\rho}$  是关于沿  $X$  轴导线通电电流的电机常数。

## 4 驱动方案设计

### 4.1 面内驱动设计

为实现 PM 阵列动子在  $XY$  平面内的面内运动控制,需通过式(16)、式(17)建立平衡位置坐标  $x_e, y_e$  与驱动电流  $I_{x1}, I_{x2}, I_{y1}, I_{y2}$  之间的关系。考虑在平衡位置处的 PM 阵列电磁力  $F_x, F_y$  和电磁刚度  $k_x, k_y$  需满足下述约束:

$$\begin{cases} F_x(x=x_e)=0, k_x(x=x_e)>0 \\ F_y(y=y_e)=0, k_y(y=y_e)>0 \end{cases} \quad (21)$$

得到:

$$\begin{cases} \frac{2\pi x_e}{\rho} + \varphi_x = (2n+1)\pi, n \in Z \\ \frac{2\pi y_e}{\rho} + \varphi_y = (2n+1)\pi, n \in Z \end{cases} \quad (22)$$

其中:  $\varphi_x, \varphi_y$  需满足以下关系:  $\tan(\varphi_x) = I_{y1}/I_{y2}$ ,  $\tan(\varphi_y) = I_{x1}/I_{x2}$ 。令空间相位角  $\theta_x = \frac{2\pi x_e}{\rho}$ ,  $\theta_y = \frac{2\pi y_e}{\rho}$ , 可得:

$$\frac{I_{y1}}{I_{y2}} = -\tan \theta_x, \quad (23)$$

$$\frac{I_{x1}}{I_{x2}} = -\tan \theta_y. \quad (24)$$

为了满足式(23)、式(24),本文提出以下激励电流波形:

$$\begin{cases} I_{y1} = I_{0x} \sin \theta_1 \\ I_{y2} = I_{0x} \cos \theta_1 \\ I_{x1} = I_{0y} \sin \theta_2 \\ I_{x2} = I_{0y} \cos \theta_2 \end{cases} \quad (25)$$

其中:  $I_{0x} = \frac{\rho^2}{4\pi^2 m'b_{1zy}} k_x$ ,  $I_{0y} = \frac{\rho^2}{4\pi^2 m'b_{1zx}} k_y$ 。通过实时调节激励电流的空间相位角,使动子平衡位置坐标与平面运动坐标保持匹配;其中两路  $Y$  向激励电流  $I_{y1}, I_{y2}$  相位互差  $90^\circ$ , 独立控制动子  $X$  轴运动, 两路  $X$  向激励电流  $I_{x1}, I_{x2}$  相位互差  $90^\circ$ , 独立控制动子  $Y$  轴运动, 以此实现  $XY$  平面运动。

### 4.2 面外驱动设计

为实现 PM 阵列动子在  $Z$  轴方向的面外运动控制,需对 PM 阵列在  $Z$  轴平衡位置坐标  $z_e$  处进行受力分析,建立  $z_e$  与驱动电流之间的关系。

考虑未通电情况下,PM 阵列悬浮于某一高度  $z_0$ , 此时抗磁力与重力之间的关系为:

$$F_d(z_0) - G = 0, \quad (26)$$

式中,  $k_{d0} = -\left. \frac{\partial F_d}{\partial z} \right|_{z=z_0}$  为在  $z_0$  的抗磁力刚度。

由图 4 可知  $F_d(z)$  为非线性函数,但当 PM 在  $z_0$  附近发生微小位移  $|z_0 - z_e| \ll z_0$  时,可将  $F_d(z)$  近似为如下线性关系:

$$F_d(z_e) \approx F_d(z_0) + k_{d0}(z_0 - z_e). \quad (27)$$

进一步考虑通电工况下,此时抗磁力、重力与定子产生的电磁力之间的关系为:

$$F_d(z_e) - G + F_z = 0. \quad (28)$$

采用 3.1 小节中提出的激励电流波形,将式(19)、式(22)、式(25)、式(26)、式(27)代入式(28)可得:

$$z_e = -\frac{K_{x2}}{k_{d0}} I_{0x} - \frac{K_{y2}}{k_{d0}} I_{0y} + z_0. \quad (29)$$

