

doi:10.3799/dqkx.2011.040

地上一体化三维空间数据库模型设计及应用

刘刚^{1,2}, 吴冲龙^{1,2}, 何珍文¹, 翁正平¹, 朱庆³, 张叶廷³, 李晓明³

1. 中国地质大学计算机学院, 湖北武汉 430074

2. 国土资源部资源定量评价与信息工程重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079

摘要: 大规模地上、地下三维实体建模与空间分析应用中, 由于三维模型的多样性和对象空间分布的不均衡性, 如何高效地一体化组织和管理海量三维空间数据成为当前三维 GIS 的核心问题之一。提出了一种兼顾空间关系与语义关系的三维空间数据库模型, 给出了相应的概念模型、逻辑模型和物理模型。特别针对地质体的复杂性, 给出了顾及语义的多尺度地下空间目标概念模型和多层次三维空间索引机制。用武汉市和南京市三维数字城市示范区模型数据进行了应用试验分析, 验证了该模型的有效性。

关键词: 三维 GIS; 数据库; 地上地下空间实体; 一体化管理; 数学模型。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2011)02-0367-08

收稿日期: 2010-10-12

Design and Application of 3D Spatial Database Model for Integrated Management of Aboveground and Underground Features

LIU Gang^{1,2}, WU Chong-long^{1,2}, HE Zhen-wen¹, WENG Zheng-ping¹,
ZHU Qing³, ZHANG Ye-ting³, LI Xiao-ming³

1. School of Computer, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Resources Quantitative Assessment and Information Engineering, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China

3. LIESMARS of Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In the application of large scale aboveground and underground entity 3D modeling and spatial analysis, it is a key issue as how to realize integrated organization and management of massive 3D spatial data efficiently due to the diversity and unbalanced distribution of 3D models. A 3D spatial database model considering spatial and semantic relationships is proposed to solve this problem and corresponding concept model, logical model and physical model are also presented. Especially aiming at the complexity of geological bodies, the multi-scale underground spatial object concept model considering semantic and multi-level 3D spatial index mechanism is put forward. The prototype 3D spatial database management system has been applied in managing and processing 3D digital city model data of Wuhan and Nanjing. The result shows the validity of the proposed 3D spatial database model.

Key words: 3D GIS; database; aboveground and underground spatial features; integrated management; mathematical models.

新型三维空间数据获取技术(如激光扫描、高分辨率遥感与三维地震等)和地上地下空间目标建模技术的发展,极大地提高了各种规模、不同细节程度三维空间数据的可得性。对于一个城市级或以上的 GIS 系统,其数据量非常巨大,可以达到 Tb 的数量级。另

一方面,三维环境中的地上一体化分析应用需求紧迫,例如露天矿山的开采设计、地铁规划设计与建设、城市发展规划与防灾减灾等等。大规模三维场景的数据内容具有复杂性和海量性的特征,表现在对象类型繁多、模型精细程度不同、数量多且对象在空间上随

基金项目:“863”计划重点项目课题(No. 2008AA121602);国家自然科学基金(No. 40772196);中央高校基本科研业务费专项资金特色团队项目(No. CUG090109)。

作者简介:刘刚(1967-),男,博士,教授,主要从事地学信息工程与应用方面的教学和科研工作。E-mail: liugang@cug.edu.cn

机分布、聚集和离散程度不均衡等方面,而这些特征显著地影响着三维实时可视化和地上地下协同空间分析应用中数据存取管理和调度的效率,因此如何高效、一体化地组织与管理复杂和不均匀分布的地上地下三维空间数据成为亟需突破的难点之一。

目前的三维空间数据模型大都面向特定的专业领域,如地质模型、矿山模型、地表景观模型、地形数据库等(周顺平等,2009;郑坤等,2010),不能满足地上地下三维空间信息的语义表达、动态更新与一致性维护以及综合分析的需要。当前主流的商业关系数据库管理系统中,只有 Oracle Spatial 11g 支持简单三维数据类型的表达(Oracle,2009,2010)。具有空间数据库引擎的商业 GIS 平台,如 MapInfo SpatialWare、ArcSDE、SuperMap SDX+ 等(吴信才,2009)大多针对地形景观、城市景观或者地质环境、矿山环境等单一场景对象,还未完全支持地上地下三维空间数据的一体化管理和表达。另外,现在大多系统采用的是文件系统管理方式,难以满足大规模三维空间数据一体化管理、无缝可视化和空间分析的要求,因此利用大型关系数据库管理系统进行三维空间数据一体化管理已成为发展方向(朱庆,2004; Zlatanova,2006; Zlatanova and Stoter,2006)。

