

呼吸角补偿行走式压电致动器驱动技术研究

陈云妹¹, 修 瑞²

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²中国科学院上海技术物理研究所第二研究室, 上海

收稿日期: 2025年3月27日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月27日

摘 要

使用行走式压电致动器驱动望远镜整体转向方案是目前空间引力波探测补偿呼吸角变化的主流方案, 分析了行走式压电致动器的致动原理与驱动信号, 研制了一种行走式压电致动器驱动系统, 使用正弦波为驱动电压波形, 利用差分原理减少传统驱动信号量。测试系统各模块输出能力以及在不同频率下行走式压电致动器时间-位移曲线, 分析驱动过程的稳定性。并利用角转换机构的模拟补偿过程, 满足 $\pm 1^\circ$ 补偿行程内仍能获得良好的输出特性。

关键词

空间引力波探测, 呼吸角补偿, 压电驱动, 差分电路

Breathing Angle Compensated Traveling Piezoelectric Actuator Drive Technology Research

Yunmei Chen¹, Rui Xiu²

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Second Research Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Science, Shanghai

Received: Mar. 27th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

The use of walking piezoelectric actuator to drive the overall steering scheme of the telescope is the mainstream scheme to compensate for the change of breathing angle in space gravitational wave detection. The actuation principle and driving signal of the walking piezoelectric actuator are ana-

lyzed, and a driving system of the walking piezoelectric actuator is developed, which uses sinusoidal waveforms as the driving voltage waveforms, and reduces the amount of the traditional driving signals by utilizing the differential principle. The output capacity of each module of the system and the time-displacement curve of the walking piezoelectric actuator at different frequencies are tested to analyze the stability of the driving process. And using the analog compensation process of the angular conversion mechanism to meet the $\pm 1^\circ$ compensation stroke can still obtain good output characteristics.

Keywords

Space Gravitation Wave Detection, Breathing Angle Compensation, Piezo Drivers, Differential Circuits

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

引力波有望区别于传统电磁波探测天文学,为探测宇宙奥秘提供全新视角与探测手段[1]。自 2015 年地面激光干涉仪引力波探测器 LIGO 首次探测到引力波信号以来,各国逐步开展引力波探测器计划,为避免由自然现象或人类活动引起的地面震动噪声干扰激光干涉仪引力波探测器的灵敏度,以欧洲空间局的 LISA、中国科学院的“太极”计划以及中山大学的“天琴”计划为首的空间引力波探测计划[2]使用三颗组成等边三角编队的探测卫星搭设迈克尔逊激光干涉仪绕日飞行,飞行过程中三颗探测器也在其形成的等边三角形平面内围绕三角形中心转动[3]。

由于轨道力学的影响,等边三角形编队的内角,即呼吸角会发生变化($\pm 1^\circ$),这将导致探测器激光轴指向出现偏差,从而影响引力波信号的准确捕捉,需对这一变化进行动态补偿。使用高精度,大输出力,快速响应的行走式压电致动器(Walking Piezoelectric Actuator, WPA)置于探测卫星后端,将望远镜、光学平台以及相关传感器视作一个整体可移动光学组件(Moving Optical Subassembly, MOSA),行走式压电致动器传动杆一端与探测卫星的一组 MOSA 连接,另一端与卫星静态框架相连。MOSA 的中段也使用枢轴固定于卫星静态框架上,使其能在尾部行走式压电致动器的伸缩下绕枢轴转动,从而补偿呼吸角的变化[4]。

使用行走式压电致动器推动 MOSA 整体转动补偿呼吸角方案是目前 LISA 呼吸角补偿设计的主要方案,具有极大的研究潜力。本文针对行走式压电致动器的特性设计驱动器,通过周期性电压波形控制使其输出连续位移。

2. 原理分析

2.1. 行走式压电致动器原理

行走式压电致动器的工作原理是基于压电材料逆压电效应,根据极化方向进行不同方式的堆叠使其产生不同方向上的形变[5]。如图 1 所示,在外部电源对压电堆叠多层电极片进行驱动时,使用极化方向为纵向的压电材料多层堆叠可实现 Z 轴上的伸缩运动;使用极化方向为横向的压电材料多层堆叠可实现 X 轴上的剪切运动。

