

地震信号谐波提频技术在辫状河砂体精细识别的应用

韦红, 白清云, 孙佳林, 张鹏志, 孟云涛

Application of Seismic Signal Harmonic Frequency Enhancement Technology for Fine Identification of Braided River Sand Bodies

WEI Hong, BAI Qingyun, SUN Jialin, ZHANG Pengzhi, and MENG Yuntao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.176>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

曲波域不规则地震数据提高分辨率技术研究

A Method for Enhancing Resolution of Irregular Seismic Data in Curvelet Domain

CT理论与应用研究. 2017, 26(6): 707–713

基于地震属性优化组合微断裂识别技术及应用

Micro-faults Identification Technology Based on Seismic Attribute Optimizational Analysis

CT理论与应用研究. 2017, 26(5): 565–574

基于EMD,EEMD与CEEMD的信号时频分析技术对比研究

Comparative Study of Signal Time–Frequency Analysis Techniques Based on EMD,EEMD and CEEMD

CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 417–426

基于解析信号重构的同步挤压小波变换的时频谱影响因素分析

Analysis of the Influence Factors on the Time–Frequency Spectrum Obtained by Synchrosqueezing Wavelet Transform based on Reconstruction of Analytic Signal

CT理论与应用研究. 2017, 26(3): 267–278

基于地震多属性融合的断层识别与评价——以塔里木盆地SHB地区碳酸盐岩缝洞型储层为例

Fault Detection and Evaluation Based on Fusion of Multiple Seismic Attributes——An Example of Fractured and Vuggy Carbonate Formation in SHB Area,Tarimu Basin

CT理论与应用研究. 2021, 30(1): 35–48

地震资料精细处理技术在神狐海域研究区的应用

The Application of Accurate Seismic Processing in Shenhu Area

CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 427–437



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韦红, 白清云, 孙佳林, 等. 地震信号谐波提频技术在辫状河砂体精细识别的应用[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(5): 577–584. DOI:10.15953/j.ctta.2023.176.

WEI H, BAI Q Y, SUN J L, et al. Application of Seismic Signal Harmonic Frequency Enhancement Technology for Fine Identification of Braided River Sand Bodies[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(5): 577–584. DOI:10.15953/j.ctta.2023.176. (in Chinese).

地震信号谐波提频技术在辫状河砂体精细识别的应用

韦红[✉], 白清云, 孙佳林, 张鹏志, 孟云涛

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459

摘要: 渤海许多油田目前处于高含水低采收率阶段, 亟需对油田的潜力进行深入研究, 维持稳产。其中渤海 B 油田经过 20 年的定向井开发, 一套层系合采强注, 层间干扰严重, 对剩余油的挖潜存在困难。由于现有地震资料分辨率有限, 无法识别辫状河复合砂体内部的储层结构, 包括隔夹层和薄砂体的纵、横向展布, 因此目前主要采用定向井开发。本次提出地震信号谐波提频技术, 使用地震数据中的基波信号预测谐波、次谐波信号, 再将所有谐波信号叠加到原地震数据中, 以拓展高频端和低频端地震信号, 达到提频目的。该方法突破传统褶积模型的限制, 不再需要估计地震子波、无需假设地层反射系数稀疏、无需井信息等等, 减少人为主观因素。通过动静态信息验证, 能有效精细识别辫状河砂体内部结构, 指导定向井改为水平井开发, 避免层间干扰, 有效助力高效开采剩余油。

关键词: 地震信号; 谐波; 辫状河砂体; 分辨率

DOI:10.15953/j.ctta.2023.176

中图分类号: P 315; P 631.4

文献标识码: A

渤海油田的不断开发, 许多油田已处于开发中后期, 存在高含水低采收率的特点, 剩余油的挖潜思路需要转变。以渤海 B 油田辫状河砂体的剩余油挖潜为例, 由于主力油层发育辫状河砂体, 整体呈薄互层发育, 其中单砂体厚度普遍约 5 m, 横向变化快, 隔夹层发育。由于现有地震资料分辨率有限, 无法识别辫状河复合砂体内部的隔夹层或薄单砂体的厚度, 单砂体的纵向期次和横向展布情况不明确, 因此无法使用水平井进行剩余油的高效开发, 而定向井受层间干扰严重, 水淹复杂, 剩余油挖掘效率低, 成本高。实钻表明同批次无隔夹层的井底部水淹很快, 有隔夹层的井水淹程度低, 因此准确识别隔夹层, 在隔夹层上方部署水平井挖掘剩余油是现阶段的重要挖潜方向之一, 即提高地震分辨率, 准确识别隔夹层的纵、横向展布。

