

李 辉,许龙舟,毛 鹏,等.悬臂梁压电俘能器结构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 Long-zhou,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.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.06.003

悬臂梁压电俘能器结构与电学性能有限元分析

李 辉,许龙舟,毛 鹏,谢正阳,赵信博,王振军

(长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为探明压电俘能器结构参数和不同压电材料对其电学输出性能的影响,基于压电效应,运用有限元仿真分析方法,采用 COMSOL Multiphysics 软件中的结构力学模块和 AC/DC 模块,建立悬臂梁压电俘能器初始结构模型,并对使用不同压电材料的俘能器进行电学输出性能分析。研究表明:根据汽车在路面行驶的速度,得出路面振动频率为 6.67~13.33 Hz,不超过 20 Hz。路面振动频率为 0~18 Hz 时使用 PZT-5H 的俘能器电学输出性能较高,路面振动频率为 19~20 Hz 时使用 PZT-5A 的俘能器电学输出性能较好,根据路面实际振动频率范围建议选用 PZT-5H;根据电学性能输出效果,对初始俘能器进行结构优化,得到优化后的结构参数[支撑结构尺寸(长×宽×高)为(1×20×1)mm³、压电材料尺寸为(30×20×0.06)mm³、金属基板尺寸为(30×20×0.1)mm³、质量块尺寸为(4×20×1)mm³];振动频率为 10 Hz、振动加速度为 1g 条件下,计算得到悬臂梁压电俘能器的最佳外接负载为 35 kΩ,对应的输出电压为 0.30 V、输出功率为 1.24×10⁻⁶ W,相对于优化前的俘能器输出电压(0.19 V)和输出功率(0.22×10⁻⁶ W)分别提升了 58%和 463%;对悬臂梁压电俘能器进行特征频率分析,计算得到其 1 阶特征频率为 76.9 Hz;而悬臂梁压电俘能器在频率为 0~20 Hz 工作时,输出电压和输出功率均随着路面振动频率增加而增加;此时路面振动频率远离 1 阶特征频率,不会对使用寿命产生影响,证明所设计的俘能器模型在路面振动频率范围内使用是合理的。

关键词:道路工程;压电俘能器;有限元方法;悬臂梁;压电路面

中图分类号:U416.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2023)06-0025-12

Structural design and electrical properties of cantilever beam piezoelectric energy harvester by finite element analysis

LI Hui, XU Long-zhou, MAO Peng, XIE Zheng-yang, ZHAO Xin-bo, WANG Zhen-jun

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To explore the effects of structural parameters and piezoelectric materials on the electrical output performances of the piezoelectric energy harvester, the piezoelectric effect and the finite element simulation analysis method were employed. The initial structural model of the cantilever beam piezoelectric energy harvester was established, and the electrical output

收稿日期:2023-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51978067);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JM-245);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102312406);长安大学创新实践能力提升项目(300102312812)

作者简介:李 辉(1984-),男,河南永城人,副教授,工学博士,E-mail:huili@chd.edu.cn。

performance of different piezoelectric materials were analyzed, using the structural mechanics and AC/DC modules in COMSOL Multiphysics software. The results show that, according to the speed of the car on the road, it is concluded that the vibration frequency of the road is 6.67 to 13.33 Hz and will not reach 20 Hz. The electrical output performance of the energy harvester using PZT-5H energy is the best in the road vibration frequency of 0 to 18 Hz, and the performance of PZT-5A is better in the range of 19 to 20 Hz. According to the actual vibration frequency range of the road surface, the piezoelectric material of PZT-5H is recommended. According to the output effect of electrical performance, the structure of the initial energy harvester is optimized, and the optimized structural parameters are obtained [the support structure size (length \times width \times height) is $(1\times 20\times 1)\text{ mm}^3$, the piezoelectric material size is $(30\times 20\times 0.06)\text{ mm}^3$, the metal substrate size is $(30\times 20\times 0.1)\text{ mm}^3$ and the mass block size is $(4\times 20\times 1)\text{ mm}^3$]. When the vibration frequency is 10 Hz and the vibration acceleration is 1g, the optimal external load of the cantilever piezoelectric energy harvester is 35 k Ω , and the corresponding output voltage and output power is 0.30 V and $1.24\times 10^{-6}\text{ W}$ respectively, which is increased by 58% and 463% comparing to the output voltage (0.19 V) and output power ($0.22\times 10^{-6}\text{ W}$) the initial structural. The characteristic frequency of the cantilever piezoelectric energy harvester was analyzed, and the calculated first-order characteristic frequency is 76.9 Hz. When the cantilever piezoelectric energy harvester works in the range of 0 to 20 Hz, the output voltage and output power increase with the increase of vibration frequency. At this time the working frequency is far away from the first order characteristic frequency, proving that the designed energy harvester model is reasonable in the range of road vibration frequency. 4 tabs, 12 figs, 33 refs.

Key words: road engineering; piezoelectric energy harvester; finite element method; cantilever beam; energy harvesting road

0 引言

公路作为重要的基础设施,在承担交通功能的同时也存在着大量能量^[1-2],包括机械能、热能等,从路面收集能量具有较大潜力。在众多的能量收集方式中,利用压电材料压电效应^[3-4]可以将行车荷载下路面产生的部分机械振动能量转换为电能,因此,压电发电路面作为一种新型可再生清洁能源技术备受国内外关注^[5]。

路面能量收集技术早在 2008 年已经出现,以压电材料为基体的道路机械能量收集系统,并对世界上第 1 条可发电的公路进行工作演示,其产生的电能可以并入电网进行供电或为路面设施提供电能^[6]。Roshani 等利用试验和有限元相结合的方法,设计了 3 种路面能量收集装置,分析了压电材料对俘能器输出功率的影响因素,结果表明,设计的能量收集装置能够为农村道路 LED 灯提供能源^[7]。

随后,中国学者陆续开展了发电路面及能量收集系统研究。赵鸿铎等对基于压电效应的沥青路面

能量收集技术效率进行探讨,验证了压电式路面能量收集技术的可行性,其设计的钹式俘能器在荷载频率为 20 Hz 时,最多可以收集到 $1.2\times 10^{-3}\text{ W}$ 的电能^[8]。黄如宝等对 PZT-5H 锆钛酸铅($\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$,简称为 PZT)等不同材料以及不同模式的压电换能系统进行了研究,从压电材料、俘能器结构、铺设模式、电处理系统设计及压电俘能模式拓展 5 个方面,总结了压电式能量收集道路未来研究的方向^[9]。谭忆秋等采用热压法制备了 PZT-沥青压电复合材料,测试了 0-3 型 PZT/沥青压电复合材料的压电性能,荷载响应稳态输出电压为 7.2 V,在 310 s 内可收集电量 $259.2\times 10^{-3}\text{ J}$ ^[10]。王朝辉等研究了压电材料与路面材料一体化的发电路面技术,提出压力发电沥青混凝土的下一步研究方向,如增大混凝土导电性、开发电能采集电路、完善极化方法等^[5]。曹阳森等对夹层式压电俘能器及交通负载下压电俘能器和路面的能量输出开展了研究,制备了小尺寸压电路面模型,在施加荷载为 5 kN、加载频率为 4 Hz 时,压电俘能器开路电压稳定在 9.44 V,

