第 31 卷第 6 期
2025 年 12 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 31 No. 6
Dec. 2025

引用格式：赵春雷，张延新，李自硕，等，2025. 基于地应力场反演的地下厂房开挖方案比选研究[J]. 地质力学学报，31（6）：1255−1267. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025081

Citation: ZHAO C L，ZHANG Y X，LI Z S，et al.，2025. Comparative study of excavation schemes for underground plant caverns based on in-situ stress field inversion[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1255−1267. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025081

基于地应力场反演的地下厂房开挖方案比选研究

赵春雷[1,2]，张延新[1,2]，李自硕[1,2]，王　强[1,2]
ZHAO Chunlei[1,2]，ZHANG Yanxin[1,2]，LI Zishuo[1,2]，WANG Qiang[1,2]

1. 燕山大学建筑工程与力学学院，河北 秦皇岛 066004；
2. 燕山大学土木工程绿色建造与智能运维重点实验室，河北 秦皇岛 066004
1. *College of Architectural Engineering and Mechanics*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *Hebei*, *China*;
2. *Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Maintenance for Civil Engineering*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *Hebei*, *China*

Comparative study of excavation schemes for underground plant caverns based on in-situ stress field inversion

Abstract: ［**Objective**］As the core hub of pumped storage power station projects, the stability of the surrounding rock of underground powerhouses directly affects engineering safety and lifecycle benefits. The control of its excavation poses a key challenge for the safe and efficient construction of such stations. To ensure safe excavation and rational support design, three excavation sequences were designed and comprehensively compared using the entropy-weighted Topsis method. The results provide a theoretical reference for the design and optimization of excavation schemes for underground powerhouses. ［**Methods**］Based on geological survey data and underground powerhouse designdocumentation, a three-dimensional geological model was established. Initial in-situ stress equilibrium was achieved through inversion of the stress field. Three excavation sequences were simulated to observe the mechanical responses of the surrounding rock in terms of principal stress, displacement, and plastic zone distribution. Using raw indicator data obtained from the simulations, the entropy weight method was applied to assign weights to these three key indicators, enabling an objective evaluation of surrounding rock stability. The Topsis evaluation system was then used to calculate the relative closeness degree of each scheme, thereby identifying the optimal excavation sequence. ［**Results**］A case study of the Daya River Pumped Storage Power Station showed that Scheme I outperformed the other two schemes in overall excavation effectiveness: (1) The surrounding rock experienced lower compressive stress with reduced susceptibility to tensile failure, and the stress distribution was more uniform; (2) displacement control was the most effective, with clear and consistent displacement trends; (3) the plastic zone developed within the smallest range, indicating a superior self-stabilizing capacity of the surrounding rock. The calculated relative closeness degrees were 0.82 for Scheme I, significantly higher than those for Scheme II (0.36) and Scheme III (0.41), confirming Scheme I as the optimal excavation scheme. ［**Conclusion**］The entropy weights assigned to stress, displacement, and plastic zone distribution indicate that displacement, particularly in the horizontal direction, plays a dominant role during construction. Subsequent support design and excavation optimization should emphasize detailed planning to ensure surrounding rock stability. The comprehensive scoring of each scheme via the entropy-weighted Topsis method reduces empirical analogy errors caused by overreliance on any single indicator, providing a more intuitive and reliable comparison. The evaluation results align well with the mechanical response patterns observed during excavation

基金项目：河北省自然科学基金项目（D2022203005）
This research is financially supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province of China (Grant No. D2022203005).
第一作者：赵春雷（2001—），男，在读硕士，专业为岩土工程。Email：2982105964@qq.com
通信作者：张延新（1977—），男，博士，副教授，从事岩土工程研究。Email：zyx382@163.com
收稿日期：2025-07-06；修回日期：2025-11-05；录用日期：2025-11-17；网络出版日期：2025-12-03；责任编辑：吴芳

simulation. [**Significance**] This study provides a basis for subsequent support design and construction excavation, while also offering valuable theoretical reference and a practical case for the design of excavation schemes under similar complex geological conditions.

Keywords: in-situ stress measurement; numerical simulation inversion; entropy weight–Topsis method; comparative selection of excavation schemes

摘　要： 地下厂房作为抽水蓄能电站工程的核心枢纽，围岩稳定性直接关系工程安全与全生命周期效益，其开挖控制是抽水蓄能电站安全高效建设的关键挑战。为保障厂区安全开挖以及合理支护，文章设计3种不同顺序的开挖方案，利用熵权−Topsis法综合比选，所得结果对地下厂房开挖方案设计以及优化提供了理论参考。文章依据地质勘察及地下厂房设计资料，建立三维地质模型，通过反演初始地应力场得到地应力平衡；设计3种开挖顺序，模拟开挖过程，观察主应力、位移、塑性区3个主要方面的围岩力学响应；基于开挖模拟得到的比选指标原始数据，应用熵权法赋予主应力、位移、塑性区分布3个主要方面的指标权重，客观评价围岩稳定性，再用Topsis评价体系计算各方案相对贴近度，选出最优开挖顺序方案。对大雅河抽水蓄能电站开展研究，对比3种开挖方案，方案1整体开挖效果要比另外2种方案效果好：围岩所受压应力较小且不容易发生受拉破坏，围岩整体应力分布较均匀；位移量控制效果最佳，且具有明显的位移变化规律；塑性区发育范围最小，表现出较好的围岩自稳能力。计算相对贴近度，方案1（0.82）大于方案2（0.36）、方案3（0.41），比选其为最优开挖方案。由应力、位移和塑性区分布的熵权权重可以看出，位移因素尤其是水平方向位移在施工过程中占据着较大比重。在后续支护以及开挖优化时应细化设计，保障施工期间围岩稳定性。通过熵权−Topsis法计算各方案综合效果评分，可以减小某一单一指标带来的经验类比误差，更直观地得出比选结果，评价结果的优劣与模拟开挖时围岩力学响应相符合。为后续的支护设计和施工开挖提供了依据，也为类似复杂地质条件下厂区开挖方案设计提供了重要的理论参考和实践案例。

关键词： 地应力测量；数值模拟反演；熵权−Topsis评价；开挖方案比选

中图分类号： P315.72+7; TV743　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1006−6616(2025)06−1255−13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025081

0 引言

岩体应力场是造成地下厂房围岩变形与破坏的关键因素，也是水电工程中地下厂房、引水隧洞等工程稳定性分析与设计的重要依据。国内外地下厂房施工实践表明，地下厂房多深埋于高山峡谷之中，具有高地应力特点(王成虎等, 2009)，开挖施工导致的围岩大规模扰动可能会造成严重的地质灾害(李桐等, 2019; 谢和平, 2019; 程智余, 2023; 苏都都等, 2024; 谭洲等, 2024; 李超瑞等, 2025)。分析其原因主要是地应力变化的影响，围岩失稳破坏大多是环境应力作用下，岩体内部节理、断层等不良结构面受上覆自重应力和水平构造应力引起的局部失稳导致(段淑倩等, 2017)，主要因素包括应力水平、最大主应力与洞室轴线的夹角，以及洞室横断面内的差应力等(白金朋等, 2023; 李征征等, 2023)。若未能充分掌握工程区地应力场分布特征，可能诱发围岩大变形、岩爆等地质灾害，并导致工程设计决策与控制不当(陈念等, 2021; 高桂云等, 2023; 刘健等, 2025; 张晓飞等, 2025)。因此如何合理设计地下厂房开挖方案，成为大型地下工程建设亟待解决的关键技术难题(杨强等, 2015)。

