

应用 GeoEast 系统预测煤层分布和厚度

王桂英* 白雪莲 李咏梅 黄娜 杨顺刚

(东方地球物理公司物探技术研究中心,河北涿州 072751)

王桂英,白雪莲,李咏梅,黄娜,杨顺刚. 应用 GeoEast 系统预测煤层分布和厚度. 石油地球物理勘探,2014,49(增刊1):184-191.

摘要 通过 GeoEast 系统中地震反演技术在鄂尔多斯盆地 BD 三维地震工区煤层勘探中的应用,总结出通过地震反演技术识别煤层分布和厚度的流程。应用结果表明,利用 GeoEast 系统中的基于遗传算法的 BP 神经网络叠后反演预测煤层分布范围,利用叠前弹性参数反演预测纵、横波速度,进而可预测煤层厚度。反演结果与测井数据吻合度高,结合相关地震资料信息,能够精细描述煤层气空间分布形态及其厚度特征。

关键词 煤层预测 煤层厚度 BP 神经网络 弹性参数

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

煤层气是一种高效、清洁的能源,我国煤层气资源丰富,其勘探开发越来越受到重视。

煤层气主要是吸附气,这种吸附气的产量与煤层厚度有一定关系,因此在煤层气勘探中,准确落实煤层厚度显得尤为重要。煤层厚度预测从最早依据区内钻孔通过不同的方法插值得到,到后来通过提取煤层反射波时间厚度进行转换来获取,发展到现在利用地震反射波振幅预测煤层厚度等。上述方法在煤层厚度预测过程中都取得了不同程度的应用效果。

理论上,煤层厚度的变化是一种非线性空间变化,如何确立一种科学的非线性的研究方法是煤层预测的难点。本文通过基于遗传算法的 BP 神经网络反演,预测煤层的分布范围,通过纵横波速度曲线交会图与叠前反演的纵横波速度数据体进行综合分析,确定煤层的分布,进而确定煤层厚度。

2 方法原理

2.1 基于遗传算法的 BP 神经网络叠后反演

2.1.1 BP 神经网络反演

神经网络反演是基于非线性理论,在层位控制

下,将工区内多口测井数据及井旁地震道数据输入到一个具有多输入 BP 网络进行整体训练,获得整个工区的自适应权函数,建立综合非线性映射关系,并根据储层在纵向上的地质变化特征,更新这种非线性映射关系(图 1)。这样,就能对反演过程及反演结果起到约束和控制作用,进而获得稳定且分辨率较高的地震反演剖面。

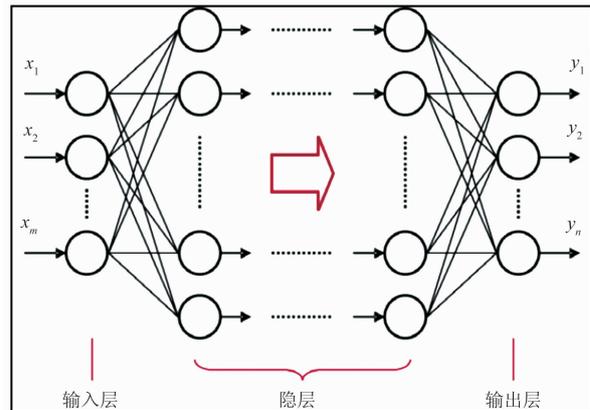


图 1 BP 神经网络方法原理图

2.1.2 遗传算法

遗传算法是以生物进化规律为背景提出的一种优化算法,通过对目标问题进行编码,该编码称为染色体,然后对染色体进行选择、交叉、变异等操作,使染色体不断变化,从而求得最优值。

* 河北省涿州市贾秀路 39 号物探技术研究中心,072751. Email:15830851564@163.com

本文于 2013 年 12 月 10 日收到,最终修改稿于 2014 年 5 月 28 日收到。

本研究受国家科技重大专项课题(2011ZX05019-003)资助。

2.1.3 基于遗传算法的 BP 神经网络叠后反演

GeoEast 系统采用遗传和 BP 神经网络相结合的方法进行叠后反演。换句话说,该系统是将遗传算法与 BP 算法结合在一起,形成一种自适应遗传和神经网络混合的算法,即在网络学习中,以遗传算法流程为框架,如果满足一定的概率条件可多次执行 BP 算法操作。这是对传统混合算法的改进,克服了 BP 神经网络易于陷入局部最优解的问题,可以快速达到全局最优解。

