

虚拟钻孔控制的地质剖面图构建算法与实现

周良辰, 林冰仙, 闫国年*

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要:地质剖面图构建采用的数据源多为钻孔数据,对于构建过程中的地层尖灭、剖面图光滑处理等问题的相应算法应用较为复杂,稳定性与健壮性不尽如人意。针对这些问题,本文提出一种虚拟钻孔控制的地质剖面图构建算法。首先,根据地层尖灭处理策略构建其虚拟钻孔;其次,依据细分光滑策略采用4点插值细分算法构建其虚拟钻孔;然后,对地层线要素进行多边形拓扑重建,构建地层多边形实体;最后,综合各项地质剖面图制图要素进行整饰输出。本文将虚拟钻孔引入地质剖面图构建的各个环节中作为算法中间单元,有效简化了建模算法实现过程,确保了算法的稳定性与高效性。实例表明,采用本文算法所构建的地质剖面图能正确反映研究区域的地质构造,增加了细分次数,可明显提高出图平滑效果。

关键词:地质剖面图;地质钻孔;虚拟钻孔;地层尖灭;曲线光滑

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00356

1 引言

地质剖面图是反映地层结构、岩体属性特征的重要成果图件。地质剖面图形象直观地表达了地层的结构构造和地层的沉积规律,并且与平面地质图相配合,可以反映地质体与地质构造在空间上的相互关系及地质演化关系^[1-2]。

地质剖面图的绘制过程是通过在地表上绘制一条剖面线,利用此剖面线上分布的钻孔数据在图纸上绘出钻孔的分层信息,并绘制出分层线,再利用不同的颜色或图形对每一土层的区域进行填充,从而得出显示该剖面地质构造的二维图形^[3]。剖面图的绘制信息来源于钻孔数据,是地质剖面图自动绘制的关键问题。

丁宇明等通过对一些插值法从运算性能、误差和精度等方面进行比较后,选定三次样条函数插值法作为地质剖面图中自由曲线的计算机辅助绘图的数学模型^[4]。朱莹等提出了地质剖面数据模型^[5],采用三次样条曲线进行地质剖面图中的曲线光滑方法,并以 ArcEngine 环境开发了地质剖面图自动绘制系统^[6-7]。左仁广等探讨了三联点构造野外描述的内容及顺序、构造级别的划分等,设计了实测

剖面图子系统^[8]。门桂珍等针对地质剖面图中断层的绘制,提出了两个需要解决的关键问题,即剖面上变倾角、变落差及任意切割交错关系的断层处理和地层曲线间的形态协调问题,并给出了相应的处理方法,对地质剖面图中断层的绘制具有一定的借鉴作用^[9]。陈崑瑛等也提出了地质剖面图中复杂断层的自动绘制方法^[10]。方世明、刘刚等(2002)提出了以兰姆赛分类方案为基础,通过褶皱形态的几何特征分析,设计出一种针对简单背斜、向斜构造的 CAD 算法^[1]。王继民将知识推理技术引入地质剖面建模算法,从而实现了用户对剖面建模算法和剖面图形的智能决策^[11]。杨一鹏等提出将已有的专家手工绘制的剖面图作为一个重要的数据来源,生成虚拟钻孔数据,获取剖面生成知识。在此基础上,给出基于知识的剖面器开发方法,研究剖面图的数据模型和知识应用模型,并给出剖面图生成实例^[12]。田甜等提出一种基于空间语义关系的空区域搜索算法,通过人机交互方式将专家知识应用于剖面连接过程,实现了融合人工编辑的剖面自动化连接方法^[13]。

从上分析看出,目前对于地质剖面图中地层结构以及断层、褶皱等构造的自动绘制方法已基本成

收稿日期:2012-09-21;修回日期:2013-01-04.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41001224);教育部博士点基金(20103207120014,20113207120013);江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介:周良辰(1979-),男,江苏南京人,博士,讲师,研究方向为虚拟地理环境与三维 GIS。E-mail: zhoulich@gmail.com

*通讯作者:闫国年(1961-),男,江苏海安人,博导,教授,研究方向为虚拟地理环境。E-mail: gnlu@njnu.edu.cn

熟,但构建算法仍较为复杂。例如,进行地质剖面图光滑处理时,采用三次样条曲线方法进行光滑,容易出现上下地层线相交的情况,此时必须就进行复杂的样条曲线相交与打断处理。这些问题导致算法稳定性与健壮性不尽如人意,难以应用到实际生产过程中。本文提出了一种以虚拟钻孔控制的地质剖面图构建算法,将虚拟钻孔引入地质剖面图构建的各个环节中作为算法中间单元,有效简化了建模算法实现过程,确保其稳定性与高效性,所构建的地质剖面图符合地学规律且具有 C^1 几何连续性,可视化效果良好。

