

层析成像在齐峦山隧道勘探中的应用

蔡成国

(中国地质大学(武汉)地球物理系, 湖北武汉 430074)

【摘要】 阐述了 CT 成像及其反演算法的基本原理, 结合齐峦山隧道勘探的实例可以看出 SIRT 反演算法得出的成像剖面精度很高, 从而使其在判断岩溶、裂隙及岩石破碎发育带方面具有独特的优势。

【关键词】 层析成像; CT 成像; 隧道勘探

【中图分类号】 V 45

Application of Computerized Geophysical Tomography in Exploring Bad Geologic Body of Tunnel

Cai Chengguo

(China University of Geoscience, Hubei Wuhan 430074 China)

【Abstract】 The CT imaging technique and the basic principle of converse deduction method are expounded. Through the case of a tunnel's exploration, it shows that the imaging profile produced by SIRT method has very highly accuracy, which has the particular advantage of judgment for the grown zone of karst, crack and rock crush.

【Key Words】 Computerized Geophysical Tomography; CT technology; tunnel exploration

0 引言

地震层析成像(computerized Geophysical Tomography 简称 CT)技术^[1], 以其分辨率高的特点而主要用于精细构造和目标的探测^[2~4]。它主要包括三个环节, 即野外施测与数据采集、数据处理与成像和图像解释。其成像质量与野外观测系统、采集数据的质量有很重要的关系。不同的井间观测系统, 不但在野外工作效率上, 而且在其层析图像质量上, 可能极不一样。而不同的成像方法、不同的重建算法, 其成像结果也有很大差异。

地震层析成像技术大致可以分为 2 种类型: 一种是基于射线理论的图像重建技术, 包括地震走时层析成像和地震衰减层析成像; 另一种是基于波动方程反演的散射(或衍射)层析成像^[5]。走时反演方法是在数据体上拾取地震波走时, 并利用全局优化方法来提取地震速度模型。由于它采用的是全局优化算法, 因而速度模型的更新有效而且效率很高^[6]。

离散层析成像的数值算法主要有三种: BPT 法、ART 法和 SIRT 法。BPT 方法相对简单, 且概念明确; ART 与 SIRT 方法属于迭代算法, 迭代精度并不完全正比于迭代次数; 但 SIRT 较 ART 方法的迭代收敛性好、收敛速度快。本文的实例即采用此算法, 在一般情

况下, 均能取得较为满意的重建结果图像^[7~9]。

1 方法原理

井间地震速度参数提取的几何地震学的层析技术和基本原理是基于矩阵求逆法。首先将要讨论的区域网格化(见图 1), 假定在每一个网格单元中, 速度函数 $v(x, y)$ 为常数, 则运行时方程的近似表达式为

$$t_k = \sum_j \frac{\Delta l_{kj}}{v_j} = \sum_j \Delta l_{kj} p_j \quad (1)$$

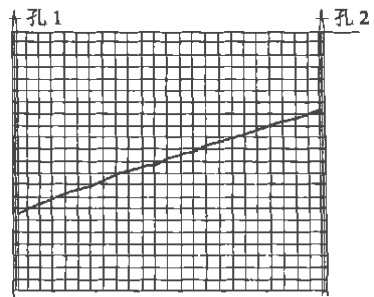


图 1 层析成像原理示意图

式中: t_k 为波沿第 k 根射线运行的时间, Δl_{kj} 为第 k 根射线在网格单位 j 中运行的距离, v_j 为单元 j 中的速度, $p_j = 1/v_j$ 为第 j 个单元中的慢度(即速度的倒数), 求和实际上是在第 k 根射线所穿过的所有

单元上进行。这是一根射线的运行时,数据采集时要记录许多根射线的运行时,因而是一个矩阵方程:

$$t = \mathbf{A}p \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为一个 (k_{\max}, j_{\max}) 的 Δl 值矩阵, 其中 k_{\max} 为穿过要讨论的区域的全部射线数, j_{\max} 要讨论的区域的全部单元数。 \mathbf{A} 是相对松散的矩阵, 任何一条射线通常只会穿过研究区中少部分单元。

只要矩阵 \mathbf{A} 建立了, 求它的逆 \mathbf{A}^{-1} , 则矢量 p 就可以很容易地求出, 因而各单元中的速度可以求得, 只要将单元划分得足够精细, 求出的速度值可以逼近地下介质的速度。根据岩溶内充填物的速度比较低, 低速区的圈定即为岩溶的空间分布。

