

长柔压电梁振动俘能与形变感知研究

常文燕¹, 王虎¹, 牛钟锐¹, 张森荣¹, 宋汝君^{1,2}, 张丹³, 张磊安¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 255000, 山东淄博; 2. 山东国创精密机械
有限公司, 251700, 山东滨州; 3. 山东理工大学电气与电子工程学院, 255000, 山东淄博)

摘要: 针对汽车运行时悬架系统因路面激励产生的振动能量未被有效利用、其振动状态缺乏监测的问题,提出了阵列式压电俘能与形变监测一体化装置的方案,实现了振动能量回收利用及监测汽车状态。阵列压电装置是由一个悬臂梁和 3 个压电片构成,压电片 I、II、III 沿直线分别粘贴在悬臂梁的根部、中部、靠近尾部的位置,利用压电效应将振动能量转换成电能,并基于激振实验测得的多点电压,通过高斯数值积分与样条插值方法建立长柔悬臂梁挠度数学模型,进行数值仿真分析。结果表明:阵列压电装置的共振频率为 19.6 Hz,输出电压随激振频率的增加先增大后减小,随激励加速度的增大而增大;悬臂梁根部的压电片 I 输出开路电压最大,其不同激励加速度下最大输出电压分别为 8.08、6.59、4.13 V。在质量块和磁力分别作用下,共振频率均会减小,且输出电压增加。在质量块影响下,压电片 I、II、III 处最大输出电压相较于无质量块分别提升了 31.19%、25.95%、52.78%,在磁力作用下,分别提升了 45.92%、28.98%、55.21%。当加速度为 2 m/s² 时,长柔压电梁末端挠度实验结果为 6.967 mm,数值仿真结果为 6.964 mm,相对误差仅为 0.43%,引入磁力后,相对误差最大为 10.06%。该研究可为振动能量收集和汽车安全行驶提供参考。

关键词: 悬臂梁;振动能量收集;压电梁;形变感知;阵列压电装置

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202512020 **文章编号:** 0253-987X(2025)12-0228-09

Research on Vibration Energy Harvesting and Deformation Sensing of Long Flexible Piezoelectric Beam

CHANG Wenyan¹, WANG Hu¹, NIU Zhongrui¹, ZHANG Senrong¹,

SONG Rujun^{1,2}, ZHANG Dan³, ZHANG Leian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China;
2. Shandong Guochuang Precision Machinery Co., Ltd., Binzhou, Shandong 251700, China; 3. School of Electrical and
Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: During the operation of a vehicle, vibration energy will be generated by the suspension system due to road excitation. Yet it is not recovered for use. The vibration state of the vehicle is not monitored, either. To address these issues, an integrated device for array piezoelectric energy harvesting and deformation monitoring is proposed, which may not only recover vibration energy but also monitor the vehicle status. The device is composed of a cantilever beam and three

收稿日期: 2025-05-08。 作者简介: 常文燕(1999—),女,硕士生;宋汝君(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2025M771362);国家自然科学基金资助项目(52075305);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME053)。

网络出版时间: 2025-06-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250627.1020.002>

piezoelectric sheets. The piezoelectric sheets are aligned in a straight line and respectively attached to the root I, middle II, and near the tail III of the cantilever beam, acting to convert vibration energy into electrical energy via the piezoelectric effect. With voltage measured at multiple points through excitation experiments, a mathematical model for the deflection of the long flexible beam is established based on Gaussian numerical integration and spline interpolation methods for numerical simulation and analysis. Results: The array piezoelectric device has a resonant frequency of 19.6 Hz. The output voltage first increased and then decreased as the excitation frequency grew, and increased as the excitation acceleration rose. The maximum open-circuit output voltage occurred at piezoelectric sheet I at the root of the cantilever beam, which reached 8.08, 6.59 and 4.13 V respectively at different excitation accelerations. Under the effect of a mass block or magnetic force, the resonant frequency decreased and the output voltage increased. With the application of the mass block, the maximum output voltage at I, II and III increased by 31.19%, 25.95% and 52.7% respectively compared to that when no mass block was applied. When a magnetic force was applied, the maximum output voltage increased by 45.92%, 28.98% and 55.21% respectively. When the acceleration was 2 m/s^2 , the deflection at the end of the long flexible piezoelectric beam was 6.967 mm, with a relative error of only 0.43% to the result obtained through numerical simulation (6.964 mm). After the introduction of the magnetic force, the maximum relative error was 10.06%. The insights presented in this research can provide a reference for vibration energy harvesting and safe driving of automobiles.

Keywords: cantilever beam; vibration energy harvesting; piezoelectric beam; deformation sensing; array piezoelectric device

近年来全球能源短缺与环境恶化问题愈发突出,国家大力倡导降低能耗,提升清洁能源在能源结构中的占比,推动能源高效利用已成为重点发展方向。生活中广泛存在的振动能作为一种清洁能源^[1-3],其回收利用受到广泛关注,例如汽车悬架在行驶过程中会受到路面不平带来的振动,这些振动能量经过缓冲后通常会被浪费,但可以通过俘能技术^[4-6]进行收集,用于汽车自身的电能供应,实现能量的回收利用^[7-8]。

在振动俘能领域^[9-11],压电材料凭借压电效应强^[12-14]、灵敏度高、环境适应性强等优点被广泛应用。已有研究表明,李辉等^[15]建立了悬臂梁压电俘能器初始结构模型,发现在 0~20 Hz 路面振动频率范围内,压电片 PZT-5H 表现出优异的电转换效率。Wang 等^[16]将压电陶瓷用于能量收集并进行了多压电俘能器阵列研究,该阵列在协同工作时的能量输出较单一俘能器提升显著,阵列化的设计^[17-18]可满足微电子系统持续供电需求。

在压电感知^[19-20]领域,压电材料还能通过感知结构形变实现对车辆运行状态的监测。通过在结构上粘贴压电材料,可以精确捕捉到极其微小的力学变化,并转化为明显的电信号^[21-22],分析其与梁变

