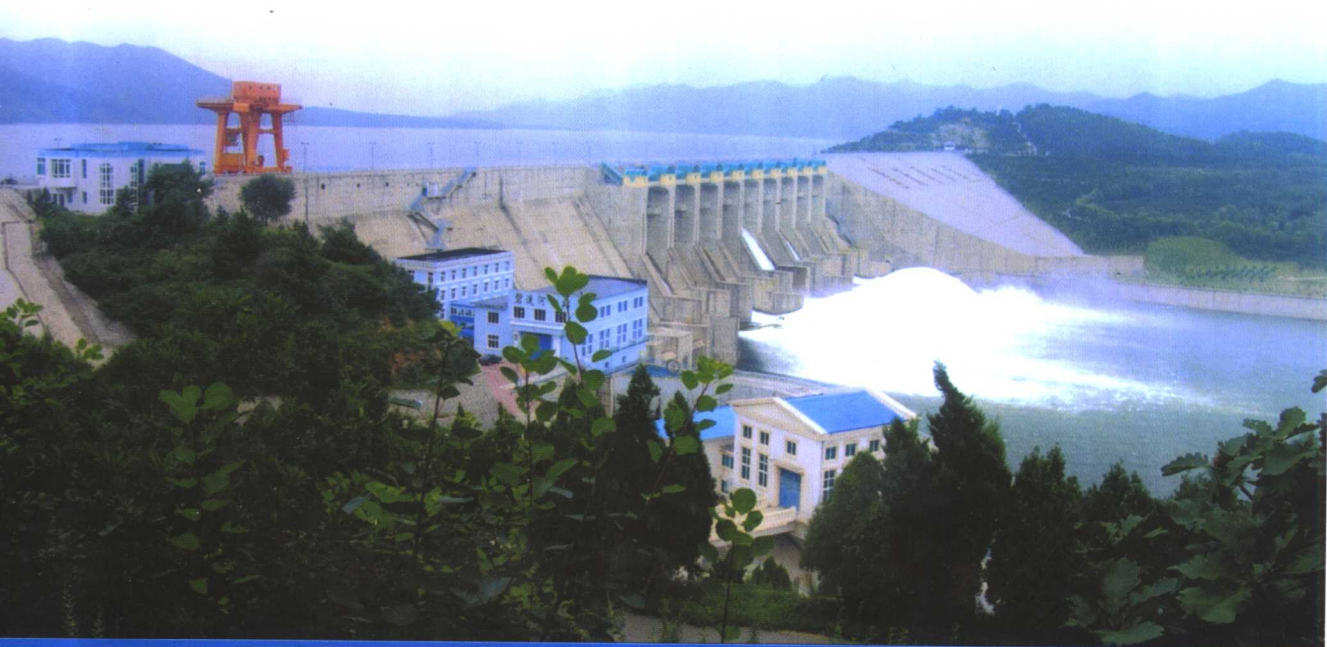


水库汛限水位动态控制 理论与方法及其应用

主 编 王本德 周惠成
副主编 王国利 袁晶瑄
梁国华 李 敏



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水库汛限水位动态控制 理论与方法及其应用

主 编 王本德 周惠成
副主编 王国利 袁晶瑄
梁国华 李 敏



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为国内外第一部系统论述水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用的书籍。按照水库汛限水位动态控制实施的基本条件、控制域值确定、实时动态控制、风险效益指标计算、方案优选等方法次序叙述, 结构合理、紧凑, 逻辑性强。书中介绍的一些方法比较新颖、实用, 每种方法都举有算例, 便于自学, 将有助于水库汛限水位动态控制理论与方法的深入研究及其应用, 有利于在防洪安全前提下提高洪水资源与水能资源利用率。

本书共分 8 章, 全面系统地论述了水库汛限水位动态控制的基本属性与理念, 洪水预报调度系统的可利用性, 应用降雨预报信息的可行性, 动态控制域的确定方法, 动态控制的主要方法, 动态控制的风险分析和效益分析, 以及动态控制方案的优选方法等。

本书可供防洪系统工程规划设计、运行管理和研究工作者, 防汛部门技术管理干部, 水库工程管理技术人员阅读; 亦可作为“水文学及水资源”、“水利工程管理”等学科研究生和有关专业高等院校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用 / 王本德,
周惠成主编; 王国利等编著. —北京: 中国水利水电
出版社, 2006

ISBN 7-5084-3726-8

I. 水... II. ①王... ②周... ③王... III. 水库—
防洪—水位—动态控制—研究 IV. TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 035797 号

书 名	水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用
作 者	主编 王本德 周惠成 副主编 王国利 袁晶瑛 梁国华 李敏
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.25 印张 362 千字
版 次	2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3500 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着经济社会的发展，人们对水库的防洪安全与供水保障提出了更高要求。在确保水库安全的前提下，科学地设计与运用汛限水位，合理地利用水库防洪与兴利“重叠”库容，是提高洪水资源和水能资源利用率，发挥水库综合利用效益，缓解我国水资源与水能资源供需矛盾的有效手段之一。