通过实时调节激励电流  $I_{y1}, I_{y2}, I_{x1}, I_{x2}$  的幅值  $I_{0x}, I_{0y}$ , 改变空间磁场强度,进而调整动子的平衡位置  $z_e$ , 以此实现  $Z$  轴方向的面外运动。

### 4.3 工作空间分析

PM 阵列的  $XY$  工作空间由 FPC 有效区域及 PG 尺寸共同决定。一方面考虑 FPC 磁场边缘效应,如图 8 所示,  $2N$  段单根  $Y$  轴导线在单位电流

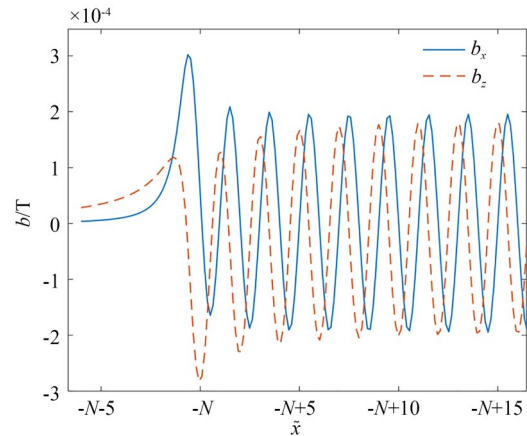


图 8 单位电流分量磁场  $b_x, b_z$  关于归一化位置  $\tilde{x}$  的曲线  
Fig. 8  $b_x$  and  $b_z$  components of magnetic field per unit current as a function of normalized position  $\tilde{x}$

下产生的磁场分量  $b_x, b_z$  随归一化坐标  $\tilde{x}$  变化的分布: 远离边缘 5 条导线后磁场趋于正弦波形, 误差可控制在 5% 以内。因此动子的面内运动范围需限定为  $\{\pm(l_s/2 - p), \pm(l_s/2 - 2p)\}$ 。另一方面考虑  $2 \times 2$  PM 阵列悬浮于 PG 上方运动时, 其侧边不可超过 PG 的表面区域, 对应的运动范围为  $\{\pm(l_p/2 - p), \pm(l_s/2 - p)\}$ 。动子的面内运动范围需对比以上两个范围取最小值。

由公式(30)可知, Z 轴运动范围存在上下双向约束, 其边界由系统结构与悬浮稳定性共同决定。下方边界受限于 PM 阵列与 PG 板的临界接触位置, 即  $t_p + t_m/2$ 。上方边界由 PM 阵列与 PG 板能维持悬浮的最大高度决定, 即  $z_0$ 。

综上所述, PM 阵列的工作空间为  $\{\pm 13.586 \text{ mm}, \pm 13.586 \text{ mm}, 0.75 \sim 0.795 \text{ mm}\}$ 。

## 5 三自由度精密定位性能表征

### 5.1 实验设备及系统搭建

图 9 给出了实验测试系统框图。PM 阵列微执行器的驱动由上位机通过 16 位 DA 转换模块输出, 经采集卡处理后输入自制功率放大器, 以实现对各驱动通道的电流控制。所有实验测试均在室温状态下进行, 并采用隔振台对环境振动进行隔离, 测试过程中环境温度、湿度无明显变化, 对实验结果未产生显著影响。

