

# 抽水蓄能工程施工技术安全保障体系构建

黄腾飞

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450001

**摘要:** 抽水蓄能工程作为新能源电力系统的关键调节设施,兼具“发电-储能”双重功能,其施工涵盖地下厂房开挖、高边坡支护、大坝浇筑、机电设备安装等复杂环节,技术安全风险突出。本文结合水利水电建筑工程施工实际场景,深入剖析深基坑坍塌、高边坡失稳、机电安装触电等核心风险类型。

**关键词:** 抽水蓄能工程; 水利水电施工; 技术安全保障体系; 风险预控; 过程监控; 应急处置

## 引言

在“双碳”目标驱动下,我国抽水蓄能工程进入规模化建设阶段,截至2024年底,在建工程规模已突破6000万千瓦,对优化电力系统调峰能力、提升能源利用效率具有重要意义。但此类工程多选址于山区峡谷地带,涉及地下洞室群开挖、高陡边坡处理等特殊结构施工,技术难度与安全风险显著高于常规水利水电项目。例如,地下厂房开挖深度常达数百米,地质条件突变易引发塌方事故;高边坡开挖高度超百米,雨水侵蚀或支护不当可能导致整体滑坡;机电设备安装过程中,高压试验与重型设备吊装操作若违规,易诱发触电或起重伤害。

## 一、抽水蓄能及传统水利水电工程施工核心技术安全风险分析

### (一) 地下洞室施工风险(抽水蓄能厂房、输水隧洞为主)

地下洞室作为抽水蓄能工程的核心结构单元,其施工风险主要源于地质条件复杂性与开挖技术的耦合问题,具体表现为以下三类:

1. 塌方风险: 当洞室穿越断层破碎带、软弱夹层等不良地质区域时,若超前地质预报未能准确识别隐患,或开挖后支护作业滞后(如喷锚支护与开挖面间距超过规范规定的5米),易导致洞室顶部、侧壁岩体失稳坍塌。某抽水蓄能电站地下厂房施工期间,因前期地质勘察未发现隐藏溶洞,开挖过程中突发顶部岩体坍塌,造成2台挖掘设备损毁,工期延误1个月。

2. 涌水突泥风险: 洞室施工遭遇承压水层或富水断层时,若排水系统设计流量不足,或止水帷幕施工质量不达标,易引发大规模涌水突泥事故。某输水隧洞施工

中,揭露富水断层后单小时涌水量达500立方米,短时间内淹没洞室施工段,被迫停工20天开展堵水修复作业。

3. 通风与粉尘风险: 地下洞室空间封闭,若通风系统配置风量低于规范要求的 $3\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{人})$ ,易导致岩尘、水泥尘等颗粒物浓度超标,长期接触会引发施工人员尘肺病;同时,柴油机械设备运行产生的一氧化碳、氮氧化物等有害气体积聚,可能造成人员中毒。某地下厂房施工曾因通风风机故障,导致洞内一氧化碳浓度升至30ppm(远超安全限值24ppm),12名作业人员出现头晕、恶心症状。

### (二) 高边坡与大坝施工风险(抽水蓄能上水库边坡、传统大坝为主)

高边坡处理与大坝浇筑是抽水蓄能工程建设的关键环节,涉及大规模土石方开挖与混凝土施工,风险具有“影响范围广、危害程度大”的特点,主要包括:

1. 高边坡失稳风险: 抽水蓄能上水库边坡开挖坡度通常为1:0.5-1:1.2,若开挖顺序违规(如未分层开挖直接顺坡施工)、支护结构(锚索、抗滑桩)施工质量不达标,或遭遇日降雨量超100mm的强降雨天气,易引发边坡整体滑动。某工程高边坡施工中,因锚索张拉锁定力仅达到设计值的85%,暴雨后出现局部滑坡,掩埋下方施工道路,造成运输中断。

2. 大坝浇筑质量风险: 传统水利水电大坝与抽水蓄能下水库大坝均采用混凝土浇筑工艺,若浇筑分层厚度超过50cm的规范限值、振捣作业不密实,易形成蜂窝、麻面等缺陷,导致大坝抗渗性能下降;若温控措施不到位(如通水冷却管道布置不合理、通水时间滞后),混凝土内部温差超过 $25^\circ\text{C}$ ,易产生温度裂缝,影响大坝结构安全。某混凝土大坝施工曾因分层浇筑厚度达80cm,振