提高地震分辨率处理有许多手段, 包括叠前和叠后处理, 叠前高分辨率处理主要是去噪音和保真, 叠后高分辨率处理主要增强小尺度地质体的识别能力。因此本次主要对叠后提高地震分辨率进行调研, 地球物理工作者经过许多尝试, 并在实际生产中取得一定成效。例如, 步进迭代法测井与井旁地震资料匹配处理, 匹配后的反射系数与高频地震子波褶积, 形成拟井间地震记录, 用于联合拓频, 有效地提高了地震资料分辨率^[1]。

利用傅里叶尺度变换性质对估算出的地震子波进行变换, 得到更高频率的地震子波, 再利用反演得到的滤波因子实现对地震资料的提高分辨率处理, 用于识别小断层和隐蔽薄层^[2]。在 Gabor 时频变换的基础上, 引入倒频谱, 在时频域对振幅谱进行对数改造, 保持相位谱不变, 同时采用平滑处理以补偿低频成分, 联合实现高分辨率处理, 识别薄层^[3]。将 Gabor 反褶积与蓝色滤波两种技术融合, 将蓝谱作为期望输出, 实现地震记录的拓频处理, 效果优于常规反褶积^[4]。

基于谱反演的谱蓝化拓频方法在稀疏约束下充分压缩子波影响, 拓宽地震的低频和低频信息, 利用井上反射系数的有色项, 提高地震资料的分辨率, 提高叠置砂体可描述性^[5]。采用相对保幅拓频处理分别得到高频和低频地震数据体, 对高、低频地震数据体逐级进行贝叶斯迭代反演, 获得能够有效识别大、中、小尺度地质体的反演波阻抗数据体, 得到实钻数据的验证^[6]。将地震信号在

Shearlet 域系数进行合理的补偿后, 再做 Shearlet 反变换, 实现对地震资料的提高分辨率处理, 清晰地识别河道^[7]。应用压缩感知拓频技术进行薄砂体的地震识别^[8]。

将无线电领域的频率域“载波调制”理念引入到地震资料处理中, 用基于最大熵谱估计的最小二乘上、下三角阵分解算法, 从低频和高频双向提高分辨率, 用于精细刻画扇三角洲前缘砂体^[9]。应用地质统计学反演方法, 预测薄层砂体的纵向展布^[10]; 应用高分辨率谱反演提频技术, 明确了不同期次河道砂体组合的地震响应特征^[11]。但是这些方法直接或间接地需要估算地震子波, 且提取子波的方法众多^[12-13], 其中地震反演方法计算周期长, 需要采用井约束等, 过程复杂, 主观性强, 不同地球物理人员得到的提频结果差异较大。

本次提出的方法, 具有计算周期短, 无需估算地震子波, 无需井信息, 无反射系数稀疏假设等特点, 在识别薄层取得较好的效果。

1 方法原理

1.1 谐波信号

地震波在地下介质传播时, 高频信号比低频信号吸收衰减更快, 使地震资料的主频特点为低频窄带, 若将地震信号分解到连续小波域, 将致高频信号的小波系数能量变弱, 而本文方法可解决这类问题。地震信号是周期循环的, 据信号的小波变换, 将地震波形分为基波、二次谐波、三次谐波、... (基波频率的整数倍)。

设一信号为 $f(t)$, 其傅立叶变换可写成:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (1)$$

i 是虚数单位, t 是时间, ω 是角频率。将信号从时间域变换到频率域, 并在频率域可求得振幅 A_j 和相位 φ_j :

$$A_j = \sqrt{\operatorname{Re}^2(F(\omega_j)) + \operatorname{Im}^2(F(\omega_j))}, \quad (2)$$

$$\varphi_j = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(\omega_j)}{\operatorname{Re}(\omega_j)}\right), \quad (3)$$

