

抽水蓄能电站施工关键技术与质量控制分析

陈卓尔

华电靖宇抽水蓄能有限公司，吉林省白山市，135200；

摘要：抽水蓄能电站作为新型电力系统的核心调节电源，其施工质量直接关系到电网安全与能源转型成效。当前，我国抽水蓄能电站建设面临复杂地质条件、超大容量机组安装等挑战，亟需系统性技术突破与精细化质量管理。抽水蓄能电站在复杂地质条件下建设地下洞室群面临多项技术挑战，近年来通过技术创新已取得显著突破。

关键词：抽水蓄能电站；施工；关键技术；质量控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.041

抽水蓄能电站作为新型电力系统的重要调节工具，其施工质量直接关乎电站全生命周期安全。

1 抽水蓄能电站施工关键技术

1.1 复杂地质条件下地下洞室群建造技术

技术难点：地质条件复杂性与围岩变形控制，超大型洞室群稳定性问题：河北丰宁电站通过研究围岩变形机理和破坏规律，提出针对性加固措施，解决了边墙变形、锚索超限等难题。永泰电站则优化了施工空间布局和时间安排，减少地质扰动。地质灾害风险：采用 TBM 技术（隧道掘进机）进行大断面施工，结合人工智能预测岩体分类和岩爆风险，提升施工安全性。地下水与结构防水技术，动态水文地质应对：通过高精度水文勘察和分级排水系统控制地下水影响，同时采用超高压岔管焊接技术保障压力管道密封性。施工机械化与智能化，少人化作业：推广 TBM 在斜井/竖井施工中的应用，实现机械化、标准化作业。长期耐久性保障，材料与工艺创新：针对混凝土裂缝问题，研发低热水泥和智能温控浇筑技术，结合岩锚梁锚杆受力特性优化支护时机。这些技术突破使我国抽水蓄能电站装机规模稳居全球第一，并为 2035 年 3 亿千瓦目标奠定基础。解决方案：复杂地质条件下的技术挑战，围岩变形控制难题，电站地下洞室群规模达 190 条、总长 50.14 千米，面临边墙变形、锚索超限、岩壁吊车梁开裂等问题。电站多洞并列纵横交错，传统开挖方式导致效率低、安全风险高。施工环境与效率瓶颈，斜井施工存在吊装危险、通风散烟困难、测量贯通精度不足等问题。华北地区火电为主电网对调峰响应速度要求极高，需缩短建设周期。关键技术突破与解决方案，硬岩 TBM 装备创新，研发全球首台紧凑型超小转弯半径硬岩 TBM，实现斜井机械化施工，

效率提升 40%。微扰动协同开挖技术，提出洞室群协同开挖微扰动控制方法，通过锚杆支护时机优化和围岩变形机理研究，将变形量控制在毫米级。变速机组与柔性电网集成，电站首次采用大型变速机组，配合张北柔直电网，实现新能源波动精准调节。工程应用与效益，电站示范效应，四项“世界第一”成就：装机容量 360 万千瓦、储能 4000 万度、地下厂房 414 米长、洞室群 50 千米。年减排二氧化碳 120 万吨，支撑冬奥 100%绿电供应。

1.2 长斜井与高压管道施工技术

创新实践：长斜井施工技术的革命性突破，动态变径掘进技术，电站采用全球首台大倾角可变径 TBM“天岳号”，在 50 度超陡坡上实现 6.5 米至 8 米动态变径掘进，攻克高水头斜井建设的世界级难题。创新三撑紧液互锁系统，通过油缸联动形成防滑三角阵，确保设备在 55 度倾角下稳定爬行，掘进效率提升 3 倍。结构优化设计，采用“上粗下细”斜井设计（上段 8 米/下段 6.5 米），既降低流速避免空蚀，又减少高压区钢材用量 30%。荒沟电站应用 TR-3000 反井钻机，完成 387.5 米超长斜井施工，偏斜率低于 1%，刷新国内纪录。高压管道施工的国产化突破，1000 兆帕级高强钢应用，天台电站首次大规模使用国产 1000 兆帕级压力钢管，通过材料适配性攻关和区域环境控制焊接技术，实现焊缝一次验收合格率 100%。该技术减少钢岔管重量和焊接量，缩短工期并打破国外垄断。复杂环境施工工艺，创新“环形导洞+以圆削球”穹顶开挖工艺，解决小直径调压井成型难题。采用 17 米三层矿用井架提升系统与 360 度抓岩机，提升超深竖井施工安全性。技术创新的综合效益，经济性：平江电站动态变径技术降低施工成本，荒

