

# 井间地震层析成像分辨率研究

裴正林<sup>1</sup>, 余钦范<sup>2</sup>, 狄帮让<sup>1</sup>

(1. 石油大学中国石油天然气总公司物探重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 通过大量数值模型试验, 并根据射线密度、射线正交性和点扩散函数, 对井间地震层析成像的分辨率问题进行了研究。结果表明, 井间地震层析成像的分辨率在空间上是可能性变的, 垂直方向的分辨率好于水平方向, 而且高速异常体和低速异常体的图像形态和分辨率是非一致的。高速异常体波形 CT 的图像水平方向最小分辨率距离为  $1/2$  波长, 垂直分辨率最小分辨率距离为  $3/10$  波长, 而低速异常体的波形 CT 图像的水平方向的最小分辨率约为  $2/5$  波长, 垂向最小分辨率约  $1/5$  个波长, 走时 CT 的图像水平方向最小分辨率为 3 个像元, 垂直方向的最小分辨率距离为 2 个像元, 当井深与井间距之比为 2 时, 图像分辨率最高。

关键词: 井间地震, 层析成像, 分辨率

中图分类号: P631.4, P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2002)03-0218-07

对井间地震层析成像非线性问题线性化处理之后, 各种反演法可归结为对适定方程的求解。井间地震层析成像反演算法解的物理意义是给出地质结构和岩性分布。因此, 对于解的可靠性和分辨率的研究就显得非常重要。在线性反演中, Backus 和 Gilbert(1969)提出用分辨率矩阵评价解的分辨率。冯锐(1991)提出了射线密度矢量和椭圆的方法。Humphreys 和 Clayton(1988)提出了检测板方法。而 Rector III 和 Washbourn(1994), 赵永贵等(1996)则采用射线密度和射线正交性评价解的分辨率。

井间地震层析成像的分辨率大小, 主要受反演算法、观测系统、震源频率、目标体的形态及性质(高速体还是低速体)等方面的影响。近年来, 许多研究者对井间地震走时层析成像分辨率问题进行了研究, 并取得了可喜的成果。Williamson(1991, 1993)从散射成像与数值模拟的角度研究, 认为该方法所能分辨的最小尺度不小于第一 Fresnel 带; Schuster(1996)从均匀介质中的孤立散射体的散射出发, 导出了井间地震走时层析成像纵横分辨率估计式:  $\Delta_z = \sqrt{\lambda x_0}$ ,  $\Delta_x = (4x_0/H)\sqrt{3\lambda x_0/4}$ ,  $x_0 = D/2$ ,  $D$  是井间距,  $\lambda$  是波长,  $H$  是井深。曹俊兴等(1995)根据费马原理, 对均匀背景下速度异常体的井间地震层析成像分辨率给出了估算式。杨文采(1992)从计算像元方面来考虑, 认为该方法技术在理想情况下, 最佳分辨宽度约 3 个像元。陈国金(1996)根据直射

线 SIRT 方法, 对井间观测系统进行了讨论。笔者利用数值模拟试验研究了井间地震弯曲射线走时成像、波形成像的分辨能力。

## 1 解估计的分辨率矩阵与图像分辨率评价的点扩散函数

### 1.1 分辨率矩阵

井间地震层析成像的线性化反演的关键是通过研究广义逆的性质对解估计进行预测和评价, 使重建的图像符合地质意义。线性化反演可以归结为解线性方程组

$$Ax = d, \quad (1)$$

对于射线 CT 式中,  $d$  为地震走时的观测值矢量,  $x$  为真实速度模型矢量。  $A_{m \times n}$  是 Jacobi 矩阵, 是根据速度模型计算出的地震波射线参数矩阵。通常, 上述方程没有严格的真解, 只有近似解。设  $A$  的广义逆为  $A^{-g}$ , 方程(1)的广义解估计表示为

$$x = A^{-g}d \quad (2)$$

把(1)式代入(2)式, 则有

$$x = A^{-g}Ax = Rx, \quad (3)$$

式中,  $R = A^{-g}A$  为方阵。当  $R = I$  ( $I$  为单位方阵) 时, 有  $\hat{x} = x$ , 说明所有模型参数的估计值都是精确解。但是在实际问题中, 常常是  $R \neq I$ , 这时, 模型参数的某个估计值  $\hat{x}_k$  可以表示为

