

大坝安全实时监控和预警系统的研制和开发

沈振中¹, 陈允平¹, 王 成², 李桃凡³, 李泽源³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 淮安市水利勘测设计研究院, 江苏 淮安 223005 ; 3. 中国水利水电第八工程局科研设计院, 湖南 长沙 410007)

摘要 为适应新形势下水库大坝安全运行和科学管理的需要, 根据国内外水利水电工程建设和管理的发展趋势, 研制和开发了水利水电行业的专业管理软件系统——大坝安全实时监控和预警系统。简要介绍系统的主要功能、总体结构设计、数据库设计, 以及实时监控和分析预警 2 个核心子系统的功能。阐述实时监控和分析预警的技术路线以及系统数据流结构, 并给出了系统应用实例。应用结果表明, 该系统通用性强, 实用可靠, 使用效果良好。

关键词 大坝安全 监测资料 实时监控 预警 数据库

中图分类号 :TV698.1

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2010)03-0068-05

Development of real-time monitoring and early warning system of dam safety//SHEN Zhen-zhong¹, CHEN Yun-ping¹, Wang Cheng², Li Tao-fan³, Li Ze-yuan³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Water Resources Investigation, Design and Research Institute of HuaiAn City, HuaiAn 223005, China ; 3. Design and Institute of SINOHYDRO Engineering Bureau 8, Changsha 410007, China)

Abstract : For the safe operation and scientific management of dams under the new situation, a professional management software system for water conservancy and hydropower engineering, real-time monitoring and early warning system of dam safety, was developed according to the development trend of domestic and international water conservancy and hydropower project construction and management. The main functions of the system, the design of the overall structure, the design of database as well as the functions of two core subsystems of real-time monitoring and early warning analysis were introduced. The technical routes of the real-time monitoring and early warning analysis and the structure of the system data flow were demonstrated, and an application example of the system was given. The test results show that the proposed system is universal, practical, reliable and effective.

Key words : dam safety ; monitoring data ; real-time monitoring ; early warning ; database

大坝安全监测资料种类多, 数据量大, 处理和分析的工作量很大。工程施工期间由于各种条件限制, 水电站、水库管理单位、施工单位的技术人员一般很难及时处理大量安全监测资料, 而是委托其他单位进行整理分析, 因而未能及时将监测和分析成果应用于大坝安全监控和运行管理, 也就不能及时发现隐患并进行预警和处理, 以至贻误时机, 造成不必要的损失。在运行期, 为了进行大坝安全定期检查, 上级主管部门和水电站或水库管理单位需要花费大量的人力、财力和时间来组织委托有关单位或部门协调工作, 整理分析监测资料, 评价大坝安全工作性态。因此, 需要对监测系统采集的数据进行科学有序的管理, 及时分析, 迅速有效地评价工程的安全状况, 发现隐患及时预警。

20 世纪 50 年代我国开始进行大坝安全监测工作, 已取得了巨大的进步和成果。90 年代, 大坝安全监测体系和监控系统又得到了进一步的完善, 如吴中如、顾冲时、沈振中等提出一机四库(综合推理机、数据库、知识库、方法库和图库)的安全监控框架体系, 并建立了大坝安全综合评价专家系统、大坝安全实时监控和反馈分析系统^[1-4], 此后温志萍^[5]、李婷婷^[6]、朱赵辉^[7]发展了大坝安全监控智能框架和结构, 并开发了系统。近年来, 国内其他一些单位也相继研究和开发了具有部分监控和预警功能的大坝安全监测管理和监控系统, 如南京水文自动化研究所开发的 DG 大坝自动监测系统、南京南瑞集团开发的 DSIMS 大坝安全监测信息管理系统^[8] ; 南京水利科学研究院开发的大坝现场实施安全监测系

基金项目 国家自然科学基金(50809025) 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2009586012)

作者简介 沈振中(1968—), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士, 从事水工结构安全评价和监控研究。E-mail :zhzhshen@hhu.edu.cn

