

文章编号: 0253-3782(2003)04-0406-09

# 共反射面道集偏移速度建模<sup>\*</sup>

李振春<sup>1)</sup> 姚云霞<sup>1)</sup> 马在田<sup>2)</sup> 王华忠<sup>2)</sup>

1) 中国山东东营 257061 石油大学地球资源与信息学院

2) 中国上海 200092 同济大学海洋地质与地球物理学院

**摘要** 共反射面(CRS)叠加是一种与宏观速度模型无关,仅依赖于近地表速度的地震成像方法.其通过地震三参数的优化实现地震成像.本文推导了基于 CRS 叠加得出的优化三参数与偏移速度之间的解析关系,提出了在 CRS 道集通过优化三参数实现速度估计的 CRS 道集偏移速度建模方法.模型试算表明,这种速度建模方法效率较高,速度分析精度取决于优化三参数的精度,适于较复杂地质体的速度建模.

**关键词** CRS 叠加 CRS 道集 偏移速度建模 优化三参数 层剥离

**中图分类号**: P315.3<sup>+</sup>1 **文献标识码**: A

## 引言

共反射面(CRS)叠加(Hubral *et al.*, 1999; Jäger *et al.*, 2001; Müller *et al.*, 1998; Thore *et al.*, 1994)是一种仅依赖于近地表速度而与宏观速度模型无关的地震成像方法.它是通过法向地震波在地面的出射角  $\alpha$ 、法向入射点波前曲率半径  $R_{\text{nip}}$  和法向波前曲率半径  $R_n$  等地震三参数的优化实现地震成像的.其理论基础是几何地震学,考虑了反射层的局部特征和第一菲涅耳带内的全部反射,反射波的同相性好,有效利用了多次覆盖反射数据.偏移到零炮检距(MZO)技术是基于零炮检距(ZO)等时线叠加原理,只在反射点处准确,一离开反射点则误差明显增大,同相性显著变差.克希霍夫叠前深度偏移(Kirchhoff-PreSDM)技术是基于绕射曲线叠加原理:在零炮检距处最准确,在近炮检距处较准确,在远炮检距处误差变大.以上分析表明(Hubral *et al.*, 1999),CRS 叠加方法在提高信噪比(S/N)和成像精度等方面优于其它叠加技术,如 MZO、正常时差校正(NMO)/倾角时差校正(DMO)/叠加和 Kirchhoff-PreSDM 技术等,从而为地震叠加和成像技术提供了一种新方法.基于 CRS 叠加得出的优化三参数,我们推导了其与偏移速度之间的解析关系,提出了在 CRS 道集通过优化三参数实现速度估计的 CRS 道集偏移速度建模方法.该方法的优势在于它是利用全局寻优得到的高精度地震三参数剖面通过射线追踪直接求取偏移速度场,无需迭代反演,解是唯一的.这一点明显不同于依据其它道集(如共中心点(CMP)道集、共反射点(CRP)道集、共成像点(CIP)道集和共聚焦点(CFP)道集等)的偏移速度建模方法(李振春等, 2000),它们是通过基于模型的迭代反演间接估算偏移速度场,建模精度取决于初始模型、约束条件、迭代反演方法和算法、速度判别准则和迭代次数等,解是非

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(49894190-024)与大庆油田有限公司共同资助.  
2002-07-08 收到初稿, 2002-10-29 收到修改稿, 2002-12-09 决定采用.

唯一的. 通过模型试算表明, CRS 道集偏移速度建模方法效率较高, 速度分析精度取决于优化三参数的精度, 适于较复杂地质体的速度建模.

## 1 方法原理

### 1.1 CRS 叠加

利用射线理论和二阶泰勒展式, 可得到以三参数表示的 CRS 的双曲近似和抛物近似时距方程 (Hubral *et al.*, 1999; Jäger *et al.*, 2001; Müller *et al.*, 1998; Thore *et al.*, 1994). 由于地震反射资料的时距关系更符合双曲规律, 故我们使用 CRS 的双曲近似时距方程. 在以中心点  $x_m$  和半炮移距  $h$  建立的坐标系中, CRS 的双曲走时近似公式为

$$t^2(x_m, h) = \left[ t_0 + \frac{2\sin\alpha}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0\cos^2\alpha}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_n} + \frac{h^2}{R_{\text{nip}}} \right] \quad (1)$$

