

地表一致性稳健反褶积技术及应用

徐伟* 丁吉丰 朱玉宝 郭帅

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

摘要 松辽盆地徐家围子断陷深层沙河子组精细层序划分对地震资料纵向分辨率提出了更高要求; 地表一致反褶积是叠前提高地震资料分辨率的重要手段。在反褶积地表一致性分解过程中, 引入自适应加权方法, 使得分解方法更为稳健, 计算效率更高。即使地震记录存在非地表一致性噪音情况下, 分解结果的误差较小。可以得到较为理想的反褶积效果。本文以徐家围子断陷深层高密度地震资料为例, 应用地表一致性稳健反褶积技术, 提高深层地震资料纵向分辨率的同时, 压制了异常噪音, 地震记录的一致性更好。

关键词 反褶积 地表一致性 稳健 异常噪音

0 引言

大庆油田徐家围子断陷深层天然气勘探不断深化, 针对沙河子组精细层序划分要求越来越高, 因此对地震资料纵向分辨率提出了更高要求。随着深层勘探两宽一高地震资料的采集, 如何提高两宽一高地震资料深层地震分辨率, 是地震处理工作的重点。两宽一高地震资料是指宽方位、宽频带和高密度采集的地震资料^[1]。针对深层两宽一高地震资料处理主要有以下难点: 油田区干扰源较多, 原始资料存在异常噪音。二是深层天然气储层埋藏深, 构造复杂^[2], 深层地震反射能量弱。

在地震数据处理中, 叠前反褶积技术是提高地震资料分辨率的重要手段。1981年Taner和Koehler将反褶积近似为地表一致性谱分解形式^[3]。在这种形式中, 地震道分解为震源、接收器、偏移距和地层脉冲响应影响的褶积, 可清楚地说明由于地表震源条件、地表检波器条件以及震源—检波器间距对子波形态变化的影响。地震道分解后进行反滤波以恢复地层脉冲响应。地表一致性的假设意味着基本子波形态只决定于震源和检波器位置, 而不决定于震源到反射层到检波器的具体射线路径^[4]。1993年俞朋寿提出的一种新型宽带雷克子波, 它具有主瓣窄、旁瓣幅度小、波形简单、振幅谱光滑连续等特点^[5]。1997年张昌君等在二维地震资料上应用地表一致性反褶积, 并取得了较好效果^[6]。2006年王西文等利用地表一致性反褶积与相位反褶积组合技术, 在沙漠资料处理中取得效果^[8]。2011年在徐家围子连片资料处理中, 裴江云等利用子波整形与地表一致性反褶积技术, 使得连片地震资料一致性统

一, 频带拓宽^[9]。2016年郭念民应用稳健地表一致性反褶积技术在碳酸盐岩储层单点高密度采集的三维地震勘探中发挥重要作用^[10]。

1 地表一致性稳健反褶积

1.1 地表一致性稳健反褶积特点与实现流程

大部分陆地数据普遍存在由非地表一致性引起的噪声, 例如地滚波或零星的突发噪音。传统上地表一致的分解是使用最小二乘法进行的, 异常噪声造成的误差分布不是高斯分布。事实上, 在大多数实际数据分析中, 这些异常噪音值会影响地表一致性迭代分解, 因此分解的结果往往存在误差。这破坏了算子设计, 从而降低了反褶积效果。即使不考虑分解是否产生多解性, 分解后的谱应该遵循严格的地表一致性模型, 不能代表突发性异常噪声。因此传统的地表一致性反褶积没有潜力抑制噪音。地表一致性稳健反褶积主要特性有两点:

稳健的求解程序: 地表一致分解基于一个统计稳健的L1/L2求解程序, 即使存在由异常噪声引起的强异常振幅时也能给出正确结果。

稳健的应用: 在实际反褶积过程中, 通过实际数据能量谱与模型能量谱比较, 利用残差谱设计额外的反褶积算子, 应用于异常道减小噪音。

地表一致性稳健反褶积实现流程主要有三步:

(1) 对所有地震道进分析和估算, 产生对数形式的能量谱;

(2) 地震道分析结束后, 用最小二乘方法来解矩阵, 得到炮点项、检波点项、CMP项、偏移距项的各个分量对数谱。

(3) 所有地震道分解后的分量谱, 炮点项、

检波点项、CMP 项、偏移距项被应用到正常反褶积算子的设计中,将得到的算子应用于地震道,完成反褶积。

2.2 地表一致性稳健反褶积原理

根据反褶积及维纳反褶积理论^[11-13],地表一致性反褶积理论模型认为地震道的能量谱可以表示为分量谱的乘积:

$$P(\text{trace}) = P(\text{src}) * P(\text{det}) * P(\text{cmp}) * P(\text{offset}) * Pg \quad (1)$$

其中, $P(\text{src})$ 、 $P(\text{det})$ 、 $P(\text{cmp})$ 、 $P(\text{offset})$, 分别表示炮点、检波点、CMP 和偏移距分量; g 为全局分量; 假设所有分量都是正值, 对 (1) 式两边取对数运算^[14], 则有:

$$L(\text{trace}) = L(\text{src}) + L(\text{det}) + L(\text{cmp}) + L(\text{offset}) + Lg \quad (2)$$

方程 (2) 写成右手侧形式

$$s(\text{src}) + t(\text{det}) + u(\text{cmp}) + v(\text{offset}) + g = \text{Spectrum}(\text{trace}) \quad (3)$$

把所有炮点项合并成一个公共矢量形式:

$$s = \begin{bmatrix} s(\text{scr}) \\ \vdots \end{bmatrix}, \text{ 同样把检波点项、CMP 项、偏移距项、都可以写成矢量形式; } t = \begin{bmatrix} t(\text{det}) \\ \vdots \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u(\text{cmp}) \\ \vdots \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v(\text{offset}) \\ \vdots \end{bmatrix}; \text{ 全局项 } g \text{ 也是一个矢量, 把这些矢量合成一个, 则有: } x = \begin{bmatrix} s \\ t \\ u \\ v \\ g \end{bmatrix}$$

对于等式右令 $b = \begin{bmatrix} \text{spectrum}(\text{trace}) \\ \vdots \end{bmatrix}$, 那么方程 (3) 可以写成

$$Mx = b \quad (4)$$

矩阵 M 是一个巨大稀疏矩阵, 对于每一个分析的地震道 $N=dx$, 有 5 个非零系数: 显然所有 M 的非零系数是唯一的, 通常 M 的行数多于列数, 但由于地表一致性分解的不确定性, 它的行数比它的列数小, 因此方程 (4) 是超定和可约束的。

传统的最小二乘法将 b 视为独立的观测值, 并寻找解向量 x^s , 使最小化 RMS 误差 $E = \|Mx_0 - b\|$, 其中 $\| \cdot \|$ 表示欧几里德范数。

$$E^2 = \sum_i (\sum_j M_{i,j} x_j - b_i)^2 = \min \quad (5)$$

一般来说, 我们用非负权系数 w_i 反应观测

值 b_i 的可知性, 那么议程引入权系数后可以得到加权最小二乘准则

$$E^2 = \sum_i w_i (\sum_j M_{i,j} x_j - b_i)^2 = \min \quad (6)$$

最小值的一个必要条件是所有偏导数为零,

即:

$$\frac{\partial(E^2)}{\partial x_j} (x^s) = 0 \quad (7)$$

易得出

$$M^t W M x = M^t W b \quad (8)$$

$$\text{其中 } W = \begin{bmatrix} w_1 & & \\ & \ddots & \\ & & w_N \end{bmatrix}, t \text{ 为矩阵变换}$$

