

工程测量新技术在水利工程中的开发与运用

文 / 田国文 临沂市水利工程保障中心

摘要：本文以某大型水利枢纽工程为探究载体，分析工程测量新技术在水利场景中的开发与实践应用。该水利枢纽工程地处高山峡谷、多雨雾、高陡边坡等复杂条件，传统测量技术难以满足高效率、高精度建设要求。文章系统阐述了针对该工程特性开发的GNSS RTK技术、三维激光扫描技术、InSAR技术，剖析新技术在坝基开挖、坝体浇筑、边坡与库区监测等环节的应用流程。本文研究旨在为同类水利工程测量技术升级提供可参考案例。

关键词：工程测量技术；GNSS RTK；三维激光扫描；InSAR；水利工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.071

引言

随着水利工程不断朝向大规模、高标准方向发展，传统测量技术因精度、效率、风险预警等方面的局限性，难以适应新建水利工程的测量需求。某大型水利枢纽工程为典型的复杂水利项目，同时面临复杂地质条件、恶劣气候、建设周期长、专业交叉多等多项挑战。对此，需要积极开发并应用新型测量技术，将GNSS RTK、三维激光扫描、InSAR等新技术与施工环节深度融合，解决该水利工程建设项目的难题，推动水利工程项目从粗放建设朝向智能化建设转型。

一、项目概况

本项目地处长江上游支流，流域的水文条件十分复杂，年均降水量约为1200mm，主要集中在6-9月汛期，这也给项目施工组织、安全管理带来了巨大挑战。从建设规模上看，本工程总库容量达到23.5亿 m^3 ，其中，8.2亿立方米的防洪库容，将下游城市防洪标准从20年一遇提升至50年一遇；发电桩基容量为120万kW，发电量约为45亿kWh/年，相当于减少标准煤消耗150万t/年，减少二氧化碳排放370万t/年；灌溉面积覆盖下游农田15万亩，打通120km航道，实现500t级船舶通航。

如图1所示，项目主体为混凝土重力坝，坝体最高处为128m，坝顶长度为890m，共计划分为32个施工段，坝基开挖深度为45m，土石方开挖量约为180万 m^3 、混凝土浇筑量约为210万 m^3 。项目区域处在高山峡谷地带，两岸边坡最大坡度为70°，局部存在断层破碎带，对地质稳定性要求极高；区域常年受云雾天气影响，能见度较低，传统测量装置易受遮挡，难以满足坝体体型控制、边坡变形监测等高精度要求。另外，项目建设周期为7年，需经



图1 项目示意图

历多个汛期、枯水期交替，施工工序衔接紧密，对测量数据实时性、精准性、连续性有严格要求，多重挑战共同构成了工程测量新技术研发与应用的现实需求场景。

二、关键工程测量新技术的开发与适配

（一）GNSS RTK技术的优化开发

针对本工程测量的重点与难点，项目团队通过3项优化实现技术突破：

（1）搭建“基准站+中继站”双层网络。在项目周边山顶、高地等无遮挡区域设置永久性基准站8座，用于实时接收卫星信号并将其传输至数据中心；在峡谷中段、坝体两侧等信号薄弱区增设临时中继站12座，借助无线技术放大信号覆盖，实现区域信号全方位覆盖，将信号失锁率控制在5%以内，保证测量连续不中断。

（2）开发多星座兼容算法。降低对单一卫星的依赖性，同时接收GPS、北斗、GLONASS三大星座信号，信号通道从120个增加至240个，在多云雾、低能见度天气环境下依然可精准捕获信号，定位精度要求 $\leq 2cm$ ，满足水利工程厘米级控制标准。

（3）定植水利专用测量模块。针对本项目需频繁换算水位、高程的特性，在设备内植入自动换算程序，采集到测量数据后可直接生成满足水利规范标准的高程报告，无需人工二次计算，极大提升了数据处理效率，单个浇筑块定位时间从4h缩短至2h。

