

地震广角反射的应用

周 锦 明

(石油地球物理勘探局研究院)

摘 要

周锦明: 地震广角反射的应用, 《石油地球物理勘探》, 24 (5) 1989: 512~522

临界角附近的地震反射是人们所公认的反射地震学的一种特征, 由于以往多采用短排列勘探, 所以很少记录到临界角附近及超临界角的反射。1987年在二连地区采用长排列勘探, 几乎所有地震剖面在浅层都明显地存在超临界角反射信息——广角反射。在炮检距0~1500m范围内所记录到的各种噪声干扰比远炮检距所记录到的噪声要严重得多, 近炮检距的有效反射信息几乎被噪声干扰所淹没。根据广角反射波具有强振幅的特征, 我们从二连地区的地震资料中提取了广角反射信息。所用的处理方法简单易行, 获得了高信噪比和较好连续性的剖面, 并在生产中得到了推广和应用。

关键词: 地震广角反射 广角反射信息的提取 广角反射剖面效果

ABSTRACT

Zhou Jinming: The application of seismic wide-angle reflections, OGP, 24 (5) 1989: 512~522

The seismic reflection near the critical angle is recognized as a property of reflection seismology. The near critical reflection and supercritical reflection were seldom recorded because people usually used short seismic spread in the past. Long seismic spread was used in Erlian area in 1987; therefore, obvious supercritical reflection informations, wide-angle reflections, occur at shallow layers of almost all seismic sections. Much more noises are recorded on the near traces (offsets 0~1500m) than on far traces. Effective reflection signals on near-offset traces are almost submerged in noises. In the light of the phenomenon that wide-angle reflection has high amplitude, we extracted wide-angle reflection informations from the seismic data in Erlian area. The method used is

simple. As a result, we acquired the high S/N sections whose seismic continuity is quite good. The sections are useful in practice.

Key words: seismic wide-angle reflection, extraction of wide-angle reflection, effect of wide-angle reflection section

原 理 分 析

研究地震广角反射的实质是研究反射振幅与炮检距的关系。所谓广角反射, 就是超临界角反射。

图1为平面波入射到高波阻抗界面的反射系数与入射角的关系曲线, 反映了二连地区浅层基底反射系数的变化规律。由图1可见, 入射角在临界角范围内, 反射系数变化很小, 几乎趋近于一个常数 r_0 ; 在临界角 θ_c 附近, 反射系数突然增大, 是垂直入射反射系数的好几倍, 即为 nr_0 。显然, 广角反射的振幅也相应提高了 n 倍。设 A_0 为入射波的振幅, $n(t)$ 为噪声, $A_{\perp}$ 为垂直入射的反射振幅, A_{θ_c} 为临界角附近的反射振幅, 则有

$$\begin{aligned} A_{\perp} &= A_0 r_0 + n(t) \\ A_{\theta_c} &= n A_0 r_0 + n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1), 表明在临界角附近的反射波的信噪比提高了, 这就是可以利用广角反射法勘探浅层基底的理由所在。

据 Zoeppritz 方程, 在广角反射的条件下, 反射系数 $r(\theta)$ 近似为

$$r(\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v} \sin^4 \theta \sec^2 \theta \quad (2)$$

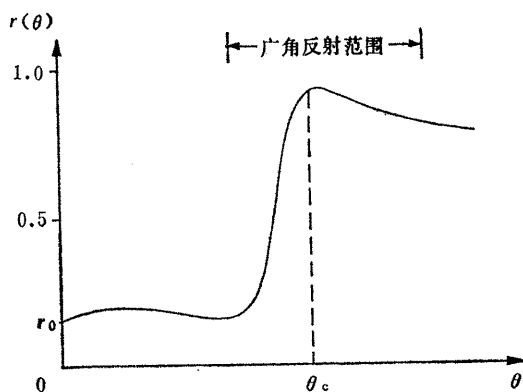


图1 反射系数与入射角的关系曲线

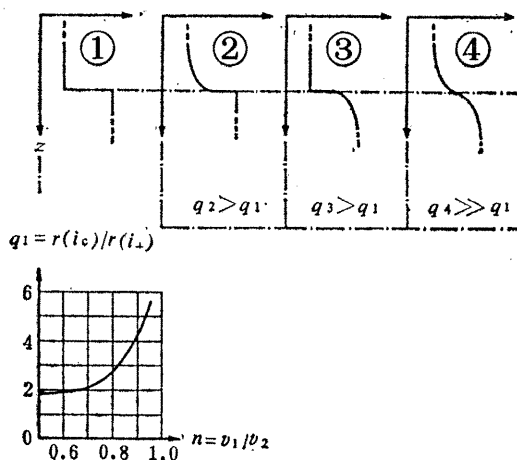


图2 反射系数与速度梯度的关系曲线

显然, 反射系数仅与界面两侧速度差的变化有关, 密度对反射系数的影响可以忽略不计。广角反射波的特征详见附录 A。

为了进一步定量地分析利用广角反射的优点, 可借助于地震模型来模拟最简单的界面速度模型。设 $q = r(i_c)/r(i_\perp)$, q 是临界角附近的反射系数与垂直反射系数之比值。

