

测井资料约束的波阻抗反演中的多解性问题*

马劲风

(西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

王学军 钟俊 许亚军

(石油地球物理勘探局研究院, 河北涿州 072751)

测井资料约束的波阻抗反演技术, 是一种建立于褶积模型基础之上的波阻抗反演技术, 由于人们对这种方法的理论基础认识不清, 片面地认为使用该方法可以获得高分辨率的波阻抗剖面或对地震资料进行提高分辨率处理。通过理论模型试算, 证明波阻抗约束反演中存在着多解性问题, 表明地震道之间的相似性, 并不能代表反射系数序列或波阻抗序列的相似性。在实际资料处理中, 不能采用将合成地震记录与实际地震记录剖面对比, 求取相关系数的方法来进行高分辨率波阻抗反演和提高地震剖面分辨率的处理。

关键词 测井约束 波阻抗反演 相关系数 高分辨率

第一作者简介 马劲风 男 34 岁 副教授(博士) 石油物探

现行测井资料约束的波阻抗反演技术起源于合成声波测井技术, 即基于褶积模型的叠后一维地震资料反演技术。70 年代后期国外提出的这项技术, 在储层识别与横向预测中起过重要的作用, 然而这种方法受噪声、不良的振幅保持, 以及地震资料带限性质的影响很大, 而且还存在波阻抗值随递推公式传递误差的问题。用这种方法处理出来的波阻抗剖面分辨率很低, 难以解决薄层或薄互层问题, 使其应用受到限制。

80 年代后期, Seymour 等^[1]提出了利用地震剖面所过井位的声波测井资料作为约束条件, 正、反演结合进行迭代, 求取地下波阻抗的方法。由于这种方法利用了测井资料的高频信息, 大幅度拓宽了地震资料的频带, 地震剖面的视分辨率得到了很大的提高, 因而这种方法表现出了强劲的发展势头, 成为国内外众多公司竞相发展的对象。出现了美国 HGS 公司的 BCI 软件、法国 CGG 公司的 ROVIM、俄罗斯的 PARM、加拿大的 STRATA, 荷兰的 JASON 等方法, 国内的许多院校、生产单位也研制了类似的软件。随着这类方法的引进和在生产单位的推广应用, 我们逐渐发现这些方法在实用中很难获得好的效果, 很难获得一张可信的反演结果。利用反演结果进行的储层横向预测, 往往与实际钻井结果相差甚远, 预测的薄层、薄互层及岩性的可信度很

低。究其原因, 主要是由于反演的多解性造成的。这种多解性问题, 主要是在震源子波通频带外的频域内, 波阻抗解的多解性所造成的。尽管这种方法以测井资料与地质资料为约束, 仍然无法避免反演的多解性。波阻抗的多解性进一步导致了速度、孔隙度等其它岩性参数的多解性, 造成解释的误区。

实际上, 早在 60 年代后期, 美国地球物理学家 Backus 和应用数学家 Gilbert 在著名的 BG 反演理论中, 就已阐明反问题的解具有高度不唯一性, 李庆忠院士和 Cooke 也曾从地震子波带限的影响, 分析了带限子波必然造成反演中的多解性的问题^[2~4]。本文从测井约束反演方法的理论与模型试算出发, 讨论了约束反演方法的多解性问题, 及目前反演方法的误区所在。

1 广义线性反演方法原理

测井资料约束反演的目的就是综合应用地震、地质和测井资料, 求取适合于油藏描述的优化宽带波阻抗模型。这种方法建立在 Cooke^[3]提出的广义线性反演 (GLI) 方法基础之上。

广义线性反演技术是以正演模型的泰勒级数展开为基础的, 这种方法也称为李亚普诺夫第一近似法。我们将忽略噪声的自激自收, 反射地震道 $s(t)$ 写为^[5]

$$s(t) = w(t) \sum_{j=1}^{n-1} r_j \delta(t - T_j) \quad (1)$$

式中 $w(t)$ 为地震子波, $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, r_j 为对应 T_j 时刻的一次反射振幅, 对离散取样, 令

