

文章编号: 0253-3782(2003)04-0415-07

井间超声波层析成像及其在 岩溶勘察中的应用*

刘红桂 刘建达 许汉刚 宋文荣

(中国南京 210014 江苏省地震局)

摘要 井间超声波 CT 技术采用网格法进行射线追踪,应用逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的方法进行图象重建. 该技术应用于工程地质勘察领域,能够达到采用相同反演方法的井间地震波 CT 技术所无法达到的勘察精度要求. 工程实践证明,对于井间距超过 30 m 的情况,超声波 CT 能分辨大于 60 cm 的地质异常体. 此方法在工程地质勘察领域具有广阔的应用前景.

关键词 超声波 层析成像 岩溶勘察

中图分类号: P642.4 **文献标识码**: A

引言

随着资源勘探、工程地质勘察的不断深入,需要了解地下构造及岩体细结构的要求愈来愈高,常规的地球物理勘探方法已很难满足要求,迫切需要采用新的分辨率更高的物探方法. 地球物理层析成像技术是从医学上 X 射线(CT)技术发展起来的. 1917 年,奥地利数学家 J. Radon 对于由投影重建图象的思想首次作了严格的数学表述,解决了由物体外部测量数据求物体内部物理量分布的问题. 在地球物理勘探领域,层析成像思想的提出与实践很早,早在 1917 年 F. Reginald 就提出通过井间测量进行矿体定位的设想. 在工程地质方面, Ricker(1953)及 Bois 等(1971)做过早期井间地震波透射成像的试验. 此后, Wong 等(1983)利用井间地震波层析成像技术在结晶基岩地区进行过有益的试验. 这些研究为勘探地球物理层析技术奠定了基础.

一般而言,通常用于井间地震波 CT 技术的地震波频率约为 100 Hz,而工程地质勘察中探测的异常体规模小,要求的精度高,因此,井间地震波 CT 技术难以满足工程地质勘察领域对岩体细结构的勘探精度要求. 而超声波(频率超过 20 kHz)的波长短,通过采用超声换能器接收到携带波传播路径中介质细结构信息的信号,由层析成像技术就能反演出介质的细结构,这就是超声波层析成像. 超声波层析成像技术与地震波层析成像方法一样,分为射线追踪和反演成像两部分.

1 射线追踪

直射假设只在介质近似均匀的情况下成立. 已有的数值模拟结果表明,当速度差异

* 地震科学联合基金(602013)资助项目.

2002-05-29 收到初稿, 2002-08-23 收到修改稿, 2002-10-10 决定采用.

小于 15 % 时, 直射反演可以给出较好的近似结果 (Bregman *et al.*, 1989). 但工程实际中完整围岩与断层、溶洞等异常体速度差异往往高达 50 % 以上, 这时必须考虑弯曲射线成像方法. 在地震 CT 理论中, 现有的射线追踪方法主要有: 基于 Snell 定律的打靶法 (黄金莉等, 1994) 和差分方程方法 (Vidale, 1988; 张霖斌等, 1996); 基于 Fermat 原理的最小旅行时射线追踪法 (Coultrip, 1993); 基于 Huygens 原理的最短路径射线追踪法 (Moser, 1991; 王辉, 常旭, 2000). 我们在研究井间超声波 CT 技术时, 采用王辉和常旭 (2000) 提出的基于图形结构的最短路径射线追踪法.

根据 Huygens 原理和 Fermat 原理, 假设地下介质由很多微元组成, 在二维问题的实际计算中, 把被测试剖面离散化为 $m \times n$ 个大小相同的矩形网格, 每个矩形网格当作一个微元, 4 个角当作 4 个节点. 波传播到每个微元的节点上时, 该节点被当作新的子源点, 向空间发射子波. 如果我们从波的发射点出发, 计算出发射点与相邻各节点的走时, 以及依次将各节点作为子波源点计算出子波源点到其相邻节点的走时, 并记录相应的射线路径, 则波的传播路径即为其中走时最小的射线路径. 最小走时可表示为

$$t(i) = \min[t(j) + t_{ij}] \quad i, j \in N = m \times n \quad (1)$$

其初始条件为

$$t(s) = 0 \quad (2)$$

式中, $t(s)$ 表示辐射波源点处的走时, $t(i)$ 表示发射点到当前节点的走时, i 表示当前节点, j 表示子波源点, t_{ij} 表示子波源点到当前节点的走时, N 表示所有网格节点.

