

文章编号:1673-5005(2011)01-0045-07

陆地多次反射折射波定量分析

郭朝斌, 李振春, 岳玉波, 郭振波

(中国石油大学 资源与信息学院, 山东 青岛 266555)

摘要:多次反射折射波在东部油田盆地隆起区、南方碳酸盐岩山区和西北地区山前带多有发育。通过相关公式推导探讨多次反射折射波的性质,分析其运动学和动力学特性,针对地震数据处理实际,研究其对振幅补偿、反褶积效果的影响,并用特征向量滤波方法对多次反射折射波进行衰减。实际处理资料结果表明,特征向量滤波方法适于衰减多次反射折射波,衰减后的地震记录构造成像更清楚。

关键词:反射折射波; 运动学; 动力学; 特征向量滤波

中图分类号:P 631.443

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.01.008

Quantitative analysis of multiple reflected refraction of land

GUO Chao-bin, LI Zhen-chun, YUE Yu-bo, GUO Zhen-bo

(College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: Multiple reflected refractions are prevailing at uplift of basin, southern mountain carbonate area and piedmont tectonic belt of the west region. The characteristics of multiple reflected refraction including the kinematic and dynamic characteristics were discussed by the related formula derivations. Subsequently, the effects of such interference on amplitude compensation and deconvolution in the seismic data processing flow were also studied. Eigenvector filter multiple attenuation method was used for the attenuation of such noise. The seismic data processing results show that eigenvector filter multiple attenuation method is suitable for the attenuation of such noise and the seismic data after attenuation make imaging profiles of the structure more clear.

Key words: multiple reflected refraction; kinematic; dynamic; eigenvector filter

折射波法由于具有理论成熟完备,野外施工简便高效,资料易于解释的特点,被广泛应用于天然地震和地表表层调查研究中。对折射波法的研究一般分为施工方法研究、解释方法研究和折射波静校正研究 3 个领域。随着中国油气地震勘探探区由东部平原转向南方碳酸盐岩山区、西北地区山前带以及沙漠地区,由于地形地貌及表层结构特点,多次反射折射波发育,这给地震数据野外采集、室内数据处理以及解释都带来了新问题,地震勘探实践要求必须分析表层多次折射波传播的特殊规律及其对地震数据处理的影响。笔者主要通过公式推导着重分析多次反射折射波的运动学和动力学规律,进而探讨消除多次反射折射波的方法。

1 多次反射折射波问题

中国南方碳酸盐岩山区、西北地区山前带以及沙漠地区在地震记录中广泛发育一类折射波,如图 1 所示。图 1 中左图为西北某山前带探区原始单炮记录,由图中方框内可以看出多套折射波平行分布于记录中,视速度在 3.2 km/s 左右,频谱相同,相位差很小,远道上甚至在 2.5 s 左右仍能看到它的影子,通过小折射施工查明该区浅层存在一稳定高速砾石层界面;图 1 中右图为某南方碳酸盐岩工区原始单炮记录,方框内发育的多套波组与一次折射波的视速度都在 4.1 km/s 左右,频谱及相位相同,在远道影响到 3.1 s 左右,通过野外表层调查发现研

收稿日期:2010-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40974073);国家“863”课题(2007AA060504)

作者简介:郭朝斌(1971-),男(汉族),河南武陟人,博士研究生,主要从事地震成像与偏移速度分析研究。

究区近地表厚度变化在数米至数十米,上覆岩层为低速的泥岩、下覆地层则为高速砂岩灰岩^[1]。

图1所示在不同探区获得的地震记录中出现了相同的折射干扰现象,其主要特征表现在折射波波组内地震波同相轴频谱和相位相同,视速度与一次折射波相等,由此可以断定是多次反射折射现象,其产生机制为当地震波从上覆低速地层入射到下覆高速层顶面时产生多次反射,当上覆低速层内多次反射波入射到高速层顶面的入射角与临界角相等时,就会产生沿高速层顶面的滑行波,从而形成了多次反射折射波^[2]。