现有研究中，地下厂房开挖方案比选已从传统的经验类比发展为系统化的多属性决策性分析。陈卫忠等(2004)基于顶拱沉降和损伤区范围比选开挖方案，奠定了以力学响应为核心的经验类比法基础；苏国韶等(2007)利用智能算法优化开挖方案和支护设计，李仁杰等(2025)通过Flac3D模拟云图比选开挖方案。尽管学者们对洞室群开挖方案设计取得了一定研究成果，从单一指标对比到数值模拟分析再到传统多指标综合分析，但因多依赖于专家的经验来确定起决定性作用的指标，主观性较强。为克服上述方法的局限性，文章将熵权−Topsis综合评价体系引入地下厂房开挖方案决策。熵权法根据各评价指标观测值本身的离散程度，通过信息熵来客观计算权重，有效规避了人为赋权的主观

偏好；Topsis 通过计算每个方案与“正理想解”(最优方案)和“负理想解”(最劣方案)的欧氏距离，利用相对接近度进行排序。其概念清晰，几何意义明确，能够精确量化各方案与理想状态的差距，从而得出直观、可靠的优劣顺序(陈雪锋等，2018；董源等，2018)。

以大雅河抽水蓄能电站地下厂房工程为依托，文章基于水压致裂法实测的地应力数据以及地质勘察数据，建立三维模型，构建地下厂房范围的地应力平衡。利用 Abaqus 软件模拟 3 种方案开挖过程，观察围岩应力集中、位移演化及塑性区分布力学响应。将模拟开挖得到的云图数据作为熵权−Topsis 分析的比选指标原始数据，利用熵权−Topsis 法确定主应力、位移与塑性区分布的各指标权重，得到各方案的综合评分排名，实现最优开挖方案比选。为复杂条件下地下厂房的安全、高效、经济开挖提供实例参考与理论方法。

1　厂区开挖方案比选原理

通过实测地应力数据构建初始地应力场，模拟 3 种开挖顺序的厂区开挖，得到应力、位移、塑性区 3 个主要方面的比选指标原始数据，利用熵权法对指标客观赋权，再根据 Topsis 原理量化待评价方案的综合评分，系统客观地实现多指标耦合效应的综合比选，揭示不同开挖顺序下围岩损伤演化机制(李梓嘉等，2025)，其分析步骤如下。

(1)依据多元线性回归原理，建立回归方程，利用最小二乘法求解回归系数，反演初始地应力场，建立开挖模拟环境下的地应力平衡：

$$\hat{\sigma}_{jk}=\sum_{i=1}^{3}L_i\sigma_{jk}^{i} \tag{1}$$

式中，$\hat{\sigma}_{jk}$—第 k 观测点的回归计算值；L_i—多元回归系数；σ_{jk}^{i}—i 工况下 k 观测点 j 应力分量的有限元计算值。

$$S_{残}=\sum_{k=1}^{6}\sum_{j=1}^{3}\left(\sigma_{jk}^{*}-\sum_{i=1}^{3}L_i\sigma_{jk}^{i}\right)^2 \tag{2}$$

式中，$S_{残}$—最小二乘法的残差平方和；σ_{jk}^{*}—k 观测点 j 应力分量的观测值，其余同公式(1)。

(2)数据标准化处理。将开挖模拟得到的云图数据作为比选指标原始数据，利用极值法对模拟开挖的数据结果进行标准化处理。应力、位移、塑性区 3 个主要方面的 5 个评价指标值越小，说明其效果越好。

$$y_{ij}=\frac{\max x_{ij}-x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}}+0.001 \tag{3}$$

式中，y_{ij}—各比选指标原始数据标准化；x_{ij}—第 i 个开挖方案的第 j 个比选指标。

(3)利用熵值法计算各指标权重 ω_j

$$\omega_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-e_j\right)} \tag{4}$$

式中，e_j—第 j 个指标的熵值；n—评价指标数。

(4)利用 Topsis 法计算各评价对象与最优对象的相对贴近度 C_i。其原理为相对贴近度越大，则对象越接近最优解，开挖方案越好。

$$C_i=\frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{5}$$

式中，d_i^+、d_i^-—各指标与正负理想解的欧氏距离。

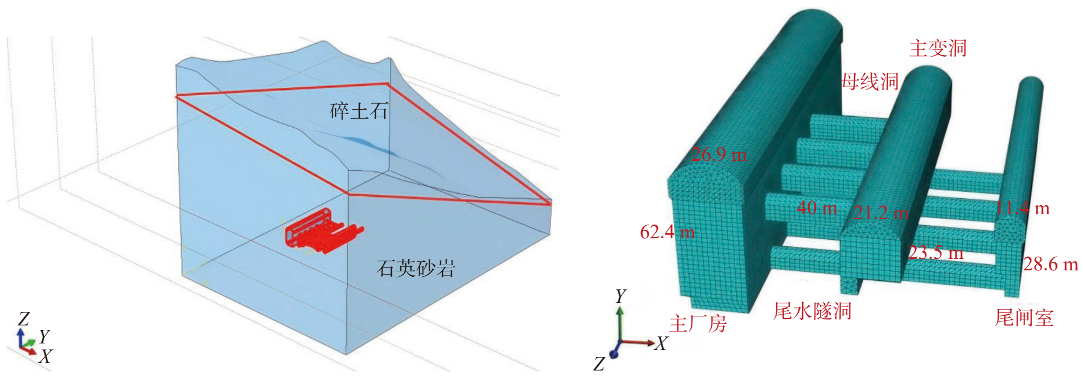
2　厂区工程概况

2.1　厂区工程地质

大雅河抽水蓄能电站工程位于辽宁省本溪市桓仁县境内，预计总装机 160 MW，安装 4 台 40 MW 可逆式机组，以 500 kV 电压等级接入辽宁电网，发挥保障大电网安全运行的“稳定器”“调节器”作用和支撑新能源大发展的“充电宝”作用。地下洞室群由主厂房、主变洞、母线洞、尾闸室组成，是抽蓄引水系统的核心地下设施(洪文彬等，2024)。

大雅河抽水蓄能电站场址位于辽东山地侵蚀剥蚀中低山区，属长白山山脉西南延伸部分。区内地势起伏剧烈，山高谷深，峰顶高程一般为 400～800 m，相对高差达 300～600 m，为“V”型河谷发育的深切地貌。地下厂房坐落于一天然封闭性良好的山顶坳地内，地形条件优越。大地构造上处于中朝准地台之辽东台隆的太子河–浑江台陷，区域构造稳定性良好。构造形迹以北东及北西向非活动性断裂为主，场地地震动峰值加速度为 0.05g(地震基本烈度Ⅵ度)。沿线基岩大部分被第四系所覆盖，地层由山坡上的崩坡积土块石(Qh^{col+dl})和崩积块石(Qh^{col})构成，基岩主要为碎土石和震旦系下统钓鱼台组石英砂岩(表 1)，层厚 30～100 cm，属中厚层，岩质坚硬，地表无基岩出露。岩层产状总体呈

N15°W～N20°E 走向，以北东/南东倾向为主，倾角20°～35°。基于勘察试验得到的地质测绘和钻孔资料，建立三维地质模型，如图 1 所示：X 向尺寸为 697 m，Y 向尺寸为 1015 m，厂房底面距离模型底面 150 m。



（a）三维地质模型及厂区位置　　（b）厂区组成及尺寸

图 1　地质模型和厂区尺寸组成图

Fig. 1　Geological model and powerhouse mesh generation

(a) 3D geological model and its location of the plant area ; (b) Composition and dimensions of the plant area

表 1　岩土体主要物理力学参数

Table 1　Primary physico-mechanical parameters of the rock and soil masses

围岩分类	干密度/(g/cm^3)	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	泊松比	凝聚力/MPa	内摩擦角/(°)
碎土石	2.40	1.20	0.06	0.17	0.01	23
Ⅱ类石英砂岩	2.63	22.0	15.0	0.23	1.50	33

2.2　厂区地应力测试

水压致裂法基于平面应变理论，假设岩体均匀、各向同性且为线弹性。以钻孔轴向为主应力方向，采用拉伸破坏准则，运算快捷简便。是当前深部原位地应力测试可靠手段（陈群策等，2014；沙鹏等，2014）。

