

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311416

压电执行器输出位移的精密自感知^{*}

熊志文, 崔玉国, 蔡永根, 马剑强, 杨依领
(宁波大学机械工程与力学学院 宁波 315211)

摘要:为省掉外部精密位移传感器,进而减小微装配与微操作系统的体积,降低系统成本,采用自感知方法来获取压电执行器的输出位移。首先,基于压电执行器在电压作用下发生变形的同时,还会发生电极化而在其晶片表面产生电荷这一思想,提出了一种非平衡电流积分式压电执行器的位移自感知方法。其次,考虑到压电执行器的漏电流与介电吸收电流,以及运算放大器的偏置电流对自感知精度的影响,给出了能够精确反映压电执行器输出位移的自感知表达式及自感知参数辨识方法。最后,在辨识压电执行器自感知参数的基础上,实验验证了所提精密位移自感知方法的有效性,结果表明,自感知位移具有亚微米级分辨率,为 $0.24\ \mu\text{m}$;在静态位移自感知方面,在 $0\sim 118.9\ \mu\text{m}$ 的位移范围内,自感知位移的最大相对误差为 1.17% ;在动态位移自感知方面,在 $0\sim 100\ \text{Hz}$ 的频率范围内,自感知位移的最大相对误差为 1.45% 。可知所提出的精密位移自感知方法既能实现静态长时间又能实现动态快速的高精度、高分辨率的位移自感知。

关键词:压电执行器;位移自感知;电流积分;电荷补偿

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8030

Precise self-sensing for output displacement of piezoelectric actuator

Xiong Zhiwen, Cui Yuguo, Cai Yonggen, Ma Jianqiang, Yang Yiling

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To eliminate the external precision displacement sensor, reduce the volume of the micro assembly and micro operation system, and reduce the system cost, the self-sensing method is used to obtain the output displacement of the piezoelectric actuator. Firstly, the deformation of the piezoelectric actuator under the action of voltage is utilized. Meanwhile, the piezoelectric actuator is polarized and charges on the surface of its surface is generated. A displacement self-sensing method of the unbalanced current integral piezoelectric actuator is proposed. Secondly, considering the influence of the leakage current and dielectric absorption current of the piezoelectric actuator, as well as the bias current of the operational amplifier on the self-sensing accuracy, the self-sensing expression and the self-sensing parameter identification method which can accurately reflect the output displacement of the piezoelectric actuator are given. Finally, on the basis of identifying the self-sensing parameters of the piezoelectric actuator, experiments evaluate the effectiveness of the proposed precision displacement self-sensing method. The results show that the self-sensing displacement has a sub-micron resolution of $0.24\ \mu\text{m}$. In terms of static displacement self-sensing, the maximum relative error of self-sensing displacement is 1.17% in the displacement range of $0\sim 118.9\ \mu\text{m}$. In terms of dynamic displacement self-sensing, the maximum relative error of self-sensing displacement is 1.45% in the frequency range of $0\sim 100\ \text{Hz}$. The proposed precision displacement self-sensing method cannot only realize the static long-time, but also achieve the dynamic fast high-precision and high-resolution displacement self-sensing.

Keywords: piezoelectric actuator; self-sensing for displacement; current integration; charge compensation

收稿日期: 2023-05-11 Received Date: 2023-05-11

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(52075273)、国家自然科学基金(51175271)、宁波市科技创新 2025 重大专项(2020Z070) 资助

0 引言

压电执行器因具有体积小、刚度高、响应快、输出力大、位移分辨率高、不发热、无噪声等优点^[1-2],而被用作微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)中的驱动单元,如生物医学中的微操作器^[3-4]、高频闭合开关中的驱动器^[5]。为获得压电执行器输出位移的大小,通常需要通过精密位移传感器对压电执行器的输出位移进行测量。目前,用来测量压电执行器输出位移的精密传感器有电阻应变式传感器^[6-7]、电容位移传感器^[8-9]、激光位移传感器^[10-11]、激光干涉仪^[12-13]等。这些位移传感器具有高精度、高分辨率、大带宽,但大都价格昂贵。其中,电阻应变式传感器可集成于压电执行器上,而电容式传感器、激光式传感器及激光干涉仪体积较大,难以集成于压电执行器中。然而,在微装配与微操作系统中,受空间限制,往往要求传感器应微型化,有的系统甚至无法安装传感器,这就给微装配与微操作系统的应用带来了不便^[14]。

为解决外部微位移传感器给微装配与微操作系统应用带来的不便,同时为降低系统成本,有学者采用省掉外部传感器,通过自感知方法来获取压电执行器的输出位移。目前,用来自感知压电执行器输出位移的方法主要有电桥法^[15-16]、串联电阻法^[17]、检测介电常数法^[18]、积分电流法^[19]。其中,电桥法的实现原理及电路构成简单,但感知电压很小,易受干扰及噪声的影响,且压电陶瓷的漏电阻会破坏电桥在静态或低频情况下的平衡,导致系统的稳定性变差,换言之,电桥法往往仅适用于动态驱动情况。串联电阻法在电路构成上也较简单,但由于同压电执行器所串联的感知电阻同压电执行器构成电阻-电容(resistor-capacitance, RC)电路,低频时感知电阻上的电压显著降低,导致感知电压信噪比显著降低,因此也不适用于低频或直流驱动情况。检测介电常数法因压电执行器的输出位移与介电常数变化之间呈线性关系,能够有效消除压电材料的迟滞非线性,但由于检测介电常数变化是通过将高频低幅值电压信号叠加在压电执行器驱动电压中实现的,这种高频驱动会影响系统的精细操作。电流积分法的实现原理及电路构成也较简单,且反映压电执行器位移的积分器输出电压(即感知电压)信噪比高,动静态驱动均适用,但为满足平衡条件,需要几十兆欧姆的精密反馈电阻,这么高阻值的精密电阻购买困难,且其阻值易受环境温度与湿度的影响而变化,从而需要经常调节积分器的反馈电阻,这就给应用带来了不便;同时,未考虑压电执行器在电压作用下的介电吸收以及运算放大器的偏置电流对自感知精度的影响,自感知精度还有进一步提升的空间。可见,相对于其他自感知方法,

