

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.001

基于钻进参数的层状岩体岩层界面识别研究*

宋纹瑶¹, 郭连军¹, 邓丁¹, 高崇², 赵鑫³, 高久庆³

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2. 中铁十九局集团有限公司, 北京 100171;

3. 中铁十九局集团 矿业投资有限公司, 北京 100161)

摘要: 在采矿工程中, 钻爆法是一种广泛应用的开挖技术, 岩体的结构面直接影响着爆破应力波的传播和衰减, 准确高效的岩层界面位置获取对钻爆法作业效率和安全开展具有重要意义。依托自主研发的室内数字钻进试验平台, 对分层类岩石试件进行切削钻孔试验, 获取钻进工作参数和振动响应信号, 基于 GA-K-means 算法建立以层状岩体界面识别为目标的预测模型, 并采用 CH 指数作为适应度指标, 提升模型全局搜索能力。通过对比分析, 钻进振动响应和钻进工作参数的累计误差最小分别 2.02 mm 和 6.08 mm, 前者较后者对岩层变化更为敏感, 岩层界面识别效果更好。钻进参数因钻头破岩不均易产生较大偏差, 振动响应信号受岩层强度变化影响显著, 预测界面位置位于实际界面之前, 揭示了其超前预测潜力。提出了一种基于特征加权和聚类分析的方法, 以提高岩层界面识别的准确性和效率, 与 K-means 算法相比, GA-K-means 算法识别精度提升了 31% 以上。结果表明: GA-K-means 岩层界面识别模型能够有效地从复杂钻进参数中提取出关键岩层信息, 为地质勘探提供重要参考。

关键词: 钻进参数; 层状岩体; 界面识别; K-means 算法; 遗传算法

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0001-08

Research on Identification of Bedding Planes in Stratified Rock Mass based on Drilling Parameters

SONG Wen-yao¹, GUO Lian-jun¹, DENG Ding¹, GAO Chong², ZHAO Xin³, GAO Jiu-qing³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100171, China; 3. China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: In the field of mining engineering, the drill-and-blast method is a prevalent excavation technique. The structural planes of the rock mass directly influence the propagation and attenuation of blasting stress waves, thereby rendering the precise and efficient determination of rock layer interface positions essential for the operational efficiency and safety of drill-and-blast operations. This study leverages a self-developed indoor digital drilling test platform to conduct cutting and drilling experiments on layered rock-like specimens, obtaining drilling operational parameters and

收稿日期 (Date of reception): 2025-01-15

网络首发日期 (Published online): 2025-04-10

作者简介: 宋纹瑶 (1995-), 女, 山东莱州市, 硕士研究生, 主要从事岩土爆破等方面的研究工作, (E-mail) sj5526@163.com。

通信作者: 郭连军 (1963-), 男, 辽宁北票市, 教授、博士生导师、博士, 主要从事采矿工程及爆破理论技术相关方面的研究工作, (E-mail) guolj@sut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51974187) 基于微观特征的岩石冲击破碎能量耗散机理研究

About the author: SONG Wen-yao (1995-), female, born in Laizhou, Shandong Province, postgraduate student, engaged in research work of rock and soil blasting, (E-mail) sj5526@163.com.

Corresponding author: GUO Lian-jun (1963-), male, born in Beipiao, Liaoning Province, Professor, doctoral supervisor, Ph. D., mainly engaged in research on mining engineering and blasting theory technology, (E-mail) guolj@sut.edu.cn.

Fund Programs: Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51974187) Study on the Energy Dissipation Mechanism of Rock Breakage under Impact based on Microscopic Features

vibration response signals. A prediction model for identifying layered rock mass interfaces is established using the GA-K-means algorithm, with the CH index employed as a fitness metric to enhance the model's global search capability. A comparative analysis demonstrates that the cumulative errors for drilling vibration response and drilling operational parameters are 2.02 mm and 6.08 mm, respectively, indicating that the former exhibits greater sensitivity to variations in rock layers and provides more accurate interface identification outcomes. Drilling parameters are prone to significant deviations due to uneven rock breaking by the drill bit, while changes in these parameters notably influence vibration response signals in rock layer strength. Predicted interface positions often occur ahead of actual interfaces, revealing their potential for early prediction. This paper proposes a method based on feature weighting and cluster analysis to improve the accuracy and efficiency of rock layer interface identification. Compared to the K-means algorithm, the GA-K-means algorithm achieves over 31% higher identification accuracy. The results demonstrate that the GA-K-means rock layer interface identification model can effectively extract key rock layer information from complex drilling parameters, providing valuable references for geological exploration.

