

院校水利水电类精品规划教材

SHUIGONG JIANZHUWU ANQUAN JIANCE YU KONGZHI

水工建筑物

安全监测与控制

主编 杨 杰 李宗坤 林志祥 任 杰
主审 陈尧隆



黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

水工建筑物安全监测与控制

主 编 杨 杰 李宗坤 林志祥 任 杰
主 审 陈尧隆

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是全国高等院校水利水电类精品规划教材,是水利水电工程专业水工建筑物安全监测与控制课程的教学用书。全书共分6章,包括绪论、水工建筑物安全监测设计、安全监测仪器及监测自动化、仪器埋设安装与监测实施方法、监测数据处理与建模分析、安全性态综合评判与决策。

本书除可作为水利水电工程专业本科生的教材外,还可供其他相关专业的师生作为教学参考书和有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物安全监测与控制/杨杰等主编. —郑州:
黄河水利出版社,2012.8
全国高等院校水利水电类精品规划教材
ISBN 978-7-5509-0107-0

I. ①水… II. ①杨… III. ①水工建筑物-安全
监测-高等学校-教材 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第174574号

策划编辑:李洪良 电话:0371-66024331 E-mail:hongliang0013@163.com

出 版 社:黄河水利出版社 网址:www.yrcp.com
地 址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003
发行单位:黄河水利出版社
发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)
E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.25

字 数:284千字

印数:1—3100

版 次:2012年8月第1版

印次:2012年8月第1次印刷

定 价:27.00元

出版者的话

近年来,随着我国对基础设施建设投入的加大,水利水电工程建设也迎来了前所未有的黄金时间。截至 2006 年,全国已建成堤防 28.08 万公里,各类水库 85 849 座,2006 年水利工程在建项目 4 614 个,在建项目投资总规模达 6 121 亿元(《2006 年全国水利发展统计公报》)。水利水电工程的大规模建设对设计、施工、运行管理等水利水电专业人才的需求也更为迫切,如何更好地培养适应现今水利水电事业发展的优秀人才,成为水利水电专业院校共同面临的课题。作为水利水电行业的专业性科技出版社,我社长期关注水利水电学科的建设与发展,并积极组织水利水电类专著与教材的出版。

在对水利水电类本科层次教材的深入了解中,我们发现,以应用型本科教学为主的众多水利水电类专业院校普遍缺乏一套完整构建在校本科生专业知识体系又兼顾实践工作能力的教材。在广泛调研与充分征求各课程主讲老师意见的基础上,按照高等学校水利学科专业教学指导委员会对教材建设的指导精神与要求,并结合教育部实施的多层次建设、打造精品教材的出版战略,我社组织编写了本系列“全国高等院校水利水电类精品规划教材”。

此次规划教材的特点是:

- (1) 以培养水利水电类应用型人才为目标,充分重视实践教学环节。
- (2) 在依据现有的专业规范和课程教学大纲的前提下,突出特色,力求创新。
- (3) 紧扣现行的行业规范与标准。
- (4) 基本理论与工程实例相结合,易于学生接受与理解。

本系列教材除了涵盖传统专业基础课及专业课外,还补充了多个新开课程的教材,以便于学生扩充知识与技能,填补课堂无合适教材可用的空缺。同时,部分教材由工程技术人员或有工程设计施工从业经历的老师参与编写,也是此次规划教材的创新。

本系列教材的编写与出版得到了全国 21 所高等院校的鼎力支持,特别是三峡大学党委书记刘德富教授和华北水利水电学院副院长刘汉东教授对系列教材的编写与出版给予了精心指导,有效保证了教材出版的整体水平与质量。在此对推进此次规划教材编写与出版的各院校领导和参编老师致以最诚挚的谢意,是他们在编审过程中的无私奉献与辛勤工作,才使得教材能够按计划出版。

“十年树木,百年树人”,人才的培养需要教育者长期坚持不懈的努力,同样,好的教材也需要经过千锤百炼才能流传百世。本系列教材的出版只是我们打造精品专业教材的开始,希望各院校在对这些教材的使用过程中,提出改进意见与建议,以便日后再版时不断改正与完善。

黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

编 审 委 员 会

主 任：	三峡大学	刘德富	华北水利水电学院	刘汉东
副主任：	西安理工大学	黄 强	郑州大学	吴泽宁
	云南农业大学	文 俊	长春工程学院	左战军
委 员：	西安理工大学	姚李孝	西北农林科技大学	辛全才
	扬州大学	程吉林	三峡大学	田 斌
	华北水利水电学院	孙明权	长沙理工大学	樊鸣放
	重庆交通大学	许光祥	河北农业大学	杨路华
	沈阳农业大学	迟道才	河北工程大学	丁光彬
	山东农业大学	刘福胜	黑龙江大学	于雪峰
	新疆农业大学	侍克斌	内蒙古农业大学	刘廷玺
	三峡大学	张京穗	华北水利水电学院	张 丽
	沈阳农业大学	杨国范	南昌工程学院	陈春柏
	长春工程学院	尹志刚	昆明理工大学	王海军
	南昌大学	刘成林	西华大学	赖喜德

