

测井曲线分形校正

李庆谋^{1,2}, 成秋明^{1,2}

(1. 中国科学院地球物理研究所, 北京 100101; 2. 加拿大约克大学地球和大气科学系, 多伦多 M3J1P3)

摘要: 用测井曲线更准确地测量薄层、薄互层的实际地球物理属性, 对油层识别、解释, 尤其是对陆相油层地球物理测井处理解释一直有重要意义. 给出了测井曲线测度的一种定义, 根据分形理论, 测度与度量尺度存在一种指数关系, 利用这种测度与尺度的指数关系求出(重建)了测井曲线. 这种方法能反映测井曲线的局部变化结构, 一定程度上补偿了测井仪对地层滑动平均等测量误差造成的结果. 利用大样钻探(ODP) Leg 127, 797C 井的中、深感应电导率测井曲线(IDPH, IMPH)进行了试算. 比较了原始测井曲线和校正后的测井曲线以及它们的功率谱曲线, 校正后的测井曲线比原始测井曲线更能部分消除邻层的影响, 并且其频谱成分更为丰富. 所以, 分形校正方法提高了测井曲线分辨薄层的能力.

关键词: 分形; 薄层测井; 测井曲线校正.

中图分类号: P631.8⁺11 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)01-0063-04

作者简介: 李庆谋(1965—), 男, 副教授, 1994年毕业于中国地质大学(北京)能源地质系, 获博士学位, 现在加拿大约克大学作博士后研究. E-mail: qingmou@yorku.cn

0 引言

测井曲线是测量探头一个邻域的平均结果(如图1a). 所以, 测井曲线并未反映当前深度下的实际地球物理属性值, 而是受到邻层、井眼环境的干扰. 如何用当前深度及邻近点的测井值恢复当前点的实际值就成为地球物理测井的一个问题. 特别是中国油气田以陆相为主, 在勘探、开发中, 薄层、薄互层测井处理、解释技术一直是赋予中国测井界的关键问题之一. 对薄层分辨能力的提高主要是从仪器的设计、刻度着手; 但是, 对测井资料的处理分析也可以在一定程度上提高测井曲线的分辨效果^[1,2].

根据分形理论, 得知测度与尺度之间存在指数关系^[3~6], 这一特性称之为自相似性或尺度无关性. 合理地定义测井曲线的测度就成为发现利用这种指数规律的关键. 如图1b所示, 设有等间距分布的一个测井曲线序列, 图1c、图1d在是用一个不断增大的尺子($\Delta h, 3\Delta h, 5\Delta h, \dots, \Delta h$ 为采样间隔), 以当前点 $K(K \cdot \Delta h$ 深度处)为中心的一个测井曲线覆盖. 在各个覆盖下定义测度:

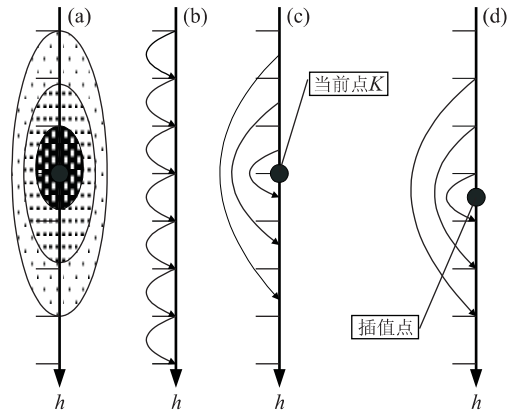


图1 测井曲线覆盖以及测井曲线测度定义

Fig. 1 Well logging curves and measurement definition

a. 测井值来自当前点邻域的平均值; b. 各测井点代表其周围采样点 Δh 覆盖内的值; c. (已知点)周围邻域的测量覆盖; d. (未知点)周围邻域的深度覆盖

$$\mu(K, \epsilon) = \sum_{i=K-\frac{M}{2}}^{K+\frac{M}{2}} x(i) \Delta h. \quad (1)$$

