

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1702-06

论文索引信息: 李爱勤, 何珍文, 邓轶. 城市地质中基于剖面的3维层状地质体动态建模[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1702-1707

城市地质中基于剖面的3维层状地质体动态建模

李爱勤¹⁾, 何珍文²⁾, 邓轶³⁾

¹⁾ (浙江省测绘科学技术研究院(中国测绘科学研究院浙江分院), 杭州 310012)

²⁾ (中国地质大学计算机学院, 武汉 430074) ³⁾ (浙江省地理信息中心, 杭州 310012)

摘要:为解决城市地质中的基于剖面的浅层地质体建模过程中的地质剖面自动对比问题,实现3维地质体模型的动态重构与局部更新,将3维拓扑推理引入3维地质建模,通过剖面投影方法在3维空间曲面上实现拓扑关系的自动构建与推理,提升地质剖面对比维数,提高地质剖面自动对比自动化程度,实现城市地质中3维层状地质体动态建模。该方法已应用于南京城市地质3维建模中,结果表明该方法适应多种剖面数据,提高了地质空间3维建模效率。

关键词: 地质剖面; 3维地质体; 拓扑推理; 动态建模

Three-dimensional dynamic modeling of stratified geology solid based on sections

Li Aiqin¹⁾, He Zhenwen²⁾, Deng Yi³⁾

¹⁾ (Zhejiang Academy of Surveying and Mapping (Zhejiang Branch, Chinese Academy of Surveying and Mapping), Hangzhou 310012 China)

²⁾ (School of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China)

³⁾ (Geomatics Center of Zhejiang, Hangzhou 310012 China)

Abstract: A dynamic geological modeling method based on topology reasoning among sections is presented in this paper in order to resolve the geological section correspondence problems, which results in the bottlenecks of automatic modeling, and enables the 3D stratified geological solid model to be updated dynamically. With topology relationship construction and reasoning on the three-dimensional surface, this method increased the dimensions of the geological section correspondence, and implemented dynamic three-dimensional geological modeling. This method had been used in Nanjing urban geologic three-dimensional modeling. The result indicated that it was suitable for many kinds of section data, and enhanced the three-dimensional modeling efficiency.

Keywords: geological section; 3D geological solid; topology reasoning; dynamic modeling

0 引言

国外城市地质工作始于20世纪初,20世纪60—90年代,城市地质工作范围逐渐扩大,并逐渐实现信息化。但总体而言,国外的城市地质调

查都是从专项出发,缺乏系统性和整体性。国内城市地质调查工作开始于20世纪50年代,进入21世纪以来,国家从解决城市发展面临的地质问题和保障城市可持续发展的战略角度出发,做出了在全国逐步开展新一轮城市地质调查工作的重大决策。2004年开始,国家启动北京、上海、

收稿日期:2010-07-21;修回日期:2010-10-26

基金项目:中国城市地质调查试点-南京城市地质调查项目(1212010511105);江苏省“六大人才高峰”项目(07-F-004)。

第一作者简介:李爱勤(1967—),男,教授级高级工程师。2001年武汉大学获摄影测量与遥感专业博士学位,主要研究方向为测绘遥感与地理信息、交换和共享平台、数字城市、数字规划、数字水印等。E-mail: aqli_cn@126.com。

南京、杭州等6个城市地质调查试点项目。在这些试点城市中,3维城市地质模型的构建是主要工作任务之一。由于现有地质建模方法主要以交互式建模方法为主,需要耗费大量的人力物力,严重影响了3维模型数据处理速度。

