

文章编号: 1671 - 8585(2009)05 - 0315 - 06

三维随机建模方法及其波场模拟分析

陈可洋

(中国石油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:为了更好地描述真实的三维地球介质以及复杂的构造、岩性、裂隙油气藏, 推导了基于随机过程的谱分解理论的三维随机建模方法, 其中大尺度的非均匀特性描述地球介质的平均特性, 小尺度的非均匀特性描述地质模型平均特性之外的随机扰动, 通常使用一个均值为 0 和给定方差的空间随机过程来表征。通过改变自相关长度、均值、方差、模糊度因子这 4 个统计量, 构建了不同自相关尺度下的混合型三维随机介质模型, 同时, 构建了多尺度的三维随机介质模型和包含构造的复杂三维随机孔洞介质模型, 并对双层均匀介质模型和随机孔洞介质模型进行了波场模拟和对比分析。数值模拟结果显示, 制作的三维随机介质模型能够更加灵活、方便地描述实际地球介质, 有效地模拟复杂非均匀介质的细节, 同时, 该模型的局部随机扰动可以引起更为复杂的散射波场, 影响声波传播速度和波前形状的变化, 造成局部波场能量的延时到达。

关键词: 三维随机建模方法; 局部自相关函数; 自相关长度; 谱分解; 多尺度; 波场模拟分析

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

在常规地震勘探中, 地球介质往往被近似为一系列较大的均匀层状地层。然而, 大量的地震勘探实践表明, 采用这样的理论模型无法解释许多复杂可变的地质特性。随着高分辨率地震勘探的不断深入和勘探目标复杂程度日益增加(目标变小, 隐蔽类型多), 地震勘探的分辨率和地震波主频随之提高, 频带也随之展宽。由于实际地球介质在其沉积或成岩过程中受到差异压实和变质作用等影响, 地层具有复杂的非均质特性。例如, 同一块岩石样品里可能包含多种不同岩性物质并呈杂乱分布, 此时就必须考虑小尺度非均匀的地层特性, 它们可以从测井数据或岩心样品中观测得到。一种描述或刻画随机介质的方法是将其视为由大小两种尺度的非均匀介质组成, 大尺度的非均匀特性用来描述地球的平均特征, 而小尺度的非均匀特性用来描述地球平均特征以外的任何其它扰动特征。在实际地球介质中, 小尺度特性广泛并无规律地分布着。小尺度上的这种非均匀性会造成大量小的不相干的波至, 这些波至在实际高分辨率地震数据处理中常常被作为“噪声”处理(其实部分源于介质在小尺度上的非均匀性), 因而使得常规地震勘探能力减弱。为了解决上述问题, 必须发展复杂非均匀介质的地震波场理论, 建立一种能够灵活、方便、完整地描述复杂非均匀介质的模型, 以便精细刻画地下介质的特征及其参数的变化。因此, 我们必须对小尺度上的非均匀性所造成的地震波场有所了解, 这只能寄希望于采用统计规律来重建真实的地震数据和地层特征, 将这种小尺度的非均匀特性用随机过

程来描述, 在统计意义下反演出非均匀特征(如自相关函数、自相关长度、标准差、均值、周期因子等)。美国 Unocal 公司的 Fred Aminzadeh^[1] 说过:“我们无法明显地排除地球物理学存在着重大突破的可能性, 这种突破很可能是引用非常规数学方法和统计技术的结果。现在看来, 对于估计大量的弹性和各向异性参数所作的任何确定性尝试(为的是让波动方程能更有效地近似表征实际情况), 多半已经没有价值了, 具有随机、非常态或模糊参数的波动方程或许会提供一种更切实的方法, 从而代替确定性的无望参数化的方法。很明显, 这种观点直接的一种应用就是模拟裂隙油气藏。”国内外许多学者对随机介质理论及其数值计算进行过大量研究, 并取得了一些成果^[2~12], 包括提出了一些随机介质模型, 并对声波或弹性波的传播影响进行了定性或初步定量研究^[13~14]。陈可洋等^[15] 提出了改进的随机自相关函数和两种定量评价随机扰动大小的尺度因子, 并将其应用于刻画复杂的火山岩孔洞介质; 奚先和姚姚等^[16~24] 提出了混合型随机介质和区域多尺度随机介质模型, 并深入探讨了弹性和粘弹性随机介质中的地震波场传播特征。对随机建模的上述研究主要集中在二维情况, 本文从三维空间域角度建立了不同自相关尺度的随机介质模型, 构建了复杂的三维随机介质模型, 可以更好地描述和刻画真实的地球介质。

