

抽水蓄能电站大坡度尾水斜井 LSD 滑模施工关键技术及工程应用

王 强

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001

[摘要]针对大坡度斜井衬砌施工难题,以河北抚宁抽水蓄能电站 55° 尾水斜井为背景,研究 LSD 连续提升滑模施工技术。阐述系统设计、轨道安装、滑模组拼、混凝土输送及动态滑升纠偏等核心工艺。工程实践表明,该技术显著提升施工效率与衬砌质量,优良率达 100%,可为同类工程提供参考。

[关键词]大坡度斜井; LSD 连续提升; 滑模施工; 混凝土衬砌

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19892

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Key Technology and Engineering Application of LSD Sliding Mode Construction for Steep Slope Tailwater Inclined Shaft of Pumped Storage Power Station

WANG Qiang

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China

Abstract: In response to the construction difficulties of lining in steep inclined shafts, LSD continuous lifting sliding mode construction technology is studied based on the 55° tailwater inclined shaft of Funing Pumped Storage Power Station in Hebei Province. Elaborate on core processes such as system design, track installation, sliding mode assembly, concrete conveying, and dynamic sliding correction. Engineering practice has shown that this technology significantly improves construction efficiency and lining quality, with an excellent rate of 100%, which can provide reference for similar projects.

Keywords: large slope inclined shaft; LSD continuously increases; sliding mode construction; concrete lining

引言

随着我国新型电力系统建设加速,抽水蓄能电站作为关键调节资源正大规模布局。其输水系统深埋于山体,受复杂地形制约,尾水斜井常呈 45°~60° 陡坡且断面狭小,传统满堂架手架衬砌因工序冗杂、缝面质量波动大及高空作业风险突出,难以适应集约化施工需求。尽管滑模技术已成熟应用于竖井工程,但在大坡度、小断面斜井中仍面临模体牵引失稳、混凝土易离析及人员通行受阻等技术瓶颈。针对上述难题,本文依托河北抚宁抽水蓄能电站,创新性研发 LSD(连续提升滑模装置)成套技术。通过重构装备受力体系、优化混凝土入仓工艺及建立全过程风险管控机制,系统解决了陡坡施工的稳定性和成型质量难题,旨在为同类工程提供安全高效的技术范式。

1 工程概况与难点分析

1.1 工程概况

河北抚宁抽水蓄能电站总装机容量 1200MW,安装 4 台 300MW 单级混流可逆式机组。尾水系统采用“一管一机”布置,共 4 条独立的尾水隧洞,平行间距 24m。每条

尾水隧洞由上平段、上弯段($R=25\text{m}$, 圆心角 50.43°)、斜直段(倾角 55°)、下弯段($R=25\text{m}$, 圆心角 55°)和下平段构成。其中, 1#-4#尾水斜直段中心长度均为 55.706m。

斜直段开挖断面为马蹄形,经初期支护后断面尺寸为 4.6m×6.2m(宽×高)。永久衬砌为 C25W8(抗渗等级 W8)二级配钢筋混凝土,衬砌厚度 0.6m,衬砌后为圆形断面,内半径 2.5m。结构缝间距 9m,内设 654 型橡胶止水带。

工程地质条件复杂,洞室围岩以 III 类为主(占 56%),但发育有 $fp54$ 等多条断层及节理密集带,部分断层蚀变严重。水文地质方面,洞室位于地下水位以下 140~175m,开挖后局部可能产生渗水至涌水,对混凝土施工不利。

1.2 施工难点分析

大坡度尾水斜井 LSD 滑模施工面临多重耦合难题: 55° 倾角下模体自重下滑分力达 24.3t,远超常规牵引系统承载力,且重力矩易引发模体偏位;高陡坡面混凝土输送易因重力加速度导致骨料分离,加之仓内作业空间受限,

振捣盲区难以消除；浇筑初期底拱混凝土浮托力可致模体上移，威胁衬砌厚度均匀性；陡坡环境下人机料垂直运输风险叠加，高处作业防护难度陡增；过流面毫米级精度要求与滑模动态微变形特性存在内在矛盾，需建立实时纠偏机制以应对体型偏差。

