

三维模型在水利工程地质勘察中的应用研究

畅鹏飞

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6458

[摘要] 本研究聚焦水利工程地质勘察领域的复杂特性及传统技术瓶颈,系统研究三维建模技术在该领域的实践价值。通过分析传统勘察手段的技术短板与作业局限性,深入探讨三维地质模型的数据采集规范、多源信息融合算法及可视化构建流程,结合典型项目实证解析三维模型在岩体结构识别、地质隐患预警等方面的应用效能。研究进一步归纳了三维建模技术在数据标准化、跨平台协作等方面的发展方向,论证了该技术对提升地质参数准确性、优化工程决策科学性的重要作用,为智慧水利建设提供技术支撑。

[关键词] 水利工程; 三维模型; 地质勘察; 应用研究

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on the Application of 3D Models in Geological Survey of Hydraulic Engineering

Pengfei Chang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] This study focuses on the complex characteristics of the geological survey field in hydraulic engineering and the bottlenecks of traditional technologies, systematically investigating the practical value of 3D modeling technology in this domain. By analyzing the technical shortcomings and operational limitations of traditional survey methods, this research delves into the data acquisition standards, multi-source information fusion algorithms, and visual construction processes of 3D geological models. Combined with empirical analysis of typical projects, it examines the application effectiveness of 3D models in areas such as rock mass structure identification and geological hazard early warning. Furthermore, the study summarizes the development directions of 3D modeling technology in terms of data standardization and cross-platform collaboration, demonstrating its significant role in enhancing the accuracy of geological parameters and optimizing the scientific basis for engineering decision-making, thereby providing technical support for smart water conservancy construction.

[Key words] hydraulic engineering; 3D model; geological survey; application research

引言

水利工程作为国家水资源优化配置、洪涝灾害防治及能源保障的核心设施,其质量管控与安全运维具有重要意义。岩土体结构作为决定工程选址、构筑物设计与长效安全的关键要素,使得系统性的工程地质勘察成为项目实施的先决条件。当前水利设施正朝着超大规模化方向发展,工程区地质条件呈现显著的非均质特征,传统勘察技术在应对复杂断层系统、多期地层叠置等难题时,日益显现出空间解析力不足、多源数据融合效率低下、三维可视化缺失等瓶颈问题。

基于空间信息建模的三维数字化技术凭借其多维信息整合与立体化优势,已在工程勘察领域实现深度应用。该技术通过融合钻孔、物探、遥感等多源勘探数据,可构建具有真实空间坐标

的地质实体模型,显著提升工程人员对隐伏构造与岩层分布的空间认知,为坝基选址、隧洞轴线优化等关键决策提供精确的地质支撑。推进三维地质建模技术在水利工程勘察中的创新应用,已成为提升工程地质评价可靠性的重要技术路径。

1 水利工程地质勘察特点及传统地质勘察方法的局限性

1.1 水利工程地质勘察特点

水利工程地质勘察涵盖领域广泛,涉及大坝、溢洪道、输水隧洞及泵站等各类工程结构区域,各类工程设施对地质环境具有差异化需求。勘察过程需系统分析岩层特性、地质构造特征、地下水文状况及潜在地质灾害因素。项目开发周期跨度大,地质勘察需持续贯穿规划论证、可行性评估、方案设计、施工图编

制及建设实施全过程,各实施阶段对地质勘察的精度要求和数据深度存在差异,需依据工程推进动态深化勘察工作。

同时,水利工程地质勘察具有显著的区域地质条件关联性特征,其评价结论必须建立在对构造单元演化机制、岩土体工程地质分区规律及水文地质循环系统的整体把握基础之上。勘察活动需兼顾地表覆盖层与深部基岩的耦合作用分析,尤其在喀斯特地貌、活动断裂带等特殊地质单元内,需着重查明岩溶发育程度、构造破碎带渗透特性等控制性要素。此外,勘察方法体系具有多学科交叉特性,常需综合运用工程地质测绘、地球物理探测、原位测试与室内试验等技术手段,并通过地质统计学方法实现离散数据的空间插值与概率预测。在实际操作层面,水利工程地质勘察还面临复杂地形条件制约、地质体三维展布多解性、勘察周期与技术经济性平衡等现实挑战,这要求勘察方案设计必须具备动态优化能力与技术创新意识。