总体上来看,地上地下一体化的三维空间数据库模型是表达地上地下三维空间数据的存储模型,

要求将不同类型的三维空间数据存储于文件或大型数据库管理系统中,能够实现从小数据量、单用户的文件数据库到大数据量、多用户并发访问的企业级数据库管理系统不同层次的高效应用。

1 地上下一体化的三维空间数据库模型设计

三维空间数据库模型的建立包括其概念模型、逻辑模型和物理模型设计。图 1 表示了总体的设计思想,地上地下空间实体集成表示的统一数据模型作为地上地下一体化三维空间数据库的概念模型,针对地上地下与室外室内建筑模型、道路网络模型、管线模型、环境模型、地质体模型等专题的三维模型数据、面向可视化应用各类多层次细节(level of detail,LOD)数据以及地形数据、属性数据等,提出了地上地下一体化三维空间数据库逻辑模型,并针对文件系统、关系型数据库管理系统及其集群并行管理系统等 3 种不同的存储环境,分别设计高效的三维空间数据库组织与存储结构。

1.1 概念模型设计

1.1.1 基于语义划分的多层次概念模型

通过对用户需求进行综合、归纳与抽象,三维空间数据库的概念模型基于各类空间对象特征建立统一的数据模

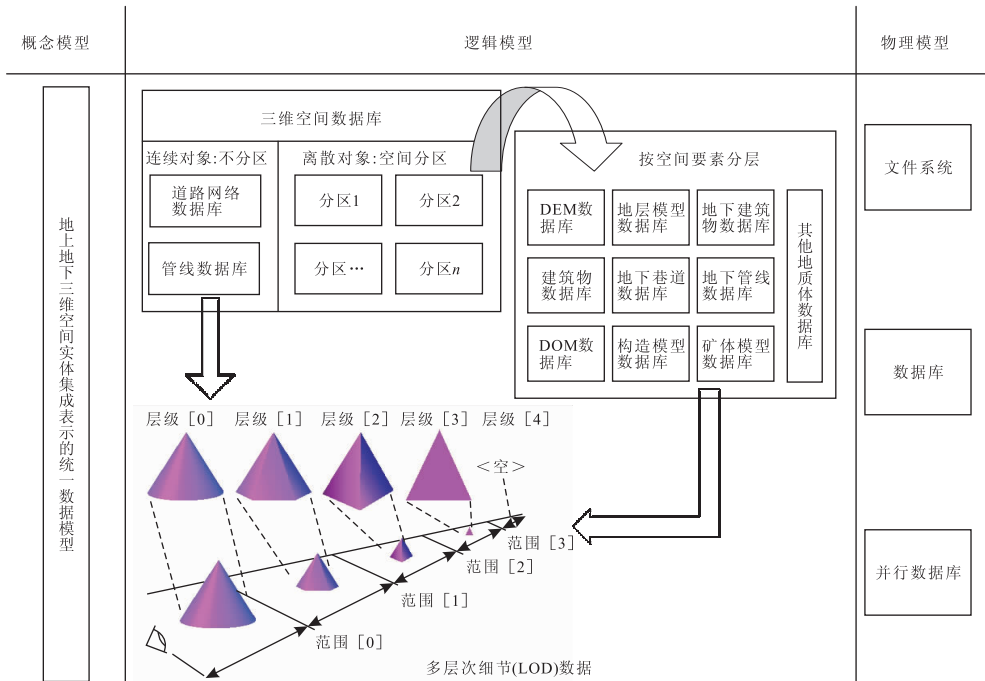


图 1 地上地下一体化三维空间数据库模型

Fig. 1 3D spatial database model for integrated management of aboveground and underground features

