



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 混凝土坝服役性态安全监控 多尺度分析理论及其应用

赵二峰 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析 理论及其应用

赵二峰 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书针对我国已建混凝土坝的数量和总高度均居世界首位的现状,围绕混凝土坝长期运行安全这一当前坝工技术的焦点问题,系统介绍了混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论,并列举了相应的应用实例。全书共分9章,介绍了混凝土坝服役性态多尺度数据估计模型和随机动态分析方法,高拱坝库盘变形的空间跨尺度正反分析方法和裂缝损伤安全监控分析方法,坝基渗流性态的有规分形分析方法、演变和转异监控模型,重力坝服役稳定性可靠度安全监控方法以及混凝土坝服役性态多源信息集成融合推理方法等内容。

本书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、运行管理的科研工作者和工程技术人员使用,也可作为水工结构工程、工程力学、安全工程和其他相近专业的本科生和研究生参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用/赵二峰著. —北京:科学出版社,2019.6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-061622-7

I. 混… II. 赵… III. ①混凝土坝—安全监控—尺度分析 IV. ①TV642

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第114476号

责任编辑:周丹 曾佳佳/责任校对:杨聪敏

责任印制:师艳茹/封面设计:许瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:26

字数:520 000

定价:199.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

## 《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》(国办发〔2015〕87号)，将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

## 序

我国水利水电事业的发展与国民经济其他事业一样，也是从小到大，从中小型水利水电工程发展到世界第一水利枢纽——长江三峡水利枢纽，从 10 多米的低坝修建到 300 米级的锦屏一级特高拱坝，在使我国大江大河和一大批中小河流的径流、洪水基本得到控制的同时，建立了从规划、勘测、试验、设计、施工到运行管理的一整套标准化技术体系，逐渐形成了具有中国特色的坝工建设技术。目前，我国坝高 100m 以上的已建、在建大坝约 200 座，其中混凝土坝约占 40%，在高坝建设中仍占重要地位。在世界装机容量前 20 名的大坝里，三峡重力坝、溪洛渡拱坝、向家坝重力坝、龙滩重力坝、小湾拱坝、拉西瓦拱坝、锦屏一级拱坝、二滩拱坝、构皮滩拱坝等均名列前茅。

工程实践证明，混凝土坝在结构形式上是安全性较高的坝型，如果坝基岩体坚固完整，混凝土坝绝少发生整体失稳破坏。但是，受地质、水文、设计、施工、运行管理等不确定因素的影响，大坝安全问题和溃坝风险一直无法回避，溃坝并导致重大人员伤亡在世界范围内都有过惨痛教训。然而，混凝土坝失稳破坏是有预兆的，只要建立合理的混凝土坝服役性态安全监控机制，混凝土坝失稳带来的溃坝洪灾是有可能避免的，至少可以减轻失事损失。尽管如此，我国一大批高坝工程的建设，其设计、建造直至运行管理至今尚无国际经验可以参考，都必须自主创新，这就要求我们必须迅速提高科技水平，还必须具有科技的前期储备。科学技术研究的宗旨是应用，对工程领域的科技工作者而言，主要任务就是成功解决工程中的实际关键问题，因此，实践是检验研发科技成功的唯一标准。

我长期从事大坝安全监控和水工结构领域的教学与科研工作，它需要综合应用水工、数学、力学、计算机、传感技术、系统工程等多学科理论。也正是由于大坝安全监控是一门综合性很强的学科，而且是一个正在迅速发展的研究方向，在理论和实践上都有很大的拓展和完善空间，每年有大量的文献发表。赵二峰同志作为大坝安全监控研究的后继人才，以自身研究及应用成果为主干撰写《混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用》一书，针对大坝安全监控领域的前沿问题，沿“原型监测数据—结构数值模拟—多源信息综合评价”主线，主要围绕混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用进行阐述，专注于多尺度数据估计模型、多尺度随机动态分析方法、跨尺度正反分析方法、裂缝损伤尺度分析方法、坝基渗流有规分形分析方法、稳定性可靠度安全监控方法、多源信息集成融合推理方法等内容，介绍了现阶段的科学分析理论和方法，并对这些

