

基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究

程朋根^{1,2} 龚健雅¹ 史文中³ 刘少华²

(1) 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2) 东华理工学院测量系, 抚州市环城西路 14 号, 344000)

(3) 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红

摘要: 以地质体三维建模为目的, 结合地质勘探工程数据的特点, 对以似三棱柱体为体元的三维数据模型和基本算法进行了研究, 并以内蒙古某矿区的实际钻孔资料进行了验证。

关键词: 似三棱柱体; 数据模型; 建模; 算法; 地质勘探工程

中图法分类号: P208

在过去的十几年中, 国内外众多学者对三维 GIS 数据模型理论进行了较深入的研究, 提出了多种三维空间模型或建模方法。从建模的基本元素来看, 这些模型可以分为基于面表示的模型、基于体表示的模型和混合数据模型。基于面表示的模型侧重于空间实体的表面表示, 如不规则三角网(TIN)、格网模型(grid)^[1]、三维规范化数据结构(3DFDS)^[2]、边界表示(B-Rep)^[3]、断面(section)模型^[4]、三维城市模型^[5~8]等。基于体表示的模型是以基本体元分割空间实体, 如三维规则格网(3D grid)^[4]、四面体格网(TEN)^[9~10]、结构实体几何(CSG)^[3]、八叉树(octree)^[11]、三棱柱体(Tri-Prism)^[12~14]、面向对象的三维体元拓扑数据模型^[15]等。混合数据模型综合了面模型和体模型的优点, 如基于八叉树和四面体格网的混合数据模型^[16], 八叉树与不规则三角形格网的混合模型(TIN-Octree)^[17], 矢量与栅格集成的面向对象三维空间数据模型^[18~21]等。在地质研究领域为了描述地质体内部的结构与属性, 通常采用基于体元的建模方法, 基本体元有六面体、四棱锥、四面体、三棱柱体等。采用六面体作为基本体元时, 边界区域难以精确表示。四面体结构在表达复杂结构上较灵活, 但会产生大量的冗余, 且生成四面体的算法比较复杂。近年来, 有些学者开始研究基于三棱柱体体元的数据模型^[12~14, 21]。

1 基于似三棱柱体的数据模型与数据结构

1.1 基于似三棱柱体的数据模型

基于似三棱柱体的数据模型是以似三棱柱体作为基本体元, 一个三棱柱体包含的几何元素有顶点、线段(棱边、三角形边)、三角形、侧面四边形、三棱柱体, 它们可以看成是数据模型的基本元素。在地质勘探领域, 从空间对象的角度来看, 钻孔是由多段棱边组成的线对象; 同一层面的相邻三角形构成了一个地层界面对象; 相互连接在一起的似三棱柱体体元构成一个完整的地质体对象; 结点可以用于描述一个点状的地质对象, 如瓦斯集焦点、矿体采样点; 在一定空间范围内的不同空间对象可以聚集成一个复杂的(地质)对象。根据面向对象建模的观点^[17~20], 可以将上述空间对象设计成不同的对象类, 并在此基础上概括出更高层次的超类, 即空间对象类, 以这些类作为模型设计的基础。用统一建模语言(UML)设计出一个基于似三棱柱体的面向对象概念的数据模型, 如图 1 所示, 其中栅格对象是描述地质体的表面影像或内部纹理, 以属性形式存在。概念模型中各几何元素和空间对象之间的拓扑关系可以用一个逻辑模型来表示, 如图 2 所示, QTP 为似三棱柱体, SQua 为侧面四边形, Tri 为三角形, Seg 为线段。

收稿日期: 2004-03-22

项目来源: 国家 973 计划资助项目(2002CB312101; G2000077904); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(WKL(01)0302); 香港理工大学战略发展研究基金资助项目(1.34.A222)。

