

引用格式:张善义,兰金玉.基于突变级数法的压裂层段组合方法研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):108-113.

ZHANG S Y, LAN J Y. Research on fracturing layer combination method based on mutation series method[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 108-113.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.05.016

基于突变级数法的压裂层段组合方法研究

张善义,兰金玉

(中国石油大庆油田有限责任公司第五采油厂,黑龙江 大庆 163513)

摘要:针对特高含水后期压裂层差异性越来越小、考虑地质因素逐渐增多、压裂层段组合越来越难等问题,优选出能够反应油层特征的储层、物性、含油性、产能等参数,利用突变级数法,将每个小层的多个参数归一成一个综合评价值,通过该评价值进行压裂层段定量组合,这样就解决了高含水后期因压裂层段组合不合理造成的层段内部分砂体无法压开的问题,实现了压裂层段的高效智能组合。通过使用该方法,完成了研究区25口压裂井的层段组合,同期相比单井日均多增油0.5 t,取得了较好的效果。该方法对油层压裂层段定量组合具有良好的借鉴。

关键词:突变级数法;层段组合;压裂;储层参数;物性参数;含油性参数

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Research on fracturing layer combination method based on mutation series method

ZHANG Shanyi, LAN Jinyu

(N0.5 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163513, China)

Abstract: In the late stage of extra-high water cut, the difference of fracturing layers becomes smaller and smaller, the geological factors taken into account increase gradually, and the combination of fracturing layers becomes more and more difficult, so that, the parameters, such as reservoir, physical property, oil content and production capacity, which can reflect reservoir characteristics are optimized. By using the mutation progression method, the multiple parameters of each small layer are reduced to one comprehensive evaluation value. Through this evaluation value, the quantitative combination of fractured strata is carried out, which solves the problem that some sand bodies in the fractured strata can not be fractured due to the unreasonable combination of fractured strata in the late stage of high water cut, and realizes the efficient and intelligent combination of fractured strata. By this method, the stratified combination of 25 fractured wells in the study area is completed, and the average daily oil increase is 0.5 t more than that of a single well in the same period, achieving a better effect. It is a good reference for the quantitative combination of fractured layers.

Key words: mutation progression method, interval combination, fracturing, reservoir parameters, physical parameters, oily parameters

油井压裂是实现油田科学、合理、高效开发的一项重要措施^[1],尤其油田开发进入特高含水后期,剩余油分布高度零散,而压裂则是挖潜零散型剩余油常见的一种有效方法^[2-5]。目前针对压裂,选井方式逐渐成熟,但在选井后压裂层段如何定量组合分段压裂^[6],相关研究较少,主要因为在压裂层段组合时需要考虑储层、物性、含水率等多种因素^[7-9],虽然模糊数学^[10]、灰色关联法^[11]、粒子群算法^[12]、神经网络

优化算法^[13]、模拟退火算法^[14]、遗传算法^[15]、混合蛙跳算法^[16]等可以进行压裂层段组合,但受参数权重等因素影响较大。现阶段对于权重的确定没有一个合理公认的方法,权值不同组合结果也就不同,大大影响了压裂层段组合的准确性。而突变级数法能够充分考虑各项参数的重要性,且避开了考虑各参数权重带来的模糊性,因此,该方法更客观、准确^[17-18]。

收稿日期:2019-05-01。

第一作者简介:张善义(1986—),男,硕士,工程师,从事油藏工程方面的研究。地址:黑龙江省大庆市红岗区第五采油厂地质大队,邮政编码:163513。E-mail:zsy0537@sina.com

