

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主要组成部分之一, 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)

可表示为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = -\rho v^2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 、 z 为空间坐标, t 为时间坐标, ρ 为密度, v 为纵波速度, p 为压力波场, v_x 、 v_z 分别为 x 方向和 z 方向的质点振动速度。有限差分法具有高效且易于实现的特点, 本文采用交错网格高阶有限差分法对式 (1) 进行离散求解。以 x 方向为例, 速度分量 v_x 和压力波场 p 的 2L 阶离散格式为^[6]:

$$\begin{cases} v_{x, i+\frac{1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} = v_{x, i+\frac{1}{2}, j}^{t-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \sum_{m=1}^L C_m^{(N)} (P_{i+m, j}^t - P_{i-m+1, j}^t) \\ P_{i, j}^{t+1} = P_{i, j}^t + \frac{v^2 \Delta t}{\rho \Delta x} \sum_{m=1}^L C_m^{(N)} \left(v_{x, i-\frac{2m-1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} - v_{x, i+\frac{2m-1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δx 为 x 方向网格间距, Δt 为时间步长, $C_m^{(N)}$ 为有限差分系数。式 (2) 即为震源波场正向时间延拓公式。检波点波场反向延拓就是正演的逆过程, 其延拓公式与正向延拓公式类似:

$$\begin{cases} v_{x, i-\frac{1}{2}, j}^{t-\frac{1}{2}} = v_{x, i-\frac{1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \sum_{m=1}^L C_m^{(N)} (P_{i-m+1, j}^t - P_{i+m, j}^t) \\ P_{i, j}^t = P_{i, j}^{t+1} + \frac{v^2 \Delta t}{\rho \Delta x} \sum_{m=1}^L C_m^{(N)} \left(v_{x, i-\frac{2m-1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} - v_{x, i+\frac{2m-1}{2}, j}^{t+\frac{1}{2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

根据成像条件, 震源波场与检波点波场需在同一时刻进行成像, 而波场延拓过程中, 两者并不一致, 震源波场是正向计算的, 而检波点波场是反向计算的, 因此需要将所有时刻的震源波场存储到磁盘中, 成像时再读入内存, 这需耗费极大的存储和 I/O 成本, 为了节约存储与 I/O 成本, 本文采用了波场重构技术, 即仅存储震源波场的边界值, 在反传时, 通过波场重构恢复震源波场, 以计算换取存储, 为了进一步提升计算效率, 本文在波场正传、波场重构、波场反传计算中都采用 GPU 并行加速^[7]。

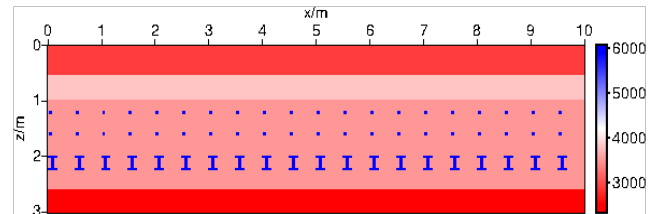
最后, 将同一时刻的震源波场和检波点波场进行零延迟互相关, 即可得到该时刻的成像值, 再将所有时刻的成像值进行叠加, 即可得到该炮的逆时偏移成像结果, 其公式为^[8]:

$$I(x, z) = \int_0^{T_{\max}} S(x, z, t) R(x, z, t) dt \quad (4)$$

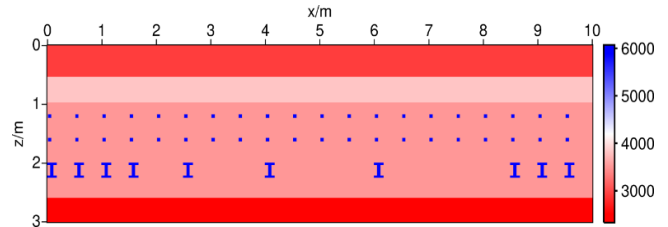
其中, $I(x, z)$ 为最终成像结果, $S(x, z, t)$ 表示震源波场, $R(x, z, t)$ 表示检波点波场。

3 模型试算

为了验证本文方法的有效性, 依据波速与砼等级、钢筋的关系, 首先建立了两个二维仰拱波速模型, 图 1 (a) 表示工字钢完整的仰拱波速模型, 图 1 (b) 表示工字钢缺失的仰拱波速模型, 图中可见: 相对图 1 (a), 图 1 (b) 中从左往右依次缺失了 1 根、2 根、3 根、4 根工字钢。上述两个模型尺寸相同, 都为 10m × 3m, 该模型在 x 方向有 501 个网格点, 在 z 方向有 151 个网格点, 网格点间距都为 0.02m, 模型中最大速度为 5900m/s, 最小速度 2500m/s; 震源为主频为 15000Hz 的雷克子波, 一共激发 51 炮, 炮间距为 0.2m, 炮点深度为 0m, 从 0m 处开始激发; 采用地表满接收方式, 每炮共设置 251 个检波点, 检波点间距为 0.04m, 起始检波点位置为 0m; 时间采样点数为 4001, 时间步长为 0.001ms, 记录时间 4ms。



(a) 完整的仰拱模型



(b) 工字钢缺失模型

图 1 二维仰拱速度模型

根据上述观测系统与计算参数, 合成两个模型的地震数据, 用于模拟野外实际采集过程, 所得结果分别如图 2 (a) 和 (b) 所示, 对比可见: 图 2 (a) 中模型分界面所对应的反射波更为清晰, 同相轴连续性较好, 由钢筋网及工字钢所产生的绕射波也具有较好的呈现; 而在图 2 (b) 中, 由于工字钢不完整, 正演记录也会存在一定差异, 图中可以清晰地看出钢筋网下层界面所对