有许多统计上的稳健的方法, 其中最重要的是最小化欧几里德范数。向量 X 的加权 L_p 族^[15]表示如下:

$$L_p(x) = \|x\|_p = (\sum_1^N w_i x_i^p)^{1/p} \quad (9)$$

且 L_p 方法使得范数 $\|Mx - b\|_p$ 最小。

对于特殊情况 $p=2$, 上式变为最小二乘方程 (4), 并且 L_1 求取最小化残差的绝对值之和。并不是所有 L_p (除了 L_2) 可以避免线性正交问题, 因此可能会出现相当大的计算开销。基于加权 L_2 的自适应重加权^[16]是一个较好的方法, 它可以非常接近 L_1 求解器:

符合条件的一种稳健方法是 α 修正平均, 对于地表一致分解再加权函数可以表示为:

$$w_i^{k+1} = w_i^0 \cdot \left(\max \left(\frac{(\sum_j M_{i,j} x_j - b_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^N w_i^k}{\delta \cdot \sum_{i=1}^N w_i^k (\sum_j M_{i,j} x_j - b_i)^2}, 1 \right) \right)^{-\alpha} \quad (10)$$

当 $\alpha=0$ 且 δ 为任意值时, 上式可以得到 L_2 加权;

当 α 较小 (0.2 ... 0.7) 且 δ 也较小 (0 ... 0.1) 时, 上式近似于传统 L_1 求解器;

当 $\alpha=0.8 \dots 1.2$ 且 $\delta=1.5 \dots 2.5$ 时, 求解器运行高效的混合 L_1/L_2 策略;

当 $\alpha>6$ 且 $\delta>4$ 时就是阿尔法修正平均结果。

部分百分比数据被拒绝, 其余部分保持不变。混合 L_1/L_2 方法^[16]能很好地进行再加权。该程序安排 L_2 迭代中所有方程权重的自适应变化。这个设置确保了在最后阶段的算法是一个具有固定权重的 L_2 方法。利用 α 修正平均重新加权函数, 可以对一些现有的稳健策略产生良好的近似, 如 L_1 、混

合 L1/L2 和 α 微调。测试显示, L1/L2 比 L1 和 α 微调都要优越。

使用这种技术,地震道模型误差谱被降低到期望的分贝,而异常值地震道对误差分布的贡献,并没有显著增加,可以更好地降低强噪声对求解结果的影响。

除此之外,实际地震记录中存在异常振幅,将地表一致性稳健反褶积模型道的对数能量谱与实际地震道的对数能量谱进行对比,即:模型道和地震道的对数能量谱差值

当超过一定阈值时,利用频谱差值设计额外的反褶积算子,应用到异常的地震道上,达到减弱高振幅噪声。

在计算性能方面,稳健地表一致性反褶积对大数据的计算能力远高于常规反褶积方法,在亿级道数的工区,不需要分块计算,求解速度更快。

2 实际地震资料应用效果分析

YX 三维高密度地震数据,为中浅层兼顾深层采集,满覆盖面积 190.17 km²,工区地表主要为农田、部分为碱地。地面海拔高度为 145-225m。工区分布村庄乡镇较多,国道公路穿过工区东北部,存在噪音干扰源。

地震采集的单炮数据,经过去噪、能量补偿后进行地表一致性反褶积处理。首先对工区所有单炮记录进行频谱分析估算,其次对所产生的频谱进行地表一致性稳健加权分解,产生各个分量谱。最后设计算子、步长等参数,应用于地震道上完成反褶积。从图 1 为反褶积前后单炮记录图。图 1a 是未做反褶积单炮记录,图 1b 是常规地表一致性反褶积后单炮记录,图 1c 是地表一致性稳健反褶积单炮记录;从图对比来看,经过反褶积处理后,地震记录频率提高。应用地表一致性稳健反褶积单炮记录(图 1c)与常规地表一致性单炮记录(图 1b)相比,异常噪音压制较好,强振幅噪音得到压制,弱振幅道能量得到加强。炮记录整体能量一致性较好。除了单炮上地表一致性稳健反褶积表现出较好的稳定性,在地震剖面上,相对信噪比也要比传统地表一致性反褶积要好。图 2 为反褶积前后叠加剖面对比,图 2(a)为未做反褶积叠加剖面,图 2(b)为地表一致性反褶积叠加剖面,图 2(c)为地表一致性稳健反褶积叠加剖面;图 2(c)中 CMP1417 处的强振幅异常噪音得到很好压制,而地表一致性反褶积剖面上的异常噪音并没有消失。此外,剖面横向能量一致性方面,地表一致性稳健反褶积也比地表一致性更均衡。

