

文章编号: 1671-8585(2009)02-0138-05

EnKF 整合三维地震数据和动态数据的应用

陈玉栋¹, 黄旭日^{1,2}

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061; 2. 北京旭日奥油能源技术有限公司, 北京 100101)

摘要: 主要介绍集合卡尔曼滤波 EnKF 在更新油藏储层静态参数方面的应用。根据集合卡尔曼滤波产生的必要条件, 介绍了集合卡尔曼滤波整合动态数据和三维地震数据的基本原理。通过实例分析, 验证了集合卡尔曼滤波在整合动态数据和三维地震数据更新油藏参数方面的有效性, 更新后的油藏模型能够较好地反映储层非均质性, 并且与三维地震数据有较好的一致性。还比较了利用三维地震数据和四维地震数据进行更新油藏模型的差别。通过 EnKF 方法将地震数据和动态数据结合起来描述油藏特征, 能够很好地拟合观测数据, 并获得较好的模型。

关键词: 集合卡尔曼滤波; 油藏描述; 历史拟合; 整合

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

集合卡尔曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF) 是 Evensen^[1] 根据 Epstein^[2] 的随机动力预报理论, 提出的用 Monte Carlo 方法来产生一种集合数据整合的方法。自 1994 年 Evensen 提出 EnKF 之后, 国外很多人在这方面做了进一步的研究, 证明了集合卡尔曼滤波能够有效地处理强非线性动力系统和多维数的状态空间^[3,4], 已在天气预报、海洋绘图、水文地理等领域得到了广泛的应用。2005 年, Navdal 等^[5] 对一个二维油藏模型用集合卡尔曼滤波方法吸收生产观测数据, 并连续进行油藏模型更新, 更新的油藏模型数据包括动态数据、静态数据; Skjervheim 等^[6] 利用 EnKF 分别吸收四维地震资料和生产数据比较它们的效果。2006 年, Haugen 等^[7] 将 EnKF 成功地应用到北海油田油藏模型的历史拟合中, 取得了实质性的进步; 郑占^[8] 研究了集合卡尔曼滤波方法结合四维地震数据的油藏历史拟合。2007 年, 季秀峰等^[9] 探讨了对于单一模型的 EnKF 方法更新油藏模型。因为 EnKF 不需要最优化和敏感系数的计算, 所以在 EnKF 的工作流程中可以使用任何油藏模拟器, 不必考虑模拟器内部流动方程的编码, 且易于并行计算。对于随机化最大似然方法^[10,11] 来说, 这是集合卡尔曼滤波的一个明显的优点。

目前, 集合卡尔曼滤波方法在国内石油工业中应用较少, 针对国内许多大油田都在进行大规模的高精度三维地震采集的状况, 为了使三维地震资料得到充分的利用, 能够更好地了解地下地质信息, 提高我国油田采收率, 本文利用 EnKF 整合三维地震数据和动态数据, 并应用到更新油藏模型中。以储层静态参数渗透率为例, 在地震数据的约束

下, 不断更新渗透率模型, 得到一个与参考模型渗透率分布大致相似的渗透率模型。通过实例验证, 本方法是可行有效的。

1 数学原理

EnKF 是一种适合处理反演问题的统计学方法, 特别是在实时利用观测数据方面有较大的优势。假设物理系统的演变可以用数学模型来近似模拟, 具有代表性的是偏微分方程的离散化。对油藏数值模拟而言, 一个状态向量可以用来代表油藏模型参数和观测量; 利用状态向量的多重实现可以清楚地表现出油藏储层模型参数的不确定性。在实时得到观测数据的情况下, EnKF 通过更新状态向量的集合可以描述模型系统的演变。

