

汀溪水库三维防洪调度管理信息系统研发

彭国均^{1,2,3}, 池天河⁴, 张新⁴, 陈世真⁵, 林跃翔⁵

(1 集美大学, 厦门 361021; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3 中国科学院研究生院, 北京 100107; 4 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

5 厦门市水利局, 厦门, 361005)

摘要: 水库防洪调度是一个非常复杂的过程。水库防洪调度的信息化主要是借助测量、遥测、遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS)、全球定位系统 (GPS) 等手段采集基础数据, 构建数字化水库防洪数据管理平台和水库虚拟三维环境。在该平台和环境中, 以系统软件和数学模型对水库流域的水雨情及洪水的调度方案进行模拟、分析和研究, 提供决策支持, 从而增强防洪调度决策的科学性和预见性。实践表明, 通过 RS、GIS 技术建立的水库三维防洪调度系统能够为水库管理者提供水库防洪调度方案制定与分析、防洪调度决策等方面的强有力的、科学的辅助支持。本文结合厦门“汀溪水库三维防洪调度系统”的实际研发, 探讨了 RS 和 GIS 技术在水库防洪调度中的应用。

关键词: 水库; 防洪调度; 遥感; GIS

1 引言

防洪管理是水利信息化建设的重要组成部分, 暴雨产汇流预报和水库泄洪调度是防洪管理工作的核心。随着 RS、GIS 技术的不断发展, 其在水利信息化建设、水利基础设施的三维模拟、水利实时信息的三维模拟、水文水力模型的模拟仿真等辅助管理工作中, 为水利信息化管理工作提供了新的技术手段和方法。本文结合福建省厦门市“汀溪水库三维防洪调度系统”的研究和开发, 探讨了系统的组成及构建思路。

厦门市位于中国东南沿海, 全市总面积 1 565 km², 气候属南亚热带海洋性季风气候, 全年湿润多雨, 且降雨时空间分布不均匀。由于太平洋温差气流影响, 厦门每年 7~9 月常受热带风暴的袭击。受特定地理环境和气候因素的影响, 厦门市防汛情况比较复杂, 水资源问题日益突出。每年汛期, 尤其是主汛期, 都要不同程度地遭受热带气旋 (台风)、高潮位、暴雨和洪涝的袭击。汀溪水库是厦门人民的主要饮用水储备水源, 属大型水库, 在汀溪水库三维防洪调度系统中, RS、GIS 技术的应用是非常关键的, 故基于构建“汀溪

水库三维防洪调度系统”可为水库管理者提供水库防洪调度方案制定与分析、防洪调度决策等方面强有力的、科学的辅助支持。

2 系统建设内容

“汀溪水库三维防洪调度管理信息系统”的建设目标是在硬件、软件、网络及数据的基础上, 根据厦门市水利管理部门在防洪工作的业务需求, 确定以 GIS (地理信息系统)、RS (遥感)、VR (虚拟现实)、DBMS (数据库管理系统) 等先进技术为手段, 建设以汀溪水库区域为重心的三维防洪调度系统。通过该系统, 实现与现有的水利信息调度系统中的综合数据库的无缝连接, 实现系统之间的数据共享, 同时实现对整个厦门市水利管理环境的三维仿真, 实现汀溪水库区域的三维防洪辅助管理, 为决策者进行防汛方案的制定、模拟、分析和评价, 为水利的规划、分析、管理和决策提供强有力的辅助平台, 从而提高工作效率、工作质量和管理水平。

系统的建设范围覆盖整个厦门市, 汀溪水库区域是系统的重点区域, 根据建设目标和建设范

收稿日期: 2007-04-28; 修回日期: 2007-10-15.

