



长江巨型水库群 防洪兴利综合调度研究

长江水利委员会 武汉大学 中国长江三峡集团公司 组编

魏山忠等 编著



长江出版社
CHANGJIANG PRESS



长江巨型水库群 防洪兴利综合调度研究

长江水利委员会 武汉大学 中国长江三峡集团公司 组编

魏山忠等 编著



长江出版社
CHANGJIANG PRESS

图书在版编目(CIP)数据

长江巨型水库群防洪兴利综合调度研究/魏山忠等编著;
长江水利委员会,武汉大学,中国长江三峡集团公司组编.
—武汉:长江出版社,2016.11
ISBN 978-7-5492-4734-9

I. ①长… II. ①魏… ②长… ③武… ④中… III. ①水库—
防洪—研究 IV. ①TV62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 272719 号

长江巨型水库群防洪兴利综合调度研究

魏山忠 等编著

责任编辑:吴曙霞

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)82926557(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉精一佳印刷有限公司

规 格:787mm×1092mm

1/16

38.75 印张

826 千字

版 次:2016 年 11 月第 1 版

2016 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-4734-9

定 价:198.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

长江巨型水库群 防洪兴利综合调度研究

编委会名单

主 任	魏山忠	郭生练		
副 主 任	金兴平	王 俊	仲志余	张曙光
委 员	刘 攀	吴道喜	程海云	熊立华
	陈桂亚	郭海晋	胡兴娥	黄 艳
主 编	魏山忠	郭生练	王 俊	金兴平
副 主 编	张曙光	刘 攀	吴道喜	仲志余
	程海云			
参编人员	陈桂亚	熊立华	郭海晋	胡兴娥
	黄 艳	丁 毅	陈剑池	安有贵
	陈永生	许全喜	乔 晔	张细兵
	陈 华	鲁 军	张明波	刘德地
	王 海	闵要武	周新春	纪国强
	李安强	戴明龙	丁胜祥	袁 晶
	廖鸿志	李 响	傅巧萍	李书飞
	邹冰玉	徐长江	高 珺	蒋 鸣
	李文俊	陈炯宏	邢 龙	黄仁勇
	蔡玉鹏	周 曼	陈瑜彬	张 俊
	秦智伟			

Preface

前言

长江是中华民族的母亲河,长江流域生产了全国三分之一的粮食,养育了全国三分之一的人口,贡献了全国三分之一的 GDP。为治理长江水患、开发利用水资源,长江上相继建成了一批大型水库,形成了以三峡水库为核心的世界上规模最大的巨型水库群。充分发挥这些分散在长江干支流上水库相互协作、共同调节径流的整体作用,实现水库群防洪兴利综合调度,是从根本上解除长江洪涝心腹大患、高效利用水资源,走生态优先、绿色发展之路,支撑长江经济带建设,造福亿万人民的重大课题。

长江巨型水库群拓扑关系复杂,防洪保护对象众多且标准不一,防洪兴利协同难度巨大,急需攻克暴雨洪水规律、实时洪水模拟预报、防洪兴利联合调度等关键技术难题。为此,长江水利委员会、武汉大学、中国长江三峡集团公司等单位历经十余年产学研用,依托“湖北省区域性巨型水库群经济运行关键技术研究与应用”(十一五国家科技支撑项目)、“以三峡水库为核心的长江干支流控制性水库群综合调度研究”(中央水利前期项目)、“长江上游控制性水库优化调度方案编制”(中央水利前期项目)等 50 余项国家重大科研课题,围绕长江巨型水库群防洪兴利综合调度的关键技术难题开展攻关研究,取得重大创新和突破。

(1)建立了长江巨型水库群暴雨洪水时空分布新理论新方法。揭示了干支流不同时空尺度、量级的洪水遭遇规律;提出了汛期洪水分期的变点分析方法,首次划定了三峡等水库汛期洪水分期节点;提出了不降低水库防洪标准的分期设计洪水计算方法。