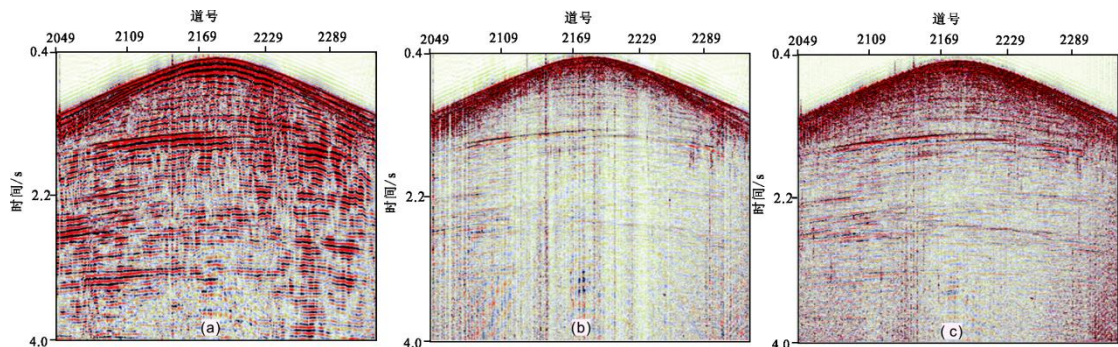


图 1 反褶积前后单炮记录

(a) 为未做反褶积叠单炮记录 (b) 为地表一致性反褶积单炮记录 (c) 为地表一致性稳健反褶积单炮记录

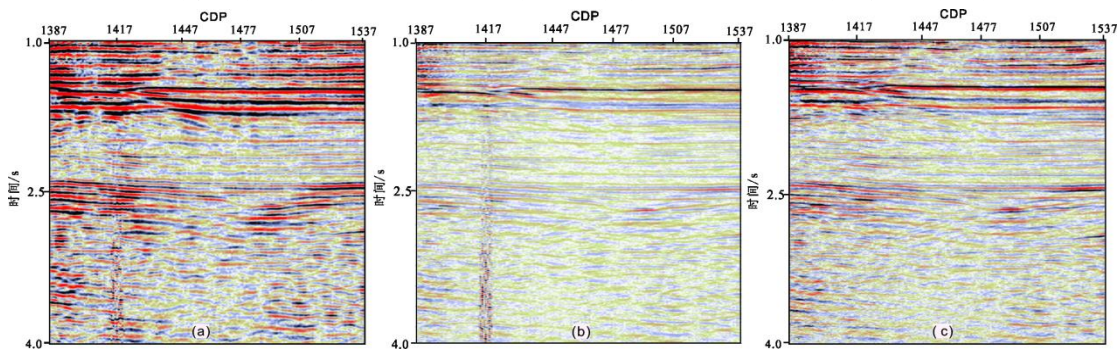


图 2 反褶积前后叠加剖面

(a) 为未做反褶积叠剖面 (b) 为地表一致性反褶积叠剖面 (c) 为地表一致性稳健反褶积叠剖面

本次研究的目的是沙河子组地震反射层，目的层段时间范围是 1.8s-3.2s，对反褶积前后叠加剖面目的层进行频谱分析，其频谱图如图 3 所示。黑色表示未做反褶积叠加剖面目的层频谱，蓝色表示地表一致性反褶积叠加剖面目的层频谱，

红色表示地表一致性稳健反褶积叠加剖面目的层频谱。经过反褶积处理后目的层频谱得到拓宽，-20dB 时，地表一致性稳健反褶积最高频率约为 42Hz，地表一致性反褶积最高频率约为 41Hz 拓频能力基本相当。

