

文章编号: 0253-9985(2004)03-0338-06

神经网络在低渗透油田试井解释中的应用

王安辉^{1,3}, 宇淑颖², 张英魁³, 王龙源⁴苗德顺⁵, 盛国军³, 刘家君³, 王琳芳⁶

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 吉林松原市宁江区第一中学, 吉林松原 138003;

3. 吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138003; 4. 吉林石油集团有限责任公司运输公司, 吉林松原 138003;

5. 吉林石油集团有限责任公司热电厂, 吉林松原 138003; 6. 华北油田分公司第五采油厂, 河北任丘 062500)

摘要: A 油田是吉林油区开发较好的典型低渗透砂岩油藏, 其试井解释比较复杂, 压力恢复曲线出现径向流的井次仅占总井次的 20%~30%。图形识别+神经网络 BP 算法+试井解释软件三位一体的联合技术能使未出现径向流的大部分井的压力恢复资料得到很好应用。该技术具体步骤为: (1) 分析解释有径向流的井的双对数图和半对数图, 找出续流段的伪斜率(m_1)、拐点处的伪斜率(m_2)、过渡段的伪斜率(m_3)和径向流直线段斜率(m); (2) 利用神经网络 BP 算法, 构建 m_1 , m_2 , m_3 与 m 之间的数学关系; (3) 将未出现径向流的井的基础测试资料录入到试井解释软件中, 求出 m_1 , m_2 和 m_3 , 利用 BP 算法求出 m ; (4) 把以上参数代入进行拟合, 直到双对数图、半对数图和历史拟合图三条曲线完全拟合为止。

关键词: 低渗透油田; 试井解释; 图形识别; 神经网络; BP 算法

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Application of neural network in well test analysis in low permeability oilfield

Wang Anhui^{1,3} Yu Shuying² Zhang Yingkui³ Wang Longyuan⁴Miao Deshun⁵ Sheng Guojun³ Liu Jiajun³ Wang Linfang⁶

(1. China University of Geosciences, Beijing; 2. No. 1 Middle School of Ningjiang District, Songyuan, Jilin; 3. Exploration and Development Research Institute of Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin; 4. Transportation Company of Jilin Petroleum Group; 5. Heat and Power Plant of Jilin Petroleum Group; 6. No. 5 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei)

Abstract: "A" oilfield is a typical low permeability sandstone oil reservoir that has relatively successfully been developed in Jilin oilfield area. The well test interpretation is relatively complicated. The times of radial flow occurring on wells' pressure build-up curves account for only 20%~30% of the total times occurring in all tested wells. This paper introduces an integrated interpretation technology by integrating pattern recognition, neural network BP algorithm and well test interpretation software. It can specifically divided into the following steps: (1) analyze and interpret the bilogarithmic and semilogarithmic diagrams of wells with radial flows, and find out the pseudoslopes(m_1 , m_2 , m_3 and m) in the continuous flow section, at the flex point, in the transitional section and on the straight line section of radial flow; (2) applying the neural network BP algorithm to construct the mathematical relation among m_1 , m_2 , m_3 and m ; (3) input the basic testing data of the wells without radial flow into the well test interpretation software, derive the m_1 , m_2 and m_3 , and then derive m with BP algorithm; (4) substitute the parameters mentioned above and fitting them through to the three curves in the bilogarithmic and semilogarithmic diagrams, and in historic fitting diagram to be fitting to one another.

Key words: low permeability oilfield; well test interpretation; pattern recognition; neural network; BP algorithm

A 油田是吉林油区的主力油田。区域构造位于松辽盆地南部中央坳陷区扶余隆起带向三肇凹

陷倾没的斜坡上。A 油田的目的层为扶余油层和杨大城子油层顶部, 属白垩系泉头组第四段和第

三段的上部地层。根据已完钻井的统计, A 油田断层比较发育, 属于低孔、低渗非均质较强的岩性断块油藏。从试井解释曲线看, A 油田出现径向流钻井约占统计井次的 20%~30%。为了使未出现径向流大部分井的试井资料得到很好应用, 本文首次提出利用神经网络 BP 算法进行低渗油田试井解释的新方法, 取得了很好的效果。