(2)突破了长江巨型水库群实时洪水预报模拟关键技术。原创性研发了复杂水位流量关系动态模拟模型;创新了气象水文耦合模式的

概率洪水预报技术;首次建立了受动库容影响的河道型水库洪水预报模拟模型。

(3)突破了长江巨型水库群防洪兴利联合调度关键技术。发明了基于两阶段的水库防洪风险率识别方法;发明了风险可控的水库群汛期运行水位动态控制方法;创建了水库群蓄水时机及蓄水方式的联合优化技术;发明了基于近似最优解和调度域的柔性调度决策技术。

(4)创建了长江巨型水库群综合调度体系。创立了平原水网区总入流洪水模拟方法,提出了长江中下游整体设计洪水;创建了长江上游区域防洪与流域整体防洪的耦合调度模型,首次提出了面向多区域、大范围、长距离、多目标的水库群防洪补偿调度方式;提出了基于预报预蓄的提前蓄水方法;发展了基于聚合分解的智能优化、解析优化以及模拟优化相结合的水库群调度算法。

依托本项目研究成果编制的《长江防御洪水方案》和《三峡水库优化调度方案》已获国务院批准。项目研究成果对水库群的联合调度、科学运用有重要的理论支撑和技术指导作用,在长江巨型水库群防洪兴利综合调度中成功应用,并获得了巨大的经济社会效益,2009年以来减少直接防汛支出12亿元,增加发电利润130余亿元,其中2013—2015年增加发电利润80余亿元。

目前,我国多条流域的大型水库调度运行面临与长江流域巨型水库群联合调度类似的问题。长江巨型水库群防洪兴利综合调度的成功应用表明,长江巨型水库群防洪兴利综合调度研究的理论和方法,对长江流域以及国内外其他多水库流域都有推广应用价值,具有广泛的发展前景和潜在效益。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.2 技术难点	3
1.2.1 暴雨洪水规律方面	3
1.2.2 水文监测模拟预报方面	4
1.2.3 防洪统一调度方面	5
1.2.4 兴利综合调度方面	5
1.3 研究内容、技术路线与研究方法	6
1.3.1 研究内容与技术路线	6
1.3.2 研究方法	7
第2章 暴雨洪水规律及设计洪水	8
2.1 技术难点与研究内容	8
2.1.1 技术难点	8
2.1.2 研究内容	10
2.2 暴雨洪水规律	10
2.2.1 长江流域暴雨时空分布	10
2.2.2 长江流域洪水时空分布	12
2.2.3 洪水遭遇规律	16
2.3 长江中下游整体设计洪水	58
2.3.1 总入流定义	58
2.3.2 总入流计算方法	59
2.3.3 基于总入流的设计洪水	61

2.4	汛期分期设计洪水	66
2.4.1	汛期分期方法	66
2.4.2	汛期分期设计洪水	75
2.5	典型应用实例	89
2.5.1	三峡水库	89
2.5.2	隔河岩水库	105
2.5.3	瀑布沟水库	119
2.6	小结	131
2.6.1	暴雨洪水规律研究	131
2.6.2	长江中下游整体设计洪水	132
2.6.3	汛期分期设计洪水	132

第3章 水文模拟预报 138

3.1	技术难点及研究内容	138
3.1.1	现状及技术难点	138
3.1.2	主要研究内容	143
3.2	水文信息测报控一体化技术	144
3.2.1	水文信息测报控集成技术研究	144
3.2.2	多信道通信与控制技术研究	152
3.2.3	相应流量报汛研究	167
3.2.4	相应流量报汛软件研发	173
3.2.5	自动化报汛	178
3.3	水文预报关键技术	182
3.3.1	分布式流域水文模型	183
3.3.2	流域气象—水文模型耦合技术	199
3.3.3	动库容调洪演算模型	213
3.3.4	基于改进 GLUE 方法的概率预报技术	232
3.4	通用型水文预报平台	242
3.4.1	开发关键技术	242
3.4.2	平台与通用软件资源库	251

3.4.3	预报模式与模型组件集	273
3.4.4	平台数据处理技术	276
3.4.5	预报模型组件派生	284
3.4.6	平台应用实例	288
3.5	小结	321

