

# 地震信号的能量维数及其在油气勘探中的应用

罗朝盛

(杭州应用工程技术学院电机系 杭州 310012)

汪富泉

(四川师范学院数学系)

**摘 要** 研究地震信息 CDP 记录的混沌与分形特征,通过数值计算,从 CDP 记录中提取其能量维数  $D_f$ ,将其应用实际勘探剖面进行油气储的预测,结果与实际勘探情况符合得较好.

**关键词** 混沌 分形 维数 CDP 记录

**中图分类号** P315.3 TE19

由于地质构造的十分复杂,非均质性和各向异性,在几何形态上呈强非线性特征,使得地震勘探记录出现非规则性的变化,有些部分振幅或频率变化缓慢,而某些部分振幅或频率变化激烈,即地震记录往往含有突变和局部奇异信号.通过前期的研究工作表明<sup>[1-3]</sup>,地震波曲线具有自仿射的分形特征.笔者认为,仅靠传统的信号处理方法处理地震记录是不够的,必须寻找新的处理方法.

在石油物探中,常常是需要对野外采集的地震记录数据进行各种处理,其中频谱分析是地震信息处理中一项十分重要的工作.反射波与干挠波的频谱差异,在野外施工中可用于选择合适的激发条件,室内处理中可用于选择合适的滤波手段压制干挠,提高信噪比,频谱中包含的与地质构造和地层岩性有关的信息,可用于地震资料的地质解释.本文将运用混沌与分形理论的方法处理地震信息,给出 CDP 记录的分形描述,并从 CDP 的频谱中求出其能量维数  $D_f$ ,将它应用于实际勘探剖面,对含油气裂缝发育带进行预测,取得了较好的效果.

## 1 CDP 记录的特征及其分形描述

地震信号的振幅随时间变化的函数记作  $X(t)$ .在弹性介质理论中,地震波是脉冲振动,可用富氏积分展开为无限多个频率连续变化的简谐振动

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A \cos(2\pi ft + \Psi) df \quad (1)$$

其中  $f = \omega/2\pi$  为振动的频率,  $\omega$  为角频率,  $\Psi$  为相位. 将信号  $X(t)$  作富氏变换, 可得其频率表示

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cos(2\pi ft + \Psi) dt \quad (2)$$

这时得到振幅的连续谱.

在文献<sup>[2,3]</sup>中, 运用系统动力学方法研究了  $X(t)$  的吸引子维数  $D_2$ , 结果表明  $X(t)$  的吸引子维数一般为非整数, 按照混沌系统的定量刻画<sup>[4]</sup>,  $X(t)$  的变化呈混沌性态. 对这类混沌振动, (2) 式给出的频谱将展示出噪声背景和宽峰且频谱连续. 另一方面, 这种混沌态中蕴藏着系统的自组织性, 例如标度不变性<sup>[5,6]</sup>. 事实上, 标度不变性是地质学中的一个普遍现象<sup>[7]</sup>, 各种不同尺度下观测各种褶皱、断层、裂缝, 表现出的某种统计自相似性或自仿射性就属于这一标度范围, 这种地质特征反映到地震的振动图及频谱中, 也将具有统计自相似或自仿射性质, 从中提取出表征这些特征的参量, 它就包含了地质和油气构造的有关信息, 因此, 可作为油气预测的参数.

首先, 引入 Weierstrass - Mandelbrot 函数

$$X(t) = \sum \gamma^{(2-D)n} [1 - \exp(i\gamma^n t)] \exp(i\Psi_n) \quad (3)$$

来描述地震波的 CDP 记录. 这里对  $n$  求和是将地震波看成若干子波的叠加, 式中  $D$  为分维,  $1 \leq D \leq 3$ ,  $\Psi_n$  为任意相角,  $\gamma^n$  ( $\gamma > 1$ ) 构成 Weierstrass 频谱. 研究表明, Weierstrass - Mandelbrot 函数的功率谱  $A(k)$  近似为一连续谱 ( $k$  为波数), 该函数的频谱以几何级数而非算术级数的形式覆盖了整个波数域<sup>[6,7]</sup>, 因此, 这一模型描述了地震波的混沌性与自仿射性.

为了研究功率随频率的变化规律并求取预测参数, 再引入分数 Brown 运动来进一步分析, 考虑 CDP 记录增量  $X(t + \tau) - X(t)$  的变化, 根据地层岩性的随机性, 可设它为一随机变量, 其分布满足:

$$P\left\{\frac{X(t + \tau) - X(t)}{\tau^H} < r\right\} = F(r) \quad (4)$$

这里  $\tau$  为时间延迟,  $r$  为空间坐标,  $0 < H < 1$  为 Hurst 指数. 这是随机信号的分数 Brown 运动模型 ( $H = 1/2$  时为通常 Brown 运动), 它同样刻画了信号的混沌性与分形自仿射性.

