

文章编号:1673-0836(2006)01-0005-05

城市地下空间信息化研究综述<sup>\*</sup>张 芳<sup>2</sup>, 朱合华<sup>1,2</sup>, 吴江斌<sup>3</sup>

(1. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 上海华东建筑设计院, 上海 200000)

**摘 要:** 地下空间建设面临着向深部发展、深部与浅部一体化设计、人文环境等新问题。因此, 建立完备准确地建设地下空间信息对于规划、设计、施工等人类工程活动是至关重要的。文章在论述地下空间信息化建设的国内外研究现状和必要性基础上, 给出地下空间信息研究范围的同时, 讨论了地层数字化、地下管线信息化、地铁信息化和其它地下构筑物的信息化建设的含义和具体研究内容, 对土木工程中逐步实现信息化建设有一定指导意义。

**关键词:** 地下空间; 信息化; 地层数字化**中图分类号:** TU9**文献标识码:** A

## Underground Space Informatization of Civil Engineering

ZHANG Fang<sup>2</sup>, ZHU He-hua<sup>1,2</sup>, WU Jiang-bin<sup>3</sup>(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. East China Design & Research Institute, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** The development of underground construction brings the new problems such as deep construction development, increase of construction difficulty, deep-shallow department integrated design, humanistic environments, etc. So, to build a complete and accurate underground space information system is essential to the activities of planning, design, constructing etc. In this paper, based on reviewing the development of underground construction both at home and abroad, the necessity of information construction of underground space is described. Then the research scope of underground space information is defined, and the research contents of stratum digitization, the informatization of underground pipeline, the informatization of the subway and construction of other underground structures are discussed. It will offer guidance for the information construction of the civil engineering.

**Keywords:** underground space; informatization; stratum digitization

## 1 引言

地下空间信息包括实体定位信息、非定位信息以及时间尺度信息, 其中实体定位信息包括地层信息(含地质构造)、地下构筑物(地下管线、地铁等)信息和地下水等自然信息, 这类信息以地理坐标和拓扑关系为描述主线; 非定位信息包括地层环境信

息和工程地质信息两部分, 地层环境信息指的是有关地层的属性、状态的描述信息如污染情况、沉降情况、历史开挖情况等, 而工程地质信息是指地层区域分布情况、断层走向和产状等信息; 时间尺度信息是记录定位信息和非定位信息的时间尺度信息。地下空间信息是城市规划建设的基础, 尤其当地下建筑越来越多, 位置要求越来越精确, 地

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2005-07-06(修改稿)

作者简介: 张 芳(1976-), 女, 辽宁大连人, 在读博士, 主要研究基于 GIS 的数字地下空间相关技术。E-mail: zhangf76@sohu.com

下空间信息是否完备准确,对于规划、设计、施工都至关重要;而相对于地上资料,当前地下资料在系统性、可靠性、现势性方面都相对较差,因此发展地下空间信息化并施行信息化管理是城市建设的迫切需要。实现地下空间信息处理的量化、可视化、实时更新与资源共享,这是城市建设部门、管理部门、服务部门实现现代化管理的必备条件。

## 2 城市地层数字化

数字地层是指利用现代的计算机技术,将原始地层信息(由地壳运动和周围环境引起的)和施工扰动地层信息(由人类工程活动引起的),用数字化的方法直观地展现出来。数字地层是数字地球的一个部分,主要描述地球表面之下的、人类工程活动所及的范围<sup>[1]</sup>。

### 2.1 城市地层数字化必要性

建立数字城市是实现数字地球的一个具体步骤,也是建设数字地球的基础和关键。对于城市来说,地层是城市土木工程的载体,特别是进入21世纪后,地铁、地下街等城市地下空间的开发与利用,使人们越来越关注城市地层的特性。建立城市数字地层成为土木工程界新的研究课题。

