

文章编号: 1000-7598-(2005) 01-0011-06

基于三维地层模型的岩体质量可视化分级

钟登华¹, 李明超¹, 王 刚², 王义锋²,

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 国家电力公司 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 岩体质量分级是岩石力学学科研究的热点和难点, 在水电工程建设中具有重要的实际意义。在对岩级分类方法进行大量研究之后, 工程人员对岩级结果的表达有了更高的要求, 传统的方式已不能满足人们空间分析的需要, 研究岩体质量可视化分级十分必要。首先, 利用 NURBS 工具以一种新的数据结构和方法重建三维地层模型, 然后, 基于岩体质量分级结果, 按照空间图形集合运算算法生成相应的三维岩级模型。将上述理论方法应用到锦屏一级水电工程岩体质量分级评价中, 并进行了一系列与工程相关的岩级可视化分析, 获得了很好的应用效果。

关 键 词: 岩体质量分级; 三维地层模型; 可视化; 水电工程

中图分类号: TU45; TP391

文献标识码: A

Visualization of rock mass quality classification based on 3-D strata model

ZHONG Deng-hua¹, LI Ming-chao¹, WANG Gang², WANG Yi-feng²,

(1. School of Civil engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, State Power Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: Rock mass quality classification is an interesting and formidable issue in the study of rock mechanics, and it plays a very important role in the hydropower engineering construction. With the study of many classification methods, the engineers desire higher regalements for the expression of rock classification. Traditional ways cannot meet the demand of spatial analysis already, and the visualization of rock mass quality classification will be very necessary. Firstly, with a new data structure, 3-D strata model is reconstructed using NURBS tool. Then, according to the classification results, the corresponding 3-D classification model can be generated by set operation algorithms of space pattern. The theory is applied to rock mass quality evaluation of Jinping first-level hydropower engineering successfully, and a series of visual analyses correlating with engineering design are also operated. This study acquires very good effects in the practical application.

Key word: rock mass quality classification; 3-D strata model; visualization; hydropower engineering

1 引 言

岩体质量分级是评价岩体工程地质性质的重要手段^[1], 其目的是为查明各级岩体的工程特性提供基础, 为工程设计提供定量指标, 并起到工程地质专业与设计专业间交流和沟通的桥梁作用。岩体质量分级是岩石力学及工程界关注的热点和难点^[2], 但目前人们更多研究的是如何进行岩体质量分级评价方法^[3,4], 而对所得到的分级结果如何表达很少涉及, 一般多采用简单的数据表格或在平面图和剖面图上粗略地标明其分级结果^[5], 局限于二维、静态的表达方式。这种方式不能充分揭示岩级分类的空

间变化规律, 难以使人们直接、快速、准确地理解岩体质量分级情况, 越来越不能满足工程人员空间分析和设计的需要, 尤其对于不熟悉地质情况的设计专业人员。

数学地质理论、地理信息系统(GIS)、计算机图形学、科学计算可视化技术(VISC)及计算机硬件的快速发展为利用地质勘探资料和解译结果建立三维地层模型, 实现岩体质量分级结果的可视化显示和分析创造了条件。本文引入工程技术和计算机技术中都已成熟的非均匀有理 B 样条(NURBS)技术作为工具, 首先, 建立工程区域内的三维地层模型, 然后, 在此基础上实现岩体质量分级的三维模型, 并

收稿日期: 2003-10-08

修改稿收到日期 2004-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(50479048)和高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(200166)资助项目。

作者简介: 钟登华, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事可视化仿真、工程地质建模分析等理论技术及其在水利水电工程中的应用研究。

结合实际工程进行相应的可视化分析和处理,直观、有效地表达工程岩体质量分级评价的相关数据和结果,为工程可视化设计服务。

2 三维地层模型的建立

实际工程岩体质量分级,首先是以岩体所属地层层位和岩石组合特征为基础的,因此建立三维地层模型是实现岩体质量可视化分级的前提条件。三维地质建模本身就是当前地质学中具有挑战性的前沿课题之一,国内外不少学者对该问题从不同角度进行了大量研究^[6-9],在相关理论和实现手段上取得了较大的进展。但是,通过总结前人的研究成果可以看出,目前通过各种途径建立的三维地质模型存在着存储量和实时性不能很好统一的矛盾,模型建立之后,难以简便快速地进行相应的可视化分析,如实时动态显示、任意剖切分析和数字钻孔模拟等。

