用于柔性板振动控制的压电陶瓷时 效损伤性能研究

邱智勇¹,王轲¹,林晔²,李强²

(1.南京航空航天大学 机械结构动力学及控制国家重点实验室,南京 210016;2.北京空天技术研究所,北京 100074)

摘要:目的 基于压电陶瓷的逆压电效应,以试验和仿真分析的方法研究压电陶瓷对某柔性板试验件振动 控制的时效性能,为压电陶瓷如何保持长时间有效参与振动控制提供参考。方法 搭建振动主动控制系统, 实现柔性板的振动控制,以压电陶瓷驱动电压的降低模拟时效损伤。建立该结构的动力学有限元模型,并 进行响应分析,以压电陶瓷产生的驱动力变小来模拟时效损伤。通过测定不同损伤程度的压电陶瓷参与振 动控制前后的动响应,得到多种条件下的振动控制效率。结果 当所有压电陶瓷的时效损伤程度均达到 80% 时,对某柔性板试验件的振动控制率降低为初始振动控制率的 60.4%。基于试验与分析结果,评估多种条 件下的振动控制率,得到了压电陶瓷时效损伤对柔性板振动控制的影响规律。结论 压电陶瓷时效损伤对 柔性板振动控制的影响可以用有限元仿真来模拟,压电陶瓷的时效损伤程度可通过调节它的驱动电压来进 行测试。

关键词:柔性板;振动主动控制;压电陶瓷;时效损伤;逆压电效应;模拟仿真 中图分类号:TB535;TJ85 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2022)09-0018-07 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.09.004

Time-dependent Damage Performance Study of Piezoelectric Ceramics for Vibration Control of Flexible Plates

QIU Zhi-yong¹, WANG Ke¹, LIN Ye², LI Qiang²

(1. State Key Laboratory of Dynamics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China; 2. Beijing Aerospace Technology Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: This paper aims to provide a reference for the piezoelectric ceramics participating in the vibration control effi-

Corresponding author: WANG Ke (1967-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: complex structural dynamics.

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2022-07-21

Received: 2022-06-23; Revised: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51775270); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51775270); Jiangsu University Advantageous Discipline Construction Project Funding Project

作者简介:邱智勇(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为复杂结构动力学减振设计与优化。

Biography: QIU Zhi-yong (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: design and optimization of complex structural dynamics for vibration reduction.

通讯作者:王轲(1967—),男,博士,副教授,主要研究方向为复杂结构动力学。

引文格式:邱智勇,王轲,林晔,等.用于柔性板振动控制的压电陶瓷时效损伤性能研究[J].装备环境工程,2022,19(9):018-024.

QIU Zhi-yong, WANG Ke, LIN Ye, et al. Time-dependent Damage Performance Study of Piezoelectric Ceramics for Vibration Control of Flexible Plates[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 018-024.

ciently for a lengthy time. The time-dependent performance of the piezoelectric ceramics in vibration control of the flexible plate is studied by the test and simulation based on the inverse piezoelectric effect. On the one hand, to realize the vibration control of the flexible plate, an active vibration control system is built, and the time-dependent damage is simulated by means of decreasing the driving voltage of the piezoelectric Ceramics; On the other hand, the dynamic finite element model of the structure is established for response analysis. The time-dependent damage of the piezoelectric ceramics is simulated with the aid of reducing the driving forces produced by the piezoelectric ceramics. When the piezoelectric ceramics are in different degrees of time-dependent damage, the vibration control rates are calculated after the dynamic responses before and after vibration control are measured. Among the rates, when the degree of the time-dependent damage of all piezoelectric ceramics reaches 80%, the vibration control rate of a flexible plate test piece is decreased to 60.4% of the initial vibration control rate. The influence rule of the time-dependent damage of piezoelectric ceramics on vibration control rates calculated from the experimental results and simulated results under various conditions. Both the experimental and simulated results indicate that the finite element simulation can be used to simulate the impact on vibration control of flexible plate when the piezoelectric ceramics are subject to the time-dependent damage, and the degree of the time-dependent damage of piezoelectric ceramics are subject to the time-dependent damage, and the degree of the time-dependent damage of piezoelectric ceramics are subject to the time-dependent damage, and the degree of the time-dependent damage of piezoelectric ceramics can be tested by adjusting its operating voltage.

