

影响空间方向滤波效果的因素分析*

张玉芬, 周建新

(中国地质大学物探系, 湖北武汉 430074)

摘要: 二分量(X, Z)理论合成地震记录的处理证明了极化滤波的思想是正确的, 也是目前分离二分量记录中 P 波和 PSV 波的一个比较有效的方法。各种滤波参数对二分量地震记录滤波效果影响规律的试验、分析结果表明: (1) 在滤波器的滤波参数中对滤波效果影响最大的是极化方向的加权值 q , 其次是滤波的时窗值 N , 极化程度加权值 p 对滤波效果影响不大; (2) 对不同分量、不同炮检距、不同深度的地震记录应采用不同的滤波参数 (q, p, N) 进行滤波处理, 只有正确地选取滤波器的滤波参数, 才能获得比较满意的滤波结果。

关键词: 多分量地震记录; 极化方向; 极化程度; 空间方向滤波; 影响因素

第一作者简介: 张玉芬, 女, 41岁, 副教授(博士生), 石油地震勘探

中图分类号: P315.61

文献标识码: A

空间方向滤波又称极化滤波, 是多波勘探中提高资料信噪比和分离纵、横波的一种重要的处理技术, 以利用各种波的极化性质的差异来达到分离纵、横波, 滤去干扰波为目的。在多波多分量地震勘探中, 由于波入射时并非是完全垂直于地面(存在炮检距), 所以, 在 Z 分量上记录到了 P 波也记录到了 PSV 转换波; 而在 X 分量上除记录了 PSV 波又记录到了 P 波, 这种情况对于炮检距与勘探深度的比值较大时尤为严重。为了得到较纯净的 P 波或 PSV 波波场, 有必要将多分量中的 P 波、 PSV 波进行分离和合成^[1], 即进行空间方向滤波。

1 基本原理

空间方向滤波是 A. Benhama 等人^[2]提出的, 其基本思想是: 利用不同波型具有不同偏振的特点, 将不需要的成分滤掉。由地震波理论可知, 据同一接收点的三分量地震记录可以画出其质点空间运动转迹图, 该轨迹图为一椭圆, 从而可以直观地判断其偏振的质量和偏振的方向^[3]。在数学上可以把该曲线上的样点看作是一批空间随机点的集合, 这样就可以使用协方差矩阵, 用统计方法由这些空间点计算出反映整体极化性质的各种参数, 并把它应用到滤波器的设计之中^[4,5]。当考虑 N 个样点

的时窗($T_1 - T_2$)时, 每一点的 3 个分量 X_i, Y_i, Z_i , 在(T_1, T_2)内的均值分别为

$$M_x = (1/N) \sum X_i, M_y = (1/N) \sum Y_i, M_z = (1/N) \sum Z_i \quad (1)$$

式中 $\sum_{i=N_1}^{N_2} (N_2 - N_1) \Delta t = T_2 - T_1$; Δt 为采样率; $N = N_2 - N_1 + 1$ 。由此可以写出协方差矩阵

$$M_c = \frac{1}{N} \begin{vmatrix} \sum A^2 & \sum AB & \sum AC \\ \sum BA & \sum B^2 & \sum BC \\ \sum CA & \sum CB & \sum C^2 \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中 $\sum_{i=N_1}^{N_2} A = (X_i - M_x); B = (Y_i - M_y); C = (Z_i - M_z)$; 通过对协方差矩阵(2)的计算, 可以得到 3 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) 以及特征向量 V_1, V_2, V_3 (每个向量用其方向余弦来确定)。进一步计算可以得到设计滤波器的一个参数, 即在某个时窗内的极化系数(椭圆系数)

$$\tau(t)^2 = [(1 - \lambda_2/\lambda_1)^2 + (1 - \lambda_3/\lambda_1)^2 + (\lambda_2/\lambda_1 - \lambda_3/\lambda_1)^2] / [2(1 + \lambda_2/\lambda_1 + \lambda_3/\lambda_1)] \quad (3)$$

