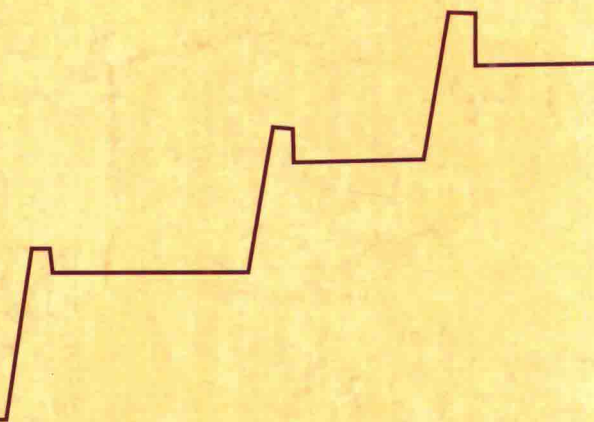


国家自然科学基金项目“流域水文水资源与社会耦合系统新理论新方法研究”(51539009)及“梯级水库汛期运行水位联合动态控制及多维风险关联规律研究”(51509008)资助



梯级水库群 联合优化调度运行

周研来 著



长江出版社

国家自然科学基金项目“流域水文水资源与社会耦
方法研究”(51539009)及“梯级水库汛期运行水位联合动态控制及
多维风险关联规律研究”(51509008)资助



梯级水库群 联合优化调度运行

周研来 著



 长江出版社
CHANGJIANG PRESS

图书在版编目(CIP)数据

梯级水库群联合优化调度运行/周研来著.

—武汉:长江出版社,2016.5

ISBN 978-7-5492-4311-2

I. ①梯… II. ①周… III. ①梯级水库—水库调度

IV. ①TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117863 号

梯级水库群联合优化调度运行

周研来 著

责任编辑:高婕妤

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

网 址:<http://www.cjpress.com.cn>

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

规 格:720mm×1000mm 1/16

10.25 印张

178 千字

版 次:2016 年 5 月第 1 版

2016 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-4311-2

定 价:28.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

前 言

水库洪水资源化可充分利用现有的水利工程条件,完善水库调度方案 and 操作规程,可达到防洪减灾、减少弃水、提高水库综合效益的目的,是实现水利清洁能源发展的一条非工程措施,为加快水利发展提供“软实力”。《梯级水库群联合优化调度运行》是在国家提出洪水资源化调度,充分利用雨洪资源,实行节能减排战略的背景下,作者根据所取得的梯级水库群联合优化调度运行方式研究成果编著而成。此外,本书的编写和完成还得到了国家自然科学基金项目“流域水文水资源与社会耦合系统新理论新方法研究”(51539009)及“梯级水库汛期运行水位联合动态控制及多维风险关联规律研究”(51509008)的资助。本书就梯级水库群联合优化调度运行相关问题的技术进行了探讨,具有如下主要特点:

(1)提出了梯级水库汛期运行水位实时动态控制模型。在保证原预留的防洪库容不变的前提下,耦合长期与短期调度规则,制订了梯级水库汛期运行水位实时动态控制方案。

(2)以防洪、发电、蓄水和航运为目标,建立了梯级水库多目标联合蓄水调度模型,在不降低原防洪标准前提下,提高了梯级水库的综合效益。

(3)建立了水库调度图对气候变化的自适应模型。根据未来气候变化情景下的径流资料,采用自适应遗传算法优化了水库多目标调度图,实现了水库多目标调度对气候变化的自适应。

这些理论与方法有助于完善梯级水库群联合优化调度运行方式,具有广泛的应用前景。

本书是在作者的博士论文的基础上编写完成,得到了导师武汉大学郭生练教授的悉心指导,在此表示衷心感谢!在书稿整理中,长江科学院陈进副院长、水资源综合利用研究所许继军所长,武汉大学水利水电学院熊立华

教授、刘攀教授、陈华教授、刘德地副教授及水问题研究中心徐长江、陈炯宏、李立平、洪兴骏、刘章君等给予许多帮助,在此一并表示敬意和感谢。

本书撰写过程中,参阅和引用了不少国内外文献和资料,作者对所列公开发表参考文献的作者表示谢意,对未能列出的其他参考文献和资料的作者也一并致谢,并请谅解!

