

大型抽水蓄能电站施工关键技术分析

闫西文

国能电力工程管理有限公司成都分公司 四川 成都 610000

摘要: 在全球能源结构加速向清洁低碳转型的当下,抽水蓄能电站作为目前技术最成熟、容量最大的储能方式,承担着调节电网供需平衡、提升新能源消纳能力的重要使命。本文聚焦大型抽水蓄能电站施工关键技术展开分析。先概述其施工技术要点,接着深入探讨地下洞室群开挖与支护、大坝填筑与防渗、长斜井与竖井施工、可逆式水泵水轮机安装调试以及智能化施工控制等关键技术。最后,展望施工技术发展趋势,涵盖智能化与数字化施工升级、绿色建筑技术应用、高海拔与大容量机组技术突破以及多功能化与综合能源耦合等方面,旨在为相关领域提供技术参考与发展指引。

关键词: 抽水蓄能电站; 施工关键技术; 发展趋势

引言: 随着能源结构的调整与清洁能源的大力发展,大型抽水蓄能电站作为保障电力系统安全稳定运行、促进可再生能源消纳的关键基础设施,其建设规模日益扩大。大型抽水蓄能电站施工涉及众多复杂技术领域,涵盖地质、水利、机械、电气等多学科交叉。施工过程中的技术难题不仅影响工程质量和进度,更关乎电站长期运行的安全性与可靠性。深入分析其施工关键技术,把握技术发展趋势,对提升我国抽水蓄能电站建设水平、推动能源行业可持续发展具有重要意义。

1 大型抽水蓄能电站施工技术的概述

大型抽水蓄能电站施工技术是集多学科交叉、多领域协同的复杂系统工程,其核心在于通过高效、安全的施工手段实现电站“削峰填谷、调频调相、事故备用”等关键功能。作为电力系统的重要调节设施,其施工需兼顾地形地质适应性、设备安装精度及运行稳定性,技术体系涵盖地下洞室群开挖、大坝防渗、长距离输水系统施工、可逆式机组安装调试及智能化控制五大核心模块。地下洞室群施工需应对复杂地质条件,采用预裂爆破、光面爆破等技术控制开挖轮廓,通过立体分层开挖与实时监测确保围岩稳定。大坝填筑与防渗技术以混凝土面板堆石坝和沥青混凝土面板坝为主,通过优化级配、增设排水体及复合防渗膜等措施提升防渗性能。输水系统施工需解决高水头、长距离管道安装难题,斜井与竖井开挖采用导井-扩挖法或VCR爆破法,结合滑模衬砌技术保障结构安全。可逆式水泵水轮机安装调试是技术难点,需通过精密对中、动态平衡测试及工况转换模拟确保机组在发电与抽水模式间快速切换。此外,智能化施工控制技术通过BIM建模、物联网监测及数字孪生系统实现施工过程实时优化,提升工程效率与质量^[1]。

2 大型抽水蓄能电站施工关键技术

2.1 地下洞室群开挖与支护技术

地下洞室群是大型抽水蓄能电站的核心结构,承担着机组安装、水道系统布置等关键功能,其施工需应对复杂地质条件与高应力环境,技术要点如下:(1)科学规划开挖方案是基础。依据洞室规模、地质构造及埋深条件,合理划分开挖分层与分序。对于大跨度、高边墙洞室,通常采用“先分块、后扩挖”的分层开挖法,通过控制单次开挖高度减少围岩暴露时间,降低应力释放引发的变形风险。同时,结合地质预报技术动态调整开挖参数,确保施工安全。(2)精准控制爆破参数是关键。采用预裂爆破与光面爆破技术,通过优化炸药单耗、孔网参数及装药结构,实现开挖轮廓的平整光滑,减少对保留岩体的扰动。对于软弱破碎围岩,采用浅孔多循环爆破,配合超前钻孔释放应力,避免因爆破振动导致围岩失稳。(3)高效支护体系构建是保障。根据围岩类别选择支护形式,对于I-II类围岩,以锚杆+喷混凝土为主;III类围岩需增设钢筋网或钢支撑;IV-V类软弱围岩则采用系统锚杆、钢拱架及超前小导管联合支护。支护施工紧跟开挖面,通过实时监测围岩收敛变形数据,动态调整支护参数,形成“开挖-支护-监测”的闭环控制体系,确保洞室群长期稳定性。

2.2 大坝填筑与防渗技术

大坝作为抽水蓄能电站的关键挡水建筑物,其填筑质量与防渗性能直接影响工程安全与运行效益。施工需兼顾材料特性、结构稳定性及环境适应性,技术要点如下:(1)科学优化填筑材料与工艺是基础。根据坝体功能分区(如心墙区、过渡区、堆石区等),严格筛选级配良好的填筑料。对于土石坝,需控制填筑料的含水

