

顾元, 朱培民, 李辉等. 2014. 二维叠后地震数据的平稳随机介质参数估计. 地球物理学报, 57(7): 2291-2301, doi:10. 6038/cjg20140723.

Gu Y, Zhu P M, Li H, et al. 2014. Estimation of 2D stationary random medium parameters from post-stack seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2291-2301, doi:10. 6038/cjg20140723.

二维叠后地震数据的平稳随机介质参数估计

顾元^{1,2}, 朱培民^{2*}, 李辉³, 李小勇²

1 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075

2 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

3 休斯敦大学地球物理系, 休斯敦 77004, 美国

摘要 随机介质参数估计是随机介质理论应用于地震勘探的关键. 本文提出了一种从二维叠后地震数据中估计平稳随机介质参数的方法. 文中阐述了二维叠后地震数据与随机介质波阻抗模型的关系, 以及随机介质自相关函数参数的估计原理和方法, 并结合实例详细介绍了应用功率谱法进行随机介质参数估计的具体步骤; 通过多个二维理论模型的估计试验, 验证了方法的可行性和正确性; 还对实际地震数据进行了随机介质参数的估计试验, 结果表明, 随机介质参数可以为三角洲沉积相的进一步划分提供参考, 反映了该方法有较好的应用前景. 相比前人的研究, 本文所提出的随机介质参数估计方法是一种真正的二维算法, 特别是能给出自相关角度 θ 的估计, 这种基于功率谱的估计方法具有直观且高效率的优点, 但也存在着误差较大的问题, 需要进一步的改进和完善.

关键词 随机介质; 自相关函数; 参数估计; 反演

doi:10. 6038/cjg20140723

中图分类号 P631

收稿日期 2013-11-11, 2014-04-18 收修定稿

Estimation of 2D stationary random medium parameters from post-stack seismic data

GU Yuan^{1,2}, ZHU Pei-Min^{2*}, LI Hui³, LI Xiao-Yong²

1 MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2 Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3 Department of Geosciences, University of Houston, TX, 77004, USA

Abstract The key of applying the random medium theory to seismic exploration is the estimation of random medium parameters (RMP) from seismic data. In this paper, we propose an approach to estimate parameters of stationary random medium from 2D post-stack seismic data. Firstly, the relationship between post-stack seismic data and the impedance model of random medium is established, and the method of parameter estimation of Autocorrelation Function is introduced. Then, by using power spectrum method, the algorithms and procedures on estimating RMP are discussed with an example. Some numerical tests show that the approach is feasible and correct. The test on the real seismic data indicates that the estimated random medium parameters can provide an important reference for further dividing delta sedimentary facies, which reflects the

基金项目 国家自然科学基金(91014002 和 41174049)资助.

作者简介 顾元, 男, 博士, 1983 年出生, 2013 年毕业于中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 主要从事地震数据处理、层析成像、数值模拟及决策分析方面的研究. E-mail: guyl5@163.com

*** 通讯作者** 朱培民, 男, 教授, 博士生导师, 1963 年出生, 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 主要从事地震数据处理、地震反演、层析成像及地震波场模拟方面的研究. E-mail: zhupm@cug.edu.cn

estimation method of RMP is very promising. Comparing with peer-researches, the estimation method in this paper is a true 2D algorithm, especially, which could estimate the autocorrelation angle. This approach based on power spectrum method is obviously efficient and easily understandable but has large errors, and needs to be further improved and perfected in the future research.

Keywords Random medium; Autocorrelation function; Parameter estimation; Inversion

1 引言

在进行构造或沉积学研究时,地球介质的非均质性可分为大小两种尺度,其中大尺度非均质性描述的是介质的分层或者缓慢变化的特性,小尺度非均质性指附加在大尺度非均质性上的扰动(Aki, 1969). 由于小尺度非均质性的随机分布特征,常规的确定性建模方法无法对其进行完整描述. Ikelle 等(1993)、姚姚和奚先(2002)、奚先和姚姚(2001, 2005)等将地下介质视作随机变量,提出了应用统计学原理对地下介质的非均匀特性进行建模的方法,即随机介质建模方法. 但是,要将该方法应用于地震勘探,需要事先了解地下介质的统计特性.

我们知道,当使用地震勘探方法进行沉积盆地研究时,沉积盆地中的地层界面为连续的强反射,而小尺度非均质性则为不连续的弱反射波. 因此,如何定量地建立小尺度非均质性与不连续反射波的关系,并利用这个关系估计深部介质的非均质特征成为了研究人员关注的重点(Hurich, 1996; Hurich et al., 2000). Gibson (1991)首先提出地下介质的横向非均质性可用叠后地震数据的横向自相关函数来近似. Poppeliers (2007)、秦臻(2008)建立了垂向上地下介质与叠后地震数据的函数关系式,并提出了应用反褶积方法估计纵向自相关函数及其特征参数的方法. 虽然上述方法都曾被用于地震解释(Hurich et al., 2000; 秦臻, 2008),但都是从水平和垂向两个方向分别进行的,均是一维估计,因此对于二维或三维情况下的非均质性分析来说显然是有相当大的差距的. 为了解决这个问题,Scholer 等(2010)后来建立了二维地下介质与叠后地震数据的函数关系式,并提出了应用蒙特卡洛反演法从叠后地震数据中同时估计纵、横向自相关函数的方法. 但是该方法估计的自相关函数仍然是一维的,因此只能对复杂程度不高的二维介质进行估计. 例如,当地层有倾角时,介质的扰动方向可能与水平方向成一

定的夹角,这种情况下计算水平和垂向自相关函数,其结果必然是有较大误差的. 为了解决上述问题,本文以褶积地震模型理论为基础,建立了叠后地震数据与随机介质波阻抗的功率谱关系,提出了二维平稳随机介质自相关函数的功率谱估计方法. 该方法可同时估计二维自相关函数及其三个特征参数,即纵、横向自相关长度和自相关角度. 以高斯型随机介质模型为例,本文分别针对不同特征参数的随机介质模型,以及不同主频的合成地震记录,对本文提出的方法进行了可行性验证,并针对随机介质参数估计中地震主频对估计结果的影响、模型的大小设置等问题进行了初步探讨. 最后应用本文提出的方法,对实际地震数据进行了参数估计试验,并分析了不同成因相的介质随机特性.

