

文章编号: 1001-1986(2005)03-0067-05

# 利用地震瞬时谱属性进行薄互层分析

高静怀<sup>1</sup>, 陈 凤<sup>1</sup>, 陈树民<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院波动与信息研究所, 陕西 西安 710049;

2. 大庆石油有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

**摘要:** 利用地震瞬时谱的属性(包括瞬时振幅、瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频及瞬时品质因数等)进行地震薄互层分析。设计了几组典型模型, 用褶积模型制作合成地震记录, 然后分别计算它们的瞬时谱属性。结果表明: 不同的薄互层模型, 尽管在时间域的合成记录几乎相同, 但它们的某些瞬时属性却有明显的差别; 多种瞬时属性可用于全面刻画薄层及薄互层。文中给出了实际资料算例, 证明了其有效性。

**关键词:** 瞬时谱属性; 薄互层分析; 地震资料处理

**中图分类号:** P631.44    **文献标识码:**A

## Using seismic instantaneous attributes to analyze thin interbeds

GAO Jing-huai<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, CHEN Shu-min<sup>2</sup>

(1. Institute of Wave and Information, School of Electronic and Information Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Exploration and Exploitation for Oil, Daqing Oil Field Limited Company, Daqing 163712, China)

**Abstract:** Instantaneous attributes including amplitude, instantaneous frequency, bandwidth, dominant frequency and decay rate are used to analyze thin interbeds. Several typical models were designed to get their seismic synthetic data and their instantaneous attributes were extracted individually. The results show that the synthetic seismic data were almost same to each other in the time domain. However, some of their instantaneous attributes may have obviously difference. As a result, multi-instantaneous attributes can be used to characterize the thin-layers and thin interbeds. Finally, a case study is presented in this paper, confirming their efficiency.

**Key words:** instantaneous attributes; thin interbeds analysis; seismic data processing

收稿日期: 2004-05-31

作者简介: 高静怀(1960—), 男, 陕西乾县人, 西安交通大学电子与信息工程学院教授, 博士生导师, 从事地震波传播、多维信息处理等研究。

25个; 同时陷落3煤层和15煤层的陷落柱25个, 只陷落15煤层的3个。根据陷落柱长轴大小分类: 3煤层中长轴大于等于100 m的陷落柱有10个, 小于100 m且大于等于50 m的有9个, 小于50 m的有6个; 15煤层中陷落柱大于长轴等于100 m的有13个, 小于100 m且大于等于50 m的有14个, 小于50 m的有1个。同时还新发现断层24条, 并在西北部发现一个面积约1 km<sup>2</sup>的15煤层煤厚变薄带。

### 3.3 验证情况

在地震资料处理的后期中, 煤矿集中回风巷揭露—50 m左右的陷落柱(编号X5), 该陷落柱地震识别标志明显(图2), 且大小和位置吻合很好。另外, 在地震资料镶边区的两个已知陷落柱也有明显的反映。

### 4 结论

陷落柱已成为目前煤矿采区三维地震勘探的主

要目标。对陷落柱的地震识别是一项综合性技术, 只有进行多角度多方位的分析和研究, 才能减少多解性, 提高分辨率和预测的准确率。原始资料的质量和资料处理方法都会对陷落柱的识别和解释产生决定性的影响。所以, 在这两个阶段必须开展有针对性的工作, 为解释工作打好基础。三维地震勘探作为一种间接的手段, 必须与钻探、巷探和地质分析相结合, 并不断总结经验和教训, 才能提高勘探精度。

### 参考文献

- [1] 刘文宝, 王根盛, 张统俊. 三维地震勘探在葛亭煤矿的应用效果 [C]. 中国煤炭地质总局. 煤矿采区三维地震勘探经验交流会论文集. 2001.
- [2] 张同兴, 闫东育, 马建民, 朱伟厚, 高明玉. 煤系地层陷落柱特征与煤层气分布浅析 [J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 22—24.
- [3] 邹才能, 张颖等. 油气勘探开发实用地震勘探新技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [4] 杨德义, 彭苏萍, 常锁亮, 杨双安. 特殊剖面在陷落柱研究中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 47—49.
- [5] 王怀洪, 王秀东, 崔若飞. 山东煤矿采区物探综合方法研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2003

