

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 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

闫泽昊, 周子夜, 李杨, 周虹, 黄林海, 顾乃庭, 饶长辉

#### 引用本文:

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): 230223.

Yan Z H, Zhou Z Y, Li Y, et al. Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230223.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230223>

收稿日期: 2023-09-06; 修改日期: 2023-11-10; 录用日期: 2023-11-13

## 相关论文

### 微结构薄膜望远镜研究进展分析

杨伟, 吴时彬, 汪利华, 范斌, 罗先刚, 杨虎

光电工程 2017, 44(5): 475 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.001

### 压电陶瓷驱动器迟滞非线性建模及逆补偿控制

刘鑫, 李新阳, 杜睿

光电工程 2019, 46(8): 180328 doi: 10.12086/oe.2019.180328

### 角钢结构光纤光栅位移传感器的研究

谢凯, 谭滔, 穆博鑫, 段超, 李卓枢, 孟怡晨, 吕中宾, 魏建林, 田野, 柴全, 刘艳磊, 张建中, 杨军, 苑立波

光电工程 2018, 45(9): 180106 doi: 10.12086/oe.2018.180106

### 电荷累加型TDICMOS探测器测试方法研究

梁楠, 张斐然, 蔡帅, 李博, 李涛

光电工程 2019, 46(8): 180504 doi: 10.12086/oe.2019.180504

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230223

# 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

闫泽昊<sup>1,2,3</sup>, 周子夜<sup>2,3</sup>, 李杨<sup>2,3</sup>, 周虹<sup>2,3</sup>,  
黄林海<sup>1,2,3</sup>, 顾乃庭<sup>1,2,3\*</sup>, 饶长辉<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

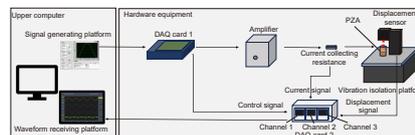
<sup>3</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

**摘要:** 超前瞄准机构 (PAAM) 是空间引力波探测望远镜的关键部件, 其主要通过给压电致动器输入电压或电荷精确控制位移量, 实现对望远镜高精度角度控制。因此, 压电陶瓷致动器位移响应直接影响超前瞄准机构指向控制性能。本文提出等效电容量计算方法定量分析压电致动器在电荷驱动下的位移响应特性, 并通过数值模拟仿真和实验验证等方式验证了计算方法的准确性和可行性。结果表明: 在使用幅值 5 V、频率 0.05 Hz~5 Hz 的正弦波信号控制的电荷放大器驱动某型号压电致动器时, 采用本文方法分析结果与实验结果相比, 二者位移响应最大偏差小于 1.35%, 为空间引力波探测望远镜超前瞄准机构的高精度指向控制提供了可能的分析方法和实现途径。

**关键词:** 压电致动器; 迟滞非线性; 电荷驱动法; 非线性电容

**中图分类号:** O439

**文献标志码:** A



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): 230223

Yan Z H, Zhou Z Y, Li Y, et al. Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230223

## Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope

Yan Zehao<sup>1,2,3</sup>, Zhou Ziyue<sup>2,3</sup>, Li Yang<sup>2,3</sup>, Zhou Hong<sup>2,3</sup>, Huang Linhai<sup>1,2,3</sup>,  
Gu Naiting<sup>1,2,3\*</sup>, Rao Changhui<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

收稿日期: 2023-09-06; 修回日期: 2023-11-10; 录用日期: 2023-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2202200, 2021YFC2202204); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目 (Y2022097)

\*通信作者: 顾乃庭, gunaiting@ioe.ac.cn.

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

**Abstract:** The point ahead angle mechanism (PAAM) is a key component of the space gravitational wave detection telescope. It can control the displacement of the telescope precisely by inputting voltage or charge to the piezoelectric actuator. Therefore, the displacement response of the piezoelectric ceramic actuator directly affects the pointing control performance of the PAAM. In this paper, the equivalent capacitance calculation method is proposed to quantitatively analyze the displacement response characteristics of piezoelectric actuators driven by charge, and the accuracy and feasibility of the calculation method are verified by numerical simulation and experimental verification. The results show that when a charge amplifier controlled by 5 V, 0.05 Hz~5 Hz sine wave signal is used to drive a certain type of piezoelectric actuator, the maximum deviation of displacement response between the analysis results and the experimental results is within 1.35%, which provides a possible analysis method and realization way for the high-precision pointing control of the PAAM of the space gravitational wave detection telescope.

**Keywords:** piezoelectric actuators; hysteretic nonlinearity; charge drive method; nonlinear capacitance

## 1 引言

LIGO (Laser interferometer gravitational-wave observatory) 于 2015 年观测到两个黑洞合并时产生的引力波信号, 直接证明了广义相对论对引力波的预言<sup>[1]</sup>, 同时也打开了一扇天文观测的新窗口。相比于地基引力波观测台, 空间引力波探测能够避开地表附近低频噪声、实现更长的臂长, 从而能够探测 1 Hz 甚至更低频率的引力波<sup>[2]</sup>。目前, 正在开展的空间引力波探测计划主要包括欧洲航空局的 LISA<sup>[3]</sup>、我国“天琴计划”<sup>[4]</sup>以及“太极计划”<sup>[5]</sup>, 他们均通过在空间搭建激光干涉仪探测自由运动验证质量块 (proof mass) 之间距离的变化, 进而获得引力波信息<sup>[6]</sup>。空间引力波探测一般需要三组星载望远镜组成三角形星座, 为了实现微弱引力波信号探测, 三个星座间组成干涉仪的臂长一般长达数十甚至数百万公里, 而距离的绝对测量精度需要达到皮米量级<sup>[7]</sup>。超远距离带来的不仅是距离测量困难, 由于激光光束指向偏差会带来等效的相位误差, 对于达到数万公里的干涉长度, 要求实现 nrad 级的超高精度指向控制, 同时给三组星载望远镜之间的高精度跟瞄也带来了极大挑战。超前瞄准机构 (the point ahead angle mechanism, PAAM)<sup>[8]</sup>应运而生, 其被放置于星载望远镜光学平台上, 提供各组望远镜超前角度修正, 校正“呼吸角”等引起的跟瞄误差。超前瞄准机构本质上是一种高精度激光光束指向机构, 国内外不同空间引力波探测研究团队对其进行了深入研究: 2009 年 Henein<sup>[9]</sup>等基于两套压电陶瓷致动器为 LISA 引力波探测任务设计了一高冗余驱动、高稳定性的高精度指向校正机构, 指向范

围达到 $\pm 1000 \mu\text{rad}$ 、指向精度达到  $0.14 \mu\text{rad}$ ; 2010 年 Rijnveld<sup>[9]</sup>等为 LISA 设计了另一种超前瞄准机构, 设计了一种压电陶瓷致动器驱动、以 Haberland 铰链为柔性支撑机构的高精度反射镜, 指向范围达到 $\pm 421 \mu\text{rad}$ 、指向稳定性达到  $8 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ ; 2023 年朱伟舟<sup>[7]</sup>等人为我国空间引力波探测任务设计了一套超前瞄准机构, 其采用柔性铰链与杠杆相结合的结构, 并在压电陶瓷致动器的驱动下实现  $709 \mu\text{rad}$  偏转范围、 $0.44 \mu\text{rad}$  指向精度。在上述典型的 PAAM 机构中, 压电陶瓷致动器是其核心组成部分, 其性能好坏直接决定了超前瞄准机构的偏转范围、指向精度、指向稳定性等各项关键性能。压电陶瓷致动器 (piezoelectric actuators, PZA) 一般由多个压电陶瓷晶圆堆叠而成, 利用其逆压电效应在外部电压的激励下产生位移响应<sup>[10]</sup>, 带动超前瞄准机构内部结构产生形变并最终使反射镜偏摆, 实现对空间引力波探测望远镜的高精度指向跟瞄。相比于机电式致动器, 压电陶瓷致动器具有分辨率高、频带宽、效率高、驱动力大、结构紧凑等优点, 在高精度位移等领域得到广泛应用<sup>[11]</sup>。

