

基于交叉折剖面的高精度三维地质模型快速构建方法研究

屈红刚 潘懋 明镜[†] 吴自兴 孙志东

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; [†]通讯作者, E-mail: eric107@gmail.com

摘要 提出一种基于交叉折剖面的三维地质模型自动构建方法,重点解决模型构建中“高精度”和“快速”的难题。该方法扩大了建模可利用的数据源,提高了建模的自动化程度,构建的模型质量得以提高。基于该方法开发了一个原型系统,并成功应用到北京市奥运场区的工程建设层三维地质建模中,结果表明该方法具有建立实际三维地质模型的能力。

关键词 三维 GIS; 三维地质建模; 交叉折剖面; 高精度模型; 快速建模

中图分类号 TP311

An efficient method for high-precision 3D geological modeling from intersected folded cross-sections

QU Honggang, PAN Mao, MINGJing[†], WU Zixing, SUN Zhidong

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871; [†]Corresponding Author, E-mail: eric107@gmail.com

Abstract Propose a new method for 3D computerized modeling of geological objects from sets of intersected folded cross-sections, and especially solve the two key problems of “high-precision modeling” and “rapid modeling”. This method expands source data and improves automatization degree for 3DGM. Besides, reconstructed geological objects are more real and smoother, and model quality is improved. Finally, a 3D prototype system has been developed based on this method. A case study at the Olympic site in Beijing, China shows that the method can be applied to practical geological areas.

Key words 3D GIS; 3D geological modeling; intersected folded cross-sections; high-precision modeling; rapid modeling

数据是信息系统的“血液”,是系统发挥作用的前提和基础。不同于二维 GIS 中数据可以通过测量、遥感等手段直接获取,三维地质模型数据由于位于地下,是无法或很难直接获取的,能够得到的只是一些采样有限、离散、模糊、甚至有时是相互冲突的低维数据^[1]。此外,由于地质体经历了长期的地质作用过程,其空间形态和拓扑关系非常复杂,并具有不确定性、非线性、多尺度等特点^[1-11]。因此,三维地质建模成为三维 GIS 研究和应用的主要瓶颈之一。

自 20 世纪 70 年代以来,国内外专家学者在三维地质建模领域开展了大量研究工作,提出了多种三维地质建模方法。从建模所使用的数据源来看,可分为基于野外数据的建模方法^[12,13],基于剖面的建模方法^[14-20],基于离散点的建模方法^[17,21,22],基于钻孔数据的建模方法^[23,24],基于多源数据的建模方法^[25],基于三维地震资料建模方法^[26]等。从研究的工具方面考虑,可将其分为基于系统集成的建模方法^[6],基于数据库的建模方法^[27]等。但这些方法存在可利用的数据源有限,建模过程中人工交互工作

量较大等问题,尚无法满足当前地质应用中对高精度三维地质模型快速构建的需要。

三维地质建模可简单分为结构建模和属性建模。结构建模是指根据钻孔、剖面图、地形图、地质图、物/化探资料等,建立反映地质体空间形态和拓扑关系的三维几何模型,通过地质体边界表面的刻画,实现地质体三维结构的表达。属性建模侧重于某一属性在地质体内部或三维空间中分布特征的表达。本文重点研究层状(似层状)地层的三维地质结构模型构建,例如工程地质模型、煤层地质模型等。并重点解决两个主要难题: 1)“高精度”:建模的粒度小,分辨率高,数据量大,模型必须逼真和光滑; 2)“快速”:在允许人机交互的基础上,实现模型的自动化快速构建和动态更新。

本文提出的基于交叉折剖面的建模方法(图1),与现有方法相比具有如下特点: 1)扩大了建模可利用的数据源。这里的交叉折剖面可广义的理解成任意方向的面状资料,包括各种纵、横和水平方向的剖面和平面资料。例如由钻孔资料生成的剖面、野外实测的地质剖面、地震解释剖面等各种剖面资料,由各种物/化探资料解释得到的面状资料以及地质图等平面资料。其存储方式统一为由“多边形-弧段-结点”组成的含拓扑矢量数据结构。另一方面,可利用折剖面(或平剖面)建模,突破了现有方法只能使用平剖面的约束。实际上折剖面在地质应用中更为常见,尤其是利用钻孔资料直接生成的剖面大多是折剖面; 2)提高了建模的自动化程度。由多组不同方向的剖面组成的交叉剖面的使用,可以方便地解决剖面之间地质界线的对应问题,因为这些不同方向上的地质界线已经自然地连接在一起,而常规方法多通过人机交互的方式加以解决; 3)构建的模型质量得到提高。一方面,不同方向的地质界线共同作为约束,使得生成的模型更加真实和准确;另一方面,原始折剖面的直接使用,避免了折剖面向平剖面的转化以及由此导致的误差,模型质量得以提高。

