

文章编号:1001-831X(2004)05-0589-07

# 城市地下空间信息系统及其关键技术研究<sup>\*</sup>

朱合华, 郑国平, 张芳

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**随着大规模城市基础设施建设的开展,城市地下空间信息系统(Urban Underground Spatial Information System,以下简称 UUSIS)的建设已显得非常迫切。本文系统阐述了借助于 UUSIS 实现地层、地下管线、地下构筑物、地下水资源等地下空间对象的可视化和信息化的技术路线,并对六个关键组件:数据输入与管理组件、三维建模组件、可视化及输出组件、统计分析组件、专业应用组件、WebGIS 组件做了介绍。成功开发的 UUSIS 将在城市基础设施的规划、管理、勘察、设计、施工,地下空间立法以及地下水资源管理等方面发挥巨大作用。

**关键词:**城市地下空间信息系统;地层;地下管线;地下构筑物;地下水资源

中图分类号:C931.6; TU984.11<sup>+</sup>3

文献标识码:A

## Study on Urban Underground Spatial Information System and its Key Technique

ZHU He-hua, ZHENG Guo-ping, ZHANG Fang

(Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** As the development of large-scale urban infrastructure, it's necessary to construct Urban Underground Spatial information System(UUSIS) as quickly as possible. The article introduces the technical steps to visualize and informationize underground spatial objects, e.g. stratum, underground pipeline, underground building, underground water resource based On UUSIS. Six key components, including data input and management component, 3-dimensional modeling component, visualization and output component, statistics and analysis component, special application component, WebGIS component are also studied in the article. A successful UUSIS will play a important role in urban infrastructure plan, management, survey, design, construction, law-making, underground water resource management, and so on.

**Key Words:** Urban Underground Spatial information System; Stratum; Underground Pipeline; Underground Building; Underground Water Resource

### 1 引言

随着大规模城市建设的开展,地下构筑物越来越多、地下管网越来越密集,地下工程设计和施工过程中对位置的要求越来越精确,因为资料不全或勘察资料不准确而导致的管爆、塌方等施工事故时

有发生,迫切需要对地层、地下构筑、地下管线实现可视化和信息化。另一方面,伴随城市化进程的发展,用地不足、交通拥挤、绿化减少、地下水污染严重等“城市病”已在我国一些大城市出现,并在一定程度上制约了城市的可持续发展。城市地下空间资源作为城市的重要自然资源,在城市基础设施建

• 收稿日期:2004-10-19

作者简介:朱合华(1962-),男,安徽人,同济大学地下建筑与工程系,教授,博导,主要从事隧道及地下建筑工程、地下空间综合利用研究。

基金项目:上海市重点学科(岩土工程)建设项目资助。

设、国防工程建设、环境建设等方面具有重要意义,因此,地下空间开发已受到各级政府的日益关注。提高地下空间资源的规划水平、开发水平、管理水平成为衡量一个城市现代化水平的重要指标。

UUSIS 是在计算机硬件和软件支持下,对地层、地下管线、地下构筑物、地下水体等实现可视化和信息化,并对城市岩土工程、市政工程、人防工程、交通工程的勘察、设计、施工、监测乃至城市规划和管理中各种地图和空间地理分布信息进行数据采集、存贮、管理、分析和输出的一个综合性空间信息系统。UUSIS 是数字城市建设的重要组成部分和基础组件,是城市信息化和城市可持续发展的重要内容。