然而, 目前空间引力波探测 PAAM 中的压电致动器均采用电压放大器作为激励信号源, 压电陶瓷在电压驱动下的迟滞特性使压电致动器产生非线性响应<sup>[12]</sup>, 这会引起 PAAM 对激光光束指向控制过程中出现指向误差与指向抖动问题, 从而大大降低 PAAM 性能。在 PAAM 中, 一般在电压驱动的基础上采用高分辨力位移传感器做闭环控制<sup>[13]</sup>, 但 PAAM 亚纳弧度的角位移对传感器性能要求极高, 同时引入位移传感器会使系统过于复杂。为提升 PAAM 性能,

需对压电致动器位移响应行为建立准确的数学建模<sup>[14]</sup>, Bruno<sup>[15]</sup>针对干涉仪的开环控制提出一种基于 Prandtl-Ishlinskii 迟滞算子的模型, 在 1.8 μm 的行程内, 模型的最大误差不超过 15 nm。高源蓬<sup>[16]</sup>建立的 Duhem 非对称迟滞模型能有效描述压电执行器非对称迟滞滞滞曲线, 模型输出与位移响应之间拟合相对误差为 0.79% (0.5 Hz); Iyer<sup>[17]</sup>利用 Preisach 模型对位移响应进行建模, 使用自适应算法来有效地近似求解 Preisach 模型, 对于 1 Hz 正弦信号跟踪, 在 60 μm 的行程下存在 ±0.5 μm 的误差。但是, 以上方法都是在电压驱动的基础上进行的, 由于压电陶瓷位移响应的复杂性, 还需要进一步深入研究。电荷驱动法从压电陶瓷位移响应与激励电荷成线性关系这一特性出发实现压电致动器的高线性度驱动, 是一种值得尝试的方法, 该方法最早由 Main<sup>[18]</sup>提出, 用于 NASA NAOMI 项目中提升反射镜在数个致动器驱动下的响应线性度。如果能对电荷驱动下的位移响应行为做出定量分析, 对于实现空间引力波探测望远镜超前瞄准机构的高精度指向控制具有重要意义。

基于以上背景, 本论文提出基于等效电容计算方法来定量分析压电致动器在电荷驱动下的位移响应特性, 并通过数值模拟仿真和实验验证等方式验证了计算方法的准确性和可行性。结果表明: 在使用幅值 5 V、频率 0.05 Hz~5 Hz 正弦波信号控制的电荷放大器驱动某型号压电致动器时, 采用本文方法分析结果与实验结果相比, 二者位移响应最大偏差小于 1.35%, 为空间引力波探测望远镜超前瞄准机构的高精度指向控制提供了可能的分析方法和实现途径。本文第二节对空间引力波探测星载望远镜中超前瞄准机构基本原理进行详细阐述, 并对致动器在电荷驱动与电压驱动下位移响应线性度等特性进行了深入对比分析; 第三节深入分析了电荷驱动压电致动器的位移响应特性, 并基于对压电致动器等效电容分析结果建立致动器位移响应模型; 第四节阐述了实验验证方案, 并给出了实验结果, 验证方法正确性; 论文第五节对全文进行了总结。

## 2 基于电荷驱动压电致动器的超前瞄准机构基本原理

### 2.1 星载引力波探测望远镜中超前瞄准机构工作原理

用于空间引力波探测的星载望远镜由激光干涉仪

与望远镜两部分组成, 其中激光干涉仪来探测两个自由悬浮的验证质量块之间距离的变化, 望远镜的功能是将激光光束从一个航天器传送到另一个航天器<sup>[19]</sup>。如图 1(a) 所示, 为了调节激光干涉仪发射光光束的角度, 可变形的超前瞄准机构 PAAM 被放置在激光干涉仪内部的激光发射路径的瞳孔平面<sup>[20-21]</sup>, PAAM 通过反射镜产生一个超高精度的偏摆角, 使得远端望远镜能够准确接收到光束以完成星间激光干涉。尽管不同团队设计的 PAAM 不同, 但是所设计的结构都是为了实现压电致动器的位移形变  $\Delta\delta$  与镜面倾斜角  $\alpha$  的线性转换<sup>[22]</sup>, 图 1(b) 为压电陶瓷致动器驱动下的 PAAM 基本工作原理, 放大器对两个压电致动器施加大小相同、正负相反的激励信号, 两个致动器产生位移  $\pm\Delta\delta$ , 镜面产生倾角  $\alpha$ , 致动器位移与镜面倾角存在如下关系:

$$\alpha = \frac{\Delta\delta}{L}, \quad (1)$$

式中:  $L$  是两压电致动器固定间距, 因此镜面倾角  $\alpha$  和位移响应  $\pm\Delta\delta$  呈线性关系。目前空间引力波探测 PAAM 中的压电致动器均采用电压放大器驱动, 由于电压驱动下压电致动器存在迟滞效应, 其迟滞效应所带来的位移响应  $\Delta\delta$  的非线性将直接传递给指向角  $\alpha$ , 压电致动器的位移响应非线性会严重影响引力波探测望远镜中 PAAM 的指向精度。电荷驱动能有效避免压电致动器的迟滞特性带来的非线性响应, 因此研究

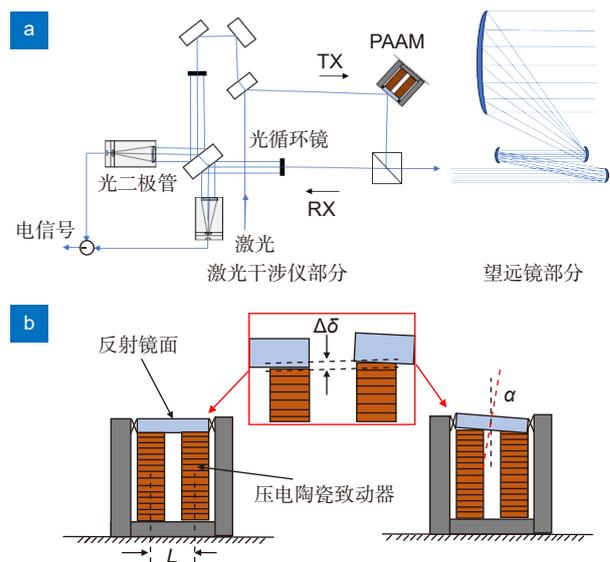


图 1 星载望远镜中超前瞄准机构基本原理。(a) 星载望远镜基本原理; (b) 超前瞄准机构基本原理

Fig. 1 The principle of PAAM in spaceborne telescopes. (a) Basic principle of spaceborne telescope; (b) Basic principle of PAAM

电荷驱动下压电致动器的位移响应行为, 对于实现空间引力波探测望远镜超前瞄准机构的高精度指向控制具有重要意义。

### 2.2 压电致动器的电压驱动和电荷驱动方式

由于压电陶瓷致动器在电压电荷两种类型的放大器驱动下位移响应线性度不同, 这里对两种放大器与压电致动器构成的驱动系统进行分析。由于压电陶瓷致动器本质上是由极板与电介质组成的器件, 在对其进行电学分析时, 普遍的做法是将其等效为一个电容  $C_p$ , 但根据电介质物理, 压电陶瓷的介电常数  $\epsilon_0\epsilon_r$  并不是一个定值, 其等效电容  $C_p$  被称为非理想铁电电容 (nonideal ferroelectric capacitors)<sup>[23]</sup>。图 2 给出了两种驱动方式下驱动回路示意图, 电压放大器的基本电路结构如图 2(a) 所示, 在这种驱动方式下, 运放直接对控制信号  $V_{in}$  进行线性放大, 得到成比例放大的电压信号  $V_o$ 。假设致动器的位移与电荷量存在恒定比例系数  $K$ , 显然非理想电容  $C_p$  的存在使放大器始终无法通过  $V_{in}$  输出成比例电荷量  $Q_p$ , 压电致动器也就无法产