为提高3维地质体建模效率,从1975年基于线框模型的最早的3维地质建模方法提出以来,相关领域的专家学者3维地质体自动建模方法进行了不懈探索研究。从20世纪90年代末期开始,人们意识到对于简单空间实体或者规则空间实体,可以通过单纯的剖分算法来实现动态构模,但对于复杂地质体建模,由于需要大量的人工交互,其中包含过多地质知识及人工智能推理过程,不可能通过剖分等简单算法来实现动态建模。因此,人们对3维地质体动态构模方法的研究逐渐从纯粹的空间构模的数据结构与算法研究转变为开始重视建模过程中的地质知识表达、推理与应用研究。1998年,Chiaruttini等人研究空间与时态推理在地质建模中的应用问题,其模型采用表面模型,主要讨论了模型的时空约束规则及其诊断问题。1998年,Perrin首次提出地质语法,并对地质一致性进行了探讨。1999年,Roberto等人讨论地质解释过程中的人工智能推理算法。2002年,Schoniger等人提出不确定性下的地质推理分析,并将其应用于地下水体重构研究。2005年,Minor等人研究基于用例推理的地质构造建模方法;Perrin在SEM(shared earth model)基础上提出适用于油气盆地重建的基于知识驱动的建模方法,采用的模型依然是面模型。在国内,中国矿业大学吴立新等人提出了GTP模型,并对基于含断层的钻孔数据的地质体建模方法进行了比较深入地研究。2006年,Zheng和Li等人提出了基于事件驱动的时空数据模型,没有进行模型重构方面的研究。2008年,何珍文等人通过剖面投影及简单拓扑关系对比实现了基于剖面数据的地质体动态建模方法;但对于复杂拓扑关系的推理没有进行深入研究。上述研究成果在一定程度上推进了空间推理在地质体建模中的应用研究,同时也为地质体动态建模的实现奠定了基础。但上述研究成果大多局限于特定地学领域知识,没有完全解决基于剖

面建模中的最关键的问题,即剖面自动对比问题。

由于城市地质模型一般为浅层地质体,且多为层状地质体,为提高城市地质模型建模速度,提出一种基于剖面的3维层状地质体动态建模方法。该方法将拓扑推理引入3维地质建模,通过3维空间曲面上拓扑关系的构建与推理,提升地质剖面对比维数,实现了3维地质体动态建模。实验表明,该方法适应多种剖面数据,提高了地质空间3维建模效率。

1 非共面剖面拓扑关系的生成与表达

剖面是地质体建模的主要数据来源之一。在以往的文献中,用于地质体建模的剖面大多是共面的序列剖面,并且在建模过程中大多使用剖面上的轮廓线进行地质体表面生成^[1-5];这种建模方法主要分为4个主要问题,即对应问题、构网问题、分支问题和光滑问题。王勇、屈红刚等人在此基础上,将剖面拓扑关系引入建模过程中,提出了断层解决方案^[6-7],其剖面拓扑关系主要靠人工编辑完成。为解决“高精度”和快速建模问题,屈红刚等人提出了基于交叉折剖面的建模方法^[8]。

1.1 拓扑关系的表达

拓扑关系在很大程度上是一种定性的关系,并且关系种类繁多。在3维空间剖面中不能直接完全引入所有的3维空间拓扑关系^[9]。为了便于非共面剖面上拓扑关系的自动生成,采用扩展的3维节点(Node)、弧段(Arc)和3维面(Face)来进行拓扑关系描述。结点(Node)是一种特殊的3维几何点,它是弧段的起始点或终止点。弧段(Arc)是一条由几何点顺序连接而成的3维有向线段,它和其他弧段只能相交于结点处。面(Face)是由一系列弧段(Arc)首尾连接形成的,在剖面上的封闭区域。它们之间的关系如图1所示,Node、Arc、Face为拓扑模型中的对象,其余对象为几何对象。与建模相关的拓扑关系主要有:Face之间的邻接关系、包含关系,Face与Arc之间的关联关系。

