

# 基于模糊多属性决策的射孔方案选择模型研究

爨莹, 王中

CUAN Ying, WANG Zhong

西安石油大学 计算机学院, 西安 710065

School of Computer Science, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065, China

E-mail: ying\_cuan@163.com

CUAN Ying, WANG Zhong. Research on selection of perforation plan based on fuzzy multiple attribute decision making. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(25): 212-214.

**Abstract:** Perforation is one of major oil and gas well completion methods. Different perforation parameters have different influences on oil-well productivity. Perforation involves productivity ratio, perforation phase angle, perforation diameter, penetration and etc, which conflict with each other. Fuzzy factors of perforation are inevitable. Fuzzy multi-attributes decision making method is applied and perforation scheme fuzzy multi-attribute decision-making model is created. The FMADM model with preference information and FMADM model without preference information are discussed in detail. The simulation experimental results show that models are effective, which offer one kind of science decision-making foundation of petroleum perforation.

**Key words:** perforating parameter; perforating scheme; fuzzy multi-attribute decision-making without preference information; fuzzy multi-attribute decision-making with preference information

**摘要:** 射孔是油气井的主要完井方式之一, 不同的射孔参数对井的产能有不同的影响。射孔方案涉及产能比、相位角、孔密、穿深、孔径、套管强度降低系数等因素, 各因素之间互相影响, 互相制约, 射孔方案的选择中存在一定的模糊性。探讨将模糊多属性决策方法应用于油气井射孔作业, 建立射孔方案模糊多属性决策模型, 讨论了无偏好及有偏好情况下的射孔决策模型。仿真实例验证了模型的有效性, 为射孔作业提供了一种决策依据。

**关键词:** 射孔参数; 射孔方案; 无偏好模糊多属性决策; 有偏好模糊多属性决策

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.25.065 **文章编号:** 1002-8331(2009)25-0212-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** N945.16; TP182

## 1 引言

射孔作业是油气田勘探开发过程中不可缺少的环节, 对油气井产能影响很大。射孔工艺所采用的射孔方案合适与否, 对井筒完善程度、储层以及井下设备的损害有直接的影响, 从而影响到油气井的产能及生产安全<sup>[1]</sup>。目前在射孔方案选择中存在重视产能比, 忽视成本及射孔安全现象。因而, 射孔完井优化方案选择问题在射孔完井优化设计中的重要性空前凸显, 受到广大设计人员越来越多的关注。

衡量射孔优化方案的优劣涉及多项指标, 各指标之间没有一个统一的衡量标准, 相互影响, 相互制约, 同时方案选择也受到决策者的经验、知识水平、主观观偏好等多种模糊因素的影响。将模糊多属性决策法引入射孔方案的选择中, 讨论了有偏好信息的射孔方案选择模型及无偏好信息的射孔方案选择模型, 为油气田完井射孔提供决策指导。

## 2 射孔方案决策模型

### 2.1 射孔优化方案建立的过程

射孔是油气井的主要完井方式之一, 在世界石油工业中得

到了广泛的应用。不同的射孔参数对射孔井的生产能力有不同的影响。目前, 国内大多数学者都是在完井射孔的有限元数值模拟基础上, 利用非线性回归分析建立完井射孔参数与油井产能比的定量关系, 通过讨论孔深、孔密等因素对油井产能的影响, 得到不同的射孔方案<sup>[2-3]</sup>。

### 2.2 模糊多属性决策的射孔方案选择模型

影响射孔的因素有孔深、孔密、钻井损害程度、压实损害程度、孔径、相位角、井筒半径、地层非均质性、压实厚度、钻井污染厚度、布孔格式等 11 项。压实损害程度、井筒半径、地层非均质性、压实厚度、钻井污染厚度、布孔格式等的作用主要体现在射孔井的产能比的有限元计算上, 因此可将产能比作为其代用属性。套管强度降低系数作为钻井损害程度的代用属性, 从而射孔方案决策需要考虑的因素转化为产能比、相位角、孔密、孔深、孔径、套管强度降低系数等六项, 可依次分别表示为属性  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 。

