

文章编号:1673-5005(2007)04-0046-05

油田开发中的不确定性问题及其求解方法

陈月明, 刘亚平, 袁士宝

(中国石油大学石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:由于油田开发人员主观认识的不确定性导致了对油藏认识程度的不确定(或灰色)性。在分析油田开发不确定性问题来源的基础上,以油田开发过程中的油藏描述、剩余油分布、油田产量预测和增产措施宏观规划等典型不确定性问题为例,说明了解决这类问题的有效手段为采用不确定性方法,包括随机建模技术、模糊数学、数理统计和最优化等方法;并逐一介绍了这些方法在解决油田开发不确定性问题中的应用。

关键词:油田开发; 不确定性; 求解方法

中图分类号:TE 329 **文献标识码:**A

Uncertainty problems in oil-field development and its solution methods

CHEN Yue-ming, LIU Ya-ping, YUAN Shi-bao

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: Uncertainty of personnel's subjective cognition results in uncertainty in understanding the reservoir. After analyzing the cause of uncertainty in the process of oil-field development, the uncertainty problems in reservoir description, residual oil distribution, oil production prediction and plan of oil increment measurement were taken as examples to show that uncertainty method is the key to solve those problems. Many uncertainty methods such as random modeling, fuzzy mathematics, mathematical statistics and optimization were introduced in the application of solving uncertainty problems in the oil-field development.

Key words: oil-field development; uncertainty; solution methods

1 问题的提出

油田开发的任务就是要从油田的客观实际出发,以最少的投资、最合适的速度(包括政治上和经济上的需要)获得最高的最终采收率,也就是要获得尽可能大的经济效益(包括社会经济效益和企业经济效益)。油田开发所面对的对象埋藏在几百至几千米的地下,油藏描述、剩余油分布、产量预测和稳产措施等都要根据油藏的静、动态特征来确定。由于油田开发人员主观认识具有不确定(或灰色)性,因此应该采取不确定性的方法,如随机建模、模糊数学、数理统计和最优化等方法来解决上述问题,以达到最大程度地符合实际的认识和决策的科学性。

作,油田自发现之日起到最后废弃,每一项开发战略的决策、修订、实施均以油藏描述为基础,油藏描述的任务是搞清地下油气藏的构造模型、地层模型和流体模型,从而建立三维、定量的油藏静态模型。

地下储层本身是确定的,它是许多复杂地质过程(沉积作用、成岩作用和构造作用)综合的最终结果,具有确定的性质和特征。储层建模的终极目标是要给出符合地下情况的砂体和物性分布规律。由于储层结构空间配置及储层参数空间变化的复杂性,任一尺度下储层的确定性质又难于掌握,在现有资料不完善条件下建立的地质模型肯定包含不确定性和多解性。随机建模技术为解决上述问题提供了一种有效手段,在表征储层非均质性、不确定性评价、风险分析、方案优选等方面具有很大优势,并在近年来得到了长足发展和广泛应用。

2 用于油藏描述的随机建模技术

油藏描述是油田开发工作中的一项最基础的工

油气储层随机建模技术是20世纪80年代后期

收稿日期:2007-04-27

作者简介:陈月明(1937-),男(汉族),浙江建德人,教授,博士生导师,从事油气田开发教学和研究工作。

萌芽兴起的一项油藏描述高新技术^[1]。随机建模技术既尊重油气储层固有的地质规律,反映客观存在的随机性,又能定量地描述由于资料信息的不足和认识的局限性给储层地质模型带来的不确定性,这为油气田开发战略决策中的风险分析提供了一个重要依据。

随机建模的步骤应包括两种模型两个阶段的模拟^[2-3]:

第一阶段,利用离散模拟方法(包括示性点过程、马尔可夫随机域法、截断高斯法、两点直方图法等),根据地震资料、测井资料和露头类比资料对与地质和沉积有关的大范围非均质地层进行模拟。

第二阶段,在第一阶段模拟结果的基础上,利用连续模拟方法(包括序贯高斯模拟法、序贯指示模拟法、分形随机函数法、多变量联合条件模拟等),对不同沉积相带的各种物性参数进行模拟。在这一阶段,不同沉积相带的参数是有差别的,应根据岩心资料和露头资料来确定变量、各变量间的关系及空间结构,求取有关的模拟参数。

