

Model for Optimizing the Acidizing of Oil and Water Wells

Zhiqi Yao¹, Xinrong Xie²

¹No. 1 Drilling Engineering Company, Bohai Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Tianjin

²Drilling Technology Service Company, Bohai Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Tianjin

Email: yao_zq@cnpc.com.cn

Received: Jul. 30th, 2018; accepted: Aug. 28th, 2018; published: Oct. 15th, 2018

Abstract

Aiming at the problems existed in the acidizing operation of oil (water) wells, the model for optimizing the acidification was specially studied in the research of real-time monitoring system for acidizing oil (water) wells. The matrix model of analytic hierarchy process (AHP) was established. The eigenvalues and eigenvectors of the matrix were solved by using approximate method. The matching comparison matrix was checked for its consistency. The utility function was set up according to the data of various indexes of alternative wells, and the comprehensive utility value was calculated. The optimal acid solution selection under the same conditions is realized through the establishment of multi-parameter optimization model. The recommendation of acid solution eventually enhances the acidizing effect of different types of reservoirs.

Keywords

Oil Well, Water Injection Well, Acidizing Effect, Optimization Method, Model, Skin Factor, Water Absorption (Oil Recovery) Index

油水井酸化优选模型研究

姚志奇¹, 谢新荣²

¹中石油渤海钻探工程有限公司第一钻井工程分公司, 天津

²中石油渤海钻探钻井泥浆技术服务公司, 天津

作者简介: 姚志奇(1983-), 男, 工程师, 现从事石油钻井技术与工程管理工作。

Email: yao_zq@cnpc.com.cn

收稿日期: 2018年7月30日; 录用日期: 2018年8月28日; 发布日期: 2018年10月15日

摘要

针对油(水)井酸化施工现场存在的问题, 在开展油(水)井酸化实时监测系统研究中专门对酸化优选模型进行了研究。建立了层次分析法矩阵模型; 采用近似方法来求解矩阵的特征根和特征向量; 对成对比较矩阵进行一致性检验; 根据备选井的多种指标数据建立效用函数, 计算出综合效用值; 通过多参数优化模型的建立, 实现同等条件下优选酸液的推荐, 最终实现提高不同类型油藏的酸化效果。

关键词

油井, 注水井, 酸化效果, 优选法, 模型, 表皮系数, 吸水(采油)指数

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

针对油(水)井酸化施工现场存在的现场资料录取不全不准、现场决策控制缺乏可靠手段及施工纪录不详细导致后续评价难度大等问题[1] [2] [3] [4], 在开展油水井酸化实时监测系统研究中[5] [6] [7] [8], 重要的是酸化优选模型研究, 目的是提高酸化技术的适应性和针对性, 最终实现提高不同类型油藏的酸化效果。

表皮系数的降低程度、吸水(采油)指数的升高程度、生效的天数和单位油层厚度的经济支出都可以用来评价油水井酸化效果的好坏[9]-[14]。但用这些指标单个地来评价油水井的酸化效果显得不够全面, 比如一口注水井吸水指数在酸化后提升明显, 然而生效的时间不够长, 则不能说这口井的效果很好。很显然, 这些指标对酸化效果评价应该有一个轻重程度, 简单的对这些指标的重要程度排序似乎太过于定性, 主观性太强, 不具有说服力。一般来说, 一口油(水)井经过酸化作业后, 理想的结果是井的表皮系数降低、吸水(采油)指数升高, 生效时间足够长。另外, 在得到这些效果的同时, 希望能尽量减少经济支出。这里, 笔者采用层次分析法将定性与定量结合起来, 尽量消除主观影响。

