

地下工程数字化的概念及其初步应用

李晓军, 朱合华, 解福奇

(同济大学 地下建筑与工程系岩土工程重点实验室, 上海 200092)

摘要: 地下工程数字化是数字地球发展战略的一部分, 是当前地下工程研究中的一个重要研究方向。在总结三维 GIS、数字地层、三维地层可视化、地下工程虚拟现实系统等相关概念及研究的基础上, 给出地下工程数字化的明确定义, 即地下工程数字化就是以数字地层为依托, 以信息化手段对地下工程建设过程中的勘察、设计、施工、监测等数据进行集中高效地管理, 为地下工程的建设、管理、运营、维护与防灾提供信息共享和分析平台, 最终实现一个地下工程全生命周期的数字化博物馆。地下工程数字化平台的系统体系应当由数据层、建模层、表现层、分析层、应用层等 5 个层次组成, 并且应当采用组件式的软件开发方法进行开发。最后给出地下工程数字化在实际工程中的初步应用实例, 并对地下工程数字化的进一步研究和发展进行探讨。

关键词: 地下工程; 地下工程数字化; 三维 GIS; 三维地层可视化; 三维地层信息系统; 数字地层

中图分类号: P 208

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)10 - 1975 - 06

CONCEPT OF DIGITALIZATION OF UNDERGROUND ENGINEERING AND ITS PRELIMINARY APPLICATION

LI Xiaojun, ZHU Hehua, XIE Fuqi

(*Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Digitalization of underground engineering is part of the development strategy of digital earth, and it is also one of the main new developing fields in the research of underground engineering. This paper first examines the concept and research of the terms such as 3D GIS, digital stratum, 3D strata visualization, and virtual reality of underground engineering. Then the concept of digitalization of underground engineering is clearly defined, that is, based on digital stratum and the technology of informatization, digitalization of underground engineering provides an integrated and effective way for the data management of underground investigation, design, construction, monitoring etc. in the construction process, and an information sharing and analytical platform for the building, management, running, maintenance and disaster prevention of underground engineering. The objective of digitalization of underground engineering is to build a digital museum of underground engineering for all life cycle. According to the concept, a system architecture of digitalization of underground engineering is then put forward. The system architecture is comprised of five levels, which are data layer, modeling layer, representation layer, analysis layer and application layer, and functionality of each layer is also described. It is also proposed that the software development of each layer should be implemented by component technology. Finally, some preliminary application examples of digitalization of underground engineering are put forward, and some research trends in the

收稿日期: 2005 - 08 - 20; **修回日期:** 2005 - 11 - 11

基金项目: 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目(2002 - 393); 上海市重点学科(岩土工程)资助项目(081401)

作者简介: 李晓军(1975 -), 男, 博士, 1995年毕业于淮南矿业学院矿山建筑工程专业, 现任讲师, 主要从事地下工程数字化与信息化、岩土与地下结构应用软件开发等方面的教学与研究工作。E-mail: xiaojli@online.sh.cn

future are discussed, too.

Key words: underground engineering; digitalization of underground engineering; 3D GIS; 3D strata visualization; 3D strata information system; digital strata

1 引言

1998年1月31日,美国前副总统戈尔(Al. Gore)在加利福尼亚科学中心的OGC(open GIS consortium)会议上发表了题为“认识21世纪我们这颗地球——数字地球”(The digital earth: understanding our planet in the 21st century)的演说^[1],首次提出了数字地球这个通俗易懂的概念,它勾绘出了信息时代人类在地球上生存、工作、学习和生活的时代特征。数字地球的提出引起了各国政府的高度重视,更引起了学术界研究上的一个热潮,不少学者根据自己的研究领域先后提出了数字地层^[2, 3]、数字城市^[4]、数字矿山^[5, 6]等概念。

在地下工程的建设过程中,由于地质环境的隐蔽性与复杂多变性、施工过程中灾害事故的突发性以及对环境影响的控制难度,地下工程施工与管理的难度就必然有别于地面工程,而对地下工程大量复杂信息的了解和掌握将有助于这些难题的解决。因此地下工程的建设,特别是重大的地下工程建设,其数字化问题显得更为重要和迫切。

