

工程地质三维空间建模技术及其应用研究

李建华¹ 边馥苓¹

(1 武汉大学空间信息与数字工程研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:对工程地质研究的主要三维空间对象(勘探区域三维地质剖面体)进行了规范化的构造描述,对当前主流三维空间建模方法进行了综合分析。在此基础上,结合专业建模对象的构造特点及三维数据模型适用表达对象的不同特性,融合单元分解表示(CE)、构造实体几何(CSG)和边界表示(B-Rep)三种数据模型的建模思想,以及栅格模型的基本体元划分机制和数据组织方式,以不规则五面体为基本分析单元,采用面向对象方法构造模型内各类对象,提出了一种面向对象的三维矢量与栅格混合模型,实现了勘探区域三维地质剖面体的惟一性拓扑表达,并给出了可视化方案。分析了几例基于此模型的工程地质应用,借以验证该模型在工程地质领域内应用的合理性和可操作性。

关键词:工程地质;地层;空间数据模型;面向对象;可视化;三维地理信息系统

中图法分类号:P208;P642

工程地质是研究与工程建筑有关的地质问题的科学与技术,在城市规划、大型工业或民用建筑物建设、修路、水电、采矿等领域得到广泛应用。其主要研究对象是地层、岩性、构造、地下水等因素的工程地质性质及其演变规律^[1]。理论上运用工程勘察钻孔数据完全可以近似构造出不同地层复杂体元,进而构造出三维区域地质剖面体,用于专业人员观察、分析、操作和研究。长期以来,由于受计算机软、硬件性能的限制,适用于地学领域的三维空间数据模型的研究一直处于探讨和试验阶段,未能占据 CAD/CAM 三维构造模型及 3D GIS 三维空间数据模型研究的主流,因此发展缓慢,很难利用一种空间数据模型解决地质领域地层构造和建立在此模型之上的专业分析操作等问题。目前工程地质分析运算的主要参考对象仍是二维剖面图或其组合,这种局面已经远远落后于高速发展的经济建设需求,在一些大型工程设计过程中显得力不从心。

三维空间数据模型一直是 3D GIS 及 CAD/CAM 设计领域研究的热门,随着研究的深入,针对不同的应用领域已经有多种不同形式的三维数据模型提出^[2~5],但这些空间数据模型多是以解决地面上规则三维建筑物建模及地貌表达为目的而提出的,相对于地质特别是工程地质,有针对性

的模型设计却很少。从另一个角度分析,由于三维空间对象及其应用的复杂性,任何一种三维空间数据模型都不能涵盖诸多专业领域的三维建模需求,多种模型的集成研究及混合应用用于解决专题问题已成为该领域研究的重要课题^[4]。具有代表性的研究成果包括:Carlson 提出的网络边界表示模型^[6],Bak 和 Mill 提出的基于表面三角形格网和线性八叉树表示的三维空间构造模型^[7]等,其思路是针对不同的三维空间对象,采用不同混合模型加以描述,以符合不同领域需求,取得实际应用效果。

本文在研究众多三维空间模型的基础上,遵从工程地质三维剖面体的构造规则,考虑到单元分解表示(CE)、构造实体几何(CSG)和边界表示(B-Rep)三种空间数据模型的建模思想及其特点和适应性,提出基于三个相邻钻孔的单层数据空间所构成的不规则五面体为基本构图分析单元,融合三种建模技术的思想于构造过程的不同阶段,最后形成一种矢量与栅格结构混合的数据模型。该模型突出表达工程地质三维地质剖面体的规范化逻辑构造过程,使得依此模型建立的复杂体不但满足表面可视化表达的需要,还从整体上对构造体进行了科学描述,交互操作性强,因而满足专业分析及运算的需要。

收稿日期:2002-10-08。

1 区域地质剖面体构造解析

1.1 工程地质研究的主要空间对象

钻孔数据是工程地质各类空间对象构造的基本元素,获取手段正在发生着变革,传统的钻探手段渐将被现代先进探测仪器所取代,数据勘探采样结果都可解译成基本钻孔数据,反映不同埋深的地质分类特征及岩土力学性质。在此基础上,依据工程地质图示规范要求,构造钻孔柱状图、二维工程地质剖面图和三维地质剖面图用于工程地质条件分析和评价。