前 言

随着经济发展和科学技术的进步,世界各国建坝数量逐年增多,坝高和体积不断增大,而坝址、地基的条件却更加复杂,一些经过长期运用的大坝会由于不同程度的老化、病变、裂缝等因素产生新的缺陷和安全隐患,如果不能及时发现和排除这些隐患,将会时刻影响着大坝的安全运行和水库综合效益的发挥,同时给下游的城镇、交通及人民的生命财产造成威胁,甚至带来严重的灾难性事故。因此,如何提高坝的安全性和经济性已成为迫切需要解决的实际问题,从而对大坝安全监测及资料分析提出了更高的要求,也促进了监测方法和资料分析方法更快的发展。

本书以水工建筑物安全监测理论为基础,紧密结合工程实际,系统地论述了水工建筑物安全监测与控制方面的有关知识和方法,为学生初步建立起水利工程安全监测与控制的知识体系和工程认识,为今后从事水利水电工程设计、施工、管理和科学研究等方面的工作奠定了基础。

《水工建筑物安全监测与控制》是结合水利水电工程安全监测实际,根据水利水电工程及相关专业教学需要而编写的专业教材,可作为水利水电工程专业本科生学习用书,也可作为相关专业研究生、本科生以及水利水电工程技术人员的学习参考书。

本书共分6章,包括绪论、水工建筑物安全监测设计、安全监测仪器及监测自动化、仪器埋设安装与监测实施方法、监测数据处理与建模分析、安全性态综合评判与决策等内容。本书由西安理工大学杨杰、郑州大学李宗坤、云南农业大学林志祥、西安理工大学任杰担任主编,由杨杰负责组织协调工作和统稿。全书由西安理工大学陈尧隆教授主审。具体编写分工如下:第一、二章由西安理工大学杨杰编写,第三章由华北水利水电学院刘凤莲编写,第四章由云南农业大学林志祥编写,第五章由西安理工大学杨杰、任杰编写,第六章由郑州大学李宗坤编写。西安理工大学马婧、武小龙、闵江涛、李墉、王亮、董航凯、江德军、尹吉娜等研究生在文字录入、绘图、排版等方面做了大量细致的工作,谨以致谢。

对本书所参阅文献的所有作者致以衷心的感谢!

由于作者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

出版者的话

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 我国水资源及其开发现状	(1)
1.2 水工建筑物的安全条件	(2)
1.3 水工建筑物安全监测的必要性	(2)
1.4 开展水工建筑物安全监测研究的重要意义	(3)
1.5 水工建筑物安全监测的国内外现状	(4)
1.6 安全监测新技术与方法	(12)
1.7 安全监测仪器的发展	(14)
1.8 水工建筑物安全监测的发展趋势	(18)
第2章 水工建筑物安全监测设计	(19)
2.1 监测设计的基本原则和要求	(19)
2.2 监测项目确定与测值限差	(21)
2.3 变形监测设计	(25)
2.4 渗流监测设计	(32)
2.5 应力应变监测设计	(36)
2.6 水文及水力学监测设计	(46)
2.7 自动化监测系统设计与优化	(50)
2.8 监测工程的施工组织设计	(51)
2.9 监测设计工程实例	(53)
第3章 安全监测仪器及监测自动化	(86)
3.1 监测仪器概述	(86)
3.2 常用传感器的类型和工作原理	(87)
3.3 外部变形监测仪器	(91)
3.4 内观仪器	(112)
3.5 环境量监测仪器	(123)
第4章 仪器埋设安装与监测实施方法	(131)
4.1 监测仪器现场检验与率定	(131)
4.2 监测仪器的安装埋设技术	(143)
4.3 监测实施方法	(147)

第 5 章 监测数据处理与建模分析	(151)
5.1 监测资料分析内容与分析方法概述	(151)
5.2 监测数据的误差分析	(152)
5.3 统计回归分析方法	(154)
5.4 水工建筑物安全监控变量的统计模型	(167)
第 6 章 安全性态综合评判与决策	(174)
6.1 概 述	(174)
6.2 安全性态综合评判与决策	(174)
6.3 水库大坝安全鉴定	(175)
6.4 病险水库的除险加固	(177)
参考文献	(185)

