

基于机器学习的围岩监测指标效力评估*

温嘉琦¹, 汤雷¹, 姜波², 占其兵^{1,3}, 王宇琨^{1,4}

(1. 南京水利科学研究院 南京, 210029) (2. 南京航空航天大学机场工程系 南京, 211106)

(3. 武汉大学水利水电学院 武汉, 430072) (4. 天津大学建筑工程学院 天津, 300350)

摘要 地下工程向着深部地层发展, 实践中常出现超经验认识现象, 需要有效评估围岩监测指标对围岩损伤状态的判定能力。针对此问题, 在引入围岩体积扩容率 (volume expansion rate, 简称 VER) 指标的基础上, 提出一种基于机器学习的围岩监测指标效力评估方案。首先, 基于离散元方法, 实施6种地应力水平的围岩监测试验, 隧洞开挖后实时监测位移、应力以及岩体损伤; 其次, 基于机器学习技术进行围岩损伤判定与指标评估试验。结果表明: 离散元试验获得的围岩监测数据合理; 基于机器学习分类算法的损伤判定结果具有较高精度; 随着地应力的增加, 显著性监测指标呈现由浅部到深部、由区域性损伤到点破坏的变化过程, 该结果从监测角度描述了围岩失稳历程; 在地应力水平更高的条件下, 切向应力对围岩状态变化更加敏感。

关键词 围岩损伤判定; 离散元方法; 机器学习; 围岩体积扩容率; 围岩失稳

中图分类号 TV554; TV698.1

引言

地下岩体工程涉及多个行业领域, 其工程设计论证、施工过程中一个重要技术问题就是围岩的稳定性^[1-2]。围岩安全监测技术是解决问题的关键之一, 其通过收集可反映施工过程中的围岩动态信息, 据此判断围岩的稳定状态以及当前支护结构参数和施工的合理性^[3-4]。

现场监测中最主要的问题是确定以什么信息为准^[5], 所获监测数据首先需要进行监测数据可靠性分析。一般可通过统计分析来确定实测值的可靠性, 也可以将监测数据转化为时间序列信号, 运用信号降噪技术^[6-7]消除监测数据的随机误差。张鹏等^[8]利用小波降噪技术对围岩接触压力进行降噪处理, 消除或削弱随机误差的干扰。潘龙等^[9]提出一种基于经验模态分解的数据处理方法, 以解决围岩监测数据的随机误差问题。其次, 进行监测数据的回归分析, 即对监测数据进行曲线拟合, 获得监测数据的时间效应和空间效应等, 能更加直观地表达围岩监测数据蕴含的内在规律。李邵军等^[10]基于某隧洞群原位监测数据, 通过回归分析获得了单测点位移历时曲线、不同边墙距离测点位移曲线以及锚杆应力历时曲线等。段涛等^[11]基于某地下洞室开挖安全监

测资料, 分析了围岩变形特征、支护应力特征以及围岩变形的变化规律等。

以上对围岩监测数据的处理, 更多局限在对相同类型监测数据的初步分析上, 而在地下工程设计与建设中, 还需要知道不同类型、不同位置测点数据的有效性, 以便指导安全监测工作中测点布置、数据分析以及安全决策。随着地下工程向着深部岩体发展, 在工程实践中常常会出现超经验认识的现象。刘宁等^[12]发现, 围岩破坏时变形仍可能在围岩变形的控制标准范围之内, 变形监测失去了预警的意义, 而锚杆应力计对围岩状态的变化比多点位移计更加敏感, 更具有预警价值。

目前, 缺少先进且便捷的围岩监测信息数据效力评估方案。机器学习是一种隶属于人工智能的大数据分析技术, 能够从多维海量数据中辨识数据特征之间的关联性^[13-14]。笔者利用机器学习技术对围岩监测信息进行效力评估, 旨在提供一种围岩监测数据分析与评估方案, 探究不同监测信息与围岩损伤之间的联系。

1 围岩监测信息与 VER 指标

围岩宏观变形是围岩力学形态最直接、最外在

* 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3090103)

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-11-25

的体现。围岩变形可以分为4个阶段^[15],即缓慢变形、急剧变形、变形减缓和基本稳定。国家规范和行业标准^[16-17]规定:当围岩变形小于0.2 mm/d时可认为基本稳定;在有长期观测成果时,观测后期全月平均变形小于0.1 mm/d时认为是稳定的;公路隧道以洞身周边收敛速率0.1~0.2 mm/d及拱顶沉降速率0.07~0.15 mm/d作为围岩稳定判据。

图1给出锦屏二级水电站引水隧洞多点位移监测结果^[12],该断面埋深约为1 122 m。由图可以看出:锦屏二级水电站1#和2#引水隧洞开挖导致的变形量较小,最大不超过10 mm;隧洞开挖以后围岩能迅速稳定,滞后变形现象不明显,从洞壁到围岩内部的变形量衰减迅速。