目前,由于三维建模、数据采集等社会经济技术因素的制约,国内外在城市地下空间信息化方面的研究还不多,尚未建立起完整的 UUSIS。现有的研究热点主要集中在对地层、地下管线、地下水等地物的分别研究上,并没有作为一个整体加以研究。例如,在基础性的地层信息化研究方面,英国政府开展的“伦敦计算机化地下与地表地质”科研项目、荷兰政府建立的基于 GIS 平台的地质数据库管理系统、日本建立的大阪湾地层二维和二维半数据处理系统,我国北京市勘察设计研究院建立的“北京工程地质信息系统”、哈尔滨市勘察测绘研究院建立的哈尔滨市岩土工程信息系统等在地层信息化方面进行了实践<sup>[1][2]</sup>;地下管线信息化工作开展较早,仅国内就有石家庄、南京、杭州、天津、广州等城市建立的功能较为完善的二维管线信息系统<sup>[3][4][5][6]</sup>;在地下水信息化方面,目前的研究主要是在地下水监测数据库基础上进行的地下水资源评价、地下水污染及环境影响评价等,如美国佛罗里达州在 Arc/Info 环境下采用三维有限差分模型 ModFlow 建立的地下水模拟系统<sup>[7]</sup>,澳大利亚 Kapferberg 市基于 GIS 和地下水数值模型建立的地下水动态监测和管理系统<sup>[8]</sup>,国内武强等研究开发的以 MapInfo 为平台的塔里木盆地地下水资源管理信息系统等<sup>[9]</sup>;遗憾的是,在地下构筑物信息化方面的研究工作则非常少见。

目前城市地下空间信息化技术研究的首先需要解决一个整合的问题,不能将原本是一个有机统一体的地层、地下构筑物、地下管线、地下水资源等研究对象人为地分割,必须重视对象之间存在的相互依存、相互作用、相互扰动的现实。其次,要对数据采集与管理、三维建模、可视化及输出、统计分

析、专业应用、WebGIS 等信息化关键技术进行重点研究。

## 2 UUSIS 的数据源分析

城市地下空间是指城市规划区内地表以下的空间<sup>[10]</sup>。城市地下空间数据的区域边界不应该是固定,是可以伸缩的。小到几万  $\text{m}^2$  的一个小区,大到穿越几个行政区域的地铁沿线,甚至整个城市都应该是研究的对象。目前主要考虑两种比例尺,1:2000 和 1:10000,前者主要用于研究小区域对象,后者用于研究大区域对象。本文将城市地下空间信息划分为四类,即地层和地质勘探信息、地下管线信息、地下构筑物信息、地下水和地面沉降监测信息。

### 2.1 地层信息和地质勘探信息

地层是所有地下构筑物、地下管线赖以存在的主要介质,是地下空间信息系统的核心。地层信息和地质勘探信息,具体包括:①地层数据,包括地层层号、成因年代、岩性、颜色、密/湿/稠度、断面状态及含有物、主要物理力学指标统计值、承载力基本值和标准值;②钻孔数据,包括钻孔编号、钻探机具、孔口标高、孔深、初见水位深度、静止水位深度、钻探日期、层号、层底深度、成因、岩性、原状土数、扰动土数;③土工试验数据,包括土样编号、取土深度、岩性、各指标试验数据值;④水试样数据,包括钻孔序号、取水深度、水试指标值等;⑤原位测试,包括静力触探、标准贯入试验、动力触探试验、载荷试验、波速试验、旁压试验等。

以上海为例,随着城市岩土工程和工程勘察的推广深入,已积累了大量的工程资料,主要包括 3000 多幢高层建筑的地质勘察资料、几十座市政隧道和交通隧道(主要是地铁隧道和越江交通隧道)的勘察资料等,估计勘探孔总量在 20 万个左右。如此庞大的地质资料一方面能够积累工程经验,对后续工程的设计、施工提供指导和借鉴,以提高工作效率,特别是需要做出宏观决策时,大量与地理位置有关的数据是必不可少的;另一方面,人工档案管理对于越来越多的资料将无能为力,且无法完全体现出工程资料的价值。因此,这些工程数据和资料,作为城市的一种资源,迫切需要借助于 UUSIS 进行管理、开发、利用<sup>[11]</sup>。

