

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.015

基于智能凿岩台车钻孔速度的爆破超欠挖预测模型^{*}

戴风华¹, 史经峰¹, 王帅帅¹, 高 轩¹, 汪久洋¹, 于礼杰²

(1. 中交第二公路工程有限公司, 西安 710065; 2. 山东大学 岩土与地下工程研究院, 济南 250002)

摘 要: 智能凿岩台车随钻参数中的钻孔速度是当前反映隧道掘进掌子面前方围岩性质最为科学且数据易于获取的指标。为定量描述钻孔速度、爆破参数与围岩超欠挖之间的关系, 依托某高原隧道智能凿岩台车施工工程, 系统采集 84 个爆破循环、共 3732 条周边孔的完整 MWD 数据。基于对数据组成与爆破影响因素的梳理, 构建了包含领钻阶段识别、正常钻进阶段钻孔速度聚类、装药结构向量化与降维、几何约束及最小抵抗线计算等环节的处理流程, 提取周边孔外插角、孔距、最小抵抗线、装药结构与钻孔速度等特征, 建立了基于 MWD 的 LightGBM 超欠挖预测模型。模型以设计原因导致的超欠挖为输出, 结合早停与贝叶斯超参数优化保证收敛与泛化。结果表明: 模型训练收敛性良好, 验证/测试阶段整体误差处于工程可用水平, 能够较好地刻画超欠挖随最小抵抗线、装药结构及钻孔速度等因素的变化趋势; 在此基础上开展现场应用验证, 平均线性超挖由 24.8 cm 降至 13.2 cm, 半孔率由 53% 提升至 79%, 轮廓控制与爆破质量得到改善。

关键词: 钻爆法; 超欠挖; 随钻参数; 钻孔速度; 机器学习; LightGBM

中图分类号: U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0149-11

Prediction Model for Blasting Overbreak and Underbreak based on Drilling Speed of Intelligent Jumbos

DAI Feng-hua¹, SHI Jing-feng¹, WANG Shuai-shuai¹, GAO Xuan¹, WANG Jiu-yang¹, YU Li-jie²

(1. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250002, China)

Abstract: Analysis of intelligent jumbo measurement-while-drilling (MWD) parameters reveals that drilling speed stands as the most scientifically valid and operationally accessible indicator for assessing in-situ rock mass conditions prior to tunnel excavation. Analysis of 3732 peripheral holes across 84 blasting rounds from an intelligent jumbo in high-altitude tunneling revealed systematic measurement-while-drilling (MWD) datasets that quantify correlations between penetration rate, explosive parameters, and excavation overbreak/underbreak. The developed analytical framework incorporates four key procedures: identification of pilot drilling phases; clustering analysis of steady-state penetration rates; vectorization and dimensional reduction of charge configurations; all derived by incorporating geometric constraints into the computation of the minimum burden. The extracted parameters comprise peripheral hole extrapolation angles, hole spacing, minimum resistance line, explosive charge configurations, and drilling speed. The

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-28

网络首发日期 (Published online): 2025-11-19

作者简介: 戴风华 (1976-), 男, 山西运城人, 学士、高级工程师, 从事施工项目科研及管理方面的研究, (E-mail) daifh@126.com。

通信作者: 于礼杰 (1996-), 男, 山东青岛人, 硕士, 从事隧道掘进爆破方面的研究, (E-mail) yulijie1996@163.com。

基金项目: 山东大学高端工程机械智能制造全国重点实验室开放基金项目 (ACMKF2024-07)

About the author: DAI Feng-hua (1976-), male, born in Yuncheng city, Shanxi province, bachelor degree, senior engineer, mainly engaged in research and management of construction projects, (E-mail) daifh@126.com.

Corresponding author: YU Li-jie (1996-), male, born in Qingdao city, Shandong province, master degree, mainly engaged in research on tunnel excavation blasting, (E-mail) yulijie1996@163.com.

Fund Programs: Open Research Fund of the State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Advanced Construction Machinery, Shandong University (Grant No. ACMKF2024-07)

MWD characteristics serve as inputs for developing a LightGBM-based excavation-contour prediction system. This computational framework generates quantitative estimates of design-induced overbreak and underbreak dimensions, incorporating early-termination protocols and Bayesian-optimized hyperparameters to enhance model convergence and predictive generalization. Experimental results demonstrate effective model convergence during training, with validation/testing errors maintained within practical engineering tolerances. The model successfully characterizes overbreak-underbreak variations that are correlated with minimum burden, charging configurations, and drilling-speed features. Field implementation achieved significant improvements: average linear overbreak decreased by 46.8% (from 24.8 cm to 13.2 cm), and the half-cast factor increased by 49.1% (from 53% to 79%), demonstrating enhanced contour precision and blast fragmentation quality.

Key words: drill-blast method; overbreak and underbreak; MWD; drilling speed; machine learning; LightGBM

光面爆破技术自 20 世纪 60 年代诞生以来在隧道掘进等领域得到了广泛的应用,经过几十年的发展,相关技术手段也在不断地进步。但囿于地质环境的复杂多变和人类对于岩性判识手段上的不足,当前的隧道掘进爆破施工中仍普遍存在着严重的超欠挖等现象,造成了严重的浪费和质量隐患^[1,2]。这意味着在光面爆破的设计和实施过程中,需要更为先进的手段,提高对现场围岩的判识速度和精度,实现对超欠挖效果的预测,进而对爆破参数进行动态的优化和调整,以保障光面爆破的效果。

随着智能凿岩台车的推广应用,钻爆法施工过程中的随钻参数逐渐受到研究人员的关注。在围岩强度预测方面,WANG Hao-teng 等通过推导岩石的 UCS(单轴抗压强度)与 TS(抗拉强度)的比值与内摩擦角之间的关系^[3],提出了基于随钻参数的围岩强度预测方法。WANG Shao-feng 等通过分析比能量、钻进指数与 UCS 之间的关系^[4],建立了 UCS 的回归模型,同时通过分析不同机器学习算法的分类精度,确定了最佳的岩石强度和可钻性分类模型。LAKSHMINARAYANA C R 研究发现通过钻机推力和扭矩等数据^[5],可以有效预测 UCS,对于砂岩和石灰岩的预测误差分别为 8.51% 和 8.01%。LIU Can-can 等研究了钻机扭矩、钻进速度等参数与岩石力学性质之间的关系^[6],发现钻进速度与 UCS 的关系最为显著,且钻进速度是预测岩石力学参数的最佳选择。张树才等建立了单因素岩石强度预测模型^[7],并提出钻进速度是围岩强度预测的主要参数。在围岩类型识别方面,易文豪^[8]、王明年等使用 SVM 等机器学习模型^[9],通过随钻参数对围岩等级进行分类,获得了较高的准确度。HANSEN T F 等应用 LightGBM 等机器学习模型结合随钻参数预测岩石类型^[10],为指导爆破施工提供了方向。

上述研究充分说明了钻孔速度对反映围岩性质和围岩类型的优越性,而关于钻孔速度与爆破效果之间的研究相对较少。为解决隧道掘进过程存在

的严重超欠挖问题,以钻孔速度作为反映围岩性质的主要因素,研究钻孔速度、爆破参数和爆破效果等数据之间的关系,建立隧道掘进爆破超欠挖预测模型,对优化爆破参数、指导现场爆破作业具有重要意义。