KEY WORDS: flexible plate; active vibration control; piezoelectric ceramics; time-dependent damage; inverse piezoelectric effect; simulation

20世纪40年代,压电陶瓷作为典型的压电材料, 具有压电系数和机电耦合系数高、稳定性好^[1]等特 点。随后它开始被广泛应用于振动控制,并衍生出了 许多种应用形式^[2-8]。例如,在柔性梁、板类结构表 面布置压电陶瓷,并采用一定的振动控制方法可取得 非常好的振动控制效果^[9-17]。在利用压电陶瓷进行振 动控制的过程中,随着使用时间的推移,压电陶瓷的 性能必然会出现不同程度的衰减,甚至是失效,这也 就是压电陶瓷所表现出来的时效损伤特性。本文将用 试验和仿真分析的方法研究压电陶瓷的时效损伤、失 效对某柔性板振动控制效率的影响,分析该类结构振 动控制的时间效应及其规律。

笔者以某柔性板试验件为例,建立了振动主动控 制系统,改变压电陶瓷的驱动电压以模拟不同的时效 损伤程度。同时也建立了该结构的动力学有限元模 型,并进行响应分析,以压电陶瓷产生的驱动力大小 表征压电陶瓷的损伤程度。最后,基于试验和仿真分 析结果,评估了多种条件下的振动控制效率,表明压 电陶瓷时效损伤对柔性板的振动控制影响可以用有 限元仿真来模拟。

1 试验

压电陶瓷在交变电源的驱动下会触发逆压电效 应^[18-20],若该交变电压信号与柔性板外加激励信号的 相位相差 180°,即可驱动压电陶瓷产生反向的振动 幅度,从而减小柔性板在正弦激励下的动响应,实 现抑振。

以某贴有压电陶瓷的柔性板试验件为研究对象, 进行试验研究,探索压电陶瓷对某柔性板试验件振动 控制的时效性能。压电陶瓷在交变电压的驱动下会产 生相应的驱动力,而性能完好的压电陶瓷在不同驱动 电压的驱动下产生的驱动力大小是不同的。根据这一 特性,在试验中调节压电陶瓷的驱动电压大小,就可 以呈现出压电陶瓷输出驱动力大小不同的状态,从而 达到模拟时效损伤的目的。若压电陶瓷的时效损伤一 直持续,最终将会导致压电陶瓷失效。失效具体是指 压电陶瓷就算受到驱动电压的作用,也无法提供驱动 力的情况,所以当压电陶瓷大效时所产生的驱动力为 0,即在试验中让压电陶瓷不接入工作电路就可以模 拟出失效的状态。

某柔性板的制作材料为铝合金 7150, 夹具的材 料为 45 号钢, 压电陶瓷的材料特性参数见表 1。压 电陶瓷(蓝色)的部分尺寸及布局、夹具(褐色)的 部分尺寸和柔性板(绿色)的部分尺寸标注如图 1 所 示。图 1 中左上角的黑色标点为结构动响应监测点, 夹具上方的红色标点为正弦激励激振点。因为压电陶 瓷面积较小, 与结构的刚度相比, 压电陶瓷本身的结 构刚度可以忽略, 因此在加电压前, 结构的模态不会 产生较大改变。

表 1 压电陶瓷的结构参数 1 Structural parameters of piezoelectric cera

Tab.1 Structural parameters of piezoelectric ceramics						
弹性模量/GPa	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	泊松比	压电刚度常数/(10 ¹⁰ N·m ⁻²)	压电应变常数/(10 ⁻¹⁰ m·V ⁻¹)	最大驱动电压/V	
5.0	7.6	0.35	5.56	5.0	150	



