

# 剩余静校正异常对叠加结果的影响与采集参数和反射特征的关系

李桂花, 朱光明, 张文波

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 从地震勘探的基本原理出发, 分析了剩余静校正异常对叠加结果影响的基本假定和数学模型, 详细推导剩余静校正异常的幅度和波长(剩余异常变化速率)对纵波和转换波叠加的影响与地震排列长度、信号频率、反射同相轴时间关系的公式, 并按公式研制了相应的软件。分析这些关系表明: 地震信号的高频分量受剩余异常影响大; 剩余异常引起的能量衰减与深度无关; 剩余异常引起的相位延迟随深度而变化; 由于切除, 长波长异常使浅层同相轴形态畸变, 短波长异常使深层同相轴能量衰减; 转换波比纵波剩余异常幅度大且变化剧烈, 转换波剩余异常是  $V_p/V_s$ 、界面深度和炮检距的函数。这些参数间的关系可作为最佳采集参数设计和处理方法选择的一种依据。

[关键词] 剩余静校正异常; 纵波和转换波叠加; 关系; 采集参数; 反射特征

[中图分类号] P315.63; P315.61 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)04-0075-06

[作者简介] 李桂花(1977—), 女, 黑龙江宝清人, 硕士研究生, 现从事地球探测与信息技术研究工作。

静校正特别是长波长剩余静校正和转换波静校正是地震勘探数据采集、数据处理和资料解释中的一个关键问题, 也是当前地震勘探技术研究的一个热点。

很多学者对静校正的研究作出了重要贡献, Hampson 和 Russell(1988)<sup>[1]</sup> 等对近地表速度模型进行了研究。White(1989)<sup>[2]</sup> 基于两点射线追踪, 用带阻尼的最小平方方法求取近地表的速度和厚度。Zhang(1998)<sup>[3]</sup> 提出用最短路径射线追踪方法的正则化非线性层析确定表层速度。赵振飞(1998)<sup>①</sup> 和李家康(1999)<sup>[4]</sup> 用约束最小平方迭代求解超大型层析反演方程, 李录明(2000)<sup>[5]</sup> 用带阻尼的最小平方正交分解法迭代求解大型稀疏矩阵方程组。陈宝孚(2002)<sup>[6]</sup> 提出近似等价约束方法, 解决近地表表层速度反演多解性的问题。潘宏勋(2003)<sup>[7]</sup> 提出改进的相对折射静校正方法, 解决复杂地区准确拾取初至和追踪同一高速折射层的问题。井西利(2003)<sup>[8]</sup> 对大剩余静校正提出了两步法求解方法。王克斌(2003)<sup>[9]</sup> 和李培明(2003)<sup>[10]</sup>

研究了复杂地区三维折射静校正和模型约束的三维初至折射静校正问题。以上研究主要涉及到表层速度的求取和静校正方法及算法的改进, 无疑, 它们对于地震资料的采集和处理都有重要的作用。除此之外, Robert Garotta(2002)<sup>[11]</sup> 还对剩余静校正异常的幅度和波长与观测系统的排列长度和地震波频率的关系进行了研究。

在文献[11]的基础上, 笔者从基本原理出发, 给出了剩余异常对迭加结果影响的基本假设和模型, 详细地推导了剩余静校正在迭加过程中的影响与地震排列长度、信号频率、反射同相轴时间关系的公式; 考虑到转换波剩余静校正的特殊性, 特别导出了转换波共转换点迭加情况下的关系式; 根据这些关系开发了相应的软件并用这些软件分析剩余静校正剩余异常的幅度和变化速率(波长)与地震排列长度、地震波类型、地震反射时间和地震频率的关系。剩余静校正异常与地震采集参数和地震反射类型、频率及深度之间的这些关系为存在复

[收稿日期] 2004-02-03

[基金项目] 国家 863 计划项目(2001AA602018-04-01)

① 赵振飞. 具有平缓变速低降速带的平缓高速顶界面反射折射波近地表模型走时层析反演算例. 物探局科技攻关项目技术交流会议材料, 1998.