1 依托项目

本研究依托于某高原隧道项目,该隧道为分离式单线特长隧道,全长 38.324 km,其中Ⅱ级围岩 450 m、Ⅲ级围岩 29019 m、Ⅳ级围岩 8260 m、Ⅴ级围岩 595 m,地质构造复杂,存在断层破碎带、塌方冒顶、软岩大变形等多种不良地质^[11]。

某隧道进口段主要为元古界中下统念青唐古拉岩群片麻岩夹石英片岩,洞身段岩性主要为燕山期片麻状花岗闪长岩、花岗岩等侵入岩体,其间夹有变质岩捕虏体。进口右线配备有中国铁建重工集团股份有限公司的 ZYS113/G 型三臂智能凿岩台车,本研究所用的 MWD(Measurement While Drilling,随钻测量)数据均来自该装备。

为详细展示基于 MWD 钻孔速度数据的隧道掘进爆破超欠挖预测模型的建立过程,选择某隧道 DK1098+565 循环的数据进行数据处理展示,该循环的实际钻孔位置及编号可视化后见图 1。

隧道掘进爆破超欠挖预测模型的数据组成包含三部分:钻孔速度、爆破参数和超欠挖数据。为了降低模型复杂度、突出主要的超欠挖影响因素,下述钻孔速度及爆破参数的研究对象主要指周边孔。

钻孔速度用于反映现场岩性。在炮孔钻进过程中,ZYS113/G 型三臂智能凿岩台车上的传感器可以在钻进每 2 cm 时记录一次间隔时间,然后计算出每钻进 2 cm 的钻孔速度。现场爆破每循环的周边孔一般为 48 个左右,炮孔长度一般在 3~5 m 之间,每个炮孔的数百条钻孔速度数据为超欠挖预测提供了可靠的依据。

爆破参数用于反映现场施工情况。爆破参数包

括炮孔空间形态、装药量及装药结构。炮孔空间形态可以通过凿岩台车钻孔时记录的每个炮孔的位姿参数获取, 装药量及装药结构等数据则需要通过人工持续对现场进行跟踪记录。

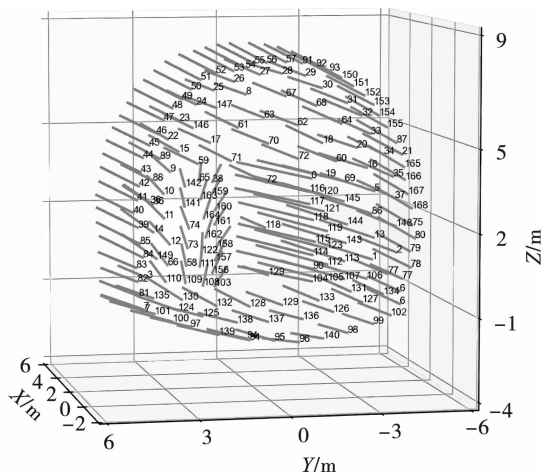
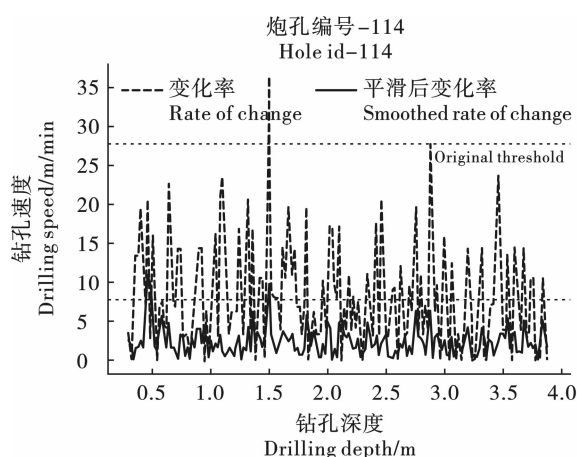


图 1 实际钻孔位置及编号

Fig. 1 Actual drilling positions and numbering

超欠挖数据用于反映爆破效果。在每循环爆破后, 对围岩进行三维激光扫描, 然后将扫描得到的点云数据与超欠挖设计轮廓线对比即可得到本循环的超欠挖数据。

研究人员在某隧道现场进行了数月的爆破循环跟踪, 收集了累计 84 个爆破循环的上述数据。其中, 主要用于研究的周边孔数据共计 3732 条。



2 数据处理与特征提取

2.1 钻孔速度

2.1.1 领钻阶段识别

局部软弱夹层、测量误差的存在, 导致钻孔速度中存在部分过大的离群数据, 因此采用箱形图的方式对数据进行了预清洗。

在钻孔起始时会出现明显的领钻阶段, 该阶段钻头无围岩约束, 且靠近掌子面的岩体受到上一循环爆破作用的影响, 通常表现为钻速较慢且持续范围不一。经过该阶段后才会进入正常钻孔阶段, 因此需要准确识别出该阶段的钻孔速度数据。

考虑到该部分炮孔钻孔速度普遍较慢且存在于钻孔起始阶段, 与正常钻进阶段存在明显突变, 采用寻找曲率最大位置的方法来寻找钻孔速度的突变点。寻找突变点的步骤如下:

(1) 计算相邻点速度与深度的一阶差分, 从而计算速度变化率。

(2) 应用一维高斯滤波对速度变化进行卷积操作^[12], 在保留主要变化特征的同时, 平滑数据并减少数据噪声的影响。

(3) 由于突变点处的变化率通常较大, 且占总体数据的极少数, 根据 3σ 法则设定阈值为均值与 3 倍标准差之和^[13], 并将第一次达到阈值的数据认为是突变点。

识别效果如图 2 所示。

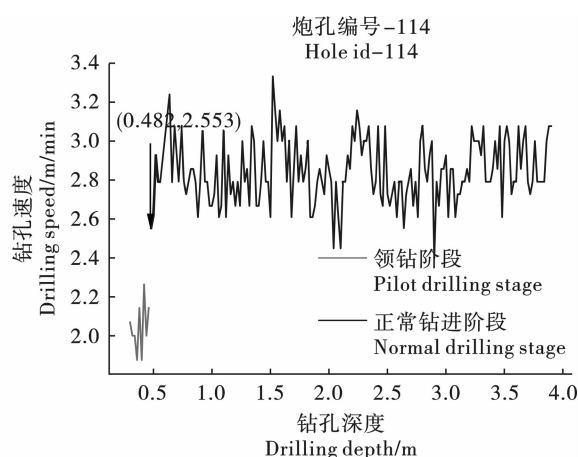


图 2 变化率光滑前后对比、领钻阶段识别

Fig. 2 Comparison before and after smoothing of the change rate and identification of the pilot drilling stage

2.1.2 正常钻进阶段分析

为研究正常钻进阶段数据分布的规律, 对该阶段的钻孔速度数据绘制相应直方图与 QQ 图 (Quantile-quantile Plot, 分位数-分位数图), 通过观察直方图是否呈对称钟形分布、QQ 图上的点是否近似落在对角线上, 可判断数据是否服从高斯分布。如图 3