众所周知,土木工程活动与人类生活关系密切,房屋兴建、市政建设、交通运输、隧道桥梁以及环境规划等无一不是土木工程的范围。与土木工程活动十分密切的环境地层是经历了漫长地质历史演变生成的地质体,具有不连续性、非均质性、各向异性、遇水软化特性和蠕变时效特征等;此外,地层荷载受地壳运动和周围环境的作用也呈明显的不确定性。地层环境的复杂性和不可见性给土木工程设计与施工带来巨大的困难,此其一。其二是当今土木工程规模日趋庞大,工程内容日益复杂,以地下空间开发为例,即包括传统意义上的勘察、设计、施工过程,又伴随着大深度开发、大深度与已有浅深度设施的一体化设计、综合防灾能力的提高、环境规划等一系列新课题,已非一般设计人员所能胜任;其三由工程活动诱发的诸如边坡失稳、地表沉陷、岩爆、瓦斯突出、涌水等灾害频发。综上所述,利用先进的计算机技术,结合土木工程特点,将原始地层信息(由地壳运动和周围环境引起的)和施工扰动地层信息(由人类工程活动引起的),用数字化的方法直观地展现出来,也就是建立城市数字地层工作是非常迫切而有意义的。

### 2.2 城市地层数字化进程

从90年代初期,受油田、地质矿山等行业信息化的推动,城市地层信息的探求出现了世界范围的新高潮。其主要成果集中在两个方面,一是地质信息的数据库管理的二维应用系统方面,如日本大阪地区历时10余年建立的大阪湾地层数据库信息系统,录入钻孔数达到30000个。荷兰阿姆斯特丹市于80年代末到90年代初建成的200平方公里范围内的4万多份钻孔记录、静力触探、地下水资料库。台北市80年代起开始建立“大地工程资料库”(GEDBC)。香港从1991年起GCO的规划处就一直在开发地学数据库,对辖区的地质地层数据进行存储、综合解释和展示。武汉市勘测设计研究院于1997年建成的“武汉市工程勘察信息系统”;二是三维地质建模系统方面,国外在该领域开展的研究比较早,已经出现了一些成熟的商业化软件。如法国T-surf公司研制的GOCAD(Geological Object Computer Aided Design)、美国的GDI(Dynamic Graphics Inc)公司开发的EarthVision6、英国的DataMine&Guiole、澳大利亚Maptek公司的Vulcan、加拿大阿波罗科技集团的Lynx/Microlyx、美国Mirrison-knudson公司的地质软件包EACKES等等。

广义上地层数字化包括地学模拟和地下构筑物的数字化再现两大方面的内容。这里所说的地学模拟包括地层模拟、地下水模拟等一切地下空间自然物理实体及现象的模拟。三维地学模拟<sup>[2]</sup>(3D Geosciences Modelling, 3D GM)是加拿大工程地质学家Simon Houlding于1994年提出的,主要利用地质勘探与工程设计数据模拟地质体及地下开挖三维建模过程。地下构筑物的数字化再现,就是利用已有工程勘探建设资料,将地铁、地下街、地下管线等构筑物信息在计算机里实现几何建模并可视化显示、分析的过程。现有的研究主要集中在对地下空间信息如地质、地下管线等的单独模拟研究上,并没有把地下空间信息作为一个整体来加以研究。三维地学模拟研究主要集中在三维地学数据模型(构模技术)、空间数据存储技术、海量数据存储技术、三维可视化技术、空间分析技术、四维数据模型等方面的研究上,由于前三项技术直接影响了系统整体运行效率和发展模式,国内外很多学者在这些方面展开了广泛深入的研究<sup>[3-15]</sup>,由于没有一种方法可以较好的全面解释三维复杂地质现象,形成了百家争鸣的局面。

近年来,随着GIS技术的不断成熟和广泛应用,国内很多研究学者开始把GIS技术应用于土木

工程中,其应用已深入到基础地质分析、地学断面研究、勘查图件辅助编绘、三维沉积盆地分析、三维冰川沉积分析、沙漠表面特征研究、地下水动力学模拟、石油化探数据分析、矿产资源综合预测、环境管理决策、地震灾害评价和风灾水灾监测等多个地学领域(姜作勤,1992)。基础软件开发方面,受GIS技术发展影响,其主要成果体现在数据信息管理、地质剖面图管理和可视化显示三方面。到90年代中期,我国已经开发出了一批具有国际先进水平的软件,如中国地质大学的MapGIS和武汉测绘科技大学的GeoStar等。由于GIS尚缺乏三维及多维数据的管理和空间分析处理能力,迄今为止,还没有一个成熟的完整的能集数据库管理、查询、可视化显示、辅助决策为一体的三维GIS系统<sup>[16]</sup>。面对地质工程信息的多源化、多维化、多主题化及海量数据的特点,国内有学者相继提出了三维地质(地学)构模(建模、模拟)系统<sup>[17-20]</sup>,三维地层信息管理系统<sup>[21-22]</sup>,勘察地质信息系统<sup>[23]</sup>,三维地层信息系统<sup>[24-27]</sup>的概念并建立了系统框架、实现了基础系统的设计。

