

面向隧道仰拱的声波全波形反演

何云川¹, 黄金强²

(1. 贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 作为当前勘探领域精度最高的速度建模方法, 全波形反演在隧道质检方面具有很好的应用前景。仰拱在隧道施工过程中容易出现质量问题且难以准确检测, 本文基于声波方程, 采用多尺度反演策略, 在时间域实现了一种针对小尺度隧道仰拱的反演检测方法, 通过模型测试验证了方法的正确性与有效性, 为仰拱结构的施工质量检测提供了新思路。

关键词: 全波形反演; 隧道仰拱; 多尺度; 时间域; 质量检测

中图分类号: U456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 10—0156—03

仰拱的施工质量在一定程度上决定着隧道的运行安全, 因此, 实现对仰拱质量的准确检测是保证隧道正常运行的重要环节^[1]。

当前一些主流的检测方法在仰拱检测中面临诸多困境, 如: 地质雷达法受钢筋网限制, 在下覆介质中几乎失效; 钻芯法对仰拱本身有一定的破坏且为“一孔之见”, 难窥全貌; 常规地震处理方法分辨率有限^[3]。起源于油气领域的全波形反演方法 (FWI, Full Waveform Inversion) 可充分利用采集数据的振幅与波形信息, 相比于传统地震波法, 其结果具有更高的反演分辨率^[2]。

本文将该方法应用于仰拱结构的施工质量检测中, 发展了一种新型的无损检测手段, 有望为工程质量检测提供更精确的检测结果。

1 方法原理

全波形反演是通过求解最优化问题得到最佳的地下介质参数模型^[4-5], 即根据合成数据与观测数据的 2 范数建立如下目标函数:

$$E^{WD}(m) = \frac{1}{2} \sum_i^{ns} \sum_j^{nr} [s_{i,j} - g_{i,j}]^2 \quad (1)$$

其中, m 为模型参数, ns 与 nr 分别表示激发源炮数与检波器个数, i 为炮号, j 为对应的检波点编号, s 为模拟数据, g 为观测波数据。上述问题通常有梯度类和牛顿类两种算法, 本文采用预处理共轭梯度法^[6]。在该算法中模型更新公式可表示为:

$$m_{k+1} = m_k + \alpha_k d_k \quad (2)$$

其中, m 为模型参数, k 为迭代次数; α_k 表示迭代步长, d_k 表示第 k 次迭代的梯度, 其公式为:

$$d_k = -P_k g_k + \beta_k d_{k-1} \quad (3)$$

g_k 为最速下降方向, 由伴随波场与震源波场的互相关求取, P_k 为预条件算子, 通常取照明补偿或高斯平滑算子, β_k 由 P-R 公式得到^[7]:

$$\beta_k = \frac{g_k^T (P_k g_k - P_{k-1} g_{k-1})}{g_{k-1}^T P_{k-1} g_{k-1}} \quad (4)$$

基于 2 范数的伴随源 $f_{i,j}^*$ 通常由观测记录与合成记录的差得到, 再将伴随源反传可得伴随波场:

$$f_{i,j}^* = s_{i,j} - g_{i,j} \quad (5)$$

由于 FWI 对初始模型依赖性较高, 为避免反演陷入局部极小, 本文采用频率多尺度策略, 通过带通滤波器逐级反演, 将低频带反演结果作为高频反演的初始模型, 可有效缓解周期跳跃的影响^[8]。

2 复杂模型试算

为检验算法的正确性, 本文依据砟等级和典型的隧道仰拱施工方案, 设计了一个隧道仰拱波速模型如图 1 (a) 所示, 图中可见: 该模型由三层不同等级的混凝土、底层的低速岩土、两层钢筋网和等间距分布的工字钢组成, 不同的地质体主要表现为波速存在较大差异。该模型沿隧道方向的大小为 10m, 竖直方向为 3m, 为了进行数值计算与反演, 将该模型离散为 500×150 个矩形网格单元, 纵横向网格间距都为 0.02m, 模型的最大、最小速分别是 5900m/s、2500m/s, 在高频地震波正演模拟中, 采样时间取 4.5ms, 采样点数为 4501 个, 采样步长为 0.001us, 震源子波采用 15000Hz 的雷克子波, 经计算, 上述参数满足频散条件与稳定性条件。本算例共激发 51 炮, 激发深度 0m, 起始炮点 0m, 炮间距 0.2m, 每炮共 251 道接收, 检波器间距 0.04m, 起始位置 0m。