所示, 59 号炮孔的数据在 QQ 图中的数据点基本沿对角线进行排列, 可以判定数据大致呈高斯分布^[14], 51 号炮孔的数据在 QQ 图中呈对称状“S”型, 在直方图中可以看出数据分布类似“双峰”高斯分布。因此, 假定钻孔速度数据呈高斯分布或混合高斯分布。

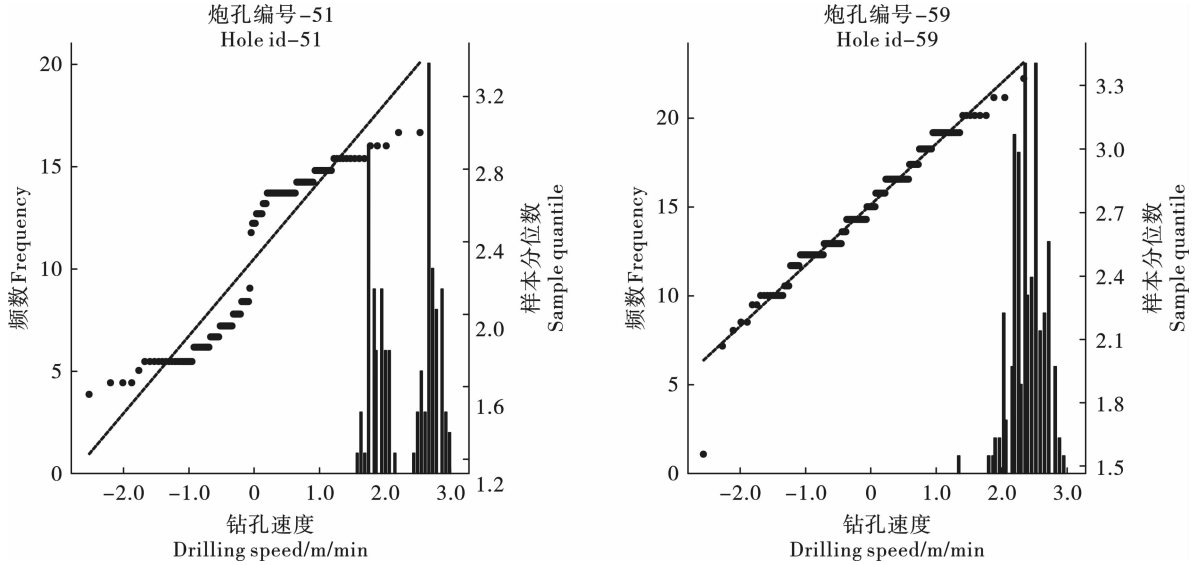


图3 直方图与QQ图绘制

Fig. 3 Histogram and Q-Q plot

2.1.3 改进高斯混合聚类分析

根据数据分布规律特征,为了准确识别不同钻孔速度对应的岩性,采用高斯混合模型聚类的方式来探索岩体的内部特征。高斯混合模型(GMM)聚类是一种基于概率模型的聚类方法,它假设数据集是由多个高斯分布组成的混合体。与传统的 K 均值聚类不同,GMM聚类不仅考虑数据点与中心点的距离,还考虑数据点的概率分布,能够处理形状复杂的簇^[15]。

通过高斯混合模型聚类不仅可以得到聚类簇的数目和范围,还可以通过EM算法估算出每个聚类簇的概率、均值等参数,对岩性进行定量判别。

在进行GMM聚类时,聚类数目的选择极为关键。常用的自动选择聚类数目的方法有赤池信息准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)^[16]。分别对钻孔数据应用以上两种方法后发现,AIC倾向于选择较多的聚类数目,而BIC虽然根据模型参数量增加了惩罚项来防止过拟合,但是仍会导致选择的聚类数目较大,最终导致聚类结果与现场围岩的实际情况不符。为了确定最佳的聚类数目,受凝聚层次聚类的启发^[17],提出了一套适用于自下而上合并相似簇GMM聚类过程优化的方法,得到最佳聚类数目。

改进GMM聚类的具体步骤如下:

1) 设置不同的初始聚类簇数目,设 K_{init} 表示初始聚类簇数目的集合,取 $K_{init} = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ 。

2) 对于每一个初始簇数 $K \in K_{init}$ 进行GMM聚类,并依据EM算法得到每个簇的均值 μ 。

3) 设置合并阈值为 $\epsilon = 0.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,对于每一对簇 (i, j) ,计算均值的差异

$$d_{ij} = \|\mu_i - \mu_j\|$$

如果存在 d_{ij} 小于 ϵ ,找到所有满足条件的簇对 (i, j) ,将这些簇对合并。设 X 为需要合并的簇集合,其中 $X = \{(i, j) \mid d_{ij} < \epsilon\}$,更新簇的数目 $K = K - X$ 。直至所有簇之间的差异均大于 ϵ 或簇数目减少到1。

4) 对每一个 $K \in K_{init}$,记录最终收敛的簇数 K_{final} 。

较大的合并阈值会导致最终聚类数目较少,较小的合并阈值会导致最终聚类数目较多。当合并阈值确定后,初始聚类簇数取 K 值大于所有样本的可能分类数时均会收敛到 K_{final} ,此处 K 的取值区间为 $[5, 10] \cap \mathbb{Z}$ 较为合理,因此 K_{final} 即为最终聚类簇数。图4为部分炮孔聚类结果。

2.2 爆破参数

2.2.1 炮孔空间形态

根据周边孔和内圈孔的炮孔空间形态可以推导出周边孔外插角、周边孔孔距和周边孔最小抵抗线方向及大小等参数。

(1) 外插角计算

凿岩台车与人工钻孔时存在着相同的问题,即周边孔位置会产生不利的外插角。且受限于操作手水平,相邻周边孔的外插角往往并不相同,该现象会对光面效果产生较大影响。

外插角的计算过程如下:

1) 提取每个炮孔孔口坐标 T_i 和孔底坐标 B_i ,计算每个炮孔的方向向量。

$$v^i = B_i - T_i$$

2) 定义隧道轴线方向,即 X 方向的方向向量

$e_x = [1, 0, 0]$ 。

3) 计算 v_i 与 e_x 的夹角, 即为外插角 θ_i 。

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{v_i e_x}{\|v_i\| \|e_i\|}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

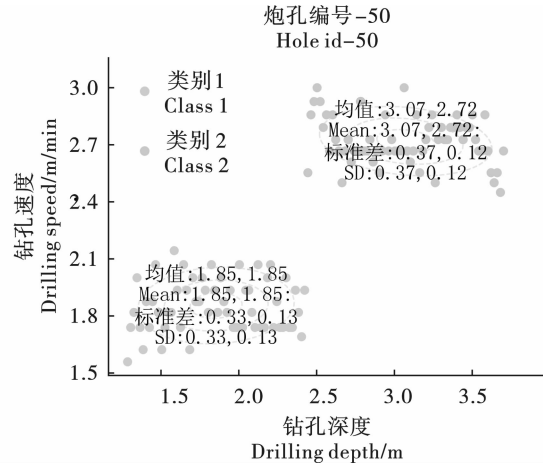
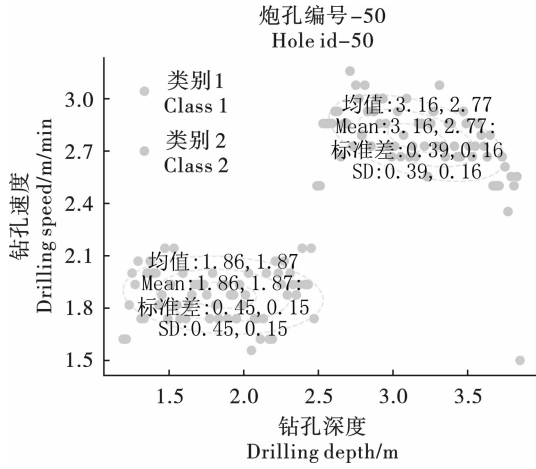