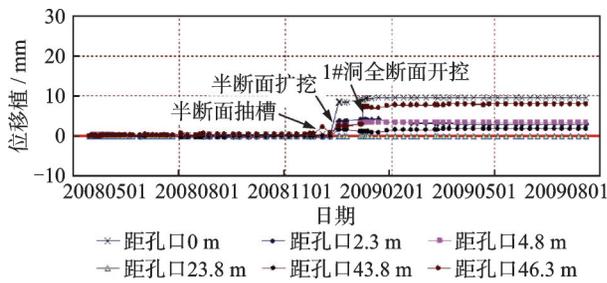


图1 锦屏二级水电站引水隧洞多点位移监测结果

Fig.1 The results of disp-monitoring of headrace tunnel of Jinping II hydro-power station

围岩体损伤是一个区域性损伤,多点位移综合指标比单点位移指标更能描述围岩区域性损伤特性。笔者以多点位移监测技术为基础,提出围岩体积扩容率指标,即开挖后围岩体积的膨胀量与开挖前围岩体积的比值,通过围岩体内部位移监测数据可进行推算。假设隧洞为圆形洞室,可采用多点位移计监测围岩内部位移,其计算公式为

$$v_{i,i+1} = \frac{\left[(r_i - u_i)^2 - (r_{i+1} - u_{i+1})^2 \right] - (r_i^2 - r_{i+1}^2)}{r_i^2 - r_{i+1}^2} \quad (1)$$

其中: r 为测点与隧洞中心点的距离; u 为测点位移。

围岩锚杆轴力的大小能够反映锚杆受力特性和支护能力,锚杆的轴力与围岩应力变化以及隧道收敛变形密切相关。在施工及围岩支护过程中对锚杆轴力的大小及分布状况进行量测,不仅能评判杆体与接触介质间的剪应力,还能进一步分析当前围岩的变形状态。根据反馈数据实时修正锚杆的设计参数,调整锚杆支护时机,对支护体系的优化和提高围岩稳定性具有重大意义。

此外,围岩监测信息还含有声学信息,即声发射

监测信息(acoustic emission,简称AE)和声波检测信息。声发射监测信息是岩体损伤的主动信息。外界应力作用会引起岩体微裂隙的产生与扩展,伴随着弹性波或者应力波的释放,这种弹性波在地质上称为声发射^[18-19]。声波检测信息是岩体损伤的被动信息。岩石声波检测技术是一种将声波发射到岩石中的人工方法,其基本原理是由于地质条件的不均匀性、隧洞开挖导致的围岩状态变化以及围岩二次应力分布不均匀性等,隧洞开挖以后在断面上进行声波测试可以获得不同的波速变化。

2 围岩监测试验

2.1 试验原理

基于离散元方法的颗粒流程序在岩土工程中被广泛应用^[20-21],其在搭建材料与结构模型、设置试验条件、监测岩石断裂和损伤等方面具有优越性。与连续介质力学计算方法不同,颗粒流程序是将材料离散为大量直径不等、刚度很大并相互接触的颗粒,模拟颗粒介质的相互作用及其运动规律。其计算原理主要基于力-位移定律和牛顿第二定律,采用显式有限差分方法进行循环迭代求解^[22]。

2.2 试验设计

本研究岩体模型采用二维模型。模型的基本参数参考一条软岩圆形矿产巷道^[23],其埋深为980 m,上覆岩层平均容重为24.5 kN/m³。巷道所处地层为泥岩,泥岩抗压和抗拉强度分别为21.5 MPa和1.28 MPa,弹性模量为2.68 GPa,泊松比为0.23,内聚力为2.5 MPa,内摩擦角为40°。

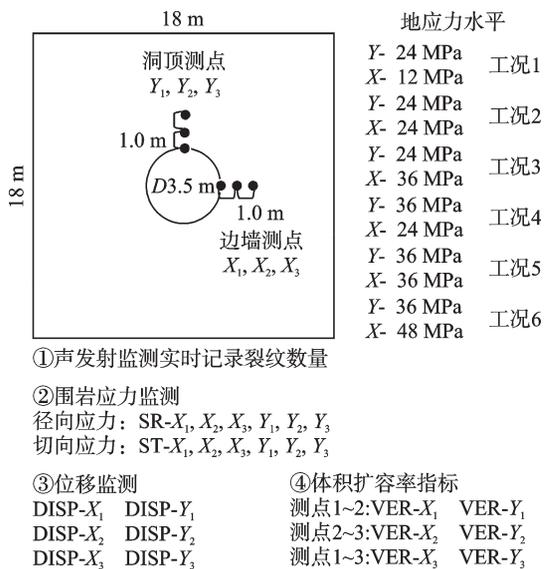
颗粒流程序中的模型细观参数不对应实际材料参数,通常是通过人为调整参数,使得模型计算出的宏观响应与室内标准压缩试验结果基本一致。崔嘉慧等^[24]通过拟合分析建立单个细观参数与宏观参数间的经验表达式,明确了不同颗粒细观参数对岩石宏观力学特性的影响规律。采用50 mm×100 mm的岩石试样进行离散元单轴试验,反复试算并调整试样材料的各个细观参数,确保其单轴压缩试验结果与实际岩体的宏观力学特征参数基本相符。模型细观参数如表1所示。