本次是采用 SIRT 算法 (simultaneous iterative reconstruction technique) 求解方程 (2), SIRT 算法就是联合迭代重建技术, 用一个或多个优化准则使得的解估计唯一。按照二次最优化准则, 得到 SIRT 典型的迭代修正公式

$$p^{k+1} = p^k + u^k [\alpha \mathbf{C} \mathbf{A}^T \mathbf{W} (t - \mathbf{A} p^k) + (\beta \mathbf{C} \mathbf{B} + \gamma \mathbf{I}) (p^0 - p^k)] \quad (3)$$

式中: α, β, γ , 为非负实数; u 为松弛系数, \mathbf{W} 为对称矩阵; \mathbf{A} 为系数矩阵; \mathbf{B} 为非负定矩阵; \mathbf{C} 为对称正定矩阵; \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 又称为平滑矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; p^0 为与 p 同维的向量, 它与图像数值的某种先验知识有关。矩阵 $\mathbf{W}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 和 p^0 向量要根据实际问题来选择, 如对最小二乘法和最小范数解估计, 选 $\mathbf{W} = \mathbf{C}_\tau^{-1}$, $\mathbf{B} = \mathbf{I}$, $\mathbf{C} = \mathbf{C}_f$, p^0 可作为初始猜测 (\mathbf{C}_τ^{-1} 为数据协方差矩阵的逆、 \mathbf{C}_f 为图像向量的协方差矩阵)。

从式 (3) 可以看出, SIRT 重建算法的特点是在某一轮迭代中, 所有像元的值 (即图像向量 $p^{(k+1)}$) 都用前一轮的迭代结果 $p^{(k)}$ 来修正。为了得到最简单情况下的 SIRT 迭代修正公式, 可令式 (3) 中 $\beta = \gamma = 0$, 适当选取矩阵 \mathbf{W}, \mathbf{C} 和重新定义不随迭代变化的松弛系数 u , 则式 (3) 可写为

$$\begin{cases} p^0 & \text{初始任取} \\ p_i^{(k+1)} = p_i^{(k)} + \frac{\sum_{j=1}^l [\alpha_{ji} [\tau_j - (\alpha_j, p^{(k)})] / \sum_{j=1}^l \alpha_{ji}]}{\mu + \sum_{j=1}^l \alpha_{ji}} \end{cases}$$

2 野外数据采集

地震仪器为美国 ES1225 浅层地震仪, 井中检波器为美国生产的 CT 专用串珠式水听器 (12 个), 主频 200 Hz, 由电缆和钢丝绳连接到地震仪, 井下设备总质量约 80 kg; 采用井中电火花震源激发, 电火花震源设备为北京中科院电工所生产, 最高电压可

达 8 kV, 井下震源设备总质量达 150 kg; 震源点距为 2 m, 水听器点距为 2 m。对两孔之间进行弹性波 CT 成像时, 工作方法: 将电火花震源激发器固定在某一孔某一深度进行激发, 水听器在另一孔进行扇形排列接收, 接收点距为 2 m。每激发一次, 一串 12 个水听器接收; 然后, 移动水听器串, 再激发和接收; 考虑到激发能量及资料的质量, 每个激发点, 检波器移动 6 次, 即扇形排列长度为 144 m。

3 资料处理和解释

3.1 资料的处理

室内资料处理是一项复杂且耗时的重要工作, 弹性波 CT 法获得的每炮地震记录, 要利用专用软件进行资料处理, 主要包括信号初至波走时读取和成像反演两部分工作。在野外测试信号过程中, 由于电磁干扰、附近振动等干扰因素的影响, 接收到的弹性波信号中不同程度的含有噪声干扰。为了能够精确读取首波走时, 首先要使用数字滤波方法对野外记录信号进行预处理以提高信噪比, 然后使用专用软件读取初至波走时值 t_0 。

完成所有的信号初至波读时工作, 经检查校对无误后, 可用所读取的初至波 t_0 文件进行成像。

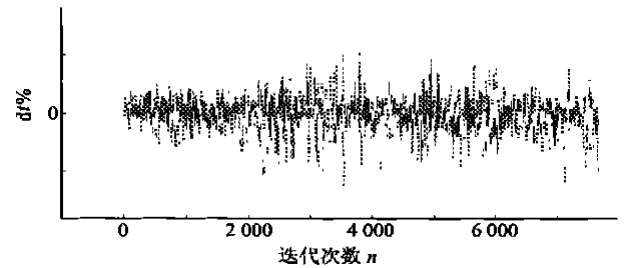


图 2 误差棒示意图

地震层析成像技术所要解决的核心问题是“成像”, 而且尽可能的提高分辨率^[10]。在成像完成后, 采用下述方法检查 t_0 值和成像精度, 设 t_c 为实测信号初至波读时, t_j 是根据成像剖面利用射线追踪方法所解得的走时值, 显然两者之差的绝对值越小, 说明成像结果与真实剖面越吻合。为了能够随时了解 t_0 数据和成像精度, 选择一定次数迭代反演结束后, 绘出每条射线走时相对误差即 $dt = (t_c - t_j) / t_c \times 100\%$ (见图 2)。如果某条射线对应误差太大, 则返回数据编辑窗中对其进行检查、校对或者删除, 然后应用校正后的数据再次进行成像可以进一步提高成像精度, 通过上述过程的多次进行, 最终可以获得精度很高的剖面。

