

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1672-1586(2004)03-0013-06

真3维地学构模的若干问题

吴立新

(中国矿业大学北京校区3S与沉陷工程研究所,北京100083)

摘要:以科学可视化、3维GIS、3维地学模拟及其在地质采矿与岩土工程中的应用为背景,系统分析了国内外3维地学领域面元构模、体元构模和混合构模方法的优缺点及其适用范围,指出了其存在的基本问题。介绍了广义三棱柱(GTP)的真3维地学构模原理、方法与技术特点,及其基于采样数据、本质开放与内含拓扑关系等性能优势,进而分析了基于GTP的真3维地学构模中亟需研究解决的核心问题和主要内容。指出:海量地学空间数据组织是3D GMS的心脏;在真3维地学模拟系统研发方面需要吸取科学可视化技术与3维GIS的营养,并充分利用VC++和OpenGL的图形函数,实现灵活方便、用户友好和可交互的地学可视化操纵。

关键词:真3维地学模拟;3维GIS;空间构模;GTP模型;GeoMo^{3D}

Some Issues on True Three-Dimensional Geosciences Modeling

WU Li-xin

(Institute of RS/GPS/GIS & Subsidence Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing Campus), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on scientific visualization, 3D GIS, 3D geosciences modeling (3DGM) and its applications in geology, mining and civil engineering, the facial model, volumetric model and mixed model for spatial modeling in geosciences domain are systematically analyzed. The existing fundamental problems of 3DGM technologies are presented. The true 3D modeling principles, methods and features of the generalized tri-prism (GTP) model are introduced. The GTP model is directly based on sampling data with essential open and topological relationship embodied properties. The key issues and core problems existing in GTP-based true 3DGM are suggested and discussed. It concludes that the massive geosciences spatial data organization is the heart of 3DGM system. The developing of true 3DGM system should employ the knowledge of scientific visualization and 3D GIS technology, and should also sufficiently utilize the graphic functions of Visual C++ and OpenGL, so as to implement the visualized geoscience manipulation with a flexible, convenient user, friendly and interactive operational environment.

Key words: true 3D geosciences modeling; 3D GIS; spatial modeling; GTP modeling; GeoMo^{3D}

0 引言

20世纪90年代以来,国内外在科学可视化(SciV)、3D地理信息系统(3D GIS)、3D地学模拟系统(3D Geosciences Modeling System, 3D GMS)、3D有限元数值模拟(3D FEM)领域的研究进展迅速。真3D地层构模、地面与地下空间的统一表达、陆地海洋的统一建模、3D拓扑描述、3D空间分析、3D地

层过程模拟等,已成为多学科交叉的技术前沿和攻关热点,相应的理论、技术、方法与软件系统不断丰富和发展。

采矿及岩土领域期望利用多种采样数据对地质环境进行真3D建模,在真3D地层模型的基础上直接进行开采开挖设计,在开采开挖过程中不断对3D地层模型进行更新和细化,以及利用3D地层模型查询采面顶板上方100 m范围的坚硬岩层或隔水岩层

的空间分布状况,利用 3D 地层模型分析或预测掘进头前方 50 m 范围内陷落柱的空间赋存情况,利用 3D 地层模型统计某一巷道或隧道穿过各岩层的长度、位置与顺序关系等。上述要求的满足关键在于:含几何拓扑关系的真 3D 地层建模理论的完善与技术实现。

SeiV 技术(包括虚拟现实技术、体视化技术、仿真技术等)虽然实现了对空间实体的真 3D、数字化表达,却并不描述实体要素的几何拓扑关系^[1-3];GIS 技术虽然对地理世界(即地球表面)实现了数字化描述与可视化表达,却没有突破真 3D 建模与真 3D 拓扑维护这一难题^[4-6];FEM 技术虽然围绕 3D 网格剖分、3D 模拟计算与后处理等方面扩展了 3D 可视化功能^[7-9],但其 3D 模型的数据组织依然是个瓶颈;国内外 GMS 虽然多以 2.5D、2.75D 和 3D 形式存在,但几乎无一描述和表达地质实体及其要素之间的拓扑关系^[10-12]。完善真 3D 地层建模理论,尤其是实现含拓扑关系的真 3D 地层建模,成为亟待研究解决的课题。

