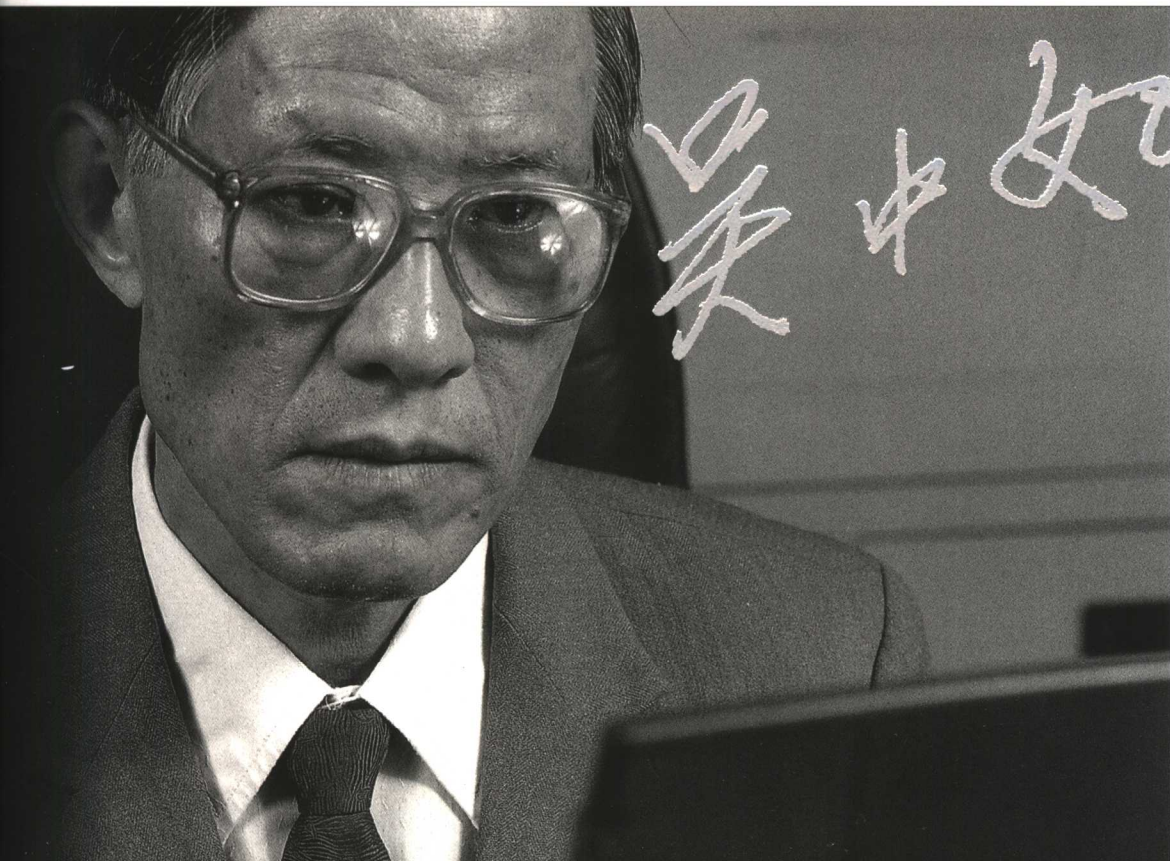


[主编 吴中如 / 副主编 顾冲时]

重大水工混凝土结构 病害检测与健康诊断



中
国
工
程
院
院
士
文
库

重大水工混凝土结构 病害检测与健康诊断

[主编 吴中如 / 副主编 顾冲时]

 高等
教育
出版
社

内 容 简 介

本书汇总了国家自然科学基金重点项目“重大水工混凝土结构隐患病害检测与健康诊断研究”(批准号 50139030)、国家重点基础研究发展规划项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”(批准号 2002CB412707)等的研究成果。全书共八章。第一章为绪论;第二章至第四章介绍重大水工混凝土结构隐患病害的现场无损检测、渗流检测、原位监测感知系统,以及现场检测与原位监测信息的集成融合理论和方法;第五章介绍水工混凝土结构的裂缝、冻融和温度交变、溶蚀和碳化等老化的机理和规律及组合老化机理;第六章介绍重大水工混凝土结构寿命评估理论和方法;第七章介绍重大水工混凝土结构健康诊断的理论和方法;第八章介绍重大水工混凝土结构病害诊断的预警系统。

本书可作为水工结构、水利水电工程、工程力学和安全工程等专业的研究生参考书,也可供该领域从事科研、设计、施工管理、运行管理的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断/吴中如主编. —北京:高等教育出版社,2005.11

(中国工程院院士文库)

