

## 矿用压电俘能器建模与俘能特性研究

张晓宇, 张旭辉

## MODEL AND HARVEST CHARACTERISTIC RESEARCH OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER USED IN COAL MINE

Zhang Xiaoyu and Zhang Xuhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-460>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 翼型颤振压电俘能器的输出特性研究

OUTPUT CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF AIRFOIL-BASED FLUTTER PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER

力学学报. 2021, 53(11): 3016-3024

#### 线形拱形组合梁式三稳态压电俘能器动力学特性研究

RESEARCH ON DYNAMICS CHARACTERISTICS OF LINEAR-ARCH COMPOSED BEAM TRI-STABLE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER

力学学报. 2021, 53(11): 2996-3006

#### 附磁压电悬臂梁流致振动俘能特性分析

ENERGY HARVESTING ANALYSIS OF A PIEZOELECTRIC CANTILEVER BEAM WITH MAGNETS FOR FLOW-INDUCED VIBRATION

力学学报. 2019, 51(4): 1148-1155

#### 基于压电振动能量俘获的弯曲结构损伤监测研究

THE RESEARCH ON DAMAGE DETECTION OF CURVED BEAM BASED ON PIEZOELECTRIC VIBRATION ENERGY HARVESTER

力学学报. 2021, 53(11): 3035-3044

#### 曲梁压电俘能器强迫振动的格林函数解

CLOSED-FORM SOLUTIONS FOR FORCED VIBRATIONS OF CURVED PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTERS BY MEANS OF GREEN'S FUNCTIONS

力学学报. 2019, 51(4): 1170-1179

#### 线绳驱动转速提升式低频俘能器的设计与研究

DEVELOPMENT OF A LOW-FREQUENCY HARVESTER BASED ON A ROPE-DRIVEN ROTOR WITH ROTATION SPEED UP-REGULATION FUNCTION

力学学报. 2021, 53(11): 3025-3034



关注微信公众号，获得更多资讯信息

矿用压电俘能器建模与俘能特性研究<sup>1)</sup>

张晓宇\* 张旭辉\*,†,2)

\*(西安科技大学机械工程学院, 西安 710054)

†(陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室, 西安 710054)

**摘要** 采煤机的无线监测节点存在供电难问题, 采用压电俘能器将振动能转化为电能可为其供电, 研究俘能特性具有重要科学意义. 采用实验与数据拟合方法建立恢复力模型, 磁化电流法建立磁力模型, 拉格朗日函数建立动力学模型, RecurDyn 提取滚筒、摇臂的截割方向加速度, 龙格库塔法求解动力学模型, 分析在不同磁距的俘能特性, 并开展实验研究. 结果表明: 受到前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压依次减小且均随煤层硬度的增大而增大, 截割 f4 煤层时, 磁距分别为 12 mm, 16 mm, 12 mm 和 12 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 5.107 V, 4.224 V, 0.998 V 和 0.882 V, 截割 f6 煤层时, 磁距均为 16 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 7.298 V, 6.747 V, 1.592 V 和 1.397 V, 加入磁力可以加大电压. 实验研究发现, 受到截割 f4 和 f6 煤层的前滚筒截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压随煤层硬度的增大而增大, 磁距分别为 12 mm 和 16 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 3.340 V 和 4.959 V, 加入磁力可以加大电压, 验证了理论分析结果具有正确性. 研究为提高电压提供理论基础, 为无线监测节点自供电提供思路.

**关键词** 压电俘能器, 建模, 俘能特性, 采煤机, 采掘激励

中图分类号: TH113.1 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-460

MODEL AND HARVEST CHARACTERISTIC RESEARCH OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER USED IN COAL MINE<sup>1)</sup>

Zhang Xiaoyu\* Zhang Xuhui\*,†,2)

\*(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

†(Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

**Abstract** About the problem of difficult electricity supply for wireless monitoring node of exploiting coal machine, a piezoelectric energy harvester is used to convert the vibration energy into electricity, the research of energy harvest characteristic has scientific significance. Using experimental and data fitting method to establish restoring force model, using magnetization current method to establish magnetic force model, using the Lagrange function to establish dynamic model, using RecurDyn to extract the exploiting direction acceleration of roller and swing arm, the dynamic model is solved by using Runge Kutta method, analyzing energy harvest characteristic at different magnetic distances, conducting experimental research. The results show that it is subjected to exploiting direction acceleration of front roller, after roller, front swing arm and after swing arm, at the magnetic distance with great energy harvest characteristic, the voltage gradually decreases, the voltage increases entirely when the hardness of the coal seam

2023-09-20 收稿, 2023-10-08 录用, 2023-10-09 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (51974228).

2) 通讯作者: 张旭辉, 教授, 主要研究方向为振动能量俘获与煤矿采掘装备智能化技术. E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

引用格式: 张晓宇, 张旭辉. 矿用压电俘能器建模与俘能特性研究. 力学学报, 2023, 55(10): 2239-2251

Zhang Xiaoyu, Zhang Xuhui. Model and harvest characteristic research of piezoelectric energy harvester used in coal mine. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2239-2251

increases,when exploiting f4 coal seam,the energy harvest characteristic are great at magnetic distances of 12 mm, 16 mm,12 mm and 12 mm, the effective voltage values are 5.107 V,4.224 V,0.998 V and 0.882 V,when exploiting the f6 coal seam, the energy harvest characteristic are entirely great at magnetic distance of 16 mm,the effective voltage values are 7.298 V,6.747 V,1.592 V and 1.397 V,the voltage increases when adding magnetic force.Through experimental research, it was found that it is subjected to exploiting direction acceleration of front roller when exploiting f4,f6 seam,the voltage increases when the hardness of coal seam increases at a magnetic distance with great energy harvest characteristic,the energy harvest characteristic are great at magnetic distances of 12 mm and 16 mm,the effective voltage values are 3.340 V and 4.959 V,the voltage increases when adding magnetic force,verifying the correctness of theoretical result.The research provides a theoretical basis for improving the voltage,providing idea for self electricity supply of wireless monitoring node.

**Key words** piezoelectric energy harvester, modeling, energy harvest characteristic, exploiting coal machine, mining excitation

## 引言

由于煤矿环境恶劣、危险系数大,为了避免发生人员伤亡事故,将工作人员从井下撤离出来,让采煤机自主运行,此时需要在采煤机上安装大量无线监测节点对运行状态进行实时监测,并将监测信息反馈给工作人员,保证采煤机正常运行.由于化学电池不能长时间为无线监测节点供电,供电成为瓶颈问题.压电俘能器可以将振动能转化为电能,研究俘能特性非常重要.

张伟等<sup>[1]</sup>发现增大压电俘能器的正弦激励强度可以增大功率输出.张颖等<sup>[2]</sup>研究提高计算俘能器磁力精度的方法.钱有华等<sup>[3]</sup>研究压电俘能器的阻尼比、势阱深浅程度和负载电阻对俘能效果的影响.曹东兴等<sup>[4]</sup>研究俘能器的俘能特性,加入磁力可以降低共振频率,提高电压输出.吴娟娟等<sup>[5]</sup>研究压电俘能器在不同中心频率的高斯白噪声激励下的输出电压.刘琦等<sup>[6-7]</sup>设计一种能使驱动力放大的双固支梁压电俘能结构,发现在弱高斯白噪声激励下可以发生突跳运动.马天兵等<sup>[8]</sup>研究不同形状压电悬臂梁在正弦激励下的输出功率.张忠华等<sup>[9]</sup>分析俘能器在不同强度正弦激励下的输出电压峰值.满大伟等<sup>[10-12]</sup>研究发现俘能器在合适的起振位置可以产生大幅值运动,并研究磁距、磁铁质量、负载电阻对输出响应的影响.李颖等<sup>[13]</sup>发现通过改变激励幅值可以使三稳态压电能量采集器实现阱间运动,提高功率输出.张强等<sup>[14-16]</sup>采用压电俘能装置为刨煤机的刨刀受力检测系统、采煤机扭矩检测系统和刮板输送机张力检测系统提供电量,通过实验发现在采煤机、刨煤机和刮板输送机工作时能够产生电