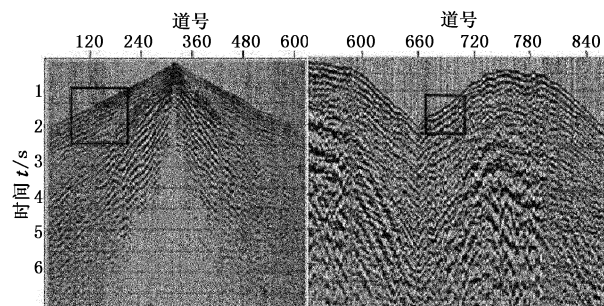


图1 存在多次反射折射干扰的单炮记录

Fig.1 Single shot records with multiple reflected refractions

仔细对比图1中两工区发育的多次反射折射波发现,右图方框中多次反射折射波同相轴线性光滑,而左方框中同相轴则略有起伏和毛刺现象,这是由于南方山地地形起伏导致的静校正量引起的,但这不影响对该套折射波组的定性判断,实际上对于复杂探区而言,静校正和多次反射折射是地震勘探中两大问题,它们之间是相互影响的。

2 多次反射折射波的运动学性质

图2为三维情况下多次反射折射波理论示意图。图中:顶面为自由表面,厚度为 h_2 的地层为下

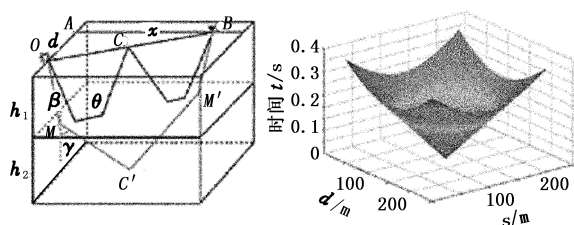


图2 多次反射折射波传播及时距曲线理论示意图

Fig.2 Raypath of multiple refraction and its map

覆高速地层,速度为 v_2 ,两者之间为上覆低速(v_1)层,厚度为 h_1 ;O点为震源,AB为地震信号接收排列,最小偏移距OA的距离为 d ,B为排列上任意一接收点,AB间距离为 x , θ 为折射临界角。震源激

发后,首先在高速层顶面产生折射波,该折射波在自由界面反射后,当其在高速层顶面的入射角与临界角相等时,高速层顶面上就会产生多次反射折射波;而射线路径 $OMC'M'B$ 为B点接收到的一次反射波,该反射波在高速层顶界面上的入射角和透射角分别为 β 和 γ 。

由二维单水平界面情况下折射波时距曲线公式^[3]

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2h_1 \cos \theta}{v_1} \quad (1)$$

可推导得出图2中所示三维情况下的二次反射折射波的旅行时公式,即

$$t = \frac{4h_1}{v_1 \cos \theta} + \frac{\sqrt{x^2 + d^2} - 4h_1 \tan \theta}{v_2} = \frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{v_2} + \frac{4h_1 \cos \theta}{v_1} \quad (2)$$

经过变换后得

$$[(v_2 t - 4h_1 \cot \theta)^2 - x^2] / d^2 = 1. \quad (3)$$

由式(3)可以得出多次反射折射波的旅行时 t 与排列长度 x 呈双曲规律,如图2中右图所示。图中显示的是 d 、 x 变化时旅行时 t 的变化规律, t 显示为一圆锥面。根据上述推导思路,同样可以得到一个水平界面下 n 次反射折射波旅行时公式为

$$[(v_2 t - 2n4h_1 \cot \theta)^2 - x^2] / d^2 = 1. \quad (4)$$

上述推导是基于三维情况下一个水平界面下多次折射波的旅行时公式,对于多层水平层状介质,已知二维情况下 m 层水平界面上的折射波时距曲线方程^[3]为

$$t = \frac{x}{v_m} + 2 \sum_{k=0}^{m-1} \frac{h_k \cos \theta_{km}}{v_k} \quad (5)$$

式中, v_m 为水平界面产生折射波的 m 层的速度; h_k 、 v_k 和 θ_{km} 分别为 k 层的速度、厚度和入射角度。与三维情况下单水平界面折射波旅行时公式的推导思路类似,可以推导得出三维情况下 m 层水平界面折射波旅行时公式,表达式为

$$[(v_m t - 2 \sum_{k=0}^{m-2} h_k \cot \theta_{km} - 2(n+1)h_{m-1} \cot \theta_{m-1m}) - x^2] / d^2 = 1. \quad (6)$$

式中, n 为波的反射折射次数; $2 \sum_{k=0}^{m-2} h_k \cot \theta_{km}$ 为一常量。由式(6)可以看出,对多层水平介质而言, d 、 x 变化时旅行时 t 的变化仍为一圆锥面。