收稿日期: 2009 - 06 - 15; **改回日期:** 2009 - 07 - 09。

作者简介: 陈可洋(1983—), 男, 大庆石油学院地球探测与信息技术专业硕士, 主要从事地震资料数字处理方法研究工作。

1 三维随机建模原理

在大多数速度或密度非剧烈变化的条件下,非均匀介质 $m(\mathbf{x})$ 可以描述为均匀介质(介质背景) $m_b(\mathbf{x})$ 和满足高斯分布的随机扰动 $\delta m(\mathbf{x})$ 组成的模型,甚至可以通过构建多尺度随机孔洞介质模型作为最佳近似描述。

随机介质模型的构建理论可描述为

$$\begin{aligned} m(\mathbf{x}) &= m_b(\mathbf{x}) + \delta m(\mathbf{x}) \\ &= m_b(\mathbf{x})[1 + f(\mathbf{x})] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(\mathbf{x}) = \delta m(\mathbf{x})/m_b(\mathbf{x})$, 代表介质的相对扰动特性; \mathbf{x} 为三维空间位置矢量。定量描述空间尺度和幅度的相对扰动量可通过自相关函数 $\hat{r}(\mathbf{x})$ 来刻画,其定义为

$$\hat{r}(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{x}') f(\mathbf{x}' - \mathbf{x}) d\mathbf{x}' \quad (2)$$

通常此自相关函数可表述为

$$\hat{r}(\mathbf{x}) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{1+r}}\right] \quad (3)$$

其中 a, b, c 分别代表 x, y, z 方向的自相关长度; r 代表模糊度因子,当 $r=0$ 时为高斯型椭圆自相关函数,当 $r=1$ 时为指数型椭圆自相关函数,介于两者之间的为混合型自相关函数。

对式(3)作三维傅里叶正变换得到能量谱密度函数

$$R(\mathbf{k}) = \|F(\mathbf{k})\|^2 \quad (4)$$

其中 $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)^T$ 。对能量谱密度函数 $R(\mathbf{k})$ 加入随机相位 $\varphi(\mathbf{k})$, 变换后有

$$F'(\mathbf{k}) = \sqrt{R(\mathbf{k})} \exp[+i\varphi(\mathbf{k})] \quad (5)$$

对式(5)作三维傅里叶逆变换,再根据均值 $\langle f(\mathbf{x}) \rangle = 0$, 方差 $\langle f^2(\mathbf{x}) \rangle = \epsilon^2$ (由于假定 $f(\mathbf{x})$ 是二阶平稳过程,所以可通过给定的均值和方差来计算空间的随机扰动 $f(\mathbf{x})$, 由此构造的介质为平稳随机介质)就可得到相应尺度的三维复杂随机孔洞介质模型。

2 应用实例

2.1 单层随机建模

这里采用 3 种不同的自相关长度来制作三维随机孔洞介质模型,只考虑扰动项 $f(\mathbf{x})$ 的特征(图 1)。模型 1(图 1a)自相关长度为 $a=b=c=5$; 模型 2(图 1b)自相关长度为 $a=2, b=10, c=2$; 模型 3(图 1c)自相关长度为 $a=b=1, c=10$ 。分析图 1 可知,用这 3 种不同的统计量可以研究不同自相关长度下的随机介质模型,构造较为复杂的随机孔洞介质模型,如裂缝介质模型、火山岩介质模型等。