基金项目:国家科技重大专项“大庆长垣特高含水油田提高采收率示范工程”(2016ZX05054)。

1 突变级数法基本原理

突变级数法简单、准确,且减少了主观人为性,可作为压裂层段定量组合的理论基础。突变级数法通过对评价目标进行多层次矛盾分解、无量纲处理、归一化计算等,最终将多个子参数通过逐级向上计算出一个综合指标评价值,从而利用该值评价不同小层的特性^[19-20]。常用的有折叠突变、尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变等模型^[21-22]。若某一类主参数 x 仅分解为1个子参数 x_1 为折叠突变;某一类主参数 x 可分解为2个子参数 x_1 、 x_2 为尖点突变;某一类主参数 x 可分解为3个子参数 x_1 、 x_2 、 x_3 为燕尾突变;某一类主参数 x 能分解为4个子参数 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为蝴蝶突变(图1)。

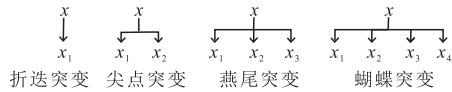


图1 突变模型
Fig. 1 Mutation model

1.1 突变模型

突变模型是压裂层段组合的基础,下面是4种模型:

$$\text{折叠突变法: } k(x) = x^3 + ax \quad (1)$$

$$\text{尖点突变法: } k(x) = x^4 + ax^2 + bx \quad (2)$$

$$\text{燕尾突变法: } k(x) = 1/5x^5 + 1/3ax^3 + 1/2bx^2 + cx \quad (3)$$

蝴蝶突变法:

$$k(x) = 1/6x^6 + 1/4ax^4 + 1/3bx^3 + 1/2cx^2 + dx \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: x 为状态变量; a 、 b 、 c 、 d 为状态变量的控制变量; $k(x)$ 为状态变量 x 的电位函数。

1.2 无量纲化处理

针对各评价参数取值范围和单位量纲的不同,需要将数据转变为[0, 1]之间的无量纲数据。处理方式有2种模型,越大越好型和越小越好型。

越大越好型:

$$R_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (5)$$

越小越好型:

$$R_{ij} = 1 - \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (6)$$

式(5)一式(6)中: R_{ij} 为模糊隶属函数值; $(x_{ij})_{\max}$ 指同一参数数据中最大值; $(x_{ij})_{\min}$ 指同一参数数据中最小值; x_{ij} 为同一参数中实际值。

1.3 归一公式

根据突变理论,利用突变模型分叉方程导出归一公式。

$$\text{折叠突变模型归一化公式: } x_a = a^{1/2} \quad (7)$$

$$\text{尖点突变模型归一化公式: } x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3} \quad (8)$$

$$\text{燕尾突变模型归一化公式: } x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4} \quad (9)$$

$$\text{蝴蝶突变模型归一化公式: } x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}, x_d = d^{1/5} \quad (10)$$

式(7)一式(10)中: x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 为对应 a 、 b 、 c 、 d 状态变量值。

1.4 综合评价判断原则

潜力压裂小层各参数归一化计算后,若参数之间无相关性采用大中取小的原则;若有相关性应采用取平均值的原则。逐层向上计算突变级数值,最终利用每个预压裂小层的多个参数计算出一个综合评价系数。

2 应用实例

2.1 研究区概况

研究区位于大庆油田长垣南部,采出程度为46.17%,综合含水率为94.3%。以萨尔图油层的三角洲外前缘和葡萄花油层的三角洲内前缘为主,砂体垂向呈现层状,随着油田开发进入高含水后期,薄层油层间差异逐渐变小,压裂层段组合越来越难。过去人工定性分析已无法满足高含水后期精准开发的需要,因此,研发了基于突变级数法的压裂层段智能组合方法。为了验证该方法,在压裂工艺、压裂用砂量等相同情况下,利用该方法开展了压裂层段组合方法应用现场试验。

按照各参数的相近性程度建立三级,将相近程度最大的参数定义为第三级,计算出一个中间突变值,然后向上逐级计算,最终计算出一个综合评价值。根据研究区实际情况,优选出储层、物性、产能和含油性4大类二级参数。其中,储层参数包括砂岩