其中,  $v_0$  是近地表速度, 可通过野外近地表速度调查 (如小折射或微地震测井) 或地质等资料得到. 若近地表速度不准, 由于 CRS 叠加是基于射线追踪通过地震三参数优化来实现的, 每点都对应一最优地震三参数. 这样近地表速度的误差就会平衡到各反射层速度上, 由此得到的偏移速度场对深度偏移的成像效果影响不大. 通过对不同的近地表速度误差的测试表明: 近地表速度误差在  $\pm 10\%$  范围内时, 所得到的 CRS 叠后深度偏移结果都具有较高的成像精度.  $t_0$  和  $x_0$  分别是零炮检距 (ZO) 射线的反射走时和地面出射位置.  $\alpha$  是 ZO 射线在地面的出射角;  $R_{\text{nip}}$  是与 ZO 射线有关的法向入射点波前曲率半径, 法向入射点波前对应于反射界面上点源产生的波前;  $R_n$  为与 ZO 射线有关的法向波前曲率半径, 法向波前对应于爆炸反射面产生的波前. 以上分析表明, 地震三参数均依赖于 ZO 射线. 这样, 无论是单炮地震记录还是多炮地震记录, 每一地下成像点对应的地震三参数 ( $\alpha$ ,  $R_{\text{nip}}$ ,  $R_n$ ) 是唯一的. 由于最佳偏移速度场与最佳地震三参数是一一对应关系, 因此偏移速度场也是唯一的.

对 ZO 剖面上的每一点  $P_0(x_0, t_0)$ , 通过确定的最佳三参数 ( $\alpha$ ,  $R_{\text{nip}}$ ,  $R_n$ ), 公式 (1) 给出的走时面能最好地拟合反射同相轴. 这是一典型的全局优化问题, 为更好地使用最优优化算法, 必须确定一初始三参数 ( $\alpha$ ,  $R_{\text{nip}}$ ,  $R_n$ ) 作为最优优化算法的起点.

易于证实, 在关于  $x_0$  的 CMP 道集和 ZO 剖面中, 方程 (1) 可以简化. 在 CMP 道集中 ( $x_m = x_0$ ) 方程 (1) 可简化为

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{2t_0\cos^2\alpha}{v_0} \frac{h^2}{R_{\text{nip}}} \quad (2)$$

在 ZO 剖面中 ( $h=0$ ) 可以得到

$$t^2(x_m) = \left[ t_0 + \frac{2\sin\alpha}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0\cos^2\alpha}{v_0} \frac{(x_m - x_0)^2}{R_n} \quad (3)$$

这样, 就可把 CRS 叠加分成几步来做: 第一步和第二步分别在 CMP 道集和 ZO 剖面上应用公式 (2)、(3), 得到 ZO 剖面、相干剖面和三参数剖面. 由此可迅速找出一个合理的三参数剖面作为第三步 (利用公式 (1)) 最优优化算法的起始剖面. 最后, 通过局部寻优法可得出最佳 ZO 剖面、最佳相干剖面和最佳三参数剖面. 另外, 为充分利用 CRS 上的原始地震数据, 在第二步可采用约束 CRS 叠加.

1.2 CRS 道集偏移速度建模

在 CRS 道集偏移速度建模中，我们使用了层剥离法。偏移速度求取过程中所需的 ZO 反射走时  $t_0$ 、法向射线出射角  $\alpha$ 、法向入射点波前曲率半径  $R_{\text{nip}}$  和法向波前曲率半径  $R_n$  分别由 CRS 叠加后得到的最佳模拟 ZO 剖面(或相干剖面)、最佳  $\alpha$  剖面、最佳  $R_{\text{nip}}$  剖面和最佳  $R_n$  剖面提供。斯奈尔定律、各参数的含义以及反射层和波前曲率半径的符号规定如图 1 所示。基于三参数剖面求取偏移速度场的层剥离法的基本原理如下。

