

文章编号: 1000-7598(2011)02-0629-06

基于弯曲路径的混凝土超声层析成像及其改进

熊 炜^{1,2}, 周曾辉¹, 余开彪¹, 吴亚平¹, 罗 炜³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.中国科学院成都光电研究所, 成都 610209; 3.武汉软件工程职业学院, 武汉 430205)

摘 要: 针对混凝土质量检测的特点, 采用弯曲射线进行超声层析成像。首先建立波速分布的网格模型, 并引入最短路径法进行射线追踪, 然后采用联合迭代重建技术(SIRT)反演成像。为使算法适应弯曲射线, 对SIRT的计算步骤进行调整, 增加外层迭代, 以便对修正后的路径进行下一轮反演; 为提高反演精度, 根据射线传播距离、幅度衰减、频率突变等信息建立和调整信号可信度系数, 并依据该系数在求取网格慢度修正值时进行加权平均; 为缩短计算时间, 动态调整网格节点个数, 并进行双向最短路径追踪。经过数值模拟及对混凝土基桩的实测, 证明该方法在计算准确性和精度上有明显改进, 计算速度也可以满足工程应用的需要。

关 键 词: 混凝土; 弯曲射线; 最短路径; 联合迭代; 层析成像

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

Concrete ultrasonic tomography imaging and improvement based on curved path

XIONG Wei^{1,2}, ZHOU Zeng-hui¹, YU Kai-biao¹, WU Ya-ping¹, LUO Wei³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. Wuhan Vocational College of Software Engineering, Wuhan 430205, China)

Abstract: Because of the characteristic of concrete quality detection, it's necessary to adopt the bending ray in the technique of ultrasonic tomography. A grid model of wave speed distribution is built at first. Then the ultrasonic ray is traced with the shortest path method and the simultaneous iterative reconstruction technique(SIRT) is adopted to image. In order to adjust the algorithm to bending ray, the calculation procedure of SIRT is revised. The iteration in the outer layer is enhanced to do the next inversion of the modified path. To improve the inversion precision, the signal reliability coefficient is established and revised according to the informations such as: ray propagation distance, amplitude attenuation and frequency break, etc. According to this coefficient, the weighted average is calculated when solving the modified value of grid slowness. In order to improve the calculation speed, the grid number is dynamically adjusted; and the shortest path is searched in bi-direction. Through the numerical simulation and field measurement of concrete piles, it is proved that there is an obvious improvement on the calculation accuracy; and its calculation speed can be accepted in the engineering application.

Key words: concrete; bending ray; shortest path; simultaneous iterative reconstruction technique; ultrasonic tomography

1 引 言

在检测混凝土质量时, 常利用超声透射法或超声回波法获得超声在介质中传播的平均特性参数。由于得到的是射线传播路径上特性参数的平均值, 因此, 这些方法无法判定缺陷的准确位置和具体尺寸, 并且当高速与低速异常同时分布或者异常区域较小时, 还会出现错判和漏判。应用超声波进行计

算层析成像能够获得整个测区的参数分布图像, 因而可以更准确地描述混凝土内部的质量情况。超声层析成像技术的研究对混凝土的无损检测具有重要意义。

过去的超声层析成像建立在直射线的基础之上, 假设超声波从震源出发, 沿直线传播到达接收装置。这种假设同声波在复杂介质中的实际传播路径有较大出入。实际上, 由于介质波速扰动对射线

收稿日期: 2009-01-23

第一作者简介: 熊炜, 男, 1971年生, 博士, 系统分析师, 主要从事与地质工程及岩土工程相关的无损检测与监测、数据分析与处理等方面的研究。
E-mail: xiongweimail@163.com

的作用,使得声波在介质中的传播路径是弯曲的。根据 Snell 定理^[1]有

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\beta}} \quad (1)$$

式中: α 、 β 分别为入射角和折射角; V_{α} 、 V_{β} 分别为声波在入射介质和折射介质中的传播速度。当介质波速发生变化时,声波在界面处会发生折射(更复杂的情况下还会存在绕射现象^[2]),折射角度同入射波速及出射波速有关。因此,获取射线路径,根据弯曲射线模型进行反演,可以大大提高图像的准确性。

