

油气田注水区块再压裂方案参数设计方法

孙海林,张鹏,杨小涛,徐克彬,陈清,赵琦

中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062552

通讯作者:Email:zhang_peng @ cnpc. com. cn

项目支持:国家重大专项“油气田及煤层气开发”子课题“储层改造关键流体研发”任务七“新型压裂液施工工艺技术及现场试验”(2017ZX05023003-007)

引用:孙海林,张鹏,杨小涛,等. 油气田注水区块再压裂方案参数设计方法[J]. 油气井测试,2020,29(5):6-13.

Cite: SUN Hailin, ZHANG Peng, YANG Xiaotao, et al. Parameter design method for re-fracturing scheme of water injection block in oil and gas field [J]. Well Testing, 2020, 29(5):6-13.

摘要 针对低渗透油藏注水开发后,老井压裂改造需要重新确定压裂参数的问题,开展注水区块再压裂方案参数设计研究。根据注水区块特点,补充选井因素,采用经过改进的综合储层地质和生产注采因素的灰色关联度综合评价方法优选压裂井位;建立适于小样本群分析的支持向量机模型,参考邻井施工经验数据给出各井施工参数,完成注水区块压裂施工方案编制,引入复合叠加核函数,提高预测精度。通过对压裂选井选层及施工参数推荐数学模型改进研究,形成注水区块再压裂方案参数设计方法。应用该方法,在 L43 断块优选出 8 口老井进行压裂增产改造,均顺利完成设计加砂,平均日产油量从 2.1 m³ 提高到 7.7 m³,压后增产显著,提高了 L43 断块整体产油量。油气田注水区块再压裂方案参数设计方法符合注水开发区块增产需求,选井参数全面,降低样本规模限制,对注水区块老井压裂具有指导意义。

关键词 压裂改造;注水断块;压裂方案;灰色综合评价;支持向量机;复合叠加核函数

中图分类号:TE21 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.002

Parameter design method for re-fracturing scheme of water injection block in oil and gas field

SUN Hailin, ZHANG Peng, YANG Xiaotao, XU Kebin, CHEN Qing, ZHAO Qi

Downhole Operating Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: After the development with water-injection technology for low-permeability reservoirs, the fracturing parameters of old wells need to be re-determined, and the research on the parameter design of re-fracturing schemes for water injection blocks is carried out. According to the characteristics of the water injection block, using well selection factors, this paper adopts an improved comprehensive evaluation method of gray correlation degree combining comprehensive reservoir geology and production injection-production factors to optimize the position of fracturing well. In addition, through the establishment of support vector mechanism model suitable for small sample group analysis and referring to the construction experience data of adjacent wells, the construction parameters of each well are given, and the fracturing operation scheme of water injection block is compiled. The prediction accuracy is improved by introducing the composite superposition kernel function. Through improving the mathematical model of well selection, layer selection and construction parameters recommendation, the parameter design method of re-fracturing scheme in water injection block is formed. By using this method, eight old wells were selected for fracturing and stimulation in the L43 fault block, and the sand addition was successfully completed. The average daily oil production increased from 2.1 m³ to 7.7 m³. After fracturing, the production increased significantly and the overall oil production of the L43 fault block was increased. The parameter design method of re-fracturing scheme in water injection block of oil and gas field meets the demand of increasing production of water injection development block, the well selection parameters are comprehensive, and the sample size limit is reduced, which has guiding significance for old well fracturing in water injection block.

Keywords: fracturing; water injection fault block; fracturing scheme; grey comprehensive evaluation; support vector machine; composite superposition kernel function

压裂施工是低渗油藏增产改造的必要措施和技术保障。对于有待实施增产改造的低产区块,编制行之有效的整体压裂方案可以科学指导区块压

裂施工,促进生产开发,最大程度提高区块总体产量^[1]。区块整体压裂方案的编制,需要进行压裂井层优选并优化施工参数^[2]、相关数学模型研究。欧

阳传湘等^[3]开发的压裂酸化效果分析与决策系统已有成果,对新投产低渗区块的改造开发有很好的指导作用。采用灰色关联综合评价技术,对压裂待选井的油层地质条件进行综合打分,按增产潜力确定压裂井施工安排;采用BP神经网络法根据单井地质资料,参考区块压裂井施工记录可以完成单井施工参数推荐,实现区块整体施工方案编制的参数设计。注水区块油井油藏连通性差,地层压力低,进入注水开发阶段后,区块油水界面复杂,地应力等参数发生变化。随着油井生产开采,油藏含油不断减少^[4]。同时,随着注水井流体注入,油藏流体压力升高引起地层岩石压缩,导致地层渗透率、孔隙度、岩石压缩系数下降^[5]。随注水时间增加,注入储层边界及邻近区域流体压力不断升高形成超孔隙压力,超孔隙压力会改变应力场分布,垂向、水平有效应力差随流体压力增加而降低。岩石吸水后弹性模量降低、泊松比增大,岩层逐渐软化。注水开发虽然会提高开发井产量,但会降低储层物性,同时岩石塑性增强,会整体提高压裂施工压力,增大加砂难度。与常规油井压裂相比,注水区块油井压裂施工压力较高,砂堵施工风险大,还需要防控含水量升高,同时优化改造规模,适度加砂,保证充分改造油藏,减少地层伤害。与常规低渗油井压裂方案相比,注水区块油井压裂选井及施工参数优选方法,考虑因素更多,演算条件更严苛,需要改进数学模型。单井累计产量及对应注水井生产压力、日注水量是评价开发井增产潜力必需考虑的因素;对于施工资料缺失及压裂施工次数少的区块,需要一种较少样本即可满足施工参数推荐的运算方法。本文阐述的注水开发区块整体压裂方案编制数学方法采用综合考虑储层地质和注采因素的灰色综合评价方法优选压裂井位,客观全面评价注水开发区块生产井的压裂增产潜力;采用支持向量机算法,可以采用较少的样本完成施工参数推荐。目前,应用该数学方法已经完成低渗注水开发断块L43断块的区块整体压裂方案编制,对L43-38x等井的压裂改造取得良好的增油效果,实现研究目标。

