

大宁水库汛限水位动态控制方案 及风险研究

(申请清华大学工程硕士专业学位论文)

培 养 单 位： 水利水电工程系

工 程 领 域： 水利工程

申 请 人： 胡 晓 斌

指 导 教 师： 田 富 强 副教授

联合指导教师： 刘 大 根 教授级高级工程师

二〇一六年三月

Research on the Dynamic Control Method and Related Risk of Daning Reservoir

Thesis Submitted to
Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement
for the professional degree of

by
Hu Xiaobin
(Hydraulic Engineering)

Thesis Supervisor: Associate Professor Tian Fuqiang
Associate Supervisor: Professorate Senior Engineer Liu
Dagen

March, 2016

摘要

北京作为海河流域的一座典型北方城市,水资源先天不足,加之近年来北京市人口和城市规模的扩张,对这个世界闻名的特大型城市的水资源承载力提出了巨大的挑战。为解决北京市严重缺水的状况,国家建设了南水北调中线工程,该工程的建成为北京市提供了重要的水资源保证。大宁水库作为北京市南水北调工程的重要调节水库,应用汛限水位动态控制方法,在可控风险条件下充分发掘其调蓄能力,最大限度地利用好南水北调来水,具有重要的实际价值。

汛限水位是水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位,也称为防洪限制水位。其在《中华人民共和国防洪法》中确定了法定地位,对水库防洪安全和兴利效益的发挥起着极其重要的作用。我国水库的汛限水位大多以年最大设计洪水为防洪调度依据,采用固定汛限水位,这种方法在过去雨水情预报体系不健全,预报手段不先进的条件下,是偏于安全的设计方式,但也因此使水库处于超标准安全状态,水资源得不到充分利用。随着科技水平的不断进步和发展,洪水预报调度方法研究的不断深入,雨水情预报信息的精度不断提高,现已达到了可利用的水平;现代化的洪水预报及调度系统、闸门自动化控制系统及先进的通讯系统的建设都为洪水预报调度提供了强有力地保证,因此对水资源实现更为精细科学的动态控制具备了运行条件。

根据降雨和洪水预报信息,利用动态控制理论,分析了水库水位的动态控制方法。以大宁水库为例,利用预泄流量法确定水库汛限水位的动态控制范围。采用预蓄预泄法分析了水库实时调度过程中的汛限水位决策值。

在对汛限水位动态控制过程中的各种风险因素及其主要成因进行分析的基础上,结合大宁水库实际工况,选用P-III型分布曲线计算出水库汛限水位动态控制方案的极限风险率,对风险进行定量分析,为风险决策提供依据。并根据汛限水位动态控制过程中的风险特征提出针对性的预防措施。

根据多水源联合调度模型对水库汛限水位动态控制及原静态控制条件下的系统供水成本进行对比分析,量化出汛限水位动态控制方案的社会及经济效益。根据风险和收益的对比分析,可以得出在现有预报条件下,大宁水库可在不增加风险的情况下进行汛期常水位蓄水的控制方案。

关键词: 汛限水位; 预泄流量法; 预蓄预泄法; 风险研究

Abstract

As a typical city in Northern China, Beijing is experiencing serious water scarcity. This situation is further deteriorated under the context of urbanization and increased population in recent decades. The National “South Water North Transfer (SWNT)” project was implemented for the purpose of alleviating water scarcity in Beijing and other cities in Northern China. The Daning Reservoir is originally a flood detention reservoir and now serves as a regulation reservoir for the SWNT project. It is thus imminent to review its regulation rule so as to exploit its full utilization.

Limit water level (LWL) refers to the maximum water level of a reservoir in flood seasons, which is a critical water level for the purposes of both flood prevention and water resources utilization. LWL has been officially defined and authorized in the “China Flood Control Law”. It plays an extremely important role in reservoir regulation. LWL is usually fixed to the maximum water level of design floods for each reservoir. A static LWL is designed mainly out of safe reasons, which is a rational way to regulate reservoir considering limited skills of flood forecast. However, with the improvement of forecasting strategies and accuracy as well as the presence of advanced dispatched system, automatic control system and communication system, dynamic LWL seem to be the most feasible way to better utilize water resources as well as minimize flood risks.

Reservoir regulation rule with dynamic LWL was investigated based on rainfall and flood forecast and the theory of dynamic control in this study. The dynamic range of LWL was determined based on “pre-discharge” approach for Daning reservoir. In addition, the strategic value for LWL was also determined based on “pre-storage pre-discharge” approach during real-time reservoir operation.

The probability of “extreme risk” for using dynamic LWL was calculated by applying the P-III distribution curve for Daning reservoir. The calculation is on the basis of risk analyses and factor analyses during the processes of using dynamic LWL regulation rule. The probability of “extreme risk” is useful for decision-makers to issue probable, instead of determinative, actions. Preventive strategies were also explored so as to minimize potential risks that are related to dynamic LWL during reservoir regulation.

This study further compared socioeconomic benefits for two different reservoir regulation rules through systematic cost analyses based on a joint, multi-water sources reservoir regulation model. LWL of Daning reservoir could be raised to normal water level without increasing potential risks under current forecast skills.

Keywords: limit water level; pre-discharge approach; pre-storage pre-discharge approach; risk analysis

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 论文研究的背景和意义.....	1
1.2 研究现状和发展趋势.....	2
1.2.1 水库汛限水位动态控制方法的研究现状.....	2
1.2.2 水库汛限水位动态控制风险研究综述.....	6
1.2.3 水库汛限水位动态控制方法及风险研究的发展趋势.....	7
1.3 论文总体思路和主要内容.....	7
1.3.1 总体思路.....	7
1.3.2 主要内容.....	8
第 2 章 大宁水库汛限水位动态控制的现状条件分析.....	10
2.1 永定河流域防洪现状分析.....	10
2.1.1 流域工程概况.....	10
2.1.2 流域水文特性.....	11
2.2 大宁水库基本情况分析.....	15
2.2.1 大宁水库工程情况分析.....	15
2.2.2 大宁水库调度规则综述.....	17
2.3 大宁水库汛限水位动态控制的必要性分析.....	18
2.4 大宁水库汛限水位动态控制的可行性分析.....	19
2.4.1 汛限水位动态控制需具备的条件.....	19
2.4.2 洪水预报信息在汛限水位动态控制中的可行性分析.....	19
2.4.3 降雨预报信息在汛限水位动态控制中的可行性分析.....	21
2.5 小结.....	22
第 3 章 大宁水库汛限水位动态控制方案研究.....	23
3.1 水库汛限水位动态控制域的确定.....	23
3.1.1 水库汛限水位动态控制域上限值的确定.....	23
3.1.2 水库汛限水位动态控制域下限值的确定.....	24
3.2 实时调度过程中汛限水位动态控制方案研究.....	25

3.2.1 实时调度过程中汛限水位动态控制方法.....	25
3.2.2 大宁水库实时调度过程中汛限水位动态控制规则研究.....	26
3.2.3 实时调度过程中汛限水位动态控制计算.....	27
3.3 本章小结.....	31
第4章 水库汛期限制水位动态控制的风险及效益分析.....	32
4.1 水库汛期限制水位动态控制的风险分析.....	32
4.1.1 风险的内涵.....	32
4.1.2 汛限水位动态控制过程中的风险研究.....	33
4.1.3 汛限水位动态控制方案极限风险率计算方法综述.....	35
4.1.4 大宁水库汛限水位动态控制过程中的风险分析.....	38
4.1.5 降低或规避大宁水库汛期防洪风险的几点措施.....	41
4.2 水库汛限水位动态控制收益分析.....	41
4.2.1 北京市水源配置概况.....	41
4.2.2 基于多水源联合调度模型的效益分析.....	43
4.2.3 大宁水库动态控制效益分析.....	45
4.3 本章小结.....	46
第5章 总结与展望.....	48
5.1 总结.....	48
5.2 展望.....	48
参考文献.....	50
致 谢.....	54
声 明.....	55
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果.....	56

第1章 绪论

1.1 论文研究的背景和意义

水资源紧缺是我国北方地区的普遍现象,在北京这一特大城市更是尤为突出,自1999年以来北京市连年干旱,密云水库等主要地表水源区水资源告急,已不能满足北京市庞大的用水需求。为此北京市连续建设了怀柔、平谷、张坊三大应急水源地,抽取地下水为城市提供水源,由于连年超采,地下水源现也已告急,仅仅依靠北京市本地的水资源已不足以承载整个城市的发展需求,北京市水资源的战略储备捉襟见肘^[1]。

为解决北京市水资源紧缺问题,国家规划建设了南水北调中线工程,2014年底中线一期工程建成通水,可为北京每年提供10亿 m^3 的水量供给。有效弥补了本地水资源承载力不足的短板,极大地提升了北京市供水保障能力,同时可利用富余水量回补已经透支的本地地表及地下水资源,有效提升北京市的水资源储量,并改善因水资源透支而引发的生态及地质恶化等问题。

南水北调中线工程由丹江口水库引水,通过1276km的输水明渠,流经河南、河北最后到达北京,其来水过程受供水区域水资源状况的影响,年内供水过程不均匀、年际供水过程变化较大^[2]。对受水区的北京市来说,年需水过程往往是较为均匀的,因此面对不均匀的供水过程,对北京市供水系统的调节能力提出了新的更高的要求和挑战。大宁水库作为永定河流域的滞洪水库其防洪功能依然存在,此外工程改建后增加了调蓄南水的新任务,较改建前其工程状况、运行要求、功能都发生了变化。

现行防洪调度方案还是在承担原有单一防洪功能的基础上设计的。其防洪调度以年设计洪水为防洪调度依据,采用控制水位高程为48m的静态汛限水位,汛期腾空库容以调蓄可能发生的洪水,这种调度方法,操作简便,在过去预报精度不高、预见期较长的情况下,应用较为广泛。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,使水库经常处于超标准安全状态。在汛期无论有无洪水发生,水库均需弃水以腾空库容防汛;汛末期在没有有效上游来水的情况下,水库往往无水可蓄。此时水库的蓄水效益很难得到最有效的利用。

汛限水位是平衡水库运行管理过程中防洪与兴利之间矛盾的关键。随着水利工程基础设计及运行管理设施的不断完善、城市防洪体系的不断提升、区域社会经济发展等,水库的周边环境和运行需求均发生了较大地变化^[3],因此水库的功能也更加多元化。而随着科技水平不断进步和发展,我国流域的自动化遥测发展迅速,降雨、洪水等雨水情信息大部可实现实时采集和传输,降雨及洪水的预报

方法更加科学、预报精度也达到了较高水准。因此,开展水库汛期水位的研究对于适应新环境的要求,提升水库的精细化管理水平具有重要的现实意义。

从防洪安全与充分发挥水库兴利效益、提高供水保证率、降低供水成本为出发点,积极慎重地利用水文气象预报信息,可提出切实可行的汛限水位动态控制方法,并充分顾及可能发生的风险,将充分发掘系统水资源的利用率,有效缓解现有水资源储量与城市用水需求之间的矛盾。由于是采用预报信息对水库汛期蓄水进行实时调控,因此其控制过程可能因为误报等情况而发生风险。如果水库的动态控制汛限水位高于原汛限水位,将会挤占原设计的防洪库容,进而降低水库蓄滞洪水的能力,遇有洪水时会加大水库工程破坏、上下游淹没等损失;如果由于预报误报提前泄水,则在没有发生有效降雨时,水库蓄水量会减少,进而降低了水库的供水保障能力。所以水库汛限水位动态控制过程中的风险及收益研究也是论文研究的关键点。

1.2 研究现状和发展趋势

随着水资源全球性紧缺的现状,世界各国对水库汛限水位的动态控制方法和风险的研究已经取得了较为丰硕的成果。本论文主要就汛限水位的动态控制和与其相对应的风险及收益进行研究。

1.2.1 水库汛限水位动态控制方法的研究现状

洪水孕育着文明,同时又毁灭着文明。人类社会发展的历史,也是人们抵御和利用洪水的历史。随着对洪水规律的研究不断深入,科学技术的不断进步,世界各国相继开展了以控制洪水为目标的防洪工程建设及治理方法的研究。西方发达国家由于水资源状况、人口密度、政府管理办法等方面的差异,其研究重点以防洪及生态环境效益为主。而且其水库等水利工程在 90 年代基本趋于饱和,因此在水库防洪及汛限水位动态控制方面的研究应用较少,但西方发达国家在水库调度领域具有丰富的研究成果和实际应用^[4]。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)、美国陆军工程师团开发的防洪兴利调度系统(HEC-5)、加拿大 Simonovic 等开发的水库调度分析专家决策支持系统^[5]。