当下覆高速地层为倾斜界面时,可以推导出类似的多次反射折射波时距曲线公式,但由于地层倾角及临界角的限制,多次反射折射波不会多套出现。

值得注意的是,产生多次反射折射波的前提条

件是上覆低速介质和下覆高速地层两者界面在一定范围内近似平行且分界面上反射系数较大,这在山前带和碳酸盐岩探区是常见的,因此多次反射折射波广泛发育于上述探区,而与其上地形高差及岩性变化导致的静校正量无关,如图 1 左方框中所示。当存在静校正量时,多次反射折射波总的旅行时可以表示为

$$T_{mj} = t_{mj} + \Delta t, \quad m = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

式中, T_{mj} 为 m 次折射波 j 道总旅行时; t_{mj} 为多次折射波的旅行时。因为静校正量对固定的一道是不变的,在炮集上表现为波组内多次折射波的旅行时有相同的变化趋势,如图 1 和图 3 所示。处理时消除静校正量的影响,可以恢复多次反射折射波的特征,而不能仅仅认为其同相轴不呈线性而否定多次折射

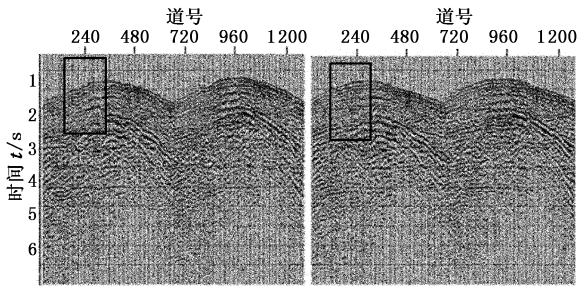


图 3 静校正前后的多次反射折射波

Fig. 3 Multiple refractions before and after statics applied

的存在。图 3 为南方某一碳酸盐岩工区同一单炮记录静校正前后的对比图,从左图可以看出,由于地形起伏及上覆地层产生的静校正量使多次折射波同相轴发生扭曲,但同相轴变化趋势是一致的,经过静校正后(右图),多套多次折射清晰可见。对炮集记录上固定的任意一道,由式(4)、(6)可得相邻折射波时间间隔为

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} = 2h_{m-1} \cos \theta / v_{m-1}. \quad (8)$$

单一水平折射界面时,式(8)可表示为

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} = 2h_{m-1} \cos \theta / v_1. \quad (9)$$

即相邻折射时间间隔与检波点位置无关,只与探区表层结构有关,这是一个有意义的结论,可用来计算工区表层厚度。炮集记录上,表层速度 v_1 为直达波速度; v_2 为一次折射波速度,可以通过计算得到; v_1 、 v_2 已知,临界角 θ 则为已知; Δt 为相邻多次折射波旅行时的差值,通过拾取折射波上同相位的旅行时获得,由此可以根据式(5)估算出低速层的厚度。目前工业界获取表层结构信息(速度、厚度)一般在采集时通过小折射、微测井技术获得,室内处理时则通过折射波初至静校正和层析静校正方法获取^[4],各种方法本身的局限性导致计算结果出现多解性和

误差,而式(5)表明通过对多次折射波的研究可以计算相关的表层结构信息,从而实现对其他表层调查技术获得的表层厚度数据准确性的监控。

3 多次反射折射波的动力学性质

在震源是谐波源的情况下,发出的球谐波的位

$$\Phi^0 = \frac{1}{-ikR_0} \exp(i\omega(t - R_1/v_1)). \quad (10)$$

其中

$$k = \omega/v_1.$$

式中, R_0 为离开震源的距离; ω 为谐波源频率。在界面上产生的反射波矢量公式^[5]为

$$W^*(m) = \frac{\exp(i\omega(t - \tau)) R_j^0 R_j^1 N^*(m)}{\sqrt{x^2 + d^2 + 4h_1^2}}. \quad (11)$$

式中, m 为接收点; x 为偏移距; $N^*(m)$ 为位移矢量; R_j^0 为波在自由表面的反射系数; R_j^1 为波在折射界面上的反射系数。 R_j^0 、 R_j^1 对图 2 所示情况可以认为是固定不变的,但由于是在临界点上的反射,所以在临界点上反射系数的准确求取就成为必要。对于 R_j^1 ,波以临界角 θ 入射到下覆高速层界面时,对 Cerveny 给出的反射系数公式^[6]修改得到

$$R_j^1 = B_1(\sin \theta) - \frac{i}{\sin \theta} \Gamma_k \left(\frac{2 \sin^3 \theta}{2\pi f \sqrt{x^2 + d^2}} \right)^{1/4} \times \sqrt{2 \cos \theta} g(0). \quad (12)$$