Key words: drilling parameters; layered rock masses; interface recognition; K-means algorithm; genetic algorithm

我国地质条件错综复杂,岩体结构在空间上展现出显著的差异性,因此,精确且高效地掌握岩层分布信息,对于确保采矿工程的安全绿色进行至关重要。在采用爆破等开采技术时,这一信息的准确性更显得尤为重要。岩体的结构面直接影响着应力波的传播和衰减,对岩石的爆破效果起着至关重要的作用^[1-3]。当露天矿山在穿孔爆破过程中遇到断层时,应针对不同的位置关系,合理采用“避”、“控”、“炸”的方法,最大限度降低断层的不利影响^[4]。

有一部分学者采用钻孔图像识别的方法进行岩层界面识别^[5-8],相较于基于随钻测量技术的钻探方法,这种方法成本较高且效率提升有限。机械钻孔是钻爆技术必要的施工工序,且钻头与岩体有着最直接的接触,钻进工作参数和钻进振动响应与岩石破碎之间有着密切关联,据此一些学者提出了基于随钻测量技术的钻探方法,可在不影响钻机正常工作的前提下获取钻机工作参数、记录并提取其中的有效信息,进而实现岩体结构的粗略判识。侯仕军等研发了露天潜孔钻机随钻测量系统^[9],实现了钻进速度等参数的实时连续测量、采集、计算、存储、显示和远程传输。提出了一种反映岩性变化的数据整合方法,并借助钻孔成像试验分析了随钻测量技术在岩体结构面识别中的可行性,结果表明钻进速度和回转力矩对岩体结构响应最为灵敏。刘灿灿提出了巷道顶板岩层类型和岩层界面的随钻识别方法^[10]。通过实验室模拟不同岩层钻进过程发现,以钻速为输入参数,采用变点检测法可以有效识别岩层界面位置。丁宇开展了界面模型钻进数值模拟^[11],建立了基于钻杆振动响应、钻速和转速的岩层界面自动识别方法,钻杆振动响应的岩层识别效果优于转速和钻速。

以上研究为岩层识别基础理论构建和工程应用提供了重要参考,但所应用的绝大多数是钻机钻进过程中产生的工作参数,例如转速、扭矩和压力等^[12,13],与此同时基于钻进振动响应的岩层界面识别研究较少,而相较于钻进工作参数,钻进振动响应更容易获取。因此钻进振动响应与岩层界面之间的关联还需进一步研究。本文以自主研发的钻进试验台为基础,分别以钻进工作参数和振动响应信号为数据集,基于 GA-K-means 算法建立以层状岩体界面识别为目标的预测模型,对比分析两种数据集的识别效果以及模型的性能表现。本文的研究将为基于数字钻探实时获取岩体结构实现提供一种新的解决途径。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验所用设备为自主研发的室内数字钻进试验平台,如图 1 所示。该设备配备转速、扭矩、压力以及振动传感器,可实时记录主机钻进过程中的工作参数和振动数据。

本室内数字钻进试验平台可通过更换钻头实现试件的取芯和切削钻孔。本试验采用金刚石复合片全断面钻头对试件进行切削钻孔,钻头直径为 50 mm,如图 2 所示。

1.2 试验设计

试验所用试件为类岩石砂浆试件,用石膏粉控制试件强度^[14,15],按 2 种不同配合比分 3 层浇筑,考虑到试件托盘尺寸为边长 100 mm 的正方形,故试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件共 3 组,如图 3(a)所示,28 d 养护后测得分层界面位置分别为 34.50 mm - 67.30 mm, 30.60 mm -

73.80 mm, 32.10 mm - 69.70 mm。另外分别制作 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,用于单轴抗压强