20 世纪初,在我国大兴水利的政策支持下,大量的水库和水电站不断建成,庞大而类型多样的水利工程产生了巨大的社会 and 经济效益,同时也催生了大量调度研究得出丰硕的成果,形成了一系列较为完善的水库调度理论。如六、七十年代对水库汛限水位提出了“预蓄预泄”的控制方法^[6],紧接着在一九八零年代发展

出“预报调度方式及规则”的水库调度控制的方法^[7]。近年来随着水文遥测技术及预报工具的不断发展,使降雨和洪水预报的预见期不断延长、预报精度不断提高,预报信息达到了可利用的程度,为水库预报调度提供了可靠的决策依据^[8]。水库可充分利用预报信息实现实时动态调度,可在风险可控的情况下提高水库重复库容利用率充分发挥其兴利效益。水库汛限水位的决策信息主要有实时雨水情、水库入流、泄流、运行工况等确定信息及基于历史雨水情等随机变量,决策人根据确定信息和统计信息分析,结合调度经验所得到的推理型模糊信息等^[3]。根据决策信息来源和分析方法的不同,可将汛限水位动态控制方法归纳为以下几种:

1 考虑综合信息的模糊推理模式法

该方法主要在对面临时刻的库水位、降雨及洪水预报信息、历史同期各量级降雨的概率分布、水库正常供水及泄流能力等进行综合分析,同时结合调度人员多年经验加以总结归纳后写出程序控制规则,再转化为推理模式,以之作为“大前提”^[7]。以实时雨、水、工情等综合信息作为“小前提”^[3],综合以上信息进行模糊推理,得出汛限水位动态控制方案。该方法侧重于逻辑推理,主要有以下关键问题:首先归纳出各种决策结果及其影响因子的关系即综合信息;建立结果与变量的联系;最后研究与选择模糊推理方法,并编写出易于操作、便于决策的系统应用软件^[9]。

周惠成等以碧流河水库实际洪水过程的为例,研究实时防洪调度中考虑综合信息的模糊推理汛限水位动态控制方法,发现模糊推理方法在不增加水库及上下游防护对象风险的前提下,能抬高汛限水位,提高水库兴利效益。茆窝、白龟山、察尔森、于桥等水库已利用此方法编制了推理模式^[10]。此方法对于流域降雨、洪水等历史资料整编规范、序列完整,雨水情测报系统健全有效,降雨及洪水预报方案可靠性高,调度人员经验丰富的水库较为适用。

2 水文信息统计法

水文信息统计法主要是对历史不同量级的降雨、洪水等水文信息进行统计分析,计算降雨及洪水发生的概率分布,总结出洪水过程的发展规律,分析出与之相对应的设计洪水及其允许的起调水位。此方法侧重于统计理论,目前已经在实践中得到运用的有前后关联法和年内洪水特性法。前者研究发现年降雨总量相对比较固定,年内暴雨发生的概率是前后关联的;后者研究发现年内洪水发生的时空分布也是有规可循的,可利用此规律分析出年内洪水发生的概率及时空分布等问题。

孙秀玲和曹升乐^[11]在对北方干旱、半干旱地区降雨规律研究的基础上,探索出了降雨发生的时空分布规律及降雨场次之间的相互关联,可利用已发生的降雨对预测出后期降雨量,据此对后期的汛限水位实现动态调整,得到汛限水位动态

控制过程线。但由于该方法只考虑了降雨的年内变化情况,而未考虑水库丰、平、枯的年际变化情况,且仅对北方地区的关联规律进行了研究,因而在实际应用中具有一定局限性;王本德等^[10]以碧流河水库年内洪水的统计规律为研究对象,根据已发生洪水情况来推断出未来洪水发生的时空分布,并根据预测结果设定下场次洪水发生时水库的洪水控制方式,进而对汛限水位实现动态控制。由于该方法的研究对象为华北以及东北部分地区暴雨形成的气候条件与天气系统的成因比较稳定、洪水规律也比较稳定的中小流域水库^[12]。因此其适用范围也受以上条件的限制,应用范围小而且适用面较为狭窄。

3 水库调度模型法

该方法以雨水情预报信息、实时水情等作为变量,通过最优化方法建立数学模型,通过数学计算求出最优解,对水位进行调整。该方法理论基础及分析模型成熟,主要有以下三种方法实践应用较多:

(1) 补偿调节法

对共同承担一个防洪目标的水库群的,一般以梯级水库的上游水库或者距离防洪保护区较远的并联水库作为补偿水库,以洪水调控能力较大、距离防洪区较近的水库作为被补偿水库,将补偿水库的富余防洪库容换算为被补偿水库的可利用的防洪库容,进而提高被补偿库的汛限水位控制值^[13]。

李玮等^[14]采用预报信息对清江流域的梯级水库群汛限水位进行动态控制研究,发现在风险可控的条件下可实现汛期库水位的动态调节。李玮等^[15]利用洪水预报方案对流域的洪水发生情况进行预判,在此基础上可对梯级水库群采用逐次渐进补偿调度模式进行汛限水位动态控制,进而提高水库群的兴利效益。

(2) 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,又称预泄能力约束法。基本思想是以保持水库原设计安全性不降低为前提,在洪水预见期内水库有多大泄流能力就将汛限水位上浮多少,上浮量留一定余地,增加水库预泄流保险系数。其影响因素包括面临时刻的雨水情信息、降雨及洪水预报信息、预见期内预泄能力、下游安全泄量、信息通讯时间、现地指令执行时间等^[16]。

万俊和陈惠源^[16]总结出在保证下游水利工程安全的基础上,可根据气象预报信息对库水位进行分阶段预泄,以此来保证下场洪水来临时水库的安全性。张百川^[17]采用预蓄预泄法对梅山水库汛期两次特大洪水进行调度研究,此方法最早应用于丹江口、丰满等水库,在碧流河、柴河、亮甲山等水库的洪水调度应用中也取得了较理想的效果^[10]。

(3) 决策调度法

该方法依托水文预报,采用数学规划方法分析调度过程中实时信息及决策人的意见,确定汛限水位动态控制方案。王本德^[10]在建立水库预蓄效益与风险控制模型的基础上,考虑了决策人的风险偏好,研究决策结果优选与确定决策目标权重时保持决策者风险偏好一致的方法,并在碧流河水库对该方法进行了实践检验。刘子慧等^[18]以丹江口水库为研究对象建立了多目标优化模型,将预期控制结果作为约束条件后推出单目标优化模型,可以在不降低水库安全系数的基础上分期提高汛期蓄水水位,有效利用未发生洪水时的库容,有效提高水库的蓄水能力和兴利效益。

刘攀等^[19]以三峡水库为例,采用带有机遇约束的汛限水位控制模型,分为时段内和调度时段后两个阶段,并以不同的风险标准进行阶段性控制,其模型整体结构框架如图1所示,主要由4个模块构成:

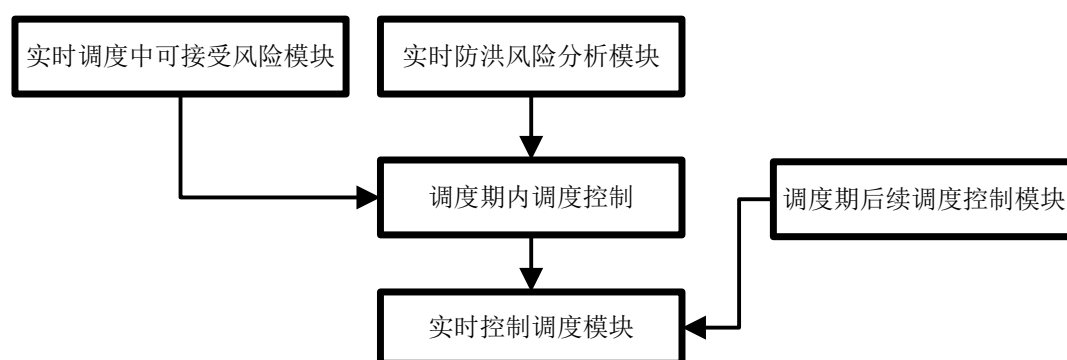


图1.1 水库汛期限水位动态控制模型示意图

①确定因调度产生的风险承受力^[19]。在水库实时调度过程中,由于用于动态控制决策所采用的预报信息、人为因素等诸多方面都存在不确定性,因此动态控制过程是存在风险的,这就需要进行风险决策。在水库实时调度中,需根据社会公众的主观意愿对风险水平的承受程度设定一个可接受风险。决策引起的风险低于这一风险,则决策后果可为社会所接受,是可行的。实时调度中的可接受风险是调度期为几小时(或几天)的风险,与年可接受风险是不同的。

②实时防洪风险分析模块^[19]。在实时调度过程中对降雨及洪水预报误报、漏报发生的概率、水库闸门开启异常等风险因素进行分析,得出风险事件的风险值,量化风险发生的概率与风险损失程度。如风险值处于一定的风险范围之内,则说明汛限水位动态控制方案是可行的。

③调度期后续调度控制模块^[19]。水库调度中,调度末水位即后续时段调度的起调水位是一个关键指标。由于调度期末的来水情况也是一个预报信息,因此调度末水位也是一个随机变量,起调水位不同则其对应的防洪风险亦不同。调度

期末水库水位通过泄流可降至原设计汛限水位高程,进而以保证水库防洪风险不增加,实现实时水库调度与传统的汛限水位之间的耦合。

④实时控制调度模块^[19]。基于预报信息的水库实时调度是一种风险调度,因此,调度过程中要遵循以下两条机遇约束:调度期内的基于预报信息的实时调度其对应的防洪风险需在给定的可接受风险以内;调度末水位的变动范围需满足抵御后续洪水的能力的要求。在实现以上两条机遇约束条件时,则可在最大化预报信息利用水平和兴利效益的同时实现风险可控,这就是所研究的动态控制模型。

1.2.2 水库汛限水位动态控制风险研究综述

世界各国对于水利工程中的风险决策及分析的研究较早、成果也较多。美国是对水库防洪风险研究较早的国家之一^[20,21],如早在1978年美国总统Carter在对美国水利资源委员会的指示中强调了对水利工程进行风险分析的必要性和重要性^[22]。而基于风险理论的洪泛区管理与洪水保险计划构成了美国国家防洪政策安全保障体系的核心^[23]。1984年美大西洋公约组织成立了专门研究水资源可靠性和风险性的ASI高级研究所,提出了水资源工程可靠性和风险性研究框架系统理论、方法和评价指标。

直到20世纪80年代才明确提出了水库调度中的风险概念和分析方法^[24],起步相对较晚。Yazicigil等^[25]对入库洪水与最大库容之间的关系进行了研究,认为根据现有典型年设计洪水所计算的水库最高防洪水位,会因所选典型年不准确而使水库存在最高防洪水位超出校核洪水位的风险。Anselmo等^[26]采用水文-水力耦合模型对意大利某洪水易发区进行洪水风险评估。目前国外风险研究主要集中在洪水保险、洪泛区管理及风险决策等方面^[27]。如Bouma等^[28]研究了决策者对待风险的偏好如何影响水资源管理的决策和结果。Shin等^[29]利用广义Logistic分配模型对大坝和堤防的失事风险进行了不确定性分析,利用矩法、最大可能概率法等计算出了失事风险的期望值和方差。

随着科学技术及研究方法的不断发展,一些新技术、新理论不断引入我国的风险研究领域,水库调度风险研究也取得了丰硕的成果^[30-34],如傅湘等^[35]以三峡水库的调度为例构建了大型水库的风险模型,决策者可根据不同的风险承受度确定出不同的控制水位。田峰巍^[36]等结合预报误差问题,提出水库泄洪的风险决策方法。王本德^[10, 37]研究了由于预报误差所引致的汛限水位动态控制误差风险,并指出气象预报的精度是洪水风险调度的关键。周惠成等^[38]依托水利部重大科技项目,结合预报信息深入研究了汛限水位动态控制的方法,综合多种信息提出了风险防范措施。郭生练和刘攀^[39]研究指出洪水风险存在的必然性,可李法确定洪水损失补偿机制以推进汛限水位动态控制的实现。刘攀等^[40]采用实时

