

中国大陆科学钻探预先导孔地层 可钻性时序特征分析

薛亚东^{1,2}, 高德利³, 黄宏伟^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘要: 为实现可钻性的钻前预测, 需要结合地层沉积层序研究成果, 对地层可钻性剖面序列特征进行深入分析。在对中国大陆科学钻探预先导孔地层可钻性序列研究的基础上, 提出可钻性时序特征的2个表征: 时序几何形态特征和内在趋势变化特征, 分别用关联维数和 Hurst 指数表示。通过与实际地层可钻性的比较分析表明, 这2个参数反映可钻性时序的内外特征。因此, 根据这2个表征参数, 结合神经网络技术, 可建造地层可钻性的预测模型。

关键词: 地质力学; 钻探; 可钻性; 时间序列; 分形几何; 预测

中图分类号: P 55

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)01 - 0102 - 06

ANALYSIS OF TIME-SERIES CHARACTERISTICS OF STRATA DRILLABILITY OF PILOT DRILLING FOR CHINESE CONTINENTAL SCIENTIFIC DRILLING

XUE Yadong^{1,2}, GAO Deli³, HUANG Hongwei^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;* 2. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
3. *School of Oil Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: The analysis and prediction of deep formation drillability are important for drilling and exploring engineering. In general, the formation drillability index is calculated based on well acoustic logging after the well being completed or at some stages. Using the well logging data, some methods can be employed to calculate the stratum drillability. For the sake of improving prediction technique, the characteristics of formation drillability time series(DTS) are needed. Based on the study of strata drillability time-series of pilot drilling of Chinese continental scientific drilling(CCSD), two typical indices were put forward. They are characteristics of time-series geometrical form and intrinsic change tendency. These two indices are expressed with correlation dimension(D_2) and Hurst(H) exponent, respectively. Based on the analysis of 32 actual well formation drillability profile curves of different oil fields in China, a conclusion was drawn that most of the curves show fractal characteristics. For a drillability time-series, its correlation dimension(D_2) can describe the degree of variety and it can be used to express the curve's outside geometrical characteristic. The Hurst exponent can be used to estimate the time-series'

收稿日期: 2007 - 03 - 21; **修回日期:** 2007 - 04 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772179); 博士后科学基金资助项目(20060390655)

作者简介: 薛亚东(1971 -), 男, 博士, 1993年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yadongxue@126.com

development tendency. The application results show that D_2 and H can describe the main characteristics of a DTS perfectly. With these two characteristics, a drillability prediction model based on intelligent neural network was developed. This model was used to predict the formation drillability of CCSD, and it was proven to be practicable.

Key words: geological mechanics; drilling and exploring; drillability; time-series; fractals; prediction

1 引言

地层岩石可钻性是评价地层钻进时难易程度的重要指标。在石油钻井和地质勘探工程中, 岩石的可钻性具有重要意义, 如钻井工程中钻头的选型、钻井工艺的确定、钻速预测和岩石分级等都离不开可钻性这一指标^[1]。为描述地层的可钻性, 通常采用室内岩芯试验和现场实测的方法。现场实测主要通过测井和录井, 利用声波时差法或录井反演法计算地层可钻性^[2, 3]。随着钻井及相关技术与理论的发展, 通过测井和录井资料的计算分析, 可获得实钻地层的全剖面可钻性曲线。但由于这些方法属于钻时或钻后可钻性评价, 因此只能用于区域地层可钻性的评价, 对未钻地层可钻性的评价就显得无能为力了。为实现对未钻地层的可钻性预测评价, 很多学者^[4~6]研究了人工智能神经网络以及时间序列等方法, 试图建立深部地层可钻性的预测模型。由于目前人们对深部地层的了解较少, 要建立可靠的预测模型就需要深入分析研究地层可钻性序列的内在规律。为此, 作者通过大量的现场调研和室内实验, 并参考国内外的相关研究成果, 提出采用分形几何学方法分析地层可钻性时序的内在特征, 并将研究成果用于建立中国大陆科学钻探先导孔地层可钻性的预测模型。

