

垂直入射假设对井旁地震道子波提取的影响及改进措施*

马劲风¹, 张忠伟¹, 王家珉²

(1. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069; 2. 中国石化新星石油公司华东石油局测井站, 江苏扬州 225007)

摘要: 子波提取是波阻抗反演的关键技术。通常采用的子波提取方法是利用测井资料求得反射系数, 然后与井旁地震道进行反褶积, 提取地震子波。这种方法的前提是假设地震波垂直入射于反射界面, 而实际地震资料采集时, 地震波并非垂直入射于反射界面, 反射系数存在随炮检距变化的关系。这样垂直入射假设下的反射系数, 就与真实的反射系数存在较大差异。经正演模型试算, 在中等炮检距的情况下, 垂直入射假设下的反射系数与精确的反射系数之间不仅存在幅值的差异, 甚至会出现极性反转。这种差异必然会导致子波提取、波阻抗反演以及地震解释等产生较大误差。为提高精度, 必须摒弃垂直入射假设, 采用倾斜入射的观点和方法, 重新推导反射系数的递推公式。经模型试算, 效果较好。

关键词: 子波; 反射系数; 递推公式; 垂直入射; 振幅随炮检距变化

第一作者简介: 马劲风, 男, 35 岁, 副教授(博士), 石油物探

中图分类号: P631.4 文献标识码: A

地震子波的提取, 是波阻抗反演中的重要技术环节。现今的以测井资料为约束的波阻抗反演方法中, 广为采用的是基于井旁地震道的子波提取方法。按照褶积模型理论, 地震道是子波与反射系数序列褶积的结果。已知井旁地震道和由测井资料得到的反射系数序列, 就可以利用反褶积方法直接求得子波。然而, 采用这种方法提取的子波, 在子波反褶积与波阻抗反演中, 效果并不理想。这其中, 除了地震道中的噪声、地震道截断误差、地震道深浅层频率、相位的差异、测井资料环境校正误差、测井资料深时转换的精度等因素的影响外, 反射系数的精度, 是影响子波提取精度的重要因素。

现今的反射系数求取方法, 都是建立于地震波垂直入射假设的基础上。此时的反射系数 ξ 满足如下表达式

$$\xi = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (1)$$

式中 ρ_1, ρ_2, V_1, V_2 分别为界面上下的密度与纵波速度。

由于实际的叠后地震资料是共中心点道集记录叠加的结果。共中心点道集内各道的采集是非

零炮检距的, 就是说地震波不是垂直入射于反射界面的, 而是有一定的入射角度。我们知道, 随入射角或炮检距的增大, 反射界面的反射系数(振幅)存在随炮检距变化(AVO)的现象。按照垂直入射假设条件计算的反射系数, 与实际共中心点道集叠加后得到的反射系数值是有很大的不同的, 两者间不仅存在振幅值强弱的差异, 而且存在极性的反转。这样, 按照垂直入射假设条件下计算的反射系数序列与井旁地震道进行反褶积, 求得的子波就会存在很大误差。以这种子波再与地震道进行约束反演, 或以子波的逆与地震道褶积求取反射系数及波阻抗, 就会导致波阻抗反演和岩性反演的错误, 进一步导致储层横向预测的错误。

基于此, 本文从理论模型试算出发, 研究了垂直入射假设条件下, 反射系数求取方法对子波提取精度的影响, 并提出了实用中改善子波提取精度的方法。

1 有偏入射对子波提取的影响

为了对比地震波垂直入射与非垂直入射对反射系数与人工合成地震记录求取的影响, 我们通过正演模型来进行定量研究。正演模型的标准模型参数如表 1, 表 1 中的纵、横波速度数据考虑了 AVO 问题中的多种含气砂岩与页岩的组合关系。

* 本研究由 863 计划重大项目“海上多波地震勘探技术”课题 (820- 05- 02- 03- 10) 资助
收稿日期: 2000- 04- 15

表 1 标准岩层速度模型
Table 1 Model of marker velocity

岩层序号	厚度/m	纵波速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	横波速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
1	600.0	2 000.0	500.0	2.00
2	150.0	2 438.0	1 025.0	2.14
3	200.0	2 480.0	1 232.0	2.16
4	180.0	2 638.0	1 125.0	2.23
5	120.0	2 438.0	1 625.0	2.16
6	100.0	2 700.0	1 825.0	2.25
7	120.0	2 500.0	1 332.0	2.17
8	100.0	2 738.0	1 625.0	2.26
9	120.0	3 048.0	1 244.4	2.40
10	100.0	2 838.0	1 650.0	2.28
11	120.0	3 148.0	1 750.0	2.43

