

文章编号: 1001-1986(2008)03-0071-04

井地地震 CT 技术及其应用

李红立, 潘冬明, 徐红利

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要: 井地地震是在井间地震方法基础上提出, 其技术核心主要是观测系统设计以及数据的采集和处理。观测系统设计旨在增加探测目标的覆盖次数、均匀程度和提高工作效率; 数据采集从震源和检波器两个方面优化, 选用激发能量强、频率高、成本低、效率高的震源, 以及灵敏度高、抗噪能力好的检波器; 数据处理分为拾取初至、建立正演模型和反演层析成像。工程应用实例说明, 井地地震具有很好的应用前景。

关键词: 井地地震; 层析成像; 直射追踪; SIRT

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Well-Ground seismic CT technology and its application

LI Hong-li, PAN Dong-ming, XU Hong-li

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The principle and characteristic of Well-Ground seismic technology are reviewed systematically based on crosshole seismic method. Special emphasis of the technology of Well-Ground seismic is superior in imaging resolution, studying scope, wild production efficiency and production cost, ect. The data acquisition system (observation system, ground seismic source and borehole seismic detector) and processing methods (ray tracing processing and tomography imaging) are discussed. Then, the application areas and development of Well-Ground seismic technology are recommended. Finally, the development and application prospects of Well-Ground seismic technology are forecasted.

Key words: Well-Ground seismic; tomography; ray tracing; SIRT

井地地震是在井间地震方法基础上提出的设计思想。井间地震是以一口井内激发另一口井内接收的方式, 利用地震波穿过岩层介质时其走时、频率、振幅及波形等物理量的变化, 通过层析成像技术得到地层内部物性参数分布图像的一种方法, 已在不同领域得到广泛应用, 数据采集方法和处理手段也比较成熟^[1-2]。但由于井间地震观测方式的局限性, 使得其研究范围固定在井孔与井孔之间的剖面上, 对于井孔周围的其他区域由于没有直接的地震信息, 无法推断周围地质构造情况; 如果井孔间距远远大于井孔深度, 井孔间地震波传播射线大多是水平或近水平的, 由前人对不同地质模型反演结果表明, 井间地震观测系统覆盖区域面上的垂向分辨率就比较低。不少专家和学者提出了提高垂向分辨率办法: 增加垂向或近垂向的射线数量以提高覆盖区域面上的垂向分辨率^[3-4]; 李庆忠也指出, 井间地

震的出路在于将接收段布置在炮点上方或下方, 在垂直距离上应错开一个井间距^[5-6]。

井地地震改善了上述井间地震观测方法的缺陷, 选择一口井作为接收井, 在井孔四周设计一个尽可能大的激发区域, 在工作量一定的情况下, 为了保证探测目标上最大覆盖次数和覆盖的均匀性, 提高目标层上的成像分辨率, 考虑了增大离井口较远的炮检距, 减小井口附近炮间距, 但偏移距不能太大, 以防止其他续至波对初至波的干扰。井地地震观测系统平面图和测线剖面如图 1 和图 2 所示。