### 3 地下管线信息化

地下管线是城市赖以生存和发展的物质基础,它含概了电力电缆、通信电缆(光缆)、给水管线、工业管道、燃气管线、供热管线、排水管线(雨水、污水)、电车电缆以及其它特殊管线,被称为城市的“生命线”。地下管线数字化是城市数字化重要组成部分,是信息港建设最基本的物质基础。建立地下管线信息系统一方面可以实现传统手工处理方式向现代化信息管理转型,以保证数据的实时更新、有效管理,避免重复收集数据信息;二是可为市政建设提供规划、设计、决策服务;三是可为应对突发事件提供支撑。

#### 3.1 地下管线信息化迫切性

城市中大量管线深埋在地下,它与土木工程具有同样的不可见特性,多年来种种地下管线像蜘蛛网似的遍布地下,广州部分道路下部并排敷设的市政管线多达50余根、上下重叠多达八层<sup>[28]</sup>,但由于多方面的原因,我国城市现有地下各类专业管线的资料残缺不全,且有关资料精度不高或与现状不符,造成在建设施工中时常发生挖断或挖坏地下管线,造成停气、停水、停暖、通信中断、污水四溢等严重事故<sup>[29]</sup>。众多的管理部门形成反复开挖路面的“拉链路现象”。地下管线的管理一直滞后于城市

建设发展,这不仅给日常管理维护、规划设计、建设施工带来诸多不便,在应对综合防灾能力(地震、水灾、突发事件等)方面更显得无能为力。如何利用先进的计算机、图形学、数据库等技术,建立与完善城市地下管线信息系统,以实现高效管理、规划、设计地下各类管线,已成为当前一个紧迫的研究课题。

#### 3.2 地下管线信息化建设现状

综合国内外研究成果,地下管线信息化建设大致经历了如下四个阶段:

(1) 基于数据库管理系统的地下管线信息系统的建立;这是早期的设计思路,可以利用数据库管理系统,进行管线数据的录入、存储管理,可以实现基于数据库的查询、统计等基本功能,但只能记录二维数据信息(定位信息、属性信息),无法记录图形信息和三维信息,也就不能对空间数据进行分析 and 可视化的直观表现;

(2) 数据库与图形平台的弱联接关系:这种模式把图形平台(如AutoCAD)作为成图系统,把数据库管理系统作为管理定位信息和属性信息的平台,它们各为一体彼此之间互不关联,虽然弥补了图形方面的不足,但因图形与数据之间缺乏有效的联系,无法自动利用图形信息和相关的定位信息和属性信息进行分析设计;

(3) 基于GIS的系统二次开发;这种开发方法在国内外被广泛地采用,如1987年北京市测绘设计研究院开始筹建的北京市地下管线信息系统(BUPNIS)是基于美国ESRI公司的ARC/INFO开发的,可以实现指定区域查询地下管线信息、查询管线点的属性信息、绘制管线的剖面图、空间信息的迭加处理与分析等功能。这种体系结构的最大好处是可以获得统一的运行环境和较高的运行性能,可以充分利用GIS的空间分析和统计功能,但是它要求作为宿主系统的GIS有强大的命令语言集或开放的API(应用程序接口)支持,开发出的系统功能将受宿主系统数据模型和数据结构的限制,特别是开发专业应用系统需慎重选振宿主系统。

(4) 基于GIS开发思想的底层开发,即建立图形系统和数据库管理系统之间的关联关系,目前通用的方法是图形用文件方式管理,属性信息和定位信息存放在关系型数据库中,图形与数据之间通过ID号建立联系。这种开发方法投资大、开发周期长、技术难度大,适合建立基础信息系统,不适合于建立单一性的应用系统。