ISBN 7-04-018179-7

I. 重... II. 吴... III. 水工结构:混凝土结构—检测 IV. TV331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 128970 号

策划编辑 王国祥 张海辰 责任编辑 刘剑波 封面设计 刘晓翔
责任绘图 朱 静 责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		
开 本	800×1050 1/16	版 次	2005 年 11 月第 1 版
印 张	24.75	印 次	2005 年 11 月第 1 次印刷
字 数	480 000	定 价	56.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18179-00

《中国工程院院士文库》编辑委员会

主任：徐匡迪

副主任：刘德培 柳百成 刘志鹏 肖培根

委员：钟群鹏 梁骏吾 李正邦 陈毓川

梁应辰 李泽椿 何继善 董庆九

吴 向 王国祥 林金安

编辑部：董庆九 刘 静 王国祥 张海辰

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用,是经济发展和社会进步的强大动力。自20世纪下半叶以来,工程科技以前所未有的速度和规模迅速发展,其重要作用日益突显,并越来越受到人们的重视。

中国工程院是中国工程科技界的最高荣誉性、咨询性学术机构。中国工程院院士是中国工程科技领域的最高荣誉性称号,授予对中国工程科技发展做出杰出贡献的工程科技工作者。院士们充分发挥群体优势,围绕国家、产业和地方经济社会发展迫切需要解决的重大科学技术问题,开展宏观性、战略性、前瞻性、综合性的咨询研究,为国家决策提供支持。他们的研究代表中国在该领域中的最高学术水平。院士们视发展工程科技、促进国家经济发展和社会进步为己任,勤奋工作在各自的专业领域,为祖国的繁荣富强、为国防建设和国家安全做出了重要的贡献。院士的学术著作,是院士多年刻苦钻研和辛勤劳动的成果,是他们智慧的结晶,也是整个社会的宝贵财富。这些学术著作,不仅对我国工程科技工作有重要的指导作用,而且具有极高的学习和参考价值,对于促进年轻工程科技人才成长,造就出类拔萃的青年科学家和工程师,推动我国工程科技事业不断发展具有重要作用。

感谢高等教育出版社设立中国工程院学术著作出版基金,资助出版《中国工程院院士文库》,把院士们的学术成果向全社会推广。此举不但有力地支持了我国优秀科学技术著作的出版,也对促进我国科技事业发展、繁荣科技出版事业具有重大意义。

徐匡迪

2005年8月

前 言

中华人民共和国成立以来,我国共修建 8.4 万多座堤坝,其中 15 m 以上大坝有 1.9 万余座,水库总库容在 500 Gm^3 以上,水电总装机容量约 100 GW,总蓄水量在 510 Gm^3 以上,灌溉面积达 $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$,保护了水库下游亿万人民的生命财产安全。大坝是我国国民经济的重要基础设施,在国民经济建设和社会安定中发挥了巨大作用。然而,由于多种原因,约有 1/3 的大坝存在不同程度的病险问题;且随着时间的推移,大坝的老化和病害越来越严重。可以预料,21 世纪将是老坝加固和处理的高潮。从 20 世纪 80 年代开始,水利部门和电力部门组织了对所属大坝的定期检查,发现高混凝土坝主要存在裂缝、溶蚀、冻融、温度疲劳和日照碳化等病变,裂缝尤甚,这将严重影响大坝的强度、稳定和耐久性。针对这些问题,国内外学者对混凝土的裂缝、冻融、溶蚀和日照碳化等的检测、监测和分析做过不少工作,但仅用单一检测或监测方法,缺乏多种检测和监测方法的集成,难以得到重大水工混凝土结构的隐患病害的真实可靠资料;由于分析理论也不够完善,缺少对重大水工混凝土结构老化机理、寿命评估、健康诊断和病害预警等的系统研究,因而对工程实践缺乏有效的技术支持。针对这些重大科学技术问题,在国家自然科学基金重点项目“重大水工混凝土结构隐患病害检测与健康诊断研究”(批准号 50139030)和国家重点基础研究发展规划项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”(批准号 2002CB412707)资助下,我们结合我国运行 20 多年且又出现较多病变的新安江、龙羊峡等工程,开展了重大水工混凝土结构的隐患病害检测与健康诊断研究。本书总结了我们在这方面的最新研究成果。

本书共八章。第一章概述了国内外重大水工混凝土结构的主要隐患病害及其检测和监测技术,以及健康诊断的理论和方法,提出了感知仿生学模型。第二章研究了用瑞利波、超声波和 CT 等现场无损检测技术,对重大水工混凝土结构的隐患病害(重点是裂缝)进行现场检测,并建立了其资料分析方法。第三章研究了示踪法、水质分析法和水下摄像等技术,重点介绍检测混凝土的渗漏和溶蚀等,并建立了其资料分析方