第1章 绪论

【本章内容提要】

- (1) 简要介绍我国水资源及其开发现状;
- (2) 简要介绍水工建筑物的安全条件;
- (3) 重点介绍水工建筑物安全监控的必要性与开展相关研究的意义;
- (4) 重点介绍水工建筑物安全监测研究的国内外现状;
- (5) 详细介绍水工建筑物安全监测新技术与方法;
- (6) 详细介绍监测仪器与测控系统的发展状况;
- (7) 分析水工建筑物安全监控的发展趋势。

1.1 我国水资源及其开发现状

1.1.1 我国水资源状况及特点

我国幅员辽阔,江河众多,河川总长 42 万 km,流域面积超 100 km² 的河流 5 000 多条,超 10 000 km² 的 97 条;面积超 1 km² 的湖泊约 2 800 个,超 100 km² 的约 130 个。我国年均降雨量 648 mm,年降水总量约 6.19 万亿 m³,河川平均年径流总量约 2.6 万亿 m³,占全球的 5.5%。

我国水资源特点:①水资源相对丰富,排全球第 4 位,但人均占有量低,仅为世界人均量的 1/4。②水资源、水能资源在地区上分布不均,水土资源分布极不平衡。其中,水资源分布东南多、西北少,由东南向西北递减;水能资源蕴藏量的 82.5% 集中在西部省区;长江流域以北地区的耕地面积占全国的 67%,但地表水资源仅占 30%。③水量在年内分配不均,年际变化很大。受季风气候影响,我国降雨量与径流量主要集中在 5~9 月的汛期,非汛期则水量缺乏,大部分地区冬春少雨、夏秋多雨,这也正是我国水旱灾害频发的自然根源。因此,需要修建各种水利设施来调节和平衡水量,以减少水旱灾害。

1.1.2 我国水资源开发现状

我国水能资源丰富,理论蕴藏量为 6.76 亿 kW,技术可开发装机容量 5.42 亿 kW,均居世界首位,具体分布情况见图 1-1。截至 2010 年年底,我国水电总装机容量达 1.72 亿 kW,成为世界第一水电大国;建成各类水库 87 873 座,其中大型水库(库容 1 亿 m³ 以上)552 座,中型水库(库容 0.1 亿~1 亿 m³)3 269 座,小型水库(库容 10 万~0.1 亿 m³)84 052 座。累计建成江河堤防长达 29.41 万 km,保护人口 6.0 亿人,保护耕地 4.7×10³ 万 hm²。多年来,这些水库大坝及堤防在防洪、灌溉、供水、发电、航运、渔业和旅游等方面发挥了重要作用,为我国的发展带来了巨大的经济效益和社会效益。

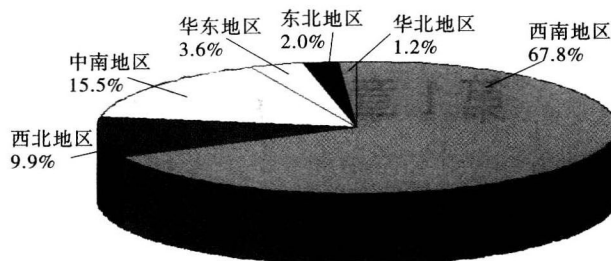


图 1-1 全国可开发水能资源分布图

1.2 水工建筑物的安全条件

通常,系统破坏或失事是指系统不能达到所期望的满意的功能。因此,水工建筑物的安全条件就是建筑物能实现其自身应有的设计预期功能。

可以定义水工建筑物的失事概率 P_f 为广义荷载 L 大于广义抗力(承载能力) R 的概率:

$$P_f = P(L > R) \quad (1-1)$$

其中,广义荷载 L 和广义抗力 R 各自的影响因素众多,都是相关影响变量的多元函数,即

$$L = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1-2)$$

$$R = g(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad (1-3)$$

近些年来,国内外在工程安全可靠度方面的研究有了一定的进展。因此,有必要明确水工建筑物失事风险与可靠度之间的区别和联系。

可靠性和风险性分别指系统完成某些特定功能的可靠程度和不可靠程度。可靠度用来度量系统或结构体系的安全性或可靠性,它定义为在规定时间内和规定条件下结构或系统完成预定功能的概率,表示为 P_s ;相反,如果结构或系统不能完成预定的功能,则称相应的概率为失效概率,也即失事风险,表示为 P_f , P_s 与 P_f 是互补的,即二者满足 $P_f = 1 - P_s$ 。

1.3 水工建筑物安全监测的必要性

随着世界各国水利水电事业的发展,水工建筑物安全问题也显得越来越突出。一方面,由于水文、地质、施工质量、运行管理以及建筑物老化等多方面不确定因素的影响,水工建筑物在一定程度上存在着不安全因素;另一方面,随着水资源的进一步开发和利用,水利工程面临的自然条件也越来越复杂,同时,水工建筑物的规模也在逐渐增大,正朝着高大型方向发展。

