



大坝安全监测与自动化

何勇军 刘成栋 向衍 范光亚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大坝安全监测与自动化

何勇军 刘成栋 向衍 范光亚 著

大坝安全监测与自动化 著：何勇军、刘成栋、向衍、范光亚 （1-0001）号：海河里三市克北，并测出水电测水同市 网址：www.waterpub.com.cn E-mail: info@waterpub.com.cn 电话：(010) 88381838（总机） （书号）：中国图书刊号中心 电话：(010) 88381838 全国各地图书馆均有代售		主 编	何 勇 军
中国水利水电出版社 北京市西城区百万庄大街2号 100044 电话：(010) 88381838 网址：www.waterpub.com.cn		副 编	刘 成 栋
中国水利水电出版社 北京市西城区百万庄大街2号 100044 电话：(010) 88381838 网址：www.waterpub.com.cn		参 编	向 衍
中国水利水电出版社 北京市西城区百万庄大街2号 100044 电话：(010) 88381838 网址：www.waterpub.com.cn		参 编	范 光 亚



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者在多年从事大坝安全监测研究工作的基础上编写的，主要内容包括：大坝安全监测设计及监测项目，监测仪器设备的工作原理、安装埋设、使用维护，测值计算方法，自动化技术（系统），大坝安全实时分析与评价系统等。

本书可作为有关设计院、水库大坝管理单位和从事大坝安全监测设计、施工的技术人员开展大坝安全监测工作的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

大坝安全监测与自动化 / 何勇军等著. —北京：中国水利水电出版社，2008

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5248 - 7

I. 大… II. 何… III. ①大坝—监测②大坝—监测—自动化系统 IV. TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 005661 号

书 名	大坝安全监测与自动化
作 者	何勇军 刘成栋 向衍 范光亚 著
出版 发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话：（010）63202266（总机）、68331835（营销中心）
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.25 印张 362 千字
版 次	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3500 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书得到南京水利科学研究院出版
基金赞助，特此致谢！



序

我国是世界上著名的筑坝大国之一，据统计，到目前为止，全国已建成各类水库大坝 8.6 万多座，数量和规模均居世界首位。这些水库在我国的国民经济建设和发展过程中发挥了巨大的作用。我国也是世界上严重缺水的国家之一，随着经济的高速发展，工农业生产以及人民的生活对于水库的依赖程度越来越重，水库在国民经济建设中的作用也越来越大，要求水库发挥其综合效能的呼声也越来越高。但是，水库综合效能的发挥必须建立在工程安全的基础之上。现在水库下游的社会经济情况与建库初期相比已大不一样，它的风险度越来越高，水库一旦失事，其破坏程度将是毁灭性的，造成的损失也是难以估量的。水库的安全是一个公共安全问题，这个问题已经引起党和国家的高度重视。

工程是否安全，要以科学的数据来说话。水库的安全，一般要靠工程和非工程措施来保证。非工程措施所涵盖的内容很多，其中十分重要的一项是工程安全监测。通过安全监测，可以获取大量工程运行性态的第一手资料，经过分析，可以了解和掌握工程的安全状况，对发现的缺陷及时采取措施，以确保水库的安全运行。但是，由于我国绝大多数水库建于几十年前那个特定的历史时期，加上长期来重建轻管思想的影响，对于如此重要的措施实际上一直未能得到应有的重视，不少水库至今无任何安全监测设施；有的虽然有一些，但大都损坏失效，已严重影响水库的管理和安全运行。近几年，全国各地开展了大规模的病险水库除险加固工作，这是一个完善大坝安全监测设施的良好机遇。近 20 年来，工程安全监测技术和监测仪器有了长足的发展，为实现水利水电工程管理现代化提供了很好的技术和装备保障。

该书由以何勇军博士为首的一批青年科技人员编写完成。他们以理论联系实际，长期来围绕大坝安全监测开展了大量的科学研究工作，积累了很多宝贵的经验。该书是他们研究成果的结晶，对大坝安全监测设计及监测项目、监测仪器设备、安装埋设、自动化技术、资料整编和大坝安全实时分析与评价等方面，均作了较为系统和全面的阐述。我相信，该书的出版，对于广大水库安全监测设计和水库运行管理人员将有很好的参考和借鉴作用。

中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '杨荣军' (Yang Rongjun), written in a cursive style.