从构图要素分析,空间对象包括三维点、线、环、面、曲面(TIN)、体元、复杂构造体七类要素,形成以复杂构造体为根,三维点为叶节点的层次树状结构^[13],且相互之间蕴含着基本的拓扑关系。这种数据结构自身具有继承、包容、聚合的特点,适合运用面向对象技术进行数据结构设计,可以存储于对象关系型数据库系统中。

1.2 三维区域性地质剖面体的构造解析

三维区域性地质剖面体是反映勘探区域地质构造的复杂体对象,由表达地层结构及走向的不规则构造体叠置形成,因此区域性地质剖面体的三维建模过程就可分解为对探明地层的逐一构造过程,最后形成基于地层体域表达的完整三维模型。但是由于受工程地质行业规范的约束,同时也为了建立简洁的推理算法,实际上的构造过程是在三个或更多钻孔之间进行同步分析,各地层同时推演产生的。地层推理应遵从区域整体地层分布规律,因此需要勘探区域的综合分层描述数据作为依据,按序推导。

综合分层描述数据反映了一个区域宏观上地层出现的先后规律及分布走向。它规定了地层构造过程中,异常地层尖灭处理的顺序关系,由此保证了推理结果的惟一性。同时对探明地层建立综合分层描述可以事先确定各地层的属性信息,按其要求推理产生的地层基本构造体元可以查询继承这些信息,为对象的属性赋值。二维剖面图的构造原理可用图 1 表达。图 1 中数字标记是综合分层描述规定地层序号,因此图 1(a)的表达是正确的。图 1(b)中错把地层 1 尖灭到地层 2 下,违反了综合分层描述中地层排序规则。

参照二维剖面图构图原理^[14],笔者在文中提出的三维构造剖面图的推理机制,实质是二维剖面图推理算法的扩充。首先应确定基本运算单元的构成,二维情况下是相邻两个钻孔构成剖面基

本组成单元,推理产生的单元组成元素是不规则三角形或不规则四边形。三维情况下基本运算单元因为选择不同的推理算法可以有不同的定义,如由相邻四个钻孔构成的不规则六面体或更复杂多面体。本文采用对区域内钻孔进行不规则三角网格划分,以三个相邻钻孔构成的不规则五面体为基本运算单元(如图 2 中的基本构造单元)进行推理运算。三角网格划分方法采用 Delaunay 算法构造 TIN 模型,产生的结果如图 2 所示。

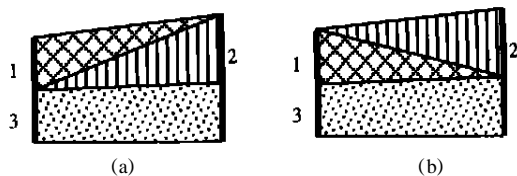


图 1 二维剖面图构造规则

Fig. 1 Formation Rule of Two-Dimensional Sections

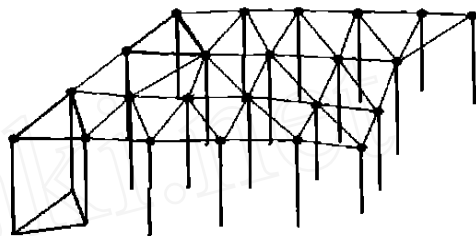


图 2 三角网格划分示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Triangular Grid

遵从地层走向的尖灭规则,基于不规则五面体进行地层推理,产生的地层组成体元是不规则四面体或五面体,如图 3 所示,图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)为推理可能产生的三种体元。这是极为简单的体域元素,数据构成简单,数据量小,建立在其上的逻辑运算及可视化表达都易于实现。

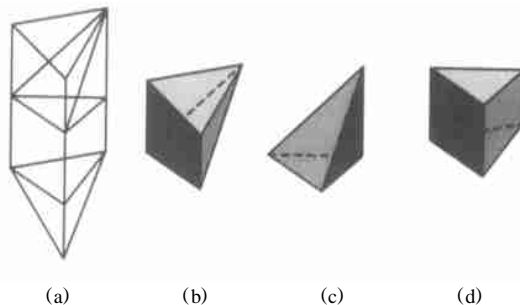


图 3 地层组成体元描述

Fig. 3 Component Cell of Stratum

关于空间数据模型的研究工作,李清泉曾提出了基于八叉树和四面体格网的混合模型,强调三维体对象的细部用四面体划分进行描述,将构造单元简化成最简单的体元。针对本文提出的算法在三维剖面体推理过程中产生的基本体元(如图 3),也可以进一步划分为不规则的四面体,这