20 世纪 30 年代以来,国际上相继发生了圣佛西斯、马尔巴塞(法)、提堂坝(美)等著名的垮坝事件,我国也先后发生了石漫滩、板桥(1975 年)洪水漫顶以及沟后水库(1993 年)渗透破坏等垮坝事件(见图 1-2 ~ 图 1-4),这些大坝的失事给相关国家带来了惨重的

灾害和巨大的经济损失。水工建筑物安全问题的日益突出,使得各国政府和坝工界开始对水工建筑物安全监控更加重视,并制定了一系列安全法规。国际水工建筑物安全委员会 1964 年正式成立了水工建筑物失事安全委员会,针对涉及水工建筑物安全的相关问题进行探讨和研究,以指导各国的水工建设。从 1958 年至 1988 年的 11 次国际水工建筑物会议中,就有 9 次讨论了与水工建筑物安全监控有关的各种课题,足以说明水工建筑物安全监控的重要程度。

惨痛的教训使人们逐渐认识到,必须针对不同水工建筑物的具体情况和特点,设置相应的安全监控项目,对水工建筑物变形、渗流、应力应变等进行连续而全面的监测,并对实测数据进行及时处理和分析,在此基础上实现对水工建筑物安全性态的实时评判,以馈控水工建筑物的安全和运行。



图 1-2 “75·8”特大洪水石漫滩水库溃坝景象



图 1-3 国外大坝失事——印度孟买“05”洪水



图 1-4 国内大坝失事——“75·8”特大洪水板桥水库大坝溃坝景象

1.4 开展水工建筑物安全监测研究的重要意义

加强水工建筑物安全监测与控制及其相关问题的研究,对于确保水工建筑物安全、反馈设计及施工、为水工建筑物运行管理提供决策依据等方面都有着十分重要的意义,具体

体现在以下几个方面:

(1)有助于认识各种观测量的变化规律和成因机理,以确保水工建筑物安全。水工建筑物运行中,结构性态、基础状况以及环境量等各种条件在随时间不断变化,因此水工建筑物的安全状况也随之变化。对水工建筑物安全监测资料及相应的结构、基础性态进行研究计算和模拟,有助于认清各种观测量的变化规律以及各种变化的物理成因,从而能及时发现隐患,以确保水工建筑物安全。

(2)反馈水工建筑物设计、指导施工和水工建筑物运行,推动坝工理论的发展。由于水工建筑物及其坝基的工作条件复杂,相关荷载、计算模型及有关参数的确定总是带有一定的近似性,因而现有的水工设计还难以和工程实际完全吻合。因此,利用水工建筑物安全监测资料进行正反分析,不仅能及时评价水工建筑物和坝基的工作性态,还能依据设计、施工方案对在建或拟建水工建筑物提出反馈意见,达到检验和优化设计、指导施工的目的。

(3)提高水工建筑物运行综合效益。通过水工建筑物安全监测与数据处理分析,可以及时发现问题,并在进行物理成因分析的基础上采取相应措施,以确保水工建筑物安全和延长水工建筑物运行寿命,提高水工建筑物运行的社会经济综合效益。

1.5 水工建筑物安全监测的国内外现状

1.5.1 水工建筑物安全监测的历史发展

20 世纪 20 年代以来,人们开始意识到水工建筑物安全的重要性,各国专家、工程技术人员纷纷开始对水工建筑物安全监测的各个环节进行研究。70 年代后,随着微电子技术、计算机技术、传感器技术和通信技术等相关学科的发展,水工建筑物安全监测技术及其相关研究也得到了迅速的发展;80 年代末至 90 年代初,水工建筑物安全自动化监测也有了实质性的发展,并逐渐趋于成熟化与实用化。国内水工建筑物安全监测工作则从 20 世纪 50 年代中期开始,研究起步晚,发展相对缓慢。但从 80 年代以来,我国的水工建筑物安全监测工作及相关研究的总体水平有了很大发展,某些方面已处于国际领先水平。

1.5.2 水工建筑物安全监测的国内外研究现状

除监测仪器研发、仪器系统埋设安装和现场监测外,有关水工建筑物安全监测的研究工作可以大致分为以下几个方面,即:观测资料的误差处理与分析,观测资料与水工建筑物运行性态的正分析,观测资料与水工建筑物运行性态的反分析,反馈分析与安全监测指标的拟定,水工建筑物安全综合评判与决策。在经过近半个世纪的发展后,国内外水工建筑物安全监测的各项研究工作已经取得了长足的发展。

