

地质雷达在公路隧道超前预报中的应用

王坤坤¹ 伍建坤²

1. 温州信达交通工程试验检测有限公司 浙江温州 325105

2. 浙江宏炜检测科技有限公司 浙江温州 325006

摘要: 地质雷达技术在公路隧道超前预报中扮演着至关重要的角色。作为一种高效的地下探测工具,地质雷达通过发射高频电磁波并接收其反射信号来识别掌子面前方的地质结构。该技术能够在不破坏地面的情况下提供连续、高分辨率的地下图像,有助于及时发现潜在的不良地质情况,如断层、裂隙以及含水层等,从而确保施工安全,优化工程设计和施工进度。地质雷达的应用显著降低了公路隧道施工过程中的风险,并且减少了由于突发地质事件导致的额外成本。

关键词: 地质雷达; 公路隧道; 超前预报; 应用

随着交通基础设施的快速发展,公路隧道工程越来越频繁地面临着复杂多变的地质条件。为了保障施工安全及工程质量,实现隧道施工的高效与经济,采用先进的地质预报技术显得尤为重要。地质雷达作为一种前沿的地下探测技术,因其独特的优势被广泛应用于隧道超前地质预报中。通过地质雷达,工程师能够及时掌握掌子面前方的地质信息,做出更为精确的判断和决策。

一、公路隧道工程超前预报重要性

公路隧道工程的超前预报对于确保施工安全、优化设计方案、减少经济损失和提高工程效率至关重要。通过有效的超前地质预报,工程团队能够提前获知掌子面前方的地质条件,包括潜在的断层、裂隙密集区、含水层或其他不稳定地层,从而采取相应的预防和应对措施,避免可能的塌方、涌水等危险情况发生,保障工人生命安全和机械设备的安全运行。此外,准确的超前预报可以帮助工程师调整施工策略和支护结构设计,以适应实际的地质条件,减少因应急处理导致的额外成本。及时的地质信息反馈还有助于提高施工进度,因为不必为处理突发的地质问题而暂停工程。最终,系统的超前预报不仅提高了公路隧道工程的整体质量,还对环境保护和工程可持续性具有积极影响^[1]。

二、公路隧道超前预报存在的问题

1. 技术手段的限制

公路隧道超前预报依赖于一系列高科技设备与方法,这些技术手段尽管先进,但不可避免地存在限制。地质雷达(GPR)虽然能够提供关于地下结构的详细信息,

但其有效探测深度有限,对于深层的地质结构无法进行有效预报。此外,地质雷达在分辨率和精度方面也面临挑战,尤其是当需要区分接近的小尺寸或低对比度的地质异常体时,其性能往往不能满足要求。电磁波在不同介质中的传播特性受多种因素影响,如地层的矿物组成、湿度等,这增加了信号解释的复杂性。同时,现场环境的干扰及设备自身的噪声也可能导致数据采集的质量受损,影响最终的解释结果。

2. 地质条件复杂多变

地质条件的复杂性是影响公路隧道超前预报准确性的关键因素。自然界的地质体表现出强烈的非均质性,从岩性变化到断层、褶皱等地质结构的出现,都极大地增加了预报的难度。地质体的多样性和不可预测性意味着即使同一种技术在不同地点的效果也可能截然不同。此外,地质历史中的多期构造运动可能导致地层错综复杂,为预报工作带来额外的不确定性。地质条件的快速变化要求预报人员必须具有高度的警觉性和应变能力,以应对随时可能出现的新情况^[2]。

3. 专业人员经验不足

尽管现代科技为公路隧道超前预报提供了先进的工具和方法,但这些技术的有效应用在很大程度上依赖于专业人员的经验。对地质雷达数据的解释需要深厚的专业知识和丰富的实践经验,新进人员往往缺乏这方面的积累。此外,地质预报不仅仅是一个技术操作过程,还涉及到对地质知识的理解和应用,这就需要专业人员具备跨学科的知识背景和综合分析问题的能力。经验

丰富的专业人员短缺，使得许多预报工作难以达到预期效果。

4. 数据处理和解释难度大

在公路隧道超前预报中，数据处理和解释是一个极具挑战性的环节。地质雷达等设备产生的数据量巨大，需要通过复杂的算法进行处理才能提取有用信息。处理过程中可能会遇到各种问题，如信号的随机噪声、设备引起的系统误差以及由环境变化引起的数据波动等。这些因素都可能影响数据解释的准确性。此外，解释人员需要从复杂的数据中识别出关键的地质特征，这不仅需要深厚的地质学知识，还需要对数据处理软件熟练操作。数据解释的难度不仅在于技术层面，还在于如何将解释结果转化为可靠的地质预报，这一过程中潜在的错误可能导致重大的工程风险^[3]。