样便将对象的数据结构统一为最简单的形体结构。但笔者的初衷是希望从地层构造的过程得到地层的整体结构模型,从整体上构造出用于描述地层的复杂体,以便于地质分析操作,因此提出基于地层组成体元之上的进一步运算方法,这些体元作为中间结果存在,因此不做进一步划分。

2 CE、CSG、B- Reps 建模方法思想的融合

目前,三维空间模型的研究工作已经取得了很大的进展,发展出了一批有价值的应用模型,并已经被一些 3D GIS 系统所采纳。由于侧重点的不同,基本上形成了两大类,即矢量模型和栅格模型。另一方面,在实践过程中,人们发现针对不同的三维现象,采用不同的模型加以描述比较合理,有时需要多种模型的混合使用来解决三维实体表现问题。在工程地质剖面体的构造推理过程中,该过程与注重表达构造过程的几类空间模型的技术思想近似吻合,但又不能完全表达,最终的三维可视化表达还需采用矢量边界表示法实现。因此笔者提出融合 CE、CSG、B- Reps 建模思想于地质剖面体构造的不同阶段,突出表达三维剖面体的构造形成过程及可视化表达的实现,并且融合栅格模型对体对象进行阵列划分的思想及数据组织方式于整个推理过程中,组成统一的建模过程。在此过程中,既包含对三维剖面体的栅格阵列划分及表达,同时需要扩展栅格模型结构,对于构造单元内的每一层所形成的不规则四面体或五面体这样的细节表达,即对划分出的基本体元需进行矢量描述。在具体实现过程中,对于所有体对象采用面向对象技术来描述其属性及方法,支持对象的粘合与求并操作,支持推理过程中产生的大量体元依所在地层及物理力学性质的编码标示,支持整体树状结构的构造与对象的遍历查询,树状数据结构的设计参考栅格模型的编码方法。最终形成一种矢量与栅格混合的采用面向对象技术进行数据管理和可视化表达的空间模型,用于解决三维地质剖面体的构造和可视化问题。它的运算过程符合工程地质规范要求,并支持工程地质条件评价过程中所需的诸如全方向任意切割、地层分离、动态显示、模拟仿真采掘或工程施工现场及图形与属性互查等操作。

2.1 CE、CSG、B- Reps 简介

2.1.1 CE 法

单元分解法以不同类型的基本体元,分解构造实体来反映实体本身的细节,各体元之间在公共面,但不相交,只要基本体元类型足够多,那么就能够运用该方法来进行三维表示。由于分解路线的不同,可以产生不同的结果,即表示结果不具有惟一性。

2.1.2 CSG 法

构造实体几何法的基本概念由美国人 Voelcher 和 Requicha 提出^[15],这是一种由简单的基本体元(如球、圆锥、圆柱等)通过正则 Boolean 运算(并、交、差)构造复杂三维空间对象的表示方法。该方法把复杂三维空间对象描述为一棵二叉树,树的叶节点为基本体元,中间节点为正则 Boolean 运算集。

2.1.3 B- Reps 法

边界表示法是以边界为基础,构造三维对象体表各组成平面及曲面形状,借以实现三维体对象的可视化表达。由于采用纯矢量结构,因此它记录了构成体对象的所有空间元素信息,易于建立点、线、环、面、体之间的拓扑关系,有利于基于点、线、面的各种几何运算。

2.2 混合模型的建立

采用上面提出的三维剖面体构造机制进行迭代推理,可以得到大量的在基本构造单元中表达某地层走向的不规则体元(不规则四面体或五面体)。这些体元以面向对象的方法进行对象构造,按三维剖面体、基本构造单元、地层、基本构造元素级体元四级建立树状结构,对推理产生的结果进行有序的数据组织,为进一步构造算法的运用奠定基础。

首先,思考三维剖面体推理构造的整个过程,其实质就是在推理一个个基本构造体元(不规则四面体或五面体)的过程。由于推理迭代过程基于不规则三角格网划分机制,因此导出的不规则四面体或五面体,无论是属于同一地层或是相异地层的元素体元,与相邻的体元存在公共面的关系。因此可以利用单元分解法的基本思想,将存在公共面的两个体元利用公共面“粘合”在一起,但并不合并。于是通过遍历树状结构所有体元,对同层体元之间在公共面的体元两两“粘合”形成复杂地层体对象。同理,通过地层体对象的“粘合”构造出完整的三维剖面体。基于此模型构造出的三维剖面体是惟一的,因为体元的推理受勘探区域的综合分层描述的约束,无论推理起点与路径如何,结果是惟一的,是符合工程地质规范要