1 生产井压裂井位优选

灰色综合评估法是一种以灰色关联分析理论为指导,基于专家评判的综合性评估方法,具有分析全面、准确性高、修正方便的优点^[6]。采用该方法进行压裂井优选可以科学分析评估影响压裂增

产潜力的复杂、非线性因素,正确判断各井的条件优劣,完成压裂施工井的优选安排。

灰色综合评估由三步完成^[7]:(1)灰色关联度分析。通过计算比较序列与参考序列的关联度(评价矩阵R),确定各因素的关联性。(2)专家评判。通过设定指标权重系数(权重矩阵W),确定各种影响因素的重要程度。(3)综合评价。将评估矩阵和权重矩阵相乘得到综合评估结果矩阵B($B=R \times W$),综合评估得数决定优选顺序。专家评判设定指标权重采用AHP层次分析法完成^[8]。

低渗区块压裂选井的灰色综合评估法,以油井有效厚度,孔隙度,渗透率,含油饱和度,深度,声波时差等油藏地质因素相关参数作为压裂增产的影响因素,根据低渗区块压裂开发经验确定权重,以灰色关联度作为测度,对与投产新井的压裂选井有很好的指导作用。当低渗油井进入注水开发阶段,储层物性及地应力条件会发生改变,油藏地质因素可靠性降低,低渗区块压裂选井的灰色综合评估法不能满足注水区块开发井压裂选井需求,需要考虑更多压裂增产潜力相关因素,提高灰色综合评估选井的准确性。低渗区块生产井压裂虽可以改造低渗油藏连通性,提高产量,但由于地层能量不足,产量衰减迅速,进入注水开发阶段,对应注水井可以为压裂井补充地层能量,是压裂井增产稳产的能量保证。对于注水区块压裂井,注采生产因素是评价其压裂增产潜力的重要考量。当生产井需要注水驱油时,对应注水井日注水量,注水压力反应了注水井提供能量补充的能力。长期注水生产,会引起地层内粘土膨胀伤害低渗储层渗透率,井筒内钙镁离子结垢堵塞孔眼,这些现象会降低地层连通性,导致注水压力升高,日注水量下降。同一区块,注水井压力低,注水量大,反应注水井与生产井之间的地层连通性好,油井可获得更充足的能力补充,压裂后单井受效好,产量更高,稳产期更长。生产井累计产油量越高,则剩余开采储量越少,增产潜力越小,生产井累计产油量反映压裂增产的物质保证。日产油量高,日产水量低,反映油井油藏条件好,含水少,能量充足,增产潜力大。注水区块压裂选井灰色综合评价法,以有效厚度,孔隙度,渗透率,含油饱和度,深度,声波时差作为油层参数,以日产油量,日产水量,累计产油量,日注水量,注水压力作为生产参数,对注水区块油井压裂增产潜力进行全面评估。在整理分析多个区块生产资料总

结规律的基础上,结合华北油田生产多名专家的经验建议,增加了日产油量、日产水量、累计产量,对应注水井日注水量、注水压力为注水区块压裂井优选评价指标,并建立判断矩阵。

1.1 建立判断矩阵

以提高单井压裂后增油量为目标,确定影响注水区块油田压裂后增产的油层地质因素与注采生产因素方面的具体评价参数,并建立注水区块压裂增产因素指标的 AHP 层次结构图(图 1)。根据注水区块压裂油层参数和生产参数各因素评价指标相对重要性(按 1~9 比例标度对重要性程度赋值),建立注水区块压裂增产各指标判断矩阵,见表 1~3。

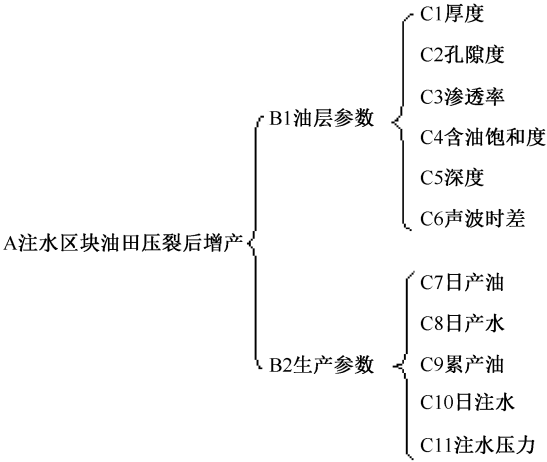


图 1 AHP 层次结构图
Fig.1 AHP hierarchy chart

表 1 A-B 权重判断矩阵

| Table 1 A-B weight judgment matrix | | |
|------------------------------------|-----|----|
| A | B1 | B2 |
| B1 | 1 | 5 |
| B2 | 1/5 | 1 |