雨水情信息对预报预泄法汛限水位动态控制方案进行了修正,降低了水库由于预报误差造成的回补不了的风险。张改红等^[41]对面临时刻的水库泄水流量与面对未来 24h 不同降雨量级时所产生的风险进行量化,进而科学指导水库汛限水位动态控制实践。周惠成等^[42]采用基于 MIKE 水利计算软件的损失评估模型可计算出不同控制水位的风险损失,结合提高汛限水位所取得的供水兴利收益进行优选计算,得出最优动态控制方案。冯平等^[43]采用入库径流随机模拟方法对洪水预报误差引起的调度风险进行研究,发现其风险程度与预报精度一般呈正相关关系。范子武和姜树海^[44]在汛限水位动态控制风险值的计算模型中将洪水预报精度作为随机特征变量,从而调整了由控制水位这一单一变量带来的风险变化,优化了汛期限制水位的动态控制运用方案。

1.2.3 水库汛限水位动态控制方法及风险研究的发展趋势

由于原有的汛限水位是基于水库设计或校核洪水等小概率事件而设计的。随着水库运行,水库流域的降雨、水文信息的不断积累,为科学分析洪水规律提供了丰富的素材。因此如何更加科学高效地利用好水库运行期积累的各类信息资源,建立实时控制汛限水位的新理念^[45],即综合利用可获取的多种信息资源,对非常事件采取合理有效的对策,确定出可靠而安全的汛限水位动态控制域,是水库汛期水位优化动态控制方法一个研究热点。

由于目前对于汛限水位动态控制风险的研究多集中在风险率的估算上,而对洪灾损失、生态环境的破坏等风险后果的定量分析较少,而这个是在水库风险控制的实际应用中是最为关键的问题;现有的防洪决策系统一般考虑单一水库,单因素分析较多,综合考虑水库群及大流域尺度的防洪风险及多风险变量组合风险的研究较少;对汛限水位动态控制过程中可能发生的风险事件进行综合分析,提出有效的事前预警与事后应急处置及补偿防范措施,以及如何分配风险收益的问题也需进一步深化研究^[45]。因此在对上述几方面的研究将是汛限水位动态控制风险研究的重点和趋势。

1.3 论文总体思路 and 主要内容

1.3.1 总体思路

在现有水雨情、洪水预报测报及洪水调度系统、水工建筑物安全监测有效可靠的情况下,采用经过实践检验的成熟的理论及分析方法,结合水库运行的实际工况及流域雨水情历史资料,研究制定水库汛限水位的动态控制方案,并通过对各种方案风险及收益的分析,为大宁水库的调度运行提出安全、经济的运行模式。

在分析水库汛期限制水位控制方法及其所产生的风险过程中,首先综述了国内外已有的调度方法,根据各种动态控制方案的实际应用条件及应用效果,结合大宁水库的实际情况,选择预泄能力约束法来求得大宁水库汛限水位动态控制域;随后根据24小时降雨预报信息及实时观测的降雨、洪水及水库入流、泄流等实时工况信息,采用“预蓄预泄”法模拟出一场洪水过程中大宁水库汛限水位动态控制的实时决策值;探讨水库由于汛限水位的抬高可能增加的风险;并依据北京水资源的调度成本计算出汛限水位动态控制相对于原有的单一汛限水位控制所取得的兴利效益,对比水库由于汛限水位的抬高可能增加的风险带来的损失,为大宁水库汛限水位的控制探索出科学可行的方式,在保证大坝及大宁水库上、下游防洪安全的前提下,使水库尽可能少弃水,降低供水成本,提高城市供水保障率,使大宁水库在汛期的水资源得到有效利用。根据以上研究思路,论文的技术路线(见图1.2)如下。

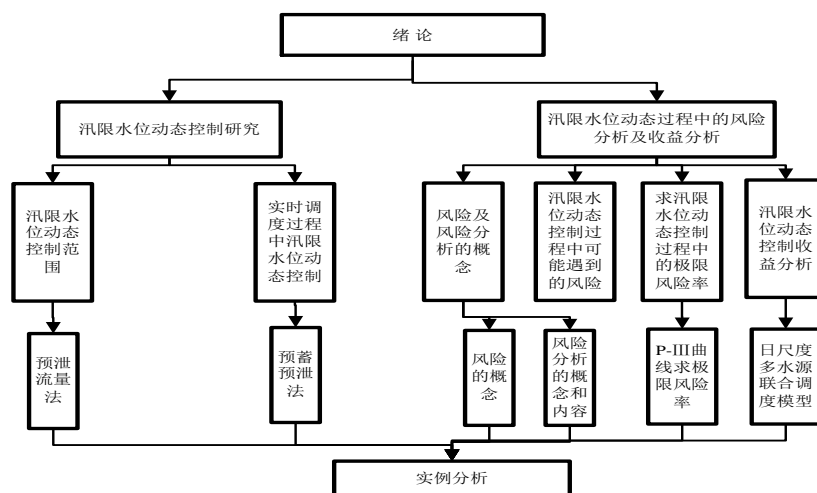


图1.2 论文技术路线

1.3.2 主要内容

(1) 对大宁水库汛限水位动态控制的必要性和可行性进行分析。

(2) 分析了实时控制方法。选用预泄能力约束法作为分析模型推导出了动态控制域,并给出了计算原理和模型。根据水库面临时刻的雨情、水情和工情信息,短期降雨和洪水预报信息,利用预蓄预泄法计算出大宁水库在一场降雨和洪水过程中面临时刻的实时水位控制值和泄流量的控制值。

(3) 研究了水库汛期面临的各种防洪风险。将雨水情的预报误差作为主要风险因子,对北京市的降雨和洪水预报精度进行分析,在此基础上计算出水库不同起调水位的极限风险率及其可靠性,进而确定出安全的控制水位。依据风险特征提出针对性的预防措施。

(4) 根据汛限水位动态控制决策值,采用多水源联合调度模型测算出汛限水位动态控制相对于原有的单一汛限水位控制所取得的兴利效益;对比水库由于汛限水位的抬高可能增加的风险带来的损失;为大宁水库汛限水位的控制探索出科学可行的方式。

第2章 大宁水库汛限水位动态控制的现状条件分析

2.1 永定河流域防洪现状分析

2.1.1 流域工程概况

永定河古称湿水、治水、瀑水，又称浑河、卢沟河，俗称无定河。其善徙、善淤、善决，清康熙年间定名为永定河。自上源灰河至屈家店总长680km，屈家店至蓟运河口的永定新河长61.9km，流域面积4.7万 km^2 。永定河北京段的起点为河北幽州，终点为崔指挥营，自北向南过五个区县，北京市内永定河流域面积为3152 km^2 ，全长172km^[46]。经过历年建设永定河流域形成“一道堤、一蓄滞洪区、两枢纽、三水库”格局。

(1) 一道堤防

永定河左右堤现有122.054km大堤。左堤从麻峪人字闸至崔指挥营北小埝市管界长75.735km，右堤从大台公路桥至金门闸市管界长46.319km。

阜石路至京门铁路桥之间左堤靠高台地挡水，其护砌高程为百年一遇洪水位加高2m。麻峪人字闸门至卢沟桥左堤堤顶为可能最大洪水位超高0.7m。卢沟桥以下左堤堤顶高程为20年一遇设计洪水位超高2.5m。

卢沟桥以上右堤设计堤顶高程为百年一遇洪水位超高1m，卢沟桥以下右堤堤顶设计高程为百年一遇洪水位超高2m，右堤高1.5m。

(2) 水闸工程

①卢沟桥拦河闸：是永定河卢沟桥防洪枢纽的一部分，共有18孔闸门，控制永定河主河道的洪水。

②小清河分洪闸：50年一遇洪水设计洪水位64.47m，200年一遇校核洪水位65.50m；三家店发生2500 m^3/s 以上洪水时启用。

(3) 水库工程

①官厅水库：总库容41.6亿 m^3 ，防洪库容29.941.6亿 m^3 。水库大坝高45.0m，千年一遇洪水设计洪水位484.84m，可能最大洪水校核洪水位为490.0m。

②大宁水库：由于超挖设计库容增加1000万 m^3 至4611万 m^3 ；正常蓄水位56.40m，最高可蓄至58.50m高程；汛期不超过48.0m，水库有1006万 m^3 的存水可用。水库泄洪闸按50年一遇洪水设计，百年一遇洪水校核。百年一遇洪水控泄流量不超过214 m^3/s ；当库水位达到61.21m且继续上涨时，大宁水库泄洪闸可逐渐加大泄量直至敞泄。

③永定河滞洪水库：包括稻田、马厂两座水库，按百年一遇洪水设计。稻田最多可蓄至 3008 万 m^3 ，马厂最多可蓄至 1381 万 m^3 ，两库最高库水位为 53.5m，50.5m。滞洪水库进水闸闸底板高程49m，百年一遇洪水控泄流量 1900 m^3/s 。连通闸闸底板高程 46m，百年一遇洪水控泄流量1176 m^3/s 。退水闸闸底板比连通闸低 0.20m，马厂蓄至 50.5m，保持流速 400 m^3/s 。

(4) 分洪区域

大宁水库泄洪闸下游区域为小清河分洪区，洪水至设计洪水位 60.01m，开启大宁水库泄洪闸分洪。可利用房山境内的 5 个乡镇 48 个村的 161.09 km^2 的区域分洪；丰台境内分洪区面积包含 2 个乡镇的 2 个街道办事处、7 个村共 180.08 km^2 。

永定河泛区位于大兴区榆垓镇境内，包含大兴区 35 km^2 区域，21893 亩农田和 8 千余人受到损失。

2.1.2 流域水文特性

永定河流域位于海河流域内的西北部，多年平均降雨量约为 550mm，降雨时空分布很不均匀，由东南向西北递减，85%左右集中在 6 至 9 月。永定河官厅水库以上位于太行山背风坡区，年降雨较少，年平均降雨在 350~500mm。官厅以下的山峡为太行山迎风坡区，雨量较充沛，是太行山多发暴雨区，年平均降雨在 700mm 左右。山峡区间自降雨产流到峰顶历时短（不足 10 小时）。官厅山峡洪水由水库洪水和山峡暴雨洪水组成，易形成暴涨暴落型洪水，而官厅山峡还无控制性工程，对下游威胁很大。

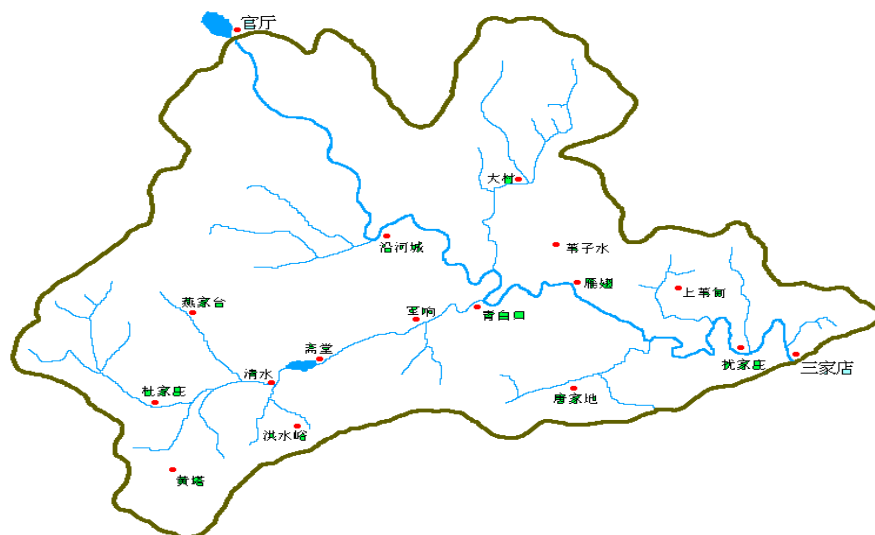


图2.1 官厅山峡流域水系图

全流域超过 100mm 的较大降雨集中在 1970 年代以前。1950 年以来流域最大 24 小时雨量接近 100mm 的共有 11 场，除 1971 年外其余均发生在 7~8 月份。1956、1958、1963 年是 50 年代以来官厅山峡降雨产生较大洪水的 3 年。最大 24h 降雨量发生在 1958 年为 162mm；最大 3 天降雨量发生在 1963 年为 226mm；最大 7 天降雨量发生在 1956 年为 308mm。而对比 1950 年以来流域最大 24 小时雨量接近 100mm 以上共有 11 场，相应官厅山峡洪水流量超过 $500\text{m}^3/\text{s}$ 仅三场，分别为 1956、1958、1963 年，其中 1956 年 $2230\text{m}^3/\text{s}$ （见表 2.2）。