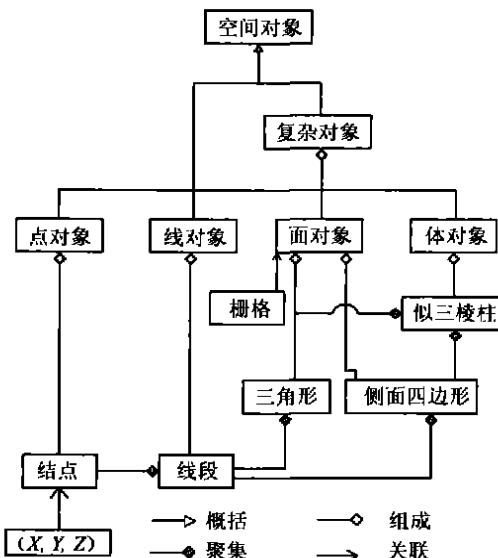


图1 标准建模语言表示的似三棱柱体概念模型

Fig. 1 QTPV Concept Model in UML

1.2 数据结构

逻辑模型中表示的只是各几何元素和实体对象之间的拓扑关系, 实际上, 为了使模型能够更好地建立具有空间位置、拓扑关系及属性信息的三维地质体模型, 必须设计更为详细的数据结构。数据结构包括顶点、三角形边、棱边、三角形、侧面四边形、三棱柱体。此外, 为了描述三维地质体及其之间的拓扑关系, 还需要设

1) 结点

标识	X	Y	Z	属性	所属对象	类型	切割标志
----	---	---	---	----	------	----	------

2) 三角形边

标识	起点	终点	左三角形	右三角形	上侧面四边形	下侧面四边形	切割标志	切割点
----	----	----	------	------	--------	--------	------	-----

3) 棱边

标识	起点	终点	邻接侧面四边形	属性	所属对象	切割标志	切割点
----	----	----	---------	----	------	------	-----

注: 棱边属性可以是一种结构数据, 以反映沿棱边的属性变化; 如果所属对象值为-1, 则棱边长度为零, 表示尖灭点。

4) 三角形

标识	三角形顶点	三角形边	邻接	正面	正面	负面	负面	所属
		三角形	属性	三棱体	属性	三棱体	属性	对象

5) 侧面四边形

标识	四边形顶点	三角形边	棱边	正面三棱体	负面三棱体	所属对象	三角剖分标志
----	-------	------	----	-------	-------	------	--------

6) 似三棱柱体

标识	三棱柱体顶点	三角形	侧面	邻接三棱柱体	所属	地质体	四面体	切割	邻接三棱柱体
		四边形	棱柱体	对象	类型		剖分编码	标志	切割标志

7) 地质体(地层、矿体、断层、褶皱)

标识	地质体类型	最小边界盒	所在地层标识	似三棱柱体集	邻接地质体	边界面	属性
----	-------	-------	--------	--------	-------	-----	----

2 似三棱柱体的建模与处理

2.1 似三棱柱体的建模

似三棱柱体的建模以地表面钻孔中心点为基

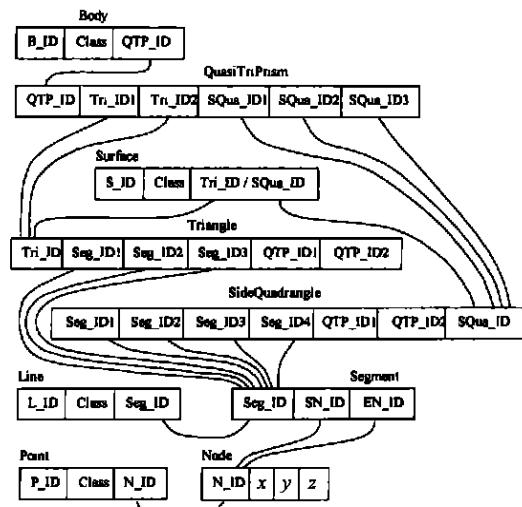


图2 似三棱柱体逻辑模型

Fig. 2 Logical Model Based on QTPV

计构成地质界面的三角网(TIN)、地层或断层面(TINs)、地质体以及影像或纹理等对象的数据结构。

限于篇幅, 这里仅仅列出构成似三棱柱体的全部6种数据结构和地质体数据结构。所设计的6种数据结构不仅描述了构成似三棱柱体的几何元素的空间位置和属性信息, 而且显式地表达或隐含了这些几何元素之间的拓扑关系, 同时, 也表达了地质体各元素之间的拓扑关系。