形的相关性。刘永斌等^[23]提出一种压电自感知电荷载驱动方法,应用于悬臂梁一阶振动,可以发现用同一压电元件既能抑制振动又能感知振动状态,从而实现了压电自感知。Lap-Arparat 等^[24]发现结构长度对振动模态频率影响最大,结构越长固有频率越低。陈捷基^[25]通过优化用于汽车悬架的压电陶瓷振动传感器结构,达到了汽车主动悬架中主动减振控制系统对感知元件灵敏度的要求。

综上所述可以发现,现有研究存在功能单一化的局限,难以同时实现俘能与形变监测的双重功能。为此,本文提出一种阵列式压电俘能与形变监测一体化装置的方案,通过采用柔性梁模型,以阵列压电片的方式对其输出性能进行分析,并利用高斯数值积分和样条插值的建模方式建立柔性梁挠度数学模型以实现其形变感知。该方案旨在同时实现汽车悬架振动能收集及汽车状态监测。

1 俘能与感知原理及实验平台搭建

本研究利用长柔压电梁对其振动俘能与形变感知进行研究,阵列压电装置如图 1 所示。该装置由长柔悬臂梁、压电片、质量块、磁铁等构成。从梁根部开始每间隔 100 mm 粘贴一片压电片,共粘贴 3

片,分别表示为压电片 I、II、III。长柔梁选用铝梁,压电片采用 PZT-5H,为避免重力影响,长柔压电梁横向且平行于激振器铝基板放置,一端由亚克力板夹住固定于激振器上随之振动,另一端为自由端。

长柔梁末端一面贴上反光条,以便激光点照射,另一面相同位置粘贴质量块。在粘贴质量块的一面,距离一定位置安装固定支架,将磁铁粘贴在固定支架上,位置与质量块位置对应,参数如表 1 所示。

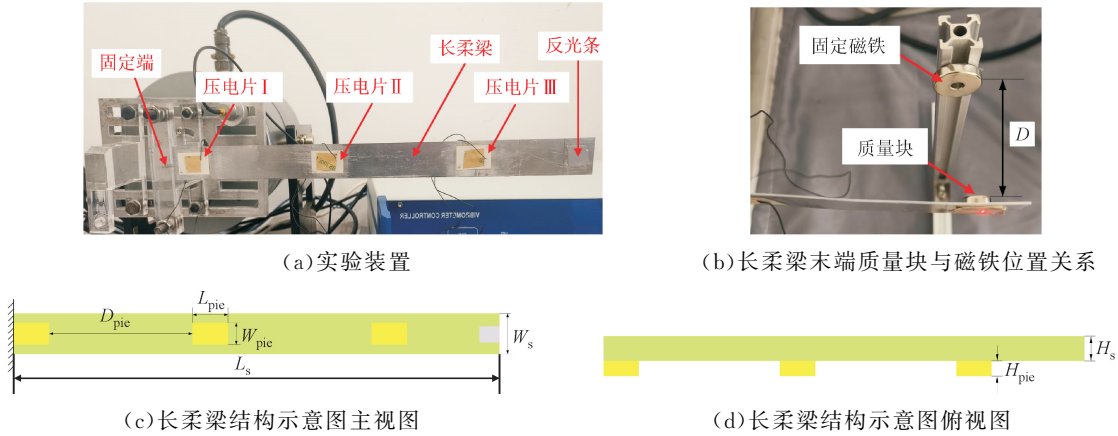


图 1 阵列压电装置结构示意图以及实物图

Fig. 1 Structure diagram of array piezoelectric device and physical drawing

表 1 阵列压电装置参数

Table 1 Array piezoelectric device parameter

参数	数值	参数	数值
长柔梁长度 L_s /mm	400	压电片密度 $\rho_{pie}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 386
长柔梁宽度 W_s /mm	30	杨氏模量 E/Pa	70×10^{-9}
长柔梁厚度 H_s /mm	0.6	压电常数 $d_{31}/(\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	-274×10^{-12}
压电片长度 L_{pie} /mm	30	磁铁直径 Φ_{mag}/mm	10
压电片宽度 W_{pie} /mm	20	磁铁密度 $\rho_{mag}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
压电片厚度 H_{pie} /mm	0.2	质量块质量/g	2
压电片间距 D_{pie} /mm	100		

压电片俘能的工作原理是基于压电效应,当悬臂梁受外部激励产生振动时,粘贴在梁上的压电片随之振动,将振动能转化成电能。同时,长柔梁形变感知的原理是通过检测压电片 I、II、III 输出的电压信号,经过推导 3 点电压与应变的关系,得到长柔梁对应位置的应变状态,可以进一步转换为挠度信息。通过建立相应的数学模型,能够计算出压电梁末端的挠度值,实现压电感知。

实验平台如图 2 所示,主要包括实验样机、激振器(JZK-40)、功率放大器(YE5873A)、振动控制器(VT-9002)、NI 数据采集卡(NI-9202,电压范围为 $-10 \sim 10 \text{ V}$,考虑到电压上限问题,采用另一种采集卡 NI-9229,电压范围为 $-60 \sim 60 \text{ V}$)、激光测振仪(LV-S01)、测振仪控制器和计算机。将实验样机固定在激振器上,功率放大器和振动控制台与计算机连接,通过计算机改变振动台振动状态,以改变压电梁的外部激励。多通道数据采集卡一端分别连接

3 片压电片采集电压信号,另一端连接计算机进行储存数据。将激光测振仪摆放在平行于压电梁振动方向且距离梁 30 cm 以上的位置,使激光点能够垂直打在梁末端的反光条上,测振仪控制器一端连接测振仪,另一端连接计算机储存挠度数据。



图 2 阵列压电俘能与监测实验平台

Fig. 2 Array piezoelectric energy harvesting and monitoring experimental platform

