

· 处理技术 ·

VSP 浮动坐标系偏振滤波

崔汝国^{*①} 牟风明^② 宋维琪^③ 王成礼^②

(^①中国石油大学(北京),北京 102249; ^②胜利石油管理局物探公司,山东东营 257100; ^③中国石油大学(华东),山东东营 257061)

崔汝国,牟风明,宋维琪,王成礼. VSP 浮动坐标系偏振滤波. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 10~14

摘要 偏振滤波是三分量 VSP 纵、横波波场分离最常用的方法之一。在传统的偏振滤波方法中,偏振角的计算是基于直达波的传播方向而确定,没有针对所需要的上行波。本文通过建立针对反射波的主能量方向计算偏振角,建立随反射深度变化的坐标系,即浮动坐标系,以有效提高波场分离精度。理论模型试算和实际资料处理结果表明,在浮动坐标系下,偏振滤波方法以所需波场为基础,能够实现波场的最优分离。

关键词 VSP 波场分离 偏振滤波 浮动坐标系

1 引言

随着采集方法的逐步完善,VSP 技术从零井源距发展到非零井源距 VSP 和变井源距 VSP (Walk-away)、逆 VSP (RVSP)、随钻 VSP (SWD)、环形 VSP (Walkaround)、三维 VSP 等多种技术^[1~3]。伴随着 VSP 技术从零井源距向非零井源距和变井源距方向的发展,VSP 资料接收到的波场类型也比较多。由于不同的波场能够解释不同的地球物理现象^[4,5],因此正确识别和准确分离各种波场是 VSP 技术需要解决的关键问题。而偏振滤波是井孔地球物理资料处理的基础,只有做好偏振滤波,才能为后续处理提供准确的基础数据。

VSP 资料接收的波场类型主要包括直达波、上行 P-P 波、下行 P-P 波、上行 P-SV 波、下行 P-SV 波等波场,在 VSP 观测中,只要通过三分量检波器接收就能够得到这些波场的完整记录。然而如何分离这些波场成为 VSP 资料处理的关键。通常最有效的方法就是运用三分量偏振滤波实现波场初步分离。传统偏振滤波偏振角的计算是基于直达波的传播方向而确定,因此对于受观测角度影响的上行 P-P 反射波,分离效果有待改进。为了得到较好的波场分离结果,本文从不同波场的偏振方向和传播方向入手,建立更为精确的随深度变化的偏振滤波

坐标系,即浮动坐标系,以提高偏振滤波精度。

2 基本理论

2.1 传统坐标系构架方法

由于井下三分量 VSP 资料中的检波器不能准确定向,因此准确识别不同偏振特性的波(P 波、SV 波、SH 波)是三分量 VSP 资料处理的中心课题之一。

图 1 为三分量 VSP 观测示意图。假设从 P 波震源传到井下第一个深度点上的直达 P 波,其质点运动方向和波的传播方向一致,都在由震源和井确定的平面内,则这种直达 P 波的偏振方向是线性的,它在水平面内的投影也是直线。根据这一假设,可以用直达波偏振方向在水平面内的投影作为参考,测出三分量检波器观测时水平分量的相对方位,并可将观测到的水平分量信号转换到以直达 P 波偏振方向在水平面内投影方向一致的(记为 H_P 方向)参考坐标系^[6]。

三分量检波器的水平分量(x, y)转换到以 H_P 为参考的一致坐标系(x', y')的转换公式为

$$\begin{cases} x' = x\cos\theta + y\sin\theta \\ y' = y\cos\theta - x\sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中 θ 为 x 与 H_P 的夹角,即直达 P 波的偏振角。

在水平面内有多种确定线性偏振信号方位的方

* 山东省东营市胜利石油管理局地球物理勘探开发公司科技办,257100
本文于 2009 年 3 月 19 日收到,修改稿于同年 5 月 31 日收到。

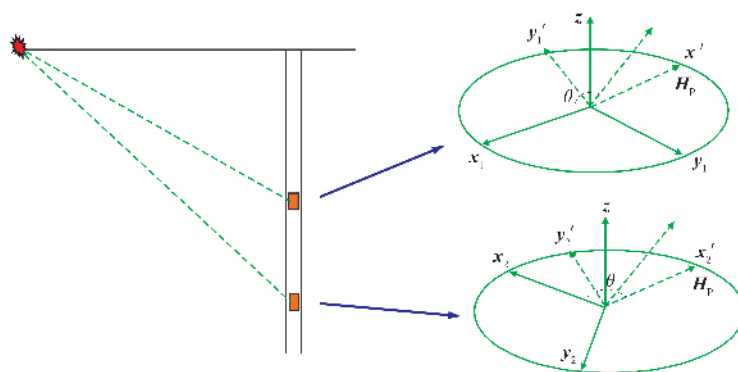


图 1 三分量检波器采集示意图

法,如今较常用的方法有:

- (1)简单的三角关系法;
- (2)矢端曲线和能量准则法;
- (3)能量加权的瞬时方位直方图法。

2.2 浮动坐标系构架方法

假定三分量检波器的水平分量 (x, y) 转换到以 H_p 为参考的一致坐标系,此时假定 H_p 分量的单位矢量为 i, z 分量的单位矢量为 j ,则相同震源相同三分量检波器接收的任意波场 u 可表示成为

$$u = \|u\| \cos\theta i + \|u\| \sin\theta j \quad (2)$$

式中 θ 为 u 传播到检波器时的振动方向与垂线的夹角。

进一步假定直达波到达检波器时,振动方向与铅垂方向的夹角为 θ_0 ,则直达波 u_0 可表示为

$$u_0 = \|u_0\| \cos\theta_0 i + \|u_0\| \sin\theta_0 j \quad (3)$$

设 u_0 的单位矢量为 m ,垂直方向(左手或右手)单位矢量为 n ,则坐标系 $(0, i, j)$ 与 $(0, m, n)$ 的关系为

$$\begin{cases} m = i \cos\theta_0 + j \sin\theta_0 \\ n = j \cos\theta_0 - i \sin\theta_0 \end{cases} \quad (4)$$

即

$$\begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} \quad (5)$$

将式(5)变形,得到

$$\begin{cases} i = m \cos\theta_0 - n \sin\theta_0 \\ j = m \sin\theta_0 + n \cos\theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),则可得到任意波场 u 在新坐标系 $(0, m, n)$ 内的表达式为

$$u = \|u\| \cos(\theta - \theta_0) m + \|u\| \sin(\theta - \theta_0) n \quad (7)$$

式(7)即为任意波场经坐标旋转后的表达式。

若将式(6)代入式(3)后,有

$$u_0 = \|u_0\| m \quad (8)$$

由式(8)可知,直达波在新坐标系 $(0, m, n)$ 内分解在 m 轴上, n 轴的投影长度为零,这就完全实现了波场分离。

假定 $\theta = \frac{\pi}{2} + \theta_0$,则式(7)可化简为

$$u = \|u\| n \quad (9)$$

从式(9)可知,与直达波传播方向垂直的波场被完全投影到 n 轴上,也实现了波场完全分离。

当 $\theta \neq \theta_0$ 且 $\theta \neq \frac{\pi}{2} + \theta_0$ 时,由式(7)可知,此时波场 u 在新坐标系的两个轴上都有投影。由于地下不同深度地层的反射波到达检波器时 θ 不同,因而在新坐标系内的投影也不同。因此必须根据反射波的 θ 值建立坐标系,从而实现反射波的波场分离。

假定对于地下反射波的 $\theta(H)$ 已知,建立新坐标系 $(0, m(H), n(H))$

$$\begin{cases} m(H) = i \cos[\theta(H)] + j \sin[\theta(H)] \\ n(H) = j \cos[\theta(H)] - i \sin[\theta(H)] \end{cases} \quad (10)$$

由同样的分析方法可知,在新坐标系内能够实现反射波的波场完全分离。由于此坐标系随着地下反射点深度的变化而变化,因此式(10)定义为浮动直角坐标系。

3 主能量方向的计算

3.1 浮动坐标偏振滤波

浮动坐标偏振滤波实质上是求取偏振滤波的跟踪分量,即把各分量有用信息的偏振能量经过坐标旋转,投影到该地震波在接收点处的振动方向上。由于各分量检波器接收的 VSP 地震记录是各种震

相地震波及干扰叠加的结果,因此为了得到更好的浮动坐标偏振滤波结果,首先采用视速度滤波或其他方法,大致分离出所要研究的震相,然后对其进行主能量分析,采用偏振滤波技术求出所研究震相的振动主能量方向。