随着观测数据不断吸收, 集合中的每个油藏模型可以得到及时的更新。因此, 得到一个多重实现模拟变量的集合:

$$\mathbf{y}_{k,j} = \begin{bmatrix} m_s \\ m_d \\ S \\ d \end{bmatrix}_{k,j} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}_{k,j}$ 是在时刻 t_k 时第 j 个集合元素状态向量; m_s, m_d 分别是静态参数和动态参数; S 为地震数据; d 是观测的动态数据。

收稿日期: 2008-10-31; 改回日期: 2008-12-11。

第一作者简介: 陈玉栋 (1981—), 男, 中国石油大学 (华东) 地球探测与信息技术专业硕士研究生, 研究方向为地震资料解释与储层预测。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2007CB209606) 资助。

集合卡尔曼滤波器包含两个过程:一是预测的过程,基于目前的状态变量;二是分析的过程,包括数据同化和状态变量的更新。

状态向量的预测:

$$\mathbf{y}_{k,j}^f = F(\mathbf{y}_{k-1,j}^u) \quad j = 1, 2, \dots, N_e \quad (2)$$

式中: F 是正演模型; $\mathbf{y}_{k,j}^f$ 是在时刻 t_k 第 j 个状态向量的预测值; N_e 是集合元素的个数; 上标 f, u 分别表示预测和分析。

假设 $\mathbf{y}_{k,j}$ 符合高斯分布, 按照观测数据 ($d_{k,j}$) 方差最小化来更新状态向量。通过利用卡尔曼增益 \mathbf{K}_k 作为加权矩阵, 状态变量的分析为:

$$\mathbf{y}_{k,j}^u = \mathbf{y}_{k,j}^f + \mathbf{K}_k(d_{k,j} - \mathbf{H}_k \mathbf{y}_{k,j}^f) \quad (3)$$

式中: \mathbf{H}_k 是状态向量和观测数据相联系的矩阵算子。观测数据是状态向量的一部分, 已在式(1)中给出, 所以 \mathbf{H}_k 可以表示为 $\mathbf{H}_k = [\mathbf{0} | \mathbf{I}]$, 这里 $\mathbf{0}$ 是所有元素为零的 $N_{d,k} \times (N_{y,k} - N_{d,k})$ 矩阵, \mathbf{I} 是一个 $N_{d,k} \times N_{d,k}$ 的单位矩阵; $\mathbf{C}_{d,k}$ 是测量噪声的一个 $N_{d,k} \times N_{d,k}$ 维协方差矩阵, 如果观测数据误差是相互独立的, 那么它是一个对角线矩阵。矩阵 $\mathbf{C}_{y,k}^f$ 定义为在 t_k 时刻对于状态变量的协方差, 它是利用标准统计方法从预测结果 ($\mathbf{y}_{k,j}^f$) 的集合估算得到的:

$$\mathbf{C}_{y,k}^f = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{j=1}^{N_e} (\mathbf{Y}_{k,j}^f - \bar{\mathbf{Y}}_k^f)(\mathbf{Y}_{k,j}^f - \bar{\mathbf{Y}}_k^f)^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Y}_{k,j}^f$ 是在 t_k 时刻第 j 个集合元素的维数为 $N_{y,k}$ 的预测状态向量; $\bar{\mathbf{Y}}_k^f$ 是一个维数为 $N_{y,k}$ 的状态变量平均值的向量。

卡尔曼增益矩阵 \mathbf{K}_k 为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{C}_{y,k}^f \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{C}_{y,k}^f \mathbf{H}_k^T + \mathbf{C}_{d,k})^{-1} \quad (5)$$

式(5)给出了预测向量的更新, 它依赖于模拟和观测数据的差异, 差异越大, 初始状态向量更新也越大。更新后, 协方差矩阵可以被估计为:

$$\mathbf{C}_{y,k}^u = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{C}_{y,k}^f \quad (6)$$

基于 \mathbf{y} 属于高斯分布的假设, 式(3)和式(5)的有效性依赖于模型误差和观测误差的相互独立和不相关性假设, 但并没有要求数据和模型的线性关系。这意味着尽管正演模型非线性强, EnKF 仍然能保持更新模型的空间相关性, 还保留着早期的地质信息。

