

文章编号:1673-5005(2007)01-0025-05

地震子波外推方法研究

张广智^{1,2}, 印兴耀¹, 刘洪²

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:根据离散反演理论,综合测井和地震资料,充分考虑了地震子波的振幅特点和相位特点,给出了精确计算井旁地震子波的方法。在此基础上,针对测井与地震资料及地层的地质特点,提出了3种无井地震道处地震子波的外推方法,即反距离内插法、相位内插法和虚拟井法。其中反距离内插法是直接按照距离内插井旁子波;相位内插法则只内插井旁子波的相位,无井地震道处的振幅谱通过邻近的地震资料求出;虚拟井法是通过地震层序分析方法,由小波时频分析求出无井地震道处的虚拟反射系数后,进而得到无井地震道处的地震子波。介绍了各种方法的实现步骤,并给出了应用实例。结果表明,尽管各种方法计算的子波不同,但子波的变化是连续的。

关键词:地震子波; 离散反演; 外推; 相位; 小波时频分析

中图分类号:P631.42 **文献标识码:**A

Study on seismic wavelet extrapolation method

ZHANG Guang-zhi^{1,2}, YIN Xing-yao¹, LIU Hong²

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Institute of Geology and Geophysics in Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: According to the theory of discrete inversion, an accurate method of seismic wavelet extraction was proposed by using well log data and seismic data. The features of amplitude spectrum and phase spectrum of seismic wavelet were considered in the method. Integrating seismic data and geological data, three seismic wavelet extrapolation methods were presented, that is, inverse distance interpolation method, phase interpolation method and pseudo well log method. The seismic wavelets in well location were interpolated according to the inverse distance in the first method. Only the phase spectrums of the seismic wavelets in well location were interpolated in the second method, and the amplitude spectrums were computed by seismic data. While in the third method, wavelet time frequency distribution technique was used to compute the virtual reflection factor and the seismic wavelet. Detailed process for realizing these methods and examples were illustrated. The results show that the variances of the wavelets are continuous for all kinds of methods, though different wavelets are extracted.

Key words: seismic wavelet; discrete inversion; extrapolation; phase; wavelet time frequency analysis

地震勘探中,地震子波在处理阶段和解释阶段都起着重要作用,特别是它对地震资料分辨率的影响更为重要。李庆忠^[1]和俞寿朋^[2]对此给出了详尽论述。当有测井资料时,井旁地震子波的求取方法主要有两种,一是统计方法,即直接由井旁多道地震道求出地震子波的振幅谱,然后结合测井资料求出子波的常相位,其优点是充分利用了井旁地震数据的振幅信息,因而其振幅谱光滑,准确度较高,但其相位由于是常相位,不能充分反映出地震子波的

真实相位;另一种是最小二乘法,即直接由井旁地震道和测井资料求取^[3-5],使用该方法求出的地震子波生成的合成地震记录与井旁道匹配较好,但由于测井曲线有误差,在其有效谱的两端还掺杂着噪音,使得直接用最小二乘法求得的子波同实际子波相比有较大的畸变。笔者根据地震离散反演理论^[6-7],求取了地震子波^[8],从而最大限度地求准地震子波。在无测井资料求取子波时,早期常使用同态滤波法或假设子波为最小相位直接求取,近年来 Gregory^[9],

收稿日期:2006-05-05

基金项目:国家“863”计划项目(2002AA614010-3)

作者简介:张广智(1971-),男(汉族),山东肥城人,副教授,博士研究生,从事石油物探的教学与科研工作。

D. R. Velis^[10]和梁光河^[4]等分别提出使用高阶积累量法求取无井道处的地震子波,孙成禹^[5]则提出使用谱模拟法和展开相位谱法求取无井道地震子波,夏洪瑞^[11]使用反演方法外推井旁地震子波。这些方法的缺点是仅考虑单道信息,而没有或较少利用井位信息,因此误差较大。但若单纯使用井位处的信息内插,又浪费了大量的地震信息,降低了子波的可靠性。针对测井与地震资料及地层的特点,笔者提出3种求取无井道子波的方法,即反距离内插法、相位内插法和虚拟井法。

1 井旁精细地震子波提取方法

根据地震资料的统计特性和测井资料的特点,借鉴离散反演算法,提出一种提取井旁子波的方法。主要分为以下三步:首先由多道相关法提取初始地震子波的振幅谱;然后结合测井资料,确定初始地震子波的相位谱;最后再迭代求取精细的井旁子波^[12]。

