

技术 · 方法

# 基于组件技术开发三维地质建模软件的探讨

赵利民<sup>1</sup>, 赵永军<sup>1</sup>, 许亚权<sup>2</sup>, 柴 婧<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 (华东) 地球资源与信息学院, 东营 257061; 2. 江苏石油勘探局, 扬州 225009;  
3. 中石化胜利石油管理局测井公司, 东营 257096)

**[摘 要]** 用计算机模拟软件来直观展示地质对象的三维形态, 能准确地观察研究其内部蕴含的丰富信息, 为开发利用矿产资源提供有效的帮助。组件技术开发应用程序的发展为地学三维可视化软件的编制提供了新的思路。经过对地质建模实验系统的开发、研究发现, 在 .Net 环境下利用 RSI 公司的 MapObjects 组件和 DL 程序提供的 DLD rawW idget 及 slicer3 组件, 能够方便快速地实现对钻孔资料进行基于 GIS 的管理和最优空间插值、三维建模可视化及模型操作。最后对该系统的完善与拓展做出了展望。

**[关键词]** 组件 地质建模 GIS 三维可视化

**[中图分类号]** P628 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 10495-5331(2008)02-0092-05

## 0 引言

随着计算机技术的发展, 地学工作者开始用数字手段描述地质对象。通过对地学信息进行计算机三维模拟, 人们可以更直观、精确地描述地质体模型, 进行更准确的矿产储量估算, 并为地学分析提供有效支持<sup>[1]</sup>, 因此, 地学信息三维可视化成为 20 世纪 90 年代地学领域的研究前沿<sup>[2]</sup>。国外较早开始进行地学模拟软件的研制, 比较著名并形成商业应用的有加拿大的 LYNX、法国的 GeoCAD 以及澳大利亚的 Vulcan 等, 国内在这方面起步较晚, 但做了大量有益的探索<sup>[1]</sup>。目前大多数开发实例都是基于 OpenGL 标准, 利用高级程序语言从底层做起<sup>[3], [4]</sup>, 虽然灵活性较高, 且初始费用低, 但存在开发周期长、风险性及不确定性高等缺点<sup>[5]</sup>, 且往往缺乏对空间数据的灵活管理及专题图绘图输出, 也较少对空间模型的有效性进行评估, 不太适合要求较短周期、较高稳定性和准确性的三维地质模拟软件的开发。

组件 (Component Object Model, COM) 技术诞生于软件工程学, 目的在于为应用软件集成各种专业功能, 以提高系统开发效率。DLD rawW idget 和 slicer3 是 DL 为 Windows 程序提供编程控件, 它集成

了 DL 强大的科学计算能力和三维数据场显示、分析能力, 可作为编制地学模拟软件的强大辅助工具。另外, 由 RSI 开发的 GIS 组件 MapObjects 能够实现空间数据动态管理, 并可进行强大的专题图绘图输出。随着“组件”技术日臻成熟, 将上述二者有机集成于地学模拟软件的开发成为可能。文章结合工程实例, 探讨了在 .Net 环境中, 利用 MapObjects 组件与 DLD rawW idget 组件进行地学数据管理、建模、模型评估与可视化表达的原理和方法。

## 1 基于 GIS 的空间数据管理

### 1.1 地学信息的整理

地学中涉及的基础资料来源多种多样, 它们的共同特点是, 均包含了对空间方位的描述信息和相应位置的属性信息。如钻井数据, 作为研究三维地质体可视化的重要数据源, 它包括井口坐标、方位、倾角等空间位置数据, 以及钻井不同深度所揭示的岩层的岩性及产状、构造性质、矿体特征等属性数据。整理时将数据数字化后按空间位置与属性进行归纳, 并尽可能多地保留原始资料的信息。另外, 对于感兴趣的地球表数据, 如数字高程模型 (DEM)、数字线画图 (DLG) 等, 还需与钻孔数据进行坐标配准、投影归一, 并统一地图比例尺, 以便进行数据融合。按上述原则, 对辽宁

