

文章编号: 1000 - 7598 - (2006) 05 - 0828 - 05

三维地质建模及可视化系统的设计与开发

朱良峰^{1,2}, 潘 信¹, 吴信才²

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 中国地质大学 信息工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 三维地学模拟是三维地质信息 GIS 可视化的核心内容。基于基础 GIS 软件平台 MAPGIS, 利用功能强大的三维可视化开发平台 MAPGIS-TDE, 设计、开发具有自主知识产权的三维地质建模及可视化系统。MAPGIS-TDE 包括 MAPGIS 内核模块、MAPGIS-TDE 基础平台、MAPGIS-TDE 构建平台和基于 MAPGIS-TDE 的应用系统等 4 个层次。基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统分为地质数据管理、二维地质分析、地质断面处理、地质结构建模和地质属性建模等 5 大功能模块。系统实现时, 将空间数据库划分为基础地理图形库、区域地质数据库、工程地质数据库、水文地质数据库、地球物理数据库、地球化学数据库等 6 类。该系统不仅提供了强大的地质数据管理、三维地质建模以及模型的可视化功能, 还为专业技术人员提供了一个可视化的分析、设计平台。

关键词: 三维地质建模; 可视化; 三维地理信息系统; 地质信息系统; 地质数据库

中图分类号: P208; TU17

文献标识码: A

Design and development of 3D geological modeling and visualization system

ZHU Liang-feng^{1,2}, PAN Xin¹, WU Xin-cai²

(1. Key Laboratory of Geographical Information Sciences for Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: 3D geoscience modeling is the key technique issue to the visualization of 3D geological data using GIS. Based on MAPGIS-TDE, the software system "3D geological modeling and visualization" is designed and established. MAPGIS-TDE, which is a powerful toolkit for 3D visualization, has a hierarchical structure composed of the kernel module of MAPGIS, the basal platform of MAPGIS-TDE, the construction platform of MAPGIS-TDE and the application system of MAPGIS-TDE. 3D geological modeling and visualization system has five functional modules as data management, 2D analysis, cross-sections processing, geometry modeling and property modeling. By integrating geographical database, areal geology database, engineering geology database, hydrological geology database, physical geology database, geochemistry database with 3D geological modeling, the system realize such functions as data management, 3D geological modeling and the visualization of 3D geological model. It is a visualization platform that assists the design and analysis for the geologists and the technologists.

Key words: 3D geological modeling; visualization; 3D GIS; geological information system; geological database

1 引 言

随着科学计算可视化技术和地质信息计算机模拟技术的发展, 三维地学模拟在 20 世纪 90 年代初期开始为人们所重视, 并逐渐成为数学地质、石油勘探、岩土工程、GIS 和科学计算可视化领域的研究与应用热点^[1-4]。三维地学模拟是一门综合运用现代空间信息理论来研究地质体几何结构及其内部物理、化学属性数据的信息处理、数据组织、空间建模与数字表达, 并运用科学计算可视化技术对其

进行真三维的再现与交互的科学与技术, 因此, 它包括两部分的内容, 即三维地质建模和可视化, 其中前者是后者的基础, 后者是前者的表现^[2]。国外将可视化技术应用于三维地质数据的管理、分析和模拟起步较早, 并达到一定的深度, 目前已有许多成熟的软件系统推出, 如 AVS、gOcad、LYNX、CTech、EarthVision 等。这些软件涉及地震勘探、地质结构建模、矿床模拟、开采评估、规划设计、生产管理等领域, 有的是通用型可视化系统, 有的则是面向地质领域的专用系统^[1,3], 其中有不少优秀

收稿日期: 2005-06-10

修改稿收到日期: 2005-07-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目资助(No.2001AA135170)

作者简介: 朱良峰, 男, 1978 年生, 博士, 主要从事三维 GIS 软件的开发与应用工作。E-mail: zhuliangfeng@163.com

系统值得借鉴，如：gOcad 是一个关于地球物理、地质、工程应用的三维地学模拟软件，其核心模块是基于离散光滑插值技术 (DSI) 进行扩展实现的；广泛应用于矿山模拟中的 LYNX、EarthVision 在地质体结构建模上有独到之处，而基于 Kriging 插值算法的 CTech 则在地质属性建模与地质体结构建模的结合上做得较好。国外的三维地学模拟系统大都价格昂贵，应用复杂繁琐且硬件环境要求较高，不符合我国的应用实际。国内在三维地质建模及可视化系统的研发方面起步较晚，已经推出的软件系统在建模功能和可用性上都与国外差距甚大，集中国内相关领域的技术力量，加大投入，尽快、尽早赶上国外系统的先进水平已经刻不容缓^[1]。基于这种情况，本文采用面向对象的程序开发语言 Visual C++ 6.0，基于优秀的国产 GIS 软件平台 MAPGIS，利用功能强大的三维可视化开发平台 MAPGIS-TDE，设计并开发具有自主知识产权的三维地质建模及可视化系统。

