

# 两端固支式双晶片压电梁建模及发电特性分析\*

彭乐乐, 钟倩文, 郑树彬, 黄如艳, 柴晓冬

(上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海, 201620)

**摘要** 压电梁能将机械振动转换为电能,有效解决了轨道车辆走行部件安全监测传感器的供电问题。为获取其发电特性,根据小弯曲变形理论建立压电梁的弯矩方程,按照一维压电片应力和电位移方程建立压电梁机电转换数学模型。采用Nelder-Mead单纯形算法实现结构参数优化并分析了压电梁材料、结构参数和振动频率对发电效能的影响规律,通过仿真及实验验证了理论模型的正确性。结果表明:双晶片梁的发电效能随弹性模量比增加而减小;低弹性模量的金属基底构成的压电梁,输出能量较高且共振频率低;压电梁存在最佳厚度比使其发电效能最大,铍铜的最佳厚度比为0.213,锰白铜为0.261。实测值与理论值相比,输出有效电压最大偏差为0.13 V,相对偏差小于2.8%;输出功率最大偏差为0.024 mW,相对偏差小于2.9%。

**关键词** 双晶片压电梁;厚度比;弹性模量比;数学建模;发电特性

**中图分类号** TN384; U279.3<sup>+</sup>21

## 引言

轨道车辆走行部关键部位的在线监控传感器是确保列车安全运营的关键设备<sup>[1-2]</sup>。随着物联网技术的发展,一些微瓦级传感器已经出现并应用。受安装条件的限制,现有的有源传感器难以应用于已有车辆的改造升级中。制约有源传感器应用的瓶颈在于如何从环境中回收能量并转换为电能,实现传感器长期可靠工作。

目前,从环境中回收能量的形式主要有太阳能<sup>[3]</sup>、温差能<sup>[4]</sup>、风能<sup>[5]</sup>和振动能<sup>[6]</sup>。然而,太阳能、温差能和风能由于应用条件限制,不适合在地铁复杂运行环境中应用。在轮轨作用力的影响下,振动能量在地铁运行中无处不在且能量较大<sup>[7]</sup>,压电回收方式相比电磁转换方式,其结构简单且转换效率高<sup>[8-9]</sup>,因此在运动载体的传感器供电领域中应用广泛<sup>[10]</sup>。压电能量回收结构<sup>[11-13]</sup>主要是通过压电陶瓷和金属基底组成的压电振子发生形变,从而实现能量转换。考虑到传感器安装于轨道车辆走行部件处,受轨道磨损及不平顺等因素的影响,压电转换结构容易受到较大的瞬间冲击。为了提高压电转换结构的可靠性,将通用的悬臂梁式的压电结构<sup>[14-16]</sup>改进为两端固支式双晶片压电梁结构。针对压电梁的发电特性分析,郭抗抗等<sup>[17]</sup>在考虑压电材料非线性特性的基础上,建立了悬臂梁机电耦合模型,获得了

压电材料非线性、外激励参数及负载电阻对发电系统的影响规律。刘祥建等<sup>[18]</sup>利用数值模拟分析了压电换能器输出电压与结构参数及材料特性的影响关系。龚俊杰等<sup>[19]</sup>通过建立悬臂梁的压电耦合有限元模型,得到了其输出电压分布和电压响应曲线。孙舒等<sup>[20]</sup>通过建立压电悬臂梁发电系统的集中参数模型,获取了双稳态压电悬臂梁发电系统的特性。然而,当前鲜有研究两端固定下压电梁发电特性,且发电效率与基底材料<sup>[17]</sup>、结构参数<sup>[18]</sup>和振动频率<sup>[17,21]</sup>相关,使得在工程应用中缺乏相关理论指导,给在线监控传感的供电应用带来了困难。

为了实现对两端固支式双晶片压电梁结构的发电特性分析,通过建立发电效能的数学模型,采用Nelder-Mead单纯形算法实现参数优化,并在此基础上仿真分析了材料特性、结构参数和频率对其能量转换的影响,并通过设计实验验证了模型及分析的可靠性。为了适应轨道车辆非线性振动环境,还需对非正弦激励下两端固支式双晶片压电梁结构的发电模型及特性做进一步研究。