2007 年 10 月
于南京 河海大学

前言

我国是世界坝工大国，共建成水库 8.6 万多座。这些水库在防洪、灌溉、供水、发电、改善生态环境等方面发挥了巨大的作用，是我国防洪保安工程体系与水利基础设施的重要组成部分，特别对发展农村经济、改善农民生产生活条件、稳定农村社会秩序等起着不可替代的重要作用。随着坝工理论和技术的不断发展和完善，在国家投入、水资源开发力度不断加大等情况和政策的推动下，大坝的规模向着高、大方向发展，如已建成的二滩双曲拱坝，在建的三峡重力坝、小湾拱坝、拉西瓦拱坝、溪洛渡拱坝，以及拟建的锦屏一级和二级拱坝等。

目前我国正在兴建的大坝的高度、数量、规模均居世界第一位。通常，大坝建造在复杂的水文地质和工程地质环境中，运行中的大坝不仅承受着巨大的水压力和温度等环境荷载，而且还会受到地震荷载的冲击，工作条件十分复杂。同时由于材料性能、施工过程中造成的人为等因素，随着时间推移，大坝会产生不同程度的老化、病变和裂缝等问题。这些缺陷或隐患若不能被及时诊断发现并解决，将会时刻影响大坝的安全运行，严重的会造成大坝溃决等灾难性事故。这在国内外都有过深刻教训，例如 20 世纪发生的三次震惊坝工界的重大工程事故：1928 年 3 月美国 St. Francis 重力拱坝在岩基坝段溃决；1964 年法国 Malpasset 双曲拱坝溃坝；意大利 Vajont 双曲拱坝近坝库区左岸发生的大滑坡。与此同时，尽管我国的筑坝技术有了长足的进步，但在管理上却与国际先进水平有很大的差距。1993 年 8 月青海沟后水库溃坝，造成近 300 多人死亡；2001 年 10 月四川大路沟水库溃坝，伤亡近 40 人；2005 年 7 月云南七仙湖水库溃坝，造成 16 人死亡。大坝作为一种挡水建筑物，其所具有的

潜在的安全问题是一个相当复杂的技术问题，也是一个社会问题。尽管我国对大坝安全已越来越重视，但大坝的安全形势仍不容乐观。由于我国大多数地区人口稠密，特别是水库下游，即使地处偏僻地区的大坝失事也都会带来大量的人员伤亡和财产损失。目前，全国中小型水库中85%以上的水库与上级防汛指挥部门没有建立较可靠的通信联系方式，90%的水库下游缺乏通信预警设施，96%的水库库区没有水雨情通信设施。而我国许多大中型大坝如新安江、丰满、刘家峡水库等，都处在具有上百万人口的大中城市的上游，一旦大坝出现问题，其后果更是不堪设想。尤为严重的是这些大坝都已运行40多年，部分已达到了设计年限，且带有严重的缺陷。

然而，大坝的失事是有预兆的，大坝安全是可控制的，只要建立合理的大坝安全监测、有效的预警机制以及可行的应急预案，溃坝事故是有可能避免的，即使大坝失事，也因事先有充分的准备而将失事损失减少到最低程度。在大坝安全监控领域，如何通过安全监测及时提供大坝性态及其变化信息，降低大坝风险已成为各国大坝安全管理工作者的首要问题。《国家突发公共事件总体应急预案》（2006）的出台，指明了进行大坝安全监测系统研究的必要性。有关专家预计，21世纪将是老坝加固、病坝除险的高峰期。随着我国社会、经济的迅速发展，以及“以人为本”、“构建和谐社会”执政理念的贯彻落实，对涉及公共安全的水库大坝安全提出了更高的要求，病险水库安全问题显得更加突出。