1.5.2.1 监测数据误差处理与分析

在利用水工建筑物安全监测资料进行正反分析前,首先应对原始测值资料进行误差处理与分析,以确保正确反映水工建筑物的实际运行状况。按照测量误差对观测结果的影响,一般可将误差分为系统误差、随机误差和粗差三类。在测量过程中,应当剔除粗差,

消除或削弱系统误差,使观测值中仅含随机误差。测量误差分析的方法一般有测值范围检验分析法、数学模型分析法及统计检验法等。

系统误差由观测的环境因素、仪器性能、不同观测者等因素造成,它按某一确定的规律变化,在多次重复观测中系统误差的数值大小和符号几乎相同。系统误差可分为定值系统误差和变值系统误差,其一般处理方法是设法找出系统误差的函数表达式,然后在观测结果中加以扣除。定值系统误差只引起随机误差在分布曲线位置上的平移,而不改变随机误差的分布规律,一般只能通过分析和试验的方法予以发现及消除。变值系统误差的发现、分离和消除方法与变值的规律有关,常见有剩余误差(残差)代数和法、剩余误差符号检验法、序差检验法以及对称消除法等。系统误差由数学模型结果判别,若实测过程线趋势性地偏离模型拟合过程线,则认为实测值有系统误差,并以偏离点为界,进行分段分析,以剔除系统误差的影响。

随机误差由随机因素造成,其符号和绝对值大小无规律且不可预料,但随着测次增加,一般认为随机误差呈正态分布,其期望均值为零。

粗差(过失误差)是由某些不正常因素所造成的与事实明显不符的一种误差,通常属于测量错误,这种误差较易被发现,应予以剔除。判别粗差常用莱因达准则,即凡剩余误差(残差) $|v_i| > \pm 3\sigma$ 的为过失误差。

目前,广泛采用最小二乘法对水工建筑物安全监测数据进行误差处理。自从高斯(G. F. Gauss)在1794年提出最小二乘法以来,广大学者对测量平差理论和方法进行了大量的研究。1947年,田斯特拉(T. M. Tienstre)提出了相关平差法,把对观测值独立的要求推广到随机相关。1962年,迈塞尔(G. Meissl)提出了秩亏自由网平差,把测量平差中的满秩阵推广到奇异阵。卡尔曼(Kalman)等提出了一种递推式滤波方法,已成功应用于航天、工业自动化等方面。1969年,克拉鲁普提出了最小二乘滤波、推估与配置,把平差参数从非随机变量推广到随机参数。在具体研究工作方面,美国 Serio G. Koreisha 和 Yue Fang 对滑动平均模型时序过程(ARMA)的测量误差影响进行了定量分析;岳建平通过对回归分析中观测误差和模型误差的分离,从而更客观地评价测量系统和模型的精度;刘文宝等提出了顾及先验信息的水工建筑物位移反分析方法,探讨了测量误差对位移反演结果的影响规律。

最小二乘法假定观测值中仅含偶然误差,这实际上是不可能的,为此,产生了研究系统误差和粗差的理论与方法。20世纪60年代后期,巴尔达(W. Baarda)提出了数据探测法和可靠性理论,为粗差研究奠定了基础。目前,对粗差的处理方法有两种,一是仍然属于最小二乘法范畴的数据探测法,二是有别于最小二乘法的抗差估计法或稳健估计法。在国内,周江文等提出了一些较为实用的抗差算法;赵斌在水工建筑物观测数据处理中引入污染分布、观测权等概念,以逐步消除粗差的影响,最终得到了合理的参数估计;郑东健用平均杠杆理论识别实测资料异常值,实现了误差的灰箱诊断。

1.5.2.2 安全监测资料的正分析

正分析的主要任务是由实测资料建立数学监控模型,以监控水工建筑物等的安全运行,同时对模型各分量(特别是时效分量)进行物理解释,借以分析大坝和其他水工建筑物的工作性态。

意大利的法那林(Faneli)和葡萄牙的罗卡(Rocha)等从1955年开始应用统计回归方法来定量分析水工建筑物的变形观测资料。1977年法那林等又提出了混凝土大坝变形的确定性模型和混合模型,将有限元理论计算值与实测数据有机地结合起来,以监控大坝的安全状况。近30年来,随着计算机技术的快速发展,水工建筑物观测资料的正分析研究也取得了很大的进步,统计模型、确定性模型及其混合模型在生产实践中得到了广泛的应用。此外,法国在资料分析方面,采用MDV法,即在测值序列中分离出水压分量和温度分量,然后对时效和残差的变化规律进行分析,进而评判水工建筑物的安全状况。