为取得地下厂房工程部位的原始地应力大小及其方向、空间分布规律，分别在引水高压管道 ZK202 钻孔和地下厂房 ZK206 钻孔开展水压致裂测试，钻孔主应力数据见表 2。该地区的地应力基本特征为：

（1）该地区最大水平主应力（S_{H}）值 11.27 MPa～18.10 MPa，最小水平主应力（S_{h}）值 7.93 MPa～11.99 MPa，垂直应力（S_{V}）10.42～14.28 MPa，三向主应力值呈现 $S_{\mathrm{H}}>S_{\mathrm{V}}>S_{\mathrm{h}}$ 区域应力状态，有利于走滑断层发育（王成虎等，2020）。

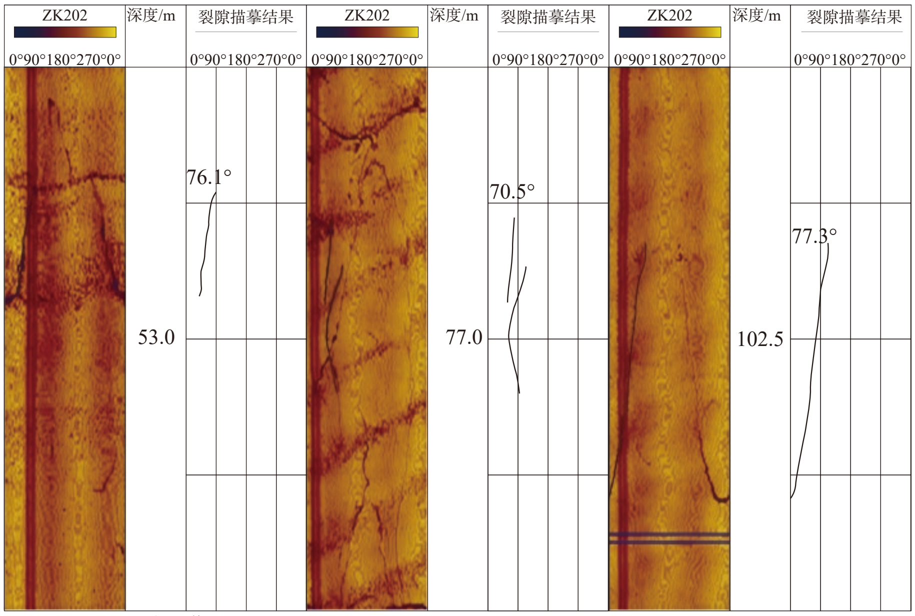
（2）侧压力系数均值分别为 $S_{\mathrm{H}}/S_{\mathrm{V}}=1.24$，$S_{\mathrm{h}}/S_{\mathrm{V}}=0.83$，根据主应力方向描摹结果可知（图 2），最大主压应力方向以水平向构造应力为主，三向主应力具有随深度增加而增大的规律性。

表 2　钻孔主应力数据

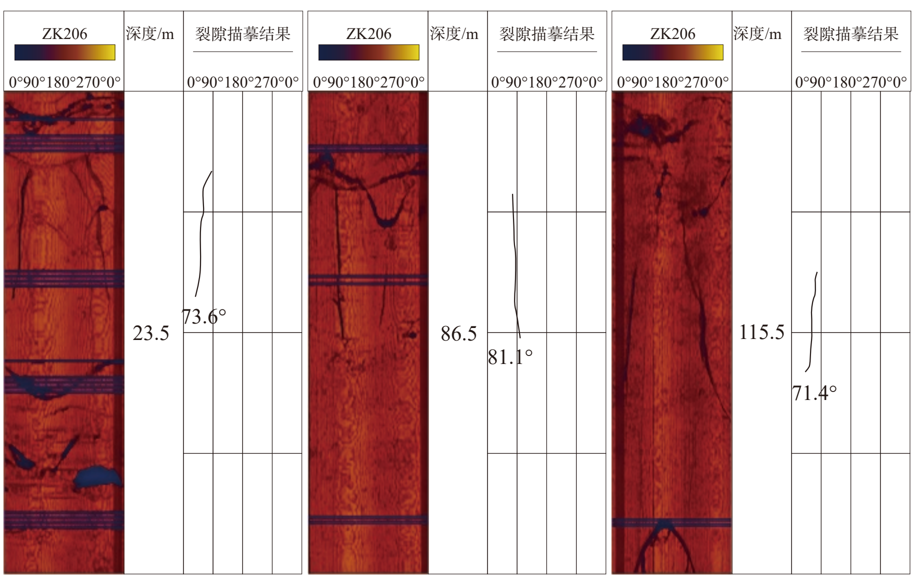
Table 2　Drill hole principal stress data

观测点	测段深度/ m	压裂参数/ MPa					主应力值/ MPa			破裂方位/(°)
		P_{b}	P_{r}	P_{S}	P_0	T	S_{H}	S_{h}	S_{V}	
ZK202-1	52.61～53.46	17.42	10.97	10.81	4.79	6.45	16.66	10.81	12.95	N76.1°E
ZK202-2	77.20～78.05	19.24	12.07	11.52	5.06	7.17	17.42	11.52	13.68	N70.5°E
ZK202-3	102.69～103.54	19.01	12.58	11.99	5.28	6.43	18.10	11.99	14.28	N77.3°E
ZK206-1	22.16～23.01	13.85	9.30	7.93	3.22	4.55	11.27	7.93	10.42	N73.6°E
ZK206-2	85.90～86.75	18.02	11.12	10.14	3.84	6.90	15.46	10.14	12.11	N81.1°E
ZK206-3	115.23～116.08	20.57	12.40	11.13	4.13	8.17	16.86	11.13	12.89	N71.4°E

注：P_{b}—初始破裂压力，P_{r}—破裂重张压力，P_{S}—瞬时闭合压力，P_0—孔隙水压，T—时间，S_{H}—最大水平主应力，S_{h}—最小水平主应力，S_{V}—垂直主应力



（a）ZK202裂隙描摹结果



（b）ZK206裂隙描摹结果

图中色卡代表裂隙的发育程度，颜色越深则岩体越破碎，裂隙越深

图 2　主应力方向描摹结果

Fig. 2　Results of principal stress orientation determination

(a) Directional tracing results of borehole televiewer for fractures in ZK202; (b) Directional tracing results of borehole televiewer for fractures in ZK206

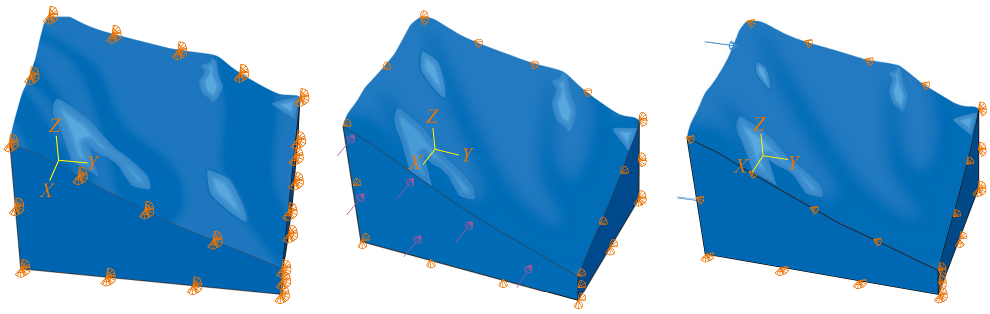
The color palette in the figure represents the development degree of fractures; the darker the color, the more fragmented the rock mass and the deeper the fractures.