量.Xie 等<sup>[17]</sup>发现具有非对称势阱的压电能量采集器在高斯白噪声激励下的输出电压比传统的压电能量采集器的输出电压大.Chen 等<sup>[18]</sup>发现双耦合梁的压电能量收集器加入弹簧可以降低势垒,在较低的激励下能够实现大幅值运动,选择合适的弹簧刚度可以提高功率输出.赵丽娟等<sup>[19-21]</sup>采用 EDEM 建立煤层模型,采用 EDEM 与 RecurDyn 耦合提取采煤机的振动加速度.Xia 等<sup>[22]</sup>发现增加压电能量采集器的端部质量可以降低共振频率,有利于提高能量收集效果.张宇等<sup>[23]</sup>发现悬臂梁在不同频率的简谐激励下存在跳跃现象.张广义等<sup>[24]</sup>发现梯形压电梁比矩形压电梁的输出功率大.Lu 等<sup>[25]</sup>发现加入多层压电材料可以加大能量采集器的输出电压.高扬等<sup>[26]</sup>采用振动能量采集装置为矿用无线监测系统供电,发现在谐振频率处的发电量最大,发电量与激励幅度呈正相关.刘建政等<sup>[27]</sup>采用压电-电磁-摩擦能量采集器实现矿用无线监测系统自供电.解胜东<sup>[28]</sup>采用压电叠堆俘能器为煤机检测系统提供电量,发现压电片的厚度与发电量呈正相关.

综上所述,目前研究压电俘能器受到采煤机采掘激励下的俘能特性非常少.因此,本文采用实验与数据拟合方法建立恢复力模型,磁化电流法建立磁力模型,拉格朗日函数建立动力学模型,RecurDyn 提取滚筒、摇臂的截割方向加速度,龙格库塔法求解动力学模型,分析在不同磁距的俘能特性,并开展实验研究.

## 1 压电俘能器结构

压电俘能器结构,如图 1 所示.在悬臂梁上固定

压电薄膜, 悬臂梁固定在基座上, 磁铁 A、B 分别固定在悬臂梁末端与基座上。目前压电梁大多采用直线结构, 文献 [29-30] 发现曲线结构压电梁与直线结构压电梁受到同等作用力, 采用曲线结构可以提高电压与功率输出, 因此, 本文压电梁采用曲线结构。压电俘能器分别受到滚筒、摇臂的截割方向加速度影响, 由于有煤落在滚筒上, 导致俘能器无法安装在滚筒上, 现分别安装在摇臂上端、摇臂质心位置, 如图 2 的 1, 2, 3, 4 位置。

悬臂梁与压电薄膜的线形段长度、拱形段半径分别为 2 cm 和 1 cm, 悬臂梁与压电薄膜的宽度为 0.8 cm, 悬臂梁与压电薄膜的厚度分别为 0.02 cm 与 0.011 cm, 悬臂梁与压电薄膜的密度分别为  $8300 \text{ kg/m}^3$  和  $1780 \text{ kg/m}^3$ , 悬臂梁与压电薄膜的弹性模量分别为  $1.28 \times 10^{11} \text{ Pa}$  和  $3.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 磁铁 A、B 的长、宽、厚分别为 0.5 cm, 1 cm 和 1 cm, 磁化强度、真空磁导率和密度分别为  $5.5 \times 10^5 \text{ A/m}$ ,  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  和  $7500 \text{ kg/m}^3$ 。

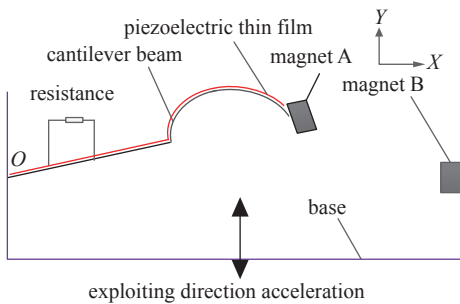


图 1 压电俘能器结构

Fig. 1 Structure of piezoelectric energy harvester

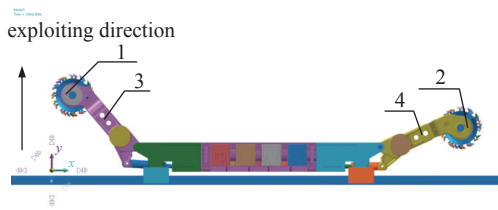


图 2 压电俘能器安装图

Fig. 2 Installation figure of piezoelectric energy harvester

## 2 压电俘能器数学模型与采煤机截割煤层仿真模型

### 2.1 压电俘能器数学模型

#### 2.1.1 恢复力模型

采用文献 [18] 实验方法测量恢复力, 如图 3 所

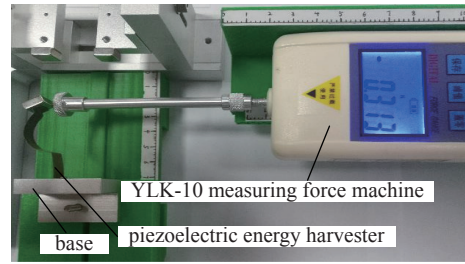


图 3 恢复力测量实验

Fig. 3 Restoring force measuring experiment

示, 将线性端固定在基座上, 采用 YLK-10 测力计多次推动曲线端, 对不同位移的恢复力取平均值, 恢复力随位移变化, 如图 4 所示, 对恢复力进行拟合, 得到的模型为

$$F_r = 41\,963.4r^3(t) + 18.29r(t) \quad (1)$$

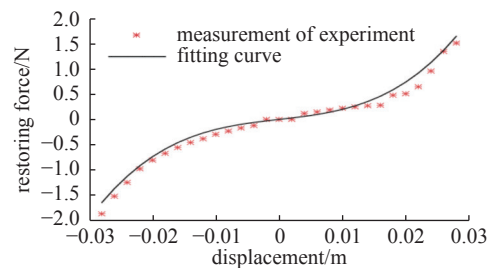


图 4 恢复力随位移变化

Fig. 4 The change of restoring force with displacement

#### 2.1.2 磁力模型

采用磁化电流法建立磁力模型, 悬臂梁转动  $\varphi$ , 磁铁 A 同样转动  $\varphi$ 。磁铁 A、B 的位置图, 如图 5 所示。

在磁铁 B 的中心建立坐标系, 磁铁 A 上下表面的中心点分别为  $O_1$  和  $O_2$ 。 $\angle AOC = \varphi$ ,  $BC = d$ ,  $AC = e$ 。 $\sin\varphi = e/(L + l_A/2)$ ,  $l_A$  和  $L$  分别为磁铁 A 的长度和悬臂梁的水平长度。

磁铁 A 受到磁铁 B 的磁力  $F_m$  为

$$F_m = \mu_0 M_A S_A \left\{ H_{x2} \left[ O_2 \left( d - \frac{h_A}{2} \sin\varphi, e - \frac{h_A}{2} \cos\varphi, 0 \right) \right] - H_{x1} \left[ O_1 \left( d + \frac{h_A}{2} \sin\varphi, e + \frac{h_A}{2} \cos\varphi, 0 \right) \right] \right\} \quad (2)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $M_A$ ,  $S_A$ ,  $e$ ,  $h_A$  为磁铁 A 的磁化强度、面积、位移、高度,  $H_{x2}(O_2)$ ,  $H_{x1}(O_1)$  为磁铁 B 在  $O_2$ ,  $O_1$  点的磁场强度,  $d$  为磁铁 A、B 的水平距离。

磁铁 B 在  $O$  处的磁场强度  $H_x(O)$  为



$$\vartheta = \frac{ze_{31}A_P}{h_P} \int_0^L \ddot{\varphi}(x) dx \quad (18)$$

$$C_P = \frac{b_P L_P \varepsilon_{33}^S}{h_P} \quad (19)$$

让振动台以加速度为  $20 \text{ m/s}^2$ , 频率为  $13 \text{ Hz}$  的激励振动, 振动一段时间后, 停止振动, 采用激光测振仪测量压电俘能器速度, 采用 coco80 采集速度信号. 速度原始信号和滤波信号, 如图 6 和图 7, 速度信号衰减线与包络线, 如图 8 所示.

