

# 水利水电工程地质 - 水工 三维协同设计系统研究

李明超<sup>1,2</sup>, 钟登华<sup>1</sup>, 王忠耀<sup>2</sup>, 刘杰<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

**[摘要]** 针对实现水利水电工程三维设计中所存在的关键问题, 基于三维地质建模、水工建筑物快速建模和计算机协同设计技术等先进技术, 采用了面向对象方法, 设计并实现了水利水电工程地质 - 水工三维协同设计系统。该系统由三维地质建模、水工建筑物建模、工程地质分析与设计, 以及数据库管理 4 个模块组成。地质和水工建筑物建模为工程地质分析与设计提供了三维模型, 能够进行三维剖切分析、建基面分析、地下建筑物布置分析、边坡开挖分析等多方面的综合分析和不同专业间的协同作业, 为水利水电工程三维设计提供了技术支持。

**[关键词]** 协同设计; 三维地质建模; 水工三维设计; 可视化

**[中图分类号]** TV314; TP391.41 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)01-0043-05

## 1 前言

随着技术的进步和各种机械设备的不断发展, 目前水利水电工程建设面临着更为复杂的条件, 其中复杂的地表地形条件(高山、峡谷、高边坡等)和地质构造(褶皱、断层、软弱带等)给工程勘测、设计和施工管理带来了较大的困难。水利水电工程不同专业队伍之间的工作方式是流水线式的, 即地质勘测—地质分析—水工设计—施工设计—施工管理。这种工作方式虽然使各专业部门的职能非常明确, 但不利于专业之间的信息交叉与反馈, 往往产生地质与水工、施工相脱节的现象; 同时, 当有新的地质资料加入或者设计方案发生更改时, 各专业人员都需花费很多时间和精力返回重新工作, 这个过程不仅存在着大量的重复性劳动, 而且不同专业之间的数据难以有效地协调, 使得工程设计的水平和效率降低, 从而影响工程施工建设的顺利进行。

基于上述原因, 随着计算机辅助设计/计算机辅

助工程(CAD/CAE)在水利水电工程中的深入应用和人们的迫切需求, 采用多种先进的技术进行水利水电工程的三维一体化设计已成为一种必然趋势。乔书光提出一种基于设计流程管理的水工协同 CAD 模型和框架<sup>[1]</sup>; 钟登华等人提出了基于 GIS 的水利水电工程三维可视化辅助设计基本方法和结构体系<sup>[2]</sup>; 袁锦虎等人提出实现三维可视化水工设计系统的可行框架和实现方案<sup>[3]</sup>; 杜廷娜等人基于 CATIA 平台设计了水电站大坝廊道三维可视化配筋系统<sup>[4]</sup>。这些成果推动了水利水电工程三维设计的发展, 然而, 水利水电工程设计和地形、地质、水文等自然条件密不可分, 三维工程设计必然要求首先建立三维地质模型。因此, 以三维数字化地质模型为基础<sup>[5]</sup>, 开发实现完善、简便、实用的水利水电工程三维一体化设计系统, 建立各专业完整的共享数据库, 地质、水工和施工等不同专业的工程人员能够很容易地进行数据采集、分析处理、设计并优化方案以及施工管理等, 实现专业间的交叉循环, 大大提

**[收稿日期]** 2008-05-28

**[基金项目]** “十一·五”国家科技支撑计划(2008BAB29B05); 中国博士后科学基金资助项目(20070420706, 200801331)

**[作者简介]** 李明超(1979-), 男, 湖北仙桃市人, 天津大学副教授, 主要从事水利水电工程建模与仿真方面的研究;

E-mail: LMC@tju.edu.cn

高水利水电工程勘测分析与设计的水平和效率,具有重要的现实意义。

## 2 总体结构

以三维地质(岩级)模型为中心,建立水利水电工程地质-水工三维协同设计系统的总体结构如图1所示。该结构包含三维地质建模、地质分析与设计、水工交互设计三大部分,通过属性库、模型库、图像库和图形库进行相互关联,将地质勘探、地质解释、地质剖面出图、岩体质量可视化分级、水工建筑物三维建模、填挖方量分析、建筑物相关地质剖切分析、枢纽建筑物布置与优化设计、方案输出等涉及地质勘测分析和水工专业的不同工作内容关联起来,形成一个完整的一体化结构,在统一的三维协同设计平台上完成。整个工作过程是不断反馈更新的、交互的、可视的过程,使得为同一项工程进行不同专业设计的工程师能够及时沟通、及时反馈、及时修改方案,提高设计效率。

