

隧道检测中地质雷达无损探测技术的应用

王彦琪 韩 松 李又娟 岳想平

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710054

摘 要：地质雷达无损探测技术在隧道检测领域至关重要。该技术基于高频电磁波发射与反射原理，实现隧道内部结构无损检测。本文概述了其工作原理，并深入分析了在初期支护厚度、二次衬砌与混凝土厚度、脱空区及钢拱规格检测中的应用。同时总结了仪器选择、测线布置等应用要点。地质雷达技术为隧道工程安全监测与质量评估提供了强有力的技术支持。

关键词：隧道检测；地质雷达；无损探测技术；应用

引言

隧道工程建设日新月异，对内部结构检测的要求愈发严格。传统方法因破坏性大、效率低而难以适应现代需求。地质雷达无损探测技术凭借非破坏性、高效及准确等优势，在隧道检测中崭露头角。该技术通过发射高频电磁波并接收反射信号，精确探测隧道内部结构，为安全监测和质量评估提供坚实保障。本文聚焦于地质雷达无损探测技术在隧道检测中的应用，深入探讨其工作原理、应用表现及相关要点，以期为隧道工程的安全与可持续发展贡献力量。

1 地质雷达无损检测技术工作原理概述

隧道工程因其复杂的地质条件和施工难度，一直是工程领域的难点和重点，为确保施工安全和工程质量，施工过程中往往需要采用多种技术手段进行辅助和监测^[1]。其中，地质雷达无损检测技术以其独特的优势，在隧道工程的检测与验收中发挥着重要作用。地质雷达无损检测技术的工作原理主要基于电磁波的传播特性。该技术利用109Hz的无线电波，对地下介质进行探测。当天线定向发射电磁波后，这些波会在目标体和地层中发生投射和反射。反射回来的电磁波会被接收天线捕获，并经过滤波器、解码器等设备的处理，转化为数字化的波形结构。技术人员通过分析这些波形结构的波幅、传播时间等参数，可以推断出地下介质的分布状况、目标体的位置和性质等信息。这些信息对于超前支护、二次衬砌等施工环节的质量控制和强度分析具有重要意义，也为后续的施工和验收工作提供了科学依据。电磁波在传播过程中会受到多种因素的影响，如目标体的埋深、电性差异等。这些因素会导致电磁波的衰减和相位变化，从而影响探测结果的准确性。因此在使用地质雷达进行探测时，需要充分考虑这些因素对探测结果的影响，并采取相应的措施进行校正和补偿。总的来说，地质雷达无损

检测技术在隧道工程中具有广泛的应用前景。它不仅能够为施工过程中的质量控制和强度分析提供科学依据，还能够为验收工作提供重要的参考信息。随着技术的不断进步和应用经验的积累，相信地质雷达无损检测技术在隧道工程中的应用将会更加广泛和深入。

2 地质雷达无损检测技术在隧道检测中的应用表现

2.1 初期支护厚度检测

在隧道工程中，初期支护作为暗挖施工阶段的关键安全防护手段，其重要性不言而喻。它不仅能够有效控制围岩的变形，还能缓和应力的释放速度，确保施工过程的顺利进行。初期支护通常采用喷射混凝土施工技术，并结合锚杆、钢架等构造，以增强其稳固性能。然而，如何准确地检测初期支护的厚度，一直是隧道工程检测中的一个难题。传统的检测方法往往需要破坏支护结构，不仅耗时费力，还可能对隧道的稳定性造成影响。而地质雷达无损探测技术的应用，则为初期支护厚度的检测提供了一种全新的解决方案。地质雷达无损探测技术利用电磁波在不同介质中的传播特性，通过接收反射回来的电磁波信号，来分析地下介质的分布和性质。在初期支护厚度检测中，由于围岩和混凝土之间存在明显的物性差异，电磁波在反射阶段会在波形图像中直观表现为振幅的增强，并出现连续的同相轴。这一特性为混凝土厚度的分析提供了科学依据。在实际应用中，技术人员需要注意判别不同波段对应的情况。空气和表面直达波由于速度较快，通常会首先返回接收天线。而混凝土等目标物的反射波则会稍慢于前者，是最后到达的波段。通过对这些波段的分析和比较，技术人员可以准确地确定初期支护的厚度^[2]。

