

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, 张 丹², 张磊安¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 255000, 山东淄博; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 255000, 山东淄博)

摘要: 为了探究长柔梁振动俘能影响因素, 揭示阵列压电装置俘能原理及感知机理, 本文提出了对长柔压电梁振动俘能与形变感知的研究。本文对压电装置采用阵列式压电片的布置方案, 利用压电效应将振动能转换成电能, 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, 且在压电片 I、II、III 中靠近悬臂梁根部的 I 输出开路电压最大, 其在不同激励加速度下最大输出电压分别为 8.08 V、6.59 V、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, I、II、III 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%, 由此说明在外界因素影响下, 该模型依然能够保障压电感知的准确性, 实现了长柔压电梁形变感知。

关键词: 长柔压电梁; 俘能; 感知; 挠度

中图分类号: TM619; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: XXXX-XXXX(XXXX)XX-0001-11

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

CHANG Wenyan¹, WANG Hu¹, NIU Zhongrui¹, ZHANG Senrong¹, SONG Rujun¹, ZHANG Dan², ZHANG Leian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of vibration energy harvesting of long flexible beam and reveal the energy harvesting principle and sensing mechanism of array piezoelectric device, this paper proposes a study on vibration energy harvesting and deformation sensing of long flexible piezoelectric beam. This paper proposes an arrangement scheme for the piezoelectric device to use an array of piezoelectric sheets, which uses the piezoelectric effect to convert vibration energy into electrical energy. And establishes a mathematical model of the deflection of long flexible beam through Gaussian numerical integration and spline interpolation method based on the multi-point voltage measured by the excitation experiments for numerical simulation and analysis. The results show that the resonant frequency of the array piezoelectric device is 19.6 Hz, the output voltage first increases and then decreases with the increase of the excitation frequency, and increases with the increase of the excitation acceleration. Moreover, among the piezoelectric sheets I, II and III, the output open-circuit voltage of I near the root of the cantilever beam is the largest, and its maximum output voltage under different excitation accelerations are 8.08 V, 6.59 V and 4.13 V respectively. Both the resonant frequency decreases and the output voltage increases under the effect of mass block and magnetic force respectively. Under the influence of the mass block, the output voltage of I, II and III increased by 31.19%, 25.95% and 52.7% respectively compared to the case without mass block. Under the action of magnetic force, the maximum output voltage increased by 45.92%, 28.98% and 55.21% respectively. When the acceleration is 2 m/s², the experimental result of the deflection at the end of the long flexible piezoelectric beam is 6.967 mm, the numerical simulation result is 6.964 mm, and the relative error is only 0.43%. And after the introduction of the magnetic force, the maximum relative error is 10.06%, which shows that the model can still guarantee the accuracy of the piezoelectric sensing under the influence of external factors and the deformation sensing of the long flexible piezoelectric beam is realized.

Key words: long flexible piezoelectric beam; energy harvesting; sensing; deflection

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础, 但是传统化石能源存在污染环境和不可再生等问题, 难以满足可持续发展的战略需求。相较之下, 风能^[1-3]、太阳能^[4-5]等新能源凭借其分布广泛、环境友好等优点被广泛应用。因此, 利用俘能技术^[6-8]的新能源收集系统具有重要的应用价值。压电材料的应用原理为压电效应^[9-10], 具有良好的压电性能, 凭借高灵敏度、环境适应性强等优点, 被广泛应用于振动监测、俘能等领域^[11-13]。在压电俘能^[14-16]领域, 李辉等^[17]建立了悬臂梁压电俘能器初始结构模型, 研究发现在 0~20 Hz 路面振动频率范围内, PZT-5H 表现出优异的电能量转换效率。Wang 等^[18]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, 多压电俘能器协同工作时的能量输出较单一俘能器提升显著, 其阵列化设计^[19-20]可满足微电子系统持续供电需求。

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输出, 分析其与梁变形的相关性, 因此在进行俘能的同时, 可以利用所采集的电压信号对结构进行形变感知。在压电