捣不充分，后期检测发现内部存在大面积空洞，需进行钻孔灌浆补强处理。

3.起重作业风险：大坝浇筑过程中，需使用门机、塔机等大型起重设备吊装模板、混凝土罐，若设备选型不当（起重量不足）、吊装指挥信号混乱，或设备维护不到位（如钢丝绳磨损量超过直径的10%），易引发起重伤害事故。某工程使用塔机吊装30吨重混凝土罐时，因钢丝绳断裂，罐体重物坠落，砸毁下方浇筑平台，造成3人受伤。

### （三）机电设备安装风险（抽水蓄能发电机组、传统水电站机电为主）

机电设备安装是抽水蓄能工程投运前的关键工序，涉及高压操作与高精度装配，风险集中于“电气安全”与“设备保护”两大维度，具体如下：

1.触电风险：发电机组定子、转子安装过程中需开展耐压试验（试验电压常达10kV以上），若接地系统电阻超标（超过 $4\Omega$ ）、绝缘性能检测不彻底，或操作人员未穿戴绝缘手套、绝缘鞋等防护用具，易引发触电事故；高压电缆敷设时，若绝缘层破损未及时发现，通电后可能导致短路跳闸，损坏设备。某电站进行定子耐压试验时，因接地不良，试验过程中产生电火花，灼伤2名操作人员手部。

2.设备损坏风险：抽水蓄能发电机组转子重量通常达数百吨，吊装时若吊点设置偏离重心、起吊速度不均匀，易导致转子变形；导水机构安装中，若零部件装配间隙超过0.1mm的设计要求，设备运行时会产生异常振动与噪声，缩短使用寿命。某电站转子吊装过程中，因起吊速度忽快忽慢，导致转子轴线偏差达0.5mm，需重新进行矫正处理，延误工期15天。

3.调试安全风险：机电设备调试阶段，若调试方案未经过专家论证、调试顺序错误（如先通电后检查机械部件运转状态），易导致设备误动作，引发机械冲击或电气故障。某电站调试导水机构时，未先检查机械卡涩情况直接通电操作，导致导叶卡死，电机过载烧毁，造成直接经济损失80万元。

## 二、抽水蓄能工程施工技术安全保障体系构建

基于上述风险分析，遵循“全流程覆盖、各环节协同、可落地执行”原则，构建“五维一体”技术安全保障体系，各体系相互支撑、协同运行，形成闭环管理。

### （一）技术标准体系：明确安全管控基准

以国家、行业现行标准为基础，结合抽水蓄能及传

统水利水电工程施工特点，构建“专项标准+作业指导书”两级技术标准体系，确保各施工环节有章可循：

1.专项技术安全标准：针对地下洞室、高边坡、大坝、机电安装四大核心施工环节，编制专项安全技术标准，明确关键技术参数与安全要求。例如，地下洞室施工标准中，规定“开挖面与支护面间距不得超过3米”“超前地质预报需采用‘地质雷达探测+钻孔验证’组合方式”；高边坡施工标准中，明确“锚索张拉锁定力偏差需控制在设计值的 $\pm 5\%$ 以内”“雨季边坡位移监测频率提升至每12小时1次”。

2.岗位作业指导书：按照“一岗一书”原则，为开挖工、支护工、起重工、电工等关键岗位编制作业指导书，细化操作步骤与安全禁忌。例如，机电安装电工作业指导书中，明确“高压试验前需检测接地电阻 $\leq 4\Omega$ ”“电缆敷设时需使用绝缘托辊避免绝缘层磨损”“试验区域需设置硬质隔离围栏与警示标识”，确保每个操作环节均符合安全规范。

3.标准动态更新机制：每年度结合工程施工实践、新型施工技术（如3D打印混凝土支护结构、无人盾构机开挖技术）及最新行业标准修订情况，对体系内标准进行梳理更新，删除滞后条款，补充新技术安全管控要求，确保标准的时效性与适用性。

### （二）风险评估体系：实现事前精准防控

建立“施工前全面评估+施工中动态评估”的风险评估机制，精准识别风险等级，制定针对性防控措施：

1.施工前全面风险评估：组建由地质工程师、结构工程师、安全工程师组成的评估团队，采用LEC风险评估法（危险性评价法）对各施工环节进行分级评估。例如，地下洞室穿越断层破碎带施工定为“极高”风险，制定超前管棚支护、增设排水孔、加密监测频次等专项防控方案；大坝常规混凝土浇筑定为“中”风险，执行常规质量管控与人员防护措施。

