

# 地震测井联合物性参数反演在煤炭岩性勘探中的应用

王秀东<sup>1,2</sup>, 施龙青<sup>1</sup>, 陈清静<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510;

2. 山东省煤田地质局物探测量队, 山东 泰安 271021)

**摘要:** 基于二维波动方程的物性参数联合反演方法, 以常规地震勘探资料为基础、地震地质解释的测井资料为约束, 采用线性、非线性反演、神经网络等方法进行地层物性参数预测。其方法保证了反演的成功进行和成果的可靠性, 其高分辨率的岩性参数反演成果可有效地用于煤田岩性地震勘探。

**关键词:** 地震; 测井; 反演; 物性参数; 岩性勘探

中图分类号: P31 文献标识码: A

## 0 引言

煤矿的建设对采区设计、工作面的布设、高产高效安全生产地质保障系统提出了更高的要求, 特别是要求地震技术能识别地层物性参数, 进行煤层顶底板岩性解释, 地层含隔水性划分, 赋水性解释, 高精度的构造、煤层宏观结构解释, 即进入岩性地震勘探阶段。

在条件好的情况下, 地震勘探数据的主频可达到 100Hz 左右, 其视周期约为 10ms。由于地震波为子波与地层反射系数序列的褶积, 再加上大地滤波作用, 实测到的地震波是多相位的, 其延续相位的长短还取决于处理中反褶积的效果, 但无论如何也得不到与地层反射系数序列一一对应的地震波同相轴, 甚至与小于 1/4 地震波长相对应的地震资料, 其相位、振幅、频率与岩性参数也难以找到直接的对应关系。受埋深、层厚及采集、处理系统的影响, 检测 3m 小断层所产生的小于 2ms 时差是困难的。因而包括三维的常规地震方法, 通过提高频率来提高分辨率是有限度的, 虽然通过属性分析的方法, 可把断层识别的能力提高到 3~5m, 但仍然无法满足解释煤层宏观结构对薄层分辨的要求, 也无法解释岩性及富水性、含隔水层划分。

现行地震技术可求出相应的波阻抗参数, 但分辨率受采集系统限制, 难以实现地质任务对地层纵横向分辨率的要求。

地震、测井资料均是物探手段得到的物性反映, 尽管产生的物理机制不同, 但两者具有分辨率和资料分布的互补性。寻求两种物探资料的联系, 综合利用地震、测井资料的互补特性, 采用地震测井联合反演技术无疑是实现岩性地震勘探目标的有效方法。

## 1 测井—地震联合反演技术原理<sup>[1]</sup>

测井数据的垂向分辨率很高, 所计算的波阻抗曲线中含有丰富的高频成分, 但它们既不对应地震反射界面, 也不对应地层界面。因此, 井参数计算的曲线必须在完成地震—地质交互解释后, 才能作为约束条件参加地震反演。对薄互层而言, 如果没有可靠的井中薄互层解释, 就谈不上薄互层反演。同理, 如果没有井参数的有效约束, 要想从波长为 30~40m 左右的地震记录中直接反演 2~5m 的薄互层, 可能性是很小的。因此, 有效利用二者的互补性, 将井中数据的高分辨率拓展到地震数据中, 以提高地层参数的分辨率, 是地震反演的有效途径。

### 1.1 线性反演井间地层形态

首先对叠前道集或叠后时间剖面进行小波去噪、频带拓宽处理, 采用 2.5 维 Bo<sub>m</sub> 反散射线性反演的方法, 将井间地层形态的细微变化搞清楚, 得到反映地下层速度界面位置分布的反射系数深度剖面。由于原始地震数据缺乏振幅真值, 所反演的反射系数值是不可靠的, 层速度界面位置也是近似的,

\* 收稿日期: 2008-02-10

作者简介: 王秀东(1967—), 男(汉族), 山东日照人, 山东省煤田地质局物探测量队应用技术研究员, 山东科技大学博士研究生, 从事煤田物探的研究与应用工作。

