

土石坝安全监测技术及安全监控理论研究进展

李永江

(河南省燕山水库建设管理局,河南 平顶山 467224)

摘要 :介绍了土石坝安全监测技术的发展过程,从土石坝安全监测资料的合理性、安全监测资料的数学模型、基于安全监测资料的土石坝结构性态反分析、土石坝安全决策支持系统等方面综述了土石坝安全监控理论的研究进展。指出了土石坝安全监测技术与安全监控理论研究的新方向。

关键词 :土石坝;安全监测;安全监控理论;研究进展

中图分类号 :TV698.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)05-0073-05

Advances in research of safety monitoring technology and safety monitoring & controlling theory for earth rockfill dam//
Li Yong-jiang(Yanshan Reservoir Construction Management Bureau of Henan Province , Pingdingshan 467224 , China)

Abstract :An introduction is given to the development of the earth rockfill dam safety monitoring technology , and some advances in safety monitoring & controlling theory for earth rockfill dam are reviewed from the aspects of rationality and numerical analysis of the monitoring data , back analysis of structural characteristics based on the monitoring data , safety decision-making and supporting system , etc. Finally , the trends for the further development of the safety monitoring technology and theory are put forward.

Key words :earth rockfill dam ; safety monitoring ; safety monitoring & controlling theory ; advance in research

自 20 世纪 70 年代末,土石坝的数量和高度均超过了混凝土坝,并且 300 m 以上的高坝均为土石坝。土石坝的造价比混凝土坝低,但风险比混凝土坝大,我国发生溃坝事件的坝体有 98% 以上是土石坝。1976 年美国坝高 93 m 的 Teton 坝管涌失事,淹没农田 4 万多 hm^2 ,死亡 14 人,损失 4 亿美元^[1];1975 年我国河南板桥、石漫滩土坝漫坝失事,淹没农田超过 113 万 hm^2 ,受灾人口 1 190 万,造成严重后果;1993 年青海沟后混凝土面板砂卵石坝因渗透破坏失事,造成 300 多人死亡^[2];2005 年青海英德尔水库均质土坝坝上溢洪道垮塌,造成右副坝溃坝。在上述失事的土石坝中,大部分是由于大坝缺乏观测设施或观测设施不完善,或未及时监测和分析监测结果,使得大坝失事前没有及时发现征兆,以致贻误时机。吸取国内外土石坝失事的严重教训,土石坝安全监测应贯穿于勘测、设计、施工、运行等各个环节^[3]。必须针对各土石坝的具体情况和特点设置相应的安全监测项目,对大坝变形、渗流量、渗透压力等进行连续而全面的监测,并对实测数据进行及时有效的分析,在此基础上,实现土石坝安全性的综合评判,以反馈土石坝的安全运行。

1 土石坝安全监测技术研究进展

1.1 初期的土石坝安全监测

我国土石坝的原型监测起步于 20 世纪 50 年代,80 年代末实现了自动化监测,之后发展迅速,但对观测仪器的要求仍以简单可靠、能取得满足精度要求的观测成果为主。90 年代后大坝安全监测技术飞速发展,许多大坝完成了自动化监测系统的更新改造,新建土石坝具有了功能较齐全的监测系统。目前土石坝安全监测实现了数据采集、数据管理、在线分析、成果预警的计算机自动化监控。土石坝安全监测技术的发展过程见表^[4]。

1.2 土石坝安全监测现状

渗流和变形是土石坝安全监测中最重要的物理量。渗流量最初采用量杯、秒表直接在测点上量读。后来发展为用电测仪器监测,包括管口渗流量仪和量水堰两种。前者是对排水孔进行单孔量测,应用较少;后者是汇流到量水堰进行量测。随着监测自动化的发展,目前渗透压力遥测仪器已在工程中得到广泛应用,可以分为振弦式、电感式、电阻式和差阻式 4 类。以前的土石坝变形监测多采用水准仪和