三、地质雷达在公路隧道超前预报中的应用优势

地质雷达（GPR）在公路隧道超前预报中提供了显著的应用优势。它通过发射高频电磁波并接收反射回来的信号来探测地下结构，从而能够揭示隧道掌子面前方的地质情况。这种无损检测技术具有快速、连续、高分辨率的特点，能够在不破坏地面的情况下提供实时的地下信息。由于其探测速度快，可以在短时间内扫描大面积区域，为工程进度提供及时的数据支持。地质雷达对于识别裂隙、空洞和含水层等潜在风险特别有效，有助于工程师提前做出决策以规避可能的安全风险。此外，地质雷达的数据处理和解释相对简单，非专业人员也容易理解和使用，这使得它在公路隧道施工中的实用性大大增强。总的来说，地质雷达的这些优势使其成为公路隧道超前地质预报中不可或缺的工具。

四、地质雷达在公路隧道超前预报中的实际应用

1. 探测未知的地质结构

地质雷达通过发射特定频率范围内的电磁波，并根据这些波在介质中的传播和反射特性来识别和映射地下结构。在实际的隧道掘进过程中，地质雷达系统通常由专业人员操作，安装在隧道掌子面或沿着掘进方向的特定位置。随着雷达波穿透岩土体，不同介质的电磁性质差异（如介电常数和电导率）会导致波在各界面处发生反射、折射或散射。随后，地质雷达接收系统捕捉反射信号，并将其转化为电信号以供分析。通过对这些信号进行时域或频域的分析，可以确定反射界面的深度、形态和其他特征，从而揭示未知的地质结构。在探测地层界面方面，地质雷达能够较准确地识别不同岩层或土层

之间的分界面，这对于预测隧道掘进过程中可能遇到的地层变化情况至关重要。反射波形的差异揭示了岩层的物理和化学属性变化，专业人员可以根据这些信息提前判断前方的地层硬度、含水量以及可能存在的夹层情况。断层和裂缝是地质结构中常见的两大特征，它们对隧道的稳定性有着显著的影响。地质雷达技术对这些小至微米级别、大至数米宽的断层和裂缝具有很高的识别能力。通过分析反射信号的强度和波动模式，探测人员可以确定断层和裂缝的位置、宽度和走向，甚至评估其充水情况。这样的信息对于评估潜在的滑移危险、确定加固范围以及选择最佳的施工方法提供了科学依据。除了断层和裂缝，天然形成的洞穴或由采掘活动造成的空洞也是施工中需要特别注意的地质结构。地质雷达可以有效地探测到这些空洞的存在，并对其规模进行初步估计。当雷达波遇到空洞或其他非固体介质时，反射信号会表现出明显的衰减和时延特征。通过对这些异常信号的精确解析，可以预测空洞的大致形状、大小及其与隧道掘进路径的关系，为避免可能的坍塌危险提供了预警。在实施地质雷达探测时，必须考虑到实际地质条件的复杂性。例如，岩石的成分、湿度、温度以及填充物的性质都会影响电磁波的传播。因此，为了提高探测精度，常常需要根据具体地质环境调整雷达参数，比如调整发射频率或者波形^[4]。

2. 识别不良地质情况

由于不同物质的电磁属性（如介电常数和电导率）存在差异，这些反射信号的特征会随着地质条件的变化而变化。专业人员通过分析这些信号的强度、传播时间和频率特性，可以识别出隧道路径中存在的不良地质情况。例如，当地下存在断层或裂隙带时，地质雷达的电磁波会在这些区域产生强烈的反射，因为空气或充填物的电磁属性与周围岩石明显不同。同样，溶洞或空洞的存在也会在雷达图像上表现出特定的反射模式，通常表现为连续的强反射界面。此外，含水地层由于其较高的介电常数，会导致电磁波传播速度减慢，从而在地质雷达剖面图上形成明显的反射事件。此外，随着机器学习和人工智能技术的发展，地质雷达数据的处理和解释正在逐渐实现自动化和智能化。这些技术能够帮助工程师和地质学家更快地识别复杂的地质特征，从而提高了地质雷达在识别不良地质情况方面的效率和准确性。