厚度、有效厚度、砂地比3个三级参数;物性参数包括渗透率、孔隙度2个三级参数;产能参数包括油层压力、采出程度、含水率、产液强度4个三级参数;含油性参数包括剩余油地质储量、剩余可采储量、目前含油饱和度3个三级参数(图2)。

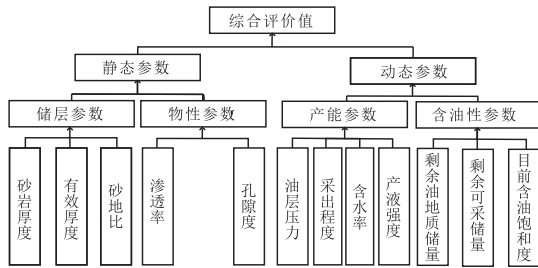


图2 研究区突变模型

Fig. 2 Mutation model of study area

首先,利用燕尾突变法将砂岩厚度、有效厚度、砂地比3个三级参数计算出一个二级储层参数;将剩余油地质储量、剩余可采储量、目前含油饱和度3个参数计算出一个含油性参数;利用尖点突变法将渗透率、孔隙度2个参数计算出一个含油性参数;利用蝴蝶突变法将油层压力、采出程度、含水率、产液强度4个参数计算出一个产能参数。

其次,利用尖点突变法将储层、物性2个参数计算出一个静态参数;将产能、含油性2个参数计算出一个动态参数。

最终,利用尖点突变法将静态、动态2个参数计算出一个综合评价值。

在归一化处理时利用对应模型的归一化公式进行处理。

2.2 单井实例

应用该方法于2018年下半年完成油井压裂25井次,压裂后累计增油 1.02×10^4 t,与2017年下半年同期对比,单井初期日平均多增油0.5 t,取得了较好的开发效果。以油井WELL534为例,详细介绍油井压裂层段组合。

2.2.1 物性参数中间突变指标值计算

分别对油井WELL534各个小层的孔隙度、渗透率进行无量纲化处理,然后对无量纲数据进行归一化计算,最终计算出每个小层的物性参数中间突变指标值,对于没有解释孔隙度和渗透率的表外储层

(S34、S35b、S35c、S36、S37c、P133a、P133b、P141、P142a、P15),中间突变指标值默认为0(表1)。

表1 物性参数评价价值
Table 1 Evaluation of physical parameters

层号	物性参数		无量纲化处理		归一化值		中间突变指标值
	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度	渗透率	孔隙度	渗透率	
P111a	25.40	302.00	0.35	0.68	0.71	0.82	0.76
P132	25.60	331.13	0.33	0.64	0.69	0.80	0.75
P142b	25.40	302.00	0.35	0.68	0.71	0.82	0.76

2.2.2 储层参数中间突变指标值计算

分别对各个小层的砂岩厚度、有效厚度、砂地比进行无量纲化处理,然后对无量纲数据进行归一化计算,最终计算出每个小层的储层参数中间突变指标值(表2)。

表2 储层参数评价价值
Table 2 Evaluation of reservoir parameters

层号	储层参数			无量纲化处理			归一化值			中间突变指标值
	砂岩厚度/ m	有效厚度/ m	砂地比/ %	砂岩厚度	有效厚度	砂地比	砂岩厚度	有效厚度	砂地比	
S34	0.4	0	0.3	0.12	0	0.46	0.49	0	0.68	0.39
S35b	0.2	0	0.1	0	0	0.07	0	0	0.26	0.09
S35c	0.8	0	0.4	0.35	0	0.73	0.71	0	0.85	0.52
S36	0.3	0	0.1	0.06	0	0.12	0.39	0	0.35	0.25
S37c	0.8	0	0.3	0.35	0	0.50	0.71	0	0.70	0.47
P111a	1.6	0.5	0.5	0.82	0.63	0.96	0.94	0.89	0.98	0.94
P132	1.3	0.4	0.2	0.65	0.50	0.38	0.80	0.79	0.78	0.79
P133a	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P133b	0.4	0	0.1	0.12	0	0.08	0.34	0	0.44	0.26
P141	0.9	0	0.3	0.41	0	0.57	0.74	0	0.75	0.50
P142a	0.6	0	0.2	0.24	0	0.40	0.62	0	0.80	0.47
P142b	1.9	0.8	0.4	1.00	1.00	0.79	1.00	1.00	0.93	0.98
P15	0.7	0	0.1	0.29	0	0.11	0.54	0	0.49	0.34