并探究了荷载水平、荷载频率、压电陶瓷晶片并联个数、沥青路面面层类型以及面层温度对开路电压的影响^[11]。上述研究在压电路面中使用了不同的压电能量收集器结构,都可以产生一定的电能来保证使用效果。

常见的压电振动能量收集结构主要有悬臂式^[12]、桥式^[1]和钹式^[13]等。在众多的压电俘能器设计方案中,悬臂梁压电俘能器^[14-16]具有体积小、发电效率高等特点,获得了广大学者的青睐。悬臂式压电俘能器通常包括压电单晶片式悬臂结构^[17]和压电双晶片式悬臂结构^[18]。相对于压电单晶片式悬臂结构而言,压电双晶片式悬臂结构具有柔顺系数高、挠度变形量较大和固有频率低等优点^[19],是当前研究的热点。

在悬臂梁压电俘能器的研究中,为了提高俘能器的电学输出性能,研究者们主要采用 2 种不同的方式:①采用新型的悬臂梁结构。Zhou 等提出了一种基于 PZT-5H 的对称 V 形压电俘能器,试验结果表明,对称 V 形压电俘能器的输出功率要比悬臂梁压电俘能器提高大约 20%^[20]。Li 等设计了一种新型的夹层结构作为压电俘能器基板,基板结构包括金属和金属层之间的软芯结构,并采用有限元法,把设计夹层结构俘能器与传统俘能器进行对比,结果表明,在 0.1g(g 为重力加速度)的振动加速度下,含有夹层结构俘能器产生的输出电压要比传统俘能器多出 18.8%^[21]。②增加孔型结构。Biswal 等使用 COMSOL 软件,通过在经典悬臂梁中增加通孔的方式,提高俘能器的电学输出性能^[22]。Xiong 等设计了一种新型的压电悬臂梁能量收集装置,中间层具有矩形孔的金属基板,仿真模拟结果表明,新型能量收集装置会产生更高的输出电压和功率,并可以提高能量转换效率^[23]。然而,在悬臂梁压电俘能器中增加孔形结构或者使用新型悬臂梁结构,虽然能够有效提升电学输出性能,但是没有考虑到结构受到的应力作用,不能保证俘能器的使用寿命。因此,使用传统悬臂梁压电俘能器时,对其进行结构优化并提升其电学输出效果,即在保证俘能器使用寿命的前提下获得较好的电学输出仍值得深入研究。

目前,在众多压电材料中,PZT 压电陶瓷具有压电应变常数高、介电常数较高、机电耦合性能好、转换效率高等优点,经常被应用于智能发电路面和能量收集系统^[24-25]。Rathod 等通过有限元仿真模拟,对比了 PZT-4D 和 PZT-7A 两种压电材料制成的悬臂梁压电俘能器的发电性能,发现 PZT-7A 比

PZT-4D 具有更好的电能输出^[26]。此外,也有部分能量收集系统采用聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride,PVDF)压电材料^[27-28]。因此,有必要将 PZT 系压电陶瓷和 PVDF 作为压电俘能器的压电材料对比分析,综合对比不同压电材料对俘能器电学输出产生的影响。

本文以收集车辆在公路上行驶产生的振动能量为目标,以压电双晶悬臂梁俘能器为对象,采用有限元方法和 COMSOL 软件,建立俘能器模型,探究不同压电材料对俘能器电学输出性能的影响,并对俘能器进行结构优化和电学性能计算,进而分析振动频率和外接负载对悬臂梁压电俘能器压电性能的影响,以期为试验研究和工程应用提供理论指导。

1 模型建立与计算参数设置

本文基于有限元方法,利用多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics^[29]中的结构力学模块和 AC/DC 模块,建立仿真模型,对悬臂梁压电俘能器的结构和电能输出性能进行研究。

1.1 几何模型构建

利用 COMSOL 软件,根据文献[30],建立悬臂梁结构压电俘能器的初始二维几何模型(图 1),包括支撑结构、压电层和质量块。压电层分为 3 层:上压电层、金属片、下压电层;质量块在压电悬臂梁结构的右上方。几何模型各部分的尺寸数据见表 1。

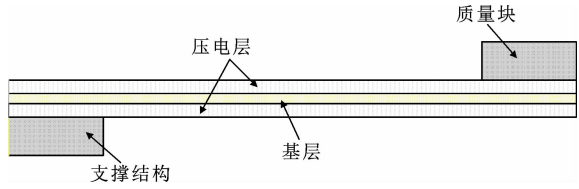


图 1 压电双晶悬臂梁二维结构

Fig. 1 Two-dimensional structure of piezoelectric bimorph cantilever beam

表 1 压电双晶悬臂梁初始结构尺寸

Tab. 1 Initial structural sizes of piezoelectric bimorph cantilever beam

结构		长/mm	宽/mm	高/mm	材料
质量块		4	14	1.00	结构钢
压电层	上层	21	14	0.06	压电材料
	中层	21	14	0.04	H62 黄铜
	下层	21	14	0.06	压电材料
支撑结构		4	14	1.00	结构钢

1.2 材料参数

在能量收集压电俘能器中,压电材料大多使用 PZT 或 PVDF。表 2 列出了相关压电材料的基本物

理性质数据,可用于后续悬臂梁压电俘能器结构设计和电学性能分析。

表 2 PZT 系和 PVDF 压电材料的基本物理性质

Tab. 2 Basic physical properties of PZT and PVDF piezoelectric materials

压电材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对介电常数	弹性模 量/GPa	泊松比
PZT-2	7 600	(504.1, 504.1, 270.0)	63.0	0.30
PZT-4	7 500	(762.5, 762.5, 663.2)	80.0	0.32
PZT-4D	7 600	(796.5, 796.5, 762.9)	75.0	0.35
PZT-5A	7 750	(919.1, 919.1, 826.6)	74.0	0.35
PZT-5H	7 500	(1 704.4, 1 704.4, 1 433.6)	60.0	0.34
PZT-5J	7 400	(1 641.3, 1 641.3, 1 143.0)	68.0	0.35
PZT-8	7 600	(904.4, 904.4, 561.6)	61.0	0.33
PVDF	1 780	(7.4, 9.3, 7.6)	1.4	0.40

注:相对介电常数分别为 x 、 y 、 z 方向上的值。

1.3 振动频率设置

假设正常情况下汽车在路面上的行驶速度为 60~120 km/h,最高速度不超过 180 km/h(机动车行驶不超过规定时速 50%)。汽车在公路上行驶时,由于移动载荷的作用会对路面产生一定频率的振动,根据式(1)可以计算得出路面振动频率^[31],结果如表 3 所示。可见,路面振动频率取为 6.67~13.33 Hz,不超过 20 Hz。式(1)可表示为

$$f=1/t=v/l \quad (1)$$

式中: f 为路面振动频率; t 为时间; v 为实际道路中的行车速度; l 为汽车轴距,本文中以普通轿车为例,取轴距 $l=2.5$ m。

表 3 不同车速下的振动频率

Tab. 3 Vibration frequencies at different speeds

$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	40	60	80	90	100	120	140	160	180
f/Hz	4.44	6.67	8.89	10.00	11.11	13.33	15.56	17.78	20.00