础, 一旦建模区域内钻孔确定, 由它们构成的 Delaunay 三角网也就惟一确定。而相邻层之间的三棱柱体的侧面四边形由 TIN 中三角形三顶点的两两组合后沿钻孔按一定规则向下扩展而成, 这样, 侧面四边形的侧棱边就只能在同一条钻孔

上, 即使钻孔倾斜, 也能保证建立惟一的侧面四边形与似三棱柱体。假定钻孔曲线上点的数据结构为(坐标, 属性编码), 其中属性编码为该点向下邻接的地质体(或岩性)编码, 地质体编码是由地表向下按递增的顺序编码。建模的主要步骤如下。

1) 根据钻孔孔口坐标按 Delaunay 三角网的构建方法生成一个三角形, 将这个三角形设置为第一个似三棱柱体的上三角形。

2) 根据上三角形点的属性编码沿 3 个钻孔向下扩展新三角形(称为下三角形), 如图 3 所示。其扩展规则是: 如果三角形三个顶点的属性编码相同, 则新三角形顶点均为相应钻孔的下一个点, 如图 3(a); 如果编码不相同, 则编码小(如 a)的钻孔上新三角形顶点为相应钻孔的下一个点, 而编码大(如 b 或 c)的钻孔上, 新三角形顶点保持不变, 即与上三角形顶点相同, 如图 3(b)~3(d)。

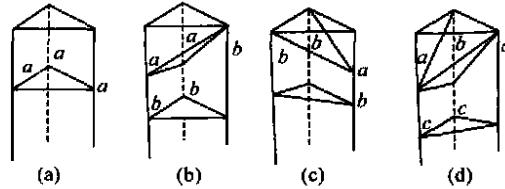


图 3 向下扩展似三棱柱体

Fig. 3 Down Expanding of QTPV

3) 根据上、下三角形的对应关系构建棱边、侧面四边形和似三棱柱体, 记录并修改似三棱柱体的描述信息, 并将下三角形置为上三角形。

4) 重复步骤 2)、步骤 3), 直到上三角形顶点均为 3 个钻孔的底部点为止。

5) 根据钻孔孔口坐标, 按 Delaunay 三角网的构建方法扩展新三角形, 并置为上三角形, 重复步骤 2)~步骤 4), 构建新的似三棱柱体。

6) 重复步骤 5), 直到地表面钻孔孔口的 Delaunay 三角网构建完成为止。

这种建模方法的优势是便于模型修改, 当插入新的钻孔时, 只需对 TIN 进行局部修改, 然后对进行了局部修改的三角形沿钻孔(向下)方向修改生成新的似三棱柱体。

2.2 剖切处理

地质剖面图或篱栅图是地质勘探人员了解地质结构最常规的手段。为了从三维地质模型中获得剖面信息, 通常采用任意剖面去切割模型。如果采用一个无限伸展的平面切割似三棱柱体, 则会出现多种不同的切割方式。文献[12] 分析了对标准三棱柱体的 5 种切割方式。但对似三棱柱体而言, 远不止这 5 种方式。假定顶点分为黑、白

两种情况, 分别对应顶点位于剖切面的正侧、负侧, 理论上, 顶点的黑白组合共有 64 种状态。考虑到图形的上下对称性、左右对称性以及侧面四边形的凸凹性后, 则有 8 种切割方式, 如图 4 所示。当不考虑对称性时, 有 35 种切割方式; 如果考虑相切情况(即顶点位于剖切面上)和对称性时, 有 36 种切割方式, 不考虑对称性时, 则有 182 种切割方式。

