

加密井、调整井地层压力的 参数识别与拟合^①

张允真 赵达壮 张兆银 杨树林

(大连理工大学)

(辽河油田)

提 要

用反算法识别地质和流体的综合物理参数,在给定井点产量或注水量和井底压力条件下,对压力场进行拟合,以求得加密井位或调整井位的层中压力。避免用正算法必须给定地质和流体的各种物理参数,而且宏观地包含了类似井点附近的油层污染、断层等特殊情况对压力场的作用。结果表明,拟合的精度高,与实测数据比较误差小于10%。

主题词 加密井 地层压力预测 数学模型 有限元法 拟合 计算

1 引 言

在充分利用邻井压力资料、采油动态资料、抽油井、自喷井、注水井的单井局部动压力基础上,应用有限元法对反映地下渗流规律的扩散方程进行计算,并将参数识别技术引入到加密井、调整井动地层压力的预测中。

文中采用反算法,在提供一定的测量数据条件下对问题进行拟合,对物理参数进行识别,求得数值解,完全或部分避开正算法中所要求的各项物理参数。例如,为打调整井的地层压力计算,反算法仅仅要求给出油、水井的井底压力和产液量(这是比较容易给出的,并且准确),用有限元法对数学模型中的系数项(由各种物理参数组合的,本文称为综合系数)进行识别和拟合。

使用本文提出的方法及相应的软件,先后在辽河油田锦16块,曙二、三区进行了油层压力预测试验,与实钻结果相比,平均误差小于3%,在钻井过程中,均实现了不涌、不喷、不漏,减小了油层污染。

实践表明,本文的方法及相应的软件能够很好地解决水驱砂岩油藏的调整井压力预测问题,特别是对非均质性严重的砂岩油藏,压力预测精度是很高的。

2 数学模型

在忽略毛管压力、重力并认为在砂岩油藏中只存在水、油的假设下,结合质量方程和状态

• 张允真,1932年7月生。1959年毕业于大连工学院水利系。现任大连理工大学工程力学系教授。通讯处:辽宁省大连市。邮政编码:116023。

① 国家自然科学基金资助项目。

方程并作简化,可以得到以下数学模型^[1~4]:

$$\nabla \cdot (\delta R \nabla \cdot P) + Q_v = \delta E \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} R &= K K_{rm} / \mu_m + K K_{ro} / \mu_o \\ E &= \beta(1 - \phi) + \phi(S_w \beta_w + S_o \beta_o) \\ Q_v &= q_w / \beta_w + q_o / \beta_o \end{aligned} \quad (2)$$

式中 m 为“o”时表示油相,为“w”时表示水相; K, K_{rm} 分别为绝对渗透率和 m 相流体的相对渗透率; δ 是油层厚度; q_m 是 m 相流体注入量; μ_m 为 m 相流体粘度; S_m 为 m 相流体饱和度; ϕ 为砂岩孔隙度, ϕ^o 为初始孔隙度; β 为岩石压缩系数, β_w, β_o 分别为水相和油相的压缩系数; P 表示油藏压力; t 表示时间。

稳态情况下, P 不随时间变化,有

$$\nabla \cdot (\delta R \nabla \cdot P) + Q_v = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 上}) \quad (3)$$

根据油田的实际情况,可将边界条件分成三类。

第一类:边界上压力是常数,即

$$P = P_0 \quad (\text{在 } S_1 \text{ 上或在控制点上}) \quad (4)$$

第二类:穿过边界面的流动是常数,即

$$-K' \frac{\partial P}{\partial n} = q \quad (\text{在 } S_2 \text{ 上}) \quad (5)$$

或

$$K' \left(\frac{\partial P}{\partial x} n_x + \frac{\partial P}{\partial y} n_y \right) + q = 0$$

第三类:经过边界面的渗流是已知的,即

$$-K' \frac{\partial P}{\partial n} = h(P - P_\infty) \quad (\text{在 } S_3 \text{ 上}) \quad (6)$$

或

$$K' \left(\frac{\partial P}{\partial x} n_x + \frac{\partial P}{\partial y} n_y \right) + h(P - P_\infty) = 0$$

初始条件:

$$P = P(x, y, 0) \quad (\text{在 } \Omega \text{ 上}) \quad (7)$$

3 有限元法

在 δR 为常量的条件下,方程(1)的泛函为:

$$\begin{aligned} I[P(x, y, t)] &= \int_{\Omega} \left\{ \frac{\delta R}{2} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right] - Q_v \cdot P + \delta E \frac{\partial P}{\partial t} \cdot P \right\} d\Omega \\ &+ \int_{S_2} \frac{\delta R}{K'} \cdot q \cdot P ds + \int_{S_3} \frac{\delta R}{K'} h \left(\frac{1}{2} P^2 - P \cdot P_\infty \right) ds \end{aligned} \quad (8)$$