频率域内数值 Im 取值为频谱的虚部, Re 取值为频谱的实部, ω_j 是任意频率。对应的谐波可写成:

$$S_j(t) = A_j \cos(\omega_j + \varphi_j). \quad (4)$$

若式 (4) 为谐波信号的基波, 设二次谐波的频率为 $\omega_k = 2\omega_j$, 公式可写成:

$$S_k(t) = A_k \cos(\omega_k + \varphi_k), \quad (5)$$

用振幅和相位表示信号的公式可写成:

$$f(t) = \Delta\omega \sum A_j \exp(i\varphi_j) \exp(i\omega_j t), \quad (6)$$

展开:

$$f(t) = \Delta\omega \sum A_j (\cos(\varphi_j) \cos(\omega_j t) - \sin(\varphi_j) \sin(\omega_j t) + i \sin(\varphi_j) \cos(\omega_j t) + i \cos(\varphi_j) \sin(\omega_j t)), \quad (7)$$

信号 $f(t)$ 为基波、谐波叠加合成^[14]。

1.2 谐波预测

简单的小波变换不能分析频率相近同时存在的整数的次谐波或非整数的次谐波信号, 因此对原始地震记录应用连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 其变换公式为^[15]:

$$W(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \varphi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad (8)$$

其中, $\varphi(t)$ 为基本小波或母小波^[14], τ 为时间平移参数, s 为尺度伸缩函数, $\varphi^*(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的复共轭, 可以表示为:

$$\varphi(t) = \exp \left(-\frac{t^2 f_m^2 \ln 2}{k} \right) \exp(i 2\pi f_m t), \quad (9)$$

其中, f_m 为峰值频率, k 为常数, 在频率域内公式为:

$$\Psi(f) = \frac{\sqrt{\pi/\ln 2}}{f_m} \exp \left(-k \frac{(f-f_m)}{\ln 2 f_m^2} \right). \quad (10)$$

连续小波变换 (CWT) 将信号从时间域变换到时间尺度域, 将其频率、时间特性同时展现, 其频域能量较集中而且频带窄。再通过逆变换将时间尺度域的信号重构, 变换为时间域信号。CWT 得到地震信号的公式为:

$$\tilde{f}(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{W}(\tau, s) \varphi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) \frac{ds d\tau}{s^2}, \quad (11)$$

地震信号的 S 变换, 也能得到地震信号的频率、时间特性。

将地震信号分为基波信号、谐波信号、次谐波信号等, 再结合实际地震资料频谱特征选取相应的基波预测谐波、次谐波, 再加回原始信号中, 达到提高地震分辨率的目的。

2 提频处理步骤

2.1 提频步骤

首先对地震资料进行连续小波变换或 S 变换, 将时间域单地震道通过频谱分解处理为频率域时频道集显示, 可以观察到时间域相似的不同地质事件在频率域却有着不同的特征频率响应。不同的沉积期, 有着不同的峰值振幅和峰值频率 (主频) 响应 (图 1 (a))。如果寻找到不同厚度地层的特征频率, 以此为依据即可开展提高分辨率处理, 解决薄储层识别的问题。

