

地震层析成像的理论研究及其在岩溶发育区的应用

谭显江¹, 付小明², 丁亮清¹, 余志奇², 刘涛²

(1. 长江工程地球物理勘测武汉有限公司, 武汉 430014; 2. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 武汉 430015)

摘要: 基于均匀介质中的波射线传播理论, 应用直射追踪方法进行射线走时正演计算, 建立了速度模型。对模型分别进行 SIRT 算法和 LSQR 算法反演, 对比分析后发现, LSQR 算法在精度、效率和稳定性三个方面都能达到较好的平衡。以溶洞发育区某水电站右岸部分平硐勘探为实例, 利用地震层析成像法准确探明了岩体速度分布情况和区内 K25 溶洞的空间分布位置, 通过与其它方法结果的对比较证, 表明地震层析成像法对于溶洞发育区具有分辨率高、图像直观、易于解释等优点。

关键词: 地震层析成像; SIRT 算法; LSQR 算法; 溶洞发育区

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0177-03

Theoretical Study of Seismic Tomography and Its Application in the Karst Development Area

TAN Xianning¹, FU Xiaoming², DING Liangqing¹, YU Zhichang², LIU Tao²

(1. Changjiang River Engineer Geophysics Survey Co., Ltd. Wuhan, Wuhan 430014, China;

2. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Wuhan 430015, China)

Abstract: Based on the wave ray propagation theory in the homogeneous medium, a velocity model was developed for the forward calculation of ray using the straight ray tracking method. The model was simulated inversely using the SIRT and LSQR algorithms. The results showed that LSQR algorithm can achieve a better balance in the accuracy, efficiency, and stability. The seismic tomography method was applied to the adit exploration on the right bank of a hydropower station in the karst development area. This method can determine the velocity distribution of the rock mass and the spatial distribution of K25 cave in the area. Compared with the results obtained from other methods, it suggested that the seismic tomography method has the advantages of high resolution, intuitive image, and easy to explain when used for the karst development area.

Key words: seismic tomography; SIRT algorithm; LSQR algorithm; karst development area

地震层析成像是 20 世纪 80 年代发展起来的地球物理勘探方法, 通过地震波走时和衰减的观测来反演地质体的内部构造并对其成像^[1]。地震波穿透岩土介质时, 其速度快慢与岩土介质的弹性模量、剪切模量和密度等有关。密度大、强度高的岩石模量大, 波速高、走时短; 反之, 波速低, 走时长。因为完整坚硬的岩体对地震波能量的吸收弱, 破碎岩体和松散土体的吸收强。因而地震 CT 波速图像能可靠地反映出各类速度差异明显的岩土体分布界线及其中的破碎岩体的破碎程度和分布^[2-5]。地震 CT 特别适用于研究各类地层、构造、岩体、土体的分布界线及其力学性状, 在工程地质勘查中常被用来探查断裂带、密集节理带、含水带、空洞、风化带等不良地质体的位置、性状及力学强度等^[68]。

1 洞间层析成像原理及离散图像重建原理

1.1 层析成像原理

弹性波层析成像是通过对观测到的弹性波各种震相的运动学(走时、射线路径)和动力学(波形、振幅、相位、频率)资料的分析, 进而反演地下介质的结构、速度分布及其弹性参数等重要信息的一种地球物理方法^[9-10]。在实际工作中, 需要根据工程岩体平硐之间的地质情况, 合理布置观测系统, 采用多次单点反射和多点同时接收的扇形穿透, 经过逐点激发将在被测区域形成致密的射线交叉网络(见图 1)。由激发与接收时间互换原理得知, 每条射线声波旅行时间将被

收稿日期: 2013-04-17 修回日期: 2013-05-08 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.012.html>