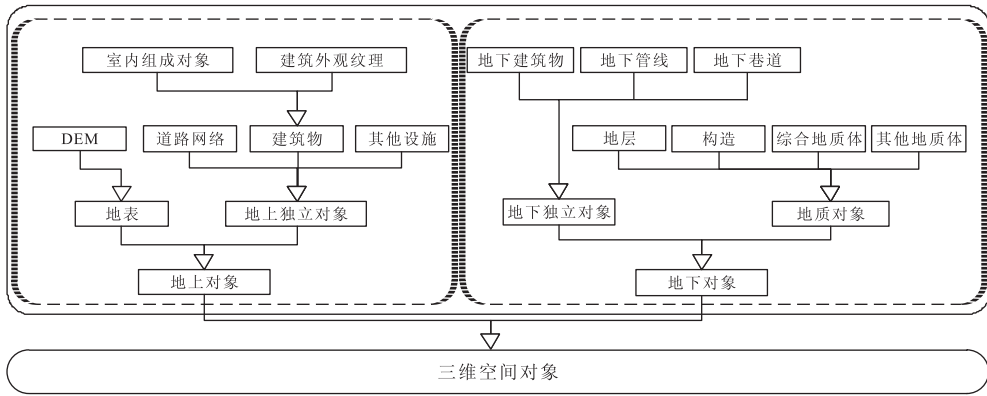


图 2 三维空间对象的专题语义划分

Fig. 2 Semantic compartmentalization of 3D spatial objects

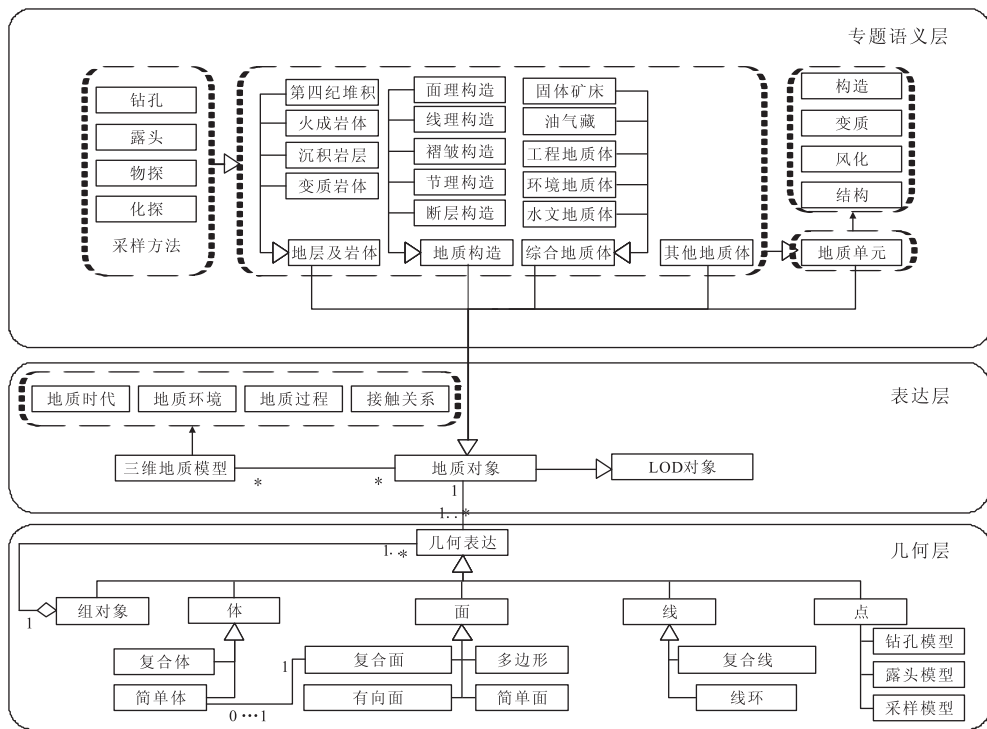


图 3 多尺度多层次的地下地质体空间目标概念模型

Fig. 3 Multi-scale and multi-layer underground spatial object concept model

型,包括几何层、多尺度表达层和专题语义层 3 个层次。按照三维空间对象的所属语义专题划分子数据库,各个子数据库采用底层自治管理、上层统一管理的方式进行调度管理。地上下各类主要三维空间对象的专题语义划分如图 2 所示,其中对象的划分层次主要在对象性质不同的大类上进行,实际应用时可根据需求进行子类的详细分类和语义划分。

1.1.2 复杂地质体的概念模型设计 地质体区别于其他空间目标的显著特征是其空间分布的连续性和各地质体介质成分的不均匀性。由于长期的地质

历史演化,形成了多种多样的地质结构和构造,使得地质体形态随机变化,空间关系和语义关系错综复杂。同时,地质调查和勘探的详细程度和方法不同,使得地质体数据具有不同精细程度和多尺度的特征。因此,提出多尺度多层次的地下空间目标概念模型,以支持地下地质体三维空间数据库的设计。

图 3 说明了基于地质知识的地质实体对象表达的分层次概念模型,基础采样—基本地质体—地质单元等构成了三个基本层次,部分内容借鉴了国际地科联(IUGS)的地质信息管理与应用委员会(CGI)提出

的 GeoSciML 2.0 架构(Sen and Duffy, 2005).

