

小断层综合解释技术及其应用

周赏* 王永莉 韩天宝 李楠 史德莲
成鹏 方海飞 张颖 马意红

(东方地球物理公司研究院地质研究中心,河北涿州 072751)

周赏,王永莉,韩天宝,李楠,史德莲,成鹏,方海飞,张颖,马意红. 小断层综合解释技术及其应用. 石油地球物理勘探,2012,47(增刊1):50~54

摘要 用于断层解释的地震属性有相干类、谱分解类、曲率体属性等多种。综合利用这些地震属性的时间切片与地震剖面,可提高小断层的解释精度。近年涌现的图形处理技术将表征断层的地震属性进行图形处理,增强了断层体属性纵向上的连续性,同时压制与地震反射同相轴相关的横向信息,并将断层属性从围岩中提取出来,嵌入到地震数据体中,能够更加准确地识别断点位置,进一步提高小断层的解释精度。

关键词 地质综合解释 小断层 图形处理技术 构造导向滤波 曲率体属性 体属性融合

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 概述

断裂是控制含油气盆地油气生成、运移、聚集、保存和分布的重要因素。中国东部油区多为断陷盆地,不同级别的断裂极为发育。规模较大的断层主要控制含油气断块的构造趋势、断块的产状和形状;小断层进一步分割含油气断块,并使含油气断块的油、气、水关系更加复杂,决定构造的规模和圈闭的有效性,直接影响井位设计和油田开发方案的制定。因此,小断层的精细解释对于勘探目标的评价、落实具有重要意义。

小断层的形成与控制它的规模较大的断层的活动及其所产生的局部应力场有密切关系。当这些局部应力场达到岩石的抗张、抗剪强度时,岩层的连续性被破坏,即形成小断层。小断层在空间上具有纵向断距小、断点不干脆、平面延伸短的特点,因此具有较强隐蔽性,在地震剖面上难以识别。

在地震剖面上,不同规模的小断层有多种表现形式。通过正演模型的对比和分析可知:断距大于10m的断层地震反射同相轴有明显的错断;断距为3~5m的断层表现为同相轴的扭曲、相位突变及振

幅的强、弱变化;断距小于3m的断层仅表现为地震反射同相轴的轻微挠曲(图1)。

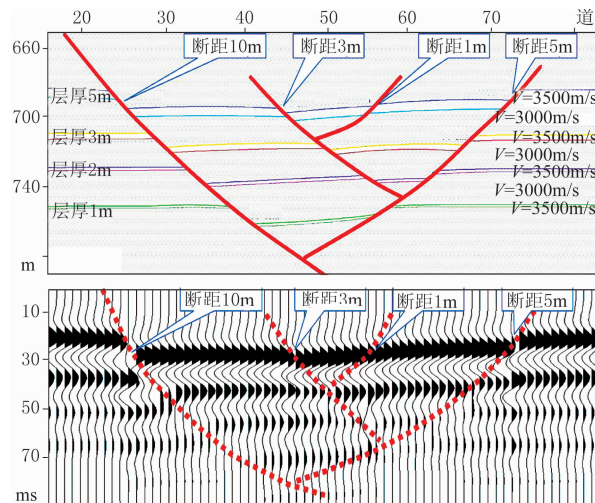


图1 小断层模型(上)与正演地震响应(下)

2 小断层综合解释技术

近年来,随着地震解释技术的发展,人们对小断层的识别能力逐渐增强。较早使用的棱边检测、沿层相干技术等面属性均依赖于解释层位,受解释

* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院地质研究中心,072751。Email:zhoushang2@sina.com

本文于2011年6月11日收到,最终修改稿于2012年11月20日收到。

人员主观因素影响较大,同时还屏蔽了地震数据本身的很多重要信息。对地震数据体进行数学运算的体属性开发是地震解释技术的一次飞跃。体属性不依赖解释层位,客观展示地震资料蕴含的地质信息,在隐蔽油气藏识别与评价中占据越来越重要的地位。