2 随机介质的数学描述

随机介质模型是描述岩石物性在空间上具有随机变化特征的介质模型(Ikelle et al., 1993),其基本特性可由统计量参数表征,包括均值、标准差和自相关函数. 大尺度的非均质用一阶统计量——均值来表征,小尺度的非均质用二阶统计量——标准差和自相关函数来表征. 以速度为例,随机介质速度模型的定义如下(Ikelle et al., 1993; 奚先和姚姚, 2001):

$$v(z, x) = v_0(z, x) + \delta_v(z, x), \quad (1)$$

其中, $v(x, z)$ 为随机介质速度模型; $v_0(x, z)$ 对应介质的的大尺度非均质特性,为速度模型的均值; $\delta_v(z, x)$ 对应小尺度非均质特性,为具有均值为 0, 固定标准差的二维随机序列,其空间分布特征可用二维自相关函数描述. 不同分布类型的随机介质,可用不同类型的相关函数来描述. 常用的相关函数有高斯型椭圆自相关函数、指数型椭圆自相关函数、混合型椭圆型自相关函数和 Von Kármán 型自相关函数(Goff and Jordan, 1988; Ikelle et al., 1993; 奚先和姚姚, 2002). 其中高斯型椭圆自相关函数的形式如下:

$$R(\Delta z, \Delta x) = \exp\left[-\left(\frac{(\Delta x \cos\theta + \Delta z \sin\theta)^2}{a^2} + \frac{(\Delta x \sin\theta + \Delta z \cos\theta)^2}{b^2}\right)\right], \quad (2)$$

式中 $(\Delta z, \Delta x)$ 为相对于中心点的偏移量; a, b 分别为横向和纵向自相关长度,描述了随机介质在各个方向上非均质异常的平均尺度; θ 为随机介质的自相关角度。

以上用于描述随机介质的统计量参数中,均值、标准差和自相关函数的类型可以直接通过声波、密度测井数据的统计得到(秦臻, 2008),不是本文讨论的重点;而本文中提到的“随机介质参数”主要指的是自相关函数中的三个特征参数,即横向、纵向自相关长度 a, b ,以及自相关角度 θ 。

3 随机介质二维自相关函数的估计原理与流程

3.1 随机介质参数估计原理

对于时间域的叠后地震剖面,其一次反射波可用线性褶积模型表达,即地震道近似为反射系数与地震子波的褶积:

$$s(t, x) = r(t, x) * w(t), \quad (3)$$

其中, $s(t, x)$ 为二维叠后地震剖面, $w(t)$ 为地震子波, $r(t, x)$ 为反射系数.若介质是连续的情况下, $r(t, x)$ 可表示如下:

$$r(t, x) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \log[Z(t, x)], \quad (4)$$

该定义常用于非均匀性较强介质的合成地震记录和波阻抗反演。

根据(1)式,设连续介质波阻抗由两部分组成:

$$\begin{aligned} Z(t, x) &= Z_0(t, x) + \sigma_z(t, x) \\ &= Z_0(t, x) [1 + \delta_z(t, x)], \end{aligned}$$

其中, $Z_0(t, x)$ 为背景波阻抗,为低频分量; $\delta_z(t, x) = \frac{\sigma_z(t, x)}{Z_0(t, x)}$ 为加在背景波阻抗上的扰动量,为高频分量.由此,可将(4)式改写为

$$r(t, x) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \log\{Z_0(t, x) [1 + \delta_z(t, x)]\},$$

进而可得

$$r(t, x) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \log Z_0(t, x) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \log[1 + \delta_z(t, x)],$$

对于平稳随机介质模型,背景波阻抗为常数,则有

$$\frac{\partial}{\partial t} \log Z_0(t, x) \equiv 0,$$

所以

$$r(t, x) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \log[1 + \delta_z(t, x)].$$

由于 $\delta_z(t, x)$ 的值较小,存在关系 $\log[1 + \delta_z(t, x)] \approx$

$\delta_z(t, x)$,则随机介质波阻抗模型的反射系数可近似为

$$r(t, x) \approx \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \delta_z(t, x),$$

将上式代入到(3)式,得到

$$s(t, x) \approx \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \delta_z(t, x) * w(t),$$

根据卷积的微分性质,有

$$s(t, x) \approx \delta_z(t, x) * \frac{1}{2} \frac{d}{dt} w(t),$$

若令 $f(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} w(t)$,则有

$$s(t, x) \approx \delta_z(t, x) * f(t),$$

上式各项的功率谱服从如下关系,

$$|S_s(\omega, k_x)|^2 \approx |S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2 |S_f(\omega)|^2,$$

由上式,可得到功率谱法估计随机介质自相关函数的原理公式:

$$|S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2 \approx |S_s(\omega, k_x)|^2 / |S_f(\omega)|^2. \quad (5)$$

根据上式,若已知地震数据和子波的功率谱,可求得 $\delta_z(t, x)$ 的功率谱,再通过傅里叶反变换,即可得到随机介质的自相关函数 $R_{\delta_z}(\Delta t, \Delta x)$ 。

该方法首先计算随机介质模型的功率谱,然后根据 Wiener-Khintchine,由傅里叶反变换直接得到随机介质的自相关函数.与其他方法(Poppeliers, 2007; Scholer et al., 2010)相比,该方法在估计自相关函数前既无需先求随机介质模型,也避免了最优化方法的搜索步骤,因此具有直观且高效的优点。

但是,实际工作中,在计算(5)式时,会遇到 $|S_f(\omega)|^2$ 在某些频率处存在零值或接近于零值的情况,这时求得的 $|S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2$ 值就变成无穷大,显然这是不合理的.所以,在实际工作时,可给 $|S_f(\omega)|^2$ 加上一个白噪 ϵ ,使得求取过程变成一个稳定的过程.为此,我们把式(5)改写为

$$|S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2 \approx |S_s(\omega, k_x)|^2 / (|S_f(\omega)|^2 + \epsilon), \quad (6)$$

其中, ϵ 的取值应兼顾稳定性和误差。

3.2 随机介质参数估计流程

我们以一个实例来说明随机介质参数估计的具体流程.设有一个二维高斯型随机介质,其模型在时间域(Time)和横向空间域(X)中的参数为: $Nt = Nx = 600, dt = 1 \text{ ms}, dx = 1 \text{ m}$,速度均值 $= 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,标准差 $= 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,自相关长度 $a = 50 \text{ m}, b = 20 \text{ ms}$,自相关角度 $\theta = 30^\circ$,其自相关函数如图 1a 所示.假设介质密度 $\rho(t, x)$ 可由 Gardner 公式估计得到(Gardner et al., 1974):

$$\rho(t, x) = \alpha v(t, x)^\beta,$$

式中, α 和 β 均为常数, 当速度和密度的量纲分别为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 取 $\alpha = 309, \beta = 0.25$. 对应的随机介质波阻抗模型如图 1b 所示; 设地震子波是主频为 20 Hz 的 Ricker 子波 (图 1c), 则图 1b 对应的合成地震记录为图 1d.

