

频谱分析方法在气氦周期分析中的应用*

李瑞华, 张海燕

(德州市地震局, 山东 德州 253016)

摘要: 利用数字信号处理的相关理论与方法, 对聊古1井两年的气氦逐时值数据进行适当的滤波处理, 用频谱分析的方法提取潜在周期信息。结果表明: 聊古1井气氦数据除明显的年周期外, 还存在12小时、24小时的短周期效应和1~2个月的中长周期波动。说明数字信号处理技术对地震前兆数据处理有很好效果和应用前景。

关键词: 频谱分析; 聊古1井; 气氦; 数字滤波

中图分类号: P315.72 文献标识码: A

0 引言

随着数字信号处理技术的不断发展与成熟, 其在各个领域的应用也越来越广泛和深入, 充分利用较为成熟的数字信号处理技术, 对现有的前兆观测数据进行分析, 对于挖掘隐含在海量数据中的规律, 可以起到事半功倍的效果。氦测项在我国地震预测研究中占据十分重要的地位^[1], 而气氦又是近几年来开展的新测项。本文利用数字信号处理中的频谱分析和数字滤波技术, 对聊古1井气氦逐时值与日均值进行分析, 寻找其中隐含的周期结构, 从而获得一些新的认识。

1 井孔概况及气氦观测介绍

本文样本数据采用山东聊城聊古1井2003年1月~2004年12月两年的气氦逐时值数据为原始数据。该段数据完整连续, 形态稳定, 无明显外部干扰。

1.1 观测井及观测设备简介

聊古1井井口装置示意图位于聊城市东郊军王屯(见图1), 地理坐标为 $N36^{\circ}28'$, $E116^{\circ}15'$, 海拔标高34m。该井构造位置在聊城—兰考断裂带北段, 系井深2337.72m的自流井。含水层为奥陶纪—寒武纪灰岩, 是多层混合岩溶裂隙承压水。流量为 $6.7\text{m}^3/\text{h}$, 井口压力为 68.6KPa , 水温为 51.5°C ^[2]。聊古1井为国家一类水化观测井, 流量稳定, 井孔封闭好, 干扰因素较少, 是理想的水化观测井孔。

本文中的“气氦”, 是指使用SD-3A型测氦仪测定的逸出氦。该仪器每日产出24个整点测值。

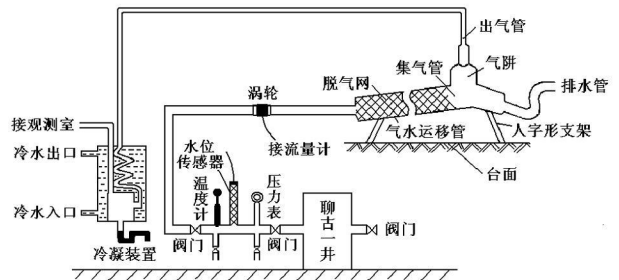


图1 聊古1井地下流体数字化观测管路示意图
(据聊城水化站)

1998年2月26日在聊城地震水化站安装了SD-3A型测氦仪; 2000年1月1日开始正式观测。

1.2 聊古1井气氦的动态特征

从图2可以看出, 聊古1井气氦具有缓慢下降的多年变化; 年动态为夏低冬高型; 月动态为起伏型, 但起伏幅度不大, 某些月份有轻微的上升或下降趋势; 日动态随机起伏, 无明显直观特征。

2 资料预处理

频谱分析法适用于长序列平稳动态资料, 即动态计时曲线的周期成分比较显著。对于含有趋势项的非平稳动态曲线, 由于趋势项没有周期变动或者其周期为无穷大, 使得傅立叶变换主要是对趋势项进行变换, 从而掩盖了周期变化。因此对气氦数据序列需要进行平稳化处理, 即消除多年连续下降的趋势项。