2 俘能实验测试与结果分析

2.1 共振频率

对阵列压电装置进行实验测试,设定激励加速度为 1 m/s^2 ,频率范围为 $5 \sim 25 \text{ Hz}$,经扫频发现压电片 I、II、III 的电压变化趋势一致,均是随着频率的增加先增大后减小,在频率 $f=19.6 \text{ Hz}$ 处,三者电压均达到最大值分别为 4.817 、 3.865 和 2.455 V 。靠近悬臂梁根部的压电片 I 输出电压最高,II 其次,III 输出电压最低,说明压电片 I 位置应变最大,且俘能性能最优,如图 3(a)所示。图 3(b)~(d)表示压电片 I、II、III 在 19.4 、 19.6 、 19.8 Hz 的瞬时电压响应,均输出稳定的正弦波信号,且 19.6 Hz 时瞬时电压幅值达到最大值,与图 3(a)所示的压电片输出电压峰值相符合。说明了阵列压电装置的共振特性:在达到共振频率前,随着振动加剧输出电压持续增大,至 19.6 Hz 时振动最剧烈使电压达到峰值,超过该频率后系统响应迅速衰减,证明 19.6 Hz 为该阵列压电装置的共振频率。

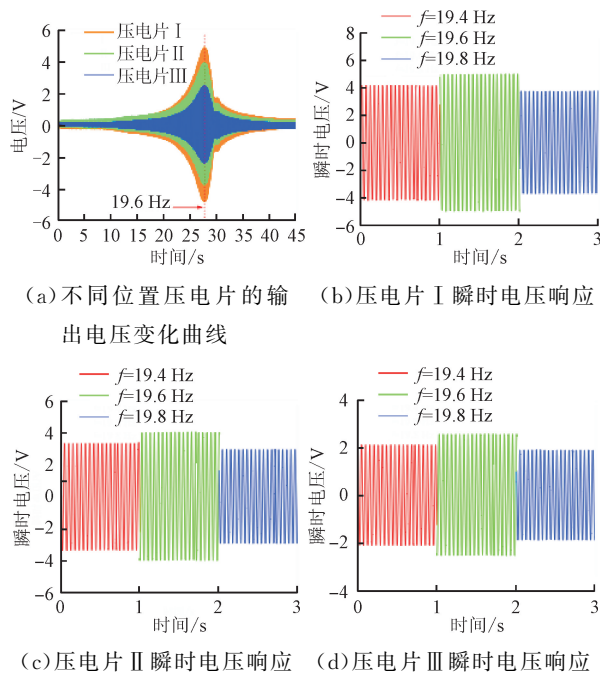


图 3 阵列压电装置的谐振特性

Fig. 3 Resonant characteristics of array piezoelectric device

2.2 激励加速度的影响

不同激励加速度会对压电俘能性能有所影响,在长柔压电梁共振频率为 19.6 Hz 的基础上,采用上述实验平台,对不同加速度的俘能特性进行探究。

当激励加速度 a 分别为 1.0 、 1.5 、 2.0 m/s^2 时,

对长柔压电梁进行 $15 \sim 25 \text{ Hz}$ 的扫频测试,且为满足后续挠度计算需要,压电片 I、II、III 采用独立并联连接方式,分别连接到采集卡上的 3 个通道中,同步采集电压数据,测量电压均为开路电压。实验结果表明在不同激励加速度下,各压电片输出电压均是随着频率的增大先增大后减小,在共振频率处达到峰值,其中最靠近根部的压电片 I 输出电压最大,压电片 II 和 III 电压依次降低,如图 4(a)~(c)所示。随着激励加速度的增大,压电片 I、II、III 的输出电压均增大,阵列压电装置俘能性能越好。图 4(d)~(f)为不同激励加速度下压电片 I、II、III 在共振频率下的瞬时电压响应,电压呈现出规律的正弦波, I、II、III 电压依次减小,电压的衰减规律证实越靠近根部的压电片具有越优的俘能性能,也能反映出加速度增大,俘能效果增强。

当加速度为 2.0 m/s^2 时,各压电片输出开路电压显著提升,压电片 I、II、III 的最大输出电压比 1.0 m/s^2 时分别提升了 66.26% 、 66.41% 、 64.54% ,俘能效果显著增强,且输出稳定。说明在一定范围内,加速度越大,振幅越大,俘能效果增强。实验结果数值如表 2 所示。

表 2 不同激励加速度下的输出电压

Table 2 Output voltage under different excitation accelerations

激励加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	电压/V		
	压电片 I	压电片 II	压电片 III
1.0	4.86	3.96	2.51
1.5	6.59	5.29	3.35
2.0	8.08	6.59	4.13

2.3 末端质量块的影响

在激励加速度为 $a=2.0 \text{ m/s}^2$ 时,探究长柔压电梁末端质量块质量变化对阵列压电装置输出性能的影响,压电片 I、II、III 的电压输出情况如图 5 所示。由图 5 可见:当质量块质量 $m=2 \text{ g}$ 时,装置共振频率为 18.1 Hz ,压电片 I、II、III 的输出电压依次减小;当 $m=4 \text{ g}$ 时,俘能频带减小到 17.4 Hz , I 的电压最大,但此时 III 的电压比 II 大;当 $m=6 \text{ g}$ 时,俘能频带减小到 16.6 Hz , I 的电压依然最大,同样 III 的电压明显大于 II。可以看出:当质量块质量增加,阵列压电装置的共振频率减小,压电片 I 的输出电压减小,但是均为 I、II、III 中的最大。当 $m=2 \text{ g}$, III 的电压低于 II,但随着质量块质量的增加, III 的电压会逐渐增加,大于 II 的电压。这是由于在长柔梁末端添加质量块,相当于在系统中增加集中质量,改变原来梁的质量分布,进而影响系统

的惯性特性。固有频率与等效质量的平方根成反比,因此末端增加质量块,会导致固有频率的下降。质量块位于长柔梁末端,距离Ⅲ位置最近,质量块越大振动时局部惯性越大,带动Ⅲ振动加强,电压上升。

综上所述,质量块质量增大会导致共振频率减

小,压电片Ⅰ的输出电压逐渐减小,Ⅲ的输出电压有增大趋势,逐渐大于Ⅱ的输出电压。在 $m=2\text{ g}$ 时,整体输出电压最大,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ输出电压分别为 10.60、8.30、6.31 V,相较于无质量块时,输出电压分别提升了 31.19%、25.95%、52.78%,俘能效果显著。

