

测井时间序列的混沌现象研究

刘咏梅 宋克欧

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要 测井时间序列的计算机沉积微相识别, 在特征提取上有一定的难度。证明测井时间序列是混沌的, 是提取其混沌特征的前提条件。混沌时间序列的判定目前已有不少方法, 本文结合测井曲线的特点, 利用相空间重构技术和G-P算法, 用关联维数方法证明了测井时间序列确实存在混沌。实验数据来自某油田的实际测井数据。实验结果表明, 油层组的关联维数与油层的构造特点有关, 并发现了该区域油井的油层组关联维数一般大于全井这一有趣的现象。

关键词 测井时间序列 混沌 关联维数 相空间重构 G-P算法

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0501-05

Researches on Chaotic Phenomena in Well-log Time Series

LIU Yong-mei, SONG Ke-ou

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract Oil-bearing layers and their sedimentary microfacies are generally analyzed by collecting oil well logs in the oilfield development. The well-log time series is the correct reflection of geological characteristics of the oil-bearing layers with quite a high probability. Unfortunately, feature extraction is of certain difficulty to the computer sedimentary microfacies recognition with well-log time series. Oil-bearing layers are the resultants of sedimentary layer sequence. The formation of oil-bearing layers is very complicated and variable. Extracting the chaotic features is promising. But proving that well-log time series are chaotic is prerequisite to extract their chaotic features. There are several methods developed for the chaos identification at present. In this paper, the well-log time series is proved to be chaotic indeed by phase space reconstruction technology and G-P algorithm, which is a practical algorithm for computing the correlation dimension of a time series. The experiment results indicate that the correlation dimension of an oil layer group is related to its structure. Another interesting phenomenon is that the correlation dimension of an oil layer group is generally larger than that of the whole well.

Keywords well-log time series, chaos, correlation dimension, phase space reconstruction, G-P algorithm

1 引言

应用岩芯、录井资料进行油层沉积特性分析, 不仅时效低, 而且由于取芯井的数量极为有限, 以及录井资料的质量等原因, 常常影响油层分析的质量。随着测井技术的发展, 利用测井法得到测井响应信号, 在计算机上进行测井解释已被越来越多地采用^[1]。

一般说来, 同一沉积环境中某类沉积相的地层, 具有特性相似的一组测井参数值, 而该组测井参数对应同一类岩性地层的概率是极高的。因此, 可以采

用电类或非电类测井方法得到测井数据, 将整个钻井剖面的地层划分成若干个具有地质意义的测井相^[2]。自动测井相识别是正确认识油层的重要途径。石油工业的实际开发中, 每钻一口井的费用都在百万元以上, 测井相识别精度每提高一个百分点都会带来巨大的经济效益。它对保证油田稳产、高产, 减少不必要的经济损失, 具有很重要的意义。

近年来, 国内外在计算机自动测井相识别方面取得了一定的成果, 但在特征提取上还不是尽如人意。特别是随着我国高产油田的二次(或更高次)加密开采, 为了对应多种沉积微相, 测井相也逐步细

分^[3]。有时微相间差异极小,甚至从测井曲线形态上很难区分,有效的特征参数变得难以寻找,而像均值、方差、过零率、功率谱等这样的线性特征又不能满足分类的要求。提取测井时间序列的非线性(混沌)特征是非常有意义的。

针对某油田的实际测井数据,采用了关联维数(correlation dimension)法作为测井时间序列存在混沌的判据,并提取了油层组和全井数据的关联维来研究测井时间序列的混沌现象,为沉积相的特征提取提供了新的思路。

2 混沌时间序列的判定方法

在提取时间序列的混沌特征之前,首先要考虑被观测的时间序列是否来自以确定性混沌为特征的动力系统,即该时间序列是否存在混沌。如果没有经过检验就事先假定实验数据是混沌的,直接用 Takens 的相空间重构理论,进行关联维数、Lyapunov 指数等特征量的计算,那么得出的结果是不可信的^[4]。目前,混沌时间序列的判定一般有以下几种方法^[5]:

(1)直接观测法 根据相空间中轨迹的特点直接观测,看是否存在奇怪吸引子。

(2)分频采样法 仅限于观察相空间中隔一定时间间隔的代表点,看它们是否为分布在一定区域内具有层次性的密集点。

(3)Poincare 截面法 观察相空间中适当截面与轨线交点的情况,观察截面上是否有一些成片的具有分形结构的密集点。

(4)主分量分析法 提取主分量,绘制并观察主分量谱图,混沌时间序列的主分量谱是一条过定点且斜率为负的直线。

(5)Lyapunov 指数法 利用时间序列的 Lyapunov 指数谱的定量信息作判据,常用最大 Lyapunov 指数 $\lambda_1 > 0$ 作为混沌的判据^[6]。

