

# 利用切片法仿真模拟井眼轨迹的三维可视化\*

黄志强, 李洋, 郑双进

(长江大学 石油工程学院 湖北省油气钻采工程重点实验室, 湖北 武汉 430100)

**摘要:** 论述了基于井筒切片技术的三维井眼轨迹软件在 WPF 中的设计思路与实现过程。首先采用三次样条插值法模拟井筒轨迹曲线, 然后构建井筒截面切片, 最后依次连接各切片并对连接处作贴图渲染处理。可利用导入的参数绘出三维井眼轨迹图, 还可利用鼠标操作来实现对三维图形的缩放和视角变换等功能。油气井井眼轨迹的三维可视化以一种直观、逼真的效果呈现给工程技术人员, 使其摆脱了抽象和枯燥的井眼数据的束缚, 可以更好地解决钻井过程中遇到的各种技术难题。现场数据的测试结果表明, 软件能较为精确地反映井下状况, 并且操作简便, 符合钻井作业的实际需求。

**关键词:** 三维可视化; 轨迹模拟; OpenGL; WPF; 切片法; 样条差值; 最小曲率法

中图分类号: TE323

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)15-0048-03

## Using the method of slices to simulate well track 3D visualization

Huang Zhiqiang, Li Yang, Zheng Shuangjin

(Key Laboratory of Oil and Gas Drilling Engineering of Hubei Province, College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuban 430100, China)

**Abstract:** This paper discusses the design idea and implementation process of a three dimensional hole trajectory software which is based on the technology of OpenGL in WPF. First of all, the cubic spline interpolation method is used to simulated wellbore trajectory curve. And then, the shaft cross-section slice is built. Finally, it connects each section and does texture rendering with joints. User can use this software to import the necessary parameters. Software will display three dimensional hole trajectory accurately. And users can use the mouse to zoom 3D graphics or change perspective. Tested by site data, this software can show the underground condition accurately, and it is user-friendly controlled. It fits the actual need of drilling operation.

**Key words:** 3D visualization; trajectory simulation; OpenGL; WPF; sectioning; spline differential; minimum curvature method

井下三维可视化技术使工程师可综合利用地质数据和随钻测量数据, 及时直观地了解所钻地层的情况, 为科学安全钻井提供了有力保障。由于欧美大型油田服务公司在钻井信息化这一领域起步较早, 加之其成熟的软件开发模式, 其井下可视化技术在世界范围内一直处于领先地位, 具代表性的有斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司的 Osprey 钻井系列软件、兰德马克 (Landmark) 公司的 3D Drill View 软件以及美国 Seismic 公司推出的 Seismitarium 软件。近年来, 国内出现了许多由高等院校及科研机构开发的此类软件, 但与国外领先产品相比仍有较大的进步空间。本项目的开发人员采用 WPF 框架和 OpenGL 图形库设计并实现了此套三维井眼轨迹绘图软件。本软件的

整体设计思路如下: 先利用样条插值法计算出平滑的井眼轨迹中轴线, 然后构建圆心位于轴线上并垂直于轴线切线方向的井筒切片, 依次连接切片圆周上的等分点, 再经 OpenGL 的渲染及贴图加工, 即可得到符合要求的三维井眼轨迹图。

### 1 井筒轨迹建模

#### 1.1 井筒轴线的 3 次样条插值

油气井的井筒可视为这样一类管道: 其内表面是由一个半径确定的球滑动形成, 而球心的轨迹即是此井筒的中轴线。通常情况下得到的井眼轨迹参数是一组离散数据<sup>[1]</sup>, 如果简单地将相邻的两个数据点连接起来, 既不符合井下实际情况, 也有可能产生“狗腿角”<sup>[2-3]</sup>。本文采用 3 次样条插值计算井眼轨迹, 以尽可能减小误差<sup>[4]</sup>。

\* 基金项目: 国家油气重大专项 (2011ZX05021-006)