1 整体思路

本方法中的三维空间数据模型采用基于边界表达的实体模型,具体通过不规则三角网(TIN)来实现。算法包括以下5个主要步骤:

1)剖面数据准备(图1(a)):剖面可以通过钻孔自动生成、数字化纸质剖面、解释地震资料等方

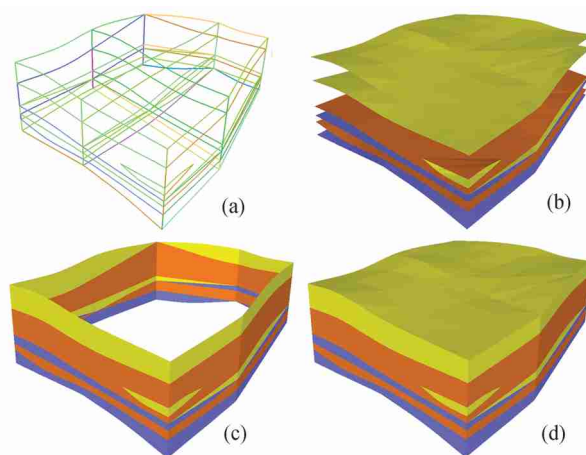


图1 基于交叉折剖面的三维地质建模

Fig. 1 Geological Modeling from intersected folded cross sections

法得到。剖面采用含拓扑信息的矢量结构存储^[18],即剖面中的地质体和地质界线分别以多边形和弧段的方式存在,多边形记录了其包含的弧段信息,并带有地质体代号等拓扑属性,弧段带有上/下地质体代号等拓扑属性。地质体代号的赋值没有特殊要求,可上下重复,例如砂岩透镜体的编号为2,可在建模区的地层中重复出现。

剖面分组:将彼此不相交的剖面作为一个剖面组。每一个剖面组具有唯一的组号,组内的每一个剖面也具有唯一剖面号。因为同一组内的剖面不用进行相交判断,所以可以在地质界面追踪时减少搜索范围,加快追踪速度。

2)地质界面建模(图1(b)):地质界面建模包括两个主要步骤:利用地质界线的空间关系信息(相交信息等)及其地质语义信息(拓扑属性等),通过地质界线追踪的方法,找到属于某一地质界面的地质界线;进而通过三角剖分这些地质界线形成地质界面。详细介绍见第2节。

3)建模区边界面建模(图1(c)):建模区边界面充当模型中垂向部分“墙”的角色。将建模区周围边界剖面投影到某一二维平面,例如坐标面,然后对剖面中的每个多边形进行二维Delaunay三角剖分^[28],最后将生成的多个TIN面还原到三维,从而得到建模区的边界面模型。

4)地质界面修正及光滑:对于尚未参与建模的钻孔或剖面数据等,可对前面生成的初始模型进行动态修正,以实现三维地质模型的快速动态更新^[11,29,30]。另外,建模数据源的稀疏性导致生成的初始三维地质界面往往比较粗糙,难以满足可视化或分析时的应用需要,所以模型的加密光滑是提高

建模精度的一项重要工作,可利用曲面细分算法^[31,32]完成该功能,并重点解决好地质体之间公共面光滑结果的一致性问题^[11]。

5) 封闭成体(图 1(d)): 将生成的曲面(地质界面和建模区边界面)都赋予上/下地质体代号等拓扑属性,利用该语义信息及生成这些曲面的弧段的空间相交信息,可方便地完成封闭地质体的生成。和其他封闭成体的算法^[23,25]不同,地质界面之间的相交处理在本方法中不需要,因为数据的一致性在建模过程中已经得到了保证,这也是本方法的特点之一。

在以上 5 个步骤中,“剖面数据准备”属于前期准备工作;“地质界面建模”和“建模区边界面建模”是整个建模的主体,而“地质界面建模”既是建模的核心,同时由于地质界面具有很高的复杂性,也是建模的难点;“地质界面修正及光滑”属于模型的优化工作,属于建模过程中的可选步骤;“封闭成体”属于建模的后期处理工作。所以,限于篇幅问题,下面的章节将重点介绍“地质界面建模”。

