

压电晶片-叠堆复合式振动马达设计与试验研究^{*}

温建明¹, 杨 玲¹, 杜人杰^{1,2}, 马继杰¹, 胡意立¹, 李新辉^{1,3}

(1. 浙江师范大学精密机械与智能结构研究所 金华, 321300)

(2. 浙江工业大学永康五金学院 金华, 321300)

(3. 浙江师范大学行知学院 金华, 321004)

摘要 针对现有微型振动马达难以兼顾强震感与快速响应的问题,提出了一种压电晶片-叠堆复合式振动马达。首先,振动马达采用压电晶片和压电叠堆串联式振动结构,使压电晶片与压电叠堆实现振动耦合;其次,建立动力学模型,通过 Matlab/Simulink 软件完成仿真分析,发现利用压电晶片与压电叠堆在系统二阶谐振频率下的协同作用是振动马达同时实现震感强、响应速度快的方法;最后,制作了样机并搭建马达性能测试平台,开展了系列试验研究。结果表明:在频率为 335 Hz、电压为 50 V_{pp} 正弦波激励下,马达稳态加速度为 1.45 g,响应时间为 19.9 ms,兼具体积小、震感强、响应速度快等优势;对样机进行了重复性和稳定性试验,表现出较好的可靠性。

关键词 微型振动马达;压电晶片-叠堆复合;振动耦合;二阶谐振频率

中图分类号 TN383.4;TH137.5

0 引 言

微型振动马达作为消费电子智能设备实现触觉反馈的核心执行部件,现已广泛应用于智能手机、可穿戴设备及 VR/XR 眼镜等设备^[1-4]。消费电子产业正朝着超薄化、高集成化方向发展,在保持小体积的基础上,对微型振动马达提出了综合性能要求^[4-5]:①需具备足够的振动强度,以满足触觉反馈的感知需求^[6-8];②要求响应快速,延迟控制在 30 ms 以内,从而适应实时交互场景^[8-10]。

线性振动马达是目前消费电子智能设备中应用最为主流的触觉反馈执行器^[4],根据驱动原理的不同,主要分成电磁驱动和压电振动两大类^[11]。电磁线性振动马达结构紧凑,能在低压驱动时产生强烈震感,备受各类消费电子设备的青睐。Jiang 等^[12]设计了一种新型电磁线性振动马达,通过增加永磁体数量提升马达响应速度,但导致马达体积显著增大。Nam 等^[13]开发了一款面向手机应用的快速响应电磁线性马达,通过提高磁通密度缩短响应时间,但该方式会明显加剧电磁干扰,增加了系统电磁屏蔽的设计成本。压电线性振动马达凭借低功耗、无电磁干扰等优势,近年来已成为研究热点^[14-18]。根据所采用的压电元件的不同,压电线性马达主要分为压电晶片振动型和压电叠堆振动型。Park 等^[19]研制

了一种放置在手机屏幕下方的 Z 型压电振动马达,通过优化压电元件的几何参数提升震感。Nam 等^[20]设计了一种压电晶片振动马达,借鉴了电磁谐振线性马达的弹簧-质量机构,通过谐振效应放大压电晶片的振幅以提升马达震感。文献[21]通过调节系统等效刚度,在维持压电晶片振动马达体积不变的前提下提高了马达响应速度。刘浩^[22]研制出一种面向手机应用的压电晶片振动马达,通过优化结构提升了马达震感。李洪洋^[23]研制了一种压电晶片振动马达,采用压电晶片直接振动的方式提高马达响应速度,但震感微弱。范抗抗^[24]研制了一种压电叠堆振动马达,采用多组分压电陶瓷材料制备压电叠堆,提升了马达震感。尹煜^[25]研制了一种压电叠堆振动马达,通过环形柔性铰链机构放大压电叠堆的输出位移,提升了马达震感。综上所述,现有研究通过结构与材料优化有效提升了马达性能,但在结构设计上通常依赖单一的驱动机制,这种模式往往难以同时兼顾强震感和快速响应的双重需求。因此,在严苛的空间约束下突破传统刚度与质量的制约,实现压电马达强震感与快速响应的协同,已成为当前亟待突破的关键瓶颈^[4,6-27]。