* 国家自然科学基金 49474227 号“复杂地质条件下的地震与测井资料综合约束反演”资助

$t = i \Delta, T_j = j \Delta, \Delta$ 为地震记录的采样间隔, 由上式不难求出它的偏导数矩阵 A 的元为

$$\alpha_{i,j} = \frac{\partial s(i \Delta)}{\partial z_j} = \frac{2z_{j-1}}{(z_j + z_{j-1})^2} w(i \Delta) \delta[(i-j) \Delta] \cdot \Delta j - \frac{2z_{j+1}}{(z_j + z_{j+1})^2} w(i \Delta) \delta[(i-j) \Delta] \quad (2)$$

式中 $\alpha_{i,j}$ 为偏导数矩阵 A 中第 i 行 j 列的元素, z_j 为第 $j \Delta$ 时刻的波阻抗值。于是, 地震道反演的最小二乘算法可归结为求

$$\Delta Z_k = (A_{k-1}^T A_{k-1} + \varepsilon_k I)^{-1} A_{k-1}^T (s - s_{k-1}) \quad k = 1, 2 \dots \quad (3)$$

$$Z_k = Z_{k-1} + \mu \Delta Z_k \quad k = 1, 2 \dots \quad (4)$$

式中 下标 k 为迭代次数, ΔZ_k 为第 k 次迭代波阻抗向量 Z_k 的修改向量, s_k 为由 Z_k 得来的合成地震道, s 为实际地震道, ε_k 为阻尼因子, μ 为松弛因子, 满足 $0 < \varepsilon_k < 1, 0 < \mu \leq 1$ 。

对反问题的解法, 前人已经研究了蒙特卡罗算法、共轭梯度法、模拟退火、神经网络、遗传算法等最优化算法, 这里不再一一赘述。我们采用普遍使用的多维求根的牛顿法或称牛顿-拉斐森 (Newton - Raphson) 算法, 求解方程组 (3), (4)。

2 模型试算与效果分析

模型试算采用表 1 中给定的速度模型作为标准速度模型道。为方便起见我们假定密度为常数 (这种假定不影响反演结果), 这样公式 (2) 至 (4) 中

的波阻抗 z 就变成表 1 中的标准速度。由于标准速度模型仅长 49 个点, 子波长度应小于模型长度, 所以子波选为零相位 65 Hz 雷克子波, 矩阵求逆时采用奇异值分解算法。图 1, 2 中所示的标准速度模型为表 1 中的速度模型, 初始速度模型表示迭代反演时所给的初始速度, 方差 $|V - V_k|$ 表示标准速度模型 V 与第 k 次迭代反演结果 V_k 的差的绝对值和, 其数值在图 1, 2 中标出。反射系数表示第 k 次迭代得到的反射系数序列 r_k , 合成地震道表示以第 k 次迭代得到的反射系数序列 r_k 与 65 Hz 零相位雷克子波褶积结果。相关系数分别表示第 k 次迭代得到的反射系数序列 r_k 与标准反射系数 r , 及第 k 次迭代得到的合成地震道 s_k 与标准地震道 s 进行相关运算的结果。标准地震道 s 是以标准速度模型求得的合成地震道, 数字 1, 2, 3, ...18 表示迭代次数。

表 1 标准速度模型
Table 1 Standard velocity model

层序号	层厚/ms	岩层速度/ m s^{-1}
1	10	2 500
2	10	3 000
3	10	3 400
4	10	3 200
5	9	3 600

以牛顿法求解方程组, 反演结果的精度与反演迭代收敛速度对初始模型有很大的依赖性。在这里我们先不考虑初始模型给定的精度, 我们任意给出两个速度线性变化的模型, 作为迭代的初始模型。

