

## 基于模式识别的钻头选型新方法

邹德永, 孟祥雨, 袁 军, 王 滨

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘 要:**针对目前钻井过程中因钻头选型不合理、钻头与所钻地层不匹配,导致钻头使用效果差的问题,建立了一种基于模式识别的钻头选型新方法。利用模式识别理论,对已钻井地层及使用的钻头进行聚类分析,建立了地层-钻头标准模式,然后利用 K-NN 算法对待钻地层进行识别归类,通过地层-钻头标准模式即可选出最佳钻头。该方法在青海油田东坪、牛东区块的 2 口井中进行了钻头选型现场试验,给出了钻头优选方案,实钻数据表明,与未使用推荐钻头的邻井相比,2 口井的钻速和进尺都有了很大提高,提速效果明显。研究结果表明,基于模式识别的钻头选型新方法既考虑了地层多种抗钻特性参数,又考虑了钻头使用效果,钻头优选方案更合理,可以更好地实现钻井提速提效的目的。

**关键词:**钻头选型;聚类分析;模式识别;标准模式;青海油田

**中图分类号:**TE921+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)02-0040-06

## A New Method for Bit Selection Based on Pattern Recognition

ZOU Deyong, MENG Xiangyu, YUAN Jun, WANG Bin

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** In drilling engineering, poor bit performance often results from unreasonable bit selections and mechanical properties that are unsuitable for certain formations. Therefore, a new method for selecting bit types based on the pattern recognition method was established. First, a cluster analysis was performed on the drilled strata and bits were adopted according to pattern recognition theory, and then a stratum-bit standard or guide was constructed. Second, the strata to be drilled were identified and classified by means of K-NN algorithm, and the optimum bit was selected on the basis of the stratum-bit standard mode. Finally, the bit selection scheme was provided and applied to two wells in Dongping and Niudong Blocks, Qinghai Oilfield. Practical drilling data showed that drilling rate and footage in the two wells improved when the recommendations were followed. It is indicated that new bit selection method based on pattern recognition not only considered various drilling resistant parameters of strata, but also focused on bit performance. So, the new bit selection scheme is considered to be more reasonable than earlier approaches, and it is possible to significantly improve the drilling rate and efficiency.

**Key words:** bit selection; cluster analysis; pattern recognition; standard mode; Qinghai Oilfield

目前常见的钻头选型方法可分为 3 类<sup>[1-2]</sup>: 统计分析法(经验法)、岩石力学参数法和人工神经网络法。统计分析法是在对已钻井资料进行统计分析的基础上,建立某区块地层与钻头类型的经验关系,据此进行钻头选型,如 H. Rabia 等人<sup>[3]</sup>的每米钻井成本法和杨进等人<sup>[4]</sup>的钻头效益指数法,选出的钻头只适用于特定地层,没有普遍指导意义;岩石力学参数法是通过对比地层岩性进行定量评价,建立某种岩石力学参数(抗压强度或可钻性级值)与钻头的对应关系,据此选择钻头,如 J. R. Spaar 等人<sup>[5]</sup>通过岩石内摩擦角选择钻头,但由于单一的岩石参数并不能全面反映地层的综合抗钻特性,因此其选型结果误差较大;人工神经网络法综合考虑地层各项力学参

数和钻头使用效果,从而建立地层和钻头的对应关系,如阎铁等人<sup>[6]</sup>的人工神经网络钻头优选方法,但该方法需要大量准确的训练样本,因此实用性不强。为此,笔者利用模式识别理论,在考虑多种地层抗钻特性参数的情况下对现场已钻地层和钻头资料进行聚类分析,建立了合理的、具有普遍指导意义的地层-钻头标准模式,利用 K-NN 算法对待

**收稿日期:**2015-11-09;**改回日期:**2016-02-19。

**作者简介:**邹德永(1962—),男,山东威海人,1984年毕业于华东石油学院钻井工程专业,2004年获石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事油气井工程方面的教学与科研工作。系本刊审稿专家。E-mail: zouyan@upc.edu.cn。