度试验。配合比及单轴抗压强度见表 1。辅助添加剂为减水剂和缓凝剂。

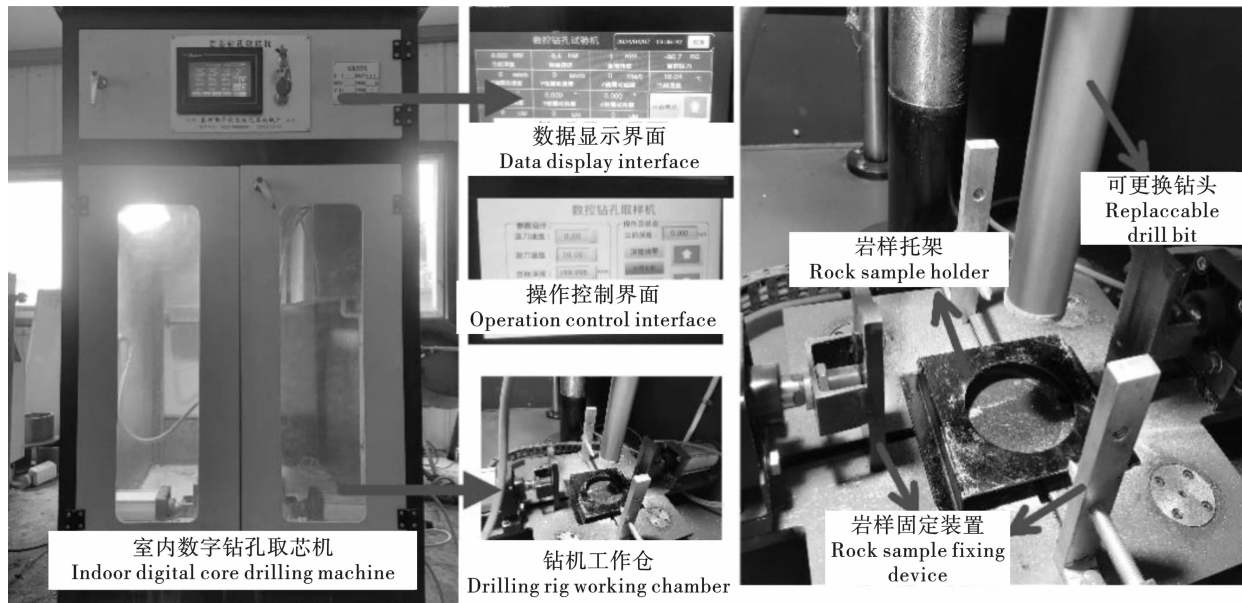


图 1 室内数字钻孔取芯机

Fig. 1 Indoor digital drilling and coring machine

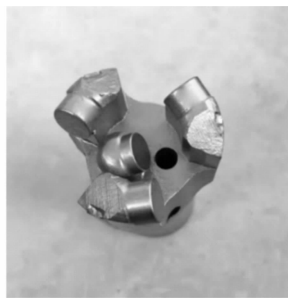


图 2 金刚石复合片钻头

Fig. 2 Diamond composite drill bits

室内数字钻孔机通过控制钻进速度恒定,自动调整钻进压力和转速。在正式试验前分别在 1 mm/min、2 mm/min、3 mm/min 钻进速度下进行预试验,结果发现在 1 mm/min、2 mm/min 钻进速度下的试件能够被完整钻通,在 3 mm/min 钻进速度下,试件尤其是花岗岩和石灰岩易发生剪切崩裂,无法取得完整试验数据。考虑 1 mm/min 钻进速度较慢,提取的岩性信息不全,本文试验钻进速度均采用

2 mm/min。数据采集频率为 1 Hz。在钻进开始前,用气压固定装置夹紧试件,拧紧前后辅助固定螺栓,防止试件在钻进中发生位置变动,同时也会对试件施加一定量的围压,可以减小试件尺寸的影响。钻进后试件如图 3(b) 所示。

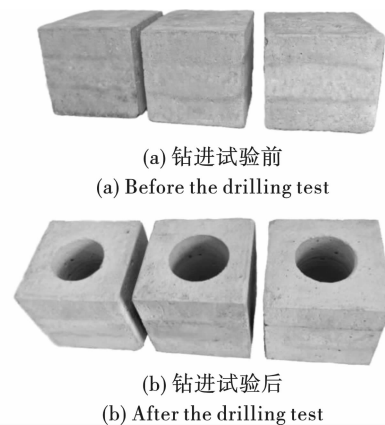


图 3 分层试件

Fig. 3 Layered specimens

表 1 配合比及单轴抗压强度

Table 1 Mixing ratio and uniaxial compressive strength

岩石类型 Rock type	水泥 Cement	砂 Sand	石膏 Gypsum	水 Water	单轴抗压强度/MPa Uniaxial compressive strength
类砂岩 (LS) Sandstone-like	1.2	1.0	0.8	0.5	16.57
类石灰岩 (SH) Limestone-like	1.0	0.7	0	0.4	29.11

2 岩层界面识别模型

将钻进工作参数和振动信号数据分别作为输入数据集,建立 GA-K-means 岩层界面识别模型,并对识别效果进行比较分析。

2.1 GA-K-means 算法介绍

K-Means 算法是一种聚类分析 (cluster analysis) 的算法,是一种无监督机器学习方法,可以将数据按自身内在的特征进行归类,划分成不同聚类簇,使同簇相似性最大,而不同簇间数据差异性最强,便于特征提取和判别分析。K-means 是最经典的聚类算法,原理简单且功能强大^[16]。以 MSE 作为 K-Means 度量聚类质量的目标函数,可表示为

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{X \in Y_i} (Y_i - X)^2 \quad (1)$$

聚类中心可表示为

$$Y_i = \frac{1}{m_i} \sum_{X \in Y_i} X \quad (2)$$

式中: n 是数据点的总数; m_i 是第 i 个簇中数据点的数量; X 是簇 Y_i 中的数据点。

GA-K-means 算法引入了遗传算法作为聚类的辅助手段,用于优化 K-means 聚类的特征权重。每个个体代表一组特征值权重,在优化后的特征空间上进行 K 均值聚类,生成聚类中心。随后通过选择、交叉、变异等遗传操作,不断迭代进化种群,寻找最优的权重下的聚类中心。