1.1 初始地震子波振幅谱的求取

叠后地震道 $s(t)$ 可以用褶积模型表示为

$$s(t) = \omega(t) * r(t) + n(t), \tag{1}$$

假设随机干扰 $n(t)$ 是白噪声,反射系数序列 $r(t)$ 也是随机白噪序列,则地震子波 $\omega(t)$ 的功率谱等于 $P_\omega(\omega)$,也等于地震道的功率谱 $P_s(\omega)$,所以可以使用井旁地震道的互相关来求取子波的功率谱 $P_\omega(\omega)$ ^[1],即

$$P_\omega(\omega) = \text{Fourier}[C_{ss}(\tau)]. \tag{2}$$

式中, $C_{ss}(\tau)$ 为井旁地震道互相关的均值; $\text{Fourier}[\cdot]$ 表示傅立叶变换。

由 $P_\omega(\omega)$ 就可以得到一个零相位的初始地震子波 $\omega(t)$ 。

1.2 初始地震子波的相位求取

假设初始地震子波的相位为线性相位。线性相位实际相当于对零相位子波进行时移后再加上一个常相位。初始地震子波时移的求取是通过使用将上述零相位的初始地震子波 $\omega(t)$ 生成的合成地震记录与井旁道互相关求得;初始地震子波的常相位则是通过相位角扫描,找出合成地震记录与井旁道之间最佳吻合的相位校正正值 θ 。

至此,即可得出初始地震子波:

$$\omega(\theta, t) = \omega_1(t) \cos \theta + H[\omega_1(t)] \sin \theta. \tag{3}$$

式中, $\omega_1(t)$ 为时移后的零相位子波; $H[\cdot]$ 表示 Hilbert 变换。

1.3 反演法求取精细子波

以上述地震子波 $\omega(\theta, t)$ 为初始地震子波,根据

离散反演理论^[14]求取精细子波。

目标函数为

$$\Phi = (S - RW)^T C_s^{-1} (S - RW) + (W^p - W)^T C_w^{-1} (W^p - W). \tag{4}$$

式中, S 为井旁地震道; R 为反射系数矩阵; W 为欲求取的子波; W^p 为初始地震子波; C_s 表示地震道的协方差矩阵,为对角阵; C_w 表示子波的协方差矩阵,为对角阵。

令 $\frac{d\Phi}{dW} = 0$, 得

$$W = [R^T C_s^{-1} R + C_w^{-1}]^{-1} [R^T C_s^{-1} S + C_w^{-1} W^p].$$

这就是求取井旁精细子波的迭代公式。

2 地震子波外推方法

2.1 反距离内插法

若井位较多,测井资料与地震资料的匹配质量较高,而且地层变化平缓,此时可以直接由井位处求出的子波,按距离内插无井处的子波。假设共有 N 口井,第 j 口井的子波序列为 $\omega_j(t) (n_1 \leq t \leq n_2)$, 则无井道对应的子波 $\omega(t)$ 为

$$\omega(t) = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_j(t) \frac{1}{d_j^m}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{d_j^m}}, n_1 \leq t \leq n_2. \tag{5}$$

式中, $\omega_j(t)$ 为第 j 口井子波序列在第 t 个样点的值; d_j 为第 j 口井到所求无井道处的距离; m 为距离的方次。

当 $m = 1$ 时,为距离反比法内插; $m = 2$ 时,为反距离平方法内插。随 m 的增大,离所求道近的井对子波的影响增大。

2.2 相位内插法

在井旁道地震子波的求取方法中,可以通过对指定地质层段的地震道的多道相关分析求出某一道子波的功率谱,即可求出子波的振幅谱 $|A(\omega)|$,而此道的相位谱 $\Phi(\omega)$ 则可以通过下式内插得到:

$$\Phi(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^N \Phi_j(\omega) \frac{1}{d_j^m}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{d_j^m}}, k_1 \leq \omega \leq k_2.$$

式中, $\Phi_j(\omega)$ 为第 j 口井子波的相位谱在第 ω 个频率采样点的值。从而得到无井道处子波的频谱 $A(\omega)$ 为

$$A(\omega) = |A(\omega)| \exp[j\Phi(\omega)].$$

然后再对 $A(\omega)$ 作反变换,即可得相应的子波 $\omega(t)$ 。通过这种方法求出的子波既具有地震资料的统计特性,同时也利用了井位处的信息,因而具有较高的可