可以证明,泛函的变分等价于方程(1)和边界条件(5)和(6)。

将区域离散化,划分出有限个单元,则在第 e 个单元上,有

$$\begin{aligned} I[P]^e &= \int_{\Omega} \left\{ \frac{\delta R}{2} \left[\left(\frac{\partial P^e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P^e}{\partial y} \right)^2 \right] - Q_v P^e + \delta E \frac{\partial P^e}{\partial t} \cdot P^e \right\} d\Omega \\ &+ \int_{S_2} \frac{\delta R}{K'} \cdot q \cdot P^e ds + \int_{S_3} \frac{\delta R}{K'} h \left(\frac{1}{2} P^{e2} - P^e \cdot P_\infty \right) ds \end{aligned} \quad (9)$$

设 e 单元上有 k 个节点, P_i^e 为该单元上第 i 个节点的压力值, N_i^e 为单元的形函数, 于是 $P^e(x, y, t)$ 可以表示为

$$P^e(x, y, t) = \sum_{i=1}^k N_i^e \cdot P_i^e = [N_1^e, N_2^e, \dots, N_k^e] \begin{Bmatrix} P_1^e \\ P_2^e \\ \vdots \\ P_k^e \end{Bmatrix} \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式, 并对泛函求极值, 则有

$$\left[\frac{\partial I[P]^e}{\partial P_1}, \frac{\partial I[P]^e}{\partial P_2}, \dots, \frac{\partial I[P]^e}{\partial P_k} \right]^T = 0 \quad (10')$$

由上式可求得单元 e 上的有限元公式:

$$[K_p]^e \{P\}^e + [T]^e \frac{d}{dt} \{P\}^e = \{Q\}^e - \{q\}^e - \{K_h\}^e \{P\}^e + \{K_f\}^e \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} [K_p]^e &= \int_{\Omega} \delta R \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) d\Omega \\ [T]^e &= \int_{\Omega} \delta E [N]^T [N] d\Omega \\ [Q]^e &= \int_{\Omega} Q_v [N]^T d\Omega \\ \{q\}^e &= \int_{S_2} \frac{\delta R}{K} q [N]^T ds \\ [K_h]^e &= \int_{S_3} \frac{\delta R h}{K} [N]^T [N] ds \\ \{K_f\}^e &= \int_{S_3} \frac{\delta R h}{K} P_{\infty} [N]^T ds \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{令} \quad [K] = [K_p]^e + [K_h]^e, \{Q\}^e - \{q\}^e + \{K_f\}^e = \{Z\} \quad (12')$$

则(11)式简化为

$$[K] \{P\} + [T] \frac{d}{dt} \{P\} = \{Z\} \quad (13)$$

根据上式, 建立计算区域上各节点有限元方程, 以节点处的渗流压力 P_i 为待定参数。通常, 每一个节点均可建立一个质量守恒方程, 计算区域上的节点总数即为代数方程组的阶数和待求的节点压力总数。应用迭代法, 可以解得各时刻每一节点的压力值。

4 综合系数及其识别

在数值解法中, 对有关的地质和流体的物理参数, 在节点处或单元内被视为常量。这些常量在各个单元上是可以不同的, 因此上述物理参数对整个计算区域来说又是变量。实际上有限元法可以有效地计算变系数微分方程的边值问题。

在单元内, 将式(1)、式(3)分别写成

$$\begin{aligned} \delta R \nabla \cdot \nabla P + Q_v &= \delta E \frac{\partial P}{\partial t} \\ \delta R \nabla \cdot \nabla P + Q_v &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中 R 、 E 及 Q_v 的表达式示于式(2)。本文称 δR 或 δE 为综合系数,它是由若干个地质和流体方面的物理参数以及油层厚度组成的,其内涵相当复杂。

如果已知每一个单元的地质和流体的各项参数,对于控制方程(1)或(3)及其边界条件和初始条件(4)~(7),应用电子计算机和有限元方法予以计算,通常称作正算。它在理论上是正确的、可行的,但对一些实际工程问题,进行正算根本行不通。如在实际采油和钻井工程中,要确定式(1)或式(3)中所包含的各项物理参数以及得知它们在各单元上的分布,是完全不可能的。

与正算相对应,近年来很多领域中开始研究和使用的反算。反算有它自身的困难之处,无论是理论上或是实用上都有待进一步探索。本文采用反算是一种尝试,结果表明是成功的。这里所说的反算,是置各项具体的地质和流体参数于不顾,利用给定的井点压力值及流量,通过最优化方法识别出上述意义的综合系数,不具体区分流体粘度、地层渗透率、岩石压缩系数、地层厚度及油、水二相等情况。不难看出,综合系数概括了以上诸多参数,而且还包含了类似井点附近油层污染、断层等特殊情况对压力场的影响。

