

二滩拱坝安全监测在线监控系统

⑨ 沈振中, 吴中如, 温志萍, 苏怀智

33-35, 66

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

TV 648.1

TV 642.4

摘要:结合二滩大坝特点,从安全监测的角度介绍二滩拱坝安全监测在线监控系统的设计思想,论述系统的开发目标、开发原则、总体结构,以及数据库和综合推理机的设计要点。该系统已经应用于二滩拱坝的安全监测,其监控的快速和有效是明显的。

关键词:拱坝;安全监测;在线监控;二滩水电站

中图分类号:TV642;TP274

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2000)03-0033-03

二滩水电站总装机容量 3 300 MW, 水库库容 58 亿 m^3 , 是四川省的主力电厂, 由世界银行提供部分贷款、国家与四川省共同投资兴建。其混凝土双曲薄拱坝坝高 240 m, 底宽 55.7 m, 是我国目前最高的大坝, 也是亚洲的第一高坝。二滩大坝的安全不仅直接影响其工程效益的发挥, 而且还影响到国计民生和我国的国际形象。因此, 确保大坝的安全是二滩水电站设计、施工和运行单位的头等大事。在“七五”期间, 国家科技攻关项目专门设立二滩拱坝的研究课题, 开展了大量的科研攻关工作, 解决了该坝设计、施工中的许多关键问题。然而, 由于大坝的工作条件极为复杂, 且存在一些不确定性因素, 如计算参数、地质构造的模拟以及荷载的随机性等, 用室内试验和数值模拟分析难以得到真正反映大坝实际工作性态的准确解。大坝的原型监测资料充分反映了各种因素的综合作用, 通过对这些资料的分析 and 反分析来综合评价大坝的工作性态, 是保证大坝安全运行的有效措施。本系统针对上述问题, 结合二滩大坝的特点, 利用现代计算机技术, 实现了运行期的在线快速分析和评价, 以及时监控大坝的运行状况, 使大坝在保证安全运行的前提下, 充分发挥工程效益。同时, 本系统对优化设计、施工和运行, 以及进一步完善坝工设计计算的理论和方法, 补充现行的设计和施工规范也可以起到一定的作用。另外, 通过建立专家系统, 将专家知识整理成知识库和综合推理机, 使其体系化、完整化, 并发挥更大的作用, 可以避免因专家年龄老化而导致这些知识的逐步消失。因此, 本系统不仅具有显著的社会经济效益, 而且具有重大

的科学价值^[1]。

二滩拱坝安全监测在线监控系统是一个庞大的系统工程, 由电力部成都勘测设计研究院、河海大学、中国科学技术大学、南京水利科学研究院、天津大学等多家单位(包括 10 多个子题)共同研制开发完成。其中河海大学研制开发的综合推理库子系统及其数据库接口涉及对其它各子系统的调用, 是本系统的核心。

1 系统开发目标

a. 在线实时分析。首先, 对设计、施工和运行资料进行科学管理; 其次, 重点对监测资料实现快速准确的采集、整编和分析, 并应用国内外成熟的研究成果, 建立各类监控模型、监控指标和安全标准, 将实测值与各模型的计算值和监控指标等进行对比, 并结合日常巡查资料和成果等, 跟踪分析大坝的运行状况, 从而实现在线实时分析和评价二滩大坝的安全状况。

b. 在线反馈分析。经在线实时分析和评价, 对发现的疑点进行综合分析。若为不安全因素, 则进行物理成因分析, 以便及时发现和预测不安全因素和险情。

c. 辅助决策。经物理成因分析, 若找不到产生疑点或异常的成因, 或环境量发生了显著变化, 则应进行在线反馈分析或专家综合诊断。根据反分析成果或专家组的诊断意见, 找出产生异常情况的原因, 并提出运行控制水位的建议; 对险情提出应急辅助决策措施, 并提出报警级别, 作为上级有关部门进行

基金项目: 国家教委青年基金重点资助项目

作者简介: 沈振中(1968—), 男, 江苏吴江人, 副教授, 博士, 从事水工建筑物安全监控研究及教学工作。

决策的依据。

综上所述,本系统的开发总目标是:充分利用现代计算机软硬件技术,对二滩大坝的安全状况实现在线实时分析,即通过自动化监测,实现由计算机自动处理监测资料,并进行分析、推理和辅助决策,及时评价大坝的安全状况,从而在保证大坝安全运行的条件下,充分发挥其工程效益。