靠性。

2.3 虚拟井法

若工区内井位较少或井的分布不均匀,可以在地震道上选取信噪比高、波形简单、地层较厚而且构造平坦的反射段生成虚拟井。然后由虚拟井结合地震道按照文中第一部分所述方法求出地震子波。

虚拟井法以层序地层学原理为基础,通过地震层序分析来实现。本方法分两步实现,第一步是使用小波时频分析方法将地震道分解到不同的频段,第二步分别求取不同频段的反射系数并将其合成虚拟反射系数。

2.3.1 地震层序模型^[13]

层序地层学中认为地质剖面是由一系列的地质体组成的,每个地质体则是由具有成因上的共同性和沉积上的周期性、旋回性的一组相对整合的地层连续体构成,称为层序体。层序体由不整合面或沉积间歇面分割。层序体是分级组织的,且等级分类不连续,等级数目有限。各个级别的层序体是相互包容的。层序体是层序地层学的基本研究单元。地震勘探把层序体作为勘探目标,既研究它的外形,又研究它的内部结构和物质成分。外形主要是指层序体分界面及其构造轮廓,而内部结构则主要是指沉积层的旋回性层理结构。物质成分与构造特征和旋回性层理相联系,由沉积环境和沉积相所确定。层序体及其旋回性结构的地震响应将构成新的旋回性地震层序模型。

与层序地层学定义相应,地震层序模型由两部分组成,一是层序体分界面地震响应,二是层序体旋回性内部结构的地震响应,后者也称为地震旋回体。现在使用的地震褶积模型,概括了分界面的地震响应,仅是地震层序模型的一部分。层序体分界面属不整合面或岩性突变分界面或沉积间歇面,其地震反射波频谱频带宽、波形稳定,反射波形与入射波形一致,具有较好的可对比追踪性。地震旋回体属地层内部结构的反射,多为物性交替或渐变过渡带,其反射波的特征,包括反射强度、频率、记录时间等,表现为多变性和不稳定性,不易对比追踪;反射波波形与入射波波形不一致,地震信号频带多为带通的,与层序级别相应,处于不同的频率范围。作频率扫描时,经常可以见到反射波频率特征有方向性的改变,反映着沉积层理结构和沉积旋回的周期性变化。地震地层学利用这些反射特征来划分地震相,有时两个层序体之间无明显分界面反射存在,可以根据两个层序体内部反射特征的差异和急剧变化带来确定分界面的位置。

2.3.2 地震道的时频分析

本文中采用小波变换对地震道作时频分析。小波分析的基本思想是用一簇函数去表示或逼近一信号或函数。这一簇函数称为函数系,它是由一个基本小波函数的不同尺度的平移和伸缩构成的。小波函数系的特点是它的时宽和频宽乘积很小,并且遵循 Heisenberg 测不准原理,在时间轴和频率轴上都都很集中,具有变焦特性。

设 $\Psi \in L^1(\mathbf{R}) \cap L^2(\mathbf{R})$, 且 $\Psi(0) = 0$, 则按如下方式生成的函数簇 $\{\Psi_{a,b}\}$

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right), b \in \mathbf{R}, a \in \mathbf{R} - \{0\}$$

称为连续小波, $\Psi(x)$ 为小波母函数。这里 a 为尺度, b 为位置。则函数 $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ 的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f(x), \Psi_{a,b}(x) \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbf{R}} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx,$$

且 Ψ 满足

$$C_\Psi = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$$

或

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0.$$

函数 $\Psi(x)$ 可以描述为一带通滤波器的脉冲响应,因此小波变换又可以描述为函数 $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ 通过一带通滤波器,于是由 $W_f(a,b)$ 重构 $f(x)$ 的连续小波逆变换定义为

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} W_f(a,b) \Psi_{a,b}(x) da db.$$

2.3.3 虚拟反射系数的求取

根据杜世通的研究可知^[13],不同频率挡的滤波反映了不同级别的层序体的沉积性质。若使用了 N 个滤波器作时频分析,将地震道分解为 N 道,则第 $K(1 \leq K \leq N)$ 道上的局部极值就与相应的层序体的分界面对应,它的大小反映了反射的强度。由于地震道不一定是零相位的,因此,本文中先对第 K 道作 Hilbert 变换,生成复地震道,然后以瞬时振幅的极值作为分界面的极值。如上所述,依次对 N 道全部处理完毕后,再用小波反变换,即生成了虚拟井反射系数。再使用此反射系数,用文中第一部分所述方法,即可求出此道所对应的子波。

