

三维地层构造发展现状*

周翠英, 赵宏坚, 杨锡鎏

(中山大学工学院//岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 三维地层模型在地下空间开发、油气资源开发和岩土工程问题分析中具有重要作用。论文系统总结了国内外学者在三维地层构造方面的研究, 从3个方面系统阐述了三维地层构造的研究现状: ①几种常用三维地层的面模型和体模型的建模原理、数据结构和各自的优缺点; ②三维地层层面、层体的构造方法以及对特殊地质的处理方法; ③三维地层模型误差产生的原因及其修正问题。最后, 指出了三维地层构造研究中存在的一些问题, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 三维地层模型; 地层; 构造; 现状; 趋势

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 05-0027-07

Development Status of 3D Stratum Construction

ZHOU Cuiying, ZHAO Hongjian, YANG Xiliu

(School of Engineering // Research Center for Geotechnical Engineering & Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Research on 3D stratum model has an important significance on the development and utilization of underground space, development of oil and gas resources and the analysis of geotechnical engineering problems. This paper is systematically summarized the present research of the construction method of 3D stratum. It includes three parts: (1) data structure, modeling principle, advantages and disadvantages of several common 3D stratum surface models and solid models; (2) the 3D stratum layer and solid construction methods and the special geological processing methods; (3) error analysis in 3D stratum model and its correction method. Finally, some issues concerning about 3D stratum model is discussed and their developing trends are pointed out.

Key words: 3D stratum model; stratum; construction; present research; trends

三维地层模型在地下空间开发、油气资源开发和岩土工程问题分析中具有重要作用。随着大规模土木工程活动的开展, 三维地层构造作为地下工程信息化的重要内容也得到了迅猛的发展^[1]。然而, 由于地质环境的复杂性与隐蔽性使得地下空间开发等地下工程的开展仍然存在很多不确定问题。因此, 对重大工程中三维地层信息的可视化提出了迫切需求^[2-3]。本文着重介绍了三维地层构造在模

型建立、构造方法、特殊地质处理及模型误差修正方面的发展现状, 最后探讨了三维地层构造研究中存在的一些问题, 并分析了其发展趋势。

1 常用的三维地层模型

目前常用的三维地层模型主要分为面模型和体模型两大类。面模型主要有分层 DEM 模型, 分层 TIN 模型等; 体模型主要有三棱柱模型, 四面体模

* 收稿日期: 2008-09-19

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2007AA11Z112); 国家自然科学基金资助项目 (40672194); 高等学校博士学科点基金资助项目 (20060558060); 广东省自然科学基金重点资助项目 (06104932); 广东省科技计划资助项目 (2004B10101002)

作者简介: 周翠英 (1963 年生), 女, 教授, 博士生导师; E-mail: zhocuy@mail.sysu.edu.cn

型等。下面分别对上述模型的建模原理、数据结构和优缺点作进一步阐述。

1.1 面模型

面模型是用各种面组合起来表示地层的模型, 层面的模型表示方法有多层 DEM, 多层 TIN 等。

DEM (Digital Elevation Model) 开始是以数字高程表示实际地形特征空间分布的一种实体地面模型, 后来被引入到地层的模型描述中。贺怀建^[4]、王纯祥^[5]等在三维地层模型构造研究中提出了使用 DEM 描述岩层和土层的方法。DEM 的数据类型一般可分为网格数据和离散数据。网格数据又有栅格和不规则网格两种。李邵军等^[6]在地层构造研究中明确提出了使用栅格构造地层的方法。下面简单介绍使用栅格 DEM 构造地层的原理及其数据结构。

图 1 是栅格 DEM 地层模型的示意图, 该模型以栅格 DEM 层面表示地层分界面, 每个层面都由拓扑位置一一对应的规则三角形组成。在三维地层构造中, 一般要根据钻孔数据对栅格 DEM 层面各栅格点的高程值进行插值。