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^J R_{kj}x_j, \quad (4)$$

式中,  $J$  表示速度模型矢量维数。(4)式说明了当  $R \neq I$  时,模型参数中的任意一个估计值都与该点附近的若干参数值有关,它实际上是真实模型  $\{x_j\}, j = 1, \dots, J$  的空间加权平均,其中的权为矩阵  $R$  的行向量。 $R$  越接近单位阵,则  $\hat{x}$  越接近真解  $x$ ,解估计的某个参数与其它参数之间的关系不密切,解估计的分辨率就越高,因此,  $R$  被称为模型的分辨矩阵(Backus 和 Gilbert, 1968)。对  $\hat{x}_k$  的分辨率的定量估计可以用分辨核表示

$$r_k = \sum_{j=1}^J (R_{kj} - \delta_j)^2 \tag{5}$$

当  $r_k$  越大时,模型估计值  $\hat{x}_k$  偏离  $x_k$  越大,说明分辨率越差。因此,当模型的观测系统确定后,通过计算分辨率矩阵可使我们在取得数据之前就可以了解解估计  $\hat{x}$  的性质。

对于射线 CT,  $R$  的计算与射线追踪方法有关,采用不同的射线追踪方法所计算的  $R$  矩阵可能不同。为了便于评价,提高可比性,我们采用 Rector III 和 Washbourn(1994)、赵永贵等(1996)提出的射线密度和正交性方法来定量评价解的分辨率和解的可靠性。

1.2 点扩散函数

反演成像时,所得图像与成像目标的实际地球物理参数分布往往不完全相符。它们之间可表示为一个映射关系。若把实际地球物理参数的分布称为源函数(或物函数)  $I$ ,成像所得图像分布称为像函数  $B$ ,而映射关系为  $E$ (投影算子),则可表示为

$$E : I = B \tag{6}$$

当源函数(或物函数)  $I$  为空间 1 个理想点  $\delta(x, y)$  时,其像函数  $B$  定义为点扩散函数  $h(x, y)$ 。由(6)式可见,对于不同的投影算子,对应的点扩散函数也不同。若点扩散函数  $h(x, y)$  等于理想的  $\delta(x, y)$ ,则图像没有模糊和失真,即  $h(x, y)$  越是尖峰突起,逼近  $\delta(x, y)$ ,成像质量越好,  $h(x, y)$  的扩散范围越大,则图像将越模糊。

一般来说,当源位置变化时,  $h(x, y)$  也会有所变化。如果一个点源在物场中移动时,它在像场上的像只移动位置而不改变函数形态,这种成像系统称为空不变的。对于井间地震 CT 而言,成像系统是空可变的。

对于上述映射系统,可利用系统的点扩散函数  $h$  来描述和预估成像图像的质量。

在成像理论中,空间分辨率一般定义为:若物函数为 2 个相隔一定距离的点,所得像函数一般有 2 个峰,当 2 点逐渐靠近时,2 峰间的下凹渐渐变小,终于合成为一个峰。定义当像函数上 2 峰之间下凹处的值为峰值的 0.707 倍时,物函数上 2 点之间的距离为此成像系统的距离分辨率或空间分辨率。

当成像目标为空间一个理想点  $\delta(x, y)$  时,速度差  $\Delta v$  渐渐小,成像的图像峰值也变小。可分辨图像的最小峰值所对应的速度差称为该成像系统的可分辨速度差。

下面应用点扩散函数的概念和射线密度以及射线正交性,通过数值模型来分析研究井间地震层析成像的分辨率问题。

2 井间地震层析成像的分辨率

2.1 波形 CT 的分辨率

Williamson(1991, 1993)、Schuster(1996)、杨文采(1992)、曹俊兴等(1995)等曾从不同角度,对均匀背景下速度异常体的井间地震走时层析成像分辨率进行了研究。笔者在前人成果的基础上,侧重研究波形 CT 的分辨率问题。

2.1.1 射线密度和射线正交性

为说明射线密度和射线正交性计算的正确性,我们设计了一网格为  $11 \times 11$  的均匀速度模型( $v_0 = 4\,000\text{ m/s}$ ),震源点和接收点均为 11 个。图 1 和图 2 分别为该模型井间地震观测系统的射线密度分布图和射线正交性分布图。从图可以看出,文中的计算方法是正确的。