法。第四章介绍研制的原位监测感知系统及其监测与检测成果的集成理论和方法。第五章研究了重大水工混凝土结构的裂缝、冻融和温度交变、溶蚀和碳化等病害的机理和规律及其组合机理。第六章提出确定重大水工混凝土结构寿命的三大原则(工程效益、工程安全和生态环境),据此将寿命分为运行寿命(使用寿命)和生存寿命,并对运行寿命中有关工程健康的变形参数、强度、渗流参数等在室内试验和原位监测资料的基础上,研究了其演变规律,建立了时变模型;建立了冻融、碳化和荷载作用下结构损伤的组合时变模型;以龙羊峡重力拱坝为例,建立了坝体徐变和坝基蠕变及位移场和渗流场相互作用的组合时变模型;最后建立了运行寿命的风险分析方法。第七章根据现场监测、原位检测、老化机理分析、寿命评估等成果,构建了结构健康诊断的原理和体系,建立了监测量的健康诊断的因果分析模型,提出了健康诊断的标准和准则及综合分析方法。第八章建立了预警原理及总体结构、预警模型和预警等级及其预警指标,最后构建了可视化的病害预警系统。

本书主编为吴中如,副主编为顾冲时。编写分工如下:第一章由吴中如撰写;第二章由江泉等撰写;第三章由陈建生、宋汉周、汪在芹等撰写;第四章由苏怀智、吴中如撰写;第五章由方永浩、包腾飞、吴中如撰写;第六章由吴中如、郑东建、郭海庆、方永浩撰写;第七章由顾冲时、苏怀智、郑东建、吴中如撰写;第八章由吴中如、向衍撰写。王健、何勇军、李雪红、徐洪忠、张乾飞等参加了本书相关内容的研究。全书由吴中如、顾冲时统稿和审核。

本书得到高等教育出版社中国工程院学术著作出版基金的资助。在编辑出版过程中,高等教育出版社提出了许多宝贵的意见和建议。在此向他们表示深切的感谢。

编 者

2005年2月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 重大水工混凝土结构隐患病害概述	(1)
1.2 国内外重大水工混凝土结构隐患病害检测和监测技术概述	(2)
1.3 重大水工混凝土结构健康诊断理论和方法概述	(5)
1.4 本书研究成果概述	(9)
第二章 结构隐患病害检测技术及其资料分析方法	(13)
2.1 概述.....	(13)
2.2 瑞利波法检测技术及其资料分析.....	(14)
2.3 超声波检测技术及其资料分析.....	(21)
2.4 CT 检测技术及其资料分析	(26)
第三章 渗流隐患的现场检测技术及其资料分析方法	(34)
3.1 概述.....	(34)
3.2 示踪法检测技术及其资料分析.....	(34)
3.3 水质分析法检测技术及其资料分析.....	(72)
3.4 水下摄像检测技术及其资料分析.....	(99)
第四章 原位监测感知系统及监测与检测成果的集成理论和方法	(103)
4.1 概述	(103)
4.2 原位监测感知系统	(104)
4.3 检测和监测信息的集成融合理论和方法	(125)
第五章 水工混凝土结构的老化机理和规律	(131)
5.1 概述	(131)
5.2 重大水工混凝土结构裂缝的产生和失稳机理及其分析方法	(131)
5.3 水工混凝土在冻融和温度交变作用下的宏观、细观及微观结构.....	(155)
5.4 渗流溶蚀及其对水工混凝土结构的影响机理分析	(162)
5.5 混凝土的碳化过程及其对结构的影响分析	(169)
5.6 水工混凝土的组合老化机理	(177)
第六章 重大水工混凝土结构寿命评估理论和方法	(189)
6.1 概述	(189)
6.2 结构的变形参数和强度的演变规律和时变模型	(190)
6.3 结构和基础渗流参数的演变规律和时变模型	(197)
6.4 冻融、碳化和荷载作用下混凝土结构损伤组合时变模型.....	(213)

6.5	重大水工混凝土结构的组合时变模型	(219)
6.6	重大水工混凝土结构运行寿命评估的风险分析方法	(247)
第七章	重大水工混凝土结构健康诊断的理论和方法	(268)
7.1	集成融合结构健康诊断的原理和体系	(268)
7.2	各监测量的健康诊断的因果分析模型	(270)
7.3	拟定健康诊断控制标准的理论和方法及其准则	(289)
7.4	健康诊断的综合分析理论和方法	(310)
第八章	重大水工混凝土结构病害诊断的预警系统	(332)
8.1	预警原理及系统总体结构	(332)
8.2	预警模型、多级预警指标和预警等级	(335)
8.3	预警子系统的逻辑模型及物理模型	(350)
参考文献	(369)
Synopsis	(381)
Contents	(383)