然而纵观国内外研究,对地下工程数字化的概念并没有一个明确的定义,它与三维GIS^[6~8]、三维地层可视化^[6, 9~11]、三维地层信息系统^[3, 10~13]、地下工程虚拟现实系统^[9, 14]等概念之间的联系与区别也并不是十分明确,因而造成了地下工程数字化的研究工作很不全面,也容易导致低水平的重复研究。本文首先在总结他人研究成果的基础上,给出了地下工程数字化的概念,然后论述了地下工程数字化平台的体系与开发过程,最后结合作者对大型地下工程的数字化研究给出了初步应用实例,并对地下工程数字化的未来发展趋势进行了展望和分析。

2 地下工程数字化的概念

2.1 地下工程信息特点

在地下工程活动中,地下工程信息具有如下的特点:(1)地下工程数据是真三维的,现有的GIS软件包处理二维、2.5维数据的能力和性能已被广泛

认可,但是对真三维的表达和处理还在不断的研究;(2)地下工程信息与时间相关,随着时间的变化信息在不断变化,例如施工过程、长期变形等因素;(3)地下工程信息量大,类型复杂,并且是多源异构的,例如勘察资料、设计信息、施工过程、监测数据等等;(4)地下工程的地层数据源在工程活动前期非常有限,但又必须对复杂地质现象的进行判断和分析,随着施工过程的进行,数据源又在不断增加;(5)地下工程的长期运营和管理、防灾减灾都依赖于对前期数据的掌握^[6, 9]。

2.2 地下工程数字化相关概念

地下工程数字化是随着三维GIS、地质体建模、可视化与虚拟现实以及工程信息管理系统等研究的开展而逐渐发展起来的一项综合性研究体系,它与三维GIS、三维地层可视化、三维地层信息系统、地下工程虚拟现实系统既有所联系,又有所区别。

三维GIS一直是GIS理论与应用研究中的热点问题之一,虽然关于三维GIS的概念和内涵尚未达成共识,但普遍观点认为,三维GIS应能够实现三维现象相关的信息的建模、表达、管理、操作、分析以及决策支持等^[6~8]。在三维GIS基础上建立起来的数字地层、三维地层信息系统等概念,其主要思想是利用三维GIS技术将原始地层信息和施工扰动地层信息用数字化的方法直观地展现出来,并对庞杂的工程资料进行综合动态管理,提高数据可视化程度,进一步利用人工智能专家系统、数值分析系统对数据进一步加工利用,实现工程智能决策,从而体现出工程信息的价值^[3, 9, 12]。

地质体建模近年来愈来愈受到城市管理、规划、建设和施工单位的重视。通过三维地质建模,可以将地质体及其形态构造直观形象地展现在工程师面前,能够最大限度地增强地质分析的直观性和准确性,使之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^[13]。三维地质建模的数据模型可以分为面模型、体模型以及混合模型三大类。面模型数据结构侧重于三维空间表面的表示,如:地形表面、地质层面等,通过表面表示形成三维空间目标表示,其优点是便于

显示和数据更新,不足之处是空间分析难以进行,代表性的有叠层 TIN 模型、多层 DEM 模型、B-Rep(boundary representation)模型等;体模型数据结构侧重于三维空间体的表示,如管线、建筑物等,通过对体的描述实现三维空间目标表示,其优点是便于空间操作和分析,但存储空间占用较大,计算速度也较慢,代表性的有 CSG(construction solid geometry)模型、四面体模型(TEN)、三棱柱模型(TP)以及广义三棱柱模型(GTP)等;混合数据模型是指由以上两种数据模型组成的混合模型,它兼具两种模型的优点,是目前地质建模研究的一个重要方向^[8, 13, 14]。

三维地层可视化是利用计算机图形学与科学计算可视化的技术与方法,来表达地层的时空数据及其关系、时空分析模型与结果,同时提供模拟和视觉交互手段。虽然图形可视化已经是一项比较成熟的计算机技术,但是由于三维地层可视化的研究总是和具体的数据模型研究相结合,所以依靠三维绘图软件(例如 AutoCAD 等)进行三维地层可视化的研究存在着很大的难度,因而选择合适的三维图形包(如: OpenGL, Java3D, VTK, IDL 等),结合编程开发语言进行自主开发是目前三维地层可视化的一种主要方法^[6, 9, 10, 11, 13]。