子波源点到相邻节点的走时计算在计算单元中进行. t_{ij} 可用对最靠近 i, j 之间直线段的所有节点上的波速进行加权平均来计算, 即

$$t_{ij} = \frac{(k+1) D_{ij}}{v_i/2 + v_{b1} + v_{b2} + \dots + v_{bk} + v_j/2} \quad (3)$$

式中, k 表示 i, j 两点之间至计算直线与各垂直网格线交点最近的节点数量; v_{bk} 表示相应节点的波速; D_{ij} 为 i, j 两点之间直线段长度.

2 图象重建

图象重建计算方法很多, 目前比较常用的重建方法一般有: 代数重建法 (ART)、联合代数重建法 (SIRT)、奇异值分解法 (SVD)、共轭梯度法 (CG) 以及最小二乘 QR 分解法 (LSQR) 等 (杨文采, 1989). 我们在研究超声波 CT 技术时, 采用逐次线性化迭代 (牛彦良等, 1995) 与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的图象重建技术.

井间超声波 CT 中跨孔射线的走时可以表示为

$$T(s, r) = \int_{(W(x), s, r)} W(x) dl + T(s, r) \quad (4)$$

式中, W 和 x 为慢度和成像区点的坐标, s 和 r 代表源和接收点, l 为射线路径, T 为噪声. 令

$$\begin{cases} \lim_k W_k(x) = W(x) \\ W_k(x) = W_{k-1}(x) + \mu W_k(x) & k = 1, 2, \dots \\ W_k(x) < W_{k-1}(x) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $W_k(x)$ 为波慢度修正量, μ 为迭代阻尼因子, k 为迭代次数, 则

$$T(s, r) = T_{k-1}(s, r) + \int_{l_{k-1}} W_k(x) dl + T(s, r)$$

上式可表示成

$$T_k = A_{k-1} W_k + e_k \quad (6)$$

分别以 A , x 和 b 代替式(6) 的 A_{k-1} , W_k 和 T_k , 则式(6) 可写成

$$Ax = b \quad (7)$$

其中, A_{k-1} 表示射线长度组成的系数矩阵, T_k 为走时差, e_k 为测量和迭代拟合误差. 逐次线性迭代, 就是通过式(6) 这样的多个线性化过程来逼近式(5) 这样的非线性迭代过程.

在井间超声波 CT 中解式(7) 为不适定问题, 应做正则化处理. 引入正则化因子即阻尼因子可对解进行光滑, 迭代时采用 QR 分解求解大型稀疏线性方程组, 将阻尼因子直接加入 QR 分解过程中, 则式(7) 的阻尼最小二乘形式为

$$\begin{bmatrix} I & A \\ A^T & \lambda I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Lanczos 分解与 λ 无关(相当于 $\lambda = 0$), 可直接在 QR 分解步中加入阻尼系数 λ , 由此即可完成带阻尼 QR 算法(杨文采, 杜剑渊, 1994).

3 岩溶区探测的物理基础

对于工程地质勘察所要求的精度而言, 超声波在地质体中传播时, 可把地质体当作无限大的固体介质, 因此, 纵波和横波的传播速度可表示为

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad v_S = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (9)$$

式中, v_P 为纵波速度; v_S 为横波速度; E 为介质的杨氏弹性模量; ρ 为介质密度; ν 为介质的泊松比.

由式(9)可知, 超声波的速度是介质性质(E , ρ , ν)的函数. 完整岩体、破损(碎)岩体、岩溶区(包括空洞、被粘土或粘土碎石充填的溶蚀区等), 其介质性质均不相同, 因此, 超声纵波在其中传播时, 其速度也将有差异. 利用超声纵波的这种差异, 采用层析成像方法, 即可反演被测区域内岩溶的分布情况.