第4章 防洪统一调度技术 331

4.1	技术难点与研究内容	331
4.1.1	防洪调度研究现状	331
4.1.2	长江防洪形势及存在的调度技术问题	332
4.1.3	主要研究内容	333
4.2	水库群防洪调度模型研究	333
4.2.1	防洪调度需求分析	333
4.2.2	水库群统一防洪调度模型	370
4.3	水库群防洪调度方式研究	375
4.3.1	调度体系	375
4.3.2	对川渝河段协同防洪调度方式	375
4.3.3	面向跨区域、多目标的长江中下游协同防洪调度方式	382
4.4	小结	405

第5章 兴利统一调度技术 409

5.1	技术难点与研究内容	409
5.1.1	现状及技术难点	409
5.1.2	主要研究内容	410
5.2	汛期运行水位动态控制模型	411
5.2.1	模型架构	412
5.2.2	实时调度安全边际子模型	413
5.2.3	实时防洪风险分析子模型	414
5.2.4	余留期调度控制子模型	417
5.2.5	实时优化调度子模型	418
5.2.6	典型应用实例	418

5.3	汛末提前蓄水关键技术	480
5.3.1	蓄水时机协同优化	481
5.3.2	提前蓄水方式	488
5.3.3	提前蓄水风险控制	495
5.4	供水期统一调度技术	514
5.4.1	水库群联合降维优化调度技术	514
5.4.2	水库群统一调度柔性决策技术	530
5.5	小结	535

第6章 防洪兴利综合调度应用与实践 541

6.1	水库群概况	542
6.2	联合调度方案	547
6.3	水库群信息共享	554
6.4	典型应用实例及成效	555
6.4.1	金沙江中游梯级	555
6.4.2	金沙江下游梯级	563
6.4.3	雅砻江梯级	567
6.4.4	大渡河瀑布沟水库	569
6.4.5	乌江梯级	572
6.4.6	清江梯级	574
6.4.7	汉江丹江口水库	578
6.4.8	三峡水库	580
6.5	小结	599

第7章 主要成果及结论 601

7.1	主要成果	601
7.1.1	暴雨洪水规律方面	601
7.1.2	洪水监测模拟预报方面	604
7.1.3	防洪优化调度方面	606
7.1.4	兴利优化调度方面	607
7.2	结语	610

第1章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

长江流域已形成的以三峡水库为核心的长江巨型水库群(见图 1.1-1),具有防洪、发电、航运、供水等综合利用功能。以三峡水库为核心的长江流域水库群防洪兴利综合调度,事关防洪安全、生态安全、供水安全、能源安全和航运安全,事关长江经济带建设乃至全国经济社会持续稳定发展,意义十分重大。规模如此庞大的水库群综合调度运行涉及领域众多、难度巨大,无论国内还是国外,都史无前例。通过研究协调防洪、兴利等目标,协同上下游、左右岸利益,实现综合效益最大化,是迫切而又现实的需求,具有极为重要的理论意义与应用价值。

长江流域水库群综合调度具有跨行业、跨部门、跨区域、多学科、多目标、多维度、随机性、非线性以及强耦合性等特点,需攻克水文预报与模拟、防洪兴利综合调度及多目标协同调度决策等世界性技术难题。

长江水利委员会、武汉大学、中国长江三峡集团公司、华中科技大学等 9 家单位,历经 10 余年,围绕“长江流域水库群防洪兴利综合调度关键技术研究及应用”问题,先后开展了“三峡水库优化调度方案研究(水利部水规计[2008]637 号)”,国家科技支撑计划“三峡—葛洲坝梯级水利枢纽调度技术集成及示范(2008BAB29B09)”,“巨型水库群洪水资源调控关键技术研究(2009BAC56B02)”,国家自然科学基金项目“基于 GIS 和遥感的水文水资源模拟仿真系统及应用研究(50179026)”,“基于大气模式的洪水预报系统研制与应用(50679063)”,“不降低防洪标准的分期汛限水位设计模式(50609017)”,“水库调度中的‘异轨同效’现象研究(50979072)”,“Copula 函数理论在多变量水文分析计算中的应用研究(51079100)”,“水库引起的流域下垫面变化下的水文预报和不确定性分析(51079098)”,“基于多智能体的水资源系统模拟与优化配置研究(51009119)”等 50 余项重大水利水电生产科研课题的研究工作,项目研究成果成功应用于 2010 年以来的长江流域综合调度中,有效指导了长江水库群综合调度实践,有力保障了以湖北省为重点的长江中下游地区防洪、供水、生态和航运安全,产生了显著的社会效益和经济效益。