基金项目 :国家自然科学基金重点资助项目(50139030)、国家“ 973 ”计划项目(2002CB412707)
作者简介 :李永江(1963—)男,河南郑州人,高级工程师,从事水利工程建设、监理和管理工作。E-mail :lyj@hnsi.gov.cn

表 1 20 世纪土石坝安全监测技术发展状况

发展阶段	数据采集及 存储方式	数据处理及 成图方式	决策分析
50 ~ 60 年代	光学、机械仪器 采集数据,手工 记录	手算及简单 编程处理数 据,手绘图形	专业知识与 经验判断
70 ~ 80 年代	光电机械化,激 光类仪器使用, 小型计算机存 储数据	程序处理限 量的数据及 成图	结合定期的 资料分析结 果与经验判 断
90 年代至今	传感器、电子、 激光类设备自 动采集系统, “3S”技术应用, 数据库存储	数据处理软 件进一步优 化,GIS 数字 化成图发展 至 3D 图像	由人机结合 向安全评判 专家系统发 展

经纬仪,现多采用全站仪和电子水准仪。如天荒坪抽水蓄能电站的表面变形采用 LEICA TCA 2003 全站仪,实现了表面变形监测的半自动化^[5]。相对于三角网人工观测而言,全站仪具有精度高、测量和数据处理时间短的优点。小浪底工程中大坝外部变形监测采用了 TCA2003 型全站仪及 DIN12 数字水准仪,从而实现了集数据采集和分析于一体的自动监测系统。碧口等土石坝采用引张线与倒垂线系统实现表面变形监测自动化^[6]。

1.3 土石坝安全监测的发展方向

目前,人们正在研究一些半自动渗流探测方法,如地球物理瞬变电磁法、同位素探测法、电磁探测法等。在多年研究工作的基础上,俄罗斯学者提出“将温度状态作为观测土石坝性态的指示因子”的观点^[7]。瑞典学者通过计算表明,当心墙渗透系数小于 $(2 \sim 6) \times 10^{-7} \text{m/s}$ 时,坝体温度的变化几乎是常数,当渗透系数大于上述值时,可由温度的变化较准确地估计出大坝渗透性^[8]。渗流的温度监测是利用了水的热传导系数及比热容和岩石及土体的差别较大的原理。渗流变化必然导致温度场的变化,这一点为今后的土石坝渗流监测提供了一个新的思路。

时域反射法(TDR)是指在需要监测的部位埋设同轴电缆,若堤坝发生滑动,滑动部位会使电缆变形,通过采用时域反射仪测量电缆变形情况可以找出坝体变形所在的部位。光时域反射法(OTDR)是指在需要监测的部位埋设光缆,其测量原理与时域反射法相似。若沿坝纵向埋设同轴电缆或光缆,可以在较大范围内监测大坝的位移^[9]。然而,因测量技术的限制和经济上的原因,目前上述测量技术有的只能采用人工方法进行测量,有的尚在实验阶段,但研究为人们指明了空间或面监测的方向,与常规监测结合起来可以发挥全面监测大坝和与之相互印证的作用。为解决安全监测自动化系统防雷击、防电磁干扰问题,近年来出现了光纤传感器^[10]。

它应用光干涉原理制成敏感元件,将变形、渗透压力等物理量变换为光纤信号并通过光缆传输,克服了差阻式、振弦式等仪器的弱点。

随着光纤传感器和光纤通讯技术的发展,必将产生一种全光纤式大坝安全监测自动化系统。与此同时,随着 GPS 技术在混凝土坝上的成功应用^[11-12],且土石坝与混凝土坝相比,具有跟踪卫星方便以及变形量较大、精确度要求较低等特点,未来 GPS 技术可用于测量土石坝沉降等。可以预想,综合应用地理信息系统(GIS)、遥感系统(RS)、全球卫星定位系统(GPS)和专家系统(ES)对水利水电工程进行安全监测将是一种新的尝试。吴中如等^[13]提出了“4S”集成框架,可用于对整个流域大坝群的监测和管理或对单个大坝进行安全监测和监控。“4S”技术及其集成技术作为数字流域中的重要技术,在大坝安全监控领域将具有广阔的应用前景。