本书是在作者多年从事大坝安全监测研究工作的基础上编写的，主要内容包括大坝安全监测设计及监测项目、监测仪器设备的工作原理、安装埋设、使用维护、测值计算方法、自动化技术（系统）、大坝安全实时分析与评价系统等，以方便有关设计院、水库大坝管理单位和从事大坝安全监测设计、施工的技术人员开展大坝安全监测工作。

全书共分九章，第一章至第四章由何勇军、范光亚同志编写，第五章至第七章由何勇军同志编写，第八章由向衍、何勇军同志编写，第九章由刘成栋、何勇军同志编写。

中国工程院院士、河海大学技术委员会主任吴中如教授在百忙之中审阅了本书，并为本书撰写了序言。河海大学水电学院副院长顾冲时教授也仔细审阅了本书，提出了宝贵意见。在本书编写过程中，水利部大坝安全管理中心原常务副主任陆云秋同志、马福恒博士河海大学水电学院苏怀智副教授给予了大力支持和帮助，在此一并谨向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了南京水利科学研究院和中国水利水电出版社的大力支持

持和资助，谨表深切的谢意。

本书在编写过程中，曾参阅了大量科技文献和资料，由于篇幅所限，未能逐一系列出，特向有关作者诚表谢意。

限于著者的水平，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2007年10月

于南京

目 录

序

前言

第一章	概论	1
第一节	大坝安全概述	1
第二节	大坝安全监测	2
第三节	大坝安全分析与评价	7
第二章	变形监测	12
第一节	变形监测概述	12
第二节	表面变形监测	13
第三节	内部变形监测	36
第四节	裂缝与接缝监测	47
第五节	近坝岸坡位移监测	50
第三章	渗流监测	53
第一节	渗流监测概述	53
第二节	土石坝渗流监测	53
第三节	混凝土坝渗流监测	58
第四节	渗流量监测	62
第五节	绕坝渗流监测	65
第四章	应力(压力)、应变及温度监测	66
第一节	应力(压力)监测概述	66
第二节	孔隙水压力监测	66
第三节	土压力(应力)监测	69
第四节	混凝土应力、应变监测	73
第五节	坝基、坝肩及岩体应力、应变监测	78
第六节	钢筋和钢板应力、应变监测	80
第七节	坝体和坝基温度监测	82
第五章	水力学监测	83
第一节	水力学监测概述	83
第二节	动水压力监测	83
第三节	水流流态和水面线监测	84
第四节	流速和流量监测	85

第五节	空蚀及掺气监测	89
第六节	消能及冲刷监测	90
第六章	环境量及地震反应监测	92
第一节	环境量及地震反应监测概述	92
第二节	水位监测	92
第三节	降雨量监测	96
第四节	气温和水温监测	99
第五节	波浪、坝前淤积和冰冻监测	99
第六节	地震反应监测	102
第七章	大坝安全监测的自动化系统	104
第一节	概述	104
第二节	监测自动化系统的结构	105
第三节	监测自动化系统的功能	112
第四节	监测自动化系统的防雷	117
第五节	应用实例	119
第八章	监测资料的野值处理与整编	122
第一节	概述	122
第二节	原始监测值的可靠性检验	122
第三节	监测的野值诊断与处理	125
第四节	监测资料的整编	136
第九章	大坝安全监测的实时分析与评价系统	148
第一节	大坝安全监测资料分析的模型和方法	148
第二节	监测的实时分析与评价系统	175
第三节	评价系统数据库的结构设计	193
第四节	评价系统的应用实例	200
参考文献		229