第一阶段的模拟提供了重要的地质形态和空间结构,而第二阶段则提供了岩石物性参数在小范围内的变化规律。

采用随机建模方法建立的储层模型不是一个,而是几个,即一定范围内的几种可能实现,以满足油田开发决策在一定风险范围内的正确性,这是与确定性建模方法的重要差别。对于每一种模型,所模拟参数的统计学理论分布特征与控制点参数值统计分布特征是一致的,即所谓等概率。各个模型之间的差别则是储层不确定性的直接反映。如果所有模型都相同或相差很小,说明不确定性因素少;如果各模型之间相差较大,则说明不确定性因素多。由此可见,随机建模的重要目的之一是对储层不确定性进行评价。

3 用于确定剩余油分布的模糊数学方法

剩余油分布研究一直是油田开发中普遍关注的重点和难点问题^[4-5]。研究表明,不同类型的沉积环境、地质条件和不同开采状况导致剩余油分布及其控制因素十分复杂。

3.1 剩余油分布的地质规律

地质因素是影响剩余油分布的决定因素,它包括沉积微相、地层所处部位、有效厚度、韵律性等^[2]。沉积微相控制注入水在油层中的运动,是影

响剩余油平面分布的主要因素。由于受断层部位、砂体边缘、注采井连通关系等因素的影响,地层平面非均质性差异大,油藏不同部位剩余油分布规律和水淹规律也不同。砂体厚度变化及连续性、延伸方向和展布规律对地下油、水运动有重要影响,有效厚度越大,原始储量丰度越高。随着有效厚度的增加,弱水淹面积比例逐渐减小。受重力作用影响,高渗透正韵律油层下部渗透率更高,上下部渗透率级差较大,加剧了水沿下部窜流,因而正韵律油层自上而下驱油效率明显增大。

3.2 剩余油分布的动态规律

开发因素是影响剩余油分布的外部控制因素,主要包括注采系统、井网密度、累积动态参数等^[2]。注采系统包括注采井网、注采井井位布置、注采压差等,它影响油藏的水淹进程和剩余油分布,主要对油层层间、层内和平面非均质性产生影响;井网密度取决于砂体连通率及其物性变化,在井网密度低的情况下,平面上剩余油的分布具有更强的非均质性,加密井网会提高水驱控制程度和油藏动用程度,减轻剩余油分布的非均质程度;累积开发动态参数包括累积水油比、累积注水倍数、累积产液倍数、累积产油倍数、累积注采比等,这些参数从不同侧面体现水驱开发效果。如果开发效果不好,则容易形成剩余油富集区。

目前,国内外学者采取了多种方法研究剩余油分布,包括地球物理方法、岩心分析法以及数值模拟方法等。这些方法都存在着各自的不足:地球物理方法获得的资料仅反映井点或近井地带的信息;岩心分析法受取心的限制,不能大面积开展;油藏数值模拟方法,存在计算工作量大、研究周期长的局限性。

剩余油分布研究问题本身是一个不确定性问题,它的不确定性来自于油藏本身的复杂性、油田开发过程的多变性以及开发数据的误差。如果采用不确定性方法确定剩余油分布,将为油田开发调整提供有力的依据并提高调整的成功率。自1965年模糊子集的概念被提出以来,在石油工业中,模糊数学已被广泛应用到地震解释、钻井、录井及数据解释、经济评估、油藏描述等多个领域,应用模糊数学描述剩余油分布对油田开发有重要意义。

3.3 剩余油定量描述的模糊综合评判方法

由于影响剩余油分布的因素很多,根据各影响因素之间的关系,将模糊综合评判指标划分为地质因素和开发因素两组,进行剩余油分布描述时,首先

对影响剩余油分布的地质因素和开发因素中的各个参数按其在该大类中对剩余油的影响程度进行综合评判,称为一级模糊评判。然后在一级模糊评判基础上进行二级综合评判,即再依据地质因素和开发因素对剩余油分布的影响权重进行综合评判。

3.3.1 一级模糊评判

(1)因素集和评语集的建立。根据影响剩余油分布的地质因素和开发因素建立一级评判的因素集合 U_1 和 U_2 。地质因素一级评判的因素集合为: $U_1 = \{ \text{微相类型, 所处部位, 有效厚度, 渗透率} \}$; 开发因素一级评判的因素集合为: $U_2 = \{ \text{注采关系, 注水距离, 井网密度, 累积注水倍数, 累积产液倍数, 累积产油倍数, 累积注采比, 累积水油比} \}$ 。