2.2 叠前弹性参数反演方法

GeoEast 系统叠前反演主要是利用纵横波在岩石骨架和混合流体中响应的不同特征、规律来区分储层和非储层。以佐普里兹方程为理论依据,利用 Gray 近似公式,把佐普里兹方程近似表示成了剪切模量、密度和体积模量或拉梅常数的函数,经过标准化后弹性阻抗方程表示为

$$EI(\theta) = A_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{a(\theta)} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{b(\theta)} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{c(\theta)}$$

$$A_0 = (8\lambda_0 \mu_0 \rho_0^2)^{\frac{1}{4}}$$

式中: $a = \left(\frac{1}{2} - k \right) \sec^2 \theta$; $b = k (\sec^2 \theta - 4 \sin^2 \theta)$;

k 为体积模量, θ 为入射角, $c = 1 - \frac{1}{2} \sec^2 \theta$; λ 为拉梅常数; μ 为剪切模量; ρ 为密度。该方法去掉了函数对尺度的依赖性并使函数更加稳定,使弹性阻抗 EI 的尺度变得与声波阻抗 AI 一样,更易于实现。

3 反演应用实例

BD 三维地震工区位于鄂尔多斯盆地山西省境内,满覆盖面积为 181km²。地表条件比较复杂,有山地、丘陵、黄土塬等地表类型,海拔高度在 787~1208m 之间。该工区地质构造简单,总体构造属单翼向斜,地层倾角较小。BD 地区煤层勘探的目的层为二叠系山西组和太原组,主力煤层为 4+5 号煤层、8+9 号煤层,该区主力煤层厚度普遍较厚,4+5 号煤层厚度为 3~8m,8+9 号煤层厚度为 5~16m,煤层间距为 35~80m,埋深一般为 400~1600m (图 2)。另外区内煤层分叉现象突出,导致煤层层数横向变化。

本次反演目的是确定 4+5 号煤层、8+9 号煤层分布范围以及煤层厚度。

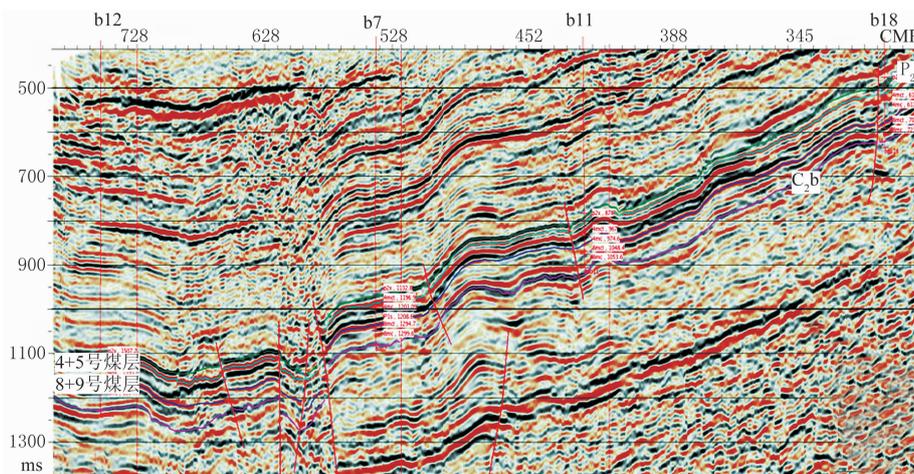


图 2 煤层剖面特征

3.1 反演关键技术

(1) 测井资料预处理 包括测井资料的编辑、测井曲线的环境校正和测井曲线的标准化处理^[1]。通过以上步骤消除奇异值、随机噪声、环境影响和系统误差,可以使测井曲线在横向上具有可比性,提高初始模型横向上的可信度^[2]。

(2) 反演可行性分析 主要是通过交会图,直方图分析工具,分析测井曲线对岩性、含油气性的分辨

能力,确定反演方法。如果曲线对岩性有较好的分辨能力,则可以采用叠后反演。如果需要通过纵、横波速度交会才能分辨岩性,则需要选择叠前反演;如果通过纵、横波速度交会仍不能区分岩性,则表明应用一般的弹性反演方法很难解决储层问题。

图 3 是 BD 地区的纵波阻抗统计直方图,从图上可以看出,煤层落在了左侧区域,砂泥岩落在了右侧区域,就是说纵波阻抗曲线能够把煤层与砂泥岩

区分开,即用叠后反演就能解决煤层分布问题。

图4为纵横波速度交会图,图中红色代表砂岩,蓝色代表泥岩,黑色代表煤层。分析后发现,在该区纵横波速度交会图上煤层和砂泥岩分布区明显不同,因此应用叠前反演方法可以解决煤层厚度问题。

(3)据测井曲线进行目的层标定 图5是b13井地震地质层位标定结果,从图上可知,煤层表现为低纵波阻抗,在相应的声波曲线上为高纵波时差,可见由测井曲线能明显地识别出来。

(4)应用 GeoEast 系统进行子波估算 由于该系统有多种求取子波方法,包括生成理论子波、井旁道提取地震子波、井震联合提取子波等功能。通过多口井子波叠合显示(图6)、分析,去掉异常子波后,即求取平均子波用于反演。

(5)应用 GeoEast 系统建立反演初始模型。该系统具备建立二维、三维初始模型的能力。由于该区断层不发育,笔者利用三个层位数据建立了初始构造模型,并在构造模型约束下,利用井曲线建立各种属性模型。