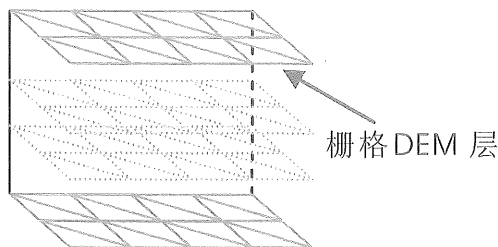


图 1 栅格 DEM 地层模型

Fig. 1 DEM stratum model

栅格 DEM 的数据结构比较简单, 由于各层上下对应的栅格点 x , y 值都相同, 不同的层面只需记录各点不同的高程 z 值, 其数据结构如图 2 所示。

TIN (Triangulated Irregular Network) 是用不规则的三角形组成网格面来表示地层分界面的, 因而可以方便的调整三角形密度来模拟地层的起伏, 其模拟效果比栅格 DEM 好。朱合华^[7]、熊祖强^[8]等提出了以 TIN 来构造钻孔之间的剖面以及地层面。

图 3 是 TIN 地层面的示意图, 可见其地层面点数据不一定是一一对应的, 因此使用 TIN 构造出来的每一个数据点都必须明确给出 x 、 y 、 z 值, 其数据结构如图 4 所示。

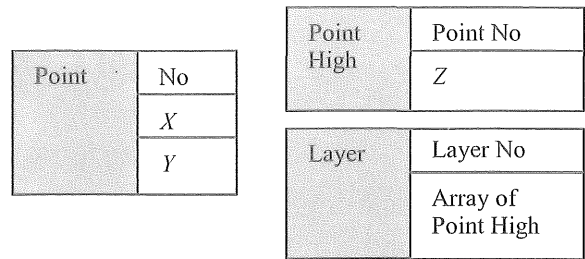


图 2 栅格 DEM 数据结构

Fig. 2 Data structure of DEM model

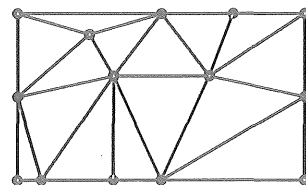


图 3 TIN 地层面

Fig. 3 TIN layer surface

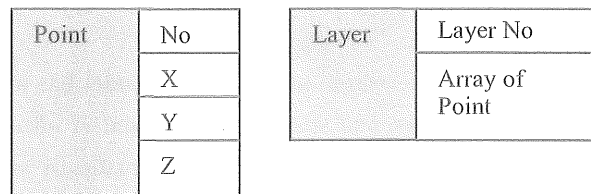


图 4 TIN 地层面数据结构

Fig. 4 Data structure of TIN layer surface

栅格 DEM 模型具有数据结构简单, 运算速度快等优点, 适合于地层面比较平缓的模拟; 但是对于地层起伏比较大的地层面, 如果要栅格 DEM 模型模拟的效果较好就需要提高栅格的密度, 这样就需要绘制比较多的三角形或四边形。使用 TIN 模型可以在地层起伏比较大的地方离散得较密, 而在平缓的地方离散得较疏, 这样就可以使用较少的三角形或四边形达到和栅格 DEM 模型一样的模拟效果, 所以就绘制效果来说 TIN 模型要比栅格 DEM 模型好。但是实现 TIN 所需要的数据结构相对比较复杂, 运算速度比栅格 DEM 模型慢。两种面模型各有优缺点, 实际应用中可根据具体需求选取。

1.2 体模型

体模型也称为实体模型, 它是具有点、线、面、体完整几何信息以及点、线、面之间拓扑信息的模型。比较常用的实体模型表示法有 CSG (Constructive Solid Geometry) 表示法、边界表示法 (B-

rep) 和分解模型表示法。CSG 表示法是通过将体元对象进行布尔运算而组合起来的实体表示方法。边界表示法是通过描述实体的点、线、面等几何元素及它们之间的拓扑结构来表示实体的方法^[9]。分解模型表示法是通过把实体分解成若干个规则或不规则的单元来表示实体的方法, 常用的表示方法有体素、空间单元和八叉树等^[9-10], 目前, 国内较多使用三棱柱、四面体等体元构造三维地层实体模型^[11-14]。

