



极深地下实验室洞室稳定可靠性分析与监测系统开发

李邵军^{1*}, 冯泽杰^{1,2}, 曾志³, 薛涛³, 李名川⁴, 申满斌⁴, 杨进忠⁴, 肖亚勋¹, 潘鹏志¹

1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 武汉 430071

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 清华大学工程物理系, 北京 100084

4. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610051

*联系人, E-mail: sjli@whrsm.ac.cn

收稿日期: 2024-10-04; 接受日期: 2024-12-20; 网络出版日期: 2025-06-03

国家自然科学基金(编号: 52125903, 42172317, 42202320)资助项目

摘要 极深地下实验室已成为全球各国基础科学研究的焦点和趋势, 为深部岩石力学的发展带来重大契机和挑战. 洞室的安全稳定是极深实验室各类科学研究的基础和关键, 本文聚焦锦屏深地工程力学与安全(Jinping Deep Rock Engineering Mechanics and Safety, DREM)项目组研究方向, 依托世界埋深最大的锦屏地下实验室二期工程, 介绍了实验室的基本工程地质条件, 分析了开挖建设和运行过程中洞室安全问题和监测结果, 提出了基于支持向量机响应面的洞室稳定可靠性分析方法, 采用物联网、数字孪生、数据可视化等先进技术, 开发了锦屏极深地下实验室洞室稳定性监测与预警系统, 设计了WEB端和3D端的交互分析模式, 实现了线下与线上相结合的实验室洞室各类监测物理量的实时监控和安全分析. 研究结果表明, 当前锦屏极深实验室二期长期运行过程中洞室围岩处于安全稳定状态. 本研究为深部实验室洞室稳定性评估和安全监测提供重要借鉴.

关键词 锦屏地下实验室, 洞室稳定, 可靠性分析, 安全监测, 深部岩石力学

PACS: 91.65.-n, 91.30.pa, 91.50.Ey, 91.55.Fg

1 引言

深部地下实验室已成为全球各国发展建设和科学探索的一种新的趋势和平台, 是开展粒子物理、天体物理、生命科学、地球科学及岩石力学研究等一系列重大基础前沿课题研究的重要基地, 还将极大地促进

各个学科间的交叉融合创新^[1,2]. 世界上许多国家已在深部地下建立实验室, 如美国、意大利、加拿大、日本、瑞士和中国等, 中国锦屏地下实验室是目前全世界埋深最大、综合条件最好、规模最大、最“纯净”的深地实验室^[3].

由于极深地下实验室洞室处于高地应力状态下,

引用格式: 李邵军, 冯泽杰, 曾志, 等. 极深地下实验室洞室稳定可靠性分析与监测系统开发. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111019

Li S J, Feng Z J, Zeng Z, et al. Reliability analysis on cavern stability and monitoring system development for extremely deep underground laboratory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111019, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0440](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0440)

且受地震、施工、活动地下水等自然和人类活动多因素扰动影响, 长期运行过程中岩体力学行为呈现复杂演化特性, 极深洞室安全稳定是工程建设和运行面临的重大挑战. 深部岩石力学和工程长期稳定性也是国际岩石力学与工程界研究的焦点和热点^[4-7].

不确定性是岩石工程的固有属性, 如复杂地质条件、物理力学特性、自然环境扰动、人类工程活动等不确定因素, 已成为地下工程失稳和破坏的关键要素, 引起了越来越多科研工作者和工程师们的关注. 传统的岩石工程稳定性分析方法(解析方法、经验方法、数值方法等)在深埋洞室的安全评价中发挥重要作用^[5-9]. 然而, 这些方法尚未考虑多因素不确定性对洞室安全的影响, 为此, 本文考虑岩石工程中的不确定性, 基于机器学习算法和数值模拟, 建立不确定性因素条件下锦屏实验室洞室稳定的可靠性评估方法^[8-12].

中国锦屏实验室二期施工开挖和运行过程中, 聚焦于地下实验室安全建设运行及国际深部岩石力学前沿科技目标, 锦屏深地工程力学与安全项目组(DREM)入驻了该地下实验室, 开展了围岩变形、应力、开裂、声波、微震等多源立体原位监测, 融合多因素不确定条件下的洞室稳定可靠性评估方法, 开发了锦屏极深实验室洞室安全监测与预警系统, 对深部洞室围岩的变形破坏等力学行为进行了实时的跟踪和信息反馈, 实时监测和预警洞室围岩灾害和支护系统性态变化, 保障实验室在建设和运行过程中的安全稳定.

2 极深地下实验室工程概况

中国锦屏地下实验室二期(China Jinping Underground Laboratory Phase II, CJPL-II)位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的锦屏山山体中, 其最大埋深约2400 m, 是当今世界上埋深最大的地下实验室^[2]. 由于地质条件复杂, 大埋深洞室区构造作用强烈, 锦屏地下实验围岩处于极高应力状态, 测试最大地应力约70 MPa^[13]. 实验室处于轴向近南北走向的地质背斜区, 工程区岩性为三迭系中统白山组(T2b)大理岩, 完整岩石比重为 $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 单轴抗压强度120–190 MPa. 基于不同学科科学研究的功能分区, 实验室主体上包括10个实验厅, 分别是A1, A2, B1, B2, B3, B4, C1, C2, D1, D2, 如图1所示. 实验室在开挖建设

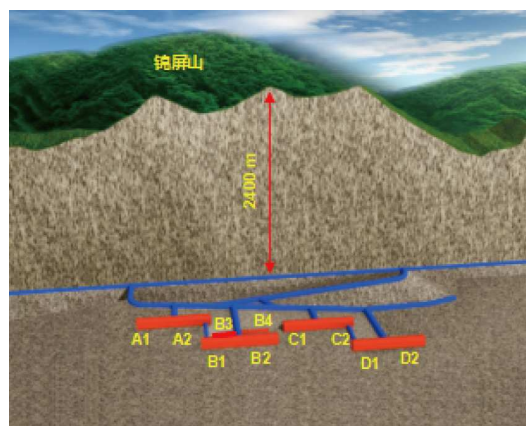


图1 锦屏地下实验室二期位置及各实验厅分布
Figure 1 Location and laboratory configuration of CJPL-II.