电流积分法在信噪比、应用范围方面具有一定的优势。另外,如果无需满足平衡条件,并消除压电执行器的漏电流及其在电压作用下的介电吸收、运算放大器的偏置电流给自感知精度所带来的影响,必将进一步提高电流积分法的性能及其相对于其他自感知方法的优势,进而提高压电执行器的自感知应用水平。

本文提出了一种无需满足平衡条件的非平衡电流积分式压电执行器输出位移的自感知方法,同时补偿了由压电执行器漏电流及介电吸收、运算放大器偏置电流所产生的不反映执行器输出位移的电荷,实现了压电执行器输出位移的精密自感知。

1 精密自感知原理

如图1所示,压电执行器在驱动电压 u 作用下会发生变形,当其输出端不受约束时,该变形就成为压电执行器的输出位移 δ ,压电执行器在变形的同时其晶片还会发生电极化,从而在晶片表面产生电荷 Q 。如果能够确定 Q 与 δ 之间的关系,并且能够获得 Q ,便可获得 δ 。

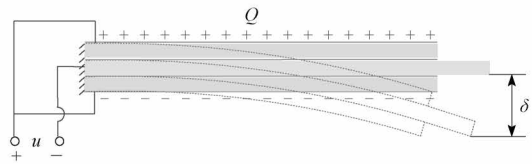


图1 压电执行器输出位移与电荷示意图

Fig. 1 Schematic for displacement and charge of piezoelectric actuator

δ 与 u 之间的关系以及 Q 与 u 之间的关系可分别根据压电材料的逆压电效应及介电效应(即电介质的电极化特性)来阐明。根据逆压电效应,压电执行器在驱动电压 u 作用下的输出位移 δ 可表示为:

$$\delta = au \quad (1)$$

式中: a 为压电执行器的位移-电压系数。

根据电介质的介电效应,压电执行器在驱动电压 u 作用下的晶片表面电荷 Q 可表示为:

$$Q = C_p u \quad (2)$$

式中: C_p 为压电执行器的电容。

根据式(1)和(2),可得 Q 与 δ 之间的关系为:

$$Q = \alpha \delta \quad (3)$$

式中: $\alpha = C_p/a$,为压电执行器的电荷-位移系数。

由式(3)可知,压电执行器的输出位移同压电晶片表面电荷之间存在着确定关系。这样,如果能够获得压电执行器在电压作用下的晶片表面电荷,便可获得其输出位移,进而省掉外部精密位移传感器,实现执行器输出位移的自感知。

压电执行器的晶片表面电荷为束缚电荷,需通过积分器对流过晶片的电流进行积分来获得。考虑到压电陶瓷材料并非理想的绝缘材料,其存在漏电阻而产生漏电流,在电压作用下还会产生介电吸收,同时任何精密运算放大器都存在偏置电流。基于此,本文提出了如图2所示的对压电执行器输出位移进行精密自感知的积分电路。在图2中,积分电路的输出电压 u_o 可表示为:

$$u_o = -\frac{Q_c}{C} = -\frac{1}{C} \left(C_p u + \int \frac{u}{R_p} dt + Q_{DA} + \int I_b dt \right) \quad (4)$$

式中: Q_c 为积分电容上的电荷, C 为积分器中的积分电容, R_p 为压电执行器的绝缘电阻, Q_{DA} 为压电执行器在电压下的介电吸收电荷, I_b 为运算放大器的偏置电流。

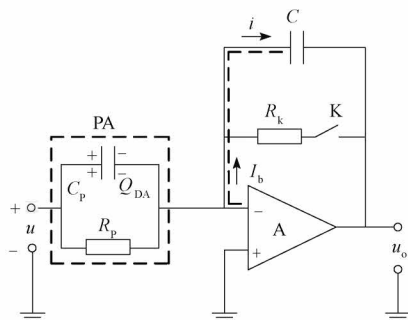


图2 压电执行器输出位移的自感知电路
Fig.2 Self sensing circuit for displacement of piezoelectric actuator

考虑式(2)、(3),进而由式(4)可得压电执行器的输出位移(即自感知位移)为:

$$\delta_s = -\frac{1}{\alpha} \left(C u_o + \frac{1}{R_p} \int u dt + Q_{DA} + \int I_b dt \right) \quad (5)$$

只要辨识出式(5)中的 α 、 R_p 、 Q_{DA} 、 I_b ,便可实现压电执行器输出位移的精密自感知。这种自感知方法无需反复调节平衡电阻,同时消除了压电执行器的介电吸收、运算放大器的偏置电流对自感知精度的影响,不仅能够提高自感知精度,而且应用更加方便。