夹具双面夹持该柔性板试验件后,将夹具固定在 试验台上,在试验件底部的正弦激励激振点处安装力 传感器和激振器。先以激振器扫频的方式和激光测振 仪测试柔性板试验件动响应监测点的速度响应,进行 模态试验后,得到试验件的实测一阶模态频率为 15.69 Hz。其中激振器的扫频信号为 5~150 Hz 的单位 正弦激励。得到试验件的一阶模态频率后,再进行柔性板振动控制试验,试验装置和主要试验仪器型号如图2所示。

调节功率放大器 1、2,直到只需设定信号发生器 1、2 的输出电信号幅值各为 5 V,就可使得激振器与压电陶瓷都正常工作。后续的试验步骤如下:

1)设置信号发生器1的输出电信号幅值为5V, 再将该电信号的频率设置为15.69 Hz。利用激振器施 加定频的单位正弦激励,使得试验件发生一阶共振。

2)设置信号发生器 2 的输出电信号幅值,将该 电信号的频率设置为 15.69 Hz。

3)设定激光测振仪的灵敏度,并标定结构动响 应监测点位置。

4)设置模拟数字转换器的采样率为1024 Hz。

5)开启功率放大器 1 的通道,并记录动响应监测点的速度响应幅值和力传感器信号。

6)开启功率放大器 2 的所有通道,并记录动响 应监测点的速度响应幅值和力传感器信号。

试验通过降低压电陶瓷的驱动电压来模拟压电 陶瓷的时效损伤。假设信号发生器 2 中的输出电信号 幅值分别为 5、4、3、2、1 V,再分别重复上述步骤, 测定动响应监测点处在压电陶瓷发生时效损伤时,参 与柔性板振动控制前后的速度响应幅值,试验结果见 表 2。



图 2 柔性板振动控制试验系统 Fig.2 Test system for vibration control of the flexible plate

表 2 压电陶瓷发生时效损伤时的柔性板振动控制试验结果

Tab.2 Results of vibration control test for the flexible plate when the piezoelectric ceramics are subject to time-dependent damage							
信号发生器 2 电信号幅值/V	振动控制前/(mm·s ⁻¹)	振动控制后/(mm·s ⁻¹)	振动控制率/%	振动控制率的变化率%			
5	1.34	0.56	58.21	—			
4	1.34	0.68	49.25	0.30			
3	1.34	0.78	41.79	0.25			
2	1.34	0.88	34.33	0.25			
1	1.34	0.92	31.34	0.10			

注: 振动控制率的变化率表示当压电陶瓷的驱动电压从 U1下降至 U2的过程中, 驱动电压每降低 1 V, 振动控制率的降低量。

试验中通过控制压电陶瓷所对应的功放通道关闭与否来模拟压电陶瓷的失效。假设逐一失效的压电

陶瓷编号为 7、8、4、3,重复上述步骤,将信号发 生器 2 中的输出电信号幅值设为 5 V,并逐一关闭功 率放大器 2 所对应的通道,测定动响应监测点在压电 陶瓷发生失效时,参与柔性板振动控制前后的速度响 应幅值,试验结果见表 3。

表 3 压电陶瓷存在失效时的柔性板振动控制结果 Tab.3 Results of vibration control test for the flexible plate when the failure of piezoelectric ceramics occurs

	•		
损坏的压电 陶瓷编号	振动控制前 /(mm·s ⁻¹)	振动控制后 /(mm·s ⁻¹)	控制率 /%
7	1.30	0.58	55.38
7,8	1.30	0.66	49.23
7, 8, 4	1.30	0.72	44.62
7, 8, 4, 3	1.30	0.84	35.38

