

张洪涛,谢向东,陈华,等.地震监测传感元件自供能技术研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):303-312.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240127

ZHANG Hongtao,XIE Xiangdong,CHEN Hua,et al.A study on self-powered technology of seismic sensing and monitoring elements [J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):303-312.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240127

地震监测传感元件自供能技术研究

张洪涛^{1,2}, 谢向东^{1*}, 陈华², 刘明周², 王雄², 张衡¹, 杜国锋¹

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434000; 2. 中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081)

摘要:为探索压电技术给地震监测传感元件供电的可行性,采用实验研究和数值计算,分析压电耦合梁形状、力臂段长度、固定段长度和杆端质量对压电俘获器输出电压和功率的影响。以峰值加速度0.012g的El-centro波、Taft波和Northridge波激励作用为例,“U”型压电梁的平均输出电压和功率分别为45.48 V、39.06 V和37.59 V和2.07 mW、1.53 mW和1.41 mW。研究结果表明“U”型压电梁输出电压和功率随地震加速度的增大而增大,在小幅值激励下即可满足地震监测仪器正常工作电压的最低要求。研究结论有助于压电技术在地震监测传感元件供电单元中的推广应用,并提供有效的理论和数据支撑。

关键词:地震能量;压电地震能量俘获器;均方根;“U”型压电耦合梁;自供能;压电技术

中图分类号:TB123

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)03-0303-10

A study on self-powered technology of seismic sensing and monitoring elements

ZHANG Hongtao^{1,2}, XIE Xiangdong^{1*}, CHEN Hua², LIU Mingzhou², WANG Xiong²,

ZHANG Heng¹, DU Guofeng¹

(1. College of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434000, China;

2. China First Metallurgical Group Company Limited, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of piezoelectric technology for providing power to seismic monitoring sensing elements, experimental studies and numerical calculations were employed to study the effects of the shape of the piezoelectric coupled beam, the length of the lever segment, the length of the fixed segment, and the mass of the rod end on the piezoelectric coupled beam's output voltage and power. Taking peak acceleration of 0.012g as an example, in the excitation of El-centro wave, Taft wave, and Northridge wave, the mean values of the voltage and power of U-shaped seismic energy harvester are 45.48 V, 39.06 V and 37.59 V, and 2.07 mW, 1.53 mW, and 1.41 mW, respectively. The results of the study show that the output voltage and power of the U-shaped seismic energy harvester increase with the increase of the seismic acceleration, and it can satisfy the minimum criteria of the usual operating voltage of seismic monitoring equipment with small amplitude excitation. The conclusions of the study contribute to the popularization and application of piezoelectric technology in the power supply unit of seismic monitoring sensing elements, and provide effective theoretical and data support.

Keywords: seismic energy; piezoelectric seismic energy harvester; root mean square (RMS); U-shaped piezoelectric coupled beam; self-powered; piezoelectric technology

0 引言

地震是频繁发生的自然灾害之一。据统计,每年有500多万次地震发生,部分地震蕴含着巨大的能量^[1]。例如,中国汶川地震(2008年)、日本

东北地震(2011年)和尼泊尔廓尔喀地震(2015年)释放出的能量分别为 $6.3 \times 10^{16} \text{ J}^{[2]}$ 、 $2 \times 10^{18} \text{ J}^{[3]}$ 和 $6.3 \times 10^{16} \text{ J}^{[4]}$ 。然而,迄今为止国内外还未见利用地震能实现地震监测传感元件自供电技术的研究。

收稿日期:2024-05-15 修回日期:2024-06-07 接受日期:2024-06-13 责任编辑:焦丽

基金项目:国家自然科学基金项目(52078052)

作者简介:张洪涛(1985-),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,主要从事建筑技术研究。E-mail: zhanghongtao0520@163.com

通信作者:谢向东(1975-),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事动力学方面的研究。E-mail: xdxie@yangtzeu.edu.cn

目前,将振动能转换为电能的方式主要有电磁式、静电式和压电式^[5-6]。基于压电转换技术的能量俘获装置因其结构简单、易于集成、制作成本低和能量转换密度高等优点^[7]在许多领域备受青睐。李如春等^[8]提出“之”字形结构的微型压电式能量收集器,输出电压可超过10 V。孙晓阳等^[9]提出一种磁力调频的压电振动能量采集装置,可实现51~110 Hz的宽频共振。刘琪才等^[10]提出一种新的电学连接方案,当悬臂梁长宽比为3.25~3.35且1阶扭振频率接近2阶弯曲振动频率时,可实现频带拓宽。XIE等^[11]研发了一种杆端带有质量块的悬臂式压电波浪能收集器,输出功率可达55 W。上述压电能量采集器可以吸收不同的振动能,输出需要的电压和功率,但悬臂式结构在振动过程中沿悬臂轴线方向表面应变不均匀,因此其能量转换效率仍有很大的提升空间^[12-13]。

为提高黏结在基底梁上的压电片的能量转换效率,一些学者提出“L/U”型压电耦合装置,这种装置在振动过程中压电耦合段的表面应变均匀。XIE等^[14]设计了一种由“L”型压电耦合梁环形阵列组成的压电发电机,并进行了模型实验研究,结果表明,在“L”型梁共振时,38 mm×13 mm×0.5 mm压电片的平均功率和电压分别可达2.35 mW和50 V。XIE等^[15-16]提出一种由单/双层“L”型压电耦合梁为发电单元的压电砖,通过实验和仿真发现压电砖中50 mm×50 mm×1 mm压电片的平均功率可达110.9 mW,功率密度可达44.4 μW/mm³。XIE等^[17-18]提出一种多段“U”型压电耦合梁,实验表明其输出功率可达56.2 mW。HU等^[19]提出一种由“U”型双晶压电耦合梁环形阵列组成的发电装置,研究表明其输出功率可达千瓦量级。

由于设计巧妙,在规则激励的共振或接近共振条件下,“L/U”型压电发电装置中的压电片应变利用率高,能量转换密度高,然而在地震等非周期随机激励场景下,该类装置的发电性能还是未知的。事实上,地震波具有巨大的能量,将能量转化为电能并服务于地震监测传感元件是有可能实现的^[20]。因此,在上述梁式压电俘获器的基础上,提出压电地震能俘获器,包括振动外壳、带杆端质量的各种压电耦合梁。通过实验和数值计算研究压电耦合梁的形状、力臂段长度、固定段长度和杆端质量对俘获器输出电压和功率的影响。考虑到地震波的不确定性,实验采用El-centro地震波、Taft地震波和Northridge地震波作为俘获器的激励波。旨在探索对以上三种地震波具有理想鲁棒性且地震收集性能最佳的压电俘获器的设计