具体的估计步骤如下:

(1) 从地震记录 (图 1d) 中估计出地震子波 (图 2a);

(2) 为了避免地震数据的频谱能量向旁瓣泄漏, 需要对地震数据做加窗 (图 2b) 预处理, 本文采

用二维汉明窗, 处理结果如图 2c 所示;

(3) 计算子波的功率谱 $|S_f(\omega)|^2$ (图 3a) 和地震数据的功率谱 $|S_s(\omega, k_x)|^2$ (图 3b);

(4) 根据 (6) 式计算随机介质的功率谱 $|S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2$ (图 4a);

(5) 对随机介质的功率谱 $|S_{\delta_z}(\omega, k_x)|^2$ 做傅里叶反变换得随机介质的二维自相关函数 $R(t', x')$ (图 4b).

(6) 将图 4b 中 $R(t', x') \geq \exp(-1)$ 的点设为 1, $R(t', x') < \exp(-1)$ 的点设为 0 (图 5a). 图中取值为 1 的点构成一个椭圆;

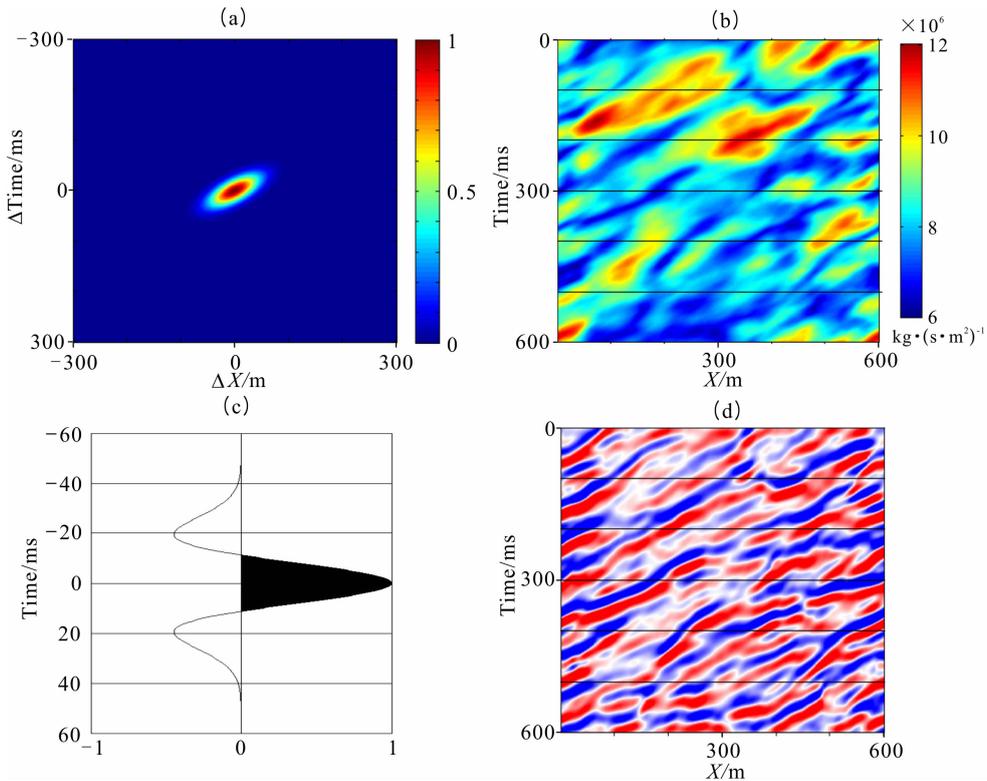


图 1 二维随机介质的理论自相关函数 (a)、波阻抗模型 (b)、Ricker 地震子波 (c) 和合成地震记录 (d)

Fig. 1 Theoretical autocorrelation function (a) and impedance model (b) of 2D random medium, Ricker wavelet (c), and synthetic seismic records (d)

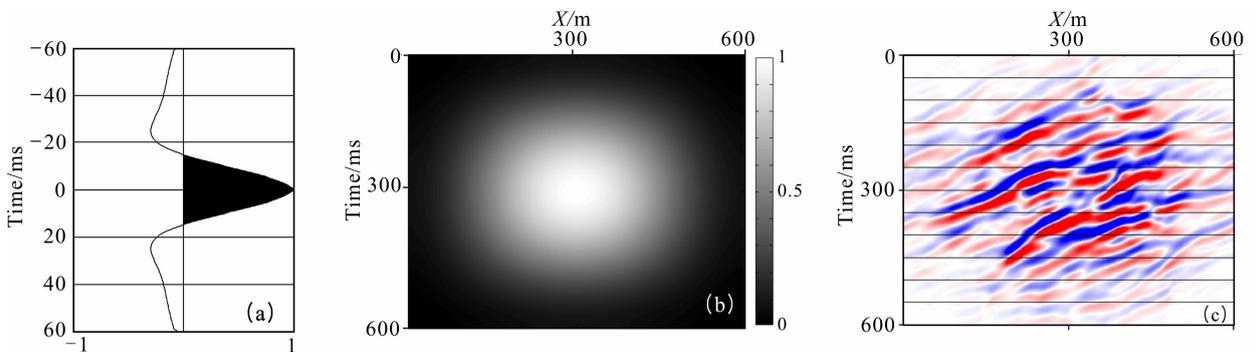


图 2 地震数据的子波估计结果 (a)、二维汉明窗 (b) 和加窗后的地震数据 (c)

Fig. 2 Wavelet estimation from seismic data (a), 2D Hamming window (b) and windowed seismic records (c)

