

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.011

疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统

缪正建¹, 钟登华¹, 李明超¹, 高伟²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

摘要: 为直观准确地理解和分析疏浚工程水下土质空间分布情况, 提出疏浚工程土质建模与可视化分析方法。基于数据库技术、土质三维建模技术、模型检测与集成技术, 建立疏浚土质集成模型。采用程序开发平台 Visual Studio 2005, 基于 OpenGL 和 OpenNURBS, 研制疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统, 实现了数字钻孔勘探模拟、三维任意剖切分析、土质信息实时查询、疏浚工程量计算分析以及其他成果输出等功能。实例应用表明, 该系统不仅具有界面可视化、操作性强、自动化程度高、运算速度快等特点, 而且其疏浚工程量计算方法提高了计算精度, 计算时间缩短约 50%, 大大减少了土质分析工作量, 能够更好地满足疏浚工程的实际要求。

关键词: 疏浚工程; 土质三维建模; 土质分析; 疏浚工程量计算; VGeoDredge 系统

中图分类号: TV851 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)04-0342-06

Development of three-dimensional modeling and visual analysis system for soil texture in dredging engineering

MIAO Zhengjian¹, ZHONG Denghua¹, LI Mingchao¹, GAO Wei²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: In order to understand and analyze the spatial distribution of underwater soil texture in dredging engineering, a method for soil texture modeling and visual analysis is put forward. Based on database technology, three-dimensional soil modeling, model testing, and integration technologies, a three-dimensional soil texture integrated model was built. A modeling and visual analysis system for soil texture in dredging engineering was developed using the platform Visual Studio 2005, based on OpenGL and OpenNURBS. Functions such as digital drilling, three-dimensional arbitrary cutting, real-time query of soil information, and dredging volume calculation were realized. Application results show that the system has the advantages of a visual interface, strong operability, high automation, and fast operation. Moreover, the proposed method for dredging volume calculation has higher precision and the calculation time can be reduced by about 50%. The system can greatly reduce workload in soil analysis and satisfy practical requirements of dredging engineering.

Key words: dredging engineering; 3D soil modeling; soil analysis; dredging volume calculation; VGeoDredge system

疏浚工程区域水下土质条件往往比较复杂、土质信息众多,传统的疏浚勘测资料都是采用二维图纸形式,不能很好地展示三维土质空间分布情况,使得设计人员难以准确分析水下三维土质的工程特性^[1]。传统的疏浚工程量计算多采用近似算法^[2],很难实现精确计算,且计算效率不高。另外,国内外关于疏浚工程土质建模和可视化分析方面的研究较少。国外学者的研究大都集中在理论分析上,对于工程应用涉及较少^[3-4]。而国内的 Wang 等^[5]、Ming 等^[6]、Zhu 等^[7]、钟登华等^[8-11]均结合实际工程应用对三维地质建模与可

视化分析开展了研究,在边坡工程、采矿工程、水利水电工程等领域取得了一定的研究成果,但是这些成果多局限于专业应用领域,不具有很好的通用性。

笔者基于数据库技术、土质三维建模技术和可视化技术,对疏浚工程土质三维建模与可视化分析进行研究。采用面向对象的程序开发平台 Visual Studio 2005,基于 OpenGL 和 OpenNURBS 研究,开发了疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统 Visual Geology Dredge(VGeoDredge),以期在实际工程中实现疏浚工程土质信息全方位的动态分析和利用,使工程人员能够直观准确地理解和分析水下土质分布情况,有效地提高疏浚工程勘测、设计效率和施工水平。

1 VGeoDredge 系统总体结构

针对疏浚工程的特点,根据用户的需求分析,提出 VGeoDredge 系统的总体结构,如图 1 所示。该系统主要由土质信息数据库、数据预处理、土质三维建模、工程土质分析以及成果输出 5 个子系统模块组成。