4 工程实例

江苏徐州地区的基岩大部分为灰岩, 且该地区岩溶比较发育. 设计中某高速公路通过徐州地区, 为了便于采用地球物理勘探手段来了解该区段内岩溶的分布情况, 根据工程初勘结果, 选择几个岩溶分布比较有代表性的剖面, 进行了部分地球物理勘探方法试验工作. 图 1 为其中的一个典型剖面. 该剖面钻孔 2#-Z-1 至 2#-Y-1 间的跨距为 31 m. 在进行物探测试之前, 在该剖面内共布设了 6 个地质钻孔, 钻孔编号分别为: 2#-Z-1, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 和 2#-Y-1. 其中, 2#-Z-1 及 2#-Y-1 为剖面边孔. 为便于进行物探, 两边孔井壁设置了 PVC 套管. 该剖面在物探工作范围内各钻孔所揭示出来的基岩位置、溶洞顶、底板位置见图 1, 各溶洞内均有棕黄色硬塑粘土充填. 值得一提的是, 在物探方法试验前, 业主仅提供了 2#-Z-1 和 2#-Y-1 钻孔的地质资料, 中间 4 个钻孔的地质资料是在物探工作完成并提交结果后业主提供的.

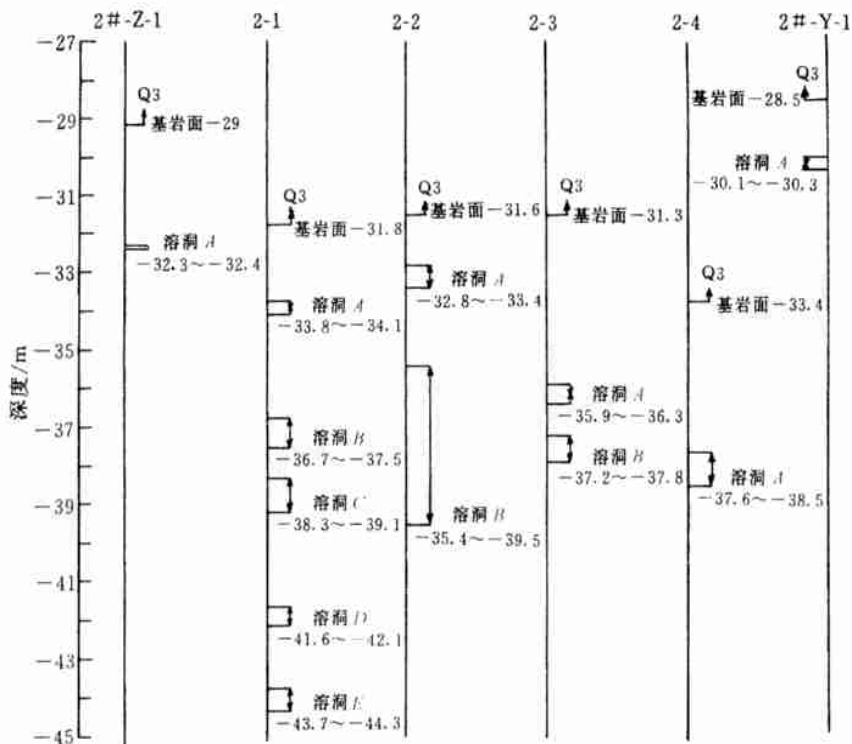


图 1 试验剖面岩溶区分布情况地质钻探结果示意图

在对该剖面进行地球物理勘探方法试验时,我们选择了井间地震波 CT 方法和井间超声波 CT 方法.井间地震波 CT 方法采用多通道地震接收器,接收探头为水晶器,波形数据采样时间间隔为 $20\ \mu\text{s}$,井间超声波 CT 方法采用单通道超声波接收器,接收探头主频为 $30\ \text{kHz}$ 带前置放大的超声换能器,波形采样时间间隔为 $0.8\ \mu\text{s}$.井间地震波 CT、井间超声波 CT 均采用高能量的电火花激振源激震,试验时要求每一条波形的初至均必须清楚.

