新型水利蓄能电站主体工程关键施工技术应用研究

刘新文 单红辉
中国电建集团港航建设有限公司，天津 300467

[摘要]当前，我国正大力推进新型电力系统建设，清洁能源开发利用规模持续扩大。水利蓄能电站凭借调峰填谷、储能稳压、应急备用的核心功能，成为保障电网安全、稳定、高效运行的重要配套设施。以新型蓄能电站主体工程施工为核心研究对象，搭建了一套适配新型工程特点的蓄能电站关键施工技术体系，梳理了各核心工序的标准化施工流程、关键技术要点、质量管控标准及实际工程应用优势，重点分析了施工中围岩变形控制、高精度结构施工、机电协同安装等重难点问题，同时结合现场工程实际，给出了具体的技术优化方法，助力工程提质增效、绿色安全施工，为清洁能源储能工程的高质量发展提供坚实的技术支撑。

[关键词]新型水利蓄能电站；主体工程；施工技术；围岩控制；精细化施工；质量管控
DOI：10.33142/hst.v9i9.20650 中图分类号：TV665 文献标识码：A

Research on the Application of Key Construction Technologies for the Main Project of a New Type of Water Conservancy and Energy Storage Power Station

LIU Xinwen, SHAN Honghui
PowerChina Harbour Co., Ltd., Tianjin, 300467, China

Abstract: Currently, China is vigorously promoting the construction of a new power system, and the scale of clean energy development and utilization continues to expand. Water storage power stations, with their core functions of peak shaving and valley filling, energy storage and voltage stabilization, and emergency backup, have become important supporting facilities to ensure the safe, stable, and efficient operation of the power grid. Taking the construction of the main project of a new type of energy storage power station as the core research object, a set of key construction technology system for energy storage power stations that adapts to the characteristics of the new project has been established. The standardized construction process, key technical points, quality control standards, and practical engineering application advantages of each core process have been sorted out. The key and difficult problems in rock deformation control, high-precision structural construction, and electromechanical collaborative installation during construction have been analyzed. At the same time, specific technical optimization methods have been provided based on the actual site engineering situation to help improve the quality and efficiency of the project, promote green and safe construction, and provide solid technical support for the high-quality development of clean energy storage engineering.

Keywords: new type of water conservancy and energy storage power station; main project; construction technology; surrounding rock control; refined construction; quality control

引言

在国家双碳战略的推动下，我国风电、光伏等新能源行业迎来快速发展，装机容量持续增长，已经逐步成为电力供应的主力能源[1]。抽水蓄能电站技术成熟、储能容量大、运行稳定且响应速度快，在保障电网安全运行、消纳多余新能源电力方面有着不可替代的重要作用。新型抽水蓄能电站对施工精度、施工工艺、安全管理的要求，都远高于传统水电工程[2]。其中，大坝、地下厂房、压力管道、输水隧洞等主体工程，其施工质量直接决定工程的安全性能、使用年限以及调峰发电效率。文章重点围绕抽水蓄能电站主体工程的关键施工技术展开研究，梳理核心施工工艺、质量管控要点，总结技术优化思路与应用方案，可为同类抽水蓄能工程施工提供实用、可落地的技术参考。

1 新型水利蓄能电站工程施工特征

新型蓄能电站结构复杂、施工场景多，是优化关键施工技术的重要依据，主要有四点：一是地下工程量占比很

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

高。厂房、调压井、压力隧洞大多埋在山里，洞室交错，斜井陡坡多。同时，作业空间窄，通风排烟差，围岩容易塌，对开挖-支护-衬砌一体化施工要求高。二是施工精度要求更高。电站双向运行，结构反复承受正负水压。大坝防渗、隧洞衬砌平整度、压力管道安装精度直接影响输水效率和结构寿命。另外，相比普通水电站，各项管控指标标准提高 30%以上。三是对地质适应性要求严。电站多建在山区复杂地质地带，裂隙、断层、地下水问题突出，容易出现围岩失稳、涌水突泥、沉降险情，施工技术要随地质情况动态调整。四是绿色和高效施工要协同。建设同时兼顾质量安全、进度与生态保护，做到低扰动、低能耗、低污染。依靠工艺、设备升级缩短工期，降低工程总体成本[3]。

2 主体工程核心关键施工技术应用

2.1 大坝主体工程关键施工技术

2.1.1 胶凝砂砾石坝施工技术

胶凝砂砾石坝（CSG 坝）是一种绿色、高效的新型坝型，最大的优势是就地取材，直接选用河床天然砂砾石料[4]。施工时掺入 3%～5%的水泥、粉煤灰胶凝材料搅拌均匀即可成型。整套施工流程主要分为原料处理、精准拌和、分层摊铺、碾压密实、切缝防渗、养护成型六大环节。施工全程使用自动化设备，严格把控材料配比。坝体摊铺采用分层施工方式，单层摊铺厚度固定控制在 30～40cm，碾压遵循“先静压、后振压、终静压”的标准工艺。碾压施工完成后，会设置间断式横缝并填充柔性防渗材料，有效预防和规避坝体温度裂缝问题，后续再通过施工表层防渗层，完善坝体整体防渗体系。该施工技术工序少、施工速度快，天然原料利用率极高，对周边生态环境破坏小，能够适应各类复杂地质条件。