因此,针对我国大型工程地质条件复杂且特殊的情况,基于不规则三角网(TIN)模型和 NURBS 技术提出一种新的混合数据结构来重建其三维地层模型。即根据地质钻孔、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),然后以此为基础,将一系列剖面数字化输入存储,采用人工定义和计算机内插计算的方式,并结合地质趋势面分析,基于混合数据结构运用 NURBS 技术重构各地层和其它结构面,进而利用图形布尔运算形成三维地层实体模型。

NURBS 技术是 ISO 颁布的 STEP 标准中自由型曲线、曲面的唯一表示方法,针对地质体复杂形态的无规律性变化,选择 NURBS 技术构建复杂地质体三维模型,具有节省存储空间、计算机处理简便易行、并可以保证空间唯一性和几何不变性等优点,对地质表示有很高的应用价值^[10]。

由于岩体结构空间分布的不连续性、不均匀性和不确定性,实际地质内部的结构关系非常复杂,地层的划分是三维地质建模一个基础性问题。地层并不单纯指以岩性为要素的不同岩层,还包括对岩层形成破坏的断层、岩脉、错动带、深裂缝等软弱结构,这使得问题更错综复杂,目前国内外在这方面尚未取得突破性成果^[11]。因此,可靠的方法依然是由有经验的地质工程师根据平硐、钻孔及其它勘探资料,进行交互式解释、推断来确定地层的空间分布,并通过一系列二维平面图表示出来。

建立工程区域三维地层可视化模型的流程图如图 1 所示。整个模型的建立过程由 3 个子系统组成:地形模型子系统、地质界面模型子系统和地层

实体模型子系统。地形模型子系统主要是应用 GIS 技术将地形等高线转化为地形表面 TIN 模型,并通过简化处理建立相应的三维数字地形 NURBS 曲面模型,然后,利用计算机图形学原理由表面模型生成所研究地质区域的整体地形轮廓体模型,所有的地质结构体都基于此构建;地质界面模型子系统是以原始数据和解译结果为基础,按照系统且面向对象的思想,将岩层、断层、岩脉及深裂缝等结构面作为整体进行分析和建模,利用 NURBS 技术可方便快速地得到相应的结构面模型;而地层实体模型子系统则是将上述两个子系统所产生的结果通过图形布尔运算有机的整合起来,并导入地质颜色,进行纹理映射描绘以及渲染运算,从而生成完整的 OpenGL 中有真实感的三维地层可视化模型。

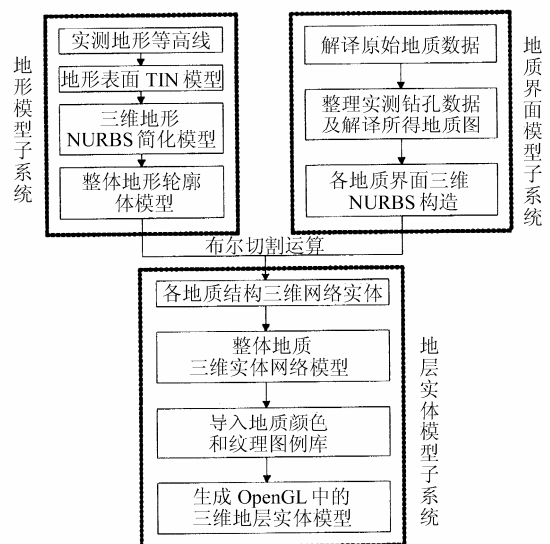


图 1 三维地层模型建立流程图
Fig.1 Flow chart of 3-D strata modeling

3 岩体质量分级三维模型

3.1 水电工程岩体质量分级

在大型水利水电工程建设中,设计和施工过程中存在的大量工程地质问题使人们逐渐认识到工程区域内岩体质量分级的实用性和重要性。合理且准确的岩体质量分类,不仅对工程岩体结构模式及强度特性作出评价,而且通过对岩体的判别评价,在合理确定建基面、调整地下洞室位置以及工程优化设计等方面都具有重要的实践价值^[12]。