式中, $\mu(K, \epsilon)$ 为当前点 K 处以 $\epsilon = M \cdot \Delta h$ 为覆盖尺度的测度, $x(i)$ 为 $i \cdot \Delta h$ 深度处的测井曲线值, Δh 为测井曲线采样间隔. 根据分形理论^[1,2], 测度 $\mu(K, \epsilon)$ 与尺度 $\epsilon = M \cdot \Delta h$ 应存在下述指数关系:

$$\mu(K, \epsilon) = A\epsilon^{\alpha(K)}. \quad (2)$$

式中, A 为常数, $\epsilon = M \cdot \Delta h$ 为度量尺度, $\alpha(K)$ 是与 K 点位置有关的常数; 并且, $\alpha(K)$ 与测井曲线在 K 点的分形维数有关. $\alpha(K)$ 刻画了 K 点处地层叠加模式特征, 称为曲线在 K 点处的奇异性 (Singularity). (1) 式中如取 $M=1$, 则 $\mu(K, \Delta h) = x(i) \cdot \Delta h$, 代入(2)式得到:

$$x(K) \cdot \Delta h = A \cdot \Delta h^{\alpha(K)},$$

$$x(K) \cdot \Delta h / \mu(K, \epsilon) = (\Delta h / M\Delta h)^{\alpha(K)}. \quad (3)$$

(3)/(2)得:

$$x(K) = (\Delta h)^{-1} (1/M)^{\alpha(K)} \cdot \mu(K, \epsilon), \quad (4)$$

$$\text{或 } x(K) = \left(\frac{1}{M-1}\right)^{\alpha(K)} \sum_{i=K-\frac{M}{2}, i \neq K}^{K+\frac{M}{2}} x(i). \quad (5)$$

若将 $x(K)$ 项提出来, 由(5)式得到如下(6)式.

求当前测井曲线分形校正结果用(5)式, 求两个已知点之间的测井曲线分形结果 (如分形插值) 用(6)式.

$$x(K) = \left(\frac{1}{M}\right)^{\alpha(K)} \sum_{i=K-\frac{M}{2}}^{K+\frac{M}{2}} x(i). \quad (6)$$

1 测井曲线局部奇异性 $\alpha(K)$

从(2)式知道, 在双对数坐标系中 $\lg \mu(K, \epsilon) \sim \lg \epsilon$ 应该是一条直线 (理论结果). 但是, 测井曲线受到邻层、井眼环境的影响, 在当前深度点的一个邻域中, 其测度和尺度并不一定严格呈一直线. 由多对 $\lg \mu(K, \epsilon) \sim \lg \epsilon$ 点, 我们可以拟合一条直线, 这条直线的斜率在

最小方差意义下是 $\alpha(K)$ 的最佳逼近.

选用了大洋钻探 (ODP) Leg127, 797c 井的测井曲线试验该方法. 分别以其 IDPH 在 345 m, 360 m, 380 m, 420 m 深度为中心, M 分别取 3, 5, \dots , 71 (采样间隔为 0.1 m, 因此最大窗长 7.1 m) 在双对数坐标系中回归的直线如图 2 所示. 可以看出, 其回归结果相当好地满足直线规律 (其回归系数、回归方差可以从图 3 相应的深度曲线读得).

M 的选取取决于测井电极系的纵向影响范围以及影响大小. M 小则强调近点邻域的影响, M 大则包括了更大邻域的结构特征. 经过试算, 在合适的范围内 $\alpha(K)$ 对 M 值的大小并不敏感 (图 2), 如图 2 中少几个或多几个点对回归直线的斜率 $\alpha(K)$ 影响不大, 回归直线较为稳定, 回归系数很大, 如图 3 中回归系数一直大于 0.998.