## 1 模型构建

### 1.1 发电结构及原理

两端固支式双晶片压电梁系统结构如图1所示

\* 国家自然科学基金资助项目(51907117,51975347);上海市科技计划资助项目(22010501600)

收稿日期:2020-07-15;修回日期:2021-03-18

示,该结构由金属基底、附着于金属基底的上、下两层压电陶瓷及上、下两片质量块构成。当压电陶瓷受外力作用时,会发生机械形变产生正压电效应,从而将机械振动转换为电能。

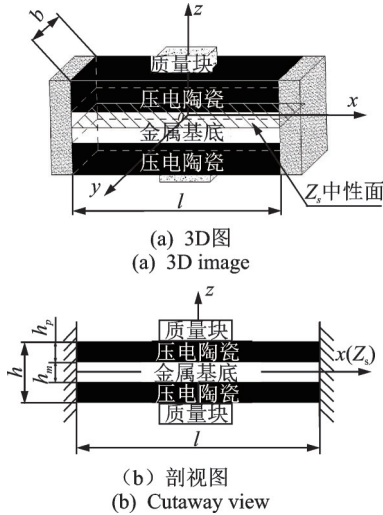


图1 两端固支式双晶片压电梁结构图  
Fig.1 Structure of piezoelectric beam

图1中,以压电梁几何重心为原点建立坐标系  $xyz$ , 设压电梁长为  $l$ , 宽为  $b$ , 厚为  $h$ , 金属基底厚度为  $h_m$ , 压电陶瓷的厚度为  $h_p$ , 金属基底厚度与压电陶瓷厚度比为  $\alpha$ , 则有

$$\begin{cases} \alpha = h_m/h \\ h_p = (1 - \alpha)h/2 \end{cases} \quad (1)$$

当压电梁受到外力时,  $\alpha$  是应力、应变的函数, 且理论上存在最佳的厚度比  $\alpha$ , 使得发电量最大。由材料的弹性理论和压电振动方程, 可得压电陶瓷的应力应变关系为

$$\sigma_x = E_p(\epsilon_x - d_{31}E_z) \quad (2)$$

$$D_z = d_{31}\sigma_x + \epsilon_{33}^s E_z \quad (3)$$

其中:  $\sigma_x$  为  $x$  轴方向上的应力;  $\epsilon_x$  为  $x$  轴方向上的应变;  $E_p$  为压电陶瓷的弹性模量;  $E_z$  为由正压电效应产生的内电场强度;  $D_z$  为在外力和电场强度共同作用下产生的电位移, 大小用电荷密度来表征;  $\epsilon_{33}^s$  为介电常数;  $d_{31}$  为压电梁在  $z$  轴方向上的压电应变常数。

式(3)表明,  $D_z$  是表征压电梁发电量大小的关键参数。

### 1.2 压电梁发电量建模

压电梁发电量的求解关键在于  $D_z$  参数的获取。

$$\begin{cases} Q(t) = \frac{F_c(t)bl^2}{2} \left\{ \frac{3bd_{31}(1-\alpha)}{h^2[(1-\alpha^3) + \alpha^3\beta]} + (\epsilon_{33}^s - d_{31}^2 E_p)K \right\} \\ \bar{U}(t) = \frac{(1-\alpha)hKF_c(t)l}{4} \end{cases} \quad (7)$$

为得出两端固支的双晶片压电梁的发电模型, 在其中心处施加载荷  $F$ , 梁弯曲变形产生电荷, 如图2所示。压电梁弯曲应变值  $\epsilon_x$  可表示为距离中性面  $Z_s$  的距离  $z$  与中性面的曲率半径  $\rho$  的比值

