

# 分形理论在地震道油气检测中的应用

Application of Fractal Theory in the Petroleum  
Gas Testing of Seismographical Channel

P618.130.8

段虞荣

郑继明\*\*

Duan Yurong

Zheng Jiming

(重庆大学系统工程及应用数学系, 重庆, 630044; 第一作者 66 岁, 男, 教授)

**摘要** 认为地震道是混沌的时间序列, 混沌运动的轨迹在相空间中的某个区域内经无穷次的折迭, 扭曲和拉伸, 构成一个有无穷层次嵌套的自相似结构——奇异吸引子。对实际的地震道信号所构成的联井反射点剖面数据进行处理, 运用重建相空间法(即 Grassberger-Procaccia 算法), 计算出各道的关联维数, 并与实际的钻井资料进行比较。对关联维数与钻井结果的关系进行了解释。用实际参照井检验, 结果十分吻合。

**关键词** 分形; 油气检测; 地震道; 混沌; 奇异吸引子; 关联维数; 重建相空间法

中国图书资料分类法分类号 O174.12; P315.2; TE19

石油, 天然气, 勘探

**ABSTRACT** The seismographical channel is a chaotic time series. The trajectory of the motion of chaos in some region of the phase space via fold, torsion and stretch infinite times, constitutes a self similarity structure with infinite hierarchical imbeddings. We process the date of cross-section of reflection point of the joint wells which are composed by the signals of the practical seismographical channel, using the method of reconstructing phase space (i. e. the Grassberger-Procaccia algorithm) to compute the correlation dimension of each channel, and compared with the data of the practical drilling wells, and we explain the relationship between the correlation dimensions and the results of the drilling wells. They are agreeable quite well.

**KEYWORDS** fractal; petroleum-gas testing; seismographical channel; chaos; strange attractor; correlation dimension; method of reconstructing phase space

## 0 引 言

地球表面或地下任一固定点上接收器(单个或组合)接收到的一次激发所产生的震动(质点位移、位移速度或位移加速度), 通过特定仪器记录下来的连续时间过程为一个地震道。因此, 地震道是一个一维的地震信号道, 它在空间上记载了地震波从激发点出发, 经过地震滤波器返回到接收点(多半在地表或地表附近)的过程, 因此载有大量地壳地质结构的信

• 收文日期 1996-05-07

\*\* 现在重庆邮电学院工作

息,在时间上记载了从激发瞬间开始到震动结束地震波变化的过程。在石油、天然气勘探中,地震道作为对沉积地层的一种直接物理测量,自然地蕴含了沉积地层的分形信息,从而为分形理论提供了应用前提<sup>[2]</sup>。由于碳酸盐岩具有非均质、裂缝性的特点,对碳酸盐岩进行油气检验比其它的储层更为困难。笔者根据许多地质体在很宽的标度范围内参差不齐,当以不同放大率或缩小率对它们进行观察时,其边界似乎是相同的,地质体的这种基本和普遍的标度不变性可以在分形几何的框架下研究。故可用分形的混沌动力学理论对地球物理勘探进行科学合理的解释<sup>[3~5]</sup>。由于地壳结构的复杂性,导致地震信号不规则,笔者认为地震道是混沌的时间序列,混沌运动的轨迹在相空间中的某个区域内经无穷次的折迭,构成一个有无穷层次嵌套的自相似结构——奇异吸引子。奇异吸引子是分形。笔者对实际的地震道信号所构成的联井反射点剖面数据进行处理。运用重建相空间法(即 Grassberger-Proccacia 算法<sup>[6]</sup>,简称 G-P 算法),计算出各道的关联维数,并与实际的钻井资料进行比较。对关联维数与钻井结果的关系进行了解释。用实际参照井检验,表明本文所提出的这种预测地震道油气的方法十分有效。

## 1 分维的定义和计算

分形理论用分维来表征广泛存在于自然界的一大类无序、复杂、奇异的客体。由于所描述的具体对象不同,分维计算的具体形式也有多种<sup>[7,8]</sup>。下面笔者先介绍 Hausdorff 维数,它对任意集都是适合的,且由于它以测度论为基础,因此在数学上就较易处理。然后再介绍处理地震道油气检测的关联维数。