在混凝土测试中,由于实际工作环境的限制,测量精度有时不是很高,而且,由于无法对测区进行全视角密集测试,得到的数据也并不完整。SIRT 法将所有射线的走时残差平均分配到每个网格单元中,通过不断修正慢度(速度的倒数)来得到结果,正好可以有效克服这种因个别数据误差较大及射线分布不均而造成的失真和误差集中^[3],因此,本文采用 SIRT 法进行图像反演。然而,经典 SIRT 算法是针对直射线的^[4],将 SIRT 应用于弯曲射线的速度反演,以前也有人做过,但在计算的精度上没有优势,计算速度也不很理想。本文从工程应用的实际出发,在计算步骤、慢度修正方式以及射线追踪手段上进行了一些改进,使之能成功应用到混凝土的弯曲路径层析成像上。

2 弯曲路径下的成像算法

2.1 建立声波慢度模型

将混凝土测区划分成离散的矩形网格单元,每个网格单元的几何尺寸相同。根据混凝土介质的材料连续性,假设同一单元内声波传播速度相同,不同单元间波速发生缓慢变化^[5]。从发射传感器激发的声波射线沿某条确定路径穿过这些单元到达接收传感器。由于每个网格内部各点波速相同,故声波在网格内沿直线传播,只在单元界面处发生折射和反射。

2.2 求超声传播路径

由惠更斯原理可知,在超声波的传播过程中,不论是在同一波前还是不同波前上的各点,都可看作是发射子波的波源,任一时刻这些子波的包迹就是该时刻的波前。因此,不论波动经过的介质是均匀的还是非均匀的,只要知道某一时刻的波前,就可以用几何方法来确定下一时刻的波前。

费马原理认为,声波总是沿着走时最短的路径传播的,以两点间的声波走时为权,采用图论中求

两点间最短路径的算法可以快速得到声波在介质中的传播路径。利用该方法不仅可以追踪到直达波,而且还可以追踪到折射波和绕射波。

如图 1 所示,在每个网格的边界上等间距地插入 k 个内插节点^[6],规定射线在跨越网格边界时必须经过这些节点。 k 值越大,射线追踪精度越高,但计算时间越长,内存开销也越大;反之,则计算时间短,内存开销小,但追踪精度低。

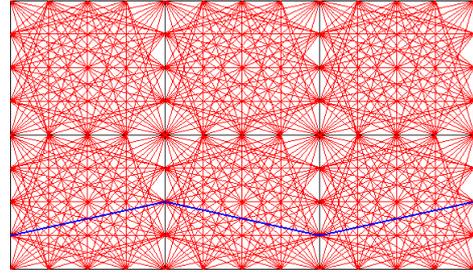


图 1 $k=3$ 时的网格模型示意图
Fig.1 Grid model diagram when $k=3$

2.3 重建慢度图像

设 A 为射线传播距离矩阵, s 为慢度向量, t 为观测走时向量,根据 Radon 变换下式成立:

$$t = As \quad (2)$$

重建慢度图像实际上就是通过 t 和 A 求解 s 的过程。设 A_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个网格内的传播距离, τ_i 为第 i 条射线的走时残差,则在第 k 次迭代时第 i 条射线对第 j 个网格中慢度修正值所做的贡献可以表示为

$$e_{ij}^{(k)} = \frac{A_{ij}\tau_i}{\sum_j (A_{ij})^2} \quad (3)$$

按照经典 SIRT 公式,在第 k 次迭代时第 j 个网格的慢度修正值为

$$e_j^{(k)} = \frac{1}{N_j} \sum_i e_{ij}^{(k)} \quad (4)$$

式中: N_j 为经过第 j 个单元格的射线条数。根据式(4)对网格慢度进行不断修正,直到不等式(5)成立:

$$|s_j^{(k+1)} - s_j^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (5)$$

即为 SIRT 算法的收敛条件。式中: $s_j^{(k)}$ 和 $s_j^{(k+1)}$ 分别为第 k 和 $k+1$ 次迭代时的拟合慢度; ε 为迭代过程中慢度的容差限。