1.4 压电本构方程

本文在有限元计算时,采用的压电本构方程为第 1 类方程,对应的弹性本构方程和电学本构方程分别用式(2)和式(3)表示^[11,32]

$$\mathbf{S}=\mathbf{s}^E\mathbf{T}+\mathbf{d}^T\mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{D}=\mathbf{d}\mathbf{T}+\epsilon_T\mathbf{E} \quad (3)$$

式中: \mathbf{S} 为应变张量; \mathbf{s}^E 为弹性顺度常数; \mathbf{T} 为应力张量; \mathbf{E} 为外电场强度张量; \mathbf{D} 为电位移张量; \mathbf{d} 为压电应变常数; \mathbf{d}^T 为 \mathbf{d} 的转置; ϵ_T 为相对介电常数。

当行车荷载作用于压电俘能器时,将产生应变;根据正压电效应,压电材料上、下表面产生异号电荷,从而将机械能转化为电能。此时 $\mathbf{E}=0$,式(3)对应的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: D_1 、 D_2 、 D_3 分别为压电片 3 个方向的电位移; d_{ij} 为压电应变常数, i 取 1,2,3; j 取 1,2,3,4,5,6。

由于本悬臂梁模型中压电材料较薄,其电位移主要在方向 3 上,方向 1 和方向 2 上电位移可以忽略,下标 1、2、3 代表 x 、 y 、 z 三个方向(x 、 y 方向平行于路面, z 方向垂直于路面),因此式(4)进一步简化为

$$D_3=d_{33}T_3 \quad (5)$$

当压电陶瓷晶片表面面积为 A 、电容为 C 时,产生的电荷量 Q_3 和开路电压 U 可分别通过式(6)和(7)计算,即

$$Q_3=D_3A \quad (6)$$

$$U=Q_3/C \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 悬臂梁压电俘能器结构设计

悬臂梁压电俘能器的结构设计主要包括俘能器压电材料选取和结构尺寸优化设计。

2.1.1 压电材料选择

不同压电材料具有不同的性能。在压电俘能器中,压电材料的选择在一定程度上会影响俘能器电学输出。为了选择更为合适的压电材料,选用表 2 中 7 种 PZT 系压电陶瓷和 1 种 PVDF 材料进行对比,分析俘能器的电学输出性能。设定路面振动频率范围为 0~20 Hz,振动加速度为 $1g$,负载电阻为 80 k Ω ,不同压电材料的仿真计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知:路面振动频率范围为 0~20 Hz 时,PZT-5H、PZT-5J 和 PZT-5A 三种材料的输出电压和输出功率性能较好,PVDF 电学输出较差,这是由于 PZT-5 系压电材料具有较高的介电常数和机电耦合系数,在相同工况下能够产生较高的电学输出。进一步分析图 2 可知:路面振动频率为 0~18 Hz 时,PZT-5H 的电学输出性能较高;路面振动频率为 19~20 Hz 时 PZT-5A 的电压和电功率输出最为优异。路面处于低频振动状态,很少情况下能够超过 18 Hz,因此可以优先选择 PZT-5H 作为俘能器的压电材料。分析图 2 还可知,在行车速度为 90 km/h、对应路面振动频率为 10 Hz 时,选用 PZT-5H 的俘能器对应的输出电压为 0.19 V、输出功率

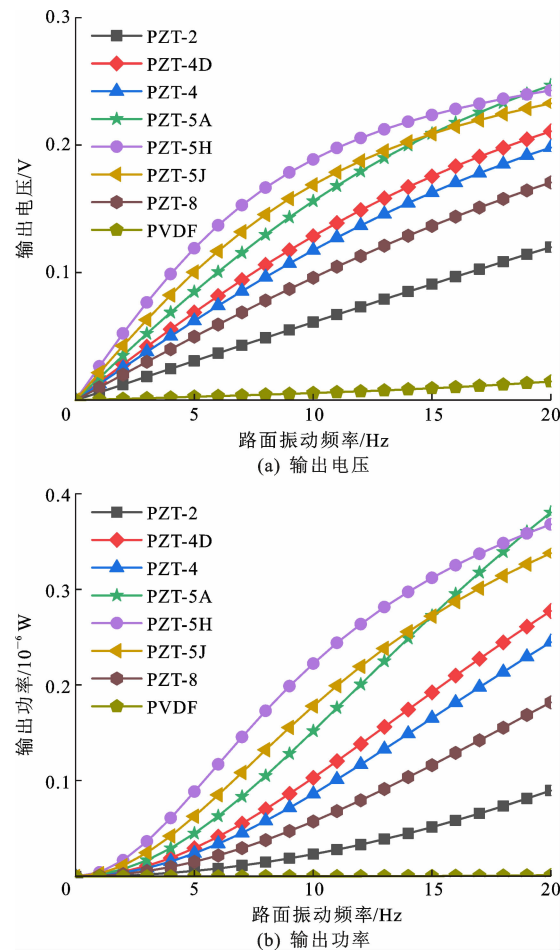


图 2 悬臂梁压电俘能器中不同压电材料的电学性能
Fig. 2 Electrical properties of different piezoelectric materials in cantilever piezoelectric transducers

为 0.22×10^{-6} W。

2.1.2 支撑结构参数优化

在悬臂梁中,初始支撑结构为 $[4(\text{长}) \times 14(\text{宽}) \times 1(\text{高})]\text{mm}^3$ (下文中尺寸排列顺序均为长 \times 宽 \times 高)的长方体。为使悬臂梁压电俘能器能获得更好的电学输出性能,需要对图 1 中悬臂梁的支撑结构进行参数优化。计算时,选用压电材料 PZT-5H,金属基板选择 H62 黄铜,路面振动频率为 $0 \sim 20$ Hz,振动加速度为 $1g$,外接负载电阻为 $80 \text{ k}\Omega$ 。

在初始结构基础上,保持其他结构不变,使支撑结构长 B 分别为 $1, 2, 3, 4 \text{ mm}$,分别对此 4 种悬臂梁结构进行频域分析,得出其对应的输出电压和输出功率如图 3 所示。

从图 3 可以看出, B 越小则电学输出性能越好,支撑结构为 $(1 \times 14 \times 1)\text{mm}^3$ 时俘能器的电功率输出是支撑结构为 $(4 \times 14 \times 1)\text{mm}^3$ 时的 1.9 倍,说明 B 减小能使悬臂梁俘能器的电学输出性能得到能提升,这是因为悬臂梁设计的时候,压电材料和金属基