1 国内研究现状分析

近年,广义地学(Geosciences)领域(包括地理 Geography、地质 Geology、地球物理 Geophysics、大地测量 Geodesy、地质工程 Geo-engineering 等)关于 3D 空间信息的研究与日俱增,形成了两大并行发展的主流:一是以地球表面及以上地理实体为研究对象的 3D GIS,二是以地球表面及以下地质实体为研究对象的 3D GMS。

尽管众多学者(包括地理、测绘、计算机科学等领域的学者)围绕 3D GIS 理论与方法进行了广泛研究,但多以 3D 拓扑关系^[13-15]和准 3D 空间数据模型为主,真 3D 空间数据模型有所涉及但技术实现不多^[16-21]。地质、矿山、岩土领域的专家学者则围绕 3D GMS,对 3D 空间数据模型进行了卓有成效的理论与技术研究^[10-12,22-29];加拿大、澳大利亚、英国、南非等国还相继推出了一批在矿山和工程地质领域得到推广应用的 3D GMS 软件,但均没有或很少考虑拓扑关系,因而难以进行矿山生产和岩土开挖阶段的安全性分析与拓扑空间查询。此外,无论是 3D GIS 还是 3D GMS,所完成的模型往往是静态的,模型更新很不方便,不能满足随时间推移和开挖进程而不断进行模型扩充和局部细化的需要,从而制约了 3D GMS 作为一种地层空间信息的集成载体来提供便捷、可视的动态服务与工程决策支持。

1.1 3D 空间构模方法分析

3D 空间构模方法研究是目前 3D GIS、3D GMS 领域研究的热点问题。许多专家学者在此领域做了有益的探索。过去十年年中,提出了 20 余种空间构模方法。若不区分准 3D 和真 3D,则空间构模方法可以归纳为面元模型(Facial Model)、体元模型(Volumetric Model)和混合元模型(Mixed Model)的 3 大类构模体系^[12],如表 1 所示。

面元模型的构模方法侧重于 3D 空间实体的表面表示,如地形表面、地质层面、构筑物(建筑物)及地下工程的轮廓与空间框架。所模拟的表面可能是封闭的,也可能是非封闭的。基于采样点的 TIN 模型和基于数据内插的 Grid 模型,通常用于非封闭表面模拟;而 B-Rep 模型和 Wire Frame 模型通常用于封闭表面或外部轮廓模拟。Section 模型、Section-TIN 混合模型及多层 DEM 模型通常用于地质构模。通过表面表示形成 3D 空间目标轮廓,其优点是便于显示和数据更新,不足之处由于缺少 3D 几何描述和内部属性记录而难以进行 3D 空间查询与空间分析,更无法进行开采开挖设计。

表 1 3D 空间构模法分类

Table 1 Classification on 3D spatial modeling methods

| 面元模型 facial model | 体元模型 volumetric model | 混合元模型 (mixed model) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------|
| | 规则体元 | 非规则体元 |
| TIN | CSG | TEN |
| Grid | Voxel | Pyramid |
| B-Rep | Octree | TP |
| Wire Frame / Linked Slices | Needle | Geocellular |
| Section | Regular Block | Irregular Block |
| Section-TIN | | Solid |
| DEMs | | 3D Voronoi |
| | | GTP |

体元模型基于 3D 空间的体元分割和真 3D 实体表达,体元的属性可以独立描述和存储,因而可以进行 3D 空间操作。体元模型可以按体元的面数分为四面体(Tetrahedral)、六面体(Hexahedral)、棱柱体(Prismatic)和多面体(Polyhedral)共 4 种类型,也可以根据体元的规整性分为规则体元和非规则体元 2 个大类。规则体元包括 CSG-tree、Voxel、Octree、Needle 和 Regular Block 共 5 种模型,(如图 1 所示),通常用于水体、污染和环境问题构模。其中:① CSG-tree 在描述结构简单的 3D 物体时十分有效,但对于复杂不规则 3D 地物尤其是地质体则很不方

