

# 地震数据处理中的相位校正技术综述

李振春<sup>1</sup>, 王希萍<sup>1</sup>, 韩文功<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院, 东营 257061; 2. 中石化胜利油田分公司, 东营 257000)

**摘 要** 提高地震剖面的信噪比和分辨率始终是地震数据处理中研究的重要内容. 在动静校正后的同一道集内振幅和相位相同的假设条件下, 地震叠加技术能明显提高资料的信噪比. 实际资料中相位差问题是影响有效反射信号实现同相叠加的重要因素之一. 相位校正技术能够消除子波的相位谱差异, 使子波接近或达到零相位, 从而达到提高叠加剖面质量的目的. 对相位校正的国内外研究现状, 影响相位变化的因素, 相位校正的方法原理以及判别准则进行了系统的总结和概述. 通过分析总结得出: 随着勘探形势的发展, 地震资料中的相位问题将越来越受到人们的关注和重视, 对相位的研究也将成为今后的攻关课题和研究热点.

**关键词** 地震数据处理, 相位校正, 判别准则, 校正角, 同相叠加, 信噪比

**中图分类号** P631      **文献标识码** A      **文章编号** 1004-2903(2008)03-0768-07

## Review of phase correction in seismic data processing

LI Zhen-chun<sup>1</sup>, WANG Xi-ping<sup>1</sup>, HAN Wen-gong<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Dongying 257061, China; 2. Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

**Abstract** Improving the signal-to-noise ratio and resolution of the seismic section is the important content in seismic data processing. The stack technique can obviously improve signal-to-noise ratio of seismic section, under the condition of the hypothetical condition that the amplitude and phase of seismic wavelets are same in the same traces after NMO and static correction. But in practice, this hypothetical condition is not satisfied. The problem of phase difference is one of the most important factors affecting the in-phase stack for the effective reflectors. Phase correction can eliminate the phase differences of seismic wavelets, to make the seismic wavelet become or approximate to zero-phase wavelets, and improve the stacked section quality. This paper reviews the domestic and overseas scholastic research achievements about the phase correction, the phase variation effect factors, phase correction methods and the correction criteria. We get the following points by analyzing and sammarizing; along with the exploration development, the phase problem will get more and more attention, and the study of phase will become the tackle key problem and the focused research subject.

**Keywords** seismic data processing, phase correction, correction criterion, in-phase stack, correction angle, signal-to-noise ratio

### 0 引 言

众所周知, 叠加可以提高地震资料的信噪比, 但这只是在子波相位相同的假设条件下, 若子波的相位不同, 叠加将使反射波的能量不同程度地受到损失. 在勘探资料处理中, 相位差问题是影响反射信号

实现同相叠加的重要因素之一. 相位校正技术能够消除子波的波形变化, 达到提高叠加剖面质量的目的.

近地表低、降速带风化层的横向厚度和速度的变化, 以及地震排列上炮点耦合、检波点耦合条件的差异等近地表因素及地下介质的非均一性和地下构

**收稿日期** 2008-01-10; **修回日期** 2008-03-20.

**基金项目** 国家“863”计划项目(2006AA06Z206)、国家“973”项目(2007CB209605)、CNPC 物探重点实验室中国石油大学(华东)研究室、CNPC 与中国石油大学(华东)共建地球物理重点实验室资助.

**作者简介** 李振春, 男, 1963 年生, 理学博士, 教授, 博士生导师. 主要从事地震波成像与反射地震学理论与方法的教学与研究工作. (E-mail: leonli@hpu. edu. cn)

造的复杂性等造成了地震子波振幅特性及相位特性的差异<sup>[1~7]</sup>,使得动校正后叠加剖面的质量受到严重的影响,而相位谱的差异对地震数据处理质量的影响尤为严重<sup>[8]</sup>.在 CMP 叠加中,若记录中子波相位相同,则在叠加过程中反射波的能量不受损失(即使振幅谱不同).若子波相位不同,则在叠加过程中反射波的能量将会受到损失,影响叠加成像的质量<sup>[1]</sup>.要提高成像质量,有必要做相位一致性校正<sup>[9,10]</sup>.