选取某一参数为描述剩余油存在概率的参考指标,根据评价指标的分布情况,将其分为不同的区间,分别对应于描述剩余油形成概率的大、较大、中、较小、小5类评价标准,即建立模糊评判的评语集: $V = \{ \text{大, 较大, 中, 较小, 小} \}$ 。

(2)隶属度的求取。统计模拟区各地质因素和开发因素在相应含水率区间的分布网格数,计算各参数面积分布所占的比例,以此作为相应的隶属度值,该值在统计意义上反映了该参数在相应含水率区间分布的概率。

(3)各因素权重确定。一般来说,各个影响因素 u_i 对所研究问题的影响程度是不同的,因此对各影响因素要赋予相应的权重值来表征,各因素权重的分配是因素集上的一个模糊子集: $A = \{ a_1, a_2, \dots, a_n \}$ 。为了避免人为确定权重的主观性,推荐采用层次分析法来计算各指标的权重值。

由各地质因素和开发因素的隶属度值构成的单因素评价矩阵以及相应因素的评判权重值,即可得到地质因素和开发因素的一级评判结果,即 $B_1 = A_1 \cdot R_1$ 和 $B_2 = A_2 \cdot R_2$ 。

3.3.2 二级综合评判

剩余油的形成是地质因素和开发因素综合作用结果,基于一级评判的结果进行二级评判。二级评判的因素集合为: $U = \{ \text{地质因素, 开发因素} \}$ 。

由于在油田开发过程中,地质因素和开发因素不断变化,在开发早期,剩余油的形成主要是地质因素影响,而到了开发的中后期,开发因素影响作用越来越大。根据油田开发的实际特点确定二级评判的权重集 A 。

进行二级综合评判后,对每个评语 v_j 打分 c_j ,根

据 $c = \sum_{j=1}^m v_j c_j$ 可计算综合评判值 c 。研究对评语集 $V = \{ \text{大, 较大, 中, 较小, 小} \}$ 中每个评语打分,得到评价指标相应评语在剩余油分布概率大的总评语中所占贡献相对大。综合评判值 c 反映了剩余油平面分布的概率。综合评判值越大,表明剩余油分布可能性越大。

应用模糊数学方法综合分析地质因素和开发因素对剩余油分布的影响,由于该描述方法考虑影响剩余油分布的因素多,较真实地反映了地下剩余油分布的不确定性,克服了以往凭经验确定剩余油分布的缺陷,为剩余油分布研究提供了新的思路。在矿场资料较齐全的条件下,即使不进行数值模拟研究,也可采用该方法对同类油藏的剩余油分布进行较为准确地定量预测。

4 用于产量预测的数理统计方法

在油田生产中,各种动态指标的变化规律及预测对开发方案的调整及部署非常重要,由于对地下油藏认识的不确定性决定了这些动态指标预测的不确定性。仅对油田产量预测这一领域,已相继出现了众多基于数理统计方法的预测模型,比较著名的有油气田产量预测的 Arps 递减模型、翁氏模型等各类生命总量有限体系预测模型,基于时间序列分析与灰色系统理论的组合模型以其准确的预测能力在油田产量预测中发挥了重要的作用。

时间序列分析是统计学的一个重要分支,灰色系统理论是一种动态趋势预测理论。在油气田产量预测中,先采用灰色建模或逐步回归方法,从数据中得到趋势项的数学模型,然后对剔除趋势项之后的数据进行时间序列分析,建立自回归滑动平均(ARMA)模型。将以上两个模型结合起来构成组合模型,用于油田产油量预测。

油田开发数据多是均值不为零且有一定变化趋势的数据序列,属非平稳时间序列^[6]。已知非平稳时间序列 $\{x_t\}$ 是确定性部分与平稳随机部分的叠加,其中 $t = 1, 2, \dots, N$ 。若记确定性部分为 d_t , 平稳随机部分为 ε_t , 则有

$$x_t = d_t + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, N.$$

上式称为组合模型,趋势项 d_t 是随时间变化的某一确定性函数,如线性函数、幂函数和指数函数等。 $\{\varepsilon_t\}$ 是从 $\{x_t\}$ 中提取了 $\{d_t\}$ 后剩下的平稳随机序列,可用 ARMA 进行模型描述,将这两部分组合即得到组合模型。采用灰色模型法和逐步回归法对确