2.3.4 模型分析

图1为小波基,图2中第1,2,3道依次为地震子波、反射系数及合成地震道模型。图3为对上述合成地震道使用虚拟井法求得的反射系数(第4道)和

地震子波(第2道)。

与图3中反射系数模型(第3道)和地震子波模型(第1道)的比较可以看出,求得的反射系数的位置是准确的,幅度也基本一致,反射系数的误差是由于合成地震道是带限的,它的频带窄于反射系数的频带。

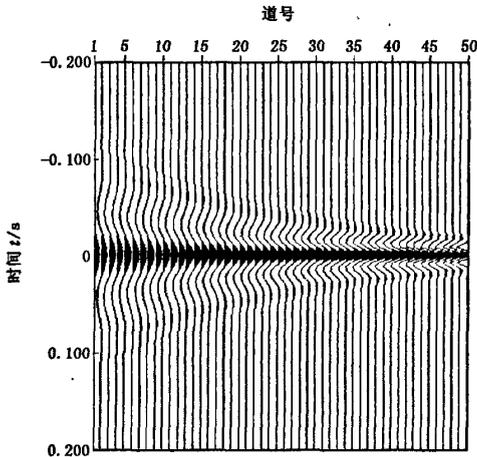


图1 小波基

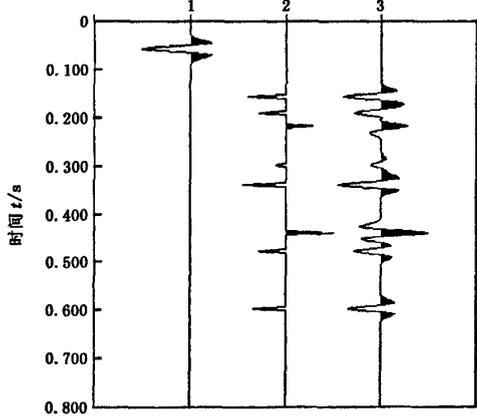


图2 地震子波、反射系数及合成地震道模型

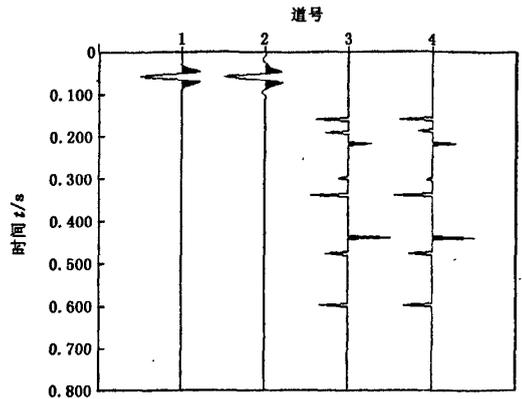


图3 求取的子波、反射系数与模型的子波、反射系数对比

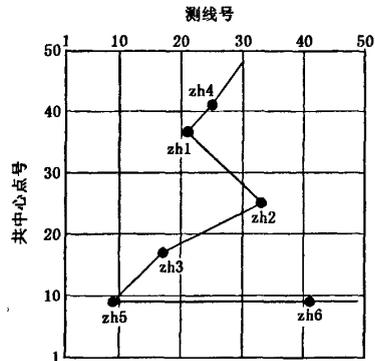


图4 井位分布示意图

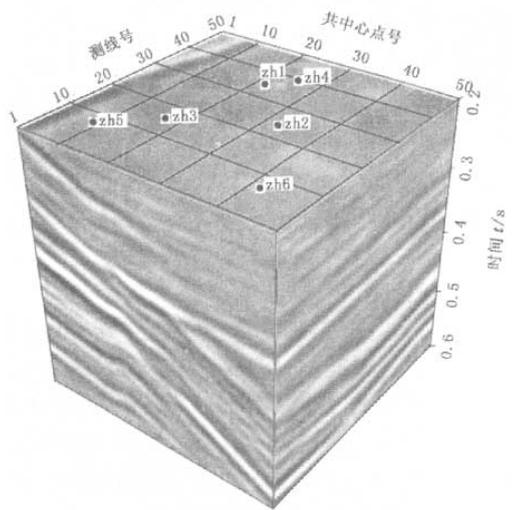


图5 工区内的三维地震数据体

3 应用

图4为某工区井位分布示意图。工区内共有5口井,zh3井为虚拟井。图5为使用的三维地震数据体,图6为求出的在图4所示连井线上的地震子波。井旁道的地震子波由本文中分井旁道子波求取方法求得,zh3井的子波是通过虚拟井法先求出反射系数,然后再按照井旁道地震子波的求取方法求出,其他无井道处的地震子波则按照文中的相位内插法求得。由此图可以看出每道对应的子波是不同的,但子波的变化是连续的。