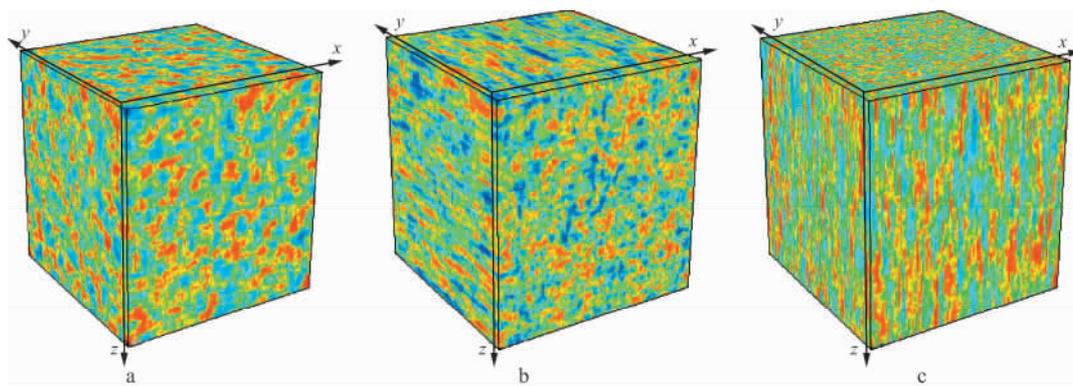


图 1 3 种不同自相关尺度下的三维随机介质模型

a 模型 1; b 模型 2; c 模型 3

2.2 复杂随机建模

根据三维随机建模的基本原理以及上述 3 个单层随机模型,构建了多尺度的随机孔洞介质模型(图 2a)。这里也只考虑扰动项 $f(\mathbf{x})$ 的特征。该模型表示,任何随机扰动量均可以由多种不同尺度的具有平稳随机过程的扰动量叠加得到。此外,制作了含构造的复杂随机孔洞介质模型(图 2b 和

图 2c), 模型中的平均介质速度从上到下依次为 1 500 m/s, 2 000 m/s, 2 500 m/s, 在此均值基础上,叠加了上述 3 种不同尺度因子的扰动量。分析图 2 可知,本文制作的三维随机模型可以有效地逼近真实的地球介质,近似刻画和描述复杂岩性、构造油气藏的细节特征,因而本文的方法是准确有效的。

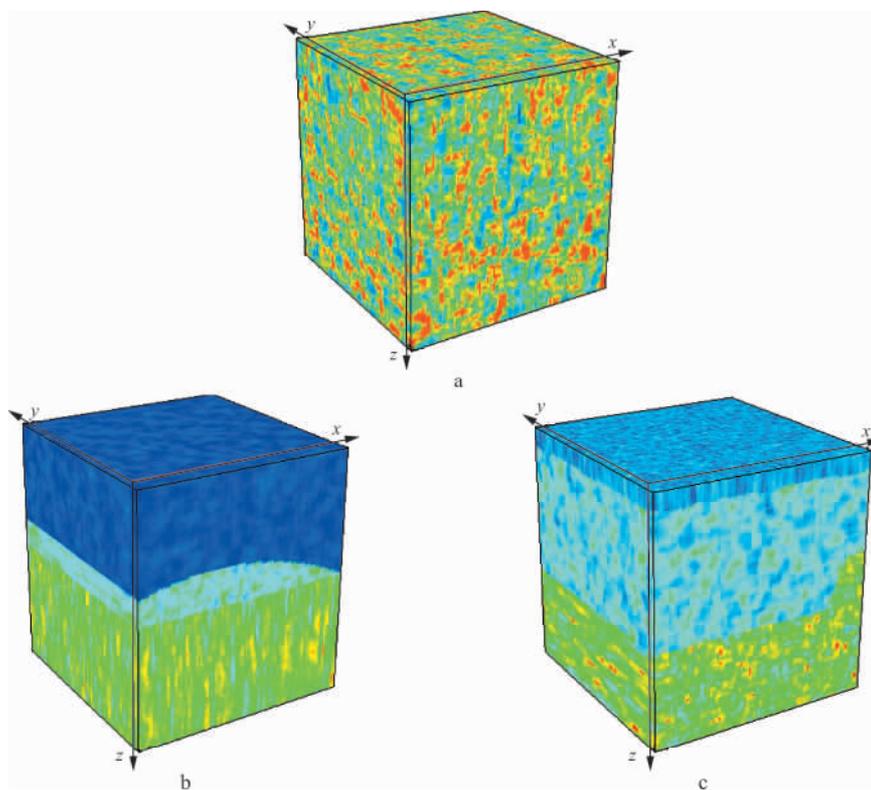


图 2 多尺度随机孔洞介质模型(a)以及含构造的三维复杂随机孔洞介质模型(b,c)

