

· 矿井物探 ·

多分量瑞利波勘探用解析信号法 提取有效波的研究^{*}

李锦飞 李人厚 (西安交通大学 710049)

王文德 (煤炭科学研究总院西安分院 710054)

摘要 通过观测波场空间三个分量,采用解析信号的方法,给出了复地震信号与波场瞬时极化特征参数的关系,设计了相应的极化滤波器,在计算机仿真研究和对实测信号的处理中,取得了满意的效果。

关键词 瑞利波勘探 解析信号 波场分离 信号处理

中国图书资料分类法分类号 P631.44

作者简介 李锦飞 男 34岁 博士研究生 智能信息处理

1 引言

瑞利波勘探是近年来发展起来的一种浅层地震勘探方法,其应用范围涉及工程地质勘察和矿井地质勘探等诸多方面,国内外有关瑞利波勘探方法、仪器及应用的研究都取得了可喜的成果。

瑞利波勘探方法分为稳态法和瞬态法两种。稳态法由于仪器笨重、施工效率相对瞬态法低,使其应用范围受到限制。瞬态法是通过两通道间记录信号互谱的相位信息计算波的速度,而相位谱对各种干扰比较敏感,因此提高瞬态法探测的可靠性与一致性是瑞利波勘探中迫切需要研究和解决的问题。

在以往的瑞利波勘探方法中,均是只观测波动的垂直分量,而忽略其他分量,且所观测的垂直分量中还包含了除有用波以外的其他干扰波,所以勘探的可靠性和一致性受到限制。极化滤波在雷达信号处理、偏振勘探和光学中有一些研究,但多是提取线性极化波,滤除椭圆极化的瑞利面波。文献[1]提出的三分量观测是根据空间波场偏振特性用极化分析和极化滤波提取有效瑞利波,进行多分量瑞利波勘探的技术方案,并研制成功了相应的仪器。极化分析采用的是时域滑动时窗法,即在时域中对记录信号

加矩形时窗处理,在窗内采用最小方差进行椭圆拟合,根据椭圆轴长和主轴方向可计算出线性度和极化角,然后根据线性度对原信号用0或1加权因子进行处理。这种方法的缺点是:

a. 只在时域中进行处理,对在时域中同时到达、而在频域中具有不同频率的信息无法分辨;

b. 窗长的选择不同对结果有较大影响,较短的时窗和较长的时窗会使计算结果出现不稳定和产生不希望的平均效应;

c. 实际测量的信号比较复杂,所以质点运动轨迹很不规则,增加了椭圆拟合的复杂性和准确性。

本文采用解析信号法,给出了复地震信号(便于频域表示)与波场瞬时极化参数之间的关系,并设计了相应的极化滤波器对信号进行滤波处理。通过对实测信号的处理表明,这种方法可有效地从地震波场中分离瑞利波,为多分量瑞利波勘探提供信噪比较高的信号。

2 解析信号法的瞬时极化特征分析原理

极化特征分析分积分参数法和瞬时参数法。积分参数是用滑动时窗作常规极化分析得到的,反映的是所选时窗内的积分效应,时窗选择不当会产生重叠和共振现象。而瞬时极化特征参数的分析方法具有较高的分辨率。

^{*} 煤炭科学基金项目(96地20810)部分内容

在研究瑞利波的极化特性时,数据限定在沿测线方向和铅垂方向两个分量,对使用 54 铍尔加林三分量检波器(u 分量在水平面投影沿测线方向布置),可使用(1)式线性变换将其变换到直角坐标系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 x ——沿测线方向;
 y ——垂直测线方向;
 z ——铅垂方向。

为分析 xz 平面内的波,将记录的实地震分量 x_r, z_r 分别变换为解析信号:

$$\begin{aligned} X(t) &= x_r(t) + ix_q(t), \\ Z(t) &= z_r(t) + iz_q(t), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $x_q(t)$ 和 $z_q(t)$ 分别是 $x_r(t)$ 、 $z_r(t)$ 的 Hilbert 变换, $i = \sqrt{-1}$ 。

