

文章编号:1008-1534(2014)01-0010-04

油井压裂选井方法在 C 油田中的应用

王立军¹, 刘 星¹, 伏荣超²

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油集团测井有限公司塔里木事业部, 新疆库尔勒 841001)

摘 要:随着油田的不断深入开发, 压裂改造是油藏开发获取工业油流的必须手段。为确保油井压裂的效果与经济效益, 提升油井压裂方案的符合率, 避免传统上压裂选井的经验性与盲目性, 依据近些年来压裂选井的实践, 应用模糊数学分析的方法, 建立了适合 C 油田的压裂选井方法, 即模糊评判分析方法。通过对模型进行实际运算应用, 其结果与该地区实际压裂的施工结果具有很好的符合性。研究成果为 C 油田可持续开发奠定基础, 对于指导油田压裂选井工作具有重要意义。

关键词:压裂; 模糊评判; 选井

中图分类号: TE357 文献标志码: A doi: 10.7535/hbgykj.2014yx0103

Application of well fracturing selection in C oilfield

WANG Lijun¹, LIU Xing¹, FU Rongchao²

(1. Petroleum Engineering Institute, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China; 2. Talimu Business Division, China Petroleum Logging Company Limited, Kuerle Xinjiang 841001, China)

Abstract: With the development of the oilfields, fracturing is a necessary way to obtain commercial oil in reservoir. In order to keep oil well fracturing effect and economic benefits, to improve the coincidence rate of the oil well fracturing scheme, and to avoid the blindness of traditionally selecting fracturing wells, according to the practices of well fracturing selection in recent years, fuzzy mathematics analysis method was established for selecting fracturing wells which is suitable for C oilfield. The computation result of the method is in accord with the region's actual fracturing construction. The result lays a foundation for sustainable development of C oilfield, and helps to select fracturing wells in other oilfields.

Key words: fracture; fuzzy evaluation; wells selection

1 C 油田目前压裂现状

截至目前 C 油田已压裂 1 433 井次, 占全厂油井总数 35.4%, 措施井增油在 C 油田开发过程中起

到至关重要的作用。自“十一五”以来累计转向压裂 323 口井, 平均单井年增油 279 t, 取得了较好的效果, 但单井年增油量由 2006 年的 387 t 下降到 2011 年的 238 t, 措施效果有明显变差趋势。针对近几年油田措施潜力变小的问题, 即油田含水逐年升高, 套损井数增多, 二次及三次以上压裂井数增多, 压裂潜力井厚度变薄且储层物性变差的问题, 以及随着油田开发进行, 选井难度进一步加大, 每年要压裂 100~110 口井, 保证 $(2.0 \sim 3.0) \times 10^4$ t 措施增油量, 为了保证压裂效果, 进一步提高经济效益, 有必要对影响压裂的效果因素进行分析, 选择适合压裂的井, 建立油井压裂效果预测模型。

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2013-06-28

责任编辑: 冯 民

作者简介: 王立军(1964-), 男, 黑龙江肇州人, 教授, 博士, 主要从事油藏工程理论及应用技术研究。

E-mail: wlj1964@163.com

王立军, 刘 星, 伏荣超. 油井压裂选井方法在 C 油田中的应用[J]. 河北工业科技, 2014, 31(1): 10-13.

WANG Lijun, LIU Xing, FU Rongchao. Application of well fracturing selection in C oilfield[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, 31(1): 10-13.

2 压裂油井潜力评价

2.1 确定影响压裂效果因素的权重

层次分析法是美国匹兹堡大学运筹学家 SAATY 于 20 世纪 70 年代提出的^[1-2]。它特别适用于分析解决一些结构比较复杂、难于量化的多目标(多准则)的决策问题。

利用层次分析法的具体运算步骤如下。

1) 将影响压裂选井的各个因素根据它们之间的内部关系分出层次。

2) 两两比较,确定对比矩阵。

为明确确定对比矩阵,所依据标度的方法为将各比较因素分别作为矩阵的行与列,在系统内存在统一标尺^[3],对它们的相对重要性进行两两比较,确定标度值。层次分析法确定对比矩阵的统一标度如表 1 所示。