本研究提出一种压电晶片-叠堆复合式振动马达,其压电晶片和压电叠堆采用串联式振动结构以

^{*} 浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ24E050008)

收稿日期:2026-07-07;修回日期:2026-09-15

实现振动耦合,在小体积基础上,能同时实现震感强、响应速度快的性能目标,为面向消费电子的高性能触觉反馈执行器提供一种新的实现路径。

1 结构设计及工作原理

1.1 结构及接线方式

压电晶片-叠堆复合马达结构及工作原理如图 1 所示。马达结构见图 1(a),其金属基板底部与外壳焊接固定,顶部焊接连接块,两侧通过导电胶分别粘接压电晶片 1 与压电晶片 2。压电叠堆一端粘接于连接块上,另一端粘接附加质量块。

马达的接线方式如下:压电晶片 1 的负极通过导电胶粘接金属基板,压电晶片 2 的正极粘接在金属基板上。驱动信号的一端通过导线连接在压电叠堆的正极、压电晶片 1 的正极与压电晶片 2 的负极,另一端连接于压电叠堆的负极与金属基板。

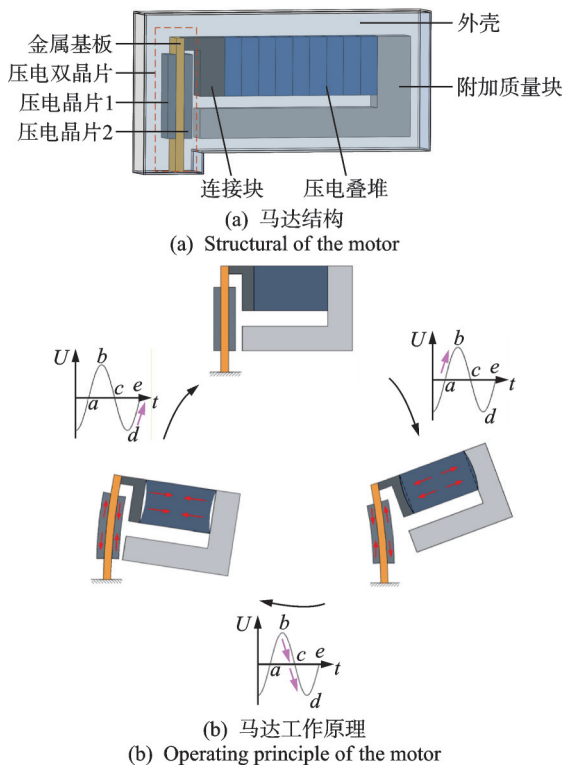


图 1 压电晶片-叠堆复合马达结构及工作原理

Fig.1 Structure and operating principle of the hybrid piezoelectric plate-stack motor

1.2 工作原理

马达工作原理如图 1(b)所示,驱动信号为正弦波形电信号,具体工作过程如下。

1) 在 a 时刻,压电晶片与压电叠堆均处于初始静止状态。

2) 在 $a \sim b$ 时间段内,压电晶片 1 发生收缩变形,压电晶片 2 发生伸长变形,产生向左的驱动力,使得金属基板向左弯曲变形;与此同时,压电叠堆同步发生伸长变形,带动其末端的附加质量块向右侧运动,产生向左的惯性冲击力,也使得金属基板向左弯曲变形。二者形成振动耦合,增大金属基板向左弯曲的形变,增强了马达震感。

3) 在 $b \sim d$ 时间段内,压电晶片 1 发生伸长变形,压电晶片 2 发生收缩变形,产生向右的驱动力,使得金属基板向右弯曲变形;压电叠堆同步发生缩短变形,带动其末端的附加质量块向左侧运动,产生向右的惯性冲击力,也使得金属基板向右弯曲变形。二者形成振动耦合,增大金属基板向右弯曲的形变,增强了马达震感。