式中, $B_1(\sin \theta)$ 为值小于 1 的与介质弹性参数有关的量,其表达式为

$$g(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (-x \exp(-i\pi/4))^{1/2} \exp(-x^2) dx \times \frac{1}{2} \exp(i\pi/8). \quad (13)$$

对于一个水平界面情况下的折射波和层状介质下的折射波,根据 Cerveny 给出的地震首波位移矢量的公式^[6]为

$$W^{mnp}(m) = \frac{v_n \Gamma_{mnp} \tan \theta}{i\omega x^{1/2} (x - x_m)^{3/2}} \exp(i\omega(t - \tau_{mnp})) N^*(m), \quad (14)$$

对多次反射折射波而言,如果将以临界角 θ 入射的地震波视为新的激发震源,则第 n 次震源入射波位参照图 2 可以表示为

$$\Phi = (nR_j^1)(nR_j^0) \exp(i\omega(t - \tau)) \cos \theta / (2nh_1). \quad (15)$$

该震源激发的 n 次反射折射波可以被视为属于新震源激发的一次折射波,参照公式(14),图 2 中三维接收排列上干涉区外 m 点 P 波 n 次折射波位移矢

量可以表示为

$$W(m) = (nR_j^1)(nR_j^0)v_k\Gamma_k \tan \theta \cos \theta \exp(i\omega(t-\tau))$$

$$N^*(m)/\{(1/2nh_1)[i\omega(\sqrt{x^2+d^2}-2nh_1 \tan \theta)^{1/2}(\sqrt{x^2+d^2}-2(n+1)h_1 \tan \theta)^{3/2}]\}. \quad (16)$$

式中, Γ_k 为界面首波系数; v_k 为折射波速度。式(16)中排列长度和折射次数的影响主要体现在分母项上, 在低速层厚度 h_1 固定情况下, 记

$$P = n(\sqrt{x^2+d^2}-2nh_1 \tan \theta)^{-1/2}(\sqrt{x^2+d^2}-2(n+1)h_1 \tan \theta)^{-3/2}, \quad (17)$$

则 P 与排列接收到的地震波垂直分量振幅变化趋势一致, 若临界距离为 50 m, 炮检距 $\sqrt{x^2+d^2}$ 记为 L , 随炮检距 L 和次数 n 变化折射波振幅的变化趋势见图 4。图 4 表明: 多次折射波振幅随炮检距的增加呈递减趋势, 振幅变化在一定距离(1.5 km 左右)后稳定下来; 相同炮检距下三次折射波振幅比二次折射波振幅值要大, 两者差值同样随炮检距的增加而递减, 在远炮检距两者相差在一个数量级内。

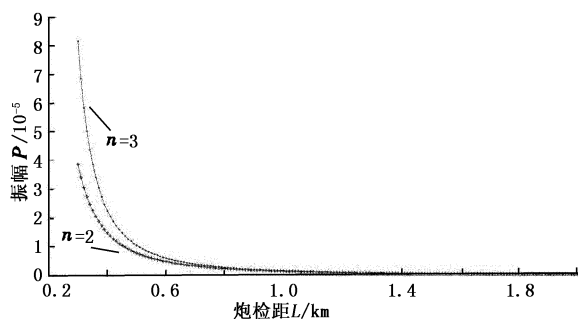


图 4 折射波振幅与炮检距和次数的关系

Fig. 4 Relation between refraction amplitude and L, n

4 多次反射折射波与反射波的干涉

折射波在上覆低速介质中传播时, 如果其旅行时与下覆高速层顶面产生的一次反射波到达时差小于震源脉冲长度, 就会发生干涉。对地震勘探而言, 同样也存在这种干涉现象, 干涉带长度如图 2 所示。

可推导出

$$\sqrt{x^2+d^2+4h_1^2} - \frac{2nh_1}{\cos \theta_c} = (L_0 + v_2 \delta_i) \sin \theta_c. \quad (18)$$