去除趋势项的方法一般有两种, 一是对原始序列估计其变化趋势, 然后从中抽取这一趋势。二是

* 收稿日期: 2007-10-18

作者简介: 李瑞华(1970—), 女(汉族), 山西阳泉人, 德州市地震局工程师, 主要从事地震监测预报工作。

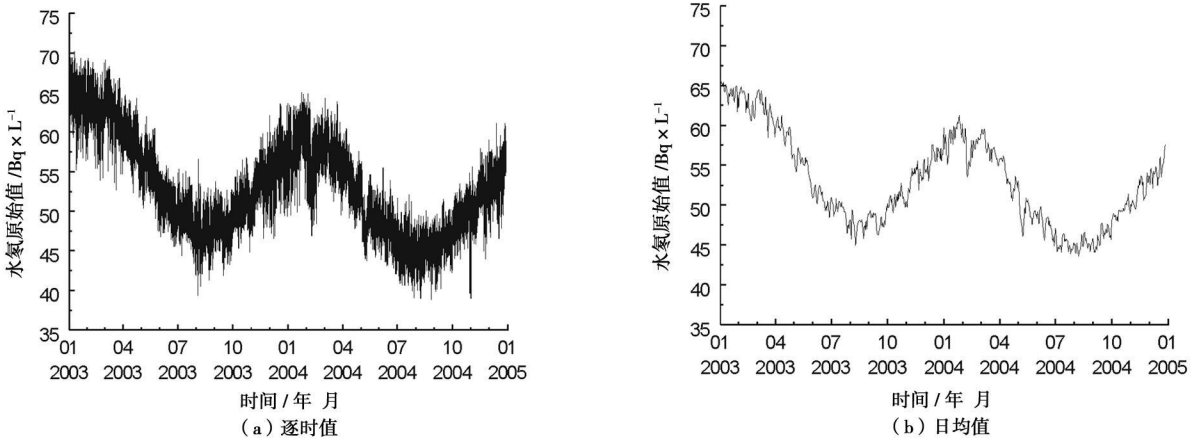


图2 聊古1井气氡变化曲线图

对原始序列进行差分。第一种方法可利用多项式函数、指数函数、对数函数或其组合等对原始序列拟合。但是, 地下流体观测的实践表明, 趋势项一般可用较初等的函数来模拟。通过实际验证对比, 本文选用第一种方法, 用比较简单的线形估计即可达到较理想的效果, 本文采用如下多项式来消除趋势项^[3]:

$$f(t) = b_0 + b_1 t$$

式中 t 为数据序号; $f(t)$ 为一元线性回归方程。

遵循最小二乘法的回归算法^[3]:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(f(t_i) - \bar{f})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

$$b_0 = \bar{f} - b_1 \bar{t} \quad \text{其中 } \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

通过实际演算, 得到本例中逐时值曲线回归方程为:

$$f(t) = 58.5939649 - 0.0006368t$$

日均值曲线回归方程为:

$$f(t) = 58.6200857 - 0.0153936t$$

利用回归方程去除趋势项后的数据序列如图3, 与图2对比可明显看出逐时值和日均值曲线中缓慢下降趋势已经被剔除。

3 频谱分析

3.1 频谱分析原理

利用时间序列的有限样本数据序列, 对时间序列的谱分布进行统计分析, 称为时间序列的谱分析, 也称为时间序列的频域分析, 主要是建立在对数据序列进行离散傅里叶变换的基础上实现的^[4]。从理论上说, 一个平稳时间序列可以被分解成不同频率谐波的叠加, 其分解的谱密度(或谱分布)描述了时间序列的频率结构。

离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, 缩写为 DFT), 是傅里叶变换在时域和频域上都呈离散的形式^[5], 离散时间傅里叶变换(Discrete Time Fourier Transform, 缩写为 DTFT)是在时域上对连