我国自20世纪80年代末开始研究建立城市地下管线信息系统,是随着城市地理信息系统技术的广泛应用而逐渐发展起来的,好多城市、部门、企业都研制了具有不同功能特点的、适合不同应用背景的地下管线信息系统,并有从二维向三维发展的趋势<sup>[30]</sup>。如北京市测绘设计研究院在1987年提出建立地下管线信息系统(BUPNIS)设想。厦门市1995年开发完成厦门市地下管线管理系统;上海市于1997-1998年间研建了上海市地下管线数据库;南京市2000年完成采用MapInfo为宿主平台,以Oracle为后台数据库管理系统的地下管线信息系统建设;杭州市采用澳大利亚GENASYS公司的GENAMAPV5.2建成地下管线管理信息系统(HZUPMIS);台湾高雄市某开发区正在规划建设信息综合管道网络系统等等。

从全国的整体情况来看,地下管线信息化仍处于初期开发研制阶段。目前,国内尚无具有广泛推广价值的软件,已有的系统还有相当大的局限性,新系统的开发还有许多问题亟待解决<sup>[32]</sup>,且系统大多停留在二维管理基础上,不能生动地表现具有三维特征的客观实体,近来已有学者<sup>[33-34]</sup>尝试管线三维建模方面的研究。国内外一些研究者<sup>[35-36]</sup>普遍认为,利用地理信息系统技术建立城市管网信息系统是一条有效的途径。国际上将GIS应用于城市规划始于20世纪70年代初期,美国、新加坡、加拿大等许多国家都已将GIS技术应用到排污管道、石油管道等多个地下管网系统建设中,获得较好的经济效益。

## 4 以地铁为主的地下构筑物信息化

### 4.1 地铁信息化

地铁信息化包括设计规划信息化、施工监测信息化、工程资料管理信息化、生产运营信息化几大方面,从国内外研究成果来看,目前地铁信息化建设主要集中在施工和运营方面,在规划设计信息化方面研究的较少,但近来要求对地下空间进行立体规划设计的呼声越来越高,可以预见不久地下空间的立体规划将成为研究热点。

国内已有不少地铁采用分布式微机监控系统(BAS,也称EMCS)对地铁车站及区间隧道内隧道通风系统、电梯、照明系统、排污系统等进行全面的运行管理。如南京地铁采用清华同方股份有限公司的地下铁道工程BAS系统运行管理控制,实现了对机电设备的就地监控及在车站的站长室及控

制中心远程监控。广州地铁用Windchill技术搭建工程设计和工程管理电子平台,将大量异构数据进行统一处理和管理,使地铁设计合作单位能够同步得到最新工程信息。

虽然轨道信息化施工、管理、运营方面国内外已有大量研究,但地铁信息化建设是最近几年发展起来的,相关技术和经验尚在不断探索中,有关三维建模、可视化等研究处在萌芽阶段。同济大学的吴江斌采用 $2n$ 个离散点直接进行3维Delaunay四面体构网来得到三角形表示的侧面<sup>[34]</sup>。适于快速构模与显示,为三维地下管线、区间隧道的可视化建模提供了新的思路。

### 4.2 其它地下构筑物的信息化

与地下管线、地铁信息相比,地下停车场、地下街等信息化相关研究的比较少,但其信息化再现无疑是重要的,特别是在城市规划、施工建设、车辆导航等方面,都有十分重要的意义,有学者注意到了这些问题<sup>[34,38-39]</sup>。

## 5 结论

当地下空间建设面对已有资料记录不全、手工管理数据方式笨拙的旧问题带来的不断增加施工难度和建设向深部发展、深部与浅部一体化设计、人文环境等新问题不断出现的情况下,信息化建设被紧锣密鼓的提到日程上来。城市的发展推动着地下空间的信息化建设,计算机技术及相关领域应用技术的不断进步和完善,使得实现地下空间信息化成为可能。目前世界各国越来越关注土木工程中逐步实现信息化施工、信息化管理、信息化规划设计乃至一体化设计的信息化建设工作。

### 参考文献:

- [1] 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, (12): 15-17
- [2] Simon W H. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Springer Verlag, 1994
- [3] 朱合华, 郑国平, 吴江斌等. 基于钻孔信息的地层数据模型研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5): 535-539
- [4] 张海荣, 许友志. 基于TIN不连续地质体的三维构模及动态显示[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 142-145
- [5] 陈学习, 吴立新. 三维地学模拟研究现状及发展趋势[J]. 华北科技学院学报, 2003, 5(2): 28-32
- [6] 王铁, 王志宏, 魏春启. 复杂地质界面模型的建立方

