

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.012

土石坝工程安全预警系统关键技术

向 衍^{1,2},马福恒^{1,2},刘成栋^{1,2}

(1.南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所,江苏 南京 210029;2.水利部大坝安全管理中心,江苏 南京 210029)

摘要 基于系统工程的预警原理,结合土石坝工程的特点,研究了土石坝工程安全预警系统架构,并将其分为警源分析子系统、警兆辨识子系统、警情分析子系统.重点研究了警源分析子系统和警情分析子系统,并将其中涉及的水库大坝的虚拟现实技术、溃坝洪水估算、下游洪水演进预测等关键技术应用于浙闽台流域某土石坝工程中.结果表明,土石坝工程安全预警系统对预警土石坝的安全具有一定的作用.

关键词 土石坝 预警系统 系统工程

中图分类号 TV698 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)05-0634-06

我国是世界坝工大国,至 2006 年底我国已建成各类水库 85 874 座,其中 90% 以上是土石坝.由于这些水库多建于 20 世纪 50 ~ 70 年代,病险水库大量存在.国务院 2006 年发布的《国家突发公共事件总体应急预案》和水利部 2006 年发布的《关于加强水库安全管理工作的通知》,对涉及公共安全的水库大坝安全提出了更高的要求.20 世纪 90 年代,国家防汛抗旱办公室致力于水库大坝“洪水风险图”的制作研究,但由于大量的不确定性因素,至今仍难以实际应用. Comerford 等^[1]最早探讨了人工智能应用于大坝安全维护的可能性.意大利和法国最早开展了大坝安全监控系统研究,对监测数据应用模型进行分析,先后开发了大坝监测数据处理系统和 MIDAS 系统^[2]. 20 世纪 90 年代,吴中如等^[3]将专家系统引入大坝安全监控领域,提出了基于“一机四库”的大坝安全综合评价专家系统,实现了对大坝安全状态的在线实时分析和综合评价.其后,有学者对其进行了改进^[4-5].大坝安全综合评价专家系统基本实现了观测数据的自动化采集、在线分析和实时监控.随着计算机科学与预警技术的发展,研究土石坝工程安全预警系统显得尤为重要.本文主要研究了土石坝安全预警系统的结构,并将其中涉及的水库大坝的虚拟现实技术、溃坝洪水估算、下游洪水演进预测等关键技术应用于浙闽台流域某土石坝工程中.

1 预警系统概述

1.1 预警系统原理

Hall 提出的系统工程三维结构图,为解决大规模、复杂巨系统提供了统一方法^[5].将其引入预警系统,可得图 1 所示的预警系统三维结构图^[6].考虑逻辑维,明确警义是预警系统研究的基础.挖掘警源是辨识警兆的前提.辨识警兆是分析警情的基础.分析警情是排除警患的关键.而排除警患是系统的目标所在.

1.2 预警系统架构

基于土石坝工程安全监控流程及预警信息流向,预警系统结构分为 3 层:(a)信息管理层.包括两方面内容:一是将原始监测资料转换为整编信息,同时该层提供对原始信息、整编信息的查询、报表等操作;二是有

