

⑪ 417-421

复杂地质条件下的地震、测井资料综合约束反演

赵圣亮 马劲风[✓] 谢言光 张晓莉

TE19

(西北大学地质学系, 710069, 西安, 第一作者 59 岁, 男, 教授)

摘要 利用测井资料中垂向分辨率和地震资料横向密集采样特点的综合约束反演技术, 极大地提高了波阻抗剖面的分辨率。反演依靠一维合成声波测井的结果, 以地震地质解释的成果为约束, 顺层横向递推形成初始波阻抗模型。然后, 以声波测井曲线的外包络为约束, 不仅加快了反演的收敛速度, 而且使反演结果与实际值更加接近。该方法在陡倾斜和多断层的复杂地质条件下, 比其他宽带约束反演方法具有更好的实用性。

关键词 综合约束反演; 非线性; 波阻抗; 分辨率

分类号 TE19

地震勘探

测井

油田

1 波阻抗反演技术发展的过程与现状

现行的非线性约束反演方法起源于合成声速测井技术, 即基于褶积模型的一维线性反演技术。80年代初期提出的这项技术, 在储层识别与横向预测中起过重要的作用。属于这类技术的有美国 COGNISEIS 公司、CGG 公司等的 SEISLOG、GLOG 及 GLI 技术、国内的西北工业大学与大庆油田的 DELOG 技术、北京石油勘探开发科学研究院的刘雯林先生的合成声速测井技术等。由于是低频分量水平递推, 这些方法在地层倾斜地区的应用效果不理想。由此西方地球物理公司推出了低频分量顺层位递推的拟声阻抗变换 PIVT 和以模型为基础的地震岩性模拟 SLIM 技术、SERRA 公司的 SERRA 软件包、斯仑贝谢公司的 RM 软件包等, 将这项技术又向前推进了一步。但这些方法受噪声、不良的振幅保持, 以及地震资料带限性质的影响较大, 同时波阻抗值随递推公式累积传递误差, 而且这种方法分辨率较低, 解决薄层或薄互层问题的能力较差, 使其应用范围受到限制。

80年代末, Seymour 等提出了利用地震剖面所过井位的声速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^[1], 将反演方法推向非线性问题。这种新方法利用了测井资料的高频信息, 大幅度拓宽了地震信号的频带, 可以获得薄层、薄互层的波阻抗信息, 因而表现出了强劲的发展势头, 成为国外各石油公司重点发展的对象。如美国 HGS 公司的宽带约束反演 BCI 技术、法国 CGG 公司的波阻抗反演模拟 ROVIM 技术、俄罗斯的 PARM^[2]、加拿大的 STRATA、国外刚推出的 JASON 等。这些方法的推出在储集层横向预测和评价及提高油气田的勘探开发效益方面起了重要的作用, 成为油气田勘探开发及油藏描述过程中必不可少的环节。但是, 由于理论上不够成熟和技术保密的缘故, 近年的国外专业文献中无完整的此项技术的报道, 因而使其在国内的应用受到了限制。为此我们以“复杂地质条件下的地震、测井资料综合约束反演”技术方法(简称综合约束反演方法)研究立项, 得到了国家自然科学基金的资助, 用3年时间(1995-01~1997-12)来完成该方法理论研究与应用研究, 以使这项技术真正实现国产化, 亦使我国在该技术的前沿领域争得一席之地。

在本课题的立项和初期工作阶段, 笔者曾对国内外有关研究成果及进口的各类软件进行过深入的

分析^[7~12]。目前国内的各种叠后地震资料约束反演方面的研究^[16~18],基本上是单井控制下地震资料的反演,极少引入测井和地质方面所能提供的宝贵信息,只能解决单井约束的、构造简单的、没有断层或岩性、岩相横向变化小的问题,在多井条件下和地质条件复杂的地区难以推广使用。

CGG 公司的 ROVIM 与 HGS 公司的 BCI 是当前解决多井约束的两种最好的方法^[1]。因为国外没有发表此方法完整的技术资料,所以国内对此方法的技术细节了解并不透彻。笔者采用非线性反演理论方法,提出坚持地质、测井、地震资料的紧密结合与综合应用、正演与反演方法的结合和交替使用及专家经验智慧与计算机高速运算的综合应用的综合约束反演方法的思想,特别适合地质构造复杂的地区和多井条件。运用约束条件,使反演的多解性降低到最低限度,最大限度地提高成果地震剖面的分辨率和可靠性。