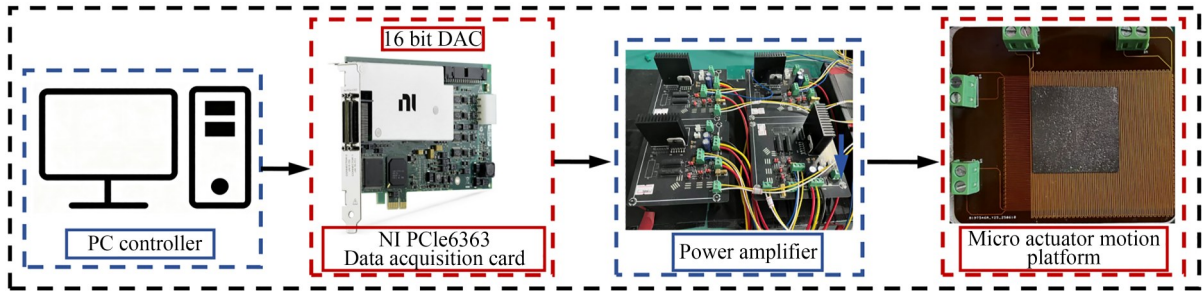


图 9 原理样机及测试系统框图

Fig. 9 Prototype and test system

图 10 是动子运动检测的方法示意图, 考虑到动子及系统整体尺度较小, 本研究采用视觉测量与色散共焦传感器测量组合方案进行位置检测。视觉测量部分使用工业相机 (TRC-2232A6-01,

国产, 180 fps, 130 万像素) 获取动子平面内运动轨迹; 色散共焦传感器 (CHRcodile 2 SE, 德国, 量程  $0 \sim 300 \mu\text{m}$ , 分辨率  $3 \text{ nm}$ ) 用于动子面外位移的高精度测量, 并对平面运动精度进行检测。

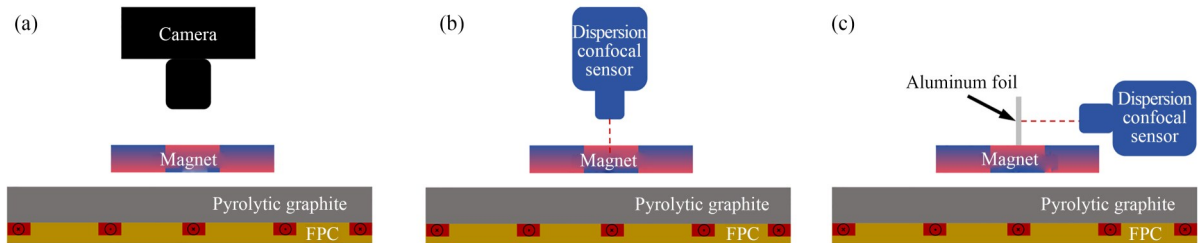


图 10 检测方法示意图

Fig. 10 Measurement methods

### 5.2 抗磁悬浮实验

为验证抗磁悬浮仿真模型的正确性, 开展了单个 PM 悬浮实验。如图 11 所示, 使用挡板对 PM 面内力进行约束, 消除抗磁材料对 PM 产生的

面内力干扰, 最终实现单个 PM 在无驱动状态下的稳定悬浮。测得 PM 中心到 PG 板表面的垂直距离  $z_d = 295 \mu\text{m}$ , 可得 PM 与 PG 板之间的实际间隙为  $45 \mu\text{m}$ , 该结果与图 4 的仿真结果一致。

