

偏移距域/角度域共成像点道集与偏移速度的关系

刘守伟, 程玖兵, 王华忠, 马在田

同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

摘要: 为了得到波动方程偏移距域共成像点道集(ODCIGs)和角度域共成像点道集(ADCIGs)与偏移速度的关系, 在匀速单层水平反射情况下, 对 ODCIGs 和 ADCIGs 随偏移速度的变化进行了定量的推导, 得到偏移速度偏小时 ODCIGs 与半偏移距成双曲关系, 反之成椭圆关系; 结合深度聚焦分析, 得到偏移速度偏大时, ADCIGs 中视入射角大于真入射角, 反之, 小于真入射角; 在速度偏小时, ADCIGs 上剩余时差(RMO)与视入射角的正切值成椭圆关系, 反之成双曲关系。在地震有效入射角度范围内, ADCIGs 对于偏大的偏移速度更加敏感。在偏移速度分析(MVA)中, 从稍大的速度开始分析会对速度分析更加有利。

关键词: 偏移距域共成像点道集; 角度域共成像点道集; 剩余时差; 偏移速度分析。

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2007)04-0575-08

收稿日期: 2007-02-10

Relationships between Offset Domain/Angle Domain Common Image Gathers and Migration Velocity

LIU Shou-wei, CHENG Jiu-bing, WANG Hua-zhong, MA Zai-tian

School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to probe the relationships between wave equation offset domain common image gathers (ODCIGs)/ angle domain common image gathers (ADCIGs) with migration velocity, we quantitatively derive the changes of ODCIGs and ADCIGs along with migration velocity on the assumption of uniform velocity medium with a horizontal reflector. We come to conclusion that ODCIGs are hyperbolas with half offset; on the contrary, they are ellipses. Combined with the results of depth focusing analysis, we find the apparent incident angles in ADCIGs are larger than the real incident angles when the migration velocity is larger than the true one and vice versa. With lower migration velocity, the residual moveout (RMO) on ADCIGs is an ellipse with the tangent of apparent incident angle; otherwise, it's a hyperbola. In the valid seismic incident angle, ADCIGs are much more sensitive to the higher migration velocity. As to migration velocity analysis (MVA), it is suggested to start with a little higher initial velocity.

Key words: offset domain common image gathers; angle domain common image gathers; residual moveout; migration velocity analysis.

近年来, 对角度域共成像点道集(ADCIGs)的研究引起了一些地球物理学家的关注。从 Prucha *et al.* (1999) 提出利用 DSR 偏移的方法得到偏移距射线参数域共成像点道集开始, Xu *et al.* (2001) 指出在 Kirchhoff 偏移中, 角度域成像是一种对复杂构造成像的策略; Xie and Wu (2002) 通过 Beamlet 分解波场的方法得到 ADCIGs, Rickett and Sava

(2002) 通过波动方程共炮偏移提出偏移距域共成像点道集(ODCIGs)和 ADCIGs。后来, Sava and Fomel (2003) 进一步发展该方法, 区分了成像前提取和成像后提取, 在成像后首先得到偏移距域共成像点道集(ODCIGs), 然后通过成像后倾斜叠加将其转化为 ADCIGs。需要说明的是, 通过波动方程偏移提取的 ODCIGs 与通常 Kirchhoff 偏移提取的

基金项目: 国家 863 研究计划项目(No. 2006AA09Z323); 国家自然科学基金项目(No. 40504016)。

作者简介: 刘守伟(1978-), 男, 博士研究生, 从事波动方程偏移成像及速度分析等方面的研究工作。E-mail: liushouwei@126.com

ODCIGs 含义是不同的,波动方程偏移 ODCIGs 中的半偏移距是成像空间的半偏移距(称为局部半偏移距),它是模型空间参数. Kirchhoff 偏移得到的 ODCIGs 中的半偏移距仍旧是地表半偏移距,它仍旧反映的是数据空间的参数(Sava and Fomel, 2000).除了特别注明的之外,本文所讲的 ODCIGs 和 ADCIGs 分别指通过波动方程偏移提取的 ODCIGs 和 ADCIGs. Soubaras(2003)通过对波场进行局部谐波分解的方法得到 ADCIG 道集.后来 Biondi and Tisserant(2004)又提取了三维(3D)情况下 ADCIGs,在 3D 情况下,ADCIGs 不仅是入射角的函数,而且还是方位角的函数.

在偏移速度分析方面的应用是对 ADCIGs 应用的一个重要分支, Biondi and Symes(2004)推导了二维 ADCIGs 上的剩余时差(RMO)关系,很快 Biondi and Tisserant(2004)又将二维 RMO 关系推广到三维情况下 ADCIGs 上.