它可作为井间地层反射界面位置分布的信息,用作非线性反演过程中附加的信息,以控制井间地层几何形态的变化。

线性反演必须从地面开始反演到目的层深度,所以需全部地震数据参加反演。

反散射线性反演成果等效于叠前或叠后深度偏移剖面,也可以作为偏移剖面使用。它的可靠程度取决于先验知识给定的猜想速度场模型。

在反散射线性反演所得成果的基础上,进行小波分析等提高分辨率与信噪比的前处理,以提高非线性波动方程反演过程中对原始地震数据的承受能力,在此基础上将线性反演得到的近似反射系数剖面,作为井间层速度界面的附加信息,约束非线性反演过程中地层几何形态纵横向的细微变化。

## 1.2 非线性反演波阻抗与反射系数参数

联合反演的第二步是在井参数对层标定的基础上,求取与地震波对应的准确的波阻抗与反射系数参数。采用的方法是非线性波动方程系数反演的最优拟合牛顿法。对多峰值目标泛函采用先验知识多重约束,以附加信息参加非线性反演过程,以确保参数反演的可靠实现。

进行非线性反演的二维地震传播模型可用如下波动方程描述:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(x, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = g(t) \delta(z) \quad (1)$$

$$\text{边界条件: } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=X} = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=Z} = 0 \quad (3)$$

$$\text{初始条件: } u|_{t=0} = \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

其中:  $u = u(x, z, t)$  为质点位移场,  $v(x, z)$  为速度场,  $g(t)$  为源函数,  $\delta(z)$  为狄拉克  $\delta$  函数。

以地面上的地震数据  $u(x, 0, t) = f(x, t)$  作为条件,测井速度  $v(x_0, z)$  作为约束,点  $[x_0, 0]$  对应于井位置,由  $f(x, t)$  来反演速度场。

以附加信息形式参加反演过程的先验知识中,主要有经对层与参数标定后的测井声阻抗参数、线性反演得到的近似层速度界面参数、地震地质解释后的宏观地层层位参数等。在多种约束信息中,按模糊叠合原则,根据其与原数据的吻合程度决定约束作用的强弱,在人工智能干预下自动完成,以防止假象产生。

非线性反演可以仅对有兴趣的目的层段进行反演,故仅需相对应的地震数据参加反演。

## 1.3 求取井中及井间储集地层的物性参数

首先由用户提供声测井、密度测井、电阻率、自然电位、中子伽马、自然伽马、粒度中值等测井参数,以及相应解释的孔隙度、渗透率、饱和度等物性参数,应用神经网络分析,计算出井中的孔隙度、渗透率、饱和度参数时间序列。仍以神经网络分析为主再求取井间各 CDP 号位置地震时间序列的相应储层物性参数,实现方法与井中类似。其具体步骤为:

- (1) 计算井中参数。
- (2) 地震资料和井资料的层位对比。
- (3) 地震资料特征参数的提取。
- (4) 学习和预测。

经过上述处理和计算后,将地震资料特征参数与井中参数一一对应,得到样本集合  $\{(x_{(j)}, y_{(j)}), j = 1, 2, 3, 4, \dots, r\}$ , 其中  $x_{(j)}$  为输入,  $y_{(j)}$  为输出。通过学习算法可得到 CUSI (Complete Utilization of Samples Information) 神经元模型输入地震特征参数,选择针对性的地震特征参数,通过神经元完成参数的横向预测。

在输入信息中必须有非线性反演的高分辨率系数、相对波阻抗、绝对波阻抗以及线性反演的反映层速度界面的反射系数剖面。网络的性能可以影响效果但不是决定性的,反演效果决定于输入的信息。从地震记录中提取的瞬时信息、统计信息等沿层地震特性有助于改进所反演物性参数剖面的质量。

## 2 联合反演的优越性

地震波参数反演方法要求地震波数据有振幅真值,波传播过程的地震信号要完整,波谱要足够宽,已知信息的提供要充分且无有色噪声。现行地震采集系统记录的地震波仅响应中频信息及相应的振幅真值的不完整及严重缺失,无法满足上述要求。联合反演充分利用先验地质知识作为附加信息参加反演,克服了地震资料已知信息严重不足缺憾,保证了参数反演的成功实现。采用小波奇异点分析处理解决地震波的有限带宽问题,以防止地震波频率成分的缺失导致反演参数值的严重失真。

测井方法的物理机制与井间地震记录的机制是不同的,两者的信息不能直接对比。在通过以上方法提高地震资料的垂向分辨率的基础上,通过同质聚类降低井资料的分辨率,使两者建立合理的联系,作为层位数据约束,有效地用于地震资料反演。正是因为有了这种约束才使地震资料的分辨率得到提高,但提高的程度显然达不到测井记录的垂向几厘