从系统角度来看,岩体质量不仅是指一定空间范围岩体的总体强度水平,还应包括岩性组合及层位、岩体结构特征、所处地应力场、地下水、软弱结构面等诸多复杂因素的影响,然后,用具体分类

指标通过不同的形式进行评价。目前, 国内外对水利水电工程的岩体质量分级方法已有数十种, 多数仍采用定性与定量相结合的方式。对于水电工程坝区的分级原则有 3 条: (1) 针对坝址区拟建大坝对地基岩体的要求; (2) 以控制岩体物理力学特性的主要地质因素作为分级的基本要素, 并采用定性与定量指标相结合的方式, 保证评价的客观性和可靠性; (3) 按不同工程地质因素组合时岩体的力学参数作为分级归类的标准, 使其与国内外同行的岩体质量评价体系有较强的对应性和可比性。

因此, 由于岩体质量分级在大型水电工程设计和施工中的重要性, 且考虑的因素众多, 地质条件复杂, 地质工程师按照规范和相应的分级方法对工程岩体进行分类评价之后, 设计人员非常迫切地希望能够从三维角度察看和分析与自己设计有关的岩体分类结果。因此岩体质量分级信息三维模型及其可视化分析的研究是计算机在工程地质领域应用的一个必然趋势, 这不仅可以获得对岩体分类结果全方位、动态地分析和利用, 而且是对传统岩体质量分级成果表达的革新, 提高工程设计水平和效率。

3.2 三维岩级模型生成算法

在三维地层模型建立和工程区岩体质量分级确定之后, 基于 NURBS 技术利用计算机图形学中三维空间实体的布尔运算(差、并等)^[13], 可获得相应的三维岩级模型。假设 A, B 两个岩层实体, 布尔模型 $C=A<OP>B$, 其中 $<OP>$ 代表—(差)、 $\cup$ (并)等布尔算子, 其运算过程可按以下步骤进行:

(1) 预处理。先运用数值计算对 A, B 进行共面、共线、共点判断, 若二者有共享的几何元素, 则将其中相应的拓扑元素合并。

(2) 求交。结合包围盒根据不同的相交判断情况, 将 A, B 两实体求交分解为边/面、面/面等进行求交计算, 把交点与交线作为几何元素保存下来, 并通过拓扑元素使之成为 A, B 共享。

(3) 分类。根据求交结果, 将 A, B 中所有拓扑元素进行分类, 实体 A 的元素标记为 $(onA)(inB)$ 、 $(onA)(outB)$ 、 $(onA)(onBshared)$ (表示 A, B 共享且外法向相同的元素)和 $(onA)(onBanti-shared)$ (表示 A, B 共享但外法向相反的元素), 同样可对实体 B 的元素进行分类。

(4) 归并。对于差运算 $A-B$, 即保留仅在 A 中的元素 $(onA)(outB)$ 、 $Flip(inA)(onB)$ ($Flip$ 表示反向)

和 $(onA)(onBanti-shared)$, 删除 B 中所有元素; 对于并运算 $A \cup B$, 可理解为 $(A-B) + (B-A)$, 即保留元素 $(onA)(outB)$ 、 $(outA)(onB)$ 和 $(onA)(onBshared)$, 并删除新实体内部的冗余元素。

(5) 几何性检查。经过归并运算即可获得新的图形运算结果 C, 最后, 需要对实体 C 的几何数据结构关系进行检查, 利用所设计的函数 $Check()$ 来检查其连续性、封闭性和拓扑结构的合理性, 若有错误则需要进行修改或重建, 直到满足要求。

4 工程应用及其可视化分析

锦屏一级水电站是雅砻江水能资源最富集的中下游河段五级水电开发的第一级, 其工程地质条件相当复杂, 地层普遍变质, 岩体质量分级影响因素众多, 为了更加准确直观地认识和分析所获得的岩体信息、辅助工程设计方案的选择和评价, 有必要对其进行三维可视化分析和处理研究。

