

基于 GIS 平台的大坝安全监控系统研究与应用

肖泽云,田 斌

(三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要 :针对大坝原型监测具有监测项目与监测仪器众多、空间分布广以及需要对海量监测数据做出适时处理与分析等特点,基于 GIS 平台建立大坝监测仪器的空间信息与监测数据的有机联系,应用大坝安全监控理论对大坝原型监测资料进行分析与建模,探讨系统数据库设计与空间数据的表达、监测数据预测模型适应性等问题,并结合清江隔河岩大坝工程构建了基于 GIS 平台的大坝安全监控系统。应用结果表明,基于 GIS 平台的大坝安全监控系统具有良好的数据管理、监测数据分析和可视化显示等功能,可显著增强大坝安全监控分析的直观性,提高大坝安全监控数据分析的工作效率。

关键词 :大坝安全监控;GIS;空间数据;人工神经网络

中图分类号:TV698.1

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2010)05-0048-05

Research and application of dam safety monitoring system based on GIS platform//XIAO Ze-yun, TIAN Bin (School of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract : According to the characteristics of various monitoring items and instruments, complex distribution of monitoring instruments and real-time treatment and analysis of monitoring data in the prototype monitoring of dams, the relationship between the spatial information of monitoring instruments and the monitoring data was established based on GIS platform. The dam safety monitoring theory was applied to the modeling and analysis of the prototype monitoring data of dams. The design of the system database and the expression of spatial information and the adaptability of prediction models of the monitoring data were discussed. A dam safety monitoring system based on GIS platform was established as regards the practice of Geheyan Dam on Qingjiang River. The results show that the proposed system has satisfactory functions of data management, analysis of monitoring data, visual display and so on. It can significantly improve the visualization and efficiency of analyzing dam safety monitoring data.

Key words : dam safety monitoring; GIS; spatial data; artificial neural network

随着我国社会经济发展对水资源高效利用与有效保护的迫切需求,包括水利工程在内的基础设施建设得到了迅速发展,大坝设计理论日趋完善,大坝安全成为影响公共安全的重要内容。如何通过及时提供大坝工作性态及其变化信息降低大坝风险是各国大坝安全管理工作关心的主要问题,大坝实时安全监控显得越来越重要^[1-2]。大坝安全监控是依据大坝的原型监测数据了解大坝工作性态、对大坝实施科学运行管理以及对大坝设计理论进行完善的重要方式和手段。通常一座大坝上布置的监测点数以千计,监测项目众多(包括位移、温度、应力、应变、渗流等),监测部位空间分布较广,形成了复杂的空

间监测网,各监测点采集和积累的监测数据量很大。因此,构建更加完善的大坝安全监控信息系统,实现大坝安全监控实时分析、可视化显示以及辅助决策已经显得十分必要,对提高大坝的安全管理水平及促进大坝设计理论的进一步完善等具有重要意义。

我国大坝安全监控信息系统发展很快,传统的由单人开发面向过程的大坝安全监控信息系统设计方法已难以满足需要,以模块化开发为代表、由多人联合开发并提高系统中常用功能的可移植型多功能新型监控系统成为目前发展的方向。很多大坝已经建立了安全监测局域网系统,正逐步形成完善的计算机网络。

基金项目:湖北省教育厅科学技术重点基金(2002A03007)

作者简介:肖泽云(1987—),男,湖北石首人,硕士研究生,从事有限元前处理及 GIS 应用开发研究。E-mail :xwebsite@163.com

通讯作者:田斌(1963—),男,湖北宜昌人,教授,博士,从事高坝设计理论与方法、水工结构工程、岩土力学等研究。E-mail :tuedilth@ctgu.edu.cn

GIS 作为获取、整理、分析和管理的地理空间数据的重要工具、技术和学科,由于其强大的数据管理、地理信息空间分析和可视化显示功能,近年来得到了广泛关注和迅猛发展,它对各种来源的数据按空间坐标进行管理、查询与检索,通过空间分析、力学分析、地学分析与相关分析、模拟、预测等手段与方法进行科学处理与决策,提供多层次、多功能的信息服务。因此,以 GIS 为技术平台进行大坝安全监控信息系统的模块化开发将进一步丰富大坝安全监控信息系统领域的开发手段与方法,提高我国在大坝科学管理方面的技术水平。