1 井地地震方法

井地地震观测系统设计时除了要注意探测目标的均匀覆盖和最大覆盖次数之外, 观测系统设计还要遵循以下几点原则: 首先, 依据正演和反演模型

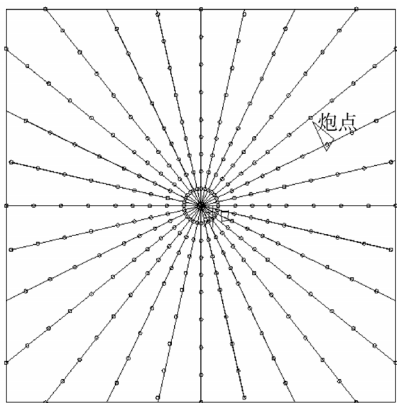


图 1 地面观测系统简图

Fig.1 The simple figure of observing system on the ground

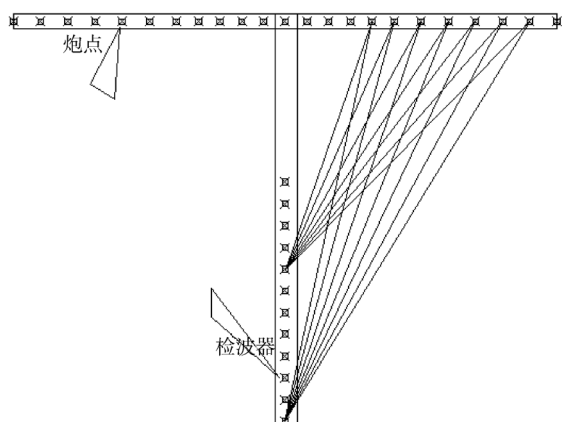


图 2 测线剖面观测系统简图

Fig.2 The simple figure of observing system in measuring line

确定道间距和炮间距,道间距应小于被探测目标体的线性尺度,般取被探测目标体的三分之一;其次,在不降低分辨率的前提下,应尽可能减少野外观测工作量,提高工作效率。

井地地震观测仪器采用常规三分量井中检波器、水听器 and 常规地面数据记录系统。观测仪器的选取要考虑以下参数:接收电压灵敏度、频率范围、方向特性、工作深度、孔径大小、水密性、抗压性和电磁屏蔽等。一般选取灵敏度高、频率范围宽、无方向性、工作深度大的检波器为佳。为了获取更多地震透射波初至时间,增加数据的区域覆盖率,提高野外生产效率,井下可采用水听器串和三分量井中检波器串多道接收。下面是几种水听器的性能参数(表 1)^[7]。

井地地震技术采用地面激发,井内观测的方式,地面激发点比较多,震源除了考虑满足激发高频地震波之外,地面震源的选用要简单易行,激发效率要高。常用的激发方法有浅井(小于 1 m)、瞬发雷管、浅井小药量炸药、重锤激发等方式。

表 1 几种水听器的性能参数

Table 1 The Parameters of some receivers

名称	灵敏度	频率范围	工作深度和方向性	研制机构
水听器 (10CE)	-218 dB	1Hz~250 kHz	900m&全向	美国 PCB 公司
水听器 (H505L)	-160 dB	2Hz~10 kHz	250m&全向	美国 wilcoxon
水听器 (ST70)	-204 dB	50Hz~70 kHz	全向	江苏无锡
水听器	14 v·Bar ⁻¹	10 Hz	全向	美国 EG&G

这里给出一个井地地震的应用实例,来说明上述数据采集方法的有效性。工程勘探目的是了解 20~60 m 的岩溶发育情况。井地地震勘探数据记录系统采用德国 DMT 公司生产的便携式 SUMMIT 24 位数字地震仪。观测系统如图 1 所示,井孔深度 60 m,地面布置 88 m×88 m 的方形激发区域,近井孔炮间距 3 m,井孔远处炮间距 4 m,井内 12 个水听器串接收,道间距 2 m,最深检波器离井口 60 m,记录长度 100 ms,采样间隔 0.25 ms;激发方式选用重锤激发。由于工区干扰严重,选择晚上施工。图 3 是一原始单炮记录。

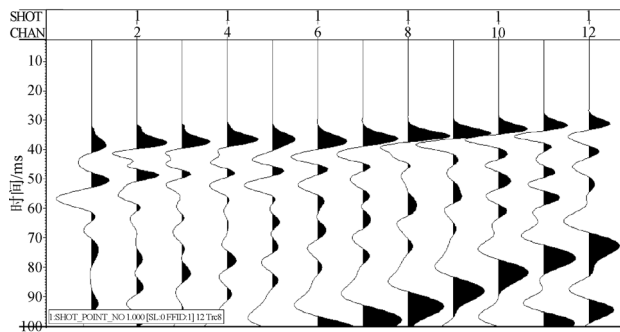


图 3 原始单炮记录

Fig.3 The original record of single shot

2 资料处理

对野外采集的原始资料进行有序编排并正确拾取初至为方便后续数据处理,习惯上把共炮点道集整理成共检波器的数据集合,形成一个锥形数据体。锥尖是每个检波器的位置,锥底是炮点覆盖区域。数据处理的重点是波速层析成像。层析成像又分为正演和反演。

2.1 建立正演模型

井地地震层析成像属非线性反演问题。求解地震层析成像的非线性反演问题,需要给定初始模型,然后对初始模型进行网格剖分。每个网格用一个物性参数来描述,这里用慢度(速度的倒数)表示。所谓建立正演模型就是给定慢度 s (速度 v),求网格距离矩阵 M 和初至矩阵 T (矩阵 M 是炮点到检波点地

震波在射线路径上被网格截断的长度)。相应的算法有,射线追踪算法(Ray-tracing methods)、基于 Snell 定律的打靶法(Shooting methods)、基于 Huygens 原理的解波动方程法(Full wave equation methods)。射线追踪算法,按对慢度 s 的假设不同,又分为直射射线追踪和弯曲射线追踪法。当所测区域地质体比较均匀时,可近似认为地震波的传播路径大致沿直线走向;当所测区域内异常体变化很大时,假如速度变化幅度在 $10\% \sim 15\%$,则采用弯曲射线追踪算法。应用效果好的弯曲射线追踪方法有两类,基于程函方程的有限差分法和基于 Huygens 原理的最短路径算法^[1]。