米的分辨力,这不仅是因为测井资料为了与地震资料对比已经过低分辨处理,还因为目前的地震采集系统对 1m 以下的薄层反射是无法记录的。

联合反演克服了其它方法对求取子波的过分依赖。其线性反演近似的反射系数、层速度界面不是最终的反演结果,而仅是进行非线性反演的附加信息,因此也不存在地质模型猜想可靠性的限制。在多种约束下,根据与原始地震数据吻合程度按模糊叠合原则非线性反演的反射系数、绝对波阻抗模型是可靠的。

### 3 物性参数反演的应用

在某矿区进行了高分辨三维地震勘探,取得了高信噪比地震资料。利用井旁合成地震记录,对比地震时间剖面的反射波,可大致确定这几组反射波所代表的层位,但是难以准确描述地震波同相轴与地层特别是其界面及薄层厚度的对应关系,更难以

进行岩性解释。为此采用以下流程进行了物性参数反演(图 1):

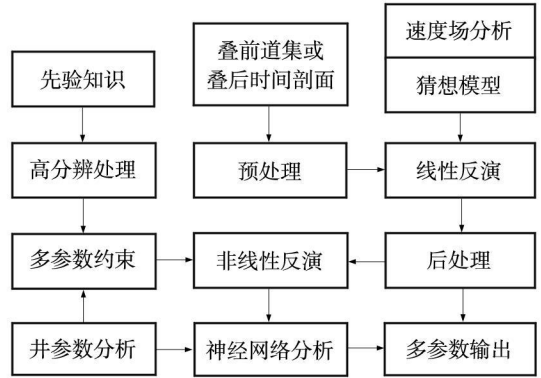


图 1 地震测井联合反演流程图

图 2 为利用测井资料制作的合成地震记录,孔中上部低速低密度对应的薄煤层厚度小于  $1/4\lambda$ , 高速高密度对应的夹层厚度介于  $1/4\lambda$  与  $\lambda$  之间,下部厚煤层厚度大于地震波长  $\lambda$ 。

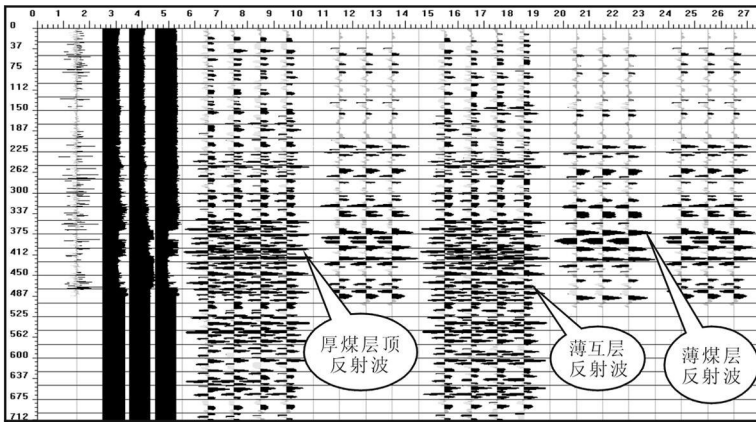


图 2 煤层中有厚夹层的合成地震记录图

当煤层厚度小于  $1/4\lambda$  时煤层顶、底反射波无法分开,形成一组能量强、连续性较好的复合反射波,由两个正相位和一个负相位组成,煤层厚度与反射波能量、频率、相位等动力学参数有关<sup>[2]</sup>。当煤层厚度大于地震波传播周期( $\lambda$ )时,煤层顶、底反射波完全分开,顶界面和底界面分别形成能量较强、信噪比较高的 Tb1、Tb2 反射波,这时的反射波能量反映了煤层与顶底板界面的反射系数,据煤层反射波顶、底时差可以解释煤层厚度。当煤层厚度介于  $1/4\lambda$  与  $\lambda$  之间时,煤层反射波由多个相位组成,反射波与地质层位无独立的对应关系,因而无法利用地震剖面数据进行煤层厚度解释。

