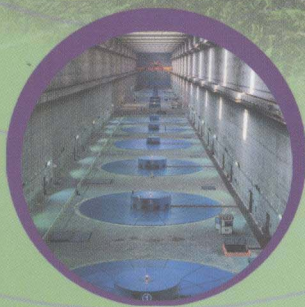
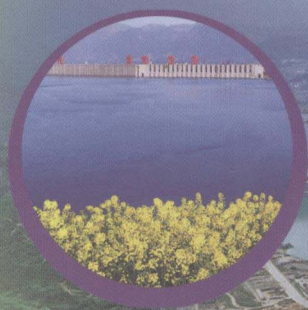
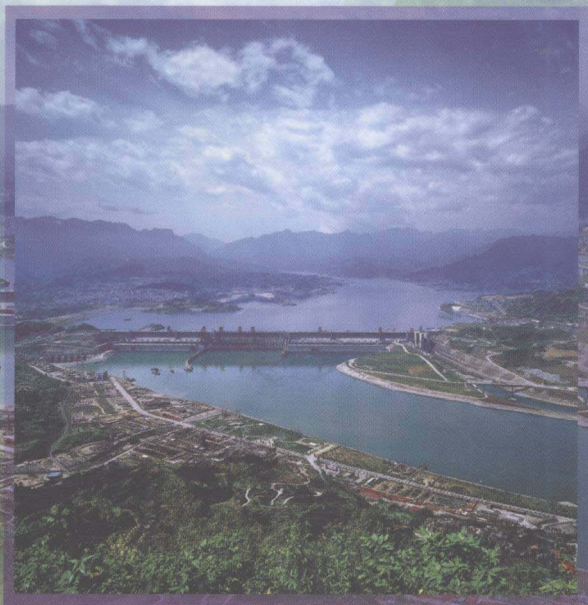


水科学前沿学术丛书

三峡水库汛限水位 动态控制关键技术研究

© 郭生练 李响 刘心愿 戴明龙 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水 科 学 前 沿 学 术 丛 书

三峡水库汛限水位 动态控制关键技术研究

◎ 郭生练 李响 刘心愿 戴明龙 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了水库汛限水位动态控制的理论、方法和研究进展。通过大量的文献资料和三峡水库的应用示范,对设计洪水分析计算和汛限水库动态控制的关键技术开展了研究。主要内容包括:长江上中游流域暴雨洪水特征;干支流洪水遭遇分析;三峡水库设计洪水复核;汛期分期及分期设计洪水;汛期水位分期控制方案;汛限水位动态控制的可行性、控制域和实时控制运用等。书中介绍的方法客观全面,便于实际操作应用,既可确保防洪调度的安全,又有利于提高水库的综合利用效益。

本书适合于水利、电力、交通、地理、气象、环保、国土资源等领域的广大科技工作者、工程技术人员参考使用,也可作为高等院校高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三峡水库汛限水位动态控制关键技术研究 / 郭生练
等编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011. 12
(水科学前沿学术丛书)
ISBN 978-7-5084-9294-0

I. ①三… II. ①郭… III. ①三峡工程—水库—汛限
水位—控制—研究 IV. ①TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第265821号

审图号: GS(2012)17 号

丛 书 名	水科学前沿学术丛书
书 名	三峡水库汛限水位动态控制关键技术研究
作 者	郭生练 李响 刘心愿 戴明龙 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京民智奥本图文设计有限公司
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22印张 563千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着社会经济的快速发展，水库防洪和兴利综合利用的矛盾日益突出。汛限水位是协调水库管理运行过程中防洪与兴利之间矛盾的关键。近十多年来，随着科技水平的不断进步和发展，计算机应用和通信技术水平大幅度提高；我国大部分水库流域已经建立了水文自动测报系统，实时采集水雨情资料和气象信息；通过改进气象预报和洪水预报方法及模型，延长了洪水预见期，提高了洪水预报精度。因此，开展水库汛限水位的研究对于适应新环境的要求，充分发挥水库的防洪兴利效益，具有重要的意义。2002年，国家防汛抗旱总指挥部办公室根据我国社会经济可持续发展和对水资源可持续利用的要求，组织开展了水库汛限水位设计与运用的基础理论研究及试点水库工作。作者及其课题组积极参与该领域的研究与应用，与同事和研究生们一起，发表了60多篇学术论文，积累了一定经验和知识。

本书的第一章论述了国内外有关汛限水位静态控制和动态控制的方法和研究进展；第二章和第三章分别为三峡水库流域暴雨洪水概况和长江干支流洪水遭遇规律研究；第四章至第六章分别为三峡水库设计洪水复核、三峡水库汛期分期及分期设计洪水、三峡水库汛期水位分期控制方案；第七章至第九章分别为三峡水库汛限水位动态控制的可行性、三峡水库汛限水位动态控制域、三峡水库汛限水位实时动态控制；第十章至第十二章分别为三峡水库防洪优化调度图、三峡水库汛末蓄水时机选择与方案、三峡水库汛期泄洪闸门优化调度。希望本书的出版能为我国进一步开展水库汛限水位动态控制研究起到抛砖引玉的作用。

全书由郭生练负责统稿，李响、刘心愿、戴明龙参与了部分章节的编写。武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室的刘攀、李玮、肖义、方彬、闫宝伟、陈璐、张娜、陈炯宏、李雨、郭家力、李天元、栗飞、汪芸，长江水利委员