根据永定河全流域降雨及单站降雨发生情况，24 小时降雨大于 100mm 的场次较大降雨发生的时间为 7 月 1 日~8 月 15 日（表 2.1），而且从历史洪水统计看，汛期 7 月 1 日~8 月 15 日发生洪峰流量大于 $500\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水概率较大，可作为主汛期（见表 2.3）。与北京市目前所称的主汛期 7 下 8 上（7 月 20 日~8 月 10 日）相比，主汛期前后均适当延长。

表 2.1 场次较大雨量统计表

24 小时雨量等级	总次数	主汛 7 月 1 日~8 月 15 日次数	主汛比例
>100mm	36	26	72%
>150mm	15	15	100%
>200mm	7	7	100%

表 2.2 1950 年以来永定河流域最大 24 小时雨量 100mm 以上降雨、山峡洪水统计表

年份	单站实测雨量 (mm)			发生时间/开始时间			洪峰流量 (m ³ /s)	
	最大 24h	最大 3d	最大 7 天	最大 24h	最大 3d	最大 7 天	三家店	官厅山峡
1953	112	151	164	8 月 23 日	8/23 或 8/19	8/23 或 8/19	993	294
1954	104	104	201	8 月 9 日	8 月 9 日	8 月 3/4	611	447
1956	134	221	308	8 月 3 日	8 月 2 日	7 月 29 日	2640	2230
1958	162	203	284	7 月 10 日	7 月 10 日	7 月 10 日	1340	1250
1959	93	122	190	8 月 3 日	8 月 1~4 日	7 月 29/31、8 月 1 日	475	375
1962	136	146	176	7 月 8 日	7 月 6、7 日	7 月 3/7 日	400	350
1963	109	226	270	8 月 7、6、8	8 月 6 日	8 月 2/3 日	800	800
1964	114	167	194	8 月 1 日、7 月 31 日	8 月 1 日、7 月 31 日	7 月 31/30 日、8 月 1 日	194	164
1971	115	129	150	6 月 25 日	6 月 25/24	6 月 25/24	53.4	53.4
1973	115	130	168	7 月 2 日	6 月 30 日	6 月 26 日、7 月 1 日	267	257
2012	132	132	132	7 月 21 日	7 月 21 日	7 月 21 日	155	155

表 2.3 永定河官厅山峡 1920 年以来 10 大场次洪水统计成果表

流量范围 (m^3/s)	排序	年份	洪峰流量 (m^3/s)			流域雨量 (mm)	三家店 洪峰出现时间
			三家店实测	官厅下泄	官厅山峡(实测—官厅)		
Q>2500	1	1924	5280	/无资料	超 2500		7 月 13 日 20:00~23:00
	2	1939	4665	540	4125 (2500 m^3/s 以上 2800 万 m^3)		7 月 25 日 21:00
	3	1929	4170	360	3810 (2500 m^3/s 以上 1100 万 m^3)		8 月 3 日 2:00
接近 2500	4	1950	2750	359	2391		8 月 4 日 15:00
	5	1956	2640	410	2230	138	8 月 4 日 0:00
	7	1931	1804	786	1018		7 月 8 日 1:00
500<Q<2500	9	1925	1452	656	796		7 月 24 日 0:46
	6	1958	1340	90	1250	157	7 月 11 7:06~8:10
	8	1963	800	0	800	121	8 月 8 日 13:48-15:00
	10	1954	611	164	447	104	8 月 9 日 19:00

2.2 大宁水库基本情况分析

2.2.1 大宁水库工程情况分析

大宁水库位于北京市西南部，是南水北调中线北京段的重要配套调节工程，工程建成后，可以通过水库的调蓄功能提高南水的有效利用率，进而有效平衡因南水北调来水季节性差异较大而导致的供水过程与北京市需水过程不匹配的问题。当干线由于外力破坏、水质污染等应急情况发生而不能正常供水时，大宁水库可为北京市进行应急供水，同时可有效提升对外调水的调节能力，提高水源利用率^[47]。工程设计总库容 4611 万 m^3 ，最高蓄水位 58.5m，相应的调蓄库容 3753 万 m^3 ，正常蓄水位 56.4m，汛限水位 48m，相应的调蓄库容 1006 万 m^3 。

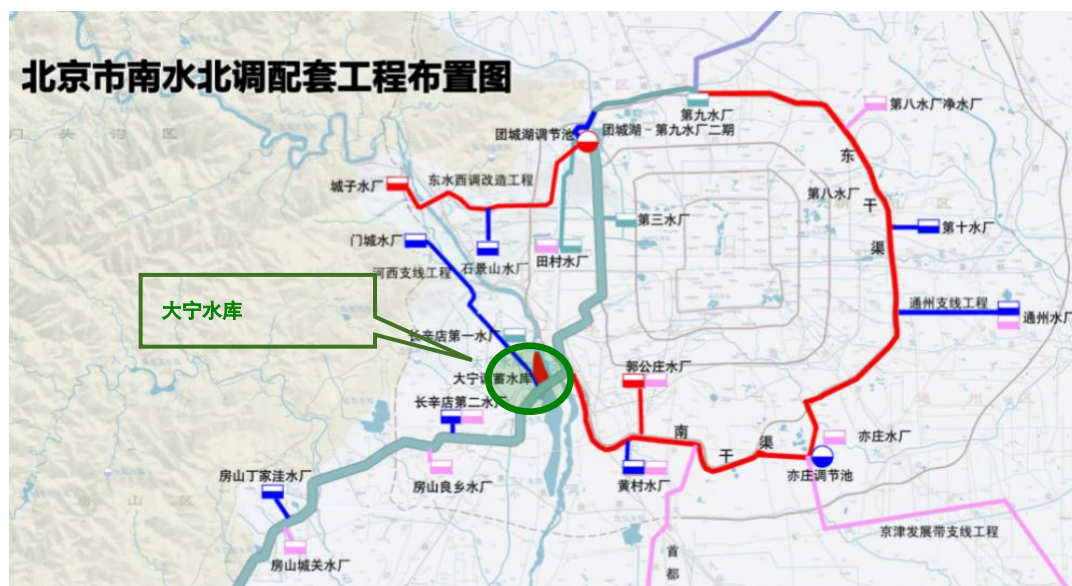


图2.2 北京市南水北调工程布置图

大宁水库原为永定河上的一座滞洪水库，不具备蓄水的功能，南水北调工程在原水库的基础上进行了改造建设，将其作为江水的调蓄水库。

(1) 水库工程现状发生改变

大宁水库 1985 年初步建成，1988 年至 1995 年期间水库进行了疏浚清挖，2009 年北京市南水北调配套工程建设对水库库区进行了平整，因此水库的库容较设计之初增加了，同时通过绕水库一周的防渗体建设，使得水库具备了蓄水能力，增建了正常蓄水位、最高蓄水位等特征水位（见表 2.4，图 2.3）。

表 2.4 大宁水库特征值

水位 (m)	1987 年原库容 (万 m ³)	现状库容 (万 m ³)	备 注
61.21	3611	4160	原校核洪水位，总库容 (100 年)
61.01	3530	4100	原设计洪水位 (50 年)
58.5		3402	最高蓄水位，最大调蓄库容
56.4		2843	正常蓄水位
49	172	1121	进水闸底高程
48	0	920	汛限水位
48.0-61.21	3610	3240	防洪库容比原设计减少

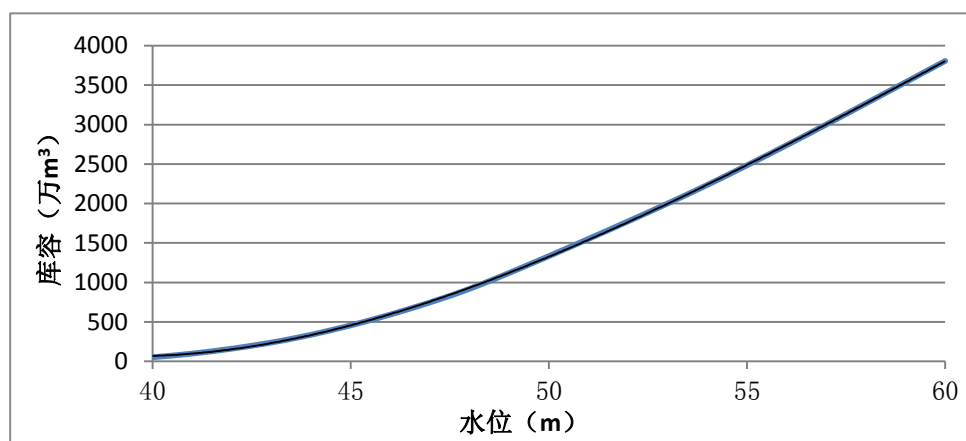


图2.3 大宁水库水位-库容曲线

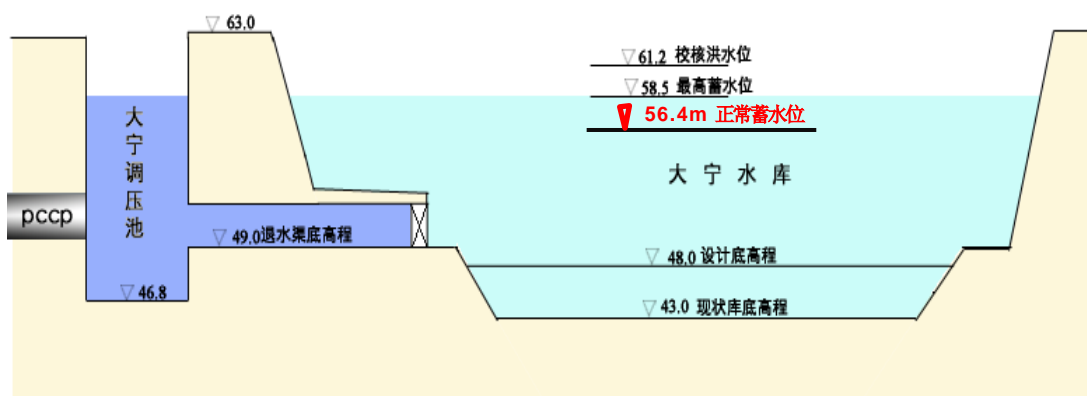


图2.4 大宁水库特征水位示意图

(2) 应用条件发生改变

北京市南水北调配套工程对大宁水库改建完成后，水库由原来常年空库运行的单一防洪水库转变为常年蓄水的调蓄水库，在汛期要同时兼顾蓄水及防洪两个功能需求，因此水库的运行条件发生了极大地改变。

2.2.2 大宁水库调度规则综述

现水库调度规则依然沿用原《永定河洪水调度方案》^[48]的规定。大宁水库及稻田、马厂水库组成的滞洪水库带用于共同蓄滞官厅山峡超 2500m³/s 及以上流量的洪水，小清河分洪闸将洪水分流至大宁水库，然后通过三库之间的控制闸，首先将洪水蓄至最下游的马厂水库，蓄至 50.5m 最高设计水位时关闭马厂水库连通闸；随后利用稻田水库蓄滞洪水，同马厂一样将稻田水库蓄满到 53.5m 后，关闭稻田水库进水闸，最后再将洪水蓄至大宁水库，当洪水达到设计洪水位 61.01m 后，开启泄洪闸以不超过 214m³/s 的流量进行泄洪；当大宁水库水位达到校核洪水位 61.21m 后，则逐步提高泄洪闸门直至全开。

表 2.5 滞洪水库闸门高程统计表

闸门名称		尺寸大小 (m) 孔数-宽*高	闸底高程(m)
大宁~稻田	进水闸	6-10*6	49.0
稻田~马厂	连通闸	5-12*8	46.0
马厂库尾	退水闸	7-8*5.2	45.8
大宁	深孔	2-6*13.2	48.0
泄洪闸	浅孔	6-8*9.2	52.0