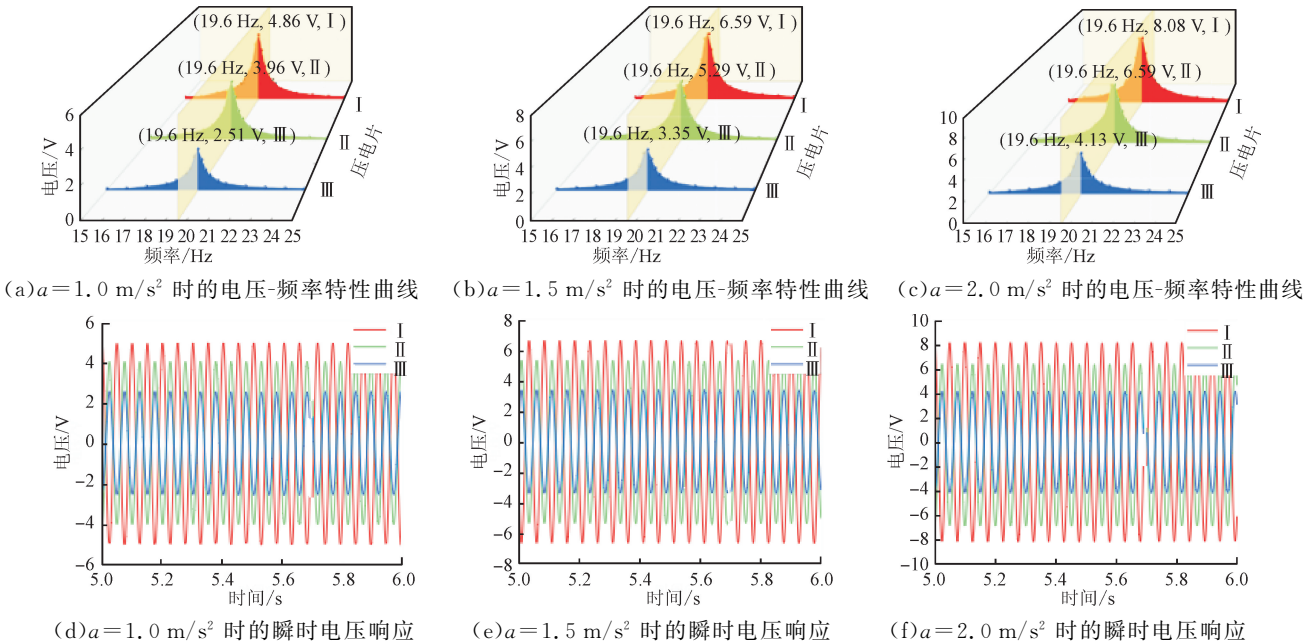


图4 不同激励加速度下电压-频率特性曲线及共振频率时的电压响应

Fig. 4 Voltage-frequency characteristic curves and the voltage response at the resonant frequency under different accelerations

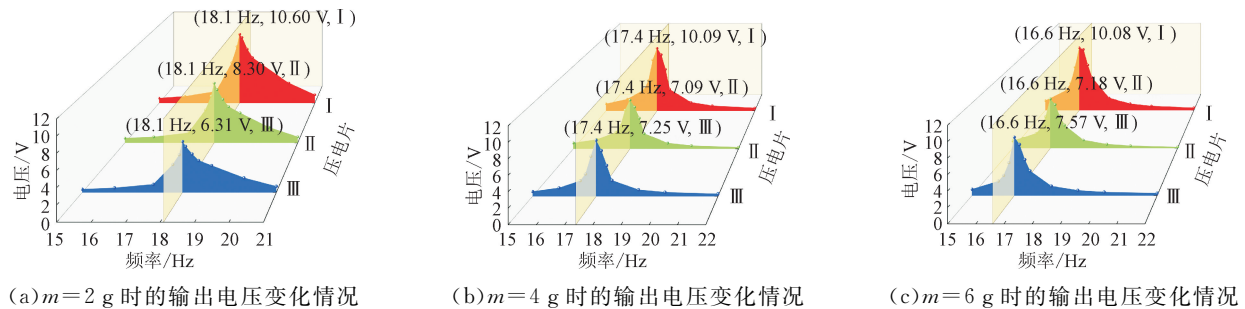


图5 不同质量块的3片压电片的电压-频率特性曲线

Fig. 5 Voltage-frequency characteristic curves of three piezoelectric sheets with different mass blocks

2.4 磁力耦合对阵列压电装置输出性能的影响

本节引入非线性磁力以探究非线性磁力耦合大小对阵列压电装置输出性能的影响。当激励加速度为 $a=2.0\text{ m/s}^2$ 时,阵列压电装置自由端磁铁质量为 2 g,改变磁铁之间的距离来调节非线性磁斥力大小。图6为不同磁距下,3片压电片的电压-频率特性曲线。当外部固定磁铁与长柔压电梁自由端磁铁间距 D 为 25 mm 时,此时长柔压电梁受到较强磁力耦合限制,振动幅度有限,阵列压电装置共振频率为 18.3 Hz,输出电压较小,压电片Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ最大输出

电压分别为 9.42、7.70、4.99 V。随着磁距的增大至 30 mm,共振频率减小至 18.2 Hz,磁力耦合约束作用减小,长柔梁振动幅度加大,输出电压增大,压电片Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的最大输出电压分别为 11.79、8.50、6.41 V。当磁距继续增加至 $D=40\text{ mm}$,磁力耦合作用减小,共振频率继续减小至 18.1 Hz,输出电压逐渐减小,磁力对阵列压电装置的输出性能影响减小。综上所述,引入非线性磁力最大输出电压分别提升了 45.92%、28.98%、55.21%,能够提高输出性能。