2 工程简介

作为“深入地球内部的望远镜”, 大陆科学深钻是当代地球科学具有划时代意义的大型科学工程, 是解决当代人类面临的资源、灾害、环境等重大问题的重要途径之一。中国大陆科学钻探工程利用现代深部钻探高新技术, 在大别—苏鲁超高压变质带实施中国第一口大陆科学深井钻探, 并从钻孔中获取全部岩芯及液、气态样品及原位测井数据, 校正地球物理对深部组成与结构的遥测结果, 重塑超高压变质带形成和折返机制, 研究中国南、北两大板块汇聚边缘的地壳行为、壳幔作用以及有关的成矿作用, 为资源、能源及地震发生机制提供新的科学

依据, 建成现代深部地质作用长期观测与实验基地和地壳深部物质研究基地。中国第一口大陆科学钻井工程的核心工程是在江苏省连云港市东海县境内的超高压变质岩中钻取的一口 2 000 m 深的全取芯先导孔和一口 5 000 m 深的全取芯主孔。

中国大陆科学钻探工程(Chinese continental scientific drilling, CCSD)不仅研究地球固体圈层的组成与结构, 还研究地下生物圈与水圈的组成与结构; 不仅重塑地球演化的过去, 还可以观测现在, 预测未来; 不仅解决科学理论问题, 还具有重大实际意义; 不仅涉及地球科学, 还包括生物学、物理学和化学等, 是一项多学科的重大科学工程。本文为实现钻探工程的安全、高效施工, 开展了管柱力学与地层可钻性的专项研究。

3 时序特征分析方法

地层可钻性沿深度剖面的分布曲线(点图)可理解为一个可钻性的时间序列, 对可钻性序列特征的分析就引申为对可钻性时序特征的分析。时间序列蕴含着系统的特征信息, 时间序列分析就是为了提取系统的有关信息, 从而揭示系统本身的结构和规律, 认识系统的固有特性, 掌握系统与外界因素的关系, 推断系统及其行为的未来情况^[7]。对于一个时间序列, 通常采用参数模型进行分析, 如自回归模型(auto-regression 模型, AR 模型)、滑动平均模型(moving average 模型, MA 模型)、自回归滑动平均模型(auto-regression moving average 模型, ARMA 模型)和其他非线性模型等。本文为分析地层可钻性时序特征, 采用了分形几何学的方法。分形几何学是一门新发展起来的可定量描述和刻画事物复杂性的边缘学科, 它的一个基本特点是分数维(区别于拓扑维数)。分形维数最早是在 1977 年由 B. Mandelbrot 提出来的。根据研究事物的不同, 分形维数有多种定义, 主要有自相似维数、容量维(科尔莫戈罗夫容量维)、信息维、关联维、广义维数等^[8~10]。对于时序类型的研究对象, 主要采用关联维数计算和重标极差分析(R/S)方法。

3.1 关联维数计算

P. Grassberger 与 I. Procaccia 在重建相空间和“嵌入定理”的基础上,提出了计算时间序列动力系统吸引子关联维数的“嵌入空间法(GP 法)”^[11]。

设 $\{x_t\}(t=1, 2, \dots, N)$ 为一个有 N 个记录的时间序列,为计算 $\{x_t\}$ 的关联维数,首先应重建相空间。假设相空间的嵌入维数为 m ,则空间向量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \\ \mathbf{X}_2 &= \{x_2, x_3, \dots, x_{m+1}\} \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_n &= \{x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m-1}\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

定义 m 维相空间中 2 个向量之间的距离 R_{ij} 为

$$R_{ij} = |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j| \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j) \quad (2)$$

关联维数 D_2 的定义为

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln c(r)}{\ln r} \quad (3)$$

式中: r 为观测距离尺度,称为标度; $c(r)$ 为关联积分,根据 GP 法有

$$c(r) = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n \theta(r - R_{ij}) \quad (4)$$

式中: $\theta(\cdot)$ 为 Heaviside 函数,可定义为

$$\theta(r - R_{ij}) = \begin{cases} 1 & (r - R_{ij} > 0) \\ 0 & (r - R_{ij} \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

如果时序具有分形特征,则 $r, c(r)$ 在双对数坐标图上应为一一直线(由于端点效应,实际曲线可能只在某一区间为直线,该区间称为无标度区间),直线的斜率即为关联维数 D_2 。

在实际计算 $c(r)$ 时,采用了修正的 $c(r)$ 计算公式^[4]:

$$c(r) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \theta(r - R_{ij}) \quad (6)$$

