

石油地球物理勘探

用非线性参数拟合法反演 Q 值

梁光河* 刘清林 何樵登

(长春地质学院应用地球物理系)

摘要

梁光河, 刘清林, 何樵登. 用非线性参数拟合法反演 Q 值. 《石油地球物理勘探》, 1992, 27 (2): 230~234

通常用于求取 Q 值的方法有升时法、频谱比法、谱模拟法及子波模拟法等。这些方法的共同缺点是对噪音敏感和费时。为此我们导出了拟合函数表达式, 提出用非线性参数统计模拟地震记录的方法反演 Q 值。其统计特性可成功地用于压制随机噪音, 不受震源子波的影响。此法不仅省时, 而且可以较精确地求取层间 Q 值, 为直接寻找岩性油气藏提供帮助。

主题词: 非线性参数 拟合 反演 Q 值

ABSTRACT

Liang Guanghe, Liu Qinglin and He Qiaodeng. Q-Value inversion by nonlinear parameter fitting. OGP, 1992, 27 (2): 230~234

Common methods for Q -value calculation are rise-time method, spectral ratio method, spectrum modeling method, wavelet modeling method and so forth. Unfortunately, these methods are sensitive to noises and time-consuming. Hence we derive the expression of fitting function and propose a new Q -value inversion method using nonlinear parameter statistical modeling of seismic records. The statistical characteristic can be used to suppress random noises successfully and to avoid the influence of source wavelets. This new method is time saving and favours calculation of accurate interval Q -values. It is favourable to direct discovery of lithologic hydrocarbon pool.

Subject heading: nonlinear parameter, fitting, inversion, Q -value

引言

当地震波在地下介质中传播时, 由于地下介质的吸收特性, 波的能量将有一部分被介质吸收。而综合描述地下介质吸收特性的参数 Q 称作介质的品质特性参数, 它是岩性勘探及直接寻找油气藏的重要信息。本文的目的就是寻找一个从地震反射数据直接求取 Q 值的方法。

以前曾有一些求取 Q 值的方法, 例如升时法 (Gladwin 和 Stacey, 1974)、频谱比法

* Geophysical Exploration Department, Changchun Geology College, Changchun City, Jilin Province, Internal Postcode: 130026

本文于 1991 年 4 月 2 日收到。

(Bath, 1974), 同时也有通过计算地震子波的频散及信号在地下介质中传播时的形变来求取 Q 值的方法, 如子波模拟方法 (Engelhard, 1979)、频谱模拟方法 (Jannsen, 1974)、迭代方法 (Scott, 1988)、用 VSP 资料的衰减求 Q 值方法 (Dietrich et al, 1985) 及迭代式层析成像方法 (Schuster, 1989) 等。用这些方法得到的只是参数 Q 的有效值, 即反射信号所经过地层的 Q 值的平均值。而且, 这些方法受到噪音限制。图 1 是利用 Jannsen 等人的试验结果, 对现有四种反演 Q 值方法的比较情况。图中示出了用每种方法反演的 Q 值、其 Q 值误差为 25% 时所允许存在的噪音最大能量的百分比, 这些方法均要求反射波之间互不干涉^[1]。

从图 1 中可以看出, 在没有噪音、对纯信号反演时, 每种方法的反演结果都是较好的; 但加入噪音后, 这四种方法都存在对噪音特别敏感的缺点。因此, 消除随机干扰是提高 Q 值求取精度的关键。基于这一想法, 我们采用统计性方法来消除随机干扰, 得到了较好的结果。

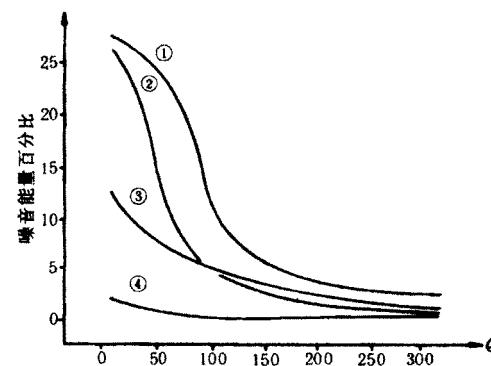


图 1 在反射波之间互不干涉、 Q 值的反演误差在 25% 内时所允许的噪音能量百分比^[1]

