

数字技术驱动下水利工程勘测设计前期风险识别机制研究

文 | 刘娜

水利工程勘测设计前期阶段是风险识别的关键阶段，复杂地质条件与数据采集的不确定性导致传统勘测方法识别精度不足。三维地质建模技术与数字孪生技术通过天空地一体化数据采集与数字映射及仿真预演，实现地质风险的精准识别与动态管控，为构建风险识别机制提供技术支撑，对提升工程勘测设计质量与决策科学性具有重要意义。

水利工程勘测设计前期典型风险类型

地质条件不确定性风险

水利工程勘测设计前期要面对复杂地质环境造成的多重不确定性风险。复杂地质构造风险体现为断层破碎带与褶皱构造及岩溶发育区等特殊地质条件，这使得地基承载力评估变得困难且工程布置方案存在重大隐患。边坡失稳风险是因为卸荷裂隙发育与软弱夹层分布不明，传统勘探手段难以准确查明边坡岩体结构，容易引发施工期滑坡灾害。基坑坍塌风险主要集中在地基承载力不足与地下水突涌等问题上，特别是岩溶地区隐伏溶洞位置难以探明，基坑开挖过程存在突发性坍塌危险。渗流破坏风险涉及岩溶管道渗漏与绕坝渗流通道等隐患，前期勘测若未准确识别渗流路径，会导致水库蓄水后出现严重渗漏，威胁工程安全运行。

勘测数据采集与传输风险

水利工程前期勘测数据采集面临多重风险隐患。传统勘探手段因成本与工期约束，使钻孔布设密度稀疏且物探测线覆盖不全，关键风险区域容易被遗漏。数据传输碎片化问题较为突出，野外采集的地质与物探及测绘等多源异构数据缺乏统一标准，现场数据缺乏实时传输机制，数据回滞后还容易出错，难以形成完整认知体系。勘测深度不足风险表现为前期工作受预算控制，对复杂地质条件探查不充分，断层破碎带与岩溶管道及软弱夹层等隐患识别精度低，给后续设计埋下安全隐患。数据采集设备精度不足造成坐标定位偏差，影响地质界面准确判定，传统测量方法在隐蔽工程部位存在盲区，数字化采集与实时传输技术应用可有效降低此类风险，提升勘测数据质量与可靠性。

传统风险识别方法的局限性

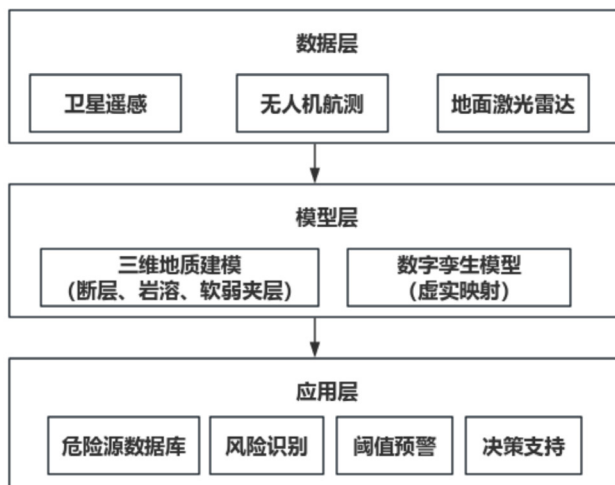
传统水利工程勘测依靠钻孔与物探及地质测绘等手段，存在数据碎片化及识别精度低等突出问题。数据碎片化体现为受勘探成本和工期限制，钻孔布置密度稀疏，地质界面形态难以完整还原，无法形成系统化的地质认知体系，关键风

险区域可能会被遗漏。识别精度不足是由于传统方法基于二维地质剖面分析，对三维空间地质结构认知能力有限，复杂岩溶与断层等地质体的空间展布特征难以准确刻画。缺少预演能力使得设计方案无法对边坡开挖与基坑降水等施工过程进行虚拟推演，后期设计变更频繁，增加工程风险与造价。数字孪生与三维地质建模等数字技术的应用为突破传统方法局限提供了技术路径。

基于数字技术的风险识别机制设计

风险识别机制总体架构与运行流程

为应对地质条件不确定性带来的风险，专门构建“数据层—模型层—应用层”三层架构的风险识别机制，具体如图1所示。数据层依靠卫星遥感、无人机航测及地面激光雷达构建天空地一体化感知网络，以此实现地质与水文等多源数据的实时采集工作。模型层把三维地质建模和数字孪生技术作为核心，将物理地质环境映射为虚拟数字模型，从而支撑断层破碎带、岩溶发育区及软弱夹层等地质风险的空间展布



来源：西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院

图1 风险识别机制总体架构

识别与态势推演。应用层集成危险源数据库，在风险指标超过阈值的情况下触发预警，其运行流程遵循“感知—建模—仿真—预警”的闭环逻辑，勘测数据经过标准化处理之后导入数字孪生模型，通过三维建模识别地质风险，预警信息实时反馈至决策终端。

