

构造面曲率分析及三维可视化软件 3DCAVF 开发与实践^{*}

李志勇¹, 曾佐勋^{1,2}, 罗文强³

(1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉, 430074;

2. 华中构造力学研究中心, 湖北武汉, 430074;

3. 中国地质大学数学物理系, 湖北武汉, 430074)

摘 要: 由微分几何学基本原理得出构造面主曲率和 Gauss 曲率的一般计算公式, 利用曲率的几何意义进行地质构造面的形态和弯曲变形程度分析, 并做为裂缝发育预测的评价因子。而且将微分几何学、数值分析、图形学和三维可视化技术相结合开发了地质构造面曲率分析及三维可视化软件 3DCAVF。软件实现的主要功能有: 构造面的主曲率和 Gauss 曲率的分析计算, 对构造不同区域的变形形式、程度进行分析, 以及地质构造面、计算分析结果的三维可视化、切片显示和等值线云图显示。并成功应用于裂缝油气藏研究。

关键词: 主曲率; Gauss 曲率; 三维可视化; 软件开发; 裂缝油气

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 05-0101-04

裂缝预测, 断裂构造和油气藏研究等, 需要对构造形态做出定量的研究。具体分析油藏产油率和油气运移等离不开对构造面形态的定量分析。建立定量的数学模型对构造几何学、运动学和动力学分析研究也是必要的。

构造面曲率在一定程度上控制了裂缝发育的密度、方向、宽度和深度; 因而油层厚度及与之有关的裂缝空隙体积和渗透率也在一定程度上受到构造面曲率的影响^[1-3]。

Murray^[4,5]首次应用曲率进行裂缝的定量分析研究, 发展了一种把油藏产率作为裂缝地带的函数的分析方法。并试图建立破裂作用与油层厚度和构造曲率有关的孔隙度和渗透率之间的关系。Lisle 和 Robinson^[6]利用 Mohr 圆确定主曲率的方向, 并用于褶皱的描述, 但 Mohr 圆图解只适用于手工计算。Ozkaya^[7,8]通过构造面网格数据来计算构造面主曲率大小和方向, 以得到破裂面走向, 并通过拟合二次趋势面, 计算褶皱的主曲率, 其方法是建立在分析对象视为简单背斜或简单向斜的基础之上, 具有一定局限性。在国内, 有学者应用构造面主曲率来研究裂缝性油气藏问题^[1-3]。其主曲率计算公式由薄板小挠度弯曲理论得到的^[1], 具有一定的局限性。

国外学者已通过分析构造面各点的高斯曲率变

化来分析构造面的异常变形带。Lisle^[9]根据褶曲表面各点所具有的曲率, 建立了一个预测断裂的模型。并应用 Gauss 曲率分析 (CGA) 研究怀俄明州卡斯帕附近的古斯塔格穹隆构造而获得成功。

本文由微分几何学基本原理得出构造面主曲率和 Gauss 曲率的一般计算公式, 利用曲率的几何意义进行地质构造面的形态和弯曲变形程度分析, 并做为裂缝发育预测的评价因子。而且开发了地质构造面曲率分析及三维可视化软件 3DCAVF。并成功用于裂缝发育区预测、裂缝油气藏研究和地质体的三维显示。

1 基本原理^[10]

设空间曲面为 $f(x, y)$, 且具有连续二阶偏导数, 该空间曲面的第一基本形式和第二基本形式分别为:

$$S_I = E dx^2 + 2F dx dy + G dy^2 \quad (1)$$

$$S_{II} = L dx^2 + 2M dx dy + N dy^2 \quad (2)$$

式中, E, F, G 为第一基本量, L, M, N 为第二基本量。曲面上任一点的法曲率 k_n 由 $\frac{S_{II}}{S_I}$ 决定。

$$k_n = \frac{S_{II}}{S_I} = \frac{L du^2 + N dv^2}{E du^2 + G dv^2} \quad (3)$$

设 k_1, k_2 为曲面上一点的两个主曲率, 主曲率

^{*} 收稿日期: 2002-10-02

基金项目: 国家理科基地创建名牌课程项目; 湖北省地球表层系统开放实验室基金资助项目; 中石化河南油田公司委托资助项目

作者简介: 李志勇 (1979 年生) 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 曾佐勋; E-mail: leezyh@sohu.com

k_1 、 k_2 为法曲率 k_n 的最大和最小值。主曲率的计算公式为:

$$(EG - F^2)K^2 - (LG - 2MF + NE)k + (LN - M^2) = 0 \tag{4}$$

$$A = EG - F^2; B = LG - 2MF + NE; C = LN - M^2;$$

$$k_1, k_2 = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \tag{5}$$

$$k = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \tag{6}$$

它们的平均数 $\frac{1}{2}(k_1 + k_2)$ 称为曲面在这一点 的平均曲率。则它们的乘积 $(k_1 k_2)$ 称为曲面在这一点 的高斯曲率 k 。其中,

$$E = 1 + p^2; F = pq; G = 1 + q^2;$$

$$L = \frac{r}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2}}; M = \frac{s}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2}};$$

$$N = \frac{t}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2}};$$

$$r = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}; s = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}; t = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}; p = \frac{\partial f}{\partial x}; q = \frac{\partial f}{\partial y};$$

2 软件设计

程序设计的开发环境使用 Microsoft 的 Visual C++ 6.0 MFC 开发。软件开发采用面向对象方法, 考虑了各个模块功能的独立, 便于模块重用和软件维护升级。

2.1 基本计算

2.1.1 曲面拟合计算 在实际应用中, 构造面数据往往都是离散的, 对离散的网格点数据可以通过多项式进行趋势面拟合, 再进行曲率计算。

选择多项式进行拟合, 方程式如下:

$$f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 + a_{40}x^4 + a_{31}x^3y + a_{22}x^2y^2 + a_{13}xy^3 + a_{04}y^4 + \dots \tag{7}$$

通过对不同次数的多项式曲面方程的拟合结果计算对比, 采用 4 次多项式拟合的效果较好, 已经能很好的反映构造面的形态特征。

通过离散数据建立趋势面方程^[1]:

$$\begin{bmatrix} N & \sum x & \sum y & \sum x^2 & \sum xy & \sum y^2 & \dots \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy & \sum x^3 & \sum x^2y & \sum xy^2 & \dots \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 & \sum x^2y & \sum xy^2 & \sum y^3 & \dots \\ M & M & M & M & M & M & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{20} \\ a_{11} \\ a_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f \\ \sum xf \\ \sum yf \\ M \end{bmatrix} \tag{8}$$

通过计算即可得出曲面拟合方程系数, 获得拟合曲面表达式。即可通过式 (5) 和 (6) 进行曲率

计算。

2.1.2 差分计算 对于规则的构造面网格数据可以直接使用差分法进行计算。规则的构造面网格数据可以直接得到, 或通过趋势面分析得到的多项式拟合曲面方程得到, 也可通过离散的网格数据进行三维插值得到。设规则构造面网格数据为 $n \times m$ 的网格:

$$P(i, j) = P(x_i, y_j, z_i)$$

$$i = 0, 1, \dots, m - 1; j = 0, 1, \dots, n - 1$$

如图 1 所示, 对网格点数据 $P(i, j)$ 利用 9 点差分法计算微分, 通过前述主曲率和 Gauss 曲率计算公式即可计算出每一网格数据点的主曲率和 Gauss 曲率值。

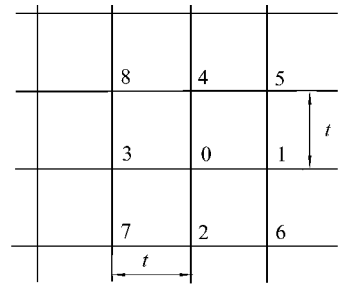


图 1 9 点差分计算网格

Fig 1 Grids for difference method with nine points

计算公式为:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_1 - f_3}{2t}; \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{f_4 - f_2}{2t};$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f_1 + f_3 - 2f_0}{t^2}; \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{f_2 + f_4 - 2f_0}{t^2};$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{(f_6 + f_8) - (f_5 + f_7)}{4t^2};$$

2.2 三维可视化实现

地质构造面的三维显示和分析计算结果的可视化, 使用户能够直观了解构造面形态; 根据计算结果分析构造面的异常区, 进行裂缝油气的预测研究。三维显示模块主要基于 OpenGL 函数库开发。

OpenGL 提供的绘制方式有: 线框绘制, 深度优先线框绘制, 反走样线框绘制, 平面明暗处理, 光滑明暗处理, 加阴影和纹理, 运动模糊绘制, 大气环境效果, 深度域效果^[11]。

2.3 软件结构

软件结构如图 2 所示。主要由曲率分析模块和三维图形显示和控制模块组成。

2.3.1 曲率分析模块 曲率分析模块主要包括: ①构造面数据和曲率数据处理; ②曲率数据计算和分析; ③ 计算结果处理。该模块主要由 CCurAnalysis 类来实现。