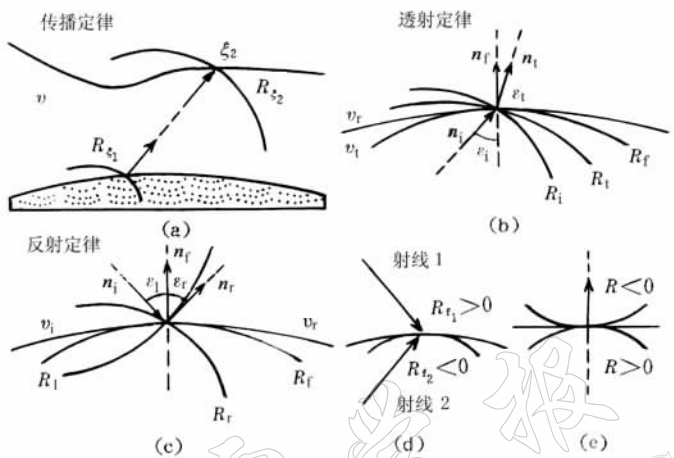


图 1 斯奈尔定律、各参数的含义以及反射层和波前面曲率半径的符号规定示意图

(a) 传播定律；(b) 透射定律；(c) 反射定律；(d) 反射层曲率半径的符号规定；(e) 波前曲率半径的符号规定。其中， $n_i, n_r, n_t$  和  $n_l$  分别表示入射波、反射波、透射波和反射层法线； $\epsilon_i, \epsilon_r$  和  $\epsilon_t$  分别表示入射角、反射角和透射角； $\alpha, R_{\text{nip}}, R_n, R_i, R_r, R_t$  和  $R_l$  分别表示 ZO 射线在地面的出射角、法向入射点波前、法向波前、入射波前、反射波前、透射波前和反射层的曲率半径； $v$  表示层速度； $v_i, v_r$  和  $v_t$  分别表示入射波、反射波和透射波的速度

1.2.1 第一层速度的求取

基于射线理论，第一层第  $j$  个分析点处的  $R_{\text{nip}_{0,j}}$  由下式给出：

$$R_{\text{nip}_{0,j}} = \frac{v_{0,j} t_{0,j}^0}{2} \tag{4}$$

可知

$$v_{0,j} = \frac{2R_{\text{nip}_{0,j}}}{t_{0,j}^0} \tag{5}$$

其中， $v_{0,j}$  是第一层在第  $j$  个分析点处的层速度， $t_{0,j}^0$  是第一层在第  $j$  个分析点处的法向射线反射走时。若第一层在第  $j$  个分析点处的法向射线在地面的出射位置为  $(x_{0,j}, z_{0,j})$ ，则可求得该法向射线的始发点坐标  $(x_{1,j}, z_{1,j})$  为

$$x_{1,j} = \frac{v_{0,j} t_{0,j}^0}{2} \sin \alpha_{0,j} + x_{0,j} \quad z_{1,j} = \frac{v_{0,j} t_{0,j}^0}{2} \cos \alpha_{0,j} + z_{0,j} \tag{6}$$

其中， $\alpha_{0,j}$  是第一层在第  $j$  个分析点处的法向射线在地面的出射角。第一反射层的平滑采用线性或/和 3 次样条函数。

1.2.2 第  $n$  层速度的求取

对第  $n$  层及其上各层的平滑采用线性或/和 3 次样条函数平滑。对简单反射层采用线性平滑。线性平滑比较简单，在此我们不再讨论。对复杂反射层采用 3 次样条函数平滑，平滑方程由下式给出：

$$z_{i-1}(x_{i-1}) = a \cdot z_{i-1,j-1} + b \cdot z_{i-1,j} + [(a^3 - a)f_{i-1,j-1} + (b^3 - b)f_{i-1,j}] \frac{h_{j-1}^2}{6} \quad (7)$$

其中,  $h_{j-1} = x_{i-1,j} - x_{i-1,j-1}$ ,  $a = (x_{i-1,j} - x_{i-1})/h_{j-1}$ ,  $b = (x_{i-1} - x_{i-1,j-1})/h_{j-1}$ .  $f_{i-1,j-1}$  和  $f_{i-1,j}$  分别表示第  $i$  个反射层第  $(j-1)$  个分析点和第  $j$  个分析点处的二阶导数, 它们是通过在 3 次样条函数的三弯矩法中, 用追赶法求解三弯矩方程组得到的(李庆扬等, 2000). 整理上式可得

$$z_{i-1} = a_1 x_{i-1}^3 + a_2 x_{i-1}^2 + a_3 x_{i-1} + a_4 \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{6h_{j-1}}(f_{i-1,j} - f_{i-1,j-1}) \\ a_2 &= \frac{1}{2h_{j-1}}(x_{i-1,j}f_{i-1,j-1} - x_{i-1,j-1}f_{i-1,j}) \\ a_3 &= \frac{1}{h_{j-1}}(z_{i-1,j} - z_{i-1,j-1}) + \frac{h_{j-1}}{6}(f_{i-1,j-1} - f_{i-1,j}) + \\ &\quad \frac{1}{2h_{j-1}}(x_{i-1,j-1}^2 f_{i-1,j} - x_{i-1,j}^2 f_{i-1,j-1}) \\ a_4 &= \frac{1}{h_{j-1}}(x_{i-1,j}z_{i-1,j-1} - x_{i-1,j-1}z_{i-1,j}) + \frac{1}{6h_{j-1}}(x_{i-1,j}^3 f_{i-1,j-1} - \\ &\quad x_{i-1,j-1}^3 f_{i-1,j}) + \frac{h_{j-1}}{6}(x_{i-1,j-1}f_{i-1,j} - x_{i-1,j}f_{i-1,j-1}) \end{aligned}$$