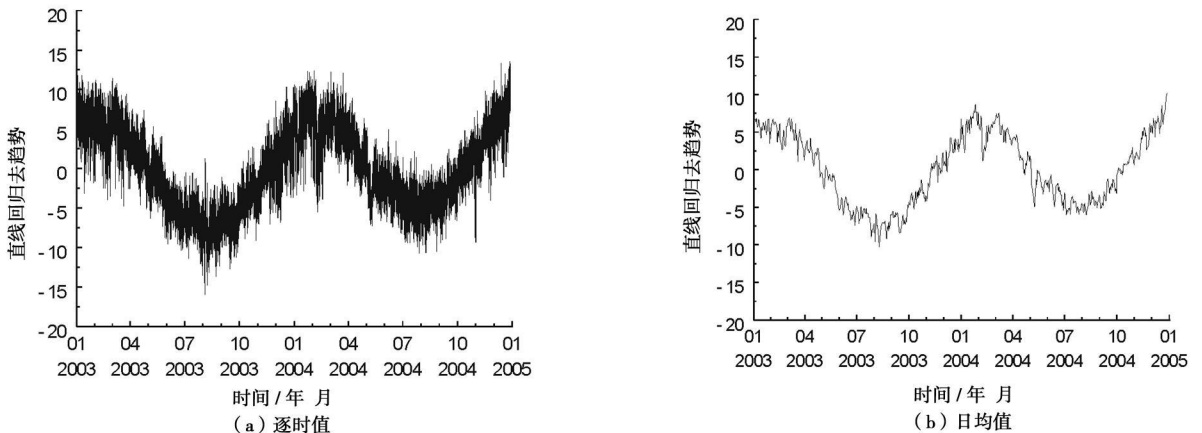


图3 聊古1井气氡去除趋势项后的逐时值、日均值数据序列图

续傅里叶变换的采样, DFT 则是在频域上对 DTFT 的均匀采样。在形式上, 变换两端(时域和频域上)的序列是有限长的, 而实际上这两组序列都应当被认为是离散周期信号的主值序列。即使对有限长的离散信号作 DFT, 也应当将其看作其周期延拓的变换。DFT 应用于频谱分析需要注意的两个问题: 即采样可能导致信号混叠和截断信号引起的频谱泄漏。前者可以通过选择适当的采样频率消减混叠, 后者一般选择适当的序列长度并设计合适的窗函数抑制频谱泄漏。在实际应用中通常采用快速傅里叶变换计算 DFT。

离散时间序列 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 的快速傅里叶变换(FFT)被定义为:

$$\begin{aligned}
 Y_k &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \exp\{-i2\pi f_k(t-1)\} \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t [\cos(2\pi f_k(t-1)) - i \sin(2\pi f_k(t-1))] \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos(2\pi f_k(t-1)) + i \left[-\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \sin(2\pi f_k(t-1)) \right] \\
 &= a_k + ib_k
 \end{aligned}$$

这里的 a, b 是由 FFT 变换产生的两个序列, 分别为:

$$\begin{aligned}
 a_k &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos(2\pi f_k(t-1)) \\
 b_k &= -\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \sin(2\pi f_k(t-1))
 \end{aligned}$$

式中 $k = 1, 2, \dots, r$
 $r = \begin{cases} (n-1)/2 \dots\dots\dots n \text{ 为奇数} \\ n/2 \dots\dots\dots n \text{ 为偶数} \end{cases}$

并且

$$\begin{aligned}
 a_0 &= X \\
 b_0 &= -\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos(\pi(t-1))
 \end{aligned}$$

傅里叶变换将信号信息转换成每个成份频率上的幅度和相位, 在频域分析中, 经常被用来确定输入信号中有那些频率的信号和没有那些频率的信号。实际应用中, 傅里叶变换经常转换成功率谱, 功率谱是每个成份频率幅度的平方。也有一些通用的频域变换方法, 例如本文采用的对数倒频谱(cepstrum)方法, 即通过傅里叶变换将信号转换到频域、取对数、然后再进行傅里叶变换。这种方法加强了幅度较小的频率成份, 同时不改变各频率幅度的顺序。

3.2 频谱分析结果

用快速傅里叶变换的方法分别对去除趋势后的气氦逐时值、日均值数据进行分析, 结果见图 4。为便于直观对比, 图中已将频率数据换算成相应的周期数据。

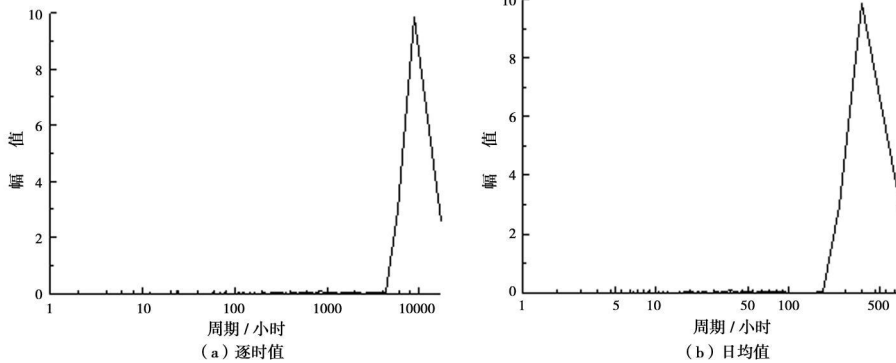


图 4 聊古 1 井气氦去除趋势项后逐时值、日均值数据的频谱图

从图 4 中可见, 数据的频域信息全部被年周期掩盖。要想观察到短周期的信息, 还需要对数据作进一步的滤波处理。

4 数字滤波处理

在离散信号数字处理中, 滤波的重要性在于最大程度地消除干扰信号, 增强和保留有效信号。数字滤波器是对数字信号进行滤波处理, 筛选出期望

的响应特性的离散时间系统。数字滤波器具有高精度, 高信噪比, 高可靠性的明显特点。滤波的方法多种多样, 但是, 基本的和重要的滤波概念都是建立在频谱分析的基础之上。