图 2 为反射系数与速度梯度的关系曲线, q 值随着界面速度梯度减小而增大。因此, 可利用广角反射振幅的变化趋势来推测基底速度梯度的变化。

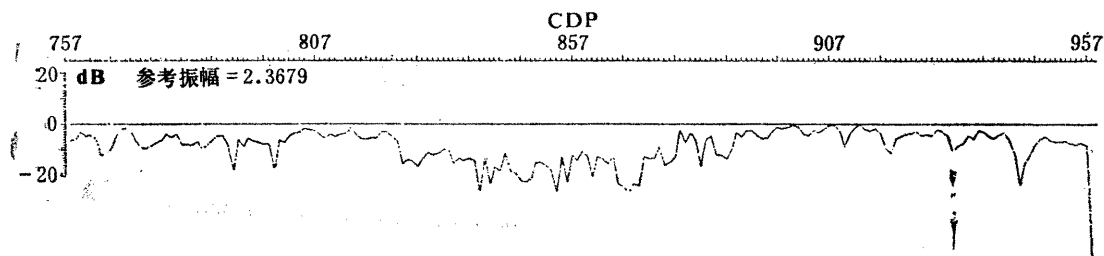


图 3 速度横向变化趋势

图 3 为 ZH87-43 测线的浅层基底广角反射振幅的横向变化曲线, 它反映了该区基底的速度横向变化趋势。

资料处理与分析

叠加剖面上的广角反射信息分析

在叠加剖面上, 可以观察到采用广角反射信息处理后所取得的良好效果。图 4 为常

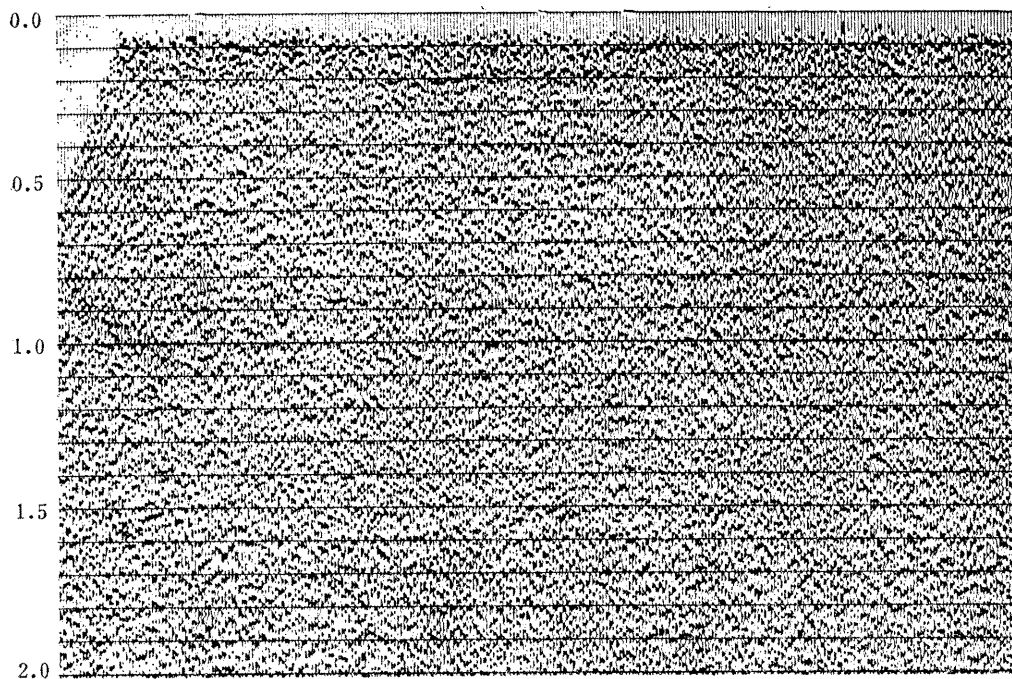


图 4 ZH87-43 测线常规处理剖面

规叠加剖面,图5为同一测线经广角反射分析处理后的叠加剖面。图5中,在200~500ms范围内,有一层强的广角反射同相轴,而这组强反射在图4中却没有出现。很显然,经广角反射处理后的叠加剖面具有高信噪比和较好的连续性。