在传统 SIRT 法中,因为不需要进行弯曲路径修正,所以,当不等式成立时算法终止, $s^{(k+1)}$ 为所求慢度分布。而在弯曲路径条件下,需要进行 2 层

迭代。内层迭代用于在上次射线追踪的基础上得到一个传统 SIRT 法的收敛解, 其终止条件仍采用式 (5)。若不等式成立, 表明在当前假设的路径上收敛成功, 算法进入下一次外层迭代, 以根据新的慢度重新进行射线追踪; 否则说明当前路径下解还没有收敛, 令 $k = k + 1$, 进行下一次内层迭代, 继续逼近真实解。外层迭代包含传统 SIRT 反演及最短路径射线追踪, 以式 (6) 为终止条件。

$$|\tau^{(q+1)} - \tau^{(q)}| \leq \varepsilon_2 \quad (6)$$

式中: $\tau^{(q)}$ 和 $\tau^{(q+1)}$ 分别为第 q 和 $q+1$ 次外层迭代时的走时残差; ε_2 为外层迭代中走时残差的容差限。若不等式成立, 则终止整个算法。否则, 用新的慢度修正射线传播路径, 再以这个新的路径为基础求取更逼近真实路径的解。

3 对算法的改进

3.1 提高反演精度

由于模型本身的误差以及测量过程中引入的误差, 式 (2) 是非适定的^[7]。根据某些先验信息对方程进行约束有助于得到更合理的解^[8]。贝叶斯重建法就是一种利用先验概率信息重建算法^[9]。针对本文所选取的 SIRT 算法, 由式 (4) 可以看出, 该算法以所有射线对某个网格慢度修正值的算术平均值对该网格进行慢度修正。当穿过每个网格的射线数量足够多, 并且每条射线的误差成均匀分布时, 这是合理的。但在测量过程中, 这种理想条件一般是无法满足的。由于观测条件和观测角度不同, 每条射线对于修正某网格所能提供的信息量是不同的, 因此, 在对该网格做慢度修正时其所作出的贡献也是不同的。对于信号质量好的射线, 其测量误差更小, 可信度更高, 应该分配更大的权值。反之, 对信号质量差的射线则应分配较小的权值。

对于信号质量的好坏可以通过以下方法来判别:

(1) 传播距离

声波在混凝土的传输过程中会逐步衰减, 其黏滞衰减公式^[10]为

$$P = P_0 e^{-\int \gamma(x) dx} \quad (7)$$

式中: P_0 为发射位置的声波幅值; γ 为衰减系数, P 为声波在传播距离为 x 时的幅值。由式 (7) 可知, 随着距离的增加, 信号呈指数衰减。所以传播路径更短的射线, 其衰减更少, 信号强度更大, 可信度更高, 因而在求平均时的权重也应该更大。

(2) 幅值

如式 (7) 所示, 尽管声波幅值在传播的过程中必然存在衰减, 并且这种衰减同介质情况以及传播距离都有关系。然而, 有些衰减是由于测量系统或测量方法本身的误差所带来的, 这类衰减通常都具有突变的特点。对于存在这种幅值出现突然衰减的射线, 应该尽量减少其在计算过程中的影响, 即给予轻权。

(3) 频率

声发射传感器发出的是复频超声波脉冲, 其中包含了一系列不同频率成分的余弦波分量。在传播过程中高频成分首先被吸收和发生散射^[11], 低频成分在传播距离不远、介质成分相对简单的混凝土测试中则变化较小。相对而言, 测量系统的频响特性 (如工频干扰) 却对低频信号存在较大的影响。因此, 对于低频成分变化较大的信号, 应减小其权重。

根据以上分析, 可以将式 (4) 改为

$$e_i^{(k)} = \sum_i \delta_i e_{ij}^{(k)} / \sum_i \delta_i \quad (8)$$

式中: δ_i 为根据射线传播距离以及声波的幅值和频率综合评判得到的第 i 条射线的信号可信度系数。

开始计算之前, 根据测量的先验信息以及波形的幅值和频率给出 δ_i 的初值, 之后只需在每次射线追踪之后根据射线传播距离进行适当调整。声波传播距离在射线追踪时就已经得出, 所以因调整 δ_i 值而增加的计算时间很少。