**基金项目:**国家科技重大专项“薄互层低渗透油藏水平井优快钻井技术”子课题“薄互层水平井导向 PDC 钻头优化设计及导向特性研究”(编号:2011ZX05051)资助。

钻地层进行识别归类,从而选出对应的最优钻头。

# 1 基于模式识别的钻头选型原理及方法

## 1.1 基于模式识别的钻头选型原理

所谓模式识别,是根据研究对象的特征或属性,运用一定的分析算法认定其类别<sup>[7]</sup>。一个完整的模式识别系统包括数据的采集、特征的提取、分类器的训练学习和未知对象的识别归类,原理如图 1 所示。其中:样本数据的采集是将研究对象的重要特征或属性进行量化,形成特征矢量或符号串,产生代表对象的模式;特征的提取及处理是为了简化计算,将对分类识别影响最大的特征提取出来,并进行规格化处理;分类器是按照某种算法,以处理后的样本数据为基础进行学习,建立分类识别的规则;分类识别是按照所训练出的分类规则,对待识别对象进行归类。

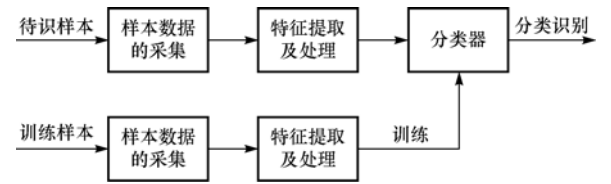


图 1 模式识别原理示意  
Fig. 1 Sketch of pattern recognition principle

目前模式识别技术已广泛应用于人工智能、生物医学和地质勘探等领域。在大量高维度样本数据处理方面,模式识别具有数据结构要求低、算法简单、学习速度快和识别归类准确的优点。油田的历史钻井资料齐全,地层和钻头相关数据充足,可以作为模式识别的训练样本,训练出地层-钻头标准模式,并指导待钻地层的钻头选型。

## 1.2 基于模式识别的钻头选型方法

基于模式识别的钻头选型方法主要包括 2 部分:1)训练模块,建立地层-钻头标准模式;2)选型模块,进行待钻地层的识别归类及钻头选型。在训练模块中,通过对历史钻井资料的统计处理,建立钻头使用数据库(包括井位、井深、钻井参数、钻头使用效果和地层抗钻特性参数),通过地层聚类分析和钻头优选,建立地层-钻头标准模式;在钻头选型模块中,通过邻井资料分析待钻地层的抗钻特性,然后利用 K-NN 识别模型对其进行识别归类,结合地层-钻头标准模式即可得到与待钻地层最匹配的钻头。

利用该方法进行钻头选型的流程如图 2 所示。

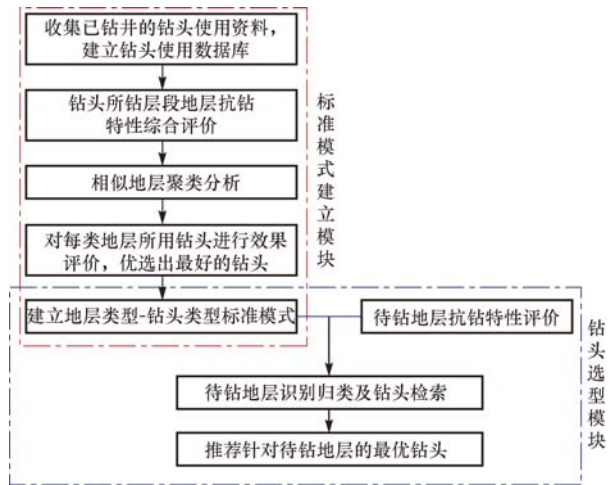


图 2 基于模式识别的钻头选型流程  
Fig. 2 Flow chart of bit selection based on pattern recognition

在该方法中,标准模式建立模块和钻头选型模块既相对独立,又通过地层-钻头类型标准模式相互关联。不断向钻头使用数据库中录入最新的钻头使用资料,通过聚类分析和钻头优选实时更新地层-钻头标准模式,保证钻头选型的准确性。