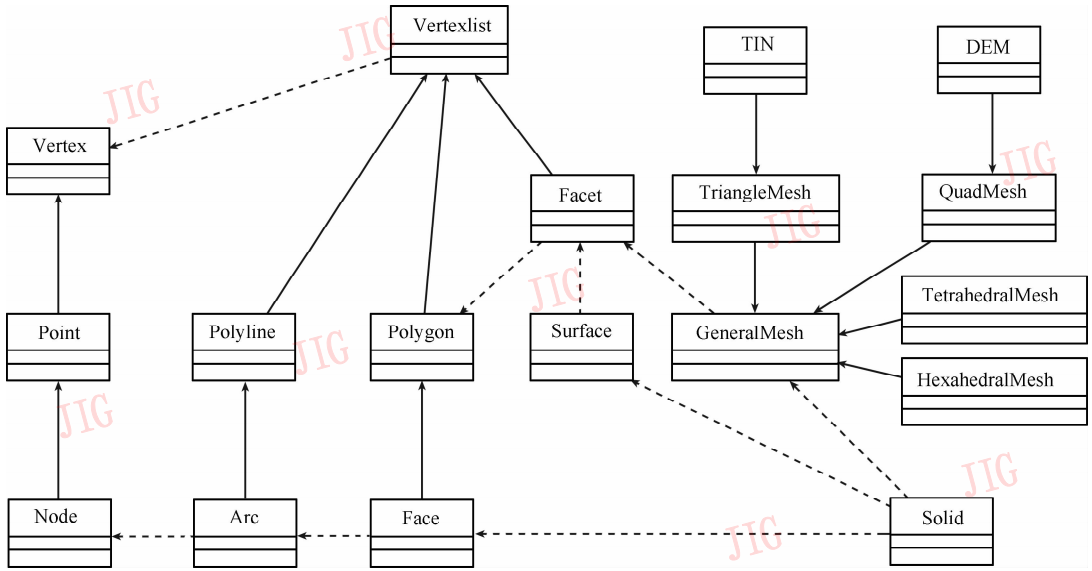


图 1 几何对象与拓扑对象对应关系

Fig. 1 Relationship between geometry objects and topology objects

1.2 拓扑关系的自动生成

空间曲面上结点、弧度、面之间的拓扑关系的自动建立是实现自动建模的关键技术之一。目前关于 2 维平面上空间对象之间拓扑关系的自动生成算法有很多,其中比较常用的是 Qi 算法、基于图的多边形拓扑关系自动生成算法和基于方位角计算的拓扑自动生成算等^[10-14];但是 3 维空间曲面上的拓扑关系自动建立算法还没有实现。

为解决非共面剖面上拓扑关系的自动生成问题,采用剖面投影法。该方法首先计算选定投影平面 P ,然后将非共面剖面 $S = \{L_i; 0 < i < n\}$ 上的所有线对象投影到平面 P 上,形成剖面 S_p ,投影矩阵记为 M_p ,逆矩阵记为 M_r (如果逆矩阵不存在,则必须重新选择投影平面 P)。对于 S 上的线对象 L_i ,其在 S_p 上的投影线对象记为 $L_{i,p}$ 。在平面 P 上,采用基于矢量外积的拓扑生成算法^[14],建立 S_p 上的拓扑关系模型。在拓扑建立过程产生的结点集合,记为 $S_{p0} = \{N_i; 0 < i < n_0\}$;产生的弧段集合记为 $S_{p1} = \{A_{ij}; 0 < i < n, 0 < j < m\}$,其中弧段 $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i(m-1)}$ 与 $L_{i,p}$ 和 L_i 对应;产生的多边形集合记为 $S_{p2} = \{F_i; 0 < i < n_2\}$;则 $S_p = S_{p0} \cup S_{p1} \cup S_{p2}$ 。将 P 平面上的结点、弧段、面集合通过逆投影变换,可以得到非共面剖面上的拓扑模型, $S = S_0 \cup S_1 \cup S_2$,其中 $S_0 = M_r S_{p0}, S_1 = M_r S_{p1}, S_2 = M_r S_{p2}$ 。这样就建立非共面曲面 S 上的类 2 维拓扑关系。

2 基于剖面拓扑推理的 3 维地质体动态重构

在剖面拓扑关系建立完成后,则可基于剖面拓扑关系进行剖面之间的推理与对比,然后进行地质体模型的建立。算法的数据模型采用基于网格的扩展边界替代集成模型。

2.1 基于网格的扩展边界替代集成模型 (EB-Rep)

B-Rep 模型是 3 维建模中广泛使用的模型之一。它将空间实体用一系列封闭的面来表示,各个面由一系列的边表示,边则由一系列的点组成。这种数据结构的优点是结构简单,数据量小;但是无法表现实体内部细节。在扩展集成模型 EB-Rep 中将边扩展成 Polyline 模型不记录边拓扑关系,将面扩展成任意个凸多边形构成的面片的集合 Facets。集合的可见部分构成表面不规则网格 Surface。由 Facets 构建通用体网格,由 Surface 构成 Solid 的表面,由 Mesh 构成 Solid 的内部结构。由相互关联的 Solid 构成 Model,模型中只记录 Surface 之间的拓扑关系。各个集合元素之间的关系如图 1 所示。

2.2 算法主要实现步骤

算法首先对序列剖面进行预处理,提取相邻两剖面,将其投影到指定平面上,在平面上利用 2 维拓扑自动建立算法建立投影平面上的拓扑关系;对拓扑关系中的区域属性进行推理对比,建立对应关系,

并将这些对应关系反向传导至原始剖面地质界线上,再根据传导的关系在两个剖面之间建立地质体的封闭的面模型,重复上述操作直到所有的两两相邻的剖面之间的地质体面模型都建立起来;进行地质体模型的合并得到地质单体模型,然后以面模型为限定条件对模型进行网格剖分,得到最终的真 3 维地质体模型。具体实施步骤如图 2 所示。