引入 Calinski-Harabasz 指数来作为 GA-Kmeans 算法的适应度指标^[17],CH 指数的计算基于簇间离散度和簇内离散度。对于一个包含 n 个样本,被划分为 k 个簇的聚类结果,设样本数据矩阵为 XX ,簇中心矩阵为 μ 。首先计算簇间离散度矩阵 B 和簇内离散度矩阵 W 。

$$B = \sum_{i=1}^k n_i (\mu_i - \mu) (\mu_i - \mu)^T \quad (3)$$

式中: n_i 是第 i 个簇的样本数量; μ_i 是第 i 个簇的中心; μ 是所有样本的中心。

$$W = \sum_{i=1}^k \sum_{X \in C_i} (x - \mu_i) (x - \mu_i)^T \quad (4)$$

式中, C_i 表示第 i 个簇。CH 指数计算公式为

$$CH(k) = \frac{tr(B)}{tr(W)} \times \frac{n-k}{k-1} \quad (5)$$

式中, $tr(B)$ 和 $tr(W)$ 分别表示矩阵 B 和 W 的迹。

CH 指数从整体数据的角度,基于簇间离散度和簇内离散度来衡量聚类质量,更侧重于反映类与类之间的分离程度和类内的紧密程度在整体上的

种平衡。一般来说,CH 指标的值越大,说明聚类效果越好,意味着簇间离散度相对较大,而簇内离散度相对较小。

GA-K-means 聚类算法是结合了遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的全局搜索能力的一种聚类方法,能够自动搜索和优化特征的权重,避免了手动选择特征和确定权重的主观性和不确定性。这有助于找到最能反映数据内在结构的特征组合和权重分配。遗传算法具有全局搜索的能力,相较于一些基于梯度的优化方法,更有可能找到全局最优或接近全局最优的特征权重解。见图 4。

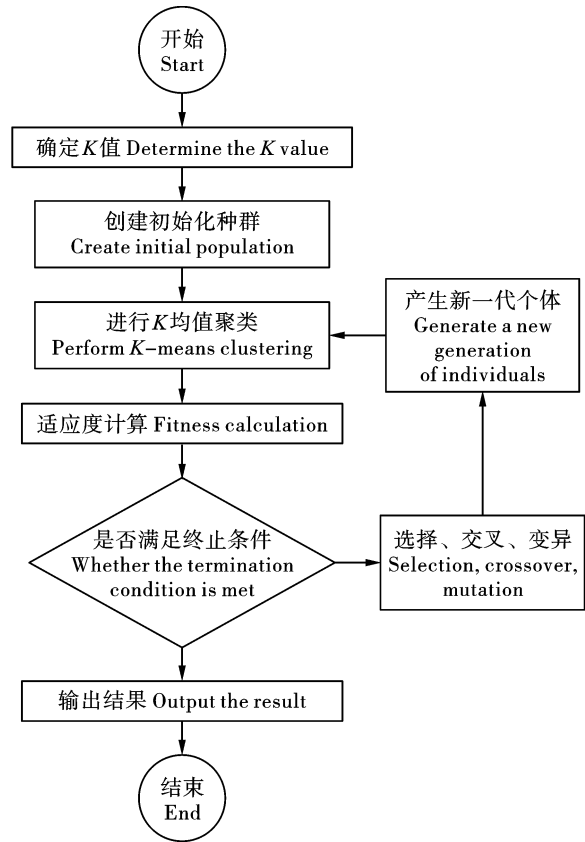


图 4 GA-K-means 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of GA-K-means algorithm

2.2 识别模型构建和结果

将采集到的数据,包括时间、钻进深度、钻进压力和振动加速度等参数,以 Excel 文件形式存储,并对数据进行标准化处理,以消除不同参数之间的量纲差异,提高聚类分析的准确性。通过 python 实现数据处理以及模型建立,最终以图像形式展示识别结果。图中不同颜色散点代表不同岩层预测结果,实线为实际界面位置,虚线为预测界面位置。

2.2.1 钻进工作参数识别模型

K 值的选择对 K-means 算法聚类效果影响显著,本文采用 Elbow Method 求得 $K = 3$,这与类岩石

试件层数一致,表明该方法可以在界面数量未知的情况下准确获取 K 值。

岳小磊等通过研究发现钻进速度、压力、扭矩与岩层都具有高度相关性^[18]。曹瑞琅等建立基于压力、扭矩、转速的钻进过程指数^[19],在岩体完整性表达上传统的钻进速度更为合理。因此,选用钻进压