$$\epsilon_x = |z/\rho| \quad (4)$$

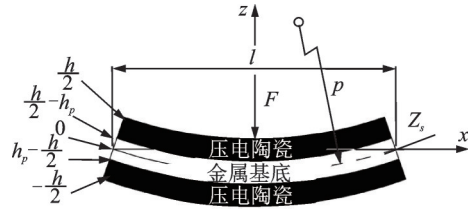


图2 压电梁受力分析

Fig.2 Force analysis of piezoelectric beam

由材料力学可知, 两端固支的等刚度矩形截面梁的中心处的挠转角为零, 可以将其等效为悬臂梁形式进行参数求解。将原点视为悬臂梁非自由端,  $x$  为  $x$  轴与坐标原点  $O$  的距离,  $x = l/2$  处的作用力为  $F/2$ , 对梁进行受力和小弯曲变形理论建立的压电梁力矩方程为

$$\begin{cases} M = F(l/2 - x)/2 \quad (0 < x < l/2) \\ M = nb \int_{h/2-h_p}^{h/2} \sigma_x z dz + b \int_{h_p-h/2}^{h/2-h_p} \sigma_m z dz \end{cases} \quad (5)$$

由于压电陶瓷具有一定的厚度和硬度, 其应变的大小可以等效为均匀应变,  $z = \pm(1 + \alpha)h/4$ 。联合式(4)和式(5)并将其代入式(2), 即可求得  $E_z$  为

$$\begin{cases} E_z = KF_x \quad (0 < x < l/2) \\ K = \frac{2bB_1 + 2b\beta(1 - B_1) - 2[(1 - \alpha^3) + \alpha^3\beta]}{bE_p h^2 d_{31} B_2 [(1 - \alpha^3) + \alpha^3\beta]} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\beta = E_m/E_p$ ;  $B_1 = 3(1 - \alpha) - 3(1 - \alpha)^2 + (1 - \alpha)^3$ ;  $B_2 = 2(1 - \alpha) - (1 - \alpha)^2$ 。

将求解出的  $E_z$  代入式(3), 则得到  $D_z$  值。电荷密度对梁横截面积积分即可得到压电梁产生的电荷量  $Q$ , 内电场强度与压电陶瓷厚度的乘积对梁长积分并取平均值, 即可得到电压  $\bar{U}$ 。

在振动环境中, 设压电梁的受力为  $F_c(t) = \mu ma$ , 加速度  $a = A \sin(\omega t + \varphi)$ , 其中:  $A$  为加速度幅值;  $\omega$  为角频率;  $\varphi$  为相位角;  $\mu$  为压电能量转换模型的校正因子<sup>[22-23]</sup>, 得到电荷量与电压关系为

将式(7)代入电能公式  $W = Q|\bar{U}|/2$ , 得到在受

$$W(t) = \frac{bhK|F_c(t)|^2 l^3}{16} \left\{ \frac{3bd_{31}(1-\alpha)}{h^2[(1-\alpha^3) + \alpha^3\beta]} + (\epsilon_{33}^\sigma - d_{31}^2 E_p) K \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在外力一定的情况下, 压电梁发电量的大小与  $\alpha$  和  $\beta$  有关, 可以根据这 2 个参数求  $W(\alpha, \beta)$  的极值点, 实现压电梁结构的最优设计。

### 1.3 模型求解

压电梁发电特性分析的关键在于如何解决压电梁结构参数  $\alpha$  和  $\beta$  与发电量之间的优化问题。根据式(8)定义  $W(\alpha, \beta) = -f(\alpha, \beta)$ , 对  $W$  取最小值, 利用 Nelder-Mead 单纯形算法<sup>[24]</sup>进行求解。该算法的基本原理是通过设定一个基本解, 然后求解能使目标函数优化的所有解。通过不断改进基本解, 找到最优解。计算反射点的值  $X_r$ 、扩展点的值  $X_e$ 、外部收缩值  $X_c$  和内部收缩值  $X_{cc}$ , 判断迭代终止点, 将计算出的  $V_{n+1}$  个无序单纯性顶点进行排序并取最小值, 即可得到所求函数的最小值。图 3 为 Nelder-Mead 算法过程图, 计算过程中可能出现的每一个点和每一种可能的新单纯形如图 3 所示。