过程中发生岩爆、塌方、片帮、板裂等高强度灾害, 通过监测预警和动态设计和施工, 施工期灾害均得到了有效控制^[4,14]. 本文以D2实验厅为例, 分析了在开挖完成后长期运行过程中洞室围岩的安全监测和可靠性评估研究. D2实验厅长65 m, 城门洞型, 洞室截面 $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高), 实验厅岩体完整性较好, 属于II级围岩, 开挖建设过程和完成后的现场照片如图2所示.

3 实验室洞室围岩安全监测与分析

3.1 监测方案设计

对于极深地下实验室, 需要通过多手段综合测试洞室围岩表面变形、岩体深部变形、三维应力状态、岩体结构和破裂、微震动和岩爆灾害等多元信息, 把握岩体长期运行过程中的性态和灾变前兆信息, 才能实现有效的安全评价与实时预警. 为此, 相应地设计开展以下5个方面的监测工作:

(1) 实验室区域洞室微震监测, 深部工程运行期围岩深部的应力性微破裂、塌方和岩爆灾害是最重要安全风险, 利用微震监测和该区域的震动、重力场探测, 揭示实验室区域的地震动、岩体微破裂、岩爆灾害并实时预警灾害等级和规模;

(2) 洞室围岩扰动应力监测, 深部工程岩体灾变前首先会反应在应力场的变化, 通过三维扰动应力计实现对洞室围岩内应力重分布状态的测试^[15,16], 针对隧洞支护锚杆, 采用锚杆应力计测试围岩对支护结构的作用力, 反应洞室整体的应力状态;

(3) 岩体深部多点变位监测, 采用多点位移计, 实

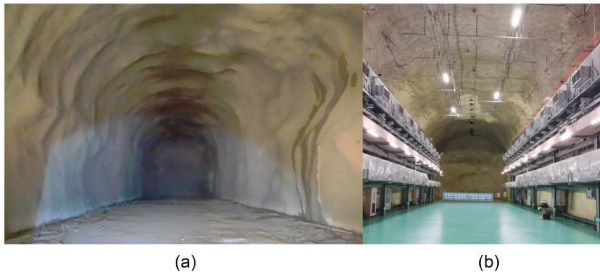


图 2 锦屏地下实验室二期D2厅现场照片. (a) 开挖完成; (b) 运行阶段

Figure 2 Field picture of excavation and operation of CJPL-II laboratory D2. (a) Completion of excavation; (b) operation phase.

现对实验室深部岩体变位情况的把握, 评价围岩长期变形条件下洞室的稳定情况;

(4) 围岩表面变形监测, 测试各洞室典型断面的表面变形情况, 确定洞室全面的收敛和局部表层的破坏

状况;

(5) 洞室围岩裂隙观测, 采用数字钻孔摄像测试岩体结构和裂隙的演化情况, 评价岩体的安全性; 通过岩石渗压计测试岩体裂隙的渗透水压力, 评估实验室运行过程中地下水压力及其对支护系统作用。

锦屏实验室二期各实验厅共布置13个监测断面, 现以D2实验厅为例分析其中部分监测成果。

3.2 扰动应力演化

为了研究D2实验厅围岩长期运行过程中扰动应力的变化情况, 通过扰动应力分量和应力扰动度SDI (Index of Stress Disturbed Degree)评价^[16]. 在实验厅的钻孔内共布置4个深度不同的光纤光栅空心包体应力传感器, 编号为ST-15-1, ST-16-1, ST-15-3, ST-16-3, 分别布置在D2厅边墙6.9, 7.8, 11.7和11.3 m的位置. 图3