会水文局沈燕舟、刘冬英、王政祥等参与了部分研究工作。本书是在综合国内外许多资料的基础上，经过反复酝酿而写成的，其中一些章节融入了作者十多年来的主要研究成果。由于作者水平有限，编写时间仓促，书中必然有许多缺陷和不妥之处，有些问题有待进一步深入探讨和研究；在引用文献时，也可能存在挂一漏万的问题，希望读者和有关专家批评指出，请将意见反馈给编著者，以便今后改正。

本书是在“十一五”国家科技支撑计划专题《三峡水库汛限水位动态控制关键技术示范研究，2008BAB29B09-3》的资助下完成的。长江三峡开发总公司曹广晶教授级高工，国家防洪减灾研究中心黄金池教授，长江水利委员会水文局郭海晋教授级高工，武汉大学熊立华教授等专家学者对本书进行了评审，提出了许多宝贵的意见和建议。在此一并感谢。

编著者

2011年4月于武汉

目 录

前言

第一章 概述.....	1
第一节 ... 汛限水位静态控制方法研究进展.....	1
第二节 汛限水位动态控制方法研究进展.....	7
第三节 .. 三峡水利枢纽工程概况.....	11
第二章 三峡水库流域暴雨洪水概况	16
第一节 三峡水库流域自然地理.....	16
第二节 长江上中游暴雨时空分布.....	19
第三节 三峡水库洪水类型及组成特征.....	20
第四节 本章小结.....	26
第三章 长江干支流洪水遭遇规律研究.....	28
第一节 研究资料和分析方法.....	28
第二节 长上干与清江洪水遭遇分析.....	29
第三节 长上干与洞庭湖洪水遭遇分析.....	38
第四节 长上干与汉江洪水遭遇分析.....	48
第五节 长江干支流洪水遭遇成因分析.....	59
第六节 基于 Copula 函数的洪水遭遇分析研究.....	81
第四章 三峡水库设计洪水复核.....	93
第一节 历史洪水概况.....	93
第二节 实测大洪水概述.....	95
第三节 三峡水库设计洪水计算.....	100
第五章 三峡水库汛期分期及分期设计洪水.....	110
第一节 三峡水库汛期分期.....	110
第二节 三峡水库分期设计洪水.....	131
第三节 基于 Copula 函数的三峡水库分期设计洪水.....	148
第四节 分期设计洪水频率与防洪标准的关系.....	162
第六章 三峡水库汛期水位分期控制方案.....	170
第一节 三峡水库防洪调度规则分析.....	170
第二节 三峡水库汛期水位分期控制方案.....	173
第三节 三峡水库汛期水位分期控制方案检验.....	177
第七章 三峡水库汛限水位动态控制的可行性.....	187
第一节 三峡水库洪水资源利用.....	187
第二节 三峡大坝质量和水库运行管理.....	188
第三节 水文气象预报成果可利用性分析.....	189

第四节 长江上游水库群建设及来沙特性.....201

第八章 三峡水库汛限水位动态控制域.....205

 第一节 预泄能力约束法.....205

 第一节 考虑洪水过程线形状不确定性的风险分析法.....211

 第二节 考虑洪水预报误差的水库汛限水位动态控制域模型法.....228

 第三节 三峡水库汛限水位动态控制域方案多目标决策.....237

第九章 三峡水库汛限水位实时动态控制.....244

 第一节 基于贝叶斯的实时洪水预报修正.....244

 第二节 考虑未来洪水量级的汛限水位实时动态控制模型.....260

 第三节 三峡水库汛限水位实时动态控制.....261

第十章 三峡水库防洪优化调度图.....269

 第一节 三峡水库防洪预报调度图模型.....269

 第二节 模型优化算法及求解.....273

 第三节 优化计算结果分析.....276

第十一章 三峡水库汛末蓄水时机选择与方案.....288

 第一节 三峡水库蓄水研究进展.....288

 第二节 三峡水库不同蓄水方案讨论.....289

 第三节 不考虑防洪要求的三峡水库提前蓄水优化方案.....303

 第四节 考虑防洪及综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案.....311

第十二章 三峡水库汛期泄洪设施优化调度.....325

 第一节 泄水设施运用调度要求.....325

 第二节 考虑泄洪设施运用要求的洪水优化调度.....327

 第三节 基于光滑支持向量机的泄水设施优化调度规则研究.....332

 第四节 本章小结.....343

第一章 概述

汛限水位是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位，也称防洪限制水位。《中华人民共和国防洪法》第四十四条明确规定^[1]：“在汛期，水库不得擅自在汛期限制水位以上蓄水，其汛期限制水位以上的防洪库容的运用，必须服从防汛指挥机构的调度指挥和监督”。因此，汛限水位具有法定地位。《水利工程水利计算规范》^[2]也规定：“汛限水位不仅是协调防洪和兴利关系的关键，而且对工程发电效益、库内引水位高程、通航水深、泥沙淤积，以及水库淹没指标等具有直接影响”。可见汛限水位的制定对水库的防洪安全和兴利效益的发挥具有极其重要的作用。

汛限水位研究方法按设计理念分为静态控制法和动态控制法；按理论基础分为水文统计法、确定性优化法和不确定性推理法；按汛期分期及水位方案分为固定汛限水位法和分期汛限水位法^[3]。目前我国大多数水库以年最大设计洪水为防洪调度依据，采用固定汛限水位，腾空库容以调蓄汛期可能发生的洪水，这种防洪调度方法，操作简便，在过去预报精度不高、预见期不长的情况下，易为人们所接受。但是这种年最大设计洪水并不能反映洪水的季节性变化规律，致使水库经常处于超标准安全状态。在汛期许多时候，一旦出现较大洪水（有时距设计洪水还很远）就被迫弃水；而在汛末又往往蓄不满。这种水库调度方式既不合理，也不经济，影响了水库兴利效益的发挥和提高^[4]。