[收稿日期] 2007-01-15; [修订日期] 2007-03-05。

[基金项目] 1973 国家重点基础研究发展项目 (编号: 2002CB11700) 资助。

[第一作者简介] 赵利民 (1982 年—), 男, 2003 年毕业于中国石油大学, 获学士学位, 在读硕士研究生, 研究方向为 GIS 在地学中的应用。

省盘锦市某区块钻井数据进行预处理 (如斜井数据纠正等),结果见表 1。

表 1 钻井数据实例

井号	X坐标	Y坐标	Z/小层 顶深	层厚	小层	孔隙 度	渗透 率	.....
h210	501065.6	29441.5	165.4	1.7	y8md			
			167.1	3.5	y81			
			170.6	.....	y82			
			.....	.....	.....			
h211	501200.9	29217.2	163.4	1.3	y8md			
			164.7	.....	.....			

辽河油田测井公司, 2005。

1.2 GIS信息管理模块开发环境

由于 GIS对数据的管理可以采用面向对象或集成化 (一体化)的管理模式,因此,用 GIS对数据进行管理、数据的提取和修改都十分灵活和方便。考虑到本实验并没有涉及复杂的地学空间分析,但要求较短的开发周期和较强的扩展性、稳定性,故信息管理模块采用 GIS组件式开发模式,在 .Net环境下用 C#语言引入 MapObjects (MO)组件。MapObjects 是美国环境系统研究所 (RSI)产品系列的组成部分,包括一个 OLE控件和 45个具有属性、事件和方法的 OLE对象,可以与 RSI其它产品 (如 ArcSDE)很好地衔接。

1.3 GIS信息管理模块主要功能

**数据访问** 通过读取文件或数据表的方式,引入经归纳、整理并预处理的地学数据,对图形数据和属性数据进行配准,并按属性类 (如地层)分层管理,实现数据访问 (增加图形属性值,或从地图特征上反馈属性信息)。上述功能可由 MO 组件中的数据访问对象组 (Data Access Objects)实现。

**地图显示** 用符号、文本或线条显示专题图,也可加入图像作为背景,在地图上显示动态数据。能够进行数据层叠置显示,也可进行简单的地图操作 (测距、缩放、漫游、闪烁选区等)。上述功能可由 MO 组件中的地图显示对象组 (Map Display Objects)实现。

**统一边界** 依据从图层中选择的特征反馈几何图形信息,并对研究区域确定统一的标准边界,用叠加和切边操作使各数据层的边界完全一致,并向空间数据插值模块输出选区离散数据。上述功能可由 MO 组件中的几何图形对象组 (Geometric Objects)实现。

2 空间数据插值

由于选区离散数据的不充足以及空间分布的不

均匀性,在进行地质体三维重构之前,需要用离散数据网格化的方法,将不规则的离散数据转化成规则的网格化数据,并增加原来数据的精度。一种经济可行的实现途径是,在开发环境中引入科学计算工具所提供的控件来完成一些复杂的插值运算。DL (Interactive Data Language)作为一种集成了所有科学计算环境中所需函数的面向矩阵运算的可视化语言,它提供了 ActiveX 控件 DLDrawWidget和 slicer3,为 Windows程序集成 DL 机制来实现数据的分析与可视化。另外,由于 DL支持真体数据的显示,并采用了 OpenGL 技术,可加速交互式的 2D 及 3D 数据分析、图像处理及可视化,很适合地学模拟工作,故选择它作为插值运算和三维重构的工具。

2.1 DL与 .Net的通信

可由 C#调用 DLDrawWidget控件提供的 SetNamedArray和 SetNamedData方法建立 C#与 DL 的共享数组,这样,C#或 DL 中任意一方的数组将随另一方的变动而变动,相当于互为镜像。语法如下:

```
Short AxDLDrawWidget SetNamedArray ( string  
strName, object vData, bool bDestroyOnFree);  
Short AxDLDrawWidget SetNamedData ( string  
strName, object vData);
```