若把出现径向流的压力恢复曲线进行拟合解释, 得出正确的结果, 再把同一压力恢复曲线的径向流删去, 进行重新拟合解释得出结果, 从曲线拟合上看两者曲线拟合得非常好, 但解释结果两者相差 5~15 MPa。产生误差的根本原因是压力恢复曲线未出现径向流井试井解释曲线存在着多解性。从试井设计上看, 压力恢复曲线未出现径向流与有效渗透率大小、井筒储集系数大小、关井时间长短有着直接关系。有效渗透率低是储层所固有的, 只有通过压裂方法来解决, 但 A 油田大部分井已进行了二次压裂和三次压裂。关于井筒储集系数问题, 笔者在文献[1]中提出井下关井, 但由于工艺不配套、套管结垢、封隔器密封不严等一系列问题一直没有得到实施。关于关井时间问题, 试井测试又与产量发生矛盾。

由于存在以上原因, 笔者试图从试井解释入手, 通过图形识别和图形分析、神经网络 BP 算法、试井解释软件, 提出了利用神经网络 BP 算法求取径向流直线段斜率, 进行低渗透油田试井解释的新方法。

1 图形识别及图形分析^[2]

均质地层是目前最常见的一种地层类型, 对于 A 油田砂岩地层, 均呈现出均质地层的特征。我们采用常见的格雷加登双对数+导数图(以下称为双对数图)和 MDH(米勒、戴斯、哈钦森, 三位作者简称)半对数曲线图(以下称为半对数图)来表示均质地层的特征。

1.1 双对数图

双对数图版是识别均质地层的典型特征图, 它的形状像一把“两齿叉子”, 可以分成三段来分析。

(1) 第 I 段是“叉把”部分。这一段双对数和导数曲线合二为一, 呈 45° 的直线, 表明续流段的影响(即井筒储集效应的影响)。

(2) 第 II 段为过渡段, 导数出现峰值后向下倾斜。

(3) 第 III 段出现导数水平段, 这是地层中产生径向流的典型特征。用它来确认半对数图中的径向流直线段。

1.2 半对数图

半对数图的形状像一把“勺子”, 作为续流段和过渡段的第 I 和第 II 段, 在半对数图中形状像“勺头”; 作为径向流的第 III 段, 在半对数图中形成直线, 可以比喻成“勺把”。因此, 半对数图图形可以分为: ①具有续流段和过渡段; ②具有斜率 m 的径向流直线段。

其中, 续流段和过渡段可进一步划分为: ①续流段; ②续流段+过渡段的拐点处, 以下称之为拐点处; ③过渡段。

通过图形识别和图形分析发现续流段伪斜率 m_1 、拐点处伪斜率 m_2 、过渡段伪斜率 m_3 与径向流拟合直线段斜率 m 有一定关系。以续流段伪斜率 m_1 、拐点处伪斜率 m_2 、过渡段伪斜率 m_3 为学习样本, 以径向流直线段斜率 m 为预测样本, 可以利用神经网络 BP 算法求取径向流直线段斜率。

2 人工神经网络^[3~9]

2.1 应用范围及条件

常用的方法是在一定的勘探开发条件下用人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)进行地下参数的时空推算。假设已知某一组勘探开发参数的值, 则通过 ANN 推算于该组勘探开发参数有关的未知参数值。

足够多的学习样本, 以确保 ANN 预测的精确度, 样本的已知指标个数大于 1, 即输入层的节点个数大于 1, 欲求的预测指标位于邻近的时间域或空间域。

2.2 BP 算法

目前 ANN 中应用最广、最直观、最易理解的算法是 BP 算法。该算法的确切含义是误差反向传播(Error Back-Propagation), 简称为 BP 算法。

2.3 确定直线段斜率

在 A 油田 18 井次出现径向流的压力恢复曲线上, 把每井次 m_1 , m_2 , m_3 , m 求出来, 并留 2 口井(把径向流部分删去)用来检验(表 1)。以 16 个测试点为学习样本, 以 2 井次为评估样本, 已知指标个数 3, 隐层节点个数为 30 个, 学习次数为 500 000 次。学习样本相对误差为 7.67%(表 1)。预测样