以表1参数为基础,进一步建立二维岩体和隧洞开挖模型。岩体尺寸为18 m×18 m,圆形隧洞直径为3.5 m^[25]。对于深埋隧洞,岩体不同方向的地应

表1 模型细观参数

Tab.1 Discrete element model parameters			
细观参数	数值	细观参数	数值
颗粒半径比	1.66	平行黏结弹性模量/GPa	3.0
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	3 000	平行黏结刚度比	1.0
颗粒接触模量/GPa	3.0	平行黏结抗拉强度/MPa	10
颗粒接触刚度比	1.0	平行黏结黏聚力/MPa	20
颗粒摩擦因数	0.5	平行黏结摩擦角/(°)	45

力之间并没有关系,垂向应力是由自重产生的,水平应力则主要受到构造作用的影响,水平应力可大可小、可正可负。本研究竖向地应力根据实际工程首先取 24 MPa,相应的水平向地应力分别设置为 12, 24 和 36 MPa;再将竖向地应力设置为 36 MPa,相应的水平向地应力分别为 24, 36 和 48 MPa,共设计 6 个计算工况。围岩监测试验设计示意图如图 2 所示。



①声发射监测实时记录裂纹数量

②围岩应力监测

径向应力: SR-X₁, X₂, X₃, Y₁, Y₂, Y₃

切向应力: ST-X₁, X₂, X₃, Y₁, Y₂, Y₃

③位移监测

DISP-X₁ DISP-Y₁

DISP-X₂ DISP-Y₂

DISP-X₃ DISP-Y₃

④体积扩容率指标

测点1~2: VER-X₁ VER-Y₁

测点2~3: VER-X₂ VER-Y₂

测点1~3: VER-X₃ VER-Y₃

图2 围岩监测试验设计示意图

Fig.2 Design of the surrounding rock monitoring test

在洞周布置 2 组测点,1 组 3 个点,距离孔口临空面分别为 0.3, 1.3 和 2.3 m,分别定义为边墙测点 X₁, X₂, X₃ 和洞顶测点 Y₁, Y₂, Y₃。共监测 4 类数据: ①声发射监测;②围岩应力监测,包括测点的径向应力(记为 SR-测点)和切向应力(记为 ST-测点);③位移监测(记为 DISP-测点);④根据式(1)计算 2 组测点之间的围岩体积扩容率(记为 VER-测点)。

2.3 试验结果

图 3 给出 6 种工况下围岩监测运行 8 000 时间步后声发射监测结果。可以看出:工况 1~2,围岩

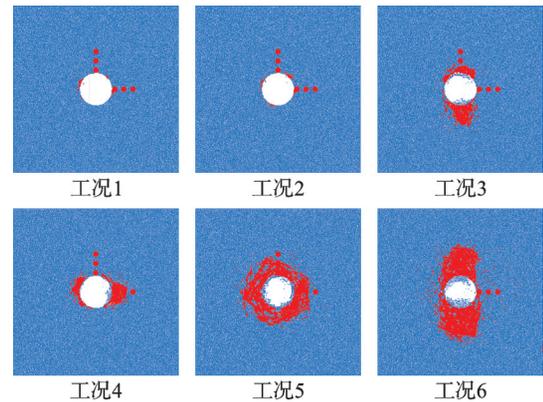


图3 声发射监测结果

Fig.3 AE monitoring results

损伤范围较小,仅有较小范围的洞周围岩有损伤现象,围岩能够基本维持自稳;工况 3~6,围岩有较大坍塌风险,不足以靠自身承载能力维持稳定,损伤范围大约在 0.6~3.2 m 之间。工况 3~6 中,隧洞围岩的损伤形态与地应力水平有直接关系。当水平地应力小于竖向地应力时,围岩损伤集中发生在两侧边墙,反之围岩损伤集中在洞顶和洞底;当两个方向地应力相当时,围岩损伤在洞周均匀分布。监测数据曲线如图 4 所示。根据图 4 进行以下分析。

1) 数据合理性分析。试验获得的位移和应力监测数据变化趋势与实际工程监测数据的变化规律一致,监测数据的数量级也较为合理。工况 1~2,围岩通过自身承载能力实现稳定,达到稳定时最大位移不超过 10 mm。其他工况围岩发生失稳破坏,相应的测点位移均有突变现象。