2 系统开发的原则

系统的主要特点是快速、准确和可靠,为此,在开发时,遵循以下的原则:

a. 实时性.在自动化或半自动化、人工采集的数据进入工程数据库后,应及时完成数据的整编和分析.若发现疑点,应立即进行综合分析和物理成因分析,当确定为不安全因素时,还需进行敏感性反分析.在资料基本齐全的情况下,该分析过程一般不超过数小时。

b. 实用性.系统应根据二滩大坝的实际情况,进行运行期大坝的安全分析和综合评价.为此,采集的数据必须经过误差分析和可靠性检验,确保数据的可靠性;分析软件必须经评审验收或有多项工程应用实例验证,确保分析方法正确;操作系统必须具有菜单系统和良好的图形界面,并能显示、输出分析和评价的过程及结论,保证操作方便、实用.总之,系统应能真正解决二滩大坝安全的在线实时分析和反馈分析。

c. 先进性.根据实时性和实用性的要求,采用当前国际上先进的计算机硬件,研制和开发应用软件,完善正反分析理论和方法,建立可靠的监控模型和监控指标,对二滩大坝的运行状况进行快速而准确的分析、解释和反馈,实现高水平的分析、评价和安全预报。

d. 易扩展性.考虑到今后分析方法的不断更新和改善,根据系统应用的需要,系统采用 Windows 图形操作界面和标准化、模块化的设计思想,因此,即使个别模块出现故障也不会影响到整个系统的正常运行,使系统的维护和扩展升级更加容易。

e. 可靠性.二滩大坝的安全监测是关系到该工程安全的大事,监测工作不允许出现中断,因此,系统的软硬件必须长期稳定地工作.其中,准确可靠的数据采集由 2380MCU 及其传感器等承担,数据的整编处理、分析由系统开发的软件承担.系统的可靠性要求是根据 2380MCU 系统采集的数据,长期地进行分析和反分析,并安全地储存和调用各类数据、分析与反分析成果.该系统充分利用了现有的成熟软件,并遵循 TCP/IP 网络通讯协议,可以确保信息通讯的

畅通.同时,系统配有人工输入接口,当 2380MCU 不能正常工作时可由人工采集监测数据。

由传感器本身故障引起的数据异常和数据采集系统的故障,是系统在分析处理监测资料并进行安全评价时考虑的一个重要因素.系统设有综合分析检查和观测系统检查两项功能,可以判别数据异常是否由于监测系统本身引起,若是监测系统引起的,则给出故障提示,以便运行人员检修,这时,数据异常不影响大坝的安全;否则,大坝将出现不安全因素,需要进一步分析。

f. 统一规划,分步实施.系统具有规模大、覆盖面广、难度高等特点.为了保证二滩大坝运行期的安全分析、安全评价和监控的需要,遵循统一规划和分步实施的原则,通过总体设计、规划和细化,对各项开发内容采取先急后缓、先易后难、先简后繁的开发步骤,按时完成系统的开发工作。

g. 突出重点,兼顾全面.从二滩大坝整体和长期安全监测的角度考虑,系统以变形和渗流为重点,并把垂线变形作为整体监测的主要依据.同时,从影响工程安全的角度出发,抓住二滩大坝的关键部位和关键问题.例如二滩大坝右岸基础内的绿泥面阳起石化玄武岩及 F_{20} 断层的变形;El. 1010 ~ 1110 范围内拱座的变形和扬压力;导流洞堵头的漏水;坝踵的应力及开裂等.系统在全面分析监测资料的同时,重点考虑上述监测内容及监测部位,并突出关键部位和关键问题的在线实时分析和反馈分析。

3 系统总体结构

二滩工程拱坝安全监测在线监控系统是一个庞大的系统工程,所包含的子系统及应用软件很多.其中,在线实时分析和在线反馈分析两个子系统既有各自明确的目标,又相互有机地联系,还有相当部分的交叉,因此,在开发时必须进行系统规划、系统结构设计、系统集成及细化等大量工作,以确保系统开发的顺利进行.根据本系统的开发目标以及开发原则,该系统由总控、综合分析推理库、工程数据库、方法库和图库组成^[2],其总体结构如图 1 所示。

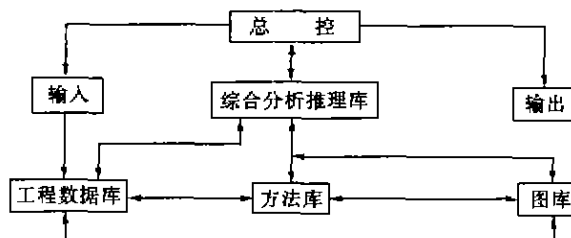


图 1 系统总体结构

3.1 总控

总控即系统的人机界面,包括各级控制菜单,可以实现对综合分析推理库、工程数据库、方法库、图库以及输入和输出的调用。

3.2 综合分析推理库

该库对二滩大坝的安全状况进行综合分析和反馈分析、综合评价、综合推理和辅助决策等,它是各类知识的集合,是本系统的核心。综合分析推理库知识的深度和广度及其质量,直接影响本系统的实时性、实用性、先进性和可靠性。