求的,因此是正确的。该步运算产生的结果如图 4 所示,图 4 中 CE 图表示运用 CE 思想对同层元素体元粘合后形成的地层复合体,由于运算的结果是只粘合而不合并,因此该复合体内还聚集有大量的不规则四面体或不规则五面体。

其次,分析上一步所获得的构造结果,各个地层内部记录了大量无用的构造面线和平面空间信息,同时为了判别地层元素体元的性质,还重复记录了所在地层的属性标识信息,增加了存储量,降低了动态可视化运行效率,也使得基于此模型的空间关系运算变得复杂。因此引入 CSG 模型的正则 Boolean 运算(并、交、差)的思路,对同一地层的邻接元素体元进行求并运算,即对相邻体元进行求并,删除公共面,形成一个新体元。对此运算在整个地层内迭代使用,最后整个地层将会合并成几个大的体元,这是因为地层异常走向及孔、洞的存在,最后各个地层变成由一个或几个不规则三维体对象构成的复杂体。由于有推理机制的保障,按规范推理,在形成各层基本构造体元的过程中,实际已经完成了特异地质构造的表达问题,在运用 CE 及 CSG 方法进行运算时是以层为单位提取基本构造体元粘合求并,因此解决了地质构造中存在的孔、洞、异常尖灭等特异情况,近似完整地表达了地下地质构造的实际情况。运算结果如图 4 所示,CE 图的地层由于体元求并而形成一个整体,内含一个洞。

现在再来观察一下构造结果,每个地层由一个或几个不规则三维体对象构成,每个体对象的上下表面都是不规则的三角网格曲面,即 TIN 模型,周围被一个曲面片包围(也可能不封闭或不封闭)。CSG 模型使地层形成一个整体,运用以上两步运算可以形成所有地层体,相邻地层间存在公共曲面,“粘合”所有地层形成完整的三维剖面体,如图 4 所示,CSG 图下的构造图为两个地层形成的剖面体。为了方便可视化表达,将结果转化成 B-Repsd 模型,提高绘制渲染的效率。

至此,用边界表示法结合 TIN 模型可以在三维环境下实现地层体对象的可视化表达,进而构造出区域三维剖面体。各阶段建模过程的构造结果及演变关系如图 4。

三种建模思想的融合用于剖面体的构造以及基本栅格体单元的划分思路和数据组织方式,使得地质剖面体的构造过程集成了矢量与栅格模型的构造特点,由点、线、环、面形成简单体元,经过求并运算形成复杂地层体。为便于表达,分解为曲面,转化成矢量边界模型,用于三维环境下绘图