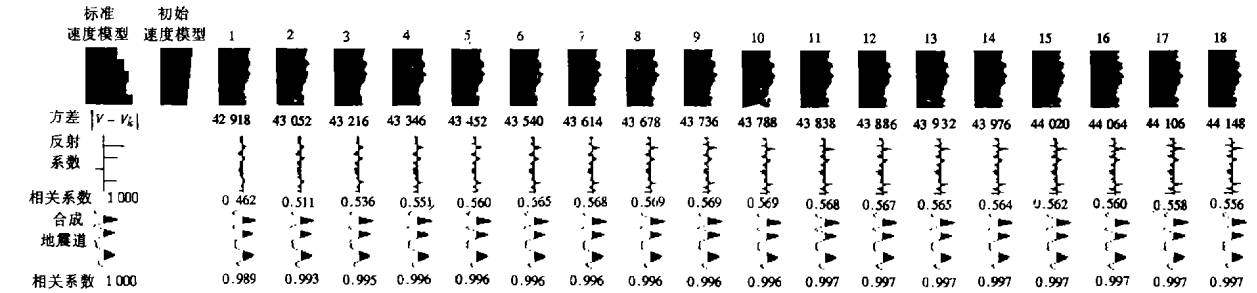


图 1 初始模型为线性速度递减模型, 广义线性反演的理论试算结果 ($\varepsilon_k = 0.0001, \mu = 1$)

Fig. 1 When initial model is linear velocity decreasing model, the generalized linear inversion theory result is shown above ($\varepsilon_k = 0.0001, \mu = 1$)

图 1 表示初始速度模型为速度线性递减的模型时 18 次迭代的结果。从中我们可以看到, 经过十多次迭代后, 迭代得到的反演结果与标准速度模型差的绝对值 $|V - V_k|$ 逐渐增大, 说明随迭代次数增加, 反演结果趋于发散。而相应迭代得到的合成地震道

s_k 与标准地震道 s 的相关系数, 随迭代次数的增加, 逐渐增大, 反射系数的变化我们从图中可以一目了然, 实际处理地震剖面时, s 就是实际的地震道。

图 1 说明, 尽管第 k 次迭代得到的合成地震道 s_k 与标准地震道 s 相似程度很高, 但反射系数序列

r_k 与标准反射系数 r 却不相似, 即便地震道的相似性达到 99.7%, 也不能说明反射系数序列的相似程度就高。而且随地震道相似性的提高, 反射系数中的高频噪声成份越来越高。这是因为, 地震道是由带限的子波与反射系数序列进行褶积的结果, 褶积运算就是滤波运算。对反射系数褶积后就滤掉了反射系数中的高频成分, 所得到的地震道是反射系数的中频成分, 这样 s 与 s_k 的相关性只能代表反射系数中频成分的相似性, 不能代表反射系数高频成分的相似性。这也说明了以褶积模型得到的 s 与 s_k 对反演的结果是不具有约束力的, 褶积模型不能检验地震信号中的高频成分。李庆忠院士^[2]也早已阐明“高频信息不可能通过褶积模型来作合理的检验。相反地, 在噪声大于信号的高频频带里, 愈是想用褶积模型来作检验, 反演结果错误就愈多”。只有中频段的地震数据才受地震褶积模型的约束。

文献[6]采用“以合成地震记录与实际地震记录剖面比较, 求取相关系数, 通过不断修改模型和反复迭代, 使所求相关系数达到给定阈值, 则此时的反射系数剖面就是要求的最佳反射系数剖面。”

