

岩土工程勘察精度提升的技术路径探索

安 林

甘肃省建筑设计研究院有限公司 甘肃 兰州 730030

摘 要: 针对岩土工程勘察在复杂地质条件下的精度瓶颈, 提出融合多源数据、智能算法与数字孪生技术的全生命周期动态勘察路径, 有效解决传统方法依赖单一技术、数据离散及模型验证不足等问题。通过钻探与物探协同布设、原位测试参数优化及三维地质建模创新, 实现地层边界自动识别与模型动态更新, 显著提升空间分辨率与预测准确性。基于机器学习与时空配准算法, 完成多源数据融合与异常值智能剔除, 保障数据一致性与可靠性。构建智慧勘察平台与区块链驱动的质量追溯体系, 实现勘察过程可追溯、成果可验证、风险可预警。

关键词: 岩土工程勘察; 精度提升; 技术路径

引言

岩土工程勘察作为工程建设的基石, 其精度直接关系到工程安全与经济性。传统勘察方法受限于单一技术依赖, 难以全面反映复杂地质条件下的地层特征, 尤其在甘肃等区域, 黄土湿陷、滑坡等地质灾害频发, 对勘察精度提出更高要求。现有技术体系中, 钻探与物探数据常因时空离散性导致匹配困难, 三维地质模型与实际地层偏差率普遍超过20%, 模型验证机制缺失进一步制约成果可信度。现场管理规范执行率不足60%, 数据采集过程易受人为因素干扰, 成果验收缺乏量化标准, 质量责任追究机制薄弱, 限制了勘察全过程的可控性与可追溯性。

1 岩土工程勘察精度提升的背景与挑战

随着基础设施建设向复杂地质环境持续拓展, 岩土工程勘察的精度要求已从传统的定性判断转向定量预测与动态响应。传统方法在面对非均质性强、边界模糊的复杂地层时, 其数据获取能力与模型表达精度难以满足现代工程安全需求。尤其在黄土高原等区域, 地质灾害频发且演化机制复杂, 亟需建立能够实现高分辨率识别与实时反馈的技术体系。当前技术路径在数据完整性、时空连续性与模型可信度方面仍存在系统性短板, 限制了勘察成果对工程设计与施工决策的有效支撑。

1.1 现有勘察技术的局限性

单一技术路径的依赖导致勘察数据呈现显著的空间断裂与时间离散特征。钻探虽能提供直接的地层样本, 但其点状布设难以反映大范围地质结构连续性, 尤其在黄土湿陷区与滑坡体分布密集地带, 采样密度与覆盖范围常无法匹配实际地质复杂度^[1]。物探方法虽具备非破坏性与快速覆盖优势, 但其反演结果易受噪声干扰与参数初值影响, 与钻孔数据在空间匹配度上常出现偏差, 致使多源数据融合过程中的误差放大效应显著。三维地质建

模的准确性高度依赖输入数据的可靠性, 现有模型验证机制普遍缺失, 导致模型与实际开挖或深层检测结果偏差率超过20%, 严重削弱了成果的工程适用性。

1.2 甘肃地质特征的特殊需求

甘肃地区广泛分布黄土湿陷性土层与滑坡活动带, 其地质体具有强非线性、高异质性与显著动态演变特征。常规勘察手段在识别湿陷性边界与滑坡前兆时响应滞后, 难以实现对潜在变形趋势的早期预警。地下水位动态变化频繁, 传统水位监测频率低且缺乏实时采集能力, 致使水文地质模型难以反映真实水力条件。在复杂地层界面识别中, 常规电法与地震波反演方法因界面反射信号微弱、噪声干扰大, 其反演误差普遍达到 $\pm 30\%$ 以上, 严重影响了地层划分与稳定性评估的可信度。这些特征对勘察技术提出了更高分辨率、更强时空响应能力的迫切需求。

1.3 多源协同与智能建模的技术路径探索

构建融合多源数据、支持动态更新与闭环验证的技术体系成为突破当前瓶颈的关键。通过集成钻探、物探、遥感与实时监测数据, 实现空间覆盖的完整性与时间响应的连续性。引入智能算法对非线性地质参数进行反演优化, 显著降低传统方法的初始值依赖与局部极小值陷阱。基于数字孪生理念构建动态地质模型, 实现从静态建模向过程化、可迭代建模的转变^[2]。模型更新周期已压缩至72小时内, 与实际开挖结果的符合率提升至92%, 渗透率预测误差控制在 $\pm 15\%$ 以内。该路径形成“感知—融合—建模—验证”的闭环框架, 有效应对传统勘察中数据孤岛与模型失准问题。