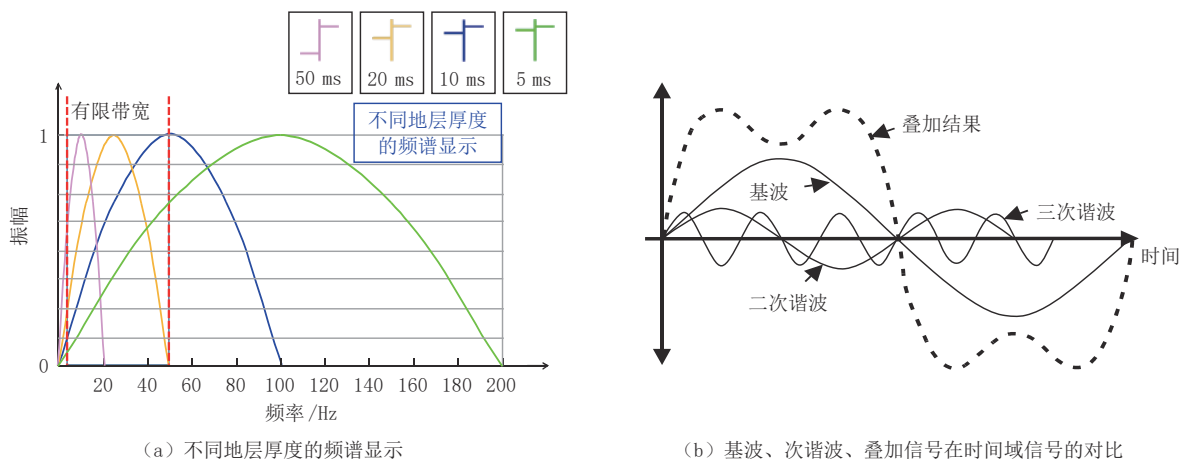


图 1 地震波在频率域和时间域信号特征

Fig.1 Signal characteristics of seismic waves in the frequency and time domains

提取地震资料的时频谱, 再提取其中有效频段的时频谱, 每次提取的时频谱视为一个基波信号, 再计算该基波信号的谐波信号, 再加回基波信号上, 得到叠加后的信号 (图 1 (b)), 再进行反变换。反复对有效频段内的不同的时频谱进行以上同样的步骤, 最终得到拓宽频带的叠加的地震信号^[16]。

由于叠加过程中基波信号, 谐波与次谐波的信号均只与原始地震资料的有效频谱有关系, 因此叠加拓频后的地震资料的波组能量相对关系与原始地震资料的基本一致, 能做到保幅保真。

具体步骤如下:

- (1) 对地震资料进行小波变换或者 S 变换处理, 得到相应时域信号的时频谱。
- (2) 在所得的时频谱中提取有效频段的时频谱, 视为基波信号。
- (3) 有效频段的每一个时频谱视为一个基波信号。
- (4) 对每个基波信号进行谐波信号的计算。
- (5) 将每个相对应的基波信号和谐波信号进行叠加, 得到相应的叠加信号。
- (6) 再重复以上步骤计算次谐波信号和高次谐波信号。
- (7) 将叠加信号进行反变换, 得到拓宽频带的地震信号。

(8) 谐波拓频是有原则的, 既能拓低频也能进行高频扩展。对要处理的原始地震资料进行信号分析, 根据其有效频谱选基准频率, 一般在 2 倍基准频率范围内效果最佳, 也能做到超过 2 倍基准频率, 具体情况视实际地震资料品质和实际地质情况再分析。

2.2 模型试算

采用地震信号的模型试算, 结果与合成地震记录进行对比, 图 2(a) 为反射系数序列, 图 2(b) 是主频为 35 Hz 理论子波的合成地震记录, 图 2(c) 是主频为 70 Hz 理论子波的合成地震记录, 图 2(d) 是主频为 105 Hz 理论子波的合成地震记录。

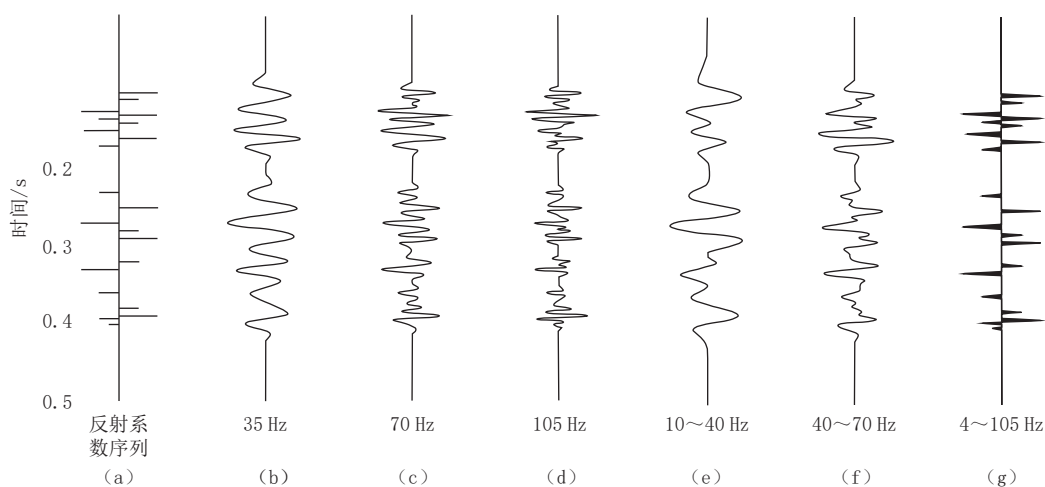


图 2 理论子波的合成地震记录、谐波混叠信号对比图

Fig.2 Comparison of synthetic seismic records and harmonic mixed signals of theoretical wavelet

