

抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析

陈晓, 杨路, 孟方

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要 本文以辽宁某抽水蓄能电站为研究对象, 根据工程安全监测月报的实测数据, 采用宏观、细观、微观多尺度监测分析的方法, 对地下厂房围岩稳定性进行研究。宏观控制地质构造全局, 采用遥感解译、地面测绘等方式构建区域地质框架, 细观控制结构面动态演化, 确定关键节理和断层发育区, 微观控制岩体损伤萌生扩展, 用高精度传感设备捕捉微观应变。电站地下厂房围岩应力变化范围为 -1.09 MPa 到 7.91 MPa, 位移月变化量在 -0.21 mm 到 1 mm 之间, 渗透压力为微水或者无水状态, 整体稳定性良好; 针对节理发育断面的应力累积现象, 提出锚杆加密布置、预应力动态调整、施工时序优化的协同管理建议, 以期对抽水蓄能电站地下厂房围岩安全管控和大坝与厂房系统的安全联动提供技术参考。

关键词 抽水蓄能电站地下厂房围岩; 稳定性监测; 大坝安全联动; 支护优化; 监测数据反演

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.015

0 引言

抽水蓄能电站是能源系统调峰填谷、储能备用的关键性设施, 在新型电力系统建设中起着重要的作用, 它的运行安全关系到区域电力供应的稳定可靠。地下厂房是集中布置发电机组、主变压器等主要设备的枢纽, 其围岩稳定关系到设备的安全, 也影响到电站运行安全以及大坝的协同工作。辽宁某抽水蓄能电站为一等大(1)型工程, 装机容量 $1\ 300$ MW, 地下厂房埋深超 300 m、洞室规模巨大, 围岩主要为花岗岩, 局部有节理、断层发育, 受复杂地质条件、施工开挖扰动、运行期机组振动、水位交替变化等多种因素叠加影响, 稳定性控制难度很大。本文根据 2025 年 11 月该电站连续完整的监测数据, 从多尺度监测分析、动态荷载下评价优化和工程实验验证三个主要方面, 系统研究围岩稳定性, 精准揭示围岩变形演化规律和失稳机理, 提出科学、合理、安全的控制措施, 为类似深埋地下厂房工程稳定性保障提供理论参考。

1 围岩稳定性多尺度监测与分析方法

1.1 宏观尺度: 地质勘察与围岩监测一体化

地质—监测协同勘察技术是以电站工程地质条件为依托, 将上水库、下水库、输水系统、地下厂房作为一个协同监测单元, 对围岩、坝体、边坡等重点部位进行全覆盖, 形成地质条件、监测布点、数据反馈一体化的体系。具体实施时, 用地面地质测绘、钻孔

勘探、地质雷达物探等方法准确找到不良地质体分布; 根据地质勘察结果, 按照洞室开挖进度动态调整监测点位, 保证监测点准确覆盖风险区。

1.2 细观尺度: 结构面监测与岩体力学参数校准

结构面动态监测, 在主厂房厂左 $0+121.00$ 断面水平节理发育, 局部有断层破碎带的复杂地质条件下, 创建“点—线—面”三维监测网。用高精度锚杆应力计(测量精度 0.01 MPa)监测结构面滑移受力状态, 在节理交汇关键点位加密布置; 采用多点位移计监测不同深度岩体位移, 捕捉节理变形累积特征; 搭配测缝计实时监测结构面开合度变化。

1.3 微观尺度: 损伤演化监测与数值模拟耦合

损伤演化监测技术, 使用孔隙水压力计、光纤光栅应变计等高精度仪器, 创建起“微观传感、宏观响应”的损伤演化监测体系, 对围岩渗透性及微观损伤过程进行监测。光纤光栅应变计测量精度很高($\pm 1\ \mu\epsilon$)、抗干扰能力强, 能及时反映岩体内部微观应变的变化情况; 孔隙水压力计能测量孔隙水压力 0 MPa 到 2 MPa 之间的变化情况, 可以反映围岩损伤和渗流通道的情况。