3.2 缩短计算时间

由于在每次外层迭代时都要重新进行射线追踪, 而搜寻最短路径所花的时间在一次外层迭代中占有较大比重, 所以随着外层迭代次数的增多, 计算时间迅速变长, 这对工程应用相当不利。Klimes、Kvasnicha^[12]及Zhang、Toksoz^[13]等提出通过改变内插节点的分布来缩短射线追踪时间, 从而提高整体计算效率。然而改变节点分布的方法使计算变得更复杂, 实现起来难度较大, 并且由此带来一些额外的计算, 抵消了其节省的一部分时间。本文采用简单易行的动态调整内插节点数的方法来提高计算效率: ①在刚开始时将每个网格边界包含的节点数 k 设为一个较小的值, 然后随着外层迭代次数的增加, 逐步提高 k 值, 直到一个理想值。在外层迭代初期, 慢度误差很大, 此时不管 k 值有多大, 依据该慢度找到的最短路径必然也存在较大误差。在这种情况下过渡追求正演精度意义不大。所以, 在开始时通过设置较低的 k 值, 加快射线追踪速度; 随着外层迭代次数的增加, 慢度误差越来越小, 而射线路径

不精确所导致的慢度误差在整个误差中所占比重越来越大，因此，降低正演误差显得越来越重要。为此逐步增加 k 值，提高射线追踪精度，降低正演误差，以便进一步减小慢度误差。②鉴于目前双核处理器已经相当普及，可以在进行计算时充分发挥多 CPU 并行处理、协同工作的优势，避免不必要的等待时间。例如，在编制程序时，采用多线程并行计算，从声波发射点和声波接收点同时出发，双向查找通向对方的最短路径，当两路查找得到同一个公共节点时，最短路径连接成功。该方法可以有效缩短正演计算的时间。

4 算例与工程应用

下面分别使用直线法、弯曲射线 SIRT 法及本文所述的改进弯曲法对表 1 给出的波速模型进行成像。表中， R 代表网格单元的行； C 代表网格单元的列。

表 1 波速模型
Table 1 The wave speed model

R	网格单元 C				
	C1	C2	C3	C4	C5
R1	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
R2	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
R3	4 000	4 000	2 000	4 000	4 000
R4	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
R5	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000

由于在很多工程应用（如混凝土桩基的完整性检测）中都存在观察面不全的问题，为模拟出这种情况下的结果，只在左右两个边界上进行观测^[14]。图 2 对比了 3 种算法得到的波速相对误差。

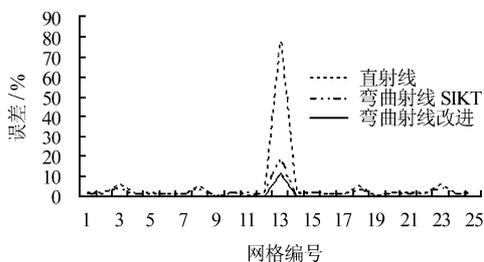


图 2 3 种方法的误差曲线
Fig.2 Error curves of three methods

从图 2 可以看出，直射线在正常部位处的误差尚可接受，但在异常部位出现了高达 80.3% 的巨大误差；对声波传播路径进行弯曲射线追踪后，结果有明显改善，但异常处的相对误差仍然达到 18.9%；

采用文中所述方法进行改进后，整个区间的波速分布都与实际情况更加接近，尤其是异常处，最大误差下降到 11.5%。

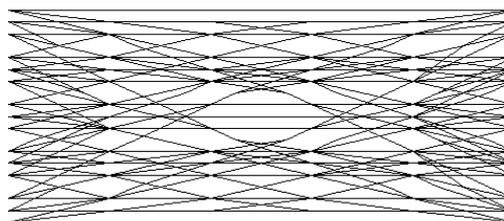
表 2 列出了 3 种方法下计算波速与真值的相关系数以及计算波速相对误差的均值和方差。