考虑到实际地震资料为共中心点道集记录的,我们简单地计算中等炮检距情况下 12 次叠加的地震记录。其中,共中心点道集的炮检距从 800~ 1 075 m,道间距为 25 m。在不考虑吸收衰减与透射损失等因素影响的情况下,我们按照射线理论计算出共中心点各道在不同深度的入射角度,然后运用精确的 Zoeppritz 方程^[1]求出共中心点道集各界面的反射系数,这相当于进行过精确动校正后的共中心点道集记录,如图 1 所示。为了显示方便,图中的纵向时间比例进行了压缩。从图 1 中我们就可以看到不同炮检距条件下,各反射界面反射系数的变化情况。

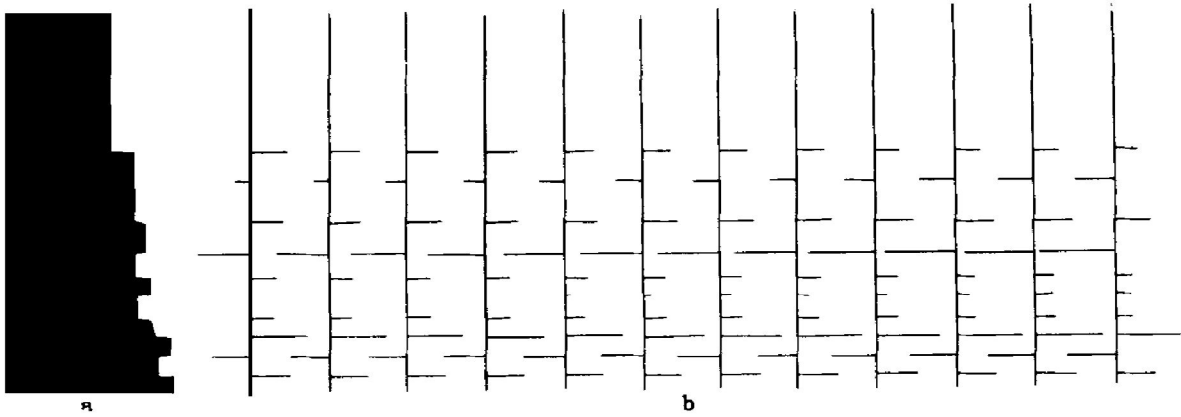


图 1 共中心点道集反射系数系列随炮检距变化图

Fig. 1 Reflection coefficient series of common mid-point trace set versus offset

a—为标准速度模型; b—从左到右为炮检距从 800 m 到 1 075 m 的共中心点道集反射系数系列

按照实际地震资料处理的方法,我们对 12 道反射系数系列进行等灵敏度叠加,然后与选定的 Ricker 子波褶积后得到精确的人工合成地震记录。再与我们常规使用的,按照垂直入射假设公式(1)

求出的反射系数及合成地震记录进行对比,如图 2 所示。

从图 2 中我们可以看到,在中等炮检距条件下(950 m 左右),精确的反射系数序列与垂直入射假

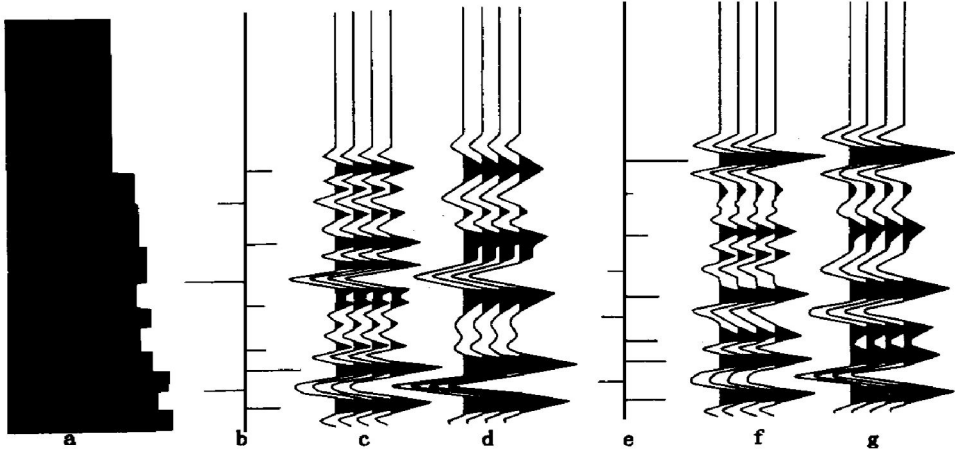


图 2 倾斜入射与垂直入射反射系数及合成地震记录对比图

Fig. 2 Comparison of reflection coefficient and seismogram between normal incidence and slope incidence

