

水工建筑物 安全监控理论 及其应用

吴中如 等著

SHUIGONG
JIANZHUWU
ANQUANJIANKONG
LILUN
JIQIYINGYONG

河海大学出版社

责任编辑 何定达 吴家虎
责任校对 陈吉平

SHUIGONGJIANZHUWU
ANQUANJIANKONG
LILUN
JIQIYINGYONG

ISBN 7-5630-0289-8/TV · 36

定价 10.00 元

水工建筑物安全监控理论及其应用

吴中如 沈长松 阮焕祥 著

河海大学出版社

内容概要

本书系统地介绍水工建筑物安全监控理论及其应用，其中重点论述大坝原型观测资料分析的方法和数学模型，并列举相应的应用实例。全书共分十章，主要包括原型观测资料的正分析、反演分析、反馈分析及其应用以及综合评判和决策等内容。

本书可作为从事水利水电工程管理、设计、施工和科研工作的技术人员的参考书，也可供“水利水电工程建筑”专业和其它相近专业的学生与研究生的教材或参考书。

责任编辑：何定达 吴家虎
责任校对：陈吉平
编 务：张 静
封面设计：赵 清

水工建筑物安全监控理论及其应用

吴中如等 著

*

河海大学出版社出版

(南京西康路1号)

河海大学出版社发行

河海大学印刷厂印刷

*

787×1092 16开本 印张24 字数600千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

印数 1—3000册

ISBN 7-5630-0289-8/TV·36 定价10.00元

序

吴中如同志主撰的《水工建筑物安全监控理论及其应用》一书，即将由河海大学出版社问世。我有机会事前获读全稿，实感荣幸。著者嘱我写篇序言，我也欣然应命。

人类修建大型水工建筑物已有很长历史，但以往的主要努力，都放在规划设计和施工建设上，对建成后的运行工况就不够注意——除非出现了意外。其实，规划设计——施工建设——运行监测是一个完整的环节，缺少了最后一环，不仅影响建筑物的安全运行，而且形不成反馈通道，构不成一个‘闭路系统’，这是非常可惜的。所幸，近年来这一情况已有所变化。究其原因，一方面是水工建筑物的规模日趋巨大，而且某些水工建筑物发生破坏，导致了极大灾难，促使人们加强了运行监测工作；另一方面则由于设计分析理论和计算技术的迅速发展，要求有更合理的数学物理模型和更精确的参数，这些离开原位测试和反演反馈是难以有较大进展的。我国对这方面也已赋予更大的重视：制订法规条例，建立专职机构，有关单位大力开展了相应的科研工作，都取得了很大的成绩。

可是，要真正完成这一‘闭路循环’需要解决很多问题和克服大量障碍。首先，当然要发展有效和完善的监测设备和手段。其次要有可靠的理论和先进的方法对大量观测数据进行归纳分析，并建立起某种数学模型，为下一步工作提供基础。第三，还要根据对资料的分析成果，进行反演反馈，和作出评价、预报以至综合决策。很显然，在这个广阔的领域中，存在大量的难题有待探讨、研究和解决。

建国以来，我们已出版了很多有关水工建筑物的规划设计、施工安装以至具体观测的书籍，但还少见到论述原型观测资料分析理论及其应用的专著。吴中如同志的这本著作，正是按照上面所述的层次，全面系统地论述了观测资料的各种分析方法和相应模型的建立方法，并进而阐述了反演分析、反馈分析以及评价和决策问题。我认为这本书正好填补了空白，正是广大读者包括我期待着的一本著作，这是使我感到十分欣慰的原因。

我认为本书还有以下一些特点，一是内容的系统和全面。例如在资料分析中，不仅有经验性模型，还叙述了确定性模型（以及混合模型）。在经验性模型中，不仅有常用的统计模型，还有基于时间序列的预报模型和基于模糊数学理论的监测模型，可以说得上完整全面。二是内容新颖，将国内外一些最新发展都作了介绍，例如第五章中的灰色系统理论，第六章的模糊数学及预测模型，第八章中有关徐变、热学参数、断裂韧度、等价摩擦系数的反演，第九章中大坝裂缝成因机理和馈控、接缝的作用探索等，都是前沿领域中的新成就（包括著者们的努力）。三是具有很强的实用性，对主要方法都引举工程实例作示范，并不是纯理论说教。因此，本书不仅具有高的学术水平，更具有重要的实际意义。