5 渗流压力的拟合

已知计算区域上各井点的注水量或产液量及其某些井点的井底压力,选取计算区域上的综合系数,给定计算区域的边界条件,则扩散方程(3)的有限元解答是确定的,但是它不是真实的渗流压力场,因其综合系数是设定的。为此,根据给定井点的井底压力与有限元法解得的对应井点的计算压力进行拟合,取给定各井点压力与对应井点计算压力差的平方和为最小二乘拟合优度,应用最优化方法实现拟合优度的极小化,确定新的综合系数,如此迭代,进行参数识别,最后得到综合系数及近似的压力场。实际上,每次迭代可以看作是求解非等式约束的非线性规划问题,其中目标函数是上述的最小二乘拟合优度,变量是若干个小区域上的综合系数,约束条件是变量的上、下限,其数学表示为:

$$\begin{aligned} \text{求 } x &= (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{使 } f(x) &= \min \\ \text{s. t. } \bar{x}_i &\geq x_i > 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (15)$$

而目标函数

$$f(x) = \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{i=1}^M (\bar{P}_i - P_i)^2} \quad (16)$$

式中 \bar{P}_i 是给定压力, P_i 是计算压力,二者都是变量 x 的函数; M 是给定压力点的个数。

本文采用共轭斜量法作优化计算。在求新点的探索方向时,为避免每次计算都修改“总刚度阵”,此处利用初参数法(等效节点荷载法),在求探索步长时,文中采用一维搜索的0.618法。

6 计算区域和边界条件及精度

6.1 计算区域

计算区域是以要打的几口调整井为中心部位,向四周延拓成足够大的任意四边形,这样可以消去边界条件对调整井位层中压力的影响。

拟合应计及计算区域上全部油、水井的产液量和注水量,并应给定有关井点的井底压力和其它点的压力。

6.2 边界条件

第一、三类边界条件(4)和(6)实际上是难以给出的,第二类边界条件(5)是不传递压力的边界,虽然不完全符合实际,但借用它时实施方便,对调整井的压力影响可以忽略。

6.3 二次网格

上述的计算区域和边界条件是属于第一次网格(疏网格)计算的。为提高计算精度,第二次取网格(密网格)作局部计算,此次计算区域取以调整井位为中心向四周延拓成的较小任意四边形,其边界条件当采用第一类边界条件(4),它由第一次网格计算所提供。

6.4 精 度

以要打的调整井为中心,采用两种不同的计算区域,分别计算调整井值的压力,若二次计算的差值小于钻井工艺允许的误差,则认为该二次计算区域都是可行的。

根据已掌握的地质和流体资料可查得有关物理参数的大小和范围,由此来计算本文提出的综合系数,这是一个参考数据,用它来确定优化变量的上限。如果欲计算区域或自行择取的计算区域较大,或者地质条件复杂,应对优化变量多取几个,尽量作到用一个变量来模拟计算区域中有共同特点的一小部分。本文认为,在参数识别中,选取的变量(综合系数)一般不得少于5~7个。

在计算中应包括整个计算区域上全部油、水井的产液量和注水量。为提高拟合精度,给定的压力 \bar{P} 不得少于6~8个。

本文是对单层油层进行讨论的。至于多层条件下的压力预测问题,可参考多层开采中的油层产液量或注水量及油层压力分析。

7 实例 DJ 油层

7.1 初始数据

初始数据如表1所示:

表1 初始数据
Table 1 Initial data

井号	节点号	产量(m ³ /d)	压力(MPa)
3-4-8	27	-32.30	8.13
2-9-5	46	-9.69	15.28
2-9-6	86	-10.70	9.50
2-9-7	70	-10.39	9.57
柱20	102	103.99	25.10
10-007	143	-65.79	8.54
10-08	147	134.00	32.40
11-09	192	118.00	30.98
11-06	202	106.00	31.81
9-03	51	关井	20.43
9-7	66	关井	24.20
10-7	120	关井	23.70

7.2 有限元离散化

节点总数224个；井点数9个；单元总数381个；综合系数6个。网格见图1。

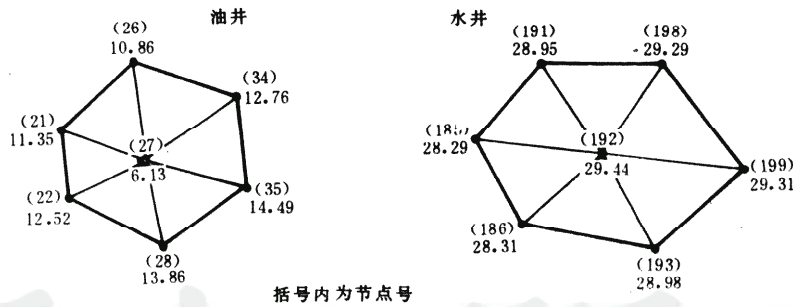


图1 网格图
Fig. 1 Grid

7.3 识别后的综合系数(取6个变量)