2) 位移指标分析。工况 1~2,隧洞开挖后位移曲线迅速增大,位移达到峰值点,然后位移有小幅下降,表明该部分变形为弹性变形,应力小幅回弹使得变形量减小,经历一段时间波动后位移曲线趋于稳定。最大位移量总体上洞顶>边墙,工况 1 洞顶位移大幅大于边墙位移,工况 2 洞顶与边墙位移相当。工况 3、工况 6 损伤发生在洞顶和洞底,其边墙位移大幅大于洞顶位移,洞顶测点 Y₁, Y₂, Y₃ 位移均有突变现象,表明相应时间的测点处围岩体发生失稳破坏。

3) 围岩应力分析。径向和切向应力均经历卸压—回升—波动—稳定 4 个阶段。径向应力稳定后较开挖前有不同程度下降,随深度增加应力降低程度减弱,在一定深度处重新达到原岩应力水平,越靠近临空面卸压越为彻底。测点径向应力下降到最小值时间随测点深度增加而增大,表明隧洞由表面向

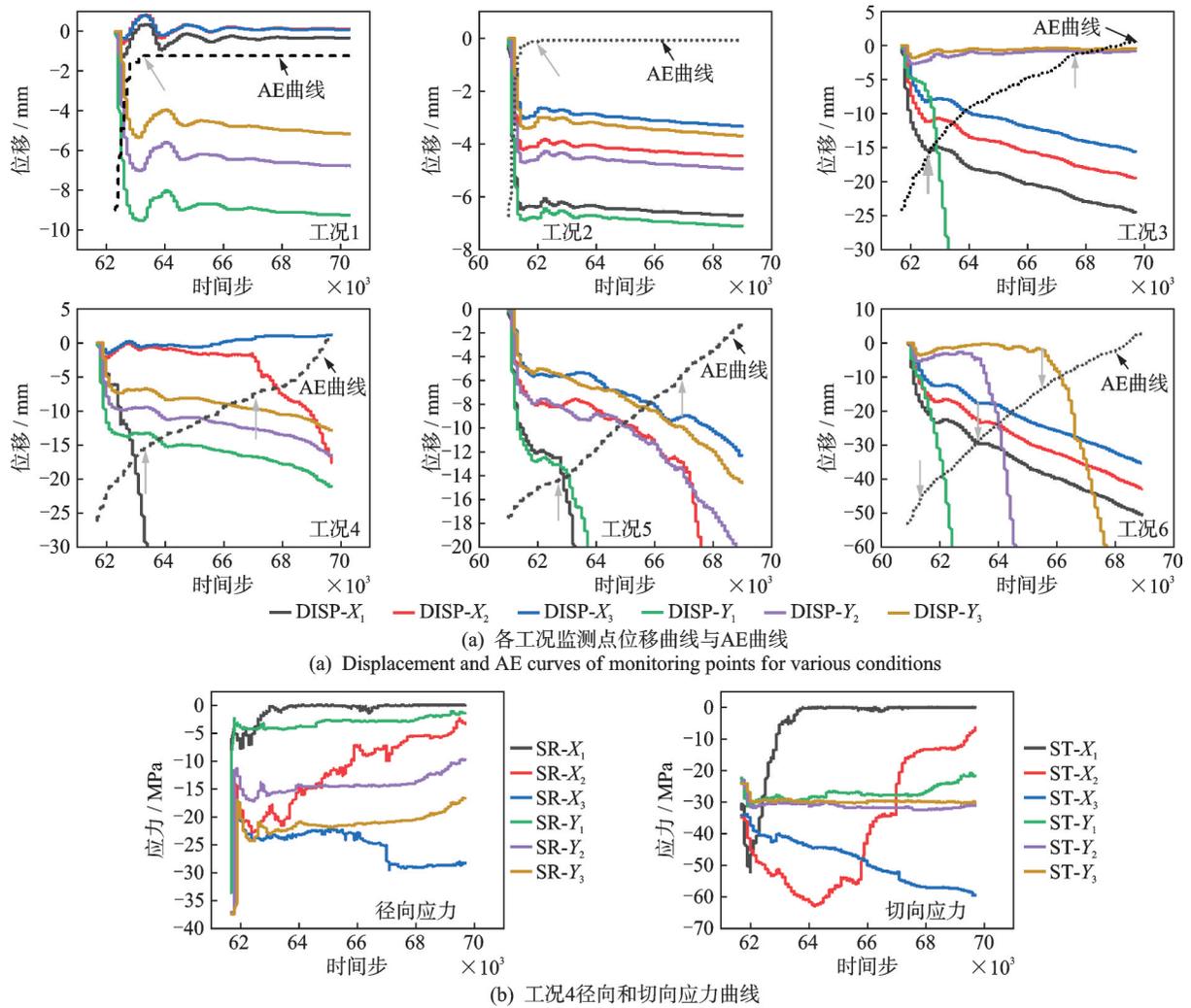


图4 监测数据曲线

Fig.4 Monitoring data curves

深部逐步完成应力释放。切向应力经历快速小幅下降后逐渐增大,在达到峰值点后开始回落,最终达到稳定。切向应力开挖瞬间应力降低幅度小于径向应力,应力再次平衡后一定深度内切向应力高于原岩应力,表明隧洞周边出现应力集中,如图4(b)ST-3X所示。

