

注水井解调联作选井选层方法研究与应用

赵立强¹, 鲜超¹, 罗志锋¹, 兰夕堂²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 塘沽 300450)

摘要: 解调联作是强非均质性油藏受伤害注水井解除污染堵塞, 控制高渗层吸水强度, 改善注水效果的有效手段。影响解调联作效果的因素很多, 且各个因素之间具有复杂的非线性关系, 传统的统计方法应用受到诸多限制。在对注水井解调联作效果影响因素分析的基础上, 采用皮尔逊相关系数法计算各因素与增注比的相关系数, 以此为依据确定各因素间的相对重要度, 结合模糊层次分析法确定各因素的权重, 进而达到优化选井选层的目的。应用新方法对渤海油田X区块注水井进行了实例计算, 决策值大小与现场作业效果吻合度高, 验证了该方法可靠性, 且计算简单快速, 为提高解调联作的成功有效率提供了有力保障。

关键词: 解调联作; 选井选层; 相关系数; 层次分析

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Research and application of candidate injection well and layer selection method for acidizing-water shutoff joint operation

Zhao Liqiang¹, Xian Chao¹, Luo Zhifeng¹ and Lan Xitang²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Tianjin Branch Company, CNOOC, Tanggu, Tianjin 300450, China)

Abstract: The acidizing-water shutoff joint operation technology is an effective method to resolve the plugging, control the water injection profile, and improve the injection effect of the damaged injection wells with the strong heterogeneity. There are many factors affecting the effectiveness of the acidizing-water shutoff joint operation. Due to the complex nonlinear relations of the various factors, the traditional statistical methods is limited. To solve this problem, and based on the analysis of the effect of the acidizing-water shutoff joint operation for the water injection wells, we calculate the correlation coefficients between the factors and the increasing injection ratio by the pearson correlation coefficient method. And according to the correlation coefficient, the relative importance of each factor is determined. Then, the weight of each factor is decided by the fuzzy analytical hierarchy process. This new method is used to calculate the injection wells in the Bohai Oilfield, and the decision value is consistent with the results of the field operation. This method is reliable and simples and provide the powerful guarantee for improving the success rate of acidizing-water shutoff joint operation for injection wells.

Key words: acidizing-water shutoff joint operation, Well and layer selection, correlation coefficient, hierarchical analysis

渤海油田大多数油藏非均质性强, 储层厚度大、小层多, 渗透率级差大^[1-2]。从20世纪80年代起, 海上油田开始规模实施酸化技术^[3-5], 取得了较为明显的增产增注效果。但随着注水开发进入中后期, 渤海油田面临着储层能量不能得到有效释放, 层间、层

内矛盾日益加剧的问题。酸化过程中酸液总是优先进入高渗透层, 进一步加剧了吸水层间矛盾, 酸化效果越来越差。单一的酸化与调剖技术难以满足生产实际需要。为此, 现场研究、实践了注水井解调联作技术, 但已实施解调联作井效果差异大。解堵与调

收稿日期: 2017-01-22。

第一作者简介: 赵立强(1957—), 男, 教授、博士生导师, 油气藏增产改造理论与技术、采油气工程。

剖考虑的因素多而复杂,传统的统计方法已不能满足现场要求,现多采用模糊评判^[6]和神经网络^[7]等非线性数学方法。

渤海油田进行解调联作井数不多,神经网络方法并不适用,因此,采用模糊综合评判法。不同因素对解调作业后效果的影响程度不同,即需要确定各因素的权值。目前常用的权重确定方法主要有经验类比法、统计分析法、主成分分析法及层次分析法等^[8]。层次分析法采取定性与定量有机结合理念,使复杂系统分解,所需定量数据信息较少。但层次分析法中的标度确定主观性强,为此,采用皮尔逊相关系数法计算各因素与目标函数的相关性,以此确定各因素之间的相对重要性,使决策更加客观合理。

