

地震曲率技术在地震资料解释中的应用

柏冠军, 赵汝敏, 杨松岭, 李培培

(中海油研究总院, 北京 100027)

[摘要] 通过地震曲率属性的分析,寻找适合研究区的地震曲率,研究其解释技术。系统总结了地震曲率技术的解释应用及应注意的问题。针对小断层在常规地震剖面上表现为同相轴的微小变化、扭曲、振幅突然变弱等特征,利用这些微小的变化在地震层曲率属性上表现为线性构造,进行小断层识别,异常的长度和方向分别代表着断层的延展长度和断层的走向。二维曲率属性有比较明确的物理意义,相对一阶导数属性(如微分、倾角、方位角等),它在构造特征识别上有明显的长处。它们对刻画地质体轮廓、分层结构、断裂系统等非常有效。实例表明,地震曲率属性对断层的轨迹、沉积体边界的刻画清晰、连续,利于解释,减少解释多解性。

[关键词] 地震曲率;断层解释;沉积体刻画;3D层位

[中图分类号] TD82 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)05-0023-05

1 前言

曲率属性在 20 世纪 90 年代中期引入解释流程中,计算方式仅为层面计算,Lisle 1994 年论述了高斯曲率与在一个露头上测量的张开裂缝之间的关系^[1]。最近体曲率属性开始流行起来,解释人员可以从沿层面属性上识别出小的扰曲、褶皱、凸起、差异压实特征,这些在常规解释时是无法追踪的,相干上也呈现为连续高相干特征。Roberts^[2]将地震层位的曲率用于断层研究,结果表明,曲率对于界定断层和断层的几何形态具有重要作用。

大的断裂在常规地震剖面上表现为同相轴的明显错开,因此在解释系统上容易被识别,而落差小的断层在地震剖面上表现为同相轴的微小错开、扭曲、振幅突然变弱等特征,若能将小断层在地震数据体上引起的微小变化突出或放大,将会提高小断层的解释效率^[3]。

而地震曲率属性是一个用来量化层界面偏离平面程度的三维层面属性^[4]。对曲率属性的分析有助于减少区域倾角的影响,同时突出小尺度的地质现象(如裂缝)。通常意义上曲率是用来表征层面

上某一点变形弯曲的程度。层面变形弯曲越厉害,曲率值就越大。如果将这些构造变形(如扭曲、褶皱等)定量结果与更常规的断裂图像结合起来,地质学家就能利用井控下的构造变形模型来预测古应力和有利于天然裂缝分布的区域^[4]。曲率属性除了可用于刻画断裂和裂缝外,还能对一些地质特征进行呈现。

通常,地震的层曲率属性反映了地层受构造应力挤压时层面弯曲的程度。小断层在地震层曲率属性上表现为小的线性构造,这些微小的变化是构造应力作用的结果,因此利用地震层曲率上的线性构造异常可进行小断层预测^[3-13]。

2 问题的提出

复杂断块油气田的复杂性主要来源于众多而密集的断层,断层多是复杂断块油气田最突出的地质特点,断裂系统的复杂性造成了断层识别难度大,增加了构造精细解释的难度^[5]。复杂断块区断层发育的复杂性和多期性,决定了复杂断块勘探的目标断层在平面上和剖面上落实困难。在断裂复杂区,多组断层在平面上相互交切,受延伸长度短和断面

[收稿日期] 2011-02-25

[基金项目] 国家重大专项“大陆边缘盆地地球物理勘探关键技术”课题(2008ZX05030-004)

[作者简介] 柏冠军(1981—),男,安徽泗县人,工程师,主要从事油气田勘探地球物理综合研究工作;E-mail:baiguanjun2000@126.com

窄等因素的影响,断层的平面组合难度较大。本区断裂的复杂性主要表现在以下特点:a. 断裂连续性差,断裂破碎,断裂搭接关系不明;b. 断裂与水下分流河道等沉积体互相切割,难以区分出断层;c. 进行沉积相研究,常规手段难以实现对河道等沉积体边界进行精细刻画。