4) 围岩损伤阶段。根据声发射监测曲线以及围岩位移突变判据,将各个工况围岩变形稳定阶段

划分成若干损伤阶段,如表2所示。工况1~2划分了2个损伤阶段,工况3~5划分了3个损伤阶段,工况6划分了4个损伤阶段。不同损伤阶段在不同工况中意义不同:在工况1~2中,损伤I阶段位移迅速增大,历时较短,损伤II工况已基本达到稳定状态;在工况3~6中,不同的损伤阶段对应围岩内微裂纹不同的发育趋势,也对应了不同深度测点发生破坏的阶段。

表2 围岩损伤阶段

Tab.2 Damage process of surrounding rock

工况(监测起始时间步/1 000)	损伤I阶段	损伤II阶段	损伤III阶段	损伤IV阶段
工况1(62.3~70.3)(自稳)	62.3~63.3时间步	63.3~70.3时间步	—	—
工况2(61.0~69.0)(自稳)	61.0~62.0时间步	62.0~69.0时间步	—	—
工况3(61.7~69.7)	61.7~62.6时间步	62.6~67.6时间步	67.6~69.7时间步	—
工况4(61.7~69.7)	61.7~63.3时间步	63.3~67.3时间步	67.3~69.7时间步	—
工况5(61.0~69.0)	61.0~63.0时间步	63.0~66.8时间步	66.8~69.0时间步	—
工况6(60.9~68.9)	60.9~61.4时间步	61.4~63.3时间步	63.3~65.5时间步	65.5~68.9时间步

3 指标评估试验

3.1 实现过程和算法选优

本研究的目的是用围岩监测指标判定围岩损伤状态,并评估各类指标的效力。结构损伤判定属于机器学习的分类问题。常见的机器学习分类预测算法有人工神经网络、决策森林、支持向量机和逻辑回归算法。在众多的机器学习平台中,Azure Machine Learning 集成了许多现有的机器学习模型,使用便捷,能够进行可视化分析,因此采用 Azure 机器学习平台进行试验。

首先进行数据处理,数据以列为单位,每个工况整理 1 个数据文件。数据包括数据特征和数据标签,数据特征为各类监测指标,数据标签为不同的损伤阶段。损伤判定试验的实现过程如图 5 所示,大致可以分为数据处理模块、训练算法和训练模块以及后处理评估模块。将需要的计算模块按照正确的逻辑排列与链接,再进行参数设置,即可完成相应的计算任务。其中:数据选择模块可以按需选择或删除后续计算中数据包括或排除的列;数据分割模块将数据集的行拆分为 2 个不同的集合,本研究设置为 70%,即 70%的数据用来模型训练,30%的数据用来精度测试;特征显著性模块可以计算训练模型和测试数据集特征变量的显著性分数;评估模块使用回归模型给出测试的精度。

笔者从 3 种分类预测算法(多类决策树、多类逻辑回归、多类神经网络)中选择 1 种最合适的,选用原则如下:①应该具有较高的分类预测精度;②指标

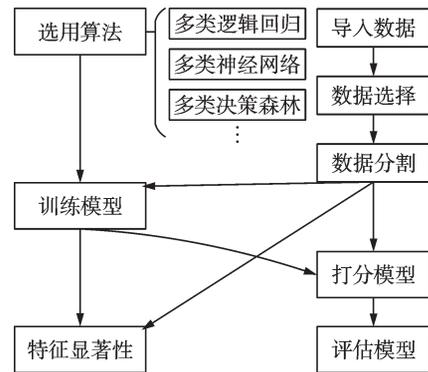


图 5 损伤判定试验的实现过程

Fig.5 Process of damage determination based on machine learning

显著性排序应该符合地下工程围岩监测数据的一般性认识,若不符合则弃用。以工况 4 的监测数据为试验对象,依次采用 3 种算法进行试算,以位移为数据特征对算法进行选优。

算法选优结果如图 6 所示。其中:第 1 行是损伤判定结果,即预测精度矩阵,图中的数字含义是实际为某类(竖列)的数据被判别为某类(横列)的概率;第 2 行是监测指标的显著性分数排位,排位越高说明相应的监测指标对损伤判定更加有效。