定性趋势项进行估计。图1是一个应用组合模型预测产量的实例,可以看出,该方法预测油田产量是准确有效的。



图1 应用组合模型预测某区块产油量

应用灰色理论等数理统计方法预测油田开发过程中的产量,可以较准确地反映油田开发过程中的产量变化固有趋势和随机特征,较准确地反映未来产量的不确定性,为油田产量预测提供较为实用的方法,在不需要进行大量计算的情况下,对油田未来产量进行快速准确的预测。

5 用于措施宏观决策的最优化方法

油气田开发的特有规律呈现为多阶段性动态特征,在不同阶段油田开发工作者面临的问题都是如何有效地组织有限资源实现经济效益最大化的问题。不同的产量构成和稳产措施配置会达到不同的开发效果,这是一个具有不确定性的问题,最优化方法是解决此类问题的有效方法^[4,7-10]。

就水驱油田稳产措施规划而言,在考虑技术和经济最佳的情况下,利用最优化理论建立一个典型的油田稳产措施配置模型,该模型由目标函数和约束条件两部分组成,目标函数是为了求解整个规划期内各项稳产措施的费用极小值或是偏差最小值。约束条件是根据油田开发实际所设立的,一般包括产油量约束(规定了规划期内全油田或开发区逐年必须完成的原油生产任务)、产水量约束(规定了全油田在规划期内年产水量最高界限,使油田的含水率控制在规定的范围内)、措施工作量约束(规定了全油田对于各段增产措施的工作量界限,在这个界限内的工作是油田实际能力所能完成的)及根据油田开发调整的方针原则必须建立的其他约束。

随机规划方法充分考虑了增产措施效果的不确定性,使措施规划更能反映开发实际。该模型是在满足增产油量、增注水量、成本和措施量限制等约束条件的同时,使其与规划方案的偏差达到最小,这里

措施效果参数是在一定范围内变化的,而且要求约束条件在一定的置信范围内满足即可。设 x_i 为决策变量,表示措施 i 的年井次数, $i = 1, 2, 3, \dots, m, \dots, n$ 。前 m 种为油井措施,后 $n - m$ 种为水井措施。数学模型的具体形式为

$$\begin{cases} \min Z = P_1(d_1^+ + d_1^-) + P_2(d_2^+ + d_2^-) + P_3 d_3^+ + \\ P_4 \sum_{i=1}^n v_i d_{3+i}^- \\ \text{s. t.} \\ P_r \left| \sum_{i=1}^m q_{oi} x_i - d_1^+ + d_1^- = Q_p - Q_l \right| \geq \alpha, \\ P_r \left| \sum_{i=1}^{n-m} q_{wi} x_i - d_2^+ + d_2^- = W_w \right| \geq \beta, \\ \sum_{i=1}^n C_i x_i - d_3^+ + d_3^- = C_s, \\ x_i - d_{3+i}^+ + d_{3+i}^- = v_i, \quad i = 1, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n x_i \leq n_s, x_i \leq u_i, \quad i = 1, \dots, n. \end{cases}$$

式中, q_{oi} 为措施 i 增油量,为随机的不确定参数,服从某种分布; q_{wi} 为措施 i 的增注量,为随机的不确定参数,服从某种分布; $P_j (j = 1, \dots, 4)$ 为优先因子,表示各个目标的相对重要性,且对所有的 j 均有 $P_j \gg P_{j+1}$; v_i 为第 i 个目标负偏差的权重因子; d_i^+, d_i^- 分别为目标 i 偏离目标值的正、负偏差; d_1^+ 和 d_1^- 分别为增油量的正、负偏差; d_2^+ 和 d_2^- 分别为增注水量的正、负偏差; d_3^+ 和 d_3^- 分别为措施成本的正、负偏差; d_{3+i}^+ 和 d_{3+i}^- 分别为措施量的正、负偏差; α, β 为事先给定的约束条件和目标函数的置信水平; Q_p 为老井总增油量; Q_l 为老井自然产量; W_w 为水井增注量; C_i 为单位措施费用; C_s 为措施资金总额; n_s 为措施总数限制。

本模型解的形式为: $x = (x_1, x_2, \dots, x_l)$, 表示 l 种措施的井次数,其中 x_1, x_2, \dots, x_l 表示 l 种油水井措施的井次数。通过规律统计,模型中随机参数 q_{oi} 和 q_{wi} 服从正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$, 其中 μ_i 为各项措施的增油量或增注量的平均值, σ_i^2 为方差。

