

犁式正断层几何形态的确定及计算机实现

徐旭辉 江兴歌 魏武 张渝昌

(地质矿产部石油地质中心实验室, 江苏无锡 214151)

在犁式拉张断层剖面中, 依据面积守恒原理, 建立剖面中断层与上盘地层形态之间的解析表达式。该表达式假定为上盘地层受单剪(simple shear)形变、下盘整体保持不形变。上盘块单剪的方向是随意的而且在所预测的断层和地层形态方面有重大的影响。笔者采用FORTRAN77语言, 在386微机实现了该方法, 应用任意改变初始断距和单剪角, 可快速直接得到犁式正断层的延伸状况。

关键词 犁式断层 几何形态 计算机实现

第一作者简介 徐旭辉 男 31岁 工程师 石油物探

地震剖面的解释、野外地质剖面的研究以及地下构造形态的推测和确定, 对了解某个地区、某个盆地的发育和演化有着很重要作用。因此, 如何确定在浅部地壳水平面上, 经过至少部分或大部分调整的大正断层的几何形态, 成为广大中、外专家研究的重点。Verrall(1981)和Gibbs(1983)应用Chervron作图法, 从滚动背斜中制作犁式断层形状(图1a), 假定当犁式正断层发育时, 水平分量是断层上盘中唯一不变的因素。在该法基础上进一步提出Chervron修订法和滑线反演法(Williams and Vam, 1985, 1987)(图1b、c), 二者均共同假设断距守恒。它们的区别在于, 前者上盘形变是按断层垂直水平面的平距块段考虑的, 后者的上盘形变则根据垂直断层的断距断块考虑的。Davison(1986)等认为在拉伸或挤压构造地区, 沉积层中的能干岩层(如石英砂岩、厚层状灰岩等)基本遵循变形前后地层长度不变的变形规律, 提出了地层长度平衡反演法(图1d)。

根据岩石力学原理, 地层受力变形时, 层内物质会出现剪切应变, 其剪切方向由地层的岩石动力学参数及边界条件决定。上述各类推测断层几何形态的方法, 虽不失为一些好方法, 但它们均有很多假设, 并且它们均为一些几何作图法。White(1986)在研究上盘地层几何变形

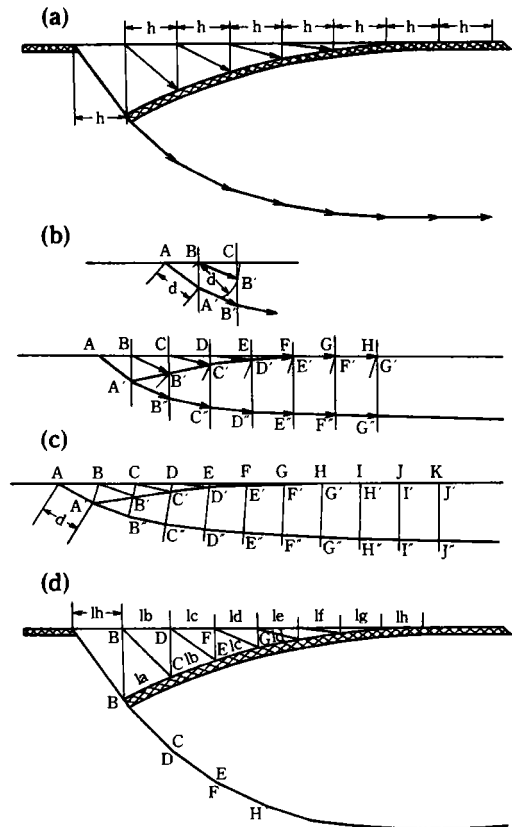


图1 各类推测断层几何形态

a. Chervron作图法, 其中 h 为上盘地层的水平位移量; b. 改进的Chervron作图法; c. 滑线法(矩形块段作图法); d. 层长守恒作图法

时,提出了单剪角(simple shear angle)的概念。认为当边界正断层拉张活动时,处在下盘看上盘地层内的质点应沿单剪角方向运动,从而导致上盘地层的变形(W. F. Dula, Jr. 1991)。本文将在该思想的基础上,建立和研究边界断裂与上盘滚动背斜之间的关系,以确定边界断裂可能的延伸状况,并把它们运用到苏北溱潼凹陷中。