力、转速和扭矩进行 K-means 聚类分析,其识别结果如图 5(a)、(b)和(c)所示。基于 GA-K-means 算法,选择钻进压力、转速和扭矩作为聚类分析的特征值,采用遗传算法对特征进行加权处理,得到优化后的最佳权重分别是 0.298、0.227、0.475,识别结果如图 5(d)所示。

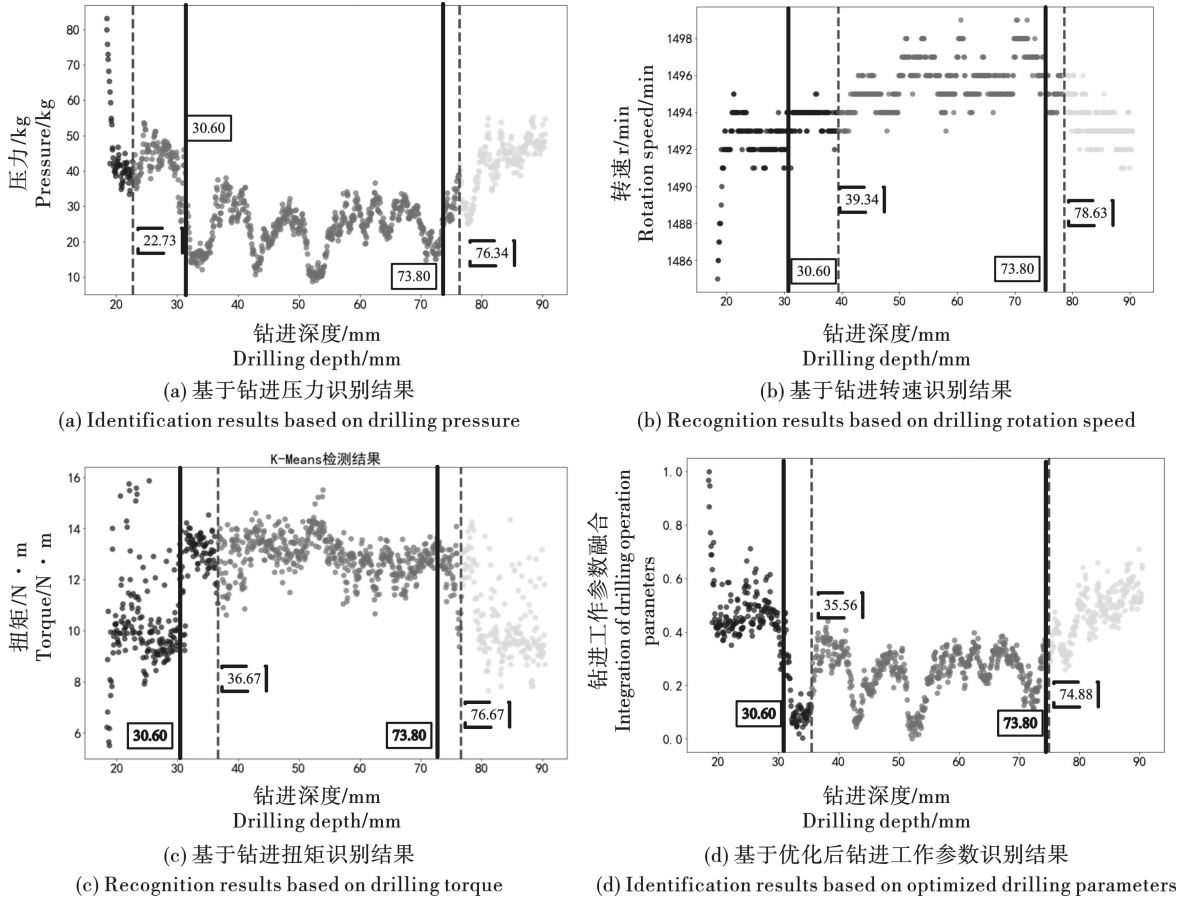


图 5 基于钻进工作参数的岩层界面识别结果

Fig. 5 Results of rock interface identification based on drilling work parameters

将三组试件的识别误差取平均值,进行统计得到表 2,其中,正值表示预测界面在实际界面之后,

负值表示预测界面在实际界面之前。

表 2 基于钻进工作参数岩层界面识别统计

Table 2 Rock interface recognition statistics based on the drilling work parameters

数据类型 Data type	界面 1 误差/mm Interface 1 error	界面 2 误差/mm Interface 2 error	累计绝对误差/mm Cumulative absolute error
钻进转速 Drilling rotation speed	9.12	2.81	11.93
钻进压力 Drilling pressure	-8.96	2.38	11.34
钻进扭矩 Drilling torque	6.07	2.70	8.77
钻进工作参数融合 Integration of drilling operation parameters	4.92	1.16	6.08