它反映了极化程度, 其值在(0, 1)之间变化, 如 $\tau = 0$, 说明极化程度为零(即没有偏振), 在空间上为一个球形; 当 $\tau = 1$, 说明高度极化, 则这个偏振接近于一个线性运动。故 V_1, V_2, V_3 和 τ 是反映时窗(T_1, T_2)内整体极化性质的参数。一般 τ 值大小反映了极化程度, 而特征向量反映了极化方向。据此, 可以设计出空间方向滤波的滤波器 $f(t)$, 其值为

* 本研究由中国石油天然气总公司“薄互层地震反射特征研究”和中国海洋石油总公司“海洋多波勘探”项目资助

收稿日期: 1999-03-29

$$f(t) = \tau(t)^p \cos^q \theta(t) \tag{4}$$

式中 $\tau(t)$ 为偏振的品质因素, 即极化系数; 指数 p, q 是人为选定的, 分别为对极化程度和极化方向的加权值, 通常 p 选择(0.5~ 1.0), q 则为(1~ 5); $\cos \theta(t)$ 是特征向量的方向余弦, 即滤波方向与极化方向之间的空间夹角的余弦。其值为

$$\cos \theta(t) = \cos \alpha(t) \cos \alpha_F + \cos \beta(t) \cos \beta_F + \cos \gamma(t) \cos \gamma_F \tag{5}$$

式中 $\alpha(t), \beta(t), \gamma(t)$ 分别为极化方向与坐标 X, Y, Z 的夹角; $\alpha_F, \beta_F, \gamma_F$ 分别为定义的滤波方向与坐标轴 X, Y, Z 的夹角。如果 $S(t)$ 为 x, y, z 分量中的任一个分量, 则经空间方向滤波以后的输出为

$$s'(t) = s(t)f(t) \tag{6}$$

分析上式可见, 若在选择的方位上三分量记录表现出完全无极化($\theta = 90^\circ$ 或 $\tau = 0$), 则滤波因子 $f(t) \rightarrow 0, s'(t) \rightarrow 0$, 说明彻底消除; 若在选择的方位上极化相当好, 则 $|f(t)| \rightarrow 1, s'(t) \rightarrow s(t)$, 完全保留, 一般情况都是介于上述情况之间。

2 影响因素分析

为了分析总结各种滤波参数对空间方向滤波方法滤波效果的影响规律, 我们制作了理论共炮点地震记录, 地震记录的地质模型及各层的参数如表 1 所示, 最小炮检距为零, 最大炮检距为 475 m, 道间距取 25 m, 采样率为 4 ms, 并分别用不同的滤波参数对地震记录(为了简单起见, 我们仅对 X, Z 二分量)进行了滤波处理。分析图 1 与图 2 可见, 不论是 X 分量, 还是 Z 分量记录, 通过上述的滤波处理后, 均收到了明显的滤波效果, 而且滤波处理参数对滤波效果有着极为明显的影响。

表 1 合成记录地质模型及参数

Table 1. Geological model and parameters of Seismogram

序号	厚度/m	V_P/ms^{-1}	V_S/ms^{-1}
1	200	1 000	500
2	200	2 000	1 000
3	300	2 500	1 750
4	200	2 000	1 000
5	150	3 000	1 500

由空间方向滤波公式 $s'(t) = s(t)f(t) = s(t) \tau(t)^p \cos^q \theta(t)$ 可知, 影响空间方向滤波效果的因素主要有: 求取地震波极化程度 $\tau(t)$ 所选取的时窗大小(N), 控制极化程度 $\tau(t)$ 和极化方向

$\cos \theta(t)$ 的加权值 p 和 q 。下面分别就上述各参数对空间方向滤波效果的影响规律进行分析。

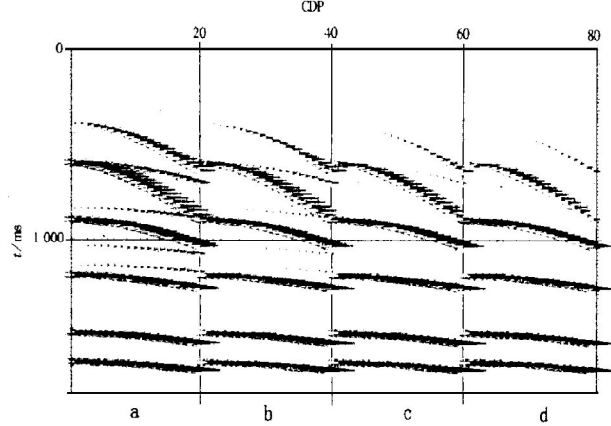


图 1 X 分量合成记录及滤波效果

Fig. 1 X -component seismogram and filtering effect
a 图为原始波场; b, c, d 图为 $p = 0.5, N = 6$, q 值分别为 1, 3, 5 时对图 a 的处理结果