1 沉积层与断层之间的几何关系

1.1 原理

利用图 2 说明拉张前后犁式断层与地层之间的关系。图 2a 表示在移动前的几何形态。如果有一移动使得上盘内的所有点相对于下盘移动一矢量 h ,其几何形态就如图 2b 所示。如果该面积没有移出该剖面平面,则依据面积守恒原理,面积 $A = \text{面积 } B$ 。实际上在上、下盘之间不会产生空隙,并且上盘物质将会充填其空隙后产生变形,同时在上部保留一空间(图 2c),因此面积 $A = \text{面积 } B = \text{面积 } C$ 。显然,图 2c 中上盘表面的形态在某些方面上与下伏断层的几何形态有关。Verrall(1981)和 Gibbs(1983、1984)等人,在垂直单剪的前提下,利用图解法来表达断层和滚动背斜之间几何形态的关系。在此将引用断层和沉积层之间更为普通的分析几何关系(White,1986),并考虑了非垂直单剪。

考虑位移处在与下盘块连着的坐标中 (x, y) ,而产生的单剪平面则平行于 y' 方向(图 3)。在该坐标系中, x' 方向的速度是一恒量 U_0 ,并且在 y' 方向上的速度是 $V = V(x')$ 。地层的形状是 $B' = B'(x')$,而断层的形状是 $F' = F'(x')$ 。此处的 B' 和 F' 是地层和断层在 y' 坐标上的值。

假设一地层段 $a b$,其在 x' 方向上长度是 $\delta x'$ 。在 x' 方向上已经被移动一小距离 $U_0 \delta t$,然后被平行于 y' 方向的单剪形变;如此,点 a 移至 c 而 b 移至 d 。假设,变形前该层的形态由 $R' = R'(x')$ 给出,在点 (x', y') 处具有 γ' 倾角,则点 a, b, c 和 d 的坐标值是:

$$\begin{aligned} a &= (x', y') \\ b &= (x' + \delta x', y' + \delta x' \tan \gamma') \\ c &= (x' + U_0 \delta t, y' + V(x') \delta t) \end{aligned}$$

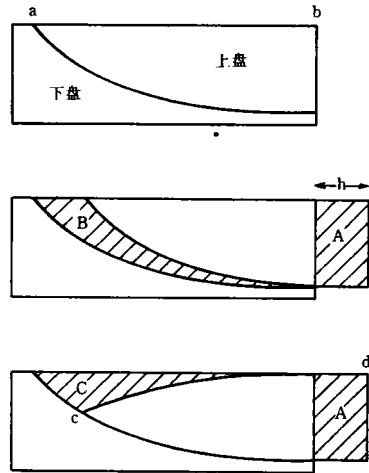


图 2 拉张前后犁式断层与地层关系 (White 等,1986)

图示说明如果上盘相对下盘移动一矢量 h ,则上盘势必充填在其之下可能的空隙引起自身的变形;在上盘内部变形之后,只有远离断层露头的点相对于下盘有一位移量 h ,注意下盘保持不变形

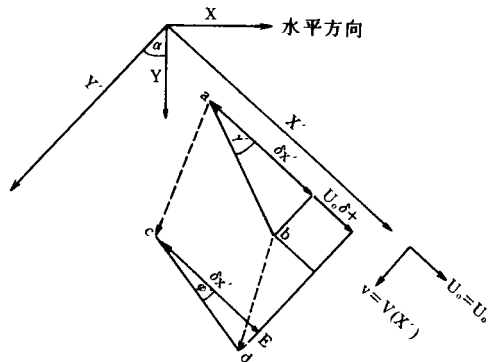


图 3 坐标系和几何关系 (据 White 等,1986)

$$d = [x' + \delta x' + U_0 \delta t, y' + \delta x' \tan \gamma' + V(x' + \delta x') \delta t]$$

c d 的倾角是 ϕ , 由下式给出:

$$\delta x' \tan \phi = Ed = V(x' + \delta x') \delta t - V(x') \delta t + \delta x' \tan \gamma'$$

$$\therefore \tan \phi = (dV/dx) dt + \tan \gamma' \tag{1}$$

然而, 如果没有空隙形成, 上盘必须与断层面保持接触。

$$\therefore v/U_0 = \tan \theta' \quad (\theta' \text{ 为初始断距与 } x' \text{ 水平轴的交角})$$

则有
$$dv/d\theta' = U_0 / \cos^2 \theta' \tag{2}$$

联合式(1)和(2)给出:

$$\tan \phi = (U_0 \delta t / \cos^2 \theta') d\theta' / dx' + \tan \gamma' \tag{3}$$