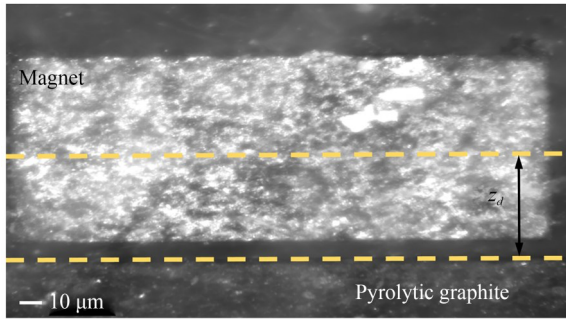


图 11 抗磁悬浮实验拍摄图

Fig. 11 Diamagnetic levitation experiment

### 5.3 面内运动表征

鉴于定子关于  $X, Y$  轴具有相同的对称性, 本文只讨论 PM 阵列沿  $X$  轴方向的运动表征(图 10(a)和图 10(b))。其中图 10(a)采用视觉测量法, 使用工业相机对 PM 阵列动子进行面内运动图像采集, 先对原始图像做灰度化、滤波降噪、对比度增强等预处理并提取轮廓; 再通过灰度质心法解算像素坐标, 结合物理尺寸标定转换, 实现动子  $XY$  平面运动轨迹、定位精度等参数的定量测量。图 10(c)采用色散共焦传感器测量方法, 使用色散共焦测量时将探头对准动子上的铝箔, 利用反射光波长与面内坐标的映射关系, 可得到动子面内定位精度。图 12(a)给出了动子位移随激励电流  $I_{y1}$  和  $I_{y2}$  相位变化的响应曲线; 当  $I_{y1}$  和  $I_{y2}$  相位完成五个空间周期( $0 \sim 10\pi$ )变化时, 累计位移达到  $7.07 \text{ mm}$ , 且实际轨迹与理论期望高度一致。图 12(b)所示, 在以  $5 \text{ mA}$  为步长调节电流  $I_{y1}$  的阶跃响应中, 动子稳定步进分辨率约为  $0.36 \mu\text{m}$ 。曲线中的微小波动主要来源于 PM 装配误差及 PG 表面局部微粗糙度引起的轻微扰动。为评估系统的定位精度与重复定位精度, 本研究在同一目标位置上进行多次往返驱动并记录其稳态收敛点的统计分布。定位精度优于  $\pm 8.232$

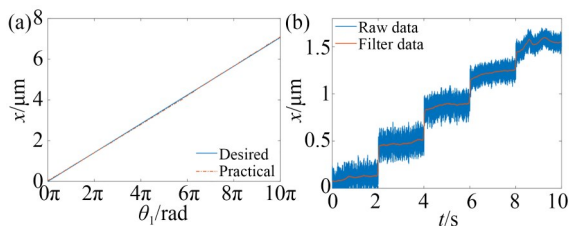


图 12 X 轴运动表征

Fig. 12 X-axis motion characterization

$\mu\text{m}$ , 重复定位精度达到  $\pm 5.690 \mu\text{m}$ , 速度达到  $5 \text{ mm/s}$ 。实验结果表明该微型电机在开环模式下可实现可靠的亚微米级步进与定位控制, 并达到  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  大范围  $XY$  向运动。

图 13(a)展示了执行器在  $XY$  平面的大行程运动特性。实验以半径  $3 \text{ mm}$  的圆轨迹为目标, 通过设定 FPC 上、下层驱动电流幅值  $I_{0x}, I_{0y}$  分别为  $0.15 \text{ A}$  和  $0.2 \text{ A}$ , 圆周运动周期设为  $0.2 \text{ Hz}$ 。依据动子实时位置动态调整电流幅值与相位, 线速度达到  $4 \text{ mm/s}$ , 实现了对目标轨迹的连续跟踪, 与四层驱动结构相比<sup>[28]</sup>, 所采用的双层 FPC 驱动结构在保证驱动力的前提下, 所需驱动电流最大降幅达  $71\%$ 。图 12(b)展示了动子的运动误差, 由于 PG 工作面微观不平整, 在部分区域存在一定误差幅值波动。实验结果表明, 动子能够稳定实现目标轨迹, 且整体跟踪误差较小, 运动过程平稳, 实现动子在平面内的大行程连续运动能力。