第一章 绪 论

1.1 重大水工混凝土结构隐患病害概述

我国水资源贫乏,年径流总量约 $2.78 \times 10^4 \text{ m}^3$,人均约 2140 m^3 ;我国水能资源却十分丰富,据最新可靠复查数据,我国大陆的水电理论蕴藏量约 $6.944 \times 10^8 \text{ kW}$,其中,技术可开发利用的达 $5.416 \times 10^8 \text{ kW}$,经济可开发量达 $4.48 \times 10^8 \text{ kW}$,居世界首位。为了开发利用这些水资源和水能资源,我国迄今已修建约 8.4 万座堤坝,其中 15 m 以上的大坝约为 1.9 万座,总蓄水量约 510 Gm^3 ,总装机容量约 $1 \times 10^8 \text{ kW}$,灌溉面积约 $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 。这些水利水电工程在防洪、灌溉或供水、发电和航运等方面产生了巨大的社会效益。随着我国西部大开发、西电东送和南水北调等项目的开展,我国在建或拟建几十座高坝大库,如在建的三峡、小湾、龙滩等,拟建的溪洛渡、白鹤滩、乌东德、向家坝等。据国际上和中国大坝委员会统计^[1,2],在坝高 60 m 以上的大坝中,混凝土坝约占 58%~73%,且大坝越高,混凝土坝所占比例越大,拱坝尤其如此。因此高坝的型式主要为混凝土坝,即重大水工混凝土结构。为了简便,本书将重大水工混凝土结构有时简称为混凝土坝或大坝。

据水利部和国家电力公司(原电力部)对所属大坝的安全定期检查发现^[3,4],至 1999 年底,我国已建水利堤坝(即以防洪、灌溉和供水为主的大坝,由水利部门管理)中,有 30 413 座为病险坝,其中大型坝 145 座、中型坝 1 118 座、小型坝 29 150 座,从 1991—2002 年垮坝达 245 座;电力部门所管理的以发电为主的 130 多座水电站大坝中有 9 座为病险大坝。检查发现,大坝的主要重大缺陷和隐患是由于设计洪水标准、坝基及库岸地质、施工质量、工程设计和运行管理等方面问题引起的,尤其是 20 世纪 60—70 年代修建的大坝,由于多种原因,隐患病害尤为严重,其中高混凝土坝存在裂缝、溶蚀、冻融、温度疲劳和日照碳化等病害^[5],特别是裂缝严重。电力部门第一轮定期检查 96 座水电站大坝的结果,如表 1.1.1^[6]所示。

表 1.1.1 96 座大中型水电站大坝隐患和病险统计

序号	隐患或病险	数量/座	比例/%
1	防洪标准低,不满足现行规范的规定,有的大坝在运行中曾发生洪水漫顶事故,造成巨大损失	38	39.6
2	坝基存在重大隐患,断层、破碎带和软弱夹层未做处理或处理效果差,有的在运行中局部发生性状恶化,使大坝的抗滑安全度明显降低	14	14.6

(续表)

序号	隐患或病险	数量 /座	比例 /%
3	坝体稳定安全系数偏低,不满足现行规范的规定	5	5.2
4	结构强度不满足要求,坝基、坝体在设计荷载组合下出现超过允许的拉、压应力	10	10.4
5	坝体裂缝破坏大坝的整体性和耐久性方面,有的裂缝贯穿上下游,渗漏严重,有的裂缝规模大且所在部位重要,已影响到大坝的强度和稳定	70	72.9
6	坝基扬压力或坝体浸润线偏高,坝基或坝体渗漏量偏大,有的坝体大量析出钙质(溶融)	32	33.3
7	泄洪建筑物磨损、气蚀损坏严重,有的大坝的坝后冲刷坑已影响到坝体的稳定	23	24
8	混凝土低强,混凝土遭受冻融破坏严重,表层混凝土剥蚀或碳化较深,有的大坝在泄洪时溢流面发生大面积混凝土被冲毁事故	10	10.4
9	近坝区上下游边坡不稳定,有的曾发生较大规模的滑坡	10	10.4
10	水库淤积严重	10	10.4
11	水工闸门和启闭设备存在重大缺陷,有的已不能正常挡水和启闭运行,影响安全度汛	27	28.1
12	大坝安全监测设施陈旧、损坏严重,测值精度低、可靠性差,部分大坝缺少必要的监测项目和设施	80 以上	