下面推导谱能量对于频率(波数)的幂律依赖关系. 根据标度不变性, 并考虑地震波的物理衰减规律, 则:

$$P(r) = r^{d-D} \quad (5)$$

$d$  为信号所在欧氏空间的维数, 对地震记录曲线  $X(t)$  本身,  $d = 2$ , 对于地震波的能量,  $d = 3$ , 因  $\tau$  是时间域上信号的标度, 因此(5)又可写作

$$P = c\tau^{d-D} \quad c \text{ 为常数} \quad (6)$$

与(4)比较知,  $H = d - D$ , 随机变量  $X(t)$  的均方值记作

$$V(\tau) = \langle [X(t + \tau) - X(t)]^2 \rangle \quad (7)$$

则由(4)、(6)、(7)得

$$V(\tau) \sim \tau^{2H} = \tau^{2(d-D)} \quad (8)$$

当  $0 < t < \tau$  时, 类似于(2), 定义  $X(t)$  的富氏变换

$$X(f, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau X(t) \exp(2\pi ift) dt \quad (9)$$

根据振动理论,其 CDP 记录频谱能量密度  $A(f)$ ,可写为:

$$A(f) \sim \tau X^2(f, \tau) \quad (10)$$

对高斯白噪声,  $A(f) = \text{常数}$ , 在其它情形下, 频谱能量密度有幂律关系

$$A(f) \sim f^{-\alpha} \quad (\alpha \text{ 为功率谱指数}) \quad (11)$$

从而得到

$$A(f) \sim f^{-\alpha} \sim \tau^{\alpha} \sim \tau V \sim \tau^{2H+1} = \tau^{2(d-D)+1} \quad (12)$$

比较(11), (12) 得

$$\alpha = 2(d - D) + 1, D = (2d - \alpha + 1)/2 \quad (13)$$

考虑地震波能量的变化时, 令  $d = 3$ , 则  $1 \leq \alpha \leq 3, 1 \leq D \leq 3$  它们反映了地震波振幅(或能量)的变化情况和标度不变性质. 根据不同地震道  $\alpha$  和  $D$  值的变化, 可对储集空间中孔隙、裂缝或孔洞的发育带或油气富集区做预测.

## 2 能量维 $D_f$ 的计算方法

笔者对地震道的 CDP 记录  $X(t)$  进行处理, 每条地震道上选择位于碳酸盐岩中的 CDP 记录共  $N$  个数据, 作离散快速富氏变换

$$X(n/NT) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) \exp(-i2\pi nk/N) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

对计算结果进行回归表明, 功率谱近似有下述关系

$$G = \|X(n/NT)\|^2 = cf^{-\alpha} \quad c \text{ 为常数} \quad (15)$$

式中  $\alpha$  称为功率谱指数, 在双对数坐标系中用最小二乘法拟合, 即可求出  $\alpha$ .

设  $D_f$  表示地震波传播中的能量分维, 则  $D_f$  与功率谱指数的关系为:

$$D_f = (7 - \alpha)/2 \quad (16)$$

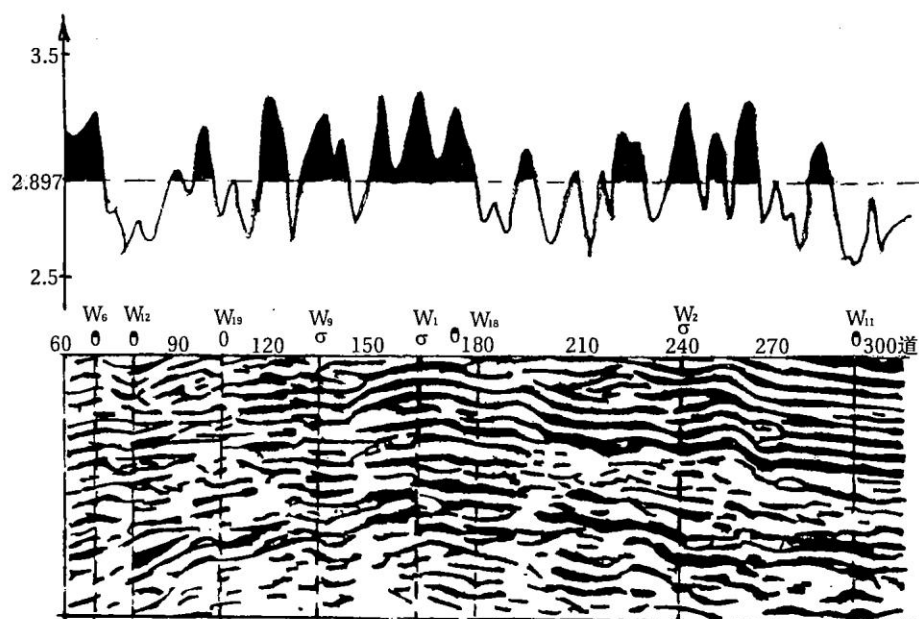
$D_f$  刻画了地震波传播过程中振幅(或能量)的衰减特性, 包含了地质和油气构造的信息, 可作为油气预测的一个参数.