2 土石坝安全监控理论研究进展

2.1 土石坝安全监测资料的合理性分析

土石坝安全监测资料的合理性分析主要包括对资料的误差处理和不同测量仪器的归一化处理。目前,主要基于最小二乘理论处理监测数据的粗差,常用的方法有数据探测法和稳健估计法。前者假定平差系统只存在一个粗差观测值,并将该粗差纳入函数模型,用统计假设检验方法检测粗差并剔除粗差;后者通过变权使观测中正常方差和异常大方差对参数产生不同影响,以达到定位粗差和削弱其对参数解的不良影响^[4]。此外,粗差处理还常用统计量检验法,如格拉布斯准则、狄克逊准则、肖维勒准则、t 检验准则、F 检验准则等。此外,Kalman 等提出了一种递推式滤波方法^[4]。徐洪钟等^[14]将小波分析应用到大坝观测数据粗差探测中,把大坝观测序列看作由不同频率成分组成的数字信号序列,把粗差看作信号的奇异点,采用小波分析的信号奇异性理论进行粗差探测。史玉峰等^[15]用信息熵原理通过对观测数据求置信区间进行测量数据的粗差识别。针对采用不用仪器得到的监测数据,为保持资料的完整性并使得样本较多,向衍^[16]采用单位阶跃函数建立统计模型,从而实现对不同测量仪器监测数据的归一化处理。马福恒等^[17]采用投影追踪赋权方法处理观测资料,进行大坝安全分析。

工程数据处理领域认为多因素监测信息中常常会出现一个或多个严重偏离目标真值的数据(通常称为野值),今后土石坝安全监测资料合理性分析的发展方向^[16],一是基于数理统计的残差分析,二是基于概率的随机模糊诊断技术研究。

2.2 土石坝安全监测资料的模型分析

土石坝的安全监测资料分析要比混凝土坝复杂得多^[4],主要表现在:①结构、材料及边界条件的物理力学特性和参数更加复杂,难以准确模拟计算;②渗流更加复杂,存在渗透破坏以及渗流场、应力场、温度场的三场耦合问题;③破坏形式和破坏机理研究还不够深入,材料的蠕变和突变特性还有待进一步研究;④观测资料不仅与坝型、结构、材料和荷载有关,还与施工过程、施工进度、施工方法、运行管理等因素有关。

徐竹青等^[18]基于灰色理论,建立了沉降状态的灰色模型。徐晖等^[19]应用灰色理论对土石坝观测资料的灰色关联度、灰色建模及灰色预测作了研究。酆能惠等^[20]基于土石坝变形与孔隙水压力产生机理的分析,研究了较合理的统计分析方法。张乾飞^[21]通过三维渗流有限元分析,分离了大坝坝体、坝基以及两岸岩体的渗流量,并建立了基于三维渗流有限元计算的土石坝渗流确定性模型。徐洪钟等^[22]将模糊数学与神经网络相结合,把构成组合模型的各个子模型作为网络学习矩阵的输入,建立土石坝的沉降组合模型,采用自适应模糊神经网络进行组合预报。邓念武等^[23]运用 BP 人工神经网络模型克服了模型必须是基本观测量的线性和非线性组合的局限性,将 BP 模型应用于土石坝空间位移分析,实现大坝空间位移的拟合和预报。唐彤芝等^[24]考虑库水位升降速率及各因子耦合的影响,建立了面板堆石坝沉降统计预报模型。高杰^[25]探讨了模糊聚类分析方法在土石坝安全监测中的应用问题,建立了模糊聚类分析模型,以监控大坝的运行性态。刘正云等^[26]考虑土石坝时效模型应该具有力学依据,根据土的固结理论,研究了一种较优的收敛非线性土石坝时效模型。何勇军等^[27]应用人工神经网络原理研究了模型的输入、输出因子和模型结构,建立了渗流自学习神经网络监控模型,用于大坝渗流分析、大坝安全运行监视和预报。杨杰等^[28]在一阶单变量灰色线性模型 $GM(1,1)$ 基础上,引入使平均相对误差最小的灰元 a 作为模型参数,建立了灰色模型 $GM(1,1;a)$ 。王初生等^[29]根据土石坝坝基水文地质特征的差异性以及渗流场的非平面性,将多元回归数学模型应用于坝基渗透稳定性预测中,讨论了影响水库正常运行的坝基渗流问题。裴向军等^[30]将灰色理论应用于土石坝的渗流量预报。

