

文章编号: 1671-7449(2025)04-0382-06

J. Test Measur. Technol., 2025, 39(4): 382-387.

变厚度悬臂梁式压电俘能器的特性研究

张雁, 马鑫, 万杰*, 孙浩栋, 李琪

(长春大学机械与车辆工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为提高梁式压电俘能器的发电性能, 对变厚度悬臂梁式压电俘能器进行俘能特性研究。在有限元仿真中, 引入局部坐标系, 保证厚度变化时压电层极化方向改变。通过仿真, 对比了相同长度下倒锥形、锥形和等截面梁式压电俘能器的发电性能。同时研究了宽度比和厚度比对该俘能器结构发电性能的影响。结果表明, 相较于等截面和锥形梁式压电俘能器, 倒锥形梁式压电俘能器具有更好的发电性能。在自由端尺寸一定的情况下, 固定端宽度和厚度越小, 压电俘能器一阶固有频率越低, 发电量越大。其中, 厚度变化对悬臂梁式压电俘能器的一阶固有频率和发电电压的影响更大。该结果将有助于梁式压电俘能器的结构设计研究, 以满足微功率电子产品及微小型远程传感/埋植监测系统的自供电需求。

关键词: 压电俘能器; 变厚度悬臂梁; 倒锥形; 极化方向; 发电性能

中图分类号: TM619

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025057

引用格式: 张雁, 马鑫, 万杰, 等. 变厚度悬臂梁式压电俘能器的特性研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 382-387.

ZHANG Yan, MA Xin, WAN Jie, et al. Research on characteristics of variable thickness cantilever beam piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 382-387.

Research on Characteristics of Variable Thickness Cantilever Beam Piezoelectric Energy Harvester

ZHANG Yan, MA Xin, WAN Jie*, SUN Haodong, LI Qi

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the power generation performance of the beam-type piezoelectric energy harvester, the energy harvesting characteristics of the variable thickness cantilever beam type piezoelectric energy harvester were studied. In finite element simulation, a local coordinate system is introduced to ensure the change of polarization direction of the piezoelectric layer when the thickness changes. Through simulation, the power generation performance of inverted conical, conical, and equal-section beam piezoelectric harvesters with the same length was compared. At the same time, the influence of the width ratio and the thickness ratio on the power generation performance of the energy harvester structure was studied. The research results indicate that inverted conical beam piezoelectric energy harvesters have better power generation performance, compared to equal-section and conical beam piezoelectric energy harvesters. When the size of the free end is constant, the smaller the width and thickness of the fixed end, the lower the first-order natural frequency of the piezoelectric energy harvester and the greater the power generation.

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 博士人才科研启动经费(ZKQD202404)

作者简介: 张雁(1987-), 女, 副教授, 博士, 主要从事压电发电、微织构刀具研究。E-mail: zhangyan19870515@163.com。

*通信作者: 万杰(1988-), 男, 讲师, 博士, 主要从事机械测试理论与技术研究。E-mail: wanjie2013@163.com。

Among them, the thickness variation has a greater impact on the first-order natural frequency and power generation voltage of the cantilever beam piezoelectric energy harvester. This study contributes to the structural design research of beam-type piezoelectric energy harvesters to meet the self-powering needs of low-power electronic products and micro remote sensing/implant monitoring systems.

Key words: piezoelectric energy harvester; variable thickness cantilever beam; reverse taper; polarization direction; power generation performance

0 引言

近年来,压电能量收集技术已成为国际多个学术领域研究的热点问题^[1]。压电俘能器主要依靠压电材料的压电特性来实现机械能和电能之间的相互转换。由压电材料制成的俘能装置具有结构简单、俘能效率高、发热小、无电磁干扰、易于加工制作、便于微型化和集成化等诸多优点,已经受到学术界和工业界的广泛关注^[2]。