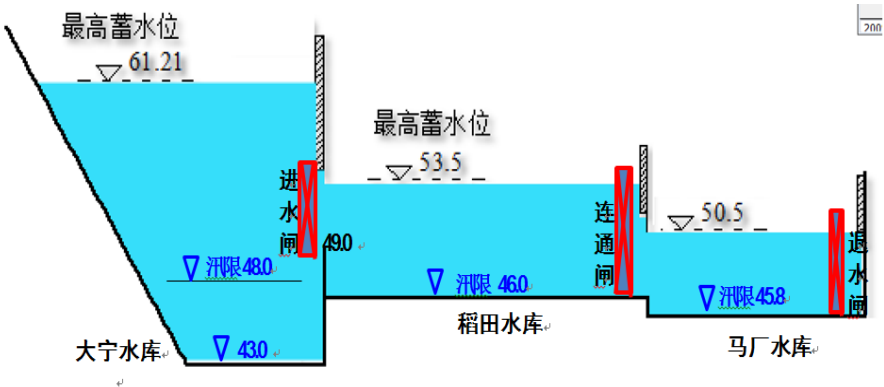


图 2.5 滞洪水库闸门高程图

2.3 大宁水库汛限水位动态控制的必要性分析

水库汛限水位是水库在汛期的最高限制水位。该水位在《中华人民共和国防洪法》给予了法定地位，因此其控制运用需要由法律规定的国家机关来决定，任何其他组织和个人无权私自调整。原有的水库汛期限制水位设计上基本依据最大设计洪水而非动态的水文预报，这种方法在过去科技不发达的时期为洪水的防范发挥了显著的作用，但在科技显著进步的今天，这种静态的控制方法显得过于保守，过度重视风险防范而忽视了水资源对城市发展的保障性作用，不符合北方水资源紧缺的现状对于调度方式的新需求。随着科技的不断进步和发展，洪水预报的精度不断提高，洪水预见期有效延长，动态控制理论的发展和成功实践，都为水库汛限水位的动态控制提供了有利条件。

永定河官厅山峡 1920 年有实测资料以来，洪峰流量超过 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 的仅 3 年（1924、1929、1939 年），官厅水库修建后山峡未发生超过 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 洪水（见表 2.5）。根据调度规则，永定河三家店断面发生 20、50、100 年一遇洪水，需启用大宁水库和滞洪水库共同滞洪，滞蓄水量分别为 129、3080、8220 万 m^3 （见表 2.6）；根据历史洪水分析，官厅山峡 1929、1939 年超 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 洪水量分别为 2800、1100 万 m^3 。因此大宁水库汛期正常蓄水位 56.4m、不提前泄流情况下其下游的滞洪水库仍有 5710 万 m^3 防洪库容，对 50 年一遇设计洪水及历史洪水防洪调度不会产生影响。根据建库以来的历史来水分析，发生需启用大宁水库蓄滞洪水的几率较小。

表 2.6 永定河设计洪水成果表

计算项目		不同重现期设计值				
		5 年	10 年	20 年	50 年	100 年
流量 (m^3/s)	官厅山峡	820	1680	2740	4330	5630
	官厅水库下泄	0	0	0	0	600
	三家店合计	820	1680	2740	4330	6230
	拦河闸下泄(m^3/s)	820	1680	2500	2500	2500
大宁水 库分蓄 洪情况	分洪闸下泄(m^3/s)	0	0	240	1830	3730
	分洪总水量(万 m^3)	0	0	129	3080	8220
	滞洪区启用情况	不分洪， 滞洪水库不启用		分洪，滞洪水库蓄滞 不下泄		滞蓄 8000 万 m^3 +大宁下泄

而大宁水库蓄水参与南水北调干线向北京市供水时，汛期若依然沿用原汛限水位控制，汛前水库必需腾空库容则会造成大量浪费，在 2014 由于防汛规则限制即使全年未发生洪水，甚至水库上游的河道依然干涸的情况下，仍然弃掉了 490 万 m^3 的南水北调蓄水，据测算南水北调水源成本价为 3 元/ m^3 ，则相当于白

白浪费了 1470 万元。而且由于水库的调蓄功能在汛期不能得到发挥,则富余的南水只能通过密云反向输水工程加压输送到怀柔水库、密云水库存蓄,由于需要使用电力进行水位抬升,这就大大增加了反向调蓄成本,这也在清华大学的相关研究中得到了证明^[49]。而且汛期正值夏季,与北京市的用水高峰相重叠,此时由于大宁水库蓄水量只剩下库底超挖的一千万方水量,而且夏季高温,水库水量极少而且几近于死水,水库水质得不到有效地保证,因此大宁水库若继续沿用原有的汛期调度方式,水库在北京市的城市应急供水保障体系中的贡献率几近为零。因此在水库今后的运行中对水库汛限水位进行动态控制是十分必要和紧迫的。

2.4 大宁水库汛限水位动态控制的可行性分析

2.4.1 汛限水位动态控制需具备的条件

汛限水位动态控制方法是综合利用降雨预报、洪水预报及实时雨水工情等信息,确定出安全经济的汛限水位动态决策值,而对于设计洪水等小概率事件的风险提前制定出弥补措施进行预防。因此水库要实现汛限水位动态控制需要满足以下几个条件^[50]:

(1) 短期降雨预报及洪水预报方案合格率及精度达到规范规定的水平^[51]。预报信息可用于汛限水位动态控制决策。

(2) 水雨情自动测报系统可靠稳定、信息传递畅通率、误码率均达到规范要求^[52],能及时、准确、可靠地提供水、雨情信息。

(3) 防汛调度决策指挥机构与实施者的通讯通道畅通。

(4) 泄洪闸等泄流设备工况良好、启闭灵活迅速。

(5) 针对预报误差,具有操作性强、灵活可行的应对措施。

基于以上论述,论文着重对条件(1)、(2)进行分析。

2.4.2 洪水预报信息在汛限水位动态控制中的可行性分析

基于预报信息的汛限水位动态控制中,主要选择降雨及洪水等的预报信息作为水库水量的预蓄预泄的决策依据,由于预报信息的不确定性导致了调度过程中存在风险,因此要求预报信息等各种决策指标需达到一定的精度,保证调度过程安全。汛限水位动态控制过程中的预报信息主要有降雨、洪水预报精度和有效预见期等。

流域内降雨和洪水的精准预测和掌握是进行汛限水位动态控制的首要条件。永定河流域自 1912 年首次设立卢沟桥水文站以来,现共有水文及雨量站 16 个(见图 2.6,表 2.7),已实现数据的自动化采集和远程传输,水情网络覆盖到整个流

域，使得永定河流域的洪水实时调度进而大宁水库的汛限水位动态控制提供了可能性。

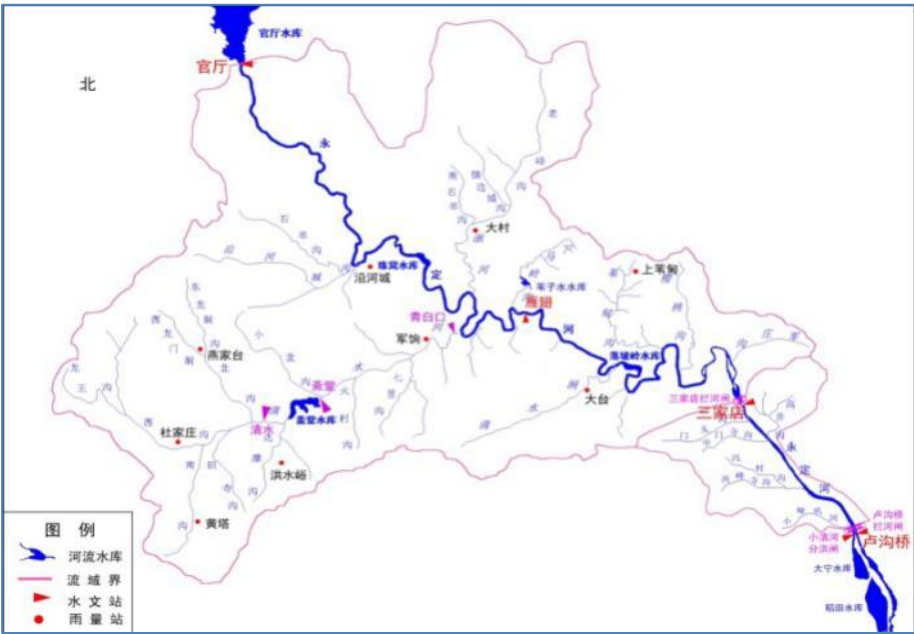


图2.6 永定河流域水文及雨量测站分布图

表 2.7 永定河流域水文及雨量测站统计表

站次	河名	站名	站别	设站年份
1	永定河	官厅水库	水文	1924
2	永定河	三家店	水文	1920
3	永定河	卢沟桥	水文	1912
4	永定河	雁翅	水文	1963
5	清水河	清水	水文	1975
6	清水河	斋堂水库	水文	1954
7	清水河	青 口	水文	1951
8	沿河城沟	沿河城	雨量	1950
9	湫 河	大村	雨量	1951
10	清水河	杜家庄	雨量	1951
11	清水河	黄塔	雨量	1971
12	清水河	燕家台	雨量	1951
13	清水河	洪水峪	雨量	1958
14	清水河	军响	雨量	1997
15	清水涧	大台	雨量	1952
16	苇甸沟	上苇甸	雨量	1951

受历史雨洪资料、流域水文特性、人类活动干扰等众多因素不确定性的影响,水库洪水预报不是绝对可靠的,其合格率及精度达到一定的标准方可用于洪水预报。目前洪水预报精度的评定方法为^[51]:凡洪水预报方案精度达到甲、乙两个等级者,可用于发布正式预报;精度方案达到丙级者,可用于参考性预报;丙级以下方案,只能做参考性估报^[53]。根据《官厅山峡区间洪水预报方案》^[54]预报模型对历史洪水检验可以看到,预报方案径流合格率为80%,洪峰合格率为100%,洪水预报精度可达到90%。依据水利部颁发的《水文情报预报规范-SL250-2000》进行分析可知,永定河流域的洪水预报方案精度达到乙级水平,可用于发布正式预报,达到了可用于防洪预报及进行汛限水位动态控制的条件。

2.4.3 降雨预报信息在汛限水位动态控制中的可行性分析

由于大宁水库的洪水有效预见期仅为3h,比较短,因此单一的采用洪水预报信息作为汛限水位动态控制的决策因子时会有很大的局限性。而且降雨预报信息优先于洪水预报发布,因此利用降雨预报信息决策以延长有效预见期,则可提高水库水资源的调控能力。

根据中央气象台发布的全国主要城市未来24h降雨预报精度分析显示^[55],北京市无雨预报准确率为93.5%,小雨预报准确率为93.2%(见表2.8)。

表2.8 中央气象台预报精度对比分析表(北京市)

预报量级	准确率(%)	漏报率(%)
无雨预报	93.5	6.5
小雨预报	93.2	6.8

在上述预报准确率统计分析的基础上,采用经验频率曲线上的三点法初定统计参数,最后用目估适线法确定统计参数,进而分析出预报无雨与小雨时,实际降雨发生于各量级的概率分布。北京市无雨及小雨预报实际概率分布见表2.9。

表2.9 北京市无雨及小雨预报实际概率统计参数表

预报量级	样本数	均值 \bar{x}	c_v	c_v / c_s
无雨预报	537	0.6	2.6	2
小雨预报	306	3.2	2.6	2

上述分析结果显示,虽然对大雨预报的研究较少,但是从现有对小雨或无雨预报的精度较高,所以利用北京市未来24h降雨预报信息来对水库汛限水位进行动态控制决策是可行的。

2.5 小结

随着科技水平的不断发展,洪水预报的精度不断提高,洪水预见期有效延长,动态控制理论的发展和成功实践,都为水库汛限水位的动态控制提供了有利条件。而北京水资源先天不足,属于资源型极度缺水地区,随着城市的不断发展,其对水资源的需求也不断增加。大宁水库作为南水北调中线北京段的重要调蓄水库,其在参与南水北调干线向北京市供水时,汛期若依然沿用原汛限水位控制,则会发生弃水,在汛期水库的应急调蓄功能也将降至很低的水平,水库蓄水也只能满足北京市3天的需水量,因此在对水库汛限水位进行动态控制方案的研究是十分必要和紧迫的。

采用预报信息对汛限水位实现动态控制的技术条件主要为:降雨及洪水预报精度需要达到较高的水平,根据水利部相关规范的要求,洪水预报方案需要达到乙级及以上标准方可用于实际预报的发布。本部分对大宁水库的水情及洪水测报系统进行分析,通过分析可知大宁水库具备实施汛限水位动态控制的技术条件,因此对其进行汛限水位动态控制是可行的。

第3章 大宁水库汛限水位动态控制方案研究

3.1 水库汛限水位动态控制域的确定

为防止因单一强调防洪安全或者兴利蓄水而导致汛限水位处于不经济或者高风险的状态,调度时水库实时水位需要处于合理的范围,即汛限水位动态控制域,进而通过分析与控制范围内相对应的风险程度来确定动态控制域是否科学可行,进而为水库汛限水位动态控制设置一个约束条件。

近年来对汛限水位动态控制域的计算方法研究也比较多,如预泄能力约束法、库容补偿法、包线法、基于年内洪水概率分布的统计分析法等,其应用也比较广泛,论文结合大宁水库历史运行资料及现状运行特点,选用发展较为成熟、操作方便的预泄能力约束法对汛限水位动态控制域进行研究。