图4 钻孔速度聚类

Fig. 4 Clustering of drilling speed

(2) 孔距计算

孔距一般指相邻两个平行炮孔之间的孔口距离, 由于周边孔之间并不严格平行, 且孔底间的距离较孔口间距离对爆破效果影响更大, 因此选择孔底距作为周边孔孔距。在实际钻孔中, 对于特定周边孔, 距离相邻周边孔的孔底距也并不一致, 为了保留更多细节, 通过一维二元数组 $[a_1, a_2]$ 保留每个周边孔与相邻炮孔间的孔底距, 数组中的 a_1 为选定周边孔与在 YZ 平面上沿顺时针的上一个炮孔的孔底距, a_2 为选定周边孔与在 YZ 平面上沿顺时针的下一个炮孔的孔底距。

(3) 最小抵抗线

最小抵抗线通常指相邻两排平行炮孔之间的最短距离, 由于内圈孔与周边孔之间并不平行, 且钻孔深度与钻孔角度也存在差异, 因此提出了使用周边孔孔底至相邻内圈孔连线的最短距离向量 $d_{\min} = [x_d, y_d, z_d]$ 表示周边孔排距。

$d_{\min}$ 的计算过程如下:

1) 提取内圈孔的孔底坐标, 记为 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ 。计算其在 YZ 平面上相对于 Y 轴正方向的顺时针角度 θ_i

$$\theta_i = \arctan2(z_i, y_i)$$

依据角度 θ_i 对内圈孔进行顺时针排序, 得到排序后的内圈孔集合。

2) 提取周边孔的孔底坐标, 记为 $Q_j = (x_j, y_j, z_j)$ 。遍历所有内圈孔, 找到与 Q_j 距离最近的内圈孔, 记为 P_B 。根据步骤 1 中得到的顺序, 将沿顺时针的上一个内圈孔记为 P_A , 下一个内圈孔记为 P_C 。

3) 计算点 Q_j 到直线 $P_A P_B$ 、 $P_B P_C$ 的垂足 F_{AB} 和 F_{BC}

$$F_{AB} = P_A + \frac{(Q_j - P_A)(P_B - P_A)}{(P_B - P_A)(P_B - P_A)}(P_B - P_A)$$

$$F_{BC} = P_B + \frac{(Q_j - P_B)(P_C - P_B)}{(P_C - P_B)(P_C - P_B)}(P_C - P_B)$$

4) 检查垂足 F_{AB} 和 F_{BC} 是否在线段 $P_A P_B$ 和 $P_B P_C$ 上, 如果共线且垂足在线段上, 则选取最近的垂足向量作为 $d_{\min}$; 否则, 直接计算周边孔 Q_j 到最近内圈孔 P_B 的向量作为 $d_{\min}$ 。

如图 5 所示, 绿色箭头表示的是周边孔孔底距离最近的内圈孔孔底连线方向与长度, 即 $d_{\min}$ 。

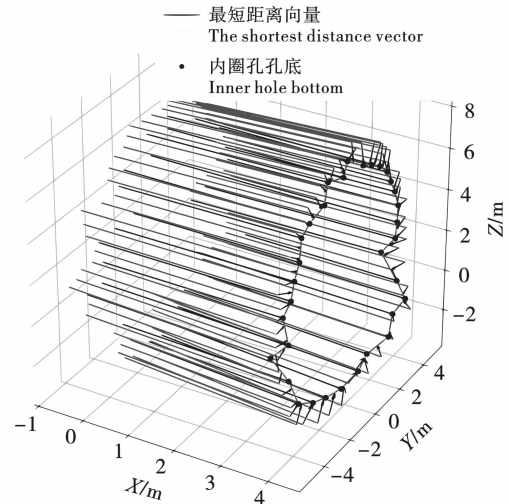


图5 最小抵抗线方向可视化

Fig. 5 Visualization of minimum burden direction

2.2.2 装药量及装药结构

根据现场采集的数据, 该隧道使用的炸药为 $\phi 32$ 的 2 号岩石乳化炸药, 单支药卷重量为 300 g, 其余参数见表 1。

表 1 2 号岩石乳化炸药参数表

Table 1 Parameters of No. 2 rock emulsion explosive

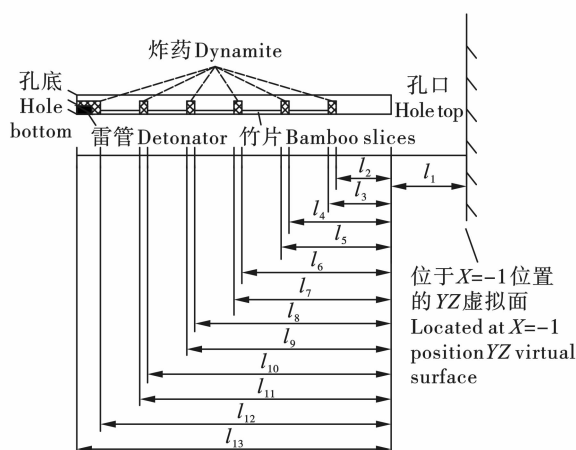
炸药名称 Name of explosive	爆速 Detonation velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	猛度 Ferocity/ mm	做功能力 Capacity for work/ mL	药卷密度 Charge density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
2 号岩石乳化炸药 No. 2 rock emulsion explosive	≥ 3200	≥ 12	≥ 220	1.05 ~ 1.20

为减少装药集中度,提高光面爆破效果,周边孔的装药结构为空气柱间隔装药。在 DK1098 + 565 循环,具体为孔底装 1 支药卷,每隔 50 cm 再装 0.33 支药卷,使用竹片对药卷进行绑扎,单孔累计装药量为 0.8 kg,如图 6 所示。



(a) 现场图

(a) Field photograph



(b) 结构图

(b) Schematic diagram

图 6 周边孔装药结构

Fig. 6 Charging structure of peripheral holes

掌子面的凹凸不平,导致周边孔的钻孔长度不同,每段药卷距离孔口的深度也不同。为了将装药结构向量化且保留分段装药在空间中的位置信息,在 $X = -1$ 的位置设置了一个 YZ 虚拟面,由于凿岩台车定位里程为 DK1098 + 565.3,那么 $X = -1$ 所在面即为 DK1098 + 564.3。将周边孔孔口、每段药卷前端、后端与虚拟面的距离作为变量描述每个炮孔的装药结构,装药结构向量化后的形式为 $[l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{12}, l_{13}]$ 。

通过上述装药结构向量化的方法可以准确描述出每个周边孔装药结构中的装药量和装药位置,但由于其存数据有 13 个维度,用于后续参数优化会导致模型复杂度较高。主成分分析法(PCA)是一种常用的降维技术^[18],它可以通过线性变换将数据映射到较低维的空间。PCA 会选择能够保留最大数据方差的主成分,从而减少维度。