20 世纪 50 年代末至今，我国许多大型的有调节性能的水库，为防止汛期弃水，汛后尽量蓄至兴利蓄水位，防止洪水与水能资源较大浪费，而逐步由“全汛期设计运用单一汛限水位值”转变为“汛期分期设计运用多值汛限水位”，按照规范要求基本将汛期分两期或三期，这些设计与运用方法已写入相应教科书或培训教材中。另外还有许多研究，将汛期分五期或一旬、候为一期，更甚者细化出一日一个汛限水位控制值，即汛限水位的随时间变化用一连续曲线描述等。应该承认，随时序变化控制汛限水位控制值，基本符合洪水变化的统计规律，亦可增加水资源与水能资源的利用率。但必须指出，上述的分期汛限水位是依据历史水文气象资料，在历史重演假定下，依据数理统计原理设计的，并没有考虑在实时调度中，利用实测或预报的水文气象信息，而是按法定要求，即使面临时刻晴空万里，也要控制汛限水位值不能超过设计的定期定值，以时刻防止遭遇下游防洪标准或水库设计标准洪水。所以对于全汛期或主汛期只发生一两次较大洪水的水库而言，往往主汛期抓不住时机蓄水，即便后汛期设计汛限水位允许抬高，也无水可蓄。许多水库“吃一堑长一智”，开始研究与应用“预蓄预泄”方法控制汛限水位，利用洪水退水余量超蓄，为防洪安全，在下次洪水起涨前必须降回批复的定期汛限水位值。水利计算规范给予约束与认定，有关的控制运用教材也初步论述这一方法。综上所述，无论是分期设计控制汛限水位，还是“预蓄预泄”法，都是基于传统的设计思想与理念，要求时刻防止小概率洪水事件发生。

“水库汛限水位动态控制”的定义、基本概念与方法，是在 1996 年 9 月国家防汛抗旱总指挥部办公室与大连理工大学合作编著的《水库防洪预报调度方法及应用》教材中正式提出的，并对各省市防汛办公室的技术人员进行多次培训。

水库汛限水位动态控制是指水库在汛期，根据实时雨、水情信息，利用降雨和洪水预报成果，在不降低水库防洪标准，确保水库及其上下游地区防洪安全的前提下，按照科学论证并经有关部门审批的水库汛限水位动态控制方案确定的控制范围对汛限水位进行浮动的调度过程。

2002年初，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，为了建立水库汛限水位设计与运用的新理念，更加充分利用洪水资源，为国民经济的可持续发展提供更强有力的支持与保障，将“汛限水位设计与运用”作为水利部重大科技项目，从运用角度，重点研究“水库汛限水位动态控制方法”，并通过专家评议推荐，委托大连理工大学在以往研究的基础上再系统深入地开展研究。

汛限水位动态控制的基本理念是：从不可能发生事件出发，综合利用现代科学技术提供的一切有用信息，以弥补措施预防非常事件，安全经济地确定一个允许动态控制的汛限水位值。其属性归类为实时预报风险调度范畴。研究的指导思想是：要利用一切可利用的信息，如卫星云图、数值预报产品、降雨预报、洪水预报、面临时刻所处的时期及补偿水库的实际库水位等，将未来某一时期的汛限水位控制在原设计汛限水位上下的一個约束域內。高于原设计汛限水位的目的是充分利用洪水资源，且不降低原设计标准；低于原设计汛限水位的意图是提高水库及其上下游原设计的防洪标准，且不降低原设计供水保证率。

通过多年研究，在国家防汛抗旱总指挥部及各级防汛抗旱指挥部办公室的支持下，在大伙房、清河、柴河、碧流河、葭窝、观音阁、白龟山、丹江口、桓仁、于桥水库，在水利部水利水电规划设计总院、天津院、东北院与辽宁省、吉林省、河北省、河南省、大连市等水利水电勘测设计研究院的密切配合下，取得了一些突破性的成果，基本形成了一套完整的方法体系。为便于该方法的推广应用和继续开展更深入的研究，特撰写本书。

本书共分8章。第1章综述水库汛限水位设计与运用方法的基本概念，水库汛限水位动态控制的目的意义、内容，基本属性与理念，方法研究的回顾与展望；第2章叙述水库汛限水位动态控制的必要性与洪水预报调度系统可利用性，重点阐述必要性和可行性分析的基本思想，内容与方法，水库汛限水位动态控制的条件与最适宜时间的基本概念；第3章专门论述降雨预报信息应用于“汛限水位动态控制”的可行性，较详细叙述降雨预报信息精度与可利用的分析内容、方法；第4章首先叙述水库汛限水位动态控制域值确定的目的意义与内容，然后重点论述“预报调度规划法”、“预蓄预泄能力约束法”和

“库容补偿法”的基本概念、应用条件与计算方法；第5章在阐述水库汛限水位动态控制关键时期与实施条件的基础上，详细论述了“预蓄预泄法”、“综合信息推理模式法”、“查算表法”、“实时洪水预报调度系统耦合法”的基本原理、方法和应用条件；第6章重点论述水库汛限水位动态控制风险分析的原则、基本假定与计算方法；第7章主要论述了水库汛限水位动态控制效益分析的原则及防洪兴利连续调节计算方法等；第8章较详细阐述了水库汛限水位动态控制方案优选方法。

书中介绍了一些新理念与实用方法，每种方法都举有算例，便于自学，将有助于水库汛限水位动态控制方法的推广应用和深入研究，有利于在防洪安全的前提下提高洪水资源与水能资源利用率。

本书主要撰写人有：王本德、周惠成、王国利、袁晶瑄、梁国华、李敏。本书由王本德、周惠成任主编，王国利、袁晶瑄、梁国华、李敏任副主编。

众所周知，水库汛限水位动态控制问题复杂，涉及许多关键性技术，且我国水库自身特性、所在区域水文气象特性差异较大，各自防洪兴利任务及其矛盾激化程度亦不同，因此，尚不可能研究一个完全通用的技术与方法。可见，本书论述的方法与关键技术只起抛砖引玉的作用，是否具有相对通用性，需要在实践中检验、证明。相信，随着科学技术的发展和应用普及，必将有新的、更完善的理论和方法诞生。