输出。混合模型的构造逻辑如图 5 所示。

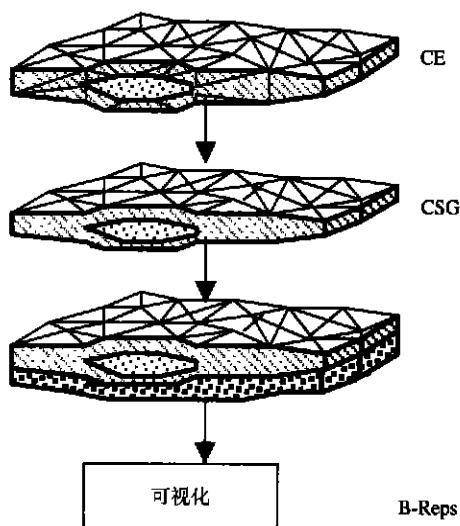


图 4 建模过程图

Fig. 4 Schematic Diagram of Modeling Process

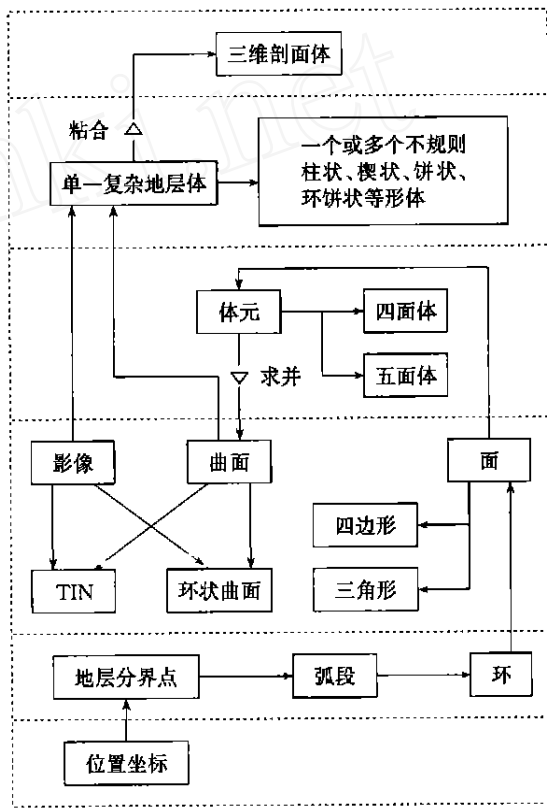


图 5 基于 CE、CSG 和 B-Repsd 的混合空间模型

Fig. 5 Hybrid Spatial Model Based on CE, CSG and B-Reps

图 5 表达了混合模型的组成,突出了 CE、CSG 和 B-Repsd 模型的融合用于可视化显示,栅格模型思想的运用主要体现在基本分析单元的划分以及在推导过程中的细化和树状数据结构的描述和表达。模型中引入了影像元素,用于区面的渲染和虚拟环境的实现,以达到在三维环境下逼真表达的效果。

3 三维可视化模型设计

三维可视化模型是为了在计算机上虚拟三维场景,重现地质构造的三维地层分布形态,为工程技术人员提供准确、直观的地质构造模型,用于分析、量算工作而设计。本文提出的混合模型产生的复杂构造体,采用了高效的矢量边界模型完成可视化表达工作,形成的是单一的矢量图形系统。关于矢量边界模型(B-Rep)的可视化实现,文献中描述较多,笔者不再赘述。但需强调两点内容。

1) 合理的数据结构及存储策略是模型实现的基础,是影响运算效率的重要因素。根据前文所述,工程地质三维要素是典型的空间对象,且呈树状分布,存在包容、继承的特性,适合采用面向对象的方法构造不同的空间对象类,并设计各自的属性和方法,为空间分析和空间操作提供必要的手段。同时可以利用商用数据库系统的空间数据管理能力进行数据存储管理,提高存取效率。

2) 空间分析及空间操作需要建立复杂体所含各类空间元素之间的拓扑关系,B-Rep模型要素分类清晰,要素间的关系明确,易于建立拓扑关系。三维矢量模型各要素间拓扑关系的分类方法很多,主要取决于应用需求,工程地质针对三维剖面的分析与操作存在拓扑分析需求,需要建立点与线、线与环、环与面、面与曲面、线与面、曲面与体、体与复杂体七类。拓扑关系的数据组织与表达在文献[5,8,13]中都有描述,差异不大,本文不再细述。另外,需要组织好各类元素的数据表,设计关联字段,建立起拓扑关系。

4 应用分析

工程地质条件评价以及地下工程设计需要针对地质构造进行多种分析和操作,如全方向切割、地层分离、动态显示、开挖及隧道的地质构造状态仿真显示等。这些分析操作的目的不同,但在某些领域则是必要的。如横向切割地质剖面体,形成不同埋深的区域横切特征面,分析区域内不同范围的地层属性及岩土力学特性,用于建筑物基础的选型。地层的分离显示可以直观地从整体上观察特定地层的构造形态。切割还可以发现特异地质构造情况(孔、洞)等。本文提出的混合模型构造产生地质剖面体,具有以下特点。

1) 模型采用精确的空间坐标系(取决于钻孔的孔口坐标 (X, Y, Z) 的精度),构造产生的结

果支持空间位置关系量算。

2) 严格依照工程地质规范推理产生的结果形成封闭的多面体,反映地质构造的真实情况,可以进行体积量算和质量计算。

3) 支持采用几何算法,实现多面体与切面求交,形成的切面将多面体一分为二,完成切割操作。

4) 由于地层由一个或多个不规则形体相邻或分散组成,采用面向对象方法可定义为统一的对象,设计对象自身的显示方法,支持对任意地层的缩放和平移,因此实现了地层的分离显示和动态浏览。

