

基于 Open Inventor 的重点海域地质体三维模型构建

孙记红^{1,2}, 魏合龙^{1,2}, 王 诏^{1,2}, 何书锋^{1,2}, 刘 展³, 张 伟⁴

(1 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266701;
3 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266555; 4 渤海钻探井下作业公司, 河北任丘 062552)

摘 要:地震勘探解释成果图是油气勘探开发行业最常用的一种图件。通过对地震勘探解释成果图所展示的复杂地质构造进行建模, 并对其进行三维可视化查询和显示, 可以有效地为海洋油气勘探开发提供决策依据。通过对重点海域地质体三维模型构建及可视化方法的研究, 建立了一套模型构建流程, 基于 Open Inventor 平台开发了地质体三维建模及可视化软件, 结合实际海洋地质地震勘探解释成果资料的应用, 表明该模型构建方法可以有效地建立地质体三维模型, 具有良好的应用价值。

关键词:Open Inventor; 地质体三维模型; 可视化

中图分类号:TP311

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.03007

近年来, 三维地质建模和可视化方面取得了诸多重要研究成果, 同时也存在着诸多问题, 比如: 对三维空间数据模型缺乏统一的认识; 原始地质数据获取艰难及其空间关系的极端复杂等。目前复杂地质体的三维模拟面临巨大困难, 主要表现在 3 个方面: 一是三维空间数据的获取艰难, 稀疏以及不充足的数据导致数据模型的建立十分困难; 二是地质体的空间关系复杂, 断层将地层切割成不连续的空间分布, 使地质体及其空间关系变得异常复杂; 三是空间分析能力的局限性, 地质现象的复杂性和不确定性以及模型的应用各异等因素导致现有的系统缺乏空间分析能力^[1]。复杂三维地层可视化研究是研究含断层地层的有效方法, 利用该方法可以把多源三维地质数据融合处

理到一个最优的模型中来表达地下复杂的地层情况, 而且能反映地质构造形态和属性特征。

1 研究现状

在地学领域, 三维可视化技术的研究和应用使传统二维静态的平面图表达向三维动态的虚拟地质环境表达方向发展, 利用地学三维可视化技术可以对地下复杂的三维空间对象进行详细、直观的表达和分析, 有助于更加全面和准确地了解三维地层结构, 分析其中的规律或趋势, 能很好地为科学研究、生产工作及宏观规划提供综合分析和决策支持服务^[2-6]。对于海洋油气资源调查来说, 尤其是对地震解释剖面成果图、构造图进行三维可视化显示, 使得地质人员对重点海域地质构造有更直观的了解, 这对提高海洋油气勘探决策水平和加快油气勘探进程具有重要意义^[7-9]。

在重点海域油气勘查中获取的数据类型多样, 尺度不一, 均统一存储在传统关系数据库中, 难以直接实现数据的可视化展示与查询, 无法实

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 中国地质调查局二级项目 (DD20160157, DD20160156)

作者简介: 孙记红 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事数据库建设及地理信息系统方面的研究. E-mail: linyu0546@163.com

现数据的可视化挖掘与综合评价,难以为其他相关部门提供可视化的决策指导。为进行可视化查询、综合对比分析、数据挖掘和综合评价等业务服务功能,需要对研究区域的调查数据进行三维地质体的建模与可视化表达。笔者结合重点海域油气勘查相关调查取得的地质地球物理资料,基于研究区域的地震地质解释剖面成果、各地质界面等深度构造图等成果数据与图件,结合现有的三维地质体建模方法^[10-19],建立适合重点海域三维地质体模型构建方法,进行三维地质体模型构建,并基于 Open Inventor 平台进行地质体模型可视化展示,实现剖面图与构造图等数据源信息与三维地质体模型的可视化展示。同时基于属性数据进行地层层位信息的查询,根据预设井位信息实现地层信息查询,生成预设井位柱状图,为相关工程组提供支持。