方法引举工程实例作示范。可见，该书拓展了大坝安全监控领域的知识，通过阅读该书，读者可以更加系统深入地理解大坝全生命周期“规划设计—施工建设—运行监测”这一“闭路系统”的内涵。

我曾在 20 世纪 90 年代初，结合龙羊峡大坝，提出并研制了“一机四库”的大坝安全综合评价专家系统。当前，随着互联网的迅速发展与应用深入，以物联网、智能技术、云计算与大数据等新一代信息技术为基本手段的智能大坝成为引领坝工建设发展的方向，这里将有众多关键技术亟待突破。科研与教学必须要有前瞻性与前沿性，我期待着作者继续刻苦努力，将大坝安全监控领域的研究成果运用到智能大坝建设中。

欣喜之余，写了个人感受，谨以为序。

中国工程院院士



2018 年 11 月

# 前 言

我国是洪灾、旱灾严重的国家，水库大坝是调蓄水资源、防范水灾及涉水次生灾害的重要基础设施。根据《第一次全国水利普查公报》，截至 2011 年年底，我国共有水库 98 002 座（未包括港澳台），总库容 9323.12 亿  $\text{m}^3$ ，是世界上水库大坝数量最多的国家，这些水库大坝在保障我国防洪安全、能源安全和供水安全等方面发挥了重大的作用，产生了巨大的效益。截至 2012 年 7 月，在 545 座坝高 30m 以上的大坝中，拱坝 46 座、重力坝 186 座；2000 年以后开工的工程共 172 座，其中拱坝 22 座、重力坝 66 座；按坝高 100m 以上统计，共计 141 座，其中重力坝 46 座、拱坝 27 座，西南地区高坝数量最多；坝高 200m 以上的大坝共 13 座，拱坝 7 座，最高的为锦屏一级拱坝 305m，重力坝 1 座，光照碾压混凝土重力坝 200.5m。随着科学技术的进步、经济的发展和水电能源开发规模的扩大，我国在复杂地质环境中修建的混凝土坝越来越多，并越来越高。但是，水库大坝安全，特别是大型水库大坝安全，因其影响范围大，一旦发生重大险情有可能造成灾难性的后果。世界水库大坝发展史上，欧洲、美国等均发生过溃坝失事等灾难性事件，例如法国马尔帕塞坝、美国圣弗朗西斯坝等。目前，我国水库大坝在数量、规模、坝高等多方面均走在世界的前列，需要对大坝安全保持高度关注。

尽管混凝土坝在结构形式上是安全性较高的坝型，但由于大坝建在复杂的水文地质和工程地质环境中，影响其服役性态的因素有设计、施工等工程因素与地形地貌条件、岩性、地质构造等地质因素，坝体承受着巨大的水压力和突发性地震荷载的冲击，以及随着时间推移带来的混凝土不同程度的老化、病变和裂缝等，这些缺陷或隐患若不能够被及时发现并采取措施解决，将会影响其正常运行，严重时将导致溃坝等灾难性事故。随着可持续发展的工程开发理念的不断深入，国家和社会对涉及能源与公共安全的大坝长效健康服役提出了更高的要求。因此，结合这方面的理论发展要求和重大工程的应用需要，作者经过近年来系统科学研究的逐步积累和总结，撰写成本书。

全书共分 9 章。第 1 章绪论，扼要介绍本书内容。第 2 章混凝土坝服役性态多尺度数据估计模型，论述了监测数据的奇异值诊断方法、监测效应量的最优估计方法、多尺度数据估计模型。第 3 章混凝土坝服役性态多尺度随机动态分析方法，论述了混凝土坝材料特性的多尺度建模分析方法、重力坝服役稳定性的随机动态分析模型和高拱坝服役性态的等效模拟分析方法。第 4 章高拱坝库盘变形的空间跨尺度正反分析方法，论述了库盘变形影响因素、模拟方法和变化规律以及