2.3 波场模拟分析

采用三维双层介质模型来进行波场模拟研究。模型总大小为 $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$, 3 个空间方向网格大小为 5 m , 如图 3 所示。其中, 均匀层状介质模型的上层速度为 $2\ 000\text{ m/s}$, 下层速度为 $2\ 500\text{ m/s}$; 随机孔洞介质模型的上层背景速度为 $2\ 000\text{ m/s}$, 下层背景速度为 $2\ 500\text{ m/s}$, 加入图 1a 的随机扰动后, 该随机孔洞介质模型的最小速度为 $1\ 761\text{ m/s}$, 最大速度为 $2\ 524\text{ m/s}$ 。选用最高频率为 80 Hz 的雷克子波, 震源位于地表中央位置; 取时间步长为 0.5 ms (满足声波波场正演数值模拟的稳定性条件), 声波传播的总时间为 0.5 s , 采用时间 2 阶精度、空间 10 阶精度高阶交错网格有限差分法求解一阶双曲型声波波动方程, 对这两个速度模型进行了三维正演数值模拟, 检波器布置于整个地表。

图 3c 和图 3d 分别为 0.15 s 时刻三维均匀层状介质和随机孔洞介质的波场快照; 图 3e 和图 3f 为图 3c 和图 3d 中过震源位置且平行于 x 轴的一张切片; 图 3g 和图 3h 为图 3c 和图 3d 中过震源位置且沿对角线方向的一张切片。图 4a 和图 4b 分别为采用三维均匀层状介质和随机孔洞介质模型计算得到的过震源位置且平行于 x 轴的数值模拟记录剖面; 图 4c 和图 4d 分别为采用三维均匀层状

介质和随机孔洞介质模型计算得到的过震源位置且沿对角线方向的数值模拟记录剖面。

对比图 3 和图 4 可知, 采用随机孔洞介质模型计算得到的波场比采用均匀层状介质模型计算得到的波场更为复杂; 在随机介质中首波和直达波后面紧连着强烈的散射波场, 这是由于随机孔洞介质存在较多的局部扰动, 即存在较多的散射点位置, 使得声波在该介质中进行了多次散射和传播。此外, 对比图 3e 和图 3f 以及图 3g 和图 3h 可知, 由于随机介质的局部扰动造成速度变化差异较大, 影响着声波波场的传播速度和波前形状; 对比图 4a 和图 4b 以及图 4c 和图 4d 可知, 图 4b 和图 4d 中的界面反射波被复杂且强烈的散射波场削弱, 同时, 该界面反射波下方仍存在着复杂的波场 (这是由该界面反射波在穿过随机介质到达地表过程中再次发生多次散射引起的), 并且由于散射作用影响造成了局部波场能量的延迟。图 4e, 图 4f, 图 4g, 图 4h 分别为图 4a, 图 4b, 图 4c, 图 4d 对应的瞬时相位剖面, 从中能很清晰地识别出由随机孔洞介质引起的复杂散射波场。可以认为, 瞬时相位有助于随机散射波场的检测与识别, 界面反射波对应的瞬时相位有较大幅度的削弱, 较弱的边界反射在瞬时相位剖面里表现突出, 而在随机介质中则被散射背景波场所淹没。