资助项目: 福建省青年人才科技创新项目 (2006F3088); 集美大学优秀青年教师基金资助。

作者简介: 彭国均 (1974-), 男, 博士, 集美大学教师, 从事地理信息系统和海上交通信息系统研究。

围，确定建设内容为以下几个方面：(1) 建立汀溪水库区域 1:1000 比例尺的数字高程模型 (DEM) 和 0.6m 分辨率的数字正射影像 (DOM)。建立厦门市其他区域 (除汀溪水库区域外) 的 1:5000 比例尺的数字高程模型 (DEM) 和 2.5m 分辨率的数字正射影像 (DOM)；(2) 在数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像 (DOM) 的基础上，创建厦门市区域范围的基础地形三维模型。以汀溪水库区域的水利工程设计图以及水利工程、建筑物等矢量图层数据为基础，创建汀溪水库区域的水利工程、重要建筑物等要素的三维模型；(3) 与现有水利系统的综合数据库中的实时工情、实时水情、实时雨情等数据实现连接，并根据获取的数据对汀溪水库区域的实时动态情况进行三维模拟；(4) 在专用图形计算机上实现快速、连续、任意角度的三维浏览；(5) 对汀溪水库区域的水利工程设施实现水情数据、工情数据、雨情数据等信息的查询；(6) 在三维的汀溪水库区域场景中实现暴雨产汇流、水库泄洪等防洪管理的模拟演示。

3 系统总体功能结构

系统采用目前主流的软件架构，如图 1 所示，支持 C/S 模式，支持 Oracle 数据管理，系统架构在现有网络环境、硬件环境、软件环境以及已建成的水利信息调度系统的基础上，充分利用水利信息调度系统的综合数据库，为整个应用系统网络提供数据服务，系统运行于厦门市水利局局域网内，网络协议采用 TCP/IP 协议。系统总体功能结构如图 1 所示。

(1) 水利三维场景创建：利用建设范围内的遥感影像数据、水利工程设计电子图以及等高线、水利工程、建筑物等矢量地图图层，创建建设范围内的三维地形场景，并叠加水利工程、建筑物等三维模型，搭建虚拟的水利三维场景。

(2) 实时数据连接：可以与已建成的水利信息系统综合数据库中的工情、水情、雨情数据库进行无缝连接，并可以根据获取到的实时水情、实时雨情数据，在水利三维场景中模拟实时的水势状态。

(3) 水利场景三维漫游：可以在三维水利场景中实时的浏览控制操作。操作人员可以随

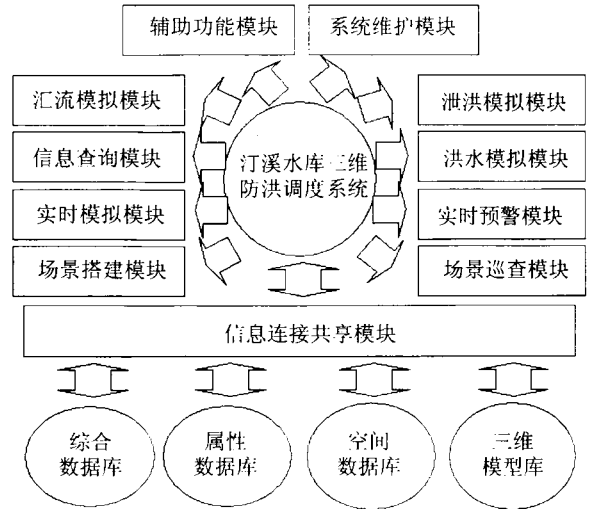


图 1 系统功能结构

Fig. 1 System function structure

意改变模拟演示的路径、高度、角度、速度等。

(4) 水利信息三维查询：可以在三维水利场景中对水利设施 (水库、水库大坝、河道等) 的工程基本状态和主要技术参数等信息以及对实时水位 (水库水位、河道水位等) 等进行查询。

(5) 水库险情三维预警：可以在三维水利场景中对汀溪水库的水位动态变化进行预警。

(6) 暴雨产汇流三维模拟：可以在三维水利场景中，通过设定相关的模拟参数，模拟汀溪水库区域的产汇流的水面动态变化情况。

(7) 水库泄洪三维模拟：可以在三维水利场景中，通过设定相关的模拟参数，模拟汀溪水库在泄洪时的水面动态变化情况。

4 系统的构建与应用

4.1 总体技术路线

根据系统的建设目标、建设内容、功能需求等确定系统建设的总体技术路线是通过运用虚拟现实、三维仿真、数据库管理等先进技术，结合相关水利业务模型，建设汀溪水库三维防洪调度系统。系统构建总体技术路线如图 2 所示。

首先利用 ARCGIS、PCI 专业 GIS 和遥感影像数据处理软件，进行数字高程模型 (DEM)、数字正射影像 (DOM) 数据处理，建立汀溪水库基础地形数据，然后进行水利工程、建筑物等地类数据的处理^[1]，完成上述数据处理工作后，选用