$U_0 \delta t$ 是在 x' 方向上的位移量并且是贯穿整个上盘的恒量。如果 $U_0 \delta t = h'$, 那么式(3)可改写为:

$$\tan \phi - \tan \gamma' = h' d(\tan \theta') / dx' \tag{4}$$

或
$$d(B' - R') / dx' = h' d^2 F' / dx'^2 \tag{5}$$

因此积分得:

$$B' = h' dF' / dx' + R' + C' \tag{6}$$

其中 C' 值取决于座标原点的选择。如果原点选在 $R' = R'_0, B' = B'_0$, 且在 $X' = 0$ 处 $dF' / dx' = \tan \theta'_0$, 那么

$$C' = B'_0 - R'_0 - h' \tan \theta'_0 \tag{7}$$

由式(6)和(7)可得:

$$h' dF' / dx' = B' - R' - (B'_0 - R'_0 - h' \tan \theta'_0)$$

积分得:

$$F' = 1/h' \int_0^{x'} \{B' - B'_0 - (R' - R'_0) + h' \tan \theta'_0\} dx' \tag{8}$$

其中: h' 是初始水平断距;

B'_0 是位移后原点的地层深度值;

R'_0 是位移前原点的地层深度值;

θ'_0 是初始断距倾角;

B' 是位移后的地层形态；

R' 是位移前的地层形态。

作为边界条件的 B_0' 、 θ_0' 和 h' 必须已知且需要指定位移前的地层形态 $R(x)$ 。从而，给出一观测到的地层几何形态，对于不同的单剪角 α ，均可计算出断层几何形态。

上述表达式都是在 (x', y') 坐标内，而该坐标对于 (x, y) 坐标来讲是通过了单剪角 α 的旋转，此处 y 是垂直向下(图 3)。因此，确定在 (x, y) 坐标内的地层 $B(x)$ 和其它参数，必须利用下式把它们旋转至 (x', y') 坐标内：

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ y' &= x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

当然，其断层几何形态的计算结果也将用下列关系式转换回 (x, y) 坐标内：

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \alpha - y' \sin \alpha \\ y &= x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

1.2 假定

等式(6)和(8)导出过程中特有的一些主要假定是：

- (I) 所有的位移量是小的；
- (II) 没有位移量出剖面平面；
- (III) 由于单剪伴随上盘形变，即说明：

$$\partial v / \partial y' = \partial u / \partial x' = \partial u / \partial y' = 0$$

和

- (IV) 在整个过程中下盘保持不变；
- (V) 不考虑压实对沉积层几何形态的改变。在这些条件中，(IV)可能是最重要的。

1.3 倾斜单剪的影响

图 4 给出了一拉张断陷剖面图，用以说明倾斜单剪的重要性。并选取第 3 个层面为特征层面，同时读取 h 、 θ_0 以及地层等参数，并假设该特征层初始状态为水平，即 $R=0$ 。图中显示了 4 种不同断层几何形状的计算结果。它们分别为 $\alpha = \theta^{\circ}, 10^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ ，该例子清楚地表明在上盘块体内单剪的影响是惊人的。同时也说明假定垂直单剪(即 $\alpha = \theta^{\circ}$)是危险的。