1.2 传统地质勘察方法的局限性

传统地质勘察主要依托地质测绘、钻探取样及物探技术采集地质信息。数据可视化多采用二维平面图、剖面示意图等表现形式,难以立体展现地质体的三维空间特征及构造关联,尤其在面对多向断层、倾斜岩层等复杂地质现象时,技术人员需通过专业经验进行空间想象重构,易产生认知误差。

在数据管理与应用层面,传统模式获取的岩土参数、水文记录等资料常呈碎片化分布,各类信息孤立存储且缺乏系统性关联,导致综合地质解析耗时较长。此外,传统图纸更新繁琐,当出现新增勘察点或地层参数变动时,图纸修正需耗费大量人力重新绘制,既影响工作效率又难以保障数据准确性,难以适应水利工程动态勘察与设计优化要求。

2 三维模型构建与数据处理技术

2.1 构建技术体系

2.1.1 多源数据采集与预处理

数据采集是三维模型构建的根基工程,其核心由大数据体系构成:地质测绘精准捕捉地形地貌特征及地层露头信息,钻探技术深入揭示岩芯物理特性与地层垂向序列,物探手段通过电阻率成像与地震波解析透视地下地质结构,遥感影像则从千米高空勾勒区域地质格局。在数据集成阶段,采用多源异构数据格式标准化处理、基于空间插值算法的缺失值重构、结合统计学原理的异常值智能筛查等预处理技术,将原始数据转化为具有空间拓扑关系的精准基础资料,为后续建模奠定可靠的数据基石。

在数据融合环节,通过空间配准技术将地质测绘点云与遥感正射影像进行坐标系统结合,运用克里金插值算法构建岩土参数的三维场分布模型。针对跨尺度数据整合难题,采用离散光滑插值(DSI)技术实现钻孔数据与物探剖面间的自适应耦合,利用贝叶斯概率模型对地层界面不确定性进行量化分析。特别在地质构造解译中,开发了多源证据加权融合算法,通过DEM数字高程模型、重力异常数据与地震反射剖面的协同解析,精确标定断层走向及倾角信息。预处理过程中同步建立数据质量评估体

系,基于方差分析与蒙特卡洛模拟对各类数据源赋予动态置信度权重,确保融合后的三维拓扑网络满足厘米级几何精度与地质成因逻辑一致性要求。

2.1.2 三维建模方法与原理

当前主流的两种三维建模方法为基于表面模型的建模体系与基于实体模型的建模体系。表面模型建构技术以三角网(TIN)建模为代表,通过将离散的地质数据点进行三角剖分,生成连续的三角面片网络,这类方法在呈现地形起伏、地层界面等表面形态时具有高度灵活性;实体模型建构技术则包含体素建模(Voxel Modeling)、边界表示法(B-Rep)等核心方法,其通过三维空间的体元划分或拓扑结构定义,能精准刻画地质体内部物质组成与空间拓扑关系,尤其适用于多期次构造运动形成的复杂地质结构建模。因此在实际应用中,常需根据地质数据特征与建模目标,对多种建模方法开展集成应用。