长江流域水库群综合调度技术的成功应用实践证明:项目提出的水库群防洪兴利综合调度技术的理论和方法,对国内梯级水库群乃至国内外其他类似工程都有显著的推广应用价值,具有广泛的发展前景和潜在效益。

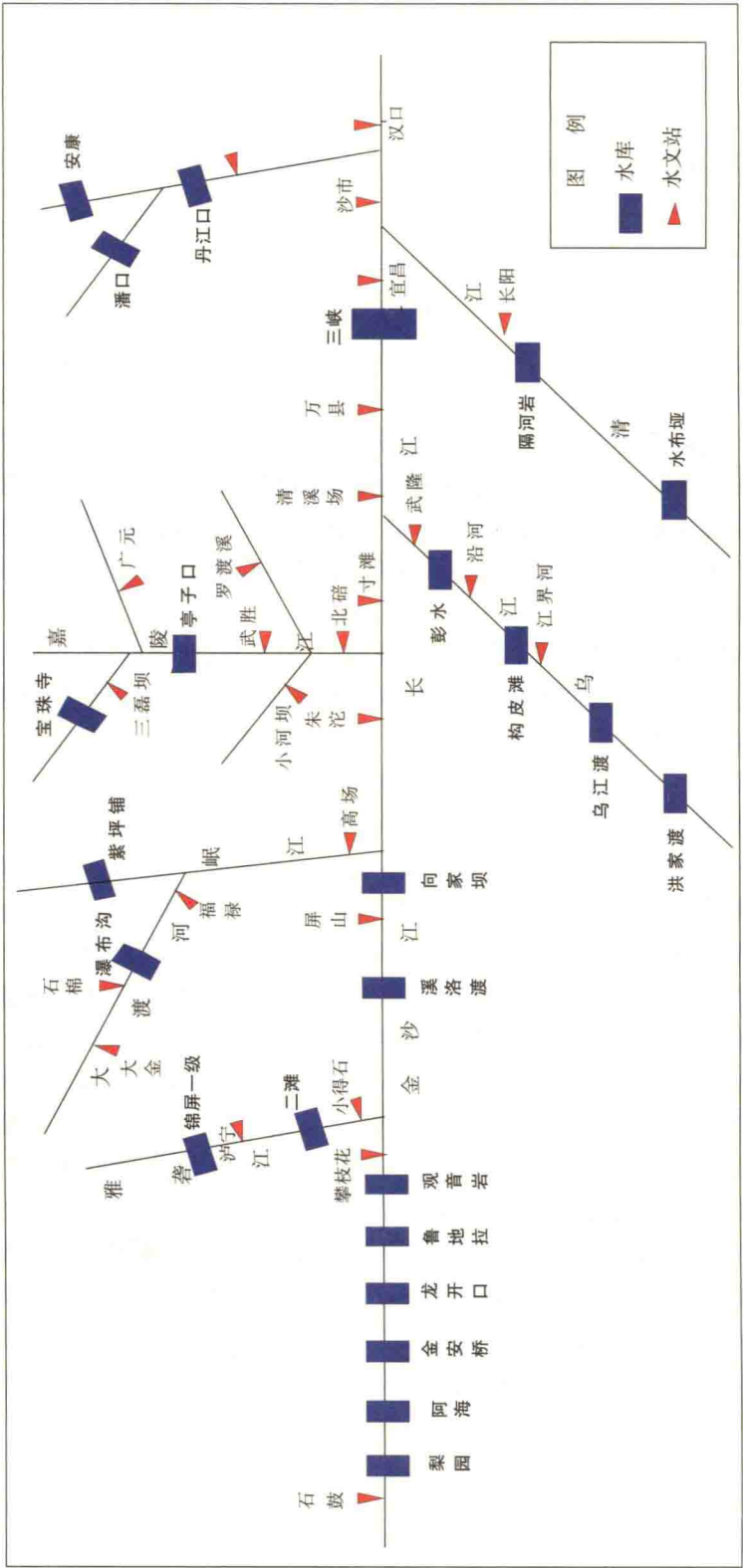


图1.1-1 纳入研究的长江流域巨型水库群示意图

1.2 技术难点

长江流域的人口、水资源量、粮食产量、GDP 均占全国的 1/3,水能资源蕴藏量占全国的 40%,通航里程占全国内河通航里程的 56%。长江上已经形成世界上规模最大的水库群,运行调度涉及防洪、发电、航运、供水、生态等多个方面,难度空前。国内外在水库群防洪兴利综合调度理论与方法方面都有大量的研究与快速发展,但仍难以解决上述大规模、多尺度、多属性、多目标流域一体化综合调度问题,需要从理论、技术、方法上研究和突破。主要技术难点体现在以下几个方面:

1.2.1 暴雨洪水规律方面

洪水灾害是由异常的水文气象因子和流域自身特点综合作用而形成的。长江流域历来为洪水多发区,洪水具有峰高、量大、历时长的特点,两岸重要保护对象较多,破坏力极强。认识和揭示长江流域的暴雨、洪水时空分布特性及洪水遭遇规律,是实施长江巨型水库群统一调度的重要理论基础。

首先是暴雨洪水时间上的季节性规律。根据长江流域水文气象特性,流域洪水均由暴雨形成,具有显著的季节变化规律,从入汛到汛末,洪水经历由弱变强,后又逐渐变弱(或螺旋式变弱)过程,大洪水常常集中在汛期少数几个月内,汛期洪水具有较为明显的分期特征。因此,对应同一防洪标准,在汛期不同时间,设计洪水也是变化的。