1.2 计算各指标权重

根据注水区块压裂增产判断矩阵,以 AHP 算法将判断矩阵行向量归一化后的算术平均值,计算注

水区块压裂增产各因素权重向量 ω 。

表 2 B1-C 权重判断矩阵

| Table 2 B1-C weight judgment matrix | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|----|-----|----|-----|----|
| B1 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
| C1 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 |
| C2 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 |
| C3 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 |
| C4 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 |
| C5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 |
| C6 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1 |

表 3 B2-C 权重判断矩阵

| Table 3 B2-C weight judgment matrix | | | | | |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| B1 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 |
| C7 | 1 | 2 | 1/3 | 1/2 | 3 |
| C8 | 1/2 | 1 | 1/4 | 1/3 | 2 |
| C9 | 3 | 4 | 1 | 2 | 5 |
| C10 | 2 | 3 | 1/2 | 1 | 4 |
| C11 | 1/3 | 1/2 | 1/5 | 1/4 | 1 |

计算各指标权重,即

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_k a_{kj}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

其中 $n = 11$

式中: a_{ij} 为参数 C_i 和 C_j 相对于 B 的重要性的比例标度。

根据(1)式计算结果,单井评价参数指标 C1 至 C12,相对于目标注水区块压裂增产的指标权重依次为:厚度权重 $\omega_1 = 0.134$;孔隙度权重 $\omega_2 = 0.085$;渗透率权重 $\omega_3 = 0.316$;含油饱和度权重 $\omega_4 = 0.207$;深度权重 $\omega_5 = 0.036$;声波时差权重 $\omega_6 = 0.055$;日产油权重 $\omega_7 = 0.069$;日产水权重 $\omega_8 = 0.01$;累计产油权重 $\omega_9 = 0.044$;日注水量权重 $\omega_{10} = 0.027$;注水压力权重 $\omega_{11} = 0.016$ 。

1.3 建立评价矩阵

按上述油藏参数及生产参数指标,建立 L43 断块 8 口井评价指标集(表 4)。

表 4 L43 区块 8 口井压裂增产指标集

| Table 4 Fracturing stimulation index set of 8 wells in L43 block | | | | | | | | | | | |
|--|----------|-----------|------------|-------------|----------|--|--|--------------|--|-----------------------|--|
| 井号 | 厚度/ m | 孔隙度/ % | 渗透率/ mD | 含油饱和度/ % | 深度/ m | 声波时差/ ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) | 日注水/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 注水压力/ MPa | 日产油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 累计产油/ m^3 | 日产水/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) |
| 最优值 | 117.6 | 16.7 | 6.4 | 72.4 | 3 167.6 | 258.8 | 21.0 | 8 | 5.0 | 3 257 | 0.2 |
| L43-38 | 117.6 | 13.9 | 10.7 | 45.7 | 3 178.0 | 242.4 | 15.4 | 30 | 4.2 | 4 163 | 3.7 |
| L43-11 | 26.0 | 14.9 | 6.4 | 52.4 | 3 191.0 | 239.6 | 2.5 | 24 | 2.6 | 8 310 | 1.0 |
| L43-57 | 14.0 | 12.5 | 18.6 | 59.7 | 3 676.4 | 238.3 | 13.7 | 34 | 1.8 | 19 736 | 4.3 |
| L43-62 | 19.8 | 12.5 | 13.2 | 58.0 | 3 542.7 | 237.4 | 13.7 | 34 | 2.4 | 6 475 | 2.7 |
| L43-12 | 22.6 | 14.9 | 29.0 | 61.3 | 3 223.6 | 258.8 | 21.0 | 34 | 5.0 | 16 787 | 4.9 |
| L43-30 | 28.8 | 15.5 | 39.5 | 72.4 | 3 167.6 | 249.8 | 4.0 | 8 | 0.3 | 9 075 | 0.4 |
| L43-35 | 26.6 | 16.7 | 49.4 | 67.5 | 3 203.6 | 255.0 | 15.0 | 34 | 0.5 | 3 257 | 0.2 |
| L43-54 | 24.2 | 11.9 | 11.3 | 61.1 | 3 773.6 | 233.9 | 12.0 | 34 | 0.3 | 6 219 | 0.3 |

对评价指标集无量纲归一化处理^[9],并计算灰色关联度系数。通过下式,将指参数标集转化为关联系数评价矩阵(表 5),即

$$\xi_i(k)=\frac{\min_i\min_k|C_k^*-C_k^i|+\rho\max_i\max_k|C_k^*-C_k^i|}{|C_k^*-C_k^i|+\rho\max_i\max_k|C_k^*-C_k^i|}$$