通过(2)式求得的复信号,可定出信号的瞬时幅度、频率和相位等,其瞬时相位差

$$\varphi(t) = \theta(t) - \theta(t), \quad (3)$$

式中 θ 和 θ 分别是复信号 $Z(t)$ 和 $X(t)$ 的瞬时相位。

$\varphi(t)$ 也可表示为:

$$\varphi(t) = \arctan \left[\frac{x_r(t)z_q(t) - z_r(t)x_q(t)}{z_r(t)x_r(t) + z_q(t)x_q(t)} \right]. \quad (4)$$

根据文献[2],[3]做适当修改,可推导出表示极化特性的椭圆长半轴、短半轴与解析信号之间的关系式:

$$a^2(t) = \{S_0(t) + [S_1^2(t) + S_2^2(t)]^{1/2}\} / 2, \quad (5)$$

$$b^2(t) = \{S_0(t) - [S_1^2(t) + S_2^2(t)]^{1/2}\} / 2. \quad (6)$$

式中 $S_0(t)$ 、 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 是三个向量参数,分别为:

$$S_0(t) = |Z(t)|^2 + |X(t)|^2, \quad (7)$$

$$S_1(t) = |Z(t)|^2 - |X(t)|^2, \quad (8)$$

$$S_2(t) = 2|Z(t)||X(t)|\cos[\varphi(t)]. \quad (9)$$

式中 $|Z(t)|$ 和 $|X(t)|$ 分别表示复信号 $Z(t)$ 和 $X(t)$ 的模,即:

$$|Z(t)| = [z_r^2(t) + z_q^2(t)]^{1/2}, \quad (10)$$

$$|X(t)| = [x_r^2(t) + x_q^2(t)]^{1/2}. \quad (11)$$

根据上述计算得到的椭圆瞬时长半轴 $a(t)$ 短

半轴 $b(t)$ 的关系。瞬时椭圆率定义为^[3]:

$$e(t) = b(t)/a(t). \quad (12)$$

对线性极化 $e(t) = 0$; 对圆形极化 $e(t) = 1$ 。

瞬时有符号椭圆率定义为:

$$\varphi(t) = \text{sign}[\varphi(t)] \cdot e(t). \quad (13)$$

$\varphi(t)$ 的正或负分别对应质点运动方向的逆时针方向或顺时针方向。

极化椭圆的主轴方向与 z 轴的夹角定义为:

$$\alpha(t) = \{\arctan[S_2(t)/S_1(t)]\}/2. \quad (14)$$

为消除瞬时极化参数易受到噪音、尖脉冲和不稳定性的影响,定义平均椭圆率为:

$$e(t) = [e(t-\Delta) + e(t) + e(t+\Delta)]/3. \quad (15)$$

3 极化滤波函数的构造

现有的极化滤波函数大多用于滤除非线性极化波,而保留线性极化波。在瑞利波勘探中,则正好与此相反,即需保留椭圆极化的瑞利波,滤除线性极化的弹性体波和各种干扰波。根据文献[4]给出的保留线性极化波的滤波算子,经改造可得出保留椭圆极化波的滤波算子。

椭圆率可以用来压制非极化和线性极化噪声,提高信噪比,提取瑞利波信号。相应于椭圆率的滤波函数可定义为:

$$G_1(t) = \exp[-(1-e(t))^2/2\delta]^2. \quad (16)$$

式中 $e(t)$ ——(15)式定义的平均椭圆率;

δ ——标准离差,一般在 0.05~0.4 之间选取。

$G(t)$ 可用来选择椭圆极化的信号,当数据为接近圆形极化时, $G(t) \rightarrow 1$; 当数据为接近线性极化时 $G(t) \rightarrow 0$ 。故这种滤波算法对信号敏感,而对噪声不敏感,利用 $G(t)$ 可消除线性极化波,保留椭圆极化的瑞利波。