(6)应用 GeoEast 系统进行横波速度估算。鉴于该区横波测井资料比较少,如何估算合理的横波速度就成了至关重要的问题。GeoEast 系统提供了几种估算横波速度的方法,有 Castagna 的泥岩线公式、韩德华泥岩线公式、Smith 的趋势线公式、甘利灯拟合直线方程、李庆忠抛物线方程、Xu-White 模型测井约束反演估算横波等方法。此外,还可以通过已知井的纵波时差与横波时差交会(图7),拟合一公式,将其作为全区的转换公式,估算横波速度。图8是横波速度分析结果。

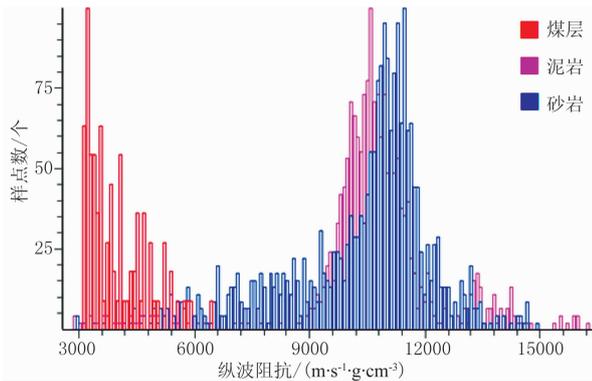


图3 BD纵波阻抗统计直方图

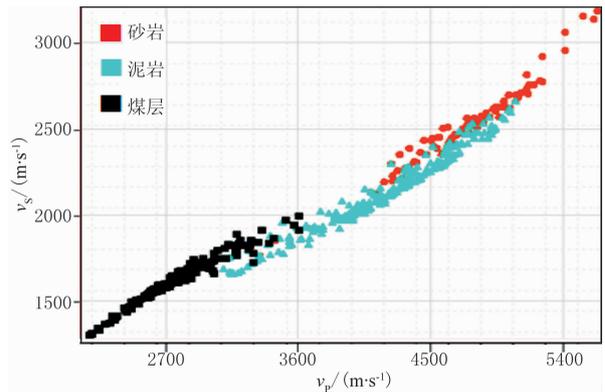


图4 纵波速度—横波速度交会图

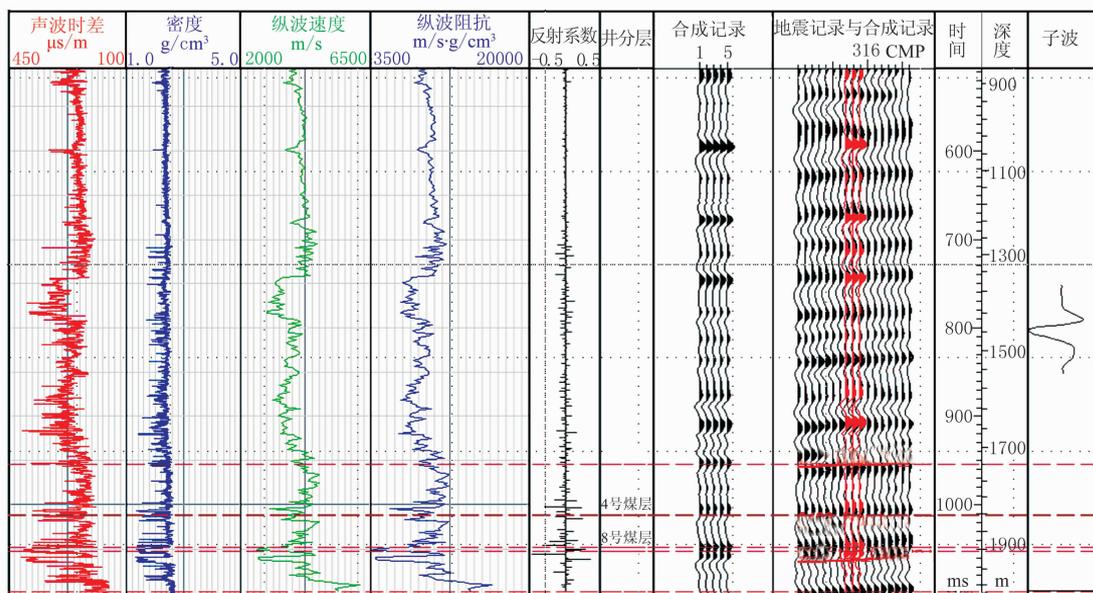


图5 b13井目的层标定结果