目前,压电俘能器的设计主要采用等截面矩形悬臂梁结构,该结构存在固有频率较高、压电材料利用率低、输出电压低等缺点^[3]。与等截面梁式压电俘能器相比,变截面结构应力、应变分布更均匀,能更好地提高俘能效率^[4]。

研究学者对变宽度悬臂梁式压电俘能器进行了大量研究。Mohamed 等^[5]利用遗传算法对 T 形、矩形、L 形、可变宽度和三角形悬臂梁等 5 种不同形状的俘能器进行优化,发现 T 形悬臂梁式压电俘能器产生的功率最大。Zhao 等^[6]构建并优化了一种用于低速风能收集的压电俘能器,优化后的变宽度梁式压电俘能器的输出功率达到了等截面压电俘能器的 3.668 倍。

在变宽度悬臂梁式压电俘能器中,梯形结构具有压电材料利用率更高、谐振频率较低、输出电压以及功率较高的优势,可以更好地提高压电俘能器的发电性能。Zhou 等^[7]针对梯形压电能量收集器,研究了随机激励下改变压电材料长度对不同形状的压电能量采集器输出特性的影响;Zhang 等^[8]研究了长度不变的情况下,梯形压电能量采集器的开路电压和输出功率分别比矩形压电能量采集器高 81.6% 和 167%。

与前述改变俘能器的宽度类似,俘能器的厚度变化也对其发电性能存在影响^[9]。Liu 等^[10]指出梁的厚度对压电能量采集器系统的固有频率影响较大,通过改变梁的厚度,可以捕获低频能量,提高能量收集效率。而 Paquin 等^[11]认为变厚度压电俘能器的

发电性能提升是由于其压电材料上的应变分布更加均匀导致的。进一步地,Xie 等^[12]提出了一种厚度和宽度均变化的悬臂梁式压电俘能器,其发电性能较等截面的情况提升了 70 倍。然而,上述研究中并没有考虑到厚度变化对压电层极化方向的影响^[13-14],即在厚度变化时,未考虑压电层的极化方向与悬臂梁振动方向不一致的问题。此外,现有变厚度梁式俘能器的研究仅局限于不同类型俘能器的对比研究,未系统化地研究倒锥形压电俘能器结构参数对其发电能力的影响。

本文在考虑极化方向偏转的情况下,对变厚度悬臂梁式压电俘能器进行了研究。通过对比倒锥形(即固定端横截面积小于自由端横截面积)和等截面梁式压电俘能器,研究了倒锥形梁式压电俘能器的发电能力。然后,针对倒锥形梁式压电俘能器,研究了宽度比和厚度比对其发电能力的影响。最后,将其与锥形(即固定端横截面积大于自由端横截面积)梁式压电俘能器进行对比,以研究不同类型变截面梁式压电俘能器的发电性能。

1 倒锥形梁式压电俘能器建模

本文所研究的倒锥形悬臂梁式压电俘能器结构如图 1 所示,其采用悬臂支撑方式,主要由基体层和上下压电层组成,其中基体层分为固定段和悬臂段两部分,压电层均匀地粘贴在基体层悬臂段上,且压电层与悬臂段上表面的面积相等。

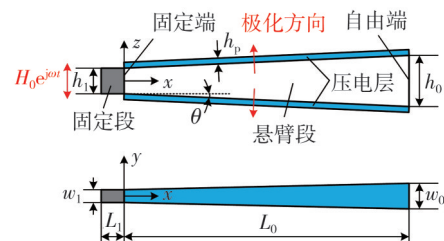


图 1 倒锥形悬臂梁式压电俘能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inverted conical cantilever beam piezoelectric energy harvester structure