2.施工中动态风险评估：基于BIM技术构建工程数字孪生模型，接入边坡位移、围岩应力、混凝土温度等实时监测数据，设定风险预警阈值（如边坡单日位移超5mm、围岩应力突变超10%）。当监测数据触发预警阈值时，自动启动风险重评估流程，评估团队结合现场实际情况调整防控措施。某抽水蓄能电站地下厂房施工中，数字孪生模型监测到围岩应力突增20%，经评估判定为断层活化风险，通过加密锚杆支护（锚杆间距从1.5m缩小至1.0m），成功化解隐患。

3. 风险分级管控责任：根据风险评估结果明确管控责任主体，极高风险由项目经理牵头负责管控，高风险由项目技术负责人专项管控，中低风险由施工班组负责人直接管控，同时建立风险管控台账，记录防控措施执行情况与效果，确保责任层层落实。

### （三）过程监控体系：实现事中动态管控

整合“智能监测设备+人工巡检+视频监控”三类手段，构建全方位过程监控体系，实时掌握施工技术安全状态，及时发现并处置隐患：

1. 智能监测系统：针对关键结构与工序部署专用监测设备：地下洞室安装“围岩应力传感器+渗压计”，实时监测岩体稳定性与涌水风险；高边坡布设“GNSS位移监测站+雨量计”，捕捉边坡位移变化与降雨影响；大坝浇筑过程中，嵌入“温度传感器+振捣密实度检测仪”，把控混凝土浇筑质量。所有监测数据实时上传至工程管理平台，当数据超阈值时自动触发声光报警，推送预警信息至管理人员终端。

2. 人工巡检机制：推行“班组日检+专业周检+项目月检”三级巡检制度。班组日检聚焦作业面安全措施落实情况（如支护是否及时、防护用具是否规范佩戴）；专业周检重点核查技术标准执行情况（如锚索拉力值、混凝土强度）；项目月检开展全面隐患排查，覆盖设备状态、应急预案、人员培训等方面。每次巡检均形成书面报告，明确隐患整改责任人与完成时限，跟踪整改闭环。

3. 视频智能监控：在起重吊装区、高压试验区、地下洞室出入口等高风险作业区域，安装具备AI识别功能的视频监控设备，可自动识别“未戴安全帽”“违规跨越防护栏”“吊装半径内站人”等危险行为。识别到违规行为后，设备立即发出声光报警，同时将违规画面与位置信息推送至安全员手机端，实现实时干预，减少人为监管盲区。

### 三、体系应用效果验证

以某总装机容量1200MW的抽水蓄能电站为应用案例，该电站施工涵盖280米深地下厂房、120米高上水库边坡、85米高混凝土大坝及4台发电机组安装，应用上

述多维技术安全保障体系后，取得显著成效：

1. 安全事故发生率大幅下降：工程建设周期3年内，未发生坍塌、涌水、触电等重大技术安全事故，仅出现2起小型设备磕碰事故，较行业内同类工程平均事故发生率（约10起/3年）降低80%，实现“零重伤、零死亡”安全目标。

2. 施工质量显著提升：关键工序质量合格率从体系应用前的92%提升至98%，其中地下洞室围岩支护合格率达100%，大坝混凝土浇筑未出现温度裂缝，机电设备安装调试一次成功，机组并网发电时各项参数均满足设计要求。

3. 工期与成本可控性增强：因安全事故减少与质量返工率降低，工程实际工期较计划提前2个月；安全管理成本较预算节约15%，主要得益于智能监测系统减少人工巡检投入、应急演练降低事故损失、培训体系减少违规操作导致的浪费。

### 四、结论与展望

本文构建的“五维一体”抽水蓄能工程施工技术安全保障体系，通过技术标准明确管控基准、风险评估实现事前防控、过程监控强化事中管理、应急处置提升事后响应、人员培训夯实能力基础，形成全流程安全管理闭环，有效解决抽水蓄能及传统水利水电工程施工安全痛点，经实践验证具备实用性与经济性。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部.SL 398-2018水利水电工程施工安全防护设施技术规范[S].北京：中国水利水电出版社，2018.
- [2] 国家能源局.NB/T 35094-2017抽水蓄能电站施工组织设计规范[S].北京：中国电力出版社，2017.
- [3] 王建军，李红伟，张磊.抽水蓄能电站地下洞室群施工风险评估与管控[J].水利水电技术，2022，53（8）：123-131.
- [4] 刘振宇，陈明，赵伟.高边坡工程施工安全监测技术应用实践[J].岩土工程学报，2021，43（S1）：89-93.