

大型洞室群智能动态设计方法及其实践

冯夏庭¹, 江 权¹, 向天兵¹, 张春生², 吴世勇³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国水电工程顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051)

摘要: 针对复杂地质条件下高边墙、多洞交叉的大型洞室群多步开挖过程中的强卸荷特点, 采用经验类比、数值分析、智能分析等方法的综合集成, 提出复杂条件下大型洞室群稳定性分析、开挖过程与支护设计的智能动态设计方法。该方法以解决大型地下洞室群不同设计阶段稳定性需要解决的关键问题为目标, 从地质条件的认识、地应力分布特征的把握、高边墙多洞室交叉的围岩变形破坏机制的理解到围岩稳定性评价、破坏模式识别、调控措施(开挖过程和支护方案)全局优化以及施工过程中的反馈分析与动态调整的系统全过程进行研究, 论述地下洞室群修建前的初步设计方法和洞群修建过程中的动态最终设计方法。在锦屏二级水电站地下厂房设计与施工全过程的应用实践表明, 该方法可以实现大型洞室群设计与施工的信息化、智能化和科学化。

关键词: 地下工程; 大型洞室群; 动态设计方法; 智能设计方法; 锦屏二级水电站; 稳定性; 破坏模式

中图分类号: TU 91

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)03 - 0433 - 16

INTELLIGENT AND DYNAMIC DESIGN METHOD OF LARGE CAVERN GROUP AND ITS PRACTICE

FENG Xiating¹, JIANG Quan¹, XIANG Tianbing¹, ZHANG Chunsheng², WU Shiyong³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 3. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: Focusing on characteristics of strong excavation unloading of high sidewalls of multi-cavern group under complicated geological conditions, an intelligent and dynamic design method is proposed for the stability analysis, design and construction of large cavern group. The method aims at the safe and economic construction for the large cavern group under complicated geological conditions. It considers the entire system's process from recognition of geological conditions, back analysis of in-situ stress field, understanding of deformation and failure mechanism of surrounding rock of large cavern group, stability analysis, global optimization of control measures of the stability such as excavation procedure and support parameters of cavern group, and dynamic adjustment of the excavation procedure and support parameters during the construction. The method has been in good practice of design and construction of underground powerhouse at Jinping II hydropower station. The results show that it is reliable information, intelligent and scientific method for design and construction of large cavern group.

Key words: underground engineering; large cavern group; dynamic design method; intelligent design method; Jinping II hydropower station; stability; failure mode

收稿日期: 2010 - 09 - 25; **修回日期:** 2011 - 01 - 13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732006); 国家自然科学基金雅砻江联合基金重点项目(50539090); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - EW - 110)

作者简介: 冯夏庭(1964 -), 男, 博士, 1986年毕业于东北工学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩石力学智能分析方法及其应用等方面的教学与研究工作。E-mail: xtfeng@whrsm.ac.cn

1 引言

为了满足日益增长的资源、能源、交通和环境需求,越来越多的大型洞室群正在或即将开挖(开采)与兴建,如水电站地下厂房、矿山巷道群、采场群、地下油气储存库群、高放废物地质处置库、军用地洞室群等。这些洞室群的特点是:(1) 规模巨大(如拟建的白鹤滩水电站地下厂房洞室群由主厂房、主变室、尾闸室、母线洞、调压井等洞室组成,其中初步设计的主副厂房洞尺寸 439 m×32.2/29 m×78 m,主变洞尺寸 400 m×20.5 m×32.2 m,尾水调压室尺寸 323.6 m×27.1 m×88.81 m);(2) 洞室群穿越的工程地质单元众多,遭遇的不良或不利地质条件复杂,如某电站厂址勘探洞内就发现对地下发电枢纽洞室群稳定性存在明显影响 II~IV 级结构面达 40 余条;(3) 大型洞室不同部位出现的稳定性问题突出而且其孕育机制各异且极为复杂,如二滩地下厂房开挖过程中就出现较严重的岩爆与围岩较大变形、锦屏一级电站地下主变室开挖后出现超过 130 mm 的较大变形等。

为解决地下工程的设计问题,Z. T. Bieniawski 等^[1~5]提出了多种设计方法。但是,需要针对上述大型洞室群的特点发展新设计方法,以体现新的特征,主要包括以下内容:

(1) 对系统的全过程进行研究:地质条件、地应力场分布特征⇒合理反映围岩变形破坏机制的模型和参数⇒围岩稳定性判别⇒调控措施识别⇒施工期动态智能反馈分析与设计优化。

(2) 根据施工过程中实际揭示的地质条件、围岩的实际响应特征和支护效果进行信息动态更新的动态反馈分析与设计优化。这是因为:对于大型洞室群来说,复杂的地质条件很难在施工前准确地勘测清楚,施工过程中实际揭露的地质信息可能会与先前预知的有差别;多洞室交叉在开挖过程中由于穿越的地层多而导致变形破坏机制复杂而且规律性差异较大,对一些复杂条件(高应力、强压缩卸荷)下高边墙、多洞室交叉围岩的变形破坏机制认识是逐步深入的;因各种可能的原因,实际施工的方案与设计可能不一致(如支护时机可能滞后),围岩变形的实际控制效果会与预期的不一样。

(3) 智能方法:既然围岩的变形破坏机制复杂,有必要通过自学习和非线性表达的方法加强对机制的不断深入理解。

(4) 多方法多手段的综合运用:如从变形管理等级、数值计算、破坏模式和智能方法等的角度综合建立围岩稳定性判别方法和控制措施识别方法。

(5) 动态调控:通过优化开挖顺序、台阶高度、精细开挖方案等减少开挖引起的应力集中和能量聚集,再进一步实施实时合理的支护方案,确保围岩的稳定。

为此,X. T. Feng 等^[6,7]将智能岩石力学的学术思想进行针对性的扩展,提出了地下工程稳定性智能分析与动态优化方法,并在水布垭和拉西瓦水电站等地下厂房洞室群设计与施工进行了成功的实践。在此基础上,进一步结合锦屏二级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与支护设计动态优化实践,丰富和发展了复杂地质条件下大型洞室群的智能动态设计方法。本文首先介绍该方法,然后以锦屏二级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与支护设计动态优化为例,介绍重点解决的难题及其效果。最后从地质条件的认识、围岩变形破坏机制的理解、主动调控措施识别、合理分析与设计方法的使用、地质、科研、设计、施工等多方人员的密切配合等影响大型洞室群稳定性和设计效果的几方面进行了讨论,也指出了今后的努力方向。

2 大型洞室群智能动态设计方法

大型洞室群智能动态设计方法的主要思想,包括初步设计和动态反馈分析与设计 2 个阶段(见图 1)。在初步设计(施工前设计)阶段,主要工作包括:

(1) 通过工程地质勘察、现场勘探洞与试验洞观察与分析,认识大型洞室群区域的地质条件、断层、岩性分布、地形地貌特征等,根据相关建议标准进行工程岩体分级。

(2) 通过地应力现场测试,考虑区域构造特征和现今的地形地貌,采用非线性反演方法^[8],进行工程区三维地应力场的反演。

(3) 通过一系列的室内试验(单轴压缩、三轴压缩、三轴加卸载、真三轴加卸载,声发射等)、现场勘探洞与试验洞的变形、应力、微震和弹性波等多元信息的观测,揭示大型洞室群围岩的变形破坏机制和特征,采用智能方法识别围岩的本构模型、强度准则和参数,如考虑多步开挖引起围岩损伤弱化累积的力学模型和参数的识别方法^[9]。