由点斜式直线方程可给出如下的射线方程:

$$z_{i-1} = k_{\text{ray},i-1,j}x_{i-1} + (z_{i-2} - k_{\text{ray},i-1,j}x_{i-2}) \quad (9)$$

其中,  $k_{\text{ray},i-1,j}$  是第  $n$  层第  $j$  个分析点处的法向射线在第  $i$  层的射线段的斜率,  $(x_{i-2}, z_{i-2})$  表示该法向射线与第  $(i-1)$  层的交点坐标. 下面给出了  $k_{\text{ray},i-1,j}$ ,  $R_{\text{nip}_{i-1,j}}$  和  $v_{n-1,j}$  的求取方法. 当求取了  $k_{\text{ray},i-1,j}$  后, 由方程(8)和(9)就可解出该法向射线与第  $i$  层的交点坐标  $(x_{i-1}, z_{i-1})$ .

1) 当第  $n$  层的法向射线位于前  $(n-1)$  层时,  $k_{\text{ray},i-1,j}$  由如下关系确定. 由斯涅尔定律知

$$\frac{\sin \epsilon_{i-1,j}}{v_{i-2,j}} = \frac{\sin \epsilon_{i-1,j}}{v_{i-1,j}} \quad (10)$$

则有

$$\sin \epsilon_{i-1,j} = \frac{v_{i-1,j}}{v_{i-2,j}} \sin \epsilon_{i-1,j} \quad (11)$$

其中,  $\epsilon_{i-1,j}$  和  $\epsilon_{i-1,j}$  分别表示第  $n$  层的法向射线在第  $(i-1)$  层和第  $(i-2)$  层的接触面上第  $j$  个分析点处的入射角和透射角. 反射层斜率由下式给出:

$$k_{i-1,j} = z'_{i-1}(x_{i-1}) = \frac{z_{i-1,j} - z_{i-1,j-1}}{h_{j-1}} + \frac{h_{j-1}}{6} \left[ \frac{1 - 3a^2}{h_{j-1}} f_{i-1,j-1} + \frac{3b^2 - 1}{h_{j-1}} f_{i-1,j} \right] \quad (12)$$

这样, 利用方程(11)和(12)以及  $k_{\text{ray},i-2,j}$  就可确定  $k_{\text{ray},i-1,j}$ . 各参数的含义见图 2.

下面确定  $R_{\text{nip}_{i-1,j}}$ . 第  $n$  层的法向射线在其上各层的射线段的反射走时由下式给出:

$$t_{n-1,i-1,j}^0 = \frac{2 \sqrt{(x_{i-1} - x_{i-2})^2 + (z_{i-1} - z_{i-2})^2}}{v_{i-1,j}} \quad (13)$$

由式(13)可给出法向入射点波入射后在第  $i$  层顶面的透射波前面的曲率半径

$$R_{i-1,j} = R_{\text{nip}_{i-2,j}} - \frac{v_{i-2,j} t_{i-1,i-2,j}^0}{2} \quad (14)$$

Hubral 和 Krey(1980)推出了对第  $i$  层如下公式:

$$\frac{1}{R_{i-1,j}} = \frac{v_{i-2,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}}{v_{i-1,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \frac{1}{R_{\text{nip}_{i-1,j}}} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \left( \frac{v_{i-2,j}}{v_{i-1,j}} \cos \epsilon_{i-1,j} - \cos \epsilon_{i-1,j} \right) \frac{1}{R_{f_{i-1,j}}} \quad (15)$$

利用上式可给出

$$\frac{1}{R_{\text{nip}_{i-1,j}}} = \frac{v_{i-1,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}}{v_{i-2,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \frac{1}{R_{f_{i-1,j}}} - \left( \frac{1}{\cos \epsilon_{i-1,j}} - \frac{v_{i-1,j} \cos \epsilon_{i-1,j}}{v_{i-2,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \right) \frac{1}{R_{f_{i-1,j}}} \quad (16)$$