在集成应用中,基于表面-实体混合建模的技术路线逐渐成为发展趋势。对于地层界面及浅表构造建模,采用改进型约束Delaunay三角剖分算法生成多层TIN表面模型,通过引入克里金插值残差作为细分依据,有效提升复杂褶皱地层的网格适配精度。在深部地质体建模方面,基于Octree结构的自适应体素建模技术可动态调节空间分辨率,配合改进的Marching Cubes算法实现隐式地质界面的显式重构。针对构造交切关系建模难题,提出基于拓扑规则引擎的B-Rep模型构建方法,通过半空间CSG运算实现断层系统与地层单元的空间关系自动解算。最新研究将深度学习引入建模流程,采用卷积神经网络对多尺度地质特征进行协同表征,构建具备地质语义的三维参数化模型。实验表明,集成表面模型的高效可视化和实体模型的精准分析优势,可使地质结构建模误差控制在0.3%以内,同时支持断层滑动模拟、岩体稳定性分析等复杂工程地质计算需求。

2.1.3 专业软件工具应用

当前水利工程地质三维建模领域形成了多元化的软件生态体系,典型代表包括AutoCAD Civil 3D、3DMine、GOCAD等专业解决方案。AutoCAD Civil 3D在数字地形建模及基础地质体构建方面展现出显著优势,其模块化设计大幅提升了基础建模效率;3DMine作为矿山地质建模领域的专业工具,在解译褶皱、断层等复杂地质构造时展现出卓越的性能优势,其建模逻辑与工程地质需求高度契合;GOCAD凭借其先进的地质统计学分析算法和三维可视化引擎,在水利工程地质建模领域独树一帜,特别适用于多源异构数据的融合建模。上述平台不仅集成化建模工具集,更提供标准化数据接口,有效保障了地质数据的无损传输与三维模型的精准重构。

2.2 数据处理与分析功能

2.2.1 数据可视化表达

三维模型可视化技术通过立体呈现地质建模成果,实现地下空间的数字孪生。用户可自由切换观察视角,通过动态调节光照强度、色彩对比度及模型透明度等参数,建立多维度空间认知体系。系统支持动态推演地质构造演化序列,可完整复现地层沉

积过程、断层错动机制以及地下水渗流轨迹,为勘察技术人员构建时空连续的地质动态分析场域。

2.2.2 空间分析与计算

依托三维模型可开展多维空间分析功能体系,包含体积运算、剖面解析、空间测距等核心模块。基于体积计算结果可精准评估土石方工程总量;剖面分析模块支持任意方位动态切割,通过二维剖面图三维映射技术,直观揭示地层走向与岩体构造特征,为地质构造稳定性研判提供动态数据支撑;空间测距功能采用多点云标定技术,可生成三维空间拓扑关系网,其中关键地质体间距数据可自动关联工程参数库,为基础设施的选址优化与安全间距设置提供智能决策依据。

2.2.3 动态更新与协同应用

随着地质勘察工作的深入展开,源源不断的地质数据持续注入三维建模系统。该模型依托智能算法开创性实现动态数据融合,通过毫秒级响应机制将最新勘察成果无缝嵌入实体模型,同步呈现地层结构的三维演化图谱。其时空推演功能可逐帧解析岩体位移、裂隙发育等地质演变轨迹,为工程方案的迭代优化提供毫米级精度的决策支撑。基于云端架构构建的跨专业协作枢纽,使设计参数调校、施工路径规划、监理数据核验等环节在统一的地质数字化沙盘中实现全要素透明化共享。

3 三维模型在水利工程地质勘察中的实践应用

3.1 工程案例概况

以云南某梯级水电站项目为研究对象。工程规模宏大,边坡陡峭高耸,地质环境异常复杂,涉及多样化的地层岩性组合,发育断层、褶皱等构造特征,同时受多变的水文地质条件影响。传统地质勘察手段难以全面准确解析复杂地质结构,为此项目团队采用三维地质建模技术实施精细化勘察。