从压电陶瓷发生时效损伤前后振动控制率的变 化量来看,压电陶瓷对柔性板振动控制率的影响随压 电陶瓷时效损伤程度的加深会越来越大。当压电陶瓷 的驱动电压从最大驱动电压降低至最大驱动电压的 80%时,压电陶瓷对柔性板的振动控制率降低了 8.96%;当压电陶瓷的驱动电压从120V降低至90V 时,压电陶瓷对柔性板的振动控制率降低了7.46%; 当压电陶瓷的驱动电压从90V降低至60V时,压电 陶瓷对柔性板的振动控制率降低了7.46%;当压电陶 瓷的驱动电压从60V降低至30V时,压电陶瓷对柔 性板的振动控制率降低了2.99%。由此可得,当压电 陶瓷只有轻微损伤时,压电陶瓷性能衰减的速率开始 会加快,随后会趋于稳定,而在压电陶瓷时效损伤严 重(表现为信号发生器2的输出电压降至原电压1/2 以下)时,有损压电陶瓷的性能衰减速率会变慢。

已知在压电陶瓷没有发生时效损伤或者失效的 情况下,对柔性板的振动控制率为 58.21%,再结合 表 3 可知,7 号压电陶瓷失效对柔性板振动控制的影 响较小,8 号和4 号压电陶瓷失效对柔性板振动控制 的影响相近,且影响程度要大于7 号压电陶瓷,3 号 压电陶瓷失效对柔性板振动控制的影响最大。说明在 柔性板结构发生一阶共振时,根部的压电陶瓷对振动 控制的影响程度最深,中间位置的次之,远端的最弱。 无论是压电陶瓷时效损伤,还是失效的情况,压电陶 瓷对柔性板的一阶共振仍存在 30%以上的抑制效果, 满足试验的目标要求。

2 有限元仿真分析

为验证试验结果的可靠性,建立了上述试验件的 结构动力学有限元模型,并进行时域响应分析。计算 响应时,柔性板的外激励和模态阻尼比均由试验实测 得到,压电陶瓷时效损伤的仿真通过控制压电陶瓷产 生的驱动力大小来模拟。用实际驱动力的百分比表 示时效损伤程度,若驱动力为0,则表示该压电陶瓷 失效。由王秋婧等^[21]的研究可知,压电陶瓷单面附 着于结构表面时的驱动电压与产生的驱动力之间的 关系为:

$$F(t) = \frac{c_{33}^{\rm E} A \omega^2 m d_{33} U_0}{4 c_{33}^{\rm E} A - 2 \omega^2 m h} \sin \omega t$$
(1)

式中: c_{33}^{E} 为压电刚度常数; A 为压电陶瓷的截 面面积; h 为压电陶瓷的厚度; m 为压电陶瓷的质量; d_{33} 为压电应变常数; $U_0 \sin \omega t$ 为压电陶瓷的驱动电压 信号。

为保证网格的精细化, 网格大小统一设定为 2.5 mm。柔性板采用 4 节点 2D 壳单元建模, 夹具和 压电陶瓷尺寸规整, 建模均采用 8 节点六面体单元, 并在与柔性板的接触区域内采用共节点处理。得到 含压电陶瓷的柔性板有限元模型如图 3 所示, 共计 20 709 个单元, 47 723 个节点。将夹具伸出柔性板板 身的部分所包含的所有有限元节点的 6 个自由度加 以约束,进行模态分析后得到一阶振型(见图 4), 频率结果见表 4。从表 4 可以看出,前三阶仿真频率 与试验频率之间的误差均在 1%以内。



图 3 含压电陶瓷的柔性板有限元模型 Fig.3 Finite element model of the flexible plate with piezoelectric ceramics



图 4 含压电陶瓷的柔性板一阶振型 Fig.4 First-order vibration pattern of the flexible plate with piezoelectric ceramics

表 4 柔性板试验件固有频率的仿真结果与试验结果对比 Tab.4 Comparison of simulation natural frequency and test natural frequency of the flexible plate

		-	
阶数	固有频		
	仿真结果	试验结果	- 庆左/70
1	15.77	15.69	0.52
2	44.23	44.00	0.51
3	83.72	83.16	0.68
4	127.26	130.56	-2.53

at

有限元模拟仿真响应分析中,需要添加的载荷可 以分为2个部分:第一部分是指使得结构发生共振的 周期激励载荷,由试验中的力传感器实测得到;第二 部分是指压电陶瓷在接入工作电路后所产生的驱动 力,由式(1)计算得到。