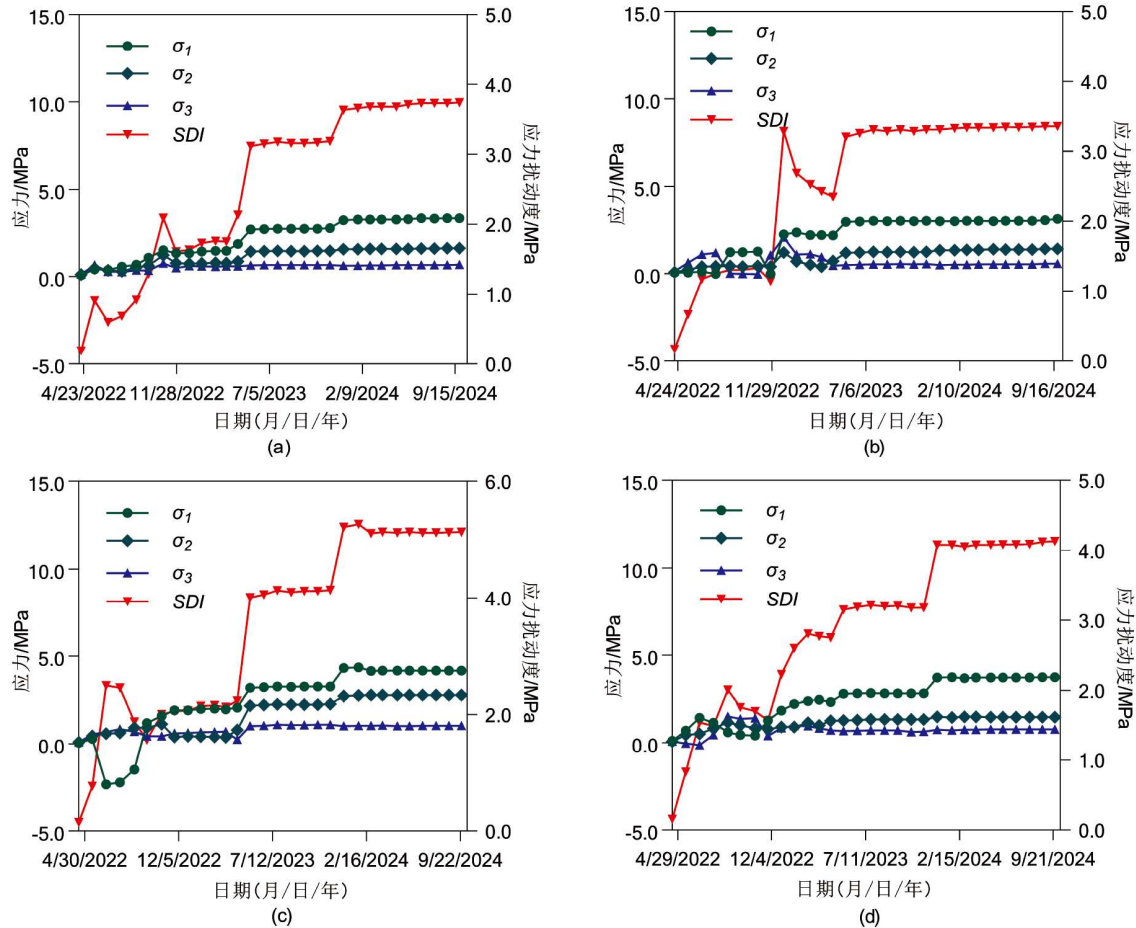


图 3 D2实验厅扰动应力监测时程曲线. (a) ST-15-1; (b) ST-15-3; (c) ST-16-1; (d) ST-16-3

Figure 3 Time travel curve of disturbance stress monitoring in laboratory D2. (a) ST-15-1; (b) ST-15-3; (c) ST-16-1; (d) ST-16-3.

为D2实验厅4支扰动应力计长期监测所得结果图, 由图中可看出, 从2022年4月份开始监测, 历时两年监测间应力扰动度SDI增加最大值为5.3 MPa, 在该应力增量条件下洞室围岩不会发生破裂, 实验室运行稳定.

3.3 深部位移演化

深部围岩位移的演化过程监测在D2实验厅左、右边墙布置2套多点位移计, 分别是DSP-15和DSP-16, 每套多点位移计包含3个测点, 布置在钻孔轴线1, 5和13 m的位置. 根据图4所示的监测结果, 自2022年至今, 围岩深部的最大位移仅为0.89 mm, 洞室围岩处于稳定状态.

3.4 锚杆应力演化

锚杆应力计布置了两个监测断面, 包含2套锚杆应力计, 分别为RA-15, RA-16, 每套锚杆应力计三个测点分别安装在距边墙围岩深度为1, 3, 5 m的位置. 由图5所示的实验厅围岩内部锚杆应力的变化情况, 岩体内部锚杆最大应力变化为6.0 MPa, 岩体内应力受到影响较小, 实验厅处于稳定状态.

3.5 岩体渗水压计演化

渗水应力计安装在D2实验厅左边墙距离洞口10 m处, 距离底板高度1.5 m, 编号为SS-5. 由图6可知, 从2022年4月9日至今, 岩体内渗压计最大应力变化为0.14 MPa, 岩体内渗透压力变化平稳, 未出现岩体突涌水风险.

4 极深实验室洞室稳定的可靠性分析

4.1 洞室稳定性评价综合指标

(1) 岩体位移评价指标

位移是地下工程开挖和支护设计过程中重要的反馈信息之一, 洞室开挖后的位移反映了洞室的稳定性. 在国内外有关规范中, 围岩稳定性判据多以变形值或变形速率为主, 认为围岩变形量或变形速率超过一定值后岩体即发生破坏.

位移评价指标采用隧洞周围最大位移与隧洞允许位移的归一化比较, 作为隧洞位移的极限状态方程, 来判断隧洞的稳定性:

$$F(D) = \frac{D_{\max}}{D_a}, \quad (1)$$

式中, $D_{\max}$ 为数值模拟得到的洞室周围最大位移, D_a 为隧道的允许位移. 隧道允许位移 D_a 可以根据允许应变 ε_a 确定, 允许应变可由临界应变 ε_r 计算.

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_{cm}}{E}, \quad (2)$$

式中, σ_{cm} 为单轴抗压强度, E 为杨氏模量.

(2) 岩体应力评价指标

采用洞室周围最大蓄存应力与洞室允许应力的归一化比较, 作为洞室应力的极限状态方程, 来判断洞室的安全性:

$$F(S) = \frac{S_{\max}}{S_a}, \quad (3)$$

式中, $S_{\max}$ 为数值模拟得到的洞室周围最大蓄存应力,

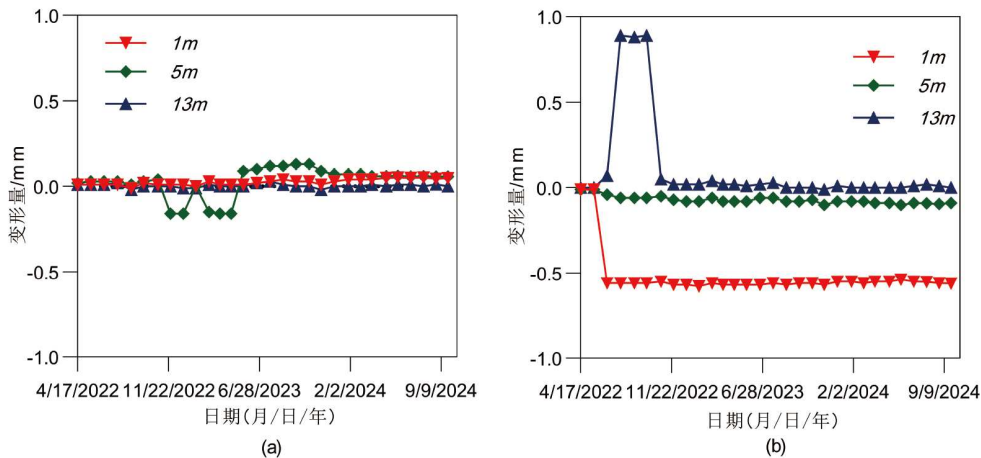


图 4 D2实验厅深部位移随时间变化过程曲线. (a) DSP-15; (b) DSP-16

Figure 4 Curve of deep displacement over time in laboratory D2. (a) DSP-15; (b) DSP-16.