汛限水位是协调水库运行管理过程中防洪与兴利之间矛盾的关键。随着水文资料的积累、防洪工程配套设施的建设、流域社会经济的发展、水库功能的转换以及水资源供求关系的变化等，一些水库的现实运行条件同设计之初的环境相比有了一定程度的改变。近十多年来，随着科技水平的不断进步和发展，计算机应用和通信技术水平大幅度提高；我国大部分水库流域已经建立了水文自动测报系统，实时采集水雨情资料和气象信息；通过改进气象预报和洪水预报方法及模型，延长了洪水预见期，提高了洪水预报精度。因此，开展水库汛限水位的研究对于适应新环境的要求，充分发挥水库的防洪兴利效益，具有重要的意义。2001 年，国家防汛抗旱总指挥部办公室根据我国社会经济可持续发展和对水资源可持续利用的要求，组织开展了水库汛限水位设计与运用的基础理论及试点水库的研究工作，已经取得了显著进展和实效。

第一节 汛限水位静态控制方法研究进展

汛限水位静态控制方法按照汛期分期及水位方案可以分为固定汛限水位法和分期汛限水位法。

（1）固定汛限水位法是汛限水位研究的传统方法。它在对河流、水库所在流域的水文气

象条件、历年暴雨、洪水等资料进行分析的基础上,硬性规定汛期起止时间并在此期间执行单一的汛限水位方案。该方法通过对历年汛期洪量或洪峰进行频率分析,推求设计洪水过程线,在一定调度规则及设施条件约束下,经调洪演算得到汛期洪水调度起调水位,并以此作为整个汛期的防洪限制水位。其优点是简单易行,在运用过程中便于管理运作,易为人们所接受。然而,由此确定的单一汛限水位方案虽然能够调度稀遇洪水,但却忽视了汛期洪水沿时程的分布规律,使得汛末水位不能及时抬高拦蓄洪水,造成水资源的浪费。事实上,固定汛限水位法是以牺牲部分兴利效益为代价来保证防洪的安全。我国早期的水库由于受各种条件制约,几乎全部都是采用这种设计思想,在运行中暴露出的问题已经越来越多。现阶段,随着水资源供需矛盾的日益紧张以及科学技术的发展,该方法已逐渐被分期汛限水位法取代。

(2) 分期汛限水位法以洪水的季节性特点为依据,将汛期划分为若干阶段,针对各分期采用适当的方法确定并执行各自的汛限水位方案。我国《水利水电工程设计洪水计算规范》^[5]中规定,确定分期汛限水位的方法是以汛期分期为基础,先推求各期同频率分期设计洪水过程,然后按水库运行原则分期进行调洪演算,从而确定水库分期汛限水位。当按分期设计洪水定出的最大防洪库容小于按全年最大设计洪水过程线算出的防洪库容时,采用前者进行防洪调度似乎降低了防洪标准,一般处理方法是以全年最大设计洪水代替各分期设计洪水最大者,或经过分析,将全年最大设计洪水用于汛期中洪峰发生最频繁、量级最大的时段,其余各期则仍用分期设计洪水的计算成果。至于分期设计洪水标准,一般均取与全年最大设计洪水同一标准^[6]。通过多年的发展,该方法虽然取得了一定的发展,但其思想依然基于水文频率计算。因此,在运用中必然受防洪标准制定、洪水样本资料选取、频率曲线线型选用以及参数估计确定方法等多种带有较强的经验性特征的因素制约。

一、汛期分期方法研究进展

为确保汛期防洪安全和充分拦蓄雨洪,把洪水变成可利用的水资源,可对汛期进行合理的划分,即汛期分期。河流洪水(流量)随季节、时间变化的过程是自然界中的一种复杂现象,在这种复杂现象的背后隐藏特定规律性,它在一定原则下显而易见,一般把满足这种原则的特定规律性洪水的年内时间段作为一个洪水分期。

所谓汛期分期法,就是按照当地暴雨特征在整个汛期的变化规律,先将汛期划分为几个时段,一般为两个或三个时段,再根据相关资料(包括上下游来水量、当地暴雨、流域、水库和河流特征等),分别确定每一段的汛限水位。这样,通过细化分析汛期各阶段的水文系列资料和相关的水文计算,分别确定出每一阶段的汛限水位值。采用这种方法计算出来的汛限水位与以往固定的汛限水位相比较,是一个动态的过程,从而也更接近于实际来水情况,也为适当抬高前汛期与后汛期的汛限水位提供了可操作的空间。毫无疑问,后汛期汛限水位的抬高对增加水库蓄水量,提高水库效益具有十分重要的现实意义。

为提高水库的综合利用效益,我国有关单位及学者利用暴雨洪水的季节性变化特征,确定汛期分期,利用水库分期汛限水位调控洪水资源,缓解水库防洪与兴利之间的矛盾。水电部北京勘测设计院、水电部天津勘测设计院和国家气象局北京气象中心在上世纪80年代对我国东部地区汛期分期设计洪水研究工作进行了初步总结,从两个方面归纳了以往的汛期分期洪水研究工作。一是汛期分期洪水的气象分析,通过对汛期降水和暴雨特征的统计分析以及对大气

环流的季节演变与暴雨关系的成因分析,为汛期内分期的划分提供成因和定量依据。二是分期洪水的分析与计算,通过汛期洪水特性和汛期内洪水峰量散布图的分析,考虑工程运用的要求,对洪水分期做出划分,进而进行分期设计洪水的计算。考虑到分期设计洪水的计算误差较大,需要对分期设计洪水成果进行合理性检查和分析。