众所周知,在偏移速度正确时,ADCIGs 是拉平的,其深度不随入射角变化而变化;速度偏大时,ADCIGs 是向下弯的,其深度随入射角增大而变深,反之,其深度随入射角增大而变浅.但是,当偏移速度存在误差时,ADCIGs 中得到的入射角(视入射角)与真正的地震传播入射角的关系怎样,视入射角随速度误差怎样变化,共成像点道集上 RMO 对速度误差的敏感性的影响等都没有明确的结论.本文结合深度聚焦分析的结论,在匀速介质中只有一个水平反射界面情况下,定量推导了 ODCIGs 中 RMO 与速度关系、ADCIGs 中视入射角与速度误差的关系及 RMO 对速度误差的敏感性.

1 ODCIGs 和 ADCIGs 成像条件

基于单程波动方程的偏移方法主要有两类,分别为双平方根方程偏移和单平方根方程偏移.通过这两种偏移方法都可以得到 ODCIGs 和 ADCIGs.在双平方根方程偏移中,对于成像点 (x, z) 其 ODCIGs 成像条件可表示为:

$$I(x, z, h) = \sum_{\omega} P(x, z, h, \omega), \quad (1)$$

其中, $P(x, z, h, \omega)$ 为地震波场, ω 表示圆频率,对频率求和相当于取 $t=0$ 的成像条件, h 为局部半偏移距.在单平方根方程偏移中,同样的成像条件为:

$$I(x, z, h) =$$

$$\sum_s \sum_{\omega} q^-(x-h, z, \omega, s) q^+(x+h, z, \omega, s)^*, \quad (2)$$

其中, $q^-(x-h, z, \omega, s)$ 和 $q^+(x+h, z, \omega, s)$ 分别表示下行和上行波场, s 表示炮点坐标,*表示求共轭运算.需要指出,这两种方法得到的 ODCIGs 是等价的(Biondi and Symes, 2004),它们均为非零偏移距成像.

波动方程波场延拓过程是利用波场方程的微分方程作为数学工具,将地表记录的地震波场反向延拓到地下反射点的过程.当偏移速度正确时,下行波的到达时等于上行波的出发时,波场恰好反传播到反射点,偏移距也退化为零,从而可以通过零时间零偏移距成像条件得到反射成像.如果利用公式(1)或者(2)的成像条件,只提取零时间成像,得到的 ODCIGs 的能量将主要集中在零偏移距附近(理想情况下将聚焦于零偏移距处).通过倾斜叠加运算,ODCIGs 可以快速转化为 ADCIGs,即

$$I(x, z, h) \Rightarrow I(x, z_w, \gamma), \quad (3)$$

其中, γ 表示地震传播入射角, z_w 为 ADCIGs 的深度,它是与入射角有关的一个量.通过公式(3)的运算,ODCIGs $I(x, z, h)$ 的波场能量展布到一定入射角范围内.波动方程 ADCIGs $I(x, z_w, \gamma)$ 被证明是没有假象的共成像点道集(Stolk and Symes, 2004),这种性质决定了 ADCIGs 在复杂构造速度分析领域的应用具有巨大潜力.

2 ODCIGs 与偏移速度的关系

当偏移速度与地下真实速度匹配时,波场在成像点处($t=0$)恰好达到最佳聚焦,即在公式(1)或者(2)中, $h \neq 0$ 的位置波场能量为零,即波场能量聚焦为一点.当偏移速度与地下速度不匹配时,按照 $t=0$ 成像条件,波场在成像点不能达到最佳聚焦,用公式(1)或者(2)将得到一个欠聚焦或者过聚焦的成像值.在这种情况下,ODCIGs 表现形式如何呢?下面我们以单层匀速模型为例讨论 ODCIGs 与速度误差的关系.

设在深度 z 有一水平层状反射面,地下介质速度为 v (图 1a),则在共中心点道集中时距曲线的旅行时函数 t 满足:

$$t^2 = \frac{4z^2}{v^2} + \frac{4h_0^2}{v^2}, \quad (4)$$

这里的 h_0 与公式(1)、(2)中的 h 是不同的, h_0 指地

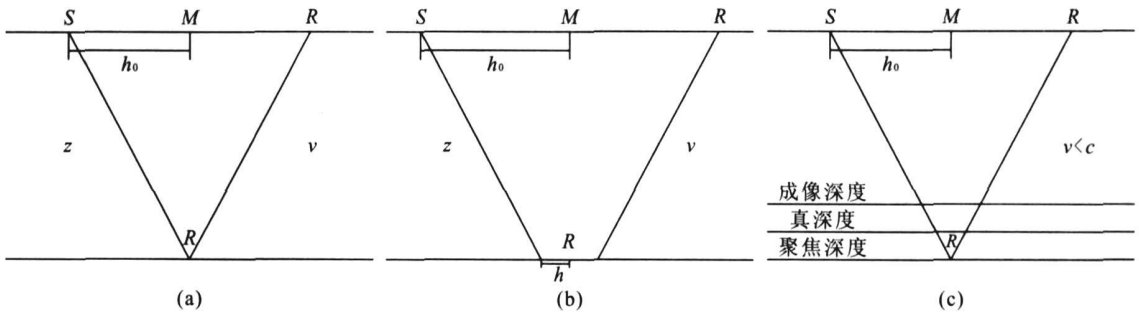


图 1 水平反射(a)、非零偏移距成像(b)及偏移速度偏小时成像(c)示意图

Fig. 1 Sketch of horizontal reflection (a), non-zero offset imaging (b) and imaging with lower migration velocity (c)