a—标准速度模型; b—由 Zoeppritz 方程计算的,炮检距从 800~ 1 075 m,道间距 25 m 的共中心点道集的标准反射系数序列; c—(b) 与 35Hz 零相位 Ricker 子波褶积的结果; d—(b) 与 25Hz 零相位 Ricker 子波褶积的结果; e—以垂直入射公式计算的反射系数序列; f—(e) 与 35Hz 零相位 Ricker 子波褶积的结果; g—(e) 与 25Hz 零相位 Ricker 子波褶积的结果

设条件下的反射系数序列有较大的差异。从图中我们可以清楚地看到,除各界面反射系数幅值的差异外,第二与第六个界面的反射系数极性相反。这也正是我们在实际生产中,利用合成地震记录标定层位时,经常遇到的问题——人工合成地震记录与井旁地震道的振幅不匹配。这种不匹配,常常导致错误的层位对比及波阻抗和岩性解释错误。从图2中两种反射系数,分别与子波褶积得到的合成地震记录的振幅与相位差异,我们可以看出垂直入射假设可能导致的错误,及其在解释中带来的问题。

在大炮检距条件下,比如海底多分量采集、陆

地延长时距曲线采集等情况下,实际的反射系数序列,与按照垂直入射假设条件计算的反射系数系列之间的差异会更大。

垂直入射假设造成的反射系数的错误,既导致了地震解释的错误,也导致了子波提取的错误。我们利用图2中的人工合成地震记录(c)、(d)与垂直入射的反射系数(e)进行反褶积,得到图3的结果。这就相当于用实际地震资料进行子波提取时,(c)、(d)为实际的井旁道记录,而反射系数采用垂直入射假设的结果。这里,我们进行子波提取时,没有考虑地震道截断误差和噪声等因素的影响。

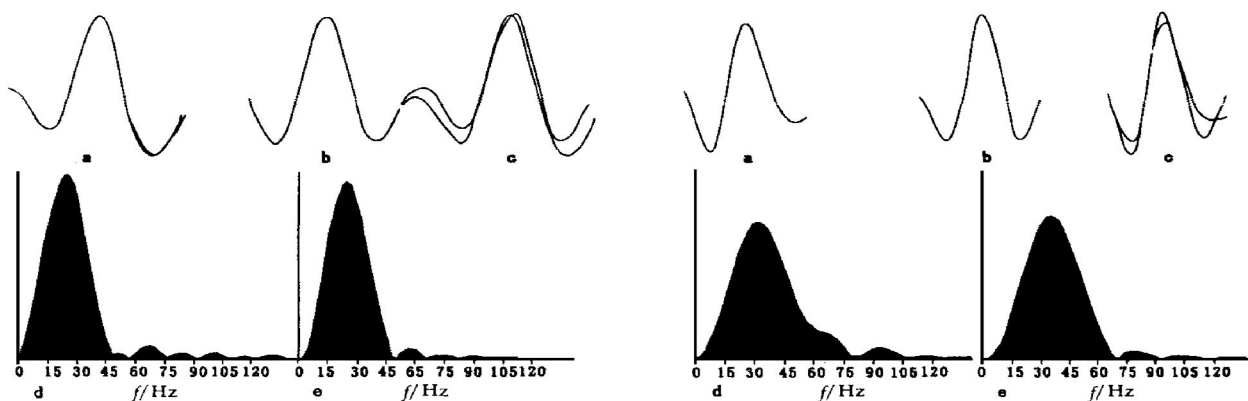


图3 井旁道提取子波与标准 25Hz(左) 35Hz(右) 零相位 Ricker 子波的差异

Fig. 3 Differences between standard of 25Hz(left) and 35Hz(right) zero phase Ricker wavelet and wavelet extracted from a seismic trace near well

a—以图1中(d)为井旁道和(e)为模型道求得的地震子波;b—标准 25Hz(左) 35Hz(右) 零相位 Ricker 子波;
c—两种子波重叠显示的结果;d—(a)子波的振幅谱;e—(b)子波的振幅谱

