

文章编号:1672—7940(2006)05—386—06

高阶统计量方法在地球物理学中的应用

李志华

(中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

摘要: 高阶统计量方法是研究非高斯过程, 非最小相位信号和非线性系统的有力工具, 其应用领域已涉及通信、地球物理、生物医学、故障诊断等。本文就近年来高阶统计量在地球物理学中的应用现状进行简要的综述。

关键词: 信号处理; 高阶统计量; 大地电磁; 地震勘探; 碳氢检测

中图分类号: P631

文献标识码: A

收稿日期: 2006—06—27

APPLICATION OF HIGH - ORDER STATISTICS IN GEOPHYSICS

LI Zhi-hua

(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: High-order statistics is a useful tool for studying non-Gaussian processes, non-minimum phase systems and nonlinear systems. The method of high-order statistics has been applied widely in different fields such as Communication, Geophysics, Biomedical, Fault Diagnosis, etc. This paper summarizes the main theoretical results about applications of high-order statistics in geophysics.

Key words: signal processing; higher-order statistics; magnetotelluric; seismic exploration; mineralization

1 引言

高阶统计量是近二十多年来发展起来的一种新的信号分析和处理理论, 它是从解决功率谱和自相关所存在的问题着手的。20世纪50年代, 一些学者就开始了高阶矩的研究, 1965年 Rosenblatt 和 Van Ness 就发表了双谱估计的文章^[1], 在同一年 Brillinger 全面介绍了多谱理论^[2]。但是, 直到20世纪80年代后期, 这方面的研究才真正得到迅速发展与应用, 出现了高阶谱理论和应用研究的高潮。人们在研究中发现, 利用高阶统计量进行信号处理, 可以抑制加性高斯(或非高斯)有色噪声的影

响, 可以检测和识别弱信号, 以及辨识非因果、非最小相位系统或重构非最小相位信号。

在信号处理领域, 人们常常习惯于假设信号或噪声服从高斯分布, 从而仅用二阶统计量(如二阶矩, 相关函数, 功率谱密度函数等)便可提取信息, 进行参数辨识以及各种处理。然而, 高斯分布只是许多分布类型中的一种。对于非线性系统而言, 即使输入是高斯信号, 输出的却为非高斯信号。因此, 非高斯信号更是普遍。对于非高斯信号来说, 二阶统计量只是其中一部分信息, 不包含相位信息。因此, 对于非最小相位系统的辨识而言, 二阶统计量便显得无能为力。在实际工作中, 我们常常遇到大量非高斯、非最小相位、非因果、非平稳信号

的处理问题。高阶统计量方法是解决这些问题的主要手段,它给我们提供了十分丰富的信息,利用高阶统计量可以辨识非因果、非最小相位、非线性系统;可以抑制高斯或非高斯的有色噪声;可以提取不同于高斯信号的多种信号特征;可以分析与处理循环平稳信号等等。高阶统计量是描述随机过程高阶(二阶以上)统计特性的一种数学工具,包括高阶累积量和高阶矩。同样与自相关函数的傅立叶变换定义为函数的功率谱类似,高阶累积量的多维傅立叶变换定义为高阶谱(或称多谱)。高阶统计量与二阶统计量(自相关函数)相比具有三方面显著的优点:①高阶累积量具有对高斯有色噪声恒为零的特点,因而可用于提取高斯有色噪声中的非高斯信号;②高阶累积量含有系统的相位信息,因而可用于非最小相位系统辨识;③高阶统计量可用于检测和描述系统的非线性,如检测高斯信号或非高斯信号。这些特征使得高阶统计量已成为信号处理领域中一种新的强有力的工具,目前,其应用范围已涉及通信、声纳、雷达、语音处理、图象处理、时延估计、系统辨识、自适应滤波、阵列处理、地震信号处理、生物医学工程、故障诊断等大量领域^[3,4]。前人的研究已经表明,高阶统计量不但继承了相关与功率谱的优点,而且在对信号的分析中提供了更多的信息,如相位,高斯性等。高阶统计量作为一种新的适用于非线性信号分析和处理的工具,能够在地球物理信号分析和处理中发挥更大的作用。这里仅就高阶统计量方法在地球物理学中的应用概况做一简要综述。