### 2.2 地下管线信息

地下管线是城市基础设施的重要组成部分,被称作维持城市正常运转的“生命线”。根据城市地

下管线探测技术规程的分为给水、排水(包括污水、雨水、雨污合流)、燃气(包括煤气、液化气、天然气)、热力(包括蒸汽、热水)、工业(包括氢、氧、乙炔、石油)、电力(供电、路灯、电车、交通信号)、电信(包括电话、广播、有线电视)、综合管沟等八大类<sup>[12]</sup>。以上海为例,上海的市政管线设施种类复杂、数量多、分布范围广,几乎涉及城市中心区全部道路,甚至街坊弄堂,总长度接近 40000km<sup>[13]</sup>。

### 2.3 地下构筑物信息

地下构筑物是城市地下空间的重要组成部分,是人类开发利用地下空间的主要方式,包括:①地下主要交通设施,如轨道交通、越江隧道、立交和地道、地下停车库;②地下主要市政基础设施,如地下水库、深井;③其它地下设施,如结合民用建筑修建的地下室、半地下室及其它地下工程。这些是地层介质中的不连续信息,也是地下空间信息化的重点研究对象<sup>[13]</sup>。

### 2.4 地下水信息

地下水信息主要是指地下水监测信息和基础性辅助信息,前者包括实时监测水质、井位空间分布及水质标准。各项指标包括色度、浑浊度、PH值、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、挥发性酚类、阴离子洗涤剂、硝酸盐、亚硝酸盐、氨态氮、氰化物、氰化物等监测项目。后者包括

研究区内的自然地理概况、河流水系、水库湖泊、植被土壤、土地利用、污染源、测站及观测井分布图、工农业生产布局、含水层信息、水库和闸门等水利工程的信息<sup>[14]</sup>。

## 3 UUSIS 的关键开发技术

UUSIS 的开发是一项多学科交叉的系统工程,涉及软件开发技术、地理信息系统(Geographic information System,以下简称 GIS)技术、数据库技术、三维建模技术、空间信息处理技术等多种技术以及工程地质与水文地质、市政工程、交通工程、地下结构工程等多个学科。限于篇幅,本文介绍 UUSIS 开发过程中的基于数据流的系统框架结构设计技术、组件化软件开发技术、三维建模技术、基于对象-关系模型的空间数据库技术和地下空间信息共享技术。

### 3.1 基于数据流程分析的 UUSIS 系统框架设计及组件化软件开发技术

数据流程分析是分析数据流动、存储、处理逻辑关系的重要工具<sup>[15]</sup>。UUSIS 中的数据流程可以简单地描述为:基础数据的多途径采集和录入→数据管理→统计分析、交互查询、可视化、信息共享。数据流程分析可以形成数据流程图,据此可以进一步进行 UUSIS 的系统框架设计,如图 1 所示。