2.1.2 碾压混凝土坝精细化施工技术

碾压混凝土坝精细化施工技术，核心依靠五大关键工艺保障施工质量，分别是配比优化、薄层摊铺、匀速碾压、层间处理以及全过程综合温控。在材料配比上，通过用粉煤灰、矿粉替代部分水泥，有效降低混凝土水化热，同时优化混凝土的和易性与抗渗性能，提升坝体基础品质。施工阶段采用薄层连续摊铺工艺，碾压速度控制在 1.0～1.5km/h 匀速作业，确保混凝土摊铺、碾压均匀，坝体密实度统一。为避免坝体出现层间冷缝缺陷，施工中严格管控层间间隔时间，保证上层混凝土施工在下层混凝土初凝前完成。同时对混凝土层间界面做刷毛、清浆处理，并涂刷专用结合剂。温控方面，通过冰水拌和、低温骨料预处理、仓面保湿养护、坝体通水冷却等多重措施，严格将坝体内外温差控制在25℃以内，从根源上抑制温度裂缝产生。

2.2 地下洞室群关键施工技术

2.2.1 精细化控制钻爆施工技术

普通洞室爆破很容易扰动围岩，超挖、欠挖问题突出，围岩稳定性变差。精细化钻爆施工就是重新优化炮孔排布、炸药用量和起爆顺序，做到低扰动开挖。结合洞室断面大小和围岩等级确定爆破参数，使用光面、预裂爆破；周边炮孔少量炸药间隔装药，再用毫秒延期起爆，降低爆破震动，减轻围岩破坏。施工过程实时监测震动数据，随时调整爆破参数。把超挖控制在 10 cm 以内，不允许出现欠挖。尽量保住围岩本身的承载能力，减少后续混凝土回填，提高施工质量，节约造价。

2.2.2 分层分区开挖与围岩支护一体化技术

大断面地下洞室、地下厂房、调压井施工，采用分层分区开挖支护一体化施工。按照从上往下、挖完马上支护的思路施工，防止一次性大面积开挖造成围岩垮塌。把洞室分成多层多段开挖，一般每层开挖厚度 2～4 m；围岩破碎的地段再减小层厚。开挖结束立刻开展支护，使用锚杆+钢筋网+湿喷混凝土+钢拱架组合支护；地质差的位置再加钢拱架补强。湿喷混凝土密闭性好、密实度高，可以快速封闭岩体裂缝，防止渗水风化。岩锚梁这类重要部位精细开挖、精细浇筑，严控断面和坡度精度，保证后期结构长期受力稳定。

2.2.3 斜井液压滑模衬砌施工技术

蓄能电站引水斜井坡度陡、高差大，施工难度大，还容易漏水。采用双轨道液压滑模衬砌可以连续快速作业。这套设备集成滑移、导流、振捣功能；施工先预埋轨道，调试设备精度。混凝土分层不间断浇筑，依靠阻尼导流控制下料速度，附着式振捣保证振捣均匀，滑模匀速向前滑动，混凝土浇筑密实，减少离析、漏浆、跑模病害。对比传统脚手架搭模板，不用反复拆装模板，衬砌表面平整没有模板接缝，较好解决斜井渗水问题，衬砌质量和施工效率都得到提升[5]。

2.3 引水输水系统关键施工技术

2.3.1 隧洞防渗衬砌施工技术

蓄能电站的压力隧洞长期承受高压水流冲刷、挤压，防渗衬砌是保障隧洞安全运行的核心施工工序。工程采用初期支护封闭+防渗垫层+钢筋混凝土永久衬砌的复合防渗结构体系。施工时先完成围岩初期支护，对洞壁围岩进行找平处理，打磨清除岩壁凸起、尖锐岩块，随后铺设土工布和防渗薄膜作为防渗垫层，填满衬砌与围岩之间的缝隙。永久衬砌施工采用整体定型模板一次性浇筑，按照对

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

称分层、连续振捣的工艺施工，严格把控混凝土抗渗等级和浇筑密实度，杜绝蜂窝、麻面、空洞等混凝土质量缺陷。衬砌浇筑完成后及时开展常态化养护工作，同时实施回填灌浆和帷幕灌浆施工。回填灌浆专门填充衬砌与围岩之间的空隙，帷幕灌浆封堵各类结构缝隙，通过双重防渗加固工艺，提升隧洞整体防渗性能，保障隧洞长期稳定运行。

