

高速铁路隧道施工中超前地质预报技术的应用与精度提升

刘佳栋

中铁北京工程局集团第一工程有限公司 陕西 西安 710000

摘要：高速铁路隧道施工中，超前地质预报至关重要。本文阐述关键技术要点，包括探测技术类型、数据采集处理及结果解读应用原则；介绍应用流程，涵盖施工前期准备、方案制定实施及结果与施工适配；分析精度影响因素，如地质体性质、设备性能、施工干扰；提出精度提升路径，包含多技术融合、算法改进及动态校验。为隧道施工安全高效推进提供理论支撑。

关键词：超前地质预报；高速铁路隧道；探测技术；预报精度；多技术融合

引言：高速铁路建设加速推进，隧道工程占比渐增。复杂地质条件下，隧道施工面临诸多挑战，超前地质预报是保障施工安全、优化施工方案的关键。准确预报地质情况，可提前应对突水、突泥等灾害，避免事故发生。本文深入探讨超前地质预报技术，在高速铁路隧道施工中的应用与精度提升，分析关键技术、应用流程、影响因素及提升路径，对推动隧道施工发展具有重要意义。

1 超前地质预报的关键技术要点

1.1 隧道施工探测技术及适配地质场景

在隧道施工中，有多种探测技术可供选择，且每种技术都有其适配的地质场景。（1）地震波反射法：它是通过分析地下介质对地震波的反射信号来识别地质界面。不仅能探测断层、破碎带等具有明显波阻抗差异的构造，在岩层变化复杂区域，可清晰呈现不同岩性的分界，还能对地质构造的规模、走向等进行初步判断，为隧道掘进方向提供参考。（2）电磁法：利用电磁波传播特性感知地下导电体分布。对富水地层反应极为敏感，在可能存在地下水富集带或岩溶发育的地段应用效果显著。通过分析电磁波的衰减、相位等参数，可有效判断水体的大致范围、埋藏深度以及含水层的厚度。（3）声波探测技术：依据岩体传播声波的速度与衰减特性评估岩体完整性。在岩体相对完整但存在局部裂隙的区域效果突出，能精确反映岩体内部的结构均匀性，帮助施工人员了解岩体的质量状况，提前做好应对措施。（4）超前钻探技术：通过直接获取岩芯样本判断前方地质情况。适用于对物探结果存疑或需要验证的关键地段，尤其在复杂地质条件下，能提供直观、准确的地质资料，为隧道施工安全提供有力保障。不同技术需结合隧道施工阶段和地质推测，合理选择单一或组合方式应用^[1]。

1.2 数据采集与处理的核心要求

数据采集需保证信号的完整性和真实性，采集前需对设备进行校准，确保发射与接收参数稳定，减少仪器误差。采集过程中保持操作规范，避免因设备移动或外界震动干扰信号接收，在岩体破碎区域需适当加密采集点，提高数据密度。数据处理需剔除干扰信号，保留有效信息，通过滤波技术去除环境噪音，对波形进行校正使数据更贴合实际地质情况。处理过程中注重信号的连续性分析，将不同位置的采集数据关联整合，形成完整的地质剖面信息。对于异常数据需反复核验，结合周边地质背景判断是否属于真实地质反应，避免因处理不当导致误判。数据处理需遵循统一标准，确保不同时段、不同地段的采集数据具有可比性，为后续预报结果的连贯性提供基础。

1.3 预报结果的解读与应用原则

预报结果的解读需结合地质理论和现场实际情况，将探测数据转化为具体的地质描述，明确前方可能存在的不良地质体类型、规模及空间分布。解读时需关注数据异常与地质现象的对应关系，避免仅凭单一指标下结论，综合考虑多种因素的相互影响。对存在争议的解读结果，需组织多轮分析讨论，结合区域地质资料验证合理性。应用原则需以指导施工为核心，预报结果需及时传递给施工团队，明确需要重点关注的地质风险点。根据预报结果调整施工方案，对可能出现的突水、突泥等风险提前制定应对措施，合理安排开挖进度和支护方式。应用过程中需保持动态调整，当实际揭露的地质情况与预报结果存在差异时，重新分析数据并修正后续预报思路，确保预报结果能持续适应施工需求。应用时需划定预警区域，明确不同风险等级对应的施工管控措施。

