

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.012

压电悬臂梁驱动传感共位特性研究

伍德¹, 彭来湖^{1,2*}

(1. 浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;
2. 杭州勤诚微电子科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要:为了探究压电陶瓷悬臂梁结构的驱动传感共位特性,笔者研究了以压电耦合悬臂梁样机分别作为传感器、驱动器和驱动传感共位时电流的变化规律,分析了压电悬臂梁被限位工作条件下其共位信号与空载状态信号的差异性,通过检测压电悬臂梁内部电流的变化来实现对压电悬臂梁驱动状态的共位检测。实验结果表明:在电压的激励下,压电悬臂梁在未被限位工作条件下,仅存在频率大小约为230 Hz的响应信号;压电悬臂梁在限位条件工作时,其采样信号在230 Hz和1 640 Hz附近处有明显响应,且仿真结果与实验结果误差均在4%以内。该实验结果证明了可将压电陶瓷悬臂梁内部电流变化所对应的特征频率作为其工作状态的判定。

关键词:压电悬臂梁;共位检测;振动;传感驱动器

中图分类号:TH89;TB381 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)04-0071-08

Research on Co-Location Characteristics of Piezoelectric Cantilever Drive Sensor

WU De¹, PENG Laihu^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Hangzhou Qincheng Microelectronics Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the co-location characteristics of the piezoelectric ceramic cantilever beam structure, the variation law of current when using the piezoelectric coupled cantilever as sensor, driver and drive sensor respectively. The difference between the co-location signal and the no-load state signal under the restricted operating conditions of the piezoelectric cantilever beam was revealed, and the internal current change of the piezoelectric cantilever beam was detected to achieve the co-location detection of the driving state of the piezoelectric cantilever beam. The experimental results show that under voltage excitation, the piezoelectric cantilever beam only has a response signal with a frequency of approximately 230 Hz under unrestricted operating conditions; when the piezoelectric cantilever beam is operating under restricted conditions, the sampled signal has a significant response around 230 Hz and 1 640 Hz, and the error between the simulation and experimental results is within 4%. The experimental results demonstrate that the characteristic frequency corresponding to the change in current inside a piezoelectric ceramic cantilever beam can be used as a determination of its operating state.

Keywords: piezoelectric cantilever beam; co-location detection; vibration; self-sensing actuator

压电陶瓷其特殊性在于它可以实现机械能与电能之间的相互转化,广泛用于结构振动控制^[1]、结构健康检测^[2-3]、选针器的驱动机构^[4]、悬臂梁式压电风能发电装置^[5]、压电振子^[6]和医疗微型压电驱动系统^[7]

收稿日期:2022-02-21;修回日期:2022-05-05

基金项目:2020年度浙江省博士后科研项目择优资助项目(ZJ2020004)。

第一作者简介:伍德(1996)男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为智能设备及智能制造。通信作者:彭来湖(1980),男,浙江苍南人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能设备及数控技术、智能制造和仪器仪表。E-mail:2408593991@qq.com

等微小驱动元件领域。1993年,由 Sincarsin 等^[8]成功将传感器与驱动器集成一体并将其命名为“传感驱动器”。1995年钱新恩^[9]利用简单搭建的试验平台,实现了单块压电材料的传感功能和执行功能。2011年张忠华等^[10]通过改变压电堆叠的边界条件总结得到驱动器位移量的变化规律。2015年刘艳梅等^[11]对实际压电陶瓷驱动特性进行测量,得到了与理论一致的压电陶瓷驱动特性曲线。2018年哈尔滨工业大学的董欣^[12]在结构上集成了压电传感驱动器,推导得到驱动器与传感器的数学模型,He 等^[13]建立压电堆叠的机电耦合模型以及电机主轴的动力学模型。2019年陆颢瓚等^[14]建立了单压电悬臂梁能量收集器在振动激励下的力学模型以及压电输出模型。Pelletier^[15]考虑到压电驱动器在振动中会引起局部应变,提出了一种补偿方法,为采集共位信号提供了方法。王光庆^[16]基于压电双向效应,借助 ANSYS 软件建立了压电振子有限元模型,为本研究进行有限元仿真提供了思路。

通过以上文献可知,驱动传感器的成功研制为驱动传感共位特性研究奠定了基础。但现有研究大部分着重于压电陶瓷功能性研究,主要用于结构主动抑制振动、结构健康检测及医疗微型驱动等领域。在同时实现驱动和传感的功能前提下,并未对驱动传感功能共位时内部电流信号的特性进行研究分析。

