

水利水电工程地质勘察全过程信息化应用

陈少林 谭子银

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

摘要: 本文围绕水利水电工程地质勘察全过程信息化应用展开系统性研究,梳理天空地深一体化采集、多源数据治理、三维可视化建模、数字孪生智能分析等核心技术体系,介绍信息化平台架构与运行机制。详述勘察各阶段及工程全周期的信息化应用场景,剖析行业数据标准杂乱、智能程度不足、平台兼容弱、复合型人才紧缺等问题,提出对应优化策略,并展望一体化、无人化、智慧化的行业发展新趋势。

关键词: 水利水电工程;地质勘察;全过程;信息化;应用

引言: 地质勘察是水利水电工程建设的前置核心环节,直接决定工程设计合理性、施工安全性与运维稳定性。传统勘察模式存在数据采集滞后、信息碎片化、专业协同低效、成果复用性差等诸多弊端,难以适配现代水利工程高精度、高效率、全周期管控的建设需求。为此,推进勘察全过程信息化转型尤为关键。本文结合行业技术现状,全面探究信息化应用体系、现存短板与优化发展路径。

1 水利水电工程地质勘察信息化核心技术与体系架构

1.1 勘察全过程信息化核心技术体系

(1) 天空地深一体化数字化数据采集技术。集成卫星遥感、无人机航测、地面传感网、钻孔随钻及地球物理深部探测等手段,构建多维度、多尺度的立体感知网络,实现勘察现场空间数据、物性参数与影像资料的快速获取与实时传输,从源头保障数据精度与时效性。(2) 多源异构地质数据集成与治理技术。针对地质编录、试验成果、遥感解译、监测序列等结构化与非结构化数据,建立统一数据标准与编码体系,研发数据清洗、关联融合与质量控制算法,消除“数据孤岛”,构建逻辑统一、物理分散的勘察数据资产池^[1]。(3) 三维地质建模与可视化仿真技术。基于钻孔、剖面及物探解译成果,采用 NURBS 与隐式曲面混合建模方法,构建高精度三维地质结构模型,实现地层、构造、水文单元的空间展布可视化,并支持任意剖切、虚拟钻探及开挖模拟,为工程布置提供直观依据。(4) 数字孪生与智能分析决策技术。构建勘察场景的实时映射数字孪生体,耦合地质参数动态反演与数值仿真引擎,开展围岩分级、渗流场预测及滑坡风险推演,辅助设计变更与灾害预警,实现从“经验驱动”向“数据—机理”双驱决

策的跃升。

1.2 信息化勘察平台层级架构

(1) 基础设施层。部署高性能计算服务器、分布式存储集群、野外移动终端及大带宽应急通信网络,配套北斗定位与气象传感套件,为海量数据传输、存储与计算提供可靠硬件底座。(2) 数据资源层。建设涵盖基础地质、勘探测试、遥感影像、设计成果及环境监测的主题数据库,配套数据字典与元数据管理系统,实现勘察全周期数据的标准化入库、版本管控与安全备份。(3) 平台服务层。封装通用 GIS 服务、三维渲染引擎、工作流引擎、报表生成及 API 接口网关,提供微服务化的数据检索、空间分析、模型计算与协同批注功能,支撑上层应用敏捷开发。(4) 业务应用层。部署野外数据采集 APP、进度质量监控看板、三维协同设计集成端及成果自动归档系统,覆盖踏勘、钻孔、编录、试验、报告编制全过程,实现勘察业务的在线化、流程化与无纸化^[2]。

1.3 全过程信息化勘察运行机制

(1) 勘察数据全生命周期管控机制。建立从数据采集、传输、存储、处理、归档到销毁的闭环管理制度,明确各环节责任主体与操作规范,实施分级存储与定期质量抽查,确保数据可追溯、防篡改、可复用。(2) 多专业协同作业与信息共享机制。构建基于统一底图与坐标框架的协同工作空间,实现地质、水工、施工、环保等专业间的模型互馈与冲突检查,配套线上会商与版本同步功能,大幅减少专业间信息摩擦。(3) 动态更新与实时校核运行机制。推行“现场采集—云端同步—模型更新—即刻校核”的滚动工作模式,利用移动终端实时提交数据,后台自动触发地层边界一致性校验与异常值报警,确保勘察成果随工作推进而持续精化。

