

放顶煤液压支架尾梁动态特性数值与试验研究

吴明珂¹ 杨善国^{1,2,3} 王瑶¹ 孟彬¹ 杨政¹ 刘后广^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 徐州 221116)

(2. 江苏省矿山智能采掘装备协同创新中心, 徐州 221116)

(3. 智能采矿装备技术全国重点实验室, 徐州 221116)

摘要: 为确定放顶煤过程中煤、矸敏感振动特征参数,提高煤矸智能识别精度,研究液压支架尾梁的动态特性。首先,建立放顶煤液压支架与煤矸的刚柔耦合动力学模型,计算放煤过程中液压支架尾梁的振动加速度;其次,利用变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)对该加速度响应进行分解,得到固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),并分析每个IMF分量的时域和频域特征;然后,采用 t 分布式随机邻域嵌入(t -distributed Stochastic Neighborhood Embedding, t -SNE)方法对这些特征进行降维,并计算不同特征的平均轮廓系数(Average Silhouette Coefficient, ASC),对比研究了煤矸冲击下的尾梁振动特征;最后,搭建放顶煤液压支架试验台,对模型计算结果进行验证。结果表明,尾梁振动加速度IMF分量中的能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差对煤、矸特征较为敏感,可作为煤矸识别的特征参数。

关键词: 放顶煤; 煤矸识别; 有限元法; 离散元法; 变分模态分解

中图分类号: TD823

DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.01.006

0 引言

目前,综放开采技术已经成为我国开采厚煤层的主要方法,也是我国在世界煤炭开采行业的标志性技术^[1]。在实际生产过程中,判断放煤口的含矸率是一个至关重要的环节,直接决定了放煤口的关闭时机。然而,现在这一判断过程大多依赖于工人的直觉和经验,综放工作面环境复杂、湿度高、粉尘多、照明不足,使得工人难以准确判断煤矸的混合情况。这种依赖人工判断的方式经常出现欠放和过放的问题。欠放不仅会降低煤炭的回采率,进而影响经济效益,还会增加采空区自然起火的风险,威胁生产安全;而过放则会使得大量矸石被采出,这不仅会降低煤炭的品质,还会增加后续分选处理的难度和成本。因此,实现综放开采自动化是我国煤炭开采必须攻克的关键问题^[2]。

煤矸的精准识别对实现综放开采自动化具有重要意义^[3],为此,基于伽马射线法、雷达探测法、截割应力分析法、图像识别法、红外探测法、高光谱识别法等煤矸识别技术被提出。然而,上述方法存在着采集信号易受开采环境干扰、系统实现成本高等问题。基于

液压支架振动信号的煤矸识别方法,具有低实现成本、信号易获取、不易受噪声干扰等优点,成为近几年的研究热点,其振动特征参数的确定是该煤矸识别方法的关键。

目前,研究放顶煤液压支架的振动动态特征主要基于井下实地采集的数据,利用信号处理方法或人工神经网络进行训练。然而,以上方法的有效性依赖于准确可靠的数据,特别是对于机器学习算法,需要大量数据样本的支持。同时,井下现场采样存在困难和风险,试验成本高,作业状况恶劣,环境繁杂。此外,顶煤的赋存条件、尾梁的放煤方式、刮板输送机的运动学参数、液压系统的渐变特征以及顶梁与顶板的相互作用等因素都会影响放顶煤过程^[4]。

为解决这一问题,ZHAO等^[5]采用理论分析与数值模拟相结合的方法,基于离散元法-多柔体动力学(Discrete Element Method-Multi Flexible Body Dynamics, DEM-MFBD)双向耦合技术,模拟放顶煤支架放煤过程,获取放顶煤支架尾梁的振动信号,但未考虑颗粒大小及形状对模拟计算的影响。WAN等^[6]基于

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274162); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 吴明珂,男,2000年生,江苏徐州人,硕士研究生; 主要研究方向为煤矸识别; E-mail: wumingke@cumt.edu.cn。

杨善国(通信作者),男,1970年生,安徽安庆人,博士,教授,硕士研究生导师; 主要研究方向为智能矿山开采、声纹识别智能放煤、振动噪声分析与控制; E-mail: ysgcumt@163.com。

引用格式: 吴明珂,杨善国,王瑶,等. 放顶煤液压支架尾梁动态特性数值与试验研究[J]. 机械强度,2025,47(1):50-57.

WU Mingke, YANG Shanguo, WANG Yao, et al. Numerical and experimental study on dynamic characteristics of the tail beam of top coal caving hydraulic support[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(1): 50-57.