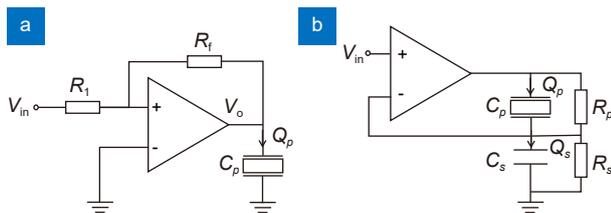


图 2 压电陶瓷致动器的 (a) 电压驱动方式和 (b) 电荷驱动方式基本电路结构

Fig. 2 Basic circuit structures of (a) voltage driving mode and (b) charge driving mode of PZA

生与  $V_{in}$  成线性关系的位移响应。放大器输入信号  $V_{in}$  与位移响应  $L$  的关系如式 (2) 所示:

$$L = KQ_p = KC_pV_o = -KC_p\frac{R_f}{R_1}V_{in} \quad (2)$$

电荷放大器的基本电路结构如图 2(b) 所示。对电路分析得出压电致动器位移响应  $L$  与输入信号  $V_{in}$  间的函数关系, 为了方便后续计算, 这里写成  $s$  域表达式, 如式 (3) 所示:

$$L = KQ_p(s) = K \cdot \frac{\frac{1}{R_s C_s} + s}{\frac{1}{R_p C_p} + s} \cdot C_s V_{in}(s) \quad (3)$$

不难发现, 当电路满足  $R_p C_p = R_s C_s$  时输入信号  $V_{in}$  与位移响应  $L$  呈线性关系, 但非理想电容  $C_p$  的存在使等式无法成立, 变化的  $C_p$  使压电致动器的位移响应  $L$  在信号频率较低 ( $s$  趋于 0) 时仍无法保持与输入信号  $V_{in}$  的线性关系。但相较于任何信号下都无法保持线性响应的电压驱动方式, 电荷驱动方式仍具有明显优势。

### 2.3 电压驱动与电荷驱动位移响应对比分析

为了验证压电陶瓷致动器在两种放大器驱动下产生位移响应的差异, 这里对同一压电致动器分别用两种类型放大器驱动, 实验使用激光测距仪对致动器位移数据进行采集, 用采样电阻对放大器输出电流精确采集, 以此计算放大器输出电荷量。这里对两种放大器分别输入 5 Hz、1 Hz、0.5 Hz 正弦信号, 对比此时输入信号与压电致动器位移响应间的关系。图 3 为电

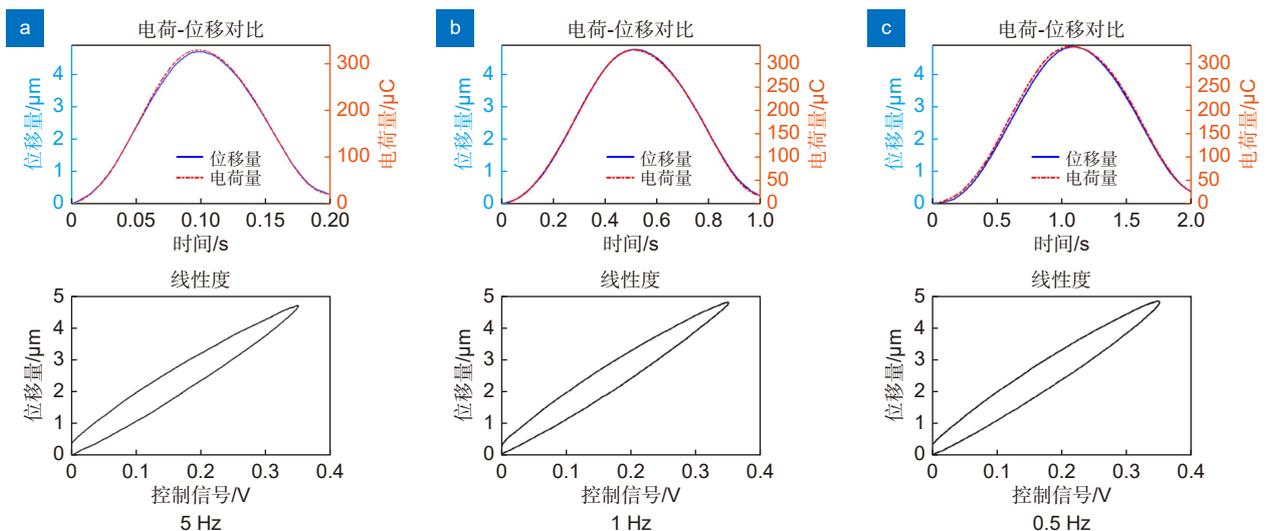


图 3 电压驱动下压电致动器位移响应及线性度

Fig. 3 Displacement response and linearity of PZA under voltage drive

压驱动下的位移响应及线性度, 图 4 为电荷驱动下压电致动器的位移响应及线性度。

结果显示, 压电陶瓷致动器在 5 Hz、1 Hz、0.5 Hz 频率的电压激励信号驱动下位移响应线性度始终较差, 其线性度分别为 13.27%、12.53%、12.66%, 在同样频率的电荷激励信号驱动下的位移线性度分别为 1.75%、1.80%、2.55%, 在信号频率较低时出现线性度变差的趋势。此外, 在整个过程中两种放大器输出电荷量始终与 PZA 位移成正比例关系, 二者存在恒定比例系数  $K = 0.014 \text{ m/C}$ , 这也证明了电荷与位移间的线性关系。总之, 基于电荷驱动的压电致动器的位移响线性度要优于电压驱动。

### 3 电荷驱动压电致动器位移响应行为研究

#### 3.1 压电致动器等效电容变化特性分析

根据式 (3) 对电荷驱动回路的描述, 为了准确得出电荷驱动下压电致动器的位移响应, 需首先得知其等效电容  $C_p$  在激励信号下的变化情况。根据电容的动态特性, 压电致动器等效电容的容值可用电荷的变化率与电压的变化率之比来计算, 这就需要获得压电致动器在激励信号下的电压变化曲线与电荷变化曲线。对于压电致动器组成的非线性电容, 其电压与电荷间存在复杂的映射关系, 这给不同信号下电压变化曲线与电荷变化曲线的获取及后续电容的计算带来困难。

但二者的映射关系仍有规律可循: 根据上文介绍, 压电致动器的位移与其电荷量具有直接线性关系, 因此可以用压电致动器在不同信号下所表现出的电压-位移迟滞特性直接推导出对应的电压-电荷映射关系, 从而便能方便得出对应信号下电压变化曲线与电荷变化曲线及等效电容的变化曲线  $C_p(t)$ 。