由于编者水平所限,书中疏漏之处恳请读者批评指正!

作者

2016年5月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 水库中小洪水动态调度研究进展	2
1.2.1 水文信息统计法	3
1.2.2 综合信息推理法	4
1.2.3 水库调度模型法	4
1.2.4 动态控制风险分析	6
1.3 水库汛末提前蓄水调度研究进展	7
1.3.1 防洪风险和效益分析问题	7
1.3.2 泥沙淤积问题	8
1.3.3 环境和生态问题	9
1.4 水库优化调度规则研究进展	10
1.4.1 水库调度规则综述	10
1.4.2 模拟调度法	13
1.4.3 显随机优化调度法	13
1.4.4 隐随机优化调度法	15
1.4.5 调度规则对气候变化的自适应	16
1.5 相关研究存在的问题	18
1.6 本书主要内容	19
第2章 水库群发电优化调度不确定性分析	21
2.1 三峡梯级与清江梯级水库概况	22

2.1.1	三峡梯级	22
2.1.2	清江梯级	23
2.2	优化调度模型	25
2.2.1	目标函数	25
2.2.2	约束条件	25
2.3	不确定性分析	27
2.3.1	水文预报不确定性	27
2.3.2	水力不确定性	27
2.3.3	水位—库容关系不确定性	28
2.3.4	汛限水位分期控制的灵敏性分析	28
2.4	三峡梯级与清江梯级调度结果分析	29
2.5	本章小结	39
第3章	水库群优化调度函数研究	40
3.1	电当量转换	41
3.2	调度函数的拟合	42
3.2.1	水量调度函数	42
3.2.2	能量调度函数	43
3.2.3	拟合方法	43
3.3	调度函数的模拟检验	43
3.3.1	水量调度函数的模拟	44
3.3.2	能量调度函数的模拟	44
3.4	三峡梯级与清江梯级调度结果分析	44
3.4.1	不确定性组合分析	45
3.4.2	调度函数方案	45
3.4.3	调度函数检验	47
3.5	本章小结	52
第4章	水库群汛期运行水位联合运用与动态控制	53
4.1	水库群汛期运行水位联合运用模型	54

4.1.1	三峡水库动态调度模块	54
4.1.2	清江梯级动态调度模块	55
4.1.3	库群优化模拟模块	55
4.2	梯级水库汛期运行水位实时动态控制	56
4.2.1	数值气象水文预报模型	58
4.2.2	长期优化调度函数模型	58
4.2.3	汛期运行水位实时动态控制模型	58
4.3	三峡与清江梯级汛期运行水位动态调度结果分析	60
4.3.1	计算结果	60
4.3.2	结果分析	65
4.4	清江梯级实时动态调度结果分析	66
4.4.1	数值气象水文预报结果	66
4.4.2	实时动态控制结果分析	67
4.5	本章小结	70
第5章	梯级水库汛末联合蓄水调度研究	72
5.1	长江上游干支流梯级水库群概况	74
5.1.1	溪洛渡水电站	74
5.1.2	向家坝水电站	74
5.1.3	三峡水库	75
5.2	梯级水库蓄水调度模型	76
5.2.1	蓄水调度约束条件	77
5.2.2	防洪风险分析模块	77
5.2.3	效益分析模块	79
5.2.4	多目标评价模块	81
5.2.5	投影寻踪法	82
5.3	溪洛渡、向家坝和三峡梯级调度结果分析	84
5.3.1	分期设计洪水	84
5.3.2	防洪调度规则	86