（二）三维激光扫描技术的功能拓展

团队使用三维激光扫描技术进行功能拓展，打造出“扫描-建模-分析”一体化解决方案。项目团队打破通用软件数据转换壁垒，研发水利专用建模软件，包含直接对接水利BIM模型的处理程序，可实现扫描获取的点云数据无需格式转换即可导入到软件生成三维模型，建模时间控制在3h以内，且模型精度达 $\pm 1mm$ ，高精度还原坝基开挖、坝体浇筑体型细节。针对项目地区多雨、多粉尘的特殊环境，给扫描仪增设IP68级防水防尘外壳，为高强度铝合金材质制作而成，能抵御边坡落石冲击；优化设备供电系统，将续航时间从4h延长至8h，满足单日连续扫描需求，有效降低故障率。另外，在软件中设置工程设计参数，生成模型之后可自动与设计参数对比，生成彩色超欠挖云图，直观标注超挖、欠挖区域的具体位置与范围，为项目开挖提供信息支持，以免盲目施工。

(三) InSAR 技术的动态监测开发

项目周边共有高陡边坡 3 处，最大一处高度为 350m，库区蓄水后可能出现滑坡、沉降等风险。对此，项目组引入了时间序列 InSAR 技术，搭建全方位监测网络。累积采集项目开工前、建设期、运行期的 Sentinel-1 卫星影像 42 景，采用干涉测量技术对影像数据处理，生成工程周边 50 平方公里内的三维形变场，检测精度可达毫米级，可采集到边坡月沉降、库区为沉降等细微参数变化，实现项目场景的宏观覆盖、精准捕捉。同时，结合水利工程地质安全相关规范标准，设置预警值，包括边坡沉降速度 $> 5\text{mm}/\text{月}$ 、水平位移 $> 3\text{mm}/\text{月}$ ，InSAR 监测数据实时传递至预警系统，一旦监测点形变超出阈值范围，系统自动发出声光警报，以 App 推送、短信等方式通知管理人员，预警信息内标注危险区域范围，为开展应急处理、人员规避风险预留充足时间。

针对 InSAR 监测中的异常区域，由人工使用全站仪、测斜仪展开复核测量，每月采集 1 次边坡内部位移数据信息，验证 InSAR 测量结果的精准性。并将两类数据融合，用于持续完善形变预测模型，保障预警信息的可靠性，截止项目完工未出现一起库区沉降、边坡滑坡等事故。

三、工程测量新技术在关键施工环节的运用实践

(一) 坝基开挖阶段：三维激光扫描技术的运用

在前期准备阶段，开挖区周边稳定岩层设置永久已知控制点 6 处，用全站仪复核控制点精度；将三维激光扫描仪架设在控制点一旁，将控制点坐标输入完成设备标定，根据开挖面高度调节扫描仪角度，确保扫描完整的开挖面，以免出现数据遗漏情况。

在数据采集阶段，考虑到开挖面较高，采用分层扫描方案，先扫描底部 0-5m 区域，再上移装置扫描中部 5-10m、上部 10-15m 区域，单次扫描约耗时 20min，每完成一层扫描后，通过控制点拼接数据，使各层数据实现无缝衔接。针对 300m 长的开挖边坡，共分为 10 个扫描段，累积采集 1.2 亿个点云数据，数据密度 ≥ 500 个点/平方米，清晰还原岩石裂隙、凸起等细节画面。

在数据处理阶段，将扫描采集的点云数据导入到定制软件内，自主生成开挖面三维模型，再将其导入到坝基 BIM 模型内，软件自动对比二者参数，计算每个点位超欠挖数值，生成彩色超欠挖分析报告。报告中的红色区域代表超挖，蓝色区域代表欠挖，且在报告中明确标注每个区域的具体坐标、面积、超欠挖深度，用于后续施工班组定位。

在现场应用阶段，施工班组根据提供的分析报告，用小型挖掘机精准凿除欠挖区域，超挖区域做好标记后续回填；每周进行一次扫描、对比、修正工作，逐步提升开挖精度。应用该技术后，坝基超欠挖量最终控制在 $\pm 10\text{cm}$ 内，减少约 2000m^3 混凝土回填量以及 80 万元成本，并缩短 15d 的开挖工期。