当然，在这样一个崭新的发展领域中，涉及的又是如此复杂的课题，本书对各章节的叙述不可能做到都如人意的程度，有些理论和方法的实用性，能否得到人们的认可和推广，还有待事实检验，但是吴中如同志和他的同事们无疑已迈开了重要的一步。我深信本书的出版问世必将对这个科技课题起良好的推动作用，我也深信著者们一定乐意听取广大读者所提出的一切意见和问题，而把这一研究推展到新的高度。

是为序。

潘家铮

1989年12月于能源部

前 言

建国以来，我国修建了众多的拦河大坝，其中相当一部分大坝已运行二十年以上，一些大坝逐渐老化和产生病变，还有一些大坝的安全度较低或者设计洪水偏小等。因此，大坝等水工建筑物的安全已引起各级政府和人民群众的普遍关注，相继成立了“水电站大坝安全监察中心”、“水利大坝安全监测中心”，分别代表能源部和水利部具体管理大坝的安全。由于党和政府的重视，我国的大坝安全监控研究工作在近几年来发展较快，理论和应用研究也十分活跃，涌现出大批研究成果。为了系统地总结这方面的研究成果，使之更广泛地应用于大坝安全监控和人员培训，作者在1985年撰写的“混凝土坝观测量的数学模型及其应用”这本教材的基础上，吸收了国内外在这方面的最新研究成果（包括作者在近几年来结合实际工程和科研项目所取得的成果），撰写成本书。

本书考虑了不同层次的科技人员和学生的水平和要求，既介绍常用的分析方法和数学模型，又引进一些新的分析方法和理论；同时，在介绍各种方法和理论时，用实例加以说明，使读者在理性认识和感性认识上都能受益。

全书共分十章，第一、二、七、八、九、十章由吴中如执笔，第三章由吴中如、沈长松执笔，第四章由沈长松执笔，第五章由吴中如、阮焕祥执笔，第六章由阮焕祥执笔，顾冲时等同志也参加部分编写，全书由吴中如同志统校。第二至第七章主要介绍统计学方法和统计模型，时间序列分析法、灰色系统理论和模糊数学及其预测模型，有限元法和确定性模型与混合模型。第八、九章介绍原型观测资料的反演分析法、反馈分析法及其在运行、设计和施工中的应用。最后介绍对大坝运行工况进行综合评判和决策的综合分析法。

中国科学院学部委员、能源部总工程师潘家铮教授在百忙中为本书撰写序言，作者十分感谢。

在编辑出版方面又承河海大学出版社何定达副教授以及《水资源保护》杂志吴家虎副编审等的详细审阅，并提出了宝贵的修改意见，在此，谨表深切的谢意。

限于作者的水平，书中难免有不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作者

1989年12月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 大坝安全及其监测概况	(1)
一、 大坝安全概况	(1)
二、 原型监测工作概况	(2)
第二节 《水工建筑物安全监控理论及其应用》概述	(5)
一、 原型观测资料正分析	(6)
二、 反演分析法及其应用	(6)
三、 反馈分析法及其应用	(7)
四、 综合评判和决策	(8)
第二章 统计学方法	(9)
第一节 概述	(9)
第二节 多元回归分析法	(9)
一、 回归方程	(9)
二、 法方程式	(10)
三、 回归方程的有效性和精度	(11)
四、 预报因子的重要性考察	(13)
五、 相关性分析	(15)
第三节 逐步回归分析法	(17)
一、 基本原理	(17)
二、 逐步回归分析的基本步骤	(18)
三、 逐步回归计算中的几个问题	(20)
四、 逐步回归计算步骤	(21)
第四节 差值回归法	(25)
一、 差值回归法的使用条件	(25)
二、 差值回归法的基本原理	(25)
三、 差值回归法的误差分析	(26)
四、 差值回归新方法	(27)
第五节 加权回归法	(30)
一、 回归方程及其法方程	(30)
二、 权系数	(30)
第六节 正交多项式回归法	(31)
一、 多元线性回归的病态问题	(31)
二、 正交法	(32)