2 地质体三维模型构建

地质体三维模型构建是利用相关输入数据,在计算机中进行一系列处理后输出符合特定应用目的的地质体模型的过程。本文采用构建地质体模型的输入数据主要是不同地质层位顶面等深度构造图、地震解释剖面成果图、测线与钻井位置分布图、钻井柱状图,利用体模型建模方法经计算机处理后输出为 *.gmd 自定义格式的地质体模型。

2.1 模型构建原理

地质体三维模型的数据组织采用不规则六面体为基本单元的角点网格模型来表征地质信息,每个六面体由 8 个角点组成,遵循以下规则:以不规则六面体为模型最基本单元;在地层尖灭等特殊构造单元附近,每个体元仍由 8 个角点组成,但其中若干个(<5)角点空间坐标相同,此时基本体元退化为五面体或四面体;各个体元间相互邻接但不重叠,无断层时,相邻网格公用一个四边形;出现断层时,断层面两侧网格之间没有公用面。

在没有断层或者地层尖灭的情况下,每个体元都是不规则的六面体且两个相邻网格单元共用 4 个角点、一个四边形面。除模型边缘和断层位置处的一些空间点外的其他角点都会被重复利用

2~8 次。存储模型的空间信息时,如果以体元为基本单元存储每个体元的 8 个角点坐标,则每个角点的坐标将会被重复存储多次,引发数据冗余。

为解决数据冗余问题,文章提出了一类无冗余的数据组织模式:用两套数据集来表达模型的空间结构,模型所有角点的坐标数据集、各个体元角点坐标的索引数据集。角点坐标数据集存储整个模型中所有角点的三维空间坐标,位置相同角点的坐标只被存储一次。体元角点坐标索引数据集按 I,J,K 3 个方向的先后顺序,以网格为单元存储每个体元 8 个顶点在角点坐标数据集中的索引值。因此对于每个体元而言只需存储其 8 个角点坐标的索引值(共 8 个整型数据),而非 8 个角点坐标(24 个浮点型数据)。

文章定义了 *.prj 工程文件格式和 *.gmd 模型文件格式。每个工程文件由 4 部分组成:模型地层层数、每个地层的空间包围盒、按从浅到深顺序保存的地层散点文件路径和三维地质模型的空间包围盒坐标。每个模型文件由五到十部分组成,分别为模型文件头、散点坐标、三维拓扑信息、网格有效性和地层属性信息;当模型包含断层时,向模型文件追加断层面散点和断层拓扑信息;当对模型进行更新时,修改模型的文件头和网格有效性,并向模型文件追加新输入散点的三维拓扑信息、散点坐标和属性信息。

(1) 模型文件头

模型文件头存储模型 I,J,K 3 个方向的网格维度,地层散点文件的散点数等基本信息,对模型快速读取和渲染作用巨大(表 1)。

表 1 模型文件头组成

Table 1 Composition of model file header

文件类型	扩展名	说明
I 方向网格维度	int	4 * 8
J 方向网格维度	int	4 * 8
K 方向网格维度	int	4 * 8
是否包含重力观测文件	Bool	1
是否包含地层年龄	Bool	1
是否包含 beta 文件	Bool	1
地层散点格式	Int	4 * 8
地层包含属性个数	Int	4 * 8
每个属性极值	Float	属性个数 * 2 * 4 * 8
属性名称	String	由实际情况确定

(2) 散点坐标

散点坐标从输入文件中读取后转换为二进制格式,保存在头文件之后。每个地层散点坐标包括 X,Y,Z 3 个 float 型数据,共占 12 字节存储空间,因此,散点坐标所占字节数为 $12 \times \text{每个地层散点个数} \times \text{地层散点文件总数}$ 。

(3) 三维拓扑信息

散点坐标标定了每个地层散点的空间位置,但是杂乱无章的空间点无法模拟地层的实际情况,需要进一步定义空间散点的连接方式,散点的连接方式保存在拓扑信息中。

(4) 网格有效性

网格的有效性用一个布尔量来表示,若其为真,则表明该网格处于有效数据边界内,否则处于有效数据边界外。在构建三维地质模型时,出于方便建立索引的目的,仍保存处于有效数据模型边界外的地层散点坐标和点号,但将其网格有效性设为假,在模型展示时屏蔽网格有效性为假的网格。