# 2 地层-钻头标准模式的建立

## 2.1 地层抗钻特性参数的提取及计算

描述地层抗钻特性的参数众多,考虑的因素过多会增加数据处理的负担,考虑过少又会影响结果的准确性。钻井实践表明,影响钻头使用效果的主要地层抗钻特性参数,包括地层岩性、岩石可钻性级值、岩石研磨性指数和地层非均质系数<sup>[8]</sup>。

1) 地层岩性划分。钻井中钻遇的地层岩性种类繁多,为了研究方便,在不影响钻头选型的前提下,参考石油地质和测井分类结果,将岩性相近的地层合并,对地层进行分类并编号,结果见表 1。

表 1 地层岩性分类			
Table 1 The classification of strata lithology			
代码	地层岩性	代码	地层岩性
1	泥岩	6	白云岩
2	煤	7	石膏
3	泥砂岩	8	岩盐
4	砂岩	9	变质岩
5	灰岩	10	火成岩

2) 岩石可钻性级值和研磨性指数计算。关于岩石可钻性级值和研磨性指数的预测方法,国内外学者进行了系统研究并取得了很好的效果<sup>[9-13]</sup>。岩

石可钻性预测模型表示为<sup>[9]</sup>:

$$K_d = ae^{\frac{b}{\Delta t}} \quad (1)$$

式中:  $K_d$  为标准岩石可钻性级值;  $\Delta t$  为纵波时差,  $\mu s/m$ ;  $a, b$  为回归系数, 与地层有关。

利用采集的现场岩心进行了大量试验, 采用试验数据拟合出了岩石研磨性预测模型:

$$A_1 = 0.1537\sigma_c^{0.5} - 6.2421V_{sh} + 6.2076 \quad (2)$$

$$R = 0.91$$

式中:  $A_1$  为岩石研磨性指数;  $\sigma_c$  为岩石抗压强度, MPa;  $V_{sh}$  为岩石泥质含量。

3) 地层非均质系数计算。钻头在地层中钻进时, 由于岩性、地质结构等因素的变化, 导致地层抗钻特性参数也在变化。抗钻特性参数波动越大, 说明地层越不均质, 反之则表示地层越均质。用地层可钻性级值的离散性程度来表示地层的非均质性。离散系数的计算式为:

$$\xi = \frac{10}{m} \sum_{i=1}^m S(i) \quad (3)$$

式中:  $\xi$  为离散系数;  $S(i)$  为第  $i$  层段地层可钻性级值的均方差;  $m$  为目标地层的分段数, 一般以 10~100 m 为一段进行划分, 地层可钻性级值的变化梯度越大, 划分应越细, 以提高计算精度。

## 2.2 地层的 K 均值聚类分析

利用地层抗钻特性参数对地层进行定量描述后发现, 即使是相同层位的地层, 其岩石力学性质差别也可能很大, 导致同一钻头钻进效果差异很大。因此, 只有结合多种地层抗钻特性参数才能对地层进行更准确的聚类分析<sup>[14-16]</sup>。K 均值聚类<sup>[17]</sup>是模式识别中运用最广泛的方法之一, 其基本原理就是取  $k$  个对象作为初始类心, 按照最小距离原则将各对象归类, 之后通过迭代计算不断改进类型和各对象类别, 最终使类内平方和最小。如图 3 所示: 取  $k=$

2, 算法就会通过迭代计算将性质相似的对象聚在一起, 最终聚为 2 类; 取  $k=3$ , 最终就会聚为 3 类(其中红点为聚类中心)。

地层的 K 均值聚类有 5 个步骤:

1) 数据统计整理, 规格化。假设通过统计现场资料得到  $m$  个钻头, 每个钻头所钻遇的地层为一个聚类对象, 得到  $m$  个地层层段, 对每个地层层段进行抗钻特性参数描述(地层岩性、可钻性级值、研磨性指数和非均质系数), 最终得到  $m$  行 4 列的地层聚类样本矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & x_{m4} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $m$  为样本中地层对象总数;  $x_{ij}$  为第  $i$  个地层的抗钻特性参数,  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $j=1, 2, 3, 4$ , 分别对应地层岩性、可钻性级值、研磨性指数和非均质系数。