图5(a)是标准三棱柱的示意图, 地层分界面进行栅格化后, 把上下对应的栅格点连接起来就形成了由多个三棱柱组成的地层模型, 如图5(b)

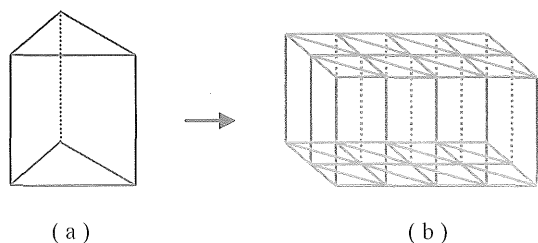


图5 标准三棱柱模型
Fig. 5 Standard tri-prism model

所示。以上是用标准三棱柱建立的地层模型, 若使用 TIN 进行上下地层层面的离散时, 由于上下两层面的数据点不一定是一一对应的, 这时把上下两个面的对应点连接起来所形成的三棱柱就称为类三棱柱或广义三棱柱, 如图6(a)所示。由多个广义三棱柱组成的地层模型称为广义三棱柱模型, 如图6(b)所示。当上下两个地层面的数据点数量不相等时, 三棱柱就有可能退化为四面体, 如图6(c)所示。

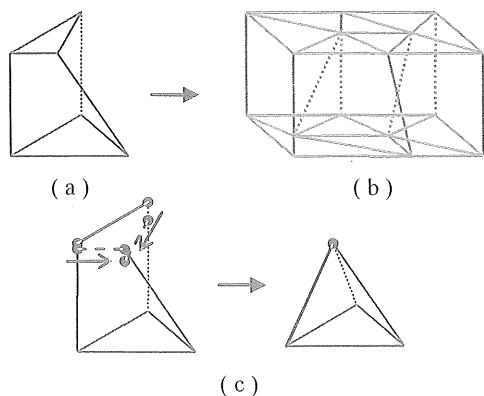


图6 广义三棱柱模型
Fig. 6 Generalized tri-prism model

使用四面体构造地层模型可以说是对三棱柱的进一步细化, 从图5和图6中可见, 三棱柱模型仅在上下地层面进行了三角化, 如果进一步对三棱柱的侧面进行三角化, 就形成了由多个四面体组成的三维地层模型, 如图7所示。

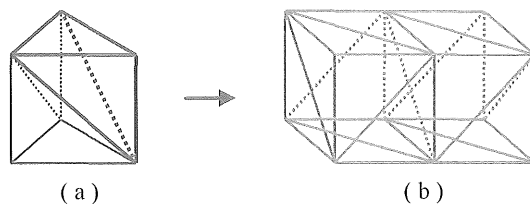


图7 四面体模型
Fig. 7 Tetrahedron model

使用体元构造三维地层模型, 其数据结构一般包括两部分: 一部分是体元本身的几何数据和拓扑数据; 另一部分是体元之间的拓扑数据, 这些数据记录了体元之间的空间位置关系。在三棱柱和四面体模型中, 一般使用链表或数组结构。图8是三棱柱模型的数据结构, 其中 Geometry Data 是三棱柱体元本身的几何数据和拓扑数据, 其它5个 Neighbor 是三棱柱五个面对应的邻接面, 是三棱柱之间的拓扑数据。

Tri-Prism	No
	Geometry Data
	Top Neighbor
	Bottom Neighbor
	Face Neighbor1
	Face Neighbor2
	Face Neighbor3