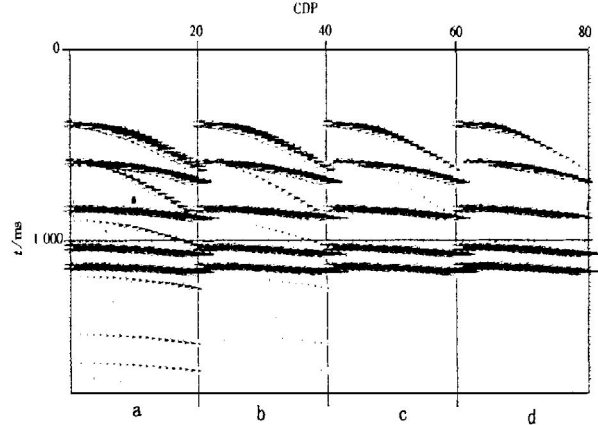


图 2 Z 分量合成记录及滤波效果

Fig. 2 Z -component seismogram and filtering effect
a 图为原始波场; b, c, d 图为 $p = 0.5, N = 6$, q 值分别为 1, 3, 5 时对图 a 的处理结果

2.1 时窗大小(N)

在滤波过程中, 时窗大小的选择在很大程度上决定了滤波的好坏, 这是因为如果时窗太大, 将有可能使 P 波、 PSV 波同时落入同一个时窗中, 这时将使计算出的极化方向误差增大(一般求出的 $\theta(t)$ 偏大), 故将会压制掉一部分有效波; 如果时窗选得太小, 将会使该方法的统计特性受到削弱, 从而导致在剖面中出现一些由求解协方差矩阵不稳定而产生的噪音。分别选用不同大小的时窗($N = 4, 6, 16, 26, 46$)对 X, Z 分量进行的空间方向滤波处理。结果表明, 随着时窗长度由小到大, 其压制干扰波的效果越来越好, 但当时窗太大时, 部分有效波也相应地被滤掉了。所以, 在实际应用中, 我们要根据原始地震记录的层位分布情况, 地

震波的延续长度(主要看同相轴的分布、多少等)以及层位之间的间隔情况综合考虑来选择合适的时窗大小。

2.2 q 值

由空间方向滤波的滤波因子 $f(t)$ 可见, q 值是一个控制极化方向 $\cos\theta(t)$ 对加权有影响的参数,由 $\cos\theta(t)$ 函数以及它的各次幂(1~5)绘成的 $\cos\theta(t)$ 函数滤波器的响应曲线(图3)^[5]分析可以

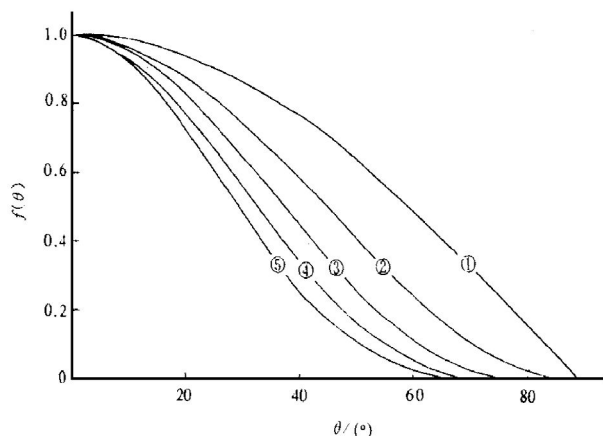


图3 余弦函数滤波器的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves of cosine function filter

- ①— $\cos^1\theta(t)$; ②— $\cos^2\theta(t)$; ③— $\cos^3\theta(t)$;
④— $\cos^4\theta(t)$; ⑤— $\cos^5\theta(t)$