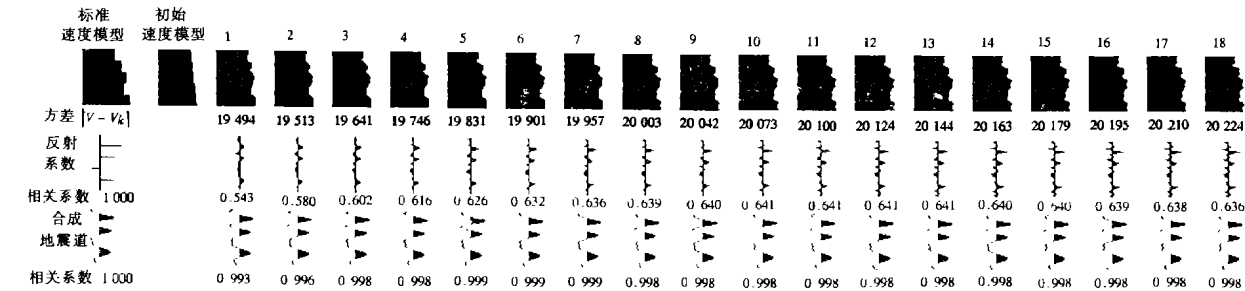


图 2 初始模型为线性速度递增模型, 广义线性反演的理论试算结果($\epsilon_k=0.0001, \mu=1$)

Fig. 2 When initial model is linear velocity increasing model, the generalized linear inversion theory result is shown above
($\epsilon_k=0.0001, \mu=1$)

迭代结果。从图中我们可以看到, 经过前 16 次迭代后, 反演结果与标准速度模型道的差的绝对值逐渐减小, 反演结果趋于收敛, 但从第 17 次迭代开始, 反演结果与标准速度模型道的差的绝对值开始增大, 反演结果趋于发散。随迭代次数增加, 合成地震道 s_k 与标准地震道 s 的相关性趋于 99.8%, 而迭代得到的反射系数序列与标准反射系数仍相差甚远。这同样说明了地震道 s 与 s_k 的相关性不代表迭代后反射系数的精确程度。若用这样迭代得到的反射系数序列, 来提高地震剖面的分辨率, 其误差可想而知。实际上 PARM, BCI, ROVIM 等方法, 都是将地震道的相关性作为波阻抗反演结果的

这种以地震道的相似性为基础, 来提高地震剖面的分辨率和获取可靠的波阻抗信息的作法, 是不正确的。还有一些学者采用标准地震道与第 k 次迭代地震道 s_k 的差最小, 即 $|s - s_k|$ 最小作为判别反演收敛和反射系数最佳的标准, 同样也是不正确的。更有甚者, 直接利用 s 与 s_k 的相似性, 采用神经网络、分形等技术, 从井点开始前道推后道, 直接内插、外推波阻抗或速度曲线, 以 s 与 s_k 的相似性代替 V 与 V_k 的相似性, 这种作法更不值得提倡。

人们之所以选择 s 与 s_k 的相关性或 $|s - s_k|$ 最小作为判别迭代收敛的准则, 是因为图 1 中所示的判别收敛的条件 $|V - V_k|$, 在实际反演中是不知道的。这主要是标准速度模型 V 是不知道的, 因而, $|V - V_k|$ 不可能作为判别收敛的准则。许多人不经论证, 就片面认为 $|V - V_k|$ 的变化趋势与 $|s - s_k|$ 的变化趋势相同, 或同于 s 与 s_k 的相似程度。从图 1 中我们看到虽然 $|V - V_k|$ 逐渐趋于发散, 但 s 与 s_k 的相关性却越来越好, 说明 $|V - V_k|$ 的变化趋势与 $|s - s_k|$ 的变化趋势是不相同的。

图 2 表示初始模型为速度递增模型时的 18 次

相关性的, 其精度可想而知。

前人研究表明, 在地震道无噪声、地震子波主频、相位变化小的理想条件下, 如果初始模型选择得接近于标准速度模型的光滑模型, 作为初始速度模型, 迭代结果才会收敛, 反演解才会有较高的分辨率^[5]。从图 1, 2 的模型试算我们看到, 任给初始模型时, 迭代反演的结果并不稳定。如果在实际地震资料处理时, 地震道中含噪声、多次波等其它干扰, 再加上子波的频率、波形、相位及地震资料与测井资料的不匹配等诸多因素的影响, 即使初始模型选择得非常理想, 反演结果也难以收敛, 反演得到的高频信息是不真实的, 最终反演结果的可信度也