三、 镜像映射法	(32)
四、 正交多项式回归的应用	(34)
第三章 变形和应力观测的统计模型	(36)
第一节 混凝土坝变形观测的统计模型	(36)
一、 引言	(36)
二、 选择统计模型各因子的基本理论和公式	(36)
三、 典型大坝的变形统计模型	(46)
四、 小结	(49)
第二节 混凝土坝时效位移的较佳数学模型	(50)
一、 引言	(50)
二、 时效位移数学模型建立的基本原理、方法和公式	(50)
三、 算例	(55)
四、 结论	(58)
第三节 土石坝变形观测的统计模型	(59)
一、 变形统计模型因子选择的原理	(59)
二、 应用实例	(63)
第四节 地下洞室周壁变形的统计模型	(64)
一、 无支护的洞室(简称毛挖洞室)在施工期周壁变形的统计模型	(64)
二、 洞室支护的周壁变形的统计模型	(71)
三、 运行期有压隧洞洞壁变形的统计模型	(73)
第五节 混凝土坝裂缝开合度的统计模型	(76)
一、 引言	(76)
二、 裂缝工作性态的定性分析	(76)
三、 再生裂缝开合度的统计模型及其分析	(79)
四、 新老混凝土接触缝的工作性态分析	(83)
第六节 应力统计模型	(93)
一、 概述	(93)
二、 混凝土体内的应力状态	(94)
三、 混凝土的徐变特性及持续应力作用下的应力应变关系	(103)
四、 混凝土自由体积变形和无应力计资料的计算	(105)
五、 混凝土实际应力计算方法	(107)
六、 应力应变观测资料的统计分析	(112)
第四章 渗流观测的统计模型	(121)
第一节 概述	(121)
第二节 混凝土坝坝身和坝基渗流观测资料分析	(121)
一、 引言	(121)
二、 坝身孔隙水压力分析	(122)

三、	混凝土坝坝基扬压力统计分析·····	(123)
第三节	土石坝渗流观测资料分析·····	(130)
一、	引言·····	(130)
二、	测压管水位观测资料分析·····	(131)
三、	渗流量分析·····	(145)
四、	潜流量估计·····	(149)
第四节	绕坝渗流观测资料分析·····	(150)
一、	引言·····	(150)
二、	绕坝渗流测压孔水位的统计模型及其分析·····	(151)
第五章	时间序列分析法和灰色系统理论及其预测模型·····	(158)
第一节	时间序列分析法及其应用·····	(158)
一、	时间序列·····	(158)
二、	平稳时间序列分析·····	(158)
三、	非平稳时间序列分析·····	(164)
四、	时间序列分析中的几个问题·····	(168)
五、	时间序列分析框图·····	(170)
六、	应用实例·····	(171)
第二节	灰色系统理论及其预测模型·····	(173)
一、	灰色系统基本概念·····	(173)
二、	建立 GM 预测模型的基本原理·····	(174)
三、	某连拱坝的应力 GM 预测模型·····	(177)
四、	灰色动态模型的基本原理及应用·····	(179)
五、	灰色系统理论在结构稳定性分析中的应用·····	(185)
第六章	模糊数学及其预测模型·····	(188)
第一节	引言·····	(188)
一、	精确数学与模糊数学·····	(188)
二、	计算机科学与模糊数学·····	(188)
三、	大系统与不相容原理·····	(188)
四、	模糊数学的应用·····	(189)
第二节	模糊数学的基本原理·····	(189)
一、	隶属函数的产生和确定·····	(189)
二、	模糊子集论·····	(192)
三、	模糊关系·····	(194)
第三节	模糊预测模型及模糊可靠度分析·····	(197)
一、	模糊聚类分析法及其预测模型·····	(197)
二、	模糊综合评判及对大坝安全度的评估·····	(206)

三、	似然推理法及其预测模型·····	(215)
四、	大坝原型结构的模糊可靠度·····	(226)
第七章	确定性模型和混合模型·····	(238)
第一节	概述·····	(238)
第二节	有限元计算模式和计算方法·····	(238)
一、	有限元计算模式·····	(238)
二、	有限单元法·····	(239)
第三节	混凝土坝的位移确定性模型和混合模型·····	(252)
一、	各分量的计算公式·····	(252)
二、	参数估计·····	(261)
三、	误差分析·····	(262)
四、	预报方程·····	(262)
五、	变形确定性模型的应用实例·····	(262)
六、	变形混合模型的应用实例·····	(264)
七、	结语·····	(265)
第四节	混凝土坝的应力确定性模型和混合模型·····	(265)
一、	基本原理·····	(266)
二、	应用实例·····	(267)
第五节	土石坝渗压的确定性模型·····	(268)
一、	渗压确定性模型的表达式·····	(268)
二、	分析渗流的有限元法及其程序·····	(269)
三、	应用实例·····	(274)
第八章	原型观测资料的反演分析法及其应用·····	(278)
第一节	混凝土坝和基岩的弹模或变模 (E_c 、 E_r) 和线膨胀系数 (α_c) 反演·····	(278)
一、	基本原理和方法·····	(278)
二、	反演 E_c 、 E_r 和 α_c 时应注意的问题·····	(280)
三、	应用实例·····	(282)
第二节	土石坝材料的物理力学参数和徐变度反演·····	(285)
一、	物理力学参数反演·····	(285)
二、	徐变度的反演·····	(288)
第三节	坝体混凝土的导温系数和渗流扩散系数的反演·····	(291)
一、	坝体混凝土的导温系数反演·····	(293)
二、	坝体混凝土的渗流扩散系数反演·····	(294)
第四节	坝体混凝土的断裂韧度和纵缝的等价摩擦系数·····	(297)
一、	坝体混凝土的断裂韧度反演·····	(297)
二、	纵缝的等价摩擦系数反演·····	(302)
第五节	土石坝防渗体的渗透系数反演·····	(305)

