

水电站地下厂房工程中单侧滑模施工技术的应用分析

麻文录

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：单侧滑模施工技术凭借连续作业、结构整体性强等优势，在地下厂房竖墙、立柱等高大结构施工中得到广泛应用。本文以哥伦比亚伊图安戈水电站地下厂房工程为依托，系统阐述工程概况，深入分析单侧滑模施工的原理及技术优势，详细梳理地下厂房单侧滑模施工的技术参数与工艺流程，重点探讨施工技术要点与质量控制措施。研究表明单侧滑模施工技术能有效解决地下厂房高大结构施工中效率低、质量难控制等问题，提升水电站施工的质量和效率。

【关键词】：水电站地下厂房；单侧滑模施工；技术应用；工艺流程；质量控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.071

引言

随着水电工程向大型化、复杂化方向发展，地下厂房作为关键枢纽，其结构施工面临空间受限、高大结构多、质量要求高等挑战。传统模板施工存在工序烦琐、施工周期长、结构整体性差等弊端，难以满足地下厂房高效施工需求。单侧滑模施工技术作为一种连续成型的先进施工方法，通过液压系统驱动模板沿结构表面滑动，同步完成混凝土浇筑与模板提升，在高大竖墙结构施工中展现出显著优势^[1]。本文结合该工程实例，全面剖析单侧滑模施工技术在水电站地下厂房中的应用逻辑与实施要点，为相关工程提供科学的技术借鉴。

1 工程概况

伊图安戈水电站地下厂房是该项目核心发电设施，整体结构尺寸宏大，总长240米，宽23米，高49米，厂内规划安装8台机组，单台机组装机容量300MW，总装机容量达2400MW。工程设计水头范围为186.6m—201.2m，库区最大水位420m，最小工作水位390m，平均年河流流量1010m³/s，设计流量1350m³/s，单个机组设计流量169m³/s。目前1#-4#机组已投入发电，本次施工聚焦南部厂房5#-8#机组修复土建工程。单侧滑模施工技术在本工程中主要应用于两大关键部位：一是厂房机组上下游侧竖墙，上游侧墙单机组宽23m，高29.45m，下游侧墙宽23m，高24.7m，墙厚均为1.4m，墙体外侧直接接触开挖支护面，采用单侧单侧滑模施工方案；二是尾水调压室立柱，共计9根，柱高40.2m，截面尺寸为3.1m×2m，施工难度较大。

2 单侧滑模施工的原理及技术优势

2.1 单侧滑模施工原理

单侧滑模施工的核心原理是利用液压传动系统提供动力，驱动模板系统沿预设轨道连续滑动，同步实现混凝土浇筑与模板提升的一体化施工。在水电站地下厂房结构施工中，滑模系

统主要由支撑桁架、滑模面板、爬升千斤顶、爬杆、液压油泵及操作平台等组成^[2]。施工时，首先在结构底部浇筑一定高度的混凝土基础，待混凝土达到初凝强度（能承受模板自重及施工荷载，且不产生明显变形）后，启动液压油泵，通过千斤顶驱动模板系统沿爬杆缓慢提升，提升过程中持续向模板内浇筑混凝土，形成连续成型的混凝土结构。爬杆作为千斤顶的支撑载体，与结构混凝土牢固结合，为模板提升提供稳定支撑；支撑桁架与锚固系统连接，保障滑模系统在单侧受力等复杂工况下的稳定性；操作平台为施工人员提供作业空间，实现钢筋绑扎、混凝土浇筑、模板调整等工序同步进行。