是很低的。

前面我们已经证明,褶积模型是不能约束高频信息的正确性的,要想反演出准确的高频信息,必须要有正确的高频资料作为约束。正是在这种情况下,人们想到利用声波测井资料和地质资料建立约束条件,来限制解的范围^[7]。理论上这个方法是可行的,实用中约束条件却难以构造准确。

波阻抗或速度的高频成分,反映的是薄层与薄互层的信息,这种信息在井点,可以通过以声波测井资料建立准确的高频约束条件来准确得到,在离开井点以外,或井与井之间的范围,薄层、薄互层信息的内插、外推实际上就是地质上的小层对比。在岩性横向变化稳定的情况下,高频约束条件构造得还比较可靠,如果横向有岩性、岩相及构造的变化,约束条件就难以构造准确了。所以,井外及井间的高频约束条件是不可靠的,因而以这种高频信息来约束反演结果,其结果也是不可靠的。这就是为什么目前测井约束反演方法,不能准确预测出井点以外横向薄储层信息的主要原因。

3 结 论

(1) 测井、地质资料的约束反演,可以提高地震资料的视分辨率,这种视分辨率在井点受测井资料的约束是比较可靠的。离开井点以后,由于约束条件的不可靠,这种视分辨率是多解的,不可靠的。

(2) 合成地震记录剖面与实际地震剖面的相似性,不代表反射系数剖面的相似性和波阻抗或速度剖面的相似性。

(3) 褶积模型对于地震资料的高频成分是没有约束力的,约束高频信息的方法只能靠测井、地质资料构造的高频分量剖面来确定,但要对垂向分辨率极高的测井资料,进行横向内插、外推而构造出准确的高频分量约束剖面,在当前的技术条件下是非常困难的。

参 考 文 献

- 1 Seymour R H. 利用地震-地质控制由井外推储集层岩性. 牛敏荃译. 国外油气勘探, 1990, 2(2): 74~ 87
- 2 李庆忠. 走向精确勘探的道路. 北京: 石油工业出版社, 1993. 162~ 167
- 3 Cooke D A, Schneider W A. Generalized linear inversion of reflection seismic data. Geophysics, 1983, 48(6): 665~ 676
- 4 李庆忠. 论地震约束反演的策略. 石油地球物理勘探, 1998, 33(4): 423~ 438
- 5 杨文采. 地震道的非线性混沌反演-I, 理论和数值试验. 地球物理学报, 1993, 36(2): 221~ 231
- 6 张玉芬. 测井资料约束的层速度反演. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 227~ 231
- 7 Vest R T. 利用地质约束条件进行地震数据反演. 见: 美国勘探地球物理学家学会第60届年会论文集. 地质矿产部石油物探研究所情报室, 中国石油天然气总公司物理勘探局科技情报所译. 北京: 石油工业出版社, 1992. 280~ 283

MULTIPLE ROOTS IN WELL-RESTRICTED IMPEDANCE INVERSION

Ma Jinfeng Wang Xuejun Zhong Jun Xu Yajun
(Geology Department, Northwest University, Xi'an, Shaanxi)

Abstract

Log data-restricted wave impedance inversion technique is based on convolutional model. Because of misunderstanding its theory foundation, this method was misused to obtain high-resolution impedance profile or to improve seismic profile resolution. The theoretic modeling results of log data-restricted wave impedance inversion indicate that seismic inversion result has multiple roots. The similarity between seismic traces does not mean the similarity between impedance series or reflection coefficient series. Coherent coefficient obtained from comparing synthetic seismic profile with original seismic profile can not be used as restricted condition to invert high-resolution impedance profile or to improve seismic profile resolution in practical seismic data processing.

Key Words: well-restricted impedance inversion coherent coefficient high-resolution