

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

水工建筑物安全监控理论及其应用

*Safety Monitoring Theory & Its
Application of Hydraulic Structures*

吴中如 编著



高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

水工建筑物安全监控理论及其应用

Safety Monitoring Theory & Its
Application of Hydraulic Structures

吴中如 编著

高等教育出版社

内容提要

本书为教育部研究生工作办公室推荐的研究生教学用书。书中系统介绍了水工建筑物安全监控理论及其应用,其中重点论述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,主要包括正分析、反演分析、反馈分析以及综合评价专家系统及其应用等内容。其中第二章至第七章介绍原型观测资料的正分析,主要包括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、确定性模型和混合模型等;第八章介绍原型观测资料的反演分析法,论述了混凝土坝、土石坝及其坝基材料的参数以及混凝土坝的温度荷载等反演分析的原理和方法;第九章介绍原型观测资料的反馈分析法,主要包括坝体裂缝的成因与机理分析及其反馈运行水位,反馈混凝土坝的实际安全度以及拟定大坝安全监控指标等方法,第十章介绍综合评价专家系统,包括专家系统的框架,以及龙羊峡大坝安全综合评价专家系统。

本书可作为水工结构、水利水电工程、工程力学、安全工程等专业、信息工程和其他相近专业的研究生教材。也可供从事水利水电工程岩土工程和土木工程等领域设计、施工、运行管理和科研工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物安全监控理论及其应用/吴中如编著.
北京:高等教育出版社,2003
ISBN 7-04-011306-6

I.水... II.吴... III.水工建筑物-监测-研究生-教材 IV.TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第046564号

| | | | |
|------|---------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 购书热线 | 010-64054588 |
| 社 址 | 北京市东城区沙滩后街55号 | 免费咨询 | 800-810-0598 |
| 邮政编码 | 100009 | 网 址 | http://www.hep.edu.cn |
| 传 真 | 010-64014048 | | http://www.hep.com.cn |
| 经 销 | 新华书店北京发行所 | | |
| 排 版 | 高等教育出版社照排中心 | | |
| 印 刷 | 中国农业出版社印刷厂 | | |
| 开 本 | 787×960 1/16 | 版 次 | 2003年1月第1版 |
| 印 张 | 26 | 印 次 | 2003年1月第1次印刷 |
| 字 数 | 440 000 | 定 价 | 35.50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

前 言

建国以来,我国修建了众多的拦河大坝,其中相当一部分已运行三十年以上,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,国家相继成立了“水电站大坝安全监察中心”、“水利大坝安全监测中心”,分别代表原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,涌现出大批科研成果。为了系统总结这方面的研究成果,使之更广泛的应用于大坝安全监控和人员培训,作者于1990年撰写了《水工建筑物安全监控理论及其应用》,在这本专著的基础上,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研究生和科技人员的知识水平和要求,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,由吴中如主编,顾冲时、郑东健参编。第二章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报模型,确定性模型和混合模型。第八、九章介绍原型观测资料的反演分析法、反馈分析法及其在设计、施工和运行中的应用。第十章介绍大坝安全综合评价专家系统。