从图3中,我们可以看到,以垂直入射假设得到的反射系数,与井旁地震道进行反褶积求得的子波,无论波形(相位)、频率、还是振幅,与标准的零

相位 Ricker 子波都有较大的差异。如果我们利用这种不准确的子波,再与地震道进行反褶积,得到的反射系数序列就会存在很大误差。图4说明了

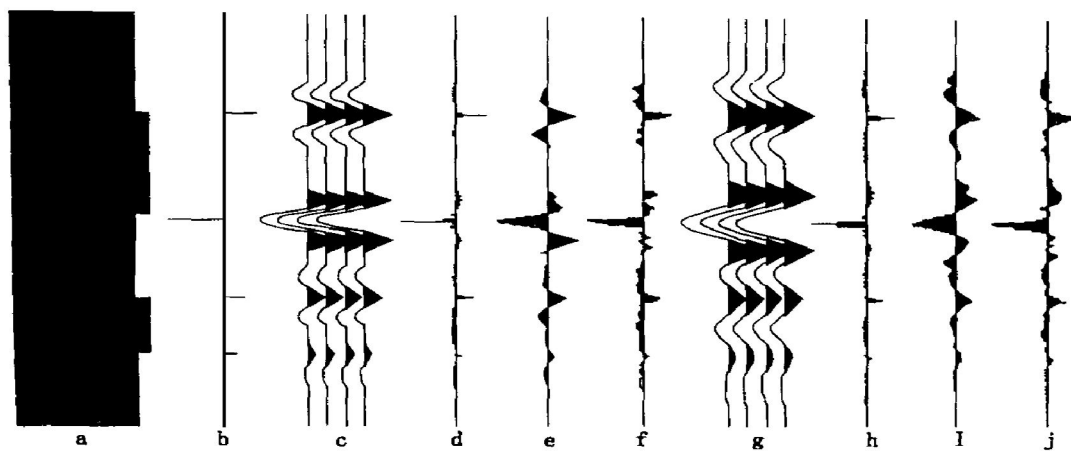


图4 不同子波与地震道反褶积后的结果

Fig. 4 Deconvolution result of using different wavelets with seismic trace

a—标准速度模型;b—由 Zoeppritz 方程计算的,炮检距从 800~ 1 075 m,道间距 25 m 的共中心点道集的标准反射系数序列;c—(b)与 35Hz 零相位 Ricker 子波褶积的结果;d—35Hz 零相位 Ricker 子波与地震道(c)反褶积的结果;e—井旁道提取子波与(c)反褶积的结果;f—改进后的井旁道子波提取方法得到的 35Hz 子波与(c)反褶积后的结果;g—25Hz 零相位 Ricker 子波与(b)褶积的结果;h—25Hz 零相位 Ricker 子波与地震道(c)反褶积的结果;i—井旁道提取子波与(c)反褶积的结果;j—改进后的井旁道子波提取方法得到的 25Hz 子波与(c)反褶积后的结果

使用精确的和精确的几种子波与地震道进行反褶积的效果,图4中的速度模型为图2速度模型的中间5层。

图4中(d)、(h)为采用25Hz-35Hz准确的零相位Ricker子波,分别与地震道(c)、(g)进行反褶积的结果,图中的(e)、(i)分别为垂直入射假设条件下提取的子波,与地震道进行褶积的结果。从中我们可以看到子波精度对反褶积的影响。关于子波波形、频率、振幅对反褶积的影响,可以参考文献[2]。子波的误差造成反射系数系列的误差,如果存在较大误差的反射系数序列再进行递推求解,求取的波阻抗序列,必然存在很大的误差。而由波阻抗剖面导出的速度剖面、孔隙度剖面、砂泥百分含量剖面等岩性参数剖面,也就会产生错误的岩性信息,导致错误的解释结论。对于采用非线性反演求取波阻抗的方法,子波对其反演结果的影响也是一样的。