为了使理论紧密联系实际,在国家自然科学基金委批准立项以后,笔者先后与华北石油管理局和石油天然气总公司物探局合作,用实际的地震和测井资料和引进的人机联作解释系统,开展本项研究工作。经过两年多的努力,发表了一系列研究工作中间成果,开发出了外挂于 Landmark 与 Geoquest 平台的非线性反演软件包,基本上达到了预定目标。

2 综合约束反演方法原理

综合约束反演技术,是一种非线性的反演方法。其优点在于巧妙地使用了最小二乘法求解线性方程组,利用泰勒展式将非线性问题化为线性问题。与普遍的递推反演技术不同,最小二乘法的结构不允许结果误差随时间而传播。这种方法避免了直接对地震资料进行反演,方法受噪声、不良的振幅保持及地震资料带限等性质的影响小,可以有较高的分辨率^[9]。在地质、测井的约束条件下,可以把多解性降低到最低限度。

设 M 为参数化的模型向量, D 为精确的地震观测数据,它们之间有下列的关系:

$$D = F(M). \quad (1)$$

其中: $M = (m_1, m_2, \dots, m_k)^T = k$ 个模型参数的矢量; $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T = n$ 个观测数据的矢量。

利用模型参数与观测值的关系可得到计算出的观测值为

$$S_i = F(m_1, m_2, \dots, m_k), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

综合约束反演技术是以正演模型的泰勒级数展开为基础的,其展开式是

$$F(M) = F(M_0) + \frac{\partial F(M)}{\partial M} \Big|_{M_0} \cdot (M - M_0) + \frac{\partial^2 F(M)}{\partial M^2} \Big|_{M_0} \cdot \frac{(M - M_0)^2}{2!} + \dots. \quad (3)$$

略去高次项可得:

$$F(M) = F(M_0) + \frac{\partial F(M_0)}{\partial M} \Delta M. \quad (4)$$

式中: M 为待求的波阻抗曲线; M_0 为猜想(假定)的波阻抗曲线; ΔM 为上述猜想的误差; F 为正演模型函数; $F(M)$ 为观测的地震记录; $F(M_0)$ 是在正演模型算式中用猜想的波阻抗曲线计算的合成地震记录; $\partial F(M_0)/\partial M$ 为 Jacobian 矩阵或灵敏度矩阵。

可以看出,观测值与计算值间的误差为

$$\Delta F = F(M) - F(M_0). \quad (5)$$

用矩阵方程可表示为

$$\Delta F = G \Delta M \text{ 或 } \Delta M = G^{-1} \Delta F. \quad (6)$$

G^{-1} 为 G 的逆矩阵。

因为通常观测值比参数的数目多,即 $n > k$, 方程是超定的,其最小二乘解为

$$\Delta M = (G^T G)^{-1} G^T \Delta F. \quad (7)$$

以褶积模型为基础,忽略多次波时反射地震道可写为

$$s(t) = \omega(t) * \sum_{j=1}^N r_j \delta(t - T_j). \quad (8)$$

式中 r_j 为对应 T_j 时刻的一次反射振幅。

对 t 离散取样,令 $t = i\Delta t$,由上式求出它的偏导数矩阵的元为

$$\alpha_{i,j} = \frac{\partial s(i\Delta t)}{\partial Z_j} = \frac{2Z_{j-1}}{(Z_j + Z_{j-1})^2} \omega(i\Delta t) * \delta\{[i - (j-1)]\} - \frac{2Z_{j+1}}{(Z_j + Z_{j+1})^2} \omega(i\Delta t) * \delta\{[i - j]\Delta t\}. \quad (9)$$

于是,地震道反演的算法可归结为求

$$\Delta m_k = (A_{i-1}^T A_{i-1} + \epsilon_k I)^{-1} A_{i-1}^T (S - S_{i-1}), \quad k = 1, 2, \dots \quad (10)$$

$$Z_k = Z_{k-1} + \mu \Delta m_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

式中:下标 k 为迭代次数, Δm_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, ϵ_k 为阻尼因子, μ 为松弛因子,满足 $0 < \epsilon_k < 1$, $0 < \mu < 1$ 。