1) 输入非共面序列剖面集合(有 n 个连续曲面构成) $SC = \{SC_i\} (1 \leq i \leq n)$;

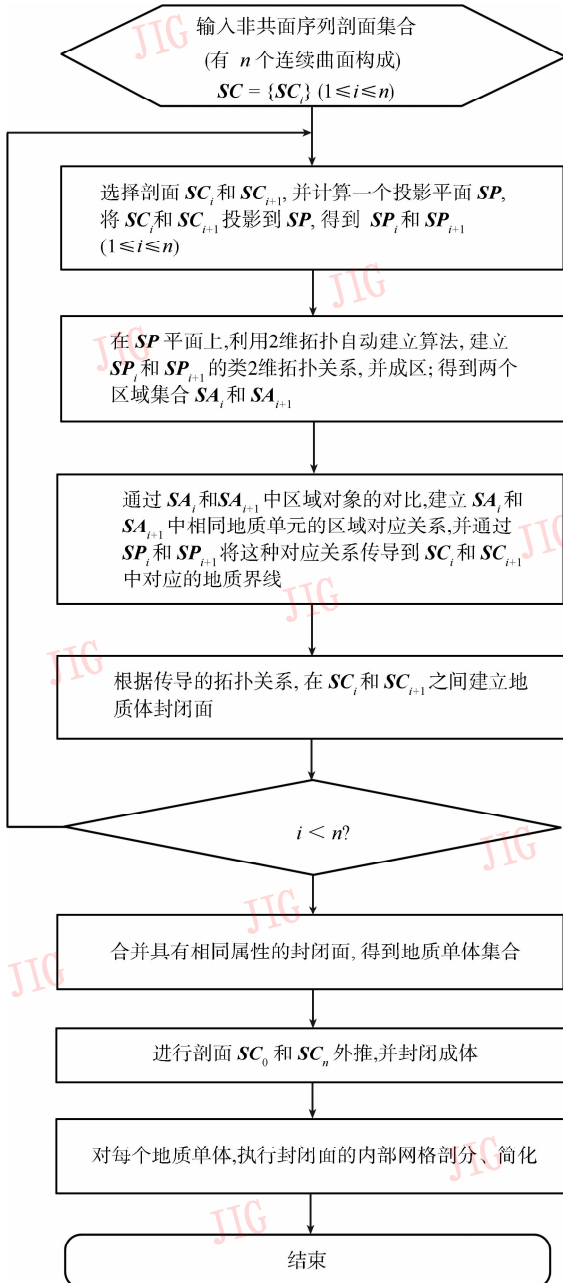


图 2 EB-Rep 算法流程图

Fig. 2 EB-Rep algorithm flow chart

2) 选择剖面 SC_i 和 SC_{i+1} , 并计算一个投影平面 SP , 将 SC_i 和 SC_{i+1} 投影到 SP , 得到 SP_i 和 SP_{i+1} , 其中 $SP_i = MP_i \times SC_i$ 投影到 SP , $SP_{i+1} = MP_{i+1} \times SC_{i+1}$ 投影到 SP , $MP_i = MP_{i+1}$;

3) 在 SP 平面上, 利用 2 维拓扑自动建立算法, 建立 SP_i 和 SP_{i+1} 的类 2 维拓扑关系, 并成区, 得到两个区域集合 SA_i 和 SA_{i+1} ;

4) 通过 SA_i 和 SA_{i+1} 中区域对象的对比, 建立 SA_i 和 SA_{i+1} 中相同地质单元的区域对应关系, 并通过 SP_i 和 SP_{i+1} 将这种对应关系传导到 SC_i 和 SC_{i+1} 中对应的地质界线;

5) 根据传导的拓扑关系, 在 SC_i 和 SC_{i+1} 之间建立地质体封闭面;

6) 重复步骤 2) — 5), 完成所有封闭面建立;

7) 合并具有相同属性的封闭面, 得到地质单体集合;

8) 进行剖面 SC_0 和 SC_n 外推, 并封闭成体;

9) 对每个地质单体, 执行封闭面的内部网格剖分, 得到完整地质体;