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,在解决复杂的全局优化问题方面,遗传算法已得到了成功的应用,故采用遗传算法解决传统方法不能解决的模糊规划问题。

应用最优化理论进行稳产措施的宏观规划,可以在考虑技术和经济最佳的情况下,兼顾油田未来措施产量的不确定性,在众多的规划方案中寻求最

优的规划方案,为充分利用有限资源、提高油田开发的经济效益提供有力手段。

6 结束语

在油田开发过程中,因为技术水平和研究手段的不同,产生了油田开发人员对研究对象主观认识的不确定性。随机建模理论和模糊数学等不确定性方法为研究油田开发过程中的不确定性问题提供了有效的手段。利用随机建模方法建立的油藏模型能更准确地描述地下非均质情况;模糊数学方法可以快速准确地判断剩余油的分布状态;数理统计方法在预测油田未来的产量中发挥了重要的作用,实现了资源和技术的最优化配置。

参考文献:

[1] 沈平平,宋新民,曹宏. 现代油藏描述新方法[M]. 北京:石油工业出版社,2003:157-178.

[2] 张团峰,王家华. 储层随机建模和随机模拟原理[J]. 测井技术,1995,19(6):391-397.
ZHANG Tuan-feng, WANG Jia-hua. The principle of stochastic modeling and stochastic simulation of reservoir [J]. Well Logging Technology, 1995, 19(6):391-397.

[3] 姜香云,王志章,吴胜和. 储层三维建模及在油藏描述中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2006,21(3):902-908.
JIANG Xiang-yun, WANG Zhi-zhang, WU Sheng-he. 3D reservoir modeling and its application [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3):902-908.

[4] 陈月明. 水驱油田高含水期稳产措施宏观决策方法[M]. 东营:中国石油大学出版社,2006:89-123, 208-252.

[5] 孙梦茹. 基于模糊综合评判的剩余油分布定量预测[J]. 油气地质与采收率,2005,12(2):52-54.

SUN Meng-ru. Quantitative description of remaining oil distribution based on fuzzy comprehensive discrimination analysis[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2):52-54.

[6] 付国民,马力宁,屈信忠. 采用多级模糊综合评判法对剩余油潜力定量评价[J]. 地球科学与环境学报, 2002, 26(2):38-41.
FU Guo-min, MA Li-ning, QU Xin-zhong. Quantitative evaluation for the potentiality of remaining oil by multilevel fuzzy judgement method[J]. Journal of Earth Science and Environmental, 2002, 26(2):38-41.

[7] 范海军,陈月明. 用组合模型预测油田产油量[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1998, 22(3):54-55.
FAN Hai-jun, CHEN Yue-ming. A combined model for predicting oil production in oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998, 22(3):54-55.

[8] 李宇峰,陈祥光. 油田产量预测系统的研制[J]. 微计算机信息:嵌入式与SOC, 2006, 22(2):191-192.
LI Yu-feng, CHEN Xiang-guang. Development of forecasting system for output oil quantity in crude oil production[J]. Control & Automation, 2006, 22(2):191-192.

[9] 盖英杰,陈月明,范海军. 油田稳产措施的随机规划模型[J]. 经济数学, 1999, 16(3):45-51.
GAI Ying-jie, CHEN Yue-ming, FAN Hai-jun. A model with random parameters for measure planning of oil field [J]. Mathematics in Economics, 1999, 16(3):45-51.

[10] 陈月明,盖英杰,范海军. 油田稳产措施规划数学模型[J]. 经济数学, 2000, 17(2):45-51.
CHEN Yue-ming, GAI Ying-jie, FAN Hai-jun. Mathematics models for measure programming of oil field[J]. Mathematics in Economics, 2000, 17(2):45-51.

(编辑 李志芬)

“土地开发整理规划关键技术研究”达到国内领先水平

由中国石油大学(华东)地球资源与信息学院樊彦国副教授主持完成的“土地开发整理规划关键技术研究”项目,通过由山东省科技厅组织的专家技术鉴定,认为该成果整体上达到国内领先水平。该成果在土地开发整理规划中的土地适宜性评价、水土资源平衡分析、土地权属调整工作方案编制、专题图制作及三维景观模型构建等方面具有一系列理论与技术创新,已在辽宁、江西、广西、江苏、新疆等9个省市地区共39个土地开发整理项目中应用,其中已有37个项目通过国土资源部审批,部分项目已进入工程施工阶段。

(焦念友 供稿)