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

2001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 |
| | 第二节 本书内容概述 | 6 |
| | 参考文献 | 9 |
| 第二章 | 统计学方法 | 10 |
| | 第一节 概述 | 10 |
| | 第二节 多元回归分析法 | 10 |
| | 第三节 逐步回归分析法 | 19 |
| | 第四节 差值回归法 | 29 |
| | 第五节 加权回归法 | 36 |
| | 第六节 正交多项式回归法 | 37 |
| | 参考文献 | 42 |
| 第三章 | 变形和应力观测量的统计模型 | 44 |
| | 第一节 混凝土坝变形测点的统计模型 | 44 |
| | 第二节 混凝土坝时效位移的较佳数学模型 | 63 |
| | 第三节 混凝土坝位移的时空分布模型 | 74 |
| | 第四节 土石坝变形观测量的统计模型 | 80 |
| | 第五节 地下洞室周壁变形的统计模型 | 87 |
| | 第六节 混凝土坝裂缝开合度的统计模型 | 102 |
| | 第七节 应力统计模型 | 112 |
| | 参考文献 | 127 |
| 第四章 | 渗流观测量的统计模型 | 129 |
| | 第一节 概述 | 129 |
| | 第二节 混凝土坝坝身和坝基渗压统计模型 | 130 |
| | 第三节 土石坝浸润线的测压管水位统计模型 | 142 |
| | 第四节 渗流量统计模型 | 146 |
| | 参考文献 | 152 |
| 第五章 | 时间序列分析法和灰色系统理论及其预测模型 | 153 |
| | 第一节 时间序列分析法及其应用 | 153 |
| | 第二节 灰色系统理论及其预测模型 | 173 |
| | 参考文献 | 189 |
| 第六章 | 模糊数学及其预测模型 | 190 |

| | | |
|-----------------|-------------------------------------|------------|
| 第一节 | 模糊数学的基本原理 | 190 |
| 第二节 | 模糊预测模型及模糊可靠度分析 | 198 |
| 参考文献 | | 247 |
| 第七章 | 确定性模型和混合模型 | 249 |
| 第一节 | 概述 | 249 |
| 第二节 | 混凝土坝的位移确定性模型和混合模型 | 249 |
| 第三节 | 混凝土坝的应力确定性模型和混合模型 | 267 |
| 第四节 | 土石坝渗压的确定性模型 | 270 |
| 参考文献 | | 281 |
| 第八章 | 原型观测资料的反演分析法及其应用 | 282 |
| 第一节 | 混凝土坝坝体弹性模量和线膨胀系数及基岩变形模量 反演 | 282 |
| 第二节 | 土石坝材料的物理力学参数和徐变度反演 | 292 |
| 第三节 | 坝体混凝土的导温系数和渗流扩散系数反演 | 301 |
| 第四节 | 坝体混凝土的断裂韧度和纵缝的等价摩擦系数反演 | 306 |
| 第五节 | 土石坝防渗体的渗透系数反演 | 317 |
| 第六节 | 由温度实测资料反演拱坝温度荷载的计算 | 320 |
| 第七节 | 拱坝实际拱梁荷载的反演 | 330 |
| 参考文献 | | 331 |
| 第九章 | 反馈分析法及其应用 | 332 |
| 第一节 | 概述 | 332 |
| 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 | 333 |
| 第三节 | 利用原型观测资料反馈混凝土坝的实际安全度 | 346 |
| 第四节 | 拟定大坝安全监控指标的方法 | 360 |
| 参考文献 | | 371 |
| 第十章 | 大坝安全综合评价专家系统 | 372 |
| 第一节 | 概述 | 372 |
| 第二节 | 大坝安全综合评价专家系统框架 | 373 |
| 第三节 | 龙羊峡大坝安全综合评价专家系统 | 380 |
| 参考文献 | | 402 |
| Synopsis | | 403 |
| Contents | | 404 |
| 作者简介 | | 406 |

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

20 世纪 50 年代以来,共修建约八万三千座堤坝,其中 15 m 以上的大坝约一万八千座,30 m 以上大坝约三千多座,装机约六千多万千瓦,万亩以上灌区有八千多处,灌溉面积八亿两千万亩。这些工程在国民经济中产生了巨大的社会效益。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 Malpasset 拱坝,美国的 Teton 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 150 m 以上高坝有二滩、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三峡、岩滩、小湾、龙滩和拉西瓦等高坝。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 1 100 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 | 土 石 坝 | | | 混 凝 土 坝 | | |
|---------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 时间 | 1950—1959 | 1960—1969 | 1970—1975 | 1950—1959 | 1960—1969 | 1970—1975 |
| 建 成 坝 数 | | 1 421 | 2 708 | / | 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 |