形状和尺寸。当然,地震波经过不同性质地层过滤后会有不同的卓越频率,所以压电俘获器的尺寸设计还要依据其所处地区和地层条件进行调整。

1 实验研究

压电地震能俘获器的立体和平面示意图1。在实际应用中,振动外壳深埋于地层中为压电耦合梁提供振动空间并使其俘获地震能量。根据压电耦合梁的形状,地震能俘获器可分为悬臂式、“L”型和“U”型,分别如图1(b)、图1(c)和图1(d)所示。在下面的实验中,所有压电耦合梁均由固定段、压电耦合段和力臂段组成且宽度相同。固定段长为 L_1 ,厚为 h_1 ;压电耦合段长为 L ,厚为 h_2 ;力臂段长度为 L_2 ,厚为 h_1 ;压电片长为 L_p ,厚为 h_p 。杆端质量固定在压电耦合梁自由端, M_1 、 M_2 和 M_3 分别表示杆端质量为6.3 g、12.6 g、18.9 g。所有压电片(PZT4贴片)的材料和尺寸相同,参数见表1,其中压电片的杨氏/剪切模量、质量密度和电容等参数均为实测值。

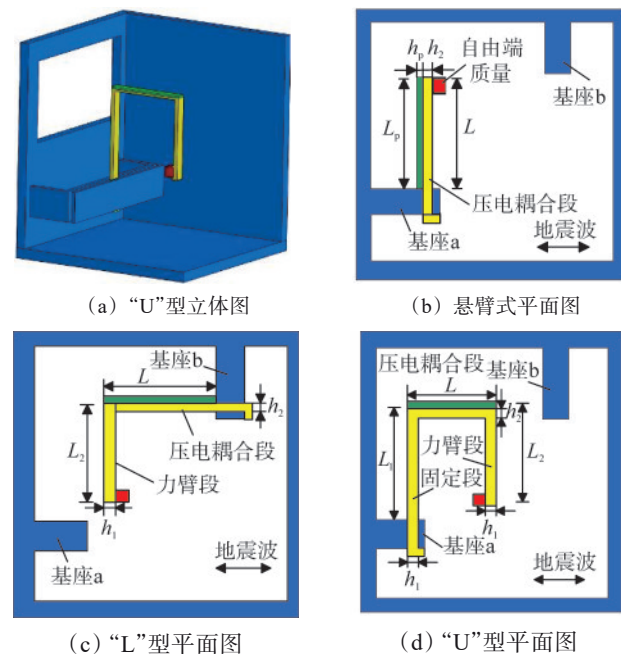


图1 压电地震能俘获装置立体和平面示意图

Fig.1 3D and 2D diagrams of the piezoelectric seismic energy harvesters

为探索压电耦合梁的形状和设计参数对其在不同地震波激励下的能量收集行为的影响,实验定制了3个“U”型梁、3个“L”型梁和1个悬臂梁,分别如图2(a)、图2(b)和图2(c)所示。在所有试样中,压电片的上表面为正极,下表面为负极,由导线连接,铜箔引出,确保压电片与

基板表面紧密结合。为研究 L_1 和 L_2 对压电地震能量俘获器性能的影响,将 L_1 和 L_2 作为变量,取值见表1。

表1 压电地震能量俘获装置参数
Tab.1 parameters of piezoelectric seismic energy harvesters

参数	基底梁类型			压电片
	悬臂式	“L”型	“U”型	
L_1/mm	60	60	30,60,90	
L/mm	60	60	60	
L_2/mm	60	30,60,90	30,60,90	
L_p/mm				60
h_1/mm		2	2	
h_2/mm	1	1	1	
h_p/mm				1
$b/b_p/mm$	10	10	10	10
杨氏模量/GPa	72	72	72	40.43
质量密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 742	2 742	2 742	7 56
C/nF				16

此外,图1(d)中“U”型梁中压电耦合段的基底厚取1 mm,小于其固定段和力臂段厚度(2 mm),使其应变集中在压电耦合段。图1(c)中“L”型梁压电耦合段的基底厚也设为1 mm,小于其力

臂部分厚度(2 mm)。为便于比较上述3种压电梁的地震能俘获行为,取它们的压电耦合段长均为60 mm。

为便于记录和描述实验结果,根据压电耦合梁的形状、力臂段长度、固定段长度和杆端质量对压电耦合梁分类标记。如“U90F90M3”,“U”表示“U”型梁,“90”表示梁的力臂段长为90 mm,“F90”表示固定段长 L_1 为90 mm,“M3”表示杆端质量包括3个单位质量,(单位质量为6.3 g)。“L”和“C”分别表示“L”型梁和悬臂梁。

实验采用3条典型的地震波,分别为El-centro波、Taft波和Northridge波,受实验激振器最大振幅(7.5 mm)的限制,根据地面峰值加速度比例法,利用式(1)和式(2)将地震峰值加速度分别压缩为0.008g、0.01g和0.012g,其中0.008g的3条地震波见图3。

$$X(t) = \alpha X_r(t), \quad (1)$$

$$\alpha = A_{\max} / A_{r\max}, \quad (2)$$

式中: $X(t)$ 和 $X_r(t)$ 分别为已调整的和原始的加速度时间历程; α 为比例系数; A_{\max} 和 $A_{r\max}$ 分别为 $X(t)$ 和 $X_r(t)$ 的峰值加速度。

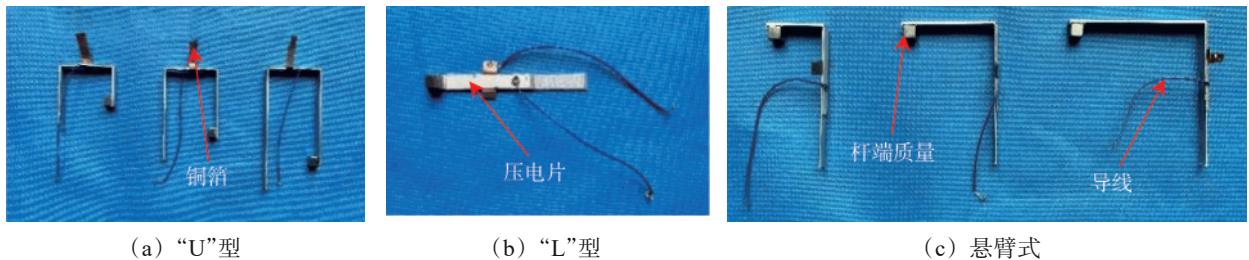


图2 压电耦合梁实验构件

Fig.2 experimental parts of piezoelectric coupled beams

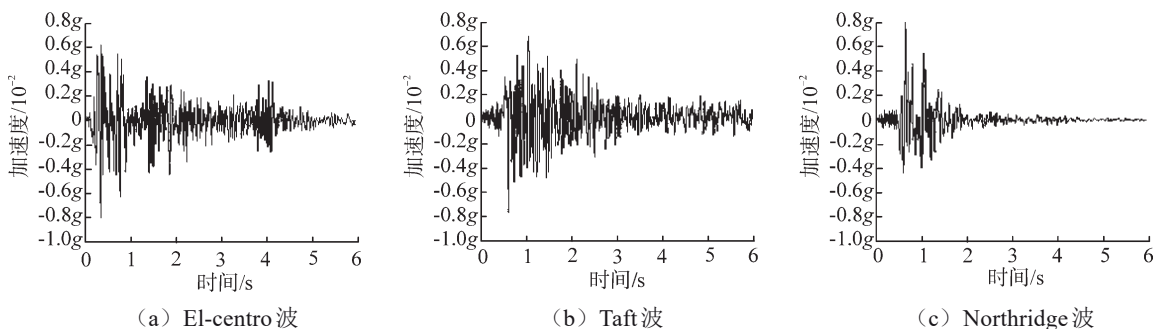


图3 地震波的加速度

Fig.3 acceleration of seismic waves

基于3种压缩后的地震波,分析压电梁在不同地震波作用下的俘能性能。针对3种地震波激励下,不同杆端质量(M_1 、 M_2 、 M_3),不同力臂段长(30 mm、

60 mm、90 mm)、不同固定段长(30 mm、60 mm、90 mm)和不同压电梁形状(悬臂式、“L”型、“U”型)的压电地震能量俘获器开展实验,实验装

置见图4。首先,通过地震波激励下压电梁的电压时程实验,揭示不同地震波、压电梁的设计参数和形状对其开环瞬时电压的影响规律;然后,基于电压时程实验计算不同地震激励下,不同设计参数和形状压电梁的平均输出电压和功率,揭示