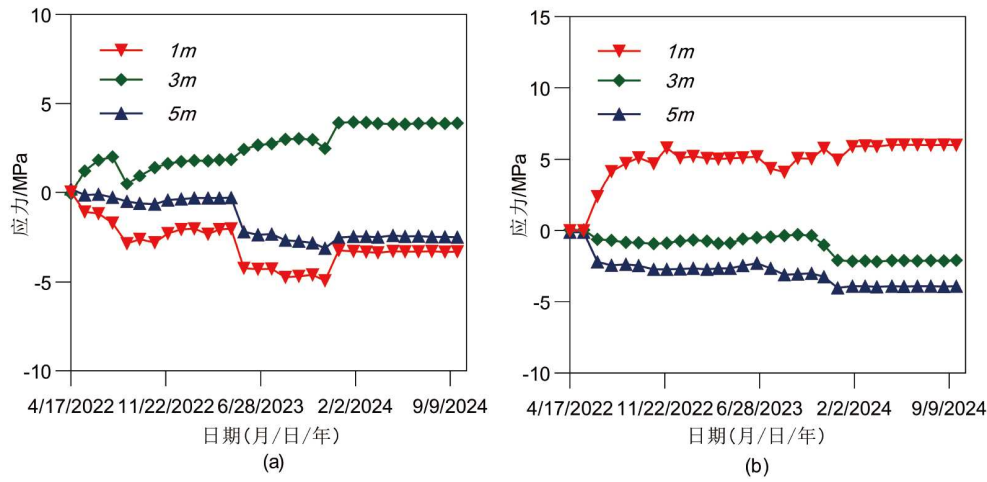


图 5 D2实验厅锚杆应力随时间变化过程曲线. (a) RA-15; (b) RA-16

Figure 5 Curve of anchor bolt stress over time in laboratory D2. (a) RA-15; (b) RA-16.

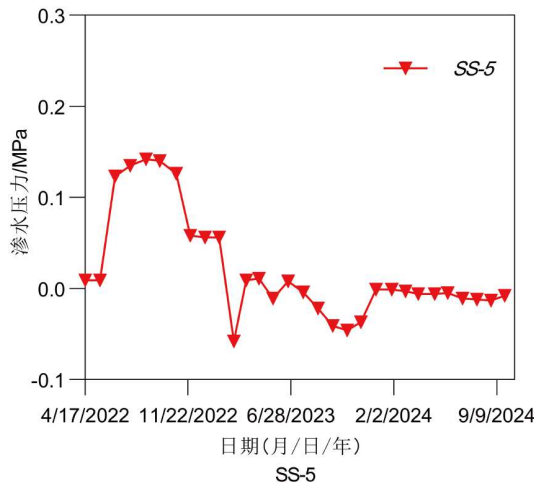


图 6 D2实验厅渗压计应力随时间变化过程曲线

Figure 6 Curve of osmometer stress over time in laboratory D2.

S_a 为隧道的允许蓄存应力, 洞室允许位移 S_a 可以根据3DNFC强度准则^[17]确定.

(3) 岩体破裂评价指标

在应力空间内, 当以应力分量作为变量时, 屈服面为六维应力空间内的超曲面. 若以主应力分量表示时, 屈服面为主应力空间内一个曲面, 称为屈服曲面. 初始屈服面或后继屈服面将应力空间分成两个部分, 应力点在屈服面内属弹性状态, 此时屈服函数 $F(\sigma) < 0$; 在屈服面上, 材料开始屈服, $F(\sigma) = 0$. 为此, 在三维主应力和三向应变空间内, 基于初始屈服面与未屈服应力

点的相互关系分析提出破坏度RFD (Rock Failure Degree Index)的新概念^[18], 可广义地表述为描述一点的现时状态与相对最安全状态参量的比值. 对于某一强度理论则可以定义为: 空间应力状态下的一点沿最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比.

$$\text{RFD} = \begin{cases} \frac{q}{g(\theta_\sigma)\sqrt{Ap^2 + Bp + C}}, & \text{峰前,} \\ 1 + (\varepsilon_{s/t}^p) / (\varepsilon_{s/t}^{p-\text{lim}}), & \text{峰后,} \end{cases} \quad (4)$$

$g(\theta_\sigma)$ 为塑性势函数; A, B, C 为强度准则系数; $\varepsilon_{s/t}^p$ 为当前塑性剪切/拉伸应变, $\varepsilon_{s/t}^{p-\text{lim}}$ 为极限塑性剪切/拉伸应变(典型试验曲线的残余段拐点值). 当破坏度RFD越大, 则表明该部位围岩破损越厉害.

(4) 综合评价指标

洞室不同部位的变形、应力和开裂情况存在显著差异, 因此单一的评价指标难以全面反映围岩的破坏状况. 为此, 提出了一种综合考虑变形、应力和开裂的隧洞安全预警评价指标:

$$\text{DSF} = \{A \cdot F(D) + B \cdot F(S)\} \times \text{RFD}, \quad (5)$$

DSF越大, 洞室围岩发生破坏的危险程度越高. 式中: $F(D)$ 为位移破坏倾向性指标, $F(S)$ 为应力破坏倾向性指标, RFD为开裂破坏倾向性指标, A 为位移破坏倾向权重系数, B 为应力破坏倾向权重系数.

4.2 基于最小二乘支持向量机响应面的洞室稳定可靠性分析

功能函数不能显式表达是求解地下洞室可靠度遇到的最大问题。响应面法是利用一些确定性分析的计算结果,对真实极限状态方程在验算点附近进行拟合,通过响应面函数来代替真实极限状态函数进行可靠度的计算,这样就避免了采用一次或二次可靠度方法(The First-Order Reliability Method, FORM 或 The Second-Order Reliability Method, SORM)不易求取极限状态函数对随机变量的偏导数的问题,使可靠度计算得到简化。近年来发展起来的基于机器学习理论的支持向量机(Support Vector Machine, SVM),为可靠性分析研究提供了一条新的途径。它在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势,与标准SVM相比, Suykens提出的最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)用等式约束代替了以往不等式约束,其算法可转化为解线性方程组,具有求解速度快的优点^[19-24]。