由图 6 可见,3 种算法损伤判定精度都很高,具体精度排序为:多类决策树算法>多类逻辑回归算法>多类神经网络算法。多类逻辑回归算法的显著性指标 $DISP-X_1=DISP-X_2>DISP-X_3$,这与前文指标分析得出的“边墙测点 $X_1\sim X_2$ 间扩容程度> $X_1\sim X_3$ 间扩容程度> $X_2\sim X_3$ 间扩容程度”结论相一致。综合对比,多类逻辑回归算法更加适合围岩损伤判定的应用场景。



图 6 算法选优结果

Fig.6 Machine learning algorithm optimization results

3.2 试验结果

试验策略是先分别选择各工况的全体位移指

标、全体 VER 指标以及全体径向、全体切向应力指标进行计算,再选取 3 类指标的最优结果,组合成综合指标进行不同类型指标的联合计算。本研究给出

工况 1~工况 3 的损伤预测精度矩阵图与指标显著性分数图,如图 7 所示。

1) 损伤判定精度分析。损伤判定结果整体具有较高精度,其中位移指标和 VER 指标损伤判定的精度最高,应力指标对围岩损伤判定的精度一般,但也基本大于 70%。工况 5、工况 6 中损伤 I 阶段的判定出现较大误差,其原因可能是数据样本较短,因此可以增大训练样本的比例或者增加数据样本的密度。围岩损伤判定的精度排序为位移指标>VER 指标>切向应力指标>径向应力指标。

2) 指标显著性分析。工况 3 的显著性指标为 Y_1

测点位移、 $Y_1 \sim Y_2$ 和 $Y_1 \sim Y_3$ 测点间体积扩容率以及洞顶 Y_3 测点的径向和切向应力,该结果反映了工况 3 洞顶损伤的位置和程度。与工况 3 相对应,地应力水平更大的工况 6,其显著性指标为洞顶 Y_2 测点位移以及 $Y_2 \sim Y_3$ 间体积扩容率,显著性指标结果反映了两种工况损伤程度的差异性。工况 4 与工况 3、工况 6 相反,其显著性指标均指向边墙位置测点。工况 5 洞顶和边墙的面积扩容率指标显著性分数相当,反映了该工况洞顶和边墙发生了相似的损伤范围。