设某井段 $[a, b]$ 具有以下 $N+1$ 组测点参数:

(1) 井深:  $a=x_0 < x_1 < \dots < x_N=b$

(2) 井斜角:  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$

(3) 方位角:  $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$

可构造三次样条函数 $S(x)$ 和 $Q(x)$ <sup>[5]</sup>:

$$S(x) = \frac{M_{K-1}(x_k-x)^3}{6L_K} + \frac{M_K(x-x_{K-1})^3}{6L_K} + \left(\frac{\alpha_K}{L_K} - \frac{M_K L_K}{6}\right) \times (x - x_{K-1}) + \left(\frac{\alpha_{K-1}}{L_K} - \frac{M_{K-1} L_K}{6}\right) \times (x_k - x) \quad (1)$$

$$Q(x) = \frac{m_{K-1}(x_k-x)^3}{6L_K} + \frac{m_K(x-x_{K-1})^3}{6L_K} + \left(\frac{\phi_K}{L_K} - \frac{m_K L_K}{6}\right) \times (x - x_{K-1}) + \left(\frac{\phi_{K-1}}{L_K} - \frac{m_{K-1} L_K}{6}\right) \times (x_k - x) \quad (2)$$

其中,  $K=1, 2, 3, \dots, N-1$ ; 测距  $L_K=x_k-x_{K-1}$ , 单位为 m;  $M_K=S''(x_k)$ ,  $M_{K-1}=S''(x_{K-1})$ ;  $m_K=Q''(x_k)$ ,  $m_{K-1}=Q''(x_{K-1})$ 。

### 1.2 计算切片上等分点的全局坐标

设井筒切片是半径为 $R$ 的圆, 某一切片圆心为 $O_1$ ,  $O_1$ 的全局坐标为 $(x_1, y_1, z_1)$ 。求 $O_1$ 圆周上等分点全局坐标 $(x, y, z)$ 的步骤如下:

(1) 切片 $O_1$ 平移 $(-x_1, -y_1, -z_1)$ 后使点 $O_1$ 与坐标原点重合, 此时切片 $O_1$ 绕 $x$ 轴逆时针旋转 $\alpha$ , 绕 $y$ 轴旋转 $\beta$ , 使其法向量和 $y$ 轴正方向一致, 再以 $x$ 轴正方向与切片相交处为起点, 逆时针等分切片 $O_1$ 为 $n$ 份。

(2) 进行步骤(1)的反操作, 使切片 $O_1$ 回到原位。切片 $O_1$ 圆周上等分点的局部坐标与全局坐标的转换关系式<sup>[6]</sup>为:

$$(x, y, z) = (x', y', z') \cdot \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha \\ \sin\alpha\sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha \end{pmatrix} + (x_1, y_1, z_1) \quad (3)$$

其中,  $(x', y', z')$ 为切片上等分点的局部坐标。

### 1.3 构建相邻切片间的侧面

构建相邻切片间侧面的基本思路为: 假设上切片的 $n$ 个等分点为 $00, 01, 02, \dots, 0n$ , 下切片的 $n$ 个等分点为 $10, 11, 12, \dots, 1n$ 。依次连接 $00, 10, 01, 11, 02, 12, \dots, 0n, 1n$ , 其路径形如“之”字形, 将相邻切片的侧面分成 $2n$ 个三角形, 然后使用 OpenGL 中的贴图和渲染技术对各个三角形进行处理, 以达到逼真的效果<sup>[7]</sup>。

## 2 OpenGL 在 WPF 环境中的配置

### 2.1 开发环境简介

OpenGL 是一个跨语言、跨平台的用于二维或者三维图形显示的应用程序编程接口<sup>[8]</sup>, 其在 C#.Net 中有多种实现方式。本项目采用 CsGL (OpenGL 包装于 .Net 的类库) 来实现软件的需求。WPF 是微软公司近几年推出的基于 Windows 图形界面处理的技术<sup>[9]</sup>, 这项技术使界面设计人员与程序员的工作得到了有效分工, 并提供了丰富的 .Net UI 框架, 集成了 3D 视觉效果和强大的空间模型。利用这些技术可带来更好的用户体验, 另外 WPF 也是 Windows 应用程序的发展趋势<sup>[10-11]</sup>。