表观测系统的半偏移距. 公式(1)或者(2)的非零偏移距成像条件在几何上可表示为图 1b 所示的形式, 即非零偏移距处提取成像值. 根据图 1b 的几何关系, 其双程旅行时满足:

$$t^2 = \frac{4z_m^2(h, z, \rho)}{v_m^2} + \frac{4(h_0 - h)^2}{v_m^2}, \quad (5)$$

其中, v_m 为偏移速度, $\rho = v_m/v$, $z_m(h, z, \rho)$ 为 ODCIGs 成像深度. 公式(5)代入公式(4), 消去旅行时 t , 得:

$$z_m(h, z, \rho) = \sqrt{\rho^2(z^2 + h_0^2) - (h_0 - h)^2}, \quad (6)$$

根据偏移成像的基本原理, 当成像深度不随地表偏移距 h_0 变化时, 提取成像值 (Bartana *et al.*, 2006). 令公式(6)对 h_0 的导数为零, 可以得到:

$$h = (1 - \rho^2)h_0. \quad (7)$$

公式(7)为 ODCIGs 中局部半偏移距 h 与地表偏移距 h_0 的关系.

根据公式(7), 局部半偏移距总是小于地表偏移距. 当 $\rho=1$, 即偏移速度等于介质速度时, ODCIGs 中局部半偏移距 $h=0$, 即 ODCIGs 聚焦为一个点. 当 $\rho<1$, 即偏移速度小于介质速度时, ODCIGs 中局部半偏移距 h 和地表半偏移 h_0 符号相同. 反之, 当 $\rho>1$ 时, ODCIGs 中局部半偏移距 h 和地表半偏移 h_0 符号相反, 也就是说当 $v_m>v$ 时, ODCIGs 的同相轴被投影到与原始数据相反的方向, 并且比原始数据缩短许多.

将公式(7)代入公式(6)中, 当 $\rho=1$ 时, $z_m(h, z, \rho)=z$, 即 ODCIGs 的深度等于反射界面深度. 当 $\rho\neq 1$ 时, 消掉地表半偏移距 h_0 , 得:

$$z_m(h, z, \rho) = \rho \sqrt{z^2 + \frac{1}{1-\rho^2}h^2}. \quad (8)$$

公式(8)表明, 当 $\rho\neq 1$ 时, 对于地下深度 z 的反射界面, 对应 ODCIGs 的同相轴深度是偏移速度和局部半偏移距 h 的函数. 当 $\rho<1$ 时, 波场欠聚焦,

ODCIGs 的同相轴深度随半偏移距 h 增大而增大; 反之, 波场过聚焦, ODCIGs 的深度随局部半偏移距 h 增大而减小. 根据公式(8), 当 $\rho<1$ 时, ODCIGs 中轨迹与局部半偏移距 h 成双曲关系; 当 $\rho>1$ 时, $z_m(h, z, \rho)$ 与 h 成椭圆关系.

对于复杂模型, 没有图 1a 的简单几何关系, 我们也无法得到公式(4)的时距关系, 也就得不到后面 ODCIGs 的轨迹曲线. 但是, 通过波场延拓, 当偏移速度不正确时, 在成像点附近, 同样也会表现为欠聚焦或者过聚焦, 也会定性地得到半偏移距与地表半偏移距的关系和 ODCIGs 的类似关系, 只是没有简单的解析表达形式.

3 ADCIGs 与偏移速度的关系

在复杂构造情况下, 波动方程偏移较 Kirchhoff 积分偏移更准确, 并且可以适应多路径情况 (Stolk *et al.*, 2005). 但是, 通过波动方程偏移提取的 ODCIGs 的同相轴在速度正确时聚焦为一点, 在速度存在误差时, ODCIGs 的同相轴也只是分布在较小的局部半偏移距 h 范围内 (满足公式(7)的范围内), 展布范围也比较窄, 不容易从中判断偏移速度误差. 通过倾斜叠加方法, ODCIGs 容易转化为 ADCIGs (Sava and Fomel, 2003). 在 ADCIGs 上, 偏移速度正确时同相轴的深度不随入射角变化而变化, 道集是水平的, 速度偏大或偏小时同相轴分别随入射角增大而下弯或上翘, 通过 ADCIGs 同相轴的曲率可以比较容易地判断速度误差.