3 综合约束反演的技术特点与应用成果

3.1 要充分重视用于综合约束反演的原始测井与地震资料的预处理工作

由于生产中提供的这些原始数据中包括有各种人为的、随机的或规则的干扰,在利用多口井的资料进行约束时,各井的尺度标定不尽相同,均会显著影响最终的反演结果。因此,在使用这些原始资料前应进行各种检测和预处理。如对测井资料进行环境校正、深度校正、标准化等处理,而对地震资料则进行各种有效地提高信噪比、分辨率和保真度的处理。除此以外,测井资料的采样率一般为每米 8 个点,要比常规的地震资料采样率(2ms 或 4ms)高出十几到数十倍。在利用测井资料进行深时转换过程中,如何尽可能多地保留薄层信息也是一个十分重要的问题。

3.2 在构造解释成果基础上的分块顺层处理

经过构造解释,地质专家们根据对工区沉积和构造发展过程的认识和理解,把每个地震层序单元的顶、底界面用相应的层位数据标注,对断层面则用断层数据标注,存入数据库相应的位置中。这样每条经过解释的地震剖面就被一系列产状相对平缓的层位界面和产状相对较陡的断层面分割为若干个块段。其中,每一小块的沉积环境相似,所处构造部位相同,处理过程中在同一小块内只允许顺层位进行内插外推,拉伸压缩,处理参数只能渐变,而不同块之间,特别是在断层两侧允许处理参数的突变。这样,就把地质条件,如沉积环境、构造变动和地质专家的经验与智慧引入了地震资料反演领域。它不但使反演出来的结果更符合、更贴近实际的地质条件,而且独立进行递推运算的区域划小,在非线性反演中求解的方程组阶数大为降低,使得整个运算工作量可呈几何级数的大幅度降低,也使得在微机或中、小型工作站上推广使用我们提供的算法进行反演成为可能。

3.3 在线性反演成果基础上的非线性反演

根据实际的理论模型计算结果表明,反演结果的准确性与给定的初始模型的好坏,特别是初始值的准确与否关系甚大。这样笔者提出了用线性反演的结果,即 SEISLOG 剖面作为初始模型,顺标准层位,参考测井数据来给定初始值的办法,从而保证了反演成果的合理与可靠。

3.4 岩性反演

由于在反演过程中直接使用了测井资料及其解释成果,而反演的结果,可将每一道地震记录转换成一条声速或声阻抗“测井曲线”。利用测井解释方法和所使用的各种量板,可以将作为反演成果的较精细的层速度处理转换成直接反映地质成果的各种岩性剖面。如孔隙度、渗透率、地层异常压力、砂泥岩百分含量剖面等等。这已是地震、测井综合约束反演过程中顺理成章的事,深得石油地质专家们的欢迎。

现以冀中盆地高阳高分辨率三维工区的一条地震剖面的反演成果来说明本方法的具体成果。图 1 是用于反演的 520 原始三维叠加偏移地震剖面。其原始剖面质量均不理想。图 2 是 520 剖面的非线性综合约束反演的层速度剖面,分辨率有很大提高。图 3 是 520 剖面泥岩百分含量剖面,从剖面上可以清楚地看到斜坡上砂泥的分布,为储层研究与横向预测提供了有力的证据。

