

大型地下洞室群地质信息三维可视化分析与应用

宋海良 王 帅 刘 杰 钟登华

(天津大学建筑工程学院 , 天津 300072)

摘要 提出采用三维地质建模技术进行大型地下洞室群地质信息可视化分析的研究方法 , 构建了模拟真实地质形态的地下洞室群地质三维可视化模型 , 直观准确地描述了工程所处的地质条件和地质环境。基于所建立的地质模型 , 可实现与地下洞室群相关的多项地质信息的三维可视化分析。工程应用表明该方法可为应对复杂地质条件下地下洞室群设计与施工中的地质问题提供一种有效的分析手段。

关键词 地下洞室群 ; 地质模型 ; 三维可视化分析 ; 地质信息

中图分类号 : P642 ; TP391.9 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2007)06-0080-05

Three-dimensional visualized analysis and application of geological information of large underground cavern groups / / SONG Hai-liang , WANG Shuai , LIU Jie , ZHONG Deng-hua(*School of Civil Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China*)

Abstract : A 3D visualized model was developed for simulation of the geological morphology of large underground cavern groups , which could describe the geological condition and geological environment precisely . With the developed geological model , 3D visualized analysis of some relevant geological information about underground cavern groups was realized . The result of engineering application shows that the method provides an effective measure for design and construction of underground carven groups under complex geological condition .

Key words : underground cavern group ; geological model ; 3D visualized analysis ; geological information

随着我国水利水电建设事业的飞速发展和施工技术的不断改进 , 水电站地下式厂房越来越多 , 其规模也越来越庞大。地下式厂房将主厂房、主变压室等布置在地下 , 各单洞和各个大洞室组成了一个立体交叉的地下洞室群体结构 , 所以又被称为地下洞室群^[1]。由于地下洞室群布置在地下山体中 , 所在区域往往地质条件不佳、地质构造复杂、地质信息众多 , 给工程设计与施工带来较大的困难 , 传统的二维、静态的地质信息处理分析方式难以满足岩体结构空间分析的需求^[2]。本文综合多种先进理论并结合实际工程需要 , 提出采用工程地质信息的三维可视化建模技术 , 基于以非均匀有理 B 样条(NURBS) 结构为主的混合数据结构 , 进行地下洞室群三维地质建模与相关地质信息的可视化分析与应用研究。

1 工程地质信息三维可视化

1.1 基本实现途径

工程地质信息的三维可视化就是以适当的数据

结构建立地质特征的数学模型 , 并采用计算机图形学技术将地质数学描述以 3D 真实感图像的形式予以表现^[3]。地下洞室群工程区域的地质构造复杂、信息量大、分析要求高 , 选择合适且真正实用的三维数据结构极为关键。在分析国内外三维地质建模研究成果的基础上 , 针对地下洞室群地质条件的复杂性和特殊性 , 本文采用以 NURBS 结构为主、结合不规则三角网模型(TIN) 和边界表示(BRep) 结构的混合数据结构^[4]作为实现三维地质建模的工具。其中 , NURBS 数据结构用来拟合构造复杂的地质曲面 , 以 TIN 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。采用这种混合数据结构 , 不仅能够有效地表达地质对象的几何形态和拓扑空间关系 , 而且便于将相关的地质属性信息与几何结构结合起来 , 模型精确度高 , 数据存储量小 , 布尔运算速度快。

基于上述数据结构 , 实现地下洞室群三维地质建模的基本思路如下 : ①根据地质钻孔、平硐和地质

勘探剖面等资料,交互解译形成平面地质剖面图(包括横剖面图、纵剖面图和平切图);②基于混合数据结构分别对自然地质对象(包括地形类、地层类、断层类等)和人工对象(包括地下工程、钻孔、平硐等)进行插值、拟合和几何建模,构建相应的工程整体区域三维地质模型和工程建筑物模型,其中地质模型还需要运用原始地质数据(主要是钻孔数据)进行地质趋势面分析以补充修改和验证;③对这两大类模型进行布尔操作运算,最终完成耦合地质信息和工程建筑物信息的地下洞室群地质三维可视化模型。