2 利用岩石物理方法获得地震数据

集合卡尔曼滤波利用岩石物理模型作为桥梁, 将油藏和地震联系起来。在有地震数据约束条件下的油藏, 地震数据可以作为观测向量或状态向量

参与到油藏模型储层参数的更新中, 这样有利于揭示油藏非均质特征信息。地震数据可以单独作为观测向量更新油藏模型, 也可以与动态数据联合作为观测向量更新模型, 从而更好地反映油藏储层的非均质性。文中地震数据取地震波阻抗, 在这里我们采用 Gassmann 岩石物理模型^[12]。

Gassmann 方程利用骨架特性来计算流体置换对地震特性的影响。已知固体基质、骨架和孔隙流体的体积模量, 则可以计算孔隙流体饱和介质的体积模量。孔隙流体饱和岩石体积模量 K 的计算公式为:

$$K = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1 - \varphi}{K_s} - \frac{K_d}{K_s^2}} \quad (7)$$

式中: K_s 为基质体积模量; K_d 为干岩石体积模量; φ 为孔隙度; K_f 为孔隙流体体积模量。

利用 Wood 方程可以计算混合流体的体积模量 K_f :

$$\frac{1}{K_f} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \quad (8)$$

式中: K_w, K_o, K_g 分别为水、油和气的体积模量; S_w, S_o, S_g 分别为水、油和气的饱和度, 并且有 $S_w + S_o + S_g = 1$ 。式(8)意味着孔隙流体在孔隙中是均匀分布的。

纵波速度的计算式为:

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (9)$$

式中: μ 为剪切模量; ρ 为岩石密度, 它可以由水、油和气的饱和度的线性方程得出。

$$\rho = \varphi S_w \rho_w + \varphi S_o \rho_o + \varphi (1 - S_w - S_o) \rho_g + (1 - \varphi) \rho_{ma} \quad (10)$$

式中: $\rho_w, \rho_o, \rho_g, \rho_{ma}$ 分别为水、油、气和岩石的密度。

地震的波阻抗 (Z) 定义为:

$$Z = \rho v_p = \sqrt{\rho \left(K + \frac{4}{3}\mu \right)} \quad (11)$$

式中: v_p 为纵波速度; ρ 为介质密度。

3 模型试验

油藏历史拟合的目的是通过更新模型模拟的生产数据和实际的生产历史数据进行匹配, 得到能够反映油藏生产规律的油藏模型, 为生产的预测和开发方案调整提供依据, 减少对地下油藏认识的多解性和不确定性。给定的模型动态的非线性特征,

真实状态的因素一般很难找到,我们求助于数值模拟。通过模型动态估计模型状态的每个实现,得到一个新的集合,这个先验的集合是利用地质统计学特征生成的;然后,利用油藏模拟器对集合中的所有元素进行模拟,得到一个模拟的观测数据集合;再与实际的观测数据拟合,更新先验集合中每个元素的模型参数。这个拟合过程需要反复进行,直至与实际观测数据达到基本一致为止。最后,将集合中的所有元素更新后模型参数的平均值作为实际状态的值。图 1 为集合卡尔曼滤波整合动态数据和地震数据的技术流程。

