

文章编号: 1671-7449(2026)01-0055-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 55-62.

用于精密驱动的双足压电执行器设计

亓雪^{1,2}, 陈昱廷², 赵美婷^{1,2}, 张丽娜^{1,2}, 谭秋林^{1,2*}

(1. 中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 压电执行器因其独特的工作原理和优越的性能受到广泛关注, 并在许多领域得到了应用, 如航空航天、微电子、医疗器械等。针对压电执行器的定动子接触特性难以精确定量建模分析, 影响系统性能如速度、带载能力等进一步提升的问题, 对双足直线型压电执行器展开研究, 提出并验证了一种弯曲振动方程与有限元数值分析相结合的结构优化方案。基于逆压电效应与等截面梁自由弯曲振动方程, 分析了定子振动模态与驱动机制。在 SolidWorks 中构建三维模型, 通过 ANSYS Workbench 进行有限元仿真, 分析定动子接触性能(驱动足法向振幅及系统输出特性等); 基于仿真数据优化结构设计, 并验证系统的带载能力。仿真结果表明, 当驱动电压为 100 V 时, 所设计执行器的左、右驱动足最大法向位移振幅分别为 14 μm 与 7.5 μm , 动子输出速度为 156 mm/s(空载), 所对应的最大带载能力为 10 N。

关键词: 压电执行器; 有限元分析; 结构优化; 数值仿真

中图分类号: TM383

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026019

引用格式: 亓雪, 陈昱廷, 赵美婷, 等. 用于精密驱动的双足压电执行器设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 55-62.

QI Xue, CHEN Yuting, ZHAO Meiting, et al. Design of bipedal piezoelectric actuator for precision driving[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 55-62.

Design of Bipedal Piezoelectric Actuator for Precision Driving

QI Xue^{1,2}, CHEN Yuting², ZHAO Meiting^{1,2}, ZHANG Lina^{1,2}, TAN Qiulin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Piezoelectric actuators have received widespread attention due to their unique working principle and superior performance, and have been widely applied in many fields such as aerospace, microelectronics, and medical devices. It is difficult to accurately and quantitatively model and analyze the contact characteristics of the piezoelectric actuator, which affects the further improvement of system performance such as speed and load capacity. This article focuses on the research of a bipedal linear piezoelectric actuator and proposes and validates a structural optimization scheme that combines bending vibration equations with

【收稿日期】2025-07-01

【基金项目】山西省基础研究计划青年项目(202303021222112); 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3209100); 国家自然科学基金资助项目(U24A20136)

【作者简介】亓雪(1996—), 女, 讲师, 博士, 主要从事压电驱动及控制研究。E-mail: 20230103@nuc.edu.cn。

*【通信作者】谭秋林(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事极端环境传感及驱动技术研究。E-mail: tanqiulin@nuc.edu.cn。

finite element numerical analysis. Based on the inverse piezoelectric effect and the equation of free bending vibration of equal section beams, the stator vibration modes and driving mechanisms are analyzed. SolidWorks software is used for 3D modeling, and ANSYS Workbench analysis tool is utilized for numerical simulation analysis of the contact performance of the stator, including the normal amplitude and output characteristics of the driving foot, further optimizing the system structure based on simulation data, and finally verifying the load-bearing capacity. The simulation results show that when the driving voltage is 100 V, the maximum normal displacement amplitudes of the left and right driving feet of the designed piezoelectric actuator are 14 μm and 7.5 μm , respectively. The no-load output speed of the rotor is 156 mm/s, and the maximum load capacity is 10 N.

Key words: piezoelectric actuator; finite element analysis; structural optimization; simulation analysis

0 引言

压电执行器由于具有高精度、响应快与断电自锁等诸多优势^[1-3],在微机电系统、半导体行业以及航空航天领域中被广泛应用^[4-5]。压电执行器主要由定子与动子构成,在交变电激励下,定子表面形成行波或驻波振动模态,通过接触界面的摩擦作用,实现电能至机械能的能量转换与运动输出^[6]。

近些年出现了各种类型的压电执行器,其性能得到了较大程度的改善。直线型压电执行器凭借高精度驱动、快速响应以及低速大扭矩等特性,在关键领域有很大的应用潜力。直线型压电执行器主要分为行波型和驻波型两大类,区别在于行波型执行器有运动平稳以及噪声低等特性,驻波型执行器则结构简单,易于控制^[7-8]。