将试验过程中的力传感器信号作为有限元中的 载荷施加在与试验激振点对应的有限元节点上。通过 式(1)可计算得到压电陶瓷产生的驱动力 *F(t*),将 该驱动力施加在有限元模型中柔性板与压电陶瓷末 端接触的中间节点上。以压电陶瓷产生的驱动力下降 表示压电陶瓷性能的降低,按照驱动力的不同百分 比,设定不同工况,分别计算与试验件动响应监测点 所对应的有限元节点在仅有周期激励载荷作用和周 期激励载荷及压电陶瓷产生的驱动力共同作用下的 速度响应幅值,得到压电陶瓷时效损伤的有限元仿真 结果和与试验进行对比的结果见表 5。

表 5 压电陶瓷时效损伤的仿真结果与试验结果对比 Tab.5 Comparison of simulation results and test results during the time-dependent damage of piezoelectric ceramics

试验驱动电压 百分比/%	试验的振动 控制率/%	仿真驱动力 百分比/%	仿真的振动 控制率/%	误差/ %
100	58.21	100	62.88	8.02
80	49.25	80	50.12	1.76
60	41.79	65	40.74	-2.52
	_	60	38.05	_
40	34.33	55	34.48	0.44
20	31.34	50	31.52	0.56

从表 5 的结果来看,在压电陶瓷时效损伤的仿真 研究中,当仿真与试验的振动控制率相近时,仿真中 压电陶瓷产生的驱动力的降低程度与试验中压电陶 瓷的驱动电压的下降程度并不完全匹配。特别是当压 电陶瓷的驱动电压降至最大驱动电压的 80%以下后, 随着压电陶瓷进一步发生时效损伤,相近控制率所 对应的仿真驱动力百分比与试验驱动电压百分比之 间相差越来越大。随着压电陶瓷产生的驱动力不断 降低,压电陶瓷性能衰减的规律也呈现出一开始衰 减很快,最后会慢慢减弱的趋势,这与试验结果基 本一致。

假设压电陶瓷的失效顺序与试验一致,逐一设置 编号为7、8、4、3的压电陶瓷产生的驱动力为0, 并进行响应分析,记录与试验件动响应监测点所对应 的有限元节点在周期激励载荷作用和周期激励载荷 及压电陶瓷产生的驱动力共同作用下的速度响应,得 到压电陶瓷失效的有限元仿真结果和与试验进行对 比的结果见表6。

从表 6 的结果来看, 在压电陶瓷失效的仿真研究 中, 仿真结果与试验结果之间的误差在可接受的范围 内, 仿真得到的压电陶瓷失效对柔性板的振动控制率

表 6	压电陶瓷失效时仿真结果与试验结果对比
Tab.6 Co	mparison of simulation results and test results

	C '1	c	•		•	
the	to111170	ot	n10700	loctric.	coromics	
unc	ranuic	UI.	piczoc.		cerannes	

失效的压电 陶瓷编号	试验的振动控 制率/%	仿真的振动 控制率/%	误差/ %
7	55.38	57.48	3.79
7,8	49.23	51.64	4.90
7, 8, 4	44.62	47.07	5.49
7, 8, 4, 3	35.38	37.01	4.61

变化规律与试验的规律基本一致,根部的压电陶瓷失 效对振动控制的影响要高于远端。

3 结论

文中对压电陶瓷作动器应用于柔性板振动控制 的时效损伤性能进行了试验研究和仿真分析。一方 面,以驱动电压降低模拟压电陶瓷的时效损伤,并搭 建了振动主动控制系统以实现柔性板的振动控制;另 一方面,以压电陶瓷产生的驱动力减小模拟压电陶瓷 的时效损伤,建立了该结构的动力学有限元模型,并 进行响应分析。得到如下结论:

1) 压电陶瓷的时效损伤对柔性板振动控制的影响可通过压电陶瓷的驱动电压调整来进行测试。

2)压电陶瓷时效损伤对柔性板振动控制的影响 可以用有限元仿真来模拟。

3)随着压电陶瓷时效损伤的不断累积,其性能的衰减速率会由快变慢。

4)根部的压电陶瓷发生时效损伤对柔性板结构 振动控制的影响程度更深。这是因为柔性板结构在发 生一阶共振时,根部产生的应变更大。同时,也正是 因为根部产生了较大的应变,从而导致根部的压电陶 瓷更容易发生时效损伤。

根据已有的理论公式推导, 压电陶瓷的驱动电压 与输出的驱动力理应成正比, 但在压电陶瓷时效损伤 的研究中, 相近控制效率下, 试验驱动电压的下降比 例与仿真驱动力的下降比例并不重合。例如, 60%的 驱动电压作用在压电陶瓷上得到的振动控制率与 65% 的驱动力作用在柔性板上得到的振动控制率更接近。 说明压电陶瓷实际的输出驱动力比理论值更大, 考虑 到在压电材料中正逆压电效应是同时存在的^[22], 由此 推断在试验过程中可能存在二次压电效应^[23-25]的影 响,导致压电陶瓷产生了一个附加的压电电位移, 对 原有的电场起到了强化的作用。后续可进行相关的理 论和试验分析进一步研究。

参考文献:

[1] JAFFE B, ROTH R S, MARZULLO S. Piezoelectric

Properties of Lead Zirconate-Lead Titanate Solid-Solution Ceramics[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(6): 809-810.

- [2] BAILEY T, HUBBARD J E. Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(5): 605-611.
- [3] SONG G, SETHI V, LI H N. Vibration Control of Civil Structures Using Piezoceramic Smart Materials: A Review[J]. Engineering Structures, 2006, 28(11): 1513-1524.
- [4] 陶云刚,周洁敏,路小波,等.利用压电传感器/驱动器
 的柔性结构主动振动控制研究[J].航空学报,1997, 18(6):720-724.

TAO Yun-gang, ZHOU Jie-min, LU Xiao-bo, et al. Active Vibration Control of Flexible Structure Using Piezoelectric Sensor/Actuator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(6): 720-724.

- [5] 李凯翔.布置压电阵列元件薄壁结构的振动控制技术 研究[J].装备环境工程,2020,17(9):89-94.
 LI Kai-xiang. Vibration Control Technology of Thin-Wall Structure with Piezoelectric Patches Array[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(9): 89-94.
- [6] 方有亮,武哲. 配置压电自感作动器智能板振动的主动控制[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(1):87-90.
 FANG You-liang, WU Zhe. Active Vibration Control of Smart Plate with Self Sensing Piezoelectric Actuators[J].
 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(1): 87-90.
- [7] 邱志成. 压电智能挠性板的主动振动控制研究[J]. 压电与声光, 2002, 24(6): 497-501.
 QIU Zhi-cheng. A Study on Active Vibration Control for Piezoelectric Intelligent Cantilever Plate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002, 24(6): 497-501.
- [8] 谭平. 粘贴式压电陶瓷作动器主动控制研究[J].南京 理工大学学报(自然科学版), 2005, 29(6): 697-699.
 TAN Ping. Active Control with Affixed Piezoceramic Actuator[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(6): 697-699.
- [9] MIN J B, DUFFY K P, CHOI B B, et al. Numerical Modeling Methodology and Experimental Study for Piezoelectric Vibration Damping Control of Rotating Composite Fan Blades[J]. Computers & Structures, 2013, 128: 230-242.
- [10] SUN Zhi-gang, WANG Xian-qiao. Postbuckling Investigations of Piezoelectric Microdevices Considering Damage Effects[J]. Sensors, 2014, 14(3): 4876-4898.
- [11] 张书扬,张顺琦,李靖,等.基于 PID 算法的压电智能 结构形状与主动振动控制[J].西北工业大学学报, 2017, 35(1): 74-81.
 ZHANG Shu-yang, ZHANG Shun-qi, LI Jing, et al.

Shape Control and Active Vibration Control of Piezoelectric Smart Structures with PID Algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 74-81.