(5) 地层属性信息

地层属性信息保存空间点对应的属性信息,如重力异常、地层年龄等。属性信息可以直接从输入文件中读入然后转换为二进制形式存储到模型文件中。

(6) 断层散点及拓扑信息

当模型中存在断层时,需要向模型文件断层散点和拓扑信息,散点坐标和拓扑信息的存储方式与地层散点相同。

(7) 模型更新

当有新的输入数据对模型进行更新操作时,需要修改模型文件的文件头和网格有效性,并存储新加入数据的散点坐标、拓扑信息和属性信息,模型更新数据的组织方式与原有模型一致。

2.2 模型构建流程

模型构建流程包括构建初始地层模型、构建断层模型和地质体三维剖面与二维剖面模型构建三部分。

(1) 构建初始地层模型

本文建模采用的是相控建模方法,即以地层为基本单位,圈定每层地层边界构建地质体模型。建立一个三维地质体模型至少需要 2 个地层文

件,每个地层数据独立存在,计算机不能直接判断各地层数据的关系。一般来讲,上覆地层平均高程值比下层地层平均高程值大。通过遍历每个地层文档,计算每个地层的平均高程值,平均高程值大的为上覆地层,确定所有地层层序并输出到工程文件中。

对于数据区域内部的地层错乱可以参照剖面图的构造信息进行消除,但在图形数据边界附近没有测线剖面参照,在执行过程中对于该区域的处理认为是下层地层解释有误,将下层地层深度赋予上层地层的深度值。这样处理虽然消除了地层错乱,但在模型边界处出现了地层的突变等情况。

(2) 构建断层模型

由于断层的断点数据、断层属性信息不易获取,要得到数据类型单一、数据量密集的数据较为艰难,所以断层建模相对困难,本文以多个地层上的断层线为约束,构建三维断层模型。如图 1 所示,断层线为图中的红、蓝线,位于断层上下盘间的分界处,断层线数据通过地层断裂平面图和地震测线解释剖面图获取,对初始地层模型进行修正并向模型文件中追加断层的信息,完成断层模型构建和断层信息存储。

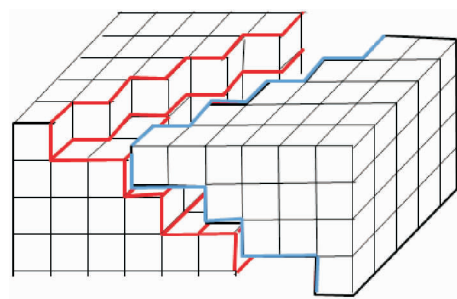


图 1 断层线示意图

Fig. 1 The diagram of a fault line

以模拟一条断层线为例,首先确定出断层线上的离散点与三维地质体模型上相对应的网格角点索引,依次根据断层线相邻 2 个离散点数据,通过空间线性插值算法求出三维地质体上的断层线。由于在三维地质体模型中,是通过角点点位来模拟地质体形状和位置,采用共用角点的方法建立地质体的拓扑关系,因此在断层线建模时,需

要确定断层线所经过的网格,以此确定出相关离散角点。根据四舍五入原则确定角点,当线性插值确定的断层线与网格边线的交点小于当前边线长度的一半时,则插值点为坐标值较小的角点,反之则为坐标值较大的角点。