图中①为子波模拟法; ②为频谱比法;
③为频谱模拟法; ④为升时法

方法原理

地下介质的品质特性参数 Q 可用下式定义, 即

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E}$$

式中, E 为波在一个周期内的最大峰值能量; ΔE 为波在一个周期内损失的能量 (Johnston 和 Toksoz, 1981), 可见, Q 是波在一个周期内存储能量与耗损能量的比值。

当噪音存在时, 地震记录可表示为

$$X(t) = S(t) + N(t) \quad (1)$$

式中, $X(t)$ 为接收的道数据; $S(t)$ 为纯信号部分; $N(t)$ 为随机噪音。我们的目的是从式(1)分离出吸收项部分, 以求取 Q 值。

由 Bath (1974) 的结论知

$$S(\omega) = A_0(\omega)G(r)R(\omega)AIN(\omega)\exp(-\alpha r) \quad (2)$$

式中, $A_0(\omega)$ 为震源子波的频谱; $G(r)$ 为几何扩散因子; $R(\omega)$ 为介质的传输函数; $AIN(\omega)$ 为接收器的特征函数; ω 为圆频率 ($\omega = 2\pi f$); r 为波离震源的距离; α 为波在介质中传播的衰减因子。我们将方程(2)化简为

$$S(\omega) = DS_0(\omega) \cdot \exp(-\pi f Q^{-1} t) \quad (3)$$

式中, D 是与频率无关的常数项; $S_0(\omega)$ 是与频率有关的项。

对式(1)两端作 Fourier 变换, 则得

物理勘探

式中, $S(\omega) = |S(\omega)| \exp(-i\varphi_s)$; $N(\omega) = |N(\omega)| \exp(-i\varphi_N)$ 。

则式(4)为

$$\begin{aligned} X(\omega) &= |S(\omega)| \exp(-i\varphi_s) + |N(\omega)| \exp(-i\varphi_N) \\ &= |S(\omega)| (\cos\varphi_s - i \sin\varphi_s) + |N(\omega)| (\cos\varphi_N - i \sin\varphi_N) \\ &= |S(\omega)| \cos\varphi_s + |N(\omega)| \cos\varphi_N - i [|S(\omega)| \sin\varphi_s + |N(\omega)| \sin\varphi_N] \end{aligned} \quad (4)$$

由此可得到 X 的功率谱, 即

$$\begin{aligned} |X(\omega)|^2 &= [|S(\omega)| \cos\varphi_s + |N(\omega)| \cos\varphi_N]^2 + [|S(\omega)| \sin\varphi_s + |N(\omega)| \sin\varphi_N]^2 \\ &= |S(\omega)|^2 + 2|S(\omega)||N(\omega)| \cos\varphi_\omega + |N(\omega)|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\cos\varphi_\omega = \cos(\varphi_N - \varphi_s)$, 它表示在频率 ω 处信号与噪音相位角之差的余弦。

拟合是在式(5)的基础上进行的。考虑式(5)中的第二项

$$2|S(\omega)| \cdot |N(\omega)| \cos\varphi_\omega$$

其噪音相位在不同频率时的变化是随机的, 故 $\cos\varphi_\omega$ 是介于士 1 之间的随机变量。这样, 该项在拟合过程中由于其均值为 0, 且 $\cos\varphi_\omega$ 为随机变量, 因而被认为是一个干扰项或误差项。式(5)中的第三项 $|N(\omega)| \geq 0$, 故可拟合为一常数项(即 $|N(\omega)|$ 的数学期望)加上一个波动的随机干扰项。因而式(5)可表示为

$$|X(\omega)|^2 = |S(\omega)|^2 + C + \xi(\omega) \quad (6)$$

式中, C 为一常数项, $\xi(\omega)$ 表示均值为零的随机干扰。所要拟合的函数形式为

$$|X(\omega)|^2 = |S(\omega)|^2 + C = D^2 S_0^2(\omega) \exp(-2\pi f Q^{-1} t) + C \quad (7)$$

数据处理

理论模型计算实例

我们用非线性参数拟合法^{[4], [5]}对本文提出的拟合反演方法进行了理论试算。图 2 为一简单的层状地质模型, 图 3 为基于图 2 的共炮点合成记录。在制作合成记录时, 第一层的 $Q_1 = 20$, 第二层的 $Q_2 = 20$, 其反演的结果为 $Q_1 = 20.7, Q_2 = 21$ 。通过对不同信噪比合成记录的测试表明, 用该方法压制噪音干扰的效果是显著的, 即使在信噪比较低的情况下也可获得较准确的 Q 值。