表 5 L43 区块 8 口井关联系数评价矩阵

Table 5 Correlation coefficient evaluation matrix of 8 wells in L43 block

| 井号 | 厚度/ m | 孔隙度/ % | 渗透率/ (mD) | 含油饱和度/ % | 深度/ m | 声波时差/ ($\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) | 日注水量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) | 注水压力/ MPa | 日产油/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) | 累产油/ m^3 | 日产水/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) |
|--------|----------|-----------|--------------|-------------|----------|--|---|--------------|--|----------------------|--|
| L43-38 | 0.364 9 | 0.911 2 | 1.000 0 | 0.796 7 | 0.994 5 | 0.942 2 | 0.448 2 | 0.655 8 | 0.556 4 | 0.671 7 | 0.746 0 |
| L43-11 | 0.336 9 | 0.814 7 | 0.673 7 | 0.860 6 | 0.893 2 | 0.938 5 | 0.673 1 | 0.539 7 | 0.484 7 | 0.385 5 | 0.364 3 |
| L43-57 | 0.349 9 | 0.814 7 | 0.787 4 | 0.844 8 | 0.919 0 | 0.936 0 | 0.673 1 | 0.539 7 | 0.536 6 | 0.762 6 | 0.484 5 |
| L43-62 | 0.356 5 | 0.911 2 | 0.527 1 | 0.876 0 | 0.987 0 | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.539 7 | 1.000 0 | 0.433 1 | 0.333 3 |
| L43-12 | 0.372 2 | 0.939 0 | 0.432 1 | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.972 0 | 0.469 2 | 1.000 0 | 0.390 4 | 0.639 9 | 0.921 6 |
| L43-30 | 0.366 5 | 1.000 0 | 0.369 4 | 0.941 2 | 0.991 6 | 0.988 0 | 0.714 7 | 0.539 7 | 0.400 8 | 1.000 0 | 1.000 0 |
| L43-35 | 0.360 4 | 0.793 7 | 0.837 1 | 0.874 0 | 0.875 4 | 0.926 3 | 0.625 4 | 0.539 7 | 0.390 4 | 0.777 3 | 0.959 2 |
| L43-54 | 0.344 0 | 0.958 5 | 0.772 9 | 0.931 1 | 0.950 7 | 0.972 9 | 0.417 1 | 0.792 1 | 0.469 6 | 0.924 0 | 0.796 6 |

1.4 评价打分

将评价矩阵与权重矩阵相乘得到各井评价得分(表 6)。

表 6 各井评价得分

Table 6 Evaluation results of each well

| 序号 | 井号 | 得分 | 序号 | 井号 | 得分 |
|----|--------|---------|----|--------|---------|
| 1 | L43-38 | 0.692 5 | 5 | L43-62 | 0.584 9 |
| 2 | L43-12 | 0.595 8 | 6 | L43-35 | 0.578 7 |
| 3 | L43-11 | 0.592 9 | 7 | L43-30 | 0.577 8 |
| 4 | L43-54 | 0.589 2 | 8 | L43-57 | 0.548 8 |

由评价结果可知,L43 区块 8 口待选井优劣排序为:L43-38 井,L43-12 井,L43-11 井,L43-54 井,L43-62 井,L43-35 井,L43-30 井,L43-57 井。L43-38 井和 L43-12 井优先施工。

2 施工参数推荐

为了保证压裂井的增油效果,提高压裂施工成功率,需要确定合理可行的压裂井施工参数,在建立地质、施工资料数据库的基础上,可以通过数学模型对施工参数进行科学预测,完成施工参数推荐^[11]。预测压裂井施工参数的 BP 神经网络模型,以地质参数及产量数据作为输入参数,以砂量、砂比、排量、破裂压力为输出参数,结合压裂施工井的统计数据作为训练样本,输入预测井的地质数据,可以推荐该井进行压裂施工适合的施工参数。BP 神经网络算法采用训练样本数是网络连接权总数的 5 至 10 倍时,可以取得较为准确的预测结果^[12],但此算法要求的训练样本容量较

式中: $\xi_i(k)$ 为 i 井指标 K 与最优指标的关联系数; $\min_i\min_k|C_k^*-C_k^i|$, $\max_i\max_k|C_k^*-C_k^i|$ 分别为两级最小值和最大值^[10]; ρ 为分辨系数(取值 0.5)。

大、易陷入局部最优的局限,对训练过程较大。L43 断块沙三段 II 油组,压裂施工记录不足 30 次,采用 BP 算法无法完成有效施工参数推荐。支持向量机算法(SVM)是一种建立在 VC 维理论和结构风险最小理论上的机器算法,通过核函数将样本向量映射到高维空间,并在建立最优分类超平面,确定支持向量样本,具有预测结构风险最小化、样本容量小的优势,实现分类回归,完成预测分析。

支持向量机算法以统计学理论为基础,避免了经验成分的影响;与 BP 神经网络算法相比,泛化计算和优化逼近能力强,适用于小样本统计的理论。其基本原理是通过核函数变换,将样本空间映射到特征空间(维数一般高于样本空间),在特征空间中构建原样本集的最优分类超平面(最优分类面可正确划分两类样本,分类间隔最大)^[13],确定支持向量机 SV,由支持向量机构造学习模型(SVM)。

2.1 支持向量机算法模型

储层因素与施工参数呈复杂的非线性关系。将样本映射到高维特征空间的映射函数即非线性支持向量回归机决策函数为^[14]

$$f(x)=w\phi(x)+b$$

(2)

式中: w 为特征空间维数; $\phi(x)$ 为输入参数空间(学习样本); b 为偏差。

利用(3)式最优分类超平面问题,即

$$\min_{w,b,\xi}\frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^l(\xi_i+\xi_i^*)$$

(3)

约束条件:

$$\begin{cases} y_i - w \cdot \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i & \xi_i \geq 0 \\ w \cdot \phi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* & \xi_i^* \geq 0 \end{cases}$$

式中: y_i 为井参数 x_i 的映射 ($i=1,2,\dots,l$); ξ 为松弛变量范围; ε 为支持向量机的不敏感参数(当真实值与样本预测值误差在 $\pm\varepsilon$ 之内, 预测结果视为有效)^[15]; C 为惩罚参数(C 越大, 则对超出管道数据点 ε 的惩罚越大。惩罚参数为模型风险与复杂程度的协调值)^[16]。