感知^[21-22]方面,刘永斌等^[23]提出一种压电自感知电荷驱动方法,应用于悬臂梁一阶振动,用同一压电元件既能抑制振动又能感知振动状态,实现了压电自感知。Lap-Arparat P.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,振动变形受激励频率和加载条件控制,纵向弯曲占主导,加载在波腹位置变形幅度最大。陈琪^[25]建立了叶片梁结构振动分析及其模态智能传感设计模型,验证了压电材料在振动特性预测方面的可行性。

然而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,本研究提出一种长柔压电梁振动俘能与形变感知研究,采用长柔梁模型通过阵列压电片的方式对其输出性能进行分析,利用高斯数值积分和样条插值的建模方式建立长柔梁挠度数学模型以实现其形变感知。

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,共粘贴三片,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。

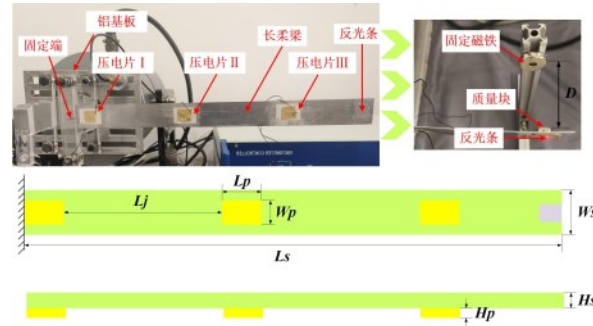


图1 阵列压电装置结构示意图以及实物图

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

表1 阵列压电装置参数表

Table 1 Array piezoelectric device parameter table

结构名称	符号	数值	单位	长柔梁长	宽	厚	L_s	W_s	H_s	400	30	0.6mm	压电片长	宽	厚	L_p	W_p	H_p	30	20	0.2mm	压电片间距	L_j	100mm	压电片密度	ρ_p	7386kg/m ³	杨氏模量	E	70×10^9 Pa	压电常数	d_{31}	-274×10^{-12} m/V	磁铁直径	Φ	10mm	磁铁密度	ρ_m	7800kg/m ³	质量块质量	M	2g
------	----	----	----	------	---	---	-------	-------	-------	-----	----	-------	------	---	---	-------	-------	-------	----	----	-------	-------	-------	-------	-------	----------	-----------------------	------	-----	---------------------	------	----------	----------------------------	------	--------	------	------	----------	-----------------------	-------	-----	----

压电片进行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,经过推导三点电压与应变的关系,可以得到长柔梁对应位置的应变状态,可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-10 V至10 V,考虑到电压上限问题,采用另一种采集卡NI-9229,电压范围-60 V至60 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三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 实验平台

Fig.2 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 $5 \text{ Hz} \sim 25 \text{ Hz}$,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 V 、 3.865 V 和 2.455 V 。靠近悬臂梁根部的 I 输出电压最高,II 其次,III 输出电压最低,说明 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 I、II、III 在 19.4 Hz 、 19.6 Hz 、 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。

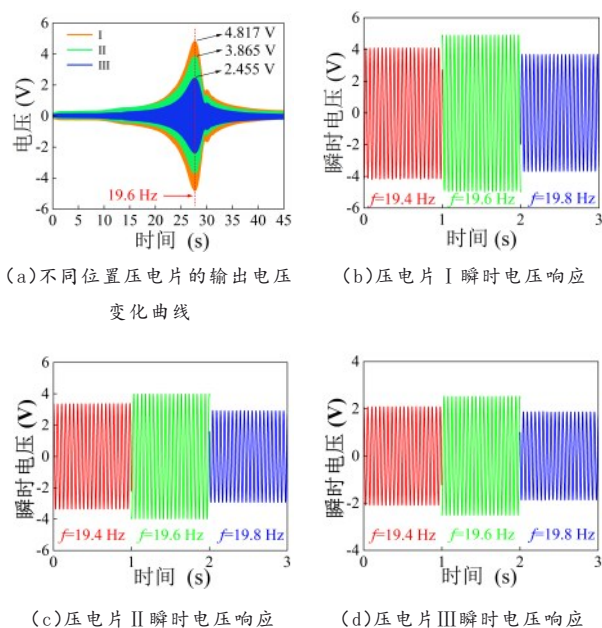


图3 阵列压电装置的谐振特性测试

Fig.3 Resonant characteristics test 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 m/s^2 、 1.5 m/s^2 、 2 m/s^2 时,对长柔压电梁进行 $15 \text{ Hz} \sim 25 \text{ Hz}$ 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三个通道中,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I输出电压最大,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,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。