库盘变形对大坝结构性态和坝体裂缝稳定性影响的分析方法。第 5 章拱坝裂缝损伤安全监控分析方法, 论述了裂缝成因挖掘方法、裂缝稳定性安全监控方法以及基于弹性补偿法的裂缝损伤尺度对拱坝极限承载能力影响的分析方法。第 6 章坝基渗流性态的有规分形分析方法, 论述了坝基渗流特性分析方法、坝基断层几何形态的有规分形模拟方法和断层面渗流特性的分形数值模拟方法, 同时论述了坝基蠕变损伤对渗流性态的影响。第 7 章坝基断层渗流性态演变和转异监控模型, 论述了坝基渗流性态演变时序模型、安全监控模型及其优化方法和时效转异诊断模型。第 8 章重力坝服役稳定性可靠度安全监控方法, 论述了重力坝服役稳定性可靠度分析模式、模糊综合评价方法和时空监控方法。第 9 章混凝土坝服役性态多源信息集成融合推理方法, 论述了混凝土坝服役性态多源信息集成融合分析模型、综合评价和推理等方法。

本书内容主要来自作者的博士学位论文、博士后工作报告和近年来完成的一系列科研项目成果, 工程应用主要来自依托龙羊峡、小湾、李家峡、锦屏一级等工程的研究成果。在做研究期间, 河海大学吴中如院士、顾冲时教授、刘汉龙教授、郑东健教授、苏怀智教授、包腾飞教授给予作者许多指导、建议, 金怡硕士、宋鹏硕士、梅一韬硕士、李经纬硕士、方春晖博士、汪亚超博士等参加了部分研究工作, 同时本书在编写过程中参考了有关书籍、文献, 在此向这些专家学者表示衷心的感谢! 特别感谢吴中如院士在 80 岁高龄之际还于百忙中亲自为本书作序予以鼓励!

本书的研究工作得到国家重点研发计划(2016YFC0401601)、国家自然科学基金重点项目(51739003)、国家自然科学基金面上项目(51779086, 51479054)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)的资助, 在此表示感谢。

由于作者水平和经验有限, 书中的谬误与不足之处在所难免, 敬请同行和读者批评指正。

赵二峰

2019 年 3 月于河海大学科学楼

# 目 录

## 《博士后文库》序言

序

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 混凝土坝服役性态安全监控的意义 .....	1
1.2 本书主要内容 .....	2
第 2 章 混凝土坝服役性态多尺度数据估计模型 .....	5
2.1 概述 .....	5
2.2 监测数据的奇异值诊断方法 .....	6
2.2.1 奇异值分类及其模型描述 .....	6
2.2.2 主元分析 .....	7
2.2.3 奇异值诊断 .....	11
2.2.4 奇异值校正 .....	13
2.3 监测效应量的最优估计方法 .....	16
2.3.1 最小方差估计 .....	16
2.3.2 极大似然估计 .....	18
2.3.3 极大验后估计 .....	19
2.3.4 线性最小方差估计 .....	19
2.3.5 最小二乘估计 .....	21
2.4 监测效应量的多尺度数据估计模型 .....	22
2.4.1 多尺度统计模型 .....	22
2.4.2 多尺度数据估计模型 .....	25
2.5 应用实例 .....	31
第 3 章 混凝土坝服役性态多尺度随机动态分析方法 .....	40
3.1 概述 .....	40
3.2 混凝土坝材料特性的多尺度建模分析方法 .....	40
3.2.1 混凝土材料特性的多尺度建模框架 .....	40
3.2.2 混凝土多相细观力学特性分析方法 .....	42
3.2.3 混凝土细观力学参数非均质随机分布模型 .....	45
3.3 重力坝服役稳定性的随机动态分析模型 .....	52

