

# 水库土石坝工程洪水 分期调度关键技术及应用

■ 莫崇勋/著



科学出版社

# 水库土石坝工程洪水分期调度 关键技术及应用

莫崇勋 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

水库土石坝工程洪水分期调度关系到流域洪水的资源化利用和水库工程的防洪安全,是新时期水利工作面临的一项新课题与新挑战,其理论、方法及技术为当前水利科技工作者所关注。本书系统介绍水库土石坝工程防洪有关问题的研究进展与存在问题;阐述水库土石坝工程防洪调度和防洪安全评价的基础理论;重点介绍水库土石坝工程洪水分期、分期设计洪水、分期调度危险度、分期调度易损度、分期调度风险度和分期调度效应评价的技术和方法。根据示例的需要,本书以广西澄碧河水库为典型工程,详细给出水库土石坝工程洪水分期调度关键技术的应用与分析。

本书可作为水利工程学科以及水文水资源、水工、岩土、安全管理等专业的本科生、研究生的教材或参考书,也可供从事风险分析和安全管理的科研、技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水库土石坝工程洪水分期调度关键技术及应用/莫崇勋著. —北京:科学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-03-039561-0

I. ①洪… II. ①莫… III. ①水库-土石坝-防洪工程-洪水调度 IV. ①TV62②TV87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 009637 号

责任编辑: 韦 沁/责任校对: 宣 慧

责任印制: 赵德静/封面设计: 北京东方人华科技有限公司

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>

北京源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张: 13

字数: 295 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

水资源短缺已经成为区域社会发展的重要制约因素。面对这种局面，水利部本着可持续发展原则，提出了由“控制洪水”向“洪水管理”转变、由“单一抗旱”向“全面抗旱”转变的防洪抗旱新思路。水库洪水资源化作为综合体现上述“两个转变”的主要工作形式之一，在增加水库蓄水量、提高水库工程综合效益方面发挥了重要作用，受到水利部和国家防汛抗旱总指挥部办公室的高度重视。然而，已建的水库土石坝工程还存在洪水漫顶失事而危害下游人民生命财产的潜在威胁。历史统计数据表明，在中国，水库洪水漫顶失事所占比例高达 50.6%，位居第一。因此，在水库土石坝工程防洪调度中，如何在确保防洪安全的前提下对水库洪水进行分期调度，是新形势下水利工作面临的一个重要课题，而解决该课题的理论和技術，对促进水库洪水资源化和加强水库土石坝工程防洪安全管理水平具有重大现实意义。

水库土石坝工程洪水分期调度理论是一门新兴学科，在世界各国水利专家、学者的共同努力下，利用各种手段进行了广泛的探索，取得了许多可喜的进展和成果。但由于水库防洪调度存在系统复杂、涉及面广、影响因素众多等因素，水库洪水分期调度无论是在理论、方法上，还是在工程应用上，都尚未达到成熟和完善的地位。为此，本书综合笔者近 10 年来围绕水库洪水资源化和防洪安全问题的研究成果，系统介绍水库土石坝工程洪水分期调度中有关洪水分期、分期设计洪水、漫坝危险度、漫坝易损度、漫坝风险度、洪水分期调度效应评价等关键和核心技术问题及其工程应用，以期促进该学科领域的发展与进步。全套方法和技术的终极目标是：确保水库土石坝工程在“不降低水库大坝防洪标准”以及“漫坝风险在容许范围内”对水库防洪调度方案进行优化，实现工程安全与经济效益的最佳结合。

本书共分 9 章，其体系和格局的形成深受课题组学术思想的影响。在同田文进、杜群超、蒋海艳、魏炜、刘俐、姜庆玲、杨庆、黄亚等多位研究生的热烈研讨中，作者得到了许多有益的启发，同时在组稿和修改过程中，他们也做了大量的整理和校对工作。没有研究生们的大力支持与帮助，要完成本书是很难的。在此，对他们的辛勤劳动表示由衷的感谢！

本书得到国家自然科学基金项目“水库土石坝工程洪水漫坝风险度评价方法及应用（资助号：50969001）”、广西自然科学基金项目“水库洪水资源化利用与示范研究（资助号：2012GXNSFAA053199）”、工程防灾与结构安全教育部重点实验室主任基金项目“坝工安全评价方法与预警决策研究（资助号：2009TMZR001）”、广西大学科学基

金项目“基于风险分析的水库防洪优化调度研究（资助号：XBZ110592）”等的支持；同时，得到了广西大学燕柳斌教授、杨绿峰教授和麻荣永教授的指导，得到了广西百色市水利局廖新添副局长、黄子俨工程师的大力支持，并提供了大量的工程资料。另外，广西工程防灾与结构安全人才小高地和广西大学 211 工程建设经费对本书出版予以资助，在此一并表示衷心的感谢！