随着分形几何学的发展,越来越多的非线性现象能被分形学解释。对监测得到的具有统计特性的非线性数据系列,可采用分形几何学中的“改变尺度范围的分析”(rescale range analysis,即 R/S 分析技

术)。向衍^[16]利用改进的 R/S 技术分析了某混凝土坝结构动态过程的分形特征,从而可利用由实测资料分析系统在外界因素作用下的演变规律,该方法也适用于土石坝的监测资料分析。

2.3 基于安全监测资料的土石坝结构性态反分析

反分析是根据原型观测资料,利用数学模型反求正分析中的计算参数、计算模型及某些结构特征等^[31]。土石坝计算的反馈分析主要包括对土体本构关系的模拟分析和模型参数的反馈计算。近年来,土石坝计算中的反馈计算工作也逐渐展开,不少学者在原有土石坝计算工作的基础上,根据土石坝观测资料进行确定性模型的反馈分析研究。土石坝反分析目前主要用于土层和荷载较简单的情况,仅限于线弹性模型。当土层较多而采用非线性模型时,需优化的参数量很大。因此土石坝计算中确定性模型的反馈分析,尚只能结合计算模型和经验针对具体问题。熊先仁等^[32]以土石坝沉陷观测资料作为反馈因子,反馈计算出土石坝土料的变形模量,使用有限元改进方法进行反馈分析。酆能惠等^[20]基于土石坝变形和孔隙水压力产生机理,在考虑填筑压力分量与流变分量有耦合影响的土石坝变形统计模型以及考虑库水位与库水位升降速率对孔隙水压力有影响的土石坝渗流统计模型的基础上,研究了考虑土石坝筑坝材料流变特性的土石坝反馈分析的基本原理和方法。郭雪莽等^[33]利用土石坝观测资料,讨论了反演结果受观测数目的影响情况以及如何提高反演结果可信度等问题,并研究了补偿观测信息量的多断面分析法,建立了适合于土石坝土料参数反演的遗传优化模型。曹邱林等^[34]通过分析土石坝渗流的影响因素,讨论了单一区域流量有丰富实测资料和坝后总渗流量有实测资料两种情况的渗透系数反演方法。张乾飞^[21]基于人工神经网络,在三维渗流有限元计算的基础上,研究了土石坝渗透系数的反演方法,计算出大坝坝体的渗透系数、坝基的平均渗透系数和两岸岩体的平均渗透系数,并利用反演成果分析大坝渗流场。

随着优化算法的发展,为充分利用安全监测资料反馈大坝的施工与运行,可利用仿生算法(如人工神经网络、遗传算法、蚁群算法等)反演土石坝的渗透系数以及其他物理力学参数。目前,由于商业有限元软件拥有丰富和完善的单元库、材料模型库和高效的求解器,接口的开放性使用户可以很方便地扩展程序功能,向衍等^[35]利用 MSC. Marc 软件提供的与 Fortran 语言的接口,研制了物理力学参数的遗传算法反演程序,这也是未来基于安全监测资料的土石坝结构性态反分析的发展方向。

