

# R/S 分析在储层垂向非均质性和裂缝评价中的应用

胡宗全

(石油大学 地球科学系, 北京 昌平 102200)

摘要: R/S 分析是一种描述及评价一维时间序列复杂性的分形方法, 文中通过理论分析及实际实验, 讨论了 R/S 分析对储层垂向非均质性和裂缝发育程度的描述能力, 并从不同的测井参数序列所反映的储层地质特征不同出发, 论证了运用声波时差与自然伽马两种参数序列的分维差值进行层段裂缝发育程度评价的可行性。该方法可以有效地排除岩性的影响而突出裂缝的特征, 较之单序列分析理论上更新颖, 实际评价效果更好。

关键词: R/S 分析; 储层垂向非均质性; 裂缝发育程度; 时间序列; 分形维数

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## 1 关于 R/S 分析

分形作为非线性科学的最新成果, 被认为可以准确地描述、评价和预测参数在空间分布的复杂性, 在经典的欧几里德几何空间中无法描述的复杂几何体, 因分形几何学及统计学的出现而使这一难题迎刃而解。在储层研究方面, 分形已广泛用来研究储层的孔隙结构<sup>[1-3]</sup>, 储层的非均质性<sup>[4,5]</sup>, 储层参数井间随机模拟<sup>[3,6]</sup>及裂缝预测<sup>[7]</sup>等方面。

R/S 分析是目前应用最广泛也最成熟的分形统计方法之一, 该方法是赫斯特多年研究尼罗河水逐年变化规律时提出的, 其中 R 称为极差, 是最大累积离差与最小累积离差之差, 代表时间序列的复杂程度; S 称为标准差, 即变差的平方根, 代表时间序列的平均趋势。二者之比 R/S 就代表无因次的时间序列相对波动强度, 这相当于流量在不同年份变化的剧烈程度。

对于一个一维的过程  $Z(t)$ , 则 R/S 分析过程如下:

$$R(n) = \min_{0 < u < n} \left\{ \sum_{i=1}^u Z(i) - \frac{u}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right\}$$

$$- \min_{0 < u < n} \left\{ \sum_{i=1}^u Z(i) - \frac{u}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right\};$$

$$S(n) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z^2(i) - \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $n$  为逐点分析层段测井采样点数;

$E$  为随采样时间变量变化的因变参数;

$u$  为由端点开始在  $0 \sim n$  之间依次增加的样点数;

$t$  为采样时间自变量;

$i, j$  为表示样点个数的变量;

$R(n)$  为过程序列全层段极差;

$S(n)$  为过程序列全层段标准差。

$R(n)/S(n)$  就是分析第  $n$  个样点所对应的 R/S 值, 有一个  $n$  值, 就有一个  $R(n)/S(n)$  值与之相对应, 将几个层自然伽马和声波时差的  $R(n)/S(n)$  与  $n$  作双对数散点图, 可以看出二者对数之间的线性相关系数很高, 一般都在 0.97 以上。这表明  $R(n)/S(n)$  与  $n$  呈明显的双对数线性关系, 即储层参数序列  $Z(t)$  具有自标度相似性的分形特征(图 1)。 $R(n)/S(n)$  曲线的斜率  $H$  称为 Hurst(赫斯特)指数, 由  $D = 2 - H$  计算得出的  $D$  是  $Z(t)$  的分形维数<sup>[5]</sup>, 代表  $Z(t)$  在一维  $t$  上变化的复杂程度。

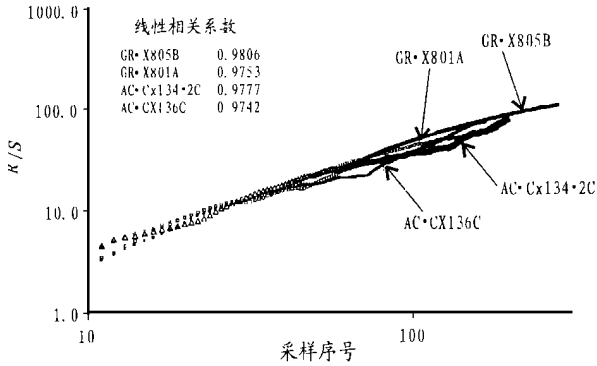


图 1 储层参数序列  $R(n)/S(n)$  与  $n$  的双对数线性关系

Fig. 1 The log-log linear relation between  $R(n)/S(n)$  and of  $n$  reservoir parameter series