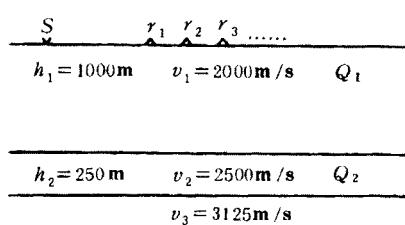


图 2 用于产生理论地震记录的层状地质模型
图中: S 为激发点; r 为接收点; h 为地层埋藏深度; Q 为地层介质的品质特性参数; v 为速度

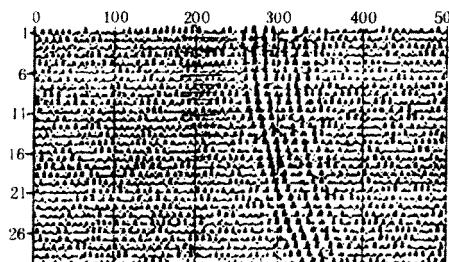


图 3 由图 2 层状地质模型获得的共炮点地震记录

地震记录计算实例

在对理论模型计算获得成功之后, 我们用该方法对东北某地区的一条地震测线的记录进行了处理。为减少处理工作量, 对上述方法作了一点改进, 即直接用同一道不同层位的反射波功率谱之比进行拟合而求得层 Q 值。为了方便起见, 在给出简化的公式之前, 首先记 $|X_1(f)|^2$ 为 $X_1^2(f)$; $|X_2(f)|^2$ 为 $X_2^2(f)$; $|N_1(f)|^2$ 为 $N_1^2(f)$; $|N_2(f)|^2$ 为 $N_2^2(f)$; $|S(f)|^2$ 为 $S^2(f)$ 。

根据上面已经讨论的结果, 可以将 $2S(f) \cdot N(f)\cos\varphi_f$ 作为一误差项。因此, 考虑关系式

$$X_1^2(f) = D_1^2 S_0^2(f) \exp(-2\pi f Q^{-1} t_1) + N_1^2(f) \quad (8)$$

和

$$X_2^2(f) = D_2^2 S_0^2(f) \exp[-2\pi f Q^{-1} t_1 - 2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1)] + N_2^2(f) \quad (9)$$

将式(8)和式(9)相比, 通过简化和去掉 D_1, D_2 及 $S_0(f)$ 的影响, 即可得到

$$\begin{aligned} \frac{X_2^2(f)}{X_1^2(f)} &= \frac{D_2^2 S_0^2(f) \exp[-2\pi f Q^{-1} t_1 - 2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1)] + N_2^2(f)}{D_1^2 S_0^2(f) \exp(-2\pi f Q^{-1} t_1) + N_1^2(f)} \\ &= \frac{\frac{D_2^2}{D_1^2} \exp[-2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1)] \cdot [D_1^2 S_0^2(f) \exp(-2\pi f Q^{-1} t_1) + N_1^2(f) - N_1^2(f)] + N_2^2(f)}{D_1^2 S_0^2(f) \exp(-2\pi f Q^{-1} t_1) + N_1^2(f)} \\ &= \frac{D_2^2}{D_1^2} \exp[-2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1)] - \frac{D_2^2}{D_1^2} \exp[-2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1)] \cdot \frac{N_1^2(f)}{X_1^2(f)} + \frac{N_2^2(f)}{X_1^2(f)} \quad (10) \end{aligned}$$

由于随机噪音是平稳且各态历经的, 因此在拟合过程中可以将 $N_1^2(f)$ 和 $N_2^2(f)$ 拟合为同一常数, 即设

$$\begin{aligned} b_1 &= (D_2/D_1)^2 \\ b_2 &= N_1^2(f) = N_2^2(f) \\ b_3 &= 2\pi f Q_a^{-1} (t_2 - t_1) \end{aligned}$$

这样, 式(10)就可表示为

$$X_2^2(f)/X_1^2(f) = b_1 \exp(-b_3) - [b_1 b_2 \exp(-b_3)/X_1^2(f)] + b_2/X_1^2(f) \quad (11)$$

式中, $X_1(f)$ 和 $X_2(f)$ 表示同一道不同时窗的地震记录振幅谱。

地震记录的处理流程为: ①给出原始 CDP 道集数据及覆盖次数、采样间隔、道间距、速度谱及选择的频率范围等参数; ②给出计算初值; ③按式(11)用阻尼最小二乘法进行迭代拟合; ④对求出的系数进行统计计算; ⑤重复上述步骤, 将所要求的 CDP 点作完为止。

