

三维地质建模技术在岩土工程勘察成果可视化中的应用

马 飞

云南省城乡规划设计研究院 云南 昆明 650228

摘 要：为解决传统岩土工程勘察二维成果信息失真、可读性差、数据利用率低的问题，本文聚焦三维地质建模可视化技术，系统梳理显式、隐式及混合建模核心技术体系，阐述数据预处理、模型构建、精度优化等全流程关键环节。结合多项工程实例验证技术应用成效，分析当前建模精度不足、数据融合困难等现存瓶颈，结合大数据与数字孪生技术，展望标准化、智能化、动态化的行业发展趋势，为岩土勘察数字化升级提供参考。

关键词：三维地质建模技术；岩土工程；勘察成果可视化；应用

引言：传统岩土工程勘察依托二维图纸呈现地质信息，存在空间信息碎片化、立体结构表达模糊、成果解读门槛高的弊端，难以适配现代复杂岩土工程的设计与施工需求。随着数字化工程建设发展，三维地质建模可视化技术成为岩土勘察转型升级的核心方向。为明确该技术的应用价值与发展潜力，本文依托主流建模技术与工程实践，探究其可视化实现逻辑、应用优势与现存问题，旨在推动勘察成果数字化、精准化、可视化落地应用。

1 三维地质建模与岩土勘察可视化核心理论与技术体系

1.1 岩土工程勘察成果可视化基础理论

(1) 岩土工程勘察核心数据包括定性（岩性、风化）、定量（物理力学参数、标贯击数）及空间数据（钻孔坐标、地层标高），具多源、异构、小样本且空间分布不均特征。(2) 地质空间信息可视化基于三维坐标映射与属性融合，通过图形学将地质体边界、结构及物性参数转为交互视觉表达，关键在于准确还原空间形态与属性分布规律。(3) 勘察成果数字化可视化评价标准涵盖几何精度（模型与实测误差控制）、属性一致性（插值与样本吻合度）、视觉真实感（界面平滑与层序合理）及实时交互性能四个维度。

1.2 主流三维地质建模技术分类与原理

(1) 显式三维地质建模技术基于离散的三角网或网格曲面，通过人工交互或自动追踪方式精确构建地层界面和断层曲面，适用于钻孔密集、地质构造清晰的工程场地，但对复杂倒转褶皱等处理困难^[1]。(2) 隐式三维地质建模技术以数学插值函数（如径向基函数、克里金

法）为基础，将地质体表达为标量场的等值面，能够自然处理复杂拓扑关系，建模效率高且结果平滑，适用于数据稀疏或构造复杂区域。(3) 混合建模技术融合显式建模的精确控制能力与隐式建模的数学拟合优势，在关键界面采用显式精确定位、在复杂区域采用隐式插值补充，兼顾模型精度与复杂地质适应性。

1.3 三维可视化核心支撑技术

(1) 多源勘察数据预处理与标准化技术涵盖数据格式统一、坐标系统转换、异常值剔除及缺失值补全等环节，旨在消除数据异质性，构建建模引擎可识别的标准化输入数据集。(2) 空间插值与地质体拟合技术通过反距离加权、普通克里金、径向基函数等算法实现离散样本到连续空间的属性推演，结合地质统计学方法量化插值不确定性，确保地质体模型的空间合理性与统计可靠性。(3) 模型轻量化与实时渲染技术通过网格简化、LOD 分层、纹理压缩及 GPU 并行计算等手段大幅降低模型数据量，在保障视觉保真度的前提下实现大规模地质模型的高效加载与流畅交互。

1.4 主流建模与可视化平台对比分析

(1) GOCAD 以地质曲面建模见长，支持复杂构造和不确定性分析；BIM 平台侧重岩土结构参数化与全生命周期管理；GIS 平台突出空间分析与地表-地下集成展示，各平台功能定位差异显著。(2) GOCAD 在地质界面精细雕刻与复杂构造处理上优势明显，但 BIM 在属性信息挂接和工程协同方面表现突出；GIS 虽便于宏观决策支持，但在深部地质体三维拟合精度上相对不足。(3) 适配岩土工程勘察的平台选型应遵循“项目主导、数据适配”原则：场地条件简单且注重工程属性管理时可优

先选择 BIM 类平台；地质构造复杂、建模精度要求高时以 GOCAD 等专业地质建模软件为核心工具；需兼顾区域地质背景与工程场地联动分析时则宜采用 GIS 与专业地质建模软件协同的融合方案。