虚拟现实(virtual reality)是用户与计算机之间的一种更为理想化的人机界面形式,虚拟现实系统具有 3 个重要特征:临境性,交互性,想象性。它利用计算机生成一个模拟环境(一般是指用计算机生成的有立体感的图形),实现人机交互、互相交流的操作环境及身临其境的感觉,使人产生强烈的真实感、参与感、操作感,从而更直观的认识了解事物。虚拟现实技术为地下工程提供了一种崭新且强有力的模拟工具,并且随着虚拟现实技术的不断成熟,在地下工程中也得到了越来越多的重视,但目前主要是利用虚拟现实模型语言 VRML 进行一些初步研究和探讨,基本上处于一个起步阶段^[6, 9, 14~16]。

2.3 地下工程数字化

综上所述,数字地层、三维地层信息系统是在地质体建模、三维GIS基础上发展起来的,三维地层可视化、地下工程虚拟现实是地下工程数字化的外在表现形式,它们共同为地下工程数字化奠定了理论和应用基础。因此作者认为,地下工程数字化就是以数字地层为依托,以信息化手段对地下工程建设过程中的勘察、设计、施工、监测等数据进行

集中高效的管理,为地下工程的建设、管理、运营、维护与防灾提供信息共享和分析平台,最终实现一个地下工程全生命周期的数字化博物馆。

3 地下工程数字化平台的系统体系与开发

3.1 系统体系

地下工程数字化平台的系统体系分为 5 个层次,分别是:数据层、建模层、表现层、分析层与应用层,如图 1 所示。

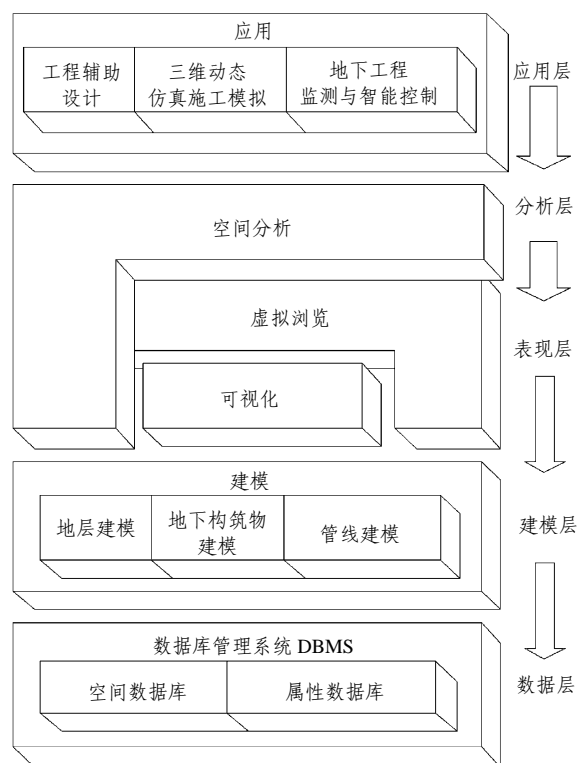


图 1 地下工程数字化平台的系统体系

Fig.1 System architecture of digitalization of underground engineering platform

数据层主要利用数据库技术来实现地下工程空间数据与属性数据的无缝整合,它是整个平台的数据提供者,其目标是建立一个标准、规范、开放的数据库及数据访问接口。

建模层包含地层建模、地下构筑物建模和地下管线建模,这是系统中最基本也是最重要的功能,主要包括三维地层模型建立的相关理论基础、构建方法与算法、产生可视化模型图件等几个部分。

表现层由可视化与虚拟现实两部分组成。可视化提供图形的显示与操作,为三维建模和分析提供

视觉表现，可以对重要局部区域进行放缩和旋转，以及纹理、光照、渲染等后期图像处理功能，以生成现实世界中栩栩如生的地下空间。虚拟现实模块提供第一人称式的地下漫游、漫游路线周边地物状态查询等。

分析层是地下工程数字化平台区别于其他系统的一个最主要的功能。它利用三维 GIS 空间分析手段直接在三维空间中进行空间操作与分析，并对空间对象进行三维表达与管理。利用空间分析功能不仅可以查询数据库系统中的各种信息，而且可以通过这些信息来发掘事物之间的内存规律和特征。

应用层是地下工程数字化平台的价值和生命力的重要体现，它将已有的数据模型、可视化、虚拟浏览及空间分析功能运用到实际的专业领域中，以解决实际问题，例如可以在数字化平台上开展地下工程辅助设计、三维动态施工仿真模拟、地下工程监测与智能控制以及地下工程防灾减灾等实际问题的研究。