2.2 技术优势

单侧滑模施工技术在水电站地下厂房工程中展现出显著的技术优势，尤其适用于高大竖墙结构施工。

第一，提升施工效率。传统模板施工需分节支设、拆除，工序烦琐，而单侧滑模施工实现连续作业，模板提升与混凝土浇筑同步进行，无需等待整节混凝土养护完成即可继续施工^[3]。第二，结构整体性强。传统分节施工易在混凝土结合面形成施工缝，影响结构整体性与抗渗性能，而单侧滑模施工连续浇筑成型，混凝土结构无纵向施工缝，整体力学性能更优，能更好地抵御地下厂房复杂受力环境与水压作用，满足结构抗渗、抗冲磨等设计要求。第三，提升施工质量。滑模面板采用高强度钢材制作，表面平整光滑，能有效保证混凝土结构外观质量，减少蜂窝、麻面等缺陷；施工过程中通过全站仪、水平仪等设备实时监测模板垂直度与水平位移，及时校准偏差，确保结构尺寸精度符合设计要求；连续浇筑模式减少了混凝土暴露时间，降低了天气、环境等因素对混凝土质量的影响^[4]。第四，适应性强。水电站地下厂房结构多样，部分部位需采用单侧模板施工，滑模系统通过锚固锚杆与岩体连接，能有效解决单侧受力不对称问题，保障施工安全；同时，滑模系统可根据结构尺寸灵活调整，适用于不同截面的墙体、立柱施工，对地

下厂房复杂空间环境的适应性较强。

3 地下厂房工程中单侧滑模施工工艺流程

单侧滑模施工工艺流程需结合地下厂房结构特点与施工条件,分区域制定针对性流程,本工程主要分为尾调单侧滑模施工流程与厂房单侧滑模施工流程。

3.1 尾调滑模工艺流程

垫层混凝土→测量放线→安装柱子结构锚杆→安装支撑桁架锚固锚杆→安装钢筋→安装预埋件及管路→安装滑模系统(桁架、面板、千斤顶、油泵、工作平台)→滑模系统试运行→第1阶段 EL192.2~EL220 混凝土浇筑、滑模提升→第2阶段 EL220~EL232 混凝土浇筑、滑模提升→混凝土养护→滑模系统拆除。

3.2 厂房滑模工艺流程

垫层混凝土→测量放线→安装底部基础及墙体结构锚杆→安装支撑桁架锚固锚杆→安装钢筋→安装预埋件及管路→安装滑模系统(桁架、面板、千斤顶、油泵、工作平台)→滑模系统试运行→混凝土浇筑、滑模提升→混凝土养护→滑模系统拆除。

4 水电站地下厂房工程中单侧滑模施工技术要点

4.1 滑模系统安装技术要点

滑模系统安装质量直接影响施工安全与结构精度,需重点把控以下要点:

(1) 支撑桁架安装前,测量人员在找平混凝土面上精准放点,严格按照图1中的位置确定桁架位置,根据桁架端面螺栓孔位置钻孔,孔径 $\phi 22\text{mm}$,深度200mm,孔内清除粉尘并保持干燥,注入HIT-RE500环氧树脂锚固剂,插入 $\phi 3/4''$ 的HILTI螺栓,凝固6—8小时后吊装首节桁架,螺栓孔对齐锚固螺栓,检查垂直度合格后拧紧螺母。(2) 桁架拼接时,两节桁架之间采用 $\phi 3/4''$ 的螺丝连接,通过带有丝扣的拉杆与墙体内锚杆连接,间隔3米设置一道,拉杆穿过支撑桁架,利用两端紧固螺母固定牢靠,每节桁架组装完成后复核垂直度,偏差超限时及时调整。(3) 爬杆安装在支撑桁架最上部,通过专用紧固装置固定,爬杆依次连接至桁架最底部,连接时确保丝扣拧紧,无松动现象,爬杆垂直度与桁架保持一致。(4) 滑模板面板安装时,相邻面板之间螺栓连接牢固,接缝平整严密,避免漏浆;千斤顶安装在面板上部垫板上,螺栓紧固到位,爬杆穿越千斤顶中心预留孔,确保滑动顺畅;操作平台组装牢固,设置防护栏杆,保障施工人员安全。安装完成后,启动油泵调节千斤顶,使滑模稍微离开地面,测量人员全面校核桁架、爬杆、面板位置,重点检查桁架垂直度、面板两侧高差,确保所