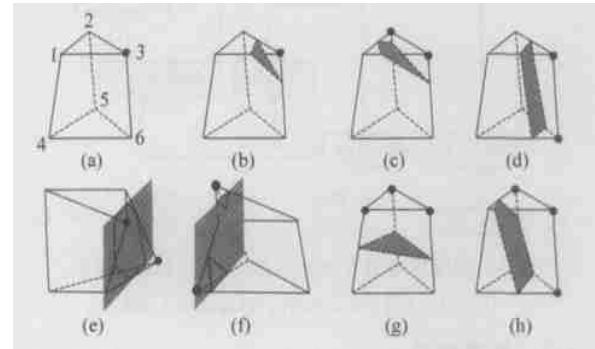


图 4 一般情况下的剖切情况

Fig. 4 General Cutting Cases

一般而言, 一个剖切面与三维模型相交后形成一个剖面。这个剖面的求解过程如下。

1) 开辟一个堆栈 S , 以存储与剖切面相交的体元号; 开辟一个剖面三角形队列 Q , 并清空。

2) 在体元表中任取一体元, 判断是否与剖切面相交, 如果不相交, 则在体元表中依次取一个未进行相交处理的体元, 直到找到一个相交的体元(假设模型与剖切面相交)并存入堆栈 S 。

3) 从堆栈中取一体元 V , 求该体元与剖切面相交形成的子多边形, 对其进行三角形化处理, 将三角形存入队列 Q 。对该体元做处理标志, 并将与该体元邻接且公共面与剖切面相交的体元号存入堆栈 S 。

4) 重复步骤 3), 直到堆栈 S 为空。

5) 检查体元表中是否还有未被检测和处理过的体元, 如果有且与剖切面相交, 则存入堆栈 S , 回到步骤 3); 如果没有, 则整个过程结束。

经过上述处理后, 队列 Q 中的三角形即为所求剖面。其中, 求解一个似三棱柱体与剖切面相交形成子多边形的过程为: 顶点切割标志计算、剖切面与三棱柱体交点的计算、剖面子多边形的生成。

2.3 似三棱柱体体元的四面体剖分

文献[23] 介绍了似三棱柱体的四面体剖分方法。为保存似三棱柱体的完整性和节省存储空间, 在模型中不直接生成四面体, 只是增加一个四面体剖分编码。似三棱柱体的四面体剖分编码可以由侧面四边形的对角线连接码依次组成。假定

侧面四边形顶点的编号顺序是“*abcd*”(图 3), 若连 *ac*, 则连线编码为 0; 若连 *bd*, 则连线编码为 1, 则 3 个四边形对角线连线码的组合码为 000~111, 其中, 001~110 是有效剖分, 000、111 为无效剖分而采用第 7 种方式。一旦知道似三棱柱体的剖分编码, 则它所剖分成的四面体是固定的。假定似三棱柱体的顶点按图 4(a)编号, 则可以建立一个剖分编码、四面体的局部编码(序号)及其对应的四面体结点的对照表(表 1)。这样, 只要知道剖分方式和给定的四面体局部编码, 就可知道该四面体的结点信息。

表 1 似三棱柱体四面体剖分编码与结点对照表

Tab. 1 Tetrahedron Partition Code and Vertex of QTPV

剖分方式	剖分编码	局部编码				
		0	1	2	3	4
1	001	4 156	5 126	6 123		
2	010	4 135	5 123	6 345		
3	011	4 156	5 123	6 135		
4	100	4 123	5 234	6 245		
5	101	4 126	5 245	6 123		
6	110	4 123	5 243	6 345		
		7 125	7 236	7 314		
	000	7 157	7 265	7 346		
7		7 124	7 235	7 316	7 123	7 456
	111	7 254	7 365	7 146		