3.2 平台的开发

由于地下工程数字化平台在数据模型、空间分析、可视化、虚拟浏览以及工程应用等方面相互依赖，所以在三维绘图软件或者GIS软件中直接进行

二次开发存在着很大的难度，利用编程开发语言以及可视化、GIS、虚拟现实二次开发工具从底层进行开发虽然周期较长，但是在功能上可以完全满足需要，且有很好的扩展性。开发工具一般选用Visual C++，可视化可选用OpenGL，VTK，OpenInventor，OpenCASCADE等工具，GIS可选用ArcGIS，MapGIS等，虚拟现实可选用VRML语言或Multigen Creator等二次开发工具。

地下工程数字化平台的开发应当采用组件化软件开发技术，这不仅因为组件化是当今软件技术的潮流，而且它改变了以往封闭、复杂、难以维护的软件开发模式。软件采用组件式开发技术(COM/CORBA技术)后，可将一个功能模块划分为多个组件，每个组件完成不同的功能。组件如同一堆各式各样的积木，分别实现不同的功能，根据需要把实现各种功能的“积木”搭建起来，就构成基础平台和应用系统。组件软件的可编程和可重用的特点在提供有效维护系统的同时，也为最终用户提供了方便的二次开发手段。此外，组件技术在很大程度上可推动系统平台集成化，同时也很好地适应了网络技术的发展。