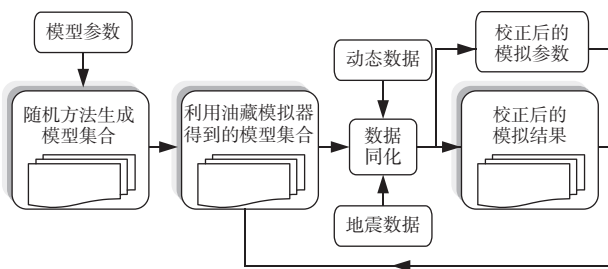


图 1 集合卡尔曼滤波实现整合动态数据和地震数据的流程

3.1 建立油藏储层参数模型试验

实验油藏模型分为 3 层,选取 $50 \times 50 \times 3$ 的均匀网格,其中每个网格的体积都相同,大小约为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,顶底为封闭的盖层和底层,边缘为封闭边界条件。初始含水饱和度为定值,初试油藏压力为 3 000 psi ($1 \text{ psi} = 6.895 \text{ kPa}$),油层顶层深度为 2 955 m,油层水平并且不含游离的天然气。全区有 5 口井:生产井 W1, W2, W3, W4 和注水井 inj。井控条件:生产井恒定的产液量为 60 标准桶/d,注水井恒定的注水量为 200 标准桶/d。分别在 1991 年 1 月和 1991 年 6 月进行了两次三维地震采集,为了方便,取模型的第 2 层为研究对象。

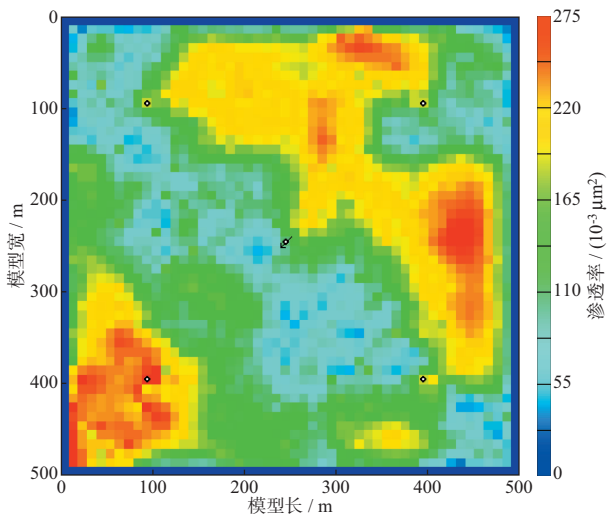


图 2 参考油藏储层模型的渗透率分布

图 2 为参考油藏储层模型第 2 层渗透率的分布图。图 3 为 1991 年 1 月的波阻抗分布图。使用随机爬山法,以井点已知的渗透率为条件点,根据油藏参考模型的地质统计学特征生成 120 个初始油藏模型的集合。图 4 为 120 个初始模型的平均渗透率分布图,可以看出,初始模型没有呈现明显非均质特征。