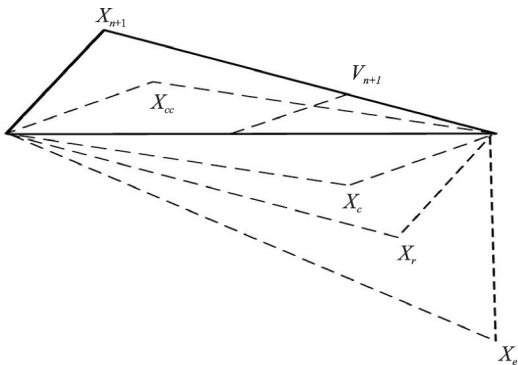


图3 Nelder-Mead算法过程图

Fig.3 Nelder-Mead algorithm process diagram

## 2 发电特性分析及验证

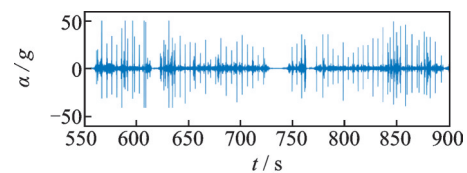
为了分析及验证压电梁发电特性, 采用常用的铍铜、锰白铜为金属基底, PZT-5H 为压电陶瓷构成的压电梁, 得出结构参数  $\alpha$  和  $\beta$  与压电梁发电量之间的关系。同时, 采用相对偏差百分比  $E$  为评判方法

$$E = \frac{|V_r - V_c|}{V_r} \times 100\% \quad (9)$$

力为  $F_c(t)$  的振动环境下的压电梁电能方程为

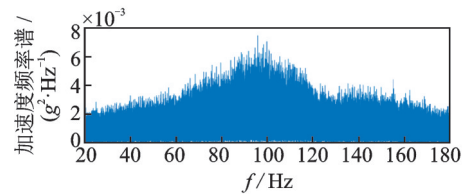
其中:  $V_r$  为理论值;  $V_c$  为实测值。

在上海地铁 1 号线路段的 AC06 型车辆轴箱端盖上安装单向 LC0110 加速度传感器, 利用东华多通道数据采集仪, 设定采样频率为 5 kHz, 获取轨道车辆轴箱处的振动情况, 并利用 Matlab 软件对振动信号进行傅里叶变换, 得到车辆走行部振动信号的时频图如图 4 所示。



(a) 时域图

(a) Time domain



(b) 频域图

(b) Frequency domain

图4 振动信号时频图

Fig.4 Time-frequency diagram of vibration signal

由图 4 可知, 车辆振动信号的主频段位于 80~120 Hz 之间。图 5 给出验证压电梁发电特性的实验平台, 该平台主要由控制器、功率放大器、激振器、压电梁、转换电路、储能电容、示波器、信号采集器及电脑组成。压电梁固定在激振器上, 输出的电源参数主要通过示波器测量。经由 LTC3588-1 芯片为主控芯片的转换电路, 将产生的交流电转换为直流电, 并存储在容量为 680  $\mu$ F 的储能电容中。金属材料、压电陶瓷及振动台关键参数如表 1 所示。

利用 Nelder-Mead 单纯形算法对式(8)进行求解, 可得压电梁的输出功率与厚度比  $\alpha$  及弹性模量比  $\beta$  的关系, 如图 6 所示。图 6 表明: 随着厚度比  $\alpha$  的增大, 输出功率先增大后减小; 随着弹性模量比  $\beta$  的增大, 输出功率逐渐降低。在常用的金属基底材料中, 铝的弹性模量为 17 GPa, 锰白铜的弹性模量为 153 GPa, PZT-5H 压电陶瓷的弹性模量为 71 GPa, 所以两者间的比值  $\beta$  取值范围约为 0.23~2.15。