3. 预测地下水分布

由于水与周围岩石或土壤的电磁属性存在较大差异，

尤其是在介电常数上,这使得电磁波在遇到含水区域时会产生明显的反射信号。地质雷达接收器捕捉到这些反射信号,经过数据处理和解析,可以确定含水区域的大致位置、范围以及含水量的多少。详细来说,当地质雷达的发射天线向掌子面发射电磁波时,这些波会穿透干燥的岩土体并继续向前传播。一旦遇到含水地带,如地下河流、裂隙水或饱和砂层等,电磁波就会因为电介质的变化而产生反射。由于水的介电常数比固体岩石或干燥土壤高得多,这会在雷达剖面上形成强反射信号。地质雷达操作人员可以通过分析这些信号的强度、时间延迟和波形特征来判断地下水的深度、厚度和流动特性。此外,地质雷达在预测地下水分布方面的优势还体现在其高分辨率的探测能力上。通过对反射信号进行细致的分析,可以分辨出单个裂隙水流或是一组相互连接的水文地质结构。在某些情况下,地质雷达甚至能够揭示地下水流动的方向和速度,这对于评估可能的水压影响和潜在的水害风险极为重要。值得注意的是,地质雷达在实际应用中需要克服一定的局限性。例如,高矿化度的地下水或粘土质含量较高的地层可能会吸收或衰减电磁波,从而影响探测效果。因此,为了提高预测的准确性,往往需要结合其他地球物理方法,如电阻率法、瞬变电磁法等,进行交叉验证。同时,地质雷达数据的处理和解释也需要依赖专业的技术人员,他们根据实际地质条件调整雷达参数,并运用先进的数据处理技术来提取有关地下水分布的详细信息^[4]。

4. 判断隧道围岩级别

隧道围岩级别反映了岩体的完整性、稳定性和承载能力,而地质雷达技术通过其高分辨率的探测性能,为准确评估这些特性提供了可能。在具体应用中,地质雷达系统通常被安装在隧道掌子面或沿隧道轮廓推进方向的特定位置。它通过发射高频电磁波并接收反射回来的信号来探测岩体结构的特征。由于不同级别的围岩具有不同的物质组成、结构状态和含水量,这些因素都会对电磁波的传播速度和反射特性产生影响。例如,完整坚硬的岩石与破碎、风化或含水岩石在电磁属性上存在显著差异,这些差异成为地质雷达识别和分类围岩级别的关键依据。在实际的数据采集过程中,地质雷达的操作人员会根据隧道的具体条件调整设备参数,如发射频率、扫描深度和采样间隔等,以获得最佳的探测效果。当电

磁波穿透岩体时,它们会在不同的界面上发生反射,尤其是在岩石的裂缝、层面、空洞或其他不连续区域。通过分析反射信号的强度、传播时间和波形特征,专业人员可以确定岩体内部的结构复杂性和连续性状况。地质雷达数据经过处理和解释后,可以生成详细的剖面图和三维模型,这些图像揭示了岩体的内部结构和潜在的薄弱区域。经验丰富的地质学家或工程师可以根据这些信息,结合岩心取样和其他地质调查结果,综合判断隧道围岩的级别。例如,如果雷达图像显示岩体内部存在大量的裂隙、断层或溶洞等不连续结构,这通常表明围岩级别较低,稳定性较差;反之,如果图像显示岩体结构完整且没有明显的弱面,那么围岩级别可能较高,稳定性较好^[6]。

结语

总体而言,地质雷达在公路隧道超前预报中的应用具有不可替代的价值。它不仅为揭示掌子面前方的地质状况提供了强有力的手段,而且对提高公路隧道建设的整体水平起到了积极的推动作用。随着技术的不断进步,地质雷达的性能和应用范围有望进一步提升,为确保隧道施工的安全与效率提供更加坚实的技术支持。未来,地质雷达技术将继续在公路隧道工程中发挥重要作用,成为隧道施工管理和维护中不可或缺的一部分。

参考文献

- [1] 刘荣国,陶川溢.地质雷达在高速公路隧道地质超前预报中的应用.中国科技信息,2022(21):75-79.
- [2] 谢代纯.地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用研究.福建建材,2022(12):37-39.
- [3] 周满兵.TRT与地质雷达在公路隧道超前地质预报中的综合应用.安徽地质,2022,32(4):360-364.
- [4] 李松,刘华.地质雷达在高速公路隧道地质超前预报中的应用.运输经理世界,2023(15):91-93.
- [5] 高阳,张庆松,原小帅,许振浩,刘斌.地质雷达在岩溶隧道超前预报中的应用.山东大学学报(工学版),2009,39(4):82-86.
- [6] 魏道平,李青.地质雷达在公路隧道超前预报中的应用研究.公路交通科技(应用技术版),2012,8(7):214-217.