2 剖面图构建的相关概念与策略

2.1 基本概念

为了便于对本文算法细节的介绍,先对相关概念进行简要说明。

定义1 虚拟钻孔:是指在研究区域内特定位置构建的虚拟点位。根据空间坐标建立虚拟点位的基本信息(X,Y和孔口高程),并利用空间插值技术拟合出虚拟点位的地质信息,这样该点位处就构建了一根具有工程地质钻孔基本信息和地层信息的计算机虚拟出来的钻孔。

定义2 尖灭处理虚拟钻孔:是指在构建过程中,根据地层尖灭处理原则确定钻孔基本信息和地层信息的虚拟钻孔。

定义3 细分处理虚拟钻孔:是指在构建过程中,根据所采用的细分算法策略确定钻孔基本信息和地层信息的虚拟钻孔。

本文提出以虚拟钻孔控制的地质剖面图构建方法,是将尖灭处理虚拟钻孔和细分处理虚拟钻孔引入地质剖面图构建过程中,与原始钻孔数据相结合,解决构建过程中所常面临的地层结构复杂与模型粗糙等问题。

2.2 基本策略

(1)地层尖灭处理策略

地层的尖灭指的是岩层的厚度在沉积盆地边缘变薄以至消失的现象。当相邻钻孔柱之间出现地层缺失时,缺失地层在钻孔柱之间必然形成尖灭。一般来说,更早年代的地层一定在更晚地层的底下,地层分布具有较强的年代顺序规律。所以,在判断地层尖灭走向时按照新地层向上尖灭,老地

层向下尖灭原则,连接顺序是按地层的新老年代排列顺序,而当该地区出现褶皱或倒转的特殊地质构造时,应该由建模者利用地质学专业知识,以及研究区域的具体情况确定地层相连接的优先级。

尖灭点的选择对于剖面的构建有着很大的影响,但目前并没有一种具有明显优势的尖灭处理规则,本文在建模过程中根据尖灭地层厚度确定处理规则^[2],根据规则所确定的尖灭位置确定尖灭处理虚拟钻孔基本信息与地层信息。

规则1:相邻钻孔间,若存在厚度小于2m的夹层,则该层忽略不计,将该层与相邻地层进行合并;

规则2:若存在尖灭的地层厚度为2~5m,则尖灭位置距离该钻孔 $1/3d$ (d 为相邻钻孔之间的距离,下同);

规则3:若存在尖灭的地层厚度为5~8m,则尖灭位置距离钻孔 $1/2d$;

规则4:若存在尖灭的地层厚度大于8m,则尖灭位置距离钻孔 $2/3d$ 。若存在间断缺失现象,则新地层尖灭位置与钻孔的距离也依此原则确定。

(2)细分光滑策略

通常有2种不同类型的细分方法,分别是逼近策略和插值策略。逼近策略一般不经过原始顶点,而插值策略则会保存前一个细分阶段的所有点。因此,对于地质剖面图中的地层线光滑而言,采用插值细分光滑策略更为合理。本文采用4点插值细分方法作为光滑策略^[14]。

在给定若干初始顶点后,首先,把初始顶点按顺序用直线段连成一条折线段;然后,进行细分,即按公式1,在上一步的每个顶点后插入一个新的点,对所有顶点重新排序,去掉上一步的折线段,将当前的顶点按顺序重新连成折线段。这个细分过程一直进行,折线段将逐渐重合于一段极限曲线,当达到精度要求或指定迭代次数时,细分停止。

$$P_{i+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{2} + w\right) \times (P_i + P_{i+1}) - w \times (P_{i-1} + P_{i+2}), -1 < i < n \text{ (细分次数)} \quad (1)$$

公式(1)中, $P_{i+\frac{1}{2}}$ 为待插入点纵坐标, P_i 为 $P_{i+\frac{1}{2}}$ 前一相邻已知点纵坐标, P_{i+1} 为待插入点后一相邻已知点纵坐标, P_{i-1} 为 P_i 前一相邻已知点纵坐标, P_{i+2} 为 P_{i+1} 后一相邻已知点纵坐标, w 为插值细分参数。对于因位于点集边界附近而不存在 P_{i-1} 或 P_{i+2} 的 $P_{i+\frac{1}{2}}$,取 $P_{i-1}=P_i$, $P_{i+2}=P_{i+1}$ 。当取 $w=1/16$ 时,曲线满足 C^1 连续。