书中一些关键性技术与概念多次得到陈守煜、鄂竟平、张志彤、邱瑞田、田以堂、朱元铎、陈清濂、王厥谋、文康、朱尔明、富曾慈、滕炜芬、孙双元、蒋肖、万海斌、刘宝军、黄金池等教授与专家的指教，给予了热情关怀、大力支持和真诚帮助，对此特向他们表示诚挚的谢忱。同时，大连理工大学水资源与防洪研究所的博士和硕士研究生们，为本书的部分研究成果付出了辛勤的劳动，在此也一并向他们表示衷心的感谢！

编者

2006年6月

目 录

前 言

1 水库汛限水位设计与运用方法综述	1
1.1 水库汛限水位设计与运用的基本概念	1
1.2 水库汛限水位动态控制方法研究与应用的回顾和展望	5
1.3 水库汛限水位动态控制的目的意义与主要内容	10
2 水库汛限水位动态控制的必要性与洪水预报调度系统可利用性分析	12
2.1 必要性与可行性分析的基本思想与主要内容	12
2.2 汛限水位动态控制的条件及最适宜时间分析	14
2.3 水库水雨情自动测报系统的可利用性分析	19
2.4 洪水预报技术发展及洪水预报方案选择	21
2.5 洪水预报方案用于汛限水位动态控制的可行性分析	24
3 降雨预报信息应用于汛限水位动态控制的可行性分析	39
3.1 降雨预报和灾害性暴雨预报水平概述	39
3.2 降雨预报信息的精度分析	43
3.3 降雨预报信息应用于汛限水位动态控制的可行性分析	54
3.4 中央气象台发布的全国主要城市的降雨预报精度分析	60
4 水库汛限水位动态控制域的确定方法	67
4.1 汛限水位动态控制域确定的目的与主要内容	67
4.2 防洪预报调度方式确定汛限水位动态控制上限值	69
4.3 考虑年内洪水变化规律确定汛限水位动态控制上限值	81
4.4 改进预泄能力约束法确定汛限水位动态控制上限值	86
4.5 库群补偿调节方法确定汛限水位动态控制上限值	89
4.6 考虑工程措施的汛限水位动态控制上限值确定	92
4.7 包线法确定汛限水位动态控制范围	92
5 水库汛限水位动态控制的主要方法	94
5.1 汛限水位动态控制方法概述	94
5.2 汛限水位动态控制预蓄预泄法	96
5.3 汛限水位动态控制的综合信息推理模式法	107
5.4 耦合于防洪预报调度系统的汛限水位动态控制值优选法	123
5.5 综合信息汛限水位动态控制决策支持表	130
6 水库汛限水位动态控制的风险分析	148
6.1 广义风险的概念	148

6.2	汛限水位动态控制风险分析的目的意义与基本特性	150
6.3	汛限水位动态控制风险分析的主要内容与原则	153
6.4	洪水预报方案的风险分析	154
6.5	水库洪水预报调度方式的风险计算	159
6.6	降雨预报信息应用于汛限水位动态控制中的风险分析	169
7	水库汛限水位动态控制的效益分析	188
7.1	效益分析的目的意义和主要内容及方法选择	188
7.2	从系统工程的角度理解兴利调节计算方法	189
7.3	防洪兴利连续调节计算方法的基本概念与原理	194
7.4	防洪兴利连续调节计算的系统运行指标的变化规律	198
7.5	兴利供水保证率的可靠性分析	205
7.6	部分水库汛限水位动态控制的效益分析成果	208
8	水库汛限水位动态控制方案的优选方法	215
8.1	水库汛限水位动态控制方案优选的目的意义与方法选择	215
8.2	多目标多阶段多人模糊优选满意决策基本模型	216
8.3	汛限水位动态控制方案的多目标模糊优选应用举例	226
8.4	初步结论	232
	参考文献	233

1

水库汛限水位设计与运用方法综述

1.1 水库汛限水位设计与运用的基本概念

1.1.1 水库汛限水位及其相关的特征水位的定义

水利水电规划设计的水库防洪、兴利指标，主要有防洪限制水位、防洪高水位、设计洪水位、校核洪水位、正常蓄水位、死水位。其定义与基本概念、设计与运用要求及计算方法，在高等院校水利及有关专业的水利水电规划教科书、设计洪水及水利计算的规范、水库控制运用教材、水库工程管理通则、中国水利百科全书等都有不同深度的论述。为了深入了解水库防洪限制水位动态控制方法研究的基础、环境及其与传统设计思想、理念的差异，本节参考文献 [1-6]，归纳性地介绍上述特征水位定义及基本概念。

(1) 防洪限制水位

防洪限制水位也称汛期限制水位（或简称汛限水位），是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位，也是水库在汛期防洪运用时的起调水位。防洪限制水位是协调防洪和兴利关系的关键，对工程防洪效益、发电灌溉等兴利效益、库内引水位高程、通航水深、泥沙淤积，以及水库淹没指标等均有直接影响，具体研究时要结合工程开发条件，防洪调度方式，全面进行分析比较后选定。

(2) 防洪高水位

水库遭遇到下游防洪保护对象的设计洪水时，在坝前达到的最高水位。它与汛期限制水位之间的库容称防洪库容。只有当水库承担下游防洪任务时，才需确定这一水位。此水位可采用相应下游防洪标准的各种典型洪水，按拟定的防洪调度方式，自防洪限制水位起始调洪计算求得。水库上游允许淹没水位（高程），也属于防洪高水位范畴，应用允许淹没标准洪水按拟定的防洪调度方式，自防洪限制水位起始调洪计算求得。

(3) 设计洪水位

水库遇到大坝的设计洪水时，在坝前达到的最高水位。它与汛期限制水位之间的库容称拦洪库容。它是水库在正常运用情况下，允许达到的最高水位，也是挡水建筑物稳定计算的主要依据之一。可采用相应大坝防洪标准的各种典型洪水，按拟定的防洪调度方式，自防洪限制水位起始调洪计算求得。