概 论

第一节 大坝安全概述

为了防洪和水资源利用,全世界修建了大量的堤坝。我国目前共修建了 8.6 万多座水库大坝,是世界上水库大坝最多的国家之一,其中大中型水库大坝 3000 多座,15m 以上大坝约 1.8 万座,这些水库大坝绝大多数是在 20 世纪 50~70 年代修建的,尤其是在 1957~1969 年,在“大跃进”的推动下,许多地区的水库大坝建设蜂拥而上,一发而不可收拾,由于片面重视蓄水,忽视水库大坝的安全,导致隐患四伏。近年来,随着水资源的进一步开发利用,新建的高坝大库越来越多,这些工程在我国的国民经济建设中发挥了巨大的作用。然而,由于多种原因,特别是 20 世纪 60~70 年代修建的相当一部分水库大坝,由于当时经济和技术条件的限制,普遍存在水文、地质、资料缺乏,设计标准低,施工和工程质量差,以及病险隐患多等问题。这些问题不仅影响着工程效益的发挥,而且还严重威胁下游人民的生命财产安全。如河南的板桥、石漫滩水库和青海的沟后水库大坝的失事,都给下游造成了毁灭性的灾难。据不完全统计^[1],目前我国大中型水库和小型水库中,病险水库的比例分别占到 20%和 40%,水利系统管理的水库大坝的病险问题更为突出。

随着水利资源的深入开发,坝址的地质条件越来越复杂,大坝的规模也向高、大方向发展,如近几年建成或正在建设的二滩、百色、小浪底和三峡等水库大坝。由于坝工建设的复杂性,要完全排除大坝失事几乎是不可能的。但通过提高设计、施工技术、运行管理水平及除险加固等措施,可以大大降低水库大坝失事的概率。我国近 50 年来的建坝实际和统计资料说明,水库大坝的溃坝率从 20 世纪初的 4%已降低至现在的 0.2%以下,但 0.2%的溃坝率仍是相当惊人的。水库大坝的安全作为十分突出的公共安全问题,已引起各级政府和人民群众的普遍关注。

世界各国对大坝安全问题均十分重视,20 世纪 50 年代以前,英、美、法等发达国家先后制定了水法、水库安全法等法令。国际大坝安全委员会 1964 年正式成立了大坝失事安全委员会,针对涉及大坝安全的相关问题进行探讨和研究,以指导各国的水利工程的建设。

20 世纪 70 年代后,特别是改革开放以来,随着我国对公共安全意识的加强,对大坝安全也十分重视,先后颁布了多个有关防洪、大坝安全等方面的法律、法规和条例,使得水库大坝的安全与管理有法可依。为了加强水库大坝的安全管理,1988 年成立了水利部大坝安全监测中心,1995 年又成立了水利部大坝安全监测中心,开始对全国的水库大坝实施注册登记,组织对大坝安全进行鉴定,完善大坝安全监测设施,以及对水库管理人员

开展培训等，加强对水库大坝安全的行业管理。同时，制定病险水库除险加固规划，分期分批地对病险水库大坝进行除险加固。

第二节 大坝安全监测

一、大坝安全监测的重要性

要让水库充分发挥其综合效益，首先必须采取措施保证大坝的安全，如果一个水库大坝存在着安全隐患，或运行管理人员不了解水库大坝的安全性态，从而使水库的运行风险很高，就无法发挥其正常效益。保证大坝安全的措施是多方面的，但概括起来主要是两方面，即工程措施和非工程措施，这两者是互相依存，缺一不可的。工程措施是指采取工程技术和手段，对水库大坝进行维修和加固；而非工程措施是指通过洪水预报、安全监测等手段，来保障大坝运行安全的措施。工程措施比较直接，一般容易被理解和重视，而非工程措施就不那么容易被人接受了。有些人甚至认为只要保证水库大坝设计、施工的质量，就不可能产生溃坝的危险。这种观点是极其错误的，一方面，由于水库大坝的水文、地质等条件的复杂性，以及人们认知水平的限制，在水库大坝的建设中，还不可能保证穷其所有、万无一失；另一方面，水库大坝在运行过程中，受降雨、水压力和温度等变化的影响，水库大坝也存在着老化和损坏等，也可能产生安全问题。对水库大坝进行安全监测，不仅是为了验证设计和施工质量，也是为了保证大坝的运行安全，发现问题，及时处理。按照我国的国情，当前突出强调非工程措施的作用具有十分重要的现实意义，加强大坝安全监测是水库非工程措施中极其重要的一个方面。

