

时频误差分析法在地震信号分析中的应用

田仁飞, 曹俊兴

(成都理工大学 信息工程学院, 成都 610059)

摘 要: 时频误差分析法与常规的误差分析法相比, 既能反映地震信号的振幅误差, 也能区分其相位误差。通过连续小波变换的时频误差分析法, 分析了平面地震波在复杂构造中含随机介质及其对应构造的各向同性介质模型中的共炮点合成地震记录的时频振幅误差和时频相位误差。研究表明, 随机介质的振幅比各向同性介质的振幅衰减大, 且随机介质的频率也较各向同性介质的频率为宽。

关键词: 时频误差分析法; 时频振幅误差; 时频相位误差; 波场特征

中图分类号: P631.414 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2008)03-0245-04

0 引言

一般来说, 在对比两个时间序列信号之间的差异时, 其衡量标准用的是均方根误差、绝对误差或相对误差, 这些误差标准只能够反映两信号的局部差异, 不能反映其时频之间的差异^[1]。本文为了研究随机介质与各向同性介质中地震信号之间的差异, 引入了时频误差分析法, 并根据近年来对随机介质波场模拟的研究进展, 建立了大量的随机介质模型。文中主要针对随机介质中含裂缝模型, 利用声波方程正演模拟了这种模型的合成地震记录, 分析各道振幅谱, 并研究与之对应的各向同性介质构造模型合成地震记录的振幅误差和相位误差。以便能够反映随机介质与各向同性介质中波场特征之间的时频差异, 帮助我们较好地认识随机介质波场的时频振幅特征和时频相位特征。

近年来, 对随机介质波场模拟的研究也取得了一些成果。在二维弹性^[2-7]和粘弹性^[8-10]随机介质模型中, 利用波动方程的交错网格差分格式正演模拟了随机介质的波场记录, 提出了随机介质模型特征频率的概念, 并分析了模型参数, 如自相关因子、背景速度、模型尺寸、扰动标准差与特征频率变化之

间的关系; 同时也分析了粘弹性吸收系数及各模型参数对横向波数、纵向频率、波场能量等 3 个波场特征量的影响, 得到一些有益的结论。以上研究都是基于单纯的随机介质, 而对于复杂地质构造中含随机介质和随机介质中含裂缝模型的合成地震记录的波场特征与各向同性介质的波场特征对比研究还未见报道。在实际地震勘探中, 反射波法是主要的勘探方法, 其利用的是 P 波地震记录, 因此, 本文用基于声波波动方程的有限差分法正演模拟随机介质的 P 波地震记录, 利用时频误差分析法研究随机介质模型的波场特征具有很重要的意义。

1 随机介质模型及数值模拟

1.1 随机介质模型的建立

油藏及复杂矿床构造的地球物理学涉及复杂、精细的非均匀介质, 用常规方法很难完整地加以描述, 因此需要发展一种灵活、方便、能完整描述油藏及复杂矿床构造非均匀性的正演模型, 由此随机介质模型理论应运而生^[11]。在随机介质中用声波方程正演模拟, 主要模拟的是 P 波记录。其介质参数为 P 波速度, 可以表示为:

$$V(x, z) = V_0(x, z) + V(x, z) \quad (1)$$

收稿日期: 2007-04-23; 改回日期: 2008-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40574032)资助。

作者简介: 田仁飞(1983-), 男(土家族), 贵州沿河人, 硕士, 从事地震波场数值模拟及偏移成像方法研究。E-mail: tianfei906@163.com

其中, $V_0(x, z)$ 为背景速度; $V(x, z)$ 为加在上述背景速度上的非均匀扰动量, 并假设其为具有零均值、一定方差及某一自相关函数的空间平稳随机过程。

