

# 三维地质建模技术在岩土工程勘察中的应用研究

孙佳锐

天津市北洋水运水利勘察设计院有限公司 天津 300460

**摘要：**三维地质建模技术融合地质学、计算机图形学与空间插值理论，可精准还原地下岩土体空间分布与属性特征。本文系统阐述了该技术的理论基础与关键技术，包括数据采集预处理、地层界面建模及地质体实体建模等核心环节，并结合基坑、桩基、隧道、边坡等岩土工程勘察场景分析了其应用价值，同时探讨了建模精度评价与不确定性分析方法。研究表明，该技术能有效弥补传统二维勘察的空间表达局限，提升勘察精细化水平与工程风险预判能力。

**关键词：**三维地质建模；岩土工程勘察；地质可视化

引言：传统岩土工程勘察成果多以二维图纸表达，存在空间关联性差、读图难度大等局限，难以满足复杂工程对地质条件精细化认知的需求。三维地质建模技术依托多学科融合理论，将离散勘察数据转化为连续三维数字化地质模型，实现地下地质环境的可视化表达。本文围绕该技术的理论基础、关键技术及在基坑、桩基、隧道、边坡等工程中的应用展开研究，并探讨精度评价与不确定性分析方法，旨在为岩土工程勘察数字化转型提供理论与技术参考。

## 1 三维地质建模技术理论基础

三维地质建模是依托地质学、岩土工程、计算机图形学与数学建模多学科融合形成的现代化地质分析技术，核心理论旨在精准还原地下岩土体的空间分布形态、属性特征及地质构造规律，打破传统二维地质图纸的平面表达局限。其基础理论主要包含地质成因理论、空间插值理论、三维拓扑几何理论三大核心体系，地质成因理论为建模提供地层沉积、构造运动、岩土演化的底层逻辑，保障建模结果符合实际地质规律。空间插值理论通过离散勘察数据推演连续地质界面与岩土属性分布，是填补勘察数据空白区域的关键支撑<sup>[1]</sup>。三维拓扑几何理论负责构建地质体空间拓扑关系，明确地层、断层、褶皱等地质要素的空间衔接与约束关系。同时，该技术依托数字地质理论，将地质体的几何形态、物理力学参数、地质边界条件转化为数字化信息，实现地下地质环境的可视化、数字化与信息化表达，为后续工程勘察分析、地质风险预判、工程设计优化提供坚实的理论支撑，是岩土工程数字化发展的核心基础技术。

## 2 三维地质建模关键技术

### 2.1 数据采集与预处理技术

数据采集与预处理是三维地质建模的首要前置工序，直接决定模型的精准度与可靠性，是整个建模体系

的基础核心环节。数据采集阶段需全面收集场地各类地质勘察资料，核心包含工程钻探数据、原位测试数据、室内岩土试验数据、地质测绘数据，同时整合场地地形地貌数据、区域地质构造资料、物探探测数据等多维度信息，全方位覆盖场地地质特征。其中钻探数据精准提供地层埋深、岩土分层、岩性特征等核心参数，试验数据补充岩土物理力学性能指标，物探数据可填补钻探点位间的空白区域数据。数据预处理阶段需对原始数据进行系统性清洗、筛选、校正与标准化处理，剔除异常误差数据、修正测量偏差数据、补充缺失关键数据。同时按照建模规范统一数据格式、坐标系统与参数标准，完成数据分类归档与结构化整理，消除多源原始数据的差异性与杂乱性，规避因数据误差、格式混乱导致的建模失真问题，为后续地层重构、实体建模、数据融合提供精准、规范、有效的基础数据支撑。

### 2.2 地层界面建模技术

地层界面建模技术是三维地质建模的核心核心环节，主要用于精准重构场地各地层分界面、构造断裂面、风化界面等关键地质界面的空间形态，是还原地下地层结构的关键技术。该技术以预处理后的钻探分层数据、地质测点数据为基础，结合区域地质演化规律与地层沉积特征，采用克里金插值、反距离加权插值、样条曲线拟合等高精度空间插值算法，对离散的界面高程数据进行连续化拟合处理。建模过程中需严格遵循地层叠置规律与地质构造逻辑，精准识别地层超覆、剥蚀、断层错断、褶皱起伏等复杂地质现象，修正插值运算产生的界面畸变问题，保障各地层界面的连续性与真实性。针对岩溶、破碎带、软弱夹层等特殊复杂地层，需结合精细化测点数据优化界面拟合精度，避免界面形态简化失真。通过该技术可精准构建多层有序的三维地层界面模型，清晰呈现各地层的空间起伏、厚度变化、边界范