本书参考了国内外相关文献，在此谨向文献的作者示以谢意！

因作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者予以批评指正。

作 者

2013 年 6 月于南宁

# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 概述                 | 1  |
| 1.1 问题来源及科学意义            | 1  |
| 1.2 国内外相关领域研究进展          | 2  |
| 1.2.1 水库汛期分期研究           | 2  |
| 1.2.2 分期设计洪水研究           | 4  |
| 1.2.3 防洪风险研究             | 6  |
| 1.2.4 溃口演化研究             | 12 |
| 1.2.5 溃坝洪水演进研究           | 13 |
| 1.2.6 溃坝损失估算研究           | 14 |
| 1.3 存在问题及本书内容            | 15 |
| 1.3.1 存在问题               | 15 |
| 1.3.2 本书内容               | 16 |
| 1.4 实例工程基本情况             | 17 |
| 1.4.1 流域特征               | 17 |
| 1.4.2 工程特性               | 17 |
| 第 2 章 水库土石坝工程防洪调度基础理论    | 20 |
| 2.1 水库基础知识               | 20 |
| 2.1.1 水库类型及等级            | 20 |
| 2.1.2 水库的主要组成部分及功能       | 21 |
| 2.1.3 水库防洪标准             | 22 |
| 2.2 水库特征水位               | 24 |
| 2.3 水库汛限水位控制基础理论         | 26 |
| 2.3.1 水库汛限水位控制方法的定义与分类   | 26 |
| 2.3.2 水库汛限水位静态控制的基本属性与理念 | 27 |
| 2.3.3 水库汛限水位动态控制的基本属性与理念 | 28 |
| 2.4 水库洪水调节计算             | 29 |
| 2.4.1 水库的调洪作用及任务         | 29 |
| 2.4.2 水库的调洪计算原理          | 31 |
| 2.4.3 水库的调洪计算方法          | 33 |
| 2.5 水库防洪调度               | 37 |
| 2.5.1 水库防洪调度概述           | 37 |
| 2.5.2 防洪限制水位的确定          | 37 |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 2.5.3 防洪调度方式的拟定 .....              | 40        |
| 2.6 水库防洪优化调度效益分析 .....             | 46        |
| 2.6.1 效益分析的目的意义和主要内容及方法选择 .....    | 46        |
| 2.6.2 防洪兴利连续调节计算方法的基本概念与原理 .....   | 47        |
| <b>第3章 水库土石坝工程防洪安全评价基础理论 .....</b> | <b>50</b> |
| 3.1 风险的有关概念 .....                  | 50        |
| 3.2 风险分析的目的、内容与程序 .....            | 53        |
| 3.2.1 风险分析的目的 .....                | 53        |
| 3.2.2 风险分析的内容 .....                | 53        |
| 3.2.3 风险分析的程序 .....                | 55        |
| 3.3 水库土石坝工程漫坝风险识别 .....            | 55        |
| 3.3.1 土石坝枢纽组成与失事风险类别 .....         | 55        |
| 3.3.2 水库土石坝工程漫坝事故分析 .....          | 57        |
| 3.4 水库土石坝工程漫坝风险估算 .....            | 57        |
| 3.4.1 失事概率分析 .....                 | 57        |
| 3.4.2 事故后果估算 .....                 | 66        |
| 3.4.3 风险值计算 .....                  | 70        |
| <b>第4章 水库土石坝工程洪水分期技术 .....</b>     | <b>72</b> |
| 4.1 汛期分期方法对比分析 .....               | 72        |
| 4.1.1 定性分析法 .....                  | 72        |
| 4.1.2 统计分析法 .....                  | 73        |
| 4.1.3 聚类分析法 .....                  | 73        |
| 4.2 数理统计分析法 .....                  | 75        |
| 4.2.1 方法简介 .....                   | 75        |
| 4.2.2 工程应用分析 .....                 | 75        |
| 4.3 聚类分析法 .....                    | 78        |
| 4.3.1 模糊集分析法 .....                 | 78        |
| 4.3.2 灰色定权聚类法 .....                | 79        |
| 4.3.3 工程应用分析 .....                 | 79        |
| 4.4 澄碧河水库汛期分期成果 .....              | 83        |
| <b>第5章 水库土石坝工程分期设计洪水分析技术 .....</b> | <b>84</b> |
| 5.1 分期选样与分期防洪标准 .....              | 84        |
| 5.1.1 分期设计洪水选样 .....               | 84        |
| 5.1.2 分期设计防洪标准与年防洪标准的关系 .....      | 85        |
| 5.2 水文频率曲线线型选择 .....               | 85        |
| 5.3 皮尔逊Ⅲ型频率曲线统计参数的估算 .....         | 87        |
| 5.3.1 矩法 .....                     | 87        |
| 5.3.2 概率权重矩法 .....                 | 87        |
| 5.3.3 权函数法 .....                   | 88        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 5.3.4 适线法 .....                       | 88         |
| 5.4 工程应用分析 .....                      | 89         |
| 5.4.1 原有设计洪水成果 .....                  | 89         |
| 5.4.2 分期设计洪水成果 .....                  | 90         |
| <b>第6章 水库土石坝工程洪水分期调度危险度评价技术 .....</b> | <b>93</b>  |
| 6.1 概述 .....                          | 93         |
| 6.1.1 常见水库防洪危险性评价方法 .....             | 93         |
| 6.1.2 存在问题分析 .....                    | 96         |
| 6.2 危险度评价的点值分析方法 .....                | 96         |
| 6.2.1 漫坝概率评估模型 .....                  | 96         |
| 6.2.2 随机变量处理分析 .....                  | 97         |
| 6.2.3 洪水作用分析 .....                    | 98         |
| 6.2.4 风浪作用 .....                      | 100        |
| 6.2.5 模型求解方法 .....                    | 101        |
| 6.2.6 分期条件下漫坝概率计算方法 .....             | 104        |
| 6.2.7 漫坝危险度赋值函数 .....                 | 104        |
| 6.3 危险度评价的区间分析方法 .....                | 104        |
| 6.3.1 区间分析方法基本原理 .....                | 105        |
| 6.3.2 评价模型及其求解 .....                  | 105        |
| 6.3.3 漫坝危险指标归一化处理 .....               | 107        |
| 6.4 漫坝危险度分级及评价指南 .....                | 107        |
| 6.5 工程应用分析 .....                      | 108        |
| 6.5.1 基础资料的处理 .....                   | 108        |
| 6.5.2 漫坝危险度计算成果 .....                 | 111        |
| <b>第7章 水库土石坝工程洪水分期调度易损度评价技术 .....</b> | <b>117</b> |
| 7.1 概述 .....                          | 117        |
| 7.1.1 关于易损度 .....                     | 117        |
| 7.1.2 漫坝易损度的定义 .....                  | 117        |
| 7.1.3 漫坝易损度的表达式 .....                 | 118        |
| 7.2 财产指标评价模型 .....                    | 121        |
| 7.2.1 漫坝财产指标分析 .....                  | 121        |
| 7.2.2 财产指标转换赋值函数 .....                | 126        |
| 7.3 人口指标评价模型 .....                    | 126        |
| 7.3.1 人口指标分析 .....                    | 126        |
| 7.3.2 人口指标转换赋值函数 .....                | 133        |
| 7.4 基于地理信息系统的溃坝易损度分析方法 .....          | 133        |
| 7.4.1 地理信息系统介绍 .....                  | 133        |
| 7.4.2 基础资料的选取 .....                   | 135        |
| 7.4.3 溃口演化及下游洪水演算 .....               | 137        |