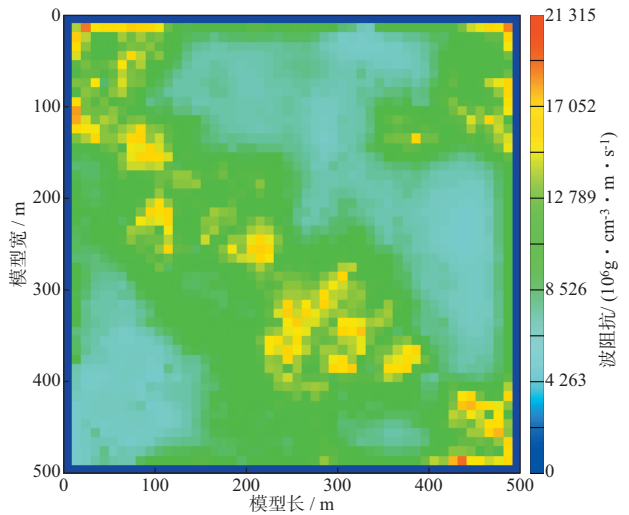


图 3 参考模型第 2 层(1991 年 1 月)的波阻抗分布

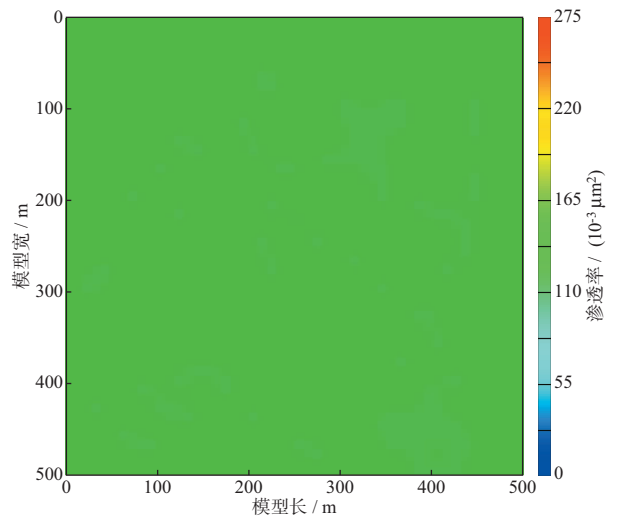


图 4 120 个初始模型的平均渗透率分布

3.2 三维地震数据和四维地震数据的比较

首先,利用集合卡尔曼滤波不断吸收新的动态数据和四维地震数据来更新油藏储层静态参数(本文取渗透率为研究对象)。利用参考模型初始时刻 ($k=0$) 和生产到 180 d ($k=1$) 两个时刻波阻抗差异作为观测数据。对初始集合的各个实现分别进行数值模拟,得到对应动态参数,通过岩石物理模型计算出各自对应的波阻抗变化,和渗透率、动态参数一起组成预测状态向量。更新步长为 30 d,

通过 180 d 的不断更新模拟得到一个与参考模型的渗透率分布非均质性相近的渗透率分布(图 5)。图 6、图 7 分别为 EnKF 结合四维地震资料校正后得到的波阻抗分布和渗透率交会图。从渗透率交会图(图 7)可以看出,集合卡尔曼滤波结合四维地震资料更新后的渗透率模型与参考模型的渗透率

分布有较好的一致性,说明了集合卡尔曼滤波结合四维地震资料更新油藏模型的有效性。

针对目前我国各大油田都在进行大规模的高精度三维地震资料采集的状况,我们利用集合卡尔曼滤波结合动态数据和三维地震数据来尝试更新油藏模型储层参数。把 1991 年 1 月和 1991 年 6 月采集的三维地震资料分别作为状态向量参与到油藏模型储层参数的更新中去。图 8、图 9 和图 10 分别为 EnKF 结合三维地震资料校正后得到的渗透率分布、波阻抗分布和渗透率交会图。可以看出,经过 180 d 的不断更新后得到的渗透率分布(图 8),与参考模型渗透率(图 2)具有较好的一致性。图 11 和图 12 分别是 EnKF 结合三维地震资料校正后 30 d 和 180 d 的波阻抗与参考模型波阻抗的差异显示。随着 EnKF 的不断更新,得到的波阻抗差异越来越小,说明 EnKF 整合三维地震数据校正油藏储层参数的不确定性与误差逐渐缩小。