地下工程数字化平台的组件设计见图 2。

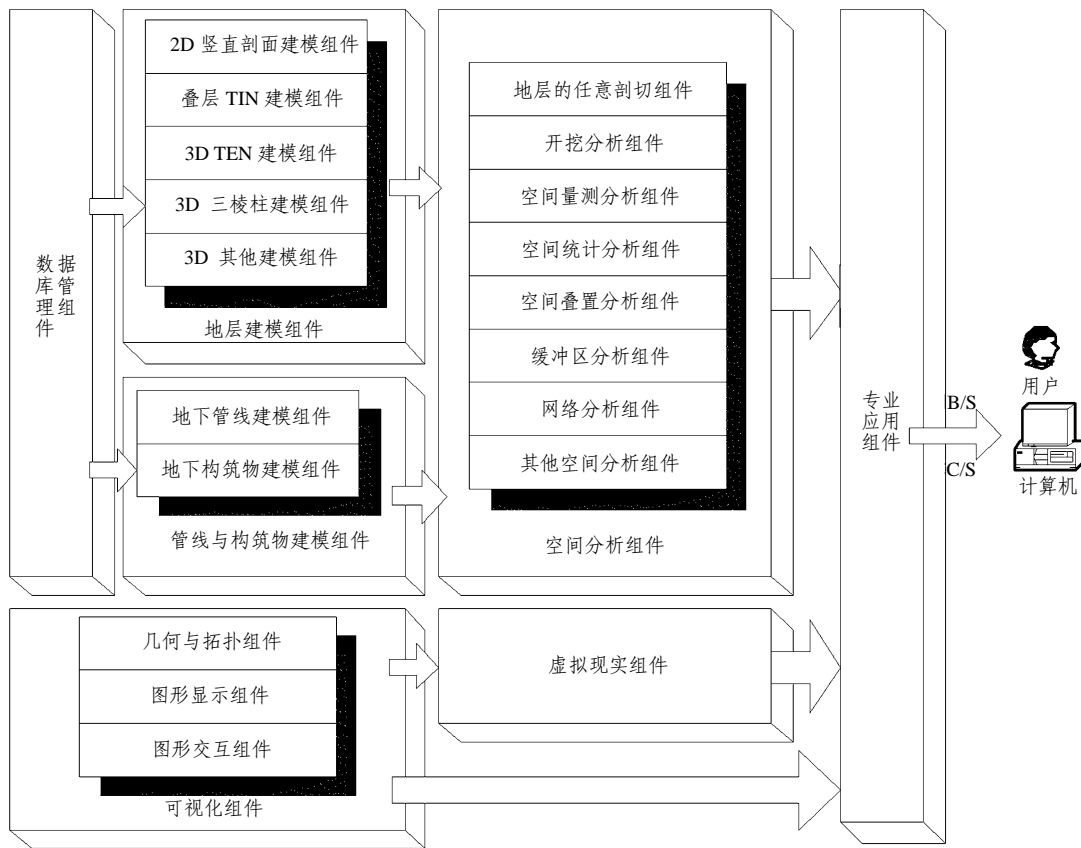


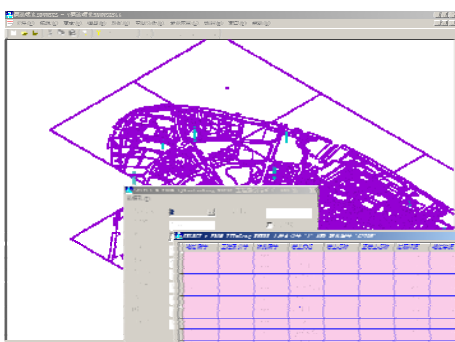
图 2 地下工程数字化平台组件设计

Fig.2 Component design of digitalization of underground engineering platform

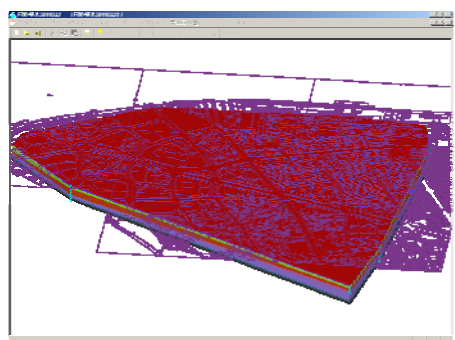
4 地下工程数字化的初步应用

根据上述提出的地下工程数字化的概念和系统体系, 本文采用Microsoft Visual C++开发语言、Microsoft Access数据库管理系统及OpenCASCADE图形软件工具包, 采用组件化技术进行开发, 初步实现了一个地下工程数字化平台——同济曙光地下工程数字化平台^[17~19], 并且在上海市小陆家嘴地区数字地层、某隧道数字化工程中进行了初步的应用。

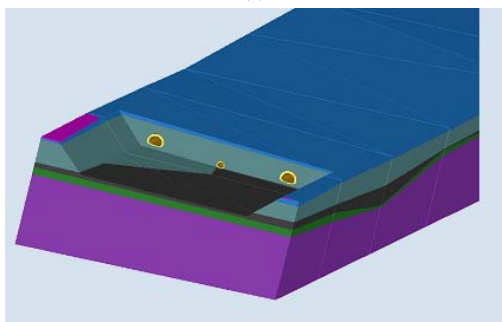
图 3 中依次给出的是上海市小陆家嘴地区数字地层建立时的电子地图、三维视图及数字地层钻孔数据的输入与查询界面; 建立好的该地区数字地层三维鸟瞰图; 某分离式公路隧道(中间的小隧道为服务隧道)的三维地层及入口的三维掀盖视图; 该隧道沿轴线方向上的任意位置、任意方向的地质剖面图。



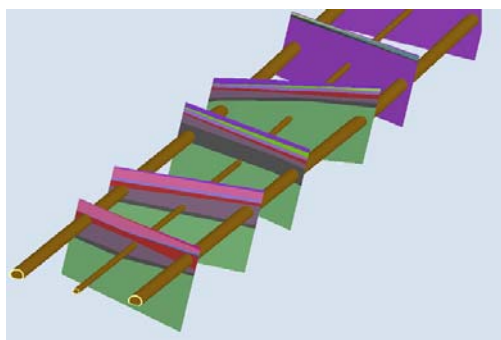
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3 数字地下空间应用实例

Fig.3 Application examples of digitalization of underground engineering

5 结论与展望

地下工程数字化是数字地球发展战略的一部分, 也是地下工程建设与管理发展的必然趋势, 它紧密结合工程实际, 具有实用性、通用性以及可扩展性等显著特点, 可运用于地下工程的勘察、设计、施工、运营管理、防灾减灾等诸多方面, 具有广阔的发展和前景。

本文在总结相关概念及相关研究的基础上, 给出了地下工程数字化的明确概念, 同时给出了其系统结构与开发方法, 并在实际工程中进行了初步应用, 为地下工程数字化的进一步研究和发展提供了宝贵的经验。

当前在地下工程数字化平台的地质建模研究方面已经取得了很大的进展, 但是在地下构筑物建模的研究、空间分析与虚拟现实系统的结合等方面的还有许多内容有待研究。此外, 建立地下工程数字化平台本身并不是目的, 目的是为地下工程的建设与管理提供更好的信息服务, 更好地服务于人类生活, 而在此方面的研究工作才刚刚起步。

参考文献(References):

[1] Gore A. The digital earth: understanding our planet in the 21st century[OL]. <http://www.digitalearth.gov/VP19980131.html>. 1998.