利用直射追踪算法, 计算出每个网格内线段的长度并保存在二维数组中, 形成一个距离矩阵 D_{ij} , 用慢度 S_{ij} 的倒数表示每个网格速度的大小。利用基本数学方法可列出如下方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = d_{11}S_1 + d_{12}S_2 + d_{13}S_3 + \dots + d_{1j}S_j \\ T_2 = d_{21}S_1 + d_{22}S_2 + d_{23}S_3 + \dots + d_{2j}S_j \\ \quad \dots\dots\dots \quad \dots\dots\dots \\ \quad \dots\dots\dots \quad \dots\dots\dots \\ T_i = d_{i1}S_1 + d_{i2}S_2 + d_{i3}S_3 + \dots + d_{ij}S_j \end{array} \right., \quad (1)$$

改写成

$$D^*S = T_{\circ} \quad (2)$$

2.2 反演层析成像

井地地震层析成像问题最后归结为解一个大型的、稀疏的、常常是病态的线性方程组,如式(1)。常用算法有,标准层析重建方法(如代数重建 ART 和联合叠代重建 SIRT)、叠代矩阵法(如 Jacobi, Gauss-Seidel 法)、共轭方向/梯度法、神经网络法等。

ART 的叠代法, 已知给定初始慢度模型参数 ($S_1, S_2, S_3 \cdots S_j$) 和通过正演射线追踪技术确定射线的路径 ($d_{11}, d_{12}, d_{13} \cdots d_{lj}$), 由第 i ($i > 0$) 条射线的 D 和 S 求第 i 条射线理论 T_i , 计算 $\Delta T = T_{\text{实}} - T_i$, 由 $D * \Delta S = \Delta T$ 计算 ΔS , 用 ΔS 修正第 $i+1$ 条射线的慢度值, 再求第 $i+1$ 条射线的理论 T_{i+1} , 重复上述过程, 直到计算出所有射线的旅行时接近实际旅行时为止。其计算公式如下:

$$S_j^{(q+1)} = S_j^{(q)} + \frac{D_{ij}r^q}{\sum_k D_{ik}^2}, \quad (3)$$

式中 q 为叠代次数; r 为计算旅行时与实际旅行时的误差(又称残差)。

SIRT 迭代算法与 ART 类重建技术不同,典型的 SIRT 算法不利用同一叠代的第 i 条射线的修改

值来计算第 $j+1$ 条射线的修改值, 而是同时处理所有的射线, 计算所有射线的慢度修正量 $\delta S_j^{(k)}$, 然后将属于同一个网格内的慢度修正量 $\delta S_i^{(k)}$ 求和平均。

其慢度修正量 $\delta S_j^{(k)}$ 的计算公式为：

$$\delta S_j^{(k)} = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^n \frac{\left[ti - \sum_{j=1}^m a_{ij} S_j^{(k)} \right] a_{ij}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}^2}, \quad (4)$$

式中 M_j 为穿过第 j 个网格的射线数; n 为射线数; m 为模型离散化后的网格数。

为了加快计算速度，并突出短射线的作用，其平均化算法更为实用，即：

$$\delta S_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta t_i^{(k)}}{N_i^4 L_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n N_i^{-4} \quad , \quad (5)$$

式中 $\delta t_i^{(k)} = t_i - \sum_{j=1}^m \frac{L_i}{N_i} S_j^{(k)}$ 和 $L_i = \sum_{j=1}^m |a_{ij}|$, 分别表示走时残差和第*i*条射线的总长度 L_i ; N_i 为第*i*条射线穿过模型的网格数。

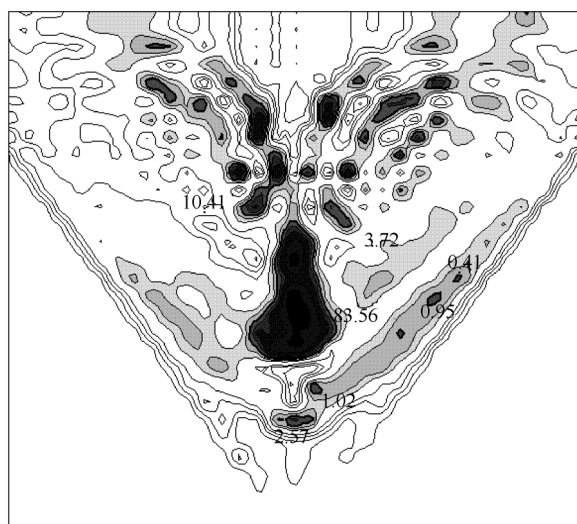
为了了解更加平稳,可以对上述每次求取的慢度修正量 δS 进行光滑。SIRT 叠代算法的主要优点是不会出现解的奇异现象,同时,能平稳收敛,计算简便快捷,占用计算机内存少等;缺点是收敛较为缓慢,叠代次数较多。