目前,日本在压电执行器领域处于全球领先地位,拥有佳能、精工、松下等多家企业,产品广泛应用于相机、汽车、医疗设备等。美国将高可靠性的压电执行器应用于火星探测器等深空探索任务中,法国与德国将其用于航天器姿态控制及导弹精确制导等。

我国也实现了在航天领域关键的技术突破,南京航空航天大学研究团队研发出一种新型梁式夹持V型直线超声电机^[9],经过对结构设计的优化,电机的输出性能及运动速度都有了一定程度的提升。南昌航空大学科研团队创造性地设计出双十字压电振子平面超声电机,为平面超声电机的类型拓展给予了新的技术方案^[10]。蒋春容团队提出了一种环形行波型压电执行器^[11],建立了多种接触摩擦模型,评估了电机的性能。

作为精密控制的基础,建模方法可分为有限元法、有限体积法、等效电路法以及能量转换法^[11-13]。

Hirata等^[14]通过等效电路法评估系统特性,但模型等效参数难以精确确定,且界面接触力对模型的影响也无法考虑。Hagood等^[15]提出的建模方法同时考虑了执行器的电气及机械特性。行波式压电执行器的接触模型研究已经比较成熟,间歇式接触涉及分离与粘滑运动,难以准确建立定动子接触模型。Tsai等^[16]建立了分段弹簧模型来等效定动子间的弹性接触模型。He等^[17]通过引入惩罚函数,建立了类似库仑摩擦的连续摩擦模型。Li等^[18]基于等效弹簧模型和修正库仑摩擦模型,表征定动子之间的粘滑分离与粗糙接触力学特性。

本文提出一种基于有限元数值分析的多足直线型压电执行器的结构优化方案。首先设计系统结构,分析工作原理,利用Solidworks进行三维建模,然后通过ANSYS软件对执行器性能(驱动足的法向振幅、输出特性等)展开有限元分析,并基于数据对系统结构进行优化,最后分析了其带负载能力。

1 系统设计

1.1 结构设计

双足直线型压电执行器由定子与动子组成,如图1所示,定子由压电陶瓷、弹性基体、驱动足组成。

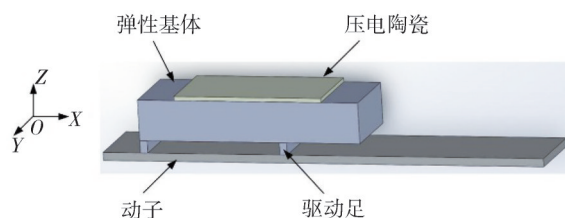


图1 机械结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical structure

核心驱动元件为压电陶瓷,粘贴于弹性体上表面,沿厚度方向极化,利用逆压电效应将电能

转换为机械振动。弹性基体作为振动传递介质,可以传递并放大驱动元件的振动,形成稳定的驻波模态。驱动足位于弹性基体下表面,直接接触动子上表面。由于定子可被激励出固定模态的驻波,其波腹(振幅最大)和波节(振幅为零)位置固定。驻波的波腹处振动幅度可达微米级,而波节处几乎无振动,若将驱动足分布于波腹处,可以将机械能量集中于驱动足。通过在动子底部施加法向预紧力使其与驱动足保持接触,利用定动子接触面间的摩擦耦合作用实现直线驱动。

1.2 工作原理

当高频交变电场施加于定子压电陶瓷的上下电极间时,压电陶瓷的晶格结构会产生周期性变形,电能转换为机械振动,传递至弹性基体部分,激励出某一特定振动模态。图 1 中压电陶瓷的极化方向沿厚度方向,伸缩振动模式为 d_{31} 模式。图 2 所示为本文所设计的压电执行器定子的工作模态,为一阶弯曲振动模态,可以看出沿长度方向上有两个节点(0.22 和 0.78)。

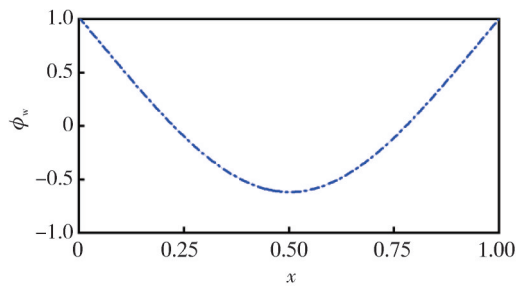


图 2 振动振型图

Fig. 2 Vibration mode diagram

将定子部分视为等截面自由梁,将梁横截面的几何中位面位置定义为中性面,利用中性面的法向位移来表征弯曲振动。中性面上各点在 Y 方向的振幅一致,其振幅决定于 X 坐标。根据振动理论,设定子上各点的横向位移为 $w(x, t)$,两端自由梁(定子)的弯曲振动方程为

$$E_s I_s \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = -\rho A_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中: ρ 、 E_s 为密度、弹性模量; I_s 为梁的截面惯量矩; A_s 为梁的轴向截面积。