式中, L_0 为干涉带长度; δ_i 为脉冲长度; θ_c 为临界角。式(18)表明了低速层内一次反射波和折射波传播路径差和干涉带长度之间的关系。在干涉带内, 排列接收到的地震波不是纯粹意义上的折射波, 估算该干涉带长度一般为震源脉冲两三个波长之内, 在排列上也就影响几道, 对地震勘探影响不大。

对于低速层界面下其他地层产生一次反射波与折射波的干涉目前讨论很少, 而恰是这类干涉对地震数据的影响更大些。

下面分析多次反射折射波和排列接收到的下覆高速地层的一次反射波之间的干涉关系。据图 2 所示, 可以得出如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{2h_1}{v_1 \cos \beta} + \frac{2h_2}{v_2 \cos \gamma} = t, \\ 2h_1 \tan \beta + 2h_2 \tan \gamma = \sqrt{x^2+d^2}, \\ \frac{v_1}{\sin \beta} = \frac{v_2}{\sin \gamma} = v_\alpha. \end{cases} \quad (19)$$

式中, v_α 为波在介质中传播的视速度。从式(19)可以推导出

$$t_{MC'M'} = \frac{\frac{2h_2}{v_2}}{\cos \gamma} = \frac{\frac{\sqrt{x^2+d^2}}{v_\alpha} v_\alpha^2 - t v_1^2}{v_2^2 - v_1^2} = \frac{t_\alpha \left(\frac{v_\alpha}{v_1}\right)^2 - t}{\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 - 1} =$$

$$\frac{t_\alpha (1/\sin \beta)^2 - t}{(v_2/v_1)^2 - 1}. \quad (20)$$

式中, t 为射线 $OMC'M'B$ 的旅行时; $t_{MC'M'}$ 为反射波在下覆高速层中的传播时间; t_α 为波沿接收排列以视速度传播的旅行时。式(20)表达了地震波在下覆均匀介质中走时 $t_{MC'M'}$ 和下覆介质速度 v_2 间的关系。如果被视为多次反射折射波的到达时, 即反射波和折射波发生干涉时, 则波在下覆介质中的走时 $t_{MC'M'}$ 和下覆介质速度 v_2 必定满足式(20)。地震勘探实践表明下覆高速地层一般为垂向非均匀介质^[3], 为适应垂向非均匀介质的速度特征, 公式(19)中 v_2 应被修改为射线平均速度, 可由下式定义:

$$v_2 = v(p, t_{MC'M'}) = \frac{\int_{h_1}^z \frac{dz}{\sqrt{1-p^2 v^2(z)}}}{\int_{h_1}^z \frac{dz}{v(z) \sqrt{1-p^2 v^2(z)}}}. \quad (21)$$

其中

$$p = \sin \beta(z)/v(z).$$

式中, p 为射线参数, 为入射角 β 的函数^[3]。

由此式(20)更具有普遍意义, 从而反射波和多次折射波干涉现象也更具有普遍意义。

5 多次反射折射波对地震数据处理的影响

5.1 对振幅处理的影响

地震数据处理中振幅处理方法是否正确, 成为各种振幅属性反演方法成功的关键^[7]。根据振幅

处理理论,振幅补偿是相关振幅处理技术的基础。地震波振幅随着波传播距离的增加而衰减,高频成分比低频成分衰减得快,导致地震勘探分辨率降低,尤其在南方碳酸盐岩山区、西北地区山前带以及沙漠地区,由于地表与地下地质条件呈现复杂的特征,地下储层有效反射信号一般都很微弱,从而振幅补偿在上述地区地震数据的处理中比较关键。几何扩散补偿为各种振幅补偿方法的理论基础^[8],具体算法如下式所示:

$$\begin{cases} e(t_i) = \exp\left(\sum_{j=0}^k a_j t^j(i)\right), \\ \varepsilon = \sum_{i=0}^n [\ln e(t_i) - \ln w(t_i)]^2. \end{cases} \quad (22)$$

式中, $t(i)$ 为计算时窗中点时间; $w(t_i)$ 为各时窗能量; $e(t_i)$ 为拟合后各时窗能量; ε 为最小平方误差; a_j 为待计算的多项式系数。具体算法步骤为:首先在地震道上计算各个时窗内的均方根振幅及其平均值,得到均方根振幅变化曲线,然后通过多项式对指数曲线进行低频分量拟合,在最小平方误差 ε 意义下,求出各多项式系数 a_j ,从而计算得到各道的补偿曲线。