建立如下决策矩阵  $D$ :

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.50335030)。

作者简介: 爨莹(1968-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 计算机网络与油气田信息技术; 王中(1975-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电子EDA设计以及嵌入式操作系统, 图形图像信息处理技术。

收稿日期: 2008-09-23

修回日期: 2008-12-15

$$D = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} & x_{n6} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个方案中第  $j$  个属性,  $x_{i1}$  表示某个方案中产能比属性,  $x_{i2}$  表示相位角,  $x_{i3}$  表示孔密,  $x_{i4}$  表示孔深,  $x_{i5}$  表示孔径,  $x_{i6}$  表示套管强度降低系数。

由于不同量纲对决策有影响,采用式(2)、(3)对决策矩阵  $D$  进行规范化处理,得到规范化决策矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times 6}$ 。产能比是效益型属性采用式(2),相位角、孔密、穿深、孔径、套管强度降低系数是成本型属性采用式(3)计算。

$$r_{i1} = \frac{x_{i1}}{\max(x_{i1})} \quad i \in n \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad i \in n, 2 \leq j \leq 6 \quad (3)$$

此时射孔方案优选问题转化为对于已知的模糊决策矩阵  $R$ , 属性权重向量  $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_6)$  未知, 在权重  $\omega_j \geq 0$ , 满足单位化约束条件  $\sum_{j=1}^m \omega_j=1$  下, 对各种方案进行优劣排序的问题。

生产施工中由于套管强度降低系数关系到射孔井的生产安全性, 通常要求不能超过 5%。但由于钻井地层岩性物性不同, 套管强度降低系数超过 5% 的情况也时有发生, 需要引入偏好信息进行决策。为此针对不同套管强度降低系数, 分别讨论无偏好信息的射孔优选和有偏好信息的射孔优选。

### 3 决策模型研究

#### 3.1 无偏好信息射孔模糊多属性决策模型

决策矩阵是一种信息的载体, 信息熵可作为评价属性相对重要程度的一个工具。其主要原理是: 如果不同策略在某一属性上的表现相当接近, 则该属性的作用不突出; 进而言之, 如果所有策略在这一属性上的表现完全相同, 那么该属性对于方案的比较便无意义, 可以剔除。因此当属性指标间的差异越大时, 提供的信息就越多, 该属性也就显得尤为重要<sup>[4]</sup>。为此, 在无偏好信息射孔模糊多属性决策模型中采用基于信息熵的客观赋权法来确定每个属性的权重。

首先, 计算完井射孔方案六个属性  $x_j(1 \leq j \leq 6)$  输出的信息熵  $E_j$ :

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n r_{ij}' \ln(r_{ij}'), j \in n \quad (4)$$

式中,  $r_{ij}' = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$ ,  $i \in n, j \in 6$ 。当  $r_{ij}'=0$  时, 令  $r_{ij}' \ln(r_{ij}')=0$ 。

因为权重  $\omega_j$  与熵  $E_j$  的关系是互反的, 为方便计算采用  $1-E_j$  来代替  $E_j$ , 并使其归一化以保证  $0 \leq \omega_j \leq 1$  和  $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_6 = 1$ 。

其次, 由于在无偏好信息情况时, 决策者没有偏重某一特定属性, 较合理的射孔属性权重分配可为:

$$\omega_j = \frac{1-E_j}{\sum_{k=1}^n (1-E_k)} \quad (5)$$

最后, 在建立的标准化决策矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times 6}$  基础上通过线性加权, 对上述 6 个经标准化后的属性进行线性加权, 可建立评价函数  $Z(X_i) = \sum_{j=1}^n r_{ij} \omega_j$ , 当评价函数值  $Z(x_i)$  越大时, 其对应的方