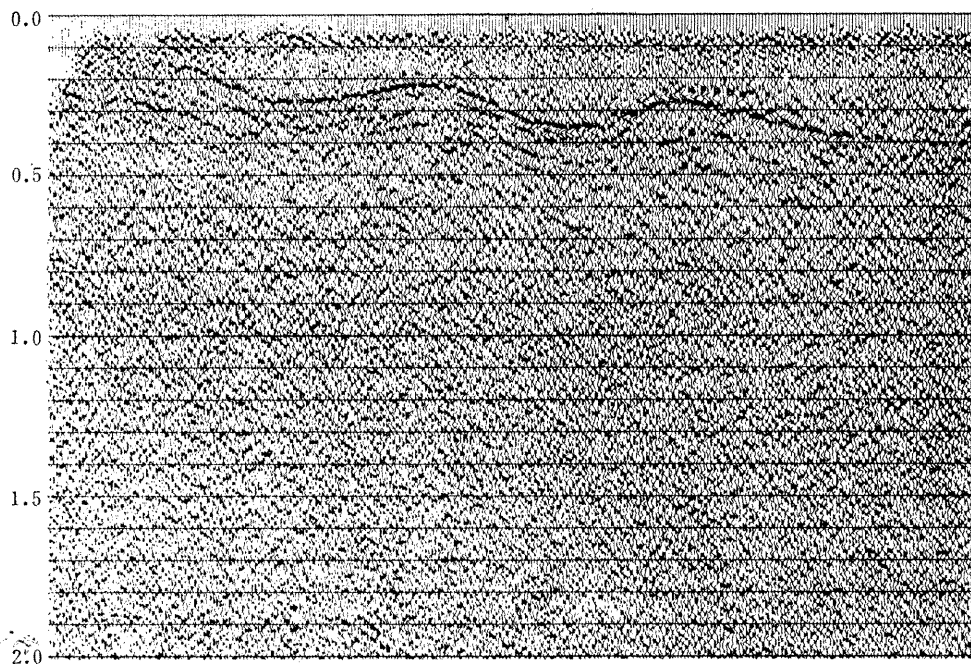


图5 ZH87-43测线广角反射处理剖面

CDP 道集上广角反射信息分析

为了提高记录的信噪比,从4个连续CDP中按共炮检距组合叠加得到CDP大道集,即多次覆盖的道集。这种显示方法不会因叠加而损害我们所感兴趣的振幅与炮检距的关系。

振幅恢复和均衡处理是关键,它关系到使用广角反射信息处理方法的效果。所以,为了保持振幅与炮检距的关系,在实际地震资料处理中,应始终使用保持振幅处理流程,采用T补偿方法,而不可使用自动增益控制方法来进行振幅恢复。

图6为351 CDP大道集,图7为701 CDP大道集。这两个典型的大道集出现浅层广角反射波与折射波纠缠在一起的现象,这个问题可通过叠前无增益道集显示和正常时差动校正来识别。在CDP道集上,若只有折射波存在的情况下,则在折射波记录范围内的振幅应随炮检距的增加而衰减,而实际观察到的现象却恰好相反;在连续的CDP大道集中,远炮检距记录却都存在着异常强的振幅信息,这些现象正是表明了广角反射信息的存在。

广角反射信息的提取

由于广角反射波的视速度与折射波的视速度很接近,所以要在动校正之前的CDP道集上根据它们的视速度差来提取有效广角反射信息是非常困难的。CDP道集经过正常时差动校正之后,广角反射波是一组水平同相轴,而初至波和折射波却是一组双曲线