续表

| 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 |
| 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 他 | | 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%是坝基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、侵蚀和碳化)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 Malpasset 坝和 1963年意大利的 Vajont 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监视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

20 世纪 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 Malpasset 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安全监测的国际性规程。

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 Teton 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,陆军工程师团提出 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。

前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况的标准条例》及《水电站水工建筑物观测小组工作条例》,这些文件对观测人员的组织、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,前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。

其他国家(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工作的。

我国对大坝安全问题也十分重视,20 世纪 60 年代水利电力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 Telemac 公司、意大利的 Paci 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 Maihak、Carlzeiss 工厂和瑞士的 Vault 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、浙江大学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。

20 世纪 70 年代开始，国内外加强对基岩和滑坡的观测，其中瑞士的 Huggenberger 公司制造的变位仪可以监测 50 m 范围内岩体的变位，法国 Telemac 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 Carlson 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。我国南京自动化设备总厂等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。意大利国家电力局及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。

(2) 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;其他仪器采用人工测读,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。

我国正在开展以单个水电站为主的自动化监测,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Fanelli和葡萄牙的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Fanelli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“已校正过”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,前苏联、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 本书内容概述

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。

本书撰写的内容,可由框图1.2.1概括。

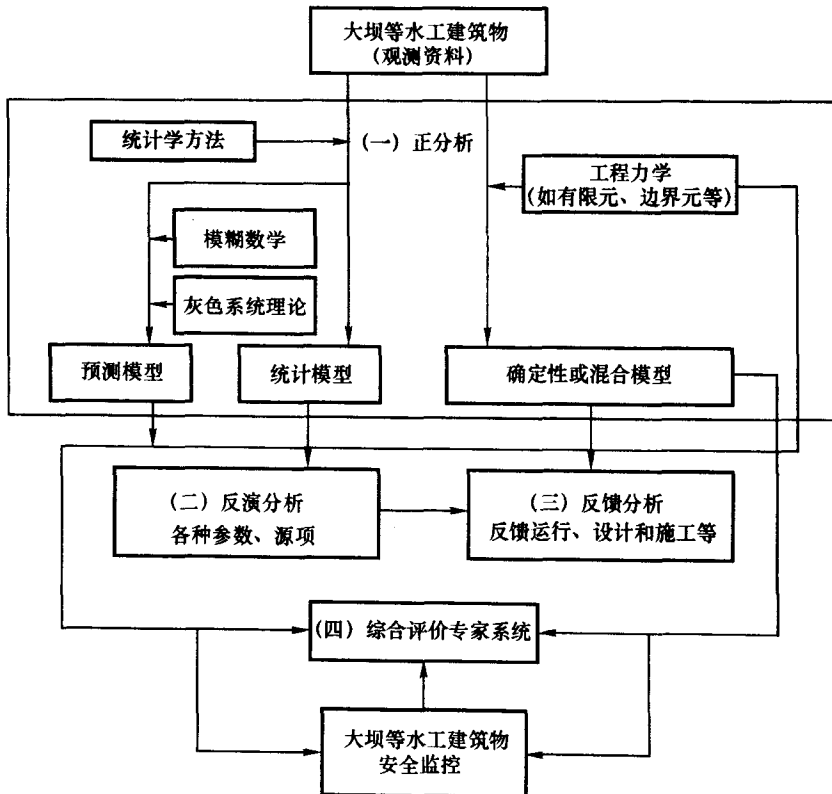


图 1.2.1 《水工建筑物安全监控理论及其应用》框图

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。

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六章介绍。

统计学方法这一章简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等方法。变形和应力观测量的统计模型以及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(Duncan - Chang 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是要用的参数。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。

三、反馈分析法及其应用

反馈分析是综合应用正分析与反演分析的成果,并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,达到优化设计、施工和运行的目的,并补充和完善现行水工设计和施工规范。它与正分析、反演分析之间既有联系又有区别,为表达三者的概念,可用图 1.2.2 表示。