2 高阶统计量方法在地震勘探中的应用

对于一个含高斯有色噪声的线性时不变系统可以表示为

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) + v(n) \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)e(n-i) + v(n) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $h(n)$ 为系统的冲激响应, $v(n)$ 为高斯有色噪声,若系统输入 $e(n)$ 为独立同分布的非高斯白噪声,即 $c_{h_e}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \gamma_{h_e}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})$, 根据高阶累积量的性质则有

$$c_{h_y}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \gamma_{h_e} \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)h(i+\tau_1) \cdots h(i+\tau_{k-1}) \quad (2)$$

对上式作 $k-1$ 维 Fourier 变换,即得高阶谱

与系统响应函数之间的重要关系式

$$S_{h_y}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \gamma_{h_e} \sum_{i=-\infty}^{\infty} H(\omega_1)H(\omega_2) \cdots H(\omega_{k-1})H[-\sum_{i=1}^{k-1} \omega_i] \quad (3)$$

(2)和(3)式就是利用高阶累积量进行非最小相位系统辨识的理论基础,也是高阶统计量首先应用于地震勘探中子波估计的基本公式。

地球物理信号,特别是地震信号大多是非线性的、非平稳的时间序列,因此可以将高阶统计量方法作为地球物理信号分析和处理的一种基本工具。在地球物理中,高阶统计量主要是应用于地震勘探方面^[5~7]。如利用高阶统计量进行时间延迟估计,检测小断层^[8];利用高阶统计量进行地震子波估计^[9],这种新方法可以解决子波相位估计问题;利用高阶统计量进行地震信号相位和振幅的恢复,进行信号的重构^[10];利用高阶统计量进行剩余静校正处理^[11]等。尹成等^[12]就高阶统计量在地震信号处理中的应用做了简要综述,并根据高阶统计量的相关理论展望了高阶统计量方法在地震勘探领域里的应用前景。

基于高阶统计量的时延估计(即切片位置估计)算法,开发了新的地震初至拾取以及同相轴追踪技术,取得的结果优于二阶统计量的技术所取得的结果。从理论模型的数据处理结果看,这些方法能有效提高成像的分辨率,具有较好的抗干扰能力。

高阶谱在子波估计及处理方面的应用,将地震资料处理方法由二阶(自相关)推向了高阶。高阶谱子波估计及处理方法,不但摆脱了地震子波最小相位的假设,使其真实的子波从高阶谱中得到恢复,从而使地震资料的分辨率得到提高,而且能够依据高阶谱的抗色噪声干扰能力,使其在子波处理过程中排除噪声干扰,使得有效波更为突出,这是常规的二阶估计方法所无法比拟的。

3 高阶统计量方法在油气地球物理勘探中的应用

各种各样的地震属性分析是地震数据解释的辅助手段。近年来,随着三维地震技术逐渐被广泛地应用在油气勘探上,对三维数据体进行属性分析也日渐成为一个必不可少的解释和油气储层预测的有利工具。地震属性是叠前或叠后地震数据经过数学变换而导出的有关地震波运动学、动

力学和统计特征的特征参数,是表征和研究地震数据内部所包含的时间、振幅、频率、相位以及衰减特性的指标。不同属性代表不同的物性,对各种异常变化的敏感点也有所不同。

3.1 基于高阶统计量的油气检测方法

在从地震信息中提取参数进行油气检测的研究中,反映油气特征的六大地震信息主要有振幅、频率、速度、吸收衰减、波形和时间,其中地震反射波的振幅类属性是地震动力学的主要特征之一,在油气预测中占有着极其重要的地位。但是,常规的振幅类属性处理方法往往围绕均方根振幅和傅里叶变换(FFT)或自相关函数或功率谱函数提取的参数进行研究,它们不仅受噪声的影响较大,而且有时还丢失了很多信息。为了克服常规振幅属性检测油气的不足,熊晓军等将高阶统计量引入到油气检测中,采用双谱能量和三谱峰值进行了计算^[13]。

除了一些比较常规的振幅属性分析、复数道分析和相关分析之外,一些新的地震属性也日益被应用进来,高阶统计量就是其中之一。高阶统计量理论对处理非平稳的、时变的、非最小相位的和非线性系统条件下的随机信号开辟了一条新的途径。信号的非平稳性、时变性、非最小相位性和非线性系统处理可以一起归结为信号的非线性处理。此前,信号的非线性处理一直都没有统一的处理框架,只能针对具体的问题,寻找不同的非线性的解决方案。高阶统计量理论为非线性信号的处理提供了一个一般的理论基础,所有的非线性信号问题几乎都能用高阶统计量进行分析和处理。