2 地质界面建模

2.1 地质界线追踪

地质界线追踪即利用地质界线的语义信息(上地质体代号、下地质体代号等拓扑属性)和空间的关系,找到属于某一地质界面的所有地质界线,为

下一步的三角剖分做好准备。追踪过程按照以下层次进行:“属性”、“地质体”、“分区”、“顶/底面”和“子面片”(图 2)。以图 3 中的例子加以说明,该建模区域有 6 个剖面(纵横方向各 3 条),它们在二维平面上组成 4 个网格区(编号为 I—IV)(图 3(a)),岩性地层代号有 1, 2 和 3(图 3(b))。

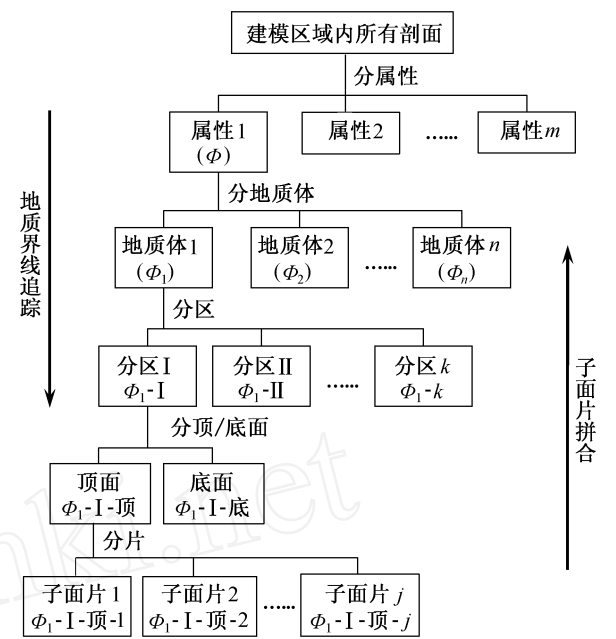


图 2 地质界线追踪和子面片拼合示意图
Fig. 2 Tracking arcs and merging surfaces

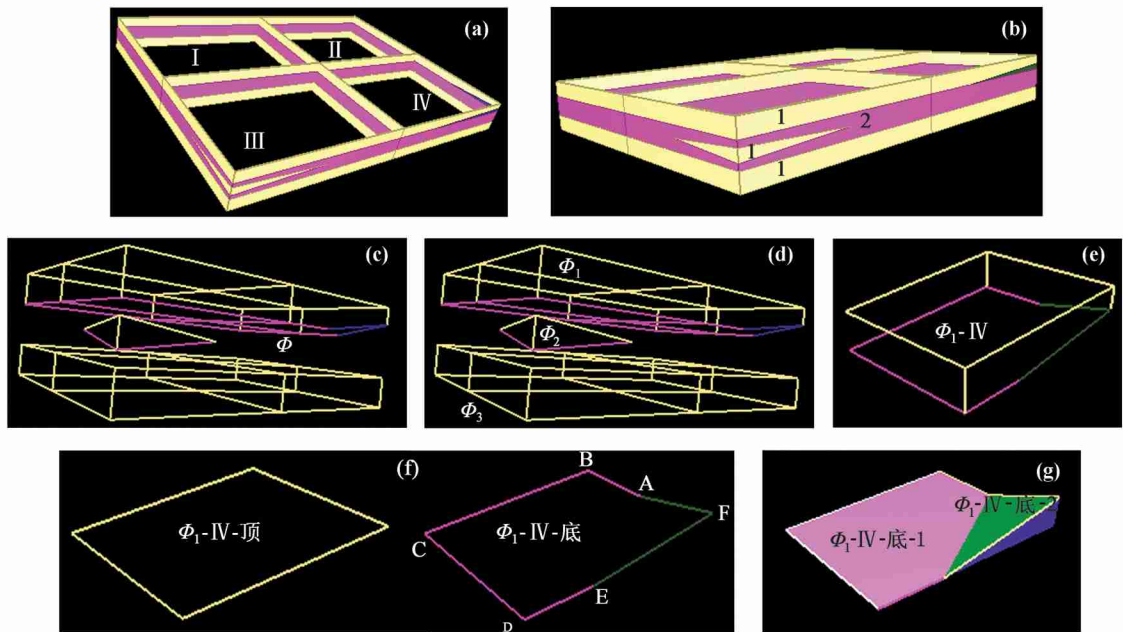


图 3 用来说明地质界线追踪算法的建模实例
Fig. 3 An example for explaining the process of tracking arcs