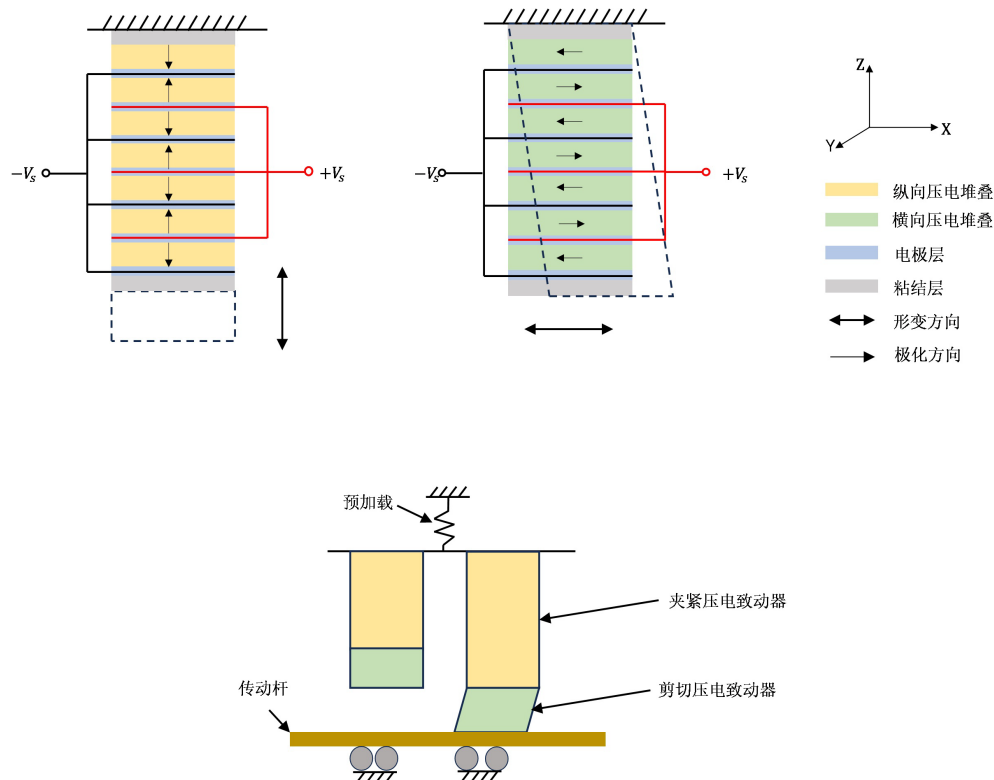


Figure 1. Principle of traveling piezoelectric actuator

图 1. 行走式压电致动器原理

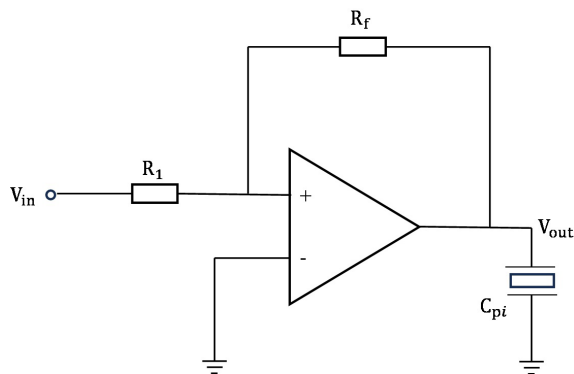


Figure 2. Voltage driver

图 2. 电压驱动

将两种压电堆叠进行上下粘接成为行走式压电致动器的一条压电“腿”，则单腿可实现两个自由度的运动。纵向压电堆叠在 Z 轴上的运动表现为对传动杆的夹紧动作，也称为夹紧压电致动器；横向压电堆叠在 X 轴上的运动表现为对传动杆的剪切运动，也称为剪切压电致动器。行走式压电致动器可简化为四个压电堆叠组成的两组压电腿的协同运动[6]。行走式压电致动器常使用高压运放周期性的驱动压电堆叠，电压驱动回路如图 2 所示，运放直接对输入的控制信号进行线性放大后输入给压电堆叠，在驱动回路中，可将压电堆叠等效为一个电容。此时压电堆叠位移与输入控制信号、运放输出信号间的关系为[7]：

$$x = dV_{out} = d \frac{R_f}{R_1} V_{in} \quad (1)$$

其中 d 为压电堆叠的压电系数。

在行走式压电致动器驱动控制中, 普遍采用如图 3 所示的四通道非对称驱动波形, 这种驱动方式对两组压电腿, 四个压电堆叠分别进行电压波形调控, 也就是说在这种梯形波-三角波驱动下的行走式压电致动器需要 4 路信号[8]。对应于驱动系统中, 需配置 4 路高压放大器以及对应的隔离式 DAC 通道, 这显著增加了系统体积。但在一些空间探测任务中, 星载设备有严苛的约束条件, 此时, 在保证行走式压电致动器正常运行的情况下缩减驱动信号就十分必要。

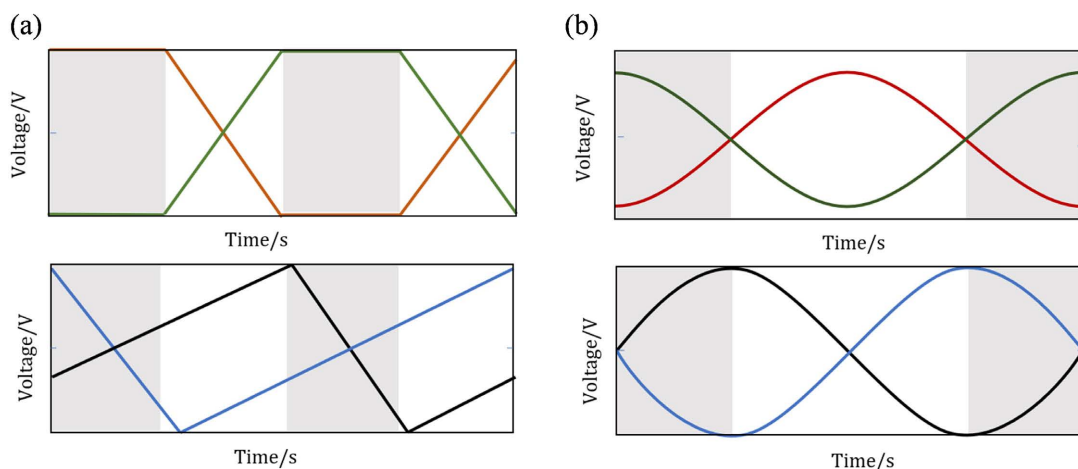


Figure 3. (a) Trapezoidal-rectangular waveform voltage drive waveform; (b) Sine waveform drive waveform