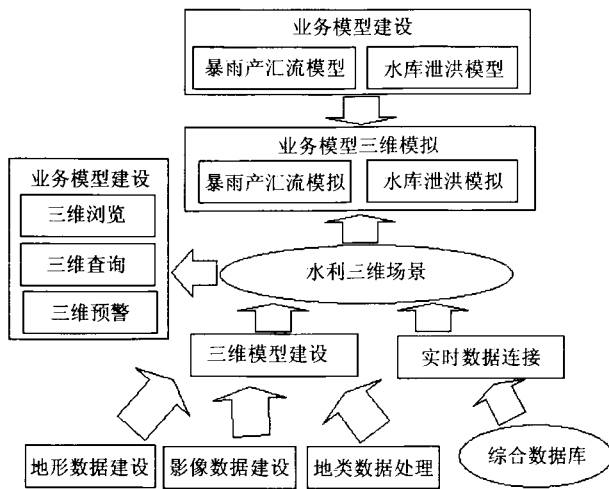


图2 系统技术路线

Fig. 2 System technique construction route

Multigen Creator 三维建模工具软件创建整个汀溪水库三维场景模型。在构建好的水利三维场景中, 集成水利信息调度系统的综合数据库, 实现工情、水情、雨情等动态数据在三维场景中的实时关联, 三维场景中的水库水面、河道水面将根据获取的高程实时变化。驱动系统采用 VEGA3.7 平台开发, 支持三维场景中的三维浏览、三维查询、三维预警等基本功能^[2]; 同时进行暴雨产汇流和水库泄洪业务模型的创建, 以满足在获取工情、水情、雨情等动态数据基础上, 借助水利业务模型, 在水利三维场景中实现三维模拟。

4.2 三维场景构建

为了要构造虚拟现实的三维水利场景, 需要对地形, 水利工程, 建筑物等各种地类物进行三维建模, 并采取有效的场景管理技术来无缝的组织各种模型, 以支持应用实现^[3]。

构建水利三维场景的首要工作是获取基础数据资料, 并做必要的实地考察, 从而确定应构建模型种类、数量、准确位置以及名称, 然后为要构建的物体进行纹理拍照, 最后根据物体尺寸构建模型。最后, 对建好的模型, 需根据系统要求, 对模型分层存储, 正确命名, 并配置好模型解析器入口文件^[4]。本文选用 Multigen Creator2.5 作为三维模型开发工具, 首先通过 Multigen Creator2.5 开发工具建立系统需要的水库、水利工程、下游楼群等三维模型, 并通过图像专业软件将原始纹理数据处理成模型所需的纹理, 通过三维造型创

建系统所需场景, 然后 VEGA 平台将场景导入, 在用户事件请求下, 实现特效、二维地图数据整合、视点控制、碰撞检测、对象拾取、自由对象等状态控制, 最后实时将视景显示到用户界面上^[5]。

4.3 防洪调度业务模型选取

本文选取新安江模型作为暴雨产汇流及水库泄洪调度的业务模型^[6], 新安江模型是赵人俊教授于 1973 年提出的分散性模型, 主要用于湿润与半湿润地区, 它把全流域分成许多个单元流域, 对每个单元流域作产汇流计算, 得出单元流域的出口流量过程。大量实践表明, 该模型的准确度较高^[7-10]。

(1) 暴雨产汇流模型: 暴雨产泄流模型主要包含蒸散发计算、产流量计算、分水源计算三个计算过程。

蒸散发计算: 当上层土壤蓄水量足够, 则:

$$\begin{cases} EP = K \times EM \\ EL = 0 \\ ED = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: EU 为上层蒸发量, EL 为下层蒸发量, ED 为深层蒸发量, K 为蒸散发折算系数; 是蒸散发能力。

当上层土壤蓄水量已干, 则:

$$\begin{cases} EU = P + WU \\ EL = (EM - EU)WL/WLM \\ ED = 0 \\ E = EU = EU + EM \end{cases} \quad (2)$$

当下层蓄量亦不足, 则:

$$\begin{cases} ED = C \times (EM - EU) - EL \\ EL = WL \end{cases} \quad (3)$$

其中, P 为降雨量, WU 为上层含水量, WL 为下层含水量, WLM 为土壤下层蓄水容量, C 为深层蒸散发系数。

产流量计算: 用蓄满产流模型计算产流量时, 增加一个不透水面积占全体流域面积的比例因素, 即不透水面积因素, 则:

$$\begin{cases} f/F = \{1 - [1 - (A + P + E)/WMM] \} \\ (1 - IMP) + IMP \\ WM = WMM(1 - IMP)/(1 + B) \\ A = WMM \times [1 - (1 - W/WM)^{1/(1+B)}] \end{cases} \quad (4)$$

