

重大工程地下空间信息系统开发应用及其发展趋势^{*}

周翠英¹, 陈 恒¹, 黄显艺², 刘祚秋¹, 李仁德¹

(1. 中山大学地下工程与信息技术研究中心 // 应用力学与工程系, 广东 广州 510275;

2. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 地下空间信息系统 (USIS) 是当前岩土工程研究中的一个重要发展方向。介绍了建立地下空间信息系统的目的和意义, 论述了 USIS 的开发方法及其关键技术, 包括: 数据库技术、界面实现技术、MAPGIS 二次开发技术、OpenGL 三维图形开发技术、数字制图与智能分析技术等, 并结合东深供水改造工程地下空间信息系统进行了开发方法和关键技术的应用研究, 最后, 对 USIS 的发展趋势作了较深入的分析, 指出了今后研究的几个主要方向。

关键词: 重大工程; 地下空间信息系统; 三维地层; GIS 技术; 3S 技术

中图分类号: TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 04-0028-05

地下空间信息系统 (USIS) 是以 GIS 技术为基础, 结合大型数据库管理技术及面向对象编程技术, 对地下空间海量信息数据进行可视化管理, 并利用已有资料建立模型进行专门问题分析的大型综合性信息管理系统。纵观国内外, 大量的城市 GIS 的建设主要集中于对地面数据的信息化管理, 而在地下空间 GIS 及其 3D 功能的开发与实现方面显得十分薄弱。美国地质调查局开发了三维地层分析模块; 日本大阪土地研究所结合城市地下开发和施工过程进行了三维信息化研究开发, 具有良好的可视化界面。我国则基本集中于城市地下管线开发方面, 在城市地下空间三维可视化研究方面尚显薄弱。少数学者对于三维空间信息开发的研究多侧重于模型研究阶段^[1,2]。此外, 有学者对某些典型问题可视化进行了研究^[3,4]。本文结合作者开发的东深供水改造工程地下空间信息系统, 论述了地下空间的特征和 USIS 的开发方法及其关键技术, 并对 USIS 的未来发展趋势进行了展望和分析。

1 地下空间的基本特征

地下空间的开发和综合利用是 21 世纪城市建设的主题, 同时, 也是可持续发展的重要战略之一。在地下空间开发中, 基于城市地下空间的海量数据信息化管理显得十分迫切, 尤其是在重大工程建设中, 这一问题显得更加突出。这是由于: ①地下空间属于隐蔽性环境, 可视为其首要问题; ②地

基基础设计须依靠大量的钻孔数据和剖面资料, 而这类资料均为点或局部面的信息, 难以获得系统全面的认识; ③复杂地质现象的判译和分析 (如: 缺失和倒转地层等) 需建立在综合信息管理系统基础上; ④数据量大, 类型复杂, 需要基于大型平台的信息化管理; ⑤工程在长期运营过程中的安全分析有必要依赖综合信息分析与管理。因而, 基于地理信息系统 (GIS) 开发地下空间信息管理系统 (USIS) 显得十分必要和迫切。

2 USIS 的开发方法

2.1 总体开发流程

本系统的开发采用生命周期法和快速原型法相结合的开发方法。开发阶段的划分沿用生命周期法的划分方法, 分为总体规划、系统分析、系统设计、编码、测试和运行维护五个阶段。在对系统进行分析和设计时, 为了缩短开发时间并及时了解用户信息反馈, 结合快速原型法, 迅速构造出系统的一个原型, 此原型只反映用户的主要需求, 暂时忽略一切次要内容, 原型建立后迅速交付下一步骤, 以后随着与用户的不断交流逐步完善原型。系统的开发流程图如图 1 所示。

2.2 GIS 技术应用方法

USIS 系统建立的核心是 GIS 技术, 应用于 USIS 开发中主要有两种形式:

(1) 嵌入式 GIS 开发方法。大多数 GIS 软件都

^{*} 收稿日期: 2003-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008); 广东省自然科学基金重点资助项目 (013188); 广东省重大科技攻关十五专项资助项目 (2001B30903); 广东省计委资助项目 (DSGZ-KJ-042; DSGZ-KJ-043)

作者简介: 周翠英 (1963 年生), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: eeszy@zsu.edu.cn