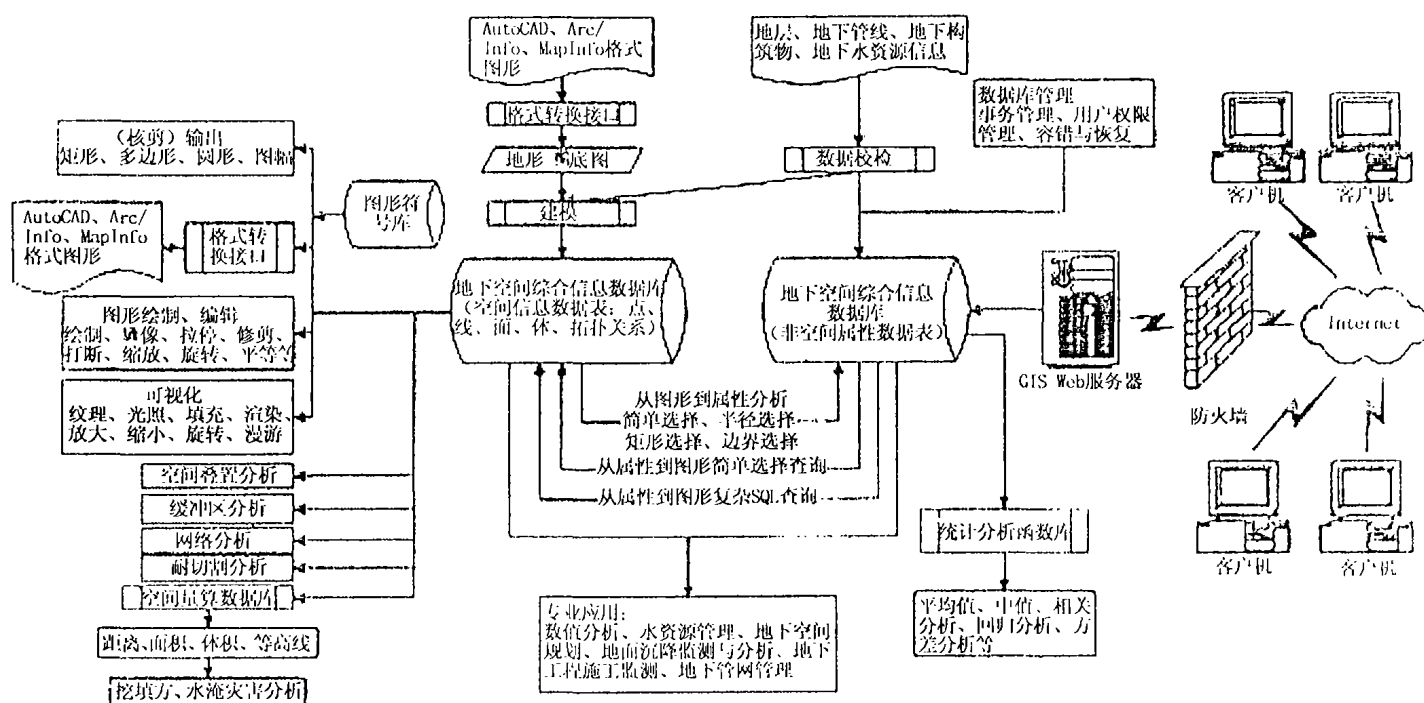


图 1 基于数据流程分析的 UUSIS 系统框架

系统框架是整个系统的骨架,侧重于表达系统中数据处理的流程,在软件开发过程中,尚需要

对各处理功能环节经过整合和封装,形成相对独立的功能组件。组件是可独立发布的二进制单元,作

为软件的基本元素可以嵌入到任何开发环境中,如 VC、VB、Delphi、FoxPro、PB 等开发环境,充分利用这些语言环境的可视化功能。随着 WWW 的普及,组件可以嵌入到 Web 主页,几乎不需要编写任何程序,就可以实现 Internet/Intranet 网络应用系统。目前,分布式组件技术已经完全标准化,可以创建平台无关的大型分布式地理信息应用系统,可以方便地进行多系统协同、互操作和数据的共享与交换。对于大型的支持分布式系统、多源数据系统,如大型的规划和决策系统特别有效。

根据 UUSIS 的系统框架图,可以按照组件化软件原理将 UUSIS 细分为六大相对独立的组件:数据采集与管理组件、三维专业建模组件、可视化和输出组件、空间分析组件、WebGIS 组件、专业应用组件,每个组件可进一步细分为功能相对独立的模块,组件与组件之间、模块与模块之间通过软件接口进行数据交换。本小节简要介绍可视化和输出组件、空间分析组件和专业应用组件。

可视化和输出组件是 UUSIS 主要的辅助组件,它提供了点、线、面、体等基本图形类型(基类),以便用户根据具体的应用环境进行派生,生成现实世界中栩栩如生的各类地物。可视化组件还应提供纹理、光照、图元填充、渲染等技术支持和放大、缩小、旋转、漫游、模拟飞行、模拟穿越等实时操作,其基本功能是提供对象数据的显示和交互操作。可视化组件可以采用商业化的三维通用科学可视化或 GIS 可视化平台,也可以基于商业图形库(OpenGL)从底层进行开发。