3.2 断层检测与解释

在地质构造中,断层是一种普遍存在的、较复杂的地质现象,对油气的运移、聚集起着很重要的控制作用,并与油气藏的形成、分布、富集有着十分密切的关系。其在地震剖面上主要表现为异常波的出现和反射波同相轴的变化特征,即错断、形变、分叉、合并或反射零乱等。目前断层解释的可视化方法以相干技术为主,它们都是对断层作出定性的解释,在识别小断层和定量解释小断层方面有很大的局限性。如何利用地震勘探技术精确地检测、识别微小断层,一直是地震资料解释中的一个十分重要的问题。

文献[14,15]提出了基于信号三阶累积量的双相干相关系数进行时延估计来鉴别地震资料上微小断层和估算其落差的方法。该方法同样利用

了高阶累积量对高斯噪声不敏感的特点,因而相对于常规的互相关时延估计来说具有更好的抗噪声能力。在断层检测中首先对相邻两道地震信号 x 和 y 求取自双谱 $B_{xxx}(\omega_1, \omega_2)$ 和 $B_{xyx}(\omega_1, \omega_2)$ 互双谱,然后用其功率谱进行规范化得到其自双相干系数和互双相干系数

$$b_{xxx}(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{xxx}(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{xx}(\omega_1)P_{xx}(\omega_2)P_{xx}(\omega_1 + \omega_2)}} \quad (4)$$

$$b_{xyx}(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{xyx}(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{yy}(\omega_1)P_{xx}(\omega_2)P_{xx}(\omega_1 + \omega_2)}} \quad (5)$$

应用两个相干系数的比值建立双相干相关函数

$$T(\tau) = \left[\frac{b_{xxx}(\omega_1, \omega_2)}{b_{xyx}(\omega_1, \omega_2)} \right] e^{i\omega_1 \tau} d\omega_1 \quad (6)$$

其双相干相关函数 $T(\tau)$ 的最大值对应的延迟时间 τ_0 即可检测出断层的存在即落差大小。基于双谱的双相干相关法对高斯随机噪声具有很好的压制作用,文献[16]从理论模型和实际资料给出了应用结果,这对于地震资料中断层的自动解释来说具有很好的应用价值。张爱敏等^[17]根据对小断层反射波特征的系统研究,得到了识别小断层的主要标志——反射波时差,因此,采用 Tugnait^[18]提出的四阶累积量函数估计相邻地震道之间的时间延迟来确定反射波时差,以便进行小断层的定量解释和自动识别。其函数的具体计算公式如:

$$J_1(d) = \frac{|cum_4[x(n-d), x(n-d), y(n), y(n)]|}{\sqrt{|cum_4[x(n)]||cum_4[y(n)]|}} \quad (7)$$

$$cum_4[x(n-d), x(n-d), y(n), y(n)] = \frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^{N_2} x^2(n-d)y^2(n) - 2\left[\frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^{N_2} x(n-d)y(n)\right]^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^N x^2(n)\right]\left[\frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^N y^2(n)\right] \quad (8)$$

式中: $x(n)$ 和 $y(n)$ 为两个数据道; d 为时间延迟量; $N_1 = \max(1, d+1)$; $N_2 = \min(N, N+d)$; cum_4 为四阶累积量函数。当估计子函数 $J_1(d)$ 取最大值时,对应的 d 值即为需要的时间延迟。该方法由于采用四阶累积量函数进行计算,不仅克服了双相干相关方法在地震信号对称的情况下(三阶累积量为零)不能正常计算的缺点,而且可以通过 FFT 进行快速计算,具有很高的计算效率。

3.3 高阶谱时频分析方法

地震信号的一个基本统计特征就是符合广义高斯分布。广义高斯分布是一种接近于高斯分布,并具有对称形式的概率密度分布。在介质是分层均匀的情况下,实际的地震信号可以看作是一种零均值的接近于对称的广义高斯分布信号;然而,当地下介质的性质发生突变时,例如孔洞、裂缝、饱和含气岩石、火山岩体等,地震信号将不再满足对称的广义高斯分布,如果能用某种手段检测这种非对称和非高斯性的变化,就能够识别出地下介质性质的突变区。检测这种非对称和非高斯性的地震信号^[19,20],既可以在时间域,也可以在频率域进行。通过试验发现,当地震反射信号的统计性质偏离广义高斯分布的情况下,含饱和气的地层或孔洞就会在频率域表现出异常的谱分布,因此,在频率域进行检测应该能够区分出地震信号的异常。杜宁平等从信号的高阶统计量这个新角度,采用高阶谱时频分析方法,研究信号的 Wigner 双谱性质,达到了识别和提取地层含气而产生的地球物理异常^[21]。结果表明高阶统计量技术能较有效地提取出地震信号的异常反射,且显示直观,便于解释,为提高碳氢检测的可靠性提供了新的信息。