一、	基本原理	305
二、	应用实例	307
第六节	由温度实测资料反演拱坝温度荷载的计算	308
一、	引言	308
二、	边界温度场计算	309
三、	坝体混凝土温度的反演	311
第七节	拱坝实际拱梁荷载的反演	315
一、	反演方法	316
二、	注意问题	316
第九章	反馈分析法及其应用	317
第一节	概述	317
第二节	大坝裂缝的成因和机理分析及其馈控设计和运行荷载	317
一、	引言	317
二、	横缝的结构作用	318
三、	混凝土坝纵缝的结构作用	320
四、	混凝土坝再生缝的成因和机理分析及其馈控设计和运行荷载	321
第三节	利用原型观测资料反馈混凝土坝的实际安全度	328
一、	前言	328
二、	估计大坝实际安全度的方法及其原理	329
三、	应用实例	334
四、	小结	339
第四节	拟定大坝安全监控指标的方法	339
一、	引言	339
二、	估计安全监控指标的方法及其原理	340
三、	某重力坝某坝段的变形监测指标估计	343
四、	小结	347
第十章	综合评判和决策	349
第一节	概述	349
第二节	决策基础知识	349
一、	引言	349
二、	统计决策中的基本概念	351
第三节	综合评判和决策	361
一、	序言	361
二、	综合评判和决策(或人工专家分析系统)的程序和实施要点	362
三、	应用实例	366
四、	评价	368

第一章 绪 论

第一节 大坝安全及其监测概况

一、大坝安全概况

建国以来,共修建 8.6 万座堤坝,其中 15 米以上的大坝有 1.8 万座,30 米以上大坝有近 2700 座,装机约三千多万千瓦,万亩以上灌区有七千多处,灌溉面积 7.2 亿亩。这些工程在国民经济中产生了巨大的社会效益,据不完全统计,到 1988 年底,已直接收益约八千多亿元。然而,由于多种原因,如水文、地质、施工质量以及老化等原因,部分大坝存在安全问题,影响着这些工程效益的发挥,甚至威胁下游人民的生命财产安全,这在国内外是有教训的,如法国的马尔巴塞拱坝,美国的提堂坝以及我国的板桥、石漫滩等大坝失事都引起了下游的严重灾难。

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,如近几年来建成的 150m 以上高坝有龙羊峡、乌江渡、东江、白山和刘家峡等大坝,拟建或正在修建的有二滩、岩滩、李家峡和拉西瓦等高坝。因此,大坝安全问题已引起政府和人民的普遍关注。

国际大坝会议“关于水坝和水库恶化”小组委员会记录了 1100 座大坝失事实例,并进行了统计分析。1950 年至 1975 年大坝失事的概率和成因分析见表 1-1-1。

表 1-1-1 大坝失事的主要原因

原因	坝型 时 间	土 石 坝			混 凝 土 坝		
		1950~1959	1960~1969	1970~1975	1950~1959	1960~1969	1970~1975
建 成 坝 数		1421	2708	/	858	868	/
失 事 数		108	195	72	79	50	11
漫 顶		42	49	16	20	18	6
地 基 和 结 构 问 题		28	59	27	14	18	4
地 下 渗 漏		19	45	18	10	8	/
材 料 问 题		12	16	3	21	4	/
坍 坡		2	5	1	2	1	/
其 它		5	21	3	12	11	1

从上表看出, 1950 年以来发生的大坝失事, 按成因和频率大致分为:

(a) 30%左右是由于遭遇特大洪水, 设计洪水偏低和泄洪设备失灵, 引起洪水漫坝而失事。

(b) 27%左右是由于地质条件复杂, 基础失稳和意外的结构事故(如假设的荷载过分乐观)。

(c) 20%是地下渗漏引起扬压力过高, 渗漏量增大, 渗透坡降过大引起坝基渗透变形等。

(d) 11%是由于大坝老化, 建筑材料变质(如开裂、侵蚀和风化)以及施工质量等原因, 使材料强度降低, 而引起的失事。

(e) 12%是不同的特有原因所致。

应特别指出: 在失事的 515 座大坝中土坝占的比例较大, 而且这些坝缺乏观测设施或设施不完善。

从上面大坝失事的成因和频率分析, 可以提高对大坝安全认识的透明度。同时, 使人们逐渐认识安全监测对保证大坝等水工建筑物安全运行的重要性。

二、原型监测工作概况

1959 年法国马尔巴塞坝和 1963 年意大利的瓦依昂特坝的失事, 在世界上引起强烈反响, 促使人们认识大坝原型监测在保证坝工安全上的重要作用。通过几十年的实践, 一致认为对大坝等水工建筑物及其基础的监测可以达到三个目的: 其一是监视建筑物在初次蓄水期间以及随后长期运行的安全; 第二是在施工过程中不断反馈, 提高设计和施工水平; 第三是通过实际工作性态的反分析, 检验设计和施工, 为提高和修正水工设计理论提供科学依据。总之, 原型监测的主要目的是证实大坝等水工建筑物是否安全的问题。为加强监测工作, 世界各国在管理体制、规章制度、仪器设备、资料整理分析以及自动化监测等方面都有较快发展, 现就有关问题分述如下:

(一) 监测机构及其法规

50 年代以前, 英、美、法等国家先后制定《水法》、《水库安全法》等法令。自法国马尔巴塞坝失事后, 各国根据各自的具体情况, 分别拟定和修改有关条例和法规。1972 年国际大坝会议综合意大利、日本、瑞士等国的准则, 发表了“关于混凝土坝观测的一般意见”, 明确规定了观测工作的范围, 观测类型, 根据坝型和目的, 安装仪器设备以及安装技术等方面, 可以视为是指导开展大坝原型工作的国际性规程。

法国在 1966 年宣布设立《大坝安全管理常务技术委员会》, 并于 1970 年对《有关大坝安全性的检查工作法规》(1927 年制定) 进行补充修订, 正式成为法律性文件, 同年通过了《一些水电站下游居民保护法》。这些文件强调了加强大坝第一次蓄水的安全监测和保护下游居民的安全。

美国大坝委员会于 1972 年公布《大坝与水库安全管理典型法令》, 美国国会又于 1972 年通过《国家大坝安全法令》。在 1976 年提堂坝突然失事后, 美国总统于 1977 年 4 月授权联邦科学、工程和技术协作委员会对已建坝进行大检查, 以总结建坝经验, 为拟定大坝安全管理

准则作准备。同年 12 月陆军工程师团对 9000 多座坝进行安全大检查；至 1980 年 2 月，工程师团提出 4960 多座坝的检查结果，其中有 29% 是不安全的。由此可见，美国对大坝安全法令、管理和检查是十分重视的。

苏联成立电站水工建筑物安全监控委员会，统一管理全国大坝的安全后，1973 年颁布了《电站水工建筑物安全运行监视条例》，1974 年提出观测工作中的标准化问题。1976 年由内务部批准《水电站水工建筑物工段的标准条例》及《水电站水工建筑物观测小组工作条件》，这些文件对水工和观测人员的组织、职责、编制等做了详细规定。1977 年对《电站和电网运行技术规范》做了第 13 次修订。以上看出，苏联十分重视水工建筑物的安全监控工作，将水工建筑物安全监测工作视为电力安全生产的前提。

日本制定了《河川法》、《电气事业法》、《河川管理设施等构造法令》，并于 1972 年成立《大坝结构管理分会》，1973 年通过《大坝结构管理标准》，这些法规对大坝建设计划的审批、设计、施工和竣工后管理等准则作了明确规定。

其它国家（如意大利、葡萄牙和捷克等）也先后正式发布了大坝等水工建筑物管理的法规或法令，成立专门的管理机构，加强水工建筑物的维护和管理。

我国对大坝安全问题也十分重视，60 年代水电部有关主管部门就着手编制水工建筑物观测工作暂行办法草案以及有关技术规范初稿，并于 1964 年出版《水工建筑物观测技术手册》，1980 年电力部颁发《电力工业技术管理法规》以及 1981 年水利部颁发《水库工程管理通则》，这些文件对水电厂（或水库）的观测设施、观测内容和初次蓄水等方面做了一些规定，初步使观测工作有章可循。为了加强水电站大坝的安全管理，原水利电力部于 1985 年底建立“水电站大坝安全监察中心”，各网局和省局也相继成立了地区中心和分中心，着手制定大坝安全管理的法规。原水电部于 1987 年 9 月 25 日颁发《水电站大坝安全管理暂行办法》，能源部又于 1988 年 8 月 29 日颁发《水电站大坝安全检查施行细则》，使全国水电厂的水工建筑物安全管理工作走上制度化。为了加强水利大坝的安全管理，1988 年 5 月水利部又建立了“水利大坝安全监测中心”。