数字滤波器一般可用 N 阶差分方程来描述⁹:

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k)$$

其相应的系统函数为:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

本文采用巴特沃斯数字高通滤波器对气氡数据进行滤波处理, 该滤波器的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦, 没有起伏; 而在阻频带则逐渐下降为零, 保证了在通频带内的信息真实还原^[7]。通过巴特沃斯数字高通滤波, 去除气氡数据中年变等长周期成份, 从而进一步呈现数据中包含的短周期成份。

n 阶巴特沃斯低通滤波器的振幅和频率关系可用如下的公式表示^[5]:

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

其中:

G 表示滤波器的放大率;

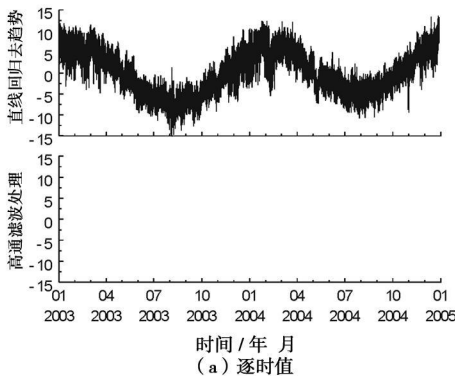
n 表示滤波器的阶数, 可由以下公式算的:

$$n = \log\left(\left(\frac{1}{G_n(\omega)}\right)^2 - 1\right) / \log(\omega)$$

ω 是信号的频率;

ω_c 是振幅下降 3 分贝时的截止频率。

对于二阶巴特沃斯滤波器, 通过查表, 可得二阶归一化模拟低通滤波器的传输函数为:



$$A(p) = \frac{1}{p^2 + \sqrt{2}p + 1}$$

p 表示拉氏变量 s 对参考频率 Ω_c 的归一化变量, 模拟低通滤波器转换成数字高通滤波器时, p 采用如下公式^[8]:

$$p = \frac{1}{2} \Omega_c T \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} = \text{tg} \frac{\omega_p}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

按采样频率为 $f=1$, 即 $T=1$, 通带截至频率 $f_p=0.001$, 即滤除波动周期大于 1000 个小时的信号波动。

$$\begin{aligned} p &= \text{tg} \frac{\omega_p}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} = \text{tg} \frac{2\pi f_p T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \\ &= 0.00314 \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{代入 } H(z) &= A(p) = \frac{1}{p^2 + \sqrt{2}p + 1} \\ &= \frac{0.9956 - 1.9911z^{-1} + 0.9956z^{-2}}{1 - 1.9911z^{-1} + 0.9912z^{-2}} \end{aligned}$$

由上述得到的二阶数字滤波器的系统函数可以得到所设计的数字滤波器的二阶差分方程为:

$$y(n) = 0.9956x(n) - 1.9911x(n-1) + 0.9956x(n-2) + 1.9911y(n-1) - 0.9912y(n-2)$$

按此方法对去除趋势项后的气氡数据滤波, 处理后数据如图 5 所示。

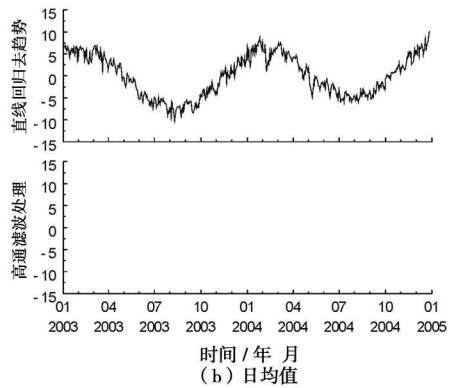


图 5 去除趋势项后的气氡逐时值、日均值的数据滤波曲线

从图 5 中可以看出, 对去处趋势项后的气氡数据作数字滤波处理后, 聊古 1 井气氡夏低冬高的年变周期规律已被剔除, 高通滤波后, 气氡逐时值、日均值基本上均呈平稳起伏状态。