设一个有 N 个样点的时窗,每个样点由三维坐标 XYZ 定义偏振滤波的三分量,在时窗 $[T_1, T_2]$

内,样点坐标的平均值为

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=n_1}^{n_2} x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=n_1}^{n_2} y_i, \\ \bar{z} &= \frac{1}{N} \sum_{i=n_1}^{n_2} z_i\end{aligned}\quad (11)$$

式中: $(n_2 - n_1) \Delta t = T_2 - T_1$, Δt 为采样间隔,且 $N = n_2 - n_1 + 1$, 采样点的协方差矩阵为

$$M_c = \frac{1}{N} \begin{pmatrix} \sum (x_i - \bar{x})^2 & \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ \sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) & \sum (y_i - \bar{y})^2 & \sum (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ \sum (z_i - \bar{z})(x_i - \bar{x}) & \sum (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y}) & \sum (z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix}\quad (12)$$

应用上述方法取滑动时窗,选择适当的窗长,计算时窗内质点振动轨迹的偏振主方向,并求出偏振主方向与期望滤波方向之间的夹角。上述滤波都比较粗略,致使滤波后的数据出现震荡失真。为矫正滤波产生的震荡,可以用偏振特征参数的加权函数修正上述的滤波值。设此加权函数 $f(t)$ 随时间变化。若 $c(t)$ 是沿期望滤波方向的滤波结果,则经加权函数 $f(t)$ 矫正后的结果 $c^*(t)$ 为

$$c^*(t) = c(t)f(t)$$

加权函数 $f(t)$ 按下述方法求得。

在一个滑动时窗内计算主偏振方向和偏振系数 $\eta(t)$ 。在主偏振方向上的单位向量 $\mathbf{I}(t)$ 可以表示为

$$\mathbf{I}(t) = \cos\psi(t)\cos\varphi(t)\mathbf{i} + \cos\psi(t)\sin\varphi(t)\mathbf{j} + \sin\psi(t)\mathbf{k}\quad (13)$$

期望滤波方向上的单位向量可表示为

$$\mathbf{E}(t) = \cos\psi_F(t)\cos\varphi_F(t)\mathbf{i} + \cos\psi_F(t)\sin\varphi_F(t)\mathbf{j} + \sin\psi_F(t)\mathbf{k}\quad (14)$$

设 $\theta(t)$ 为偏振主方向和期望滤波方向的夹角,则有

$$\cos\theta(t) = \mathbf{I}(t)\mathbf{E}\quad (15)$$

其中 \mathbf{E} 为求出的期望滤波方向上的单位向量。

加权函数定义为

$$f(t) = \eta^p(t)\cos^q\theta(t)\quad (16)$$

式中:指数 p, q 为分别控制偏振系数和夹角大小的参数。通常 p 选在 $0.5 \sim 1$ 之间, q 在 $1 \sim 2$ 之间。

用此方法可以计算出某种震相的振动主能量方向,然后再利用浮动坐标旋转方法,对 VSP 资料进行滤波。

4 理论模型试算

图 2 为单层地质模型正演模拟得到的水平分量和垂直分量,包含直达波,上行反射波和上行转换波。

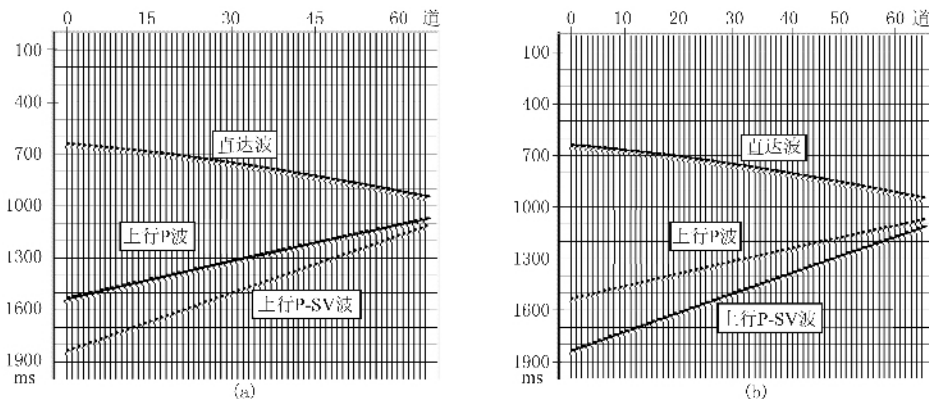


图 2 正演模拟

(a)正演模拟垂直 z 分量; (b)正演模拟水平 x 分量

图 3 为传统坐标系下的滤波结果和浮动坐标系下滤波结果对比。从图 3a 中可以看出, 经偏振滤波后, 垂直分量中的直达波已经被有效分离, 理想情况下上行 P-SV 转换波也应该被完全分离, 只剩下上行 P 波, 但实际上上行转换波没有被完全分离。图 3b 为应用上行转换波求取偏振角度后建立浮动坐标系进行偏振滤波的结果, 从图中可以看