3.3.1	工程材料时变特性的随机场分析	52
3.3.2	重力坝服役荷载和效应的随机处理	55
3.3.3	基于递阶对角神经网络的动态分析模型	58
3.3.4	应用实例	64
3.4	高拱坝服役性态的等效模拟分析方法	71
3.4.1	高拱坝施工期黏弹性力学参数反演方法	71
3.4.2	高拱坝运行期极限承载能力等效分析方法	76
3.4.3	应用实例	83
<b>第 4 章</b>	<b>高拱坝库盘变形的空间跨尺度正反分析方法</b>	<b>93</b>
4.1	概述	93
4.2	库盘变形影响因素分析	94
4.2.1	坝体-坝基-库盘系统模拟的有限元方法	95
4.2.2	库盘变形的影响因素	99
4.2.3	库盘变形影响因素的权重分析方法	100
4.2.4	算例分析	102
4.3	库盘变形变化规律分析	106
4.3.1	库盘变形实测资料分析	107
4.3.2	库盘变形数值模拟分析	109
4.4	库盘变形对大坝结构性态影响分析	121
4.4.1	跨尺度模型构建方法	121
4.4.2	小湾双曲拱坝结构性态模拟分析	127
4.4.3	龙羊峡重力拱坝结构性态模拟分析	133
4.5	库盘变形对坝体裂缝稳定性的影响分析	136
4.5.1	薄层单元模拟方法	137
4.5.2	裂缝薄层单元等效弹性模量估算方法	139
4.5.3	应用实例	143
<b>第 5 章</b>	<b>拱坝裂缝损伤安全监控分析方法</b>	<b>148</b>
5.1	概述	148
5.2	高拱坝裂缝成因挖掘方法	150
5.2.1	高拱坝裂缝成因分析	150
5.2.2	基于粗集理论的高拱坝裂缝成因挖掘	153
5.2.3	应用实例	158
5.3	高拱坝裂缝稳定性安全监控方法	160
5.3.1	基于断裂力学理论的裂缝稳定性分析	161
5.3.2	基于小波理论的裂缝稳定性分析	164

5.3.3	基于典型小概率法的裂缝失稳警戒指标拟定	170
5.3.4	应用实例	172
5.4	高拱坝裂缝损伤尺度影响的分析方法	189
5.4.1	基于弹性补偿法的高拱坝极限承载能力分析	189
5.4.2	高拱坝裂缝损伤尺度对极限承载力的影响分析	202
<b>第6章</b>	<b>坝基渗流性态的有规分形分析方法</b>	<b>219</b>
6.1	概述	219
6.2	坝基断层渗流特性分析方法	220
6.3	坝基断层几何形态的有规分形模拟方法	224
6.3.1	分形特性与分形维数	225
6.3.2	断层单一表面的分形模拟	225
6.3.3	断层的开度分布模拟	232
6.3.4	断层的组合形貌	232
6.4	坝基断层面渗流特性的分形数值模拟方法	233
6.4.1	断层面渗透系数的确定方法	233
6.4.2	渗流场数值模拟方法	236
6.4.3	断层面渗流特性数值模拟试验	240
6.5	坝基蠕变损伤的力学特性分析	244
6.5.1	断层带蠕变损伤模型	245
6.5.2	坝基等效连续介质岩体黏弹性蠕变本构模型	256
6.5.3	断层面剪切黏弹塑性蠕变本构模型	258
6.6	考虑蠕变损伤的坝基渗流性态分析模型	259
6.6.1	坝基蠕变对渗流分形特性影响的数学模型	260
6.6.2	坝基蠕变与渗流耦合模型	262
6.6.3	应用实例	268
<b>第7章</b>	<b>坝基渗流性态演变和转异监控模型</b>	<b>274</b>
7.1	坝基渗流性态演变时序模型	274
7.1.1	考虑断层面分形特性的坝基渗透系数反演方法	274
7.1.2	坝基渗流演变规律和时序模型	283
7.2	坝基渗流安全监控模型	286
7.2.1	坝基测压管水位安全监控模型	286
7.2.2	坝基渗流量安全监控模型	298
7.3	坝基渗流监控模型优化方法	301
7.3.1	基于量子遗传算法的坝基渗流混合模型优化	302
7.3.2	基于小波神经网络的坝基渗流监控模型	305