对于压电致动器的迟滞非线性特性, 目前已经有大量研究做出分析, 这里对激励信号的幅值、频率、波形对致动器电压-位移迟滞特性的影响展开介绍。对于不同幅值的激励信号, 压电致动器迟滞曲线会随激励信号幅值改变, 这意味着其电荷-电压映射关系也会随着信号幅值改变。图 5(a) 给出了不同幅值的正弦波电压激励信号下的电荷-电压映射关系, 显然其等效电容在不同幅值的信号下的变化情况是不同的。对于不同频率的激励信号, 压电致动器的迟滞曲线在频率较低的一定频段范围内相同, 即表现出频率无关性。这意味着低频时在同样波形信号的驱动下, 压电致动器的电荷-电压映射关系不会随频率发生改变, 如图 5(b) 所示。此外, 对于不同波形的激励信号, 在相同的输入信号极值范围内压电致动器的迟滞曲线是一致全等的, 迟滞曲线与信号的具体波形无关, 即一致性。图 5(c) 给出了电压驱动、电荷驱动下的相同幅值范围的三角波、正弦波激励信号时的电荷-电压映射关系。

经过以上对压电致动器电压-电荷映射关系的分

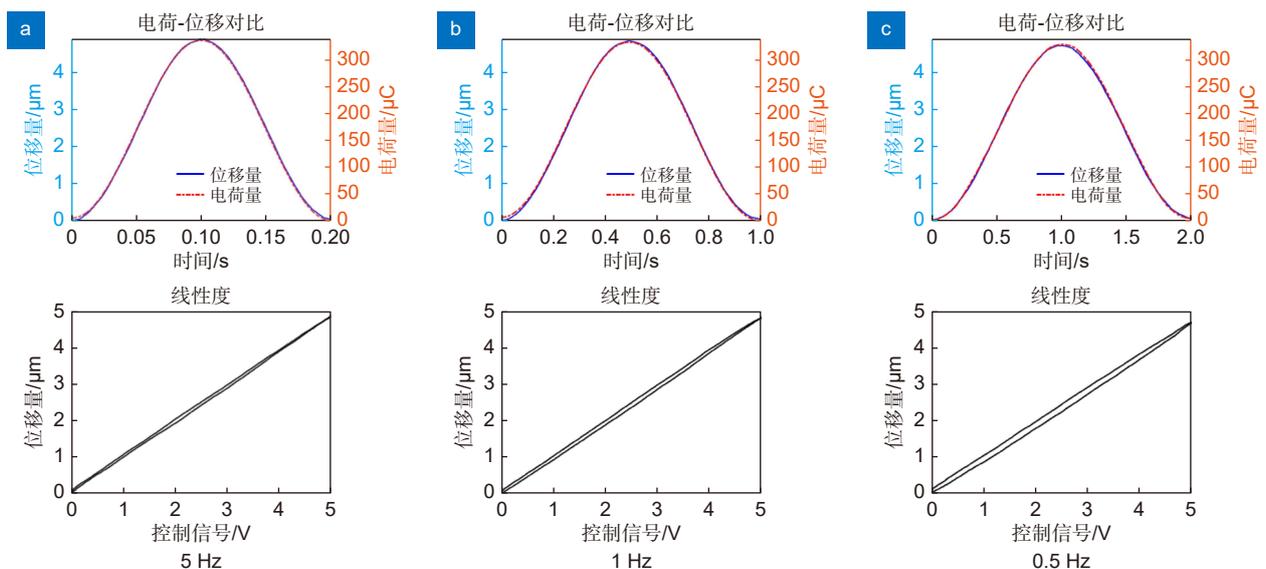


图 4 电荷驱动下压电致动器位移响应及线性度

Fig. 4 Displacement response and linearity of PZA under charge drive

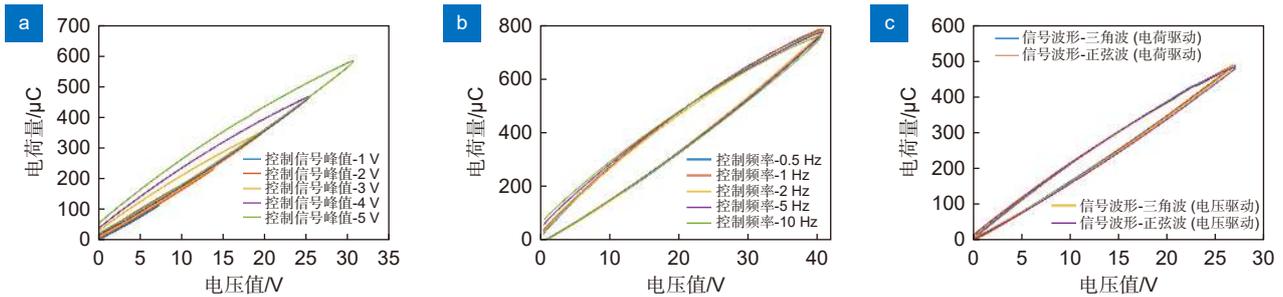


图 5 压电致动器的 Q-U 映射关系与激励信号的关系。(a) 信号幅值; (b) 信号频率; (c) 信号波形

Fig. 5 The relationship between Q-U mapping and excitation signal of PZA. (a) Signal amplitude; (b) Signal frequency; (c) Signal waveform

析不难得出, 尽管其映射关系在不同激励信号下复杂多变, 但电压-电荷映射关系在某些情况下是相同的: 低频信号下同样振幅信号的频率、波形变化不会引起映射关系再次变化。因此, 在实际使用时, 在测得某激励信号下压电致动器电压变化曲线与电荷变化曲线, 并计算出二者映射关系与电容变化曲线  $C_p(t)$  后, 能够得到与该激励信号相同极值范围、不同频率的激励信号下的映射关系与电容变化曲线。

以正弦电荷激励信号为例, 当给予压电致动器 5 Hz 的信号时, 测得此时压电致动器电压变化曲线与电荷变化曲线, 可得出二者映射关系与电容变化曲线  $C_p(t)$ , 如图 6 所示。根据上述推论, 在对 5 Hz 信号下的等效电容进行拟合后, 能够直接推导出 2 Hz、1 Hz 等频率的同样幅值的正弦激励信号下的等效电容  $C_p'(t)$  的拟合公式。而不再需要对这些信号过程中的电压电荷变化进行实时测量, 这大大简化了等效电容的计算, 对于推断不同信号下的等效电容变化具有重要意义。

### 3.2 电荷驱动的压电致动器位移响应数学模型

式 (3) 给出了电荷驱动下压电致动器的位移量  $L$  与输入信号  $V_{in}$  间的传递函数, 将其写为时域表达式, 如式 (4) 所示:

$$\frac{1}{K} \cdot \frac{L(t)}{R_p C_p(t)} + \frac{1}{K} \cdot \frac{dL(t)}{dt} = \frac{V_{in}(t)}{R_s} + C_s \cdot \frac{dV_{in}(t)}{dt} \quad (4)$$

假设等效电容在某信号  $V_{in}(t)$  下的变化情况用多项式  $C_p(t) = at^2 + bt + c$  拟合, 将  $C_p$  的拟合函数代入式 (4), 得到系统输入信号  $V_{in}$  与压电致动器位移响应  $L$  间的一阶微分方程数学模型, 如式 (5) 所示:

$$\frac{dL(t)}{dt} = -\frac{1}{R_p(at^2 + bt + c)} \cdot L(t) + K \cdot \left( \frac{V_{in}(t)}{R_s} + C_s \cdot \frac{dV_{in}(t)}{dt} \right) \quad (5)$$

图 2(b) 中  $Q_p$  是电荷放大器真正传递给压电致动器的电荷量, 是致动器存在失真现象的真实位移响应的体现, 而  $Q_s$  是在输入信号控制下期望通过反馈电容  $C_s$  传递给压电致动器的电荷量, 是致动器无失真理想位移响应的体现, 式 (6) 给出了系统输入信号  $V_{in}$  与压