图8 三棱柱模型数据结构
Fig. 8 Data structure of tri-prism model

目前, 大多数地层体模型构建研究只对体元本身进行较深入的研究, 而对体元之间的拓扑关系研究较浅, 以致于对地层模型的边界检测, 属性计算(距离、面积、体积等), 开挖与切割以及空间和结构分析等操作未能提供很好的支持。因此, 地层体模型中体元之间的拓扑关系研究有待进一步发展。

2 三维地层构造

三维地层的构造包括地层层面和层体构造以及对特殊地质问题的模型处理。下面简单介绍这两方面研究的发展状况。

2.1 地层层面及层体构造

地层层面的构造,是根据钻孔上的分层点来构造地层层面的过程,实际就是把空间点插值成平滑曲面的过程。插值方法一般有代数插值和几何插值。

栅格 DEM 地层面的栅格点是均匀分布的,而由稀疏的、不均匀分布的钻孔点插值出均匀的栅格点使用代数插值较好,如图 9 所示。常用的代数插值算法有 Kriging 法^[15]、距离反比加权法、自然邻近点法^[16]、最小曲率法和多值曲面函数法等^[17]。

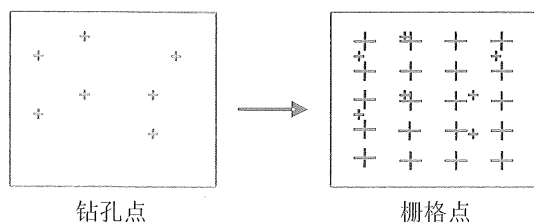


图 9 栅格插值

Fig. 9 Grid interpolation

使用 TIN 构造地层面时,由于 TIN 面上的点一般是不均匀分布的,而由不均匀分布的钻孔点插值出不均匀分布的 TIN 点,一般使用几何插值。常用的插值细分方法有 Doo-Sabin 细分、Catmull-Clark 细分和 Butterfly 细分等^[18-20]。使用几何插值构建地层面一般分两个步骤:第一步是对钻孔点进行三角网格构建,常用的如 Delaunay 三角网格;第二步是对三角网格进行细化,如图 10 所示。在我国,朱合华、吴江斌^[7,14]提出了使用离散钻孔点构造 Delaunay 三角网格来构建地层面的方法,但这些研究都只探讨了几何插值构建地层面的第一步,对第二步的细分并没有进行详细的研究。

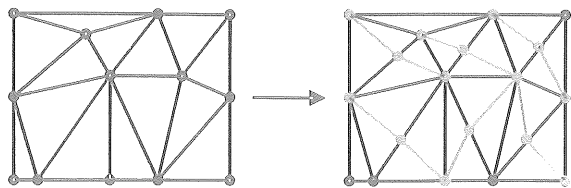


图 10 三角网格细分

Fig. 10 Triangular mesh subdivision

前面已探讨了栅格 DEM 和 TIN 各自的优缺点,这里需要指出在栅格点插值中,原来的钻孔点一般不会出现,也就是说栅格模型不会保存原始的钻孔点,需要额外记录。而对几何插值来说,原始的钻孔点都会得到保存,每一次插值只是对三角网格进行细化,并不会对三角网格的拓扑结构造成影响,有较好的曲面表示,因此使用几何插值要比使用代数插值好一些。

当地层模型的地层面构造好以后,就可以构造地层层体了。基于三棱柱模型的层体构造是直接连接层体上下面的对应点来构造三棱柱的,并在构造三棱柱过程中建立棱柱间的拓扑关系。基于四面体模型的层体构造也是类似的过程,不同的是需要把三棱柱拆分成三个四面体。

2.2 特殊地质的模型处理

三维地层建模中的特殊地质一般是指地层的缺失,倒转和断层等。

地层缺失是指某一地层层体内部出现局部层体缺失,这一问题的模型处理关键是要找出缺失的边界。Lemon 和 Jones^[21]使用了模型层体间的集合运算去确定地层层体的缺失,但这种集合运算涉及到比较复杂的几何实体运算,实现起来比较复杂。张芳等^[22]在构建 TIN 面过程中直接对缺失地层的三角块进行记录,然后用确定缺失边界的方法来处理地层的缺失模型,这种方法较为快捷简便,如图 11 所示。