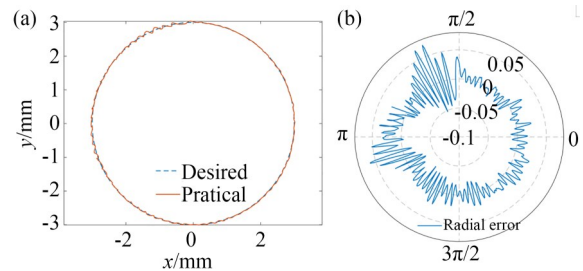


图 13  $XY$  平面内大范围运动及其误差

Fig. 13 Large-range motion within the  $XY$  plane and motion error

### 5.4 面外运动表征

PM 阵列沿  $Z$  轴方向的运动表征采用了如测试采用如图 8(b)所示的色散共焦测量方法, 将色散共焦传感器探头垂直对准悬浮动子表面, 通过反射光波长偏移解算面外位移, 可实现纳米级分辨率的位移检测。

图 14(a)~图 14(d)展示了面外运动表征结果。图 14(a)给出了阵列的  $Z$  轴行程特性, 通过调节驱动电流幅值( $0 \sim 0.5 \text{ A}$ )可获得最大约  $22 \mu\text{m}$  的位移行程。当  $Z = 5 \sim 22 \mu\text{m}$  时, 对应的位移与电流相位的线性度良好; 当  $Z < 5 \mu\text{m}$  时, 位移响应出现明显非线性。图 14(b)呈现了 PM 阵列  $Z$  轴的高度随驱动电流  $I_{y1}$  以  $15 \text{ mA}$  步长递

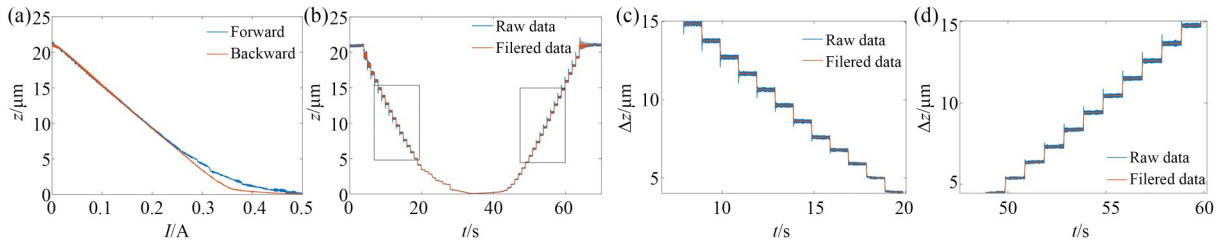


图 14 Z 轴的运动表征

Fig. 14 Motion Characterization of the Z-axis

增和递减的动态变化,展示了PM阵列从接触PG板到逐渐远离板的完整运动过程。图14(c)、图14(d)为该过程中两个典型的步进阶段,分别对应阵列靠近与远离PG的状态。在5~15 μm的中心工作区内,动子在双向步进过程中均实现约0.95 μm的稳定步进幅值,表明该区间

内电磁驱动具备良好的垂直方向调控一致性。由图4结果可知,抗磁悬浮系统的刚度 $k_d$ 具有明显的非线性,在极小间隙处( $Z < 5 \mu\text{m}$ ) $k_d$ 较大,导致恒定电磁力变化产生的步长较小;在 $Z > 15 \mu\text{m}$ 的区间, $k_d$ 极其微弱,对应的悬浮高度步长变大。

表 2 相关指标对比

Tab. 2 Performance comparison

|         | 本文                                  | Allen Hsu <sup>[28]</sup>            | 杨晓升 <sup>[38]</sup>                              |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 平台尺寸    | 50 mm × 50 mm                       | 288 mm × 288 mm                      | 480 mm × 480 mm × 4.5 mm                         |
| 功率/电流需求 | 驱动电流范围 5~400 mA                     | 驱动电流标称值(0.25 A, 0.3 A, 0.5 A, 0.7 A) | 最大励磁电流 15 A                                      |
| 定位精度    | 定位精度 ± 8.232 μm, 重复定位精度为 ± 5.690 μm | 重复定位精度约 100 nm                       | X, Y 定位稳态误差为 ± 0.161 mm / ± 0.102 m, Z 轴 ± 19 μm |
| 运动性能    | XY 平面大行程, Z 轴位移约 22 μm, 速度 4~5 mm/s | 仅平面运动, 速度 8~9 mm/s                   | XY 行程 120 mm × 120 mm, Z 轴悬浮高度 2.5 mm            |