2 系统开发技术背景

世界的本原是三维的，传统的 GIS 将现实世界简化为平面上二维投影的概念模型，注定了它在描述三维空间现象上的局限。同时，随着 GIS 应用的深入，人们越来越多地要求以真三维空间来处理问题。但三维空间是复杂的，基于三维的应用也存在

着巨大的差异，以目前的研究现状和技术条件，研发通用三维 GIS 是不太现实的。基于这种认识，MAPGIS 提供了具有开放体系结构的三维可视化开发平台——MAPGIS-TDE，在提供一般三维空间数据模型及其管理功能的基础上，允许针对特定应用领域动态扩展建模及分析功能插件，以适应特定的三维应用。

考虑到不同领域的三维应用在数据组织、建模及三维分析方面存在着较大的差异，MAPGIS-TDE 的设计体现了体系结构的开放性和功能插件的可动态扩展性。整个 MAPGIS-TDE 的架构如图 1 所示。可以看出，MAPGIS-TDE 的体系结构分为 4 个层次：MAPGIS 内核模块，MAPGIS-TDE 基础平台，MAPGIS-TDE 构建平台和基于 MAPGIS-TDE 的应用系统。

MAPGIS-TDE 基础平台是建立在 MAPGIS 内核模块之上的三维数据管理及基础显示平台，它包括基础数据管理工具和基础显示驱动工具。基础数据管理工具提供对三维空间数据库和数字高程库的管理。通过基础数据管理工具，MAPGIS-TDE 基础平台提供针对 2.5 维和 3 维空间数据的综合管理。基础显示驱动工具支持国际通用的两种三维渲染引擎 (OpenGL 和 DirectX)，并提供统一的绘制引擎接口。MAPGIS-TDE 构建平台是一个开放的、可扩展的三维开发平台，提供一系列面向三维应用的专