基于上述认识,本文结合皮尔逊相关系数法和模糊层次分析法,建立了注水井解调联作选井选层模型,既克服了传统方法的盲目性,又避免了层次分析法中标度选取的主观性。

1 解调联作选井选层因素分析

从储层物性特征和注水井生产动态出发,综合分析影响注水井酸化解堵和调剖效果的各项因素,选取平均渗透率、射开厚度、渗透率变异系数、吸水百分数变异系数、平均视每米吸水指数、吸水百分数、连通状况指标、连通井含水率和受效油井未采出程度、表皮系数、欠注系数、视吸水指数减小幅度等12项指标^[9-11]作为注水井解调联作选井选层的判别依据。各评价指标均为越大越优型。其中,连通状况指标是指对应油井油层连通程度,其值等于平均连通油井层位数与注水井射孔层位数之比;欠注系数等于欠注量与配注量的比值;视吸水指数反映注水井吸水能力的变化,等于目前吸水指数与初始吸

水指数之差比上初始吸水指数。采用下式对越大越优型参数进行标准化:

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 个变量的值; x_{\min} 、 x_{\max} 为变量 x 的最小、最大值。

2 因素相关性分析

引入皮尔逊相关系数来衡量各因素与目标函数线性相关程度。相关系数计算公式为:

$$c_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: x 、 y 为包含 n 个样本的变量; \bar{x} 、 \bar{y} 为变量 x 、 y 的平均值。

3 模糊层次分析法

3.1 模糊一致矩阵的建立

将论域 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上的模糊关系“一因素比另一因素重要得多”的矩阵表示为模糊矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$ 。 r_{ij} 的大小是 x_i 比 x_j 重要程度的度量,且 r_{ij} 越大, x_i 比 x_j 就越重要, $r_{ij} > 0.5$ 表示 x_i 比 x_j 重要;反之,若 $r_{ij} < 0.5$,则表示 x_j 比 x_i 重要。这里采用 0.1 ~ 0.9 标度进行量化处理。将所得相关系数划分为 5 个区间: [0, 0.2], [0.2, 0.4], [0.4, 0.6], [0.6, 0.8], [0.8, 1], 因素重要程度按所处区间依次增加,处于同一区间的因素同等重要,以此为依据确定各因素间的重要度,见表 1。

对各元素相对于上一层某元素进行比较,得到模糊一致矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$ 。其具有以下性质: 当 $i=j$ 时, $r_{ij}=0.5$; $r_{ij}=1-r_{ji}$; $r_{ij}=r_{ik}-r_{jk}+0.5, i, j, k=1, 2, \dots, n$ 。

表1 重要程度标度
Table1 Scale of importance

标度	定义	说明	对应相关系数
0.5	同等重要	两元素相比,同等重要	[0, 0.2]
0.6	稍微重要	两元素相比,一元素比另一元素稍微重要	[0.2, 0.4]
0.7	明显重要	两元素相比,一元素比另一元素明显重要	[0.4, 0.6]
0.8	重要得多	两元素相比,一元素比另一元素重要得多	[0.6, 0.8]
0.9	极端重要	两元素相比,一元素比另一元素极端重要	[0.8, 1]
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较	若元素 a_i 比 a_j 得到判断矩阵 r_{ij} , 则元素 a_j 比 a_i 得到判断矩阵 $r_{ji}=1-r_{ij}$ 。	

3.2 模糊一致矩阵权重的确定

设元素 x_1, x_2, \dots, x_n 的权重值分别为 w_1, w_2, \dots, w_n , 则对于模糊一致矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 有:

$$r_{ij} = 0.5 + a(w_i - w_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

由式(3)得因素权重计算公式:

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad (4)$$

为了保证权重 $w_i \geq 0$, 必须满足 $a \geq (n-1)/2$ 。在实际应用中应取 $a=(n-1)/2$, 这是最重视元素间重要程度的取法。令 $w_j=w_i$, 得权重矩阵为:

$$w = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \dots & w_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