表 1 层次分析法标度尺

Tab. 1 Scale of AHP

标度	含义
1	两个因素比较,具有同样的重要性
3	两个因素比较,前者比后者稍微重要
5	两个因素比较,前者比后者明显重要
7	两个因素比较,前者比后者强烈重要
9	两个因素比较,前者比后者极端重要
2	介于 1,3 两相判断的中值
4	介于 3,5 两相判断的中值
6	介于 5,7 两相判断的中值
8	介于 7,9 两相判断的中值
倒数	因素 i 与因素 j 的重要性之比为 P_{ij} , 则因素 j 与因素 i 的重要性之比就为 $P_{ji}=1/P_{ij}$

3) 构建等价矩阵。

所建立的对比矩阵有时会不满足判断一致性,为避免此种情况的发生,利用最优传递矩阵使对比矩阵改良,使其满足一致性的要求。

$$C_{ji} = \lg P_{ji}, \quad (1)$$

式中: P_{ji} 为对比矩阵; C_{ji} 为对比矩阵经对数变换后的矩阵。

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^N (C_{ik} - C_{jk}) / N, \quad (2)$$

式中: N 为对比矩阵中因素的个数。

接下来进行一次指数运算,如式(3)所示。

$$P_{ij}^* = 10^{d_{ij}}, \quad (3)$$

得到的 P_{ij}^* 作为判断矩阵,具有判断一致性,且与 P 完全等价。

4) 根据已确定的等价矩阵应用方根法求取权重,如式(4)所示。

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n P_{ij}^*}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

将 \bar{W}_i 进行规范化处理:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{W}_k}, \quad (5)$$

则 $W_i = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 为该层各有关元素即各个影响因素对上一层次的权重。

5) 计算各因素的总权重。

若上一层共有 m 个因素,其权重值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m , 本层的 n 个因素 A_1, A_2, \dots, A_n 对于上一层各因素的相对权重值为 $W_1^i, W_2^i, \dots, W_n^i (i = 1, 2, \dots, m)$, 则本层次各因素的总权重为 $\sum_{i=1}^m a_i W_i^i$,

$$\sum_{i=1}^m a_i W_2^i, \dots, \sum_{i=1}^m a_i W_n^i.$$

由此可知,一层一层依次自上而下去求,最终所有影响因素的权重均可求出^[4-5]。

2.2 优选压裂井模糊综合评判模型的原理

模糊评判分析方法是借助于模糊关系原理^[6],充分考虑与预评判事物相关的各个因子的影响后,即考虑与压裂效果有关的各个因素的影响后,对优选压裂井做出总的评判^[7-9]。其基本方法和步骤如下。

1) 建立影响压裂效果的因素集。

因素集是以影响评判优选压裂井的各种影响因素为元素组成的一个普通集合^[10-11]。通常选用大写字母 U 来表示,即:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}. \quad (6)$$

各个元素 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 即代表各影响压裂效果的因素,然而这些影响因素都具有一定不同程度的模糊性。对于本文研究的问题,评判油井是否适合压裂时,有效厚度、连通方向数、压前含水率、初期产量、采出程度这些影响因素所构成的集合即为因素集。

比如,第 i 口井有 n 个影响因素需要分类,记为

$$u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}). \quad (7)$$

这样,样本集可用一个描述各井影响因素特征的模糊矩阵来确定,记为

$$U = (u_{ij})_{n \times m} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (8)$$

2) 效用函数计算方法。

描述各井影响因素特征的物理量差异很大,但是在分类计算时,只需定量分析,所以必须去除物理量单位所带来的干扰。因此,要利用效用函数^[12]的处理方法对描述各井影响因素的特征值进行规范化。

本文使用的处理方法如下。

① 越大越优型因素指标,效用函数的计算为

$$b_{ij} = \frac{u_{ij} - (u_{ij})_{\min}}{(u_{ij})_{\max} - (u_{ij})_{\min}}, \quad (9)$$

式中: u_{ij} 为第 i 口井的第 j 个影响因素的值; $(u_{ij})_{\min}$ 为所有井第 j 个因素的最小值; $(u_{ij})_{\max}$ 为所有井第 j 个因素的最大值; b_{ij} 为第 i 口井的第 j 个影响因素越大越优型归一化后所对应的值。

② 越小越优型因素指标,效用函数的计算为

$$b_{ij} = 1 - \frac{u_{ij} - (u_{ij})_{\min}}{(u_{ij})_{\max} - (u_{ij})_{\min}}, \quad (10)$$