为便于与锥形梁式压电俘能器对比,保证倒锥形梁式压电俘能器自由端尺寸不变,通过改变固定

端尺寸来得到不同形式的变截面悬臂梁模型。设倒锥形梁式压电俘能器基体层自由端的初始宽度 w_0 为6 mm, 初始厚度 h_0 为12 mm, 固定端的宽度为 w_1 , 厚度为 h_1 , 悬臂段长度 L_0 为124 mm。基体层固定端的宽度和厚度与悬臂段固定端的宽度和厚度相等, 长度 L_1 为10 mm。压电层厚度 $h_p=0.25$ mm。设悬臂段小端尺寸与大端尺寸的比例为 μ , 故倒锥形梁式压电俘能器悬臂段的宽度比 $\mu_w=w_1/w_0$, 厚度比 $\mu_h=h_1/h_0$ 。而锥形梁式压电俘能器悬臂段的厚度比 $\mu_h=h_1/h_0$ 。因本文仅研究宽度不变, 变厚度的情况, 故宽度比 $\mu_w=1$ 。

建立压电俘能器的有限元数值模型, 分析变截面梁式压电俘能器的振动特性和发电能力。基体层材料选择7075铝, 压电层材料选择PZT-5H。在仿真软件中输入的压电材料PZT-5H^[15]相对介电常数矩阵 ϵ_r 、压电常数矩阵 e 和压电弹性系数矩阵 c 分别为

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 1700 & 0 & 0 \\ 0 & 1700 & 0 \\ 0 & 0 & 1470 \end{bmatrix} \times 10^{10} (\text{F/m}), \quad (1)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -6.5 \\ 0 & 0 & -6.5 \\ 0 & 0 & 23.3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 17.0 & 0 \\ 17.0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{C/m}^2), \quad (2)$$

$$c = \begin{bmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 7.95 & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ 8.41 & 8.41 & 11.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.32 \end{bmatrix} \times 10^{10} (\text{N/m}^2). \quad (3)$$

选用Solid 5单元对所建倒锥形梁式压电俘能器模型进行网格划分, 采用由密到疏的映射网格划分方式以兼顾计算效率和计算精度, 即网格大小从固定端到自由端逐渐变大。所建立的有限元模型共包含168 960个单元, 如图2所示。

需要说明的是, 倒锥形压电俘能器的厚度变化会导致压电层极化方向与仿真软件中整体坐标系的方向不一致, 因此, 需要对压电层的单元坐标系进行设置。极化方向未发生偏转时, 坐标系如图3(a)所示。

本文引入局部坐标系 $x'y'z'$, 该局部坐标系的 z' 轴方向与极化方向一致, 然后在该局部坐标系下进行单元划分, 进而实现极化方向相对于整体坐

标系的偏转^[16], 如图3(b)所示。

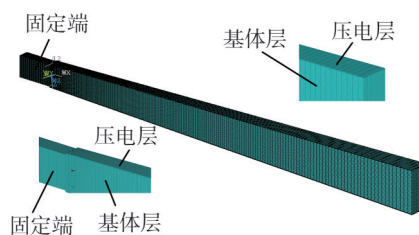


图2 有限元模型三维实体网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D solid mesh division for finite element model

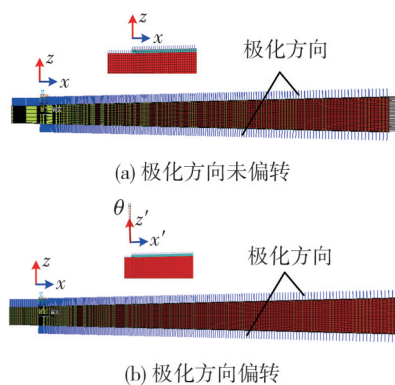


图3 极化方向未偏转与偏转坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate system for polarization direction without deviation and polarization direction deviation

2 倒锥形梁式压电俘能器和等截面梁式压电俘能器的对比

等截面梁式压电俘能器可用于评价本文所提压电俘能器的发电能力。为便于对比, 将等截面压电俘能器的截面尺寸分别设置为所提压电俘能器的两端尺寸, 即 w_1 为3 mm, h_1 为6 mm, 并且保证这3个压电俘能器的长度一致, 如图4所示。