2. 建立模型

对油(水)井酸化的效果评价, 下面以3口井(W1, W2, W3)为例, 建立层次分析法模型[15] [16] [17] (图1)。

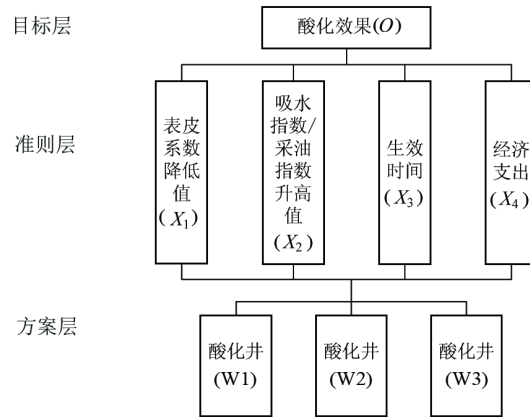


Figure 1. The analytic hierarchy process model
图 1. 层次分析法模型

2.1. 构造成对比较矩阵

对酸化效果评价，有经验的决策人用成对比较法，将表皮系数降低(X_1)、吸水(采油)指数升高(X_2)，生效时间足够长(X_3)和经济支出减少(X_4)这 4 个指标进行两两比较(表 1)。表 1 中， a_{21} 为酸化效果评价中吸水(采油)指数升高与表皮系数降低的重要性之比； a_{31} 为酸化效果评价中生效时间延长与表皮系数降低的重要性之比； a_{32} 为酸化效果评价中生效时间延长与吸水(采油)指数升高的重要性之比； a_{41} 为酸化效果评价中经济支出减少与表皮系数降低的重要性之比； a_{42} 为酸化效果评价中经济支出减少与吸水(采油)指数升高的重要性之比； a_{43} 为酸化效果评价中经济支出减少与生效时间延长的重要性之比。

Table 1. The paired comparison table
表 1. 成对比较表

O	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	1	$1/a_{21}$	$1/a_{31}$	$1/a_{41}$
X_2	a_{21}	1	$1/a_{32}$	$1/a_{42}$
X_3	a_{31}	a_{32}	1	$1/a_{43}$
X_4	a_{41}	a_{42}	a_{43}	1

则成对比较矩阵为：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{a_{21}} & \frac{1}{a_{31}} & \frac{1}{a_{41}} \\ a_{21} & 1 & \frac{1}{a_{32}} & \frac{1}{a_{42}} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \frac{1}{a_{43}} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 \end{pmatrix}$$

2.2. 一致性矩阵与权向量

由于成对比较矩阵是由专家进行两两比较给出，理论上如果 X_1 相比 X_2 重要， X_2 相比 X_3 重要，那么必然有 X_1 相比 X_3 重要。而在两两比较时可能出现相反的结果，显然这是不合理的。因此要对所建立的成对比较矩阵进行一致性检验[16]。

一般地, 如果一个正互反矩阵 A 满足:

$$a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik} \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n$$

则称 A 为一致性矩阵。

如果得到的成对比较矩阵 A 是一致性的, 则取对应的特征根 n 的归一特征向量 w 表示准则层诸因素 X_1, X_2, \dots, X_n 对目标层因素 O (酸化效果)的权重, 这个特征向量称为权向量。

如果得到的成对比较矩阵 A 是不一致性的, 但在不一致性的容许范围内, 可按对应于 A 的最大特征根(记作 λ)的归一特征向量作为权向量 w , 即 w 满足:

$$Aw = \lambda w$$

因为 A 的特征根和特征向量连续地依赖于矩阵 a_{ij} , 所以当 a_{ij} 离一致性要求不远时, A 的特征根和特征向量也与一致性的相差不大。

3. 模型求解近似方法

由于成对比较矩阵是通过定性比较得到的比较粗糙的量化结果, 因此对它进行精细计算是不必要的, 可用近似方法[17]来求解。

3.1. 幂法求解

- 1) 任取 n 维归一化初始向量 $w^{(0)}$ 。
- 2) 计算 $\tilde{w}^{(k+1)} = Aw^{(k)}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 。
- 3) $\tilde{w}^{(k+1)}$ 归一化, 即令 $w^{(k+1)} = \tilde{w}^{(k+1)} / \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i^{(k+1)}$ 。
- 4) 对于预先给定的精度 ε , 当 $|\tilde{w}^{(k+1)} - \tilde{w}^{(k)}| < \varepsilon$ 时, $w_i^{(k+1)}$ 即为所求的特征向量; 否则返回步骤 2)。
- 5) 计算最大特征根: $\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{w}_i^{(k+1)}}{w_i^{(k)}}$ 。