1.2 三维数字地形简化建模

目前地形表面模拟采用得较多的是不规则三角网模型(TIN)和规则格网模型(GRID),但这两种模型均无法满足实际地质建模的需要^[5]。为了获得准确实用的区域地质轮廓体模型,这里对三维数字地形提出一种新的处理方法,即利用NURBS技术对TIN进行简化处理,主要分为3个步骤:

a. 利用地形等高线原始数据,在GIS环境中采用改进的Delaunay三角剖分算法生成TIN。对于生成的初始TIN,应消除由于等高线数据过于密集或采集信息缺乏所造成的细小、狭长三角形,然后内插生成高精度的TIN。

b. 从所得到的TIN中利用三角线性插值采样提取相同间距的断面线数据,然后根据NURBS曲面算法和蒙面法重新生成新的地形表面。根据实验验证,将地形TIN转化为相应的NURBS曲面模型,其数据存储量大大地减小,且精度损失很低。

c. 根据所得到的NURBS曲面模型标明所研究区域的长方体,利用计算机图形学的布尔操作运算,获得整个研究区域的地形轮廓体模型。

1.3 地下洞室群三维数字几何建模

地下洞室群的三维几何建模较为简单,为了能够与地质对象进行布尔操作运算,本文采用NURBS建模技术,利用其三维参数并通过BRep拓扑结构来完成地下洞室群三维数字几何模型的构建。地下洞室群是由若干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,洞室中心线控制其空间位置。洞室断面形态是地下洞室群几何建模的重要参数,主要有城门洞形、圆形、矩形和梯形等,用符号Cross_Sec_Curves表示;洞室中心线是洞室底板的轴线,用符号Rail_Curve表示。根据这两项数据,再加上控制坐标,利用路径扫描法^[6]快速实现洞室三维建模,这可通过Sweep(Rail_Curve, Cross_Sec_Curves)函数完成。最后将所有完成的洞室实体集合,清除多余的曲线或曲面,合并重复部分,得到完整的地下洞室群三维几何模

型。为了便于分析和管理的,可以将建筑物模型按类别分放在不同的层上,并可以采用不同的颜色绘制以示区分。

1.4 地质结构面的构造方法

对岩体结构而言,结构面是起主导作用的,结构体则是由相关结构面组合围限而成的。结构面是地质体中力学强度相对较弱的部位,尤其是不连续面的存在会导致地质体力学特征的不连续性和不均一性,对地质体的变形和稳定性起到控制作用^[7]。区域地质体在数学描述上是一个被结构面切割形成的有限个结构体的集合,因此首先应从整体上对地质结构面(如地层面、断层面等)进行系统的拟合构造,获得更接近真实的地质构造拓扑关系。针对工程地质的需要,基于NURBS技术运用一种新的途径,将地质定性分析和定量分析有机地结合起来,可以分4个步骤进行:①根据实际勘探的地质数据,采用地质交互式解译法,由地质专业人员交互解译得到各种二维地质图(包括区域整体平面地质图、横剖面图、纵剖面图和平切面图等)并将其数字化存储;②将原始数据(钻孔、平硐数据)和上述图形数据按真实坐标系统进行三维转换,并全部集合到一起;③从该集合中按各个地质结构面提取相应的点、线数据,修改整理后按结构面分类存储;④基于所得的建模数据,利用NURBS曲面技术快速重建各个地质结构面。

此方法思路清晰简单,较复杂的图形和数学运算封装在底层,处理速度快,实用性较强。其中,第①步就将各个结构面的空间交错关系作为整体考虑,第④步将结构面的建模数据转化为可视的空间曲面,注意要保证所形成的结构面与钻孔、平硐数据相一致。利用NURBS技术建立了地形表面数字模型和地质结构面之后,即可通过布尔切割运算得到相应的结构体。