如表2所见,以累计绝对误差为判断依据,基于钻进工作参数的岩层识别结果效果依次是钻进扭矩 > 钻进压力 > 钻进转速,累计误差分别为 8.77 mm、11.34 mm 和 11.93 mm。钻进扭矩在界面 1、2 的识别效果均优于钻进压力和转速;钻进压力在界面 2 的识别误差比钻进转速的小,而钻进转速在界面 1 的识别效果较好,整体来看这两种数据的预测准确率相差不大。钻进压力、扭矩、转速在界面 2 的识别误差均小于 3 mm,而界面 1 的识别误差均大于 5 mm,这是由于在界面 1 钻进深度小、钻头破岩不均、转速不稳定等,而在界面 2 处钻进深度大、钻进

工作趋于稳定、钻头破岩均匀原因造成等的;采用遗传算法进行加权处理后的钻进工作参数识别误差降低 31% 以上。

2.2.2 振动响应识别模型

基于 K-means 算法建立岩层界面识别模型,分别对振动位移、速度和加速度进行聚类分析,其识别结果如图 6(a)、(b) 和 (c) 所示。基于 GA-K-means 算法,选择振动位移、速度和加速度作为聚类分析的特征值,采用遗传算法对特征进行加权处理,得到优化后的最佳权重分别是 0.237、0.357、0.406,识别结果如图 6(d) 所示。