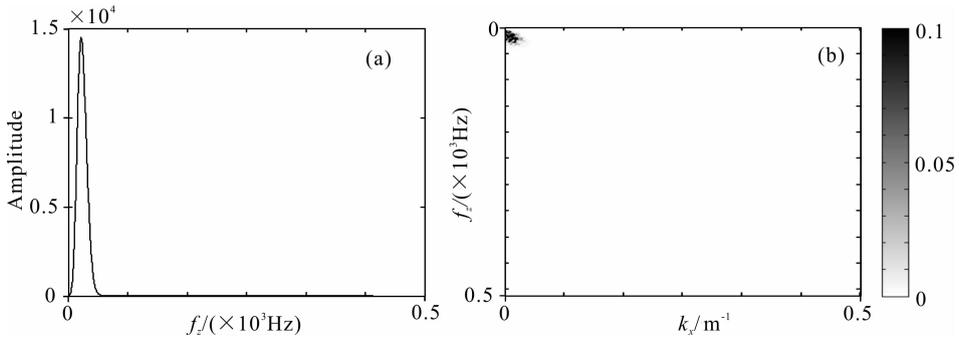


图 3 子波功率谱(a)和地震数据的功率谱(b)

Fig. 3 Power spectra of wavelet (a) and seismic records (b)

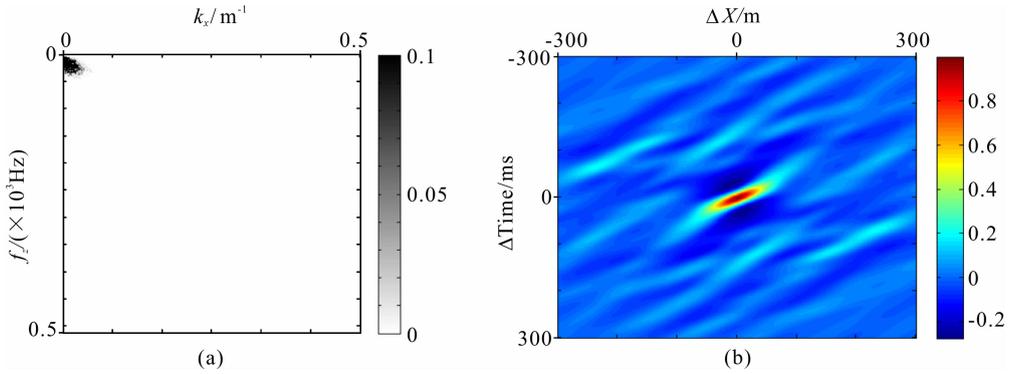


图 4 估计得到的随机介质功率谱(a)和二维自相关函数(b)

Fig. 4 Power spectrum of random medium (a) and 2D autocorrelation function (b)

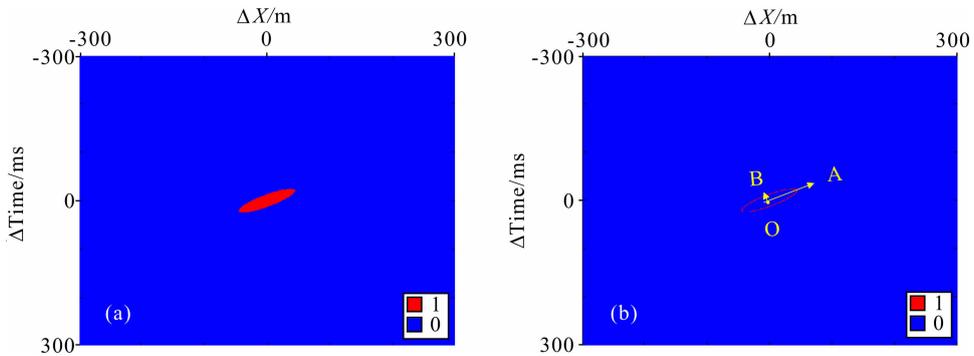


图 5 特征向量法估计自相关函数的特征参数步骤(1)的结果(a)和步骤(2)的结果(b)

Fig. 5 Characteristic parameter estimation of autocorrelation function by eigenvector method in step (1) (a) and (2) (b)

(7)由图 5a 中取值为 1 的 M 个点的坐标,计算

方向矩阵 $\mathbf{P} = \sum_{n=1}^M [x_n \ t_n]^T [x_n \ t_n]$, 得

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 161.99 & -260.34 \\ -260.34 & 557.09 \end{bmatrix};$$

计算二维矩阵 \mathbf{P} 的特征向量矩阵 $\mathbf{V} =$

$$\begin{bmatrix} 0.8957 & 0.4447 \\ 0.4447 & -0.8957 \end{bmatrix}, \text{ 于是有}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x \ \alpha_t]^T = [0.8957 \ 0.4447]^T,$$

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_x \ \beta_t]^T = [0.4447 \ -0.8957]^T.$$

向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 所指的方向即为椭圆的主轴方向

(Odgaard et al., 1997);

(8)提取图 5a 中图形的边界(图 5b);

(9)在边界上搜索与特征向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 相交的点,与 O 点距离最大的点设为 A 点,为横向自相关长度 a ,搜索与 O 点距离最小的点设为 B 点,为纵向自相关长度 b (图 5b);由此得到横向和纵向自相关长度分别为 $a=50 \text{ m}$ 和 $b=12 \text{ ms}$;

(10)计算自相关角度即 OA 与 X 轴的夹角 $\theta =$

$$\frac{1}{\pi} \arctan \frac{\alpha_x dx}{\alpha_t dt} \times 180 = 26.41^\circ;$$

以上流程中,为了方便,本文省去了时深转换的

环节,所构建的随机介质为时间域中的模型,其估计出的随机介质参数也是一个时间域中的相对值.要估计深度域的随机介质参数,理论上需要应用深度域地震剖面来进行参数估计工作.

4 二维平稳随机介质参数估计数值实验

为了进一步研究随机介质参数估计算法的可行性和稳定性,本文设计了三个试验,来研究不同随机介质参数模型、地震数据的主频和地震数据的规模对估计误差的影响.

4.1 试验 1

本试验主要测试不同随机介质参数所构成的模型对估计误差的影响.为此构建了一系列不同自相关长度和角度的高斯型随机介质波阻抗模型(图 6),用于测试估计结果的误差.这组模型大小 $N_x = N_t = 300$, 网格间距 $dx = 1$ m, $dt = 1$ ms, 速度均值为 5000 m \cdot s $^{-1}$, 标准差为 500 m \cdot s $^{-1}$, 密度值根据

Gardner 公式估算. 表 1 列出了构建的随机介质模型自相关函数的特征参数,图 6 (a1、b1、c1、d1)为对应的自相关函数图,图 6 (a2、b2、c2、d2)为构建的二维平稳随机波阻抗模型.图 6 (a3、b3、c3、d3)为主频 40 Hz Ricker 子波的合成地震记录.