我国水工建筑物安全监测的资料分析工作起步相对较晚,最初只以定性分析为主,通过对实测过程线和简单统计的特征值来分析水工建筑物的运行状况。1974年后,陈久宇等开始应用统计回归分析安全监测资料,并对分析成果加以物理成因的解释,还对时效变化进行了研究,提出了时效变化的指数模型、双曲函数模型、对数模型、线性模型等。自此,资料分析工作在纵深方面不断发展。20世纪80年代中期,吴中如等从徐变理论出发推导了坝体顶部时效位移的表达式,用周期函数模拟温度、水压等周期荷载,并用非线性二乘法进行了参数估计;同期提出了裂缝开合度统计模型的建立和分析方法、坝顶水平位移的时间序列分析法以及连拱坝位移确定性模型的原理和方法,并在实际工程中得到了成功应用;吴中如等通过三维有限元渗流分析,建立了渗流测点的扬压力、绕坝渗流测孔水位的确定性模型,并用于分析和评价水工建筑物基础及岸坡的渗流性态。

20世纪80年代以来,模糊数学、灰色理论、神经网络、小波分析等各种方法和理论也纷纷被引入水工建筑物安全监测资料分析中来,并取得了一定成果。80年代,邓聚龙提出了灰色系统(Grey System,简称GS)理论;李珍照等于1991年最早将GS理论引入到水工建筑物安全监测资料分析领域;蓝悦明等应用灰色理论,提出了位移预报模型;杨杰、郭海庆等在一阶单变量灰色线性预测模型的基础上,引入了灰元作模型参数,建立了土石坝变形预测的灰色非线性模型,并对其适用性进行了探讨。同时,模糊聚类分析、似然推理和模糊评判等模糊数学方法也在水工建筑物安全监测数据的分析处理和模型预测方面得到了应用,如李珍照等提出了用模糊数学进行资料分析的思路,并阐述了水工建筑物观测数据模糊识别的方法和步骤。近些年来,随着人工神经网络研究热潮的再次到来,将其用于水工建筑物监测数据处理与分析方面的应用研究也逐步展开,尤其是模糊数学与神经网络方法的有机结合,为相关研究展现了广阔的前景。神经网络模型属于隐式模型,具备自组织、自适应能力,已有的研究成果表明,用神经网络模型对水工建筑物变形、渗流等进行拟合,其精度要优于传统的统计模型。陈继光等采用模糊近似推论后的隶属度作为BP网络的输出神经元,从而实现位移量的预报;赵斌、杨杰等分别对Hopfield网络和BP网络在水工建筑物观测资料处理中的应用进行了探讨;徐平通过对水工建筑物观测资料作吸引子分析,定量计算出建立相应的水工建筑物安全监控数学模型时,描述水工建筑物运行系统动态特性所需要的最小因子数。

近些年来,国内外学者提出了多种水工建筑物安全监测资料分析的新模型新方法,如张进平等于1991年提出了水工建筑物安全监测的位移分布数学模型;吴中如、顾冲时等通过引入空间三维坐标,提出了混凝土坝空间位移场的时空分布模型,将单测点模型拓宽至空间三维;尹辉等提出了一种实时引入新信息的等维新信息和等维灰数逆补组合的动

态预测方法;何金平、李珍照提出了重力坝位移二维分布模型,并把单测点确定性模型扩展为空间多测点确定性模型。此外,部分研究人员还提出了水工建筑物安全监控的位移分布模型、贝叶斯模型、数字滤波模型、优化组合模型、岭回归和主成分回归模型以及小波分析方法等。沈振中用基岩和水工建筑物的黏弹性模型,分析了三峡大坝和基岩施工期的变形,建立了一种特殊的施工期监控模型。此外,在土石坝研究方面,郦能惠、蔡飞、沈珠江等基于土石坝变形与孔隙水压力产生机理的分析,提出了较合理的统计分析方法。

1.5.2.3 安全监测资料与结构性态反分析

以水工建筑物安全监测资料正分析的成果作为依据,通过相应的理论分析,反求大坝等水工建筑物和地基的材料力学参数以及某些结构特性等,即为反分析。

1969年由太沙基提出的观测设计法(Observation Design Method)是反分析思想的最早应用,他用现场观测结果修正参数和设计。近年来,奥地利 L. V. Rabcewicz 教授提出的新奥法(New Austria Tunneling Method)在隧道工程中得到了广泛应用,其思想是在隧洞开挖过程中,通过对围岩及支护的观测来反馈施工和设计。

根据现场量测信息的不同,反分析方法可以分为应力反分析法、位移反分析法及应力(荷载)与位移的混合反分析法。由于位移信息较易获取,因此位移反分析法应用最为广泛。如果按计算方法划分,位移反分析法又可分为解析法和数值法。解析法的优势在于概念明确、计算速度快,但只适宜求解简单几何形状和边界条件下的线黏弹性与无支护洞室问题。数值法则主要用于解决复杂工程性态和非线性问题。因此,数值法对于复杂的岩土工程更具有普遍的适用性。就数值法的求解过程而言,它可以划分为逆解法、直接法、正反耦合法、图谱法、神经网络法和模糊法等。