量、粒径分布及压实度,采用分层填筑、逐层碾压的方式,确保坝体密实度达到设计要求。碾压设备选型需匹配填筑层厚,振动平碾适用于大面积堆石区,而凸块碾则更适用于黏性土料压实,通过控制碾压遍数与行驶速度,实现坝体均匀密实。(2)精准构建防渗体系是核心。防渗技术包括水平防渗与垂直防渗两类。水平防渗通常采用复合土工膜或沥青混凝土面板,通过铺设层间粘结材料、设置锚固沟等措施确保防渗层整体性;垂直防渗则以混凝土防渗墙或塑性混凝土防渗墙为主,施工时需控制槽孔垂直度、泥浆性能及墙体搭接质量,形成连续封闭的防渗屏障。对于高水头大坝,还需结合灌浆技术对防渗体系进行补强,通过高压喷射灌浆或化学灌浆填充细微裂缝,提升防渗可靠性。(3)动态监测与质量反馈是保障。填筑过程中埋设沉降观测桩、测斜管等监测设备,实时跟踪坝体变形与渗流状态,结合数值模拟分析调整施工参数。防渗体系施工后需进行压水试验或电位法检测,验证防渗效果是否达标,确保大坝在长期运行中具备足够的抗渗能力与结构稳定性。

2.3 长斜井与竖井施工关键技术

长斜井与竖井是抽水蓄能电站输水系统的关键通道,其施工需应对高陡坡度、复杂地质及高空作业等挑战,技术要点如下:(1)科学规划开挖方法是基础。长斜井施工通常采用“导井-扩挖”法,先通过反井钻机或爬罐法形成导井,为后续扩挖提供通风、出渣通道,再自上而下分层扩挖至设计断面,有效控制开挖精度与安全风险。竖井施工则多采用“自上而下全断面开挖”或“先导井后扩挖”方式,结合地质条件选择合适的开挖顺序,确保井壁稳定性。开挖过程中需严格控制超欠挖,通过激光导向仪或三维坐标测量实时校核开挖轮廓,避免因偏差影响后续衬砌施工。(2)高效出渣与支护协同是关键。长斜井出渣需配置专用设备,如溜渣槽、卷扬机或连续式皮带机,结合井口吊罐实现渣料快速转运,减少井内作业时间。竖井出渣则采用吊桶或抓岩机配合井架提升系统,提高出渣效率。支护施工需紧跟开挖面,对于破碎围岩,采用超前小导管注浆加固、钢拱架支撑等措施;对于稳定岩体,以系统锚杆+喷混凝土为主,通过“短进尺、强支护”原则确保井壁安全。支护与开挖的时空衔接需通过施工模拟优化,避免工序干扰。(3)精准衬砌与安全监测是保障。衬砌施工采用滑模、钢模或预制构件安装工艺,确保混凝土浇筑质量与结构密实性。对于高水头斜井,需设置抗冲磨层或增设钢筋网,提升衬砌耐久性。施工期间埋设应力计、收敛计等监测设备,实时跟踪井壁变形与渗流状态,结合数值模型分析调整

施工参数,形成“开挖-支护-衬砌-监测”的全过程动态控制体系,确保长斜井与竖井长期运行安全。

2.4 可逆式水泵水轮机安装调试技术

可逆式水泵水轮机是抽水蓄能电站的核心设备,兼具水泵与水轮机双重功能,其安装调试精度直接影响机组运行效率与稳定性,技术要点如下:(1)精密安装是基础保障。安装前需对机坑基础进行严格验收,确保混凝土强度、平整度及预埋件位置符合设计要求。机组各部件吊装需采用专用工具与吊装方案,通过激光跟踪仪或全站仪实时监测部件空间姿态,严格控制转轮、主轴、顶盖等关键部件的垂直度与同轴度,偏差需控制在毫米级以内。导轴承间隙调整需结合机组运行特性,通过塞尺测量与液压顶推法相结合,确保间隙均匀且满足热膨胀补偿需求。安装过程中需同步完成油、水、气管道的清洁与密封性试验,避免杂质进入系统影响机组寿命。(2)系统调试是性能优化的关键。调试分为静态调试与动态调试两个阶段:静态调试重点检查电气回路绝缘、控制逻辑连锁及保护装置动作可靠性;动态调试则通过低速盘车、空载运行、负荷试验等步骤,逐步验证机组在发电与抽水模式下的运行稳定性。调试过程中需实时监测振动、摆度、温度等参数,结合频谱分析定位异常源,通过调整导叶开度、励磁电流等参数优化机组运行曲线,确保其在全工况范围内满足效率、噪声及稳定性指标。(3)全流程质量管控是长效保障。建立“安装-调试-验收”三级质量追溯体系,对关键工序实施影像记录与数据存档。调试完成后需进行72小时连续试运行,模拟电网频率波动、负荷突变等极端工况,验证机组应急响应能力。最终通过性能试验核定机组出力、效率及调节品质,确保其满足合同技术规范要求,为电站长期安全运行奠定基础。