空间统计分析组件是地下空间信息的基本应用模块,提供对地下空间数据及地下空间模型的常用分析功能,包括距离、面积、体积、重心等常规的空间量测分析功能模块,剖切开挖功能模块,专业化统计评估模块等。

专业应用组件是 UUSIS 应用价值和生命力的体现,它实际上是将 UUSIS 作为一个基础的信息平台进行专业的二次开发,并将这些领域以专业应用模块的形式集成到 UUSIS。地下空间信息的专业应用领域主要有:岩土工程地质勘察与辅助设计、数值分析、地下水运移模拟、城市地面沉降分析、地下管网管理、地下工程施工监测信息系统等。

### 3.2 三维建模技术

模型是对现实世界某一事物或某一现象的一种数学表达,通常用参数来表达现实世界中对象的属性(颜色、品质、质量、密度、速度等),用函数来表

达对象的一些功能(如汽车能开动、土层受扰动会产生物理力学性质的变化等)。地下空间数据模型是 UUSIS 的关键技术之一,它不但应该能够记录土层、地下构筑物、地下管线的物理力学参数,而且还应该能够实现地质实体(如断层、土层等)以及工程实体(如基坑、隧道、勘探孔等)的几何以及拓扑信息可视化、对信息来源进行跟踪、对信息质量进行评估、以及提供一些工程实用功能等。目前,研究和应用较多的三维数据模型主要有 3D 栅格数据模型、八叉树数据模型、四面体网格数据模型、CSG 数据模型、基于边界表示(Boundary Representation, B-Rep)的数据模型、面片数据模型、混合数据模型等。根据地下空间的特点,基于边界表示(Boundary Representation, B-Rep)的数据模型具有良好的适用性,这种模型的主要元素是地质面(Geological Surface)和地质体(Geological Block)。

三维地下空间模型将三维空间划分成封闭的小单元,称为地质体。地质体是由相交的上下前后左右六个地质面包围而成,地质面可以是普通的地层分解面,也可以是断层面等地质不连续体界面,甚至可以是隧道等地下构筑物的界面。这种建模思想强调的是由“面”到“体”建模过程中,各种地物界面必须封闭性,如果存在不封闭的点,则将导致建模过程的失败。本文提出的地下空间数据模型是基于以下“考虑不连续地质信息的三步地层建模法”,如图 2 所示:

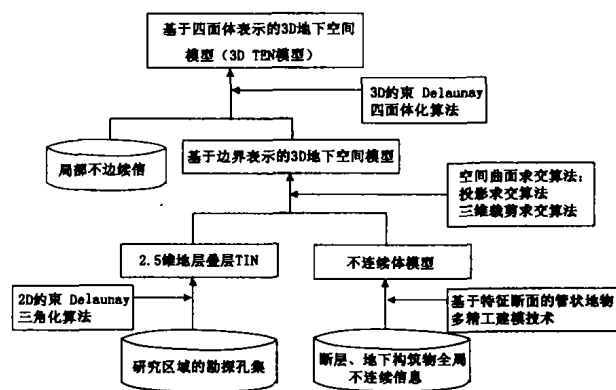


图2 考虑不连续地质信息的三步  
地层建模法的地下空间数据模型

第一步,提取数据源信息,对全局性的地质不连续体(主要是指断层、地下构筑物、地下管线等)建模。这里所谓的“全局性”,是相对于“局部性”概念而言的,指的是在研究区域内连续存在并对全局地层构造产生影响的不连续体。举个例子,我们要

建立上海市黄浦区的地下空间模型,地铁一号线和地铁二号线横穿该区,显然在建模之前宜先确定地铁隧道的轮廓线,这样在用勘探孔信息构建地层界面时将自动作打断处理,这对于建模效率的提高是有帮助的。