2 滑模施工系统设计

针对上述难点，本工程摒弃了传统工艺，采用一套集牵引、作业、成型于一体的 LSD 斜井滑模系统。系统主要由滑模模体、LSD 液压牵引系统和运料小车三大部分组成。

2.1 滑模模体结构设计

本模体以 30.3 吨钢桁架为主体，采用 Q345B 高强度钢材焊接成 13.5m 中主梁，构建刚度-质量比最优的承力

骨架。行走机构创新性地采用“前轨后砣”双模式：前行走机构沿专用轨道导向，后行走机构直接滚动于已凝结混凝土面，显著降低轨道依赖，提升适应性与经济性。四层平台系统通过型钢悬挑与主梁刚性连接，形成垂直分层作业空间：顶层(+2.5m)集成 LSD 液压控制与钢筋堆场，中层($\pm 0.0m$)配置旋转分料器实现均匀布料，底层(-2.4m)专责抹面与养护，实现工序并行与空间高效利用。圆形模板系统由 16 块定型钢模拼装成 $\phi 5m$ 圆环，通过花篮螺杆实现 $\pm 20mm$ 径向微调，结合《滑动模板工程技术标准》(GB/T 50113-2019) 规范要求的 $\pm 2mm$ 对中精度控制，形成“粗调-精控”双级对中机制，确保衬砌几何精度。该设计融合结构轻量化、功能集成化与误差补偿闭环，构建了高刚度、低自重、多任务协同的现代滑模模体新范式。

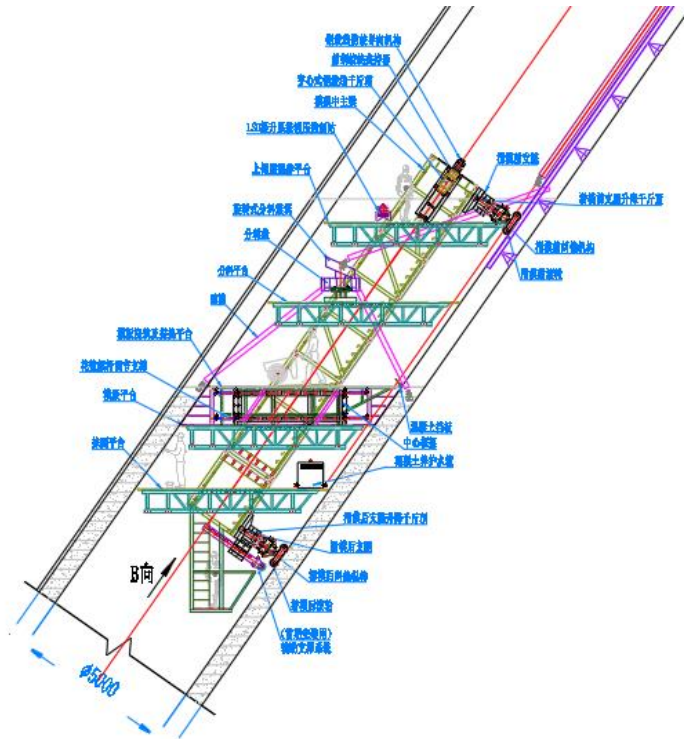


图 1 滑模模体系统

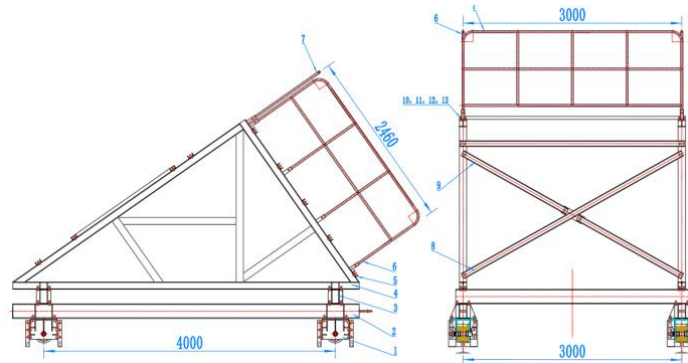


图 2 运料小车结构示意图

2.2 LSD 牵引系统

LSD 牵引系统作为核心技术,采用双 YDC1000 液压千斤顶驱动,以 8 根 1860MPa 级无粘结钢绞线构建爬升轨道,锚固于斜井上弯段混凝土锚块。经计算,系统总牵引力达 63.39t (含 1.5 倍安全系数),8 根钢绞线破断力总和 2000kN,安全系数 4.83,远超规范要求的 2.0。相较于传统卷扬机,该系统具备 0~0.5m/min 无级调速、同步爬升及机械自锁功能,彻底消除了大坡度工况下的溜车风险,为模体平稳滑升提供了本质安全保障。