3) 显著性指标分析。对于围岩能够自稳的工况 1 和 2,浅部测点间扩容率以及深部测点的径向和

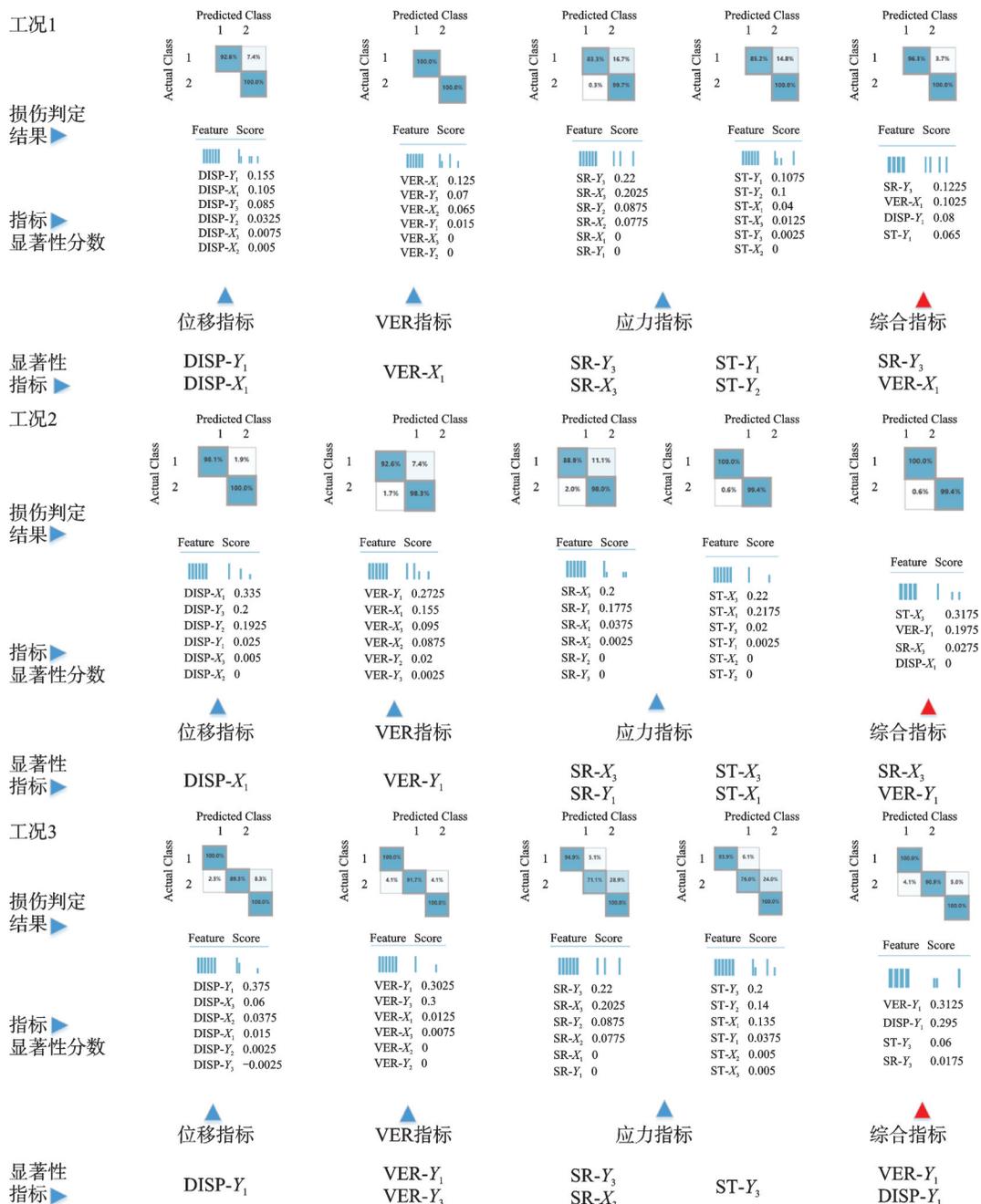


图 7 围岩损伤判定结果

Fig.7 Results of damage diagnosis based on machine learning

切向应力对围岩损伤状态变化较为敏感;对于围岩失稳情况的工况3~工况6,浅部测点的位移及中部、中部的切向应力对围岩损伤状态变化较为敏感。

从工况1到工况6,随着地应力水平越来越高,显著性指标呈现如下规律:浅部测点间扩容率→浅部测点位移→深部测点间扩容率→深部测点位移,反映了各工况下围岩损伤程度的差异性。在地应力较大的工况4~工况6,围岩切向应力是反映围岩损伤状态的显著性指标。

综上所述,基于机器学习算法的围岩损伤判定结果整体具有较高的精度,指标显著性分数排序反映了各个工况下不同监测指标对损伤的判定效力。显著性指标不仅可以反映不同工况的损伤位置,还能反映损伤程度。随着地应力的增加,位移监测的显著性指标呈现由浅部到深部、由区域性损伤到点破坏的变化过程。该结论从监测角度描述了围岩从损伤到失稳的历程:当监测点之间的损伤达到一定程度后,浅部测点的围岩将失稳,启发了新的失稳判据指标,即围岩体积扩容率阈值。同时,在地应力水平高的条件下,围岩切向应力对围岩状态的变化更加敏感。

4 结 论

1) 离散元试验获得的围岩监测数据与实际围岩监测数据规律基本一致,数量级合理。通过试验设计,获得了2种围岩自稳情况和4种围岩失稳情况。围岩体积扩容率指标相比于单点位移指标在描述围岩损伤范围上时具有优越性。

2) 设计的机器学习分类算法能有效进行围岩损伤判定试验,围岩损伤判定结果整体具有较高的精度。算法优选试验结果表明,多类逻辑回归方法更加适合围岩损伤判定的应用场景。

3) 显著性监测指标可以反映不同工况围岩的损伤位置和损伤程度。随着地应力的增加,显著性监测指标呈现由浅部到深部、由区域性损伤到点破坏的变化过程。在地应力水平高的条件下,围岩切向应力对围岩状态的变化更加敏感。

参 考 文 献

[1] 龚剑, 吴小建. 地下工程施工安全控制及案例分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021: 1-20.

[2] 郑颖人, 朱合华, 方正昌, 等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 304-338.

[3] 张建伟, 李香瑞, 严鹏, 等. 基于尖点突变理论和MWMPE的围岩稳定监测[J]. 振动、测试与诊断,

2021, 41(6): 1199-1205.

ZHANG Jianwei, LI Xiangrui, YAN Peng, et al. Stability monitoring of surrounding rock based on sharp point mutation theory and MWMPE[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1199-1205. (in Chinese)