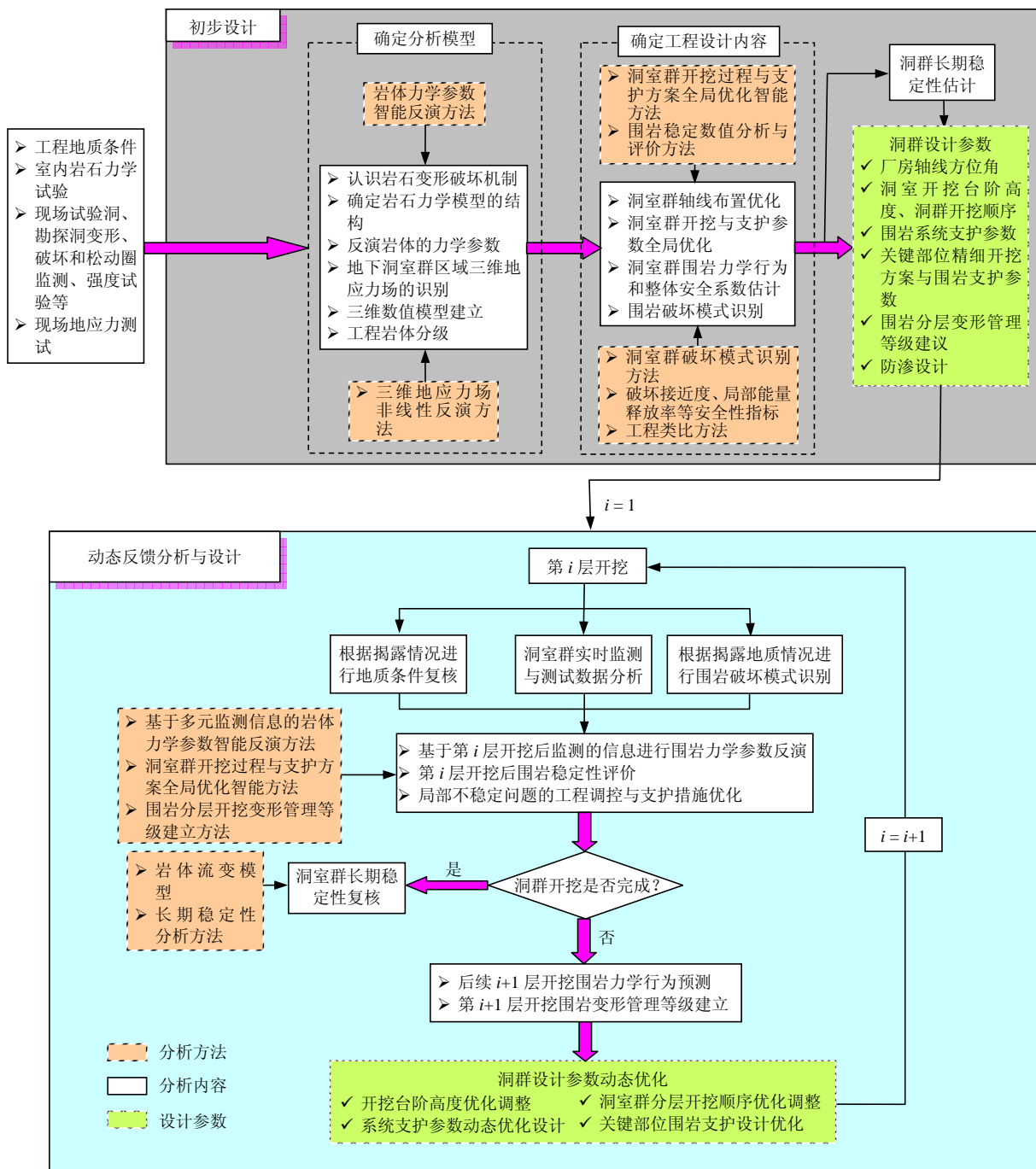


图 1 大型地下洞室智能动态设计思路与流程

Fig.1 Flowchart of dynamic and intelligent design method for large underground caverns

(4) 采用洞室群开挖过程与支护方案全局优化智能方法^[10], 结合数值分析, 优化开挖分层数、开挖顺序、台阶高度和关键部位精细开挖方案以及合理的支护型式和参数。

(5) 通过建立的破坏模式分类方法^[11], 进行潜在的大型洞室群破坏模式识别。

(6) 采用围岩分级、强度折减、能量超载等可能的方法, 进行洞室群整体稳定性和安全系数评价^[12]; 以破坏接近度^[13]和局部能量释放率^[14]为指标的数值分析, 评价围岩的整体和局部稳定性; 采用可靠

性方法等对洞室群进行风险估计。

(7) 采用工程类比与数值模拟相结合, 建立大型洞室群各层(或第一层)开挖的围岩变形管理等级。

(8) 根据上述分析结果、有关设计要求等, 综合建议满足功能需求和安全性要求的大型洞室群设计方案, 主要包括: 厂房轴线方位角、洞室开挖台阶高度、洞群开挖顺序、围岩系统支护参数、关键部位精细开挖方案与围岩支护参数、围岩分层开挖变形管理等级、防渗设计等。

在施工期, 逐层进行大型洞室群的动态反馈分

析与设计优化, 直至其开挖完成, 主要工作包括:

(1) 根据开挖过程中所揭露的地质条件对分析和设计所考虑的地质条件进行复核和破坏模式复核, 根据需要可以动态更新地质模型。

(2) 据开挖所揭示的围岩局部破坏形式与位置、变形特征复核三维地应力场分布特征。

(3) 据揭露地质情况进行围岩破坏模式复核和识别。

(4) 采用基于多元监测信息的岩体力学参数智能反演方法^[15], 反演和复核围岩的力学参数, 并用反演所得参数评价当前开挖状态洞室的稳定性, 根据稳定性评价结果进行洞室的支护优化设计; 并进一步预测下一步开挖后围岩的变形破坏特征。

(5) 结合工程类比、数值模拟与上几层开挖围岩变形管理等级建立经验, 建立大型洞室群下一层开挖的变形管理等级。

(6) 基于变形管理等级、围岩开裂、锚索应力超标、数值分析的破坏接近度和局部能量释放率等, 综合判别洞室后续开挖围岩的稳定性。

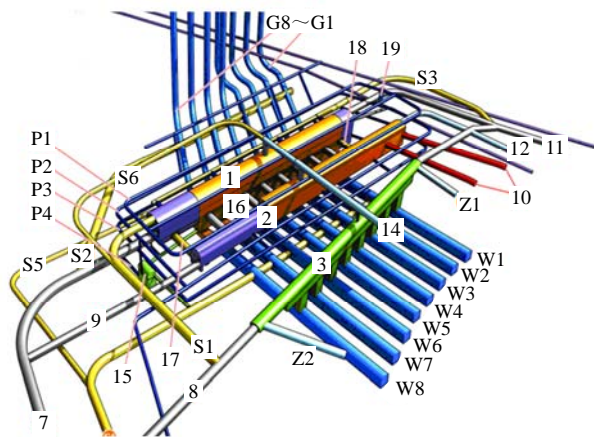
(7) 采用洞室群开挖过程与支护方案全局优化

智能方法, 根据围岩的实际地质条件和变形破坏特征等, 进行动态调控措施识别, 包括进一步优化下一步开挖方案(开挖参数、开挖时间等)和支护设计方案(支护类型、参数和时机等)^[16]。

(8) 利用长期稳定性分析方法, 对大型洞室群的长期稳定性进行分析预测和评价。

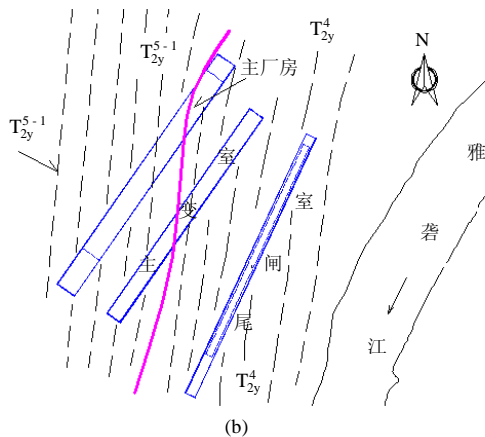
3 锦屏二级水电站地下厂房洞室群稳定性动态分析与设计优化实践

锦屏二级地下厂房枢纽洞室群以及断层、岩层倾角、地应力与厂房轴线以及高边墙的关系^[17], 锦屏二级水电站地下厂房洞室群主要包括上游调压井、主副厂房、主变洞、尾闸室、尾水洞及其附属洞室组(见图 2(a))。从满足厂房发电要求, 以及围岩分类、经验类比和数值分析等综合给出了轴线布置、洞室群尺寸、防渗、开挖分层及参数、支护参数等初步设计方案。主厂房尺寸 352.4 m×28.5 m×72.1 m, 主变室尺寸 374.6 m×19.8 m×35.1 m^[18]。

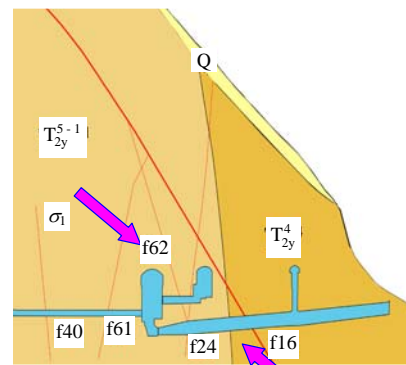


- 1—主副厂房; 2—主变室; 3—尾闸室;
- 7—进场交通洞; 8—尾闸室交通洞; 9—主变进风洞;
- 10—GIL 出线洞; 11—通风兼安全洞; 12—主变排风洞;
- 14—厂顶排风排烟洞; 15—排水泵房; 16—母线洞;
- 17—主变运输洞; 18—交通电缆道; 19—交通井;
- G8~G1—8#~1#高压管道; P1~P4—1#~4#排水廊道;
- W1~W8—1#~8#尾水隧洞; Z1, Z2—1#, 2#尾闸室进风洞;
- S1, S2, S3, S5, S6—1#, 2#, 3#, 5#, 6#施工支洞

(a)



(b)



(c)

图2 锦屏二级地下厂房枢纽洞室群以及断层、岩层倾角、地应力与厂房轴线以及高边墙的关系^[17]

Fig.2 Underground cavern group of Jinping II hydropower station and relationships between faults, rock obliquity, in-situ stress and axis of powerhouse and high sidewall^[17]

受该区域特殊的工程地质条件影响, 锦屏二级地下厂房洞室群开挖过程中面临着一些稳定性难题:

(1) 与洞轴线陡呈小夹角陡倾岩层: 在洞群布置设计时, 考虑到避开厂区的最不利地质条件, 以及地下厂房发电枢纽的规模和协调性, 主厂房轴线选择为 $N35^{\circ}E$ 。这一厂房轴线方位角实际上与该区域的主要发育 NNE 向构造基本一致, 更是与厂区 T_{2y}^{5-1} , T_{2y}^4 岩层的层面走向($N10^{\circ}W \sim N30^{\circ}E$)呈不利的小夹角(见图 2(b)), 而且岩层为倾角为 $73^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 陡倾层面。这样的岩层产状对厂房上游边墙的稳定性的非常不利的, 开挖过程中必将因岩体层面松弛易导致局部围岩掉块与滑塌等不稳定性问题。

