

文章编号:1673-5005(2010)01-0046-04

# 利用4D地震数据校正储层静态模型的 集合卡尔曼滤波方法

郑占<sup>1</sup>, 黄旭日<sup>2</sup>, 兰瑞芳<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 北京旭日奥油能源技术有限公司, 北京 100101;  
3. 江苏油田分公司, 江苏 江都 225265)

**摘要:**储层静态模型是利用已知数据,结合先验性认识对未知储层空间进行插值预测,由此得到的结果与实际生产观测数据以及4D地震观测数据之间存在较大差异。基于集合卡尔曼滤波方法,通过观测数据反推系统模型的状态向量,对储层静态模型加以校正使得校正后的储层静态模型和观测数据之间差异最小化。选择4D地震属性差异作为观测数据,通过合理地抽取观测点,提高了运算效率。模型试验表明,校正后的静态模型能够较好地反映储层非均质性,并且与4D地震数据有较好的一致性。

**关键词:**集合卡尔曼滤波; 4D地震; 储层非均质性

**中图分类号:**TE 122.22, P 631.4      **文献标志码:**A

## Reservoir static model updating by 4D seismic data using ensemble Kalman Filter method

ZHENG Zhan<sup>1</sup>, HUANG Xu-ri<sup>2</sup>, LAN Rui-fang<sup>3</sup>

(1. Institute Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. Sunrise Petrosolution Technology Limited Company, Beijing 100101, China;  
3. Jiangsu Oilfield Branch Company, Jiangdu 225265, China)

**Abstract:** The unknown reservoir properties are usually interpolated by using known data and priori knowledge. The results of the static model from this process could not agree well with production history and 4D seismic response. Taking the observation data as state vector, ensemble Kalman Filter (EnKF) is able to update the model and to minimize the mismatch of observed data and simulated data. Selecting 4D seismic attributes difference as observation data, the calculated efficiency is improved by choosing rational observation point. The updated models can represent heterogeneity of the reservoir and match the 4D seismic data well.

**Key words:** ensemble Kalman Filter (EnKF); 4D seismic data; reservoir heterogeneity

1994年, Evensen首次引入集合卡尔曼滤波方法,用于校正非线性海洋模型<sup>[1]</sup>。随后集合卡尔曼滤波在天气预报、海洋汇图、水文地理等领域得到了广泛应用。2005年 Evensen从 Bayes 定理出发,推导给出了集合卡尔曼滤波和集合卡尔曼平滑严格的数学表达式<sup>[2]</sup>。最近几年,集合卡尔曼滤波逐渐被引入到油藏开发领域,用于油藏历史拟合、生产预测以及揭示储层非均质性等方面,并取得了较好效果<sup>[3-11]</sup>。集合卡尔曼滤波能够应用

4D地震观测数据,揭示储层的非均质信息<sup>[12-13]</sup>,然而地震数据庞大,使得该方法的应用存在一定的困难。笔者在前人研究的基础上,对利用4D地震作为观测数据校正储层静态模型的集合卡尔曼滤波方法进行研究。

## 1 集合卡尔曼滤波方法

### 1.1 原理模型

集合卡尔曼滤波系统模型包括状态方程和观测

方程。状态方程是联系前后两个时刻状态向量之间的函数关系,通过状态方程可由前一时刻状态向量得到下一时刻状态向量。观测方程是联系状态向量和观测向量之间的函数关系。

状态方程为

$$\mathbf{S}_{k,j}^f = \mathbf{F}(\mathbf{S}_{k-1,j}^u) + \mathbf{e}_1(k), \quad (1)$$

观测方程为

$$\Delta \mathbf{S}e_{k,j} = \mathbf{H}_k \mathbf{S}_{k,j}^f + \mathbf{e}_2(k). \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{F}(\cdot)$  为状态函数,这里为油藏模拟器和岩石物理模型;  $f$  代表预测量;  $u$  代表校正量;  $\Delta \mathbf{S}e_{k,j}$  为 4D 地

震观测数据; 观测因子  $\mathbf{H}_k = [0 \quad \mathbf{I}]$ , 其中  $\mathbf{I}$  为单位阵,  $\mathbf{I}$  的维数为观测数据个数;  $\mathbf{e}_1(k)$ ,  $\mathbf{e}_2(k)$  为白噪声误差。

