

综合小波分析与分形方法进行弱磁异常识别

耿喜哲¹ 张春华²

(1. 中国地质大学 地球物理系 湖北 武汉 430074; 2. 河南石油勘探局 河南 南阳 473132)

摘 要: 利用小波分析塔式算法对单一分形模型数据进行处理, 结合“随机共振”理论, 对高精度弱磁异常中的噪声和误差进行有效的分析评价, 依据趋势分析方法获得的剩余磁异常, 提出“加窗移动”最小二乘方法对应用非整数阶微积分的布朗运动正态随机行走进行控制, 为高精度弱磁异常的有效识别提供有益的指导。

关键词: 小波分析; 分形; 随机共振; 弱磁异常; 非整数阶微积分

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2002)02-0126-05

随着地球探测与信息技术学科的发展, 根据实际生产的需求, 对探测理论和方法提出了更高更严谨的期望值。如何更好地应用近 20 a 来出现的非线性理论, 诸如混沌、小波、分形、神经网络等, 解决遇到的实际问题, 是值得探讨和商榷的^[1]。文献[2]提出, 混沌系统是局部不稳定而整体稳定的, 其运动轨道在相空间中的几何形态具有分形的性质, 即混沌是一种分形, 具有局部与局部、局部与整体的自相似性。混沌产生于非线性方程的数值计算结果, 但是描述混沌吸引子的分形维数却不依赖于方程。寻找混沌吸引子普适常数的物理内容与研究分形维数的物理意义在本质上是同一个问题。文献[3]结论认为, 小波变换在揭示尺度不变性和空间不变性方面有着独特的优点, 而分形的本质就是具有这两方面的特征, 两者在这里找到了共同点。小波变换是进行分形分析的最为有效的手段之一, 在分形领域将得到更广泛的应用。

70 年代初期, B. B. Mandelbrot^[4]创建了分形理论, 主要是定量研究自然界中那些复杂的、不规则现象。80 年代末期, 分形理论开始应用于地球物理领域。到目前为止, 主要应用分形理论进行油气检测、数据压缩以及小断层与裂缝预测等。在重磁勘探方面, E. D. Mark^[5]等人进行了航磁数据谱的统计分析, 发现不同尺度上出现类似的磁异常模式, 统计结果表明磁异常具有分形特征; M. Pilkington 和 M. E. Gregotski^[6]等人研究了加拿大地盾的磁异常, 研究表明近地表磁源特征是功率谱密度反比于径向波数 3 次方的噪音, 分形维约为 2.5; Mark 和 Aronsor^[7]计

算了重力曲面和地形曲面的分形维; 申宁华^[8]等从理论上分析了重磁异常具有分形特征。文献[9]应用分形集中的关联维去描述重力弱异常, 探索分形理论在高精度重力油气检测中应用的可行性和有效性, 成功地给出了模型与实际资料的试算结果。刘庆生^[10]测定了几个已知油气藏浅层土壤样品的磁性矿物成分, 结果表明, 土壤中磁性载体主要为磁铁矿, 并认为“是在深部油气中烃向上长期渗漏的化学还原条件下形成的”。D. F. Saunders^[11]等认为“异常高的磁化率是油田上方极为普遍的现象”, “磁化矿物成分有磁赤铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿, 其中磁铁矿最常见”。

作者从侧面分析了小波与分形乃至混沌吸引子的内在联系, 并介绍和引入“随机共振”^[12]、“非整数阶微积分”^[13]等理论方法, 为解决单纯依靠小波分析获得的高精度弱磁异常中噪声和误差存在的理论基础和识别方法提供一种探索途径, 并为微磁方法寻找油气藏提供有实际意义的指导。

1 理论分析

虽然关于混沌、小波、分形等较为完整的数学理论已经很多, 但是真正地建立非线性理论的整体框架还有待于进一步的努力。对此, 文中不作为分析的重点内容, 只是介绍和引入“随机共振”、“非整数阶的微积分”理论作为一种探讨, 应用效果体现在模型实验和实际资料的处理上。