到现在为止,本课题还在进行中。我们正在与中国石油天然气总公司石油地球物理勘探局合作,加紧对软件进行外包装和测试,预计到 1997 年底,可在生产单位推广使用。

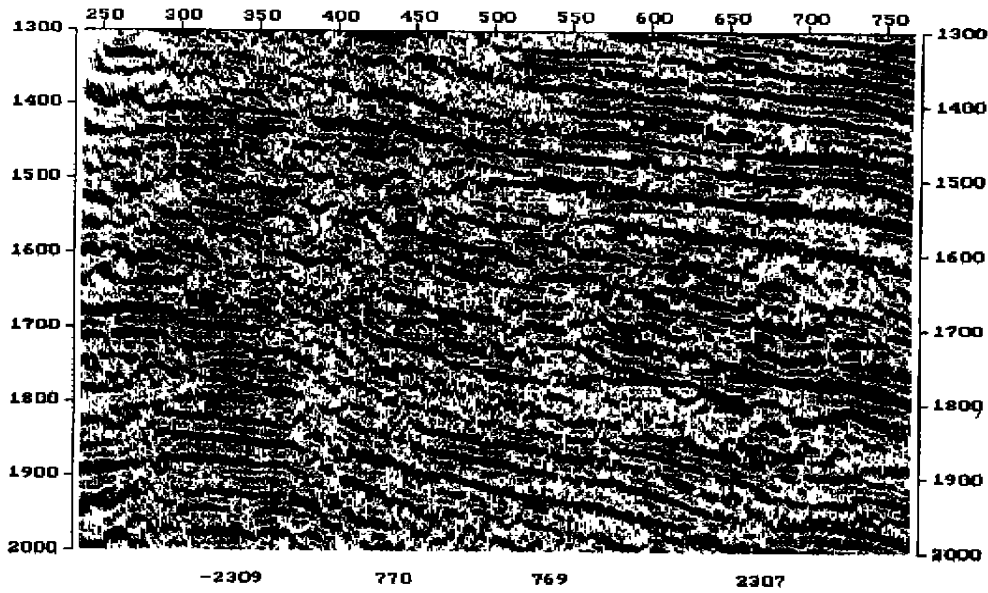


图 1 520 主测线叠加偏移剖面

Fig. 1 520 In-line Stack and Migration Profile

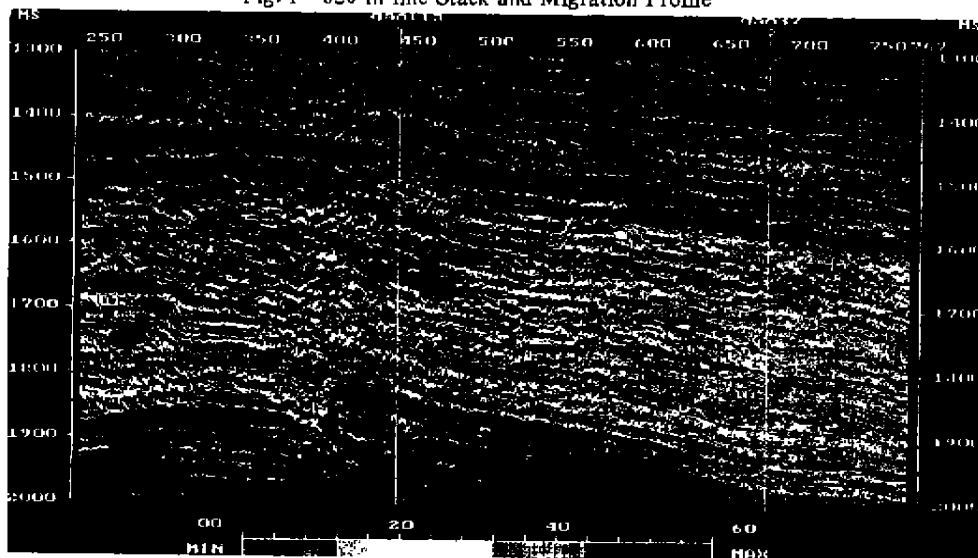


图 2 520 主测线波阻抗剖面

Fig. 2 520 In-line Impedance Profile

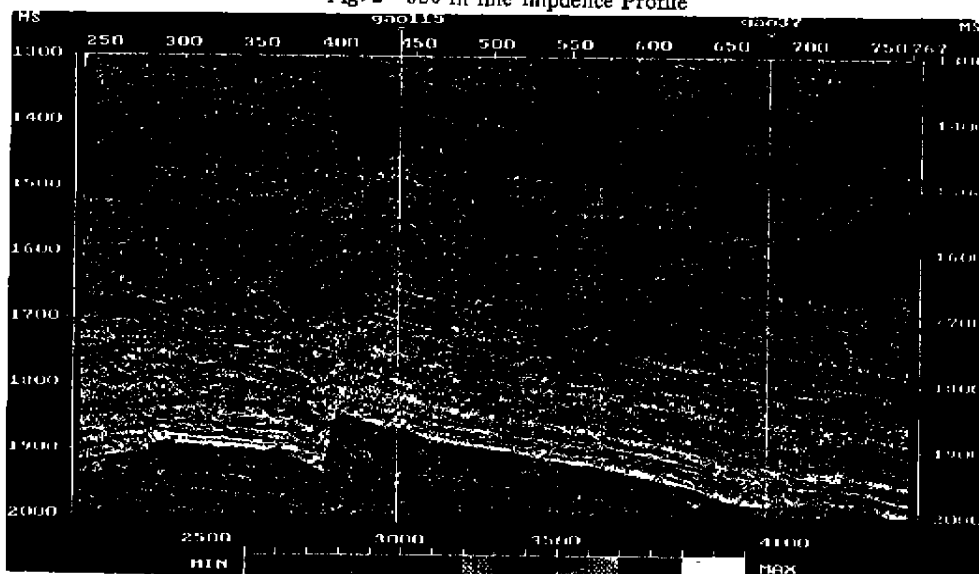


图 3 520 主测线砂岩百分含量剖面

Fig. 3 520 In-line Sand Percent Profile

参 考 文 献

- 1 李庆中. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析. 北京:石油工业出版社,1994
- 2 赵圣亮,王小明,王建华. 一种简单的频率补偿方法. 石油地球物理勘探, 1994(2):231~235
- 3 马劲风,赵圣亮,曲志浩. 风化店中生界火山岩油藏描述中的地震技术. 中国地球物理学会年刊,北京:中国建材工业出版社,1996. 53~53
- 4 马劲风,赵圣亮,曲志浩. 蠡县斜坡高阳高分辨率三维工区油藏描述. 中国地球物理学会年刊,北京:中国建材工业出版社,1996. 57~57
- 5 马劲风,赵圣亮,曲志浩. 地震资料的非线性综合约束反演初步研究. 西北大学学报(自然科学版),1996,26(增刊):137~141
- 6 Cooke D A, Schneider W A. Generalized linear inversion of reflection seismic data. *Geophysics*,1983,48:665~676
- 7 Seymour R H. Extrapolation of Reservoir Lithology away from wells using Seismic-Geologic Controls. 第51届 EAEG 年会论文集. 北京:石油工业出版社,1989
- 8 Berkhout A J. 不适定问题的反演策略. 第60届 SEG 年会论文集. 北京:石油工业出版社,1991. 262~264
- 9 Robein E. 利用反演进行岩性地层解释——一种综合的方法. 国外油气勘探,1992,4(4):64~71
- 10 Berkhout A J. 地球物理反演策略:技术发展和市场需要. 第63届 SEG 年会论文集,北京:石油工业出版社,1993
- 11 陈祖传. 从63届 SEG 国际年会看地球物理勘探技术的发展方向. 石油物探信息,1994,2
- 12 Brain Russell. 叠后反演方法的比较. 第61届 SEG 年会论文集. 北京:石油工业出版社,1992. 425~428
- 13 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