2 水利水电工程地质勘察全过程信息化应用

2.1 勘察前期筹备阶段信息化应用

(1) 基于大数据的勘察区域地质资料整合分析。广泛收集区域地质图、前期研究成果、邻近工程勘察报告及遥感解译资料,利用大数据文本挖掘与空间叠加分析技术,快速提取区域构造格架、地层岩性组合及水文地质特征,形成初步地质认知图谱,为后续勘察方案制定提供宏观背景支撑。同时,通过历史数据与本次勘察目标的智能匹配,预判关键工程地质问题,辅助风险初步识别。(2) 信息化勘察方案智能编制与优化设计。基于整合后的区域地质大数据与工程布置方案,运用智能推理引擎自动生成勘察大纲草案,涵盖钻孔深度、物探方法组合、室内试验项目等核心内容。引入多目标优化算法,综合考虑精度要求、成本预算与工期约束,对勘察工作量分配方案进行迭代寻优,形成技术可行、经济合理的勘察实施方案。(3) 勘察点位智能化布设与路径规划。依托三维地形模型与地质分析预判结果,利用空间优化算法自动确定钻孔、探坑、物探测线的最优布设位置,确保勘探网密度合理、控制性剖面完整。同步结合现场地形起伏与道路通达条件,运用路径规划算法生成野外踏勘与设备调运的最优行进路线,有效减少无效往返,提升前期筹备效率。

2.2 现场勘察实施阶段信息化应用

(1) 野外勘察数据实时采集、上传与同步存储。基于移动智能终端与云平台,现场人员通过标准化电子卡片录入钻探编录、试坑描述、水文观测等数据,支持拍照、录音及短视频等附件上传。利用 4G/5G 或北斗短报文通信,实现数据实时上传至云端数据库,自动完成多终端同步,确保内外业数据无缝衔接,从源头杜绝纸质记录滞后与转录错误。(2) 钻探、物探原位数据智能识别与初步校验。在钻探过程中集成随钻测量参数(钻速、扭矩、压力)与岩屑智能识别系统,实时判定岩性变化界面;物探数据采集端嵌入智能滤波与初至拾取算法,自动剔除干扰信号。现场端部署轻量化校验规则引擎,对异常数据即时报警并提示复测,有效提高原始数据可靠性^[3]。(3) 移动端勘察作业协同管控与进度动态监管。通过移动端项目管理看板,实时展示各钻孔进度、样品采集状态及物探作业完成率,支持任务派发、进度填报与问题上报。项目管理人员可远程监控各作业面实施情况,结合预设进度计划进行偏差预警,及时调度资源,确保现场作业有序推进。

2.3 数据处理与成果编制阶段信息化应用

(1) 多源地质数据自动化处理、融合与分析。搭建数据处理流水线,对钻孔岩芯编录、标准贯入试验、室内土工试验、物探测深剖面等数据进行自动解析与格式转换。运用聚类分析与交叉验证算法,将分层信息、物性参数与空间坐标关联融合,生成标准化地质属性数据集,为建模和报告编制提供统一、可靠的数据底盘。(2) 三维地质模型快速构建与动态修正。基于融合后的地质数据集,调用建模平台自动化构建初始三维地质结构模型,实现地层面、断层迹线和地下水水位面的快速生成。在后续补充勘探或设计变更时,支持通过新增数据驱动模型局部快速更新,保持模型与现场认知同步,实现“边勘察、边建模、边精化”。(3) 勘察报告智能化生成与成果可视化输出。构建勘察报告知识库与标准化模版引擎,自动提取数据库中的关键地质参数、统计图表及模型截图,按规范章节结构生成报告初稿。同时,将三维地质模型、剖面图、等值线图等成果通过可视化门户发布,支持多终端交互浏览,便于设计人员直观理解地质条件^[4]。

2.4 工程全周期延伸信息化应用

(1) 施工期地质风险动态监测与预警分析。将勘察阶段建立的地质模型与施工期实时监测数据(如围岩变形、支护受力、渗流量)进行动态关联,结合数值仿真与机器学习预测模型,对塌方、突涌水等地质风险进行分级预警,及时指导施工方案调整,发挥勘察成果在施工安全管控中的先导作用。(2) 运维期地质状态数据迭代更新与应用。在工程运维阶段,持续接入大坝位移、库区地震活动及渗流监测数据,通过数据同化技术更新地质模型参数,分析库水位变动下边坡稳定性演化趋势,为水库调度与大坝安全鉴定提供长期地质数据支撑,实现勘察成果向运维阶段的有效延伸。(3) 勘察成果与设计、施工、运维数据联动共享。基于工程数据中心,打通勘察成果数据库与设计 BIM 系统、施工管理系统及运维监测平台之间的数据接口,实现地质信息在不同阶段的无缝流转与互馈调用。建立统一的数据共享与权限管控机制,促进勘察、设计、施工、运维各方在同一数据底座上协同工作,充分发挥地质数据的全周期复用价值。