ArcGIS 是 ESRI(美国环境系统研究所)推出的一套完整的 GIS 软件产品,具有海量空间数据存储、编辑、分析等功能,通过它提供的 GIS 开发工具还可创建客户化 GIS 桌面应用程序,具有很好的系统集成性。根据 GIS 的这些特点,本文以 ArcGIS Engine 为开发平台、结合大坝安全监控理论建立一套基于 GIS 平台的大坝安全监控系统,以实现大坝安全监控的实时分析、可视化显示和辅助评价等功能,从而为大坝安全监控管理、综合评价和辅助决策提供可靠依据。

1 系统设计

本系统采用 ArcGIS Engine 和 Visual C# 程序相结合的开发手段,参考国内外大坝安全监控和管理的经验,结合大坝安全监控的理论知识,确定该系统研制开发的总体目标为实时数据采集、空间数据管理、监测数据分析处理、分析结果的可视化显示以及

辅助决策等功能,实现大坝安全监控的信息化、可视化和系统化。系统模块化结构如图 1 所示。

基于 GIS 平台的大坝安全监控系统主要由 4 个模块组成:①系统数据库管理模块。该模块主要对流域的地理信息数据、大坝安全监测数据等进行组织和管理;②监测分析方法库模块。该模块主要包括统计模型和仿生算法模型,并提供其他算法模型的程序输入接口以扩充监测分析的方法库;③安全监测分析模块。该模块主要实现对系统数据库中的监测数据结合监测分析方法库中的方法进行分析;④系统输出模块。该模块主要基于系统数据库和安全监测分析的结果对相应的分析成果进行可视化显示、图表显示以及数据文件输出等。

该系统的主要功能有:①可视化显示及查询功能。在系统中能实现以二维和三维的形式显示和查询坝区地形地质信息、坝体结构信息、监测仪器信息以及监测数据的极值查询、条件查询、绘图分析等。②数据编辑功能。包括对坝区地形地质、水文水资源信息和监测仪器等数据进行编辑,对人工、自动采集的监测数据进行检验和校正。③监测数据分析功能。通过指定监测数据分析模型或外部算法模型接口,对指定区域时间段的监测资料进行分析比较。④输出功能。根据用户要求可输出指定范围内多种类型的数据(包括 GIS 数据、监测数据和分析成果数据等),可以数据文件形式输出,也可以图表形式输出,还可以直接输出到外部设备,如打印机等。