LsDyna 中离散元法 (Discrete Element Method, DEM) 和有限元法 (Finite Element Method, FEM) 的耦合方法,模拟了放煤全过程,建立了液压支架尾梁有限元模型和煤矸石颗粒离散元模型,但只指出,煤矸掺混阶段的振动信号特征和放煤阶段的振动信号特征有明显的上升趋势,无法作为煤矸识别的依据。

为此,本文构建了放顶煤液压支架-煤矸耦合动力学模型,分析了放顶煤过程中液压支架尾梁动态特性,提取了煤矸识别敏感特征参数并用试验台进行验证。首先,建立放顶煤液压支架与煤矸的刚柔耦合动力学模型,计算放煤过程中液压支架尾梁的振动加速度;其次,利用变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 对该加速度响应进行分解,得到固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF),并分析每个 IMF 分量的时域和频域特征;然后,采用 t 分布随机邻域嵌入 (t -distributed Stochastic Neighborhood Embedding, t -SNE) 方法对这些特征进行降维,并计算不同特征的平均轮廓系数 (Average Silhouette Coefficient, ASC),筛选出的煤矸识别敏感振动特征为能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差;最后,搭建放顶煤液压支架试验台,对模型计算结果进行验证。研究表明,模拟数据的动态特征与试验数据的动态特征保持一致,验证了模型建立的准确性。这一研究不仅降低了振动数据样本的获取难度,还对实现综放开采自动化具有至关重要的意义。

1 相关理论和总体框架

1.1 相关理论

在模拟颗粒物理状态时,采用了 Hertz-Mindlin 黏结模型。该模型设定了一个以 C 为中心、 r 为半径的圆盘,其上分布着一系列刚度恒定的平行弹簧。这些弹簧模拟了煤岩颗粒间的接触行为,包括法向力 F_n 、切向力 F_t 以及力矩 M 的传递^[7],并承受一定切向、法向方向的运动^[8-10]。通过调整法向和切向黏结强度,颗粒实现了一定的拉伸和剪切承受能力。颗粒间的作用力超过黏结强度,就会导致黏结的破坏。

在进行降维处理时,使用 t -SNE 方法。这是一种基于概率模型的无监督学习算法,可以将高维数据映射到低维空间,使得数据点之间的相似性得到最大化。其基本思想是将高维空间中的数据点映射到低维空间,同时保持数据点之间的局部结构和全局结构的特征^[11]。计算步骤如下^{[12]195-204}:

1) 对于数据集中的每对数据点 x_i 和 x_j , 计算它们之间的相似度:

$$P_{ji} = \frac{\exp[-\|x_i - x_j\|^2 / (2\sigma_i^2)]}{\sum_{k \neq i} \exp[-\|x_i - x_k\|^2 / (2\sigma_i^2)]} \quad (1)$$

式中, σ_i 为用于控制点 x_i 的邻域大小的方差。

2) 计算高维空间 2 个数据点 x_i 和 x_j 的联合概率密度:

$$P_{ij} = \frac{P_{ji} + P_{ij}}{2n} \quad (2)$$

3) 初始化低维空间的样本数据 $Z^{(0)}$ 为

$$Z^{(0)} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \quad (3)$$

4) 基于自由度 1 维的 t 分布计算低维空间样本点的联合概率密度 f_{ij} 和梯度 $\partial C / \partial z_i$:

$$f_{ij} = \frac{(1 + \|z_i - z_j\|_2^2)^{-1}}{\sum_{k \neq l} (1 + \|z_k - z_l\|_2^2)^{-1}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z_i} = 4 \sum_j (P_{ij} - f_{ij})(z_i - z_j)(1 + \|z_i - z_j\|_2^2)^{-1} \quad (5)$$

式中, C 为 K-L 散度 (Kullback-Leibler Divergence) 举例定义的代价函数, $C = \sum_i \sum_j p_{ij} \log_2 \frac{p_{ij}}{f_{ij}}$ 。

5) 更新输出:

$$Z^{(h)} = Z^{(h-1)} + \alpha \frac{\partial C}{\partial Z} + m(h)(Z^{(h-1)} - Z^{(h-2)}) \quad (6)$$

式中, h 为迭代次数; α 为学习率; m 为动量因子; $\partial C / \partial Z$ 为目标函数的梯度。

6) 若满足迭代次数 h , 则停止迭代, 否则返回步骤 4)。

为了量化 t -SNE 得到的图形, 引入了轮廓系数, 这是评估聚类算法效果的常用指标之一。它结合了聚类的凝聚度和分离度, 能够量化聚类结果的紧密度和分离度^[13]。计算步骤如下^{[12]195-204}:

1) 对于每个数据点 i , 计算它与同一簇内所有其他数据点的平均距离 a_i 。

2) 对于每个数据点 i , 计算它与其他簇中所有数据点的平均距离 b_i , 并选择其中最近的一个作为簇间相似度。

3) 对于每个数据点 i , 计算其轮廓系数, 定义为

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (7)$$

则

$$s_i \in [-1, 1] \quad (8)$$

$$s(i) = \begin{cases} 1 - \frac{a(i)}{b(i)}, & a(i) < b(i) \\ 0, & a(i) = b(i) \\ \frac{a(i)}{b(i)} - 1, & a(i) > b(i) \end{cases} \quad (9)$$

轮廓系数接近于 1, 表示簇内数据点相似度高, 不同簇之间的差异很大, 聚类效果较好。轮廓系数接近

于0,表示数据点在簇内的相似性与簇间的差异相当,可能是重叠的聚类或者不明显的聚类。轮廓系数接近于-1,表示数据点更适合分配到其他簇,不同簇之间的差异相比簇内差异更小,聚类效果较差。

1.2 总体框架

总体框架如图1所示,具体步骤如下:

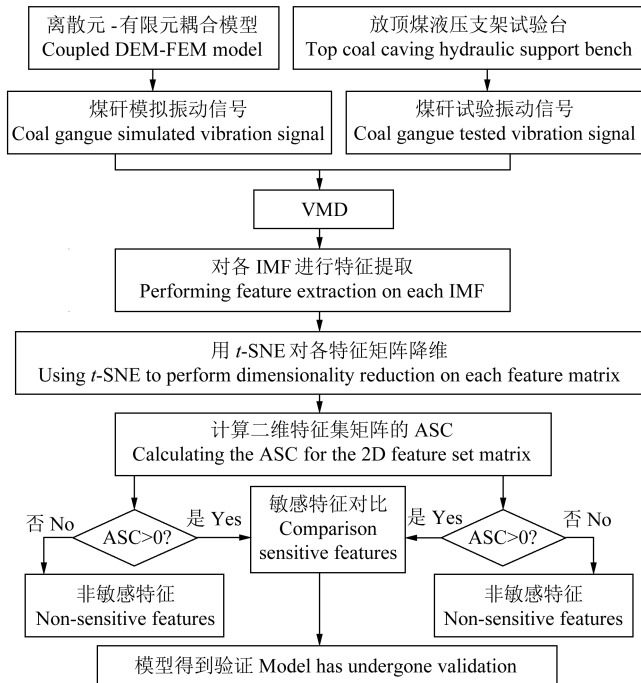


图1 总体框架图

Fig. 1 Overall frame diagram

1) 对模拟数据和试验数据进行变分模态分解,每个信号分解成8个IMF分量。

2) 对于每个IMF分量,进行特征提取并构建数据集矩阵,其中每个特征的矩阵维度为8。

3) 将每个特征的数据集矩阵使用t-SNE算法降维至二维空间。然后,计算每个二维特征数据集矩阵的ASC。ASC是评估特征在空间中聚类效果的指标。因此,如果ASC大于临界值0,则将特征归类为敏感特征;如果ASC小于临界值0,则将特征归类为非敏感特征。

4) 对比模拟数据和试验数据分别得到的敏感特征,验证模型。

2 离散元与有限元刚柔耦合模型建立和分析

2.1 放顶煤液压支架刚柔耦合模型的建立

对放顶煤液压支架进行特征简化及合并,将原有零件合并为7个部件,分别为顶梁、底座、前连杆、后连杆、液压缸、掩护梁、尾梁^[14]。构建出的放顶煤液压支架刚柔耦合模型如图2所示。

为了建立放顶煤液压支架的有限元仿真模型,首先,根据液压支架的实际工作原理,将底座相对于地面固定,并通过添加虚拟旋转副满足各部件之间的运

动关系^[15]。同时,在需要设置旋转副的部件之间建立不同标记点,并将各个标记点与轴孔上的相应点进行连接,以确保轴孔上的点都能受到适当的约束和压力^[16]。将尾梁设为柔性体,其余部分设为刚体。将液压缸等效为弹簧。在分析与建模过程中,忽略尾梁千斤顶在尾梁自身重力或煤和矸石颗粒冲击力作用下液压油溢出导致的等效刚度变化^[17]。同时,通过计算得到弹簧的等效刚度^[18],设置弹簧阻尼系数为12 000。

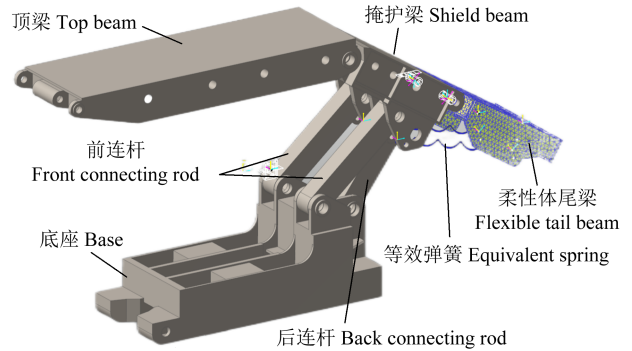


图2 放顶煤液压支架刚柔耦合模型

Fig. 2 Rigid-flexible coupling model of the caving coal hydraulic support

2.2 煤和矸颗粒离散元模型的建立

煤和矸颗粒与材料部分参数设置如表1~表3所示。

表1 颗粒黏结参数

Tab. 1 Particle bonding parameters

颗粒黏结参数 Particle bonding parameter	值 Value
单位面积切向应力 Tangential stress per unit area/Pa	6.0×10^6
单位面积法向应力 Normal stress per unit area/Pa	2.0×10^7
单位面积切向刚度 Tangential stiffness per unit area/(N/m ³)	3.0×10^7
单位面积法向刚度 Normal stiffness per unit area/(N/m ³)	5.0×10^7

表2 颗粒力学参数

Tab. 2 Particle mechanical parameters

颗粒类别 Particle type	密度 Density/(kg/m ³)	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/Pa
煤 Coal	1.5×10^3	0.3	2×10^8
矸 Gangue	2.59×10^3	0.123	1.35×10^{10}

颗粒的形状会显著影响下落运动情况^[19],而放煤过程中存在着大量形状各异的煤和矸石,普通的圆形颗粒无法准确反映形状对其的影响。为准确模拟下落过程和颗粒之间的相互作用^[20],对仿真中选用的颗粒大小和形状进行优化,依据试验用煤和矸石的大小、形状各建立了4种形状的颗粒,如图3所示。