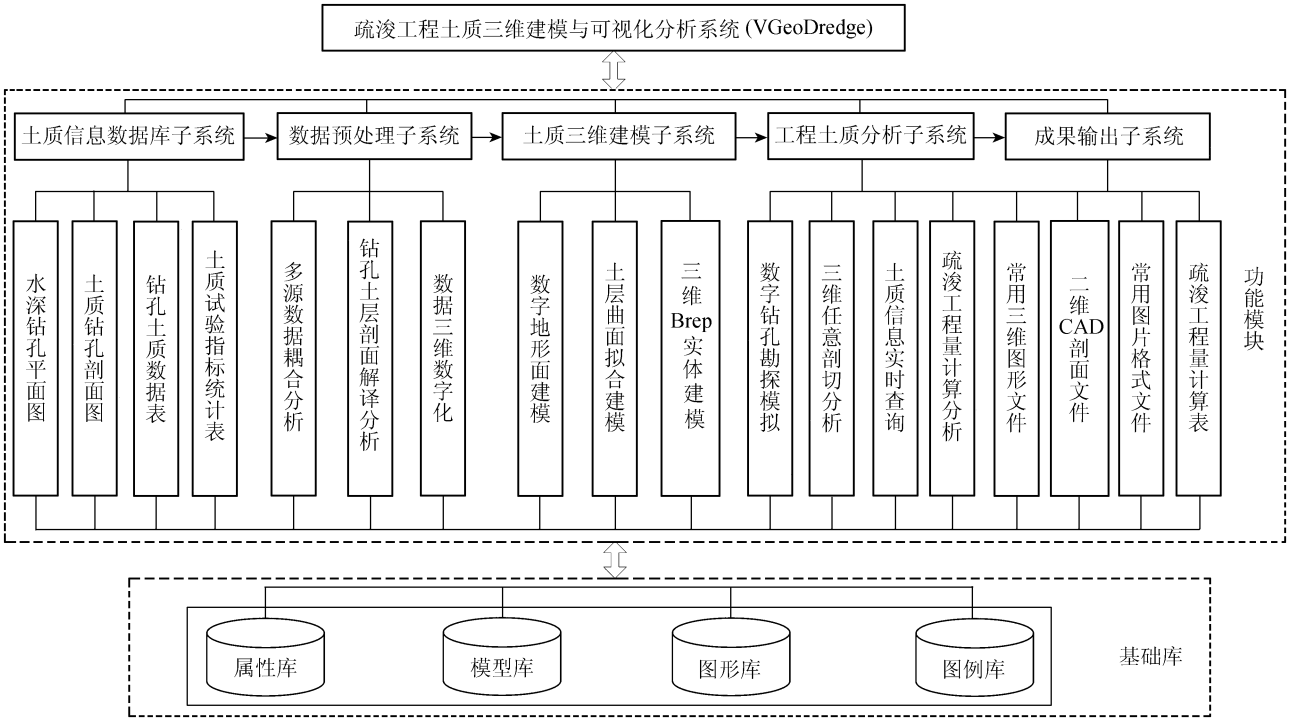


图 1 VGeoDredge 系统总体结构

Fig. 1 General structure of VGeoDredge system

2 VGeoDredge 系统关键技术

2.1 土质信息数据库技术

疏浚工程土质数据信息主要包括工程基本信息、水文气象信息、土层分布信息、钻孔信息、水深测量数据、土质试验指标统计资料及相关的分析图、表等资料。

数据结构是指对数据进行合理的组织和分类,以便构造数据库并进行计算机处理。针对疏浚工程土质三维建模的需要,将其数据结构分类如下:

- a. 地质报告,包括工程基本信息、地形地貌、水文气象条件等。此类信息主要是将文字信息按一定的数据结构输入、保存与管理。
- b. 测量数据,包括水下地形数据和陆地地形数据。该类数据主要以水深点或水深图表示,通过对水深点数据进行识别并转换,得到需要的数据结构。
- c. 钻孔数据,包括钻孔表格数据、钻孔平面图、钻孔剖面图等。此类数据主要由描述其空间位置的参数和穿过各类土层体的编录数据组成,需要将其统一成表格数据,便于自动读取并保存。表 1 是钻孔数据及钻孔中的土类分层数据示例。

表1 钻孔数据及土类分层数据示例

Table 1 Borehole data and soil classification data

钻孔编号	土层编号	土层名称	孔口坐标 x/m	孔口坐标 y/m	层底高程 z/m
ZK101	1-2	粉质黏土	4425 599.62	487 466.79	-13.38
ZK101	5-1	全风化花岗岩	4425 599.62	487466.79	-15.28
ZK102	1-2	粉质黏土	4425 583.73	487 440.23	-13.57
ZK102	5-1	全风化花岗岩	4425 583.73	487 440.23	-15.46

d. 土质试验指标数据,包括土样基本信息、物性指标、剪切指标、压缩指标、颗粒分析、特殊性指标、原位测试指标等参数。该类数据主要以表格形式进行保存与管理,并且与钻孔数据直接紧密联系,便于后期土质模型的实时查询分析与土级定量分类指标选取。