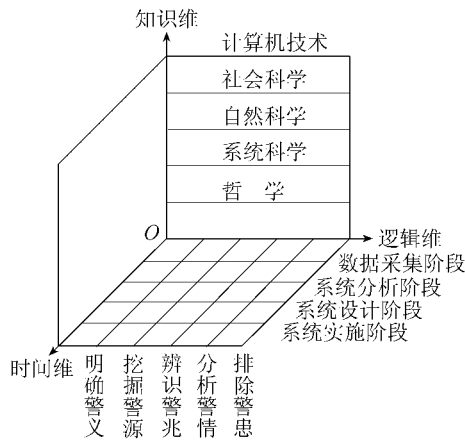


图 1 预警系统三维结构原理

Fig.1 3-D structural chart
of early-warning system

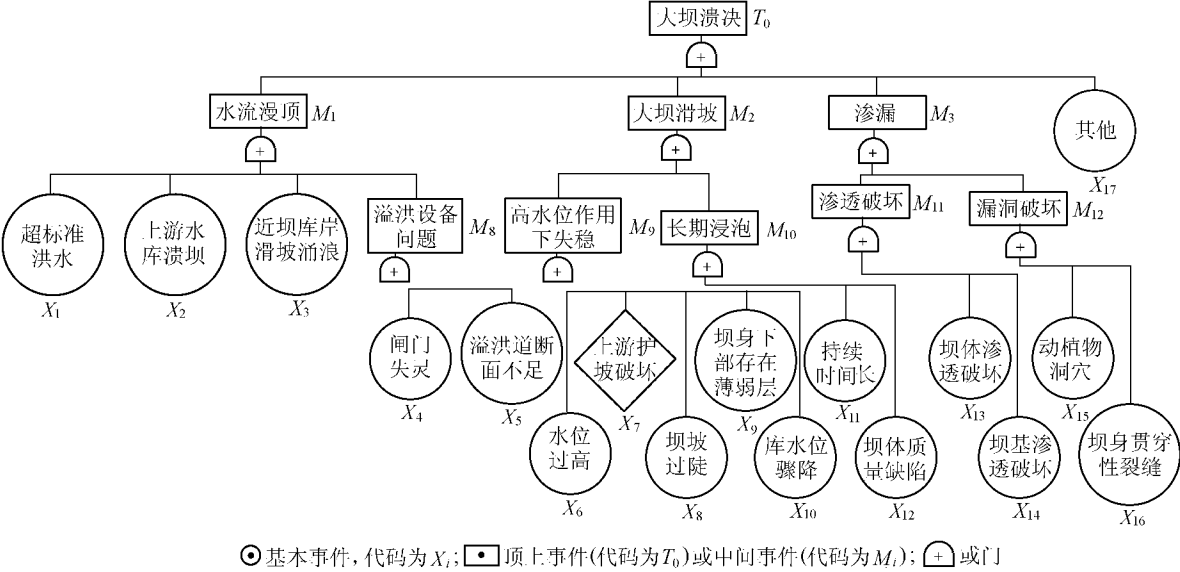


图3 某水库大坝警源挖掘事故树

Fig.3 Event tree for warning root mining of a reservoir dam

地理信息系统(GIS)作为对空间分布及其有关空间数据和信息进行储存、管理、分析的一项综合性信息技术,在水利工程中已广泛应用. 计算机网络技术的发展将 GIS 网络化(Web GIS),于是构建网络化、数字化、智能化的水库管理信息系统,成为大坝安全预警系统建设的方向. 此外,还可以通过收集水库大坝防洪工程的安全监测数据,进行实时正反分析,得到表征工程实际的物理力学参数. 然后,依据流域实时雨、水、工情信息和预报成果,在防洪调度预案的基础上,预测防洪工程的风险程度. 在此基础上,土石坝安全预警系统将各类应急预案分解、组合,通过智能化技术,将应急预案贯穿于安全监测信息和工程险情、洪水、暴雨、台风等灾害信息中. 若出现险情信息,系统即自动提示相应的应急预案,以人机交互方式生成实时调度方案,进行调度方案仿真,结合灾情分析等因素进行多方案比较,并具有调度方案、成果、系统管理等功能.

4.1 水库大坝的虚拟现实技术

GIS 具有信息管理的功能,是一种为防洪决策提供信息支持的理想工具. 借助于 GIS 可对灾害形成、发展条件、灾情分析进行综合评价. 估计灾害损失、制定灾民撤退路线、确定险工段、制定避灾设施建设方案. 并可利用系统中具有的丰富信息,进行灾区资源调查、水土资源综合利用规划等工作. 总体上,水库大坝的虚拟现实技术可分为数据库的建立、灾前预测评估、灾中实时评估和灾后反馈评估 4 个部分^[10].

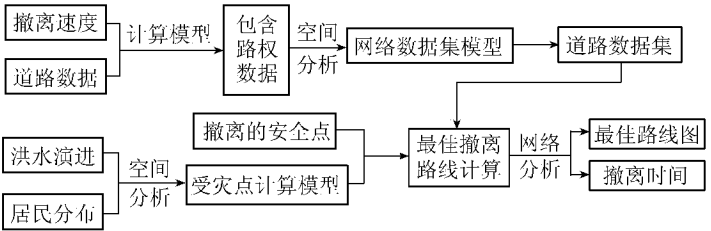


图4 基于 Web GIS 的应急撤离仿真流程

Fig.4 Simulation flowchart of emergency evacuation based on Web GIS

基于 Web GIS 技术的大坝安全预警系统采用基于 Intranet/Internet 应用的 Web GIS 技术、GPS 技术、RS(遥感系统)技术,以及分布式网络数据库技术、多级异构数据库复制技术、数据仓库与数据挖掘等技术搭建一个“数字平台”,以数字化地图为信息发布平台,实现信息的实时查询、分析与数据挖掘,为大坝安全预警提供及时准确的信息和决策支持. 基于 Web GIS 的应急撤离仿真流程见图 4. 大坝安全预警系统可在电子地图上全面反映历史与实时的汛情数据和相对稳定的基础工情数据.