由此,我们可以看到反射系数求取的精度,对于子波提取、层位标定及波阻抗反演的重要意义。

2 提高精度的方法与模型试算

2.1 递推公式的推导

从前面的讨论我们知道,提高井旁道子波提取精度的关键,是提高反射系数序列求取的精度。这样,就必须摒弃垂直入射假设条件,重新建立反射系数递推公式。当然,提高反射系数序列求取精度最好的方法,是利用Zoeppritz方程来求取。但是这种求取方法计算效率不高,使用起来也不很方便。我们给出一种简单的反射系数求取方法。

我们知道,在反射界面上下岩层的纵、横波速度和密度差异不大的情况下,Aki和Richards对Zoeppritz方程中纵波反射系数的简化公式^[3]为

$$R_{pp} = \frac{1}{2}(1 - 4\beta^2 P^2) \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2\cos^2\theta} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4\beta^2 P^2 \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (2)$$

式中 $P = \sin\theta_1/V_{p1}$; $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$; $\alpha = (V_{p1} + V_{p2})/2$; $\Delta\alpha = V_{p2} - V_{p1}$; $\beta = (V_{s1} + V_{s2})/2$; $\Delta\beta = V_{s2} - V_{s1}$; $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$; $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$; V_{p1} , V_{s1} 与 V_{p2} , V_{s2} 分别为反射界面上下岩层的纵、横波速度, ρ_1 与 ρ_2 分别为上下岩层的密度; θ_1 与 θ_2 分别为界面上岩层P波的入射角与透射角。

这个公式在反射界面上下岩层的纵、横波速度和密度差异不大的情况下,有比较高的精度。参照文献[4]的方法,我们将公式(2)写成下列形式

$$R_{pp} = A \frac{\Delta\rho}{\rho} + B \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + C \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad (3)$$

其中系数项A, B, C分别为

$$A = \frac{1}{2}(1 - 4\beta^2 P^2); B = \frac{1}{2\cos^2\theta}; C = -4\beta^2 P^2$$

这样,我们可把方程(3)写成常用对数微商或差分形式。对于第j个界面的反射系数,可以写成如下形式

$$R_{PPj} = \ln\left(\frac{\rho_{j+1}}{\rho_j}\right)^A + \ln\left(\frac{V_{pj+1}}{V_{pj}}\right)^B + \ln\left(\frac{V_{sj+1}}{V_{sj}}\right)^C \quad (4)$$

这样就建立了沿射线路径的反射系数递推公式。由于A, B, C均是界面j的函数,因此上式又可写为

$$R_{PPj} = \ln\left(\frac{\rho_{j+1}}{\rho_j}\right)^{A_j} + \ln\left(\frac{V_{pj+1}}{V_{pj}}\right)^{B_j} + \ln\left(\frac{V_{sj+1}}{V_{sj}}\right)^{C_j} \quad (5)$$

式中 $A_j = \frac{1}{2}(1 - 4V_{sj}^2 \frac{\sin^2\theta}{V_{pj}^2})$; $B_j = \frac{1}{2\cos^2\theta}$;

$$C_j = -4V_{sj}^2 \frac{\sin^2\theta}{V_{pj}^2}$$

然而,公式(5)是沿射线路径的反射系数递推公式。要运用公式(5)解决实际的共中心点道集的反射系数,那么公式中系数项 A_j , B_j , C_j 中包含的 θ 角,就应当是炮检距固定条件下,各反射界面沿不同射线路径的入射角。

为了计算炮检距固定条件下,层状介质中各反射界面的入射角。我们采用地震勘探基础理论中等效层的方法^[5],即采用均方根速度来作为多层介质等效层的速度。

若炮检距为x,对第n个反射界面,设上覆n-1层介质的均方根速度为 $V_{rms\ n-1}$ 。那么地震波在第n个界面的入射角为

$$\sin\theta_{n-1} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + V_{rms\ n-1}^2 t_0^2}} \quad (6)$$

式中 t_0 为第n个界面的双程旅行时间。

若地震波沿实际射线路径传播到第n个界面的入射角为 θ ,则按照公式(6)求出的角度 θ_{n-1} 与 θ 角是不同的。而从视速度的角度来看,射向第n个界面的入射波无论是以 θ_{n-1} 还是 θ 角度,其视速度都应当是相同的(时距曲线斜率相同),因此有

$$V_{Pn-1}/\sin\theta = V_{rms\ n-1}/\sin\theta_{n-1} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$\sin\theta = \frac{V_{Pn-1}}{V_{rms\ n-1}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + V_{rms\ n-1}^2 t_0^2}} \quad (8)$$