在以往常规地震资料解释中,地震属性体与地震数据体是分离的,应用交互解释对断层识别精度有一定影响,也给地震解释带来某些不便。近年发展起来的基于图形处理的断层解释技术是地震体属性解释的有益补充,能够使小断层解释更加直观、精确,从而进一步完善了断层综合解释技术。

2.1 小断层综合解释技术流程

小断层综合解释技术主要包括如下步骤:

(1)滤波处理 通常滤波处理主要用于提高地震资料信噪比,高信噪比地震数据体是断层属性提取的基础。在优势频带滤波、构造导向滤波等解释性处理的基础上,可得到信噪比较高的地震数据。

(2)断层属性提取 敏感的地震体属性是小断层识别的关键。在信噪比较高的地震数据体上提取表征断层的地震属性体,如相干体、倾角体、曲率体等。

(3)图形增强处理 利用图形处理技术对表征断层的纵向属性进行图形增强,同时压制可能与地震反射同相轴相关的横向信息以及其他尺度较小的背景噪声。

(4)断层探测 在图形增强处理后的断层属性数据体中将围岩值置为 0,断层属性值置为 1,使断层属性从围岩中剥离出来。

(5)断层属性体与地震数据体融合 将表征断层的体属性嵌入地震数据体中,增加了断层解释的直观性,使断层(尤其是小断层)解释更加直观、精细、快速。

2.2 构造导向滤波

小断层的识别精度受地震资料品质的影响。不同信噪比和频带宽度的地震资料对小断层的识别能力差异较大,得到一个高信噪比的“干净”地震数据是小断层识别的基础。

在一般的图像处理过程中,滤波是沿标准的三维网格即 x 、 y 、 z 方向进行的。但在地震数据处理过程中,尤其是在地层倾角较大的地区,基于规则网格的滤波可能反映了地震子波的变化。因此考虑地

震数据体的倾向性,并沿这种方向进行滤波则更为合理。

构造导向滤波的原理是通过分析沿构造方向间地震信号的变化,达到衰减白噪声和构造性噪声的目的,主要用于去除地震数据图形中的噪声,提高信噪比,同时能够保留小规模断层和有地质意义的振幅变化。实现过程一般是首先产生倾角和方位角两个转换数据体,用这两个数据体控制滤波的平均值和中值以衰减地震数据中的噪声。

经构造导向滤波处理后,地震剖面的信噪比得到明显提高,同时原始地震剖面上表现为挠曲的小断层在滤波后的剖面上表现为干脆的断点,断层特征更加明显(图 2)。该数据体可直接用于小断层精细解释,也是断层属性体提取的基础。