## 1 引言

在地震勘探中,薄互层研究占有十分重要的地位。常用的分析薄互层地震资料的方法有:加窗Fourier变换法和小波变换法等<sup>[1,2]</sup>。这些方法是把薄互层地震记录变换到时—频域,然后,利用其能量在时—频域的分布规律来研究薄互层的结构,但无法研究薄互层内部的结构及岩性变化。

瞬时谱的属性(简称瞬时属性)是研究地下岩性分布及地层结构的有效工具<sup>[3,4]</sup>,不同的瞬时属性,反映出信号中所含的不同信息。Barnes等人提出用瞬时带宽、瞬时主频、瞬时品质因数等参数,与常用的瞬时频率、瞬时相位及瞬时振幅等参数相互配合,分析反射地震资料的思想和方法<sup>[3]</sup>。然而,信号的瞬时属性对噪声是很敏感的<sup>[5]</sup>,这使其在实际应用中受到限制。近年来发展起来的相空间瞬时属性计算方法,计算精度高,抗噪能力强,在实际中见到了很好的效果<sup>[5~8]</sup>。本文从理论和实践两方面探讨了瞬时属性用于薄互层分析的可能性。

## 2 瞬时属性的定义及算法

设输入信号为  $s_i(t)$ ,经Hilbert变换后结果为  $s_r(t)$ ,对应的解析信号为:

$$s(t) = s_r(t) + j s_i(t), \quad (1)$$

其中  $j = \sqrt{-1}$ 。由解析信号(1)可定义瞬时属性如下:

$$\bar{A}_i(t) = \sqrt{s_r^2(t) + s_i^2(t)}; \quad (2)$$

$$\Psi_i(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{s_i(t)}{s_r(t)} \right]; \quad (3)$$

$$\bar{f}_i(t) = \frac{d\Psi_i(t)}{2\pi dt}; \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_i(t) = \frac{1}{2\pi \bar{A}_i(t)} \left| \frac{d\bar{A}_i(t)}{dt} \right|; \quad (5)$$

$$\bar{f}_d(t) = \sqrt{\bar{f}_i^2(t) + \bar{\sigma}_i^2(t)}, \quad (6)$$

$$\tilde{q}_i(t) = \frac{\bar{f}_i(t)}{2\bar{\sigma}_i(t)}, \quad (7)$$

其中  $\bar{A}_i(t)$ 、 $\Psi_i(t)$ 、 $\bar{f}_i(t)$ 、 $\bar{\sigma}_i(t)$ 、 $\bar{f}_d(t)$  及  $\tilde{q}_i(t)$  依次表示瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频以及瞬时品质因数<sup>[1,2]</sup>。

在实际应用中,为了克服分母趋于零时引起的不稳定性,常常采用阻尼瞬时属性。阻尼瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频以及瞬时品质因数的定义为<sup>[5]</sup>:

$$f_i(t) = \frac{s_i'(t)s_r(t) - s_r'(t)s_i(t)}{2\pi(\bar{A}(t)^2 + \epsilon \bar{A}_i(t)_{\max}^2)}, \quad (8)$$

$$\sigma_i(t) = \frac{|s_r'(t)s_r(t) - s_i'(t)s_i(t)|}{2\pi(\bar{A}_i(t)^2 + \epsilon \bar{A}_i(t)_{\max}^2)}, \quad (9)$$

$$f_d(t) = \sqrt{f_i^2(t) + \sigma_i^2(t)}, \quad (10)$$

$$q_i(t) = \frac{f_i(t)}{2\sigma_i(t) + 2\epsilon\sigma_i(t)_{\max}}, \quad (11)$$

式中  $\epsilon > 0$  称为阻尼因子;下标  $\max$  表示求极大值,如  $g(t)_{\max}$  表示求  $g(t)$  的极大值;  $f'(t)$  表示  $f(t)$  对时间的导数;  $|f(t)|$  表示  $f(t)$  的绝对值。

下文算例中用到的瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频以及瞬时品质因数均采用阻尼瞬时参数。上述瞬时属性与时—频谱的联系参见文献[2],其物理意义参见文献[9]。

下面通过一例说明这些参数的含义。计算信号  $x(t) = \exp[-(10\pi t)^2 + j60\pi t]$  的瞬时属性,结果如图1所示。对窄带信号,它的瞬时频率就等于它的载波频率(图1c);它的瞬时带宽反映了瞬时振幅的变化率(图1d);瞬时主频反映了解析信号相位和幅度变化的综合效果(图1e);瞬时品质因数描述了相位的变化率与幅度变化率的相对快慢(图1f)。在0点附近,解析信号的瞬时振幅变化率为零,故解析信号的瞬时带宽为0,而该信号的瞬时频率为30 Hz,故该点处瞬时品质因数趋于无穷大。