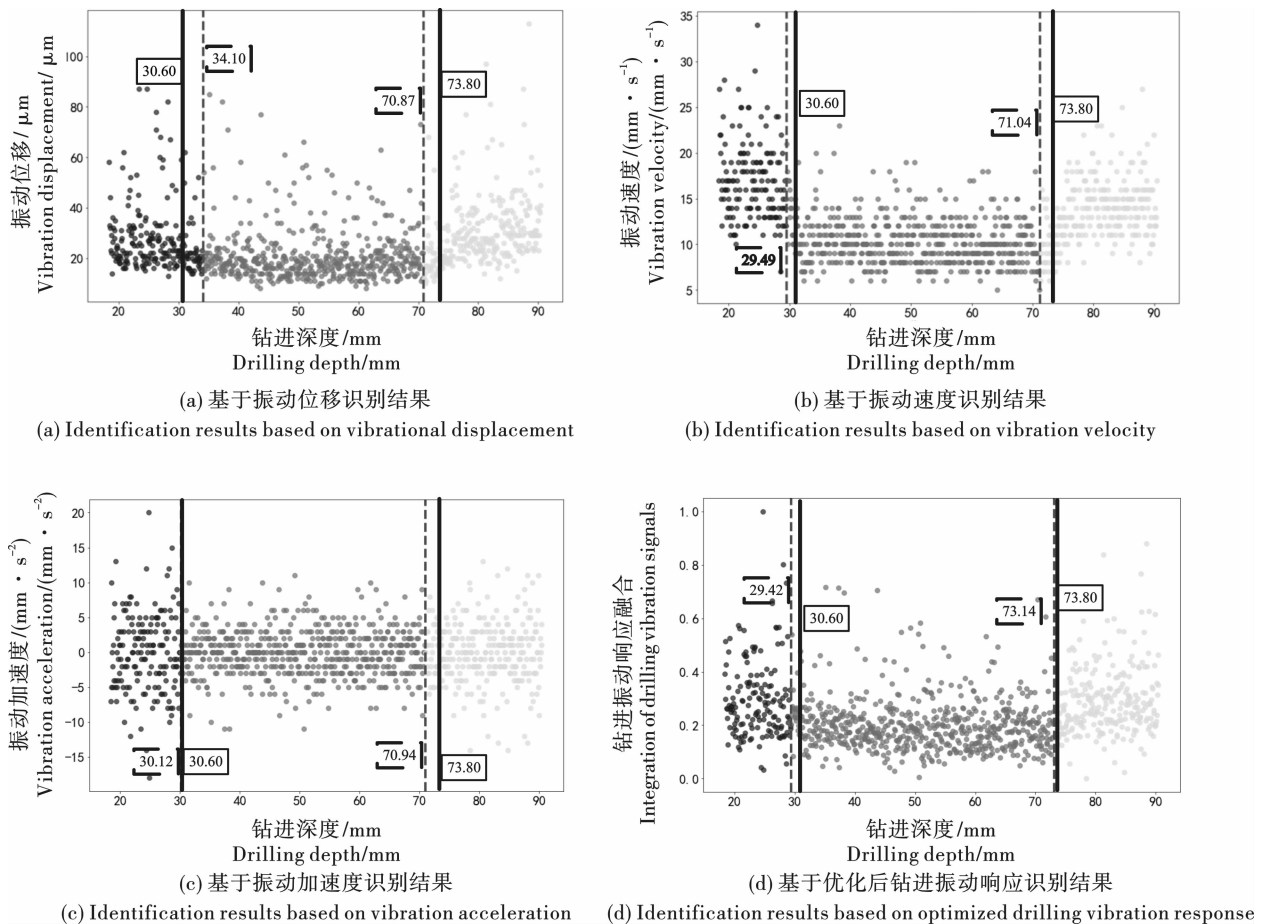


图6 基于振动响应的岩层界面识别结果

Fig. 6 Results of rock interface identification based on vibration response

由表3可见,基于振动响应的岩层识别结果效果依次是振动加速度 > 振动速度 > 振动位移,累计误差分别为 3.89 mm、4.80 mm 和 7.01 mm,在各界面误差均小于 5 mm;误差基本为负值说明预测界面位置位于实际界面之前,这是由于钻头与岩体碰撞产生的钻杆振动受应力波传递和透射系数影响显著,振动的变化会受到下一层岩石的影响;采用 GA-K-means 算法的识别效果提升 48% 以上。

2.3 模型效果分析

通过对比分析节 2.2.1 与 2.2.2 以钻进工作参数和钻进振动响应分别作为数据集识别结果可知:振动位移、振动速度和振动加速度 3 种振动响应数据累计误差为 15.07 mm,钻进压力、扭矩和转速 3 种钻进工作数据累计误差为 32.04 mm,振动响应识别结果整体优于钻进工作参数。在界面 1 的识别中,钻进振动响应累计误差均小于 5 mm,优于钻进

工作参数,这说明钻机工作情况对于振动响应的影响较小,对钻进工作参数的影响较大,这是由于钻进工作参数主要由破碎岩石的特性决定,在钻头完全进入岩层中时才会逐渐趋于稳定导致。对于界面2的识别,钻进工作参数和钻进振动响应预测绝对误差相差仅为0.22 mm,可见二者在界面2的识别效

果相差不大。振动响应预测界面位置在实际界面之前,这是由于振动响应受岩层强度影响较大,对于岩体结构变化更为敏感,进一步可以利用这一特点进行地层超前预测。无论是钻进工作参数和钻进振动响应在采用遗传算法优化权重后,识别结果都有显著提高,误差幅度降低31%以上。

表3 基于钻进振动响应岩层界面识别统计

Table 3 Drilling vibration response based rock interface identification statistics

数据类型 Data type	界面1 误差/mm Interface 1 error	界面2 误差/mm Interface 2 error	累计绝对误差/mm Cumulative absolute error
振动位移 Vibration displacement	4.31	-2.70	7.01
振动速度 Vibration velocity	-2.24	-2.56	4.80
振动加速度 Vibration acceleration	-1.48	-2.41	3.89
钻进振动响应融合 Integration of drilling vibration response	-1.69	-0.33	2.02

3 结论

以岩石室内钻进试验为基础,分别以钻进工作参数和钻进振动信号为输入,岩石界面位置为输出,建立了K-means岩层界面识别模型和GA-K-means岩层界面识别模型。经对比分析,得到如下结论:

1)在钻进过程中,钻进扭矩、压力、转速以及振动位移、速度、加速度的变化与岩体结构之间有一定的相关性,所构建的岩层界面识别模型累计误差在12 mm以下,均可较好地预测出岩层界面位置。

2)基于钻进振动响应建立的岩层界面识别模型识别效果更好,3种数据累计误差为15.07 mm,受钻机工作状态和岩层强度分布的影响,钻进工作参数在浅层位置的界面识别效果出现较大偏差,3种参数累计误差为32.04 mm。

3)构建的GA-K-means岩层界面识别模型可以较为准确地预测出层状岩体岩层界面位置,与K-means算法相比准确率提升31%以上,引入CH指数来作为适应度指标,以提高岩层界面识别的准确性。本预测模型可为地质勘探提供重要参考。

4)所构建的GA-K-means岩层界面识别模型直接采用原始数据作为输入,预测精度仍有提升空间,可寻找有效的数据预处理方法使得预测精度更进一步。以室内实验为主的研究仅提供了研究方法和思路,现场应用时,还需考虑实际应用的钻机类型,结合地应力等其他因素,对输入数据和模型进行调整。

参考文献 (References)

- [1] 陈建平,高文学,刘运通. 岩体爆破结构效应研究[J]. 爆破,2005(2):30-33.
- [1] CHEN Jian-ping,GAO Wen-xue,LIU Yun-tong. Study on the structure planes effect of rock mass blasting[J]. Blasting,2005(2):30-33. (in Chinese)
- [2] 叶海旺,周建敏,余红兵,等. 岩体结构面对爆破地震波传播规律影响分析[J]. 爆破,2016,33(1):12-18.
- [2] YE Hai-wang,ZHOU Jian-min,YU Hong-bing, et al. Influence of rock structure planes on propagation of blasting seismic wave[J]. Blasting,2016,33(1):12-18. (in Chinese)
- [3] 傅鹏. 岩体结构面对台阶爆破效果影响研究[J]. 爆破,2023,40(1):77-84.
- [3] FU Peng. Influence of rock mass structure on bench blasting effect[J]. Blasting, 2023, 40(1):77-84. (in Chinese)
- [4] 常治国,薛婷婷,陈亚军,等. 岩体断层位置对硐室爆破效果影响[J]. 煤矿安全,2015,46(3):41-43,47.
- [4] CHANG Zhi-guo,XUE Ting-ting,CHEN Ya-jun, et al. Influence of fault location on chamber blasting effect[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(3):41-43,47. (in Chinese)
- [5] 李炜,刘耕,葛云峰,等. 基于深度学习的钻孔图像岩体结构面识别[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(3):702-720.
- [5] LI Wei,LIU Geng,GE Yun-feng, et al. Detection of rock discontinuities in borehole images based on a deep learn-