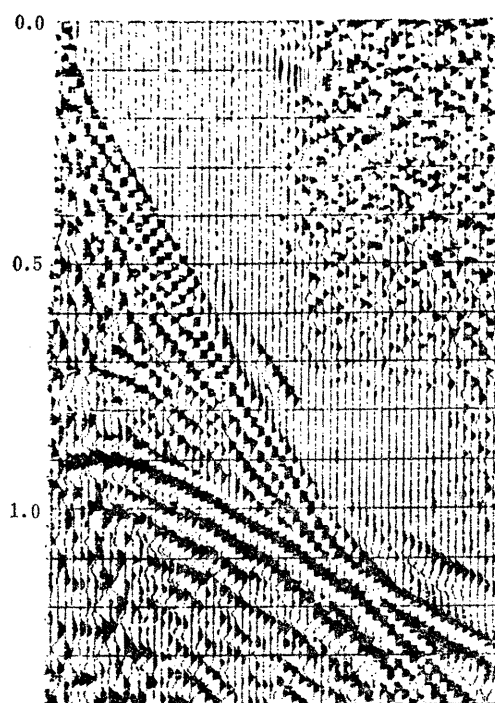


图 6 351CDP道集

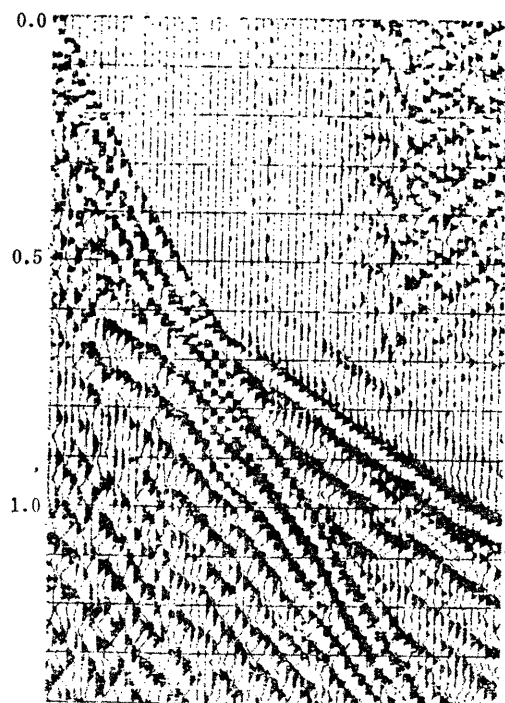


图 7 701CDP道集

同相轴。根据这一特征, 可通过 $f-k$ 域滤波和叠加来分离广角反射信息, 具体实现流程见图 8。

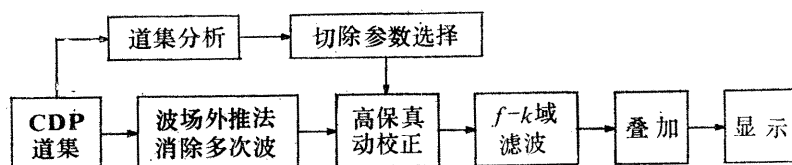


图 8 提取广角反射信息处理流程

上面已经阐明了浅层广角反射信息的存在, 而且只有远炮检距道才能记录到这种信息。提取广角反射信息与正常动校正有关, 在以往常规处理中, 选择动校正切除参数的准则是保留近道、切除远道, 这种切除方法恰好切除了全部广角反射信息。因此, 切除参数是广角反射处理的关键参数。

为了进一步从感性上认识广角反射波和多次广角反射波, 下面示出了第 351 道集分别经过速度为 $v_{NMO} = 2300\text{m/s}$ 和 $v_{NMO} = 2650\text{m/s}$ 动校正之后的 CDP 道集 (图 9 和图 10)。由图中明显地看到, 浅层远炮检距的广角反射同相轴具有强振幅特征。在图 9 道集中, 不仅可以看到广角反射信息, 而且还可观察到多次广角反射波 (二次)。多次广角反射波具有强振幅特征, 它比震源和面波噪声要强得多, 对浅层勘探危害极大, 也是广角反射勘探中要解决的问题。采用波场外推法可以压制长周期多次广角反射波, 而且对实际资料处理收到了较好的效果 (图 11)。有关波场外推法压制多次波的原通理