利用分离变量法,式(1)的一般解为

$$w(x, t) = \phi_1(x) \cdot (A_1 \sin \omega_1 t + B_1 \cos \omega_1 t), \quad (2)$$

式中: $\phi_1(x)$ 为一阶弯振振型函数; ω_1 为一阶弯振固有频率; $\omega_1 = \alpha_1^2 \sqrt{E_s I_s / \rho A_s}$; $\alpha_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{L}$ 。

其中,振型函数为

$$\phi_1(x) = C_1 \cos(\alpha_1 x) + C_2 \sin(\alpha_1 x) + C_3 \operatorname{ch}(\alpha_1 x) + C_4 \operatorname{sh}(\alpha_1 x), \quad (3)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为与边界条件有关的参数。

作为驻波型压电执行器,驱动足的运动轨迹为直线或斜椭圆。轨迹的垂直分量与水平分量分别决定驻波的振幅与定子弯曲振动的切向位移。定动子之间为间歇性接触模式:两者接触时,通过摩擦耦合,动子输出直线运动;两者分离时,动子靠惯性维持运动。当驱动电压频率与模态振动固有频率一致时,便可激发出一阶弯振模态,使得驱动足产生垂向往复运动,其末端形成倾斜的直线轨迹。当驱动足和动子接触时,在预紧力作用下,通过摩擦耦合作用把驱动足运动转变成动子的水平直线位移。

2 仿真分析

2.1 模态分析

弹性基体材料与驱动足材料选用 45 号钢,提高耐磨性。压电陶瓷与动子的材料分别选择 PZT-4 与铝。压电陶瓷与弹性基体的尺寸分别为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 与 $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,动子的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,定动子表面静、动摩擦因数设置为 0.1。表 1 所示为材料参数,其中, E_s 为弹性模量。

表 1 材料参数

Tab. 1 Parameters of material

材料	E_s/GPa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比
45 号钢	206	7 850	0.28
铝	72	2 700	0.30

压电陶瓷的关键参数包括弹性系数矩阵 C 、压电应力矩阵 e 与介电系数矩阵 ϵ ,

$$C = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ Pa}, \quad (4)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ C/m}^2, \quad (5)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 805 & 0 & 0 \\ 0 & 805 & 0 \\ 0 & 0 & 660 \end{bmatrix} \times \epsilon_0, \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}. \quad (6)$$

本文通过ANSYS Workbench软件建立定子的有限元仿真模型,明确各部件的材料属性定义,随后进行网格划分工作,如图3所示,采用SOLID185单元划分网格,网格尺寸为0.000 5 mm。

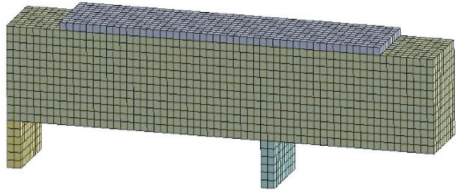


图3 网格划分图

Fig. 3 Grid division diagram

图4所示为定子振动模态的分析结果,仿真得到系统的一阶弯振模态所对应的固有频率为26.5 kHz。通过模态分析所获取的动力学特性,为后续谐响应分析和瞬态分析提供了基础。

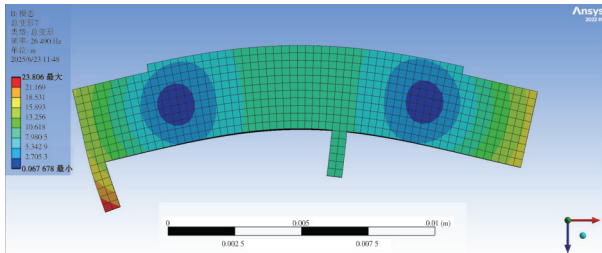


图4 模态分析结果

Fig. 4 Modal analysis results

2.2 谐响应分析

完成模态分析后,对定子模型进行谐响应分析,导入耦合场谐波分析系统后,根据共振频率设置扫频范围。压电陶瓷的上下表面均有电极,上表面施加激励电压(100 V和150 V),下表面接地。位移约束施加于定子振动节点的X方向与Y方向。在求解设置中插入频率响应来绘制驱动足输出位移的幅频特性曲线,从而验证共振频率,并得出中性面法向振幅。