案越优, 以  $Z(x_i)$  值最大的方案作为最终的施工方案。

#### 3.2 有偏好信息射孔模糊多属性决策模型

由于决策优化仅在方案集中有限个方案间进行选择比较, 具有相对性<sup>[5-9]</sup>。不妨令理想解为  $x^+ = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_6^+]$ , 其中  $v_i^+ = \max(r_{ij})(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq 6)$ 。当某方案距离理想点越近, 方案就越优。现采用加权海明距离来刻画方案与理想点的距离偏差。

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - x_j^+| \omega_j^2 \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

解此模型, 求得权重的最优解为:

$$\omega_j^+ = \frac{1}{\sum_{j=1}^6 \frac{1}{\sum_{i=1}^n |r_{ij} - x_j^+|}}, j \in 6 \quad (7)$$

计算决策方案  $x_j$  与模糊理想点  $x^+$  之间的加权海明距离  $f_i(\omega) = \sum_{j=1}^6 |r_{ij} - x_j^+| \omega_j^2, i \in n$ , 按  $f_i(\omega)$  值由大到小的顺序对方案进行排序, 值最小者所对应的方案为最终的施工方案。

### 4 仿真算例分析

(1) 胜利埕东油田 XX 井, 油层中部深度 2 175 m, 产层厚度 12 m, 射孔层段的厚度 6 m, 孔隙度 14%, 产层泻油半径 180 m, 井眼半径 0.062 15 m, 地层压力 21 mPa, 原油饱和压力 7.74 mPa, 钻井污染深度 165 mm, 污染程度 0.525, 经查套管抗挤压强度为 35 mPa, 产层非均质性 0.8, 地层粘土含量 12%, 相邻泥岩声波时差 298  $\mu\text{m/s}$ , 井斜  $0^\circ$ , 地层原油粘度 10.5 mPa.S, 得到如表 1 所示优化射孔方案。

表 1 胜利埕东油田 XX 井射孔方案表

	产能比 (PR)	相位 角/ $(^\circ)$	孔密 (孔/m)	穿深/mm	孔径/mm	套管强度降低 系数/(%)
A1	0.672 6	120	30	273.21	10.30	4.7
A2	0.672 5	90	30	273.21	10.30	4.5
A3	0.670 2	120	30	312.24	10.15	4.6
A4	0.670 1	90	30	312.24	10.15	4.3
A5	0.662 4	45	30	273.21	10.30	4.1
A6	0.648 6	45	24	273.21	10.30	3.3
A7	0.646 1	120	30	254.18	8.95	3.1
A8	0.646 0	90	30	254.18	8.95	3.1
A9	0.641 5	90	18	273.21	10.30	2.6

由于套管强度降低系数没有超过 5%, 采用无偏好信息方法进行决策。

由表 1 可构造如下的决策矩阵  $A=(a_{ij})_{9 \times 6}$ :

$$A = \begin{pmatrix} 0.672 6 & 120 & 30 & 273.21 & 10.3 & 4.7 \\ 0.672 5 & 90 & 30 & 273.21 & 10.3 & 4.5 \\ 0.670 2 & 120 & 30 & 312.24 & 10.15 & 4.6 \\ 0.670 1 & 90 & 30 & 312.24 & 10.15 & 4.3 \\ 0.662 4 & 45 & 30 & 273.21 & 10.3 & 4.1 \\ 0.648 6 & 45 & 24 & 273.21 & 10.3 & 3.3 \\ 0.646 1 & 120 & 30 & 254.18 & 8.95 & 3.1 \\ 0.646 0 & 90 & 30 & 254.18 & 8.95 & 3.1 \\ 0.635 3 & 45 & 18 & 273.21 & 10.3 & 2.6 \end{pmatrix}$$