10) 采用“单体塌陷”(simplex collapse)算法, 对地质体表面与内部网格进行简化。

算法的关键是投影面上拓扑区域的自动对比; 在上面的算法步骤中, 步骤 2) — 5) 是该算法的关键步骤, 为增强算法的适应性和实用性, 算法预留了人工引导交互接口, 可以在算法上增加部分人工辅助对比。

2.3 算法分析比较

算法利用 EB-Rep 面体混合模型将 B-Rep 模型的数据结构简单、数据量小的优点与 TEN 模型的可自动重构性有机融合, 通过非共面序列剖面之间的类 2 维拓扑关系的构建与推理对比, 将剖面的对比维数提升, 实现序列剖面的两两自动对比。算法有效地解决了非共面序列剖面自动对比问题, 基于剖面的 3 维地质体的局部模型更新问题和模型的整体动态重构问题。与已有的基于剖面建模算法相比, 主要具有以下不同:

1) 由于算法在剖面对比之前对剖面进行了投影处理, 使得本算法能直接处理非共面的 3 维剖面数据;

2) 算法避免了以往剖面建模的强交互性, 实现将拓扑推理引入剖面对比, 提升剖面对比维数, 提高了剖面对比的自动化程度;

3) 利用 EB-Rep 面体混合模型将 B-Rep 模型的

数据结构简单、数据量小的优点与 TEN 模型的可自动重构性有机融合在一起。基于此模型的构建的地质体是真 3 维地质体, 能根据精度要求调整地质体的表面网格精度和地质体内部体元网格精度。

3 结 论

算法通过对剖面进行平面投影, 将 3 维空间中的拓扑关系降维成可以自动构建的简单 2 维拓扑关系, 并将其用于地质体尖灭、分叉和断层等复杂情况辅助推理, 解决了相邻剖面自动对比和自动构网问题, 并采用扩展的 E-Rep 数据结构模型实现基于剖面的 3 维地质体动态建模。

图 3—6 是本文算法在中国地质调查局城市地质调查试点项目—“南京城市地质调查信息系统”中应用实例。实际使用证明, 该方法对于不存在地层严重倒转的地层地质体能有效的进行动态自动建模, 所建模型与采用钻孔人工交互建模得到的地质体模型在关键分层界面处完全吻合, 证明了该算法的有效性。但对于存在倒转地层的区域, 算法中采用的剖面自动对比方法还存在较大缺陷, 需要进一步加入区域地质背景知识推理进行算法完善。

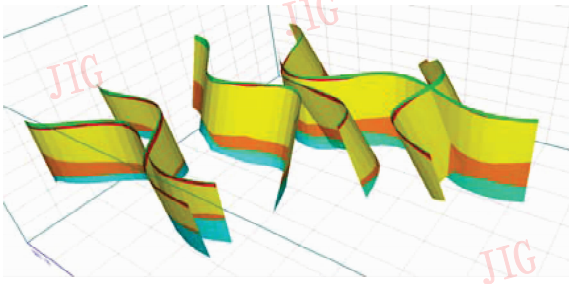


图 3 算法输入—非共面序列剖面

Fig. 3 Input—Noncoplanar section series

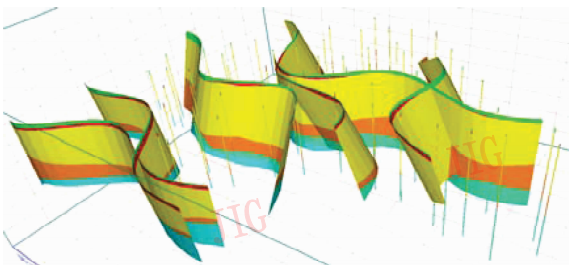


图 4 校验钻孔数据

Fig. 4 Check borehole data

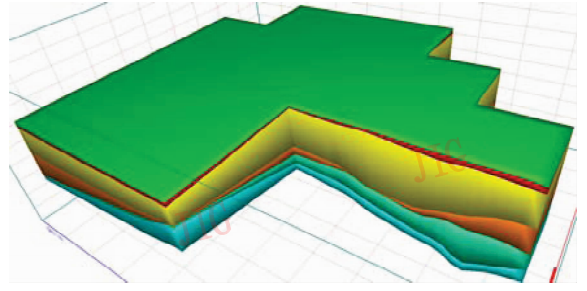


图 5 动态建模后经过研究区域多边形裁剪后的结果

Fig. 5 3D geological solid model constructed by this method (trimmed by the case polygon)