## 3 薄互层模型的瞬时属性分析

下面通过几个典型模型,研究不同瞬时属性对薄互层地震记录的响应。

图2是分析其他较复杂模型的基础。比较图2和图3可见,两者的瞬时品质因数的峰值大小不同。

图4是两个反射界面和反射系数大小不等时的情况。当两个反射系数大小悬殊过大时,合成记录的瞬时属性会比较接近仅有一个大的反射系数时的

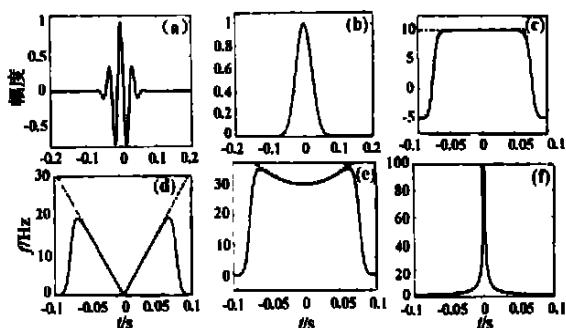


图1 信号  $x(t)$  瞬时属性分析

Fig. 1 The instantaneous attributes of signal  $x(t)$

a——待分析信号; b——信号瞬时振幅;

c——信号瞬时频率; d——信号瞬时带宽;

e——信号瞬时主频; f——信号瞬时品质因数。

注 在(b)~(f)中,实线为数值计算结果,虚线为理论计算的相应量

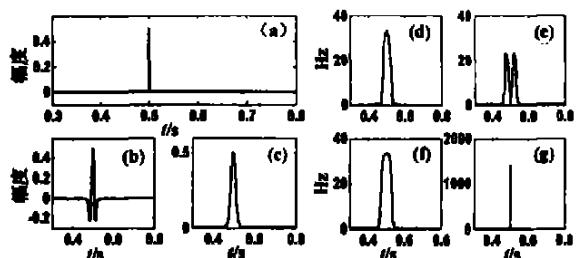


图2 单界面分析

Fig. 2 Single interface analysis

a——反射介质模型; 在 500 ms 处反射系数为 0.5;  
b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

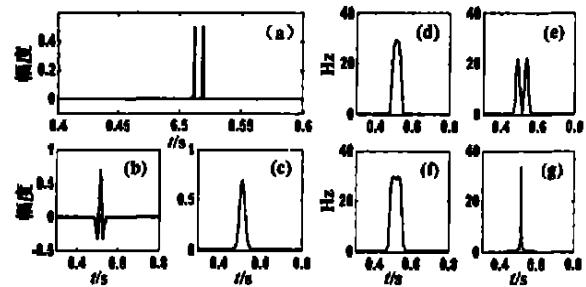


图3 双界面分析

Fig. 3 Double interface analysis

a——反射介质模型; 在 512 ms 处、519 ms 处反射系数均为 0.5;  
b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

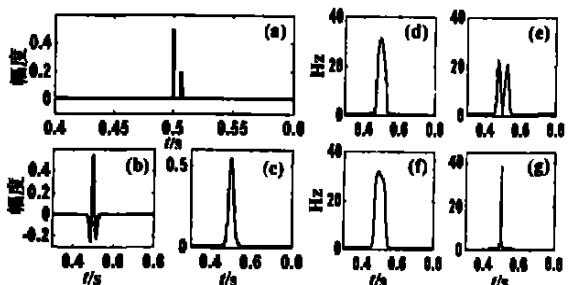


图4 双界面分析

Fig. 4 Double interface analysis

a——反射介质模型; 在 500 ms 和 507 ms 处的反射系数分别为 0.5 和 0.2; b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

情况。当反射序列不对称时, 合成记录的瞬时属性可能不对称(见图4), 而反射系数序列对称时, 合成记录的瞬时属性是对称的(见图3)。

瞬时属性可反映薄互层厚度的变化, 如图5中的瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频以及瞬时品质因数与图6中对应的瞬时属性差异很大。