## 1 相位校正的研究现状

对相位的研究国外开始的较早,Levy, S.<sup>[11,12]</sup>指出常相位校正方法是对子波的剩余相位进行校正的一种近似方法(因为实际剖面中的子波剩余相位不一定是常数).其中假设子波剩余相位是不依赖于频率的常数,对子波的相位谱进行某一常数的调整,并给出了实现的方法和在有测井资料和无测井资料两种情况下的校正准则.周兴元<sup>[13]</sup>对常相位校正的判别准则和校正后记录的包络进行了讨论.白志信<sup>[14]</sup>基于常相位假设在频率域实现了最佳相位的校正.

陈必远等<sup>[15]</sup>针对子波相位受复杂因素的影响随时间、空间及频率而变化的特性,提出了一种时间、空间及频率变化的相位校正方法.郭向宇等<sup>[16]</sup>在分析已有各种子波处理方法优缺点的基础上,提出了一种新的估算混合相位子波剩余相位的算法.利用这种方法对地震信号子波进行相位校正,可使子波接近或达到零相位,从而消除了剩余相位的影响,提高了地震记录的分辨率.

李合群等<sup>[17]</sup>同时对相位和时差进行局部调整,不仅使子波形态得到了某种程度的一致性校正,而且所获得的时差也更趋真实,从而使叠加剖面的质量得到改善.宋宗平等<sup>[18]</sup>指出叠前常相位校正技术能够消除地震波在传播过程中因地表条件和传播路径的不同而引起的波形变化,达到提高叠加剖面质量的目的.国九英,周兴元<sup>[19,20]</sup>基于最大叠加能量法准则,提出了一种地表一致性相位校正方法,采取一种迭代算法求取炮点、检波点的相位校正算子,对地震记录进行校正.高少武等<sup>[21]</sup>采用纯相位滤波器来逼近地表变化引起的相位变化,对做了地表一致性振幅处理和静校正处理后的地震数据进行了地表一致性相位处理.Yanghua Wang<sup>[22]</sup>基于波场下延理论介绍了一种常 Q 反滤波,这种常 Q 反滤波方法通过两个指数项对大地 Q 滤波的相位效应(速度频

散)和振幅效应(能量吸收)进行补偿.Yanghua Wang<sup>[23]</sup>对 2002 年提出的算法进行了扩展,指出稳定性只应用于全反 Q 滤波的振幅补偿因子,全反 Q 滤波的相位因子是无条件稳定的.

## 2 影响地震记录相位变化的因素

地震波在传播过程中会受到许许多多因素的影响,另外,在资料处理中有时也会使地震记录的相位发生不同程度的畸变.影响地震子波相位的因素可以归纳为以下几种<sup>[24]</sup>:

(1)近地表因素对地震子波相位的影响<sup>[8,19,21]</sup>:近地表因素主要包括低降速带速度及横向厚度变化、炮点、检波点耦合情况的差异等.不同炮点、不同检波点得到的地震记录因近地表因素的变化将会受到不同的相位改造作用.

(2)记录仪器系统对信号相位的影响:在地震记录的记录过程中,仪器响应对地震记录会有改造作用.仪器的相位响应对所有的记录的影响是一致的.在资料处理中用确定性相位处理可以消除仪器相位响应对地震记录的影响.

(3)地层的滤波作用<sup>[1~7]</sup>对地震子波相位的影响:地震波在传播过程中,会受到各个地层的作用(这种作用实质上就是滤波),这种作用使子波相位发生畸变.

(4)动校正对信号相位的影响:动校正必将产生拉伸现象,造成子波的波形畸变,是对信号的一种时变相位校正.

(5)静校正对信号相位的影响<sup>[25~27]</sup>:静校正问题也是相位问题,它只不过反映的是地震记录相位谱中的线性部分,这部分通常用时差调整的办法加以解决.