5.3.3	坝前最高安全水位	87
5.3.4	梯级水库群蓄水方案集	89
5.3.5	同步起蓄时间的蓄水方案分析	91
5.3.6	错开起蓄时间的蓄水方案分析	102
5.3.7	蓄水方案多目标评价	108
5.4	本章小结	109
第 6 章	水库调度图对气候变化的自适应	110
6.1	丹江口水库概况	110
6.2	调度图优化模型	111
6.3	优化算法设计	114
6.3.1	编码	114
6.3.2	目标函数及适应度函数处理	115
6.3.3	选择、交叉与变异	115
6.4	VIC 模型与 GCM 耦合	116
6.5	丹江口水库调度结果分析	117
6.5.1	基于 Tennant 法的生态需水计算	117
6.5.2	气候变化下流域径流预测分析	117
6.5.3	调度结果及分析	118
6.6	本章小结	132
第 7 章	结论与展望	133
7.1	主要研究成果与结论	133
7.2	展望	135
主要参考文献		137

第1章 绪论

1.1 研究背景

洪水资源化是以水资源可持续利用和发展为前提,以现有水利工程为基础,通过利用现代化的水文气象预报技术和科学管理调度等手段,在保证水库大坝本身和上下游防洪安全及生态环境允许的条件下,利用水库、湖泊、蓄滞洪区、地下水回补等工程措施调蓄洪水,减少洪水入海量,以提高洪水资源的利用率^[1]。洪水资源化是根据我国的具体国情,按照新时期的治水思路和治水理念,全过程、全方位、多角度地转变洪水“入海为安”的思想,统筹防洪减灾和兴利,实现水资源的高效利用和维护生态环境的良好发展,为小康社会的全面建设,提供强有力的防洪抗旱支撑。洪水资源化是针对传统水利而提出的兴利与除害结合、防洪与抗旱并举的治水理念在新时期的一个具体体现,该概念的提出具有崭新的时代特征,是治水思想与时俱进在实践中不断开拓创新的理论结晶^[2]。

随着科技进步和人们认识水平的提高,在我国实行洪水资源化已成为可能,实行洪水资源化的重大意义主要表现在:

(1)实现“给洪水出路,让洪水为我所用”的治水战略,促进人水和谐发展。洪水资源化的提出意在把防洪减灾与兴利有效地结合起来。据统计,目前我国的江河年平均入海水量约为 16000 亿 m^3 ,1998 年全年的入海水量为 21321 亿 m^3 ,并且主要集中在汛期以洪水的形式入海,如 1998 年长江下中游的大通水文站最大 30d 洪量为 2231 亿 m^3 全部流入东海。我国河流的汛期通常为 4~5 个月,而大部分河流的主汛期仅为 2 个月,汛期来水量占据全年来水量的 60% 以上,现有的防洪规则都是基于单一汛期制定的,未能充分考虑洪水的季节性变化规律,致使汛期大部分洪水资源被溢弃,而汛末因

来水较少,水库常常出现无水可蓄或蓄满率较低的被动局面。通过洪水资源化,可有效权衡防洪和抗旱之间的矛盾关系,在不降低原有防洪标准的前提下,提高水库汛末的蓄满率,可使区域性严重缺水的状况得到有效缓减,实现洪水资源综合利用效益最大化。

(2)为实现水资源优化配置与综合开发利用提供技术支撑。2005 年国务院颁布的第 044 号文件《国家中长期科学和技术发展规划(2006—2020)》中明确指出:水资源优化配置与综合开发利用是建设资源节约型社会的优先主题之一。需重点研究开发大气水、地表水、土壤水和地下水的转化机制和优化配置技术,污水、雨洪资源利用技术,长江、黄河等重大江河综合治理及南水北调等跨流域重大水利工程治理开发的关键技术等。洪水资源化为实现水资源优化配置与综合开发利用提供了技术支撑。