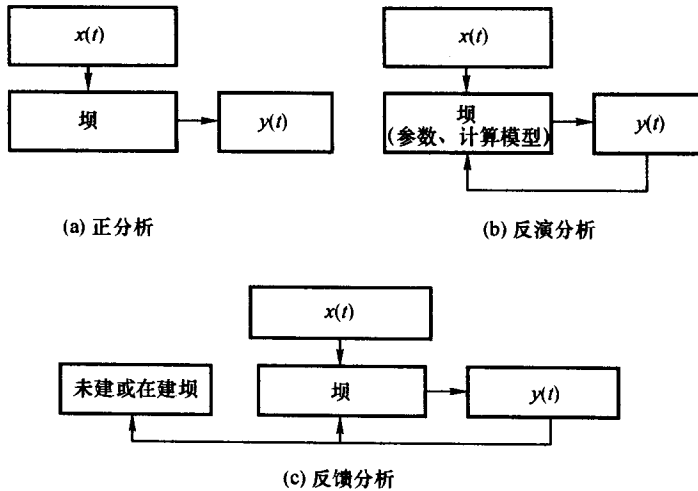


图 1.2.2 三种分析示意图

图中: $x(t)$ ——输入量,表示外力或周围环境的影响(如水压力、温度等);

$y(t)$ ——输出量,即荷载效应量,如变形、应力和扬压力等。

从图中看出:反馈分析的特点是一方面要将成果反馈到原型结构中,

达到馈控的目的;另一方面要为未建坝的设计、施工反馈信息,从而最大限度地从观测资料中提取信息。因此,反馈分析的内涵十分丰富,是水工建筑物安全监控中一个新的综合性课题。由于难度较大,研究还不够深入,今后还要不断补充。本部分主要介绍三方面内容:

(一) 坝体裂缝的成因和机理分析及其馈控运行水位

利用观测资料分析横缝和纵缝的工作性态及其对坝体结构性态的影响。分析再生缝的成因和机理,利用正分析和反演分析的成果以及混凝土坝的设计规范,反馈控制裂缝发生和发展的临界荷载(水位和温度),以作为大坝运行控制的依据。

(二) 反馈混凝土坝的实际安全度

根据原型观测资料,应用可靠度理论,提出一种新的JC法迭代格式来复核混凝土坝的稳定、强度和抗裂安全度。从而使运行部门掌握运行多年后大坝的安全状况,找出薄弱点,以便控制运行。

(三) 拟定大坝安全监控指标的方法

利用原型观测资料正分析和反演分析的成果,结合设计规范和 safety 准则,提出用五种方法(置信区间估计法、典型监测量的小概率法、安全系数法、一阶矩极限状态法和二阶矩极限状态法)来拟定水工建筑物各个观测量的监控指标及其相应的控制荷载(水压、温度等),从而为监控大坝安全运行提供科学依据。

四、大坝安全综合评价专家系统^[6]

在观测资料正分析、反演分析和反馈分析的基础上,针对各观测量的单项分析的缺陷,提出了大坝安全综合评价专家系统。该系统充分利用现代计算机软硬件和人工智能技术,开发大量的先进应用软件,以观测资料正反分析成果和专家知识为依据,对大坝安全实现全过程的分析和评价。本书主要介绍该系统的框架,包括系统的目标、总体结构、专业总体构成和网络等,并以龙羊峡为实例,介绍系统的建立过程。

参 考 文 献

- 1 水电部科技情报所. 国内外水利水电技术发展概况. 北京:水利电力出版社,1984
- 2 长江科学院主编. 15 届国际大坝会议译文集. 观测技术,1986(4)
- 3 吴中如,陈继禹. 大坝原型观测资料分析方法和模型. 河海大学科技情报,1989(2)
- 4 彭 虹. 法国大坝安全监测的新进度. 河海大学科技情报,1989(2)
- 5 邓昌铁. 意大利水电站大坝安全监控概况. 河海大学科技情报,1989(2)
- 6 吴中如,顾冲时. 大坝安全综合评价专家系统. 北京:北京科学技术出版社,1997