3　地下厂房开挖模拟

3.1　反演初始地应力场

三维地质模型建立区域主要包括主厂房、主变洞、尾闸室、母线洞等大型洞室群，并且尽量避开地层中较大的断层。模型 X 向沿主厂房左边墙向上游取 282 m，沿尾闸室右边墙向下游取 288 m，总长为 697 m；Y 向即主厂房轴线方向，前后边界分别距离主厂房 240 m、598 m，总长为 1015 m；Z 向正方向从洞室顶部取到地表，下部边界由主厂房底板向 Z 轴负方向取 150 m。

此次研究针对已有的工程地质条件及钻孔实测数据，采用多元线性回归平衡地应力场（郭怀志等，1983），通过分解岩体应力状态为3种应力条件的线性叠加进行初始地应力场反演（图3）：①自重应力；②X方向水平构造应力；③Y方向水平构造应力。自重应力施加重力荷载作用，水平构造应力施加大小为1 MPa的压强，对其余边界施加约束（周佐健等，2024），如图3中所示黄色部分。



（a）自重应力作用 （b）X方向水平构造应力作用 （c）Y方向水平构造应力作用

图3 各应力作用模型图

Fig. 3 Stress models

(a) Overburden stress model ;(b) Tectonic stress model in X-direction; (c) Tectonic stress model in Y-direction

将应力反演结果与实测数据进行对比分析（表3）：最大水平主应力误差在−0.36～1.71 MPa；最小水平主应力误差在−0.83～1.25 MPa；破裂方位误差在−2.2°～4.5°，整体上反演结果与实测数据相近；对反演结果进行显著性检验，复相关系数$R=0.902$，接近1，说明整体回归效果较好，作为后续厂区开挖比选的基础条件。

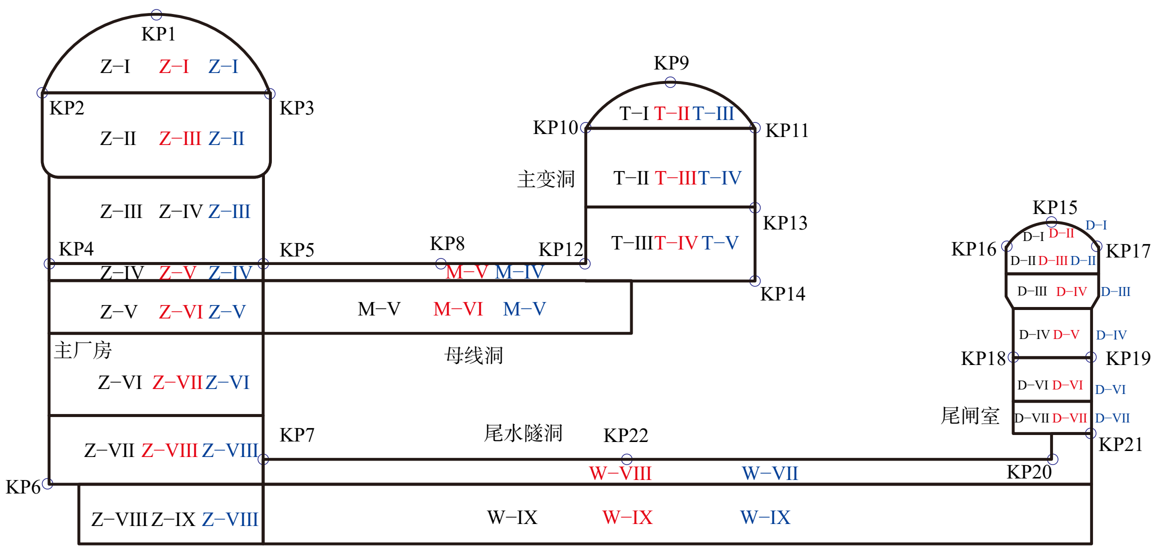
表3 各钻孔应力分量实测值与反演值比较

Table 3 Comparison between measured and inverted stress components in individual boreholes

观测点	数值类别	S_H/MPa	S_h/MPa	S_V/MPa	破裂方位/(°)
ZK202-1	实测值	16.66	10.81	12.95	N76.1E
	反演值	15.38	9.56	10.56	N73.1E
	误差	1.28	1.25	2.39	3.0
ZK202-2	实测值	17.42	11.52	13.68	N70.5E
	反演值	15.72	10.50	11.20	N75.0E
	误差	1.70	1.02	2.48	4.5
ZK202-3	实测值	18.10	11.99	14.28	N77.3E
	反演值	16.39	12.01	12.55	N79.5E
	误差	1.71	−0.02	1.73	−2.2
ZK206-1	实测值	11.27	7.93	10.42	N73.6°E
	反演值	11.63	8.01	9.64	N69.7E
	误差	−0.36	−0.08	0.78	3.9
ZK206-2	实测值	15.46	10.14	12.11	N81.1°E
	反演值	15.93	11.21	11.74	N79.6E
	误差	−0.47	−1.07	0.37	1.5
ZK206-3	实测值	16.86	11.13	12.89	N71.4°E
	反演值	16.91	11.96	13.28	N72.4E
	误差	−0.05	−0.83	−0.39	−1.0

3.2　厂区开挖方案对比

地下厂房施工期间，高地应力环境下的开挖卸荷作用将打破原有岩体应力平衡，诱发围岩应力重新分布。为确保洞室群稳定性，开挖方案设计应重点关注主应力大小、位移和塑性区分布 3 个方面。根据厂房设计初步制定了 3 种不同的开挖方案，通过 9 期（I—IX）模拟开挖比选最优方案，具体开挖分区示意及关键点布置见图 4。



Z、T、D、M、W 分别代表主厂房、主变洞、尾闸室、母线洞和尾水隧洞开挖；黑色代表方案 1，红色代表方案 2，蓝色代表方案 3；KP 是关键点，代表塑性区分布位置；I—IX 为开挖期数

图 4　地下厂房开挖分区示意及关键点布置

Fig. 4　Schematic diagram of excavation zoning and key point layout in underground powerhouse

Z, T, D, M, W denote the excavation of the main powerhouse, main transformer tunnel, tailgate chamber, busbar tunnel, and tailrace tunnel, respectively; Black, red, and blue indicate Scheme Ⅰ, Scheme Ⅱ, and Scheme Ⅲ, respectively; KP are key points indicating the distribution of plastic zones; I—IX are the excavation phase numbers.

（1）方案 1：主厂房、主变洞、尾闸室同时开挖，连续开挖 3 期直至主变洞开挖完成，再对主厂房和尾闸室进行分期开挖，中间Ⅴ期单独穿插着母线洞的开挖，最后对尾水隧洞进行单独开挖。

（2）方案 2：首先开挖主厂房，之后暂停 1 期对主变洞和尾闸室进行开挖，接着对主厂房、主变洞和尾闸室进行分期开挖，之间母线洞和尾水隧洞分 2 期开挖；母线洞开挖在Ⅴ、Ⅵ期，尾水隧洞开挖在Ⅷ、Ⅸ期。