第二步,根据勘探采样数据(如勘探孔信息、平洞信息、地质剖面图信息等),构建地层分解面,其中对于采样数据范围内的地层界面采用数值内插方法,而对于采样数据范围以外的部分则需要进行数值外推,并应与不连续体作相交处理。这里涉及的主要建模算法,包括2D 竖直剖面地层建模、2.5 维地层 TIN 建模、3DTEN 真三维实体建模、DEM 的各种插值算法等。

第三步,插入局部性的地质不连续体,并将这些地质不连续体与地层界面进行切割运算。比如,因为新建一条过街人行隧道,如果从头到尾新建模型显然是耗时的,如果能在前两步建立的地下空间模型中通过某种切割运算开挖掉相应的一块地层,而其它区域的地层不受影响,显然是一种比较经济合理的方法。这一步主要是一个人工干预的过程,得到的将是一个精确的地下空间数据模型。

### 3.3 基于对象——关系模型的空间数据库技术

关系数据库(RDB)是一种比较成熟的数据库技术,在数据安全性、完整性、一致性、并发能力和海量数据管理、开放性以及系统的维护、管理方面都非常完善,并已经打下了坚实的用户基础,拥有相当数量的市场占有率。纯面向对象的数据库(OODB)具有完全面向对象的特征,其中包括对象的抽象、封装、继承、重载和动态联编等特征。对象—关系数据库(ORDB)是 OODB 和 RDB 的折中方案,既保留了原有关系数据库的理论和技術,又融合了面向对象的特征,实现了两者的优势互补。通过面向对象技术,将图形要素作为数据库记录的字段保存起来,结合空间结构化查询等技术,实现了图形数据和属性数据实现无缝管理,使所有数据实现统一的用户、安全和共享管理。可以说,基于 ORDB 的空间数据管理组件是整个系统的基础,可以细分为以下功能模块:

(1) 输入和编辑模块:实现数据的文件、表格等多种方式录入,数据修改、删除、增加。完成对象的生成、分配对象和工作区的唯一标志符,并对输入数据的正确性进行检验。

(2) 查询及统计模块:提供从属性到图形以及从图形到属性的双向查询,提供地下空间的相邻、

三维缓冲区等专业查询等,以及进行地下构筑物数量、地下管线长度等简单的信息统计。

(3) 输出模块:支持图形输出和表格输出两种方式,数据的多格式多用途输出,如通用数据文件格式输出、系统内根据查询将数据库中的相应数据传递给调用程序,实现可视化等功能。

(4) 数据转换模块:实现与 Surfer、ARC/INFO、MapInfo、AutoCAD 等常用软件的数据格式转换,实现数据共享,以及按照数据交换标准,生成数据交换文件。

(5) 维护模块:提供数据库表格结构的维护,维护数据的一致性、完整性,数据字典的形成与维护。

(6) 安全模块:提供基于权限审核和用户验证的数据共享管理方式,在提供最大程度的数据共享的前提下,为合法用户提供安全的数据访问。

### 3.4 地下空间信息共享技术

地下空间信息共享研究的内容相当广泛,包括地下空间立法、数据标准、WebGIS 技术等,这已经不仅仅是简单数据的共享。提高地下空间信息共享水平是目标,鼓励信息公开是手段,这些只有通过制定相应的法规政策才能激励信息权属单位共享的积极性,抑制影响共享的消极性,达到共享的目的。建设部于 1997 年制定并发布了《城市地下空间开发利用管理规定》,2001 年对部分条款作了修改。该规定对各级政府建设行政主管部门和城市规划行政主管部门在地下空间规划、开发、管理过程中的职责分工作了界定,但对地下空间信息共享方面并未涉及。

数据标准是数据交换、数据共享、数据组织、查询、管理等工作的基础,是保证数据质量的重要手段。数据能够在系统之间传输并不等于信息共享,只有系统之间遵守一种共同的数据规范和标准以及对数据的描述,才能解决不同领域之间的数据共享问题。因此,有必要编制《城市地下空间基础信息平台标准》。其内容主要包括是数据分类、数据编码、数据结构、数据交换格式、地下空间信息元数据、软件结构等,从而为地下空间信息的交换与共享提供标准依据。