2.2 土质三维数字建模技术

疏浚工程水下土质往往比较复杂,一般包括地形体、土层体、土级体、夹层体、剥离体、透镜体等。针对疏浚工程勘测、设计与施工不同阶段,多源数据具有不同的精度要求^[12]。为满足不同阶段的要求,笔者提出了土质三维多精度建模方法,包括直接拉伸建模法、点线混合建模法、网络线拟合建模法、边界线封闭建模法。

笔者以 30 个检查点作为样本试验数据,分别采用上述 4 种建模方法进行对比分析,结果见表 2。

表2 4种建模方法对比

Table 2 Comparison of four modeling methods

建模方法	工程阶段	精度 σ/m	人工交互	时间消耗/min	模型大小/kB
直接拉伸建模法	勘察		否	<1	
点线混合建模法	勘察、设计	3.66	否	<1	215
网络线拟合建模法	勘察、设计、施工	1.91	是	1~2	384
边界线封闭建模法	勘察、设计、施工	0.17	是	2~3	516

注: $\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n(R_k-Z_k)^2}$,其中 n 为检查点数; Z_k,R_k 分别代表检查点的原始高程和模型高程, m 。

2.3 模型检测与集成技术

建立了集成众多土质信息的土质三维模型后,模型的精度与可靠性是模型能否真正应用于工程实践的关键,因此模型的可靠性分析是土质三维建模工作中极其重要的一环,模型的可靠性检测与集成分析应该贯穿整个模型的建立过程。

模型的可靠性检测和集成分析主要从以下 4 个方面进行^[13]:(a)模型数据检测,即检测工程不同阶段数据的一致性、完整性及不确定性等;(b)模型几何检测,即检测点、线、面、体等几何模型的空间位置、形态分布和拓扑关系等;(c)模型算法检测,即检测空间数据转换算法、曲面拟合生成算法、实体布尔剖切算法等;(d)模型规则检测,分为数据格式、曲面法向等定量规则和土层边界推演、实体分块等定性规则检测。

通过模型检测技术集成土质属性信息、水下土质几何模型等,实现整体三维模型的构建,如图 2 所示。

3 VGeoDredge 系统功能实现

基于 VGeoDredge 系统关键技术,采用 SQL Server 数据库技术,以 Visual Studio 2005,OpenGL 和 OpenNURBS 为主要开发平台,结合 AutoCAD, Visual Basic 等辅助技术平台进行 VGeoDredge 系统开发,系统主界面如图 3 所示。

3.1 数字钻孔勘探模拟

在疏浚工程中,钻孔勘探成本很高,因此钻孔数据很少,笔者在仅有的钻孔数据基础上建立了土质三维模型。为能够对工程局部地区的土质情况进行分析,需要实施数字钻孔勘探模拟,一方面可以节省实际钻孔的成本,另一方面还可以对某些工程区域的钻孔进行优化布置,提高钻孔的有效性。

笔者设计了数字钻孔函数 DigitalDrill(DrillObjects, SoilObjects, DrillParameters),该函数可以实现多个数字钻孔同时与土质三维模型进行布尔剖切运算,实现勘探模拟与优化布置分析,并且还可以与原始钻孔柱体进行对比分析,同时可输出钻孔柱状图,直观展现水下土质的垂直分布情况,为工程人员进行土质分析提供

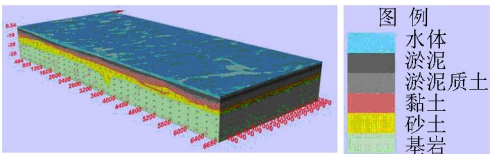


图2 疏浚工程土质集成模型(截屏)

Fig. 2 Integrated model of soil texture in dredging engineering(screenshot)

可视化分析手段。

图 4 为数字钻孔布置和勘探模拟分析结果。工程人员可采用视图区选点确定和坐标精确确定 2 种方式进行数字钻孔布置,然后采用所建的土质三维模型进行布尔剖切计算,自动输出各个钻孔的三维柱状体模型,以直观地展现各个钻孔处土质的垂直分布情况。