应用拉格朗日函数, 将上述优化问题转化为无约束条件问题^[17], 求其对偶问题, 即

$$\max_{\alpha, \alpha^*} \left\{ L_D = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \times K(x_i, x_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \right\} \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C; 0 \leq \alpha_i^* \leq C$$

其中 $K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \phi(x_j)$

式中: α_i 与 α_i^* 为拉格朗日乘子; $K(x_i, x_j)$ 为核函数(样本空间经核函数运算, 映射为 w 维特征空间内积)。

通过最优超平面, 求出全局最优解, 确定标准支持向量机, 将非线性支持向量回归机决策函数表示为回归估计函数式, 即

$$f(x) = \sum_{x_i \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (5)$$

其中

$$b = \frac{1}{N_{NSV}} \left\{ \sum_{0 < \alpha_i < C} \left[y_i - \sum_{x_j \in SV} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_j, x_i) - \varepsilon \right] + \sum_{0 < \alpha_i^* < C} \left[y_i - \sum_{x_j \in SV} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_j, x_i) + \varepsilon \right] \right\}$$

式中: (x_j, x_i) 为训练样本集; N_{NSV} 为标准支持向量个数; SV 为支持向量。

选取合适的核函数是实现支持向量机算法最优的关键。支持向量机中通常应用的核函数主要有: 高斯径向基核函数和多项式核函数两种。

高斯径向基核函数:

$$K_l(x, x_i) = \exp\left(-\frac{|x - x_i|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

多项式核函数:

$$K_g(x, x_i) = [(x \cdot x_i) + c]^n \quad (7)$$

式中: n 为多项式函数阶数(一般取 2); σ 为核函数

宽度(对预测结果影响较大)。

高斯径向基核函数为局部核函数, 对训练样本预测效果较好, 但超出训练样本范围, 预测效果不足。多项式核函数为全局核函数, 对于远离测试点的样本数据也有明显影响。目前利用支持向量机优化压裂规模的数学模型采用的是高斯常规径向基核函数或多项式核函数, 由于核函数算法的局限, 对与小样本的预测准确性不能满足需求。本文采用将高斯径向基核函数与多项式核函数线性叠加得到的新型复合叠加核函数。复合叠加核函数结合了局部核函数与全局核函数的算法优势, 相比普通单一核函数支持向量机模型, 有着更高的预测精度, 较好的解决了小样本压裂施工参数推荐的问题。

叠加核函数关系式为

$$K_{\text{mix}} = aK_l + bK_g \quad (8)$$

式中: K_{mix} 为叠加核函数; K_l 为局部核函数; K_g 为全局核函数。

参数 a, b 是局部核函数与全局核函数组合的比例系数, 反映了叠加核函数的线性组合。参数 a, b 必须符合 K_{mix} , 且 K_{mix} 叠加核函数才能保证维持原映射空间的可行性。图 2 为叠加核函数特征曲线图, x 为自变量, y 为核函数值。从特征曲线图可以发现, 叠加核函数不仅能对测试点附近的样本数据影响强烈, 而且明显影响到了远离测试点的数据, $a = 0.9, b = 0.1$ 时, 准确性最高。

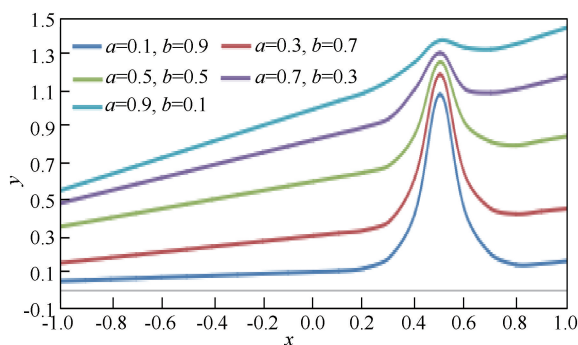


图 2 叠加核函数曲线特性图

Fig. 2 Curve characteristic diagram of superimposed kernel function

2.2 支持向量机模型验证

采用 L43 区块的地质、施工资料建立样本库(表 7), L43-14 井至 L43-50 井共 23 井为训练样本, L43-41 井至 L43-46 井共 6 口井为检验样本。以油层数据(厚度、孔隙度、含油饱和度、深度、声波时差)为输入参数, 砂量、砂比、排量、破裂压力为输出参数。