4) 在 $d \sim e$ 时间段内,重复 $a \sim b$ 时间段的工作过程。

5) 在 e 时刻,压电晶片与压电叠堆均回到初始静止状态,至此完成一个周期的振动。

2 动力学模型及仿真

为了更好地分析振动马达的运动特性,建立了马达动力学模型,如图 2 所示。

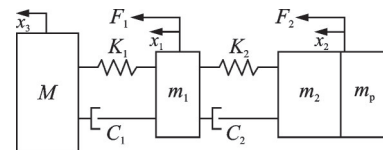


图 2 马达动力学模型

Fig.2 Dynamic model of the motor

马达的驱动电压为

$$U(t) = V_0 \sin(\omega_n t) \quad (1)$$

压电晶片的输出力为

$$F_1 = \frac{3\omega E_p d_{31}}{2L_p} (t_m + t_p) V_0 \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

其中: t_m 为金属基板厚度; t_p 为压电层厚度; L_p 为压电晶片长度。

压电叠堆的输出力为

$$F_2 = \left[\frac{m_2 K_T \left(\frac{K_{eq}}{K_T K_{eq}} \right)}{2(m_2 + 2m_f)} n d_{33} + \frac{\pi^2 m_2 f_{res}^2}{K_T} \times \frac{3\omega E_p d_{31}}{2L_p} (t_m + t_p) \right] V_0 \sin(\omega_n t) \quad (3)$$

其中: K_T 为压电叠堆的等效抗弯刚度; K_{eq} 为压电悬臂梁的等效抗弯刚度; m_i 为质量块的质量; f_{res} 为振动系统的谐振频率。

在驱动信号作用下,马达的动力学方程可表示为

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 x_3}{dt^2} = & -c_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - k_2 (x_2 - x_1) + F_1 + \\ & F_2 - k_1 (x_1 - x_3) - c_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - \\ & m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} - (m_2 + m_p) \frac{d^2 x_2}{dt^2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: M 、 m_1 、 m_2 及 m_p 分别为振动马达外壳固定基座、压电双晶片、压电叠堆及附加质量块的质量; F_1 、 F_2 分别为压电双晶片、压电叠堆的输出力; x_1 、 x_2 及 x_3 分别为压电双晶片、附加质量块及基座的位移; k_1 、 k_2 分别为压电双晶片、压电叠堆的等效刚度; c_1 、 c_2 分别为压电双晶片、压电叠堆的等效阻尼。

利用 Matlab/Simulink 软件对马达的加速度进行仿真,压电晶片-叠堆振动马达仿真模型如图3所示。驱动信号为50 V_{pp}、仿真频率为0~600 Hz的正弦波信号时,马达的加速度频率响应特性曲线如图4所示。两个谐振频率分别为50 Hz与360 Hz,对应的谐振加速度分别为0.67 g与1.59 g。马达在360 Hz工作时可产生最强震感,为此,确立了“晶片非谐振-叠堆谐振”的复合驱动模式。叠堆利用谐振效应主导强震感,晶片则依托非谐振态确保快速响应,从而实现强震感与快速响应的有效协同。

为进一步验证压电晶片和叠堆复合驱动机理,对马达在压电晶片单独驱动、压电叠堆单独驱动与压电晶片-叠堆复合式驱动3种模式下进行仿真。二阶谐振频率下的稳态响应如图5所示。为统一性能评价标准,振动马达响应时间定义为输出振动幅值首次达到稳态值90%所需的时间^[27]。结果表明,