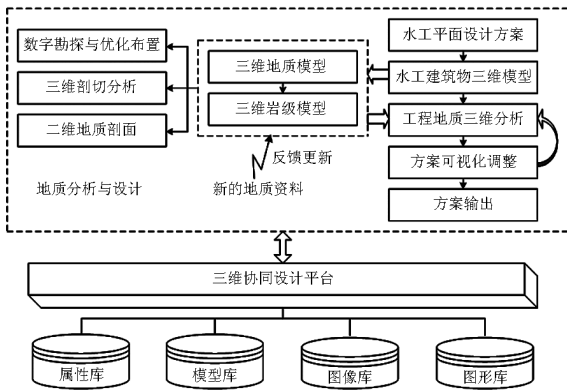


图1 总体结构图

Fig. 1 Overall structure scheme of the system

## 3 系统设计与关键技术

### 3.1 系统设计

结合实际工程情况,以 VC++、OpenGL 和 VisualGeo 为工作平台,提出三维协同设计系统的模块设计方案如图2所示。系统由三维地质建模、水工建筑物建模、工程地质分析与设计,以及数据库管理4个模块组成。4个模块不仅分工明确,易于程序实现,而且相互之间关系密切。三维地质建模和水工建筑物建模模块能够提供直观准确的三维地质模型和设计方案,并能将两者进行耦合;工程地质分析与设计模块是核心,在模型建立

和设计方案的基础上,根据实际的需要对地质剖面、基础处理、地下建筑物布置、边坡开挖等多方面的综合分析,研究对比多种方案的优劣并作出合理设计;数据库管理模块为工程地质三维建模、三维可视化分析、三维协同设计提供对象属性管理和各种输入输出手段。整个系统结构规范且具有良好的维护性。

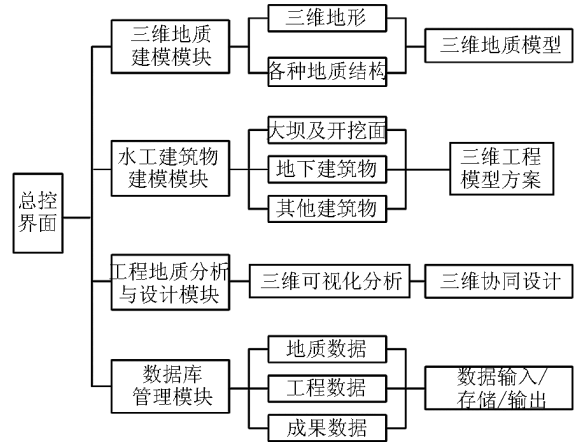


图2 系统模块设计方案

Fig. 2 Module design of the system

### 3.2 系统关键技术

#### 3.2.1 三维地质建模技术

地形地质是水利水电工程设计与建设的基本载体,三维地质模型是实现水工三维可视化设计的基础。三维地质建模是目前国内外研究具有挑战性的一个热点问题,在分析总结已有研究成果的基础上,笔者等针对水利水电工程地质信息的复杂性和特殊性,提出了以非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)结构为主、结合不规则三角网(triangular irregular network, TIN)模型和边界表示(boundary representation, BRep)结构的混合数据结构<sup>[5, 6]</sup>,其中 NURBS 结构用来拟合构造复杂的地质曲面,以 TIN 模型作为一种中间转换表达方式,而 BRep 结构则用来组织 NURBS 地质曲面的拓扑关系,构造复杂的地质体。

基于上述数据结构,三维地质模型的建立过程由地形建模、地质结构面构建和地质体建模构成<sup>[7]</sup>。地形建模是运用 TIN 模型和 NURBS 技术获得满足地质建模要求的地形轮廓体,这是构建地质模型的基础。地质结构面则利用 NURBS 工具和相关算法构造描述各类地质对象的几何结构面,如地层、断层、侵入体、错动带等。而地质体模型则将上述结果通过 BRep 拓扑结构和图形布尔切割运算有

机地整合起来,构建相应的三维地质几何模型,并导入地质颜色、进行纹理映射描绘以及渲染运算,通过对模型的检查、检验及补充修改后,输出最终便于分析与应用的三维地质模型。

### 3.2.2 水工建筑物三维快速建模技术

与地质条件密切相关的水工建筑物主要包括有大坝工程(拱坝、重力坝、土石坝等)、地下工程(地下厂房系统、导流洞等)和开挖工程(坝基面、溢洪道、边坡开挖等)等。为了能够与地质对象进行耦合运算,水工建筑物亦均采用 NURBS 建模,具有精度高且数据量小的优点。