(1)语义层.对三维地质对象的多层次逻辑管理特性进行了分类综合,主要由采样方法、地质体类型和地质单元划分组成.地下地质体是不可直接看见的,因此了解其赋存状态,需要通过直接观察露头、钻孔等勘探工程以及物探、化探的采样方法来获得相关信息.这些采样数据是构建各类地质体的最基本信息.基于地质知识和理论,这里将地质体分为四大类型:地层及岩体、地质构造、综合地质体和其他地质体.地层及岩体可分为第四纪堆积、沉积岩体、火成岩体和变质岩体,其中第四纪松散堆积体对于城市建设和工程应用关系紧密,因而区别于其他沉积岩体而单独列出;地质构造主要有断层构造、褶皱构造、面理构造、线理构造和节理构造,可以顾及不同细节程度的应用;综合地质体是地质专业应用领域所定义的地质体,可以是单一地质体,也可以是重新划分和组合的综合地质体.其中固体矿床和油气藏说明了固体、液体(气体)状态的矿产体;工程地质体用于工程建设和治理领域;环境地质体则涵盖了与环境演化、现状以及地质灾害相关的地质体;水文地质体主要用于地下水体的水文性质分析.其他地质体则是指不包含在上述类型中的地质体,如地下溶洞等.这些地质体,包括地质灾害体、溶洞等与城市的建设、规划和发展有着密切的关系.地质单元是在一定划分原则下在基础地质体的基础上构建的分析和应用的组合体,主要划分方法包括结构、构造、变质程度以及风化程度等.

(2)表达层.在基础地质数据和地质体对象的基础上,实现三维地质体模型的构建、表达以及存储管理.三维地质模型的建立,一方面是取决于所采用的数学模型,如插值模型,另一方面也受到地质语义的约束,主要包括地质时代、地质环境(形成状态)、地质过程(演化过程)和接触关系(相互关系);由于地质调查和勘探程度的不同,使得地质体的表达具有整体的多比例尺和多尺度状态以及局部的不同表达精度,这需要通过多细节层次对象来进行表达和存储.此外,与几何层关联,实现三维几何表达与不同尺度的空间表达与分析.

(3)几何层.用于实现地质对象的几何表达、空间分析以及内部空间的几何语义表达,包含 4 种对象要素:点对象、线对象、面对象和体对象.点对象除具备基本的点特征外,与钻孔模型、露头模型和采样模型等基础信息进行关联集成,辅以语义信息实现多层次复杂三维地质对象的表示和构建.线对象用

于表现线性特征并派生多线与线环,其中构造线、剖面线等可以通过多线方式表达,钻孔钻进线可以通过点对象关联钻孔模型等复杂信息模型进行集成表达.面对象由简单面、复合面、多边形、有向面等组成.体对象有简单体和复合体两种基本类型.组对象主要表现为多个对象的聚类关联,如面片和填充体元联合组合形成的地质实体对象等.

1.1.2 逻辑模型设计 基于概念模型的三维空间数据库逻辑模型设计目标是要实现三维空间数据的有序组织.主要策略包括:(1)按三维对象特征进行分类组织.连续对象不分区组织,例如管线、道路数据;不连续对象进行分区组织,例如 DEM 地形数据等;(2)纵向上按空间对象内容进行分层组织;(3)按多尺度特征进行多层次细节数据组织,无论连续对象还是不连续对象均提供此类组织方式.三维空间数据库从数据专题内容上可分为下列子数据库:DEM 数据库、DOM 数据库、交通设施数据库、建筑设施数据库(含地上和地下建筑设施)、管线设施数据库、地质体数据库和其他设施模型数据库等,如图 4 所示.

1.1.3 物理模型设计 针对文件系统、关系型数据库管理系统及其集群并行管理系统等三种存储环境对于数据管理的不同特性,分别设计适于每种存储环境的三维空间数据库逻辑结构及物理存储的方案.

