

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209768

圆弧螺旋型压电振动能量收集系统的设计*

邓丽城,唐姝婷,王德波

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院 南京 210023)

摘 要: 为了实现低频、多方向能量收集和高输出性能,提出了一种圆弧螺旋结构的压电能量收集系统。该圆弧螺旋压电能量收集系统不仅可以降低谐振频率,减少系统体积,而且圆弧型悬臂梁具有不对称性,因此可以进行多方向收集。理论分析不同弧度下能量收集系统的应力分布、谐振频率以及输出性能。加工制备了 2π 、 3π 和 4π 圆弧螺旋压电振动能量收集系统并进行了性能测试对比。研究表明, 4π 圆弧螺旋压电能量收集系统具有更好的输出性能,谐振频率为 47 Hz,输出电压达到 23 V,输出功率达到 353 μ W。该圆弧螺旋压电振动能量收集系统可应用于人体健康检测、环境控制系统、嵌入式系统、军事安全等应用领域。

关键词: 圆弧螺旋;压电能量收集;谐振频率;输出电压;输出功率。

中图分类号: TH89 TN62 TP212.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3030

Design of arc spiral piezoelectric vibration energy harvester

Deng Licheng, Tang Shuting, Wang Debo

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: To achieve low-frequency, multi-directional energy harvesting and high output performance, a piezoelectric energy harvesting system with arc helix structure is proposed in this article. The arc helical piezoelectric energy harvester cannot only reduce the resonance frequency and the volume of the system, but also the arc type cantilever beam has asymmetry. Therefore, the multi-directional collection can be performed. The stress distribution, the resonant frequency and the output performance of the energy harvesting system with different radians are analyzed theoretically. The 2π , 3π , and 4π arc spiral piezoelectric vibration energy harvesting system are fabricated, and their performance are measured and compared. Results show that the 4π arc spiral piezoelectric energy harvesting system has better output performance. The resonant frequency is 47 Hz, the output voltage is 23 V, and the output power is 353 μ W. The arc spiral piezoelectric vibration energy harvesting system can be applied to human health detection, environmental control systems, embedded systems, military security and other application fields.

Keywords: arc spiral; piezoelectric energy harvesting; resonant frequency; output performance; output power

0 引 言

随着大规模甚至超大规模集成电路技术的日益发展,电子设备对供电系统的要求不断提高^[1-2],传统电池存在寿命短、容量小等瓶颈技术问题。为了满足微型低功耗器件的需求,从环境中获取能量成为研究的热点。在多种能量收集方式中,压电振动能量收集具有无外加电源、与微机电系统(micro electromechanical system,

MEMS)工艺兼容性好、不受电磁干扰、能量密度大和绿色环保等优点^[3-5]。

对于压电振动能量收集器,国内外学者进行了大量研究,以实现环境中低频、多方向能量的高效收集。铅钛酸铅压电陶瓷(piezoelectric transducer, PZT)薄膜利用在基底上使用颗粒纹理和外延薄膜来增加机电耦合,可以实现高效地能量收集^[6-7]。2014 年 Beltran 等^[8]设计了一种双晶压电悬臂梁式振动能量收集系统,优点是通过调整能量收集系统的尺寸来同步与外界振源频率,但是能

收稿日期:2022-05-11 Received Date: 2022-05-11

* 基金项目:国家青年自然科学基金(61904085)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_0260)资助

量转化效率较低。2017 年 Guo 等^[9]提出了一种桥式压电能量收集系统,该能量收集系统由压电堆和桥式放大结构两部分组成,压电堆由 400 层 7 mm×7 mm 的正方形 PZT 薄片组成,当施加 200 N 的力时,开路电压为 33.705 V。但是该结构整体尺寸较大,不适用于为微电子设备供电。2018 年周雅慧等^[10]提出 AlN 压电振动能量收集系统的优化设计,压电悬臂梁单元的尺寸为 5 mm×12 mm×0.05 mm,在 1 g 的加速度,204.6 Hz 谐振频率激励下,输出电压为 2.3 V,输出功率为 66.125 μW,不过谐振频率较高,输出性能较低。2020 年 Debnath 等^[11]提出了一种新型对称的 U 型结构的压电能量收集系统,两个悬臂梁的固定端都连在外围的基体上,共用一个质量块,可以减少对空间的使用,谐振频率为 28.6 Hz,可以产生 50.765 mV 的电压和 10.738 nW 的功率。谐振频率虽然低,但只能进行单方向收集,输出性能较低。2021 年 Chen^[12]提出了一种高效率 and 宽带的非线性压电能量收集系统,在 0.1 g 加速度下,可以工作在弯曲模态和扭转模态实现多方向能量收集,在不同模态下最大输出功率为 125.07 μW,不过系统尺寸较大,不易于集成,输出性能也比较低。