2 地下洞室群三维地质模型的建立

2.1 布尔切割运算

由于地下洞室群三维地质模型是采用NURBS技术实现地质体重构的,因此面与体、体与体之间布尔切割运算的基本原理是相同的,假设有A、B两个岩层实体,布尔切割算法的基本过程如下:

a. 利用最大最小包围方盒检查A、B是否相交,若相交则进行第b步。

b. 采用算法简单的离散法(均匀网格逼近)计算A、B的交线。

c. 根据交线对A、B表面判定分类,可以把A的所有表面由对B的关系分为4个子集合: $A_{in}B$, $A_{out}B$, AB_{shared} , $AB_{anti-shared}$,分别表示A实体中位于B

实体内的表面集合 A 实体中位于 B 实体外的表面集合 A , B 实体相交部分外法向与 B 表面法向一致的 A 的表面集合 , 以及 A , B 实体相交部分外法向与 B 表面法向相反的 A 的表面集合。

同样地可对 B 的所有表面分类 , 则有

$$\begin{cases} A \cup * B = A_{\text{out}} B + B_{\text{out}} A + AB_{\text{shared}} \\ A - * B = A_{\text{out}} B + \text{Flip}(B_{\text{in}} A) + AB_{\text{anti-shared}} \\ A \cap * B = A_{\text{in}} B + B_{\text{in}} A + AB_{\text{shared}} \end{cases}$$

其中函数 $\text{Flip}(f)$ 表示对表面 f 外法向的方向矢量进行反转操作。

d. 删去与结果无关的边界 , 建立新的数据结构 , 获得新的图形运算结果。

在上述算法中 , 若 A , B 分别由 m , n 个面组成 , 则其求交运算量为 O 的数量级为 mn) 效率较低 , 因此在一些实际情况中 , 引入了局部运算 , 只需对现有物体的形状作局部修正 , 就可大大减少运算量。

2.2 地质体的表示

在工程地质三维可视化模型中 , 地质体的颜色是一个非常重要的物理特征 , 尤其是在地质构造非常复杂的情况下 , 它可以明显地表示不同层位之间、地层和断层之间的关系以及其他重要的地质结构面。一般地 , 可以简单地用颜色区分地质体 , 但为了更真实地反映实际地质情况 , 更多地采用表面纹理来映射各种地质结构。表面纹理的描绘用于表示细微的凹凸不平的物体表面 , 如岩石表面、布纹等。由于将这种细微的表面凹凸表达为数据结构不仅非常困难且无必要 (因为通常只是为了逼真的视觉效果) , 因此可以用一种特殊的算法^[8]即纹理扰动函数将纹理逼真地显示出来 , 满足观察需要。

在地下洞室群地质三维可视化模型中 , 依据实际的工程地质描述 , 并结合中华人民共和国水利部制定的水利水电工程制图标准 , 对各岩层实体、岩脉进行表面纹理描绘 , 而其他地质结构体如断层、地下水位线、风化卸荷带以及覆盖层等则用标准颜色醒目地显示和区分。

2.3 模型的建立与检验

对研究区域的地形轮廓体和各个地质结构面分 2 个步骤处理 : ①以地形轮廓体为对象 , 用每一地层结构体的上下地质界面作切割运算 , 即可得到相应的地层结构体 ; ②以各个地层结构体集合形成的初始地质体为对象 , 利用已经围限而成的其他结构体 (如断层、岩脉、深裂缝等) 进行体的布尔差运算 , 并将这些不同构造的部分与地层体按相应的空间位置关系正确地组合起来 , 这样就由各个地质结构体及其拓扑关系建立了工程研究区域整体三维地质模型。将已建立的地下洞室群三维数字几何模型按对

应的位置坐标导入工程区域整体三维地质模型中 , 再对这两大类模型进行布尔操作运算 , 即可得到最终的地下洞室群地质三维可视化模型。

模型应满足确定性、可视性、可修改性的要求。在模型建立过程中要进行一系列检查和检验 , 主要包括 : ①图形的几何性检查 : 需要从几何结构上检查模型构造过程中线的连续性、面的连续性和拓扑性、体的封闭性等 ; ②原始数据的精度检验 : 要求模型能够与实际钻孔、平硐处的原始信息吻合 , 达到一定的精度要求 , 这是检验中最重要的一环 ; ③地质结构合理性检查 : 在保证原始数据精度的基础上 , 需要从总体结构上分析构造的合理性 , 结合二维剖面图进行检查和修改。这样才能保证所建立地下洞室群三维地质模型的客观准确性 , 在此基础上进一步合理化以满足可视化分析的需要。