4.1 地层划分及三维地层模型

锦屏一级电站岩性层位多, 既有坚硬的大理岩、变质砂岩, 又有相对软弱的板岩和绿片岩, 岩石组合较复杂, 具体的地层划分及岩性描述详见表 1。

根据所划分的地层及相关地质结构建立起锦屏一级电站工程整体的三维地层可视化模型, 如图 2 所示。其中包括了众多的地质信息: 22 个地层体(不同地层 15 个, 重复地层 7 个)、13 个大断层、4 条云斜煌斑岩脉、十余条深裂缝等。该模型通过数字钻孔与实际钻孔进行了对比检验, 精度较高, 能够满足实际工程分析的需要。

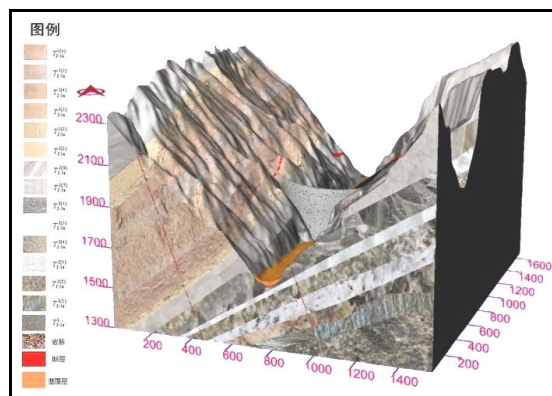


图 2 三维地层可视化模型
Fig.2 3-D visual strata model

表 1 工程区地层划分简表
Table 1 Terrane subdivision in the construction area

段	层	地层代号	厚度/m	岩性
第三段	第 6 层	$T_{2-3z}^{(6)}$	>60	中厚-巨厚层状变质细砂岩及中粗砂岩
	第 5 层	$T_{2-3z}^{(5)}$	60~80	薄-极薄层泥质、粉砂质板岩
	第 4 层	$T_{2-3z}^{(4)}$	30~130	中厚-巨厚层变质细砂岩夹薄-极薄层粉砂质板岩
	第 3 层	$T_{2-3z}^{(3)}$	35~160	厚层变质粉细砂岩夹薄-极薄层粉砂质板岩
	第 2 层	$T_{2-3z}^{(2)}$	20~50	厚-巨厚层变质粉细砂岩夹少量薄层粉砂质板岩
	第 1 层	$T_{2-3z}^{(1)}$	10~30	薄-极薄层粉砂质板岩、薄层状变质粉砂岩
	第 8 层	$T_{2-3z}^{(8)}$	45~100	灰色厚层条纹状大理岩, 底部夹绿片岩透镜体
	第 7 层	$T_{2-3z}^{(7)}$	20~65	灰色厚层条纹状大理岩, 夹薄层大理岩
第二段	第 6 层	$T_{2-3z}^{(6)}$	85~100	深灰色薄-中厚层条带状大理岩, 黑色大理岩局部夹绿片岩透镜体
	第 5 层	$T_{2-3z}^{(5)}$	10~40	灰白-浅灰色厚层状条纹状大理岩
	第 4 层	$T_{2-3z}^{(4)}$	80~130	杂色厚层角砾状大理岩夹团块状、透镜状绿片岩
	第 3 层	$T_{2-3z}^{(3)}$	60~200	浅灰-灰色厚层大理岩、角砾状条带状大理岩
	第 2 层	$T_{2-3z}^{(2)}$	35~80	钙质绿片岩、大理片岩, 底部为角砾状粗晶大理岩
	第 1 层	$T_{2-3z}^{(1)}$	40~60	绿片岩、钙质绿片岩夹角砾状大理岩
第一段	未分	T_{2-3z}^1	>90	绿片岩、钙质绿片岩

表 2 锦屏一级坝区岩体质量分级
Table 2 Rock mass quality classification in Jinping first-level dam area