尽管图7中瞬时振幅的峰值小于前面的3种模型所对应的瞬时振幅的峰值, 但它的瞬时频率的峰值却大于前3种模型的瞬时频率的峰值。这是由于

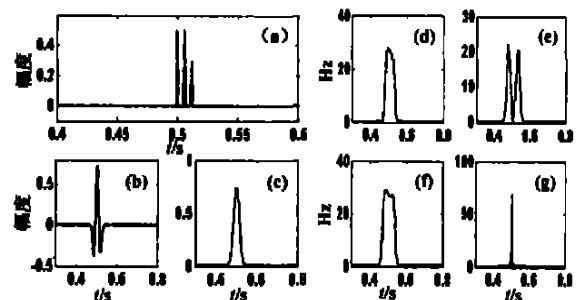


图5 复杂界面分析

Fig. 5 Complex interface analysis

a——反射介质模型; 在 500 ms 和 506 ms 处的反射系数均为 0.5; 在 512 ms 处为 0.3; b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

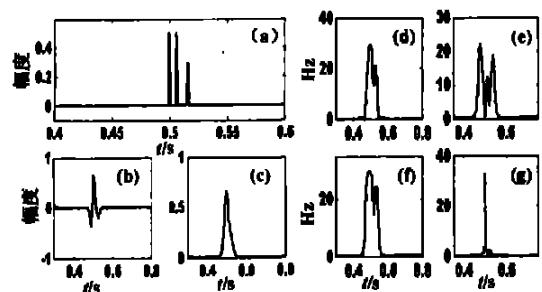


图6 复杂界面分析

Fig. 6 Complex interface analysis

a——反射介质模型; 在 500 ms、506 ms 和 516 ms 处的反射系数分别为 0.5、0.5 和 0.3; b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

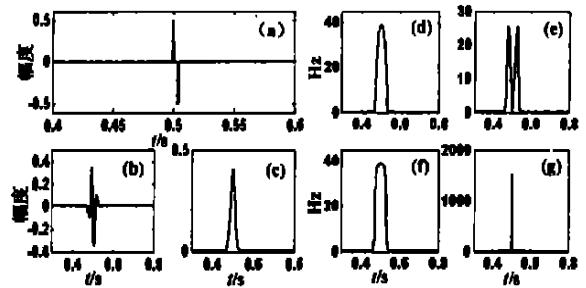


图7 双界面分析

Fig. 7 Double interface analysis

a——一个反射介质模型; 在 500 ms 和 504 ms 处的反射系数分别为 0.5 和 0.5; b——合成记录; c——记录的瞬时振幅; d——瞬时频率;  
e——瞬时带宽; f——瞬时主频; g——瞬时品质因数

Ricker 子波经过正反反射面后, 后一个波的相位与前者相反, 从而在一部分区域加剧了相位的变化。而它的瞬时带宽的宽度小于前 3 种模型的瞬时带宽的宽度, 这是由于 Ricker 子波经过正反反射面后, 一部分能量相互抵消了, 从而减小了幅度的变化区域。由于瞬时主频综合反映了信号的幅度变化以及相位变化的情况, 所以瞬时主频的峰值比前三者大, 它的宽度比前三者的宽度窄。

通过对上述模型的地震记录瞬时属性的分析对比, 得到如下认识: 瞬时主频反映比较敏感。当反射系数同向时, 瞬时频率的峰值会比单个反射面时的小; 当反射面反向时, 瞬时频率的峰值会比单个反射面时的大, 此时瞬时主频的峰值也会比单个反射面时的瞬时主频的峰值大。当反射面的间距增大时, 瞬时频率的峰值会减小, 同时瞬时主频的峰值也会降低。瞬时品质因数对瞬时带宽为零而瞬时频率不为零的点很敏感。当反射系数序列对称时, 记录的瞬时属性是对称的; 当反射系数序列不对称时, 记录的瞬时属性可能不对称。

#### 4 实际资料算例

图8是某油田的一段水平叠加剖面, 这里仅画出部分瞬时属性。下面举例说明如何借助前面的模型结果, 以瞬时属性为工具分析实际地震记录对应的地下结构。图9是第700道的瞬时频率、瞬时带宽、瞬时主频以及瞬时品质因数。与前面所设计的模型对比, A点处瞬时属性与图6所示的反射介质模型相似, 故可判断该点处为3个反射界面, 且底面的反射系数值大于顶面的反射系数值; B点附近的瞬时属性与两个反射系数大小不等(图4)的模型吻合, 故可认为该处地下结构为两个反射界面——顶面反射系数较大而底面反射系数较小。如果用这种方法沿横向逐道分析, 可研究储层的横向变化。