3.3 评判向量的计算

设 A 为由注水井相应参数组合建立的模糊适宜度矩阵, 则 $w \times A$ 的 $n \times n$ 维方阵的对角元素即为各井

的评判结果, 即:

$$V(i) = \sum_{j=1}^n w_j \times A_{ij} \quad (6)$$

根据 V 值大小, 即可进行井排序优选。选择视吸水指数较大的层位考虑进行调剖, 渗透率较小及受污染较为严重的层位考虑进行酸化解堵。

4 实例分析

以渤海油田 X 区块 12 口注水井为例来阐述基于皮尔逊相关系数的模糊层次分析法解调联作选井选层方法的应用, 各井典型特征参数见表 2。对表 2 中前 7 组数据进行相关性分析及模糊层次分析确定权重, 利用后 5 组进行验证。

根据(1)式对各参数进行标准化处理, 并将各井相应的标准化后的参数表达为选择调剖井的决策因子, 建立模糊适宜度矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.08 & 0 & 1 & 0.03 & 0 & 0 & 0.88 & 0.77 & 0.22 & 0.72 & 0.07 \\ 1 & 0.63 & 1 & 0.71 & 0.03 & 0.63 & 0.18 & 0.83 & 0.41 & 1 & 0.69 & 0.13 \\ 0.60 & 0.32 & 0.95 & 0.51 & 0.46 & 1 & 1 & 0.96 & 0.32 & 0.18 & 1 & 1 \\ 0.92 & 1 & 0.60 & 0 & 0.37 & 0.45 & 0.14 & 0.63 & 0.45 & 0.25 & 0.20 & 0.47 \\ 0.79 & 0.38 & 0.42 & 0.76 & 0.09 & 0.73 & 0.10 & 0 & 0.51 & 0 & 0.38 & 0.13 \\ 0.82 & 0.23 & 0.91 & 0.60 & 0.17 & 0.93 & 0.44 & 1 & 1 & 0.59 & 0 & 0.70 \\ 0 & 0 & 0.79 & 0.59 & 1 & 0.27 & 0.64 & 0.33 & 0 & 0.12 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 2 12 口注水井的特征数据
Table 2 Characteristic data of 12 wells

井号	H/m	$\bar{K} / 10^{-3} \mu\text{m}^2$	K_v	\bar{J}	\bar{W}	W_v	LT	Unp	WCUT	QZ	I_w	S	P
A1	22.3	418.1	0.6	1.8	0.3	0.3	0.3	0.8	0.7	0.2	0.8	10.0	0.4
A2	47.1	1 279.7	1.0	1.4	0.3	0.7	0.4	0.8	0.4	0.8	0.8	12.0	5.2
A3	33.3	785.4	1.0	1.2	0.5	1.0	0.8	0.8	0.3	0.2	1.0	38.0	10
A4	44.3	1 875.4	0.8	0.5	0.5	0.6	0.4	0.7	0.4	0.2	0.5	22.0	2.5
A5	40.0	886.0	0.7	1.5	0.4	0.8	0.4	0.6	0.5	0.0	0.6	12.0	0.5
A6	40.9	642.3	0.9	1.3	0.4	1.0	0.6	0.8	0.9	0.5	0.4	29.0	10
A7	12.7	283.2	0.9	1.3	0.7	0.5	0.7	0.7	0.0	0.1	0.4	8.0	1.8
A8	47.1	1 279.7	1.0	0.9	0.3	0.7	0.5	0.8	0.7	0.4	0.5	14.0	5.8
A9	40.9	642.3	0.9	1.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.3	0.4	15.0	5.1
A10	5.1	288.6	0.4	1.2	0.3	0.3	0.4	0.6	0.4	0.8	0.7	38	0.5
A11	28.3	1080.9	0.6	1.5	0.4	1.0	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	15	2.8
A12	21.8	867.9	0.7	1.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.5	0.3	0.6	18	2.6