细分虚拟钻孔的实现原理是利用4点插值细分方法拟合钻孔点位信息(即细分顶点)和地层参数的过程。将原始钻孔中地层顶、底板在地质剖面中的位置作为初始顶点,按照4点插值细分方法插入新点,将新点作为虚拟钻孔添加到钻孔序列中去,以此实现地质剖面图的光滑处理。

3 地质剖面图构建算法

3.1 钻孔地层数据模型构建

地质剖面构建的主要数据源是钻孔资料,包括空间基本信息(即钻孔在三维空间的(X,Y,Z)坐标及完井深度)、地层分层信息(即各岩层岩性描述、

地层厚度、埋深等)、品位信息(包括采样样品的名称、位置等信息),如图1所示。

这些原始数据相互关联性差,且不规则。为了将钻孔和地层信息进行统一管理,实现地层的划分、排序和统一编号,本文根据“地层序律”,建立了基于语义的工程钻孔地层信息模型(图2)。其中,钻孔类型有工程地质钻孔和尖灭处理钻孔、细分虚拟钻孔3种,孔口坐标通过(X,Y,H)来表示,H为钻孔点的地面高程。该模型可以清晰地表达复杂多变的地层信息,将有不同地层层序的各个钻探点统一成相同的结构,解决了在地质剖面图中难以表达地层倒转、缺失信息的问题,为后续的钻孔信息处理带来了极大的方便。

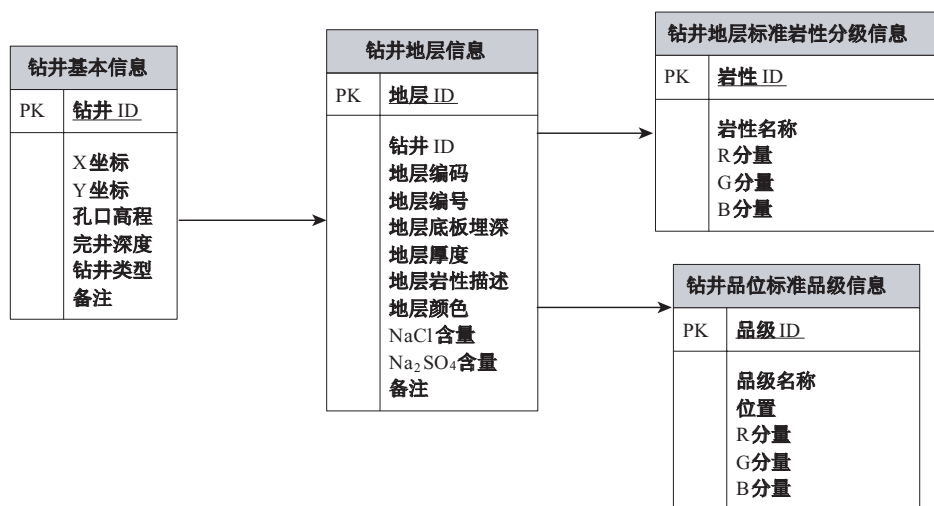
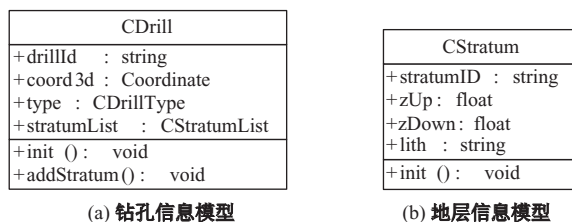


图1 工程地质钻孔数据表结构

Fig.1 Data table structure of engineering geological drilling



(a) 钻孔信息模型

(b) 地层信息模型

图2 基于语义描述的钻孔地层模型

Fig.2 The drilled stratigraphic model based on semantic description

为了方便后续的计算设计,在构建钻孔地层信息模型时,对于每个钻孔的地层描述信息,按照地层标准分级表进行补全,将相同的岩性并且垂直方向位置相似的看作同一层;根据钻孔孔口高程和所穿过岩层的厚度,计算出该岩层的顶底板绝对高程,对于缺失的地层,则将其顶板值与底板值都设