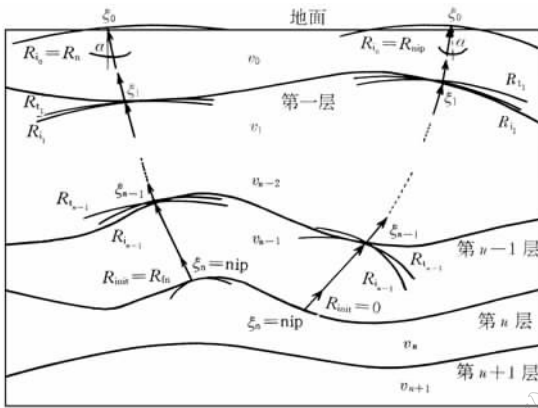


图 2 法向入射点波和法向波形成图. 图中,  $\alpha$ ,  $R_{\text{nip}}$ ,  $R_n$ ,  $R_i$ ,  $R_t$  和  $R_f$  分别表示 ZO 射线在地面的出射角、法向入射点波前、法向波前、入射波前、透射波前和反射层的曲率半径,  $v$  表示层速度

式中, 第  $i$  层的曲率半径  $R_{f_{i-1,j}}$  由数学分析知

$$R_{f_{i-1,j}} = \frac{[1 + z'_{i-1}(x_{i-1})]^{3/2}}{z''_{i-1}(x_{i-1})} \quad (17)$$

其中,  $z'_{i-1}(x_{i-1})$  由式(12)给出,  $z''_{i-1}(x_{i-1})$  由下式给出:

$$z''_{i-1}(x_{i-1}) = a \cdot f_{i-1,j-1} + b \cdot f_{i-1,j} \quad (18)$$

这样, 利用方程(11)、(14)、(16)和(17)就可确定  $R_{\text{nip}_{i-1,j}}$ . 各参数的含义见图 2.

2) 当第  $n$  层的法向射线位于第  $n$  层时,  $v_{n-1,j}$  由如下关系推出. 利用式(13)可给出第  $n$  层的法向射线在第  $n$  层的射线段的反射走时

$$t_{n-1,n-1,j}^0 = t_{n-1,j}^0 - \sum_{i=1}^{n-1} t_{n-1,i-1,j}^0 \quad (19)$$

由此给出法向入射点波入射后在第  $n$  层顶面的入射波前面的曲率半径

$$R_{\text{nip}_{n-1,j}} = \frac{v_{n-1,j} t_{n-1,n-1,j}^0}{2} \quad (20)$$

由公式(15)可知, 对第  $n$  层

$$\frac{1}{R_{t_{n-1,j}}} = \frac{v_{n-2,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}}{v_{n-1,j} \cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \frac{1}{R_{\text{nip}_{n-1,j}}} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon_{i-1,j}} \left( \frac{v_{n-2,j}}{v_{n-1,j}} \cos \epsilon_{i-1,j} - \cos \epsilon_{i-1,j} \right) \frac{1}{R_{f_{n-1,j}}} \quad (21)$$

其中, 法向入射点波入射后在第  $n$  层顶面的透射波前面的曲率半径  $R_{t_{n-1,j}}$  由式(14)给出(令  $i=n$ ), 第  $n$  层的曲率半径  $R_{f_{n-1,j}}$  由式(17)给出(令  $i=n$ ). 这样, 利用方程(11)、(20)和(21), 可推出求取速度  $v_{n-1,j}$  的解析公式

$$v_{n-1,j} = \sqrt{\frac{b_2 \pm \sqrt{6_2^2 - 4b_1b_3}}{2b_1}} \quad (22)$$

其中

$$b_1 = b_0^2 + \frac{v_{n-2,j}^2 t_{n-1,n-1,j}^2 \sin^2 \epsilon_{t_{n-1,j}}}{R_{t_{n-1,j}}^2} \quad b_2 = 4b_0 v_{n-2,j}^2 + \frac{v_{n-2,j}^4 t_{n-1,n-1,j}^2}{R_{f_{n-1,j}}^2}$$
$$b_3 = 4v_{n-2,j}^4 \quad b_0 = \frac{v_{n-2,j} \cos^2 \epsilon_{t_{n-1,j}} t_{n-1,n-1,j}^0}{R_{t_{n-1,j}}} + 2 \sin^2 \epsilon_{t_{n-1,j}} + \frac{v_{n-2,j} \cos \epsilon_{t_{n-1,j}} t_{n-1,n-1,j}^0}{R_{f_{n-1,j}}}$$

各参数的含义见图 2.