表 3 颗粒运动系数

Tab. 3 Motion coefficient of particles

	颗粒恢复系数 Restitution coefficient of particles	颗粒静摩擦因 数 Static friction coefficient of particles	颗粒动摩擦因 数 Dynamic friction coefficient of particles
煤-煤 Coal-Coal	0.5	0.6	0.1
煤-矸 Coal-Gangue	0.5	0.6	0.05
矸-矸 Gangue-Gangue	0.5	0.65	0.1
煤-液压支架 Coal-Hydraulic support	0.5	0.4	0.1
矸-液压支架 Gangue-Hydraulic support	0.5	0.4	0.1

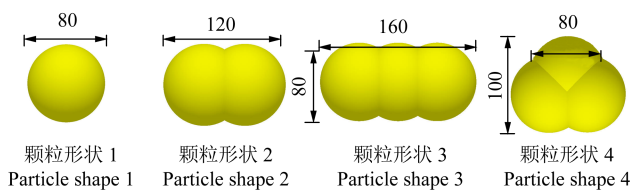


图 3 仿真中煤和矸石颗粒的 4 种形状及大小

Fig. 3 Four shapes and sizes of coal and gangue particles in the simulation

在生成过程中确保 4 种形状的颗粒均占比 25%，从而建立放顶煤液压支架的离散元仿真模型。

2.3 离散元模型与有限元模型的耦合

在模型中,尾梁上方到与顶梁平行的高度覆盖了一层煤,煤的上方再覆盖一层矸石,各 4 种煤和矸石颗粒都被限制在有限的空间内,共有 8 种颗粒,用不同的颜色表示。具体的耦合界面如图 4 所示。

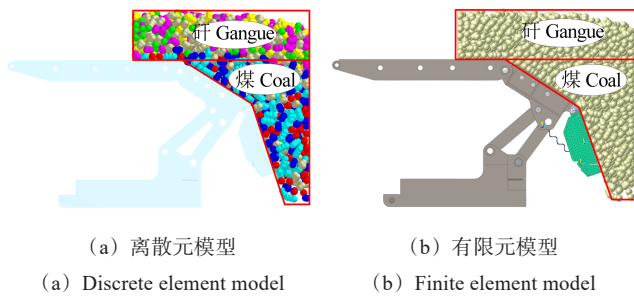


图 4 放顶煤有限元与离散元耦合模拟

Fig. 4 Finite element and discrete element coupling simulation of the top coal caving

设定总仿真时间为 15 s,总步数设为 1 500,设置绘图步长因子的大小为 100,将求解步与报告步进行匹配。同时确保求解器在结束时间步数的时间点进行计算,并使动画步长和绘图步长匹配,计算之后得到 150 000 个数据点。

2.4 振动数据分析与特性研究

选取垂直于尾梁方向的一组加速度数据进行分析^[21],并绘制加速度曲线,如图 5 所示。

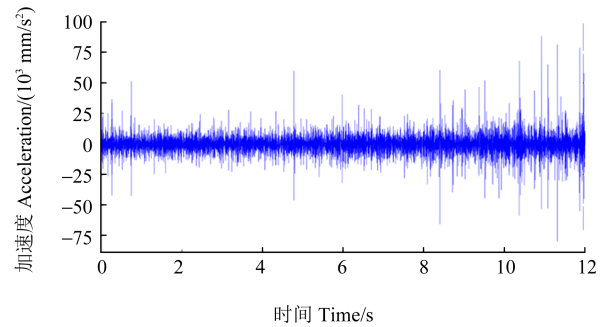
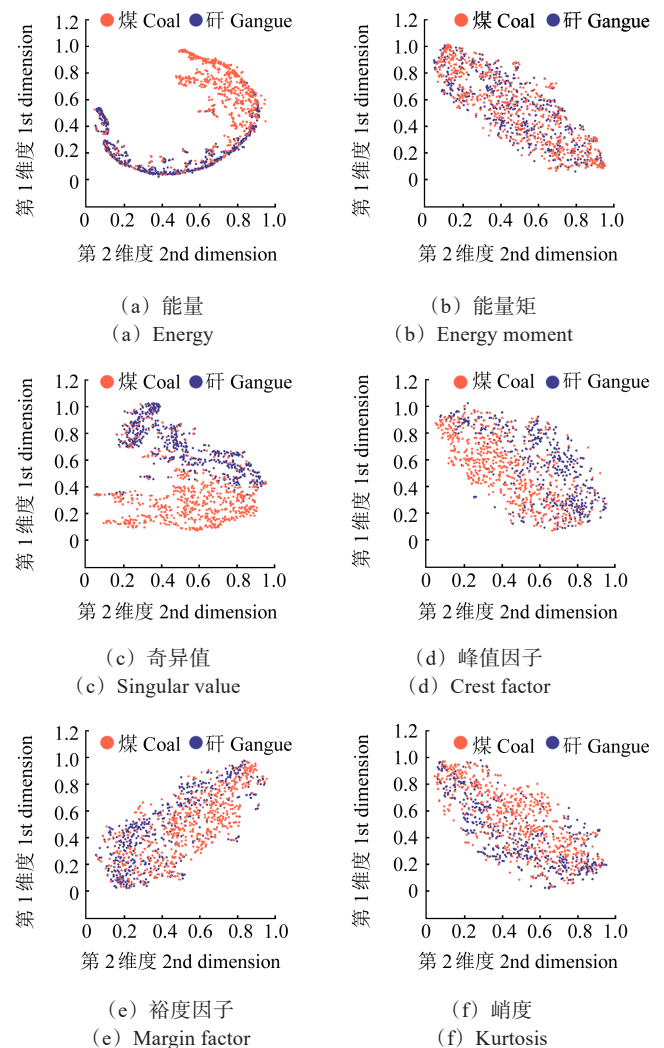