2.3.2 压力钢管智能化制安技术

压力钢管是蓄能电站输水系统的核心承压构件，其制作、安装及焊接质量，直接决定整个输水系统的运行安全。施工依托数字化预制生产线，通过数控设备精准完成钢板下料和坡口加工，有效把控构件尺寸精度。依靠自动化设备进行钢管管口组对作业，严格管控管口同心度、平整度等关键指标。焊接环节采用全自动埋弧焊、气体保护焊工艺，通过数字化系统锁定焊接电流、电压、速度等核心参数，稳定焊接质量。焊接施工完成后，对所有焊缝开展全覆盖无损检测，百分百确认焊缝质量达标。整套智能化流水线作业模式，不仅大幅降低人工劳动强度、规避人工施工偏差，还提升施工效率。

2.4 机电预埋与主体配套施工技术

机电预埋工程是连接土建施工和机电设备安装的关键工序，也是主体施工后期的重要收尾环节。本工程主要依靠精准预埋、一体化预留孔洞、智能化监测预埋三项核心技术施工。在精准预埋施工环节，针对机组基础、止水套管、监测仪器、电缆管线等核心预埋构件，全程采用高精度测绘放线、定型支架固定、混凝土浇筑全程防护的标准化施工流程。施工前，工作人员使用专业高精度仪器，精准确定各类预埋构件的位置、高程和角度，再通过专用定型支架将构件固定。针对大坝、隧洞、厂房等建筑结构的各类预留孔洞，施工采用定制专用定型模具一次性浇筑成型，精准把控孔洞的尺寸和安装位置，最大程度保留主体结构的完整度和稳定性。与此同时，工程同步开展智能化监测预埋作业，在结构关键受力、防渗、沉降重点点位布设各类监测传感器，实现工程施工阶段和后期运行阶段的结构状态实时监测。既为工程质量管控、安全运维提供精准的数据依据，也实现了土建施工与智能化运维的高效一体化衔接。

3 施工技术应用现存核心难点

目前，国内新型蓄能电站主体工程施工技术体系已逐步完善、日趋成熟，但现场实际施工中依然存在多项突出技术难题。蓄能电站大多为深埋地下工程，隧洞、地下厂房等核心结构施工，需要穿越断层破碎带、富水岩层、软弱夹层等各类不良地质段。常规的支护技术无法适配复杂多变的地质情况，出现支护施工滞后、围岩加固不彻底等问题。大坝、地下厂房等关键构筑物均采用大体积混凝土浇筑施工。即便现场采用分层浇筑、通水冷却等常规温控工艺，依旧会受昼夜温差、季节温度变化、混凝土水化热集中释放、各施工工序衔接偏差等因素影响，导致混凝土结构局部内外温差超标，产生细微结构性裂缝。同时，蓄能电站地下施工空间封闭、场地狭小，各工序的施工进度、设备调度、人员作业难以精准统筹匹配，容易出现工序衔接脱节、各工种施工相互干扰等问题，不仅造成工期延误，也大幅增加了现场质量管控和安全管理的难度。

4 施工技术优化与应用提升策略

结合当前新型蓄能电站施工技术的发展趋势，针对现场施工过程中的各类技术难点，从动态施工管控、施工工艺优化、多工序协同施工三个核心角度，结合绿色、智能化施工理念，制定全面的主体工程施工技术优化方案。

一是动态施工管控优化，在施工区域全面布置围岩位移、应力、渗流监测点位，同时搭配超前地质预报技术，提前精准排查溶洞、破碎带等不良地质情况，提前做好加固、预处理工作。依托实时监测数据，实时判断围岩稳定状态，灵活调整施工参数。根据现场情况动态调整开挖步距、爆破参数和围岩支护方案，针对破碎、松散的围岩区域，加密支护结构、强化支护力度，从根本上杜绝围岩变形、失稳、坍塌等安全质量问题。

二是施工工艺优化，重点针对大体积混凝土施工易开裂的通病，落实全流程精细化温控防裂工艺。施工前期通过优化低热粉煤灰混凝土配合比、严格把控砂石、水泥等原材料温度、避开高温正午时段施工等方式，做好前置防控。

三是协同施工优化，推行工序标准化、智能协同化施工管理模式，明确各施工工序的操作流程、质量验收标准和工序交接要求。依托智能调度系统，对现场施工人员、机械设备、施工时序进行数字化统一统筹，合理规划交叉作业区域，规避各工序交叉施工的相互干扰，提升施工流畅度。同步做好已完工构件的标准化成品保护，避免后续施工、交叉作业对已完成结构造成磕碰、损坏。

四是，全面落实绿色智能施工要求，推广应用智能施工设备、环保施工工艺，搭建工程质量数字化追溯体系，实现施工全过程数据留痕、可查可溯，全方位提升施工效率、工程质量和绿色施工水平。