为上一层的底板,即为假想的零厚度地层;最后,根据钻孔垂直方向上顶底板绝对高程的关系和地层层序律,可确定地层的空间顺序关系,进而可对地层进行排序。这样的设计和处理为下一步的构造推理和自动建模奠定了基础。

3.2 算法的实现

算法实现的流程如下:(1)以原始钻孔序列数据 L_1 为基础,根据地层尖灭处理策略,构建尖灭处理虚拟钻孔,并插入原始钻序列中,构成新的钻孔序列数据 L_2 ;(2)根据细分光滑策略,构建细分光滑虚拟钻孔,添加至钻孔序列数据 L_2 中,得到钻孔序列 L_3 ;(3)连接相邻钻孔具有相同地层属性的顶、底板,构成初始地质剖面框架;(4)对地质剖面图进行多边形拓扑重建,以得到封闭的地层多边形;(5)对

地质剖面图数据进行整饰输出。

3.2.1 地层尖灭处理

根据前文所述地层尖灭处理策略,在初始剖面线上添加尖灭处理虚拟钻孔,按照新地层向上尖灭、老地层向下尖灭的原则计算出尖灭处理虚拟钻孔中的地层参数。具体步骤如下:

(1)遍历剖面线中所有线段,根据尖灭规则添加尖灭钻孔点及对应的尖灭处理虚拟钻孔;

(2)据剖面线中各线段两端原始钻孔的地层参数,计算尖灭处理虚拟钻孔的地层参数,一般有:

①若两端的钻孔间不存在地层缺失情况,则尖灭处理虚拟钻孔中各地层的底板埋深等于两端地层底板埋深的均值;

②若两端的钻孔间存在地层缺失情况,则按照地层尖灭规则计算尖灭处理虚拟钻孔中各地层参数。

3.2.2 适应细分光滑

各类细分算法所产生的细分结果,其曲线的节点数都呈指数增长。因此,考虑根据研究区域地表形态特征,在较平坦区域进行较少细分,而在变化复杂区域多次细分,以此在保证光滑效果的前提下,减少最终细分结果的数据量,即自适应细分算法,其步骤:

(1)遍历目标线对象,计算每条线段与相邻线段的夹角,并将其中最大的作为该线对象的平坦

度;

(2)再次遍历目标线对象的每条线段,将每条线段的平坦度与给定的阈值比较,如果小于阈值,将该线段标记为“平坦”;

(3)对于未标记为平坦的线段,根据细分光滑策略,进行细分处理,求出细分顶点;

(4)根据细分光滑策略求出与细分顶点对应的细分虚拟钻孔地层参数,计算细分虚拟钻孔的地层顶板和底板标高;

(5)对细分虚拟钻孔进行后处理,解决可能出现的拓扑错误。例如地层底板埋深值高于其顶板埋深值,则将其底板埋深值设为其顶板埋深值,将其视为零厚度地层;

(6)连接各钻孔相同岩性地层节点,生成地层线集合;

(7)由生成的地层线集合连接相邻地层线构造多边形,读取钻孔线集合的地层信息,构建地层剖面集合。

通过将地质剖面图的光滑通过添加细分虚拟钻孔实现,一方面,可以实现自适应的细分光滑效果,使得最终剖面在数据量和可视化效果上达到平衡;另一方面,也简化了光滑处理过程中地层线相交的处理,有效地降低了算法实现的复杂度,算法效果如图3所示。

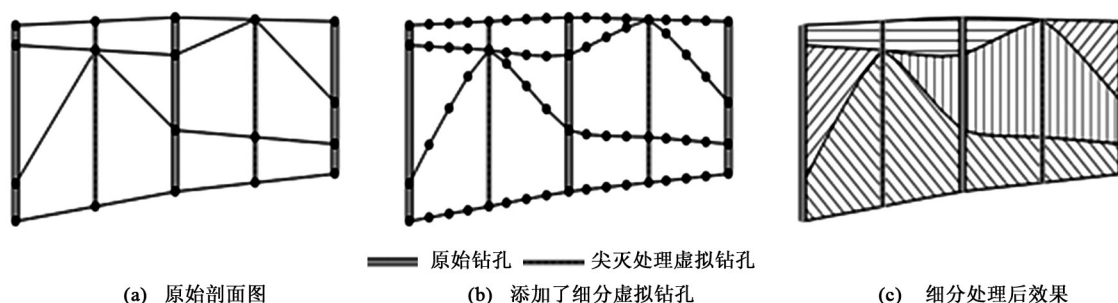


图3 基于虚拟钻孔的自适应细分光滑

Fig.3 The adaptive segmentation smooth model based on a virtual drilling

3.2.3 地层多边形生成

根据上述步骤得到的是地质剖面图的地层线要素,为了满足后续建模算法的需要,还要对地质剖面图进行多边形拓扑重建,以得到封闭的地层多边形,算法流程如图4所示。具体步骤如下:

(1)读取所有地层线要素,判断是否相交,若相交,则将其按交点打断;

(2)更新弧段数据,更新弧段-结点、结点-弧段

的对应关系;

(3)按坐标方位角从小到大将弧段排序;

(4)根据多边形左转算法^[15]生成地层多边形;

(5)将地层属性赋值给各地层多边形。

3.2.4 剖面图整饰输出

在前面生成的地质剖面图上标示图名、比例尺、走向,对各种要素进行渲染和符号填充,对纵标尺,以及图例进行绘制,整饰后打印输出。

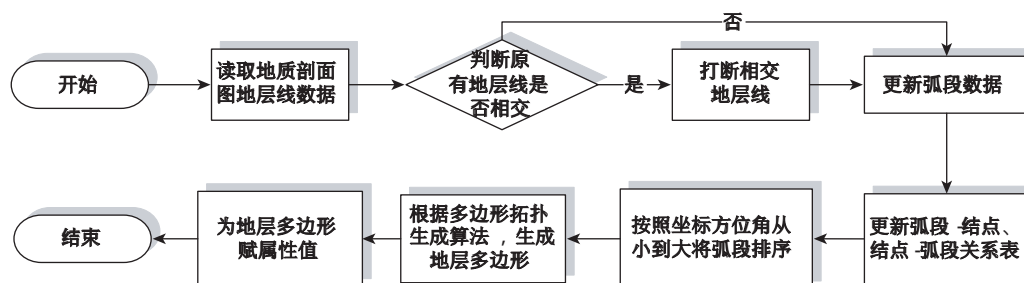


图4 地层多边形生成流程图

Fig.4 The flow chart generated from strata polygons

4 地质剖面图构建案例分析

本文以南京火车南站地区三维地质体模型的构建为例,验证了本文算法的有效性。首先,采集原始钻孔数据,按照前文所述钻孔数据模型进行组织与管理;其次,任意选择地质剖面线,按照上述的尖灭处理策略与细分光滑策略分别添加尖灭处理虚拟钻孔和细分光滑虚拟钻孔,将相邻钻孔间相同地层的顶、底板相连,并进行地层多边形拓扑重建,最后,进行图形整饰输出,得到最终的地质剖面图(图5)。

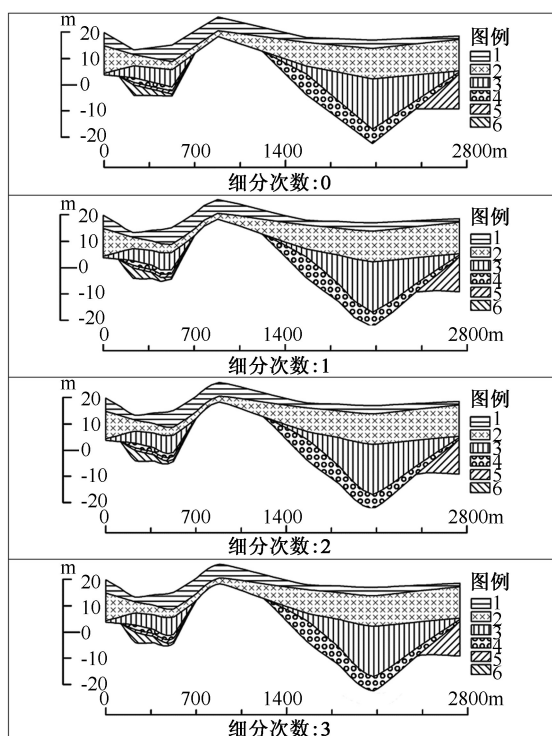


图5 不同细分光滑次数的地质剖面图构建效果对比

Fig.5 Contrast of the construct effect among the smooth model with different number of segments

实例证明,利用原始钻孔、尖灭处理虚拟钻孔以及细分光滑虚拟钻孔构建的南京火车南站地区地质剖面图,能够正确反映研究区域的地质构造,并随着细分次数的增加,模型光滑程度可明显提高,可视化效果良好。