## 2 $R/S$ 分析对储层垂向非均质性的表征

理论上说  $R/S$  能反映时间序列的变化程度, 对于井上的储层参数序列来讲, 实际上就是储层的垂向非均质性。为了论证  $R/S$  分析对储层非均质性的表征能力, 设计了下面一个实验。取一复杂的储层参数时间序列  $Z(t)$ , 然后对该曲线进行多次的一维滤波, 得到一系列的新时间序列(图 2)。运用  $R/S$  分析法, 分别求取各个时间序列的分形维数。结果发现, 随着滤波次数的增加, 曲线越来越光滑, 相应地分形维数随之呈单调递减变化趋势。由此可见分形维数是可以体现储层参数时间序列的复杂程度的, 即可以用来评价储层的垂向非均质性, 分形维数越高表明储层参数的垂向非均质越强。

## 3 $R/S$ 分析对裂缝的表征

### 3.1 裂缝的 $R/S$ 显示特征

研究发现, 在裂缝发育带, 自然伽马测井曲线的振荡频率和幅度虽有一定程度的增加, 但在  $R/S$  曲线上并未表现出来, 仍按原来的大致斜率上升, 说明自然伽马测井的变动规律与前一段仍大致相同; 可是在声波时差曲线上明显存在着周波跳跃现象,  $R/S$  曲线上也就出现了一个偏离原有斜率直线的一个下凹线段。同自然伽马  $R/S$  分析相比, 声波时差  $R/S$  曲线的分形维数要高, 即说明声波时差曲线所反映的储层非均质性比自然伽马曲线所反映

的要强。这并非储层岩石发生了变化, 而是由于两条曲线反映的岩石性质不同。自然伽马主要反映岩性特征, 泥质含量的变化是其主要影响因素, 所以, 自然伽马所反映的储层非均质性是由沉积-成岩微相在垂向上的旋回变化引起, 而声波时差除了可以探测到这种岩性上的旋回变化趋势之外, 在岩石局部发育的孔隙、裂缝也能导致声波时差的突然加大, 尤其是当孔隙和裂缝发育带中被气充满时, 更是要发生剧烈的跳波现象。这种由于物性、含气性的叠加在岩性变化之上表现出来的储层非均质性, 当然比旋回特征很明显的岩性变化要剧烈得多, 所以分形维数较高。一些研究者已经运用分形方法对裂缝在井上的这种强烈非线性特征作了描述<sup>[2,3]</sup>。

$R/S$  分析是从某一研究目的层段的第 3 个采样点开始计算的,  $R/S$  曲线的前几个点的斜率比整条曲线的后半段斜率高得多, 这主要是由于前几点在同一个相对均质的岩性旋回内部, 所以导致高 Hurst 指数而低分形的  $R/S$  响应特征, 采取统计样点向下截止的方法, 将第 10 个样点以前的样点剔除, 可以得到各层段另一组  $D$  值, 分别称为  $DA_{C10}$  和  $DGR_{10}$ , 相应地, 从第 3 点开始算起的  $D$  值称为  $DA_{C3}$  和  $DGR_3$ , 通过编程运算, 计算出了 57 个样本层的声波时差时间序列和自然伽马时间序列的各种分形维数值, 进一步统计出各统计参数之间的差异(表 1)。

大量样本层的 GR 和 AC 分形维数的统计结果

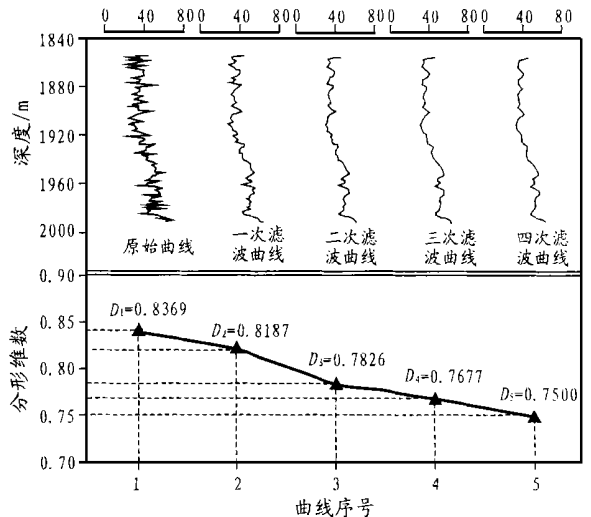


图 2 分形维数与储层参数时间序列复杂性的对应关系

Fig. 2 The corresponding relation between fractal dimension and complexity of 1-dimensional reservoir parameter series

