[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.003

多点接触粘滑驱动微动平台 复合运动模型构建

崔希铭^{1,2},呼延鹏飞^{1,2},李鹏超^{1,2},黄雨霖^{1,2}

(1. 西安工程大学 机电工程学院,陕西 西安 710048;2. 西安工程大学 西安市现代智能纺织装备重点实验室,陕西 西安 710048)

摘 要:为了精确模拟基于多点接触粘滑驱动原理的微动平台动态微位移输出,验证粘滑驱动原理在微动平台应用的可 行性,课题组基于4稳态电磁执行器的粘滑驱动微动平台,建立了一种复合动态模型。该动态模型包含4个子动态模 型,即磁力计算模型、LuGre 摩擦模型、碰撞反弹模型和质心偏移模型;课题组在此基础上搭建了实验平台,研究了不同 驱动电流对微动平台动态输出位移影响。结果表明:复合动态模型模拟动态位移输出与实验输出趋势基本一致,验证了 所提出和建立的复合动态模型的有效性。

关键 词:微动平台;多点接触;粘滑驱动;复合动态模型;移动永磁铁
 中图分类号:TP242;TH145.1
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2023)06-0017-10

Construction of Multi-Point Contact Stick-Slip Driven Micro-Motion Platform Composite Motion Model

CUI Ximing^{1,2}, HUYAN Pengfei^{1,2}, LI Pengchao^{1,2}, HUANG Yulin^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to accurately simulate the dynamic output of a micro-motion platform based on the multi-point contact stick-slip driving principle and verify the feasibility of the application based on stick-slip driving principle on micro-motion platforms, a composite dynamic model was established for a micro-motion platform with stick-slip drive based on a four-stable state electromagnetic actuator, which contained four sub-models of the dynamic model: the magnetic force calculation model, the LuGre friction model, the collision bounce model and the mass center shift model. On this basis, an experimental platform was built to research the effect of different drive currents on the dynamic output displacement of the micro-motion platform. The result shows that the simulated dynamic output of the composite dynamic model is basically consistent with the experimental output trend, and verifies the effectiveness of the proposed and established composite dynamic model.

Keywords: micro-motion platform; multi-point contact; stick-slip driven; composite motion model; MPM (Mobile Permanent Magnet)

粘滑驱动微动平台是微机电系统中传递位移与力 的微位移机构,此类微动平台利用接触表面之间的摩 擦力差异实现动能传递,可以达到跨尺度精确运输,具 有结构紧凑、输出位移大和精度高等优点。因此,基于 粘滑驱动原理的微动平台在光学仪器、生物医学工程、 以及微/纳米操纵等领域应用广泛[1-3]。

粘滑驱动微动平台按粘滑接触点数量可分为2 类:单点接触^[48]和多点接触^[9-12]。对于不同结构设计 的粘滑驱动微动平台,由于其结构设计的多样性及微 摩擦接触的复杂性,导致针对粘滑系统动态模拟难度

第一作者简介:崔希铭(1998),男,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向为微电磁执行器。E-mail:cui15296665667@163.com