1.1 “随机共振”理论

随机共振^[12]的概念是由邦济(R. Benzi)等人在

研究古气象冰川问题时提出的。在过去的 70 万 a 中,地球的冰川期和暖气候期以大约 10 万 a 为一周期交替出现。研究这一时期地球环境的变化,人们发现地球绕太阳转动的偏心率的变化周期也大约为 10 万 a。这一变化自然意味着太阳对地球施加了周期变化的信号。然而,这一周期信号很小,本身不足以产生地球气候从冰川到暖期的如此大幅度的变化。只有将这一信号与地球本身的非线性条件,以及在这时期内地球所受的随机力作用结合起来,研究它们的协同作用,才可能解释上述气候现象。在邦济等人的气候模型中,地球处于非线性条件下,这种条件使地球可能取冷态(冰川态)和暖态 2 种状态。地球离心率的周期变化使气候有可能在这 2 个态之间变动,而地球所受的随机力(如太阳常数的各种无规变化)则大大提高了小的周期信号对非线性系统的调制能力,通过“随机共振”引起地球古气候的大幅度周期变动。

混沌运动的物理本质和物理模型可以归于多重共振的概念,而这一概念是由经典物理学中共振的概念推广到多维相空间中的产物^[2]。“随机共振”理论在物理实验模拟中已经得到证实^[12]。当系统的非线性与输入的信号和噪声之间存在某种匹配时,人们出乎意料地发现,如果增加输入噪声,不仅不降低,反而大幅度地增加了输出的信噪比。出现了随机力和信号之间的协作效应。在这种情况下,存在某一最佳输入噪声强度,使系统产生最高信噪比的输出。这一现象类似于力学中的共振现象:如果系统具有一固有频率 f_0 , 输入信号频率为 f_0 时系统的输出最强,高于和低于 f_0 的频率的输入都只能引起系统较弱的响应。显然,随机共振已不具有力学上共振的传统的含义,使用“共振”一词仅用以强调信号、噪声和系统的非线性条件之间的某种最佳匹配。将信号和噪声同时输入一系统,研究系统输出信号和输出噪声与输入之间的关系,这在信息理论、光学、电学及许多领域的信号处理问题中都具有重大的意义。人们发现在双稳系统中,在一定条件下增加输入的噪声,会导致增加输出的信号和压低输出的噪声,即增加输入的无序导致了增加输出的有序。

1.2 非整数阶的微积分

大家知道,微分和积分的阶数与因次一样可扩大到非整数^[13]。正如所推测的那样,这一设想与分数维具有密切关系。对于正弦波 e^{ikx} , 进行几次微分演算 d/dx 等于乘上 $(ik)^n$, 即

$$\frac{d^n}{dx^n} e^{ikx} = (ik)^n \cdot e^{ikx} \quad (1)$$

当 n 为包含 0 的自然数时,这个等式很明显。 n 为负的自然数时,由于可把 n 阶微分看成是 $|n|$ 阶积分,因此,上式成立,此时可以假定把积分常数的项忽略掉。当 n 为非整数时,可以考虑把上式看成为非整数阶的定义。这样,就很容易考虑有关单一正弦波的非整数阶的微积分。对于一般的函数,可以扩大这一微分的定义。利用下面的傅立叶变换,即可定义函数 $f(x)$ 的 n 阶微分

$$\frac{d^n}{dx^n} f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (-ik)^n \hat{f}(k) \cdot e^{ikx} dk \quad (2)$$

当 $n=0$ 时,是普通的傅立叶变换,利用这种变换,可以决定 $\hat{f}(k)$ 。当 n 为整数时,与通常的微积分一致。已经知道,如果对某函数进行微分,就会减少函数的平滑。对扩大到非整数的微积分,同样如此。现在考虑一下函数 $f(x)$ 的谱 $S(k)$ 变成下述 k 的幂的情况

$$S(k) = |\hat{f}(k)|^2 \propto k^{-\alpha} \quad (3)$$

如果对 f 进行 n 次微分,并把其 n 次微分后的函数谱假定为 $S^n(k)$,那么(1)式就成为 $S^n(k) \propto k^{-\alpha+2n}$ 。当 $1 < \alpha < 3$ 时,假定函数图形的分数维维数为 D ,已经证明,关系式