进行振幅补偿,理论上为补偿有效反射波振幅,各时窗内的均方根振幅及平均值计算的应该是反射波的振幅值,而当记录中存在多次反射折射波时,由式(16)计算得到当排列上接收点位置固定不变时,即炮检距不变时,检波器接收到的第 $n+1$ 次反射折射波和 n 次反射折射波振幅比值为

$$\begin{aligned} \eta &= A_{n+1}/A_n = W_{n+1}/W_n = (n+1)n^{-1} \times \\ &(x^2 + d^2 - 2nh_1 \tan\theta)^{1/4} \times \\ &(x^2 + d^2 - 2(n+1)h_1 \tan\theta)^{1/2} \times \\ &(x^2 + d^2 - 2(n+2)h_1 \tan\theta)^{-3/4}. \end{aligned} \quad (23)$$

若记

$$f(n) = \sqrt{x^2 + d^2 - 2(n+2)h_1 \tan\theta},$$

则 $f(n)$ 是 n 的单调递减函数,式(23)中 $(n+1)/n$ 又大于 1,从而

$$\eta > 1. \quad (24)$$

式(24)表明对于固定炮检距而言,接收到的 $n+1$ 次折射波的振幅值比 n 次折射波的振幅值要大,这是一个出乎意料的结论,一般直觉上折射波只会越来越弱,但理论上分析, n 次折射波的折射路径要比 $n+1$ 次折射波的折射路径要长,从而其能量发散也大,其结果就是式(24)表示的结论。

图 5 为南方山地地震记录,发育两次折射波。图中方框明显地显示二次折射波振幅比一次折射波

振幅在每一道上都要强一些,从而验证了文中的推论。在多次折射发育的地区式(22)计算的是多次反射折射波的振幅值,这样将不能得到有效波的补偿函数,严重影响振幅补偿效果。

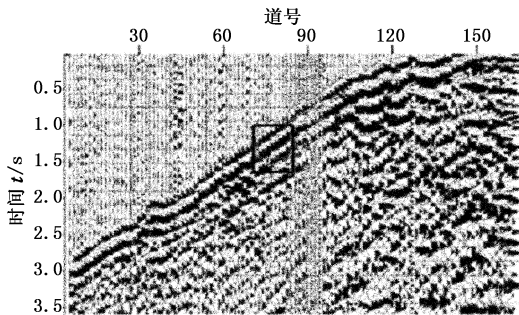


图 5 南方山地原始记录上折射波振幅图

Fig. 5 Amplitude of refraction waves in southern mountain record

5.2 对反褶积效果的影响

勘探工区普遍发育多次反射折射波线性噪声时,其对地震数据反褶积效果的影响值得研究。在时间域进行研究过于复杂,因为涉及到线性噪声对反褶积求取子波因子的影响,需要分析其与地层反射系数间的关系^[9],导致复杂的矩阵运算,而从频率域分析则可以简单明了地分析其影响。

噪声为白噪声时,地震记录 $x(t)$ 可表示为子波 $b(t)$ 与反射系数 $\xi(t)$ 的褶积与随机噪声 $n(t)$ 之和,即

$$x(t) = b(t) * \xi(t) + n(t).$$

在反射系数序列为白噪声时,子波振幅谱为

$$a_b(\omega) = \frac{a_{x(\omega)} - n_0}{\xi_0}. \quad (25)$$

式(25)显示子波的振幅谱与地震数据的振幅谱呈线性关系,所以理论上可以由地震数据的振幅谱得到子波的振幅谱^[10],而地震记录上发育多次折射波 $r(t)$ 时,有

$$x(t) = b(t) * \xi(t) + r(t).$$

子波的振幅谱为

$$a_{b(\omega)} = \frac{a_{x(\omega)} - a_{r(\omega)}}{\xi_0}. \quad (26)$$

根据 Osvaldo 的研究^[11],有

$$\begin{cases} |sd(\omega)|^2 + |n(\omega)|^2 = |s(\omega)|^2 + |nd(\omega)|^2, \\ |sd(\omega)|^2 + |nd(\omega)|^2 = k. \end{cases} \quad (27)$$

式中, $s(\omega)$ 、 $sd(\omega)$ 、 $n(\omega)$ 、 $nd(\omega)$ 分别为反射率函数 $\xi(t)$ 的自相关、反褶积后地震道的自相关、噪声 $r(t)$ 的自相关、噪声反褶积后自相关在频率域中的