常用构建随机介质模型的自相关函数有高斯型、指数型及 Von Karman 型, 高斯型相关函数能描述单尺度平滑的非均匀介质, 而指数型和 Von Karman 型相关函数描述的随机介质具有多尺度、自相似的特性, 可以较好地模拟地下介质。本文根据研究的需要选择高斯椭圆型自相关函数构建了许多随机介质模型, 其具体制作随机介质模型可以参考文献^[12, 13]。在文中, 主要针对随机介质中含一组平行裂缝(图 1 左)和各向同性介质中含一组平行裂缝(图 1 右)进行了波场模拟, 并利用时频误差分析法对比研究了两种介质合成地震记录的时频振幅误差特性和时频相位误差特性, 得到一些有益的结论。

1.2 波场数值模拟

在数值模拟计算中, 通过声波方程有限差分^[14], 利用吸收边界条件正演模拟了随机介质模型的 P 波地震记录。把图 1 中两个模型的地质剖面都按 200 200 的网格点划分(图中纵横坐标为网格点数)。其中, 随机介质模型的速度为加在 3 000 m/s 的背景速度上的随机扰动, 裂缝介质速度为 1 500 m/s; 各向同性介质模型速度为 3 000 m/s, 裂缝介质速度为 1 500 m/s。数值模拟中, 模型参数的空间步长取 10 m, 时间步长 0.000 5 s, 在网格点(98, 1)激发震源, 在地面接收, 得到的合成 P 波地震记录(图 2)。

2 随机介质地震信号的时频误差分析

2.1 随机介质与各向同性介质的频谱对比

对比分析图 2 的合成地震记录, 可以清楚地辨识出裂缝引起的反射同相轴, 这说明地震波场可以分辨出介质中的裂缝。但是, 在图 2(左)中含有许多短小和不连续的同相轴以及许多细小的绕射波, 这是由于介质中含随机参数而引起的。为了从定量上分析随机介质的波场特征, 对图 2 中的各道合成地震记录进行频谱分析, 图 3 分别是随机介质和各向同性介质模型的地震记录其中一道的振幅谱图。从图 3 的对比可知: 随机介质模型中, 由于加入了随机参数后, 频谱展宽了, 这就可以提取更多的信息, 同时也可能会引入更多的干扰信号, 这些干扰信号也有可能是矿场、油气等分布的表现, 不过还需要在

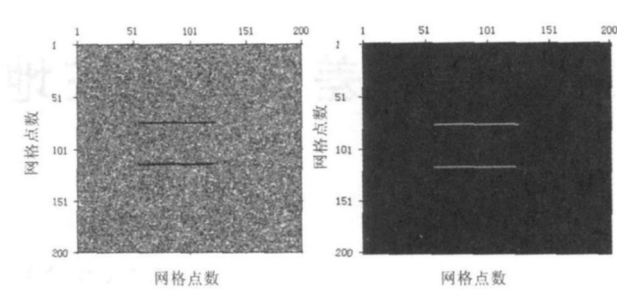


图 1 波场模拟图像

Fig. 1 The simulated image of the wave field
左: 随机介质中含一组平行裂缝 右: 各向同性介质含一组平行裂缝

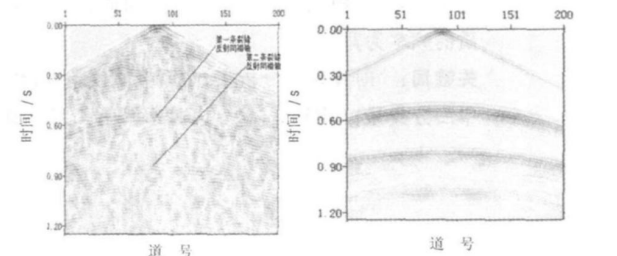


图 2 不同介质的单炮合成地震记录

Fig. 2 Single shot synthetic seismogram in various media
左: 随机介质单炮合成地震记录 右: 各向同性介质单炮合成地震记录