4 高阶统计量方法在大地电磁(MT)中的应用^[22~26]

在大地电磁测深法(MT)中,大地电磁响应函数(视电阻率、相位等)经常出现个别频点分散、误差棒较大、形态扭曲等现象,在资料反演解释时,许多地质特征难以有效提取出来,这些问题严重阻碍了 MT 的实际应用和发展。其主要原因是天然大地电磁信号通常比较微弱、传统资料处理方式存在问题。MT 法是以天然场作场源,尤其在 1s 附近强度很小,而该频段所对应的又常常是地质勘探的重要区段。就信号处理方法而言,以往基于功率谱的各种方法,对信号和地质模型作了许多假设和要求,如假设大地电磁信号为高斯信号,噪声为高斯白噪声,大地系统为线性最小相位系统等,但实际情况往往并非如此。由于功率谱方法本身内在的计算方式,不能有效抑制高斯噪声,致使 MT 解释结果不太理想^[27,28]。

大地电磁资料处理方法近年来得到了迅速发

展,取得了许多理论和应用成果,但仍然存在许多问题,如对大地电磁信号统计特征的分析 and 判断,针对高斯噪声的抑制等。20 世纪 80 年代后期以来,随着高阶统计理论进一步发展和完善,高阶统计信号处理已经渗透到信号处理各个应用领域,在地球物理资料处理中也取得了一些研究成果。高阶统计量理论及方法应用到 MT 领域进行统计特征分析、模型识别、模型参数和阶的估算以及有色噪声抑制等,是一个崭新的前沿课题。国内把高阶统计量应用于 MT 的文章并不多见。针对大地电磁测深法(MT),王书明等提出了 MT 资料处理的高阶统计量方法^[22~26]。

4.1 利用高阶统计量重构功率谱

线性非高斯信号的高阶谱可以表示为^[3]

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \gamma_{kx} H(\omega_1) \cdots H(\omega_{k-1}) H^*(\omega_1 + \dots + \omega_{k-1}) \quad (9)$$

式中 γ_{kx} 是一个与输入信号 u 相对应的常标量, $H(x)$ 是线性时不变系统的频率传递函数, H^* 是 H 的共轭。如果非高斯信号 $x(n)$ 是由非高斯白噪声 $u(n)$ 激励一个线性时不变系统产生,那么式(9)对所有阶数均成立,并且有

$$P_x(\omega) = \gamma_{2x} |H(\omega)|^2 \quad (10)$$

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \gamma_{3x} H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2) \quad (11)$$

$$T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \gamma_{4x} H(\omega_1) H(\omega_2) H(\omega_3) H^*(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \quad (12)$$

式中 P_x 、 B_x 和 T_x 分别是信号 x 的功率谱、双谱和三谱。根据(10)~(12)式,我们可以由一个线性过程的双谱和三谱重构其功率谱,重构的功率谱和原功率谱之间至多相差一常数。通过上述方法重构功率谱之后,就可以利用已有的方法估算视电阻率、相位等 MT 响应函数了。

4.2 MT 时间序列的一些统计特性

MT 信号一般呈非线性特征^[29,30]。最小相位系统和非最小相位系统的输出具有相同的功率谱密度,但是它们的双谱是明显不同的。功率谱密度(及相应的自相关函数)不含信号的相位信息,不能分辨非最小相位信号,如果利用功率谱方法处理非最小相位信号,将会丢失信号中许多有用信息。然而,双谱(及相应的累积量)包含了信号模型的相位信息,利用双谱方法处理非最小相位信号不会丢失信号中的有用信息。所以,高阶统计量方法可以有效处理具有非最小相位特征的 MT 信号。

5 高阶统计量方法在其它方面的应用

在地球物理中,高阶统计量主要用于地震勘探方面。1983年 Mendel 率先将高阶统计量用于地震反褶积方法中反射系数序列呈非高斯分布的实现问题^[5]。随后, Lazea、Velis 和 Ulrych 分别在 Geophysics 杂志上发表了用四阶累积量估计混合相位子波的实例^[6,7]。Yung 利用双谱相关技术拾取初至时间比传统的互相关方法精度更高^[31],表明高阶统计量作为一种新的信号分析和处理工具,能够在地球物理信号分析和处理中发挥较大作用。在国内地球物理界,高阶统计量是一个新生事物,它在地球物理相关领域的应用还处于研究阶段,但一些学者已利用高阶统计量在大地电磁模式识别^[22~25]、子波提取^[32,33]、固井模式特征提取^[34]、“磁亮点”识别和提取^[35]、地质孔洞识别^[36]等方面做了一些尝试,也取得了一些成果。