课题组对压电陶瓷驱动传感共位特性进行探究,通过理论推导验证了压电悬臂梁分别作为传感器、驱动器、传感驱动器工作时内部电流的变化规律,揭示驱动传感信号共位的特性;最后通过仿真和实验验证在不同工作条件下其共位信号的特点,以期对压电陶瓷驱动传感共位特性在微小驱动元件等领域的研究提供参考,对利用共位检测信号的压电结构自检测方面研究具有一定意义。

1 双晶片压电悬臂梁共位工作机理

压电悬臂梁是压电材料在工程中最常用的机械结构,一般为单层或双层压电晶片与一基板组成的耦合体,如图 1(a)和(b)所示;借此耦合体实现传感或执行功能以满足工程上的需求。无论单层晶体还是双层晶体的压电悬臂梁,在绝大多数情况下仅应用其传感或执行功能中的一种,并未将其作为传感驱动器来用。

现研究人员将传感驱动器分成结构集成型和功能集成型,如图 1(c)和(d)所示。分类依据为传感器和驱动器的集成方式,其主要区别在于 2 个功能是否由 1 个器件来承担实现。集成型压电传感器分别由 2 个独立的器件来承担,将驱动器和传感器在结构上集成在一起;而功能型的传感器则由 1 个器件来实现传感和执行功能。

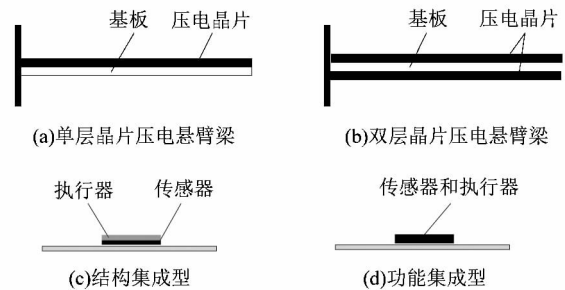


图 1 压电悬臂梁类型及传感驱动器类型

Figure 1 Piezoelectric cantilever type and sensor actuator type

课题组采用双层晶片压电悬臂梁作为研究对象,其中一片实现驱动传感功能,另一片作为传感器采样信号,将 2 片作为对照组,以提高本研究的可靠性。在实际应用中,相较于单层压电晶片悬臂梁,其优势在于高频工作条件下可通过分时驱动上下 2 片压电晶片使压电悬臂梁摆动。该方法具有工作寿命长、产热低、稳定性高等特点。本次研究压电悬臂梁的边界条件为机械自由和电学短路,因采用第一类压电方程作为理论基础,取应力和电场强度为自变量,应变和电位移为因变量。则压电方程可表示为:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{31}^E & d_{31} \\ d_{31} & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: D_3 为电位移; S_1 为应变; d_{31} 为压电常数; E_3 为电场; S_{31}^E 为 E_3 为常数或零时的弹性柔顺系数; T_1 为 X 方向上的应力; ϵ_{33}^T 为 T_1 为零或常数时的介电常数。

对于压电悬臂梁,当在压电晶片上施加一与极化方向相同的电场,因电场作用,使得极化强度增大,此时压电晶片内电荷之间的距离发生变化,造成压电晶片沿极化方向缩短或伸长,使得压电悬臂梁弯曲摆动,此时压电悬臂梁的等效电路内会因外加电场产生电信

号。在正常弯曲摆动过程中,压电悬臂梁局部产生应变变形,二次压电效应产生电信号耦合进入内部等效电路中。若在摆动过程中与外界产生碰撞,当碰撞力或其分力方向与极化方向平行时,压电晶片受力变形,内部电荷之间距离减小,产生电位移,从而产生放电现象;当碰撞力消失,压电晶片恢复原有形状,同理会产生充电现象。根据压电悬臂梁的工作条件,以上几种信号会根据出现的时间不同耦合在一起,出现信号共位的情况。针对该共位信号的特性展开深入研究,详细解析双晶片压电悬臂梁作为传感驱动器工作时内部电流变化的特点。

2 压电悬臂梁驱动传感电流特性分析

双层压电晶片耦合体的材料为 PZT-5H,极化方向沿压电悬臂梁的厚度方向。并且选用高碳纤维作为中间基板。3层结构之间通过胶粘接而成。悬臂梁固定端通过导电柱为压电悬臂梁供电。压电悬臂梁的尺寸以及实物如表 1 和图 2 所示。