统^[9-10]、中国水利水电科学研究院和河海大学等单位合作开发的小浪底水利枢纽工程安全监控系统开发研究^[11]等。其中,有的系统侧重于监测信息管理,适用于施工期安全监测和管理,如大坝安全信息管理系统主要针对监测数据信息管理,在研究的深度和广度方面有所欠缺,有的系统侧重于大坝安全的综合评价,适用于运行期大坝的安全监控,如大坝安全监控专家系统主要针对监测数据和大坝安全的综合评价、专家评判等方面进行开发,其实用性和经济性有其局限性,特别是在易操作性、通用性等方面存在不足。此外,现有的许多安全监控理论和方法主要针对大坝运行期的安全分析和评价,而对于施工期、蓄水初期则缺乏系统深入的研究。在国外文献中,有关集施工期、蓄水初期和运行期等各阶段于一体的大坝安全实时监控和预警系统的相关报道尚不多见。大坝安全实时监控和预警系统采用先进的计算机信息技术,针对施工期、蓄水初期和运行期进行开发,可以满足施工期、蓄水初期和运行期等各阶段实时监控和预警的要求。此外,系统采用了改进粒子群算法,将仿生算法应用于大坝安全预警系统,并将块体系统理论用于拟定大坝安全预警指标。

本文主要介绍了大坝安全实时监控和预警系统的主要功能和总体结构设计以及数据库设计,并给出了实时监控和分析预警2个核心子系统的应用实例。

1 系统的主要功能和技术

1.1 主要功能

根据大坝安全监测的有关规范和规程,以及满足应用和科学管理的要求,确定本系统的主要功能(或目标)如下。

a. 对人工采集和自动化监测系统采集的监测资料以及与安全有关的设计、施工资料进行科学有序的管理。

b. 动态管理监测系统及其监测资料数据库,可根据需要增加或删除测点信息,而不影响系统运行。

c. 对监测资料进行及时(人工)或实时(自动化)整编和初分析,用户可根据需要对监测资料的整编和归档进行调整,自动生成满足应用要求的报表,如月报、年报等。

d. 依据监测资料及其分析成果,对大坝等水工建筑物的安全状况做出及时或实时评价,实现及时或实时监控。

e. 对及时或实时监控发现的异常测值进行在线实时反馈分析。首先对异常测值进行综合分析检查和监测检查,区分建筑物异常或险情,其次对建筑

物的异常或险情进行物理成因分析,并发出报警信息。

系统实现了由用户定制格式自动生成月报、季报和年报,比现有的一般只能生成固定格式报表的系统更先进实用。此外,系统实现的授权用户利用Internet远程浏览本系统监测信息的网络功能,也是一个特色。系统的大部分模块模块化程度高,易于移植,具有很好的通用性。

1.2 主要技术

1.2.1 数据库及网络技术

系统分为信息处理、信息分析评判、系统管理、远程浏览等子系统,实现面向用户有效地管理、处理、分析及评判大坝安全各种信息的目标。在水库大坝管理中心建立监控大坝安全性态的实时监控和预警系统,实现大坝安全全方位的实时监控,同时按‘中心管理、多端浏览’的需求,允许远程用户按特定的权限访问管理中心的监测数据库,查看有关信息、图表等。

1.2.2 监测信息分析技术

系统中对监测信息的分析方法主要有逐步回归分析法、基本粒子群算法及改进粒子群算法。逐步回归分析法是从一个预报因子开始,将各预报因子按其对因变量作用的显著程度,从大到小依次引入回归方程,直到显著因子都包括在回归方程以内为止,由此建立监测资料的回归预报模型。仿生算法的兴起为大坝安全监控领域提供了新的思路,粒子群算法是近几年备受关注的仿生优化算法。该算法概念清晰、参数少、简单易行,已广泛用于参数反演、函数优化、优化组合等问题。本系统采用了改进粒子群算法,应用于系统对监测资料的在线分析,建立中、长期预报模型。