2.5 智能化施工控制技术

智能化施工控制技术是提升大型抽水蓄能电站建设效率与质量的核心手段,通过集成物联网、大数据、人工智能等技术,实现施工全过程的精准感知、动态优化与智能决策,技术要点如下:(1)多源数据融合与实时感知是基础。在地下洞室、大坝、输水系统等关键部位部署高精度传感器,实时采集应力、应变、位移、渗流等物理量,结合无人机倾斜摄影、三维激光扫描等手段获取空间几何数据,形成覆盖施工全要素的“数字孪生”基础数据库。通过边缘计算节点对数据进行本地预处理,降低传输延迟,为后续分析提供实时、可靠的数据支撑。(2)智能算法驱动的动态优化是核心。基于机器学习算法构建施工参数预测模型,结合历史数据与实时监测信

息,动态调整爆破参数、混凝土配合比、设备运行轨迹等关键指标,实现开挖效率、填筑质量与能源消耗的多目标优化。例如,通过强化学习算法优化盾构机掘进姿态,减少人工干预;利用深度学习模型预测大坝沉降趋势,提前调整施工节奏,避免质量隐患。(3)全流程协同与智能决策是保障。开发集成化的施工管理平台,打通设计、施工、监理等各环节数据壁垒,实现进度、质量、安全、成本等要素的联动管控。通过数字孪生技术模拟施工过程,提前识别工序冲突与资源瓶颈,生成最优调度方案。同时,引入专家系统与知识图谱,为现场管理人员提供智能诊断与决策支持,例如自动生成质量缺陷修复方案、预警设备故障风险,推动施工管理向“数据驱动、智能决策”模式转型^[2]。

3 大型抽水蓄能电站施工技术的发展趋势

3.1 智能化与数字化施工升级

未来,大型抽水蓄能电站施工将深度融合智能化与数字化技术。借助5G、物联网,实现设备间实时互联与数据共享,施工过程全要素可感知、可追溯。利用大数据与人工智能算法,对施工参数精准分析、动态优化,提前预警质量安全风险。数字孪生技术构建虚拟电站模型,模拟施工全流程,辅助决策、减少试错成本。同时,智能机器人将广泛应用于危险、繁重作业环节,提升施工效率与安全性,推动施工管理向智能化、精细化方向迈进。

3.2 绿色建造技术应用

随着环保要求提高,绿色建造技术成为抽水蓄能电站施工重要趋势。施工材料优先选用环保、可再生及本地材料,降低运输能耗与碳排放。采用低噪声、低粉尘的施工设备与工艺,减少对周边环境的影响。加强水资源循环利用,如设置雨水收集系统用于施工降尘、绿化灌溉。此外,注重生态修复,施工结束后及时恢复植被,保护生物多样性。通过绿色建造技术应用,实现电站建设与生态环境和谐共生。

3.3 高海拔与大容量机组技术突破

高海拔地区建设抽水蓄能电站面临诸多挑战,未来将重点突破高海拔环境下机组适应性技术,如增强设备防风沙、抗低温、耐辐射能力。大容量机组是提升电站效能的关键,研发更大单机容量、更高效率的可逆式水泵水轮机,优化水力设计与制造工艺,降低机组振动与噪声。同时,攻克大容量机组安装调试难题,确保其在复杂工况下稳定运行,满足电力系统对大规模储能与灵活调节的需求。

3.4 多功能化与综合能源耦合

未来抽水蓄能电站将向多功能化发展,除传统调峰填谷功能外,还将集成供水、旅游、生态保护等功能,提升综合效益。在能源耦合方面,加强与风电、光伏等可再生能源的协同,通过储能调节实现多能互补,提高能源利用效率。探索与氢能、地热能等新兴能源的融合应用,构建综合能源系统。借助智能控制技术,实现不同能源间的优化调度与灵活转换,推动能源体系向清洁、低碳、高效方向转型^[3]。

结束语

大型抽水蓄能电站施工关键技术涵盖了地下洞室、大坝、输水系统、机组安装调试以及智能化施工控制等多个复杂且关键的领域。这些技术相互关联、协同作用,共同保障了电站建设的高质量推进。随着科技的不断进步,智能化、绿色化、适应复杂环境及多功能综合发展已成为施工技术演进的重要方向。持续创新与优化这些关键技术,不仅能提升电站建设效率与质量,更能推动能源结构转型,助力“双碳”目标实现,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供坚实的支撑。

参考文献

- [1]王富强,王福运,冯吉新.抽水蓄能电站地下施工通道布置分析[J].东北水利水电,2020,38(02):4-7+71.
- [2]张春生,王小军,姜忠见.天荒坪抽水蓄能电站关键技术[J].水电与抽水蓄能,2021,4(05):10-19+30.
- [3]林铭山.抽水蓄能发展与技术应用综述[J].水电与抽水蓄能,2022,4(01):1-4+22.