为了消除特性指标单位的差别和量级不同的影响, 需对各指标值实行数据规格化处理, 笔者采用了极差规格化法:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

式中:  $M_j$  和  $m_j$  分别为第  $j$  个参数的最大值和最小值。

2) 用户给定聚类数目  $k$ , 随机选取  $k$  个对象作为初始聚类中心。

3) 计算每个对象与  $k$  个初始聚类中心的距离, 将其分配到最近的聚类中, 最终将样本分为  $k$  类; 常用的 Euclid 距离计算模型的表达式为:

$$d(x_i, x_j) = \left\{ \sum_{k=1}^m [\omega_k (x_{ik} - x_{jk})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中:  $\omega_k$  为各特征参数的权重。

历史钻井资料的统计分析结果表明, 岩石可钻性对钻头使用效果的影响最大, 研磨性和非均质性次之, 岩性最弱, 因此笔者将可钻性级值、研磨性指数、非均质系数和岩性的权重分别定为 0.5、0.2、0.2 和 0.1。

4) 对每一聚类体, 采用均值算法计算新的聚类中心。

5) 如果新的聚类中心与初始聚类中心不相等, 则将新的聚类中心作为初始聚类中心, 重复步骤 3)、4), 直至聚类中心不再变化。

完成迭代后, 即得到  $k$  类地层和对应的聚类中心, 每一类地层的聚类中心可作为该类地层的代表, 从而得到  $k$  类地层的抗钻特性参数向量:

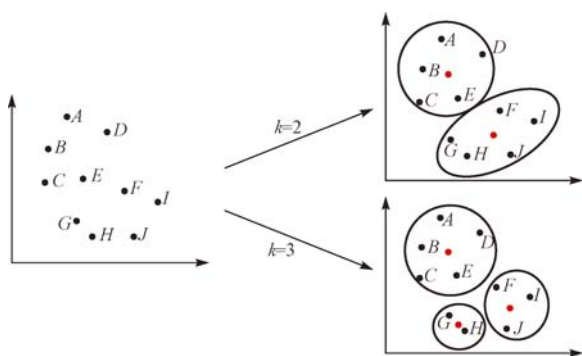


图 3 聚类分析示意

Fig. 3 Sketch of cluster analysis

$$\mathbf{Y}_i = \{y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}\} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

2.3 钻头使用效果评价

每一类地层所对应的钻头,需要对其使用效果进行合理的评价,以优选出效果最好的钻头。在钻井作业现场,钻头的进尺和机械钻速仅与所钻地层性质、钻头品质和钻井液性能有关,能够真实地反映出钻头性能的优劣,并且容易获得。因此,笔者采用机械钻速与钻头进尺的乘积来评价钻头的使用效果,定义为钻头使用效果指数(简称效果指数):

$$P = \sqrt[5]{\Delta D v} \quad (8)$$

式中:  $P$  为钻头使用效果指数;  $v$  为机械钻速,  $\text{m/h}$ ;  $\Delta D$  为钻头进尺,  $\text{m}$ 。

对每一类地层中的钻头计算其效果指数,效果指数最大的钻头即为最适合该类地层的钻头。

3 待钻地层识别归类

模式识别是在已有的分类模式下,根据待识别对象的特征,运用一定的算法认定其类别。模式识别有多种方法,其中 K-NN 法<sup>[7]</sup>原理简单、可靠度高,且对数据结构无特殊要求。K-NN 法的基本原理为:有一堆已知分类的数据,然后当一个新数据进入时,计算新数据与已分类数据的距离,然后挑选离这个新数据最近的  $k$  个点,查看这  $k$  个点所属分类,然后用少数服从多数的原则,给新数据归类。因此,当训练数据较大时,该方法计算量也会增大。