实际中进一步的证明; 而且随机介质的地震记录的振幅谱峰值明显的降低, 这是由于地震波在随机介质中衰减比在各向同性介质中较快。

2.2 时频误差分析法

信号 $s(t)$ 的连续小波变换(CWT)定义为:

$$CWT_{(a,b)}\{s(t)\} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} s(t) * \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

其中, t 为时间; a 为尺度因子; b 为位移因子。本文选用 Morlet 小波

$$(t) = e^{-1/4} \exp(i W_0 t) \exp(-t^2/2) \quad (3)$$

所用参数 $w_0 = 6, f = w_0/2 a$, 所以信号 $s(t)$ 时-频表示(TFR)定义为:

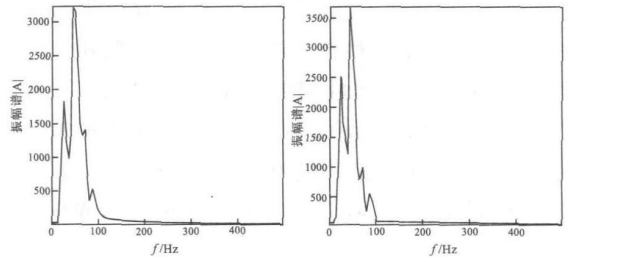


图 3 不同介质的振幅谱

Fig. 3 Amplitude spectrum in different medium
a. 随机介质的振幅谱 b. 各向同性介质的振幅谱

$$W(t, f) = CWT_{(a, b)}(s(t)); a = w_0/2f, b = t \quad (4)$$

如果 $W_{REF}(t, f)$ 表示 TFR 参考信号 $s_{REF}(t)$ 的小波变换, $W(t, f)$ 表示 TFR 信号 $s(t)$ 的小波变换, 从而得到时频(TF)的振幅差

$$E(t, f) = |W(t, f)| - |W_{REF}(t, f)| \quad (5)$$

以及 TF 的相位差

$$P =$$

$$|W_{REF}(t, f)| \frac{Arg[W(t, f)] - Arg[W_{REF}(t, f)]}{\max_{(t, f)} |W_{REF}(t, f)|} \quad (6)$$

根据 TF 的振幅差和相位差, 在时间和频率域定义时频振幅误差(TFEM)

$$TFEM(t, f) = \frac{E(t, f)}{\max_{(t, f)} |W_{REF}(t, f)|} \quad (7)$$

和时频相位误差(TFPM)

$$TFEM(t, f) = \frac{P(t, f)}{\max_{(t, f)} |W_{REF}(t, f)|} \quad (8)$$

$TFEM(t, f)$ 和 $TFPM(t, f)$ 分别表示 2 个信号在时频域的时频振幅误差和时频相位误差函数。

为了更进一步分析随机介质地震记录的时频特征, 我们用以上基于连续小波变换的时频误差分析法(TFR), 以各向同性介质的合成地震记录为标准信号, 用随机介质的合成地震记录的信号与标准信号作对比分析, 得到二者之间与图 4 相对应地震道的时频振幅误差(TFEM)如图 4(左)和时频相位误差(TFPM)如图 4(右)。

从图 4 看出, 二者的时频振幅误差主要集中在频率 f 为 50~130 Hz 之间。结合图 3 的振幅谱对比分析, 由于各向同性介质的振幅谱主要集中在 0~80 Hz, 而随机介质的时频展宽到了 140 Hz, 所以二者的时频振幅误差主要集中在 50~130 Hz 也能够得到很好地解释, 而时频相位误差主要集中 60~140 Hz, 对其他各道的分析也能够得到类似的结果。因此, 采用时频误差分析法可以进一步了解随