PCA 降维的具体步骤如下:

1) 使用 Z-score 标准化数据,消除 PCA 对特征尺度的敏感性。

2) 计算各个特征间的协方差,并得到协方差矩阵。

3) 计算协方差矩阵的特征向量和特征值,特征向量表示主成分的方向,特征值表示对应特征向量方向上的方差大小。

4) 选择能解释最多方差的特征向量作为主成分,丢弃解释较少方差的特征向量,以实现降维。

通过上述 PCA 算法对 DK1098 + 565 循环装药结构原始数据降维后得到表 2。

由表 2 可知,装药结构的第一主成分解释方差比例为 99.09%,可以很好地保留原始数据的重要信息,因此使用该主成分作为该循环装药结构的特征变量。经分析,导致该结果的原因主要为不同循环间的装药量不同,但同一循环内的装药量和装药结构基本类似。但由于同一循环内的掌子面凹凸程度对爆破效果也存在影响,所以对循环内的装药结构进行研究也存在其合理性。

2.3 超欠挖数据

由于欠挖会极大影响施工进度,因此现场通常会多装炸药以避免欠挖,但随之也会产生过量的超挖。实际上造成超挖的原因主要有两种:机械原因和设计原因。机械原因为凿岩台车设计上固有的结构缺陷,会使周边孔钻孔时产生不可避免的外插角,从而导致孔底位置出现较大超挖;设计原因为周边孔爆破参数设计不合理,导致周边围岩损伤过大,如图 7 所示。

表 2 DK1098 + 565 循环装药结构数据降维

Table 2 Dimensionality reduction of charge-structure data for cycle DK1098 + 565

编号 Id	装药结构 Charge structure	第一主成分 The first principal component	解释方差比例 Explain the variance ratio
81	[4.01,3.71,3.21,3.11,2.61,2.51,2.01,1.91,1.41,1.31,0.81,0.71,1.11]	-0.922	99.09%
82	[3.65,3.35,2.85,2.75,2.25,2.15,1.65,1.55,1.05,0.95,0.45,0.35,1.11]	-5.984	
83	[3.86,3.56,3.06,2.96,2.46,2.36,1.86,1.76,1.26,1.16,0.66,0.56,1.15]	-3.074	
84	[4.61,4.31,3.81,3.71,3.21,3.11,2.61,2.51,2.01,1.91,1.41,1.31,0.26]	8.421	
85	[4.63,4.33,3.83,3.73,3.23,3.13,2.63,2.53,2.03,1.93,1.43,1.33,0.38]	8.574	
39	[4.36,4.06,3.56,3.46,2.96,2.86,2.36,2.26,1.76,1.66,1.16,1.06,0.64]	4.500	
40	[3.95,3.65,3.15,3.05,2.55,2.45,1.95,1.85,1.35,1.25,0.75,0.65,1.01]	-1.659	
41	[3.99,3.69,3.19,3.09,2.59,2.49,1.99,1.89,1.39,1.29,0.79,0.69,0.86]	-0.937	
42	[4.06,3.76,3.26,3.16,2.66,2.56,2.06,1.96,1.46,1.36,0.86,0.76,0.97]	-6.961	
43	[3.97,3.67,3.17,3.07,2.57,2.47,1.97,1.87,1.37,1.27,0.77,0.67,0.93]	-1.292	

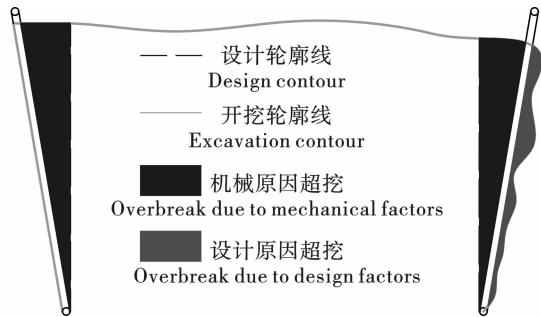


图 7 超欠挖原因分析

Fig. 7 Analysis of overbreak and underbreak causes

在目前的技术水平上,机械原因产生的超挖很难避免,因此进行爆破参数优化主要是分析设计原因导致的超欠挖。经推导,设计原因导致的超欠挖计算见下式

$$\Delta O_l = O_{lo} - l \sin \theta$$

式中: ΔO_l 为炮孔 l 深处设计原因导致的超欠挖; O_{lo} 为炮孔 l 深处实际三维激光扫描处理后得到的超欠挖; l 为超欠挖的计算深度; θ 为周边孔外插角。

3 模型建立与训练

由于爆破机理及岩性判识的复杂性,当前的爆破理论尚存在诸多分歧,应用常规计算手段难以准确计算爆破效果。LightGBM 作为当前应用最为广泛的梯度提升树 (GBDT) 实现之一,具有训练速度快、处理异构特征和小样本数据能力强、对缺失值与异常值鲁棒等优点,已在许多工程预测任务中取得良好表现。当前,已有大量研究证明了机器学习模型在爆破领域应用的可行性^[19,20]。本节将通过构建 LightGBM 模型,研究通过 MWD 钻孔速度数据和现场施工的爆破参数预测围岩的超欠挖情况。

3.1 数据进一步处理与展示

为了保证不同炮孔间的特征长度相等且不丢失太多特性,对钻孔速度等数据进行等间距采样,将关联性较强的钻孔速度与设计原因导致的超欠挖的变量位置进行对齐。如表 3 所示,钻孔速度中的每个元素代表着自 DK1098 + 565 里程起每 0.4 m 深度处的钻孔速度,取值由聚类结果确定,领钻阶段取值由第一组聚类结果外延得到;设计原因导致的超欠挖取值位置与钻孔速度对应,正值代表超挖,负值代表欠挖。周边孔编号对应着其位于轮廓线上的顺序,具体方向为从断面左侧拱脚沿顺时针方向,详细位置可见图 1。

3.2 模型结构与训练结果

根据现场实际收集的样本和特征,建立了如下 LightGBM 模型:外插角、孔距、最小抵抗线、装药量及装药结构、钻孔速度为输入变量,设计原因导致的超欠挖作为输出变量。

将数据集中的 80% 的数据 (2986 条) 作为训练集,10% 的数据 (373 条) 作为验证集,10% 的数据 (373 条) 作为测试集。在训练集上以验证集早停进行超参数优化,目标为最小化验证集 RMSE。使用 Optuna 中的贝叶斯优化进行超参数搜索,搜索空间如下

$$\begin{aligned} n_estimators &\leq 5000, \text{ learning_rate} \in [0.01, 0.3], \text{ max_depth} \in [3, 12], \text{ num_leaves} \in [16, 512], \\ \text{min_child_samples} &\in [10, 200], \text{ feature_fraction, bagging_fraction} \in [0.5, 1.0], \text{ bagging_freq} \in [0, 10], \\ \text{lambda_l1, lambda_l2} &\in [0, 10]. \end{aligned}$$

具体超参数搜索过程见图 8。从图 8 看出,超参数在搜索过程中,模型 RMSE 收敛趋势明显,最终

模型测试集 RMSE 为 0.137 m, 满足工程需求。最终搜索到的最优超参数如下:

‘n_estimators’: 793, ‘learning_rate’: 0.01870
6308668326236, ‘max_depth’: 7, ‘num_leaves’:
136, ‘min_child_samples’: 34, ‘feature_fraction’: 0.5

892848253476178, ‘bagging_fraction’: 0.61642367
30465142, ‘bagging_freq’: 5, ‘lambda_l1’: 0.864
5891191669577, ‘lambda_l2’: 3.719143147595
8807。

表 3 DK1098 + 565 循环部分周边孔数据

Table 3 Partial peripheral hole data of cycle DK1098 + 565

编号 Id	外插角 extrapolation angle/°	孔距 Space/m	最小抵抗线 Burden/m	装药量 Charge	钻孔速度 Drilling speed/ (m · min ⁻¹)	设计原因导致的超欠挖 Overbreak/Underbreak due to design factors/m
81	6.31	[0.53, 0.57]	[0.05, -0.60, -0.01]	-0.922	[2.05, 2.05, 2.05, 2.05, 2.05, 2.05, 2.05, 2.05, 2.48]	[0.311, 0.225, 0.161, 0.078, -0.003, 0.011, -0.008, -0.008, -0.112, -0.386]
82	6.35	[0.57, 0.55]	[0.26, -0.67, 0.04]	-5.984	[1.91, 1.91, 1.91, 1.91, 1.91, 1.91, 1.91, 3.15, 3.15]	[0.241, 0.203, 0.199, 0.151, -0.041, 0.046, 0.033, 0.036, 0.055, 0.004]
83	5.50	[0.55, 0.63]	[-0.12, -0.71, -0.06]	-3.074	[1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 2.61, 2.61]	[0.313, 0.221, 0.128, 0.056, 0.024, 0.022, 0.014, -0.014, -0.011, -0.014]
84	3.95	[0.63, 0.50]	[-0.15, -0.73, -0.07]	8.421	[1.93, 1.93, 1.93, 1.93, 1.93, 1.93, 2.55, 2.55, 2.55, 2.55]	[0.159, 0.176, -0.094, -0.020, -0.083, -0.099, -0.074, -0.059, -0.025, -0.103]
85	3.77	[0.50, 0.56]	[-0.19, -0.82, 0.03]	8.574	[1.82, 1.82, 1.82, 1.82, 1.82, 1.82, 2.46, 2.46, 2.46, 2.46]	[0.114, 0.080, -0.011, -0.008, -0.031, -0.059, -0.060, -0.045, -0.094, -0.078]
39	3.91	[0.56, 0.49]	[-0.02, -0.85, -0.07]	4.500	[1.85, 1.85, 1.85, 1.85, 1.85, 1.85, 2.64, 2.64, 2.64, 2.64]	[0.121, 0.086, 0.026, 0.012, -0.025, -0.036, -0.026, -0.079, -0.062, -0.053]
40	4.00	[0.49, 0.52]	[0.04, -0.91, -0.08]	-1.659	[1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 1.87, 2.54, 2.54, 2.54]	[0.212, 0.058, 0.043, -0.009, -0.027, -0.019, -0.046, -0.059, -0.063, -0.088]
41	3.87	[0.52, 0.52]	[0.17, -0.85, 0.05]	-0.937	[1.86, 1.86, 1.86, 1.86, 2.58, 2.58, 2.58, 2.58, 2.58]	[0.152, 0.017, -0.038, -0.054, -0.070, -0.098, -0.137, -0.173, -0.223, -0.226]
42	3.74	[0.52, 0.53]	[-0.00, -0.72, 0.04]	-6.961	[1.84, 1.84, 1.84, 1.84, 1.84, 1.84, 2.66, 2.66, 2.66, 2.66]	[0.246, 0.102, 0.001, -0.014, -0.022, -0.076, -0.111, -0.164, -0.148, -0.247]
43	3.85	[0.53, 0.51]	[0.13, -0.73, -0.25]	-1.292	[1.77, 1.77, 1.77, 1.77, 1.77, 1.77, 2.77, 2.77, 2.77, 2.77]	[0.210, 0.074, 0.079, 0.037, 0.024, -0.032, -0.026, 0.015, -0.088, -0.068]

测试集中的部分炮孔将进行展示, 见图 9, 可以看出炮孔的预测曲线整体趋势与实测结果基本一致, 说明 LightGBM 模型能够有效捕捉围岩超欠挖变化的整体规律。但在局部波动区间, 预测结果与实测值之间存在一定偏差, 表明模型在处理局部突变特征时仍存在一定不足。整体而言, LightGBM 模型不仅能够较好地反映超欠挖的变化趋势, 而且在多数情况下预测精度满足工程实践要求, 为基于 MWD 钻孔速度数据与爆破参数的超欠挖预测提供了可靠的方法支撑。

4 应用效果与讨论

4.1 现场应用情况

应用训练得到的 LightGBM 模型, 根据钻孔速度

和爆破参数对超欠挖效果进行预测, 使用预测结果对周边孔爆破参数进行优化, 现场爆破效果显著提升, 平均线性超挖由 24.8 cm 降低到了 13.2 cm, 半孔率由 53% 提高到了 79%, 如图 10 所示。

4.2 讨论

本研究详细介绍了基于 MWD 钻孔速度数据的隧道掘进爆破超欠挖预测模型的数据获取方式、处理过程及模型建立方法, 模型经验证可以有效改善现场的爆破效果。但由于本模型数据主要来源于单一隧道与单一凿岩台车, 对于不同隧道及不同台车的应用效果仍需要进一步验证。