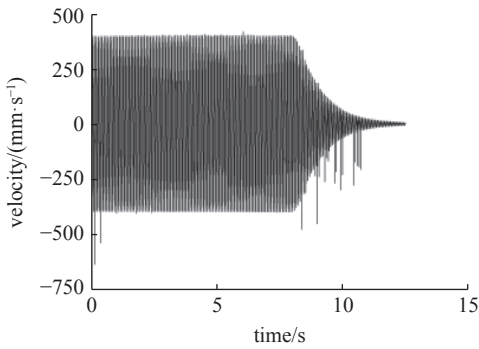


图 6 原始信号  
Fig. 6 Original signal

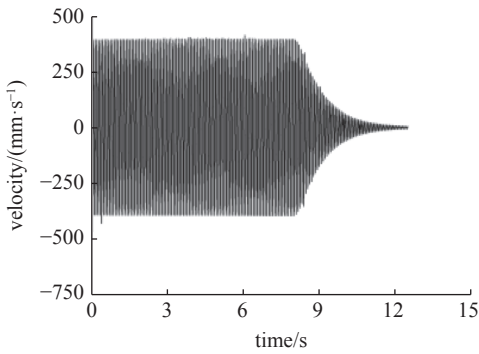


图 7 滤波信号  
Fig. 7 Filtering signal

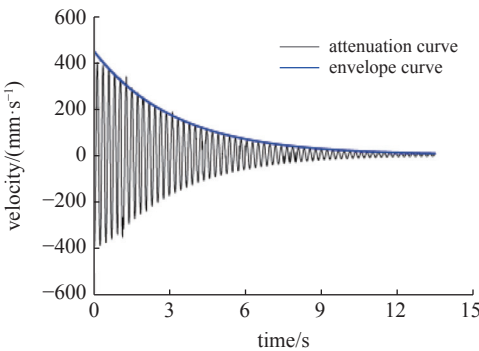


图 8 衰减线与包络线  
Fig. 8 Attenuation and envelope line

对速度衰减信号的振幅进行指数函数拟合<sup>[33]</sup>, 为下式, 其中  $\zeta_w = 0.9347$ .

$$\dot{r}(t) = Ae^{-\zeta_w t} = 445.158e^{-0.9347t} \quad (20)$$

式 (13) 的  $Kr(t)$  项为恢复力, 表示出恢复力随位移变化为线性关系, 而压电俘能器结构为曲线型, 恢复力随位移变化为非线性关系,  $Kr(t)$  项采用式 (1) 代替

$$r_1(t) = r(t), r_2(t) = \dot{r}(t), r_3(t) = v(t) \quad (21)$$

在 Matlab 中, 采用龙格库塔法对式 (13) 和式 (14) 求解, 得出电压

$$\dot{r}_1(t) = r_2(t) \quad (22)$$

$$\dot{r}_2(t) = \frac{-H_s \ddot{z}(t) + \vartheta r_3(t) - F_m - F_r - Cr_2(t)}{M} \quad (23)$$

$$\dot{r}_3(t) = -\frac{1}{c_p} \left( \frac{r_3(t)}{R} + \vartheta r_2(t) \right) \quad (24)$$

其中,  $r_1(t)$  为位移,  $r_2(t)$  为速度,  $r_3(t)$  为电压.

## 2.2 采煤机截割煤层仿真模型

### 2.2.1 煤层模型

在 EDEM 建立硬度为 f4 和 f6 的煤粒, 半径均为  $50 \text{ mm}$ , f4 煤的剪切模量和泊松比为  $9.56 \times 10^8 \text{ Pa}$  和  $0.15$ , f6 煤的剪切模量和泊松比为  $1.72 \times 10^9 \text{ Pa}$  和  $0.22$ , f6 煤的硬度相对于 f4 煤的硬度大, 将煤层几何模型导入 EDEM, 煤粒在煤层几何模型中生成, 并采用黏结键黏结煤粒. 黏结键参数计算公式为

$$S_n = \frac{2G(1+\mu)}{2.2r} = 2(1+\mu)S_t \quad (25)$$

$$\sigma_y = 10f \quad (26)$$

式中,  $S_n$ ,  $S_t$  和  $\sigma_y$  分别为法向刚度、切向刚度和极限法向应力,  $G$ ,  $\mu$ ,  $r$  和  $f$  为煤粒的剪切模量、泊松比、半径和普氏系数.

根据式 (25) 和式 (26), f4 煤层的  $S_n$ ,  $S_t$  和  $\sigma_y$  为  $1.99891 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ ,  $8.6909 \times 10^9 \text{ N/m}^3$  和  $4.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ , 极限切向应力  $1.6 \times 10^7 \text{ Pa}$ ; f6 煤层的  $S_n$ ,  $S_t$  和  $\sigma_y$  为  $3.81527 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ ,  $1.5636 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$  和  $6.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ , 极限切向应力  $2.4 \times 10^7 \text{ Pa}$ . 煤粒模型、煤层几何模型和煤层模型, 分别如图 9 ~ 图 11 所示.

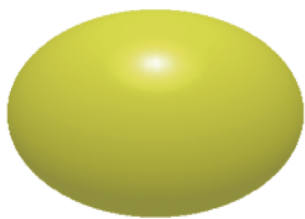


图 9 煤粒模型

Fig. 9 Coal particle model

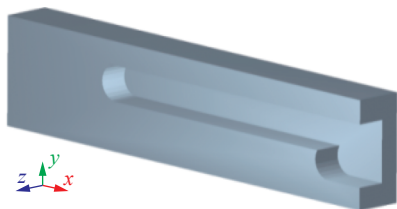


图 10 煤层几何模型

Fig. 10 Coal seam geometric model

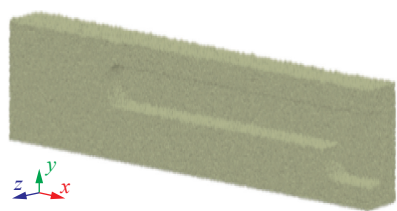


图 11 煤层模型

Fig. 11 Coal seam model

### 2.2.2 采煤机动力学模型

(1) 仿真模型的建立. 将采煤机和刮板输送机中部槽几何模型导入到 RecurDyn, 仿真模型, 如图 12.

(2) 约束的建立. 为提取滚筒载荷, 在滚筒与摇臂、摇臂与机身、摇臂与油缸、活塞与机身的连接处建立旋转副, 在油缸与活塞、平滑靴与刮板输送机中部槽的连接处建立移动副, 在导向滑靴与机身、平滑靴与机身、大地与刮板输送机中部槽的连接处建立固定副; 为提取截割方向加速度, 在滚筒与摇臂、摇臂与机身、摇臂与油缸、活塞与机身、导向滑靴与机身、平滑靴与机身的连接处建立弹性与阻尼元件, 在油缸与活塞的连接处建立弹簧元件, 在

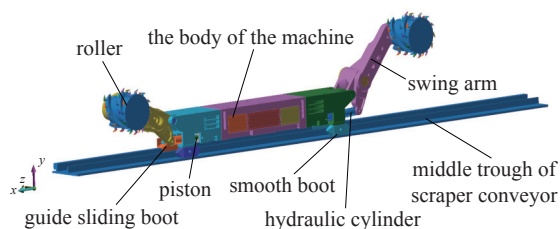


图 12 仿真模型

Fig. 12 Simulation model

平滑靴与刮板输送机中部槽连接处建立移动副, 在大地与刮板输送机中部槽的连接处建立固定副.

(3) 驱动的建立. 为提取滚筒载荷和截割方向加速度, 在平滑靴与刮板输送机中部槽的移动副处建立移动速度驱动, 大小为  $4 \text{ m/min}$ , 方向沿  $X$  轴负方向; 为提取滚筒载荷, 在滚筒与摇臂的旋转副处建立转速驱动, 大小为  $3\pi \text{ rad/s}$ , 方向为逆时针.