2 基于三维地质建模的岩土勘察可视化实现流程与关键环节

2.1 岩土工程勘察多源数据采集与预处理

(1) 钻孔数据、原位测试数据、室内试验数据采集涵盖钻孔坐标、孔口标高、分层深度、岩性描述、标贯击数、动探指标、土工试验物理力学参数及水文地质数据，形成涵盖几何、属性和文本的多模态原始资料集，为后续建模提供基础数据支撑。(2) 勘察数据坐标统一、去噪与标准化处理通过坐标转换参数实现多坐标系归一化，采用统计滤波剔除明显异常值，对缺失数据借助邻近钻孔或经验公式合理插补，统一数据格式与字段命名规范，确保多源数据在空间基准和属性维度上具有可比性^[2]。(3) 地质构造、地层边界等辅助数据整合修正以区域地质图、物探解译成果及已有相邻工程资料为参照，对钻孔揭示的地层界线进行合理外延与调整，消除钻孔间地层对比矛盾，使模型初始构架符合区域地质规律。

2.2 三维地质模型构建完整流程

(1) 地质数据库搭建与参数赋值依据标准化数据表结构设计钻孔信息表、地层分层表、试验参数表及地质构造表，通过唯一标识码实现多表关联，并采用地质统计学方法将离散物理力学参数赋值至各地质单元体，形成属性完整、结构清晰的三维地质数据库。(2) 地层、断层、褶皱等地质体模型构建基于地层顶底板高程数据，依次生成各沉积地层界面，结合隐式建模技术拟合标准层序三维实体模型；对于断层和褶皱等复杂地质构造，采用显式曲面雕刻与块体切割相结合的方法进行专项建模，确保构造形态精确可控。(3) 特殊不良地质体精细化建模处理针对溶洞、采空区、软弱夹层、透镜体等特殊地质体，首先依据钻孔揭示及物探异常圈定其空间分布范围，然后采用局部加密网格与布尔运算技术实现异形体独立建模，并嵌入主地层框架形成完整地质结构模型^[3]。

2.3 勘察成果三维可视化表达实现

(1) 地层结构三维可视化直观呈现采用多色分层渲染与透明化显示技术，结合任意角度剖切、爆炸视图和虚拟漫游功能，使工程人员能够直观把握地层空间展布规律、厚度变化及构造相互关系，大幅提升勘察成果解

读效率。(2) 岩土参数属性可视化映射与展示基于各岩土单元的物理学参数统计值，通过颜色渐变映射、等值面生成和体绘制技术，将承载力、压缩模量、内摩擦角等关键指标直观投影于三维地质模型之上，实现地质结构与工程属性的协同可视化表达，为设计决策提供直接依据。(3) 勘察剖面、钻孔信息联动可视化表达实现三维地质模型与原始钻孔柱状图、地质剖面图的动态联动，任意点击钻孔即可弹出完整试验资料卡片，在三维空间中同步显示勘探点位置、轨迹及对应地层信息，保障模型成果可溯源、可检验。

2.4 模型精度验证与优化校正

(1) 三维地质模型精度检测方法采用预留钻孔交叉验证、模型界面与实测地层标高偏差统计分析、以及各地质体体积与理论估算值对比等定量手段，辅以专家经验定性评判，从几何形态和属性场分布两个维度构建系统化精度检测方法体系。(2) 基于实测数据的模型误差校正当新增钻孔或补充勘探资料揭示模型局部偏差超出容许范围时，将新数据纳入地质数据库重新执行插值计算，动态更新修正模型，针对持续偏差区域实施迭代校准，确保模型具备持续动态更新能力，始终贴合工程实际^[4]。(3) 复杂地质条件下模型优化策略针对地层尖灭、透镜体发育、构造强烈等复杂情形，采用逐层约束插值、多级网格加密及局部重剖分等技术手段，在不破坏整体模型稳定性的前提下重点优化局部形态，确保模型在复杂地质条件下仍保持合理的几何精度与工程可用性。

3 工程应用、现存问题与发展展望

3.1 工程实例应用分析

(1) 项目工程概况与勘察工作概况以北京市某再生水厂二期深大基坑工程为典型实例，工程依托 EngeoCAD 勘察软件的开放环境定向开发钻探数据接口，基于钻探数据与试验数据构建地质体三维地质结构模型和高精度属性模型。以某地铁站地下空间开发项目为例，通过引入 Terzaghi 承载力公式和 Peck 分层勘探经验公式构建参数筛选与勘探密度优化模型。(2) 三维可视化勘察成果应用落地过程以杭州市地铁项目为例，通过攻克数据多元融合、复杂地质体建模、BIM 与 GIS 融合等关键技术，整合多源数据构建城市级三维地质大数据平台，实现了多参数查询统计功能。北京市再生水厂项目经实际开挖地层验证，属性模型识别的不良地层空间分布域与实际地层具有较高吻合度。(3) 与传统二维勘察成果的应用效果对比经现场计量验证，三维地质模型解析的填土方量与传统方法估算的填土方量相对误差分别为

