

时间域瞬变电磁法与频率域电磁法协同探测在隧道超前地质预报中的对比验证

于家鑫

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830091

摘要: 随着隧道建设工程规模的不断扩大,隧道超前地质预报成为确保施工安全和工程质量的重要环节。电磁探测技术作为一种非破坏性探测手段,在隧道超前地质预报中具有广泛的应用前景。时间域瞬变电磁法(TDEM)和频率域电磁法(FDEM)是当前常用的两种电磁探测技术,它们各自具有独特的优势和应用场景。本文通过对比验证时间域瞬变电磁法与频率域电磁法在隧道超前地质预报中的应用效果,探讨两者的适用性及协同探测优势。研究结果表明,两种方法在不同地质条件下各有优缺点,通过合理的结合应用可以提高超前地质预报的准确性和可靠性。本研究为隧道施工中的地质预报提供了新的技术思路。

关键词: 时间域瞬变电磁法;频率域电磁法;隧道超前地质预报;电磁探测;地质勘察

引言

隧道施工中的地质预报是确保施工安全的重要手段,特别是在复杂地质条件下,准确的超前地质预报能够有效避免由于地质条件不明引起的施工风险。随着现代隧道建设技术的发展,传统的地质勘探方法已难以满足隧道施工的高精度要求。因此,发展快速、高效且可靠的地质预报技术成为了亟待解决的问题。

电磁探测技术凭借其非破坏性、高效性和适用性广泛性,在隧道超前地质预报中得到了广泛应用。时间域瞬变电磁法(TDEM)和频率域电磁法(FDEM)是电磁探测中的两种主要技术,它们通过不同的工作原理探测地下介质的电学性质,具有不同的优势和局限性。TDEM通过测量电磁脉冲的时间响应来获得地下介质的电导率信息,而FDEM则通过测量不同频率下的电磁场响应来进行地下探测。

尽管两种方法在隧道地质预报中均有应用,但它们在实际应用中各自存在一定的局限性,例如TDEM适用于深层地质探测,但对浅层结构的分辨率较低,而FDEM则在浅层探测中表现较为突出,但对深层的分辨能力较差。因此,如何合理结合这两种方法,发挥各自的优势,提高隧道超前地质预报的精度和可靠性,是本研究的核心问题。

1 时间域瞬变电磁法与频率域电磁法原理比较

1.1 时间域瞬变电磁法原理

时间域瞬变电磁法(TDEM)是一种基于电磁脉冲激发地下介质,测量电磁波响应信号以获取地下信息的地球物理探测技术。该方法通过发射器释放一段短时的

电磁脉冲,脉冲信号传播到地下后与地下介质发生相互作用,产生感应电流。地下介质的电导率与介电常数会影响电磁脉冲的传播特性。随着信号的传播,感应电流会因介质电导率的不同而以不同速率衰减,并产生电磁波。这些衰减的电磁波信号会被接收器探测到,通过对这些信号衰减过程的分析,TDEM能够推测出地下介质的电导率、介电常数等电学特性。

TDEM方法的优势之一在于其能够探测较大深度的地下地质结构,尤其适用于复杂地质环境中的深层结构分析。在TDEM探测过程中,地下介质的电导率直接影响信号衰减的速率,因此,通过对衰减过程的分析,可以推断出不同深度的地质层次和电学特性。TDEM特别适用于隧道超前地质预报,在探测深部岩层、裂缝及地下水等方面具有显著优势。与其他地球物理方法相比,TDEM能够为隧道工程人员提供深入的地质信息,帮助他们在施工过程中准确评估地下水、土壤类型以及岩石的分布情况,进而优化施工方案,提高施工的安全性和效率。

此外,TDEM探测深度较大,通常能够达到数百米,特别适合对深层地质特征的分析。在复杂的地下环境中,TDEM方法可以有效地穿透各种地质体,如沙土、岩石、矿体等,为地质勘探和工程建设提供精准的地下信息。基于这些优点,TDEM在隧道工程、水利工程以及矿产资源勘探中,已经成为重要的辅助勘探手段。

1.2 频率域电磁法原理

频率域电磁法(FDEM)是一种通过测量地下介质对不同频率电磁场的响应来获取地下地质信息的技术。FDEM采用多频率或连续频率的电磁波信号,激发地下介

质,并通过接收不同频率下的电磁波响应来反演地下介质的电导率和介电常数等物理性质。与TDEM的短脉冲信号不同,FDEM使用的是持续的、不同频率的电磁波。这些电磁波与地下介质相互作用时,其传播特性将受到地下介质电导率和介电常数的影响,从而反映出地下介质的电学特性。接收器通过分析不同频率下电磁信号的衰减过程,可以推断出地下的电学属性及其分布特征。