2 动态荷载下围岩稳定性监测评价与支护优化

2.1 动态荷载监测与特征提取

动态荷载是决定抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性的主要因素, 各个工程阶段荷载的特性不一样, 必须采取针对性的监测并加以提取。施工期以爆破振动(频

作者简介: 陈晓(1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水电水利工程、海上风电工程安全监测。

率 5 ~ 50 Hz, 峰值加速度 0.1 ~ 1 g) 和机械开挖扰动为主; 充水准备期和首次充水期主要关注库水压力传递引起应力重分布和渗流荷载; 机组调试期主要以机组振动 (频率 10 ~ 100 Hz, 峰值位移 0.01 ~ 0.1 mm) 和水位周期性变化动水压力为主^[1]。据此制定不同的监测频率和数据采集方式, 施工期围岩内部变形监测每星期 1 次, 爆破前后加密到每天 2 次; 充水准备期渗流监测频次提高到每天 1 次; 机组调试期监测频次提高到 2 ~ 6 次/天, 采用 100 Hz 高频采集。

2.2 稳定性监测评价指标体系

为了全面准确地评价围岩的稳定性, 建立了以应力、位移、渗流、锚固状态这四个方面的评价指标体系, 各个方面的指标都根据工程实际和规范要求来确定量化标准及安全等级。应力指标用锚杆应力变化量来确定, 主厂房的应力变化量在安全区间内为 1.09 ~ 7.91 MPa, 主变洞的应力变化量在安全区间内为 0.4 ~ 2.14 MPa; 同时, 限定应力变化率的阈值 (Ⅱ级围岩小于等于 5%/月, Ⅳ级围岩小于等于 3%/月); 位移指标用多点位移计的月变化量和累计变形量双重控制, 主厂房的月变化量允许范围为 -0.21 mm 到 1 mm; 累计变形量不超过 30 mm; 同时要求变形速率呈衰减趋势; 渗流指标包括孔隙水压力允许的变化量 ± 5 kPa, 渗流量增量不大于 10 L/(m·d); 重点监测数据突变; 锚固状态指标用锚索荷载损失率和锚杆应力均匀性系数, 主厂房的荷载损失率范围为 0.54% 到 3.67%; 主变洞的荷载损失率范围为 0.07% 到 7.58%; 锚杆应力均匀性系数不小于 0.8。用层次分析法确定各个指标的权重, 用模糊综合评价法量化评分, 达到全方位多维度的稳定性评价。

2.3 支护优化设计与监测反馈

根据主厂房节理发育断面的应力累积情况, 开展相应的支护优化设计。利用数值模拟分析原支护方案下的应力分布, 准确找到最大应力大于 8 MPa 的集中区; 根据应力集中程度和节理发育情况来优化锚杆布置和参数, 将应力集中区域锚杆间距从 2.5 m×2.5 m 减小到 2 m×2 m, 采用“梅花形”布置提高约束的均匀性, 并且把锚杆预应力由 50 kN 提高到 60 kN, 增强对围岩的主动约束^[2]。在节理密集带增设全长粘结型锚杆, 长度由 6 m 增加到 8 m, 穿透节理面传递应力, 加强受力关键区支护强度, 有效分散集中应力, 降低失稳风险。

创建起监测数据、数值模拟、方案调整的闭环支护效果监测反馈体系, 从而达成支护方案的动态改良。在优化支护区域中将锚杆应力计、多点位移计布设密

度提高 50%, 监测频次提高到每天一次, 实时跟踪支护结构受力和围岩变形。利用监控中心的数据分析平台, 将监测数据和数值模拟预测结果进行实时对比, 误差大于 15% 时重新校准模型参数; 出现变形速率增大、锚杆应力异常升高的情况时立即组织专家论证调整支护参数。主厂房顶拱 12 个支锚索测力计重点观测, 数据显示优化后的锚索荷载分布均匀, 荷载损失率在 3% 以内, 可以证明支护方案的合理性, 保证支护效果的持久可靠。

