

文章编号: 0253-2697(2006)03-0096-04

流线数值试井解释模型

姚 军 吴明录 戴卫华 朱玉国

(中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061)

摘要: 考虑到生产历史、油藏非均质、多井以及油水两相流等特征建立了数值试井解释模型(包括生产阶段和关井阶段),采用快速、稳定的流线方法进行求解,得到关井测试时的压力场、饱和度场和流线分布,沿每条流线建立流线数值试井解释模型,并对由测试井发出的所有流线进行联立求解,得到关井后的压力响应。对压力响应和测压数据进行自动拟合或手动拟合,可得到试井解释参数。理论和应用实例验证了本方法的可靠性及实用性。

关键词: 流线技术;数值试井模型;非均质油藏;油水两相流;自动拟合

中图分类号: TE353.1 **文献标识码:** A

Streamline numerical well test interpretation model

Yao Jun Wu Minglu Dai Weihua Zhu Yuguo

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061)

Abstract: In consideration of the characteristics of producing history, reservoir heterogeneity, multi-well and oil-water two-phase flow, a model for numerical well test interpretation (including producing phase and shut-in phase) was established. The pressure field, saturation field and the distribution of streamlines for shut-in well can be obtained with a quick and stable streamline method to solve the model. The streamline numerical well test interpretation models along all streamlines were established. All the streamline equations were solved together, and the pressure response for the shut-in well was determined. The well test interpretation parameters could be obtained by manually matching or automatically matching the pressure response and the tested pressure. The reliability and practicability of this method were identified by theory and field data analysis.

Key words: streamline methodology; numerical well test interpretation model; heterogeneous reservoir; oil-water two-phase flow; automatic matching

数值试井的特点是较全面地考虑了油藏的地质因素(油藏非均质、断层与边界等)和开发因素(生产历史、驱替过程和井网等),试井解释模型更加符合油藏的实际情况^[1]。国外一些大公司也推出了数值试井解释软件,大多数是采用复杂网格和有限差分方法,其速度和稳定性不能满足试井解释的要求。在最近的 5~10 年内,流线数值模拟技术以其高效的求解速度和准确性^[2]已广泛应用于油藏数值模拟。笔者将流线技术应用于数值试井,建立了流线试井解释模型,具有计算速度快、稳定性高的特点。

1 数值试井技术

在利用流线数值试井的方法进行试井解释时,首先对试井过程中所波及到的区域进行划分,取测试井以及周围的井所控制的区域进行生产历史阶段压力场

和饱和度分布计算,得到关井测试前测试井控制区域的生产历史和流度场;然后在生产历史阶段求解得到的压力场和流度场基础上进行流线追踪^[3],得到由测试井控制区域的流线分布;再沿每条流线建立流线试井解释模型,对流线试井解释模型进行求解得到测试井关井后每个时刻的理论压力响应;最后利用遗传算法对求得理论压力响应和实测压力响应数据进行自动拟合,得到测试井控制区域的渗透率分布等试井解释参数^[4]。

2 生产历史阶段的数学模型及其流线求解方法

2.1 简化的油水两相渗流模型及其求解

生产阶段的渗流模型假设条件为:油藏中存在油水两相流体渗流;油藏中岩石和流体均可压缩;

基金项目:中国石油天然气集团公司重点科技攻关项目(990507-04-03)“试井分析应用基础研究”部分成果。

作者简介:姚 军,男,1964 年 3 月生,1984 年毕业于华东石油学院,现为中国石油大学(华东)教授,博士生导师,主要从事油气田开发工程的教学和科研工作。E-mail:youcang@hpu.edu.cn

油藏中流体渗流符合达西定律; 油藏岩石具有各向异性和非均质性; 考虑毛管压力的影响; 不考虑重力的影响。

数学模型为

$$\left[\frac{\phi_o K K_{ro}}{\mu_o} p_o \right] + q_o = \frac{\partial(\phi_o S_o)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\left[\frac{\phi_w K K_{rw}}{\mu_w} p_w \right] + q_w = \frac{\partial(\phi_w S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

$$p_c = p_o - p_w \quad (3)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (4)$$