图 3. (a) 梯形-矩形波电压驱动波形; (b) 正弦波驱动波形

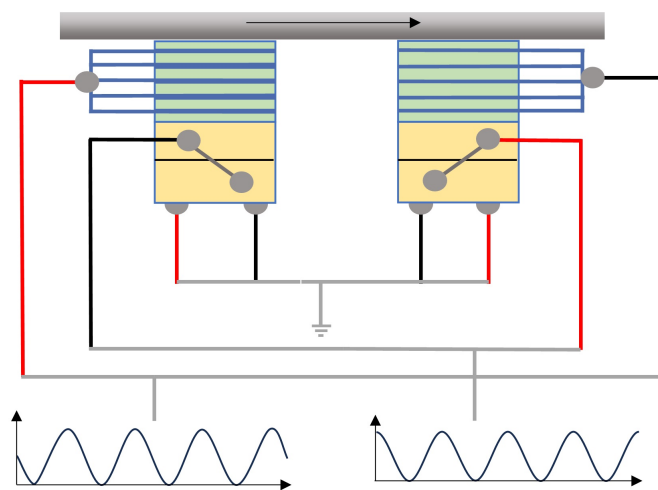


Figure 4. Drive signal differential

图 4. 驱动信号差分

在基于正弦波驱动的行式压电致动器控制框架中, 驱动波形如图 4 所示, 夹紧压电堆叠 1 与夹紧压电堆叠 2 的正弦波驱动信号严格反向(相位差 $\varphi = 180^\circ$), 剪切压电堆叠 1 与剪切压电堆叠 2 的正弦波驱动信号严格反向。单压电腿内部夹紧压电堆叠与剪切压电堆叠正弦波驱动信号相位差 $\varphi = 90^\circ$ 。观察到这一规律, 我们可以对驱动拓扑进行优化。基于差分原理, 将夹紧压电堆叠 1 的正极与夹紧压电堆叠 2 负极并联至功率放大器的同一输出通道上, 同时将夹紧压电堆叠 1 的负极与夹紧压电堆叠 2 正极并联至参考地, 两组剪切压电堆叠接法同理。此时, 可将驱动系统的驱动信号数量缩减的同时保持原有的驱动力。

2.2. 差分驱动原理

前面提到传统驱动需要对四组压电堆叠独立施加电压, 一个行走式压电致动器需要输入四组压电驱动信号, 而差分驱动通过将两个驱动信号间的信号线与参考地反接实现两个信号相位反向, 将驱动通道缩减。假设夹紧堆叠 1 与剪切堆叠 1 的驱动电压分别为:

$$V_{\text{clamp1}} = V_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$V_{\text{shear1}} = V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3)$$

经过信号差分后夹紧堆叠 2 与夹紧堆叠 1 的驱动电压应分别为:

$$V_{\text{clamp2}} = -V_{\text{clamp1}} = -V_m \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$V_{\text{shear2}} = -V_{\text{shear1}} = -V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (5)$$

对于差分驱动信号对单压电堆叠的位移以及驱动力 F 由压电方程可以推导为:

$$S = d_{33} \cdot E = d_{33} \cdot \frac{V}{t_p} \quad (6)$$

$$T = Y \cdot S = Y \cdot d_{33} \cdot \frac{V}{t_p} \quad (7)$$

其中 S 为压电堆叠的应变, T 为压电堆叠产生的应力, E 为外加电场, d_{33} 为压电系数, t_p 为单层压电片和厚度。

压电堆叠驱动力 F 可以表示为:

$$F = T \cdot A = d_{33} \cdot Y \cdot \frac{A}{t_p} \cdot V = K \cdot V \quad (8)$$

其中 K 为驱动力参数, 对于两组压电腿, 两组夹紧致动器与两组剪切致动器驱动力参数不变。因此使用差分驱动信号在驱动信号减少的同时仍能保证驱动力保持不变。

3. 方案设计与实现

3.1. 系统结构设计

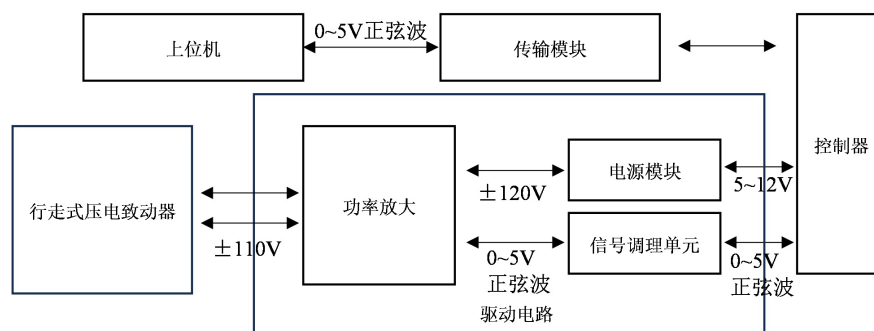


Figure 5. Block diagram of drive system

图 5. 驱动系统框图

本次设计的被驱动对象为八足行走式压电致动器(重庆巛慧科技 YDDJ-01.080-2 型), 八足间如上述分析一样仍分为两组压电腿的协同运动, 八足分为上下两层, 同一平面对角线压电腿动作一致, 上下对

称压电腿动作一致。行走式压电致动器夹紧压电堆叠等效电容 55 pf, 夹紧压电堆叠等效电容 24 pf, 驱动器等效电容为 632 pF/axis $\pm 20\%$ 。驱动系统由上位机、传输模块、控制器以及驱动电路构成, 驱动系统结构框图如图 5 所示。

驱动电路工作流程为上位机生成两路相位差 90° 的正弦波信号(0~5 V), 通过传输模块与控制器模块输入至驱动电路中, 正弦波信号经过信号调理模块缓冲、滤波后输入功率放大模块。高压电源模块输出 ± 120 V 为功率放大模块供电。功率放大模块 PA79DK 将信号放大至 ± 110 V, 通过差分连接方式(夹紧堆叠 1 正极与夹紧堆叠 2 负极并联)驱动压电腿。其中驱动电路主要由信号调理模块、功率放大模块、高压电源模块组成。信号调理模块采用 OP27 运放搭建电压跟随器与二阶低通滤波器(截止频率 10 kHz), 输入信号幅值信号 0~5 V, 输出阻抗 $< 1 \Omega$ 。功率放大模块基于 PA79DK 高压运放, 输入 0~5 V, 差模增益 A_d 为 44, 输出电压为 ± 110 V。高压电源模块采用 LT3757 反激拓扑, 输入 5~12 V, 变压器匝数比 1:10, 输出 ± 120 V。

3.2. 硬件主要模块

功率放大模块和电源模块为驱动系统的核心单元[9], 其是否能满足足够大的功率关系着行走式压电致动器是否能被驱动, 电源模块主要为功率放大模块供电, 因行走式压电致动器的驱动电压为高压, 为保证功率放大模块输出足够的电压值, 电源模块要保证其输出的工作电压大于驱动电压范围。