由式(2)、式(3)将决策矩阵转化为规范化决策矩阵  $R=(r_{ij})_{9 \times 6}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.375 & 0.60 & 0.930 & 3 & 0.868 & 9 & 0.553 & 2 \\ 0.999 & 8 & 0.500 & 0.60 & 0.930 & 3 & 0.868 & 9 & 0.577 & 7 \\ 0.996 & 4 & 0.375 & 0.60 & 0.814 & 0 & 0.881 & 7 & 0.565 & 2 \\ 0.996 & 2 & 0.500 & 0.60 & 0.814 & 0 & 0.861 & 7 & 0.604 & 6 \\ 0.984 & 8 & 1.000 & 0.60 & 0.930 & 3 & 0.868 & 9 & 0.634 & 1 \\ 0.964 & 3 & 1.000 & 0.75 & 0.930 & 3 & 0.861 & 9 & 0.787 & 9 \\ 0.960 & 6 & 0.375 & 0.60 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.838 & 7 \\ 0.960 & 4 & 0.500 & 0.60 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.838 & 7 \\ 0.953 & 7 & 0.500 & 1.00 & 0.930 & 3 & 0.868 & 9 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

计算相应属性权重向量  $\omega=(0.144\ 5, 0.179\ 3, 0.191\ 0, 0.149\ 4, 0.145\ 6, 0.190\ 1)$ , 评价函数值向量  $Z=\{0.097\ 612\ 3, 0.102\ 730\ 5, 0.096\ 027\ 3, 0.101\ 568\ 3, 0.121\ 571\ 1, 0.130\ 578\ 9, 0.109\ 067\ 4, 0.113\ 429\ 8, 0.126\ 677\ 6\}$ , 得最优方案为 A6。即在现有地层条件下, 以射孔弹四川 SYD127-1、相位角  $45^\circ$ 、孔密 24、穿深 273.21 mm、孔径 10.3 mm 等参数进行射孔可以获得理想的射孔结果。

(2)长庆油田白 XX 井, 油层中部深度 1 930 m, 产层厚度 2.7 m, 射孔层段的厚度 2 m, 孔隙度 14.67%, 产层泻油半径 200 m, 井眼半径 0.111 m, 地层压力 13.073 mPa, 原油饱和和压力 9.86 mPa, 钻井污染深度 70.7 mm, 污染程度 0.6, 经查套管抗挤压强度为 35 mPa, 产层非均质性 0.7, 地层粘土含量 12%, 相邻泥岩声波时差 298  $\mu\text{s}$ , 井斜  $5^\circ$ , 地层原油粘度 1.03 mPa.S, 得到如表 2 所示射孔优化方案。

由于套管强度降低系数最大值超过 5%, 采用有偏好信息方法进行决策。由表 2 构造决策矩阵  $A=(a_{ij})_{9 \times 6}$  如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.958 & 4 & 120 & 36 & 328.68 & 10.68 & 6.6 \\ 0.944 & 3 & 120 & 32 & 328.68 & 10.68 & 5.7 \\ 0.943 & 4 & 60 & 36 & 328.68 & 10.68 & 5.7 \\ 0.929 & 3 & 60 & 32 & 328.68 & 10.68 & 5.0 \\ 0.915 & 0 & 90 & 26 & 328.68 & 10.68 & 4.2 \\ 0.908 & 6 & 120 & 36 & 267.55 & 9.42 & 4.6 \\ 0.894 & 0 & 120 & 32 & 267.55 & 9.42 & 4.0 \\ 0.893 & 1 & 60 & 36 & 267.55 & 9.42 & 4.1 \\ 0.891 & 9 & 90 & 32 & 267.55 & 9.42 & 3.8 \end{bmatrix}$$