- 法[J]. 阜新矿业学院学报, 1994, 13(2): 29-31
- [7] 侯恩科, 吴立新. 三维地学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
- [8] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋, 刘浩吾. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 55-59
- [9] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 陈健. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637-639
- [10] 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
- [11] 王笑海. 基于三维拓扑格网结构的 GIS 地层模型研究[PHD]. 博士学位论文. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999
- [12] 白世伟, 王笑海, 陈健等. 岩土工程的信息化与可视化[J]. 岩土工程界, 2001, 4(8): 16-17
- [13] Go Yonezawa, Tatsuya Nemoto. 3-D Geologic Modeling and Visualization of Faulted Structures: Theory and GIS Application. Proceeding of the Open GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy, 11 - 13 September 2002
- [14] Shinji Masumoto, Venkatesh Raghavan. Construction and visualization of three dimensional geologic modeling using GRASS GIS. Proceeding of the Open GIS - GRASS users Conference 2002 - Trento, Italy, 11 - 13 September 2002
- [15] Tatsuya Nemoto, Venkatesh Raghavan. Development of SISGeM - an online system for 3D geologic modeling. Proceeding of the Open GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy, 11 - 13 September 2002
- [16] 王纯祥. 三维地层信息系统及其力学分析功能研究[PHD][D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003
- [17] 牛文杰, 朱大培, 陈其明. 三维地质模型建模系统的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(16): 179-181
- [18] 何满潮, 刘斌, 徐能雄. 工程岩体三维可视化构模系统的开发[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 38-43
- [19] 郝海森, 吴立新. 基于强约束 Delaunay - TIN 的三维地学模拟与可视化[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 15-18
- [20] 胡金星, 吴立新, 高卫贞等. 三维地学模拟体视化技术的应用研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 345-349
- [21] 朱合华. 三维地层信息管理系统设计[J]. 岩土工程界, 2000, (1): 22-25
- [22] 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(3): 25-29
- [23] 郑国平, 杨震, 朱合华, 胡展飞. 工程勘察地质信息系统的设计与开发[J]. 工程地质计算机应用, 2003, (3): 1-7
- [24] 陈健. 三维地层信息系统的建模与分析研究[PHD][D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文, 2001
- [25] 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, 2002, 19(1): 23-26
- [26] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 614-617
- [27] 刘春. 城市三维地层信息系统的提出与思考[J]. 绍兴文理学院学报, 2004, 24(7): 85-89
- [28] 冯榕. 地下空间利用不足, 广州市六年内将建四个地下城. <http://house.sohu.com/newshtml/69476.html>
- [29] 曾文. 运用地理信息系统技术实现管线管理信息化. <http://www.mapgis.com.cn/about/qikan/3/015.htm>
- [30] 杜国明, 龚健雅, 熊汉江. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. 武汉大学学报, 2002, 5: 534-537
- [31] 王丹. 我国城市空间数据和 GIS 应用的现状与前景. <http://www.navchina.com/gps/w10.asp>
- [32] 于海龙, 邹时林. 城市地下管线信息系统的开发与应用[J]. 华东地质学院学报, 1998, 21(4): 364-371
- [33] 杜国明, 龚健雅等. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. 武汉大学学报, 2002, 27(5): 534-537
- [34] 吴江斌. 基于 Delaunay 构网的城市三维地层信息系统研究与应用[PHD][D]. 同济大学博士学位论文, 2003
- [35] 于海龙, 谢刚生, 邹时林. 基于 MapInfo 的城市综合管网信息系统的开发[J]. 江苏地质, 1999, 23(3): 156-161
- [36] Moutal H P, Bowen D R, Wendy D. GIS: New York's pipe dream. Civil Engineering, 1992, 62(2): 66-67
- [37] 刘梅. 数千万南京地铁实现智能监控, 中国计算机用户 - 赛迪网, 2002
- [38] 齐安文, 吴立新等. 三维地学模拟述评及其矿山应用关键问题[J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 61-64
- [39] 孙国庆, 施木俊等. 三维工程地质模型与可视化研究[J]. 工程勘察, 2001(5): 8-10