从表中看出:除防洪标准偏低等以外,裂缝、溶蚀、冻融与温度疲劳及日照碳化等是混凝土坝的主要隐患病害,分别约占总坝数的 72.9%、33.3%、10.4%。因此,以重大水工混凝土结构的裂缝、溶蚀、冻融、温度疲劳和日照碳化等为重点,综合应用现场检测、原位监测、室内实验及理论与数值分析等方法,研究重大水工混凝土结构的隐患病害检测与监测、老化机理、寿命评估理论和健康诊断的理论与方法及预警系统等,将为病险坝与老坝的补强加固及新建高坝等提供科学依据和相关技术支持,因而,具有重要的科学意义和应用价值。

1.2 国内外重大水工混凝土结构隐患病害检测和监测技术概述

为了监视重大水工混凝土结构(即混凝土坝)的安全运行状态,通常在坝体与坝基内埋设各种监测仪器(即称原位监测),以定期或实时监测埋设仪器部位的变形、应力应变和温度、渗流(扬压力和渗流量)等,并通过对这些监测资料的分析 and 反分析,评价和监控重大水工混凝土结构的安全状况。然而,在出现隐患、病害等部位不一定预埋监测仪器,或者因仪器使用寿命而失效,因此需要用现场检测加以弥补。下面概述国内外重大水工混凝土结构隐患病害的检测技术和监测技术。

1.2.1 现场检测技术^[7,8]

目前国内外常用电法、地震法和温度法等对重大水工混凝土结构隐患病害进行检测,其中电法和温度法主要用来检测渗漏,地震法用来检测裂缝和缺陷等。

(1) 国外现场检测现状

在1973年第11次国际大坝会议上,美国 R. B. Jansen 等提出:进行人工巡视检查是大坝安全监测的重要内容,能较好弥补仪器监测的局限性,但这种检查主要依靠目测或简单工具进行外表检查,仍难以发现内部存在的隐患。为此,自20世纪70年代,科技人员开始研究大坝病害检测技术。

20世纪80年代,意大利结构与模型研究所(ISMES)开始研究用声波层析的方法对大坝进行安全检测,于1990年提出了系统的检测方法,并在第17届国际大坝会议上作了介绍;该法经意大利100多座大坝的应用,被认为是无损检测的经济实用方法,其后在美国多处大坝中应用。日本于1991年在我国丰满大坝进行声波层析检测,得到坝内纵波速的分布。特别是近几年来,国外发明了三维声波层析技术,可以检测坝内的力学参数及病害的立体分布图,分辨率也有较大提高。与此同时,应用探地雷达检测渗流通道等也有较大发展。

(2) 国内现场检测现状

国内从20世纪80年代开始,陆续开展了这方面的工作,除强调将日常巡视作为安全监测的重要内容外,在发展检测技术方面也有较大进展。

在20世纪80年代末,我国研制了电阻率检测的电法探测仪,90年代开始应用探地雷达检测大坝隐患,并应用瞬态面波法和瞬态电磁法探测大坝坝基和坝体的隐患和缺陷。研发的混凝土坝声波层析检测系统(ST-200),其性能优于日本的DYD系统,并在丰满等大坝检测中得到成功应用。与此同时,河海大学用同位素跟踪等方法检测渗漏也取得了较大进展。

(3) 评述

从国内外大坝安全检测工作的成果来看,检测还难以定量,尚处于定性阶段,是一个薄弱环节;尤其是以无损探测为主的安全检测,其技术尚需要进行研发和提高。

1.2.2 原位监测技术

对于重大水工混凝土结构(如混凝土坝),在20世纪30年代就开展原位安全监测。

1.2.2.1 传感器技术^[8]

(1) 国外传感器技术

在监测应力应变、温度和渗流等方面,主要传感器有应变计、应力计、钢筋计、测缝计和渗压计,如美国加利福尼亚大学的Carlson和前苏联的Davidenkov于20世纪

30年代分别研发了 Carlson 电阻式传感器和振弦式传感器等,这些仪器在监测混凝土坝的应力应变、温度和渗压等方面得到了广泛应用,并取得了监测的实效。

在变形监测方面,主要有由法国的 Telemac 公司(现归属加拿大)、美国的 Geokon 和 Sinco 公司等生产的光电式、变电容式、光电编码式等非接触式垂线和引张线坐标仪,以及德国的 Maihak、Carlzeiss 工厂和瑞士的 Soileperts 公司等生产的激光光学仪等。在地基和滑坡等监测方面,Telemac 公司、Geokon 公司、Sinco 公司、Geomation 公司等生产了多点变位仪、倾斜仪和变位仪等。