冯尚友等^[6]针对丹江口水库调度的需要对汛期划分进行了研究,主要包括两个方面的分析:一是水文统计分析,具体分析了单站多年旬平均雨量、多年旬平均流量、七日最大降水量的时间分布、历年最大洪峰流量出现过程;二是气候成因分析,具体分析了各种天气系统的变化过程。基于以上两个方面的综合分析,提出了丹江口水库汛期的分期划分方案。

在汛期分期的定量描述方法上,陈守煜^[8]首次提出了描述汛期的模糊集合论,认为汛期属于模糊概念,利用模糊集合分析方法来解决汛期分期问题,并总结出了完整的计算步骤。喻婷等^[9]应用矢量统计法和相对频率法,基于年最大值取样以及超定量取样进行汛期分期计算,并与现有的方法进行比较研究。实例应用结果表明,这两种方法均可用于汛期的分期计算中,具有一定的实用价值。刘攀等^[10]提出了基于日最大值取样的均值变点分析模型、基于超定量取样的概率变点分析模型以及基于年最大值取样的概率变点分析模型,并应用统计试验方法对这三种汛期分期模型进行效率评价与比较,结果表明:三种方法都可以客观、精确地进行汛期分期计算,在一定程度上避免了分期中的主观随意性。方彬等^[11]首次采用圆形分布法计算洪水发生的集中期、集中度和高峰期的起止时间,由此确定汛期分期。三峡水库的计算结果表明,汛期分期结果合理可靠。统计试验显示,考虑洪水量级的圆形分布法效果最优。圆形分布法可以较好地描述洪水季节性特征,为洪水汛期分期计算提供了一条新的途径。

当前确定汛期分期普遍使用的传统做法一般是:依据暴雨和洪水发生的季节性特性,特别是洪水在汛期的成因和发生规律,通过试算将整个汛期分为洪水特性明显差异的若干分期,例如可分为前汛期、主汛期、后汛期,也可分为前汛期和后汛期。现有的分期方法主要包括成因分析法和数理分析法两种,通常前者是基础,后者在前者的基础上进行分析计算。现行的分期方法及其应用方面存在几方面的问题:

(1) 成因分析法需要对成灾天气进行大量的分析,工作量大;而且分期具有一定的主观性,也难于将汛期划分得很细。

(2) 数理分析法在成因分析的基础上,采用数学统计思路对汛期进行划分。这类方法有一定的理论基础,通过不同的分期指标对汛期进行划分,但在分割点的选取上仍有较大主观性。

(3) 当前在水库汛期分期的实际运用中,将多种方法的分期结果进行统一比较的实例比较少,所以所选的分期模型可能不是最优的、分期划分可能不是最合理的。

二、分期设计洪水研究进展

为了克服采用年最大洪水作为调度运行依据所带来的缺点,人们开始研究能反映汛期洪水演变规律的设计洪水,即分期设计洪水或时变设计洪水。所谓分期设计洪水是指一年中某个时段所拟定的设计洪水。计算分期设计洪水的方法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,把整个年内划分为若干个分期,然后在分期的时段内,按年最大值法或超定量法选样,进行频率计算,估算分期设计洪水。

我国《水利水电工程设计洪水计算规范》^[5]第 3.4 条规定:当汛期洪水成因随气候变化特

征具有显著差异时,应根据水库运行调度需要,分析计算分期设计洪水;各分期洪水量级应有明显差别,分期以 2~3 个为宜。根据《水利水电工程动能设计规范》^[12]第 11 条:“在满足大坝安全和不降低下游防洪标准的前提下,根据汛期的洪水规律,研究防洪库容与兴利库容重叠使用的可能性”。该规范明确指出优化设计洪水,使之能反映汛期洪水演变规律。以汛期分期设计洪水过程作为防洪调度依据,是科学合理协调防洪与兴利矛盾、充分利用洪水资源,达到既符合防洪标准又能充分发挥水库经济效益的最基本途径之一。

对汛期分期洪水的研究,国内在 20 世纪 50 年代即已开始,如三峡工程调度研究中宜昌站前汛期和后汛期洪水的研究、丹江口水利枢纽工程汛期分期洪水研究及设计、长江中下游及沿海地区(如浙江省等)汛期梅雨洪水和台风暴雨洪水研究等,北方河流在分期设计洪水的研究方面也作了不少工作,均为我国的汛期分期洪水研究积累了不少经验。但如前所述,分期洪水计算方法研究牵涉面广、影响因素较为复杂,虽然在国内部分水库中试行分期调度,但有关分期设计洪水或汛期时变设计洪水的计算仍未形成一套较为成熟且能被专家共同接受的、自成体系的方法。

现行分期设计洪水方法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,然后在分期的相应时段内进行分期洪水最大值选样,对分期最大洪水采用 P-III 型分布进行描述,通过频率计算求得满足设计频率的分期设计洪水。其中,分期设计洪水频率通常均假定为设计标准对应的重现期的倒数。在各分期分别取样后,分期设计洪水值均小于或等于年最大洪水设计值,不能保证分期设计洪水能够真正达到规定的防洪标准,主汛期设计洪水一般较年最大值取样得到的设计洪水小,这样可能导致主汛期汛限水位较原设计汛限水位抬高这一明显不合理现象,从而降低水库的防洪标准。