幅频特性曲线峰值所对应的频率为共振频率,系统响应幅值最大。图5所示为驱动足的幅频特性曲线仿真结果,可以看出,在激励频率达到26.5 kHz附近时,曲线呈现出明显的峰值,表明此时激励频率与系统的固有频率达到了最佳匹配状态,系统的振动能量转换效率最高。由此,

可认为26.5 kHz是所设计系统一阶弯振的固有频率。

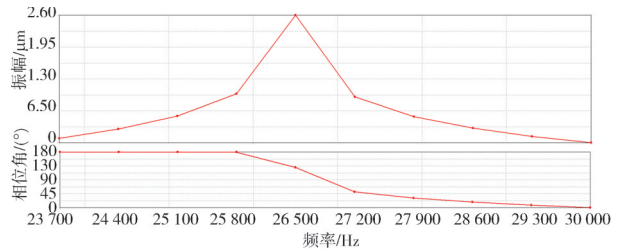


图5 幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency curve

基于定子谐响应分析,提取弹性基体中性面中部的法向位移振幅,具体如图6所示。根据式(2)拟合中性面的节点振幅,并通过最小二乘法确定系数,图7与图8分别为100 V与150 V电压下的多项式拟合结果,如表2所示,最终选择六次多项式来拟合中性面节点振幅。上述拟合结果将作为关键边界条件,为后续定子和动子接触三维模型的瞬态分析奠定基础。

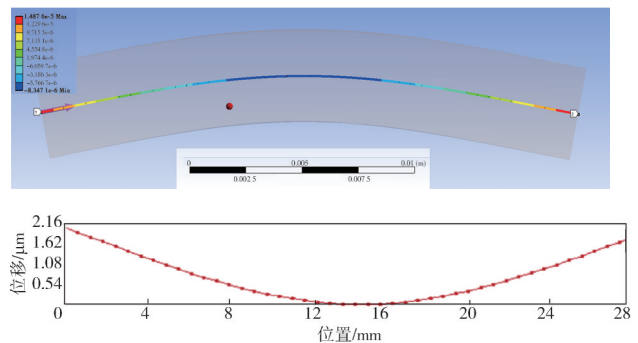


图6 法向位移振幅曲线

Fig. 6 Normal displacement amplitude curve

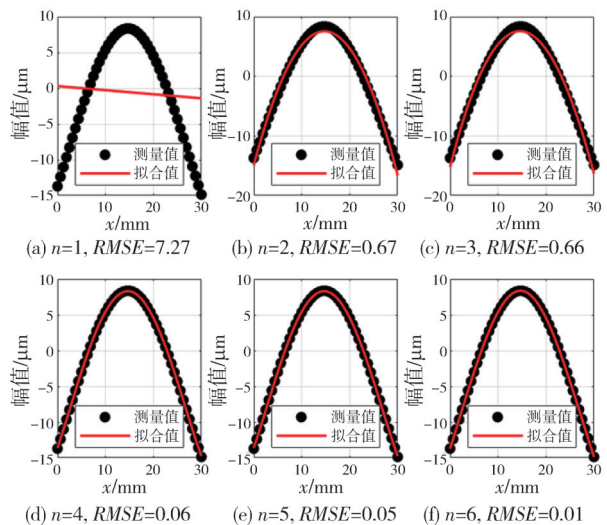


图7 振型函数拟合曲线(100 V)

Fig. 7 Curve fitting of vibration mode function (100 V)

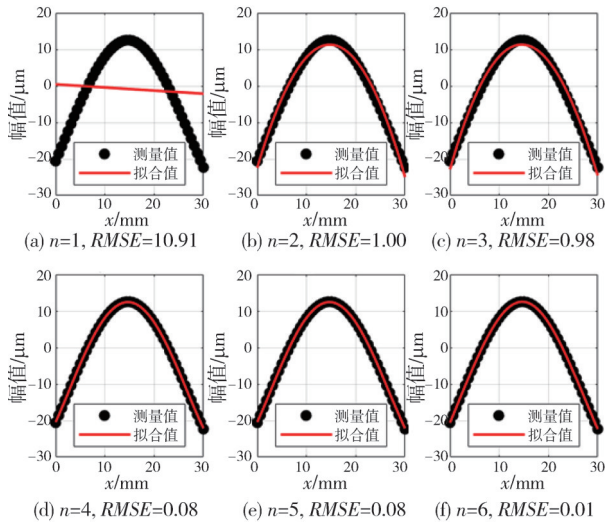


图 8 振型函数拟合曲线 (150 V)