本相对误差为 9.50%(表 1)。学习样本、预测样本相对总误差为 7.87%。显然, BP 算法的精度相对较高。这样,我们就可以用该方法计算低渗透压力恢复曲线直线段斜率。

表 1 利用 BP 算法确定 MDH 曲线径向流斜率学习样本与预测样本表
Table 1 Emulating and predicting samples of slopos in radial flow sections of MDH curve determined with BP algorithm

井号	测压日期	$m_1/$ (kPa·cycle ⁻¹)	$m_2/$ (kPa·cycle ⁻¹)	$m_3/$ (kPa·cycle ⁻¹)	$m/$ (kPa·cycle ⁻¹)	$m'/$ (kPa·cycle ⁻¹)	相对误差 / %	备注
a1	1999- 01- 22~ 28	504. 1	1 332. 2	2 432. 7	1 399. 0	1 424. 50	1. 79	学习样本
a1	1999- 06- 24~ 30	534. 7	1 140. 0	1 718. 2	1 574. 3	1 524. 10	3. 29	
a2	1999- 04- 12~ 19	53. 2	182. 4	551. 1	248. 5	270. 69	8. 20	
a3	2000- 08- 01~ 08	25. 7	89. 0	160. 8	211. 5	229. 75	7. 94	
a4	1999- 04- 14~ 21	65. 1	537. 1	1 498. 8	467. 0	481. 85	3. 08	
a4	1998- 04- 12	46. 2	224. 0	392. 8	246. 9	261. 74	5. 67	
a5	2000- 08- 08~ 16	60. 8	462. 9	1 321. 8	611. 0	415. 02	47. 22	
a6	2000- 08- 01~ 08	58. 6	1 451. 8	6 060. 1	654. 3	672. 42	2. 69	
a7	2001- 02- 08~ 03- 21	60. 1	396. 4	1 486. 8	396. 9	390. 86	1. 55	
a8	2001- 09- 18~ 25	100. 6	1 045. 5	2 180. 6	1 389. 9	1 388. 80	0. 08	
a9	2000- 10- 17~ 24	57. 3	821. 4	1 802. 7	680. 8	665. 84	2. 25	
a10	1999- 06- 24~ 30	127. 8	413. 3	836. 4	483. 8	452. 74	6. 86	
a11	2001- 06- 17~ 30	165. 2	3 654. 1	8 707. 0	2 966. 3	2 966. 30	0. 00	
a12	2001- 11- 26~ 12- 04	51. 2	487. 4	749. 6	390. 4	343. 72	13. 58	
a13	1999- 06- 22~ 29	48. 7	386. 8	1 094. 2	313. 4	339. 20	7. 61	
a14	1999- 07- 14~ 20	26. 4	130. 5	278. 0	209. 5	235. 05	10. 87	
a15	1999- 07- 14~ 20	45. 2	472. 5	1 174. 1	418. 9	361. 36	15. 92	预测样本
a16	2000- 10- 17~ 24	140. 2	1 167. 6	4 815. 1	1 018. 3	1 050. 70	3. 08	

注: 神经网络 BP 算法总相对误差为 7.87%

3 试井解释拟合方法

试井解释基础参数^[10~ 12], 包括: ①单井控制半径; ②生产历史数据: 时间- 压力、测试前的稳定产量; ③流体参数: 天然气比重、原油比重、饱和压力、地层油体积系数、粘度、油水压缩系数、溶解油气比; ④油藏参数: 原始压力、有效厚度、孔隙度、油气水饱和度、井筒半径、地层温度、岩石压缩系数。

将这些参数录入到试井解释软件, 在半对数图中, 分别求出续流段、拐点处、过渡段的斜率, 再利用 BP 算法计算径向流直线段斜率。

3.1 初拟合

在试井解释软件的半对数图中, 按 BP 算法求得的径向流斜率 m' 画出直线段, 这样, 就求出该井的有效渗透率。有效渗透率求出后, 在试井解释软件的双对数图中, 上下左右平移曲线, 找出与有效渗透率相符的一条曲线, 从而就求得该井的井筒储集系数和表皮系数。再回到半对数图中, 上下移动径向流直线段, 找出与表皮系数相符的一条直线, 即可计算求出平均地层压力。用以上