1.2.3 专业分析程序

专业分析程序主要用于识别监测异常或建筑物异常和险情,建立变形、应力和渗流的预警指标,供实时分析和监控以及预警调用。专业分析程序主要包括:①弹性有限元分析、弹塑性有限元分析程序。对于混凝土坝,可以认为除局部应力集中外,在已知各项荷载的作用下,坝体混凝土均处于弹性范围内,可采用黏弹性本构模型进行有限元计算分析,确定结构位移和应力及其一级预警指标。岩质边坡等在自重及外荷载作用下,结构的局部应力可能会超过材料的屈服应力,进入塑性状态,应力应变不再呈线性关系,因此,可采用黏弹塑性本构模型进行有限元计算分析,确定结构位移和应力以及一级和二级预警指标。②渗流分析程序。渗流分析程序包括各向异性介质的非稳定饱和-非饱和二维和三维有限元

分析程序,主要用于对坝基和两岸的渗流场进行计算分析,确定扬压力、渗透坡降、渗流量及其预警指标等,并为结构分析提供荷载。③非连续变形分析程序。非连续变形分析是一种崭新的研究非连续块体系统不连续位移和变形的数值分析方法,不仅可以计算块体系统的小变形小位移,而且可以计算块体系统的大变形大位移,可以模拟块体从小变形到大变形破坏的整个过程。由于重力坝和拱坝等都是依据稳定和强度进行设计的,位移并非其控制标准。采用非连续变形分析可以建立结构极限状态下变形与稳定和强度之间的对应关系,从而确定一级、二级和三级预警指标。④温度场分析程序。该程序用以分析确定混凝土坝运行期的准稳定温度场,确定温度荷载,供结构分析程序调用。同时,也可以为施工期混凝土温度监测和控制提供理论依据。

2 系统的结构设计

2.1 系统的功能设计

根据大型系统软件工程研制和开发流程,结合本系统的功能要求,对本系统进行详细设计,规划菜单和子系统,绘制系统结构和数据流程图,细化功能模块,编制实施细则。本系统主要功能设计内容如图 1 所示。

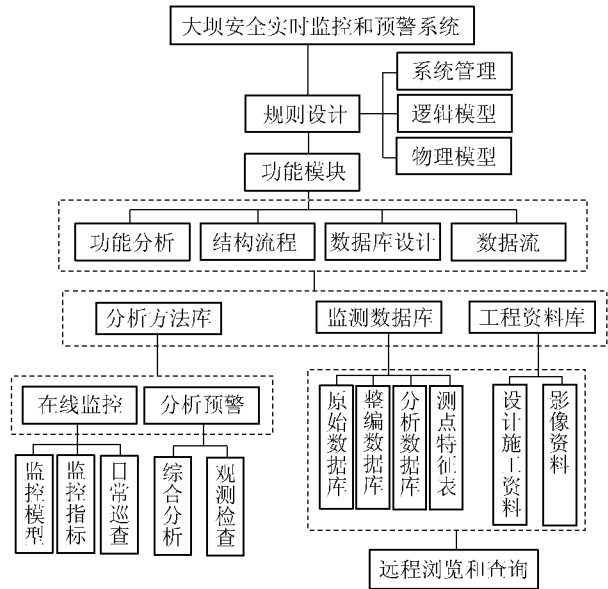


图 1 系统主要功能示意图

系统具备广域网远程浏览和查询功能,可供多个授权用户在 Internet 网络浏览和查询水库大坝安全资料及安全监测和评价预警信息。授权用户(含上级领导 and 主管部门)的任何一台计算机通过浏览器,按指定的权限访问管理中心的数据库,查看相关的信息、图表等。评判专家可以通过局域网直接查询和调阅管理中心数据库中的所有相关资料和数据