如表2所示,与现有方案相比,本文所提出的抗磁悬浮微型平面电机平台在微型化、低功耗与高精度方面具备显著优势,同时实现了多自由度精密运动与紧凑体积的良好平衡,更适配对空间、能耗及定位精度有严格要求的应用场景。

### 5.5 系统动力学特性

PM阵列受电磁力与抗磁力联合作用,在恒定电流条件下处于平衡位置。当输入电流参数发生变化,导致平衡位置出现微小偏移,则PM阵列的运动可通过质量-弹簧-阻尼模型描述。则其X, Y, Z轴方向运动学方程:

$$\begin{cases} m_t \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = f_x \\ m_t \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = f_y, \\ m_t \ddot{z} + c_z \dot{z} + k_z z = f_z \end{cases} \quad (30)$$

其中: $m_t$ 为整体磁体阵列的质量, $c_x, c_y, c_z$ 为分别

沿X, Y, Z轴的等效阻尼系数, $k_x, k_y, k_z$ 为三轴等效刚度, $f_x, f_y, f_z$ 为三轴激励力。X, Y轴阻尼主要来源于空气阻力与PG电涡流效应,而Z轴阻尼主要受空气压膜效应与PG电涡流效应支配。

基于以上动力学模型,开展100 mA阶跃响应实验并进行系统参数辨识<sup>[39]</sup>,得到了抗磁悬浮微型平面电机的核心动态特性参数。由于X, Y轴导线结构设计与驱动原理的对称性,执行器沿X, Y轴平移的固有频率完全一致,均为 $\omega_{nx} = \omega_{ny} = 35.67 \text{ rad/s}$ ,对应的阻尼比均为 $\xi_x = \xi_y = 0.09$ ,开环带宽为 $\omega_{bx} = \omega_{by} = 55 \text{ rad/s}$ ;Z轴因面外动力学机制与平面内运动存在差异,其固有频率为 $\omega_{bz} = \omega_{by} = 55 \text{ rad/s}$ ,阻尼比为 $\xi_z = 0.06$ ,开环带宽为 $\omega_{bz} = 30 \text{ rad/s}$ 。

## 6 结 论

本文提出一种面向抗磁悬浮磁体阵列的单面驱动方案。该方案通过在柔性印刷电路(FPC)基板上集成蛇形线圈,并采用四路独立电流调控,完成磁场谐波构建与PM力学建模,进而建立电流-力解析关系,实现X、Y、Z轴三自由度独立控制。搭建的实验验证平台可稳定实现7 mm×7 mm大范围XY向运动,定位精度为±8.232 μm,重复定位精度为±5.690 μm。通过调控驱动电流幅值,平台Z轴分辨率达0.95 μm,位移调节范围约23 μm。相较于传统抗磁悬浮驱动结构,本方案总体积缩减超过一个数量级<sup>[38]</sup>,显著提升系统集成度与布置灵活性;与四层驱动结构相比,所需驱动电

流最大降幅达71%。此外,相较于已有文献报道的抗磁悬浮微执行器,基于FPC的简化驱动结构在维持性能稳定的同时,显著降低制造成本。后续针对磁悬浮与单面驱动致刚度、抗扰性和承载能力不足,电磁耦合设计缺乏转动自由度,测控精度与闭环控制欠缺等问题,将从力控、结构、测控三方面优化设计,提升系统综合性能。

### 作者贡献申明:

张鹤:论文构思,实验验证,可视化呈现,初稿写作;

施至超:论文构思,方法论,指导,获取资助,项目管理,审核与编辑;