式中: n 为向量数,且 $n = N - m + 1$ 。

为计算时间序列的关联维数,需要确定嵌入空间维数 m 的大小,从已有的研究结果看,为使关联维数计算结果接近真实值, m 应尽量大,但 m 的增大,需要更多的时间序列样本。时间序列的最小样本容量 N_{\min} 可采用下式确定:

$$N_{\min} = \frac{2p(m-2)}{E(1-\gamma)} \quad (7)$$

式中: p 为时步延迟数; E 为互差限,一般取 0.001 ~ 0.100; γ 为无标度区间宽度,一般取 0.001 ~ 0.500。

3.2 R/S 方法

H. E. Hurst 为研究水库容量与流量的关系,提出了重标极差分析 R/S 方法^[12~15]。该方法主要考虑了统计意义下的事物发展变化的前后“记忆性”特征,是研究时序特性的有效方法。

设 $\{x(t)\}_{t=1, 2, \dots, N}$ 为等间隔采样时间序列,则其均值为

$$\bar{x}(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (8)$$

累计离差为

$$X(i, \tau) = \sum_{t=1}^i [x(t) - \bar{x}(\tau)] \quad (i < \tau) \quad (9)$$

极差为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) \quad (10)$$

标准差为

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - \bar{x}(\tau)]^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

式中: τ 为计算间隔,且 $\tau < N$ 。

根据 H. E. Hurst 的统计结果,时间序列存在如下关系式:

$$R(\tau)/S(\tau) \propto (\tau/2)^H \quad (12)$$

式中: H 为 Hurst 指数或间歇性指数。

如果 $R(\tau)/S(\tau)$ 相对于 τ 的变化在双对数坐标系中沿一直线分布,则可认为此过程具有分形特征。通过 $\lg[R(\tau)/S(\tau)] - \lg \tau$ 中的数据点用最小二乘法进行拟合,拟合线的斜率即为 Hurst 指数 H ,它与分形维数 D 相关,且有

$$D = 2 - H \quad (13)$$

对一个时间序列,若 $H = 0.5000$,则意味着此序列为一独立随机过程;若 $H > 0.5000$,则表示此过程具有持久性,过去的增加(或减少)意味着将来平均意义上的增加(或减少)趋势;若 $H < 0.5000$,则表示此过程具有反持久性,过去的增加意味着未来的减少趋势。根据这一特性,可以研究地层可钻性时序的内在趋势特征,对地层可钻性的预测具有指导意义。

4 地层可钻性时序特征分析

4.1 关联维数计算

根据前述理论和方法, 编制了时序分形计算程序, 并对大陆钻探先导孔的地层可钻性序列进行关联维数计算。

为确定合理的嵌入维数 m , 选择 $m = 3, 5, 6, 8$ 分别进行计算, 计算中时间延迟步数取 1。图 1 给出了 62~1 027 m 井段地层可钻性序列在不同嵌入维数下关联积分与标度的双对数曲线。

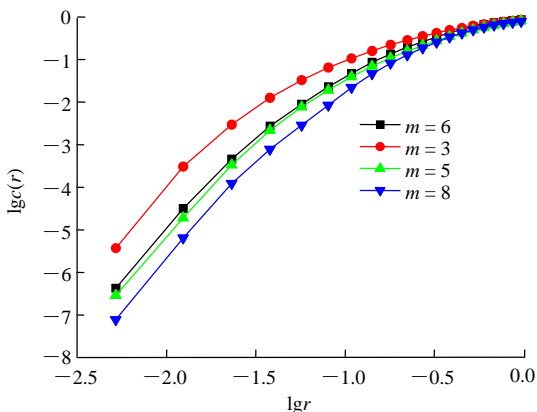


图 1 关联积分与标度的双对数曲线

Fig.1 Logarithmic curves between $\lg r$ and $\lg c(r)$

当 $m = 3$ 时, $D_2 = 1.181 7$; 当 $m = 5$ 时, $D_2 = 1.690 2$; 当 $m = 6$ 时, $D_2 = 1.652 7$; 当 $m = 8$ 时, $D_2 = 2.020 4$ 。通过分析可以得出, 当 $m = 6$ 时, D_2 基本保持不变, 因此选择 $m = 6$ 。

作者^[3]通过复杂的迭代运算以确定可钻性时序模型的阶数, 而采用 GP 算法计算时序的关联维数, 一方面可以用关联维描述系统的动态特性, 另一方面可以由嵌入维数确定相空间的最小维数, 即描述动态过程需要的最小变量数, 也即时序模型的阶数。另外, 在建立地层可钻性时序神经网络预测模型时, 计算嵌入维数可优化网络输入节点数。