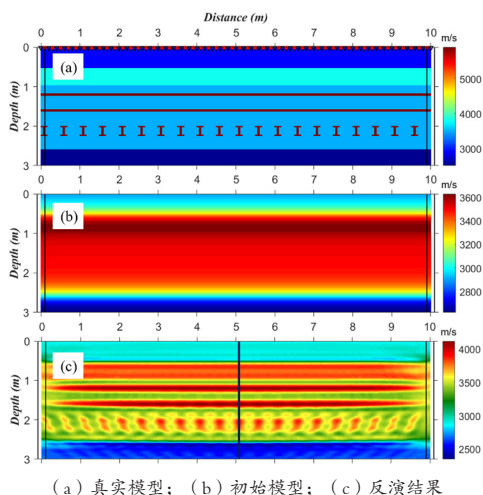


图1 正常的隧道仰拱模型

基于上述观测系统和计算参数,选择如图1(b)所示的初始模型,采用多尺度全波形反演方法,得到如图1(c)所示的反演结果,观察可见:初始模型仅仅反映了三层结构,无法得知钢筋网与工字钢位置与形态以及混凝土等级,在实际数据处理中,可根据仰拱的设计方案进行估算;而经过波形反演之后,四层不同波速的介质结构清晰可见,钢筋网和工字钢的位置与形态都得到呈现,但分辨率有限,在反演结果中有放大趋势,此外,受观测系统的影响,模型两侧的工字钢有倾斜效应,但总体而言,各个异常体与分界面都能够清楚地辨识。

为了进一步分析与展示上述方法的正确性,图2(a)给出了正常仰拱模型第25炮激发的合成地震记录,图中可见:由于模型的对称性,地震记录也存在一定对称性,在图中可观测到来自四个反射界面的反射波,同时还可看到来自钢筋绕射体的绕射波。图2(b)抽取了第254道(如图1(c)中黑色位置所示)的波速进行对比,图中蓝色为真实结果,绿线为初始结果,而红线为反演结果,对比可见:反演结果与真实模型在波速变化上趋于一致,波速明显变大的位置即为钢筋所在位置。

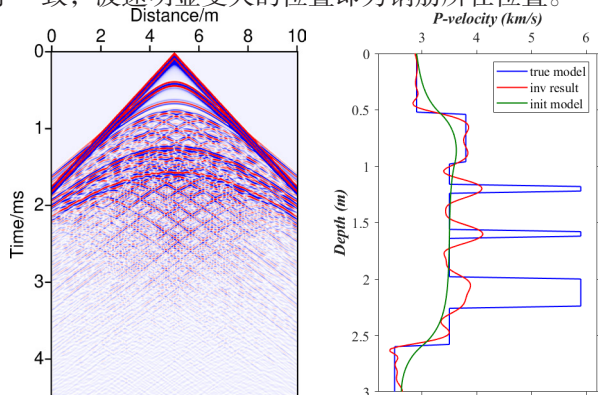


图2 单炮记录(a)与单道对比(b)

工字钢的间距与工字钢是否缺失是隧道仰拱施工质量检测的重要内容之一。图3(a)给出了工字钢存在缺失时的仰拱模型,从左往右依次缺失一根、两根、三根和四根工字钢,图3(b)为初始模型,图3(c)为反演结果,图中可见:即使在初始模型非常不准确的情况下,反演结果中依然清晰准确地还原了工字钢缺失的位置,检测结果可靠。

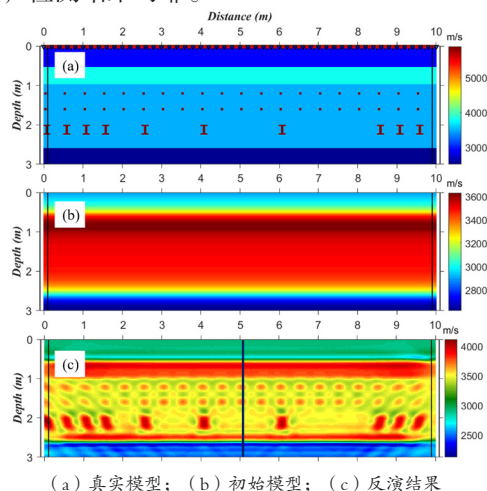


图3 工字钢存在缺失的隧道仰拱模型

图4(a)为第25炮激发的正演记录,与图2(a)对比可见:由于模型的不对称性,导致绕射波存在明显的不对称性,如黑色箭头所指。图4(b)为第254道波速结果对比,图中可见:在深度为2~2.5m处,没有明显的波速变化,指示此处工字钢存在缺失,达到了检测的目的。

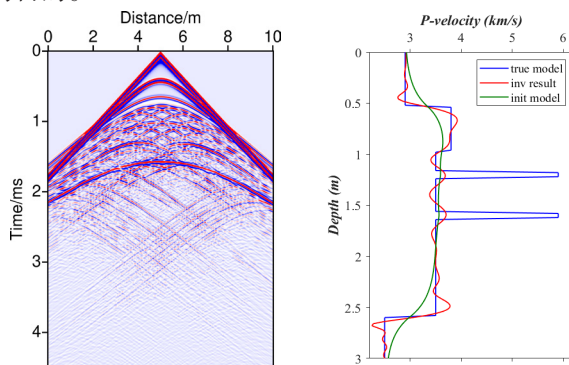


图4 单炮记录(a)与单道对比(b)