表 2 3 种方法的统计对比
Table 2 Statistical comparison between three methods

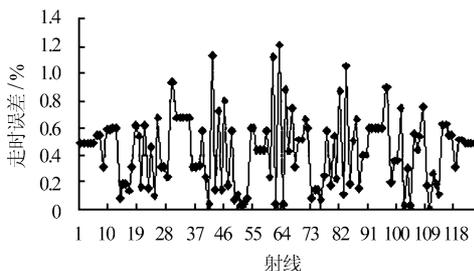
方法	相对误差/%		相关系数
	均值	方差	
直路径	5.27	15.59	0.620 32
弯曲法	1.33	3.66	0.882 18
改进弯曲法	0.53	2.27	0.999 81

从表 2 的统计数据中可以得出以下结论：①改进弯曲法的误差均值比另两种方法小 2~10 倍，说明总体上看前者所得结果比后者要好得多；②改进弯曲法的误差方差更小，说明该法得到的误差更稳定，各网格中的误差相对较均匀，出现较大误差的可能性更小；③从相关系数的对比看，改进弯曲法得到的波速分布与真实波速模型的相关度更高，数据拟合质量更好，异常部位的波速变化与真实情况更接近。

改进弯曲法在开始计算时，将内插节点数 k 设为 3，以后随迭代次数的增加，逐渐增加 k 值，当 k 达到 11 时可以得到比较理想的结果。继续增加 k 值会使计算时间显著增加，而对计算准确性的提高没有明显帮助。图 3~5 给出在不同 k 值情况下的射线追踪效果及据此计算得到的射线走时残差。



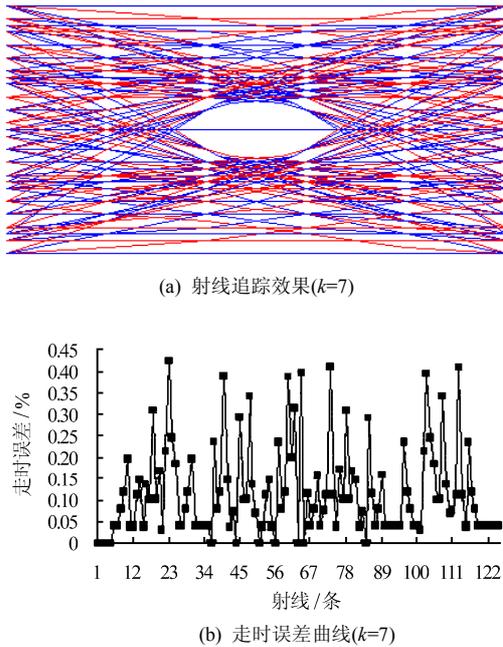
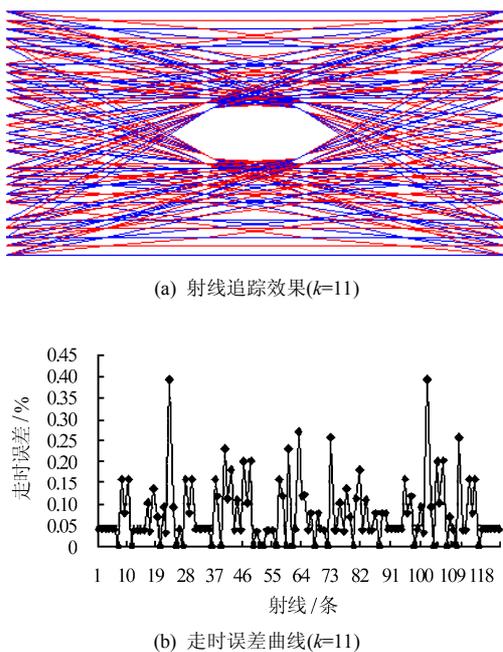
(a) 射线追踪效果($k=3$ 时)



(b) 走时误差曲线($k=3$ 时)

图 3 射线路径及走时误差($k=3$ 时)

Fig.3 Ray path and travel time error(when $k=3$)

图4 射线路径及走时误差($k=7$)Fig.4 Ray path and travel time error(when $k=7$)图5 射线路径及走时误差($k=11$)Fig.5 Ray path and travel time error(when $k=11$)