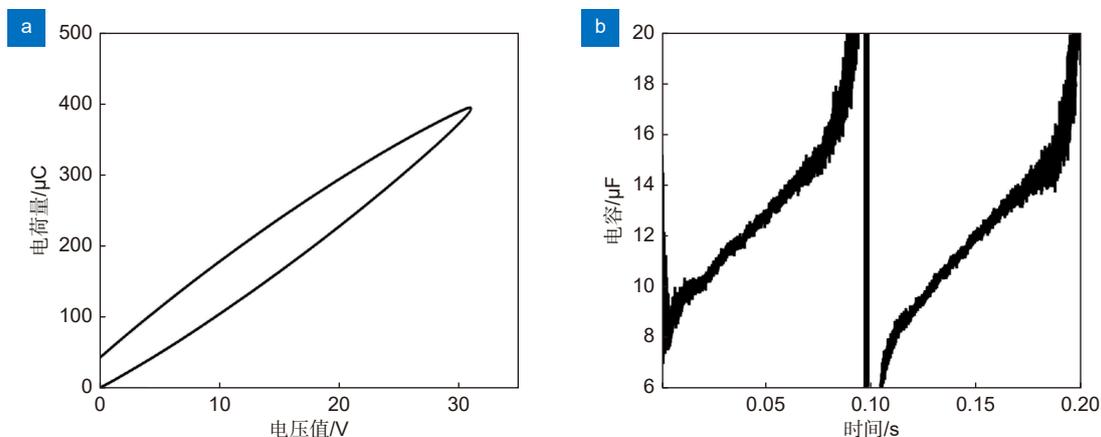


图 6 压电致动器在正弦信号激励下的 (a) 电压-电荷映射关系及 (b) 等效电容变化情况

Fig. 6 (a) Voltage-charge mapping relationship and (b) equivalent capacitance variation of PZA under sinusoidal excitation

电致动器理想位移 $L$ 间的数学模型:

$$L(t)' = K \cdot Q_s(t) = K \cdot C_s V_{in}(t) . \quad (6)$$

因此, 在得知输入信号 $V_{in}(t)$ 及其等效电容变化曲线的拟合函数 $C_p(t)$ 后, 将其代入位移响应模型式(5)与式(6)中, 可解出对应真实位移与理想位移响应。对某压电致动器在 1 Hz 正弦信号激励下得出的真实位移与理想位移响应情况及二者线性度如图 7 所示。

## 4 实验验证

### 4.1 实验系统

为了验证以上关于压电致动器等效电容变化理论推导的正确性, 本节对电荷驱动下压电致动器的位移响应开展实验, 并与推导得出的位移响应做对比。为此搭建图 8 所示实验平台, 平台可对放大器的输入信号、压电致动器位移响应, 以及放大器输出电流精确采集, 实验平台工作流程如下: 位于上

位机的信号发生平台将控制信号经数据采集卡 1 发送给放大器, 控制信号经放大器放大后产生激励信号给压电致动器, 再利用位移传感器测得压电致动器实时位移量, 同时串联电流采集电阻对放大器输出电流进行超高速率采集, 对电流数据在时间上积分得到对应时间的电荷量。信号发生器的控制信号、电流采集电阻采集信号、位移传感器的位移信号均由数据采集卡 2 接收并将数据、波形存储、显示于上位机。

实验平台实物图如图 9 所示, 平台使用电压放大器为 PI E-508.00 放大器; 电荷放大器为 PI E-506.10 模块化电荷放大器, 二者输出电压均可达 100 V 以上, 值得注意的是: E506.10 内部的  $R_p=10R_s$ , 一般每次在驱动不同的 PZA 时都要替换与之小信号电容值成 10 倍关系的反馈电容  $C_s$ ; 压电致动器为 PI P-840.6, 可在 0~100 V 的输入电压范围内输出 90  $\mu\text{m}$  最大行程;

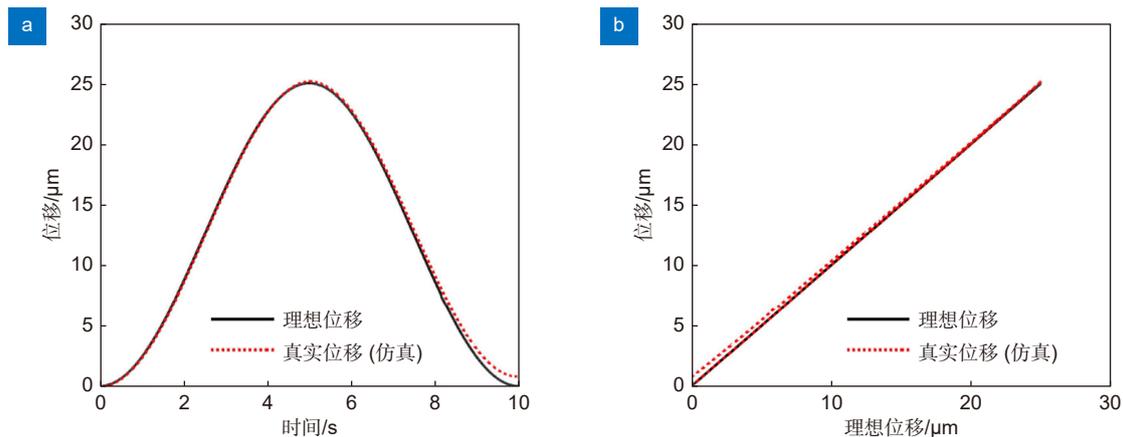


图 7 (a) 压电致动器的真实位移与理想位移响应及 (b) 二者线性度

Fig. 7 (a) Real displacement and theoretical displacement response of PZA and (b) the linearity of both