过去进行的汛期分期设计洪水计算,通常分为两期,如东南沿海的梅雨洪水、台风洪水;长江上游和汉江的夏季洪水、秋季洪水等。从水库运行调度需要考虑,两段制分期尚嫌不够,未能充分发挥水库潜力;但是各分期洪水抽样样本是否满足数理统计理论中样本独立和同分布的假设等,致使进一步细化分期及如何分期不仅困难且目前争议较大。同时,沿海地区梅雨暴雨和台风雨常交叉发生,有些站也不是每年都遭遇台风暴雨洪水,秋季暴雨洪水亦不是每年均会发生,使得某些年份的分期年最大洪水很小。分期洪水的分布函数一直假定与年最大洪水的相同,未能深入研究,分期洪水是年最大洪水的一部分,逻辑上,全体分期洪水的联合分布即是年最大分布,其与年最大洪水的关系长期以来未能得到解决。因此,如何分期及分期长短、分期洪水抽样方法及样本分布特性等仍需结合流域暴雨洪水特性及数理统计理论等进行深入分析,在此基础上才能研究和提出适合分期洪水特性的分期设计洪水计算方法。另外,历史洪水和实测系列中的特大值在汛期分期设计洪水计算中如何考虑也是需要研究的重要内容,因为在有限的样本中,加入历史洪水信息,无疑将扩大样本容量和代表性,增加参数估计的可信度。

目前,我国已有一些水库、水电站通过对汛期按季节分期,并采用现行分期设计洪水方法(即分期最大洪水抽样和常规频率分析方法)计算分期设计洪水,以实行分期防洪调度,收到了明显的经济效益。然而,这样计算的分期设计洪水本身仍然存在明显的缺陷。例如:在沿海地区的许多站,并不是每年都遭遇台风暴雨洪水;在秋雨地区的一些站,也不是每年都一定有秋季暴雨洪水发生。这就使这些站的某些分期(尤其是在非主汛期)最大洪水系列中有一部分不能称之为“洪水”。在机率格纸上,它们的经验点据呈横向“平台”状排列。当出现上述“平台”现象时,还采用常规方法,以连续频率曲线拟合这类经验点据(目前几乎都是这样做

的),显然是不合理的。又如,为得到某种防洪标准(重现期)的分期设计洪水,通常都采用重现期等于频率的倒数假定,也不合理。另一方面,将汛期按季节分期,且在大多数条件下只分两期,每个分期仍比较长,在反映洪水规律方面也嫌粗糙。而且,各分期设计洪水差别往往悬殊,以至据此推算的各分期汛限水位差别很大,给实际调度带来困难和不便。

对现行方法的改进和完善,应重点解决分期设计洪水统计选样,年最大设计洪水与分期最大设计洪水的对比分析,分期最大洪水频率与年最大洪水频率不一致问题等,在此基础上确定分期设计洪水过程。

Singh^[13]在分析了日本、前苏联、波兰、捷克斯洛伐克、意大利和美国共6个年洪水系列后,建议采用混合分布方法提高设计洪水估计的可靠性。王善序^[14]提出采用分期年最大洪水取样估算分期设计洪水,建立了年最大洪水与分期年最大洪水的关系式。上述这两种分期设计洪水估计方法仍然是基于年最大值系列,所以能够满足防洪标准的要求;又因为是对各分期分别进行取样,因此亦能够反映洪水的季节性规律。Singh等^[15]指出该方法通过分期使得样本满足同分布特征,因而较年最大值法更合理。但是该方法在取样中(包括分期取样)仅取年最大值,可能导致非主汛期的分期抽取到的样本容量很少,最终导致该分期频率分析结果不可靠;且与我国现行的分期设计洪水取样方法(分期最大值法)有所区别。Durrans等^[16]提出了一类近似、实用但理论上不精确的方法来联合季节、年洪水分布。他们描述了两种建模方法,其中一种方法假设各分期的最大洪水系列都服从对数P-III分布,然后从中推导出年洪水分布(即分期一年方法)。

邹鹰^[17]针对水库分期设计和调度运用所涉及的分期情况下如何定义水库防洪标准,以及如何在突破水库防洪标准的前提下合理确定分期设计洪水标准等关键问题,基于概率论中独立事件的概率组合原理,提出了水库分期运用情况下的水库防洪标准的等价表达形式,并以一个水库作为分析案例,在确保水库分期运用情况下的等价防洪标准不突破水库防洪标准的前提下,分别确定了各个分期设计洪水标准以及相应的汛限水位。

肖义等^[18]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,并构造边缘分布为P-III分布的分期最大洪水联合分布,建立了分期最大洪水与年最大洪水的关系式,讨论了分期设计洪水频率与防洪标准应满足的关系,探讨了能够满足防洪标准的新的分期设计洪水模式。应用实例表明,新模式主汛期设计值相对年最大设计值小幅度增加,而非主汛期设计值则小于年最大设计值,既满足不降低防洪标准的要求又能够起到优化设计洪水的作用,为分期设计洪水研究提供了一条新的思路。

张娜等^[19]采用了Archimedean 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,推导了基于Copula函数的分期设计洪水频率和防洪标准的关系,进而推求分期洪水设计值,并与现行分期设计洪水模式的计算成果相比较,分析论证了基于Copula函数分期设计洪水的合理性。