## 3 应用实例与讨论

笔者选择了完钻的四川丹凤场气田联井 II 测线的地震记录进行处理. 该剖面长约 12Km, 其上有 8 口已知钻井, 在 1.2 ~ 1.4s 间有  $P_1$  层, 是一套厚约 350m 的碳酸盐岩沉积. 主要储层在  $P_{13}^3 \sim P_{12}^3$ , 厚约 70 ~ 80m. 其储集空间主要是由于构造和溶蚀作用产生的缝洞发育带, 为典型的裂缝性气藏.

利用上述算法, 对该剖面 CDP 记录的 60 ~ 300 道进行计算, 求出每条地震道的  $D_f$  值. 以地震道号作为横坐标,  $D_f$  作为纵坐标, 绘成一条曲线. 结果, 该曲线连续而不可微, 振荡频繁, 它反映了碳酸盐地质构造极不均质, 变化激烈. 为便于预测, 采用 5.3 次平滑算法对曲线做了 2 次平滑处理, 结果如图 1 所示.

取井旁 CDP 记录的  $D_f$  值作  $F$  检验与  $t$  检验, 再应用<sup>[1]</sup>的方法求出检测临界值  $C = 2.897$ , 从而

图 1 地震道与  $D_f$  关系曲线及油气预测结果

得到判别准则:  $D_f > 2.897$  的区域可能为含油气裂缝发育带, 预测结果与实钻结果如表 1 所示

表 1 预测结果与实钻结果的比较

井号	W1	W2	W6	W9	W11	W12	W18	W19
预测结果	有	有	有	有	无	无	无	无
实钻结果	有	有	无	有	无	无	无	无

预测结果与实钻结果比较, 预测精度为  $7/8 = 87.5\%$ , 其中被误判的井为 W6, 该井旁地震道能量维数  $D_f$  在临界值以上, 被判为有气, 而实钻结果为干井, 其原因可能在于这口井下部近邻有一巨大硬盘, 导致反射增强, 能量维数升高。

从图 1 可见,  $D_f$  变化频繁, 曲线复杂, 说明地下非均匀性十分显著, 缝洞体分布很不规则。在一些未获气的已知钻井邻近, 也出现  $D_f$  高值区, 但井位与  $D$  高值区有偏差, 如 W12, W18。这些结果为勘探开发决策者提供的启示是: 应改变只钻直眼井的决策, 而采取钻丛式井、斜井、水平井、聚能压裂等开发决策, 做老井的复活工作, 增加获气可能。

用上述方法, 笔者处理了四川合江九线和十线两个实勘地震剖面, 其预测精度都在 80% 以上。

笔者认为 CDP 记录的能量维数  $D_f$  可作为预测油气的一个重要参考指标。当然  $D_f$  并不是唯一的判据,  $D_f$  的高值区未必一定含油气, 如 W6 井下邻近的硬盘也使  $D_f$  升高。但它毕竟从一个新的角度提供了很有意义的信息。同时还提出了其它的预测参数, 如 CDP 记录的关联(吸引子) 维数<sup>[2]</sup>, Hurst 指数和容量维<sup>[1]</sup>。它们都有较高的预测精度而且可以和  $D_f$  的预测结果互补。运用多种数理方法对地震信息进行处理, 并与其他地质参数综合预测, 将有利于勘探开发决策者做出正确的决策, 提高勘探开发效益。

本研究所使用的数据由四川石油管理局地质调查处提供, 其成果已通过四川石油管理局地质调查处组织的专家验收, 并应用于丹凤场、合江等 10 余个剖面处理, 均获得较好结果。

## 参 考 文 献

- 1 汪富泉,罗朝盛,高如曾. Hurst 指数与容量维在油气检测中的应用. 石油地球物理勘探, 1996, 31(2): 184 ~ 189
- 2 汪富泉,罗朝盛,陈国先. 关联维数在油气勘探中的应用. 中国海上油气(地质), 1992, 16(6): 61 ~ 67
- 3 罗朝盛,汪富泉. 用拟测井曲线重建声测井曲线的算法及应用. 计算物理, 1998, 15(3): 363 ~ 366
- 4 Wang F Q, Luo C S, Cheng G X. Quantitative Characterization of Chaos System and dynamical forecasting of gniun yield in China. ICSSSE'93. Beijing: International Academic Publishers, 1993. 602 ~ 605
- 5 董连科. 分形理论及应用. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1991. 85 ~ 108
- 6 李后强,汪富泉. 分形理论及其在分子科学在的应用. 北京: 科学出版社, 1993. 135 ~ 187
- 7 Alder P M. Transport Process in Fractals. Phys Fluids, 1986, 29(1): 15 ~ 24

## The Energy Dimension of Seismic Information and The Application in Oil-Gas Exploration

Luo Chaosheng

(Dept. of Machinery and Electron, Hangzhou institute of Applied Engineering, Hangzhou 310012)

Wang Fuquan

(Dep. of Maths, Sichuan Teacher's College)

**Abstract** The chaotic and fractal characterization of the CDP record of seismic information are studied. We have extracted energy dimension  $D_f$  from the CDP record information by numerical computation and applied it to the real exploration section to forecast the oil-gas distribution, The results of forecasting accord every good with the real exploration.

**Key words** chaos fractal dimension CDP record