应的反射波同相轴不连续、工字钢界面对应的绕射波部分缺失（如图 2（b）中虚线框所指）。虽然从地震记录中可粗略地判断仰拱是否存在病害,但病害体的位置、形态难以定量化,需要进一步采用逆时偏移进行定量检

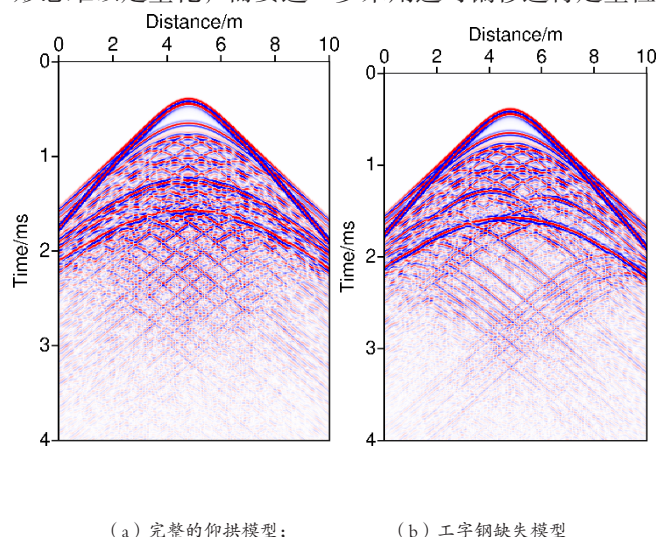


图 2 仰拱模型的单炮正演结果

本文采用相同的偏移速度和成像方法对上述两个模型进行逆时偏移成像试处理,成像结果分别如图 3（a）、（b）所示,图 3（a）为工字钢完整时的仰拱模型成像结果,图 3（b）为工字钢缺失时的仰拱模型成像结果,对比可见:两个成像结果与其给定模型的分界面具有高度的一致性,分辨率较高,成像效果良好,特别是仰拱内部结构的混凝土分界面、钢筋网与工字钢的位置、几何形态都得到清晰的刻画;从工字钢缺失模型的成像剖面中还可看到,工字钢缺失的位置和缺失的数量都十分清晰,这表明该检测方法具有很好的适应性和优势,也验证了将逆时偏移方法应用于隧道仰拱质量检测中具有一定的可行性。

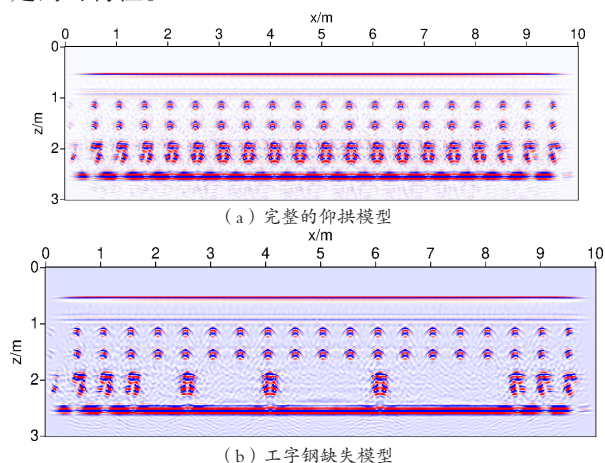


图 3 仰拱模型的逆时偏移成像结果

4 结论

本文将逆时偏移方法应用到隧道仰拱质量检测中,利用高频拓展实现了对小尺度模型的精确成像,同时引入波场重构与 GPU 并行策略,有效地提高了波场延拓效率,降低了存储与 I/O 成本。典型模型测试结果表明:逆时偏移可以实现对仰拱模型的高精度快速成像,能够直观地定位仰拱中异常体的位置和形态,特别是工字钢的成像效果十分显著,验证了逆时偏移成像方法在隧道仰拱质量检测中的可行性与实用性。

参考文献:

- [1] 上官涛. 铁道隧道底部病害成因分析与质量检测技术[J]. 铁道建筑, 2015(6):64-66.
- [2] 刘继滨, 张方, 汪旭, 等. 瞬态面波法在隧道仰拱质量检测中的应用研究[J]. 路基工程, 2018(1):115-119.
- [3] 申付全. 隧道仰拱施工质量检测方法探讨[J]. 路基工程, 2017(3): 208-211.
- [4] 李振春. 地震偏移成像技术研究现状与发展趋势[J]. 石油地球物理勘探, 2014,49(1):1-21.
- [5] 何兵寿, 高琨鹏, 徐国浩. 各向异性介质中弹性波逆时偏移技术的研究现状与展望[J]. 石油物探, 2021, 60(2): 210-223.
- [6] 彭更新, 刘威, 郭念民, 等. 基于时空域交错网格有限差分法的应力速度声波方程数值模拟[J]. 石油物探, 2022, 61(1):156-165.
- [7] 张慧, 蔡其新, 秦广胜, 等. 基于 GPU 并行加速的逆时偏移成像方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013,48 (5):707-710.
- [8] 薛浩, 刘洋. 基于多方向波场分离的逆时偏移成像方法[J]. Applied Geophysics, 2018, v.15(2):76-87.

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)