对于大坝及其坝基的参数反演而言,具体的方法有两种,即常规分析法和确定性模型法。常规反演分析法的基本原理是:从安全监测资料的分析中,找出真实的水压分量 $\{\delta_H\}$,然后,假设初始参数(如 E_0 、 E_{s0}),用结构分析法推求水压分量 $\{\delta'_H\}$,最后根据变形与综合弹模成反比来反演参数;确定性模型分析法则首先是假设初始参数,由结构有限元计算水压、温度分量,建立水压分量与水头、温度分量与温度梯度场的关系式,然后建立确定性模型,进行参数估计,可得水压分量调整参数,并由调整参数进行综合弹模的反演。由于确定性模型对实测资料(如混凝土温度场等)要求较高,许多情况难以建立确定性模型。为此,可以采用混合模型对部分力学参数进行反演。

国内外对大坝和坝基参数的反演分析工作开展比较深入,尤其对混凝土坝的反分析研究已较为普遍,并取得了较多成果。Bonaldi、Fanalli 和 Giuseppetti 等提出了有明显物理概念的确切模型,并以此来反演坝体的弹性模量和温度线膨胀系数,在水工建筑物的反分析中起到了积极作用。陈久宇等利用离上游面不同距离的渗压计测值,并考虑上游水位的波动,来反演坝体混凝土的扩散系数,有一定的实用价值。吴中如、顾冲时等提出了利用安全监测资料,由确定性模型和统计模型,并结合有限元计算成果,反演坝体混凝土的平均弹性模量和温度线膨胀系数的方法。吴中如、刘眉县等提出了利用离下游不同深度的温度计测值,并考虑坝面黏滞层的影响,来反演混凝土导温系数的方法。国际上对土石坝的反分析研究相对较少,近年来,国内外较具代表性的是采用非线性弹性模型(邓肯模型)或双屈服面弹塑性模型(沈珠江模型)。此外,沈珠江、赵魁芝等还提出了比较简单

实用的三参数模型。

近 30 年来,对于位移的反分析方法研究发展很快,已从弹性问题的位移反分析发展到弹塑性和黏弹塑性问题的位移反分析。在弹性问题的位移反分析中,N. Shimizu 和 S. Sakurai 提出了边界元位移反分析方法;杨志法、吴凯华、樱井春铺、G. Gioda 等在隧洞、非圆形洞室的位移反馈分析方面提出了各自的位移反分析方法。在黏弹性参数反演方面,刘怀恒和杨林德等引入基于时间的等效弹性模量,然后反推流变参数,但这种算法只局限于简单的线弹性材料;沈家荫、林炳仕提出了由位移观测资料反演分析的边界元法。此外,国内外众多学者如薛琳、G. Gioda、沈振中等也在岩体黏弹性参数反分析方面提出了一些实用的计算方法。而在弹塑性问题的反分析研究方面,意大利学者 Gioda、Sakurai 和 Maier 等首先利用单纯形优化方法进行了弹塑性反分析,在此基础上,国内外学者进一步完善和发展了这种方法。在黏弹塑性的位移反分析方面,陈子荫通过对圆形洞室的 Laplace 变换,导出了广义开尔文模型的位移解析解,并利用直接搜索法求解非线性方程中的待定参数;王芝银等研究了西原流变模型的反分析问题,并提出了黏弹塑性增量位移反分析的复合形法,提高了优化效率;沈振中在单纯形法的基础上,通过动态约束搜索误差,提出了参数反分析的可变容差法,以加快迭代速度;胡维俊等基于优化理论,提出了拱坝位移反分析的多点拟合法,得到了合理的成果;近几年,吴中如、顾冲时、朱伯芳等提出了位移时空模型、模糊数学反演以及其他反分析方法。

从总体上来看,上述各种反分析方法均是利用确定性模型进行反演分析。然而,由于工程研究所面临的是一个非确定性过程,存在着大量的不确定信息,确定性模型在对各种不确定性因素影响的考虑方面存在不足,因而难以概括复杂多变的岩土工程力学特性。因此,进入 20 世纪 90 年代以来,运用随机系统论的方法进行工程反演分析,建立非确定性模型的研究已日益引起国内外学者的关注。

不确定性反分析是指应用概率论、数理统计、随机过程、模糊数学、灰色系统理论或分形几何等不确定性数学工具来分析量测信息的不确定性,反演模型的不确定性,并考虑参数的先验信息(即量化的专家经验,实验室的试验结果以及一切关于被反演参数的已知量化信息与有关的基本定律等)等,建立不同的目标函数,从而进行不确定性参数的反分析。目前,应用较多的是建立在随机理论基础上的随机反演分析方法,如极大似然(Maximum Likelihood)反分析、贝叶斯(Bayes)反分析、卡尔曼滤波(Kalman Filtering)反分析等。