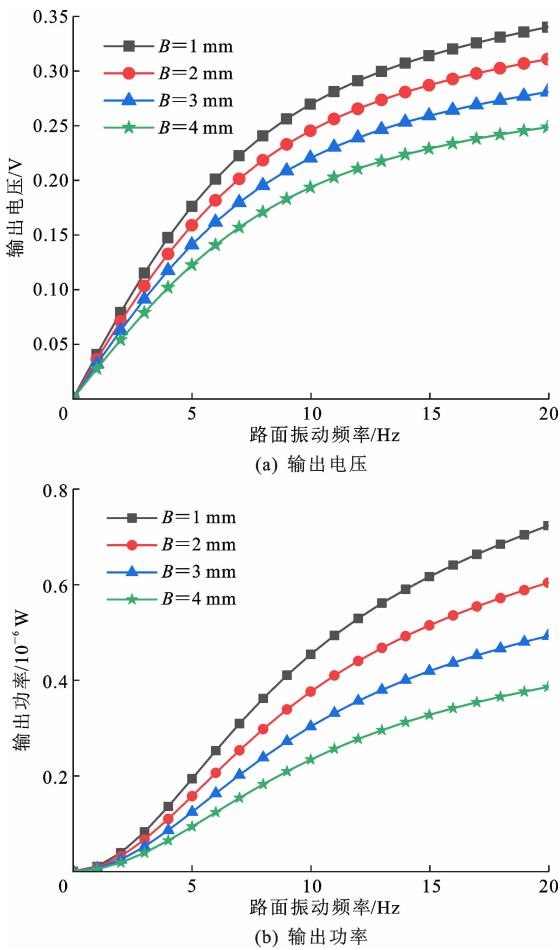


图 3 不同支撑结构的电学性能

Fig. 3 Electrical properties of different support structures

板是固定在支撑结构端, B 越小,压电材料和金属基板与其接触更小,当俘能器受力产生应变时,则能产生更好的应力效果,就会使电能输出效果明显提升,但是支撑结构也不能过小,过小会使支撑结构不足以提供支撑作用。

悬臂梁中悬臂部分与支撑结构的接触面积与支撑结构高无关,因此支撑结构高变化不会对俘能器的电学输出产生影响。综合考虑,选择支撑结构截面尺寸为 $(1 \times 1)\text{mm}^2$ 。

2.1.3 悬臂部分尺寸选择

悬臂梁压电俘能器的悬臂部分主要由压电片和金属基板构成,在上文计算过程中,选用的压电片 PZT-5H 尺寸为 $(21 \times 14 \times 0.06)\text{mm}^3$,金属基板选用 H62 黄铜尺寸为 $(21 \times 14 \times 0.04)\text{mm}^3$,为了确定最佳的悬臂梁部分尺寸,需要探究悬臂部分尺寸对压电俘能器电学输出的影响。

(1) 材料高度参数优化

为了更好地对比分析,选择压电材料高度 H_1 为 $0.02, 0.06, 0.1 \text{ mm}$,金属基板高度 H_2 为 0.04 、

0.1、0.2 mm,利用 COMSOL 软件进行频域计算分析,结果如图 4 所示。

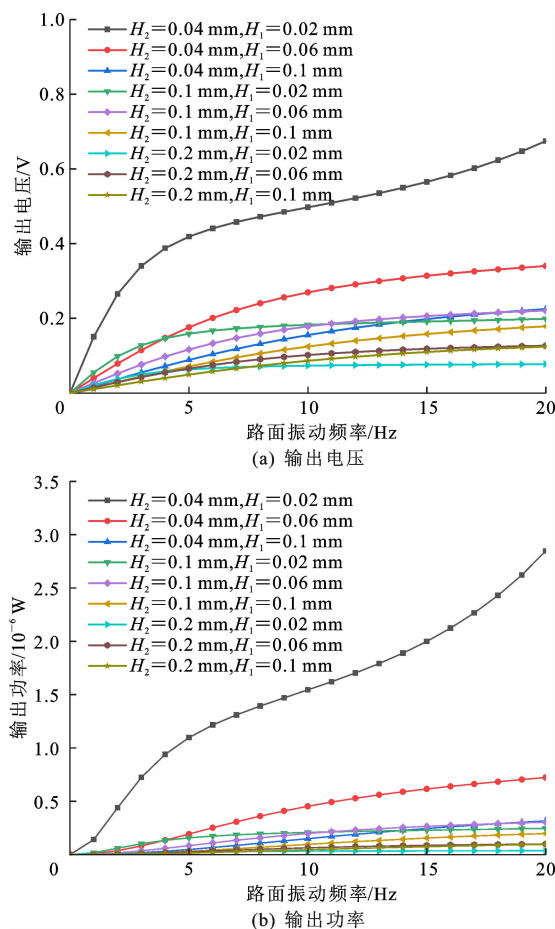


图 4 不同高度金属片和压电材料的电学性能

Fig. 4 Electrical properties of metal sheets and piezoelectric materials with different thickness

由图 4 可知:当 $H_2=0.04$ mm 时, $H_1=0.02$ mm 的俘能器电学输出最好,进一步计算表明在路面振动频率为 10 Hz 时其最大应力为 5.53 MPa,因此当金属基板和压电片较薄时应力较大,可能会使俘能器的使用寿命变短;当 $H_2=0.1$ mm 时, $H_1=0.06$ mm 的俘能器电学输出较好,进一步计算表明在路面振动频率为 10 Hz 时其最大应力为 1.09 MPa,此时金属基板和压电片厚度适中、应力较小,综合考虑使用寿命和电学输出,认为此时性能最好;当 $H_2=0.2$ mm 时,俘能器电学输出稍差。综合分析,优化后的金属基板高度 $H_2=0.1$ mm、压电片高度 $H_1=0.06$ mm。

(2) 压电材料的长度优化

由文献[20]、文献[24]、文献[33]可知,PZT-5H 的长度为 10~30 mm,压电陶瓷的加工工艺比较复杂,在实际应用中,悬臂梁部分过长,会使悬臂

梁末端产生的应力更大,增大悬臂梁断裂的风险。固定压电材料的宽度为 14 mm,取固定压电材料的长度 L 分别为 10、15、21、30 mm,通过仿真分析,得到电学输出结果如图 5 所示。

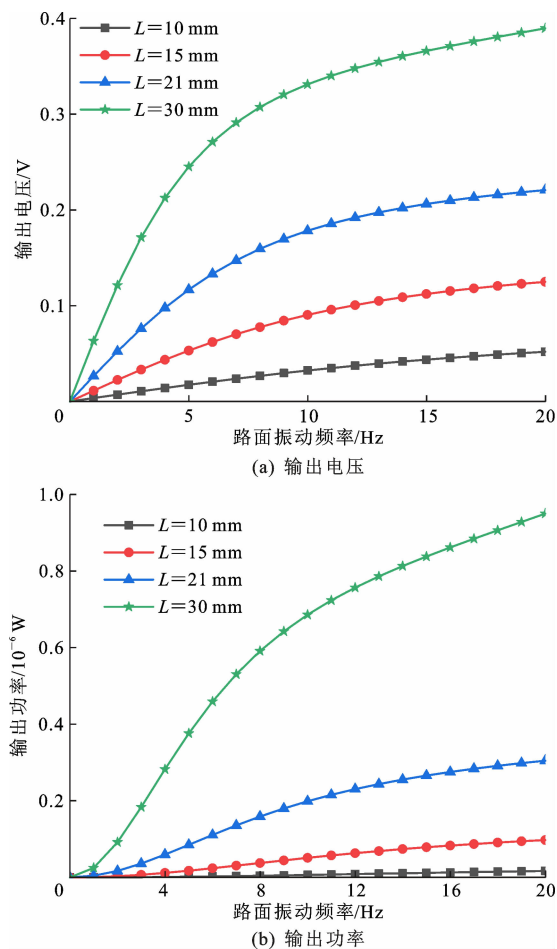


图 5 不同长度的压电材料的电学性能

Fig. 5 Electrical properties of piezoelectric materials with different lengths

从图 5 可知, L 为 10~30 mm 时,同一宽度的悬臂梁俘能器的电压输出和电功率输出随其长度的增大而增大,主要原因有:①压电材料变长,压电材料体积增大,会产生更好的电学输出;②压电材料变长时,压电悬臂梁在振动时产生的应力更大,也会产生更好的电学输出。通过上述分析,本文选择压电片长 $L=30$ mm,可以在提高电学输出性能的基础上,保证悬臂梁俘能器的使用寿命。