5) 由于推理过程中产生的每一个体元都从综合分层描述中继承了所在地层的属性信息,求并的操作也维持了属性信息存在,因此构造剖面体中的每个地层体都支持实现属性与图形互查的操作。

通过对模型特点的分析可知,该模型可以解决实际应用操作与分析问题,适用于工程地质领域,且可操作性强,数据组织严密,推理过程规范明了,易于编程实现,可用于工程地质领域3D GIS系统的空间建模。

5 结 语

工程地质三维建模有其自身的特点,即不仅要求形体的三维表达效果,对三维地质体的分解推理过程亦应符合地质构造原理,所以模型的选择应顾及专业的特殊要求,有的放矢,力求做到准确适用。目前该领域成熟的3D GIS产品太少,针对性不强,有待于进一步研究。

三维数据模型的研究工作依然如火如荼,不同应用领域的科研工作人员面对的三维对象不同,相应地会提出不同的模型或见解。本文是笔者在实际研究工作中得到启发,提出这种面向对象的矢量与栅格混合空间数据模型,具有很强的专业特点,操作灵活,其整体性能可在今后的实际工程应用过程中得到检验,并作扩充发展。

参 考 文 献

- 1 长春地质学校,南京地质学校. 工程地质学. 北京:地质出版社,1979
- 2 边馥苓. 地理信息系统原理与方法. 北京:测绘出版社,1996
- 3 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

- 4 李德仁,李清泉.一种三维 GIS 混和数据结构研究.测绘学报,1997,26(2):128~133
 - 5 李青元.三维矢量结构 GIS 拓扑关系及其动态建立.测绘学报,1997,26(3):235~240
 - 6 Carlson E. Three Dimensional Conceptual Modeling of Subsurface Structure. ASPRS-ACSM. Annual Convention,1987(4):188~200
 - 7 Bak P,Mill A. Three Dimensional Representation in a Geoscientific Resources Management System for the Minerals Industry. In: Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems. London:Taylor and Francis,1989.155~182
 - 8 程朋根,龚健雅.地勘工程 3 维空间数据模型及其数据结构设计.测绘学报,2001,30(1):74~81
 - 9 Victor J D,Alan P. Delaunay Tetrahedral Data Modeling for 3D GIS Applications. GIS/ LIS,1993(93):671~678
 - 10 朱大培,牛文杰.地质构造的三维可视化.北京航空航天大学学报,2001,27(4):448~451
 - 11 徐化,武强.基于层状结构的三维地质体可视化设计与实现.计算机应用,2001,21(12):59~60
 - 12 张海荣,许友志.基于 TIN 不连续地质体的三维建模及动态显示.中国矿业大学学报,2002,31(2):143~145
 - 13 陈云浩,郭达志.一种三维 GIS 矢量数据结构的研究.测绘学报,1999,28(1):41~44
 - 14 李建华.工程地质条件评价过程中 GIS 方法的应用:[硕士论文].武汉:武汉大学,2000
 - 15 Requicha A A G,Voelcher H B. Solid Modeling a Historical and Research Directions. IEEE CG&A,1982,2(2)
-
- 第一作者简介:李建华,工程师。现从事三维数据模型、空间数据库及数据挖掘、GIS 空间数据存储等方面的研究。
E-mail:ljhmm@sina.com

3D Spatial Modeling Technology and Its Application to Engineering Geology

LI Jianhua¹ BIAN Fuling¹

(1 Research Centre of Spatial Information & Digital Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: In this paper, a standard description about the construction of three-dimensional geological section and geological entity is given, and the mainstream spatial data models are analyzed comprehensively. With this understanding, considering the constructed specialty about professional spatial object and the different characters of three dimensional spatial data models, special three-dimensional spatial data model is only applicable for special application domain. We graft the essential of CE, CSG, B-Reps and the method of raster model to organize tree data structure, adopt the object-oriented method to construct all kinds of objects in target model, finally prefer an object-oriented three dimensional blended data model with integrated vector and raster base on a primary analyze cell. This paper fulfills the unique expression on three-dimensional geological section and whole geological entity with topologic relation, then suggests a visualized schema. In order to test the rationality of the model. We analyze several applications to engineering geology. The result proves that this model is rational and operational.

Key words: engineering geological; stratum; spatial data model; object-oriented; visualization; 3D GIS

About the first author LI Jianhua, engineer. He majors in 3D data model, spatial database, data mining, etc.
E-mail:ljhmm@sina.com