2 超前地质预报技术的应用流程

2.1 施工前期的地质资料分析与准备

施工前期需全面收集隧道沿线的地质勘察资料，包

括区域地质图、地层柱状图和钻孔记录,梳理地层岩性变化规律和已知断层分布特征。结合卫星遥感图像识别地表地形与地质构造的关联,标记可能延伸至地下的褶皱或裂隙带^[2]。对收集的资料进行交叉比对,剔除矛盾信息,形成统一的地质背景框架。准备工作还涉及现场环境排查,明确隧道洞口周边的地形条件、植被覆盖情况及周边建筑物分布,判断这些因素对探测设备信号可能产生的干扰。清理探测区域的障碍物,平整场地为设备架设创造条件。同时检查探测仪器的工作状态,校准传感器灵敏度和数据记录精度,确保设备性能符合现场探测要求。

2.2 预报方案的制定与实施步骤

在制定方案时,要紧密结合隧道施工工法以及掌子面前方的地质推测情况,以此确定合理的探测技术组合方式。若选择物探与钻探技术搭配,要清晰界定二者各自的探测范围和侧重点,物探技术用于覆盖较大区域,精准圈定异常带,钻探技术则针对异常区域开展精准验证。同时,方案中要明确规定探测频率,依据施工进度确定每次预报的间隔距离和具体实施时间。实施时,先从掌子面清理入手,去除表面浮土和松动岩块,让新鲜岩体表面露出,方便信号接收。接着,按照预设位置架设探测设备,仔细调整发射与接收装置的角度和距离,保证信号传播路径符合设计要求。数据采集过程中,要确保设备稳定运行,防止振动或位移影响信号质量。采集完成后,立即对原始数据进行初步整理,去除明显干扰信号,为后续处理创造良好条件。

2.3 预报结果与施工方案的动态适配

预报结果需转化为具体的地质描述,明确掌子面前方的岩性变化、裂隙发育程度和含水情况,标注可能存在的不良地质体位置和规模。将这些信息与施工方案中的开挖方法、支护参数进行对比,判断现有方案是否适用。若预报显示前方岩体完整性较好,可维持原开挖进尺;若存在软弱夹层,则需缩短循环进尺并加强支护。动态适配还体现在施工过程中的实时调整,根据掌子面揭露的实际地质情况,验证预报结果的准确性。若实际地质与预报存在差异,分析偏差原因并及时修正后续预报参数,同时调整施工方案中的关键工序。通过这种持续反馈机制,使预报结果与施工措施形成良性互动,确保隧道施工在复杂地质条件下有序推进。当遇到未预见的地质变化时,暂停施工重新开展预报,待明确地质情况后制定新的施工策略。

3 预报精度的主要影响因素

3.1 地质体物理性质的干扰

地质体物理性质的复杂性直接干扰预报精度,不同岩性的密度、弹性模量存在差异,导致地震波等探测信号在传播中发生折射或反射,改变信号原本的传播路径。岩体中存在的裂隙发育程度不一,裂隙中填充的水或黏土会吸收部分信号能量,使接收端收到的信号强度减弱,难以准确判断裂隙分布范围^[3]。岩层的层理走向与探测方向的夹角会影响信号穿透效果,平行于层理的信号传播速度更快,垂直方向则容易出现信号衰减,造成对岩层厚度的误判。断层破碎带中混杂的岩块与泥质物,其物理性质差异较大,信号在穿过时产生杂乱反射,掩盖断层的实际边界。可溶性岩体因溶蚀形成的溶洞,内部空气或水体与周围岩体的物理性质差异显著,探测信号经过时会出现强烈反射,可能被误判为其他地质构造。地质体的非均质性越强,信号传播过程中的畸变越明显,增加了预报结果的不确定性。

3.2 探测设备性能的局限

探测设备的信号发射功率会限制探测深度,功率不足时难以穿透坚硬岩层,导致深部地质体的信息无法被有效捕捉。接收装置的灵敏度不足,无法识别微弱的反射信号,使得一些规模较小的地质异常体被遗漏。设备的频率响应范围有限,无法完全适配不同地质体的探测需求,高频信号虽能识别细小构造,但传播距离短;低频信号传播距离远,却难以区分细节特征。信号处理单元算法设计存在偏差,对复杂地质条件下的信号解析能力不足,可能将正常的岩性变化误判为不良地质体。设备的稳定性受环境温度影响,在高温或低温环境下,电子元件性能波动,导致信号采集出现偏差。探测探头的分辨率不足,无法精准区分相邻地质体的边界,造成对地质构造规模的估算误差。设备的便携性与性能存在矛盾,体积较小的设备在复杂施工环境中便于操作,但探测精度往往低于大型设备。