便,且效率也大大降低;② Voxel 虽然结构简单,操作方便,但表达空间位置的几何精度低,且不适合于表达和分析地质实体之间的空间关系;③ Octree 在医学、生物学、机械学等领域已得到成功应用,但在矿床地质构模中有较大的局限性;④ Needle 用于单一地层构模比较有效,对于复杂多地层则难以适应;⑤ Regular Block 用于属性渐变的3D空间(如浸染状金属矿体)构模较有效,但对于有边界约束的沉积地层、地质构造和开挖空间的构模则必须不断降低单元尺寸,从而引起数据急速膨胀。因此,Voxel、Octree 模型比较适合无采样约束的面向场物质(如重力场、磁场)的连续空间构模,而 Needle 和 Regular Block 则一般只适用于较简单的地质体构模。

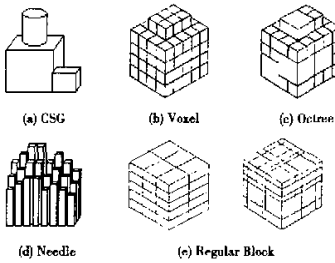


图1 规则体元模型^[12]

Fig. 1 The regular volumetric models^[12]

常用的非规则体元包括 TEN、Pyramid、TP、Geocellular、Irregular Block、Solid 和 3D - Voronoi 等 7 种模型,如图 2 所示。这些非规则体元模型均是有采样约束的、基于地质地层界面和地质构造的面向实体的 3D 模型。

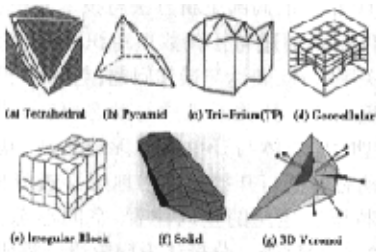


图2 非规则体元模型^[12]

Fig. 2 The irregular volumetric models^[12]

其中:① TEN 虽然可以描述实体内部,但不能表示 3D 连续曲面,而且用 TEN 来生成 3D 空间曲面也较困难,算法设计较复杂;② Pyramid 类似于 TEN 模型,只不过是用了 4 个三角面片和 1 个四边形封闭形成的金字塔状模型来实现对空间数据场的剖分,由于其数据维护和模型更新困难,一般很少采用;③ TP 的前提是 3 条棱边相互平行,因而不能基于实际

的偏斜钻孔来构建真 3D 地质,也难以处理复杂地质构造;④ Geocellular 的实质是 Voxel 模型的变种,可以形成逼近实际界面的 3D 体元空间剖分,但需要做大量空间数据内插;⑤ Irregular Block 的优势是可以根据地层空间界面的实际变化进行模拟,但对数据密度有较高要求;⑥ Solid 虽然适合具有复杂内部结构(如复杂断层、褶皱和节理等精细地质结构)的构模,但人工交互工作量巨大,需要极大的工作耐心;⑦ 3D Voronoi 图可适用于海洋、污染、水体及金属矿体构模,对于含界面约束的构模则难以适应。

混合元模型的目的则是综合面模型和体模型的优点,以及综合规则体元与非规则体元的优点,取长补短。其中,① TIN - CSG 混合构模是当前城市 3D GIS 和 3D CM 构模的主要方式,即一个目标分别由某一种模型来表示,然后通过公共边界来连接,因此其操作与显示都是分开进行;② TIN - Octree 混合构模 (Hybrid 构模) 的缺点是 Octree 模型数据必须随 TIN 数据的改变而改变,否则会引起指针混乱,导致数据维护困难;③ Wire Frame - Block 混合构模实用起来有效率不高的问题,即每一次开挖或地质边界的变化都要要进一步分割块体,即修改一次模型;④ Octree - TEN 混合构模:虽然可以解决地质体中断层或结构面等复杂情况的建模问题,但空间实体间的拓扑关系不易建立。

综上所述可见,存在以下基本问题:

1) 面元模型虽然可以较方便地实现地层可视化和模型更新,却不是真 3D 的,也不描述 3D 拓扑关系,更无法进行开采开挖设计;

2) 规则体元模型虽然是真 3D 的,模型更新也比较方便,却难以适应复杂地质体构模,且几乎不描述拓扑关系;