- [4] 朱维申, 孙爱花, 王文涛, 等. 大型洞室群高边墙位移预测和围岩稳定性判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1729-1736.
- ZHU Weishen, SUN Aihua, WANG Wentao, et al. Study on prediction of high wall displacement and stability judging method of surrounding rock for large cavern groups [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1729-1736. (in Chinese)
- [5] BOZORGZADEH N, BATHURST R J. Bayesian model checking, comparison and selection with emphasis on outlier detection for geotechnical reliability-based design [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 116: 103181.
- [6] PENG Y X, LIU Y S, ZHANG C, et al. A novel denoising model of underwater drilling and blasting vibration signal based on CEEMDAN [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(5): 4857-4865.
- [7] LI H, WANG G, WEI B, et al. Improved variational mode decomposition method for vibration signal processing of flood discharge structure [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 28(12): 107754632110161.
- [8] 张鹏, 李献勇, 陈剑平. 基于小波降噪的隧道围岩监测数据分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(6): 1010-1014.
- ZHANG Peng, LI Xianyong, CHEN Jianping. Monitoring data analysis of tunnel surrounding rock based on wavelet denoising [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(6): 1010-1014. (in Chinese)
- [9] 潘龙, 王建国. 基于EMD和RBF的隧道围岩监测数据分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(3): 395-398, 402.
- PAN Long, WANG Jianguo. Analysis of monitoring data of wall-rock in expressway tunnel based on EMD method and RBF neural network [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(3): 395-398, 402. (in Chinese)
- [10] 李邵军, 郑民总, 邱士利, 等. 中国锦屏地下试验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8): 842-852.
- LI Shaojun, ZHENG Minzong, QIU Shili, et al. Characteristics of excavation disasters and long-term in-situ mechanical behavior of the tunnels in the China Jinping

- Underground Laboratory [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 842-852. (in Chinese)
- [11] 段涛, 段杭, 任大春, 等. 白鹤滩水电站左岸地下厂房施工期围岩稳定安全监测分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 37-44, 66.
DUAN Tao, DUAN Hang, REN Dachun, et al. Safety monitoring analysis of surrounding rock stability during construction of left bank underground powerhouse in Baihetan hydropower station [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(6): 37-44, 66. (in Chinese)
- [12] 刘宁, 张春生, 单治钢, 等. 深埋硬岩隧洞开挖响应合理解释与监测优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(supp1): 2818-2827.
LIU Ning, ZHANG Chunsheng, SHAN Zhigang, et al. Reasonable interpretation and monitoring optimization of excavation response for deep buried hard rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(supp1): 2818-2827. (in Chinese)
- [13] DOMINGOS P. A few useful things to know about machine learning [J]. Communications of the ACM, 2016, 55(10): 78-87.
- [14] LIN Y, ZHOU K P, LI J L. Application of cloud model in rock burst prediction and performance comparison with three machine learning algorithms [J]. IEEE Access, 2018, 6: 30958-30968.
- [15] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 3-21.
Zhang Dingli. Essential issues and their research progress in tunnel and underground engineering [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 3-21. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国水利部. SL279—2016 水工隧洞设计规范: [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [17] 中华人民共和国交通运输部发布. JTG F60—2009 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [18] 冯夏庭. 深埋硬岩隧洞动态设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 264-272.
- [19] 张传庆, 高阳, 刘宁, 等. 深埋隧洞力学响应监测与测试设计的思考[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2626-2631.
ZHANG Chuanqing, GAO Yang, LIU Ning, et al. Reflection on the problems in mechanical response monitoring and testing design of deep tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2626-2631. (in Chinese)
- [20] HUANG Y H, YANG S Q, ZHAO J. Three-dimensional numerical simulation on triaxial failure mechanical behavior of rock-like specimen containing two unparallel fissures [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(12): 4711-4729.
- [21] 崔臻, 侯靖, 吴旭敏, 等. 脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(5): 983-995.
CUI Zhen, HOU Jing, WU Xumin, et al. Influence of time-dependent of crack propagation of brittle rock on long-term stability of Jinping water diversion tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(5): 983-995. (in Chinese)
- [22] 王涛. PFC2D/3D 颗粒离散元计算方法及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 7-10.
- [23] 林志斌, 李元海, 高文艺, 等. 基于PFC^{3D}的深埋圆形隧洞变形破裂时效特征分析[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 73-80.
LIN Zhibin, LI Yuanhai, GAO Wenyi, et al. Analysis of deformation and rupture time characteristics of deep buried circular tunnels based on PFC^{3D} [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 73-80. (in Chinese)
- [24] 崔嘉慧, 梁奇锋. 基于PFC^{3D}模型的岩石宏观力学参数相关性研究[J]. 科技通报, 2019, 35(10): 8-15.
CUI Jiahui, LIANG Qifeng. Research on the correlation of macro and micro mechanical parameters of rocks based on PFC^{3D} model [J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(10): 8-15. (in Chinese)
- [25] 于辉, 张晓君, 李宝玉, 等. 巷道开挖扰动下围岩宏观力学响应及能量机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(supp1): 60-69.
YU Hui, ZHANG Xiaojun, LI Baoyu, et al. Macroscopic and microscopic mechanical response and energy mechanism of surrounding rock under disturbance during tunnel excavation [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(supp1): 60-69. (in Chinese)



第一作者简介:温嘉琦,男,1994年5月生,博士、工程师。主要研究方向为岩石力学与围岩安全监测。
E-mail:jqwen@nhri.cn

通信作者简介:汤雷,男,1972年6月生,博士、正高级工程师、博士生导师。主要研究方向为水工结构损伤探测。
E-mail:ltang@nhri.cn