7.3.3	基于最大熵的坝基渗流监控组合模型	307
7.3.4	应用实例	309
7.4	坝基渗流时效转异诊断模型	313
7.4.1	突变势函数	313
7.4.2	坝基渗流的灰色尖点突变模型	314
7.4.3	坝基渗流性态的转异准则	316
<b>第 8 章</b>	<b>重力坝服役稳定性可靠度安全监控方法</b>	<b>317</b>
8.1	概述	317
8.2	重力坝服役可靠度分析模式	318
8.2.1	重力坝服役稳定性风险因素识别	318
8.2.2	重力坝失稳破坏模式构成方式概化模型	322
8.2.3	基本随机变量的随机过程模型	323
8.2.4	考虑破坏模式相关性的串联系统可靠度算法	325
8.2.5	累积破坏模式形成的并联系统可靠度算法	327
8.3	重力坝服役可靠度模糊综合评价方法	328
8.3.1	模糊综合评判分析模型	328
8.3.2	重力坝服役可靠度计算	333
8.3.3	应用实例	335
8.4	重力坝服役稳定性的时空监控方法	338
8.4.1	重力坝深层滑动失稳分析方法	338
8.4.2	重力坝服役稳定性时效位移突变监控模型	345
8.4.3	应用实例	349
<b>第 9 章</b>	<b>混凝土坝服役性态多源信息集成融合推理方法</b>	<b>352</b>
9.1	概述	352
9.2	多源信息集成融合分析模型	353
9.2.1	多源信息集成融合分析结构	353
9.2.2	数据信息的模糊贴近度融合模型	355
9.2.3	关联信息的相似度融合模型	357
9.2.4	特征信息的 GA-BP 网络融合模型	360
9.2.5	决策信息的 D-S 证据理论融合模型	362
9.3	多源信息的相容方法集综合评价方法	368
9.3.1	相容方法集的确定	368
9.3.2	综合评价方法	371
9.3.3	可靠性分析	380
9.4	多源信息集成融合推理方法	382

---

9.4.1 黑板框架结构 .....	382
9.4.2 推理分析结构 .....	384
9.4.3 知识库和推理过程 .....	385
参考文献 .....	394
编后记 .....	399

# 第1章 绪 论

## 1.1 混凝土坝服役性态安全监控的意义

1949年中华人民共和国成立以来,我国水利水电工程建设得到了大力发展,现拥有水库大坝9.8万余座,成为世界上拥有水库大坝数量最多的国家。我国的坝工建设在数量、规模、技术难度和技术创新等方面都已进入世界前列,其中已建混凝土坝的数量和高度均居世界首位<sup>[1-3]</sup>。截至2016年3月,在国家能源局大坝安全监察中心注册和登记备案的水电站大坝有528座<sup>[4]</sup>(其中混凝土坝和浆砌石坝所占比例超过了75%),虽然数量仅占全国大坝总数的0.54%,但总库容与总装机容量分别占全国的53.5%和75.1%,这些大坝在防洪、发电、供水和灌溉等方面创造了巨大的经济效益和社会效益。然而,这些水电站工程多为高坝大库,在发挥巨大工程效益的同时,也存在一定的风险。一旦大坝溃决失事,不仅大坝损毁,直接影响电力供应与电网安全,还会给下游地区的人们生命财产和社会经济环境等造成极严重的损失。比如,1928年,美国圣弗朗西斯重力坝溃决失事,造成400余人死亡;1959年,法国马尔帕塞拱坝溃决失事,造成500多人死亡和失踪,财产损失约300亿法郎。1954~2007年,我国水利部曾对全国溃坝先后进行过3次统计,全国水库大坝溃坝共计超过3500座,其中土石坝占97.78%,混凝土坝占0.33%。从统计资料来看,虽然国内外混凝土坝溃坝数量较少,但混凝土坝溃坝事故发生时,往往属于瞬时溃决,预警时间短,造成的后果极为严重。