4.2 溃坝洪水估算

土石坝的溃坝模型可采用 Fread^[11] 的土石坝侵蚀模型 Breach. 该模型基于水力学、泥沙动力学、土力学等

原理及大坝的几何特性、材料特性和水库特性(库容、溢洪道特性和库水位随来水量的变化),模拟因管涌和漫顶引起的溃坝过程.溃口是大坝失事时形成的缺口,其形态主要与坝型和筑坝材料有关.目前,由于实际溃坝机理仍不是很清楚,因此,溃口形态主要通过近似假定来确定.考虑到模型的直观性、通用性和适应性,一般假定溃口底宽从一点开始,在溃决历时内,按线性比率扩大,直至形成最终底宽.若溃决历时小于 10 min,则溃口底部不是从一点开始,而是由冲蚀直接形成最终底宽.溃口形态描述主要由 3 个参数确定.溃决历时、溃口底部高程、溃口边坡.溃决历时可以确定大坝溃决是瞬溃还是渐溃.溃口底部高程、溃口边坡可以确定溃口断面形态为矩形、三角形或梯形,以及是局部溃或是全溃.

4.3 洪水演进预测

洪水在坝下游区域演进数值模拟与一般二维水体运动数值模拟相比,最大特点在于:洪水淹没范围随时间变化,存在不确定性.洪泛区内纵横交错的河道、圩垸、交通道路、涵洞、桥梁、建筑物、植被等对下泄水流影响很大.洪水演进数值模拟的困难在于各种复杂内外边界的处理.通常,洪水在下游的运动用二维洪流方程描述:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = S_0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uU) + \frac{\partial}{\partial y}(vU) + gh \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uV) + \frac{\partial}{\partial y}(vV) + gh \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} = 0 \tag{3}$$

式中: U, V —— x, y 方向的单宽流量, $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{m}$; u, v —— x, y 方向的流速, m/s ; h ——水深, m ; H ——水面高程, m ; S_0 ——源项, m/s .

计算平台采用 Wallingford 公司的河流水动力模拟平台 InfoWorks. RS 9.0. 该软件计算引擎采用基于地面高程模型 DEM 或 DTM 的河道一维和洪泛区二维模型相结合的办法,能很好地模拟河流系统洪水漫溢或溃坝洪水在地面上的演进过程.

4.4 实例

4.4.1 工程概况

本文以浙闽台流域一座以供水为主,兼灌溉、防洪、发电、养鱼等综合利用的中型水利枢纽为例.该水库下游为温岭城区经济繁华地带,有 130 多个村庄,共 12.5 万人口和超过 4 000 hm^2 农田以及近百家企业.大坝为黏土心墙土坝,最大坝高 20.60 m.溢洪道位于大坝右侧,为正槽式溢洪道.进口为奥氏实用堰式.输水建筑物包括拱条石涵洞和石桥半岭隧洞.其中拱条石涵洞为放空涵洞,属穿坝建筑物,拟封堵.

4.4.2 计算模型

计算区域根据坝址下游平原区 1:10 000 地形图中 25.00 m 等高线确定,计算区域地面高程模型(DEM)根据 1:10 000 地形图中 35.00 m 以下等高线和测量点高程 2 种数据生成.同时,采用概化断面对地面模型进行切割以充分考虑河道断面形态对溃坝水流变化的影响.模型中把 25.00 m 等高线作为‘墙边界’处理,即水流无法流入或流出计算区域.高程低于 25.00 m 部分边界采用‘临界条件’,即如果计算水位高于 25.00 m,则按无能量损耗的宽顶堰公式计算流出计算区域的单宽流量.若计算水位低于 25.00 m,则不考虑计算区域内外水量交换.在大坝溃口处,计算断面形态和高程是根据 DEM 及事先估算的溃口大小、形状概化而成的,以溃坝流量过程作为边界条件.从 1:10 000 地形图中提取出居民地、草地、林地、经济林和耕地 5 种地物的分布区域作为糙率分区,相应的糙率值分别设定为 0.075, 0.035, 0.050, 0.050 和 0.030,河道的糙率设置为 0.025.计算范围内其他区域的糙率设定为 0.035.水库下游可能淹没范围(计算区域)总面积约为 521 km^2 . DEM 模型及计算网格见图 5.