3 应用实例

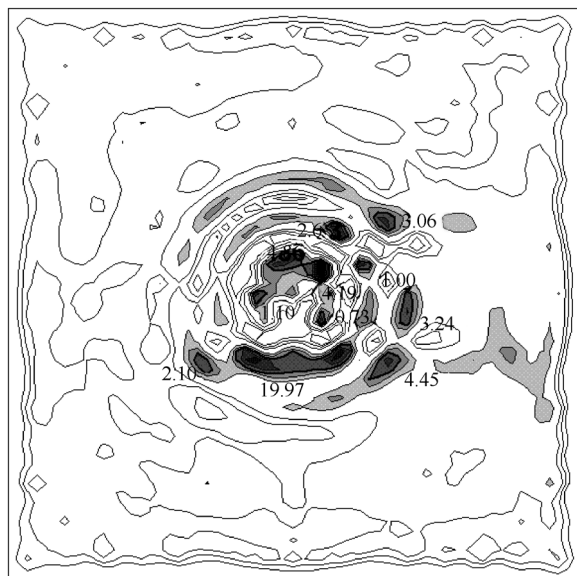
为了验证井地地震方法原理的可行性,可靠性和稳定性,分别选择了直射追踪的正演算法和联合叠代重建 SIRT 的反演方法,从速度场的空间分辨率,变化幅度等情况下构建复杂地质模型进行验证。

图 4 是井孔一条测线剖面图(图 4a)和 20 m 深度的切面图(图 4b)。数据采集过程如前所述,剖面图纵横坐标表示井孔深度和测线长度(m);切面图的纵横坐标表示地震波传播射线覆盖区域有效数据(m);阴影区域为低速异常区,结合钻探资料解释为溶洞发育区域。颜色越深速度越低,图上数字表示出部分异常区域的面积大小(m^2)。

由井地地震的方法原理，决定了井地地震可应用到以下领域：探测地下岩溶、古洞、空洞、矿区采空区、埋设物；查明地下构造、渗透带、水流通道和方位，圈定破碎带位置和范围；建筑物路基、铁路公路路基等不良地质体检测等。



(a)



(b)

图 4 侧线剖面图(a)和 20 m 深度的切面图(b)

Fig.4 Cross-section (a) and sectional drawing at 20 meter (b)

4 结语

井地地震技术的核心从野外到室内可以划分以下几个阶段:观测系统设计、数据采集和数据处理。观测系统设计旨在增加探测目标的覆盖次数、均匀程度和提高工作效率;数据采集要从震源和检波器两个方面优化,例如选用激发能量强、频率高、成本低、效率高的震源,选用灵敏度高、抗噪能力好的检波器。数据处理大体分为 3 个过程:拾取初至,建立正演模型和反演层析成像。初至拾取的精度关系到最后结果的正确与否,用小波法拾取初至,能量比值及其改进法和分形维法等可以提高初至拾取的水平。充分考虑地质的非均匀性,地震波的传播路径弯曲程度,优化建立正演模型算法,如上面提到的基于程函方程的有限差分法、基于 Huygens 原理的最短路径算法和神经网络法等。反演技术的提高分为以下几个方面:多种资料联合层析反演、各向异性介质地震成像方法、矢量地震层析成像方法和多维地震层析成像方法等。

参考文献

- [1] 裴正林. 井间地震层析成像应用研究[J]. 勘察科学技术, 2001 (2): 56-57.
- [2] 刘跃华, 赵殿栋, 于世煥, 等. 井间地震野外采集方法试验研究[J]. 石油物探, 1999, 38(4): 74-75.
- [3] 陈国金, 曹辉, 吴永检, 等. 最短路径层析成像技术在井间地震中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(4): 327-330.
- [4] 宋伟, 罗大清, 吴律, 等. 双井与地面数据集的透射与反射层析成像[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 149-154.
- [5] 张文波, 朱光明, 马德堂, 等. 井间地震初至波分析[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 70-74.
- [6] 李庆忠, 王建华. 井间地震勘探的误区及出路[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 1-11.
- [7] 曹辉. 井间地震技术发展现状[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 1-5.