第二章 统计学方法

第一节 概 述

水工建筑物的观测物理量大致可以归纳为两大类:第一类为荷载集,如水压力、泥砂压力、温度(包括气温、水温、坝体混凝土和坝基的温度)、地震荷载等;第二类为荷载效应集,如变形、裂缝开度、应力、应变、扬压力或孔隙水压力、渗流量和水质等。通常将荷载集称为自变量或预报因子(用 x_1, x_2, \dots, x_k 表示),荷载效应集称为因变量或预报量(用 y 表示)。

在坝工实际问题中,影响一个事物的因素往往是复杂的。例如大坝位移,除了受库水压力(水位)影响外,还受到温度、渗流、施工、地基、周围环境以及时效等因素的影响。扬压力或孔隙水压力受库水压力、岩体节理裂隙的闭合、坝体应力场、防渗工程措施以及时效等影响。因此,在寻找预报量与预报因子之间的关系式时,不可避免地要涉及到许多因素,找出各个因素对某一预报量的影响,建立它们之间的数学表达式,即回归模型。借此推算某一组荷载集时的预报量,并与其实测值比较,以判别建筑物的工作状况,对建筑物进行监测。同时,分离方程中的各个分量,并用其变化规律,分析和估计建筑物的结构性态。

本章所述内容为:水工建筑物原型观测资料分析的常用方法——多元回归、逐步回归、加权回归、正交多项式回归和差值回归等的基本原理和计算公式。

第二节 多元回归分析法

一、回归方程

回归分析的中心问题是由变量组

$$(X_1, X_2, \dots, X_k; Y)$$

得到母体资料,即 N 组观测数据

$$X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{kt}; Y_t \quad t = 1, 2, \dots, N \quad N \geq k$$

对线性回归方程

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \cdots + \epsilon = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \epsilon \quad (2.2.1)$$

进行最佳拟合, 求出 B_0, B_i , 建立预报量 Y 和自变量 X_1, X_2, \dots, X_k 之间的数学表达式, 即理论回归方程或真正回归方程。然而, 在实际工程问题中是不可能求得的。数理统计理论讨论的一切问题, 都是抽样估计问题, 也就是在母体资料中随机地抽取部分子样:

$$x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{kt}; y_t \quad t = 1, 2, \dots, n; \quad n < N$$

根据上述子样资料对母体的数量特征和规律性进行估计, 即用 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ 作为 $B_0, B_1, B_2, \dots, B_k$ 的估计值, 则所得的回归方程称为经验回归方程:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (2.2.2)$$

在回归分析时, 有三个基本假定:

(1) 误差 ϵ 没有系统性, ϵ_t 的数学期望全为零, $E(\epsilon_t) = 0 (t = 1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 各次观测互相独立, 并有相同的精度, 即 ϵ_t 之间的协方差可表示为

$$\text{COV}(\epsilon_i, \epsilon_j) = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ \sigma^2 & i = j \end{cases}$$

(3) 观测误差呈正态分布, 即 $\epsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ 。

下面介绍估计 b_0, b_i 的方法以及有效性和精度等问题。

二、法方程式

k 元线性回归涉及 k 个自变量, 则自变量与因变量有 n 组观测资料系列:

$$\left. \begin{array}{l} x_{11}, x_{21}, \dots, x_{k1}; y_1 \\ x_{12}, x_{22}, \dots, x_{k2}; y_2 \\ \vdots \\ x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}; y_i \\ \vdots \\ x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{kn}; y_n \end{array} \right\} \quad (2.2.3)$$

那么, 确定 k 元线性经验回归方程 (2.2.2) 可归结为根据上述观测资料 (子样) 来确定 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ 的问题。