上述能量收集结构大多是单方向能量收集、谐振频率较高、输出电压较低、系统尺寸较大。为了解决上述问题,本文提出了一种圆弧螺旋压电振动能量收集系统。该圆弧螺旋压电能量收集系统不仅可以降低谐振频率,减少系统体积,而且因为其悬臂梁是圆弧形状,具有不对称性,因此可以进行多方向收集,从而大大增加系统的输出电压和输出功率,其转换效率也得到了提高。

1 圆弧螺旋压电能量收集系统的理论模型

1.1 结构设计

如图 1(a)、(b)、(c) 分别是弧度为 2π、3π、4π 的圆弧型螺旋压电能量收集系统,该圆弧型压电振动能量收集系统是由悬臂梁、压电层、质量块组成。将悬臂梁的一处固定,压电层附着在悬臂梁上,在受到外界激励时悬臂梁开始振动,压电层会随着悬臂梁的振动而振动,压电层会因为受到形变而产生电荷。其中悬臂梁和压电层的厚度都为 1 mm,宽度都为 6 mm,中间的质量块用来降低谐振频率,大小为 6 mm×6 mm×6 mm。

悬臂梁和质量块所用的材料是铜,压电层材料是 PZT-5H。相比较传统的长方形悬臂梁,圆弧螺旋压电振动能量收集器的悬臂梁是圆弧形状,结构不对称,可以进行多方向振动能量的收集,降低系统工作频率。材料参数和结构尺寸如表 1 和 2 所示。

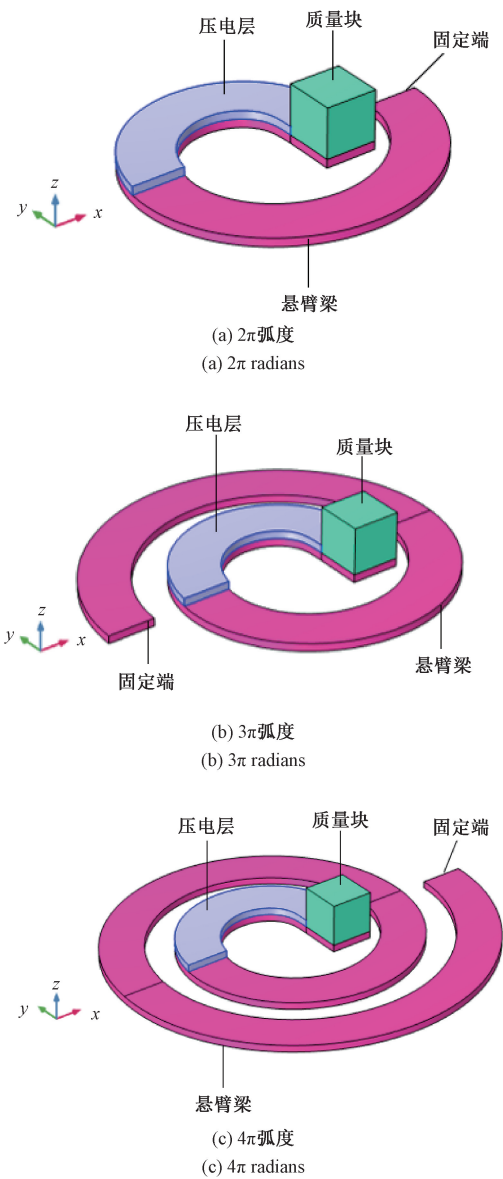


图 1 圆弧螺旋压电振动能量收集结构
Fig. 1 Arc spiral piezoelectric vibration energy harvester structure

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

材料	PZT-5H	铜
密度/(kg·m ⁻³)	7 500	8 900
杨氏模量/GPa	76	130
泊松比	0.34	0.35
相对介电常数	1 433	—
压电常数/C·m ²	-6.6	—

表 2 4π 圆弧结构尺寸Table 2 4π arc structure dimension mm

结果尺寸	悬臂梁	压电层
长度	230	30
宽度	6	6
厚度	1	1

圆弧螺旋压电能量收集系统可以进行三维方向振动能量的收集, X 、 Y 两个方向的水平振动和 Z 方向的垂直振动。

1.2 水平振动分析

当圆弧螺旋压电能量收集系统收到来自 X 、 Y 方向的水平振动时, 可以用 Euler-Bernoulli 梁进行分析。

$$\frac{d^2 M(x, t)}{dx^2} + c_s I \frac{d^5 w(x, t)}{dx^4 dt} + m \frac{d^2 w(x, t)}{dt^2} + c_a \frac{dw(x, t)}{dt} = 0 \quad (1)$$

