

三维基坑参数化自动建模与动态可视化软件开发研究

泮晓华^{1, 2}, 马 平³, 王媛媛⁴, 韩 超^{1, 2}, 李国梁^{1, 2}

(1. 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 北京交科公路勘察设计研究院有限公司, 北京 100088; 4. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘要: 为了能够简单、快速、高效、准确、直观地建立基坑三维模型并实现设计成果的三维可视化展示, 研究开发了一套集成化、可独立运行的三维基坑参数化自动建模与动态可视化软件。介绍了软件的整体功能、架构, 开发过程中的技术关键、难点、对策以及开发实现过程。同时, 通过中央电视台(CCTV)新台址基坑工程实例对软件的可行性和实用性进行了验证。结果表明, 本软件的开发研究在基坑工程领域有着重要的理论意义和应用价值。

关键词: 基坑; 参数化建模; 动态可视化; 三维显示

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0225-05

作者简介: 泮晓华(1986-), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面研究工作。E-mail: panxh616@163.com。

Development of 3D excavation software for parametric modeling and dynamic visualization

PAN Xiao-hua^{1, 2}, MA Ping³, WANG Yuan-yuan⁴, HAN Chao^{1, 2}, LI Guo-liang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. RIOH Transport Consultants Ltd., Beijing 100088, China; 4. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to establish excavation 3D model simpler, more quickly, more efficiently, more accurately, more directly and to realize 3D displaying of the design results, a 3D excavation software for parametric modeling and dynamic displaying is developed. The functions, architecture, key technology, difficulties, countermeasures and realization process of this software are introduced. Meanwhile, application of the software to the excavation of CCTV verifies the feasibility and practicality. The results show that this study has important theoretical significance and application value.

Key words: excavation; parametric modeling; dynamic visualization; 3D displaying

0 引言

加拿大的 Simon W Houlding 最早于 1993 年提出了地质体三维可视化技术的概念^[1], 基于计算机技术和现代空间信息理论, 将空间信息管理、地质解释、空间分析、地学统计与预测、实体内容分析与三维图像可视化等工具结合起来, 最终形象的模拟、再现三维地质体。该技术克服了日益显现的传统地质信息的模拟与表达主要采用平面图和剖面图的非直观、非形象化弊端, 被广泛应用于石油探测、数学地质、岩土及地理信息系统等相关学科^[2]。

随着现代计算技术的不断发展, 国内外已涌现了许多优秀的三维建模软件^[3-6], 如 CATIA、SolidWorks、UniGraphics、AutoCAD、Pro/Engineer、MDT、Cimatron、Solidedge、I-deas 及一些基于大型商业软件开发的专业性用途软件。

近年来国家开展大规模建筑工程的建设, 行业内竞争不断加大, 岩土工程勘察、设计等单位要想突出自身优势, 提高竞争力, 不仅要有更具性价比的设计方案, 还要能将设计成果通过三维可视化更直观地展示给管理者、决策者及其他相关人员。然而, 目前还没有能够独立运行且简单、快速、高效、准确、直观地建立基坑工程地质体三维模型的软件。现有通用大型三维建模软件或者基于此开发的用于基坑工程的三维建模软件^[7-8]建模过程不仅工作量大、工作效率低, 还要安装相关母软件和要求技术人员较好地掌握该软件复杂的建模方法和繁琐的操作过程。

因此, 三维基坑参数化自动建模与动态可视化软

基金项目: 国家十一五科技支撑计划项目(2008BAJ06B-04)

收稿日期: 2012-08-24

件的开发研究有着重要的理论意义和工程应用价值。

1 软件整体架构

本软件包括界面、参数输入、支护结构施工过程数据库、三维动态显示、三维静态显示、坡段剖面图显示、坡段参数显示及文件、结果管理 8 个子模块系统, 其整体架构如图 1 所示。