应用功率谱法对合成地震记录(图 6(a3、b3、c3、d3))分别进行了随机介质参数的估计,得到了如图 6(a4、b4、c4、d4)所示的二维自相关函数图像,估计出的特征参数如表 2 所示.对比理论参数和估计结果,发现存在一定的误差,但还是比较接近理论值的,因此基于功率谱法的随机介质参数估计方法是可行的.

4.2 试验 2

本试验的目的是测试不同主频的合成地震记录中随机介质参数估计的精度.为此构建了大小为 $N_x = N_t = 300$ 的高斯型随机介质波阻抗模型,其中 $dx = 1$ m, $dt = 1$ ms, 速度均值为 5000 m \cdot s $^{-1}$, 速度标准差为 500 m \cdot s $^{-1}$, 密度值根据 Gardner 公式计算,随机介质参数为 $a = 50$ m, $b = 10$ ms, $\theta = 30^\circ$. 图

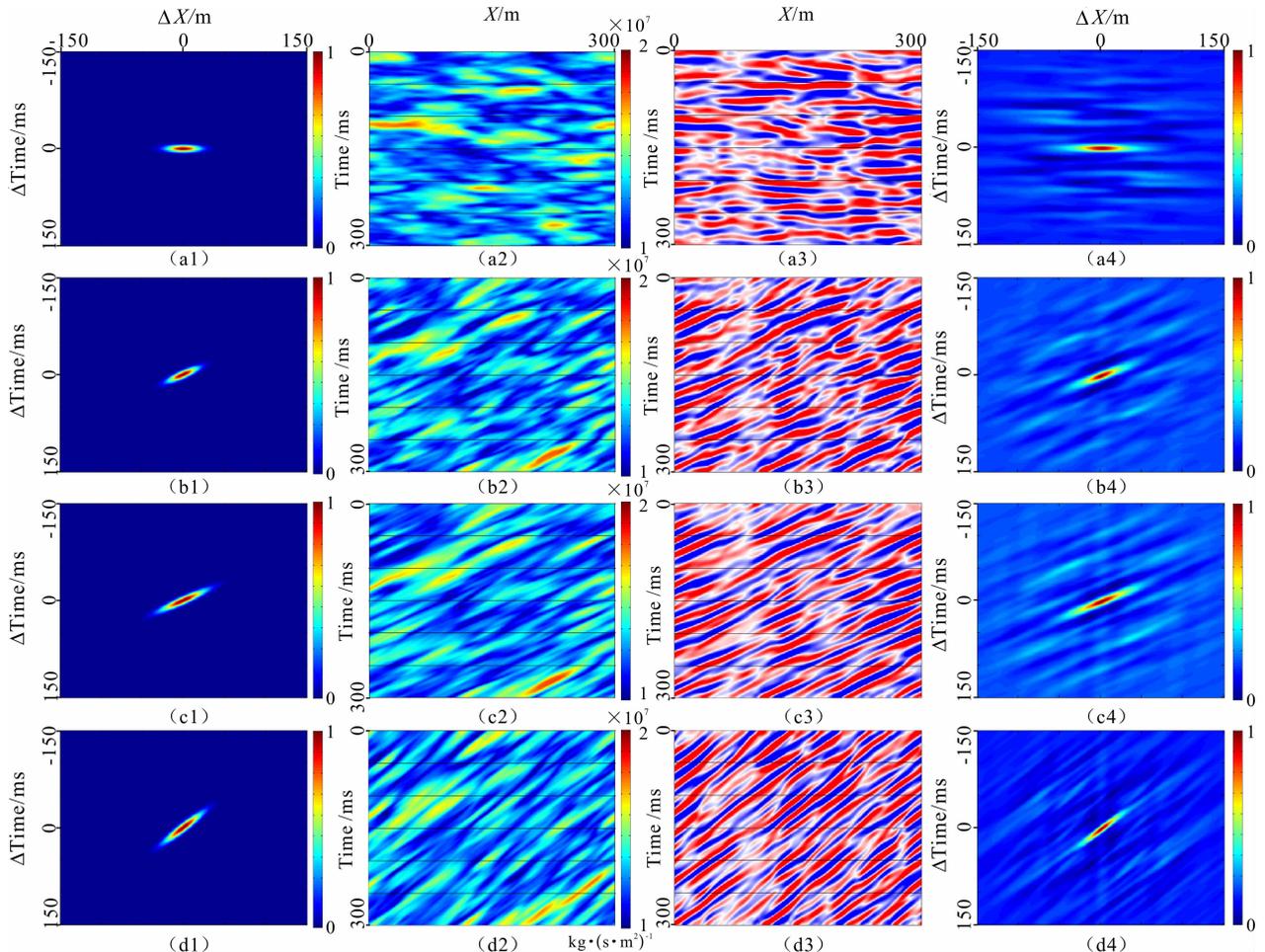


图 6 随机介质模型、合成地震记录和估计结果(从上到下为模型 1—4)

Fig. 6 Stationary random medium models, synthetic seismic records and estimated results

表 1 随机介质模型参数

Table 1 Parameters of random medium models

理论模型	理论参数			自相关函数	随机介质模型	合成地震记录 (主频 40 Hz)
	a/m	b/ms	$\theta/(\circ)$			
模型 1	20	5	0	图 6(a1)	图 6(a2)	图 6(a3)
模型 2	20	5	30	图 6(b1)	图 6(b2)	图 6(b3)
模型 3	30	5	30	图 6(c1)	图 6(c2)	图 6(c3)
模型 4	30	5	45	图 6(d1)	图 6(d2)	图 6(d3)

表 2 二维自相关函数参数估计结果对比

Table 2 Comparison of estimated results with different primary frequencies

模型	理论参数			估计结果			二维自 相关函数
	a/m	b/ms	$\theta/(\circ)$	a/m	b/ms	$\theta/(\circ)$	
模型 1	20	5	0	31.1	7	-1.4	图 6(a4)
模型 2	20	5	30	21	7	25.2	图 6(b4)
模型 3	30	5	30	33	7	26.9	图 6(c4)
模型 4	30	5	45	24	6	44.3	图 6(d4)

7(a1)和(a2)分别为随机介质模型的自相关函数及其对应的随机介质波阻抗模型. 根据波阻抗模型分别生成主频为 20 Hz(图 7(b1))、30 Hz(图 7(c1))、40 Hz(图 7(d1))和 50 Hz(图 7(e1))的合成地震记录,用于二维随机介质参数估计试验.