我国大多数水库沿用设计阶段使用的年最大设计洪水拟定汛限水位是安全的,但不符合洪水在时间上的变化规律,也很不经济,影响了工程兴利效益的发挥、提高。因此,研究反映长江流域汛期分期设计洪水,是科学合理协调防洪与兴利矛盾、达到既符合防洪标准又充分发挥三峡水库综合效益的有效途径。分期设计洪水核心研究内容包括汛期分期方法与分期设计洪水计算技术两个方面。目前针对汛期分期的研究方法很多,可以概括分为成因分析法和数理统计法两种,分别属于定性和定量分析方法。数理统计法包括模糊分析法、分形分析法、系统聚类法、矢量统计法、相对频率法和圆形分布法等。其中成因分析法属于定性分析的方法,早期应用较为广泛,但由于缺乏科学的数学计算依据,使得分期带有一定的不确定性,各种定量分析方法的出现弥补了这方面的不足。虽然汛期分期的方法很多,但各有一定的优缺点,各种方法得到的分期结论会有差异,至今尚未形成公认有效的方法。此外,我国现行的分期设计洪水计算方法基于分期最大值系列,采用单变量的P-Ⅲ型分布进行描述,假定为分期设计洪水的频率等于设计标准对应的重现期的倒数,求得各设计频率的分期设计洪水。研究表明:现行方法计算的汛期分期设计洪水系统偏小,通过应用它来提高水库兴利效益,存在降低水库防洪标准的风险。需要探索不降低防洪标准的分期设计洪水计算技术。

其次是暴雨洪水的空间遭遇规律。历史实测资料表明,大洪水通常是由干支流的洪水遭遇形成的。按遭遇标准不同,洪水遭遇可分为洪峰遭遇和过程遭遇两种情况。洪峰遭遇意味着干支流的洪峰在汇流处同时出现,叠加在一起,在控制站距离汇流处相差不