其中, m 是单位长度质量, $M(x, t)$ 是弯矩, c_a 是空气弹性阻尼, c_s 为内部应变率, I 是截面惯性矩, $w(x, t)$ 是悬臂梁的位移和时间之间的关系。

当考虑机电耦合作用时, 悬臂梁的弯矩如式(2)所示:

$$M(x, t) = EI_b \frac{d^2 w(x, t)}{dx^2} + \alpha V_1(t) \quad (2)$$

其中, E 为弹性模量, I_b 为截面惯性矩, α 为机电耦合系数。

圆弧螺旋压电能量收集器的水平振动位移可表示为式(3):

$$w(L, t) = \sum_1^{\infty} \sqrt{\frac{1}{mL}} [\cosh \lambda_n - \cos \lambda_n - \sigma_n (\sinh \lambda_n - \sin \lambda_n)] \times \frac{mw^2(\gamma_n^w G_0 + \gamma_n^0) - \chi_n V_m e^{j\omega t} + Y_0 e^{j\omega t}}{w_n^2 - w^2 + j2\xi_n w_n w} \quad (3)$$

根据水平振动位移可得到负载电阻的电压为:

$$V_1(t) = V_m e^{j\omega t} = \frac{\sum_1^{\infty} \frac{jmw^3 \phi_n (\gamma_n^w G_0 + \gamma_n^0 H_0)}{w_n^2 - w^2 + j2\xi_n w_n w}}{\sum_1^{\infty} \frac{jw \chi_n \phi_n}{w^2 - w^2 + j2\xi_n w_n w} + \frac{1 + jw\tau_c}{\tau_c}} e^{j\omega t} \quad (4)$$

1.3 垂直振动分析

圆弧螺旋压电能量收集系统的垂直振动分析可以等效成一个由质量, 弹簧, 阻尼组成的集中参数动力学模型, 可以看作简谐振动。悬臂梁的弯矩主要是由垂直振动所造成的:

$$w_2(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

根据牛顿第二定律可以得到等效质量动力学方程。

$$F(t) = M_{eq} \ddot{w}(t) + \xi_n \dot{w}(t) + Kw(t) + \alpha V_2(t) \quad (6)$$

其中, ξ_n 是阻尼比, w_n 是 n 阶振动角频率, M_{eq} 是能量

收集器的等效质量。 K 是能量收集器的等效刚度, α 是机电耦合系数, $F(t)$ 是外界激励。

其中, R_L 是电路中的负载电阻, C 是等效电容, 则:

$$I(t) = \frac{V_2(t)}{R_L} \quad (7)$$

$$M_{eq} = \beta_m (m_b + m_p) \quad (8)$$

传统的悬臂梁弯曲刚度可以通过查找材料特性来解决, 螺旋压电悬臂梁弯曲刚度推导公式为:

$$K = \beta_K w_m \left\{ \left(\frac{2h_p^3}{3l_m^3} + \frac{h_m h_p^2}{l_m^3} + \frac{h_p h_m^2}{2l_m^3} \right) E_p + \frac{h_m^3 E_b}{12l_m^3} \right\} \quad (9)$$

$$C = \frac{w_m l_m \epsilon_{33}^s}{2h_p} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\beta_0 w_m (h_m + h_p) e_{31}}{2l_m} \quad (11)$$

其中, l_m 是悬臂梁的长度, w_m 是悬臂梁的宽度, h_m 是悬臂梁的厚度, l_p 是压电层的长度, w_p 压电层的宽度, h_p 是压电层的厚度, m_b 是悬臂梁的等效质量, m_p 是压电层的等效质量, m_a 为质量块的质量。 β_0 , β_k , β_m 是 Rayleigh-Ritz 逼近常数^[13], e_{31} 是压电常数, ϵ_{33}^s 是介电常数, E_b 是悬臂梁的弹性模量, E_p 是压电层的弹性模量。根据基尔霍夫电流定律:

$$\alpha w(t) = C \dot{V}_2(t) + V_2(t)/R_L \quad (12)$$

根据式(6)、(12)可推导出输出电压:

$$V_2(t) = \frac{R_L w A \cos(\omega t + \theta) [\alpha^2 - w^2 M_{eq} C + CK]}{\alpha} - \frac{R_L C \xi_n A w^2 \sin(\omega t + \theta)}{\alpha} - \frac{R_L C w F_0 \cos \omega t}{\alpha} \quad (13)$$