由于似三棱柱体的剖分需要顾及相邻体元, 因此, 似三棱柱体体元四面体化过程按体元的邻接顺序进行。为此, 设计一个堆栈 *S* 来存储与当前处理体元相邻的体元。为判断一个体元是否已被剖分和已被压入堆栈, 以及所采用的剖分方式, 需要将这些信息记录在体元的四面体剖分编码中, 其结构如下:

```
struct TENPartCode { unsigned isPart : 1;
unsigned isInStack : 1; unsigned code : 3; }
```

似三棱柱体体元四面体化过程如下。

1) 首先选一初始体元, 从对应的剖分方式中任取一种, 将其压入堆栈 *S*, 并记录剖分方式。

2) 如果堆栈不为空, 从堆栈中弹出一体元, 将其剖分标志位置 1。

3) 检查这个体元的三个侧面四边形面, 如果这个侧面不是边界面, 则考虑与该侧面相邻的体元; 如果该体元没有压入堆栈, 则要根据该体元相邻体元的状态及对应的剖分方式来决定这个体元的剖分方式, 并将其压入堆栈。对每个侧面的相邻体元均进行上述处理。

4) 从堆栈中弹出一个体元, 并执行步骤 2)、步骤 3), 直到堆栈为空。

3 似三棱柱体建模分析

为对似三棱柱体(QTPV)建模进行分析比较, 将其与三维形式化数据结构(3DFDS)和四面体(TEN)建模进行对比, 并用它们来分别描述一个矩形, 如图 5 所示。有关 3DFDS 和 TEN 的逻辑模型, 文献[7]有较详细的描述, 似三棱柱体的逻辑模型见本文图 4。3 个模型的相关统计见表 2。

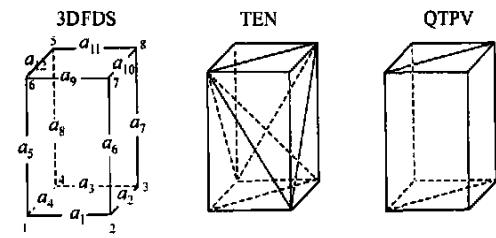


图 5 矩形的 3DFDS、TEN 和 QTPV 表示

Fig. 5 A Cubic Description Using 3DFDS, TEN and QTPV

从表 2 可以看出, QTPV 尽管几何元素的类型比 TEN 多 1 个(侧面四边形), 但从几何元素的总个数来看, QTPV 的元素个数比 TEN 要少于 33%、比 3DFDS 少 14%; 从字节总数来看, QTPV 占用的字节数最为节省存储空间, 它比 TEN 节省存储空间达 33%, 与 3DFDS 相当。

在建模过程中, 由于采用了基于 TIN 的建模技术与沿钻孔向下扩展似三棱柱体的方法, 因此, 建模结果具有唯一性。

QTPV 可以很好地描述实体的内部结构, 根据三角形和侧面四边形的正面、负面属性, 通过一定的算法可以提取地质体边界, 实现体模型与面模型之间的转换与统一, 适合顾及实体内部和拓扑关系描述的建模。

采用似三棱柱体作为模型的基本体元, 可以很好地结合地质勘探数据源的特点, 考虑地质数据的约束特征进行建模, 这是 TEN 模型所不能达到的。基于这一模型, 通过在顶点和棱边结构中增加属性指针(可以带有多个属性)方法存储地质体的属性信息, 在三棱柱体内部, 通过线性内插处理或有限元内插处理可以得到地质体内部任意一点的属性信息, 从而实现对地质体的真三维管理。似三棱柱体还用于地表诸如建筑物等规则物体的建模, 因此, 选择似三棱柱体作为建立地质体数据模型的基本体元具有更好的优势, 可以达到与地表统一建模的目的。