2.1.1 按“属性”追踪地质界线

建模区域内通常存在多个属性不同的地质体,按“属性”追踪地质界线即从所有剖面中提取出属于某一属性的所有地质体单元(多边形),直到所有的属性都被处理过。例如追踪属性为“1”的地质体的所有多边形集合(图3(c))。按“属性”追踪地质界线追踪不但方便数据的组织,而且便于并行快速建模。

2.1.2 按“地质体”追踪地质界线

将上一步追踪出的结果进一步根据空间相交信息分成不同的地质体,这些地质体虽然属性相同,但空间中相互独立,互不连接。据此可以将属性为“1”的多边形集合进一步划分为3个多边形子集合: 1_1 , 1_2 和 1_3 (图3(d))。

按“地质体”追踪地质界线使得该方法不但可以处理根据时代划分的地层,也可以处理根据岩性划分的地层,而后者常常在沉积序列上出现地层重复。

2.1.3 按“区块”追踪地质界线

构成某一地质界面的若干地质界线进行三角剖分时,由于该工作通常是基于离散点的 Delaunay 三角剖分实现的,所以初始的剖分结果是凸的,会导致出现连通凹区域的多余的三角形,如图4(b)中的三角形 Tri_1 和 Tri_2 。为了防止该类三角形的产生,实现模型的自动化快速构建,可以采用分区处理的思路。即地质界线在相交处打断,进而形成多个小的凸区域,基于每个凸区域进行三角剖分,最后将各个凸区域剖分的结果进行拼接,从而得到最终结果。如图4(a)所示,可分为4个凸区域。另一方面,采用分区的方法,便于用户建模,即用户可以每次只对当前凸区域进行建模,便于观察和操作。而且,这种“分而治之”的策略,很容易扩展为并行算法,以实现海量高精度模型的快速构建。

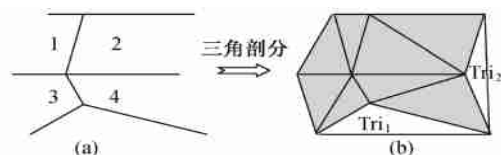


图4 三角剖分中出现多余三角形示例

Fig. 4 An example for explaining the reason for tracking by regions

为了实现快速的分区操作,可在进行建模前,将剖面上的地质界线提前进行统一分区处理。具体步骤包括: 剖面之间的地质界线进行相交判断及打断操作。地质界线在相交处打断,并生成新的地质界线,

进而更新地质体和地质界线之间的拓扑关系; 取出各个剖面最上部的地质界线投影到 XOY 平面上,进一步通过建立地质体和地质界线的拓扑关系^[33],形成最终的多个区域,并给每个区域赋唯一的标识号; 将剖面上每一条地质界线投影到 XOY 平面上,并匹配到相应的区域(内部弧段可匹配到左右两个区域,边界弧段匹配到一个区域),并保存相应的区域标识号。

在分区追踪时,根据组成地质体的地质界线所在区域标识号,进行分区处理。以地质体 1_1 为例,可分为弧段集合 1_1^- , 1_1^- , 1_1^- 和 1_1^- (1_1^- , 1_1^- 和 1_1^- 表示区号),在区 1_1^- 中的弧段集合 (1_1^-) 如图3(e)所示。

2.1.4 按“顶/底面”追踪地质界线

由于三角剖分算法不能直接处理多值情况,所以需要分出地质体的顶/底面,并分别进行三角剖分。在上一步追踪出的弧段集合中,去掉垂向弧段后,通过弧段相交判断,即可将彼此相连的弧段划分到一个弧段集合中去,从而实现将弧段分出顶/底面。以 1_1^- 为例,可分为弧段集合 1_1^- -顶和 1_1^- -底(图3(f))。对于透镜体等不存在垂向弧段时,可在弧段发生拐折的点处分开,从而实现将多值问题化为单值问题来处理。

2.1.5 按“子面片”追踪地质界线

为了保持建模区域内地质体之间公共面数据的一致性,即没有空隙、重叠或穿插等现象,为此可有两种处理思路,一种是公共面只生成一次,并被上/下地质体共用;另一种是公共面数据在上/下地质体建模时分别生成,但要保证在公共面处的三角形构网完全一致,即要保证两次三角剖分时使用的是相同的弧段数据。考虑到整个数据组织的方便性,本方法采用了后一种方法。