近些年,地震曲率逐渐流行起来,应用领域也在不断深化,地震曲率对边界刻画精细的特性可以用于沉积体的雕刻、断裂系统的分析。

3 地震曲率技术原理

3.1 曲率的计算公式

曲率作为描述曲线(或曲面)上任一点的弯曲程度的数据参数^[2,3],与曲线 $y=f(x)$ 的二阶导数密切相关,其数学表达式为

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

3.2 三维欧氏空间中的曲线和曲面的曲率

1) 平均曲率是空间上曲面上某一点任意两个相互垂直的正交曲率的平均值。如果一组相互垂直的正交曲率可表示为 K_1, K_2 , 那么平均曲率 K_m 表示为

$$K_m = \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (2)$$

2) 主曲率。过曲面上某个点上具有无穷个正交曲率,其中,存在一条曲线使得该曲线的曲率极大,这个曲率为极大值 K_{max} ,垂直于极大曲率面的曲率为极小值 K_{min} 。这两个曲率属性为主曲率,它们代表着法曲率的极值。法曲率 K_i 可以用 Euler 公式表示:

$$K_i = K_{max} \cos^2 \delta + K_{min} \sin^2 \delta \quad (3)$$

式(3)中, δ 为法曲率 K_i 所在平面与极大曲率 K_{max} 所在平面之间的夹角,可见,法曲率 K_i 可由主曲率导出。

3) 高斯曲率。两个主曲率的乘积即为高斯曲率,又称总曲率,反映某点上总的完全程度。高斯曲率 K_g 被定义为主曲率的乘积:

$$K_g = K_{max} K_{min} \quad (4)$$

3.3 地震曲率体积计算^[4,6]

曲率体积计算是反映反射面弯曲的多谱段估算^[7]。方法是选择一个移动的次数据体计算 3D 地震体每一点上的曲率。首先将次数据体中的伪同相

轴最小化,并计算倾角分量;然后由次数据体中计算的部分导数分析曲率波长(短波长对应强烈而局部化的断裂系统,长波长则对应宽而平的断裂区)。曲率的短波长估算能合并 9~25 个地震道的倾角信息,而长波长估算则能达到 400 个甚至更多的地震道倾角信息。在每个时间切片上应用部分导数结合先前在每个地震面元上计算的倾角分量估算出曲率。曲率体积估算消除了解释问题,使我们可以沿层位求取曲率,有助于更好地了解地下构造特征。由于篇幅限制,具体曲率计算原理不再赘述,请参见文献[1~6]。

3.4 地震曲率的解释应用

曲率是用来反映几何体的弯曲程度。在构造解释中,如果我们根据层位的解释数据计算其曲率,自然就可以定量来描述其构造特征,图 1 给出了背斜、单斜、向斜、平层和断层的曲率描述。其中,背斜的曲率为正,向斜的曲率为负,而且褶皱越厉害,曲率值越大;平层和单斜层的曲率为零;断层在平滑后可近似认为其曲率有正到负或负到正的变化。显然,上述曲率对于单斜和水平地层的区分是无能为力的,对于平行断层、水平面上或沿层面上有方向变化的复杂构造,也是无能为力的,必须要借助于以二维曲面分析为基础的曲率属性。在刻画断裂、地质体方面,最大正曲率、最大负曲率是最易计算也是最常用的曲率属性^[1~8]。

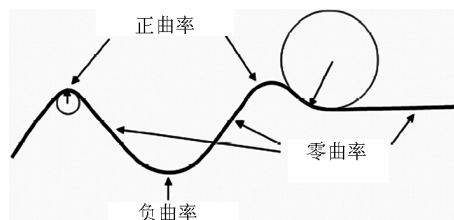


图 1 2D 曲率属性示意图^[9]

Fig. 1 2D curvature attribute of a line^[9]

4 实际资料的应用分析

4.1 海外 X 区块复杂断块特征

X 区块位于典型弧后走滑拉分盆地内,受右旋走滑应力场作用,区内发育多期次断裂系统,发育大量负花状、阶梯状、叠瓦状等复杂断层。多期构造运动造成该区块特殊油气地质背景:断裂系统复杂,断层密度高,地层破碎,构造幅度低;断背斜、断鼻和断块等构造圈闭是该区主要圈闭类型;断块面积小,断层分布密集,相互交叉切割,断点位置难以确定,

断层组合困难;受三角洲沉积作用,水下分流河道、小水道等沉积体与断层互相交割,常规方法难以识别。

4.2 地震曲率属性的计算

地震资料预处理^[2,4,6]:在曲率属性计算前,有必要进行资料的预处理,由于曲率与层面的二次导数密切相关,它的品质对噪声相当敏感。在绘制的层面上这类噪声源很多,如地质、处理、采集和层面的自动追踪处理等。因此建议在计算曲率前对层面进行适当的2D空间滤波处理。这种滤波可以通过多种方法实现,如迭代中值滤波、加权平均滤波等,这里权值可以是与距离有关的,也起到了高截滤波器的作用,能使多数由噪声引起的层面的急剧变化得到减弱。把高频噪声留在层面上可能会掩盖层面的真实曲率。滤波器设计就是要在寻找不降低分辨率和不模糊太多细节与有效去除噪声之间取得平衡。这种形式的层面处理是曲率计算过程中非常重要的一个方面。