(4) 校核洪水位

水库遇到大坝的校核洪水时，在坝前达到的最高水位。它与汛期限制水位之间的库容称调洪库容。它是水库在非常运用情况下，短期内允许达到的最高水位，是确定大坝坝顶

高及进行大坝安全校核的主要依据。此水位可采用相应大坝校核标准的各种典型洪水，按拟定的防洪调度方式，自防洪限制水位起始调洪计算求得。

(5) 正常蓄水位

水库在正常运用情况下，为满足兴利要求应在开始供水时蓄到的最高水位，也称正常高水位、兴利蓄水位、设计蓄水位。此水位通常根据设计标准兴利需水量，拟定的兴利调度方式，调节设计标准的各种典型径流过程求得。它与汛期限制水位之间的库容现规范称为重叠库容，俗称共用库容或重复库容。正常蓄水位决定水库的规模、效益和调节方式，也在很大程度上决定水工建筑物的尺寸、型式和水库的淹没损失，是水库最重要的一项特征水位。当采用无闸门控制的泄洪建筑物时，它与泄洪堰顶高程相同；当采用有闸门控制的泄洪建筑物时，它是闸门关闭时允许长期维持的最高蓄水位，也是挡水建筑物稳定计算的主要依据。

(6) 死水位

水库在正常运用情况下，允许消落到的最低水位，曾称设计低水位。它以下的库容称死库容。它与正常蓄水位之间的库容称兴利库容，亦称调节库容。日调节水库在枯水季节水位变化较大，一般每 24h 内将有一次消落到死水位。年调节水库一般在设计枯水年供水期末才消落到死水位。多年调节水库只有在连续枯水年组成的枯水段末才消落到死水位。水库正常蓄水位与死水位之间的变幅称水库消落深度。一些调节性能低而径流较丰沛的水库，死水位等于汛期限制水位。

水库的重叠库容大小依据汛期限制水位的位置而变化。当水库设计功能以发电等兴利任务为主，防洪任务为次，则往往汛期限制水位等于正常蓄水位，重叠库容为零；若防洪任务重，水量充沛且调节性能低，则汛期限制水位等于死水位，重叠库容最大，等于兴利库容；通常汛期限制水位在正常蓄水位与死水位之间，重叠库容小于兴利库容。

科学地设计与控制汛期限制水位，就是要合理设计与运用重叠库容。它可以减少专用防洪库容降低设计投资，或同样的造价可以提高防洪标准；若分期设计与运用汛期限制水位，则可以提高兴利库容蓄满率、设计供水保证率；如果实时调度中，结合预见期内精度较高的洪水和降雨预报信息实施动态控制，则可以提高防洪标准、增加洪水资源利用量与提高供水保证率。这些防洪与兴利效益便是人们重视汛期限制水位设计与运用理论方法研究的动力。

1.1.2 水库汛限水位控制方法的定义与分类

按照设计与运用所依据的信息类型和实时控制的理念与原则，可将目前已有的汛限水位控制方法分为两大类。

若依据历史资料设计出汛限水位固定值，且要求实时运用中严格按照设计值控制，则定义为“汛限水位静态控制法”。

若依据不同信息与方法设计出汛限水位域值，且运用中允许根据实时水、雨、工情及可利用的预报等综合信息，在此域值内上下浮动，则定义为“汛限水位动态控制法”。

静态控制法细分为 4 种，即：

1) “全汛期运用单一值”方法。它依据历史洪水资料及其随机性假定，用统计学方法推求全汛期设计洪水，用不考虑预报的调洪方式调节计算得出该值，运行中严格按照此值



及相应的调洪方式控制。本方法按照现行的规范设计与防洪法运行。

2) “汛期分期运用不同值”方法。它依据汛期不同时段洪水特征的明显差别与规律,基于成因与统计分析确定汛期分期,各分期仍用上述的计算方法求得相应的限制水位,运行中亦严格按照分期设计值及相应的调洪方式控制。本方法也按照现行的规范设计,通常分二~三期。上述两种方法可简称“规范方法”,是目前大多数水库设计与运用的方法。

3) “逐日或旬运用相应值”方法。它基于汛期的模糊描述^[39]或暴雨量级升降连续变化的统计规律,应用滑动平均方法或按照汛期的隶属程度预留防洪库容,并换算为逐日或旬控制的汛限水位值。尽管这种方法设计的汛限水位值随时间而变动,但是面临时刻控制的值仍是设计时给定的值,运行方式与原设计相同。这一方法曾在红山、白龟山、察尔森、音河、卡伦、密云、门楼等水库试用,尚需更多实践检验。

4) “预报调度方式抬高汛限水位”方法。设计洪水仍用上述方法推求,但它的调洪方式却考虑了洪水预报信息。比较规范的调度方式,能够提前判断发生洪水的量级,需要的防洪库容可减少,若保持原设计的防洪高、设计与校核水位不变,则可抬高汛限水位。实时调度中要求严格按照抬高的汛限水位值与预报调度方式运行。这种方法在北方的大伙房、清河、柴河、石头口门、新立城、碧流河、侵窝、白龟山、东武仕、于桥等水库进行试用与检验。对于运行多年且洪水预报精度较高、预见期较长的水库,在设计洪水及其特征值复核时,可试用本方法。

“动态控制法”。基于方法应用状况和参考文献 [12],可归纳为 3 种,即:

1) “预蓄预泄”法。它是考虑洪水或降雨预报信息的动态控制方法之一。它的基本思想是保持原设计安全度,当预报无雨时,在有效预见期内,水库有多大泄流能力,就将汛限水位上浮多少,且留一定余地,保证在下次洪水起涨前将水位降至原设计汛限水位值;当预报有较大降雨或已开始降雨,可据有效预见期内退水过程的余富水量,下调汛限水位,亦留一定的余地,当发生空报现象,利用退水余量将库水位回升到原设计汛限水位值,亦称预泄回充法。前者目的是提高洪水资源与水能资源的利用率,后者是为了提高防洪能力。若分期控制汛限水位后仍有较大的水资源或能量损失,尤其有些水库在汛期常常发生 1~2 次洪水,主汛期弃水,即使后汛期抬高汛限水位也无水可蓄,则可选择本方法。这种方法最早应用于大伙房水库,丰满、丹江口等发电水库。现行的水利计算规范已允许考虑洪水预报的“预蓄预泄”法,暂不考虑降雨预报。实际上随着降雨预报的预见期增长、精度提高,许多水库已试用考虑降雨预报的“预蓄预泄”法,2004~2005 年间,星星哨、石头口门、亮甲山、柴河、碧流河等水库运用本方法取得较好的效果。

2) 综合信息推理模式法。它是考虑洪水与降雨预报、实时水雨工情等综合信息的汛限水位动态控制法。它在分析影响汛限水位控制的各种因子的基础上,把调度人员的多年控制经验和调度方式及其规则加以归纳,写成语言控制规则,再转换为推理模式,称为“大前提”。水库实时调度时,根据面临时刻的综合信息,称为“小前提”,通过推理方法,给出满意的汛限水位控制方案,以此指导水库蓄或泄。碧流河、侵窝、白龟山、察尔森、于桥等水库已编制推理模式,尚需要实践检验。若水库运行多年且积累了丰富的防洪调度经验,洪水预报精度高,区域降雨预报信息可利用,则可试用本方法。为便于操作,可编制

综合信息汛限水位动态控制值推理决策表。

3) 耦合于防洪实时预报调度系统的汛限水位动态控制值优选法。本方法是将综合信息推理模式的交互决策子系统与水库现行的防洪实时预报调度系统融为一体, 首先在面临时刻(t_0)以交互子系统决策“下次涨洪前(t_E)汛限水位”, 然后依此为约束, 用多阶段多目标优选模型选择 $t_0 \sim t_E$ 期间的满意蓄泄方案; 亦可以交互方式或自动生成 $t_0 \sim t_E$ 期间的可行蓄泄方案集及相应的 t_E 时刻的汛限水位控制方案集, 再用多阶段多目标优选模型选择 t_E 时刻的满意汛限水位控制方案。随着时序变化及综合信息的更新, 重复优选与更新汛限水位控制决策方案。目前, 本方法正在碧流河、白龟山、于桥、桓仁等水库试用与检验。

1.1.3 水库汛限水位静态法控制的基本属性与理念

汛限水位静态控制法, 是严格按照防洪设计或汛期计划阶段确定的汛限水位值及相应的防洪调度方式运行。属于规划设计或编制汛期控制运用计划范畴。

按照水利水电工程设计洪水计算及水利计算规范要求, 静态控制的汛限水位值设计方法可概括为: 首先依据历年实测洪水(或暴雨)资料及历史特大洪水(或暴雨)资料, 采用年最大取样法形成洪水系列, 基于其随机特性以概率论与数理统计原理计算出不同典型的设计频率洪水过程。然后设计不同的汛限水位方案与调洪规则方案, 计算相应方案的防洪高水位、设计洪水位、校核洪水位、坝顶高等防洪经济效益指标等。最后通过综合分析选定汛限水位及其相应的防洪运用方式与规则。水库运行期间应按照规定设计的汛限水位及其调洪规则进行调度。

从设计方法原理及其运行原则可以看出, 汛限水位静态控制法的理念是全汛期始终要预防设计标准的小概率洪水事件发生, 满足设计的防洪安全要求。其实质是承认以下基本假定, 即:

1) “设计标准的洪水随时可发生且机会均等”。认为汛期的实时调度阶段, 任何时刻都有可能发生防洪或设计或校核标准洪水量值、峰与过程, 此时由汛限水位起调且按照设计的调度规则调洪, 才能保证水库及下游防洪安全。

2) “面临时刻发生的洪水不是年最大洪水”。水库全汛期可能发生2次以上洪水, 年最大取样的洪水可能是第一场或第二场……或最后一场, 实际运行中难以判断面临时刻发生的洪水是否属本年度最大洪水, 基于此假定便要求本次洪水应尽快加大泄量, 将库水位降到设计的汛限水位值以迎接下次更大洪水。

3) “汛限水位超设计值, 水库防洪安全标准便降低”。在拟定的防洪调度方式下, 设计与运用的汛限水位制约着防洪高水位、设计洪水位、校核洪水位。只要运用的汛限水位超过设计值, 便认为防洪特征水位也超原设计值, 降低了水库防洪设计标准, 防洪不安全; 若汛限水位低于防洪设计值, 则正常蓄水概率降低, 兴利效益减小。

汛期分期设计与运用限制水位方法的每一期控制的理念同上。预报调度方式尽管采用洪水预报的调度方式, 比原设计提前判断洪水量级而可抬高汛限水位, 但是调洪仍依据原设计洪水成果, 并严格静态控制汛限水位值, 故控制理念未变。

1.1.4 水库汛限水位动态控制的基本属性与理念

根据汛限水位控制方法分类的定义, 水库汛限水位值, 在实时运用中允许根据实时



水、雨、工情及可利用的预报等综合信息,在设计的域值内上下浮动,相应地改变调度方案,而不是原设计的防洪调度方式。可见研究与实施汛限水位动态控制方法属于实时调度阶段的任务。

