

脉冲试井数值模拟的现场应用

徐 劭* 梁万库 李忠义 刘曰武

(大庆油田采油工艺研究所)

(中国科学院力学所)

摘要 通过油藏数值模拟技术,建立了多层油藏非均质及多相流体条件下的理论模型,并做出脉冲试井的压力理论曲线。现场应用中,在充分考虑地质及沉积特征的前提下,通过调整静态参数得到了理论曲线与实测曲线的最佳拟合,最终获得模拟区域内多层非均质渗透率分布图。该方法所获得的地层水平渗透率分布与其它方法所获得的渗透率分布互相补充,可为三次采油方案设计提供可靠依据。

关键词 脉冲试井 数值模拟 应用 模型 压力

引 言

在油田开发后期实施三次采油时,由于成本高,在方案实施之前必须进行详细的油藏描述。利用测井、录井和取芯等工艺可以提供有关岩石渗透率、孔隙度及流体饱和度等参数,在此基础上运用小层对比等方法可以建立起初始的地质模型。但这些方法所提供的参数只反映油藏一小部分,并受到钻井、测井等技术条件的影响,具有一定的局限性。储层经长期注水后,储层参数及流体分布情况均发生很大变化,因此必须通过其它方法对初始的地质模型进行修正。

脉冲试井是多井试井的一种特殊形式,其分析方法是利用脉冲试井理论图版,通过实测压力曲线,可得出流动系数、渗透率和储能系数。其理论模型仍局限于把油藏视为单层、均质、流体仅为单相的假定范围内。为使理论模型能更真实地描述实际油藏,本文通过油藏数值模拟技术,得到了较符合实际油藏情况的多层非均质及多相流体条件下的地质模型,为三次采油方案设计的优化提供了可靠的依据。

理论模型的建立和求解

脉冲试井数值模拟方法是将数值模拟技术和脉冲试井相结合,充分利用两者的优点进行油藏描述的一种方法。在建立数学模型时,考虑到油藏的纵横向非均质性及流体分布情况,建立了三维两相流的数学模型,利用差分方法将数学方程离散,建立差分方程,用隐式压力显式饱和度的 MPES 方法求解,从而得到任一时刻的压力及饱和度分布。

1 三维两相流的数学模型

基本假设:油藏由几个水平小层组成(厚度可以不同),隔层具有微弱垂向连通性,但其厚度忽略不计;油藏内存在油水两相流;油层具有非均质性;油藏流体流动符合达西定律;油藏岩

* 徐劭,男,工程师,硕士,现从事试井分析与理论研究工作。地址:大庆市采油工艺研究所试井中心,邮政编码:163453

石及其流体均可轻微压缩;油水两相间及油水与岩石之间无化学反应;不考虑毛管力及重力。

$$\text{数学模型} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_l \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_l \frac{\partial p}{\partial z} \right) + q_l = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho S_l) \quad (1)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (2)$$

外边界封闭

$$\lambda \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{\Gamma=p} = 0 \quad (3)$$

内边界条件

$$Q_l(k) = f(t) \quad (4)$$

初始条件

$$p(x, y, z) \Big|_{t=0} = p_i \quad (5)$$

其中

$$\lambda_l = \rho_l K_x K_{rl} / \mu_l \quad \lambda_l = \rho_l K_y K_{rl} / \mu_l \quad \lambda_l = \rho_l K_z K_{rl} / \mu_l$$

上述模型的辅助关系式是

$$K_{rv} = K_{rv}(S_w) \quad (6)$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_o) \quad (7)$$

式中: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ —— l 相在 x, y, z 方向的流动系数; p_i ——原始地层压力, 10^{-3} MPa; S_o, S_w ——含油、含水饱和度; K_{ro}, K_{rv} ——油、水相对渗透率; l ——油、水相。

2 差分方程的建立

采用 MPES 方法,即将单相方程联结成以压力为基础的单相多相方程,求出压力分布,然后对每一点显式求解饱和度,将压力与饱和度交替求得。在计算过程中,方程左端的达西系数取上一时间步长的值,用差分方法将方程离散。对于空间任一点 (i, j, k) 得到的差分方程为

$$z_l p_{k-1} + g_l p_{j-1} + c_l p_{i-1} + a_l p + b_l p_{i+1} + f_l p_{j+1} + S_l p_{k+1} = d_l + v_{ijk} \frac{\varphi}{B_l} \cdot \frac{S_l^{n+1} - S_l^n}{\Delta t^n} \quad (8)$$