$$\alpha = 5 - 2D \quad (4)$$

成立。

如果(1)~(3)式中,当 $f(x)$ 图形的分数维维数为 D 时,对 $f(x)$ 进行 n 阶微分的 $d^n(f(x))/dx^n$ 图形分数维维数 $D^{(n)}$ 为

$$D^{(n)} = D + n \quad (5)$$

但这一关系式只有当 n 为 1 和 2 之间的非整数时, D 和 $D^{(n)}$ 才是有效的。当 $n > 0$ 时,由于 $D^{(n)} > D$, 并且假定进行微分,则图形的分数维维数就会变大,而且图形比原来的更为复杂。相反,当 $n < 0$ 时,则 $D^{(n)} < D$, 如果对此进行积分,图形就会变得平滑。由此可知,利用非整数阶微积分演算,可以使曲线的分数维维数连续地发生变化。虽然布朗运动的轨迹是二维的,但轨迹可沿任意坐标轴自由地转动,因此分数维维数可以变小。根据对这种布朗运动的非整数次微积分,可以制定图形的分数维的维数是 $1 < D < 2$ 的概率过程。通常称这样的随机运动为非整数布朗运动,引进新的参数 H ($0 < H < 1$),即可把这样的布朗运动表示为

$$B_H(x) = I^{H-1/2} (B(X)) =$$

$$\frac{1}{\Gamma(H+1/2)} \int_{-\infty}^{\infty} (x-y)^{H-1/2} dB(y) \quad (6)$$

式中 $\Gamma(H+1/2)$ 为伽马函数。利用下式可以把 H 与分数维维数 D 之间联系起来: $D=2-H$ 。另外, 可知 $B_H(x)$ 具有下面这样的相似性:

$$B_H(x+X) - B_H(x) = h^{-H} \{B_H(x+hX) - B_H(x)\} \quad (7)$$

其中, h 是任意的正数, 即利用适当的规格化, 大尺度的变动应该遵从与小尺度变动相同的分布。假如把 x 当作二维空间的坐标, 把 $B_H(x)$ 当作地表磁源异常, 那么, 把 H 做适当的调整以后, $B_H(x)$ 的图形可以认为是地表磁源异常的真正分布形态。

2 模型试验与实际资料处理

2.1 单一分形模型设计与小波分析

为验证分形与小波分析之间的关系, 设计了大量的分形模型进行分析计算, 对获得的数值模拟结果, 目前只能做简单的分析, 进一步的结论正在研究之中。图 1a 是最为简单的分形模型设计方式, 介于康托集(Cantor)与科克(Koch)曲线之间。图 1b 是该模型的小波分析处理的连续部分与细节部分及原始模型综合分析。从图 1b 中可以看出, 所有图形的唯一共性是都经过坐标原点(0, 0)。对此, 作者认为, 正是这一点集中反映了分形与小波分析的最为本质的特征。可以看出, 对于图 1a 分形模型的不同

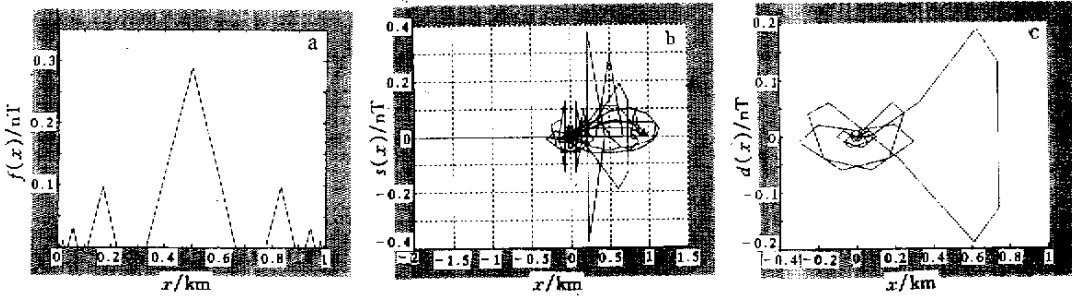


图 1 单一分形模型与小波分析

a—理论模型 b—小波分析结果 c—小波分析细节部分

焦距下的每一个三角形, 都可以通过伸缩、平移, 化为等价于经过坐标原点的三角形。而这种伸缩、平移正是小波分析引入的塔式算法的本质。从图 1c 上, 可以进一步看出, 小波分析与分形存在着必然的联系, 至于除伸缩、平移以外的旋转以及与混沌吸引子的关系等, 是进一步的研究方向之一。