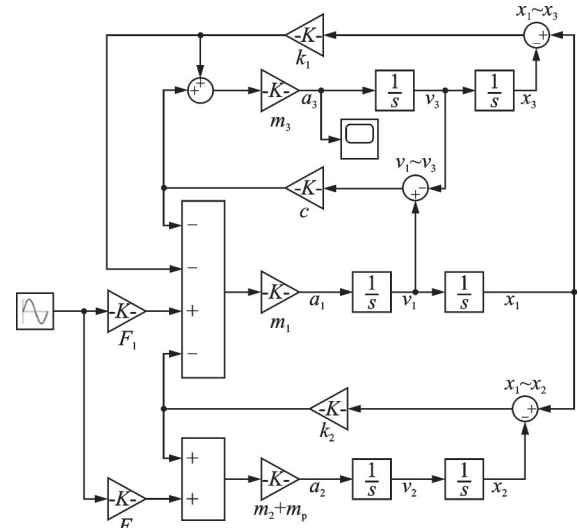


图3 压电晶片-叠堆振动马达仿真模型

Fig.3 Simulation model of the piezoelectric plate and stack vibration motor

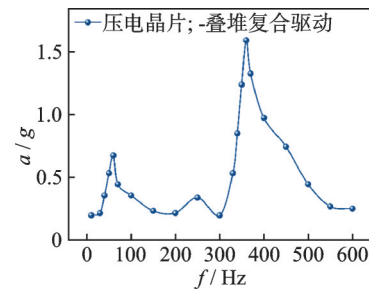


图4 加速度频率响应特性曲线

Fig.4 Acceleration frequency response characteristic

在系统二阶谐振频率下,压电晶片单独驱动模式时马达的震感弱(稳态加速度为0.39 g)但响应速度快(5 ms);压电叠堆单独驱动模式下,马达的震感强(稳态加速度为1.4 g)但响应速度慢(22 ms);复合式驱动模式下,压电叠堆为马达提供了强劲震感输出(稳态加速度为1.6 g),压电晶片有效提升了马达响应速度(13 ms)。上述仿真结果表明,二者协同作

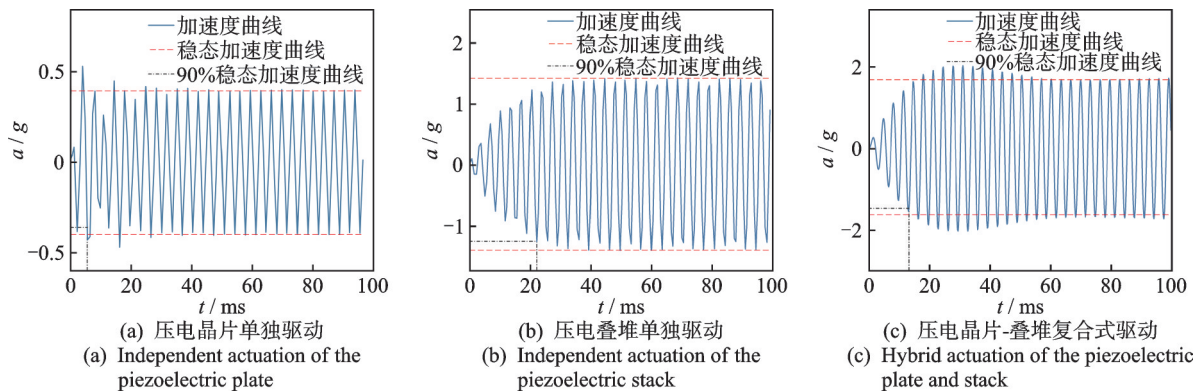


图5 二阶谐振频率下的稳态响应

Fig.5 Steady-state response at the second-order resonant frequency

用,可使马达同时实现震感强、响应速度快的性能需求。

3 试验研究

3.1 试验系统

笔者设计并制作了压电晶片-叠堆复合式振动马达样机,马达主要元件的材料及尺寸见表 1。试验测试平台如图 6 所示。样机及试验设备安放在气浮隔振光学平台上,信号发生器产生的正弦波形电信号被功率放大器放大后作用到样机上。激光测位仪测量样机的振幅并将数据输出到计算机上,