表 2 3DFDS, TEN 和 QTPV 大小比较

Tab. 2 Comparison Among 3DFDS, TEN and QTPV

3DFDS				TEN				QTPV			
几何元素	个数	字节/条	字节数	几何元素	个数	字节/条	字节数	几何元素	个数	字节/条	字节数
体	1	24	24	体	1	24	24	体	1	24	24
面	1	24	24	面	1	24	24	面	1	24	24
-	0	0	0	四面体	6	8	48	似三棱柱体	2	8	16
-	0	0	0	三角形表面	12	8	96	三角形表面	4	8	32
-	0	0	0	-	0	0	0	侧面四边形表面	4	8	32
面	6	16	96	三角形	18	24	432	三角形	4	24	96
边	24	13	312	-	0	0	0	侧面四边形	5	30	150
弧	12	12	144	弧	19	12	228	弧	14	12	168
结点	8	16	128	结点	8	16	128	结点	8	16	128
总数	50		680	总数	65		980	总数	43		654

注: 3DFDS 和 TEN 列数据摘自文献[7]。

4 应用实例

笔者在 Windows 环境下, 利用 VC⁺⁺ 6.0 作为系统开发的集成环境, 结合 SQL Server 数据库技术和 OpenGL 图形库, 开发了一个基于似三棱柱体元的三维地质体建模与可视化操作的系统原型。

笔者采用内蒙古某地质勘探区的真实钻孔数据进行了试验。原始钻孔 42 个, 勘探区有 5 个地层, 在剖面内进行内插后一共有 212 条虚拟和实际钻孔。所建立的似三棱柱体模型的线框图如图 6 所示, 共有 1 880 个似三棱柱体、2 256 个三角形、2 900 个侧面四边形。图 7 为基于模型的篱栅图。图 8 为两个地层的似三棱柱体四面体化后的线框图。

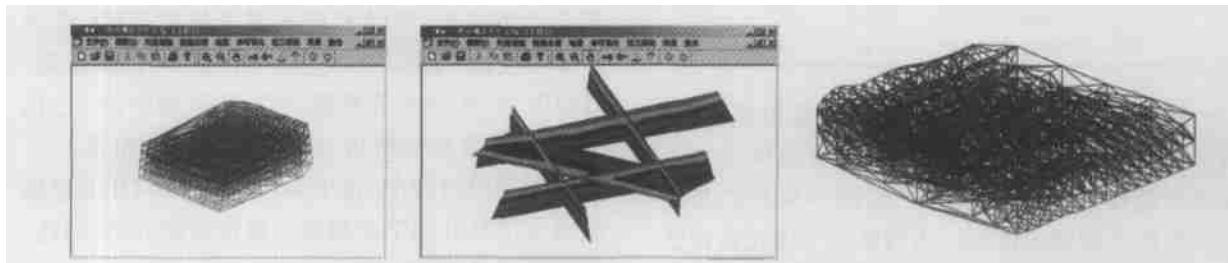


图 6 地层模型线框图

Fig. 6 Stratum Model Wireframe Graph

图 7 模型的篱栅图

Fig. 7 Fence Sections of Stratum Model

图 8 地层似三棱柱体四面体化

Fig. 8 Tetrahedron Wireframe Graph

目前, 只是对基于似三棱柱体的数据模型、建模方法及其应用进行了初步研究。今后还要进一步完善在断层、采掘等约束数据条件下建模、空间操作、三维地质体内部属性内插及其可视化方法的研究。

参 考 文 献

- 1 李志林, 朱 庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000. 29~59
- 2 Molanaar M. A Topology for 3D Vector Maps. ITC Journal, 1992(1): 25~33
- 3 Li R X. Date Structure and Application Issues in 3D Geographic Information System. Geomatics, 1994, 48(3): 209~244
- 4 Houlding S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization. New York: Springer Verlag, 1994. 119~129
- 5 Wang X, Gruen A. A Hybrid GIS for 3D City Models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(4/3): 1 165~1 172
- 6 孙 敏, 陈 军, 张学庄. 基于表面剖分的3DCM 空间数据模型研究. 测绘学报, 2000, 29(3): 257~265
- 7 Zlatanova S. 3D GIS for Urban Development: [Ph. D Dissertation]. Amsterdam: ITC, 2000
- 8 杨必胜, 李清泉, 梅宝燕. 3 维城市模型的可视化研究. 测绘学报, 2000, 29(2): 149~154
- 9 Pilout M, Tempfli K, Molenaar M. A Tetrahedron-Based on 3D Vector Data Model for Geoinformation. Advanced Geographic Data Modeling. Delft, Netherlands, 1994
- 10 Chen X Y. A Workstation for Three-Dimensional Spatial Data Research. The Fourth International Symposium of LIESMARS, Wuhan, 1995