(2) 河谷应力场条件下的最大主应力与洞轴线呈大夹角(见图 2(c)): 厂区地应力回归分析和同类工程研究都表明: 由于地下厂房洞群紧邻雅砻江 V 型河谷地区, 厂房主要洞群基本都位于河谷应力场中的应力升高区域, 这会使得洞群开挖施工面临的地应力导致围岩不稳定性问题将比非地应力升高区严重些; 而且厂区 NW 向实测地应力方位($S43.1^{\circ} \sim 47.4^{\circ}E$)厂区主要洞室的轴线方向呈大夹角。这样, 在开挖卸荷作用下, 厂房和主变上游侧边墙围岩必将发生较大的应力释放, 导致边墙围岩变形较大, 给上游边墙支护方式和支护参数设计带来了严格的要求。

(3) 存在多条贯穿厂房与主变室的断层和软弱结构面: 前期的地质勘查表明, 走向与厂房洞轴线基本一致、倾角为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的 $f65$ 断层及其次生断层 $f65-1$, $f65-2$ 和 $f65-3$ 穿越厂房上游边墙、厂房下游边墙和尾水洞扩散段。而且, 陡倾断层 $f16$ 贯穿厂房与主变室之间的中隔墙。这 2 条断层蚀变泥化强烈、力学性质较差, 厂房与主变开挖的开挖扰动必然会对断层产生较大的扰动, 具有导致断层错动并进而危及洞室整体稳定性的风险。

(4) 岩体强度应力比不高: 根据地应力测试结果和工程区岩石力学试验结果, 如果取实测地应力的平均值 15 MPa , 大理岩单轴抗压强度取 $50 \sim 80 \text{ MPa}$, 则 III 类大理岩的强度应力比为 $3.3 \sim 5.3$, 而 IV 类大理岩的强度应力比为 $2.7 \sim 3.0$; 如果取实测地应力的最大值 22.9 MPa , 则 III 类大理岩的强

度应力比为 $2.2 \sim 3.5$, 而 IV 类大理岩的强度应力比为 $1.7 \sim 2.0$ 。实际上, 如果进一步考虑到开挖后围岩的劣化, 而洞群围岩的强度应力比将进一步减小。

应用大型洞室群智能动态设计方法, 解决了锦屏二级水电站地下厂房洞室群稳定性与开挖的如下关键难题:

(1) 地质条件的动态更新: 表 1 给出了地质、监测和施工信息动态更新汇总; 图 3 给出了厂房主要监测布置示意图。

(2) 厂区三维地应力场的识别及其验证: 通过反演获得的锦屏二级水电站地下厂房区域的三维地应力场识别结果^[8], 在施工前经过了多个探洞实测和局部破坏实际观察结果的验证, 洞室开挖后所观察到的围岩变形模式、局部破坏类型和位置(见图 4)进一步给予了证实。

(3) 根据室内加卸载试验结果和现场观测成果, 认为锦屏二级地下厂房区大理岩可以用考虑多步开挖引起围岩损伤弱化累积的力学模型^[9]进行描述。利用多元信息的综合反演方法和洞室群逐层开挖后所获得的变形增量和松动圈等实测数据进行了力学参数的反演。利用反演的参数进行围岩下层开挖的变形特征和破坏深度等的预测分析^[16], 所获得的结果为实测结果所证实(见图 5 和表 2)。

(4) 通过优化合理给出了洞室群的开挖参数, 包括分层数和台阶高度(见图 6, 7, 表 3)、主厂房和主变室的优先开挖顺序(见图 8 和表 4)、岩壁吊车梁位置精细开挖方案(见图 9)、自上而下的集水井开挖方案(见图 10)。通过确保施工质量, 这些开挖参数有力地减小了开挖诱发的围岩损伤破坏程度和范围, 有利于发挥围岩的自身承载能力。

(5) 分别采用强度折减法和应力超载法对洞室群的整体稳定性进行了评价^[12], 评价结果为实践所证实。

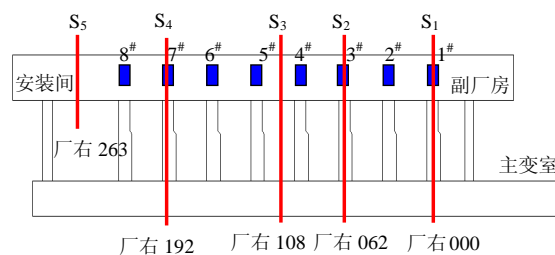
(6) 合理识别了厂房洞室群的主要破坏模式, 并根据其结果对洞室群进行了及时调控^[11]。

(7) 建立了锦屏二级水电站主厂房、主变室各分层的变形管理等级(见表 5, 6), 并以此为基础合理判别了厂房施工过程中的稳定性, 有效指导了洞室群的安全快速施工(见表 7)。具体方法描述如下:

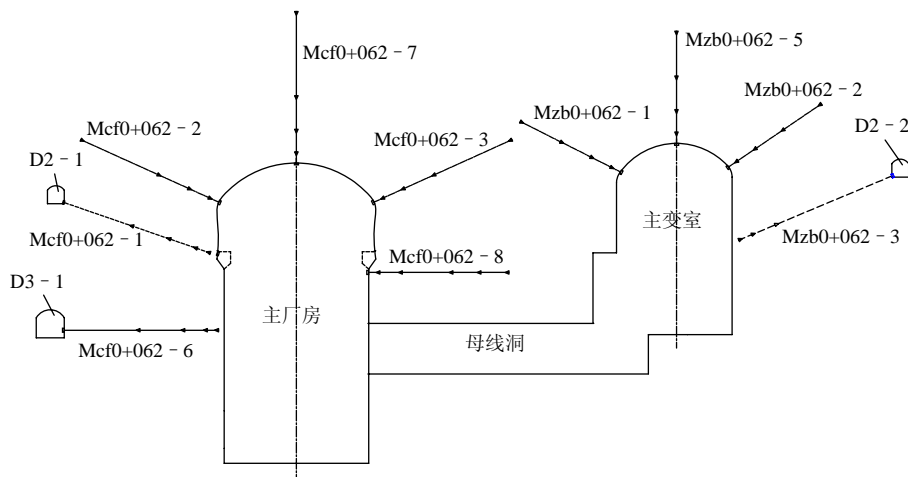
表 1 地质、监测和施工信息动态更新汇总
Table 1 The updated information of geology, monitoring and construction

分期	地质信息	监测信息*	施工信息	
			开挖分层**	支护
1	厂房岩性为 T_{2y}^4 和 T_{2y}^{5-1} 大理岩, III 类为主, 高倾角顺层节理、裂隙发育, 顶拱出露 f78 断层, 下游边墙出露 f68 断层; 主变室出露 f16 断层	厂房 S_3 监测断面在顶拱、上游拱座和下游拱座安装 3 支多点位移计及锚杆应力计, S_4 断面顶拱布置 1 支多点位移计及锚杆应力计, 均获得监测数据; 厂右 186 和厂右 270 两断面进行首层松动圈测试	厂房和尾闸室 I 层, 导洞开挖	挂网 $\phi 8$ mm@20 mm, 喷混凝土 15 cm; $L = 6.9$ m, $T = 120$ kN, $\phi 28$ mm@150 cm \times 300 cm 预应力中空注浆锚杆交叉布置; f68 断层采用预应力锚杆和锚索补强支护; f16 断层影响带增加钢拱架
2	厂房岩性和围岩类别不变, 上游边墙发育缓倾角节理, 局部密集发育, 下游边墙出露断层 f78; 主变室岩性为 T_{2y}^4 大理岩, III 类为主, 出露断层 f35, f21	S_1, S_2, S_3, S_4 和 S_5 监测断面第 I, II 层多点位移计(顶拱、上下游拱座和上游岩梁)及锚杆应力计、锚索测力计均随着开挖进程完成埋设, 并获得监测数据; 厂房和主变室厂右 000、厂右 062、厂右 124 断面完成首层松动圈测试	厂房和尾闸室 II 层, 主变室 I 层	挂网、喷混凝土同上, 边墙锚杆改为普通砂浆锚杆, 高程 1 350 m 上游边墙施加第一排 $L = 20$ m, $T = 1 750$ kN 压力分散型预应力锚索, 下游施加第一排 $L = 45$ m, $T = 2 000$ kN 压力分散型预应力对穿锚索
3	厂房上游 f65 断层主带在 D3-6 排水廊道出露, 次级节理呈羽状密集发育, 下游边墙 f68 断层产状变化较大, 由倾向下游变为倾向上游; 主变室 f16 断层破碎带宽度增大	$S_1 \sim S_5$ 监测断面完成第 III 层多点位移计(上游边墙通过排水廊道预埋)及锚杆应力计、锚索测力计并获得监测数据, 厂左 025 新增 S_1 监测断面完成第 I, II 层监测仪器埋设并获得监测数据; 厂房和主变室厂右厂右 000、厂右 062、厂右 124 断面完成第 II 层松动圈测试	厂房和尾闸室 III 层, 主变室 II 层, 母线洞上半层	完成各层喷锚支护, 参数同上; f65 断层影响带固结灌浆加固, 多处围岩局部破坏部位增加预应力锚杆; 厂右 009 及安装间等锚索超标部位补打预应力锚索
4	地质条件变化不大, 仅在厂房下游边墙出露若干小型水平断层, 对围岩影响不大	$S_1 \sim S_5$ 监测断面完成 IV 层以上多点位移计(上游边墙 IV 层和下游岩梁下方)及锚杆应力计、锚索测力计并获得监测数据, 厂左 025 新增断面 A-A 完成第 III 层监测仪器埋设并获得监测数据; 完成厂房厂右 000、厂右 062、厂右 124 和厂右 186 共 4 个断面第 III 层围岩松动圈测试; 厂右 140 断面增加一个系统监测断面; 增加松动圈长期观测孔	厂房 IV 层和 V 层(上), 主变室 III 层和 IV 层, 尾闸室 III 层母线洞下半层, 尾水洞上半层, 高压管道下平段; 厂房 IV~IX 层开挖台阶高度调整	完成各层喷锚支护, 参数同上; 母线洞区域锚索间距加密为 3 m; 房上下游侧岩锚梁范围各增加两排 $T = 2 000$ kN 预应力锚索
5	厂房 f65 断层及次生断层 f65-1 在下游边墙出露, 延伸范围较大	$S_1 \sim S_5$ 监测断面完成 V 层以上多点位移计(上下游边墙 V 层)及锚杆应力计、锚索测力计并获得监测数据; 完成厂房厂右 000、厂右 062、厂右 124 和厂右 186 共 4 个断面 IV 层松动圈测试	厂房 V 层(下)和 VI 层, 尾闸室 IV 层, 尾水洞下半层; 集水井 VI 层以下开挖方案改为自上而下明挖	完成各层喷锚支护, 参数同上; 第 VI 层锚索间距加密为 3 m; 母线洞和高压管道交叉口垮塌部位增加预应力锚杆或锚索加强支护; 高压管道下平段喷锚支护参数全面加强
6	地质条件变化不大, 仅发育若干小型断层破碎带或顺层挤压带, 其中 Pz17, Pz19 破碎带和 f81 断层影响较大	$S_1 \sim S_5$ 监测断面完成 VII 层以上多点位移计(上下游边墙 VII 层)及锚杆应力计、锚索测力计并获得监测数据; 集水井增加多点位移计、锚杆应力计和锚索测力计; 厂右 000、厂右 062、厂右 124 和厂右 186 共 4 个断面 V 层松动圈测试; 完成厂右 025、厂右 018.5、厂右 062、厂右 108.5 和厂右 192 共 5 断面 VI 层松动圈测试	厂房 VII~IX 层, 尾水洞下半层, 尾闸井	完成各层喷锚支护, 参数同上; 房下游侧拱, 主变室上游墙脚和下游拱座均增加 2 排 $T = 2 000$ kN 预应力锚索