作者简介: 谭显江(1985-), 男, 助理工程师, 主要从事水电工程物探研究。E-mail: txianjiang@126.com

唯一地确定。然后根据射线的疏密程度及成像精度, 将施测范围划分成若干规划的成像单元^[11-12]。由此运用适当的反演算法即可精确地获得异常体的展布形态。

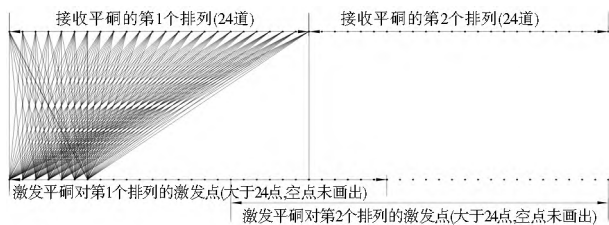


图 1 平硐地震波 CT 观测系统

Fig. 1 The observation system of adit seismic wave CT

地震波层析成像中, 弹性波射线走时可以表示为:

$$T_{(s,r)} = \int_{W(x,l,r)} W(x) dl + \delta T_{(s,r)} \quad (1)$$

式中: W 为慢度; x 为目标区点的坐标; s, r 分别为震源和接收点; l 为射线路径; δT 为噪声。

1.2 离散图像重建原理

地震波层析成像属于离散图像重建技术。首先通过扇形观测系统获取钻孔或平硐的首波走时数据(t_i), 然后通过求解大型矩阵方程来获取两孔之间速度剖面图像, 根据速度剖面图像可以直观准确地判断异常体大小分布。

层析成像中的反演方法可分为线性方法和非线性方法两种, 非线性方法主要有: 遗传算法、模拟退火法和神经网络法等。在体波层析成像中, 使用线性反演方法的较多, 如奇异值分解法(SVD)、共轭梯度法(CG)和最小二乘法(LSQR)等(见图 2)。

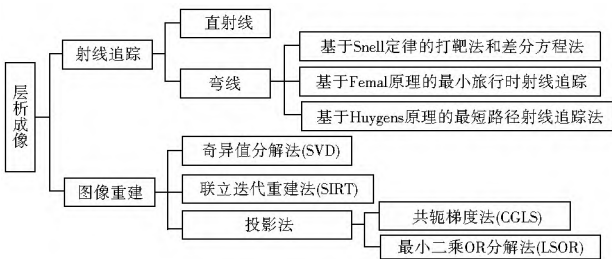


图 2 层析成像方法原理

Fig. 2 The principle of tomography method

典型的联合迭代图像重建法(SIRT)不利于同一迭代的第 j 条射线的修改值来计算第 $j+1$ 条射线的修改值, 而是把第 k 轮迭代中由所有射线得到的修改值保存起来, 在本轮对射线迭代结束时求某种平均 Δf , 然后由 $f^{k+1} = f^k + \Delta f$ 对每个象元的慢度作修改, 并留作下一轮迭代使用。

最小二乘法(LSQR)求解的是 $A^T A x = A^T b$, 具有计算量小的优点, 并且能很容易地利用矩阵的稀疏性简化计算, 因而适合求解大型稀疏问题。

2 数值模拟

本文为了比较 SIRT 算法和 LSQR 算法求解大型稀疏矩阵方程的能力, 建立如图 3 所示模型进行速度层析成像反演。正演模型一个单元数为 9×12 , 单元边长为 30×50 的速度传播区域, 即横向和纵向步长分别是 50 m 和 30 m , 其

中存在一个 $6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的长方形高速异常区和一个 $3 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 长方形低速异常区。左边设置 4 个激发点, 右边 12 个检波点接收。模型背景速度为 3000 m/s , 异常区域速度分别为 5000 m/s 和 2000 m/s , 迭代收敛精度值 e 等于 0.1×10^{-6} 。其反演结果见图 4。