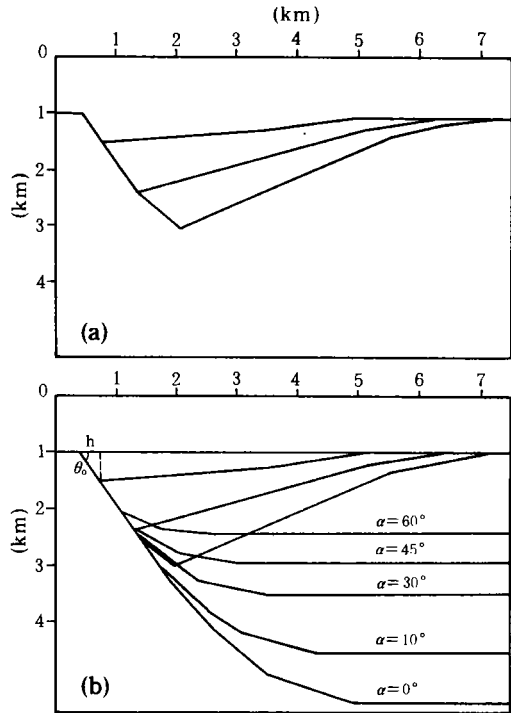


图 4 拉张断陷剖面图

对来自同一所观测的地层形状和水平断距 h ，不同的单剪角 α ，可计算出不同几何形态的断层

2 计算机实现

依据沉积层和犁式断层之间的关系,以及所建立的数学分析式,设计出相应的主断裂延伸状况计算流程图(图 5)。

从该计算流程中可以看到,一旦给定:(1)主断裂位置(地震或地质信息所确认的浅层部分,即初始断距);(2)标志层;(3)单剪角;(4)变形前地

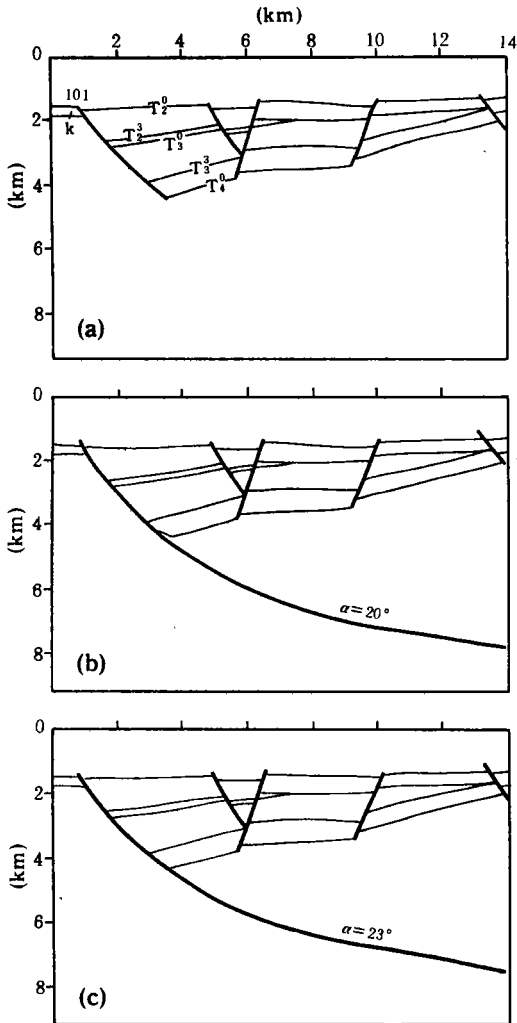


图 6 苏北溱潼凹陷深度剖面及断层延伸形状
a. 横穿溱潼凹陷的深度剖面图(引自张淮等,1992);b、c. 利用特征层 T_i^0 , $\alpha=20^\circ$ 和 $\alpha=23^\circ$, 预测 101 号断层的延伸形状。该图有一致的水平和垂直比例尺

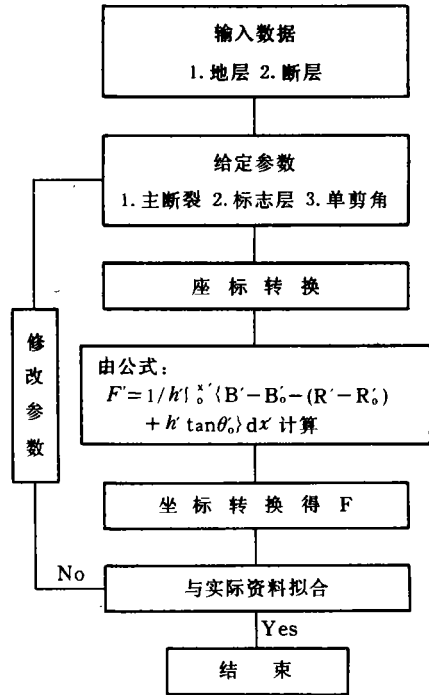


图 5 主断裂延伸状况计算流程图

层的初始状态等参数,即可计算犁式主断裂的延伸形态。从地质地球物理研究过程中我们能得到第一、二项参数。但如何确定第三、四项参数呢?从前述的原理中知道,上盘的形变被假设为是由于单剪所成,则在变形期间,单剪角将保持一恒量;并且上盘的形态表现为由一系列亚平行的小断层进行调节。因此,可以利用二个或更多个特征层的几何形态,拟合出‘最好的’单剪方向;同时也得到了‘最合适’的主断裂几何形态。

3 应用例子

图 6a 给出了经解释和转换的横穿苏北溱潼凹陷的深度剖面。剖面内振幅

强、连续性好,可作为反射特征层的有 T_4^0 、 T_3^3 、 T_3^0 、 T_2^3 、 T_2^0 等波组。它们组成倾向 SE 的楔状,截止于东南端的大正断层上,该断裂是溱潼凹陷南界断阶带上的主断裂之一。部面内的上盘为一滚动背斜,其顶部形成了顶塌地堑,整个上盘形变被一系列亚平行的、倾向 NW 的内部断层所调节。这些倾向 NW 的断层与垂直方向有一 20° 左右的夹角,从而说明了该剖面内地层形变为非垂直单剪所成。该剖面走向基本上垂直于整个构造走向。依据地质研究情况给出主断裂模拟计算模型,假设认为剖面内质点运动完全在剖面平面内,由于计算主断裂之前,先把上覆拗陷(T_2^0 以上地层)剥除,同时考虑了剥除拗陷后的 T_2^0 — T_4^0 各层层厚的恢复(即去压实作用),则在计算主断裂时,断陷内略去考虑其压实作用。笔者选择 T_2^3 作为特征层,由于上下盘均沉积了三垛组地层,故首先考虑消除同沉积影响,则下盘上的层 K 为 T_2^3 位移前的起始位置,保证了下盘保持不变的要求。从而可知参数 h 和 θ_0 ,并认定 T_2^3 在位移前的区域倾角大约是水平的,即 $R=0$ 。