初始条件为

$$p_o|_{t=0} = p_{oi} \quad (5)$$

$$S_w|_{t=0} = S_{wi} \quad (6)$$

封闭外边界条件为

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big| = 0 \quad (7)$$

定压外边界条件为

$$p| = p_e \quad (8)$$

内边界条件:若为定产条件,则在井点所在网格差分方程中直接加上产量项;若为定压条件,则可由给定的井底流压和井点所在网格节点压力来表示。表达式为

$$q_i = J_1(p_{i,j} - p_{wf}) \quad (9)$$

式中 K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_{ro} 和 K_{rw} 分别为油相和水相的相对渗透率,无量纲; p_o 、 p_w 、 p_c 和 p_{oi} 分别为油相压力、水相压力、毛管压力和初始油相压力, 0.1 MPa; q_w 为注水(产水)量, cm^3/s ; q_o 为地下产油量, cm^3/s ; S_o 、 S_w 和 S_{wi} 分别为油、水相饱和度和初始水饱和度,无量纲; t 为时间, s ; μ_o 和 μ_w 分别为油和水的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ϕ 为地层孔隙度,无量纲; ρ_o 和 ρ_w 分别为地下条件下油、水的密度, g/cm^3 ; q_i 为生产井地下产液量, cm^3/s ; $p_{i,j}$ 和 p_{wf} 分别为测试井所在网格的压力和井底流动压力, 10^{-1} MPa; J_1 为采液指数, $\text{cm}^3/(\text{10}^{-1} \text{MPa}\cdot\text{s})$ 。

式(1)至式(9)构成了油水两相渗流数学模型。

对上述生产历史阶段渗流数学模型首先进行差分离散,采用 IMPES 方法求解得到网格系统的压力场和饱和度分布以后,采用 Pollock 提出的流线追踪方法^[3]进行流线追踪,得到测试区域的流线分布。如果增加新井或关井则流线发生变化,此时须将流线参数转化为网格参数,采用上述计算步骤重新更新流线^[5-6]。

2.2 含油饱和度由网格向流线的转化

通过求解生产历史阶段二维水驱数学模型所得到

的是网格系统中的饱和度分布,而要沿着流线建立试井解释模型,须将网格中的饱和度值转化到每条流线中去,以便计算出相对应流线各节点的流度值。在此转化过程中,首先要判断流线上的节点处在网格系统中的哪条网格线上或是处在哪些网格线的交点上,然后根据流线节点所处的位置,按相应的左右 2 个网格或上下 2 个网格或是上下左右 4 个网格的饱和度值来求取流线上节点的饱和度值。含油饱和度求取方法是:在经网格饱和度转化到流线饱和度时,该网格有几条流线就使用传播时间占的权数来进行饱和度的分配^[2]。

3 油水两相流线试井解释模型及其求解

3.1 油水两相流线试井解释模型

设由测试井发出的流线总数为 N ,则沿每条流线的渗流控制方程为

$$\frac{1}{l_j} \frac{\partial}{\partial l_j} \left(l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right) = \frac{\phi C_t}{\tau} \frac{\partial p_i}{\partial t} \quad (10)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, N$; l_j 为沿第 j 条流线的曲线坐标,曲线坐标系的原点定义为测试井位置, cm ; p_i 为第 j 条流线上的压力值, 0.1 MPa; C_t 为总压缩系数, 0.1MPa^{-1} ; τ 为油水两相总流度。

模型内边界条件,分测试井为生产井和注入井两种情况。

生产井定产液量内边界条件为

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} \left(q_i - C \frac{d p_{wf}}{d t} \right) \quad (11)$$

$$p_{wf} = p_w - S \left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} \quad (12)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, N$ 。

式(11)和式(12)可合写为

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} \left\{ q_i - C \left[\frac{d p_w}{d t} - S l_j \frac{d}{d t} \left(\frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

式中 p_w 为测试井井筒上的压力值,也是每条流线上第一个节点的压力值, 0.1 MPa; h 为地层厚度, cm ; C 为井筒储存系数, $\text{cm}^3/(\text{10}^{-1} \text{MPa})$; S 为表皮系数,无量纲; r_w 为测试井井眼半径, cm 。

注水井的内边界条件为

$$\left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} = - \frac{1}{2 h \tau} \left(q_w + C \frac{d p_{wf}}{d t} \right) \quad (14)$$

$$p_{wf} = p_w - S \left[l_j \frac{\partial p_i}{\partial l_j} \right]_{l_j=r_w} \quad (15)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, N$; r_w 为流线的终止端油(水)井井眼半径, cm 。

流线的外边界即为流线的终止端。流线的终止存

在两种情况，流线到达另一口油水井；流线到达一个压力平衡区，即压力梯度 $p = 0$ 。此时该点的速度变为 0，即

$$\vec{v} = \dots \cdot p = 0 \quad (16)$$

式中 \vec{v} 为渗流速度矢量。

3.2 流线数值试井解释模型的求解

对式(10)至式(15)进行差分离散，得到下列形式的三对角方程为

$$b_{ji} p_{ji}^{n+1} + c_{ji} p_{ji}^{n+1} + d_{ji} p_{ji}^{n+1} = g_{ji} \quad (17)$$