出, 上行转换波已经被完全分离出去, 剩下上行反射 P 波。由于没有考虑直达波偏振方向, 直达波被保留下来。

通过理论试算可以看出, 可以分别采用上行 P 波和上行转换波求取偏振角度, 建立浮动坐标系进行偏振滤波, 可以得到完全分离的上行 P 波和上行 P-SV 转换波。

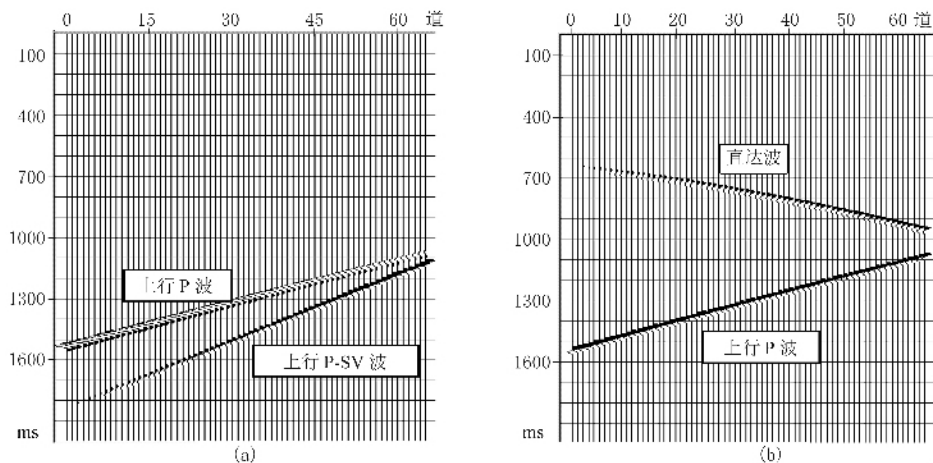


图 3 不同坐标系下的偏振滤波结果对比
(a)传统坐标系偏振滤波; (b)浮动坐标系偏振滤波

5 应用实例

应用实例为中国南方 F 区 A 井非零井源距 VSP 资料, 该井位于背斜带长轴高部位, 井下用多

级三分量检波器进行采集。野外原始资料直达波起跳干脆, 能量较强, 续至下行波能量较弱, 资料整体信噪比较高。资料预处理和成像采用常规处理技术流程, 波场分离采用浮动坐标系偏振滤波方法。