采用上述方法, 对先导孔地层可钻性时序的关联维数进行分段计算, 计算结果见图 2。

从图 2 中可以看出: 不同井段地层可钻性序列均具有分形特征, 62~315 m 可钻性序列的 $D_2 = 1.713 3$; 316~600 m 可钻性序列的 $D_2 = 1.112 8$; 601~1 027 m 可钻性序列的 $D_2 = 1.909 3$ 。各个井段地层的关联维数差别很大, 对比图 3 可以看出, 地

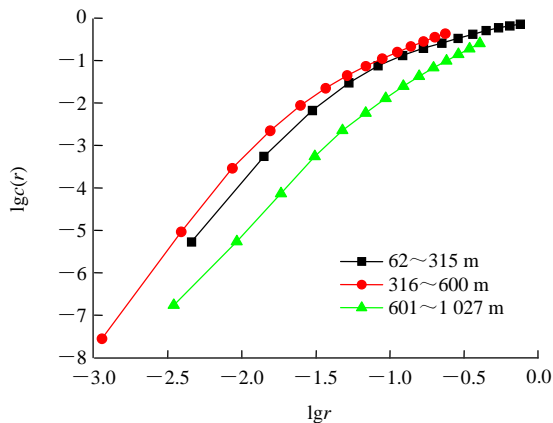


图 2 关联维数计算结果

Fig.2 Calculating curves of correlation dimension

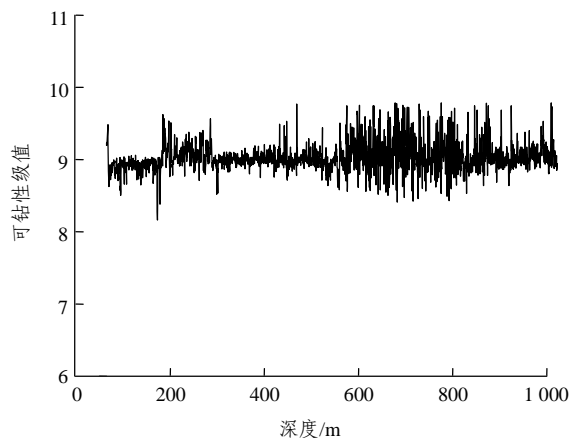


图 3 先导孔地层可钻性

Fig.3 Drillability curve of CCSD pilot well

层可钻性变化大的井段, 关联维数也较大, 相反, 可钻性变化较小的井段, 关联维数也较小。这表明可钻性序列的关联维数可以反映可钻性的变化, 因而可用于定量描述区域地层可钻性的变化及分布特征, 这对建立地层可钻性预测模型具有指导作用。

4.2 R/S 分形计算

对先导孔地层可钻性序列从 62~1 027 m 进行建模, 取时间延迟为 1, 利用 R/S 方法进行分析。图 4 给出了 $\lg[R(\tau)/S(\tau)] - \lg \tau$ 关系曲线。

从图 4 中可以看出, $\lg R(\tau)/S(\tau) - \lg \tau$ 具有很好的线性特征, 表明可钻性序列具有分形特征。采用最小二乘法进行拟合可得

$$\lg[R(\tau)/S(\tau)] = -0.776 41 + 0.689 4 \lg \tau \quad (R = 0.990 3) \quad (14)$$