输出电压和输出功率的关系如式(14)所示:

$$P = \frac{V^2(t)}{R_L} \quad (14)$$

其中, R_L 是电路中的负载电阻。

根据式(11)~(13)压电能量收集系统的输出电压与悬臂梁的厚度、长度以及压电层的厚度有关。压电振子处于机械加持和电学短路的边界条件, 阻尼比、Rayleigh-Ritz 逼近常数取已知, π 取值 3.14。式(19)可得输出电压和悬臂梁的厚度、长度以及压电层的厚度关系。

$$a = \frac{[12l_m^3 w_m^2 \beta_m (m_b + m_p) w_m \epsilon_{33}^s - 6h_p \beta_0^2 w_m^2 (h_m + h_p)^2 e_{31}^2]}{24h_p l_m^2} - \frac{8w_m^2 \epsilon_{33}^s \beta_k h_p^3 E_p}{24h_p l_m^2} [R_L A w_n \sin(w_n t)] \quad (15)$$

$$b = \frac{[12w_m^2 \epsilon_{33}^s \beta_k h_m h_p^2 E_p + 6w_m^2 \epsilon_{33}^s \beta_k h_m^2 h_p]}{24h_p l_m^2} + \frac{w_m^2 \epsilon_{33}^s \beta_k h_m^3 E_b}{24h_p l_m^2} [R_L A w_n \sin(w_n t)] \quad (16)$$

$$c = (\xi_n A w_n + F_0) R_L C w_n \cos(w_n t)$$

(17)

$$d = \frac{\beta_0 w_m (h_m + h_p) e_{31}}{2 l_m}$$

(18)

$$V = \frac{a - b - c}{d}$$

(19)

2 圆弧螺旋压电能量收集系统的仿真分析

2.1 圆弧螺旋压电振动能量收集系统的应力分析

以 4π 圆弧螺旋压电振动能量收集系统为例用 COMSOL 软件对应力进行仿真分析。图 2(a) 是激励为

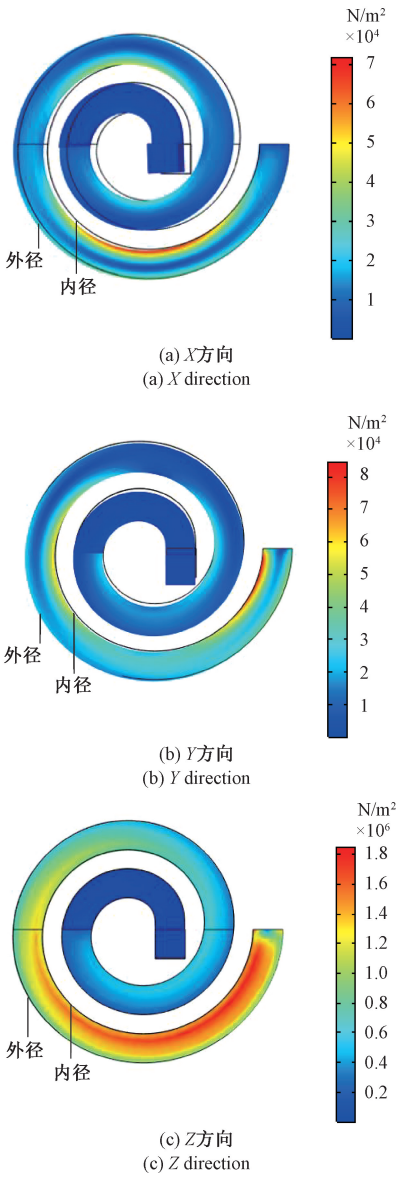


图 2 4π 圆弧螺旋压电振动能量收集系统的应力分布
Fig. 2 Stress distribution of a 4π arc spiral piezoelectric vibration energy harvester

X 方向时,激励的方向和固定端的方向垂直,圆弧形状的悬臂梁有着不对称结构,使内外径受力不均^[14],从而产生输出电压和输出功率,使得圆弧螺旋压电能量收集系统可以在 X 方向上进行能量收集。图 2(b) 是激励为 Y 方向时,悬臂梁在受到外界激励时开始振动,这时激励的方向和固定端的方向是平行的,会使悬臂梁有较小的形变,使得圆弧螺旋压电能量收集系统可以在 X 方向上进行能量收集。图 2(c) 是激励为 Z 方向时,内外径不是同时振动,导致受力不均匀,这时悬臂梁会产生较大的形变,产生较高的输出电压和输出功率。

2.2 谐振频率仿真

不同弧度下圆弧螺旋压电能量收集系统的谐振频率仿真图如图 3 所示,弧度的增加导致悬臂梁的长度增加,根据悬臂梁长度与谐振频率的关系可以得到谐振频率会逐渐减少。通过 COMSOL 软件仿真可以发现:在 0.1 g 加速度下, 2π 圆弧螺旋压电能量收集器最大振动位移为 0.2 mm ,谐振频率为 169 Hz , 3π 圆弧螺旋压电能量收集器最大振动位移为 1 mm ,谐振频率为 84.5 Hz ,而 4π 圆弧螺旋压电能量收集器的最大振动位移为 3.34 mm ,谐振频率为 48 Hz ,谐振频率比较低。随后弧度的增加,谐振频率下降趋势不明显,但弧度的增加会使加工制备圆弧螺旋压电能量收集系统的难度升级。