给定训练样本集 $\{x_k, y_k\} (k=1, 2, \dots, N)$ 其中输入样本 $x_k \in \mathbf{R}^N$, 输出样本 $y_k \in \mathbf{R}$, $\mathbf{R}^N$ 是N维向量空间, $\mathbf{R}$ 是一维向量空间, LSSVM可以用下列式子表示:

$$y(x) = W^T \varphi(x) + b, \quad (6)$$

$\varphi(\cdot)$ 表示把输入样本从原空间 $\mathbf{R}^N$ 映射到特征空间 $\mathbf{R}^{Nh}$ 的非线性映射, $W^T \in \mathbf{R}^{Nh}$, $b \in \mathbf{R}$ 。式(6)可以变换为下列式子:

$$y(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k K(x, x_k) + b, \quad (7)$$

式中, $K(x, x_k)$ 为核函数, 表示样本点 x 与训练样本 x_k 之间的相似度; α_k 为拉格朗日乘子, b 为偏差量, α_k 和 b 可由线性方程组求解得到。

结合综合评价指标DSF, 洞室安全可靠性分析的具体流程如下:

(1) 选择功能函数 $Z(x)$ 为综合评价指标DSF, $Z(x) = \{A \cdot F(D) + B \cdot F(S)\} \times \text{RFD}$;

(2) 通过拉丁超立方采样、蒙特卡洛采样等方法选择一定数量初始样本点 $X_0=(x_1, x_2, \dots, x_N)$, 一旦模型建立完成后, 根据LSSVM模型的可靠性分析结果进行后续的迭代采样;

(3) 计算各样本点的功能函数, 作为训练样本

集 $\{x, y\}$, 对于选定的 N 个样本点 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 计算对应的功能函数值 $Z(x_i)$, 即: $y_i = Z(x_i)$, 构造一个训练集 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ 用于训练LSSVM模型;

(4) 选择LSSVM的核函数及核函数的相关参数, 计算 α_k 和 b ;

(5) 利用最小二乘支持向量机LSSVM构造响应面函数 $\hat{Z}(x) \approx \text{SVM}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N \alpha_k K(x, x_k) + b$, 响应面 $\hat{Z}(x)$ 就是LSSVM预测的功能函数, 用来代替原始的功能函数 $Z(x)$;

(6) 根据一阶可靠度方法FORM计算可靠度 β^k ,

$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{[n]^T [R]^{-1} [n]}$, $n_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} = \Phi^{-1}[F(x_i)]$, 上标 k 表示第 k 次迭代;

(7) 判断 $|\beta^k - \beta^{k-1}| < \varepsilon$ (一般取 $\varepsilon = 0.001$)是否成立, 如果成立, 则迭代结束; 否则返回步骤2进行下一步迭代。

相比于传统的可靠性分析方法, 上述新方法通过使用核函数有效地处理数据中的非线性关系, 更加适用于复杂的工程问题。此外, 将最小二乘支持向量机(LSSVM)与响应面方法结合使用, 可以构建高效的响应面模型, 显著减少实验所需的样本数量, 同时提高分析效率并降低成本。

5 实验室洞室安全监测系统开发

5.1 开发环境与整体架构

锦屏地下实验室洞室安全监测系统采用C#软件自主开发, 基本数据库为Microsoft SQLServer。利用云平台技术, 提供系统基础运行环境, 系统以及数据库建设都在基础设施云平台之上建设。

锦屏地下实验室洞室安全监测系统基于已有的硬件资源与设备, 引进先进的大数据技术, 设计包含了数据层、平台层和业务层的云平台整体架构。

(1) 数据层

系统产生的数据纳入数据中心统一管理运维, 构建充分共享、适度开放、安全可控的数据共享开放新机制。数据层的建设基于统一的信息资源目录和分布式信息资源管理模式, 整合与综合管理体系内的多比例尺、分布式、海量、异构的现状等空间地理信息以

及全社会各行业空间数据, 统一组织空间信息、实现无缝的衔接、统一的服务和高效的应用.

(2) 平台层

平台层即服务引擎(应用支撑平台), 实现面向地下水资源环境信息实时监控平台的常规数据库访问、WebGIS, WebService数据服务和数据交换应用.

(3) 业务层

信息系统的门户构建在平台层之上, 采用包括服务分发、负载均衡、权限管理和访问控制等技术手段, 为各级用户提供统一的访问入口, 形成分布式体系. 此应用体系旨在保证高并发访问的高效性、稳定性和安全性. 用户通过本层提交具体业务请求, 系统在响应后将结果通过本层展示给用户.

监测系统主要由WEB端和3D客户端两大部分组成. 系统采用了物联网、数字孪生、数据可视化等先进技术, 建立了锦屏地下实验室的洞室精细模型和设备传感器模型, 借助监测采集设备、智能传感器、智能识别终端等智能感知系统, 利用基础设施平台和数

据中心打通数据通道, 结合建设方项目监测、运营管理、维护、安全控制等实际需要建设, 以最终实现“场景三维可视化、监测预警自动化、管理运营精细化”等目标^[25,26]. 如图7所示, WEB端采用B/S架构, 主程序采用“前后端分离(前端分权限展示)+数据程序服务端+数据云存储(本地可同步存储)”的形式; 3D客户端采用Unity 3D技术、三维模型及数据可视化技术.

5.2 WEB端模块开发与功能

图8所示WEB端包含了在线监测分析、数值仿真管理、洞室稳定性预警、数据采集管理和平台通用功能五大模块.

(1) 在线监测分析

主要管理锦屏实验室洞室各类相关数据资料, 包括文档类资料和洞室分布情况数据资料. 本模块对洞室设计的基础信息进行存储和维护, 也是处理和展示洞室监测点的监测设备窗口, 如图9所示.