图 7(b2)、(c2)、(d2)、(e2)分别为计算得到的地震数据的自相关函数. 图 7(b3)、(c3)、(d3)、(e3)为功率谱法估计得到的二维自相关函数,具体结果见表 3. 以上结果与所设计的随机介质模型的二维自相关函数(图 7(a1))对比,其估计结果都比较接近理论值. 但是,地震数据中子波的主频越高,估计的横向和纵向自相关长度相对真实值偏小的程度越大,Bean 等(1999)认为这是由于地震数据的频带宽度引起的.

表 3 不同主频地震数据的随机模型参数估计结果对比

Table 3 Comparison of estimated results of 2D random medium parameters

理论模型	自相关函数	参数估计结果		
		a/m	b/ms	$\theta/(\circ)$
理论模型	图 7(a2)	50	10	30
估计结果	20 Hz 合成地震记录(图 7(b2))	44	11	27
	30 Hz 合成地震记录(图 7(c2))	41	8	26
	40 Hz 合成地震记录(图 7(d2))	37	7	26.8
	50 Hz 合成地震记录(图 7(e2))	33	7	26.7

4.3 试验 3

本试验的目的是测试在相同的随机介质参数

下,地震数据的规模对于参数估计精度的影响. 为此,我们构建了模型大小分别为 $N_x = N_t = 200$ 、300、400、500 四种情况,而其他参数相同的高斯型随机介质波阻抗模型各 10 个. 其中网格间距 $dx = 1$ m, $dt = 1$ ms,速度均值为 5000 m \cdot s $^{-1}$,速度标准差为 500 m \cdot s $^{-1}$, $a = 50$ m, $b = 20$ ms, $\theta = 30^\circ$. 然后,对主频 40 Hz Ricker 子波合成地震记录进行参数估计,结果列在表 4—7 中. 网格数为 $N_x = N_t = 200$ 、300、400 和 500 对应模型的估计结果,其综合平均误差分别为 37.1%、19%、22.1%和 22.1%.

总结上述三个试验的结果,可以发现自相关角度的估计误差较小,自相关长短轴的估计误差较大. 总的来说,地震数据规模越大,随机介质参数估计误差越小. 当地震数据的规模在 200×200 时的误差比较大,平均误差为 37.1%;而当地震数据的规模在 300×300 以上,其估计平均误差均减小到 20%左右. 因此,假设 $a > b$ 时,用于随机介质参数估计的地震数据的单边规模至少是 a 的 5 倍以上,可得到较为可信的结果.

我们认为,误差的主要来源可能是:(1)子波估计、功率谱估计中的加窗等多个步骤中都存在计算误差造成的;(2)在计算过程中,为了防止子波的某些频率的功率谱会出现零值,加白噪处理产生的误差;(3)更重要的因素,可能是随机介质地震记录不满足线性褶积模型的假设,从而产生计算误差.

5 实际地震数据的参数估计

图 8 为歧口凹陷东一下亚段地震数据体中的一个典型剖面. 从剖面可以看出,东一下亚段地层的底界内部发育有进积型地震相,以北西南东向分布于歧口滩海过渡区,地震相整体振幅为中等,连续性为中等或中、差连续,也有部分连续有顶超和底超终止现象,在终止点由于反射波复合干涉呈现弱振幅,一般为弱-中强振幅. 通过井震对比,我们将该进积型