朱志伟:指导,形式分析,审核,提供资源。

### 参考文献:

- [1] SHI C Y, LUU D K, YANG Q M, *et al.* Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2016, 2: 16024.
- [2] MCCLINTOCK H, TEMEL F Z, DOSHI N, *et al.* The milliDelta: a high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale Delta robot[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14): eaar3018.
- [3] NOMURA T, SUZUKI R. Six-axis controlled nanometer-order positioning stage for microfabrication[J]. *Nanotechnology*, 1992, 3(1): 21.
- [4] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, *et al.* Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 61: 1-93.
- [5] WANG F C. The development of a long-stroke precision positioning stage for micro fabrication by two-photon polymerization[J]. *Journal of Laser Micro*, 2016, 11(1): 1-12.
- [6] GAO D L, DING W Q, NIETO-VESPERINAS M, *et al.* Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17039.
- [7] MARZO A, SEAH S A, DRINKWATER B W, *et al.* Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8661.
- [8] ANDRADE M A B, PÉREZ N, ADAMOWSKI J C. Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 014101.
- [9] PELRINE R, HSU A, WONG-FOY A, *et al.* Optimal control of diamagnetically levitated milli robots using automated search patterns[C]. 2016 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 18-22, 2016, Paris, France. IEEE, 2016: 1-6.
- [10] WRONOSKY J B, SMITH T G, CRAIG M J, *et al.* Wafer and reticle positioning system for the extreme ultraviolet lithography engineering test stand [J]. *Emerging Lithographic Technologies IV*, 2000, 3997: 829-839.
- [11] KIM W J, TRUMPER D L. High-precision magnetic levitation stage for photolithography[J]. *Precision Engineering*, 1998, 22(2): 66-77.
- [12] THIER M, SAATHOF R, SINN A, *et al.* Six degree of freedom vibration isolation platform for in-line nano-metrology [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(21): 149-156.
- [13] VLAJIC N, DAVIS M, STAMBAUGH C. Nanometer positional control using magnetic suspension for vacuum-to-air mass metrology [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2018, 140(12). DOI: 10.1115/1.4040504.
- [14] KRAMER L, VAN DEN DOOL T, WITVOET G. Demonstrator for nano-precision multi-agent MagLev positioning platform for high throughput

- metrology [J]. *IFAC—PapersOnLine*, 2019, 52 (15): 471-476.
- [15] GAUTHIER-MANUEL B, GARNIER L. Development of a magnetic levitation force microscope [J]. *Surface and Interface Analysis*, 1999, 27(5/6): 287-290.
- [16] HOLMES M, HOCKEN R, TRUMPER D. The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(3): 191-209.
- [17] LI Q, KIM K S, RYDBERG A. Lateral force calibration of an atomic force microscope with a diamagnetic levitation spring system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(6): 065105.
- [18] PELRINE R, WONG-FOY A, MCCOY B, *et al.* Diamagnetically levitated robots: an approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties [C]. 2012 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. IEEE, 2012: 739-744.
- [19] PELRINE R, HSU A. Magnetic Pick, Mechanical place on small scales [C]. 2022 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2022: 1-7.
- [20] PELRINE R, WONG-FOY A, HSU A, *et al.* Self-assembly of milli-scale robotic manipulators: a path to highly adaptive, robust automation systems [C]. 2016 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 18-22, 2016, Paris, France. IEEE, 2016: 1-6.
- [21] PELRINE R, HSU A, WONG-FOY A. Methods and results for rotation of diamagnetic robots using translational designs [C]. 2019 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 1-5, 2019, Helsinki, Finland. IEEE, 2019: 1-6.
- [22] PELRINE R E. Room temperature, open-loop levitation of microdevices using diamagnetic materials [C]. *IEEE Proceedings on Micro Electro Mechanical Systems, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*. February 11-14, 1990, Napa Valley, CA, USA. IEEE, 2002: 34-37.
- [23] VIKRANT K S, BISWAS P, REZA MOHEI-MANI S O. A three-axis nanopositioner based on near-field acoustic levitation and electromagnetic actuation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, 394: 116894.
- [24] VIKRANT K S, NASRABADI H M, MOHEI-MANI S O R. A novel actuator based on near-field acoustic levitation and electromagnetic actuation [C]. 2023 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. October 9-13, 2023, Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2023: 1-6.
- [25] HSU A, COWAN C, CHU W, *et al.* Automated 2D micro-assembly using diamagnetically levitated milli-robots [C]. 2017 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 17-21, 2017, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2017: 1-6.
- [26] HSU A, CHU W, COWAN C, *et al.* Diamagnetically levitated Milli-robots for heterogeneous 3D assembly [J]. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 2018, 14(1): 1-16.
- [27] HSU A, PELRINE R, DE GOUVEA PINTO R, *et al.* Design of a novel lunar transportation system (FLOAT) consisting of diamagnetically-levitated robots on a flexible film track [C]. 2023 *IEEE Aerospace Conference*. March 4-11, 2023, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2023: 1-20.
- [28] HSU A, ZHAO H H, GAUDREAU M, *et al.* Magnetic milli-robot swarm platform: a safety barrier certificate enabled, low-cost test bed [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5 (2): 2913-2920.
- [29] GAO Q H, YAN H, ZOU H X, *et al.* Magnetic levitation using diamagnetism: Mechanism, applications and prospects [J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(1): 44-58.
- [30] NASR G, PETIT L, HAJJAR HAL, *et al.* Modeling and experimental validation of diamagnetic levitation system [C]. 2024 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 1-5, 2024, Delft, Netherlands. IEEE, 2024: 1-6.
- [31] HSU A, PELRINE R, DE GOUVEA PINTO R, *et al.* 2D-compliant, diamagnetic levitating micro-robots for operation on non-flat, non-clean tracks [C]. 2022 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small*