看到,随着 $\cos\theta(t)$ 函数的幂次增加滤波器响应函数曲线变陡。如果取0.707作为滤波器的阈值,这时, $\cos^1\theta(t) \sim \cos^5\theta(t)$ 所对应的临界角分别为 45° , 32.5° , 26° , 23° , 20.5° ,这就是说,无论是 P 波还是 PSV 波,如果其偏振方向(极化方向)与选定的某一滤波方向的空间夹角 $\theta(t)$ 在临界角内,就可以得到增强,而当 $\theta(t)$ 大于临界角时所对应的波则受到压制。由此可见,参数 q 实际上控制了极化滤波的滤波器通放带的大小, q 值越大,对应的滤波器曲线通放带边界值 $\theta(t)$ 就越小,通放带就越窄,滤波效果就越好,但这时也容易滤去较大的 $\theta(t)$ 的有效波信息。图1和图2的滤波结果证明了这一点,如在图2中,当 q 值较小时($q=1$),在浅层还残留了较强的 PSV 波,而当 q 值增大到5时,垂直剖面上已基本看不到 PSV 波的痕迹,但部分浅层 P 波信号也受到了一定的压制。因此,只有正确的选择 q 值,才能控制滤波器通放带的大小,达到压制干扰,增强有效信号的目的。

根据我们的经验,合适的 q 参数值的选取,取决于对待处理的地震记录中各种波的偏振特点的深入了解,如各种波的偏振方向与选定的滤波方向

空间夹角 $\cos\theta(t)$ 变化情况等。由图4a可见,当炮检距比较小时(近震源处),对于 Z 分量来说, P 波(有效波)的偏振方向(极化方向)与 Z 坐标轴的夹角(α_1)较小, PSV 波(干扰波)的偏振方向与 Z 坐标轴的夹角($\pi/2 - \beta_1$)却比较大,这说明了 P 和 PSV 波在近震源处极化方向差异较大,故比较容易地将 P 波和 PSV 波进行分离;随着炮检距由小到大, P 波的偏振方向与 Z 坐标轴的夹角(α_2)也由小到大, PSV 波的偏振方向与 Z 坐标轴的夹角($\pi/2 - \beta_2$)也由大变小,从而使 P 波与 PSV 波之间的极化方向的差异也越来越小,故这时的 P 波与 PSV 波就难以被分离。另外,由于 $\pi/2 - \beta_2$ 角度的变小,使其很难满足于某个临界角的条件,因此不易落入压制区,从而导致了在同一剖面上远道的干扰波比近道的干扰波更不易被压制掉。对于 X 分量(P 波为干扰波, PSV 波为有效波)亦具有相同的特点。另外,由于在相同的炮检距时,来自同一界面的 Z 分量中的 PSV 干扰波的偏振方向与 Z 坐标轴的夹角比 X 分量中 P 干扰波的偏振方向与 X 坐标轴的夹角要大,在使用相同滤波参数处理时(如 q, p, N 相同),会出现 Z 分量的滤波效果优于 X 分量的现象(图1c,图2c)。