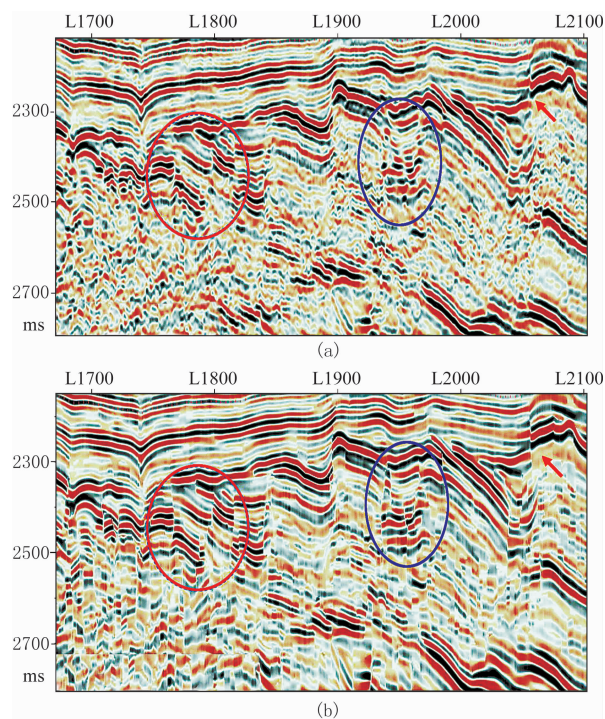


图 2 构造导向滤波效果比较

(a)原始地震数据体;(b)构造导向滤波数据体

需要注意的是,对于一些特殊地质现象,尤其是与喀斯特地貌、滑塌沉积、热液交代的白云化等有关的混杂堆积结构,应慎用构造导向滤波,否则滤波后会改变这些特殊的沉积特征,使这些现象更加难以识别。

2.3 属性体提取

当前用于断层识别的体属性主要包括倾角数据体、相干体、曲率体等。相干体属性是地震数据体的

一阶导数属性,主要用于对地震数据的去同存异,以突出不相干的数据。算法包括特征值相干、相似性相干、边缘检测等。在经构造导向滤波处理后的地震数据体上提取相干属性体,得到的相干属性体噪声较小,断层比由原始地震数据直接得到的相干属性更加明显清晰。

曲率是曲线的一种二维特征,它描述曲线上某点的弯曲程度。对于曲线上的一个特定的点,曲率定义为沿曲线方向的变化率。数学上有两种定义方法:①曲率是曲率半径的倒数;②以导数形式定义为

$$K = \frac{d^2 y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}}$$

通常二阶导数被用于曲率的直接度量,因为公式中没有一次项和常数项信息,所以仅在倾角为0的特定条件下,这个定义才是严格正确的。

在应用曲率属性技术初期,通常沿解释后的层面提取曲率平面属性,层位经插值、平滑处理后,因滤波和二次项的近似作用,用于曲率计算的层位实际是原始层位的平滑结果。这种层位平滑处理对断面陡产状也产生了平滑作用。就是说曲率算法均是基于平滑过的连续界面(图3)进行的。于是,在正断层的上升盘出现最大正曲率,在下降盘出现最大负曲率,中间的0值点就是断面的中点。

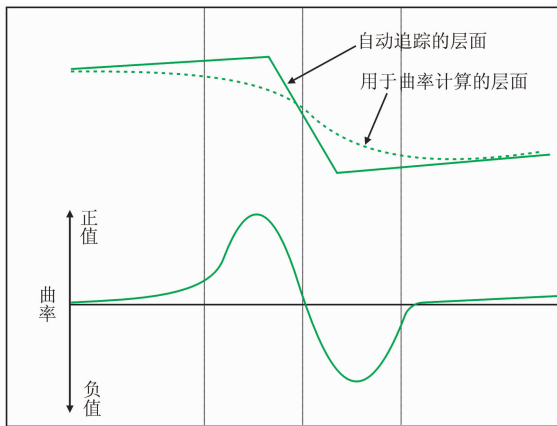


图3 曲率属性识别断层图解

在三维空间中,一条曲线可以用一个平面切割界面构成。因此在界面上的任一点会有无数个曲率值,最有用的一组是由正交平面定义的曲率,叫法线曲率(Normal curvatures)。在无限个法线曲率中,绝对值最大的叫最大曲率(K_{max}),而与之正交的叫最小曲率(K_{min}),这两个曲率被称为主曲率(Princi-

pal curvatures)。由主曲率组合可得到不同的曲率属性,用于识别不同的线性特征、局部形状等大量信息。最正值的曲率为最正曲率(K_{pos}),最负值的曲率为最负曲率(K_{neg})。这两种曲率突出了边界,主要用于显示断层。根据曲率属性的计算公式,最负曲率用于识别正断层时,断层线位置应向上升盘方向偏移;最正曲率则相反,断层线位置应向下降盘方向偏移。