### 2.2 开发环境配置

配置开发环境的具体步骤如下:

(1) 新建一个“WPF 应用程序”项目。在此项目中添加“组件类”, 如图 1 所示, 令此类继承“OpenGLControl”。

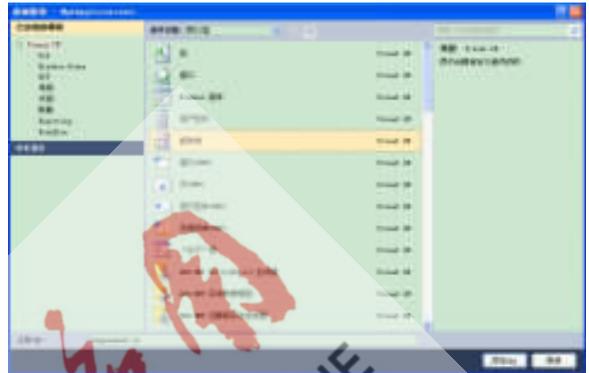


图 1 添加“组件类”

(2) 添加项目对“CsGL.Basecode.dll”、“csgl.dll”和“csgl.native.dll”3 个动态链接库的引用<sup>[12]</sup>, 如图 2 所示。



图 2 添加 CsGL 动态链接库的引用

(3) 在“组件类”中编写所有与 OpenGL 图形相关的操作。在“MainWindow”的构造函数中对“组件类”实例化并指定其在“MainWindow”中显示的各属性。

## 3 三维井眼轨迹软件设计与实现

### 3.1 软件功能需求分析

井眼轨迹三维可视化软件应具有对地层和井眼轨迹数据的前期处理功能, 地层与井眼轨迹的三维显示功能, Excel 文件的数据导入、导出功能以及通过鼠标控制视角观察生成的三维图形的功能。根据功能的划分可设计为图 3 所示的功能模块。

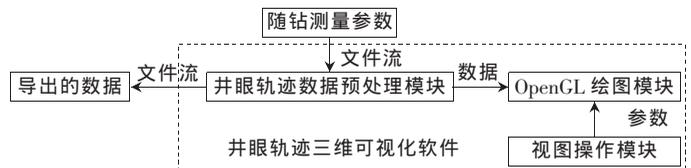


图 3 功能模块图

### 3.2 三维绘图的实现过程

三维绘图的具体实现过程如图 4 所示, 具体步骤如下:

- (1) 绘制坐标框架及刻度值;
- (2) 对导入的数据进行预处理;
- (3) 利用预处理所得的数据进行绘图。

《微型机与应用》2013 年第 32 卷第 15 期

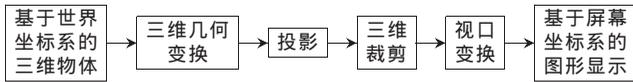


图4 OpenGL 绘图机理

其中,实现绘制井筒圆柱体的代码如下:

```
glLoadIdentity();
glTranslatef(0.0, -1.0, -5.0);
glRotatef(15.0, 1.0, 0.0, 0.0);
for(int i=0; i<N; i++)
    drawSurface(bottomVertex[i][0], bottomVertex[i+1][0], topVertex[i+1][0], topVertex[i][0]);
drawSurface(bottomVertex[N-1][0], bottomVertex[0][0], topVertex[0][0], topVertex[N-1][0]);
glFlush();
```

通过加入一个标志位 btn\_flag 来实现鼠标控制图形旋转的功能。当鼠标按下时,将 true 赋值给此标志位,并定义只有在 btn\_flag 为 true 时才将鼠标坐标赋值给图形坐标。