压电俘能器的最大输出电压取决于悬臂梁的固有振动频率, 当环境中的振动频率接近悬臂梁模型的固有频率时, 压电俘能器的输出电压最大。因此, 得出梁模型的固有频率至关重要。对这3种悬臂梁式压电俘能器进行仿真分析, 对悬臂梁固定段施加固定约束, 得到这3种模型在 z 方向上发生弯曲变形时的一阶固有频率, 即图4(a)结构为323.42 Hz, 图4(b)结构为244.98 Hz, 图4(c)结构为637.89 Hz。由此可得, 倒锥形梁式压电俘能器的一阶固有频率最小。当悬臂梁式压电俘能器固有振动频率与施加的激励频率接近时, 输出电压最大。为了确定这3种模型的最大输出电压, 在 z 方向上对悬臂梁固定端施加一个振幅为1 mm的简谐激励, 得到

这 3 种形式的压电俘能器在一阶固有频率附近的最大输出电压, 即图 4(a) 结构为 99.714 8 V, 图 4(b) 结构为 187.57 V, 图 4(c) 结构为 99.628 8 V。由此可以得出, 倒锥形梁式压电俘能器的输出电压最大, 发电性能最好。相比于等截面悬臂梁式压电俘能器, 倒锥形梁式压电俘能器的发电性能提高了 88%。图 5 为倒锥形梁式压电俘能器的一阶模态及其应变分布。

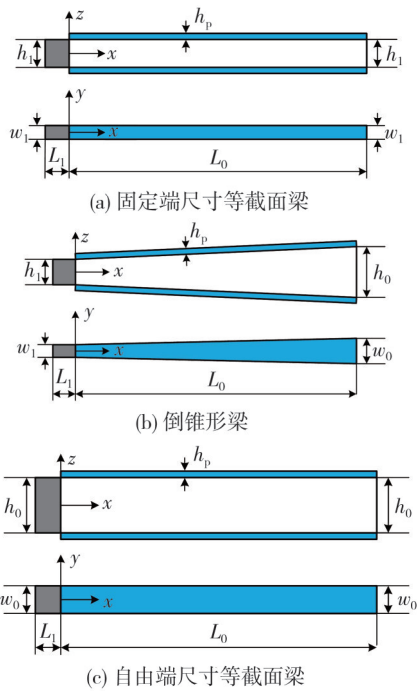


图 4 3 种结构的压电俘能器

Fig. 4 Three types of piezoelectric energy harvesters with different structures

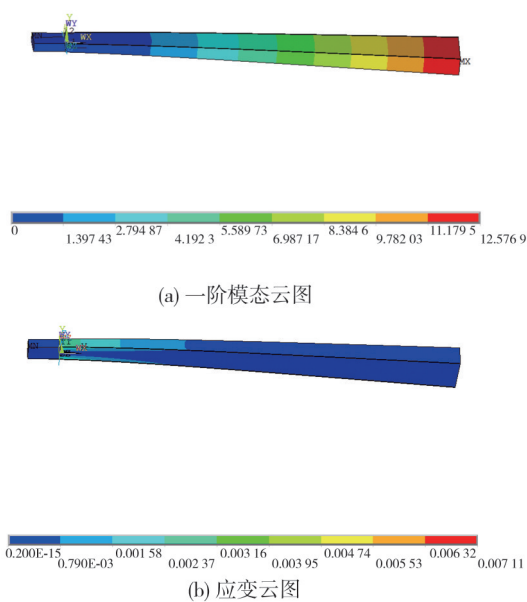


图 5 一阶模态云图及应变云图

Fig. 5 Firstorder modal could map and strain could map

3 倒锥形梁式压电俘能器发电能力

为进一步研究该俘能器的发电性能, 以第 2 小节中定义的宽度比和厚度比作为设计变量, 得到并分析了不同宽度比和厚度比下的发电电压。但是, 过小的固定端尺寸会导致压电俘能器根部失效。因此, 在对倒锥形梁式压电俘能器进行仿真分析时, 要保证压电俘能器固定端的最小尺寸有效。