有参数符合设计要求后,方可进入试运行阶段^[5]。

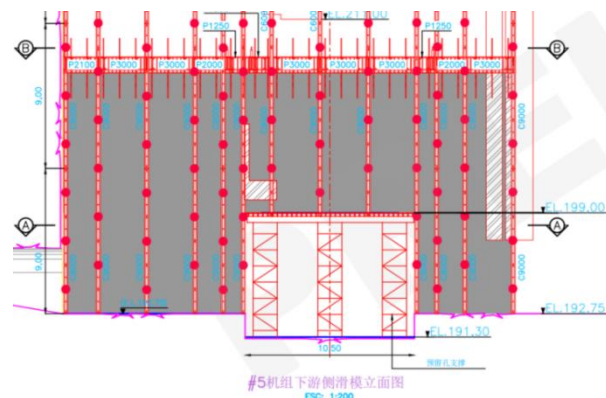


图1 厂房滑模支撑桁架布置图

4.2 钢筋与预埋件安装技术要点

钢筋原材进场时需提供监理认可的检测报告,外观无锈蚀、油污、弯折等缺陷,尺寸偏差符合标准要求。钢筋储存时采用防雨布覆盖,下设垫块或木板,离地30cm以上,按不同规格、等级分别堆放并设立标识牌。钢筋加工制作严格按图纸要求进行,弯曲半径和弯钩长度符合哥伦比亚抗震建筑规范表C.7.2规定的最小弯曲直径,冷弯成型后表面无裂纹。框架柱钢筋接头相互错开,同截面接头率不大于50%,箍筋平面与主筋垂直,弯钩叠合处沿主筋交错布置。钢筋安装时采用支架、垫块等固定系统保持正确位置,垫块强度与混凝土强度一致,钢筋保护层厚度偏差控制在设计值的 $\pm 10\%$ 以内。预埋件及管路安装前进行精准放点,安装完成后再次复核,焊接作业由持证焊工操作,焊接质量符合美国焊接协会(AWS)标准,焊缝无夹渣、气孔、裂纹等缺陷。

4.3 混凝土浇筑与滑升技术要点

混凝土配合比需经试验确定并报监理审批,各种材料用量严格按配合比执行,本项目采用的混凝土配合比如表1所示。混凝土运输采用 10m^3 混凝土罐车,运输过程中保持罐体转动,防止离析,入仓前检测坍落度与温度,不符合要求的混凝土不得使用。混凝土入仓采用汽车泵输送,下料高度不超过1m,必要时搭设溜筒或溜槽,防止骨料分离。分层浇筑厚度严格控制在30cm,按顺序依次浇筑,避免出现冷缝。混凝土振捣采用插入式振动棒,型号为 $\Phi 30$ 、 $\Phi 50$,振动棒插入上一层混凝土深度不小于50mm,垂直快插慢拔均匀振捣,至混凝土表面无明显塌陷、有水泥浆出现、不再冒气泡时停止振捣。振动棒与模板距离不大于作用半径的50%,插点间距不大于作用半径的1.4倍,避免漏振、欠振或过振。滑升速度与混凝土凝结时间密切相关,根据现场环境温度及混凝土强度发展情况动态调整,确保滑升时混凝土强度达到0.2-0.4Mpa。每次提升前检查混凝土表面状态,若出现拉裂、坍塌等情况,立即停止提升,

分析原因并采取调整措施。滑升过程中安排专人观察模板受力情况，监听有无异响，发现问题及时停机处理。

表1 施工配合比

编号	强度	最大粒径	水灰比	水	胶凝材料	水泥	高岭土	沙子	小石	减水剂	缓凝剂	坍落度	初凝时间	终凝时间
		mm		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	cm	h:min	h:min
FL-343	28MPa	19	0.5	163	325	275	50	1048	846	1.72	2.18	12±2	3:10	4:30