加速度为 2 m/s^2 时各压电片输出开路电压显著提升,I、II、III的最大输出电压比 1 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	压电片 I 电压	压电片 II 电压	压电片 III 电压
$a=1\text{ m/s}^2$	4.86 V	3.96 V	2.51 V
$a=1.5\text{ m/s}^2$	6.59 V	5.29 V	3.35 V
$a=2\text{ m/s}^2$	8.08 V	6.59 V	4.13 V
2 m/s^2 比 1 m/s^2 电压提升	66.26%	66.41%	64.54%

2.3 末端质量块的影响

在激励加速度为 $a=2\text{ m/s}^2$ 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,I、II、III的电压输出情况如图5所示。当质量块质量 $M=2\text{ g}$ 时,装置共振频率为 18.1 Hz ,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。由此可以看出,当质量块质量增加,阵列压电装置的共振频率减小,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。而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,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分别为 10.60 V 、 8.30 V 、 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。

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 $a=2\text{ m/s}^2$ 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,三片压电片的电压-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,I、II、III最大输出电压分别为 9.42 V 、 7.70 V 、 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,I、II、III的最大输出电压分别为 11.79 V 、 8.50 V 、 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。

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,通过分析三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。

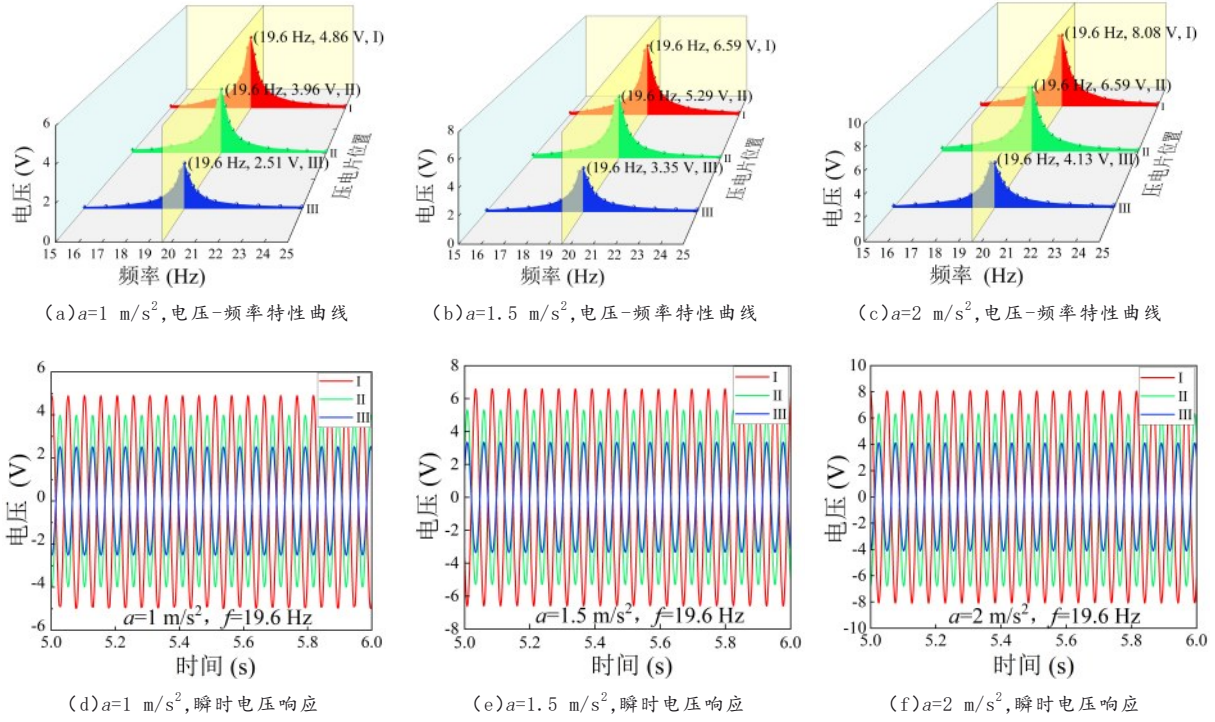


图4 不同激励加速度下,电压-频率特性曲线及共振频率时的电压响应

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

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:

$$\begin{Bmatrix} D_n \\ \epsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{nn} & d_{ni} \\ d_{ni} & S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_n \\ \sigma \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, D_n 为电位移, ϵ 为应力, σ 为应变, ϵ_{nn} 为压电介电常数, d_{ni} 为压电应变常数, E_n 为电场强度, S 为弹性柔顺常数, $S=1/E$, E 为弹性模量。