3.85%和9.84%，三维模型计算精度优势明显。优化后勘察钻孔数量减少23%，关键土层参数误差率由12.5%降至4.8%，工期缩短15天。

3.2 三维可视化技术在岩土工程中的应用价值

(1) 提升勘察成果直观性与数据利用率三维地质模型实现了地质体空间形态与属性分布的全方位可视化表达，改变了传统二维图纸存在空间信息丢失、失真等问题，大幅提升了离散钻孔数据的综合利用率与成果可读性。(2) 辅助工程设计、风险预判与施工决策以安庆市某隧道工程为试点，依托 Bentley 图形平台 MicroStation 和 SQLserver 数据库开发的工程三维地质系统，直观清晰地展示了项目区地质情况，为设计、施工、运维等全生命周期提供决策支撑。(3) 实现勘察成果数字化留存与复用通过构建标准化的三维地质数据库与模型成果库，实现勘察数据的长期保存、动态更新与多项目复用，避免了重复勘察的资源浪费。

3.3 当前技术应用存在的问题与瓶颈

(1) 复杂地质建模精度不足、细节缺失问题目前三维地质建模技术在岩土工程勘察中的应用大多停留在“可视化”阶段，难以充分发挥三维地质模型的优势。受限于工程钻孔数据的稀疏性、不规则性，单一方法在地质建模中往往难以达到理想精度。传统建模方法多依靠人工交互，难以满足复杂地质环境下对精细结构表达和实时更新的需求。(2) 多源数据融合难度大、模型兼容性较差钻探数据跨平台共享困难，地下建模多基于稀疏钻孔与物探数据插值，易受数据密度限制导致隐伏构造误判，尤其在岩溶发育区、断裂带等复杂地质区域存在显著建模误差^[5]。(3) 建模效率低、规模化应用成本偏高当前三维地质建模存在数据处理效率低、自动化程度不足等问题，加之专业软件采购与培训成本高昂，限制了技术在中小型勘察项目中的规模化推广。

3.4 技术发展趋势与未来展望

(1) 大数据、人工智能与智能建模融合发展三维地质建模已从半智能化阶段发展到机器学习和深度学习驱动的新阶段。地质统计+AI智能融合建模技术已成为地

质非均质性建模领域的研究热点，人工智能、大数据等新兴技术正驱动地矿空间智能建模快速发展。(2) 数字孪生驱动的勘察可视化动态更新高精度三维地质建模是数字孪生技术快速发展的重要基础。数字孪生通过持续获取实时数据自动更新模型结构、状态变量和参数，数字钻孔技术可实现钻孔信息采集、传输、存储、管理全过程数字化与三维可视化建模，推动地质模型从静态展示向动态演化跃升。(3) 三维勘察可视化全流程标准化、产业化发展随着贵州省《1:50 万三维地质格架建模技术规范》(DB52/T1802-2024)等地方标准的出台，三维地质建模与可视化正从技术探索走向标准化、产业化发展道路，未来将在地质勘察及工程建设领域发挥更大作用。

结束语

综上，三维地质建模可视化技术有效弥补了传统岩土勘察的技术短板，可精准还原地质结构与岩土参数，提升勘察精度与工程决策效率，具备极高工程实用价值。当前技术仍存在复杂地质建模精度有限、规模化应用成本偏高问题。未来依托 AI、大数据及数字孪生技术，推动建模流程标准化、智能化升级，可彻底实现勘察成果动态复用，助力岩土工程行业数字化高质量发展。

参考文献

- [1] 李萌,王勇,张健.基于多源勘察数据融合的三维地质可视化建模研究[J].岩土工程学报,2023,45(S1):186-192.
- [2] 陈永吉,王璐,李想.基于三维地质建模的复杂场地岩土工程勘察成果优化表达[J].中国地质,2023,50(06):1210-1218.
- [3] 王希元.基于三维地质建模的岩土工程勘察可视化技术应用[J].工程技术研究,2025,10(08):134-136.
- [4] 张宇,刘鑫.BIM结合三维地质建模在岩土工程勘察中的可视化应用[J].施工技术,2024,53(12):98-102.
- [5] 吴浩,陈思远.复杂工况下岩土工程勘察三维可视化建模精度控制技术[J].地质与勘探,2024,60(04):812-819.