拟合的参数进入终拟合。

3.2 终拟合

把以上的参数带入进行终拟合试算, 如果双对数图、半对数图、历史拟合图的三条曲线都拟合的很好, 这口井的解释就完成了。否则, 重新调整参数。

在进行参数调整时, 可根据曲线形态调整如下参数: ①调整井筒储集系数; ②调整表皮系数; ③调整地层压力; ④最后调整有效渗透率。

调整到双对数图、半对数图、压力史拟合图三条曲线完全拟合为止。这样该井试井解释才算完成。

4 实例

A 油田 a16 井, 该井于 2000 年 10 月17~ 24 日测试。把试井解释基础参数录入到试井解释软件。

4.1 图形识别及图形分析

在半对数图中求出(图 1):

$$m_1 = 140.2 \text{ kPa/cycle}$$
$$m_2 = 1\,167.6 \text{ kPa/cycle}$$
$$m_3 = 4\,815.1 \text{ kPa/cycle}$$

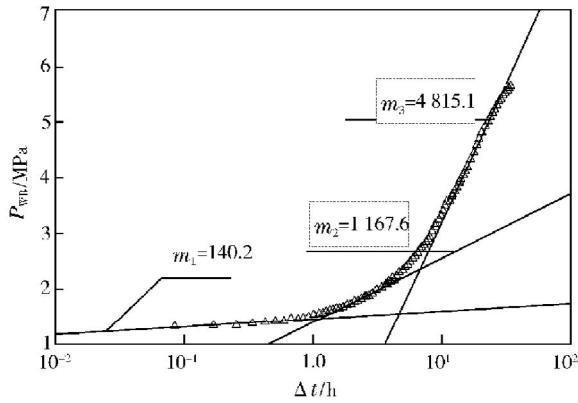
图1 a16井图形识别确定 m_1, m_2, m_3 图

Fig. 1 m_1, m_2 and m_3 defined with pattern recognition method in a16 well

注: cycle 为对数周期

4.2 BP 算法

利用神经网络 BP 算法, 把径向流直线段斜率 m' 算出, $m' = 1.0507 \text{ MPa/cycle}$ 。

4.3 试井解释软件技术

4.3.1 初拟合

在试井解释软件的半对数图中, 按求出来的径向流斜率 $m' = 1.0507 \text{ MPa/cycle}$ 画出直线段, 求取渗透率的公式为

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_0 \mu_o B_o}{m' h} \quad (1)$$

式中 K 为油有效渗透率, μm^2 ; q_0 为原油产量, m^3/d ; μ_o 为原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B_o 为原油体积系数, 小数; m' 为半对数图斜率, MPa/cycle ; h 为地层有效厚度, m 。

根据式(1), 求得该井的有效渗透率 $K = 6.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2)。有效渗透率求出后, 在试井解释软件的双对数图中, 上下左右平移曲线, 找出与有效渗透率相符的那一条曲线(为 E 曲线 $K = 6.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。通过曲线拟合值从而可求出该井的井筒储集系数 $C_D = 1141$ (图3), 计算公式为

$$C = 7.2 \pi \frac{Kh}{\mu_o} \cdot \left| \frac{t_D/C_D}{t} \right|_{\text{拟合值}} \quad (2)$$

式中 C 为井筒储集系数, m^3/MPa ; C_D 为无因次井筒储集系数, 小数; t_D 为无因次时间, 小数; t 为时间, h ; $\left| \frac{t_D/C_D}{t} \right|_{\text{拟合值}}$ 为时间拟合值。