$$\delta R = 0.46616 \times 10^{-6}, 0.59428 \times 10^{-6}, 0.47576 \times 10^{-4},$$

$$0.50441 \times 10^{-4}, 0.15669 \times 10^{-4}, 0.38801 \times 10^{-4}$$

7.4 计算结果

对照网格图,可得曙2-09-6井、09-7井、010-7井的压力,见表2。

表2 曙2-09-6井、09-7井、010-7井压力结果

Table 2 Shu 2-09-3, 09-7, 010-7 well pressure

井号	节点	井深 (m)	压力 (MPa)	压力系数	设计密度 (g/cm ³)	实际密度 (g/cm ³)
2-09-6	83	1774.5	22.90	1.29	1.34	1.35
2-09-7	67	1765.0	22.178	1.25	1.30~1.35	1.34
2-010-7	107	1847.0	23.85	1.29	1.34	1.35

7.5 结果分析

1. 本文的计算压力对水井和油井呈反漏斗和正漏斗形状。由有限元理论所致,在井点处压力集中程度不甚明显,井点处压力的平均差为20%。对井点之外的层中压力,计算精度有明显的提高,理论和实际都可证明这一点。例 DJ 块,井号3-4-8(节点号27)的正漏斗和井号11-09(节点号192)的反漏斗形状,如图2所示。

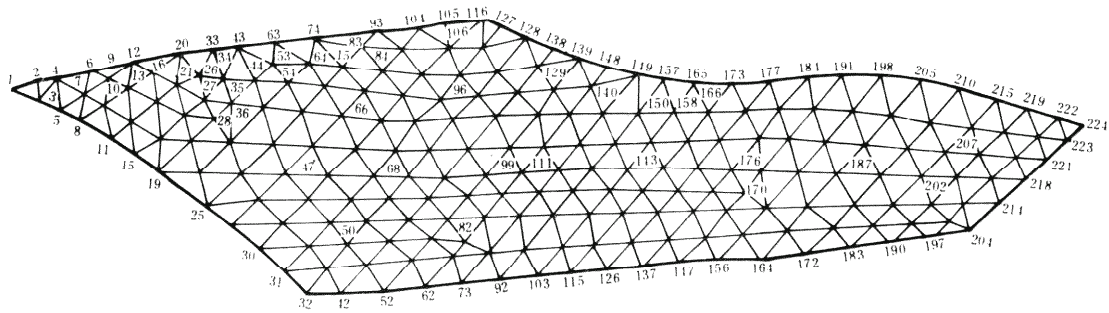


图2 油水井节点及其周围节点号

Fig. 2 Oil and water well nodes and the around nodes

2. 水井的计算压力小于给定的井底压力,油井的计算压力大于给定的井底压力,这与理论分析是一致的。关井处的控制压力,计算值与给定值相同。

3. 计算分析表明,加密网格和增加综合系数个数将提高计算压力的精度。只要计算区域取得比较大和调整井居中,边界条件对调整井的层中压力影响很小。

致谢 在完成本项工作中,得到了大连理工大学高潮同志和辽河油田江胜宗同志的帮助,谨致谢意。

参考文献

- [1] 葛家理. 油气层渗流力学. 北京:石油工业出版社,1982.
- [2] Douglas J J, Dupont T. The application of variational methods to waterflooding problems. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1969.
- [3] 张允真,张翼,冯思民. 用有限元法解热水驱油数值模拟问题. 大连理工大学学报, 1990(4): 385~392.
- [4] 沙德松,孙焕纯,徐卫真. 线粘弹性体的模型识别. 大连理工大学学报, 1990(4): 401~406.

PARAMETER IDENTIFICATION AND MATCHING IN
THE PREDICTION OF RESERVOIR PRESSURE IN INFILL
WELLS AND ADJUSTING WELLS

Zhang Yunzhen Zhao Dazhuang

(Dalian University of Technology)

Zhang Zhaoyin Yang Shulin

(Drilling & Production Research Institute, Liaohe Oilfield)

Abstract

Demonstrates how to identify the comprehensive physical parameters of geology and fluids by means of backward algorithm. It can fit the pressure field under given well production or injection rates. So the pressure within the infill and adjusting wells can be calculated need not to know physical parameters of geology and fluids macroscopically in forward algorithm. Meanwhile, it can include the effect of some special cases on pressure field, such as reservoir damage and faulted formation etc. of the nearby wellsite. Oilfield test indicate that this method has a high accuracy and the relative error between predicted ones and field measurement is less than 10%.

Key words infilling well formation pressure prediction mathematical model
finite element method match computation

(本文收到日期1992-04-01)

(修改稿收到日期1993-08-17)

(编辑 杨 茁)