2.2.3 产能参数中间突变指标值计算

分别对各个小层的含水率、地层压力、采出程度、产液强度4项参数进行无量纲化处理,然后对无量纲数据进行归一化计算,最终计算出每个小层的产能参数中间突变指标值(表3)。

2.2.4 含油性参数中间突变指标值计算

分别对各个小层的剩余可采储量、含油饱和度、剩余油地质储量3项参数进行无量纲化处理,然后对无量纲数据进行归一化计算,最终计算出每个小层

表3 产能参数评价
Table 3 Evaluation of capacity parameters

层号	产能参数				无量纲化处理				归一化值				中间突变指标值
	含水率/ %	地层压力/ MPa	采出 程度/%	产液强度/ [t·(d·m) ⁻¹]	含水率	地层 压力	采出 程度	产液 强度	含水率	地层 压力	采出 程度	产液 强度	
S34	88.00	5.00	0.36	1.00	0.70	0.44	0.66	0.92	0.89	0.85	0.90	0.96	0.90
S35b	88.90	5.00	0.37	0	0.64	0.44	0.60	1.00	0.86	0.85	0.88	1.00	0.90
S35c	94.90	4.97	0.45	3.00	0.22	0.42	0.28	0.77	0.74	0.75	0.73	0.88	0.77
S36	98.00	5.02	0.50	1.00	0	0.45	0.05	0.92	0	0.77	0.48	0.96	0.55
S37c	85.80	4.75	0.33	2.50	0.86	0.30	0.80	0.81	0.93	0.79	0.94	0.93	0.90
P111a	94.70	4.54	0.46	6.20	0.23	0.18	0.22	0.53	0.61	0.71	0.68	0.73	0.68
P132	91.80	4.21	0.34	4.20	0.44	0	0.74	0.68	0.81	0	0.86	0.88	0.64
P133a	84.60	4.73	0.28	0	0.94	0.29	0.99	1.00	0.99	0.78	1.00	1.00	0.94
P133b	83.80	5.20	0.32	1.00	1.00	0.55	0.83	0.92	1.00	0.86	0.96	0.97	0.95
P141	88.40	5.05	0.37	3.50	0.68	0.47	0.60	0.74	0.88	0.86	0.88	0.86	0.87
P142a	87.70	5.12	0.36	0.50	0.73	0.51	0.66	0.96	0.90	0.87	0.90	0.98	0.91
P142b	93.20	5.10	0.31	6.88	0.34	0.50	0.85	0.48	0.80	0.79	0.92	0.83	0.84
P15	84.00	5.46	0.28	1.00	0.99	0.70	1.00	0.92	1.00	0.93	1.00	0.98	0.98