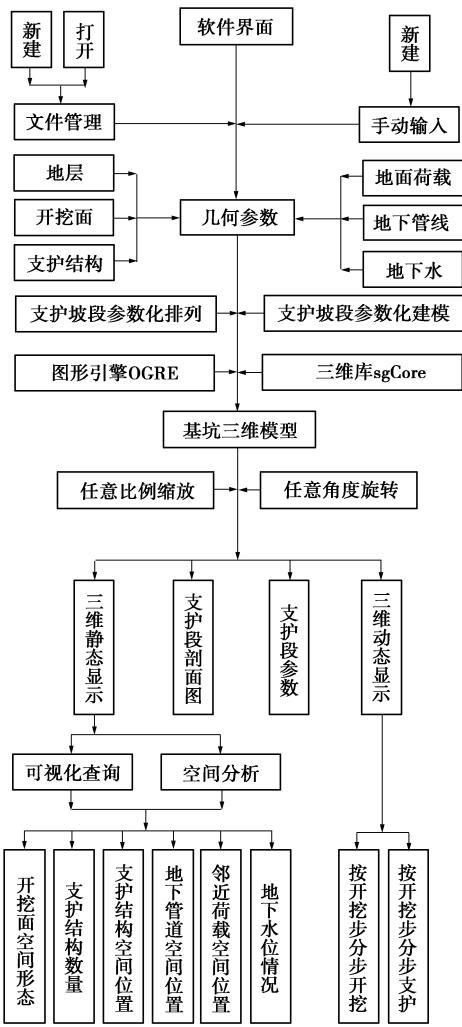


图 1 软件整体架构图

Fig. 1 Diagram of software overall architecture Framework

2 技术关键、难点及对策

2.1 参数化自动建模

基坑三维模型由支护坡段依次排列而成, 各支护坡段三维模型主要由地层、开挖面、支护结构、地面荷载、地下管线及地下水等部分组成, 不同支护段可以选择不同开挖面形式和支护结构。模型支护结构包括放坡、土钉墙(锚)、水泥土墙、桩(墙)锚(撑)和组合支护等形式。

综上所述, 实现参数化自动建模的关键技术首先在于如何将支护坡段参数化排列; 其次, 根据排列好

的支护坡段和每一坡段确定了的支护结构形式, 如何快速、便捷、高效地基于地层、开挖面、支护结构、地面荷载、地下管线及地下水等几何参数实现参数化建模。

(1) 支护坡段参数化排列方法

支护坡段参数化排列方法采用相邻支护坡段通过方位角首尾相连法。

支护坡段方位角表示各支护坡段支护边在水平面上的投影与正北方向的顺时针夹角, 单位为度。例如在图 2 中, 基坑存在 9 个支护坡段, 各支护边的方位角如图中所示, 其描述遵循顺时针原则, 方位角的取值范围 $[0^\circ, 360^\circ]$ 。然后, 任意选择一个端点作为整个基坑支护边的起点 (A 点), 在方位角方向上的线段长度表示基坑该支护边的长度 (AB 段), 下一支护边以前一支护边在方位角方向的端点为起点 (B 点), 以该点为起点在方位角方向上的线段长度表示该支护边的长度 (BC 段), 其他依此类推。

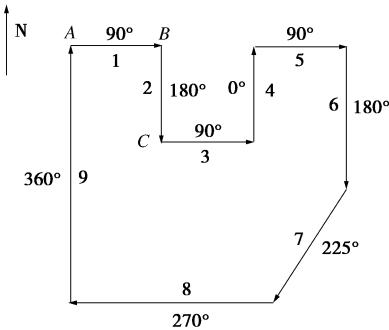


图 2 基坑支护坡段参数化排列方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of excavation support segment parametric arrangement method

(2) 支护坡段参数化自动建模

不同支护坡段可以具有不同开挖面形式、不同支护结构、不同地面荷载、不同地下管线以及不同地下水埋深等情况, 但均有一个共同点是它们的空间组合、排列模式是完全一样的。支护结构设置在开挖面上, 不同支护形式有其固定的支护结构组合、排列方式, 地面荷载位于地面上, 地下管线、地下水位于地下土层中, 唯一的不同就是空间几何位置和数量的区别。因此, 可以根据用户输入的相关参数, 从而确定固定空间组合、排列模式下不同组成部分的数量和空间位置, 达到参数化自动建模的目的。

以下就支护坡段参数化自动建模的技术关键、难点及对策进行分析、阐述, 三维空间具体几何参数见图 3。

a) 开挖面几何形态描述及确定方法

支护坡段开挖面的几何形态由线段类型和坡面条

件来描述和确定。其中, 线段类型分直线和圆弧两种。线段类型为直线, 代表被支护基坑侧壁为平面(面2); 线段类型为圆弧, 代表被支护基坑侧壁为弧面(面1)。圆弧弧度大小通过拱高(UV 段)来确定。正数表示外凸, 负数表示内凹。坡面条件通过坡高(EL 段)、坡角($\angle EKL$)和台阶宽度(JK 段)来描述和确定。