收稿日期:2022-11-19;修回日期:2023-06-29

增加。近些年来,很多学者^[13-17]针对不同接触点数量 的粘滑驱动动态过程精确模拟仿真做了大量的工作, 也获得了丰硕的成果。例如针对单点接触的粘滑驱 动:Shao 等^[18]采用 Hunt-Crossley 动力学模型和 LuGre 摩擦模型对粘滑执行器进行建模,通过接触面之间的 局部压痕和相对速率来描述粘滑驱动过程中摩擦力的 变化情况,该模型可以有效地模拟因接触行为产生的 位移不一致的现象: Wang 等^[19]提出了一种考虑整体 系统变形的粘滑压电执行器动力学模型,该模型引入 了整个系统的刚度系数和阻尼系数,模拟了该粘滑执 行器的回退运动、平滑运动等多个动态特征;Nguyen 等^[20]利用降维技术 MDR 模型对库伦摩擦模型中的经 验参数进行简化,同时描述了执行器的宏观运动和接 触点的微观动态行为,解释了临界振幅现象。而对于 多点接触粘滑驱动: Huo^{[9]3056}提出了一种粘滑旋转平 台,利用柔性机构中2个驱动元件的交替运动,获得了 稳定的输出性能,并通过 LuGre 摩擦模型,建立了双驱 动工作原理的动态模型:李伟达等[21]提出了一种采用 碰撞运动和粘滑驱动双运动机理的3足微型机器人, 通过库伦摩擦模型描述碰撞时产生的切向力,模拟了 足端粘滞-滑移过程中摩擦力的变化;Yu^{[12]108815}针对多 点接触的粘滑驱动装置,提出了一种协同激励方法,利 用多个驱动元件的协同运动控制摩擦力,改善了粘滑 驱动执行器运动平稳性,并通过 LuGre 摩擦模型和数 值模拟解释了消除回退现象的原理。上述文献针对各 自设计的粘滑驱动系统,多采用 LuGre 摩擦模型来描 述动、静摩擦状态以及二者间的过渡过程,具有较高的 模拟精度。然而,对于多点接触粘滑驱动系统中可能 存在的边界碰撞现象及被驱动物行程过大可能产生的 质心偏移现象均未作描述,因此所述模型应用存在一 定的局限性。

为了进一步精确描述粘滑驱动运动特征,模拟粘 滑驱动过程中可能存在的边界碰撞现象和质心偏移现 象,课题组基于4稳态电磁执行器的粘滑驱动微动平 台原型系统,建立了复合动态模型。该动态模型包含 磁力计算模型、LuGre摩擦模型、碰撞反弹模型以及质 心偏移模型4个子动态模型,并使用该复合动态模型 对原型系统动态特征进行了仿真;在此基础上,搭建微 动实验平台,进行动态输出实验,通过对仿真数据和实 验数据进行比较,验证所提出的复合动态模型的准确性。

1 基于4 稳态电磁执行器的微动平台结构设计

1.1 微动平台的结构设计

基于4 稳态电磁执行器的微动平台在以往的研究 中已经设计^[22],微动平台结构如图1所示。







图 1 中, 微动平台由 4 个采用 2 × 2 矩阵排布的电 磁执行器单元、8 个对称放置于阵列周围的平衡永磁 铁以及放置在执行器单元顶部的输送板组成。

电磁执行器单元由1个移动永磁铁和4个固定永 磁铁以及基体组成。移动永磁铁作为微动平台的可移 动部件,被放置于基体的方形槽中,4个固定永磁铁分 别固定在方形槽周围。移动永磁铁与固定永磁铁、平 衡永磁铁的磁感应方向沿 z 轴方向相反,使得3者之 间产生静磁吸引力。从图1(a)和图1(c)可知,每个 移动永磁铁沿 x 向, y 向的2个面紧贴方形槽的2个 面,受到的静磁吸引力最大,无需能量输入也能保持在 该位置,因此该位置也被称为稳态位置。

为了驱动移动永磁铁,将印刷有4组垂直导线(x, y方向导线)的双层印制电路板(printed circuit board, PCB)放置于方形槽下方。对一根导线施加电流脉冲 时,移动永磁铁和导线之间会产生洛伦兹力,使得移动 永磁铁在其行程(移动永磁铁与方形槽之间的间隙 S) 内沿着驱动导线的垂直方向运动,实现其 x 或 y 方向 驱动;同时,在移动永磁铁和 PCB 之间放置一层薄玻 璃板,为移动永磁铁提供运动支撑平面及保证电磁隔 离。每个电磁执行器单元可以独立控制,通过其间协 同运动实现复杂平面传输任务。微动平台的设计参数 如表1所示,微动平台结构设计参数如表2 所示。