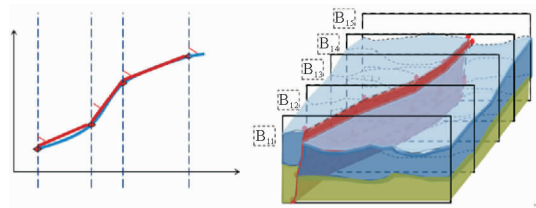
断层的上下盘是相互独立的两部分,由于两盘的岩体有着不同的形变,为了更好地独立处理两盘,需要在断层线处做特殊处理。具体地说,在确定出代表断层线的一系列离散角点后,对该套角点进行复制,复制出的新角点与原角点的位置相同,这样相当于在上下盘之间形成了 2 条断层线,保持原角点与左盘相关体元的拓扑关系,建立新角点与上盘相关体元的拓扑关系,用这两套角点独立模拟断层的断距和上下盘的形变。

断层建模流程(图 2)如下所述:

第 1 步:生成断层线,根据断层线数据,计算出三维模型上与之匹配的离散点索引号,以确定断层线在三维地质体模型中的位置;

第 2 步:生成断层面,在同一地层上,采用空间线性插值算法插值生成断层线,对所有地层做相似处理,则确定出一系列断层线,依据上文所述的方法复制角点、对新角点构建拓扑关系,则生成了两套断层线,所有断层线经过的体元共同组成断面,因此存在 2 个断面,一个为上盘的断面,一个为下盘的断面;

第 3 步:生成断层体,由于生成断层模型时,断层附近的岩层会发生不同程度的变形,所以在插值时,需要充分考虑地层的重构,根据断层大小确定断层范围,对左右盘分别进行处理,最后生成完整的三维断层模型。