2.4 土石坝安全决策支持系统的研究进展

土石坝安全监测的目的是为管理部门决策大坝是否安全提供资料,土石坝安全决策支持系统的发展紧随着计算机科学与技术的发展。意大利和法国是最早开发大坝安全监控数据处理系统的国家。法国电力公司开发的大坝监测数据处理系统,对监测数据采用简单的统计模型进行分析。意大利开发的MIDAS系统以使用混合模型及确定性模型进行在线监控而著称^[36]。国内南京水利水电自动化研究所开发了DG大坝自动监测系统,南京自动化研究院研制开发了DAMS大坝自动监测系统和DSIMS大坝安全管理信息系统。水利部大坝安全管理中心研制了DSAMS大坝安全监控管理系统,该系统后来成为国家防汛指挥系统工程中有关水利工程运行情况的一个子系统。华锡生等^[4]开发的小浪底大坝安全监控专家系统按照“四库三功能”的决策支持系统的模式统一规划,综合分析的整个过程可用于在线分析和离线分析。这些系统实现了观测数据的自动化采集、在线分析和实时监控。

随着计算机科学的发展,土石坝安全决策支持系统从最初的信息管理系统发展到了专家系统。专家系统是模拟人类领域专家,对问题作出专家水平的解答。将大坝安全领域内的专家知识整理、编码成计算机语言,将专家的经验 and 思维转化成合理的推理策略,从而实现对大坝的实时安全监控。Portela^[37]探讨了人工智能应用于大坝安全维护的可能性。吴中如等^[36]将开发专家系统的技术引入到大坝安全监控领域中,提出并开发了建立在“一机四库”基础上的大坝安全综合评价专家系统,应用模式识别和模糊评判,通过综合推理,对四库进行综合调用,将定量分析和定性分析结合起来,实现对大坝安全状态的在线实时分析和综合评价。Gaziew^[38]吸取其他领域成熟的专家系统的开发经验,结合大坝安全监控的特点,设计了一套大坝安全监控专家系统,将其初步应用于土石坝的诊断。纪清岩等^[39]对土石坝病害诊断专家系统(EDD DES)的实现策略、技术措施以及知识整理等进行了论述,并研究了进一步完善的方向。

20世纪90年代中期,数据挖掘技术(data

mining)^[40-41]从传统人工智能、机器学习中发展起来,从数据库、数据仓库中挖掘有用的知识,对知识的推理形成智能模型,以定性分析方式辅助决策^[42]。马福恒等^[43]曾结合计算机的软硬件技术以及安全监测的成果,研制了混凝土坝的安全监测预警系统。该预警系统总的体系结构大致可分为两层:其一是信息管理层,主要对原始的监测资料进行转换、初分析等,进而生成整编信息,同时在该层中还提供对原始信息、整编信息及生成数据信息的查询、图形显示、报表等操作;其二是预警分析层,该层首先利用数据融合技术对信息进行预处理及评判,然后利用预警模型评判,其中包括警源分析、警兆分析和警情分析等,最后通过实时数据远程通信系统发布警情预警。该系统的框架与内核也适用于土石坝,见图1。

在今后的土石坝安全监控中,应努力克服以往土石坝安全监测分析软件的缺点,通过人工智能技术实现土石坝监控的自动化,集规范性、专业性、通用性于一体,以提高土石坝的监控和管理水平,确保水库社会效益的实现。