(3) 压电材料的宽度优化

固定压电材料的长度为 30 mm,改变固定压电材料的宽度 L_1 分别为 5、10、14、20 mm,通过仿真分析,得到电学输出结果如图 6 所示。

从图 6 可以得出:当 L_1 为 5~20 mm 时,悬臂梁俘能器的电学输出随着 L_1 的增加而增大,在

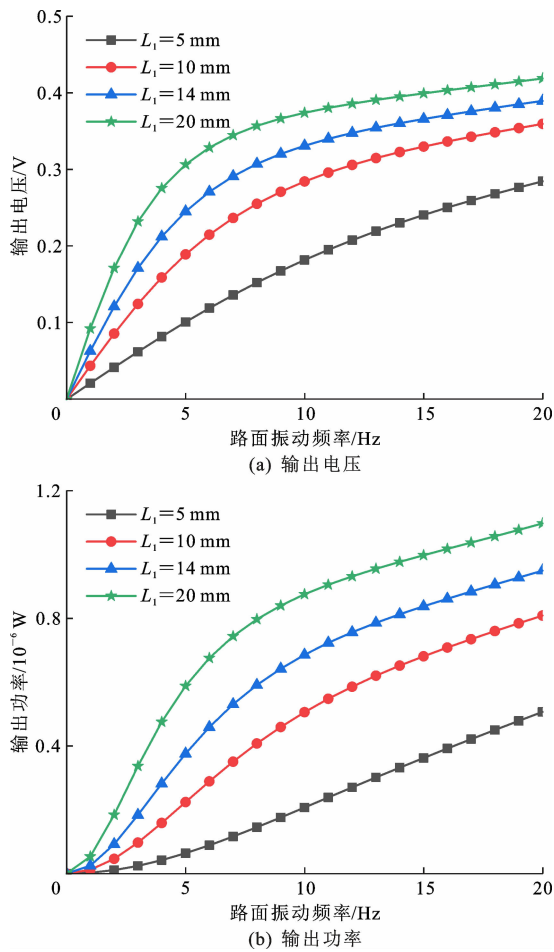


图6 不同宽度的压电材料的电学性能

Fig. 6 Electrical properties of piezoelectric materials with different widths

$L_1 = 20$ mm 电学输出性能最好。

综合上述高度、长度和宽度结果分析,本文得到最优化的压电片尺寸为 $(30 \times 20 \times 0.06) \text{ mm}^3$ 。

2.1.4 质量块的选择

质量块体积以及摆放位置会对悬臂梁俘能器的电学输出产生一定影响。确定压电片宽度为 20 mm,保持质量块宽度与压电片一致,分析质量块体积、长度和高度变化对悬臂梁俘能器产生电学性能的影响。

(1) 质量块体积的影响

保持质量块宽度和高度不变,改变长度使体积变化,选用 $(4 \times 20 \times 1)$ 、 $(3 \times 20 \times 1)$ 、 $(2 \times 20 \times 1)$ 、 $(1 \times 20 \times 1) \text{ mm}^3$ 的质量块进行频域分析,得到电学输出结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在质量块体积为 $(4 \times 20 \times 1) \text{ mm}^3$ 时,悬臂梁俘能器的输出电压和输出电功率较好。因为较大体积的质量块振动时,能使悬臂梁结构产生较大的应力和形变效果,从而增强俘能器的

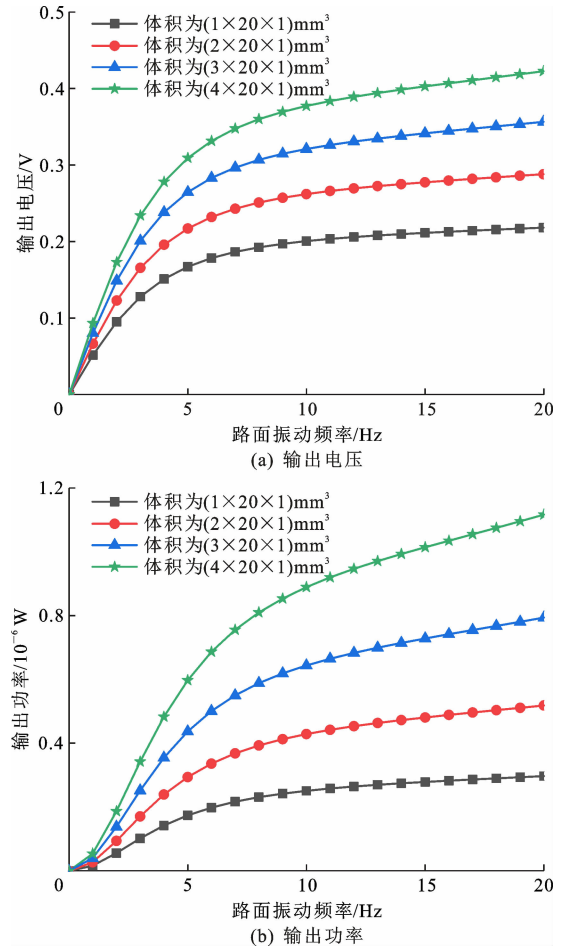


图7 不同体积质量块的电学性能

Fig. 7 Electrical properties of different volume mass blocks

电学输出。因此,可以选择体积为 $(4 \times 20 \times 1) \text{ mm}^3$ 的质量块。

(2) 质量块与悬臂部分接触面积影响

根据上文计算结果,保持压电悬臂梁俘能器的质量块体积 80 mm^3 不变,同时改变其长度和高度,使得质量块与悬臂部分的接触面积发生变化,建立 $(1 \times 4 \times 20)$ 、 $(2 \times 2 \times 20)$ 和 $(4 \times 1 \times 20) \text{ mm}^3$ 的质量块模型,如图 8 所示。

对建立模型进行频域分析,探究同体积不同接触面积质量块的俘能器电学输出效果,结果如图 9 所示。

从图 9 可以得知:当保持质量块体积为 80 mm^3 不变时,长度和高度的改变对悬臂梁压电俘能器的电学输出性能影响较小。其中 $(1 \times 20 \times 4) \text{ mm}^3$ 的质量块产生的电学输出性能稍好,因为其距离悬臂梁支撑结构部分较远,会在一定程度上增加悬臂部分的应变效果,从而产生更好的电学输出。但在实际的应用场景中,由于质量块与悬臂部分的接触面积较小,会影响质量块与悬臂部分的黏结效果,可能