具体地说,汛限水位动态控制方法是从成因分析与统计学的条件概率事件出发,综合利用现代科学技术提供的一切可利用的信息(如实时的水、雨、工情,水文气象预报的水、雨情及卫星云图与测雨雷达等),并采用弥补措施预防预报的小概率误差与稀遇洪水事件发生,安全经济地确定一个允许动态控制域,并在此约束域内对汛限水位实施动态控制。实时调度过程中,若根据洪水预报信息、无雨或中雨以下量级降雨预报信息,将库水位控制在汛限水位动态控制域的上限,其目标是可在满足原设计防洪安全要求的前提下,提高洪水与水能资源的利用率;如根据中到大雨以上量级降雨预报信息及实际降雨预报的洪水信息,将库水位控制在汛限水位动态控制域的下限,其目标是在保证兴利蓄水的前提下,提高水库的防洪能力。

从研究与应用的基本思想分析汛限水位动态控制方法的理念是,全汛期以不可能事件作为汛限水位控制的主体,采用弥补措施防止小概率预报误差或稀遇洪水事件的发生,且不增加水库设计的防洪安全与兴利供水风险^[16]。其实质是承认以下基本假定,即:

1)“设计标准洪水是预报无雨或小雨条件下的不可能性事件”。基于目前降雨预报水平分析,无雨或小雨预报精度较高,漏报后发生大到暴雨的概率为0.01%,若从环流形势、卫星云图看,本流域受高压控制,则无雨或小雨预报精度更高。这一假定指导水库汛限水位控制在上限。

2)“设计标准洪水是中雨或以上量级降雨预报漏报条件下的可能事件”。事实上,基于目前降雨预报水平,漏报条件下发生小于设计标准洪水可能性大,故本假定还是偏安全的。随着预报水平的提高,相应的假定会更符合实际,如有的流域分析暴雨洪水特性后给出如下假定“设计标准洪水是台风影响本流域条件下的可能事件”,只要台风未生成,便不可能发生设计标准洪水。上述假定指导水库汛限水位控制在下限。

3)“若洪水预报方案或降雨预报产品的误差分布规律明显且有弥补措施,则可利用于研究汛限水位动态控制方法”。此假定制约着预泄能力法、预报调度规划法所确定的动态控制域的上限值。

4)“若洪水起涨时的水位值不超过动态控制域的上限,则不增加原设计的防洪风险;若不低于动态控制域的下限,则不降低原设计的供水保证率”。这一假定指导水库汛限水位控制的风险分析。

应该指出,汛限水位控制新理念及其基本假定的科学性需要经过较长时期的实践检验。相信随着水雨情信息采集系统的建设,洪水预报方法研究的进展及气象部门降雨预报产品质量的提高,汛限水位控制新理念将趋于完善,为逐步推广应用提供新的理论与方法。

1.2 水库汛限水位动态控制方法研究与应用的回顾和展望

1.2.1 回顾

(1) 全汛期汛限水位按照单一值控制

中华人民共和国成立初期,丰满水库续建竣工,另一批重要的大型水库,如官厅、佛子岭、梅山、大伙房、狮子滩也相继建成,他们参考国外经验和《丰满水电站的水库调度》一书的方法,结合各自特点进行调度实践。在设计的调度方式及规则约束下,随预报精度的提高,发电为主的水电站水库,多试用水文预报调度的方法增加发电效益。由于新建水库原设计全汛期洪水资料样本容量较小,若分期更显洪水资料少,所以不具备分期控制汛限水位的基本条件,当时的全汛期都是设计一个固定的汛限水位值,如丰满水电站水库设计的汛限水位即是正常蓄水位 263m,大伙房为 126.2m,狮子滩为 345.5m 等。另外,当时中国人口较少,人均拥有水资源量 4800m^3 ,用水水平较低,污染较轻,水的供需矛盾尚不突出,加之 1954~1963 年间我国南北方洪水不断,防洪任务十分艰巨,从防洪安全的角度,暂无实施分期抬高汛限水位的调度条件与必要性,所以实时调度中,汛限水位基本是按照规划设计批复的全汛期单一值控制。

(2) 汛限水位分期控制与实时预蓄预泄动态控制

应该指出,20 世纪 50~60 年代前期所谓的“无研究与实施分期抬高汛限水位方法的条件和必要性”只是暂时的。随着洪水资料的积累、分期洪水特性的显现,随着国民经济发展用水量、用电量增加,一些区域(尤其是北方地区)水库的供需矛盾、防洪兴利矛盾突出,从理论与实用两方面研究和处理上述矛盾既具有科学意义与实用价值,又具有长远的社会与经济效益。

1957 年松花江流域大洪水之后,丰满水库调度工作手册记载:1958 年 5 月 26 日吉黑两省省委书记向中央的报告,提出丰满水库“自八月一日至八月二十日防洪控制水位(正常高水位) 263m 降至 261m”。这便是我国水库汛限水位分三期控制的最初的尝试。

1963 年刘光文编写的高校教科书《水文分析与计算》,当年颁布的《水工建筑物设计洪水规范草案》及 1965 年华东水利学院、陕西工业大学、成都工学院合编的高校教科书《工程水文学》等,论述了分期设计洪水的基本概念、洪水分期的原则、方法及分期设计洪水计算方法。初步建立了合理使用水库防洪库容,分期控制汛限水位的理论方法。

1964 年大伙房水库调度技术人员,接受 1960 年汛限水位控制过低,汛后没能蓄至正常高水位,而 1964 年汛限水位控制过高,致使下游受淹的经验教训,从正确处理防洪兴利矛盾的角度,基于“洪水的季节性变化的统计规律”,研究了“分期防洪限制水位确定方法”。1969 年审批实施,多年平均增加供水 $80 \times 10^6\text{m}^3$,从实践上再次论证了“分期控制防洪限制水位”的必要性与可行性。1968~1972 年间在入库洪水、区间洪水预报方案和模型研制,水库下游河道不稳定流原型实验等基础上,研究了“大伙房水库预蓄预报调度”方法,经辽宁省防汛抗旱办公室批准用于实践并获省科技进步奖,是汛限水位动态控制方法研究的一个实践范例。