3 结 语

a. 通过对土石坝进行安全监测和资料分析可及时发现运行中的异常,及时预测土石坝的未来安全性态和发展趋势,防止灾害的发生。根据监测和评价结果进行土石坝的控制运行,适时调整原因量以控制效应量,在确保大坝安全运行的基础上,充分发挥土石坝的工程效益,实施科学管理。

b. 安全监测成果可用于指导设计,监测资料可反馈和验证土石坝设计的正确性,求得设计的合理、完善和创新,总结经验,从而更全面地指导今后土石坝的设计。安全监测成果可用于指导施工,监测结果可用于评价土石坝所采用施工技术的适用性、优越性,有助于施工方法的改进研究。

c. 通常土石坝监测系统设施不太完善,自动化程度相对较低,通过测控技术和监测资料处理法的深入研究,可逐步改善现状,弥补不足,加快土石坝监测技术以及监控理论的深化和发展。

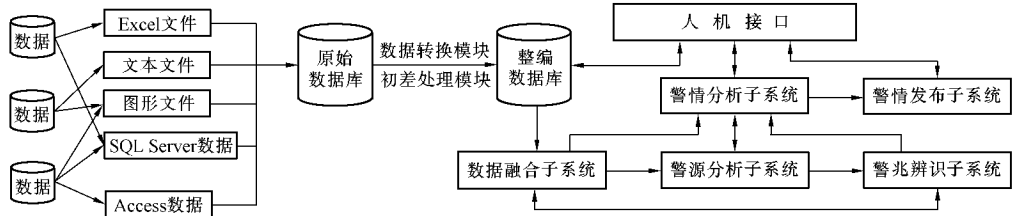


图1 土石坝预警系统的体系结构

参考文献：

- [1] BALLOFFET A, SCHEFFLER M. Numerical analysis of Teton dam failure flood[J]. J. of Hydraulic Research, 1982, 20(4): 317-328.
- [2] 汝乃华, 牛运光. 土石坝的事故统计和分析[J]. 大坝与安全, 2001(1) 31-37.
- [3] McCLELLAND D M, BOW L D S. Life-loss estimation: what can we learn from case histories[C]//Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Annual Meeting. New South Wales, Australia: ANCOLD, 1999: 35-51.
- [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) 54-57.
- [5] 方卫华. 综论土石坝的安全监测[J]. 红水河, 2002, 21(4) 64-67.
- [6] 高澜, 胡本雄. 碧口土石坝实测变形分析[J]. 西北水电, 1998(2) 20-22.
- [7] KUZNETSOV V A, ZOTOV V M, NOVOZHENIN V D, et al. Hydraulic power engineering in Russia: problems and solutions[J]. Hydrotechnical Construction, 2000, 34(1) 1-12.
- [8] MAJORS D G, RAGAN J F. Site selection of the largest earth rockfill dam project in United States history[C]//Managing the Risks of Dam Project Development, Safety and Operation: Eighteen Annual USCOLD Lecture Series. New York: USCOLD, 1998: 11-30.
- [9] 袁天奇, 张冰. 大坝外部变形监测技术现状与发展趋势[J]. 水力发电, 2003, 29(6) 52-55.
- [10] CHOQUET P. 大坝监测的新一代光纤传感器[C]//99 大坝安全及监测国际研讨会论文集. 宜昌: 99 大坝安全及监测国际研讨会, 1999.
- [11] AVAKYAN A B. Reservoirs of the Volga-Kama series of hydroelectric plants and their operating problems[J]. Hydrotechnical Construction, 2000, 34(1) 33-37.
- [12] TAMATE T, TAKAHASHI A. Slope stability test[C]//Proceedings of International Conference on Centrifuge. Rotterdam: Balkema A A, 1998: 15-29.
- [13] 吴中如, 于龙. “4S”集成技术在大坝安全中的应用[J]. 水电能源科学, 2001, 19(3) 16-17.
- [14] 徐洪钟, 吴中如, 李雪红, 等. 基于小波分析的大坝观测数据异常值检测[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4) 20-21.
- [15] 史玉峰, 靳奉祥, 王健. 基于信息熵的测量数据粗差识别法[J]. 测绘通报, 2002(2) 9-13.
- [16] 向衍. 高坝坝体与复杂坝基互馈的力学行为及其分析理论[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [17] 马福恒, 刘成栋. 大坝安全评价中的信息赋权模型研究[J]. 大坝自动化与大坝监测, 2005(3) 20-22.
- [18] 徐竹青, 郦能惠. 土石坝沉降的状态灰色模型[J]. 水利水运科学研究, 1997(3) 260-271.