式中: $z_l, g_l, c_l, a_l, b_l, f_l, d_l$ ——方程组的系数。

将油水两方程合并,消去饱和度项,可以对每一个节点得到一个压力方程,即

$$z_l p_{k-1} + g_l p_{j-1} + c_l p_{i-1} + a_l p + b_l p_{i+1} + f_l p_{j+1} + p_{k+1} = d \quad (9)$$

将这些方程联立,再把求得的压力值代入原方程,显式地求出各网格饱和度,从而将压力与饱和度交替求得。在自然排列方式下,该方程组系数是一个规则的七对角矩阵,其非零元素呈条带状分布。

3 观察井井底压力的计算

在计算过程中,本模型没有考虑观察井井内层间窜流。由于井底压力主要受总流动系数的影响,因而观察井井底压力取井穿过该点网格处的总流动系数的算数平均值来计算。

应用实例

基于上述理论模型,编制计算机软件,可以进行实测脉冲试井资料的数值模拟。现以北一断西丁 6-P28 井组的模拟结果为例,进行模拟并分析。

1 概况

该井组由 1 口激动井(注水井)和 4 口观察井(生产井)组成,以激动井为中心,呈“X”型分布。激动井:北 1-丁 6-P28 井(简称 1 井);观察井:北 1-丁 6-P127 井(简称 2 井),北 1-5-P37 井

(简称3井), 北1-丁6-P128井(简称4井), 北1-6-P36井(简称5井)。测试及模拟层位是葡12, 分为两个小层, 即葡12A层、葡12B层。该井组位于北一区断西东侧的水驱对比区, 是由喇嘛甸—萨西河系统形成的泛滥—分流平原相的碎屑岩构成的地层, 砂体类型以曲流河道砂和分流河道砂为主, 是大庆油田最好的油层之一。

2 数值模拟

该模型平面网格为 22×18 , 上下共两层, 总计网格数为792个, 边界网格为200m。在模拟时, 对地面的井位作了坐标校正, 根据井斜、井深等折算到油层中部位。

3 地质及流体的静态初始参数

由测井曲线及取芯资料获得的各井点的水平渗透率、垂向渗透率、有效厚度及含水饱和度值, 通过计算机自动插值后填入各网格, 作为模拟的初值。在模拟过程中, 各层的有效厚度、含水饱和度及隔层垂向渗透率值均未变动。油、水及岩石的压缩系数分别为 $8.6 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ 、 $6.62 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ 及 $9.6 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$; 油、水的粘度为 $8.3 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 、 $0.6 \text{mPa} \cdot \text{s}$; 油的体积系数为1.12; 岩石孔隙度为28%。

4 脉冲测试情况

该井组测试前关井较长时间, 其周围井保持原工作制度不变, 保证了测试前压力基本稳定, 用高精度电子压力计在4口观察井上分别测到静压。本次测试共完成5个脉冲周期, 每个周期96h, 开井48h, 关井48h, 现场直接记录每个脉冲流量。各观察井的压力反应曲线分别见图1~图4。