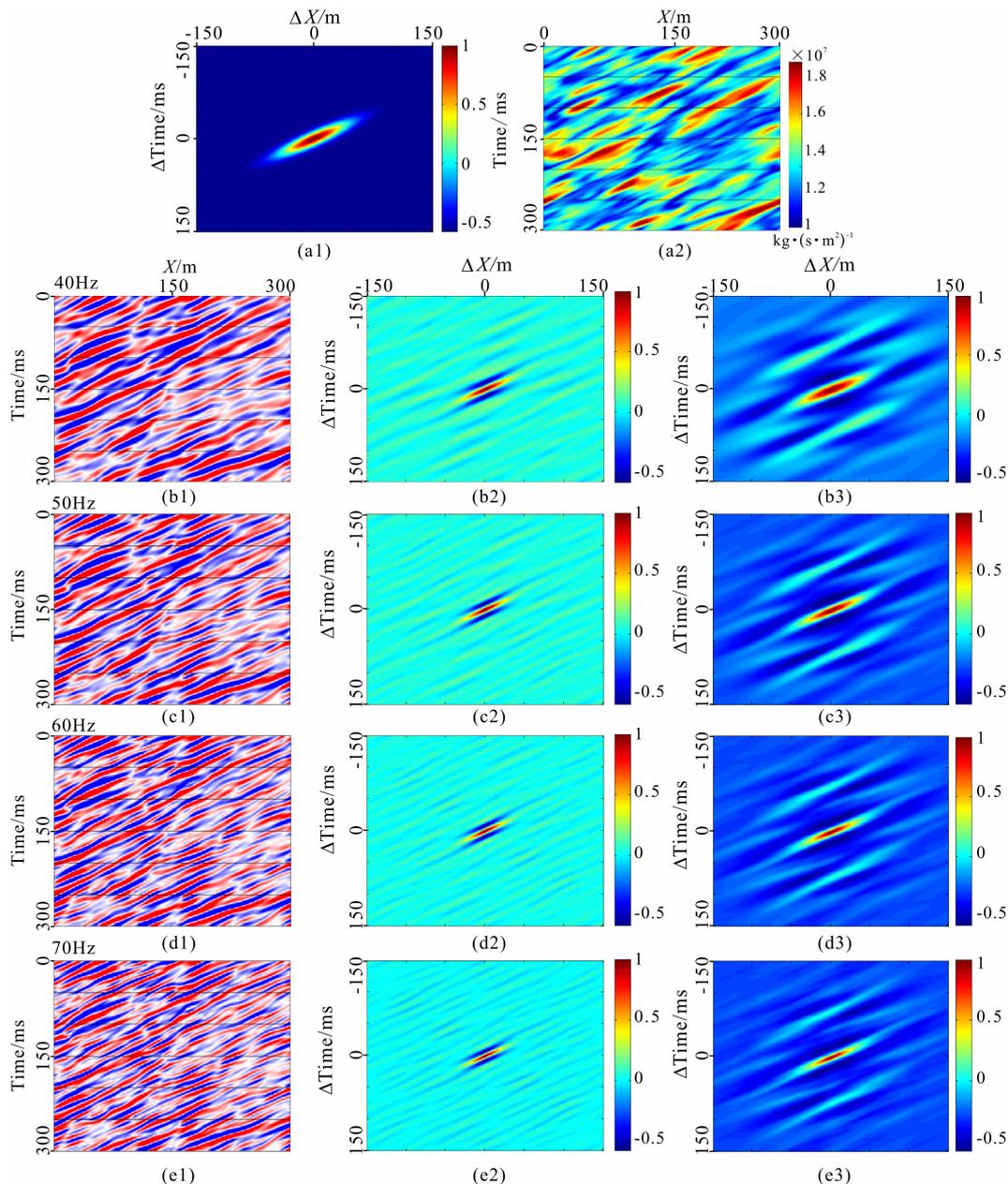


图 7 不同主频地震数据对估计结果影响对比

Fig. 7 Comparison of estimated results with different primary frequencies

表 4 随机介质参数估计结果 ($N_x = N_t = 200$)

Table 4 Estimation of parameters of random media with the size; $N_x = N_t = 200$ from Test 1

参数	理论参数	估计结果										误差/(%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a/m	50	37.2	39.2	37.7	37.7	33	37.8	28.2	19.7	40.8	40.5	29.5
b/ms	20	17.2	19.4	12.3	13.4	12.5	50.9	25.7	13.5	81.4	20.2	64.9
$\theta/(\circ)$	30	27.5	26.7	21.4	25.2	21.8	31	26.0	26.8	25.6	19.4	16.7

地震相解释为三角洲(图 8),并划分为三角洲平原(1号区域)、三角洲前缘(2号区域)和前三三角洲(3号区域)三个成因相.我们选取这三个典型区域的地

震数据,进行随机介质参数的估计试验,估计结果如下:

三角洲平原:自相关长度 a 为 200.1 m;自相关

表 5 随机介质参数估计结果($N_x=N_t=300$)Table 5 Estimation of parameters of random media with the size: $N_x=N_t=300$ from Test 2

参数	理论参数	估计结果										误差/(%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a/m	50	41.7	37.2	39	35.2	44.1	35.2	44.7	36.7	34.2	49.2	20.5
b/ms	20	14.4	17.5	13.9	19.2	15.2	11.8	18.4	16.2	17.6	14.7	20.2
$\theta/(\circ)$	30	24.8	24.0	25.3	26.2	26.8	27.9	25.9	24.1	23	22.9	16.2

表 6 随机介质参数估计结果($N_x=N_t=400$)Table 6 Estimation of parameters of random media with the size: $N_x=N_t=400$ from Test 3

参数	理论参数	估计结果										误差/(%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a/m	50	42.2	40.2	44.7	37.2	38.7	44.7	40.7	34.2	36.0	45	19.2
b/ms	20	11.2	11.9	16.9	13.0	15.9	16.9	13.9	17.1	15.7	13	27.1
$\theta/(\circ)$	30	26.3	25.3	22.2	22.2	22.9	22.2	26.4	23.8	23.4	24.6	20.1

表 7 随机介质参数估计结果($N_x=N_t=500$)Table 7 Estimation of parameters of random media with the size: $N_x=N_t=500$ from Test 4

参数	理论参数	估计结果										误差/(%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a/m	50	38.0	44.9	39.5	38.0	42	40.2	39.2	40.2	38.7	41.2	19.5
b/ms	20	11.9	12.7	14.5	11.9	12.8	11.1	11.4	12.5	13.1	19.3	34.1
$\theta/(\circ)$	30	27.8	27.3	26.2	27.8	25.6	25.4	25.1	22.4	26.4	26.9	12.8

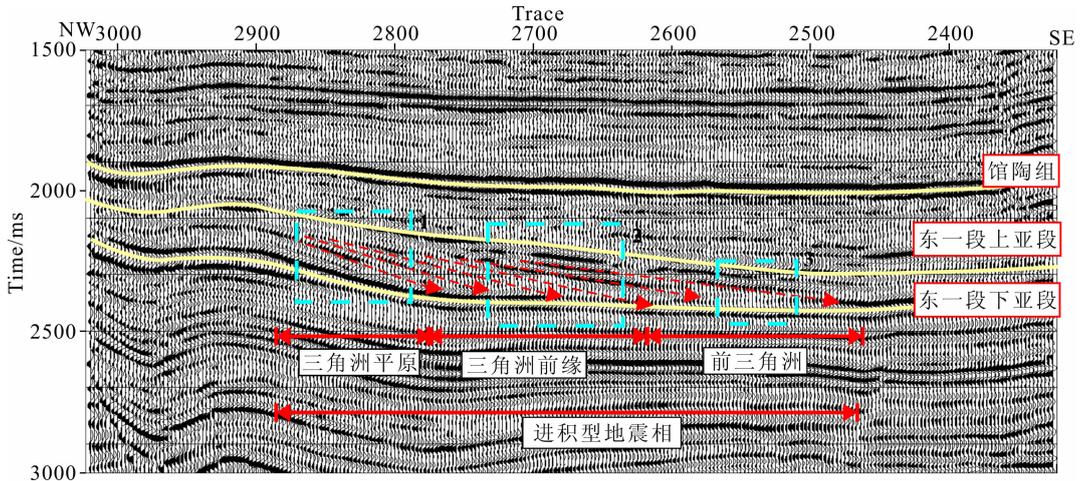


图 8 Line 2430 典型地震相分析

Fig. 8 Analysis of typical seismic facies for the field seismic data in Line 2430

长度 b 为 10.3 ms; 自相关角度 θ 约为 -3.8° ;

三角洲前缘: 自相关长度 a 为 348.5 m; 自相关长度 b 为 6.2 ms; 自相关角度 θ 约为 -1.7° ;

前三三角洲: 自相关长度 a 为 805.6 m; 自相关长度 b 为 15.8 ms; 自相关角度 θ 约为 -0.2° .

对比三角洲平原、三角洲前缘和前三三角洲相, 其

介质的横向非均质性依次由强、中强过度到弱; 而纵向非均质性, 三角洲前缘的非均质性最强, 三角洲平原次之, 前三三角洲最弱; 而自相关角度的总体趋势为: 其绝对值由三角洲平原向前三角洲逐渐变小, 直至趋近于 0.