Fig. 8 Curve fitting of vibration mode function (150 V)

表 2 多项式拟合式

Tab. 2 Polynomial fitting formula

电压/V	振型函数拟合式
100	$\phi_1(x) = -2.23 \times 10^{-7}x^6 + 1.98 \times 10^{-5}x^5 - 5.05 \times 10^{-4}x^4 + 1.10 \times 10^{-3}x^3 - 0.73 \times 10^{-2}x^2 + 2.21x - 13.74$
150	$\phi_1(x) = -3.34 \times 10^{-7}x^6 + 2.97 \times 10^{-5}x^5 - 7.57 \times 10^{-4}x^4 + 1.64 \times 10^{-3}x^3 - 0.01x^2 + 3.31x - 20.61$

2.3 瞬态分析

2.3.1 定子尺寸优化

定子下表面端点施加相应的位移约束,并通过远程点耦合其法向自由度,在设置中仅Z方向定义为活动,其余方向为非活动,采用中性面位移约束来等效代替压电激励。在瞬态分析中,采用与谐响应分析相同的网格划分标准,如图9所示为在中性面施加基于拟合多项式的位移约束边界条件。瞬态分析的时间步如初始时间步、最小和最大时间步均设置为1 μs。

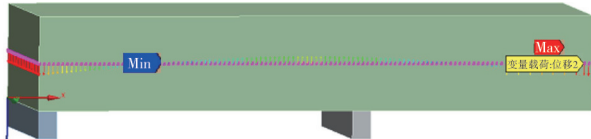


图 9 中性面位移约束图

Fig. 9 Neutral plane displacement constraint diagram

图10所示为在100 V电压激励下,驱动足长度为1 mm的法向振幅曲线,呈现出一种从左边线向右边线递减的分布特征。将左右驱动足下表面平行于Y轴的长边法向振动位移提取出来,就可精准地表征其振幅特性。为了进一步优化驱动足

尺寸,针对1~3 mm驱动足长度范围内的振动响应展开了分析。通过观察可知,左右驱动足输出特性呈现180°的相位差。

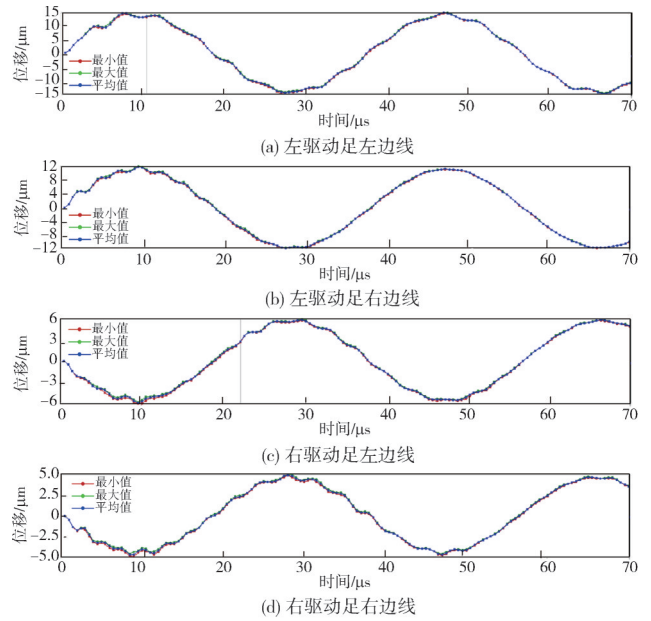


图 10 法向位移振幅曲线

Fig. 10 Normal displacement amplitude curve

通过对不同驱动足长度的振幅数据进行对比得出,当长度为1.5 mm时,右驱动足的振幅最大,且左右两侧的振幅差值最小(左右边线分别为7.5 μm和6.9 μm),即振动对称性最好。因此,最终确定驱动足的最优尺寸为10 mm×1.5 mm×1 mm。此方案不仅可以保证足够大的振动幅值,还有效改善了双侧驱动的对称性。

2.3.2 定动子接触分析

建立表征定子与动子接触特性的动力学模型,并基于此开展瞬态分析。基于优化后的定子模型,通过设置远程位移点约束来等效模拟预压力作用,考虑到100 V电压驱动下右驱动足的最大法向振幅为5.8 μm,将约束值设定在3~6 μm范围内。在完成三维接触模型的边界条件设置后,针对每个约束值工况执行瞬态分析,重点监测驱动足下表面两侧边线的接触压力分布特性。通过分析接触状态变化曲线,选择最优的位移约束值。