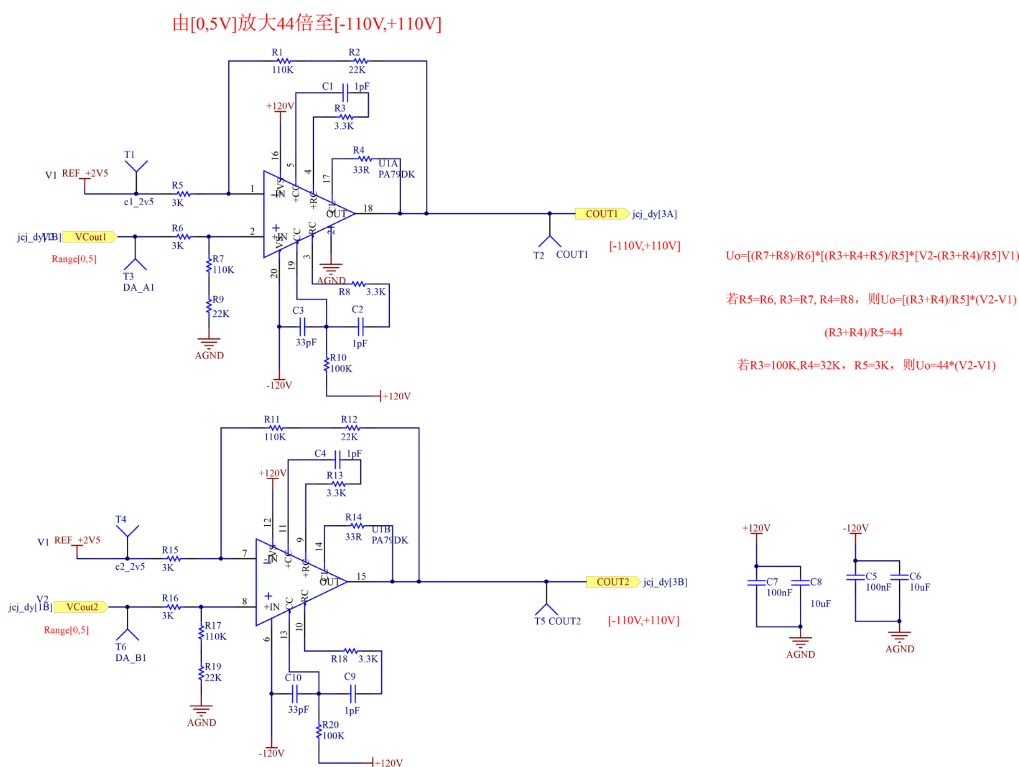


Figure 6. Power amplifier modules
图 6. 功率放大器模块

功率放大模块设计采用 APEX 公司的 PA79DK, 其采用非对称供电方式, 供电电压范围宽, 能够实现输出电压 ± 200 V 的高幅值。同时可持续输出电流达 50 mA, 峰值输出电流达 200 mA。此外 PA79DK 也具备高达 350 V/us 的摆率, 确保在 ± 110 V 电压这种大信号条件下, 快速增加动态电流实现 500 kHz 的

工作频率, 从而提供快速的信号响应, 满足高动态性能的需求。它还具有出色的电源电压抑制比, 能够有效减少电源噪声和波动对输出信号的干扰。其具备的卓越的高压输出能力, 不仅实现了输入信号的高精度功率放大, 还保证了在高压大电流工作条件下的稳定性和可靠性。其高输出电压能力能够直接驱动压电堆叠产生所需的位移和力, 从而精确控制行走式压电致动器的行为。