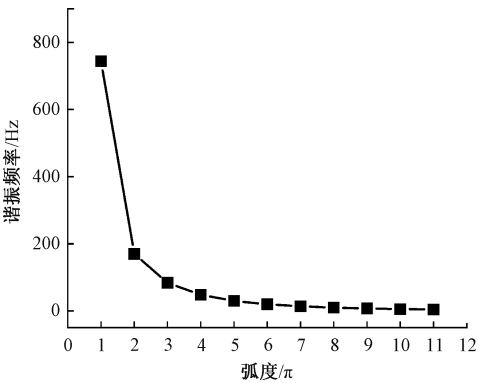


图 3 不同弧度的圆弧螺旋压电能量收集系统的谐振频率
Fig. 3 Resonant frequency of circular arc spiral piezoelectric energy harvesters with different radians

2.3 输出电压仿真

不同弧度下圆弧螺旋压电能量收集系统三维方向的输出电压如图 4 所示。通过 COMSOL 仿真,在 0.1 g 加速度下,弧度为 π 、 4π 和 7π 时,圆弧螺旋压电能量收集系统的输出电压较高。弧度为 π 时,输出电压仿真值为 16 V ;弧度为 4π 时,输出电压仿真值为 25.6 V ;弧度为 7π 时,输出电压仿真值为 27 V 。虽然弧度为 7π 的输出电压最高,不过尺寸太大,不易加工。

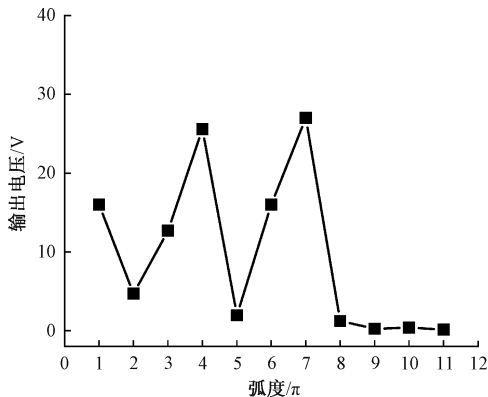


图 4 不同弧度的圆弧螺旋压电能量收集器的输出电压

Fig. 4 Output voltage of a circular spiral piezoelectric energy harvester with different radians

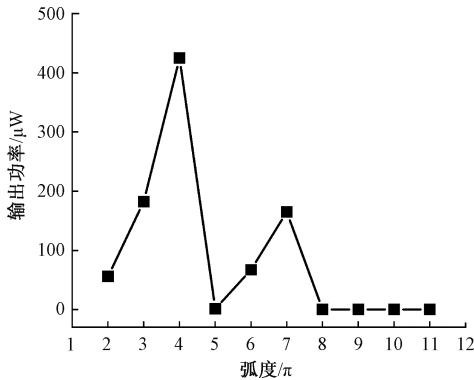


图 5 不同弧度的圆弧螺旋压电能量收集系统的输出功率

Fig. 5 Output power of circular spiral piezoelectric energy harvesters of different radians

2.4 输出功率仿真

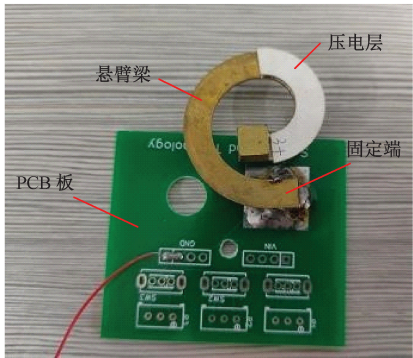
不同弧度下圆弧螺旋压电能量收集系统输出功率如图 5 所示。随着圆弧螺旋压电能量收集弧度的增加,输出功率在弧度为 4π 时最大。弧度为 3π 时,在负载阻抗为 $225\text{ k}\Omega$ 时,输出功率仿真值最大为 $182\text{ }\mu\text{W}$;弧度为 4π 时,在负载阻抗为 $385\text{ k}\Omega$ 时,输出功率仿真值最大为 $425\text{ }\mu\text{W}$;弧度为 7π 时,在负载阻抗为 $1\text{ }100\text{ k}\Omega$ 时,输出功率仿真值最大为 $165\text{ }\mu\text{W}$ 。