图 4 为用于反演 Q 值的地震叠加剖面。该剖面的覆盖次数为 30 次, 时间采样间隔为 2ms, 道间距为 50m, 所选取的初始 Q 值为 50, 速度谱点距为 1km。我们选取地震剖面上的 AA' ($2.7 \sim 2.9$ s)、 BB' ($3.2 \sim 3.5$ s)

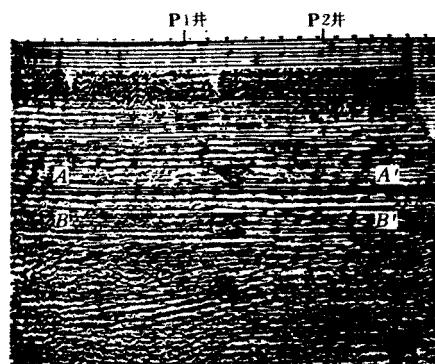
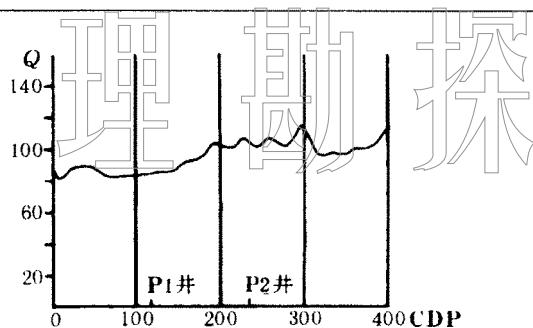
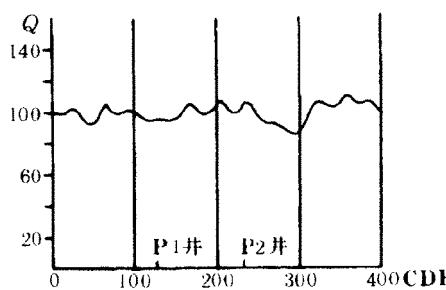


图 4 用于反演 Q 值的地震叠加剖面

图 5 图 4 中 AA' 层的 Q 值反演结果曲线图 6 图 4 中 BB' 层的 Q 值反演结果曲线

两个目的层进行 Q 值反演, 其中 AA' 层为含油气层, BB' 层为不含油气层(据该区钻井资料)。

图 5 为图 4 中 AA' 层的 Q 值反演结果, 图中的 P_1 井处为该层的低 Q 值区, 则产油气; 而 P_2 井位于高 Q 值区, 则为干井。图 6 为图 4 中 BB' 层的 Q 值反演结果, 图中 P_1 、 P_2 井处均为高 Q 值区, 两井在该层均未见油气显示。

结 束 语

从上述分析中可以看出, 以前求取 Q 值的方法中, 子波模拟方法是最好的, 它允许信噪比为 $S/N \geq 4$, 而且还需要震源子波的信息。本文给出的方法, 在信噪比较低的情况下, 可提高反演 Q 值的精度, 而且不需要震源子波的信息。另外, 对野外地震资料处理的结果表明, 用非线性参数拟合方法反演的 Q 值, 可用于解释地下岩性变化和寻找岩性油气藏。但是, 在求取层的 Q 值时, 需对其作一定的平滑, 不能只凭某一点的 Q 值来判断岩性。

参 考 文 献

- 1 Jannsen D. Comparison of methods to determine Q in shallow marine sediments from vertical reflection seismograms. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33 (4): 479~497
- 2 Gladwin M T and Stacey F D. An elastic degradation of acoustic pulses in rock. *Physics of the Earth and planetary Interiors*, 1974, (8): 332~336
- 3 Johnston D H and Toks öz M N. Seismic wave attenuation - definition and terminology. *Geophysics Reprint Series No 2*, SEG, 1981
- 4 王德仁.《非线性方程的解法及最优化方法》. 人民教育出版社, 1985
- 5 梁光河. Q 值反演. 长春地质学院硕士研究生论文, 1987
- 6 Dietrich M and Bouchon M. Measurement of attenuation from VSP by iterative modeling. *Geophysics*, 1985, 50 (6): 931~949
- 7 Scott W. Velocity analysis and Q -Value inversion. *58th SEG Annual Meeting Abstracts*, 1988