大或距离较近时,可近似认为控制站的洪峰在同日出现即为洪峰遭遇;洪水过程的遭遇可定义为干支流 15 天洪水有 7 天及以上重叠者。按此定义,洪水遭遇需满足两个条件:干支流洪水发生(或间隔)时间在一定的时间范围内,洪水量级在一定程度之上。长江洪水遭遇问题事关下游河道的防洪安全,干支流洪水一旦遭遇将加剧下游的防洪形势,控制不好,还可能会引起洪灾。此外,目前常用的洪水遭遇分析方法仍然是根据研究区域历年同步洪水资料进行统计。但现有方法无法定量估计发生 100 年一遇或 1000 年一遇设计洪水的遭遇概率。

最后是平原区的设计洪水问题。长江中下游属平原河道,河流、湖泊密布,河流与湖泊水力联系复杂,中下游地区地势平坦低洼,汛期洪水主要依靠堤防约束,洪水位常高于地面较多。当洪水超过堤防防御能力时,往往会造成堤防溃决或采取人工分洪措施,这使得实测洪峰流量和时段洪量与天然实际情况有较大差别,导致实测洪水过程不能充分反映出洪水的真实面目。同时,因分洪情况不同和江湖关系的逐年演变,中下游分洪量和江湖调蓄量每次洪水过程均不同。这使中下游各站的实测洪水资料较难满足水文系列的一致性要求,为设计洪水分析与计算带来了困难。为了解决洪水系列的一致性问题,真实反映天然洪水情况,急需研究平原区设计洪水问题。

1.2.2 水文监测模拟预报方面

气象水文预报作为水电工程运行管理的重要非工程措施,是水库群发挥正常社会经济效益必不可少的关键技术和前提条件。根据水文预报,可以事先控制水利工程(水库、闸坝)的泄洪、拦洪、削减洪峰、与下游洪水错峰等。根据水文气象预报,可以利用分蓄洪区拦蓄超额洪水,以牺牲局部来保护全局。根据水文预报,可以组织群众逃洪避险,保障人民的生命财产安全。根据水文预报,可以开展防洪抢险行动,加高加固堤防,防止堤防的溃决和漫溢。气象水文预报预警关键技术研究在提高长江流域防洪能力、提高水库群汛期洪水资源利用率与汛末蓄满率、改善电力系统运行条件、保障生态环境的持续发展等方面起着不可估量的作用。

在水文工作者的努力下,我国水文预报技术有了显著提高,但是与国民经济建设对防洪减灾的高要求还有很大差距。主要差距表现为:水文预报方案基本是以“落地雨”为基础,未考虑预见期内的降雨等信息,限制了预报的预见期长度;水文预报基本是确定性的预报,回避了不确定性的问题,未向决策者提供更多有用的风险信息;水文预报的开展需要依赖工程预报人员的个人经验及鉴别能力,因而在推广和使用这些方法时受到限制,手段依然落后。

流域水文模型以整个流域水文系统为研究对象,根据降雨、蒸发和径流等水文过程在自然界的运动规律建立数学模型,借助现代计算方法,模拟、分析和预测流域内水体的存在方式、运动规律和分布状况等。就反映水流运动物理规律的科学性和复杂程度而言,水文模型通常被分为三大类:系统模型(黑箱模型)、概念性模型和物理模型。目前应用较为广泛的模型多为系统模型和概念性模型,水文物理模型因资料条件难以满足,在实际应用中受到限制。但是,系统模型和概念模型不能反映实际暴雨洪水产汇流的空间

分布特性,无法全面地刻画水文系统分散输入集中输出的产汇流规律,更无法模拟变化环境(如土地利用、水土流失、面源污染、气候变化影响评价等)中的陆地表面过程。因此,为了研究和解决变化环境中的水文水资源问题,评估和监测流域的径流过程和水资源量的动态变化规律,实现水资源的可持续利用和发展战略,必须开发研制有物理基础的分布式流域水文模型。

传统的洪水预报以“落地雨”为预报基础,预见期非常有限,这不仅削弱了预报的及时性,最终在很大程度上降低了工程效益。因此在保证洪水预报精度的前提下,如何延长洪水预见期已经成为防洪减灾、兴利调度措施中一个非常重要的研究课题。要延长预报的预见期,最有效的方法是在“落地雨”未发生以前获取其信息,引进降水预报的预见期。近年来,得益于气象科学的发展和雷达、卫星等新观测技术的广泛使用,数值天气预报模式为解决这个问题提供了可能。因此,考虑将数值天气预报模式与分布式水文模型进行耦合,是延长水文预报预见期,提高预报精度的重要技术难点。