综上,可以发现 4π 圆弧螺旋压电能量收集系统具有较低谐振频率和较高的输出性能。

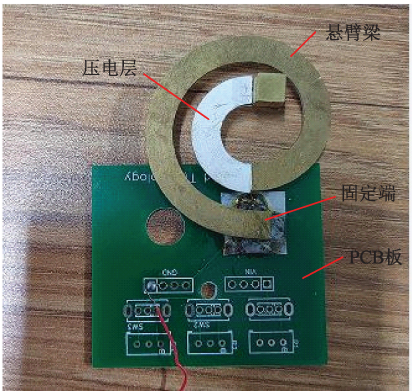
3 测试与讨论

图 6(a)、(b)、(c)分别是制备的 2π 、 3π 、 4π 圆弧螺旋压电能量收集系统样机。对制备的圆弧螺旋压电能量收集系统进行测试,测试系统主要由软件 YMC9800、振动台、信号发生器、功率放大器和示波器组成。将圆弧螺旋能量收集系统焊接到印制电路板 (printed circuit board, PCB)

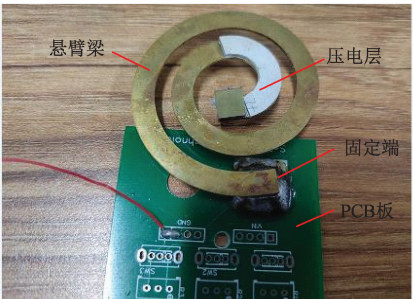
板上,用导电胶将压电层粘在悬臂梁上。信号发生器产生一定频率的正弦信号,功率放大器将正弦信号放大后送到振动台,振动台产生设定频率的振动,振动加速度的值可通过 YMC9800 软件进行调整,振动台的振动可以带动圆弧螺旋压电能量收集系统的振动,使压电能量收集系统产生电压,最后用示波器记录系统的输出。



(a) 2π 弧度
(a) 2π radians



(b) 3π 弧度
(b) 3π radians



(c) 4π 弧度
(c) 4π radians

图 6 圆弧螺旋压电振动能量收集系统

Fig. 6 Arc spiral piezoelectric vibration energy harvester

3.1 输出电压测试

如图 7(a) 所示,测试弧度为 2π 的圆弧螺旋压电能量收集系统的输出电压为 4 V ,输出电压理论值为 4.2 V ,相对误差为 4.8% 。如图 7(b) 所示,测试弧度为 3π 的圆弧螺旋压电能量收集系统的输出电压为 11 V ,输

输出电压理论值为 12.2 V,相对误差为 9.8%。如图 7(c) 所示,测试弧度为 4π 的圆弧螺旋压电能量收集系统的输出电压为 23 V,输出电压理论值为 24.6 V,相对误差为 6.5%。图中可以看出实际测量的输出电压和谐振频率要小于理论值。这是因为悬臂梁和压电层 PZT-5H 在粘合过程中没有完全粘合,会有一定的误差。

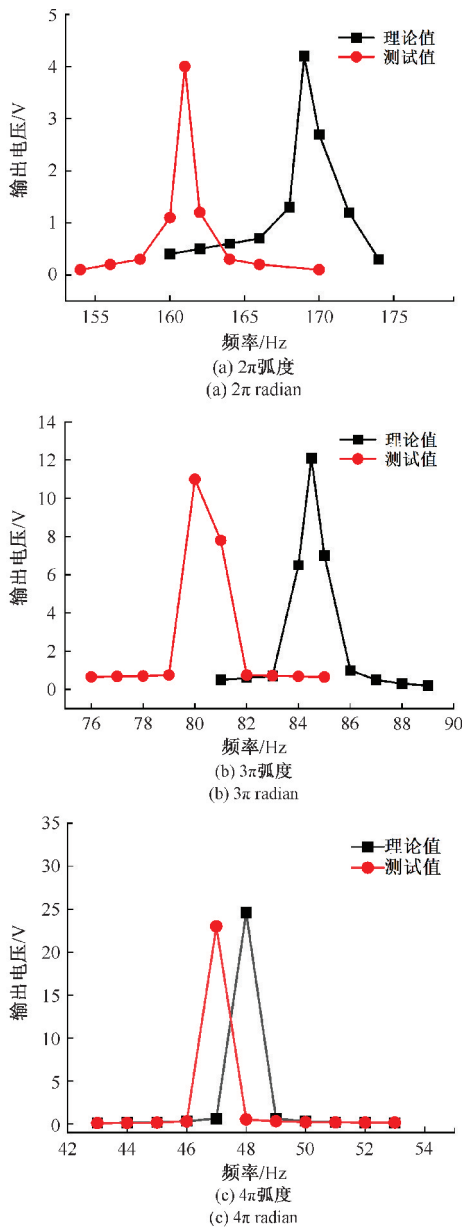


图 7 输出电压的测试结果

Fig. 7 The results of output voltage

3.2 输出功率测试

如图 8(a) 所示,弧度为 2π 的圆弧螺旋压电能量收集系统在最佳负载阻抗为 90 k Ω 时,测试得到的输出功率为 44.4 μ W。最佳负载阻抗理论值为 90 k Ω ,输出功率理论值为 49 μ W,相对误差为 10.2%。如图 8(b) 所示,弧度为