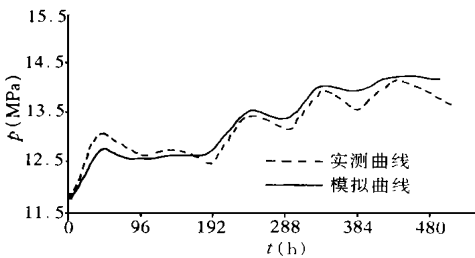


图1 1井与2井脉冲反应曲线

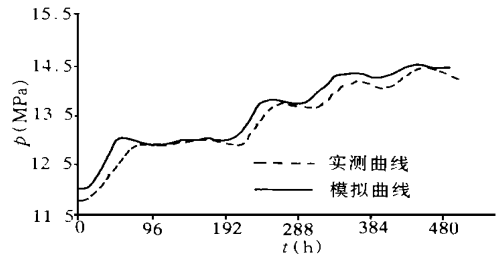


图2 1井与3井脉冲反应曲线

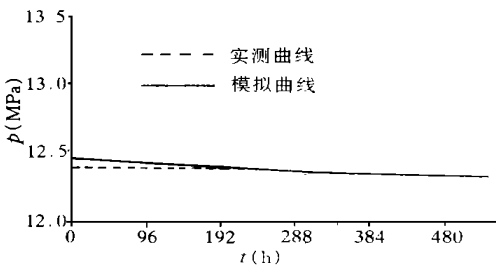


图3 1井与4井脉冲反应曲线

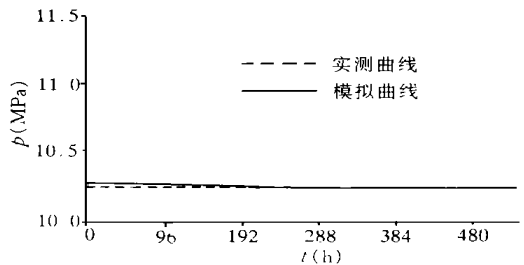


图4 1井与5井脉冲反应曲线

5 模拟结果及分析

从拟合情况看, 理论与实测压力反应曲线很接近, 在满足这一拟合条件下, 所得到的两层平面渗透率分布图应当认为比较合理(见图5)。

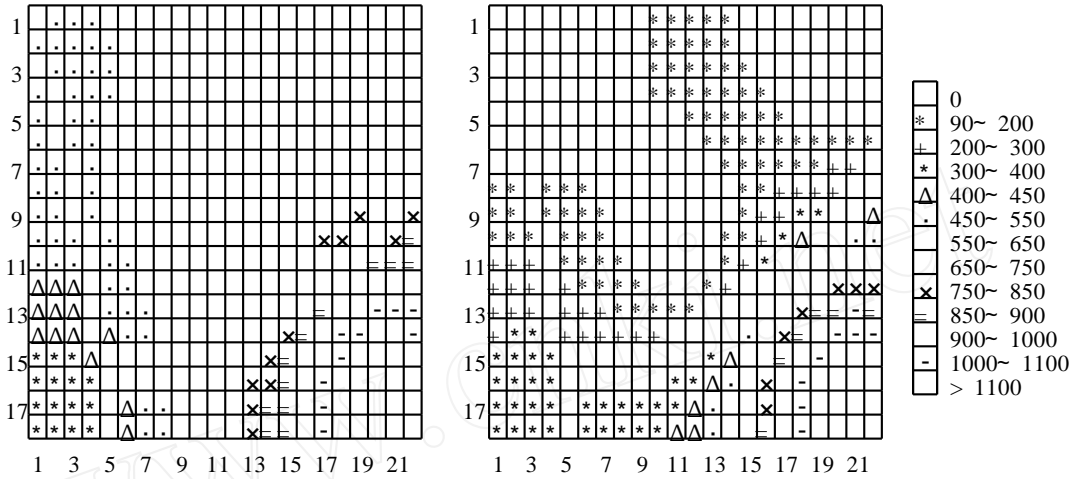


图5 葡12A层(左)、葡12B层(右)水平渗透率分布图

(1)从实测脉冲压力反应曲线看,4井、5井没有接收到压力反应。经详细复查是由于地质因素造成的。因此,可知1井和2井、3井是一个水动力系统,4井与5井不属于这一水动力系统,从实测静压值的比较中也可以得到证明。在脉冲测试前,各井关井长时间后测静压,得到2井、3井、4井和5井的静压分别为11.12MPa、11.34MPa、12.26MPa和10.11MPa。4井、5井也不是一个水动力系统,因此模拟过程中,在研究了其地质特征并考虑地质专家们关于该区域内沉积相特征意见的基础上,在4井附近加上一条断层遮挡,而5井与1井之间存在一条古废弃河道。通过对各参数模拟分析,对地层参数进行调整,得到理论与实测压力反应曲线最佳拟合,确定了此断层与古废弃河道的地理位置(见图5)。

(2)从实测反应曲线可知,1井与2井、3井是一个水动力系统,关于这一区内的渗透率分布,模拟中认为比较均质。原因在于:从静压看,经长时间关井,压力恢复值基本接近;从生产动态看,2井、3井1993~1994年的生产情况比较稳定。2井的有效厚度为1.3m,日产液量为 39 m^3 ,平均单位厚度产液量为 $30\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$;3井有效厚度为3.9m,日产液量为 136 m^3 ,平均单位厚度产液量为 $35\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。说明两井附近的渗透率比较接近,且测井解释的渗透率分别为 $0.537\text{ }\mu\text{m}^2$ 和 $0.580\text{ }\mu\text{m}^2$;另外,葡12是大庆油田最好的油层之一,各油砂体的渗透率相对比较均匀。在模拟时考虑渗透率分布基本均质,获得最佳拟合条件下,做了适当调整。