为了准确观测驱动足的接触特性,总时长设定为两个周期,以此来消除初始振动不稳定所带来的影响。通过仿真发现,当约束值为3.5 μm时,如图11所示,两侧驱动足都保持着良好的接触状态。如图12

所示,当约束值为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 时,明显呈现出右驱动足的接触失效特征。经过综合分析可知, $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 的约束值可保证可靠接触,还可以维持适当间隙,将其确定为最优预压力参数。采用相同方法确定 150 V 电压激励下的约束值为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

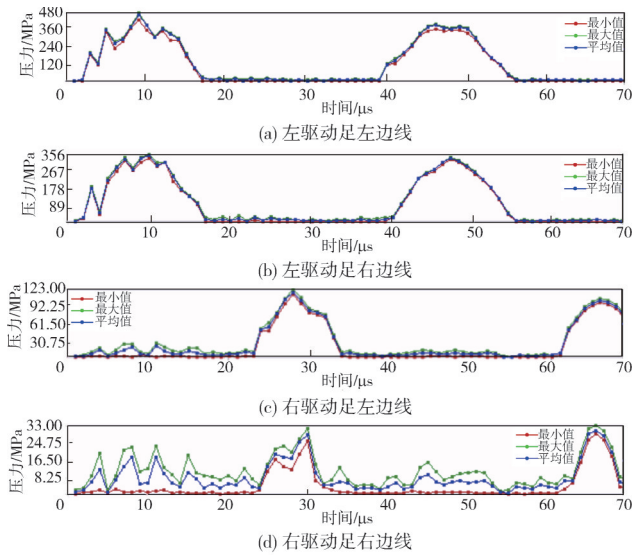


图 11 约束值为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 的仿真结果

Fig. 11 Simulation results with constraint of $3.5\text{ }\mu\text{m}$

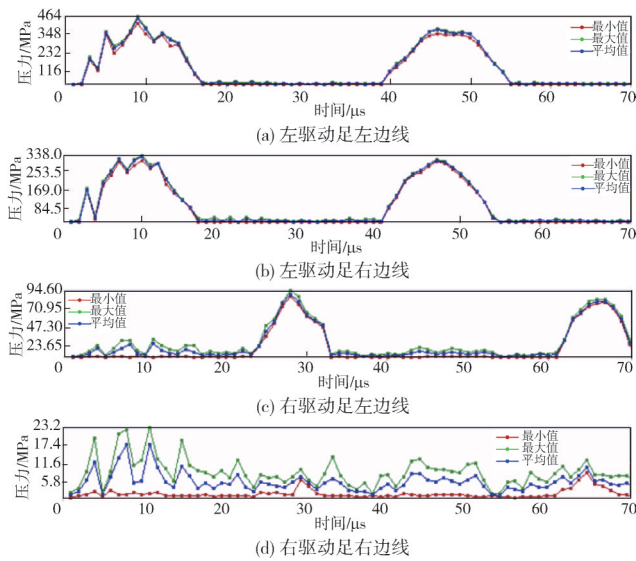


图 12 约束值为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的仿真结果

Fig. 12 Simulation results with constraint of $4\text{ }\mu\text{m}$

在振动周期内,定子之间的接触特性实质是周期性动力学特性:当 $t=0\sim T/4$ 时,定子的法向位移量为 0 ,并且两个驱动足均与动子接触;当 $t=T/4$ 时,弹性基体产生向上的弯曲变形,左侧驱动足此时的位移最大,持续和动子接触,并推动动子向右运动,而右侧驱动足则与动子分离;当 $t=T/2$ 时,定子运动至平衡状态;当 $t=3T/4$

时,弹性基体产生向下的弯曲变形,此时右侧驱动足位移最大,并推动动子继续向右运动,左驱动足抬起分离;当 $t=T$ 时,系统恢复至初始接触状态。这种周期性交替接触机制使得动子被轮流推动,从而输出连续单向的运动,如图 13 所示为工作原理图。