表 1	微动-	平台	设.	计.	参	数
~~ ·	12.11	1 12	\sim	۲ Ι'	2	~~

 Table 1
 Design parameters of micro-motion platform

部件	长×宽×高/	氏具/。	++ *1	磁化
	$(mm \times mm \times mm)$	灰里/g	7/3 个牛	强度/T
移动永磁铁	$2.45 \times 2.45 \times 1.55$	0.072	铷铁硼磁铁	1.4
固定永磁铁	$2.45 \times 2.45 \times 0.95$	0.040	铷铁硼磁铁	1.4
平衡永磁铁	$1.85\times1.85\times0.95$	0.023	铷铁硼磁铁	1.4
基体	80.00 × 80.00 × 0.16	10.025	硅	
输送板	40.00 × 40.00 × 0.16	0.657	石英玻璃	

表2 微动平台结构设计参数

Table 2 Design parameters of micro-

motion	platform	structure	
--------	----------	-----------	--

mm

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	S
3.85	0.22	0.46	0.30	20.00	11.72	0.20

1.2 微动平台的粘滑驱动原理

课题组提出的微动平台粘滑驱动原理是由一种多 点粘滑驱动策略完成实现,该驱动策略能够分时合理 地调用微动平台中的4个电磁执行器单元协同驱动, 从而实现输送板的动态位移输出。这种多点接触粘滑 驱动策略如图2所示,包括"滑移"和"粘滞"2个 阶段。







在"滑移"阶段,通过向所有执行器单元下方的 x 方向导线施加驱动电流 I_d(如图 2(b)所示),使得移 动永磁铁在洛伦兹力驱动下向 x 方向移动,由一个稳 态位置到达另一个稳态位置;与此同时,输送板受其与 移动永磁铁间的微摩擦力作用也向 x 方向移动,实现 x 方向单步位移输出。在"粘滞"阶段,通过向导线依 次施加反向驱动电流 I_r,使移动永磁铁依次返回至初 始稳态位置(如图 2(c)和图 2(d)所示),此时单个移 动永磁铁与输送板之间的微摩擦力不足以驱动输送 板,因此理论上输送板没有位移产生。基于上述策略, 重复"滑移"到"粘滞"阶段驱动步骤,即可实现输送板 在平面内 *x* 或 *y* 方向的连续位移输出。

2 多点接触粘滑驱动微动平台的复合动态模型

为了进一步精确描述多点接触粘滑驱动运动特征,针对上述粘滑驱动微动平台原型设计建立了一种 复合动态模型。该复合动态模型包含4个子模型,分 别为:磁力计算模型、LuGre 摩擦模型、碰撞反弹模型 以及质心偏移模型。在上述子模型中,磁力计算模型、 LuGre 摩擦模型分别分析计算了2种不同类型的且与 微动平台输出相关的力(如图3所示):①电磁力及静 磁力(移动永磁铁与驱动电流、固定永磁铁间的电磁 力 *F*_{em}和静磁力 *F*_m);②摩擦力(移动永磁铁和基体、 玻璃薄板及输送板之间的摩擦力 *F*_n,*F*₂和 *F*_B)。碰 撞反弹模型以及质心偏移模型分别计算了移动永磁铁 在驱动过程中存在的微碰撞现象,及输送板在长距离 运输中由于其质心偏移而产生的对输送板位移的影 响。移动永磁铁和输送板的加速度公式为:

$$ma_{1} = F_{em} + F_{m} + F_{f1} + F_{f2} + F_{f3}; \qquad (1)$$

$$Ma_2 = F_{\mathfrak{B} \circ} \tag{2}$$

式中:m 为移动永磁铁的质量,M 为输送板的质量,a₁ 和 a₂分别为移动永磁铁和输送板的加速度。

2.1 磁力计算模型

磁力计算模型由洛伦兹力(电磁力)模型和静磁 力模型2部分组成。其中,电磁力是驱动每个移动永 磁铁位移输出的源动力,静磁力是保持移动永磁铁在 稳态位置的阈值力。为了分析计算移动永磁铁在驱动 过程中的实时电磁力和静磁力,建立了磁力计算子模 型。通过磁力计算方程分别计算移动永磁铁与其它磁 铁间的静磁合力 *F*_m及移动永磁铁其所受洛伦兹力 *F_{em}*^[23]:

$$F_{\rm m} = \sum_{p} \sigma_{\rm m}(\boldsymbol{x}_{p}) B_{\rm ext}(\boldsymbol{x}_{p}) \Delta A_{p}; \qquad (3)$$

$$F_{\rm em} = I \int_{\rm wire} d\mathbf{l} \times B_{\rm ext \, \circ} \tag{4}$$