现场测试完成后,通过计算机程序自动读取每一条地震波、超声波的到时,并随机抽取部分波形进行人工校正,以便保证原始资料的可靠性.在反演过程中,不论是地震波 CT 计算还是超声波 CT 计算,均采用本文中介绍的射线追踪方法及逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的图象重建技术,同时采用代数迭代图象重建技术进行超声波 CT 计算.图 2 为采用逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的图象重建技术反演得到的地震波 CT 图,图 3 为采用代数重建法反演得到的超声波 CT 图,图 4 为采用逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的图象重建技术反演得到的超声波 CT 图.其反演结果与地质钻孔资料对比情况见表 1.

从表 1 可以看出,代数重建的反演结果与实际钻孔地质资料相差较大,这可能与代数重建过程中误差的分配方式及收敛情况有关.地震波 CT 反演的溶蚀区有 4 个与实际地质钻孔资料比较吻合,吻合率仅为三分之一;基岩面的反演结果与实际钻孔资料也存在一定的差距.这主要是由地震波的波长较长、分辨率较低引起的.超声波 CT 反演结果有 9 个溶蚀区与实际地质钻孔资料吻合,吻合率为三分之二,且岩溶位置误差均小于 $0.5\ \text{m}$,基

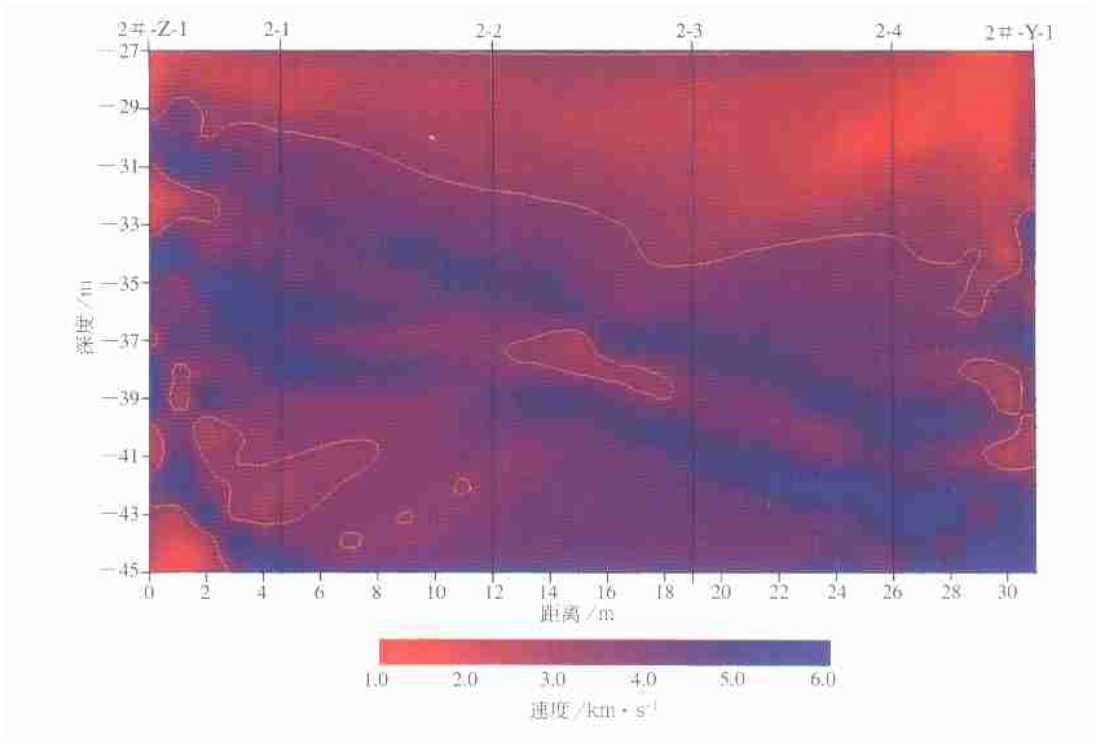