三、分期汛限水位研究进展

分期汛限水位确定方法按其数学原理思想主要分为设计洪水过程线法、模糊统计法、多目标优化法及其他方法等。在汛期分期确定以后,需要拟定各分期的汛限水位。目前确定分期

汛限水位有如下几种方法。

（一）设计洪水过程线法

设计洪水过程线法是规范中确定分期汛限水位的方法^[20]。具体步骤是：①根据暴雨和洪水的季节性特征，特别是洪水在汛期的成因和发生规律等情况，把汛期划分为若干个分期；②计算各分期设计洪水，拟定相应的分期设计洪水过程线；③初步选定分期汛限水位，指定分期防洪标准等同于年防洪标准，由分期设计洪水过程线根据调洪方式计算各分期坝前洪水位，以其低于水库防洪安全标准的坝前水位为控制条件，通过试算最终确定各分期汛限水位。当按分期设计洪水过程线算出的最大防洪库容小于按全年最大设计洪水过程线算出的防洪库容时，采用前者进行防洪调度似乎降低了防洪标准，一般处理方法是全年最大设计洪水代替各分期设计洪水最大者，或经过分析，将全年最大设计洪水用于汛期中洪峰发生最频繁、量级最大的时段，其余各期则仍用分期设计洪水的计算成果。至于分期设计洪水标准，一般均采用与全年最大设计洪水同一标准^[21]。

华家鹏等^[22]提出了两种设计分期汛限水位的方法：组合频率法和库水位法，用实测资料来推求分期汛限水位和相应的设计洪水位，避免了频率不一致的问题，这一成果可从理论上得到不降低水库防洪标准的分期汛限水位。

武鹏林和晋华^[23]通过统计汛期中每日为起点的最大来水量，研究洪水循时程的变化规律，计算洪水循时程变化的概率分布，据此求出循时程变化的汛限水位，并运用于汾河水库汛期防洪限制水位的确定。杜丽惠等^[24]在此基础上，统计汛期中每日为起点的最大来水量，求出固定频率的设计来水量，选择合适的典型洪水过程线进行调洪计算后得到每天的汛限水位，并对密云水库汛限水位进行计算分析。方彬等^[25]采用逐日样本系列进行频率分析求出设计洪水，选择典型洪水过程线放大，经过逐日调洪计算后得到逐日滑动汛限水位，并采用统计试验来计算逐日滑动汛限水位的外包线，然后计算出方便水库调度的概化汛限水位外包线，最后进行防洪风险分析和经济效益分析。

对于给定的防洪标准，分期设计洪水具有不唯一性。刘攀等^[26]提出采用独立、保守组合两种频率不等式，由分期频率估计年频率，得出了不降低水库防洪标准的汛限水位优化设计模型，该模型以兴利效益最大化为目标，不降低原设计年防洪标准为约束条件，建立了优化设计模型。

张娜等^[27]以隔河岩水库为例，利用三维非对称型 Frank Copula 函数构建汛期三分期的联合分布，基于调洪演算的方法，计算水库最高调洪水位达到防洪高水位时的分期频率和年组合频率，并与年最大方法、现行方法计算结果进行比较和探讨，初选水库的汛限水位。该方法克服了现行汛限水位确定方法中存在年频率和分期频率不一致的问题。

（二）模糊统计法

模糊统计法是根据其隶属于汛期的程度来给出相应的防洪库容。首先需要确定汛期模糊子集隶属函数，根据属于汛期的隶属度大小来决定所需的防洪库容，直接求出汛期分期的各时段（旬或日）汛限水位。如童黎熙^[28]在海河潘家口水库汛限水位确定中，将模糊统计法同参数法作比较，并指出模糊分析法的关键是选择汛期与非汛期的分界指标，指标不同则隶属函数也不同。陈守煜和张文国^[29]指出了传统的模糊统计试验与隶属度存在相悖的理论缺陷，并提

出直接模糊统计试验的概念与方法,并运用此法对汛期的绝对隶属度稳定性进行了分析和实例应用,准确描述了汛期物理演变过程。陈守煜等^[30]应用模糊水文水资源学理论与方法计算水库汛期相对隶属函数,确定汛限水位,对水库汛期水位进行动态模糊控制。

(三) 多目标优化法

水库的防洪和兴利是一对矛盾体,汛期调度既要追求风险的最小化,又要满足效益的最大化,因此,汛限水位确定实际是防洪风险与兴利效益等多目标优化问题。因此,可以采用数学规划的方法进行求解,其目标函数就是防洪、兴利等综合效益的最大化。多目标优化法利用了数学规划的相关理论成果,通过综合分析汛限水位调整给防洪、兴利等目标带来的影响,经寻优得出使不同汛期分期综合目标函数达到极值时的汛限水位方案集。该方法思路清晰、理论成熟,具有其他方法所不具备的优势。

胡振鹏等^[31]在丹江口水库的汛期过渡期水库运用方案研究中提出三种汛限水位提高方案,并建立随机动态规划的优化调度模型,得出最佳调度方案。王才君等^[32]建立多目标风险决策模型,通过对给定的动态汛限水位方案进行多风险指标的综合评价,得到三峡水库围堰发电期相对合理的汛限水位。刘攀等^[33]基于模拟调度分析,利用这些风险指标评价分期汛限水位方案,采用遗传算法优化设计了三峡水库分期汛限水位与蓄水时间,可自动设置过渡期,避免规划设计与实际运行脱节。该方法利用系统分析原理,最大化水库的综合效益,理论上较为可行。但为了检验设计的分期汛限水位不降低水库防洪标准,仍需采用分期设计洪水过程线进行调洪演算,或者以原设计汛限水位的防洪风险值为上限构造一个约束条件,利用基于模拟的优化方法得到分期汛限水位的非劣解集。

(四) 其他方法

容积—历时曲线法^[34],即将历史资料中各分期历次洪水过程取出,计算需预留的防洪库容的频率曲线,根据防洪标准得到所需的防洪库容和分期汛限水位。Andrade等^[35]利用随机微分方程,导出了预留防洪库容的计算公式,用Bayesian方法对参数进行估计。方法从另一个角度对水库的汛限水位作了探讨,具有一定的理论意义,但忽略了入流之间的相关性,且难于确定防洪库容的上下界,方法尚有待完善。