式中 $i = 2, \dots, N_{ji}$; b_{ji} 、 d_{ji} 、 c_{ji} 和 g_{ji} 为离散系数。

对线性方程组式(17)的求解可采用迭代法或追赶法^[7-8]。对式(17)进行求解可得到测试井关井后的压力响应，对该压力响应和实测压力数据进行自动拟合或手动拟合，得到测试井控制区域的试井解释参数，主要是渗透率分布、污染系数和井储系数。

4 流线数值试井解释模型的验证

为了检验该方法的正确性，将本文方法中两相流计算退化成单相流计算，并且取均质油藏取五点法作为算例，取非常大的井距来模拟无限大油藏进行压降试井。油藏及井的基础参数：油藏面积为 $1\ 890\ \text{m} \times 1\ 890\ \text{m}$ ；油层厚度为 $10\ \text{m}$ ；孔隙度为 0.3 ；渗透率为 $0.8\ \mu\text{m}^2$ ；产量为 $40\ \text{m}^3/\text{d}$ ；原始地层压力为 $19.2\ \text{MPa}$ 。

井筒存储系数为零、表皮系数为零条件下的有因次压力和压力导数见图 1。图 2 是在井筒存储系数 $C = 2\ \text{m}^3/\text{MPa}$ 、表皮系数为零条件下的有因次压力和

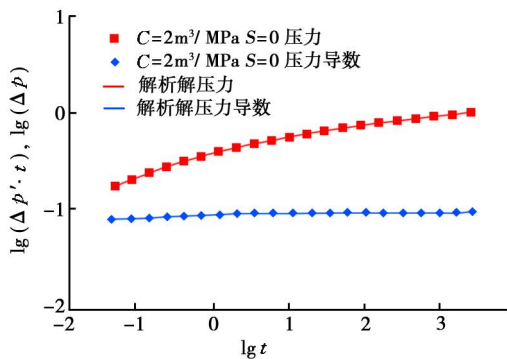


图 1 $C = 0$ 及 $S = 0$ 时压力和压力导数计算结果

Fig. 1 Pressure and derivative of pressure calculated under conditions of $C = 0$ and $S = 0$

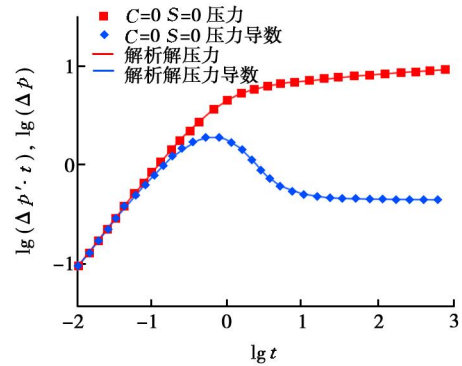


图 2 $C = 2\ \text{m}^3/\text{MPa}$ 及 $S = 0$ 时压力和压力导数计算结果

Fig. 2 Pressure and derivative of pressure calculated under conditions of $C = 2\ \text{m}^3/\text{MPa}$ and $S = 0$

压力导数见图 2。从图 1 和图 2 可以看出两种方法计算结果的一致性，从而证明了本文提出方法的正确性。

5 应用实例

图 3 为 2004 年 8 月某油田一个生产区块的流线图，同时期对其中的 S5 注水井关井进行压力降落测试，对 Y2 油井进行压力恢复测试。

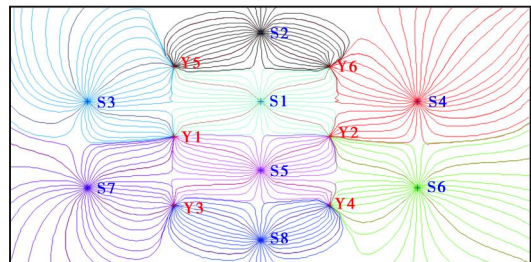


图 3 某区块流线形态

Fig. 3 Streamline plot of a block

应用本文所介绍的试井解释模型对由这 2 口测试井的流线建立联立方程组进行求解，并利用遗传算法通过调整测试井控制区域网格块的渗透率值与试井测试数据进行自动拟合，S5 注水井和 Y2 油井的试井拟合曲线分别如图 4 和图 5 所示。最终得到了解释后测试井控制区域的渗透率分布如图 6 所示。用本文试井解释方法得到的测试井点结果与现代试井解释结果进行的对比见表 1。

表 1 试井解释结果对比

Table 1 Contrast of well testing results

井号	本文方法解释结果				现代试井解释结果			
	渗透率 / μm^2	表皮 系数	井储系数 / $(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1})$	地层系数 / $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$	渗透率 / μm^2	表皮 系数	井储系数 / $(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1})$	地层系数 / $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$
S5	0.75	3.03	1.91	12.4	0.77	2.96	2.03	13.2
Y2	0.80	2.14	5.47	13.6	0.83	1.94	5.73	14.4