- 14 杨文采. 地震道的非线性混沌反演—II,关于 Lyapunov 指数和吸引子. 地球物理学报,1993,36(3):376~386
- 15 Sen M K, Stoffa P L. Simulated annealing, genetic algorithms, and seismic waveform inversion. 第60届 SEG 年会论文集,北京:石油工业出版社,1992
- 16 刘雯林. 油气田开发地震技术. 北京:石油工业出版社,1996
- 17 张宏彬,何楠登. 宽带约束反演. 石油物探,1995,34(1):1~10
- 18 李正文. 地震数据多参数约束反演及应用. 石油地球物理勘探,1994,29(5):581~587

责任编辑 张银玲

Comprehensive Well and Geological Constrained Seismic Inversion Under Complex Geological Condition

Zhao Shengliang Ma Jinfeng Xie Yanguang Zhang Xiaoli

(Department of Geology, Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract Comprehensive constrained inversion makes full use of detailed vertical resolution of well data and horizontal dense sampling, greatly improves resolution of impedance profile greatly. Combined with the result of one-dimensional synthetic acoustic curve and seismic geological interpretation, comprehensive constrained inversion forms primitive impedance model along with layers. Then constrained by encircle of acoustic curves, comprehensive constrained inversion not only makes convergence quickly but also makes inversion result closely to reality. This method has better practicability than other Board Constrained Inversion under sharp layers and multi-faults condition.

Key words comprehensive constrained inversion; nonlinear; impedance; resolution