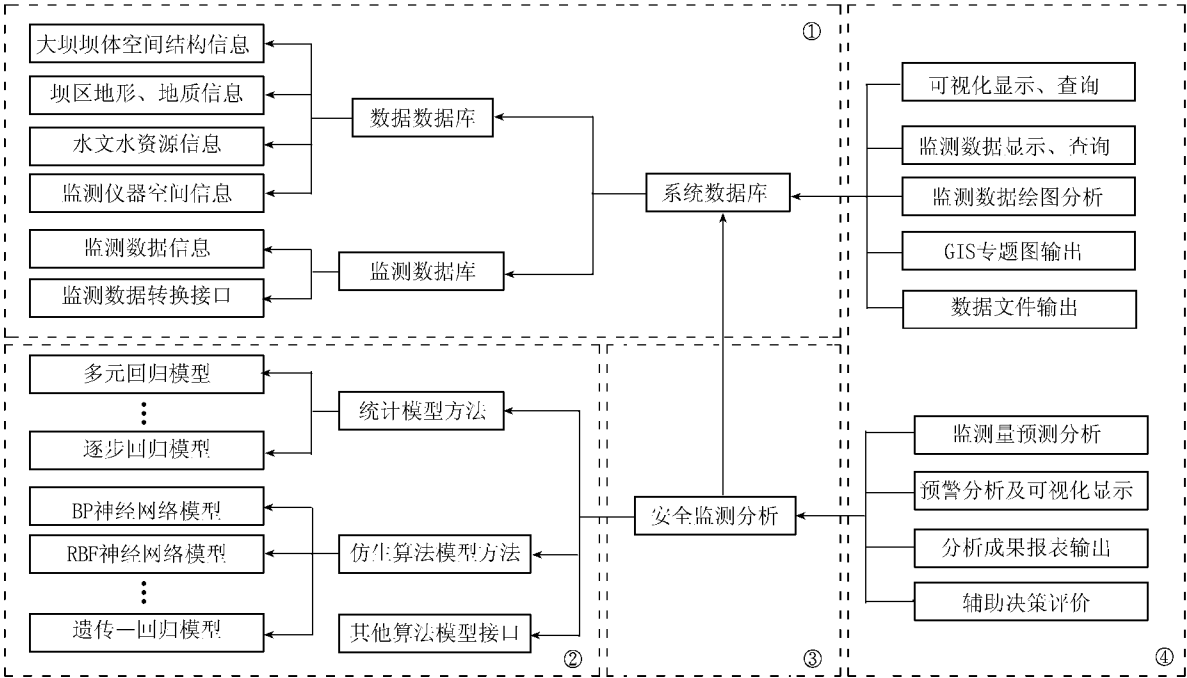


图 1 系统结构示意图

2 系统实现中的几个关键问题

2.1 系统数据库设计

由于系统数据库中存储和管理的数据种类较多、数据量大、关系比较复杂,系统数据库组织的好坏将直接影响数据查询、检索方式、访问速度和效率以及数据的可靠性。因此,合理设计系统数据库对系统开发与应用具有非常重要的作用^[3]。系统数据库主要包括基础数据库和监测数据库两部分。

该系统采用 ArcGIS 的 GeoDatabase 数据模型实现对空间数据、属性数据以及栅格数据的统一管理,通过 ArcSDE 空间数据引擎将海量数据存储在 SQL Server 等大型商用数据库管理系统中^[4],这样不仅可以提高空间数据的访问速度,而且还保证了数据的安全性、可靠性和管理的高效性。

基础数据库主要包括大坝坝体空间结构信息、坝区地形地质数据、水文水资源信息以及监测仪器空间信息等,它是一个空间数据库,主要存储空间数据和属性数据。传统的空间数据早期通常都采用文件方式存储,存在数据管理安全性较差、效率低以及数据量存储有限等缺点^[5]。针对上述数据管理方式的缺陷,采用了数据库系统的手段来管理地理空间数据,这种数据管理方式与传统的文件式数据管理方式相比,虽然提高了数据的安全性、增加了数据的存储量,但由于空间数据具有空间连续性 & 很强的空间相关性等特点,仍存在数据管理和维护困难、数据访问速度慢、多用户数据并发共享冲突等问题。以空间数据库引擎(SDE)作为中间桥梁连接 GIS 应用程序和关系数据库系统的 ArcSDE,较好地解决了空间数据和属性数据统一存储和管理的问题^[6],特别是在海量数据管理中具有明显的优势。

监测数据库主要包括大坝内各种监测仪器所监测的数据。按监测项目,可以分为气温水位监测、垂线监测、水准监测、渗流渗压监测、应力应变监测等。大坝内的监测仪器除了具有空间和属性信息外,还具有时间信息。在基础数据库中存储的监测仪器只具有空间和属性信息,通过监测仪器的 ID 号连接监测数据库中相同 ID 号监测仪器所监测的数据,即可形成监测仪器的时空特性,如图 2 所示。所以,由基础数据库和监测数据库组成的系统数据库也是一个时空数据库,用于描述某一时刻监测仪器的空间状态。