图 4a 为传统坐标系下偏振滤波结果, 图 4b 为

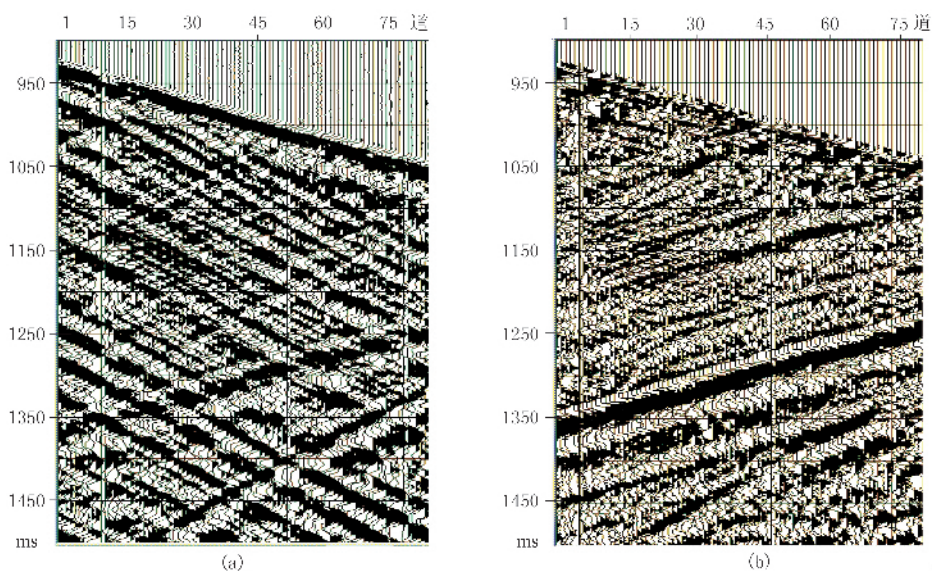


图 4 不同坐标系下的偏振滤波结果对比
(a)传统坐标系下偏振滤波; (b)浮动坐标系下偏振滤波

应用上行转换波求取偏振角度后建立浮动坐标系进行偏振滤波的结果。从浮动坐标系中偏振滤波的结果(图4b)可以看出,上行反射波较强,上行转换波得到较好分离,波场分离效果明显优于传统坐标系下偏振滤波效果。

图5为VSP-CDP剖面 and 地面地震剖面拼接图(箭头标注位置为井所处的位置,箭头左侧为VSP-CDP剖面,箭头右侧为地面地震剖面)。从图5中可以看出,VSP-CDP剖面与井旁地面地震剖面吻合较好,对井旁构造能够进行细致的描述。

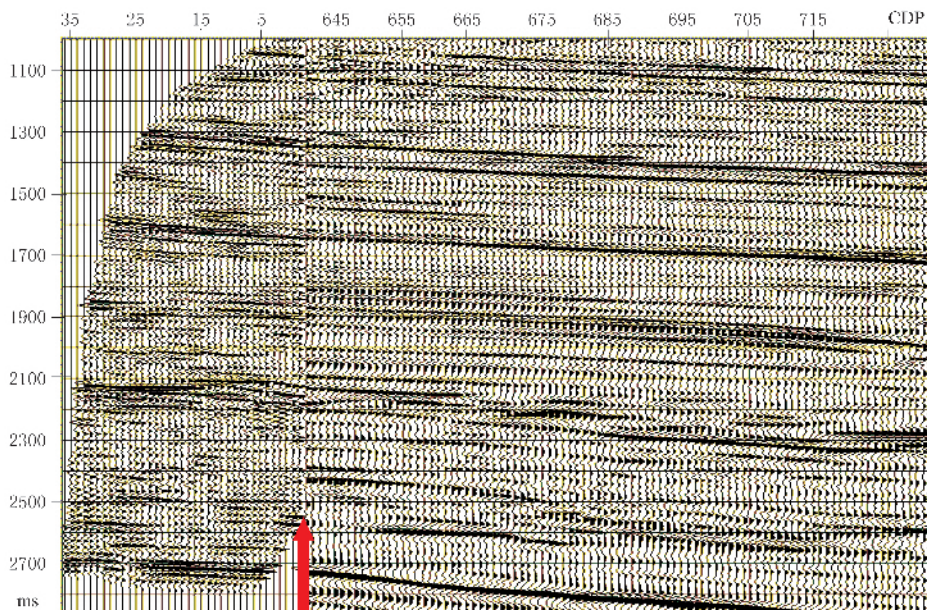


图5 VSP-CDP剖面 and 地面地震数据对比

6 结束语

浮动坐标系偏振方法是相对于固定直角坐标系方法而提出的,常规方法是基于直达波的传播方向而确定,没有针对所需要的上行波。浮动坐标系方法对于地下任意一个反射点,以该点的反射波的主能量方向建立坐标系,不同的点坐标系不同。该方法完全以所需要波场为基础,能够实现波场的最优分离。

参考文献

[1] 王成礼,焦湘恒等.变偏移距VSP方法与效果——

- N35井实例的研究.石油物探,1992,31(4):11~22
- [2] 严又生,宜明理,魏新等.三维三分量VSP数据处理方法及效果.石油地球物理勘探,2005,40(1):18~24
- [3] Chen G. 3D VSP CDP mapping with interactive reflection traveltime display. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 17:
- [4] 曹立斌,李亚林,梁波,吴战培,程莉莉.三分量VSP资料在裂缝检测中的应用.石油物探,2008,47(1)
- [5] 董良国,马在田,丁建荣等.利用横波源四分量VSP资料检测盐城凹陷地下裂隙.石油地球物理勘探,2000,35(4):517~526
- [6] 朱光明.垂直地震剖面方法.北京:石油工业出版社,1988

(本文编辑:金文昱)