式中: b_{ij} 为第 i 口井的第 j 个影响因素越小越优型归一化后所对应的值。

由此可以得到效用函数矩阵 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = [b_{ij}]_{n \times m}, \quad (11)$$

式中: n 为井数; m 为影响因素的个数; b_{ij} 为第 i 口井的第 j 个影响因素归一化后所对应的值。 \mathbf{B} 为效用函数矩阵。

根据上面求出的各影响压裂效果因素的权重矩阵 $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 和各影响因素的效用函数矩阵 \mathbf{B} , 则各井的综合效用评价值为

$$E = \sum_{j=1}^n W_j b_{ij}, \quad (12)$$

式中: b_{ij} 为第 i 口井的第 j 个影响因素归一化后所对应的值; W_j 为第 j 个影响因素的权重值; E 为综合效用评价值。

由于综合效用值越大压裂效果越好,故可以依据 E 值由大到小将待选油井排序^[13],最后选出适合压裂的井。

3 实例分析

以 C 油田一类区块为例,影响压裂效果的因素为有效厚度、连通方向数、压前含水率、初期产量、采出程度。对 C 油田确定影响因素权重的问题,本文取层次分析法的层数为一层来进行分析,那么首先需要确定该类区块各个影响因素之间构成的对比矩阵,如表 2 所示。

表 2 对比矩阵

Tab. 2 Comparison matrix

因素	有效厚度	连通方向数	压前含水率	初期产量	采出程度
有效厚度	1.00	2.00	2.00	0.50	2.00
连通方向数	0.50	1.00	2.00	0.50	2.00
压前含水率	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50
初期产量	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00
采出程度	0.50	0.50	2.00	0.50	1.00

再根据层次分析法原理得到各个因素所占的权重,如表 3 所示。

表 3 各因素权重

Tab. 3 Weights of the factors

因素	有效厚度	连通方向数	压前含水率	初期产量	采出程度
权重	0.237 5	0.125 4	0.028 9	0.542 0	0.066 2

根据模糊评判原理,对 C 油田该类区块的已压裂井进行分析,可以得到所有单井的综合评价指数,将其由大到小排序。该类区块单井影响因素统计结果如表 4 所示。该类区块单井统计排序结果如表 5 所示。

表 4 压裂井的影响因素数据

Tab. 4 Data of influencing factors of fracture wells

井号	有效厚度/m	连通方向数/个	压前含水率/%	初期产量/t	采出程度/%
J1	19.20	1	0.00	3.6	2.56
J2	24.00	1	37.60	5.2	27.81
J3	14.80	3	7.00	8.0	32.22
J4	22.00	2	12.00	8.7	31.96
J5	12.40	4	19.50	10.2	34.70
J6	11.40	2	2.10	4.2	32.53
J7	11.80	2	14.40	1.8	7.78
J8	11.20	3	2.40	3.5	5.20
J9	7.00	2	0.90	4.0	10.33
J10	9.40	2	3.00	4.2	8.77
J11	12.20	2	5.00	9.0	24.94
J12	11.80	2	6.00	3.9	26.33
J13	19.80	3	30.00	6.2	11.47
J14	15.80	1	96.00	5.7	10.15
J15	21.00	2	15.00	5.2	9.12
J16	6.90	4	28.00	3.9	30.36
J17	18.40	4	32.00	4.8	25.86
J18	12.00	2	20.00	5.9	33.25
J19	9.40	3	23.00	8.5	19.74
J20	12.80	2	20.00	5.8	13.71
J21	12.80	2	12.00	0.0	9.01
J22	10.00	2	28.20	6.0	34.10
J23	11.60	1	14.00	5.8	14.40
J24	18.80	2	16.00	5.9	8.54
J25	18.80	2	0.00	5.9	2.22

表5 压裂井的排序结果

Tab.5 Sequence result of fracture wells

井号	综合评价指数	井号	综合评价指数	井号	综合评价指数
J5	0.766 8	J17	0.577 5	J10	0.380 5
J4	0.744 7	J2	0.545 4	J16	0.362 0
J13	0.659 4	J20	0.497 6	J12	0.361 2
J3	0.650 3	J14	0.476 5	J6	0.360 2
J11	0.640 9	J1	0.456 5	J9	0.334 0
J19	0.622 5	J18	0.452 0	J7	0.284 9
J25	0.615 7	J23	0.439 5	J21	0.201 4
J24	0.598 0	J22	0.425 3		
J15	0.590 5	J8	0.417 6		