建立规范决策矩阵  $R=(r_{ij})_{9 \times 6}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.500 & 0 & 0.722 & 2 & 0.814 & 0 & 0.882 & 0 & 0.575 & 8 \\ 0.989 & 5 & 0.500 & 0 & 0.812 & 5 & 0.814 & 0 & 0.882 & 0 & 0.666 & 7 \\ 0.984 & 3 & 1.000 & 0 & 0.722 & 2 & 0.814 & 0 & 0.882 & 0 & 0.666 & 7 \\ 0.969 & 6 & 1.000 & 0 & 0.812 & 5 & 0.814 & 0 & 0.882 & 0 & 0.760 & 0 \\ 0.954 & 7 & 0.666 & 7 & 1.000 & 0 & 0.814 & 0 & 0.882 & 0 & 0.904 & 8 \\ 0.948 & 0 & 0.500 & 0 & 0.722 & 2 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.826 & 1 \\ 0.932 & 8 & 0.500 & 0 & 0.812 & 5 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.950 & 0 \\ 0.931 & 9 & 1.000 & 0 & 0.722 & 2 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.926 & 8 \\ 0.930 & 6 & 0.666 & 7 & 0.812 & 5 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

令理想解为  $x^*=(1, 1, 1, 1, 1, 1)$ 。按式(7)计算属性权重向量  $\omega=(0.265, 0.050, 0.076, 0.083, 0.455, 0.069)$  加权海明距离  $f(\omega)=(0.018\ 21, 0.017\ 763, 0.018\ 799, 0.018\ 348, 0.025\ 642, 0.025\ 203, 0.012\ 957, 0.012\ 547, 0.026\ 613)$ , 由排序可得最优方案为 A8。即在现有地层条件下, 以射孔弹四川 SYD127-1、相位

表 2 长庆油田白 XX 井射孔方案表

	产能比 (PR)	相位 角/ $^\circ$	孔密 (孔/m)	穿深/mm	孔径/mm	套管强度降低 系数/(%)
A1	0.958 4	120	36	328.68	10.68	6.6
A2	0.944 3	120	32	328.68	10.68	5.7
A3	0.943 4	60	36	328.68	10.68	5.7
A4	0.929 3	60	32	328.68	10.68	5.0
A5	0.915 0	90	26	328.68	10.68	4.2
A6	0.908 6	120	36	267.55	9.42	4.6
A7	0.894 0	120	32	267.55	9.42	4.0
A8	0.893 1	60	36	267.55	9.42	4.1
A9	0.891 9	90	32	267.55	9.42	3.8

角  $60^\circ$ 、孔密 36、穿深 267.55 mm、孔径 9.42 mm 等参数进行射孔可以获得理想的射孔结果。

## 5 结论

建立了模糊多属性决策射孔方案选择模型, 针对套管强度降低系数的不同, 研究了有偏好及无偏好情况下的决策方法。无偏好情况下采用熵值法确定权重, 只依赖决策矩阵, 而且稳定性比较好。有偏好情况下在原属性指标值基础上确定理想解, 采用加权海明距离刻画方案与理想解之间的距离, 可以始终保持模糊元素的线性性质, 能获得问题的解析性结果。仿真算例验证了模型的有效性, 为射孔方案决策提供了一种决策理论依据。

## 参考文献:

- [1] 牛超群, 张玉金. 油气井完井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 2-15.
- [2] 唐愉拉, 潘迎德. 有限元方法在射孔完井中的应用[J]. 石油学报, 1989, 10(3): 48-57.
- [3] 朱九成, 郎兆新. 射孔产率比计算模型[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 65-69.
- [4] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making and applications[M]. New York: Springer-verlag, 1981.
- [5] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 23-58.
- [6] Xu Xiaozhan. A note on the subjective and objective integrated approach to determine attribute weights[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156: 530-532.
- [7] Tan Chunqiao, Zhang Qiang. Fuzzy multiple attribute decision making based on interval valued intuitionistic fuzzy sets [C]//2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 2006.
- [8] Quan Zhanga, Wang Yucai. Fuzzy multiple attribute decision making with eight types of preference information on alternatives [J]. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, 2007: 288-293.
- [9] Liu Jia-zhong. A projection method for fuzzy multi-attribute decision making [C]//Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2004: 1863-1868.
- [10] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 68-86.