式中: σ_m 为所计算移动永磁铁的磁荷密度, x_p 为各区 域元素的相对位置向量, ΔA_p 为所划分的全部区域计 算面积,I为导线的电流,dI是沿着导线长度的矢量,





B_{ext}为移动永磁铁为周围磁铁产生磁场的磁通密度。
 移动永磁铁静、动磁力计算示意图如图4所示,图
 中 ΔA 为所划分的单位计算面积。



图 4 移动永磁体静磁力和动磁力计算示意图 Figure 4 Schematic diagram of static and dynamic agnetic force calculation for mobile permanent magnet

2.2 LuGre 摩擦模型

在输送板驱动过程中,移动永磁铁与输送板间的 微摩擦力是输送板实现粘滑驱动的驱动力,直接影响 粘滑驱动的动态输出。为了能较好地了解该微摩擦力 对微动平台位移输出的影响,建立了基于 LuGre 模型^[24]的微动平台系统摩擦模型。LuGre 模型结合了 Stribeck 效应^[25]和 Dahl 模型^[26]的摩擦滞后,在理论上 能够较好地分析系统的摩擦状态,该模型可描述为:

$$F_{\rm f3} = \sigma_0 h + \sigma_1 \dot{h} + \sigma_2 v_{\rm c}; \qquad (5)$$

$$\dot{h} = v - \frac{\sigma_0 |v_c|}{s(v)} h; \qquad (6)$$

$$s(v) = F_{c} + (F_{s} - F_{c}) e^{-(v_{c}/v_{s})^{2}}$$
(7)

式中: $F_{\rm B}$ 为输送板所受摩擦力; $v_{\rm c}$ 为2个接触面的相对 速度;h为平均鬃毛扰度; σ_0 为鬃毛刚度,取 σ_0 =8125 N/m; σ_1 为微观阻尼系数,取 σ_1 =90N·s/m; σ_2 为黏 性摩擦因数,取 σ_2 =0.4N·s/m;s(v)为描述 Stribeck 效应和库仑摩擦力的函数; $F_{\rm s}$, $F_{\rm c}$ 分别为静摩擦力和 库伦摩擦力,取 $F_{\rm s}$ =2.3 mN,取 $F_{\rm c}$ =1.8 mN; $v_{\rm s}$ 为 Stribeck 速度,取 $v_{\rm s}$ =0.01 m/s。

2.3 碰撞和反弹效应模型

在微动平台输送板完成"滑移"和"粘滞"的动态 过程时,每个移动永磁铁均会与其所在方形槽发生微 碰撞并反弹。为分析计算这种微碰撞及反弹对输送板 位移输出的影响,建立了移动永磁铁碰撞和反弹效应 模型,描述碰撞和反弹对输送板"滑移"和"粘滞"过 程中运动速度的影响。该模型可以描述为^[27]:

$$v_1 = \frac{mu_1 + m_2u_2 + m_2c_r(u_2 - u_1)}{m + m_2};$$
 (8)

$$v_2 = \frac{mu_1 + m_2u_2 + mc_r(u_2 - u_1)}{m + m_2}$$
(9)

式中:u₁和 v₁分别为移动永磁铁在碰撞前后的速度;u₂ 和 v₂分别为碰撞前后基体的速度;m 和 m₂分为别移动 永磁铁和基体的质量;c_r 为移动永磁铁与方形槽碰撞 后的恢复系数。