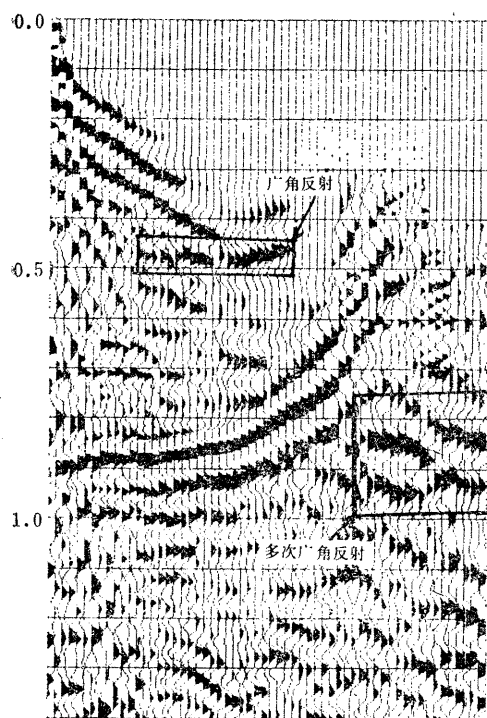


图 9 经 $v_{\text{NMO}} = 2300\text{m/s}$
动校后的351道集

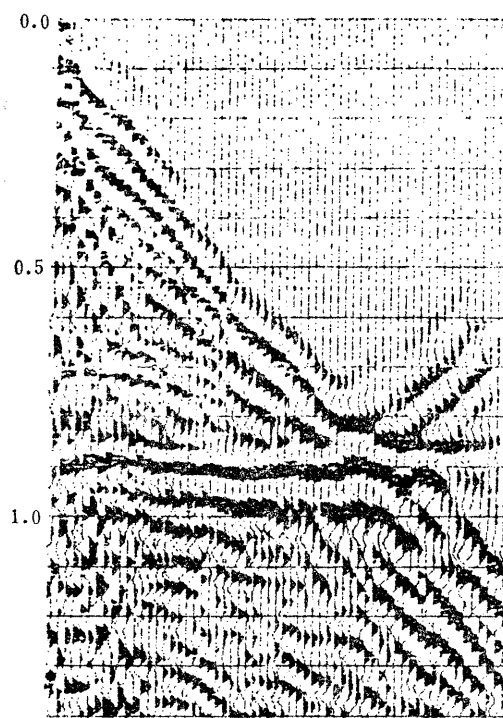


图 10 经 $v_{\text{NMO}} = 2650\text{m/s}$
动校后的351道集

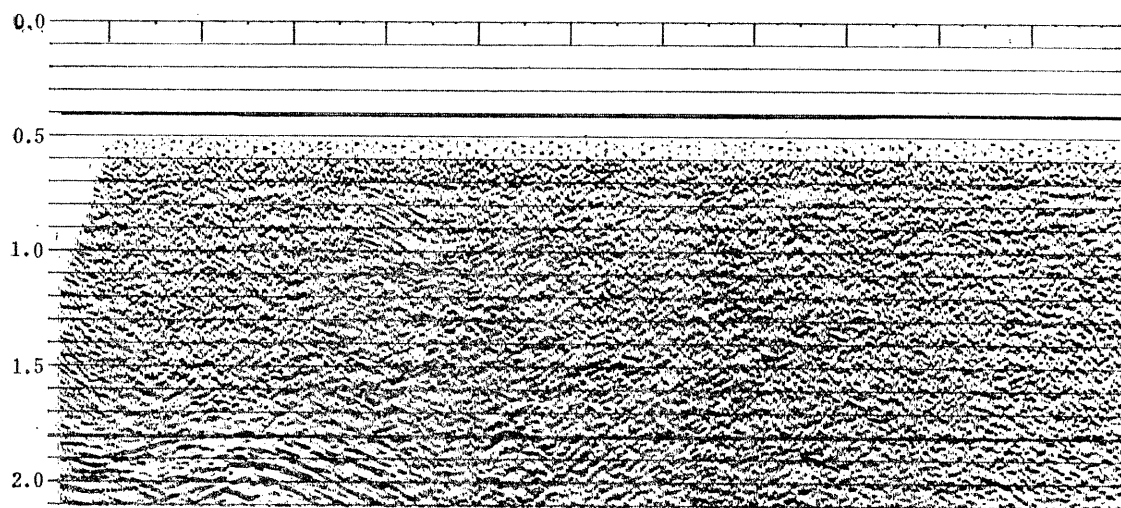


图 11a HG87-89测线常规偏移剖面

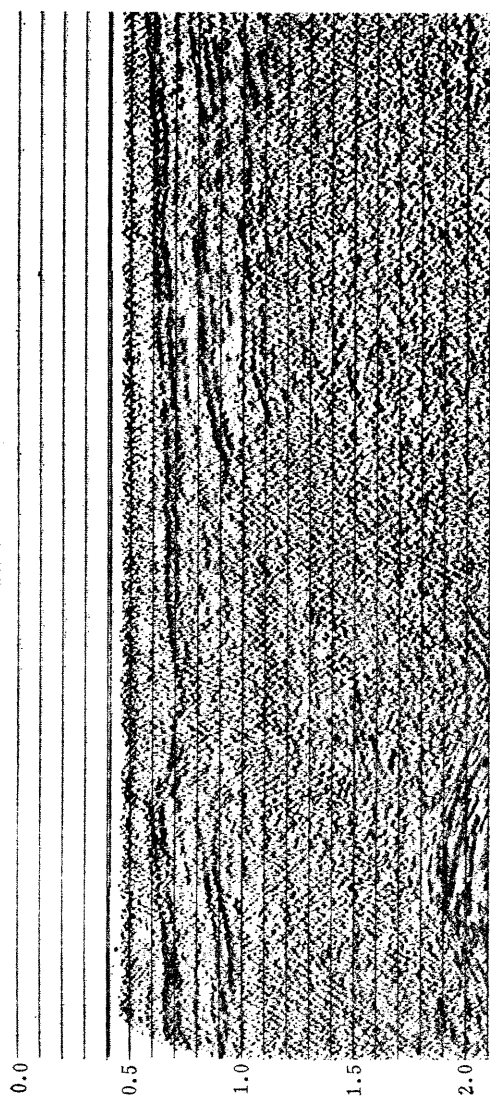


图 11b HG87-89测线经广角反射处理的剖面

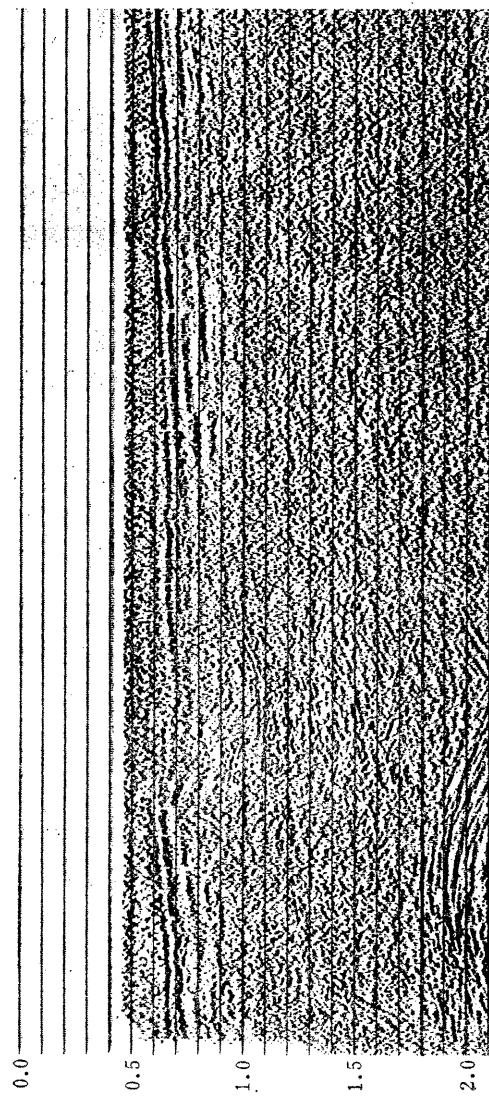


图 11c HG87-89测线经波场外推法去多次广角反射后的剖面

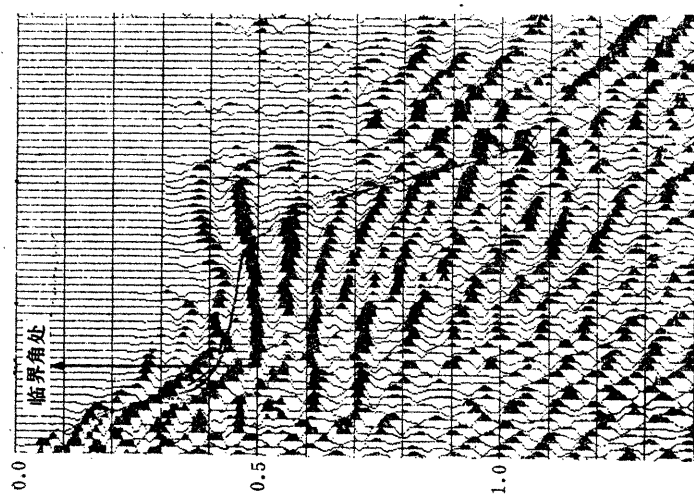


图 12 经 $v_{NMO} = 2300\text{m/s}$ 动校后的701CDP道集

和实现过程请参考附录 B。

此外, 在 CDP 道集上还可以看到反射子波相位随炮检距增大而变化的现象。如图 12 所示, 在时间为 470ms、炮检距为 1500m 处, 反射同相轴的相位发生了 180° 的反转。这种现象在今后的 AVO 技术中有待进一步研究。

结 束 语

综上所述, 对常规地震记录中存在的浅层超临界角反射信息, 采用广角反射处理方法, 可解决以往对浅层反射处理效果不佳的实际困难。

本文在实际资料处理中得到了朱智玲、赵海燕同志的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

孙忠勤: 广角反射地震学, 《石油物探专题情报成果集》, 石油部物探局情报所, (4) 1987: 149~167

附录 A 广角反射波特征

为了充分地认识广角反射波的所有特征, 首先从弹性动力学理论出发, 假设一套 n 层水平、均匀、完全弹性介质, 第 n 层介质的密度和速度分别为 ρ_n 和 v_n , 如图 A 所示。