表 1 压电悬臂梁组成材料以及尺寸大小

Table 1 Material and size of piezoelectric cantilever beam

材料	长/mm	宽/mm	厚/mm
PZT-5H	41.000	7.200	0.245
高碳纤维	41.000	7.200	0.300

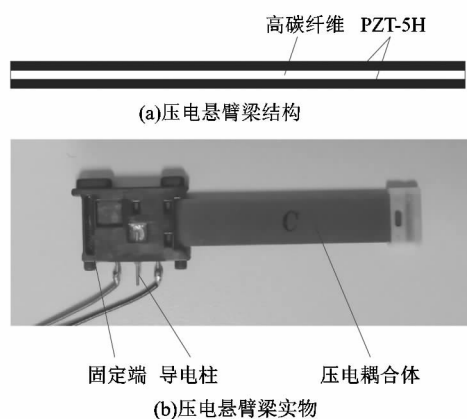


图 2 压电悬臂梁结构和实物

Figure 2 Schematic and physical of piezoelectric cantilever

2.1 压电驱动器电流特性

压电悬臂梁做为驱动器时,可运用机电等效的方

法,根据机电类比原理将机械振动与电路振荡 2 个领域的问题归结到一起分析机电耦合问题。电路中常用的基本原件有电容器、电阻器和电感线圈,而机械系统中常用元件有质量元件、阻尼元件和弹性元件。将电能与机械能进行对比,具体对比关系如表 2 所示。

表 2 机械系统与电路系统中功能关系

Table 2 Functional relationship between mechanical system and circuit system

机械系统		电路系统	
名称	公式	名称	公式
动能	$E_m = mv^2/2$	磁能	$W_L = Li^2/2$
弹性势能	$E_k = kx^2/2$	电容器电能	$W_C = Q^2/2C$
克服阻尼消耗功率	$W_c = cv^2/2$	电阻消耗功率	$W_R = Ri^2/2$

从表 2 可知,在机械系统与电路系统中,质量元件、弹性元件和阻尼元件功能分别类似于电感元件、电容元件和电阻元件。针对压电陶瓷的基频共振电路,将其类比等效为单自由度机械振动系统。在实际工况中存在阻尼,需考虑机械损耗,因此根据压电材料基频附近的电路特性可将其等效电路简化为一电容 C_0 并联由电容 C_1 、电阻 R_1 、电感 L_1 组成电路,等效示意如图 3(a) 所示。由阻抗分析仪(图 3(b) 所示)测出其等效电路具体数值如下:电阻 $R_1 = 8.863\ 2\ \text{k}\Omega$,电容 $C_1 = 305.7\ \text{pF}$,电感 $L_1 = 95.378\ \text{H}$,电容 $C_0 = 13.765\ \text{nF}$ 。

压电陶瓷片处于自由状态时,在激励电压下,其内部存在由等效电路产生的电流信号,且该电流的具体变化特征为:①在电容 C_0 的作用下产生充放电过程;②在图 3(a) 等效电路的作用下会产生振荡电流。2 种电流耦合在一起即为自由状态下压电陶瓷片内部电流的变化特征。借助 Multisim 软件搭建如图 3(c) 所示仿真电路,探究自由状态下压电陶瓷的内部电流变化特征。图 3(d) 为压电陶瓷自由状态下等效电路的充放电过程,因充放电过程中幅值相对于等效电路的幅值较大,为方便后续实验测量数据与观察分析,在采样电路中加入一放大电阻,通过检测电阻的电压值,来反映内部电流的变化。

当压电陶瓷片边界条件发生改变时,将压电陶瓷片一端作为固定约束,成为压电悬臂梁模型。此时再

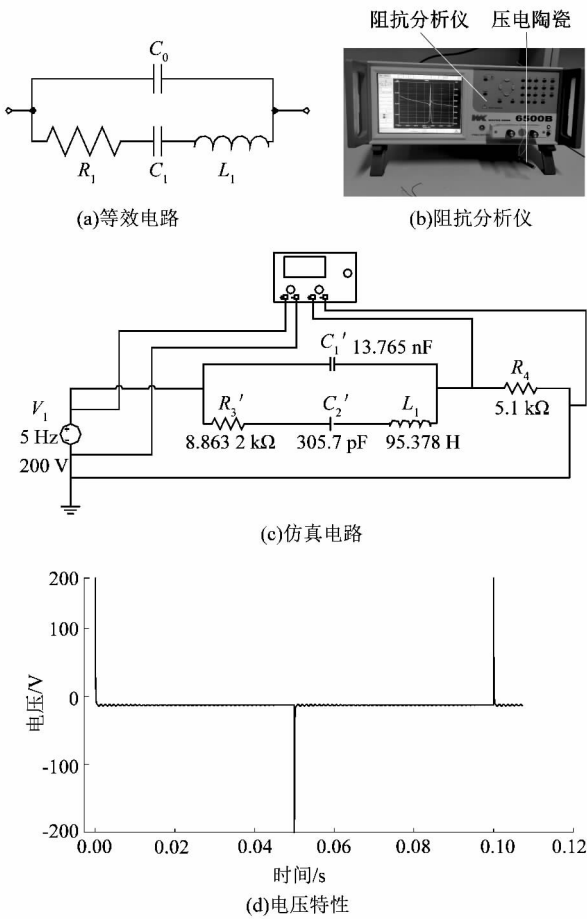


图3 压电陶瓷片自由状态下仿真电路及电压特性
Figure 3 Simulation circuit and current characteristics of piezoelectric ceramics in free state