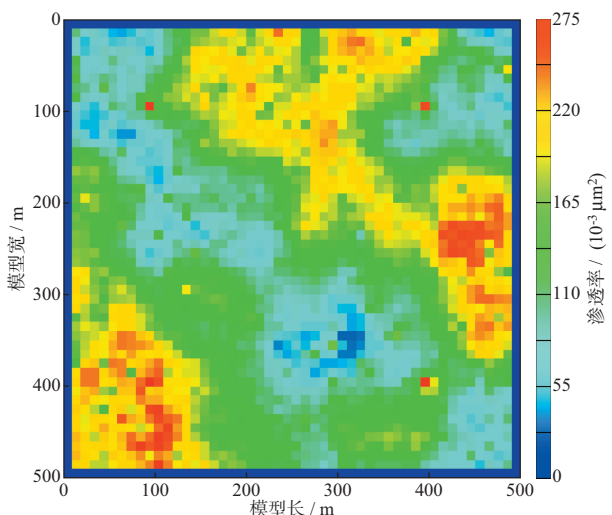


图 5 EnKF 结合四维地震资料校正后得到的渗透率分布

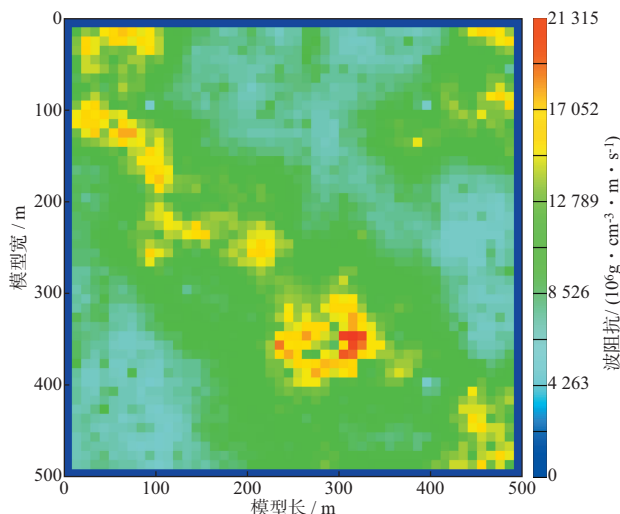


图 6 EnKF 结合四维地震资料校正后得到的波阻抗分布

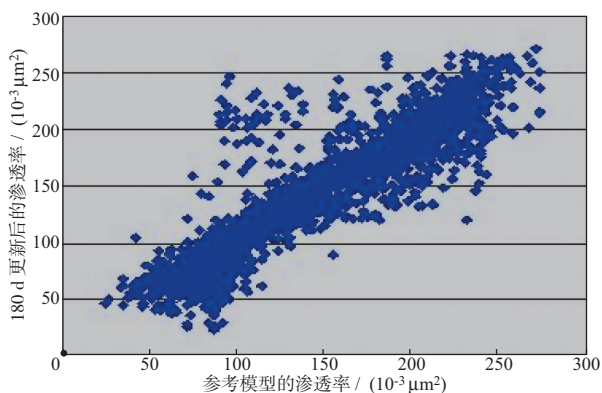


图 7 EnKF 结合四维地震资料校正后的渗透率与参考模型渗透率交会分析

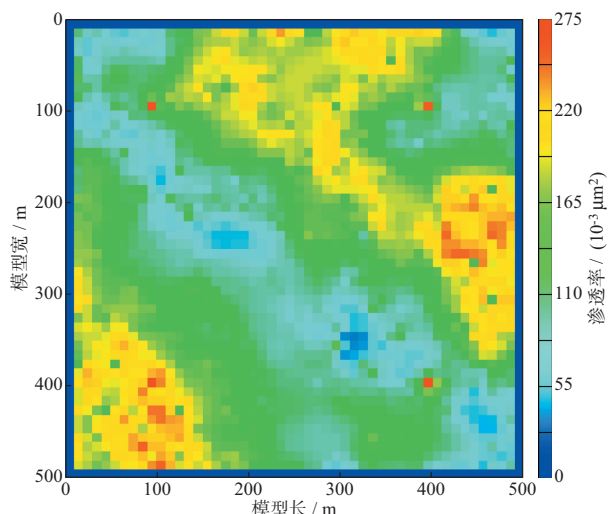


图 8 EnKF 结合三维地震资料校正后得到的渗透率分布

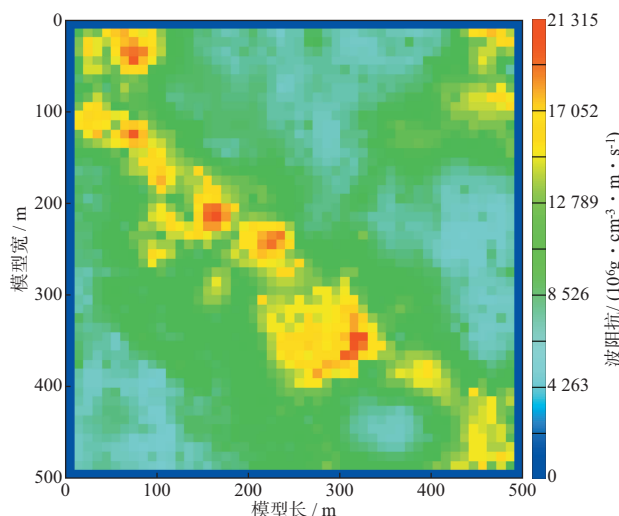