(2) 数值仿真管理

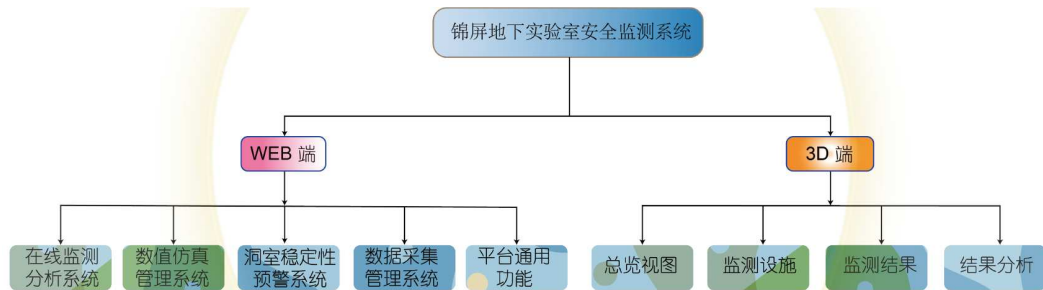


图 7 锦屏实验室安全监测系统总体设计

Figure 7 Overall design of CJPL-II safety monitoring system.

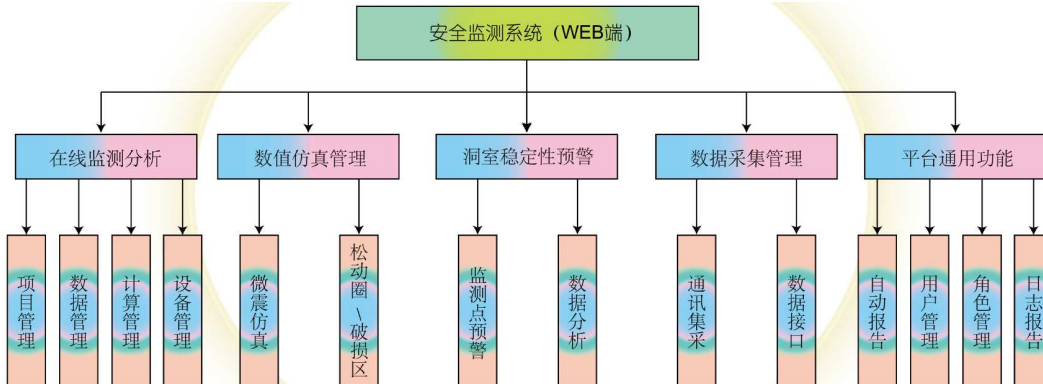


图 8 锦屏实验室安全监测系统WEB端功能设计

Figure 8 WEB terminal function design of CJPL-II safety monitoring system.

主要融合数值计算、微震仿真、围岩松弛变形分析等. 如图10所示, 操作人员将数值仿真和测试数据图片上传至系统中, 可供后期的数据比对和监测分析.

(3) 洞室安全性预警

主要通过本文提出的综合安全评价指标, 结合最小二乘支持向量机响应面可靠性分析、数值模拟和经验类比, 对监测数据进行综合判断. 系统能够自动生成综合预警阈值, 并将预警等级划分为安全、橙色、黄色和红色四类, 以评估洞室的具体安全系数等级. 同时, 将安全预警的最高和最低阈值区间作为安全作业的规范条件, 如图11所示.

(4) 数据采集管理

主要包含在线监测系统中的各种监测类型设备的数据传输协议和传输地址等参数化功能对接. 如图12所示, 将采集仪的基本信息进行设置, 并对应好采集仪传输数据的目标地址IP以及接收数据端口.

(5) 系统平台通用功能

主要为支撑平台的正常运转所设计, 包含自动报告、用户管理、用户角色管理等通用设置功能, 如图13所示.



图 9 设备统计功能示意图
Figure 9 Diagram of equipment statistics function.

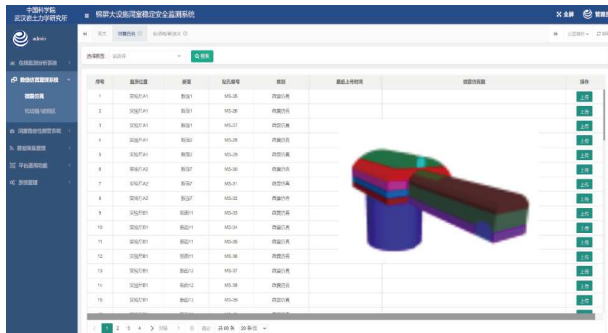


图 10 数值仿真分析示意图
Figure 10 Diagram of numerical simulation analysis.



图 11 监测点预警级别示意图
Figure 11 Warning level diagram of monitoring points.

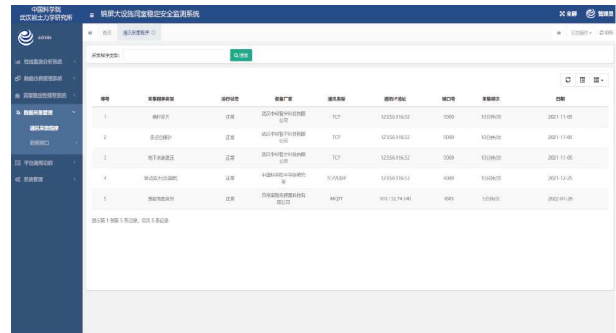


图 12 数据采集设置示意图
Figure 12 Diagram of data acquisition setup.

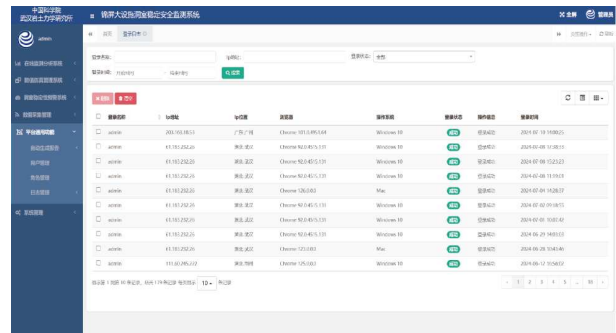


图 13 用户管理示意图
Figure 13 Diagram of user management.

5.3 3D端模块开发与功能

通过3D客户端可直观展示锦屏地下实验室洞室所在地理位置、洞室分布情况、断面布局、钻孔位置、监测数据和分析功能等.