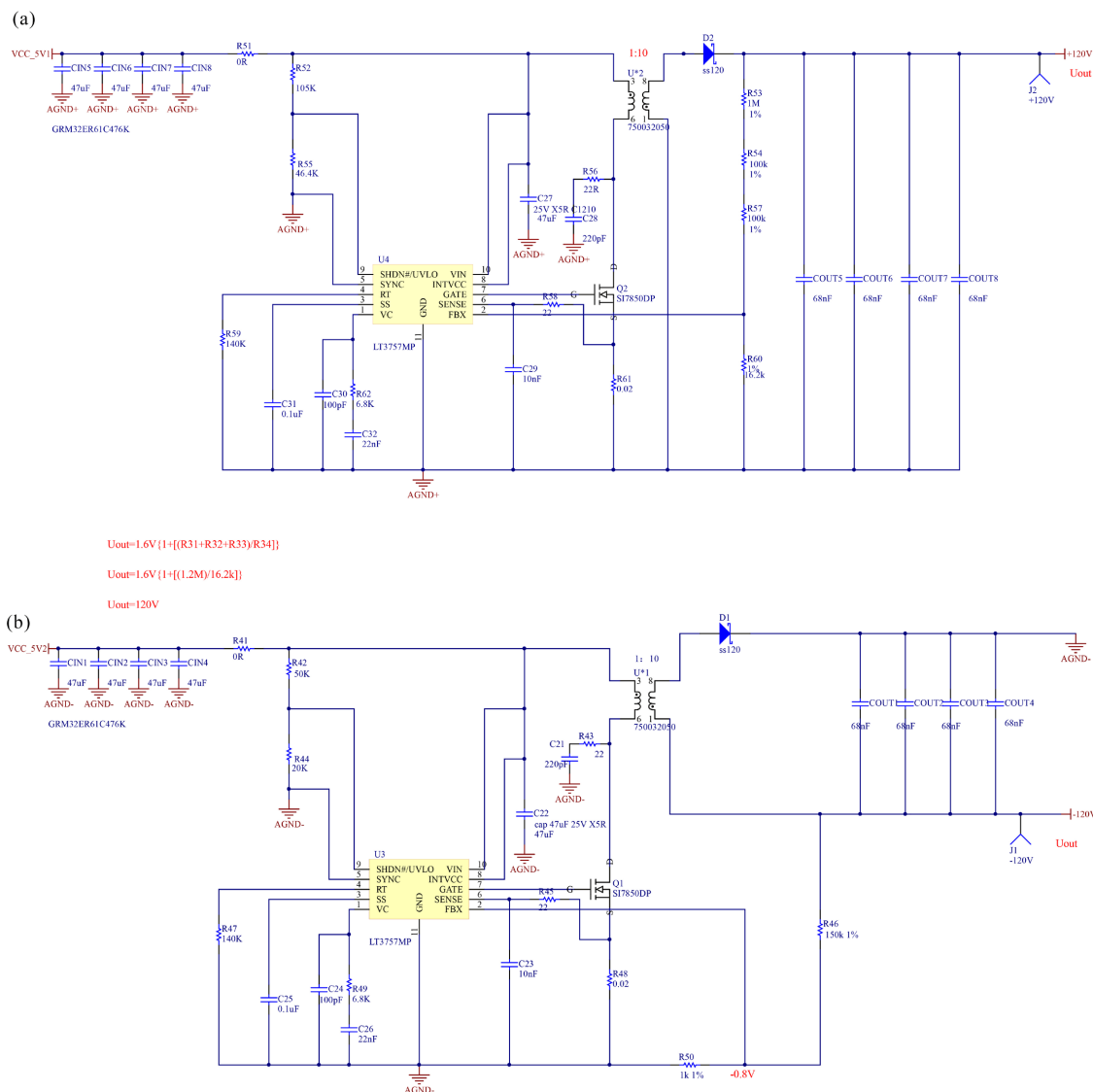


Figure 7. (a) +120V output; (b) -120V output
图 7. (a) +120V 输出; (b) -120 V 输出

功率放大电路采用差分放大器设置, 使用两个输入信号, 放大其差值电压。如图 6 所示, 放大器反相输入固定参考电压 2.5 V, 正相输入 0~5 V 信号, 其差值为正向输入电压与反相输入电压作差, 差值为 -2.5~2.5 V 通过功率放大电路放大至 -110~+110 V, 其功率放大模块差模增益 A_d 为:

$$A_d = \frac{V_{out}}{(V_2 - V_1)} = \frac{R_f}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_5} = 44 \quad (9)$$

电源模块的设计关键是需要满足足够宽的电压生成范围以及保证输出电压的稳定性。采用 ADI 公司

的高压 DC-DC 转换模块的 LT3757MP, 其可通过不同的拓扑结构, 如 boost、flyback、SEPIC 和 inverting 转换器等灵活的生成正负输出电压, 最大输出能力为 350 V/10 mA, 满足 PA79 高压功率运算放大器的工作电压需求, 提供稳定的电源供应。

如图 7 所示, 使用 LT3757 模块组成高压反激式电源[10], 主要部件有变压器、开关管、整流二极管、输出电容等。变压器负责实现电压转换和电气隔离; 开关管通常采用 MOSFET, 用于控制变压器初级绕组的电流; 整流二极管将变压器次级绕组的交流电压整流为直流电压; 输出电容则用于平滑输出电压, 降低纹波。高压反激电源的工作过程分为导通阶段和关断阶段。在导通阶段, 开关管导通输入电压施加于变压器的初级绕组上, 能量以磁场形式存储在变压器中; 而在关断阶段, 开关管断开变压器初级绕组的磁场能量传递到次级绕组, 次级绕组产生感应电压经过整流二极管和输出电容的平滑处理后, 最终得到稳定的直流输出电压。

LT3757 组成的高压反激式电源输出正压和负压原理一致, 使用电阻分压网络将反馈引脚(FBX)拉至 1.6 V 输出正压, 或者拉至 -0.8 V 输出负压。其输出电压可以表示为:

$$V_{\text{out, positive}} = 1.6 \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) + 1.6 \left(1 + \frac{R_{53} + R_{54} + R_{57}}{R_{60}} \right) \quad (10)$$

$$V_{\text{out, negative}} = -0.8 \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) = -0.8 \left(1 + \frac{R_{64}}{R_{50}} \right) \quad (11)$$

信号调理单元使用运算放大器 OP27 搭建电压跟随器和低通滤波器作为功率放大前的缓冲与隔离, 同时保证了功率放大单元的输入信号质量。

3.3. 上位机设计

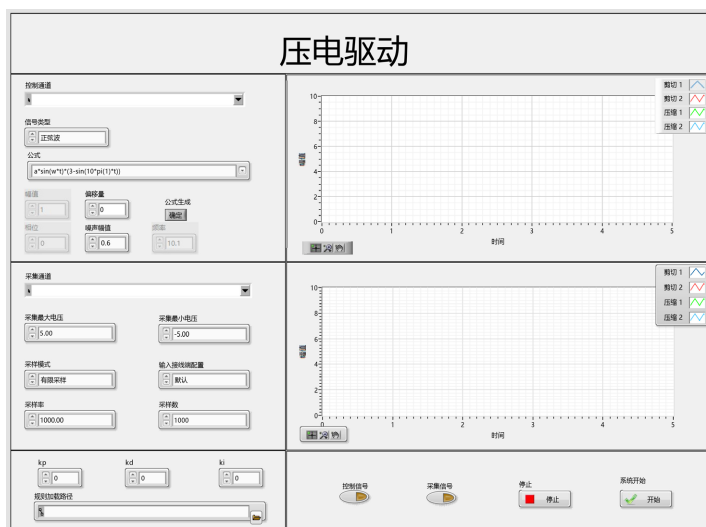


Figure 8. LabVIEW interfaces

图 8. LabVIEW 上位机界面

系统上位机使用图形化编程工具 LabView 建立可视化控制界面[11], 如图 8 所示, 该界面主要包括波形信号发生模块、参数设置模块、启停模块以及模糊 PID 控制参数设置模块。在波形信号发生模块设置驱动电压正弦波的幅值、相位以及频率等, 通过数据采集卡产生所需电压信号波形, 通过驱动系统进行功率放大到行走式压电驱动器所需驱动电压。

使用位移传感器进行位移实时反馈到控制系统中, 计算测量位移 $y(t)$ 与期望位移 $r(t)$ 之间的偏差 $e(t)$ 到 PID 控制器中, 其时域表达式为:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (12)$$

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^t e(j) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (13)$$

其中 $u(t)$ 为 PID 控制器的输出值, K_p 为比例增益, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间, T 为采样增益。