式中: f/F - 产流面积, 以小数计; WM - 流域蓄水容量; WMM - 为点的最大蓄水容量; B - 蓄水容量曲线的抛物线指数; A - 与 W 相对应纵坐标值, 即代表某一点蓄水容量值。

分水源计算: 将总径流 R 划分为地面径流 (RS)、壤中流 (RSS) 和地下径流 (RG) 三个部分, 应用山坡水文学的概念, 去除了参数 FC , 增加了表层土自由水最大蓄水容量 SM (mm), 表层土自由水蓄水容量曲线的方次 EX , 自由水蓄量对地下水的出流系数 KG , 自由水蓄量对壤中流的出流系数 KI 。各水源的计算公式为:

$$\begin{cases} PE = P - K \times EM \\ MS = (1 + EX) \times SM \\ AU = MS \times [1 - (1 - S/SM)^{1/(1+EX)}] \\ FR = (R - IMP \times PE)/PE \\ RG = S \times KG \times FR \\ RI = S \times KI \times FR \end{cases} \quad (5)$$

式中: S - 自由水蓄水量 (mm); RS - 地面径流量 (m^3/s); RG - 地下径流量 (m^3/s); RI - 壤中流的产流量 (m^3/s); AU - 自由水初始蓄水量 (mm); MS - 点自由水蓄量的最大值。

(2) 水库泄洪调度模型

水库泄洪调度就是利用入库流量过程和出库流量过程推求水库蓄水量过程, 设调度时段长为 T , 入库流量过程为; $inputq(i)$, ($i=1, 2, \dots, T$), 出库流量过程 (含蒸发、渗漏损失) 为; $OUTPUTQ(I)$; ($I=1, 2, \dots, T$), 水库蓄水量过程为 $w(i)$; ($i=1, 2, \dots, T$), W_0 为水库初始蓄水量, 则水库调度的基本方程式 (6) 所示。

$$\begin{cases} w(i) = w(i-1) + (inputq(i) + inputq(i-1))/2.0 * unit - \\ (outputq(i) + outputq(i-1))/2.0 * unit \\ w(1) = w(0) \\ i = 2, 3, \dots, T \end{cases} \quad (6)$$

其中: $unit$ 为单位换算系数。如果蓄水量单位用百万方, 流量单位为, 计算时段长为 1 小时, 则 $unit = 0.0036$ 。

4.4 防洪调度预报过程

防洪调度预报是在选择设置一组参数序列的基础上进行的, 参数包括流域基础数据、新安江模型参数、土壤前期蓄水量、蒸发量、各断面单

位等。汀溪水库流域分为溪东和汀溪两个断面, 因此在进行暴雨产汇流计算时, 首先分别根据溪东和汀溪两个断面的雨量站数据, 计算两个断面在预报时内的加权平均雨量过程, 再根据新安江模型, 分别计算出溪东断面和汀溪断面的暴雨产汇流量; 然后, 基于溪东断面暴雨产汇流过程数据, 结合溪东水库起报时刻的水位和溪东水库水位库容关系、溪东水库泄洪流量关系等, 计算出溪东水库在预报时段内的泄洪流量变化过程和水位变化过程; 最后, 基于汀溪断面暴雨产汇流量、溪东水库泄洪流量和相关的引流及发电流量参数等, 结合汀溪水库水位库容关系、汀溪水库泄洪流量关系等, 设置汀溪水库的闸门调度参数, 从而计算出汀溪水库在预报期时段内的水位变化过程和水库泄洪流量变化过程, 汀溪水库防洪调度预报过程如图 3 所示。