以上因素变化对试样平均输出电压和功率的影响规律;最后,结合以上因素变化对压电梁自振频率的影响规律,解释其对其输出瞬时电压、平均电压和平均功率的作用机制。

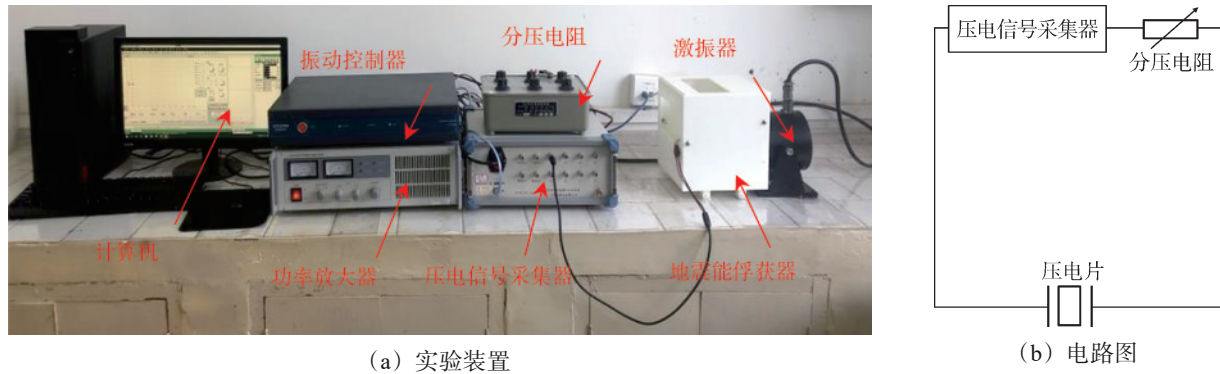


图4 压电地震能俘获器的实验装置和电路

Fig.4 experimental device and circuit of piezoelectric seismic energy harvester

利用实验测得的瞬态电压计算平均电压,为

$$V_{rms} = \sqrt{\left[\frac{\Delta t}{2(T-\Delta t)} \right] \sum_{i=2}^j [V(t_i)^2 + V(t_{i-1})^2]}, \quad (3)$$

平均功率为

$$P_{rms} = V_{rms}^2/R, \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: $V(t_i)$ 、 $V(t_{i-1})$ 分别为压电梁上的压电片在 t_i 、 t_{i-1} 时刻产生的瞬态电压; Δt 为时段长; T 地震波时长; R 为最优负载电阻,根据实验测得为 $1\text{ M}\Omega$ 。

2 结果和讨论

2.1 地震波激励下压电梁的电压时程

对定制的1个悬臂式、3个“L”型和3个“U”型压电梁在El-centro波激励下的瞬时电压进行了测试。研究讨论地震加速度幅值、杆端质量、

力臂段长度、固定段长度和压电梁形状对试样能量收集行为的影响规律。

(1) El-centro波激励的输出电压(开环)

在El-centro波的激励下,通过实验研究了地震加速度、杆端质量、力臂段长度、固定段长度和压电梁形状对输出电压的影响。以力臂段长度 L_2 为 30 mm 、杆端质量为 M_1 的“L”型压电梁为例,地震加速度幅值对输出电压的影响见图5。由图5可见,随地震加速度的增大,电压变化趋势一致,幅值逐渐升高。当地震波加速度振幅 a 分别为 $0.008g$ 、 $0.01g$ 和 $0.012g$ 时,“L”型压电梁的最大电压分别为 30.10 V 、 42.99 V 和 50.52 V 。这是因为地震加速度幅值的增加,相当于给“L”型压电梁施加的惯性力增大,从而使压电梁的振动幅值、变形以及输出电压增大。

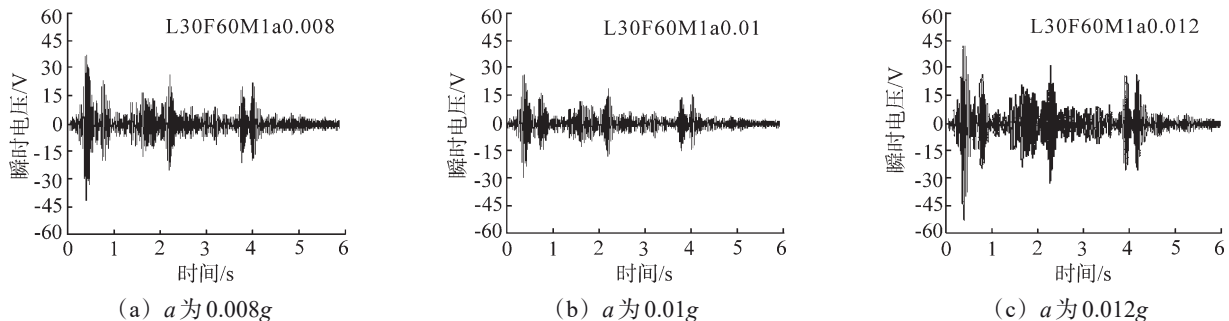


图5 不同加速度幅值的El-centro波激励下“L”型压电梁的输出电压

Fig.5 voltage of L-shaped beams in action of El-centro wave with various acceleration amplitude

在El-centro波作用下杆端质量对“L”型压电梁输出电压的影响见图6,图中“a0.01”表示加速

度振幅为 $0.01g$,以下依此类推。由图6可知,杆端质量为 M_1 、 M_2 和 M_3 的“L”型压电梁的卓越电

压时段分别为 0.5~1 s、0~0.5 s 和 0.5~3 s, 每一卓越时段的最大电压分别为 58.76 V、66.89 V 和 76.78 V。这是由于“L”型压电梁的杆端质量不同, 其固有频率也不同, 造成在相同的 El-centro