在钻孔速度部分, 为了简化模型, 本研究忽略了节理裂隙等因素对于钻孔速度的影响, 对于复杂地质环境下的预测可能存在较大偏差。

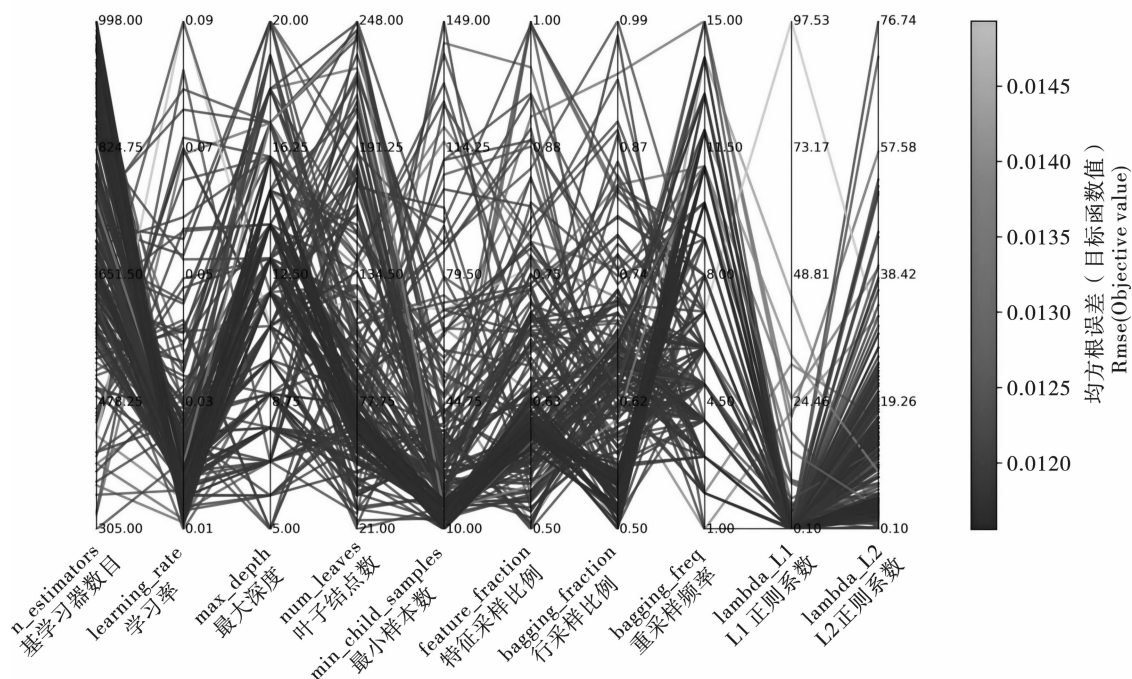


图 8 超参数搜索过程

Fig. 8 Hyperparameter search process

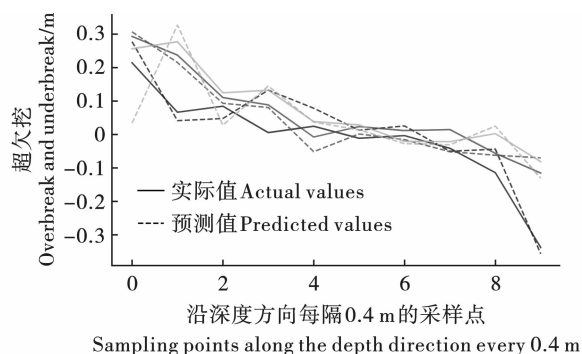


图 9 部分测试集数据与预测值对比

Fig. 9 Comparison between part of the test set data and predicted values

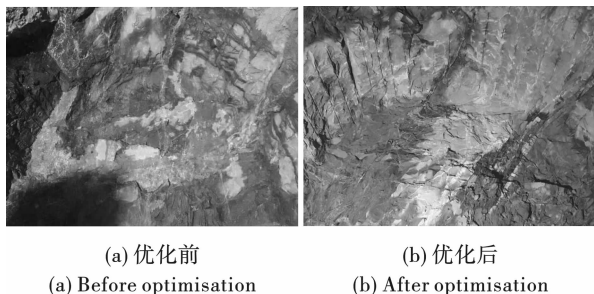


图 10 爆破效果优化前后对比

Fig. 10 Comparison of blasting effects before and after optimisation

在炮孔空间形态部分,虽考虑了周边孔最小抵抗线在空间中的大小,但实际却假定了内圈孔之间的连线便是周边孔的自由面。该假定依赖于内圈孔

的实际爆破效果,若内圈孔爆破效果不佳,亦会影响预测结果。

在装药量及装药结构部分,采用了 PCA 分析后的主成分作为装药量及装药结构的代表特征。该方法对于不同现场的适用性可能存在较大差异,本研究的小规模数据可以简化模型结构,但当整体数据量达到一定规模时,还是应采用原始数据进行建模。

5 结论

本研究通过对智能凿岩台车钻孔速度数据结构进行研究,得到了一套完整的钻孔速度数据处理方法。将高斯滤波与寻找速度突变点相结合,可以准确区分出钻孔过程中的领钻阶段和正常钻进阶段。对于正常钻进阶段数据进行统计,发现了其高斯分布的规律,并结合围岩变化的特点,对 GMM 聚类算法进行改进,用聚类结果中的钻进区间钻孔速度均值代表不同钻进阶段的围岩性质。

根据 MWD 数据的特点,提出了一套针对周边孔空间形态参数提取的方法,可以计算出三维空间中周边孔外插角、孔距和最小抵抗线等参数。根据实际装药的空间形态及数据,提出了装药量及装药结构的特征提取方法。受限于数据集的大小,为了减小模型复杂度,使用 PCA 分析对特征进行降维,后续模型的表现验证了此举的可行性。分析了将设计原因导致的超欠挖作为模型输出的可行性,并推导出了其计算公式。

根据钻孔速度、爆破参数与超欠挖等因素所提出的特征,构建了 LightGBM 模型。模型经充分训练后可以较好地根据实际钻孔速度和设计的爆破参数预测超欠挖效果,根据预测效果可以对爆破参数进行反复优化以指导现场作业。模型在所研究隧道现场应用后,爆破效果得到了显著的提升和改善。

参考文献 (References)

- [1] 龚伟毅,姚颖康,杜宇翔. 中等断面隧道长进尺直孔掏槽爆破开挖与超欠挖控制现场试验[J]. 爆破, 2024, 41(2): 32-39.
- [1] GONG Wei-yi, YAO Ying-kang, DU Yu-xiang. Field test of long footage burn cut blasting excavation and control of overcut and undercut in medium section tunnel[J]. Blasting, 2024, 41(2): 32-39. (in Chinese)
- [2] ZHANG Wan-mao, LIU Dun-wen, TANG Yu, et al. Multi-fractal characteristics of smooth blasting overbreak in extra-long hard rock tunnel[J]. Fractal Fract, 2023, 7: 842. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7120842>.
- [3] WANG Hao-teng, HE Ming-ming. Determining method of tensile strength of rock based on friction characteristics in the drilling process[J]. Rock Mech Rock Eng, 2023, 56: 4211-4227. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03276-5>.
- [4] WANG Shao-feng, WU Yu-meng, CAI Xin, et al. Strength prediction and drillability identification for rock based on measurement while drilling parameters[J]. J Cent South Univ, 2023, 30: 4036-4051. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5492-4>.
- [5] LAKSHMINARAYANA C R, TRIPATHI A K, PAL S K. Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength[J]. Geo-Engineering, 2021, 12: 23. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00152-5>.
- [6] LIU Can-can, ZHENG Xi-gui, SHAHANI N M, et al. An experimental investigation into the borehole drilling and strata characteristics [J]. PLoS ONE, 2021, 16(7): e0253663.
- [7] 张树才,仇文革,张齐芳,等. 基于凿岩台车钻进参数的岩石强度预测模型研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(12): 2007-2017.
- [7] ZHANG Shu-cai, QIU Wen-ge, ZHANG Qi-fang, et al. Research on rock strength prediction model based on drilling parameters of drilling jumbo [J]. Tunnel construction (English and Chinese), 2023, 43(2): 2007-2017. (in Chinese)
- [8] 易文豪,王明年,童建军,等. 基于支持向量机的大断面岩质隧道掌子面围岩非均一性判别方法[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 112-122.
- [8] YI Wen-hao, WANG Ming-nian, TONG Jian-jun, et al. Method for identifying the heterogeneity of surrounding rock of large-section rock tunnel face based on support vector machine [J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 112-122. (in Chinese)
- [9] 王明年,赵思光,童建军,等. 基于炮孔钻进参数的隧道掌子面围岩三维精细化分级方法[J]. 铁道学报, 2024, 46(10): 163-173.
- [9] WANG Ming-nian, ZHAO Si-guang, TONG Jian-jun, et al. A three-dimensional refined classification method for surrounding rock of tunnel face based on borehole drilling parameters[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(10): 163-173. (in Chinese)
- [10] HANSEN T F, LIU Zhong-qiang, TORRESEN J. Predicting rock type from MWD tunnel data using a reproducible ML-modelling process [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 152: 105843. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105843>.
- [11] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468.
- [11] XUE Yi-guo, KONG Fan-meng, YANG Wei-min, et al. Major adverse geological conditions and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445-468. (in Chinese)
- [12] RYBAKOVA E O, LIMONOVA E E, NIKOLAEV D P. Fast gaussian filter approximations comparison on SIMD computing platforms [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4664. <https://doi.org/10.3390/app14114664>.
- [13] BELHAOUARI S B. Unsupervised outlier detection in multidimensional data [J]. J Big Data, 2021, 8: 80. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00469-z>.
- [14] KAREN K, SPIEGELMAN C H. An alternative to ordinary q-q plots: Conditional q-q plots [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 1986, 4(3): 167-184. [https://doi.org/10.1016/0167-9473\(86\)90032-0](https://doi.org/10.1016/0167-9473(86)90032-0).
- [15] FRALEY C, RAFTERY A E. Model-based clustering, discriminant analysis, and density estimation [J]. Journal of the American Statistical Association, 2002, 97(458): 611-631. <https://doi.org/10.1198/016214502760047131>.
- [16] ANDREI A T, GRIGORE O. Low-cost optimized U-Net model with GMM automatic labeling used in forest semantic segmentation [J]. Sensors, 2023, 23: 8991. <https://doi.org/10.3390/s23218991>.
- [17] MURTAGH F, CONTRERAS P. Algorithms for hierarchical clustering: an overview [J]. WIREs Data Mining Knowl Discov, 2012, 2: 86-97. <https://doi.org/10.1002/widm.53>.
- [18] 赵荣溪,杨玉民,周传波,等. 基于 MD-PCA-BP 模型的露天矿山爆破振动速度预测[J]. 爆破, 2024,