图 5 耦合模拟放顶煤得到的尾梁加速度曲线

Fig. 5 Acceleration curve of the tail beam obtained by coupling simulation of the top coal caving

将加速度数据划分为 2 段,分别为纯煤和纯矸阶段。进行变分模态分解,每个样本分解为 8 个 IMF 分量。将 2 个阶段的加速度数据分别以 0.04 s 为长度进行不重叠截取,每段包含 100 个点,获得 1 100 段数据。对各 IMF 分量进行特征提取,选取能量、能量矩、奇异值、峰值因子、裕度因子、峭度、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差等 10 种特征,每个特征数据集的矩阵大小为 8×1 100,并对其进行归一化处理,对不同特征使用 *t*-SNE 将它们降至二维,如图 6 所示。



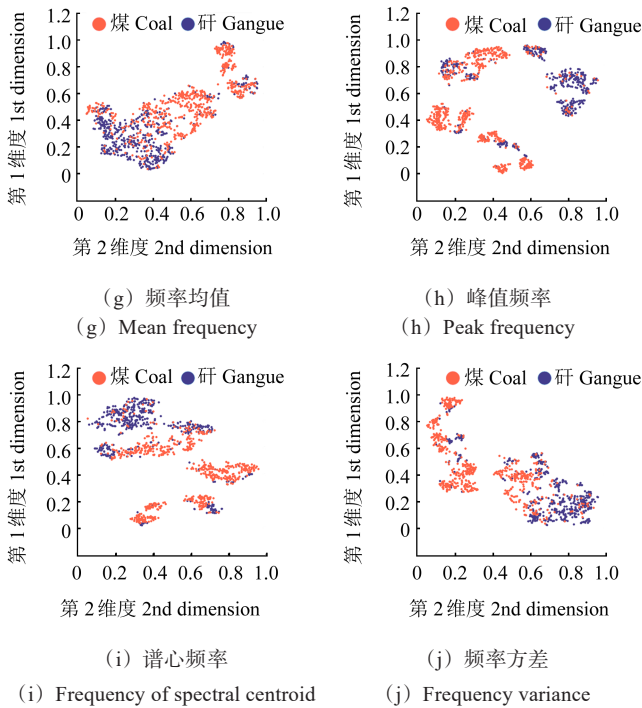


图6 模拟数据VMD分解后各特征 t -SNE 降维图

Fig. 6 t -SNE dimension reduction diagram of each feature after VMD decomposition of the simulation data

对于每个二维特征数据集矩阵,计算其ASC值,并汇总于表4中。

表4 模拟振动信号特征集平均轮廓系数

Tab. 4 Average silhouette coefficient of the feature set of simulated vibration signals

能量 Energy	能量矩 Energy moment	奇异值 Singular value	峰值因子 Crest factor	裕度因子 Margin factor
0.34	-0.002 4	0.38	0.05	0.03
峭度 Kurtosis	频率均值 Mean frequency	峰值频率 Peak frequency	谱心频率 Frequency of spectral centroid	频率方差 Frequency variance
0.03	0.18	0.18	0.23	0.22

由表4可知,模拟振动信号敏感特征为能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差;非敏感特征为能量矩、峰值因子、裕度因子、峭度。由此可见,基于煤矸在尾梁上加速度得到的这些敏感特征更有助于煤矸识别。

3 试验台搭建与数据分析

3.1 试验台搭建

为了进一步验证得到的结论,选用ZF8200/17/35型号的放顶煤液压支架,按照1:5的比例进行等比例缩小^[22],设计放煤滑移试验台模型。在新建立的模型中,顶梁、掩护梁和尾梁都以液压支架同型材料简化,即采用Q690的钢板。顶梁和掩护梁的等效钢板通过螺栓固定在型材上。试验台底部配备了地脚螺栓,可用于

调平或保持特定的坡度。尾梁与掩护梁之间通过金属合页连接,位于金属合页前部的横梁上安装有弹簧阻尼器。在三块钢板上垂直于地面的型材之间均配有透明亚克力板,可以清楚地观察放煤过程,也构成了煤和矸石存储的空间。在尾梁钢板与周围型材之间设置有开关,可以控制尾梁钢板开闭。如图7所示,整个试验系统由试验台、数据采集仪等组成。

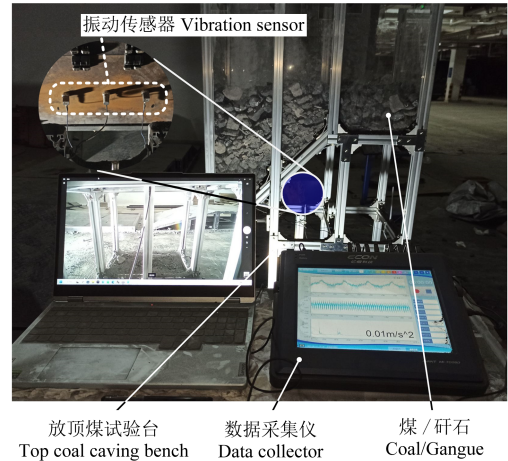


图7 放顶煤试验台总体图

Fig. 7 Overall diagram of the top coal caving bench

3.2 试验过程与数据分析

进行试验前,确保煤和矸石的堆积与仿真一致。完成校准和准备好记录数据后,打开尾梁钢板与型材之间的开关,让煤和矸石开始滑落,同时开始记录振动信号。在煤和矸石完全掉落,停止信号记录并命名保存数据。将掉落的煤和矸石分开,然后重复以上步骤进行多次试验。取单轴加速度的一组加速度曲线,如图8所示。