#### 4 软件应用实例

国内某定向井的实际测深为 4 040 m,垂深为 3 919.36 m,水平位移为 764 m,共有 143 组实测数据,具体参数如表 1 所示。把数据以 Excel 文件的格式导入本软件后,绘制的效果如图 5 所示。图中深色管道表示实际井眼轨迹曲线,浅色管道表示井眼轨迹的水平投影。

表 1 井眼轨迹测量参数

序号	井深/m	井斜角	方位角	垂直井深/m	NS 坐标	EW 坐标	水平位移/m	方位变化率	井斜变化率
1	0.00	0.00	69.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	75.00	0.36	69.92	75.00	0.11	0.21	-0.04	0.000	0.140
3	150.00	0.07	89.95	150.00	0.20	0.47	-0.04	8.010	-0.120
4	225.00	0.22	271.87	225.00	0.32	0.46	-0.16	-71.230	0.060
5	300.00	0.30	238.72	300.00	0.19	0.15	-0.13	-13.260	0.030
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
142	4 025.00	1.49	69.68	3 904.37	-638.79	204.70	670.76	13.610	0.050
143	4 040.00	1.50	70.23	3 919.36	-638.61	205.04	670.69	1.100	0.020

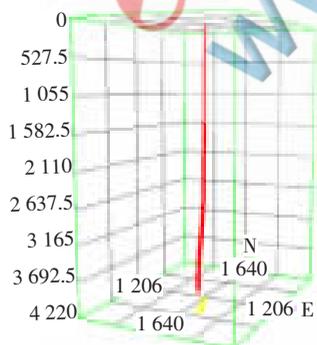


图5 三维井眼轨迹图(单位:m)

本文主要介绍了三维井眼轨迹软件的开发思路与技术要点。使用油气钻井作业中的实际数据对本软件进

行测试,结果表明,通过该软件绘制的三维井眼轨迹图像较为精确,立体感强,对油气钻井现场施工具有实际的指导意义。今后将在本软件的基础上添加显示地层、岩性和地下流体等元素,并逐步实现随钻测量系统与软件的实时数据传输功能。

#### 参考文献

- [1] 陈平.钻井与完井工程[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [2] 杨炯明.水平井眼轨迹三维可视化技术研究与应用[D].南充:西南石油学院,2002.
- [3] 黄志强,田海,郑双进,等.定向井实钻井眼轨迹三维可视化描述[J].西安石油大学学报(自然科学版),2009,24(4):79-82.
- [4] 白冬青.最小曲率法计算中的几个问题[J].断块油气田,2007,14(5):67.
- [5] 杜春常.用三次样条模拟定向井井眼轨迹[J].石油学报,1988,9(1):113-120.
- [6] 张敏.石油钻井井眼轨迹三维可视化建模[J].电脑知识与技术,2011,7(13):3182-3183.
- [7] 张德.基于OpenGL的钻井井眼轨迹可视化研究与实现[D].成都:西南石油大学,2011.
- [8] SHREINER D. The Khronos OpenGL ARB working group, OpenGL 编程指南[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [9] 李成刚,冯静,凌玲.基于WPF的交互式绘图系统的开发[J].微型机与应用,2011,30(6):50-52.
- [10] ESPOSITO D, SALTARELLO A. Microsoft .Net 企业级应用架构设计[M].陈黎夫,译.北京:人民邮电出版社,2011.
- [11] NAGEL C, EVJEN B, GLYNN J. C# 高级编程(第7版)[M].李铭,译.北京:清华大学出版社,2010.
- [12] 李洋.储层损害评价软件研究与设计[J].广东化工,2012,39(14):132-134.

(收稿日期:2013-05-17)

#### 作者简介:

黄志强,男,1964年生,硕士,教授,主要研究方向:油气井钻井完井技术。

李洋,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向:油气田信息化技术。

郑双进,男,1983年生,硕士,讲师,主要研究方向:油气井固井完井技术。