经阻抗分析仪测量得到此时边界条件下压电陶瓷的等效电路具体参数为电阻 $R_1 = 88.176 \text{ k}\Omega$, 电容 $C_1 = 1.6776 \text{ nF}$, 电感 $L_1 = 350.31 \text{ H}$, 电容 $C_0 = 14.105 \text{ nF}$ 。若压电悬臂梁末端负载时,其等效电路具体数值为:电阻 $R_1 = 18.06 \text{ k}\Omega$, 电容 $C_1 = 2.5035 \text{ nF}$, 电感 $L_1 = 149.95 \text{ H}$, 电容 $C_0 = 40.865 \text{ nF}$ 。

分别对压电陶瓷处于空载,负载和自由状态下的等效电路进行仿真分析,结果如图4所示。

针对3种不同边界条件下的压电陶瓷,其基频共振等效电路一致,但各等效元件具体数值不同,等效电路采集到振荡信号在振幅和频率上差异明显,故作为驱动器时压电悬臂梁的工作边界条件与其工作过程内部电流信号息息相关。

2.2 压电传感器电流特性

压电悬臂梁作为传感器时,沿厚度方向极化,本身

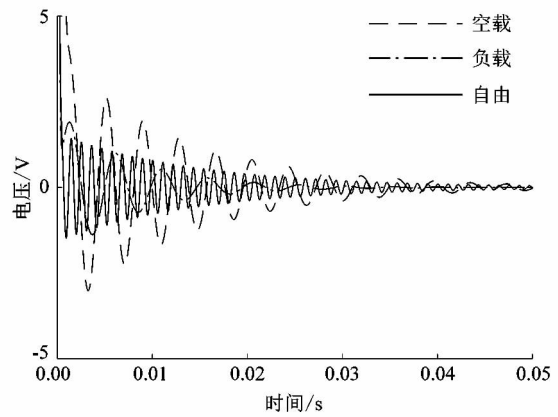


图4 不同状态下电流特性放大图
Figure 4 Current characteristic diagram in different states

为绝缘体,因正压电效应使得2极表面聚集电荷,此时压电悬臂梁相当于一电容器,其电容量大小为 $C = \frac{\epsilon A}{h}$, 其中 A 为电极板表面积, ϵ 为压电晶片的介电常数, h 为压电晶片的厚度,由此可见作为传感器时压电晶片的等效电容由压电晶片的材料参数和其物理尺寸所决定。

如图5所示,压电悬臂梁在工程应用中,末端弯曲到一定程度与限位装置发生碰撞,造成压电悬臂梁内部电流因正压电效应而改变,压电悬臂梁在该过程中可实现传感功能。冲击力 F 作用于压电悬臂自由端,为一非周期变化的的激振力,该力作用时间十分短暂,是典型的非周期作用下的响应。若 v_1 和 v_2 为系统受到冲击前后的速度, m 为压电悬臂梁的质量, u 为冲量大小,则有:

$$u = F\Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_t^{t+\Delta t} F dt = mv_2 - mv_1 \quad (2)$$

因为 dt 趋近于0,若要使 Fdt 为有限值,则 F 的值需要趋近于无穷大,此处冲量可以作为一个非常有意义的分析工具来量化力的大小。故可以将压电悬臂梁受外力冲击等效为受冲量作用的单自由度的欠阻尼系统,则:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_d t} \left[x_0 \cos(\omega_d t) + \frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0}{\omega_d} \sin(\omega_d t) \right] \quad (3)$$

式中: ζ 为阻尼比, ω_d 为有阻尼振动时的频率, ω_n 为无

阻尼振动时的固有频率, c 为压电悬臂梁的阻尼系数, k 为压电悬臂梁的等效弹簧常数。

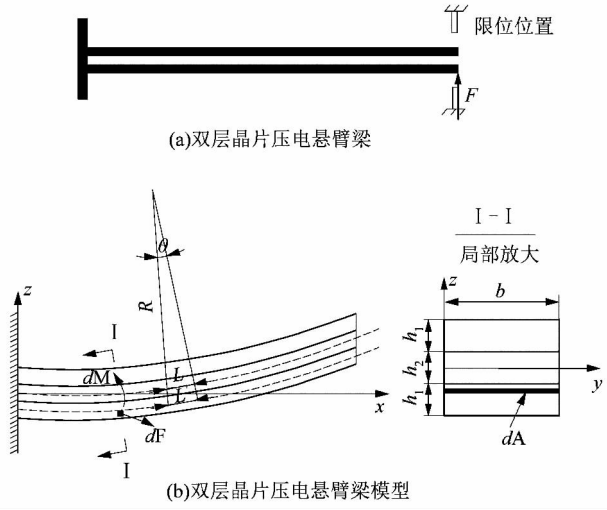


图5 压电悬臂梁限位等效模型
Figure 5 Limit equivalent model of piezoelectric cantilever beam

等效弹簧常数为:

$$k = \frac{3EI}{l^3}。$$

式中: E 为材料的弹性模量, I 为复合梁的横截面关于 $y-y$ 方向上的惯性矩, $I = bh^3/12$ 。

由于该压电悬臂梁上下2层为压电晶片,中间层为高碳纤维,所以需计算其等效的弹性模量,上下2层压电陶瓷厚度相同为 h_1 ,弹性模量为 E_1 ,中间基层厚度为 h_2 ,弹性模量为 E_2 ,令 E_c 为复合梁的等效的弹性模量, b 为复合梁的宽, R 为中性轴的曲率半径,弯矩为:

$$M = \int_{-h_1-h_2/2}^{-h_2/2} \frac{E_1 z^2}{R} b dz + \int_{-h_2/2}^{h_2/2} \frac{E_2 z^2}{R} b dz + \int_{h_2/2}^{h_1+h_2/2} \frac{E_1 z^2}{R} b dz。 \quad (4)$$

而 $M = E_c I/R$, 因此从式(4)得到弯矩 M 后,即可求得:

$$E_c = \frac{(8h_1^2 + 12h_1^2 h_2 + 9h_2^2 h_1) E_1 + E_2 h_2^3}{8h_1^3 + 12h_1^2 h_2 + 6h_2^2 h_1 + h_2^3}。 \quad (5)$$

根据挠曲线公式推出应变关于时间变化的规律:

$$\sigma(t)_{\max} = \frac{3x(t) E_c y_1}{l^2}。 \quad (6)$$

由压电方程可知:

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3。 \quad (7)$$

所用压电陶瓷片 PZT-5H 压电常数为 d_{31} , 电极表面积为 A_p , 对电极表面积上的电位移量进行积分, 可得到压电陶瓷传感器电极面输出电荷量的总和 Q_3 为:

$$Q_3 = \iint_{A_p} D_3 dx dy = A_p d_{31} T_1。 \quad (8)$$

联立式(5)~(7)解得:

$$Q_3 = 3A_p d_{31} E_c y_1 \frac{\mu e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t)}{m \omega_d l^2}。 \quad (9)$$

再用电荷量对时间求导得到电流: $i = \frac{dQ}{dt}$, 将式(9)代入电流求解方程中, 解得压电悬臂梁在工作过程中由机械碰撞所产生的电流随时间变化的关系:

$$i = \frac{3A_p d_{31} E_c y_1 (v_2 - v_1)}{\omega_d l^2} [\omega_d e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t) - \zeta \omega_n e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t)]。 \quad (10)$$

综上, 根据动力学方程以及压电方程求得压电悬臂梁在限位作用下与限位装置发生碰撞产生的电流随时间变化的规律。

2.3 驱动传感器共位电流特性

压电悬臂梁作为功能性驱动传感器, 处于正常工作时, 压电悬臂梁往返摆动, 内部存在由其驱动等效电路产生的电信号; 在该过程中因压电悬臂梁振动使得局部应变发生改变, 产生并耦合了二次压电效应电信号。压电悬臂梁在限位边界条件下工作时, 当压电悬臂梁末端未撞击到限位装置时, 其内部电信号与未被限位时相同; 撞击到限位装置的瞬间, 因正压电效应在压电悬臂梁内部产生的电信号耦合进入压电悬臂梁正常摆动的信号之中, 整个过程如示意图6所示, t_1 为压电悬臂梁撞击限位装置时间点, t_2 为截取共位信号结

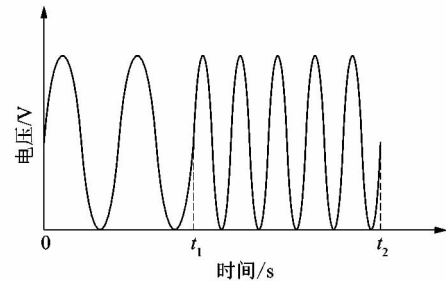


图6 共位信号产生过程

Figure 6 Co-location signal generation process

束的时间点。压电悬臂梁同时实现传感器和驱动器功能时,根据分析可知其内部电信号为线性耦合。

3 实验

为验证压电悬臂梁驱动传感共位的电特性,课题组以压电双晶片悬臂梁为研究对象设计实验,分别对不同工作状态下压电悬臂梁内部电信号的变化进行分析比较,对上述理论及仿真进行验证。实验流程如图7(a)所示。