1977 年水利部水管司组织大连工学院水利系和大伙房水库工程管理局,在原《水库控制运用》培训讲义的基础上,汇总河南省水利局、辽宁省水利局等省已编讲义中的相同方法,正式出版《水库控制运用》一书^[2](1980 年再版),系统地论述“汛期分期”、“分期防洪限制水位的确定”、“利用短期洪水预报预蓄”、“结合短期天气预报和利用洪水退水规律抬高限制水位”等方法。该教材为普及应用和深入研究“汛期分期设计汛限水位值与实时预蓄预泄动态控制汛限水位值的方法”起到了重要作用。



1979年试行的SDJ22—79《水利水电工程设计洪水计算规范》和1981年颁布的SLJ702—81《水利工程管理通则》等部颁标准,正式将汛期分期及分期确定设计汛限水位方法作为法规实施。

1987年水利部水管司又组织水利部长江流域规划办公室、河海大学、水利部丹江口水利枢纽管理局合编《综合利用水库调度》^[10]一书。就上述课题,论述了发电水库提高水能利用率的“考虑短期预报精度的预泄法”、“利用短期预报拦蓄洪水尾部方法”,并介绍一些水电站“利用气象预报进行发电调度的方法、经验与教训”等,补充论述“考虑预报误差的方法”、“洪水尾部是预蓄关键期”等重要问题,进一步完善了汛限水位动态控制的预蓄预泄方法。

1998年颁布的SL206—98《水利工程水利计算规范》^[15],从设计或修改设计角度规定:对于洪水预报条件好,预报方案完善,预报精度较高的水库,进行洪水调节计算时,在估计预报误差留有余地的前提下,可适当考虑预蓄预泄,一般不考虑气象预报。

(3) 水库汛期分期的气象成因与不确定性分析的汛限水位变化曲线

汛期的科学合理分期,是分期控制汛限水位的关键,20世纪80年代以前基本是水文要素的数理统计方法。

1984年《水文计算经验汇编(第四集)》^[7]中,水利部电力部天津勘测设计院,国家气象局北京气象中心发表了《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,这一方法对汛期的科学合理分期具有重要的理论价值与实用的指导意义。

1987年《水利水电水资源与环境模糊集分析》^[8]论文集中,陈守煜等用模糊集理论研究了水库的共用库容控制方法,提出汛期的模糊概念、模糊描述方法,汛期的隶属度曲线及相应的汛限水位变化曲线推求方法。1990年王本德在《水库模糊优化调度》^[9]一书中,又补充论述“汛期描述的模糊统计方法”,“分期汛限水位的简易确定方法”。此时,北方的碧流河、大伙房、丰满、红山、察尔森、音河、向阳山、卡伦、二龙山、岳成等大型水库都进行了模糊集方法的应用研究。基于统计学原理,2003年清华大学研究出密云水库逐日滑动汛限水位,山东大学研究出门楼水库旬旬汛限水位等。至此,汛期的分析方法已发展为3种,即水文气象要素的数理统计分析、成因分析和模糊集分析法,相应地提出了汛限水位变化曲线的概念及其推求方法。

(4) 预报调度方式确定汛限水位的研究与应用

汛限水位传统的确定方法(即设计规范方法)是不考虑预报的,判断洪水量级的规则通常用实际水位或入流量。1988年大伙房水库与大连理工大学联合研究“应用降雨二级分辨预报、洪水总量预报信息的预报调度方式”,为运行多年、需要进行复核设计的水库做一新的尝试,1990年辽宁省水利厅以辽水电字[1990]113号文正式批复运用并获省级科学技术进步奖。该方法在满足原设计防洪安全的基础上,提高了洪水资源利用率,其防洪效益近5亿元,可将沈阳和抚顺防洪标准分别提高到300年和100年,汛限水位由126.4m提高到127.8m,年平均增加工业供水 $43 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。1995年大伙房水库遭遇特大洪水,7d与13d入库洪量达到原设计0.1%标准洪水。参照预报调度规划方式,并结合实时水雨情信息实施预报调度,削峰率为50%,保护了沈阳和抚顺两大城市的防洪安全,



初估减灾效益 75 亿元。实践证明, 预报调度方式的基本设计思想和方法是合理、可行的, 是水库解决防洪与兴利矛盾的有效途径之一, 具有重要理论意义与实用价值。国家防汛抗旱总指挥部办公室组织专家论证并建议“有条件的水库, 特别是北方严重缺水地区的运行多年的大型水库, 在做好洪水预报的前提下推广这一调度方式”。这项研究与应用为确定汛限水位动态控制域的上限奠定了基础。

1993~1996 年间, 国家防汛抗旱总指挥部办公室、水利学会减灾研究会组织水库防洪专业技术咨询专家, 针对北方水库暴雨洪水特点及传统汛限水位控制存在的问题, 开展了充分利用洪水资源的一系列研究与咨询工作, 重点对吉林省石头口门、新立城水库, 辽宁省的清河、柴河水库预报调度方式及抬高汛限水位方案的研究进行指导与咨询, 取得的成果已应用于水库调度实际; 并进一步完善了预报调度方式中判断指标的选择方法。