采用提取滚筒载荷的动力学模型与煤层模型做采煤机截割煤层的仿真, 可以提取滚筒载荷, 截割煤层图, 如图 13 所示. 将滚筒载荷导入提取截割方向加速度的动力学模型, 可以提取截割方向加速度.

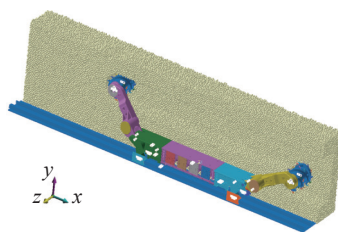


图 13 截割煤层图

Fig. 13 Figure of exploiting coal seam

## 3 采煤机截割方向加速度的提取

截割 f4 和 f6 煤层的滚筒载荷分别如图 14 和图 15.

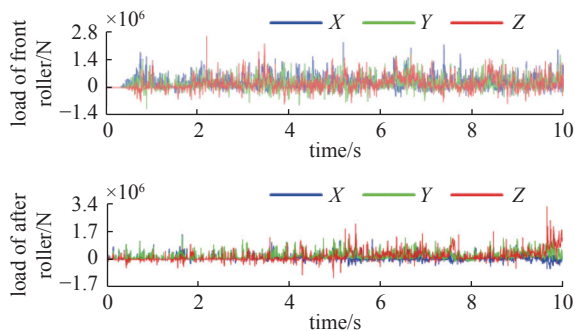


图 14 截割 f4 煤层的滚筒载荷

Fig. 14 Load of roller when exploiting f4 coal seam

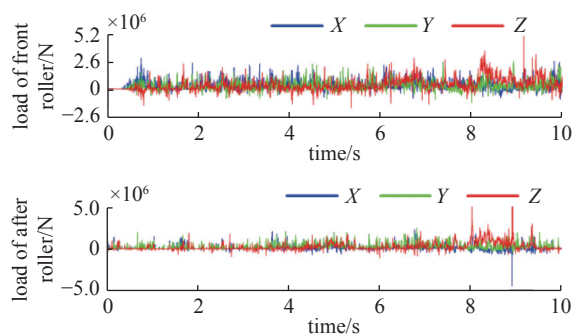


图 15 截割 f6 煤层的滚筒载荷

Fig. 15 Load of roller when exploiting f6 coal seam

由图 14 和图 15 可知, 截割 f4 煤层的前滚筒的  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向载荷有效值分别为  $3.694 \times 10^5$  N,  $3.309 \times 10^5$  N 和  $3.521 \times 10^5$  N, 后滚筒的  $X$  向、 $Y$  向、 $Z$  向载荷有效值分别为  $1.826 \times 10^5$  N,  $2.905 \times 10^5$  N 和  $3.404 \times 10^5$  N. 截割 f6 煤层的前滚筒的  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向载荷有效值分别  $5.344 \times 10^5$  N,  $4.832 \times 10^5$  N 和  $6.501 \times 10^5$  N, 后滚筒的  $X$  向、 $Y$  向、 $Z$  向载荷有效值分别  $2.881 \times 10^5$  N,  $3.960 \times 10^5$  N 和  $5.324 \times 10^5$  N.

截割 f4 和 f6 煤层的采煤机各部位截割方向加速度, 分别如图 16 和图 17 所示.

由图 16 和图 17 可知, 振动从滚筒传到摇臂会减小, 前滚筒 3 向载荷相对于后滚筒大, 且前、后滚筒的 3 向载荷随煤层硬度的增大而增大, 使前滚筒、后滚筒、前摇臂、后摇臂的截割方向加速度在依次减小且均随煤层硬度的增大而增大. 截割 f4 煤层的前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度的有效值分别为  $21.257 \text{ m/s}^2$ ,  $19.580 \text{ m/s}^2$ ,  $9.004 \text{ m/s}^2$  和  $8.455 \text{ m/s}^2$ , 截割 f6 煤层的前滚筒、后

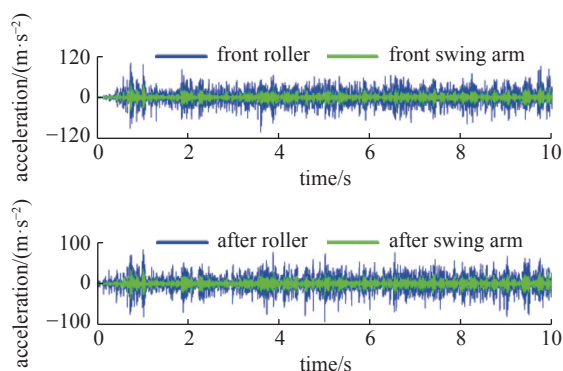


图 16 截割 f4 煤层的各部位截割方向加速度

Fig. 16 the exploiting direction acceleration of each part when exploiting f4 coal seam

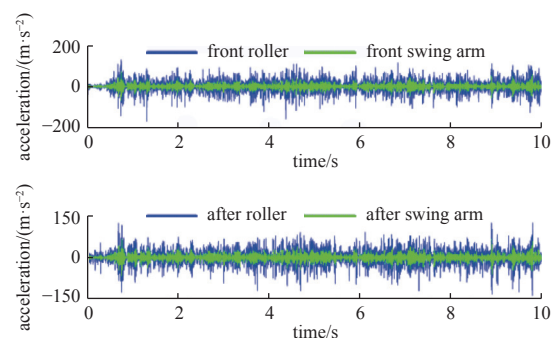


图 17 截割 f6 煤层的各部位截割方向加速度

Fig. 17 the exploiting direction acceleration of each part when exploiting f6 coal seam

滚筒、前摇臂、后摇臂的截割方向加速度的有效值分别为  $30.724 \text{ m/s}^2$ ,  $28.538 \text{ m/s}^2$ ,  $13.095 \text{ m/s}^2$  和  $12.370 \text{ m/s}^2$ .

## 4 压电俘能器的俘能特性分析

压电俘能器受到采煤机各部位截割方向加速度发生振动, 压电薄膜产生变形并输出电压. 将截割方向加速度导入到动力学模型中, 采用龙格库塔法求解, 得出电压随时间变化趋势.

### 4.1 在截割 f4 煤层的俘能特性分析

当受到前滚筒的截割方向加速度, 在不同磁距的电压如图 18 所示.

由图 18 可知, 在无磁力时, 电压有效值为  $2.662 \text{ V}$ , 磁距分别为  $12 \text{ mm}$ ,  $16 \text{ mm}$  和  $20 \text{ mm}$ , 电压有效值分别为  $5.107 \text{ V}$ ,  $4.049 \text{ V}$  和  $3.845 \text{ V}$ , 加入磁力可以加大电压, 磁距为  $12 \text{ mm}$ , 俘能特性较好, 电压较大.

当受到前摇臂的截割方向加速度, 在不同磁距的电压如图 19 所示.

由图 19 可知, 在无磁力时, 电压有效值为  $0.513 \text{ V}$ , 磁距分别为  $12 \text{ mm}$ ,  $16 \text{ mm}$  和  $20 \text{ mm}$ , 电压有效值分别为  $0.998 \text{ V}$ ,  $0.802 \text{ V}$  和  $0.851 \text{ V}$ , 加入磁

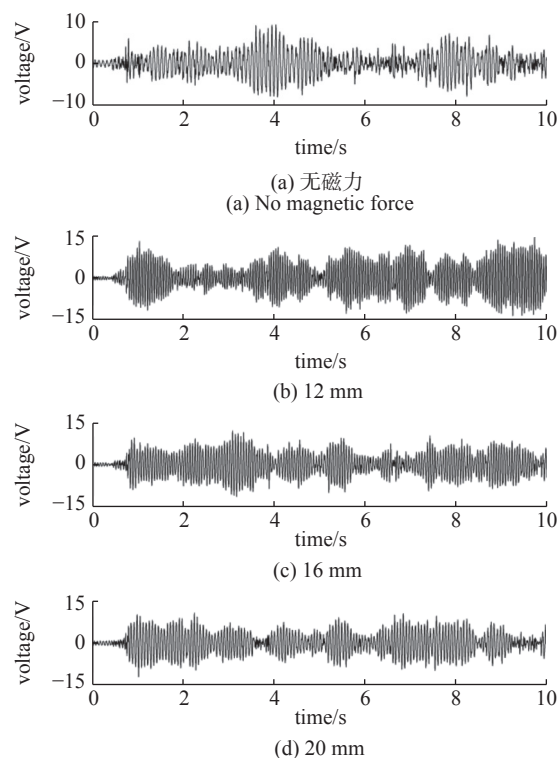


图 18 受到前滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 18 The voltage with exploiting direction acceleration of front roller