假设碰撞前后基体是静止的,且基体的质量远大 于移动永磁铁,则 *c*.^[28]为:

$$c_{\rm r} = \alpha \left(\frac{Y}{1}\right)^{5/8} \cdot \left(\frac{1}{E_*}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{v}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1/8} (10)$$

式中:v 为移动永磁铁的冲击速度;Y 为屈服压力,取 $Y = 165 \text{ MPa}; E_*$ 为移动永磁铁材料和基体材料的等效 弹性模量,取 $E_* = 92.85 \text{ GPa}; \rho$ 是移动永磁铁的材料 密度,取 $\rho = 7.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}; \alpha$ 取决于碰撞物体的几何形 状、硬度和接触面积,在该微动平台中移动永磁铁与方 形槽内壁的碰撞面为平面,因此取 $\alpha = 1^{[28]}$ 。

2.4 质心偏移模型

在微动平台输送板完成连续"滑移"和"粘滞"的 动态输出后,输送板的质心位置逐渐远离初始坐标中 心,导致移动永磁铁对输送板移动永磁铁的支撑力 F_n 发生改变(如图3所示),进而影响每个移动永磁铁与 输送板之间的摩擦力,使得输送板的位移在连续输出 过程中产生变化。为了分析计算这种由质心偏移现象 引起的输送板所受摩擦力 F_n在其运动过程中不断变 化的运动状态,以及计算输送板在运动过程中的实时 摩擦力,建立了基于系统支撑力平衡方程的质心偏移 子模型。微动平台的质心偏移受力分析如图5所示。



在图 5 中, 0 点为输送板几何中心初始位置(计算 坐标中心), 0'为输送板的实时质心位置, F'₁, F'₂, F'₃ 和 F'₄分别为 4 个移动永磁铁对输送板的支撑力。以 0 点为矩心, 建立 x, y 方向的力矩平衡方程:

$$\sum F_{z} = 0, \qquad (11)$$

$$F'_{1} + F'_{2} + F'_{3} + F'_{4} - M \cdot g = 0; \qquad (11)$$

$$\sum M_{x} = 0, \qquad (12)$$

$$\sum \left[(F'_{1} + F'_{2}) - (F'_{3} + F'_{4}) \right] + \Delta y \cdot M \cdot g = 0; \qquad (12)$$

$$\sum M_{y} = 0,$$

$$\frac{L}{2} [(F'_{1} + F'_{3}) - (F'_{2} + F'_{4})] + \Delta x \cdot M \cdot g = 0_{\circ}$$
(13)

式中: Δx 为输送板质心 x 轴偏移量; Δy 为输送板质心 y 轴偏移量;L 为 2 个相邻移动永磁铁之间的距离,为 20 mm。

由于系统模型中的几何结构属于超静定结构,因 此需要补充方程来计算各个移动永磁铁上的支撑力, 假设移动永磁铁在外力作用下是均匀可变形的,输送 板为理想刚体,则4个移动永磁铁变形量 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 和 δ_4 之间的关系可由矢量共面定理得出^[29-30]:

$$\delta_1 + \delta_4 = \delta_2 + \delta_{30} \qquad (14)$$

利用式(14)及胡克定律式(15)可得到4个移动 永磁铁支撑力间的关系:

$$\delta_i = F_i H / (EA), i = 1, 2, 3, 4_{\circ}$$
 (15)

式中: *E* 为移动永磁铁的弹性模量,取 160 GPa; *A* 为移 动永磁铁与输送板的接触面积; *H* 为移动永磁铁的高 度,为 1.55 mm。

将式(15)代入式(11)、式(12)和式(13),即可计 算出各个支撑面的实际支撑力。

2.5 复合动态模型仿真流程

将上述磁力计算模型、LuGre 摩擦模型、碰撞反弹 模型以及质心偏移模型结合到一个系统复合动态模型 中,并通过 MATLAB/Simulink 软件实现系统动态模 拟,该复合动态模型仿真流程如图 6 所示。在仿真过 程中,移动永磁铁和输送板的加速度分别通过式(1) 和式(2)计算得出,而后通过对加速度的积分获得二 者的速度和位移。将每个移动永磁铁和输送板的位置 信息分别反馈给碰撞反弹模型、磁力计算模型和质心 偏移模型,并将实时变化的磁力、摩擦力反馈至移动永 磁铁和输送板,进而实现更精确的模拟输出。