1.5.2.4 反馈分析与安全监控指标的拟定

反馈分析是综合应用正、反分析的成果,通过相应的理论分析,从中寻找某些规律和信息,及时反馈到设计、施工和运行中去,以达到优化设计、施工和运行的目的,并补充和完善水工设计与施工规范。反馈分析一方面将成果反馈到原型结构中以实现反馈目的,另一方面要为将来的水工建筑物设计、施工反馈信息,从而最大限度地从观测资料中提取信息。反馈分析的内涵十分丰富,是水工建筑物安全监控中的一个新的综合性课题。

为了监控水工建筑物及其他水工建筑物的安全运行,目前坝工界对反馈分析的研究主要包括以下几方面:①拟定水工建筑物等水工建筑物各个观测量的安全监控指标及其相应的水压、温度等控制荷载;②根据安全监测资料,应用可靠度理论反馈水工建筑物的

实际安全度,以复核水工建筑物的稳定、强度和抗裂安全度;③分析裂缝、再生缝的物理成因、机理及其对建筑物结构性态的影响,以反馈控制裂缝发生和发展的临界荷载。

安全监控指标是评价和监测水工建筑物安全的重要指标,对于馈控水工建筑物等的安全运行相当重要。拟定安全监控指标的主要任务是根据水工建筑物和坝基等建筑物已经抵御经历荷载的能力,来评估和预测抵御可能发生荷载的能力,从而确定该荷载组合下,监控效应量的警戒值和极值。由于有些水工建筑物可能还没有遭遇最不利荷载,同时水工建筑物和坝基抵御荷载的能力在逐渐变化,因此安全监控指标的拟定是一个相当复杂的问题,也是国内外坝工界研究的重要课题。通常,对于水工建筑物的应力和扬压力,一般以设计值作为监控指标,因此目前研究的重点和难点是对水工建筑物变形监控指标的确定。

国外对变形监控指标的研究报道较少。而在国内,吴中如、顾冲时、沈振中等在利用安全监测资料反馈水工建筑物的安全监控指标方面进行了系统的研究,提出了拟定变形监测指标的原理和方法,并成功地应用于佛子岭连拱坝等实际工程的监控。目前,对坝体和坝基变形监控指标的拟定方法主要有置信区间法、典型监控效应量的小概率法、极限状态法、仿真计算法和力学计算法等。

1.5.2.5 水工建筑物安全性态综合评判

安全监测资料的正反分析和反馈分析一般仅局限于对单项物理量的分析,存在一定的局限性。因此,应针对目前各个观测量的单项分析的缺陷,在正反分析和反馈分析基础上,对大坝等水工建筑物的安全性态进行综合评判与决策。综合评判与决策是指对各种资料进行不同层次的分析,其关键是找出荷载集与效应集之间的非确定性(定性)和确定性(定量)关系以及效应集与控制集之间的关系,然后通过一定的理论和方法或凭借专家的丰富经验进行综合分析和推理,以评判大坝等水工建筑物的工作性态,并提出防范决策和处理方案。

在水工建筑物安全综合评判与决策的研究和应用方面,吴中如、顾冲时、沈振中等提出并开发了建立在一机四库(推理机、数据库、知识库、方法库和图库)基础上的水工建筑物安全综合评价专家系统,应用模式识别和模糊评判,通过综合推理机,对四库进行综合调用,将定量分析和定性分析结合起来,实现对水工建筑物安全性态的在线实时分析和综合评价,该系统在龙羊峡、二滩、水口等水工建筑物工程中得到实际应用,并取得了水工建筑物安全分析、评价和监控的实效。此外,原南京国电自动化研究所研制开发了 DAMS 水工建筑物自动监测系统和 DSIMS 水工建筑物安全管理信息系统;1994 年,水利部南京水利水文自动化研究所开发了 DG 水工建筑物自动监测系统。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,在三门峡、葛洲坝等工程中得到了应用。

近些年来,国内外对水工建筑物安全评价方法的研究有了较大的发展。在国外,美国、加拿大等已经用 SEED 法及风险值的概念,对水工建筑物失事的总概率进行计算,借此评价水工建筑物的安全状况。如:L. Duckstein 和 YEN. B. C 等对随机荷载与抗力作用下水工建筑物系统的可靠性估算方法进行了研究,对均值一次二阶矩法和改进的一次法进行了重点探讨,并将它们与失事树(或事件树)联合应用,为定量考虑影响整个系统可