3.2 三维任意剖切分析

土质三维模型建立后,工程人员可以进行任意方向、任意位置、任意深度的快速、实时剖切分析,对复杂的水下土层体各个不同剖面方向的土质分布情况进行综合研究与多角度认识,直观了解土质对疏浚工程的影响状况。

疏浚工程土质剖切分析主要包括土质横剖面图、纵剖面图、平切面图、斜切面图、曲面剖切图及栅栏剖切图等的剖切分析。在此基础上,利用数学集中的布尔剖切算法,设计了统一的剖切函数 Get3DSection (CutPlaneType, CutPlaneNum, CutPlaneParameter, CutObjects, RemainDirection, BooleanOperation),其中函数参数分别表示剖切面类型、剖切面数量、各种剖切面的参数、被剖切对象集、剖切后保留方向和图形布尔剖切运算类别。剖切函数运算之后,即可在三维空间中得到各类剖面图。

图 5 为土质三维任意剖切分析结果,包括横纵剖切、水平剖切、斜向剖切和曲面剖切。本文设计的剖切函数能够实现多角度、多维、多重剖切分析,不仅直观形象,而且能为工程设计与施工提供精确的基础剖面数据。

3.3 土质信息实时查询

在疏浚工程施工过程中,挖泥船在进行施工作业时,施工人

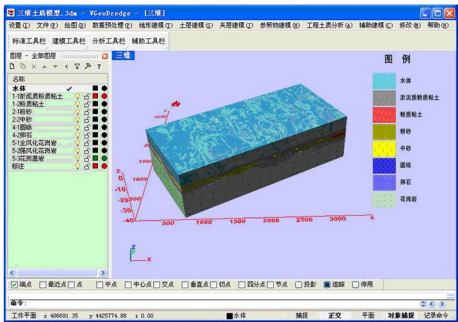


图 3 VGeoDredge 系统主界面(截屏)
Fig. 3 Interface of VGeoDredge system (screenshot)

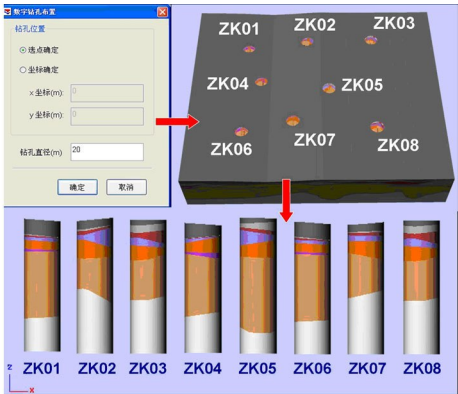


图 4 数字钻孔布置和勘探模拟分析(截屏)
Fig. 4 Digital borehole arrangement and drilling analysis (screenshot)

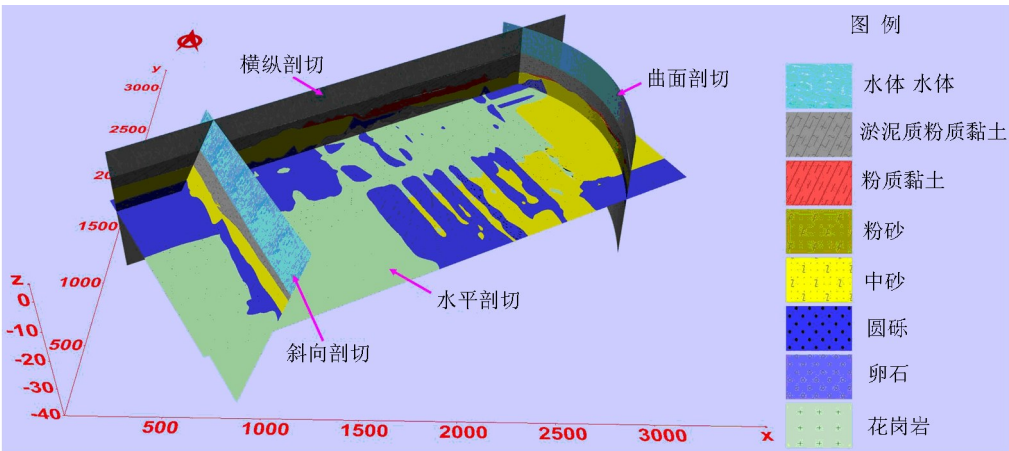


图 5 三维任意剖切分析(截屏)
Fig. 5 3D arbitrary cutting analysis (screenshot)