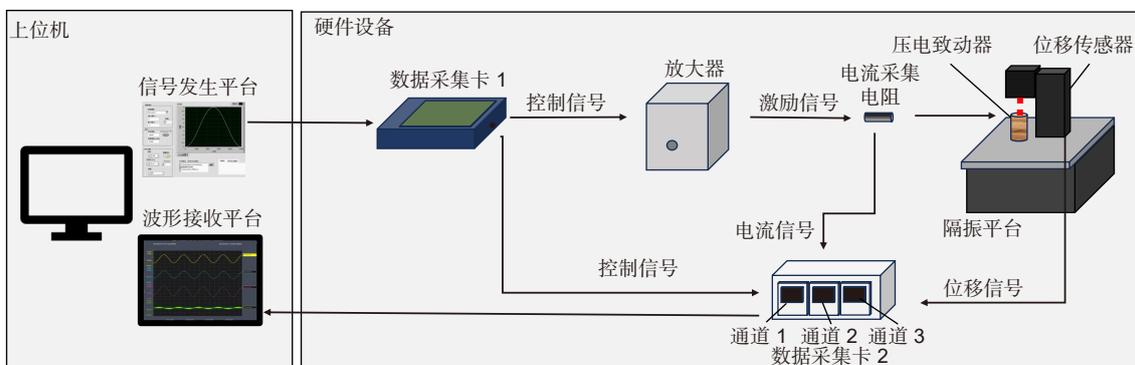


图 8 压电致动器位移响应实验平台框图

Fig. 8 PZA displacement response experiment platform block diagram

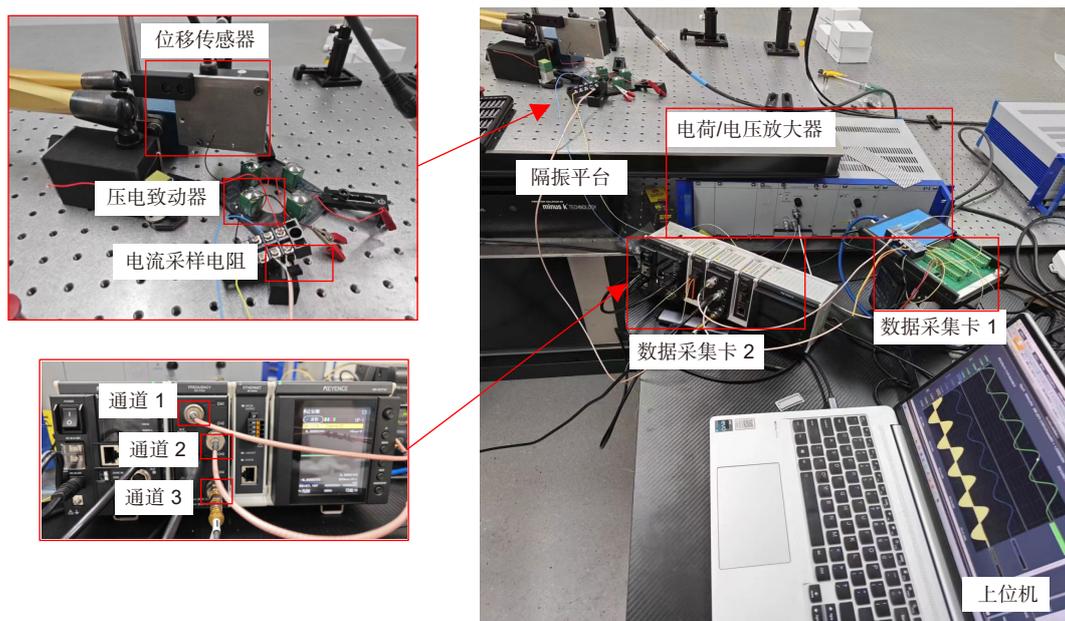


图 9 压电致动器位移响应实验平台实物图

Fig. 9 Physical diagram of PZA displacement response experiment platform

位移传感器采用 KEYENCE LK-H025& LK-HD500 激光式位移传感器, 精度可达  $0.001 \mu\text{m}$ ; 隔振平台采用 Minus K BM-8 被动隔振平台, 相较于传统气垫隔振性能提升 10~100 倍; 采集卡 1 采用 ART USB-2872A-D, 采集卡 2 采用 KEYENCE NR-X100 采集模块, 二者最大采样率均可达到 1 MHz; 电流采集电阻采用精度  $1 \Omega \pm 0.01\%$ 、温漂  $\pm 5 \text{ PPM}$  的金属箔电阻 RJ711。

#### 4.2 实验结果及分析

在上述实验平台中, 用电荷放大器 E506.10 对静态电容  $10 \mu\text{F}$  的 P-840.6 压电致动器进行驱动。对电荷放大器分别输入峰值为 5 V, 频率为 5 Hz、2 Hz、1 Hz、0.5 Hz、0.2 Hz、0.1 Hz、0.05 Hz 的正弦波控制信号, 以此得出真实位移响应。同时, 根据上文提供的电容变化规律, 在测得 5 Hz 的 Q-U 映射关系及电容变化曲线  $C_p(t)$  后, 以此为标准可直接推导出其它频率的电容变化曲线, 并将其代入位移响应模型得出仿真位移响应, 之后根据各频率信号所对应位移响应不难计算出实测与仿真线性度的具体值以及二者误差。图 10 给出了对这些信号作用下压电致动器位移响应的实测位移与仿真位移, 结果表明, 随着信号频率的降低, 压电致动器理想位移与真实位移间的失真程度逐渐增大、位移响应线性度逐渐变差, 此时信号  $V_m$  与位移响应  $L$  的线性关系越差, 这与上文式 (3) 的表述

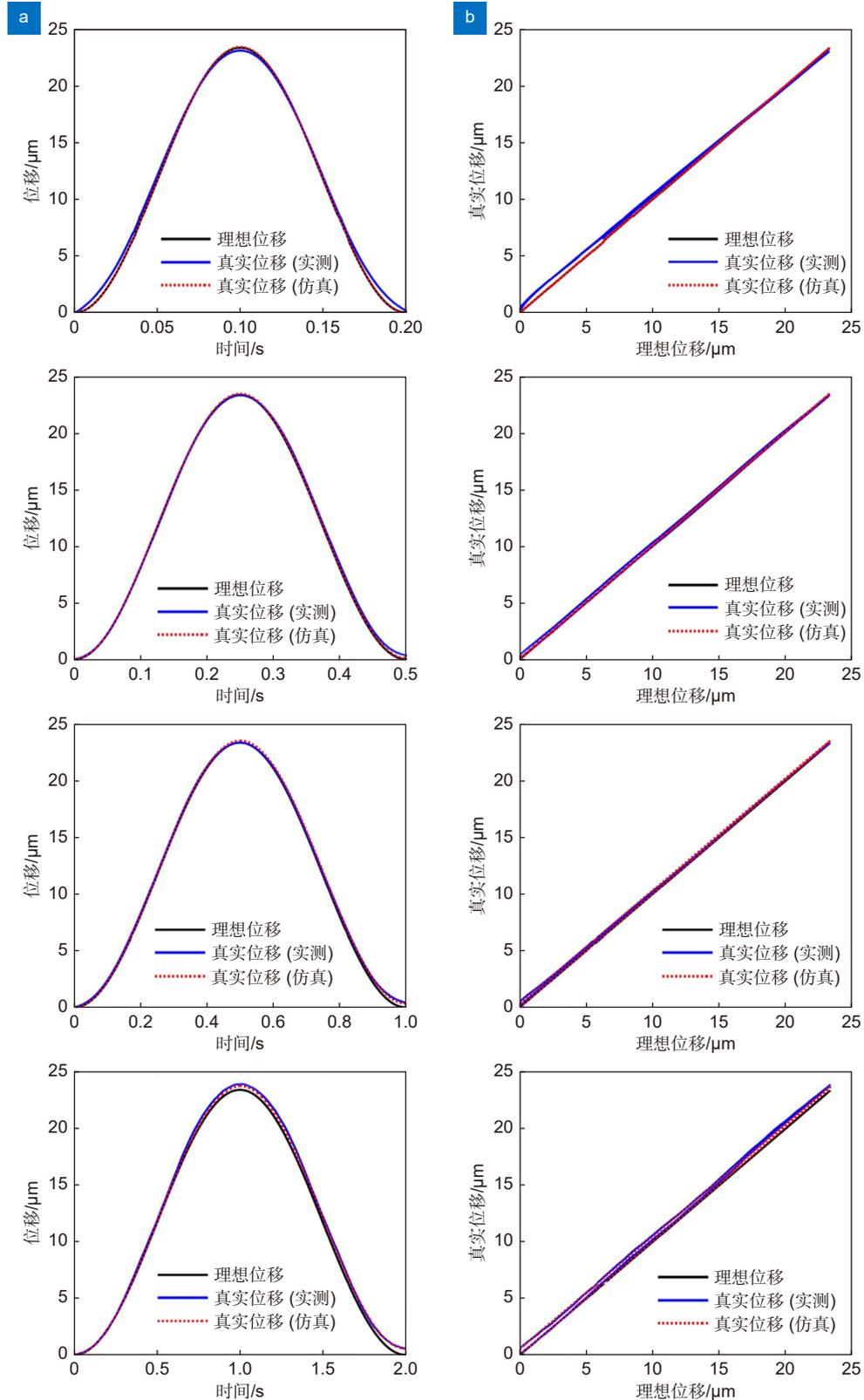
相一致。图 11 给出了实测与仿真的线性度的对比, 结果表明, 仿真结果与实际测试结果能够较好地拟合, 二者最大偏差小于 1.35%。受实验系统中设备性能限制, 如非接触式位移传感器长时间使用时产生的位移漂移误差、电流采集后附带的噪声给电荷计算带来的累计误差等, 这些在实验中存在的误差使实验结果与仿真结果无法完美拟合, 同时也为更低频率下的仿真与实验带来了一定的困难。此外, 尽管本文仅给出了针对某具体型号的压电致动器在特定正弦激励信号下的仿真与实验结果, 但得益于本文提出的位移响应数学模型可灵活调节参数, 该方法对电荷驱动的不同型号压电致动器以及不同幅值、频率的激励信号下具有通用性。