围,为后续地质体实体建模提供精准的界面约束框架,是保障整体地质模型贴合实际场地条件的关键<sup>[2]</sup>。

### 2.3 地质体实体建模技术

地质体实体建模技术是在精准地层界面模型的基础上,实现从二维界面框架到三维实体地质模型转化的核心技术,可完整构建具备空间体积、属性特征的地下岩土实体结构。该技术依托地层界面的空间约束关系,采用四面体网格、六面体网格、不规则三角网格等多元网格剖分方式,对各地层、地质构造单元进行实体填充与拓扑构建,形成封闭、完整、无重叠的三维地质实体模型。建模过程中需严格遵循地质拓扑规则,精准区分不同岩性地层、构造体、不良地质体的空间边界,清晰划分填土、粉质黏土、砂土、岩层等不同岩土单元,同时精准刻画断层、溶洞、软弱夹层等特殊地质体的实体形态。针对复杂场地地层交错、构造叠加的工况,通过自适应网格优化技术调整网格密度,重点加密工程核心区域网格,兼顾模型精度与运算效率。

## 3 三维地质建模在岩土勘察中的应用场景

### 3.1 场地岩土条件可视化

场地岩土条件可视化是三维地质建模在岩土勘察中最基础、最广泛的应用,彻底解决传统二维地质图纸表达抽象、空间关联性差、读图难度大的问题。传统勘察成果依靠多张平面图纸、剖面图纸拼接展示地质条件,难以直观体现地层空间起伏、岩土分布规律与不良地质体的空间位置,极易出现读图偏差与认知漏洞。三维地质建模可整合场地全部勘察数据,构建全场地三维数字化地质模型,直观立体展示场地地形地貌、地层分层、岩土岩性变化、地下水分布、断层及溶洞等不良地质体的空间分布特征。工作人员可通过模型多角度旋转、剖切、缩放查看,精准掌握任意位置的地层结构、岩土厚度、地质属性,实现地下地质环境的透明化展示。同时模型可联动展示岩土物理力学参数的空间分布,实现几何形态与属性信息的一体化可视化。

### 3.2 基坑工程勘察应用

在基坑工程岩土勘察中,三维地质建模技术可实现基坑区域地质条件的精细化分析,针对性解决基坑工程地质风险复杂、变形控制要求高的勘察难点。基坑工程开挖深度大、受地层变化与地下水影响显著,传统勘察难以精准预判基坑周边地层起伏、软弱夹层分布、地下水埋深变化等关键条件。通过三维地质建模可精准还原基坑开挖范围内及周边区域的地层结构、岩土属性、地下水分布、不良地质体位置,清晰展示基坑侧壁、基底的岩土分布特征与地质薄弱区域。基于模型可精准提取

基坑各区域地层厚度、岩土承载力、渗透系数等关键参数,为基坑支护结构选型、开挖坡度设计、降水方案编制、抗浮设计提供精准地质依据。同时可提前识别基坑开挖过程中可能出现的流沙、管涌、边坡失稳、基底隆起等地质风险,预判复杂地层对基坑施工的不利影响。相较于传统勘察,该技术可大幅提升基坑地质勘察的精细化程度,减少勘察盲区,有效规避因地质认知不足导致的基坑设计不合理、施工坍塌、渗水等安全隐患。

### 3.3 桩基工程勘察应用

桩基工程对地基岩土条件精度要求极高,三维地质建模技术可精准服务桩基工程勘察工作,为桩基设计、选型、施工优化提供核心地质支撑。传统桩基勘察仅依靠离散钻探点位数据判断地层分布,难以精准预判桩位区域地层起伏、持力层厚度变化、软弱土层分布情况,易出现桩基承载力不足、桩长设计偏差等问题。通过三维地质建模可构建桩基施工区域精细化地质模型,精准还原各桩位对应的地层结构、持力层埋深、岩层起伏、软弱夹层及空洞分布特征,清晰展示桩基穿越的各层岩土属性与厚度参数<sup>[3]</sup>。工作人员可依托模型精准筛选优质桩端持力层,科学确定桩基有效桩长、桩基间距、单桩承载力设计参数,优化桩基布置方案,避免桩长过长或过短、桩基布置不合理等问题。同时可精准识别桩位区域的不良地质问题,提前预判桩基施工中可能出现的塌孔、沉渣过厚、桩端悬空等风险,为桩基施工工艺优化、风险防控提供数据支撑,有效提升桩基工程勘察质量与设计施工的精准性、安全性。

### 3.4 隧道工程勘察应用

隧道工程属于地下线性隐蔽工程,地质条件复杂多变,三维地质建模技术可有效解决隧道勘察中地质预判难度大、线性地层变化复杂的行业痛点。隧道施工穿越区域长、地层交错频繁,常遇到断层破碎带、岩溶洞穴、软弱围岩、地下水富集区等复杂地质体,传统二维勘察难以精准展现隧道全线的地质变化规律。通过三维地质建模可沿隧道线路构建连续完整的三维地质模型,精准还原隧道轴线及两侧影响范围内的地层分布、地质构造、不良地质体空间位置与规模、地下水富集区域。可直观展示隧道掘进段的围岩等级分布、岩土力学参数变化,精准预判掘进过程中可能出现的塌方、涌水、突泥、围岩变形等地质灾害风险。基于模型可分段精细化分析隧道各区段地质条件,为隧道围岩支护设计、施工工法选择、风险分级管控、专项防护方案编制提供精准的勘察数据支撑。