计算孔径选择:当层面在解释工作站上以网格化的形式建立时,要根据研究对象的规模选择适当的计算窗口和采样间隔,大的孔径用于区域研究而小的孔径则用于局部层面的细节描述。例如,在区域走向上可选用较大的窗口(大的断裂),而在局部层面上可选用较小的窗口(如小断层、裂缝等)。选择有效的窗口有多种方法。一种方法是改变曲率计算中的网格结点数^[2]。然而使用太多的结点会增加计算的复杂性,降低计算的速度。更简单的方法是增大预处理的滤波半径或以某种方式对网格数进行分样处理,如每 n 线 n 道取一次样。查阅文献[8]可以得到更详细的描述。文章计算以 5×5 为宜。

4.3 海外X区块复杂断裂精细解释

鉴于X区块的复杂断块特征,为了有效落实构造和精细评价目标,解决复杂断裂解释问题是该区块勘探的主要方面。

第一步,每隔10条测线10道解释一下,局部加密到 5×5 ,然后由层自动追踪完成其余部分。第二步,层面经过 5×5 迭代中值滤波,再经过 9×9 距离加权平均平滑滤波。体曲率计算采用 7×7 、60 ms样点进行计算,沿层提取各曲率属性进行断层解释和组合。综合利用各种曲率属性信息进行精细断裂解释,落实断层的搭接关系,有效落实构造。

最大曲率:最大曲率属性(见图2)包含了大量

不连续信息。在所有曲率中找出最大正曲率或最小负曲率,就能得到地质体的边缘显示。将这种方式引入构造解释中不仅放大了层面中的断层,也放大了一些小的线性构造,使曲率属性成为这类层面解释方法的有益补充。



图2 最大曲率

Fig.2 Maximum curvature

最大正曲率:这个曲率属性对界定断层和断层的几何形态非常有效。以该属性表示的断层表现为正曲率值(高值)。注意图3中右下部的地方为一组负花状断层。曲率具有包含形态信息的优点,用它能够将断层与其他线性构造区分开来。



图3 最大正曲率

Fig.3 Most positive curvature

倾向曲率:倾斜曲率是每个分析点上沿倾斜方向提取的曲率,并且测出最大方向上的倾斜变化率。倾斜曲率清楚地显现断层的落差和方向(见图4),Wood 1996年在《地貌分析》中称之为剖面曲率。该曲率既包含了断层的大小信息,又包含了断层的方位和错断方向信息,正的曲率值代表上升盘,负的曲率值代表下降盘。同时,这种曲率方法能放大层面上的局部起伏,同时也能强化像河道砂体这样的压实特征。

曲率属性能给出一个层面里许多有关断层、线性构造和局部形态的额外信息。曲率与层面的方位无关,这意味着如果层面是充分采样的(无假频),

那么即使层面发生了旋转或倾斜,它的曲率总是保持不变。

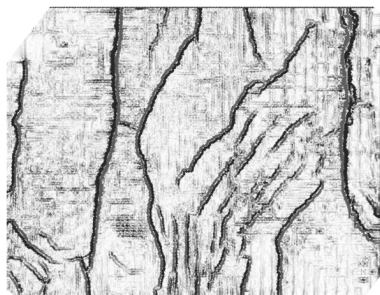


图4 倾向曲率
Fig. 4 Dip curvature

从曲率属性信息图上可以看到,与相干切片相比(见图5),断层的连续性明显变强,轨迹清晰且直观,对河道等沉积体的边界特征刻画得尤其清晰(见图6)。本方法适合于断裂解释和沉积特征研究。



图5 相干切片
Fig. 5 The coherence cube slice



图6 最大曲率体L层切片
Fig. 6 The maximum curvature cube slice(Horizon L)