设第 n 层介质的入射波压力函数为

$$\varphi'_n(x, z, \omega) = A_n^+ \exp \left[ik \left(x + z \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \right] \quad (\text{A-1})$$

$$\text{其中: } k = \frac{\omega}{c}; \quad c = \frac{v_0}{\sin \theta_0} = \frac{v_1}{\sin \theta_1}$$

$$= \dots = \frac{v_n}{\sin \theta_n} = \dots$$

于是, 反射波的压力函数为

$$\varphi''_n(x, z, \omega) = A_n^- \exp \left[ik \left(x - z \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \right] \quad (\text{A-2})$$

第 n 层介质全波场压力函数为

$$\varphi_n(x, z, \omega) = \varphi'_n(x, z, \omega) + \varphi''_n(x, z, \omega) \quad (\text{A-3})$$

同理, 第 $n+1$ 层介质的入射波和反射波的压力函数及全波场压力函数应分别为

$$\varphi'_{n+1}(x, z, \omega) = A_{n+1}^+ \exp \left[ik \left(x + z \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \right] \quad (\text{A-4})$$

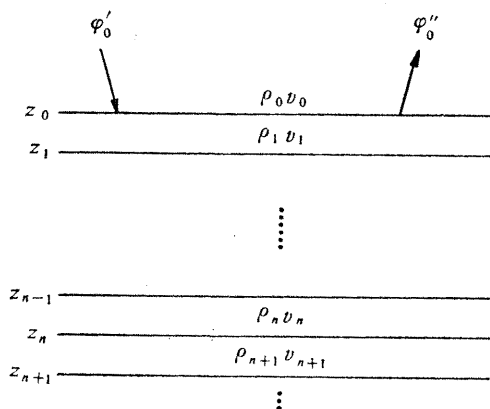


图 A 地层模型

$$\varphi_{n+1}''(x, z, \omega) = A_{n+1}^- \exp \left[ik \left(x + z \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \right] \quad (\text{A-5})$$

$$\varphi_{n+1}(x, z, \omega) = \varphi_{n+1}'(x, z, \omega) + \varphi_{n+1}''(x, z, \omega) \quad (\text{A-6})$$

根据波在介质中传播时的压力连续条件

$$\lim_{z \rightarrow z_{n+}} \varphi_n(x, z, \omega) = \lim_{z \rightarrow z_{n-}} \varphi_{n+1}(x, z, \omega) \quad (\text{A-7})$$

可得

$$\begin{aligned} & A_n^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) + A_n^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \\ &= A_{n+1}^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) + A_{n+1}^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

由牛顿第二运动定律, 可得质点位移的法向分量与压力的关系式

$$\frac{\partial^2 u_z(x, z, t)}{\partial t^2} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial z} \quad (\text{A-9})$$

将其变换到频率域内, 有

$$U_n(x, z, \omega) = \frac{1}{\rho \omega^2} \frac{\partial \varphi_n(x, z, \omega)}{\partial z} \quad (\text{A-10})$$

同样, 根据位移连续条件

$$\lim_{z \rightarrow z_{n+}} U_n(x, z, \omega) = \lim_{z \rightarrow z_{n-}} U_{n+1}(x, z, \omega) \quad (\text{A-11})$$

可得

$$\begin{aligned} & -ik \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \frac{1}{\rho_n \omega^2} \left[A_n^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) - A_n^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \right] \\ &= -ik \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \frac{1}{\rho_{n+1} \omega^2} \left[A_{n+1}^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \right. \\ & \quad \left. - A_{n+1}^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

简化式 (A-12), 设 $L_{n+1} = \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1}$, $L_n = \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1}$, 则有

$$\begin{aligned} & \frac{L_n}{\rho_n} \left[A_n^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) - A_n^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \right] \\ &= \frac{L_{n+1}}{\rho_{n+1}} \left[A_{n+1}^+ \exp \left(ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) - A_{n+1}^- \exp \left(-ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A-13})$$

根据

$$A_n^- = A_n^+ R_n(\omega) \exp \left(2ik z_n \sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1} \right) \quad (\text{A-14})$$

$$A_{n+1}^- = A_{n+1}^+ R_{n+1}(\omega) \exp\left(2ikz_{n+1}\sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1}\right) \quad (\text{A-15})$$

解式 (A-8), (A-13), (A-14) 和 (A-15) 联立方程, 可得

$$R_n(\omega) = \frac{R'_n + R_{n+1}(\omega) \exp\left[2ik\sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1}(z_{n+1} - z_n)\right]}{1 + R'_n R_{n+1}(\omega) \exp\left[2ik\sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1}(z_{n+1} - z_n)\right]} \quad (\text{A-16})$$

其中

$$R'_n = \frac{L_n/\rho_n v_n - L_{n+1}/\rho_{n+1} v_{n+1}}{L_n/\rho_n v_n + L_{n+1}/\rho_{n+1} v_{n+1}}$$