基于平滑后连续界面的曲率属性对在地震剖面上仅表现为挠曲的小断层有较好的表征。

由于算法的特点,相干体和曲率体对剖面上表现为不同形态断层的识别能力有差异。断面表现为挠曲和微幅度扭曲的断层在曲率属性图上易分辨,但在相干属性图上难以分辨;断层表现为明显的同相轴错断时,断层两侧地层没有挠曲形变,则在曲率体上不清晰,而在相干体上可清晰识别。

2.4 断层图形增强技术

需要注意的是,曲率属性是一种混沌属性,适合在时间切片上识别断层,而不适合在剖面上解释断层。针对断层识别的图形处理技术使地震属性在三维空间的解释性得到进一步增强。

图形处理技术是在优化各类体属性算法的基础上,以图形为处理对象,在断层识别的各个环节更加突出断点的微小变化。在处理过程中,通过图形增强提高纵向上表征断层的图形连续性,同时压制平面上与地震反射同相轴相关的图形,使表征断层的属性更加清晰;再通过断层探测将断层从围岩中剥离出来,将其值置为1,同时将围岩置为0,以更好地突出断层,得到断层的空间展布信息。结合虚拟现实技术,可在三维空间中观察、分析研究断层展布规律。

最后将获得的断层属性体嵌入到地震数据体中,得到带有断层信息的地震数据体,以便更加直观、精确地解释断层。

2.5 小断层识别效果分析

在图4中,将相干属性体经图形处理后与地震数据体融合,得到含有断层信息的地震数据体。对于剖面上表现为同相轴明显错断、同相轴挠曲变形以及上、下盘同相轴数量变化等形式的断点都能有效识别。对于反射轴没有明显变化的断层,经图形增强处理后,可根据上下地层断点的位置将断点识别出来,增强了断层纵向上的连续性。

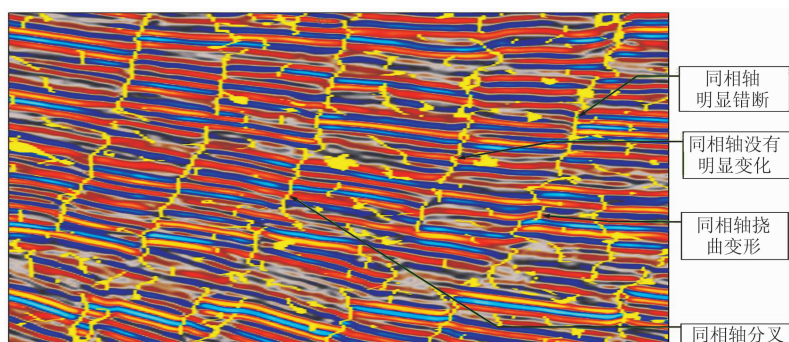


图 4 相干属性与地震数据融合体剖面

3 应用实例

冀中拗陷的各个凹陷普遍发育规模较大的缓坡带,占整个凹陷面积的 40% 以上,如霸县凹陷的文安斜坡、饶阳凹陷的蠡县斜坡等。缓坡带是形成“构造+岩性”油藏的有利地区,而断层既是圈闭形成侧向封挡的重要因素,又是油气运移的主要通道。继承性的缓坡带一般较稳定,但小断层比较发育,因此小断层识别成为精细构造解释和储层研究的重要内容。

高 9 井区位于饶阳凹陷蠡县斜坡带,以“构造+岩性”油藏为主。该区的主力生油层位是沙一下特殊岩性段,沙一段尾砂岩及以下地层成藏需要有顺向断层沟通油源。同时该区的储层为砂泥岩互层中

的薄砂层,要依靠断层形成侧向封挡。但是蠡县斜坡是继承性发育的斜坡带,构造运动较弱,断裂不发育。而古近系断裂体系主要受基底古构造背景控制,在此基础上发育继承性小断层。这类小断层纵向断距小,在地震剖面上没有明显的断点,仅形成幅度微小的挠曲,断点位置难以落实;它们在平面上延伸短,识别困难(图 5)。