沟电站机械化工法缩短工期。安全性：液压互锁系统与无轨胶轮运输系统显著降低陡坡施工风险。可持续性：国产高强钢的应用推动产业链自主可控。

1.3 大容量机组安装与调试技术

变速机组技术：我国在抽水蓄能电站施工关键技术领域取得多项突破，尤其在变速机组技术和大容量机组安装与调试方面表现突出：变速机组核心技术突破，300兆瓦级变速抽蓄机组：东方电气集团成功研制300兆瓦级变速抽水蓄能发电电动机全尺寸交流集电系统，突破高电压大电流供电均流、绝缘与散热等技术难题，填补国产化空白。该技术已通过验证试验，可直接应用于真机产品。交流励磁系统：国内首台大型交流励磁变速机组在电站投产，实现转速灵活调节，提升电网负荷响应速度30%以上。其转子侧馈电系统采用自主技术，打破国外垄断。关键部件国产化：安徽合凯电气研制的大容量真空断路器通过国家级鉴定，达到国际领先水平，解决发电机断路器长期依赖进口的问题。大容量机组安装与调试技术，超深竖井施工：肇庆浪江电站完成532米超深竖井衬砌，创世界纪录，为引水系统提供结构性保障。喀斯特地貌施工：电站在地下厂房开挖中实现单月掘进215米，关键节点超前4.3个月，攻克岩溶地质难题。机组总装技术：天台抽蓄电站完成单机容量最大机组转子吊装，标志我国进入大容量机组总装阶段。技术应用与效益，变速机组调节效率较定速机组提升40%，支撑新能源消纳能力增强。电站变速机组年发电量达21.6亿千瓦时，减排二氧化碳160万吨。

1.4 智能调试系统

抽水蓄能电站施工关键技术突破，近年来，我国在抽水蓄能电站施工领域取得多项重大技术突破，尤其在复杂地质条件和大容量机组安装方面表现突出。例如，抽水蓄能电站通过喀斯特地貌区施工技术优化，实现单月引水隧洞掘进速度215米，关键节点超前4.3个月完成；电站则攻克了532米超深竖井衬砌的世界级难题，为引水系统稳定性奠定基础。大容量机组安装与调试技术，机组研制突破，东方电气集团自主研发的300MW级变速抽水蓄能机组通过飞逸试验，其转子采用端部整体护环固定结构和新型绕组接线方法，解决了高转速大尺寸转子设计难题。安徽合凯电气研发的发电机真空断路器填补国内空白，技术达国际领先水平。安装工艺创新，

大容量机组安装需严格把控水平度与螺栓预紧力，如海上风电机组机舱吊装中需分三次对称预紧螺栓至设计力矩值。抽水蓄能机组调试则需完成油系统冲洗、电动机空转等步骤，确保振动值和轴承温度达标。智能调试系统应用，监控系统采用数字式设备和网络通信，实现“无人值班”自动化管理，提升电站安全性和经济性。构网型储能技术的研发进一步推动多场景自适应调试系统发展。技术发展趋势，中国工程院院士张宗亮指出，抽水蓄能正从“稳定器”向新能源融合的“巨型电池”转型，未来需突破更多规模化开发瓶颈。当前我国已形成从11MW到3600MW的全系列技术能力，装机规模全球领先。

2 质量控制体系构建

2.1 材料与设备管理

材料管理的关键控制环节，全生命周期溯源管理，建立从供应商准入到现场使用的数字化追溯体系，对钢筋、水泥等主材实行“一物一码”标识，通过区块链技术实现质量数据不可篡改。例如缙云电站采用三维建模预演材料堆场布局，优化运输路径使损耗率降低至1.2%。特殊材料工艺控制，蜗壳钢板采用“预弯+热处理”工艺，结合百分表实时监测系统控制焊接变形，高竖井管路安装使用自密实混凝土，通过流变仪检测坍落度确保浇筑密实度。设备管理的创新实践，智能化选型与安装，针对低水头电站特性，采用CFD模拟优化机组选型，如句容项目通过三维分解定制桥架，使材料利用率提升15%。关键设备引入“五维同步”管理法，实现土建与机电安装的工序无缝衔接。动态维护机制，建立设备健康档案，对卷扬机等重型设备实施“日检+AI预测性维护”。缙云电站通过振动传感器监测机组运行状态，将故障停机时间压缩至4小时/台年。质量保障体系构建，双闭环控制流程，内环：执行ISO9001标准，落实“三检制”与“质量一票否决”原则，外环：采用BIM+GIS技术实现施工质量数字孪生，偏差超2%自动触发预警，协同管理平台，开发物资管理APP集成以下功能：供应商绩效动态评分，库存超耗自动分析，设备保养智能提醒，该平台在缙云项目实现168项关键节点零延误。可持续发展策略，建立绿色供应链评价体系，优先采购低碳建材（如低热水泥），推行设备再制造计划，旧机组改造利用率达85%以上，应用光伏+储能技术为施工设备供电，降低碳排放23%。