3) 非规则体元模型虽然是真 3D 的,也可以适应复杂地质体构模,但模型更新比较困难,且几乎不描述拓扑关系;

4) 混合元模型虽然理论上探讨较多,但技术实现难度大,许多难点尚未突破。

比较起来,真正适合复杂地质条件和工程开挖的真 3D 构模单元还是非规则体元。一旦非规则体元在模型更新、拓扑描述、拓扑维护和无缝集成方面取得突破,将把 3D GMS 推进到一个新的发展阶段,其应用效能将大幅度提高。

1.2 GTP 体元构模与拓扑表达

结合矿山和岩土工程的需求,针对煤矿山和一般岩土工程的层状沉积环境以及深钻偏斜的特点,

吸收非规则体元中 TP 模型的有益成份,研究提出了一种可以不受 TP 模型的棱边平行即(钻孔垂直)限制的 ATP(Analogical Tri-Prism, ATP)体元模型,用 ATP 来实现任意复杂地层的真 3D 构模^[27],取得了较好的效果。经进一步改进和扩展,该模型现已扩展为广义三棱柱(Generalized Tri-Prism, GTP)体元模型^[28,29],并将 TP 构模称为 GTP 的特例,Pyramid 和 TEN 为 GTP 的退化。GTP 构模原理如图 3 所示。

GTP 的组成要素包括点、TIN 边、侧边、TIN 面、侧面和 GTP 共 6 个基本要素(P1~P6)和 1 个临时要素(P7)——对角线(将 GTP 单元剖分为 3 个四面体,辅助空间操作和体积计算);用 GTP 的上下底面的三角形集合所组成的 TIN 面来表达不同的地层面,然后利用 GTP 侧面的空间四边形面来描述层间 GTP 的空间邻接关系,用 GTP 柱体来表达层与层之间内部实体。

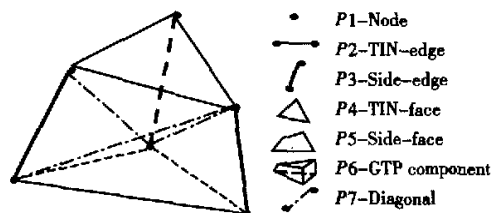


图 3 基于钻孔数据的 GTP 构模要素^[28,29]

Fig. 3 The geometrical primitives of GTP model based on divergent drill holes^[28,29]

基于 GTP 非规则体元进行真 3D 地层构模具有以下优势和显著特点^[29]:

1) 直接基于采样数据: GTP 模型直接以钻孔(无论垂直或偏斜)为数据源,无须进行空间插值来建构地层界面的基础形态。直接利用钻孔数据的不同分层来模拟地层的分层实体并表达地层界面的形态,从而最大限度地保障了模型的精度。而其它许多构模方法则以剖面图、等高线图等二次性数据为数据源,导致了从二次性数据继承解释误差并在数字化过程中再次产生误差,使得所构 3D 模型难以满足采矿与工程开挖设计要求。

2) 本质开放式: GTP 体元本质上提供了 3 种机制,即可以通过对 GTP 体元的边相邻扩充、GTP 体元组合的结构调整与 GTP 体元内部分裂来实现模型更新(扩充、修改与细化),可以不对原始模型产生整体影响,从而为不断利用补充勘探、地球物理、地球化学、槽探及开挖揭露等多种地学数据来进行模型更新提供了基础。

3) 内含拓扑关系: 基于 GTP 模型可以定义 GTP

构模 6 要素之间的拓扑关系,从而为地层拓扑查询与空间分析提供基础;目前,基于点、TIN 边、侧边、TIN 面、侧面和 GTP 初步定义了 6 组拓扑关系,实现了 GTP 体元的空间邻接和空间邻近查询。

4) 2.5D GMS 为其子集: 由于同一地层的 GTP 体元集合的上下界面为 TIN,在不需要进行体积计算、地质统计和开挖设计时,可以舍弃上下 TIN 之间的对应连接,直接以 TIN 数据对地层界面进行非真 3D 模拟和可视化,则自然成为 2.5D GMS 的一种构模技术。