力可以加大电压,磁距为 12 mm,俘能特性较好,电压较大。

当受到后滚筒的截割方向加速度,在不同磁距的电压,如图 20 所示。

由图 20 可知,在无磁力时,电压有效值为 2.655 V,磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm,电压有效值分别为 3.078 V, 4.224 V 和 3.038 V,加入磁力可以加大电压,磁距为 16 mm,俘能特性较好,电压较大。

当受到后摇臂的截割方向加速度,在不同磁距的电压,如图 21 所示。

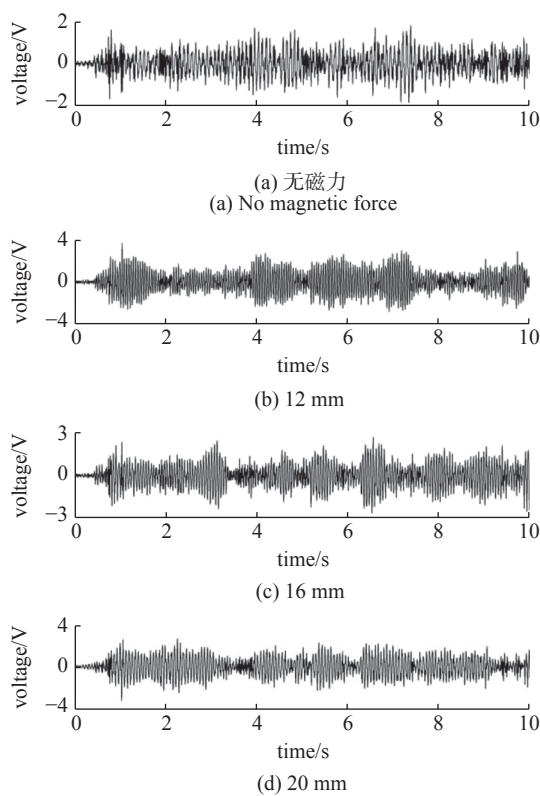


图 19 受到前摇臂截割方向加速度的电压

Fig. 19 The voltage with exploiting direction acceleration of front swing arm

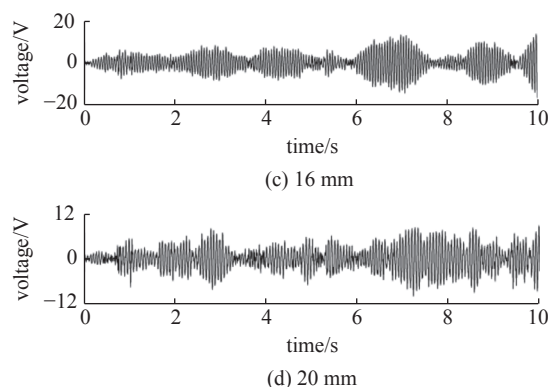
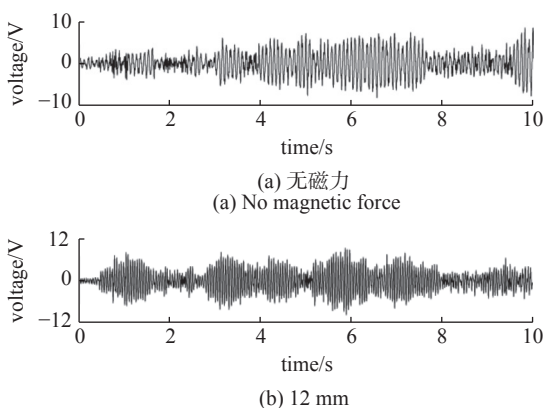


图 20 受到后滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 20 The voltage with exploiting direction acceleration of after roller

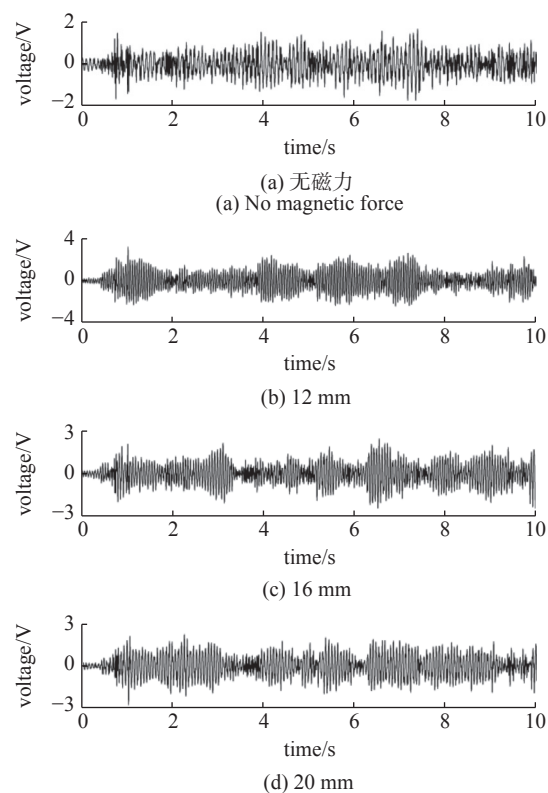


图 21 受到后摇臂截割方向加速度的电压

Fig. 21 The voltage with exploiting direction acceleration of after swing arm

由图 21 可知,在无磁力时,电压有效值为 0.477 V,磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm,电压有效值分别为 0.882 V, 0.736 V 和 0.756 V,加入磁力可以加大电压,磁距为 12 mm,俘能特性较好,电压较大。

截割方向加速度呈随机波动,使电压呈随机波动。截割 f4 煤层时,前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度在依次减小,使受到前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度,

在俘能特性较好的磁距时, 电压在依次减小。

#### 4.2 在截割 f6 煤层的俘能特性分析

当受到前滚筒的截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 22 所示。

由图 22 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 4.910 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压有效值分别为 5.825 V, 7.298 V 和 5.571 V, 加入磁力可以加大电压, 磁距为 16 mm, 俘能特性较好, 电压较大。

当受到前摇臂的截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 23 所示。

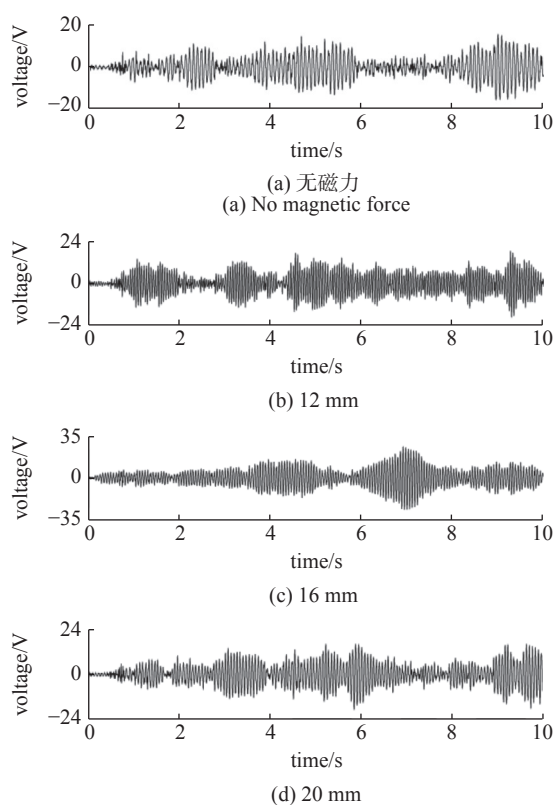


图 22 受到前滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 22 The voltage with exploiting direction acceleration of front roller