3 模型地质信息的可视化分析

基于所建立的三维地质模型 , 对地下洞室群进行工程地质信息的可视化分析 , 可以从以下几个方面进行 :

a. 三维模型的动态显示。这可通过 Camera (ObserverPoint , TargetPoint , ViewAngle , RollAngle) 函数来控制 , 函数中的参数反映了观察者位置、被观察对象中心、观察视角范围和被观察物体在二维投影面的旋转角度。根据需要 , 改变相应的函数参数 , 可全方位、动态地显示 (旋转、平移、放大、缩小等) 三维地质模型 , 并可层次化地显示单个地质结构 , 可以方便地观察模型和从模型上获取各种所需信息 , 从而为决策者提供一种方便的观察和评价手段。

b. 地质模型的剖切分析。地下洞室群三维地质模型建立后 , 可对其进行一系列相关的剖切分析 , 如沿三大洞室 (主厂房、主变压室、调压室) 轴线的地质剖切等 , 这可通过 Get3DSection (CutPlaneType , CutPlaneParameter , CutObjects , RemainDirection , BooleanOperation) 函数来实现和控制 , 函数中的参数反映了剖切面类型、各种剖切面的参数、剖切对象、切后保留方向和图形布尔运算类别。通过地质模型的剖切分析 , 不仅可对洞室不同剖面方向及其切平面或层面的地质特征进行综合研究与多角度认识 , 而且能够准确直观地看到地下洞室群所处的地质构造情况。

c. 地下洞室布置方案的地质评价与优化。地下洞室位置的选择主要受地形、岩性、岩体质量、地质构造、地下水等工程地质条件的控制 , 其中地形对地下洞室进出口位置影响较大 , 而其他几项则对地下洞室的围岩稳定与施工开挖有重要的影响。依据

三维地质信息的可视化分析,可对不同布置方案的诸多地质因素进行快速直接的对比分析,获得客观的地质评价结果,并能实时修改调整,设计更优的布置方案。

d. 施工开挖的宏观地质信息预测。在地下洞室布置方案的实施过程中,地质情况的不确定性和未知性给施工带来很大的困难,尤其是那些会产生不良影响的地质现象,如软弱岩层塌方、断层破碎带涌水等是施工的潜在威胁。通过地质分析可为地下洞室群施工提供宏观的地质预测,能够及时提供施工前方地质条件的变化信息,获取掌子面前方断层、裂隙等软弱结构的准确资料,辅助决策人员及时采取有效措施安全通过不良地质区域,从而可以有针对性地制定施工开挖方案,减少施工过程中的盲目性,缩短施工工期,以取得可观的效益。

e. 与施工过程动态可视化分析的结合。若将三维地质模型与地下洞室群施工过程的动态分析结合起来,针对不同的岩性条件选取施工参数,考虑不良地质构造对地下洞室群施工进度影响,可使施工过程动态分析成果更加可靠合理。同时利用三维地质模型实现施工过程的动态可视化分析,将地下洞室群置于整个地形与枢纽布置中,不仅模拟了工程真实的地质形态,使动态图形效果更为精确、形象、逼真,而且能更为深入地了解地下洞室群所处的地质条件和地质环境,从而为工程决策提供更多的信息,有助于施工方案的分析确认。