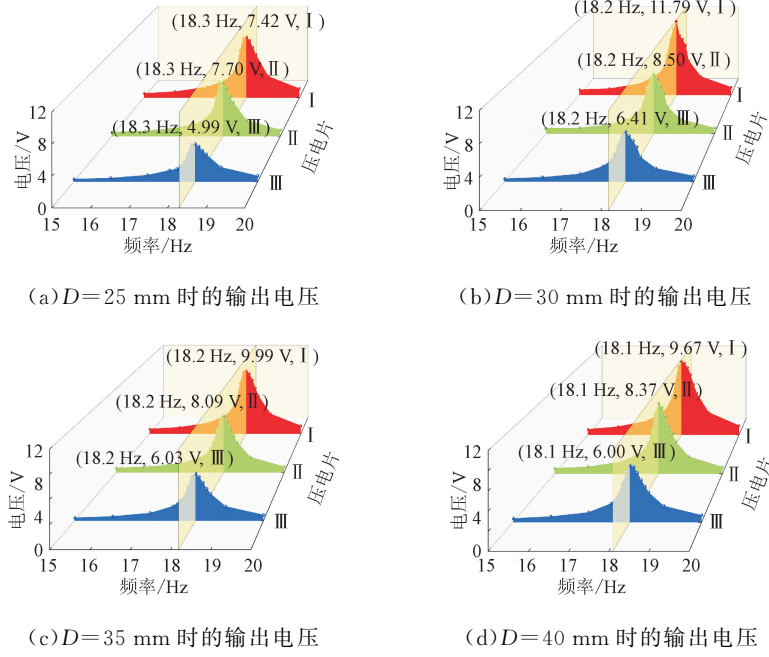


图 6 不同磁距下的电压-频率特性曲线

Fig. 6 Voltage-frequency characteristic curves under different magnetic distances

3 数学模型建立与感知实验分析

在俘能的基础上,利用压电片受振动产生电信号的特性,通过分析 3 点电信号与梁形变的相关性来实现形变感知。本节采用数学建模及实验分析的方法,对不同工况下的电压信号进行采集并处理,并将实验所得的数据与构建的理论模型结果进行对比,以此验证理论分析与实验结果的符合程度。

3.1 挠度数学模型的建立

为了保证挠度数学模型的准确性,需要对模型做出以下假设:

- (1) 压电片与悬臂梁之间的粘合界面理想;
- (2) 梁自由端位移轨迹始终垂直于梁的初始平衡位置。

压电材料的本构方程为

$$\begin{bmatrix} D_e \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{pie} & d_{31} \\ d_{31} & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: D_e 为电位移; ϵ 为应变; σ 为应力; ϵ_{pie} 为压电介电常数; d_{31} 为压电应变常数,其中下标 3 指的是电学方向,平行于材料极化轴,1 指的是力学方向,垂直于极化轴; E_e 为电场强度; S 为弹性柔顺常数。

当用压电片进行测量时,是利用其正压电效应,因此不加外加电场,所以有 $E_e = 0$ 。由式(1)可知

$$D_e = d_{31} E \epsilon \quad (2)$$

压电片上所产生的电荷 Q 为

$$Q = \int_A d_{31} E \epsilon dA \quad (3)$$

当压电片的长度远小于悬臂梁长度时,可近似认为压电片上的应变分布均匀, ϵ 计算式为

$$\epsilon = \frac{Q}{d_{31} E A} \quad (4)$$

由式(4)可知,通过测量压电片产生的电荷量即可确定该位置的应变值。

悬臂梁的挠度曲线方程为

$$w = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

式中: M 表示弯矩; E 表示杨氏模量; I 表示惯性矩。

压电片的应力可表示为

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{MH}{2I} \quad (6)$$

式中: H 表示梁的厚度。由式(6)可得

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{2\epsilon(x)}{H} \quad (7)$$

式中: $\epsilon(x)$ 为任意位置的应变。对式(7)进行一次积分运算可求得结构任意位置的转角分布,而通过二次积分则可建立完整的挠度分布函数

$$y(x_0) = \frac{2}{h} \int_0^{x_0} \left[\int_0^x \epsilon(x) dx \right] dx + Cx + D \quad (8)$$

式中: x 是梁上任意位置坐标变量,用于积分计算过

程中的中间变量; x_0 是目标位置坐标,用于指定需要计算挠度的具体点。挠度 $y(x_0)$ 通过对 x 在 $[0, x_0]$ 内的应变 $\epsilon(x)$ 进行积分得到,体现了从固定端到目标位置的累积变形效应,最终得到该点的挠度值。

用高斯数值积分及样条插值的方法求解挠度方程,便可以计算得出任意一点的挠度。这是因为,3个压电片位置将整个长柔梁分为3段,假设梁在受力均匀情况下表面应变呈线性分布,通过相邻压电片的电压值,可以获得中间段任意一点的应变,再对其挠度进行计算,可以得到各点挠度与梁上位置的关系,并对其进行拟合,进而可以得到整条形变曲线。

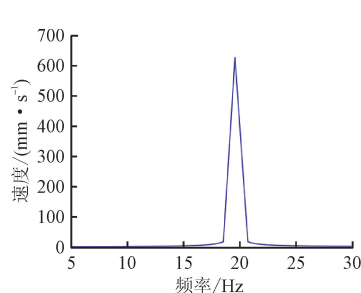
因此在进行俘能的同时,实时采集3片压电片的电压信号,这些由振动俘能获得的输出电压即挠度模型所需的电压数据,结合 MATLAB 数值计算平台,即可得到模型中任一点的挠度。

3.2 感知实验测试及结果分析

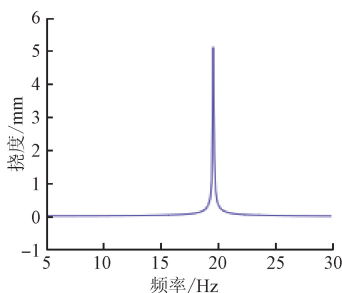
在未加入质量块和磁力时,对不同激励加速度下的长柔压电梁,利用激光测振仪测得其末端速度及挠度,如图7所示,发现速度和挠度均随着频率的增加先增大后减小,最大值即达到共振时,共振频率与此前实验一致,为19.6 Hz。当 $a=1.0 \text{ m/s}^2$ 时,长柔压电梁末端的最大振动速度和挠度分别为626.30 mm/s 和 5.096 mm,基于电压测量值和理论推导进行挠度计算,通过 MATLAB 求解,数值仿真结果如图7(c)所示,长柔压电梁末端挠度为5.176 mm,相