实验采用2组恒压源来控制输出加载电压,通过主控板控制输出电压的频率,并加载于压电悬臂梁上层压电晶片,使上层晶片作为驱动传感器。模拟压电悬臂梁的不同工作状态,经采样电路通过高性能示波器分别获取上层与下层压电晶片输出信号,最后由PC端进行数据处理并分析结果,样机平台如图7(b)所示。

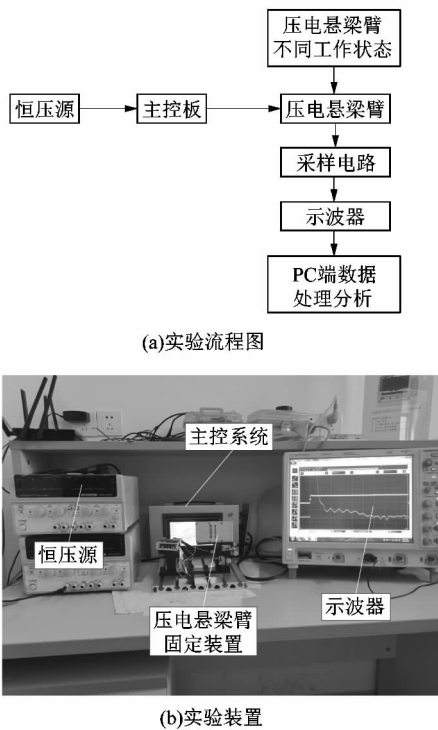


图7 实验流程及装置

Figure 7 Experimental process and device

采用 MATLAB 对数据进行滤波处理,得到压电悬臂梁在空载正常工作时,上下2层压电晶片的采样信号,如图8所示。上层压电晶片因外部加载电场,所以其充电峰值较大,局部振荡信号相对较小。下层压电

晶片作为传感器被动弯曲,因上下晶片极化方向相同,故其信号与上层晶片输出信号相位角相差180°,且充电时峰值远小于上层压电晶片输出信号峰值。压电晶片输出信号充放电过程为其常见特性,其振荡信号特性为本研究重点,因此下文将取其局部振荡信号作为研究对象。

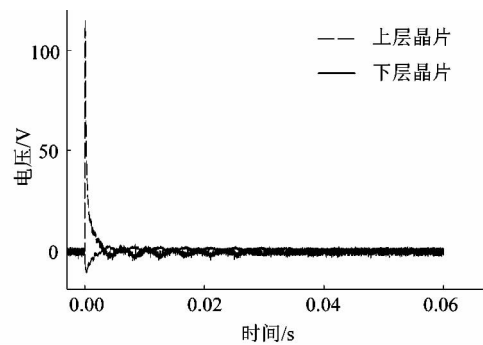
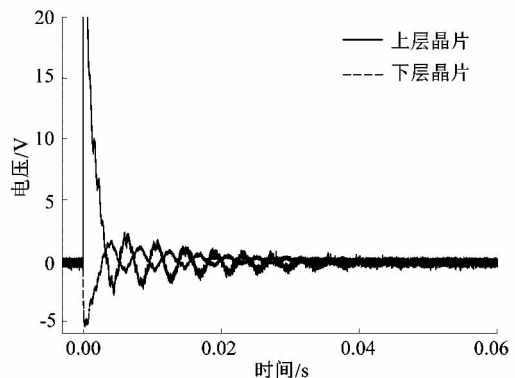


图8 空载条件下采样信号波形

Figure 8 Sampling signal waveform under no-load condition

对压电悬臂梁在空载正常条件下与限位条件下局部采样信号进行分析,具体如图9所示。图9(a)为本次压电悬臂梁空载正常工作时经上下2晶片获取的电信号,该信号为压电悬臂梁作为驱动器产生的局部振荡信号及二次压电效应的耦合信号。图9(b)为在压电悬臂梁被限位时经上下2晶片获取的电信号,压电悬臂梁从平衡位置达到限位位置所用时间十分短暂,当压电悬臂梁撞击到限位装置的一瞬间,在冲击力的作用下经正压电效应压电悬臂梁内部产生电位移,耦合到压电悬臂梁作为驱动器产生的耦合信号之中,其内部电信号发生突变。下层压电晶片输出信号整体趋势与上层晶片一致。