众所周知，造成大坝失事的原因是多方面的，主要有：①泄洪能力不足或遭遇超标准洪水；②坝体质量和基础问题；③其他运行管理方面的问题。据统计^[2]，有 35% 的大坝失事是由于泄洪能力不足，也就是勘测设计中存在洪水计算和防洪能力方面的问题。大部分大坝失事还是其他工程原因或运行管理原因造成的，而这些是可以通过加强安全监测，及早发现问题并及时进行处理，以避免发生事故。如 1962 年，安徽省梅山水库大坝，监测发现右岸山坡渗流量明显增大，引起了管理人员的重视，通过进一步检查，右岸几个坝段向左倾斜达 51mm，坝体出现了较长的裂缝。经综合分析，判断为右岸基岩发生了部分错动，大坝险情严重，后决定放空水库，并进行了加固处理，有效地避免了一次重大事故。又如 1993 年，通过监测，发现佛子岭水库大坝向下游位移量明显增大，超过历史最大值 30% 多，水库管理单位立即进行全面检查和分析，判定为大坝遭遇到不利工况所致，考虑到大坝基础、坝体均存在一定的缺陷，决定控制水位运用，避免了大坝安全性态的进一步恶化。1998 年 7 月，江西上饶地区玉山县境内的七一水库上游流域普降暴雨，形成了百年未遇的特大洪水，恰巧在此前不久安装的大坝安全监测自动化系统投入运行，在暴雨过程中，系统及时提供了反映大坝运行性态的可靠信息，调度人员依靠这些信息进行科学调度，在保证大坝安全的前提下提高了水库蓄水位，使下泄洪量由原定的 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 减少到 $1192\text{m}^3/\text{s}$ ，保证了下游 4.2 万人口、1.2 万多间房屋、1.8 万亩农田、2.1km 河堤和 700 多亩鳊鱼池的安全，减少直接经济损失 1 亿多元，间接社会效益达 10 亿以上。在以往失事的水库大坝中，绝大多数缺乏安全观测设施或监测设施不完善。由此可见，建设和

完善大坝安全监测设施不仅重要，而且也是十分必要的。

对大坝安全状况实施监测的目的，一是监视大坝在运行期间的安全状况，及时准确的大坝安全监测资料，可以为评估大坝工作性态提供科学依据，进而通过控制运用或加固等工程措施，来保障大坝的安全，只要监测及时、监测数据可靠，分析判断准确，就可以做到避免重大灾害事故的发生或减少灾害所造成的损失；二是可以在施工过程中不断获得反馈信息，用以验证设计的合理性；并为修正水工设计提供科学依据。总之，大坝安全监测是了解大坝安全性态、对大坝安全实施科学管理必不可少的重要手段。

对大坝等水工建筑物进行安全监测和监控，已受到各级政府和坝工界的高度重视，我国已先后颁布了《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T 5178—2003)和《土石坝安全监测技术规范》(SL 60—94)。正在编制的有《大坝安全监测仪器安装与管理标准》、《安全监测仪器检验测试规程》等，这些规范规程和标准，为大坝安全监测提供了有力地技术保证。

二、大坝安全监测技术的现状与进展

对大坝安全进行监测开始于 19 世纪末，1891 年德国的埃斯希巴赫重力坝进行了变形观测。20 世纪初，澳大利亚的鲑溪拱坝和瑞士的孟萨温斯拱坝进行了挠度观测，孟萨温斯拱坝坝体内还埋设了压阻式仪器，美国新泽西州的波顿重力坝进行了温度观测。这些监测最初主要是为了研究大坝设计计算方法，发展坝工技术，其后才真正成为大坝安全管理的手段。法国、德国等国家先后研制出了钢弦式仪器，利用测量钢弦自振频率将所对应的大坝的应力、应变、渗流压力等物理量计算出来。与此同时，美国开发研制的差动电阻式仪器，在世界上许多国家得到了广泛应用。

20 世纪 50 年代，我国开始在永定河上官厅水库和淮河上南湾、薄山等大型水库大坝上进行了水平位移、垂直沉降和浸润线等项目的观测。其后，在丰满、佛子岭、梅山水电站以及上犹江、流溪河等水库大坝上安装了温度、应变计等监测仪器。60 年代后期，我国在一些大型水库大坝上开始对渗流、渗流量、渗水浊度、波浪、倾斜、挠度、扬压力、接裂缝和应力应变以及水位、雨量等项目进行观测。