(6)剩余子波对信号相位的影响:叠前反褶积技术通常要对子波作最小相位假设,在实际工作中,这一假设难以得到满足,经反褶积后的输出,很难保证共中心点(CMP)道集中同一反射波组的波形保持一致,使共中心点同相叠加难于实现.

(7)各种干扰对信号相位的影响:在地震资料野外采集过程中,干扰波的介入,不但干扰了有效信号的振幅谱,而且影响了其相位谱,使记录发生波形畸变.

(8)其他因素对信号相位的影响:除了上述诸因素之外,还有许多因素与相位有关,例如,有时不合适的处理参数会造成信号的波形畸变.因为许多种信号处理技术都有其前提条件,当其前条件不能满

足时,就会使其负面效应加到输出结果中。

### 3 简述几种相位校正方法

#### 3.1 常相位校正方法

常相位校正<sup>[11,12,13,18]</sup>方法是基于子波的剩余相位不依赖频率变化的假设,对记录的相位谱进行一个不依赖于频率的常数的调整。

常相位校正可以在时间域实现<sup>[13,18]</sup>,也可以在频率域内实现<sup>[14,28~30]</sup>。

##### 3.1.1 时间域相位校正原理及其实现方法

设地震记录  $s(t)$  的频谱为  $S(f)$  (不妨设  $S(0)$  为零),用常数  $\alpha$  对  $s(t)$  进行常相位校正后的输出为  $g(\alpha, t)$ ,其频谱  $G(\alpha, f)$  为

$$G(\alpha, f) = \begin{cases} S(f)e^{i\alpha}, & f > 0 \\ S(f)e^{-i\alpha}, & f < 0 \end{cases} \\ = \begin{cases} S(f)(\cos\alpha + i\sin\alpha), & f > 0 \\ S(f)(\cos\alpha - i\sin\alpha), & f < 0 \end{cases} \quad (1)$$

应用 Hilbert 变换得到常相位校正的时间域表达式为

$$g(\alpha, t) = s(t)\cos\alpha - H[s(t)]\sin\alpha, \quad (2)$$

其中:  $H[s(t)]$  是  $s(t)$  的 Hilbert 变换。

##### 3.1.2 频域常相位校正原理及实现方法

设原始记录  $x(t)$  的频谱为  $X(f)$ ,经振幅补偿处理后,令相位移量为  $\varphi$ ,则在频率域经过校正后的频谱为

$$\bar{X}(f) = X(f)e^{i\varphi}, \quad (3)$$

设  $R_e(f)$ 、 $I_m(f)$  分别为原始记录频谱的实部和虚部,整理可得到经相位移后记录的实部和虚部分别为

$$\bar{R}_e(f) = R_e(f)\cos\varphi - I_m(f)\sin\varphi, \\ \bar{I}_m(f) = R_e(f)\sin\varphi + I_m(f)\cos\varphi. \quad (4)$$

$\bar{X}(f)$  经过反傅氏变换后得到的输出结果为  $x(t)$ ,式(4)为频率域相位校正公式,它是频率域的坐标变换,这表明:对记录的相位加上一个常量,等价于对每一个频率分量在复平面内的坐标旋转一个角度。

相位校正量是在  $-\pi/2$  到  $\pi/2$  之间扫描求取的。相位旋转了的信号的方差模可以被测得,并把方差模最大的作为相位校正的最终结果。

##### 3.1.3 常相位校正的判别准则

相位校正的关键在于正确拾取相位校正量,即依据一定的判别准则拾取校正量。

###### (1) 相似系数准则<sup>[28,29]</sup>

当有测井资料可用时,以零相位合成记录作为标准道,用最大相似系数为判别准则拾取最佳相位是一种可靠的方法,相似系数计算公式为

$$C_j = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} x_j(t) \cdot x(t)}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_2} x_j^2(t) \cdot \sum_{t=t_1}^{t_2} x^2(t)}}, \quad (5)$$

式中:  $x(t)$  为测井零相位合成记录,  $t_1$  到  $t_2$  为相关时窗,  $C_j$  为井旁的第  $j$  个相移记录与合成记录的相关系数。