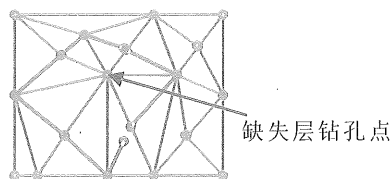


图 11 缺失边界确定

Fig. 11 Absence border identification

地层倒转是相对于主地层序列,出现地层层面相交,褶皱等情况。地层倒转的实质研究并不多,对于地层相交的情况可以看作是地层缺失的特殊情况,只要确定了地层层面相交的边界线,就可以沿着边界线把相交的地层层面分成四个地层缺失层面来处理。对于地层的褶皱情况比较复杂,李培军^[23]、王鹏等^[24]专门对地层褶皱情况下的地层建模进行了深入探讨,他们提出了基于核心序列优先的倒转地层构模方法,该方法是通过钻孔中的层面进行核心序列确定,然后根据核心序列在不同钻

孔中的位置来建立褶皱地层模型。

对于地层断层的处理, 由于断层信息很难比较全面的体现在钻孔上, 不可能只依靠钻孔信息进行处理, 还必须依靠其它勘探手段来比较精确的确定断层的位置和其它属性, 才能较好地构建地层的断层模型。关于断层的模型处理, 现有研究较少, 李培军^[23]、熊祖强等^[8]在他们的研究中曾简单地作过探讨。

3 地层模型误差修正

在岩土工程中, 可用来构造地层模型的信息来源不多, 一般只有钻孔信息。考虑到工程成本和自然环境等问题, 钻孔一般会比较稀疏, 因而利用钻孔数据构造出来的地层模型与实际情况必然会在一定差别, 如何修正地层模型误差是一个值得探讨的问题。

现有对地层模型误差修正的研究较少, 大多集中在虚拟钻孔添加方法方面的研究。刘祚秋^[25]、朱良峰等^[26]较详细地讨论了虚拟钻孔的添加方法和流程, 其修正方法着重以各种专业人员的经验和其它勘探手段获取的结果为依据来添加虚拟钻孔。另外, 由于剖面图是各类工程勘察试验和专家经验解释结果的综合, 能够较好地反映研究区域典型、特殊的地质现象, 朱良峰等^[27]还提出了基于剖面图来修正地层模型的方法。

目前地层模型误差修正的研究大部分是基于专家经验进行修正, 而专家经验并不能完全精确地反映地层的真实情况, 因此对于模型的精确修正还有赖于新勘探手段的发展, 为模型建立提供更多更精确的信息。

4 讨论与展望

三维地层模型的研究从面模型的栅格 DEM、TIN 模型到体元模型的三棱柱、广义三棱柱、四面体模型, 是一个从面模型到体模型过渡的发展过程。但是, 这些体元模型只是实体分解模型中的几种, 且分解模型研究还处于起步阶段, 并不完善, 对于一些复杂形状的地层情况, 很难使用以上体元模型进行表达, 对于一些不规则地层的开挖模拟也比较困难。

三维地层模型的层面构造是整个三维地层模型构造的关键。层面的构造经过了规则的栅格表示向不规则的 TIN 表示发展, 使用的插值方法也由代数插值向几何插值方向发展。但几何插值在三维地层构造中的应用还有许多地方需要研究, 如模型的边

界处理, 缺失地层的边界外推等。

总体来说, 三维地层构造研究已经取得了长足的发展, 但在实体模型和辅助工程分析方面还有待进一步的研究与实践。今后的研究应侧重在以下几个方面:

(1) 由于面模型和实体分解模型不能对实体地层和特殊地质情况进行很好的描述, 三维地层模型的建立应使用更加完善和成熟的实体模型表示法, 如 CSG 表示法和边界表示法;