- 11 韩国建, 郭达志, 金学林. 矿体信息的八叉树存储和检索技术. *测绘学报*, 1992, 21(1): 13~17
- 12 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法与应用. *中国图形图像学报*, 2001, 6(3): 285~290
- 13 吴立新, 张瑞新. 三维地学模拟与虚拟矿山系统. *测绘学报*, 2002, 31(1): 28~33
- 14 Gong J Y, Cheng P G. Study on 3D Modeling and Visualization in Geological Exploration Engineering. ISPRS Commission II Symposium: Integrated System for Spatial Data Production, Custodian and Decision Support. Xi'an 2002
- 15 侯恩科, 吴立新. 面向地质建模的三维拓扑数据模型. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(5): 467~472
- 16 Shi W Z. A Hybrid Model for 3D GIS. *Geoinformatics*, 1996(1): 400~409
- 17 李德仁, 李清泉. 一种三维GIS混合数据结构研究. *测绘学报*, 1997, 26(2): 128~133
- 18 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(1): 7~15
- 19 边馥苓, 傅仲良, 胡自锋. 面向对象的栅格矢量一体化的三维数据模型. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25(4): 295~297
- 20 程朋根, 龚健雅. 地勘工程三维空间数据模型及其数据结构设计. *测绘学报*, 2001, 30(1): 74~81
- 21 李建华, 边馥苓. 工程地质三维空间建模技术及其应用研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2003, 28(1): 25~30
- 22 洪永清, 黄德才, 吕丽民. 面向对象建模与设计. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 36~77
- 23 唐泽圣. 三维数据场可视化. 北京: 清华大学出版社, 1999. 157~163

第一作者简介: 程朋根, 教授, 博士生。主要研究领域为地理信息系统、三维空间数据模型、计算机地图制图。代表成果: 地勘工程三维数据模型与数据结构设计; GIS 中地图符号设计系统研究与实现。

E-mail: pgcheng@21cn.com

Geological Object Modeling Based on Quasi Tri-prism Volume and Its Application

CHENG Penggen^{1,2} GONG Jianya¹ SHI Wenzhong³ LIU Shaohua²

(1) State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) Department of Surveying, East China Institute of Technology, 14 West Huancheng Road, Fuzhou 344000, China)

(3) Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: Taking the geological exploration engineering as our research objects, we propose a QTPV (quasi tri-prism volume) model and make research about the model manipulation. In this paper, QTPV data structure is analyzed. 3D QTPV data model and data structures are designed. Model manipulation algorithms, such as modeling according borehole sample data, model cutting, model partition into tetrahedron, are proposed. The QTPV model features have been discussed by making a comparison among 3DFDS, TEN and QTPV. A system prototype is developed based on the proposed model and manipulations on QTPV by using VC⁺⁺ and OpenGL graphic library under Windows environment. A set of real borehole sample data, which come from Inner Mongolia China, is used to verify the model and algorithms implemented in the system prototype.

Key words: quasi tri-prism volume; data model; modelling; algorithm; geological exploration engineering

About the first author: CHENG Penggen, professor. His main research orientation are GIS 3D spatial data model and computer cartography, and his typical achievements are design of 3D spatial data model in GEE, design and implementation of map symbol design system in GIS. E-mail: pgcheng@21cn.com

(责任编辑: 晓晨)