(1)基于文件系统的三维空间数据物理模型设计.根据三维空间数据库的数据内容与数据模型的设计要求,文件系统主要面向单用户、小范围的空间分析及各类专题应用,提供高效和便捷的客户端处理环境;此外文件系统还需要建立面向关系数据库数据的导入、导出接口,对三维场景中的数据进行相关的修改、编辑都在文件系统中进行,编辑结果通过

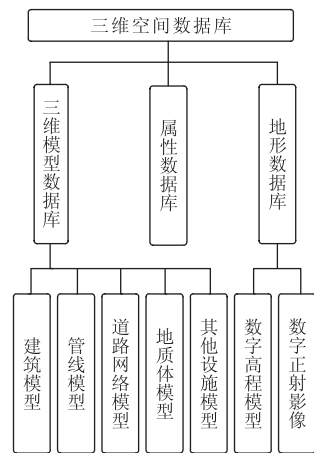


图 4 三维空间数据库的数据专题内容

Fig. 4 Data subject contents of 3D spatial database

文件系统中所提供的更新接口提交关系数据库进行数据存储. 文件系统拥有以下数据文件:工程文件、要素类文件、要素信息文件、有效索引文件、更新索引文件、LOD 数据文件、LOD 索引文件、更新 LOD 索引文件、材质信息文件、项目模型文件夹、共享模型数据文件、共享模型索引文件、系统纹理文件、纹理索引文件、纹理文件等.

(2)基于关系数据库的三维空间数据库物理模型设计. 三维空间数据库的物理结构设计包括:确定表及索引的物理存储参数、确定及分配数据库表空间,确定初始的回滚段,临时表空间及重做日志文件等,并确定系统的主要初始化参数. 三维空间数据库的物理结构设计目的是提高系统的性能,有效地利用存储空间;整个物理结构设计的参数可以根据实际运行情况做出适当的调整. 数据库的存储结构设计及相关设计包含对象类型设计、表空间设计、数据表设计、序列设计、触发器设计、存储过程设计等方面. 底层基于 Oracle 11g 关系数据库管理系统进行物理模型设计和开发.

(3)基于并行 RDBMS 的三维空间数据库物理模

型设计. 基于 Oracle 11g RAC(真正应用集群)构建的并行三维空间数据库系统采用“sharing everything”的并行实现模式,通过 CPU 共享和存储设备共享来实现多节点之间的无缝集群,用户提交的每一项任务被自动分配给集群中的多台机器执行,不必通过冗余的硬件来满足高可靠性要求. 因此,对于构建在 Oracle RAC 的并行三维空间数据库的逻辑模型和物理模型可以与单数据库服务器模式下一致,即在数据表、索引、视图,存储参数设置方面与非集群情况下相同. 为提高基于 Oracle RAC 的并行三维空间数据库系统的稳定性及性能,设计总系统由几个小集群系组成,对于整体的集群系统而言,在横向和纵向上都可以根据实际情况进行扩展和缩减.