具体而言,上一步划分出的顶面或底面,它可能同时被该地质体和多个地质体所共用,所以需要进一步划分为若干个小片,每个小片对应该地质体和某个地质体之间的公共面。以弧段集合 1_1^- -底为例,它同时和体 2_1 、体 3_1 都有公共面(图3(g))。因此,弧段集合 1_1^- -底需要进一步划分为两个小片:面 1_1^- -底-1(地质体 1_1 和地质体 2_1 的公共面)和 1_1^- -底-2(地质体 1_1 和地质体 3_1 的公共面),并基于每个小片分别进行三角剖分。

划分子面片的具体规则是将具有相同上地质体

代号和下地质体代号的弧段划分到同一个弧段集合中去。例如,面₁-底-1由图3(f)中的弧段{AB,BC,CD,DE}组成,而面₁-底-2由弧段{AF,FE}组成。

2.2 三角剖分地质界线

将上面通过追踪划分出的最小弧段集合进行Delaunay三角剖分,从而得到构成地质体的各个子面片。具体过程为先将这些弧段投影到二维面上,然后进行三角剖分,最后将剖分结果再返回到三维。

最后,与地质界线追踪步骤相反,按照“分片分顶/底面 分区 分地质体”的层次从下向上进行

曲面合并,最终生成属于各个地质体的完整地质界面,如图2所示。

3 方法试验

基于本文提出的建模方法,利用 Visual C++ 和 OpenGL 图形库,开发了一个在 PC 机上运行的原型系统。在北京市奥运场区选择了一块面积为 255.6 m × 240.0 m 的区域,基于 53 口钻孔数据(图 5(a))生成了 8 条横折剖面 and 9 条纵折剖面(图 5(b)),构建了 57 个工程建设层地质三维模型(图 5(c),(d))。图 5(e)是对这些模型进行剖切后的显示效果。

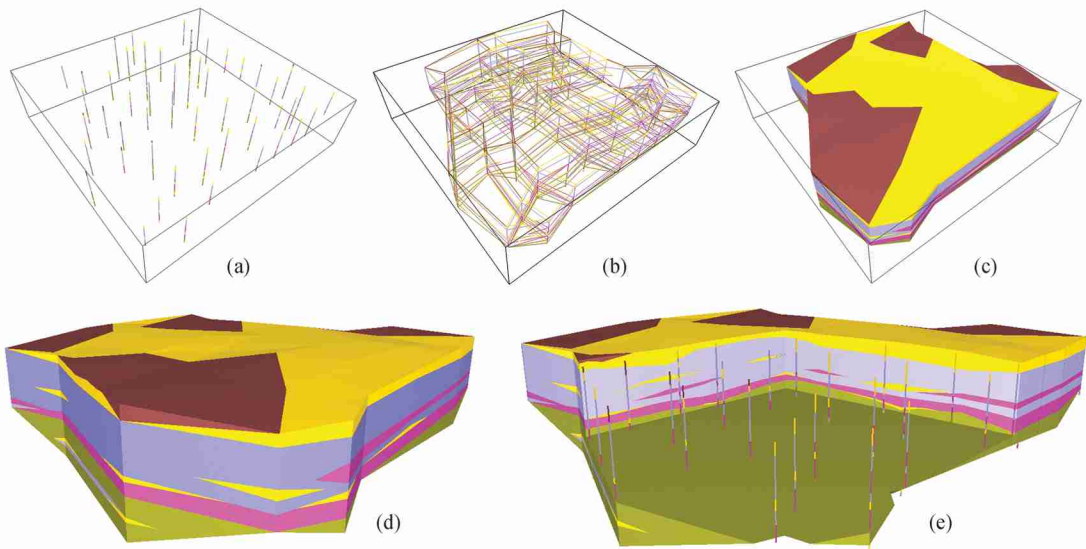


图 5 北京市奥运场区建模实例

Fig. 5 A case study at the Olympic site in Beijing

4 结论

本文提出的基于交叉折剖面的建模方法,不但可以实现高精度三维地质模型的自动、快速构建,而且扩大了建模可利用的数据源,更多的资料参与建模,构建的模型质量得以提高。该方法的整体思路 and 关键算法在文中进行了详细描述。最后,基于该方法,开发了一个三维地质建模原型系统,并成果应用到北京市奥运场区的建模中,证明该方法具有建立实际三维地质模型的能力。