此外,为了便于监测数据的统一管理,系统提供了将常用数据文件(如 Excel 表格、文本文件)导入到监测数据库的接口。

2.2 空间数据的表达

空间数据主要包括工程所在区域的行政区域

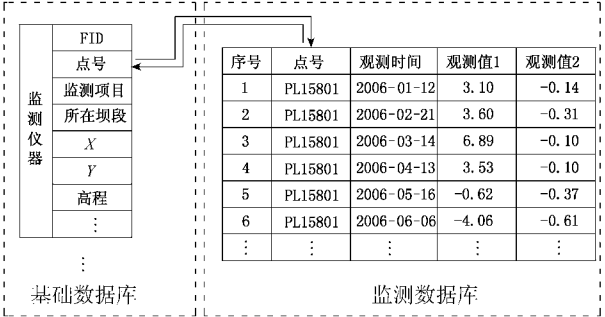


图 2 基础数据库与监测数据库间的关系

图、道路图、水系图、坝区地形、坝体结构、监测仪器等。根据空间数据结构的类型,可将数据分为栅格数据和矢量数据。地形信息可以用不规则三角网(TIN)或栅格数据形式来表示,在该系统中主要通过 CAD 等高线生成 TIN 来表示数字高程模型(DEM)。由于 GIS 中简单的矢量数据结构只包括点、线和多边形,不包括体对象,所以在该系统中采用空间面片来表示各个坝段的表面。该系统中基础地理信息表达的数据类型以及其包括的属性字段如表 1 所示。

表 1 地理信息的数据表达类型及主要属性字段

地理信息类型	名称	数据类型	主要属性字段
基础地理信息	行政区域图	Polygon	Name ,Area
	道路	Polyline	Name ,Class ,Length
	河流水系	Polyline	Name ,Class ,Length
坝区地理信息	上游水位	Polygon	Name ,WaterLevel
	下游水位	Polygon	Name ,WaterLevel
	大坝	MultiPatch	Name ,Dam
监测仪器	地形	TIN	
	垂线人工	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	应力应变人工	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	精力水准	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	精密水准	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	渗流	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	渗压人工	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation
	垂线静水准自动化	Point	Name ,Type ,DamCode ,X ,Y ,Elevation

2.3 监测数据分析模型

2.3.1 物理推断分析

对于不同的监测量,根据坝工理论及力学知识,利用原型监测资料,通过物理推断来建立效应量和影响量之间的关系式^[7]。如混凝土坝体的水平位移主要受水压力、扬压力、泥沙压力、温度以及时效因素等影响^[8],即有

δ = δ_H + δ_T + δ_θ (1)

式中:δ_H 为水压分量;δ_T 为温度分量;δ_θ 为时效

分量。

2.3.2 统计学模型

统计学模型具有建模简单、使用方便、收敛速度快等特点,是大坝原型观测资料分析的常用方法。但其拟合精度与选取的因变量密切相关,应尽量选取对因变量影响显著的因子。如混凝土坝体的水平位移主要由水压分量、温度分量和时效分量等组成。如水压分量主要与坝前水位有关,可表示为^[8]

$$\delta_H = a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 \quad (2)$$

式中: H 为水头; a_1, a_2, a_3 为系数。

温度分量由坝体和地基的变温引起,在只有气温资料的情况下,可以采用多种谐波组合,即

$$\delta_T = \sum_{i=1}^2 \left[b_{1i} \sin\left(\frac{2\pi i t}{365}\right) + b_{2i} \cos\left(\frac{2\pi i t}{365}\right) \right] = b_{11} \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + b_{21} \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + b_{12} \sin\left(\frac{4\pi t}{365}\right) + b_{22} \cos\left(\frac{4\pi t}{365}\right) \quad (3)$$

时效分量是由混凝土和基岩的徐变、塑性变形以及基岩地质构造的压缩变形等因素引起,它的变化规律为初期急剧,后期渐趋稳定。时效分量的数学模型主要有:① $\sigma_\theta = c_1 \theta$;② $\delta_\theta = c_2 \ln \theta$;③ $\delta_\theta = c_2 / \theta$;④ $\delta_\theta = c_2 \theta^{\frac{1}{2}}$ 。其中 θ 为时间,以月为单位,自水库蓄水开始计算; c_1, c_2 为系数。

当观测资料不包括荷载发生的极值或观测资料系列较短时,统计学模型将很难用于监测和预报。

2.3.3 人工神经网络模型

人工神经网络模型具有较好的非线性映射能力。由于大坝受环境和荷载等作用非常复杂,影响因素诸多,内在因素有地质条件高度非线性、筑坝材料各向异性等,外在因素有水荷载、降雨量非恒定性等,这些内外因素相互耦合作用使得效应量与因变量之间的关系表现出极强的非线性特征。根据人工神经网络的自组织、自适应、自学习的非线性映射能力^[9],对大坝观测数据建立神经网络模型,可得到较高的拟合精度和预测精度。目前神经网络的种类主要有感知器神经网络、BP神经网络、径向基神经网络、自组织网络、反馈网络等。其中BP神经网络是基于误差反向传播算法的多层前向网络,也是一种目前应用非常广泛的神经网络。在大坝安全监测分析中可采用3层BP神经网络,即输入层、中间层和输出层,其结构如图3所示。