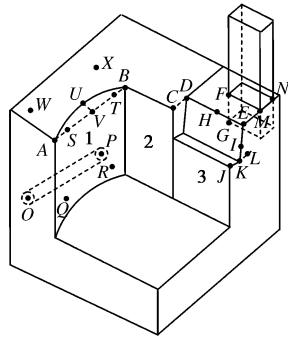


图3 基坑三维空间示意图

Fig. 3 Schematic diagram of excavation 3D space

b) 支护结构类型及空间几何参数

① 支护结构类型

支护结构类型包含土钉墙(锚)、水泥土墙、桩(墙)锚(撑)和组合支护4种形式。

② 各支护类型空间几何参数

土钉墙(锚): 土钉墙面层(厚度)、土钉参数(埋深、长度、倾角、水平间距、直径)、锚杆参数(埋深、长度、倾角、水平间距、直径); 桩(墙)锚(撑):

锚杆参数(埋深、长度、倾角、水平间距、直径)、撑参数(埋深、倾角、离起点距离、方位角、支撑轴力)、桩(直径、水平间距、嵌固深度)、墙(宽度、嵌固深度); 水泥土墙: 水泥土墙(宽度、嵌固深度);

组合支护参数: 土钉面层(厚度)、土钉参数(埋深、长度、倾角、水平间距、直径)、锚杆参数(埋深、长度、倾角、水平间距、直径)、撑参数(埋深、倾角、离起点距离、方位角、支撑轴力)、桩(直径、水平间距、嵌固深度)、墙(宽度、嵌固深度)。

c) 地面荷载类型及空间几何参数

构筑建筑物等条形荷载与邻近基坑支护坡段相对位置关系主要由以下参数确定: 距离坡段起点的距离(DH 段)、长度(MN 段)、宽度(FM 段)、距离坡面的距离(FH 段)和埋深(FG 段)。

d) 地下管线类型及空间几何参数

地下管线与邻近基坑支护坡段相对位置关系主要由以下参数确定(管道顶末端两点确定管道直线位置): 顶端距离坡段起点的距离(AS 段)、距离开挖面的距离(OQ 段)、埋深(OW 段)、尾端距离坡段起点的距离(ST 段)、距离开挖面的距离(PR 段)、埋深

(QP 段)。

2.2 动态显示

软件根据用户输入的开挖步数和每一步的开挖深度, 能够动态显示开挖过程和每一开挖步完成后的支护过程。

这就要求程序能识别对应开挖步的支护情况, 并能够智能化地模拟该支护情况下的实际支护结构施工过程。

因此, 根据需求编写了上述支护类型的支护结构施工过程数据库。在进行动态显示时, 软件调用该数据库进行智能化对比分析。然后, 结合界面输入的几何参数进行开挖和支护结构施工过程的智能化动态显示。

2.3 支护坡段剖面图显示

用户鼠标单击任一支撑坡段的开挖支护面某一位置时, 在软件右上方区域显示出该位置处的支护结构剖面图。剖面图主要包括土层、放坡、支护结构、荷载、地下管线及地下水位等部分。

然而, 由于土钉、锚杆、桩等支护结构存在支护间距, 鼠标点击处可能处于间隔区域并没有支护结构, 从而所显示的剖面图只有土层和坡面等基本信息。

因此, 为了保证鼠标点击在支护结构间隔区域时也能显示该支护坡段完整的支护结构剖面图, 编写智能化邻近支护结构剖面搜索程序, 将鼠标所选剖面位置向邻近满足要求剖面处平移, 并将此处的支护结构剖面图进行显示。

3 软件实现

开发平台为 Microsoft Visual Studio 2005; 开发语言为 C#; 图形引擎+三维库为 Object-Oriented Graphics Rendering Engine+sgCore; 开发方法采用面向对象的模块化设计、开发法。

根据软件整体架构和功能需求, 利用 VS2005 集成控件设计开发了软件界面; 基于所提出的相邻支护坡段通过方位角首尾相连法达到了支护坡段参数化排列的功能; 根据上述支护坡段参数化自动建模技术和方法实现了各支护坡段的三维建模的功能; 通过不同类型支护结构施工过程数据库的编写和智能化比较, 实现了按开挖步动态显示功能; 通过鼠标点击和智能化邻近支护结构剖面搜索, 读取对应处土层、支护结构、荷载、地下管线、地下水等几何信息, 自动生成剖面图并进行显示。