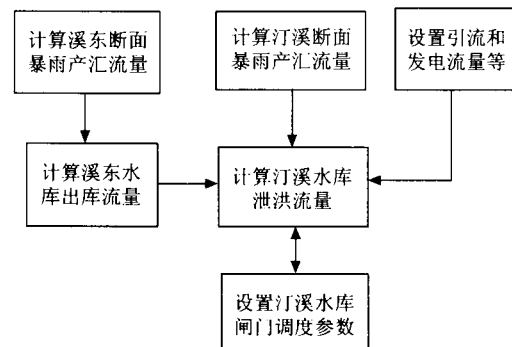


图 3 防洪调度预报过程

Fig. 3 Flood prevention control forecast procedure

以下从水文模型参数设置、水文模型预报调度计算以及三维防洪调度模拟等三个应用层面介绍了系统的运行过程。

(1) 水文模型参数设置: 在水文模型参数设置面板上, 设置用于汀溪流域暴雨产汇流、洪水调度等计算的相关参数, 参数包括汀溪流域基础数据、新安江模型参数、蒸发量、各断面单位线、初始时刻土壤前期蓄水量参数、起报时间、预报长度、预见期雨量、预报过程闸门调度情况等, 图 4 是为对 2006 年 5 月 1 日至 2006 年 8 月 1 日时段进行暴雨产汇流预报而选择设置的参数序列, 参数序列包括新安江模型参数、蒸发量、各断面单位线、初始时刻土壤前期蓄水量参数等。

(2) 水文模型预报调度计算: 在设置好相关预报调度的参数后, 系统支持手动或自动完成预



图4 模型参数设置

Fig.4 Model parameter set

报、调度计算，并将各断面暴雨产汇流、预报水位、泄洪流量等计算结果通过图、表显示在计算结果面板上，图5是对2006年7月16日至2006年7月18日时段进行暴雨产汇流预报和洪水调度计算的参数设置和计算结果图表，并将计算结果与历史实际数据进行比较。经比较得到，基于历史实际降雨过程和汀溪水库闸门调度过程数据，预报调度计算的过程数据与实际过程数据差距不大。

(3) 三维防洪调度模拟：在实时水雨情数据、历史水雨情数据、预报调度计算结果等数据的基础上，通过三维仿真，实现对指定时段的汀溪流域三维水利环境进行三维仿真，实现水库水面的三维模拟等，并提供三维浏览、三维预警、即时数据查询等功能。图6是对2006年7月16日至

2006年7月18日时段的暴雨产汇流预报和洪水调度计算结果过程数据的三维模拟系统截图。

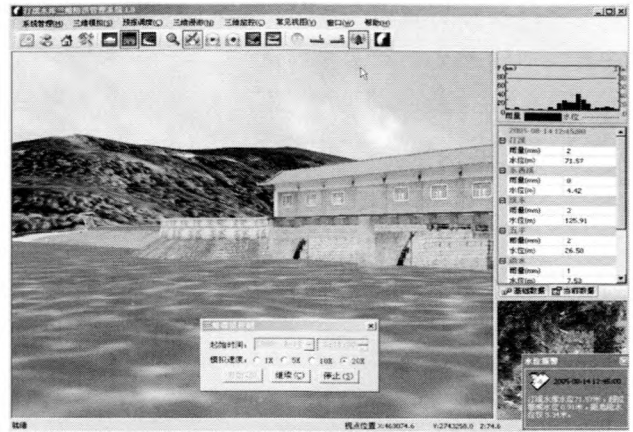


图6 三维防洪模拟

Fig.6 3D flood prevention simulation

5 结语

防洪调度是水利信息化建设的重要组成部分。本文针对“厦门汀溪水库三维防洪调度系统”的研究和开发需求，借助RS、GIS和虚拟现实技术，实现了暴雨产汇流预报和水库泄洪调度的三维模拟。应用结果表明，该系统在水库防洪调度方案的制定与分析、防洪调度决策等方面为管理者提供科学的辅助支持，但模型计算的精度很大程度上依赖于水情、工情等实时数据的准确性，模型的调参工作也直接影响到计算精度。今后尚需在以下两个方面开展深入的研发工作：(1) 进一步研究模型的调参机制，为用户提供简单、易操作的参数功能；(2) 三维场景的动态显示技术逼真度不高，尚需加入较多实时仿真图形特效功能。

参考文献

[1] 王国庆. 虚拟现实技术及其应用. 航空计算技术, 1994, (2): P21~27

[2] 彭国均, 池天河, 唐丽玉等. 数字城市的三维图形构建技术. 地球信息科学, 2003, 5 (3): 84~88.

[3] Fu Haifang, et al. The current state of 3D-GIS data model. Geo-information Science, 2002, 3 (2): 45~49.