对误差为1.57%。 $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时,长柔压电梁末端最大速度和挠度分别为858.19 mm/s 和 6.964 mm,求解长柔梁末端挠度为6.967 mm,如图7(f)所示,与实际测量误差仅0.43%。 $a=2.0 \text{ m/s}^2$ 时,长柔压电梁末端最大振动速度为1030.25 mm/s,最大挠度为8.369 mm,如图7(i)所示,数值分析得到长柔梁末端挠度为8.505 mm,与实际测量值相比,误差为1.63%。对比图7中加速度为 1.0 m/s^2 和 1.5 m/s^2 的情况,加速度为 2.0 m/s^2 时长柔梁末端振动速度与挠度增幅明显,各压电片输出开路电压显著提升。

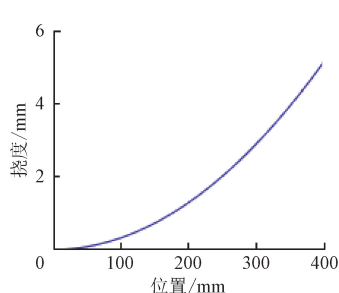
当 $a=1.0 \text{ m/s}^2$ 时,通过实验测量得到的长柔压电梁末端最大挠度为5.096 mm,通过高斯积分与样条插值方法计算长柔压电梁末端挠度为5.176 mm,实验测量值与理论计算值相对误差为1.57%。 $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时,长柔压电梁末端实际测得的最大挠度为6.964 mm,基于电压测量值和理论推导进行挠度计算,并通过 MATLAB 进行求解,长柔梁末端挠度的理论计算结果为6.967 mm,与实际测量误差仅为0.43%。 $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时,长柔压电梁末端实验测得最大挠度为6.964 mm,数值分析得到的挠度值为8.505 mm,与实际测量值相比,误差为1.63%。由此可知,在不同的激励加速度时,长柔压电梁末端挠度的实际测量值与理论计算值相对误差始终控制在2%以内,图8为不同激励加速度时的相对误差。



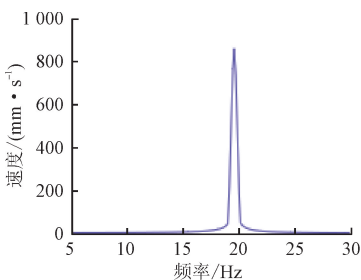
(a) $a=1.0 \text{ m/s}^2$ 时的速度频谱



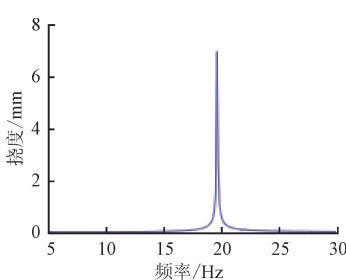
(b) $a=1.0 \text{ m/s}^2$ 时的挠度频谱



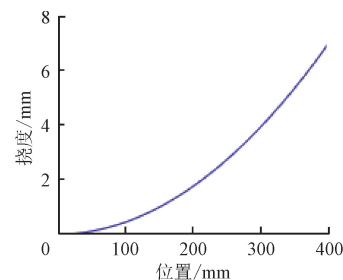
(c) $a=1.0 \text{ m/s}^2$ 时挠度数值仿真分析



(d) $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时的速度频谱



(e) $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时的挠度频谱



(f) $a=1.5 \text{ m/s}^2$ 时挠度数值仿真分析

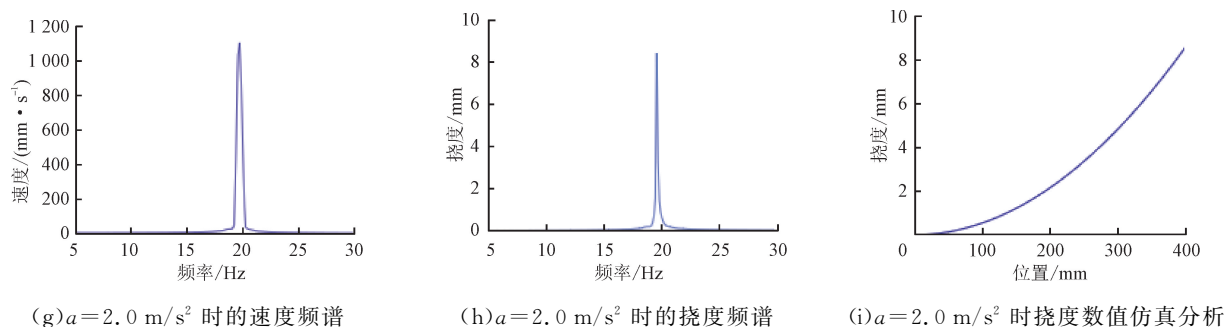


图 7 不同加速度下的长柔梁末端速度频谱、挠度频谱及挠度数值仿真分析

Fig. 7 Frequency spectrum of the end velocity, deflection frequency spectrum and deflection numerical simulation analysis of long flexible beam under different accelerations