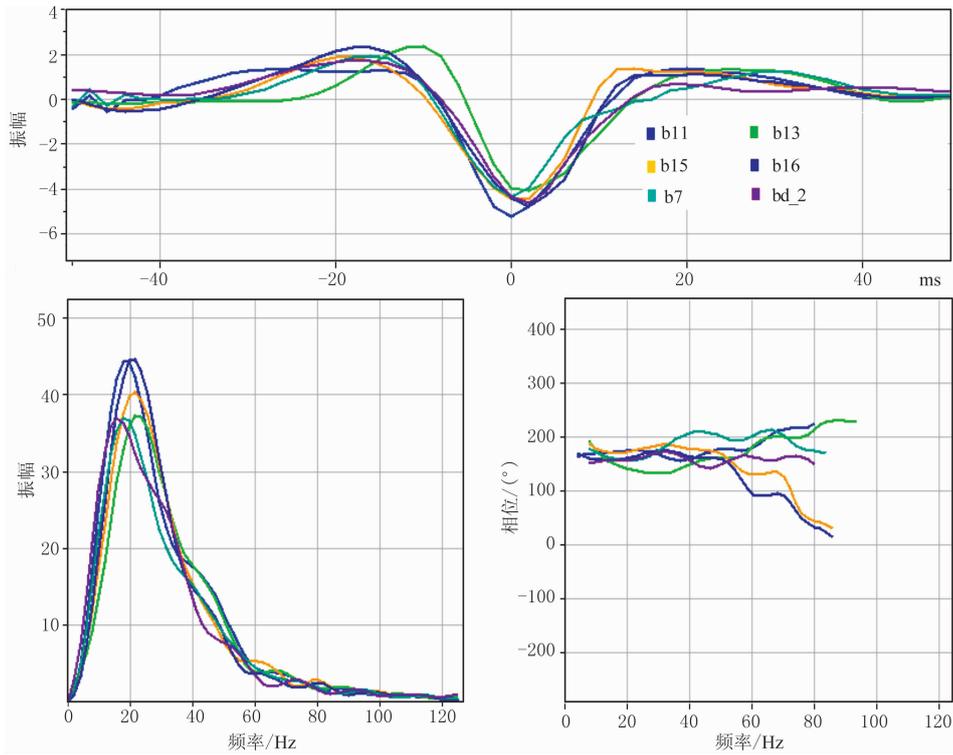


图 6 多口井子波叠合显示

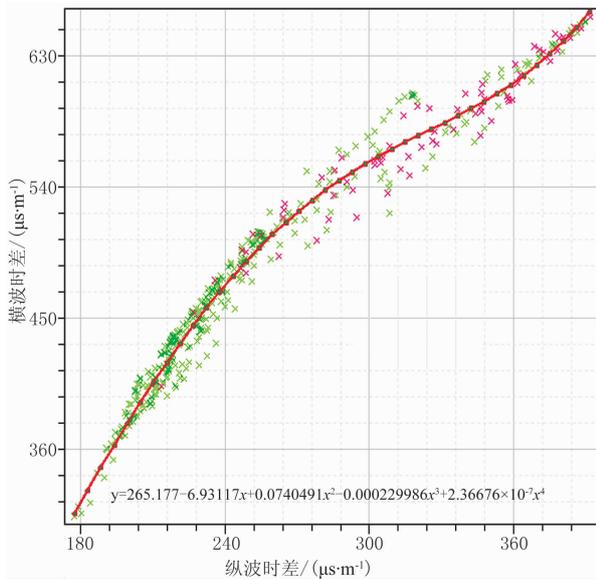


图 7 纵波时差—横波时差拟合曲线

图 8 中第四道,黑色曲线是经验公式估算的横波速度,红色曲线是拟合公式估算的横波速度,蓝色曲线是测量的横波速度。可以看出,拟合公式估算的横波速度与原始测量横波速度吻合得非常好,用该方法求得横波速度,能够提高反演精度。

以上 6 项关键技术是做好反演的基础,直接影响反演效果。

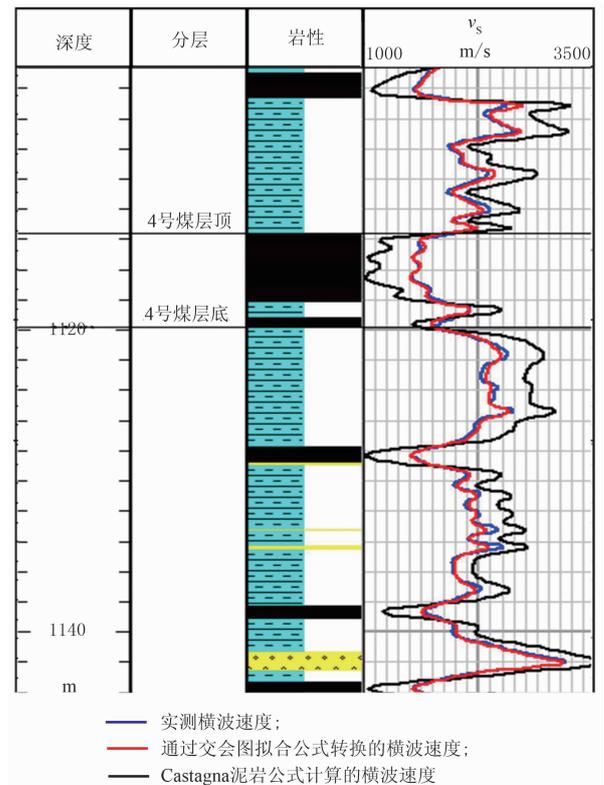


图 8 b16 横波速度分析结果

3.2 反演

分别应用宽带约束叠后反演、模拟退火叠后反

演、BP 神经网络叠后反演、稀疏脉冲叠后反演和叠前弹性参数反演技术进行反演。通过对比和分析反演结果与参数试验认为, BP 神经网络叠后反演和叠前弹性参数反演的应用效果较好, 下面对此重点介绍。