2 实现步骤

在一般偏移速度建模方法中,大多用的是扫描法、迭代法和加权法. 这些方法对偏移速度的确定是从初始速度场(即初始速度模型或速度场范围)开始,逐渐逼近真实速度场的过程. 而 CRS 道集偏移速度建模是基于最优三参数,直接确定偏移速度的. 值得注意的是,偏移速度的精度直接依赖于优化三参数. 因此,CRS 道集偏移速度建模要得到高精度的偏移速度场,首先必须做好 CRS 叠加,以获取高质量的 CRS 叠加剖面、相似系数剖面 and 优化三参数剖面. 下面基于层剥离法给出 CRS 道集偏移速度建模的实现步骤:

- 1) 获取高质量的 CRS 叠加剖面、相似系数剖面和优化三参数剖面.
- 2) 解释出主要反射层位,由此拾取零炮检距反射走时、法向射线出射角和法向入射点波曲率半径.
- 3) 从第一层开始,利用上面推导的方程,由第一个分析点起从左到右逐点求取层速度.
- 4) 当第一层上的所有分析点求完后,转移到下一层,直到所有层做完为止.
- 5) 由于这种方法基于层剥离和射线追踪,因此存在速度误差累计的问题. 这样,必须要求有高精度的地震三参数剖面. 另外,是否能正确解释出主要反射层位也是减小速度误差累计的一个关键步骤. 反射层的平滑采用线性插值或/和 3 次样条函数.

3 模型试算

3.1 CRS 叠加

为检验 CRS 叠加,用图 3a 所示由 4 个反射层组成的凹陷模型,基于有限差分法正演模拟生成共炮点道集数据,道间距为 30 m. 所用速度场范围为 1~640 CDP,CDP 间距为 15 m. 抽取其中满覆盖次数的道组成 CMP 道集,中心点范围为:  $199\text{ CDP} \leq x_m \leq 464\text{ CDP}$ , 间隔  $\Delta x_m = 15\text{ m}$ , 半炮移距  $h$  从 0 到 -1 425 m, 增量  $\Delta h = 30\text{ m}$ . 用主频为 30 Hz、

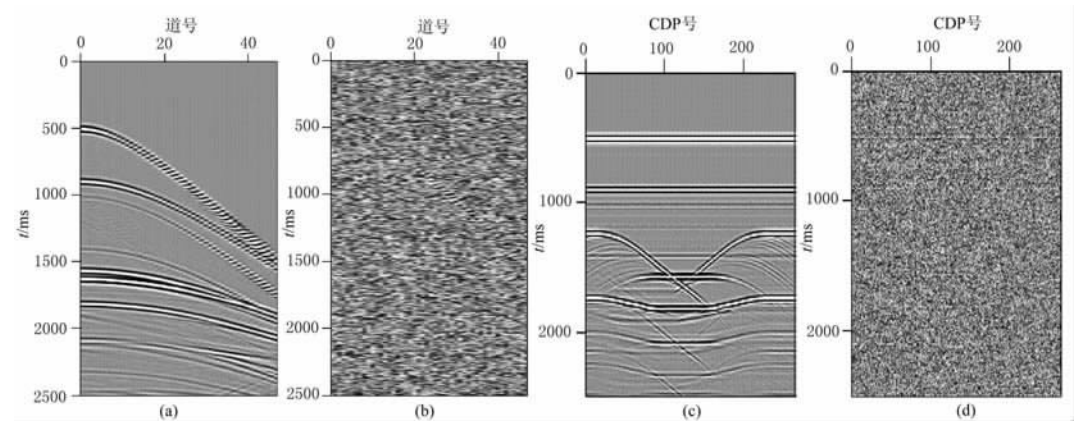


图 3 (a) 无噪声时模型中央处的 CMP 道集; (b) S/N=1 时模型中央处的 CMP 道集; (c) 无噪声时的 CO 道集(炮检距=0); (d) S/N=1 时的 CO 道集(炮检距=0). 图中  $t$  表示反射走时