5 结论与展望

针对目前地质剖面图自动绘制过程中地层尖灭处理、地层线光滑处理过程中需要进行复杂的样条曲线相交打断等复杂处理,导致算法稳定性与健壮性不足等问题。本文提出了一种基于虚拟钻孔控制的地质剖面图构建算法。其将虚拟钻孔引入地质剖面图构建的各个环节中作为算法中间单元,有效简化了建模算法实现过程,确保了算法的稳定性与高效性,所构建的地质剖面图符合地学规律且具有 C^1 几何连续性,可视化效果良好。

本算法的不足之处在于尚不能将断层与褶皱等以虚拟钻孔进行统一处理,目前,仍需要采用传统方法进行处理。今后将考虑以虚拟钻孔形式构建含复杂构造的地质剖面图的自动绘制算法,以提高地质剖面图自动绘制的可靠性与实用性。

参考文献:

- [1] 方世明,吴冲龙,刘刚,等.地质图切剖面计算机辅助编绘系统设计及实现[J].煤田地质与勘探,2004(1):11-13.
- [2] 朱莹.地质剖面自动绘制系统研究[D].南京:南京师范大学,2006.
- [3] 李锋,胡维平.剖面图中分层区域自动生成的计算机实现[J].岩土力学,2001(1):117-120.
- [4] 丁宇明,马文田.地质剖面参数式计算机绘图通用软件研制[J].工程勘察,1992(2):31-34.
- [5] 朱莹,刘学军,陈锁忠.地质剖面自动绘制的数据模型研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007(3):96-100.
- [6] 朱莹,刘学军,陈锁忠.地质剖面自动绘制系统设计与实现

- [J].人民长江,2008(8):72-74.
- [7] 朱莹,刘学军,陈锁忠.基于GIS的地质剖面图自动绘制软件的研究[J].南京师范大学学报(自然科学版),2007(4):104-108.
- [8] 左仁广,汪新庆.地质调查剖面图的机助设计制图[J].地球信息科学,2004,6(3):120-125.
- [9] 门桂珍,萨贤春,雷宝林.地质剖面图的计算机绘制技术[J].煤田地质与勘探,1995(1):34-37.
- [10] 陈崑瑛,李文斌,武强,等.地质剖面图中复杂断层的自动生成方法[J].煤田地质与勘探,2010(5):7-12.
- [11] 王继民,吕庆,万定生.基于钻孔数据的地质剖面建模系统[J].河海大学学报(自然科学版),2009(4):463-466.
- [12] 杨一鹏,张银,王桥.基于知识的地质剖面图生成器研究和实现[J].地理与地理信息科学,2004(5):24-27.
- [13] 田甜,潘懋,陈雷,等.基于空间语义的地质剖面自动连接算法[J].地理与地理信息科学,2008(6):54-56.
- [14] Dyn N, Levin D, Gregory J A. A 4-point interpolatory subdivision scheme for curve design[J]. Computer Aided Geometric Design, 1987,4(4):257-268.
- [15] 闫浩文,杨维芳,陈全功,等.基于方位角计算的拓扑多边形自动构建快速算法[J].中国图象图形学报,2000(7):27-31.

A Geological Section Construction Based on Virtual Drillhole

ZHOU Liangchen, LIN Bingxian and LV Guonian*

(Key Laboratory of Virtual Geography Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The source of data used in the process of building geological section is drillhole data, and the way of modeling deals with the problem of depositional termination or section smoothing is more complex, stability and robustness is not satisfactory. So it is difficult to apply to the actual production process. To solve this problem, this article proposes a geological section construction algorithm based on virtual drilling controlling. First of all, according to processing strategy of depositional termination we build the virtual drilling on the thinning out treatment; second, in accordance with segments smooth strategy, we use four-point interpolation subdivision algorithm to build subdivision smoothing virtual drilling; third, we rebuild the polygon topology on formation line feature, that can build strata polygon entity; and the last, we integrate various of geological section's mapping elements to finish the output. The example shows that using the algorithm proposed in this paper to build the geological section can accurately reflect the geological structure of the study area, and increased segmentation times can significantly improve the plots moothing effect. This algorithm puts the virtual drilling into all aspects of geological section building and takes it as the middle unit in the algorithm. It can effectively simplify the implementation process, and ensure the stability and efficiency of the algorithm.

Key words: geological section; geological drilling; virtual drill; depositional termination; curve-smoothing

*Corresponding author: LV Guonian, E-mail: gnlu@njnu.edu.cn