(6)神经网络法 选取适当的特征量,用神经网络的输出来区分混沌和噪声。

(7)关联维数法 考察关联维数随嵌入维数增加的关联积分图形。混沌时间序列的关联积分是呈指数衰减的,其关联维数作为关联积分的幂指数,随嵌入维数的增加逐渐趋于一个定值,当达到某个特定的嵌入维数后,基本不再增大^[7]。

(8)功率谱法 观察时间序列的功率谱情况,混

沌时间序列的功率谱无明显的峰值或峰连成一片,出现噪声背景和宽峰。

(9)替代数据法 假设时间序列是线性的(零假设),构造替代数据,比较它与原数据适当特征量的差异。如果两者的特征量有较大的差别,则零假设不成立,说明原数据服从确定性的非线性规律^[8]。

在动力系统的数学模型已知,的情况下,可以采用直接观测法、分频采样法和 Poincare 截面法这样确定性的方法。对于像天气、股票、心电图、石油地质等复杂的实际观测序列,则像关联维、Lyapunov 指数和替代数据法等定量方法比较适用。

3 测井时间序列混沌产生的机理及其相空间重构

3.1 混沌产生机理

众所周知,石油是一种流体资源,它存在于岩石的孔隙中。孔隙连通的岩层才能够储集石油,这样的岩层通常叫做储油岩。储油岩形成过程中的不稳定因素较多,时间尺度跨越极大,因此,储油岩所在的岩层圈很可能是一个以确定性混沌为特征的非线性耗散系统^[9]。

3.2 相空间重构

采用 Takens 的嵌入空间理论对测井时间序列进行相空间重构。

定义 1 系统中独立变量构成的空间称为相空间。

设 $\{x(t)\}$ 为采样所得的测井时间序列,则 $\{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}$ 就构成了 m 维相空间,其中 m 称嵌入维数, τ 称延迟时间。根据相空间的定义,要求 $x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)$ 之间尽可能独立。延迟时间 τ 的选取既不能太大,也不能太小,因太大会使数据失去应有的联系,太小又不能保证独立。采用将自相关函数首次达到零值时的时间作为 τ 值的方法^[10],对于计算测井时间序列的关联维意义不大^[11]。

4 关联维数

关联维数是一种描述吸引子自相似结构的不变量。1983年,Grassberger 和 Procaccia 提出了从时间序列出发计算关联维数的 G-P 算法^[7]。虽然 G-P 算法有尺度依赖等弱点,但由于它简便、易于实现,

已被人们广泛接受。

定义 2 设原单变量时间序列 $\{x_i | i=1, \dots, n\}$ 以延迟时间 τ 作 m 维嵌入, 得到新的 m 维向量序列 $\{S_i | i=1, \dots, N, N=n-(m-1)\tau\}$, $S_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau})$, 构成了 m 维相空间中的 N 个点。为了计算吸引子的维数, 引入一距离测度 r , 对每一个参考点 S_i 计算它与其他所有点之间的距离, 并统计距离小于 r 的一切点对的数目在全体点对数 (N^2) 中的比例。

$$C_m(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Theta(r - \|S_i - S_j\|) \quad (1)$$

称作关联积分, 其中 $\Theta(x)$ 为 Heaviside 函数, 即

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases}$$

关联维数定义为

$$d_m = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_m(r)}{\ln r} \quad (2)$$

当 r 较小且处于直线段上时, 关联维数 d_m 与关联积分 $C_m(r)$ 满足对数线性关系, 即 $d_m = \ln C_m(r) / \ln r$ 。用最小二乘法拟合该直线段 $y=kx+b$, 此直线的斜率 k 即为 d_m 的估算值。

去掉距离为零的点对以及重复计入的点对, 式(1)又可写成

$$C_m(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \Theta(r - \|S_i - S_j\|) \quad (3)$$

由于关联维数是关联积分的幂指数, 它表达了相空间中点对 (S_i, S_j) 的总体相关程度, 是描述时间序列混沌程度的重要不变量。需要注意的是, 关联积分在计算时仍是依赖于尺度 r 的, 而且用时间序列计算 d_m 需要足够量的点数 N 。

混沌时间序列的关联积分是呈指数衰减的, 而噪声序列的关联积分不是指数衰减的。混沌时间序列的关联维数作为关联积分的幂指数, 随嵌入维数的增加逐渐趋于一个定值, 当达到某个特定的嵌入维数后, 基本不再增大。因此, 可以通过考察关联积分的图形来区分混沌和噪声序列。