可由 C#调用 DLDrawWidget控件的 ExecuteStr方法实现对 DL的操作,包括:执行 DL 内部命令、函数或过程或调用用户自定义的 DL 函数或过程。

2.2 插值运算

DL 包含多个曲面插值函数,有几何方法 (如线性插值三角网)、函数方法 (如最小曲率)也有统计方法 (如 Kriging等),不同的模拟对象选择的插值方法不尽相同。我们采用了地学数据处理中较常用 3种插值方法。

改进谢别德法 (Modified Quadratic Shepard)

DL 中改进谢别德插值函数的语法结构为  
 $result = grid3 (x, y, z, f[, delta = scalar/vector] [, dtol = value])$

其中  $f$ 是与  $x, y, z$ 具有同数量元素的数组, $delta$ 表示格网间距。

克里金法 (Kriging)

DL 中克里金插值函数的语法结构为  
 $result = krig2d (z[, x, y][, method = vector])$   
其中  $method$ 表示插值模式,包括球模式 (spherical)和指数模式 (exponential)。

最小曲率法 (Minimum Curvature)

DL 中最小曲率法插值函数的语法结构为

`result=min_curve_surf(z[, x, y][, /double][, /tps])`

其中 `double`强制数据为双精度; `tps`使用薄板样条法,设空时默认为最小曲率法。

以上只是几种较有代表性的插值方法,其它方法诸如泰森多边形分析、自然临近点插值、径向基函数插值等等不一而足,各有优劣和适宜情况。同一数据,采用不同内插方法,结果往往截然不同,故需慎重选择插值模型。

2.3 插值模型的评价与选择

地质数据的插值处理必须考虑地质原理和相关制约条件以及数据分布特点,在充分了解各插值方法基本理论的基础之上,选择恰当的插值方案,不能简单地直接套用常规自动插值方法。插值完成后还需插值方法评价,并重新选择插值方法直至合理。

我们采用以下几个统计指标来对插值有效性进行评价:

平均误差百分比 (Percent Average Estimation Error, PAEE)

$$PAEE = \frac{100\%}{Z_1 n_i} \sum_{k=1}^{n_i} [Z_i^*(X_k) - Z_i(X_k)]^2$$

其中,  $Z_i(X_k)$ 为位置  $X_k$  随机变量  $Z_i$  的估计值,  $Z_i(X_k)$ 为位置上的样点值,  $X_k$  为样点均值,  $Z_i$  如果 PAEE 趋向于 0,则认为估计是无偏的;

相对均方差 (Relative Mean - Square Error, RMSE)

$$RMSE = \frac{1}{s_2 n_i} \sum_{k=1}^{n_i} [Z_i^*(X_k) - Z_i(X_k)]^2$$

其中  $s^2$  为样点方差;

均方根预测误差 (Root - Mean - Square Prediction Error, RMSPE)

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} [Z_i^*(X_k) - Z_i(X_k)]^2}$$

RMSPE 值越小,预测值就越接近它们的真实值,这点可用来比较插值方法的优劣性;

残差 (Residuals)

$$Z_{res} = Z_{dat} - Z_{gnd}$$

其中  $Z_{res}$ 为残差值,  $Z_{dat}$ 为数据文件中的  $z$  值,  $Z_{gnd}$ 为该点格网值。残差可用于定量估计源数据的  $z$  值与格网化方法内插  $z$  值之间的一致性,并可计算出平均残差和标准残差。

我们选取 10 个钻井资料来检验地层模拟定有效性。对其中一个小层 (y8md) 的钻井数据分别进行改进谢别德插值、克里金插值和最小曲率法插值,计算了原始钻井数据和模拟数据之间的残差,并进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 某小层不同插值模式残差比较