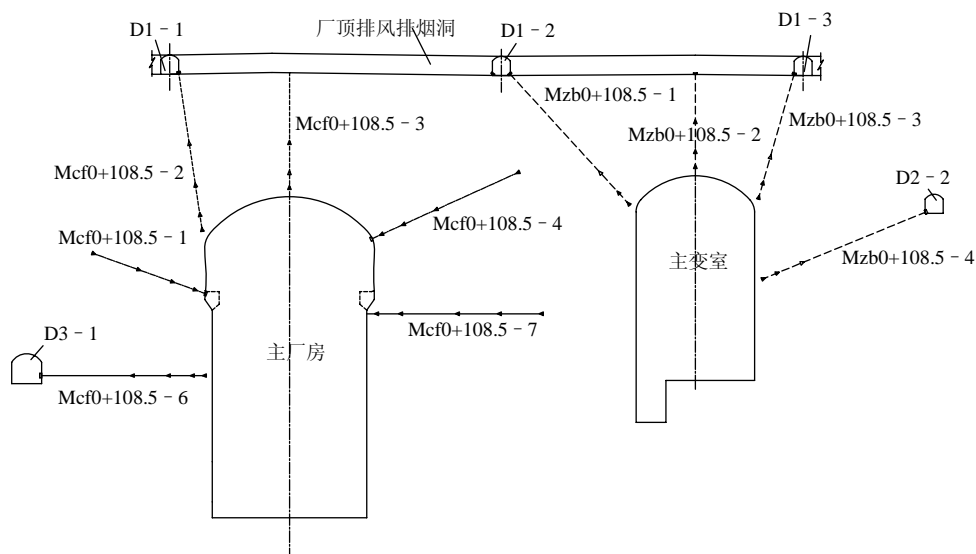
注: 监测断面布置见图 3(a)~图 3(d); 开挖分层**见图 3(e)。



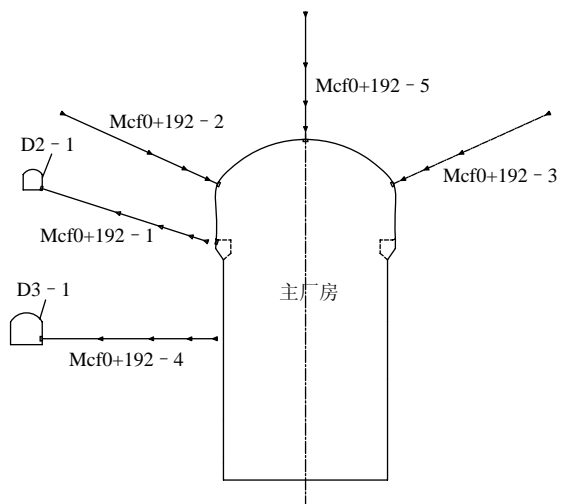
(a) 系统监测断面



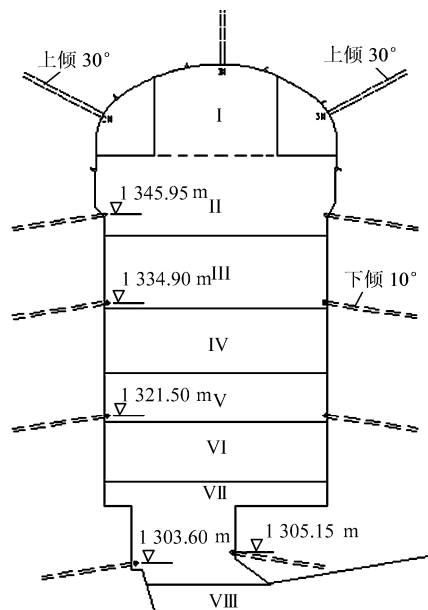
(b) 监测断面 S₂上的多点位移计布置图



(c) 监测断面 S₃上的多点位移计布置图



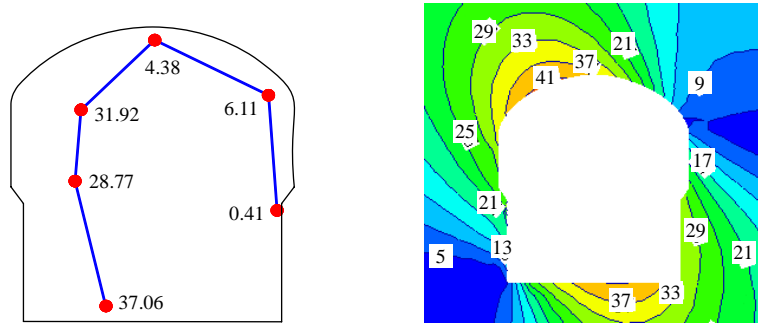
(d) 监测断面 S₄上的多点位移计布置图



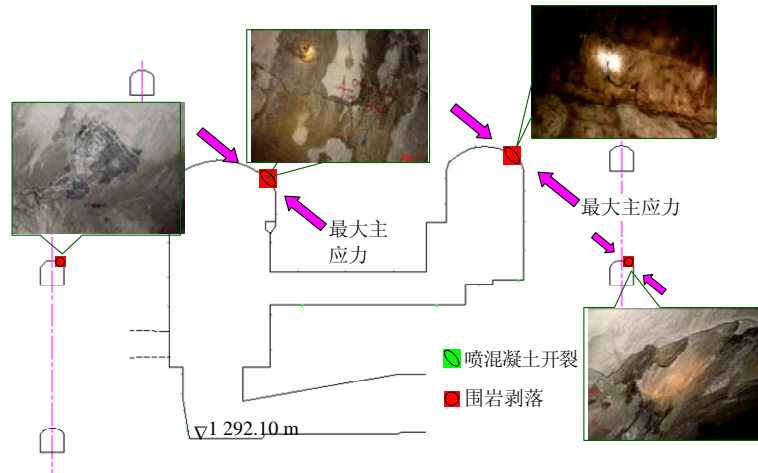
(e) 松动圈测试及其高程示意图

图 3 地下厂房主要监测布置示意图

Fig.3 Layout of monitoring instrument in main underground powerhouse



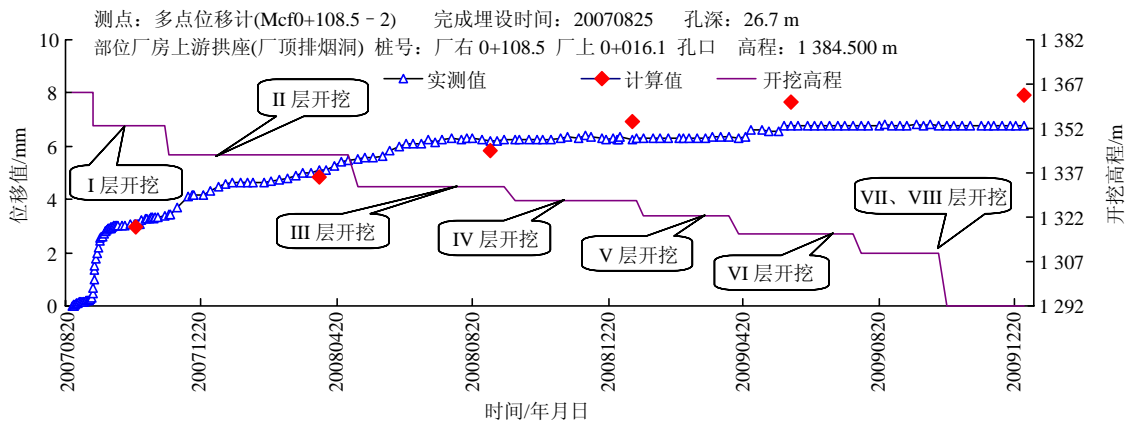
(a) 变形实测与预测值(单位: mm)