通过计算机进行数据记录和处理。加速度传感器测量样机的加速度并将数据传输到示波器。

表 1 马达主要元件的材料及尺寸
Tab.1 Materials and dimensions of the primary motor components

元件	尺寸(长×宽×高)/mm	材料
压电晶片	5.00×2.00×0.67	PZT
压电叠堆	3×3×18	PZT
金属基板	6.00×2.00×0.15	铍青铜
连接块	3×3×2	45 钢
附加质量块	3.0×1.9×18.4	钨钢
外壳	3.5×6.5×19.6	不锈钢



图 6 试验测试平台
Fig.6 Experimental test setup

3.2 振幅测试

信号发生器输出电压为 1 V_{pp} 的电信号,同时启用自动扫频功能,扫频频率范围为 $0\sim 600\text{ Hz}$,该信号经过放大倍数为 50 倍的功率放大器作用在样机上。样机振幅的频率响应曲线如图 7 所示。激光测位仪每次采样 20×10^4 个点,每个采样点的间隔时间

为 $10\text{ }\mu\text{s}$,采样过程持续 20 s ^[28]。样机振幅频响特性表现出两个谐振频率,分别为 62 Hz 和 335 Hz ,对应振幅分别为 $105\text{ }\mu\text{m}$ 和 $443\text{ }\mu\text{m}$ 。试验结果表明,样机在二阶谐振频率下的振幅最大,具有最强震感。

3.3 加速度稳态响应测试

信号发生器输出电压为 1 V_{pp} 、频率为 335 Hz 的电信号,经过放大倍数为 50 倍的功率放大器作用在样机上。分别测试了 3 种模式下的加速度稳态响应波形,二阶谐振频率下的加速度稳态响应如图 8 所示。由图可知:压电晶片单独驱动时,马达稳态加速度为 0.62 g ,响应时间为 13.9 ms ;压电叠堆单独驱动时,马达稳态加速度为 1.08 g ,响应时间为 29.8 ms ;压电晶片-叠堆复合驱动时,马达稳态加速度为 1.45 g ,响应时间为 19.9 ms 。

试验测试与动力学仿真的结果较为吻合,表明

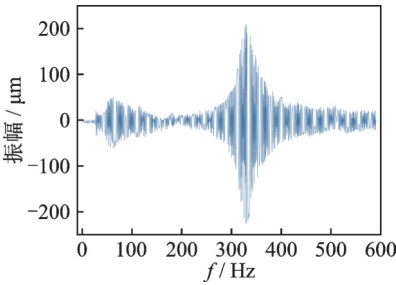


图 7 频率响应曲线
Fig.7 Frequency response curve

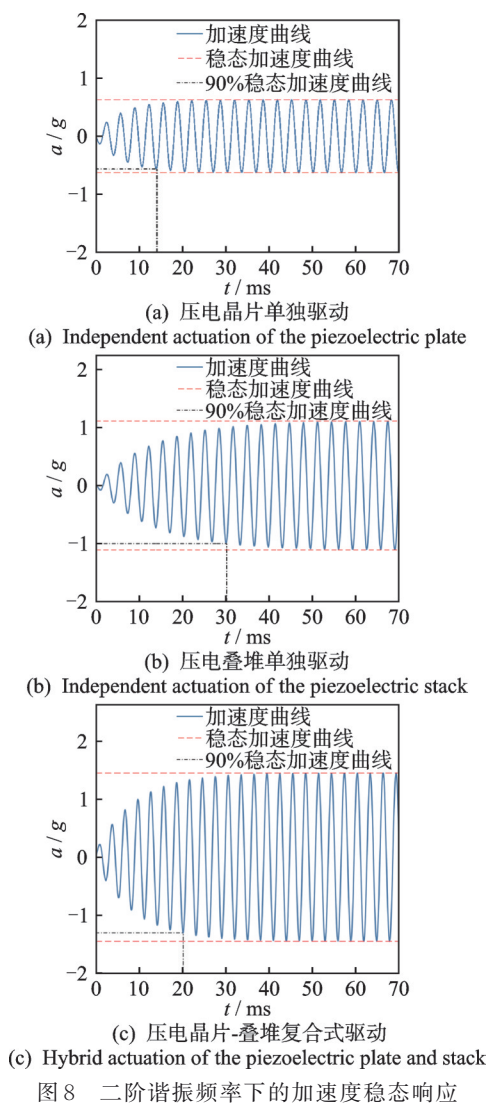


图8 二阶谐振频率下的加速度稳态响应
Fig.8 Steady-state acceleration response at the second-order resonant frequency