随着技术的进步，大坝安全监测仪器设备得到了长足的发展。经过多年的努力，我国主要观测仪器的研制及工艺技术水平也取得了很大进展，一些高、精、尖的技术和先进的仪器、设备应用到了大坝安全监测中，如基础岩层电测、光纤传感、CCD、GPS、大坝 CT 和渗流热监测等技术。基础岩层电测技术的原理是基于岩石在剧烈变动之前，会有异常的电荷释放，局部区域会产生激烈的电荷骤变，骤变的电荷以静电的方式向四周地层或坝体的方向传播，通过测量电荷的变化可预测基础岩层的变化，这一技术已在日本进行了实际应用。光纤传感是利用光导纤维来感受各种物理量，并传送所感受信息的一种新技术，广东的茜坑水库大坝应用光纤传感器建立了渗流监测系统。小浪底水库大坝外观监测中应用了测量机器人技术，由带电动马达驱动和程序控制的 TPS 系统结合激光和 CCD 技术组合而成，具有目标识别、自动照准、自动测量、自动跟踪和自动记录功能^[8]。随着 GPS 系统硬件和软件技术的提高，GPS 技术已应用于大坝安全监测，如隔河岩大坝就建立了用于表面变形监测的 GPS 系统。GPS 观测系统具有精度高、速度快、自动化、全天候以及测点之间无需通视等优点，但其高昂的价格却极大地制约了其在大坝安全监测领域

的发展。针对这一问题,杨光等开发应用了GPS多天线监测系统^[4],它使得一台GPS接收机能够同时连接多台天线并保证信号完整可靠。GPS多天线变形监测系统已在小浪底、东江等大坝的监测中得到了实际应用。意大利首先将CT技术应用于水工建筑物的性态诊断,采用声波方法,并利用介质的波速分布进行反演,形成大坝的CT成像,有效地应用于大坝安全检查和工程处理效果的验证。渗流热监测技术是通过观测温度场分布和变化情况来监测坝体、坝基渗流性态,已在美国、瑞典和俄罗斯等国得到应用。目前,应用于大坝安全的监测仪器设备不仅种类繁多,而且其测量精度和可靠性也大大提高,为我国大坝的安全监测提供了最基本的手段。

监测数据采集自动化系统的研制和应用起步较晚,20世纪60年代后期国外开始研制大坝安全自动化设备。日本首选在梓川的3座拱坝上实现了监测数据采集自动化。70年代后期意大利在Talvacchia双曲拱坝上利用模拟计算机和垂线坐标仪实现了变形自动化监测,在Chotas坝上安装了集中式数据采集系统,经过改进在Ridracoli坝上安装了分布式系统为一体的混合式系统^[5]。现在发展的GPDAS(Global Position Data Assemble System)分布式数据采集系统,已被广泛推广应用。

美国在20世纪80年代初期开始大坝安全监测自动化的研制开发,1981年美国垦务局在Moniticello拱坝上安装了集中式数据采集系统。从1982年起在FlamingGeogo等四座拱坝上安装了分布式数据采集系统,取得了较成功的应用,此后分布式数据采集系统得到了广泛应用。

从国外大坝安全监测自动化发展过程来看,都是由集中式数据采集系统向分布式数据采集系统发展,目前有代表性的国外产品有意大利ISMES研究所的GPDAS系统,美国GEOMATION公司的2300系统和SINCO公司的IDA系统,都是分布式,其相关产品和系统已在我国有所应用。

我国大坝安全监测自动化工作起步较晚,从20世纪70年代末到80年代中期,只解决了部分仪器的远距离集中测量,主要是差动电阻式仪器。80年代后期能够遥测的垂线坐标仪在大坝上开始使用。通过“七五”攻关计划的实施,研制成功了集中式数据采集系统。90年代初已有近30座大坝安装了一些遥测仪器或采用集中式数据采集系统,实现了部分监测项目的自动化。90年代后期发展为分布式数据采集系统。