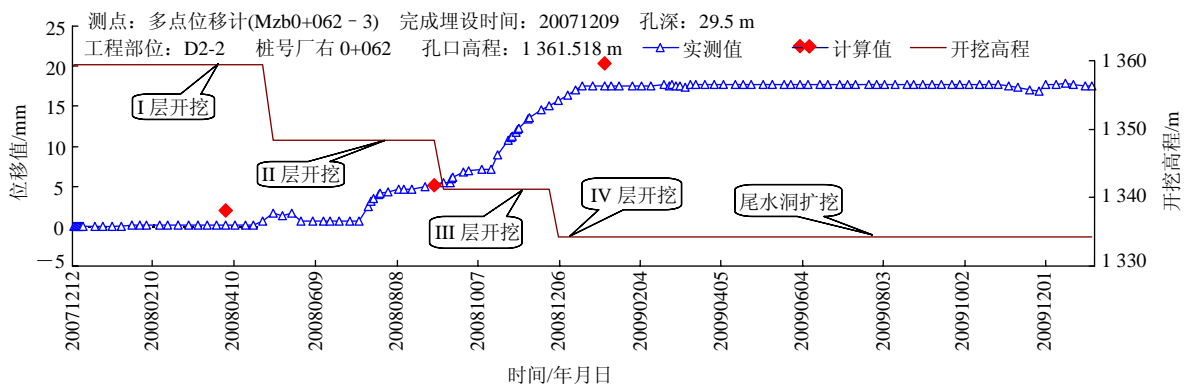
(b) 围岩破坏模式与最大主应力的关系

图4 锦屏二级地下洞室群开挖后的变形模式、围岩破坏模式与最大主应力的关系

Fig.4 Relationships between deformation mode, failure mode of rock and the maximum principal stress at underground caverns



(a) 主厂房上游拱座 Mcf0+108.5-2 测点4



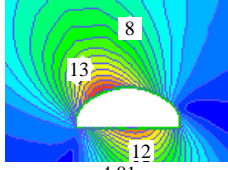
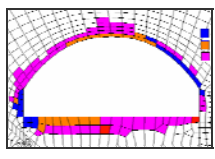
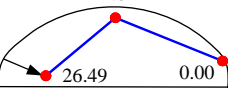
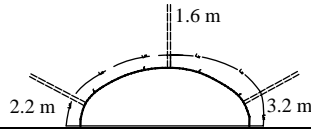
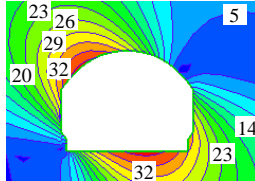
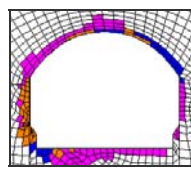
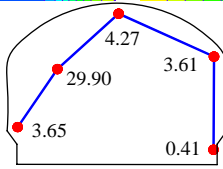
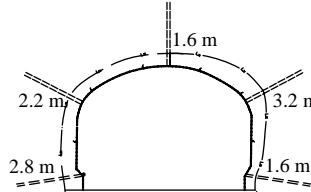
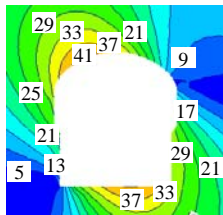
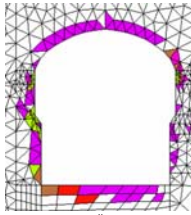
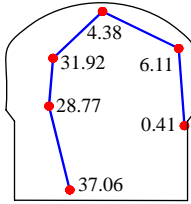
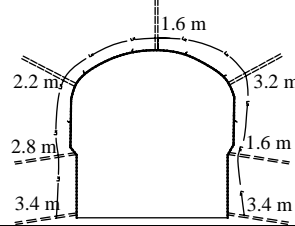
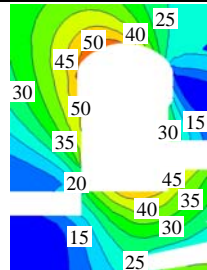
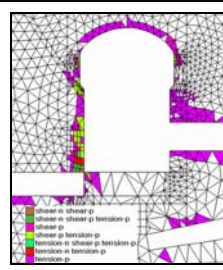
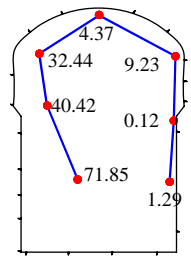
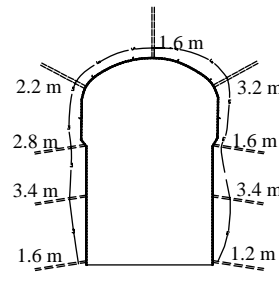
(b) 主变室下游边墙 Mzb0+062-3 测点3

图5 主厂房和主变室典型监测断面测点位移计算值与实测值对比图

Fig.5 Comparisons of measured deformation of surrounding rock and prediction for main powerhouse and main transformer chamber

表 2 各期开挖厂房整体稳定性预测与验证

Table 2 Prediction and verification of stability of powerhouse for each excavation layer

分期	对比项目	变形/mm	松动圈	破坏模式
1	预测			f65 断层和 f16 断层影响带围岩松弛垮塌; 陡倾层面张开或沿层面滑塌; 下游侧拱应力型剥落、劈裂
	实际			上游边墙围岩结构面松弛、沿结构面松脱; 下游侧拱剪切破坏和轻微的片状岩体剥落
2	预测			上游墙脚围岩剥落、片帮等; 上游岩锚梁层面松弛, 结构面张开
	实际			岩体沿层面开裂; 多组结构面切割导致局部岩体滑落; 断层导致围岩局部落块
3	预测			上游边墙的层面张开; 陡倾层面和缓倾节理面相互切割导致局部掉块; 软弱破碎带诱发的局部垮塌等
	实际			岩体受结构面切割形成块体滑落; 上游边墙围岩层面张开; f65 断层影响带内围岩呈块裂状或碎裂状; 下游拱肩围岩剪切破坏, 导致围岩和喷层外鼓、开裂; 下游边墙 f68 断层影响带围岩垮塌
4	预测			上游边墙的岩层张开; 陡倾层面和缓倾节理面相互切割导致局部掉块; 断层区域、软弱破碎带诱发的局部垮塌等; 较大的松弛变形导致局部的围岩和支护结构破坏; 母线洞环向开裂; 母线洞与高边墙交叉口围岩松弛垮塌
	实际			结构面切割形成不稳定块体; 层面或节理张开; 断层影响带内围岩滑落; 洞室交叉口掉块; 应力调整导致下游拱座喷混凝土剥落; 高边墙交叉洞室环向开裂

续

分期	对比项目	变形/mm	松动圈	破坏模式
5	预测			上游边墙陡倾层面和缓倾节理面相互切割导致局部掉块; 软弱破碎带诱发的局部垮塌等; 母线洞开裂风险依然较大; 房与母线洞交叉口、高压管道与厂房交叉口、母线洞与主变室交叉口、机窝上方台阶、机窝隔墩等外凸部位垮塌
5	实际			结构面切割形成不稳定块体; 层面或节理张开; 断层影响带内围岩滑落; 洞室交叉口掉块; 下游拱座喷混凝土剥落; 厂房边墙喷混凝土开裂
6	预测			上游边墙层面张开与楔形滑落; 结构面密集部位围岩掉块; 断层影响带部位围岩垮塌与大变形; 交叉洞口和凸出台阶处由于应力松弛导致掉块和垮塌
6	实际			机坑隔墩围岩垮塌; 尾水洞与下游边墙交叉口围岩垮塌; 下游侧拱围岩挤压外鼓; 节理密集发育部位掉块、垮塌

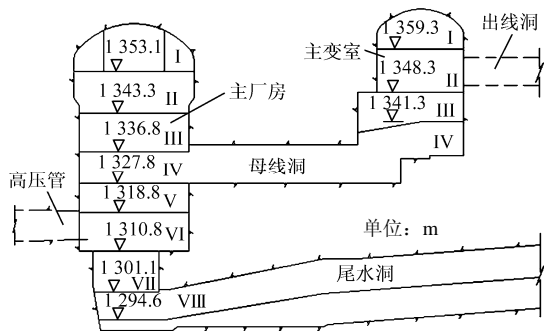
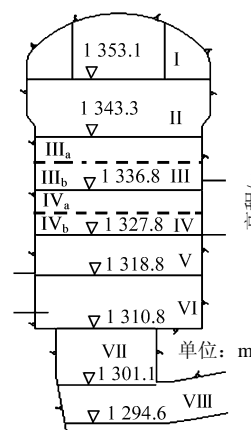
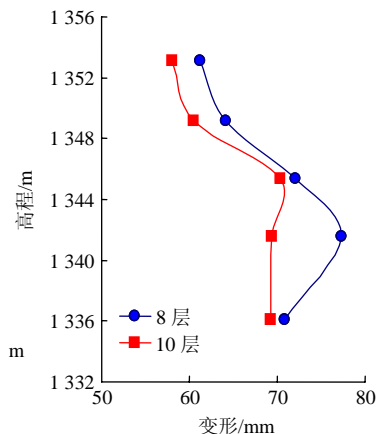