4.4.3 溃坝洪水估算

水库溃坝口门形态采用渐溃,该溃坝口门形态下计算工况包括特征水位下的漫顶或管涌工况^[12].利用 Breach 土石坝侵蚀模型对各工况进行计算,得到图 6 所示的流量过程.

4.4.4 洪水演进预测

利用本文介绍的模型和方法,得到了该水库各工况下下游淹没图及洪水演进历时,图 7 和图 8 为 5 000 年一遇洪水溢洪道正常下泄时洪水漫顶工况的淹没和洪水演进历时过程.

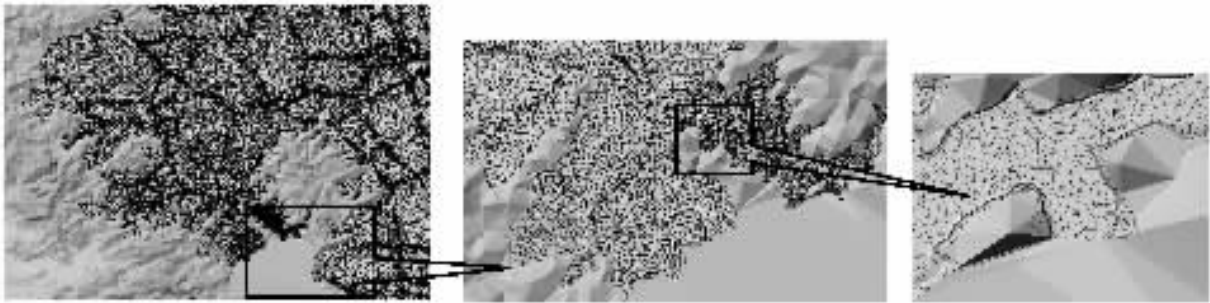


图 5 DEM 模型及计算网格
Fig.5 DEM model and computational grid

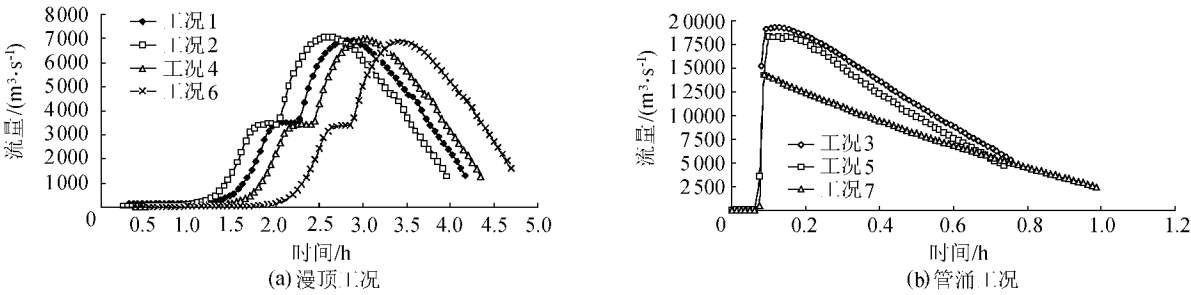


图 6 某土石坝溃坝洪水流量过程
Fig.6 Dam-break flood process of an earth-rock dam

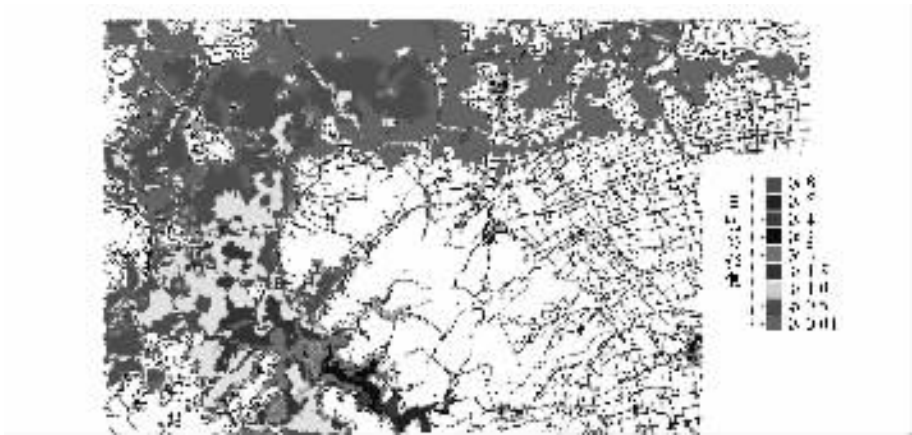


图 7 水库下游淹没示意图
Fig.7 Sketch of flood of reservoir downstream

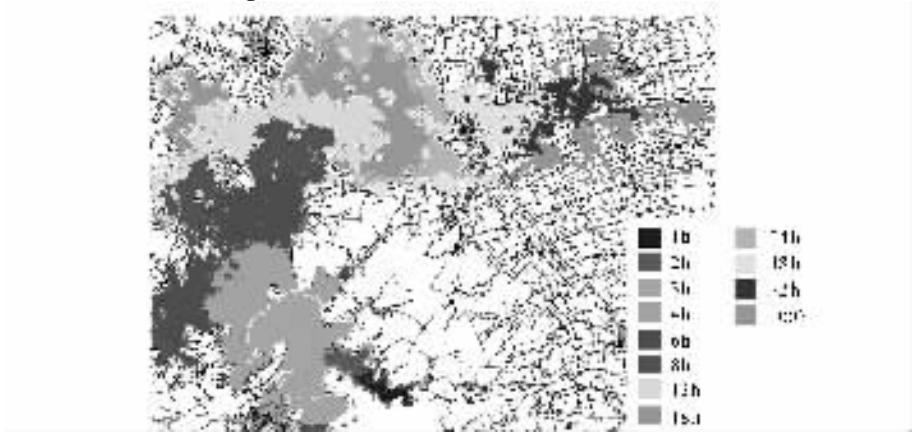


图 8 水库下游洪水演进历时
Fig.8 Flood routing process of reservoir downstream

5 结 语

本文借助计算机科学与信息技术,基于《国家突发公共事件总体应急预案》和预警系统的三维结构原理,研究了土石坝工程安全预警系统的关键技术,即预警系统架构、警源分析子系统、警兆辨识子系统、警情分析子系统等,重点研究了警情分析的理论与方法,包括水库大坝的虚拟现实技术、溃坝洪水估算、下游洪水演进预测等关键技术.该关键技术已成功应用于某土石坝工程,该工程安全预警系统的建立对研制土石坝工程安全预警系统具有重要意义.

参考文献：

[1] COMERFORD J B,SALVANESCHI P,LAZZARI M,et al.The role of AI technology in the management of dam safety :the DAMSAFE system[J]. Dam Eng,1993,3(4) 215-226.

[2] 李永江.土石坝安全监测技术及安全监控理论研究进展[J].水利水电科技进展,2006,26(5) :73-77.

[3] 吴中如,顾冲时.大坝安全综合评价专家系统[M].北京 科学技术出版社,1997 :1-10.

[4] 黄红女,周琼,华锡生.大坝安全监控理论与技术研究现状综述[J].大坝与安全,2005,2(29) 54-57.

[5] 马福恒,向衍.水工混凝土结构健康诊断的预警系统[J].水利水运工程学报,2005(3) 7-12.

[6] 吴延熊.区域森林资源预警系统的研究[M].昆明 云南科技出版社,1999 :70-75.

[7] 罗伯特·希斯.危机管理[M].王成,译.北京 中信出版社,2001 :75-100.

[8] 吴中如,顾冲时.重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M].北京 高等教育出版社,2005 :332-350.