对于拱坝、重力坝等混凝土坝,可以直接根据描述其体形的一系列函数或曲线方程及相应的控制点坐标,生成其三维几何模型;对于土石坝,根据各分区形体参数(包括高度、宽度、坡度)、控制高程和内部结构形态进行 NURBS 图形建模,然后按照分区间层次拓扑关系连接组合,通过布尔合并运算完成整体大坝模型的构建。

对于地下工程建筑物,他们一般是由若干条地下洞室组成的集合;对于每一个地下洞室对象,洞室断面形态控制洞室的几何形态,洞室中心线则控制其空间位置。洞室断面是地下工程几何建模的重要参数,主要有城门洞形、圆形、矩形和梯形等;而洞室中心线则是洞室底板的轴线。根据这两项数据,再加上控制坐标,则利用路径扫描法快速实现洞室三维建模。

对于坝基/坝肩面、溢洪道等开挖面,则主要是根据平面布置图和剖面图构建出其轮廓线框架,然后采用线性插值方法形成相应的 NURBS 曲面,即可得到开挖面的三维模型。

### 3.2.3 计算机协同设计技术

计算机支持的协同工作(computer supported cooperative work, CSCW)是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一个新的研究领域,是指在异地环境下的群体成员借助计算机及网络技术,共同协调与协作来完成一项任务<sup>[8]</sup>,计算机协同设计技术(computer supported collaborative design, CSCD)是 CSCW 在设计工作中的应用<sup>[9]</sup>。协同 CAD 是协同设计与 CAD 的交叉领域,它将 CAD 技术与 CSCD 技术结合在一起,为用户提供实时的、在线的协作工具和环境,使得来自不同领域专家并行协同高效地工作,从而得到高质量的设计结果。

协同 CAD 以共享的协同设计环境为中心,研究

在一个 CAD 设计队伍中如何协调那些负责设计项目的不同方面的技术人员之间的活动,使整个设计工作能协同进行<sup>[10]</sup>。协同 CAD 系统需要在各用户之间共享设计的多方面内容,其中最主要的是共享设计模型,在协同 CAD 中可以使用图形共享,通过全分布式结构、异步刷新功能来实现。

## 4 系统实现

根据上述分析、设计和关键技术,基于 Windows 2000/XP 操作系统,应用 Visual C++ 2005, OpenGL 和 VisualGeo 平台进行系统开发。该系统采用了快速原型化方法进行开发,即在对用户需求初步调查的基础上,以快速的方法先构造一个可以工作的系统原型,随着用户或开发人员对系统理解的加深而不断地对原型进行细化、修正和补充,产生一个新的原型版本,如此反复,从而形成一个相对稳定的、质量较高的系统。

以某一实际水电工程为例,应用该系统进行地质-水工三维可视化分析与设计,图 3 为所建立的三维地质模型,图 4 为大坝设计方案的三维模型,图 5 为耦合了地质、大坝及建基面、地下工程和边坡开挖的三维统一模型,图 6 为大坝、地下建筑物与覆盖层、断层、软弱夹层等不良地质结构之间的复杂关系分析。图 7 为大坝与地下厂房系统进行协同设计的一个示例,协同作业功能将一个需要多人分工作业完成的模型切割成多个文件,由不同的使用者共同完成这个模型;一个文件同时只能由一个使用者编辑,每一个使用者在自己负责的文件里都可以看到模型其他部分的进度,例如图 7 中的大坝和地下洞室模型,其中地下厂房模型是附加的参考文件,不能编辑,但可以进行更新;在地下厂房模型的参考下,大坝模型是可以编辑调整的,从而达到两者更好的协调统一。

## 5 结语

基于三维地质建模技术、水工建筑物快速三维建模技术、可视化仿真技术、计算机协同设计技术和水利水电工程设计等理论方法和技术,对水利水电工程地质-水工三维协同设计系统进行了研究。该系统采用了面向对象的程序设计思想,包含三维地质建模、水工建筑物建模、工程地质分析与设计,以及数据库管理 4 个模块。通过地质建模和水工建筑物建模,为工程地质分析与设计提供了三维模型基