FDEM的一个突出特点是能够根据不同频率的变化,揭示地下介质的电学性质。由于不同深度的地下介质对电磁波的反应在不同频率下会有所差异,FDEM可以有效地区分地下的多层结构,尤其在浅层探测方面具有显著优势。FDEM能够为地下浅层地质体提供详细的电导率分布信息,这使得它在矿产勘探、土壤调查以及浅层地下水的分析中得到了广泛应用。在探测浅层结构时,FDEM能够精准反映电导率的微小变化,帮助科学家分析土壤、岩层的厚度及其电学性质。

然而,FDEM的主要限制在于其探测深度相对较浅,通常只能有效探测几十米以内的地下结构,因此它主要用于浅层地质的探测。在隧道建设中,FDEM适用于浅层土壤、电水位监测和地质断层等问题的检测,但对于深层岩土探测能力有限。因此,在复杂的地下地质环境中,FDEM常常与其他探测技术结合使用,以弥补其深度探测的不足。

1.3 TDEM与FDEM的比较

TDEM和FDEM在原理上的差异导致它们在不同应用场景、探测深度、分辨率等方面存在不同的特点和优势。TDEM主要通过短脉冲激发地下介质,测量信号的衰减过程来获取深层地下信息。这种方法能够探测较大的深度,适用于隧道施工中的深层地质预报,特别是在需要精确分析深层岩层的电性分布时,TDEM具有显著的优势。通过对衰减信号的分析,TDEM能够有效推断出地下不同深度的电导率分布,帮助识别深层的异常地质体,如断层、裂缝、矿体等。

与TDEM不同,FDEM通过不同频率的电磁波来探测地下介质的电学性质,适用于较浅层的地质探测。由于FDEM对不同频率的电磁波的响应敏感,因此能够较为准确地揭示地下浅层的电导率变化,尤其适用于浅层土壤、地质断层的监测以及地下水位的测量。FDEM的高空间分辨率使得它在浅层结构的探测中具有较好的精度,能够提供丰富的地下浅层信息,尤其在矿产勘探和土壤分析中应用广泛。

然而,FDEM的探测深度有限,通常只能探测浅至中等深度的地下介质,无法有效探测较深的地下结构。因此,在隧道地质勘查中,FDEM主要用于浅层结构分析,特别是在施工过程中涉及到的浅层土壤、水文条件等问题。对于深层地质问题,则依赖于TDEM的高效探测能力。两者的结合使用可以弥补各自的不足,通过综合分析,能够获得更为全面、精确的地下地质信息。

总体而言,TDEM适用于对深层地质的探测,尤其在需要获取深部地下信息时具有重要作用,而FDEM则在浅层结构的高分辨率探测方面具有独特优势。二者结合使用,可以为隧道超前地质预报提供全方位的地下信息,不仅提高了预测精度,还能提高施工过程中的安全性。

2 TDEM与FDEM协同探测的应用实践

2.1 协同探测的实验设计

为了验证TDEM和FDEM在隧道超前地质预报中的协同效果,本文设计了相关的实验方案。在某隧道工程中,选择了若干不同的监测点进行两种方法的联合探测。实验的目的是通过结合TDEM和FDEM的优点,进一步提高对隧道前方地下结构的预报精度。实验过程中,TDEM主要用于探测隧道前方的深层地质结构,利用时间域电磁波的脉冲信号,获取深层岩层的电导率分布、地下水层及断层带的分布情况。FDEM则侧重于浅层地质结构的分析,特别是土壤层、地下水位及岩层电性变化等,提供更高分辨率的浅层地质信息。

实验中,选择的监测点考虑了隧道建设中可能遇到的不同地质问题,监测点分布范围涵盖了隧道前方不同深度及不同地质层次的区域。TDEM设备设置在离隧道前方一定距离的位置,重点对隧道前方的深层岩土层进行扫描。而FDEM则设置在距离隧道较近的区域,主要针对浅层土壤、表层岩层以及地下水的情况进行高频探测。通过两种方法的联合应用,可以全方位覆盖隧道周围不同深度的地下地质信息。实验设计中,还考虑了不同地质环境下的探测效果,通过不断调整探测参数,确保实验结果的准确性和可靠性。

为了确保数据的准确性和完整性,实验中还采用了多种设备参数和多个测量周期。通过对比不同探测时间点和不同探测深度下的实验数据,可以更好地分析TDEM与FDEM在协同探测中的表现,评估它们在隧道超前地质预报中的协同效果。