由图8可以看出,试验得到的加速度曲线与仿真得到的加速度曲线(图5)存在差异。这主要因为试验台是基于实际放顶煤液压支架缩小至1/5制造的,由此引入了新的影响因素。其次,仿真所用煤和矸石形状与试验所用的存在差异,从而导致运动状态存在差异。同时,试验台尾梁材料与仿真材料可能存在区别,导致尾梁在受力时的变形和响应有所不同。此外,试验过程中煤或矸石的碎裂会改变其质量分布和形状,进一步加剧了两者之间的差异。

为了更深入地分析这些差异,将加速度数据划分为两段,即纯煤和纯矸阶段。进行变分模态分解,每个样本分解为8个IMF分量。将两个阶段的加速度数据分别以0.5 s为长度进行重叠截取,重叠率为0.7,每段包含12 800个点,共1 000段数据。对各IMF分量进行特征提取,选取能量、能量矩、奇异值、峰值因子、裕度因子、峭度、频率均值、峰值频率、谱心频率、

频率方差等 10 种特征。每个特征数据集的矩阵大小均为 8×100 , 并对其进行归一化处理, 使用 t -SNE 将不同特征降至二维, 如图 9 所示。对于每个二维特征数据集矩阵, 计算其 ASC 值, 并汇总于表 5 中。

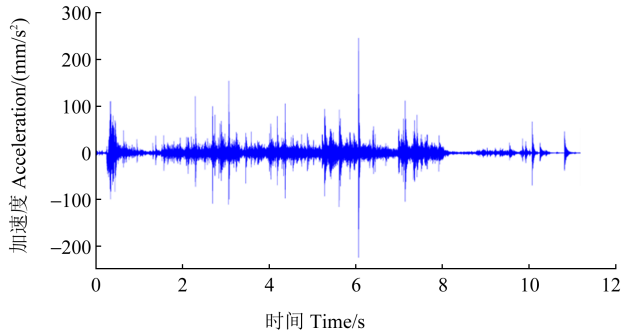


图 8 放顶煤试验得到的尾梁加速度曲线

Fig. 8 Acceleration curve of the tail beam obtained by the top coal caving test

由表 5 可知, 试验振动信号敏感特征为能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差, 非敏感特征为能量矩、峰值因子、裕度因子、峭度。

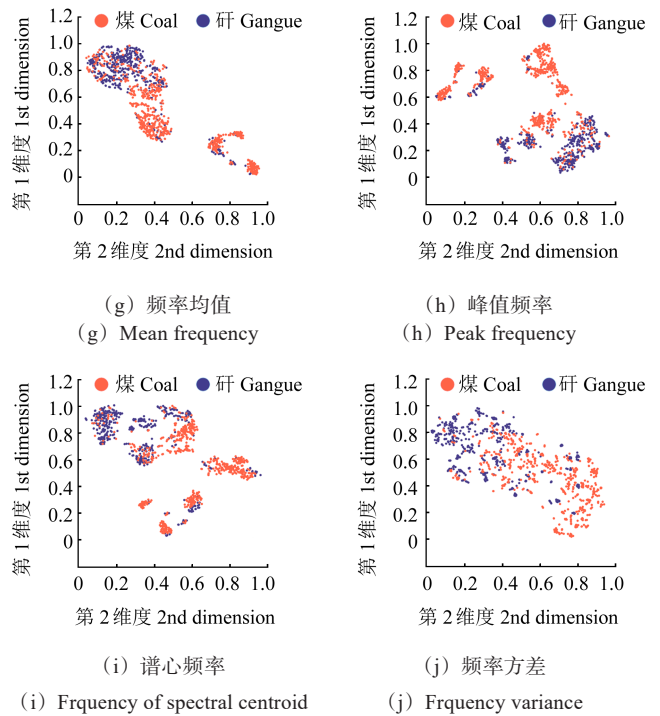
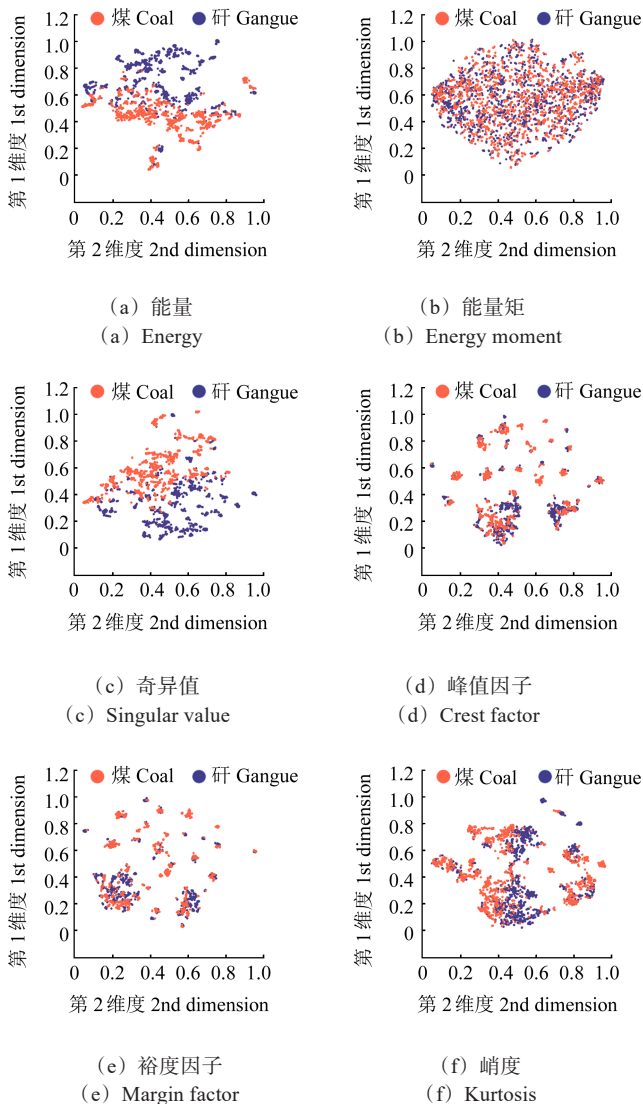