3 实验和仿真数据对比分析

为了进一步验证所提出的复合动态模型的准确 性,搭建了微动实验平台,测试了核心驱动参数(驱动 电流)对微动平台输送板位移输出的影响,同时进行 长距离位移实验,并将仿真数据与实验数据进行了对

比分析。

3.1 实验条件

微动平台的基体由硅材料制成,如图 7 所示,其中 的方形槽使用六氟化硫 SF₆进行刻蚀加工,并采用八 氟环丁烷 C₄F₈进行表面钝化,通过交替刻蚀和钝化过 程获得准确的刻蚀深度和平滑的刻蚀侧面(Bosch 刻 蚀工艺)。此外,使用电子显微镜(A0-V128S)对基体 原型所刻蚀方形槽进行了测量,所刻蚀方形槽制造误 差为 -4.52 ~ +8.03 μm。

图7 硅制基体 Figure 7 Silicon substrate

微动平台的控制系统由1台计算机、1个微处理器(MCS-89C52)、2个直流电源(KA3005D)、1个CCD工业相机(MV-CA060)以及14个电磁继电器组成,整个设备控制系统如图8所示。该系统由上位机程序控制,向微处理器发送控制信号;微处理器通过控制电磁继电器吸合状态以此将直流电信号转化为脉冲信号;

使用 CCD 工业相机采集微动平台输送板的位置信息, 并将输送板的位置信息传输回计算机进行处理,从而 实现输送板的动态输出。

图8 设备控制系统

Figure 8 Equipment control system

实验测量采用非接触式的测量方式,避免对系统 微位移造成误差影响。如图9(a)所示,将1个方形标 记粘贴于输送板的顶部表面,并采用了 Canny 边缘检 测算法^[31]提取方形标记的边缘和质心特征。同时,利 用上位机图像处理程序,计算2个连续图片之间的质 心坐标差(板的位置信息),以此获得微动平台输送板 的步长。

图 9 输送板粘贴方形标记及图像后处理 Figure 9 Square marker pasted on conveyed plate and image post-processing

3.2 驱动电流对输送板位移的影响

驱动电流是数字电磁执行器的核心驱动参数,驱 动电流大小直接影响载流导线施加在每个移动永磁铁 上的洛伦兹力,从而影响微动平台输送板的位移输出 性能。实验中采用的驱动电流为2.5~5.0 A,其中 2.5 A为微动平台最低驱动电流,5.0 A 为直流电源最 高供电电流。另外,为了确保移动永磁铁在驱动过程 中具备充足的驱动时间,电流脉冲宽度选为20 ms。 在相同驱动电流下,将连续测量20次位移步长的平均 值作为该微动平台在特定电流值下的输出步长。图 10 所示为驱动电流对输出步长的影响。

图 10(a)中分别展示了不同驱动电流下输送板的 输出步长(实验步长及复合模型仿真步长)。由实验 步长与仿真步长对比可知,二者的变化趋势基本一致。 随着驱动电流增大,输送板的输出步长逐渐减小,这一 现象可以由图 10(b)中所示的移动永磁铁和输送板的 单步长轨迹曲线来解释。随着驱动电流提高,移动永 磁铁在行程内驱动所需的时间变短,输送板与移动永 磁铁间的相对滑移时间变短。因此,移动永磁铁通过 摩擦力传递给输送板的动能减小,输送板的输出步长 因而随之降低。