由于式(5)中等号由边括号中第1项通过 u_o 来反映电压作用下晶片上所产生的电荷(即 $C u_o$),而该电荷中包含了压电执行器的迟滞非线性及蠕变,因此本文所提出的自感知方法能够反映压电执行器的非线性、迟滞及蠕变等特性。

2 自感知参数辨识

2.1 I_b 辨识

运算放大器的偏置电流仅与其本身性能有关,而与压电执行器的驱动电压 u 无关,故在辨识 I_b 时,在不给

压电执行器施加驱动电压(即 $u=0$)的情况下,采集运算放大器的输出电压 u_o 。由于压电执行器的驱动电压为0,故其极化电荷 $C_p u$ 、漏电流 u/R_p 、介电吸收电荷 Q_{DA} 均为0,于是对式(4)两端求导,可得:

$$I_b = -C \frac{du_o}{dt} \quad (6)$$

由于 I_b 是 u_o 的斜率,故为使 I_b 的辨识结果更加精确,在实际辨识时,对 u_o 的采集时间取得长些,结果如图3所示,辨识出运算放大器的偏置电流 $I_b = -8.42 \times 10^{-11}$ A。

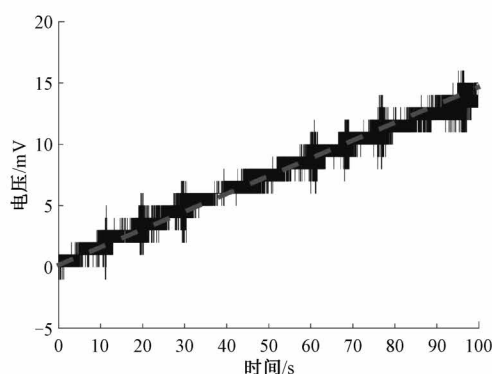


图3 由运算放大器偏置电流所产生的输出电压
Fig.3 Output voltage generated by the bias current of the amplifier

2.2 R_p 辨识

在辨识压电执行器的绝缘电阻 R_p 时,给压电执行器施加恒定的驱动电压 u ,在驱动电压作用几十秒后,采集运算放大器的输出电压 u_o 。由于驱动电压恒定,故压电执行器的极化电荷 $C_p u$ 为常数;同时,由于电介质的介电吸收仅与瞬时充放电过程有关,故此时 $Q_{DA}=0$,于是对式(4)两端求导,可得:

$$R_p = -\frac{u}{C \frac{du_o}{dt} + I_b} \quad (7)$$

给压电执行器施加10~90 V、间隔为10 V的阶跃电压,采集不同幅值下的自感知电路输出电压 u_o ,如图4所示。根据式(7)求得各输入电压下压电执行器的漏电阻,再对这些漏电阻求平均,辨识出压电执行器的漏电阻 $R_p = 34.27$ G Ω 。

2.3 α 辨识

压电执行器的电荷-位移系数 α 是积分器中积分电容 C 上的电荷 Q_c (即 $C u_o$)与压电执行器的输出位移 δ 之比,即:

$$\alpha = -\frac{C u_o}{\delta} \quad (8)$$

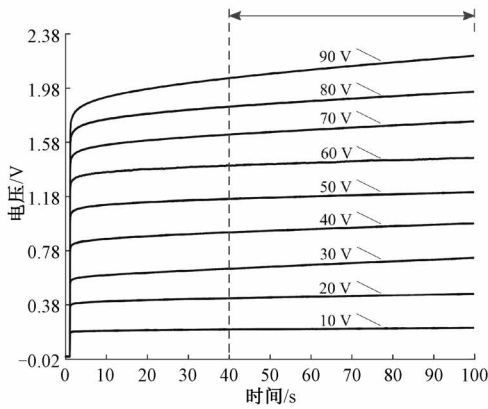


图 4 不同电压下自感知电路的输出电压
Fig. 4 Output voltage of the self-sensing circuit in different voltage

给压电执行器施加 10 ~ 90 V、间隔为 10 V 的阶跃电压,由激光位移传感器测得不同幅值下压电执行器的输出位移 δ (如图 5 所示,精密位移传感器仅在辨识参数时使用,作为自感知不是必须的),同时由自感知电路采集不同幅值下的自感知电路输出电压 u_o (如图 4 所示)。选择图 5 中各输入电压达到稳态时激光位移传感器所测得的压电执行器输出位移 δ ,以及图 4 中各输入电压达到稳态时自感知电路的输出电压 u_o (这里选择 80 s 时压电执行器的输出位移与自感知电路的输出电压),根据式 (8) 求得各输入电压下压电执行器的电荷-位移系数 α ,再对这些系数求平均,辨识出压电执行器的电荷-位移系数 $\alpha = 0.022\ 24\ \text{C/m}$ 。

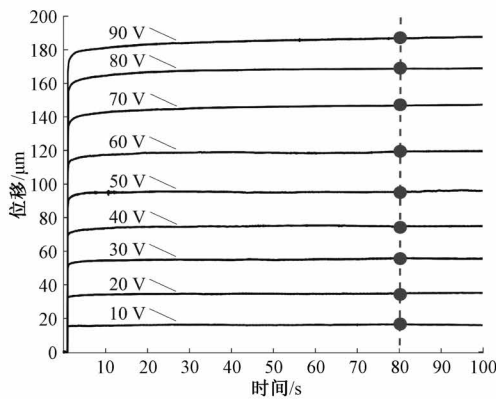


图 5 不同电压下压电执行器的输出位移
Fig. 5 Displacement of the piezoelectric actuator in different voltages