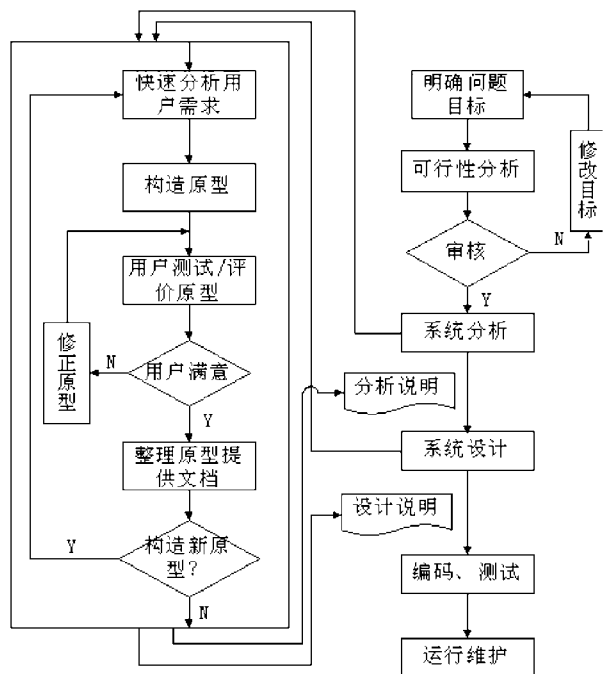


图1 系统开发流程图

Fig.1 Flowing chat of system development

可以用它自带的开发语言进行二次开发,如 ArcInfo 的 XML, ArcView 的 Avenue, MapInfo 的 MapBasic 等,这是一种基于源代码的开发方式,系统所有的界面与应用模型均由 GIS 提供的编程语言编写,它的优点在于界面风格一致,结构紧密,缺点是功能有限,高级编程语言中一些常用的模型程序必须重新改写,而且设计出的图形界面较差。

(2) 组件式 GIS 开发方法。这种形式缩短了开发时间,开发者不需了解一些通用的模型的具体实现过程就可把模型集成到系统中,而且通过面向对象的编程语言如 VB、VC++、C++ Builder 等可以方便地弥补功能设计中的不足,例如数据库设计及数值分析等。

在工程应用当中,第二种方式是比较常用的,这主要是因为这种方式的开发周期短,功能实现能力强,适应性、扩展性及可维护性较好。

3 USIS 采用的关键技术

3.1 C/S 体系结构

USIS 采用 C/S 即 Client Server 体系结构。地下信息系统的开发通常可分为两部分,即后端(服务器部分)数据库设计与实现和前端(客户机部分)应用程序的开发,客户机和服务器之间体现为服务请求/服务响应关系。采用这种结构的优点在于:①提供数据和服务的无缝集成;②均衡地分配客户和服务端上的负载,为联机事务处理提供高事务吞

吐量、短响应时间和支持大量的用户;③良好的开放性、易扩充性;④将数据的存储管理与应用控制分离实现,保障了原始数据与控制系统的双重安全。

3.2 数据库设计

USIS 数据库因其自身特点主要分为两类:属性数据库和空间数据库。属性数据库用于存储属性数据,通常采用关系型数据库系统(RDBMS)来管理,如 Visual FoxPro、SQL Server、Oracle 等。空间数据库用于存储专业图形数据,则通常用地理信息系统(GIS)来生成和管理,使用较为广泛的有 ArcInfo、MapInfo、MapGIS 等等。数据库设计的关键技术包括:

(1) 空间数据库关键技术:①地图的录入与矢量化处理;②空间数据属性设置。

(2) 属性数据库关键技术:①建立图形属性与数据库索引字段关联;②专业数据中文搜寻平台建立;③数据并发传输与多种数据格式的转换;④多重安全保护机制的设定。

3.3 图形用户界面(GUI)实现

随着 VC++、VB、Delphi、C++ Builder 等面向对象的可视化编程语言问世以来,开发者可以方便地利用它们提供的各种窗体、文本框、图像框、组合框等标准控件及商用的第三方控件,设计出美观、友好的 GUI。另外,地理信息系统提供的内部编程语言也可生成 GUI,与 VC++、VB、C++ Builder 等相比,它们的优势在于它们是 GIS 内部的编程语言,与 GIS 在空间查询及信息分析等功能上结合很好,但正是由于 GIS 编程语言的相对封闭性,它不方便调用 Windows 内部 DLL 函数及 ActiveX 控件资源,其生成 GUI 的功能较弱。因而,将可视化编程语言与 GIS 二者有机地结合起来不仅可以生成美观的用户操作界面,还可以充分利用 GIS 的空间分析和显示功能,达到功能和视觉俱佳的效果。

3.4 MapGIS 二次开发技术

本系统采用 MAPGIS 作为二次开发平台。MAPGIS 是国内较好的 GIS 平台,其部分功能便于地理信息系统的开发与功能实现,体现在:

(1) 图形属性定义功能:图形数据可以由用户自定义属性及其属性结构,用户根据各行业规范可自定义图形属性及其结构。

(2) 库文件扩充功能:MAPGIS 的图例库,图形库可以由用户自行扩充,用户根据行业标准定义图例及各种专业符号,用于显示调用。

3.5 OpenGL 三维图形编程技术

本系统具有三维地层显示技术，可以根据基本钻孔信息，建立三维地层模型，并对模型进行多种操作。本功能的实现主要通过 OpenGL 技术，结合 C++ 语言编程，OpenGL 核心技术具体应用于：①用“绘制描述表（RenderingContext，RC）”^[6]进行三维图形的绘制；②创建“绘图描述表”与“设备描述表（Device Context，DC）”^[6]的关联，通过 RC 对应的 DC 将三维图形显示出来；③由三角形网格绘制三维曲面，在数值剖分基础上，进行三维曲面的绘制，再重复操作，绘制三维地层模型；④平移、旋转操作，对建立好的三维图形进行任意方向的平移、旋转；⑤颜色管理及纹理映射，对三维模型进行配色及纹理映射操作，增强立体效果。

3.6 数字制图与智能分析

任意选用工程中的钻孔位置，即时显示钻孔范围内的地层信息，包括倒转地层和异常地质现象的钻孔柱状图显示等；剖面图的绘制提出了关键字段信息定义的数据优化搜寻和数据优化组合条件搜寻的技术方法，建立了数据库和 GIS 系统之间的桥梁，实现了根据自定义 MAPGIS 图形属性调用数据库属性数据的功能。钻孔柱状图的绘制及剖面图的绘制只需点选钻孔，系统根据外部数据库数据自动生成矢量图形，真正实现全自动化操作。提供了两种不同用户权限的设计：①高级用户的任意剖面绘制功能，供专业技术人员进行各种分析；②指定剖面连线的剖面图绘制功能，供一般用户或非业务人员的查询使用。显示了系统良好的智能化水平。

4 开发实例

本文介绍的 USIS 开发实例——东改工程地下空间信息系统，是采用组件式 GIS 技术开发的大型信息管理系统。系统采用 MapGIS 为 GIS 平台，结合客户端开发工具 Borland 公司的 C++ Builder 及数据库管理系统 SQL Server 2000，以及 OpenGL 技术进行开发，应用效果良好。

4.1 工程背景及系统建设目标

东深供水改造工程（简称东改工程）是向香港、深圳以及工程沿线东莞城镇提供饮用原水及农田灌溉用水的跨流域大型调水工程，是近几年广东省境内最大的水利工程之一。工程全长约 50 公里，沿线地质环境十分复杂，地下空间信息丰富。系统建设总体目标是利用先进的 GIS 平台和大型数据库系统建立东改资料基础信息库，在此基础上结合岩土工程领域的专业知识建立二维及三维分析模型，实现东改工程全线地下空间管理的信息化，并为工

程设计提供辅助决策支持。

程设计提供辅助决策支持。

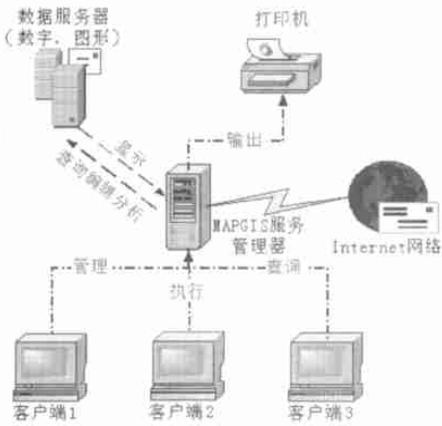


图 2 USIS 系统逻辑结构

Fig 2 Logic structure of USIS

4.2 系统设计

USIS 系统逻辑上包括基础数据库，地图库，操作平台 3 部分组成；系统采用模块化设计，总共由 11 个模块组成，包括文件管理模块、数据输入编辑模块、图形输入编辑模块、数据查询模块、空间分析模块、地基基础计算模块、三维地层分析模块、数字制图模块、报表模块、用户管理模块、帮助模块等，每个模块下还分为若干子模块。系统逻辑结构如图 2 所示。

如东改工程地下空间信息系统主窗口外观如图 3 所示，主要包括标题栏、菜单栏、工具栏、图形显示区、图例区、图层控制区、状态栏。

5 USIS 的发展趋势

(1) 组件化 (ComGIS)、网络化 (WebGIS)^[7]。ComGIS 是指基于组件对象平台，以一组具有某种标准通信接口的、允许跨语言应用的组件所提供的 GIS，GIS 组件之间以及 GIS 组件与其他组件之间可以通过标准的通信接口实现交互，这种交互甚至可以跨计算机实现。ComGIS 不仅可以成功地解决传统 GIS 在软件开发、应用系统集成和用户使用等方面的困难，而且有利于降低成本，具有无限扩展性等特点。