图 9 试验数据 VMD 分解后各特征 t -SNE 降维图

Fig. 9 t -SNE dimension reduction diagram of each feature after VMD decomposition of the test data

表 5 试验振动信号特征集平均轮廓系数

Tab. 5 Average silhouette coefficient of the feature set of test vibration signals

能量 Energy	能量矩 Energy moment	奇异值 Singular value	峰值因子 Crest factor	裕度因子 Margin factor
0.19	0.001	0.21	0.04	0.03
峭度 Kurtosis	频率均值 Mean frequency	峰值频率 Peak frequency	谱心频率 Frequency of spectral centroid	频率方差 Frequency variance
0.04	0.17	0.18	0.22	0.21

虽然仿真结果与试验结果的 ASC 值差别明显, 但通过分析发现, 能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差等特征在两组结果中均表现出远大于其他 4 种特征的趋势。这表明, 尽管细节上存在差异, 但两组结果的总体趋势是一致的。模拟数据与试验数据的敏感特征与非敏感特征表现出一致性, 且两者的数据趋势相吻合。这证明了基于煤矸在尾梁上加速度提取这些敏感特征对煤矸识别具有显著意义, 也说明了所建立的模型具有准确性和可靠性。

4 结论

本文基于有限元-离散元耦合方法建立了放顶煤液压支架与煤矸的耦合动力学模型, 研究煤矸敏感振动特征; 设计试验台, 验证了模型分析结果的可靠性。得出以下结论:

- 1) 对模拟得到的煤矸振动信号利用 VMD 分解和

t -SNE降维,有效规避了虚假分量,减少了数据的冗余信息,并使用ASC指标筛选出能量、奇异值、频率均值、峰值频率、谱心频率、频率方差等敏感特征。

2) 建立放顶煤试验台获取试验数据,证明了所建立的模型具有准确性和可靠性,不仅降低了振动数据样本的获取难度,还可丰富样本数量,对实现综放开采自动化具有至关重要的意义。

参考文献(References)