3.2.1 BP 神经网络叠后反演预测煤层分布范围

图 9 上是基于遗传算法的 BP 神经网络反演的纵波阻抗剖面, 图 9 下是叠前弹性参数反演的纵波阻抗剖面, 剖面中蓝色是低阻抗煤层, 可以看出两种

反演方法反演的煤层与井揭示的煤层吻合度非常高。图 10 为沿层提取的纵波阻抗信息, 其中红色代表低阻抗煤的位置。因此, 通过该方法可以预测煤层的平面展布, 且弹性参数反演与 BP 神经网络反演预测的煤层分布范围基本一致。

3.2.2 叠前弹性参数反演预测煤层厚度

图 11 是叠前弹性参数反演的纵、横波速度剖面, 剖面中蓝色代表低阻抗煤层。

通过纵、横波速度交会图分析(图12), 可刻画

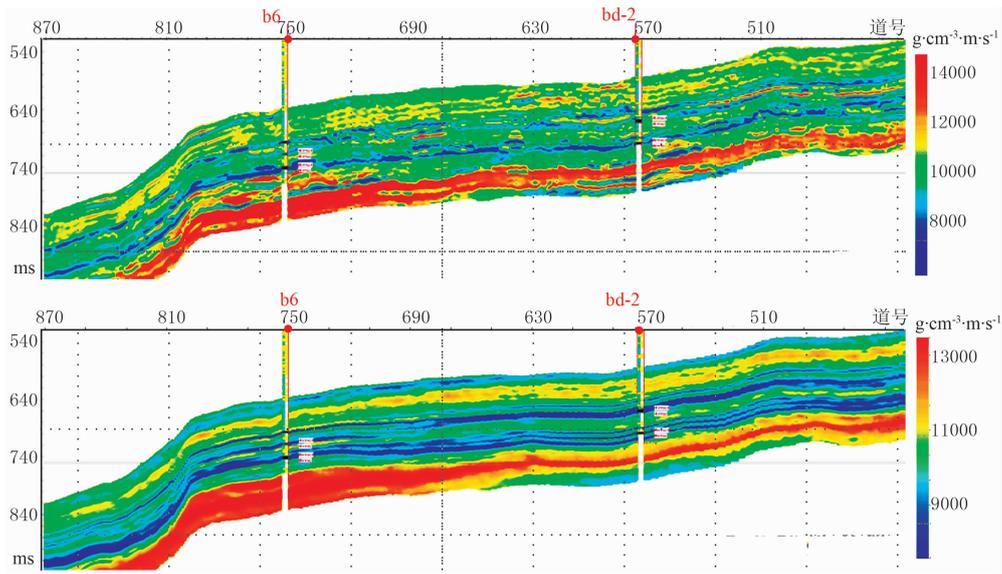