利用本文的方法理论进行谐波信号混叠, 混叠后的信号达到较好的提频效果, 图 2(e) 是主频为 10~40 Hz 谐波混叠信号、图 2(f) 是主频为 40~70 Hz 谐波混叠信号, 图 2(g) 是主频为 4~105 Hz 的谐波提频结果, 尤其是将所有谐波信号进行混叠后提频效果得到明显提高, 且与反射系数的结构特征很相似, 达到提高地震分辨率的目的。

3 实际数据应用

渤海 B 油田已进入开发中后期, 目前已进入开发中后期“双高”阶段, 存在产能递减快、稳产难度大的问题。油田开发即将进入全面二次加密调整, 当前最重要的工作是深入挖掘油田的潜力。辫状河砂体纵横向变化快, 连通性复杂多变, 多处从地震剖面上看似连通的往往出现油水界面矛盾, 采用其中一块矛盾较集中的三维地震资料进行本文方法的拓频处理。从图 3(a) 中原始的相对阻抗

地震剖面来看, 由于地震分辨率低, 难以识别纵向的单砂体, 一个地震同相轴基本包含了多个单砂体, 当出现油水界面矛盾的时候, 比如高部位是水, 低部位是油 (图 3(a)), 在低部位油层部署井位的信心不足, 严重束缚了剩余油的挖掘。

首先对原始地震资料进行了分析, 其主频约 45 Hz, 频宽为 5~80 Hz, 确定高频端基准频率为 70 Hz, 低频端基准频率为 20 Hz。据处理流程, 设高频段的谐波频带为 60~80 Hz, 预测此范围内地震信号的谐波, 得到预测的地震谐波信号为 80~100 Hz, 将预测的谐波信号加回到原始地震信号中, 完成高频段的拓频。同理, 设低频段的谐波频带为 8~20 Hz, 预测得到低频段的谐波信号为 4~10 Hz 的地震信号加回到原始地震信号中, 完成低频段的拓频, 最终完成低频和高频段的拓频处理。地震分辨率得到明显提高, 从地震资料频谱分析结果看, 从频宽从原始地震的 8~80 Hz 到拓频后的 4~100 Hz, 原来的陷波也得到一定的改善, 并且从拓频后的地震剖面看, 没有明显的噪音, 信噪比得到保证, 使地震资料变得更可靠。

拓频后的地震资料显示, 辫状河砂体的薄互层识别能力提高, 能有效解释油水界面矛盾的问题, 并且能将单砂体的纵横向分布范围进行详细描述, 以图 3(d) 提频后的相对阻抗地震剖面中的砂 1 和砂 2 为例, 能清楚地将砂体 2 的边界描述, 并且与原始地震资料 (图 3(a)) 相比, 总体相对能量关系保持较好, 保幅保真效果较好。