从以上的分析结果可以看出, 在三角洲沉积体

系中,由于各成因相所对应的沉积环境不同,非均质体的分布特性必然有较大的差别.这种差别可以反映到随机介质的参数上,因此,随机介质参数估计结果可以用来识别地震相和沉积相.

6 结论和建议

随机介质参数估计是随机介质理论应用于地震勘探的关键.本文首先基于地震记录的褶积公式,推导出了二维情况下叠后地震数据与随机介质波阻抗模型的功率谱关系式,提出了功率谱法进行随机介质参数估计的方法,并结合实例详细介绍了估计的步骤.最后,通过多个理论模型和实际地震数据的估计试验,验证了方法是可行的和正确的.主要结论如下:

(1) 随机介质参数估计的功率谱法,依据 Wiener-Khintchine 定理,可直接求得随机介质模型的自相关函数,不需要通过反迭代计算过程,具有直观且高效率的优点;

(2) 该方法是从二维叠后地震数据中估计平稳随机介质参数的方法,可同时估计出随机介质自相关函数在横、纵方向上的自相关长度以及自相关角度三个特征参数.

(3) 通过地震主频与估计误差的分析表明,估计结果的偏差与地震主频具有一定的规律.对于同一个地震数据,由于各部分系统子波的主频差异较小,其估计结果的偏差也较为一致;

(4) 为保证随机介质参数估计的精确度,本文提出了用于计算的地震数据规模的选取原则.一般情况下,地震数据单边的规模至少 5 倍于自相关长度以上,可得到 20% 左右误差的估计结果.如果用于多个差异较大(参数值的差异大于 40%)的随机介质模型对比,估计结果还是较为可信的;

(5) 本文针对实际地震数据中的三角洲平原、三角洲前缘和前三三角洲三个成因相进行了随机介质的参数估计试验.结果表明,三角洲各成因相的随机介质参数具有较大的差异,进而可以为三角洲成因相的划分提供参考,反映了该方法拥有较好的应用前景.

本文仅对随机介质的参数估计方法进行了理论上的探索,模型试验的估计结果也还存在着较大的误差.我们认为,误差的主要来源可能是:子波估计、功率谱估计中的加窗和为了防止某些频率的子波功率谱出现零值进行的白噪处理,以及随机介质地震

记录不完全满足线性褶积模型假设等原因造成的计算误差.

在应用于实际地震数据时,还需要在以下四个方面继续进行研究:

(1) 寻求精度更高的子波估计、功率谱估计算法,以期从多个角度约束二维功率谱法随机介质参数估计的结果,减小估计误差;

(2) 研究随机介质地震记录是否满足线性褶积模型的假设,改进或建立新的以波阻抗为基础的地震记录数学物理模型,提高功率谱法随机介质参数估计的精度;

(3) 本文中的波阻抗模型是由速度与密度的经验公式计算得到的.由于公式中的参数是人为给定的,这显然与实际情况有一定的差距,因此是估计结果误差的来源之一.未来还将根据不同的沉积环境,对速度与密度的经验公式进行标定和校正,以减小估计误差;

(4) 本文所提出的随机介质参数估计算法,主要是基于平稳介质的假设.实际介质的随机特性在空间上是变化的非平稳随机介质.因此,发展非平稳随机介质参数的估计方法将更接近于实际情况.

致谢 感谢中国地质大学(武汉)姚姚教授、奚先教授、顾汉明教授、刘江平教授对本研究提出的很多中肯的建议,以及唐淋、王君、徐钦在研究过程中给予的无私帮助.

References

- Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(2): 615-631.
- Bean C J, Marsan D, Martini F. 1999. Statistical measures of crustal heterogeneity from reflection seismic data: the role of seismic bandwidth. *Geophysical Research Letters*, 26(21): 3241-3244.
- Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. 1974. Formation velocity and density; the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6): 770-780.
- Gibson B S. 1991. Analysis of lateral coherency in wide-angle seismic images of heterogeneous targets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B6): 10261-10273.
- Goff J A, Jordan T H. 1988. Stochastic modeling of seafloor morphology: Inversion of sea beam data for second-order statistics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B11): 13589-13608.
- Hurich C A. 1996. Statistical description of seismic reflection wavefields; a step towards quantitative interpretation of deep

- seismic reflection profiles. *Geophysical Journal International*, 125(3): 719-728.
- Hurich C A, Kocurko A. 2000. Statistical approaches to interpretation of seismic reflection data. *Tectonophysics*, 329(1-4): 251-267.
- Ikelle L T, Yung S K, Daube F. 1993. 2-D random media with ellipsoidal autocorrelation functions. *Geophysics*, 58(9): 1359-1372.
- Odgaard A, Kabel J, Van Rietbergen B, et al. 1997. Fabric and elastic principal directions of cancellous bone are closely related. *Journal of Biomechanics*, 30(5): 487-495.
- Poppeliers C. 2007. Estimating vertical stochastic scale parameters from seismic reflection data: deconvolution with non-white reflectivity. *Geophysical Journal International*, 168(2): 769-778.
- Scholer M, Irving J, Holliger K. 2010. Estimation of the correlation structure of crustal velocity heterogeneity from seismic reflection data. *Geophysical Journal International*, 183(3): 1408-1428.
- Qin Z. 2008. The impedance inversion method research based on the theory of random medium [Ph. D. thesis] (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences.
- Xi X, Yao Y. 2001. 2-D random media and wave equation forward modeling. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 36(5): 546-552.
- Xi X, Yao Y. 2002. Simulations of random medium model and intermixed random medium. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 27(1): 67-71.
- Xi X, Yao Y. 2005. Non-stationary random medium model. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 40(1): 71-75.
- Yao Y, Xi X. 2002. Modeling in random medium and its seismic wavefield analysis. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 41(1): 31-36.

附中文参考文献

- 秦臻. 2008. 基于随机介质理论的波阻抗反演方法研究[博士论文]. 武汉: 中国地质大学.
- 奚先, 姚姚. 2001. 二维随机介质及波动方程正演模拟. 石油地球物理勘探, 36(5): 546-552.
- 奚先, 姚姚. 2002. 随机介质模型的模拟与混合型随机介质. 地球科学: 中国地质大学学报, 27(1): 67-71.
- 奚先, 姚姚. 2005. 非平稳随机介质模型. 石油地球物理勘探, 40(1): 71-75.
- 姚姚, 奚先. 2002. 随机介质模型正演模拟及其地震波场分析. 石油物探, 41(1): 31-36.

(本文编辑 胡素芳)