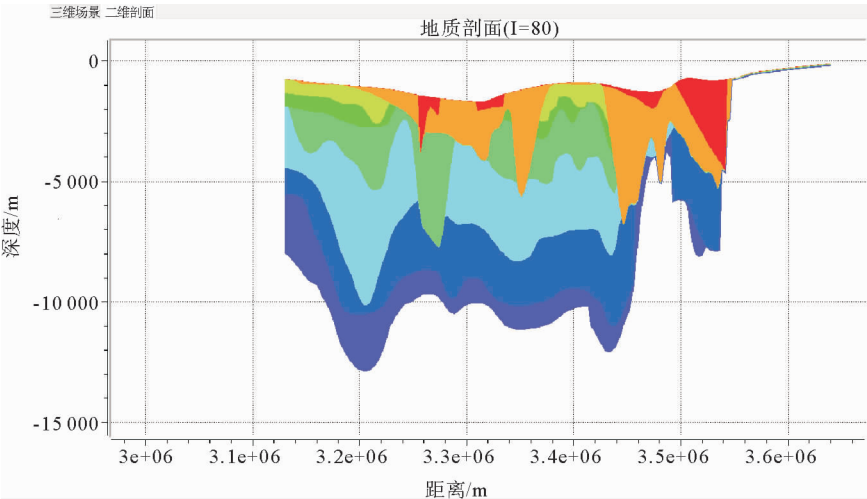


图 3 同一剖面图在二维展示环境下的效果图

Fig. 3 Display of a section in 2D environment

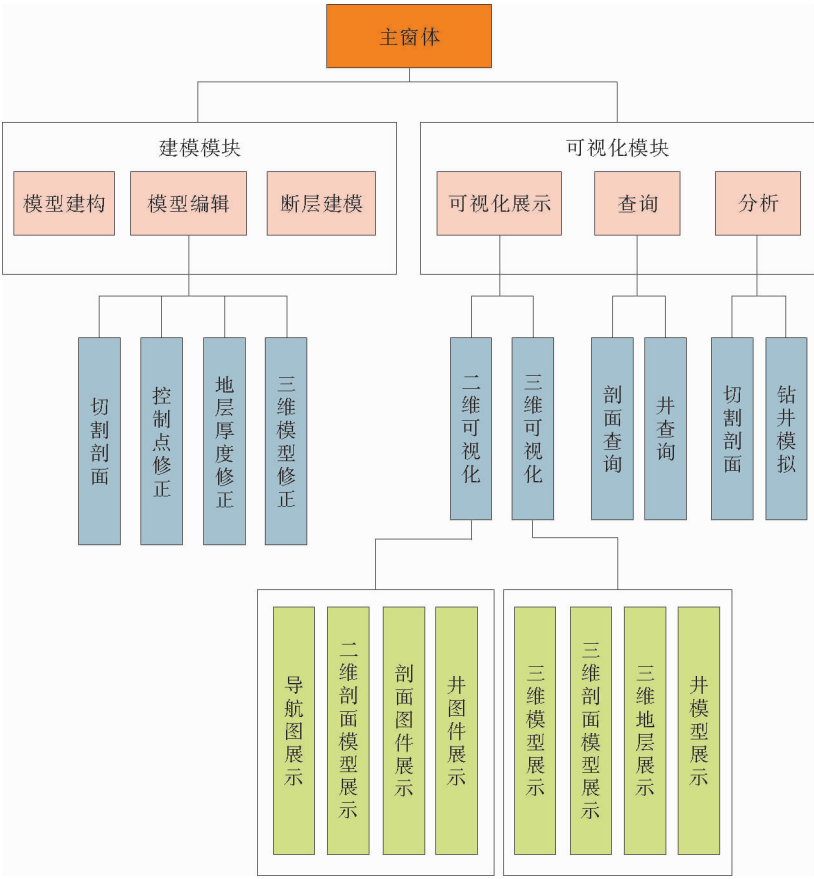


图 4 软件功能模块设计图

Fig. 4 Design of software function modules

模型编辑 相比较显示建模方法,隐式方法建模是通过导入数据,完全由计算机自动快速建

立模型,由于缺少人工干预,可能会存在局部区域与真实地质构造不符的现象,因此,需要增加模型

编辑功能,对局部地质模型进行微调,使之与真实情况一致。模型编辑功能包含切割剖面、修正控制点、修正地层厚度与修正三维模型等内容。

断层建模 包含导入断层线数据和建模两部分。断层线文件名需要标注所属地层、断层以及上盘(或下盘),断层数据为每条断层的离散点(x,y,z)坐标。

(2) 可视化模块

可视化模块包括可视化展示、查询和分析功能。可视化展示主要包含二维可视化展示和三维可视化展示,三维剖面与地层模型展示以及二维剖面图件展示与井图件展示等。

油气勘查重点海域目前资料主要为构造图、地震剖面图与井图,查询功能主要是根据系统可视化展示的导航图或者模型,查询相应的测线、钻井等解释成果图件信息。

分析功能是业务人员根据需求切割剖面,以二维和三维剖面的方式进行展示;通过输入三维空间坐标,预测过该点的钻井将通过研究区的地层,并计算出模拟的钻井穿过每个地层的厚度。

3.2 模型实例

根据上述地质体模型构建方法,对油气勘查重点海域数据类型特征及其数据组织特点进行分析,根据数据特征,融合多种类型数据,进行了地层模型构建、剖面模型构建、断层模型构建和地质体模型构建(图5)。基于 Open Inventor 三维引擎,采用 C++ 开发语言,开发了油气勘查重点海域地质体模型构建软件,实现了基于地震解释成果图数据的海洋地质三维可视化。该软件包含数据模型构建模块、模型编辑模块和可视化展示模块,能够进行地质体模型的可视化展示、测线剖面

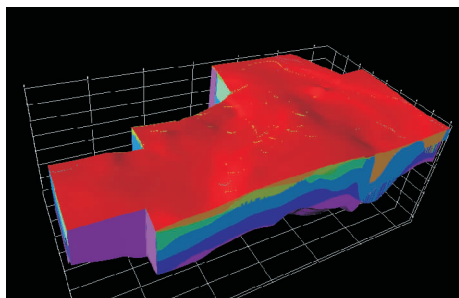


图5 地质体模型展示效果图

Fig. 5 Display of the model for a geologic body

图查询、钻井柱状图查询、虚拟钻井分析等,强化了人机交互功能。

4 结论

海洋地质调查地震勘探解释成果图是海洋油气勘探中所用到的重要资料,是指导海洋油气勘探开发的重要依据。通过对地震勘探解释成果图所展示的复杂地质构造进行建模和三维可视化查询和显示,可以直观地为油气勘探开发提供决策依据。笔者研究了地质体三维模型构建及可视化方法,建立了一套地质体三维模型构建流程,并基于 Open Inventor 平台开发了地质体三维建模及可视化软件,结合实际海洋地质地震勘探解释成果资料进行地质体三维模型构建和可视化展示,可以直观地反映地质构造,具有良好的应用价值。