信息等。

2.2 数据库设计

数据库是本系统的基础,是保证系统各功能模块正常高效运行的关键。数据库设计时,首先进行需求分析,找出应用领域的数据库项和数据操作任务,形成需求分析说明书,并根据说明书进行概念数据库设计,形成概念数据库模式,然后进行逻辑数据库设计,形成特定的数据模型,最后进行物理数据库设计,优化数据库的存储结构。数据库设计过程如图 2 所示。在数据库设计过程中,需求分析和概念数据库设计可以独立于任何数据库管理系统以外进行。逻辑数据库设计和物理数据库设计与数据库管理系统密切相关。

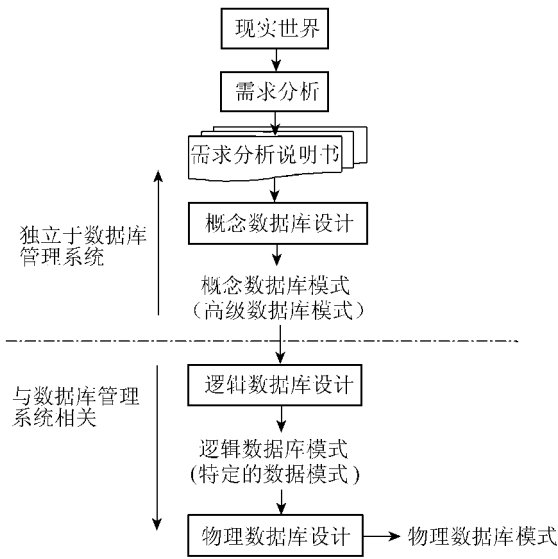


图 2 数据库设计过程

2.3 系统的控制界面设计

本系统是一个庞大的软件系统工程,为了保证系统安全正常运行,需要有良好的菜单系统。本系统的集成主要依靠菜单系统。系统一级菜单为系统功能模块的集成,负责调用系统各个组成子系统及其功能模块。本系统共设有 8 个一级菜单,主控界面如图 3 所示。



图 3 系统主菜单

系统模块主要是帮助用户对系统进行有效的日常维护和管理。工程档案模块主要是管理工程资料库中与大坝安全有关的设计、施工、影像等资料。监测仪器模块主要是对工程中布置的监测仪器和监测测点的基本信息进行科学的管理。监测数据模块主要对人工、半自动化、自动化等 3 种采集方式得到的监测数据进行基本的管理,用户可以通过交互界面查询、整编并以报表等多种形式输出所需的监测数

据。查询模块主要对各测点信息及其监测数据按要求进行查询。帮助模块主要帮助用户熟悉了解本系统的组成和功能等。

3 实时监控和分析预警子系统的功能实现

3.1 实时监控子系统

实时监控子系统主要负责评判大坝的关键问题、关键监测项目或关键部位监测资料的力学规律性,以期及时发现疑点和问题。对于自动化监测系统,变形、渗流和应力等监测资料可以随时采集,其采集的时间间隔较短,甚至可以根据监测系统硬件的标准任意指定。实时监控子系统的核心模块始终在后台运行,它及时扫描监测系统的采集数据库(扫描时间可以根据监测系统采集时间间隔设定),如发现新增监测数据,就调用本系统内置的批量录入程序将监测数据存储进入原始数据库,随后调用监测资料预处理和整编程序,将原始数据进行转换、整编并存储进入整编数据库。这时实时监控子系统的显示核心模块可将新增监测数据显示在监控界面上,并调用分析数据库中预设的评判准则进行评判。若发现疑点和问题,立即发出提示信息。

由于控制大坝安全的关键项目不止一个,也非全部监测项目,因此本系统选择变形(坝顶水平位移)、渗流(坝基扬压力)、应力(坝踵应力)等常见的具有代表性的监测项目进行实时监控。同时,考虑到通用性和灵活性,该子系统对于未建模的监测项目进行提示,并预设实时监控通道,用户可以根据需要选择需要实时监控的监测项目,设置坐标轴,进行实时监控。此外,实时监控的扫描时间间隔也可以根据监测数据子系统的实际情况由用户自主设置。