3.1 宽度比对发电性能的影响

为研究宽度比变化对压电俘能器发电性能的影响, 在俘能器的悬臂段长度一定的情况下, 控制其固定端厚度和自由端厚度相同, 改变固定端与自由端的宽度比 μ_w , 分别计算宽度比在 0.2~1.0 变化时的一阶固有频率和电压。仿真数据结果如图 6 所示。

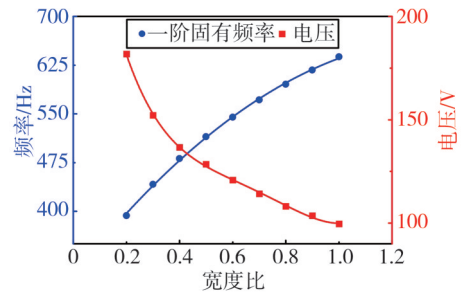


图 6 宽度比与一阶固有频率、电压线图

Fig. 6 Width ratio with first-order natural frequency and voltage line diagram

由图 6 可知, 随着宽度比逐渐增大, 该压电俘能器一阶固有频率逐渐升高, 发电电压逐渐减小。相比于等截面梁式压电俘能器, 只改变宽度的倒锥形梁式压电俘能器的最大发电电压提高了 82.6%。

3.2 厚度比对发电性能的影响

为研究厚度比变化对压电俘能器发电性能的影响, 在俘能器的悬臂段长度一定的情况下, 控制其固定端宽度和自由端宽度相同, 改变固定端与自由端的厚度比 μ_h , 分别计算厚度比在 0.2~1.0 变化时的一阶固有频率和电压。仿真数据结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着厚度比逐渐增大, 该压电俘能器一阶固有频率逐渐升高, 电压逐渐减小。相比于等截面梁式压电俘能器, 只改变厚度的倒锥形梁式压电俘能器的最大发电电压提高了 146.9%。

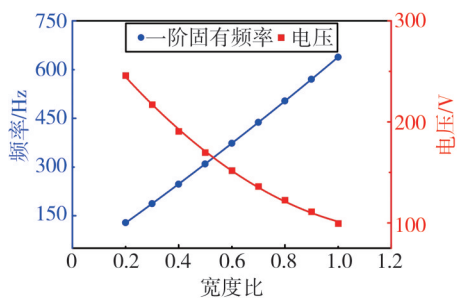


图7 厚度比与一阶固有频率、电压线图

Fig. 7 Thickness ratio with first-order natural frequency and voltage line diagram

3.3 不同宽度比下厚度变化对发电性能的影响

在压电俘能器悬臂段长度一定的情况下,控制其自由端宽度和厚度相同,在固定端与自由端厚度比在0.2~1.0变化时,测得对应的宽度比在0.2~1.0变化时的一阶固有频率和电压。对得出的数据进行分析处理,结果如图8所示。