2.4 Q_{DA} 辨识

式(5)中不包含 Q_{DA} 项时所描述的自感知位移 δ_s 同由精密位移传感器所获得的实测位移 δ 之间存在偏差,

该偏差即为压电执行器在电压作用下的介电吸收 Q_{DA} 与 α 之比,即 Q_{DA}/α 。另一方面,由电介质物理学可知, Q_{DA} 具有一阶惯性特性。于是, Q_{DA}/α 就可用 $\delta_s - \delta$ 与 u 之间的一阶传递函数来表示:

$$\frac{Q_{DA}(s)}{\alpha} = \frac{\delta_s(s) - \delta(s)}{u(s)} = \frac{k}{\alpha(\tau s + 1)} \quad (9)$$

式中: $Q_{DA}(s)$ 、 $\delta_s(s)$ 、 $\delta(s)$ 、 $u(s)$ 分别为时间域中 Q_{DA} 、 δ_s 、 δ 、 u 的拉氏变换, k 为 $(\delta_s - \delta)$ 与 u 之间的静态灵敏度, τ 为时间常数。

给压电执行器施加阶跃电压,通过精密位移传感器测量其输出位移 δ ,同时采集运算放大器的输出电压 u_o ,然后采用已辨识出的参数,通过不包含 Q_{DA} 项的式(5)求得 δ_s ,如图 6 所示。求出 δ_s 与 δ 的差值 $(\delta_s - \delta)$,画出 $(\delta_s - \delta)$ 随时间变化的曲线(如图 7 所示),根据 $(\delta_s - \delta)$ 的稳态值与 u 的稳态值之比 k/α ,辨识出 k 为 $1.47 \times 10^3\ \text{m/V}$;根据 $(\delta_s - \delta)$ 达到稳态值 63.2% 所对应的时间即为 τ ,辨识出 τ 为 0.8 s。在辨识出 $Q_{DA}(s)$ 后,对其进行拉氏反变换,即可求得 $Q_{DA}(s)$ 的时域响应 Q_{DA} (如图 7 所示)。

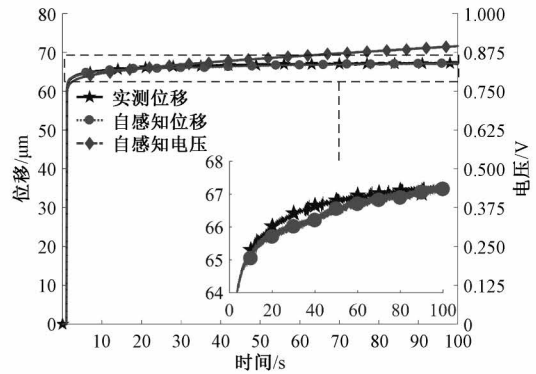


图 6 阶跃电压下的实测位移与自感位移
Fig. 6 Measured and self-sensing displacement in step voltage

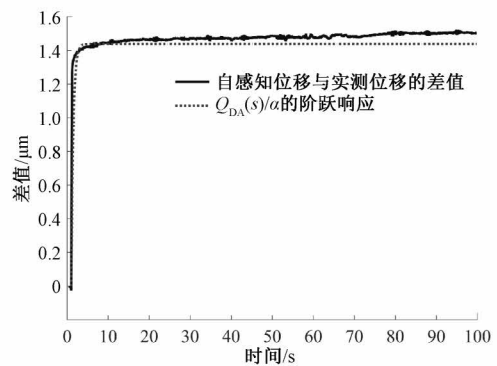


图 7 阶跃电压下的位移差与 $Q_{DA}(s)/\alpha$ 的响应
Fig. 7 Displacement difference and response of $Q_{DA}(s)/\alpha$ in step voltage

3 实验验证

3.1 实验装置

如图8所示,压电执行器输出位移的精密自感知实验系统由多功能数据卡(NI PCI6221, A/D、D/A均为16位,它们的最大转换电压均为 ± 10 V,最高采样频率为250 kS/s)、激光位移传感器(米铱ILD2300-2,量程为2 mm,分辨率为30 nm,最高测量频率为49.14 kHz)、压电执行器驱动电源(芯明天E01.C3,电压纹波为 ± 5 mV,平均输出电流为23 mA,纯电阻性负载时输出信号带宽为0~2 kHz)、悬臂梁式压电执行器(其有效输出位移尺寸为27 mm \times 2 mm \times 0.8 mm)、自感知电路(其中所用运算放大器为高阻抗运算放大器,为德州仪器OPA627,输入阻抗 10^{13} Ω ,输出阻抗55 Ω ,输入偏置电压130 μ V,输入偏置电流10 pA)、计算机构成。实验过程如下:计算机产生的离散信号经多功能数据卡转换为模拟信号,该模拟信号使压电执行器驱动电源驱动压电执行器产生与信号相对应的输出位移;激光位移传感器测得该输出位移后,将位移数据输送至计算机,与此同时,自感知电路获取与输出位移相对应的输出电压,经多功能数据卡转换为离散信号,并输送至计算机。