杂剩余静校正情况下的地震采集参数的最佳设计及选用某些处理方法来减少剩余静校正对叠加结果的影响提供了科学依据。

## 1 基本公式

假设有一共反射点道集(图 1), 考察有无剩余静校正正情况下这一共反射点道集的迭加结果。

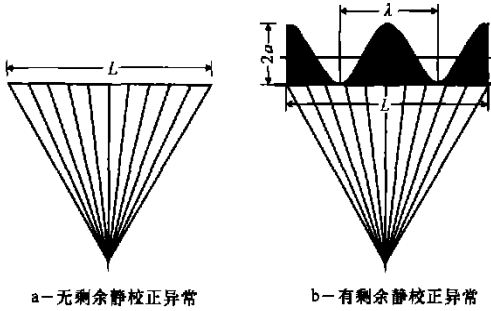


图 1 共反射点道集

Fig. 1 Common-reflection gather

设地震信号的一个频率分量为:

$$A = A_0 e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad (1)$$

式中:  $A_0$  为波的振幅;  $\omega t + \varphi$  为波的相位;  $\omega$  为圆频率;  $\varphi$  为初相位。按照付氏变换理论, 整个信号可看成是不同频率和相位的各个频率分量线性迭加的, 所以讨论式(1)不失一般性。展开式(1)得

$$A = A_0 [\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)] = A_0 [\cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi) + j \sin(2\pi \frac{t}{T} + \varphi)], \quad (2)$$

式中:  $T$  为信号的周期。在共反射点道集中,  $t$  可看成反射同相轴的波至时间;  $\varphi$  是相位差。对于共反射点道集中的各个道, 如果动校正后同相轴被拉平(图 1a, 水平地表), 没有剩余时差, 则各道之间没有相位差。或者说总相位为  $\varphi_0 = \omega t = 2\pi \frac{t}{T}$ , 显然这时迭加的结果是理想的完全同相的迭加。

当存在剩余静校正异常(图 1b, 起伏地表)时, 动校正以后, 还存在剩余时差。假设剩余时差沿检波点排列的变化可用一个余弦函数表示, 余弦函数的振幅为  $a$ , 波长为  $\lambda$ , 也即剩余时差的最大变化幅度为  $2a$ , 剩余时差变化的快慢用波长  $\lambda$  表示。共反射点道集中的各个道位于检波点排列的不同位置, 因而各道之间有按余弦规律变化的相位差, 各道的时差  $\Delta t$  和相位差  $\Delta \varphi$  可写成:

$$\Delta t = a (\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} + 1.0), \quad (3)$$

$$\Delta \varphi = 2\pi \frac{a}{T} (\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} + 1.0),$$

各道的相位可写成:

$$\varphi_x = 2\pi [\frac{t}{T} - \frac{a}{T} (\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} + 1.0)], \quad (4)$$

式中:  $x$  为检波点离开排列中心(异常顶点)的距离。

设排列长度为  $L$ , 参加迭加道数为  $N$ , 对于纵波, 炮点和接收点相对于炮检中点是对称的, 假设炮点和接收点的剩余静校正量相同, 则迭加公式可写为:

$$\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n + j \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n, \quad (5)$$

式(5)是一复数, 其模和相位角可分别写为:

$$R = \frac{2}{N} [(\sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n)^2 + (\sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

$$P = \text{tg}^{-1} [\sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n / \sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n], \quad (7)$$

模  $R$  表示剩余异常引起的迭加结果的振幅畸变(如同相轴幅度的减弱), 相位  $P$  表示剩余异常引起的迭加结果的相位畸变(如同相轴或反射界面形态的变化)。

## 2 剩余异常对迭加结果的影响

图 2a、图 2b 分别根据式(6)和式(7)计算的剩余异常对迭加结果的振幅影响和相位影响。图 2 中横坐标是  $L/\lambda$ ,  $L$  是共反射点道集中最大炮检距的排列长度,  $\lambda$  是剩余异常的波长(或剩余静校正量沿测线变化的波长)。通常将  $\lambda$  相对于  $L$  大的剩余异常称为长波长, 而将  $\lambda$  相对于  $L$  小的剩余异常称为短波长; 纵坐标是  $a/T$ ,  $a$  是剩余异常的幅度(毫秒为单位),  $T$  是信号的周期(毫秒为单位),  $f = 1/T$  是信号的频率成分。对于同样幅度的  $a$ , 高频相对影响大, 低频相对影响较小。图 2a 中色标或灰度表示迭加后振幅减弱的程度, 图 2b 中色标或灰度表示迭加后的相位延迟。

从图 2 总体上可以看出:

(1) 当异常波长比排列长得多, 异常幅度比信号主周期小得多时, 迭加结果受影响不明显。

(2) 长波长的剩余异常会改变反射同相轴的

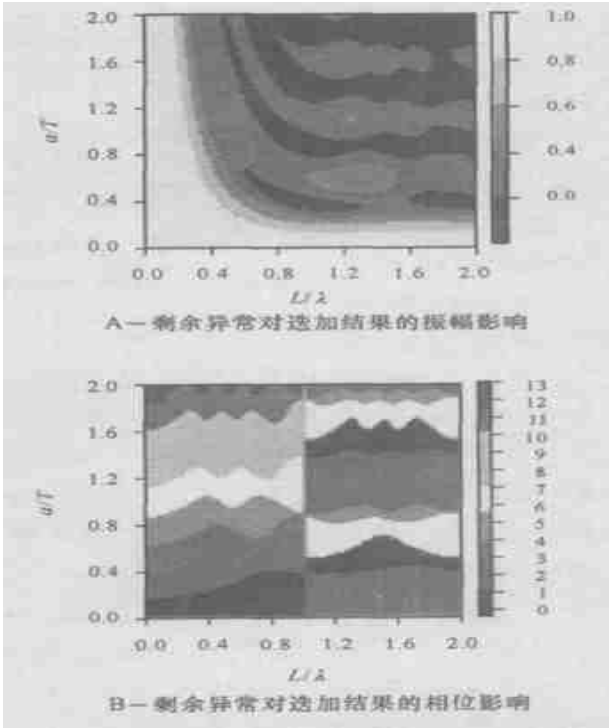


图 2 剩余异常对迭加结果的振幅影响和相位影响  
Fig. 2 Attenuation and phase difference due to statics  
时间或界面形态, 但对共反射点道集 CRP 迭加道的迭加能量衰减较小。

(3) 短波长的剩余异常不影响构造形态, 但会严重降低迭加信号的能量, 特别是信号的高频成分。  
(4) 在很长和很短波长之间, 中间波长的剩余异常, 既影响构造形态, 也影响信号能量。

(5) 相位谱响应中, 对应于  $L/\lambda > 1$  和  $(a/T) > 1$  的区域相位延迟比较复杂, 有一些相位突跳, 难以利用。

2.1  $a/T$  对迭加结果的影响

对于给定的剩余异常幅度  $a$ , 当  $T$  小时,  $a/T$  大, 对应于信号高频成分的情况; 当  $T$  大时,  $a/T$  小, 对应于信号低频成分的情况。  $a/T$  对迭加结果的影响与频率有关, 高频相当于图 2 上部, 低频相当于图 2 下部。显然, 高频部分迭加振幅受影响大。

2.2  $L/\lambda$  对迭加结果的影响

对于给定的剩余异常宽度或波长  $\lambda$ , 当  $L$  小时, 排列短,  $L/\lambda$  值小; 相对于  $L$  给定时,  $\lambda$  大, 异常波长长, 异常称为长波长。反过来, 对于给定的  $\lambda$ , 当  $L$  大时, 排列长,  $L/\lambda$  值大; 相对于  $L$  给定时,  $\lambda$  小, 异常波长小, 异常称为短波长。前者相对于图 2 左边  $L/\lambda$  取较小值的情况。后者相当于右边  $L/\lambda$  取较大值的情况。从图 2a 可以看出其对迭加结果

的影响: 长波长对迭加振幅影响小, 短波长对迭加振幅影响大。

2.3 切除和有效排列长度

通常地震资料处理要对浅层大偏移距作切除处理 (图 3), 因而 CRP 道集中浅层缺少大偏移距道, 有效排列长度减小, 剩余异常相对于变短的有效排列长度, 其波长变长, 所以同样变化范围的剩余异常, 浅层剩余异常变化相当于长波长, 深层剩余异常变化相当于短波长, 浅层形态有较大变化, 深层振幅有较大衰减。