为了简化计算,笔者以每类的类心代表该类所有地层。因此,当待钻地层加入时,不再需要和所有对象进行计算,只需和各类心进行计算,然后按照最

小距离原则归类即可,如图 4 所示。

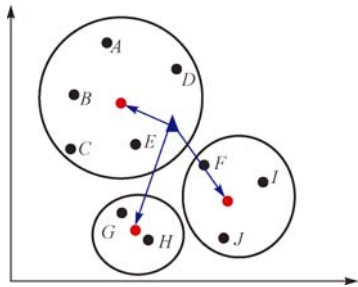


图 4 简化的模式识别原理示意  
Fig. 4 Sketch of a simplified pattern recognition principle

设对待钻地层进行抗钻特性预测后得到的抗钻特性参数向量为:

$$\mathbf{Z} = (z_1, z_2, z_3, z_4) \quad (9)$$

K-NN 模式识别模型:

$$d_i = d(\mathbf{Z}, \mathbf{Y}_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^4 \{w(i)(y_{ij} - z_j)\}^2} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{Z}$  为待钻地层的抗钻特性参数向量;  $d_i$  为待钻地层与分类地层的相似度;  $\mathbf{Y}_i$  为钻头选型标准模式中的地层抗钻特性参数向量;  $w(i)$  为特征参数的权重。

4 现场试验

4.1 青海油田地层-钻头标准模式的建立

收集青海油田东坪、牛东、扎哈泉 3 个区块的地质资料、钻井报告和测井资料等,共计 23 口井 208 只钻头,进行地层抗钻特性评价、地层模糊聚类分析和钻头优选,建立了地层-钻头标准模式(见表 2)。

表 2 青海油田地层-钻头标准模式

Table 2 Stratum-bit standard mode of the Qinghai Oilfield

序号	地层信息				钻头信息			
	地层岩性	可钻性级值	研磨性指数	非均质系数	钻头型号	钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	进尺/m	效果指数
1	1	1.53	4.36	4.56	SKG124	9.74	839.8	6.06
2	3	2.61	5.36	4.13	GD1905	12.80	1 741.5	7.41
3	3	2.89	4.88	3.57	GD1905S	17.29	1 183.0	7.28
4	3	3.17	6.03	4.52	P3519LD-AB	19.18	700.0	6.69
5	3	3.68	5.60	5.67	WM5519L	7.16	1 185.0	6.11
6	3	3.72	6.48	4.98	GD1905	14.30	1 448.3	7.30
7	3	4.16	6.19	4.41	P5519LR-A	8.62	1 135.0	6.28
8	3	4.59	7.15	5.06	DM1925SHIT	8.34	850.4	5.89
9	3	5.08	6.70	4.23	P3516LR-AB	4.51	668.2	4.96
10	3	5.34	7.05	6.59	P3516LR	4.89	718.0	5.12
11	3	5.72	7.01	5.92	M1365	4.97	640.8	5.02
12	4	6.02	7.42	6.74	MD517	3.00	197.0	3.58
13	10	6.54	8.00	6.48	HJ517G	2.93	118.8	3.22



## 4.2 现场试验效果分析

东坪区块某预钻井(记为 A 井)位于柴达木盆地阿尔金山前东段,是东坪斜坡东坪 1 区块的一口开发直井,设计井深 3 650.00 m,完钻层位为基岩。

表 3 东坪区块 A 井推荐钻头使用效果

Table 3 The performance of the bit recommended for Well A in the Dongping Block

井眼直径/mm	井深/m	地层岩性	可钻性级值	研磨性指数	非均质系数	相似地层	推荐钻头型号	平均钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均进尺/m	效果指数
311.1	3 140.00~3 510.00	4	5.97	7.89	6.50	12	MD517	2.84	185	3.50
215.9	3 510.00~3 650.00	10	6.46	8.31	6.15	13	HJ517G	2.56	70	2.82

表 4 东坪区块 A 井邻井所用钻头及钻进效果

Table 4 The adopted bit and its drilling effects in the offset well of Well A in the Dongping Block