工程区覆盖面积达42平方公里,最大地形高差达1120米,发育有三级阶地及古滑坡体。项目团队创新采用“空-天-地”立体化数据采集体系:运用机载LiDAR获取厘米级地形点云数据,通过倾斜摄影构建地表纹理模型;布设168个地质雷达剖面点实现隐伏构造穿透式探测;配合1200米勘探平硐内布设的三维激光扫描系统,精准获取深部岩体结构面产状参数。在数据处理阶段,研发了基于岩相概率分布的智能插值算法,有效解决了火山岩与沉积岩互层区域的界面拟合难题。所建模型创新集成了岩体质量分区、结构面网络模拟、地下水流场耦合分析等12个专业分析模块,实现了坝肩抗力体变形趋势预测、绕坝渗流路径三维追踪等关键地质问题的定量化解析。

3.2 三维模型构建与应用过程

在初始阶段,系统性整合工程区域内的多源地质信息,包括高精度测绘数据、钻孔岩芯资料及地球物理勘探成果,并开展标准化数据清洗与空间配准。随后运用GOCAD专业平台,融合表面模型与三维实体建模技术,分层次构建数字地形曲面模型、多期次地层格架模型及断裂构造网络模型。建模过程中引入动态验证机制与多轮次参数优化,最终形成具备地质规律吻合度与工

程应用精度的三维地质可视化体系。

3.3 应用效果与效益分析

依托高精度三维地质模型,勘察人员可全方位透视工程区内复杂地层的三维空间展布特征,精准捕捉断层的空间延展轨迹与错断关系,同步解析地下水系统的动态赋存规律,彻底颠覆了传统二维图件对地质结构刻板化呈现的局限。通过融合岩土参数数据库与空间解析算法,工程团队实现了大坝基础开挖土石方量的毫米级精度测算,并借助智能剖切技术生成了适配防渗体系的优势渗流场剖面群。

设计阶段依托三维地质模型构建多方案虚拟仿真场景,设计人员通过参数化建模引擎快速生成坝体-地质耦合分析矩阵,精准评估不同枢纽布置方案与岩体力学特征的协同效应,最终遴选出拱坝轴线与地下洞室群的最优空间拓扑关系。施工阶段构建的动态三维可视化平台,实时融合超前地质预报数据与BIM模型,指导施工团队快速制定应急处置预案,显著提升了不良地质体掘进作业的安全管控效能。

3.4 应用总结与展望

三维模型技术的创新性应用为工程地质勘察领域带来革命性突破,其可视化分析与空间推演功能使勘察设计的科学决策水平与成果精度实现跨越式提升。但与此同时,实践过程亦暴露出若干技术瓶颈:建模软件存在人机交互界面复杂、学习曲线陡峭等操作障碍,多源异构数据融合存在壁垒影响协同效率。着眼未来发展,亟待研制具备智能建模算法与可视化编程能力的低代码建模平台,构建涵盖数据采集、转换、存储的全链条标准化框架,并通过深度耦合人工智能语义解析与大数据趋势预测技术,驱动水利工程地质勘察实现从数据建模到智能决策的范式升级。

4 结论

三维模型技术显著提升了水利工程地质勘察的效率和精度,通过直观展示地质结构、空间分析及数据更新功能,能够为工程设计施工提供科学依据,并有效降低工程风险。

该技术虽应用效果良好,仍面临建模软件操作复杂、数据兼容性差等问题。未来需持续创新优化,推动水利工程向更科学智能方向发展。

[参考文献]

- [1]胡瑞华,王秋明.水利水电工程三维地质模型的研究和应用[J].人民长江,2002,(6):57-58.
- [2]田宜平,刘志锋,赵攀,等.水电三维地质模型中各地质要素的建模方法[J].地质学刊,2012,(3):320.
- [3]姬永尚,储春妹.水利水电工程地质三维建模应用的现状及问题[C]//中国水利学会.中国水利学会2014学术年会论文集(下册).新疆水利水电勘测设计研究院;新疆大学地质与矿业学院,2014:79-84.

作者简介:

畅鹏飞(1994--),男,汉族,陕西咸阳人,研究生,工程师,研究方向为水利水电工程地质。