参考文献

[1] Kelk B. 3-D Modelling with geoscientific information systems: The problem // Turner A K. Three-dimensional Modeling with Geoscientific Information System. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992: 29-37

[2] Turner A K. The Role of three-dimensional geographic information systems in subsurface characterization for hydrogeological applications // Raper J R. Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems. London: Taylor and Francis, 1989: 115-127

[3] Houlding S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 27-36

[4] Mallet J L. Discrete modeling for natural objects. Mathematical Geology, 1997, 29 (2): 199-219

[5] Quattrochi D A, Goodchild M F. Scale in Remote Sensing and GIS. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 1997: 406

[6] Breunig M. An approach to the integration of spatial data and systems for a 3D geo-information system. Computers & Geosciences, 1999, 25 (1): 39-48

[7] Wu Q, Xu H. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D. Computers &

- Geosciences, 2003, 29(4): 507-513
- [8] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究. 中国科学(D辑), 2004, 34(1): 54-60
- [9] 朱庆. 对3维GIS技术进展的思考. 地理信息世界, 2004, (3): 6-7
- [10] 吴立新, 史文中. 论三维地学空间构模. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 1-4
- [11] 屈红刚. 基于交叉折剖面的三维地质表面建模方法研究[博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2006
- [12] Jessell M. Three-dimensional geological modelling of potential-field data. Computers & Geosciences, 2001, 27(4): 455-465
- [13] Fernández O, Muñoz J A, Arbués P, et al. Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). AAPG Bulletin, 2004, 88(8): 1049-1068
- [14] Tipper J C. The study of geological objects in three dimensions by the computerized reconstruction of serial sections. Geology, 1976, 84(4): 476-484
- [15] Sirakov N M, Granado I, Muge F H. Interpolation approach for 3D smooth reconstruction of subsurface objects. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 877-885
- [16] Xu C, Dowd P A. Optimal construction and visualisation of geological structures. Computers & Geosciences, 2003, 29(6): 761-773
- [17] 王勇. 三维空间矢量数据生成算法研究及原型系统实现[博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2003
- [18] 屈红刚, 王勇, 潘懋, 等. 基于含拓扑剖面的三维地质建模. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(6): 717-723
- [19] 吴冲龙, 毛小平, 田宜平, 等. 三维数字盆地构造地层格架模拟技术. 地质科技情报, 2006, 25(4): 1-8
- [20] Qu H G, Pan M, Wang Z G, et al. A new method for 3D geological reconstruction from intersected cross-sections // Tong Q, Chen X, Huang A, et al. Remote Sensing and Space Technology for Multidisciplinary Research and Applications. Proc of SPIE, 2006, 6199: 619900
- [21] Horsman J, Bethel W. Methods of constructing a 3D geological model from scatter data // Advanced Visual Systems Conference. Boston, MA, 1995: 19-21
- [22] Yu Z W. Surface interpolation from irregularly distributed points using surface splines, with Fortran program. Computers & Geosciences, 2001, 27(7): 877-882
- [23] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Computers & Geosciences, 2003, 29(5): 547-555
- [24] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 26-30
- [25] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43
- [26] 王焕弟, 熊翥. 石油物探关键技术现状与展望. 中国石油勘探, 2004, 9(1): 41-51
- [27] Arens C, Stoter J, van Oosterom P. Modelling 3D spatial objects in a geo-DBMS using a 3D primitive. Computers & Geosciences, 2005, 31(2): 165-177
- [28] Shewchuk J R. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator // First Workshop on Applied Computational Geometry. Philadelphia, Pennsylvania, ACM, 1996: 124-133
- [29] 齐安文. 基于类三棱柱的三维地质模拟与三维拓扑研究[博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2002
- [30] 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术. 岩土力学, 2006, 27(2): 268-271
- [31] Loop C. Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles [Master Thesis]. Department of Mathematics, University of Utah, 1987
- [32] Zorin D. Smoothness of Stationary subdivision on irregular meshes. Constructive Approximation, 2000, 16(3): 72-75
- [33] 杨海宏, 李天宏, 薛安. 利用双邻点判断法优化拓扑关系自动生成算法. 中国图像图形学报, 1998, 3(7): 583-587