5.1 高阶统计量弱信号识别方法

碳酸盐岩是一种重要的储油岩。在由碳酸盐岩形成的岩体中,常包含大量的孔、洞和缝隙,是油气运移和富集的主要通道和储层。这类储层形成的油藏,产量高、储量大。碳酸盐岩储层具有非均质性强、连通性差、裂缝分布不均、一些区域有较强的各向异性的特点。因此,寻找一种有效的方法,能够识别和确定出含孔洞、缝隙形成的油藏的碳酸盐岩储层是一项非常有价值和具有实际意义的工作。

20世纪80年代后,国内外学者根据烃垂向运移渗漏效应在近地表面形成的磁性蚀变带,提出了根据磁性蚀变带产生的弱磁异常直接找油气的理论。由于极易受到地面人文设施的影响,难以将烃运移所形成的弱磁异常从人文干扰中可靠地识别出来。弱信号之所以能够被识别和提取,是因为它与其他干扰信号在时间分布(空间分布)上,或在频率分布上,或在统计分布上存在一定的差异。因此,如果干扰信号和有用信号在时间分布(空间分布)上有一定差异,可以用一定长度的时窗来提取有用信号;如果干扰信号和有用信号在频率分布上有差异,就可以用频率域滤波的方法(高通滤波、低通滤波或带通滤波)来分离干扰信号;如果干扰信号和有用信号在统计分布上有

差别,可以用相关分析的方法来识别干扰信号和有用信号。

高阶统计量能够抽取随时间而变化的非高斯性信息,能够有效地识别出在高斯强干扰下的非高斯微弱信号,在对信号分析中不但可以反映信号的整体与局部变化,而且对信号有更高的分辨率。高阶统计量为强噪声背景下地质孔洞识别提供了一种新方法。

5.2 高阶统计量在工程勘探中的应用研究

声波和探地雷达方法是水利工程、高速公路、大型建筑物地基勘察、质量检查的重要方法,在浅层(0~20cm)的工程勘探和质量检测中效果相当的显著。由于实际问题的复杂性和各种干扰波的存在,传统声波探测和探地雷达获得的结果,不管是从波的运动学观点还是动力学观点解释都是比较困难的。因此,必要的后期数据处理和解释性处理以提取出工程勘探和质量检测中的异常,直观地进行工程地质解释和显示是必要的。

声波数据中面波和多次波比较发育,探地雷达数据频率比较高、衰减较快、易受干扰等因素,对实测资料解释,特别是对一些小的异常解释比较困难。声波和雷达信号与地震信号都是波动信号,应该可以将在地震中发展起来的高阶统计量分析方法应用于这两种工程质量检查方法。事实证明,高阶统计量分析方法在声波和探地雷达的应用中有相当好的效果,其处理结果对工程质量检测的直观解释很有帮助。

一般情形下,地震信号是广义高斯分布的时间序列;具有广义高斯分布的地震信号,当记录中混有由非均匀介质导致的非高斯的或非线形的低频信号时,能够利用广义高斯分布地震时间序列的基本性质,用随时间变化的斜度变化率和峰度变化率、时频双谱分析、时频互双谱、Wigner 时频双谱分析等方法检测出这些异常信号。声波和探地雷达信号也是广义高斯分布的时间序列,也可以将时间域和频率域的高阶统计量分析方法应用于声波和探地雷达信号的分析。

6 结 语

高阶统计量方法在地球物理资料数字信号处理和属性参数提取等方面有较强的理论性和实用性。可以预见,随着地球物理学各个领域的发展,高阶统计量方法将在国内外地球物理勘探领域形

成新的研究热点。

参考文献:

- [1] Rosenblatt M, Van Ness J W. Estimation of the bispectrum[J]. *Ann. Math. Statist.* 1965, 36(1): 1120—1136.
- [2] Brillinger D R. An introduction to polyspectra[J]. *Ann. Math. Statist.* 1965, 36(1): 1351—1374.
- [3] 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [4] 李宏伟, 程乾生. 高阶统计量与随机信号分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2002.
- [5] Mendel J M. Optimal Seismic Deconvolution. An Estimation Based Approach [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [6] Lazear G L. Mixed—phase wavelet estimation using fourth order cumulants[J]. *Geophysics.* 1993, 58(7): 042—1051.
- [7] Velis D R, Ulrych T J. Simulated annealing wavelet estimation via fourth—order cumulant matching[J]. *Geophysics.* 1996, 61(6): 1939—1948.
- [8] 石玉梅, 刘天放, 谢桂生. 三阶累积量法在断层检测和落差估算中的应用[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(4): 73—75.
- [9] 尹成, 唐兵, 谢桂生. 地震子波估计——高阶累积量矩阵方程法[J]. *信号处理*, 2000, 16(增刊): 83—87.
- [10] 唐兵, 尹成. 基于高阶统计的非最小相位地震子波恢复[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(3): 404—410.
- [11] 尹成, 熊晓军, 张白林, 等. 四阶累积量在剩余静校正中的应用研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(12): 48—50.
- [12] 尹成, 伍志明, 邓怀群. 高阶统计量方法在地震勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(3): 546—550.
- [13] 熊晓军, 贺振华, 尹成, 等. 高阶统计量方法在油气地球物理勘探中的新应用[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 77—84.
- [14] 石玉梅, 刘天放, 谢桂生. 一种断层解释的新方法双相干相关法[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 117—121.
- [15] 谢桂生, 石玉梅. 双相干相关法在断层解释及落差估算中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(6): 719—722.
- [16] 熊晓军, 尹成, 张白林, 等. 一种新的基于交阶统计量的相干体算法[J]. *工程地球物理学报*, 2004(3).
- [17] 张爱敏, 李海山, 董守华, 等. 小断层垂向分辨率与反射波特征——以淮南谢桥煤矿为例[J]. *中国矿业大学学报*, 1996, 25(3): 79—83.
- [18] Tugnait J K. Time delay estimation with unknown spatially correlated gaussian noise [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41: 549—558.
- [19] Mendel J M, Tutorial on higher—order statistics in signal and system theory: theoretical results and some applications, process[J]. *IEEE*, 1991, 79(3): 278—305.
- [20] Nikias C L, Raghuvver M R. Bispectrum estimation: a digital signal processing framework[J]. *IEEE*, 1987, 75(5): 869—891.
- [21] 杜宁平, 史军, 朱红涛, 等. 高阶统计量分析在油气预测中的应用[J]. *海洋地质动态*, 2004, 20(8): 27—29.
- [22] 王书明, 王家映. 利用高阶谱重构功率谱抑制高斯有色噪声[J]. *科学技术与工程*, 2004, 4(2): 69—73.
- [23] 王书明, 王家映. 高阶统计量对大地电磁测深资料处理方法的改进[J]. *石油地球物理勘探*, 2004(增刊): 1—3.
- [24] 王书明, 李宏伟, 王家映, 等. 地球物理学中的高阶统计量方法[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [25] Wang S M, Wang J Y. Application of higher—order statistics in magnetotelluric data processing[J]. *Chinese J. Geophysics*, 2004, 47(5): 1046—1053.
- [26] 孙洁, 晋文光, 白登海, 等. 大地电磁测深资料中的噪声干扰[J]. *物探与化探*, 2000, 24(2): 119—127.
- [27] 陈乐寿, 王光镠. 大地电磁测深法[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [28] 石应骏, 刘国栋, 吴广耀, 等. 大地电磁测深法[M]. 北京:地震出版社, 1984.
- [29] 王书明, 王家映. 大地电磁信号统计特征分析[J]. *地震学报*, 2004, 26(6): 669—674.
- [30] Wang S M, Wang J Y. Analysis of statistics characteristics of magnetotelluric signal[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 17(6): 734—740.
- [31] Yung S K and Ikellez L T. An example of seismic time picking by third order bicoherence[J]. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1947—1951.
- [32] 梁光河. 地震子波提取方法研究[J]. *石油物探*, 1998, 37(1): 31—39.
- [33] 石殿祥. 基于高阶累积量的非最小相位地震子波提取[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(5): 491—499.
- [34] 余厚全. 利用双谱提取固井模式特征信息[J]. *测井技术*, 2000, 24(6): 410—414.
- [35] 杨宇山, 李媛媛, 刘天佑. 高阶统计量在地震弱信号及“磁亮点”识别中的应用[J]. *石油地球物理学报*, 2005, 40(1): 103—107.
- [36] 杨宇山, 李媛媛, 王法刚, 等. 高阶统计量弱信号识别方法在识别地质孔洞中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2005, 22(4): 30—33.