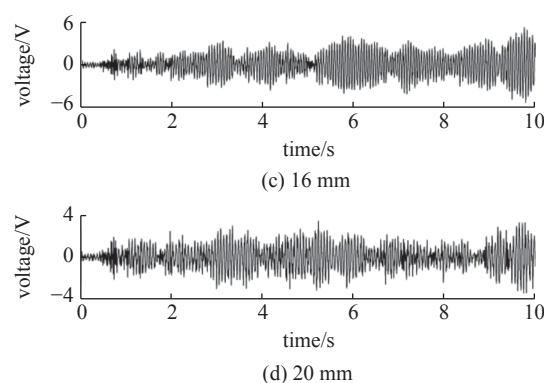
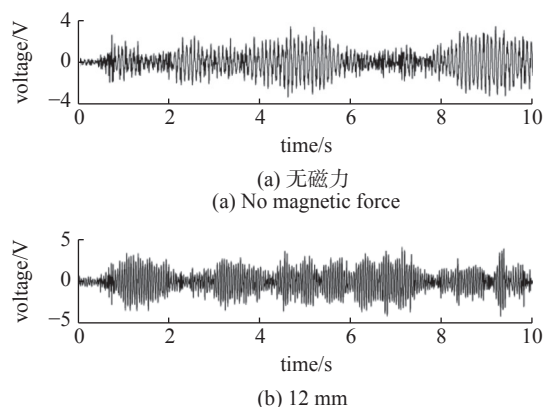


图 23 受到前摇臂截割方向加速度的电压

Fig. 23 The voltage with exploiting direction acceleration of front swing arm

由图 23 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 1.060 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压有效值分别为 1.307 V, 1.592 V 和 1.048 V, 加入磁力可以加大电压, 磁距为 16 mm, 俘能特性较好, 电压较大。

当受到后滚筒的截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 24 所示。

由图 24 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 2.872 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压

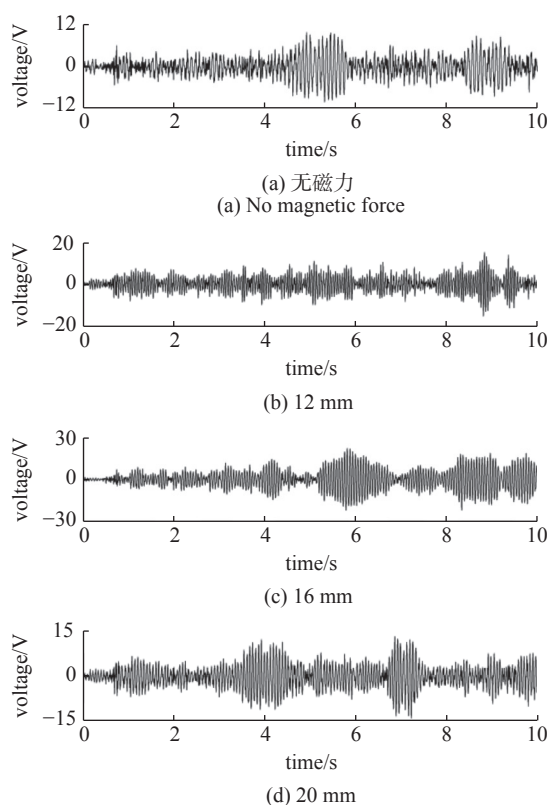


图 24 受到后滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 24 The voltage with exploiting direction acceleration of after roller

有效值分别为 3.571 V, 6.747 V 和 3.798 V, 加入磁力可以加大电压, 磁距为 16 mm, 俘能特性较好, 电压较大。

当受到后摇臂的截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 25 所示。

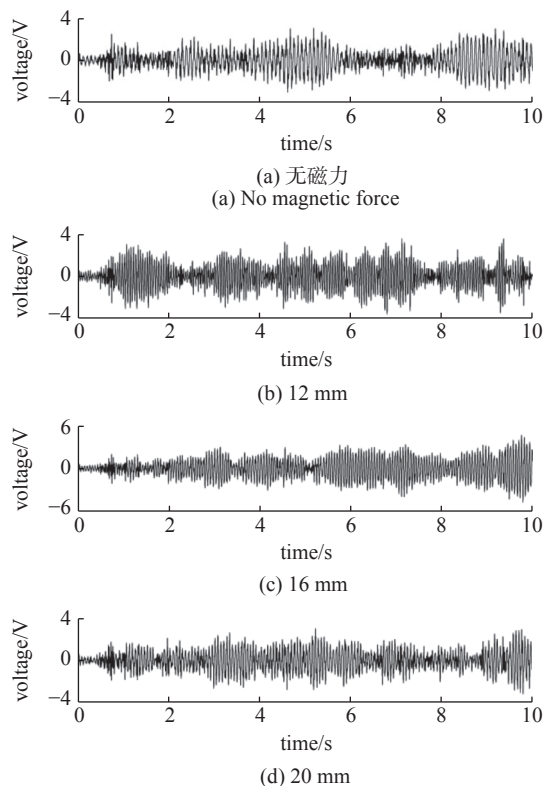


图 25 受到后摇臂截割方向加速度的电压

Fig. 25 The voltage with exploiting direction acceleration of after swing arm

由图 25 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 0.918 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压有效值分别为 1.125 V, 1.397 V 和 0.928 V, 加入磁力可以加大电压, 磁距为 16 mm, 俘能特性较好, 电压较大。

截割 f6 煤层时, 前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度在依次减小且均随煤层硬度的增大而增大, 使受到前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压依次减小且均随煤层硬度的增大而增大。

## 5 压电俘能器俘能特性实验验证

采用 RecurDyn 提取截割 f4, f6 煤层的前滚筒截割方向加速度的功率谱密度, 分别如图 26 和图 27 所示。

对俘能特性进行实验验证。实验过程为: 将功率谱密度数据导入计算机中, 计算机控制振动控制器产生激励信号, 激励信号经过振动控制器、功率放大器传递到振动台, 振动台产生振动。示波器与压电俘能器相连, 采集电压信号。实验测试平台、压电俘能器, 分别如图 28 和图 29 所示。

当受到截割 f4 煤层的前滚筒截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 30 所示。

由图 30 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 2.219 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压

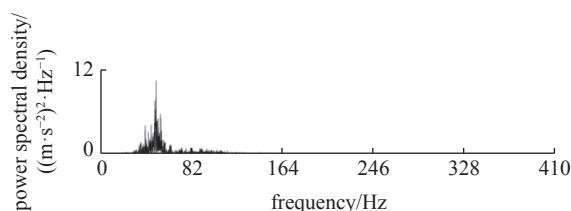


图 26 截割 f4 煤层的功率谱密度

Fig. 26 Power spectral density when cutting f4 coal seam

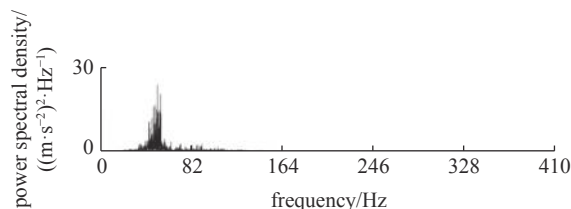


图 27 截割 f6 煤层的功率谱密度

Fig. 27 Power spectral density when cutting f6 coal seam

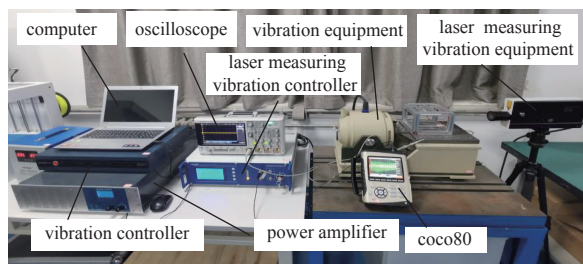


图 28 实验测试平台

Fig. 28 Experimental testing platform

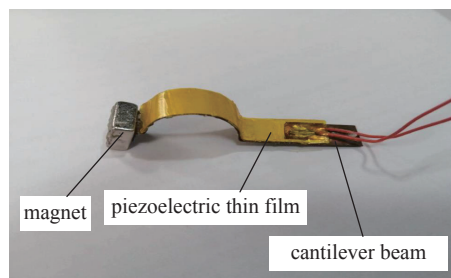


图 29 压电俘能器

Fig. 29 Piezoelectric energy harvester

有效值分别为 3.340 V, 3.092 V 和 2.456 V, 相应的理论结果为: 在无磁力时, 电压有效值为 2.662 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压有效值分别为 5.107 V, 4.049 V 和 3.845 V, 将理论结果与实验结果对比发现, 磁距均为 12 mm 的俘能特性较好, 电压较大, 加入磁力可以加大电压, 理论结果与实验结果定性吻合, 验证了理论分析结果具有正确性。