配合任意比例缩放、任意角度旋转等图形操作、文件管理等模块程序的开发, 三维基坑参数化自动建模与动态显示软件成功开发完成(如图 4)。

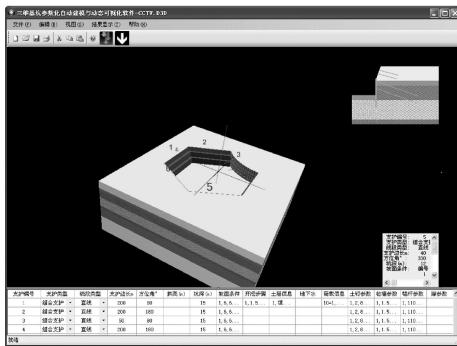


图 4 三维基坑参数化自动建模与可视化软件

Fig. 4 3D excavation software for parametric modeling and dynamic visualization

4 实例应用

4.1 工程概况

中央电视台（CCTV）新台址位于北京市中央商务区核心区域，位处朝阳区东三环以东、光华路以北、朝阳路以南。台址工程建筑用地面积总计 178000 m²，总建筑面积 59.7 万 m²，最高建筑高度 234 m。

地层情况为: ①杂土, 厚度 3.0 m, ②粉土, 厚度 7.0 m, ③砂土, 厚度 10.0 m, ④黏性土, 厚度 4.0 m, ⑤砂土, 厚度 12.0 m, ⑥黏土, 厚度 4.0 m, ⑦碎石土, 厚度 20.0 m。

承压水地下水埋深 21.5 m。

基坑基槽长约 267 m, 宽约 220 m (如图 5)。主体部分由两座塔楼及空中悬臂组成, 其中西北侧塔楼基础埋深-27.3 m, 东南侧塔楼基础埋深-27.4 m; 西侧及南侧群房部分基础埋深-10.6~-13 m; 北侧纯地下室部分基础埋深-17.3 m, 东侧群房部分基础埋深-15.5~-18.7 m; 中部群房部分埋深-19.3~-20.2 m。

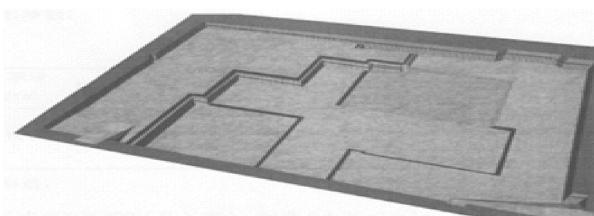


图 5 中央电视台新址基坑工程效果图

Fig. 5 Effect diagram of new CCTV excavation project

根据“中央电视台新台址建设工程（CCTV）主楼土方开挖、降水及护坡工程”设计方案，基坑护坡措施如下：基坑四周为桩锚加土钉墙联合支护工艺（-6 m以上为土钉墙，以下为桩锚），并为结构施工预留1 m宽的肥槽；基坑中部区域存在高差的坡段采取直坡护坡，对于深度在6 m以内的采取土钉墙工艺，深度在6 m以上的采取护坡桩（或加预应力锚杆）工艺，为结构预留0.4 m宽肥槽。总护坡面积约19000 m²，其中护坡桩护坡面积约11000 m²，土钉墙护坡面积约8000 m²。

4.2 三维建模结果

选取北边支护坡段西端点为起点，依次快速输入支护坡段的方位角、支护边长、土层、开挖步信息及每一支护坡段的支护结构、地面荷载、地下管线及地下水等几何信息，便成功生成图 6~8 所示三维模型，分别为不同角度和土层不显示模式下显示效果图。可以通过任意比例缩放查看不同大小下的模型；可以通过任意角度旋转查看不同角度下的模型；可以选择土层、支护结构、荷载、地下管线及地下水等模型组成部分显示或者不显示从而满足用户对不同部位可视化查询的需要，以便用户可以直观地分析支护结构与荷载、地下管线等之间的空间位置关系，实现三维直观展示设计成果合理性的目的；还可以通过鼠标点击相应支护面查看每一支护坡段的剖面图，如图 9 所示。