（二）监测技术概况

1. 监测项目和仪器

根据大坝的监测目的，观测的项目主要有：变形、应力应变、接缝开度、温度、水位、扬压力（或测压孔水位）、渗流量以及水质等等。其中，变形和渗流观测普遍视为最重要的观测项目，这不仅因为这些观测直观可靠，而且基本上反映在各种荷载作用下的大坝工作性态。内部观测也比较重要，其观测成果可以用来反馈和检验设计和施工等。

变形观测常用控制网、视准线、引张线、激光准直和垂线等方式观测。对混凝土坝，采用垂线观测坝体位移尤为普遍，所使用的垂线坐标仪型式有多种，其中主要有法国的泰勒马克公司、意大利的佩斯等公司制造的光电跟踪式、变电容式、变电感式、光电编码式以及电感平衡式等非接触式垂线坐标仪。德国的麦哈克、蔡司工厂和瑞士的威尔特工厂生产的多种类型的激光光学仪器，如自动激光准直仪、激光测距仪等，可使量测大坝位移的精度大大提高。我国南京自动化研究所、水利电力仪表厂和测绘仪器厂等单位，先后制成引张线观测仪、垂直坐标仪、三向变位仪和 SD-65 型视准仪等。东北勘测设计院、浙江工学院和丰满水电厂等单位研制的真空管道激光准直首次成功地应用于丰满大坝。河海大学研制的 CCD 光学坐标

观测仪不仅可以观测垂线的三向位移，而且可以在比较恶劣的环境下工作。

70年代开始，国内外加强对基岩和滑坡的观测，其中瑞士的胡根堡公司制造的变位仪可以监测50m范围内岩体的变位，法国泰勒马克公司制造的深层基岩多点变位计和深层基岩倾斜仪以及日本制造的标准型管内倾斜仪、多点岩盘变位和水平变位计等，在观测基岩和滑坡变形方面也有较高的精度。我国南京自动化研究所与水利电力仪表厂制造的倾斜仪，也已用于基岩变形的监测。

在内部观测仪器方面，日本使用卡尔逊振动弦式以及电阻应变片式等应变计，然后用数字测定装置(UCAM-8C)直读应变数，并配微机进行观测数据的处理，绘制图表。我国有关单位制造的内部观测仪器基本上与上述型式类似。测缝计通常采用三向或二向测缝计。

扬压力或测压孔水位通常采用压力表、电测水位器、示数水位器、压气U型管、遥测水位器和测深钟等仪表。渗流量观测，日本等国用自记漏水量测定装置；我国通常采用量水堰观测。

随着科学技术的发展，大坝等水工建筑物的观测设备的性能将更加可靠，精度更高。

2. 自动化监测的概述

世界各国根据本国的国情，采用不同程度的自动化监测方案，大致可分为两种类型：

(1) 实现大坝等水工建筑物的遥控和自动化监测方案，这种类型以意大利为代表。意大利国家电力局和贝格莫模型和结构试验研究所合作开发了自动采集观测数据，由微机处理、储存以及不同干预方法的快速分析等功能的自动化系统。该系统还可以与离线处理分析连接，即在全国八个地区中设立二级管理中心，统一集中到米兰研究中心，该中心配置较大规模的计算机系统，建立全国性的计算机网络，各地区的观测数据，通过网络通讯、载波电话或记录磁带定期送到米兰中心进行处理分析。

实现局部自动化监测方案，以西班牙为代表，主要对内部观测仪器设备(应变计、温度计、测缝计和压力计等)进行自动化采集数据和计算机处理；其它仪器采用人工测读，然后人工输入计算机处理。或以法国、葡萄牙和美国等国家为代表的采用人工测读数据，由计算机进行观测数据的自动化处理的监测方案。