钻孔编号	X坐标	Y坐标	观测值	MQS残差	Kriging残差	MinC残差
201 - 10	501065. 6	29441. 5	165. 4	0. 762936	0. 091470	- 0. 061331
201 - 11	501200. 9	29217. 2	163. 4	- 0. 796514	- 0. 051260	- 0. 104666
201 - 12	501511. 9	30094. 2	159. 3	- 0. 110189	0. 000000	0. 000000
201 - 13	501256. 4	30083. 5	155. 8	0. 401258	- 0. 010866	- 0. 027584
201 - 14	501096. 9	29898. 9	155. 6	- 1. 200150	- 0. 115954	0. 225630
201 - 15	500995. 5	29685. 7	163. 4	1. 068928	0. 137125	0. 112975
201 - 16	500887. 1	29528. 1	160. 6	- 0. 768565	- 0. 044248	- 0. 054225
201 - 17	500934. 4	29226. 2	160. 6	- 0. 062785	- 0. 034927	- 0. 094122
201 - 18	501080. 6	28989. 8	162. 2	0. 109671	- 0. 039762	0. 086426
201 - 19	501321. 7	29002. 2	168. 3	0. 467104	0. 041286	0. 023436

根据插值有效性指标对不同模型的有效性评价,如表 3 所示。

表 3 插值模型有效性比较

模型	PAEE	RMSE
MSQ	0. 297131	0. 033571
Kriging	0. 003086	0. 000349
MinC	0. 006130	0. 000693

在对选定的 10 个钻井资料空间插值效果评定,通过计算评价估计误差百分比 PAEE、相对均方

94

差 RMSE,结果显示 Kriging 法残差、PAEE 和 RMSE 均最小,表明 Kriging 方法明显好于其它方法,其次为最小曲率法和改进谢别德法。

3 地质体可视化

我们由以下思路进行三维地质模型重构:先将空间数据按层网格化,插值构造出曲面,形成各地层的分界曲面;将地质体切分成规定层数的均匀平面,根据地层分界曲面获取这些平面上各点的属性值;

连接上下网格节点,构造出规则直六面体单元来填充地质体,各单元即为构成体数据的体素。

3.1 构造规则子块体

地质体三维重构之前,首先构建为足够精度的三维体数据  $N_x \times N_y \times N_z$ ,每个规则子块体称为体素,体素内任意一点的值由八个顶点上的采样值三次线性插值计算,如图 1 所示。

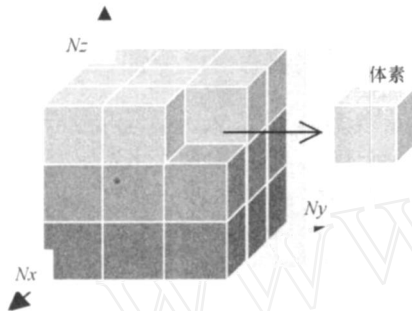


图 1 规则子块体构成的地质空间区域示意

在 DL 中,体数据由一个三维数组表达:

$$vol = NTARR(N_x, N_y, N_z)$$

其中 vol 为  $N_x \times N_y \times N_z$  的三维数组,将数组定义为整型以便用颜色值标定体素属性。 $N_x, N_y$  使用网格化时定义的网格数。在垂向 (Z) 上,按整个钻井最深井层平均分层,层数 ( $N_z$ ) 可根据实际情况需要调整密度,理论上  $N_z$  越大模型越精确,但数据量随之很快增长,故需折中选取  $N_z$ 。 $[X, Y]$  处深度为  $Z$  的点的属性值可根据分层间距计算,与插值得到的数据  $[X, Y]$  相对应单元相比,便可获得  $[X, Y, Z]$  处属性。

3.2 三维地质体显示

首先在 DL 中用 DLgrVolume 构造一个代表三维地质体的对象 Obj\_vol:

```
Obj_vol = OBJ_NEW('DLgrVolume', vol)
```

显示这个三维地质体主要包括三个过程:

```
Obj_model = OBJ_NEW('DLgModel')
```

```
Obj_view = OBJ_NEW('DLgrView')
```

```
Obj_window = OBJ_NEW('DLgrWindow')
```