波激励下输出电压的卓越区段和最大电压也不同。另外, 杆端质量增加会使杆端惯性力增大, 以及施加在压电耦合段上的弯矩增大, 进一步导致输出电压增大。

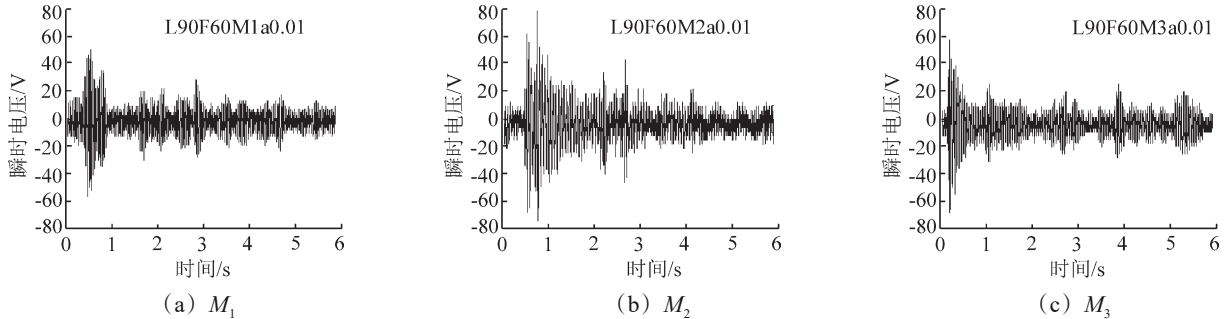


图 6 El-centro 波激励下不同杆端质量的“L”型压电梁的输出电压

Fig.6 voltage of L-shaped beams with different proof mass in action of El-centro wave

不同力臂段长 L_2 对“U”型压电梁输出电压的影响见图 7, L_1 为 30 mm, 杆端质量为 M_3 。由图 7 可见, 不同 L_2 对应的电压变化趋势不同, 但最大输出电压均逐渐增大。当 L_2 分别为 30 mm、60 mm 和 90 mm 时, “U”型压电梁的最大输出电压分别为 70.10 V、88.73 V 和 116.02 V。这是由于 L_2 增大

会使压电耦合段上的弯矩增大, 进一步使输出电压增大, 其推算依据见式 (5)~式 (8)。另外, L_2 增大会使“U”型压电梁第一固有频率降低, 并趋于地震波激励频率, 进一步导致压电梁振幅增大, 压电耦合段输出电压增大, 其推算依据式 (9)、式 (10)。

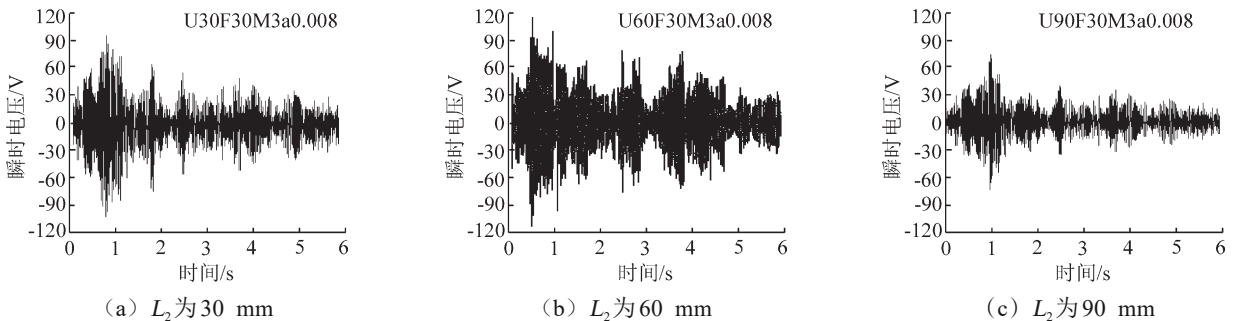


图 7 El-centro 波激励下不同力臂段长度的“U”型压电梁的输出电压

Fig.7 voltage of U-shaped beams with different force arm length in action of El-centro wave

$$\sigma_1 \propto M/I = F_m L_2/I, \quad (5)$$

$$D_3 = d_{31} \sigma_1, \quad (6)$$

$$Q = \int_0^{L_1} b D_3 dx = \int_0^{L_1} b d_{31} \sigma_1 dx, \quad (7)$$

$$V = Q/C, \quad (8)$$

式 (5)~式 (8) 中: σ_1 为应力; D_3 为位移; d_{31} 为压电常数; Q 为电量; V 为电压; C 为电容; M 为压电耦合段的弯矩; I 为压电耦合段的截面惯性矩。

$$v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x) \cdot q_n(t), \quad (9)$$

$$q_n(t) \propto 1/(\omega_n^2 - \omega^2), \quad (10)$$

式中: $v(x,t)$ 为压电梁的振动位移; $\varphi_n(x)$ 为第 n 个振形函数; $q_n(t)$ 为第 n 个广义坐标; ω_n 为压电梁的第

n 个圆频率; ω 为地震波的激励频率。

“U”型压电梁的等效刚度为

$$K = 1/\delta = 3EI/(L_x^3 - 3L_2L_x^2 + 3L_2^2L_x), \quad (11)$$

式中: δ 为“U”型梁的柔度; L_x 为固定段长度, 本实验为 L_1 。

固定段长度 L_1 变化对“U”型压电梁输出电压的影响见图 8, L_2 为 90 mm、杆端质量为 M_2 。由图 8 可见, L_1 为 30 mm、60 mm 和 90 mm 的“U”型压电梁电压均在同一范围内波动, 最大电压分别为 77.22 V、83.07 V 和 94.53 V。由式 (11) 可得, 当 L_1 大于 30 mm 时, L_1 继续增加会使“U”型压电梁的等效刚度/固有频率微弱减小, 并接近地震波激励频率, 相应地使 U 型压电梁的最大电压略有增加。

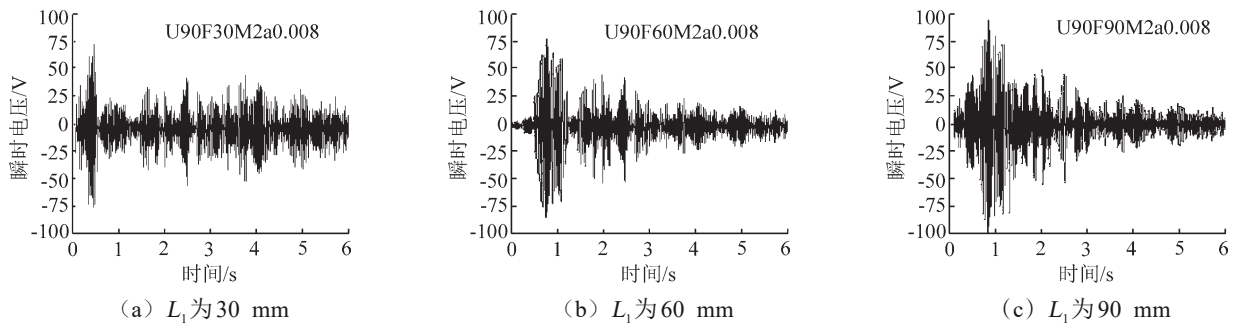


图 8 El-centro波激励下不同固定段长度的“U”型压电梁的输出电压

Fig.8 voltage of U-shaped beams with different fixed length in action of El-centro wave