当受到截割 f6 煤层的前滚筒截割方向加速度, 在不同磁距的电压, 如图 31 所示。

由图 31 可知, 在无磁力时, 电压有效值为 2.304 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压

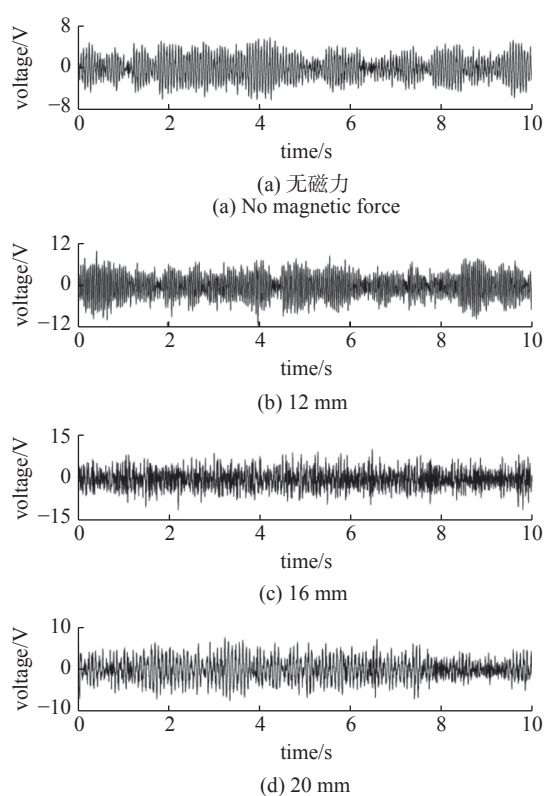


图 30 受到截割 f4 煤层的前滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 30 The voltage with exploiting direction acceleration of front roller when exploiting f4 coal seam

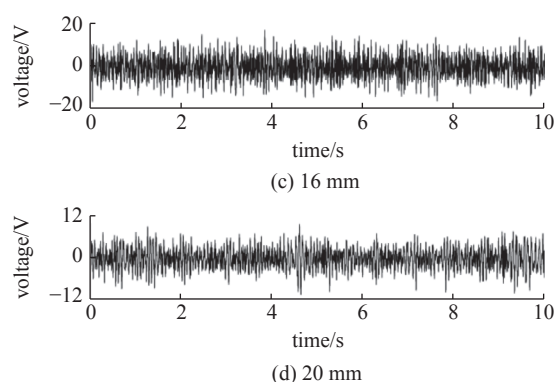
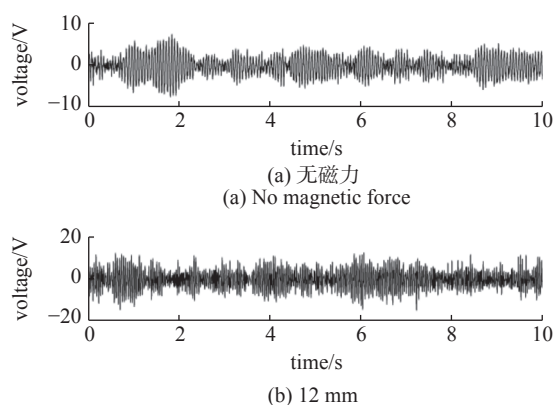


图 31 受到截割 f6 煤层的前滚筒截割方向加速度的电压

Fig. 31 The voltage with exploiting direction acceleration of front roller when exploiting f6 coal seam

有效值分别为 4.379 V, 4.959 V 和 2.856 V, 相应的理论结果为: 在无磁力时, 电压有效值为 4.910 V, 磁距分别为 12 mm, 16 mm 和 20 mm, 电压有效值分别为 5.825 V, 7.298 V 和 5.571 V, 将理论结果与实验结果对比发现, 磁距均为 16 mm 的俘能特性较好, 电压较大, 加入磁力可以加大电压, 理论结果与实验结果定性吻合, 并通过实验结果发现, 当受到截割 f4 和 f6 煤层的前滚筒截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压随煤层硬度的增大而增大, 通过理论结果分析发现同样有此现象, 验证了理论分析结果具有正确性。

## 6 结论

(1) 设计一种矿用压电俘能器, 采用实验与数据拟合的方法建立恢复力模型, 采用磁化电流法建立磁力模型, 采用拉格朗日函数建立动力学模型. 采用 RecurDyn 提取滚筒、摇臂的截割方向加速度。

(2) 压电俘能器受到前滚筒、后滚筒、前摇臂和后摇臂的截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压依次减小且均随煤层硬度的增大而增大. 截割 f4 煤层时, 磁距分别为 12 mm, 16 mm, 12 mm 和 12 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 5.107 V, 4.224 V, 0.998 V 和 0.882 V, 截割 f6 煤层时, 磁距均为 16 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 7.298 V, 6.747 V, 1.592 V 和 1.397 V。

(3) 通过实验研究发现, 压电俘能器受到截割 f4 和 f6 煤层的前滚筒截割方向加速度, 在俘能特性较好的磁距时, 电压随煤层硬度的增大而增大, 磁距分别为 12 mm 和 16 mm 的俘能特性较好, 电压有效值分别为 3.340 V 和 4.959 V, 加入磁力可以加大电

压,验证了理论分析结果具有正确性.