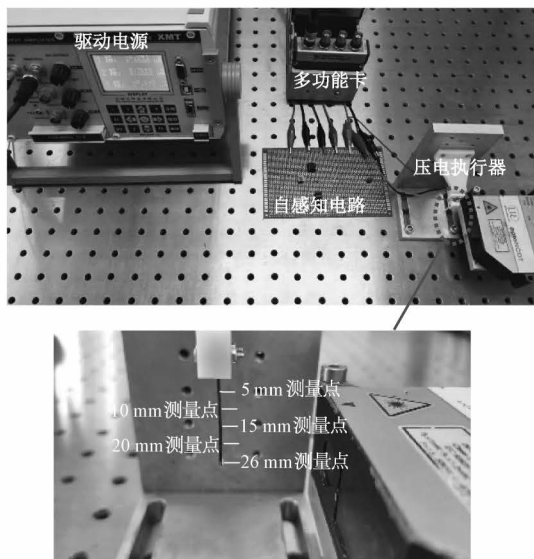


图8 压电执行器位移自感知实验系统

Fig. 8 Experimental system for self-sensing displacement of the piezoelectric actuator

3.2 三角波电压下自感知

给压电执行器施加0~60~0 V的三角波电压,分别采用激光精密位移传感器与自感知电路获得其输出位移。由图9的结果可知,实测迟滞回线与自感知迟滞回线近乎重合,自感知迟滞回线相对实测迟滞回线的最大

误差为1.65 μ m(1.70%),可见所提自感知方法能够很好地表征压电执行器的迟滞非线性。

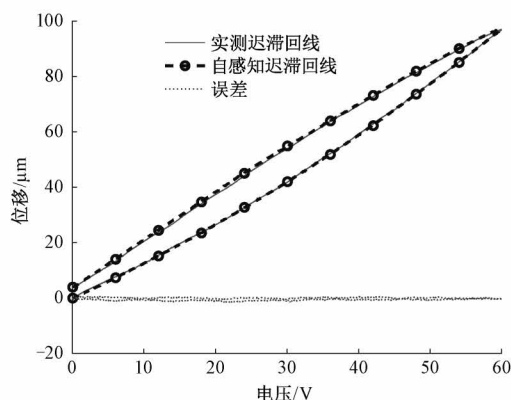


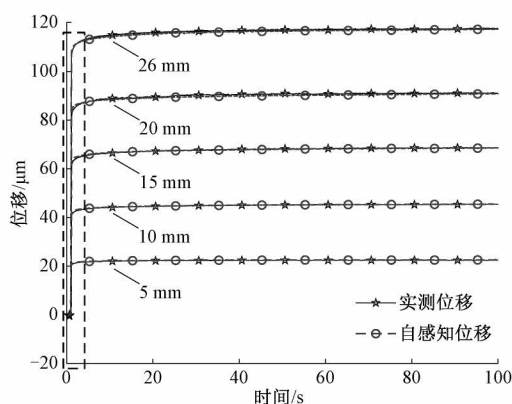
图9 压电执行器的实测迟滞回线与自感知迟滞回线

Fig. 9 Measured and self-sensing hysteresis curves of the piezoelectric actuator

3.3 阶跃电压下自感知

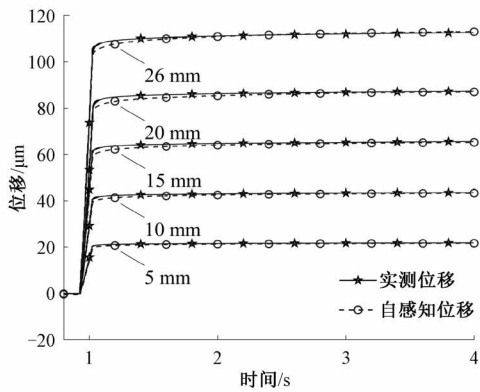
给压电执行器施加持续时间为100 s、幅值为60 V的阶跃电压,选取距离悬臂梁式压电执行器根部5、10、15、20、26等5个测量点进行测试,分别采用激光精密位移传感器与自感知电路获得压电执行器在这5个测量点的输出位移。由图10(a)的测量结果可知,在100 s的恒定电压作用下,压电执行器的输出位移发生了一定的蠕变,自感知结果所反映的位移蠕变同实测结果所反映的位移蠕变具有很好的一致性,可见所提自感知方法亦能够很好地表征压电执行器的蠕变特性。

由图10(b)的测量结果可知,即使在不同的测量位置,自感知位移同实测位移也具有很好的一致性,随着测量点离压电执行器根部距离的增大,压电执行器的输出位移增大,自感知位移相对于实测位移的误差也略有增大,当达到118.9 μ m的最大位移时,自感知位移的最大误差为1.4 μ m(1.17%)。



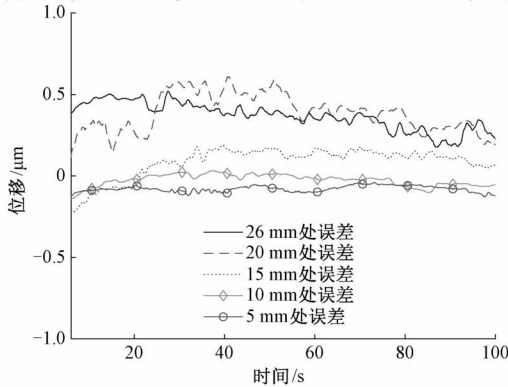
(a) 不同测量位置的实测值与自感知值

(a) Measured and self-sensing value at different measuring positions



(b) 图(a)中虚线所框部分的放大图

(b) Enlargement of the portion framed by the dashed line in Figure (a)