## 5 总结与讨论

本文提出一种等效电容量计算方法来定量分析压电致动器在电荷驱动下的位移响应特性, 并通过数值模拟仿真和实验验证两种方式验证了计算方法的准确性和可行性。结果表明: 在使用 5 V、0.05 Hz~5 Hz 频率正弦波信号控制的电荷放大器驱动某型号压电致动器时, 采用本文方法分析结果与实验结果相比二者位移响应最大偏差小于 1.35%。受限于目前实验设备性能的限制, 本文研究的信号频段范围相较于空间引力波探测领域的 1 mHz~1 Hz 还有一定差距, 后续通

过采用更高性能的实验设备或重新设计电荷驱动电路等方法继续探索电荷驱动下压电致动器在更低频率下

的响应情况, 为空间引力波探测望远镜超前瞄准机构的高精度指向控制提供可能的分析方法和实现途径。



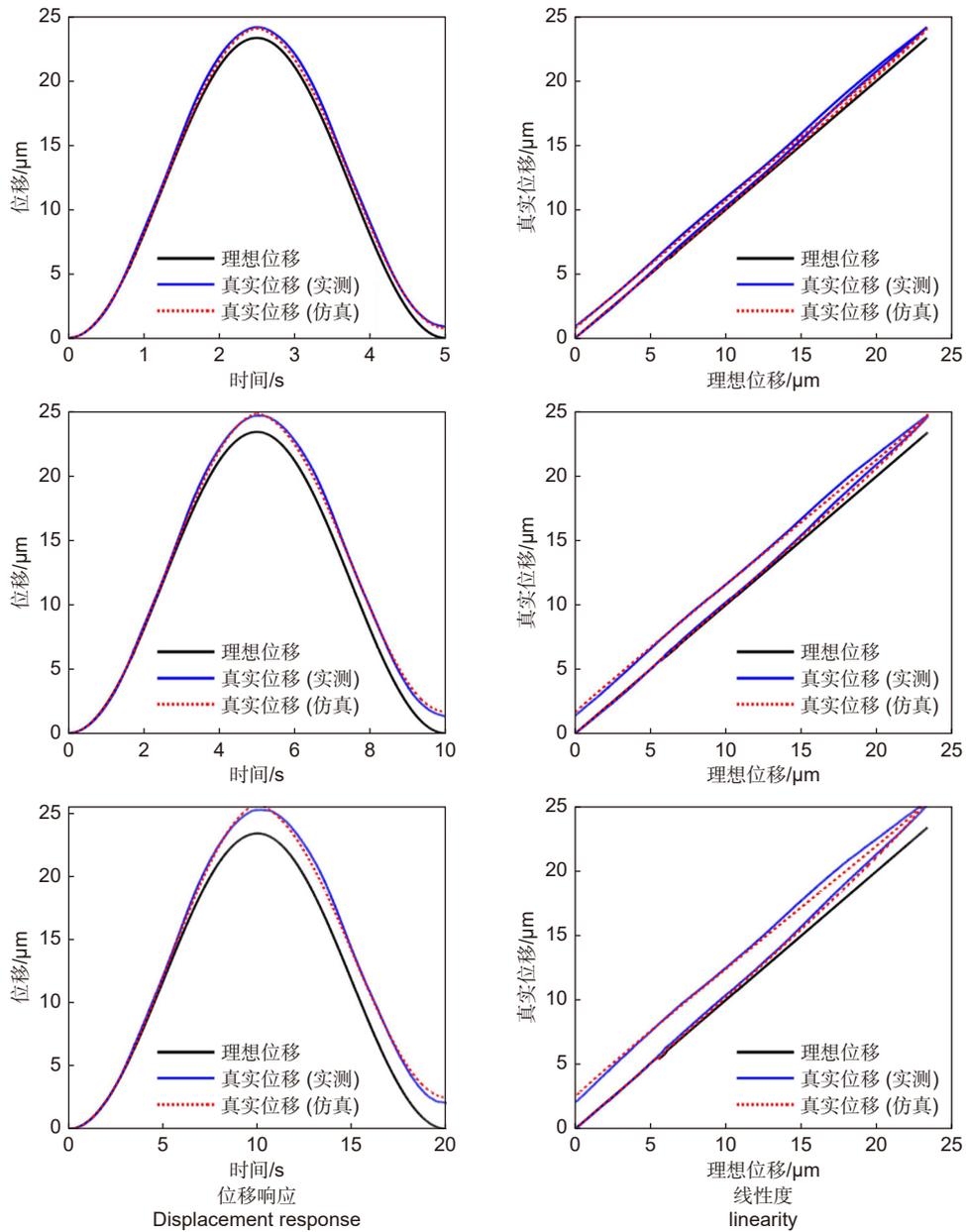


图 10 电荷驱动的压电致动器位移响应线性度仿真与实测对比

Fig. 10 Comparison between simulation and measurement of linearity of displacement response of charge-driven PZA

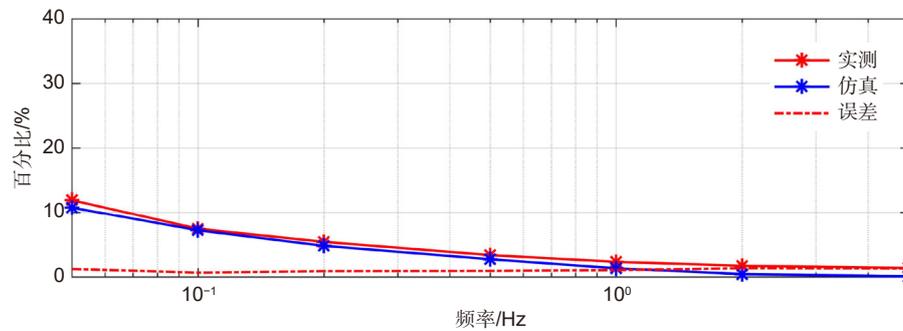


图 11 不同信号下电荷驱动的压电致动器位移响应线性度仿真与实测对比

Fig. 11 Comparison between simulation and measurement of displacement response linearity of charge-driven PZA under different signals