图 6b、c 展示了利用 T_2^3 特征层计算得到的主断裂延伸状况图。其一为单剪角 $\alpha=20^\circ$; 另一为单剪角 $\alpha=23^\circ$ 。计算结果表明,从 T_2^3 开始向下延伸的部分与通过地质地球物理资料获得的实际断裂数据吻合较好。有趣的是,计算拟合得到的单剪角在 $20^\circ\sim 23^\circ$,与实际测得的单剪角基本相同。从计算结果中还可看出,若 $\alpha<20^\circ$,其主断裂形态将向下偏离,若 $\alpha>23^\circ$,其主断裂形态将向上偏离。结合地震剖面等资料,利用主断裂计算结果,可以较好地预测主断裂向下的延伸状态。

4 结 论

给出一小位移量且上盘是由于单剪造成变形,在横剖面中正断层的形状与上盘块内的地层层面的形状关系存在一分析公式。该公式假定了在整个变形过程中下盘保持不变。图解法中断层和沉积层几何形状的关系,大多假定了单剪在垂直平面内移动产生,该条件很明显是一特殊情况,并且从苏北溱潼的剖面描述中,观测到的上盘内部断层总是不垂直的。这对于主断裂来说具有一本质上的形态区别,换句话说,在上盘块内,单剪方向对在其内的地层层面的形状有非常强烈的影响。

(收稿日期:1995 年 3 月 2 日)

参 考 文 献

- 1 Nihite NJ et al. The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls. *JSG* 1986, 8(8): 897~909
- 2 Davison I. Listric normal fault profiles; calculation using bed length balance and fault displacement. *JSG*, 1986, 8: 209~210
- 3 Dula WF, Jr. Geometric Models of Listric Normal Faults and Rollover Folds. *AAPG*, 1991, 75(10): 1609~1625
- 4 Graham Williams, Ian Vann. The geometry of listric faults and deformation in their hangingwalls. *J. Struct. Geol.*, 1987, 9(7)
- 5 Ellis PG et al. Listric extensional fault system—results of analogue model experiments. *Bsain Research*, 1988, (1): 55~

BASIC CHARACTERISTICS OF THE EARLY CARBONIFEROUS DEPOSITIONAL SYSTEM TRACT IN THE NORTH OF THE TARIM BASIN

Ma Lixiang Wan Jingping Wang Shifeng

(*China University of Geosciences, Wuhan*)

Wang Genchang Qu Xiaoguang

(*Geology Party of Northwest China Bureau of Petroleum Geology, MGMR, Urumqi 830011*)

Abstract

Based on the principles of sequence stratigraphy, the paper described the basic characteristics of depositional system tract in the Lower Carboniferous. Field data showed that the system is a secondary cyclic sequence interbedded between 2 tectonic unconformities of the Early and Late Variscan periods. A transgressive system domain and a highstand system domain were developed within the sequence, with the sediments of lowstand system domain being absent. Favourable areas for oil/gas accumulation are barrier bar facies zones developed in the transgressive system domain and tidal channels developed in the highstand system domain.

~~~~~

(上接 205 页)

## DETERMINATION OF THE GEOMETRY OF LISTRIC NORMAL FAULT AND ITS REPRESENTATION ON COMPUTER

Xu Xuhui   Jiang Xingge   Wei Wu   Zhang Yuchang

(*Central Lab of Petroleum Geology, Wuxi 214151*)

### Abstract

Based on the principles of area conservation, a functional relationship of a fault and the morphology of its hanging wall in the section is proposed for extensional listric normal faults. It presumes that the beds in the hanging wall are deformed by simple shearing, while the foot wall on the whole remains unchanged. The shearing direction of the hanging wall is random, which plays an important role in the faults and stratigraphic morphology predicted. The method is programmed with FORTRAN 77 on 386 microcomputer. The extent pattern of listric normal faults could be output directly and rapidly, by inputting arbitrarily the initial fault displacements and simple shear angles.