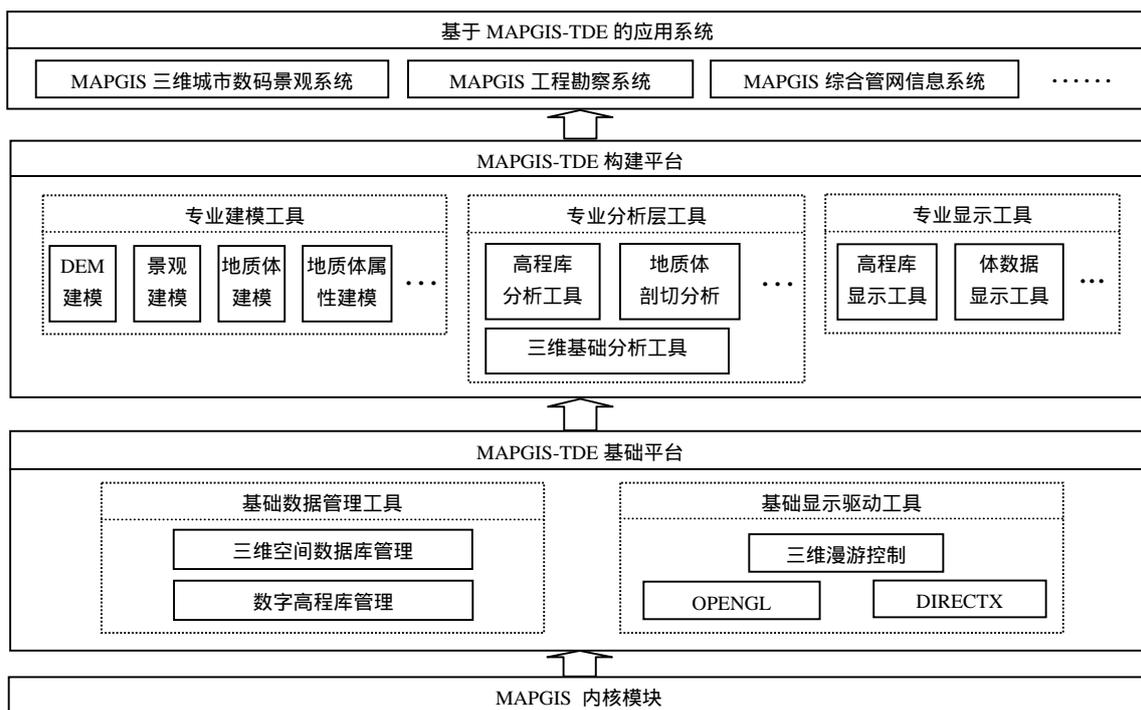


图 1 MAPGIS-TDE 架构图
Fig.1 Framework of MAPGIS-TDE

业建模、分析及可视化工具；用户可借助 MAPGIS-TDE 构建平台提供的面向专业应用的建模、分析与可视化接口构建自己的三维应用系统。

MAPGIS-TDE 减轻了应用系统开发人员在不同三维渲染引擎上的花费,可极大地提高开发效率。MAPGIS-TDE 不仅渲染处理功能强大,方式灵活多样,而且全方位为开发者考虑,提供多种实用处理功能,如键盘与鼠标驱动、路径漫游等多种三维场景交互方式。在基于 MAPGIS-TDE 开发三维地质建模及可视化系统时,开发者能够将精力集中到实际应用业务与专业模型的构建上,另外,还可直接利用 MAPGIS 在二维图形图像处理方面所积累起来的强大的管理、分析工具,这些都能极大的简化三维可视化系统开发的工作量。

3 系统总体设计

3.1 系统设计原则

基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统的开发目标是:结合 GIS、MIS、OA 技术的特点与发展趋势,开发一个集三维地质信息输入、数据库管理和三维地质数据建模与可视化分析功能于一体的智能化的三维地质信息综合管理系统,使之能够全面满足三维地质数据管理与分析的多方面需求,为地质工作人员、项目管理人员和工程技术人员提供综合化、智能化、规范化的基础平台。在系统的设计与开发时应遵循一致性、先进性、实用性、可靠性、安全性、经济性、健壮性、可视性、交互性、可扩充性、模块化、应用模块与数据相分离等基本原则,在充分考虑地质数据多源性、复杂性、不确定性等特点的前提下,也应注意到三维地质建模的目的不仅仅是用计算机来展示地质体的真实面貌,更重要的是要为解决地质领域和实际工程应用问题提供一个开发研究的崭新环境和科学手段^[4]。

3.2 系统体系结构

根据系统功能需求、系统用户特征和系统建设目标,基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统,目前采用 C/S 结构的集中式数据管理模式,运行于局域网环境。以后可考虑扩充至 C/S 结构与 B/S 结构并存的多层体系结构,使系统能够适应并支持局域网和广域网两种网络环境。

3.3 系统功能模块

基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统分为地质数据管理、二维地质分析、地质断面处理、地质结构建模和地质属性建模等 5 大模块。各个模块的具体功能包括:

(1) 地质数据管理。系统利用 GIS 技术对以各种图件、图像、表格、文字报告为基础的单个工程勘察项目或区域地质调查成果资料以及基础地理信息,进行一体化的存储、管理。实现了对地理底图、地质勘察所获取的资料和成果的录(导)入、转换、编辑、查询等功能。系统提供了与钻孔相关的试验表类属性数据与图形数据的关联存储管理功能,支持对各种三维地质模拟结果、成果资料的存储管理,提供与钻孔相关的各种基本信息及试验结果等属性信息的查询,提供对多种成果图件及分析表单的查询与统计。

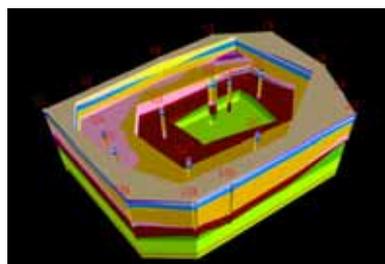
(2) 二维地质分析。针对目前地质工作中常见的二维地质分析应用,提供了符合工程勘察行业规范的二维专业分析模块。能够辅助完成的工程勘察专业分析工作有:生成与钻孔相关的钻孔平面布置图、土层柱状图、岩石柱状图和工程地质剖面图;生成各类等值线与各种试验曲线;与 OA 完美结合,能够根据工程勘察所获取的数据自动生成工程勘察报告。

(3) 地质断面处理。地质断面(包括横剖面和平切面)是一类重要的三维地质建模数据,但源自物探的地质断面的数据格式往往并不规范,无法直接利用这些数据进行三维地质建模。因此,在建模前要按照标准的数据格式生产、存储、管理地质断面数据,系统的地质断面处理模块就是用来完成此工作的。