|                     |                                   |            |
|---------------------|-----------------------------------|------------|
| 7.4.4               | 坝址断面溃坝洪水过程线的确定 .....              | 143        |
| 7.4.5               | 水库下游控制断面最大流量的确定 .....             | 143        |
| 7.4.6               | 易损指标的确定与分析 .....                  | 144        |
| 7.5                 | 漫坝易损度分级及评价指南 .....                | 144        |
| 7.6                 | 工程应用分析 .....                      | 144        |
| 7.6.1               | 财产和人口指标方法 .....                   | 144        |
| 7.6.2               | 地理信息系统方法 .....                    | 146        |
| 7.6.3               | 成果统计与分析 .....                     | 155        |
| <b>第8章</b>          | <b>水库土石坝工程洪水分期调度风险度评价技术</b> ..... | <b>159</b> |
| 8.1                 | 概述 .....                          | 159        |
| 8.1.1               | 现有风险标准及其分类 .....                  | 159        |
| 8.1.2               | 生命风险标准 .....                      | 160        |
| 8.1.3               | 经济风险标准 .....                      | 163        |
| 8.1.4               | 环境风险标准 .....                      | 164        |
| 8.1.5               | 社会风险标准 .....                      | 165        |
| 8.1.6               | 现有风险标准存在问题及发展趋势 .....             | 166        |
| 8.2                 | 漫坝风险度等级划分及其应用分析 .....             | 167        |
| 8.2.1               | 等级划分 .....                        | 167        |
| 8.2.2               | 应用分析 .....                        | 167        |
| 8.3                 | 洪水分期条件下漫坝风险度评价 .....              | 168        |
| 8.3.1               | 理论基础 .....                        | 168        |
| 8.3.2               | 方法步骤 .....                        | 170        |
| 8.4                 | 工程应用分析 .....                      | 171        |
| 8.4.1               | 水库漫坝风险度计算 .....                   | 171        |
| 8.4.2               | 水库汛限水位的优化调整 .....                 | 172        |
| <b>第9章</b>          | <b>水库土石坝工程洪水分期调度效应评价技术</b> .....  | <b>173</b> |
| 9.1                 | 概述 .....                          | 173        |
| 9.2                 | 随机动态规划模型介绍 .....                  | 173        |
| 9.2.1               | 动态规划模型 .....                      | 173        |
| 9.2.2               | 随机动态规划模型 .....                    | 177        |
| 9.3                 | 随机动态规划模型求解 .....                  | 180        |
| 9.3.1               | 求解思路 .....                        | 180        |
| 9.3.2               | 求解过程 .....                        | 181        |
| 9.4                 | 工程应用分析 .....                      | 182        |
| 9.4.1               | 工程运行情况 .....                      | 182        |
| 9.4.2               | 效益计算结果与分析 .....                   | 186        |
| <b>主要参考文献</b> ..... |                                   | <b>189</b> |
| <b>附录</b> .....     |                                   | <b>194</b> |

# 第1章 概述

## 1.1 问题来源及科学意义

全球水的总量为 13.86 亿  $\text{km}^3$ ，其中海洋水的总量为 13.38 亿  $\text{km}^3$ ，占全球水总量的 96.5%，陆地水储量只有 0.48 亿  $\text{km}^3$ ，占全球水总量的 3.5%；陆地水中淡水（含盐量小于等于  $1\text{g/L}$ ）总量为 0.35 亿  $\text{km}^3$ ，占陆地水储量的 73%，占全球水储量的 2.53%；在陆地淡水中，目前人类容易开发利用的淡水（包括河水、淡水湖泊水、浅层地下水和土壤水等）总量为 0.1065 亿  $\text{km}^3$ ，只占全球淡水总量的 30.4%，占全球总储水量的 0.07%（许武成，2011）。可见，水资源的静态储量是极其有限的，也是十分宝贵的资源。