5) Pyramid 和 TEN 是 GTP 的退化: 基于 TIN 边退化和 TIN 面退化,可以由 GTP 导出 Pyramid 模型和 TEN 模型,(如图 4 所示),从而为地层分叉、尖灭与断层等复杂地质构模及开挖单元构模提供有力工具,可以适应复杂地质条件以及地质体与开挖体无缝集成构模的要求。

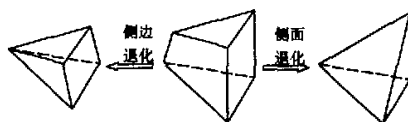


图 4 GTP 的两种退化模式^[29]

Fig. 4 Two degradations of GTP component^[29]

2 亟待解决的关键问题

尽管与其它基于体元的真 3D 地层模型相比, GTP 模型在许多方面具有独特优势,但 GTP 构模原理还不很成熟,许多基础理论与关键技术尚需研究解决。如: GTP 构模数据的质量评估和模型可靠性评估, GTP 模型的局部更新方法与技术实现, GTP 元素的最佳拓扑描述与拓扑数据组织,地质 0 单元间的拓扑关系描述、表达与操作问题,与 GTP 模型局部更新相适应的拓扑关系维护与动态更新问题,基于 GTP 模型的地质体与开挖体的无缝集成,基于 GTP 模型的动态开挖与开挖过程的地层穿透分析(即开挖体穿越围岩地层的空间位置、空间形态、空间容量、优劣方向等)等。分析认为现阶段急需研究的内容有以下 6 方面。

2.1 GTP 模型扩充、修改与局部细化方法

GTP 模型更新主要包括模型的横向与纵向扩充、模型的局部修改及 GTP 单元内部的细化 3 个方面。文后参考文献[28,29]虽然对 GTP 模型的扩充、修改与局部细化机制进行了初步讨论,但主要考虑了补充勘探钻孔数据的利用,对于其它多源地学数据的利用研究不够。实际上,除补充勘探钻孔数

据之外,还有地球物理、地球化学、开采开挖揭露、人工解译推测等多种地学数据可以参与 GTP 模型的更新,这些数据采用的坐标系或投影参照可能互不相同。此外,在模型更新过程中如何最大限度地减少工作量和避免对已有模型的过度扰动,必须寻求一种合理、可靠而有效的局部更新机制。

因此,需要建立一种统一的空间框架,使得除钻孔之外的其它地学数据(如散点采样、地球物理、地球化学、3D 地震、剖面图、等值线图、开挖揭露等)经投影和坐标转换之后,均可以参与 GTP 模型的动态扩充、修改与细化;并基于 GTP 模型的形态特点和地学数据的有效影响范围,研究提出一种高效、方便和灵活的 GTP 模型局部更新方法,并结合数据组织方式进行技术实现。

2.2 GTP 模型精度及其可靠性分析

由于采用了多种地学数据参与 GTP 构模和模型更新,而这些地学数据的来源、精度、尺度、时态等互不相同,必然对 GTP 模型的精度和可靠性产生不同程度的影响。

因此,需要根据这些数据的质量和误差传播规律,研究其参与 GTP 构模时的数据质量与误差影响,提出 GTP 初始模型及其更新模型的精度评估指标,进而建立 GTP 模型的可靠性评价方法,以供资源评估、开采开挖设计、空间分析和工程决策参考。

2.3 GTP 组成要素的拓扑关系优化与动态维护

虽然文献参考[29]对 GTP 要素之间的拓扑关系进行了研究,并在文献参考[27]8 组拓扑关系表的基础上,重新设计了 6 组拓扑关系表,但仍然不是最优的。

因此,需要严格考虑拓扑完备性、一致性和效率—冗余的平衡性等原则要求,重新审查上述拓扑关系,并进行新的设计和优化组合,提出更为科学、合理的拓扑关系表达。进而为 GTP 模型提供性能更为优良的拓扑关系描述与表达方式,提高系统的可靠性和空间分析效率,并建立方便、实用的 GTP 模型的基础拓扑的表达与动态维护方法。

2.4 基于 GTP 的地质单元拓扑关系描述与表达

在 3D GMS 中,对地质体进行拓扑关系描述几乎还是一项空白。而实际上,若对地质体相互之间、地质体与开挖体之间的拓扑空间关系(包括空间邻接、空间关联和空间包含)进行描述和表达,并在数据组织中进行管理和维护,则可为地层空间查询、地