曲率属性对在 seismic 剖面上地震反射同相轴表现为挠曲的小断层有较好的识别能力。首先对高 9 井区高分辨率处理后的地震数据进行构造导向滤波处理;在此基础上提取负曲率属性,再对负曲率属性进行图形增强,使负曲率属性在纵向上更加连续;最后将负曲率属性与地震数据体融合,得到带曲率属性信息的地震数据体(图 6)。

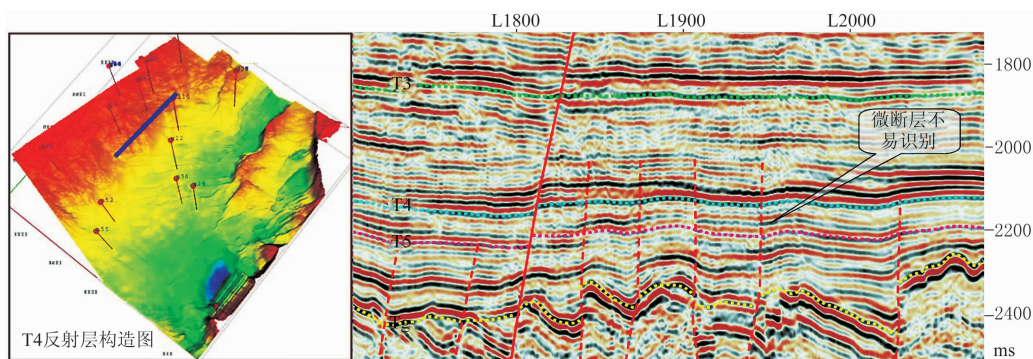


图 5 蠡县斜坡带空间位置(左)与典型剖面(右)

从断层属性融合体剖面可看到:负曲率属性对于表现为负向挠曲的小断层识别效果较好;经断层属性图形增强处理后,断层的纵向连续性得到增强,从而提高了小断层在剖面上的可识别性。

从时间切片上可看到:在低幅度斜坡背景上,地震反射同相轴存在微幅度挠曲,转折部位即为小断层发育位置,符合该区的地质特点。工区北部的地

震反射同相轴有轻微扭动,反映在微幅度挠曲的两翼,发育一组受基底古构造控制的北北东向隐伏断层。工区南部受后期拉张应力作用,在基底古背景上发育一组北北西向断层。这两组断层是该区发育的沙一下段滩坝砂储层的油源断层,并控制了圈闭的规模。应用融合后的数据体进行立体构造解释,提高了断层解释的客观性和精细程度。

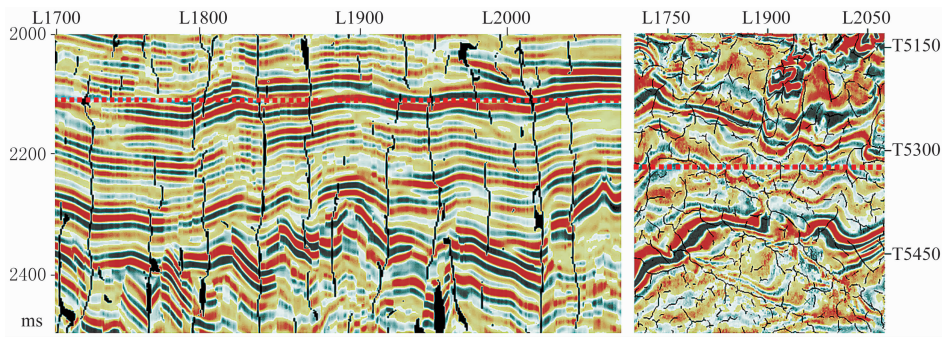


图6 曲率属性与地震数据融合体剖面(左)和切片(右)