这里的 θ 角,对第j个反射界面,就是公式(5)

中的 θ 角。这样,利用公式(5)和(8),就可以计算出炮检距 x 固定条件下的反射系数序列。对于一个共中心点道集,就可以计算不同炮检距 x 的反射系数序列道集,对这些反射系数序列道集相加求和,就得到与实际叠加道相同的反射系数序列。也可以按照平均的炮检距 x 代入公式(5)与(8),计算一个共反射点道集的反射系数序列,求近似多道叠加的平均反射系数值。

2.2 改进后子波提取的精度

我们运用递推公式(5)和(8)重新计算了反射系数,并与精确的反射系数及垂直入射反射系数进行了比较,如图5所示。从图5中我们可以明显看出,新递推公式计算反射系数序列的精度,远较垂直入射假设公式精确。图5中为简单起见,图中(c)采用了平均炮检距 925 m,代入公式(5)和(8)计算反射系数序列。

图6为按照新递推公式求得的反射系数序列,重新进行井旁道子波提取后的结果。对比图3我们可以清楚地看到,反射系数序列求取精度提高后,子波提取的精度也有了很大的提高。我们同样运用新提取的子波与地震道进行反褶积,如图4中的(f)、(j)。对比两种方法提取子波反褶积的效果,可以看到(f)和(j)较(e)和(i)的剩余子波要窄,

说明反褶积的效果好。这同样说明了公式(5)和(8)的精度是足够高的。

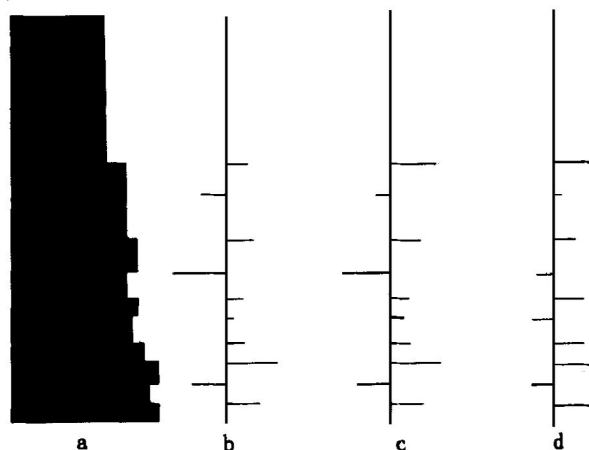


图5 改进后的反射系数递推公式的精度

Fig. 5 Accuracy of reflection coefficient obtained by improved recursive formula

a—标准纵波速度模型; b—精确的反射系数; c—以递推公式(5)和(8)求得的反射系数序列; d—以公式(1)计算的反射系数序列

从前面的讨论也给我们以启示,由于实际地震资料的共中心点道集并不是垂直入射的,采用垂直入射假设来进行子波提取、包括波阻抗反演等运算,必然会导致错误的结论。改革现有的以垂直入射为基础的反演方法,采用倾斜入射的观点和方法,就成为当前波阻抗反演方法研究的新方向。