- [12] INMAN D J. Active Modal Control for Smart Structures[J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359(1778): 205-219.
- [13] WU Da-fang, HUANG Liang, PAN Bing, et al. Experimental Study and Numerical Simulation of Active Vibration Control of a Highly Flexible Beam Using Piezoelectric Intelligent Material[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 37: 10-19.
- [14] 戴宗杰,叶红玲,尹芳放. 基于模态空间的压电结构振动主动控制的研究[C]//北京力学会第二十三届学术年会会议论文集.北京:北京力学会,2017.
 Dai Zongjie,Ye Hongling and Yin Fangfang. Research on Active Control of Vibration of Piezoelectric Structure Based on Modal Space[C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2017.
- [15] 唐纪晔,黄海,夏人伟. 压电复合材料层合板自适应结构的振动控制[J]. 计算力学学报,2000,17(4):441-446. TANG Ji-ye, HUANG Hai, XIA Ren-wei. Vibration Control of Adaptive Structure Using Composite Laminated Piezoelectric Element[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(4): 441-446.
- [16] WU Da-fang, HUANG Liang, SU Fei, et al. Realization of Active Vibration Control on Piezoelectric Intelligent Flexible Beam[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 5580-5585.
- [17] 程淑莲,穆腾飞.温度对压电陶瓷传感器信号传输的 影响研究[J].民用飞机设计与研究,2021(3):81-85. CHENG Shu-lian, MU Teng-fei. Influence of Temperature on the Piezoelectric Transducer Signal Transmission[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2021(3): 81-85.
- [18] 范勇军,黄文超,王巍. 压电主动振动控制系统受噪声 影响时域仿真研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 48-52.

FAN Yong-jun, HUANG Wen-chao, WANG Wei. A Time Domain Method for Noise Impact Study of Piezoelectric Active Vibration Control System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 48-52.

- [19] OSHIMA K, ISHIGURO R, OGATA K. Development of Static Load Sensor Utilizing both Direct and Inverse Piezoelectric Effect of Piezoelectric Element[J]. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 27(4): 419-427.
- [20] 李园芳,何孔智,张宇,等. 逆压电效应对双稳态压电 俘能器的性能影响研究[J]. 计算力学学报, 2022(3):

1-8.

LI Yuan-fang, HE Kong-zhi, ZHANG Yu, et al. Research on the Influence of Inverse Piezoelectric Effect on the Performance of Bi-Stable Piezoelectric Energy Harvester[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022(3): 1-8.

- [21] 王秋婧, 阎石, 梁丽娉. 压电陶瓷驱动力学模型及数值 分析[J]. 现代振动与噪声技术, 2010(8): 284-290.
 WANG Qiu-jing, YAN Shi, LIANG Li-ping. Mechanical Model and Numerical Analysis of Piezoelectric Ceramic Drive[J]. Modern Vibration and Noise Technology, 2010(8): 284-290.
- [22] LEE S S, WHITE R M. Piezoelectric Cantilever Voltage-to-Frequency Converter[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 71(1/2): 153-157.
- [23] 史丽萍, 孙宝元, 钱敏. 二次压电效应研究及利用其原 理设计微驱动器探析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1522-1525.

SHI Li-ping, SUN Bao-yuan, QIAN Min. Investigation of the Secondary Piezoelectric Effect and Its Application to Design Micro-Drive System[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(11): 1522-1525.

[24] 史丽萍,孙宝元,钱敏.利用一次正、二次逆压电效应
 设计可作动传感器研究[J].大连理工大学学报,2008,48(4):519-522.

SHI Li-ping, SUN Bao-yuan, QIAN Min. Investigation of Generating Actuation Sensor Applying the First Direct and the Secondary Converse Piezoelectric Effect[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(4): 519-522.

[25] ZHOU Yong, LI Si, ZHOU Hong-bo. State Space Finite Element Analysis for Piezoelectric Precision Positioning Considering Secondary Converse Piezoelectric Effect[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 102-103: 85-94.

责任编辑:刘世忠