从结构上讲,这种自动化系统均为集散式测控系统(DMCS, Distributed Measure and Control System),虽然能成功地解决大坝安全监测数据的自动化采集和系统拓扑结构复杂的问题,但从一些管理单位反馈的信息表明,普遍存在着系统的可靠性不高和设备更新换代困难等问题,需要从监测系统结构、通信制式和标准化上开展研究,以提高监测系统的可靠性,并解决设备的更新换代问题。

三、大坝安全监测的主要项目

揭示大坝是否安全,一般需要通过日常的人工例行检查和仪器监测来完成。日常检查已被大多数水库工程管理部门所理解和接受,并已普遍付诸实施,该项制度还被编入了各水库管理部门的规章中,这一措施在水库安全管理中发挥了很好的作用。而仪器监测是指依据有关规范,结合工程实际,在水库大坝上布设各类安全监测仪器和设备,用以采集大坝运行的各种性态信息。通过对这些信息的处理和整编分析,结合人工例行检查所提供的

情况，对大坝的运行性态及安全状况作出较为客观的评价，这种评价结果可作为大坝安全运行和水库调度的依据，还可作为大坝除险加固或采取其他工程措施的依据。

根据大坝安全监测的目的，监测的主要项目有：变形、渗流、压力、应力应变、水力学及环境量等。其中变形和渗流监测是最为重要的监测项目，因为这些监测量直观可靠，可基本反映在各种荷载作用下的大坝安全性态。对大坝的内部性态进行监测也是比较重要的，其监测成果可以用来反馈和检验设计、施工质量。

1. 变形监测

大坝在自重、水压力、扬压力、冰压力、泥沙淤积压力及温度等荷载作用下，会产生变形，变形监测是了解大坝工作性态的重要内容，变形监测主要包括以下几方面。

(1) 表面变形：为了解大坝在施工和运行期间是否稳定和安全，应对其进行位移监测，以掌握它的变形规律，研究有无裂缝、滑坡、滑动和倾覆等趋势。表面变形包括竖向位移和水平位移。水平位移中包括垂直坝轴线的横向位移和平行坝轴线的纵向位移。表面变形可采用水准测量和视准线（或三角网）法进行观测，一般用水准仪、经纬仪或全站仪进行测量，也可采用自动化观测方式，包括引张线水平位移监测系统、激光（大气激光、真空激光和微压激光）准直观测系统和 GPS 位移观测系统等。

(2) 内部变形：内部变形包括竖向位移和分层水平位移。竖向位移是指大坝在施工和运行期间坝体内的固结和沉降；分层水平位移是指垂直坝轴线方向或平行坝轴线方向的位移，在水压力作用下不同层面的水平位移，或由于坝基或坝体的抗剪强度低而产生的侧向位移。在坝体可能发生较大位移部位安装位移监测仪器，观测大坝在施工和运行期间坝体内部的位移情况，进行综合分析，判断大坝的稳定性及坝体内有无隐蔽裂缝，可作为施工控制和工程安全运行的依据。测量内部分层竖向位移的仪器有：连通管式沉降仪、横梁式沉降仪、电磁式沉降仪、干簧管式沉降仪及连杆式分层沉降仪等；测量内部水平位移的仪器有：测斜仪、引张线式水平位移计、正倒垂线式位移计及电位器（钢弦）式位移计等。

(3) 坝基变形：为了解大坝在自重和水压力作用下的变形情况，需对坝基进行变形监测。主要观测仪器有：基础变位计、位移计和静力水准仪等。

(4) 裂缝及接缝：水工建筑物在设计 and 施工中均留有一些接缝，如混凝土面板的接缝和周边缝等；由于结构应力的不均变化，在运行中也会产生一些裂缝。对这些接缝和裂缝进行观测，可了解其现状和发展趋势，以便分析其对建筑物结构安全的影响。监测接缝和裂缝的仪器有：单向测缝计、双向测缝计和三向测缝计等。