WebGIS 技术的研究内容包括信息的定位、管理、获取、操作等技术,具体涉及到数据的安全机制研究、软件开发技术研究等。前者可采用身份验证和权限审核相结合的手段来对数据库的安全性进行控制。具体来说,WebGIS 用户要访问系统中任

何数据时,必须先以合法的用户身份登录数据库,该用户登录后可以读该数据库中的哪些数据及可以修改该数据库中的哪些数据,这些都是由数据库的用户权限管理机制来控制的。WebGIS 软件开发技术可采用浏览器服务器模式(Browser/Server 模式,简称 B/S 模式),B/S 模式是客户服务器(Client/Server,简称 C/S)技术与 Internet 技术相结合的成果,这种模式不仅利用了基于 Browser 的 Internet 结构简便和灵活性的特点,而且应用 C/S 技术大大地强化了其事务处理和安全性、完整性约束能力,从而实现了真正业务相关的 WebGIS。

## 4 UUSIS 的应用前景

UUSIS 实现了地层和地质勘探数据、地下管网、地下构筑物、地下水资源等地下空间地物的可视化再现和信息化管理。因此,成功开发的 UUSIS 将在城市基础设施的规划、管理、勘察、设计、施工,地下空间立法以及地下水资源管理等方面发挥巨大作用。具体地说,地下空间空间信息系统能在以下领域大显身手:

### 4.1 在岩土工程和市政公用工程勘察、设计、施工和管理方面

地下构筑物选址过程(如地铁隧道的选线过程)和可行性研究阶段往往非常重视区域地质情况,包括地质构造、地层结构、岩土工程特性、地下水埋藏条件、不良地质作用的原因、分布、规模、发展趋势,以及场地的稳定性等,虽然可以通过可行性研究勘察和初步勘察来进行评价,但这种方法是一种十足的劳民伤财的方法。利用 UUSIS 这一信息共享渠道,根据对周边或沿线区域已有地质勘探资料的比较分析,推测拟建地下构筑物的所在地区或穿越地区的地质情况,这无疑将提高工程前期的工作效率,并为国家节省大笔建设资金。

另外,在地下工程勘察和施工过程中,对周边地下管线的重视程度正日益加强,因为盲目开挖造成自来水管线断裂、燃气管线爆炸等工程事故时有发生,给人民群众的生命财产安全造成了巨大的损失。如果能够在编制施工组织设计过程,通过 UUSIS 中共享的地下管线信息了解工程周边、施工扰动影响范围内的地下管线平面位置、走向、埋深(或高程)、规格、性质、材料等信息,合理的布置开挖步骤、并采取行之有效的保护措施,就能从根本上防止上述事故的发生。

除此之外,在地铁、基坑、地下管线、各类建筑

地基基础的地质勘察数据的分析与处理,对设计与施工提供全面而强有力的背景资料,可以优化工程设计,提高工程建设与管理质量。

### 4.2 在地下空间规划和地下空间立法方面

国家和地方各级政府对地下空间规划管理和立法工作已经越来越重视,建设部于 1998 年发布了《城市地下空间开发利用管理规定》,并与 2001 年对部分条款作了修改,为地下空间的规划管理和立法工作定下了基调,各省市也在加紧研究制定相关法规,但是由于传统的地下空间信息分头管理模式不利于协调各部门之间的权利和义务,急需提供一个各方都能接受的信息交流平台,在这个平台的基础上,实现各类地下空间信息的共享与整合,进而深入研究规划和立法问题。可以说没有共享的地下空间信息,地下空间规划和立法将成为纸上谈兵。