结合了模糊逻辑的模糊 PID 控制, 使用模糊规则来调整 PID 参数, 其过程包括模糊化、模糊控制和解模糊化[12]。基本原理图如图 9 所示:

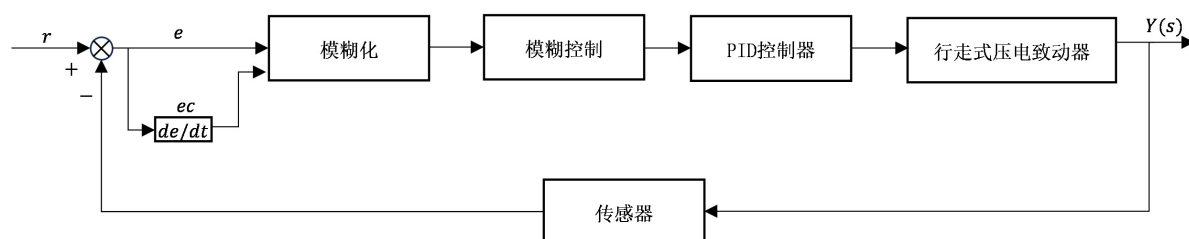


Figure 9. Fuzzy PID control principle

图 9. 模糊 PID 控制原理

其中 r 为设置值, e 和 ec 分别为误差以及误差变化率。

模糊 PID 控制器与普通 PID 控制器仿真原理[13]对比如图 10 所示, 上位机通过加载模糊规则与 LabView 自带 PID 控制器组成模糊 PID 控制器。

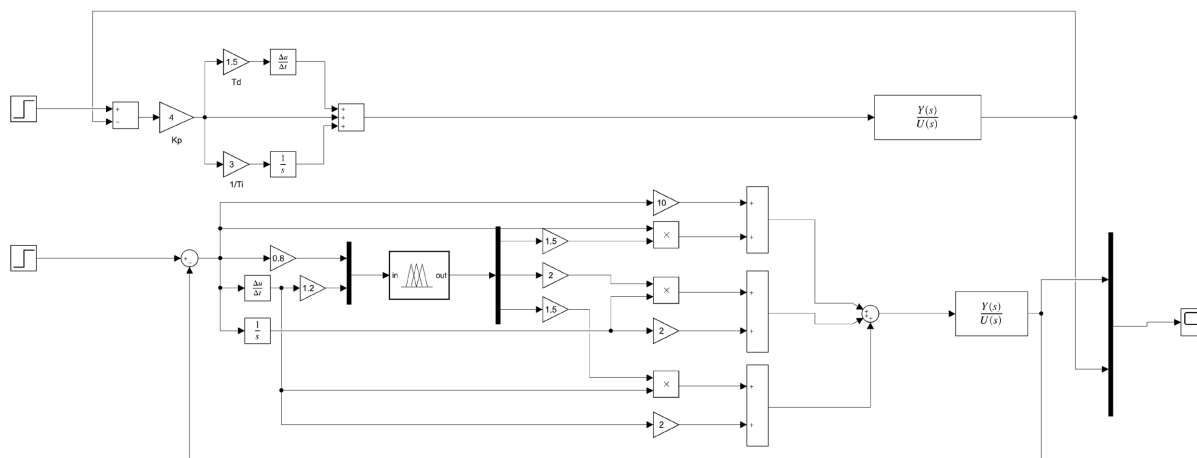


Figure 10. Fuzzy PID and Normal PID

图 10. 模糊 PID 与普通 PID

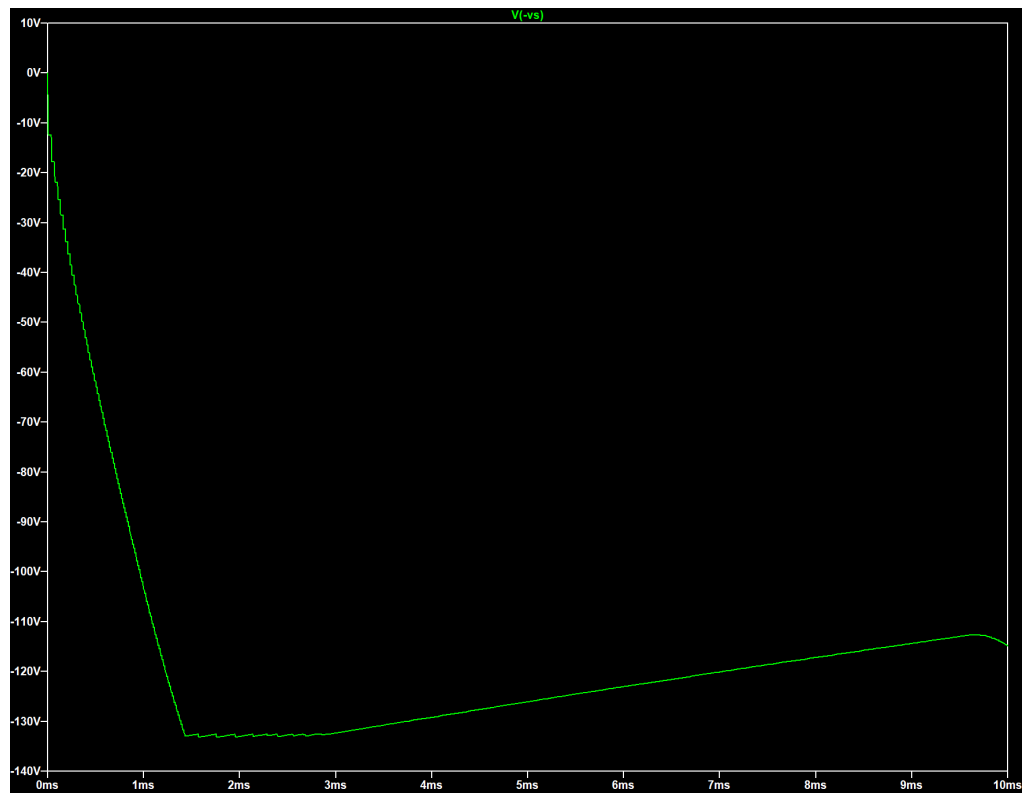
4. 行走式压电致动器驱动测试

对 LT3757 组成的正、负反激式高压电源分别输入 5 V 参考电压, 通过调节外部电阻分压网络将反馈引脚 FBX 分别拉至 1.6 V 输出 +120 V 电压, 以及拉至 -0.8 V 输出 -120 V 电压。结果如图 11 所示。