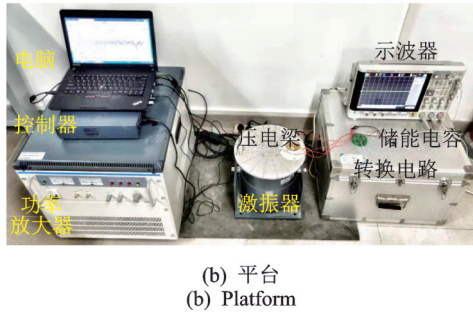
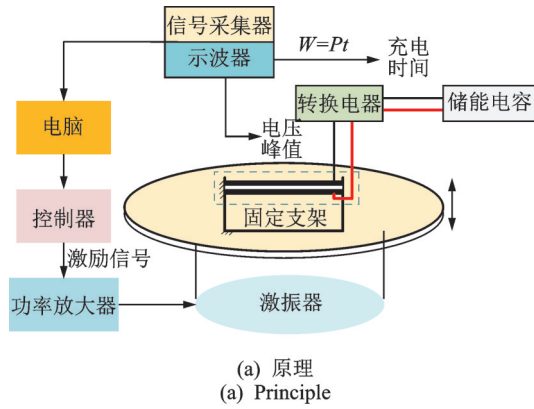


图 5 实验原理及平台

Fig.5 Experimental principle and platform

表 1 两端固支式双晶片压电梁实验参数

Tab.1 Experimental parameters of bimorph piezoelectric cantilevered beam fixed at both ends

参数	数值
压电梁长度/mm	84
压电梁宽度/mm	30
压电梁厚度/mm	0.75
压电陶瓷厚度/mm	0.275
金属基底厚度/mm	0.2
质量块质量/g	30
PZT-5H 弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	71 × 10 <sup>9</sup>
PZT-5H 介电常数 ε <sub>33</sub> <sup>σ</sup>	1 470ε <sub>0</sub>
PZT-5H 压电应变常数 d <sub>31</sub> /(C·N <sup>-1</sup> )	-274 × 10 <sup>-12</sup>
铍铜弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	130 × 10 <sup>9</sup>
锰白铜弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	153 × 10 <sup>9</sup>
加速度/g (g=9.8 m/s <sup>2</sup> )	0.5g
载荷激励频率/Hz	100
相位角 φ	π/2

图 7 为锰白铜和铍铜的输出功率随厚度比  $\alpha$  变化曲线图,从曲线变化趋势可以看出,厚度比在增大过程中,输出功率逐渐增大,至最佳厚度比时达到最大值,之后下降至零。由图 7 可知,锰白铜压电梁最佳厚度比  $\alpha_{\text{mt}} = 0.261$ ,铍铜为  $\alpha_{\text{pt}} = 0.213$ 。

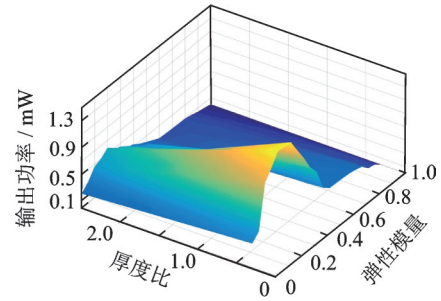


图 6 输出功率与厚度比及弹性模量比的关系图

Fig.6 Relationship between output power and thickness ratio and elastic modulus

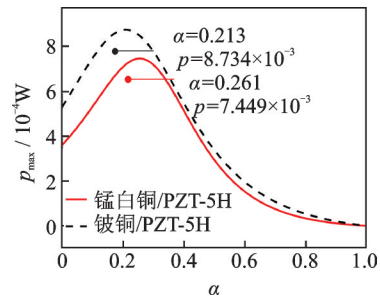


图 7 输出功率与厚度比的关系

Fig.7 Relationship between output power and thickness ratio

图 8 为压电梁在厚度比  $\alpha = 0.26$ 、压电层材料为 PZT-5H 的压电陶瓷时,输出功率与弹性模量比之间的关系曲线。由图 8 可知,弹性模量较低时,双晶片压电梁的输出功率较大。发生上述现象的原因在于弹性模量值较小,双晶梁中的压电陶瓷应力较大,产生的内电场强度  $E_z$  越大,故产生的电能较多。再结合公式推断出,当弹性模量比  $\beta$  取值较小时,  $K$  值变大,则对应的  $E_z$  也会增大。