不同形状的压电梁在El-centro波激励下的输出电压变化见图9。由图9可以看出,悬臂式、“L”型和“U”型压电梁的电压时程曲线差异很大,最大电压分别为46.39 V、55.80 V和85.33 V。这是因为悬臂式、“L”型和“U”型压电梁的弯曲刚度和固有频率依次显著降低,在相同的El-centro波作用下,它们的动态响应依次增强。悬臂式压电梁的电压在1~6 s内稳定,而“L”型和“U”型

压电梁的电压在1~6 s内有明显跃变。这是因为悬臂式压电梁的固有频率远大于地震波的激励频率,地震波频率的变化对悬臂式压电梁的动态响应影响微弱,而“L”型和“U”型压电梁的固有频率小于悬臂式压电梁,更接近El-centro波频率。因此,即使El-centro波的激励频率发生很小的变化,也会使“L”型和“U”型压电梁的动态响应发生较大变化(见式(9)和式(10))。

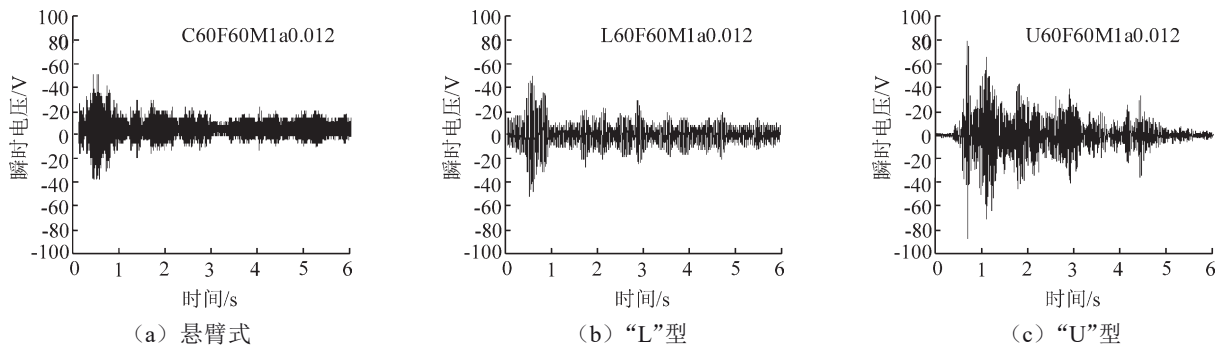


图 9 El-centro波激励下不同形状压电梁的输出电压

Fig.9 voltage of L-shaped beams with different shape in action of El-centro wave

(2) 其他地震波激励的输出电压(开环)

根据上述研究可知,U90F90M3压电梁地震能俘获器在El-centro波作用下具有最佳的地震能量吸收性能。为进一步了解U90F90M3压电梁的能量

收集行为,实验测量并记录了在Taft波和Northridge波激励下的输出电压。U90F90M3压电梁在加速度为0.012g的El-centro地震波、Taft地震波和Northridge地震波激励下的电压变化见图10。

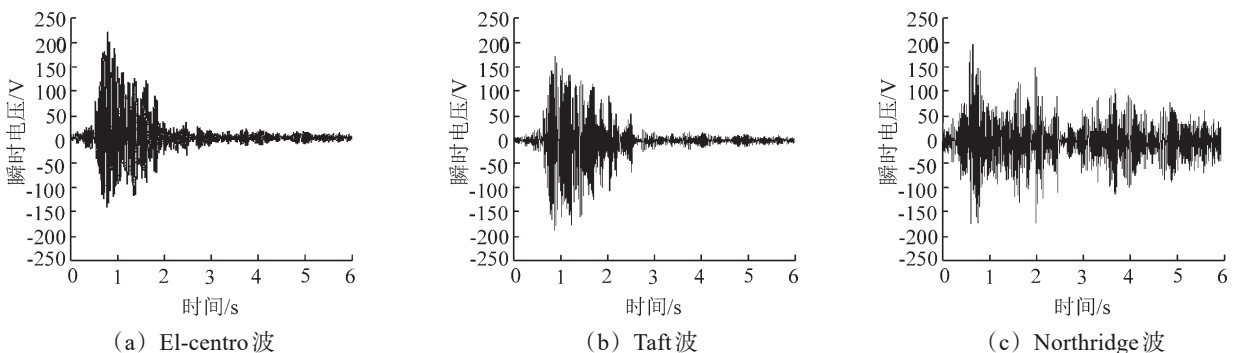


图 10 不同地震波激励下 U90F90M3 压电梁的输出电压

Fig.10 voltage of U90F90M3 beam in action of different seismic wave

由图10(a)可见,U90F90M3压电梁的电压变化趋势与图3(a)对应时间段的加速度变化趋势基本吻合,特别是0~1s、1.5~2.5s和3.5~4.5s内电压变化趋势与图3(a)中El-centro波完全一致;由图10(b)可见,0.5~2.5s内电压幅值较大,与图3(b)中Taft波变化一致;由图10(c)可见,最大电压发生在0.5~2.5s内,且正电压的幅值大于负电压幅值,与图3(c)中Northridge波特性相同。上述现象说明,U90F90M3压电梁的输出电压与地震加速度幅值的变化基本一致,对不同特性的地震波激励具有很高的灵敏度。

2.2 地震波激励下压电梁的平均电压和功率

实测电压和平均电压之间存在很大差异。悬臂式、“L”型和“U”型压电梁的最大电压分别为20~61V、30~80V和64~196V,平均电压分别为4~11V、4~22V和9~45V。这一现象表明瞬

时电压高但并不代表工作电压高。为研究本文提出的压电地震能俘获器的工作可靠性,对其在地震波激励下的平均电压进行计算和分析。

(1) El-centro波激励下的平均电压

L_2 分别取30mm、60mm、90mm,杆端质量分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 , a 分别取0.008g、0.01g、0.012g时,“L”型压电梁的平均电压的影响见图11。由图11(a)可知, L_2 为30mm、杆端质量为 M_3 、 a 不同时,“L”型压电梁的平均电压分别为10.04V、12.56V和16.56V;由图11(b)可知, L_2 为60mm、杆端质量为 M_3 、 a 不同时,“L”型压电梁的平均电压分别为12.29V、14.28V、17.51V;由图11(c)可知, L_2 为90mm、杆端质量为 M_3 、 a 不同时,“L”型压电梁的平均电压分别为16.12V、18.35V、19.87V。由式(5)~式(10)和这些数据可知,在不同力臂段长度和杆端质量条件下,随地震加速度幅值增大,压电梁的动态响应增强,平均电压逐渐升高。