5 测井时间序列的关联维数计算

由于已经用替代数据法证明了全井测井时间序列中存在混沌, 故这里重点讨论油层组的混沌特性以及与全井分数维之间的差异。实验数据来源于某

油田的真实测井数据。该油田某标准井 x 从地下 850m 至 1 250m 含有如表 1 所示的 7 个油层组。

表 1 x 井 7 个油层组的深度

单位: m

油层组	start	end
1	922.8	936.8
2	947.6	1 001.8
3	1 006.3	1 052.6
4	1 053.2	1 075.4
5	1 076.2	1 110.2
6	1 111.2	1 164.5
7	1 165.6	1 204.2
全井	922.8	1 204.2

对于该区域的油井, 最适合沉积相测井解释的曲线是电类测井法中的自然电位 (SP) 曲线, 首先取采样间隔 $\Delta t=0.025\text{m}$, 延迟时间 $\tau=\Delta t$ 进行三维相空间重构。图 1 为 7 个油层组和全井数据的三维重构相图, 通过初步的直接观测, 可以明显地感到混沌吸引子的存在。

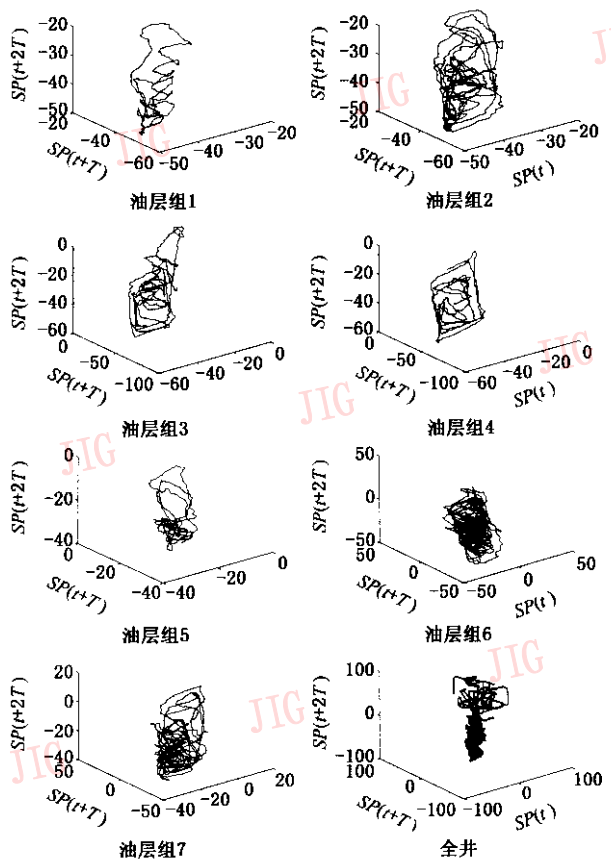


图 1 8 组数据的三维重构相图

按 G-P 算法分别计算 7 个油层组和全井数据的关联维数。取采样间隔 $\Delta t=0.25\text{m}$, 延迟时间 $\tau=\Delta t$, 作 $m=3, 5, 7, 10, 12$ 时的 $\ln C_m(r) - \ln r$ 曲线如

图2所示。将双ln曲线靠近零值的直线段用最小二乘(least square)法拟合直线,该直线的斜率即为 d_m 。8组数据均在 $m=12$ 左右 d_m 开始收敛而趋于定值,这说明油层组和全井的测井时间序列都存在混沌现象。

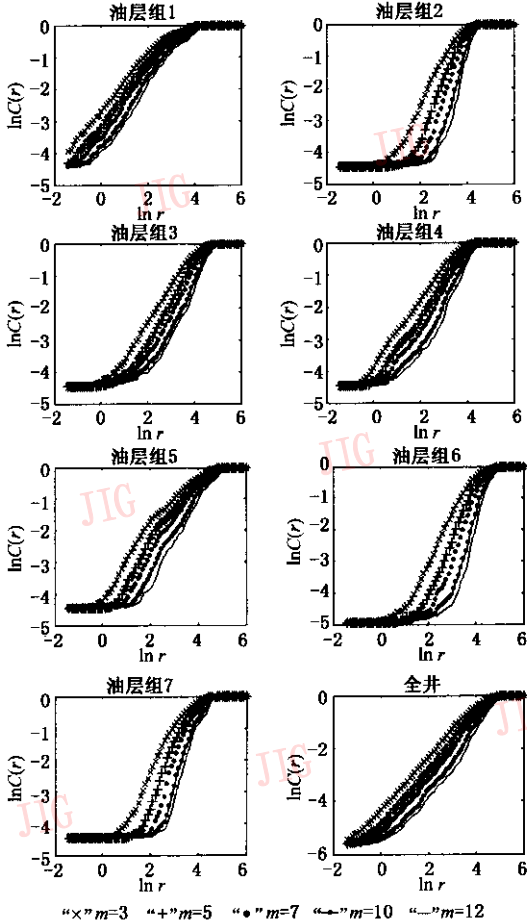


图2 8组数据的曲线图

该实验的结果列于表2和表3中。其中,油层组1和4的样本点数严重不足,故将第1组数据向上补了一小段侧偏值不大的泥岩数据,补齐到100个点,第4组数据采用油层组3的底和油层组5的顶为界,补齐到94个点。