图 9 EnKF 结合三维地震资料校正后得到的波阻抗分布

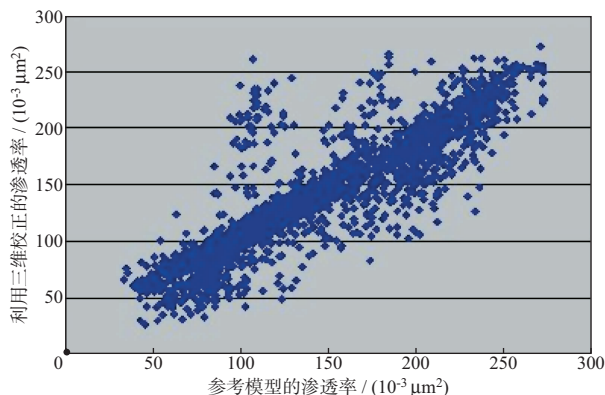


图 10 EnKF 结合三维地震资料校正后的渗透率与参考模型渗透率交会分析

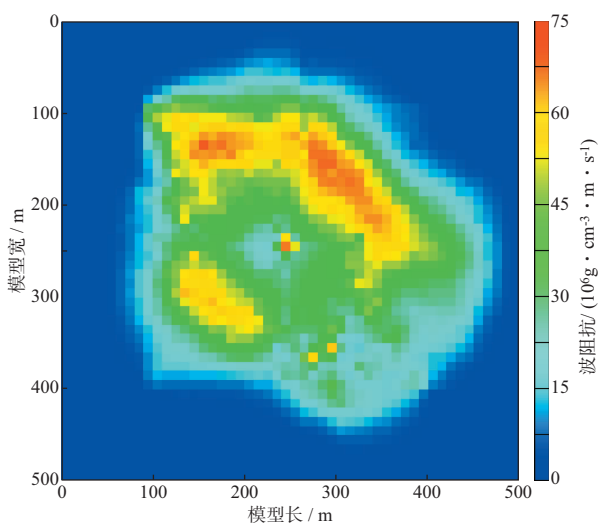


图 11 三维地震资料校正 30 d 后与参考模型波阻抗的差异

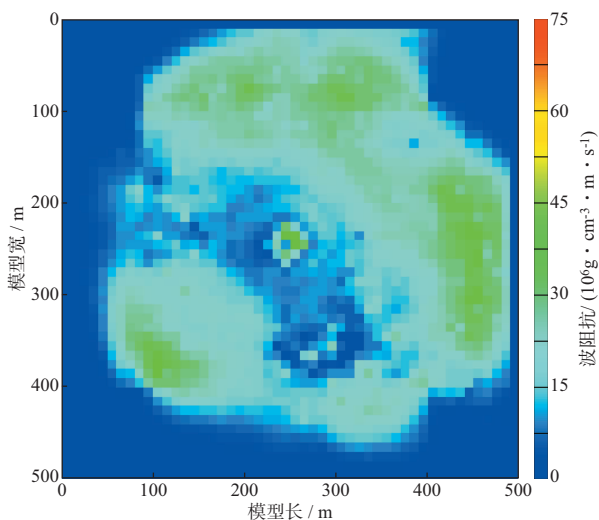


图 12 三维地震资料校正 180 d 后与参考模型波阻抗的差异

对比图 2、图 6 和图 9 可以看出, EnKF 整合四维校正得到的波阻抗图(图 6)和整合三维校正得到的波阻抗图(图 9)基本上能够揭示参考模型的波阻抗分布趋势。