（3）方案 3：主变洞延缓 2 期开挖，先开挖主厂房和尾闸室，至Ⅴ期主变洞开挖完成，母线洞在Ⅳ、Ⅴ期开挖，尾水隧洞开挖在Ⅶ、Ⅸ期。

3.3　洞室稳定性分析

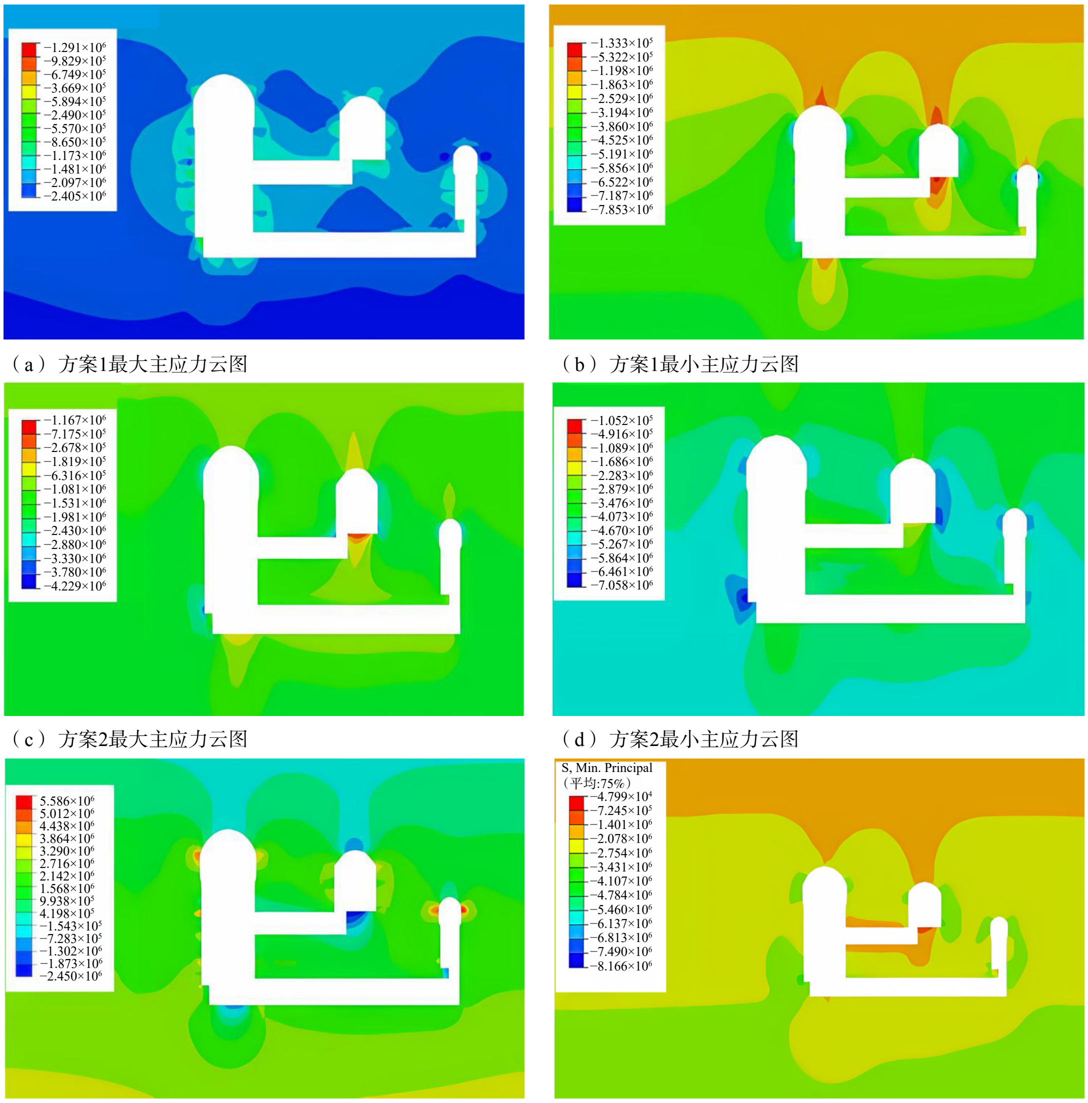
3.3.1　主应力分析

依据模拟开挖的应力云图结果（图 5）对 3 种开挖方案对比分析。方案 1 开挖完成后，整体应力场呈现良好的收敛特性，最大拉应力 $\sigma_{拉\max} = 1.29$ MPa，最大压应力 $\sigma_{压\max} = 7.85$ MPa，高应力出现在顶拱拱脚、边墙与底板衔接处等区域。方案 2 出现显著的拉、压应力集中，$\sigma_{拉\max} = 1.17$ MPa，$\sigma_{压\max} = 7.06$ MPa，应力集中区域较多，开挖风险大。方案 3 除拱脚和拱顶外，边墙中部出现异常拉应力集中区，$\sigma_{拉\max} = 5.58$ MPa，张拉破裂风险。

由于应力集中情况发生在主厂房拱脚、主变洞底板和尾闸室拱脚处，选取关键点 KP2、KP13 和 KP16，观察其应力随开挖期数变化趋势。由图 6 可以看出，方案 1 与方案 2 在厂区各个部分的应力变化趋势基本相似，但方案 1 所受应力小于方案 2 的应力水平。方案 3 在主变洞以及尾闸室出现了明显的拉应力集中情况。

3.3.2　位移分析

位移是反映围岩稳定性的关键指标，在模拟开挖作业时，U1 代表水平方向位移，U3 代表垂直方向位移。如果位移在开挖完成后无收敛迹象，表明围岩稳定性较差，若位移在一定范围内波动后趋于稳定，则说明围岩相对稳定；且若某关键点位移超出



（a）方案1最大主应力云图 （b）方案1最小主应力云图

（c）方案2最大主应力云图 （d）方案2最小主应力云图

（e）方案3最大主应力云图 （f）方案3最小主应力云图

图 5 各方案最大、最小应力云图

Fig. 5 Principal stress contour plots for each scheme

(a) Maximum principal stress for Scheme Ⅰ; (b) Minimum principal stress for Scheme Ⅰ; (c) Maximum principal stress for Scheme Ⅱ; (d) Minimum principal stress for Scheme Ⅱ; (e) Maximum principal stress for Scheme Ⅲ; (f) Minimum principal stress for Scheme Ⅲ

预期，可在该位置针对性加强支护。

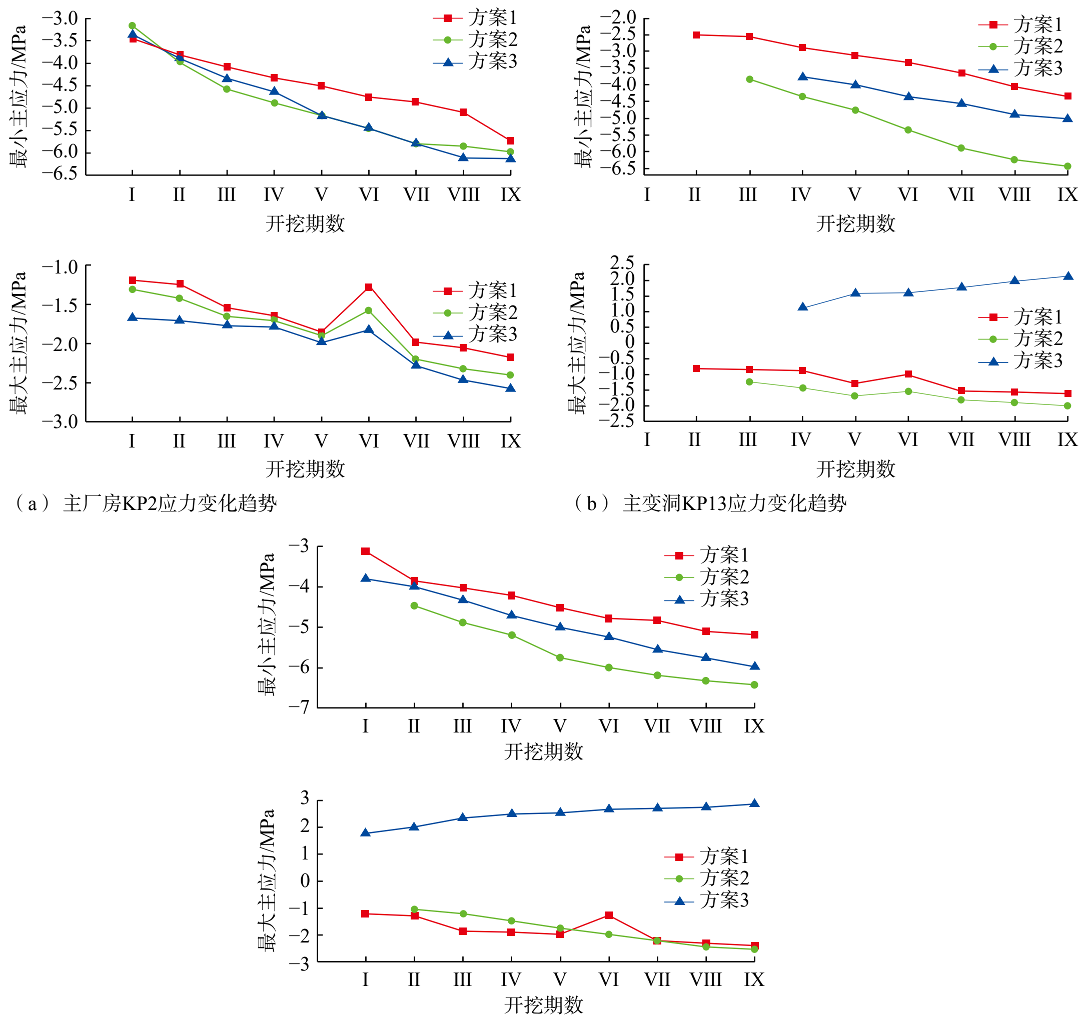
因此，由图 7 可得，3 种开挖方案下洞室具有相似的位移规律，仅位移量不同。U3 位移最大位置均位于各洞室拱顶，分别为 8.42mm、9.91mm、10.00 mm，最小位移位于边墙部位；U1 位移最大处位于各洞室边墙中部，分别为 15.01mm、15.76mm、14.26 mm，最小位移位于拱顶和底板。