在实际应用中,有必要改进相似系数的计算公式,使相似系数是在给定时间范围内的扫描结果,即

$$C_j = \max \left\{ \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} x_j(t + \tau) \cdot x(t)}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_2} x_j^2(t + \tau) \cdot \sum_{t=t_1}^{t_2} x^2(t)}} \right\}, \\ \tau = -l, -l + \Delta t, \dots, -\Delta t, 0, \Delta t, \dots, l \quad (6)$$

其中,  $-l$  到  $l$  为测井合成记录与实际井旁道的对比时差范围。

###### (2) 最大方差模准则<sup>[13,14,28,29]</sup>

Wiggins 在最小熵反褶积研究中,提出用最大方差模作为目标函数来指示时间序列的脉冲性<sup>[34]</sup>。Levy S 等把最大方差模引入到相位校正中,不但定性地说明了用方差模最大作为常相位校正准则的合理性,而且以 Klauder 子波为例,给出了常相位校正中不同的常数值与方差模的关系曲线,说明零相位时方差模最大<sup>[11,12]</sup>。

令离散时间序列为  $x(t)$ ,其规范方差模定义为

$$V = \frac{\sum_{\tau=1}^T x^4(t)}{\left[ \sum_{\tau=1}^T x^2(t) \right]^2}. \quad (7)$$

为了避免单道记录的偶然性,方差模可以采用多道记录的平均来计算,即

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\sum_{\tau=1}^T x_i^4(t)}{\left[ \sum_{\tau=1}^T x_i^2(t) \right]^2} \right\}, \quad (8)$$

其中,  $N$  为道数,  $x_i(t)$  为第  $i$  个记录的相移结果。

###### (3) Parssimony 准则<sup>[15]</sup>

Parssimony 准则即使得目标函数

$$Q = \ln \left( \sum_i |X_i|^n \right) - \frac{\sum_i (|X_i|^n \cdot \ln |X_i|^n)}{\sum_i |X_i|^n}, \quad (9)$$

分母为  $x_i$  绝对值的  $n$  次方和和达到极小。这一目标函数对强、弱反射都有较高的灵敏度,可以很好地保存弱反射信息。使  $Q$  取得极小的  $\phi_j$ ,即为所求

的相位校正量。

#### (4) 相似度准则<sup>[18]</sup>

定义常相位校正后道集记录与模型道  $p(t)$  的相似度

$$Q = \sum_{t=t_1}^{t_2} \{x_i(t) \cos \alpha_i - H[x_i(t)] \sin \alpha_i\} p(t), \quad (10)$$

通过求  $Q$  的极大值来求取相位校正角  $\alpha_i$ 。这里  $p(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t)$ ,  $x_i(t)$  为 CMP 道集中的第  $i$  道,  $\alpha_i$  为第  $i$  道的相位校正角。

### 3.2 分频常相位校正<sup>[30,31]</sup>

相移量是与频率无关的常量,这只是一近似的假设。实际上,剩余相位在各个频段上是有差别的并非常数。分频常相位校正方法在常相位校正方法的基础上,采用分频的方法对不同频段的信号分别进行相位校正,再对校正后的不同频段数据进行同相处理,最后将整个频段的数据叠加起来得到最终的校正结果。

分频常相位校正方法在局部窄频带上是常相位校正,但对整个频带来说,在一定程度上实现了变相位校正,较单纯的常相位校正更精确、效果更稳定。

### 3.3 时差、常相位校正及加权叠加

该方法<sup>[18]</sup>是将动、静校正后的 CMP 道集内的各道与模型道相比较,同时找出各道与模型道间的时差和常相位差,并作相应的时差、相位校正(双参数校正),再对双参数校正后的各道在指定的(常为高信噪比)频带估算加权系数,最后进行加权叠加,以提高叠加剖面的信噪比。

具体实现时,分两步进行:

#### (1) 时差和常相位估算

对单道  $s_i$  做常相位  $\alpha$  校正之后与模型道  $s'_i$  做互相关。互相关函数为

$$S(\alpha, \tau) = \cos \alpha \cdot R(\tau) - \sin \alpha \cdot r(\tau), \quad (11)$$

其中:  $R(\tau)$  和  $r(\tau)$  分别为  $s_i$  与  $s'_i$  的实部道和虚部道的互相关。

根据极值原理,由  $S(\alpha, \tau)$  可得

$$\frac{1}{2} \frac{\partial [R^2(\tau) + r^2(\tau)]}{\partial \tau} = 0. \quad (12)$$

可由  $R^2(\tau) + r^2(\tau)$  极大值对应的点同时得到  $\Delta t$  和  $\theta$ 。

#### (2) 频域内加权系数的求取

在指定的频带内(一般为高信噪比段)用互相关计算该道  $s_j = a_j + ib_j$  与模型道  $s'_j = c_j + id_j$  频谱间的归一化相似系数

$$C = \frac{\sum_j (a_j c_j + b_j d_j)}{\sqrt{\sum_j (a_j^2 + b_j^2) \sum_j (c_j^2 + d_j^2)}}. \quad (13)$$

用上述方法所得的相似系数对叠前道进行加权叠加,可以起到相对压制噪声来增强信号,从而改善叠加质量的作用。

图 2 和图 3 是用这种方法处理剖面的对比分析,其效果十分明显。

### 3.4 时空变分频常相位校正

以常相位扫描方法为基础,将相位扫描限制在一个随时间、空间及窄频带而变化的范围很小的数据窗口内,从而拾取到随时间、空间及窄频带变化的三维相位校正量。在时间、空间平面上对三维相位校正量进行二维平滑、插值之后得到最终的相位校正量,并用于地震数据的相位校正处理,这就是时空变分频常相位校正方法<sup>[15]</sup>。

该方法分三步完成:

- (1) 拾取三维相位校正量;
- (2) 划分数据窗口;
- (3) 相位校正量的二维平滑和插值。

完成所有频带的所有窗口数据的相位拾取和相位校正后,再把所有数据进行叠加,就得到完全随时间、空间及窄频带变化的相位校正结果。

### 3.5 地表一致性相位校正

近地表异常的影响可以认为是纯滤波<sup>[16,19,20]</sup>。叠前地震数据可以写成:

$$X_{i,j}(t) = F_{i,j}(t) S_i(t) R_j(t), \quad (14)$$

式中  $X_{i,j}(t)$  是在第  $i$  个炮点和第  $j$  个检波点的位置观测到的地震道,  $F_{i,j}(t)$  是在第  $i$  个炮点和第  $j$  个检波点的位置上的没有近地表异常影响的地震道,  $S_i(t)$  是第  $i$  个炮点的近地表响应,  $R_j(t)$  是第  $j$  个检波点的近地表异常响应。

假设  $S_i(t)$  和  $R_j(t)$  的逆分别为  $\varphi_i(t)$  和  $\varphi_j(t)$ , 可以通过目标函数的最大化来计算  $\varphi_i(t)$  和  $\varphi_j(t)$ :

$$Q = \sum_m \sum_t \left[ \sum_{\substack{i,j \\ t+i=j}} X_{i,j}(t) \varphi_i(t) \varphi_j(t) \right]^2, \quad (15)$$

式中  $m$  是 CMP 号,  $t$  是旅行时,  $i$  是炮号,  $j$  是检波点号。

图 4(a) 是一个没有进行地表一致性静校正的叠加剖面。通过地表一致性相位校正的应用,剖面图 4(b) 的质量得到了明显的提高,无论是强反射还是弱反射连续性都有了明显地改善。

## 4 结 语

本文对相位校正的国内外研究现状,影响地震记录相位变化的因素,相位校正的方法原理,判别准则以及国内外学者的研究成果进行了总结和概述,通过分析总结,得到以下几点认识:

(1)相位差问题是影响有效反射信号实现同相叠加的重要因素<sup>[8,17]</sup>之一。

(2)由于多种复杂因素的影响,要完全消除子波剩余相位的影响是很困难的。

(3)尽管实际资料中存在的相位差并非严格线性,但在很大程度上近似为线性处理可以基本消除相位差给叠加造成的影响<sup>[17]</sup>。

(4)对叠前数据的相位谱进行调整,处理结果与其他方法相比有更好的保真性。

(5)相位补偿往往要求数据有一定的信噪比,信噪比太低,补偿很难成功,因此相位补偿往往安排在振幅、频率补偿之后进行<sup>[44]</sup>。

(6)在实际应用中我们可以根据实际资料的特点,选用不同的相位校正方法。

随着勘探形势的发展,对地震勘探的精度要求越来越高(如岩性勘探、低信噪比地区的地震勘探等)以及勘探目标向深层的转移,地震资料处理中的相位问题显得更加重要<sup>[46~48]</sup>。到目前为止,人们提出的各种相位校正方法并不能完全有效地消除剩余相位的影响,因此对相位的研究将成为今后一段时间内的一个攻关课题和研究热点。

**致 谢** 感谢 Leon Li 工作室全体研究人员对该论文完成的指导和帮助。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 田春志,刘洪. 深层地震勘探的地震波传播理论研究前景[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(4): 564~574.  
Tian C Z, Liu H. Study on seismic wave propagation for deep layer seismic exploration[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2002, 17(4): 564~574.
- [2] 裴江云,刘洪,李幼铭. 在随机噪音背景下地震反射信号的增强[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 91~95.  
Pei J Y, Liu H, Li Y M. Enhancing seismic reflection signal under random noise[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2002, 17(1): 91~95.
- [3] 李振春,姚云霞,马在田,王华忠. 波动方程法共成像点道集偏移速度建模[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 86~93.  
Li Z C, Yao Y X, Ma Z T, Wang H Z. Common imaging point gather migration velocity modeling based on wave equa-
- tion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(1): 86~93.
- [4] 姚振兴,高星,李维新. 用于深度域地震剖面衰减与频散补偿的反Q滤波方法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 229~230.  
Yao Z X, Gao X, Li W X. The forward Q method for compensating attenuation and frequency dispersion used in the seismic profile of depth domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(2): 229~230.
- [5] 尹军杰,刘学伟,李文慧. 地震波散射理论及应用研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 123~134.  
Yin J J, Liu X W, Li W H. The view of seismic wave scattering theory and its applications[J]. Geophysics (in Chinese), 2005, 20(1): 123~134.
- [6] 马昭军,刘洋. 地震波衰减反演研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1047~1082.  
Ma Z J, Liu Y. A summary of research on seismic attenuation [J]. Geophysics (in Chinese), 2005, 20(4): 1047~1082.
- [7] 刘洪,袁江华,陈景波,等. 大步长波场深度延拓的理论[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1779~1793.  
Liu H, Yuan J H, Chen J B, Shou H, Li Y M. Theory of large-step wavefield depth extrapolation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1779~1793.
- [8] 刘光鼎,李幼铭,吴永刚,等著. 陆相油储地球物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 109~110.  
Liu G D, Li Y M, Wu G, et al. Lacustrine oil storage physical geography guide theory[M]. Beijing: Science Presh, 1998, 109~110.
- [9] 葛瑞麟. 印尼 BINJAI 地区资料处理中的一致性问题[J]. 勘探地震物理进展, 2006, 29(3): 206~219.  
Ge R L. Consistency processing of data from BINJIA, Indonesia[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 206~219.
- [10] 秦亚玲,侯丽春,等. 东濮凹陷高精度地震资料处理[J]. 勘探地震物理进展, 2002(4): 14~18.  
Qin Y L, Hou L C. High precision seismic data processing in dongpu hollow[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002 (4): 14~18.
- [11] Levy S, Oldenburg D W. Automatic phase correction of common-midpoint stacked data[J]. Geophysics, 52(1)1987: 51~59.
- [12] Levy S, Oldenburg D W. The deconvolution of phase-shifted wavelets[J]. Geophysics, 47(9)1982: 1285~1294.
- [13] 周兴元. 常相位校正[J]. 石油地球物理勘探, 1989, 24(2): 119~129.  
Zhou X Y. Constant phase correction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1989, 24(2): 119~129.
- [14] 白信志. 子波剩余相位的校正[J]. 中国煤炭地质, 1996, 8(2): 48~50.  
Bai X Z. Wavelet residual phase correction[J]. China Coal Geology. 1996, 8(2): 48~50.
- [15] 陈必远,等. 时空变分频常相位校正[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(1): 103~108.  
Chen B Y, et al. Time and space and subsection frequency