2.2 协同探测的结果分析

通过对实验数据的分析,结果表明,TDEM和FDEM

协同探测能够显著提高隧道超前地质预报的准确性和深度覆盖。在实验过程中, TDEM能够清晰地识别出隧道前方的深层岩层分布情况, 尤其是能有效探测到深层岩石的电导率分布, 为隧道前方的地质情况提供了非常重要的参考。通过分析TDEM数据, 能够准确地识别出深层的断层带、裂缝以及水流通道等关键地质体, 这些信息对于隧道建设至关重要, 能够为隧道的建设提供必要的指导, 避免施工过程中出现意外的地质灾害。

同时, FDEM在探测浅层地质方面展现了其独特优势。在实验中, FDEM能够提供高分辨率的浅层地质信息, 尤其在土壤结构、电导率的细微变化以及地下水位的变化监测中, FDEM能够获得清晰的数据。在实验中, 通过FDEM的探测, 成功识别了地下水位波动较大的区域和松散层的存在, 这些浅层地质特征对隧道施工过程中土壤稳定性和水害风险的评估至关重要。FDEM能够精准地揭示这些问题, 有效预防隧道施工中可能遇到的困难。

TDEM和FDEM的结合应用不仅增强了深层和浅层地质信息的获取能力, 还提供了全面的地质预报数据。通过融合两种方法的数据, 实验结果能够更准确地揭示地下结构, 提升了预警系统的效能, 尤其是在隧道施工的前期阶段, 对隧道建设风险的评估提供了可靠的依据。这种多层次、多角度的数据支持, 极大地提高了隧道超前地质预报的准确性, 确保了施工安全。

2.3 协同探测的优势与不足

协同探测的最大优势在于, TDEM和FDEM各自的特点互补, 能够弥补单一方法的不足, 提供更为全面的地下地质信息。TDEM适用于深层地质的探测, 尤其在分析隧道前方深层岩层、断层、地下水等重要地质信息时具有明显优势。TDEM通过测量电磁波的衰减过程, 可以深入探测几十米甚至几百米深的地下地质结构, 帮助工程师深入了解隧道前方潜在的复杂地质状况。例如, TDEM能够识别深层断层和裂缝等地质现象, 为隧道施工提供有效的预警, 避免施工过程中出现突发的地质灾害。

FDEM则在浅层地质结构的探测中具有明显优势, 尤其在浅层土壤、岩层电性变化及地下水分布的探测中表现出色。FDEM可以精准地识别浅层土壤的变化, 帮助判断地下水体的分布, 进而指导施工过程中的水害防治。FDEM的高分辨率使得它能够捕捉到地下浅层细微的电性变化, 提供更精细的浅层地质数据, 对于隧道开挖过程

中的土壤稳定性监测尤为重要。

通过TDEM与FDEM的联合使用, 能够将两者的优点结合起来, 全面覆盖隧道前方的地下地质信息。特别是在隧道施工前期, TDEM能够为深层结构提供准确的信息, 而FDEM则可以帮助分析浅层结构和地下水位等问题, 两者的协同应用极大提高了隧道超前地质预报的准确性, 确保了隧道施工的安全性和顺利推进。

然而, 尽管协同探测在实践中表现出了很多优势, 但也存在一些不足之处。例如, TDEM和FDEM设备的操作和维护要求较高, 需要专业的技术人员进行设置和数据解读。此外, TDEM在探测深层地质时, 受到电导率等因素的影响, 可能出现信号衰减较快的情况, 导致探测精度有所下降。FDEM则在深层探测方面受到局限, 无法有效获取更深层次的地质信息。尽管如此, 通过优化设备设置和数据处理, 协同探测的应用仍然能够在复杂地质环境中提供非常有价值的地质信息, 显著提升隧道施工的安全性。

结语

随着隧道施工技术的不断发展, 对隧道超前地质预报的精度要求越来越高。TDEM和FDEM作为两种常用的电磁探测方法, 在隧道超前地质预报中各自具有重要的应用价值。通过对比验证, 本文发现TDEM和FDEM的协同探测可以有效提升隧道地质预报的准确性, 特别是在复杂地质环境中, 两者的联合使用能够弥补各自的不足, 提供更加全面的地质信息。

尽管协同探测在实际应用中取得了显著的成果, 但在数据处理、结果融合等方面仍存在一定的挑战。未来, 随着电磁探测技术的进一步发展, TDEM与FDEM的协同应用将在隧道施工中的地质预报中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 马为, 刘正, 冯野. 瞬变电磁法用于煤矿致灾因素探查的效果[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (23): 181-183. DOI: 10.13487/j.cnki.imce.024502.
- [2] 李巧灵, 雷晓东, 李晨, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在地裂缝调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(06): 716-724.
- [3] 刘翔宇, 杨仁树, 杨立云, 等. 竖井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 145-152.