表4 含油性参数评价
Table 4 Evaluation of oily parameters

层号	含油性参数			无量纲化处理			归一化值			中间突变指标值
	剩余可采 储量/10 ⁴ t	含油饱和度/ %	剩余油地质 储量/10 ⁴ t	剩余可采 储量	含油 饱和度	剩余油 地质储量	剩余可采 储量	含油 饱和度	剩余油 地质储量	
S34	23.39	0.37	107.48	0.14	0.44	0.03	0.51	0.66	0.42	0.53
S35b	19.83	0.37	90.40	0.11	0.44	0.01	0.48	0.66	0.33	0.49
S35c	18.73	0.37	145.74	0.10	0.44	0.08	0.47	0.66	0.53	0.55
S36	3.56	0.37	83.32	0	0.44	0	0	0.66	0.16	0.27
S37c	50.82	0.37	177.84	0.32	0.44	0.12	0.69	0.66	0.58	0.64
P111a	50.94	0.37	487.85	0.32	0.44	0.48	0.75	0.76	0.69	0.74
P132	64.53	0.37	442.88	0.42	0.47	0.43	0.80	0.68	0.75	0.75
P133a	23.63	0.37	80.08	0.14	0.44	0	0.52	0.66	0	0.39
P133b	150.18	0.37	471.16	1.00	0.44	0.46	1.00	0.81	0.77	0.86
P141	53.21	0.37	214.73	0.34	0.44	0.16	0.70	0.66	0.63	0.66
P142a	46.37	0.37	186.20	0.29	0.44	0.13	0.66	0.66	0.60	0.64
P142b	96.98	0.41	924.38	0.64	1.00	1.00	0.89	1.00	1.00	0.96
P15	77.62	0.37	225.80	0.51	0.44	0.17	0.71	0.76	0.64	0.70

的含油性参数中间突变指标值(表4)。

2.2.5 综合参数评价计算

通过该方法计算出压裂层S34综合评价为0.62, S35b综合评价为0.56, S35c综合评价为0.62, S36综合评价为0.51, S37c综合评价为0.65, P111a综合评价为0.90, P132综合评价为0.89, P133a综合评价为0.43, P133b综合评价为0.65, P141综合评价为0.65, P142a综合评价为0.65, P142b综合评价为0.95, P15综合评价为0.65(表5)。

按照综合评价越相近、层段差异性越小的原则进行组合,如果相邻两个值相差越小,两者之间组合在一起压裂效果就越好。通过组合,共组成8个层

段,其中层段①包括S34、S35b、S35c三个小层,层段②包括S36一个小层,层段③包括S37c一个小层,层段④包括P111a一个小层,层段⑤包括P132一个小层,层段⑥包括P133a、P133b二个小层,层段⑦包括P141、P142a、P142b三个小层,层段⑧包括P15一个小层,与人工分析层段组合一致(表5),说明此方法是可行的。

2.2.6 效果分析

利用该方法2018年4月对油井WELL534进行压裂,压裂前日产液为24.2 t,日产油为0.6 t,含水率为97.8%;压裂初期日产液为76.9 t,日产油为18.1 t,含水率为76.5%。结果压裂初期日增油17.5 t,含水率下降了21.3个百分点,取得了较好的效果。

表5 综合指标评价价值
Table 5 Evaluation comprehensive index

层号	中间突变指标值				中间变量突变级数值				综合 评价值	隔层 厚度	优化 组合层段
	储层发育	产能指标	含油指标	物性指标	储层发育	产能指标	含油指标	物性指标			
S34	0.29	0.90	0.53	0	0.73	0.95	0.81	0	0.62	1.1	①
S35b	0.07	0.90	0.49	0	0.51	0.95	0.79	0	0.56	2.5	①
S35c	0.39	0.77	0.55	0	0.79	0.88	0.82	0	0.62	1.7	①
S36	0.19	0.55	0.27	0	0.66	0.74	0.65	0	0.51	2.5	②
S37c	0.35	0.90	0.64	0	0.77	0.95	0.86	0	0.65	3.5	③
P111a	0.70	0.68	0.74	0.76	0.92	0.93	0.90	0.87	0.90	1.7	④
P132	0.60	0.64	0.75	0.75	0.90	0.89	0.91	0.86	0.89	4.0	⑤
P133a	0	0.94	0.39	0	0	0.97	0.73	0	0.43	2.8	⑥
P133b	0.19	0.95	0.86	0	0.66	0.97	0.95	0	0.65	3.9	⑥
P141	0.37	0.87	0.66	0	0.78	0.93	0.87	0	0.65	1.0	⑦
P142a	0.35	0.91	0.64	0	0.77	0.96	0.86	0	0.65	0.7	⑦
P142b	0.73	0.84	0.96	0.76	0.94	0.94	0.98	0.93	0.95	5.7	⑦
P15	0.26	0.98	0.70	0	0.71	0.99	0.89	0	0.65	3.4	⑧