(二) 坝体浇筑阶段：GNSS RTK 技术与全站仪的协同运用

坝体为混凝土重力坝结构，分 32 个浇筑快 ($25\text{m} \times 15\text{m} \times$

$3\text{m}/\text{块}$)，浇筑期间严控模板定位精度、浇筑高程、接缝平整度。本项目团队搭建“GNSS RTK+ 全站仪”测量一体，实时管控浇筑全流程。

模板安装前，使用已优化的 GNSS RTK 设备对浇筑块四角、侧边轴线点位进行定位，采集点位平面坐标、高程数据，定位精度为 $\pm 3\text{mm}$ ；对比定数据与设计坐标，一旦偏差超过 3mm，立即优化调节模板位置，直至达标。相比传统的全站仪定位，GNSS RTK 定位效率得到极大提升，单个浇筑块模板定位时间为 2h，且无需频繁移动设备，十分适用于坝体浇筑现场狭窄的作业空间。

在混凝土浇筑期间，考虑到混凝土侧压力作用，模板可能出现倾斜或位移情况。对此，施工团队每浇筑 1m 高度，使用高精度全站仪（测角精度 0.5s，测距精度 $\pm 1\text{mm}+1\text{ppm}$ ）对模板底部、中部、顶部 6 个监测点展开测量，采集倾斜和位移数据；累积获取 5000 余组监测数据，共发现 2 处模板超过 3mm 的偏差，最大倾斜量达 6mm，立即通知施工班组暂停浇筑，调整模板支撑螺杆纠正偏差量，以免坝体体型出现永久性缺陷。

完成浇筑工作且混凝土已初凝后，使用 GNSS RTK 设备全面测量浇筑块顶面高程，测量点设置间距为 5m，共计设置 150 个测量点位；将测量数据导入至软件内生成高程分布图，检查有无高程偏差超标情况，检查中发现 1 处偏差达 7mm（要求 $< 5\text{mm}$ ），对其人工凿平。应用协同体系，使坝体浇筑体型合格率提升至 99.5%，为后续坝体防渗膜铺设、机电设备安装提供了非常平整的作业面。

(三) 边坡与库区监测阶段：InSAR 技术与人工监测的互补运用

工程周边 3 处高边坡为中风化岩层，最大高度为 350m，存在断层破碎带；库区蓄水后的水位落差为 80m，可能造成边坡滑坡、岸边沉降等地质灾害，严重威胁作业人员人身安全以及施工进度。对此，项目团队采用“InSAR 技术宏观监测 + 人工监测精准验证”方案，构建全方位的安全防线。

如图 2 所示，InSAR 宏观监测中，使用 Sentinel-1 卫星采集工程区域影像，采集频率为 2-3 景/月，采用时间序列 InSAR 技术处理影像，生成边坡与库区变形趋势图，图中可精准识别边坡有无沉降、局部滑坡等；区域有无均匀沉降或不均匀沉降等。本项目监测中发现坝体左岸 1 处边坡存在缓慢沉降，沉降率为 $3\text{mm}/\text{月}$ ，虽然是临近预警值，但项目团队依然将其划定为中点观测区域，并设置警示标志警告无关人员不得进入。

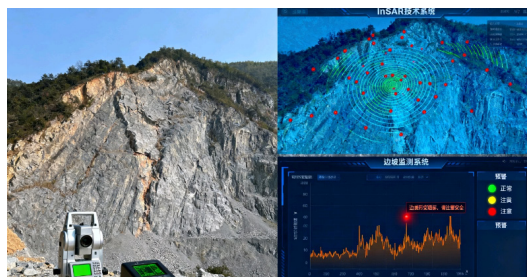


图 2 InSAR 监测系统示意图

人工精准验证中,针对 InSAR 监测发现的重点区域,项目团队每月组织 1 次人工监测,技术人员使用全站仪测量边坡表面 50 个监测点坐标变化情况,确定表面位移参数;在边坡内部钻孔埋设 3 组测斜仪,测量不同深度岩层的位移数据,明确边坡内部变形规律,验证 InSAR 监测结果的精准性。最终监测数据表明,该边坡内部最大位移量为 4mm,与 InSAR 监测表面沉降趋势吻合,代表无突发性滑坡风险。