由图 3~5 可见, 当 $k=3$ 时, 折线显得比较稀疏, 这说明不同射线间存在一些共同的路径段, 即路径重复。一方面这些由于节点数太少而带来的虚假重复会严重影响距离矩阵的计算精度; 另一方面还会使射线过于集中在某些路径上, 从而降低了对那些未被覆盖路径所在网格的慢度修正。从走时误差图中可以印证这一点: $k=3$ 时的残差最大值达到 1.2%, 而 $k=7$ 及 $k=11$ 时的最大残差仅为 0.4% 左右。

$k=7$ 时, 折线密度已经较高, 追踪到的路径也较光滑, 这说明射线覆盖面扩大, 更多的网格可以获得更精确的慢度修正。然而不足之处是, 有不少射线的走时残差仍然较大 ($>0.15\%$), 这说明距离矩阵仍存在较大误差, 使得最终得到的计算走时同测量走时有较大差异。当 $k=11$ 时, 射线更加均匀, 同时走时残差进一步减小, 大多数都位于 0.15% 以下, 这说明此时的节点数量已经可以满足计算精度的要求了。试验证明, 此后再增加节点数, 对精度的提高没有明显帮助。

在最终 k 值都是 11 的情况下, 动态 k 值与固定 k 值具有相近的精度, 动态调整 k 值不会对成像精度带来不利影响 (前提是动态 k 值法在 $k=11$ 时至少应迭代 2 次); 而在计算时间上, 前者明显更短。计算表明, 固定 k 值弯曲成像法所需计算时间是直射成像时间的 14.5 倍; 改为做加权平均修正后, 由于需要计算信号可信度系数, 因而成像时间增加到直射时间的 15.6 倍; 而改用动态调整 k 值及双向最短路径追踪后, 加权平均修正法所需时间达到直射成像时间的 12.9 倍。可见, 在采取上述优化措施后, 新算法的计算时间虽然仍远超直射算法, 但已经有了很大的改善。

这里根据本文所述方法对一个有缺陷的混凝土灌注桩进行成像的实例。经过声波透射法初步发现该桩基在距桩头 7.7 m 附近存在波速异常, 由于在浇灌时预留了声测管, 因而可以在声测管间进行纵向加密测试, 获得层析成像结果。由于条件限制, 无法在上下边界上安装传感器, 因而缺乏正交方向上的射线。为弥补因此而引起的观测数据不足, 在测量时采取了以下措施: 采用高压发射, 增强信号强度; 使用低频传感器收发, 延长声波传输距离; 增加在左右边界上的收发点数量, 加大扇测角度。应用文中所述方法对距桩头 7.0~8.5 m 之间的 3 个剖面进行超声层析成像, 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 1-2 剖面在 7.2~8.2 m 处, 2-3 剖面在 7.3~7.7 m 及 8.0~8.3 m 处, 1-3 剖面在 7.3~8.0 m 处均存在波速为 1 563~2 515 m/s 之间的低速区, 说明这些部位混凝土质量较差。根据其他正常部位的检查结果及获取的有关工程记录推算, 正常部位的波速应为 3 500~4 500 m/s 左右, 即波速在 3 466~4 893 m/s 之间的区域为正常区域, 波速在 2 515~3 466 m/s 之间的区域为过渡区域。综合 3 个剖面的情况, 得出以下结论: 桩基在距桩头 7.2~8.3 m 之间存在缺陷, 该缺陷在 1-2 剖面间比较连续; 在 2-3 剖面间或有间断, 从 2 号管到 3 号管呈逐渐