本系统实时评估子系统包括单测点评估和多测点评估,用户可根据自己的需要选择不同的评估方法。多测点评估的操控界面如图4所示。



图4 大坝安全实时监控界面

3.2 分析预警子系统

分析预警子系统主要负责调用分析方法库中的程序和专业知识构建监控模型,并应用监控模型对变形、渗流和应力应变等监测资料以及环境量、相关

监测量和相同监测量进行计算分析,快速发现异常测值,并对异常测值拟定报警级别。调用结构分析程序、渗流分析程序和温度场分析程序等内置程序对坝体、坝基以及坝肩岸坡等进行必要的计算分析,了解大坝的工作性态,并结合监测资料分析确定预警指标。根据监测资料及其评判结果,考虑各类监测项目在大坝安全中的重要程度及异常程度,对大坝安全进行综合评价,并拟定报警级别,实现预警。现以平班大坝应力应变监测项目中的测点 B6P_1 为例简要介绍该模块。

a. 选取建模方法,包括选取监测测点、监测时段、监测物理量以及各影响分量等,从整编数据库中读取这些监测资料,并进行建模计算。建模所得结果包括统计模型表达式、模型复相关系数、标准差以及各影响因子的拟合过程线等。建模计算完成后将结果显示在监控界面上,并绘出该测点的实测值、模型拟合值和残差等过程线,如图5所示。

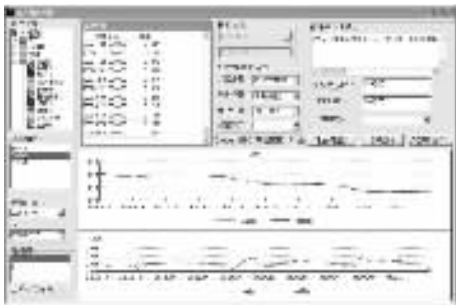


图5 测点 B6P_1 统计模型拟合成果

b. 将建模所得结果保存到数据库中,保存的数据包括:各监测测点的水压、温度和时效等各影响分量、模型标准差和复相关系数等。

c. 选取需分析预警的监测测点、监测时段、监测物理量、相应的预警指标等,经综合分析后给出评价结果,如图6所示,包括实测值、模型计算值、环境量(上游水位、下游水位和气温等)、残差过程线等,并对异常值进行整理归类、集中显示。

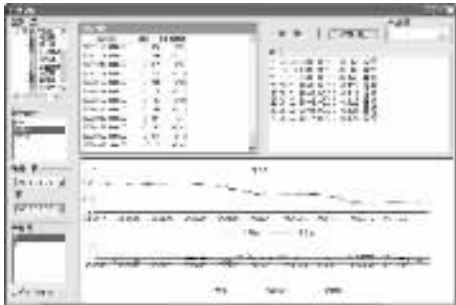


图6 测点 B6P_1 分析预警界面

本系统预警指标分3级,用户可以根据施工期、蓄水初期和正常运行期等不同阶段的实际情况,调用本系统的内置分析程序和操控工具拟定、更改监

测系统各测点的预警指标。因此,本系统具有良好的通用性和可操作性。

4 结 语

大坝安全监测自动化是安全监测的发展趋势,建立大坝安全实时监控和预警系统是实现水库大坝安全运行和科学管理的必要保障。本文主要介绍了大坝安全实时监控和预警系统的主要功能组成、结构设计和主要控制界面,以及核心子系统(实时监控和分析预警子系统)的主要模块功能。大坝安全实时监控和预警系统以解决大坝安全管理和分析评价为重点,遵循大坝安全监测相关规范、规程和要求,采用功能完善、操作灵活、运行可靠、实用先进的硬(软)件,以解决工程和管理中的实际问题为第一目标。系统中所有子系统模块都按照国家相应规范、规定和要求进行研制和开发,并且充分考虑了系统的通用性,实现了模块标准化和通用化的应用管理目标,并满足实用性、可靠性和实时性。本系统已在红水河南盘江平班水电站、长江三峡水利枢纽、资水株溪口水电站、龙河藤子沟水电站等工程大坝安全监测中应用,使用效果良好。该成果已获得中国水利水电建设集团公司 2009 年度科学技术进步一等奖。