图6 厂房枢纽洞群分层开挖方案

Fig.6 Excavation scheme of underground cavern group



(a) 厂房分层细化示意图



(b) 不同分层时边墙变形

图7 厂房8层开挖对上游边墙变形的影响

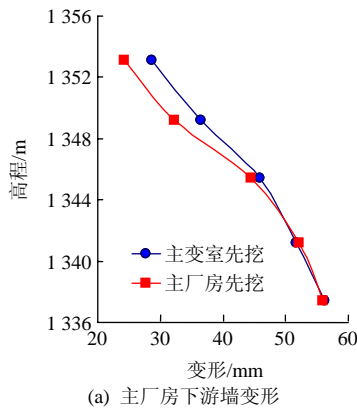
Fig.7 Comparison of deformation induced by excavation of 8 layers and excavation of 10 layers of main powerhouse

首先基于工程类比,对我国多个已建成的典型大型水电站地下房的基本信息进行了统计分析(见表7)。由于围岩实测变形大多包含了支护的效果。考虑最关键的因素(洞室区岩体强度、洞室区的最大主应力值量和洞室的几何尺寸)以及支护效果等因

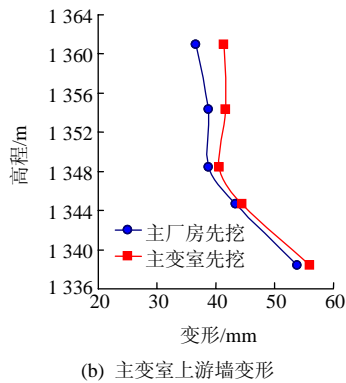
表 3 优化的开挖分层高度

Table 3 Optimized height for each excavation layer

项目	原方案分层		优化方案分层	
	高程/m	高差/m	高程/m	高差/m
第 IV 层	1334.3~1326.8	7.5	1332.3~1327.8	4.5
第 V 层	1326.8~1320.8	6.0	1327.8~1323.3	4.5
第 VI 层	1320.8~1313.5	7.3	1323.3~1314.3	9.0
第 VII 层	1313.5~1301.1	12.4	1314.3~1302.1	12.2
第 VIII 层	1301.1~1294.6	6.5	1302.1~1294.1	8.0
第 IX 层	1294.6~1292.1	2.5	1294.1~1292.1	2.0



(a) 主厂房下游墙变形



(b) 主变室上游墙变形

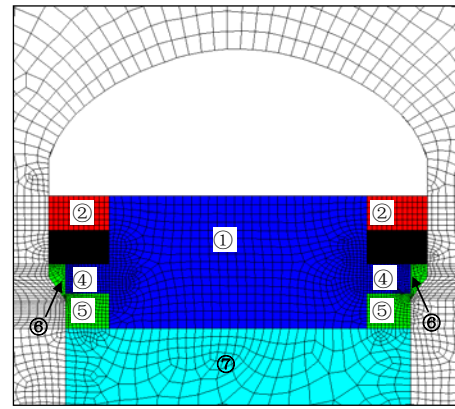
图 8 主厂房与主变室开挖顺序不同导致围岩变形差异性

Fig.8 Difference of deformation induced by different excavation sequences between main powerhouse and main transformer chamber

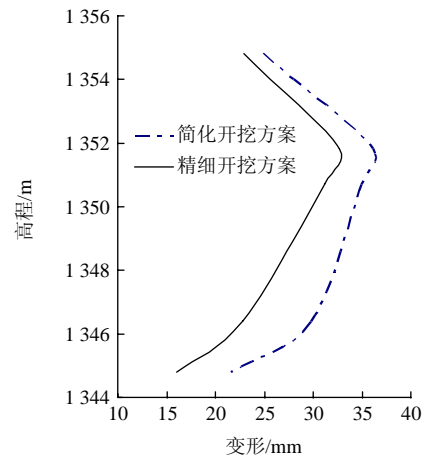
表 4 锦屏二级电站地下厂房枢纽洞群分期开挖顺序

Table 4 Excavation sequences of Jinping II underground caverns

开挖期	主厂房	主变室	其他洞室
1	I		通风兼安全洞
2	II	I	
3	III	II	出线洞
4	IV	III, IV	母线洞
5	V		高压管
6	VI		
7	VII		尾水洞
8	VIII		尾水洞



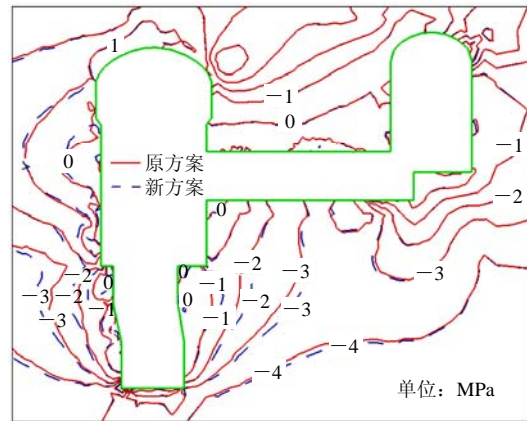
(a) 数值计算模型



(b) 不同岩锚梁开挖方案对厂房上游边墙的影响

图 9 岩锚梁的精细开挖方案

Fig.9 Fine excavation scheme for rock anchoring beams



新方案: 1#机组 VIII 层厂下部分→2#机组 VIII 层厂下部分、集水井 VIII 层→1#机组 VII 层→2#机组 VII 层→厂房 1#机组 VIII 层厂上部分→集水井 VII 层、厂房 1#机组 IX 层→厂房 2#机组 VIII 层厂上部分→厂房 2#机组 IX 层→集水井 IX 层;
原方案: 1#机组 VIII 层厂下部分→2#机组 VIII 层厂下部分→1#机组 VII 层→2#机组 VII 层→厂房 1#机组 VIII 层厂上部分→厂房 1#机组 IX 层→厂房 2#机组 VIII 层厂上部分→厂房 2#机组 IX 层→集水井依次开挖 VII, VIII, IX 层

图 10 集水井导井开挖顺序与原方案的计算的最小主应力结果比较与开挖顺序

Fig.10 Comparison of the minor principal stress after excavation of two excavation schemes of collecting well

表 5 厂房各层开挖围岩稳定变形管理标准及实践效果

Table 5 The established deformation management classification of surrounding rock for excavation of each layer of main powerhouse and its practice

分期	分层	部位	变形管理标准值				超标位移计	现场验证		
			安全等级		预警等级				危险等级	
			位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$			位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$
1	I	顶拱	10	0.10	15	0.20	20	0.3		
		上游	8	0.15	12	0.25	16	0.4		
		下游	5	0.15	8	0.25	13	0.4		
2	II	顶拱	4	0.10	6	0.20	10	0.3		
		上游	15	0.15	20	0.25	30	0.4	Mcf0+192 - 1 增量 20 mm	节理密集带垮塌
		下游	8	0.10	12	0.25	20	0.4	Mcf0+000 - 4 增量 15 mm	出现 10~12 m 长的喷混凝土裂缝
3	III	上游	18	0.20	25	0.30	35	0.6	Mcf0+263.6 - 1 增量 29.2 mm, 速率达 1.1~3.4 mm/d	出露软弱破碎带
		下游	12	0.20	18	0.30	25	0.5		
4	IV	上游	15	0.30	25	0.50	35	0.8	Mcf0+000 - 1 每次爆破后位移速率均达 0.4 mm/d 左右	喷混凝土开裂、锚索超限
		下游	12	0.20	18	0.40	25	0.7		
5	V 上	上游	15	0.30	25	0.50	35	0.8	高程 1 334.5 m 位置多个位移计监测值超过预警甚至危险等级	第三层排水廊道出现多条环向裂缝
		下游	12	0.20	18	0.40	25	0.7		
6	V 下	上游	15	0.30	20	0.50	30	0.7		
		下游	15	0.30	20	0.50	30	0.7	岩梁下方位移增长明显, S ₄ 断面平均速率达 0.3 mm/d	母线洞出现环向裂缝, 岩梁下方锚索超限
7	VI	上游	15	0.30	20	0.50	30	0.7	高程 1 322 m 位置多个位移计超过预警甚至危险等级	超挖严重, 边墙成型很差, 少量锚索超限
		下游	15	0.30	20	0.50	30	0.7		
8	VII	上游	12	0.30	18	0.50	24	0.7		
		下游	15	0.30	20	0.50	25	0.7	S ₂ 和 S ₃ 断面 5 层多点位移计增量达 20 和 35 mm	少量锚索超限
		下游	12	0.30	18	0.50	24	0.7		

表 6 主变室各层开挖围岩稳定变形管理标准及实践效果

Table 6 The established deformation management classification of surrounding rock for excavation of each layer of main transformers chamber and its practice

分期	分层	部位	变形管理标准值				超标位移计	现场验证		
			安全等级		预警等级				危险等级	
			位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$			位移增量 /mm	速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$
2	I	顶拱	15	0.15	20	0.25	25	0.4		
		上游	18	0.15	25	0.25	35	0.4		
		下游	18	0.15	25	0.25	35	0.4		
3	II	上游	15	0.15	20	0.25	30	0.4		超挖严重, 成型极差
		下游	10	0.15	15	0.25	20	0.4	Mzb0+000 - 3 增量 17.2 mm	出现长约 4 m 的喷混凝土裂缝
4	III	上游	10	0.30	15	0.50	25	0.7		母线洞出现环向裂缝
		下游	10	0.30	18	0.50	25	0.7	S ₁ 和 S ₃ 监测断面下游边墙位移增量均超过 25 mm	与边墙相交的排水廊道出现裂缝
5	IV	上游	10	0.30	15	0.50	25	0.7		边墙中下部锚索超限、劈裂缝
		下游	10	0.30	18	0.50	25	0.7	S ₂ 监测断面下游拱座位计增量达 35 mm	侧拱和边墙外鼓、开裂, 侧拱锚索超限