(5) 水库防洪实时预报调度方法与汛限水位动态控制基本方法研究

随着水文气象科学与计算机科学的发展、预报技术与精度的提高, 为了推广应用和深入研究防洪预报调度方法及实现防洪调度自动化管理, 在 1993 年全国调度技术人员培训讲义的基础上, 1996 年 9 月国家防汛抗旱总指挥部办公室与大连理工大学合作编著《水库防洪预报调度方法及应用》^[12]教材, 第一篇重点讲述“短期降雨预报成果利用方法”、“水库防洪预报调度方式及规则选择方法”、“水库防洪实时预报调度方案选择原理及考虑预报误差的风险调度”、“水库防洪汛限水位动态控制方法”, 第一次给出汛限水位动态控制的定义与属性, 初步地、相对系统地论述汛限水位动态控制方法及其降雨预报利用、风险的计算等关键问题。第二篇以全国防洪调度系统一期 (NFCDS) 工程为原型, 详细叙述淮河、漳卫南运河、二松流域水库群防洪预报调度系统应用软件结构、功能、界面、数据库等设计思想与开发方法。依此教材在全国范围进行了多次培训, 为深入研究与应用上述方法起到了抛砖引玉的作用, 为全国水库防洪预报调度系统工程建设奠定了基础。

同时, 在国家防汛抗旱总指挥部办公室、松辽水利委员会和海河水利委员会的支持下, 大连理工大学还完成了水利部技术开发基金“我国北方水库汛限水位控制方法及应用模型研究”(SJ9120) 项目^[11], 重点设计研究了汛限水位动态控制模型影响因子、结构、功能与开发可操作性人机交互界面与应用软件, 并分发给全国水库防洪专业学组各大水库与省市防办成员单位参考交流。

1998~2001 年大连理工大学又研究完成了“辽宁省大型水库特大洪水实时预报调度方法研究”(辽宁省科学技术基金-自然科学类, 项目编号: 972203), 重点研究短期降雨预报信息误差分布规律及可利用度、考虑短期降雨预报的特大洪水实时调度方案模糊优选模型、特大洪水时的水库洪水预报系统风险定量计算方法。基于上述研究成果汇编《水库水文气象预报风险调度》论文集, 在 2001 年全国水库防洪专学组年会上交流。

1994~2001 年间大连理工大学的一些硕士、博士学位论文亦围绕这一课题展开^[17~22], 如刘明的《水库汛期分期汛限水位确定与准汛期汛限水位动态控制方法研究》、贾东旭的《多目标分期抬高汛限水位模型》、徐玉英的《水库风险调度理论方法的研究与应用》、李成林的《水库汛限水位动态控制方法与应用研究》、蒋云钟的《考虑 24h 降雨预报的防洪预报调度可靠性计算方法》、卢正刚的《水库群防洪系统调度方案生成与提高水库供水量的研究》、潘东的《水库群防洪特征指标模糊优选模型研究与应用》、黄金美的

《综合多种信息的梯级水库群模糊优化调度模型研究与应用》。

2001年7月~2004年4月,为了充分利用洪水资源,按照国家防汛抗旱总指挥部办公室的要求,大连理工大学又与大连市水务局、碧流河水库管理局、辽宁省水利勘测设计研究院、大连市气象局立项,合作研究“碧流河水库汛限制水位动态控制”方法(一期)。

(6) 水库汛限水位动态控制方法的专题研究

在国家防汛抗旱总指挥部办公室各级行政、技术领导的支持和指导下,大连理工大学在水库防洪调度运用的研究领域中,结合北方水库的调度实际形成了自己的研究特色,就本学科发展前沿的科研课题与生产迫切需要的实践课题,取得了较系统的理论与应用成果。率先在全国开展了水库汛限水位动态控制的研究,为2002年国家防汛抗旱总指挥部办公室设立的水库汛限水位动态控制方法专题研究奠定了理论与应用基础。

2002~2004年间,大连理工大学在承担水库汛限水位动态控制方法专题研究任务中,基于水利部领导的四点要求:“要从实践新时期治水新思路高度认识开展汛限制水位研究工作的重要意义,要始终用辩证的观点正确处理风险与效益的关系,要将其作为提升水库现代化管理和科技水平的突破口,要以科学的态度积极稳妥、实事求是、扎扎实实地开展这项工作”,得到六座水库大力帮助,从理论与应用角度,就关键性课题进行了系统深入的研究,取得如下成果^[23],即:

- 1) 理顺了水库汛限水位动态控制的基本概念,包括定义、属性、基本理念。
- 2) 明确了实施水库汛限水位动态控制的必要性、可行性的基本条件分析内容与方法,重点分析了洪水、降雨预报信息可利用的基本条件。
- 3) 研究提出水库汛限水位动态控制的约束域值的确定方法原理,重点研究预报调度方式确定水库汛限水位动态控制上限值的基本原理方法。
- 4) 研究提出水库汛限水位动态控制的基本方法原理,根据水库的不同条件,推荐4种可选择的方法。
- 5) 研究提出水库汛限水位动态控制多方案优选方法,推荐一种简单实用的多目标多阶段模糊优选方法。
- 6) 研究提出水库汛限水位动态控制的效益与风险分析与计算方法,推荐一个狭义的风险定义及其定量计算公式。
- 7) 设计一个有参考价值的水库汛限水位动态控制方案优选交互界面,并将其耦合于防洪实时预报调度系统中。

2004年9月8日,上述专题研究成果通过了国家防汛抗旱总指挥部办公室、水利部水利水电规划设计总院组织的专家评审。专家认为:水库汛限水位动态控制方法研究,对于合理利用洪水资源具有重要的意义;研究成果具有较强实用性和推广价值;洪水预报、24h无雨和小雨预报信息,可在汛限水位动态控制中采用;可视水库具体情况,综合分析确定汛限水位动态控制约束域;在汛限水位动态控制约束域内,实施汛限水位动态控制是可行的;研究提出了汛限水位动态控制的多种风险描述形式及其计算方法,其成果可供调度与决策人员参考。

2005年7月6日,水利部国际合作与科技司在北京组织召开了“水库汛限水位动态