### Hausdorff 维数

定义 1 设在  $R^n$  上,  $\forall X \subset R^n, \{U_i\}$  是  $X$  的一个直径不超过  $\delta$  的复盖。对  $d \geq 0$ , 记

$$\mu^d(X) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^d \mid X \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i, 0 < |U_i| \leq \delta \right\}$$

称极限  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \mu^d(X)$  为集  $X$  的 Hausdorff 维数测度,记为  $\mu^{(d)}(X)$ , 即

$$\mu^{(d)}(X) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \mu^d(X) \quad (1)$$

可以证明,  $\mu^{(d)}(X)$  为关于参数  $d$  的单调递减函数。

定义 2 称 Hausdorff 测度  $\mu^{(d)}(X)$  的临界跳跃点  $d^*$  为集  $X$  的 Hausdorff 维数,记为  $d_H(X)$ 。

为了明确表达分形维数的分数性质, Mandelbrot 把 Hausdorff 维数称为分维,记为  $D_f$ 。

Hausdorff 维数作为集合的几何特征度量有许多性质,以下为其性质之一:

性质(Hölder 控制特性) 设  $X \subset R^n, f(x)$  是从  $X$  到  $R^n$  的点映射,满足指数为  $\alpha$  的 Hölder 条件

$$|f(x) - f(y)| \leq c|x - y|^\alpha, c \text{ 为常数}, \alpha > 0, \forall x, y \in X \quad (2)$$

则

$$d_H f(x) \leq \frac{1}{\alpha} d_H(X) \quad (3)$$

证 由 Hausdorff 测度性质知,  $\forall d \geq 0, \mu^{(d/\alpha)}(f(x)) \leq C^{d/\alpha} \mu^{(d)}(X)$ 。如果  $d > d_H(X)$ , 则

$\mu^{(a)}(X) = 0, \mu^{(a/a)}(f(x)) = 0$ , 即  $\frac{d}{a} > \frac{1}{a}d_H(X)$ , 因此  $\mu^{(a/a)}(f(x)) = 0$ , 令  $S = \frac{d}{a}, \forall S, S > \frac{1}{a}d_H(X)$ . 因此  $\mu^{(a)}(f(x)) = 0$ , 于是  $d_H(f(x)) \leq \frac{1}{a}d_H(X)$ .

利用这个性质, 易得下面的推论.

**推论 1**  $f$  是 Lipschitz 映射 ( $a = 1$ )  $\Rightarrow d_H(f(x)) \leq d_H(X)$ .

**推论 2**  $f$  是平移、旋转、伸缩、相似、仿射等变换  $\Rightarrow d_H(f(x)) = d_H(X)$ .

## 1.2 关联维数

分维  $D$ , 的一般定义为

$$D_q = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{q \rightarrow +\infty} \frac{1}{q-1} \frac{\ln \sum_{i=1}^n p_i^q}{\ln \epsilon}$$

其中参数  $q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$ .  $p_i$  是复盖几率. 当  $q$  取不同值时,  $D_q$  表示不同的分维. 例如  $q = 0$  时,  $D_q$  等于 Hausdorff 维数  $D_0$  (即  $D_f$ ); 当  $q = 2$  时,  $D_q$  (即  $D_2$ ) 就是关联维数. 关联维数有许多种求法. 1983 年 Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和重建相空间思想, 提出了从时间序列直接计算关联维数  $D_2$  的算法, 即 G-P 算法. 简介如下.

假定在实验中测得一个数据时间序列  $\{x_i\}, i = 1, \dots, n$ . 其中  $x_i = x(t_i)$ . 将时间序列  $\{x_i\}$  重新排列, 构造一个  $m$  维的向量相空间  $\{X_i\}$ , 其中

$$X_i = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}), i = 1, \dots, N, N = n - m + 1$$