(c) 自感知结果相对于实测结果的误差

(c) Deviation of self-sensing results from measured results

图 10 阶跃电压下压电执行器的输出位移

Fig. 10 Measured and self-sensing displacement of the piezoelectric actuator in step voltage

由图 10(c) 的测量结果可知,位移达到稳态后的误差变化范围为 $-0.13 \sim 0.61 \mu\text{m}$ ($-0.53\% \sim 0.67\%$), 可见所提自感知方法具有较高的精度与良好的稳定性。

3.4 自感知分辨率

1) 系统噪声水平

测量系统的分辨力可通过系统的噪声水平来反映, 本文通过激光位移传感器与自感知电路获得了实测位移系统与自感知系统的噪声大小, 由图 11 的结果可知, 实测位移系统的噪声水平为 $0.17 \mu\text{m}$, 自感知系统的噪声水平为 1.8 mV 。

2) 系统位移分辨率

给压电执行器施加间隔为 2.7 s 、增幅为 0.15 V 的阶梯波驱动电压, 使其输出最小的阶梯波位移, 通过激光精密位移传感器测量该最小位移; 另一方面, 给压电执行器施加间隔为 2.7 s 、增幅为 0.2 V 的阶梯波

驱动电压, 使自感知电路输出最小的阶梯波电压, 采集该最小电压并求得最小自感知位移。由图 12 的测量结果可知, 实测位移分辨力与自感知位移分辨力分别为 0.17 和 $0.24 \mu\text{m}$, 可见所提出的自感知方法具有较高的分辨率, 达到了亚微米级。

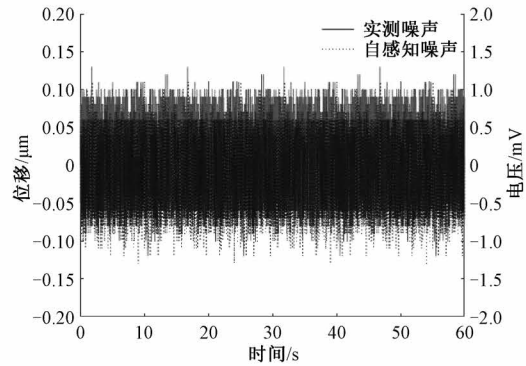


图 11 实测系统与自感知系统噪声

Fig. 11 Noise of measured system and self-sensing system

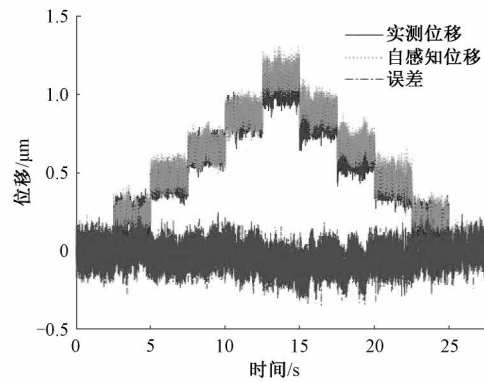


图 12 实测位移与自感知位移分辨率

Fig. 12 Resolution of measured and self-sensing displacement

3.5 正弦波电压下自感知

先测量压电执行器及其自感知系统的频率响应特性, 以验证二者的相关性; 进而, 获取正弦波作用下压电执行器的实测位移与自感知位移, 以进一步验证所提自感知方法的有效性。

1) 自感知频响特性

图 13 给出了测量压电执行器及其自感知系统频率响应特性的实验系统, 包括信号发生器 (安捷伦 33220A, 频率范围为 $1 \mu\text{Hz} \sim 20 \text{ MHz}$, 输出电压分辨率为 14 bit)、驱动电源、压电执行器、FFT 分析仪 (小野测器 CF-7200, 频率解析范围为 $0 \sim 100 \text{ kHz}$, 输入电压范围为 $0.01 \sim 31.62 \text{ V}$)、激光位移传感器、自感知电路。实验过程如下: 信号发生器产生正弦波信号, 经驱动电源放大后, 作用于压电执行器, 其位移由激光位移传感器测得后传送给 FFT 分析; 与此同时, 自感知电路获得与压电执行器位移相对应的输出电压, 将其传送给 FFT 分析仪。FFT 分析仪对压电执行器的输出位移与自感知电路的输出电压进行分析, 便可获得各自的频率响应特性。

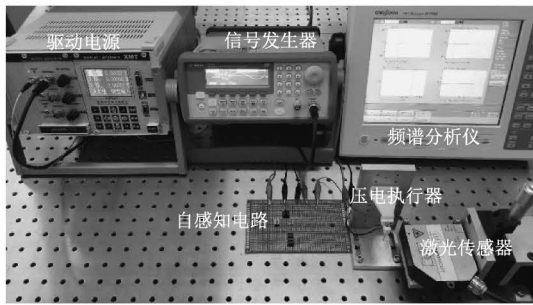


图 13 压电执行器与自感知系统频率响应测试系统
Fig. 13 The system for measuring frequency response of the piezoelectric actuator and its self-sensing system

由图 14(其中的扫频间隔设置如表 1 所示)的测量结果可知,压电执行器在 450.6 Hz 与 748.8 Hz 出现共振峰,在两共振峰之间的 570.6 Hz 存在一不显著的共振峰;自感知系统在 445 Hz 与 745.6 Hz 出现谐振峰,在两