在系统二阶谐振频率下的复合式驱动模式,可使马达同时实现震感强、响应速度快的性能需求。

3.4 功耗测试

信号发生器输出电压为 $1 V_{pp}$ 、频率为335 Hz的电信号,经过放大倍数为50倍的功率放大器作用在样机上。在压电晶片-叠堆复合驱动模式下,采用高精度功率分析仪对样机的功耗进行实测。测试结果表明,样机的功耗较低,仅为62 mW,可满足消费电子智能设备的应用要求。

3.5 重复性与稳定性测试

在完成单个样机的性能测试后,对马达的重复性和稳定性进行了测试。试验共制作了4个样机,利用加速测试平台测试样机的谐振频率和对应的稳态加速度,每组样机均连续开展了10次测试,测

试结果取平均值。4个样机的稳态加速度均分布在 $1.42 g \sim 1.47 g$ 的范围内,谐振频率则集中在330~350 Hz的区间,振动量与谐振频率的误差范围均在5%以内,表明样机具有较好的重复性。

随机取2个样机进行长时间的连续振动测试,测试总时长为50 h,每间隔5 h对样机的谐振频率和对应的稳态加速度进行测试并记录数据,用于分析样机长期工作的稳定性。可靠性试验结果如图9所示。由图可知,样机的稳态加速度和谐振频率均呈现出初期略微下降的趋势,随后逐渐趋于平缓,整体波动幅度在10%以内,表明样机具有较好的稳定性。

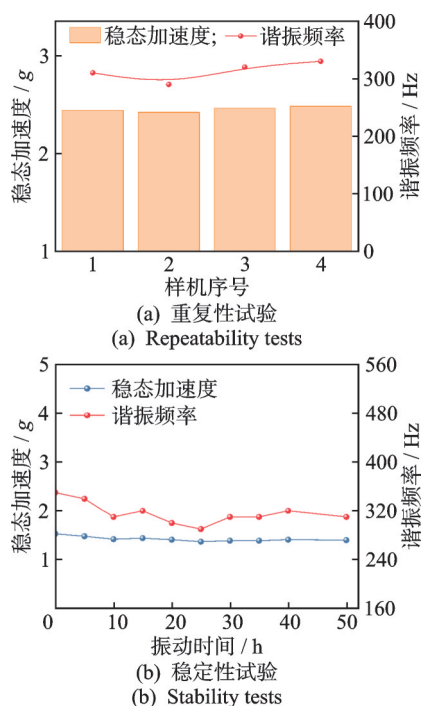


图9 可靠性试验结果

Fig.9 Result of reliability tests

3.6 性能比较与分析

为了评估所提出的压电晶片-叠堆复合式振动马达的性能,从体积、驱动电压、稳态振动加速度与响应时间等方面对本设计样机与现有振动马达进行对比。振动马达的参数及性能比较见表2。与现有电磁振动马达相比,所提马达的震感偏弱,但响应速度提升了约1倍;与现有压电振动马达相比,所提马达的驱动电压较低,震感较强,同时响应速度也具有突出的优势。