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 $E_n=0$ 。由式(1)可知:

$$D_n = d_{31} E_n \epsilon \quad (2)$$

压电片上所产生的电荷为 Q :

$$Q = \int_A d_{31} E_n \epsilon d_A \quad (3)$$

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:

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

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。

又知悬臂梁的挠曲方程为:

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

式中, ρ 为曲率, 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:

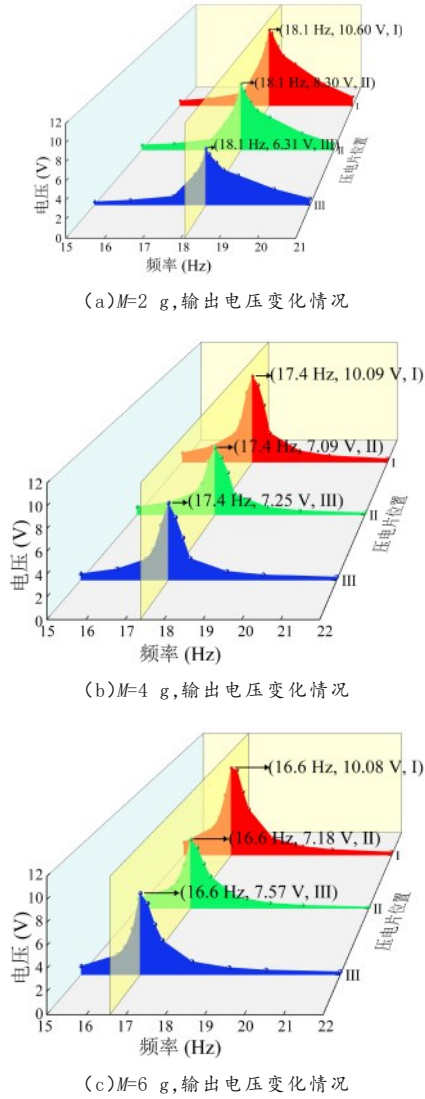


图5 不同质量块,三片压电片的电压-频率特性曲线

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

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

式中, H 表示梁的厚度。

由上式可得:

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

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:

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

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 $\varepsilon(x)$ 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。

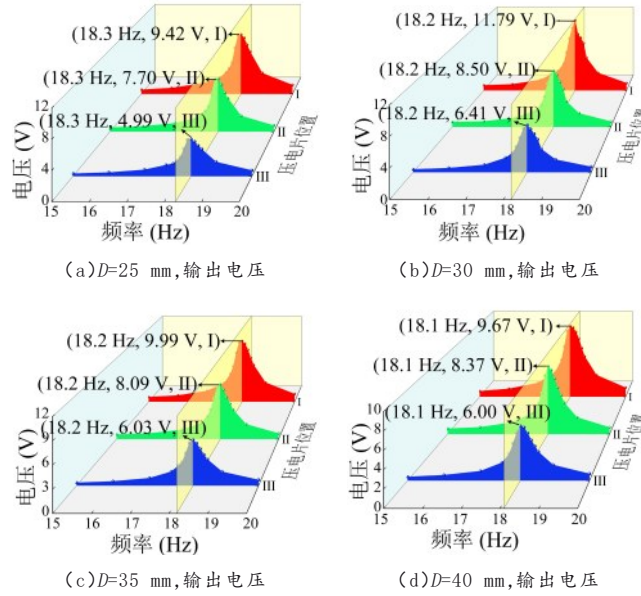


图6 不同磁距下,电压-频率特性曲线

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

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挠度。是因为三个压电片位置将整个长柔梁分为三段,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,实时采集三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值。

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 $a=1 \text{ m/s}^2$ 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%。 $a=2 \text{ m/s}^2$ 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%。