(1) 总览视图

主要展示项目基本情况、监测设施类型、监测点数量、监测设备数量等总体信息, 如图14所示, 可使用

3D环绕操作更直观地可视化洞室山体周边地理环绕情况。

(2) 监测设施可视化查看与分析

主要以俯视图为初始视角, 可旋转方式多维度查看洞室的整体结构和钻孔布局, 左侧按洞室逐个分类展示洞室-断面-钻孔-设备的结构。右侧自动播放各设施的监测数据以及工作情况。如图15所示, 点击到具体所需监测设施时, 可展示该设施的历史数据情况。

(3) 综合预警

主要以时间维度展示监测点的监测结果, 如图16所示, 可做时间筛选操作查看具体时间段的数据监测预警情况, 并在三维视图上自动显示预警的监测设施。

(4) 结果分析

主要通过漫游形式展示洞室内部情况, 包括洞室的内部结构、钻孔的断面位置以及监测点与钻孔的具体情况, 如图17所示。用户可以实现自动漫游查看功能, 当漫游至特定监测点时, 可以查看该断面的平面和剖面监测点的数据结果分析情况。



图 14 监测系统的3D总览示意图

Figure 14 3D overview diagram of the monitoring system.

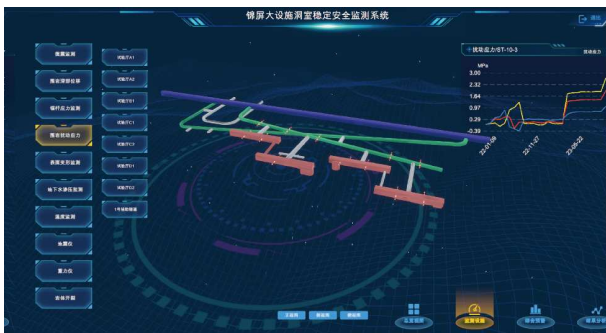


图 15 监测设施和监测数据自动播放示意图

Figure 15 Diagram of monitoring facilities and data auto play.

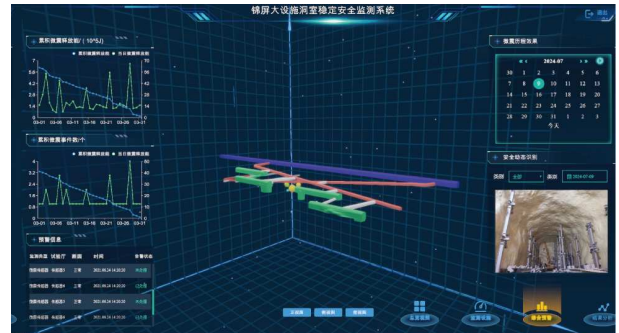
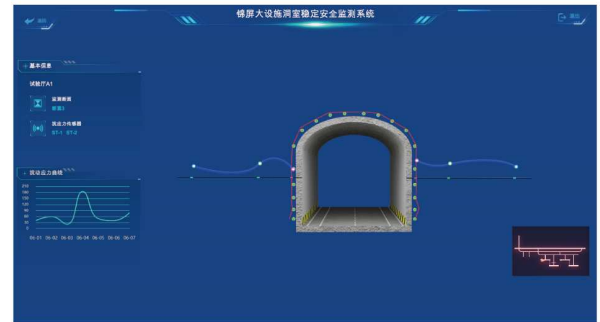


图 16 监测预警分析示意图

Figure 16 Diagram of monitoring and early warning result analysis.



(a)



(b)

图 17 监测断面的结果分析示意图. (a) 断面平面; (b) 断面剖面

Figure 17 Diagram of cross-sectional monitoring result analysis. (a) Cross-sectional plane; (b) cross-sectional profile.

6 结论

针对锦屏极深地下实验室建设和运行过程面临的洞室安全稳定问题, DREM项目组通过现场原位监测、可靠性分析和软件开发, 探讨了实验室洞室的变形破坏等力学行为, 评估了洞室的稳定性, 建立洞室稳定

安全监测系统平台, 得到主要结论如下:

(1) 锦屏极深地下实验室赋存于高应力和复杂地质条件区, 开挖建设发生了岩爆、塌方、板裂等深部工程灾害, 长期运行现场监测表明, 洞室围岩的变形、应力、开裂和渗压等参数均稳定收敛, 实验室各洞室处于稳定安全运行状态.

(2) 建立了岩体位移、应力、破裂参数综合的洞室稳定性评价指标, 提出基于支持向量机响应面法的

洞室稳定可靠性分析方法, 为洞室安全评估提供了新的途径.

(3) 基于物联网、数字孪生、数据可视化等先进技术, 开发了锦屏极深地下实验室洞室稳定性监测与预警系统, 设计了WEB端和3D端的交互分析模式, 实现了线下-线上相结合的实验室洞室各类监测物理量的实时监控和安全分析, 研究成果为深部实验室洞室稳定性评估和安全监测提供了重要支撑.