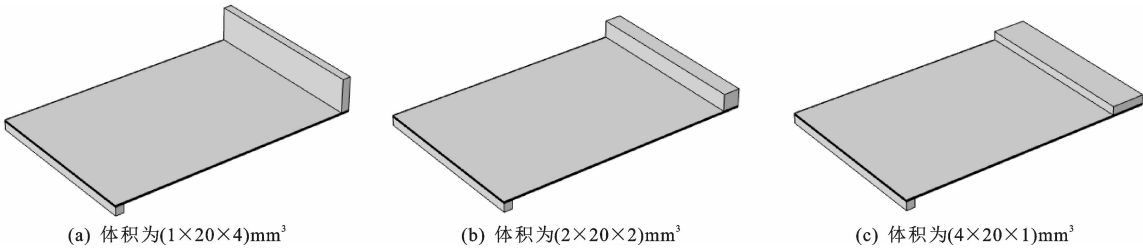


图 8 不同形状质量块的悬臂梁俘能器

Fig. 8 Cantilever beam energy harvesters with mass blocks of different shapes

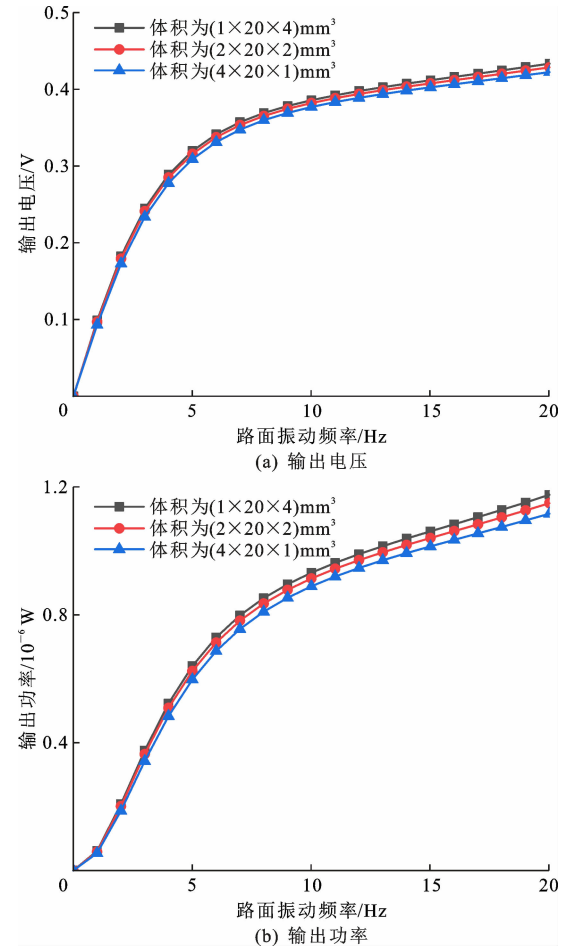


图 9 不同接触面积质量块的电学性能

Fig. 9 Electrical properties of mass blocks with different contact areas

导致结构不够稳定。因此为了方便黏结,仍采用体积为 $(4\times20\times1)\text{mm}^3$ 的质量块。

通过上述压电材料选择、支撑结构参数优化和质量块选择,得到优化的悬臂梁俘能器结构尺寸及相关参数如表 4 所示。

2.2 悬臂梁压电俘能器电学性能分析

悬臂梁压电俘能器应用于路面能量收集时,影响电学输出性能的因素较多,如路面振动频率、外接负载电阻、悬臂梁端的振动加速度等。在表 4 得到的悬臂梁压电俘能器优化结构基础上,本文主要考

表 4 优化后悬臂梁俘能器的尺寸参数

Tab. 4 Optimized structural sizes of cantilever

beam energy harvester				
结构	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	材料
质量块	4	14	1.00	结构钢
压电层	上层	30	20	0.06
	中层	30	20	0.04
	下层	30	20	0.06
支撑结构	1	20	1.00	结构钢

虑外接电阻和路面振动频率 2 个方面。

2.2.1 外接电阻对压电俘能器性能的影响

设定路面振动频率为 10 Hz,悬臂梁振动加速度为 1g,在 0~100 kΩ 改变外接电阻 R,分析外接电阻对压电俘能器性能的影响,模拟仿真得到输出电压和输出功率随负载的变化,如图 10 所示。

由图 10(a)可见,随着负载 R 在 0~100 kΩ 内增大,压电俘能器产生的电压逐渐增大,在 100 kΩ 时达到最大值 0.38 V。从图 10(b)可以看出:在 0~35 kΩ 内随着 R 的增加,压电俘能器的输出功率逐渐增大,在 35 kΩ 时输出功率最大为 1.24×10^{-6} W;当 R 在 35~100 kΩ 内变化时,输出功率呈现减小趋势。因此,外接负载电阻可选为 35 kΩ。

2.2.2 路面振动频率对压电俘能器性能的影响

设定外接电阻为 35 kΩ,悬臂梁振动加速度为 1g,分析路面振动频率对压电俘能器性能的影响。

(1)路面振动频率为 0~20 Hz 的电学输出性能
在路面振动频率为 0~20 Hz 时,对悬臂梁压电俘能器进行频率响应分析,得到电学输出结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着路面振动频率的增加,输出电压和输出功率均逐渐增加,在路面振动频率为 20 Hz 时达电压最大值 0.39 V。在行车速度为 90 km/h 时,对应的路面振动频率为 10 Hz,此时产生的电压为 0.30 V,输出功率为 1.24×10^{-6} W,相对于优化前,俘能器的输出电压(提升 58%)和输出功率(提升 463%)均有明显提高,表明优化

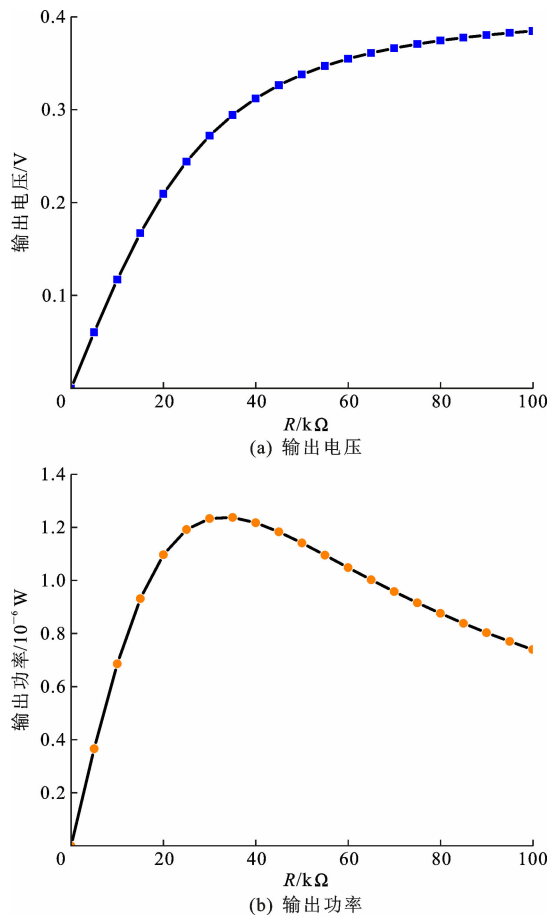


图 10 不同负载 R 下的电学性能

Fig. 10 Electrical properties under different load resistances R

后的俘能器获得了更加优异的电学输出性能。Kim 等设计的压电能量采集器采用尺寸为 $(12 \times 25 \times 0.2) \text{ mm}^3$ 的 PZT-PZNN,在试验时的最大瞬时功率能够达到 $1.5 \times 10^{-6} \text{ W}$ ^[33],由于采用的压电材料尺寸不同,与本文结果存在一定差异,但都是在同量级,说明本文结果具有可靠性。