- [19] 徐晖, 邱福清, 吕世德. 土石坝观测资料的灰色分析方法研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(6) 26-29.
- [20] 郦能惠, 蔡飞, 沈珠江. 土石坝原型观测资料分析方法的研究[J]. 水电能源科学, 2000, 18(2) 6-10.
- [21] 张乾飞. 复杂渗流场演变规律及转异特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [22] 徐洪钟, 张乾飞, 顾冲时. 基于神经网络的土石坝沉降组合模型[J]. 水电能源科学, 2000, 18(4) 19-21.
- [23] 邓念武, 邱福清, 徐晖. BP 模型在土石坝资料分析中的应用[J]. 武汉大学学报, 2001, 34(4) 17-20.
- [24] 唐彤芝, 李国英, 徐竹青. 土石坝沉降统计预报模型[J]. 水利水运工程学报, 2001(3) 29-34.
- [25] 高杰. 模糊聚类分析在土石坝安全监控中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13(2) 24-26.
- [26] 刘正云, 顾冲时. 探讨较优的土石坝变形时效模型[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(1) 21-24.
- [27] 何勇军, 沈秋. 土石坝渗流的自学习神经网络模型[J]. 水利水电技术, 2002, 33(2) 26-29.
- [28] 杨杰, 党志良, 吴中如, 等. 土石坝竖向位移的灰色非线性拟合与预测[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4) 31-33.
- [29] 王初生, 唐辉, 杨裕云. 多元回归模型在坝基渗透稳定性预测中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2003, 26(4) 367-370.
- [30] 裴向军, 黄润秋, 许模. 病险土石坝渗流量的灰色预报[J]. 水文地质工程地质, 2004(5) 60-63.
- [31] 吴中如, 顾冲时. 大坝原型反馈分析及应用[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1990.
- [32] 熊先仁, 杨菊梅, 张旅波, 等. 洪门水电站土石坝反馈分析[J]. 江西科学, 1996, 14(3) 129-135.
- [33] 郭雪莽, 田明俊, 秦理曼. 土石坝位移反分析的遗传方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3) 94-98.
- [34] 曹邱林, 赵瑜, 靳彩. 土坝渗透系数反分析方法研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4) 47-49.
- [35] 向衍, 顾冲时, 吴中如, 等. 基于大坝安全监测资料的物理力学参数反演[J]. 水利学报, 2004(8) 98-102.
- [36] 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.
- [37] PORTELA E T A. Knowledge-based expert system: an application to the safety control of dams[C]//Eighteenth Congress on Large Dams. Australia: ICOLD, 1994: 1019-1033.
- [38] GAZIEV E G. Safety provision and an expert system for diagnosing and predicting dam behavior[J]. Hydrotechnical Construction, 2000, 34(6) 285-289.
- [39] 纪清岩, 李书全, 郝辉耀, 等. 土石坝病害诊断专家系统[J]. 海河水利, 1994(2) 25-27.
- [40] USAMA M F. Data mining and knowledge discovery in databases: implications for scientific databases[C]//Scientific and Statistical Database Management - Proceedings of the International Working Conference. New York: IEEE, 1997: 395-405.
- [41] MUNAKATA T. Knowledge discovery[R]. New York: Communications of the ACM, 1999: 26-29.
- [42] 向衍, 吴中如. 数据挖掘技术在大坝安全决策支持系统中的应用[J]. 水力发电, 2003, 29(1) 20-23.
- [43] 马福恒, 向衍, 吴中如. 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.

(收稿日期: 2005-11-01 编辑: 骆超)