致谢 本系统规模巨大,参与研制和开发的人员还有刘强、王伟、刘士佳、周磊、温志萍、毛春梅、徐力群、唐志贤、张锋、江世勇、田承宇、丁长青等,在此表

示感谢。

参考文献：

[1] 吴中如,沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社,1990.

[2] 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.

[3] 沈振中,吴中如,温志萍,等. 二滩拱坝安全监测在线监控系统[J]. 水利水电科技进展,2000,20(3): 33-35.

[4] 沈振中,苏怀智,吴中如,等. 水口水电站工程在线实时监控及反馈分析系统[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2000,28(2): 12-16.

[5] 温志萍. 开放式大坝安全监控系统[D]. 南京: 河海大学,2000.

[6] 李婷婷. 混凝土坝健康诊断及其预警系统[D]. 南京: 河海大学,2006.

[7] 朱赵辉. 大坝安全监控信息融合与挖掘方法研究[D]. 南京: 河海大学,2008.

[8] 刘观标. 南瑞大坝安全监测智能分布式工程安全自动监测系统[J]. 中国水利,2006(6): 67-67.

[9] 李宗坤,胡铁成,王建有. 大坝安全监测分析评价系统开发及应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报,2008,20(1): 8-12.

[10] 王仁钟,施伯兴. 一个完整的大坝现场实时安全监测系统[J]. 水利管理技术,1994(2): 34-36.

[11] 林季山,宗志坚,王跃. 小浪底水利枢纽工程安全监控系统开发研究[C]//99 大坝安全及监测国际研讨会论文集. 宜昌: 中国水力发电工程学会,1999: 471-475.

(收稿日期: 2009-08-01 编辑: 骆超)

· 简讯 ·

河海大学 2009 年获 3 项国家‘973’计划项目

河海大学主持申报的‘重大水利工程影响下长江口环境与生态安全’和参与申报的‘高效规模化太阳能热发电的基础研究’“复杂装备研发数字化工具中的计算力学和多场耦合若干前沿问题”重大科研项目获得 2009 年国家‘973’计划立项,将获得重大专项资金资助。

“973”计划是我国专门针对重点基础研究领域的发展计划,入选和资助的都是国家最高层次的战略基础研究项目,并着眼于加强我国的原始性创新,解决国家经济与社会发展中的重大科学问题。“重大水利工程影响下长江口环境与生态安全”项目旨在全球气候变暖海平面上升的大背景下,通过对长江流域水资源开发利用不断增强和水利工程建设规模迅速扩大而导致的长江入海水沙量减少、水质恶化、河口动力沉积及生态结构变化的研究分析,科学预测长江口环境与生态系统的发展趋势,评估其健康安全程度,并提出合理的对策,以满足国家在战略层面决策的重大需求。“高效规模化太阳能热发电的基础研究”项目致力于解决太阳能热发电成本高、效率低的瓶颈,以促进我国太阳能热发电技术走向大规模商业化的发展进程。“复杂装备研发数字化工具中的计算力学和多场耦合若干前沿问题”项目则为国防与民用高技术装备自主创新设计提供关键建模理论、先进数值分析方法和技术支撑。

国家 2009 年新立项‘973’计划项目 144 项,其中江苏省共有 4 个单位主持 8 项,分别是: 南京大学 5 项,东南大学、河海大学、中国科学院南京土壤研究所各 1 项。

(本刊编辑部供稿)