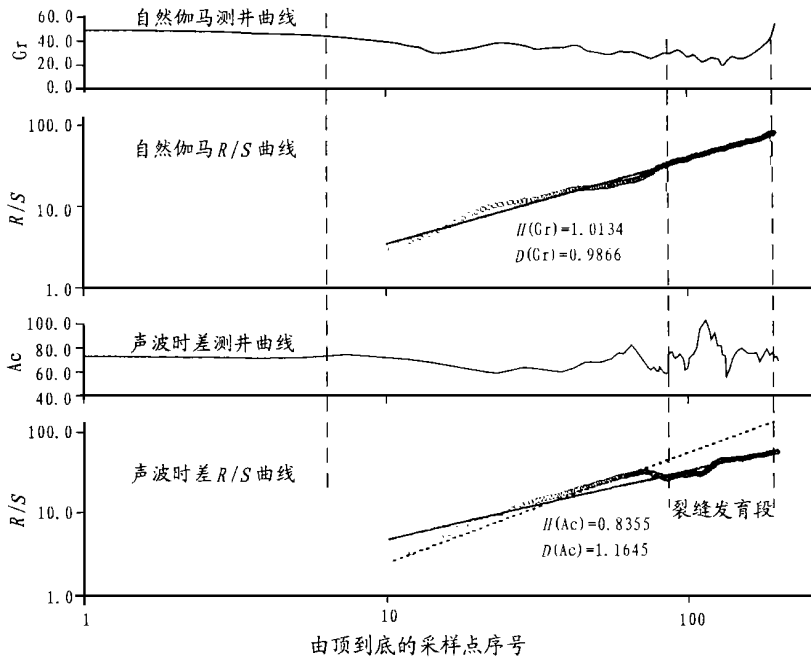


图 3 裂缝发育段的 R/S 分析曲线上的显示特征

Fig. 3 The displaying characteristics of fracture segment on R/S curves

表 1 GR 和 AC 曲线分形维数统计参数对比表

Table 1 Statistical fractal dimension parameters of GR and AC curves

参数名称	统计参数项目				
	统计层数	最大值	最小值	平均值	方差
DAC <sub>3</sub>	57	1.388 6	0.814 1	1.031 3	0.105 7
DGR <sub>3</sub>	57	1.174 1	0.731 9	0.954 5	0.099 3
DAC <sub>3</sub> - DGR <sub>3</sub>	57	0.329 4	- 0.188 2	0.076 8	0.124 9
DAC <sub>10</sub>	57	1.498 9	0.905 7	1.119 9	0.111 2
DGR <sub>10</sub>	57	1.345 3	0.854 6	1.050 9	0.112 7
DAC <sub>10</sub> - DGR <sub>10</sub>	57	0.359 9	- 0.191 3	0.069 0	0.124 4

表明:

(1) 声波时差的分维一般比自然伽马的分维高。无论统计样点截止个数为 3 还是 10, 声波时差分维的最大值、最小值和平均值都无一例外地高于自然伽马的分维, 这体现了两种测井资料体现地层性质的差异。

(2) 声波时差的分维也有可能同自然伽马的相近甚至比后者还低。在所有的 57 个统计样本层中, 声波时差分维比自然伽马分维数高的有 43 层, 占 77.5%, 声波时差分维较后者低的有 15 层, 占

24.5%(使用的是 DAC<sub>10</sub>和 DGR<sub>10</sub>)。如果前者与后者相近或前者更低, 表明这些层声波的变化只体现岩性旋回的变化, 变化趋势与自然伽马大致一致, 往往代表裂缝不发育。这 15 个样本层的分维差值平均值为 0.069 3, 最小为 - 0.157 5, 最大为 - 0.013 6, 说明即使少数层段的声波时差分维比自然伽马的低, 其值也是十分相近的。

### 3.2 层段裂缝发育程度评价

要运用分形维数进行裂缝发育程度评价, 必须对分维数与产能及裂缝发育程度作对应关系分析,

表2 各不同产能级别产层的分形维数参数统计表

Table 2 Statistical fractal dimension parameters of producing formations with different levels of production