3.2. 和法求解

- 1) 将 A 的每一列向量归一化, 得: $\tilde{w}_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij}$ 。
- 2) 对 \tilde{w}_{ij} 按行求和, 得: $\tilde{w}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_{ij}$ 。
- 3) 对 \tilde{w}_i 归一化: $w_i = \tilde{w}_i / \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i$, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 即为所求近视特征向量。
- 4) 计算 $\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}$, 作为最大特征根的近似值。

3.3. 根法求解

根法的求解步骤基本上与和法相同, 只是步骤 2) 改为对 \tilde{w}_{ij} 按行求积并开 n 次方, 即: $\tilde{w}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{w}_{ij} \right)^{1/n}$ 。

4. 模型一致性检验

前面已给出 n 阶一致性矩阵的特征根是 n 。而且可以证明 n 阶正互反矩阵 A 的最大特征根 $\lambda \geq n$ 。

值得注意的是, 当 $\lambda = n$ 时, A 是一致性矩阵; 但当 $\lambda > n$ 且越来越大时, A 的不一致性也越来越严重, 此时用特征向量作为权向量引起的判断误差也越来越大[16]。

为此, 用 $\lambda - n$ 的大小来衡量 A 的不一致性程度。将 $C_1 = (\lambda - n)/(n - 1)$ 定义为一致性指标—— $C_1 = 0$, 有完全的一致性; C_1 接近于 0, 有满意的一致性; C_1 越大, 不一致性越严重。

当成对比较矩阵 A 的一致性检验可以通过时, 特征向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 就是问题所需要的。将该向量标准化, 使它的各分量都大于 0, 各分量之和等于 1, 即:

$$w'_i = \frac{w_i}{\max(w_i)}$$

得到标准化后的 $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T$ 即为权向量。在这里, 权向量表示在评价一口井酸化效果好坏的时候各个指标所占的权重。

5. 模型综合效用值计算

根据备选井的多种指标数据建立效用函数:

$$R = \begin{pmatrix} S_r^{(1)} & J_r^{(1)} & D_e^{(1)} & C_p^{(1)} \\ S_r^{(2)} & J_r^{(2)} & D_e^{(2)} & C_p^{(2)} \\ S_r^{(3)} & J_r^{(3)} & D_e^{(3)} & C_p^{(3)} \end{pmatrix}$$

式中: S_r 为表皮系数降低程度; J_r 为注水指数升高程度; D_e 为生效时间; C_p 为单位油层厚度经济支出。

根据归一化的数学模型, 将各指标值处理成(0, 1)之间的值, 建立效用函数矩阵。其中期望值越大越好的因素有: 表皮系数降低程度 S_r 、注水指数升高程度 J_r 、生效时间 D_e ; 期望值越小越好的型因素: 单位油层厚度经济支出 C_p 。即:

$$S_{r\max} = \max(S_r^{(1)}, S_r^{(2)}, S_r^{(3)})$$

$$J_{r\max} = \max(J_r^{(1)}, J_r^{(2)}, J_r^{(3)})$$

$$D_{e\max} = \max(D_e^{(1)}, D_e^{(2)}, D_e^{(3)})$$

$$C_{p\min} = \min(C_p^{(1)}, C_p^{(2)}, C_p^{(3)})$$

归一化得:

$$R_{m \times n} = \begin{pmatrix} S_r^{(1)}/S_{r\max} & J_r^{(1)}/J_{r\max} & D_e^{(1)}/D_{e\max} & C_p^{(1)}/D_{p\min} \\ S_r^{(2)}/S_{r\max} & J_r^{(2)}/J_{r\max} & D_e^{(2)}/D_{e\max} & C_p^{(2)}/D_{p\min} \\ S_r^{(3)}/S_{r\max} & J_r^{(3)}/J_{r\max} & D_e^{(3)}/D_{e\max} & C_p^{(3)}/D_{p\min} \end{pmatrix}$$

计算出综合效用值:

$$F_i = R_{m \times n} \times w' = \begin{pmatrix} S_r^{(1)}/S_{r\max} & J_r^{(1)}/J_{r\max} & D_e^{(1)}/D_{e\max} & C_p^{(1)}/D_{p\min} \\ S_r^{(2)}/S_{r\max} & J_r^{(2)}/J_{r\max} & D_e^{(2)}/D_{e\max} & C_p^{(2)}/D_{p\min} \\ S_r^{(3)}/S_{r\max} & J_r^{(3)}/J_{r\max} & D_e^{(3)}/D_{e\max} & C_p^{(3)}/D_{p\min} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w'_1 \\ w'_2 \\ w'_3 \\ w'_4 \end{pmatrix}$$