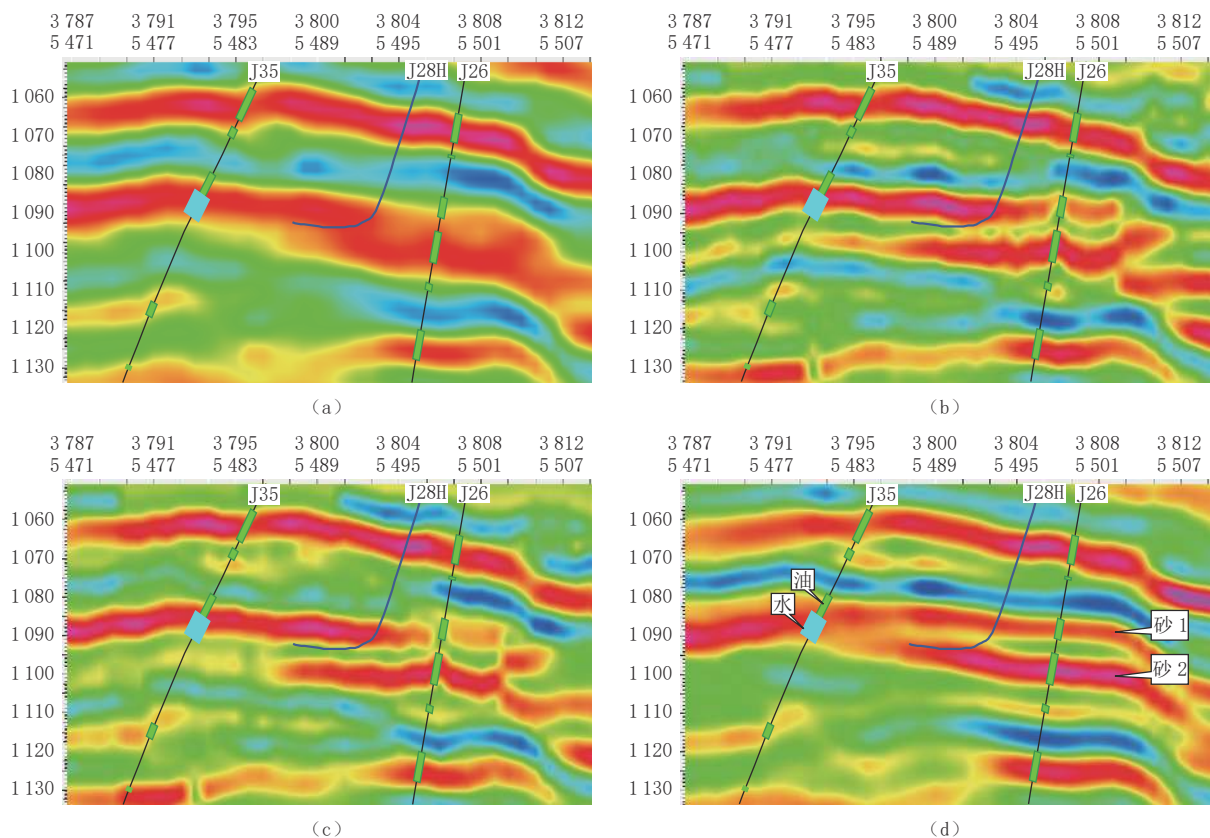


图 3 原始、反射系数反演、分频反褶积、谐波提频后的相对阻抗地震剖面对比

Fig.3 Comparison of relative impedance seismic profiles after original, reflection coefficient inversion, frequency division deconvolution, and harmonic frequency enhancement

在使用该技术之前, 原始地震资料基础上未认识到砂体 1 和砂体 2 的纵向期次关系, 存在油水矛盾的时候往往没有信心在低部位部署井位, 因此多处存在未充分挖掘的剩余油, 在此基础上, 部署 J28H 水平井进行油水矛盾区的剩余油挖掘。实钻结果表明该井的砂岩钻遇率高, 投产两年基本不见水, 为日产超 100 方的优质井, 动、静态数据均诠释了本次研究结果的有效性。

但是从其他的提频方法来看, 图 3(b) 反射系数反演处理后的相对阻抗地震剖面、图 3(c) 分频反褶积处理后的相对阻抗地震剖面显示均对薄层有响应, 但同时也将厚储层的地震同相轴进行分割, 且噪音增加, 沿着 J35H 出现假地震同相轴, 给地震储层解释带来多解性。并且从提取相应地震剖面的频谱显示, 可清楚看到谐波提频方法频谱的低频和低频均得到提高(图 4(d)), 反射系数反演(图 4(b))和分频反褶积(图 4(c))的频谱特征显示, 虽然高频有提高, 但是均表现出不同程度地陷波特征, 因此出现不同的噪音特征, 同时还损失些低频。