1.2.3 防洪统一调度方面

长江流域范围广、支流众多、区间洪水比重大,社会经济发展迅速,各区域及流域整体防洪任务艰巨。长江流域水库群的联合防洪调度是实现流域防洪安全的有效手段。

长江流域水库群联合防洪实时调度主要存在两类技术问题:一是如何运用水库群针对同一防洪目标进行联合防洪调度,此类防洪调度的重点在于确定各参与防洪水库的启动次序、时机与运用条件,以及实现防洪目标达到预定防洪标准所需防洪库容在参与防洪水库群间的库容分配。二是如何运用水库群针对多重防洪目标进行联合防洪调度,此类防洪调度的重点在于如何合理地划分承担各防洪目标所需的防洪库容,以及此防洪库容在各参与防洪水库群间的划分,在此基础上研究不同洪水组成类型条件下各梯级水库参与防洪调度的启动条件和运用参数。

1.2.4 兴利综合调度方面

在方案的编制上,目前的联合调度方案还比较宏观,各控制性水库在水库群系统中的总体调度方案和针对不同防洪对象的调度方式还不明确,操作性不强,对各梯级水库所在地的防洪基础设施、防洪需求等掌握得不够细致,基础资料不够系统,技术要求不够明确。在实时调度方面,编制的联合调度方案尤其防洪调度方案着重针对的是防御标准洪水的调度方式,但在实时调度中,经常遇到的是防洪标准以内的常遇洪水,如何在联合调度方案的原则指导下,结合实时洪水预报,实施常遇洪水的调度,更大程度地发挥水库综合效益,是近年来实时调度经常面临的现实问题。此外,如何制订长江上游特大水库群联合运用的分期方案和确定汛限水位联合动态控制阈值,定量分析长江上游梯级水库群汛限水位动态控制方案对中小洪水消纳程度,这些方面的研究基础还十分薄弱,尤其是主要支流调度基础研究更显不足,对水库实时调度支撑性不强。

同时考虑到长江巨型水库群除三峡、瀑布沟、亭子口等水库主要承担防洪任务外,其他水库均以发电为主要开发任务。一方面,由于流域防洪需要,在汛期需预留一定防洪



库容以备发生洪水时调度,对水库群兴利调度运用产生一定的影响。另一方面,长江上游各水库设计汛后蓄水时间相近且蓄水规模巨大,若统一安排在汛后集中蓄水,必然对下游水库蓄水计划以及枯水期中下游供水需求产生影响。为解决此种矛盾,水库群防洪减灾与兴利蓄水协调技术是研究的重点,难点在于如何构建水库群联合蓄放水调度模型和提取蓄放水调度规则,以及如何预留防洪库容以协调水库群防洪减灾与兴利蓄水关系,并定量分析和评估不确定因素影响下联合蓄放水方案的防洪风险与兴利效益。

此外,梯级电站群联合发电调度面临兼顾多个电网安全稳定经济运行的复杂工程应用难题,如何突破制约流域梯级电站群多时空联合优化发电调度的瓶颈问题,建立跨电网梯级电站群发电调度分区优化控制建理论与方法体系,实现流域梯级电站群发电计划编制的差异化目标控制,以及如何精确描述变时空尺度下大规模复杂梯级电站群联合优化发电调度及安全稳定运行域边界条件,这方面的研究工作具有较大的技术难度。

1.3 研究内容、技术路线与研究方法

1.3.1 研究内容与技术路线

如图 1.3-1 所示,针对水库群统一调度问题,分别开展暴雨洪水时空分布规律、水文监测模拟预报以及防洪与兴利调度三方面的研究。主要包括:

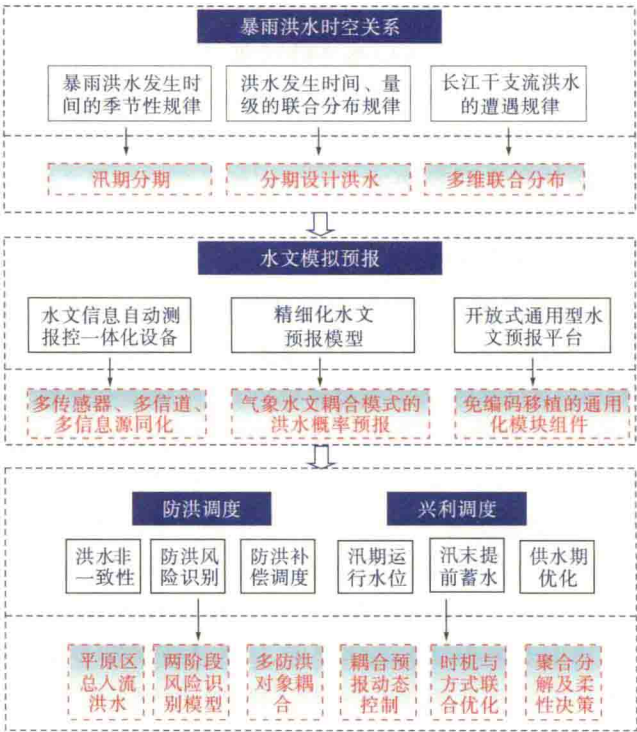


图 1.3-1 研究内容与技术路线图

在暴雨洪水时空分布规律方面,研究水库规划设计中的汛期分期、分期设计洪水以及洪水遭遇等问题。其中汛期分期包括变点分析方法,设计洪水包括不降低防洪标准的分期设计洪水计算理论,洪水遭遇包括 Copula 多元函数。

在水文监测模拟预报方面,研究测报控监测体系,耦合气象模式的不确定性洪水预报,开展耦合气象预报的分布式水文模型、洪水预报不确定性分析等研究。

在水库调度方面,开展防洪与兴利的统一研究。具体包括不降低防洪标准的水库汛期运行水位动态控制,揭示防洪风险率的时间、空间尺度变换,以及衍生、动态演变等规律,开展了攻克维数灾的聚合分解方法研究、处理随机性和多目标难题的水库柔性决策研究,实现了水库群联合优化与决策。

1.3.2 研究方法

本次研究主要运用了以下方法和技术:

基于 Copula 函数理论的多变量设计洪水计算方法。Copula 函数可以描述水文变量的相关性结构,加之单变量边缘分布的选择及其参数估计方面已有的成果,多元联合分布建模的主要问题仅包括 Copula 函数的选择和参数估计这两个部分,从而使多元联合建模问题大大简化,成为水文变量联合分布模型研究的有力工具。

基于空间水库聚合分解的水库群联合优化调度降维方法。基于先总后分的思路,先将水库群聚合为一个虚拟水库,开展该单个水库调度得到总的最优决策。然后将总决策通过分解原理分配到各水库中,构建了水库群联合优化调度的聚合分解降维方法。结合制定梯级水库群联合优化调度方案的“优化—拟合—再优化—随机仿真”框架,为水库群优化计算降维提供了通用的、一般性的框架和方法。

基于贝叶斯理论的不确定性分析技术。不确定性分析技术可用来分析系统的输入不确定性、模型不确定性以及参数不确定性等,在洪水预报和水文模型、水文分析计算以及水环境等领域应用广泛。在传统的水库调度中,通常只保留一个最优解,而忽略其他等效的最优解,这样往往丢失了很多有用的信息。水库优化调度是一个最优辨识问题,调度轨迹或者调度规则参数均需进行参数识别,传统方法仅采用了优化的思路,如果“异轨同效”(指对于相同的调度模型和相同的模型输入,会有多个最优参数组,如调度轨迹或者调度规则参数,使所获得的调度结果具有相同的目标函数值)现象客观存在,那么采用基于不确定分析的方法来识别参数就具有可能性。应用通用似然不确定性估计法(GLUE)和马尔科夫链蒙特卡罗法(MCMC)等不确定性分析方法到水库优化调度问题中,将单一决策扩展为区间决策,实现水库柔性调度决策。