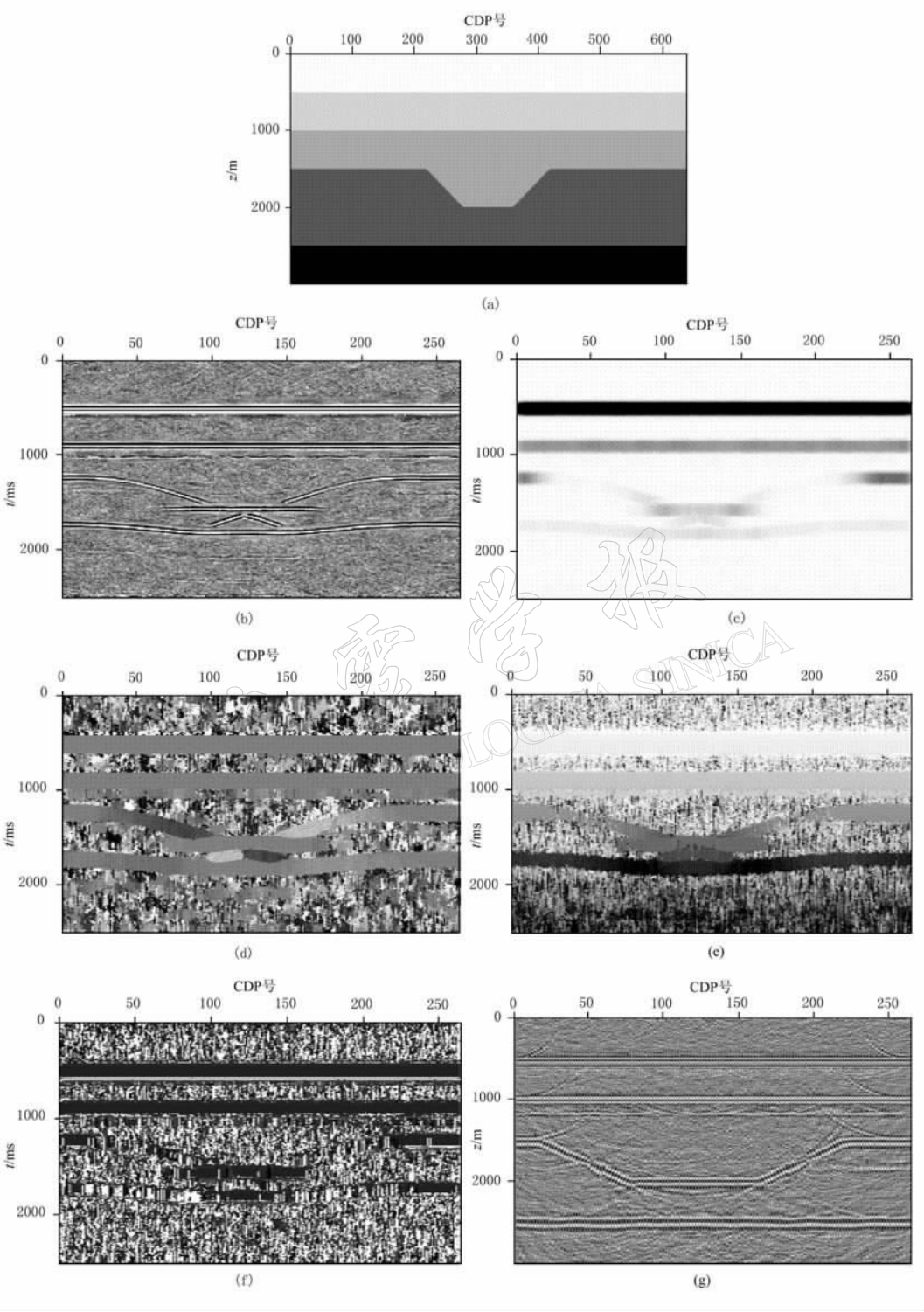


图 4 由 4 个反射界面组成的凹陷模型(a)、CRS 叠加得到的 ZO 剖面(b)、相干剖面(c)、 $\alpha$  剖面(d)、 $R_{np}$  剖面(e)、 $R_n$  剖面(f)和 CRS 叠后深度偏移剖面(g). 图中  $t$  表示反射走时,  $z$  表示深度

采样间隔为 4 ms 的雷克子波作为地震信号，最后，在反射模拟数据中增加了信噪比为  $S/N=1$  的随机噪声，这意味着无论在共炮检距(CO)道集还是在 CMP 道集中，深层界面的反射同相轴几乎不能用肉眼识别出来(图 3)，因而通过深层反射的质量可检验 CRS 叠加的效果。图 4b~f 是由 CRS 叠加得到的 ZO 剖面、相干剖面及各参数剖面，可以看到噪声被很好地压制。图 4g 是基于实际速度-深度模型，对上述 CRS 叠加得到的 ZO 剖面做叠后深度偏移的结果。结果表明，凹陷和其下的水平层均正确归位，断点清晰且位置准确，验证了 CRS 叠加的正确性和有效性。

3.2 CRS 道集偏移速度建模

基于 CRS 叠加得出的三参数剖面，利用上述推出的方程和实现步骤，我们对凹陷模型进行了试算。由试算结果(表 1)可知，层速度估计误差小于 20 m/s，反射层深度估计误差小于 20 m。图 5 是基于估算的速度-深度模型，对 CRS 叠加剖面做叠后深度偏移的结果。通过对图 5 与图 4g 比较可明显看到：凹陷和其下的水平层均正确归位，断点清晰且位置准确，验证了 CRS 道集偏移速度建模的正确性和有效性。