在 20 世纪 90 年代,美国 Honeywell 公司研制了有关智能传感器,它将硅敏感元件与微处理器的计算与控制结合起来,该公司还研制了 ST3000 系列全智能变送器;其后,德国的 Strohrmann 公司研制的二维速度传感器及西门子公司研制的 IQ-Sense 等智能传感器系统,通过 ProfibusDP 的通信,使其具有故障的自动诊断性能。

光纤传感技术在国外主要用于桥梁和土木建筑物等的监测,而在水利水电工程中应用较少。

(2) 国内传感器技术

从 20 世纪 50 年代开始,我国对上述国外的传感技术进行引进吸收、消化和改进,形成了有中国特色的传感技术,主要有南京自动化设备厂生产的差动电阻式传感器类型,南京水利科学院、丹东三达测试仪器厂等生产的振弦式传感器类型,南京电力自动化研究院等生产的坐标仪等。其中,差动电阻式传感器已有 18 万套(台)成功应用于我国几百座大坝。另外,由东北勘测设计院研制的激光传感技术,在监测丰满和太平哨等的大坝变形中取得良好的效果。

在智能传感技术方面,从 20 世纪 80 年代中期开始,国内部分高等学校及研究机构首先采用混合集成技术研制了实用的智能传感器,但其性能与国外相比还有差距。

光纤传感器在 20 世纪 90 年代开始应用于监测大体积混凝土的裂缝,有一些成功的实例,但尚需进一步提高。另外,由河海大学研制的 CCD 位移传感器、武汉大学应用 GPS 监测表面变形等的新颖技术也有应用于大坝变形监测的实例。

1.2.2.2 自动监测技术

大坝的工作条件极其复杂,而安全又十分重要。为了实时或及时采集资料,并用于定量分析、评价与监控大坝的安全状况,以防患于未然,从 20 世纪 90 年代开始,国内外研制了大坝安全自动监测系统,主要包括监测数据的自动采集、管理及分析评价与监控等部分^[8,9]。

(1) 自动采集

自动采集的主要任务是将各类传感器测得的物理量(如电阻、电阻比、电容、电感和频率等)转化为数字量(如位移、渗压、渗流量、应力应变和温度等),即 A/D 转换,以便远程输运这些监测信息到计算机的数据库中。因此,一般先将几十个传感

器接入自动数据采集装置,完成 A/D 转换,然后输入数据库。这种自动数据采集装置主要有美国 Geomation 公司研制的 2300 系列系统、Sinco 公司的 IDA 及我国南京电力自动化研究院的 NARI 系统等。

(2) 数据管理系统

将上述采集的大量数据采用数据库管理软件平台进行科学有序的管理。在大型水利水电工程中常用的数据库管理平台一般有 Oracle、Sybase、Inforamix 及 SQL server 等数据库管理系统,在中小型水利水电工程中常用 dBase、Foxpro 等管理平台。按信息的类型和安全分析评价的需要将数据库分为工程档案、原始数据、整编数据和生成数据等四个分库。

(3) 分析评价和监控系统

分析评价和监控系统,是根据监测资料对其进行全面、深入的分析和反分析,进而对结构和渗流进行分析和反分析,据此建立各类监控模型和监控指标,并结合有关大坝安全的设计、施工、运行管理、规范和法规等方面的专业知识进行编辑,构成大坝安全分析、评价、监控和辅助决策等方面的知识。再依据这些知识和监测资料,对大坝的安全状况进行分析评价和监控,对出现的异常或险情进行物理成因解析,并提出辅助决策建议。为实现以上的定量分析和远程监控,该系统除包括上述的数据管理外,还包括方法库、知识库和图库等支持库群及通信网络等。这部分内容将在 1.3 节中详细介绍。

1.3 重大水工混凝土结构健康诊断理论和方法概述

前面介绍了重大水工混凝土结构隐患病害的检测和监测技术,得到了隐患病害的信息。而检测和监测的目的是依据这些信息和资料,对大坝的安全状况作出分析评价和监控,即对结构进行健康诊断。为此,本节介绍国内外对重大水工混凝土结构进行健康诊断的理论和方法。

1.3.1 检测和监测资料的处理及集成融合技术^[10]

由于多种原因,检测和监测资料存在各类误差,尤其是过失误差(或称粗差)。一般将检测的资料作为隐患病害的定性或定位分析的依据,而将监测资料作为定量分析的依据,因此需要将检测和监测资料进行集成和融合,以获得大坝被测信息的一致性,得到准确可靠的反映大坝安全状态的信息,为大坝安全分析提供可靠依据。

1.3.1.1 检测和监测资料的处理

对检测和监测资料进行处理的主要任务是诊断资料中的粗差。目前识别粗差的方法归纳为两大类:第一类是以假设检验为基础的粗差识别和修正方法(简称识别法),主要有 Cook 和 Weisberg 的残差分析法, Baarda 的数据探测法,陶本藻提出的平差模型假设检验的统一方法,李德仁提出的两个多维备选假设下的可靠性