5 对滤波后数据进行频谱分析

对数字滤波后的气氡逐时值、日均值分别进行离散傅里叶分析, 结果如图 6。

从频谱分析图 6a 可见, 气氡逐时值具有明显的 12 小时和 24 小时的周期曲线成分, 即气氡固体潮的半日潮和日潮效应。

在日均值频谱分析图 6b 中, 最大的 6 个峰值周期分别为 16.93 天、36.4 天、48.53 天、66.18 天、72.8 天、80.89 天, 具有明显的线性递增关系。其线形回归模型为 $y=11.325x+15.66$, 都接近是 12 的倍数(图 7)。

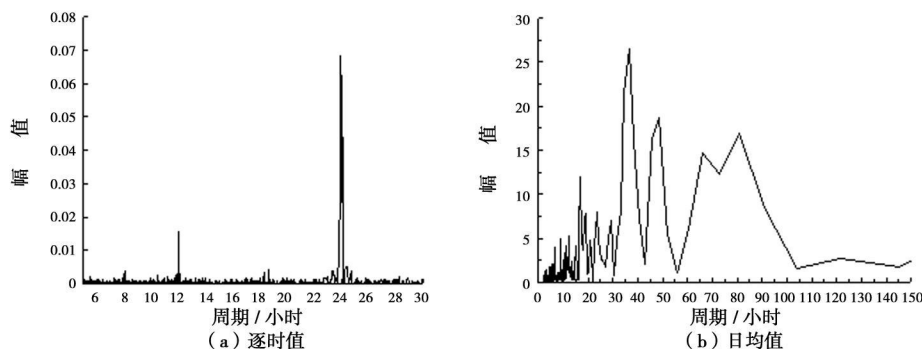


图6 数字滤波后的频谱分析图

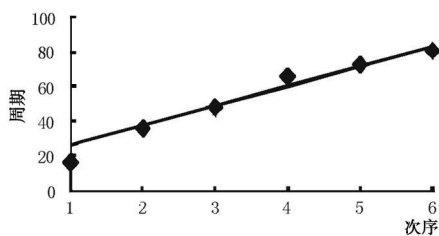


图7 日均值频谱分析的峰值线形回归示意图

6 结语

(1)用频谱分析的方法能有效从众多信息中提取气氡的隐含周期,以利于深入揭示气氡等正常与异常动态变化规律。

(2)在频谱分析中,提取短周期信息,需要去除趋势项,并合理的选择滤波器。

(3)使用快速傅里叶变换方法做分析,显示出聊古一井气氡逐时值、日均值数据含有显著的年周期变化。年变化为“夏低冬高”型,且与气温的年变化有关^[1]。

(4)聊古1井气氡逐时值频谱分析显示,该井气氡值有12小时、24小时的固体潮效应。气氡日均值频谱分析数据显示,有一组集中在16~81天之间的周期项,线性关系明显,且均接近12的整数倍,其内部规律有待进一步揭示。

(5)把数字信号处理的方法运用到地震前兆数据分析过程中,能为地震前兆数据分析提供更为可靠的分析依据,有着较好的应用前景。

聊城水化站魏汝庆等为本文提供了详实可靠的基础数据资料,并给以大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 张伟,王吉易,鄂秀满,等.水文地球化学预报地震的原理和方法[M].北京:教育出版社,1988.23-250.
- [2] 魏汝庆,赵杰峰,崔娜.聊古一井气氡动态特征分析[J].华北地震科学,2006,24(3):40-43.
- [3] 韩金炎.数学地质[M].北京:煤炭工业出版社,1987.102-113.
- [4] 安鸿志.时间序列分析[M].上海:华东师范大学出版社,1992.167-189.
- [5] 程乾生.信号数学处理的数学原理[M].北京:石油工业出版社,1993.132-173.
- [6] 杨华中,汪蕙.数值计算方法与C语言工程函数库[M].北京:科学出版社,1996.380-427.
- [7] 邹鲲,袁俊泉,龚享钰.MATLAB 6.x 信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.153-214.
- [8] 程佩青.数字信号处理教程(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2001.202-322.

Application of spectral method in the analysis of gas radon's cycle

LI Rui-hua, ZHANG Hai-yuan

(Earthquake Administration of Dezhou City, Dezhou 253016, Shandong Province China)

Abstract: Based on digital signal processing method, the gas radon data of Liaogu-1 Well in recent two years are filtered, and its potential cycle is picked up with spectral analysis. The results show: besides the annual cycle, there are a 12 and a 24 hour short cycle and a 1~2 month moderate long cycle in the data. It indicates that digital signal processing technology is useful in the processing of seismic precursory data.

Key words: spectral analysis; gas radon; digital filtering