入井深度/m	出井深度/m	钻头型号	钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	进尺/m	效果指数
3 196.86	3 207.36	BR1376WA-6	0.72	10.50	1.50
3 207.36	3 235.17	HL513	1.34	27.81	2.06
3 235.17	3 278.47	HL513	1.25	43.30	2.22
3 278.47	3 360.00	BR1376WA-6	0.68	81.53	2.23

对比表 3 和表 4 可知,非均质性较强的砂砾岩地层(埋深 3 140.00~3 510.00 m)不宜选用 PDC 钻头,应选择抗冲击振动能力更好的 MD517 型牙轮钻头;而在硬质的变质砂岩和火成岩地层(埋深

其中预钻地层为路乐河组和基岩地层,属于难钻地层。先利用邻井测井资料对其进行了抗钻特性评价,然后结合该井地质分层和井身结构设计,给出了钻头优选方案,实钻数据见表 3,邻井所用钻头及钻进效果见表 4。

3 510.00~3 650.00 m)中,由于地层研磨性较高,PDC 钻头的效果同样不理想,宜选用抗研磨性的 HJ517G 型镶齿牙轮钻头。总体来看,相比未使用推荐钻头的邻井,A 井的钻速和进尺都有明显提高。

牛东区块某井(记为 B 井)位于柴达木盆地西部北区阿尔金山前牛东鼻隆构造高点,设计井深 2 480.00 m,在小煤沟组地层完钻。该区块地层岩性复杂,夹层较多,地层非均质性强。为提高该井的钻井速度,结合邻井资料,对路乐河组及小煤沟组地层进行了抗钻特性分析,结合该井地质分层和井身结构设计,给出了钻头优选方案,实钻数据见表 5,邻井所用钻头及其钻进效果见表 6。

表 5 牛东区块 B 井推荐钻头使用效果

Table 5 The performance of the bit recommended for Well B in the Niudong Block

井眼直径/mm	井深/m	岩性	可钻性级值	研磨性指数	非均质系数	相似地层	推荐钻头型号	平均钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均进尺/m	效果指数
215.9	1 800.00~1 950.00	4	4.80	6.30	6.09	9	P3516LR-AB	3.84	150	3.56
215.9	1 950.00~2 480.00	4	5.24	6.62	6.65	10	P3516LR	3.56	215	3.77

表 6 牛东区块 B 井邻井所用钻头及钻进效果

Table 6 The adopted bit and its drilling effects in the offset well of Well B in the Niudong Block

入井深度/m	出井深度/m	钻头型号	钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	进尺/m	效果指数
2 072.92	2 137.55	HJ517G	1.56	64.63	2.52
2 137.55	2 274.32	HJ517G	1.27	136.77	2.81
2 274.32	2 300.00	HJ517G	1.77	25.68	2.15