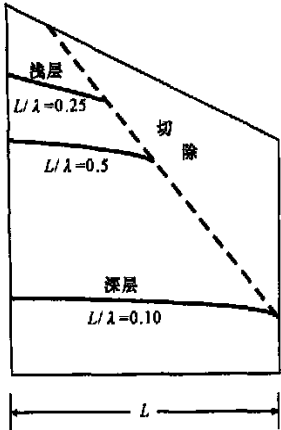


图 3 切除和有效排列长度  
Fig. 3 Muting and effective spread length

图 4 说明有效排列长度对迭加振幅的影响是随深度变化的。假设剩余异常幅度为 10 ms, 信号频率从 0 ~ 100 Hz, 异常波长为  $\lambda$ , 原排列长度也为  $\lambda$ , 对应于三个深度, 切除以后有效排列长度分别为原来排列长度的 25%, 50%, 100%, 也即  $L/\lambda$  分别为 0.25, 0.5 和 1.0, 计算结果如图 4。由图可以看出  $L/\lambda = 1.0$  表示的短波长比  $L/\lambda = 0.25$  表示的长波长衰减大。总体来说, 高频部分比低频部分衰减大。并且衰减随频率的变化表现出周期性。

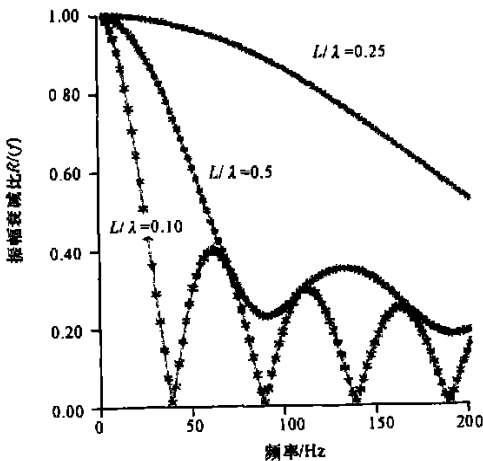


图 4 假设异常大小为 10 ms 时, 对于不同  $L/\lambda$  计算的频率响应  
Fig. 4 Frequency response assuming an anomaly size ( $a$ ) of 10 ms for variable  $L/\lambda$

2.4 反射同相轴深度与剩余异常影响的关系

图 5 分别表示同样幅度  $a$  和波长的剩余异常, 同样排列长度  $L$  和子波频率  $f$  对于不同深度 (不同  $t_0$  时间) 的反射同相轴迭加结果引起的振幅和相位的变化。可以看出, 随着反射同相轴深度的变化, 振幅衰减的规律不随  $t_0$  时间而变化 (没考虑切除因而有效排列长度不变), 但相位延迟的规律变化剧烈, 不同频率有不同的周期性, 但不同的  $L/\lambda$  有相同的周期性, 这也说明浅层切除以后, 同相轴能量衰减不大, 但同相轴形态明显变化的原因。

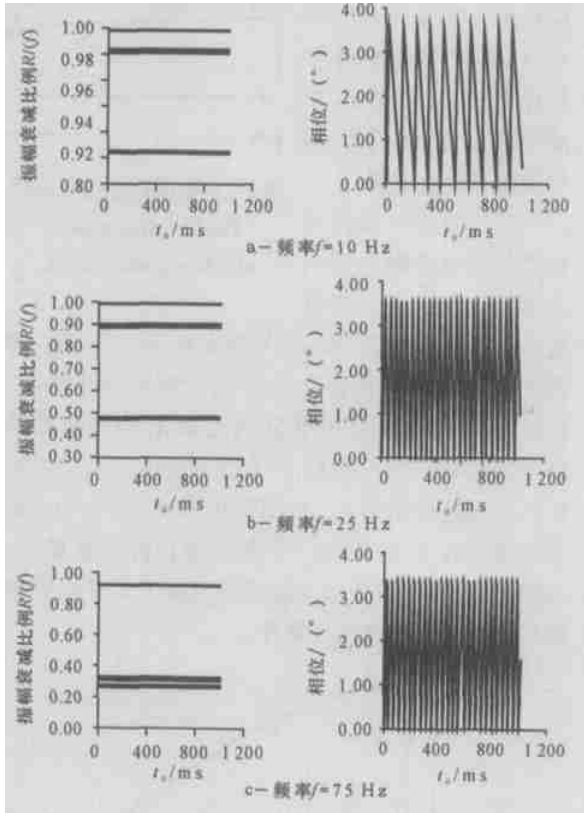


图 5 剩余异常  $a=10\text{ ms}$   $L/\lambda=0.25, 0.5,$

1.0. 信号频率  $f=10, 25, 75$  时迭加振幅衰减相位延迟随反射时间  $t_0$  的变化

fig. 5 When anomaly size  $a=10\text{ ms}$   $L/\lambda=0.25, 0.5, 1.0$  and the signal frequency  $f=10, 25, 75$ , attenuation of amplitude and phase difference with time  $t_0$  change