3 结论

针对仰拱施工过程中存在的工字钢缺失等问题,本文提出了一种高频地震波全波形反演检测方法。通过典型模型试算表明本文方法具有良好的适应性与优势,不存在检测盲区,弥补了地质雷达法在钢筋网下覆介质中的不足,结合微损检测方法的直观性,该方法可实现对

面向隧道仰拱的高频地震波逆时偏移成像

杨礼胜, 黄金强

(贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 仰拱作为隧道结构的重要组成部分之一, 其施工质量关系着隧道的运行安全, 因此开展隧道仰拱施工质量检测至关重要。逆时偏移是当前油气勘探领域最前沿的一种成像方法, 本文通过频率拓展处理及 GPU 并行优化, 将该方法推广至隧道仰拱质量检测中。通过开展两个典型仰拱模型的逆时偏移试算, 其结果表明: 拓展至高频后的逆时偏移方法能够实现对仰拱内部结构的准确成像, 达到准确、快速、无损检测的目的。

关键词: 隧道仰拱; 施工质量检测; 逆时偏移; 频率拓展; 无损检测

中图分类号: U456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 10—0158—03

1 引言

仰拱主要用于改善隧道上部支护结构的受力条件, 仰拱的施工质量不达标会在隧道运营过程中产生很大的安全隐患, 因此, 开展隧道仰拱质量检测是确保隧道安全的重要内容之一^[1]。

当前隧道仰拱的检测方法主要有无损的地质雷达法、瞬态面波法以及微损的钻孔法。钻孔法具有一定的破坏性, 已逐渐被仰拱检测行业淘汰; 瞬态面波法精度不足, 经常出现遗漏和误判, 需结合钻孔法进行综合判定^[2]; 地质雷达法精度高、检测速度快, 成为目前仰拱检测的主流技术, 但也存在一个固有缺陷, 即由于钢筋网对电磁波的吸收衰减严重, 导致钢筋网下覆介质中病害问题难以检测, 如: 工字钢缺失或间距过大等问题^[3]。

在地球物理领域, 随着物探技术与计算机技术的日益发展, 出现了很多新兴的无损检测理论与方法, 如逆

时偏移, 该方法在油气勘探、工程物探、人脑检测中都展现出巨大的潜力, 是地震勘探领域最具潜力的成像技术之一^[4]。本文提出将该方法进行频率拓展, 以适应小尺度仰拱检测, 同时, 考虑到计算成本, 采用了 GPU 并行加速策略。最后, 通过对两个典型的仰拱模型进行逆时偏移成像试算, 验证了本方法的可行性及有效性。

2 方法原理

逆时偏移的基本原理是利用地震波在地下介质中的传播规律, 通过波场正传、波场重构与波场反传计算出准确的震源波场与检波点波场, 然后对同一时刻的两个波场值, 利用互相关成像条件提取该时刻的成像值, 最后对所有时刻的成像值进行叠加, 即可得到完整的成像剖面^[5]。

在二维各向同性声波介质中, 一阶速度—应力方程

仰拱结构的快速、高效、全面且精细化检测, 为无损检测提供了新思路。

参考文献:

- [1] 白国权. 隧道仰拱缺陷程度划分组合与处治措施探析[J]. 公路, 2016, (10): 251-256.
- [2] 杨勤勇, 胡光辉, 王立歆. 全波形反演研究现状及发展趋势[J]. 石油物探, 2014, 53(1): 77-83.
- [3] 杨午阳, 王西文, 雍学善, 等. 地震全波形反演方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 766-776.
- [4] Tarantola A. Linearized inversion of seismic reflection data[J]. Geophysical Prospecting, 1984, 32(6): 998-1015.
- [5] 何云川, 黄金强, 金宗玮. 基于褶积目标泛函的弹性

波全波形反演[C]. 中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集, 2021: 1296-1299.

[6] 刘宇航, 黄建平, 杨继东, 等. 弹性波全波形反演中的四种优化方法对比[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(1): 118-128.

[7] Fletcher R, Reeves C M. Function minimization by conjugate gradients[J]. The Computer Journal, 1964, 7(2): 149-154.

[8] Bunks C, Saleck F M, Zaleski S, et al. Multiscale seismic waveform inversion[J]. Geophysics, 1995, 60(5): 1457-1473.

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础 [2020]1Y174, 黔科合基础 -ZK[2022] 一般 060)