(3)为加快水利发展提供“软实力”。我国近年来经济发展迅速,综合实力不断增强,这种发展一方面对水资源的需求在不断增加,另一方面也在不断地增加水利投入。水利工程建设作为国家主要的基础性建设之一,近十年来投入很大。自 2000 年以来,连续八年的中央一号文件都聚焦“三农”问题,强调了水利在我国农业基础建设中的重要作用,特别是 2011 年以水利改革发展为主题的中央一号文件和中央水利工作会议,更是将水利提高到了一个新的历史高度。

洪水资源化调控措施,主要包括工程措施和非工程措施。前者通常指配以额外的水利工程和水保工程,将尽可能多的洪水拦蓄起来,使之更多地被人们利用,而后者是指在现有工程基础上,通过科学规划和合理调度,最大限度地拦蓄洪水资源,使之满足社会经济和生态环境的需水要求。本书重点研究非工程措施中的水库群洪水资源调控问题。

1.2 水库中小洪水动态调度研究进展

水库中小洪水动态调度的定义:在不降低原防洪标准的前提下,根据水雨情预报信息,充分利用水库对中小洪水(小于 20 年一遇)的调节能力,实现水库汛期运行水位的动态控制,以缓解水库下游的防洪压力和提高发电、供水、灌溉和航运等综合效益^[3]。因此,水库汛期运行水位的动态调度是实现中小洪水动态调度的关键。

汛期运行水位动态控制方法为解决我国防洪与兴利之间的矛盾提供了一条有效途径,2002年和2008年国家防汛抗旱总指挥部办公室先后在全国选择了23座试点水库,逐步推广了汛期运行水位动态控制在全国范围的应用,并取得了明显实效。基于年际间的洪水是独立的、不相关的,各年发生洪水的概率是相等的假定,动态控制法相对于传统的静态控制方法而言,考虑了水库调度过程中实时的水雨情信息和工况信息等^[4]。动态控制方法实质上属于风险调度的范畴,结合洪水预报及调度过程中的各种实时信息,在一定的风险范围内,实时调度过程中不断调整汛期运行水位,使水位控制在某一范围内上下浮动,以期使综合效益最大。随着我国水文遥测系统建设的不断完善,定量降雨预报和洪水预报水平都得到不断的提高,水库已经具备了防洪预报调度的基础,这为开展水库安全调度研究提供了可靠的技术支撑^[5]。

根据利用到的信息及数学理论,推求汛期运行水位的方法主要包括以下几种^[6]:

1.2.1 水文信息统计法

水文信息统计法主要是依据历史水文信息统计出汛期洪水的变化规律,当一次洪水过后,可为决策者提供未来发生洪水的概率分布,分析出相应的设计洪水和允许起调水位。该方法侧重于统计理论,主要有年内洪水特性法和前后关联法两种。前面的方法认为年内发生的洪水时间及特大洪水与次大洪水之间间隔有一定规律,可通过分析加以利用,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;后者注意到每年的总降水量一般是稳定的,如果前期发生了暴雨则后期再次发生暴雨的概率就会相对小。

周惠成等^[7]考虑水库实时调度的需要,重点分析年内洪水特性变化规律,当发生一次大洪水后,可为决策者提供“未来时期”发生洪水的概率分布,分析相应的设计洪水及其允许的起调水位,作为确定汛期运行水位动态控制的上限值。孙秀玲和曹升乐^[8]分析研究了我国北方地区流域,提出动态汛期运行水位过程线的概念,根据降雨统计特性,对汛期进行分期,统计分析各分期间的降雨统计关系,采用前一分期的降雨统计特性修正后一分期的汛期运行水位,从而得出动态汛期运行水位过程线,但是该方法在南方

湿润和半湿润地区的适用性有待考究。

1.2.2 综合信息推理法

综合信息推理法以影响水库汛期运行水位动态控制的各因素的历史资料建立推理模式(逻辑推理关系),在已知面临时刻的上述因素(小前提)条件下,推理出未来 24h 汛期运行水位动态控制值。逻辑推理关系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,未来 48h、72h 降雨信息预报;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^[9]。