3.3 施工干扰对数据采集的影响

施工过程中的机械振动会产生干扰信号,与探测信号混杂在一起,导致接收装置无法准确识别有效信号。钻机作业时产生的噪音通过岩体传播,掩盖了地质体反射的微弱信号,影响信号的信噪比。隧道内的通风设备运行时产生的气流,会使空气介质的密度发生变化,干扰电磁信号的传播路径,造成信号传播速度的波动。施工人员与设备的移动可能遮挡探测探头,改变信号的发射与接收角度,导致数据采集出现偏差。爆破作业后岩体应力重新分布,会暂时改变地质体的物理性质,此时进行探测可能获得失真的数据,无法反映岩体的原始状态。隧道内的积水会吸收部分探测信号,尤其是在富水

段，信号衰减明显，影响对水体分布范围的判断。施工材料的堆放改变了隧道内的电磁环境，金属材料会反射或屏蔽探测信号，导致设备接收的信号出现异常，增加了数据解析的难度。施工进度压力可能压缩探测作业时间，导致数据采集不充分，影响预报结果的可靠性。

4 预报精度提升的技术路径

4.1 多技术融合的探测方法优化

多技术融合从不同维度互补探测优势，地震波反射法与电磁法结合可增强对断层与地下水的联合识别能力。地震波反射法精准定位断层走向，电磁法同步探测周边水体分布，两者数据叠加能区分富水断层与干燥断层。声波探测与超前钻探配合，声波技术初步圈定岩体破碎范围，钻探针对性取样验证，减少单一技术对岩体完整性的误判。技术融合需遵循适配原则，针对不同地质条件选择组合方式。复杂岩溶区采用地震波法与电磁法为主，辅以声波探测细化溶洞边界；软弱夹层段侧重钻探与声波技术结合，确保对夹层厚度的精准判断。融合过程中需统一数据采集基准，通过时间与空间坐标校准，使不同技术的探测结果处于同一参考体系，避免因数据偏差影响融合效果。技术切换时保持探测区域重叠，通过重叠部分的数据一致性验证融合可靠性。

4.2 数据处理算法的改进方向

数据处理算法改进需强化信号分离能力，通过滤波技术剔除施工干扰信号，保留地质体反射的有效信息。针对复杂地质信号的非线性特征，采用自适应算法动态调整处理参数，增强对微弱信号的识别能力。算法需提升对多源数据的融合效率，建立统一解析框架，将不同技术的原始数据转化为可对比的地质参数，减少数据转换中的信息损耗。改进算法需引入地质知识约束，结合区域地质规律优化解析逻辑，避免将正常岩性变化误判为不良地质体。针对断层破碎带的杂乱信号，算法可通过模式识别技术提取典型特征，区分断层与其他干扰信号。算法迭代需结合实际探测反馈，根据预报结果与实

际揭露的差异，调整参数权重，提升对特定地质条件的适应能力。处理流程中增加异常数据校验环节，自动识别偏离常规范围的数据并标记复核。

4.3 施工过程中的动态校验机制

动态校验机制要求预报结果与掌子面揭露情况实时比对，每循环作业后将实际地质状况与预报结果逐项核对，分析偏差原因并修正后续预报参数。建立校验档案记录偏差类型，如断层位置偏移、水体规模估算误差等，为同类地质条件下的预报调整提供参考。校验周期与施工进度同步，确保反馈信息及时融入下一轮预报。施工中设置校验观测点，在隧道开挖面布置监测仪器，实时记录岩体应力、地下水渗流量等数据，与预报的地质参数对比验证。当校验发现重大偏差时，暂停常规探测，启用备用技术方案重新探测，避免错误预报引导施工。动态校验需联动施工方案调整，根据校验结果优化开挖方式，反向修正预报模型，形成“预报-施工-校验-修正”的闭环机制。校验过程注重信息传递效率，确保地质人员与施工人员对偏差的理解一致。

结束语

高速铁路隧道施工中的超前地质预报，是保障工程顺利推进的重要环节。通过明确关键技术要点、规范应用流程、分析精度影响因素并探寻提升路径，可有效提高预报精度。多技术融合、算法改进及动态校验等措施，能增强预报的准确性与可靠性。未来，需持续优化技术，以适应更复杂的地质条件，为高速铁路隧道建设提供坚实保障。

参考文献

- [1]张涛.复杂地质条件下隧道施工地质超前预报技术研究[J].铁道标准设计,2023(10):125-128.
- [2]李伟,韩超.铁路隧道地质超前预报技术应用及发展趋势[J].隧道建设,2022(06):1111-1116.
- [3]郑云.隧道施工地质超前预报技术的研究与实践[J].中国铁道科学,2023(03):66-70.