如图 1a 所示模型和观测系统. 设在此观测系统中能够观测的地震入射角为 γ , 则有:

$$\tan \gamma = h_0/z. \quad (9)$$

当偏移速度正确, 入射射线与反射射线的路径都是

正确的, ADCIGs 中的入射角就是实际地震入射角, 其满足公式(9). 当偏移速度存在误差时, 情况是怎样呢? 图 1c 为 $\rho < 1$ 时成像深度、真深度和聚焦深度关系示意图. 根据深度聚焦分析的结果 (MacKay and Abma, 1992), 在偏移距不大时, 有:

$$z_f = \frac{z}{\rho}, \quad (10)$$

$$z_m = \rho z, \quad (11)$$

其中, z_f 为聚焦深度, z_m 为成像深度. 根据图 1c 几何关系, 显然有:

$$\tan \gamma_e = \frac{h_0}{z_f} = \frac{h_0}{z/\rho} = \rho \tan \gamma, \quad (12)$$

也就是说, 偏移速度不正确时, 波动方程偏移得到的入射角也不是真正的入射角, 它是与速度误差有关的一个入射角 γ_e , 我们称之为视入射角. 从公式(12)不难发现, 当偏移速度大于实际速度时, 得到的视入射角大于实际入射角, 反之则小于实际入射角. 需要说明的是, 公式(12)只有在小角度才是成立的, 对于大入射角, 其偏移距也是较大的, 公式(10)和(11)不再成立, 从而公式(12)在大角度也存在误差.

根据倾斜叠加原理, 波动方程 ODCIGs $I(x, z, h)$ 通过倾斜叠加可以转化为 ADCIGs $I(x, z_w, \gamma)$. 倾斜叠加转化满足如下关系 (Bartana *et al.*, 2006):

$$z(h) = z_w(\gamma) + h \tan \gamma. \quad (13)$$

当速度存在误差时, 偏移得到的入射角为视入射角 γ_e , 公式(13)中用 γ_e 代替 γ , 根据公式(13)和公式(8), 令

$$z(h) = z_m(h, z, \rho), \quad (14)$$

并且令它们对局部半偏移距 h 的一阶导数相等, 即

$$z'(h) = z'_m(h, z, \rho), \quad (15)$$

消去 h , 可以得到:

$$z_w(\gamma) = \rho z \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) \tan^2 \gamma_e}, \quad (16)$$

这就是在匀速介质中水平反射情况下, ADCIGs 的同相轴深度与视入射角的函数关系. 根据公式(16), 当 $\rho < 1$ 时, ADCIGs 同相轴的深度 $z_m(\gamma)$ 随着入射角的增大而减小, 与视入射角的正切值 $\tan \gamma_e$ 成椭圆关系; 当 $\rho > 1$ 时, $z_w(\gamma)$ 随着入射角的增大而增大, 与视入射角的正切值 $\tan \gamma_e$ 成双曲关系. 这与 ODCIGs 道集表现形式公式(8)是不同的.

根据公式(16), 在 ADCIGs 上 RMO 关系为:

$$\Delta t_{RMO} = z_w(\gamma) - z_w(0) =$$

$$\rho z \left[\sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) \tan^2 \gamma_e} - 1 \right], \quad (17)$$

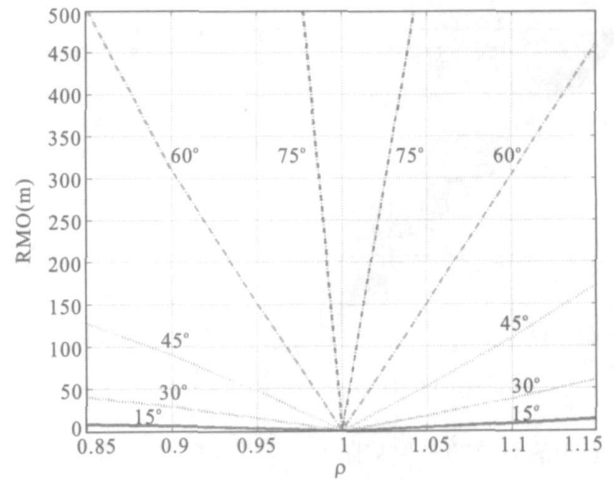


图 2 RMO 与偏移速度误差关系

Fig. 2 Relationship between RMO and migration velocity error

公式(12)代入公式(17), 得:

$$\Delta t_{RMO} = \rho z \left[\sqrt{1 + (\rho^2 - 1) \tan^2 \gamma} - 1 \right], \quad (18)$$

公式(18)为 ADCIGs 同相轴的 RMO 与真实入射角的关系, 它反映了当偏移速度不正确时, ADCIGs 上反射界面随着真入射角的关系, 即对于同一观测系统, 随偏移速度偏大或者偏小能够实际得到的剩余时差大小. 当偏移速度偏小时, 公式(17)、(18)对于较大的入射角是不稳定的, 将得到虚数的剩余时差值.