预泄能力约束法是在有效预见期内,水库有多大泄流能力就将水位上浮多少,一次作为水库汛期限制水位控制的上限,以原静态汛期限制水位作为动态控制域的下限值^[56]。假定水库下游河道、消力池等水利工程的综合安全泄量为 Q_s ,在有效预见期 T_c 内,动态控制域上限库水位 Z_u 及原设计汛限水位 Z_0 的库容关系为:

$$V_0 = V_u + \int_{t_c}^{t_c+T_c} Q_t dt - Q_s \cdot T_c = V_u + \sum_{t=t_c}^{t_c+T_c} Q_t \times \Delta t - Q_s \cdot T_c \quad (3.1)$$

式中: V_u 、 V_0 分别为 Z_u 、 Z_0 对应的库容; Q_t 为第 t 时刻的实测入库流量; t_c 为当前时刻, Δt 为计算时段长。

3.1.1 水库汛限水位动态控制域上限值的确定

论文中主要分析预泄能力的以下几方面影响因素:有效预泄时间、预泄期内的水库来水量、水库最大安全泄流能力等。

(1) 有效预泄时间(t_y)包括:扣除预报信息获得、分析、决策指令传达、现场指令执行等时间后的降雨及洪水的有效预报时间,计算公式如下:

$$\begin{cases} t_y = t_1 - t_2 \\ t_1 = t_x + t_z \end{cases} \quad (3.2)$$

式中: t_x —预报精度达到可利用程度的有效洪水预见期;

t_z —预报精度达到可利用程度的有效短期降雨预报时间;

t_2 —预报信息获得、分析、决策指令传达、现场指令执行时间。

①预报精度达到可利用程度的有效洪水预见期 t_x 。大宁水库利用现有的水情自动测报系统,可获得预见期3小时以上较准确的洪水预报。因此论文取 $t_x=3h$ 。

②预报精度达到可利用程度的有效短期降雨预报时间 t_z 。中央气象台24h降雨预报达到了可利用的精度标准,但为保险起见,在水库汛限水位动态控制域上限确定时只考虑水库的极限预泄时间。大宁水库一次洪水极限预泄时间为6-8h,因为求水库汛限水位动态控制范围,取较小时间 $t_z=6h$ 。

③预报信息获得、分析、决策指令传达、现场指令执行时间 t_2 。根据大宁水库闸门开启时间及信息传递、预报、决策时间,取 $t_2=2h$ 。

因此大宁水库有效预泄时间为: $t_y=3+6-2=7h$ 。

(2) 有效预泄期内水库的来水量。

$$w'=q'*t_y \quad (3.3)$$

q' —洪水入库前的入库来水流量。

大宁水库上游建有小清河分洪闸,因此无自然来水,正常情况下水库来水均为南水北调干线分流的水量,可自由控制,汛期在水库没有抽水或退水的情况下,一般不会向水库长期输水,尤其当库水位位于汛限水位动态控制域上限时,可选择采用不向水库输水,即 $q'=0\text{ m}^3/\text{s}$ 的调度规则,确保安全。

(3) 预见期内允许泄流量 q 。

预泄期内的允许泄量为下游河道的安全泄流量或下游水库的安全入库流量。水库最大安全泄流量为 $1190\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(4) 预泄水量 w 。

$$w=t_y*q-w' \quad (3.4)$$

通过计算可得出水库在有效预泄期内的最大安全泄流能力,可将其作为汛期水位上浮的库容,最后通过库容—水位关系即可得出水库的汛限水位动态控制范围上限值。

通过计算大宁水库一次洪水前预泄水量的计算可得预泄水量为2999万 m^3 。根据水位-库容曲线可知在一次洪水过程中,汛限水位动态控制上限值可提高9m达到57m高程。

3.1.2 水库汛限水位动态控制域下限值的确定

动态水位控制域下限值一般可由预泄回充法进行计算,但是由于论文研究的大宁水库上游无自然来水,且原汛限水位48m高程即为水库的设计库底高程,没有下浮的空间,因此论文中将汛限水位动态控制域下限设定为原汛限水位值48m高程。

3.2 实时调度过程中汛限水位动态控制方案研究

3.2.1 实时调度过程中汛限水位动态控制方法

预泄能力约束法以原设计防洪安全为准则,对动态控制域进行研究,所指定“范围”时的思想与实时调度相接近,但依据的不是调度阶段的实时雨、水情信息,更没有考虑工情和灾情,它属于规划设计阶段完成的内容,因此水库汛限水位动态控制域并不能替代实时调度阶段水库水位控制决策值,它给出的只是一个上下限^[55]。

现阶段研究汛限水位动态控制的方法主要有“预蓄预泄”法、综合信息推理法、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和综合信息汛限水位动态控制值推理决策表。以下主要采用“预蓄预泄”法求面临时刻的汛限水位动态控制决策值。

1 预蓄预泄法水量平衡原理的基本公式

预蓄预泄法有两种用途:一是用于确定汛限水位动态控制范围,完成规划设计阶段任务;二是用于确定实时预报调度阶段应该控制的汛限水位值,即本部分需要讨论的内容。

在已知水库汛限水位动态控制域的基础上,依据水量平衡原理,预蓄预泄法推求汛限水位动态控制值的基本公式为:

$$\begin{cases} W_{\text{预泄}} = \sum_{t=t_0}^{t_0+t_y} \{ [q_{\text{泄}}(t) - Q_{\text{入}}(t)] \Delta t \} \\ q_{\text{泄}} = [q_{\text{安}} - q_{\text{区间}}(t)] \leq q_{\text{安}} \end{cases} \quad (3.5)$$

式中: $W_{\text{预泄}}$ —— t_0 时刻允许预泄的水量;

$Q_{\text{入}}(t)$ ——考虑预报误差后有效预见期 t_y 内的预报入库流量过程;

$q_{\text{泄}}(t)$ ——有效预见期 t_y 可能下泄的流量过程;

$q_{\text{安}}$ ——防洪控制点安全流量;

$q_{\text{区间}}(t)$ ——考虑预报误差时下游流域预报洪水过程;

Δt ——考虑洪水和降雨预报信息的有效预泄时间。

有效预泄时间 t_y 为:

$$t_y = T_j - t_2 \quad (3.6)$$

式中: T_j ——预报系统对未来降雨和洪水的有效预见期;

t_2 ——预报信息收集处理所耗时量、预报信息及决策信息等的传递时间、决策者依据预报信息及经验进行决策的时间、运行人员开启闸门的操作时间。

求得 $W_{\text{预泄}}$ 后,可根据水库安全性和水库汛限水位上限值推求面临时刻允许预蓄的水位 $Z_d(t_0)$,即:

$$Z_d(t_0) = f[V(Z_d^-) + W_{\text{预泄}}] \leq Z_d^+ \quad (3.7)$$

式中: Z_d^- —汛限水位动态控制域下限值;

Z_d^+ —汛限水位动态控制域上限值;

$f(\bullet)$ —库容与水位的关系。

2 预蓄预泄法动态控制汛限水位的步骤

汛期任何时刻 t_0 其对应的水库水位 $Z(t_0)$ 均在动态控制域上下限范围之内,即 $Z_d^- \leq Z(t_0) \leq Z_d^+$,在没有预报有效降雨时,保持水库水量平衡,即 $q_{\text{出}}(t_0) = Q_{\text{入}}(t_0)$ 。当接到未来 T_j 小时后有暴雨及以上量级降雨的预报后,根据调度法则规定,依据预见期内允许的出流过程方案 $q_{\text{出}}(t)$ 求预见期末消落水位 $Z(t_0+T_j)$ 值,其步骤是:

(1) 求有效预见期 T_y 。

$$T_y = T_j - T_2 \quad (3.8)$$

(2) 在降雨和洪水有效预见期 T_y 内的上游来水总量。

将预泄流量设定为当时的来水流量 $Q(t_0)$,用退水预报方案预报预见期 T_y 内的入库流量过程 $Q_{\text{入}}(t)$ 或总水量。

(3) 预报有效预见期内的水库控制泄流过程 $q_{\text{出}}(t)$ 。

先预报有效预见期 T_y 内的区间流量过程 $Q_{\text{区间}}(t)$,然后在安全泄流量约束条件下,依据下式求 $Q_{\text{区间}}(t)$ 。

$$q_{\text{出}}(t) = [q_{\text{安}} - Q_{\text{区间}}(t)] \quad (3.9)$$

(4) 计算有效预见期内的泄水量 $Q_{\text{区间}}(t)$ 。

(5) 求预见期末消落的水位 $Z(t_0+T_j)$ 的值。

先用水位-库容关系查求面临时刻水位 $Z(t_0)$ 所对应库容 $V(Z(t_0))$,并要求 t_0+T_j 期间水位持平为 $Z(t_0)$,然后参照公式2.14,用下式计算遇见期末的消落水位位置。

$$Z_d(t_0+T_j) = f\{V[Z(t_0)] - W_{\text{预泄}}\} \quad (3.10)$$

(6) 检验并修改计算得到的泄流方案。

$Z_d(t_0+T_j) > Z_d^-$ 时,预泄方案可行, $Z_d(t_0+T_j) = Z_d^-$,预泄方案最优,若 $Z_d(t_0+T_j) < Z_d^-$,泄流量过大,造成水资源损失,此时需要将预泄流量降低,调整至最优方案的泄流量,最后达到 $Z_d(t_0+T_j) = Z_d^-$ 。

3.2.2 大宁水库实时调度过程中汛限水位动态控制规则研究

官厅山峡洪水不仅跟24小时降雨量相关,还跟前期降雨直接相关。根据表2.1的历史降雨及洪水的对应关系可以初步确定:预报未来3天发生大暴雨,最

大 24 小时降雨量超 200mm、或 3 天总降雨量超 300 mm，永定河可能发生流量超过 2500m³/s 洪水，大宁水库需提前预泄。

表 3.1 国家气象局降雨等级划分标准表

降雨等级	无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
值域/mm	0	0.1~10	10.1~25	25.1~50	50.1~100	100.1~250

根据降雨及洪水的历史规律的分析，为保险起见，将预泄的降雨预报量级下调为预报未来 24~48h 有大雨及以上量级（>25mm）降雨时开始预泄。根据上节预泄过程及预蓄过程需要遵循的规则及程序，对大宁水库的水位动态控制进行以下设定，见表 3.2。

表 3.2 大宁水库汛限水位实时动态控制规则

当预报未来 24~48h 有“≤10mm 量级”（无雨或小雨）降雨时	当预报未来 24~48h 有“10~25mm 量级”（中雨）降雨时	当预报未来 24~48h 有“>25mm 量级”（大雨及以上量级）降雨时	
将水库水位蓄至动态控制上限值 57m 高程；若果在上限值以下，如有入库水量，则可将水库水位蓄至动态控制域上限。		水库以不超过下游安全泄量 1190m ³ /s 的流量进行预泄，根据气象台的实时天气预报进行实时动态控制。	如果天气预报为未来 48h 以内无大雨及以上量级的降雨，则水库停止预泄。如有入库来水，可将库水位提升至动态控制域上限值。
			如果未来 48h 天气预报为大雨及以上量级降雨，则即使未来 24h 天气预报是中雨以内的降雨，水库仍需按原泄流方案继续泄流，直到动态控制域下限。 若下次预报未来 24h 有大雨及以上量级降雨，则按照调度规则，不管未来天气情况如何，水库继续保持原流量预泄，在有效预见期内将库水位降至动态控制域下限。

3.2.3 实时调度过程中汛限水位动态控制计算

论文以流域内降雨和洪水预报信息为主要决策因子，通过“预蓄预泄”法求得面临时刻汛限水位实时动态控制决策值。由于建库以来，水库流域没有发生洪水，因此以 1956 年 8 月 2~5 日三家店断面洪水为研究对象，分析实时调度过程中汛限水位的动态控制。

（1）假设预报上游无有效降雨的情况下，水库预蓄水位处于动态控制上限 57m 高程。

(2) 预报信息: 3日上午8时预报未来24小时官厅山峡流域有大到暴雨; 4日上午8时预报未来24小时有小到中雨; 5日8:00预报未来24小时无雨。

(3) 实际降雨信息: 2日9时开始降雨, 到3日17:00时流域降雨140.93mm, 4日流域降雨52.09mm, 5日无雨。

(4) 水情: 8月2日6时, 三家店站洪水从 $41.4\text{m}^3/\text{s}$ 开始起涨, 4日0时洪峰流量 $2640\text{m}^3/\text{s}$, 根据调度规则向大宁水库分洪流量 $140\text{m}^3/\text{s}$ 。