注: H 为射孔厚度; \bar{K} 为平均渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_v 为渗透率变异系数, f; \bar{J} 为平均视每米吸水指数, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot \text{MPa})$; \bar{W} 为平均吸水百分数, f; W_v 为吸水百分数变异系数; LT 为连通状况指标, f; Unp 为受效油井未采出程度, f; $WCUT$ 为连通井含水率, f; QZ 为欠注系数, f; I_w 为视吸水指数减小幅度, f; S 为表皮系数; P 为增注比, f

利用皮尔逊相关系数法计算各因素与目标函数增注比的相关性见表3。

表3 各影响因素与增注比的相关性
Table 3 Correlation between influence factors and augmented injection ratio

因素	H	\bar{K}	K_v	\bar{J}	\bar{W}	W_v	LT	Unp	$WCUT$	QZ	I_w	S
相关系数	0.33	0.01	0.74	0.19	0.01	0.79	0.67	0.69	0.25	0.42	0.16	0.86

参考表1相关系数与标度的关系得模糊一致矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} C & H & K & K_v & \bar{J} & \bar{W} & W_v & LT & Unp & WCUT & QZ & I_w & S \\ H & 0.5 & 0.6 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.2 \\ K & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ K_v & 0.7 & 0.8 & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.8 & 0.4 \\ \bar{J} & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ \bar{W} & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ W_v & 0.5 & 0.8 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.2 \\ LT & 0.7 & 0.8 & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.8 & 0.4 \\ Unp & 0.7 & 0.8 & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.8 & 0.4 \\ WCUT & 0.5 & 0.6 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.2 \\ QZ & 0.6 & 0.7 & 0.4 & 0.7 & 0.7 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.7 & 0.3 \\ I_w & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ S & 0.8 & 0.9 & 0.6 & 0.9 & 0.9 & 0.8 & 0.6 & 0.6 & 0.8 & 0.7 & 0.9 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由式(4)计算得各参数权重见表4:

表4 区块解调联作选井各因素权重
Table4 Weight of well selection factors in break down joint with profile control

因素	H	K	K_v	\bar{J}	\bar{W}	W_v	LT	Unp	$WCUT$	QZ	I_w	S
权重	0.075	0.058	0.108	0.058	0.058	0.075	0.108	0.108	0.075	0.092	0.058	0.125

根据表4各因素的权重,由式(6)计算表2中后5口井的评判向量,计算结果见表5。目前,该5口井已经进行了解调联作作业,其中A8井有4个小层,各层物性差异大,且该井控制油井未动用程度高。对第1、3层(视吸水指数较大)进行调剖,对第2、4层(渗透率较小)进行酸化解堵,作业后日注水量由26.4 m³增加到179.5 m³,注入压力由10.2 MPa下降到4.1 MPa,效果显著,与决策结果一致。A10井由于厚度小,层间物性差异较小且控制油井未动用程度较低,不适合解调作业,解调作业后日注水量由36.4 m³增加到54.6 m³,注入压力由9.8 MPa下降到7.5 MPa,

效果不显著,与决策结果一致。

绘制各井评判向量与增注比的柱状图(图1),可以看出决策结果与注水井实际作业后的增注效果吻合,说明由该方法计算的权重合理,可指导该区块解调联作井层的选择。

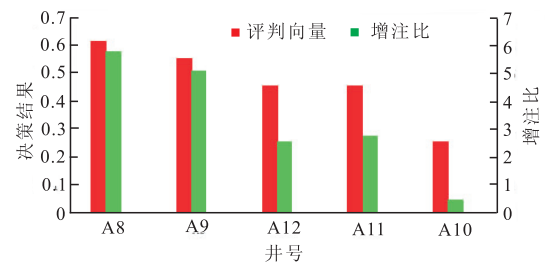


图1 各候选井决策结果与增注比

Fig. 1 Decision results and augmented injection ratio of alternative wells

表5 各候选井决策结果

井号	增注比	决策结果 $V(i)$
A8	5.8	0.62
A9	5.1	0.56
A10	0.5	0.26
A11	2.8	0.46
A12	2.6	0.46

5 结论

- 1) 基于皮尔逊相关性分析,确定出各因素间的
(下转第70页)