(5) 混凝土面板变形：混凝土面板的变形观测包括面板的表面位移、挠度、接缝和裂缝等。水上部分的表面位移观测可采用前述的表面位移观测方法，水下部分的位移、挠度和接（裂）缝观测可采用连通管式沉降仪、斜坡测斜仪和测缝计等进行观测。

(6) 岸坡位移：对于危及大坝、输泄水建筑物及附属设施安全和运行的滑坡体应进行观测，以监视其发展趋势，必要时采取处理措施。岸坡位移观测主要包括表面位移、裂缝及深层位移等。表面位移和裂缝观测可采用前述方法，深层位移可采用多点位移计和测斜仪等进行观测。

2. 渗流监测

渗流监测是指对在上下游水位差作用下产生的渗流场的监测，主要包括渗流压力、渗

流量及其水质的观测。渗流观测主要包括坝体渗流、坝基渗流、绕坝渗流和渗流量。

(1) 坝体渗流：坝体渗流观测是为了掌握坝体浸润面的变化情况，如果高于设计值，就可能造成滑坡失稳。

(2) 坝基渗流：坝基渗流观测可以检验有无管涌、流土及接触面的渗流破坏，判断大坝防渗设施的效果。

(3) 绕坝渗流：绕坝渗流除影响两岸山体本身的安全外，对坝体和坝基的渗流也可能产生不利的影响，如抬高岸坡部分坝体的浸润面或使坝基的渗流压力增大，在坝体与岸坡或混凝土建筑物的接触面上可能产生接触渗透破坏等。

(4) 渗流量：渗流量的变化能直观全面地反映坝的工作状态，据以分析大坝运行期的安全性，所以渗流量一般是必测项目。

坝体、坝基和绕坝渗流压力一般采用测压管和埋设渗压计的方法进行观测；渗流量的观测可采用三角量水堰的方法进行观测。

3. 压力监测

压力监测主要包括对孔隙水压力、扬压力、土压力和接触土压力等进行的观测。

(1) 孔隙水压力：孔隙水压力是指水中填土坝、水坠坝坝身或坝基产生的孔隙水压力，观测其分布和消散情况，以掌握其对施工的影响、大坝运行期的渗流性态和坝身的稳定。孔隙水压力一般采用水管式孔隙水压力仪和埋入式孔隙水压力计进行观测。

(2) 扬压力：扬压力观测主要是为了解水库水头在坝基面上产生的渗透压力或浮托力，包括混凝土坝和溢洪道基础，从扬压力的大小可以判断防渗和排水设施的效果。扬压力一般采用测压管或埋入式扬压力计进行配合观测。

(3) 土压力：土压力观测的目的是了解坝体填土中的内部土体压力。可采用埋入式土中土压力计进行观测。土压力测量的是土体总应力，如需测量土体内的有效应力，在埋设土压力计的同时，应埋设孔隙水压力计进行观测。

(4) 接触土压力：接触土压力的观测目的是了解土与建筑物的作用压力大小和分布情况，包括岸墙、溢洪道边墙，以及坝基土与水工建筑物的作用力或心墙对混凝土垫层的作用力等，还包括坝体土对坝内涵管的接触压力。接触土压力一般采用接触式土压力计进行观测。

4. 应力应变及温度监测

应力应变及温度监测项目主要包括混凝土（包括混凝土面板）应力、应变、锚杆（锚索）应力、钢筋应力、钢板应力、基岩应变及温度场等监测。

(1) 混凝土应力、应变一般采用压应力计和应变计等进行观测。用应变计观测混凝土应力时，需安装无应力计。

(2) 锚杆（锚索）及钢筋应力观测一般采用锚杆测力计或钢筋计观测。钢板应力采用钢板计观测。

(3) 温度是引起坝体应力和变形的重要因素，坝体温度场的观测可采用铜电阻或铂电阻温度计观测。

(4) 基岩的应变一般采用基岩应变计或基岩变位计观测。

5. 泄水建筑物水力学监测

泄水建筑物水力学监测项目主要包括泄水压强、泄水流速、流量及水面线观测。