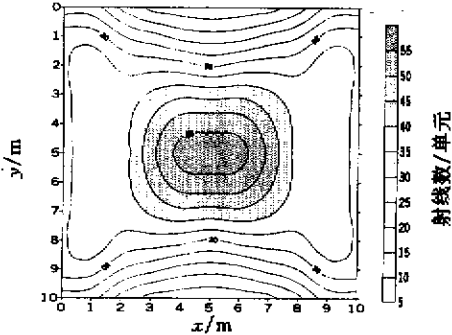


图 1 射线密度分布

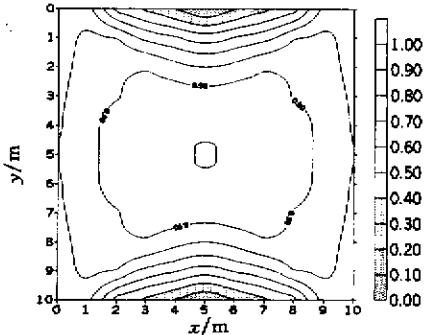


图 2 射线正交性分布

2.1.2 不同位置点扩散图

为了研究井间地震 CT 的射线密度、正交性和不同位置点扩散图关系,我们设计了另外一个模型,网格大小为  $21 \times 31$ ,背景速度为  $4\,000\text{ m/s}$ 。震源点和接收点均为 31 个。图 3 和图 4 分别为射线密度分布图和射线正交性分布图。

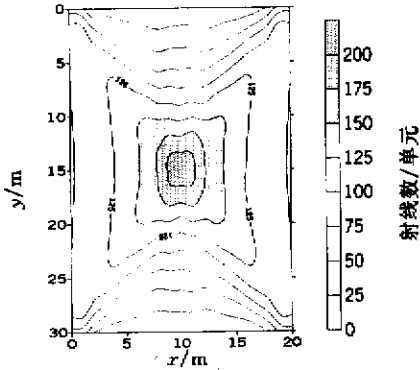


图 3 射线密度分布

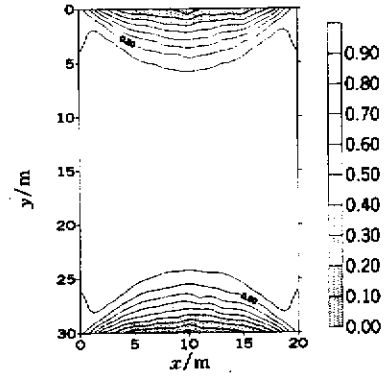


图 4 射线正交性分布

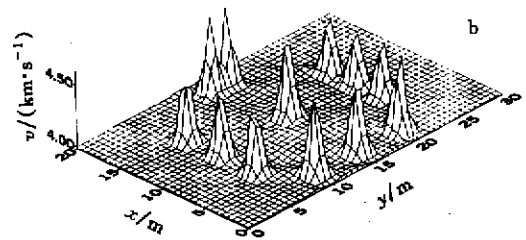
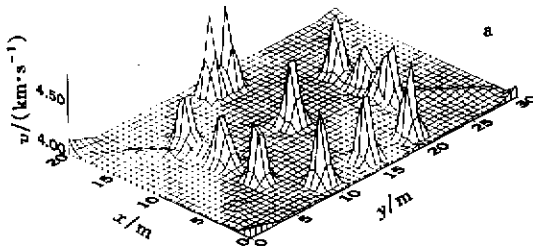


图 5 井间地震 CT 不同位置点扩散分布

a—弯曲射线走时 CT (LSQR 法) b—波形 CT (CG 法,  $f = 800\text{ Hz}$ )

应于射线密度低、正交性差。可见,井间地震 CT 的射线密度和正交性可以评价图像可靠性、质量和分辨率。波形 CT 的图像分辨率高于走时 CT 的。

的分辨率明显优于  $x$  方向。另外,低速点散射体的点扩散函数比高速点散射体的要尖锐些,因此,低速体的分辨率要高于高速体的。

不同大小的正方形低速体的波形 CT 成像结果见图 7。随着低速体尺寸的增大,波形 CT 异常图像越逼近实际速度值。当低速体的尺寸大小等于  $2/5$  波长 ( $5 \times 5$  个像素)时,图像最逼近实际模型。当低速体的尺寸再增大,则异常体图像在  $y$  方向由单峰逐渐分化为双峰,即出现伪像。图 8 所示为相同观测角,不同大小模型正负点异常体波形 CT 中心区点扩散函数分布。可以看出,随着模型尺寸变大,点扩散函数由尖锐变为平缓,分辨率降低, $x$  方向比  $y$  方向扩散更快。高速点散射体的扩散函数的幅度随模型尺寸的增大而变化不大,而低速点散射体的扩散函数的幅度,则随模型尺寸的增大而产生指数衰减。但低速体的扩散面积小于高速体的,即低速点散射体的分辨率高于高速点散射体的。