[2] 朱合华. 从数字地球到数字地层——岩土工程发展新思维[J]. 岩土工程界, 1998, 1(12): 15 - 17.(Zhu Hehua. From digital earth to digital stratum—a new idea in the development of geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineering World, 1998, 1(12): 15 - 17.(in Chinese))

[3] 朱合华, 叶为民, 张先林. 三维地层信息管理系统设计[J]. 岩土工程师, 2002, 14(3): 25 - 29.(Zhu Hehua, Ye Weimin, Zhang Xianlin.

- 3D digital ground information management system design[J]. Geotechnical Engineer, 2002, 14(3): 25 - 29.(in Chinese)
- [4] 顾朝林, 李满春. “数字城市”研究漫谈[J]. 城市规划汇刊, 1999, (5): 25 - 27, 58.(Gu Chaolin, Li Manchun. Discussion on the study of digital city[J]. Urban Planning Forum, 1999, (5): 25 - 27, 58.(in Chinese))
- [5] 吴立新, 殷作如, 邓智毅, 等. 论 21 世纪的矿山——数字矿山[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 337 - 342.(Wu Lixin, Yin Zuoru, Deng Zhiyi, et al. Research on the mine in the 21st century: digital mine[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 337 - 342.(in Chinese))
- [6] 李梅, 毛善君. 数字矿山中 3D GIS 关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(8): 44 - 48.(Li Mei, Mao Shanjun. Research on key technologies of 3D GIS for digital mine[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(8): 44 - 48.(in Chinese))
- [7] 徐苏维, 王军见, 盛业华. 3D/4D GIS/TGIS 现状研究及其发展动态[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(3): 58 - 62.(Xu Suwei, Wang Junjian, Sheng Yehua. Review on the status of 3D GIS/4D GIS/TGIS and development trends[J]. Computer Engineering and Application, 2005, 41(3): 58 - 62.(in Chinese))
- [8] 李青元, 林宗坚, 李成明. 真三维 GIS 技术研究的现状与发展[J]. 测绘科学, 2000, 25(2): 47 - 51.(Li Qingyuan, Lin Zongjian, Li Chengming. Research on status and trends of real 3D GIS technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2000, 25(2): 47 - 51.(in Chinese))
- [9] 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]. Journal of Sun Yat-sen(Zhongshan) University(Natural Science), 2004, 43(4): 28 - 32.(in Chinese))
- [10] 孙国庆, 施木俊, 雷永红, 等. 三维工程地质模型与可视化研究[J]. 工程勘察, 2001, (5): 8 - 10.(Sun Guoqing, Shi Mujun, Lei Yonghong, et al. Study on 3D engineering geosciences modeling and visualization[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2001, (5): 8 - 10.(in Chinese))
- [11] 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.(in Chinese))
- [12] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统与有限元方法集成研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3695 - 3699.(Wang Chunxiang, Bai Shiwei. Study on integration of 3D strata information system and FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3695 - 3699.(in Chinese))
- [13] 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 - 43.(Zhu Liangfeng, Wu Xincan, Liu Xiuguo, et al. Introduction and implementation of virtual borehole in the construction of urban 3D strata model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(6): 26 - 43.(in Chinese))
- [14] 彭曙光. 虚拟现实技术在地下工程设计中的应用[J]. 山西建筑, 2004, 30(22): 225 - 226.(Peng shuguang. The application of virtual reality technology to underground engineering[J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(22): 225 - 226.(in Chinese))
- [15] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism(GTP) model for a 3D geosciences modeling system[J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(4): 405 - 418.
- [16] 张海林, 王明生, 康拥政. 基于组件技术的行业 3D GIS 的研究与设计[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004, 17(4): 79 - 82.(Zhang Hailin, Wang Mingsheng, Kang Yongzheng. The study and design on 3D GIS using COM technology[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2004, 17(4): 79 - 82.(in Chinese))
- [17] 吴江斌. 基于 Delaunay 构网的城市三维地层信息系统核心技术研究与应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2003.(Wu Jianbin. Study of key techniques of 3D strata information system based on Delaunay triangulation[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2003.(in Chinese))
- [18] 郑国平. 城市地下空间信息系统设计及关键技术研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.(Zheng Guoping. Research on design and key development technique of urban underground space information system[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese))
- [19] 叶勇庚. 三维数字地层建模及其在隧道工程中的应用[硕士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2005.(Ye Yonggeng. Modeling of 3D digital strata and its application in underground engineering[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2005.(in Chinese))