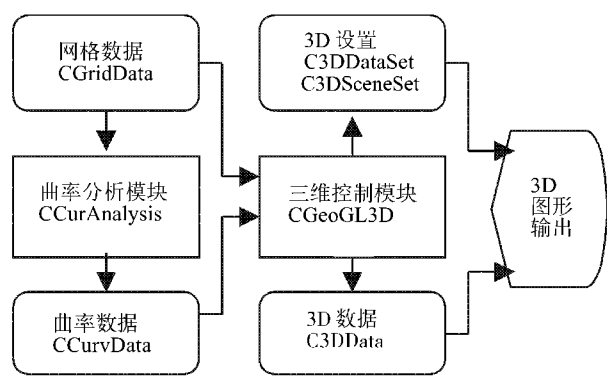


图 2 程序结构
Fig 2 Structure of the program

```
class CCurAnalysis
{
public:
    CGridData *m_pGridData; //网格数据指针
    CCurvData *m_pCurvData; //曲率数据指针
    .....
    bool SubDivisionGrid (int exponent=2);
    bool CalculateCurv ();
    bool GetGridGaussCurv (int nx, int ny, float dx,
float dy, float *pData, double *pGaussCurv, double
*pGaussCurvAbs); //计算 Gauss 曲率
    bool GetGridPrinCurv (int nx, int ny, float dx,
float dy, float *pData, double *pPrinCurv1, double
*pPrinCurv2, double *pPrinCurvAbs, float *
pPrinCAngle); //计算主曲率
    .....
};
```

2.3.2 三维显示与控制模块 它主要实现：三维数据输入输出与处理、三维图形绘制、图形控制、三维场景设置与特殊显示效果等。

该模块主要功能由 COpenGL3D 类来实现。

```
class COpenGL3D
{
public:
    C3DDataset *m_p3DDataset; //3D 数据控制
    C3DSceneSet *m_p3DSceneSet; //3D 场景设置
    C3DData *m_p3DData;
    .....
    void InitOpenGL3D (); //初始化图形设备
    bool GeoGLRendering (CDC *pDC); //渲染场景
    long NormalisationData (int type, long n, float *
pData, float u1, float u2, float &fmin, float &fmax,
float &scale); //标准化数据
```

```
void ColorLevelStand (int type, float level); //定义颜色等级
void GLDrawLegend (); //绘制图例
void GLDrawSur3D (int mode=3, int mx=0, int
ny=0, float dx=0. f, float dy=0. f, float *
pData=NULL); //绘制 3D 曲面图
....
};
```

3 软件功能

软件实现的主要功能有：①构造面的主曲率和 Gauss 曲率的分析计算；②地质构造面三维图形显示；③计算分析结果的三维图形和等值云图显示；④三维图形结果的切片显示；⑤三维图形显示控制（放大、缩小、旋转和动画漫游）；⑥不同投影模式、光照、纹理等三维效果。

4 应用实例

我们以江汉盆地王场地区潜二段底界构造面为应用实例。由软件分析得到的构造面三维图形如图 3 所示，得到的 Gauss 曲率等值云图如图 4 所示。得到的 Gauss 曲率等值云图反映出两个高值区。最高值区域与录井油气显示和测井裂缝显示有较高的吻合性（图 5）。另一高值区与录井油气和测井裂缝发育区也具有一定的相关性。

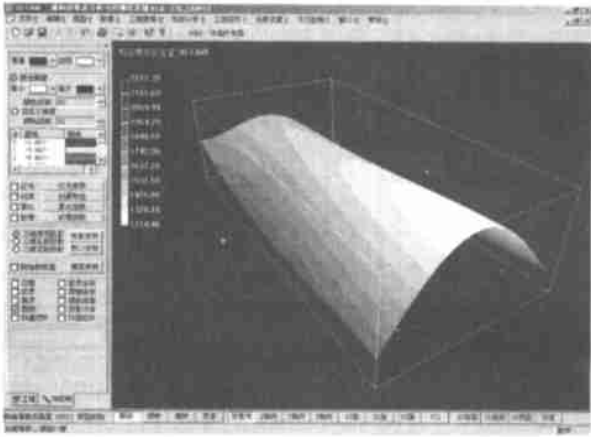


图 3 王场地区潜二段底面三维等值云图显示
Fig 3 3D Contour of the surface of the layer 2
in Qianjiang formation, Wangchang area