(a)空载信号

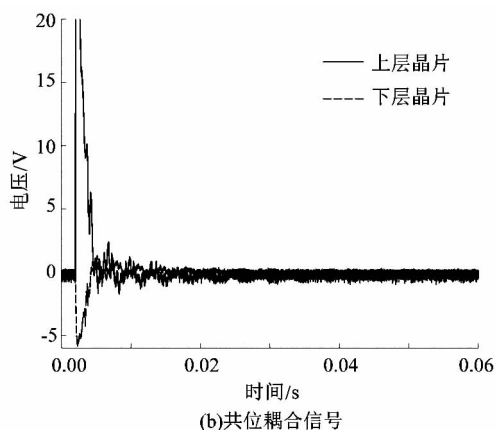


图9 不同工作条件下局部采样信号波形
Figure 9 Local sampling signal waveform under different working conditions

由图10(a)和(b)可知,压电悬臂梁在空载条件下的仿真耦合信号频率为230 Hz,在受冲击力时的仿真耦合信号为1 690 Hz。如图10(c)与(d)所示,分别为上下2晶片在200 V电压激励下的不同工作条件下的响应频谱,经分析可知,在空载正常工作时,上下2晶片信号特征频率分别为226 Hz和244 Hz。由电路仿真可知,该信号仅为压电驱动器等效电路产生的信号,因此二次压电效应产生的电信号,在本研究中忽略不计。在限位工作时,上层晶片信号特征频率为239 Hz和1 644 Hz,下层晶片信号特征频率为236 Hz和1 629 Hz,因此上层驱动压电晶片信号耦合了压电晶片作为传感器的电信号,验证了实验的准确性及可靠性。图10中纵坐标数值代表 $N/2$ 倍的信号电压幅值, N 为采样点数。

表3为压电悬臂梁在限位工作条件下时,不同激励电压下的采样信号频率及其与仿真耦合信号频率之间的误差,可以发现在不同大小的电压激励下,压电悬臂梁的采样信号频率与仿真耦合信号频率之间的误差低于4%,且压电悬臂梁在限位工作条件下存在频率值在230 Hz和1 640 Hz附近处的响应信号。

4 结论

课题组针对压电悬臂梁驱动传感共位特性进行研究,探究了压电悬臂梁分别作为传感器和驱动器的等效电路以及其内部电流的变化规律,分析了压电传感驱动器其电流特性为各种信号在时序上的线性耦合,

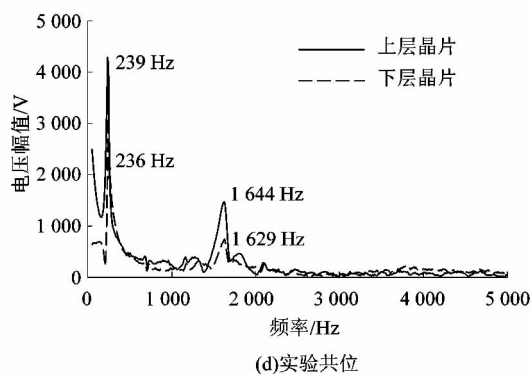
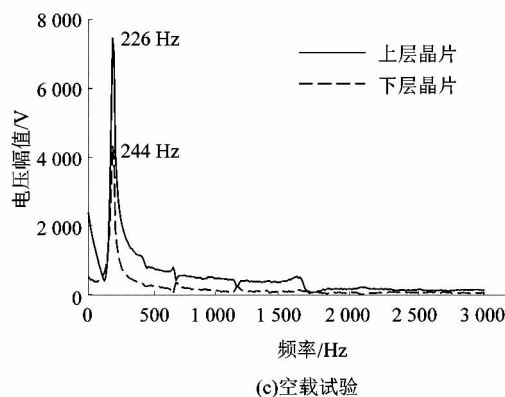
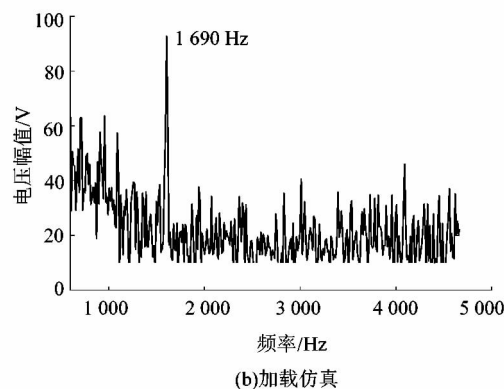
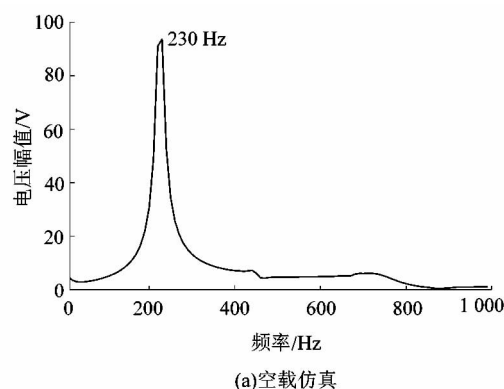