尽管水资源是可再生资源，但受世界人口增长、人类对自然资源过度开发、基础设施投入不足等因素的影响，水资源的供应量远远不能满足人类生产和生活的需要，人类生存所必需的基本生活用水面临短缺、水质不达标或获取困难等问题。联合国儿童基金会和世界卫生组织 2008 年 7 月公布的报告显示：目前全球有 8.84 亿人无法获得安全的饮用水，其中亚洲国家约占一半，撒哈拉沙漠以南非洲国家约占 40%。联合国教科文组织 2009 年 3 月 12 日发布的《世界水资源开发报告》指出，人类对水的需求正以每年 640 亿  $\text{m}^3$  速度增长，到 2030 年，全球将有 47% 的人口居住在用水高度紧张的地区，一些干旱和半干旱地区的水资源缺乏将对人口流动产生重大影响。

我国多年平均水资源总量为 28124 亿  $\text{m}^3$ ，其中河川径流量为 27113 亿  $\text{m}^3$ ，仅次于巴西、前苏联、加拿大、美国和印度尼西亚，约占全球径流总量的 5.8%，居世界第 6 位。可见，我国水资源具有总量丰富的一面。然而，我国人口众多，耕地面积较大，水资源又有人均水量和地均水量贫乏的一面。按 2000 年人口水平，我国人均水资源为 2220  $\text{m}^3$ ，约为世界人均水平的 1/4，在世界排在第 121 位，被联合国列为 13 个贫水国家之一。从单位国土面积水资源量和单位耕地面积水资源量分析，分别为 29.9 万  $\text{m}^3/\text{km}^2$  和 1440  $\text{m}^3/\text{亩}$ <sup>①</sup>，约为世界水平的 1/2。可见，无论是按人均还是按地均水资源量，我国都是一个水资源比较贫乏的国家，以占世界 7% 的耕地和 6% 的淡水资源养活着世界上 22% 的人口。

目前，我国水资源供需矛盾日益突出。全国 640 个城市中，每年缺水城市达 300 多个，其中严重缺水的城市有 114 个，日缺水量 1600 万 t，每年因缺水造成的直接经济损失达 2000 亿元，每年因缺水少产粮食 700 亿~800 亿 kg。据预测，2030 年中国人口将达到 16 亿，届时人均水资源量仅有 1750  $\text{m}^3$ 。在充分考虑节水情况下，预计用水总量为

---

<sup>①</sup> 1 亩  $\approx 666.7\text{m}^2$ 。

7000 亿~8000 亿  $\text{m}^3$ , 要求供水能力比现在增长 1300 亿~2300 亿  $\text{m}^3$ , 全国实际可利用水量接近合理利用水量上限, 水资源开发难度极大。由此可见, 我国水资源供需面临非常严峻的形势, 如果在水资源开发利用上没有大的突破, 在管理上不能适应这种残酷的现实, 水资源很难支持国民经济迅速发展的需求, 水资源危机将成为所有资源问题中最为严重的问题。

可见, 全球特别是中国的水资源短缺情势非常严峻, 已经成为社会经济发展的重要制约因素。面对这种局面, 水利部本着可持续发展和以人为本的原则, 提出了由“控制洪水”向“洪水管理”转变、由“单一抗旱”向“全面抗旱”转变的防洪抗旱新思路。水库洪水资源化作为综合体现上述“两个转变”的主要工作形式之一, 在增加水库蓄水量, 提高水库工程综合效益方面发挥了重要作用, 受到水利部和国家防汛抗旱总指挥部办公室的高度重视(向立云、魏智敏, 2005)。然而受气候条件影响, 水库流域洪水往往表现出季节性变化的特点, 这为水库执行洪水分期调度提供了可能。水利科技工作者以此为切入点, 积极探索水库洪水分期调度的办法和途径, 以提高水库蓄水量、充分利用水库雨洪资源, 在保障经济社会发展方面起到积极的推动作用。

中国现有水库总数为 87000 多座, 总库容达 7000 多亿  $\text{m}^3$  (孙继昌, 2008), 由于历史原因, 已建大坝中 90% 以上为土石坝, 它们在发挥防洪与兴利重要作用的同时, 也存在洪水漫顶失事而危害下游人民生命财产的潜在威胁。水库土石坝工程失事统计数据表明, 洪水漫顶失事所占比例高达 50.6%, 位居第一(吴中如等, 2008)。

因此, 在水库土石坝工程防洪调度中, 如何在确保防洪安全的前提下对水库洪水进行分期调度, 是新形势下水利工作面临的一个重要课题, 而解决该课题的理论和技術, 对促进水库洪水资源化和加强水库土石坝工程防洪安全管理水平具有重大现实意义。基于上述需要, 本书对水库土石坝工程洪水分期调度中有关洪水分期、分期设计洪水、漫坝危险度、漫坝易损度、漫坝风险度及效应评价问题进行探讨和分析, 以期促进该学科领域的发展与进步。