3 转换波剩余静校正影响的公式

在图 6 中, 假设深度  $Z$  处有一水平反射转换波界面  $B$ , 界面以上介质的纵横波速度分别是  $V_p$  和  $V_s$ 。位于地表的震源和接收点的位置分别是  $S$  和  $R$ , 炮检中点为  $M$ , 转换点在地面的水平投影点为

$C$ , 如果选择  $S$  为坐标原点, 则  $S, M, C, R$  的  $x$  坐标分别为  $0, x_M, x_C, x_R$ ,  $SC$  的距离为  $x_p$ ,  $CR$  的距离为  $x_s$ 。根据斯奈尔定律, 从  $S$  到  $D$  的入射射线和从  $D$  到  $R$  的反射转换射线两者相对炮检中点是不对称的。 $SD$  和  $DR$  的不对称性是纵横波速度比  $V_p/V_s$ 、炮检距  $X$  和界面深度  $Z$  三者的函数。当  $V_p/V_s$  和界面深度  $Z$  以及转换点  $CCP$  固定时, 改变  $S, R$  和炮检距  $X$  可构成转换波的共转换点点集。现在考虑共转换点点集中各炮点位置以及各接收点位置之间的关系。

图 6 水平界面转换波射线路径  
Fig 6 Converted wave transmit route on horizontal interface

设第一震源点的  $x$  坐标为  $0$ , 炮点距为  $ds$ , 参加迭加的总道数为  $N$ , 当共转换点和深度固定时, 由图 6 的几何关系及斯涅尔定律, 可得第  $m$  个震源点时, 接收点  $R$  离开转换点的水平距离为:

$$x_s = \frac{Z}{\sqrt{(x_p - m \cdot ds)^2 \frac{V_p^2}{V_s^2} + \frac{V_p^2}{V_s^2} - 1}}, \quad (7)$$

第  $m$  个震源点离开转换点的水平距离为:  $x_p = x_c - (m - 1)ds$ , 设炮点和接收点的剩余异常幅度分别为  $a_p$  和  $a_s$ , 波长分别为  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$ , 纵横波综合波长近似为:

$$\lambda_{ps} = \frac{\lambda_p + \lambda_s}{2}, \quad (8)$$

炮点和检波点剩余静校正引起的时差分别为  $a_p[(\cos 2\pi \frac{x_p}{\lambda_p}) + 1]$  和  $a_s[(\cos(2\pi \frac{x_s}{\lambda_s}) + 1)]$ , 总时差为  $a_p[(\cos 2\pi \frac{x_p}{\lambda_p}) + 1] + a_s[(\cos(2\pi \frac{x_s}{\lambda_s}) + 1)]$ , 则任意一道的相位可写成:

$$\begin{aligned} \varphi_{m1} &= 2\pi \left[ \frac{t}{T} - \frac{a_p}{T} (\cos 2\pi \frac{x_p}{\lambda_p} + 1.0) \right], \\ \varphi_{m2} &= 2\pi \left[ \frac{t}{T} - \frac{a_s}{T} (\cos(2\pi \frac{x_s}{\lambda_s}) + 1.0) \right], \\ \varphi_m &= \pi \left[ \frac{2t}{T} - \frac{a_p}{T} (\cos 2\pi \frac{x_p}{\lambda_p} + 1.0) - \frac{a_s}{T} (\cos(2\pi \frac{x_s}{\lambda_s}) + 1) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

迭加公式可写为:

$$\sum_{m=0}^{N-1} (\cos \varphi_{m1} + \cos \varphi_{m2}) + j \sum_{m=0}^{N-1} (\sin \varphi_{m1} + \sin \varphi_{m2}), \quad (10)$$

模和相位角可分别写为:

$$R = \frac{1}{N} [ (\sum_{m=0}^{N-1} (\cos \varphi_{m1} + \cos \varphi_{m2}))^2 + (\sum_{m=0}^{N-1} (\sin \varphi_{m1} + \sin \varphi_{m2}))^2 ]^{1/2}, \quad (11)$$

$$P = \text{tg}^{-1} [ \sum_{m=0}^{N-1} (\sin \varphi_{m1} + \sin \varphi_{m2}) / \sum_{m=0}^{N-1} (\cos \varphi_{m1} + \cos \varphi_{m2}) ]. \quad (12)$$