受限于压电效应的固有机理,压电马达的驱动电压通常高于传统电磁马达。然而,参照当前产业链现状,诸多同类压电驱动器件(如微型压电泵、压

表 2 振动马达的参数及性能比较

Tab.2 Performance and parameter comparison with vibration motors

马达	体积/mm ³	驱动电压/V _{pp}	稳态加速度/g	响应时间/ms	驱动类型
文献[12]	700	1.78	2.50	49.9	电磁
文献[13]	236	2.00	2.20	45.0	电磁
文献[20]	267	150.00	—	290.0	压电晶片
文献[21]	267	150.00	—	50.0	压电晶片
文献[22]	490	140.00	1.70	67.2	压电晶片
文献[25]	353	11.80	0.60	—	压电叠堆
所提马达	446	50.00	1.45	19.9	压电晶片-叠堆复合

电扬声器等)在消费类电子设备中已有应用,微型升压芯片能够满足当前驱动电压的要求。此外,通过掺杂改性等提升压电陶瓷的应变常数,采用高精度机械加工降低压电晶片厚度,能够进一步降低压电陶瓷驱动电压,使压电振动马达能够适应更广泛的应用场景。

4 结束语

本研究提出了一种压电晶片-叠堆复合式振动马达,采用压电晶片和压电叠堆串联式振动结构使二者实现振动耦合,解决了传统微型振动马达难以同时实现震感强、响应速度快的性能目标。制作了尺寸为3.5 mm×6.5 mm×19.6 mm的马达样机,搭建了马达振幅与加速度测试平台,开展了系列性能测试试验。测试结果表明,样机在频率为335 Hz(系统二阶谐振频率)、电压为50 V_{pp}的正弦波电信号激励下,最大振幅为443 μm,稳态加速度为1.45 g,响应时间为19.9 ms。试验结果表明,在系统二阶谐振频率下,压电叠堆为马达提供强劲震感输出,压电晶片有效提升了马达响应速度,二者协同作用可使马达同时实现震感强、响应速度快的性能需求,样机在重复性和稳定性测试试验中表现出较好的特性。与现有振动马达的性能对比发现,所提马达能在保持体积较紧凑的同时,具备较强震感,响应时间从45~67 ms范围内降低到19.9 ms,响应速度提升了45%~70%。

参 考 文 献

[1] VAN-WEGEN M, HERDER J L, ADELSBERGER R, et al. An overview of wearable haptic technologies and their performance in virtual object exploration[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1563.

[2] PARK S U, LEE H K, KIM H B, et al. Wearable

interactive full-body motion tracking and haptic feedback network systems with deep learning[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 8604.

[3] GUO Y, WANG Y, TONG Q Q, et al. Active electronic skin: an interface towards ambient haptic feedback on physical surfaces[J]. *Flexible Electronics*, 2024, 8(1): 25.

[4] JUEYU C, TONG H E T, KUI Y. Electromechanical actuators for haptic feedback with fingertip contact[J]. *Actuators*, 2023, 12(3): 104-104.

[5] 刘恩稷, 李想, 谭卓, 等. 人工智能手机产业发展现状、趋势及对策建议[J]. *机器人产业*, 2025(6): 18-35.

LIU Enji, LI Xiang, TAN Zhuo, et al. Current situation, trends and countermeasures of the development of artificial intelligence mobile phone industry[J]. *Robot Industry*, 2025(6): 18-35.(in Chinese)

[6] ZHANG J J, DIAO W D, FAN K, et al. A miniature standing wave linear ultrasonic motor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332: 113113.

[7] SENKOW T L, THEIS N D, QUINDLEN-HOTEK J C, et al. Computational and psychophysical experiments on the Pacinian corpuscle's ability to discriminate complex stimuli[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, 12(4): 635-644.

[8] REMACHE-VINUEZA B, TRUJILLO-LEÓN A, VIDAL-VERDÚ F. Vibrotactile stimulus duration threshold for perception of pulse to vibration transition [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 5057.

[9] KAARESOJA T, BREWSTER S, LANTZ V. Towards the temporally perfect virtual button: touch-feedback simultaneity and perceived quality in mobile touchscreen press interactions[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2014, 11(2): 9.

[10] JAY C, GLENCROSS M, HUBBOLD R. Modeling the effects of delayed haptic and visual feedback in a collaborative virtual environment[J]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2007, 14(2): 8.