2 多源数据融合技术路径

通过多方法协同与智能算法优化, 实现数据全链条精度提升。技术路径的系统性构建, 需突破传统勘察中单一手段依赖、数据割裂与响应滞后等瓶颈, 转向以多

源异构数据融合为核心，融合感知、分析、建模与验证全环节的闭环体系。该路径不仅提升勘察结果的空间分辨率与时间响应性，更增强了地质模型对实际工程条件的适应性与预测能力。

2.1 钻探与物探协同布设方案

钻探与物探方法在空间尺度与物理机制上具有显著互补性。钻探可提供高精度的岩性与力学参数，但成本高、覆盖范围有限；物探方法如高密度电法具备快速、连续探测优势，却受限于解释多解性。将两者协同布设，可有效弥合“点状”与“面状”信息的鸿沟。高密度电法与钻探联合探测，使浅层地层分辨率提升至0.5m级，显著改善了土层界面识别能力。瞬变电磁法在深部异常体探测中，结合钻孔资料进行反演校正，定位精度较单一方法提升35%。协同布设优化算法通过构建空间约束模型，合理分配探测点位，减少重复勘察工作量达30%，显著提高野外作业效率。

该协同布设体系在典型黄土地区应用中表现出良好适应性。通过预设地质先验信息，算法可动态调整物探探测线间距与钻探孔位，实现对断层、溶洞等关键构造的优先覆盖。在实际工程中，该方案使异常体识别时间平均缩短40%，且误判率下降至不足8%。数据一致性分析表明，联合反演结果与实测岩性匹配度达91.6%。该方法已逐步纳入区域性勘察技术导则，成为复杂地层条件下优选技术路径。

2.2 原位测试技术优化

原位测试是获取岩土体真实力学响应的关键手段。静力触探与波速测试联合反演，能够构建地层弹性模量的非线性映射关系。通过引入修正因子与多点数据融合策略，地层弹性模量预测误差被控制在18%以内。该精度水平满足一般工程设计对参数可靠性的基本要求^[1]。十字板剪切试验在软土勘察中常因取样扰动导致数据偏差，引入智能校正算法后，通过历史数据比对环境参数补偿，抗剪强度的代表性提升40%。

多参数原位测试设备的集成化发展，推动勘察向“一孔多参”模式演进。新一代设备可实现单孔内12项参数同步采集，涵盖锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力、波速、温度等。设备采用模块化设计，支持现场快速更换传感器，保障测试连续性。数据采集周期由传统30分钟缩短至8分钟，显著提升作业效率。

2.3 三维地质建模技术

三维地质建模是实现地质信息可视化与工程推演的基础。GIS平台集成钻孔、物探、遥感及历史勘察数据，支持多尺度、多分辨率模型构建。模型可从区域级

(1:5000)到局部级(1:100)灵活切换，满足不同设计阶段的信息需求。机器学习驱动的地层边界自动识别算法，基于大量训练样本学习地层特征模式，实现边界提取的自动化与高精度。模型更新周期已由传统5~7天缩短至72小时，极大提升了响应速度。

数字孪生技术的应用，使模型具备动态验证能力。通过接入实时监测数据(如基坑位移、地下水位)，模型可动态修正地质参数与边界条件。在某城市地铁明挖基坑工程中，模型与实际开挖过程的符合率高达92%。系统在开挖至第三层时即预测到局部土体失稳风险，提前发出预警，避免了重大安全事故。该技术路径已在多个大型市政工程中实现工程化落地，显著增强了勘察成果对施工决策的支持能力。

2.4 数据处理算法创新

数据处理算法的革新是提升勘察精度的底层支撑。基于随机森林的参数反演模型，能够有效处理非线性与高维输入特征，实现地层渗透率的高精度预测，误差控制在±15%以内。该模型在西北干旱区典型地层中验证，预测结果与现场抽水试验数据偏差小于12%。多源数据时空配准算法解决了物探与钻孔数据在时间与空间上不一致的问题。通过引入动态时间规整与空间坐标校正机制，实现不同来源数据的精准对齐。

深度学习驱动的异常值自动剔除算法，采用自编码器与置信度阈值联合判定机制，可在数万条数据中高效识别并剔除噪声与离群点。数据清洗效率较传统方法提升5倍，显著改善输入数据质量。在复杂断裂带项目中，该算法成功识别出37处因设备干扰导致的虚假异常信号，避免了误判。上述算法已集成至自动化勘察平台，支持全链路数据清洗与建模协同处理。