3.3.3 塑性区分析

塑性区标志着岩体内部微裂纹萌生、扩展、贯通，发生不可逆的剪切或拉伸屈服，宏观上表现为岩体强度（内聚力 c、内摩擦角 φ 值）的持续劣化。塑性区深度越大，意味着整体承载能力下降越显著。深部损伤累积会削弱围岩对后续开挖扰动的抵抗能力，增加渐进性破坏风险。根据表 4 可以发现，不同方案下塑性区分布特征较为相似，塑性区分布主要集中在洞室边墙处、洞室拱顶和底板处。但不同的开挖顺序会在某些关键点位移变化不同，方案 2 和方案 3 在尾闸室出现塑性区，相较塑性区出现的位置数量和总体范围来说，方案 1 要更占优势。

4 基于熵权–Topsis 法的最优开挖方案分析

根据《水力发电工程地质勘察规范》（GB50287—



（a）主厂房KP2应力变化趋势

（b）主变洞KP13应力变化趋势

（c）尾闸室KP16应力变化趋势

图 6　厂区各部分关键点应力变化趋势

Fig. 6　Stress variation trends at key points of each powerhouse section

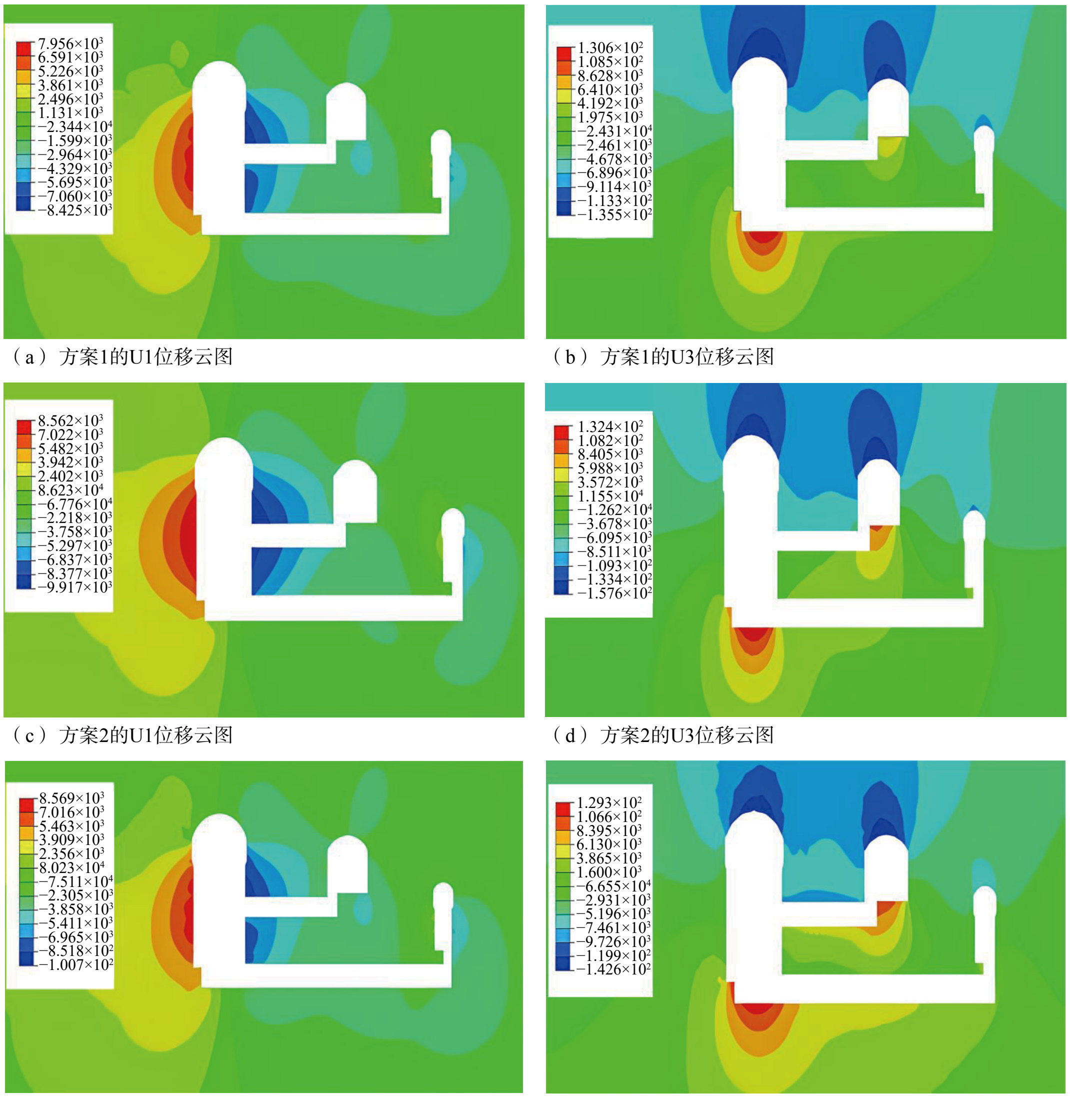
(a) KP2 in the main powerhouse; (b) KP13 in the transformer cavern; (c) KP16 in the tail gate chamber

2016)围岩工程地质分类标准，参照岩性、风化、岩体结构、地下水活动情况等，厂区Ⅱ类石英砂岩的单轴抗压强度为 150 MPa，抗拉强度为 15 MPa。根据《水电站地下厂房设计规范》(NB/T 35090—2016)和工程实践经验，水电站地下厂房开挖位移允许阈值为拱顶沉降不超过 35 mm。将洞室稳定性分析得到的原始数据标准化用作比选方案(表 5)，结果如下：

(1)在 3 种开挖方案的施工模拟过程中，云图结果显示的主应力、位移和塑性区分布均是负向指标，其数值越大，效果越差。因此利用公式(1)—(4)将 5 个评价指标的数据标准化并计算权重，由表 6 可以得出：基于熵权法计算的指标权重，位移影响占比较大，约为 45%，其次主应力权重为 36%，塑性区分布占 19%。在现场开挖施工中，最大水平位移(U1)主要集中在洞室边墙处，最大垂直位移(U3)主要集中在洞室拱顶和底板处。这一现象与 Sone and Zoback(2014)提出的脆–塑性转化理论一致：高抗压强度的石英砂岩在卸荷作用下仍可能因应力路径变化产生局部塑性变形。

(2)利用权重和 Topsis 法计算各开挖方案综合得分，评价结果直观且效果显著。根据表 7，以各指标正负理想解为评价标准，根据公式(5)—(7)，计算出各方案的相对贴近度 C_i，方案 1(0.78)显著优于方案 2(0.33)、方案 3(0.51)，因此选择方案 1 作为最优开挖方案。