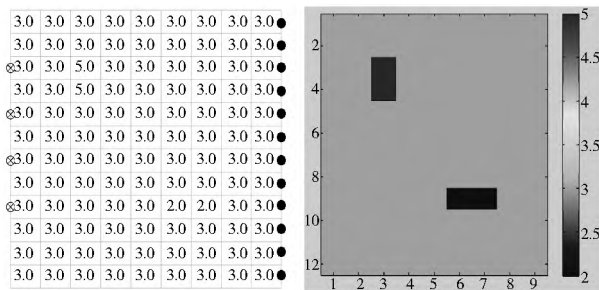


图 3 原始速度模型数据及图像

Fig. 3 The original velocity model data and image

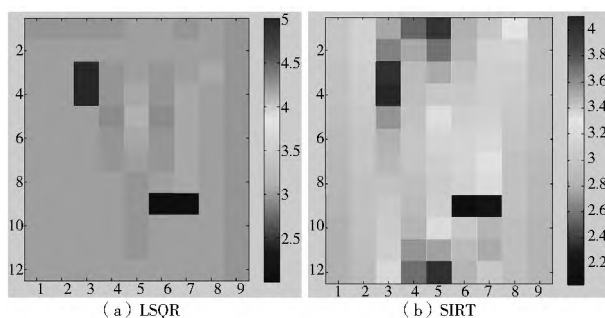


图 4 LSQR 法层析成像反演图及 SIRT 法层析成像反演图

Fig. 4 The tomographic inversion diagrams based on LSQR

algorithm (a) and SIRT algorithm (b)

从图 4 中分析得出, 在 SIRT 算法中, 获得的数据量较少, 而未知像素较多, 得到的系数矩阵通常是大型的稀疏矩阵, 因而方程组都是欠定的, 甚至是严重欠定的。所以采用 SIRT 的反演方法, 波速异常区域虽然可以大致反映出来, 但与原始模型有一定误差, 如右图中较小的速度变大, 较大的速度变小, 此误差源于 SIRT 方法的局限性; LSQR 的反演方法, 具有数值稳定、能充分利用矩阵稀疏性减少计算量等特点, 所以采用 LSQR 法取得了较好的结果, 波速异常区域在图 4(a) 中明显反映出来, 与原始模型吻合, 且波速误差较小。通过两种算法模型的对比分析得出, LSQR 算法在精度、效率和稳定性三个方面都能达到较好的平衡, 运用 LSQR 算法进行层析处理能获得较为满意的图像。

3 工程实例

3.1 工区概况及勘探目的

某水电站坝址区地层主要由褶皱基底浅变质岩及盖层沉积岩构成。褶皱基底主要分布于河床覆盖层之下和两岸谷坡中下部, 沉积盖层角度不整合超覆于褶皱基底之上, 主要分布于两岸谷坡中上部。坝址区地层主要出露因纽组(P_2^1)和落雪组(P_2^0)两组地层, 为一套浅变质的碳酸盐岩。坝址发育的地表岩溶类型有: 溶缝、溶沟、溶槽、溶洞、溶蚀洼地。

本次地震 CT 探测主要目的是探查坝址区右岸 K25 岩

溶区发育分布情况。

岩体中弹性波的传播特征主要取决于岩体的物理力学性质,除本身强度外,在很大程度上受岩体结构面性质及其组合关系的控制。受风化卸荷影响的岩体,其物理力学性质及强度与新鲜基岩存在较大差异,且风化与卸荷程度不同的岩体结构和强度也会不同,这些差异和变化都可以通过 CT 成像中的波速分布情况来判断。该水电站平硐、钻孔声波测试成果表明,坚硬完整的碳酸盐岩声波速度较高,一般在 5 000 m/s 左右,受溶洞的影响,则呈现低波速,一般在 3 500 m/s 以下,这种明显的波速差异为平硐地震 CT 法的应用提供了地球物理前提。

3.2 工作方法及成果分析

本次地震 CT 采用一硐发射、另一硐接收的观测方式。具体步骤是观测射线网络;根据射线的疏密程度及成像精度划分规则的成像单元;运用射线追踪理论椭圆约束法;采用的最小二乘法形成被测区域的波速图像;根据图像中的波速分布情况来重建探测区域内岩体空间分布。

信号采集器为 R24 地震仪,以及与之配套的高灵敏度地震检波器。激发方式采用炸药震源,采样间隔 100 us,道间距为 3 0 m,主频 30 kHz 检波器接收做全硐观测。

图 5 为右岸 850 m 高程地震 CT 成果图,测试区域跨 PD56、PD58 和 LPD24 平硐,由剖面的波速图像可看到,完整性较好的岩体波速以 4 000~5 000 m/s 为主,而位于 PD58 平硐硐深 22 m 左右的上游硐壁附近,存在波速为 2 000~2 250 m/s 低速异常区(k25)。

后通过对此低速异常区进行开挖验证,揭露出此低速异常区(k25)为一发育范围 8 m×6 m、近似椭圆型岩溶区,其内溶蚀角砾发育、有泥质填充,与周围岩体速度差异大,异常明显。利用硐间层析成像技术,直观划分了岩体速度分布情况,准确的探明了岩溶发育区的空间分布及走向情况。