岩级	亚级	层位	RQD / %	分布位置	岩体基本特征及评价
II	—	$T_{2-3Z}^{2(3)-(5),(7),(8)}$, $T_{2-3Z}^{3(2),(4),(6)}$	>85	右岸及河床弱卸荷带、左岸深部拉裂影响区以内	岩体较完整, 节理一般无软弱物质充填, 岩体嵌合紧密, 常处于较高围压状态, 属良好地基。
		$T_{2-3Z}^{2(2),(6)}$		左、右岸弱卸荷带以内	
III	III ₁	$T_{2-3Z}^{2(7),(8)}$, $T_{2-3Z}^{3(2),(4),(6)}$	65-85 (局部 40-50)	左岸深部拉裂带间相对完整岩体	岩体较完整, 部分裂隙中充填方解石膜, 岩体嵌合较紧密, 总体上强度较高; 但对影响稳定的层间错动带、松弛裂隙带和小型构造破碎带等应作专门处理。
		$T_{2-3Z}^{3(1),(3),(5)}$		左岸弱卸荷带以内	
		$T_{2-3Z}^{2(3)}$		河床浅部	
		$T_{2-3Z}^1, T_{2-3Z}^{2(1),(2)}$		右岸及河床深部	
IV	III ₂	$T_{2-3Z}^{2(3)}$	45-65	河床基岩表部	岩体完整性较差, 岩体较松弛或强度较低, 一般不宜作为高坝地基; 若需利用, 应作专门处理。
		$T_{2-3Z}^{3(1)-(6)}, T_{2-3Z}^2$		两岸弱卸荷带	
		煌斑岩脉 X 及胶结的断层带		左岸 1680 m 以下 f_5 及右岸部分胶结好的 f_{13} 、 f_{14}	
		$T_{2-3Z}^{3(1)-(6)}$, T_{2-3Z}^2		两岸强卸荷带	
IV	IV ₁	T_{2-3Z}^2, T_{2-3Z}^3	25-45 (局部 45-70)	左岸深部(III, IV 级)拉裂松弛带	岩体完整性差, 拉裂松弛, 煌斑岩脉岩体软弱, 强度低; 不宜直接作为高坝地基, 须经专门加固处理。
		煌斑岩脉 X		左岸 1680 m 以上	
V	V ₁	断层破碎带	—	f_{13} 、 f_{14} 及 f_2 、1680 m 以上 f_5 、 f_8 等	岩体破碎, 不能直接作为坝基, 须经特殊加固处理或开挖清除。
		层间错动带		$T_{2-3Z}^{2(6)}$ 上部大理岩夹绿片岩层内	
		T_{2-3Z}^2, T_{2-3Z}^3		左岸深部(I, II 级)强拉裂松弛密集带	