(3)将 Topsis 计算综合得分结果与洞室稳定性云图对比分析来看，Topsis 评价开挖方案的优劣与模拟开挖时围岩力学响应相符合，方案 1 整体开挖效果要比另外 2 种方案效果好，表现为：①围岩所



（a）方案1的U1位移云图　（b）方案1的U3位移云图

（c）方案2的U1位移云图　（d）方案2的U3位移云图

（e）方案3的U1位移云图　（f）方案3的U3位移云图

图 7　各方案的位移云图

Fig. 7　Displacement contour plots for each scheme

(a) U1 component for Scheme Ⅰ; (b) U3 component for Scheme Ⅰ; (c) U1 component for Scheme Ⅱ; (d) U3 component for Scheme Ⅱ; (e) U1 component for Scheme Ⅲ; (f) U3 component for Scheme Ⅲ

表 4　不同开挖方案下塑性区深度范围

Table 4　Depth range of plastic zones under different excavation schemes

洞室名称	塑性区位置（分布见图4）	塑性区深度/m		
		方案1	方案2	方案3
主厂房	KP2	11.6	11.9	10.2
	KP3	12.1	13.5	9.9
	KP4	9.4	11.8	11.3
	KP5	5.3	4.9	5.9
母线洞	KP8	2.3	2.4	4.6
主变洞	KP12	6.2	7.8	6.8
	KP13	6.5	8.1	7.0
尾闸室	KP18	0	3.8	10.4
	KP19	0	4.2	11.2

表 5　评价指标标准化

Table 5　Indicator standardization

评价方面	评价指标(x_{ij})	方向性	开挖方案1	开挖方案2	开挖方案3
主应力	$\frac{\text{最大压应力}}{\text{岩体抗压强度}}\times 100\%$	负向指标	1.60	2.82	1.63
	$\frac{\text{最大拉应力}}{\text{岩体抗拉强度}}\times 100\%$	负向指标	8.61	7.78	37.24
位移	$\frac{\text{U1}}{\text{允许阈值}}\times 100\%$	负向指标	18.71	22.02	22.22
	$\frac{\text{U3}}{\text{允许阈值}}\times 100\%$	负向指标	42.89	45.03	40.74
塑性区	$\frac{\text{各方案最大塑性区深度}}{\text{总塑性区最大深度}}$	负向指标	0.90	1.00	0.84

注: x_{ij}—第i个开挖方案的第j个比选指标; U1—最大水平位移; U3—最大垂直位移

表 6　各指标熵权计算结果

Table 6　Results of entropy weight calculation for all indicators

评价指标	y_{ij}			e_j	ω_j
$\frac{\text{最大压应力}}{\text{岩体抗压强度}}\times 100\%$	1.0010	0.0010	0.9764	0.3890	0.1815
$\frac{\text{最大拉应力}}{\text{岩体抗拉强度}}\times 100\%$	0.9728	1.0010	0.0010	0.3890	0.1815
$\frac{\text{U1}}{\text{允许阈值}}\times 100\%$	1.0010	0.0580	0.0010	0.1226	0.2606
$\frac{\text{U3}}{\text{允许阈值}}\times 100\%$	0.4998	0.0010	1.0010	0.3580	0.1907
$\frac{\text{各方案最大塑性区深度}}{\text{总塑性区最大深度}}$	0.6260	0.0010	1.0010	0.3745	0.1858

注: y_{ij}—各比选指标原始数据标准化; e_j—各指标熵值; ω_j—各指标权重

受压应力较小且不容易发生受拉破坏，围岩整体应力分布较均匀；②位移量控制效果最佳，且具有明显的位移变化规律；③塑性区发育范围最小，表现出较好的围岩自稳能力。在主应力分析时，如果依靠传统的经验类比来评价开挖方案，方案 3 出现受拉破坏的可能性大，可能会将其视为最不利开挖，但基于多决策分析可以看出，方案 3 在其他方面效果好，其综合评价要优于方案 2，说明熵权–Topsis 综合评价方法在地下工程开挖方案设计及优化时具有显著优势，能够更加客观直观科学合理地比选施工方案，这为其他复杂地质条件下地下工程施工方案设计提供了理论参考。

表 7　Topsis 计算综合得分

Table 7　Comprehensive score calculation by Topsis

方案	d_i^+	d_i^-	C_i	排名
1	0.08945	0.41961	0.82428	1
2	0.34604	0.19108	0.35576	3
3	0.33635	0.23173	0.40791	2

注: d_i^+、d_i^-—各指标与正负理想解的欧氏距离, C_i—与最优对象的相对贴近度

5　结论

文章以大雅河水电站项目为例，通过模拟 3 种开挖方案的施工过程，从多个方面分析了该项目在地下厂房开挖时可能面临的工程问题，获得的主要结论如下：

(1)应用熵权–Topsis 综合评价最优开挖方案，首先基于地应力实测数据构建地应力平衡，其次设计 3 种开挖顺序，分期开挖观察其围岩响应规律，并记录比选指标原始数据，最后计算各指标权重和各方案相对贴近度。结果表明，相比于模拟云图分析，熵权–Topsis 法利用综合评分更直观地得出比选结果，且评价结果的优劣与模拟开挖时围岩力学响

应相符合。

（2）综合对比，方案1能更有效地控制围岩扰动，比选方案1为最优开挖方案。并且由应力、位移和塑性区分布的熵权权重可以看出，位移因素尤其是水平方向位移在施工过程中占据着较大比重。在后续支护以及开挖优化时应细化设计，保障施工期间围岩稳定性。通过熵权–Topsis法计算各方案综合效果评分，可以减小某一单一指标带来的经验类比误差，直接以得分排名情况计算出最优开挖方案，为大型地下厂房开挖顺序设计提供了思路。

References

BAI J P, DONG Y A, GAN J, et al., 2023. In-situ stress state in critical areas of the Taiyuan pumped storage power station and its application in pivot project layout[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 375-387. (in Chinese with English abstract)

CHEN N, WANG C H, GAO G Y, et al., 2021. Characteristics of in-situ stress field in the powerhouse area on the right bank of Baihetan based on stress polygon and borehole breakout method[J]. Rock and Soil Mechanics, 42(12): 3376-3384. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q C, FAN T Y, LI X S, et al., 2014. In situ measurements and comprehensive research on the present crustal stress of northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(8): 2518-2529. (in Chinese with English abstract)

CHEN W Z, LI S C, ZHU W S, et al., 2004. Excavation and optimization theory for giant underground caverns constructed in high dipping laminar strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(19): 3281-3287. (in Chinese with English abstract)

CHEN X F, CHEN W T, LUO J M, et al., 2018. Application of entropy weight Topsis method in the quality evaluation of underground cavern rock[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 44(3): 20-23. (in Chinese with English abstract)

CHENG Z Y, LIU R, ZHANG J F, et al, 2023. Study on Seepage Mechanism Characteristics of A Single Fracture Based on Fracture Deformation Under Different ConfiningPressures[J]. Geoscience, 37(4): 972-976. (in Chinese with English abstract)

DONG Y, ZHANG Y, XI C H, 2018. Study on rock burst prediction based on combination weighting—Topsis theory[J]. Pearl River, 39(9): 87-91. (in Chinese with English abstract)

DUAN S Q, FENG X T, JIANG Q, et al., 2017. Failure modes and mechanisms for rock masses with staggered zones of Baihetan underground caverns under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(4): 852-864. (in Chinese with English abstract)

GAO G Y, WANG C H, ZHOU H, et al., 2023. Analysis of in-situ stress characteristics in southern Sichuan basin based on multi-source data[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 19(2): 550-559. (in Chinese with English abstract)

GUO H Z, MA Q C, XUE X C, et al., 1983. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 5(3): 64-75. (in Chinese with English abstract)