图 2 逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的地震波 CT 图

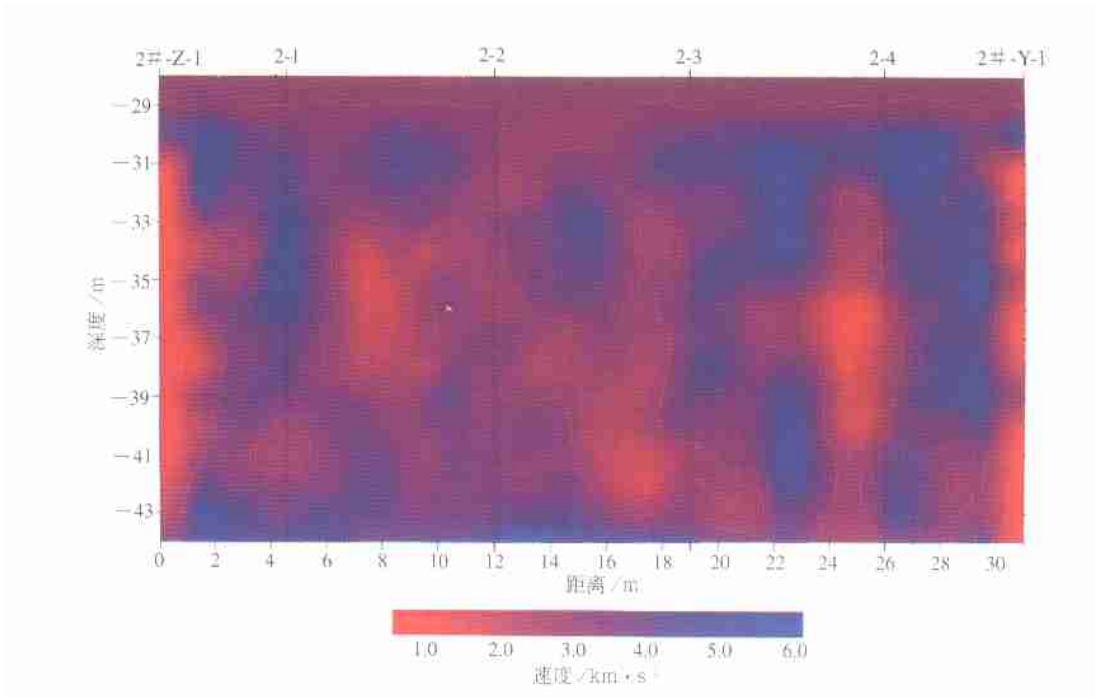


图 3 代数迭代法超声波 CT 图

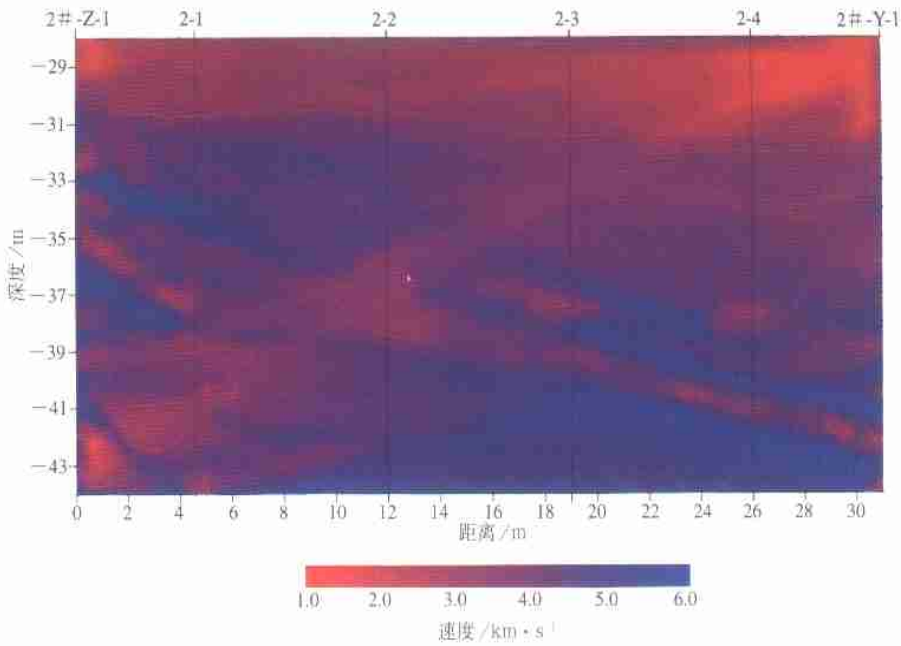


图 4 逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的超声波 CT 图

表 1 反演结果与地质钻孔资料对比情况

钻 孔		地质钻孔资料 / m	地震波 CT 结 果(图 2)/ m	超声波 CT 结 果(图 3)/ m	超声波 CT 结 果(图 4)/ m
2 # - Z-1	基岩面	- 29.0	- 29.3	- 29.0	- 29.7
	溶洞 A	- 32.3 ~ - 32.4	- 30.9 ~ 33.2	- 30.3 ~ - 43.8	- 32.2 ~ - 32.6
2-1	基岩面	- 31.8	- 29.7	- 28.9	- 30.7
	溶洞 A	- 33.8 ~ - 34.1			
	溶洞 B	- 36.7 ~ - 37.5			- 37.1 ~ - 37.5
	溶洞 C	- 38.3 ~ - 39.1		- 39.7 ~ - 41.6	- 38.5 ~ - 39.1
	溶洞 D	- 41.6 ~ - 42.1	- 41.0 ~ - 43.4		- 40.4 ~ - 41.7
2-2	基岩面	- 31.6	- 31.8	- 32.5	- 30.7