2.3 辅助配套系统

运料小车:配置一台独立的 JZ-10 型 (10t) 卷扬机,牵引一辆特制钢结构小车,沿与滑模相同的轨道运行,用

于将钢筋、止水带、小型机具等从斜井上口运输至模体顶层平台。小车设有限载装置 (2t) 和断绳保护器。

混凝土输送系统:采用“溜管+缓降器+旋转分料器”组合。混凝土由上平段罐车卸入受料斗,经 $\Phi 219\text{mm}$ 溜管输送,管内每隔 10m 设置一个螺旋式混凝土缓降器,以降低流速,防止离析。溜管末端接旋转式分料簸箕,可将混凝土均匀分配至不同落料点。

3 关键施工工艺

3.1 高精度轨道安装

轨道是滑模的基准线,其安装精度直接影响衬砌中心线准确性。

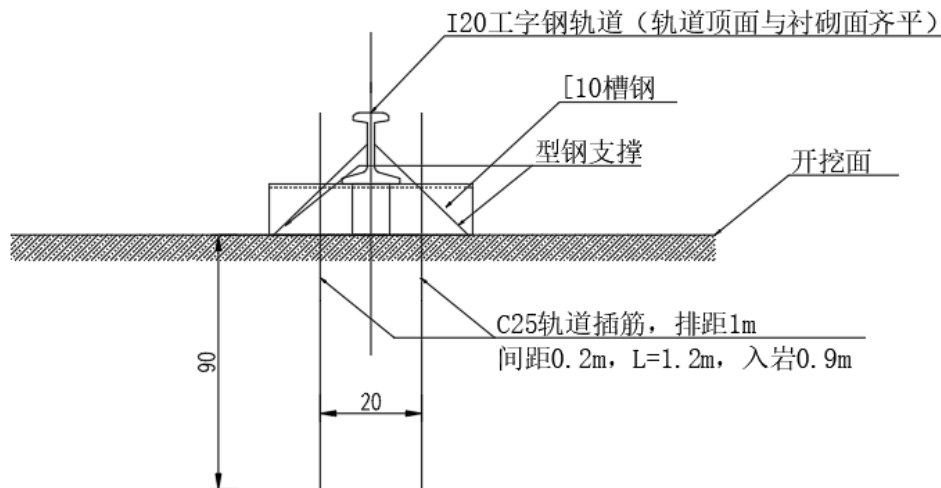


图 3 轨道安装及固定示意图

轨道选型与布置:采用 I20b 工字钢,分段制作 (长 3m/节),沿斜井底板中心线两侧对称铺设,轨距 3m,轨顶标高与衬砌内表面设计标高一致。

固定方式:采用先锚后焊法。首先,沿轨道中心线按 1.0m 间距钻孔并安装 $\Phi 25$ 砂浆锚杆 ($L=1.2\text{m}$,入岩 0.9m)。锚杆外露端与 10 槽钢轨枕焊接,再将工字钢轨道焊接在轨枕上,并在两侧每米加焊斜撑,形成“锚杆-轨枕-轨道”的稳固体系。

精度控制:采用全站仪和水准仪逐段精确定位。关键控制指标:轨道中心线与隧洞设计中心线偏差 $\leq 5\text{mm}$;轨距偏差 $\leq +3\text{mm}$;接头高差 $\leq 1\text{mm}$;轨顶横向高差 $\leq 5\text{mm}$ 。