图 2 为根据公式(18)得到的 RMO 与偏移速度误差关系曲线, 为了便于比较, 我们取 RMO 的绝对值, 其中, 我们令反射界面深度 $z = 1000$ m, 速度误差 ρ 从 0.85 到 1.15. 图中, 我们分别画出了入射角 $\gamma = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 五条曲线. 从图中可以看出, 在入射角度不大 (小于 60°) 时, 偏大的偏移速度引起的 RMO 较大. 我们知道, 在实际的地震勘探中, 地震排列的长度是有限的, 有效的入射角度范围一般都在 60° 范围内, 也就是说, 在偏移速度分析中, 地震数据的 RMO 对偏大的偏移速度更加敏感. 比较不同入射角度得到 RMO, 无论是速度偏大还是速度偏小, 大角度对应的 RMO 都远远大于小角度情况.

4 模型测试

图 3a 为一匀速模型用正确偏移速度得到的成像剖面, 该模型在深度 500 m 处有一水平反射界面. 观测系统为左边放炮, 右边接收, 最大偏移距为 1000 m, 最小偏移距为 0 m. 根据公式(9), 我们可以

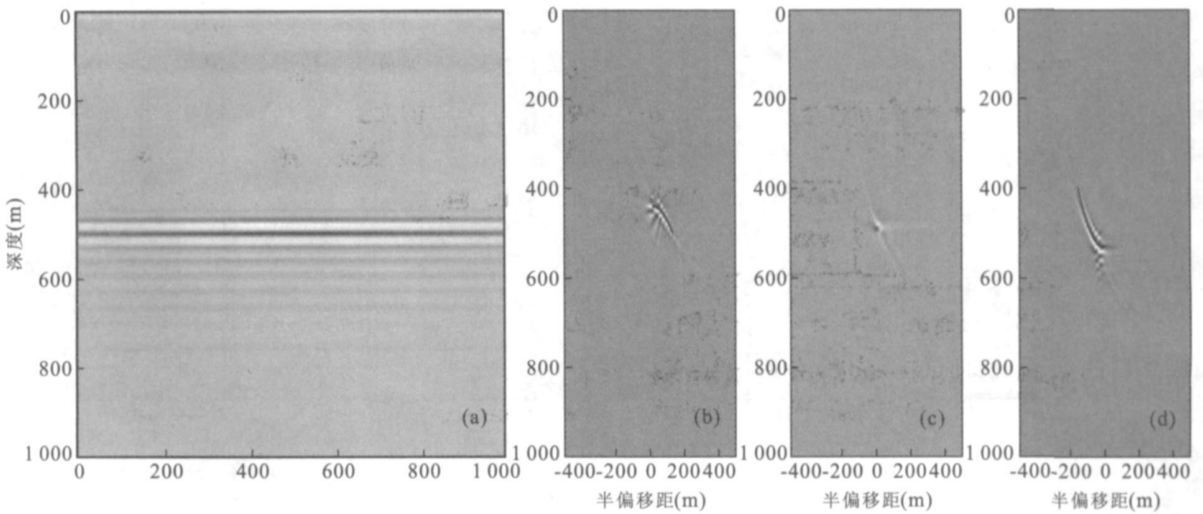


图 3 匀速模型成像剖面 and 不同偏移速度得到的 ODCIGs

Fig. 3 Velocity model and imaging section and ODCIGs gained with different migration velocities

a. 成像剖面; b. 90%模型速度; c. 100% 模型速度; d. 110%模型速度

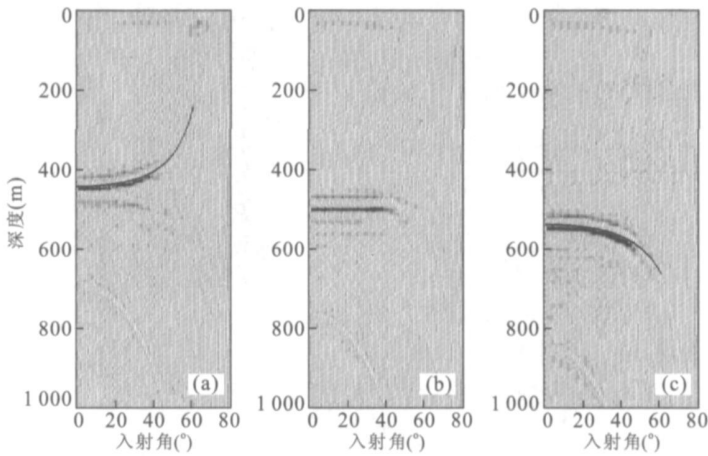


图 4 不同偏移速度得到的 ADCIGs

Fig. 4 ADCIGs gained with different migration velocities

a. 90% 模型速度; b. 100%模型速度; c. 110% 模型速度

接收到的入射角范围为 0° 到 45° . 为了验证本文结论, 我们分别用 900 m/s 、 1000 m/s 和 1100 m/s 的速度进行偏移, 在水平位置坐标为 500 m 处提取 ODCIGs 和 ADCIGs. 图 3b—3d 为用不同偏移速度得到的 ODCIGs, 图中黑线为根据公式 (8) 得到的理论曲线. 当偏移速度小于真实模型速度时, ODCIGs 的同相轴分布在正偏移距一侧, 向下弯曲, 它与理论曲线能够很好的吻合. 反之, 同相轴分布在负的偏移距一侧, 向上弯曲, 也能够很好的与理论曲线吻合. 当偏移速度等于真实介质速度时, ODCIGs 聚焦为零偏移距处的一个点. 图 3b 和 3d 中, ODCIGs 的轨迹都可以较好的与理论曲线相吻合, 证明本文推导

是正确的.