任意两向量  $X_i$  与  $X_j$  的距离记为  $r_{ij}$ , 即

$$r_{ij} = |X_i - X_j|$$

任意给定一个正数  $\epsilon$ , 检查有多少点对间的距离  $r_{ij} < \epsilon$ , 其数目记为  $N_1(\epsilon)$ , 而  $r_{ij} > \epsilon$  的数目记为  $N_2(\epsilon)$ , 则点对总数  $N(\epsilon) = N_1(\epsilon) + N_2(\epsilon)$ . 将距离小于  $\epsilon$  的点对在所有点对中所占的比例记为  $c(\epsilon)$ , 即

$$c(\epsilon) = N_1(\epsilon)/N(\epsilon)$$

并适当调整  $\epsilon$  的取值大小, 则可能在一段  $\epsilon$  区间内有

$$c(\epsilon) = \epsilon^\gamma \quad (4)$$

(4) 式中指数  $\gamma$  是一种维数. 关联维数  $D_2$  定义为

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln c(\epsilon)}{\ln \epsilon} \quad (5)$$

其中

$$c(\epsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(\epsilon - r_{ij}) \quad (6)$$

而

$$\theta(\epsilon - r_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \epsilon - r_{ij} \geq 0; \\ 0, & \text{当 } \epsilon - r_{ij} < 0. \end{cases} \quad (7)$$

## 2 利用重建相空间法(G-P 算法)检测油气的储量

根据岩石断裂力学和石油、天然气的地质构造理论, 石油、天然气一般存储在地层断层的岩石裂缝里, 特别是在岩石倾斜褶皱严重的“背斜层”里. 因此利用地球物理勘探技术, 通

过搜索地震波沿地壳不同地质年代的岩石传播,经吸收、折射和反射后得到的信息进行分析 and 物理解释,可预测石油、天然气的储层位置和储量。特别是在关联维数的高值区,即可能含油气区,该产层的顶底会有新的反射系数出现,表明地震反射序列十分复杂,因此关联维数的大小反映了地震反射系列的复杂程度。

### 2.1 地震道具有自仿射分形特征

一个时间过程  $x(t)$  如果具有自相似或自仿射的分形特征,则在时间  $t$  的标度变换  $t \rightarrow \lambda t$  下应满足标度律

$$x(\lambda t) = \lambda^\alpha x(t) \quad (8)$$

$\alpha$  为标度指数。如果  $\alpha = 1$ , 则  $x(t)$  具有自相似性;  $\alpha \neq 1$ , 则  $x(t)$  具有自仿射性。可以证明,满足(8)式的  $x(t)$  的功率谱为

$$S(f) = f^{-(2\alpha+1)} \quad (9)$$

因此,时间变量  $x(t)$  是否具有分形性质,可根据  $x(t)$  的功率谱是否满足负幂律来判断,即

$$S(f) \sim f^{-\beta} \quad (10)$$

$$\log S(f) = -\beta \log f + \log c \quad (11)$$

(11) 式表明功率谱  $S$  在  $\log S - \log f$  的双对数坐标系下应为直线,据此可以检验  $x(t)$  的分形性质。

文献[5]通过测井资料分析,证实地层反射系数的功率谱服从负幂律,说明反射系数具有分形特性。笔者根据许多地质体在很宽的标度范围参差不齐,当以不同放大率或缩小率对它们进行观察时,其边界似乎是相同的这种基本和普遍的标度不变性,因此笔者就尝试用分形理论来处理实际的地震资料。由于地层地质结构的复杂性,导致地震波反射信号的不规则,启示笔者进一步认为地震道是地层地震系统内的非线性动力学过程当周期无限制地倍增时所产生的非周期宏观时空行为(性态),即系统处于混沌状态是由系统内部动力学随机性(内禀随机性)产生的不规则行为。混沌是一种无周期性的有序态,表现为无序性与内在的规律性巧妙地融为一体。它具有整体稳定性,而局部则是非稳定的,而系统内的局部不稳定正是内(禀)随机性的特点,也是对初值敏感性的原因所在。混沌具有分维性质,系指系统运动轨迹在相空间的几何形态可以用分维来描述,系统的混沌运动在相空间内无穷次缠绕、折迭和扭结,构成具有无穷层次嵌套的自相似性结构或自仿射结构。存在无标度区,这种结构称为奇异吸引子。奇异吸引子是分形集,它蕴含了地层地质特征的丰富信息。