图 9 反演纵波阻抗剖面

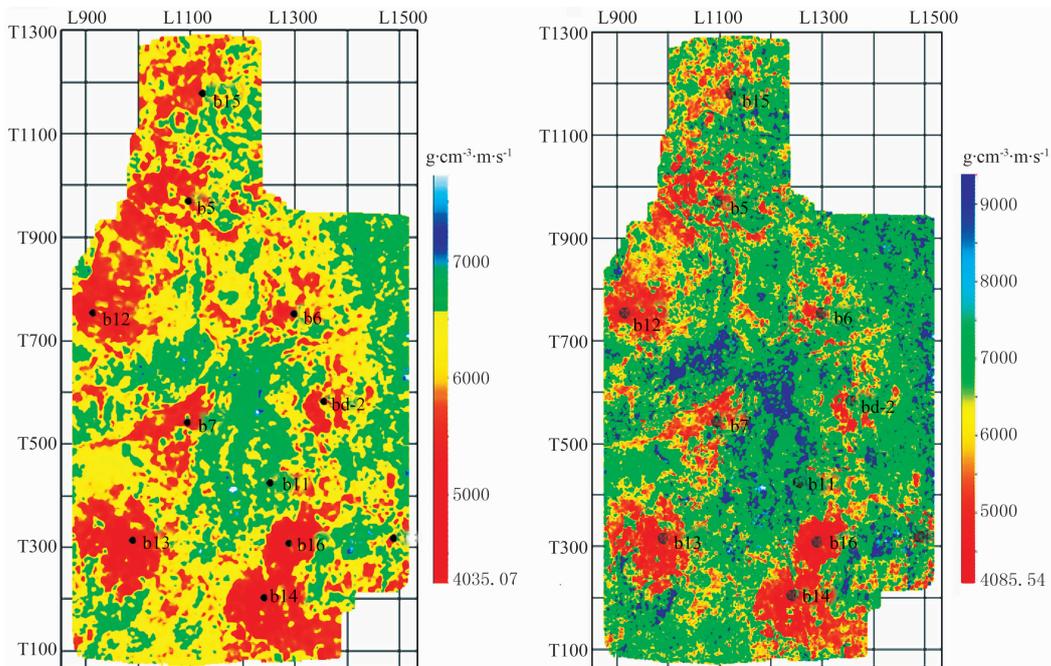


图 10 8+9 号煤层最小纵波阻抗(EI,左)8+9 号煤层最小纵波阻抗(BP,右)对比

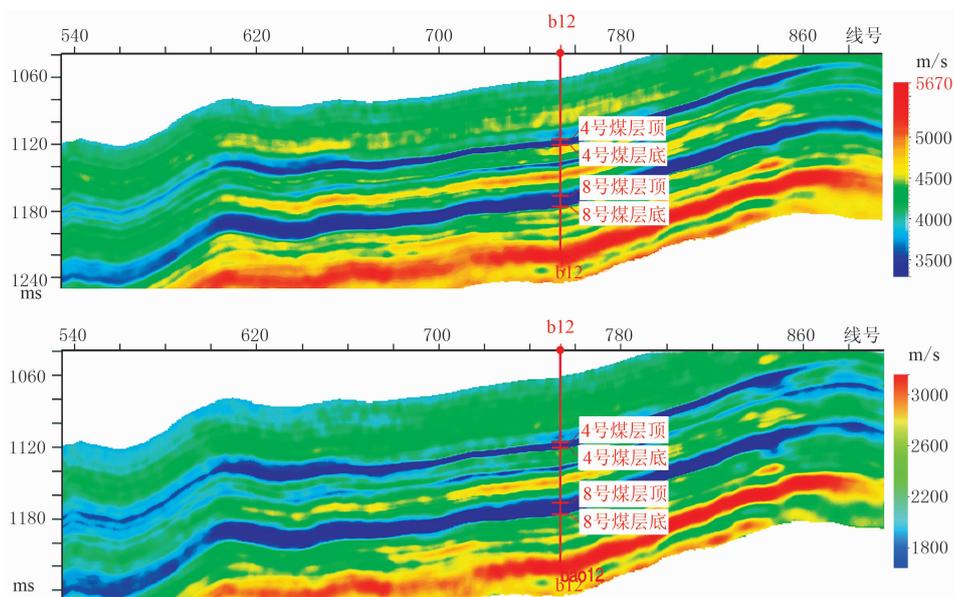


图 11 叠前弹性参数反演求取的纵(上)、横(下)波速度剖面

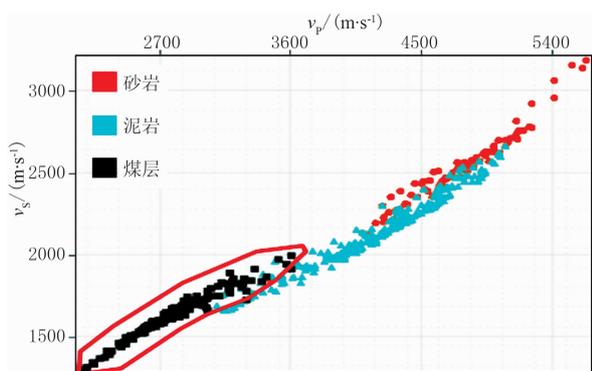


图 12 纵波—横波速度交会圈定的煤层范围

煤层厚度。图中红色点代表砂岩,蓝色点代表泥岩,黑色点代表煤岩,把代表煤层的点映射到剖面中(图 11),与煤层值相等的点则变为高亮显示,如图 13 中白色点就是煤层的位置和厚度。从而可以得到煤层厚度数据体。