谐振峰之间的 565 Hz 存在一不显著的谐振峰。可见,压电执行器及其自感知系统具有基本一致的频率响应特性,这进一步验证了所提出的自感知方法的有效性。

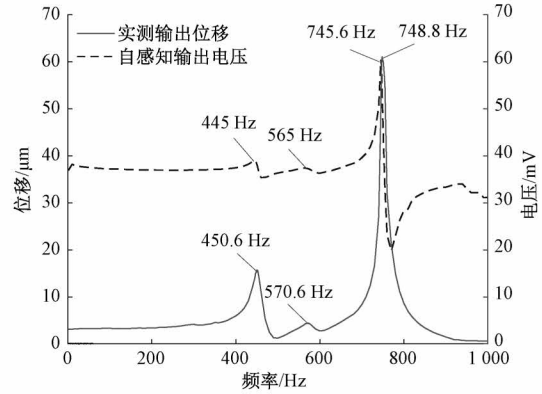


图 14 压电执行器及其自感知系统的频率响应特性
Fig. 14 Frequency characteristics of the piezoelectric actuator and its self-sensing system

表 1 扫频间隔设置

Table 1 Sweep interval setting

频段/Hz	0~440	440~460	460~560	560~580	580~740	740~760	760~1 000
频率间隔/Hz	10	0.1	10	0.1	10	0.1	10

2) 正弦波下自感知结果

给压电执行器施加幅值为 15 V,频率分别为 10、50、100 Hz 的正弦波电压,分别通过精密位移传感器与自感知系统获得压电执行器的输出位移。由图 15 的测量结果可知,在幅值为 15 V 的正弦波电压作用下,实测位移与自感知位移的幅值均约为 19.3 μm,10、50、100 Hz 下自感知位移相对于实测位移的最大绝对误差分别为 0.21、0.24、0.28 μm,最大相对误差分别为 1.08%、1.24%、1.45%。可见,随着驱动电压频率的增加,自感知位移相对于实测位移的误差虽略有增大,但仍具有较高的精度,这表明所提出的自感知方法在动态驱动下也具有良好的效果。

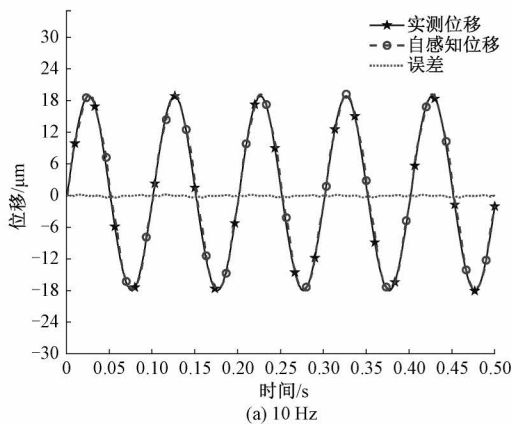
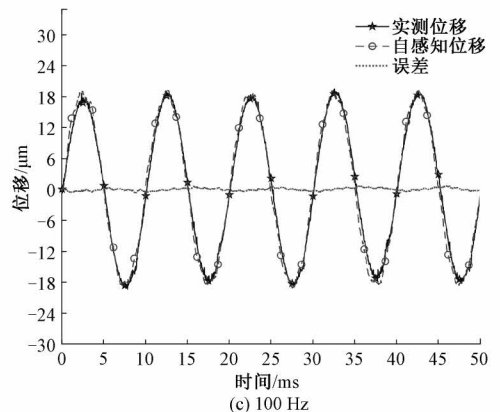
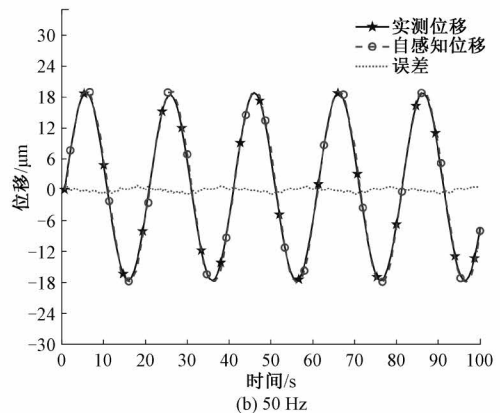


图 15 正弦波电压下的实测位移与自感知位移
Fig. 15 Measured and self-sensing displacement in sine wave voltage

3.6 对比分析

表2给出了本文所提出的位移自感知方法同电桥法、串联电阻法、检测介电常数法、积分电流法的对比,可知:在静态位移自感知方面,本文所提出的自感知方法在0~118.9 μm 位移范围内的最大相对误差为1.17%,仅大于串联电阻法在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 位移范围内

0.69%的误差,但本文中压电执行器的输出位移范围远大于其他4种方法的位移;在动态位移自感知方面,相对于电桥法与串联电阻法的自感知结果,本文所提出的自感知方法在0~100 Hz的频率范围内,具有1.45%最小自感知误差。可见,本文所提出的自感知方法具有良好的静动态性能。

表2 不同自感知方法的结果
Table 2 Results of different self-sensing methods

静动态性能	电桥法 ^[15-16]	串联电阻法 ^[17]	检测介电常数法 ^[18]	电流积分法 ^[19]	本文自感知法
静态位移范围/ μm	30	± 3	10	35.91	118.9
静态感知误差/%	1.33	0.69	1.50	2.17	1.17
动态位移范围/ μm /频率/Hz	80/100	$\pm 3/50$	—	—	19.3/100
动态感知误差/%	30.29	6.01	—	—	1.45