它们分别定义了一个模型对象、一个视图对象和一个窗口显示设备对象。

据此流程,我们从 GIS 模块中划定模拟区域(包含 10 个钻井数据),按地层分别进行 Kriging 插值,并对其中 3 套相邻地层进行三维重构,生成立体模型,见图 2、图 3。

3.3 地质体切割及专题图输出

DL 可以快速实现地质体三维模型的一些交互

操作,如旋转、平移、缩放等。应用 Slicer3 控件可实现地质体交互式切块和切片分析;应用 contour 过程则可以进行等值线的绘制与填充。对图 3 模型进行按纵深切块和切片,结果如图 4、图 5 所示。

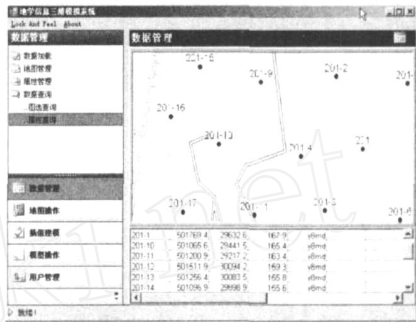


图 2 基于 GIS 的钻孔数据管理

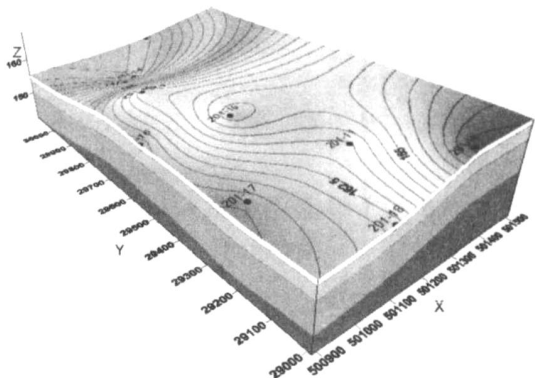


图 3 选定区域的地质对象三维模拟图

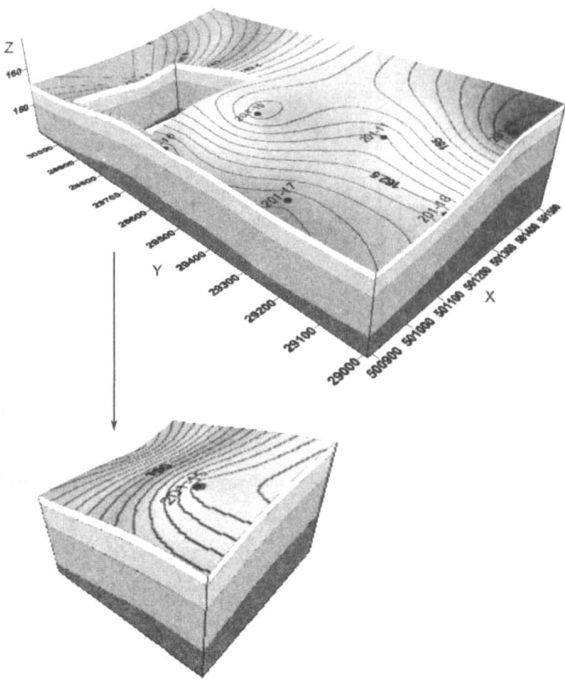


图 4 沿 Z 轴对选定区域切块

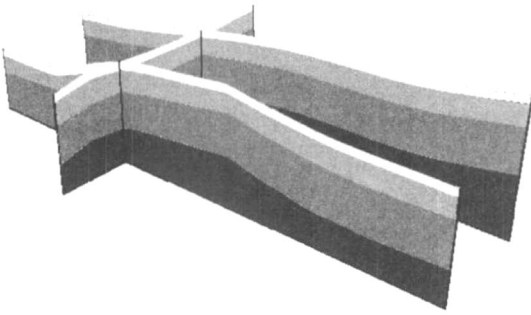


图 5 沿 Z轴任意切片

#### 4 结语

国内外一些科学计算工具提供的插件为在 Windows 程序中集成空间数据模拟、分析功能提供了很大的方便,基于“组件”技术相关应用系统的开发在“数字地质”中有广泛的应用前景。利用文章提出的方法所构造的实验系统,对某地质区块地质数据基本实现了基于 GIS 的科学管理和地质三维重构与图形显示,但还需很多改进,如:在插值过程中对大断层及地层不整合面的考虑,利用 DL 控件 slicer3 进行储量估计和品位分析,以及对大量属性相同的“体素”实现压缩存储等,都有待进一步研究。

##### [参考文献]

- [1] 郑贵洲,申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟研究现状 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 218 - 223.
- [2] 曹代勇,李青元,等. 地质构造三维可视化模型探讨 [J]. 测绘科学, 2001, 37(4): 60 - 62.
- [3] 曹代勇,朱小弟,等. OpenGL 在三维地质模型可视化中的应用 [J]. 中国煤田地质, 2000, 12(4): 20 - 23.

- [4] 李芳玉,陈传波. 基于 OpenGL 地质模型三维可视化图形显示方法 [J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23(1): 20 - 21.
- [5] 刘光,刘小东. 地理信息系统二次开发实例教程 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [6] 盖迎春,冯敏,等. DL 与 .Net 环境通信机制研究 [J]. 遥感技术与应用, 2006, 20(3): 350 - 354.
- [7] 赵鹏大. 定量地质学方法及应用 [M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [8] 僧德文,李仲学,等. 空间数据插值算法与矿体形态模拟的研究 [J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(3): 67 - 69.
- [9] 闫殿武. DL 可视化工具入门与提高 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [10] David W. Fanning. Coyote's Guide to DL Programming [EB/OL]. <http://www.dfanning.com>, 2006.
- [11] 李汉林,赵永军. 石油数学地质 [M]. 东营:石油大学出版社, 1998.
- [12] 黄海峰,包世泰,等. 初探 DL 在地质三维建模中的应用 [J]. 地质与勘探, 2004, 40(6): 53 - 55.