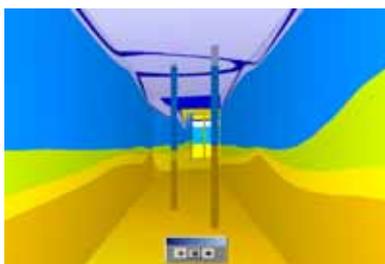
(4) 地质结构建模。采用灵活友好的建模方式和经过优化的数据组织结构,将以点、线为基本形态的零散的、局部的勘查资料解释结果在三维空间中综合起来,重现地下地质界面和地质体的空间形态和组合关系,进而重建三维地质构造形态模型,通过剖分获取三维地质体的真三维实体填充模型,将三维地质模型用三维图形图像生动地表现出来,实现对三维地质模型的旋转、平移、放大、缩小等可视化操作及实时漫游^[5]。系统综合应用体视化技术和传统的可视化技术,基于地质体三维实体模型绘制各种等值线、等值面,提供表现地质体内应力、渗透率等各种属性值的功能,提供对三维地质实体模型进行任意剖切、开挖、虚拟钻探、隧道生成和虚拟漫游等可视化模拟功能(图 2),提供包括体积、面积、距离计算等的三维量算功能。

(5) 地质属性建模。对于地质体内部的物理、化学属性数据的重构,系统提供了多种空间插值方法(如距离倒数加权法、Kriging 法等)和数据处理方案,使用户能够根据不同的需求和数据特点进行

选择，最大限度方便用户建模。



(a) 三维地质模型的剖切与开挖



(b) 隧道漫游

图 2 地质体几何结构建模与可视化分析
Fig.2 Geometry modeling and visualization analysis
of 3D geologic body

4 数据库设计

基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统是个高度集成的应用系统，系统建设过程中必须充分考虑系统涉及的多专业图形、属性、影像、文字资料数据的一体化集成、系统数据库与系统软件功能的集成以及系统与网络环境的集成等关键问题。为实现功能的集成与扩展，构建了一个数据中心，将系统涉及的地表、地上、地下多维、动态空间信息全部存储在系统服务器数据库上，并利用大型商用关系数据库集中管理这些海量数据，以确保数据的安全，真正实现各种数据的一体化存储与管理。按照工业标准建立数据中心，可以充分利用商业数据库强大的数据管理功能和性能良好的网络服务功能，并能够将系统数据应用于不同的 GIS 平台。在数据访问模式上，采用 SQL 方式访问空间数据和属性数据，利用图文一体化管理机制方便、准确地查询空间数据及对应的属性数据；另外，对空间图形数据采用开放的管理方式，从而有利于实现 GIS 数据共享。

三维地质数据所涉及的信息众多且来源广泛，按照数据来源的不同可分为工程地质勘察数据（包括地表调查数据、钻探数据、坑探井探数据等）、物探数据（包括重、磁、电及地震数据）、化探数据、遥感数据等 4 大类^[3]，按照数据表现形式不同可分

为图形、图像和文字等 3 类信息。这些信息综合在一起，能够完整地描述地质环境的现状，对三维地质模型的构建有着至关重要的意义。三维地质数据具有来源广泛、资料分散、时间跨度大、不同比例尺、数据量巨大、数据种类繁多等特点，如何针对数据特点将这些多源海量地质数据进行整合，从而进行一体化的采集、存储与管理，是关系到系统成败的一个重大问题^[6]。系统在实现过程中，将空间数据库按照专业不同划分为基础地理图形库、区域地质数据库、工程地质数据库、水文地质数据库、地球物理数据库、地球化学数据库等 6 大类，并允许用户根据自己的建模需要进行适当的扩展与定制。

基础地理图形数据包括地形线、交通线、行政区划界线、居民点分布图、区域气候区划图、区域地貌区划图、土地利用现状图、土地利用远景规划图等。这些基础地理数据多以矢量图件的格式存在，可以直接矢量化为 MAPGIS 格式的点、线、面文件来存储管理。区域地质数据包括区域地质构造背景图件以及相关的文档资料。主要表现形式是矢量图和文档。对于矢量图可存储为 MAPGIS 格式的文件。文档类数据可按照文档编号或者资料所属的区域编号来进行分类存储与管理。工程地质数据主要包括工程地质分区图、工程地质钻孔分布图、工程地质剖面图、工程钻孔数据。工程地质分区图、工程地质钻孔分布图可采用 MAPGIS 图库的方式进行统一的存储与管理；工程地质剖面图可采用工程管理的方式；工程钻孔数据直接存储在数据库中。工程地质数据库是构建工程地质三维模型的主要数据来源。水文地质数据包括各类水文地质钻孔数据、观测孔资料数据。表现形式有表格、文字报告、观测结果图件等。这些数据在进行标准化处理以后可以以水文钻孔编号为序进行入库。水文地质数据库是构建水文地质三维模型的主要数据来源。地球物理数据包括采用重力勘探、磁法勘探、电法勘探、放射性勘探、地震勘探等方法获取的地质剖面数据。这类剖面图可采用 MAPGIS 工程管理的方式入库。地球化学数据主要是地表水、地下水、岩土体地球化学采样点分布图以及各类化学试验指标表格，这类数据可在标准化处理后入库管理。