员往往不知道前方土质的具体情况,经常出现绞刀损坏或泥泵损坏等问题,严重影响了挖泥船疏浚效率。因此船上施工人员需要根据前方土质情况预先进行决策判断,以便实时调整挖泥船绞刀头的前进速度、挖掘深度、泥泵转速等重要参数。本文的土质三维模型可以对三维土质情况进行实时可视化查询并及时快速反馈到挖泥船系统中,为船上人员提供所需的基本土质情况。

VGeoDredge 系统采用 SQL Server 数据库技术,建立综合土质信息数据库,通过空间数据与属性数据的一一对应关系,实现疏浚工程土质三维模型指标信息的可视化查询,包括简单的土质揭层查询、任意深度单

点查询、坐标精确查询以及某一类土质实时查询等功能。对于不同类别的土质结构体,工程人员可查询得到不同的土质信息。

图6为三维土质单点坐标精确查询结果。由图6可知,该点所在的土质为淤泥质黏土,其对应的土质试验指标参数包括天然密度、液性指数、标准贯入锤击数。单点坐标精确查询可为疏浚施工提供重要的土质指标信息,从而辅助工程人员进行决策分析,实时调整挖泥船绞刀头的前进速度、挖掘深度、泥泵转速等重要参数,提高疏浚效率和产量。

3.4 疏浚工程量计算分析

在疏浚工程招投标和设计阶段,施工人员都需要进行工程成本概算和多方案优化设计等工作,其中最主要的是要进行疏浚工程量的计算;而在施工阶段,还需要进行疏浚区域回淤和扫浅工程量分析。因此笔者采用较精确的相对坐标系下的实体体积积分算法,实现相关的工程量,包括设计工程量、超挖工程量、扫浅工程量、回淤工程量等的计算。实体体积积分算法的计算过程简单快速,不仅能够直观展现三维计算模型,而且能够较精确地分土质类型输出统计计算结果^[14]。

图7为分土级进行设计疏浚工程量分析结果。通过隧道开挖曲面与土质三维模型之间的布尔剖切运算,自动生成相应的工程量计算模型。计算结果表明,土级2~6、土级9、土级10(每一类土级代表一种土质)的疏浚工程量分别为1309.3万m³,563.4万m³,435.8万m³,454.8万m³,369.8万m³,0.4万m³,9.0万m³,总疏浚工程量为3142.5万m³。

传统的断面法进行计算只能获得总疏浚工程量,约为3190.6万m³。由于本文工程的地形起伏不大,几乎呈水平分布,因此计算的疏浚工程量与断面法的计算结果接近,只相差48.1万m³,相对误差约为1.5%,符合工程精度要求。本文采用的计算方法不仅能够计算每一类土质的疏浚工程量,且计算结果更加精细。断面法计算疏浚工程量往往需要1~2d,本文算法中的土质三维建模工作需要不到1d,计算疏浚工程量并输出结果仅需要1~2min,因此总的计算时间比断面法缩短约50%,大大提高了计算效率。另外,本文算法能够输出相应的土质三维几何模型,使计算结果更直观、可视化,能够更好地满足疏浚工程的实际需求。

3.5 其他成果输出

利用土质三维模型,不仅能够获得高质量、任意间距的土质界面等值线图,还可以自动生成水深高程分布图。

另外,基于土质三维模型还可以输出多种数据格式的几何图形,包括dxf,IGES,3ds,VRML, csv, stl等,供GOCAD,ANSYS,ABAQUS等三维软件读取使用,因此其具有良好的数据兼容性,提高了系统的应用性和扩展性。

4 结 语

针对目前我国疏浚工程水下土质复杂且难以分析的特点,基于数据库技术、土质三维建模和可视化技术、模型检测与集成技术,进行疏浚工程土质三维建模与可视化分析研究,研制了疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统。该系统能够快速、精确地建立疏浚工程土质三维模型,同时基于该模型可进行一系列的三维可视化分析,输出清晰的钻孔柱状图、工程剖面图、土质实时查询结果以及疏浚工程量计算结果等,从而为