1.2.3 水库调度模型法

水库调度模型法是基于水库或水库群联合调度建立的调度模型,根据实时信息动态调整汛期运行水位。该方法理论成熟,在实际中应用广泛,主要有以下三种方法:

1.2.3.1 补偿调节法

针对具有共同防洪目标的水库群,库容补偿法可利用上下游水库的补偿作用、水文预报的异步性,按防洪控制点错峰补偿调度。李玮等^[10]对梯级水库汛期运行水位动态控制运用进行了初探。提出基于预报及上游水库补偿的梯级水库汛期运行水位动态控制模型,基于预报及库容补偿的梯级水库汛期运行水位动态控制逐次渐进补偿调度模型,采用贝尔曼的逐步逼近思想,将原来的 N 维水库问题分解成为 N 个一维水库问题,考虑实时洪水预报信息并结合上下游水库的库容补偿作用,通过优化运算并反复迭代,使它们的最优解逐步逼近原问题的最优解。陈炯宏等^[11]基于大系统分解协调理论,将梯级水库先“聚合”再“分解”,由梯级防洪目标和预报水雨情信息来确定该“聚合水库”允许最大预蓄水量,再根据梯级水库间的联系协调分配各水库的预蓄水量,以确定梯级水库的汛期运行水位动态控制域。建立的梯级水库汛期运行水位联合运用模型,在不降低原防洪标准的前提下,寻求综合利用效益最大的梯级水库汛期运行水位联合动态控制方案,为开展梯级水库洪水资源化研究提供了一条切实可行方法。清江梯级水库汛期运行水位联合运用计算结果表明,在不增加防洪风险的前提下,这种非工程措施方法可显著地提高梯级水库的兴利效益。

1.2.3.2 预蓄预泄法

预蓄预泄法又称预泄能力约束法,其基本思想是在洪水预见期内水库有多大的泄流能力就将水库的汛期运行水位上浮多少,主要受到当前时刻的水库库容、预报入库流量、预泄能力、允许下泄流量、决策信息传递时间和闸门操作时间等因素的影响。张百川^[12]利用预蓄预泄法对梅山水库汛期运行水位进行了分期控制,为有效地解决防洪与兴利之间的矛盾提供了可靠的技术支持。万俊和陈惠源^[13]充分地考虑气象水文预报信息,对水库进行分阶段预蓄预泄:大洪水来临前可适当抬高拦蓄水位;预报大洪水来临时,可有效地将库水位降至汛期运行水位;洪水过后至下场洪水来临前,可进一步抬高水库拦蓄水位,以提高水库综合利用效益。李旭光和王本德^[14,15]基于洪水预报调度方式提出的约束前移法,可保持原水情判别指标不变,采用面向对象的思想耦合不同流域具体的洪水预报预见期和基于常规调度方式设计汛期运行水位的结果,推求新汛期运行水位和新泄流规则。该方法克服了面向过程的方法中将洪水预报特征要素引入水情判别指标后带来的预报要素的选择、要素过程线的模拟、过程线误差的风险分析等问题,可快速随不同的水库和不同的洪水预报预见期及精度而变化。该方法适用于规划设计阶段的水库,尤其适用于运行阶段由于调度方式的改变需要重新复核汛期运行水位的水库。该方法应用于浑江桓仁一回龙梯级电站,在保持原防洪标准不变的基础上,提高了梯级水库的兴利效益。

1.2.3.3 决策调度法

决策调度法是根据水文预报信息,在调度中引入决策者的意见,权衡各种反馈信息,确定动态汛期运行水位方案,可实现调度过程中的动态控制特性。刘子慧和吴泽宇^[16]考虑水文预报信息,建立了防洪与兴利相结合的多目标优化调度模型,对丹江口水库进行了汛期运行水位分期控制,在不降低防洪标准的前提下,可有效增加丹江口水库夏季和秋季的兴利库容。王本德和周惠成^[17]认为水库汛期运行水位动态控制方案的优选是一个多目标多阶段多人模糊决策问题,建议决策者在权衡效益型目标和风险型目标时,可综合考虑多部门多人与决策者的倾向来确定目标权重,以充分发挥决策者在水库调度中的作用。韩自奋^[18]通过分析黄河上游水库水电站多年的运用