图 4 为用不同速度得到的 ADCIGs, 与图 3 中一样, 图中黑线为根据公式 (16) 得到的理论曲线. 当偏移速度小于真实速度时, ADCIGs 同相轴向上弯曲, 反之, 则向下弯曲. 当偏移速度等于介质速度时, 得到的 ADCIGs 的同相轴是水平的 (图 4b), 它在入射角度的分布范围也是 $0^\circ \sim 45^\circ$. 从图 4a 和 4c 可以看出, 偏移得到的 ADCIGs 与根据公式 (16) 得到的理论曲线能够很好的吻合. 对比图 4 中不同速度得到的 ADCIGs 的角度分布范围, 当偏移速度偏小时, 同相轴展布的角度范围要小于用正确速度得到的 ADCIGs 的分布范围; 当偏移速度偏大时, 其角

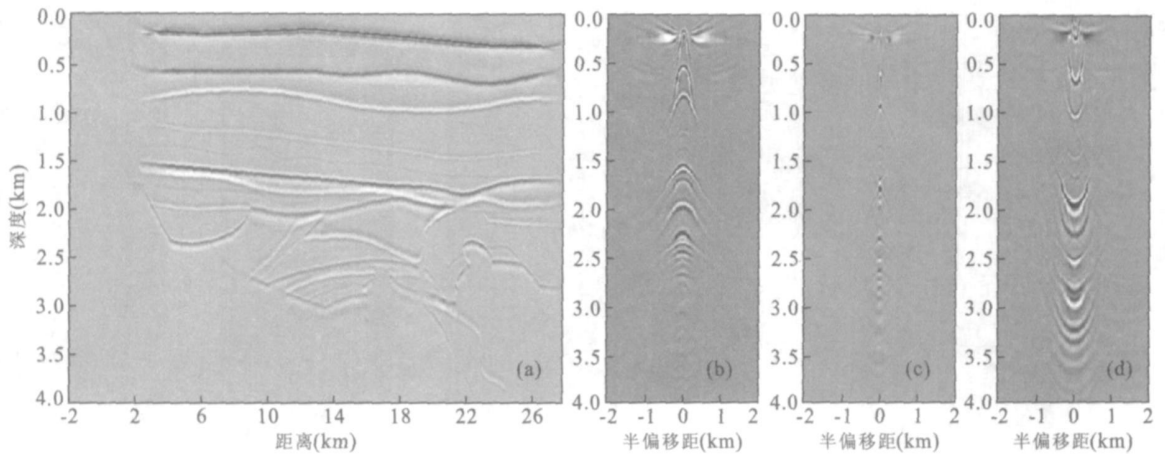


图 5 大庆模型成像剖面

Fig. 5 Daqing model imaging section and ODCIGs gained with different migration velocities of Daqing model

a. 成像剖面; b. 90%模型速度; c. 100%模型速度; d. 110%模型速度

度范围要大于用正确速度得到的 ADCIGs 的角度分布范围. 图 4c 与图 4a 比较, 速度偏大时也能够得到较大的剩余深度差.

当速度模型比较复杂时, 我们得不到 ODCIGs 同相轴的 RMO 与局部半偏移距的关系, 也得不到 ADCIGs 的角度范围和 RMO 与速度误差的关系. 但是, 我们确信它们也有与匀速情况下类似的关系.

下面我们给出较复杂模型的测试结果. 我们选择大庆理论模型为例进行方法测试, 该速度模型横向间距 24 m, 纵向间距 8 m, 最大速度 6 200 m/s, 最小速度为 2 500 m/s, 深层具有很强的横向变速. 观测方式采用双边接收, 炮间距 48 m, 最大偏移距为 2 880 m, 道间距 24 m. 图 5a 为用正确速度得到的成像剖面. 与在简单模型上测试一样, 我们分别用 90%、100%、和 110% 的模型速度进行偏移并在横向 16 km 位置处提取 ODCIGs 和 ADCIGs. 图 5b—5d 为对应不同偏移速度的 ODCIGs, 当偏移速度偏小时, ODCIGs 是向下弯曲的, 反之, 是向上弯曲的, 当速度正确时, 它会聚焦于反射界面处的一点. 图 6 为用不同偏移速度得到的 ADCIGs, 与 ODCIGs 相反, 在速度偏小时, ADCIGs 是向上弯曲的, 反之, 是向下弯曲的, 当偏移速度等于模型速度时, 得到的是拉平的道集. 对比图 6 不同速度得到的 ADCIGs, 当偏移速度偏小时, 对应各层的 ADCIGs 上同相轴角度分布范围都要小于速度正确时得到的道集; 当偏移速度偏大时, ADCIGs 角度分布范围要大于正确速度得到的道集分布范围. 当速度偏大时, 得到剩余深度差也比速度偏小时大得多, 在这种情况下, 我