### 3.5 边坡工程勘察应用

边坡工程稳定性受地层结构、岩土属性、地质构造、地下水等多重因素影响,三维地质建模技术可实现边坡地质条件的全方位精细化勘察分析。传统边坡勘察多采用局部剖面探测,难以全面掌握边坡整体地层分布、岩土分层、结构面走向与倾角、软弱结构面空间延伸特征,无法精准预判边坡滑移风险。借助三维地质建模技术可构建边坡整体三维地质模型,完整还原边坡地形地貌、地层结构、岩土体空间分布、节理裂隙及软弱结构面的延伸范围,同时精准展示边坡区域地下水分布与渗透特征。通过模型可精准分析边坡潜在滑移面位置、岩土体稳定性参数,量化判断边坡整体及局部失稳风险,精准识别边坡坍塌、滑坡、崩塌等地质隐患区域。依托建模成果可针对性制定边坡支护、锚固、排水、削坡减载等防护方案,为边坡工程勘察评级、稳定性验算、治理方案优化提供精准的数字化依据,有效提升边坡地质风险预判能力,保障边坡工程施工及运营阶段的整体稳定性与安全性。

#### 4 三维地质建模的精度评价与不确定性分析

##### 4.1 建模精度评价方法

建模精度评价方法是量化判定三维地质模型真实性与准确性的标准化技术手段,通过多维度、多指标的量化分析,科学界定模型的精度等级与工程适用价值。当前行业通用的精度评价方法主要包含测点对比法、剖面校验法、误差统计分析法与工程实测验证法四类核心方式。测点对比法将模型模拟的地层埋深、界面高程、岩土属性参数与实际钻探、原位测试测点数据进行逐一比对,计算单点误差值,直观判断模型局部精度。剖面校验法通过截取模型任意地质剖面,与实际勘察剖面图纸、现场揭露地质情况对比,校验地层结构、构造形态的整体拟合度。误差统计分析法通过均值误差、均方根误差、相对误差等统计指标,量化分析模型整体误差水平,判断建模数据与算法的合理性。工程实测验证法依托施工开挖、桩基成孔、隧道掘进等现场实测数据,验证模型预测地质条件的准确性。

##### 4.2 不确定性分析

三维地质建模的不确定性贯穿数据采集、处理、建

模、推演全流程,是影响模型精度与工程应用效果的重要因素,需开展系统性分析与管控。建模不确定性主要来源于三大核心维度,首先是原始数据不确定性,受勘察点位密度有限、仪器测量误差、野外勘察人为偏差影响,离散勘察数据无法完全覆盖复杂地质区域,存在数据缺失与测量误差。其次是建模算法不确定性,不同空间插值、网格剖分算法的拟合逻辑存在差异,对复杂地层、突变地质构造的拟合适配性不同,易产生算法拟合偏差<sup>[4]</sup>。最后是地质推断不确定性,地下地质条件具备隐蔽性、随机性与复杂性,地层相变、微小构造、岩土属性非均匀分布难以完全精准预判,人工地质推断存在主观偏差。上述不确定性会导致模型地层界面、岩土属性、地质构造存在细微偏差,影响工程参数提取与风险预判精度。通过不确定性分析可明确各类误差的影响权重与分布规律,针对性采取加密勘察点位、优化建模算法、修正地质推断结论等措施,有效降低建模不确定性,提升模型工程应用的稳定性与可靠性。

#### 结束语

传统岩土工程勘察成果多以二维图纸表达,存在空间关联性差、读图难度大等局限,难以满足复杂工程对地质条件精细化认知的需求。三维地质建模技术依托多学科融合理论,将离散勘察数据转化为连续三维数字化地质模型,实现地下地质环境的可视化表达。本文围绕该技术的理论基础、关键技术及在基坑、桩基、隧道、边坡等工程中的应用展开研究,并探讨精度评价与不确定性分析方法,旨在为岩土工程勘察数字化转型提供理论与技术参考。

#### 参考文献

- [1]陈云钦.BIM技术在岩土工程勘察信息模型中的快速建模方法研究[J].石河子科技,2025(5):39-41.
- [2]杨锐.大数据技术在地质岩土工程勘察中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025(9):38-40.
- [3]尤叶雷.信息化技术提升岩土工程地质勘察工作效率的价值探讨[J].科学与信息化,2025(2):67-69.
- [4]李相,肖瞳,李艳龙,等.岩土工程勘察数据驱动的工程地质模型构建与应用[J].西部资源,2026(1):46-48.