向下倾斜的趋势；在 1-3 剖面之间最为连续，并对过渡区域具较大影响。经钻孔取芯发现，在距桩头

7.2~8.5 m 处存在多处夹泥，需要进行补强处理。这一结果同层析成像的结果是相吻合的。

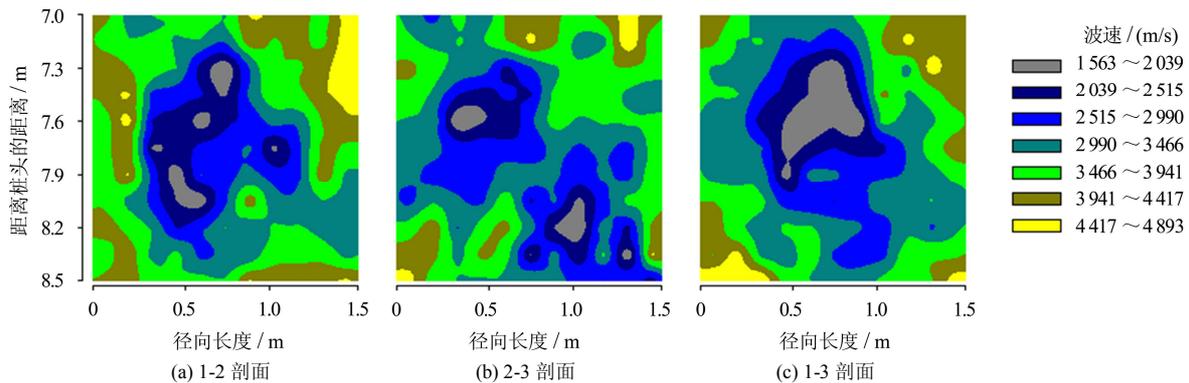


图 6 缺陷桩成像实例

Fig.6 imaging instance of defect pile

5 结 论

(1) 调整传统SIRT法的计算步骤和终止条件，增加外层迭代，对射线追踪得到的弯曲路径进行反演成像，可以得到比直路径成像更好的结果。

(2) 根据声波传播距离、幅度衰减、低频突变等确定射线可信度系数，以该系数对慢度修正进行加权平均可以提高成像质量。

(3) 动态调整内插节点个数，及采用双向最短路径追踪的并行算法，可以有效缩短计算时间，提高整体计算效率。

尽管采取以上措施弱化可信度低的射线对计算结果的影响，但仍然应该通过提高信号强度、增加射线角度等方法尽可能提高有效信号的数量和质量。

参 考 文 献

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 257-258.
- [2] 刘波, 李朝荣. 超声 CT 成像方法及应用[J]. 中国仪器仪表, 2007, (2): 28-31.
LIU Bo, LI Chao-rong. The methods and application of ultrasound computed tomography[J]. *China Instrumentation*, 2007, (2): 28-31.
- [3] 王五平, 宋人心, 傅翔, 等. 声波层析成像技术[J]. 岩石力学与工程学报. 2003, 22(1): 122-125.
WANG Wu-ping, SONG Ren-xin, FU Xiang, et al. Technique of acoustic tomography[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 122-125.
- [4] HUMPHREYS E, CLAYTON R. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 73-85.
- [5] MOSER T J. Shortest path calculation of seismic rays[J]. *Geophysics*, 1991, 56: 59-67.
- [6] FISCHER R, LEES J M. Shortest path ray tracing with sparse graphs[J]. *Geophysics*, 1993, 58: 987-996.
- [7] IVANSSON S. Seismic borehole tomography theory and computational method[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1986, 74: 328-338.
- [8] JACKSON D D. The use of a priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion[J]. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1979, 37: 137-157.
- [9] BALTES H P, HEINRICH P. Inverse scattering problems in optics[M]. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [10] 黄政宇, 黄靛, 缪仑. 混凝土超声波幅值衰减层析成像研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(2): 35-38.
HUANG Zheng-yu, HUANG Liang, MIU Lun. Study on computerized tomography of ultrasonic attenuation for concrete[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2004, 1(2): 35-38.
- [11] 于师建, 刘家琦. 声波速度-频移衰减联合层析成像检测技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 659-663.
YU Shi-jian, LIU Jia-qi. Acoustic velocity-frequency shift attenuation combined tomography detection technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 659-663.
- [12] KLIMES L, KVASNICHKA M. 3D network ray tracing[J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 116: 726-738.
- [13] ZHANG J, TOKSOZ M N. Nonlinear refraction and reflection travel time tomography[J]. *Geophysics*, 1998, 63: 1726-1737.
- [14] 林梁, 黄真萍. 混凝土灌注桩的跨孔超声波检测方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 99-104.
LIN Liang, HUANG Zhen-ping. Study on cross-hole ultrasonic testing method for cast-in-place concrete piles. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Supp.1): 99-104.