### 2.2 地震道的油气检测

由于碳酸盐岩具有非均质、裂缝性的特点,使得对碳酸盐岩进行油气检测比其它地质结构的储层更为困难。根据在地球物理勘探中大量存在的分形现象可以用混沌动力学进行科学合理的解释,从而认为地震道是混沌的时间序列,利用前面介绍的从时间数据序列计算系统奇异吸引子关联维数  $D_2$  的 G-P 算法(重建相空间算法),编制了计算关联维数  $D_2$  的 C 语言程序。对一个实际油气勘测区的地震道剖面的各道数据进行了试算,并与该剖面所在地区的 8 口已知钻井资料进行了分析和比较,对油气井与干井的分维值进行分类划分,确定出该地区具体的最有利地带的阈值,从而可以检测出是否存在油气。8 口已知钻井对应的地震道关联维数值如下表所示,计算框图参见附图。

附表 计算结果对照表

#号	1	2	3	4	5	6	7	8
关联维数 $D_2$	1.666	1.724	2.204	2.390	2.533	1.569	2.839	1.608
含油气解释	气显示井	气显示井	干井	气井	气井	气显示井	气井	气显示井

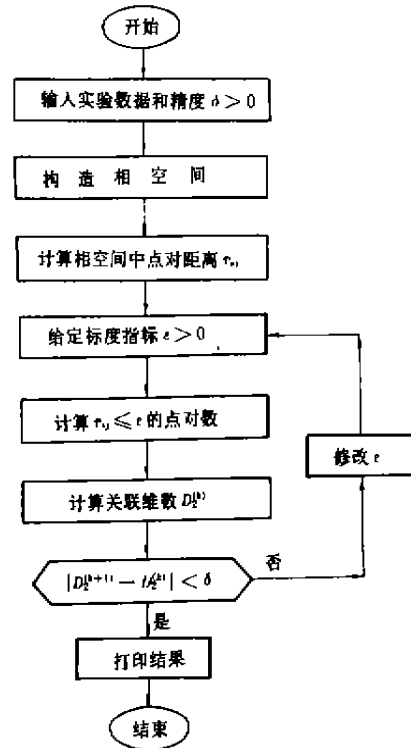
上表中的8口已知井所在的剖面长约12 km,在1.2~1.4秒间有一层厚约为350 m的碳酸盐岩沉积,储集空间主要是由于构造作用、溶蚀作用所产生的缝洞发育带。这8口已知钻井含气的类别可充分说明这一典型的裂缝性特点。通过绘制相应的 $\ln-D$ 图,经无标度识别,得到了上面8口井对应的最小相空间中奇异吸引子的关联维数在12至15之间。结合实际的钻井资料,依据关联维数 $D_2$ 的大小,可对每口井是否含油气作如下的解释:

1) 1号、2号、6号、8号井均位于关联维的低值区,为非产气井;

2) 4号、5号、7号井均位于关联维的高值区,为产气井;

3) 3号井虽位于关联维高值区,但实际为非产气井。这是因为

该井在产层发生断层,而不是含油气异常。因此对于位于关联维高值区含油气异常的井还应该考虑用其它的分维来检测,比如计算其振幅谱的分维等来进行检测。

附图 应用重建相空间法计算关联维数  $D_2$  的框图

## 参 考 文 献

- 1 Falconer K J 著,曾文曲等译. 分形几何——数学基础及应用. 沈阳:东北工学院出版社,1991. 42~53
- 2 刘祖荫等译. 地球科学中的分形研究. 北京:中国科学技术出版社,1991. 18~39
- 3 段虞荣等. 用分形理论和小波变换相结合的方法来选择油气田的勘探井位. 见:辛厚文主编. 分形理论及其应用. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 366~369
- 4 曾锦光等. 地球物理资料预测油气的分形方法. 物理化探计算技术,1994,16(4):345~352
- 5 何光明,高如曾. 分形理论在油气检测中的尝试. 中国地球物理学会第七年年会交流论文,1991,1~7
- 6 Grassberger P,Procaccia I. Phys. Rev. Letters. 1983,50:346~349
- 7 李后强,程光敏 编. 分形与分维——探索复杂性的新方法. 成都:四川教育出版社,1990. 15~25
- 8 林鸿溢,李映雪 编著. 分形论——奇异性探索. 北京:北京理工大学出版社,1992. 117~169