表6 同期油井压裂效果对比
Table 6 Comparison of fracturing effects of oil wells in the same period

时间	砂岩厚度/ m	有效厚度/ m	措施前 日产油/t	措施前 含水率/%	措施后 日产油/t	措施后 含水率/%	压裂前后 日产油量差值/t	压裂前后 含水率差值/%
2018年下半年使用该方法	13.1	5.0	1.4	89.0	5.3	85.6	3.9	-3.5
2017年下半年未使用该方法	13.5	5.2	1.6	87.0	5.0	86.4	3.4	-0.7
差值	-0.4	-0.2	-0.2	2.0	0.3	-0.8	0.5	-2.8

应用该技术2018年下半年完成25井次油井压裂层段组合,累计增油 1.02×10^4 t,与2017年下半年同期未使用该方法相比,在压裂工艺、压裂用砂量等相同,压裂砂岩厚度和有效厚度单井平均低0.4 m和0.2 m的情况下,压裂井日平均多增油0.5 t(表6),取得了较好的效果。应用表明,该技术能够较好地解决高含水后期薄差油层间层段差异性小、组合难的问题,实现压裂层段的高效高质量定量组合,为高含水后期油田高效开发提供良好的借鉴。

3 结论

1) 研发了基于突变级数法的压裂层段组合法,通过将压裂井每一个小层的孔隙度、含油性等多个参数计算成一个综合指标评价值,实现了小层多个参数的定量评价,解决了高含水后期薄差油层间层段差异性小、考虑因素多、定量组合难的问题,为高含水后期剩余油的高效挖潜提供了较好借鉴。

2) 利用该方法完成了25井次油井压裂层段组合,压裂后单井平均多增油0.5 t,单井含水率平均下

降了2.8个百分点,累计增油 1.02×10^4 t,取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 薛颖. 基于油层分类标准的特低渗油藏压裂井层定量优选研究及应用[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(3): 58-63.
XUE Y. A quantitative optimization research based on the classification criteria[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(3): 58-63.
- [2] 高辉, 张晓, 何梦卿, 等. 基于测井数据体的页岩油储层可压裂性评价研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 603-612.
GAO H, ZHANG X, HE M Q, et al. Study on evaluation of shale oil reservoir fracability based on well logging data volume[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 603-612.
- [3] 张文, 王禄春, 郭玮琪, 等. 特高含水期水驱油井压裂潜力研究[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 115-120.
ZHANG W, WANG L C, GUO W Q, et al. Study on fracturing potential of water driving oil wells in extra-high water cut stage[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 115-120.
- [4] HU Y, HAN L G, ZHANG P, et al. Multi-step full waveform inversion based on waveform mode decomposition[C]// paper SEG-2016-13712251 presented at the 2016 SEG International Exposition and Annual Meeting, 16-21 October 2016, Dallas, Texas, USA.
- [5] KLINGENSMITH B C, HOSSAINI M, FLEENOR S. Considering far-field fracture connectivity in stimulation treatment designs