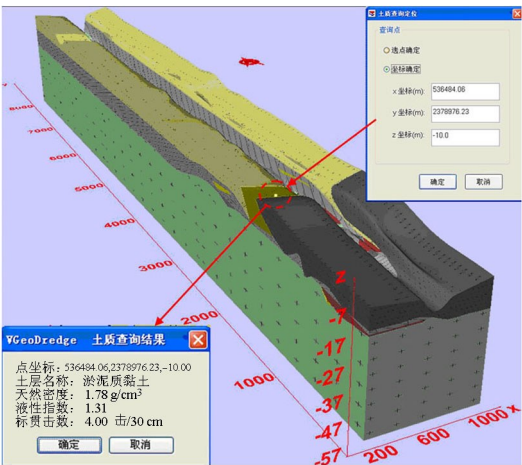


图6 三维土质单点坐标精确查询(截屏)

Fig. 6 Precise query of 3D soil texture in a single point (screenshot)

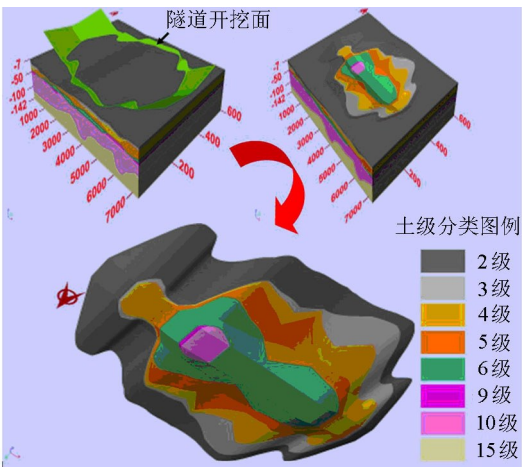


图7 不同土级下疏浚工程量计算分析(截屏)

Fig. 7 Calculation and analysis of dredging volume in soils of different classes (screenshot)

疏浚工程人员提供一个实用快捷的三维数字化平台。该系统的应用将会大大降低工程人员的工作强度,缩短设计周期,提高工程设计与施工中的工程量计算精度,在疏浚工程领域具有广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 吴学春,孙衣春,丁建文,等. 南水北调东线工程3个疏浚泥堆场踏勘调查及试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4): 47-50. (WU Xuechun, SUN Yichun, DING Jianwen, et al. Field and experimental investigations on three reclaimed yards of dredged soil in Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(4):47-50. (in Chinese))
- [2] 罗德仁,邹自力,汤江龙. 工程土方量计算比较分析[J]. 东华理工学院学报,2005,28(1):59-64. (LUO Deren, ZOU Zili, TANG Jianglong. Contrasting and analysis of the method of earthwork calculation[J]. Journal of East China Institute of Technology,2005,28(1):59-64. (in Chinese))
- [3] KAUFMANN O, MARTIN T. Reprint of "3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines"[J]. Computers & Geosciences, 2009,35(1):70-82.
- [4] MAXELON M, RENARD P, COURRIUX G, et al. A workflow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complex poly-deformed geological units[J]. Computers & Geosciences,2009,35(3):644-658.
- [5] WANG Baojun, SHI Bin, SONG Zhen. A simple approach to 3D geological modeling and visualization[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(4): 559-565.
- [6] MING Jing, PAN Mao, QU Honggang, et al. GSIS: A 3D geological multi-body modeling system from netty cross-sections with topology[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(6): 756-767.
- [7] ZHU Liangfeng, ZHANG Chengjuan, LI Mingjiang, et al. Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from borehole data: an automatic method and case studies[J]. Engineering Geology, 2012, 127: 1-13.
- [8] 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. (ZHONG Denghua, LI Mingchao, YANG Jianmin. 3D visualization construction of complex engineering rock mass structure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(4):575-580. (in Chinese))
- [9] ZHONG Denghua, LI Mingchao, SONG Lingguang, et al. Enhanced NURBS modelling 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.
- [10] ZHONG Denghua, LI Mingchao, LIU Jie. 3D integrated modeling approach to geo-engineering objects of hydraulic and hydroelectric projects[J]. Science in China Series E-Technological Sciences,2007,50(3):329-342.
- [11] ZHONG Denghua, LIU Jie, LI Mingchao, et al. NURBS reconstruction of digital terrain for hydropower engineering based on TIN model[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(11): 1409-1415.
- [12] WU Qiang, XU Hua, ZOU Xukai. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43.
- [13] 武强,徐华. 虚拟地质建模与可视化[M]. 北京:科学出版社,2011:102-103.
- [14] MIAO Zhengjian, LI Mingchao, ZHONG Denghua. Numerical calculation of channel dredging volume using 3D digital stratum model[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(2): 90-96.