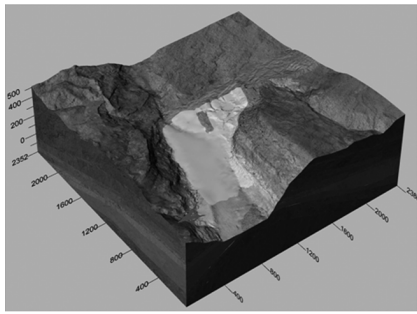


图3 三维地质模型  
Fig.3 3D geological model

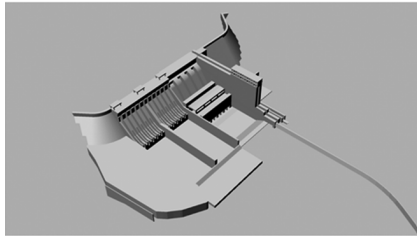


图4 三维大坝模型  
Fig.4 3D dam model

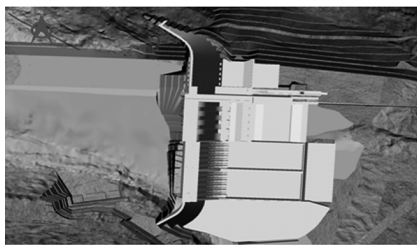


图5 三维统一模型  
Fig.5 3D engineering – geological integrated model

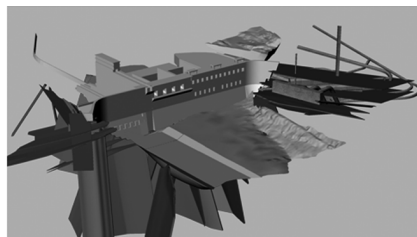


图6 工程方案 – 地质结构三维分析  
Fig.6 3D analysis between project scheme and geological structures

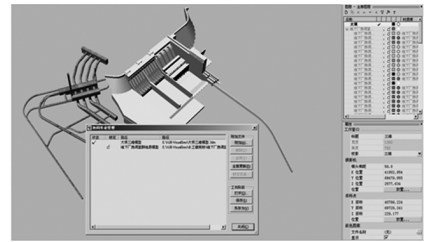


图7 三维协同设计  
Fig.7 3D cooperative design

基础,能够进行任意的三维剖切分析、建基面处理分析、地下建筑物布置分析、边坡开挖分析等多方面的综合分析和不同工程师之间的协同作业,提高设计效率。该系统具有较强的通用性和实用性,为水利水电工程三维地质 – 水工协同设计提供了技术支持平台。

#### 参考文献

- [1] 乔书光. 基于设计流程管理的水工协同 CAD 模型研究[D]. 河海大学, 2003
- [2] 钟登华, 刘东海. 工程可视化辅助设计理论方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004
- [3] 袁锦虎, 常晓林, 邓虹. 水工三维可视化设计系统的技术支撑和实现[J]. 水利水电科技进展, 2009, 26(增1): 93 – 95
- [4] 杜廷娜, 丁一, 何朝良, 等. 水电站大坝廊道三维配筋 CAD 系统设计[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(10): 82 – 86
- [5] 钟登华, 李明超. 水利水电工程地质三维建模与分析理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [6] 钟登华, 李明超, 刘杰. 水利水电工程地质三维统一建模方法研究[J]. 中国科学 E 辑(技术科学), 2007, 37(3): 455 – 466
- [7] Zhong D H, Li M C, Song L G, et al. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoenvironmental applications: an example from the Jinping first – level hydropower engineering project, China[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(9): 1270 – 1282
- [8] 李峰, 郭玉钗, 林宗楷. 工作流管理系统中协同建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(11): 810 – 812
- [9] 崔玉珍, 刘弘. 一种基于构件的协同 CAD 环境[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2006, 21(1): 42 – 45
- [10] Wang X Y, Dunston P S. User perspectives on mixed reality tabletop visualization for face – to – face collaborative design review[J]. Automation in Construction, 2008, 17(4): 399 – 412

# 3D geology-hyrotechnics cooperative design system of hydraulic and hydroelectric engineering

Li Mingchao<sup>1, 2</sup>, Zhong Denghua<sup>1</sup>, Wang Zhongyao<sup>2</sup>, Liu Jie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Mid-South Design & Research Institute, China Hydropower Consulting Group, Changsha 410014, China)

[**Abstract**] Based on 3D geological modeling technique, rapid modeling technique of hydraulic structures, and computer supported collaborative design technique, the 3D geology-hyrotechnics cooperative design system of hydraulic and hydroelectric engineering is implemented by the object-oriented method. The system includes four modules: 3D geological modeling, hydraulic structure modeling, engineering-geological analysis and design, and database management. The modeling modules offer the analysis-design module different kinds of 3D models. Then, comprehensive analyses and cooperative works among different specialities can be realized, such as 3D slitting analysis, treatment analysis of fundamental surfaces, arrangement analysis of underground structures, slope cutting analysis. It can offer technical supports to 3D design of hydraulic and hydroelectric engineering.

[**Key words**] cooperative design; 3D geological modeling; 3D hyrotechnics design; visualization