结合式(2)及图 2 知道, $\alpha(K)$ 是测井曲线测度与尺度双对数坐标中直线的斜率. $\alpha(K)$ 代表了曲线在 K 点邻域的凹凸特性. 如果在当前点不断增大的邻域中, 测井曲线保持平稳, 则在图 2 中直线的斜率为 1, 测井曲线在当前点无须校正; 如果当前点不断增大的邻域测井曲线测比平稳增大过程增大速率较快, 则图 2 中回归直线的斜率 $\alpha(K) > 1$, 曲线是凸的, 它周围点的叠加模式是增的, 而它处于这个增的核心 (滑动窗口中心), 它的测量值受到周围高的邻域污染, 校正的作用是降低测量值; 同理, 对 $\alpha(K) < 1$, 则曲线是凹的, 校正的作用是提升当前点的测井值. 因此, $\alpha(K)$ 反映的是测井曲线在当前点邻域的局部变化性或地层的叠加模式. 用这种方法校正的测井曲线反映了当前点邻域的变化趋势特征.

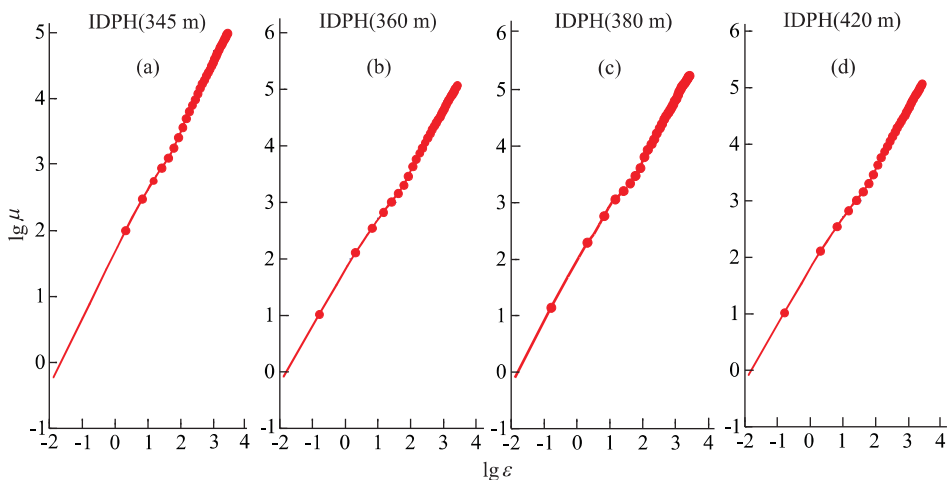


图 2 测井曲线测度 (μ) 与度量尺度 ($M\Delta h$) 在双对数坐标中呈一直线 (IDPH: 深感应电导率)

Fig. 2 Measures of well logging curve vs. scales showing a linear line in dual logarithm coordinate system

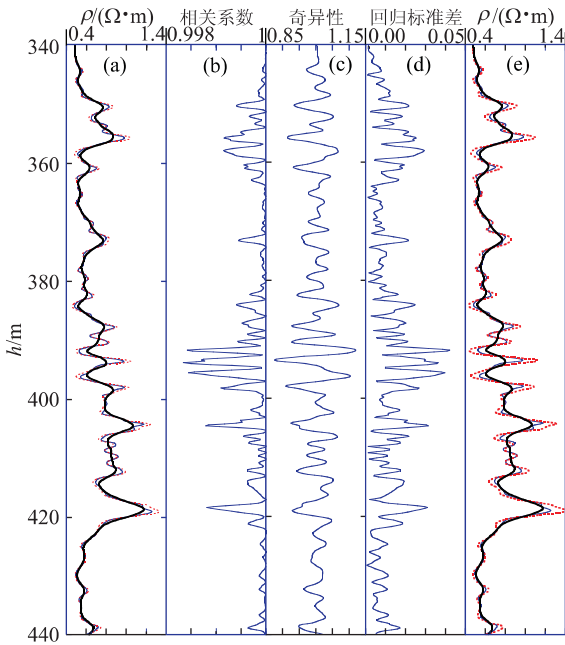


图 3 大洋钻探 (ODP) Leg 127, 797C 井感应深电导率 (IDPH) 和中感应电导率 (IMPH) 测井曲线分形校正与参数曲线

Fig. 3 Deep and middle induced conductivity (IDPH, IMPH) of ODP Leg 127, Hole 797C original and corrected curves