规律和运行特点,依托天气预报和水雨情测报系统技术,改变上游刘家峡水库主汛期固定汛期运行水位的调度方式,实现水库安全有效的汛期蓄水。根据不同调度时期刘家峡出库流量的规律,动态控制下游盐锅峡、八盘峡、大峡水电站的运行水位,实现梯级水库汛期运行水位动态控制,充分挖掘黄河洪水资源的发电、灌溉和供水潜力,达到了黄河水量综合利用效益的最大化。

1.2.4 动态控制风险分析

王本德等^[19]分析了降雨预报在减免水库下游洪灾损失的防洪实时风险调度模型中的可行性,结果表明,降雨预报误差是水库实时调度过程风险因素的主要来源。刘攀等^[20]建立了带有机遇约束的水库汛期运行水位实时动态控制模型,将调度过程分为调度时段内实时防洪风险分析和调度期后续调度控制两个子过程。周惠成等^[7]对水库汛期运行水位动态控制的风险定义、风险源、风险分析的内容与原则、风险的计算作了详细的阐述,并分别给出了单个水库和梯级水库汛期运行水位动态控制风险率的计算实例。郭生练和刘攀^[21]认为汛期运行水位动态控制风险源包括:通讯工程风险、气象水文预报误差风险、决策风险等,建议水库业主单位、上下游群众与地方政府及防汛主管部门之间协调好权责利的关系,提出了成立专项洪水保险基金的基本构想。刘攀等^[22]基于预泄末和回充末水位的经验频率分布,建立了推求汛期运行水位动态控制域的风险分析模型,可有效地利用洪水资源。张改红等^[23]基于预蓄预泄法建立了汛期运行水位实时动态控制模型,并对24h降雨预报误差产生的风险进行分析。周惠成等^[24]为解决水库下游洪灾淹没损失指标难以确定的问题,应用 MIKE 水力软件定量计算了水库下游洪灾淹没风险损失,建立了水库防洪风险、年均发电量、洪水资源利用率及供水保证率可靠度多目标评价体系,以优选汛期运行水位动态控制方案。冯平等^[25]采用随机模拟法将洪水预报误差叠加至入库洪水过程,通过 Monte-Carlo 法计算了洪水预报误差引起的汛期运行水位动态控制风险。范子武和姜树海^[26]分析了在不同预报精度等级和预见期条件下水文预报误差的传递过程,并建立了水库汛期运行水位动态控制的风险分析模型,定量评估汛期运行水位动态控制对水库自身和下游河道断面防洪安全的影响。

1.3 水库汛末提前蓄水调度研究进展

水库的汛末提前蓄水关系到水库供水期利用效益的正常发挥,其中最关键的影响因素为水库的起蓄时间及蓄水进程。汛末水库的起蓄时间的确定需要综合考虑防洪风险、水库蓄满率、航运、发电以及生态蓄水量等多种因素,是一个复杂的且亟待解决的科学问题。每年汛末期在制定面临年份的蓄水调度规则时,还需要根据短期、中期以及长期气象水文预报结果,在确保水库及上下游地区防洪安全的前提下,在分期控制蓄水位的约束下,尽可能减少弃水,抬高水库的蓄水位,以利于水库尽快蓄满,抬高发电水头,减少枯水期的蓄水量,更有利于改善下游地区的用水缺口,从而提高水库的综合利用效益。

随着国内一批库容大、调节性能好的综合利用水利枢纽的建成运用,与水库蓄水调度相关的一系列问题如提前蓄水期间的防洪安全问题、泥沙淤积问题以及下游的生态和环境问题等,引起了越来越多学者们的关注,下面从三个方面展开论述^[27]。