层类	层数	统计项	$DAC_3$	$DGR_3$	$DAC_3-DGR_3$	$DAC_{10}$	$DGR_{10}$	$DAC_{10}-DGR_{10}$
所有井层	57	最大	1.388 6	1.174 0	0.329 4	1.498 9	1.345 3	0.359 9
		最小	0.814 0	0.731 9	-0.188 2	0.905 7	0.854 6	-0.291 3
		平均	1.031 3	0.954 5	0.076 8	1.119 9	1.050 9	0.069 0
高产井层	5	最大	1.138 8	1.100 6	0.170 2	1.297 1	1.201 1	0.239 2
		最小	0.950 7	0.898 7	0.023 8	1.031 9	0.854 6	0.024 6
		平均	1.040 5	0.991 3	0.049 1	1.137 9	1.053 8	0.084 1
中产井层	11	最大	1.146 7	1.146 5	0.313 4	1.214 9	1.345 3	0.177 9
		最小	0.859 8	0.787 4	-0.140 1	0.989 7	0.884 9	-0.291 3
		平均	1.037 0	0.956 0	0.081 0	1.122 4	0.056 4	0.074 5
低产井层	41	最大	1.388 6	1.174 0	0.329 4	1.498 9	1.290 4	0.359 9
		最小	0.814 0	0.731 9	-0.188 2	0.905 7	0.882 5	-0.157 5
		平均	1.030 6	0.951 5	0.079 1	1.116 5	1.047 9	0.068 5

看一下二者之间是否有确切的相关关系存在。为此,统计了不同产能级别的层段的测井分维参数统计量(表2)。

在不同的产能级别统计量中,  $DAC_3$  与  $DAC_{10}$  的变化大致趋势是分形维数随产能的降低而降低;而  $DGR_3$  和  $DGR_{10}$  就不具这一规律,这是由于 GR 曲线主要受沉积旋回的控制,沉积相对产能的控制作用不如裂缝的控制作用明显。 $DGR_{10}$ 和  $DGR_3$  相比,各产能级别的统计结果稳定性更好,这说明  $DGR_{10}$ 的统计结果更为合理,因为自然伽马主要反映沉积旋回的变化,而这种旋回变化在横向上的可对比性是较好的,因而应该具有一定程度上的井间稳定性。 $DAC_{10}-DGR_{10}$ 与产能的对应关系较好,随产能的降低,分维差值的平均值是单调递减的,且在高产层中,没有分维差值为负值的情况,该参数可以作为评价层段裂缝发育程度的一个重要的定量参数。

$DAC_{10}-DGR_{10}$ 与产能之间相对较好的对应关系,其地质解释是这样的:声波时差的分形维数主要受控于岩性和裂缝发育程度两种地质因素,岩性多变和裂缝发育均会导致分形维数的升高,岩性多变对储集油气不利而裂缝发育有利,这造成仅运用声波时差分形维数评价裂缝发育程度的多解性;自然伽马则主要受控于岩性因素,用声波时差与自然伽马的分维差值,可以突出除岩性变化之外的附加分维高值异常,而这种异常恰恰又是裂缝的叠加造成的。

## 4 结论

本文探讨了分形中的  $R/S$  分析在描述储层垂

向非均质性中的诸多理论及实现问题,论证了  $R/S$  分析对描述储层垂向非均质性和裂缝发育程度这类非线性参数的重要作用,取得了以下结论

(1) 测井资料所反映的储层参数在一维井柱上的分布具有明显的分形自相似特征,表现为  $R/S$  分析曲线的明显线性特征;

(2)  $R/S$  分析对储层垂向非质性的表征能力是很强的,随着储层参数的垂向分布复杂性的逐步降低,分形维数递减;

(3) 当裂缝发育段在测井时间序列上具有显性显示特征时,  $R/S$  分析曲线及其得出的分形维数可以定量指示裂缝的发育程度;

(4) 声波时差除受控于储集岩物性、裂缝发育程度、含气性等因素之外,还受到岩性旋回的影响,但二者的影响对储集性能的改善作用是相反的,而自然伽马主要受控于岩性因素,为了排除岩性影响而突出裂缝的作用,运用声波时差与自然伽马的分形维数差值,可以定量评价裂缝的发育程度。

本文运用两条测井时间序列的分维数对比进行裂缝发育程度评价,为具有强烈非线性特征的裂缝储渗体的描述提出了一种全新的思路,本次研究的目的储层为一种致密裂缝性碎屑岩储层,裂缝的发育程度很低,评价得出的分维数差值较小且分异性相对不高,估计对岩性相对单一,裂缝发育程度较高的储层,该方法的应用效果会更好一些。