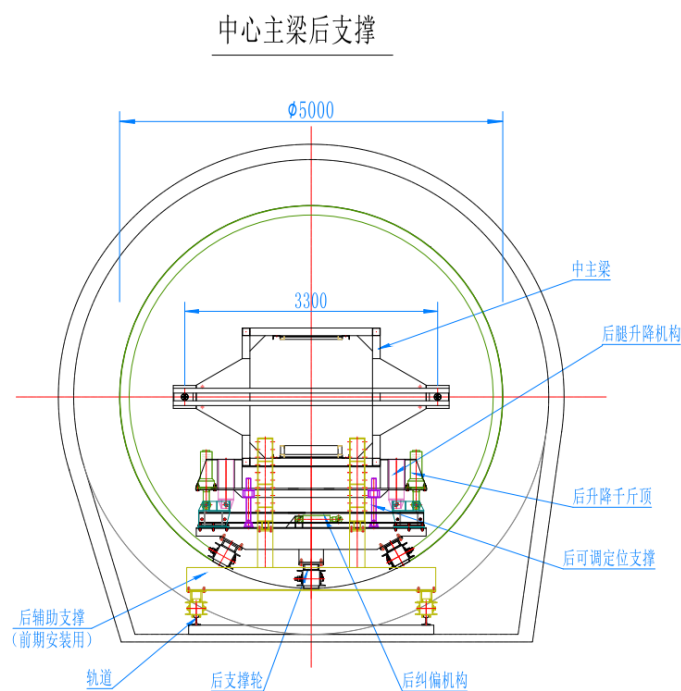
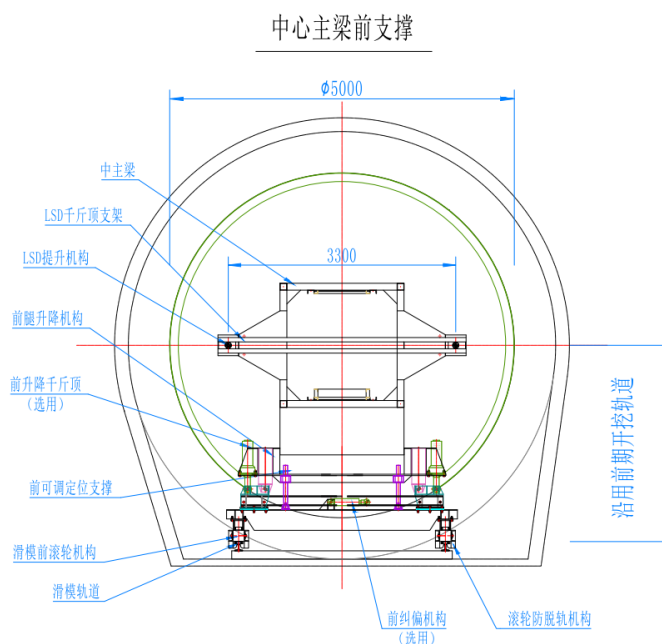
3.2 滑模模体安装与调试

滑模模体在斜井下平段的拼装,本质是高精度空间定位系统的预构建过程。基础组装:依托临时轨道实现机构

模块化对接,后行走机构、前行走机构、底梁与中主梁按力学传导序列依次就位,确保结构刚度连续性。平台及模板安装:采用编号吊装策略,16 块模板经手拉葫芦精准定位后拼合成闭合圆环,丝杠预紧形成整体刚性约束,避免环向变形累积。整体就位:通过上平段卷扬机-导向滑轮系统实现重载牵引,利用滑轮组机械优势降低牵引力需求,保障模体无损转移。系统调试:以 LSD 液压千斤顶为核心,联动位移传感器与激光指向仪构成闭环反馈系统,通过前后支腿伸缩丝杠微调与液压纠偏千斤顶动态补偿,实现模板中心线与设计轴线的毫米级重合,同轴度误差稳定控制在 $\pm 1\text{cm}$ 以内,满足隧洞衬砌几何精度的工程极限要求。该流程融合机械装配、液压控制与传感反馈,构成斜井滑模施工的高可靠安装范式。

3.3 滑模前行轮与后行轮

滑模行走机构是模体沿轨道平稳运行的关键部件。



3.4 钢筋及预埋件安装

斜井环境下,钢筋工程实施“工厂化下料+小车垂直运输”模式,单根6m限长有效规避大倾角运输失稳风险。采用双层作业面分阶绑扎:外层钢筋先行固定于模板平台,内层钢筋随滑模上升逐环施作,实现空间作业与结构进度