- [11] KIM J T, SHIN H S, YOO J Y, et al. Mechanics of vibrotactile sensors for applications in skin-interfaced haptic systems[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2023, 58: 101940.
- [12] JIANG Z X, PARK K H, HWANG S M. Novel magnetic circuit design and acceleration calculation of horizontal linear vibration motor[J]. *Actuators*, 2022, 11(6): 149-149.
- [13] NAM J, YEON T, JANG G. Development of a linear vibration motor with fast response time for mobile phones[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(8): 1505-1510.
- [14] CHEN Y B, YAN Z. Nonlinear analysis of unimorph and bimorph piezoelectric energy harvesters with flexoelectricity[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113454.
- [15] 刘英想, 邓杰, 常庆兵, 等. 压电驱动技术研究进展与展望[J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(6): 1045-1061. LIU Yingxiang, DENG Jie, CHANG Qingbing, et al. Progress and prospects in piezoelectric actuation technologies[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1043-1061.(in Chinese)
- [16] ZHOU X Y, WU S, WANG X X, et al. Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2024, 19(1): 6.
- [17] 柏德恩, 邓少龙, 李云涛, 等. 尺蠖式压电线性作动器设计及实验研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(3): 435-441. BAI Deen, DENG Shaolong, LI Yuntao, et al. Design and experimental study of a novel inchworm piezoelectric linear actuator[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3): 435-441.(in Chinese)
- [18] 张柳煜, 申超强, 何江波. 采用压电陶瓷检测预应力管道灌浆质量方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2025, 45(4): 690-697. ZHANG Liuyu, SHEN Chaoqiang, HE Jiangbo. Method of using piezoelectric ceramics to detect the grouting quality of prestressed pipelines[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2025, 45(4): 690-697. (in Chinese)
- [19] PARK Y M, KIM K J. The dynamic modeling and design improvement of a piezoelectric exciter of a touch screen device for efficient tactile feedback [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(5): 055008.
- [20] NAM J, KIM Y J, JANG G, et al. Resonant piezoelectric vibrator with high displacement at haptic frequency for smart devices[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 394-401.
- [21] NAM J, OH H, JANG G, et al. Externally leveraged resonant piezoelectric actuator with fast response time for smart devices[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2764-2772.
- [22] 刘浩. 压电驱动型手机振动马达的仿真优化设计与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [23] 李洪洋. 压电振动马达优化设计及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [24] 范抗抗. PZT基多层压电陶瓷的制备及作动器件[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [25] 尹煜. 超小体积叠堆式压电陶瓷振动马达及其放大机构的设计研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
- [26] HUANG Y, YAO K M, LI J Y, et al. Recent advances in multi-mode haptic feedback technologies towards wearable interfaces[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 22: 100602.
- [27] AJAYI O K, DU S Z, NAHRI S N F. A review of haptic technologies for hardware-in-the-loop development [J]. *Sensors and Actuators Reports*, 2025, 9: 100331.
- [28] ZHANG S D, YANG Z G, CAO D, et al. Vibration characteristics analysis of piezoelectric vibration motor based on magnetic interaction[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, 332: 130263.



第一作者简介:温建明,男,1980年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为压电驱动与控制技术、机器人智能驱动与传感技术、生物检测与医疗装备等。完成国家自然科学基金、浙江省重点研发计划、浙江省自然科学基金重点项目等省部级以上项目20余项。发表SCI/EI论文170余篇,其中SCI论文113篇;授权发明专利50多项。获中国商业联合会科技进步一等奖1项、浙江省自然科学奖三等奖1项。入选浙江省高等学校中青年学科带头人、浙江省高层次拔尖人才培养计划、金华市科技创新卓越人才。

E-mail: wjming@zjnu.cn

通信作者简介:杨玲,女,2000年10月生,硕士生。主要研究方向为压电精密驱动技术。

E-mail: yangling1@zjnu.edu.cn