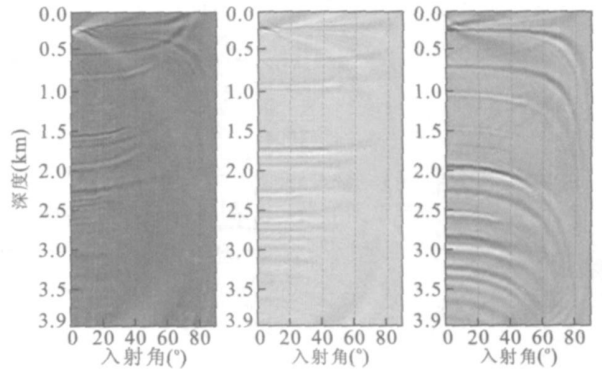


图 6 大庆模型中不同偏移速度得到的 ADCIGs

Fig. 6 ADCIGs gained with different migration velocities of Daqing model

a. 90%模型速度; b. 100%模型速度; c. 110%模型速度

们可以更清楚的判断偏移速度的误差.

通过上面简单模型测试, 证明本文的推导是正确的. 在大庆模型上测试的结果表明, 本文结果的定性推论在复杂情况下是正确的, 偏大的偏移速度能够得到较大的视入射角和较大的 RMO. 大入射角和大 RMO 对于 MVA 来说是至关重要的, 它们可以保证速度分析人员对速度误差的判断是正确的, 从而保证向正确的方向更新偏移速度模型.

5 讨论

Liu (1995) 推导了 Kirchhoff 型的 ODCIGs 的定量表达式:

$$z_m(h_0, z, \rho) = \sqrt{z^2(0) + (\rho^2 - 1)h_0^2}. \quad (19)$$

在 Kirchhoff 偏移中, 零偏移距成像深度 $z(0)$ 仍旧满足公式(11), 即

$$z_m(h_0, z, \rho) = \rho^2 z^2 \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) \frac{h_0^2}{z^2}}. \quad (20)$$

根据公式(20), 当 $\rho < 1$ 时, $z_m(h_0, z, \rho)$ 与地表偏移距 h_0 成椭圆关系, 反之成双曲关系. 并且, 速度偏大时, Kirchhoff 型 ODCIGs 随地表半偏移距按双曲关系下弯, 而波动方程型 ODCIGs 随半偏移距按椭圆关系上翘. 反之, 它们分别按椭圆关系上翘和按双曲关系下弯. 波动方程 ADCIGs 轨迹公式(16)与公式(20)有类似的形式. 也就是说, 波动方程 ODCIGs 和 Kirchhoff 积分得到的 ODCIGs 形式是完全不同的, 对于偏移速度误差的反映也是不可比的. 波动方程 ADCIGs 对偏移速度误差的反映与 Kirchhoff 积分偏移得到的 ODCIGs 对偏移速度误差具有类似的反映.

根据对波动方程 ODCIGs 分析的结果, 在匀速水平情况下, 当偏移速度小于介质速度时, ODCIGs 是按照双曲规律向下弯曲的, 局部半偏移距符号与地表半偏移的符号一致; 当偏移速度大于地下实际速度时, ODCIGs 按照椭圆关系向上弯曲, 并且局部半偏移距符号与地表半偏移距的符合恰好相反. 这告诉我们, 在波动方程偏移速度分析中, 无论数据的观测方式是单边还是双边的, 在提取 ODCIGs 过程中都要提取关于地下半偏移距双边的 CIGs 道集, 否则将会丧失部分地震数据信息.

当偏移速度不正确时, 得到的 ADCIGs 的同相轴是不能够拉平的. 同样, ADCIGs 中的入射角也不是真正的地震入射角, 而是视入射角. 根据深度聚焦分析的结果, 我们知道当偏移速度偏大时, 成像深度偏大, 聚焦深度偏移小. 与深度聚焦分析结合, 可以得到当偏移速度大于介质速度时, ADCIGs 中能反映的入射角也偏大, 反之, 则得到偏小的入射角. 这就是入射角随偏移速度的变化关系. 这种关系建议我们在波动方程偏移速度分析中, 如果初始速度略大, 能够得到较大角度信息, 对速度误差的判断会有所帮助.