从以上分析可见, 转换波剩余静校正的影响与界面深度、纵横波速度比、排列长度以及剩余异常的幅度和波长都有关系。

4 转换波剩余静校正异常对迭加结果的影响

图 7 是剩余异常对 PP 波和 PS 波叠加结果影响的对比, 两者的变化趋势是一致的, 但 PS 波比 P 波变化剧烈。

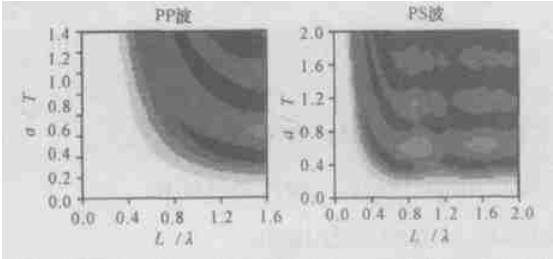


图 7 剩余异常对 PP 波和 PS 波叠加结果影响的对比  
Fig. 7 Comparison effect of residual anomalies on PP and PS mode stack result

图 8 为陆上多分量接收的垂直分量(a)和水平分量(b)的记录, Z 分量上直接看到的是 P 波, X 分量上直接看到的是 PS 波, 比较两图可见, 转换波(图 8b)同相轴的扭动明显地反映出转换波剩余静校正异常幅度大和变化剧烈的特点。转换波剩余异常幅度大、变化剧烈的原因可用图 9 说明:

- (1) 近地表横波速度很低,  $V_p/V_s$  可以达到 10, 而深部固结好的地层大约为 1.7 ~ 3.5, 对于静校正来说, 这就意味着 PS 波比 P 波有更高的异常幅度或  $a/T$  比值。
  - (2) 近地表横波速度变化快, 异常变化快即波长相对较短, 转换波随  $L/\lambda$  的变化比 P 波剧烈。
- 转换波剩余静校正, 因为入射射线和反射转换波射线不对称, 所以炮点静校正和检波点静校正异常对迭加结果的影响不同。但是对于炮点静校正

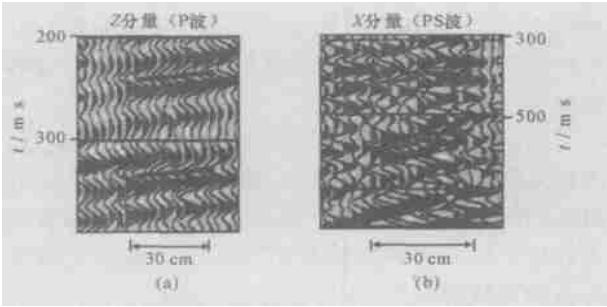


图 8 多分量记录显示出只有 S 波有静校正畸变<sup>[13]</sup>  
Fig. 8 Multi-component record showing static distortion in the S mod only<sup>[13]</sup>

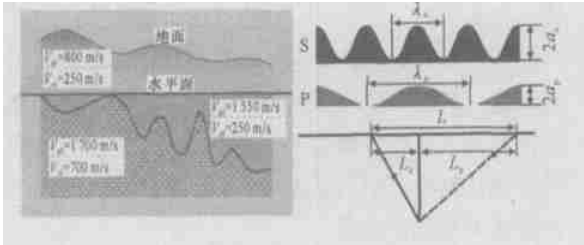


图 9 近地表模型(左)及 P 和 S 波排列和静校正异常的特点(右)<sup>[13]</sup>

Fig. 9 Near-surface model(left), characteristics of the P and S spreads and static anomalies(right)<sup>[13]</sup>

来说, P 波和 PS 波的射线是相同的。所以在处理 P 波资料时, 先求出 P 波炮点剩余静校正量, 作为 PS 波炮点剩余静校正量, 再求 PS 转换波接收点静校正量, 是很有益的。