我国正在逐步开展自动化监测，但是总体上开展得还不够，今后要加强这方面的开发研究工作。

3. 原型观测资料分析的概述

早在1955年意大利的法那林(Fanelli)和葡萄牙的罗卡(Rocha)等，应用统计回归方法定量分析了大坝的变形观测资料。在此基础上法那林等又于1977年提出混凝土坝变形的确定性模型和混合模型，即将理论计算值(运用有限元计算)与实测数据有机地结合起来，这类模型对监控大坝安全比较适用。法国在资料分析方面要求简便、迅速，他们采用了MDV方法监测大坝，即在测值序列中去掉水压和温度分量后的剩余部分(即时效和残差，亦称“已核正过”的值)，并分析其规律，判断大坝的运行工况。在常规分析资料的基础上，苏联、日本、法国等国家也开展不同内容的反分析，其主要内容为反演坝体材料的物理力学参数以及施工期的反馈分析。

我国的资料分析工作大致分两个阶段，第一阶段在1974年以前，以定性分析为主。在1974年以后，在河海大学陈久宇教授的开创下，应用统计回归法分析原型观测资料，并将分析成果加以物理成因的解释，使其逐渐用于监测大坝的安全运行和评价大坝的工况。在此基

基础上，全国逐渐开展了资料分析工作，并向纵深方向发展，如进行原型观测资料的反演分析和反馈分析，并将成果逐步应用于设计、施工和运行。

第二节 《水工建筑物安全监控理论及其应用》概述

水工建筑物安全监控理论及其应用的内涵广泛，这里主要介绍大坝等水工建筑物的原型观测资料的分析方法、理论及其在设计、施工和运行中的应用。根据笔者多年来的研究，并参考国内外这方面的最新研究成果，试图较全面系统地介绍这一领域中的分析理论及其应用，并渴望将这些成果及早地推广应用到实际工程中，以便使这些观测设备测到的资料尽快应用于生产实际。这也是笔者撰写本书的目的。