$$C_D = \frac{C}{2 \pi \phi C_t h r_w^2} \quad (3)$$

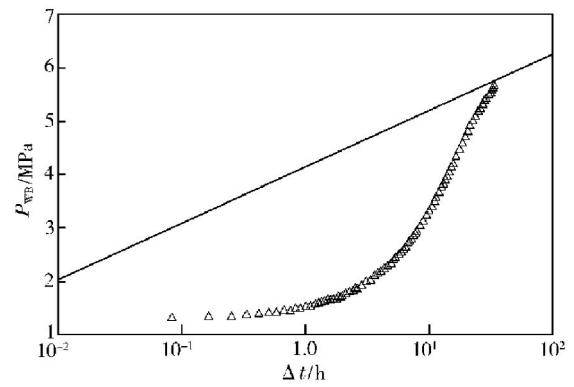
图2 a16井初拟合确定有效渗透率(K)图

Fig. 2 Effective permeability(K) defined with preliminary fitting in a16 well

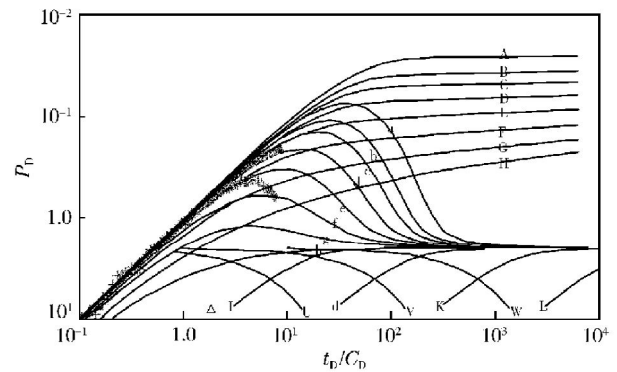
图3 a16井初拟合确定储集系数(C_D), 表皮系数(S)图

Fig. 3 C_D and S curves defined with preliminary fitting in a16 well

式中 Φ 为地层孔隙度, 小数; C_t 为综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; r_w 为井筒半径, m 。求出表皮系数 $S = -0.06581$ (图3)。计算公式为

$$S = \frac{1}{2} \ln \frac{(C_D e^{2S})_{\text{拟合值}}}{C_D} \quad (4)$$

式中 S 表皮系数, 小数; $(C_D e^{2S})_{\text{拟合值}}$ 为样板曲线拟合值。

然后, 再回到半对数图中, 上下移动径向流直线段, 找出与表皮系数相符的那一条直线, 求出平均地层压力 $P_R = 8.941 \text{ MPa}$ (图4)。计算公式为

$$\bar{P}_R = P^* - \frac{m' P_{\text{DMBH}}}{2.303} \quad (5)$$

式中 $\bar{P}_R$ 为平均地层压力, MPa ; P^* 为霍纳外推压力, MPa ; P_{DMBH} 为无因次压力, 小数。

4.3.2 终拟合

把以上的参数带入进行终拟合试算, 由于该井的双对数图、半对数图、压力史拟合图中三条曲线未完全拟合, 则重新调整参数。

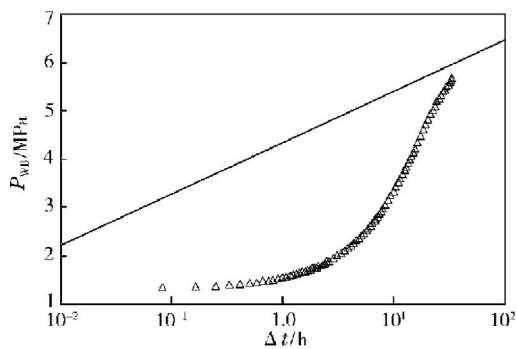


图 4 a16 井初拟合确定地层压力(P_R)图

Fig. 4 P_R curve defined with preliminary fitting in a16 well

经反复调整,直到双对数图、半对数图、压力史拟合图三条曲线完全拟合为止(图 5~7)。这样该井试井解释才算完成。与未删去径向流直线段的图 8、图 9、图 10 相比拟合状况良好。从两口井拟合参数对比中看出平均地层压力相对误差为 2.4%。删去径向流直线段与有径向流直线段各项拟合参数见表 2。

5 结语

应用图形识别、神经网络BP算法、试井解释

表 2 删去和存在径向流直线段拟合参数对比表

Table 2 Comparison between fitting parameters before and after deleting linear portions of radial flow

井号	测压日期	完整曲线形态试井解释结果				删去径向流直线段试井解释结果				平均压力相对误差/%	模型
		P_R/MPa	$K/(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	S	$C_D/(m^3\cdot\text{MPa}^{-1})$	P_R/MPa	$K/(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	S	$C_D/(m^3\cdot\text{MPa}^{-1})$		
a15	1999-07-14~20	2.81	14.61	-1.73	1506	2.77	15.81	-1.372	1609	1.44	均质
a16	2000-10-17~24	9.48	5.23	-0.026	919	9.81	5.02	-0.001	908	3.36	均质