## 参 考 文 献

- 张伟,刘爽,毛佳佳等.磁耦合式双稳态宽频压电俘能器的设计和俘能特性.力学学报,2022,54(4):1102-1112 (Zhang Wei, Liu Shuang, Mao Jiajia, et al. Design and energy harvest characteristic of a magnetic coupled bistable broadband piezoelectric energy harvester. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(4): 1102-1112 (in Chinese))
- 张颖,王伟,曹军义.多稳态俘能系统的准确磁力建模方法.力学学报,2021,53(11):2984-2995 (Zhang Ying, Wang Wei, Cao Junyi. Accurate magnetic modeling method for multistable energy harvest system. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 2984-2995 (in Chinese))
- 钱有华,陈娅妮.双稳态压电俘能器的簇发振荡与俘能效率分析.力学学报,2022,54(11):3157-3168 (Qian Youhua, Chen Yani. Analysis of cluster oscillation and energy harvest efficiency for bistable piezoelectric energy harvester. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(11): 3157-3168 (in Chinese))
- 曹东兴,马鸿博,张伟.附磁压电悬臂梁流致振动俘能特性分析.力学学报,2019,51(4):1148-1155 (Cao Dongxing, Ma Hongbo, Zhang Wei. Analysis of flow induced vibration energy harvest characteristic for magnetic piezoelectric cantilever beam. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1148-1155 (in Chinese))
- 吴娟娟,冷永刚,乔海等.窄带随机激励双稳压电悬臂梁响应机制与能量采集研究.物理学报,2018,67(21):79-95 (Wu Juanjuan, Leng Yonggang, Qiao Hai, et al. Research on response mechanism and energy harvest of bistable piezoelectric cantilever beam for narrowband random excitation. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(21): 79-95 (in Chinese))
- 刘琦,秦卫阳,邓王蒸等.惯性固支梁双稳态振动俘能系统设计与实验验证.振动工程学报,2022,35(5):1165-1173 (Liu Qi, Qin Weiyang, Deng Wangzheng, et al. Design and experimental verification of an inertial fixed beam bistable vibration energy harvest system. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(5): 1165-1173 (in Chinese))
- Liu Q, Qin W, Yang Y, et al. Harvesting weak vibration energy by amplified inertial force and multi-stable buckling piezoelectric structure. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 189: 110125
- 马天兵,贾世盛,丁永静等.梯形悬臂梁压电振动俘能器的特性研究.仪表技术与传感器,2021,11:43-47 (Ma Tianbing, Jia Shisheng, Ding Yongjing, et al. Research on the characteristic of a trapezoidal cantilever beam piezoelectric vibration energy harvester. *Instrument Technique and Sensors*, 2021, 11: 43-47 (in Chinese))
- 张忠华,柴君凌,阚君武等.单磁耦合式压电振动俘能器的建模与试验.中国机械工程,2021,32(19):2288-2293,2304 (Zhang Zhonghua, Chai Junling, Kan Junwu, et al. Modeling and testing of a single magnetic coupling piezoelectric vibration energy harvester. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(19): 2288-2293, 2304 (in Chinese))
- 满大伟,王建国.非对称势阱对三稳态压电俘能器性能的影响分析.应用力学学报,2021,38(1):60-69 (Man Dawei, Wang Jianguo. Effecting analysis of asymmetric potential trap on the performance of tristable piezoelectric energy harvester. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(1): 60-69 (in Chinese))
- 满大伟,王建国.梁端磁铁尺寸对三稳态压电俘能器性能影响分析.应用力学学报,2020,37(4):1459-1467,1854 (Man Dawei, Wang Jianguo. Effecting analysis of magnet size on the performance of tristable piezoelectric energy harvester. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(4): 1459-1467, 1854 (in Chinese))
- 满大伟,王建国.基于多尺度法双稳态压电俘能器动力特性分析.应用力学学报,2019,36(1):1-7,249 (Man Dawei, Wang Jianguo. Analysis of dynamic characteristic for bistable piezoelectric energy harvester based on multi-scale method. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(1): 1-7, 249 (in Chinese))
- 李颖,鞠洋,谭江平等.三稳态压电振动能量采集器的动力学建模、仿真与实验研究.传感技术学报,2020,33(8):1098-1109 (Li Ying, Ju Yang, Tan Jiangping, et al. Dynamic modeling, simulation, and experimental research of tristable piezoelectric vibration energy harvester. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(8): 1098-1109 (in Chinese))
- 张强,石抗抗,王海舰等.基于压电俘能装置的刨刀受力检测系统.煤炭科学技术,2017,45(2):136-140 (Zhang Qiang, Shi Kangkang, Wang Haijian, et al. The force detection system for plane irons based on piezoelectric energy harvest device. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 136-140 (in Chinese))
- 张强,石抗抗,王海舰等.基于压电振动俘能装置的采煤机滚筒扭矩检测系统.中国机械工程,2016,27(20):2785-2790 (Zhang Qiang, Shi Kangkang, Wang Haijian, et al. The torque detection system for mining coal machine's roller based on piezoelectric vibration energy harvest device. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(20): 2785-2790 (in Chinese))
- 张强,王海舰,毛君等.基于压电振动俘能的自供电刮板输送机张力检测系统.传感技术学报,2015,28(9):1335-1340 (Zhang Qiang, Wang Haijian, Mao Jun, et al. The tension detection system for self powered scraper conveyor based on piezoelectric vibration energy harvester. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(9): 1335-1340 (in Chinese))
- Xie Z, Zhou S, Xiong J, et al. The benefits of a magnetically coupled asymmetric monostable dual-cantilever energy harvester under random excitation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(20): 3136-3145
- Chen K, Zhang X, Xiang X, et al. High performance piezoelectric energy harvester with dual-coupling beams and bistable configurations. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 561: 117822
- 赵丽娟,王雅东,张美晨等.复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略.煤炭学报,2022,47(1):541-563 (Zhao Lijuan, Wang Yadong, Zhang Meichen, et al. A adaptive mining control strategy for mining coal machine under complex coal seam condition. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 541-563 (in Chinese))
- 张美晨,赵丽娟,王雅东.基于CPS感知分析的煤岩截割状态识别系统.煤炭学报,2021,46(12):4071-4087 (Zhang Meichen, Zhao Lijuan, Wang Yadong. A coal rock mining state recognition system based on CPS perception analysis. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 4071-4087 (in Chinese))
- 张美晨,赵丽娟,李明昊等.基于双向耦合法的采煤机螺旋滚筒振动特性分析及实验研究.煤炭科学技术,2023,出版中 (Zhang

- Meichen, Zhao Lijuan, Li Minghao, et al. Analysis and experimental research on the vibration characteristic of the spiral roller of mining coal machine based on bidirectional coupling method. *Coal Science and Technology*, 2023, in press (in Chinese))
- 22 Xia G, Kang X, Lim C, et al. Parametric excitation analysis for system performance of piezoelectric energy harvesters. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 121: 321-338
- 23 张宇, 汪权. 磁力双稳态压电悬臂梁俘能器的非线性振动特性研究. 计算力学学报, 2017, 34(6): 725-731 (Zhang Yu, Wang Quan. Nonlinear vibration characteristic of magnetic bistable piezoelectric cantilever beam energy harvester. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(6): 725-731 (in Chinese))
- 24 张广义, 金磊, 高世桥等. 双端固支梯形梁压电俘能器机电耦合模型与试验分析. 北京理工大学学报, 2018, 38(6): 600-605 (Zhang Guangyi, Jin Lei, Gao Shiqiao, et al. Electromechanical coupling model and experimental analysis of a double end fixed trapezoidal beam piezoelectric energy harvester. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(6): 600-605 (in Chinese))
- 25 Lu Q, Liu L, Scarpa F, et al. A novel composite multi-layer piezoelectric energy harvester. *Composite Structures*, 2018, 201: 121-130
- 26 高扬, 穆继亮, 何剑等. 煤机设备无线自供电状态监测系统. 机械工程学报, 2020, 56(13): 41-49 (GaoYang, Mu Jiliang, He Jian, et al. Wireless self power supply status monitoring system for mining coal machine. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 41-49 (in Chinese))
- 27 刘建政, 王泽坤, 郝聪聪. 矿用自供电多节点无线传感监测系统. 测试技术学报, 2022, 36(6): 518-524 (Liu Jianzheng, Wang Zekun, Hao Congcong. Self power multi node wireless sensor monitoring system used in coal mine. *Journal of Test And Measurement Technology*, 2022, 36(6): 518-524 (in Chinese))
- 28 解胜东. 用于煤机装备无线自供能检测系统的压电叠堆俘能器研究. [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018 (Xie Shengdong. Research on piezoelectric stack energy harvester for wireless self power detection system in mining coal machine. [Master Thesis]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018 (in Chinese))
- 29 Ding J, Lu M, Deng A, et al. A piezoelectric energy harvester using an arc-shaped piezoelectric cantilever beam array. *Microsystem Technologies*, 2011, 28(8): 1947-1958
- 30 Yang Z, Wang Y, Zuo L, et al. Introducing arc-shaped piezoelectric elements into energy harvesters. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 260-266
- 31 王铎, 孙毅, 程靳. 理论力学. 北京: 高等教育出版社, 2016 (Wang Duo, Sun Yi, Cheng Jin. Theoretical Mechanics. Beijing: Higher Education Press, 2016 (in Chinese))
- 32 王光庆, 崔素娟, 武海强等. 多稳态压电振动能量采集器的动力学模型及其特性分析. 振动工程学报, 2019, 32(2): 252-263 (Wang Guangqing, Cui Sujuan, Wu Haiqiang, et al. Dynamic model and characteristic analysis of a multi-stable piezoelectric vibration energy harvester. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(2): 252-263 (in Chinese))
- 33 孙伟, 齐飞, 韩清凯. 基于自由振动衰减信号包络线法辨识硬涂层复合结构的阻尼特性. 振动与冲击, 2013, 32(12): 50-54 (Sun Wei, Qi Fei, Han Qingkai. Identification of damping characteristic of hard coated composite structure based on free vibration attenuation signal envelope method. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(12): 50-54 (in Chinese))