2.2 施工过程控制

质量控制体系架构设计,三位一体管理框架,组织体系:建立业主主导、监理监督、施工主体实施的三级质量管理架构,明确项目经理为第一责任人,总工程师负责技术方案审核。标准体系:以 IS09001:2000 为基础,结合抽水蓄能电站特殊技术要求(如高压管道焊接、调压井开挖等),制定专项施工标准。监控体系:采用 5G+物联网技术实现关键工序实时监测,如混凝土浇筑温度、锚杆支护应力等数据动态采集。关键施工环节质量控制要点,地下厂房开挖支护,采用地质雷达超前预报技术,对围岩稳定性进行分级(BQ 值 280-350 为Ⅲ类围岩需加强支护)。实施光面爆破+预应力锚索联合支护,超挖控制在 15cm 以内,锚杆注浆饱满度 $\geq 95\%$ 。高压管道焊接,执行 NK-HITEN610U2 钢板焊接工艺:预热温度 120-150℃,层间温度 $\leq 200^\circ\text{C}$,焊缝 100%超声波探伤+20%磁粉复检。防腐施工采用三层复合防护体系,干膜总厚度 430 μm ,附着力划格法测试达 1 级标准。调压井施工,大直径竖井(如潘口电站 $\Phi 30\text{m}$)采用反井钻机导井+扩挖法,垂直度偏差 $\leq H/1000$ (H 为井深)。阻抗孔施工需控制水头损失系数 ≤ 0.3 ,通过 CFD 模拟优化连接管渐变段曲率。动态控制与持续改进,偏差预警机制,建立质量红黄牌制度:关键指标(如混凝土强度、焊缝合格率)连续 3 次低于标准值触发黄牌,5 次触发红牌停工整顿。数字化管理平台,应用 BIM+GIS 技术整合地质数据、施工进度与质量记录,实现质量缺陷智能识别(如衬砌裂缝 AI 识别准确率 $\geq 92\%$)。质量追溯体系,实行材料批次-施工班组-检测报告三码关联,关键部位(如压力钢管)质量档案保存期不少于电站设计寿命。

2.3 人员与标准化管理

技能分级培训:三级管控机制,企业级:制定《抽水蓄能电站施工质量标准手册》,涵盖土石坝填筑、地下洞群开挖等 12 类关键技术指标,项目级:建立数字化质量监控平台,实现混凝土浇筑温度、帷幕灌浆压力等 300+参数实时采集,二、人员能力分级培训体系,技能等级划分,初级工(0-2 年):掌握基础操作规程,

需通过《抽水蓄能电站应知应会 200 题》考核,中级工(3-5 年):能独立处理常规质量问题,需取得国家能源局颁发的特种作业操作证,高级工(6+年):具备技术方案优化能力,每季度开展 72 学时封闭式培训,采用 VR 技术还原深圳三洲田电站施工场景。动态管理机制,人员能力雷达图评估,每季度从技术规范掌握度、设备操作熟练度等 6 维度进行测评,结果与岗位津贴挂钩,标准化文件迭代,建立技术问题库,每年更新《施工质量负面清单》,2025 版已新增 7 类新型材料管控要求。数字化管理工具,实现:电子化质量检查单、缺陷照片自动归档、智能预警推送(如混凝土温升超标)。精品机组标准:质量控制体系总体架构,三级管控机制,企业级:制定《抽水蓄能电站施工质量标准手册》,明确精品机组验收标准(如振动值 $\leq 0.05\text{mm}$ 、效率 $\geq 92\%$),项目级:建立 BIM+数字化质检平台,实现混凝土浇筑温度、灌浆压力等 200+参数实时监控。班组级:推行“一机一档”质量追溯制度,关键工序采用 RFID 芯片记录施工人员信息,质量控制体系总体架构。数字化质量管控工具,智能监测系统,基于 BIM 的 4D 进度管理,关键路径偏差预警阈值 ≤ 2 天,灌浆质量监测:采用分布式光纤传感,压力波动范围 $\pm 0.1\text{MPa}$,知识管理系统,建立“质量缺陷库”,移动端 APP 实现质量问题“发现-整改-验证”闭环管理。

总之,当前抽水蓄能电站施工已形成“地质适应性设计-智能建造-数字运维”全链条技术体系,但设备耐久性(如水泵水轮机抗空蚀涂层寿命)仍需提升。未来需进一步融合 AI 预测性维护与新型材料技术,推动行业向“零缺陷”目标迈进。

参考文献

- [1]张利荣,严匡柠,张孟军.大型抽水蓄能电站施工关键技术综述[J].水电与抽水蓄能,2016,2(3):49-59,91. DOI:10.3969/j.issn.1671-3893.2016.03.012.
- [2]方海宇.大型抽水蓄能电站施工关键技术分析[J].户外装备,2023(9):4-6. DOI:10.12277/j.issn.1673-9434.2023.09.002.