数字技术驱动的机制构建方法

机制构建把三维地质建模和数字孪生技术当作核心，以此实现地质风险的精准识别与动态管控。三维地质建模运用离散光滑插值和克里金插值算法来处理钻孔、物探及遥感数据，通过拓扑型切割封闭技术生成涵盖断层、岩溶及软弱夹层等地质构造的三维地质结构模型，精确刻画地质界面形态与空间展布特征，解决传统方法地质认知碎片化和空间展布不清的问题。数字孪生技术构建物理地质环境与虚拟模型的双向映射体系，将勘测数据实时导入数字孪生模型，通过模型动态更新反映地质条件变化，实现地质信息的可视化展示与智能化分析。当实测数据与模型预测偏差超过设定阈值时，系统自动触发风险预警并生成优化建议，支撑设计方案的动态调整。该方法把传统经验驱动的风险识别转变为数据驱动的精准识别，为勘测设计前期决策提供科学依据。

数字技术在典型风险识别中的应用

地质风险识别：三维建模与数字孪生应用

面对断层破碎带、岩溶发育区及软弱夹层等复杂地质条件所带来的不确定性风险，运用空地一体化数据采集与三维地质建模技术以实现精准识别。天基平台依靠高分辨率遥感卫星来获取数字高程模型，空基平台借助倾斜摄影构建厘米级三维实景模型，地基平台采用激光雷达扫描隐蔽工程部位，结合钻孔柱状图与物探测线数据，通过GNSS与RTK定位技术统一坐标系，以此确保多源数据的精准配准。采用离散光滑插值算法和克里金插值技术构建地质数字孪生体，将地层岩性、构造产状及水文地质等属性参数进行存储，并支持对这些参数进行编辑和动态更新操作。模型会清晰标注溶洞空间位置、断层产状及地下暗河渗流路径等关键信息，通过GIS空间分析预测潜在渗漏通道与高风险区域范围，从而实现地质条件的可视化展示与智能化分析，为坝址选择、地基处理及防渗方案设计提供可靠依据。

边坡稳定性分析与开挖方量优化

某抽水蓄能电站工程区地质条件复杂，地下洞室群要穿越多条断层破碎带与软弱地层，传统勘探手段没办法准确查明地质构造三维空间展布特征，这对洞室轴线选择和支护方案设计决策造成影响。项目采用空地一体化数据采集技术，借助无人机倾斜摄影完成约20平方千米区域高精度地形测绘；结合地面激光雷达扫描获取隐蔽部位的精细数据，整合

钻孔柱状图和物探测线成果；运用离散光滑插值和克里金插值算法构建覆盖约50平方千米的数字孪生地质模型，模型精准地展现出工程区、坝址区及料场区的地质结构，清晰地标定了断层破碎带空间位置、软弱夹层分布范围及地下水富集区域特征。基于数字孪生模型开展边坡稳定性数值分析、三维开挖方量智能统计及地质风险动态评估，优化了洞室轴线布置方案和边坡支护参数设计，编制了90余张二维地质专业图件，为工程设计决策与施工组织提供了可靠的地质依据，有效降低了施工期地质风险。

基础处理方案优化与风险评估

某抽水蓄能电站工程区地质构造复杂多变，隐伏断层和岩溶发育区分布十分广泛，局部软弱夹层分布很密集。前期勘测对地质空间特征把握存在不足，尤其对岩溶管道连通性及渗流路径识别不明确，这影响到工程方案优化和投资控制。项目采用三维地质建模与数字孪生技术，整合86个钻孔、12条物探测线及大量地质测绘数据，运用克里金插值法和拓扑切割封闭技术，建立约70平方千米高精度三维地质模型。该模型精准呈现地层岩性分布、断层产状与延展特征、岩溶管道走向及连通性，明确潜在渗流通道与高渗漏风险区，构建工程区、坝址区及料场区精细地质数字孪生体。基于数字孪生模型开展岩溶渗流分析及地质风险动态评估，优化大坝基础处理方案和防渗帷幕设计参数，编制180余张高质量地质图件，三维地质建模成果在预可行性研究审查中得到专家组的高度评价，有效提高勘查设计的质量和决策的科学性，为项目的顺利实施提供坚实的地质基础保障。

结束语

基于三维地质建模与数字孪生技术的水利工程勘测设计前期风险识别机制，通过构建数据感知、三维建模及仿真预演技术体系，实现了地质风险的精准识别与动态管控。工程实践表明，该机制显著提升了地质风险识别精度与设计方案优化效率，为前期决策提供了科学依据，有效降低了工程建设风险。未来需深化人工智能与大数据技术融合应用，完善风险知识库与预警模型体系，强化多源数据协同分析能力，推动水利工程勘测设计向智能化与精准化方向发展。

作者简介：刘娜 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院

责任编辑：徐培炎 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com