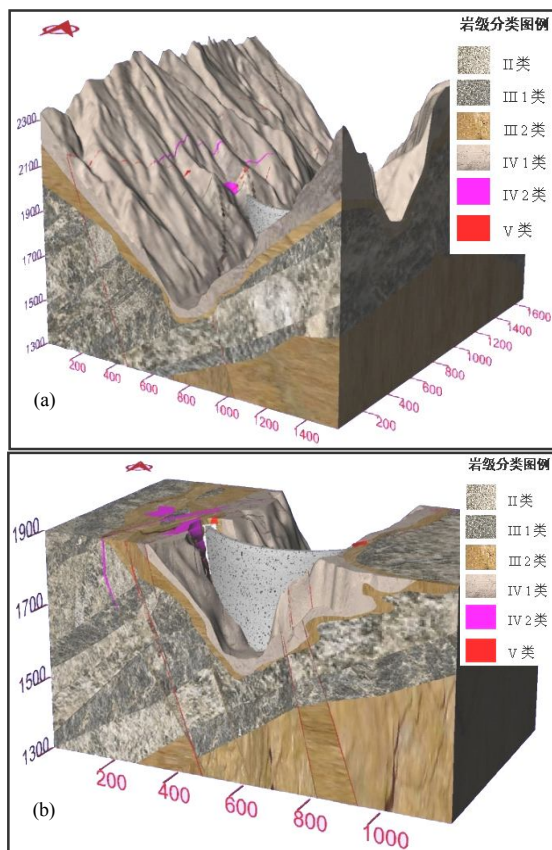


图 3 三维岩体质量分级模型

Fig.3 3D model of rock mass quality classification

4.2 坝区岩体质量分级结果

锦屏一级水电站坝址区不仅岩性复杂,而且岩体内层间挤压错动带、断层及节理裂隙发育,岩体赋存环境地应力高,两岸浅表部岩体受卸荷作用影响强烈,特别是左岸存在的深裂缝等构成了影响坝基岩体质量的基本地质要素。因此,锦屏一级水电站坝区岩体质量分级分两步进行:(1)以岩体所属地层层位和岩石组合特征为基础,同时考虑岩体结构特征及卸荷作用影响程度,进行基本工程地质单元划分和岩体质量初步分级;(2)对初分岩级与岩体力学试验成果进行相关分析,研究主要地质因素与岩体力学参数的相关性和规律性,进行岩级的调整、归纳,并参照相应规范形成最终的岩级系列。

根据上述思路,在深入分析锦屏一级水电站坝区层位及岩性组合、岩体结构特征、岩体紧密程度和深部裂缝发育状况等单一地质因素对坝基岩体质量影响的基础上,综合上述地质因素对岩体质量的影响,结合岩体力学试验成果,参照水电工程岩体分类标准,将坝区岩体划分为 4 大级(II、III、IV、

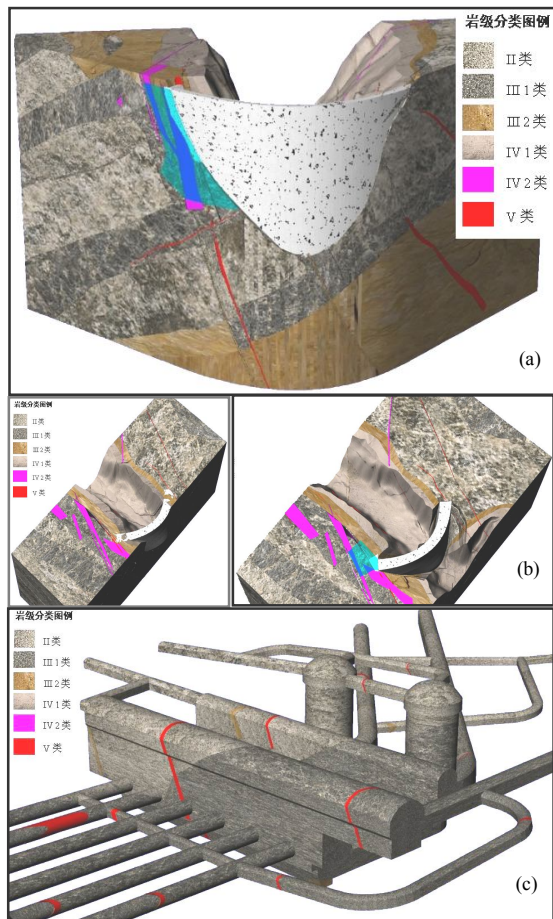


图 4 三维岩级模型可视化分析

Fig.4 Visual analysis of 3-D rock mass classification model

级)7 个亚级,具体分级结果如表 2 所示。

4.3 三维岩级模型及可视化分析

在建立了锦屏一级水电站坝区三维地层模型并获得相应的岩体质量分级结果后,对岩级相同的地层进行 *Boolean Union* 运算,对处于同一地层但因断层、岩脉等软弱结构面分割而导致岩级不同的岩体进行 *Boolean Difference* 运算,以及其它一些处理操作,就可实现三维岩级模型的构建,并能够进行与工程相联系的可视化分析。如图 3 所示,其中(a)表示工程整体区域的岩级分类结果显示,(b)为基于(a)图经过剖切运算得到的坝区范围内的岩级可视化模型,由于 V 类岩体相对很少,建模时将 V₁、V₂类合并在一起作为 V 类表示。图 4 给出的是基于三维岩级模型的几个典型可视化分析结果,其中(a)为沿拱坝轴线剖切后的三维岩级图,左岸坝肩青色的部分是表示经过灌浆和砼网格置换处理的;(b)则为沿 1790 m 高程平切所得处理前后的坝区岩级分类对比图;(c)是从整体岩级模型中开挖出来的地