同步。所有纵向接头均采用II级直螺纹套筒连接,接头率严格控制在50%以内,满足JGJ 107-2016对受拉区接头错开的强制性要求,保障结构延性连续。橡胶止水带经专用卡箍精确定位,中心线与结构缝偏差 $\leq 2\text{mm}$,杜绝机械穿孔损伤。灌浆管等预埋件通过点焊与主筋固结,端口采

用闭孔泡沫板密封,有效阻断混凝土浆液渗入;滑模通过后立即人工复位校准,确保预埋件空间位置精度与功能完整性,形成“定位-封堵-复核”三位一体的防渗控位机制。

3.5 混凝土浇筑与动态滑升

针对大坡度斜井施工,混凝土配合比采用水胶比 0.45、砂率 38%、高效减水剂 1.0%与早强剂 2%的组合,实现坍落度可控(出机 160~200mm)、初凝 3~4h 的快硬早强特性,保障滑升窗口内塑性稳定。浇筑遵循“分段、对称、分层”原则,通过旋转簸箕与溜槽实现均匀布料,浇筑顺序为顶拱→腰线→底板,有效均衡模板侧向荷载。每层≤30cm 厚度,配合 Φ50 插入式振捣棒处理内部密实、ZW-10 附着式平板振捣器整平表面,形成“内振+表振”协同体系,显著提升均质性与抗渗性。动态滑升过程中,混凝土出模强度精准控制于 0.2~0.4MPa,确保滑移不损结构,凝结时间与振捣节奏形成闭环调控,实现高精度衬砌成型。

滑升控制(“初滑-正常滑升-末滑”三阶段):初滑阶段,首次浇筑高度达到模板高度的 2/3(约 80cm)且下层混凝土接近初凝时(约浇筑后 3~4 小时),进行 2~3cm 的试探性滑升,确认摩擦力正常。正常滑升阶段进入循环作业,遵循“多动少滑”原则。每间隔 1 小时左右滑升一次,每次滑升 25~30mm,平均滑升速度控制在 10~15cm/h。出模混凝土强度应维持在 0.3~0.5MPa,经验判断为“手按有硬感,指甲划痕不明显”。末滑阶段,滑升至距上弯段起点 1m 处,放慢滑升速度至 5cm/h,并加强测量监控,确保与弯段精准衔接。

抗浮与纠偏:初浇阶段,在模体后部用两只 5t 手拉葫芦将其与轨道临时锚固,抵抗上浮力。滑升过程中,通过激光指向仪和位移传感器实时监测,若发现模体偏移,可通过控制左右两个 LSD 千斤顶的分动操作进行快速调整。

3.6 模体拆除

滑模滑至上弯段终点后,停止浇筑。利用上平段的卷扬机作为主牵引,由上而下,按“后吊平台→底层抹面平台→模板系统→中部平台→主梁”的逆序进行解体拆除。

4 安全与质量控制体系

4.1 安全保障措施

LSD 牵引系统作为核心技术,采用双 YDC1000 液压千斤顶驱动,以 8 根 1860MPa 级无粘结钢绞线构建爬升轨道,锚固于斜井上弯段混凝土锚块。经计算,系统总牵引力达 63.39t(含 1.5 倍安全系数),8 根钢绞线破断力总和 2000kN,安全系数 4.83,远超规范要求的 2.0。相较于传统卷扬机,该系统具备 0~0.5m/min 无级调速、同步爬