表 7 L43 区块压裂施工井参数表
Table 7 Parameters of fractured wells in Block L43

| 井号 | 厚度/ m | 孔隙度/ % | 渗透率/ mD | 含油饱和度/ % | 深度/ m | 声波时差/ (μs/m) | 砂量/ m ³ | 砂比/ % | 排量/ (m ³ ·min ⁻¹) | 破裂压力/ MPa |
|--------|----------|-----------|------------|-------------|----------|-----------------|-----------------------|----------|---|--------------|
| L43-14 | 65.0 | 12.2 | 15.7 | 65.7 | 3 078 | 252.4 | 36.0 | 24 | 5.5 | 58.5 |
| L43-15 | 22.0 | 16.9 | 20.5 | 57.4 | 3 295 | 249.6 | 20.0 | 23 | 5.0 | 60.9 |
| L43-16 | 18.5 | 16.7 | 16.8 | 62.7 | 3 404 | 257.2 | 14.5 | 21 | 4.5 | 61.5 |
| L43-17 | 27.5 | 12.5 | 15.2 | 52.7 | 3 252 | 245.2 | 20.0 | 24 | 5.0 | 61.8 |
| L43-18 | 21.6 | 15.7 | 12.2 | 57.2 | 3 079 | 238.5 | 15.0 | 25 | 5.0 | 57.9 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| L43-50 | 14.9 | 27.2 | 18.6 | 59.7 | 3 676 | 238.5 | 14.5 | 25 | 4.5 | 64.1 |
| L43-41 | 35.2 | 12.5 | 13.2 | 68 | 3 542 | 247.2 | 27.0 | 22 | 5.0 | 61.3 |
| L43-42 | 27.6 | 9.8 | 9.2 | 62.3 | 3 223 | 258.8 | 19.3 | 24 | 5.0 | 58.0 |
| L43-43 | 22.9 | 10.5 | 8.5 | 72.5 | 3 567 | 229.5 | 17.2 | 25 | 5.0 | 61.9 |
| L43-44 | 25.8 | 8.7 | 19.4 | 66.5 | 3 283 | 227.2 | 15.0 | 23 | 5.0 | 59.0 |
| L43-45 | 22.2 | 15.9 | 12.5 | 49.1 | 3 775 | 212.6 | 15.5 | 23 | 5.0 | 65.4 |
| L43-46 | 19.5 | 16.9 | 16.8 | 56.6 | 3 378 | 252.7 | 15.0 | 21 | 4.5 | 62.8 |

对输入参数数据进行标准化处理,将数据变化控制在[-1,1]或[0,1]之间,标准化处理公式为

$$x_i = 2 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} - 1 \tag{9}$$

式中: x_{\min} , x_{\max} 分别为输入参数最小值和最大值。

采用均方根误差作为检验支持向量机模型的标准。均方根误差越小,说明预测值预检验值吻合度越高,模型真实性越强。均方根误差计算公式为

$$MSR = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TstY_i - Y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

式中: $TstY_i$ 为支持向量机预测值; Y_i 为真实值; MSR 为均方根误差。

非线性支持向量回归机函数需要确定不敏感参数 ε ,与惩罚参数 C 与核函数宽度 σ ,根据枚举法优化支持向量机参数。以破裂压力预测为例,首相固定惩罚参数和不敏感参数,比较不同核函数宽度 σ 时破裂压力的均方根误差,选取 σ 最优值(图 3)。以此类推,依次确定不敏感参数 ε 和惩罚参数 C 的最优值(图 4、图 5)。

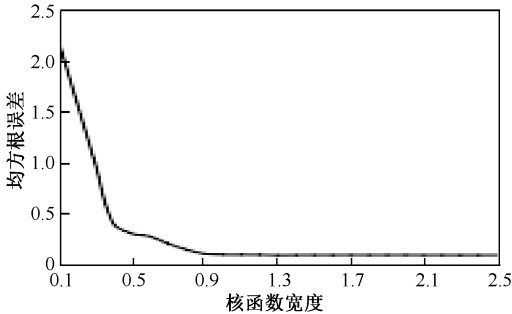


图 3 核函数宽度均方根误差图
Fig. 3 Root mean square error of kernel function width

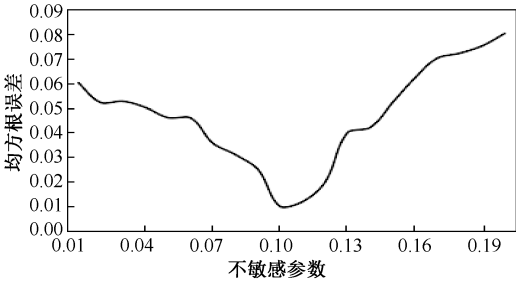


图 4 不敏感参数均方根误差图
Fig. 4 Root mean square error of insensitive parameters

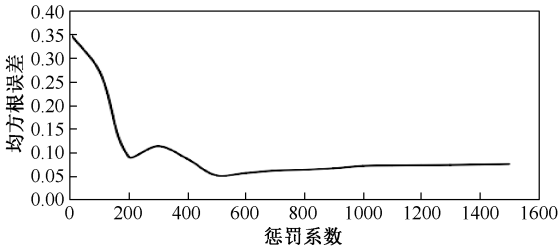


图 5 惩罚系数均方根误差图
Fig. 5 Root mean square error of penalty coefficient

确定破裂压力预测模型支持向量机函数参数:核函数宽度 $\sigma=1.4$,不敏感参数 $\varepsilon=0.09$,惩罚因子 $C=500$ 。利用支持向量机模型对 L43-41 等 6 口井施工破裂压力进行预测,实际值和预测值接近(图 6),准确性符合预测要求。采用枚举法确定各施工参数预测模型的支持向量机参数(表 8)。

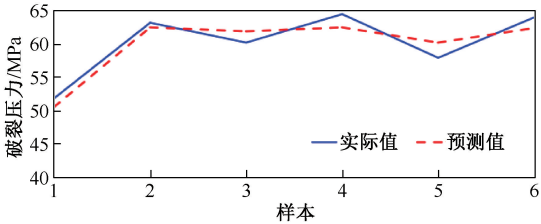


图 6 支持向量机模型对破裂压力预测结果
Fig. 6 Prediction results of fracture pressure by support vector machine model

表 8 施工参数预测模型支持向量机参数
Table 8 Support vector machine parameters of construction parameter prediction model

| 施工参数 | 核函数宽度 σ | 不敏感系数 ε | 惩罚系数 C |
|------|----------------|---------------------|----------|
| 砂量 | 0.4 | 0.01 | 450 |
| 砂比 | 0.7 | 0.03 | 600 |
| 排量 | 1.2 | 0.05 | 500 |
| 破裂压力 | 1.4 | 0.09 | 450 |