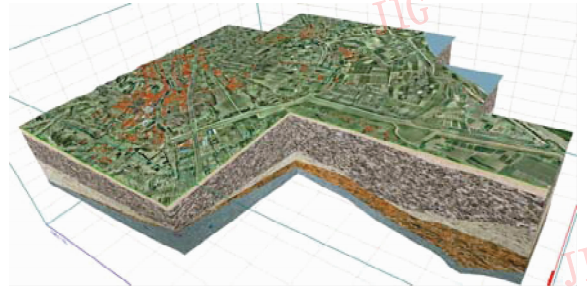


图 6 带纹理的算法结果模型

Fig. 6 3D geological solid model integrated with texture

参考文献 (References)

[1] Meyres D, Skinner S, Sloan K. Surfaces from contours [J]. ACM Transactions on Graphics, 1992, 11 (3) : 228-258.

[2] Muller H, Klingert A. Surface interpolation from cross sections [M] // Hagen H, Muller H, Nielson G. Focus on Scientific Visualization. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 139-189.

[3] Herbert M J, Jones C B. Contour correspondence for serial section reconstruction: complex scenarios in palaeontology [J]. Computers & Geosciences, 2001, (4) : 427-440.

[4] Cheng Dan, Yang Qin, Zhang Yongbo, et al. Three-dimensional geological modeling based on hydro sections [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1362-1366. [程丹, 杨钦, 张永波, 等. 基于水文剖面的三维地质建模方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11): 1362-1366.]

[5] Wang Xiaoming. Research on 3D geology modeling and visualization based on Sections [J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(11): 70-74. [王小明. 基于剖面的三维地质模型构建与可视化研究 [J]. 岩土工程界, 2009, 12(11): 70-74.]

[6] Wang Yong, Xue Sheng, Pan Mao, et al. An automatic 3D vector data creation algorithm based on topology of section [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(5): 1-2, 75. [王勇, 薛

- 胜,潘懋,等. 基于剖面拓扑的三维矢量数据自动生成算法研究[J]. 计算机工程与应用,2003,39(5):1-2,75.]
- [7] Qu Honggang, Pan Mao, Wang Yong, et al. Three-dimensional geological modeling from topological cross-sections [J] . Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42 (6) : 717-723. [屈红刚, 潘懋, 王勇, 等. 基于含拓扑剖面的三维地质建模[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(6):717-723.]
- [8] Qu Honggang, Pan Mao, Ming Jing, et al. An efficient method for high-precision 3D geological modeling from intersected folded cross-sections [J] . Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44 (06) : 915-920. [屈红刚, 潘懋, 明镜, 等. 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[J]. 北京大学学报(自然科学版),2008,44(06):915-920.]
- [9] He Zhenwen, Wu Chonglong, Tian Yiping, et al. Three-dimensional reconstruction of geological solids based on section topology reasoning [J] . Geo- spatial Information Science, 2008, 11 (3) : 201-208.
- [10] Qi Hua, Liu Wenxi. *Qi* algorithm for node-arc topology relation construction [J] . Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996, 25 (3) : 233-235. [齐华, 刘文熙. 建立结点上弧-弧拓扑关系的 *Qi* 算法[J]. 测绘学报,1996,25(3):233-235.]
- [11] Yang Haihong, Li Tianhong, Xue An. Optimization on automatic topological relation generating algorithm with double neighboring point judgement method [J] . Journal of Image and Graphics, 1998, 3 (7) : 583-587. [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[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3 (7) : 583-587.]
- [12] Zhou Lixin, Yan Jing, Pan Yunhe. A graph-based algorithm for generating polygons' topological relationships [J] . Computer Applications, 1999, 19 (10) : 37-39. [周立新, 严静, 潘云鹤. 一个基于图的多边形拓扑关系生成算法[J]. 计算机应用, 1999, 19 (10) : 37-39.]
- [13] Yan Haowen, Yang Weifang, Cheng Quangong, et al. A fast algorithm of topological polygon auto-construction based on azimuth calculation [J] . Journal of Image and Graphics, 2000, 5A (7) : 563-567. [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, 5A (7) : 563-567.]
- [14] Gao Yunqiong, Xu Jiangang, Tang Wenwu. A new algorithm for generation of arc-arc topological relationship on the same vertices [J] . Application Research of Computers, 2002 (4) : 58-59. [高云琼, 徐建刚, 唐文武. 同一结点上弧-弧拓扑关系生成的新算法[J]. 计算机应用研究, 2002 (4) : 58-59.]