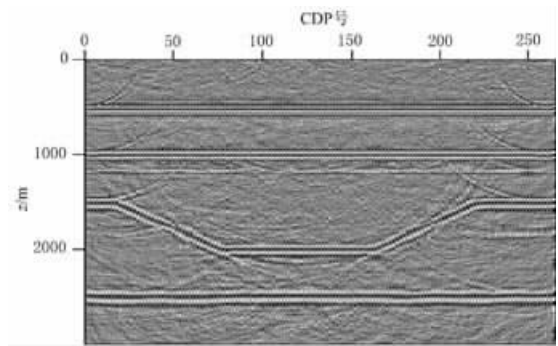


图 5 基于估算速度-深度模型的 CRS 叠后深度偏移剖面。图中  $z$  表示深度

表 1 基于优化三参数得出的层速度结果(分析点位于凹陷模型中央)

层号	实际层速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	估算后的层速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	实际反射层深度/m	估算后的反射层深度/m
1	2 000	1 992	500	496
2	2 500	2 490	1 000	995
3	3 000	3 012	2 000	2 014
4	4 000	3 980	2 500	2 492

4 结论

由凹陷模型的试算结果可以得出以下结论：

- 1) CRS 叠加是一种与宏观速度场无关，仅依赖于近表速度的地震成像方法。它是基于射线理论，通过法向地震波在地面的出射角、法向入射点波曲率半径和法向波曲率半径等地震三参数的优化实现地震叠加成像的。其最终结果除了得到叠加剖面外，还可得到高质量的相似系数剖面 and 地震三参数剖面。
- 2) CRS 道集偏移速度建模不同于共中心点(CMP)道集、共反射点(CRP)道集、共成像点(CIP)道集和共聚焦点(CFP)道集偏移速度建模。它是基于 CRS 叠加得出的三参数剖面，直接求取偏移速度。因而，其精度直接依赖于优化三参数剖面的质量。
- 3) 试算结果表明，层速度估计误差小于 20 m/s，反射层深度估计误差小于 20 m。
- 4) 由于对反射层的平滑采用了线性插值或/和 3 次样条函数，因而适于较复杂地质体的偏移速度建模。



5) 由于直接通过三参数求取偏移速度, 因此本方法具有较高的计算效率.

6) 由于这种方法基于层剥离和射线追踪, 因此存在速度误差累计的问题. 这样, 必须要求有高精度的地震三参数剖面. 另外, 是否能正确解释出主要反射层位, 也是减小速度误差累计的一个关键步骤.

### 参 考 文 献

- 李庆扬, 关治, 白峰杉. 2000. 数值计算原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 66~81
- 李振春, 王华忠, 马在田. 2000. 共中心点道集偏移速度分析[J]. 石油物探, **39**(1): 20~26
- Hubral P, Krey T. 1980. Interval velocities from seismic reflection traveltime measurements[J]. *Soc Expl Geophys*
- Hubral P, Höcht G, Jäger R. 1999. Seismic illumination[J]. *The Leading Edge*, **18**(11): 1 168~1 171
- Jäger R, Mann J, Höcht G, *et al.* 2001. Common-reflection-surface stack; Image and attributes[J]. *Geophysics*, **66**(1): 97~109
- Müller T, Jäger R, Höcht G. 1998. Common reflection surface stacking method—Imaging with an unknown velocity model[A]. *68th Ann Internat Mtg, Soc Expl Geophys, Expanded Abstracts*[C], 1 764~1 767
- Thore P D, de Bazelaire E, Ray M P. 1994. Three-parameter equation: An efficient tool to enhance the stack[J]. *Geophysics*, **59**(2): 297~308

## MIGRATION VELOCITY MODELING BASED ON COMMON REFLECTION SURFACE GATHER

Li Zhenchun<sup>1)</sup> Yao Yunxia<sup>1)</sup> Ma Zaitian<sup>2)</sup> Wang Huazhong<sup>2)</sup>

1) College of Earth Resources and Information, University of Petroleum, Dongying 257061, China

2) College of Marine Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** The common-reflection-surface (CRS) stack is a new seismic imaging method, which depends on near-surface velocity instead of macro-velocity model. According to optimized three parameters obtained by CRS stacking, we derived an analytical relationship between three parameters and migration velocity field, and put forward CRS gather migration velocity modeling method, which realize velocity estimation by optimized three parameters in CRS gather. The test of a sag model proved that the method is more effective and adaptable for the velocity modeling of a complex geological body, and the accuracy of velocity analysis depends on the precision of optimized three parameters.

**Key words:** CRS stack; CRS gather; migration velocity modeling; optimized three parameters; layer stripping