a, e. 细实线为原始测井曲线, 粗实线为滑动平均结果 (7.1 m 窗长), 虚线为分形校正后的测井曲线; b. 图 a 中分形校正图 d 中的回归系数; c. 图 a 中分形校正中的局部奇异性 $\alpha(K)$; d. 图 a 中分形校正的局部方差

2 IDPH、IMPH 曲线处理

大洋钻探 (ODP) Leg127, 797c 井 IDPH、IMPH 曲线的处理结果如图 3 所示。

图 3a 中细实线为 IDPH 曲线, 粗实线是以 71 点为窗长滑动平均原始曲线的结果, 细点划线为用分形方法校正的测井曲线。从其中可以知道, 滑动平均方法对测井曲线作用是削高、填低, 压制了高频信息, 而分形校正方法一般地是增高最高值点, 拉低最低值点, 起到补偿邻层影响的作用。但是, 应该注意到, 有时分形方法也会降低高值点, 拉高低值点, 这要视当前深度点邻域内测井曲线变化 (叠加) 模式而定。

图 3c 是计算的测井曲线局部奇异性 $\alpha(K)$, 从图中可以知道, $\alpha(K)$ 在 1 左右摆动。 $\alpha(K) > 1$ 时测井曲线分形校正作用是压低当前点的曲线值; $\alpha(K) < 1$ 时, 测井曲线分形校正作用是抬高原始测井曲线值; $\alpha(K) = 1$ 时, 当前点无奇异性, 测井曲线无须校正。

图 2b 线性回归求 $\alpha(K)$ 的相关系数, 从图中知道, 其值都大于 0.998, 大部分接近 1, 说明测井曲线相当满足本文定义测度下的分形条件, 图 2d 是线性回归求 $\alpha(K)$ 时的回归方差。

校正的 IMPH 曲线如图 3e 所示, 细实线是 IMPH 原始曲线, 粗实线是以 71 点为窗长的滑动平均结果, 点划线是分形校正结果。图 3e 表现了图 3a 相同的结果。

3 讨论

对图 3a、图 3e 中的原始曲线、分形校正曲线作功率谱分析, 结果如图 4a、b 所示。从图 4 中知道, 分形曲线校正方法加强了原始曲线功率谱中的峰值部分而保持了原始曲线功率谱中的波谷。这样, 测井曲线分形校正方法不仅丰富了原始曲线中的功率谱