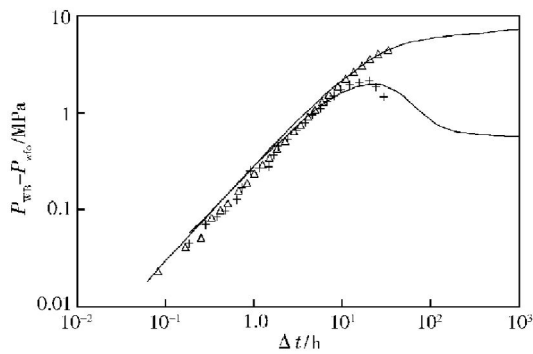


图 5 a16 井双对数终拟合图

Fig. 5 Final fitting curve of log-log analysis in a16 well

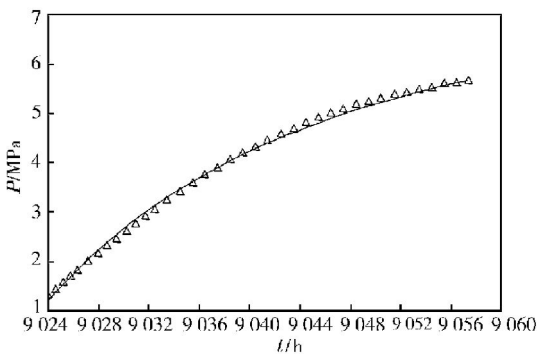


图 7 a16 井压力史终拟合图

Fig. 7 Final fitting curve of pressure history in a16 well

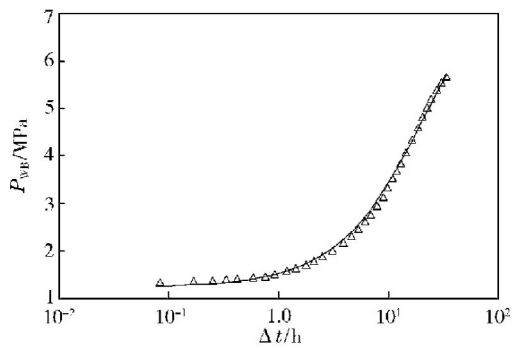


图 6 a16 井半对数终拟合图

Fig. 6 Final fitting curve of semi-logarithmic analysis in a16 well

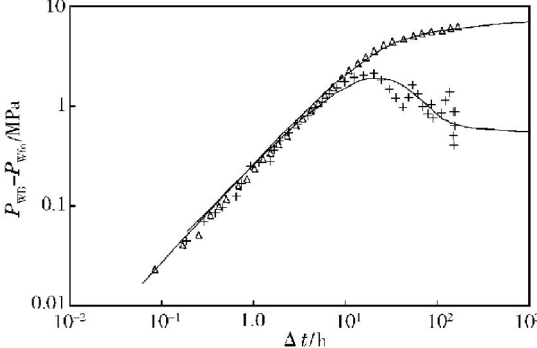


图 8 a16 井不删去径向流直线段的双对数拟合图

Fig. 8 Final fitting curve of log-log analysis in a16 well before deleting linear portion of radial flow

软件三位一体的联合技术,进行低渗透储层试井解释的研究是一项新的技术方法。通过吉林油区

A 油田的实践,该项技术方法初步获得成功,解决了 A 油田低渗透储层试井解释难题。该方法可以

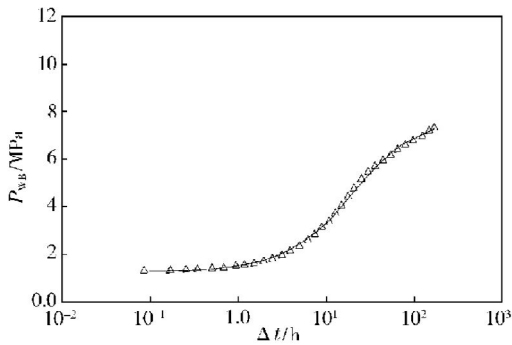


图9 a16井不删去径向流直线段的半对数拟合图

Fig. 9 Final fitting curve of semi logarithmic analysis in a16 well before deleting linear portion of radial flow