参考文献

- Li S J, Feng X T, Li Z H, et al. *In situ* experiments on width and evolution characteristics of excavation damaged zone in deeply buried tunnels. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 167–174
- Li S J, Xie Z K, Xiao Y X, et al. Review of international research on rock *in situ* rockmass behavior in deep underground research laboratory (in Chinese). *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2021, 52: 2491–2509 [李邵军, 谢振坤, 肖亚勋, 等. 国际深部地下实验室岩体原位力学响应研究综述. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52: 2491–2509]
- Cheng J P, Wu S Y, Yue Q, et al. A review of international underground laboratory developments (in Chinese). *Physics*, 2011, 40: 149–154 [程建平, 吴世勇, 岳骞, 等. 国际地下实验室发展综述. 物理, 2011, 40: 149–154]
- Li S J, Zheng M Z, Qiu S L, et al. Characteristics of excavation disasters and long-term *in-situ* mechanical behavior of the tunnels in the China Jinping Underground Laboratory (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2021, 61: 842–852 [李邵军, 郑民总, 邱士利, 等. 中国锦屏地下实验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61: 842–852]
- Feng X T, Yao Z B, Li S J, et al. *In situ* observation of hard surrounding rock displacement at 2400-m-deep tunnels. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51: 873–892
- Siren T, Kantia P, Rinne M. Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2015, 73: 165–174
- Zhang C, Chu W, Liu N, et al. Laboratory tests and numerical simulations of brittle marble and squeezing schist at Jinping II hydropower station, China. *J Rock Mech Geotech Eng*, 2011, 3: 30–38
- Hoek E. Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1998, 35: 63–68
- Zhao H, Chen B, Li S, et al. Updating the models and uncertainty of mechanical parameters for rock tunnels using Bayesian inference. *Geosci Front*, 2021, 12: 101198
- Li X H, Wang H T, Jia J Q, et al. Ultimate displacement discrimination of stability and reliability analysis of surrounding rocks of tunnel and underground engineering (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2005, 26: 850–854 [李晓红, 王宏图, 贾剑青, 等. 隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性分析的极限位移判别. 岩土力学, 2005, 26: 850–854]
- Li D Q, Zhang F P, Cao Z J, et al. Reliability sensitivity analysis of geotechnical monitoring variables using Bayesian updating. *Eng Geol*, 2018, 245: 130–140
- Zheng M, Li S, Zhao H, et al. Probabilistic analysis of tunnel displacements based on correlative recognition of rock mass parameters. *Geosci Front*, 2021, 12: 101136
- Zhong S, Jiang Q, Feng X T, et al. A case of *in situ* stress measurement Jinping Underground Laboratory (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2018, 39: 356–366 [钟山, 江权, 冯夏庭, 等. 锦屏深部地下实验室初始地应力测量实践. 岩土力学, 2018, 39: 356–366]
- Feng X T, Wu S Y, Li S J, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping Underground Laboratory (CJPL-II) (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35: 649–657 [冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析. 岩石力学与工程学报, 2016, 35: 649–657]
- Kaiser P K, Yazici S, Maloney S. Mining-induced stress change and consequences of stress path on excavation stability—A case study. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38: 167–180

- 16 Li S J, Zheng M Z. Development and engineering application of three-dimensional disturbed stress measurement system for deep hard rock engineering based on Fiber Bragg Grating (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2024, 43: 261–274 [李邵军, 郑民总. 基于光纤光栅的深部硬岩隧洞三维扰动应力测试系统研制及工程应用, *岩石力学与工程学报*, 2024, 43: 261–274]
- 17 Zheng M, Li S. A non-linear three-dimensional failure criterion based on stress tensor distance. *Rock Mech Rock Eng*, 2022, 55: 6741–6760
- 18 Jiang Q, Feng X T, Li S J, et al. Cracking-restraint design method for large underground caverns with hard rock under high geostress condition and its practical application (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 1081–1101 [江权, 冯夏庭, 李邵军, 等. 高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38: 1081–1101]
- 19 Suykens J A K. Support vector machines: A nonlinear modelling and control perspective. *Eur J Control*, 2001, 7: 311–327
- 20 Low B K, Tang W H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method. *J Eng Mech*, 2007, 133: 1378–1387
- 21 Li S, Zhao H, Ru Z. Relevance vector machine-based response surface for slope reliability analysis. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2017, 41: 1332–1346
- 22 Zhao H. A practical and efficient reliability-based design optimization method for rock tunnel support. *Tunn Undergr Space Tech*, 2022, 127: 104587
- 23 Li L, Jiang Q, Huang Q, et al. Advances in stability analysis and optimization design of large underground caverns under high geostress condition. *Deep Resour Eng*, 2024, 1: 100113
- 24 Samadi H, Alanazi A, Muhodir S H, et al. In-depth exploration of machine learning algorithms for predicting sidewall displacement in underground caverns. *Geomech Eng*, 2024, 37: 307–321
- 25 Han T C, Lin B W, He L, et al. Three-dimensional slope modelling method and its stability based on coupled GIS and numerical simulation software (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2019, 40: 2855–2865 [韩同春, 林博文, 何露, 等. 基于GIS与数值模拟软件耦合的三维边坡建模方法及其稳定性研究. *岩土力学*, 2019, 40: 2855–2865]
- 26 Liu Z P, Liu J, He Y W, et al. Seamless coupling of 3D GIS techniques with FEM and its application to tunneling engineering (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2017, 38: 866–874, 901 [刘振平, 刘建, 何雨微, 等. 3D GIS与有限元模拟无缝耦合方法及其在隧道工程中的应用研究. *岩土力学*, 2017, 38: 866–874, 901]

Reliability analysis on cavern stability and monitoring system development for extremely deep underground laboratory

LI ShaoJun^{1*}, FENG ZeJie^{1,2}, ZENG Zhi³, XUE Tao³, LI MingChuan⁴, SHEN ManBin⁴,
YANG JinZhong⁴, XIAO YaXun¹ & PAN PengZhi¹

¹ State Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

⁴ Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China

*Corresponding author (email: sjli@whrsm.ac.cn)

The extremely deep underground laboratory has become a focus and trend of basic scientific research in various countries around the world, bringing significant opportunities and challenges for the development of deep rock mechanics. The safety and stability of caverns are the foundation and key to various scientific research in the Extreme Deep Laboratory. This article focuses on the research direction of Jinping Deep Rock Engineering Mechanics and Safety (DREM) group, it is based on the second phase project of the world's deepest underground laboratory in Jinping. The basic engineering geological conditions of the laboratory are introduced, and the safety issues and monitoring results of the tunnel during excavation construction and operation are analyzed. A stability and reliability analysis method for the tunnel based on support vector machine response surface is proposed. Advanced technologies such as Internet of Things, digital twin, and data visualization are adopted to develop a stability monitoring and early warning system for the Jinping Extremely Deep Underground Laboratory tunnel. The interactive analysis mode of WEB and 3D is designed to achieve real-time monitoring and safety analysis of various monitoring physical quantities in the laboratory tunnel through the combination of offline and online. The research results indicate that the surrounding rock of the tunnel is in a safe and stable state during the long-term operation of the second phase of the Jinping Extreme Deep Laboratory. This study provides important reference for the stability assessment and safety monitoring of deep laboratory caverns.

Jinping Extremely Deep Underground Laboratory, cavern stability, reliability analysis, safety monitoring, deep rock mechanics

PACS: 91.65.-n, 91.30.pa, 91.50.Ey, 91.55.Fg

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0440](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0440)