升及机械自锁功能,彻底消除了大坡度工况下的溜车风险,为模体平稳滑升提供了本质安全保障。

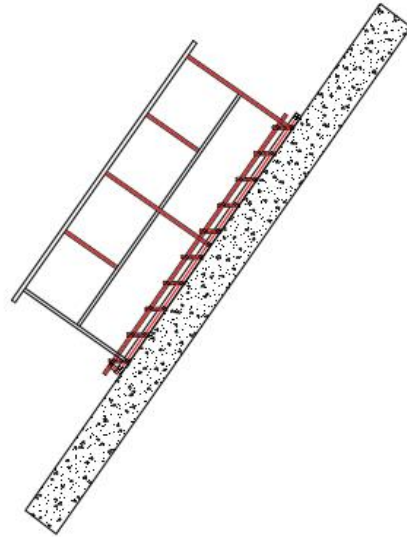


图 6 人员安全通道示意图

4.2 质量控制要点

在滑模施工中,质量控制需构建多维度闭环体系。体型控制以全站仪全断面扫描为基准,每 6m 校核几何偏差,超±2cm 即触发停工机制,实现动态纠偏。混凝土质量通过出机口与入仓口双点坍落度监测,结合模板平台坍落度损失试验,动态优化外加剂掺量,确保工作性稳定。外观质量采用“即时抹压+土工布喷淋”复合工艺,28 天持续保湿养护,显著抑制塑性收缩与温度裂缝。冬雨季施工实施分季干预:冬季拌合水温≤60℃,罐车保温、洞内暖风机增温;雨季设防雨棚阻断雨水入仓,保障材料纯度与浇筑连续性。四维协同控制,显著提升结构耐久性与成型精度。

5 实施效果与效益分析

该 LSD 滑模施工技术 in 抚宁抽水蓄能电站 4 条尾水斜井中成功应用,取得了显著效果。施工方面,滑模施工实现了连续流水作业,相比传统分段支模工艺,工期显著缩短,且实现了多工作面平行流水作业,施工效率大幅提升。质量方面,经第三方检测,衬砌后混凝土平均半径偏差仅为+3mm/-2mm,远优于规范允许偏差(±10mm)。混凝土表面光滑、色泽一致,无蜂窝、麻面、明显裂缝等质量通病,4 个单元工程优良率达到 100%。安全方面,整个施工周期内未发生一起人员伤亡或设备重大损失事故,LSD 系统的自锁功能和独立的应急通道为人员安全提供了双重保障,安全风险得到有效管控。经济效益方面,

滑模系统虽存在一次性设备投入,但大幅节省施工工期,减少脚手架、模板耗材及劳动力投入,有效降低单条斜井衬砌综合施工成本,综合效益显著,相较于传统工艺具备明显优势。

6 结论

河北抚宁抽水蓄能电站 55° 大坡度尾水斜井的成功实践,验证了 LSD 连续提升滑模施工技术的先进性与可靠性。通过本研究,可以得出以下结论:LSD 牵引系统是解决大坡度滑模施工的核心装备,其自锁、平稳、大吨位提升的特性,从原理上消除了溜车风险,是技术上的关键创新。“模体-轨道-液压控制”三位一体的精度控制体系,是实现大坡度圆形隧洞高质量衬砌的基础,高精度轨道提供基准,可调模体提供实现手段,液压纠偏系统提供动态调整能力。设备结构安全与人员行为安全相结合的系统性安全设计,有效化解大坡度陡坡临空作业风险,实现高风险作业常态化安全施工。该成套技术适配 50° 以上、中等断面的抽水蓄能电站引水及尾水斜井衬砌施工,机械化程度高、成型质量优、安全可控、经济性好,推广应用

前景广阔。

本技术的成功应用,为大坡度、小断面水工隧洞的混凝土衬砌开辟了新的技术路径,对推动抽水蓄能电站建设技术进步具有重要意义。

[参考文献]

- [1]张忠义,李强.抽水蓄能电站长斜井滑模混凝土衬砌施工技术[J].水力发电,2018,44(8):52-55.
- [2]王浩,陈卫东.LSD 斜井滑模系统在抽水蓄能电站引水斜井施工中的应用[J].四川水力发电,2020,39(2):89-92.
- [3]刘志明,王文军.大坡度水工隧洞全断面滑模衬砌施工技术研究[J].水利水电技术,2019,50(6):112-118.
- [4]陈志刚,孙建国.抽水蓄能电站斜井混凝土衬砌滑模施工质量控制[J].水力发电学报,2017,36(4):89-96.
- [5]杨志强,赵志宏.连续提升滑模系统在大坡度斜井衬砌中的应用[J].水利与建筑工程学报,2021,19(3):145-150.

作者简介:王强(1989—),男,汉族,河南济源人,工程师,本科,毕业于河南城建学院土木工程专业,现从事水利水电工程施工技术工作。