2.2 二次衬砌与混凝土厚度检测

隧道工程中，衬砌混凝土厚度的检测是至关重要的环节。传统的钻芯法虽然能提供一定的数据，但其破坏

性强且受多种干扰因素影响,难以全面、准确地反映实际情况。地质雷达无损检测技术的引入,为这一难题提供了新的解决方案。地质雷达无损检测技术利用电磁波在不同介质中的传播特性,能够准确地识别出围岩与衬砌之间物质成分和介电常数的差异。当电磁波进入这些介质时,其振幅和频率会发生显著变化,从而可以准确定位有效波段。同时,电磁波在不同界面上的反射速度和时间也各不相同,这为区分一、二次衬砌以及测量其厚度提供了可能。在实际操作中,地质雷达无损检测技术能够快速准确地获取并区分不同结构层的厚度。由于一、二次衬砌之间往往存在缝隙,这些缝隙会对电磁波的反射产生影响,从而帮助技术人员准确地识别出各个结构层。通过计算和判别,技术人员可以迅速得出衬砌混凝土的厚度数据,实现高效无损检测。在实际应用中,也需要注意一些特殊情况。当一、二次衬砌的结合度较好时,可能会出现界面不清的状况。这主要是由于喷射混凝土和衬砌混凝土之间的物性差异本身不大,而结合度的提升进一步缩小了这种差异。这种情况下,反射波图像可能会受到干扰,导致难以准确识别界面。在进行地质雷达无损检测时,技术人员需要综合考虑实际情况,理性分析反射波图像,以确保检测结果的准确性。

2.3 脱空区检测

脱空是隧道施工中常见的质量问题,其成因多样,如超挖过大、模板漏浆等,这些问题均可能导致衬砌结构稳固性下降,进而影响隧道的整体安全。地质雷达无损检测技术在此类问题的检测中发挥着重要作用^[3]。由于空气和混凝土的介电常数存在显著差异,当衬砌与围岩结合不紧密或回填环节密实度未能达标时,电磁波在界面上的反射信号会明显增强。这一特性使得地质雷达无损检测技术成为检测脱空区的有效手段。在脱空区检测中,地质雷达无损探测技术能够捕捉到弧形反射波的频繁出现以及同相轴特征的异常明显。这些波形特征的变化与脱空区的存在密切相关。随着时间的推移,这种反射能力还会逐渐增大,脱空区面积越大,界面清晰度越高。技术人员通过地质雷达无损探测技术获得的波形图像,可以直观地观察到脱空区的存在及其范围。结合波速、介电常数等确切值,技术人员还可以较为准确地计算出脱空区的具体尺寸和位置。这一技术的应用为隧道的验收和修整提供了重要依据。在验收阶段,技术人员可以通过地质雷达无损探测技术快速识别出脱空区,确保隧道工程的安全和质量。

2.4 钢拱规格与分布检测

在隧道工程中,钢拱作为重要的支撑结构,其规格和分布的准确性对于隧道的稳定性和安全性至关重要。地质雷达无损探测技术在钢拱规格与分布检测中展现出了独特的优势。由于金属材料在电磁波理论中属于良性导体,对波的反射能力尤为明显。在利用雷达检测技术时,天线定向释放的电磁波在遇到钢筋结构时,会产生强烈的反射信号。这些反射信号在波形图像上表现为连续的点状特征,为技术人员提供了清晰的识别依据。当电磁波触碰到钢拱结构时,反射信号则呈现出月牙形的特征。这一特征不仅为技术人员提供了识别钢拱的直观依据,还使得单个信号能够对应单个钢拱,从而实现了钢拱数量的准确统计^[4]。通过地质雷达无损探测技术获得的波形图像,技术人员不仅可以清晰地观察到钢结构的分布情况,还可以依据图像上的信号特征,准确判断钢拱的规格和尺寸。这一技术的应用极大地提高了钢拱规格与分布检测的准确性和效率。在隧道工程的验收阶段,地质雷达无损探测技术为技术人员提供了快速、准确的检测手段。通过该技术,技术人员可以迅速掌握钢拱的规格和分布情况,为隧道的整体安全 and 质量评估提供了重要依据。