## 1.2 国内外相关领域研究进展

### 1.2.1 水库汛期分期研究

#### 1. 国内方面

1949 年以后我国陆续修建了大量水库, 由于新建水库水文基础资料样本容量较小, 不具备汛期分期研究的基本条件, 且当时我国人口较少, 水的供需矛盾尚不突出, 暂无实施水库汛期分期以便抬高分期汛限水位的必要。随着洪水资料的累积、分期洪水特性的显现、水库调度经验的增加以及国民经济的迅猛发展和水资源需求量的持续增长, 一些地区水资源供需矛盾突出, 于是便开始了水库汛期分期以及分期汛限水位的研究。汛期分期早期的研究多见于水资源短缺严重、水资源开发利用程度高的东北地区及海河流域(胡四一等, 2002; 邹鹰等, 2006)。随着经济社会可持续发展对水的需求全面提升(包括水量的增加、供水保证率和供水水质的提高), 汛期分期思想逐渐应用到水资源相

对丰富的南方地区（莫崇勋等，2007a，2009；金保明、方国华，2010）。

水库汛期分期在国内的研究始于20世纪50年代，其发展大致经历了以下三个阶段。

第一阶段：20世纪50年代至80年代初，为汛期分期研究的起步阶段，分期主要根据水文要素采用简单的数理统计方法。在1958年5月26日吉林、黑龙江两省省委书记向中央呈报的报告中提出丰满水库自8月1日至20日防洪控制水位（正常高水位）由263m降至261m，这便是我国将水库汛期进行分期以便实施分期控制洪水的最初尝试（王本德等，2006）。1961年华东水利学院、陕西工业大学和成都工学院合编的高校教科书《工程水文学》（华东水利学院等，1961）及1963年刘光文先生编写的高校教科书《水文分析与计算》（刘光文，1963）都论述了洪水分期的原则、方法及分期设计洪水计算方法。1978年水利电力出版社出版的《水库控制运用》较为系统地论述汛期分期和分期防洪限制水位的确定方法（大连理工大学水利工程学院、大伙房水库工程管理局，1978）。1979年和1981年先后颁发的《水利水电工程设计洪水计算规范》（SDJ22—1979）和《水利工程管理通则》（SLJ702—1981）正式将汛期分期以及分期确定设计汛限水位方法作为法规实施。至此，汛期分期的研究进入了一个崭新的阶段。

第二阶段：20世纪80年代至20世纪末，为汛期分期的探索发展阶段。期间，气象成因分析法、模糊集分析法等方法逐渐被应用到汛期分期计算中，使汛期分期达到定性分析与定量计算相结合的层次。1982年冯尚友和余敷秋在对丹江口水库汛期分期的研究中指出，汛期及其分期的起止日期要基本符合气象水文特性，从水文统计和气象成因两方面对丹江口水库汛期进行分期（冯尚友、余敷秋，1982）。1984年在北京召开的汛期分期洪水讨论会指出，“今后应根据我国季风气候的特点，从环流形势天气系统的季节变化入手，结合水文条件和防洪要求，进行汛期内分期暴雨和洪水的研究”（杜兆沛，1984）。1984年水利电力部天津勘测设计院和国家气象局北京气象中心联合发表了“岳城水库汛期后期暴雨特性及设计洪水分析”论文，从气象成因角度论述岳城水库汛期分期方法（水利部电力部天津勘测设计院、国家气象局北京气象中心，1984）。1987年陈守煜等提出的模糊集分析法突破了硬性划分汛期起讫时间的传统水文学观点，该分析方法对汛期的科学合理分期具有重要的理论价值与实用意义（陈守煜等，1987）。1995年陈守煜在论述水文系统模糊集分析的哲学基础之上，又提出水文成因、概率统计、模糊集分析相结合的确定汛期隶属函数的综合性方法，阐述了水文系统模糊集分析的基本方法论（陈守煜，1995）。

第三阶段：21世纪初至今，为汛期分期研究的蓬勃发展时期，其中2005～2010年为汛期分期研究的高潮期。21世纪经济社会迅猛发展，水资源供需矛盾日益激化，人们开始转变治水理念，以谋求经济社会的可持续发展和水资源的可持续利用。“海河流域洪水资源安全利用——水库汛限水位的确定与运用”（胡四一等，2002）和“以科学精神和积极态度对待洪水资源化”（程殿龙等，2004）这两篇文章拉开了21世纪关于洪水资源化与水库调度研究的序幕。为充分利用洪水资源，以实现水资源的可持续利用，2002年，国家防汛抗旱总指挥部办公室站在“从洪水控制向洪水管理”的新时期治水思路的高度，提出开展“水库设计运用专题”重大科研项目，水库汛期分期的研究也随

之如火如荼地展开。继侯玉等(1999)证明了洪峰散点序列是一种分形,初步探讨了分形理论在水库汛期分期中的应用,为汛期分期提供了新思路之后,方崇惠、雒文生(2005)于2000年对分形理论在水库汛期分期中的应用作了详细研究。2005~2007年,刘攀等(2005, 2006, 2007)将变点分析法引入到水库汛期分期计算中,并用统计试验方法对变点分析法的3种模型进行效率评价与比较,得出基于超定量取样的概率变点分析模型具有较好的无偏性和有效性。2006~2007年,刘克琳等(2006, 2007)指出Fisher最优分割法对有序样本进行分类具有多指标聚类、不破坏样本原有顺序等特点,且能根据定义的目标函数确定最优分期数。随后,投影寻踪法(陈曜、王顺久, 2009)和集对分析法(谢飞、王文圣, 2011)等多种方法也被引用到水库汛期分期计算中。至此,人们对汛期发展过程具有多重属性的认识逐步完善,汛期分期的精度不断提高。