4 仿真计算

图 1、2 的 a 、 b 为输入信号。其中 a 为垂直分量,由两个 50 Hz 雷克子波合成; b 为沿测线分量,由与垂直分量对应但分别产生 0° 、 90° 相移的 50 Hz 雷克子波合成; c 为椭圆率; d 为滤波函数; e 、 f 为滤波后的输出信号。图 2 是在图 1 的输入信号 a 、 b 中叠加了零均、标准离差为 $D=0.2$ 的正态分布随机噪音后得到的。

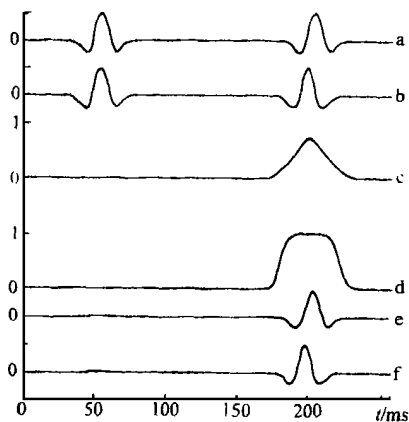


图 1 合成波无噪音时极化滤波图

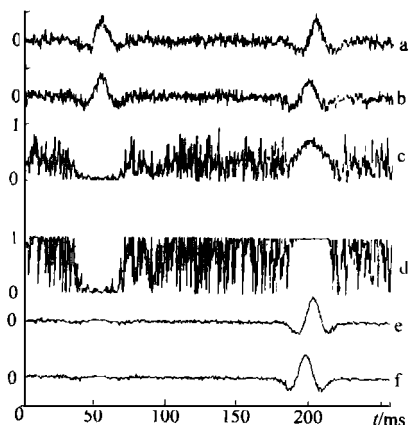


图 2 合成波叠加噪音时极化滤波图

从图 1、2 中可以看出, 极化滤波滤除了相移为 0° 的子波(体波), 保留了相移为 90° 的子波(面波)。滤波后, 信号的信噪比有所提高, 通过对随机噪音的标准离差取不同值的计算和分析表明: 随着噪音水平的提高, 极化滤波器去除噪音和线性极化波的能力有所下降。

5 实测信号的分析 and 处理

为了对解析信号法做极化分析和滤波的效果评价, 进行了野外数据的采集和处理试验。由于我们的目的是进行面波勘探, 所以要求采集的信号中包含较强(明显)的面波成分。为此我们不是采用两通道瑞利波仪器进行两个单分量的观测, 而是采用多通道仪器做三分量观测。

图 3 是其中一炮的实测记录(炸药放炮), 偏移距为 75 m, 记录中 1~3、4~6、7~9 道分别对应 3 个 54° 三分量检波器, 其余道均采用单分量检波器。