第二节 汛限水位动态控制方法研究进展

静态控制方法没有考虑降雨和洪水的预报信息,无法挖掘水库兴利潜力,造成了一定程度上洪水资源的浪费。随着水文气象预报手段、理论的发展,预见期和精度都有所提高,这就为防洪调度中动态控制水库汛限水位提供了可能性。国家防汛抗旱总指挥部办公室为解决我国防洪与兴利矛盾突出的问题,2002年在全国选择了12座试点水库,开展汛限水位动态控制方法研究,取得了明显实效,并逐步在全国推广。水库汛限水位动态控制方法实质属于风险调度范畴,将水位控制在规划的汛限水位上、下某范围内浮动。相对于传统方法而言,动态控制法考虑了诸如水文预报信息及运行过程中其他信息的影响,并且舍弃了基于频率分析的假定,即认为洪水是一随机现象,年际间的洪水是独立不相关的,每年发生设计洪水的概率相等^[3]。动

态控制法结合洪水预报及调度过程中的各种实时反馈信息,以一定风险为代价,在汛期水库调度过程中进行实时调度,对汛限水位不断做出调整,以获得综合效益的最大化。水库汛限水位动态控制方法依托当前先进的科技手段和完善的水利设施,利用水文预报技术,探求洪水变化规律,科学有效地实施水库调度管理。随着水文遥测系统建设的不断发展,定量降雨预报和洪水预报水平的不断提高,水库已经具备开展防洪预报调度的工作条件,这对逐步抬高汛限水位,增加水库重复库容后的安全运行提供了可靠的信息保障^[36]。

水库运行过程中,控制汛限水位所依据的信息主要有实时监测的确定性信息、基于物理成因理论的比较确定性信息和基于随机理论的统计信息,以及决策人基于上述信息和调度经验所得到的推理型模糊性信息等^[3]。根据水库实际运行过程中汛限水位确定中主要利用的信息及采用的数学理论基础,主要可分为以下几种动态控制方法。

一、综合信息推理法

综合信息推理法是以影响水库汛限水位动态控制的各因素的历史资料建立推理模式(也称大前提),在已知面临时刻的上述因素(小前提)条件下,推理出未来24h汛限水位动态控制值。大前提是指实际洪水的起调水位,落地实测降雨及6h、12h、24h降雨预报,预报未来48h、72h降雨信息;历史同期不同量级发生的统计概率;调度专家及决策者防洪调度经验等^[20]。该方法侧重于逻辑推理,主要有三个关键问题:一是分析汛限水位控制值与其影响因子的关系;二是建立逻辑推理关系,亦称“大前提”;三是汛限水位允许动态控制上限。除此之外,还必须编制易于操作、便于决策的汛限水位动态控制系统应用软件,编制保证汛限水位动态控制实施的规程^[3]。

二、水文信息统计法

水文信息统计法主要依据历史水文信息统计汛期洪水变化规律,当一次洪水后,可为决策者提供未来发生洪水的概率分布,分析相应的设计洪水及其允许起调水位。该方法主要侧重于统计理论,目前已有前后关联法和年内洪水特性法在实践中得到运用。前者注意到每年总降雨量一般比较固定,因此若前期发生暴雨则后期再次发生的概率就会小一些;后者认为年内洪水发生时间及特大洪水与次大洪水之间间隔有一定规律,通过分析加以利用就能在一场大洪水后回答“将来时段会不会发生更大的洪水”的问题。

孙秀玲和曹升乐^[37]通过对我国北方地区流域分析研究,首次提出了动态汛限水位过程线的概念,认为汛期各阶段降雨量存在相互关联,可根据汛期前一阶段降雨情况对后一段的汛限水位过程线进行修正,得出动态汛限水位过程线。但水库经常出现丰、平、枯年份,因此该方法仍有一定局限性,仅结合北方地区开展了研究;王本德等^[38]在碧流河水库研究中以年内洪水统计特性变化规律为研究对象,认为一次大洪水的发生,可为决策者提供未来发生洪水的概率分布,经分析相应的设计洪水及其允许的起调水位,从而确定汛限水位极限允许动态控制值。

三、水库调度模型法

水库调度模型法以水库或水库群联合调度为基础建立调度模型,并在运行过程中根据实时信息调整汛限水位。该方法主要侧重于系统优化理论,由于其理论成熟,在实际运用中也很活跃,到目前为止已有很多的发展,在实践中已有以下三种方法得到了运用。

(一) 补偿调节法

考虑水库群各水库实时库容信息,适宜于共同承担一个下游防洪目标的水库群,根据水文不同步性或其库容差异,按下游防洪控制点要求进行补偿调度或错峰调度,确定各时期各自设计防洪库容和汛限水位。李玮等^[39]结合清江流域梯级水电站工程特性及防洪任务,以不降低梯级防洪标准为原则,建立基于预报及上游水布娅水库库容补偿的汛限水位动态控制模型,推求隔河岩水库汛期汛限水位动态控制方案。李玮等^[40]结合流域实时洪水预报及梯级水库防洪库容信息,提出了基于预报及库容补偿的梯级水库汛限水位动态控制逐次渐进补偿调度模型。

(二) 预蓄预泄法

我国在 20 世纪六七十年代研究提出了“预蓄预泄”汛限水位控制方法,是保持原设计风险率的一种方法。该方法又称预泄能力约束法。基本思想是在洪水预见期内有多大泄流能力就将汛限水位上浮多少,其影响因素包括面临时刻水文信息、入库水文预报信息、预见期内预泄能力、下游河道允许预泄流量、决策信息传递稳定性和速度及闸门操作时间等。