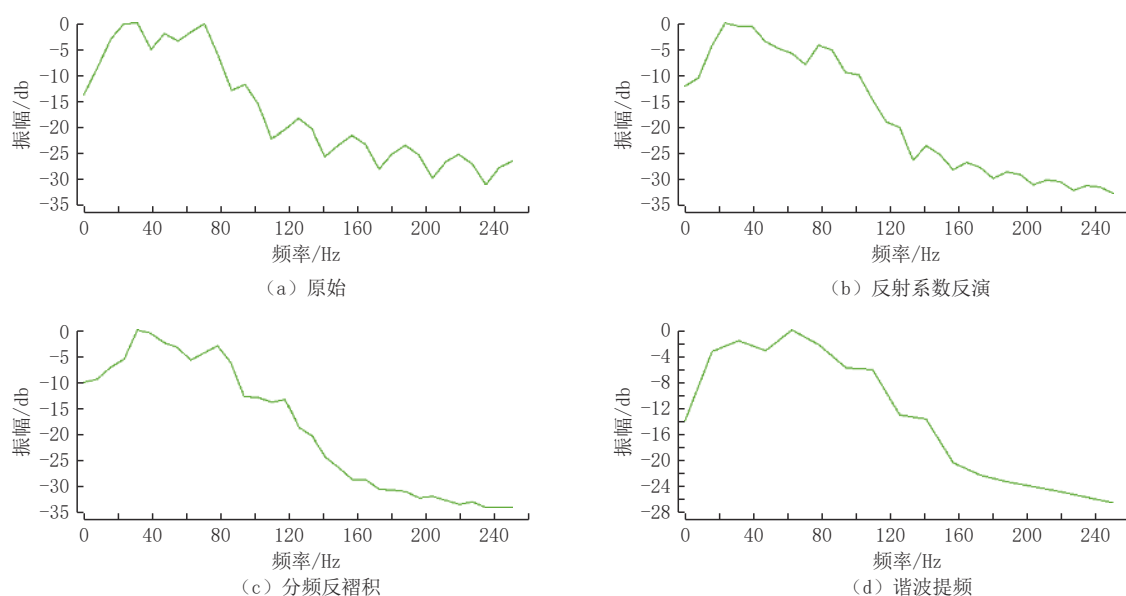


图 4 不同地震资料的频谱对比

Fig.4 Spectral comparison of different seismic data

4 结论

本文根据地震信号进行谐波分析, 利用谐波信号提高地震分辨率, 提出基于地震谐波信号提频处理方法, 在渤海 B 油田的实际工区的地震资料提频处理后的应用, 验证本文方法的有效性。本方法可以帮助油田调整井的合理开发、剩余油的充分挖掘, 对老油田保持持续稳产提供巨大帮助。

根据谐波理论, 结合实际地震资料特点, 形成地震信号谐波预测的处理技术流程, 达到提高地震分辨率的目的。提频处理后的地震剖面显示, 有更丰富的薄层砂体期次信息, 信噪比得到较好地保持, 未增加噪音。

参考文献

- [1] 宋建国, 程亮, 孟宪军, 等. 步进迭代法测井与井旁地震资料匹配处理[J]. 石油地球物理探, 2016, 51(1): 80-86.
SONG J G, CHENG L, MENG X J, et al. Well logging and well-side seismic data matching based on step-by-step iterative method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 80-86. (in Chinese).
- [2] 陈双全, 李向阳. 应用傅里叶尺度变换提高地震资料分辨率[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 213-218.
CHEN S Q, LI X Y. Seismic resolution enhancement based on the scale characteristics of Fourier transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(2): 213-218. (in Chinese).
- [3] 徐倩茹, 孙成禹, 乔志浩, 等. 基于 Gabor 变换的地震资料高分辨率处理方法研究[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 460-464.
XU Q R, SUN C Y, QIAO Z H, et al. High-resolution processing method of seismic data based on Gabor transform[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 460-464. (in Chinese).
- [4] 王宗俊. Gabor 有色反褶积[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1103-1108.