(2) 现有的地层层面造型插值算法大多需要规则排列的控制点, 这样对地层的非均匀拓扑结构来说并不直观。因此, 完善与发展基于非均匀离散数据的三维地层层面几何插值算法成为必然;

(3) 对于断层、褶皱、倒转等特殊地质情况的模型处理方法和模型误差修正方法研究还处于探索阶段, 以比较概括和经验的方法为主, 还缺乏深入的理论性研究;

(4) 三维地层模型的重要作用是辅助工程分析, 而目前的研究大多集中在可视化技术上, 辅助分析功能如剖切、开挖、属性计算、结合有限元分析等的研究还需进一步加强, 从本质上更好地解决工程实际问题。

参考文献:

- [1] 李晓军, 朱合华, 解福奇. 地下工程数字化的概念及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1975-1980.
LI Xiaojun, ZHU Hehua, XIE Fuqi. Concept of digitalization of underground engineering and its preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1975-1980.
- [2] 周翠英, 董立国, 陈恒, 等. 重大工程三维地层分析的功能设计与实现[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, 45(4): 39-43.
ZHOU Cuiying, DONG Liguang, CHEN Heng, et al. Function design and realization of 3D stratum in the development of underground space[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(4): 39-43.
- [3] 周翠英, 陈恒, 黄显艺, 等. 重大工程地下空间信息系统开发应用及其发展趋势[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(4): 28-32.
ZHOU Cuiying, CHEN Heng, HUANG Xianyi, et al. Developing trends of underground spatial information system in major projects[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(4): 28-32.
- [4] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637-639.

- HE Huaijian, BAI Shiwei, ZHAO Xihua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 637-639.
- [5] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1722-1726.
- Wang Chunxiang, Bai Shiwei, He Huaijian. Study on geological modeling in 3D strata visualization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1722-1726.
- [6] 李邵军, 冯夏庭, 王威, 等. 岩土工程中基于栅格的三维地层建模及空间分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 532-537.
- LI Shaojun, FENG Xiating, WANG Wei, et al. Three-dimensional grid-based strata model and spatial analysis in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 532-537.
- [7] 朱合华, 吴江斌. 基于 Delaunay 构网的地层 2D、2.5D 建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4073-4079.
- ZHU Hehua, WU Jiangbin. 2D and 2.5D modeling of strata based on delaunay triangulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4073-4079.
- [8] 熊祖强, 贺怀建, 夏艳华. 基于 TIN 的三维地层建模及可视化技术研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1954-1958.
- XIONG Zuqiang, HE Huaijian, XIA Yanhua. Study on technology of 3D stratum modeling and visualization based on TIN[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1954-1958.
- [9] REQUIOHA A A G. Representation for rigid solids: Theory, method and systems[J]. ACM Computing Surveys, 1980, 12(4): 437-464.
- [10] JACKINS C L, TANIMOTO S L. Oct-trees and their use in representing three-dimensional objects[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 4: 249-270.
- [11] 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用[J]. 中国图象图形学报: A, 2001, 6(3): 285-290.
- ZHANG Yu, BAI Shiwei. An Approach of 3D Stratum Modeling Based on Tri-Prism Volume Elements[J]. Journal of Image and Graphics: A, 2001, 6(3): 285-290.
- [12] WU Lixin. Topological relations embodied in a generalized tri-prism(GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 405-418.
- [13] 周翠英, 董立国. 三维地层构造的块体理论方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1081-1084.
- ZHOU Cuiying, DONG Ligu. Block theory for the structure of 3D stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1081-1084.
- [14] 吴江斌, 朱合华. 基于 Delaunay 构网的地层 3D TEN 模型及建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4581-4587.
- WU Jiangbin, ZHU Hehua. 3D TEN model of strata and its realization based on delaunay triangulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4581-4587.
- [15] 张渭军, 王文科. 基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(1): 108-113.
- ZHANG Weijun, WANG Wenke. 3D modeling and visualization of geological layers based on borehole data[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2006, 30(1): 108-113.
- [16] 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[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 26-30.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, LIU Xiuguo, et al. Reconstruction of 3D Strata Model Based on Borehole Data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(3): 26-30.
- [17] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究[J]. 2003, 22(10): 1722-1726.
- WANG Chunxiang, BAI Shiwei, HE Huaijian. Study on geological modeling in 3D strata visualization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1722-1726.
- [18] NASRI A. Surface interpolation on irregular networks with normal conditions[J]. Computer Aided Geometric Design, 1991, 8(1): 89-96.
- [19] LOUNSBERRY M, MANN S, DEROSE T. Parametric surface interpolation[J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1992, 12(5): 45-52.
- [20] DYN N, GREGORY J, LEVIN D. A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control[J]. ACM Transactions on Graphics, 1990, 9: 160-169.
- [21] LEMON A M, JONES N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29: 547-555.
- [22] 张芳, 朱合华, 宁民霞. 适于海量数据的三维地层建模方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3305-3310.