结 论

- 1 本文提出了脉冲试井数值模拟方法,并进行了现场实验研究,获得了较好的结果。
- 2 利用本文提供的方法所获得的地层水平渗透率分布与用其它方法(如示踪剂)所获得的渗透率分布图互相补充,可以为三次采油方案设计提供可靠的地质基础。
- 3 将地质静态与测试动态相结合的油藏描述方法具有强大的优势,它不仅可以对油藏中多个小层的特性有所了解,而且可以对每个小层内平面上井间连通情况获得较为可靠的认识。
- 4 本文数值计算方法合理,模拟结果真实可信,具有较好的应用推广价值。

本文收稿日期:1998-08-20 编辑:王 军

WELL TESTING (YOUQING CESHU)

Vol 8 No 2 (Serial No 56) 1999

Abstracts

· Research of Theory & Method ·

Field Application of Pulse Test Numerical Simulation 1999 (2) 8: 1- 4*Xu Shao, Liang Wanku, Li Zhongyi (Research Institute of Oil Production Technology, Daqing Oilfield), Liu Yuewu (Research Institute of Mechanics, The Academy of Sciences of China)*

By use of reservoir numerical simulation technique, a theoretical model for a multilayered reservoir was created under the condition of heterogeneity and multiphase fluid, and a theoretical pulse test pressure curve was plotted. In the field application, on the premise of fully considering the geological and sedimentary characteristics and through adjustment of static parameters, the best match of theoretical curve with actual curve was realized, and multilayered and heterogeneous permeability distribution graph in the range of simulation was finally obtained. The horizontal permeability distribution obtained with this method and the permeability distribution obtained by other methods can be supplemented each other to provide reliable basis for design of tertiary recovery program.

Subject heading: pulse test, numerical, application, model, pressure**A Method to Determine Flow Efficiency Vogel Parameter and Bubble Point Pressure of a Well Using IPR Equation** 1999 (2) 8: 5- 11*Guo Xiaoping, Guo Changyuan, Zheng Jiapeng (Research Institute of Jidong Petroleum Exploration & Development Company)*

In the utilization of the equation for IPR curve, when calculating flow efficiency FE and Vogel parameter V which affect each other, the method is usually adopted to first suppose one is a fixed value and then to calculate the other, the calculation result like that would differ from actual well conditions. Based on the studies of predecessors and actually measured data and under the condition of average formation pressure already known within the drainage area and by use of IPR equation, this paper derives a calculation formula for FE and V parameter which represent the true well conditions. This paper also derives and studies the calculation approach for bubble point pressure p_b using a general formula for dimensionless IPR curve. The actual application results show that this method is simple, reliable and practical.

Subject heading: productivity index, saturation pressure, calculation method, productivity forecast**Syntactic Recognition of Well Testing Interpretation Models** 1999 (2) 8: 12- 16*Chen Wei, Duan Yonggang, Liu Hui, Li Qishen (Southwest Petroleum Institute), Qian Bing, Wu Jingping, Guan Bin (Dawnhole Operation Department, Sichuan Petroleum Administrative Bureau)*

In accordance with the application of expert system and artificial nerve network method, this paper advances a new recognition technique for well testing models based on the recognition of syntactic pattern, which overcomes the difficulties of existing techniques in curve pattern recognition and inference of model diagnosis. The technique treats the recognition process into five steps: curve smoothing and cut apart, extraction of elementary cell of characteristics, tracing of curve patterns and division of flow periods, preliminary inference and confirmation of interpretation models, it finishes recognition tasks step by step by the way of sequence. The recognition programme developed using the technique is able to correctly identify several dozens of complicated well testing models. Based on that, research on automatic estimation of initial value of model parameters may be further developed, combined with least square method, automatic well testing interpretation will be finally realized to increase quality of well testing interpretation.

Subject heading: well test interpretation, pattern recognition, artificial intelligence**Application of Nonlinear Optimization Method in Well Testing Analysis** 1999 (2) 8: 17- 20*Li Weibin (Research Institute of Nanhai West Oil Company), Zhang Yanbin (No. 4 Oil Production Factory, Hubei Oilfield)*

Based on the integration of Newton method and Gauss - Newton method which concern non-binding and