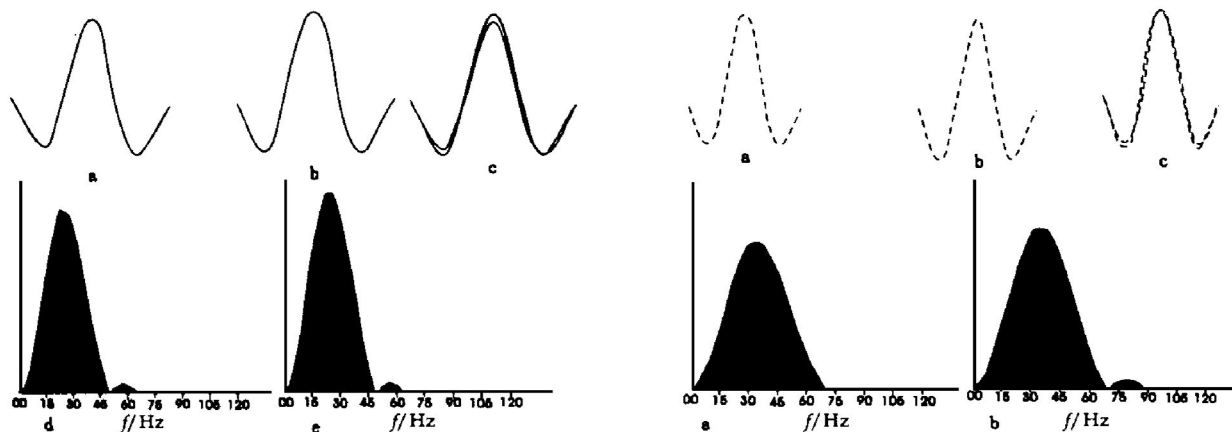


图6 改进后井旁道提取子波与标准 25Hz(左) 35Hz(右) 零相位 Ricker 子波的差异

Fig. 6 Difference between standard 25Hz(left) and 35Hz(right) zero phase Ricker wavelets and wavelet extracted from a seismic trace near well using improved method

a—以图2中(d)为井旁道和(e)为模型道求得的地震子波; b—标准 25Hz(左) 35Hz(右) 零相位 Ricker 子波; c—两种子波重叠显示的结果; d—(a)子波的振幅谱; e—(b)子波的振幅谱

3 结论与建议

(1) 垂直入射假设条件下得到的反射系数序列,与 Zoeppritz 方程求得的精确反射系数值,存在较大差异。这种差异不仅影响地震解释中的层位

标定的精度,而且直接影响以井旁道为基础的子波提取,进一步影响波阻抗反演的精度。在多井约束的波阻抗反演中,会增加不同井提取的子波之间的差异。

(2) 改进的反射系数递推公式,考虑了振幅随

炮检距的变化,提高了反射系数求取的精度和子波提取的精度。对于提高层位标定、反褶积及波阻抗反演的精度,具有重要意义。

(3) 递推公式(5)和(8)在上下岩层波阻抗差异不大和地层水平的情况下,具有很高的近似程度。在上下岩层波阻抗差异较大,以及地层产状变化很大的条件下,仍然存在一定的误差,尚须进一步改进。

(4) 改进的反射系数递推公式没有考虑岩层的各向异性、粘弹性、多相性以及对于临界角入射等可能造成反射波相位变化的因素,这些因素对于子波提取与波阻抗反演的影响会更加复杂,还须深入研究。

(5) 改进的反射系数求取方法,需要利用全波测井资料提供的纵、横波速度信息。在没有横波资

料时,可以采用纵横波间的统计关系^[6],来求取横波速度。

参 考 文 献

- 1 Zoeppritz K. Über erdbebenwellen, gottingen nachrichten der Koniglichen [M]. Gesellschaft: Wissen, 1919. 66~ 84
- 2 刘雯林, 李文华, 王良全, 等. 合成声波测井[J]. 石油地球物理勘探, 1980, 15(2): 15~ 40
- 3 安艺敬一, 理查兹 P G. 定量地震学——理论和方法(第一卷) [M]. 李钦祖, 邹其嘉, 译. 北京: 地震出版社, 1987. 146~ 168
- 4 马劲风, 贾春环, 李庆春, 等. 转换波人工合成地震记录与速度反演方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 509~ 519
- 5 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982. 220~ 227
- 6 李庆忠. 岩石的纵、横波速度规律[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(1): 1~ 12

EFFECT OF WAVELET EXTRACTING WITH A SEISMIC TRACE NEAR WELL BASED ON NORMAL INCIDENCE ASSUMPTION AND ITS IMPROVING METHOD

Ma Jingfeng¹ Zhang Zhongwei¹ Wang Jiamin²

(1. Geology Department, Northwest University, Xi'an, Shaanxi; 2. Well Log Station, East China Bureau of Petroleum Geology, CNSPC, Yangzhou, Jiangsu)

Abstract: Wavelet extracting is the essential technique of impedance inversion. A wavelet is generally extracted based on the assumption of normal incidence by the deconvolution of reflectivities obtained from well log with a seismic trace near the well. But actual seismic waves do not always strike a interface normally, and the reflectivities change with offset. Therefore, there must be considerable differences between the reflectivities obtained and the real ones. In this case, a newly derived recursion formula for calculating reflection coefficient by slope incidence is proposed in this paper, and it could improve the accuracy of wavelet extracting and impedance inversion and seismic interpretation. The result of model calculation has proved that the accuracy of wavelet extracting and the result of deconvolution have been improved.

Key Words: wavelet; reflection coefficient; recursive formula; normal incidence; AVO