4 工程实例应用

采用本文的方法,对我国某大型水电站工程右岸地下洞室群施工系统进行三维地质建模及其可视化地质分析研究,首先建立工程研究区域整体三维地质模型,如图 1 所示。图中包括了数字地形、4 个不同岩性的地层实体(J_2^s 、 J_3^1 、 ξ_5^3 和松动岩体)、115 个大小断层、弱风化带下限以及表面覆盖层等众多地质信息。然后将模型与地下洞室群三维数字几何模型进行布尔操作运算,完成了地下洞室群地质三维可视化模型的构建,如图 2 所示。在该模型的基础上,进行了一系列与工程相关的三维地质信息的可视化分析,如图 3~图 5 所示。其中,图 3 为工程研究区域 1 170 m 高程处的三维平切图;图 4 为沿地下洞室群施工系统中轴线的地质剖切分析图;图 5 为沿主厂房轴线的地质剖面。同时,本文对地下洞室群各施工工序所涉及的地质信息分别进行统计分析,相关信息可通过编制脚本文件从已建模型中方便地获取并输出,从而可为应对洞室施工遇到的不良地质现象提供一种新的分析预测手段。三大洞室

各工序开挖经过的主要地层岩性和地质构造情况如表 1 所示。

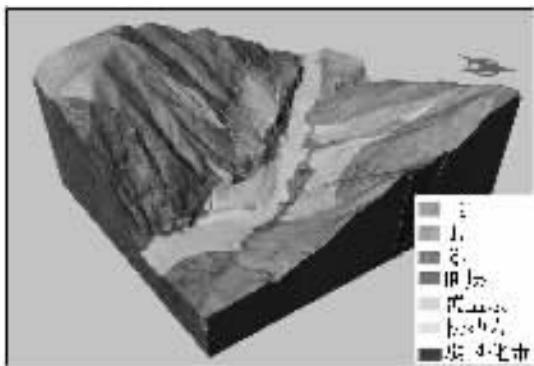


图 1 某工程研究区域整体三维地质模型

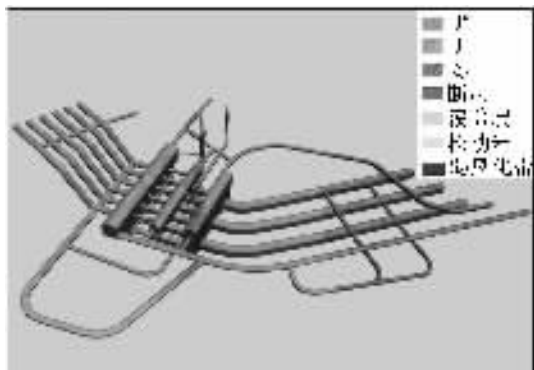


图2 地下洞室群地质三维可视化模型

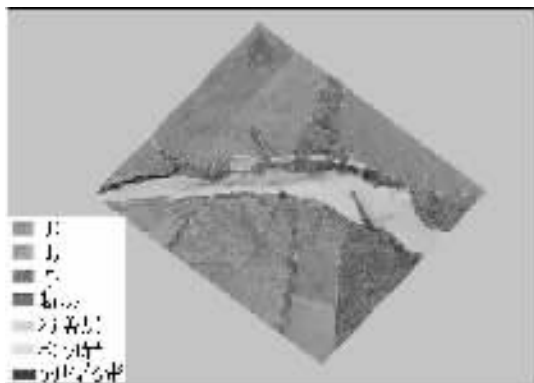


图3 工程研究区域三维平切图

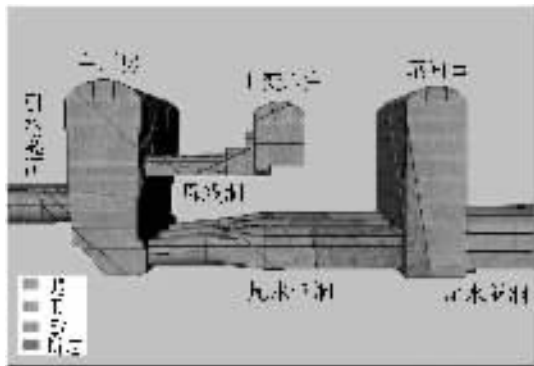


图 4 沿地下洞室群中轴线的地质剖切分析图

本文还将工程三维地质模型与施工过程的动态可视化分析进行结合,通过对任意时刻工程施工的

5 结 语

工程地质是工程建设的基础 地下洞室群的设计与施工离不开对所在区域地质情况的清楚认识和分析 而这往往是难以把握的。本文针对大型地下洞室群所处区域地质条件复杂、涉及地质信息众多的特点 提出了工程地质信息的三维可视化建模方法 完成了地下洞室群地质三维可视化模型的构建。基于地质模型 可以实现与地下洞室群相关的剖切分析、地下洞室布置方案的地质评价、地下工程施工开挖的超前地质信息预报 以及地下洞室群地质模型与施工过程动态分析的结合等多项分析应用 工程实例研究表明该方法为解决地下洞室群设计与施工中遇到的工程地质问题提供了一种有效的分析手段。

参考文献：

[1] 王树人,董毓新.水电站建筑物[M].北京:清华大学出版社,1992.

[2] 钟登华,李明超,杨建敏.复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):575-580.

[3] FRITSCH D. Three-dimensional geographic information systems: status and prospects[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vienna, 1996, 18(3):215-221.

[4] 李明超.大型水利水电工程地质信息三维建模与分析研究[D].天津:天津大学,2006.