3π 的圆弧螺旋压电能量收集系统在最佳负载阻抗为 210 k Ω 时,测试得到的输出功率为 144 μ W。最佳负载阻抗理论值为 215 k Ω ,输出功率理论值为 173 μ W,相对误差为 16.3%。图 8(c) 是弧度为 4π 的圆弧螺旋压电能量收集器,在最佳负载阻抗为 375 k Ω 时,测试得到的输出功率为 353 μ W。最佳负载阻抗理论值为 378 k Ω ,输出功率理论值为 400 μ W,相对误差为 11.8%。由于输出电压有一定误差,根据输出电压和输出功率的关系式 (14),输出功率也存在一定的误差。

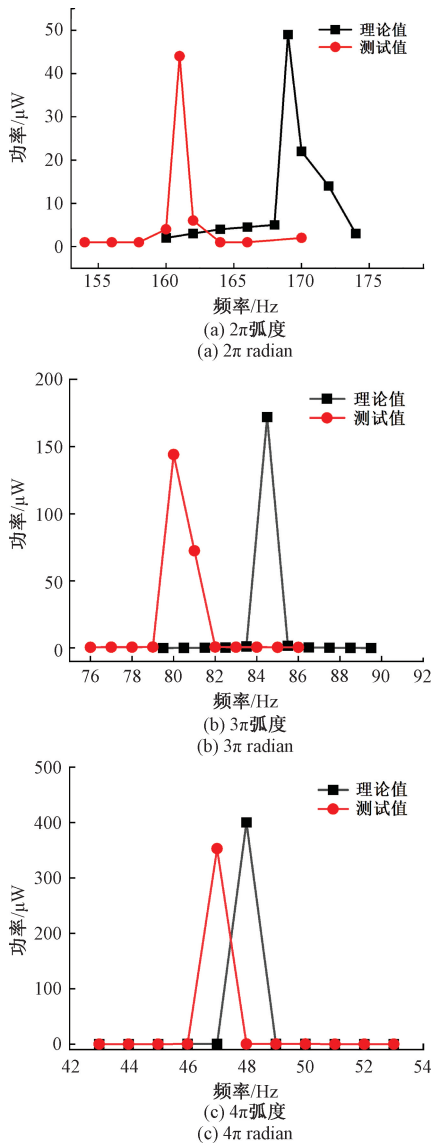


图 8 输出功率的测试结果

Fig. 8 The results of output power

将该圆弧螺旋结构与其他结构压电能量收集系统做比较,结果如表 3 所示。与其他能量收集系统相比,可以发现圆弧螺旋结构可以兼顾占用空间与输出性能,有效提高单位体积的能量收集效率,改善输出电压和输出功率。

表 3 压电能量收集系统的比较
Table 3 Comparison of piezoelectric energy harvesters

结构模型	尺寸/mm	输出电压/V	输出功率/ μW	功率密度/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$
Rainbow 形 ^[15]	30×30×30	—	15.4	0.57
四螺旋-质量块形 ^[16]	12.4×12.4×0.4	0.14	—	—
宽频带型 ^[17]	8×8×0.3	0.368	0.388	20.2
T 形 ^[18]	50×10×0.4	1.02	1.04	5.2
压电阵列双相形 ^[19]	64×120×0.3	16.8	300	130.2
钟表形 ^[20]	76.8×17×17	4.18	109.4	4.92
4 π 圆弧螺旋形	55×52×2	23	353	61.7

4 结 论

本文提出不同弧度的圆弧螺旋压电振动能量收集系统,通过计算来优化尺寸降低谐振频率,提高输出,满足微型低功耗器件的需求。分析圆弧螺旋压电能量收集系统的三维应力特点,可以进行多方向收集。相比较于其他弧度的圆弧螺旋压电能量收集系统,4 π 圆弧螺旋压电能量收集系统在谐振频率为 47 Hz 时,测得输出电压为 23 V,输出功率为 353 μW ,具有更低的谐振频率、更高的输出、尺寸比较小,更符合设计要求。

参考文献

[1] 芮小博,张宇,曾周末. 旋转运动能量收集及其实现[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9): 1-11.
RUI X B, ZHANG Y, ZENG ZH M. Rotational motion energy harvesting technology and its realization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 1-11.

[2] TWIEFEL J, WESTERMANN H. Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24(11): 1291-1302.

[3] 陆颖瓚,朱宇宸,刘琪才,等. 悬臂梁压电式能量收集器方向性效率的研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 181-187.
LU H Z, ZHU Y CH, LIU Q C, et al. Research on the efficiency of cantilever piezoelectric energy collector [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 181-187.