图10 信号频谱图

Figure 10 Signal spectrogram

表3 实验信号频率采集结果
Table 3 Experimental signal frequency acquisition results

激励电压/V	信号频率/Hz		误差/%	信号频率/Hz		误差/%
	空载	仿真耦合		加载	仿真耦合	
20	222	230	3.60	1 635	1 690	3.36
40	232	230	0.87	1 641	1 690	2.99
60	227	230	1.31	1 638	1 690	3.17
80	234	230	1.74	1 656	1 690	2.05
100	237	230	3.04	1 678	1 690	1.31
120	224	230	2.61	1 654	1 690	2.78
140	241	230	4.78	1 630	1 690	3.68
160	235	230	2.17	1 639	1 690	3.11
180	218	230	5.22	1 659	1 690	1.89
200	239	230	3.91	1 644	1 690	2.80

建立了压电悬臂梁工作限位时的传感器输出电流与外部载荷的数学模型;通过 ANSYS Workbench 有限元仿真软件模拟了压电悬臂梁在不同条件下内部电流变化,并设计了压电悬臂梁空载和限位 2 种工作状态实验。得到以下结论:①在未被限位正常工作时,在二次压电效应被忽略的情况下,其内部仅存在特征频率为 230 Hz 的响应信号;②在限位工况时,其内部存在特征频率分别约为 230 Hz 与 1 640 Hz 的响应信号。

针对压电悬臂梁作为驱动传感器共位信号特性的研究表明:该共位信号可作为压电悬臂梁驱动结果的衡量标准。因压电悬臂梁中间胶接层剥落或压电材料老化等因素出现压电悬臂梁动作不到位,可通过共位信号反馈出压电悬臂梁的工作状态,为智能驱动器在自检测、自诊断和自保护等领域提供了新方法,为压电陶瓷在微小驱动传感器领域以及驱动传感共位特性研究提供了思路,推动该领域的应用。该研究所探究的压电悬臂梁驱动传感共位特性在不同工程应用中,压电材料的边界条件不尽相同,后续可在不同边界下、更多工况下其共位特性进行深入探究。

参考文献:

[1] 艾亿谋,杜成斌,于国军. 压电智能材料在悬臂梁结构振动控制中

的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):695-698.

[2] 孙艾薇,郭少华. 土木工程结构健康监测中的压电传感技术研究[J]. 四川建筑,2010,30(6):118-119.

[3] 孙威,阎石,姜绍飞,等. 基于压电陶瓷传感器的钢筋混凝土框架结构裂缝损伤全过程监测[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(4):84-90.

[4] 夏天宇,彭来湖,史伟民. 选针器压电陶瓷驱动及往复位移特性研究[J]. 针织工业,2019(11):15-18.

[5] 宁艺文,张健滔,张佳,等. 悬臂梁式 PVDF 压电风能发电装置的优化设计[J]. 微特电机,2020,48(3):1-5.

[6] 杨晋宁,曹雅莉. 线性悬臂梁式压电振子的理论分析与仿真[J]. 机电信息,2020(11):45-47.

[7] 杨剑之. 应用于医疗精确给药的微型压电驱动系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019:21-24.

[8] SINCARSIN G B, DELEUTERIOG M T, HUGHESP C. Dynamics of an elastic multibody chain: part D modelling of joints [J]. Dynamical and Stability of Systems, 1993, 8(2):3-5.

[9] 钱新恩. 自传感主动式减振控制[J]. 湖北汽车工业学院学报, 1995(1):26-30.

[10] 张忠华,程光明,阚君武,等. 基于多次压电效应的微执行器[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):1998-2003.

[11] 刘艳梅,金博伟,魏阳杰,等. 基于显微视觉的亚像素压电陶瓷驱动特性测量[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):1163-1169.

[12] 董欣. 极化式压电传感执行器系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018:9-19.

[13] 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): 17-24.

[14] 陆颖瓚,朱宇宸,刘琪才,等. 悬臂梁压电式能量收集器方向性效率的研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(3):181-187.

[15] PELLETIER A, MICHEAU P, BERRY A. Harmonic active vibration control using piezoelectric self-sensing actuation with complete digital compensation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(7):9-13.

[16] 王光庆,王学保,李秀玲,等. 能量采集型压电超声驱动器设计与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(12):55-63.