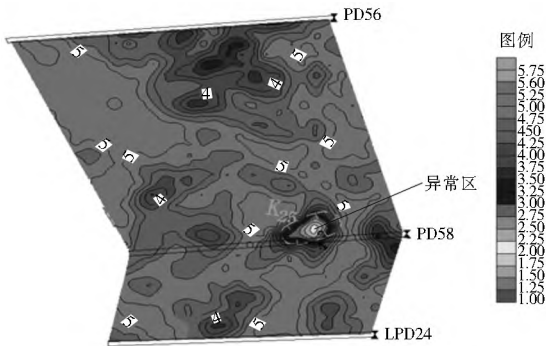


图 5 右岸 850 高程地震 CT 成果图

Fig. 5 The earthquake CT results map on the right bank with an elevation of 850 m

4.3 与平硐波速测试对比

图 6 为 PD 58 平硐内进行的地震波速、单孔声波及跨孔声波的岩体波速测试。从图中可以看出,三种方法得到的岩体波速大致呈相同的趋势,位于 PD 58 平硐硐深 20 m 左右的位置都出现明显速度降低,与地震 CT 探测成果相吻合。

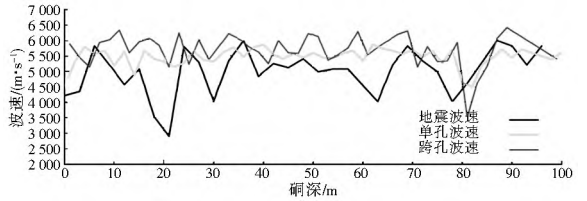


图 6 PD 58 地震波速、单孔声波及跨孔声波的岩体波速对比
Fig. 6 Comparison of the PD58 seismic velocity and the velocity of rock mass from the single hole sonic and cross hole sonic waves

4 结语

本文利用硐间层析成像技术,直观准确地判断了岩溶发育区某水电站右岸坝址区岩体质量,探明了喀斯特洞穴的空间分布及走向情况,为水电站坝址设计提供了必要的地球物理参数。层析成像成果与该地区单孔声波及跨孔声波所测的岩体波速相吻合,表明了地震层析成像技术是一种高分辨率探测岩溶发育区的有效手段。

(1) CT 图像重建与许多因素有关,在反演方法上,进行了模型试算,得出最小二乘正交分解法(LSQR)的效果较联合迭代重建法(SIRT)有一定的提高,LSQR 算法在精度、效率和稳定性三个方面都能达到较好的平衡。

(2) 在岩溶地区的工程勘察中,地震层析成像技术在划分岩体速度分布情况及探查岩溶或者岩体破碎带等方面具有良好的效果,并与地震波 CT 和单孔声波测试、跨孔声波测试等物探方法吻合较好,表明了地震层析成像技术是一种高分辨率探测岩溶发育区的有效手段。

参考文献(References):

- [1] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社, 1997. (YANG Wei cai. Theory and Methods in Geophysical Inversion[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [2] 胡明顺,潘冬明,李兵,等. 井地地震 CT 成像数值模拟研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1399-1404. (HU Ming shun, PAN Dong-ming, LI Bing, et al. Study of Numerical Simulation and Application on Well-ground Seismic Tomography[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(4): 1399-1404. (in Chinese))
- [3] 雷宛,肖宏跃,钟韬,等. 灌浆质量检测的声波 CT 法及其与综合检测效果的对比[J]. 成都理工大学(自然科学版), 2006, 33(4): 336-343. (LEI Wan, XIAO Hong yue, ZHONG Tao, et al. Sound Wave CT of the Cement in Jection Quality Detection and Comparison between Its Effect with that of the Comprehensive Detection[J]. Journal of Cheng Du University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(4): 336-343. (in Chinese))
- [4] 刘劲松,刘福田,刘俊,等. 地震层析成像 LSQR 算法的并行化[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 540-545. (LIU Jin song, LIU Fu tian, LIU Jun, et al. Parallel LSQR Algorithms Used in Seismic Tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 540-545. (in Chinese))