3 地质雷达无损检测技术在隧道检测中的应用要点

3.1 仪器选择与测线布置

在我国广阔的地理空间中,隧道工程面临着复杂多变的地质条件。为了确保地质雷达无损检测技术的有效应用,必须根据具体的探测需求和目标物的深度来选择合适的雷达天线。通常,雷达天线的频率与探测深度之间存在一定的反比关系,即频率越高,探测深度越浅,但分辨率也越高^[5]。在探测深度较浅的场景,如初期支护检测中,可以选用较高频率的雷达天线,如500至800MHz。这样的天线在电磁波传播速度为12cm/ns时,其释放的电磁波波长最高可达24cm,穿透深度可达100cm,足以满足初期支护的检测需求。而在进行衬砌检测时,则需要根据衬砌的最大厚度来选择合适的天线频率。如果衬砌的最大厚度达到0.7cm左右,那么应选用稍低频率的天线,如400至500MHz,以保证探测的精度和深度。在选择雷达主机时,也需根据实际需求进行考量。目前市场上,无论是国产的LED型雷达,还是国外的EKKO型、SIR-20型雷达,都各有其特点,可以根据项目需求和预算进行选择。选定设备仪器后,测线布置也是确保检测数据全面性的关键。一般来说,至少需要布设5条线路,分别对应隧道的左右边墙、左右拱腰以及拱顶,以实现全方位、无死角的检测。(如下表1地质雷达隧道检测仪器与测线布置要点)

表1 地质雷达隧道检测仪器与测线布置要点

项目	详情
雷达天线选择原则	频率与探测深度反比，高频分辨率高但深度浅，低频反之
初期支护检测天线	500-800MHz，对应波长最高24cm，穿透深度100cm（电磁波速12cm/ns）
衬砌检测天线	约0.7cm厚度时，选400-500MHz
雷达主机选择	国产LED型、国外EKKO型、SIR-20型等，按需和预算选
测线布置	至少5条，对应左右边墙、左右拱腰、拱顶，确保全方位检测

3.2 检测数据采集

地质雷达在隧道检测中的应用，其核心在于数据采集的精准与全面。在地质雷达运作过程中，控制器作为指令的下达者，指挥着天线接收命令并释放信号，沿着预先设定的线路完成检测工作，这一流程采用不间断作业形式，确保了数据采集的连续性和完整性，从而提升了检测的准确性和全面性^[6]。雷达主机释放信号的频率极高，每秒通常可达70余个，这意味着在短时间内可以产生大量的检测数据。单次脉冲信号发送后，产生的检测点数量也是极为可观的，一般可以达到50个以上。这样的高密度数据采集方式，为后续的准确分析提供了坚实的基础。在采集环节，虚实测点的结合问题至关重要。为了确保数据的准确性，每间隔一段距离后，都需要在隧道的内壁上做好标记，并注释相应的里程数。这些标记不仅有助于技术人员在后续的数据整理中快速定位每个测点的位置，还能为数据分析提供重要的参考依据。数据采集完成后，及时整理和分析是确保准确度的关键步骤。

结语

综上，地质雷达无损探测技术在隧道检测中具有重

要的应用价值。该技术不仅能够实现对隧道内部结构的精确探测，还能够为隧道工程的安全监测和质量评估提供有力支持。在实际应用中，需要注意仪器选择与测线布置的合理性，以及检测数据采集和数据分析处理的准确性。未来，随着技术的不断进步和应用的深入，地质雷达无损探测技术将在隧道检测领域发挥更加重要的作用，为隧道工程的安全和可持续发展贡献力量。

参考文献

[1]李冬杰.隧道检测中地质雷达无损探测技术的应用[J].现代交通与路桥建设,2023,2(9).15-16

[2]白宇.地质雷达无损探测技术在隧道检测中的应用研究[J].百科论坛电子杂志,2021(3):1626.

[3]刘远.地质雷达无损探测技术在隧道检测中的应用研究[J].工程技术研究,2024,9(15):75-77.

[4]余清.地质雷达无损探测技术在隧道检测中的应用[J].运输经理世界,2024(14):81-83.

[5]宋环环.隧道地质雷达检测技术在工程中的应用探讨[J].大众标准化,2024(19):182-184.

[6]何森.地质雷达探测技术在公路隧道检测中的应用[J].包装世界,2023(9):76-78.