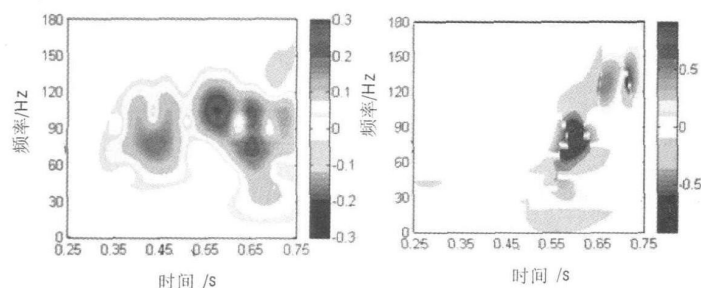


图 4 时频振幅误差(左)和时频相位误差(右)

Fig. 4 Time-frequency envelope misfit (left) and time-frequency phase misfit(right)

机介质波场的时频特性, 有利于分析随机介质的波场特征。

3 结论与认识

为了区分复杂构造中含随机介质及各向同性介质中的波场特征, 本文利用基于连续小波变换的时频误差分析法研究了随机介质和各向同性介质合成地震记录的时频振幅误差和时频相位误差特性, 得到以下认识:

(1) 在所利用的模型试验中, 通过联合各道地震记录的频率和振幅特性进行时频误差分析, 统计各道地震记录的频率误差特征和振幅误差特征, 得出随机介质与相应构造模型各向同性介质的频率展宽了, 而且振幅衰减较大。

(2) 采用时频误差分析法与传统的频谱分析法研究随机介质的时频特性, 二者能够较好地吻合, 说明了利用时频误差分析法研究随机介质地震信号的波场特征是可行的。

参考文献:

- [1] Miriam Kristekov, Jozef Kristek, Peter Moczo, *et al.* Misfit Criteria for Quantitative Comparison of Seismograms [M]// In: press in the Bulletin of the Seismological Society of America, 2006.
- [2] 奚先, 姚姚. 二维横各向同性弹性随机介质中的波场特征[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 924-932.
- [3] 奚先, 姚姚. 弹性随机介质模型的特征频率[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 681-687.
- [4] 奚先, 姚姚. 二维弹性随机介质中的波场特征[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 147-154.
- [5] 奚先, 姚姚, 顾汉明. 随机溶洞介质模型及其波场模拟[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 365-369.
- [6] Korn M. Seismic wave in random media[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 29(4): 247-269.
- [7] Bertrand Ioss. Seismic reflection travesties in two-dimensional statistically anisotropic random media [J]. Geophysics, 1998, 135(3): 999-1010.
- [8] 奚先, 姚姚. 二维粘弹性随机介质中的波场特征分析[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 608-615.
- [9] 钟伟, 杨宝俊, 张智. 复杂介质地震波场研究进展[J]. 世界地质, 2005, 24(4): 402-412.
- [10] Guido Kneib, Serge A Shapiro. Viscoacoustic wave propagation in 2-D random media and separation of absorption and scattering attenuation[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 459-467.

[11] 奚先,姚姚. 二维随机介质及波动方程正演模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(5): 564-552.

[12] Ikelle L, Yung S, Daube F. 2-D random media with ellipsoidal autocorrelation function[J]. Geophysics, 1993, 58(9): 1359-1372.

[13] 奚先,姚姚,顾汉民. 随机溶洞介质模型的构造[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(9): 105-108.

[14] 常旭. 地震正反演与成像[M]. 北京: 华文出版社, 2001.

THE APPLICATION OF THE TIME-FREQUENCY REPRESENTATION
TO SEISMIC SIGNAL ANALYSIS

TIAN Ren-fei, CAO Jun-xing

(College Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Compared to conventional error analytic methods, time-frequency representation can reflect the amplitude misfit and phase misfit of seismic signal. The continuous wavelet transformation was used to analyse the amplitude and phase misfits of the seismic signal of the common point's synthetic seismogram of the surface wave with the random medium model and the correspondant isotropic model. The results show more attenuation of the random medium amplitude than that of isotropic medium and wider frequency of the random than isotropic medium.

Key Words: time-frequency representation; Time-frequency envelope misfit; time-frequency phase misfit; wave field characteristics