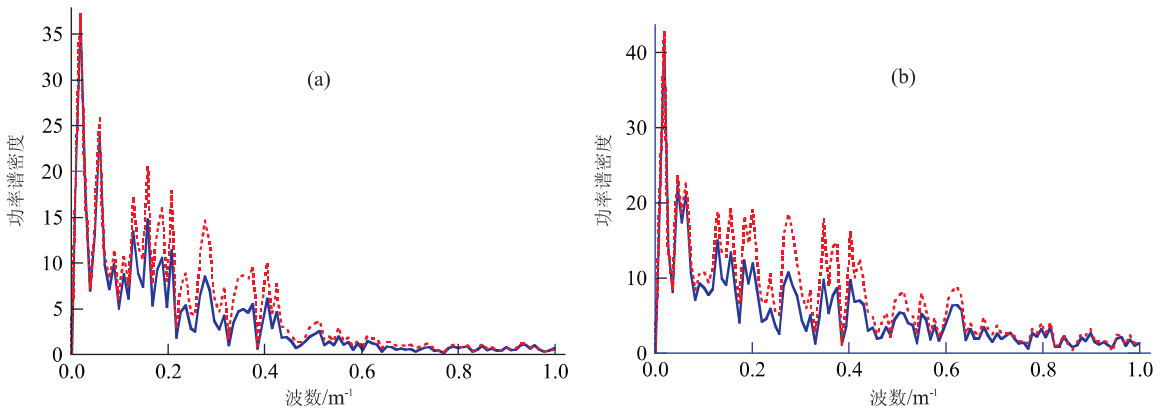


图 4 IDPH(a) 和 IMPH(b) 测井曲线校正前 (实线) 和校正后 (虚线) 的功率谱曲线

Fig. 4 Power spectra of IDPH (a) and IMPH (b) against corrected curves (dotted lines)

成分,而且保持了其功率谱结构。

分形校正方法还需要考虑仪器的特性,在式 5 中加上适当的常数,以及根据仪器的特征选择窗长 M 的大小,需要进一步的实验分析。

在非均匀点分布的情况下,可以求一个覆盖内的均值(如图 1)作为该覆盖的测度。本文的方法已经在 Windows(WIN32)下用 VC++ 实现。

参考文献:

- [1] 汪宏年,李舟波,杨善德,等. 提高自然伽马测井曲线分辨率的正则化方法[J]. 地球物理学报, 1997, 40(6): 847—855.
Wang H N, Li Z B, Yang S D, et al. Regularized algorithm for enhancement of vertical resolution of natural gamma-log [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(6): 847—855.
- [2] Qian Y X, Zhong X S. Thin bed information resolution of well-logs and its application [J]. Log Analyst, 1999,

40(1): 31—38.

- [3] Donald L T. Fractals and chaos in geology and geophysics [M]. Second Edition. London: Cambridge University Press, 1997. 398.
- [4] Pape H, Clause C, Iffland J. Variation of permeability with porosity in sandstone diagenesis interpreted with a fractal ore space mode [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157: 603—619.
- [5] Cheng Q M. Multifractal interpolation [A]. In: Lippard S J, Nass A, Sinding L, eds. 5th annual conference [LAMG'99] proceedings: international association of mathematical geology [C]. Norway: Trondheim, 1999. 245—250.
- [6] Shiao T W, Hu D J. The fractal characteristics of sub-surface wireline logs of Tertiary strata in offshore Taiwan — a preliminary study [J]. Petroleum Geology of Taiwan, 1992, 27: 225—236.

Fractal Correction of Well Logging Curves

Li Qingmou^{1,2}, Cheng Qiuming^{1,2}

(1. *Geophysical Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *Department of Earth & Atmospheric Science, York University, Toronto M3J1P3, Canada*)

Abstract: Accurate measurement of actual geophysical properties, with well logging curves, for thin layers and thin alternate layers is of great importance to the identification and interpretation of oil beds, and especially to the processing and interpretation of geophysical well logging data from the continental oil beds. In this paper, the authors present a definition of well logging measurement. The fractal theory shows an exponential relationship that is present between measure and scale. This exponential relationship can be used to obtain or reconstruct well logging curves, reflecting the local variation structure of the well logging curves and amending some errors in such surveying measurements as stratigraphic sliding average caused by the well logger. This method has been tested with the intermediate- and deep-induction electrical-conductivity well-logging curves obtained from Ocean Drilling Project (ODP), Leg 127, 979C hole. The comparison between the original and corrected well logging curves and their corresponding power spectral curves indicates that the corrected well logging curves are more effective than the original well logging curves in the resolution enhancement, because the corrected well logging curves eliminate part of the interferences from their neighboring strata and contain more frequency spectral components. Therefore, the fractal corrected method can be employed to increase the resolution of the well logging curves to detect thin stratigraphic layers.

Key words: fractal; well logging of thin layer; correction of well logging curve.