[9] 向衍,马福恒,袁辉.地震对英德尔水库溃坝的影响分析[J].长江科学院院报,2007,24(5) 31-33.

[10] 马福恒,向衍,吴中如.基于 Web GIS 技术的病险水库灾情动态评估系统架构[J].水利水运工程学报,2007(1) 27-30.

[11] FREAD D L. Breach :an erosion model for earthen dam failures (Revision 1991) [R]. Silver Spring, Maryland :National Weather Service,NOAA,1991.

[12] 温岭市湖漫水库突发事件总体应急预案[R].南京 南京水利科学研究院,2008.

Key technologies for an early-warning system for earth-rock dam safety

XIANG Yan^{1, 2}, MA Fu-heng^{1, 2}, LIU Cheng-dong^{1, 2}

- (1. Dam Safety and Management Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029, China ;
2. Dam Safety Management Center of MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract :Based on the early warning principles of system engineering, combined with the characteristics of an earth-rock dam project, an earth-rock dam safety early-warning system architecture is studied. The system is divided into three subsystems :the warning source analysis, the warning sign identification and the warning situation analysis. The warning situation analysis subsystem involves some key technologies, such as virtual reality, dam-break flood estimation and downstream flood evolution forecasting. The application of these key technologies to an earth-rock dam project shows that the earth-rock dam safety early-warning system provides an important early-warning reference value for earth-rock dam safety.

Key words :earth-rock dam ;early-warning system ;system engineering