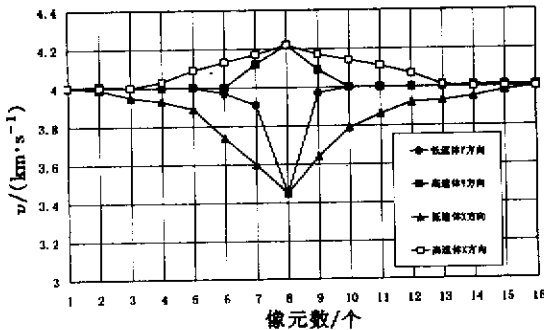


图 6 成像中心区波形 CT 正负点异常体的点扩散函数

井间距  $D = 1.5\lambda$ , 井深  $H = 1.5\lambda$ ,  $\lambda = 10\text{ m}$

图 6 所示为井间成像中心区的波形 CT 点扩散图。可以看出,点扩散函数在空间具有明显的方向性, $x$  方向扩散的厉害, $y$  方向则较尖锐,故  $y$  方向

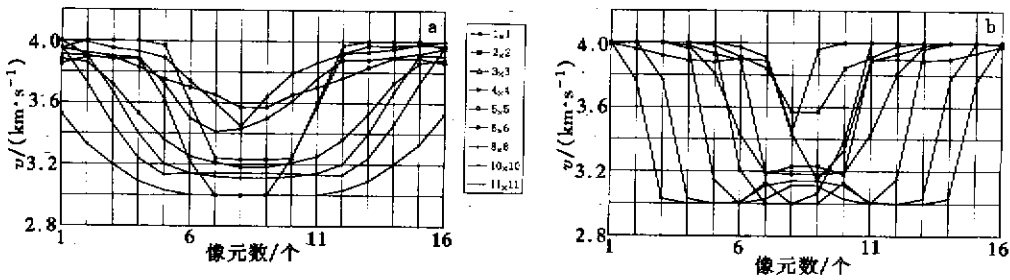


图 7 不同大小正方形负异常体井间波形 CT 中心区切片

井间距  $D=1.5\lambda$ , 井深  $H=1.5\lambda$ ,  $\lambda=10\text{ m}$ ; a— $x$  方向中心切片, b— $y$  方向中心切片