(2)路面振动频率为 $0 \sim 100 \text{ Hz}$ 的电学输出性能

特征频率即固有频率,是系统趋于振动时的特定离散频率;当系统或结构在特征频率下振动时,会变形为相应的形状,称为特征模态。在特征频率下,压电俘能器变形较大,产生应力也较大,会产生较好的电学输出,但同时也会增加俘能器损坏的风险,所以实际使用中应避免在特征频率附近工作。因此,需要进一步对压电俘能器进行特征频率分析,用于检验所设计的俘能器模型在实际频率范围内工作时的合理性。

在路面振动频率为 $0 \sim 100 \text{ Hz}$ 范围,进行特征频率分析,得到 1 阶特征频率为 76.9 Hz 。根据第

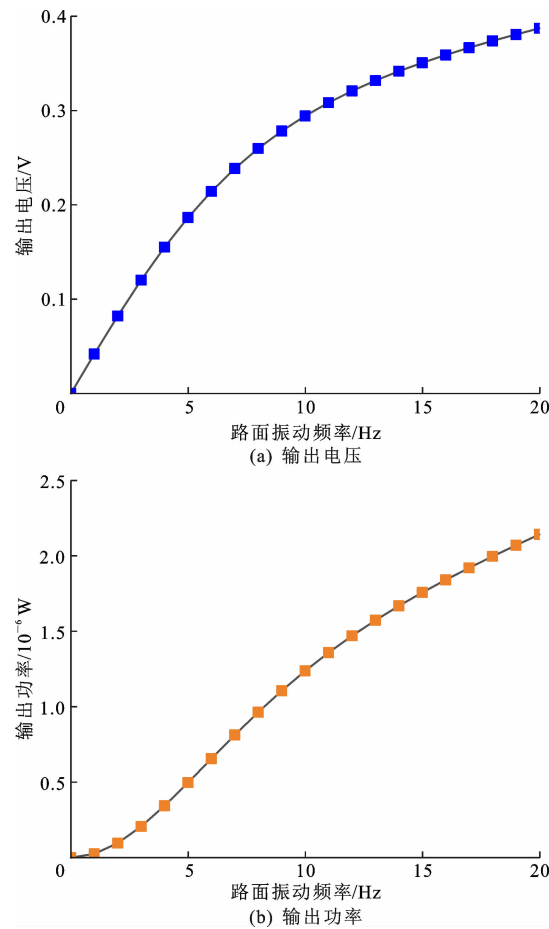


图 11 不同频率下的电学性能

Fig. 11 Electrical properties under different frequencies

1.3 节分析,路面振动频率为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$,此范围不包括 1 阶特征频率。因此所优化的俘能器结构在振动频率为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$ 范围内工作合理,其输出电压和输出功率(图 11)没有出现峰值。

为了更好了解悬臂梁式俘能器与振动频率的关系,在路面振动频率为 $0 \sim 100 \text{ Hz}$,间隔 5 Hz 进一步进行仿真分析,得到电学输出结果如图 12 所示。从图 12 可以看出:俘能器的输出电压和输出功率均随着路面振动频率的增加先增大后减小;路面振动频率为 $0 \sim 75 \text{ Hz}$ 时,输出电压和输出功率逐渐增大;路面振动频率为 $75 \sim 100 \text{ Hz}$ 时,输出电压和输出功率逐渐减小;路面振动频率为 75 Hz 时,输出电压和输出功率都达到最大值,表明悬臂梁式俘能器在接近 1 阶振动频率(76.9 Hz)工作时,能产生较好的电学输出。但是在 1 阶振动频率时,俘能器将会产生共振,此时俘能器产生的应力为 19.9 MPa ,是路面振动频率为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$ 时产生应力的 10 倍以上,易造成俘能器损坏,因此俘能器应当尽量避免在 1 阶振动频率时工作。

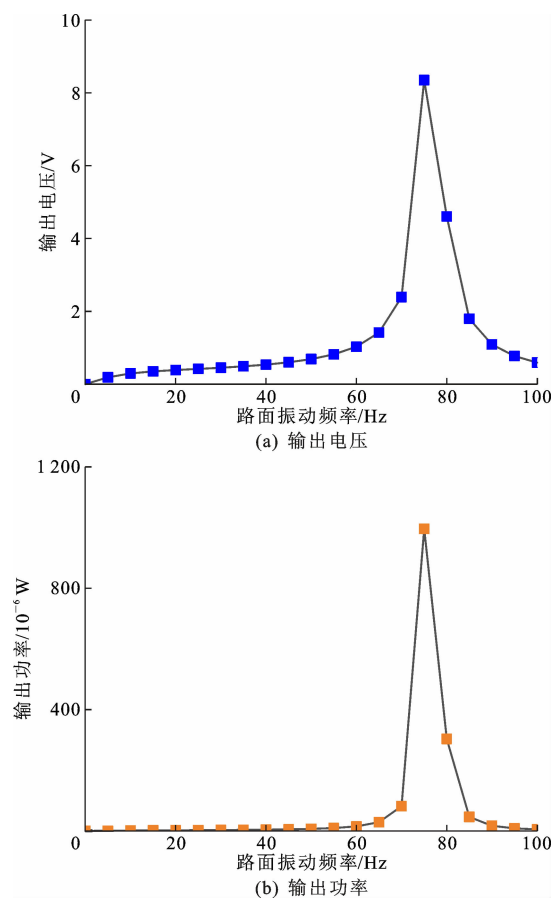


图 12 0~100 Hz 压电俘能器的电学性能

Fig. 12 Electrical properties of piezoelectric energy harvester under 0 to 100 Hz

3 结 语

(1)在路面振动频率为 0~20 Hz 时,PZT-5 系压电材料的压电性能较好,其中在路面振动频率为 0~18 Hz 时,PZT-5H 的电学输出性能较高,路面振动频率为 19~20 Hz 时,PZT-5A 电学输出性能较好;但车辆在路面行驶时的路面振动频率一般低于 18 Hz,因此建议选用 PZT-5H 作为压电材料用于路面能量收集。

(2)优化后的悬臂梁压电俘能器结构参数为:支撑结构尺寸为 $(1 \times 20 \times 1) \text{ mm}^3$ 、压电材料尺寸为 $(30 \times 20 \times 0.06) \text{ mm}^3$ 、金属基板尺寸为 $(30 \times 20 \times 0.1) \text{ mm}^3$ 、质量块尺寸为 $(4 \times 20 \times 1) \text{ mm}^3$ 。

(3)当路面振动频率为 10 Hz,振动加速度为 $1g$,选用 PZT-5H, R 为 0~100 k Ω 时,悬臂梁压电俘能器适配的最佳外接负载电阻为 35 k Ω ,对应的输出电压为 0.30 V、输出功率为 1.24×10^{-6} W;相对于优化前,优化后俘能器输出电压和输出功率分别提升了 58% 和 463%,表明优化后的俘能器获得

了更加优异的电学输出性能。

(4)在路面振动频率为 0~100 Hz,俘能器的电压和输出功率随着路面振动频率的增加先增大后减小,在 1 阶振动频率 76.9 Hz 附近达到最大值;在实际路面使用时,其路面振动频率一般在 0~20 Hz 时,输出电压和输出功率均随着振动频率增加而增加。