- [13] 张君,李星. 利用 DL 进行地质数据处理的多种插值方法 [J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(1): 49 - 53.
- [14] 李新,程国栋,等. 空间内插方法比较 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 260 - 264.
- [15] R. Marschallinger. Three-dimensional reconstruction and visualization of geological materials with DL [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(4): 419 - 426.
- [16] Qiang Wu, Hua Xu, Xukai Zou. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration [J]. Computers & Geosciences, 2005, (31): 35 - 43.
- [17] 唐丽玉,陈崇成,等. 基于 DL 的地质体真三维重构与可视化探讨 [J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 79 - 81.
- [18] 潘炜,刘大安,等. 向家坝水电站坝址三维地质建模研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1317 - 1322.

## DISCUSSION OF DEVELOPMENT OF 3D GEO - MODELING SYSTEM WITH COM TECHNIQUE

ZHAO Li - min<sup>1</sup>, ZHAO Yong - jun<sup>1</sup>, XU Ya - quan<sup>2</sup>, CHAI Jing<sup>3</sup>

(1. College of Geo - resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061

2. Jiangsu Bureau of Oil Exploration, Yangzhou 225009;

3. Well Logging Company, Shenghi Petroleum Administration, SINOPEC, Dongyin 257096)

**Abstract:** 3D pattern of the geological body revealed directly by software of computer modeling can precisely observe plentiful inner containing information, and provide effective help for developing and utilizing mineral resources. Development of application software of component techniques supplies a new thought for program composition of geoscience 3D visualization. Based on development and studies of geology modeling system, using MapObjects component of RSICorporation, DLDrawWidget and slicer3 of DL software under .NET environment, management and optimum space interpolation, 3 - D reconstruction visualization and modeling of drilling data can be realized conveniently.

**Key words:** component, geological modeling, GIS, 3D visualization