2.2 高精度弱磁异常与噪声、误差分析评价

图 2 选用的是存在 2 个次极大值的 Morlet 小波基函数 $h(t) = \cos(1.75t) \exp(-t^2/2)$, 而非一般

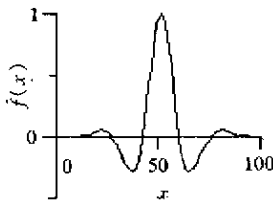


图 2 Morlet 小波基函数

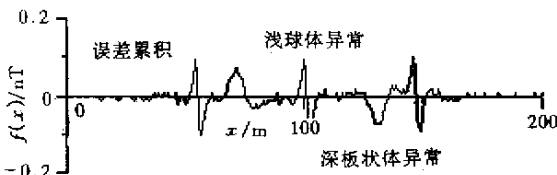


图 3 深板状体与浅球体异常小波分析研究
万方数据

的墨西哥帽函数。从图 3 的模型试验可知^[14], 在高精度弱磁异常的处理上, 前者对微弱的异常信息具有更高的分辨率, 由于小波基函数的不同, 应用小波分析处理的结果不同。如果单纯依靠小波分析, 虽然可以消除深部磁性体异常, 但是, 由于舍入误差的存在, 导致误差积累, 最终影响对弱磁异常的识别判断。在应用小波分析处理实际资料的过程中, 由于“随机共振”现象的存在, 数据采集误差以及噪声干扰等都可能转化为弱磁信号的加强, 而某些原始弱磁异常由于受到噪声、误差的畸变而减弱, 为有效异常信息的识别带来一定的困难。

2.3 内蒙古某地高精度弱磁异常处理

1979 年美国地质调查所的 T. J. Donovan 博士^[15] 根据俄克拉荷马州 Cement 油田上航磁观测到的一些短波长的磁异常, 最早提出常见蚀变矿化作用中的磁铁矿化作用, 推测在相应的沉积层中存在与烃类垂向运移相关的成岩作用磁铁矿。磁铁矿化作用^[10] 可以解释为油气中的碳氢化合物及相关的化合物(如硫化氢)缓慢而长期持续地向上渗漏, 并在上覆岩层中造成还原环境, 使铁从含铁矿液中的“活化物”(三价的赤铁矿及针铁矿、铅铁矿)还原成亚铁

态 亚铁离子沉淀下来形成磁铁矿。深部油气藏中烃类的垂向微渗漏作用与周围物质之间发生的物理—化学作用过程是地表土壤的磁性与深部油气藏之间关系的理论基础,地表土壤中的磁性矿物是其物质基础。

上述磁铁矿化作用理论,可以为分形技术的应用提供这样一个理想前提,即某种程度上得到的局部磁异常和浅层弱磁异常存在着必然的联系,可以认为是同源磁异常。因而在客观上这 2 种磁异常具有共同的性质特征,在分形技术处理上可以理解为它们具有同一的分数维。分形理论完全不同于以往欧式空间中的理论、方法,它的实质在于更好地对某一物理现象进行客观的描述,但是在实际应用中又不能完全脱离过去的理论。如何很好地完成两者的有机结合,是一个正在探索中的问题。

由图 3 可知,如果仅依靠小波分析方法,也可以提取出地表浅层弱磁异常,但是对于深部磁性体的异常并没有很好的消除,同时产生了舍入误差。原因在于小波分析仅仅是一种滤波处理手段,并没有对真正的浅层弱磁异常进行刻画。在图 4 上经过对比可以知道,即使经过 5 阶和 8 阶趋势分析,也仅仅是反映一般的局部场特征。在测点 200~400 附近的高频磁异常不能简单地认为是观测误差或者噪音,认为完全是弱磁异常也是缺乏理论基础的。在微磁研究领域一般是野外采取岩石或土壤标本在实验室内进行测定,而在航空磁测的处理解释中对包