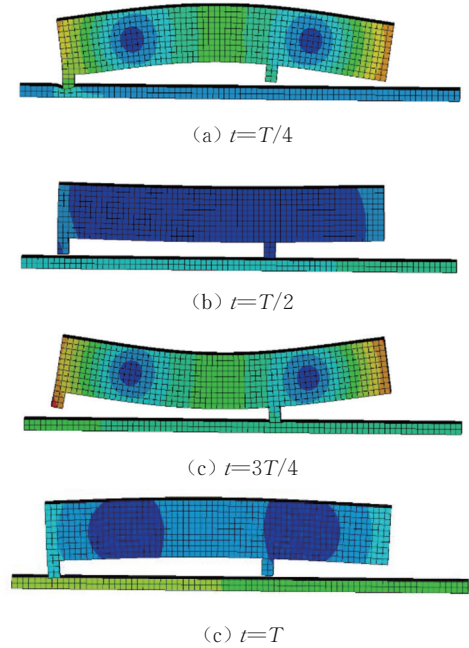


图 13 工作原理图

Fig. 13 Diagram of working principle

2.3.3 负载性能分析

基于优化后的接触模型,借助后处理方式提取动子位移时程曲线,计算平均输出速率,同时分析电压幅值对于输出性能所产生的影响,通过施加等效负载力矩,评估 100 V 激励下的带负载能力。

图 14 所示为动子的位移曲线,当处于 100 V 与 150 V 电压激励作用时,系统呈现出明显不同的运动特性。对初始不稳定周期的数据给予剔除,计算得出稳定工作状态下的平均输出速率,在 100 V 时为 156 mm/s ,在 150 V 时增加至 278 mm/s ,输出速率与驱动电压呈正相关。

在 100 V 工作电压下,通过给动子施加反向作用力的方式来模拟负载工况。如图 15 所示为施加不同负载情况下的仿真结果,当负载处于 $5\sim 10\text{ N}$ 时,系统可以维持稳定的运动输出状态,而当负载超过 10 N 时,位移曲线便开始呈现明显的波动情况,即系统已进入不稳定的工作状态。因此,在 100 V 电压驱动下,该系统最大可以在 10 N 的负载作用下稳定输出。

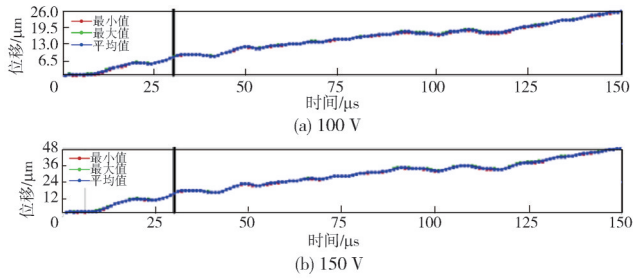


图 14 位移曲线

Fig. 14 Displacement curve

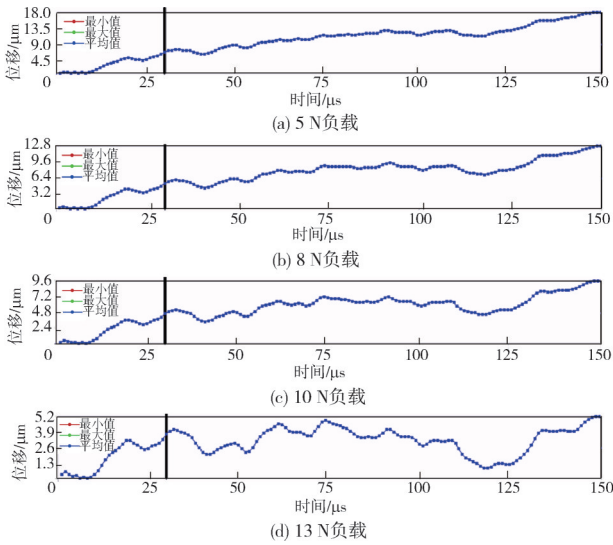


图 15 位移曲线

Fig. 15 Displacement curve

表 3 为 5~10 N 负载下的动子输出速率。基于此仿真结果,确定了该执行器在 100 V 驱动条件下的最大稳定负载能力为 10 N。

表 3 不同负载下的输出速率

Tab. 3 Output rate under different loads

负载/N	5	6	7	8	9	10
输出速率/(mm·s ⁻¹)	99	89	78	67	57	47

3 结论

本文采用弯曲振动方程与有限元数值分析相结合的结构优化方案,系统分析了驻波直线型压电执行器的接触特性与动态性能。在理论建模方面,依据各部件选材标准并考虑驱动足与动子的接触状态,建立了准确的三维动力学模型。瞬态分析中,基于自由梁弯曲振动方程,应用多项式拟合表征定子振动特性,将复杂的压电-机械耦合场问题转化为等效机械激励源,有效提升了计算效率。