利用支持向量机模型对施工参数进行预测,并取整数确定压裂设计参数,完成施工参数推荐(表 9)。

表 9 L43 断块各井施工参数推荐结果
Table 9 Recommended data of operation parameters of every well in the L43 fault block

| 井号 | 砂量/ m^3 | | 砂比/% | | 排量/ m^3 | | 破裂压力/ MPa | |
|--------|------------------|------|------|------|------------------|-----|--------------------|------|
| | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 |
| L43-41 | 26 | 25.8 | 25 | 24.7 | 5.0 | 4.9 | 51.80 | 50.5 |
| L43-42 | 20 | 20.2 | 23 | 22.5 | 5.0 | 4.8 | 63.20 | 62.5 |
| L43-43 | 16 | 15.9 | 26 | 26.6 | 5.0 | 5.2 | 60.20 | 61.9 |
| L43-44 | 16 | 16.2 | 24 | 24.2 | 5.0 | 5.0 | 64.50 | 62.5 |
| L43-45 | 15 | 14.9 | 25 | 25.0 | 5.0 | 4.9 | 57.90 | 60.2 |
| L43-46 | 15 | 15.2 | 20 | 20.0 | 4.5 | 4.6 | 64.01 | 62.4 |

预测施工参数与实际施工参数相比,实际施工

表 10 L43 断块压裂井施工参数推荐结果

Table 10 Recommended data of operation parameters of fracturing wells in the L43 fault block

| 井号 | 砂量/ m^3 | | 砂比/% | | 排量/ m^3 | | 破裂压力/ MPa | | 日产油/ m^3 | |
|--------|------------------|------|------|------|------------------|-----|--------------------|------|-------------------|------|
| | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 | 实际 | 预测 | 压前 | 压后 |
| L43-38 | 40.0 | 38.0 | 22.0 | 23.0 | 5.1 | 5.0 | 61.0 | 62.5 | 4.2 | 12.5 |
| L43-12 | 20.3 | 19.9 | 37.3 | 37.2 | 5.3 | 5.2 | 60.6 | 59.2 | 5.0 | 10.2 |
| L43-11 | 60.4 | 60.3 | 20.5 | 20.3 | 5.2 | 4.9 | 51.9 | 52.6 | 2.6 | 8.7 |
| L43-54 | 24.8 | 19.9 | 26.3 | 25.9 | 4.8 | 4.5 | 50.1 | 53.5 | 0.3 | 6.2 |
| L43-62 | 11.4 | 12.0 | 17.9 | 18.5 | 5.9 | 5.4 | 61.5 | 60.8 | 2.4 | 7.4 |
| L43-35 | 20.0 | 19.8 | 19.8 | 20.2 | 4.4 | 4.2 | 62.0 | 59.5 | 0.5 | 5.9 |
| L43-30 | 15.2 | 14.8 | 22.5 | 23.4 | 4.2 | 3.9 | 58.9 | 60.9 | 0.3 | 5.1 |
| L43-57 | 11.3 | 11.3 | 21.0 | 21.5 | 4.5 | 4.6 | 62.5 | 61.6 | 1.8 | 6.2 |

4 结论

(1)评价注水区块开发井压裂增产潜力,除了油层地质因素,必须全面分析日产油量、累计油量、日产水量、日注水量、注水压力这些注采生产因素。采用补充注采生产因素的灰色综合评价法优选注水区块压裂井,更符合实际情况,为指导注水区块压裂施工安排提供可靠依据。

(2)研究建立的支持向量机模型可实现 30 口井以下的小样本压裂施工参数推荐。采用复合叠加核函数,进一步提高施工参数推荐的准确性和可行性,可保证压裂施工成功率。

(3)油气田注水区块再压裂方案参数设计方

时未出现超压砂堵等问题,加砂符合设计要求,破裂压力误差不超过 10%,表明破裂压力预测准确,加砂量合理,砂比、排量可行,表现出该算法利用小样本完成施工参数预测的强大优势。利用向量机模型预测 L43 区块压裂施工参数满足压裂方案对准确性的需求。

3 现场应用

采用注水区块压裂方案编制数学方法,完成了对低渗注水开发区块 L43 断块压裂井位的增产评估和施工参数推荐,指导了 L43 断块的压裂改造。8 口井压裂施工均获成功,井位评估排序合理,推荐施工参数满足施工需求(表 10)。L43-38 井 2017 年 1 月 19 日施工,施工总液量 363.72 m^3 ,总砂量 40 m^3 ,砂比 23%,裂缝破裂压力 61 MPa 。L43-38 井压后平均日产油 12.5 m^3 ,而压前日产油 4.2 m^3 。8 口井压后增产显著,平均日产油从 2.1 m^3 提高到 7.7 m^3 ,提高了 L43 断块整体产量。现场实际应用表明,注水区块再压裂方案参数设计方法可靠实用,实现了注水区块压裂井位优选,以及小样本推荐压裂施工参数的研究目标。

法,可以实现注水驱油阶段,施工资料较少的复杂生产区块压裂井位优选及施工参数推荐,对提高区块老井、高含水井压裂增油效果,有一定的指导意义。

致谢:感谢“新型压裂液施工工艺技术及现场试验”项目组提供的详实资料;感谢参考文献作者们的研究成果。

参考文献

[1] 俞绍成. 水力压裂技术手册[M]. 北京:石油工业出版社,2010:57-58.
[2] 马新仿. 水力压裂参数优化的解析方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):102-105.
MA Xinfang. Analytical method for parameter optimization in hydraulic fracturing [J]. Journal of China University of Petro-