含高频弱磁异常的部分一般认为是误差、噪音而不予考虑。

为了对航空弱磁异常进行有效的识别分析,可以看到,由于地表磁源信息的复杂性,对于弱磁信号、噪声、误差的存在不可避免。本次工作正是在上述理论背景下进行的。首先,基于近地表磁源特征分形维约为 2.5 的观点^[6],确定研究地区的分数维特征和相应的局部磁异常的最大值和最小值,采用非整数阶正态随机行走方法进行重复试验,获取大量的地表磁源特征正态随机行走曲线。由于这样获得的正态随机行走曲线具有同一的分数维,所以选取任意不同的窗口宽度截取的模拟数据,总可以在另一个尺度上得到缩放,进而包含可能的浅层弱磁异常的分布。因此,窗口宽度的选择主要依赖实际观测数据的点距和测线的长度,即窗口划分首先依据的是通过趋势分析获得的包含局部磁异常的实际曲线。以图 4 上实际的每一个观测点为起始位置,以 n (n 为自然数) 倍的点距为窗宽,依次读取经过趋势分析处理后的实际数据,建立一个不同测量范围内的实际数据库。在完成非整数阶正态随机行走方法处理后,在图 4 中选取相对应的窗口宽度,依次读取不同范围的分形模拟数据。对由图 4 获得的分形模拟数据和由图 5 的趋势分析曲线获得的实际数据库进行光滑,获得理论和实际 2 种局部场数据。将光滑后获得的分形模拟数据逐窗口与相应的趋势分析曲线局部场相减后平方求和,即按最小二乘方

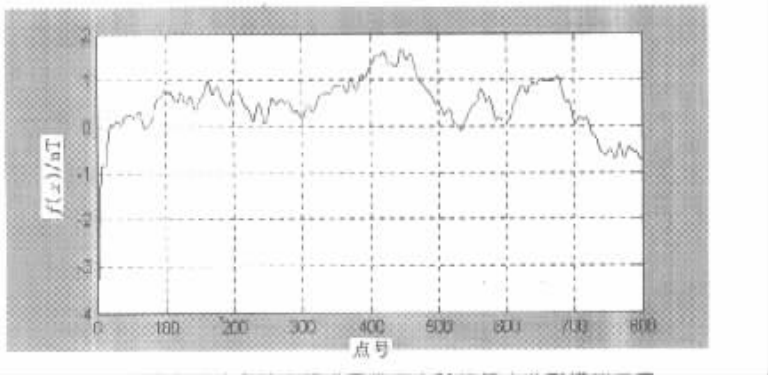


图 4 内蒙古某地高精度弱磁异常正态随机行走分形模拟示意

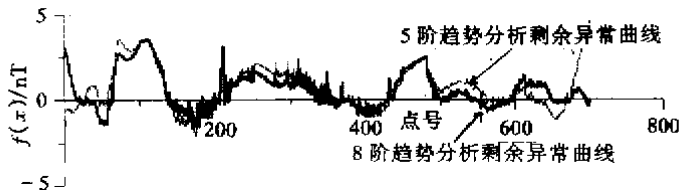


图 5 内蒙古某地高精度弱磁异常趋势分析处理

法进行计算,在给定误差范围内以最初的分形模拟数据代替原始局部场数据,然后对相应的分形模拟数据采用小波分析方法进行处理,小波分析的细节部分即提取的高频弱磁信号,可以作为去噪后的浅层弱磁异常。

通过对比由趋势分析方法获得的实际曲线,从分形模拟数据中选取比较合理的曲线采取“加窗移动”“最小二乘方法进行”“去噪”“真值”模拟,逐窗口识别出具有同一维数的分形模拟数据作为小波分析处理的原始数据输入进行处理。由图 1 的理论模型可以知道,通过对具有分形特征的模拟数据进行小波处理后的细节部分具有不同的特征,因而可以进一步的识别出高频弱磁异常。对比在图 3 中的理论模型小波分析处理可以看出,经过上述方法的处理,可以消除噪声和误差干扰,排除了局部场的影响,最终得到高频的弱磁信号。同时结合该地区圈定的航空伽马能谱异常以及地质资料,根据微磁方法找油原理,可以为该地区油气探测提供有效的指导作用。