由此可得拟合曲线的斜率 $H = 0.689 4$ 。

先导孔地层的 Hurst 指数 $H > 0.500 0$, 表明地层可钻性在深部与上部之间具有持久性, 即上部

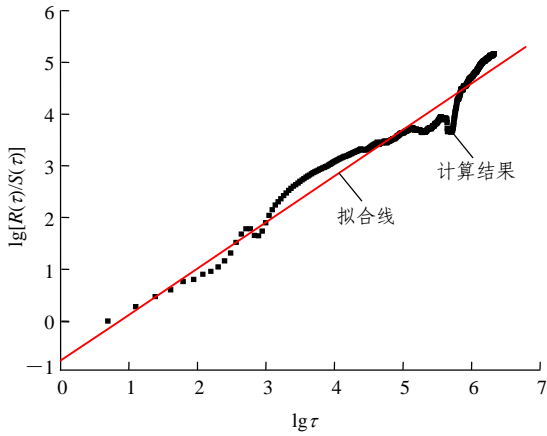


图 4 $\lg[R(\tau)/S(\tau)] - \lg \tau$ 关系曲线

Fig.4 Relationship curves between $\lg[R(\tau)/S(\tau)]$ and $\lg \tau$

可钻性表现为增加趋势，则下部可钻性也表现出增加趋势；相反，如果上部可钻性表现为降低趋势，则下部可钻性也表现出降低趋势。对 1 027 m 以上地层可钻性进行分析可以得出，上部地层可钻性具有增加趋势，因此可以认为下部未钻地层的可钻性也会增加。作为对比，对预先导孔地层可钻性 H 进行分段计算；计算结果见图 5。

3 段的拟合结果分别为

(1) 62~315 m:

$$\lg[R(\tau)/S(\tau)] = -0.4997 + 0.9248 \lg \tau$$

$$(R = 0.9807, H = 0.9248)$$

(2) 316~600 m:

$$\lg[R(\tau)/S(\tau)] = -0.7665 + 0.7653 \lg \tau$$

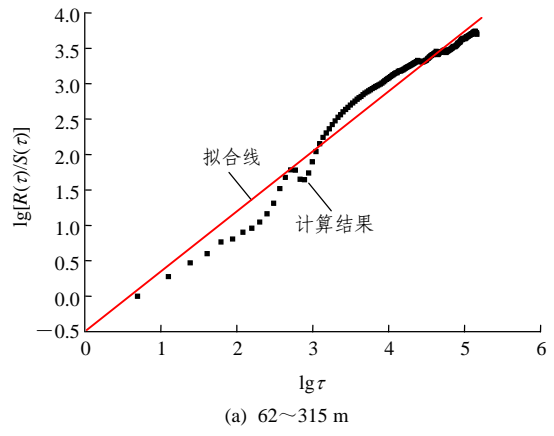
$$(R = 0.9859, H = 0.7653)$$

(3) 601~1 027 m:

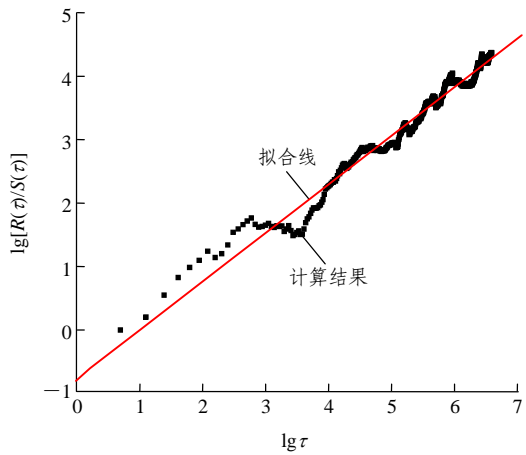
$$\lg[R(\tau)/S(\tau)] = -0.9840 + 0.7886 \lg \tau$$

$$(R = 0.9892, H = 0.7886)$$

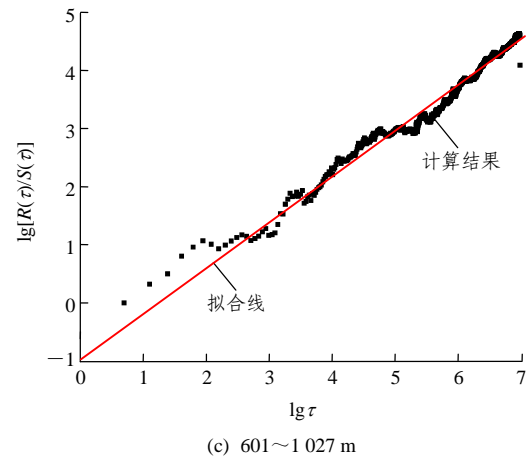
从计算结果来看，3 段的 Hurst 指数均大于 0.5000，表明整个井段均表现出持久性特性。对于 62~315 m 井段，地层可钻性序列的 Hurst 指数 $H = 0.9248$ ，表示此段地层的可钻性序列具有强持久性，也可以认为这一段地层的可钻性随着深度增加，可钻性级值基本是线性递增的；对于 316~600 m 井段，可钻性序列的 Hurst 指数 $H = 0.7653$ ，表示此段地层的可钻性序列具有持久性，但较 62~315 m 段的程度降低，可以认为该段地层的可钻性随着深度增加，可钻性级值总体是递增的，但中间存在较