- in the Permian Basin[C]// paper URTEC- 2153821- MS presented at the Unconventional Resources Technology Conference, 20-22 July 2015, San Antonio, Texas, USA.
- [6] SAHAI R, MISKIMINS J L, OLSON K E, et al. Laboratory results of proppant transport in complex fracture systems[C]// paper SPE- 168579- MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February 2014, The Woodlands, Texas, USA.
- [7] 翟文宝,李军,周英操,等.突变理论在页岩储层可压性评价中的应用[J].断块油气田,2018,25(1):76-79.
ZHAI W B, LI J, ZHOU Y C, et al. Application of catastrophe theory to fracability evaluation of shale reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(1): 76-79.
- [8] 牛世忠.红岗油田压裂选井选层方法研究及应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(6):916-918.
NIU S Z. Method and its application of well selection for fracturing in Honggang Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(6): 916-918.
- [9] 梁焯,韩立国,许卓,等.互相关与最小二乘加权目标函数全波形反演[J].世界地质,2017,36(2):588-594.
LIANG H, HAN L G, XU Z, et al. Full waveform inversion based on weighted cross-correlation and least squares objective function[J]. Global Geology, 2017, 36(2): 588-594.
- [10] 王勃,孙粉锦,李贵中,等.基于模糊物元的煤层气高产富集区预测——以沁水盆地为例[J].天然气工业,2010,30(11):22-25.
WANG B, SUN F J, LI G Z, et al. Prediction of prolific CBM zones with the fuzzy matter element method: A case study of the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 22-25.
- [11] 张善义,兰金玉.基于灰色关联分析的沉积微相定量描述技术及应用[J].断块油气田,2019,26(1):25-28.
ZHANG S Y, LAN J Y. Quantitative description technique of sedimentary micro-facies by grey relational analysis and its application[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(1): 25-28.
- [12] 张善义,兰金玉,李冰.基于粒子群算法的综合调整方案优化方法[J].特种油气藏,2019,26(1):126-130.
ZHANG S Y, LAN J Y, LI B. Comprehensive optimization of adjustment program based on particle swarm optimization[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 126-130.
- [13] 雷能忠.基于RBF神经网络的煤储层随机建模[J].煤炭学报,2012,37(7):1144-1149.
LEI N Z. Stochastic simulation of coalbed methane reservoir by radial basis function neural network[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1144-1149.
- [14] 郑鸿明,彭立,李生杰.模拟退火静校正[J].新疆石油地质,2001,22(1):32-34.
ZHENG H M, PENG L, LI S J. Conducting static correction by annealing analog[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(1): 32-34.
- [15] 梁昌勇,柏桦,蔡美菊,等.量子遗传算法研究进展[J].计算机应用研究,2012,29(7):2401-2405.
LIANG C Y, BAI H, CAI M J, et al. Advances in quantum genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(7): 2401-2405.
- [16] 张强,李盼池,刘丽杰.基于量子混合蛙跳算法的油田开发规划多目标优化[J].信息与控制,2014,43(1):116-122.
ZHANG Q, LI P C, LIU L J. Multi-objective optimization of oilfield development plan based on quantum-shuffled frog-leaping algorithm [J]. Information and Control, 2014, 43(1): 116-122.
- [17] 白云飞,叶振华.基于突变优选理论的采矿方法选择[J].金属矿山,2011,40(10):61-67.
BAI Y F, YE Z H. Selection of mining method based on the mutation optimization theory[J]. Metal Mine, 2011, 40(10): 61-67.
- [18] 师俊峰,刘玉章,吴晓东,等.基于突变理论的油气井出砂预测新方法[J].西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(2):128-132.
SHI J F, LIU Y Z, WU X D, et al. A new probe of sand production prediction based on catastrophic theory[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(2): 128-132.
- [19] 凌复华.突变理论应用及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
LING F H. The theory and application of catastrophe theory[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1987.
- [20] 戴勇,李正文,吴大奎.突变论在震害资料储层预测中的应用[J].天然气工业,2006,26(6):47-49.
DAI Y, LI Z W, WU D K. Application of catastrophic theory to seismic reservoir prediction[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 47-49.
- [21] 何沙,吉安民,杨品,等.安全流变—突变模型在井喷事故中的应用分析[J].天然气工业,2011,31(4):109-112.
HE S, JI A M, YANG P, et al. Application of safety rheology-mutation models in well blowout accidents[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 109-112.
- [22] 李绍飞,孙书洪,王向余.突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用[J].水利学报,2007,38(11):1312-1317.
LI S F, SUN S H, WANG X Y. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1312-1317.

(编辑 李青)