由图4b可见,对于 Z 分量, PSV 波的偏振方

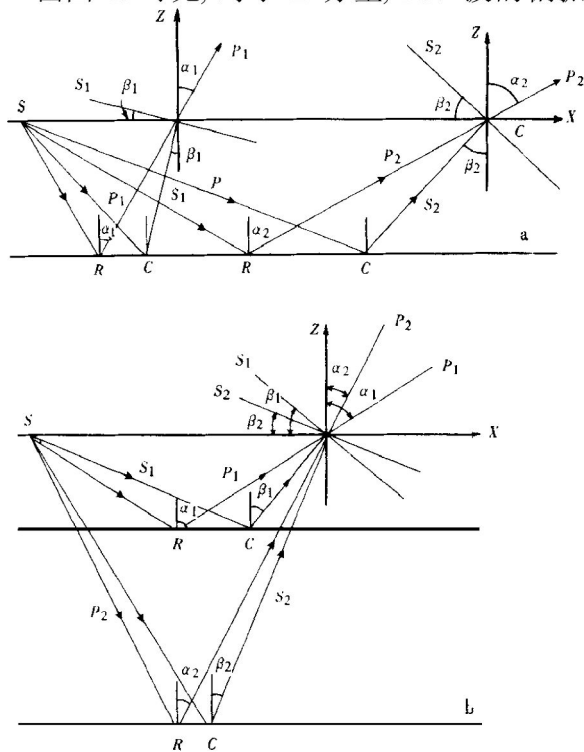


图4 P , PSV 波射线路径示意图

Fig. 4 Sketch map of P and PSV wave ray paths

a—不同炮检距射线路径示意图; b—不同深度界面射线路径示意图

向与 Z 坐标轴的夹角具有深层比浅层大的特点,故 Z 分量中深层的 PSV 波比浅层的 PSV 波更易于被滤掉。同样, X 分量中的深层 P 波比浅层 P 波更易于被滤掉。鉴于相同炮检距深层与浅层波的偏振方向的不同,在进行空间方向滤波时应选用不同的滤波参数。一般,处理深层时可选择较小的 q 值,而处理浅层时可以选用较大一点的 q 值。

2.3 p 值

由公式(4)知, p 值控制着极化程度对加权的影响,那么它对空间方向滤波有什么影响呢?为了证明这一点,我们分别用 $p=0.5, 0.75, 1.0$ 对 X, Z 分量沿 X 或 Z 坐标轴方向进行了滤波处理,结果表明, p 值的改变对滤波效果影响不大。

3 结论

通过对理论合成记录的处理以及各种滤波参数对滤波效果的影响分析,得出如下一些看法:

(1) 空间方向滤波方法是目前分离二分量记录中 P 波和 PSV 波场的一个较有效的方法。通过合理选择滤波器的有关参数(如 p, q, N 等)可达到分离纵、横波,增强有效信号,压制干扰波的目的。

(2) 不同炮检距、不同深度的反射波具有不同的偏振特点,因此,针对其不同的偏振特点应选择不同的滤波器参数。就分离纵、横波而言,处理近道或深层波时 q 值应比处理远道或浅层波时的 q 值要小, q 值的具体选择应由试验确定。

(3) 对同一点的 X, Z 分量而言,在采用相同的参数处理时, Z 分量比 X 分量有更好的滤波效果。所以,在处理 X 分量时,要选取比 Z 分量处理时更大的 q 值。

(4) 在滤波参数中,对滤波效果影响最大的参数是 q 值,其次是时窗 N ,参数 p 一般对滤波效果影响不大。改变 q 值可以达到调节滤波器通放带宽窄的目的,达到不同的滤波效果;改变时窗 N 的大小,可以直接影响到求出的 $\tau(t)$ 值的大小及计算出的极化方向的准确性。

(5) 当有效波和干扰波具有相近的极化性质(如极化方向)时,该方法就无法实现分离纵、横波或滤去干扰波的目的,这也是该方法的一个不足之处。因此,还应综合利用其它的滤波方法,以便达到良好的滤波结果。

参 考 文 献

- 1 Dankbaar J W M. Separation of P and S waves [J]. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33(7): 970~986
- 2 Benhama A, Cllet C, Dubesset M. Study and application of spatial directional filtering in three-component recordings [J]. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(6): 591~613
- 3 Perelberg A I, Hornbostel S C. Applications of seismic polarization analysis [J]. *Geophysics*, 1994, 59(1): 119~130
- 4 詹正彬, 姚姚. 多波及横波地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 64~70
- 5 朱衍镛. 二分量记录的空间方向滤波[J]. *石油地球物理勘探*, 1995, 30(增刊2): 116~125

FACTOR ANALYSIS OF AFFECTING SPATIAL DIRECTION FILTERING

Zhang Yufen Zhou Jianxin

(Department of Geophysical Exploration, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei)

Abstract: The thought of polarization filtering is proved to be correct with theoretical two-component (X, Z) seismic recording processing. The results of Various filtering parameters affecting two-component seismic record filtering show: (1) polarization direction's weight value (q) is the largest affecting factor, polarization filtering time windows (N) is secondary and polarization degree's weight value (p) has little effect on filtering parameters of the filter, (2) seismic records of different components, different distances between shot and collect and different depths must be processed by different filtering parameters. As long as correct filtering parameters of filter are selected, satisfied filtering results can be acquired.

Key Words: multi-component seismic records; polarization direction; polarization degree; spatial direction filtering; affecting factors