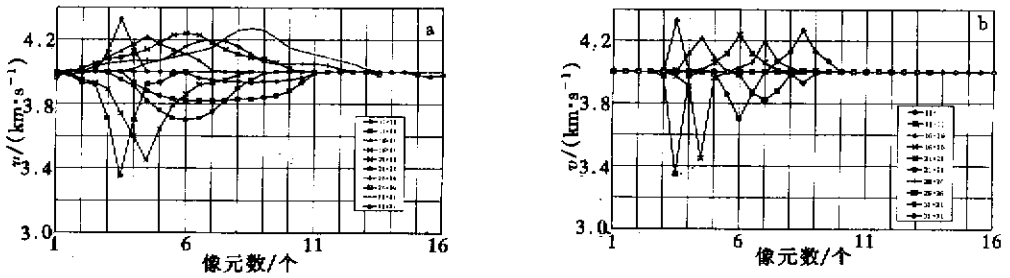


图 8 不同大小模型正负点异常体波形 CT 中心区点扩散函数分布

a— $x$  方向分布 b— $y$  方向分布

2.1.3 不同速度差的分辨率

图 9 所示为正负异常体不同速度反变量波形 CT 中心区切片图。对于高速体,当速度反差在

50%时,波形 CT(CG 法)仍能很好地恢复异常体。对于低速体,当速度反差大于 40%时,波形 CT(CG 法)图像  $x$  方向出现双峰伪像。

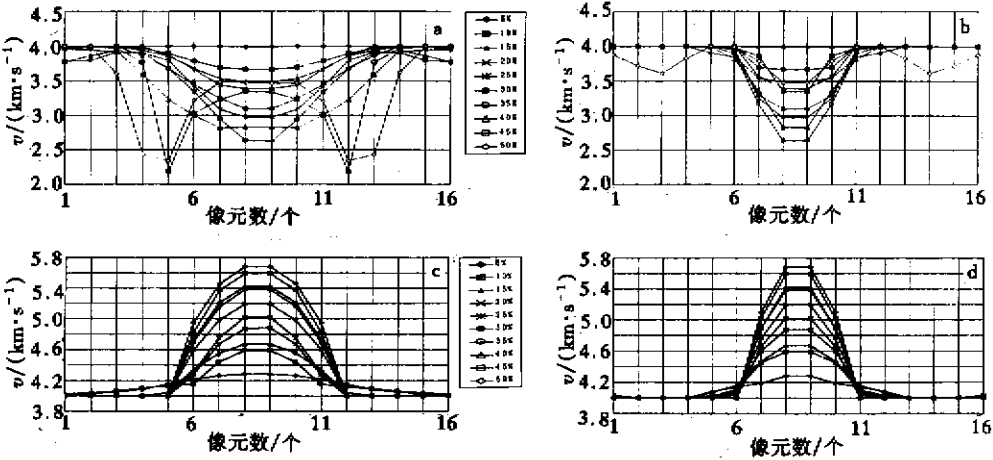


图 9 正负异常体不同速度反变量波形 CT 中心区切片

异常体大小为  $4 \times 4$  个像元。a—负异常体  $x$  方向 b—负异常体  $y$  方向 c—正异常体  $x$  方向 d—正异常体  $y$  方向

2.1.4 分辨率与井深井间距的关系

下面我们对井间距  $D$  不变,井深  $H$  变化(观测角变化)时的分辨率进行讨论。图 10 为井间中心区波形 CT 的距离分辨率与井深井间距比的变化曲线。井间距  $D=10\text{ m}$ ,  $H/D$  增大,则观测角也增大。对于高速点散射体,随着观测角的增大,分辨率提高。水平方向分辨率收敛于  $1/2$  波长,即水平

方向最小分辨距离为  $1/2$  波长;垂向分辨率收敛于  $3/10$  波长,即垂向最小分辨距离为  $3/10$  波长。

图 11 为不同大小模型波形 CT 成像中心区距离分辨率图曲线。 $H/D$  一定,观测角不变,模型尺寸增大,即  $D$ 、 $H$  同时增大(最小值为  $10\text{ m}$ )时,水平方向和垂直方向的距离分辨率曲线都有一个极小点,这个点的空间分辨率距离最小,2 个方向的最小

分辨距离与图 10 结果基本一致。因此,当井深与井间距的比值为 2.0 时,该观测系统的图像分辨率最高。此结果同 Schuster(1996)对井间地震走时层析成像分辨率与观测角的关系的研究结果一致。

### 2.1.5 低速异常体

对于低速体的分辨率,设计的模型为均匀背景,速度 4 000 m/s,模型规模 10 m×16 m,网格大小 1 m×1 m,像元数 176。震源主频选择 500 Hz、400 Hz、300 Hz,对应波长分别为 8 m、10 m、13.3 m。

对于图 12 所示垂向分布的 2 点目标体(或散射体),其图像分离和速度逼近程度在 500 Hz 是最好的。随着频率的降低,图像由完全分离逐渐发展到部分重叠到完全重叠,速度逼近程度逐渐变差。根

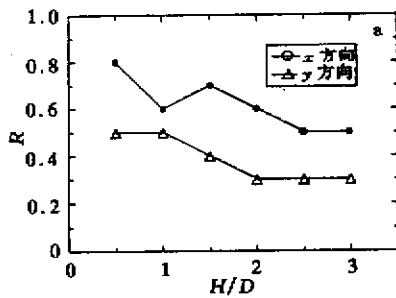


图 10 井间地震成像中心区波形 CT 的距离分辨率  
高速点异常体,坐标以波长为单位,  $\lambda = 10$  m

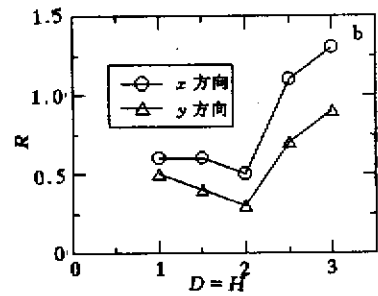


图 11 不同大小模型波形 CT 成像中心区距离分辨率  
(条件同图 10)