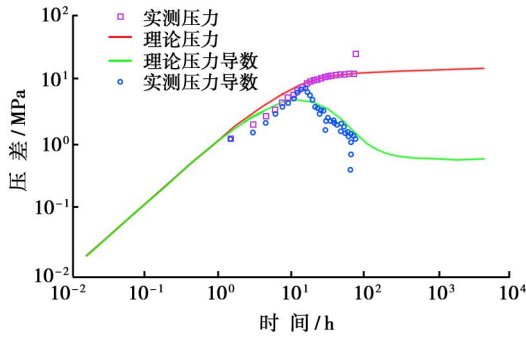


图 4 S5 试井自动拟合曲线

Fig. 4 Auto-matching well testing curve of S5 Well

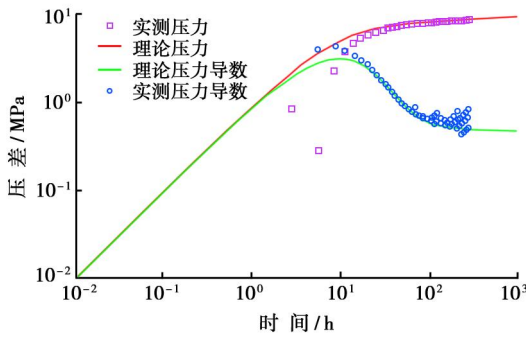


图 5 Y2 试井自动拟合曲线

Fig. 5 Auto-matching well testing curve of Y2 Well

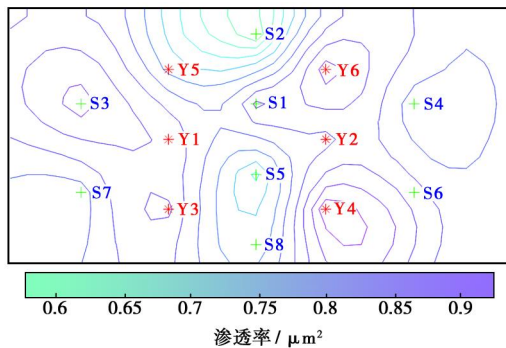


图 6 渗透率分布

Fig. 6 Distribution of permeability

6 结 论

(1) 建立了油水两相流流线数值试井解释模型,模型中考虑了生产历史、非均质性、油水两相流、多井干扰等因素影响。

(2) 通过求解均质无限大油藏试井解释模型并与 Gringarten 图版比较,验证了流线数值试井解释模型的正确性。

(3) 由于对流线数值试井解释模型的求解是一维的,因而求解速度快;同时该模型便于实现对近井网格的高度加密,因而求解结果的准确性高,稳定性好。

(4) 油田应用实例进一步验证了流线试井解释模型的准确性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 吴洪彪,刘立明,陈钦雷,等. 四维试井理论研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 57-62.
- [2] Batycky R P. A three-dimensional two-phase scale streamline simulator[D]. The stanford university: Department of petroleum engineering and the committee on graduate studies, 1997.
- [3] Pollock D W. Semianalytical computation of path lines for finite-difference models[J]. Ground Water, 1988, 26(6): 743-750.
- [4] 柳毓松,王才经. 自动识别油藏渗透率分布微分方程反演算法[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 73-76.
- [5] 姚军. 数值试井理论研究[D]. 山东东营: 中国石油大学, 2000.
- [6] 朱玉国. 具有高渗透条带的水驱和聚合物驱油藏试井解释方法研究[D]. 山东东营: 中国石油大学, 2004.
- [7] 韩大匡, 陈钦雷, 闫存章. 油藏数值模拟基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 91-104.
- [8] 刘慧卿. 油藏数值模拟方法专题[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2001: 80-102.

(收稿日期 2005-06-30 改回日期 2005-09-15 编辑 孟伟铭)

中国石油化工集团公司发现国内最大的整装气田

中国石化宣布,在我国川东北地区发现了迄今为止国内规模最大、丰度最高的特大型整装海相气田——普光气田。这也是国内目前发现的 5 个 2 000 亿 m^3 以上的大气田之一。根据审定结果,普光气田已具备商业开发条件,规划到 2008 年实现商业气量 40 亿 m^3 /年以上,2010 年实现商业气量 80 亿 m^3 /年,并配套建设川东北至山东济南的天然气管线。

经国土资源部矿产资源储量评审办公室审定,到 2005 年末普光气田累计探明可采储量为 2 510.75 亿 m^3 ,技术可采储量为 1 883.04 亿 m^3 。普光气田的发现,对中国石化资源发展战略具有重大意义,同时也为缓解中国油气资源紧缺起到了积极作用。

摘自《石油综合信息》