下洞室三维岩级模型(放大),可以看出,其所处岩级大部分为Ⅱ类和Ⅲ₁类围岩,条件较好。这些直观准确的可视化分析为工程人员提供了很好的地质依据。

5 结 语

随着水利水电工程设计要求的不断提高和计算机软硬件技术的快速发展,实现工程可视化设计已成为一种必然的趋势,本文所提出的岩体质量可视化分级正是其基础内容之一。以往在分析得到岩体质量分级结果后,一般通过绘制普通的二维 CAD 图形来表达,其工作量极大,效率较低,且不易识别使用,传统的表现方式已难以满足工程人员空间分析和方案修改的要求。本文利用 NURBS 工具以新的数据结构实现了复杂工程三维地层模型的生成,进而通过图形运算和岩体质量分级结果构建了三维岩级模型,并结合锦屏一级水电工程进行了一系列的岩级可视化分析,这为工程设计人员提供更加直观有效的工程岩体质量数据,准确地进行岩级评价研究以及大坝坝基处理、地下洞室设计等方面都取得了良好的效果。下一步研究在完善三维地质建模和岩体质量分级方法的基础上,能够根据变化的信息对岩级可视化模型进行动态实时地修改,进一步丰富可视化分析成果,并能实现相应信息数据库的管理和查询,使之更好地为工程可视化设计服务。

参 考 文 献

- [1] Stille H., Palmström A. Classification as a tool in rock engineering[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18: 331—345.
- [2] 杜时贵,王思敬. 岩石质量定量描述研究现状及趋势[J]. **工程地质学报**, 1998, 6(3): 230—237.
Du, S.G., Wang, S.J. Review and trend of quantifying rock quality[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1998, 6(3), 230—237.
- [3] Şena Z., Sadagahb B. H. Modified rock mass classification system by continuous rating[J]. **Engineering Geology**, 2003, 67(3-4): 269—280
- [4] 张咸恭,王思敬,张倬元等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 59—62.
Zhang X.G., Wang S.J., Zhang Z.Y., et al. Chinese Engineering Geology[M]. Beijing: Science Press, 2000. 59—62.
- [5] 蒋晗,徐卫亚,谢守益等. 三维数字模型超单元生成法在工程岩体质量评价的应用[J]. **工程地质学报**, 2000, 8(1): 123—126.
- Jiang H., Xu W. Y., Xie S. Y., et al. Automatic generation of 3D digital model for rock mass quality assessment[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(1), 123—126.
- [6] Houlding S.W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [7] 柴贺军,黄地龙,黄润秋等. 岩体结构三维可视化及其工程应用研究[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(2): 217—220.
- [8] de Kemp E.A. Visualization of complex geological structures using 3-D Bézier construction tools[J]. **Computers & Geosciences**, 1999, 25(5): 581—597
- [9] 郑榕明,陈文胜,葛修润. 节理岩体三维块体系统面向对象的数据结构[J]. **岩土力学**, 2002, 23(1): 55—59.
Cheng R.M., Chen W.S., Ge X.R. Data structure for three-dimensional blocky system based on object oriented programming[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 55—59.
- [10] 李清泉,李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构[J]. **武汉测绘科技大学学报**, 1996, 21(2): 128—133.
Li Q.Q., Li D.R. Data structure in 3D geographic information systems[J]. **Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping**, 1996, 21(2): 128—133.
- [11] 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—639.
He H.J., Bai S.W., Zhao X.H., et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 637—639.
- [12] 胡卸文,黄润秋. 水利水电工程中的岩体质量分类探讨[J]. **成都理工学院学报**, 1996, 23(3): 64—68.
Hu, X.W., Huang R.Q. A simple discussion on quality classification of the rock mass in a water conservancy and hydroelectric project[J]. **Journal of Chengdu Institute of Technology**, 1996, 23(3), 64—68.
- [13] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 444—463.
Sun J.G. Computer Graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 444—463.