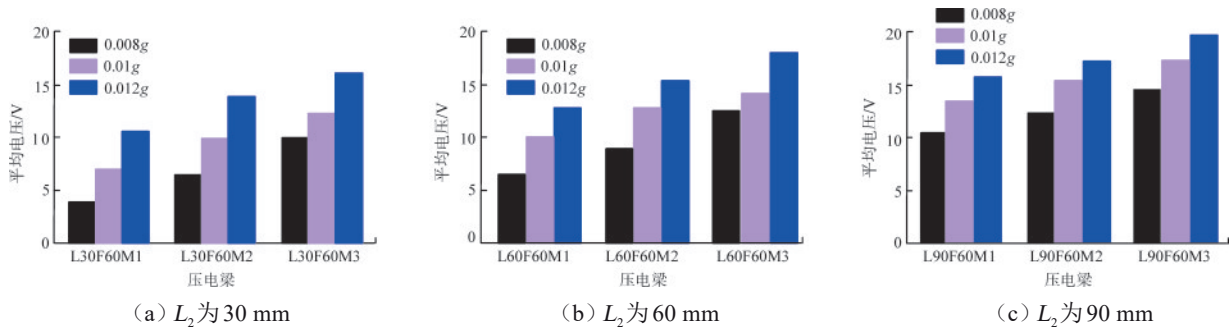


图11 地震加速度对不同杆端质量的“L”型压电梁平均电压影响

Fig.11 influence of seismic acceleration on the average voltage of L-shaped piezoelectric beams with different end mass is studied

在El-centro波作用下, a 分别取0.008g、0.01g、0.012g,不同力臂长度条件下,杆端质量对“L”型压电梁平均电压的影响见图12。由图12(a)可见, L_2 为30mm, a 为0.012g、杆端质量不同条件下,“L”型压电梁的平均电压分别为10.67V、13.03V和15.89V;由图12(b)可见, L_2 为60mm, a 为0.012g、杆端质量不同条件下,“L”型压电梁的平均电压分别为14.02V、15.52V、17.42V;由图

12(c)可见, L_2 为90mm、 a 为0.012g,在杆端质量不同条件下,“L”型压电梁的平均电压分别为16.12V、18.35V、19.87V。显然,平均电压均随杆端质量增大而增大。这是因为“L”型压电梁的第一固有频率随杆端质量的增加而降低,使其在相同的El-centro波作用下产生更大的动态响应。此外,杆端质量的增加会使施加在压电耦合段上的弯矩增大,进一步提升平均电压。

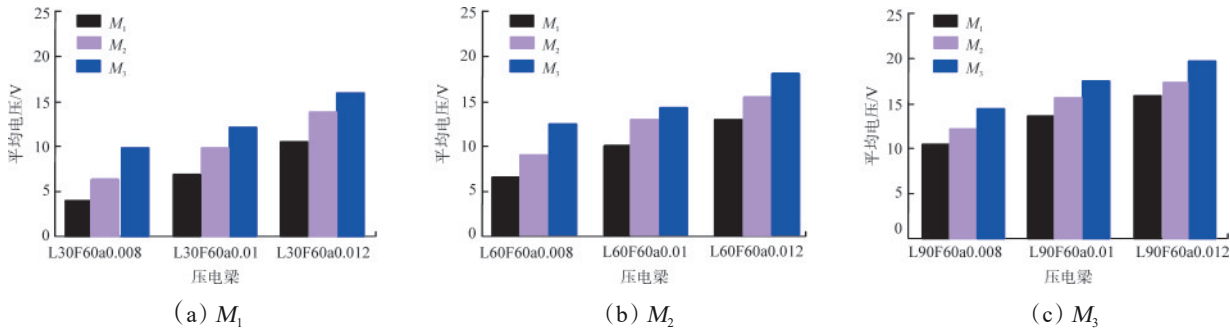


图12 不同地震加速度激励下杆端质量对“L”型压电梁平均电压的影响

Fig.12 influence of rod end mass on the average voltage of L-shaped piezoelectric beam under different seismic acceleration excitations

在 El-centro 波作用下, a 分别取 0.008g、0.01g、0.012g, 不同杆端质量条件下, 压电耦合段长度 L 对“L”型压电梁平均电压的影响见图 13。由图 13 (a) 可见, 杆端质量为 M_1 , a 为 0.012g, L 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, “L”型压电梁的平均电压分别为 10.67 V、14.02 V 和 16.12 V。由图 13 (b) 可见, 杆端质量为 M_2 , a 为 0.012g、 L 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, “L”型压电梁的

平均电压分别 13.03V、15.52 V、18.35 V。由图 13 (c) 可见, 杆端质量为 M_3 , a 为 0.012g, L 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, “L”型压电梁的平均电压分别为 15.89 V、17.42 V、19.87 V。可见, 在不同杆端质量和地震加速度条件下, 平均电压均随压电耦合段长度的增加而增加。这是因为 L 的增加会使压电梁等效刚度减小, 压电片应变和输出电压增大。

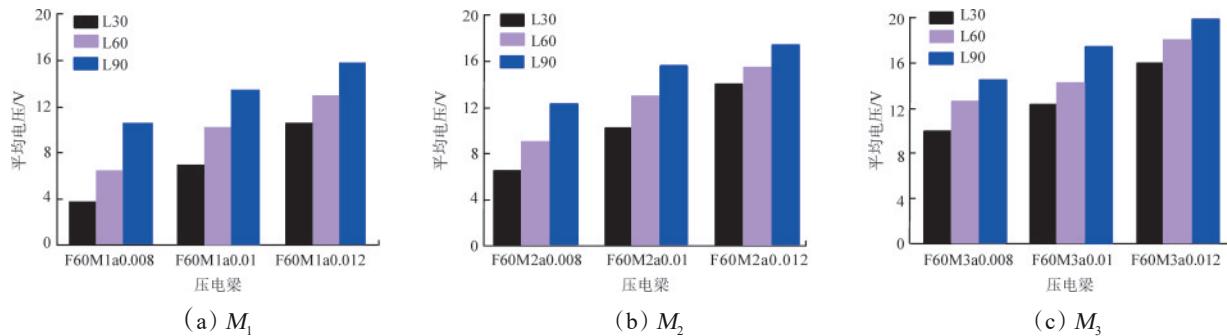


图 13 不同地震加速度激励下压电耦合段长度对“L”型压电梁平均电压的影响

Fig.13 influence of different piezoelectric coupling length on the average voltage of L-shaped piezoelectric beam under different seismic acceleration excitations

在 El-centro 波作用下, a 分别取 0.008g、0.01g、0.012g, 在不同杆端质量条件下, 固定段长度 L_1 对“U”型压电梁平均电压值的影响见图 14。由图 14 (a) 可见, 杆端质量为 M_1 、 a 为 0.012g、 L_1 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, “U”型压电梁的平均电压分别为 21.11 V、25.85 V 和 37.50 V; 由图 14 (b) 可见, 杆端质量为 M_2 、 a 为 0.012g、 L_1 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, U 型压电梁的平均电压分别为 24.90 V、38.59 V、42.52 V; 由

图 14 (c) 可见, 杆端质量为 M_3 、 a 为 0.012g、 L_1 分别为 30 mm、60 mm、90 mm 时, U 型压电梁的平均电压分别为 25.67 V、42.12 V、45.49 V。显然, 无论杆端质量和加速度幅值如何变化, L_1 的增加都会使平均电压微弱增加。这是因为当 L_1 大于 30 mm 时, L_1 的大幅增加仅导致 U 型压电梁固有频率的微弱下降, 进而使得“U”型压电梁在 El-centro 波作用下的动态响应和输出电压产生微弱增长。