形式。式(27) 表明只有非白噪声的频谱与输入信号频谱成比例,反褶积的效果才是理想的。

图6 为图1 所示单炮频谱(左图) 和多次折射波频谱(右图) 的比较。由图6 可以看出,由于浅层激发多次折射波频谱中其峰值频率和能量分布与有效波频谱有较大差异,导致其频谱与单炮频谱不成线性比例关系,如式(26) 所示,由此当存在多次折射噪声时,根据频谱确定的自相关特征是不可靠的,常规的反褶积算法无法在含有多次反射折射波的记录上准确求出反褶积因子。

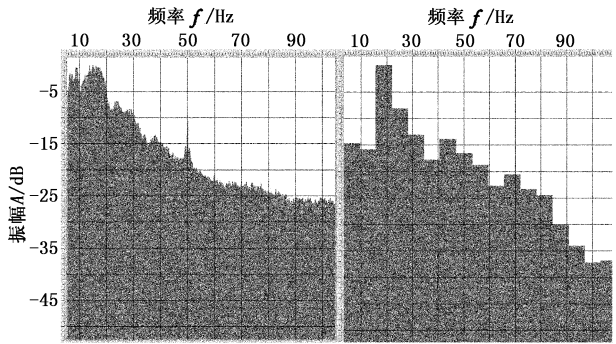


图6 单炮和多次折射波频谱比较

Fig.6 Frequency spectrum comparison between original shot and refraction waves

6 多次反射折射波的衰减

本文中用特征向量滤波方法来衰减三维炮集记录上的多次折射干扰波。特征向量滤波方法原理^[12] 为通过对地震数据矩阵进行KL变换分解成一组特征分量,有关噪声分量的特征分量在地震数据矩阵重建过程中可以被有选择性滤掉,实现有关噪声数据的衰减和去除。

对地震数据而言,KL变换指的是在信号处理过程中,CMP道集数据表示为矩阵 $X_{ij}, i = 1, 2, \dots, n$ 为地震道, $j = 1, 2, \dots, m$ 为样点,其均值为0,则有半正定对称协方差矩阵

$$C = XX^T.$$

矩阵C 中,道集数据中相干有效信号集中分布在C 的前几个较大特征值所对应的主分量上,而小特征值对应的分量视为噪声。如果矩阵C 的特征值所对应的特征向量为N 阶矩阵 K_j ,则地震数据矩阵 X_j 的KL变换Y 为

$$Y = K^T X.$$

如前所述,若对地震数据矩阵应用前k 个较大的特征值所对应的主分量进行重构,重构后的去噪地震数据矩阵 $Z^{[12]}$ 可以表示为

$$Z = K^T Y =$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1k} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{k1} & y_{k2} & \cdots & y_{km} \end{bmatrix}.$$

该方法在实际应用中比较重要的是选择前k 个较大的特征值,应首先对相关数据进行分析,只要选择好合适的特征值,小特征值对应的地震噪声就可以得到衰减,从而提高地震数据的信噪比。具体到多次波的衰减,通过KL变换只要去掉对应多次波的有关特征向量,即可以达到衰减多次波的目的^[13]。

对多次反射折射波而言,该类干扰在CMP道集上表现为多次波,可以考虑采用特征向量滤波方法来去除此类能量强、延续时间长的干扰。具体处理过程中关键在于用折射层速度在做过静校正的CMP道集上把多次折射波同相轴拉平,然后在相关时窗上减去包含有关多次折射的特征向量,衰减多次折射噪声。其实现流程如图7 所示。

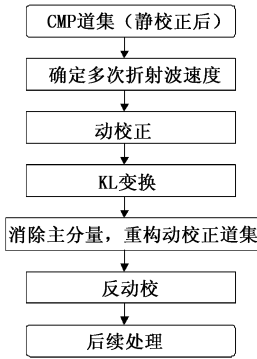


图7 特征向量滤波法衰减多次折射干扰流程图

Fig.7 Flowchart of multiple refractions attenuated by Eigenvector filter method

图8 为南方山地某单炮原始数据与用特征向量滤波方法衰减多次折射波后的数据对比。在左图的原始单炮记录上显示多次反射折射波发育,在右图的衰减多次折射后的记录中显示多次折射干扰明显得到了衰减,单炮上信噪比得到了提高,为后续的处理如振幅补偿、反褶积、速度分析和成像打下了良好的基础。