5 系统应用扩展

基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统不仅提供了强大的地质数据管理、三维地质建

模与模型的可视化功能,还为专业技术人员提供了一个可视化的分析、设计平台。通过三维模型,将以往仅仅蕴涵于地质学者脑海中的地质体及其形态构造直观形象的展现在规划设计师和岩土工程师面前,能够最大限度地增强地质分析的直观性和准确性,做出符合地质现象分布变化规律的工程设计与施工方案,从而减少人类对地质问题认识的盲目性以及地下工程设计、施工面临的巨大风险^[7]。针对城市岩土工程的应用需要,开发出了一个面向实际工程的桩基承台辅助设计模块,深受城市岩土工程部门的欢迎。图3展示了系统的阵列桩基、承台和三维地层模型组合显示时的设计效果。

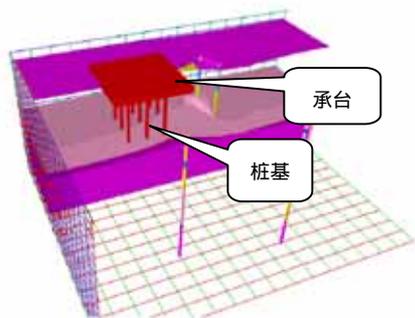


图3 阵列桩基、桩基承台和模型切割显示效果图

Fig.3 Combined view of pile array, bearing platform and the incision of 3D stratum model

6 结 语

三维地学模拟是三维地质信息 GIS 可视化的核心研究内容。随着科学计算可视化技术和三维 GIS 技术的发展,地质信息的三维可视化也将得到进一步的深化。本文所设计、开发的基于 MAPGIS-TDE 的三维地质建模及可视化系统,目前尚处于原型阶段,还有许多问题需要进一步的研究与探索。结合三维地质建模及可视化系统的研究现状、相关技术的发展走向以及实际工程实践的应用需求,笔者认为,需要进一步探索、研究并解决以下几个问题:

(1) 发展面向特定专业与行业的三维空间分析工具和应用系统。例如,可加强对矿山开采辅助决策系统、岩土工程勘察系统、地下水模拟系统的研发,使三维地质建模及可视化理论与技术能及时地转化为现实的生产力,指导实际的工程实践。

(2) 研究并实现现有的三维地质建模系统与其他专业分析软件(如三维有限元分析、DDA、FLAC 等)的接口。

(3) 发展通过 Internet 用 VRML 和 XML-3D

发布和交换三维地质模型的技术,研究浏览器环境下三维数据的标准化与互操作技术,为三维地质建模技术面向更为广大范围内的社会人群、专业技术人员 and 地质科学家提供更加普遍的支持与服务奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 郑贵洲, 申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟研究现状[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 218 - 223.
ZHENG Gui-zhou, SHEN Yong-li. 3D analysis of geological characteristics and status research of 3D geology modeling[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(2): 218 - 223.
- [2] Simon W Houlding. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [3] 宁书年, 李育芳. 三维地质体可视化软件理论探讨[J]. 矿产与地质, 2002, 16(4): 254 - 255.
NING Shu-nian, LI Yu-fang. Discussion of the software theory for the visualization of 3D geological bodies[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2002, 16(4): 254 - 255.
- [4] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D 辑, 地球科学), 2004, 34(1): 54 - 60.
WU Qiang, XU Hua. On three-dimensional geological modeling and visualization[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004, 34(1): 54 - 60.
- [5] Matthias K. Visualization of geographically related multidimensional data in virtual 3D scenes[J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26(1): 101 - 108.
- [6] 朱良峰, 吴信才, 刘修国. 3D GIS 支持下的城市三维地质信息系统研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 882 - 886.
ZHU Liang-feng, WU Xin-cai, LIU Xiu-guo. Study of information system of urban 3D geological data supported by 3D GIS[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 882 - 886.
- [7] 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(1): 23 - 26.
BAI Shi-wei, HE Huai-jian, WANG Chun-xiang. 3-Dimension strata information system and information of geotechnical engineering[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Urban Science Edition)*, 2002, 19(1): 23 - 26.