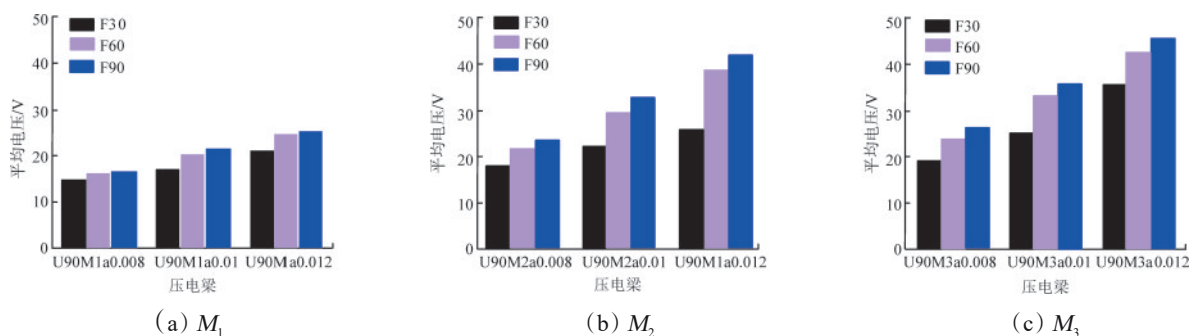


图 14 不同地震加速度激励下固定段长度对“U”型压电梁平均电压的影响

Fig.14 influence of fixed section length on the average voltage of U-shaped piezoelectric beam under different seismic acceleration excitations

在 El-centro 波作用下, a 分别取 0.008g、0.01g、0.012g, 压电梁形状对其平均电压的影响见图 15。由图 15 可见, “U”型压电梁的平均电压明显大于“L”型和悬臂式压电梁的平均电压。由图 15 (c) 可见, 杆端质量为 M_3 , a 为 0.012g 时, 悬臂式、“L”型、

“U”型压电梁对应的平均电压分别为 11.16 V、18.35 V 和 42.52 V。这表明, 在 El-centro 波的作用下, “U”型压电梁的能量收集效率更好, 这是因为在悬臂式、“L”型和“U”型梁中, “U”型压电梁的固有频率最小, 更接近地震频率, 其平均电压也更大。

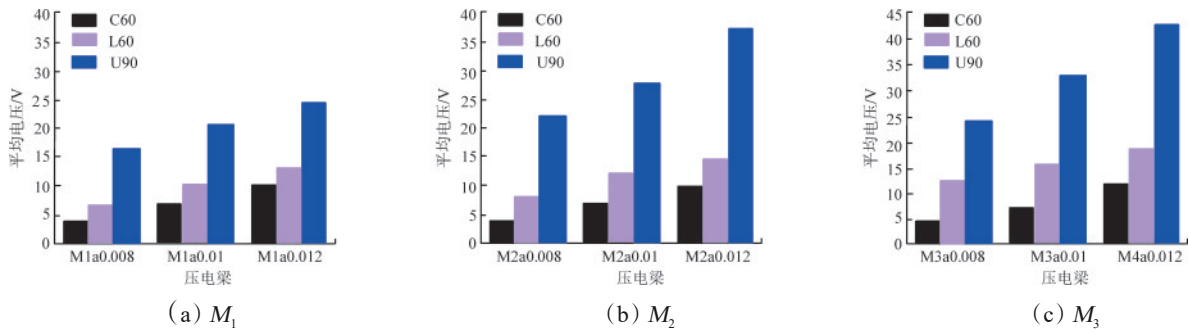


图15 不同地震加速度激励下压电梁形状对平均电压的影响

Fig.15 influence of piezoelectric beam shape on the average voltage under different seismic acceleration excitations

(2) El-centro 波激励下的平均功率

根据式(4)和El-centro波作用下压电梁的平均电压计算平均功率 P_{rms} ,如图16,可见, P_{rms} 为0.016~2.069 mW。当地震加速度为0.008g时, P_{rms} 最小值(0.016 mW)出现在杆端质量为 M_1 的悬臂压电梁上;当地震加速度为0.012g时, P_{rms} 最大值

(2.069 mW)出现在 L_1 为90 mm、 L_2 为90 mm、杆端质量为 M_3 的“U”型压电梁上。因此认为,压电梁的平均功率随地震加速度、杆端质量、力臂段长度、固定段长度和压电梁形状的增大而增大。此外, L_2 和压电梁形状对输出平均功率有显著影响,但杆端质量和 L_1 对平均功率的影响很小。

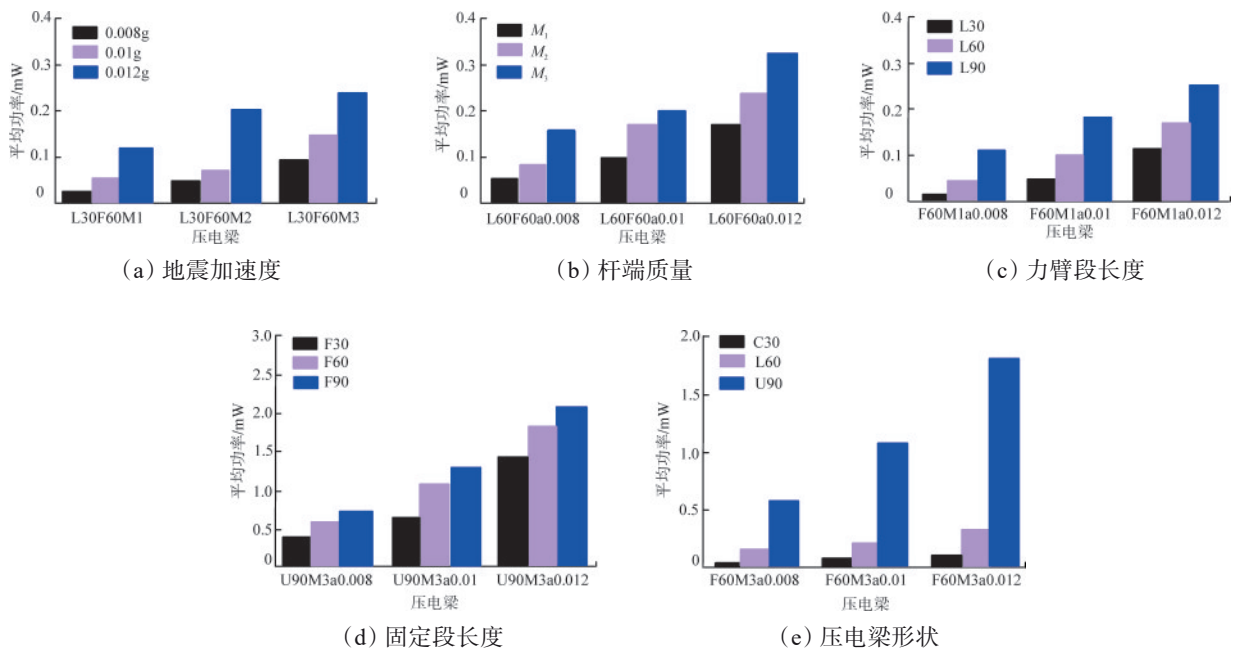


图16 地震加速度和各设计因素对压电梁平均功率的影响

Fig.16 effects of seismic acceleration and design factors on RMS power of piezoelectric beams