万俊和陈惠源^[41]提出考虑下游安全泄量,利用水文气象预报信息进行分阶段预泄来防止下一场洪水来临前库水位仍较高时造成的风险。张百川^[42]在梅山水库汛期控制中以两次特大洪水为例说明了预蓄预泄法在水库调度中的重要作用。

(三) 决策调度法

该方法依托水文预报,在调度中引入决策意见,采用数学规划方法,在分析权衡调度过程中各反馈信息的基础上,通过引入决策人的意见确定动态汛限水位方案。同多目标优化法相比,此法引入了更多的实时信息,考虑了决策人的决策意见,实现了调度过程中的动态控制特性。

王本德等^[38]在建立水库预蓄效益与风险控制模型的基础上,探讨了决策后果优选与决策目标权重确定中保持决策者风险偏好一致的方法,发挥了决策人在水库调度中的作用,并将该方法运用于碧流河水库进行验证。刘子慧等^[43]建立了丹江口水库汛限水位确定的多目标优化模型,并将部分目标转化为约束条件,得到单目标优化模型,结合预报信息,分别得到夏季和秋季汛限水位,结果表明在不降低防洪标准的前提下,可适当抬高汛限水位,使水库夏季和秋季兴利库容分别增加 12.7 亿 m^3 和 7.0 亿 m^3 。

刘攀等^[44]提出的水库汛限水位实时动态控制模型,将调度过程分为调度时段内和调度时段后两部分,分别予以不同的风险标准进行控制,其模型整体结构框架如图 1-1 所示,主要由 4 个模块构成。

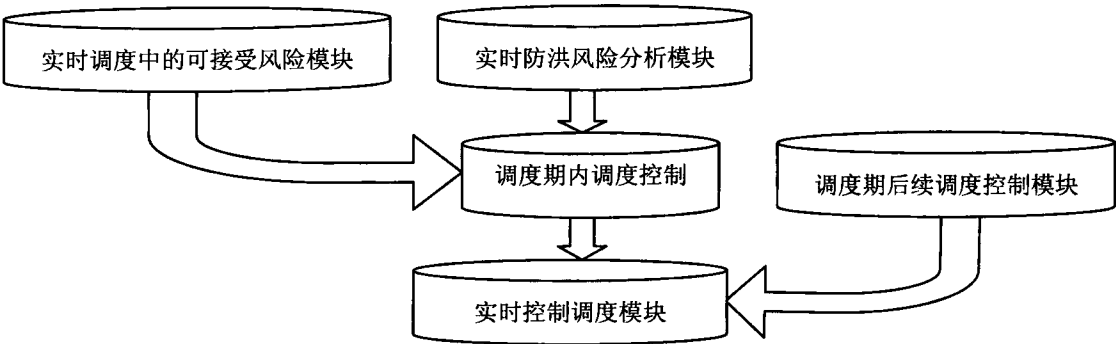


图 1-1 水库汛限水位实时动态控制模型框架图

（1）实时调度中的可接受风险模块。在实时水库调度中，存在众多的不确定性，因此有必要采用风险调度的方法。在风险决策中，为了量度多大的冒险程度是值得的，出现了可接受风险的概念：可接受风险水平是社会公众根据主观意愿对风险水平的接受程度。在水库实时调度中，也存在一个可接受风险：通过决策，只要失事风险低于这一风险，则决策可行，或者说是可以为整个社会群体所接受。值得指出的是，实时调度中的可接受风险，是相对于年可接受风险提出来的，是调度期为几小时（或几天）的风险。

（2）实时防洪风险分析模块。对调度过程中水文、水力及结构等不确定性进行分析、评估，即对实时调度进行风险识别，量化失事的概率与损失。对于一场特定的实时调度过程，如果通过风险分析，能将其控制在可接受风险值以内，那么这个调度是合理、可以接受的。

（3）调度期后续调度控制模块。水库调度中，调度末水位是一个很重要的指标，它也是后续时段调度的起调水位。在调度中，模型考虑随机因素，调度末水位也是一个随机变量。调度期后续的来水情况信息是未知的，在这种情况下，防洪策略又回到了现行的水库汛限水位控制方法，即进行水位控制，每个起调水位对应着不同的防洪风险。因此，调度期以后的风险（主要受调度末水位的影响）也应该控制在一个范围内，即通过调度末水位，实现实时水库调度与传统的汛限水位（或分期汛限水位）之间的耦合。

（4）实时控制调度模块。在水库实时调度中，为了在充分利用预报信息的同时进行风险防范，在传统的水库调度模型基础上加入两条机遇约束：①利用预报等信息，控制调度期内的实时防洪风险在给定的范围内，即可接受风险以内；②确保调度末水位在一定的范围内变动，以能够满足抵御后续洪水的能力。在这两者的约束下，达到兴利效益最大，就是所研究的动态控制模型。

在整个调度过程中，引入了实时调度中的可接受风险率的概念，作为机遇约束；在调度末，通过调度末水位来耦合传统的汛限水位。由于整个调度过程是在不断的“预报—决策—实施”的前向滚动决策方法下运行的，在动态控制中仅以调度末水位耦合（或衔接）汛限水位，因此在调度过程中水库水位可能高于汛限水位，同样也可能低于汛限水位。

动态控制方法要求面临时刻水位高于动态控制范围的下限，水库闸门具有控制能力，这就具备了动态控制条件，其最适宜时间是在洪水的退水期。动态控制方法对实施条件要求较高，在水库多年运行经验的基础上，必须建设有现代化的防洪调度决策支持系统，包括可靠的水情