2 三维空间数据库管理系统结构与关键技术

2.1 三维空间数据库管理系统的结构分析

三维空间数据库结合三维空间数据引擎和三维空间数据管理工具可以构成完整的三维空间数据库

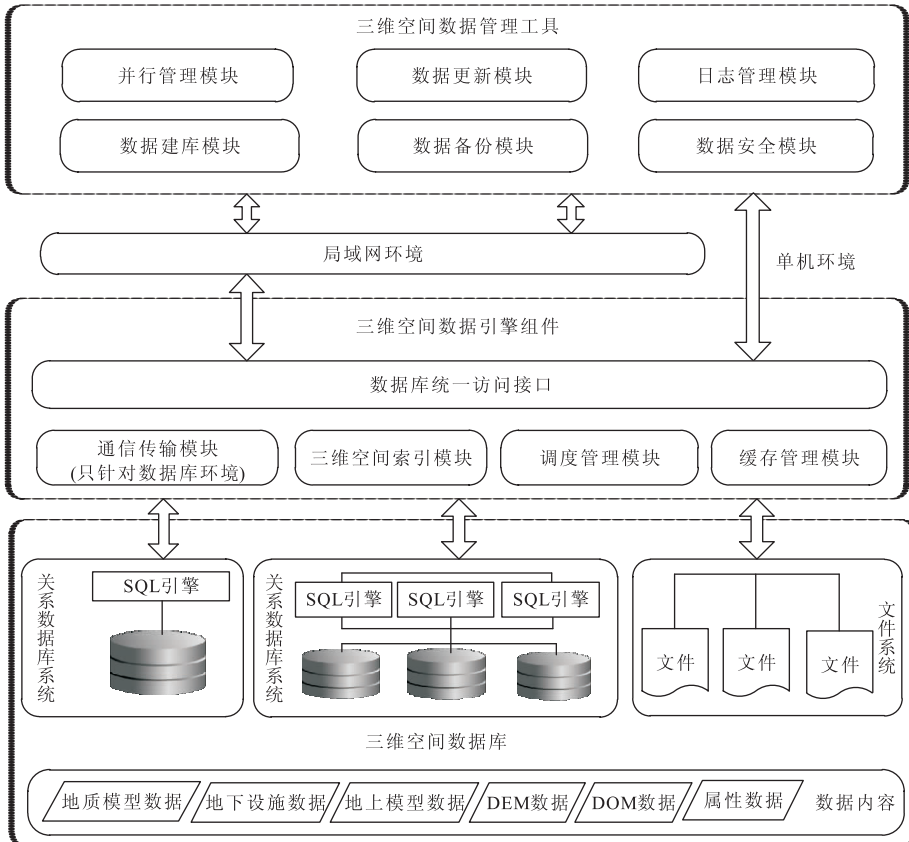


图 5 三维空间数据库管理系统结构

Fig. 5 Structure of 3D spatial database management system

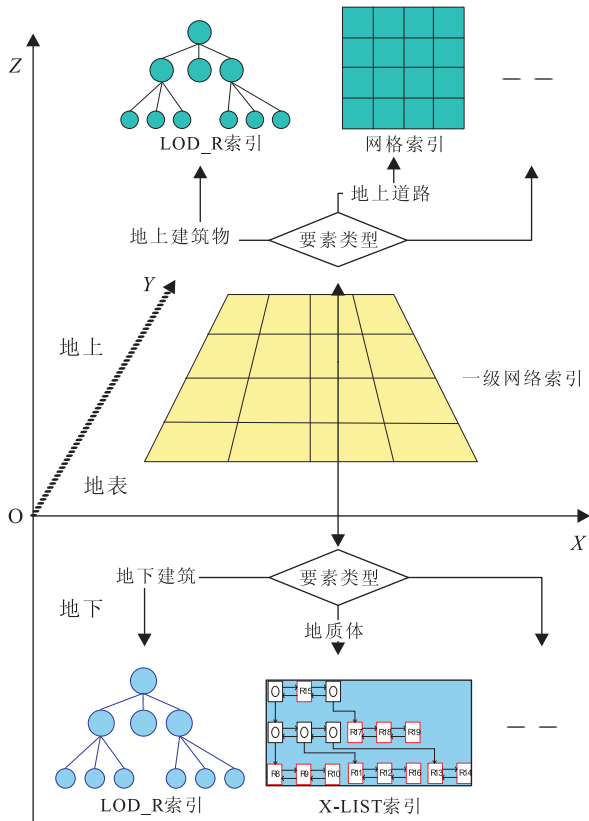


图 6 多层次混合型三维空间索引示意

Fig. 6 Sketch map of multi-level hybrid 3D spatial indexes

管理系统,如图 5 所示。三维空间数据库引擎,是三维 GIS 平台与关系数据库数据交互的连接通道,为单机环境和局域网分布式环境提供统一的数据库访问接口,进而提高了数据库系统应用的灵活性。三维空间数据库引擎相关的关键技术问题有:三维空间数据的动态调度、三维空间索引、多级缓存机制和多用户并发访问等。

系统设计中采用了基于三维空间数据内容的自适应多级缓存机制、实时调度与预调度有机结合的多线程调度机制、多层次的空间索引和多用户异步通信传输机制来提高空间数据引擎的工作效率。下面重点分析与地下地质体一体化组织管理密切相关的三维空间索引设计情况。

2.2 多层次混合型三维空间索引

地上下一体化应用对于三维空间索引所带来的问题是:需要兼顾地上各类空间实体,它们几何形状各异,空间分布不均匀,而且空间关系错综复杂,因此采用一种通用的三维空间索引不能满足所有类型三维模型数据的高效组织。本文采用了多层次多类型的三维空间索引方法,一级索引通过格网索引实现区域的快速定位;然后采用改进的 R 树索引、

X-List 索引等作为二级索引实现地上三维目标的精确查找,改进的 R 树索引能有效顾及地上三维空间目标的多层次细节(LOD)特性(Zhu *et al.*, 2007)。针对地质模型分层连续分布、形态随机变化、拓扑关系复杂、属性丰富的特点,采用含拓扑关系的 X-List 三维空间索引方法和 CSR-Tree 数据预处理技术来提高地质数据的处理效率(何珍文,2009);针对空间对象标识建立了 B⁺-Tree 索引,用于提高通过拓扑关系的查询效率。该多层次混合空间索引方法由粗到精,能够查全查准,具有速度快、多级索引、多级过滤的特点,如图 6 所示。