加强施工协同管理, 建立监测系统同施工协调的控制机制, 避免施工活动对监测设备和围岩稳定造成干扰。编制详细的施工组织方案, 确定监测仪器布设区域的施工禁区 and 限制条件, 锚杆钻孔、爆破作业等与监测仪器保持不小于 3 m 的安全距离。爆破前将仪器和线缆用柔性防护材料包扎好, 爆破后及时检查仪器的工作情况; 创建施工和监测数据共享平台, 施工单位上传进度和爆破参数, 监测单位传送数据, 发现异常马上停工检查风险^[3]。提高施工人员对监测系统保护意识和安全控制能力的认知, 保证监测数据的连续性和可靠性, 给支护优化、稳定性评价提供完整的监测数据。

3 案例实证: 辽宁某抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析实践

3.1 项目背景

电站与大坝枢纽概况: 辽宁某抽水蓄能电站是辽宁省“十四五”能源规划重点项目, 工程等级为一等大(1)型, 总装机容量 1 300 MW, 装设 4 台 325 MW 可逆式水轮发电机组, 年发电量 22.8 亿 kW·h, 年抽水电量 30.4 亿 kW·h。电站采用单库双洞式布置, 主要建筑物有上水库 (总库容 1 097 万 m³, 正常蓄水位 890 m)、下水库 (总库容 1 184 万 m³, 正常蓄水位 450 m)、输水系统 (引水隧洞长 2 800 m、尾水隧洞长 2 600 m)、地下厂房及地面开关站。地下厂房为一洞三机布置, 尺寸 210 m×26 m×52 m, 主变洞平行布置尺寸 180 m×18 m×25 m, 两者用母线洞连接。地下厂房、大坝枢纽组合在一起工作, 监测部位为围岩、岩壁吊车梁、机组结构、大坝渗流等重要部位, 保证工程整体安全。

地质与监测基础条件: 地下厂房围岩主要为燕山期花岗岩, 岩石致密坚硬, 饱和抗压强度 80 ~ 100 MPa, 但区域有三条主要的断层 (F1、F2、F3), F1 断层破碎带宽 1.5 ~ 3 m, 含断层泥和角砾岩, F2、F3 断层规模小, 但与 F1 相交。主厂房厂左 0+121.00 断面还

存在水平节理（间距 0.5 ~ 2 m）^[4]。原有监测系统已布设多点位移计 68 套、锚杆应力计 85 套等各类仪器 256 套，仪器完好率 100%，但是存在三个痛点，即多类型监测数据独立分析没有融合、监测频次没有动态匹配荷载变化、数据和数值模拟脱节。因此本研究增加 30 个光纤光栅应变计、15 套振动传感器来创建数据融合分析平台提高监测系统智能化程度和精度。

3.2 实施过程

布置好监测系统：按分层分区、重点突出、全域覆盖的原则，将监测区分为核心区（厂房顶拱、边墙、断层影响带），关联区（主变洞、母线洞）和联动区（输水系统的进出口、大坝渗流点）^[6]。核心区增加 30 套光纤光栅应变计进行微观应变监测，增加 15 套振动传感器监测机组振动荷载传递，原有仪器间距从 2.5 m 缩短到 1.5 m；关联区补充 12 套锚索测力计，在母线洞接口布设测斜仪监测变形协调；联动区对接大坝监测系统实现数据共享。所有的仪器都采用有线和无线双传输的方式，建立 24 小时不间断的采集系统，核心区 100 Hz 高频监测，关联区和联动区 10 Hz 常规监测，配套数据质量控制体系保证数据准确。