得:

$$F = (F_1 \quad F_2 \quad F_3)^T$$

式中: F_1 、 F_2 、 F_3 即为酸化井 1、酸化井 2、酸化井 3 的综合效用值, 代表的就是这 3 口井酸化效果的综合评价结果。

通过多参数优化模型的建立, 实现同等条件下优选酸液的推荐。酸液优选指标为:

$$z = \begin{pmatrix} d_1, d_2, \dots, d_n \\ r_1, r_2, \dots, r_n \\ m_1, m_2, \dots, m_n \end{pmatrix}$$

式中: d 为区块约束条件; r 为酸液体系约束条件; m 为经济约束条件。酸液优选模型为:

$$R = F \times z$$

6. 结语

通过酸化优选模型研究, 一方面提高酸化技术的适应性和针对性, 从而实现以最小酸液用量取得最佳酸化效果; 另一方面, 由于同一区域油水井在物性上的相似性, 因此对某一个地区油水井进行酸化实时监测, 进行现场应用试验, 并分油藏类型对酸化施工效果和开发效果进行跟踪评价。在该基础上, 可以总结形成适合该区域的酸化配套方案和酸液体系, 提高不同类型油藏的酸化效果, 最终达到提高酸化工作质量和效益的目的。

参考文献

- [1] 刘伟, 乔永富. 酸化施工效果实时测试与评价技术[J]. 油气井测试, 2005, 14(1): 34-35.
- [2] 郭建春, 陈朝刚. 酸化工作液发展现状[J]. 河南石油, 2004, 18(6): 40-42.
- [3] 陈朝刚, 郭建春, 周小平, 等. 基质酸化施工存在的问题及处理[J]. 断块油气田, 2004, 11(5): 69-71.
- [4] 宋宪实. 松南火山岩气藏酸化施工难点分析及技术对策[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(1): 72-73.
- [5] 邱峰, 徐占东, 何建军, 等. 压裂酸化施工远程指挥决策系统设计方案研究[J]. 中国石油和化工, 2011, 18(10): 62-63.
- [6] 丘峰, 徐占东, 向利群, 等. 压裂酸化施工远程指挥决策系统的研究及开发[J]. 中国石油和化工, 2012, 19(2): 67-69.
- [7] 耿庆福. 对酸化施工效果的质量控制[J]. 石油工业技术监督, 2008, 24(6): 34-36.
- [8] 檀朝鑫, 翟权, 吴瑜. 压裂酸化施工远程指挥决策系统的应用[J]. 中国石油和化工, 2013, 20(2): 53-55.
- [9] 李年银, 赵立强, 张倩, 等. 油气藏压裂酸化效果评价技术研究进展[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 67-71.
- [10] 叶俊华, 谈卫, 章跃中, 等. 酸化效果经济评价方法[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(2): 59-62.
- [11] 颜廷润, 张红岗, 刘秀华, 等. 注水井暂堵酸化效果评价体系研究[J]. 石油化工应用, 2017, 36(9): 46-50.
- [12] 郭玲玲. 油气藏压裂酸化效果评价技术研究进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(16): 163-164.
- [13] 王建良, 邢艳娟. 利用压力监测资料进行压裂酸化效果评价[J]. 油气井测试, 2015, 24(1): 31-33.
- [14] 孙良刚. 酸化效果评价的一种新方法研究[J]. 内江科技, 2010, 31(6): 96.
- [15] 任胜兵, 冯迪, 陈潇男. 基于最优一致性矩阵的灰色层次分析法研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(18): 44-50.
- [16] 刘相利. 层次分析法的一致性改进及其应用[J]. 舰船电子对抗, 2015, 38(5): 5-9.
- [17] 丁克华, 王明刚. 求解一类矩阵特征向量的几种近似方法[J]. 数学学习与研究: 教研版, 2009, 27(14): 81.

[编辑] 帅群

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org