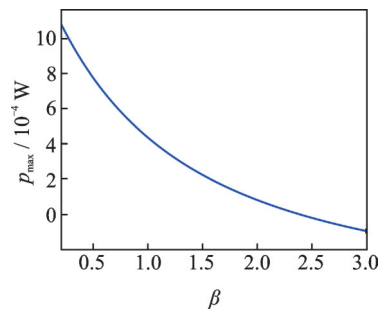


图 8 输出功率与弹性模量比的关系

Fig.8 Relationship between output power and elastic modulus

图 9 为厚度比  $\alpha = 0.26$ 、压电层材料为 PZT-5H 的压电陶瓷时,基底材料的输出功率与频率的关系图。由图 9 可知,铍铜在其自身共振频率处的输出功率值比锰白铜的输出功率大,相同的结构参数下,铍铜的输出功率高于锰白铜。由此可以推断出,弹

性模量低的金属,共振频率低且能量大。由于地铁 1 号线车辆走行部振动信号的主频段集中在 80~120 Hz 之间,且固有频率随着附加质量块的增加而减小。因此,在地铁振动环境中选择弹性模量相对较低的铍铜作为基底较为合适。

图 10 为采用图 5 实验平台下,厚度比为 0.26 时

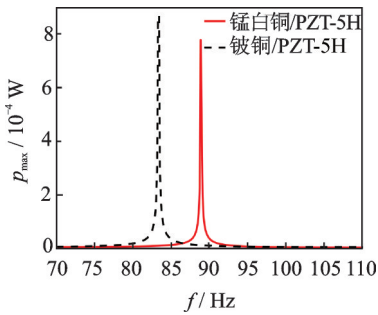


图 9 不同金属材料的输出功率与频率关系图

Fig.9 Relationship between output power and frequency of different metal materials

所获取的铍铜和锰白铜为基底的压电梁输出电压波形,其中蓝色为铍铜金属基底的输出电压,绿色为锰白铜基底输出电压。表 2 为采用两端固支式双晶片压电梁模型的理论值与实验测试值对比表。

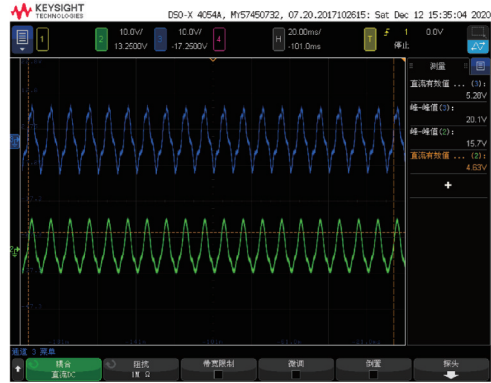


图 10 不同金属材料的压电梁输出电压波形

Fig.10 Output voltage waveform of piezoelectric beams of different metal materials

表 2 两端固支式双晶片压电梁实验对比

Tab.2 Experimental comparison of bimorph piezoelectric cantilevered beam fixed at both ends

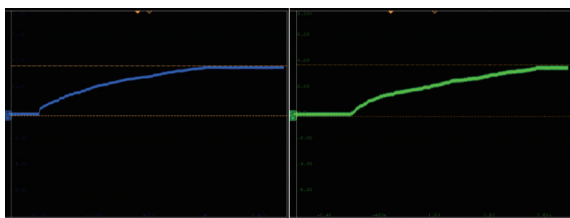
材料	理论输出	理论输出	实测输出	实测输出	输出电压	输出功率
	电压/V	功率/mW	电压/V	功率/mW	相对偏差/%	相对偏差/%
铍铜	5.36	0.840	5.28	0.816	1.49	2.86
锰白铜	4.76	0.745	4.63	0.731	2.73	1.88

由式(8)可以计算出铍铜基底的输出有效电压为 5.36 V,实际测量值为 5.28 V;锰白铜金属基底输出有效电压为 4.76 V,实际测量值为 4.63 V。受示波器探头内阻的影响,造成理论值相比实验测量值略大。铍铜输出电压高于锰白铜,其对应的输出功率也较高。图 11 为采用 LTC3588-1 主控芯片对储能电容进行充电的曲线。用铍铜和锰白铜构成的压电梁充满储能电容所用时间分别为 6.0 s 和 6.7 s,可以得出其输出功率为 0.816 mW 和 0.731 mW,理论计算得出的输出功率为 0.840 mW 和 0.745 mW。输出功率偏差分别为 0.027 mW 和 0.014 mW,相对