图9 为多次反射折射波衰减前(上图) 后(下图) 叠加剖面对比,从图中看出:未去除多次折射波前,浅层有效反射同相轴由于受多次折射的影响模糊不连续,并且上冲构造细节交代的不清楚;衰减多次反射折射后,浅层同相轴得到补偿后自然连续能量强,上冲构造细节成像很清楚。可见,衰减多次反射折射波干扰对相关探区高分辨率成像是十分必要的。

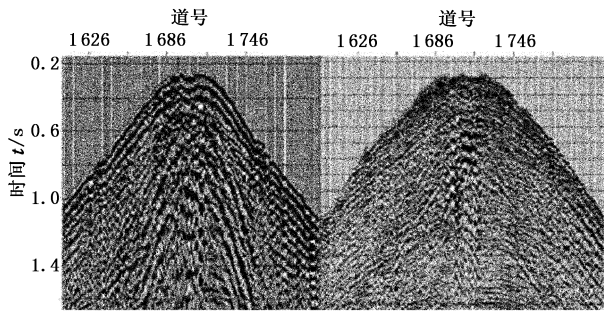


图 8 原始单炮与衰减多次折射后单炮对比
Fig.8 Comparison between records before and after multiple refractions attenuation

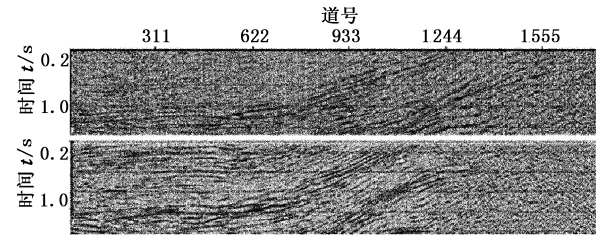


图 9 衰减多次折射波前后叠加剖面对比
Fig.9 Comparison between stack profiles before and after multiple refractions attenuation

7 结束语

本文通过公式推导着重分析了陆地多次反射折射波性质,包括其运动学性质和动力学性质,研究了多次折射和反射波之间的干涉现象,同时结合数字信号处理理论,指出多次反射折射波干扰的发育会严重影响地震数据品质,在数据处理振幅补偿和反褶积环节出现误差,进而影响地下构造体的正确成像。用特征向量滤波方法对实际资料进行了处理,验证了特征向量滤波方法消除多次折射的适用性。

参考文献:

[1] 朱铨. 中国南方海相油气区地震勘探中的问题与对策[J]. 勘探地球物理进展,2008,31(5),318-320.

ZHU Xuan. Problems of seismic exploration for marine hydrocarbon reservoirs in southern China and some countermeasures [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008,31(5):318-320.

[2] 李庆忠. 论地震次生干扰[J]. 石油地球物理勘探, 1983,18(4):296-297.

LI Qing-zhong. On seismic secondary noises[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1983,18(4):296-297.

[3] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:石油大学出版社, 2006.

[4] SHERIFF L R E, GELDART L P. Exploration seismology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 261-263.

[5] BREKHOVSKIKH L M. Waves in layered media[M]. New York:Academic Press,1960.

[6] RAVINDRA V Cerveny. Theory of seismic head waves [M]. Toronto: University of Toronto Press,1971.

[7] TURHAN Taner. Multi-component edge detection algorithm[R]. Houston: Rock Solid Images,1999.

[8] 凌云,高军. 时频空间域球面发散与吸收补偿[J]. 石油地球物理勘探, 2005,40(2):176-177.

LING Yun, GAO Jun. Compensation for spherical dispersion and absorption in time frequency spaced domain[J]. Oil Geophysical Prospecting,2005,40(2):176-177.

[9] 李振春. 地震数据处理方法[M]. 东营:中国石油大学出版社,2004:70-76.

[10] YILMAZ O Z. Seismic data analysis[M]. Tulsa:Society of Exploration Geophysicists,2001.

[11] Osvaldo de Oliveira Duarte. Predictive deconvolution with additive noise [J]. SEG Expanded Abstracts, 1992,11:1149-1151.

[12] HEMON C H, MACE D. Use of the Karhunen Loeve transformation in seismic data processing[J]. Geophysical Prospecting,1978,26:600-626.

[13] JONES I F. Applications of the Karhunen-Loeve transform in reflection seismic processing[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1985.

(编辑 修荣荣)