参考文献:

- [1] HANZO L, MUNSTER M, CHOI B J, et al. OFDM and MC-CDMA for broadband multi-user communications, WLANs and broadcasting [M]. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] LIU H, LI G. OFDM-based broadband wireless networks: design and optimization [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] STUBER G, LI Y. Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications [M]. Boston, MA: Springer, 2006.
- [4] HUGHES-HARTOGS D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media [P]. U. S.: Telebit Corporation, 1987.
- [5] CAMPello J. Practical bit loading for DMT [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications, 1999. ICC 99. Vancouver, Canada, 1999, 2: 801-805.
- [6] FISCHER R, HUBER J. A new loading algorithm for discrete multitone transmission [C]//Proc of Globecom'96. London, 1996, 724-728.
- [7] CHAN P W C, LO E S, WANG R R, et al. The evolution path of 4G networks: FDD or TDD? [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12): 42-50.
- [8] LOVE D J, HEATH R W JR. OFDM power loading using limited feedback [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1773-1780.
- [9] LAU V, LIU Y, CHEN T A. On the design of MIMO block-fading channels with feedback-link capacity constraint [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 62-70.
- [10] LAU V K N, WU T. Optimal transmission and limited feedback design for OFDM/MIMO systems in frequency selective block fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1569-1573.
- [11] GERSHO A, GRAY R. Vector quantization and signal compression [M]. Boston: Kluwer, 1992.
- [12] GUI B, CIMINI L J. Bit loading algorithms for cooperative OFDM systems [J/OL]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008: 9. doi:10.1155/2008/476797
- ZHANG Fang, ZHU Hehua, NING Minxia. Modeling method of 3D strata suitable for massive data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Sup. 1): 3305-3310.
- [23] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化 [J]. 地质前缘, 2000, 7(增): 271-277.
- LI Peijun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(Sup.): 271-277.
- [24] 王鹏, 江南. 基于核心序列优先的倒转地层构模方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(5): 52-55.
- WANG Peng, JIANG Nan. Modeling Method of Overturned Stratum Based on Core-Sequence First [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(5): 52-55.
- [25] 刘祚秋, 周翠英, 赵旭升, 等. 三维地层模型及可视化技术研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42 (4): 21-23.
- LIU Zuoqiu, ZHOU Cuiying, ZHAO Xusheng, et al. Research on three-dimensional stratum model and its visual technology [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(4): 21-23.
- [26] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 城市三维地层建模中虚拟孔的引入与实现 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 26-30.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, LIU Xiuguo, et al. Introduction and implementation of virtual borehole in the construction of urban 3D strata model [J]. Geo-Information Science, 2004, 20(6): 26-30.
- [27] 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 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 268-271.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, PAN Xin. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 268-271.

(上接第32页)