表 7 典型地下洞室的监测变形统计

Table 7 Statistical deformation of typical underground caverns

工程名称	围岩分级	UCS /MPa	σ_1 /MPa	洞宽 /m	洞高 /m	实测变形 /mm
二滩	II	136.0	25.0	30.7	65.38	96.6
瀑布沟	II	100.0	20.0	26.8	70.10	58.0
拉西瓦	II	110.0	27.0	30.0	73.84	71.0
天荒坪	I	120.0	10.0	21.0	48.00	29.0
小浪底	III	88.5	5.0	26.2	61.44	24.0
小湾	II	105.0	20.0	30.6	79.38	75.0
龙滩	III	80.0	13.0	31.5	71.00	57.7
漫湾	I	96.0	8.0	22.0	69.40	32.0
十三陵	III	70.0	13.0	23.0	46.60	40.5
棉花滩	III	120.0	6.8	21.9	52.80	17.5

素(以洞室的变形特征系数 k 为表征), 洞室开挖后围岩变形存在下列关系式:

$$\text{围岩变形} \propto k \frac{\text{洞室尺寸}}{\text{岩石强度} - \text{应力比}} \quad (1)$$

这里选取工程区岩石单轴抗压强度(UCS)、工程区实测最大原岩主应力值(σ_1)、厂房的高度(h)、洞室开挖后监测的稳定围岩最大变形(δ_{\max})进行计算分析, 可获得洞室的变形特征系数 k (见图 11)。这些洞室的平均变形特征系数(参见式(2)) $k = 5.628$ 。

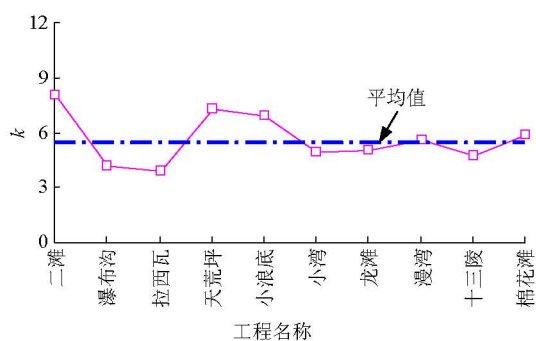


图 11 典型工程的变形特征系数 k

Fig.11 Deformation characteristic coefficient(k) of typical engineering

$$\delta_{\max} = k \frac{h}{UCS - \sigma_1} \quad (2)$$

采用上述变形特征系数, 考虑锦屏二级地下厂房基本的地应力条件、围岩条件和高度, 可以大体估计该厂房在基本支护的情况下围岩的基本变形量级 $\delta_{\max} \approx 81 \text{ mm}$ 。

考虑到锦屏二级地层厂房最大主应力与厂房轴线呈大夹角、陡倾层面与厂房轴线呈极小的夹角、厂房位于河谷应力场这 3 个不利因素, 厂房边墙围岩在开挖卸荷下将会发生较大的卸荷变形, 总体估计洞室基本变形特征总体上 $80 \sim 100 \text{ mm}$ 是可能的。这里, 从保守的角度出发, 还是确定围岩的变形的保守估计值约 81 mm 。进一步分析上述厂房开挖的三维数值计算结果可发现, 厂房第一层开挖后最大变形的部位(上游侧拱)在整个厂房 6 次开挖计算的位移释放率如图 12 所示。

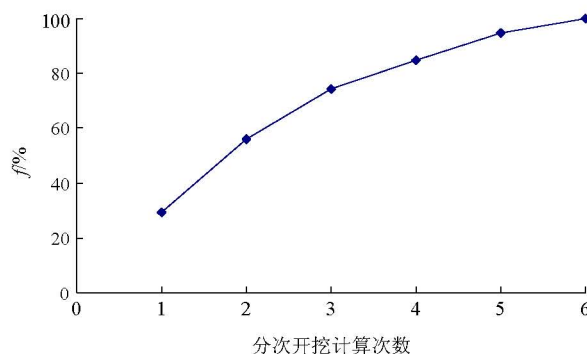


图 12 第一层最大变形部位在整个厂房开挖中的位移释放率

Fig.12 Displacement release rates of the maximum displacement in the first layer during whole excavation of powerhouse

由于第一期的围岩最大变形部位释放率 $f \approx 28\%$, 则根据对锦屏二级地下厂房 δ_{\max} 的估计值为 81 mm 而言, 厂房第一层围岩稳定的最大值大体约为 23 mm 。但是, 在未获得对该洞群充分的地质信息和实践经验前, 可以将该值作为变形管理等级的预警值; 并且设定安全储备系数为 1.25, 则获得了厂房顶拱变形管理等级的安全值为 18 mm ; 同样, 取放大系数为 1.2(参见前文洞群整体安全系数计算结果), 可获得顶拱变形危险值为 28 mm 。

围岩破坏的孕育过程一般都表现出围岩变形快速增加过程, 因此在判断大型洞室围岩稳定性时其围岩变形速率也是一个重要指标。从厂房第一层开挖的围岩位移释放率特征看, 围岩在距离开挖掌子面 3 倍洞宽时就开始发生位移释放, 而当开挖面经过后的 3 倍洞宽时还具有围岩释放(见图 13)。根据锦屏二级厂房的开挖施工计划, 假定厂房第一层 160 m 长度的总体开挖与系统支护时间大体为 75 d , 如果假定围岩变形随开挖整体上表现为稳定过程, 则大体可估计围岩变形释放速率约为 0.3 mm/d , 并将此作为顶拱围岩变形的预警速率。

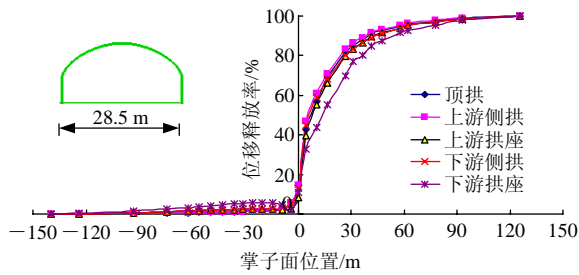


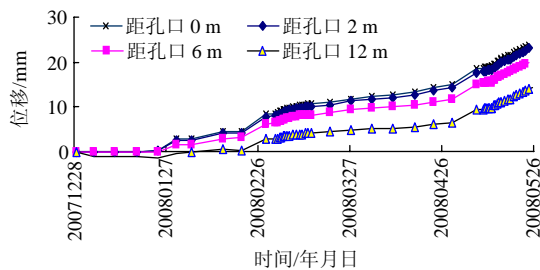
图 13 厂房第一层开挖围岩位移释放率特征

Fig.13 Displacement release rates during excavation of the first layer of main powerhouse

表 8 基于变形管理等级的典型不稳定问题识别与调控措施

Table 8 Recognition of typical instable regions and their engineering control measures based on deformation management classification

破坏位置	主要特征	调控措施
厂右 263 安装间部位上游边墙围岩大变形	2008 年 2 月 25 日, 厂右 263 安装间上游边墙部位的预埋多点位移计 Mcf0+263-1 监测到围岩发生了明显的变形突变, 最大变形从原来的 12.76 mm(2008 年 2 月 24 日)增大到 20.89 mm(2008 年 2 月 28 日), 变形速率为 1.1~3.4 mm/d, 其变形量和变形速率都超出了此前制定的厂房第二层开挖围岩稳定管理标准的预警级别	厂房第二层开挖后变形突增→停止第二层开挖并实施支护→第三层上半部分开挖, 变形增加→实施支护→第三层下半部分开挖, 变形略增→实施支护, 变形趋于稳定 ^[16]
主厂房下游拱座喷混凝土开裂	2008 年 4 月 29 日, 厂房厂右 000 下游拱座多点位移计 Mcf0+000-4 监测到围岩变形约 14.99 mm(见图 14(a))(第一层开挖监测到 2.5 mm 变形), 即超出了厂房下游边墙围岩稳定管理标准的“预警”等级 12 mm。随后的现场踏勘发现, 5 月 8 日, 该拱座喷射混凝土出现一条长为 8~10 m 的水平裂缝(见图 14(b))	增加 2 排排水孔, 新增 6 排间距为 1.5 m 预应力锚杆, 增加 2 排锚索
厂房第二层上游边墙厂右大变形	该部位上游边墙多点位移计 Mcf0+192-1 近期一直保持较大的变形速率, 其累积最大变形约 32.4 mm; 扣除该预埋多点位移计监测到的厂房一层开挖变形, Mcf0+192-1 实际监测到的厂房二层开挖变形约 20 mm, 达到了厂房二层开挖围岩稳定管理标准的“预警等级”	及时施作系统支护, 并在原系统锚杆基础上内插 9 m 长的预应力锚杆
主变室下游侧拱开裂	主变室第二层开挖完后第三层下游侧导洞开挖过程中, 主变室 1-1 监测断面多点位移计 Mzb0+000-3 在 9 月下旬监测到围岩变形约 17.18 mm(2008 年 9 月 15 日, 见图 15(a)), 其变形增量超出主变室下游边墙围岩变形“预警值 15 mm”。2008 年 9 月 26 日, 现场人员发现主变室厂右 017 区域下游侧拱发生延伸长度约 4 m 的喷混凝土开裂(见图 15(b))	主变室下游拱肩进行加强支护, 方案为增加一排预应力锚索和在原系统锚杆基础上内插长度为 9 m 的预应力锚杆