- Scales (MARSS)*. July 25-29, 2022, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2022: 1-7.
- [32] 叶志通. 微型振动能量采集器振动响应机理与输出特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.  
YE Z T. *Research of Vibration Response Mechanism and Output characteristic on Micro-Vibration Energy Harvester* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
- [33] FURLANI E P. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [34] KRISHNA R, JAYANTH G R. Design and development of a planar nanopositioning system with magnetic actuation[J]. *Journal of Micro and Bio Robotics*, 2025, 21(2): 13.
- [35] VIKRANT K S, DADKHAH D, REZA MOHEIMANI S O. Optimization of design parameters to improve performance of a planar electromagnetic actuator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2024, 60(9): 8000610.
- [36] 倪有源, 孙森. 永磁屏蔽电机不同齿尖结构参数的空载磁场分析[J]. *电气工程学报*, 2017, 12(1): 9-16.  
NI Y Y, SUN M. No-load magnetic field analysis of a PM canned motor with different structure parameters of tooth tips[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2017, 12(1): 9-16. (in Chinese)
- [37] HALBACH K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(8): 3605-3608.
- [38] 杨晓生. 六自由度动磁式磁悬浮平面电机的控制系统研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.  
YANG X S. *Research on Control System of 6-DOF Magnetically Levitated Planar Motor with Moving Magnets* [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020. (in Chinese)
- [39] 王大志, 杨明洛, 王奉书, 等. 多足式微型直线超声电机定子的设计与仿真[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(11): 1713-1723.  
WANG D Z, YANG M L, WANG F S, *et al.* Design and simulation of stator for multi legged miniature linear ultrasonic motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(11): 1713-1723. (in Chinese)

#### 作者简介:



张鹤(2000—),男,山东济南人,硕士研究生。主要研究方向为抗磁悬浮平面微执行器。E-mail: ZhangH123@njust.edu.cn



朱志伟(1988—),男,江苏南通人,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为先进光学制造技术、智能微纳制造技术和微纳驱动与控制。E-mail: zw.zhu@njust.edu.cn

#### 通讯作者:



施至超(1989—),男,江苏南京人,博士,讲师。主要研究方向为智能微纳制造技术和微纳驱动与控制。E-mail: zhichao.shi@njust.edu.cn