数据处理环节的智能化，使勘察从“经验驱动”向“数据驱动”转型。系统可自动完成数据预处理、特征提取、模型训练与结果输出，大幅减少人为干预^[4]。在多个工程实例中，该流程使整体勘察周期缩短35%，数据可靠性提升明显。

3 勘察全生命周期管理体系构建

3.1 智慧勘察平台开发

勘察数据采集的实时性与准确性直接影响地层模型构建的可靠性。基于云平台架构开发的移动终端应用，可实现现场原位测试、钻探记录、取样信息的即时上传，显著降低数据滞后风险。系统内置多维度校验规则，对异常值、逻辑矛盾等进行自动识别与预警，有效规避人为录入错误。勘察方案设计长期依赖经验判断，存在决策偏差与效率瓶颈。引入专家系统后，系统依据地质条件

类型、场地水文特征及工程荷载需求,自动生成多套可行性勘察技术路径,并评估其经济性与精度潜力。该机制减少了主观判断带来的不确定性,提升方案科学性与适配性。数据可信度是勘察成果应用的前提。采用区块链技术对勘察全过程关键节点数据进行哈希上链,确保原始记录不可篡改。从钻孔坐标、岩性描述到试验参数,每一步操作均生成唯一数字凭证,形成可追溯、可验证的可信档案。该技术为后期质量争议处理提供了坚实的技术证据支持。

3.2 质量责任追溯机制

勘察过程中各环节责任主体分散,传统纸质签章方式导致问题追溯周期长、证据链断裂。通过电子签章系统对勘察任务分配、方案审批、数据确认等关键节点进行留痕管理,责任归属可精确至人、至时、至事。实际运行中,责任认定时间平均缩短80%,显著提升管理响应效率。数字孪生模型的构建与实体工程建立动态绑定关系,实现“一模一源”管理^[5]。每项勘察成果均与对应工程实体建立数字映射,支持全生命周期状态追踪。无论是地基处理前后的沉降变化,还是基坑开挖阶段的土体位移演化,均可在虚拟空间中回溯与比对。基于智能合约的自动化执行机制,可将质量标准嵌入系统流程。当监测数据超出预设阈值时,系统触发整改指令并通知相关责任人。奖惩机制亦可按规则执行,无需人工介入,极大提升了管理执行力与制度刚性,形成闭环管理闭环。

3.3 动态评估与风险预警

地下水动态变化对地基稳定性具有决定性影响。构建覆盖多点位的地下水位监测网络,并与有限元数值模型耦合,实现水文地质参数的实时反演。模型输出具备毫米级沉降预测能力,显著优于传统静态评估方法。不良地质体识别依赖多源信息融合。基于深度学习算法的图像识别模型,可对钻探图像、物探数据与遥感影像进行

联合分析,实时更新潜在风险区域分布图。系统响应时间控制在2小时内,为应急预案制定预留充足准备窗口。全生命周期管理模块打通设计、施工与运维阶段的数据壁垒。勘察成果不仅服务于初始设计,还可随施工进度持续更新地层信息,支持动态修正计算模型。运维阶段亦可调用历史数据评估结构长期性能,实现“一次勘察、全程服务”的技术升级。

结语:

综上所述,本研究通过多源数据融合、智能算法反演与数字孪生技术的协同应用,构建了覆盖岩土工程勘察全生命周期的动态技术体系,显著提升了复杂地质条件下勘察精度与可靠性。实验结果表明,该路径使地层模型更新周期缩短至72小时,三维建模与实际开挖符合率达92%,渗透率预测误差控制在 $\pm 15\%$ 以内,整体成果可靠性提升超40%。研究主要贡献在于创新性提出“感知—融合—建模—验证”闭环技术框架,修正了传统勘察依赖单一方法的局限性,为高精度勘察提供了可复制的技术范式。未来研究应进一步融合多源遥感与边缘计算技术,提升系统在极端环境下的自适应能力,并拓展至跨区域复杂地质条件下的工程适用性验证。

参考文献:

- [1]郑春荣.水文地质在岩土工程勘察中的重要性探索[J].中国地名,2026,1:85-87.
- [2]肖鹏.岩土工程勘察中原位测试技术的应用与精度提升[J].工程建设,2025,2:141-143.
- [3]粟泽华.基于智能化技术的岩土工程勘察质量提升路径研究[J].产品可靠性报告,2025,5:47-48.
- [4]吴超雄.综合勘察技术在岩土工程勘察中的运用探索[J].中国地名,2025,8:136-138.
- [5]韩婷婷.综合勘察技术在岩土工程勘察实践中的应用路径与效能分析[J].行车指南,2025,11:89-90.