质统计、复杂空间分析、巷道穿透分析等提供更为有效的工具和更为便捷的途径。

因此,需要在 GTP 要素拓扑关系优化的基础上,针对地质体形态复杂、边界多变的特征,先把复杂地质体进行空间划分为地质单元;再以面向实体的方式研究地质单元之间、地质单元与开挖单元之间的拓扑关系描述与表达方法,建立若干优化的拓扑关系表。进而形成基于 GTP 和地质单元进行空间查询、地质统计与拓扑分析的理论与技术基础。

2.5 与工程开挖无缝集成的数据组织方法

国内外现有的 3D GMS 大体可以分为两类:其一为仅进行地质体的 3D 建模与可视化,不能在其中进行开采开挖设计;其二为不仅进行地质体的 3D 建模与可视化,而且可在其中进行开采开挖设计,但在数据组织方面,地质体与开挖体是分开的,两者之间存在空间裂缝(和非一致性),即存在不同数据精度与空间位置不匹配问题。关于地质体与开挖体的无缝集成是一个难度很大的课题,国内外少有研究。

因此,需要面对这一难题,基于地质体 G—GTP 与开挖体 E—GTP 的集成表达原理^[28],研究地质体、围岩与采面、巷道、硐室等开挖体的一体化数据组织方法;并研究建立直接在 G—GTP 模型中进行开挖设计与效果分析的技术方法,进而形成开挖过程的地层穿透分析与空间统计分析方法。

2.6 算法实现与 GeoMo^{3D} 系统的功能扩充

目前形成的 3D GMS 实验系统 GeoMo^{3D},无论在理论基础还是技术性能上还不够成熟,其功能尚有待完善和改进,并不断提高其实用价值。

因此,需要以 VC++ 和 OpenGL 为开发语言、以 SQL Server 为空间数据管理环境,对前述研究成果进行算法实现、结构化设计和组件化编程;并应用于已有的 GeoMo^{3D} 实验系统中,扩充其 GTP 模型动态更新、拓扑维护、空间查询、空间分析与工程开挖功能,并在矿山、岩土及城市地质领域进行典型应用实验。

3 结语

海量地学空间数据组织是 3D GMS 的心脏,它管理和维护 3D GMS 的三大类数据:即空间坐标数据、几何拓扑数据和属性数据。在多地学数据的坐标转换、投影转换、空间索引、拓扑表建立与维护、无缝集成、动态开挖、空间查询、地质统计、空间分析全过程中,均要对空间数据等进行不断的访问、存储和操作。因此,需要借鉴 GIS 大型空间数据库设计、

组织与动态管理方面的经验,在海量地质数据组织、数据索引、数据安全、数据访问、数据维护、数据版本等多方面进行细致的研究。

此外,基于 GTP 模型的真 3D 地层构模、更新、查询、统计、分析结语、开挖等所有过程,均依赖于对地质数据和 GTP 模型的可视化操纵,包括显示效果、遍历漫游、旋转变换、放大缩小、空间切割、空间度量、穿透分析等。因此,需要吸取科学可视化技术和 3D GIS 的营养,并充分利用 VC++ 和 OpenGL 的图形函数,实现灵活方便、用户友好和可交互的地学可视化操纵。

参考文献:

- [1] Neilson G M. Challenges in visualization research [J]. IEEE Transactions on Vis. & Computer Sci. 1996, 2(2).
- [2] 管伟光. 体视化技术及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [3] 唐泽胜. 3 维数据场可视化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [4] Turner A K. Three Dimension GIS [J]. Geobyte, 1991, 5(1): 31 - 32.
- [5] Siyka Zlatanova. 3D GIS for Urban Development [D]. ITC, 2000.
- [6] 李青元, 林宗坚, 李成民. 真 3 维 GIS 技术研究的现状与发展 [J]. 测绘科学, 2000, 25(2): 47 - 51.
- [7] Callagher R S, Nagtegal J C. An efficient 3D visualization technique for finite element models and other coarse volumes [J]. Computer Graphics. 1989, 23(3): 185 - 192.
- [8] 周 勇, 唐泽胜. 适应于体绘制技术的 3 维有限元网格剖分 [J]. 计算机学报. 1995, 18(5): 339 - 350.
- [9] 谢 春, 马 兰, 彭颖红. 有限元计算结果的可视化处理 [J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2000, 12(2): 81 - 84.
- [10] Christopher B J. Data structure for 3D spatial information system in geology [J]. Int. J. GIS, 1989, 3(1): 15 - 31.
- [11] Simon W H. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization [M]. Springer - Verlag, 1994.
- [12] 吴立新, 史文中, Christopher G. M. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术 [J]. 地理与地理信息科学. 2003, 19(1): 5 - 11.
- [13] Molenaar M A. Topology for 3D Vector Maps [J]. ITC Journal, 1992, (1): 25 - 33.
- [14] 陈 军, 郭 薇. 3 维空间实体间拓扑关系的矩阵描述 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 359 - 363.
- [15] 孙 敏, 唐小明, 赵仁亮. 面向对象的 3 维矢量 GIS 数据模型及拓扑关系的建立 [J]. 测绘通报, 1998, (7): 11 - 14.
- [16] Victor J D, Alan P. Delaunay tetrahedral Data Modeling for 3D GIS Application [C]. Proc. GIS/LIS'93, 1993, 671 - 678.
- [17] Shi W Z. Development of A Hybrid Model for Three - Dimensional GIS [J]. Geo - Spatial Information Science. 2000, 3(2): 6 - 12.
- [18] Pilout M, Tempfli K, and Molenaar M. A Tetrahedron - Based 3D Vector Data Model for Geoinformation [M]. In: Advanced Geographic Data Modelling. 1994, (40): 129 - 140.
- [19] 边馥蓉, 傅仲良, 胡白锋. 面向目标的栅格矢量一体化 3 维数据模型 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 294 - 298.
- [20] 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的 3 维数据模型 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 7 - 15.
- [21] 李德仁, 李清泉. 一种 3 维 GIS 混合数据结构研究 [J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 128 - 133.
- [22] Wu L X, Hou F K, Tang C A. Geological Data Organization for FEM Based on 3D Geoscience Modeling [C]. Proc. 3rd Int. Symposium on DMGIS. Bankou, 2001, 323 - 325.
- [23] 侯恩科, 吴立新. 3 维地质模拟几个方面的研究现状与发展趋势 [J]. 煤田地质与勘探. 2000, 28(6): 5 - 7.
- [24] 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 [J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 74 - 81.
- [25] 张 煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的 3 维地层建模方法 - 应用 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(3): 285 - 290.
- [26] 齐安文, 吴立新, 侯恩科等. 3 维地质模拟述评及其矿山应用关键问题 [J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 61 - 64.
- [27] 齐安文, 吴立新, 李 冰, 等. 一种新的 3 维地质空间构模方法: 类三棱柱法 [J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 158 - 163.
- [28] 吴立新, 陈学习, 史文中. 基于 GTP 的地下工程体与围岩一体化真 3 维空间构模 [J]. 地理与地理信息科学. 2003, 19(6): 1 - 6.
- [29] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri - prism (GTP) model for a 3D geosciences modeling system [J]. Computers & Geosciences. 2004 (in press).

作者简介:

吴立新(1966—),男,江西宜春人,博士,中国矿业大学(北京校区)3S 与沉陷工程研究所所长,教授,博士生导师。主要从事 3D GIS 理论与方法、3S 集成与应用、数字矿山、动态遥感、遥感-岩石力学、开采沉陷与防护、可持续发展等领域的研究与教学工作。获省部级科技奖励 5 项;出版专著 4 部,教材 1 部,译著 1 部,发表学术论文 180 余篇。

2004 年国产 GIS 软件测评

2004 年度国产地理信息系统软件测评报名工作已经结束,近 60 个软件报名参加,报名单位资格审查已完成,日前正在进行双方签订协议和交纳测评费阶段。预计测评从 2004 年 8 月开始至 9 月底结束。有关测评的相关信息,将在协会网站上适时发布。

(中国地理信息系统协会)