理论、顾孝烈等提出的多个粗差定位的矢量分析法等；第二类是以变权为基础的抗差估计方法(简称估计法)，由 Hubber、Hample 和 Roussew 等建立了抗差估计理论，这一理论由 Kubik、李德仁等进行了发展、完善和应用。上述两类方法各有优缺点。识别法对多维粗差难以准确定位，残差的大小有时难以反映实测粗差，其剔除有时会导致检测和监测信息的损失；估计法选择权函数有较多的主观性和不稳定性，残差有时掩盖真实的粗差，在多维粗差相关检测时可能失真。

本书作者首先分析粗差(或称野值)产生的原因，据此选出野值分类模型及随机模糊诊断技术，较好地处理了检测和监测中的粗差。

1.3.1.2 检测和监测信息的集成融合技术

将检测和监测信息进行集成融合，国内外研究较少。作者提出的集成融合技术，主要包括建立信息的度量函数，建立有效数据的提取准则，应用 Bayes 估计理论、优化融合算法对信息进行优化集成融合，并据此建立感智融合体系(或称感智系统)。

1.3.2 健康诊断的理论和方法

至今，国内外坝工界对重大水工混凝土结构(如混凝土坝)的健康诊断尚处于起步阶段，目前主要对检测和监测等实测资料进行分析，然后对大坝进行安全评价和监控。至于综合进行老化机理分析、寿命评估，进而进行健康诊断和建立预警系统，至今尚未发现有文献报道。因此，这里重点介绍依据实测资料对大坝进行安全分析评价的馈控理论和方法等。

1.3.2.1 大坝安全分析评价与馈控的理论和方法^[9]

(1) 建立监控模型体系的理论和方法

国外于 20 世纪 30 年代就开始对监测资料进行分析，主要代表有 D. Tonini^[11] 和 M. Rocha^[12]，他们首次将影响大坝位移的因素分为水位、温度和时效三个分量，以函数式表达各个分量，然后用回归分析法建立回归模型。P. Bonaldi 等^[13] 于 1977 年用有限元计算了水位和温度分量及时效的统计模式，然后用最小二乘法建立确定性模型或混合模型，借以评价和监控大坝的安全状况，用时效分量的变化规律分析了大坝的安全变化趋势。

国内在 1974 年以前，主要通过绘制过程线以及统计最大与最小值等特征值，借以定性分析和评价大坝的运行状况。其后，河海大学陈久宇等^[14] 开创了应用统计回归法建立统计模型，以分析评价大坝的安全状况。作者等^[9,15~17] 在前人工作的基础上，进行全面系统的总结、发展和创新，建立了大坝与坝基安全监控模型体系，主要包括对上述的统计模型、确定性模型、混合模型的因子用坝工理论和力学原理等进行分析 and 演绎，应用多种统计数学(如逐步回归、加权回归、正交多项式回归和差值回归等方法)，结合实测资料，建立了各类监测量的测点及空间位移量的

统计模型;或者用有限元法分析计算水压分量、温度分量和时效分量或仅水压分量,结合实测资料,用范数的最小二乘法,建立了测压孔和变形测点及空间位移场的确定性模型和混合模型等;与此同时,应用时序分析法、灰色系统、模糊数学、混沌理论、神经网络等建立了预测模型。应用这些模型对大坝、坝基与库岸岩体边坡等的安全状况进行定量分析评价和监控。

(2) 馈控大坝安全运行理论和方法

依据以上监控模型对大坝安全分析评价和监控的成果,为进一步监视大坝,使其在安全状态下运行,作者结合众多的科研项目,建立了馈控大坝安全运行的理论和方法^[18],主要包括反演分析和反馈分析。

1) 反演分析法。依据以上建立的统计模型、确定性模型和混合模型等数值监控模型所分离的水压、温度和时效等分量,通过计算力学(主要用有限元法)模拟了大坝在相应荷载组合工况和考虑徐变或蠕变等因素情况下的水压、温度和时效分量等,通过优化演绎,反演了大坝的计算模型、有限元计算成果处理、混凝土坝的变形参数(坝体与坝基和库盘的模量及粘弹性参数等)、断裂参数(断裂韧度和接缝的等价摩擦因数等)、热力学参数(导温系数、导热系数、放热系数、绝热温升、线膨胀系数、库水温及拱坝温度荷载计算公式等)、混凝土的渗透扩散系数与坝基防渗帷幕的渗透系数等,从而为大坝的反馈监控提供准确的计算模型、计算方法及计算参数等。