数据融合和数值模拟：建立多源数据融合平台，把应力、位移、渗流等各种类型的监测数据综合起来，用加权平均法处理同一断面数据，用卡尔曼滤波算法处理各种类型的数据，去掉冗余误差提取主要特征。利用融合数据来建立地下厂房、主变洞和输水系统三维耦合数值模型，模型范围为洞室周围 5 倍洞径，单元数超过 100 万个，考虑岩体非线性、断层剪切变形和渗流、应力耦合效应。将 2025 年 10 ~ 11 月监测数据代入参数校准，校准后的模拟与实测数据平均误差 ≤ 8%。模拟不同的工况下围岩的响应，施工期主厂房多点位移计月变化量 -0.21 ~ 1 mm，主变洞锚索荷载 1 211.50 ~ 1 623.54 kN，各工况均无异常风险。

3.3 效果评估

稳定性状态：通过优化之后监测系统连续数据与数值模拟结果综合分析得知，辽宁某抽水蓄能电站地下厂房围岩整体稳定性好，各项关键指标都在安全阈值之内。应力上主厂房 -1.09 ~ 7.91 MPa、主变洞 -0.4 ~ 2.14 MPa，分布均匀无明显集中，顶拱局部拉应力经支护优化已受控；位移上主厂房月变化量 -0.21 ~ 1 mm、累计最大 8.2 mm，主变洞月变化量 0.02 ~ 0.73 mm、累计最大 6.5 mm，变形速率呈衰减趋势，符合深埋洞室变形规律；渗流上孔隙水压力月变化量 0 ~ 0.3 kPa，

渗流量稳定无突增，围岩完整性好；锚固状态上锚索荷载损失率、锚杆应力均匀性均合格。模糊综合评价得 92 分，属于稳定等级。

监测有效性，在优化过的监测系统中可以精确的获取多尺度、多种类型的监测数据，并且得到充分验证。就数据的完整性来说，各仪器有效采集率大于 98%，不存在长时间的停止；对于数据的准确性来说，经现场校准和数值模拟检验，平均误差仅在 8% 以内，完全符合工程精度要求；预警系统可以及时捕捉 2 次由施工扰动引起的应力突变并发出预警，通过临时支护措施减少风险；各监测点的数据也可以相互关联、综合分析以展现大坝及厂房安全情况。监测数据给参数校准、模拟优化、支护调整提供可靠的依据，形成监测、分析、优化、验证的闭环管理，充分发挥工程价值^[6]。

4 结束语

抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性控制，是地质勘察、监测技术、数值模拟、支护设计等诸多学科融合而成的系统工程，必须依靠多尺度监测和数据驱动优化策略，从“被动防控”走向“主动预警”。辽宁某抽水蓄能电站的实践证明，创建宏观—微观—微观一体化监测体系，可以全面地捕捉到围岩的动态变化，创建应力—位移—渗流—锚固状态四维动态评价指标体系，可以实现围岩稳定性的精确量化评价，创建基于监测反馈的支护优化机制，可以提高围岩稳定性。本研究的创新点是多尺度数据和模拟的深度融合、差异化分级和阈值联动、厂房—大坝协同预警。

参考文献：

- [1] 李锦飞,肖海波.对抽水蓄能电站关键工程地质因素的一些认识[J].西北水电,2024(04):50-55.
- [2] 王波,王灵,任永政,等.扰动荷载作用下抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J].华北科技学院学报,2023,20(03):49-59.
- [3] 王兰普,吕凤英,王波,等.丰宁抽水蓄能电站二期地下厂房施工期围岩变形规律分析[J].水电与抽水蓄能,2023,09(02):106-114.
- [4] 戚海峰.抽水蓄能电站地下厂房洞室围岩稳定性监测与分析[J].中国设备工程,2022(13):248-250.
- [5] 何一纯,丁秀丽,吕凤英,等.大型抽水蓄能电站地下厂房围岩变形时效特征和反馈分析[J].长江科学院院报,2020,37(11):172-179,186.
- [6] 高乔,马克,唐春安,等.荒沟抽水蓄能电站地下厂房开挖过程微震活动特征与围岩稳定性研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(05):775-782.