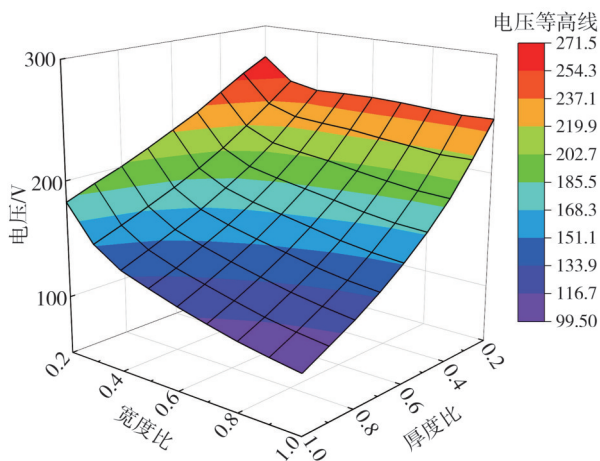


图8 不同宽度比下的厚度变化电压曲线

Fig. 8 Voltage curves of thickness variation under different width ratios

由图分析可知,该悬臂梁式压电俘能器在宽度比和厚度比均为1,即等截面时,电压最小,在宽度比和厚度比均为0.2时,电压最大,最大发电电压提高了172.1%;且无论是厚度变化还是宽度变化,变截面梁式压电俘能器的发电电压均大于等截面;在不同的厚度比下,电压都随着宽度比的增大而减小,在不同的宽度比下,电压也是随着厚度比的增大而减小,但厚度变化对电压的影响要远大于宽度变化对电压的影响。

4 倒锥形梁式压电俘能器和锥形梁式压电俘能器的对比

厚度变化对悬臂梁式压电俘能器的发电性能

影响更大。因此,在悬臂段长度和宽度相同的情况下,对比倒锥形和锥形梁式压电俘能器的发电性能。倒锥形梁固定端的厚度为锥形梁自由端的厚度,倒锥形梁自由端的厚度为锥形梁固定端的厚度,模型如图9所示。

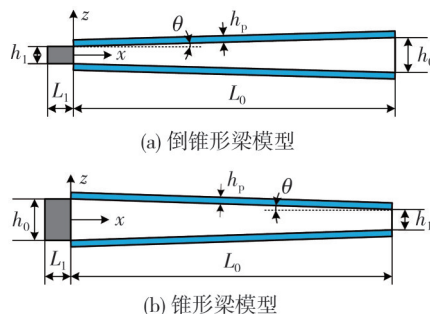


图9 倒锥形梁和锥形梁模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of inverted conical beam model and conical beam model

对这两种形式的悬臂梁式压电俘能器进行仿真分析,分别测出其一阶固有频率,然后在一阶固有频率范围内测出压电俘能器的最大发电电压,结果如图10所示。

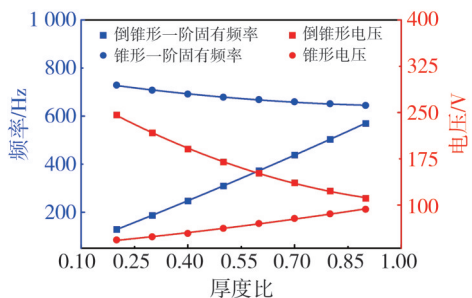


图10 倒锥形梁和锥形梁的一阶固有频率和电压线图

Fig. 10 First-order natural frequency and voltage line diagram of inverted cone beam and cone beam

对仿真结果分析可知,倒锥形梁式压电俘能器一阶固有频率随厚度比的增大而增大,电压随厚度比的增大而减小,而锥形梁式压电俘能器恰恰相反。但整体上,倒锥形梁式压电俘能器的一阶固有频率更低,发电性能更好,在厚度比都为0.2时,倒锥形梁式压电俘能器发电电压是锥形梁式压电俘能器发电电压的5.66倍。

5 结论

本文对变厚度悬臂梁式压电俘能器进行俘能特性研究,通过有限元仿真,证实了变截面梁式压电俘能器的发电性能要优于等截面梁式压电俘能器,同时研究了宽度比和厚度比对该俘能器结构发电性

能的影响,另外,还针对倒锥形和锥形悬臂梁式压电俘能器的发电能力进行了对比。得出结论如下:

1) 相较于传统的等截面梁式压电俘能器,倒锥形梁式压电俘能器的一阶固有频率更小,输出电压更大,发电电压提高了 88%。

2) 固定端宽度和厚度的变化均会影响倒锥形梁式压电俘能器的一阶固有频率和发电电压。在自由端尺寸一定的情况下,固定端宽度或厚度越小,压电俘能器一阶固有频率越低,发电电压越大,最大发电电压分别提高了 82.6% 和 146.9%;电压都是随着宽度比或厚度比的增大而减小,并且厚度变化对电压的影响要远大于宽度变化对电压的影响,宽度和厚度都改变时的最大发电电压提高了 172.1%。