- WANG Z J. Colored Gabor deconvolution[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1103–1108. (in Chinese).
- [5] 陈平, 谭辉煌, 秦童, 等. 基于谱反演的谱蓝化拓频方法研究及应用[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(6): 21–29.
- CHEN P, TAN H H, QIN T, et al. Research and application of spectrum blueing technology for frequency-broadening based on spectrum inversion[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(5): 21–30. (in Chinese).
- [6] 廖仪, 刘巍, 胡林, 等. 地震保幅高低频拓展与多尺度贝叶斯融合反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(6): 1330–1339.
- LIAO Y, LIU W, HU L, et al. Research on high and low frequency expansion of seismic amplitude preserving and multi-scale Bayesian fusion inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1330–1339. (in Chinese).
- [7] 郭爱华, 路鹏飞, 余波, 等. 利用 Shearlet 变换提高叠后地震资料分辨率[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(5): 992–1000.
- GUO A H, LU P F, YU B, et al. Improving post-stack seismic data resolution based on Shearlet transform[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(5): 992–1000. (in Chinese).
- [8] 潘海娣, 吕健飞, 陈娟, 等. 三步法提高地震分辨率处理技术在鄂尔多斯盆地苏东南地区薄砂体识别中的应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(6): 144–149.
- PAN H D, LV J F, CHEN J, et al. Three-step method of processing technique for enhancing the seismic resolution and its application in the thin sandbody recognition in Southeast Sugeli of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(6): 144–149. (in Chinese).
- [9] 王江, 涂国田, 王杰. 基于载波调制的高分辨率地震双向拓频技术及其应用[J]. *石油物探*, 2021, 60(6): 954–963. DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2021.06.009.
- WANG J, TU G T, WANG J. High-resolution seismic bidirectional frequency extension based on carrier modulation[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(6): 954–963 DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2021.06.009. (in Chinese).
- [10] 李弘艳, 杨子川, 韩强, 等. 属性分析和地质统计反演在塔里木盆地深层薄砂体识别中的联合应用[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(2): 159–164. DOI:10.3969/j.issn.1672-7940.2017.02.007.
- LI H Y, YANG Z C, HAN Q, et al. The combined application of attribute analysis and geo-statistical inversion to identification of the deepthin sand body in sandaoqiao area of the tarim basin[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(2): 159–164. DOI:10.3969/j.issn.1672-7940.2017.02.007. (in Chinese).
- [11] 姜传金, 扈玖战. 松辽盆地北部胡吉吐莫北地区萨尔图油层河道砂体地震识别方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(2): 120–124.
- JIANG C J, HU J Z. Seismic recognizing method of the channel sandbodies in Saertu oil reservoir in Hujitumobei area of North Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(2): 120–124. (in Chinese).
- [12] 高少武, 赵波, 贺振华, 等. 地震子波提取方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(4): 1384–1391. DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.028.
- GAO S W, ZHAO B, HE Z H, et al. Research progress of seismic wavelet extraction[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(4): 1384–1391. DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.028. (in Chinese).
- [13] 杨培杰, 印兴耀. 地震子波提取方法综述[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(1): 123–128.
- YANG P J, YIN X Y. Summary of seismic wavelet pick-up[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(1): 123–128. (in Chinese).
- [14] WALKER J S. A prime on wavelets and their scien tific applications[M]. CRC Press, BocaRaton, 1999.
- [15] QIAN S. Introductiontotime-frequencyandwave-lettransforms[M]. Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
- [16] 刘立彬, 周小平, 魏庆, 等. 面向小尺度地质目标体的地震信号谐波预测拓频技术及应用[J]. *物探化探计算技术*, 2020, 42(4): 460–466. DOI:10.3969/j.issn.1001-1749.2020.04.04.
- LIU L B, ZHOU X P, WEI Q, et al. Technology and application of seismic signal harmonic prediction extension processing for small scale geological targetbody[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 42(4): 460–466. DOI:10.3969/j.issn.1001-1749.2020.04.04. (in Chinese).

Application of Seismic Signal Harmonic Frequency Enhancement Technology for Fine Identification of Braided River Sand Bodies

WEI Hong[✉], BAI Qingyun, SUN Jialin, ZHANG Pengzhi, MENG Yuntao

China National Offshore Oil Corporation Limited Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

Abstract: Many oil fields in the Bohai Oilfield are currently in the stage of high water cut and low recovery. Thus, it is urgent to conduct in-depth research on the potential of these oil fields to maintain stable production. After 20 years of directional well development, Bohai B Oilfield has developed a set of layers with combined production and strong injection, resulting in severe interlayer interference and difficulties in tapping the potential of the remaining oil. Owing to the limited resolution of existing seismic data, it is not possible to identify the reservoir structure inside the braided river composite sand body, including the vertical and horizontal distribution of the interlayer and thin sand body. Therefore, directional well development is currently mainly used. Here, the seismic signal harmonic frequency enhancement technology is proposed, which directly uses the fundamental component of seismic data to predict harmonic and subharmonic information, and then adds it to the original seismic data to expand the high-frequency and low-frequency seismic information, achieving the purpose of frequency enhancement. This method overcomes the limitations of traditional convolutional models, eliminating the need of well information and to estimate seismic wavelets and assume sparse stratigraphic reflection coefficients, thereby reducing the human subjective factors. The research results, verified through dynamic and static information, showed that the seismic signal harmonic frequency enhancement technology can effectively and finely identify the internal structure of braided river sand bodies, help to transform directional wells into horizontal wells for development, avoid interlayer interference, and promote efficient extraction of the remaining oil.

Keywords: seismic signal; harmonics; braided river sand bodies; resolution



作者简介: 韦红[✉], 女, 博士, 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院高级工程师, 主要从事地震资料解释工作, E-mail: weihong@cnooc.com.cn。