3 系统应用与分析

基于本文三维空间数据库模型的原型系统已应用于南京市和武汉市的示范项目中。

3.1 南京市城市地质信息系统应用

城市地质信息系统由数据管理(原始数据、基础数据、成果数据)、地质图件编绘、三维地质建模与分析、地质信息查询与发布四个子系统构成。系统采用统一的数据标准,实现了城市地质中九大专题数据的采集、存储、管理、查询、统计分析等功能;各种地质图件编绘功能,包括钻孔柱状图、地质剖面图等;基于多源地质数据的三维城市地质建模,进行各种地质体的空间分析;地质信息查询与发布功能。试验区原始数据量超过 100 Gb,数据管理能力和调用效率满足了城乡建设用地适宜性评定实际应用需求。图 7 显示了实验区大范围场景的调度(图 7a)和一体化剖切分析(图 7b)的情况。

3.2 武汉市城市规划信息系统应用

武汉市是全国三维“数字城市”建设示范城市,拥有良好的数据基础和应用环境。城市现有三维城市模型数据作为试验数据,包括武汉全市域 5 m 分辨率的 DEM 数据、1 m 分辨率的航空影像以及主城区 0.2 m 分辨率的航空影像;武汉市主城区的三维模型数据,由建筑模型、交通设施模型、地上地下管线模型、地质体模型、植被模型以及建筑室内模型等数据组成。总体原始数据量达到 2 Tb 以上,三维静态目标数量超过 50 万个。通过三维数据库系统将上述试验数据采用 Oracle 11g 数据库管理系统实现了一体化的建库和管理。为了测试系统,已完成 2.08 Tb 试验库建设,而 5 Tb 的实际数据正在逐步整合建库。