输入层节点数与因变量数目有关,输出层节点数与影响的效应量数目有关。选择合适的因变量、隐含层节点数、层间传递函数和学习函数等可以提高网络的收敛速度和拟合精度。但采用人工神经网络模型

进行监测资料分析时需要大量的数据样本,此外,该算法容易陷入局部极值而导致网络训练失败。

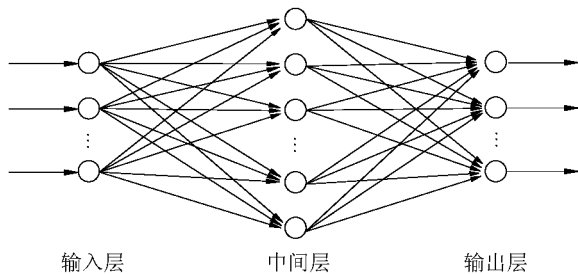


图3 BP神经网络结构

3 工程应用

3.1 隔河岩大坝工程概况

隔河岩水利枢纽工程位于湖北省长阳县城西9 km处,由重力拱坝、垂直升船机、电站厂房、引水隧洞、高边坡及副坝等建筑物构成,控制流域面积14 430 km²,具有发电、防洪、航运与旅游等综合效益^[10]。大坝为“上重下拱”的重力拱坝,上游坝面采用铅直圆弧面,下游坝坡的下部拱坝为中间大半径、两侧小半径的变截面三圆心单曲重力拱坝。大坝全长653.15 m,自右向左共分为30个坝段,最大坝高为151 m,坝顶高程为206.00 m,坝顶宽为8 m,正常蓄水位高程为200.00 m,总库容为34亿 m³。

1998年8月我国长江流域遭受特大洪水,为与长江洪水错峰,隔河岩水库库水位最高达到203.94 m高程,超过正常蓄水位(200.00 m)近4 m^[11]。隔河岩大坝为确保长江下游人民生命财产安全起到了重要的作用,而且其坝型独特,因此研究其坝体安全监测情况具有十分重要的意义。

3.2 可视化显示与查询

该系统以ArcGIS Engine为GIS开发平台,使用MapControl、SceneControl和TOCCControl等控件来实现坝区二维地理信息系统和三维地理信息系统。

在二维地理信息系统中,通过ToolbarControl控件提供的地图浏览工具可以实现数据加载和地图放大、缩小、平移以及数据查询等功能。此外,通过程序开发实现监测仪器的空间位置查询、属性信息查询、监测数据查询以及测量距离、面积和绘制剖面图等功能。

三维地理信息系统中除了具有基本的三维场景浏览功能外,还具有监测仪器、坝段以及坝段剖面等的三维查询功能,同时实现了生成等高线、输出三维场景动画等功能。通过点击坝段或输入坝段值即可查询该坝段的属性信息,同时显示该坝段的剖面图以及该坝段中的监测仪器。点击剖面图中的监测仪器点号即可查询该仪器所监测的数据,如图4所示。