5 工程案例应用分析

5.1 工程概况

本次实践依托一座总装机 1200MW 的省级重点新型

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

山地抽水蓄能电站，电站配置 4 台 300MW 可逆式机组，整体以地下工程为主。包含上水库、下水库、输水隧洞、地下厂房、压力管道及配套机电设施，地下工程占比达 85%，输水系统包含多条高陡斜井、长距离压力隧洞，最大斜井坡度 48°，隧洞总长度 8.6km。

5.2 核心技术现场应用落地

5.2.1 坝体工程技术应用

采用胶凝砂砾石坝（CSG 坝），全程采用绿色施工核心技术，就地取用河道天然砂砾石料，搭配 4%的水泥、粉煤灰复合胶凝材料，通过自动化设备完成拌和、摊铺全流程作业。施工过程将单层摊铺厚度固定为 35cm，统一采用“静压-振压-终静压”的标准化碾压施工工艺，同时搭配间断式防渗横缝和表层防渗结构。针对大体积混凝土施工常见的温控难题，项目采用精细化温控优化方案，通过调配低热粉煤灰配合比、对原材料进行低温预处理、避开高温时段施工、做好仓面保湿养护以及通水冷却等一系列手段，将坝体混凝土内外温差稳定控制在 20℃以内。本次施工完成的坝体未出现结构性温度裂缝，防渗检测合格率 100%。

5.2.2 地下洞室群施工技术应用

针对地下厂房、调压井、隧洞等破碎围岩的复杂地质条件，采用精细化钻孔爆破+分层分区开挖支护一体化施工技术。结合洞室断面大小、围岩等级的不同情况，差异化定制爆破参数，搭配光面预裂爆破、毫秒延期起爆施工工艺，同时根据现场施工情况动态微调参数，最终将洞室超挖量控制在 8cm 以内。针对稳定性较差的Ⅳ、Ⅴ级破碎围岩，采用分层开挖、随挖随支护的施工方式，单层开挖厚度固定为 2m，同步搭配锚杆、钢筋网、湿喷混凝土加钢拱架的组合支护结构，保障围岩结构稳定。针对 48°高陡引水斜井施工场景，采用双轨道液压滑模衬砌技术，可实现混凝土连续浇筑作业。施工后衬砌结构平整度误差控制在 3mm 以内，完全杜绝渗水隐患。

5.2.3 输水系统与机电施工技术应用

长距离压力隧洞采用复合型防渗施工体系，通过基面精准找平、铺设防渗垫层、一次性对称混凝土浇筑、双重灌浆加固的全套工艺。压力钢管采用智能化制作安装技术，施工全过程锁定固定焊接参数，所有焊缝 100%通过无损检测且全部合格，严格把控安装偏差，将误差控制在规范标准限值的 50%以内，远超常规施工标准。机电预埋施工采用一体化精准施工工艺，核心构件预埋安装偏差不足 2mm，各类预留孔洞成型规整、质量完好。

6 结论

新型水利蓄能电站主体工程的施工技术升级与优化，是保障工程质量、运行安全，提升整体综合效益的核心所在。围绕大坝、地下洞室群、引水输水、机电预埋四大核心施工模块，梳理关键施工技术；重点分析围岩稳定管控、混凝土温控防裂、多工序交叉协同三大施工重难点问题，针对性提出技术优化方案，并结合实际工程案例完成技术落地验证。研究表明，精细化施工、智能管控、绿色低碳是新型蓄能电站施工技术的主流发展方向，通过更新施工工艺与设备、完善现场管控体系，能够有效解决复杂工况下的各类施工难题。后续需进一步推进施工技术与数字化深度融合，搭建完善的标准化施工体系，为新型电力系统建设、清洁能源高质量发展提供技术支撑。

[参考文献]

[1]武志强.融合人工智能与BIM的水利水电施工协同控制技术研究——以某抽水蓄能电站工程为例[J].技术与市场,2025,32(12):116-119.

[2]李艳生.2025中国建筑经济研讨会科技与管理分论坛论文集[C].河南:河南省豫商经济文化交流协会,2025.

[3]陈俊,李锦.混凝土施工技术在贵阳抽水蓄能电站施工中的应用探究[J].水泥,2025(11):91-94.

[4]杜贤军.TBM用于抽蓄电站地下洞室影响要素研究[D].北京:清华大学,2023.

[5]张星.抽水蓄能电站土建施工难点与对策分析[J].水电站机电技术,2021,44(9):120-122.

作者简介：刘新文（1974—），男，汉族，山东庆云人，中级职称，本科，毕业于国家开放大学土木工程专业，研究方向为水利蓄能电站工程施工技术和施工安全，现从事市政工程施工技术和施工安全方面工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.