## 参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(6): 061102.
- [2] Wanner G. Complex optical systems in space: numerical modelling of the heterodyne interferometry of LISA Pathfinder and LISA[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2010: 1–106.
- [3] Danzmann K. LISA mission overview[J]. *Adv Space Res*, 2000, **25**(6): 1129–1136.
- [4] Luo J, Ai L H, Ai Y L, et al. A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2021, **60**(1-2): 1–19. 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, **60**(1-2): 1–19.
- [5] Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program "Taiji" and "Taiji-1" satellite mission[J]. *J Deep Space Explor*, 2020, **7**(1): 3–10. 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.
- [6] Park I H. Detection of low-frequency gravitational waves[J]. *J Korean Phys Soc*, 2021, **78**(10): 886–891.
- [7] Zhu W Z, Xie Y, Jia J J, et al. Development and test of the Point Ahead Angle Mechanism for space gravitational wave detection[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(4): 20220423. 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): 20220423.
- [8] Henein S, Spanoudakis P, Schwab P, et al. Design and development of the point-ahead angle mechanism for the laser interferometer space antenna (LISA)[C]//*Proceedings of the 13th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2009.
- [9] Rijnveld N, Pijnenburg J A C M. Picometer stable scan mechanism for gravitational wave detection in space[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7734**: 77341R.
- [10] K. Uchino, Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Boston, MA: Kluwer Academic, 1996.
- [11] Yang S, Jiang B, Zhou B. Research on new mechanism of nanometer actuating with large driving force and high rigidity[J]. *Microfabr Technol*, 2003(1): 65–68,72. 杨圣, 江兵, 周波. 大驱动力高刚度纳米致动新原理研究[J]. *微细加工技术*, 2003(1): 65–68,72.
- [12] Zhou M L, Yang Z G, Tian Y T, et al. The development on the nonlinear control method of piezoelectric actuator[J]. *Piezoelectr Acoustoopt*, 2007, **29**(6): 656–659,662. 周森磊, 杨志刚, 田彦涛, 等. 压电执行器非线性控制方法研究进展[J]. *压电与声光*, 2007, **29**(6): 656–659,662.
- [13] Fleming A J. Position sensor performance in nanometer resolution feedback systems[J]. *IFAC Proc Vol*, 2013, **46**(5): 1–6.
- [14] Clayton G M, Tien S, Leang K K, et al. A review of feedforward control approaches in nanopositioning for high-speed SPM[J]. *J Dyn Syst Meas Control*, 2009, **131**(6): 061101.
- [15] Bruno L, Maletta C. Real-time calibration of open-loop piezoelectric actuators for interferometric applications[J]. *Int J Mech Mater Des*, 2008, **4**(2): 97–103.
- [16] Gao Y P, Zhang Q, Li Q L, et al. Hysteresis nonlinear compensation and optimal control of piezoelectric actuators[J]. *Chin J Sci Instrum*, 2022, **43**(8): 163–172. 高源蓬, 张泉, 李清灵, 等. 压电陶瓷执行器迟滞非线性补偿与最优控制[J]. *仪器仪表学报*, 2022, **43**(8): 163–172.
- [17] Iyer R V, Tan X B. Control of hysteretic systems through inverse compensation[J]. *IEEE Control Syst*, 2009, **29**(1): 83–99.
- [18] Main J A, Garcia E, Newton D V. Precision position-control of piezoelectric actuators using charge feedback[J]. *Proc SPIE*, 1995, **2441**: 243–254.
- [19] Fan W T, Zhao H C, Fan L, et al. Preliminary analysis of space gravitational wave detection telescope system technology[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2021, **60**(1-2): 178–185. 范纹彤, 赵宏超, 范磊, 等. 空间引力波探测望远镜系统技术初步分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, **60**(1-2): 178–185.
- [20] Weise D, Marenaci P, Weimer P, et al. Opto-mechanical architecture of the LISA instrument[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10566**: 1056611.
- [21] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(6): 210040.
- [22] Guo Y M, Chen K L, Zhou J H, et al. High-resolution visible imaging with piezoelectric deformable secondary mirror: experimental results at the 1.8-m adaptive telescope[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(12): 230039.
- [23] Li Z L, Jun Y U, Li Z W, et al. Physical Modeling of Ferroelectric Capacitors[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2001.

## 作者简介



闫泽昊(1999-), 男, 硕士研究生, 目前就读于中国科学院大学, 主要研究方向为压电致动器高线性度驱动技术。

E-mail: yanzehao21@mails.ucas.ac.cn



【通信作者】顾乃庭(1984-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要从事光电成像及探测技术研究 and 系统研制, 具体包括光电望远镜、自适应光学以及偏振成像等。

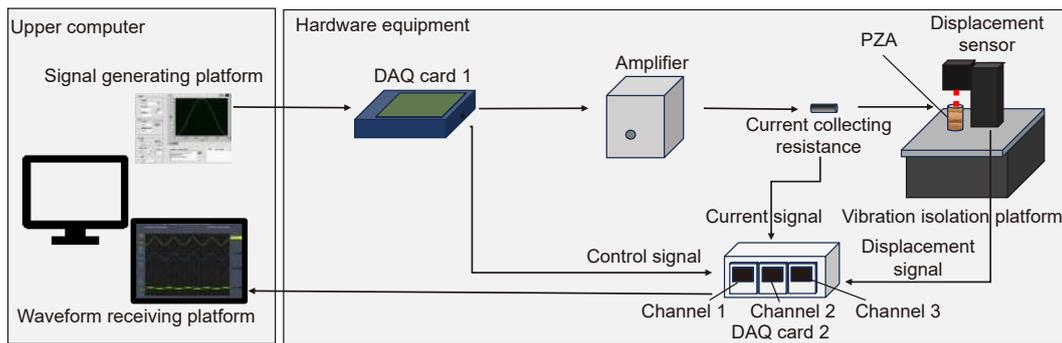
E-mail: gunaiting@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope

Yan Zehao<sup>1,2,3</sup>, Zhou Ziye<sup>2,3</sup>, Li Yang<sup>2,3</sup>, Zhou Hong<sup>2,3</sup>, Huang Linhai<sup>1,2,3</sup>,  
Gu Naiting<sup>1,2,3\*</sup>, Rao Changhui<sup>1,2,3</sup>



PZA displacement response experiment platform block diagram

**Overview:** In the space gravitational wave telescope, the Point Ahead Angle Mechanism (PAAM) is the essential core device to realize ultra-long beam distance measurement and  $\text{nrad/Hz}^{1/2}$  level ultra-high precision pointing control. The Piezoelectric Actuator (PZA) is the core component of the PAAM, which mainly controls the displacement through the external input voltage or charge, and drives the PAAM to make the laser beam produce a small inclination Angle to realize the high precision Angle control of the spaceborne telescope. Therefore, the displacement response of piezoelectric ceramic actuators directly affects the pointing control performance of the PAAM. However, the inherent hysteresis of piezoelectric materials causes the linearity of the displacement response of PZA to deteriorate, which makes it difficult to control the direction of the PAAM. In order to realize the high linearity drive of PZA, the charge drive method is worth trying. This paper studies the response behavior of PZA driven by charge. In order to verify the advantage of the charge-driven method in improving the linearity of the displacement response of PZA, the comparison of the charge-driven method with the voltage-driven method is made. The experimental results show that although the charge-driven method has an advantage in improving the linearity of the displacement response compared with the voltage-driven method, there is still poor linearity at low frequency. In this paper, it is pointed out that the main cause of linearity variation under low-frequency signal is the mismatch of circuit components caused by the change of equivalent capacitance of PZA with the signal. In order to accurately describe the displacement response behavior of PZA under low-frequency signals, this paper proposes a calculation method for the equivalent capacitance of PZA. By fitting the equivalent capacitance, a mathematical model of the displacement response of the PZA under charge driving is established, and the displacement response characteristics of the PZA under charge driving are quantitatively analyzed. The accuracy and feasibility of the calculation method are verified by numerical simulation and experimental verification. The results show that when a charge amplifier controlled by 5 V, 0.05 Hz~5 Hz sine wave signal is used to drive a certain type of piezoelectric actuator, the maximum deviation of displacement response between the analysis results and the experimental results is within 1.35%. Which provides a possible analysis method and realization way for the high-precision pointing control of the Point Ahead Angle Mechanism of the space gravitational wave detection telescope.

Yan Z H, Zhou Z Y, Li Y, et al. Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230223; DOI: 10.12086/oe.2023.230223

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202200, 2021YFC2202204), and Excellent Member of Chinese Academy of Sciences Youth Promotion Association (Y2022097)

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; <sup>3</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

\* E-mail: gunaiting@ioe.ac.cn