对渗透率交会图(图 7, 图 10)进行定量分析, 四维地震资料校正后渗透率与参考模型渗透率的相关系数为 0.92, 协方差为 4 154; 三维地震资料校正后渗透率与参考模型渗透率的相关系数为 0.89, 协方差为 4 086。校正后渗透率模型与观测数据差异明显减小, 具有较好的一致性, 说明校正模型是合理的; 可为三维和四维地震解释提供参照, 降低多解性。集合卡尔曼滤波是一种不断同化吸收观测数据来反推状态向量的方法; 随着观测数据同化吸收, 能够揭示更多的储层信息。

模型实验表明, 集合卡尔曼滤波利用三维地震和动态数据结合可以校正储层油藏参数, 校正结果也能够揭示储层的非均质性; 利用四维地震观测数据进行校正的效果较好, 校正后的储层模型正演地震数据与观测地震数据有较好的一致性。

4 结论

集合卡尔曼滤波已经在油藏方面得到了一定的应用, 并且显示了其在历史拟合方面的优越性, 能够反映油藏的不确定性。EnKF 对非线性问题的解同样也可以应用到岩石物理模型和油藏动态数据中, 并且经过集合卡尔曼滤波的系统模型可以将反映油藏动态的地震数据作为状态向量或观测数据的一部分来进行模型的更新和预测, 从而可以改善对参数变量的估计。

通过 EnKF 在油藏和地震结合的模型试验, 可以得出如下结论:

1) 针对高精度三维地震采集的实际情况, 用 EnKF 整合三维地震数据和动态数据校正油藏储层静态参数, 经过 180 d 的不断更新, 得到了一个较好的模型;

2) 通过 EnKF 分别整合三维地震数据和四维地震数据更新油藏储层参数的模型试验对比可知, EnKF 整合三维地震也同样能反映出油藏储层的非均质性;

3) 在模型更新和优化时, EnKF 方法回避了要求高度非线性方程导数的缺点, 同时又具有比全局优化计算效率高的特点。

参 考 文 献

- 1 Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transactions of the ASME, 1960, 83(Ser. D):33~45
- 2 Epstein E S. Stochastic dynamic prediction[J]. Tellus

(下转第 146 页)

(上接第 142 页)

(Ser. A), 1969, 21: 739~759

- 3 Tippett M K, Anderson J L, Bishop C H, et al. Ensemble square root filters [J]. Mon W Rev, 2003, 131: 1 485~1 490
- 4 Evensen G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation [J]. Ocean Dyn, 2003, 53: 343~367
- 5 Navdal G, Johnson L M, Aanonsen S L, et al. Reservoir monitoring and continuous model updating using ensemble Kalman filter [J]. SPE Journal, 2005, 10 (1): 66~74
- 6 Skjervheim J A, Evensen. G, Aanonsen S I, et al. Incorporating 4D seismic data in reservoir simulation models using ensemble Kalman filter [A]. In: SPE. Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2005. 95789
- 7 Haugen V, Nvik L J, Evensen G, et al. History Matching Using an Ensemble Kalman Filter on a North Sea Field Case [A]. In: SPE. Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006. 102430
- 8 郑占. EnKF 结合 4D 地震的油藏拟合 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2006
- 9 季秀峰, 黄旭日. 单一模型法更新油藏模型的探讨 [J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(3): 192 ~ 196
- 10 Oliver D S. On conditional simulation to inaccurate data [J]. Math Geology, 1996, 28(6): 811~817
- 11 Liu N, Oliver D S. Evaluation of uncertainty assessment methods [J]. SPE Journal, 2003, 8(2): 188~195
- 12 Wang Zhijing (Zee) 著. 地震岩石物理学基本准则 [J]. 王炳章译. 石油物探译丛, 2001(4): 1~20

(编辑: 顾石庆)