3.2 资料的反演和解释

地震层析成像方法的最终目的是要对成像结果做出切合实际的地质解释。成像结果中包含各类信

息,有些与地质实际有关,有些则无关。须对地震波动在研究区域的覆盖程度与图像重建结果之间的内在联系进行分析,图像重建结果中的假象不容忽视,同时应该研究重建图像的地质解释方法。这是地震层析成像方法真正地切实地用于解决实际问题时必须认真对待的一个极其重要的方面。

利用基于上述原则编写的弹性波 CT 反演解释软件对上述拾取的初至时间进行反演,可以得到两孔之间的层速度等值线图。反演过程中,反演的网格大小为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,同时,将声波测井得到的结果作为反演的约束条件,以减少反演解的非唯一性。为了消除局部网格反演的误差,对反演的结果进行空间平滑。根据钻孔资料、声波测井资料所得到的不良地质体的声波速度范围以及完整岩层的速度范围,可以对层速度等值线图进行地质推断解,圈定出岩溶或裂隙发育带。根据本工区的地质条件,确定岩溶发育带的速度为小于 $2\ 500\text{ m/s}$,岩石破碎带的速度为 $2\ 500 \sim 3\ 500\text{ m/s}$,岩石裂隙发育带的速度为 $3\ 500 \sim 5\ 500\text{ m/s}$ 。由于在灰岩地区里,岩溶发育与裂隙发育关系密切,故本次将速度范围为 $2\ 000 \sim 3\ 500\text{ m/s}$ 的带推断为岩溶或破碎带,完整岩层(灰岩)的速度范围大于 $5\ 500\text{ m/s}$ 。

依据岩溶、裂隙及岩石破碎发育带在速度剖面上的特征,结合钻孔资料、声波测井资料,可以推断孔 1、孔 2 及孔 3 之间的地质断面图(见图 3)。

基于速度剖面色阶、及其等值线图(见图 4),可以看到剖面上裂隙比较发育,并且存在四个条带的低速异常,推断为裂隙发育带。

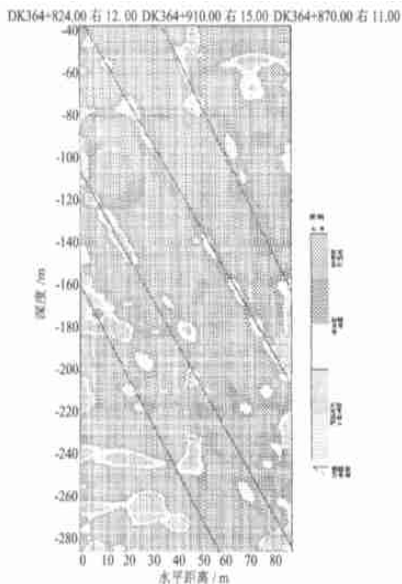


图 3 推断孔-1、孔-2、孔-3 地质断面图

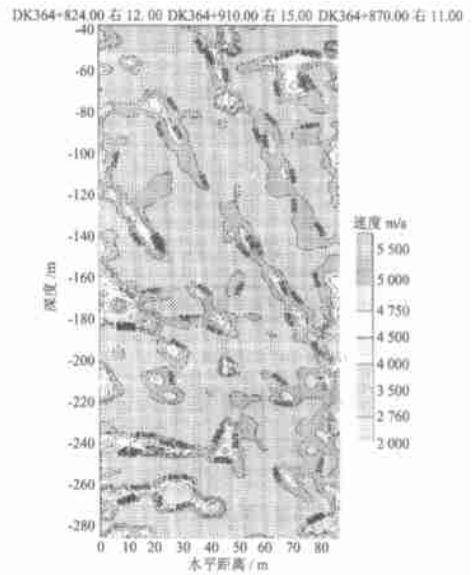


图 4 孔-1、孔-2、孔-3 弹性波速度

由于低速异常连续性差,故推断场区所出现的岩溶连通性相对较差。同时,本次弹性波 CT 成果未反映出有大型岩溶通道(暗河和大溶洞等)存在,但在 1 号孔附近深度 200 m 以下的裂隙带范围较大,如果该深度范围内的地下水的径流速度和流量较大,会使岩溶发育或断裂带的范围进一步加大。