5 结论

- (1) 剩余静校正异常对迭加结果的影响, 依赖于异常幅度与信号周期的比值 ( $a/T$ )、观测排列长度与异常波长的比值  $L/\lambda$  以及反射同相轴的深度或双程时间  $t_0$ 。 $\lambda$  与  $L$  相比较大时称为长波长,  $\lambda$  与  $L$  相比较小时称为短波长。
- (2) 反射同相轴浅时, 由于切除使有效排列长度减小,  $\lambda$  与  $L$  的比相对较大, 近似为长波长的情况, 同相轴的形态受剩余异常的影响会明显改变。反射同相轴深时, 由于切除未使有效排列长度减小,  $\lambda$  与  $L$  的比相对较小, 近似为短波长的情况, 同相轴的能量受剩余异常的影响会明显减弱。这种浅部同相轴形态改变, 深部同相轴能量减弱的特征可帮助检测剩余异常, 并设法校正剩余异常。

- (3) 对地震信号的低频分量, 剩余异常  $a/T$  相对较小, 而对地震信号的高频分量, 剩余异常  $a/T$

相对较大。所以地震信号的高频部分受剩余异常的影响大。

(4) 转换波比纵波剩余异常幅度大, 变化剧烈, 因而受剩余异常的影响大, 且难以补偿。转换波入射线一侧的炮点静校正与纵波一致, 先求出纵波炮点静校正值再求转换波反射线一侧的接收点静校正值是有利的。

(5) 转换波的转换点是随深度而变的, 不能简单的选排出共转换点道集并且共转换点与  $V_p$  和  $V_s$  的比值变化有关, 所以转换波静校正应考虑按共转换点点集进行。

(6) 关于剩余静校正异常幅度和异常波长与排列长度、信号频率、反射同相轴时间以及波的类型之间的关系可作为最优采集参数设计, 分析剩余异常对迭加结果影响的依据, 也为新的更有效的剩余静校正方法提供线索。

# [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Hampson D, Russell B. 利用广义线性反演进行初至波三维解释[ A]. 美国勘探地球物理学家学会. 第 54 届 SEG 年会论文集

文集(地震及专题部分)[ C]. 北京: 石油工业出版社, 1985. 224~226.

[ 2 ] White D J. Two-dimensional seismic refraction tomography[ J]. Geophy, 1989, 97: 223~245.  
[ 3 ] Zhang J, Toksoz M N. Nonlinear refraction traveltime tomography[ J]. Geophysics, 1998, 63: 1726~1737.  
[ 4 ] 李家康. 近地表速度折射层析[ A]. 中国地球物理学会. 中国地球物理学会年刊[ C]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.  
[ 5 ] 李录明, 罗省贤, 赵波. 初至波表层模型层析反演[ J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 559~564.  
[ 6 ] 陈宝孚. 先验约束初至波层析成像方法研究及应用[ D]. 西安: 长安大学, 2002.  
[ 7 ] 潘宏勋. 改进的相对折射静校正方法[ J]. 石油物探, 2003, 42(2): 208~211.  
[ 8 ] 井西利. 大剩余静校正量求解的两步法[ J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(1): 22~26.  
[ 9 ] 王克斌. 折射波静校正正在苏里格七天三维处理中的应用[ J]. 石油物探, 2003, 42(2): 248~251.  
[ 10 ] 李培明. 模型约束的三维处置折射静校正[ J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 199~202.  
[ 11 ] Robert Garotta. About compressional, converted mode and shear statics[ A]. Int'l Exposition and 72nd Annual Meeting Salt lake City[ C]. Salt lake City: SEG, 2002.

## Some effects of residual static correction anomalies on stack result and its relationship with acquisition parameters and reflection characteristic

LI Gui-hua, ZHU Guang-ming, ZHANG Wen-bo

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University Xi'an 710054, China)

**Abstract** This paper analyses fundamental hypotheses and model for influence of residual static correction on stack result based on basic principle of seismic survey, deduces the relationship formulae between the influence of residual anomalies (size and length) on stack result and the spread length, the dominant signal frequency, reflected event time, and develops corresponding software. These analyses indicate that the influence on high frequency of seismic signal are enormous, the energy attenuation aroused by residual anomalies are independent of depth, while phase detention varies with depth, owing to muting, long wave-length anomalies bring the aberration to shallow events configuration, and short wave-length anomalies lend to deep events energy attenuation, the sizes of residual anomalies of PS wave are bigger than ones of P wave and change acutely, PS residual anomaly is a function of  $V_p/V_s$  interface depth and shot-receive distance. The relationship of these parameters can provide an evidence for optimal acquisition parameter devising and processing.

**Key words:** residual anomaly; P and PS wave stack; relationship; acquisition parameter design

[ 英文审定: 李庆春 ]