- leum (Edition of Natural Science), 2011,35(1):102-105.
- [3] 欧阳传湘,谭蓓. 压裂酸化效果分析与决策系统[J]. 断块油气田,2010,17(4):487-490.
OUYANG Chuanxiang, TAN Bei. Effect analysis and decision-making system for fracturing and acidizing [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010,17(4):487-490.
- [4] 杨小涛,张鹏,徐克彬,等. 乌兰花潜山火成岩储层压裂技术[J]. 油气井测试,2018,27(6):39-45.
YANG Xiaotao, ZHANG Peng, XU Kebin, et al. Fracturing technology for Wulanhua buried hill igneous rock reservoir [J]. Well Testing, 2018,27(6):39-45.
- [5] 杨敏,李明,陈宝新,等. 异常高压水驱气藏产能评价及预测方法[J]. 油气井测试,2019,28(5):62-66.
YANG Min, LI Ming, CHEN Baoxin, et al. Productivity evaluation and forecast method for waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure [J]. Well Testing, 2019,28(5):62-66.
- [6] 肖寒. 威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法[J]. 油气井测试,2018,27(4):73-78.
XIAO Han. Production evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan block [J]. Well Testing, 2018,27(4):73-78.
- [7] 欧阳传湘,涂志勇,付蓉. 灰色综合评判法优选压裂井[J]. 岩性油气藏,2009,21(3):101-104.
OUYANG Chuanxiang, TU Zhiyong, FU Rong. Grey comprehensive evaluation method in the optimization of fracturing well [J]. Lithologic Reservoirs, 2009,21(3):101-104.
- [8] 汪少勇,李建忠,郭秋麟,等. 层次分析法在致密油有利区优选中的应用——以川中侏罗系大安寨段为例[J]. 地球科学进展,2015,30(6):715-723.
WANG Shaoyong, LI Jianzhong, GUO Qiulin, et al. Application of AHP method to favorable area optimization for tight oil: A case study in Daanzhai formation, Jurassic, central of the Sichuan basin [J]. Advances in Earth Science, 2015,30(6):715-723.
- [9] 章雨,李少华,李俊仪,等. 环江油田长6储层基于多元回归分析的产能评价[J]. 油气井测试,2019,28(2):68-72.
ZHANG Yu, LI Shaohua, LI Junyi, et al. Productivity evaluation of Chang 6 formation in Huanjiang Oilfield based on multivariate regression analysis [J]. Well Testing, 2019,28(2):68-72.
- [10] 陈珊珊,邓虎成,吴巧英,等. 灰色关联分析在压裂效果影响因素研究中的应用[J]. 辽宁化工,2012,41(8):829-831.
CHEN Shanshan, DENG Hucheng, WU Qiaoying, et al. Application of gray associative analysis in the research on influence factors of the fracturing effect [J]. Liaoning Chemical Industry, 2012,41(8):829-831.
- [11] 石莹. 榆树林油田缝网压裂改造体积影响因素分析[J]. 油气井测试,2019,28(4):32-37.
- SHI Ying. Analysis of influencing factors on volume of network fracturing stimulation in Yushulin Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(4):32-37.
- [12] 徐凤兰,李琳琳,王永军,等. 动静因素双重约束下储层压裂综合决策方法[J]. 油气井测试,2019,29(5):67-73.
XU Fenglan, LI Linlin, WANG Yongjun, et al. Comprehensive decision-making method for reservoir fracturing under dual constraints of dynamic and static factors [J]. Well Testing, 2019,29(5):67-73.
- [13] 朱永才. 基于支持向量机的储层参数预测方法研究[D]. 成都:西南石油大学,2012.
ZHU Yongcai. Research on the method of reservoir parameter prediction based on improved support vector machine[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University,2012.
- [14] 虞朝阳,马群,郑鹏宇. 基于改进支持向量机的压裂效果预测方法研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2016,18(3):116-118.
YU Zhaoyang, MA Qun, ZHENG Pengyu. Research on the method of fracturing effect prediction based on improved support vector machine [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2016,18(3):116-118.
- [15] 刘春明,左磊,吴军. 支持向量机平凡解判别与修正的新方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2648-2654.
LIU Chuming, ZUO Lei, WU Jun. A new method for discrimination and modification of null solutions in support vector machines [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012,43(7):2648-2654.
- [16] 郭建春,邹一锋,邓燕,等. 利用支持向量机优化压裂加砂规模研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(5):79-82.
GUO Jianchun, ZOU Yifeng, DENG Yan, et al. The study on optimizing the proppant quantity in fracturing by SVM [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009,31(5):79-82.
- [17] 褚春波,郭权,黄小云,等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. 油气井测试,2018,27(2):59-66.
CHU Chunbo, GUO Quan, HUANG Xiaoyun, et al. Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2018,27(2):59-66.

编辑 穆立婷

第一作者简介:孙海林,男,1969年8月出生,高级工程师,1995年毕业于江汉石油学院石油地质勘查专业,从事油气田开发技术及管理工作。电话:0317-2723758,15130735386;Email:sunhailin@cnpc.com.cn。通信地址:河北省任丘市会战南道渤海钻探井下作业分公司,邮政编码:062552。