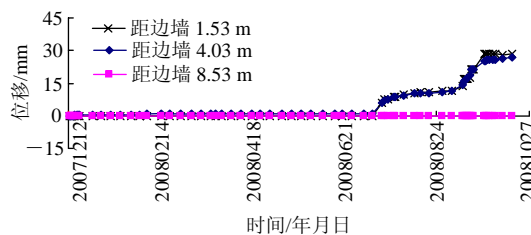
(a) 围岩变形



(b) 喷混凝土开裂现象

图 14 主厂房下游拱座围岩变形与喷混凝土破坏

Fig.14 Deformation of surrounding rock and crack of shotcrete at downstream arch of main powerhouse



(a) 变形监测结果



(b) 喷混凝土开裂图片

图 15 主变室下游侧拱围岩变形与喷混凝土破坏

Fig.15 Deformation of surrounding rock and crack of shotcrete at downstream arch of main transformer chamber

(8) 厂房施工过程的快速动态调控。利用了基于数值分析结果(局部能量释放率较大、破坏接近度较大)、变形管理等级、破坏模式^[11]、锚索超标、以及上述几个方面信息的综合对锦屏二级水电站地下厂房施工过程中的围岩稳定性进行了及时调控措施识别^[19]。调控的措施包括: 开挖进尺、开挖台阶高度和顺序、支护类型、支护时机和参数等。表 8 给出了基于变形管理等级的典型不稳定问题识别与调控措施, 表 9 给出了锦屏二级水电站地下厂房洞室群各期开挖稳定性评价结果与最终设计部分汇总。

表 9 锦屏二级水电站地下厂房洞室群各期开挖稳定性评价结果与最终设计部分汇总

Table 9 Partial results of final stability analysis and final design

分期	开挖	支护	监测
1		副厂房 f68 出露区域锚杆加密	监测周报格式规范修订
2	减缓开挖进度, 控制爆破质量	主变室 f16 出露区域增加钢拱架; 大变形和围岩破碎区域增加预应力锚杆; 系统预应力锚索型式由全长黏结改为无黏结压力分散型	变形突增条件下监测频次的制定
3	控制爆破质量, 采用预裂爆破, 预留保护层, 每层分为上下两半层开挖; 主厂房 4~8 层开挖顺序优化	锚索排距减小为 3 m; 喷混凝土剥落区域清理和预应力锚杆加强支护; 锚索超限区域增加补强锚索; 上游边墙 f65 伴生节理影响带固结灌浆	增强对 f16 断层活动性监测; 进行围岩弹性波和声波测试
4	高边墙各交叉洞室洞口及母线洞电缆槽施工中严格控制施工质量, 减小围岩扰动; 集水井开挖顺序优化	母线洞与高边墙交叉口区补强锚索支护; 安装间端墙增加 3 排预应力锚索; 主变室下游边墙大变形区域补强锚索	厂右 140 位置增加系统监测断面; S ₁ 监测断面增加多点位移计; 关键部位增加松动圈长期观测孔
5	放缓厂房整体开挖进度, 尽量避免厂房与尾水洞扩散段同步开挖	高压管道下平段系统支护整体加强, 锚杆长度和密度均增加, 近厂段增加钢拱肋	增加下游边墙缓倾角断层位移监测
6	机坑间隔开挖, 控制厂房下游边墙与尾水隧洞交叉口爆破质量	厂房和主变室下游侧拱、主变室上游边墙下部各增加 2 排预应力锚索	集水井四面边墙增加各类监测仪器; 选取 2 个系统监测断面在不同高程增加多点位移计进行加密监测

4 讨论与结论

大型洞室群动态智能设计方法的提出及其在拉西瓦、锦屏二级等水电站地下厂房设计和施工的成功实践, 表明了以下要点:

(1) 正确认识地质条件: 岩性边界、断层、控制性结构面、软弱带分布特征(位置、产状及其与大型洞室群高边墙等的关系), 计算模型应与地质条件的动态更新而进行相应的更新。

(2) 正确认识高应力下硬质围岩的变形破坏机制, 需要合适的力学模型和参数反映该特征和机制。

(3) 主动调控: 开挖方案优化⇒减少开挖引起的应力集中和能量聚集程度、控制能量释放速率⇒尽可能减少开挖引起的损伤破坏程度。

(4) 合理的分析方法: 自学习、全局优化、非线性模型、综合集成、快速动态更新。

(5) 地质、计算、设计与施工人员的密切配合, 快速决策与及时实施, 沟通理解, 配合默契, 保证好的效果出现。

考虑到我国今后大型地下工程建设的新特点, 下步重点研究将是含有特殊地质单元(层间错动带、层内错动带、柱状节理等)以及高应力强卸荷下大型高边墙洞室群的变形破坏机制及其有效调控方法的进一步深化研究。

致谢 特别感谢中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院陈建林、侯靖、陈祥荣和锦屏建设管理局曾雄辉、王继敏等为本文方法的应用提供的帮助和支持!

参考文献(References):

[1] BIENIAWSKI Z T. Design methodology in rock engineering[M]. Balkema, Rotterdam: Taylor and Francis Group, 1992.

[2] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock institution of mining and metallurgy[M]. [S. l.]: Elsevier, 1977.

[3] LI S H. A new concept of tunnel support design—application and theory of precedent type analysis[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[4] 潘家铮. 岩石力学与反馈设计[J]. 水电站设计, 1994, 10(3): 3 - 10.(PAN Jiazheng. Rock mechanics and feedback design[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1994, 10(3): 3 - 10.(in Chinese))

[5] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(ZHU Weishen, LI Shucai, CHEN Weizhong. Failure mechanism and anchorage effect of jointed rock mass and its application to engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))

[6] FENG X T, KATSUYAMA K, WANG Y J, et al. A new direction: intelligent rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1): 135 - 141.

[7] 冯夏庭, 江权, 苏国韶. 高应力下硬质地下工程的稳定性智能分

- 析与动态优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 341 - 1 352. (FENG Xiating, JIANG Quan, SU Guoshao. Integrated intelligent stability analysis and dynamic optimization of underground engineering in hard rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 341 - 1 352.(in Chinese))
- [8] 江 权, 冯夏庭, 陈建林, 等. 锦屏二级水电站厂址区域三维地应力场非线性反演[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3 003 - 3 010.(JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Jianlin, et al. Nonlinear inversion of 3D initial geostress field in Jinping II hydropower station region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3 003 - 3 010.(in Chinese))
- [9] 江 权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144 - 152.(JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Guoqing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 144 - 152.(in Chinese))
- [10] 苏国韶, 冯夏庭, 江 权, 等. 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, 2007, 26(增 1): 2 800 - 2 808.(SU Guoshao, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. 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, 2007, 26(Supp.1): 2 800 - 2 808.(in Chinese))
- [11] 向天兵, 冯夏庭, 江 权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式识别与动态调控方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(待刊).(XIANG Tianbing, Feng Xiating, JIANG Quan, et al. Failure mode recognition and dynamic control method for surrounding rock of large cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(to be published).(in Chinese))
- [12] 江 权, 冯夏庭, 揭秉辉, 等. 地下多洞室结构的中隔墙安全度区间计算方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1 847 - 1 852.(JIANG Quan, FENG Xiating, JIE Binghui, et al. Interval analysis method of safety degree for mid partition in underground multi-cavern structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1 847 - 1 852.(in Chinese))
- [13] 张传庆, 周 辉, 冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 888 - 893.(ZHANG Chuanqing, ZHOU Hui, FENG Xiating. Stability assessment of geotechnical engineering based on failure approach index[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 888 - 893.(in Chinese))
- [14] 苏国韶, 冯夏庭, 江 权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 1 741 - 1 756.(SU Guoshao, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Study on new index of local energy release rate of stability analysis and optimal design of underground rock mass engineering with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 1 741 - 1 756.(in Chinese))
- [15] 江 权, 冯夏庭, 苏国韶, 等. 基于松动圈 - 位移增量监测信息的高地应力下洞室群岩体力学参数的智能反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 2 654 - 2 662.(JIANG Quan, FENG Xiating, SU Guoshao, et al. Intelligent back analysis of rock mass parameters for large underground caverns under high earth stress based on EDZ and increment displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 654 - 2 662.(in Chinese))
- [16] 江 权, 冯夏庭, 向天兵, 等. 大型地下洞室群稳定性分析与智能动态优化设计的数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 524 - 539.(JIANG Quan, FENG Xiating, XIANG Tianbing, et al. Dynamical numerical simulation method for stability analysis and intelligent design optimization of large cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 524 - 539.(in Chinese))
- [17] 陈建林, 江 权, 周 辉. 锦屏二级水电站尾部厂区枢纽布置方案研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增 1): 31 - 36.(CHEN Jianlin, JIANG Quan, ZHOU Hui. Scheme design of underground powerhouse junction for Jinping II hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Supp.1): 31 - 36.(in Chinese))
- [18] 陈祥荣, 侯 靖, 陈建林, 等. 雅砻江锦屏二级水电站地下厂房洞室围岩稳定与支护优化[R]. 杭州: 中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院, 2007.(CHEN Xiangrong, HOU Jing, CHEN Jianlin, et al. Stability and support optimization of surrounding rock for Yalong River's Jinping II underground caverns[R]. Hangzhou: HydroChina Huadong Engineering Corporation, 2007.(in Chinese))
- [19] 江 权, 侯 靖, 冯夏庭, 等. 锦屏二级水电站地下厂房围岩局部不稳定问题的实时动态反馈分析与工程调控研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 899 - 1 907.(JIANG Quan, HOU Jing, FENG Xiating, et al. Dynamic feedback analysis and engineering control of surrounding rock local instability in underground powerhouse of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 899 - 1 907.(in Chinese))