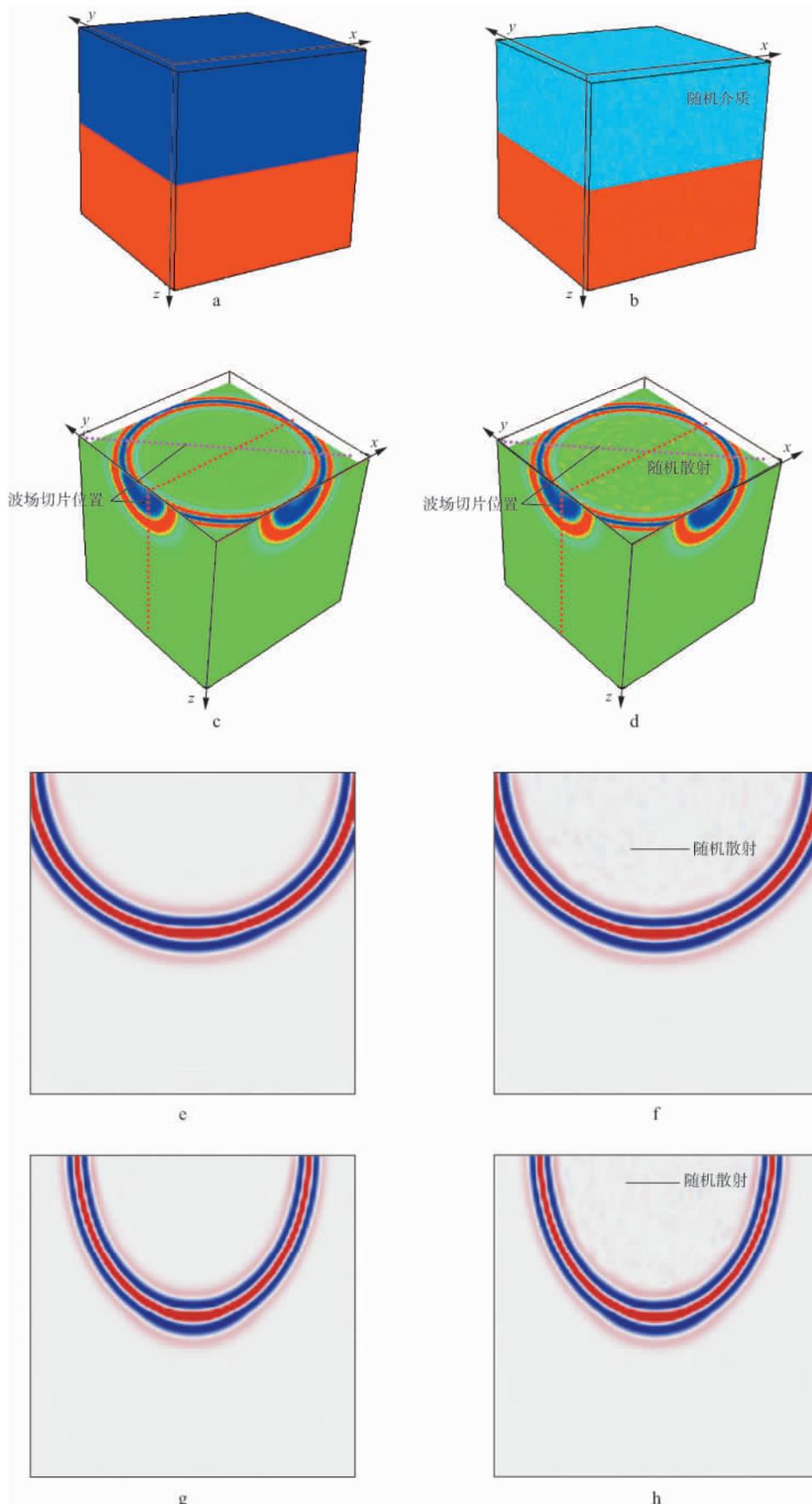


图 3 三维双层速度模型及其波场快照(0.15 s)
 a, c, e, g 均匀介质; b, d, f, h 随机孔洞介质

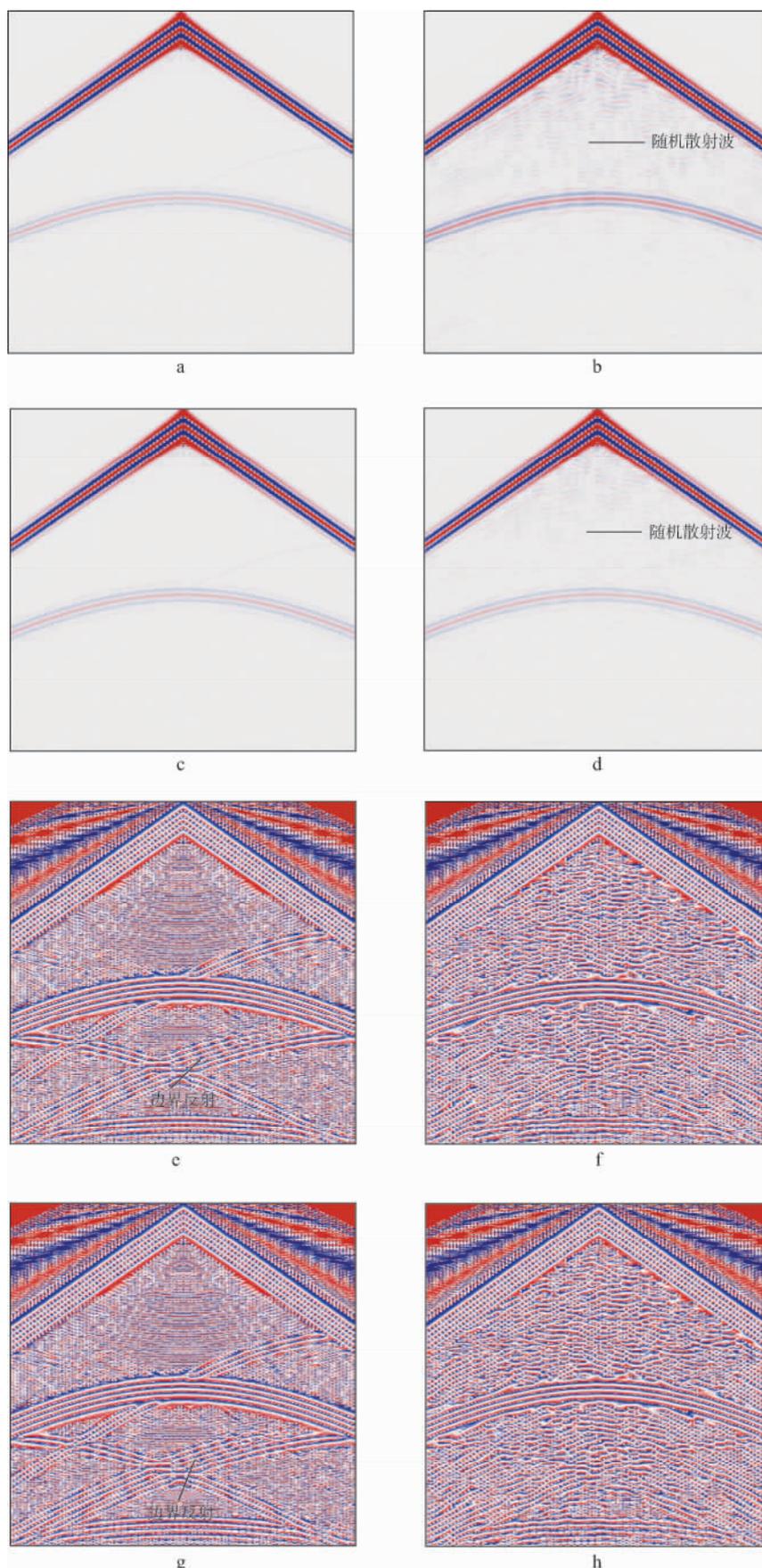


图 4 三维波场模拟剖面及其对应的瞬时相位剖面
a, c, e, g 均匀介质; b, d, f, h 随机孔洞介质

3 结束语

本文从具有椭圆自相关函数的混合型连续随机介质模型出发,根据随机过程的谱分解原理,推导了三维随机孔洞建模方法,制作了不同自相关尺度下的混合型三维随机介质模型以及多尺度和含构造的复杂三维随机介质模型。通过改变三维空间 3 个方向上的局部自相关长度以及模糊度因子,可以灵活方便地构造出各种尺度因子条件下复杂、非均匀的孔洞型或裂隙型随机介质模型,从而可以模拟复杂构造、岩性或裂隙油气藏的细节。构建的多尺度随机介质模型可以更方便地模拟各种地下介质情况,比常规单尺度随机介质模型更具实用价值。