4 结论

利用据岩土物性参数的一般规律,洞穴(包括土洞与溶洞)内部的介质密度及其速度。均比围岩小得多,弹性波经过洞穴的传播时间比经过相同距离的围岩中传播的时间要长,通过拾取波的传播时间,利用走时反演算法的地震层析成像法,求取了介质的速度。根据速度的大小及分布,确定洞穴的大小和分布,取得了较好的结果。

参 考 文 献

- 1 高 星. 地震层析成像研究的回顾与展望. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 41~45
- 2 裴正林. 井间地震层析成像应用研究. 勘查科学技术, 2001(1): 56~61
- 3 裴正林. 井间地震走时波形层析成像方法. 现代地质, 2001, 15(3): 333~338
- 4 裴正林. 局部异常体井间地震走时层析成像研究. 现代地质, 1999, 13(4): 461~465
- 5 刘盛东, 李承华. 地震走时层析成像算法与比较. 中国矿业大学学报, 2000, 29(2): 211~214
- 6 井西利等. 建立速度模型的层析成像方法研究. 石油物探, 2002, 41(1): 72~75

(下转封 3 页)

表4 94341型测力环检定荷重与变形标定值

检定荷重 P/kN	变形值 s/mm
0	1.000
3	1.228
5	1.380
8	1.604
10	1.761
15	2.149
20	2.537
25	2.918
30	3.312

在实验室里使用渗透性浆液固结砂样品($6.25\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$),抗压截面面积($6.25\text{ cm} \times 4\text{ cm}$) 在恒

表5 无侧限抗压实验结果

($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$)质量分数/%	变形值 s/mm				算术平均值/ mm		检定荷重 P/kN	抗压强度 q_u/MPa	
1	1.405	1.355	1.345	1.35	1.33	1.36	1.358	4.71	1.884 4
2	1.42	1.38	1.385	1.40	1.39	1.38	1.393	5.174	2.069 6
3	1.32	1.39	1.30	1.325	1.345	1.31	1.332	4.368	1.747 2

3) 交联剂与PVA浆的液量不同,其交联度不同,要注意随着作用目的的不同进行必要的调节;在室内试验时所用的质量配合比为 $1/4 \sim 1/5$ 。

4) 主剂PVA的浓度增大,其液相的粘度也增大,当溶液的粘度较大时,所作用的注浆的压力也应相对地提高;经室内试验其浓度在 $3\% \sim 7.5\%$ 。 3% 时浆液交联的时间要长一些,可以留给注浆较长的时间。可以根据具体的情况采取不同的浓度配比。

5 结论

预期的聚乙烯醇硼酸钠新型注浆材料的研制是完全可行的,可用于堤坝治理,用于堵水防渗时,不

温 $25\text{ }^\circ\text{C}$,湿度为 $90\% \sim 100\%$ 环境下养护固化14 d参照表4使用插值法计算(见表5)。

4 灌注工艺

1) 聚乙烯醇依相对分子质量(有1755和1788)的不同,其溶解的能力相差很大,推荐使用相对分子质量为1788的聚乙烯醇,它可在冷水中溶解,但其溶解的时间大约也在 $2 \sim 3\text{ h}$ 左右,需要在溶解过程中搅拌,以加快溶解速度。

2) 交联剂硼酸钠的溶解度比较低,使用时宜先制成相应的浓度。浓度太高时,会造成主剂交联过度使凝胶体的脆性增加,降低固结体的强度;若交联剂的浓度过大,溶液会存在着一定量的未溶物,造成管路的堵塞,影响注浆施工的正常进行;合适的浓度在 $3\% \sim 5\%$ 。

会在坝体接触处发生渗水现象;由于时间限制,有些实验(如强度测定、精确流变性等)未能展开,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 王文臣. 钻孔冲洗与注浆. 长春: 吉林科技出版社, 1998. 98~200
- 2 严瑞暄等编著. 水溶性聚合物. 北京: 中国化学工业出版社, 1988. 42~86
- 3 周成彦等编著. 无机结构化学. 北京: 高等教育出版社, 1982. 70~85

收稿日期: 2003-11-18

(上接第92页)

- 7 刘盛东等. 透射地震层析成像中射线追踪技术. 淮南工业学院学报. 1999, 19(1): 1~4
- 8 宋 炜等. 双井与地面数据集的透射与反射层析成像. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 148~154
- 9 陈 赞. 井间地震数据直达波走时层析成像, CT Theory and Applications, 2000, 10(9): 65~66
- 10 杨晓春等. 地震波反演方法研究的某些进展及其数学基础. 地球物理学进展, 2001, 16(4): 96~109

收稿日期: 2003-12-29