使用 LT3757 电源模块为功率放大 PA79 模块供电, 功率放大模块正相端输入 0~5 V 正弦信号, 频率 1 Hz, 反相端输入 2.5 V 参考电压, 通过电阻比值生成如图 12 所示 ± 110 V 正弦波驱动电压。



(a)



(b)

Figure 11. Power module output
图 11. 电源模块输出

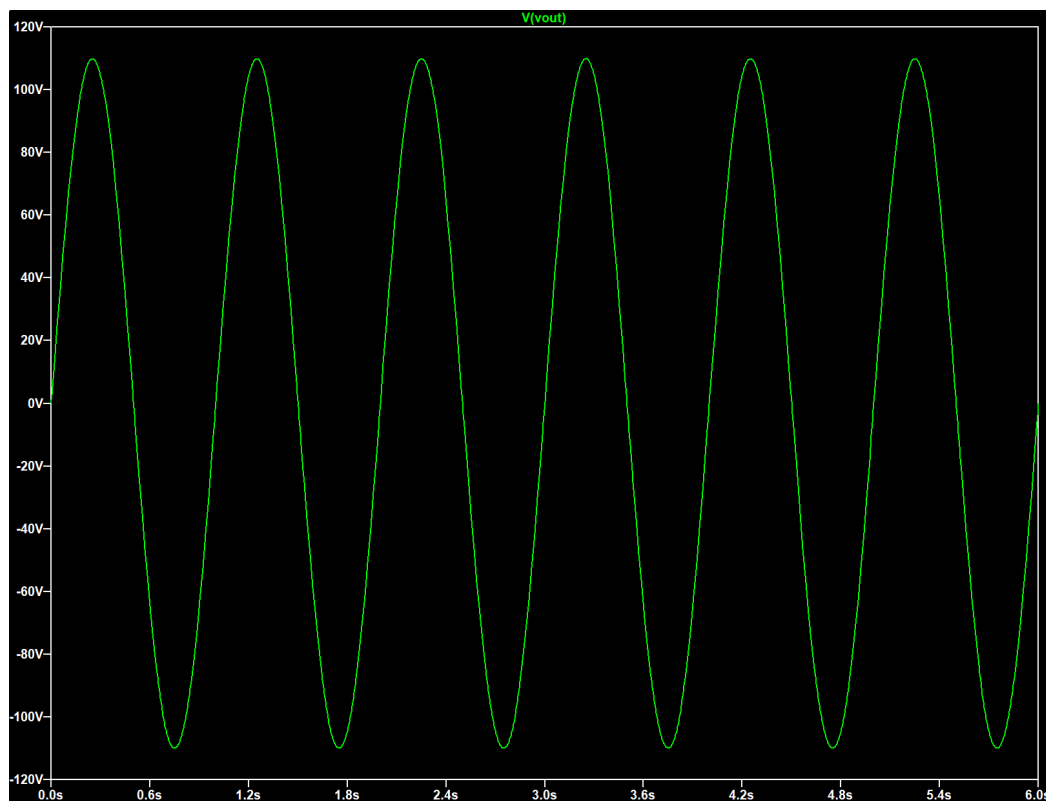


Figure 12. Power amplifier module output

图 12. 功率放大模块输出

在上位机信号发生平台设置如图 3 所示正弦波, 分别正弦波频率为 10 Hz、1 Hz 对行走式压电致动器进行测试, 使用激光位移测距仪对其位移进行监测。如图 13 所示:

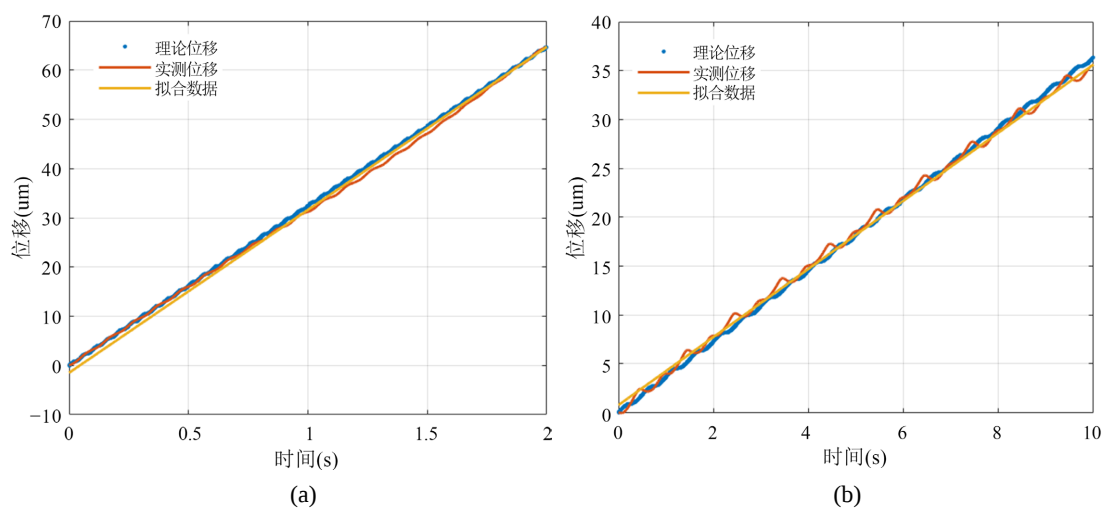


Figure 13. (a) 10 Hz traveling piezo actuator displacement; (b) 1 Hz traveling piezo actuator displacement