这种方式预测的煤层厚度是否合理,可以通过钻井煤层厚度进行验证(图 14)。

从图 14 中可以看出,反演预测煤层厚度与钻井揭示煤层厚度吻合得非常好。说明该预测煤层厚度的方法是可靠的。

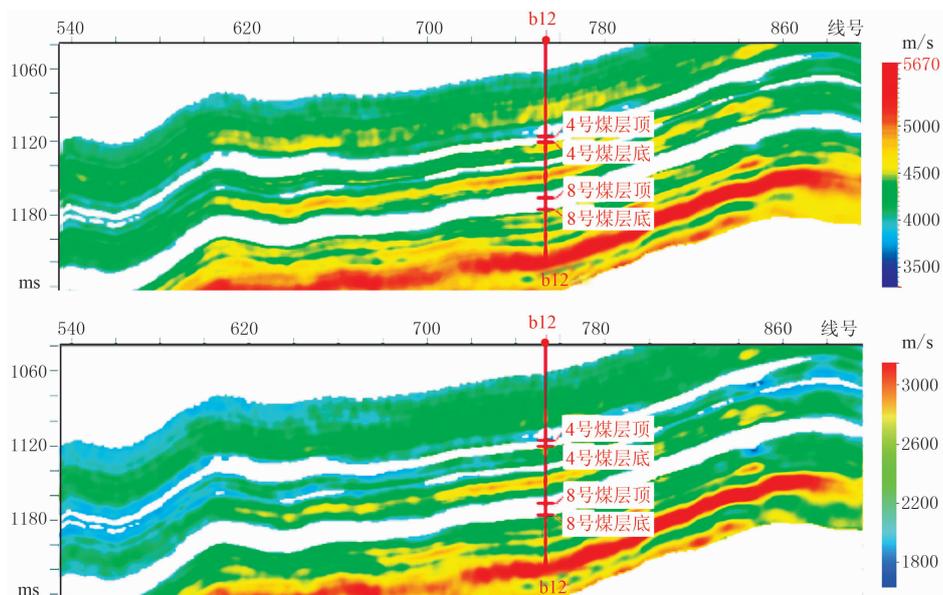


图 13 通过交会图求取的纵(上)、横(下)波速度剖面

由煤层厚度数据体沿层提取属性信息,可以得到煤层的厚度的平面分布图(图 15),最终可以求出煤层预测厚度及对井误差(表 1)。

从表 1 可以看出,厚度预测小于 1m 的吻合率大于 60%,因此这种预测煤层厚度的方法是可靠的。

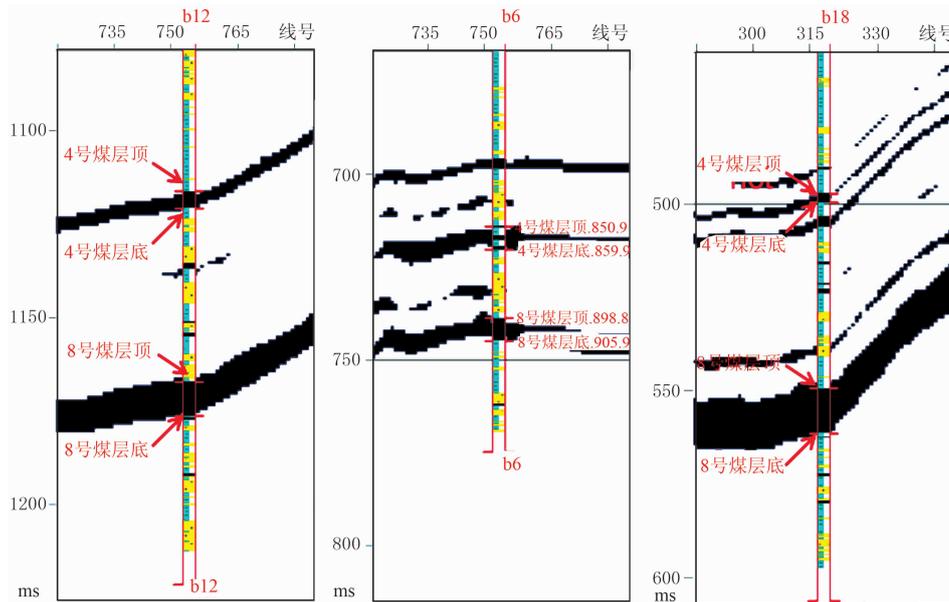


图 14 反演预测煤层厚度与钻井煤层厚度对比

左为 b12 井; 中为 b6 井; 右为 b18 井

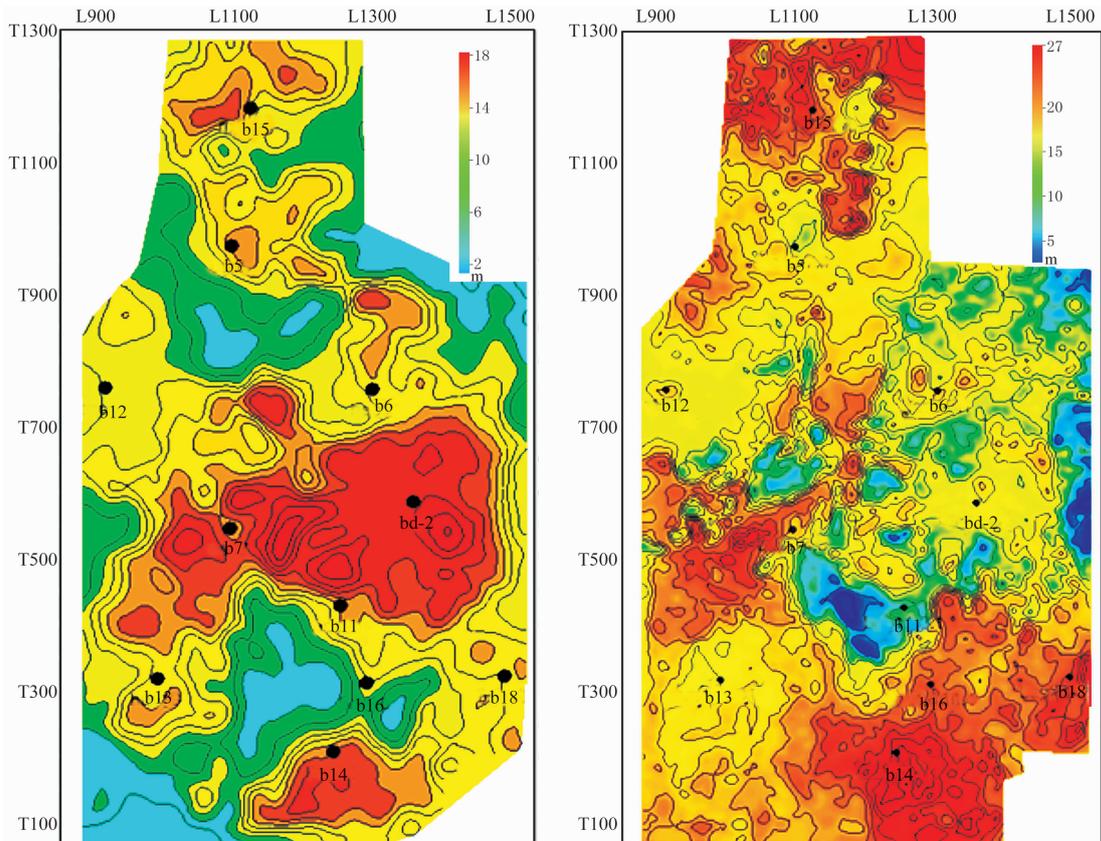


图 15 4+5 号煤层厚度(左)与 8+9 号煤层厚度(右)平面图

表 1 煤层预测厚度及对井误差

4+5 号煤层/m			
井位	煤层厚度	预测厚度	绝对误差
b11	6.7	7.5	0.8
b12	5.5	6.7	1.2
b13	5.75	7.2	1.45
b14	8.1	7.6	0.5
b15	7.0	6.3	0.7
b16	9.8	10.0	0.2
b18	9.15	11.3	2.15
b5-1	9.6	6.5	3.1
b5-2	6.4	5.6	0.8
b5	8.1	6.0	2.1
b6	7.7	7.8	0.1
b7	11.6	10.2	1.4
bd-2	9.1	10.0	0.9
8+9 号煤层/m			
井位	煤层厚度	预测厚度	绝对误差
b11	5.5	5.0	-0.5
b12	12.1	7.8	-4.3
b13	13.75	14.0	0.25
b14	9.2	9.5	0.3
b15	7.45	7.2	-0.25
b16	11.4	10.0	-1.4
b18	15.4	11.3	-4.1
b5	7.4	7.5	0.1
b6	7.1	5.3	-1.8
b7	4.3	5.0	0.7

4 认识与建议

本文用基于遗传算法的 BP 神经网络和叠前弹性参数反演预测了煤层的分布范围和厚度,通过上述分析,可以得出如下认识和结论:

(1)在该区煤层反演的应用中进一步证明 GeoEast 系统的基于遗传算法的 BP 神经网络反演和叠

前弹性参数反演在预测煤层分布范围方面具有一致性;

(2)利用 GeoEast 系统叠前弹性参数反演可以较准确地预测煤层厚度,与钻井揭示的煤层厚度吻合较好;

(3)横波速度的估算是叠前弹性参数反演的关键。

参考文献

- [1] 王权锋,王元君,郭科等. 多井约束地震反演技术在储集层预测中的应用. 新疆石油地质,2008,29(3):367-369.
- [2] White L and Castagna J. Stochastic fluid modulus inversion. Geophysics,2002,67(6):1835-1864.
- [3] 孙思敏,彭仕宓. 地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中的应用. 西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(1):41-44,48.
Sun Simin, Peng Shimi. Geostatistics inversion method and its application in the prediction of thin reservoirs. Xi'an University of Petroleum Journals (Natural Science),2007,22(1):41-44,48.
- [4] 黄捍东,贺振华,刘洪昌. 测井—构造约束地震资料目标反演. 石油地球物理勘探,1999,34(5):595-600.
Huang Handong, He Zhenhua and Liu Hongchang. Target inversion of seismic data under the restrictions of logging and structural data. OGP,1999,34(5):595-600.
- [5] 孟宪军. 复杂岩性储层约束地震反演技术. 山东东营:中国石油大学出版社,2006.

(本文编辑:冯杏芝)

作者简介



王桂英 工程师,1973 年生;1997 年毕业于大庆石油学院测井专业,获学士学位;一直在东方地球物理公司物探技术研究中心从事 GeoEast 软件开发及技术支持工作。