3 结果与讨论

1. 从理论上构建非线性理论的整体框架,探索其内在的必然联系是十分有意义的。

2. 认为分形技术作为一种计算方法,它能方便地在空间域中定量描述自然界中的复杂、不规则现象,探索其应用的一般性前提条件是一个紧迫而实际的任务。

3. 综合小波分析与分形方法,能够更为合理地处理有关感兴趣的信息,从根本上提高信噪比。在高精度航磁异常数据的处理上,对弱磁异常、误差、噪声干扰的有效识别理论上是成立的,在具体实现上,很多工作有待于进一步的验证。

4. 对应用非整数阶正态布朗运动技术生成的具有分数维结构的地表磁源信息模拟,作者提出采用“加窗移动”“最小二乘技术”,与趋势分析曲线建立

了有效的联系,为弱磁异常与噪声的有效识别,提供了可靠的途径。

参考文献:

- [1] 郝柏林.从抛物线谈起—混沌动力学引论[M].上海:上海科技教育出版社,1993.
- [2] 王金龙.混沌和分形的普适常数的物理意义[J].自然杂志,1998,20(6).
- [3] 朱治军,李后强.用小波分析进行分形反演的理论研究[A].冯长根.非线性科学的理论、方法和应用[C].北京:科学出版社,1997.
- [4] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman Company, 1983.
- [5] Mark E G, Olivia J, Jafar A H et al. Fractal stochastic modeling of aeromagnetic data[J]. Geophysics, 1991, 58(11): 1706-1715.
- [6] Pilkington M, Gregotski M E, Todoceschuck J P. Using fractal crustal magnetization models in magnetic interpretation[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 42: 667.
- [7] Mark D M, Aronson P B. Scale-dependent fractal dimension of topographic surface—An empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping[J]. Math. Geol., 1984, 16: 671-683.
- [8] 申宁华,王喜臣,王光杰,等.中国大陆重磁异常场的计算方法及地质解释[M].长春:吉林科学技术出版社,1997.
- [9] 吴永栓,曹辉,俞建宝,等.分形理论在高精度重力油气检测中的应用[J].石油物探,1997,36(4).
- [10] 刘庆生.微磁方法寻找油气藏的基本原理与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [11] Saunders D F, Burson K R, Thompson C K,等.土壤磁化率和壤气烃分析与地下油气聚集的观测关系[J].国外油气勘探,1992(1): 97-114.
- [12] 胡岗.随机力与非线性系统[M].上海:上海科技教育出版社,1994.
- [13] 高安秀树.分数维[M].沈步明译.北京:地震出版社,1989.
- [14] 耿喜哲,刘天佑,丁艳红,等.小波神经网络在重磁资料反演中的应用前景[J].物探与化探,2001,25(2).
- [15] Donovan T J, Forgey R L, Roberts A A et al. Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oilfield[J]. AAPG, 1979, 63: 245-248.

THE APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS AND FRACTAL TECHNIQUE TO THE RECOGNITION OF MICRO-MAGNETIC ANOMALY

GENG Xi-zhe¹, ZHANG Chun-hua²

(1. Department of Applied Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China; 2. Henan Bureau of Petroleum Exploration, Nanyang 473132, China)