[5] 柴贺军,黄地龙,黄润秋,等.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.

[6] 张煜,温国强,王笑海,等.三维体绘制技术在工程地质可视化中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):563-567.

[7] 贾洪彪,马淑芝,唐辉明,等.岩体结构面网络三维模拟的工程应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):976-979.

[8] 潘云鹤.计算机图形学:原理、方法及应用[M].北京:高等教育出版社,2001.

(收稿日期 2007-06-06 编辑 骆超)

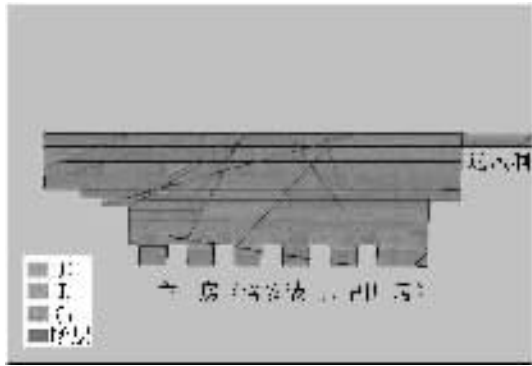


图5 沿主厂房轴线的地质剖面

表1 三大洞室各施工工序相关地质信息统计(部分)

	工序名称	地层岩性	地质构造
主厂房	主厂房上1层	k _{2-s}	f33 f30 f39 f20 f23 , f34 f4 f41 f14 f38 f18
	主厂房中1层梯段	k _{2-s}	F18 f38 f14 f6 f41 , f4 f34 f23 f39 f30 f33
	主厂房中1层保护层	k _{2-s}	F18 f38 f14 f6 f41 f4 , f23 f7 -1 f39 f30 f33 f40
	主厂房下1层	k _{2-s}	F18 f38 f37 f41 f4 f23 f39
主变压器室	主变压器室上1层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	L57 组 f39 f14 f41 f34 f23 , f40 f20 f30 f33
	主变压器室中层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	L57 组 f14 f41 f34 f23 , f40 f20 f39 f33
	主变压器室下层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	L57 组 f14 f41 f23 , f40 f39 f33
尾调室	尾调室上1层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	f41 f30 f33 f20 f39
	尾调室中1层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	f41 L57 组 f20 f39 f33
	尾调室下1层	ξ ₅₋₃ , k _{2-s}	f39 f41

整体三维面貌与相关施工信息、地质信息的全面耦合,实现地下洞室群施工过程三维动态分析,获得了各个时刻的施工信息(洞室开挖顺序、开挖强度、同时施工的工序、各工作面对应的施工时间等),以及涉及的地质信息(洞室各开挖工序当前经过的主要地层岩性、地质构造等),较为全面地表达了地下洞室群施工过程的复杂情况,从而可对地下洞室群施工方案进行更为直观、有效的分析和检验。图6为基于地质模型的地下洞室群施工动态分析界面。



图6 基于地质模型的地下洞室群施工动态分析