3) 在变厚度梁式压电俘能器长度和宽度相同的情况下,倒锥形梁式压电俘能器一阶固有频率随厚度比的增大而增大,电压随厚度比的增大而减小,而锥形梁式压电俘能器恰恰相反。且倒锥形梁式压电俘能器的一阶固有频率更低,发电性能更好,在厚度比都为 0.2 时,倒锥形梁式压电俘能器发电电压是锥形梁式压电俘能器的 5.66 倍。

参考文献:

- [1] SAFAEI M, SODANO H A, ANTON S R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008-2018) [J]. *Smart Material Structures*, 2019, 28(11): 113001.
- [2] YANG Z, ZHOU S, ZU J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications [J]. *Joule*, 2018, 2(4): 642-697.
- [3] 王鹏博, 孙骏驰, 胡喆成, 等. 悬臂式压电俘能器结构设计的综述[J]. *智能制造*, 2023(3): 103-107.
WANG Pengbo, SUN Junchi, HU Zhecheng, et al. Summary of structural design of cantilever piezoelectric energy harvester [J]. *Intelligent Manufacturing*, 2023 (3): 103-107. (in Chinese)
- [4] KESHMIRI A, WU N, WANG Q. A new nonlinearly tapered FGM piezoelectric energy harvester [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 52-60.
- [5] MOHAMED K, ELGAMAL H, KOURITEM S A. An experimental validation of a new shape optimization technique for piezoelectric harvesting cantilever beams [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60 (1): 1751-1766.
- [6] ZHAO K, ZHANG Q, WANG W, et al. Topological optimization of a variable cross-section cantilever-based piezoelectric wind energy harvester [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 956182.
- [7] ZHOU X, GAO S, JIN L, et al. Effects of changing PZT length on the performance of doubly-clamped piezoelectric energy harvester with different beam shapes under stochastic excitation [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(9): 3799-3813.
- [8] ZHANG G, GAO S, LIU H, et al. A low frequency piezoelectric energy harvester with trapezoidal cantilever beam: theory and experiment [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(8): 3457-3466.
- [9] IBRAHIM D S, SUN B, JIBIA A U, et al. Optimal strain-deflection analyses of a wedge edged beam for enhanced vibration energy scavenging in patch-like harvester [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2023, 51(5): 2435-2457.
- [10] LIU S, MAO J, ZHANG W. Theoretical modeling and analysis of piezoelectric energy harvester with variable section overhanging beam [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1906(1): 012019.
- [11] PAQUIN S, ST-AMANT Y. Improving the performance of a piezoelectric energy harvester using a variable thickness beam [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(10): 105020.
- [12] XIE X D, CARPINTERI A, WANG Q. A theoretical model for a piezoelectric energy harvester with a tapered shape [J]. *Engineering Structures*, 2017, 144: 19-25.
- [13] PRADEESH E L, UDHAYAKUMAR S. Investigation on the geometry of beams for piezoelectric energy harvester [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25 (9): 3463-3475.
- [14] CALDERON HURTADO A, PERALTA P, RUIZ R O, et al. Shape optimization of piezoelectric energy harvesters of variable thickness [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 517: 116503.
- [15] 王姣姣, 曹东兴, 姚明辉. 变截面悬臂梁压电俘能器动力学特性分析 [J]. *压电与声光*, 2018, 40(5): 727-731.
WANG Jiaojiao, CAO Dongxing, YAO Minghui. Dynamic characteristic analysis of piezoelectric energy harvester with variable cross-section cantilever beam [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2018, 40 (5): 727-731. (in Chinese)
- [16] ZHOU W, WANG B, LIM C W, et al. A distributed-parameter electromechanical coupling model for a segmented arc-shaped piezoelectric energy harvester [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107005.