对比表 5 和表 6 可知,虽然该层段非均质性强,但总体可钻性级值和研磨性指数都不高,采用具有抗冲击性的 PDC 钻头要比牙轮钻头的效果更好。

综合而言,相比未使用推荐钻头的邻井,A 井和 B 井的钻速及进尺都有很大提高,可见推荐钻头选

型方案更合理、更有针对性。

## 5 结 论

1) 提取了地层岩性、可钻性级值、研磨性指数和非均质系数等 4 个抗钻特性参数作为地层聚类分析和识别归类的特征值,既能全面反映地层的抗钻特性,又简化了计算。

2) 聚类分析有效地解决了复杂地层分类与钻头优选的问题,建立的地层-钻头标准模式具有普遍指导意义,K-NN 模型能够准确地对待钻地层进行识别归类。

3) 现场试验结果表明,利用基于模式识别的钻头选型新方法优选的钻头选型方案更合理,可以更

好地实现钻井提速提效的目的。

4) 基于模式识别的钻头选型新方法为一套既考虑地层多种抗钻特性参数又考虑钻头使用效果的通用性钻头选型方法。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 白萍萍,步玉环,李作会. 钻头选型方法的现状及发展趋势[J]. 西部探矿工程,2013,25(11):79-82.  
BAI Pingping, BU Yuhuan, LI Zuohui. The present situation and development of bit selection[J]. West-China Exploration Engineering, 2013, 25(11): 79-82.
- [2] 张辉,高德利. 钻头选型方法综述[J]. 石油钻采工艺,2005,27(4):1-5.  
ZHANG Hui, GAO Deli. Review on drill bit selection methods[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(4): 1-5.
- [3] RABIA H, FARRELLY M, BARR M V, et al. A new approach to drill bit selection[R]. SPE 15894, 1986.
- [4] 杨进,高德利,刘书杰,等. 一种钻头选型新方法研究[J]. 石油钻采工艺,1998,15(5):38-40.  
YANG Jin, GAO Deli, LIU Shujie, et al. Research on a new method for type-selection of bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 15(5): 38-40.
- [5] SPAAR J R, LEDGERWOOD L W, GOODMAN H, et al. Formation compressive strength estimates for predicting drillability and PDC bit selection[R]. SPE 29397, 1995.
- [6] 阎铁,刘春天,毕雪亮,等. 人工神经网络在大庆深井钻头优选中的应用[J]. 石油学报,2002,23(4):102-106.  
YAN Tie, LIU Chuntian, BI Xueliang, et al. Application of artificial neural network on optimizing bit type in Daqing deep wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 102-106.
- [7] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2001:1-8.  
SUN Jixiang. Modern pattern recognition[M]. Changsha: University of National Defence Technology Press, 2001: 1-8.
- [8] 张辉,高德利. 钻头选型通用方法研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(6):45-49.  
ZHANG Hui, GAO Deli. Study on universal method of bit selection[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(6): 45-49.
- [9] 高德利,潘起峰,张武攀. 南海西江大位移井钻头选型技术研究[J]. 石油钻采工艺,2004,26(1):1-4.  
GAO Deli, PAN Qifeng, ZHANG Wunian. Study on drill bit selections for Xijiang extended-reach wells in South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(1): 1-4.
- [10] MENSA-WILMOT G, FEAR M J. The effects of formation hardness, abrasiveness, heterogeneity and hole size on PDC bit performance[R]. SPE 67698, 2001.
- [11] 邹德永,程远方,查永进,等. 利用岩屑波速随钻检测地层可钻性及优选钻头类型[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(1):37-40.  
ZOU Deyong, CHENG Yuanfang, ZHA Yongjin, et al. Rock-drillability evaluation and bit selection through ultrasonic velocity measurement on cuttings[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(1): 37-40.
- [12] 梁启明,邹德永,张华卫,等. 利用测井资料综合预测岩石可钻性的试验研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(1):17-19.  
LIANG Qiming, ZOU Deyong, ZHANG Huawei, et al. Predicting rock drillability by well logging: an experimental research[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 17-19.
- [13] 邹德永,王瑞和. PDC 钻头的岩石研磨性试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(2):41-43.  
ZOU Deyong, WANG Ruihe. Experimental study on rock abrasiveness with PDC bit[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 41-43.
- [14] 王克雄,魏凤奇. 测井资料在地层抗钻特性参数预测中的应用研究[J]. 石油钻探技术,2003,31(5):61-62.  
WANG Kexiong, WEI Fengqi. Applications of logging information in predicting formation anti-drilling parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 61-62.
- [15] 周德胜,夏宇文. 为钻头选型的地层模糊聚类研究[J]. 西南石油学院学报,1994,16(4):74-78.  
ZHOU Desheng, XIA Yuwen. The fuzzy cluster analysis of formation for the bit selection[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1994, 16(4): 74-78.
- [16] 张鹏,张在明,杨宇友,等. 模糊聚类在地层分析中的应用[J]. 岩土力学,2009,30(8):2348-2352.  
ZHANG Peng, ZHANG Zaiming, YANG Yuyou, et al. Application of fuzzy cluster to geotechnical stratum analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2348-2352.
- [17] 邵峰晶,于忠清. 数据挖掘原理与算法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:219-224.  
SHAO Fengjing, YU Zhongqing. Principle and algorithm of data mining[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2003: 219-224.

[编辑 令文学]