(3) 其他地震波激励下的平均电压和功率

U90F90M3压电梁在不同地震波作用下的平均电压和平均功率表2,可知,当地震加速度为0.012g时,U90F90M3的平均电压可以满足地震预警设备的要求(11 V^[16])。0.012g的地震加速度幅值仅仅相当于微弱地震,实际6度地震烈度对应的地震加速度幅值可达0.1g,因此以U90F90M3为获能单元的压电地震能俘获器能够满足地震监测传感元件的用电需求。

表2 不同地震波的峰值电压、平均电压值和平均功率

Tab.2 peak voltage, RMS voltage and RMS power in different seismic wave

地震波类型	振幅	峰值电压/V	RMS电压/V	平均功率/mW
El-centro		195.63	45.48	2.07
Taft	0.012g	180.45	39.06	1.53
Northridge		217.74	37.59	1.41

3 结论

为了探索压电地震能俘获器在不同地震激励下的能量收集能力和地震敏感性,本文设计并定制以悬臂式、“L”型和“U”型压电耦合梁为俘获单元的3种俘获器。通过一系列实验和数值计算研究了设计参数对其在不同地震波激励下俘获地震能性能的影响。

3种压电梁对地震波激励的灵敏度较高,输出电压时程曲线的变化趋势与相应的地震加速度-时间曲线的特征基本吻合。3种压电梁的峰值电压和平均电压随地震加速度、杆端质量、力臂段长度和固定段长度的增加而增加。U90F90M3压电梁在不同地震波作用下能量收集性能最好。在加速度为0.012g的El-centro波激励下,U90F90M3的平均电压为45.49 V,平均功率为2.07 mW。实验结果表明,通过匹配更大尺寸的“U”型压电地震能俘获器或合适的“U”型阵列压电地震能俘获器,可为地震监测传感元件提供足够的输出功率和电压。

本文提出的3种压电地震能俘获器主要针对单一地震波传播方向设计,考虑到实际地震波方向的随机性,工程应用中需在地震能俘获器中安装多个方向的压电单元,用以吸收来自多个方向的地震波能量。

参考文献(References):

- [1] 张立新.地震次生火灾研究进展[J].地震工程学报,2020,42(6):1693-1699.
ZHANG Lixin. Advances in research on post-earthquake fires[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6):1693-1699.
- [2] 高孟潭,周本刚,潘华.“5·12”汶川特大地震灾害特点及其防灾启示[J].震灾防御技术,2008,3(3):209-215.
GAO Mengtan, ZHOU Bengang, PAN Hua. Damage characteristics and enlightenment of disaster prevention of “5·12” Wenchuan earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3):209-215.
- [3] 郝金来,王卫民,姚振兴.2011年3月11日日本东北沿海M_w9.0级地震震源破裂过程[J].中国科学(地球科学),2011,41(6):745-749.
HAO Jinlai, WANG Weimin, YAO Zhenxing. Focal rupture process of the Mw9.0 earthquake off the northeast coast of Japan on March 11th, 2011[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(6): 745-749.
- [4] 许冲,田颖颖,沈玲玲,等.2015年尼泊尔廓尔喀M_w7.8地震滑坡数据库[J].地震地质,2018,40(5):1115-1128.
XU Chong, TIAN Yingying, SHEN Lingling, et al. Database of landslides triggered by 2015 gorkha(Nepal)M_w7.8 earthquake[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5):1115-1128.
- [5] XIE X D, LIAO H, ZHANG J F, et al. An investigation on a cylinder harvester made of piezoelectric coupled torsional beams[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251:114857.
- [6] XIE X D, HUANG X N, WANG J J, et al. An investigation on energy harvesting behavior of an array piezoelectric coupled disc damper [J]. Micromachines, 2022, 13:1244.
- [7] 骆懿,梅开焯.压电式能量收集器中能量提取电路的研究进展[J].传感器与微系统,2018,37(1):1-5,14.
LUO Yi, MEI Kaihuang. Research progress of energy extraction circuit in piezoelectric energy harvester[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(1):1-5,14.
- [8] 李如春,征琦,施朝霞.微型之字形压电式能量收集器输出电压的建模和仿真[J].传感技术学报,2015,28(5):629-634.
LI Ruchun, ZHENG Qi, SHI Zhaoxia. Modeling and simulating for output voltage of piezoelectric energy harvester[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(5): 629-634.
- [9] 孙晓阳,王佩红,王卓,等.一种可调频的压电式振动能量采集器[J].微纳电子技术,2014,51(8):518-522,541.
SUN Xiaoyang, WANG Peihong, WANG Zhuo, et al. A piezoelectric vibration energy harvester with the adjustable frequency[J]. Micronanoelectronic Technology, 2014, 51(8):518-522,541.
- [10] 刘琪才,何渊,王德波.悬臂梁压电式能量收集器频带扩展研究[J].微电子学,2021,51(2):255-259.
LIU Qicai, HE Yuan, WANG Debo. Research on frequency band extension of cantilever beam piezoelectric energy harvester[J]. Microelectronics, 2021, 51(2):255-259.
- [11] XIE X D, WANG Q, WU N. Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(5):1421-1429.
- [12] ZHANG J F, XIE X D, SONG G B, et al. A study on a near-shore cantilevered sea wave energy harvester with a variable cross section[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6):3174-3185.
- [13] XIE X D, ZHANG J F, WANG Z J, et al. Contribution evaluation from each optimization factor of cantilevered harvesters in the improvement of their energy harvesting performance [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2022: 17(1):139-154.
- [14] XIE X D, WANG Z J, LIU D Z, et al. An experimental study on a novel cylinder harvester made of L-shaped piezoelectric coupled beams with a high efficiency[J]. Energy, 2020, 212:118752.
- [15] WANG Z J, XIE X D, ZHANG J F, et al. An experimental study on efficient piezoelectric coupled beams and corresponding piezoelectric bricks [J]. Applied Sciences, 2021, 11(23):11504.
- [16] XIE X D, WANG Z J, ZHANG J K, et al. A study on a novel piezoelectric bricks made of double-storey piezoelectric coupled beams[J]. Energy, 2022, 250:123769.
- [17] XIE X D, ZHANG J F, WANG Z J, et al. An experimental study on a high-efficient multifunctional U-shaped piezoelectric coupled beam[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224:113330.
- [18] ZHANG J K, XIE X D, ZHANG J F, et al. An investigation on an absorber working through piezoelectric conversion mechanism [J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(2): 538-551.
- [19] HU X B, LI Y, XIE X D. A study on a U-shaped piezoelectric coupled beam and its corresponding ingenious harvester[J]. Energy, 2019, 185:938-950.
- [20] ESPOSITO M, PALMA L, BELLI A, et al. Recent advances in Internet of Things solutions for early warning systems: a review[J]. Sensors, 2022, 22(6):2124.