实验环境的配置包括 1 台数据库服务器、1 台

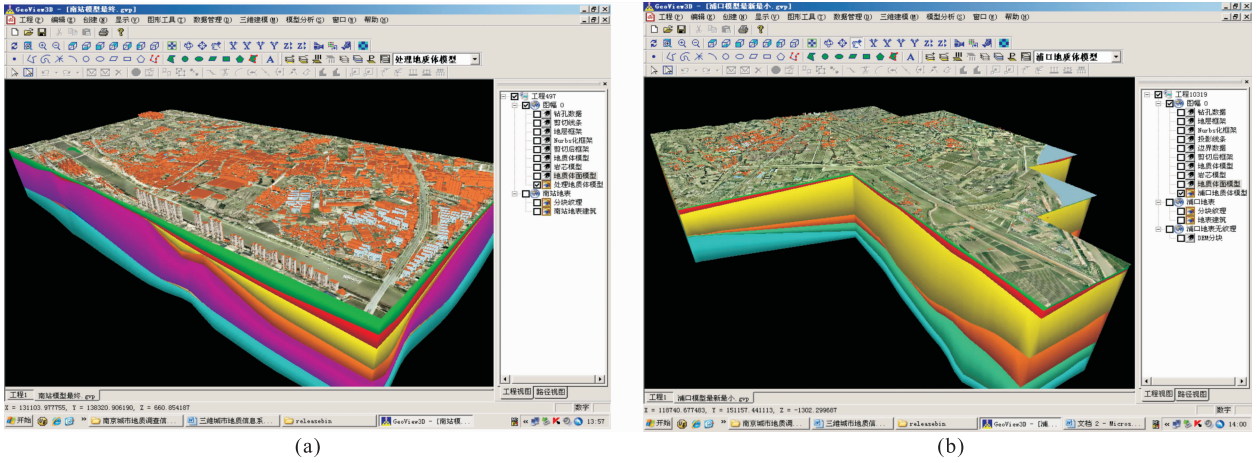


图 7 南京城市地质信息系统应用示例

Fig. 7 Application example of Nanjing city geological information system

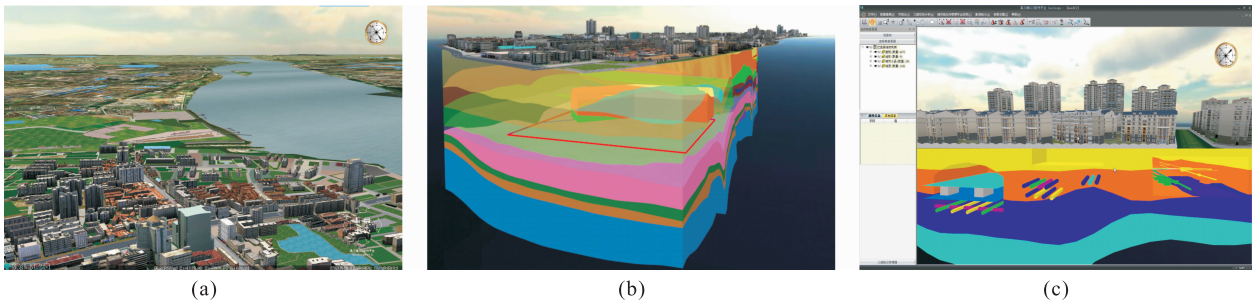


图 8 武汉城市规划信息系统实际运行效果

Fig. 8 Some results from Wuhan city planning information system

a. 大范围三维数据调度情况; b. 地上一体化环境中的隧道开挖分析效果, 采用了半透明的显示方式展现了隧道的分布情况; c. 地上一体化剖切分析的结果, 其中包含地上地下建筑、管线、地质体和道路等多类三维目标对象

应用服务器和若干个客户端;数据库服务器与应用服务器通过千兆交换机相连,客户端通过千兆网络与服务器建立连接.数据库应用模式下每个客户端的三维实时可视化应用效率基本都稳定在每秒 25 帧左右的流畅效果,与一般文件系统的效率基本相当.图 8 是系统实际运行的状况和空间分析结果.

4 结论

由于表达地上地下的三维空间数据不仅具有结构复杂、类型繁多、数据量庞大等特点,而且三维模型数据具有空间上随机分布、个体对象的差异性以及多层次细节表达的特性,因此对于大规模地上地下三维空间数据的一体化组织管理与高效调度提出了挑战.本文提出了一种兼顾空间关系与语义关系的地上一体化的三维空间数据库模型,进行了相应的概念模型、逻辑模型和物理模型设计,其目标是

实现数据模型、数据结构和数据存储与管理的一体化.针对复杂地质体的特点,给出了多尺度地下空间目标概念模型和多层次三维空间索引机制.该模型系统支持文件系统与数据库管理系统及其并行管理系统等多种存储环境,为三维实时可视化与空间分析等应用提供高效数据支持.用南京市和武汉市三维数字城市示范区地上下模型数据进行了应用试验分析,说明了该模型的可行性.

References

He, Z. W., 2009. Bulk construction algorithm of clustered sorting generics 3DR-tree. *Geography and Geo-information Science*, 25(3): 12-15 (in Chinese with English abstract).

Oracle, 2009. Information management with Oracle database 11g. <http://www.oracle.com/us/products/database/options/spatial/039947.pdf>

Oracle, 2010. Oracle database new features guide 11g release

- 2 (11. 2). http://download.oracle.com/docs/cd/E11882_01/server.112/e17128.pdf.
- Sen, M., Duffy, T., 2005. GeoSciML: development of a generic geoscience markup language. *Computers and Geosciences*, 31(9): 1095 – 1103. doi: 10. 1016/j. cageo. 2004. 12. 003
- Wu, X. C., 2009. Spatial database. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, K., Yun, X. L., Liu, X. G., et al., 2010. A 3D spatial data model based on rule base. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(3): 369 – 374 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. P., Hao, M., Tian, J. M., et al., 2009. Vector database establishment scheme based on map GIS workflow. *Science of Surveying and Mapping*, 34(3): 217 – 218, 136 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., 2004. A survey of three dimensional GIS technologies. *Geomatics World*, 2(3): 8 – 12 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., Gong, J., Zhang, Y. T., 2007. An efficient 3D R-tree spatial index method for virtual geographic environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(3): 217 – 224. doi: 10. 1016/j. isprsjprs. 2007. 05. 007
- Zlatanova, S., 2006. 3D geometries in spatial DBMS. In: Abdul-Rahman, A., Zlatanova, S., Coors, V., eds., *Innovations in 3D geoinformation systems*. Springer, Berlin, 1–14.
- Zlatanova, S., Stoter, J., 2006. The role of DBMS in the new generation GIS architecture. In: Rana, S., Sharma, J., eds., *Frontiers of geographic information technology*. Springer, Berlin, 155–180.

附中文参考文献

- 何珍文, 2009. 泛型聚类排序 3DR 树批量构建算法. *地理与地理信息科学*, 25(3): 12–15.
- 吴信才, 2009. 空间数据库. 北京: 科学出版社.
- 郑坤, 贡新莉, 刘修国, 等, 2010. 基于规则库的三维空间数据模型. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(3): 369 – 374.
- 周顺平, 郝苗, 田俊明, 等, 2009. 基于 MAPGIS 工作流的矢量数据库建库方案. *测绘科学*, 34(3): 217–218, 136.
- 朱庆, 2004. 三维地理信息系统技术综述. *地理信息世界*, 2(3): 8–12.