2) 反馈分析法。融合监控模型和反演分析成果,通过计算力学的分析计算与演绎,从中挖掘了大坝和坝基运行的某些新规律和信息,据此反馈和优化了设计施工,馈控了大坝安全运行。主要包括以下内容。

① 建立施工期反馈分析的原理和方法及其流程,据此馈控施工温度及质量。

② 馈控大坝运行期的荷载工况。由于裂缝是混凝土坝的主要病变,为此,分析了裂缝的产生和扩展机理,提出了控制裂缝失稳的荷载组合工况及其图表。还发现了有些大坝(如陈村拱坝和佛子岭连拱坝等)在低水位时的高温或低温荷载组合工况也是裂缝失稳的控制工况;并发现了由于库水温的影响(即实际库水温比设计估算的库水温要高)使坝体实际准稳定温度场要比设计值高 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$,为提高封拱温度而节约冷却费用提供了科学依据。

③ 发现了坝踵区由于渗入混凝土孔隙中水的湿胀作用而产生湿胀压应力,并提出了湿胀应力计算或试验的方法,为提高允许拉应力提供了科学依据。

④ 基于监测资料,建立了强度、抗裂和稳定的可靠度分析方法,以分析评价大坝现状的实际安全度。

⑤ 基于变形监测是监视大坝安全的最主要和可靠的项目,其准确的变形监控指标及其控制荷载组合,将十分有效地快速馈控大坝的安全状况。而由于每座大坝及其坝段有各自的特点,其影响因素极其复杂,目前尚无规范可参照,因此成为国内外坝工界的热点和难点。作者结合较多实际工程,依据实测资料,基于强度、

抗裂和稳定等控制条件,提出了小概率及粘弹性、粘弹塑性和大变形理论的结构分析法,拟定了坝顶和坝基位移的一级、二级和三级监控指标及其控制荷载工况,为避免佛子岭等大坝由于不利运行工况所造成的严重运行事故起到了关键作用,产生了重大的社会效益。

1.3.2.2 大坝安全综合分析评价理论和方法

随着国内外病险坝的逐渐增多,要求实时或及时掌握大坝的安全状况,而其影响因素又极其复杂,坝工界发现单用监控模型或反分析等理论和方法,对大坝安全状况做出分析评价和监控有其局限性。随着自动化监测技术、现代计算理论和方法、人工智能、计算机科技等的发展,从20世纪90年代起,国内外监测界开始研发大坝安全综合分析评价的专家系统。

(1) 国外研究概况

以意大利结构和模型研究所(ISMES)为代表,早期开发的微机辅助监测系统(MIDAS)是一个管理和辅助程序,可实现监测数据的实时存储、更新和图形显示,并应用回归统计模型、确定性模型和混合模型进行简单的对比分析。其后,相继开发了DAMSAFE的决策支持系统等^[19],将人工智能技术应用于大坝安全管理,并与Internet连接,用于管理显示解析监测数据,检索设计、试验及专家对大坝评价等资料,还有Web浏览器供用户访问等。

法国、美国和日本等国也先后开发了大坝安全监测数据处理系统,其功能基本上与MIDAS相同,但监控模型主要是统计模型。

(2) 国内研究概况

在20世纪80年代,我国结合“七五”和“八五”国家科技攻关项目,研发了基于微机的坝监测数据管理系统,主要用于存储和管理监测数据、制作图表、统计分析 & 异常值的识别等,缺乏对大坝进行综合分析等功能。

河海大学在原电力工业部的资助下,与电力部大坝安全监察中心合作,于20世纪80年代末开始,研发了“一机四库”(即综合推理机、知识库、方法库、工程数据库和图库)的大坝安全综合评价专家系统^[20],在基于分布式C/S(或B/S)体系及网络上实现了对大坝安全进行及时或实时分析评价和综合评价的两大功能。其中,“实时分析评价”为及时或实时发现异常测值,并对其进行物理成因解析提供了辅助决策的技术支持;“综合评价”为结合大坝一般每五年一次定期安全检查的需要,实现了对大坝安全级别作出综合评价,对病险坝提出辅助决策的建议。这里需要说明的是,因工程需要,有时将综合推理机和知识库合并为综合分析推理库,因此构成了由“四库”组成的在线监控及反馈分析系统。国内的有关研究单位也研发了具有类似功能的系统。从这些系统应用情况来看,监测系统采集资料的可靠性、软硬件平台的水平及运行管理的水平等,是专家系统应用于实际工程的关键。

1.3.2.3 风险评价理论和方法^[21]

国外对大坝安全进行风险评价已有几十年的历史,其中最早提出风险概念的