(下转第 188 页)

- 践[J]. 水运工程, 2009, (5): 5-8. (LEI Jir sheng, YI Guang hui, FAN Yong hua. Practice of Claim for Contractor in Large Water Conservancy and Hydropower Project[J]. Port and Waterway Engineering, 2009, (5): 5-8. (in Chinese))
- [3] 孙建强. 建筑工程业主方施工索赔管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. (SUN Jian qiang. Studies on Construction Claims Management of Building Project Proprietors [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese))
- [4] 熊熊, 张维, 王元璋. 工程索赔管理的神经网络法[J]. 天津大学学报, 2001, 34(3): 400-402. (XIONG Xiong, ZHANG Wei, WANG Yuan zhang. Management of Construction Claiming Based on Neural Networks[J]. Journal of Tianjin University, 2001, 34(3): 400-402. (in Chinese))
- [5] 谢识予. 经济博弈论[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2008. (XIE Shi yu. Economic Game Theory[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 上海三联书店, 格致出版社, 2008. (ZHANG Wei ying. Game Theory and Information Economics[M]. Shanghai: Shanghai Renmin Press, Shanghai Sanlian Press, Truth and Wisdom Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 林敏. 浅析建设工程中业主项目经理的不完全信息动态博弈思想[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 141-143. (LIN Min. Preliminary Discussion on the Incomplete Information and Dynamically Game Theory of the Project Manager of Owner in Constructing Engineering [J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(2): 141-143. (in Chinese))
- [8] 宋晖, 成虎. 夸大建设工程实际损失的索赔欺诈博弈研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(6): 120-123. (SONG Hui, CHENG Hu. Research on Claiming Fraud Game Model of Exaggerating the Loss in Construction Project [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(6): 120-123. (in Chinese))
- (上接第 179 页)
- [5] 刘伊克, 常旭. 地震层析成像反演中解的定量评价及其应用[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2): 251-256. (LIU Yi ke, CHANG Xu. Quantitative Assessment of Inversion Solution of Seismic Tomographys and Its Application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(2): 251-256. (in Chinese))
- [6] 成谷, 马在田, 张宝金, 等. 地震层析成像中存在的主要问题及应对策略[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 512-518. (CHENG Gu, MA Zai tian, ZHANG Bao jin, et al. Primary Problems and According Strategies in Seismic Tomography [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 512-518. (in Chinese))
- [7] 汪兴旺, 杨勤海, 孙堂生, 等. 岩溶探测中井间地震波层析成像的应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(1): 105-108. (WANG Xing wang, YANG Qin hai, SUN Tang sheng, et al. The Application of Well Seismic Wave Tomographic Imaging Technique to Karst Survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, 32(1): 105-108. (in Chinese))
- [8] 井西利, 杨长春, 王世清. 一种改进的地震反射层析成像方法[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1831-1836. (JING Xi li, YANG Chang chun, WANG Shi qing. A Improved Sseismic Reflection Tomographic Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1831-1836. (in Chinese))
- [9] 邹俊, 雷宛, 罗有春, 等. 洞间地震层析成像及其工程应用[J]. 工程勘察, 2008(8): 60-64. (ZOU Jun, LEI Wan, LU O You chun, et al. Seismic Computerized Tomography in Adit and Its Engineering Practice [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(8): 60-64. (in Chinese))
- [10] 刘盛东, 李承华. 地震走时层析成像算法与比较[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(2): 211-214. (LIU Sheng dong, LI Cheng hua. Algorithm and Comparison of Seismic Travel Time Computerized Tomography Echnique [J]. Journal of China University of Minging & Technology, 2003, 29(2): 211-214. (in Chinese))
- [11] 李张明, 练继建, 戚蓝. 地震波层析成像技术探测复杂岩体结构应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 107-111. (LI Zhang ming, LIAN Ji jian, QI Lan. Study on Detection of Complex Rock Structure bu CT Technique of Seismic Wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 107-111. (in Chinese))
- [12] 杨文采, 杜剑渊. 层析成像新算法及其在工程检测中的应用[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 239-244. (YANG Wen cai, DU Jian yuan. A New Algorithm of Seismic Tomography with Application to Engineering Detections [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(2): 239-244. (in Chinese))