抗剖面。可以看出 ZKW0301、ZKW0303、ZKW0302、ZKW0306 号孔的单煤层的低波阻抗反应清晰,波阻抗的突变点包络线即为煤层的顶底界面,以该孔测井数据所作的合成记录与井旁时间剖面 and 测井区曲线对应关系明确,沿时间剖面煤层向大号逐渐变薄。这为结构单一煤层的解释提供了依据。同样在 ZKW0304 部位反演的物性参数剖面显示煤层中部存在夹层,这与图 3B 中的钻探资料是吻合的(钻孔柱状为部分放大)。

利用物性参数剖面进行煤层宏观结构解释分辨率高,直观且具有方法上的连续性。不像上面分析的不同厚度采用的方法不一,且存在无法解释的盲区。

图 3A 是某区利用地震测井资料联合反演的波阻

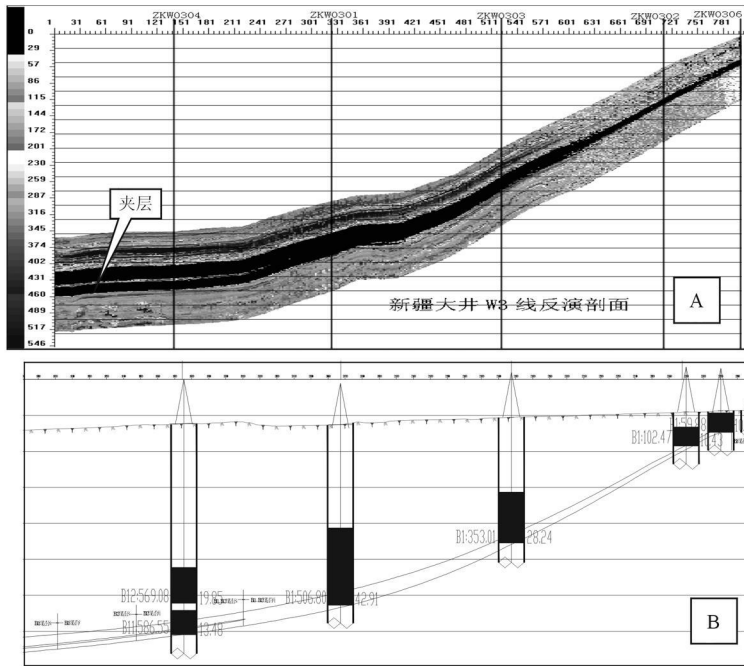


图3 波阻抗反演剖面及对应的地质剖面图

另外,对煤系地层的上覆第四系地层地震反射波资料进行物性参数反演,取得的波阻抗剖面提供了整条剖面连续的岩性信息,可分析粘土层、砂层的空间分布情况,划分含、隔水层,对提高煤层的开采上限和环保具有重要意义。

#### 4 结论

反演要求的原始数据尽可能为高保真的全波场,不作反褶积及去多次波处理,这与常规处理是有

差别的。

可靠的井约束是联合反演物性参数成功进行及有效提高分辨率的保证<sup>[3]</sup>。物性参数联合反演为应用地震资料进一步进行岩性解释提供了有力的目标处理手段。

反演参数剖面的高分辨率可最大限度地满足岩性、赋水性、煤层宏观结构、岩浆岩侵入、小构造等地质、水文解释的需要。

#### 参考文献:

- [1] 范祯祥, 郑仙种. 地震波的参数反演[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
- [2] 崔若飞, 等. 利用地震资料进行煤层厚度解释预测[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 54.
- [3] 张明振, 等. 对测井约束地震波阻抗反演的理解与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 699-702.

## Application of inversion for physical parameters with seismic and logging data in coal lithology exploration

WANG Xiu-dong<sup>1,2</sup>, SHI Long-qing<sup>1</sup>, CHEN Qing-jing<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong Province, China;

2. Physical Prospecting & Survey Team, Shandong Provincial Bureau of Coal Geology, Taian 271021, Shandong Province, China)

**Abstract:** The method to inverse the physical parameters with seismic and logging data that based on 2-D wave equation can be used in the prediction for physical parameters of stratum. It combines the linear, nonlinear and NN inversion under the restriction of logging data. It assures the reliability of inversion and its results can be used in seismic exploration of coalfield.

**Key words:** earthquake; logging; inversion; physical parameter; lithology exploration