(2) 地下空间信息管理标准化、规范化。数据标准化和技术规范化是建立 USIS 系统有效的、适用性强且接口友好的数据库的前提。制定并完善地理信息分类与编码标准、系统开发过程规范、信息处理技术规范等，可实现不同级别 USIS 系统的数据交换。

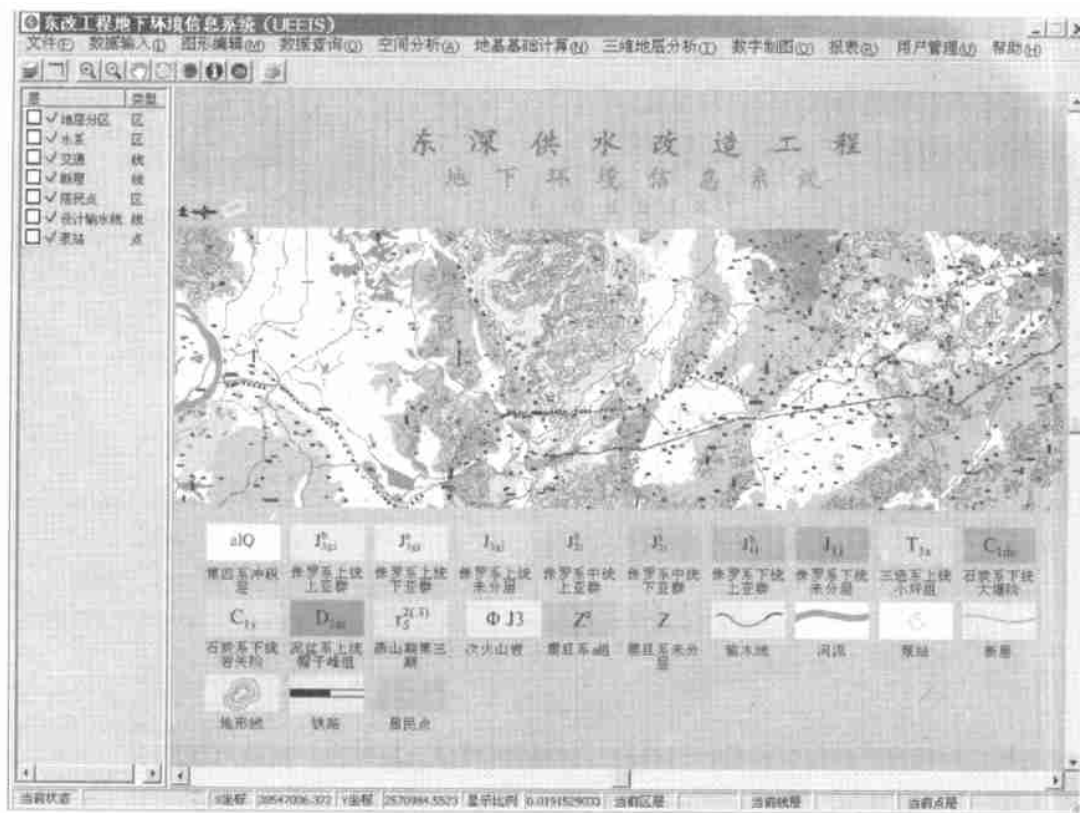


图 3 USIS 主窗体界面
Fig. 3 Main windows of USIS

(3) 3S 技术的广泛应用。由于 USIS 研究对象的显著空间特性，强大的空间信息处理技术在 USIS 中会得到越来越广泛的应用，遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS)、全球定位系统 (GPS) 合称的 3S 技术作为地球信息科学的核心，必定为未来的发展趋势。GIS 集测绘、地理、数据库于一体，实现地理空间数据的有效收集、管理和分析；RS 通过接受地物光谱的信息，可以提供全方位、全时空的地物表层环境信息，为环境信息的动态监测等提供强大的技术支持；GPS 则是利用卫星导航系统实现地球任一空间点的准确定位。三者的有机组合会大大促进 USIS 系统的直观性、准确性、实时性，并为 USIS 研究层次的深化提供技术基础。