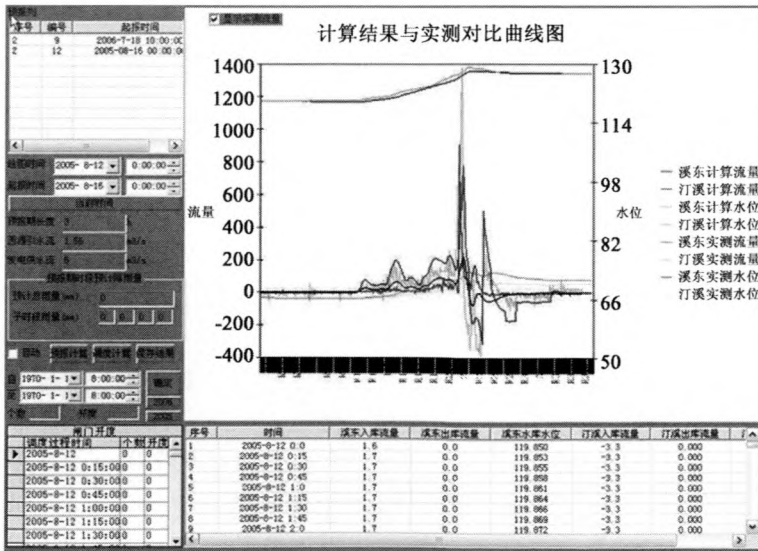


图5 预报调度计算

Fig.5 Forecast control calculation

- [4] 彭国均, 池天河, 纪翠玲 等. 航标三维 GIS 系统的构建与应用. 地球信息科学, 2005, 7 (3): 92 ~ 97.
- [5] Creating Models for Simulations. MultiGen-Paradigm, Inc, 2000, 8.
- [6] 赵人俊. 流域水文模拟-新安江模型和陕北模型. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [7] 李艺婷, 张万顺, 朱齐艳 等. 新安江模型产流模式在山区型和平原型水库入库径流量中的模拟与应用. 水资源与水工程学报, 2007, (1): 45 ~ 49.
- [8] 李致家, 姚成, 汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用. 河海大学学报 (自然科学版), 2007, (2): 32 ~ 39.
- [9] 童立新, 新安江模型在东江水库洪水预报中的应用. 水利科技与经济, 2005, (1): 47 ~ 53.
- [10] 王金忠, 胡环. 新安江模型在清河水库产流预报中的应用. 东北水利水电, 2001, (9): 41 ~ 46.

Research on Applying RS and GIS Technique in Big Reservoir Flood Prevention Control

PENG GuoJun^{1,2,3}, CHI Tianhe⁴, ZHANG Xin⁴, CHEN Shizhen⁵, LIN Yuexiang⁵

(1 *Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China;*

2 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100107, China;*

4 *Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;*

5 *Xiamen Flood Prevention Control Center, Xiamen 361005, China)*

Abstract: Since reservoir flood prevention control is very complicated, it is necessary to apply information technique to support flood prevention control decision. Informationization of Big Reservoir Flood Prevention Control mainly includes the following contents: (1) acquiring basal reservoir data or flood data by full-digital photography and measure technique, remote monitoring, remote sensing, geographical information system, GPS, etc; (2) constructing digital reservoir flood prevention control management information system and three-dimensional virtual reservoir environment; (3) simulating and analyzing the scheme of reservoir flood prevention control based on massive history data analysis and scientific calculation according to professional reservoir flood prevention mathematic models; (4) providing flood prevention control suggestions for reservoir supervisor. By acquiring basal reservoir data or flood data by full-digital photography and measurement techniques, remote monitoring, remote sensing, geographical information system, GPS, etc, digital reservoir flood prevention control management information system and three-dimensional virtual reservoir environment could be constructed. And then through simulating and analyzing the scheme of reservoir flood prevention control based on massive historical data analysis and scientific calculation according to professional reservoir flood prevention mathematic models, flood prevention control suggestions could be provided for reservoir supervisor. By introducing the research and software development of "Tingxi Reservoir Flood Prevention Control Management Information System", this thesis gives a detailed explanation about how to apply Remote Sensing and Geographical Information System technique in Big Reservoir Flood Prevention Control.

Key words: Big Reservoir; Flood Prevention Control; Remote Sensing Technique; Geographical Information System