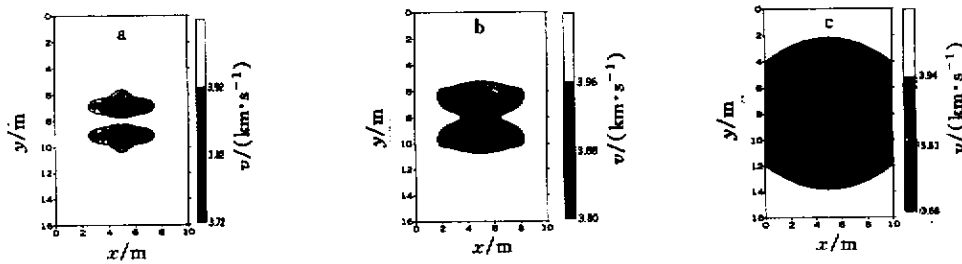


图 12 垂直分离低速点异常体的图像

a— $f=500$  Hz; b— $f=400$  Hz; c— $f=300$  Hz; 垂向分离距离为 m

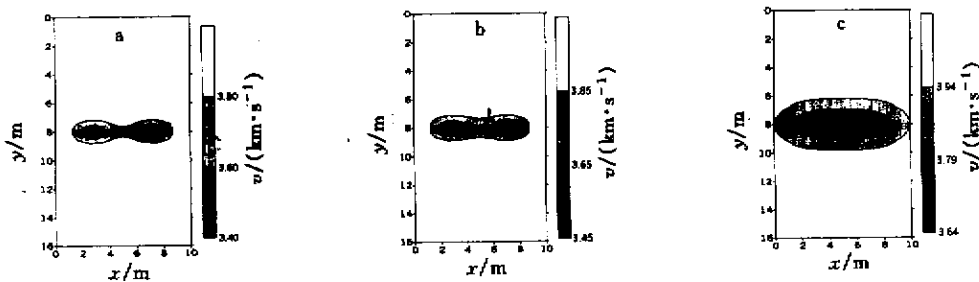


图 13 水平分离低速点异常体的图像

a— $f=500$  Hz; b— $f=400$  Hz; c— $f=300$  Hz; 水平分离距离 4 m。

### 2.1.6 板状体异常

基于上述工作,为进一步研究分辨率问题,我们做如下模型试验。背景是均匀介质,速度为 4 000

据分辨率的定义,可以确定频率为 400 Hz 的图像为可分辨图像。于是可以得出低速体波形 CT(CG 法)图像的垂向最小分辨率约 1/5 个波长。

对于图 13 水平分布的 2 个目标体,其图像分离和速度逼近程度在 500 Hz 是最好的,但在速度逼近程度上不如垂向分布的。同样,可以确定频率为 400 Hz 的图像为可分辨图像即可以得出波形 CT 的水平方向的最小分辨率约为 2/5 波长。

由上述可以清楚地看出,井间地震 CT 的分辨率直接与震源频率有关,频率越高,分辨率越好。对于井间(或跨孔)观测方式,地震波形 CT 的垂向分辨率好于水平方向的,垂直分辨率比水平的约高 1 倍,低速体的分辨率高于高速体的。

m/s 模型规模为 10 m×16 m。网格大小为 1 m×1 m,像元数为 176。震源子波主频为 400 Hz。

图 14 所示为单一板波形 CT(CG 法)成像结

果。单—板状体板宽 2 m,长 5 m,倾角  $\beta$  分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和  $90^\circ$ 。低速板的速度为 3 000 m/s,高速板的速度为 5 000 m/s。由图可以看出,水平板状体逼近程度较高。图 14c 中倾斜板的位置、倾角和倾斜长度可以正确分辨;垂直的低速板状体长度在  $1/2$  波长以内可分辨其形态,而垂直的高速板状体长度在 1 个波长以内可分辨其形态(图 14d)。

图 15 所示为 2 个平行板波形 CT(CG 法)成像结果。对于平行板,倾角  $\beta$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 和  $45^\circ$ 。平行板垂向间距为 3 m,长度为 5 m。 $0^\circ$ 和  $30^\circ$ 倾角时,图像中平行板能很好地分辨,长度比实际略大一点。随着倾角的增加,平行板水平方向上的分辨率较快降低。 $45^\circ$ 倾角时,无法分辨为 2 个平行板。