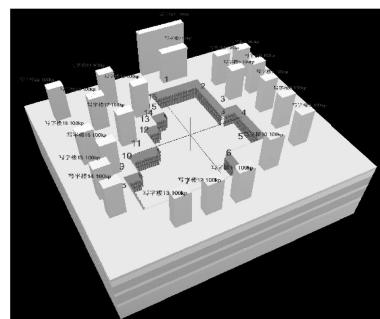


图 6 中央电视台新址基坑工程三维模型

Fig. 6 3D model of new CCTV excavation project

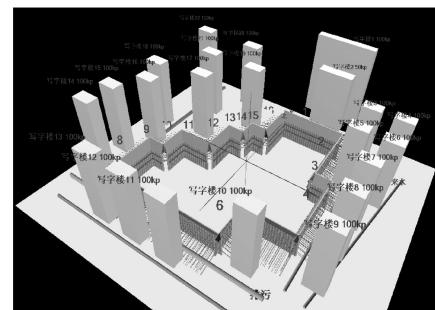


图 7 中央电视台新址基坑工程土层不显示三维模型俯视图

Fig. 7 Top view of new CCTV excavation project without soil layers

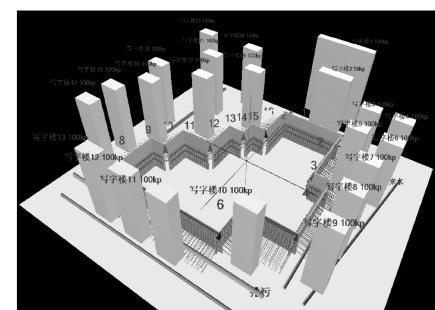


图 8 中央电视台新址基坑工程土层不显示三维模型平视图

Fig. 8 Head up diagram of CCTV excavation project without soil layers

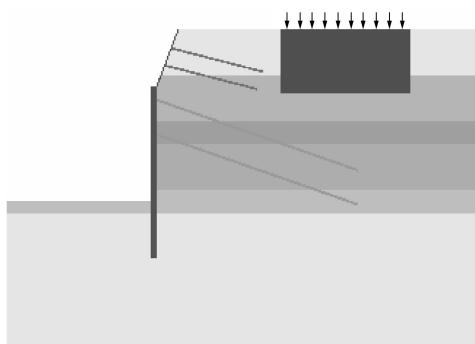


图 9 中央电视台新址基坑工程三维模型剖面图

Fig. 9 Profile of CCTV excavation project

5 结语

本文结合笔者开发实践,介绍了三维基坑参数化自动建模与动态显示软件的整体功能、架构,开发过程中的技术关键、难点、对策以及开发实现过程。同时,通过中央电视台(CCTV)新台址基坑工程的实例应用表明,软件能够基于地层、开挖面、支护结构、地面荷载、地下管线及地下水等几何参数简单、快捷、准确地生成三维模型,且可以任意比例缩放、任意角度旋转进行可视化查询、空间分析和按开挖步动态显示,真正实现了基坑工程简单、快速、高效、准确、直观的三维可视化展示。

参考文献:

- [1] SIMON W. 3D geoscientific modeling computer technique for geological characterization[M]. Springer-Verlag, 1994.
- [2] 王明华, 白云. 三维地质建模研究现状与发展趋势[J]. 土工基础, 2006, 20(4): 68 - 70. (WANG Ming-hua, BAI Yun. The status quo and development tendency of 3D geosciences modeling[J]. Soil Eng and Foundation, 2006, 20(4): 68 - 70. (in Chinese))

- [3] 王秋明, 胡瑞华. 基于 CATIA 的三维地质建模关键技术研究[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 76 - 78. WANG Qin-ming, HU Rui-hua. Research on key technology of 3D geological modeling based on CATIA[J]. Yangze River, 2011, 42(22): 76 - 78. (in Chinese))
- [4] ZHANG Hong-yang, LI Tong-chun, LI ZONG-kun. Modeling in Solid Works and analysis of temperature and thermal stress during construction of intake tower[J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(1): 95 - 102.
- [5] FENG Sheng-qiang, HU Sheng-sun, SHEN Jun-qi. Kinematic study on motoman hp6 arc welding robot based[J]. Transactions of Tianjin university, 2011, 17(3): 199 - 202.
- [6] 徐文杰, 胡瑞林, 李厚恩, 等. CAD 软件在工程地质三维建模中的应用[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 279 - 283. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, LI Hou-en, et al. Applicable of CAD software in 3D modeling of engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 279 - 283. (in Chinese))
- [7] 熊春宝, 马路滨, 房园林. 基坑变形监测三维可视化模拟系统设计[J]. 低温建筑技术, 2010(10): 65 - 67. (XIONG Chun-bao, MA Lu-bin, FANG Yan-lin. Design of 3D visual simulation system for foundation pit deformation monitoring[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(10): 65 - 67. (in Chinese))
- [8] 董文澎, 朱合华, 李晓军, 等. 大型基坑工程数字化施工仿真方法研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 776 - 781. (DONG Wen-peng, ZHU He-hua, LI Xiao-jun, et al. Research on digital construction simulation in large foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 776 - 781. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)