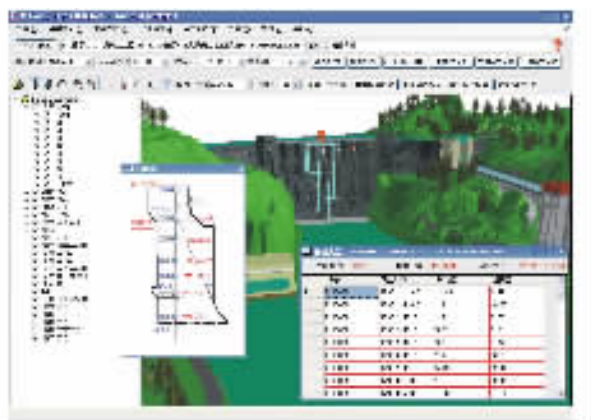


图4 三维地理信息系统

3.3 监测数据分析

该系统主要提供 2 类数学模型对监测数据进行分析 and 预测,即统计学模型和人工神经网络模型。其中,统计学模型包括逐步回归模型和多元线性回归模型。人工神经网络模型主要采用 3 层 BP 神经网络模型,通过导入外部的数据样本或直接从监测数据库中提取相关因子、设置神经元数目和传递函数、设置训练函数及目标、设置学习函数及学习速率,即可建立 1 个 BP 神经网络模型。

通过对隔河岩大坝拱冠梁坝顶处的垂线监测仪器 PL15801 在 2006 年内所监测的资料进行分析,分别采用逐步回归模型和 3 层 BP 神经网络模型进行分析预测,2 种模型分析比较的结果如图 5 所示。

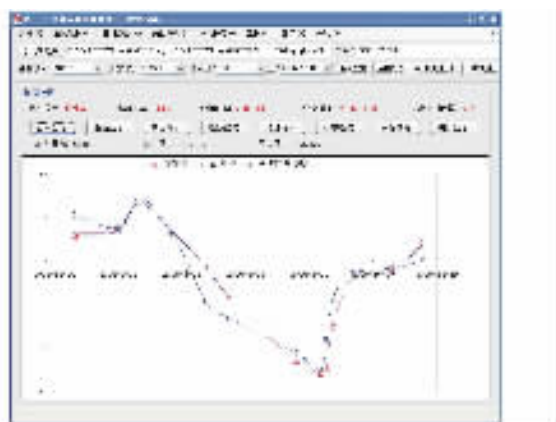


图5 2 种模型分析结果比较

通过对上面 2 种模型分析的结果进行比较可知,采用 3 层 BP 神经网络模型比逐步回归模型具有更高的拟合和预测精度,能够很好地逼近原函数曲线,达到满意的拟合和预测效果。

4 结 语

利用 GIS 平台强大的空间分析、空间数据管理能力和可视化技术等优势,结合大坝安全监控理论知识,建立一套集监测数据查询、分析、可视化于一体的系统,对提高大坝安全监控管理和大坝安全评

价都具有重要的意义。笔者对此作了尝试,得出结论:①通过统计学模型和人工神经网络模型对监测资料进行分析,实现了监测资料的实时查询、分析和预测,为大坝安全决策评价提供了重要的依据;②通过与 GIS 平台结合的方式,实现了大坝、监测仪器等空间信息的可视化显示和查询等功能,为大坝安全运行管理提供了一个直观、方便的平台;③为了适应不断发展的大坝安全监控理论和新的监测分析方法,系统提供了监测数据接口和算法模型接口,具有很好的通用性和扩展性。

参考文献:

- [1] 吴中如,顾冲时.大坝安全综合评价专家系统[M].北京:北京科学技术出版社,1997.
- [2] 顾冲时,苏怀智,赵二峰.大坝安全监控及反馈分析系统[J].中国水利,2008(20):37-40.
- [3] 黄杏元,马劲松,汤勤.地理信息系统概论[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [4] 党安荣,贾海峰,易善桢,等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [5] 熊丽华,杨峰.基于 ArcSDE 的空间数据库技术的应用研究[J].计算机应用,2004,24(3):90-91,96.
- [6] 王天化,李瑞有,周武,等.基于 GIS 技术的水库大坝安全应急管理系统构架[J].长江科学院院报,2009,26(增刊):130-133.
- [7] 陈红,顾冲时.古田溪二级大坝水平位移监控模型的研究[J].水电能源科学,2003,21(2):13-15.
- [8] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [9] 李孝安,张晓红.神经网络与神经计算机导论[M].西安:西北工业大学出版社,1995.
- [10] 徐卫超,田斌,邓凤铭.清江隔河岩水利枢纽坝体内部监测研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2002,24(1):56-59.
- [11] 刘宁,万学军.隔河岩上重下斜封拱式重力拱坝设计研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):166-167.

(收稿日期 2010-01-08 编辑:方宇彤)