- phase correction[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1997, 32(1):103~108.
- [16] 郭向宇,等.混合相位子波的相位估算及校正[J].*石油地球物理勘探*,1998,33(2):214~221.  
Guo X Y, Zhou X Y, Dong M Y. Estimation and correction of mixed-phase wavelet phase[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1998,33(2):214~221.
- [17] 李合群,周兴元.时差、常相位校正及加权叠加[J].*石油地球物理勘探*,2000,415~418.  
Li H Q, Zhou X Y. Moveout and constant phase corrections, along with weighted stacking[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000,415~418.
- [18] 宋宗平,等.叠前常相位校正[J].*大庆石油地质与开发*,2004,23(2):69~70.  
Song Z P, *et al.* Pre-stack constant phase correction[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004,23(2):69~70.
- [19] 国九英,周兴元.二维及三维地表一致性相位校正[J].*石油地球物理勘探*,1995,30(3):345~350.  
Guo J Y, Zhou X Y. Surface-consistent phase correction in 2-D and 3-D domains[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1995, 30(3):345~350.
- [20] Guo J Y, Zhou X Y. Surface-consistent phase correction[J]. SEG Int'l Exposition and Annual Meeting, September 9~14, 2001.
- [21] 高少武,等.反射波地表一致性相位校正[J].*石油地球物理勘探*,2001,36(4):480~487.  
Gao S W, *et al.* Surface-consistent phase correction for reflection wave[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001,36(4):480~487.
- [22] Wang Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. *Geophysics*,2002,67(2):657~663.
- [23] Wang Y H. Inverse Q filter for seismic resolution enhancement[J]. *Geophysics*, 2006,71(3): 51~60.
- [24] 李建军.叠前相位校正[J].*石油大学硕士学位论文*,1998.  
Li J J. Prestack phase correct[J]. Master thesis, University of petroleum. 1998.
- [25] 刘伊克,常旭,王辉.三维复杂地形近地表速度估算及地震层析静校正[J].*地球物理学报*,2001,44(2):272~277.  
Liu Y K, Chang X, Wang H. Estimation of near-surface velocity and seismic tomographic static corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001,44(2):272~277.
- [26] 张红梅,吕小林,刘洪.改进的约束单纯形模拟退火剩余静校正[J].*地球物理学进展*,2004,19(2):341~346.  
Zhang H M, Lü X L, Liu H. The improved method of simplex-simulated annealing residual statics[J]. *Progress In Geophysics*. 2004,19(2):341~346.
- [27] 王云专,杨立伟,李素华.剩余时差校正及泊松比反演[J].*地球物理学进展*,2006,21(1):214~218.  
Wang Y Z, Yang L W, Li S H. Residual moveout correction and Poisson's ratio inversion[J]. *Progress In Geophysics*. 2006,21(1):214~218.
- [28] 姚逢昌.振幅谱补偿和相位校正[J].*石油物探*,1990,29(1):46~57.  
Yan F C. Amplitude spectra compensation and phase correction[J]. *Geophysical Prospecting For Petrole*. 1990,29(1):46~57.
- [29] 景建恩.测井与岩心、地震数据的匹配方法研究[J].*长春科技大学*,长春:硕士学位论文,2000.  
Jing J E. Matching study of well data, rock core and seismic data[J]. Master Thesis. Chang-chun University of Science and Technology, 2000.
- [30] 赫永峰.分频相位校正[J].*石油物探*,1998,37,增刊,66~71.  
He Y F. Subsection frequency phase correction[J]. *Geophysical Prospecting For Petrole*. 1998,37, supplement,66~71.
- [31] 秦义龙.基于信噪比估计的反褶积方法研究[J].*大庆石油学院*,硕士学位论文,2000.  
Qin Y L. Study of deconvolution method based on estimation of signal-to-noise ratio[J]. Daqing Petroleum Institute, Master Thesis, 2000