3 水利水电工程地质勘察全过程信息化应用现存问题、优化对策与发展趋势

3.1 全过程信息化勘察应用现存主要问题

(1) 数据标准不统一,多源融合困难。钻探、物探、试验等环节的数据格式、编码与精度基准各异,缺乏统一语义映射,空间配准与属性对齐需大量人

工干预,融合质量不稳,制约三维建模与智能分析深度。(2)智能化应用深度不足,核心环节仍依赖人工。现阶段信息化多限于采集与存储数字化,在地质分层识别、参数反演、风险判识等关键环节,算法精度与可靠性尚难替代人工,工程师经验仍占主导,智能工具仅作辅助,技术红利未充分释放。(3)平台兼容性差,跨部门协同效率低。各专业软件接口不开放、架构不一,地质模型向BIM传输时存在几何丢失与属性失真,设计施工方难以直接利用原始数据,需二次加工,致使信息传递链长、沟通成本高,协同效率整体不高。(4)复合型人才短缺,安全管控体系不完善。既精通地质业务又掌握大数据、建模与编程的复合人才匮乏,制约系统深度运维与优化;同时,地质数据涉及核心机密,当前在加密传输、权限管控及异地容灾备份方面仍存薄弱环节,存在泄露与损毁风险。

3.2 全过程信息化应用优化对策

(1)统一勘察数据标准,完善数据治理体系。制定覆盖勘察全流程的数据采集、存储、交换与可视化标准,建立统一的数据字典与编码体系。配套研发数据质量自动校验工具,构建从数据入库、版本管理到归档销毁的全生命周期治理流程,确保多源数据在统一框架下高效融合与可信复用。(2)深化AI、数字孪生技术与勘察业务深度融合。加大面向地质领域的大模型训练与知识图谱构建力度,开发岩性智能识别、地层自动对比及风险预测专用算法。同时,利用数字孪生技术构建勘察现场高保真映射体,耦合实时监测数据进行动态仿真推演,逐步实现从辅助参考向自主研判的跨越。(3)搭建一体化协同平台,打通信息共享壁垒。基于微服务架构构建开放式的勘察协同平台,统一数据接口标准并开发适配各类专业软件的数据转换插件,实现地质模型与设计、施工系统间的无损交互。配套建立跨部门线上协作流程与版本协同机制,消除信息孤岛^[5]。(4)强化人才培养与数据安全防护体系建设。依托校企合作与继续教育,定向培养“地质+信息化”复合型人才。完善数据安全管理制度,采用国密算法实现数据传输与存储加密,部署多级权限管控与操作审计系统,建立异地灾备中心,全方位筑牢数据安全防线。

3.3 水利水电勘察信息化未来发展趋势

(1)勘察、设计、施工、运维全流程一体化数字化发展。未来将打破阶段壁垒,构建覆盖工程全生命期的统一数字孪生底座,地质数据在勘察完成后直接服务于设计选型、施工模拟及运维监测,实现一次建模、全程复用,各阶段数据双向互馈、持续精化。(2)智能化、无人化勘察作业模式普及应用。无人机集群航测、机器人自动钻探与随钻智能判识、无人船水上物探等装备将逐步替代传统人工操作,配合现场边缘计算与自主决策终端,实现恶劣环境下全天候、高效率的无人化勘察作业。(3)基于数字孪生的智慧地质勘察与风险智能决策。以高精度三维地质模型为核心,融合物联网实时感知数据与多场耦合数值仿真引擎,构建可演化、可交互的智慧地质孪生体,支撑工程地质风险的提前预判、动态预警与主动防控,推动勘察决策从经验主导向数据-机理双驱动智能决策的根本转变。

结束语

全过程信息化改造为水利水电工程地质勘察提质增效提供了核心支撑,彻底改变传统人工勘察的作业模式,实现勘察数据全生命周期管控与多专业协同共享。现阶段行业信息化建设仍存在技术应用浅层化、体系机制不完善等短板。未来需持续深化数智技术与勘察业务融合,完善数据标准与安全体系,推动工程全生命周期数字化贯通,助力水利水电工程勘察行业迈向智慧化发展新阶段。

参考文献

- [1] 裴丽娜,王泉伟,刘建磊,等.基于数字孪生技术的数字水利工程勘察平台关键技术研究[J].工程地质学报,2025,33(6):231-234.
- [2] 高玉生,王国岗,赵文超.水利工程勘测全过程数字孪生技术研究[J].人民长江,2025,56(18):198-204.
- [3] 税正华.提升水利水电工程地质勘察成果精度的数字化技术探讨[J].水电能源科学,2022,40(6):110-113.
- [4] 陈健,盛谦,陈国良.岩土工程数字孪生技术研究进展[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):79-88.
- [5] 李汶谕.基于数字孪生技术的水利水电工程地质勘察数字化应用[J].陕西水利,2024,23(4):118-121.