对均匀双层介质模型和随机孔洞介质模型进行的波场模拟分析表明,随机介质中局部随机扰动的存在使得地震波场在该介质中形成多次散射,进一步使地震波场复杂化。同时,由于局部扰动速度变化较大,对声波的波前形状和传播速度有较大的影响,造成局部地震波场能量延时到达。作者认为,实际资料的随机定量分析和随机参数反演问题仍值得继续研究。

参 考 文 献

- 1 Aminzadeh F. Future geophysical technology trends [J]. *The Leading Edge*, 1996, 15(6): 739~742
- 2 Aki K. Analysis of seismic coda of local earthquakes as scattered waves [J]. *J Geophysics Res*, 1969, 74(2): 615~631
- 3 O'Doherty R F, Anstey N A. Reflections on amplitudes [J]. *Geophysics Prosp*, 1971, 19(3): 430~458
- 4 Richards P G, Menke W. The apparent attenuation of a scattering medium [J]. *Bull Seis Soc Am*, 1983, 73(4): 1 005~1 021
- 5 Frankel A, Clayton R W. A finite-difference simulation of wave propagation in two-dimensional random media [J]. *Bull Seis Soc Am*, 1984, 74(6): 2 167~2 186
- 6 Frankel A, Clayton R W. Finite-difference simulations of seismic scattering: Implications for the propagation of short-period seismic waves in the crust and models of crustal heterogeneity [J]. *J Geophys Res*, 1986, 91(6): 6 465~6 489
- 7 Lenoach B. Surface wave propagation in a random layered medium [J]. *J Phys A: Math Gen*, 1987, 20(9): 2 367~2 377
- 8 Burridge R, Chang H W. Multimode, one-dimensional, Wave propagation in a highly discontinuous medium [J]. *Wave Motion*, 1988, 11(3): 231~249
- 9 Shapiro S, Schwarz R, Gold N. The effect of random isotropic inhomogeneities on the phase velocity of seismic waves [J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 127(3): 783~794
- 10 Stanke F E, Burridge R. Comparison of spatial and ensemble averaging methods applied to wave propagation in finely layered media [J]. *Expanded Abstracts of 60th Annual International SEG Meeting*, 1990, 1 062~1 065
- 11 Kneib G, Shapiro S. Viscoacoustic wave propagation in 2D random media and separation of absorption and scattering attenuation [J]. *Geophysics*, 1995, 60(2): 451~461
- 12 Kerner C. Anisotropy in sedimentary rocks modeled as random media [J]. *Geophysics*, 1992, 57(4): 564~576
- 13 Korn M. Seismic wave in random media [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1993, 29(3): 247~269
- 14 Ikelle L, Yung S, Daube F. 2-D random media with ellipsoidal autocorrelation function [J]. *Geophysics*, 1993, 58(9): 1 359~1 372
- 15 陈可洋, 刘洪林, 杨微, 等. 随机介质模型的改进方法及应用 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2008, 27(5): 124~126, 131
- 16 奚先, 姚姚. 随机介质模型的模拟与混合型随机介质 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2002, 27(1): 67~71
- 17 姚姚, 奚先. 随机介质模型正演模拟及其地震波场分析 [J]. *石油物探*, 2002, 41(1): 31~36
- 18 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): 546~552
- 19 姚姚, 奚先. 区域多尺度随机介质模型及其波场分析 [J]. *石油物探*, 2004, 43(1): 1~7
- 20 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
- 21 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
- 22 奚先, 姚姚. 非平稳随机介质模型 [J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(1): 71~75
- 23 陈可洋. 声波完全匹配层吸收边界条件的改进算法 [J]. *石油物探*, 2009, 48(1): 76~79
- 24 陈可洋, 杨微. 优化的三维地震波旁轴近似吸收边界条件 [J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(3): 179~181, 206

(编辑:戴春秋)