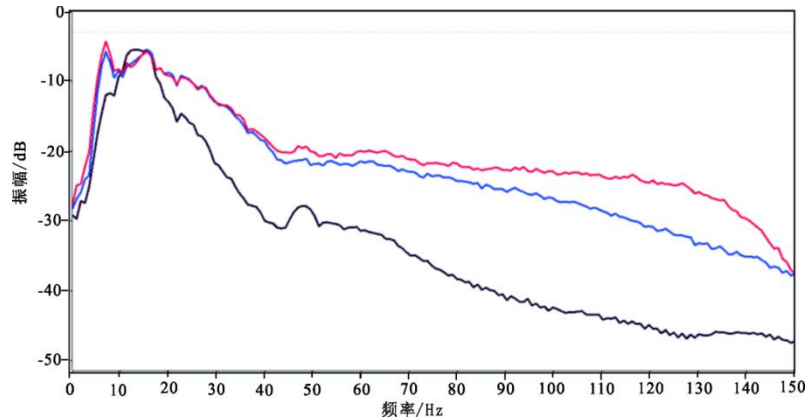


图 3 反褶积前后叠加剖面目的层频谱

黑色为未做反褶积的频谱；蓝色地表一致性反褶积频谱；红色地表一致性稳健反褶积频谱

3 结论

地表一致性反稳健褶积，通过对频谱分解求解过程自适应加权，得到更稳健的求解方程，减少了异常噪音对结果的影响。对比常规地表一致性反褶积，稳健反褶积方法更好地消除激发和接收因素的差异，改善了地表一致性的处理质量。地表一致性稳健反褶积压缩地震子波、子波空变特征减弱、高频噪声削弱、信号有效频带拓宽，提高了高密度地震资料的垂向分辨能力。为后续沙河子组层序精细划分提供基础资料。

参考文献

- [1] 张丽艳, 李昂, 于常青. 低频可控震源“两宽一高”地震勘探的应用. 石油地球物理勘探, 2017, 52(6): 1236-1245
- [2] 刘学锋, 钟广法, 王正允等. 松辽盆地北部徐家围子断陷构造格局及其成因. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(4): 6-10
- [3] Taner, M. T., and Koehler, F. Surface consistent corrections. Geophysics, 1981, 46: 17-22
- [4] 渥. 伊尔马滋. 地震数据处理. 石油工业出版社, 1994
- [5] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探. 石油工业出版社, 1993

- [6] 张昌君, 罗晓微. 四分量地表一致性反褶积. 石油物探, 1997, 36(增刊): 63-66
- [7] 李英才. 地表一致性俞氏子波反褶积. 石油物探, 1997,
- [8] 王西文, 胡自多, 田彦灿等. 地震子波处理的二步法反褶积方法研究. 地球物理学报, 2006, 21(4): 1167-1179
- [9] 裴江云, 张丽艳, 王丽娜等. 松辽盆地深层地震资料叠前时间偏移连片处理技术研究. 地球物理学报, 2011, 54(2): 294-303
- [10] 郭念民, 陈猛, 崔永福等. 碳酸盐岩储层单点高密度采集三维地震勘探实例. 石油物探, 2016, 55(6): 771-780
- [11] Claerbout, J. F. Fundamentals of geophysical data processing. McGraw-Hill Book Co. 1976
- [12] 李庆忠. 走向精确勘探的道路. 石油工业出版社, 1994
- [13] Levin, S. A. Surface-consistent deconvolution. Geophysics, 1989, 54, 1123-1133
- [14] Cambois, G. and Stoffa, P. L. Surface-consistent deconvolution in the log-Fourier domain. Geophysics, 1992, 57, 823-840
- [15] Kirchheimer, F., Ferber R. Robust surface consistent deconvolution with noise suppression. 71th Ann. Meetg. SEG, San Antonio, 2011
- [16] Bube K. P. and Langan R. T. Hybrid L1/L2 minimization with applications to tomography, Geophysics, 1997, 62, 1183-1195