在匀速介质中, 当偏移速度偏大时, ADCIGs 同相轴随着入射角的变化轨迹按照双曲关系向下弯曲, 反之, 则按照椭圆关系向上弯曲. 在地震数据有效入射角度范围内, 对于同样比例因子的偏移速度误差, 速度偏大时能够得到更大的 RMO, 即 ADCIGs 中的 RMO 与其入射角变化关系一样, 当偏移

速度偏大时, 得到的 RMO 也要比同比例偏小的速度得到的 RMO 要大. 无论偏移速度偏大还是偏小, 在大入射角处 RMO 也更大.

在 ADCIGs 上, 当偏移速度偏大时, 能够得到更大的入射角, 也能够得到更大的 RMO, 这对于偏移速度分析来说是至关重要的. 较大的 RMO 能够帮助我们更加准确的判断速度误差, 从而保证偏移速度分析向正确的方向修改速度模型.

我们上述分析都是在最为简单的匀速模型上分析得到的, 对于复杂的模型, 我们得不到文中的解析关系. 在复杂模型中, 波场传播是通过波场延拓来实现的. 波场延拓是适应复杂速度模型的, 在成像点附近我们认为仍旧满足局部匀速的假设, 所以这些推论也是适用于复杂介质的.

6 结论

波动方程偏移 ODCIGs 和 Kirchhoff 积分偏移 ODCIGs 是不同的, 它们对于偏移速度误差的反映也是不同的. 波动方程 ODCIGs 反映的是成像空间的信息, 在偏移速度偏大时, 其向上弯曲, 反之, 向下弯曲. 当偏移速度不正确时, 波动方程偏移 ADCIGs 中的入射角不是真正入射角, 而是视入射角. 视入射角在速度偏大时也要大于实际地震传播入射角, 反之, 则小于地震入射角.

在地震数据有效入射角度范围内, ADCIGs 的 RMO 对于偏大的速度误差更加敏感. 用略大的偏移速度进行偏移速度分析对速度分析更加有利.

References

- Bartana, A., Kosloff, D., Ravve, I., 2006. Discussion and reply on "angle-domain common-image gathers by wavefield continuation methods". *Geophysics* 71(1): X1-X4.
- Biondi, B., Symes, W. W., 2004. Angle-domain common-image gathers for migration velocity analysis by wavefield continuation imaging. *Geophysics* 69(5): 1283-1298.
- Biondi, B., Tisserant, T., 2004. 3D angle-domain common-image gathers for migration velocity analysis. *Geophysical Prospecting*, 52: 575-591.
- Liu, Z., 1995. Migration velocity analysis (Dissertation). Colorado School of Mines.
- MacKay, S., Abma, R., 1992. Imaging and velocity estimation with depth-focusing analysis. *Geophysics* 57(12):

1608—1922.

Prucha, M., Biondi, B., Symes, W., 1999. Angle-domain common image gathers by wave-equation migration. 69th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 824—827.

Rickett, J. E., Sava, P. C., 2002. Offset and angle-domain common image-point gathers for shot-profile migration. *Geophysics* 67(3): 883—889.

Sava, P. C., Fomel, S., 2003. Angle-domain common-image gathers by wavefield continuation methods. *Geophysics*, 68(3): 1065—1074.

Soubaras R., 2003. Angle gathers for shot-record migration by local harmonic decomposition. 73rd Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts 889—892.

Stolk, C. C., Symes W. W., 2004. Kinematic artifacts in prestack depth migration. *Geophysics* 69(2): 562—575.

Stolk, C. C., De Hoop M. V., Symes, W. W., 2005. Kinematics of prestack shot-geophone migration. 75th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1866—1869.

Xie, X., Wu R., 2002. Extracting angle domain information from migrated wavefield. 73rd Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts 1360—1363.

Xu S., Chauris, H., Lambare G., et al., 2001. Common-angle migration: A strategy for imaging complex media. *Geophysics* 66(6): 1877—1894.

《地球科学——中国地质大学学报》 2007 年 第 32 卷 第 5 期 要目预告

青藏高原古近纪—新近纪沉积盆地类型与分布	张克信等
东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学纪录	王国灿等
临夏盆地渐新世沉积物中坡缕石的发现及其环境气候意义	洪汉烈等
嘉黎断裂带两侧晚新生代差异隆升的磷灰石裂变径迹纪录	向树元等
西藏米林地区湖积物的环境磁学特征及其古气候意义	朱宗敏等
藏北唐古拉山地区沱沱河组孢粉组合及其地层意义	段其发等
西藏吉隆盆地沃马组下部中新世洪积扇沉积序列的厘定及其孢粉组合	徐亚东等
东昆仑山昆仑河纵剖面形貌分析及构造涵义	曹 凯等
甘肃临洮晚更新世黄土的环境变迁	曾方明等
西昆仑新藏公路北段古—中生代多期次构造—热事件年龄确定	计文化等
青藏高原北羌塘地区古近系火山岩中埃达克岩的岩石化学特征及其构造意义	赵振明等