表 1 塔北 A 井 BP 神经网络识别油气水层实例

h_1	h_2	R_t	S_w	$S_w - S_{wi}$	F_w	S_o	$R_{sw} - R_w$	$\frac{R_w \times R_t}{R_i}$	R_{t1}	O_1	O_2	O_3	O_4	TYPE
4205.50	4215.50	1.421	1.000	.557	1.000	.000	.000	.082	.760	.000	.000	.003	.993	4
4243.60	4253.60	2.267	.616	.326	.389	.070	.054	.101	.077	.038	.998	.000	.000	2
4278.50	4285.20	1.252	.667	.439	.999	.082	.044	.113	.077	.000	1.000	.000	.000	2
4291.50	4302.00	.979	.615	.323	.377	.072	.011	.110	.154	.000	1.000	.000	.000	2
4309.70	4311.40	.609	.527	.222	.065	.083	.000	.066	.143	.051	.982	.000	.000	2
4361.30	4364.50	1.502	.301	.016	.000	.137	.055	.032	.029	1.000	.000	.000	.000	1
4396.50	4398.50	1.243	1.000	.553	1.000	.000	.000	.025	.746	.000	.000	.004	.997	4
4399.50	4401.50	2.078	.159	.010	.000	.101	.041	.018	.045	1.000	.000	.000	.000	1
4403.70	4421.40	2.264	.260	.047	.000	.195	.167	.019	.010	1.000	.000	.000	.000	1
4457.50	4460.40	1.720	.438	.065	.001	.074	.027	.062	.097	1.000	.000	.000	.000	1
4461.50	4471.50	.646	.867	.532	1.000	.020	.000	.088	.240	.000	.000	1.000	.000	3
4471.50	4479.00	.349	1.000	.709	1.000	.000	.000	.075	.279	.000	.000	1.000	.000	3

6 结语

低阻油气层是塔北地区的一种重要油气储层，由于其成因等原因增加了识别油(气)水层的判断难度，我们成功地利用 BP 人工神经网络技术，识别油气层、油水同层、水层和干层。对 A1 井等实际资料的解释表明，BP 人工神经网络识别结果与试油和产层的结果一致，没有漏掉油气层，与实际相符，明显地提高了测井的解释精度。

参考文献：

[1] 康玉柱.中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价[A].北京：地质出版社,1996.

[2] 曾文冲.油气藏储集层测井评价技术[A].北京：石油工业出版社,1991.

[3] 樊政军,金意志,贺铎华.低阻储层参数的测井解释与精度检验[J].西北油气勘查与开发,1996(1).

[4] 潘和平,刘国强.BP 网络确定煤质参数和煤层气含量[J].地球科学,1997(3).

[5] 潘和平,樊政军,王家映,等.新疆塔北低阻油气储层导电模型—双水泥质骨架导电模型[J].中国科学,2001(2).

THE APPLICATION OF BP NEURAL NETWORK TO RECOGNITION OF THE TABEI LOW RESISTIVITY OIL AND GAS LAYERS

HE Duo-hua

(Engineering and Technical Center , Northwest Bureau of Petroleum , New Star Company of China Petroleum and Chemical Industry Corporation , Urumchi 830011 , China)

Abstract : This paper describes in brief the lithologic profiles and the geophysical logging curves of the low resistivity oil and gas layers in Tabei area , analyzes the origin of the low resistivity oil and gas reservoirs in that area , and deals emphatically with the principle of applying the neural network to recognizing oil and gas layers , oil-water layers , water layers and dry layers. The recognition of low resistivity oil (gas) layers and water layers is consistent with the real conditions , thus obviously improving the interpretation precision of logging data.

Key words : Tabei area ; low resistivity oil and gas layer ; BP artificial neural network ; interpretation of logging data.

作者简介:贺铎华(1961-)男,1985~1988年在成都地质学院物探系(石油测井)学习,目前在中石化新星公司西北石油局工程技术中心工作,主要从事塔里木盆地测井资料解释与研究工作。

(上接 130 页)

Abstract : This paper processed the simple fractal data with pyramidal algorithm of wavelet analysis and , in combination with the "random resonance" theory , analyzed and approached noise and error in high-precision micro-magnetic anomaly. According to residual magnetic anomaly detected by tendency analysis , the authors suggest controlling normal random Brown motion of non-integer rank calculus with "shift with the window" least squares technique , and provide essential guidance for effective recognition of high-precision micro-magnetic anomaly.

Key words : wavelet analysis ;fractal ;random resonance ;micro-magnetic anomaly ;calculus of non-integral rank

作者简介:耿喜哲(1968-)男,黑龙江省呼兰县人,1999年获中国地质大学(武汉)硕士学位,现为该校博士生,发表论文3篇。