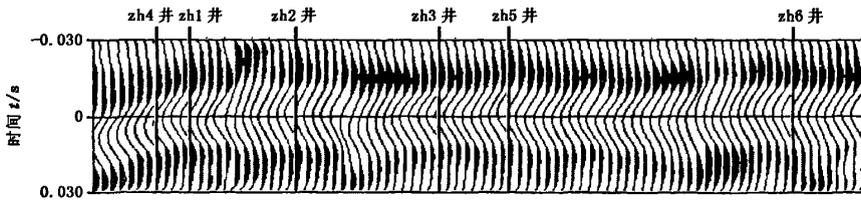


图6 连井线上的地震子波

4 结论和建议

(1) 影响地震子波提取精度的因素,主要有测井资料与地震资料匹配程度、时深转换的准确程度、地震资料的分辨率与信噪比等。

(2) 反距离内插法是一种常用的子波外推方法,主要用于井位较多,且地质层位变化平缓时的情况,此方法的运算速度较快。相位内插法只是内插每道对应子波的相位谱,子波的振幅谱由对应地震道及相邻地震道计算得到,因而运算量较大。而虚拟井法主要用于在井位较少时进行地震子波的外推。

(3) 当用于提取地震子波的时窗较大时,还应考虑地震子波的时变特性。

致谢 胜利油田地质院为本研究提供了实际数据并为图件的显示提供了帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [2] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [3] 查中圻. 提取子波的一种算法[J]. 石油地球物理勘探,1981, 16(4):27-36.
ZHA Zhong-qi. The algorithm to extract the wavelet[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1981, 16(4):27-36.
- [4] 梁光河. 地震子波提取方法研究[J]. 石油物探, 1998, 37(1):31-39.
LIANG Guang-he. On the methods of seismic wavelet extraction[J]. Geophysics Prospecting for Petroleum, 1998, 37(1):31-39.
- [5] 孙成禹. 空变地震子波提取方法研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000, 24(1):77-80.
SUN Cheng-yu. Study on the extraction of spatial varied seismic wavelet[J]. Journal of the University of Petrole-

um, China (Edition of Natural Science), 2000, 24(1): 77-80.

- [6] SHERIFF Robert E. Reservoir geophysics[C]. USA: Society of Exploration Geophysics,1992.
- [7] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [8] ZHANG Guang-zhi, YIN Xing-yao. An acoustic impedance inversion approach using discrete inversion theory, 74th annual internate mtg soc expl geophys expanded abstracts [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 2004.
- [9] GREGORY D Lazear. Mixed phase wavelet estimation using fourth-order cumulants [J]. Geophysics, 1993, 58(7):1042-1051.
- [10] VELIS D R and ULRYCH T J. Simulated annealing wavelet estimated via fourth-order cumulants[J]. Geophysics,1996,61(6):1939-1948.
- [11] 夏洪瑞,周开明,黄桥,等. 波阻抗反演技术中空变子波的求取[J]. 石油物探, 2002,41(4):470-474.
XIA Hong-rui, ZHOU Kai-ming, Huang Qiao, et al. Calculation of spatial variant wavelet in acoustic impedance inversion[J]. Geophysics Prospecting for Petroleum, 2002,41(4):470-474.
- [12] 张广智,刘洪,印兴耀. 井旁道地震子波精细提取方法[J]. 石油地球物理勘探,2005, 40(2):158-162.
ZHANG Guang-zhi, LIU Hong, YIN Xing-yao. Method for fine picking up seismic wavelet at uphole trace[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(2):158-162.
- [13] 杜世通. 地震层序模型与地震资料高分辨率处理[J]. 勘探家,1998, 3(1):17-23.
DU Shi-tong. Seismic sequence model and high resolution seismic data processing [J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(1):17-23.
- [14] RUSSELL Brian H. Introduction to seismic inversion method[C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 1990.

(编辑 沈玉英)