状态向量  $\mathbf{S}_{k,j} = [R_s \quad R_d \quad \Delta \mathbf{S}e]_{k,j}^T$  为  $k$  时刻第  $j$  个实现的状态向量, 包括 3 个部分:  $R_s$  为储层静态参数,  $R_d$  为动态参数,  $\Delta \mathbf{S}e$  为 4D 地震差异数据。

## 1.2 滤波过程

集合卡尔曼滤波校正储层静态模型分为 5 个步骤(图 1)。

图 1 集合卡尔曼滤波工作流程

Fig. 1 Ensemble Kalman Filter working flow

(1) 利用地质统计学方法产生初始集合, 即多个储层静态模型集合。由这些储层模型(实现)静态参数、初始时刻动态参数以及  $\Delta \mathbf{S}e$  组成初始状态向量  $\mathbf{S}_{k,j}$ 。

(2) 集合静态参数模型数值模拟得到下一时刻各个实现对应的动态参数(流体饱和度、压力等), 通过岩石物理模型计算岩石物理参数的变化, 进而得到各个实现对应的地震响应差异  $\Delta \mathbf{S}e_{k,j}^f$ , 并和静态参数、动态参数一起组成预测状态向量。

(3) 求取集合卡尔曼滤波因子:

$$\mathbf{K}g_k = \mathbf{C}_{S,k}^f \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{C}_{S,k}^f \mathbf{H}_k^T + \mathbf{C}_{S,k})^{-1}, \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_{S,k}^f = \frac{1}{N_e - 1} (\mathbf{S}_k^f - \bar{\mathbf{S}}_k^f) (\mathbf{S}_k^f - \bar{\mathbf{S}}_k^f)^T. \quad (4)$$

式中,  $N_e$  为集合中实现的数目。

(4) 预测状态向量同化吸收观测数据, 校正状态向量。抽取校正后各个实现的静态参数, 求取平均值作为滤波结果(蒙特卡罗方法)。校正公式为

$$\mathbf{S}_{k,j}^u = \mathbf{S}_{k,j}^f + \mathbf{K}g_k (\Delta \mathbf{S}e_{k,j} - \mathbf{H}_k \mathbf{S}_{k,j}^f). \quad (5)$$

(5) 校正的集合作为下一时刻滤波的初始集合, 重复(2)~(4), 从而得到不同时刻校正的储层静态模型。

## 2 模型试验

试验模型选取渗透率作为校正的储层静态参数, 4D 波阻抗差异作为观测数据(图 2)。参考模型网格为  $50 \times 50 \times 1$ , 单一网格尺度  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10$

m。生产井 p1, p2, p3, p4 以恒定的产液量生产, 注水井 in 以恒定的注水量注水。利用地质统计学方法产生 100 个渗透率( $k$ )模型集合, 其平均值为校正前初始模型。由图 2 可以看出, 初始模型没有呈现明显非均质特征。

图 2 试验模型

Fig. 2 Experimental model

利用参考模型初始时刻( $k=0$ )和生产到 200 d( $k=1$ )两个时刻波阻抗差异作为观测数据(图 3(a))。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( $\Delta Z$ ), 和渗透率、动态参数一起组成预测状态向量。求取集合 4D 波阻抗差异的均值(图 3(b))。求取正演观测 4D 波阻抗差异与观测 4D 波阻抗差异之间的差值(图 3(c)), 可以看出差值最大的区域并非观测 4D 波阻抗差异最大的区域。

抽取差值绝对值最大的 100 个网格点作为观测点(图 3(d)),并抽取集合各个实现相对应网格点 4D 波阻抗差异,与静态数据、动态数据一起组成预测状态向量,同化吸收观测数据得到校正状态向量。抽取各个实现校正后的渗透率场并求它们的平均值,得到 200 d 时校正的渗透率模型(图 4(a))。依次抽取 200 和 300 个观测点重复以上的步骤,得到校正后的渗透率模型(图 4(b),图 4(c))。

抽取 100,200,300 个观测网格点校正的渗透率模型都能较好地反映储层非均质性的主要特征,表明滤波中起关键作用的是与观测 4D 波阻抗差异比较大网格数据。因此,对数据量庞大的地震监测数据,通过合理选择观测网格点,既能揭示储层的非均质性特征,又能提高计算效率。