通过复杂断裂的精细解释,落实了断层695条,精细评价潜力目标6个,为下一步的勘探开发提供了有效的技术手段,图7是本技术解释的结果,画圈

的位置展示了该方法的有效性,进一步查明了三条断裂的搭接关系。

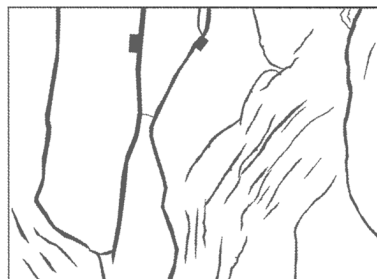


图7 断裂解释成果
Fig. 7 Interpretation result of seismic curvature

显然,利用地震曲率属性能够快速解释、组合断层、刻画沉积体等。地震曲率属性技术包含了更多的有关地层的非连续性信息,且其显示的断层更清晰、更容易识别,搭接关系明朗,适合断层的快速解释和目标评价。

5 结语

曲率属性是深入观察目标层面的有效手段,是一种基于二阶导数的方法,对地层中的任何噪声污染都很敏感。因此有必要用空间滤波对层面进行预处理。在计算曲率时,研究对象的尺度是需要重点考虑的另一个因素。

根据地震层面的曲率线性构造异常,可进行复杂断裂精细解释,曲率异常的长度代表着断层的延展长度,曲率异常的走向代表着断层的走向。曲率对沉积体边界的刻画较清晰,优于传统相干手段。

参考文献

- [1] Lisle R J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 1811 - 1819.
- [2] Roberts Andy. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. First Break, 2001, 19(2): 85 - 100.
- [3] 杜文凤,彭苏萍. 利用地震层曲率进行煤层小断层预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2901 - 2906.
- [4] Satinder Chopra, Kurt J Marfurt. Multi - spectral volumetric curvature adding value to 3D seismic data interpretation [J]. SEG Expanded Abstracts, 2008, 27: 1585 - 1589.
- [5] 赵贤正,张 玮,邓志文,等. 富油凹陷精细地震勘探技术[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
- [6] Satinder Chopra, Kurt Marfurt. 曲率属性在3D地面地震资料中的应用[J]. 赵剑敏,吴龙丽摘译. 油气地球物理, 2007, 5(4): 50 - 59.

- [7] Saleh Al - Dossary, Kurt J Marfurt. 3D volumetric multi - spectral estimates of reflector curvature and rotation[J]. *Geophysics*, 2006, 71(5): 41 - 51.
- [8] Stewart R, Podolski S A. Curvature analysis of gridded surfaces. In: Coward M P, Daltaban T S, Johnson H. *Structural Geology in Reservoir Characterization* [M]. London: Geological Society Special Publications, 1998, 127:133 - 147.
- [9] Satinder Chopra, Kurt Marfurt. Seismic curvature attributes for mapping faults/fractures, and other stratigraphic features [J]. *CSEG Recorder*, 2007, 11:37 - 41.
- [10] 孙尚如. 预测储层裂缝的两种曲率方法应用比较[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(4):71 - 74.
- [11] 石 瑛,王 赟,芦 俊. 煤田地震多属性分析技术的应用[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12):1397 - 1402.
- [12] 柏冠军. 三维地震资料微机管理及可视化解释系统研究与开发[D]. 西安:西北大学硕士学位论文, 2006.
- [13] 王 伟. 地震几何属性识别断层技术研究及应用[D]. 青岛:中国石油大学(华东)硕士学位论文, 2009.

Seismic curvature attributes and their application to seismic interpretation

Bai Guanjun, Zhao Rumin, Yang Songling, Li Peipei

(China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100027, China)

[**Abstract**] Based on the theory of seismic curvature attributes, this paper analyzed features of seismic curvature attributes and found out effective seismic curvature attributes to interpret the seismic data. Suming up the application of the seismic curvature attributes and the notable problems during the process of application, 2D curvature attributes explicit physical meanings and obvious advantages in identification of structure characteristics. The attributes are usually related to seismic horizon's geometric shapes (like dip, azimuth and curvature, etc.), which are effective to describe geologic configuration, hierarchy and fault system. Minor faults on general seismic section show the features such as even tiny variety, twist, weaking abruptly of the amplitude. These tiny varieties show small linear structure on curvature attribute of the seismic horizon, so minor faults can be interpreted according to linear structure abnormality. The length of abnormality and directions represent the continued length and directions of faults respectively. The applications show that it is effective and convenient to interpret faults using seismic curvature attributes. The track of the faults and the sizes, shapes and boundaries of sedimentary bodies become continuous and clear. And it is beneficial for fault interpretation.

[**Key words**] seismic curvature; fault interpretation; sedimentary bodies interpretation; 3D interpreted horizon