参考文献:

- [1] 武强,徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(1): 54-60.
- [2] 徐立明,牛新生. 地质体三维可视化模拟的现状与展望[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2006(1): 151-154.
- [3] 曹代勇,王占刚. 三维地质模型可视化中直接三维交互的实现[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 384-387.
- [4] 曾新平,杨自安,刘碧虹,等. 地质体三维可视化建模的技术方法研究[J]. 矿产与地质, 2005, 2(1): 103-105.
- [5] 张剑秋. 三维地质建模与可视化系统开发研究[D]. 南京: 南京大学, 1998.
- [6] 朱大培,牛文杰,杨钦,等. 地质构造的三维可视化[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 827(4): 448-451.
- [7] 许琦. 复杂三维地层融合建模与可视化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- [8] 刘卫波,刘展,魏合龙,等. 基于 Open Inventor 的地层三维可视化[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(1): 61-64, 69.
- [9] 孙记红,魏合龙,刘展,等. 海洋地质三维可视化数据模型的设计方法[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(3): 56-61.
- [10] 陈军,葛瑛芳,阎洪军. 复杂地层三维可视化显示的实现[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 321-325.
- [11] Jessell M. Three-dimensional geological modeling of potential field data[J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(4): 455-465.
- [12] Zhang Y, Bai S W. An approach of 3D stratum modeling based on tri-prism volume elements[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(3): 285-290.
- [13] 李攀,王明君,傅旭杰,等. 基于 Open Inventor 的三维地层可视化[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(4): 345-347.

- [14] 朱良峰,潘 信,吴信才,等.地质断层三维可视化模型的构建方法与实现技术[J].软件学报,2008,19(8):2004-2017.
- [15] Zhang Y, Wen G Q. Application of 3D volume visualization in geology of civil engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 563-567.
- [16] 刘少华,程朋根,况代智,等. DeLaunay 三角网嵌入约束线段算法的研究及三维可视化[J]. 华东地质学院学报, 2003, 26(1): 82-86.
- [17] 靳玉萍,苏丹丹. 基于 TIN 的三维地质建模研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 279-280, 283.
- [18] 李明超,胡兴娥,安 娜,等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1355-1360.
- [19] 刘少华,程朋根,史文中. 约束 Delaunay 三角网生成算法研究[J]. 测绘通报, 2004(3): 4-7.

3D MODEL CONSTRUCTION OF GEOLOGICAL BODIES IN KEY MARINE AREAS BASED ON OPEN INVENTOR

SUN Jihong^{1,2}, WEI Helong^{1,2}, WANG Zhao^{1,2}, HE Shufeng^{1,2}, LIU Zhan³, ZHANG Wei⁴

(1 The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Geology, MLR, Qingdao 266071, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266701, China;

3 College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China;

4 Downhole Services Company BHDC, Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: Seismic data are widely used in oil and gas exploration and development. By modeling the complex geological structure revealed by the seismic interpretation results through the three-dimensional (3D) visual query and display, we may effectively acquire the information for decision making in the process of marine oil and gas exploration and development. In this paper, we made a thorough study on the construction of 3D model and its visualization for some geological bodies in some key areas of China seas. A 3D geological modeling and visualization software based on Open Inventor platform is adopted, and the procedure to establish the model discussed. The application of the model indicates that the 3D model for geological bodies based upon interpreted seismic data has a high value in application.

Key words: Open Inventor; 3D model of geological body; visualization

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部