HONG W B, ZHOU L Y, WANG G Y, 2024. Influence analysis on Liaoning Dayahe pumped storage power station on Dayahe reservoir[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 42(10): 46-49. (in Chinese with English abstract)

LI C R , TANG M G , ZHOU J, et al , 2025. Distribution and impoundment response law of landslides in the reservoir area of Wudongde Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 56(4): 35-51. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.004. (in Chinese with English abstract)

LI R J, JIANG H, SU G S, et al., 2025. Optimization of excavation and support schemes for underground caverns of pumped-storage power station[J]. Water Power, 51(4): 54-61. (in Chinese)

LI T, FENG X T, WANG R, et al., 2019. Characteristics of rockburst location deflection and its microseismic activities in a deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 40(7): 2847-2854. (in Chinese with English abstract)

LI Z J, ZHOU J, PENG F X, 2025. Comprehensive evaluation of integrated development of pumped storage power stations and photovoltaic systems based on entropy weight Topsis method[J]. Water Resources and Power, 43(3): 205-209, 195. (in Chinese with English abstract)

LI Z Z, YANG W C, ZHANG P, et al., 2023. In-situ stress measurement and inversion analysis of a large hydropower project in southeast Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 442-452. (in Chinese with English abstract)

LIU J, XIA Y, JIANG Q, et al., 2025. Surrounding rock deformation and failure characteristics of Yingliangbao hydropower station in highly tectonic region and response analysis to Luding earthquake in underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 46(7): 2265-2280. (in Chinese with English abstract)

SHA P, GUO Q L, WANG C H, 2014. Application of hydraulic fracturing method in the construction of deep buried tunnels in western China[C]//Proceedings of the 2014 national conference on engineering geology. Taiyuan: Engineering Geology Committee of the Geological Society of China: 119-125. (in Chinese)

SONE H, ZOBACK M D, 2014. Viscous relaxation model for predicting least principal stress magnitudes in sedimentary rocks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 124: 416-431.

SU D D, FAN Y, WU J G, et al., 2024. Research progress on failure mechanism of surrounding rock in deep cavern blasting excavation crossing fault fracture zone[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 46(4): 25-34. (in Chinese with English abstract)

SU G S, FENG X T, JIANG Q, et al., 2007. Intelligent method of combinatorial optimization of excavation sequence and support parameters for large underground caverns under condition of high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(S1): 2800-2808. (in Chinese with English abstract)

TAN Z, LI B, LI P, et al., 2024. Study on the formation mechanism of excavation damage zone of surrounding rock of the underground powerhouse under high geostress[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 20(6): 1979-1990. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, GUO Q L, DING L F, et al., 2009. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(8): 2359-2364. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)

XIE H P, 2019. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 44(5): 1283-1305. (in Chinese with English abstract)

YANG Q, PAN Y W, CHENG L, et al., 2015. Mechanism of valley deformation of high arch dam and effective stress principle for unsaturated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11): 2258-2269. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X F, WANG J M, ZHANG P, et al. , 2025. Analysis on the three-dimensional in-situ stress state and underground cavern stability of a pumped storage hydropower project area in Xinjiang Uygur autonomous region[J/OL]. Journal of Geomechanics. [2025-11-30]. https://link.cnki.net/urlid/11.3672.P.20250910.1652.002. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Z J, CHEN H J, LUO T, et al., 2024. A simple inversion method for initial ground stress of underground powerhouses based on FLAC3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 57(S2): 11-15. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白金朋，董延安，甘俊，等，2023. 太原抽水蓄能电站关键部位地应力状态及其在枢纽工程布设中的应用[J]. 地质力学学报，29(3)：375-387.

陈念，王成虎，高桂云，等，2021. 基于应力多边形与钻孔崩落的白鹤滩右岸厂房区地应力场特征研究[J]. 岩土力学，42(12)：3376-3384.

陈群策，范桃园，李绪深，等，2014. 中国南海海域北部地区现今地应力实测及综合分析研究[J]. 地球物理学报，57(8)：2518-2529.

陈卫忠，李术才，朱维申，等，2004. 急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究[J]. 岩石力学与工程学报，23(19)：3281-3287.

陈雪锋，陈文涛，罗建梅，等，2018. 熵权 Topsis 模型在地下工程岩体质量评价中的应用[J]. 工业安全与环保，44(3)：20-23.

程智余，刘瑞，张金锋，等，2023. 围压变化作用下基于水力开度变化的单裂隙渗流特性研究[J]. 现代地质，37(4)：972-976.

董源，张引，刁朝辉，2018. 基于组合赋权-Topsis 理论的岩爆预测研究[J]. 人民珠江，39(9)：87-91.

段淑倩，冯夏庭，江权，等，2017. 高地应力下白鹤滩地下洞室群含错动带岩体破坏模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，36(4)：852-864.

高桂云，王成虎，周昊，等，2023. 基于多源应力数据的川南地区地应力特征分析[J]. 地下空间与工程学报，19(2)：550-559.

郭怀志，马启超，薛玺成，等，1983. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报，5(3)：64-75.

洪文彬，周立洋，王冠宇，2024. 辽宁大雅河抽水蓄能电站对大雅河水库影响分析[J]. 东北水利水电，42(10)：46-49.

李超瑞，汤明高，周剑，等 2025. 乌东德水电站库区滑坡发育分布及蓄水响应规律[J]. 水利水电技术（中英文），56(4)：35-51. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.004

李仁杰，江浩，苏国韶，等，2025. 抽水蓄能电站地下洞室群开挖支护方案优化研究[J]. 水力发电，51(4)：54-61.

李桐，冯夏庭，王睿，等，2019. 深埋隧道岩爆位置偏转及其微震活动特征[J]. 岩土力学，40(7)：2847-2854.

李征征，杨文超，张鹏，等，2023. 藏东南某大型水电站工程区地应力状态及反演分析[J]. 地质力学学报，29(3)：442-452.

李梓嘉，周佳，彭方旭，2025. 基于熵权 Topsis 法的抽水蓄能电站与光伏配套开发综合评价[J]. 水电能源科学，43(3)：205-209, 195.

刘健，夏勇，江权，等，2025. 强烈构造区硬梁包水电站地下洞室群围岩变形破坏特征与泸定地震响应分析[J]. 岩土力学，46(7)：2265-2280.

沙鹏，郭啟良，王成虎，2014. 水压致裂法在西部深埋隧道工程建设中的应用[C]//2014 年全国工程地质学术大会论文集. 太原：中国地质学会工程地质专委会：119-125.

苏都都，范勇，吴进高，等，2024. 穿越断层破碎带深埋洞室爆破开挖围岩破坏机理研究进展[J]. 三峡大学学报（自然科学版），46(4)：25-34.

苏国韶，冯夏庭，江权，等，2007. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石力学与工程学报，26(S1)：2800-2808.

谭洲，李彪，李鹏，等，2024. 高地应力地下厂房围岩开挖损伤区形成机理研究[J]. 地下空间与工程学报，20(6)：1979-1990.

王成虎，高桂云，王洪，等，2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报，26(02)：167-174.

王成虎，郭啟良，丁立丰，等，2009. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. 岩土力学，30(8)：2359-2364.

谢和平，2019. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报，44(5)：1283-1305.

杨强，潘元炜，程立，等，2015. 高拱坝谷幅变形机制及非饱和裂隙岩体有效应力原理研究[J]. 岩石力学与工程学报，34(11)：2258-2269.

张晓飞，王继明，张鹏，等，2025. 新疆某抽蓄电站深部岩体地应力赋存规律及地下硐室稳定性分析[J/OL]. 地质力学学报. [2025-09-09]. DOI:10.12090/j.issn.1006-6616.2025076

周佐健，陈焕杰，罗滔，等，2024. 地下厂房初始地应力简易 FLAC3D 反演方法[J]. 武汉大学学报（工学版），57(S2)：11-15.