(5)本文在俘能器建模及结构优化时,基板材料直接选用了 H62 黄铜,未对不同金属基板材料进行对比分析;在分析压电俘能器电学输出性能时,直接选用振动加速度为 $1g$,未分析不同振动加速度的影响;本文工作仅为理想情况下的模拟仿真结果,指导试验的同时也需要试验数据验证及反馈改进。

(6)下一步工作中,将会进一步通过理论计算,对比分析不同金属基板材料、不同的振动加速度等因素对压电俘能器电学输出性能的影响,为压电俘能器的结构优化和材料选择提供理论指导;在此基础上,开展部分试验验证工作,通过试验和理论计算结果对比,不断优化模型参数和提升电学输出性能。

参考文献:

References:

- [1] WANG H, JASIM A, CHEN X D. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—A comprehensive review[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1083-1094.
 - [2] GHOLIKHANI M, ROSHANI H, DESSOUKY S, et al. A critical review of roadway energy harvesting technologies[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114388.
 - [3] WEI H G, WANG H, XIA Y J, et al. An overview of lead-free piezoelectric materials and devices[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(46): 12446-12467.
 - [4] COVACI C, GONTEAN A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review [J]. Sensors, 2020, 20(12): 3512.
 - [5] 王朝辉,王海梁,李彦伟,等. 压电材料与路面材料一体化发电路面技术研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(11): 14-19, 25.
- WANG Chao-hui, WANG Hai-liang, LI Yan-wei, et al. Study on technology of power pavement based on integration of piezoelectric material and pavement material[J]. Journal of Highway and Transportation

- Research and Development, 2016, 33(11): 14-19, 25.
- [6] 蔡树生, 杨京鸿. 压电技术探析及其在道路能量收集中的应用[J]. 工业技术创新, 2016, 3(5): 945-948.
- CAI Shu-sheng, YANG Jing-hong. Analysis of piezoelectric technology and its applications on road energy collection [J]. Industrial Technology Innovation, 2016, 3(5): 945-948.
- [7] ROSHANI H, DESSOUKY S, PAPAGIANNAKIS A T, et al. Experimental and finite element assessment of three energy harvesting prototypes for roadways [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-12.
- [8] 赵鸿铎, 梁颖慧, 凌建明. 基于压电效应的路面能量收集技术[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(增1): 62-66.
- ZHAO Hong-duo, LIANG Ying-hui, LING Jian-ming. Study on harvesting energy from pavement based on piezoelectric effects[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(S1): 62-66.
- [9] 黄如宝, 牛衍亮, 赵鸿铎, 等. 道路压电能量收集技术途径与研究展望[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 1-8.
- HUANG Ru-bao, NIU Yan-liang, ZHAO Hong-duo, et al. Technical approach and research prospect of piezoelectric energy harvest from highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 1-8.
- [10] 谭忆秋, 钟 勇, 吕建福, 等. 路面用 PZT/沥青压电复合材料的制备及性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 975-980.
- TAN Yi-qiu, ZHONG Yong, LU Jian-fu, et al. Preparation and properties of PZT/asphalt-based piezoelectric composites used on pavement [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 975-980.
- [11] 曹阳森, 沙爱民, 蔡若楠, 等. 夹层式压电换能器开路电压影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 53-60, 80.
- CAO Yang-sen, SHA Ai-min, CAI Ruo-nan, et al. Influence factors of open-circuit voltage on sandwich piezoelectric transducer [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(1): 53-60, 80.
- [12] REZAEI M, KHADEM S E, FIROOZY P. Broadband and tunable PZT energy harvesting utilizing local non-linearity and tip mass effects[J]. International Journal of Engineering Science, 2017, 118: 1-15.
- [13] POIKSELKA K, LEINONEN M, PALOSAARI J, et al. Novel genetically optimised high-displacement piezoelectric actuator with efficient use of active material [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 095022.
- [14] PEDDIGARI M, LIM K W, KIM M, et al. Effect of elastic modulus of cantilever beam on the performance of unimorph type piezoelectric energy harvester [J]. APL Materials, 2018, 6(12): 121107.
- [15] AVVARI P V, YANG Y W, SOH C K. Long-term fatigue behavior of a cantilever piezoelectric energy harvester [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(9): 1188-1210.
- [16] RAJU S S, UMAPATHY M, UMA G. Cantilever piezoelectric energy harvester with multiple cavities [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(11): 115023.
- [17] PRIYA S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers [J]. Journal of Electroceramics, 2007, 19(1): 167-184.
- [18] BABU I, HENDRIX M M, DE WITH G. PZT-5A4/PA and PZT-5A4/PDMS piezoelectric composite bismorphs [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(2): 025029.
- [19] BEEBY S P, TUDOR M J, WHITE N M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(12): 175-195.
- [20] ZHOU N N, GAO S, LI R Q, et al. Transient output performance of symmetrical V-shaped micro-piezoelectric energy harvester by using PZT-5H [J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(3): 779-787.
- [21] LI X Y, UPADRASHTA D, YU K P, et al. Sandwich piezoelectric energy harvester: Analytical modeling and experimental validation [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 69-85.
- [22] BISWAL P, KAR S K, MUKHERJEE B. Design and optimization of high-performance through hole based MEMS energy harvester using Piezo MUMPs [J]. Journal of Electronic Materials, 2021, 50(1): 375-388.
- [23] XIONG Y, SONG F, LENG X. A piezoelectric cantilever-beam energy harvester (PCEH) with a rectangular hole in the metal substrate [J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(3): 801-810.
- [24] KIM T, KO Y, YOO C, et al. Design optimisation of wide-band piezoelectric energy harvesters for self-

- powered devices[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 225:113443.
- [25] TAN Z, PENG Y T, AN J A, et al. Intrinsic origin of enhanced piezoelectricity in alkali niobate-based lead-free ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(9):5262-5270.
- [26] RATHOD A P S, KUKRETI K, MISHRA A, et al. Performance analysis of bimorph cantilever beam using piezoelectric materials and MEMS technology[J]. *Materials Today*, 2021, 46:10865-10869.
- [27] LIU W, HAN M D, MENG B, et al. Low frequency wide bandwidth MEMS energy harvester based on spiral-shaped PVDF cantilever[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(6):1068-1072.
- [28] BAE J H, CHANG S H. PVDF-based ferroelectric polymers and dielectric elastomers for sensor and actuator applications; A review[J]. *Functional Composites and Structures*, 2019, 1(1):012003.
- [29] SUNITHAMANI S, LAKSHMI P. Simulation study on performance of MEMS piezoelectric energy harvester with optimized substrate to piezoelectric thickness ratio[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(4):733-738.
- [30] LEFEUVRE E, AUDIGIER D, RICHARD C, et al. Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(5):2018-2025.
- [31] WANG S, WANG C H, YU G X, et al. Development and performance of a piezoelectric energy conversion structure applied in pavement[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207:112571.
- [32] IBRAHIM D S, SUN B B, FATAI S, et al. Numerical and experimental study of a gauge-shaped beam for improved performance of piezoelectric energy harvester[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(12):4253-4268.
- [33] KIM J H, CHO J Y, JHUN J P, et al. Development of a hybrid type smart pen piezoelectric energy harvester for an IoT platform[J]. *Energy*, 2021, 222:119845.