	溶洞 A	- 32.8 ~ - 33.4			
	溶洞 B	- 35.4 ~ - 39.5		- 34.1 ~ - 36.4	- 35.7 ~ - 38.4
	溶洞 C	- 38.3 ~ - 39.1			
	溶洞 D	- 41.6 ~ - 42.1			
2-3	基岩面	- 31.3	- 34.4	- 29.0	- 31.3
	溶洞 A	- 35.9 ~ - 36.3			
	溶洞 B	- 37.2 ~ - 37.8		- 40.6 ~ - 42.7	- 37.2 ~ - 37.5
2-4	基岩面	- 33.4	- 33.4	- 28.7	- 32.1
	溶洞 A	- 37.6 ~ - 38.5		- 35.0 ~ - 40.0	- 37.3 ~ - 38.1
2 # - Y-1	基岩面	- 28.5	- 30.2	- 29.0	- 29.0
	溶洞 A	- 30.1 ~ - 30.3	- 39.5 ~ - 41.3	- 30.5 ~ - 44.0	

岩面与实际地质钻孔资料基本一致. 图 4 中未反映出来的实际溶蚀区垂直方向的最大尺寸均不超过 60 cm.

5 结语

利用直达波到时反演介质内部的细结构, 其反演精度不仅与反演方法本身有关, 而且与直达波的性质(频率等)、接收仪器的采样率等均有关系。采用在网格法射线追踪基础上进行逐次线性化迭代与带阻尼最小二乘 QR 分解相结合的图象重建超声波 CT 技术应用于工程地质勘察领域, 能够达到采用相同反演方法的地震波 CT 技术所无法达到的勘察精度要求, 在工程地质勘察领域具有广阔的应用前景。