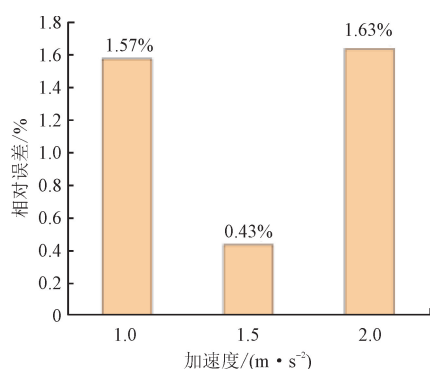


图 8 不同加速度时的相对误差

Fig. 8 Relative errors at different accelerations

在引入非线性磁力后,探究在不同磁力下其形变感知效果。以 $D=30 \text{ mm}$ 和 $D=35 \text{ mm}$ 为例,长柔压电梁末端振动挠度频谱如图 9(a)和(b)所示,最大振动挠度为 11.03 mm 和 9.74 mm 。借助 MATLAB 计算得出,如图 9(c)和(d)所示,悬臂梁末端的挠度分别为 11.95 mm 和 10.72 mm 。当 $D=30 \text{ mm}$ 时,长柔压电梁末端实验测得的最大振动挠度为 11.03 mm ,通过高斯积分与样条插值方法计算长柔压电梁末端挠度为 11.95 mm ,实验测量值与理论计算值相对误差为 8.34% 。当 $D=35 \text{ mm}$ 时,长柔压电梁末端实验测得的最大挠度为 9.74 mm ,数值分析得到的挠度值为 10.72 mm ,实验测量值与理论计算值相对误差为 10.06% 。由此可知,在不同的磁间距时,长柔压电梁末端挠度的实际测量值与理论计算值相对误差仍然较小,图 10 为不同磁间距时的相对误差。结果表明长柔梁引入磁力后,悬臂梁的挠度建模结果未发生显著变化。说明外界因素对现有挠度模型的影响很小,该模型依然能够有效保障压电感知的准确性。

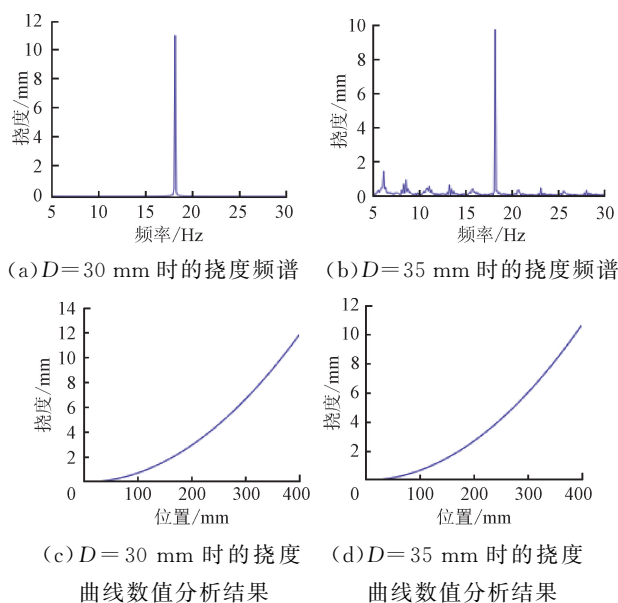


图 9 不同磁距下的阵列压电装置输出特性

Fig. 9 Output characteristics of array piezoelectric devices under different magnetic distances

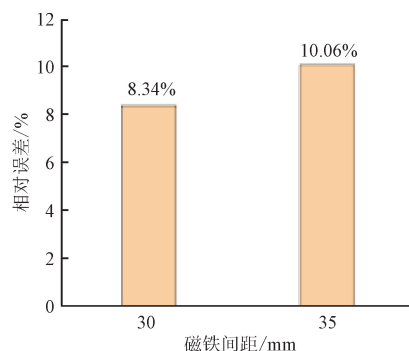


图 10 不同磁间距时的相对误差

Fig. 10 Relative errors at different magnetic spacings

4 结 论

本文提出了长柔压电梁振动俘能与形变感知研

究,采用阵列式压电片的布置方案,实现了长柔梁振动俘能与形变感知的双重功能,主要结论如下。

(1)无质量块无磁力影响下,阵列压电装置的谐振频率为 19.6 Hz,3 片压电片在不同激励加速度下,输出电压均随着频率的增加先增大后减小,在谐振频率时达到峰值,且靠近悬臂梁根部的压电片Ⅰ输出开路电压最大,最高可达 8.08 V,中间电压片Ⅱ的电压次之,最大电压为 6.59 V,靠近末端的电压片Ⅲ的电压最低,最大电压为 4.13 V。在一定范围内,激励加速度的提升可显著增强系统的俘能性能。

(2)随着质量块质量增加,共振频率由 18.1 Hz 减小至 16.6 Hz,输出电压减小;在磁力的作用下,随着磁距增大,共振频率由 18.3 Hz 减小至 18.1 Hz,输出电压整体处于先增大后减小的趋势。加入质量块,压电片Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ最大输出电压分别提升了 31.19%、25.95%、52.78%。引入磁力后,分别提升了 45.92%、28.98%、55.21%,俘能性能效果显著。

(3)通过建立悬臂梁挠度模型,采用高斯数值积分与样条插值方法实现了叶片振动挠度的重构。数值仿真与实验对比表明,在无外界因素影响下,当加速度为 2.0 m/s^2 时,长柔压电梁末端挠度实验结果为 6.967 mm,数值仿真结果为 6.964 mm,相对误差仅为 0.43%,充分验证了数学模型的准确性。在加入质量块与磁力后,当磁距为 30 mm 时,数值计算长柔压电梁挠度与实际测量相对误差在 8.34%,该模型依然能够有效保障压电感知的可靠性,实现长柔压电梁振动俘能与形变感知的双重功能。

参考文献:

- [1] ZHANG Huirong, ZHOU Shuzhe, ZHANG Jiaqin, et al. A sustainable and enhanced-performance vibration energy harvester for application on railway bridge: Design, modeling, and analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 225: 112279.
- [2] 赵庆玲, 于蓬勃, 刘诗雨, 等. 几种压电电磁复合俘能器的发电性能实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(11): 195-204.
ZHAO Qingling, YU Pengbo, LIU Shiyu, et al. Experimental study on power generation performance of several types of piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesters [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(11): 195-204.
- [3] 罗梦婷, 郑薛亮, 姚兆琦, 等. 面向智能轴承自供电系统的压电-摩擦复合式振动能量采集器 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(3): 173-182.
- LUO Mengting, ZHENG Xueliang, YAO Zhaoqi, et al. Hybrid piezoelectric-triboelectric vibration energy harvester for intelligent bearing self-powered system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(3): 173-182.
- [4] WANG Hu, ZHAO Qingling, SONG Rujun, et al. Design and performance study of low frequency magnetic coupling bistable piezoelectric and electromagnetic energy harvester [J]. *Energy*, 2025, 320: 135178.
- [5] TIAN Haigang, YURCHENKO D, LI Zhaoyu, et al. Dumbbell-shaped piezoelectric energy harvesting from coupled vibrations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 281: 109681.
- [6] SEZER N, KOÇ M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting [J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105567.
- [7] 许广灿, 徐俊, 李士盈, 等. 电动汽车振动能量回收悬架及其特性优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(8): 90-95.
XU Guangcan, XU Jun, LI Shiyong, et al. Energy regenerative suspension and its performance optimization for electric vehicle [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(8): 90-95.
- [8] 郜浩楠, 徐俊, 蒲晓晖, 等. 面向新能源汽车的悬架振动能量回收在线控制方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(4): 19-26.
GAO Haonan, XU Jun, PU Xiaohui, et al. An online control method for energy recovery of suspension vibration of new energy vehicles [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(4): 19-26.
- [9] ZHOU Chen, ZHU Chendi, GUO Wenjie, et al. Vibration energy transfer in forced laminated composite box structure [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025, 32(6): 1191-1210.
- [10] 罗莲健, 赵文浩, 宋汝君, 等. T 型磁力耦合压电俘能器发电性能研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(7): 217-223.
LUO Lianjian, ZHAO Wenhao, SONG Rujun, et al. Research on power generation performance of T-type magnetically coupled piezoelectric energy harvester [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(7): 217-223.
- [11] 赵庆玲, 宋汝君, 罗莲健, 等. 双 L 支架回扣式压电俘能器: 设计与实验 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(6): 34-41.
ZHAO Qingling, SONG Rujun, LUO Lianjian, et al. Double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester: design and experiment [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(6): 34-41.

(下转第 248 页)

- Fire Science and Technology, 2024, 43(7): 1001-1006.
- [25] LIU Siyuan, XIE Yongqi, CHEN Mengdong, et al. Prediction of the release process of the nitrogen-extinguishant binary mixture considering surface tension [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 145(1): 185-199.
- [26] TUZLA K, PALMER T, CHEN J C, et al. Development of computer program for fire suppressant fluid flow [EB/OL]. (1998-06-01)[2025-03-12]. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/A DA370999/>.
- [27] 高光华. 高等化工热力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [28] DE SCHEPPER S C K, HEYNDERICKX G J, MARIN G B. Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker [J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(1): 122-132.
- [29] NFPA. Standard on Halon 1301 Fire Extinguishing Systems; NFPA 12A [S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2018.

(编辑 刘杨 陶晴)

(上接第 236 页)

- [12] 王晖. 汽车悬架用压电陶瓷振动传感器采集系统设计与分析 [D]. 盐城: 盐城工学院, 2024.
- [13] XIA Guanghui, ZHANG Su, LIU Mingrui, et al. Stability performance analysis of complex nonlinear piezoelectric energy harvesting systems [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2025, 172: 105037.
- [14] TIAN Haigang, SHAN Xiaobiao, LI Xia, et al. Enhanced airfoil-based flutter piezoelectric energy harvester via coupling magnetic force [J]. Applied Energy, 2023, 340: 120979.
- [15] 李辉, 许龙舟, 毛鹏, 等. 悬臂梁压电俘能器结构设计与电学性能有限元分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(6): 25-36.
- LI Hui, XU Longzhou, MAO Peng, et al. Structural design and electrical properties of cantilever beam piezoelectric energy harvester by finite element analysis [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(6): 25-36.
- [16] WANG Guotai, SONG Rujun, LUO Lianjian, et al. Multi-piezoelectric energy harvesters array based on wind-induced vibration: design, simulation, and experimental evaluation [J]. Energy, 2024, 300: 131509.
- [17] WU Hongxin, KE Shitang, LU Manman, et al. Research on vibration suppression effect and energy dissipation mechanism of wind turbine piezoelectric blade [J]. Journal of Fluids and Structures, 2023, 117: 103814.
- [18] 孙霞阳. 大型风力机叶片压电陶瓷布置方案及抑颤研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [19] 任正奎. 海上风电叶片智能结构压电感知技术研究 [D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2023.
- [20] CAI Yuanqiang, JIANG Junjie, LIU Zhiming, et al. Experimental research on geological fissure monitoring based on distributed piezoelectric sensing technology [J]. Engineering Geology, 2025, 347: 107941.
- [21] 金政扬, 耿皓宇, 刘荣坤, 等. 面向智能传感的多材料电子纤维器件的设计与应用 [J]. 科学通报, 2025, 70(17): 2644-2659.
- JIN Zhengyang, GENG Haoyu, LIU Rongkun, et al. Design and application of thermally drawn multimaterial electronic fiber devices for smart sensing [J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(17): 2644-2659.
- [22] LV Jun, SHAO Minjie, XUE Yuting, et al. A new strong form technique for thermo-electro-mechanical behaviors of piezoelectric solids [J]. Coatings, 2021, 11(6): 687.
- [23] 刘永斌, 陈凤林, 张连生, 等. 基于压电驱动的自感知振动抑制研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 42-45.
- LIU Yongbin, CHEN Fenglin, ZHANG Liansheng, et al. Self-sensing vibration suppression based on charger driven piezoelements [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(12): 42-45.
- [24] LAP-ARPARAT P, TUCHINDA K. Computational study of excitation controlling parameters effect on uniform beam deformation under vibration [J]. International Journal of Engineering, 2023, 36(1): 60-70.
- [25] 陈捷基. 汽车悬架用压电陶瓷振动传感器机械系统设计与分析 [D]. 盐城: 盐城工学院, 2024.

(编辑 刘杨 陶晴)