### 4.3 在地下水资源管理和地面沉降监控方面

借助于 UUSIS 中的地下水和沉降监测信息,建立空间统计分析模型、地下水均衡模型、数值模拟模型、地质生态环境评价模型等主要模型,可以开展地下水可供能力与污染调查评价、有害废弃物的安全地质处置、选址及其环境影响调查评价、地下水系统对建筑和基础设施影响调查评价以及地面沉降的预测预报等工作。并能分析地下水位下降与地面沉降的关系和机理,模拟地下水移动过程,如按渗流力学的理论和方法,建立地下水非稳定三维流有限元数值解数学模型;按一元固结理论建立水流—沉降(回弹)耦合数学模型,对地下水水流运动和土层变形进行模拟计算等。

### 4.4 在地下管网管理方面

借助于 UUSIS 中的管线信息,可以对管线设备信息进行空间位置和物理属性两个方面的查询:能够完成各类信息的统计,如管线长度、消火栓和排水阀等管网附属设备等的统计;能进行事故模拟,对出现水管爆管等事故发生情况下迅速做出关闸和扩大关闸方案以及网络分析等。

### 4.5 在环境地质和地质灾害防灾方面

借助于 UUSIS 中的地质信息,可以进行主要地质灾害(包括洪水、地面沉降、滑坡和地震)风险评价、环境地质化学、地球物理场及其对人类健康影响的调查和评价、地下空间开发利用的工程地质、地球物理调查评价、以及城市资源(尤其是建筑石料)调查评价等。

## 5 结语

根据数据流程分析和系统框架结构设计,UUSIS可以按照组件化软件开发技术原理,细分为六个关键组件,即数据输入与管理组件、三维建模组件、可视化及输出组件、统计分析组件、专业应用组件、WebGIS组件。作为一个整体,UUSIS可以实现地层、地下管线、地下构筑物、地下水资源等地下空

间对象的数据库存贮、可视化再现、信息化管理、专业化应用。

UUSIS在岩土工程和市政公用工程勘察、设计、施工和管理,地下空间规划和地下空间立法,地下水资源管理和地面沉降监控,地下管网管理,环境地质和地质灾害防灾等方面都有着美好的应用前景,无疑将会提高城市地下空间资源的规划水平、开发水平和管理水平,促进城市的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 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[D].上海:同济大学博士论文,2003.9
- [2] 娄华君,王宏,夏车,等.地质信息可视化的应用——城市环境地质研究之发展方向[J].中国地质,2002,29(3):330-334
- [3] 毛志红,张军.石家庄市地下管线普查暨信息系统建设综述[J].测绘通报,2002(11):58-60,67
- [4] 谢士杰,孙劲松.南京市城市地下管线信息系统的设计与实施[J].现代城市研究,2000(6):43-46
- [5] 蒋云良.城市地下管线管理信息系统[J].计算机应用,2000.2,20(2):65-66
- [6] 商小玲.福州城市地下管线管理信息系统[J].城市勘测,1999(4):1-4
- [7] EL-Kadi, Oloufa, Eltahan and Malik. Use Of a geographic information system in site-specific ground water modeling[J]. Groundwater, 1994, 32(4):617-625
- [8] Werner Erhart-Schippek, Herbert Mascha. Dynamic groundwater management system based On GIS[C]. Water Resources and the urban environment-98, ASCE, 1998, 667-675
- [9] 武强,邹德禹,董东林等.塔里木盆地水资源开发管理的地理信息系统(GIS)[J].中国矿业大学学报,1999,28(1):78-81
- [10] 中华人民共和国建设部.城市地下空间开发利用管理规定[S].1997年发布,2001年修改
- [11] 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
- [12] CJJ61—2003,城市地下管线探测技术规程[S].2003
- [13] 上海市市政工程管理局.城市道路地下空间资源规划研究[R].2003.9
- [14] 黄满红,顾国维.地下水环境监测系统的设计[J].环境监测管理与技术,2003,15(1):13-15
- [15] 吴信才等编著.地理信息系统设计与实现[M].北京:电子工业出版社,2002