对比加速度为 1 m/s^2 和 1.5 m/s^2 的情况,加速度为 2 m/s^2 时长柔压电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。通过高斯积分与样条插值方法计算长柔压电梁末端挠度,与实际测量值相比计算误差始终控制在 2% 以内,如图 8 所示,该方法能够有效实现长柔压电梁形变感知。

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,与实际测量值相比,误差分别为 8.34% 和 10.06%,如图 10 所示。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。

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

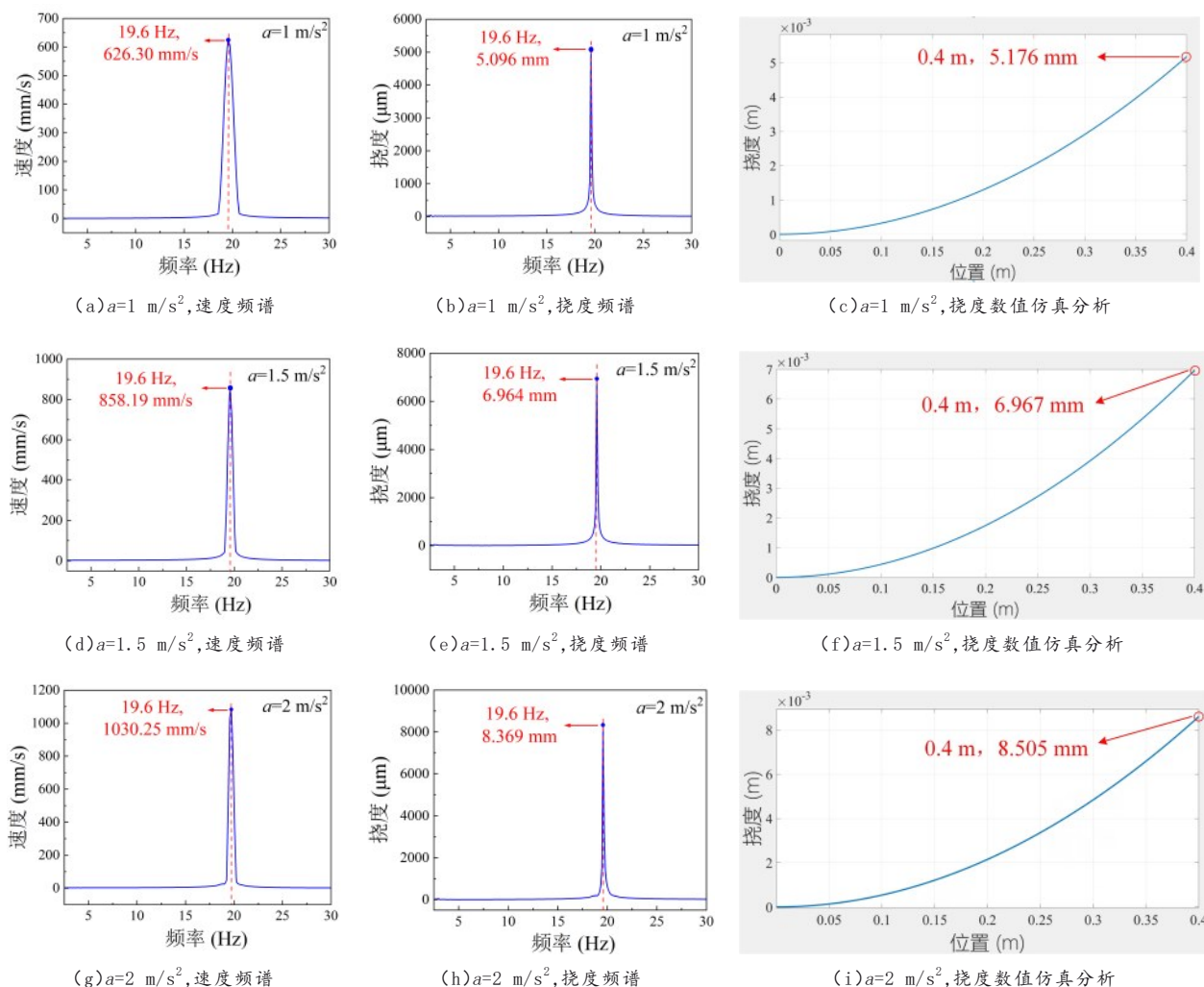


图7 不同加速度下,长柔梁末端速度频谱、挠度频谱及挠度数值仿真分析

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

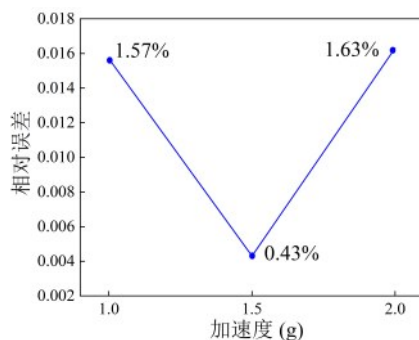


图8 长柔梁挠度的实验与理论计算相对误差

Fig. 8 Relative error of deflection of long flexible beam

俘能与形变感知的双重功能。本研究结论如下:

(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,三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I的压电片输出开路电压最大,最高可达 8.08 V,中间II的电压次之,最大电压为 6.59 V,靠近末端的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。

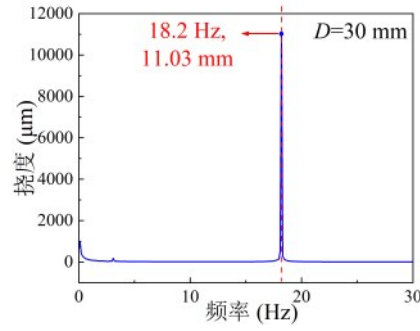
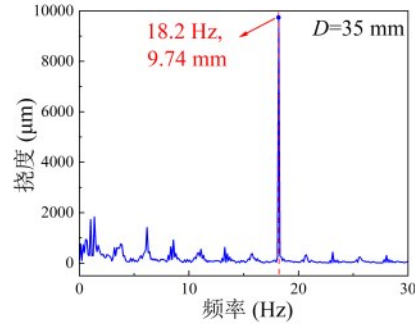
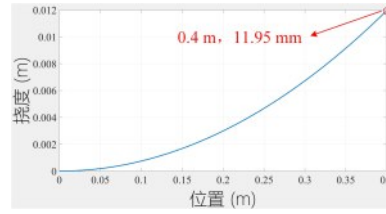
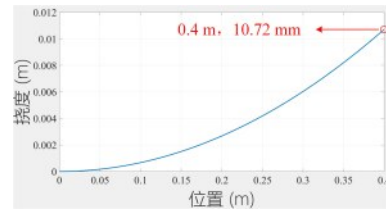
(a) $D=30$ mm, 挠度频谱(b) $D=35$ mm, 挠度频谱(c) $D=30$ mm, 挠度曲线数值分析结果(d) $D=35$ mm, 挠度曲线数值分析结果

图9 不同磁距下,阵列压电装置输出特性

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

(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,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 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。

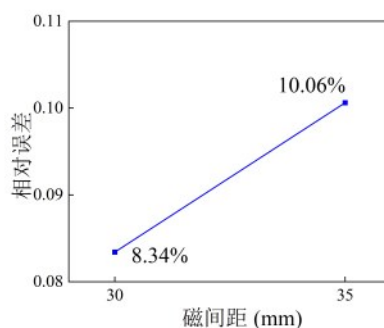


图 10 长柔梁挠度的实验与理论计算相对误差

Fig.10 Relative error of deflection of long flexible beam

参考文献:

- [1] 侯成伟,单小彪,宋汝君,等. 风向自适应型涡激振动压电俘能器的试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 120-127.
HOU C, SHAN X, SONG R, et al. Experimental study of orientation adaptive piezoelectric energy harvester based on vortex induced vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20):120-127.
- [2] Li J, Wang G, Yang P, et al. An orientation-adaptive electromagnetic energy harvester scavenging for wind-induced vibration[J]. Energy, 2024, 286.
- [3] 蔡彦枫,李晓宇,任宗栋,等. 面向空中风力发电系统的风能资源分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(02):624-632.
Cai Y, Li X, Ren Z, et al. Wind Resource Analysis for Airborne Wind Energy Systems[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2025, 46(02):624-632.
- [4] Shridharan S T, Sivanantham A, Lee H J, et al. Mechanochemical activation of silicon photothermal material for efficient interfacial solar desalination and wastewater purification[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486150247.
- [5] 盖忠睿,赵凯,杨天龙,等. 双级聚光集热的槽式太阳能热发电系统研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(02): 32-40.
GAI Z, ZHAO K, YANG T, et al. An Investigation into Parabolic Trough Solar Thermal Power Generation System with Double-Stage Concentrated Heat Collection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(02):32-40.
- [6] Xu P, Jia S, Zhang Y, et al. Experimental and data-driven optimization of vortex-induced vibration for marine energy harvesting[J]. Ocean Engineering, 2025, 324120683-120683.
- [7] Wang H, Zhao Q, Song R, et al. Design and performance study of low frequency magnetic coupling bistable piezoelectric and electromagnetic energy harvester[J]. Energy, 2025, 320135178-135178.
- [8] Tian H, Yurchenko D, Li Z, et al. Dumbbell-shaped piezoelectric energy harvesting from coupled vibrations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 281109681-109681.
- [9] 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 Q, YU P, LIU S, 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.
- [10] 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(03):173-182.
LUO M, ZHENG X, YAO Z, et al. Hybrid Piezoelectric-Triboelectric Vibration Energy Harvester for Intelligent Bearing Self-Powered System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(03):173-182.
- [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(06): 34-41.
ZHAO Q, SONG R, LUO L, et al. Double L bracket buckle type piezoelectric energy harvester: Design and experiment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(06):34-41.
- [12] 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(07): 217-223.
LUO L, ZHAO W, SONG R, et al. Research on power generation performance of T-type magnetically coupled piezoelectric

- energy harvester[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(07):217-223.
- [13] 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]. 盐城工学院, 2024.
WANG H. Design and Analysis of DSP System of the Vehicle Suspension used Piezoelectric Ceramic Vibrometer[D]. Yancheng Institute of Technology, 2024.
- [14] Nurettin S, Muammer K. A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting[J]. *Nano Energy*, 2020, 80:105567.
- [15] Xia G, Zhang S, Liu M, et al. Stability performance analysis of complex nonlinear piezoelectric energy harvesting systems [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2025, 172105037-105037.
- [16] TIAN H, SHAN X, LI X, et al. Enhanced airfoil-based flutter piezoelectric energy harvester via coupling magnetic force [J]. *Applied Energy*, 2023, 340.
- [17] 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(06):25-36.
LI H, XU L, MAO P, 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(06):25-36.
- [18] Wang G, Song R, Luo L, et al. Multi-piezoelectric energy harvesters array based on wind-induced vibration: Design, simulation, and experimental evaluation[J]. *Energy*, 2024, 300131509.
- [19] WU H, KE S, LU M, et al. Research on vibration suppression effect and energy dissipation mechanism of wind turbine piezoelectric blade[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2023, 117.
- [20] 孙霞阳. 大型风力机叶片压电陶瓷布置方案及抑颤研究[D]. 兰州理工大学, 2020.
SUN X. Study on Piezoelectric Ceramic Layout and Flutter Suppression of Large Wind Turbine Blades[D]. Lanzhou University of Technology, 2020.
- [21] 任正奎. 海上风电叶片智能结构压电感知技术研究[D]. 郑州航空工业管理学院, 2023.
REN Z. Research on Piezoelectric Sensing Technology of Intelligent Structure of Offshore Wind Turbine Blade[D]. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, 2023.
- [22] Cai Y, Jiang J, Liu Z, et al. Experimental research on geological fissure monitoring based on distributed piezoelectric sensing technology[J]. *Engineering Geology*, 2025, 347107941-107941.
- [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+78.
LIU Y, CHEN F, ZHANG L, et al. Self-sensing vibration suppression based on charger driven piezoelements[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(12):42-45+78.
- [24] Lap-Arparat P, Tuchinda K. Computational Study of Excitation Controlling Parameters Effect on Uniform Beam Deformation under Vibration[J]. *International Journal of Engineering (IJE)*, 2023, 36(1).
- [25] 陈琪. 叶片梁结构振动建模及其模态传感设计研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2022.
CHEN Q. Study on Vibration Modeling of Blade Beam and its Modal Sensing Design[D]. Harbin Engineering University, 2022.