当移动永磁铁的驱动(从一稳态位置到另一稳态 位置)即将结束时,移动永磁铁与方形槽会发生微碰 撞。这种微碰撞现象会导致移动永磁铁的位移出现先 减小后回归稳态位置的现象,即反弹现象(见图 10(b) 中 *A*,*B*,*C* 碰撞点),这种反弹现象会导致输送板的位 移略微增大。随着驱动电流的增大,洛伦兹力继续增 大,微碰撞现象也进一步增大,因此其对输送板的位移 影响进一步增大。

3.3 长距离测试

长距离位移输出是微动平台的重要应用。实验中 采用4A电流作为驱动电流,沿单一方向进行连续70 步运动输出。微动平台长距离运输中的实验轨迹如图 11所示。

由图 11(a) 所示输送板实验位移与复合模型仿真 位移对比可知二者的轨迹几乎重合。按照输送板实验 位移与模拟位移的重合度可将其划分为3个区域:线 性区(I-II)、过渡区(II-III)和非线性区(II-IV)。 在线性区内,复合模型仿真位移轨迹与实验位移轨迹 高度重合,复合模型仿真数据精度为99.48%,复合模 型仿真位移轨迹与实验轨迹平均误差值仅为 19.66 μm,最大误差为43.58 μm。在过渡区内,复合模型仿 真位移轨迹与实验位移轨迹出现一些偏差,复合模型 仿真数据精度为96.82%,复合模型仿真位移轨迹与 实验轨迹平均误差值为46.22 μm,最大误差为79.12 um。产生这种偏差是由于在上述所提出的理论碰撞 反弹模型中,移动永磁铁与方形槽内壁为理想的面-面 接触碰撞关系,然而,受其加工精度的影响,实际接触 碰撞关系更为复杂,这种复杂接触碰撞现象致使输送 板发生振动并产生不可控运动。在非线性区,复合模 型仿真位移轨迹与实验位移轨迹偏差进一步加大,复 合模型仿真数据精度为93.19%,复合模型仿真位移 轨迹与实验轨迹平均误差为 84.83 µm,最大误差为 132.93 μm。在此非线性阶段,输送板上方形标记 (Ⅲ-IV)发生较大的偏转,产生这一现象是由于随着位 移步数的增大,输送板的振动现象逐步显现。此外,质 心偏移现象对输送板输出步长的影响变大,致使输送 板的实验位移轨迹发生较大偏差。

图 11 微动平台长距离运输中的实验轨迹 Figure 11 Experimental trajectories in long-

distance transport of micro platform

当微动平台输送板在驱动电流 4 A 时进行 70 次 的位移输出后,输送板会从多个移动永磁铁的支撑表 面脱离,此时输送板不能继续运动,其最大位移测量值 为4 100 μm。

4 结论

课题组设计了一种基于多点接触粘滑驱动的微动 平台,建立了包括磁力计算模型、LuGre 摩擦模型、碰 撞反弹模型和质心偏移模型的复合动态模型;采用硅 材料及微加工技术,建立了实验原型机及其控制测量 系统;完成了驱动电流对原型系统输出影响的研究,通 过实验数据与仿真数据的对比,验证了所提出的复合 动态模型的准确性。

所得数据对比表明:①复合模型仿真数据与实验

数据变化趋势基本一致;②在微动平台长距离实验测 试中,复合模型仿真数据与实验数据变化趋势完全一 致,其复合模型仿真数据最大模拟精度为99.48%。

后续工作应进一步研究多点接触微动平台输送板 连续运动中所产生的振动现象,并针对这种负面现象 改善接触碰撞面的结构(面-面接触改变为点-面接 触),降低这种现象对粘滑驱动系统输出精度的影响; 此外,还应探究不同输送物体形状对系统仿真精度的 影响;最后,应研究执行器单元中磁体表面及运输物体 的表面粗糙度对模型系统仿真精度的影响。

参考文献:

- [1] CHANG Q B, LIU Y X, DENG J, et al. Design of a precise linearrotary positioning stage for optical focusing based on the stick-slip mechanism [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165;108398.
- [2] CHUNG S E, DONG X G, SITTI M. Three-dimensional heterogeneous assembly of coded microgels using an untethered mobile microgripper
 [J]. Lab on a Chip, 2015, 15(7):1667-1676.
- [3] DRIESEN W, RIDA A, BREGUET J M, et al. Friction based locomotion module for mobile MEMS robots [C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, California; IEEE, 2007; 3815 – 3820.
- [4] ZHANG Y K, PENG Y X, SUN Z X, et al. A novel stick-slip piezoelectric actuator based on a triangular compliant driving mechanism[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (7):5374-5382.
- [5] GUO Z, TIAN Y, ZHANG D, et al. A novel stick-slip based linear actuator using bi-directional motion of micropositioner [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 128:37 - 49.
- [6] QIN F, TIAN L Y, HUANG H, et al. Actively controlling the contact force of a stick-slip piezoelectric linear actuator by a composite flexible hinge[J]. Sensors and Actuators A; Physical, 2019, 299:111606.
- [7] XU Z, HUANG H, DONG J S. A stick-slip piezoelectric actuator with measurable contact force [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144:106881.
- [8] WANG X Y, HUANG H, FAN H Y, et al. Evolution of one-stepping characteristics of a stick-slip piezoelectric actuator under various initial gaps[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295:348 – 356.
- [9] HUO Z C, TIAN Y L, WANG F J, et al. A dual-driven high precision rotary platform based on stick-slip principle [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5):3053 - 3064.
- [10] WANG J R, HUANG H, ZHANG S Z, et al. Development and analysis of a stick-slip rotary piezoelectric positioner achieving high

velocity with compact structure [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145:106895.

- SHI B C, WANG F J, HUO Z C, et al. Design of a rhombus-type stick-slip actuator with two driving modes for micropositioning [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 166:108421.
- [12] YU H P, LIU Y X, DENG J, et al. A collaborative excitation method for piezoelectric stick-slip actuator to eliminate rollback and generate precise smooth motion [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 170: 108815.
- ZHONG B W, SUN L N, CHEN L G, et al. The dynamics study of the stick-slip driving system based on LuGre dynamic friction model
 [C]//2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2011;584 – 589.
- [14] 时运来,娄成树,张军,等. 黏滑驱动式小型精密运动平台[J]. 光 学精密工程,2018,26(5):1124-1132.
- [15] TIAN Y L, HUO Z C, WANG F J, et al. Design and modeling of a decoupled 2-DOF stick-slip positioning stage [C]//2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). Zhenjiang: IEEE, 2019:211-215.
- [16] 刘彬,钟博文,王振华,等.一种磁吸附式微小型惯性粘滑运动平 台研究[J]. 压电与声光,2019,41(5):725-727.
- [17] PINSKIER J, SHIRINZADEH B, AL-JODAH A. Design and evaluation of a dual-stage, compensated stick-slip actuator for longrange, precision compliant mechanisms [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2021, 331:113007.
- SHAO Y, XU M L, SHAO S B, et al. Effective dynamical model for piezoelectric stick-slip actuators in bi-directional motion [J].
 Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145:106964.
- [19] WANG Y,XU M L,SHAO S B,et al. A novel stick-slip type rotary piezoelectric actuator [J]. Advances in Materials Science and Engineering,2020,2020:1-11.
- [20] NGUYEN H X, TEIDELT E, POPOV V L, et al. Modeling and waveform optimization of stick-slip micro-drives using the method of dimensionality reduction [J]. Archive of Applied Mechanics, 2016, 86(10): 1771-1785.
- [21] 李伟达,李娟,胡海燕,等.一种基于粘滑运动原理的微小型机器 人建模与实验[J].机器人,2012,34(2):182-189.
- [22] 呼延鹏飞,代海风,胥光申.一种四稳态数字电磁执行器阵列设 计及磁场模拟分析[J].机械科学与技术,2020,39(4):508-515.
- [23] FURLANI E P. Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications [M]. New York: Academic Press, 2001:1.

(下转第57页)