## 2. 国外方面

由于水资源供需矛盾、人口密度及分布以及水文气象特性等的不同,汛期分期的研究主要集中在国内,国外只有少量关于洪水季节性规律的研究。Beurton和Thieken(2009)在对德国境内481个水文站年最大洪水季节性分布规律进行聚类分析的基础上,得出以下聚类:德国西部和中部地区的河流汛期发生在冬季;东北部地区河流的汛期主要发生在春夏季节;德国南部地区洪水主要发生在夏季。Cunderlik等(2004a, 2004b)认为在水文与水资源管理中,洪水季节性规律的研究是非常基础与实用的,针对数理统计方法较主观地划分洪水分期,提出了矢量统计法和相对频率法,并对比年最大值取样和超定量取样两种取样方法对英国洪水的季节性规律进行了研究。

迄今为止,国外虽然还没有系统地对水库汛期分期进行研究,但在水库调度领域有许多成功的应用实例(郭生练, 2000),如美国加利福尼亚中心流域工程优化调度系统(CVP)、田纳西流域机构的水资源优化调度系统(HYDROSIM)、加拿大Simonovic等开发的水库调度分析专家决策支持系统、美国陆军工程师团开发的防洪兴利调度系统(HEC-5)等。1985年,Yeh(1985)发表了“水库调度综述”一文,全面回顾了水库调度的各种优化方法,此外,还指出了模拟调度的优越性。2004年,Labadie(2004)发表了水库群调度的综述文章,不仅介绍了水库群模拟和优化技术,还讨论了神经网络、遗传算法以及模糊技术在水库调度中的应用进展。

### 1.2.2 分期设计洪水研究

分期设计洪水研究主要集中在国内,国外鲜有报道。

年最大设计洪水对各分期都采用年最大样本设计值,因此不能反映洪水的季节性变化规律,而且整个汛期以单一汛限水位运用水库,使水库在汛期的每一天都做好迎接设计标准的洪水,这与事实不符,导致水库常处于超标准安全状态,无法充分发挥水库的综合效益。人们意识到这一问题之后,随即开展了水库分期运用的研究。所谓分期设计洪水是在分析流域洪水季节性规律的基础上,按照设计和管理要求,把整个汛期划分为若干个分期(通常划分为前汛期、主汛期、后汛期),然后在各个分期内选样进行频率

计算。根据确定的分期规则,研究分期内洪水随机特性和分布规律,寻求较合理的取样方法。目前,研究较多的抽样方法主要有年最大洪水、分期年最大洪水、分期最大洪水和超定量取样方法,取样一般有不跨期和适当跨期两种(方彬等,2007b)。关于分期设计洪水的研究在我国起步较早,与水库汛期分期基本一致。然而对分期设计洪水中关于洪水取样、分期洪水频率与年洪水频率以及分期防洪风险与年防洪风险等问题认识得不全面,导致对分期设计洪水的研究基本停滞不前。分期设计洪水的研究在国内的发展大致经历了以下两个阶段。

第一阶段:大致在2005年以前,基本上沿用年设计洪水的思路。这是分期设计洪水的起步发展阶段,这个阶段的分期设计方法沿用了年设计洪水的思路,只不过是年取样转变成各分期内取样。基于分期设计洪水标准等价于年设计洪水标准的基础上,采用分期取样法对各分期内洪水进行频率分析计算,其中取样方法又分为分期年最大洪水取样法、分期最大洪水取样法和超定量取样法。人们很快对将分期设计洪水标准等价于年设计洪水标准这一假设提出了质疑。叶秉如(1995)认为现行分期洪水的处理方法带有一定的经验性,因为在洪水分期出现时,总的防洪破坏概率究竟为多少,是否恰好满足所需求的防洪设计标准,现行洪水分期方法对此并未给予答复。丁晶等(1998)指出,基于分期最大洪水取样得到的洪水系列所计算出的洪水频率,本质上不同于全年最大洪水系列推求出的洪水频率;前者是指洪水事件在某一分期发生的可能性,后者是指洪水事件在一年内(包括所有分期)发生的可能性,两者从水库防洪安全来看存在本质区别。王善序(2005)经论证分析和实际计算后得出:采用分期洪水频率等于防洪标准 $T$ 的倒数的假定是错误的,由此计算得出的 $T$ 年一遇分期设计洪水一般系统偏小,实际是 $T/(K+1)$ 年一遇( $K$ 为非负整数随机变量);真正的 $T$ 年一遇分期设计洪水与 $T$ 年一遇全年最大洪水是相等的;他指出,现行的分期设计洪水计算技术仍存在严重错误,通过它来提高水库兴利效益,是在冒着降低水库防洪标准的风险。

第二阶段:大致从2005年至今,是采用优化设计的方法。由于人们已经意识到现行分期设计洪水模式估算的分期设计洪水值系统小于年最大洪水设计值,分期后水库达不到原设计年防洪标准,于是便开始探讨能够满足防洪标准的新的分期设计洪水模式。在这个研究阶段,不再假设各个分期之间的洪水是相互独立的,而是开始考虑不同分期的分期最大洪水之间的相关关系。优化设计方法通过选择合适的Copula函数构建汛期分期为三分期、边缘分布为P-Ⅲ分布的分期设计洪水的联合分布;在假定分期设计洪水的联合重现期等于防洪标准 $T$ 的前提下,推导基于Copula函数的分期设计洪水频率和防洪标准的关系,进而推求分期设计洪水值。肖义等(2008)采用Gumbel-Hougaard Copula函数描述两个分期的分期最大洪水之间的相关性结构,并得到分期最大洪水的联合分布和联合重现期,在基于分期联合重现期等于防洪标准的基础上推导出