本库的主要功能是,由监测系统或日常巡查采集的各类资料和数据,经校准和整编后,由评判准则识别测值的性质——正常、基本正常或疑点。若为疑点,则进行物理成因分析。首先检查监测因素,如果是观测或监测系统引起,则发出仪器报警,排除疑点;如果是非监测因素引起,则为不安全因素,需进行外因(即环境量)分析,以及外因对坝基和坝体工作性态影响的反分析,在必要时,进行结构反分析。若找出成因,则进行辅助决策;若找不出成因,则进入专家模糊综合评判,并提出辅助决策的建议。

为了完成上述功能,综合分析推理库知识范围广博,包括必要的规范类知识、专业知识以及一些权威性机构的研究成果等。这些知识可归纳为在线实时分析类知识和在线反馈分析类知识两大类,其中,在线实时分析类知识也称为综合评价类知识,包括时空分布评判准则、力学规律评判准则、监控模型评判准则、监控指标评判准则、日常巡查评判准则、关键问题评判准则以及安全综合评价等;在线反馈分析类知识也称为综合推理分析和反分析类知识,包括工程的设计、施工技术文件,以及国内外大坝安全监测领域内的专家知识等。系统应用上述知识对实测值或日常巡查资料进行评判,若正常,则综合分析和推理结束;若有疑点或异常,则进行综合分析和推理,以确定成因。

这里需要特别指出的是:在应用上述评判准则进行评判时,可能会出现矛盾,即用某一准则评判为疑点或异常,而用另一准则评判为正常,因此,要分析各准则的评判权重。本系统在吸收国内外专家经验的基础上,依据各准则的内涵和重要性,采用以下方法确定各评判准则的权重:总体上以变形和扬压力的监控指标,并结合日常巡查作为第一依据;时空和力学规律并结合日常巡查作为第二依据(在无监控指标评判准则时,也作为第一依据);监控模型结合日常巡查作为第三依据;最后用关键问题评判准则作为评价大坝安全的主要依据。

3.3 工程数据库

工程数据库是本系统的基本组成部分,主要用于管理二滩大坝大量的工程档案和监测资料,并为快速而准确地分析、反分析以及实时评价二滩大坝的安全状况提供可靠的定量依据。

根据资料和数据的性质或来源,以及考虑到推理分析过程中的调用方便,工程数据库分为工程档案库、原始数据库、整编数据库及生成数据库等四个子数据库。其中,工程档案库主要包括设计、施工、运行等资料,大致分为工程概况、工程地质及水文地质、主要工程措施、监测系统以及安全资料等;原始数据库主要包括监测系统及日常巡查所采集的原始数据;整编数据库主要包括经检查、校准以及按规范整编后的资料和数据;生成数据库主要包括已建立的各类监控模型、数值分析模型以及监控指标、结构分析和反分析与渗流分析和反分析、洪水调节计算等各种计算成果。

3.4 方法库

该库主要包括用以进行二滩大坝的原型监测资料正反分析、结构与渗流正反分析、综合分析和综合评价等各类计算程序。利用这些程序可以建立各类监控模型和监控指标,复核大坝的强度和稳定;并在结构出现异常时,进行敏感性分析、综合分析和综合评价以及洪水反调节计算等。

方法库主要包括原型监测资料的正反分析、结构和渗流正反分析、综合分析和综合评价、洪水反调节计算等四类程序。其中,原型监测资料的正反分析主要包括监测资料预处理、建立各类监控模型、边界条件及参数反分析、建立各级监控指标等程序;结构和渗流正反分析主要包括规范法和有限元法等程序;综合分析和综合评价主要包括多层次阈值模糊评判等程序;洪水调节计算主要包括频率分析和洪水反调节计算等程序。

3.5 图库

该库主要用于进行在线实时分析和反馈分析、综合分析和评价过程中的图表显示,为专家决策提供直观的图表。

图库主要包括工程和安全概况图表、原型监测资料正反分析图表、结构和渗流正反分析图表、综合分析和评价图表、辅助决策图表等。图库中相当一部分的图表是内嵌在综合分析推理过程中的。

3.6 输入和输出

系统的输入子系统具有以下功能:①由传感器和二次仪表采集数据或由人工采集数据,并将各种数据输入原始数据库;②应用方法库中的预处理程序,包括误差识别和处理、观测值转化(下转第 66 页)

的,因此相对于场内任一点的条间力都应达到最大。推力最大原理还可引伸出下面的推论:

如果一个滑动面是危险滑动面(出口处剩余推力最大),则该面上任一点至坡顶部分的子滑动面也必构成危险滑动面(将此点作为子滑动面的出口,其剩余推力也必最大)。

上述推力最大原理及其推论是通过分析条间力递推关系从力学直观上论证得出的,有趣的是,它们在数学上与动态规划中的最优性原理^[13]完全一致。

5 结 语

对传统的极限平衡条分法进行了改进,建立了条间力与条间力矩的递推关系式,并给出高精度高效计算安全系数的解析代数格式。通过数学论证与物理直觉推断定义了边坡危险滑动场 DSF、临界滑动场 CSF 及全局临界滑动场 GCSF。从条间力递推关系出发论证了推力最大原理,并发现它与最优性原理的等价关系。本文内容将成为边坡临界滑动场数值模拟的理论基础。

参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].第2版.北京:中国水利水电出版社,1996.
- [2] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite-

element analysis of slopes[J]. J of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7):577~596.

- [3] Castillo E, Revilla J. The calculus of variations and the stability of slopes [A]. Proc 9th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engrg[C], Vol. 2, 1977, 25~30.
- [4] Baker R. Determination of the critical slip surface in slope stability computations[J]. Int J Numer and Analytical Methods in Geomech, 1980(4): 333~359.
- [5] Celestino T B, Duncan J M. Simplified search for noncircular slip surfaces[A]. Proc of the 10th Int Conf on Soil Mech and Foundation Engrg[C], Stockholm, 3, 1981, 391~394.
- [6] Chen Z Y, Shao C M. Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis[J]. Can Geotech J, 1988, 25: 735~748.
- [7] Greco V R. Efficient Monte-Carlo technique for locating critical slip surface[J]. Can Geotech J, 1994, 122(7):517~525.
- [8] Chen Z Y. Random trials used in determining global minimum factors of safety of slopes[J]. Can Geotech J, 1992, 29:225~233.
- [9] 朱大勇.边坡临界滑动场及其数值模拟[J].岩土工程学报,1997,19(1):63~69.
- [10] 朱大勇,钱七虎,周早生.岩体边坡临界滑动场及在露天矿边坡设计中的应用[J].岩石力学与工程学报,1999(5):567~572.
- [11] 朱大勇,钱七虎,周早生.基于余推力法的边坡临界滑动场[J].岩石力学与工程学报,1999(6):667~670.
- [12] 朱大勇.土体稳定性分析方法—临界滑动场法[D].南京:南京工程兵工程学院,1999.
- [13] 甘应爱等.运筹学[M].北京:清华大学出版社,1990.

(收稿日期:1999-11-16 编辑:熊水斌)

(上接第35页)

为物理量等,对原始观测数据进行误差处理,并根据需要转换为物理量,然后进行整编并输入整编数据库;③应用方法库中的各种建模程序,计算监测量对应的模型预报值,并将监测量及相应的计算量输入,生成数据库。

输出子系统可以在在线实时分析和在线反馈分析过程中,任意显示输出或打印输出所有分析成果,包括相应的图表。

4 系统运行效果

系统从1993年开始进行部分研究工作,1996年5月正式全面启动系统的开发工作,并于1998年12月在二滩水电站总装,随即投入试运行。二滩拱坝的安全监测系统包括变形控制网、垂线坐标仪、引张线、多点变位计、伸缩仪、测缝计、静力水准仪、倾斜仪、倾角计、渗压计、渗流量计、应变计、无应力计、钢筋计、锚索测力计、水位计、水质分析仪等各类监测仪器,共1000多个测点,除变形控制网等少数监测点以外,其余均已接入自动化数据采集系统2380MCU,并由本系统控制监测、采集数据,同时自

动进行监测量和物理量的转换。运行人员利用本系统进行监测资料的分析和处理,并打印报表。在这几个月的运行中,系统未出现过软件故障,且基本上满足了运行人员监控和管理的需要,极大地提高了资料分析的速度,提高了二滩拱坝的安全监测水平。

5 结 语

二滩拱坝安全监测在线监控系统是一个庞大的系统工程。该系统可以快速分析和评价二滩拱坝的运行状况,是保证二滩拱坝安全,并使其充分发挥工程效益的重要措施。它的开发和投入运行提高了二滩拱坝的安全监测水平。同时,该系统对优化设计、施工和运行,以及进一步完善坝工设计计算的理论和方法,补充现行的设计和施工规范也起到了一定的作用。因此,该系统的设计思想具有一定的推广应用价值。

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:北京科学技术出版社,1997.

(收稿日期:1999-01-06 编辑:张志琴)