偏差分别为 2.86% 和 1.88%。因引入整流滤波电路会增加功率的损耗,导致实测功率值比理论功率值低。

### 3 结束语

本研究根据梁的小弯曲变形理论,建立了两端固支的矩形压电梁双晶片压电梁能量转换模型,分析了压电梁的材料特性、结构参数和工作频率对压电梁发电功率的影响。通过参数仿真可知,最大功率时梁有最佳厚度比,  $\alpha_{mi} = 0.261$ ,  $\alpha_{pi} = 0.213$ 。弹性模量低的金属谐振频率低且能量高。通过搭建实验平台,结果表明,输出电压最大偏差为 0.13 V,输出功率最大偏差为 0.024 mW,验证了模型的正确性。



(a) 铍铜 (b) 锰白铜  
(a) Beryllium copper (b) Manganese copper

图 11 储能电容的充电曲线

Fig.11 Charging curve of energy storage capacitor

### 参 考 文 献

[1] BOSSO N, MAGELLI M, ZAMPIERI N. Application of low-power energy harvesting solutions in the railway field: a review [J]. Vehicle System

- Dynamics, 2020, 1:1-31.
- [2] NAJAFI K, AKTAKKA E E. A micro inertial energy harvesting platform with self-supplied power management circuit for autonomous wireless sensor nodes [J]. *Ieee Journal of Solid-State Circuits*, 2014, 49 (9) : 2017-2029.
- [3] PENG L L, ZHENG S B, CHAI X D, et al. A novel tangent error maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system under fast multi-changing solar irradiances [J]. *Applied Energy*, 2018, 210 (2018) : 303-316.
- [4] 王兵振,张巍,段云棋. 小型温差能发电装置发电特性分析与试验[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(12) : 3302-3310.  
WANG Bingzhen, ZHANG Wei, DUAN Yunqi. Analysis and test of power generating characteristics of small ocean thermal energy conversion device [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(12) : 3302-3310. (in Chinese)
- [5] 杨国良,郝帅,杨梓,等. 风电系统改进 T 型逆变器并网优化模型预测控制[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(6) : 53-59.  
YANG Guoliang, HAO Shuai, YANG Zi, et al. Predictive control of improved T-type inverter grid-connected optimization model in wind power system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(6) : 53-59. (in Chinese)
- [6] HASSAN F. Recovering waste vibration energy of an automobile using shock absorbers included magnet moving-coil mechanism and adding to overall efficiency using wind turbine[J]. *Energy*, 2019, 189:1-9.
- [7] 刘卫丰,刘维宁,DEGRANDE G. 地铁列车运行引起地表振动的预测模型及其试验验证[J]. *振动工程学报*, 2010, 23(4):373-379.  
LIU Weifeng, LIU Weining, DEGRANDE G. Prediction model of ground vibration caused by subway train operation and its experimental verification [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2010, 23(4) : 373-379. (in Chinese)
- [8] GAO M Y, WANG P, CAO Y, et al. A rail-borne piezoelectric transducer forenergy harvesting of railway vibration[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(7) : 4647-4663.
- [9] LIAO Y, SODANO H A. Structural effects and energy conversion efficiency of power harvesting [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20: 505-514.
- [10] 范媛媛,吴尚光,李曼,等. 基于压电的车载传感器自供电技术研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(8) : 10-12, 15.  
FAN Yuanyuan, WU Shangguang, LI Man, et al. Research on self-powered technology of automotive sensor based on piezoelectricity [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(8) : 10-12, 15. (in Chinese)
- [11] 袁江波,谢涛,单小彪,等. 压电俘能技术研究现状综述 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9) : 36-42.  
YUAN Jiangbo, XIE Tao, SHAN Xiaobiao, et al. A review of current situation for piezoelectric harvesting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(9) : 36-42. (in Chinese)
- [12] 阚君武,唐可洪,王淑云,等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):71-75.  
KAN Junwu, TANG Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation piezoelectric cantilever generators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1) : 71-75. (in Chinese)
- [13] 马小青,李帅波,王喃喃. 复合式压电悬臂发电梁设计与实验分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2019, 16(10) : 8-11.  
MA Xiaoqing, LI Shuaibo, WANG Nannan. Design and experimental analysis of composite piezoelectric cantilever beam [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019, 16(10) : 8-11. (in Chinese)
- [14] 贾尚帅,孙舒,李明高. 基于谐波平衡法的双稳态压电发电系统非线性振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(6):170-173.  
JIA Shangshuai, SUN Shu, LI Minggao. Non-linear vibration analysis of bistable piezoelectric power generation system based on harmonic balance method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(6) : 170-173. (in Chinese)
- [15] 蒋树农,郭少华,李显方. 单压电片悬臂梁式压电俘能器效能分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(19):90-94.  
JIANG Shunong, GUO Shaohua, LI Xianfang. Effectiveness analysis of single piezoelectric cantilever piezoelectric capacitor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(19) : 90-94. (in Chinese)
- [16] 袁江波,谢涛,单小彪,等. 复合型悬臂梁压电振子振动模型及发电实验研究 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(9):87-92.  
YUAN Jiangbo, XIE Tao, SHAN Xiaobiao, et al. Vibration model of piezoelectric oscillator with composite cantilever and experimental study on power generation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9) : 87-92. (in Chinese)
- [17] 郭抗抗,曹树谦. 考虑材料非线性时压电发电悬臂梁的主共振响应分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(19) : 8-16.