目前,我国面临大坝数量多、极端气候变化和建设条件复杂等多重因素带来的风险,加之大坝长期运行过程中,由于受到水、大气、侵蚀性介质和温度变化的反复作用,会不断发生物理性和化学性变化,其性能和结构逐渐劣化,尤其是设计标准偏低、施工质量差、管理不善和在外界自然条件及运行环境恶劣时,其劣化行为将越来越严重,并逐步影响其安全服役。同时,我国200m级以上高坝主要集中在西部地区,大都分布在黄河、金沙江、雅砻江、澜沧江、大渡河等大江大河,对水工建筑物的安全性、稳定性、耐久性要求十分高<sup>[5,6]</sup>。此外,我国梯级开发的江河众多,在规划阶段没有充分考虑溃坝产生的流域安全风险传播和风险阻断,而高坝枢纽工程多为这些江河上的龙头水库或控制性工程,这要求高坝大库长期运行必须做到绝对安全。

我国未来水电工程建设中,高坝占有相当的比重,不仅有200m级的高坝,

而且有 300m 级超高坝, 如此密集地建设一批高坝工程, 在世界筑坝史上前所未有<sup>[7,8]</sup>。高坝坝型中, 混凝土坝仍占重要地位, 其中混凝土拱坝为典型代表, 重力坝较少。坝址在河谷狭窄、地形地质条件基本对称、坝基坝肩岩体坚硬完整的情况下, 适合修建高拱坝。由于具有超载能力强、抗震性能好、坝身泄量大、配合地下厂房布置方案施工和运行干扰小以及坝体混凝土工程较省等优点, 拱坝已成为超高坝极具竞争力的坝型, 甚至是首选坝型。混凝土重力坝结构简单、受力明确, 泄水建筑物组合形式较多, 抵御洪水安全性高, 可灵活布置各种类型的电站厂房, 对地形地质条件有较好的适应性, 仍然是高坝选择中的主要坝型, 可作为超高坝比选坝型。但是, 由于坝的应力水平与坝的高度大体成正比, 坝体越高, 应力越大, 安全系数越低, 随之带来勘测设计和建设管理中的诸多技术难题, 使得特高混凝土坝的安全问题成为当前坝工技术的焦点<sup>[9,10]</sup>。

工程实践证明, 混凝土坝在结构形式上是安全性较高的坝型, 如果坝基岩体坚固完整, 混凝土坝绝少发生整体失稳破坏。尽管如此, 由于混凝土坝承受着巨大的荷载, 而且工作条件极为复杂, 在服役过程中, 受到多重环境因素(如冻融循环、碳化、溶蚀或侵蚀、碱集料反应、干湿循环、温度疲劳冲击等)与荷载因素(如水压力、扬压力等)的长期作用, 并经受各种突发性灾害(如汛期洪水、地震等)的侵袭, 其服役性态受控于多因素协同作用下材料与结构的交互响应<sup>[11]</sup>。通过国内外混凝土坝溃坝资料统计分析表明, 将近 50%都是由于坝基或坝肩问题引起, 如坝基、坝肩存在软弱夹层导致渗流、冲刷破坏等; 其次是洪水漫顶以及坝体破坏造成的, 分别占 25%和 10%左右, 且在漫顶引起的溃决大坝中, 绝大多数均为长时间的持续漫顶引发坝基冲刷滑移或坝肩拱座失稳等而导致最终溃坝。截至目前, 虽然我国在大坝中心注册的水电站大坝尚未发生过溃坝之类的重大恶性事件, 但在运行中曾出现过洪水漫顶、坝基错动、坝体结构损坏、水淹厂房等险情。