表2 各油层组和全井的关联维数

油层组	关联维数	点数
1	1.1861	100
2	2.6236	216
3	1.5061	185
4	1.1833	94
5	1.5548	136
6	2.6135	213
7	2.4369	154
全井	1.1764	1125

表3 各油层组的关联维数和构造特点统计结果

组层号	①	②	③	④	⑤	关联维数
1	4	5	0	5	1.25	1.1861
2	8	7	2	9	1.125	2.6236
3	7	4	3	7	1	1.5061
4	4	0	2	2	0.5	1.1833
5	5	5	2	7	1.4	1.5548
6	15	18	0	18	1.2	2.6135
7	13	10	0	10	0.769	2.4369

注:①小层数;②细分层数;③夹层数;④夹层和细分层的总数;⑤夹层和细分层总数与小层数之比

由表2可知,各油层组的关联维数存在差异,全井数据和作为其一部分的油层组之间也不相同。根据表3的统计结果发现,油层组间关联维数存在差异是由于不同的地质构造和沉积特性造成的。

油层组由油层的基本单位小层组成,又有相当一部分小层分为若干个细分层或存在若干个夹层,夹层厚度也不计入有效油层厚度。油层组的细分层和夹层所占比例越大,关联维数就可能越高。导致有的油层组关联维数大于全井的原因,基本上就是相同范围内小层个数过多,特厚油层过少或基本没有,油层组6和油层组7就是比较典型的例子。

由表2还可以发现一个有趣的现象,就是所有的油层组其关联维数均大于全井的关联维数。这极可能是因为油层组之间侧偏值不大的泥岩段数据对全井关联维数的求取造成了一定影响,使估计值偏小。油层组1的关联维数与全井值比较接近也很可能是因为补了一小段泥岩数据,而油层组4则是由于大比例的厚油层造成的。所以,根据油层组的关联维数,还可以初步预测主力油层组的位置。通过本实验可以获得的结论是,油层组4为该井的主力油层组,其次为油层组3和油层组5。

6 结论

通过提取测井时间序列的关联维数特征,证明了测井曲线的确是一种实测的混沌时间序列。通过实验结果数据还发现:油层组的关联维数一般大于全井的关联维数;油层组关联维数的大小与油层构成有关,关联维数小的油层组一般含有较厚的小层,且细分层和夹层所占比例较小。

证明测井时间序列存在混沌,对计算机测井识别的混沌特征提取十分有意义。对测井时间序列适于提取的其他混沌特征将有待继续研究。

参考文献

- 1 雍世和编著. 测井资料数字处理与综合解释[M]. 北京:石油工业出版社, 1982:459~467.
- 2 [法] O. 塞拉著. 测井解释基础与数据采集[M]. 谭廷栋等译. 北京:石油工业出版社, 1992:100~115.
- 3 刘咏梅. 油层沉积相模式识别与绘图系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 1999.
- 4 Kantz H, Schreiber T. Nonlinear time series analysis [M]. Cambridge University press, Cambridge, UK, 1997.
- 5 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.
- 6 Wolf A, Swift J B, Swinney H L, *et al.* Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D, 1985, **16**(9):285~317.
- 7 Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physica D, 1983, (9):189~208.
- 8 Theiler J, Eubank S, Longtin A, *et al* Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data[J]. Physica D, 1992, (58):77~94.

- 9 [美] 格里博格 C, 约克 J A 编. 混沌对科学和社会的冲击[M]. 杨立等译. 长沙:湖南科学技术出版社, 2001:241~253.
- 10 章新华, 张晓明, 林良骥. 船舶辐射噪声的混沌现象研究[J]. 声学学报, 1998, **23**(2):134~140.
- 11 石雨田, 潘宝芝. 分维的应用—定量描述裂缝发育程度[J]. 物探与化探, 2000, **24**(6):426~430.



刘咏梅 1973年生,现为哈尔滨工程大学计算机应用技术专业博士研究生。主要研究方向为模式识别、图像处理、时序分析和石油地质相识别。



宋克欧 1940年生,哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院教授。主要研究方向为图像处理、模式识别、计算机视觉、水声信号特征提取及石油测井曲线特征提取和识别。