将 InSAR 监测数据与人工检测数据及时录入到安全管理平台中,该平台设置了三级预警机制,分别为蓝色预警(3-5mm/月)、黄色预警(5-8mm/月)、红色预警(>8mm)。一旦采集数据超过阈值范围,平台自动发出预警

信息,并将其推动给管理人员,同时启动应急程序。发出蓝色预警要求加大检测频率至 1 次/10d;发出黄色预警需组织人工撤离预警区域;发出红色预警立即启动边坡加固方案。截止本项目竣工,所有监测点形变均处于安全阈值范围内,未发生一起地质灾害事故,确保工程建设能顺利推进。

四、新技术运用成效与经验总结

(一) 运用成效

在水利工程建设全流程融入开发适配后的测量新技术,有效加强了精度控制、测量效率、成本节约、3 大维度效益,实际成效如表 1 所示。

表 1 测量新技术应用的核心效益

成效类别	传统技术水平	新技术应用水平	优化结果	核心价值体现
精度控制	坝基开挖超欠挖量 $\pm 15\text{cm}$	坝基开挖超欠挖量 $\pm 10\text{cm}$	超欠挖控制范围缩小 33%	减少混凝土回填,保障坝基稳定性
	坝体浇筑体型合格率 92%	坝体浇筑体型合格率 99.5%	合格率提升 7.5 个百分点	避免返工,为后续工序奠定基础
	边坡监测精度 $\pm 5\text{mm}$	边坡监测精度 $\pm 0.5\text{mm}$	监测精度提升 90%	精准捕捉细微形变,提前预警风险
效率提升	坝基开挖单次扫描 24h	坝基开挖单次扫描 3h	扫描效率提升 87.5%	缩短测量等待时间,加快施工进度
	单个浇筑块模板定位 4h	单个浇筑块模板定位 2h	定位效率提升 50%	减少工序衔接耗时,保障浇筑节奏
	边坡人工监测单次 2d	边坡 InSAR 监测单次 1h	监测效率提升 96%	降低人工强度,覆盖更广监测范围
成本节约	混凝土超填量约 3500m ³	混凝土超填量约 1500m ³	减少超填量 57%,节约成本 80 万	降低材料损耗,直接减少建设投入
	测量人员配置 20 人	测量人员配置 14 人	人员成本降低 30%,节约 240 万	优化人力资源,减少管理成本
	-	累计节约工程成本约 320 万元	-	综合提升项目经济效益

结语

综上所述,某大型水利枢纽工程建设的成功实践,充分证明了新型工程测量技术对复杂水利工程建设积极作用。从针对高山峡谷地形优化的 GNSS RTK 网络,到针对多雨多尘环境改进的三维激光扫描设备,再到使用 InSAR 技术搭建边坡动态预警体系,每项新技术的开发与应用都契合工程建设需求,全面保障项目的测量精度、效率、安全,项目关键测量指标均满足规范标准,并且减少返工、节约材料降低建设成本,规避了地质灾害风险,确保水利工程项目顺利完工。

参考文献

[1] 胡静雅. 工程测量新技术在水利工程中的开发与应用[J]. 现代农业科技, 2025, (17): 155-158+166.
 [2] 吴硕先, 王宁, 孟昊, 等. 新型测绘技术在大中型水库测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信

息, 2025, (08): 170-173.

[3] 黄亚文, 王亚丽. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用[J]. 科技与创新, 2025, (15): 208-211.
 [4] 虞道祥. 现代工程测量技术在水利工程中的应用探析[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(04): 129-131.
 [5] 陈尚林. 河道测量新技术及应用[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(05): 50-52.
 [6] 梁达炜, 李艳芳, 朱楠. 测绘新技术在河道测量中的应用[J]. 中国水运. 航道科技, 2021, (26): 67-70.
 [7] 张勇. 现代工程测量新技术在水利工程的应用探究[J]. 滁州职业技术学院学报, 2019, 18(03): 64-66.
 [8] 马良, 高天虹. 现代水运工程测量新技术的应用[J]. 科学技术创新, 2019, (05): 155-156.
 作者简介: 田国文(1970.11-), 男, 汉族, 山东省临沂市, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。