4 结 论

1)应用层次分析法确定了影响压后增油效果的主要因素权重,表征影响因素对压裂效果的不同;

2)效用函数的处理方法可以使压裂的影响因素数据消除物理量单位所带来的干扰;

3)应用模糊评判方法建立了优选压裂井的选井模型。

参考文献/References:

- [1] MENG H Z, PROANO E A, BUHIDMA I M, et al. Production system analysis of vertically fractured wells [A]. SPE Unconventional Gas Recovery Symposium [C]. Pittsburgh: [s. n.], 1982. 16-18.
- [2] 钟诗胜. 工程方案设计中的模糊理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
ZHONG Shisheng. The Fuzzy Theory and Technology in Engineering Design [M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2004.
- [3] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. The research and application of analytic hierarchy process [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2008, 18(5): 148-153.
- [4] 蒋廷学, 田占良. 模糊数学在压裂设计中的应用[J]. 天然气工业, 1998, 18(3): 61-64.
JIANG Tingxue, TIAN Zhanliang. Application of fuzzy mathematics in fracturing design [J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(3): 61-64.
- [5] 孙福街, 程林松, 李秀生. 层次分析法在油田开发综合评价与方案优选中的应用探讨[J]. 中国海上油气(地质), 2002,

16(5): 328-332.

SUN Fujie, CHENG Linsong, LI Xiusheng. Discussion of the application in comprehensive evaluation of analytic hierarchy process (ahp) in the oil field development and plan optimization [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2002, 16(5): 328-332.

- [6] 吴建发, 郭建春, 赵金洲. 压裂酸化选井模糊综合评判方法[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(2): 54-57.
WU Jianfa, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou. Fracture acidizing fuzzy comprehensive evaluation method of selecting well [J]. Oil Drilling Process, 2004, 26(2): 54-57.
- [7] 周志军, 李慧敏, 侯亚伟. 应用模糊综合评判方法优选非均质油藏调剖井和层[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(4): 88-93.
ZHOU Zhijun, LI Huimin, HOU Yawei. Fuzzy comprehensive evaluation method is applied to optimization of inhomogeneous reservoir profile control wells and layers [J]. The Practice of Mathematics and Understanding, 2010, 40(4): 88-93.
- [8] 付永强, 郭建春, 赵金洲, 等. 多层次模糊聚类在压裂酸化选井选层中的应用[J]. 天然气工业, 2001(5): 58-60.
FU Yongqiang, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. Application of multi-level fuzzy clustering in fracturing acidification to choose well and layer [J]. Natural Gas Industry, 2001(5): 58-60.
- [9] 杨小松, 孙雷, 张国强, 等. 压裂酸化选井选层中的变权评判方法研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 640-645.
YANG Xiaosong, SUN Lei, ZHANG Guoqiang, et al. Variable weight evaluation method research in fracturing acidification to choose well and layer [J]. Natural Gas in Earth Science, 2004, 15(6): 640-645.
- [10] 杨小松, 孙良田, 孙雷, 等. 模糊数学在气井压裂酸化选井选层因素分析中的应用[J]. 钻采工艺, 2005, 28(4): 39-43.
YANG Xiaosong, SUN Liangtian, SUN Lei, et al. Application of fuzzy mathematics in fracturing acidification to choose well and layer of gas well [J]. Drilling Process, 2005, 28(4): 39-43.
- [11] 杨光, 申芙蓉. 重复压裂选井选层模糊综合评判方法[J]. 内蒙古石油化工, 2007(4): 140-142.
YANG Guang, SHEN Furong. Fuzzy comprehensive evaluation method of repeated fracturing to choose well and layer [J]. Petroleum Chemical Industry in Inner Mongolia, 2007(4): 140-142.
- [12] 唐庚, 白璐, 龙学, 等. 排水采气工艺方法优选的模糊决策研究[J]. 钻采工艺, 2001, 24(6): 33-35.
TANG Geng, BAI Lu, LONG Xue, et al. Fuzzy decision-making research of method optimization in drainage gas recovery [J]. Drilling Process, 2001, 24(6): 33-35.
- [13] 孙晓丰. 重复压裂选井选层模糊综合评判方法[J]. 科技创新导报, 2008, 24: 80-81.
SUN Xiaofeng. Fuzzy comprehensive evaluation method of repeated fracturing to choose well and layer [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, 24: 80-81.