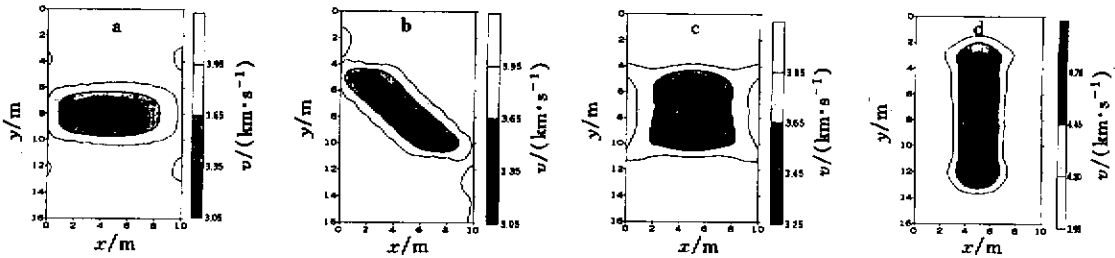


图 14 不同倾角低速板状体成图像

a—低速板,  $\beta=0^\circ$ ; b—低速板,  $\beta=45^\circ$ ; c—低速板,  $\beta=90^\circ$ ; d—垂直高速板

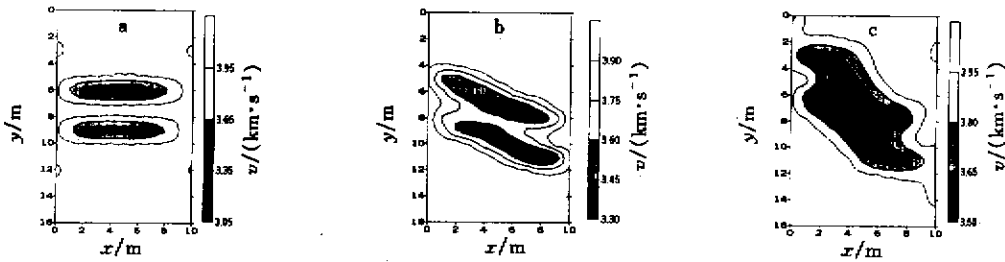


图 15 不同倾角双低速板状体成像

a— $\beta=0^\circ$ ; b— $\beta=30^\circ$ ; c— $\beta=45^\circ$

2.2 走时 CT 的分辨率

下面研究弯曲射线走时层析成像的分辨能力。设计一简单模型即均匀背景( $v=4\,000$  m/s)中含有 12 个异常点的速度数值模型。模型设计井间距 20 m、井深为 30 m。接收间距为 1 m,激发间距 1 m。离散网格单元尺度是衡量重建图像分辨能力的重要参数。模型剖分的最佳网格的大小应等于最小观测点距(陈国金, 1996)。该模型被剖分为  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  的矩形像元。图 17a、b 分别是模型和弯曲射线正

演,LSQR 法成像结果。初始速度模型为 4 000 m/s。反演速度约束范围为 3 000~4 000 m/s。

图 16a 中 12 个异常点的尺度为 1 个网格尺度即 1 m 2 个散射点的最小垂直分布间距为 2 m,最小水平分布间距为 3 m。图 16b 与真实速度模型逼近程度很高。除中心点散射体的速度值略小之外,其余点与真实速度值 4 000 m/s 相同。图 17 则为图 16 模型的波形 CG 法成像结果。初始速度模型为 4 000 m/s。反演速度约束范围 3 000~4 000 m/s。

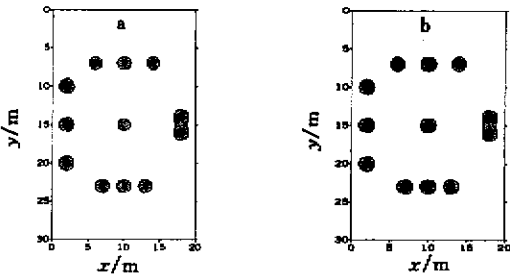


图 16 异常点井间地震走时层析成像

a—速度模型; b—异常点弯曲射线走时成像

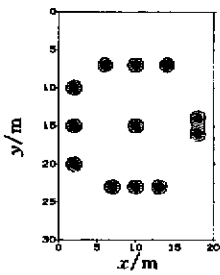


图 17 异常点井间地震波形层析成像

震源主频为 800 Hz。与井间地震走时 CT 相比,波形 CT 的分辨率更高些。由此模型试验可以得出:在均匀背景下,弯曲射线 LSQR 法井间地震走时层析成像可分辨尺度为 1 个像元宽度的目标,最小垂直分辨距离为 2 个像元(该例中为 2 m);最小水平分辨距离为 3 个像元(该例中为 3 m)。