参考文献:

- [1] 王域辉,廖淑华.分形与石油[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [2] 胡宗全,董孝华,王允诚.川中大安寨段灰岩裂缝分形特征及孔隙结构模型[J].成都理工学院学报.1999,26(1):31-33.
- [3] 沈平平,刘明新,贾芬淑.分形几何技术在油藏开发中的应用

- [A]. 中国石油天然气集团公司信息研究所. 第六次国际石油工程会议论文集[A]. 1999. 83- 93.
- [4] Perez G, Chopra A K. Evaluation of fractal models to describe reservoir heterogeneity and performance[J]. Spe Formation Evaluation, 1997: 65- 71.
- [5] Pang J, North C P Fractals and their applicallity in geological wireline log analysis[J]. Journal of Petroleum Geology, 1996, 19 (3): 339- 350.
- [6] 毛宁波, 桂志先, 朱广生. 井间储层参数分形预测及其应用[J]. 江汉石油学院学报. 1995, 17(2): 43- 47.
- [7] 吴大奎, 甘其刚. 应用分形插值预测裂缝[J]. 石油地球物理勘探. 1995, 30(6): 823- 827.

## APPLICATION OF $R/S$ ANALYSIS IN THE EVALUATION OF VERTICAL RESERVOIR HETEROGENEITY AND FRACTURE DEVELOPMENT

HU Zong-quan

(Dept. of Geoscience, Petroleum University, Changping, Beijing 102200, China)

**Abstract:**  $R/S$  analysis is a kind of fractal method to describe and evaluate the complexity of 1-dimension parameter series, based on research of theoretical analysis and practical experiment, this paper discussed about the capability of  $R/S$  analysis in describing vertical reservoir heterogeneity and fracture development, and through discussing the difference of reservoir geologic characteristics embodied by different log curves, this paper demonstrated the feasibility of using the fractal dimension difference between AC and GR log curves to evaluate fracture development quantitatively. This method can effectively eliminate the lithological influence but highlight the characteristics of fracture, it has a novel pattern theoretically and shows much better evaluating effects than that of single series analysis.

**Key words:**  $R/S$  analysis; vertical reservoir heterogeneity; fracture development; 1-dimension series; fractal dimension

### 继承朱夏学术思想 开拓油气盆地研究

——“朱夏油气勘探地质理论应用学术研讨会”在无锡所召开

本刊讯 中国地质学会石油地质专业委员会、海洋地质专业委员会、中国石油学会石油地质专业委员会和中国石化新星石油公司、中国石化石油勘探开发研究院 11 月 25 日至 28 日在无锡实验地质研究所共同组织举行“朱夏油气勘探地质理论应用学术研讨会”，以追思他光辉的人生历程，缅怀他对中国地质学和石油天然气勘探事业的卓越贡献，学习他不断创新和科学严谨的治学精神以及高尚的情操与崇高的人格风范，发扬他具有中国特色的石油地质勘探理论和学术思想，实现他生前的理想和未竟的事业。

朱夏先生是我国油气盆地研究的奠基人，他建立了盆地分析理论体系，为我国石油地质学的发展和油气勘查部署的科学决策作出了卓越的贡献。朱夏学术思想至今还主导着我国的盆地研究，是珍贵的地学财富。继承和发展朱夏的学术思想，是加快我国现阶段油气勘查的需要。本次会议的举行，将对我国石油天然气工业的发展起到积极的推动作用。

会议期间，中国石油学会副理事长、新星公司副总经理周佰修，中国地质学会副理事长、新星公司总地质师周玉琦，中石化科技开发部许卫平处长，朱夏先生的夫人严重敏教授分别讲了话。中国地质学会副秘书长、中石化石油勘探开发研究院领导戴进业致欢迎词，并作了会议总结。原地矿部老领导塞风、许宝文，中科院院士刘光鼎、田在艺、任纪舜、张国伟等与来自中石化、中石油、中海总、中科院、国土资源部等系统的领导、专家及北京大学、南京大学、同济大学、中国地质大学等院校的教授、学者共 80 余人参加了会议。会议围绕油气盆地地球动力学及其演化、盆地结构与油气成藏响应、盆地模拟及应用以及盆地油气勘探中的物、化探方法等专题，展开了深入研讨和广泛交流。

(特约记者 江其勤)