可见, 混凝土坝工程除了精心设计、精心施工、加强运行管理外<sup>[12]</sup>, 安全监测作为了解大坝工作性态的耳目, 可为评价其安全状况和发现异常迹象提供依据, 并在出现险情时发布警报以预防大坝失事破坏, 降低其造成的损失<sup>[13-16]</sup>。因此, 研究混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用, 不仅对监控大坝安全状况起到重要作用, 而且可以有效降低大坝运行风险、增强溃坝洪灾防控能力。

## 1.2 本书主要内容

本书主要围绕混凝土坝服役性态安全监控多尺度分析理论及其应用进行阐述, 具体涉及混凝土坝服役性态多尺度数据估计模型、混凝土坝服役性态多尺度随机动态分析方法、高拱坝库盘变形的空间跨尺度正反分析方法、高拱坝裂缝损伤安全监控分析方法、坝基渗流性态的有规分形分析方法、坝基渗流性态演变和转异

监控模型、重力坝服役稳定性可靠度安全监控方法、混凝土坝服役性态多源信息集成融合推理方法等内容。

### 1) 混凝土坝服役性态多尺度数据估计模型

鉴于混凝土坝服役性态安全监测效应量之间存在一定的相关关系,首先对效应量监测数据中的奇异值进行分类和模型描述,研究了奇异值诊断和校正方法;然后,在分析监测效应量的最优估计方法的基础上,基于多尺度系统理论,引入时间尺度变量,对监测效应量进行多尺度表示,建立了监测效应量的多尺度数据估计模型,实现在任一尺度上获得基于全局监测信息的最优估计值。将上述方法应用于某重力坝工程,定量分析了大坝服役性态,有效地监控了大坝安全运行。

### 2) 混凝土坝服役性态多尺度随机动态分析方法

水工混凝土在宏观上连续,在微观、细观上为离散颗粒的集合体,通过分析混凝土材料特性的多尺度建模方法,研究了混凝土细观力学性质对结构的影响。考虑工程材料参数的随机性,利用随机有限元方法计算重力坝服役荷载作用下的效应场,结合某重力坝实测资料,利用递阶对角神经网络获取了工程材料力学参数,建立了重力坝服役稳定性随机动态分析模型。同时,依托锦屏一级双曲拱坝工程,研究了基于伯努利神经网络的高拱坝施工期黏弹性参数反演方法以及运行期极限承载能力等效分析方法。

### 3) 高拱坝库盘变形的空间跨尺度正反分析方法

由于高坝大库工程的库盘承受巨大水压作用,产生明显向上游转动的变形,其对坝体的影响不可忽视,在对工程运行性态进行分析时有必要加以考虑。通过建立大尺度的库盘模型和小尺度的近坝区模型以及细尺度的坝体结构裂缝模型,提炼了影响高拱坝库盘变形的一般性因素,正反分析了库盘变形变化规律。在此基础上,依托小湾双曲拱坝和龙羊峡重力拱坝工程,结合库盘和大坝实测资料,研究了库盘变形对高拱坝结构性态的影响。

### 4) 拱坝裂缝损伤安全监控分析方法

通过典型拱坝裂缝相关资料的归纳分析,研究了高拱坝裂缝产生和扩展的影响因素,建立了高拱坝裂缝成因故障树模型,基于粗集理论,依托李家峡工程,进行了高拱坝裂缝成因挖掘,拟定了裂缝失稳判据和警戒指标。在此基础上,分析了混凝土断裂过程区的软化特性和虚拟裂缝模型的特点,探讨了通过承载比均匀度与基准承载比调整单元弹性模量的方法,避免了弹性补偿法名义应力确定的困难,通过模拟某高拱坝极限承载能力状态和局部裂缝损伤状态,分析了裂缝损伤尺度对拱坝极限承载力的影响。

### 5) 坝基渗流性态的有规分形分析方法

坝基渗流特性取决于岩体的风化程度和岩体裂隙结构面的产状、渗透与变形特性以及岩体的主要断层等透水带。为了准确衡量坝基集中透水通道等对大坝安