校正后储层渗透率模型通过状态方程正演 4D 波阻抗,求取与观测 4D 波阻抗差异(图 5)。

图 3 观测点抽取

Fig.3 Extration of observing grid

图 4 不同观测数据校正的渗透率模型

Fig.4 Updated permeability model of different observing grids system

图 5 校正后模型 4D 波阻抗与观测 4D 波阻抗之间的差异

Fig.5 Difference of 4D seismic acoustic impedance between forward modeling and observing

通过比较可以看出,校正后渗透率模型与观测数据差异明显减小,有较好的一致性,说明校正模型是合理的,可以为 4D 地震解释提供参照,降低多解性。集合卡尔曼滤波是个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。

地震数据处理中通常得到两次地震之间的属性差异数据,因此利用 4D 属性差异作为观测数据更加具有适用性。观测数据过于庞大,给集合卡尔曼滤波矩阵求逆带来很大的计算负担,因此合理的选择观测数据是十分必要的。

### 3 结 论

(1)集合卡尔曼滤波可以利用4D地震观测数据校正储层静态参数,校正结果能够揭示储层的非均质性。

(2)校正后的储层静态模型与4D地震观测数据有较好的一致性。

(3)滤波中,起关键作用的是与4D地震观测数据差异较大观测数据点,合理选择观测数据,既能达到校正储层静态模型目的,又能提高计算效率。

#### 参考文献:

- [1] EVENSON G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo method to forecast error statistics [J]. *Geophys Res*, 1994, 99: 10143-10162.
- [2] EVENSON G. The combined parameter and state estimation problem [J]. *Computational Geosciences*, 2005, 9 (1):1-39.
- [3] NAEVDAL G, D-IANNSETH T, VEFRING E H. Near-well reservoir monitoring through Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 75235, 2002.
- [4] GU Y, OLIVER D S. History matching of the PUNQ-S3 reservoir model using the Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 89942, 2004.
- [5] LORENTZEN R J, NAEVDAL G, VALLES B, et al. Analysis of the Ensemble Kalman Filter for estimation of permeability and porosity in reservoir models [R]. SPE 96375, 2005.
- [6] NXVDAL G, JOHNSON L M, AANONSEN S L, et al. Reservoir monitoring and continuous model updating using Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 84372, 2005.
- [7] LIU Ning, OLIVER DEAN S. Ensemble Kalman filter for automatic history matching of geologic facies [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 47: 147-161.
- [8] LIU N, OLIVER D S, OKLAHOMA U. Critical evaluation of the Ensemble Kalman Filter on history matching of geologic facies [R]. SPE 92867, 2005.
- [9] ZAFARI M, REYNOLDS A C. Assessing the uncertainty in reservoir description and performance predictions with the Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 95750, 2005.
- [10] WEN X H, CHEN W H. Real-time reservoir model updating using Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 92991, 2005.
- [11] GAO G, REYNOLDS A C. Quantifying uncertainty for the PUNQ-S3 problem in a bayesian setting with RML and EnKF [R]. SPE 93324, 2005.
- [12] KHAZANEHDARI J, CURTIS T Yi T. Combined seismic and production history matching [R]. SPE 97100, 2005.
- [13] SKJERVHEIM J A, CIPR U, EVENSEN G, et al. Incorporating 4D seismic data in reservoir simulation models using Ensemble Kalman Filter [R]. SPE 95789, 2005.

(编辑 刘为清)

## 欢迎订阅《中国石油大学学报(自然科学版)》

《中国石油大学学报(自然科学版)》是教育部主管、中国石油大学主办、国内外公开发行的石油科学技术类综合性的学术刊物,属中文核心期刊,两获国家百种重点科技期刊奖和两届中国高校精品科技期刊奖,连续被评为山东省优秀期刊。目前被列入以下国际重要检索刊源数据库:美国《工程索引》(EI)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、日本《科学技术文献速报》(CBST)、美国《石油文摘》(PA)。主要刊登矿产普查与勘探工程、油气田开发工程、石油炼制与石油化工、石油机械工程及油气储运、工业过程自动化、石油工业管理工程等专业,以及计算机科学和基础科学方面的科学研究成果学术论文,并报道阶段性科研成果和学术动态。可供国内外科研人员、油田矿场技术人员和高等院校教师、学生阅读与参考。

本刊为国际标准大16开本,双月刊,逢双月20日出版,每册定价10.00元,全年60.00元(含邮费)。欢迎广大读者直接从本期刊社订阅,在校学生半价优惠。