- [32] Hileman J A, *et al.* Automated static corrections[J]. *Geophysical Prospecting*, 1968,16(3): 326~358.
- [33] Taner M T, *et al.* Estimation and correction of near surface time anomalies[J]. *Geophysics*,1974, 39(3):441~463.
- [34] Wiggins R A. Minimum entropy deconvolution[J]. *Geoexploration*, 1978, 16(1):21~35
- [35] Ronen J, Clearbout J F. Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization [J]. *Geophysics*, 1985,50(2): 2759~2767.
- [36] Musser J W, King D, Wason C B. Total differential statics [J]. 56th Ann., Int. Meeting of SEG., 1986.
- [37] Guo J Y, Zhou X Y. Surface consistent static correction using second order difference and maximum stack energy[J]. *Oil Geophys Prospecting*, 1992, 27(3):361~370.
- [38] Guo J Y, *et al.* Pure phase correction[J]. SEG/CPS (93 Beijing) International Geophysical Meeting, 1993.
- [39] Guo J Y, *et al.* Phase correction in 2D and 3D domains[J]. *Oil Geophys. Prospecting*. 1995,30(3):345~350.
- [40] Taner M T, Korhler F. Surface consistent correction[J]. *Geophysics*, 1981, 46(1): 17~22.
- [41] 张山译.静态校正:时间、振幅和相位[M].*美国勘探地球物理学家学会第61届年会论文集*,北京:石油工业出版社,1993, 1016~1018.  
Zhang S. Static Correction: Time, Amplitude and Phase [M]. America Exploration Geophysicist Academy 61<sup>th</sup> Annual Meeting Thesis, Beijing; Petroleum Industry Press, 1993.
- [42] 国九英,周兴元.最大叠加能量法地表一致性相位校正[J].*北京 SEG/CPS 国际地球物理年会*,1993.  
Guo J Y, Zhou X Y. Surface consistency phase correction based maximum stack energy[J]. Beijing SEG/CPS International Physical Geography Annual Meeting, 1993.
- [43] Tuner M T, Corp S R, Rice U, *et al.* Static Corrections: time Amplitude and Phase[J]. 1399~1401.
- [44] 熊焘著.复杂地区地震数据处理思路[M].北京:石油工业出

版社,2002,120~122.

Xiong Z. Seismic data processing ideas in complex areas[M]. Beijing:Oil Industry Press, 2002,120~122.

- [45] 李亚峻,李月,高颖. 基于双谱幅值和相位重构的地震子波提取[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):947~952.

Li Y J, Li Y, Gao Y. A method of extracting seismic wavelet based on bispectrum amplitude and phase reconstruction[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(2):947~952.

- [46] 刘志,王夫运,杨健. 一种震相拾取误差的自动判别和计算方法[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):924~928.

Liu Z, Wang F Y, Yang J. A method for automatically identifying and calculating the uncertainty in phase picking[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(2):924~928.

- [47] 常晓涛,李建成,郭金运,黄金维. 一种多前缘多阈值的波形重构算法[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1629~1634

Chang X T, Li J C, Guo J Y, Hwang Cheinway. A multi-leading edge and multi-threshold waveform retracker [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1629~1634

- [48] 常晓涛,李建成,郭金运,黄金维. 一种多前缘多阈值的波形重构算法. 地球物理学报,2006,49(6):1629~1634

Chang X T, Li J C, Guo J Y, Hwang Cheinway. A multi-leading edge and multi-threshold waveform retracker [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1629~1634