(4) 面向地下空间的多源、多类、多量、多维和多主题数据的管理与处理功能的二次开发和集成化、智能化^[8,9]。近年来随着人工神经网络、模糊理论和概率统计的发展，一些人开始利用人工智能技术进行遥感图像分类、专题信息提取、综合评判等，使系统具有一定的智能特点，然而大规模和系统化的应用还有待进一步发展。决策支持系统 (DSS) 是人工智能在 USIS 中的应用，但大多数的 DDS 还是数据+模型=结果的类型，未来的智能决策支持系统应该不仅具有传统的数据管理和模型分

析的功能，还应包括人工智能和专家系统的许多方面，如人机接口、自然语言理解、知识学习和积累、知识表达、模型组织等，能够在人机结合的集成环境中解决复杂的环境问题，而这些技术的实现有待于进一步的深入。

(5) 施工过程的三维可视化分析^[10]。结合地下空间可视化设计，分析地下开挖对周围环境的影响等，是地下空间开挖和施工过程监控的有效手段之一，可方便地进行开挖过程监控，并有效控制对周围环境的影响。

(6) 与虚拟技术的结合^[11]。虚拟现实技术的兴起和发展为地球科学提供了一种崭新且强有力的工具来模拟和分析现实世界的各种真实现象。其优势在于：它不仅具有与传统的二维测绘图件相一致的诸多功能，如反映现实世界的全貌，可以获取观察者和各种目标物的精确位置等；而且它能以三维动态可视化的形式更为细致地描述和反映现实世界的真实现象；特别是，能够分析和揭示研究目标的区域的微小运动和变化规律，如物质和能量在时间和空间上的运动和变化规律。毋庸置疑，虚拟现实技术为 USIS 的发展注入了新的活力。

6 结 语

(1) 重大工程地下空间信息系统（USIS）功能强大，紧密结合工程实际，具有实用性、通用性、易操作性、易维护性、可扩展性等显著特点，是一个大型综合性信息管理系统。

(2) 重大工程地下空间信息系统的开发和应用为地理信息系统在岩土工程领域的应用研究迈出了重要的一步，特别是三维可视化分析及数值分析功能，为岩土工程信息化、自动化、数字化开辟了广阔的前景。

(3) 重大工程地下空间信息系统的研制符合 GIS 系统开发组件化、网络化、规范化的发展趋势，与专家系统及决策支持系统的紧密结合，为 GIS 技术研究提供了宝贵经验。

(4) 未来的地下空间信息系统开发应着重在数据的时空动态变化、空间数据引擎方面加以深入探讨。

参考文献:

[1] 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.
[2] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划

分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637—641.
[3] 刘祚秋, 周翠英, 赵旭升, 等. 三维地层模型及可视化技术研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(4): 21—24.
[4] 徐云和, 赵吉先, 程朋根. 地矿 3 维 GIS 模型的构建及可视化[J]. 中国矿业, 2003, 12(4): 60—63.
[5] 钱七虎. 地下空间开发利用的第四次浪潮及中国的现状、前景和发展战略[A]. 第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 武汉, 2002.
[6] 费广正, 芦丽丹. 可视化 OpenGL 程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 20—34.
[7] 吴信才. 地理信息系统的基本技术与发展动态[J]. 地球科学, 1998(4): 1—3.
[8] 李德仁, 李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 128—133.
[9] CHEN J, JIANG J. Integrated systems for spatial data production, custodian and decision support [C]. The International Archives of ISPRS, 2002, 34.
[10] PILOUK M, KLAUS T, MARTIEN M. A tetrahedron-based 3D vector data model for geo-information // MARTIEN M. Advanced geographic data modeling[M]. Sylvia De Hoop, 1994: 129—140.
[11] BETROL D, FOELL D. Designing digital space —— an architect's guide to virtual reality[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.

Developing Trends of Underground Spatial Information System in Major Projects

ZHOU Cui ying¹, CHEN Heng¹, HUANG Xian yi², LIU Zuo qiu¹, LI Ren de¹

(1. Research Centre of Underground Engineering and Information Technology //

Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Department of Earth Science, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: For the moment, underground environment information system is one of the main developing fields in the research of geotechnical engineering. Firstly, on the introduction of establishing underground environment information system (USIS) is concentrated. And then, the exploitation methods and the key techniques of USIS, including data base design, main surface realization, MAPGIS secondary development, OpenGL 3D mapping techniques and digital mapping and intellective analytical technology, are discussed. By combining the techniques with the developing practice in the Underground Spatial Information System of Water Supply Improvement Project from Dongguan to Shenzhen, the developing trends of USIS is analyzed. Finally, the authors put forward some new trends of USIS in the future.

Key words: major project; underground spatial information system; 3D stratum; GIS technology; 3S technology