1. 在波沿临界角入射到界面 $z = z_n$ 的情况下, 有

$$L_{n+1} = \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1} = 0$$

则 $R'_n = 1$, 由此可得 $R_n(\omega) = 1$ 。对于一切频率范围, $R_n(\omega) = 1$, 我们可以递推到第 $n-1$ 层

$$R_{n-1}(\omega) = \frac{R'_{n-1} + \exp\left[2ik\sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1}(z_n - z_{n-1})\right]}{1 + R'_{n-1} \exp\left[2ik\sqrt{\frac{c^2}{v_n^2} - 1}(z_n - z_{n-1})\right]}$$

$|R_{n-1}(\omega)|$ 的模等于 1。可见 $R_{n-2}(\omega), \dots, R_0(\omega)$ 的模都等于 1。所以, 在临界角入射的反射响应是白噪声的。

2. 在小于临界角入射情况下, R'_n 是实数。对于所有地层, 模量都小于 1, 同样 $R_n(\omega)$ 的模量也小于 1。所以, 小于临界角的反射响应不是白噪声的。

3. 在超临界角入射的情况下, $\frac{c}{v_{n+1}} > 1$; 由于 $L_{n+1} = \sqrt{\frac{c^2}{v_{n+1}^2} - 1}$ 是虚数, R'_n

是复数, 而其模仍然为 1。因此可以断言, 超临界角反射响应也是白噪声的。

综上所述, 在临界角之前的反射波是非白噪声的; 在超临界角的反射波 (广角反射) 是白噪声的。由此可知, 在以往的常规地震反射资料中, 假定反射系数是白噪声的这种假设是不合理的; 只有在广角反射条件下, 该假设才合理。根据广角反射的特点, 我们可用广角反射的波谱来确定震源入射波的频谱, 并可以选择一段质量较好的广角反射, 采用多项式求根方法, 准确地提取地震子波。

附录 B 波场外推法压制多次波

波动方程外推法衰减表层基底长周期鸣震干扰处理方法分三步进行: ①把记录数据转换到频率域内做正反向延拓, 使正反向延拓后数据的总时移等于一个鸣震周期; ②用一个代表表层基底反射算子处理正向延拓数据, 使延拓数据变成一个模拟的鸣震信号;

③从反正向延拓数据中减去它。该方法衰减多次广角反射是有效的,即使在基底构造和反射系数复杂的情况也是有效的。该方法的不足之处是未考虑反射系数随入射角的变化关系。

在时空域内,波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{B-1})$$

将式(B-1)转换到 $f-k$ 域内,得

$$k_x^2 + k_z^2 = \omega^2 / v^2 \quad (\text{B-2})$$

式中: v 为表层速度; k_x 为水平方向波数; k_z 为垂直方向波数; ω 为频率。

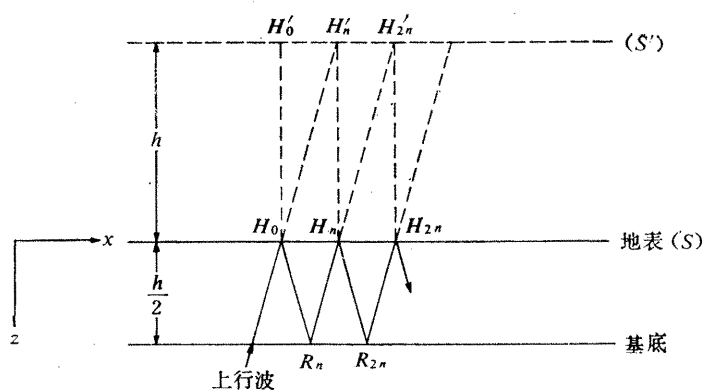


图 B 波场外推示意图

图 B 为波场外推示意图。 $p(x, s, t)$ 为在 S 处记录到的波场, 将它转换到 $f-k$ 域为 $P(k_x, s, \omega)$; $p(x, s', t)$ 为在 S' 处的外推多次波, 只要将 S 处的波场外推一个鸣震周期到 S' 处, 并(根据位移定律)通过傅里叶变换到 $f-k$ 域, 有

$$P(k_x, s', \omega) = P(k_x, s, \omega) \exp 2i\pi h k_z \quad (\text{B-3})$$

其中 h 为基底上覆介质厚度的二倍。

将式(B-3)通过二维反傅里叶变换到 $x-t$ 域内, 求得模拟的多次波。然后, 将所求得的多次波模型, 采用最小平方差的方法, 从原始道上减去, 便收到了压制多次波的效果, 即使得

$$[P(x, s', t) * L(t) - x(t)]^2 + (\lambda^2 - 1)L^2(t)$$

达到最小。