3 结 论

点扩散函数,射线密度和射线正交性可以评价井间地震 CT 图像的可靠性、质量和分辨率。井间地震层析成像的分辨率在空间上是可变的,垂直方向分辨率优于水平方向的。波形 CT 的分辨率高于走时 CT 的分辨率,且与震源主频有关。频率越高,分辨率越高。有限观测角对目标体空间特性如板的倾角或者 2 个散射体可分辨能力等有影响,但不影响在图像中的位置或倾斜方向。常规层析成像方法对投影条件(观测角、数据完整性)的要求比较高。

笔者在撰写过程中,得到了牟永光教授的关心和支持,在此表示衷心感谢。

参考文献:

[1] 曹俊兴,严忠琼.地震波跨孔旅行时层析成像分辨率的估计[J].成都理工学院学报,1995,22(4).

[2] 陈国金.井间观测系统的讨论[J].石油物探,1996,35(3).  
[3] 杨文采,杜剑渊.煤矿陷落柱地震层析成像试验[J].物探与化探,1992,16(3).  
[4] 赵永贵,王超凡,陈燕民,等.地震 CT 在寻找隐伏铜镍矿中的应用[J].地球物理学报,1996,39(2).  
[5] Backus G, Gilbert F. The resolving power of gross earth data[J]. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1968, 16(1): 169 - 205.  
[6] Humphreys J T, Clayton R W. Adaption of back projection tomography to seismic travelttime problems[J]. J. G. R., 1988, 93: 1073 - 1085.  
[7] Rector III J W, Washbourne J K. Characterization of resolution and uniqueness in crosswell direct - arrival travelttime tomography using the Fourier Projection slice theorem[J]. Geophysics, 1994, 59(11): 1642 - 1649.  
[8] Schuster G T. Resolution limits for crosswell migration and travelttime tomography Geophys[J]. J. Int., 1996, 127(2): 427 - 440.  
[9] Williamson P R, Worthington M N. A guide to the limits of resolution imposed by scattering in ray tomography[J]. Geophysics, 1991, 56(2): 202 - 207.  
[10] Williamson P R, Worthington M H. Resolution limits in ray tomography due to wave behavior: Numerical experiments[J]. Geophysics, 1993, 58(5): 727 - 735.  
[11] 冯锐.西北地区的基地速度图像[J].地球物理学报,1991,34(4).  
[12] Wu R S, Toksoz M N. Diffraction tomography and multisource holography applied to seismic imaging[J]. Geophysics, 1987, 52(1): 11 - 25.

RESOLUTION IN CROSSHOLE SEISMIC TOMOGRAPHY

PEI Zheng-lin<sup>1</sup>, YU Qin-fan<sup>2</sup>, DI Bang-rang<sup>1</sup>

(1. University of Petroleum, Key Lab of Geophysical Exploration CNPC, Beijing 100083, China; 2. University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Resolution in crosshole seismic tomography has been studied in this paper by means of ray density, ray orthogonality and point - spread function. Numerical experiments indicate that the resolution is better in the vertical direction than in the horizontal, and the high velocity anomalous body is different from the low velocity anomalous body in resolution and shapes of tomography. For the high velocity anomalous body, the spatial resolution of the waveform velocity tomogram in horizontal is about 1/2 of the wavelength, and that in vertical about 3/10 of the wavelength. For the low velocity anomalous body, the spatial resolution of the waveform velocity tomogram in horizontal is about 2/5 of the wavelength, and that in vertical about 1/5 of the wavelength. The spatial resolution of the travelttime velocity tomogram in horizontal is about three tomographic elements width, and that in horizontal about two tomographic elements width. When the ratio between the borehole depth and well offset is equal to 2.0, the spatial resolution of the velocity tomogram is the best.

**Key words:** crosshole seismic; tomography; resolution

作者简介:裴正林(1962 - )男,高级工程师,2000年获中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业博士。发表论文 30 余篇,曾分别主研和负责完成“八五”、“九五”国家科技攻关三级项目二项,获部级科技三等奖二项。现在石油大学(北京)从事博士后研究工作,主要研究方向:小波变换、遗传算法及神经网络应用,层析成像理论方法和地震叠前深度偏移等方面研究。