#### 5 结论与讨论

不同结构的薄互层(或薄层), 其瞬时属性(其中某一种或几种)有明显的差别; 当薄互层的结构(或岩性)变化时, 瞬时属性也跟着发生变化。因此, 瞬时属性是薄互层分析的有力工具, 实际资料算例证明了其有效性。我们可根据目标区的先验知识、测井及其他资料, 建立模型库, 然后对每一模型计算其瞬时属性。如果把每一种模型视为抽象空间中的一个点, 不同的瞬时属性可看作点的坐标(该坐标系可能不正交)。对实际的地震资料, 计算瞬时属性(得到“点”的坐标), 从而确定其地质结构(即确定“点”的位置)。我们知道, 地球物理反问题都存在多解性, 这相当于“抽象空间”的维数大于坐标系维数, 因此, 要正确地确定地层结构, 可能还需其他信息。尽管如此, 瞬时属性为我们分析地层结构及岩性, 提供了重要参考。

本文中讨论了几个简单模型, 也未讨论不同岩性组合的薄互层模型的瞬时属性响应, 这些有待进一步的工作。

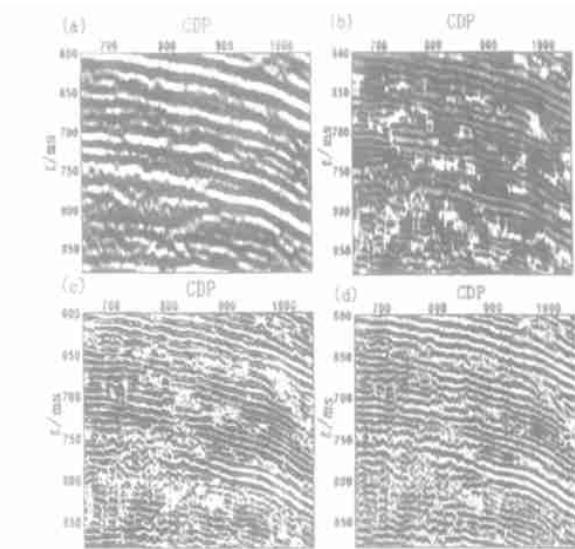


图8 实际资料分析

Fig. 8 Real seismic data analysis

a—某油田的一段水平叠加剖面; b—该剖面的瞬时频率;  
c—该剖面的瞬时带宽; d—该剖面的瞬时品质因数

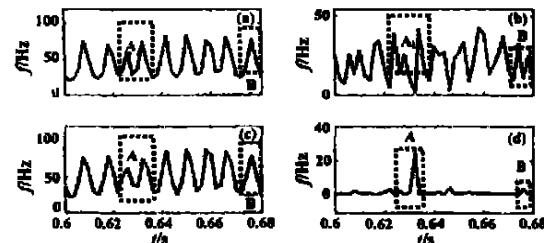


图9 单道分析

Fig. 9 Single trace analysis

a—第700道的瞬时频率; b—该道的瞬时带宽;  
c—该道的瞬时主频; d—该道的瞬时品质因数

#### 参考文献

- [1] 崔凤林, 管叶君. 时频分析——波互层结构研究的新途径[J]. 石油物探, 1992, 31(2): 1—15.
- [2] 雷克辉, 朱广生, 毛宁波, 段健康等. 在小波时频域中研究沉积旋回[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(增刊1): 72—78.
- [3] Taner M, Koehler F, Sheriff R. E. Complex seismic trace analysis [J]. Geophysics, 1979, 44: 104—1063.
- [4] Arthur E, Barnes. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data [J]. Geophysics, 1993, 58: 419—428.
- [5] 高静怀等. 小波变换与信号瞬时特征分析[J]. 地球物理学报, 1997, 40(6): 421—432.
- [6] Gao J H, Li Y M, Chen W C. On the instantaneous attributes analysis of seismic data via wavelet transform[A]. Expanded Abstracts of the Technical Program, SEG 68<sup>th</sup> Annual Meeting[C]. 1998: 1084—1087.
- [7] Gao J H, Dong X L, Wang W B, et al. Instantaneous parameter extraction via wavelet transform[J]. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 867—870.
- [8] Gao J H, Wu R S, Wang B J. A new type of analyzing wavelet best matching seismic wavelets and its applications for extraction of the instantaneous spectrum bandwidth[A]. Expanded Abstracts of the technical Program, SEG 71<sup>th</sup> Annual Meeting[C]. 2001