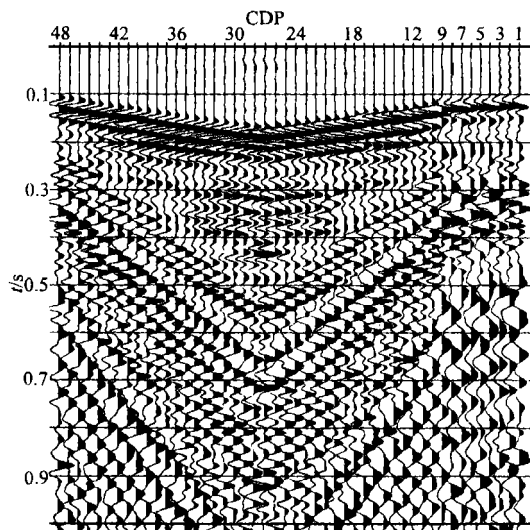


图 3 野外实测记录

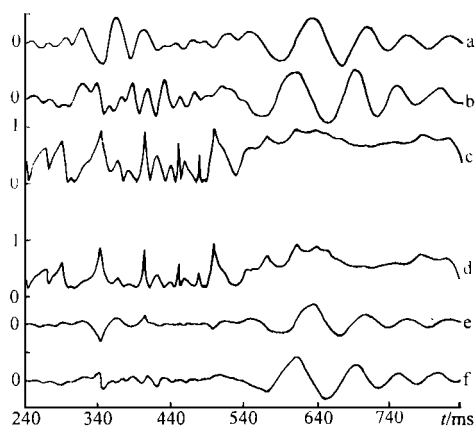


图 4 实测信号的极化滤波结果

利用(1)式, 可将 54 检波器采集到的 u 、 v 、 w 信号变换为 x 、 y 、 z 直角坐标系信号。

图 4 给出了第一个三分量检波器原始记录经线性变换的 z 、 x 分量的极化分析和滤波结果。图中 a、b 为第一接收点三分量检波器的 z 、 x 分量信号; c、d 分别为计算得到的椭圆率和保留面波的极化滤波函数的变化曲线; e、f 为经极化滤波后的 z 、 x 分量信号。从滤波结果可以看出: 在 540~840 ms 时间段内的面波信号, 滤波后基本保留了下来, 而在 540 ms 以前的线性体波基本被消除了。

6 结束语

通过研究, 给出的多分量瑞利波勘探的方法, 其技术方案是:

a. 数据采集采用三分量、多通道接收,通过对不同偏移距放炮得到的数据进行分析,找出瑞利波较强的记录。

b. 对探测点两侧各测点检波器的二分量数据进行极化滤波处理和频散曲线计算。

c. 对得到的多条频散曲线(对应一个测量点)进行统计处理,得到最终探测结果。

这种方法的特点是:体现了面波勘探采用的主要是面波,而不是以其它波为主。通过本文给出的极化滤波方法,大大提高了有效信号的信噪比,对多条频散曲线用统计方法处理,最大限度地利用了野外观测数据,提高了勘探的可靠性和能力。极化分析和滤波方法有很多种,这里采用的解析信号法给出的通过将时域实信号变为复信号,进而建立了它与极化参数之间的关系,简化了极化分析的计算,消除了其它方法中由于人为选取时窗的大小不合适,导致

计算结果的不正确这一人为因素的影响。极化滤波时选用文中(13)式定义的平均椭圆率既保持了这种方法得到的瞬时参数具有高分辨率的特征,又有效地抑制了瞬时参数可能产生的算法噪音。

参考文献

- 1 李锦飞等. 瑞利波勘探技术改进与完善——多分量瑞利波勘探技术及仪器研究. 煤科总院西安分院科研报告, 物 82, 1996
- 2 Born M, Wolf E. Principles of Optics. London: Pergamon Press, 1980; 14~36
- 3 Rene R M, Fitter J L, Forsyth P M *et al*. Multicomponent seismic studies using complex trace analysis. Geophysics, 1986; 51: 1235~1251
- 4 Azik I, Pereleg, Scott C. Hornboste. Applications of seismic polarization analysis. Geophysics, 1994; 59: 119~130

(收稿日期 1997-10-14)

STUDY ON THE EXTRACTION OF EFFECTIVE WAVE USING ANALYTIC SIGNAL METHOD IN MULTICOMPONENT RAYLEIGH WAVE EXPLORATION

Li Jinfei Li Renhou (Xi'an Jiaotong University)

Wang Wende (Xi'an Branch of China Coal Research Institute)

Abstract By observing three components in wave field space and using analytic signal method, the relationships between complex seismic signals and characteristic parameters of instantaneous polarization in wave field are given, the corresponding polarized filter is designed, and the satisfactory effects in computer emulation research and measured signal processing are obtained.

Keywords Rayleigh wave exploration; analytic signal; wave field separation; signal processing