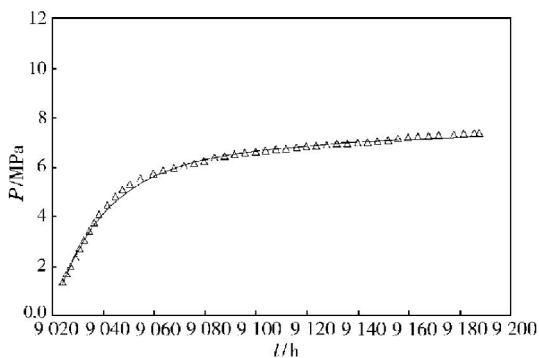


图10 a16井不删去径向流直线段的压力史拟合图

Fig. 10 Final fitting curve of pressure history in

a16 well before deleting linear portion of radial flow

较为准确的计算低渗透油藏的地层压力, 相对误差较小, 从而使大多数未出现径向流的试井测试资料, 得到有效的应用, 提高测试资料的利用率。

但是, 由于该项技术方法数学模型所限, 目前, 该项技术方法的应用尚存有局限性: ①方法只适于均质油藏; ②适宜于一个油田有多井次出现径向流直线段的试井资料; ③随着出现径向流直线的试井资料的增多, 回归式将更趋于完善。

参 考 文 献

- 1 张英魁, 张太春. 新民油田试井测试与试井解释存在问题及解决方法研究[J]. 油气井测试, 2002, 11(2): 29~31
- 2 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 3 石广仁. 地学中的计算机应用新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 8~21, 47~61
- 4 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990
- 5 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993
- 6 王天顺, 赵敏. 烃类体系相态特征图的 ANN 识别方法[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 88~91
- 7 陈玲, 冯其红, 于红军. BP 网络方法在油田措施规划的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 78~80
- 8 杨久西. 谢凤桥构造油气层的人工神经网络识别[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 76~80
- 9 杨斌, 肖慈. 基于神经模糊系统的储层参数反演[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 173~176
- 10 张英魁, 胡光, 栾海波, 等. 油田注水开发中后期试井解释中基础参数的确定方法研究[J]. 油气井测试, 2001, 10(6): 23~25
- 11 王安辉, 张英魁, 高景龙, 等. 应用人工神经网络方法确定岩石压缩系数[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 105~107
- 12 张英魁, 刘斌. 利用多元回归方法确定岩石压缩系数[J]. 油气井测试, 2001, 10(1): 7~9

(上接第 337 页)

- 3 任战利, 冯建辉, 崔军平, 等. 东濮凹陷杜桥白地区天然气藏的成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 376~381
- 4 常俊合, 李新军, 吕红玉, 等. 东濮凹陷文留潜山构造文古 2 井原油地球化学特征和油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 44~48
- 5 张洪安, 李继东. 白庙构造油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 45~49
- 6 Du Jianfen, Li Shilun, Sun Lei. Effect of porous medium adsorption on the percolation law of condensate gas mixture[R]. SPE50926, 1998
- 7 李士伦, 刘建仪, 孙雷, 等. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 8 O' Dell H G, Miller R N. Successfully cycling a low permeability high yield gas condensate reservoir[J]. JPT, 1967: 41~47
- 9 黄全华, 李士伦, 孙雷, 等. 考虑多孔介质吸附影响的凝析油气渗流[J]. 天然气工业, 2001, (2): 75~78
- 10 [美] 格雷格 S J, 辛 K S W. 吸附、比表面与孔隙率[M]. 高敬琮译. 北京: 化学工业出版社, 1989
- 11 阿巴索夫 M T, 奥鲁贾利耶夫 Ф Г. 凝析气田的开发及气水动力学[M]. 俞经方译. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 12 米尔扎赞扎杰 A X, 杜尔米希扬 A Г. 凝析气田开发[M]. 杨培友译. 北京: 石油工业出版社, 1984
- 13 中国石油天然气总公司开发生产局. 试井理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 14 郭康良, 周丽娟. 低渗气井压力恢复资料解释新方法[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 59~62