经构造精细解释后,高9井区小断层的数量明显增加,横向延伸长度增大,提高了构造落实程度,为该“构造+岩性”油藏描述奠定了基础。结合储层预测结果,在该区提供了两个“构造+岩性”目标(图7)。已完钻的XL23井在主要目的层沙一尾砂岩段测井解释为含水水层(18.8m/7层),总体显示良好。

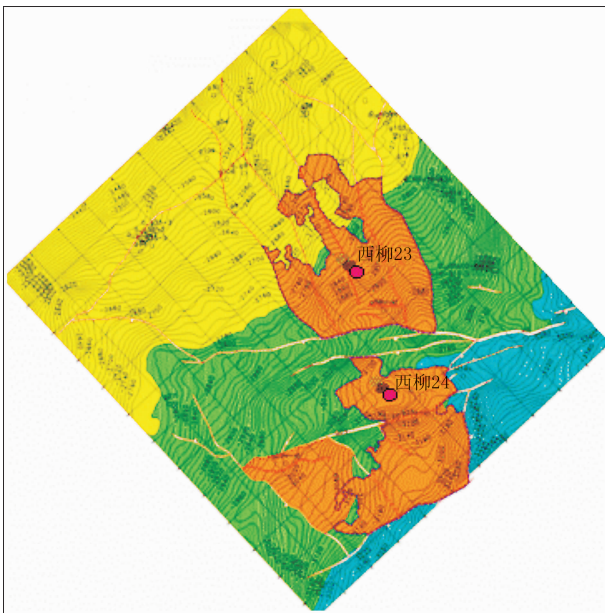


图7 蠡县斜坡带沙一段底界立体显示图

4 结论

经构造导向滤波处理后的地震数据体突出了地震反射同相轴在断点位置的不连续性,使断点更清晰,为地震属性提取提供了较高信噪比的地震数据,并可直接用于小断层的精细解释。

相干、曲率等体属性可以揭示与断层有关的大量信息,用于识别小断层。在构造的主体部位,断裂系统发育,断层规模大,剖面上一般表现为干脆的断

点,相干属性识别效果较好。在平缓的斜坡带,小断层发育,断点可能仅表现为微幅度挠曲,曲率属性的应用效果较好。但是各类断层属性对由于沉积相横向变化和特殊的沉积现象引起的地震反射同相轴的变化也会刻画出来,在断层识别时要加以甄别。

对识别断层能力较强的属性体进行图形增强处理,可有效提高断层纵向连续性,同时压制与地震反射同相轴相关的水平方向信息,以更加有效地突出断层,提高小断层识别能力。将两种以上的断层属性融合后再与地震数据体融合,可使构造解释更直观并能提高对不同级别断层的识别能力。

另外,小断层解释要参考研究区的地质条件,对用单种技术手段识别出的断层进行合理取舍,使小断层解释更精细、客观、合理!

参考文献

- [1] 吴清龙,张延庆,崔全章. 小断层综合解释技术在英台地区的应用. 石油地球物理勘探,2003,38(5):527~530
Wu Qinglong, Zhang Yanqing and Cui Quanzhang. Integrative interpretation of minor fault and its application in Yingtai area. *OGP*,2003,38(5):527~530
- [2] 冉怀江,梁兴等. 复杂小断层精细解释方法在洋心次凹的应用. 石油地球物理勘探,2011,46(2):299~303
Ran Huaijiang, Liang Xing et al. Seismic subtle interpretation of complex minor fault in Yangxin Sub-sag. *OGP*,2011,46(2):299~303
- [3] 徐中清,周海明. 复杂断块油田精细勘探开发技术. 北京:石油工业出版社,2002:36~47
- [4] 罗群,黄捍东等. 低序级断层的成因类型与地质意义. 油气地质与采收率,2007,14(3):19~21
Luo Qun, Huang Handong et al. Genetic types of low-grade faults and their geologic significance. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,2007,14(3):19~21
- [5] Andy Roberts. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First Break*, 2001, 19(2):85~100

(本文编辑:朱汉东)