4 结 论

本文基于压电执行器在电压作用下发生变形的同时,还会发生电极化而在其晶片表面产生电荷这一思想,提出了一种非平衡电流积分式压电执行器的位移自感知方法,它既具有平衡电流积分法实现原理与电路构成简单、信噪比高的优点,又克服了平衡电流积分法需满足平衡条件的不足,同时消除了压电执行器漏电流与介电吸收电流、运算放大器偏置电流对自感知精度的影响。实验及对比分析表明,所提出的精密位移自感知方法既能实现静态长时间又能实现动态快速的高精度、高分辨率的位移自感知。

参考文献

- [1] LI J P, CAI J J, WEN J M, et al. A parasitic type piezoelectric actuator with the asymmetrical trapezoid flexure mechanism [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 28: 50-56.
- [2] SABARIANAND D V, KARTHIKEYAN P, MUTHURAMALINGAM T. A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 13(2): 176-189.
- [3] LU Q, CHEN X F. Application of piezoelectric actuator in series nano-positioning stage [J]. *Science Progress*, 2020, 103(1): 1-14.
- [4] MISHAKOV G V, DEMIKHOW E I, SHARKOV A V, et al. Inertial motor on a single piezoelectric actuator for a low-temperature near-field scanning optical microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 1(90): 10-23.
- [5] 俞军涛, 占昊, 王丽, 等. 压电式高速开关阀控液压缸位置系统 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(4): 706-714.
YU J T, ZHAN H, WANG L, et al. Hydraulic cylinder position system controlled by piezoelectric high-speed on-off valve [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(4): 706-714.
- [6] CHEN Y S, QIU J H, GUO J H, et al. A charge controlled driving power supply for hysteresis compensation of piezoelectric stack actuators [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, 1(59): 281-290.
- [7] LIAO C, XU M L, XIAO R J, et al. Integrated design of piezo-actuated 2-DOF submillimeter-range super-resolution platform with self-sensing unit [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 139.
- [8] 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 M R, ZHOU ZH H, LIU X, et al. Modeling of asymmetric dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric actuators [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 108-120.
- [9] BHAGAT U, SHIRINZADEH B, CLARK L, et al. Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 74: 173-187.
- [10] 刘宽, 赵梓舒, 武文华, 等. 宏纤维复合材料 MFC 作动器迟滞非线性分析与补偿方法研究 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(14): 178-185.
LIU K, ZHAO Z SH, WU W H, et al. Hysteresis nonlinear analysis and its compensation method of MFC

- actuator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(14): 178-185.
- [11] CHEN W S, LIU Y Y, LIU Y X, et al. Design and experimental evaluation of a novel stepping linear piezoelectric actuator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 276: 259-266.
- [12] 于志亮, 王岩, 曹开锐, 等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(8): 2113-2120.
- YU ZH L, WANG Y, CAO K R, et al. Hysteresis compensation and composite control for Piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2113-2120.
- [13] 顾寒烈, 吴洪涛, 杨小龙, 等. 压电作动器非对称迟滞模型的建立和参数辨识[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 903-909.
- GU H L, WU H T, YANG X L, et al. Modeling and parameter identification of asymmetric hysteresis for piezoelectric actuator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 903-909.
- [14] 霍典, 张洪朋, 史皓天, 等. 一种液压油多污染物微检测传感器设计及研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 50-58.
- HUO D, ZHANG H P, SHI H T, et al. Design and research of a micro-sensor for multi-pollutant detection in hydraulic oil [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 50-58.
- [15] HE Y, CHEN X A, LIU Z, et al. Piezoelectric self-sensing actuator for active vibration control of motorized spindle based on adaptive signal separation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(6): 065011.
- [16] HU B, PANG C K, WAN J, et al. Asymmetric indirect-driven self-sensing actuation and its application to piezoelectric systems[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, 43(4): 802-811.
- [17] MOHAMMADZAHERI M, EMADI M, GHODSI M, et al. A variable-resistance digital charge estimator for piezoelectric actuators: An alternative to maximise accuracy and curb voltage drop[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(11): 1699-1705.
- [18] SAIGUSA K, MORITA T. Self-sensing control of piezoelectric positioning stage by detecting permittivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 226: 76-80.
- [19] 崔玉国, 郑军辉, 马剑强, 等. 压电自感知微夹钳[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(7): 1996-2004.
- CUI Y G, ZHENG J H, MA J Q, et al. Self-sensing piezoelectric micro-gripper [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1996-2004.

作者简介



熊志文, 2021年于江西农业大学获得学士学位, 现为宁波大学硕士研究生, 主要研究方向为微/纳米定位。

E-mail: vean0607@163.com

Xiong Zhiwen received his B. Sc. degree from Jiangxi Agricultural University in 2021.

He is currently a master student at Ningbo University. His main research interest includes micro/nano-positioning.



崔玉国(通信作者), 1999年于吉林工业大学(现吉林大学)获得硕士学位, 2004年于大连理工大学获得博士学位, 现为宁波大学教授, 主要研究方向为微/纳米定位及精密测试。

E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

Cui Yuguo (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Jilin University in 1999, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2004. He is currently a professor at Ningbo University. His main research interest includes micro/nano-positioning and precision measurement.