本研究剖面的野外测试工作由江苏省地震工程研究院完成。在此表示感谢。

参 考 文 献

- 黄金莉, 刘家琦, 欧阳代俊, 等. 1994. 工程物探中地震层析成像的研究[J]. 地球物理学报, 37(5): 682 ~ 687
- 牛彦良, 杨文采, 吴永刚. 1995. 跨孔地震 CT 中的逐次线性化方法[J]. 地球物理学报, 38(3): 378 ~ 386
- 王辉, 常旭. 2000. 基于图形结构的三维射线追踪方法[J]. 地球物理学报, 43(4): 534 ~ 541
- 杨文采, 杜剑渊. 1994. 层析成像新算法及其在工程检测上的应用[J]. 地球物理学报, 37(2): 239 ~ 244
- 杨文采. 1989. 地球物理反演和地震层析成像[M]. 北京: 地质出版社, 153 ~ 197
- 张霖斌, 姚振兴, 纪晨. 1996. 地震初至波走时的有限差分计算[J]. 地球物理进展, 11(4): 47 ~ 52
- Bois P, La Porte M, La Vergne M, *et al.* 1971. Determination of seismic velocity by measurements between wells[J]. *Geophys Prosp*, 19: 19 ~ 42
- Bregman N D, Bailey R C, Chapman C H. 1989. Crosshole seismic tomography[J]. *Geophysics*, 54: 200 ~ 215
- Coultrip R L. 1993. High accuracy wavefront tracing traveltimes calculation[J]. *Geophysics*, 58: 284 ~ 292
- Moser T J. 1991. Shortest path calculation of seismic rays[J]. *Geophysics*, 56(1): 59 ~ 67
- Ricker N. 1953. Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution[J]. *Geophysics*, 18: 769 ~ 792
- Vidale J. 1988. Finite-difference calculation of travel times[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 78: 2 062 ~ 2 076
- Wong J, Hurley P, West G F. 1983. Crosshole seismology and seismic imaging in crystalline rocks[J]. *Geophys Res Lett*, 10: 686 ~ 689

CROSSHOLE ULTRASONIC TOMOGRAPHY AND ITS APPLICATION IN KARST DEVELOPMENT

Liu Honggui Liu Jianda Xu Hangang Song Wenrong

(Seismological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Crosshole ultrasonic tomography is referred to raytrace by gridding method and rebuild image by combining successive linearization iteration with damping LSQR, with which the resolution has better precision than that with crosshole seismic tomography by using the same inversion method, in engineering geologic development. It has been proved in practice that the investigation with crosshole ultrasonic tomography can clearly show the location and shapes of the abnormal geologic unit with resolution less than 60 cm, the result of investigation has been confirmed by the drilling. The crosshole ultrasonic tomography method will be extensively used in application of engineering geologic development.

Key words: ultrasonic; tomography; karst development



李振春 石油大学(华东)地球资源与信息学院副教授。1983年华东石油学院勘探系物探专业毕业;2002年同济大学海洋学院固体地球物理专业研究生毕业,获理学博士学位。现从事教学及地震成像、偏

移速度分析和正反演理论与方法,及开发地震理论与方法的研究与应用工作。中国石油学会和美国 SEG 会员。



吕 坚 江西省地震局工程师。1995年防灾技术高等专科学校毕业。现从事地震分析预报研究和地震安全性评价工作,对地震震源理论和地震动力学研究等方面的课题颇有兴趣。



刘红桂 江苏省地震局副研究员。1995年国家地震局兰州地震研究所固体地球物理专业研究生毕业,获硕士学位。现从事地震预报及地震波的工程应用研究。中国地震学会会员,江苏省地震学会理事。



李裕激 中国地震局研究员。1963年北京大学地质系毕业。历任中国地震局司长、科技委副主任、烈度评定委副主任、地质研究所和工程力学研究所客座研究员。中国地震学会会员。



郑金滔 中国地震局地球物理研究所研究员。1968年复旦大学数学系力学专业毕业;1981年中国科学院研究生院地球物理专业毕业,获硕士学位。从事重力与固体潮的观测与研究 and 地震预测的探索。中国

地球物理学会和中国地震学会会员。

注:程万正、牛安福等简介分别见本刊 Vol. 14, 增刊; Vol. 21, No. 1.