4.4 测量监控技术要点

单侧滑模施工全过程需进行实时测量监控，监测项目包括支撑桁架垂直度、滑模平台水平度、结构轴线偏差、高程偏差等。厂房滑模在面板顶部每3米设置一个监测点，共设置8个；尾调滑模在面板拐角部位顶部设置监测点，每个框架柱设置6个，随模板提升及时测量坐标数值变化。垂直度监测采用全站仪实时观测，每提升30cm测量一次，发现偏差超过允许范围时，通过调整千斤顶提升速度进行校正，校正时遵循“缓慢调整、逐步到位”的原则，避免一次性大幅调整导致结构开裂。水平度监测采用水准仪，平台水平度偏差 $\leq 1/500$ ，通过调整不同区域千斤顶的提升行程进行控制。同步性监测通过液压系统同步传感器实现，千斤顶行程差 $\leq 5\text{mm}$ ，发现同步偏差过大时，暂停提升，调整油泵流量分配，确保各千斤顶协同作业。结构轴线偏差监测采用激光准直仪，偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ ，高程偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ ，及时发现并纠正施工偏差。

4.5 滑模拆除技术要点

滑模拆除需在最上部混凝土初凝后进行，拆除顺序与安装相反，先拆除操作平台上的附属设施，再拆除千斤顶、滑模面板，最后分节拆除支撑桁架与爬杆。拆除过程中使用吊车或桥机进行吊装，严禁自由坠落，吊点设置合理，确保构件平稳吊装。

拆除的构件及时清理、检修，表面混凝土残渣清理干净，检查有无变形、损坏，对损坏部件进行修复或更换，合格后分类堆放，以备后续使用。拆除过程中设置警戒区，禁止无关人员进入，安排专人指挥吊装作业，确保施工安全。

5 单侧滑模施工中的质量控制措施

施工过程质量控制贯穿单侧滑模施工全过程，技术交底工

作需在施工前完成，向所有施工人员明确技术要求、操作流程、质量标准及安全注意事项，交底记录签字齐全。测量放线工作实行“双检制”，测量成果经复核无误后报监理验收，验收合格后方可进行下道工序施工。

第一，滑模系统安装完成后进行专项验收，检查桁架强度、刚度、稳定性，模板尺寸、平整度、垂直度，千斤顶、油泵、爬杆等设备的安装质量与运行状态，验收合格后签署验收记录。混凝土浇筑前检查钢筋、预埋件、预留孔洞的安装质量，钢筋保护层厚度、预埋件位置偏差等符合要求后，方可浇筑混凝土。第二，混凝土浇筑过程中安排专人旁站监督，记录浇筑时间、浇筑方量、混凝土坍落度、入仓温度等参数，检查振捣质量，防止漏振、欠振、过振。滑升过程中密切关注混凝土表面质量，若出现蜂窝、麻面、露筋等缺陷，及时采取修补措施。第三，施工过程中严格执行“三检制”（自检、互检、交接检），每道工序完成后，施工班组进行自检，合格后报技术人员复检，复检合格后报监理工程师验收，验收合格后方可进行下道工序施工。隐蔽工程验收需留存影像资料，验收记录完整规范。

6 结语

单侧滑模施工技术在水电站地下厂房工程中的应用，有效解决了高大竖直结构施工效率低、质量难控制、结构整体性差等难题。通过哥伦比亚伊图安戈水电站工程实践表明，单侧滑模施工技术凭借连续作业、效率高、结构整体性强等优势，能显著缩短施工周期，保障工程质量，降低施工成本，尤其适用于地下厂房墙体、立柱等高大结构施工。单侧滑模施工技术在具体应用过程中需要严格遵循工艺流程并强化施工过程质量控制，从而确保工程质量的合格达标。随着水电工程技术的不断发展，单侧滑模施工可结合物联网、自动化控制等技术，优化滑模系统同步控制精度，以提升施工过程监测智能化水平。

参考文献:

- [1] 王志.某枢纽地下厂房通风竖井混凝土衬砌单侧滑模施工措施[J].水利水电技术(中英文),2022,53(S2):215-220.
- [2] 王应高.水电站工程中单侧滑模施工技术的应用[J].中国科技投资,2021,(36):131-133.
- [3] 孟双全.大断面多格型深竖井混凝土单侧滑模施工技术[J].电力勘测设计,2021,(09):8-13.
- [4] 孙钦中.新藏水电站调压室竖井混凝土单侧滑模施工技术[J].技术与市场,2021,28(04):62-64.
- [5] 张华.杨房沟水电站地下厂房出线竖井单侧滑模施工技术[J].四川水利,2019,40(04):80-85.