- ing method[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(3):702-720. (in Chinese)
- [6] 刘飞跃,刘一汉,杨天鸿,等. 基于岩芯图像深度学习的矿山岩体质量精细化评价[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(5):968-974.
- [6] LIU Fei-yue, LIU Yi-han, YANG Tian-hong, et al. Meticulous evaluation of rock mass quality in mine engineering based on machine learning of core photos[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5):968-974. (in Chinese)
- [7] 夏 丁,葛云峰,唐辉明,等. 数字钻孔图像兴趣区域分割与岩体结构面特征识别[J]. *地球科学*, 2020, 45(11):4207-4217.
- [7] XIA Ding, GE Yun-feng, TANG Huiming, et al. Segmentation of region of interest and identification of rock discontinuities in digital borehole images[J]. *Earth Science*, 2020, 45(11):4207-4217. (in Chinese)
- [8] Azarafa M, Ghazifard A, Akgün H, et al. Development of a 2D and 3D computational algorithm for discontinuity structural geometry identification by artificial intelligence based on image processing techniques[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78:3371-3383.
- [9] 侯仕军,丁伟捷,田帅康,等. 露天潜孔钻机随钻测量系统研发与应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(7):1509-1515.
- [9] HOU Shi-jun, DING Wei-jie, TIAN Shuai-kang, et al. Development and application of MWD system for DTH drilling rig[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7):1509-1515. (in Chinese)
- [10] 刘灿灿. 煤巷顶板岩层地质特征随钻探测机理研究与应用[D]. 北京:中国矿业大学, 2022.
- [10] LIU Can-can. Research and application of detection while drilling mechanism for geological features of coalmine roadway roof strata[D]. Beijing:China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)
- [11] 丁 宇. 岩体结构及力学特性随钻智能获取的理论与方法[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
- [11] DING Yu. Theory and method of intelligent acquisition of rock mass structure and mechanical properties while drilling[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
- [12] 谭卓英,李 文,岳鹏君,等. 基于钻进参数的岩土地层结构识别技术与方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(7):1328-1333.
- [12] TAN Zhuo-ying, LI Wen, YUE Peng-jun, et al. Techniques and approaches for identification of geo-formation structure based on diamond drilling parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(7):1328-1333. (in Chinese)
- [13] 王玉杰,余 磊,赵宇飞,等. 基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9):1669-1678.
- [13] WANG Yu-jie, SHE Lei, ZHAO Yu-fei, et al. Experimental study on measurement of rock strength parameters based on digital drilling technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9):1659-1668. (in Chinese)
- [14] 耿晓阳,张子新. 砂岩相似材料制作方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(1):23-28, 142.
- [14] GENG Xiao-yang, ZHANG Zi-xin. Study on preparation methods for similar materials of sandstone[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(1):23-28. (in Chinese)
- [15] 王胜伟. 软硬互层类岩石力学特性试验及本构模型研究[D]. 荆州:长江大学, 2023.
- [15] WANG Sheng-wei. Experimental study on mechanical properties and constitutive model of soft and hard interbedded rocks[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023. (in Chinese)
- [16] AHMED M, SERAJ R, ISLAM S M S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation[J]. *Electronics*, 2020, 9(8):1295.
- [17] HASSANI M, SEIDL T. Using internal evaluation measures to validate the quality of diverse stream clustering algorithms[J]. *Vietnam Journal of Computer Science*, 2017, 4:171-183.
- [18] 岳小磊,岳中文,马文彪,等. 基于数字钻进的层状岩体界面及岩石强度识别试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2025, 42(2):440-451.
- [18] YUE Xiao-lei, YUE Zhong-wen, MA Wen-biao, et al. Experimental study on identification of layered rock mass interface and rock strength based on digital drilling[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2025, 42(2):440-451. (in Chinese)
- [19] 曹瑞琅,王玉杰,赵宇飞,等. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4):679-687.
- [19] CAO Rui-lang, WANG Yu-jie, ZHAO Yu-fei, et al. In-situ tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4):679-687. (in Chinese)