1.3.1 防洪风险和效益分析问题

为使水库能按设计条件发挥其防洪、发电、供水、航运等综合利用效益,汛末提前蓄水是实现洪水资源化的有效途径。但提前蓄水期间会占用一部分的防洪库容,可能会增加一定的防洪风险。因此,确保蓄水期间的防洪安全是水库汛末提前蓄水的前提条件。

纪恩福等^[28]针对岗南水库多年运行中库水位常达不到正常蓄水位这一问题,在岗南水库和黄壁庄水库联合调度下,采用风险效益分析法,对岗南水库提高汛期运行水位的可能性进行了研究,切合实际地给出了合理的汛期运行水位,使水库蓄水期的起蓄水位抬高,提高了水库的兴利效益。李义天等^[29,30]在分析三峡水库洪水的基础上,提出了9月分旬控制蓄水的方案,并且还全面比较了三峡水库汛末推迟蓄水方案和提前蓄水方案对三峡工程防洪、发电及航运的影响,对各蓄水方案的综合效益进行初步评价,归纳了各蓄水方案的利弊。彭杨等^[31]通过对三峡水库汛末分期设计洪水进行调洪演算,计算得到了不同提前蓄水方案下的防洪风险率及其相应的风险损失,

并以此为基础,建立了三峡水库蓄水期的水沙联合调度模型,较好地解决了不同蓄水方式下,三峡水库的防洪、发电以及航运等多目标决策问题。刘攀等^[32]提出了防洪、发电和航运等指标体系,建立了用于动态汛期运行水位和蓄水时机优化的混合规划数学模型,并设计了一种混合编码方式,运用遗传算法对该模型进行优化求解。刘心愿等^[33]采用三峡水库汛期分期方案,将蓄水时间提前至汛末期,综合考虑上下游防洪、发电、通航和蓄满率等要求,建立了多目标蓄水调度模型,构建了“优化—模拟—检验”的算法流程,采用遗传算法进行求解,通过对汛末期防洪库容进行科学划分和对蓄水调度图进行优化,既确保防洪安全又最大限度地挖掘了兴利效益。郭家力等^[34]基于贝叶斯方法建立了水文防洪风险分析模型,采用多输入单输出系统模型把出库流量演进至防洪控制点。根据拟定的提前蓄水方案,选用实测的 60 年日径流资料分别计算了提前蓄水和非提前蓄水两种情况下的风险率。研究发现,三峡水库提前蓄水并未增加长江中游荆江河段的防洪风险。李雨等^[35]建立了三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析模型,对多组分台阶蓄水方案,从防洪风险和蓄水效益两个方面进行了优选,并建议三峡水库可从 9 月 1 日及以后开始蓄水。欧阳硕等^[36]针对流域干支流梯级水库群汛末竞争性蓄水这一工程问题,在保证防洪安全的前提下,将流域水库群蓄水原则与 K 值判别式法相结合,提出了一种新的蓄放水策略来判定流域梯级水库各水库的蓄水时机和次序,但其仅仅是生成了梯级水库群联合蓄水调度非劣质解集,并没有提出能权衡好防洪、发电、航运等多目标的蓄水决策方案。

1.3.2 泥沙淤积问题

对于具有防洪、发电、供水、航运等综合效益的大型水利工程,水库泥沙问题一直是制约水库蓄水运用的焦点问题。在工程规划设计阶段,为减轻水库泥沙淤积,一般会制定“蓄清排浑”的运用方式,即汛期水库维持在汛限水位,使洪水和泥沙能顺畅地排除库外,蓄水期从汛限水位开始蓄水,蓄水期末蓄至正常蓄水位。但由于入库流量过程一般比较复杂,随机性大,再加上下游用水需求的增加,水库的蓄满率会有所降低,对电站的发电效益和下游河段的航运均会产生不利影响。因此,很多学者研究了蓄水期的泥沙淤