本书撰写的内容，可由框图 1-2-1 概括。

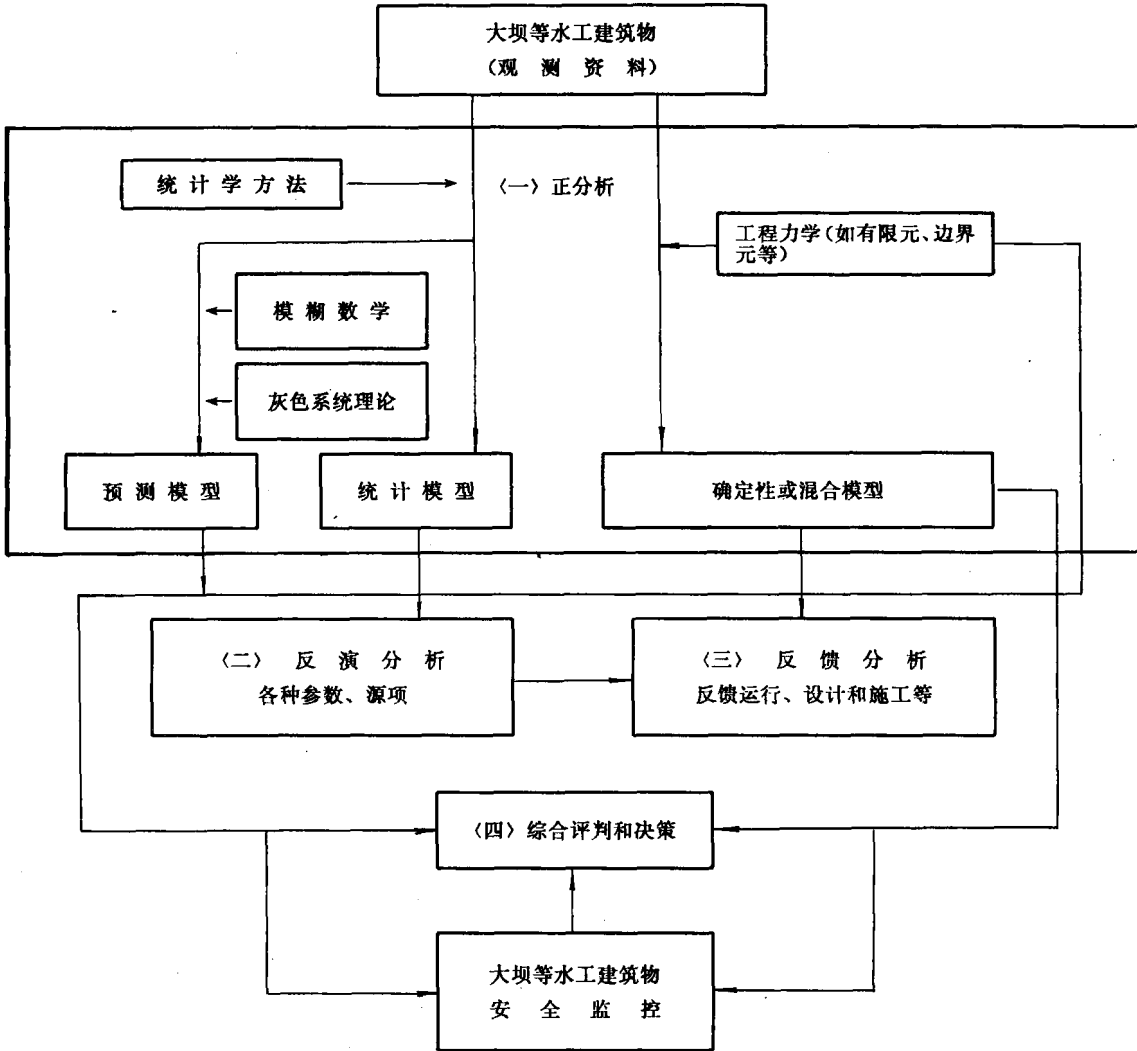


图 1-2-1 《水工建筑物安全监控理论及其应用》框图

从框图看出：本书主要介绍四大部分：即观测资料的正分析、反演分析、反馈分析以及

对大坝安全进行综合评判和决策。为了使读者在学习本书各章节前，有一个缩影，这里首先作一概要的介绍。

一、原型观测资料正分析

正分析的主要任务是由实测资料建立数学监控模型（如统计模型、确定性模型、混合模型，以及模糊数学和灰色系统理论建立的预测模型等）。应用这些模型监控大坝等水工建筑物的今后运行；同时对模型中的各个分量（特别是时效分量）进行物理解释，借以分析大坝等水工建筑物的工作性态。根据建立模型方法不同，可以归纳为：用统计学方法建立统计模型；应用时间序列法和灰色系统理论建立预测模型；用模糊数学建立预测模型；用有限元法分析计算，并与实测值拟合，建立确定性模型或混合模型。由于这一部分内容较多，故又分为《统计学方法》、《变形和应力观测量的统计模型》、《渗流观测量的统计模型》、《时间序列分析法和灰色系统理论及其预测模型》、《模糊数学及其预测模型》、《确定性模型和混合模型》等第六章介绍。

《统计学方法》这一章简单概要地介绍逐步回归分析法，加权回归、正交多项式回归以及差值回归法等方法。《变形和应力观测量的统计模型》和《渗流观测量的统计模型》这两章重点介绍各种坝型（包括混凝土坝和土石坝）和地下工程的变形、渗流以及混凝土坝的应力统计模型的因子选择，并介绍它们的应用实例；同时还对变形的时效分量作了专门研究。《时间序列分析法和灰色系统理论及其预测模型》在介绍时间序列法和灰色系统理论的基础上，应用这些原理建立了某坝的变形和应力的预测模型。《模糊数学及其预测模型》这一章首先介绍模糊数学中常用的逐步模糊聚类分析法、似然推理法以及模糊可靠度分析等方法，然后应用这些方法分析某坝的变形和扬压力的观测资料，建立相应的预测模型，并对某坝的模糊可靠度作了分析。《确定性模型和混合模型》这一章介绍建立这种模型的基本原理，其中侧重介绍用常规有限元法、分载有限元法和边界元法等方法计算荷载分量（即水压和温度分量），以及该值与实测值拟合的原理，并用这些方法和原理建立混凝土坝的变形、应力以及土石坝的渗压确定性模型和混合模型。

二、反演分析法及其应用

通过原型观测资料的正分析，建立各种数学监控模型，用以监测和评价大坝运行工况。如果仿效系统识别理论，将正分析的成果作为依据，通过相应的理论分析，借以反求大坝等水工建筑物和地基的材料参数以及某些结构特性（简称源项）等，则称之为反演分析法。

本书有五节介绍混凝土坝、土石坝以及地基材料的参数反演分析的基本原理及其应用实例，其内容包括混凝土坝和基岩的弹性模量或变形模量（ E_c ， E_r ）和线膨胀系数（ α_c ），土石坝材料的物理力学参数（邓肯—张模型的八个参数）和徐变度，坝体混凝土的导温系数和渗流扩散系数、断裂韧度以及纵缝的等价摩擦系数，土石坝防渗体的渗透系数等参数。这些参数在进一步研究水工建筑物的结构性态和反馈控制运行等方面都要用的参数。有两节介绍源项反演分析，主要内容有：由温度实测资料反演拱坝的温度荷载，以及利用实测变形资料反演拱坝的实际拱梁荷载分配等。这些成果将为设计、施工提供科学依据。