- [1] 王家臣. 我国综放开采40年及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 83-99.
WANG Jiachen. 40 years development and prospect of longwall top coal caving in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 83-99. (In Chinese)
- [2] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36. (In Chinese)
- [3] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 5-19.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 5-19. (In Chinese)
- [4] 韩立国. 综合放顶煤开采煤矸识别关键技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023: 82.
HAN Ligu. Research on key technology of coal gangue identification in comprehensive caving coal mining [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023: 82. (In Chinese)
- [5] ZHAO L J, HAN L G, ZHANG H N, et al. Dynamic response of a coal rock caving impact tail beam for hydraulic support[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 11535.
- [6] WAN L R, WANG J T, MA D J, et al. Study on coal gangue identification based on vibration and its adaptability to coal-caving process parameters[J]. Shock and Vibration, 2023, 2023: 8345011.
- [7] 钟声. ZF15000/28/52型放顶煤液压支架放煤过程及围岩耦合特性仿真分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017: 21.
ZHONG Sheng. Simulation analysis of the coal caving process and surrounding rock coupling characteristics of ZF15000/28/52 caving hydraulic support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017: 21. (In Chinese)
- [8] 王卫华, 李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(4): 177-181.
WANG Weihua, LI Xibing. A review on fundamentals of distinct element method and its applications in geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(4): 177-181. (In Chinese)
- [9] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.
XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 251-260. (In Chinese)
- [10] SU O, ALI A N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3): 434-442.
- [11] HINTON G E, ROWEIS S. Stochastic neighbor embedding [C]. Proceedings of the 15th International Conference on Neural Information Processing Systems, Vancouver, British Columbia, Canada, 2002: 833-840.
- [12] 陈剑, 程明. 基于tSNE-ASC特征选择和DSmT融合决策的滚动轴承声振信号故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 195-204.
CHEN Jian, CHENG Ming. Fault diagnosis of rolling bearing acoustic vibration signal based on tSNE-ASC feature selection and DSmT evidence fusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 195-204. (In Chinese)
- [13] 朱连江, 马炳先, 赵学泉. 基于轮廓系数的聚类有效性分析[J]. 计算机应用, 2010, 30(增刊2): 139-141, 198.
ZHU Lianjiang, MA Bingxian, ZHAO Xuequan. Clustering validity analysis based on silhouette coefficient[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(Suppl. 2): 139-141, 198. (In Chinese)
- [14] 王家臣, 魏立科, 张锦旺, 等. 综放开采顶煤放出规律三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1905-1911.
WANG Jiachen, WEI Like, ZHANG Jinwang, et al. 3-D numerical simulation on the top-coal movement law under caving mining technique[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1905-1911. (In Chinese)
- [15] 毛君, 刘思阳, 张坤, 等. 基于EDEM的放顶煤液压支架放煤过程的仿真研究[J]. 机械强度, 2019, 41(2): 468-472.
MAO Jun, LIU Siyang, ZHANG Kun, et al. Simulation study on caving process of caving coal hydraulic supports based on EDEM[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(2): 468-472. (In Chinese)
- [16] 王学文, QIN Y, TIAN Y K, 等. 基于EDEM的煤仓卸料时煤散料流动特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 130-134.
WANG Xuewen, QIN Y, TIAN Y K, et al. Analysis on flow features of bulk coal during coal unloading period based on EDEM[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 130-134. (In Chinese)
- [17] 万丽荣, 陈博, 杨扬, 等. 单颗粒煤岩冲击放顶煤液压支架尾梁动态响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2905-2913.
WAN Lirong, CHEN Bo, YANG Yang, et al. Dynamic response of single coal-rock impacting tail beam of top coal caving hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2905-2913. (In Chinese)
- [18] 马明明, 余慧杰, 倪维宇, 等. 剪式座椅悬架系统动态性能分析[J]. 机械强度, 2024, 46(2): 431-438.
MA Mingming, YU Huijie, NI Weiyu, et al. Dynamic performance analysis of scissor seat suspension system[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(2): 431-438. (In Chinese)
- [19] 张成功, 尹振宇, 吴则祥, 等. 颗粒形状对粒状材料圆柱塌落影响的三维离散元模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1197-1203.

- ZHANG Chenggong, YIN Zhenyu, WU Zexiang, et al. Three-dimensional discrete element simulation of influence of particle shape on granular column collapse[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019,40(3):1197-1203. (In Chinese)
- [20] ZHAO L J, HAN L G, ZHANG H N, et al. Influence of particle characteristics on dynamic characteristics of tail beam under coal rock caving impact [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 976210.
- [21] 薛光辉,赵新赢,柳二猛,等. 基于振动信号时域特征的综放工作面煤岩识别[J]. *煤炭科学技术*,2015,43(12):92-97.
- XUE Guanghui, ZHAO Xinying, LIU Ermeng, et al. Time-domain characteristic extraction of coal and rock vibration signal in fully-mechanized top coal caving face[J]. *Coal Science and Technology*, 2015,43(12):92-97. (In Chinese)
- [22] 卢进南,岳建光,谢苗,等. 自主激振式辅助截割相似实验样机研制及其力学实验[J]. *机械强度*,2022,44(2):317-325.
- LU Jinnan, YUE Jianguang, XIE Miao, et al. Development of automated excitation auxiliary cutting similar experiment prototype and its mechanical experiment [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022,44(2):317-325. (In Chinese)

Numerical and test study on dynamic characteristics of the tail beam of top coal caving hydraulic supports

WU Mingke¹ YANG Shanguo^{1,2,3} WANG Yao¹ MENG Bin¹ YANG Zheng¹ LIU Houguang^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(2. Jiangsu Province and Education Ministry Co-sponsored Collaborative Innovation Center of Intelligent Mining Equipment, Xuzhou 221116, China)

(3. National Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to determine the sensitive vibration characteristic parameters of coal and gangue in the process of top coal caving and improve the intelligent identification accuracy of coal and gangue, the dynamic characteristics of the tail beam of the hydraulic support were studied. Firstly, the rigid-flexible coupling dynamic model of top coal caving hydraulic support and coal gangue was established, and the vibration acceleration of the tail beam of the hydraulic support in the process of coal caving was calculated. Secondly, the acceleration response was decomposed by variational mode decomposition (VMD) to obtain the intrinsic mode function (IMF), and the time domain and frequency domain characteristics of each IMF component were analyzed. Thirdly, the *t*-distributed stochastic neighborhood embedding (*t*-SNE) method was used to reduce the dimension of these features, and the average silhouette coefficient (ASC) of different features was calculated. The vibration characteristics of the tail beam under the impact of coal gangue were compared and studied. Finally, the bench of the top coal caving hydraulic support was built to verify the calculation results of the model. The results show that the energy, singular value, mean frequency, peak frequency, spectral centroid and frequency variance in the IMF component of the vibration acceleration of the tail beam are sensitive to the characteristics of coal and gangue, which can be used as the characteristic parameters of the coal and gangue identification.

Key words: Top coal caving; Coal gangue identification; Finite element method; Discrete element method; Variational mode decomposition

Corresponding author: YANG Shanguo, E-mail: ysgcumt@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52274162); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

Received: 2024-05-16 Revised: 2024-06-11