- 41(2):203-211.
- [18] ZHAO Mo-xi, YANG Yu-min, ZHOU Chuan-bo, et al. Prediction of blasting vibration velocity in open-pit mine based on MD-PCA-BP model [J]. *Blasting*, 2024, 41(2):203-211. (in Chinese)
- [19] HE Biao, ARMAGHANI D J, LAI Sai-hin. Assessment of tunnel blasting-induced overbreak: A novel metaheuristic-based random forest approach [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 133: 104979. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104979>.
- [20] LIU Yao-sheng, LI Ang, DAI Feng, et al. An AI-powered approach to improving tunnel blast performance considering geological conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 144: 105508. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105508>.
-
- (上接第148页)
- [6] 李世明,胡保宁,赵增祥,等. 地下水封洞库施工巷道开挖爆破技术研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(6): 81-89.
- [6] LI Shi-ming, HU Bao-ning, ZHAO Zeng-xiang, et al. Study on blasting technology of construction tunnel of underground water-sealed cavern [J]. *Engineering Blasting*, 2024, 2023, 29(6): 81-89. (in Chinese)
- [7] 汪飞. 复杂环境下露天矿山爆破及安全控制[J]. *工程爆破*, 2022, 28(4): 120-124, 130.
- [7] WANG Fei. Open-pit blasting and safety control in a complex environment [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(4): 120-124, 130. (in Chinese)
- [8] 吴贤振,余敏,吴强. 铜坑矿中深孔凿岩爆破参数优化试验研究[J]. *黄金*, 2011, 32(5): 31-33.
- [8] WU Xian-zhen, YU Min, WU Qiang. Experimental study on optimization of deep hole drilling and blasting parameters in Tongkeng mine [J]. *Gold*, 2011, 32(5): 31-33. (in Chinese)
- [9] 肖雄,余佑林. 扇形中深孔采矿中凿岩爆破参数的试验确定及其应用[J]. *中国钨业*, 2011, 32(5): 31-33.
- [9] XIAO Xiong, Yu You-lin. Experimental determination and application of rock drilling and blasting parameters in fan-shaped deep hole mining [J]. *China Molybdenum Industry*, 2011, 32(5): 31-33. (in Chinese)
- [10] 刘连生,夏胜明,曾鹏,等. 基于工程地质分区的某钨矿爆破参数优化[J]. *工程爆破*, 2024, 30(4): 42-50.
- [10] LIU Lian-sheng, XIA Sheng-ming, ZENG Peng, et al. Blasting parameter optimization of a tungsten mine based on engineering geological zoning [J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(4): 42-50. (in Chinese)
- [11] 张继春,钮强,徐小荷. 用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素[J]. *爆炸与冲击*, 1993(3): 212-218.
- [11] ZHANG Ji-chun, NIU Qiang, XU Xiao-he. Using grey relational analysis method to determine the main factors influencing the quality of rock mass blasting [J]. *Explosion and Shock*, 1993(3): 212-218. (in Chinese)
- [12] 朱志彬,刘成平. 中深孔凿岩爆破参数试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2009, 29(5): 90-92.
- [12] ZHU Zhi-bin, LIU Cheng-ping. Experimental study on parameters of medium and deep hole rock drilling and blasting [J]. *Mining Research and Development*, 2009, 29(5): 90-92. (in Chinese)
- [13] 尹岳降,李瑞泽,陈明,等. 基于正交试验法的爆破块度分布影响因素敏感性分析[J]. *爆破*, 2019, 36(4): 37-42.
- [13] YIN Yue-jiang, LI Rui-ze, CHEN Ming, et al. Sensitivity analysis of influencing factors on blasting block size distribution based on orthogonal experimental method [J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 37-42. (in Chinese)
- [14] 周游,陈作彬,王静,等. 最小抵抗线对深孔岩石爆破块度的影响[J]. *工程爆破*, 2016, 22(6): 70-74.
- [14] ZHOU You, CHEN Zuo-bin, WANG Jing, et al. The influence of minimum resistance line on the fragmentation of deep hole rock blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(6): 70-74. (in Chinese)
- [15] WEN Yi-ping, LAI Nan-jun, DU Zhao-feng, et al. Application of orthogonal experiment method in foam flooding system composition and injection parameter optimization [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204: 108663. (in Netherlands)
- [16] 邹宗山,崔峻语,和铁柱,等. 孔间延时时间对台阶爆破块度影响试验研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(6): 75-80.
- [16] ZOU Zong-shan, CUI Jun-yu, HE Tie-zhu, et al. Experimental research on the delay time between holes on the fragmentation of bench blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(6): 75-80. (in Chinese)
- [17] 翟小鹏,杨军,陈占扬,等. 基于应变率变化的爆破块度预测模型及应用[J]. *工程爆破*, 2022, 28(6): 73-79, 118.
- [17] ZHAI Xiao-peng, YANG Jun, CHEN Zhan-yang, et al. Predictive model and application of blasting fragmentation based on strain rate change [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 73-79, 118. (in Chinese)
- [18] 陈起建. 隧道岩体爆破碎片预测方法对比研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(4): 78-86.
- [18] CHEN Qi-jian. Comparative study on prediction methods of blasting debris in tunnel rock mass [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(4): 78-86. (in Chinese)