图 13. (a) 10 Hz 行走式压电致动器位移; (b) 1 Hz 行走式压电致动器位移

可以看出在减少信号输入, 使用夹紧致动器 1 正极与夹紧致动器 2 负极进行对接, 夹紧致动器 1 负极与夹紧致动器 2 正极对接, 切变陶瓷同理正负对接的情况下行走式压电致动器仍然保持良好的性能。

为模拟行走式压电致动器呼吸角补偿过程, 使用角转换机构将行走式压电致动器的直线位移转换为角位移。如图 14 所示, 角转换机构为带反射镜的柔性铰链, 行走式压电电机推动角转换机构摆臂, 带动摆臂前端反射镜的旋转。使用 ELCOMAT 3000 型号的自准直仪对角转换机构反射镜的旋转角度进行测量。

经系统测试, 在行走式压电致动器使用正弦波进行驱动过程中, 满足角转换机构反射镜 $\pm 1^\circ$ 旋转, 行走式压电致动器行程为 15 mm, 这次行程中, 行走式压电致动器性能完好。

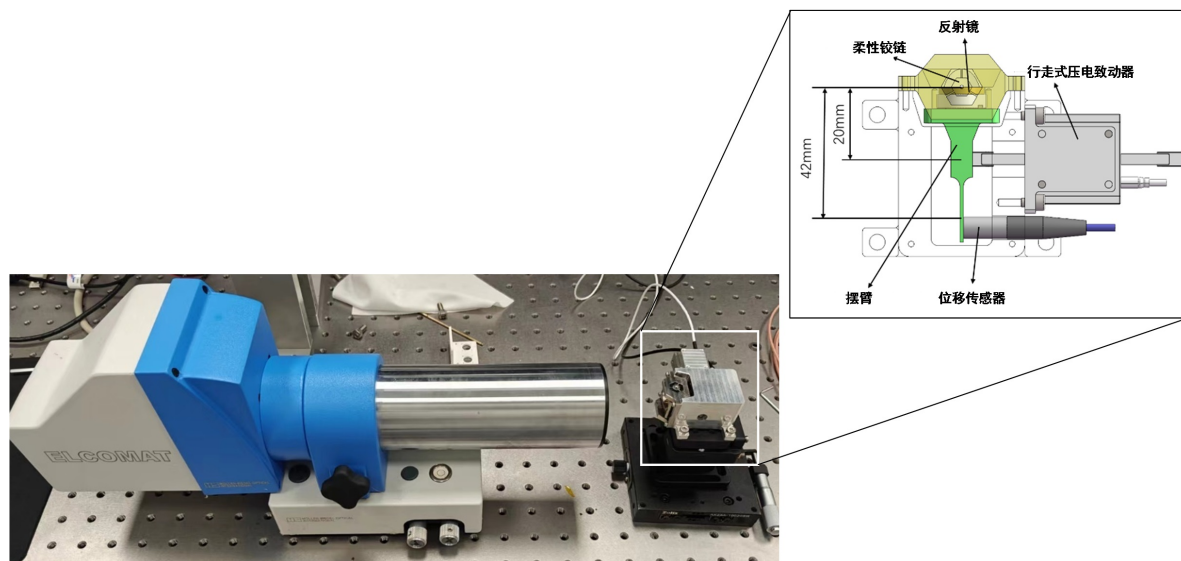


Figure 14. Traveling piezo actuator breathing angle compensation test system

图 14. 行走式压电致动器呼吸角补偿测试系统

5. 结论

本文基于空间引力波探测呼吸角补偿的行走式压电致动器设计驱动系统进行测试, 使用正弦波电压驱动波形将驱动系统输出信号减半, 在呼吸角补偿全行程下, 驱动性能稳定。

参考文献

- [1] 朱伟舟, 谢永, 贾建军, 等. 空间引力波探测超前瞄准机构研制与测试[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 105-112.
- [2] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
- [3] 倪维斗. 空间引力波探测现状与展望[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2024, 54(7): 2-63.
- [4] Berger, M., Schulte, H.R., Gath, P., Weise, D., Marenaci, P., Weimer, P., et al. (2017) Opto-Mechanical Architecture of the LISA Instrument. *International Conference on Space Optics—ICSO 2008*, Toulouse, 14-17 October 2008, 1-7. <https://doi.org/10.1117/12.2308192>
- [5] Kang, H., Li, Z., Sun, Y., Yu, Q. and Yang, X. (2024) Model of the Longitudinal-Shear Piezoelectric Inchworm Motor in Shear Movement. *International Journal of Mechanical Sciences*, **269**, Article 109033. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109033>
- [6] Cai, J., Chen, F., Sun, L. and Dong, W. (2021) Design of a Linear Walking Stage Based on Two Types of Piezoelectric Actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, **332**, Article 112067. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112067>
- [7] 闫泽昊, 周子夜, 李杨, 等. 空间引力波望远镜超前瞄准机构致动器电荷驱动位移行为研究[J]. 光电工程, 2023, 50(11): 100-112.
- [8] Aarnoudse, L., Strijbosch, N., Tacx, P., Verschueren, E. and Oomen, T. (2023) Compensating Commutation-Angle Domain Disturbances with Application to Waveform Optimization for Piezo Stepper Actuators. *Mechatronics*, **94**, Article

103016. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103016>

- [9] 鲁倩, 任斌, 边晶莹, 等. 激光通信压电陶瓷型精跟踪机构驱动技术[J]. 空间电子技术, 2017, 14(3): 38-41.
- [10] 崔庆林, 李永. 基于 Sepic 和 Flyback 混合拓扑的辅助电源设计[J]. 微电子学, 2024, 54(1): 104-109.
- [11] 甘晓明, 张臣, 石晗. 基于 LabVIEW FPGA 的压电迟滞补偿控制研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 117-124.
- [12] 李冲, 沈亮, 方记文, 等. 基于模糊控制的柔性耦合梁压电主动抑振研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2024, 38(1): 49-54.
- [13] 王金星, 石邵军, 刘双喜, 等. 基于模糊 PID 的路径跟踪控制系统[J]. 计算机科学与应用, 2020, 10(3): 529-540.