- GUO Kangkang, CAO Shuqian. Primary resonance cantilevered piezoelectric energy harvesters considering nonlinearities of piezoelectric material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 8-16. (in Chinese)
- [18] 刘祥建,陈仁文. 激励环境下 rainbow 型压电转能器发电性能分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 172-176.  
LIU Xiangjian, CHEN Renwen. Output voltages of a rainbow type piezoelectric transducer under incentive environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(21): 172-176. (in Chinese)
- [19] 龚俊杰,许颖颖,阮志林,等. 双晶悬臂梁压电发电装置发电能力的仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 658-664.  
GONG Junjie, XU Yinyin, RUAN Zhilin, et al. Simulation on generating capacity for energy harvesting device with piezoelectric bimorph cantilever[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(4): 658-664. (in Chinese)
- [20] 孙舒,曹树谦. 双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 1-11.  
SUN Shu, CAO Shuqian. Dynamic modeling and analysis of a bistable piezoelectric cantilever power generation system [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(21): 1-11. (in Chinese)
- [21] 赵道利,胡新宇,孙维鹏,等. 基于驰振的压电能量采集器建模与实验研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 437-442.  
ZHAO Daoli, HU Xinyu, SUN Weipeng, et al. Modeling and experimental study of galloping-based piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 437-442. (in Chinese)
- nese)
- [22] ROBERT A, GUS M D, VINCENT G. Experiment and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2012, 178: 76-87.
- [23] LI P, GAO S, CAI H, et al. Design, fabrication and performances of MEMS piezoelectric energy harvester [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2015, 47(1): 125-139.
- [24] 郭照庄,岳雅璠,孙月芳. 单纯形法原理及其扩展[J]. 北华航天工业学院学报, 2014, 24(3): 1-3.  
GUO Zhaozhuang, YUE Yafan, SUN Yuefang. The principle of the simplex method and its extension [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2014, 24(3): 1-3. (in Chinese)



**第一作者简介:**彭乐乐,男,1984年12月生,博士、副教授。主要研究方向为轨道交通自主感知及健康诊断。曾发表《A comprehensive detection system for track geometry using fused vision and inertia》(《IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement》2021, Vol.70)等论文。  
E-mail: lele.peng@sues.edu.cn

**通信作者简介:**钟倩文,女,1986年3月生,博士、讲师。主要研究方向为轨道交通车辆智能检测及数据分析。  
E-mail: qianwen.zhong@sues.edu.cn

## 欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332  
邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcns.nuaa.edu.cn