分期设计洪水频率与防洪标准的关系式:  $p_x = p_y = 1 - \left| 1 - \frac{1}{T} \right|^{|0.5 \frac{1}{\theta}}|$ , 最后,以实例

对比验证了现行分期模式的分期设计洪水值与新的分期设计洪水模式的洪水设计值,得到新的分期设计洪水模式的主汛期的设计值略大于年最大洪水,非主汛期的设计值则小于年最大设计洪水值。张娜等(2008)随后对此法展开了推广应用,并得到较合理的分

期设计洪水。

分期设计洪水的研究目的是为了确定合理的分期汛限水位, 尽管目前有人提出采用模糊分析法或优化设计法来确定分期汛限水位, 但分期设计洪水法仍然是最常用的方法, 是规范推荐采用的方法。然而, 关于分期设计洪水法的争议较多, 有争议就会有发展, 对现行方法的改进和完善, 应重点解决分期设计洪水的统计选样、年最大洪水与分期最大洪水的对比分析、分期最大洪水频率与年最大洪水频率不一致问题等。

### 1.2.3 防洪风险研究

#### 1. 国内方面

水库在设计、运行过程中存在着大量的不确定性因素, 包括水文不确定性、水力不确定性和工程结构不确定性等。正是由于存在这些不确定性因素, 包括汛限水位调整在内的水资源决策系统不可避免地存在一定风险。汛限水位调整必须在综合考虑风险和效益的基础上进行。

我国对汛限水位的研究较国外多, 对分期汛限水位调控风险分析也有一定研究。汛限水位调控风险计算方法主要包括频率分析法、随机模拟法等。频率分析法发展最早, 也是最简单的方法。该方法假定水库年调洪最高水位与年最大洪水出现频率相同, 以年调洪最高水位等于不破坏水利工程极限指标水位的洪水频率作为极限风险率。若利用设计洪水推求该极限风险率, 则风险率的大小为对应设计洪水重现期的倒数, 因此频率分析法有时也称重现期法。频率分析法在计算风险上具有简单易行的优点, 但该法将水库防洪安全标准同设计洪水标准完全等同起来, 其合理性尚待考证; 另外, 该法只考虑了洪水的作用。

随机模拟法作为推求风险率的一种重要方法, 在国内得到了广泛应用。成都科技大学在国家“七五”攻关中, 以三峡工程运行和管理的防洪风险研究为对象, 以随机模拟法技术手段, 对工程现行设计洪水是否真的达到设计标准加以论证, 在拟定的防洪调度方式下, 通过建立理想防洪库容对防洪调度风险做出评价, 从而达到水库防洪安全可靠性的要求。1994年, 长江水利委员会水文局为进一步论证三峡工程设计洪水计算的合理性, 通过实测与模拟两种方法计算了三峡水库失事风险, 从而验证了三峡工程采用的设计洪水及过程线是较为安全的。梅亚东、谈广鸣(2002)综合考虑了水文、水力不确定性及调洪起始水位、调洪规则可选择性等对大坝防洪安全的影响, 应用一阶季节性自回归模型对入库洪水进行模拟, 应用三角分布和正态分布描述水力不确定性对泄洪能力的影响, 给定调洪起始水位和调洪规则, 经水库调洪演算, 得出了水库最高调洪水位的随机分布和洪水漫顶风险率。丁大发等(2005)系统分析了水库运行过程中常遇洪水风险事件、大坝安全风险事件及水库防洪调度的主要风险因素, 提出了基于随机模拟技术的水库防洪调度多因素组合风险估计模型, 对汛限水位进行比较选择。该方法打破了传统风险率计算中只考虑洪水不确定性的弊端, 将水库大坝防洪风险的研究建立在综合分析的基础上。刘晓琴等(2005)结合陆浑水库实际情况, 在分析影响水库防洪调度主要不确定性因素的基础上, 讨论了风险分析的计算方法, 采用蒙特卡罗模拟技术给出水库

防洪调度风险分析的实施程序,对陆浑水库分期运用方案下不同频率入库洪水在不同汛限水位下造成的洪灾风险率进行了评估。随机模拟法能够考虑多种不确定性因素作用,用随机模拟法建立汛限水位调控风险分析模型具有一定的优越性,值得推广应用。

水库防洪风险与大坝安全密切相关。我国对水库大坝的安全评价,过去一般按照设计规范分别对防洪、抗滑、抗震、抗渗、抗裂等功能分项作安全计算,按规范要求用大于1的安全系数 $[k_0]$ 值作为安全与否的衡量标准(李雷、盛金保,1999;王仁钟,2002)。然而水库大坝的地质、水文、环境及勘测、施工、运行管理等涉及大量随机因素的影响,即使用最先进的勘测试验手段,按现代的力学原理及筑坝技术和管理知识,仍难完全弄清地质、水文和环境等在庞大空间和漫长时间内的变异,也难免施工质量的缺陷及管理工作的失误等。因此用安全系数 $[k_0]$ 分项计算的结果仍难确保工程的绝对安全,也没有绝对安全的水库大坝。更何况水库各子项工程之间的相互关联、水库经济效益及事故风险等均未深入系统分析。近20年来结构可靠度分析方法,考虑了许多随机变量及它们的相依关系,并逐渐在水库大坝中引用,弥补了 $[k_0]$ 法的一些缺点。我国的《混凝土重力坝设计规范》(SDJ21—78)和《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SDJ20—78)校准后,参照国外的技术标准及长期积累的工程经验,确定了这两种结构持久状况承载能力极限状态的目标可靠指标(王仁钟等,2006)。但是,它仍然局限于工程结构的力学问题,而对水库经济效益、失事风险及其影响等仍未触及。一些坝工先进及水库灾害频繁的国家,迫于水库下游经济高度发展、人口密集等社会压力,非常重视上述问题,产生了水库大坝安全评价的新方法。我国水利部大坝安全管理中心在这样的情况下,于1990年提出了水库大坝总体安全度(SD)法及相应的安全度判别标准,运用概率论、坝工原理和现代计算技术及工程数据库信息,提出了计算方法和计算程序,将总体安全度定义为