5 结 论

由微分几何学基本原理得出构造面主曲率和 Gauss 曲率的一般计算公式，具有普遍适用性。利用曲率的几何意义可以进行地质构造面的形态和弯曲变形程度分析。

软件将微分几何学、数值分析和三维可视化技

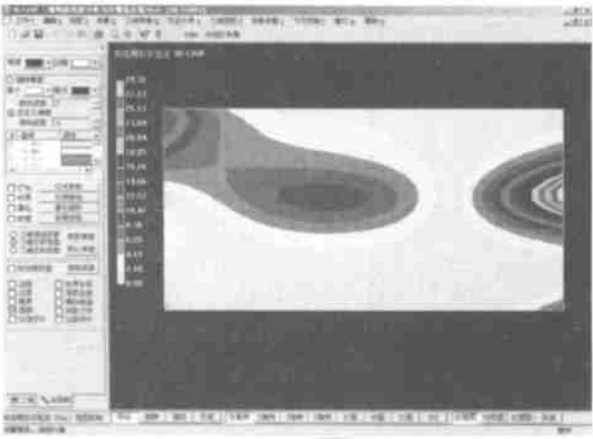


图 4 王场地区潜二段构造面 Gauss 曲率等值云图
Fig. 4 Contour of Gauss curvature of the surface of the layer 2 in Qianjiang formation, Wangchang area

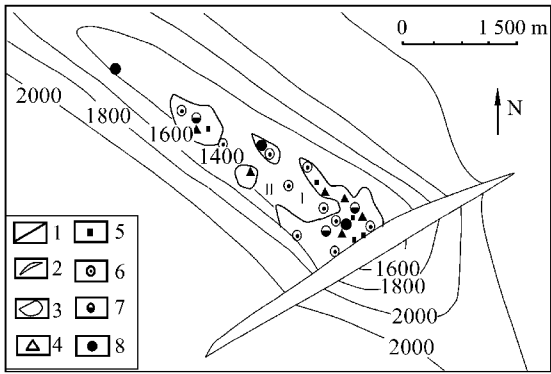


图 5 王场潜二段构造面裂缝及录井油气显示分布图^[2]
Fig. 5 Distribution of Fractures and log gas-oil shows of layer 2 in Qianjiang formation, Wangchang area
1. 等深线; 2. 断层; 3. 裂缝发育区; 4. 井喷;
5. 产油; 6. 井涌; 7. 井口显示; 8. 油花

术相结合, 实现了构造面的曲率分析计算与三维可视化。可供裂缝发育区预测、裂缝油气藏研究借鉴和使用。

参考文献:

[1] 曾锦光, 罗元华, 陈太源. 应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题[J]. 力学学报, 1982(2): 202—206.
[2] 梅廉夫, 李春梅. 江汉盆地王场地区泥岩储层裂缝演化及其模拟[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1995, 20: 256—263.
[3] 郭科, 胥泽银, 倪根生. 用主曲率研究裂缝性油气藏[J]. 物探化探计算技术, 1998, 20: 335—337.
[4] MURRAY G H. Quantitative fracture study —— Sanish pool McKenzie Country[J]. North Dakota. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1968, 52(1): 57—65.
[5] T. D. 范, 高尔夫—拉特. 裂缝油气藏工程基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
[6] LISLE R J, ROBINSON J M. The Mohr circle for curvature and its application to fold description [J]. J Structural Geology, 1995, 17(5): 739—750.
[7] Sait Ismail Ozkaya. QUADRO—a program to estimate principal curvatures of folds[J]. Computers & Geosciences. 2002, 28: 467—472.
[8] Sait Ismail Ozkaya. CURVAZ—a program to calculate magnitude and direction of maximum structural curvature and fracture—flow index[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 399—407.
[9] LISLE R J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994(78): 1811—1819.
[10] 梅向明, 黄敬之. 微分几何学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
[11] RICHARD S W, JR M S. OpenGL 超级宝典(第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

Development and Application of Software 3DCAVF
for Curvature Analysis and 3D Visibility of Structural Surfaces

LI Zhi yong¹, ZENG Zuo xun^{1,2}, LUO Wen qiang³

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, China;
3. Department of Mathematics and Physics, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper obtains the general expressions of the principal curvature derived from differential geometry and use the geometry meaning of curvatures to analyze the shape and the extent of deformation of structural surfaces. The bend extent of structural surfaces was taken as one factor for the forecasting of cracks, and the software 3DCAVF was designed for curvature analysis and 3D visibility. The main functions of the software were as follows: the calculation and analysis of the curvatures of structural surfaces, the analysis of deformation styles, contour and 2D/3D visibility of structural surfaces and analyzing results. It has been applied to the research of the crack oil gas resources.

Key words: principal curvature; Gauss curvature; 3D visibility; software development; crack oil gas resources