仿真结果表明所设计的执行器在 100 V 驱动

电压空载状态下,左、右驱动足的最大法向位移振幅分别为 14 μm 和 7.5 μm,动子平稳输出速度为 156 mm/s 的直线运动。且随驱动电压升高,执行器输出速度增加。在 100 V 电压下,其最大承载能力为 10 N。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 叶文强, 薛春霞. 纵向冲击下弹簧连接的压电层合杆波动分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 530-535.
YE Wenqiang, XUE Chunxia. The wave motion analysis of piezoelectric laminated rod with springs under the longitudinal impact[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(5): 530-535. (in Chinese)
- [2] 王登攀, 向路, 王露, 等. 基于位移放大的压电致动器设计与仿真[J]. 压电与声光, 2024, 46(3): 376-380.
WANG Dengpan, XIANG Lu, WANG Lu, et al. Design and simulation of piezoelectric actuator based on displacement amplification [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2024, 46(3): 376-380. (in Chinese)
- [3] 云浩, 魏绍亮, 原路生, 等. 贴片式复合模态型直线超声电机的仿真与试验评价[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 253-258.
YUN Hao, WEI Shaoliang, YUAN Lusheng, et al. Simulation and experimental evaluation of a bonded-type hybrid modes linear ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(14): 253-258. (in Chinese)
- [4] 彭洪涛, 凌杰, 李成刚, 等. 基于 J-A 模型的压电双晶片执行器非线性建模及验证[J]. 压电与声光, 2025, 47(1): 142-147.
PENG Hongtao, LING Jie, LI Chenggang, et al. Nonlinear modeling and verification of piezoelectric bimorph actuator based on Jiles-Atherton model [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2025, 47(1): 142-147. (in Chinese)
- [5] 孟莹, 薛春霞, 王勋. 压电材料圆形板热弹耦合作用下的主共振[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 495-502.
MENG Ying, XUE Chunxia, WANG Xun. Principal resonance of piezoelectric material circular plates under

- thermoelastic coupling[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 495-502. (in Chinese)
- [6] 陈建毅, 林星陵, 吴庆勇. 多自由度超声电机的研究进展[J]. 微电机, 2023, 56(9): 54-60.
CHEN Jianyi, LIN Xingling, WU Qingyong. Research progress of multi-degree-of-freedom ultrasonic motor[J]. Micromotors, 2023, 56(9): 54-60. (in Chinese)
- [7] TIAN X, LIU Y, DENG J, et al. A review on piezoelectric ultrasonic motors for the past decade: classification, operating principle, performance, and future work perspectives [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 306: 111971.
- [8] 毕卫鹏, 范平清, 张江桥, 等. 新型双驱动足压电机非线性接触模型及其实验研究[J]. 电子器件, 2023, 46(6): 1546-1551.
BI Weipeng, FAN Pingqing, ZHANG Jiangqiao, et al. Research on the nonlinear contact model and experiment of a new binate piezoelectric motor[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(6): 1546-1551. (in Chinese)
- [9] 李响. 驻波型直线超声电机的动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [10] JIANG C, ZHAO Z, LU D, et al. Contact analysis and performance evaluation of ring type traveling wave ultrasonic motors based on a surface contact model[J]. Ultrasonics, 2023, 127: 106851.
- [11] 时梦想, 胡泓, 吴浩, 等. 基于 LSTM 神经网络的压电执行器位移迟滞建模[J]. 压电与声光, 2023, 45(2): 231-238.
SHI Mengxiang, HU Hong, WU Hao, et al. Displacement hysteresis modeling of piezoelectric actuator based on LSTM neural network[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(2): 231-238. (in Chinese)
- [12] 蔡子艺. 基于改进粒子群优化算法的压电执行器迟滞特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [13] 周民瑞, 周振华, 刘鑫, 等. 压电执行器的非对称动态迟滞特性建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 108-120.
ZHOU Minrui, ZHOU Zhenhua, LIU Xin, et al. Modeling of asymmetric dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 108-120. (in Chinese)
- [14] HIRATA H, UEHA S. Characteristics estimation of a traveling wave type ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1993, 40(4): 402-406.
- [15] HAGOOD N W, MCFARLAND A J. Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(2): 210-224.
- [16] TSAI M S, LEE C H, HWANG S H. Dynamic modeling and analysis of a bimodal ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(3): 245-256.
- [17] HE Y, YAO Z, DAI S, et al. Hybrid simulation for dynamic responses and performance estimation of linear ultrasonic motors [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 153: 219-229.
- [18] LI X, KAN C, CHENG Y, et al. Performance evaluation of a bimodal standing-wave ultrasonic motor considering nonlinear electroelasticity: modeling and experimental validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 141: 106475.