$$SD = P_s / \eta \quad (1.1)$$

式中, $P_s$ 为某一水库大坝的工程安全度; $\eta$ 为水库的社会经济影响因子。

关于大坝工程安全度 $P_s$ 的分析,按坝的防洪、抗滑、抗裂、抗渗、抗震及抗生物破坏共6个方面进行计算,认为其中任何一项功能失效,都将造成坝工结构的整体破坏,因此工程安全度可表达为

$$P_s = \prod_{i=1}^n (1 - P_{fi}) = \prod_{i=1}^n P_{si} \quad (1.2)$$

式中, $P_{fi}$ 是第 $i$ 项功能的失效概率; $P_{si}$ 是第 $i$ 项功能的可靠度。

水库大坝对社会经济的影响因子 $\eta$ 可用简单的经济尺度和工程重要性来衡量。按水库产出效益 $E$ 与工程除险加固总投入 $I$ 之比以及工程等级 $C$ 之间的关系反映为

$$\eta = (E/I)^{1/10} e^{C/3} \quad (1.3)$$

式中, $e=2.718$ 。

根据水库大坝总体安全度SD,参考水库大坝安全度评判标准,得出水库大坝的风险程度。这种方法理论上可将水库大坝的安全度予以量化界定,既以结构安全的可靠度为基础,又涉及工程的社会及经济等影响,代表了我国坝工界从工程安全管理向风险管

理的转化和探索。但是由于大坝溃决概率的可靠性分析的复杂性、所需计算参数获得的困难性,这种方法距实用还有较大的困难。但对大坝风险管理的探索并未停止,2002年,水利部大坝安全管理中心对江西省29座大中型水库按照现场评分法和葡萄牙综合风险指数法进行了风险排序。排序的目的是了解水库大坝的安全现状,以便在对各工程作除险加固规划时权衡其轻重缓急,因此排序的原则主要考虑各坝的相对安全程度,作出定性比较,水库效益则置于从属位置,仅作适当考虑。

关于防洪风险研究,姜树海、范子武(2006)利用数值模拟技术、GIS技术等,从洪水灾害风险分析角度,对区域洪水的调度、调蓄、滞洪、溃堤过程进行数值模拟和洪水调控、防洪失控风险的分析评估。陈肇和李其军(2000)对漫坝风险进行了较为系统的研究,取得比较丰硕的成果。这些研究基于可靠度分析方法,考虑影响风险的不确定性因素的随机性,建立相应的风险模型及计算方法,比较符合客观情况,在工程上得到一定应用。

## 2. 国外方面

风险分析技术的发展,最早起源于美国。美国首先将风险分析技术使用于军事工业方面,1974年美国原子能委员会发表了商用核电站风险评价报告,引起了世界各国的普遍重视,推动了风险分析在各个领域的研究与应用(汪元辉,1999)。自从20世纪80年代初美国发表了不少关于水库大坝风险分析的原理、方法和实例的文章以来,大坝风险分析技术发展很快,特别是在美国、加拿大、澳大利亚和西欧国家发展迅速,其他国家主要是向这些国家学习,并在实践中推广应用。因此,下面主要介绍这些国家大坝风险分析发展现状。

### 1) 美国

美国各部门用于水库大坝风险评判的标准各异,风险分析方法也各异。美国陆军工程兵团(United States Army Corps of Engineers, USACE)的Hagen于1982年最早提出风险的概念,提出用相对风险指数来判别大坝风险<sup>①②</sup>。相对风险指数(R)用式(1.4)表示为

$$R = \prod_{i=1}^3 O_i + \prod_{j=1}^3 S_j \quad (1.4)$$

式中, $O$ 和 $S$ 分别为漫顶因素和结构险情因素,各占125分,共250分; $O_i$ 为洪水漫顶的第 $i$ 项风险因素值, $O_1$ 为溃坝危及的家庭数, $O_2$ 为按现行洪水设计标准工程达到的防洪库容, $O_3$ 为大坝抗御漫顶破坏的能力; $S_j$ 为建筑结构的第 $j$ 项险情(含地震及洪水)值, $S_1$ 为溃坝危害的家庭数, $S_2$ 为建筑物明显的损坏, $S_3$ 为潜在地震活动性。

<sup>①</sup> 李君纯. 1997. 水库大坝安全评判的研讨. 水利部、交通部、电力工业部、南京水利科学研究院大坝安全管理中心技术部

<sup>②</sup> 李雷, 李君纯. 2000. 江西省部分大、中型水库安全现状调研报告. 水利部大坝安全管理中心、江西省水利厅水管处