(a) 62~315 m



(b) 316~600 m



(c) 601~1 027 m

图 5 Hurst 指数计算结果

Fig.5 Calculation results of Hurst exponent

大波动；601~1027 m 段规律与 316~600 m 段相近。对比图 3 中的地层可钻性曲线可以发现，Hurst 指数的变化能反映可钻性的总体变化趋势。

5 结 论

地层可钻性剖面曲线通常具有复杂特征，为建

立可靠的预测评价模型, 首先必须对可钻性时序的特征进行分析。本文在对中国大陆科学钻探预先导孔地层可钻性曲线数据分析的基础上, 提出了可钻性时序特征的 2 个主要表征: 时序几何形态特征和内在趋势变化特征, 分别用关联维数和 Hurst 指数表示。

关联维数反映了序列的动态变化复杂特性。对于较平稳的序列, 其关联维数较小; 对于变化剧烈, 表现出强非线性的序列, 其关联维数就较大。利用这一特性, 可以根据关联维数对区域地层的可钻性变异复杂性进行评价, 以减少人为因素的影响。利用重标极差分析方法, 可以计算序列的 Hurst 指数 H , 根据 H 可以分析序列的持久与反持久特性, 从而可以定量评价序列的内在趋势变化特征。

根据关联维数和 Hurst 指数, 结合人工神经网络, 可建立地层可钻性的预测模型, 从而实现地层可钻性序列的综合准确评测, 这是地层可钻性评测的新方法, 也是地层可钻性智能化评价的发展方向。

参考文献(References):

- [1] KAHRAMAN S, BALCI C, YAZICI S, et al. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 729 - 743.
- [2] 潘起峰, 高德利. 用声波法评价地层可钻性各向异性的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 162 - 167.(PAN Qifeng, GAO Deli. Experimental study on evaluation of formation drillability anisotropy by acoustic wave velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 162 - 167.(in Chinese))
- [3] 薛亚东. 地层可钻性及其各向异性的综合智能评测方法[博士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学, 2001.(XUE Yadong. Comprehensive evaluation of the formation drillability and its anisotropy with intelligent methods[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum, 2001.(in Chinese))
- [4] 李士斌, 闫铁, 李玮. 地层岩石可钻性的分形表示方法[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 124 - 127.(LI Shibin, YAN Tie, LI Wei. Fractal representation of rock drillability[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 124 - 127.(in Chinese))
- [5] 张辉, 高德利. 钻头下部未钻开地层的可钻性预测新方法[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 97 - 100.(ZHANG Hui, GAO Deli. A new method for predicting drillability of un-drilled formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 97 - 100.(in Chinese))
- [6] 薛亚东, 高德利. 基于人工神经网络的实钻地层可钻性预测[J]. *石油钻采工艺*, 2001, 23(1): 26 - 29.(XUE Yadong, GAO Deli. Formation drillability prediction method based on artificial neural network[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 2001, 23(1): 26 - 29.(in Chinese))
- [7] 张玉祥. 岩土工程时间序列预报问题初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(5): 552 - 558.(ZHANG Yuxiang. Primary research on forecasting problem of time sequence in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(5): 552 - 558.(in Chinese))
- [8] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature*[M]. New York: Freeman and Company, 1982.
- [9] 李后强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1993.(LI Houqiang, WANG Fuquan. Fractal theory and its application to molecule science[M]. Beijing: Science Press, 1993.(in Chinese))
- [10] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993.(XIN Houwen. Fractal theory and its application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1993.(in Chinese))
- [11] 胡守仁. 神经网络导论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.(HU Shouren. Introduction of neural network[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999.(in Chinese))
- [12] FEDER J. *Fractals*[M]. New York: Plenum Press, 1988.
- [13] 唐依民, 肖江. 矿井涌水量时间序列分析的域重新标度法[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(1): 66 - 69.(TANG Yimin, XIAO Jiang. Mine hydraulic discharge character research using time series rescaled range analysis method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(1): 66 - 69.(in Chinese))
- [14] LAI D. Estimating the Hurst effect and its applications to monitoring clinical trials[J]. *Comput. Statist. Data Anal.*, 2004, 45(4): 549 - 562.
- [15] DAVIES R B, HARTE D S. Tests for Hurst effect[J]. *Biometrika*, 1987, 74(1): 95 - 101.