[4] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(3): R1-R21.

[5] 张坤,武科迪,苏宇锋. 基于分段线性系统的宽频振动

能量收集器[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 140-145.
ZHANG K, WU K D, SU Y F. Wideband vibration harvester based on piecewise linear system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 140-145.

[6] DRAGAN D. Ferroelectric dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics [J]. Reports on Progress in Physics, 1998, 61 (9): 1267-1324.

[7] ISARAKORN D, SAMBRI A, JANPHUANG P, et al. Epitaxial piezoelectric MEMS on silicon [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20 (5), 55008.

[8] BELTRAN C F, SILVA N G. Active vibration control in Duffing mechanical systems using dynamic vibration absorbers [J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(14): 3019-3030.

[9] GUO T Y, XU Z, JIN L, et al. Optimized structure design of a bridge-like piezoelectric energy harvester based on finite element analysis [C]. Proceedings of 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017: 1-5.

[10] 周雅慧,温志渝,贺显明,等. AlN 压电振动能量收集器的结构优化设计与实验[J]. 传感器与微系统, 2018,37(7): 18-21.
ZHOU Y H, WEN ZH Y, HE X M, et al. Structural optimization design and experiment of AlN piezoelectric vibration energy harvester [J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(7): 18-21.

[11] DEBNATH B, KUMAR R. Design and simulation study of a new flared-u shaped springs based mems piezoelectric vibration energy harvester [C]. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and

- Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2020:101-105.
- [12] CHEN K Y, GAO Q, FANG S, et al. An auxetic nonlinear piezoelectric energy harvester for enhancing efficiency and bandwidth [J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117274.
- [13] YUSUKE M, SINIAH I. On the rayleigh-ritz method, gorman's superposition method and the exact dynamic stiffness method for vibration and stability analysis of continuous systems [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 10747.
- [14] KARAMI M A, INMAN D J. Electromechanical modeling of the low frequency mems energy harvester[C]. *Proceedings of ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2009: 523-530.
- [15] 刘祥建, 陈仁文. Rainbow 型压电单膜片换能结构负载电压和输出功率分析 [J]. *航空学报*, 2011, 32(3): 561-570.
- LIU X J, CHEN R W. Analysis of load electric pressure and output power of Rainbow piezoelectric single-diaphragm energy exchange structure [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2011, 32(3): 561-570.
- [16] 高翔, 石树正, 徐方良, 等. 基于四螺旋梁-质量块的 MEMS 压电能量采集器 [J]. *微纳电子技术*, 2018, 55(1): 32-37, 62.
- GAO X, SHI SH ZH, XU F L, et al. MEMS piezoelectric energy collector based on four-helix beam-mass block [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018, 55(1): 32-37, 62.
- [17] HUANG P C, TSAI T H, YANG Y J. Wide-bandwidth piezoelectric energy harvester integrated with parylene-C beam structures[J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 111: 214-219.
- [18] 李莉, 林杉杉, 王军, 等. 基于涡致振动的 T 型悬臂梁压电俘能结构的仿真与实验研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2021(7): 32-37.
- LI L, LIN SH SH, WANG J, et al. Simulation and experimental study on piezoelectric energy capture structure of T-shaped cantilever beam based on vortex-induced vibration [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(7): 32-37.
- [19] 师阳, 李妮, 李勇, 等. 压电阵列双相能量收集器的有限元分析模型 [J]. *电子机械工程*, 2021, 37(2): 50-54.
- SHI Y, LI N, LI Y, et al. Finite element analysis model of piezoelectric array biphasic energy harvester [J]. *Electromechanical Engineering*, 2021, 37(2): 50-54.
- [20] HE X F, ZHANG H J, JIANG S. A bell-inspired piezoelectric kinetic energy harvester[C]. *Proceedings of 2020 IEEE Sensors*, Rotterdam, Netherlands, 2020: 1-4.

作者简介



邓丽城, 2008 年于重庆理工大学获得学士学位, 2010 年和 2014 年于重庆大学获得硕士和博士学位, 现为南京邮电大学讲师, 主要研究方向为环境动能收集技术。

E-mail: dlc@njupt.edu.cn

Deng Licheng received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2008, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Chongqing University in 2010 and 2014, respectively. He is currently a lecturer at Nanjing University of Posts and Telecommunications. The discipline of his research focuses on ambient kinetic energy harvesting technology.



王德波 (通信作者), 2007 年于河北科技大学获得学士学位, 2010 年和 2012 年于东南大学获得硕士学位和博士学位, 现为南京邮电大学副教授, 主要研究方向为 RF MEMS、传感器与执行器。

E-mail: wdb@njupt.edu.cn

Wang Debo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2007, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Southeast University in 2010 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include RF MEMS, sensors and actuators.