(5) 面临时刻3日8时接到未来24小时暴雨预报, 库水位位于汛限水位动态控制域上限57m高程, 相应的库容 $V(t_0)=2999\text{万 m}^3$, 当气象台24小时天气预报为“暴雨到大暴雨”, 此时需实施预泄方案。根据假设条件, 水库有效预见期 $t_y=T_j-t_2=24-2=22\text{h}$, 有效预泄期内入库流量 $\overline{Q_\lambda}=0$ 。大宁水库下游为居民区, 有防洪任务, 因此下泄流量 $\overline{q_{\text{泄}}}$ 取水库最大安全泄流量 $1190\text{m}^3/\text{s}$ 。

由公式3.5

$$W_{\text{预泄}} = \sum_{t=t_0}^{t_0+t_y} \{ [q_{\text{泄}}(t) - Q_\lambda(t)] \Delta t \} = (\overline{q_{\text{泄}}} - \overline{Q_\lambda}) \times t_y = 9424.8\text{万 m}^3$$

即在此预泄期内可将库容全部腾空, 预泄量太大, 水资源利用不经济。为提高水资源利用率, 应控制 $Z_d(t_0+T_j)=57\text{m}$, 此时水库库容为 $V(t_0)=2999\text{万 m}^3$, 根据公式 $\overline{q_{\text{泄}}}=[V(57)-V(48)]/t_y+\overline{Q_\lambda}=(29991006)\times 10^4/22\times 3600+0=252\text{m}^3/\text{s}$ 。

3日22:00时, 库水位达到51.81m高程, 位于动态控制域之内, 此时三家店站洪峰流量达到 $2550\text{m}^3/\text{s}$, 根据调度规则, 需向大宁水库分洪, 进水流量 $50\text{m}^3/\text{s}$, 根据动态调整规则, 将水库泄流量增加至 $302\text{m}^3/\text{s}$; 4日0时, 库水位降至50.83m, 洪峰流量达到最大 $2640\text{m}^3/\text{s}$, 大宁水库分洪流量达到 $140\text{m}^3/\text{s}$, 将水库泄流量增加至 $392\text{m}^3/\text{s}$, 4时三家店洪水流量降至 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 以下, 根据调度规则停止向大宁分洪, 大宁水库进水流量为0, 库水位降至48.66m, 按照预泄规则继续以 $252\text{m}^3/\text{s}$ 的流量退水; 至4日4:25分, 库水位降至汛限水位动态控制域下限值48m高程, 水库停止退水, 同时天气预报调整为未来24小时小到中雨, 此时开启分洪闸利用雨洪水向大宁水库蓄水, 经分析洪水过程按照 $400\text{m}^3/\text{s}$ 的流量, 8小时后水库水位蓄至动态控制域上限57m高程, 关闭分洪闸停止向水库蓄水。以上就是对1956年8月2~5日三家店断面洪水的模拟控制过程(见图3.1), 实际调度过程成果表见表3.2。

此时在没有大到暴雨的情况下, 可为水库多蓄 1993万 m^3 的水量, 按照北京市 300万 m^3 的日需水量, 在干线故障的情况下单独依靠大宁水库可为北京市提供6.6天的供水量, 将为干线应急抢修争取到宝贵的时间。

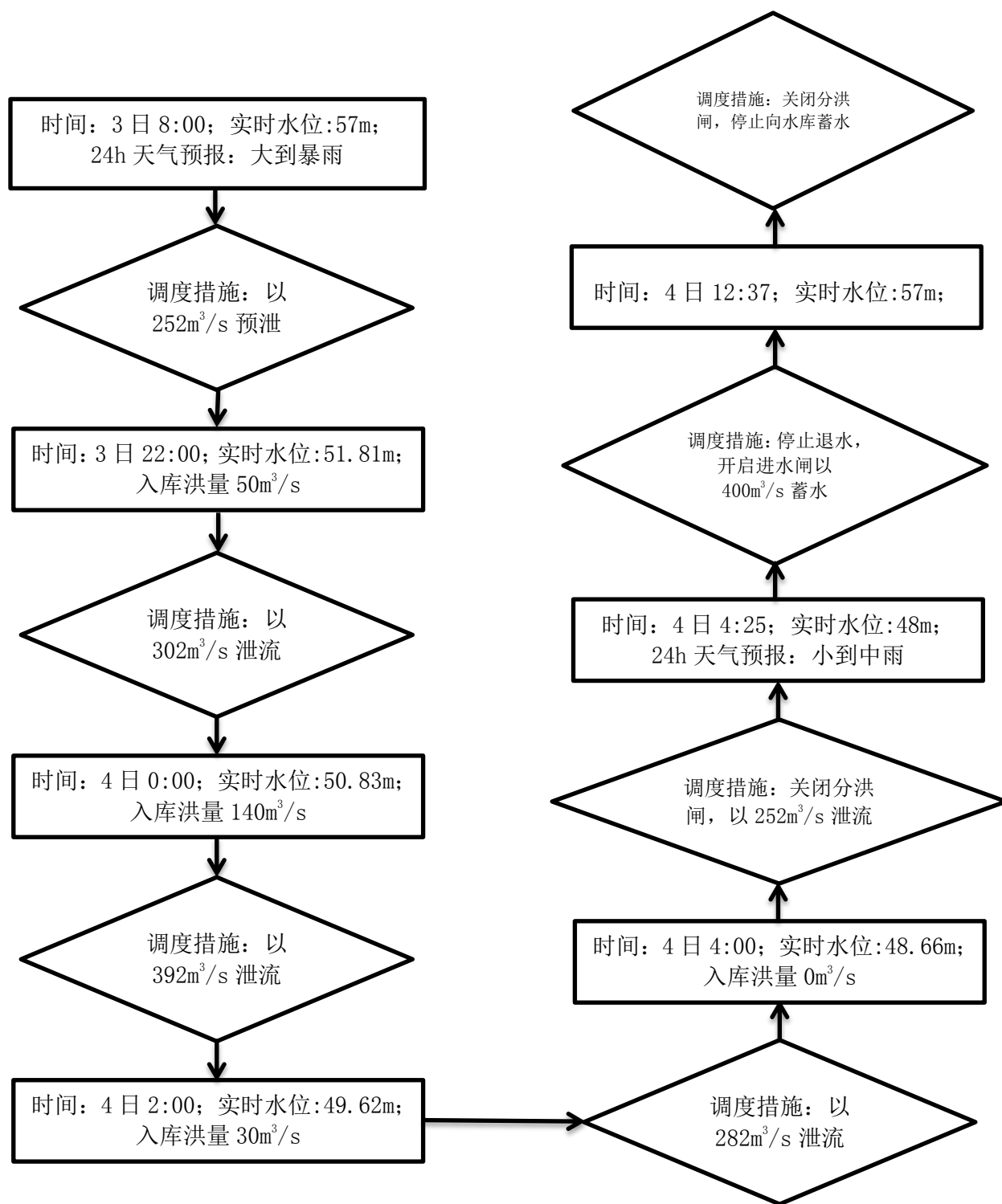


图 3.1 大宁水库“19560802”号洪水模拟调度图

表 3.2 大宁水库“19560802”号洪水模拟调度过程成果表

日	时	实际降雨 /mm	入流/ (m ³ /s)	实际预蓄预泄调度				常规调度	
				水位/m	出流/ (m ³ /s)	措施	24h 天气预报	水位/m	出流/ (m ³ /s)
2	8:00		0.00	57.00	0.00			48.00	0.00
3	8:00		0.00	57.00	252.00	预泄	大到暴雨	48.00	0.00
	17:00	140.93	0.00	53.79	252.00				
	22:00		50.00	51.81	302.00			48.00	50.00
4	0:00		140.00	50.83	392.00			48.00	140.00
	2:00		30.00	49.62	282.00			48.00	30.00
	4:00		0.00	48.66	252.00			48.00	0.00
	4:25		400.00	48.00	0.00	蓄水	小到中雨	48.00	0.00
	12:37		0.00	57.00	0.00			48.00	0.00
5	8:00	52.09	0.00	57.00	0.00			48.00	0.00

表 3.3 大宁水库“19560802”号洪水两种调度方案调洪特征值

洪水号	调度方式	调洪最高水位/m	最大泄量/(m ³ /s)	调洪末水位/m
19560804	预蓄预泄调度	57.00	392.00	57.00
	常规调度	48.00	140.00	48.00

整个调度过程中水库水位严格控制在汛限水位动态控制域 48~57m 之间, 根据预报信息采取了预泄措施, 并根据入库洪量动态调整水库泄流量, 保证水库防洪安全; 同时调度末根据 24 小时预报信息, 及时拦蓄雨洪水, 回补了水库蓄水。由表 3.3 可以看出, 充分考虑预报信息的预蓄预泄调度方式较传统调度方式在保证水库防洪安全的基础上, 可利用雨洪资源蓄水 1993 万 m³。

3.3 本章小结

本章主要介绍了汛限水位动态控制方法。结合大宁水库历史运行资料及现状运行特点, 选用发展较为成熟、操作方便的预泄能力约束法对汛限水位动态控制域进行研究, 给出了计算原理和模型。根据水库面临时刻的雨、水、工情信息, 采用基于短期降雨和洪水预报信息的预蓄预泄法计算出水库实时调度中的汛限水位动态控制决策值。最后以大宁水库现实工况为对象进行实例分析, 利用预泄能力约束法计算出了大宁水库汛期限水位控制上限值为 57m 高程。由于水库建成后没有实际洪水发生, 因此以 1956 年 8 月 2~5 日三家店断面洪水为研究对象, 分析汛限水位的动态控制方法在实时洪水调度过程中的应用效果, 通过模拟调度过程可以看出, 汛限水位动态控制方法在水库洪水实时调度过程中不仅没有增加水库及上下游防洪风险, 还提高了洪水资源的利用效率, 保证了水库在汛期最大限度地发挥兴利效益。

第4章 水库汛期限制水位动态控制的风险及效益分析

4.1 水库汛期限制水位动态控制的风险分析

水库汛期限制水位的决策依据为降雨及洪水预报等预报信息而非实测信息,由于预报误差的存在,使得在水库汛限水位动态控制过程中存在一定的风险。论文综合分析影响水库预报调度的关键性因子,通过模型计算,量化出水库汛限水位动态控制中的极限风险率。

4.1.1 风险的内涵

广义风险是指在特定时空条件下非期望情况发生的可能性及其可能造成的危害程度^[55]。水库的汛限水位动态控制风险可定义为在特定的时空环境下,水库汛限水位动态控制过程中所发生的非期望事件^[57]。可用系统分析过程中的载荷和抗力来描述,荷载为造成风险事件的外部因素的强度,抗力为事物抵御风险的能力。

整个系统或系统中的某一部分构成超过某一特定状态时,系统的整体功能会弱化或者被破坏,那么此时这个临界点即为系统的极限状态,可以由功能函数加以表述^[57]。当系统有 n 个影响因素时,可表示为:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

式中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表系统的基本变量,如负载和阻力等。当 $Z > 0$ 时,系统稳定安全;当 $Z = 0$ 时,系统负荷达到最大;当 $Z < 0$ 时,系统崩溃。系统的极限状态函数可表述为 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, 其对应的系统发生风险的概率函数可表示为:

$$P_f = p(Z < 0) = \int_{-w}^0 f(z) dz \quad (4.2)$$

式中: $f(z)$ 为变量 z 的概率密度函数。

在水库汛期限制水位动态方案的研究中,仅以水库的起调水位及坝顶高程或特征水位分别作为功能函数的两个变量,即

$$Z = g(R, L) = R - L \quad (4.3)$$

水库的坝顶高程或者特征水位在水库建成后即为稳定不变,因此功能函数中的抗力 R 可视为定值,起调水位是随机可变的,因此可将功能函数中的荷载 L 视作变量进行研究。

4.1.2 汛限水位动态控制过程中的风险研究

汛限水位动态控制方法是在实时预报调度的关键时期运行,其利用面临时刻的雨水情信息、洪水预报及统计预报信息来进行实时决策。基于雨水情、洪水、统计预报信息由于在预报过程中由于漏报、误报等原因可能存在误差,因此需对预报误差在汛限水位动态控制过程中带来的风险进行研究。

4.1.2.1 汛限水位动态控制过程中的风险源

论文在汛限水位动态控制过程中采用的关键决策依据即为产生风险的原因。概括起来主要有以下三个风险源:

- (1) 洪水预报信息误差;
- (2) 雨水情预报信息误差;
- (3) 统计预报信息误差。

因此需对上述预报信息误差进行分析统计,对其误差分布律进行统计及检验。

4.1.2.2 汛期水库蓄水位对水库造成的风险的特性

- (1) 水库汛期防洪风险存在的客观性

风险的客观性是指其存在是不以人的意志为转移的^[58],水库汛限水位动态控制过程中存在着诸多风险因素,如流域水文特性、预报模型水平等。这就要求决策者在决策过程中应承认风险、承担风险,尽可能地降低或者规避风险。

- (2) 汛限水位动态控制风险的破坏性

汛限水位动态控制风险的破坏性即风险的表现形式,诸如超安全泄量引起的水工建筑物破坏、水库蓄水减少或者弃水增加、上、下游发生洪涝灾害造成人民生命财产与社会经济的损失等,这些风险事件对风险主体都是不利的。因此风险的破坏性要求对风险要有客观和准确的认识,进而可进行科学的决策以降低风险的危害^[58]。

- (3) 汛限水位动态控制风险与利益的对称性

汛限水位动态控制过程中风险与效益是并存的,且随着控制方案的不同,风险与效益各不相同。一般来说风险与效益是成正比的,但有时因实施措施不科学,导致风险与效益不对等的状况。汛限水位动态控制要兼顾效益与风险,不能一味追求收益而忽视风险,应当让决策的受益者同时成为风险损失的承担者^[55]。

- (4) 汛限水位动态控制风险的可测度性

风险发生的可能性可通过统计分析得出,风险形成的因素主要为降雨和洪水预报等信息,其具有随机变量特征,因此汛限水位动态控制风险概率是可用统计加以量化的。

- (5) 汛限水位动态控制风险的相对性

风险相对性是指在相同的风险环境中,因不同风险主体的抗力不同,因而其所面对的风险程度也相异。在汛限水位动态控制中,水库类型不同,其所承担的风险是不同的^[55]。

如对水库库容对水深变化不敏感的V型水库,汛期控制水位的调整对水库的防洪库容的影响不会太显著;而对于U型水库,与V型水位正好相反,其水位变化对库容的影响较大,因此汛限水位变化对防洪库容进而对水库防洪风险影响较大。因此要对客观情况进行认真科学地分析,以保证汛限水位动态控制方案的经济性和可靠性。

4.1.2.3 汛期限限制水位动态控制风险研究的重点与原则

(1) 汛限水位动态控制风险分析的主要内容

汛限水位动态控制过程中风险是多种多样的,论文主要分析以下几方面的水库汛期险情:

① 垮塌风险

该风险对水利工程和人民生命财产安全带来巨大的破坏性损失,造成的危害程度也是最大的一种,此类风险应作为水库汛限水位动态控制的首要因素来考虑。

② 水库应急泄洪风险

论文基于降雨和洪水预报分析的基础上进行汛期调度研究,由于预报信息存在一定的误差,这就可能增加水库应急泄洪的机率,进而加大下游地区和水利工程遭受破坏的风险。

③ 降低水库兴利的风险

由于降雨及洪水预报信息存在误差,因此当预报不准确时,若据此进行预泄水库存水,将导致水资源浪费和水库兴利效益的降低。

④ 给水库上游地区造成的风险

汛限水位的提高,将有可能对上游地区洪水泄流造成阻碍,进而加大上游地区的淹没风险。

汛限水位动态控制的风险分析就是对不利事件的影响要素进行识别,对不利时间发生的概率及其相应损失作出定性或者定量估计,对评价结果进行处理与决策的过程^[55]。包括风险识别、风险评估、风险评价与风险决策四个模块。

① 风险识别

面对复杂的风险类型,首先需要识别出风险,进而采取措施加以应对,论文将预报信息作为重点研究对象。据相关研究表明,我国定量预报水平达到较高水准,但依然存在误差,未来24h降雨二级分辨预报误报率为:10%~15%,未来48h定量预报误报率为40%^[59]

水库汛限水位动态控制过程中,风险的主要影响因素有降雨、洪水预报信息及决策者风险偏好等。如我国未来 24h 定量预报成果已达到可利用的程度,但当前依然存在误差。

② 风险估计

基于大量历史降雨、洪水等预报资料分析或者经验判断,对不确定性因素进行客观或主观概率分布统计计算,进而基于计算结果进行风险估计。

③ 风险评价

论文采用极限风险率法对水库风险估计的量化结果进行科学处理,对照行业通用的风险评价指标对面临的风险等级进行判定。

④ 风险决策

基于风险评价中得出的极限风险率,决策者进行判断汛限水位动态控制方案是否可行及提出应对风险的措施。

(2) 汛限水位动态控制分析应遵从的原则

汛限水位动态控制是基于预报信息等多种变量而开展的,其不确定性要求要坚持以下分析原则:

①多方法综合对比分析原则。对汛期限水位进行调整时,影响决策方案的因素有客观的自然随机因子,又有主观因素,风险成因复杂^[58]。论文中主要研究起关键作用的自然随机因子,分析中主要采用概率论与统计学方法。

②防洪安全第一原则。对汛限水位进行动态控制的水库应经过安全鉴定,有着安全良好的运行工况。其次汛限水位动态控制应确保水库防洪安全为基础,不降低水库原有防洪等级。在汛限水位动态控制方案的制定中,其风险率不能高于原设计汛限水位的风险率。

③坚持 Zadeh^[60]“互克性原理”。汛限水位动态控制的调度决策方案没有最优解,因此要偏保守地求出“安全前提下的洪水资源利用较多且可承受的风险方案”。

4.1.3 汛限水位动态控制方案极限风险率计算方法综述

风险评估方法有基于实际调查的评估方法、定性分析、定量分析以及定性和定量结合分析等多种方法。论文选用在水库调度领域使用成果较多的定性与定量相结合的分析方法开展水库汛限水位动态控制风险研究。对于风险率难以计算或者测定的风险类型一般采用调查法、Delphi 法等定性方法进行分析^[61];对于风险程度可测定或者量化的风险类型则可采用概率论与数理统计法、随机模拟法和模糊数学法等定量方法加以分析^[58]。

汛期限水位动态控制过程中存在的风险变量多服从三角形、正态、Gauss、Gamma、Pearson-III等一些概率分布。从现有资料看, Pearson-III型分布比较符

合我国水文随机变量分布^[62], 论文采用 Pearson-III型分布对汛限水位动态控制方案的极限风险率进行计算。

皮尔逊III型曲线为单峰状, x 轴方向趋向于无穷大的不对称曲线, 见下图 4.1, 概率函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x - a_0)] \quad (x \geq a_0) \quad (4.4)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ —— α 的伽马函数, $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$;

α 、 β 、 a_0 ——三个参数。

当三个参数确定后, 该密度函数即随之确定。三个参数的关系为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2}{c_s^2} \\ \beta = \frac{2}{xc_v c_s} \\ \alpha_0 = x(1 - \frac{2c_v}{c_s}) \end{cases} \quad (4.5)$$

式中 c_v ——为风险度, 或离势系数; c_s ——表示不对称的大小程度, 偏态系数。

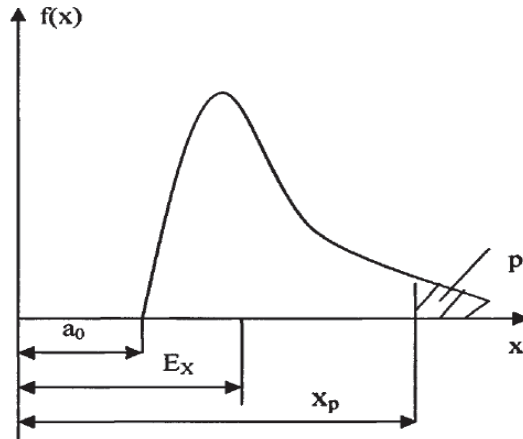


图4.1 皮尔逊III型曲线

论文中, 需要根据设定的固定概率 p 反推出其对应的随机变量 x_p 的大小, 具体可用下式表示: $p(x > x_p) = p$ 的 x_p , 即:

$$p = p(x > x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x - a_0)] dx \quad (4.6)$$

将短期降雨和洪水预报的误报、漏报误差按照 P-III分布处理后, 得到汛限水位动态控制方案的极限风险率公式为:

$$\begin{aligned}
 P_f = 1 - p = 1 - \mu_z(z) \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x - a_0)] dx \\
 = \mu_z(z) \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^{x_p} (x - a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x - a_0)] dx \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

式中： $\mu_z(z)$ —引起防洪风险的相对隶属度；

x_{\min} —现有预报条件下产生的最小误差。

$\mu_z(z)$ 为引起防洪风险的相对隶属度，可以用来表示由起调水位带来的危害相关度，论文中将其设定为水库现实水位超过校核洪水位的度，其计算公式如下：

$$\mu_z = \begin{cases} 0 & Z < Z_{\text{校}} \\ \frac{Z - Z_{\text{校}}}{Z_{\text{防}} - Z_{\text{校}}} & Z \geq Z_{\text{校}} \end{cases} \quad (4.8)$$

式中 $Z_{\text{校}}$ —水库校核水位； $Z_{\text{防}}$ —水库防渗体高程。

风险指标变量的预测精度与得到的风险率呈负相关关系。在采用风险率进行决策时，需要考虑风险与收益的对比率，现有的针对风险因素的应对措施的整体性及有效性等一些综合性因素。风险大小只是一个数量指标，在没有评价标准时，其绝对数值不具备任何现实意义。不同的决策者对风险标准的划分也有一定的差异性，论文采用以下参考标准作为汛限水位动态控制风险大小划分标准^[63]。

$$F(S^*) = \begin{cases} 0-0.1 \\ 0.1-0.2 \\ 0.2-0.5 \\ 0.5-1.0 \end{cases} \quad (4.9)$$

根据以上量化标准可将风险划分为四个等级：极限风险率在 0.1 以下时，认为决策产生的风险小，方案可行；极限风险率在 0.1 至 0.2 之间时，判定为风险较小，决策比较可靠；极限风险率落于 0.2 至 0.5 区间时，判定为风险较大，该决策不可靠；当其值高于 0.5 时，判定为风险大，该决策不可行。汛限水位动态控制过程中，求出的风险率与公式（4.9）中的风险率标准进行对比，一般认为风险率应低于 0.2，如高于 0.2 则认为决策不可靠，需对动态控制方案进行调整。

4.1.4 大宁水库汛限水位动态控制过程中的风险分析

基于决策的雨水情、洪水、统计预报信息由于在预报过程中由于漏报、误报等原因可能存在误差,可利用上节确定的风险评价指标,对比量化后的方案风险值确定出安全可靠的控制方案。

永定河流域自 1912 年首次设立卢沟桥水文站以来,现共有水文及雨量站 16 个(见图 2.6,表 2.7),已实现数据的自动化采集和远程传输,水情网络覆盖到整个流域,使得永定河流域的洪水实时调度进而大宁水库的汛限水位动态控制提供了可能性。现有预报系统对降雨过程预报预见期可达到 24h,洪水有效预见期可以达到 3h,平均洪峰流量预报精度 $\bar{x}=90\%$ 。虽然预报精度达到较高的水准,但是还是有误差的存在,这就需要对在汛限水位动态控制过程中由预报误差引起的风险进行计算及评估,进而为实时调度提供决策依据。

表 4.2 给出了官厅山峡洪量频率成果, $C_V=1.75$, $C_S=2.5$ $C_V=4.38$;预报平均精度 $\bar{x}=90\%$ 。则根据公式可计算出参数:

$$\alpha = \frac{2}{C_S^2} = \frac{2}{2.5^2} = 0.32$$

$$\beta = \frac{2}{xc_v c_s} = \frac{2}{0.9 \times 1.75 \times 4.375} = 0.29$$

$$\alpha_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{2c_v}{c_s}\right) = 0.9 \times \left(1 - \frac{2 \times 1.75}{4.38}\right) = 0.18$$

公式(4.8)给出了相对隶属度 $\mu_z(z)$ 的一般计算方法,在汛限水位动态控制过程中,可将 $\mu_z(z)$ 定义为库水位超过汛限水位上限的幅度。即(4.8)式可定义为:

$$\mu_z = \begin{cases} 0 & Z < Z_d^+ \\ \frac{Z - Z_d^+}{Z_{\text{防}} - Z_d^+} & Z \geq Z_d^+ \end{cases} \quad (4.10)$$

式中: Z_d^+ —汛限水位动态控制上限,3.1.1 节中已计算得出 $Z_d^+=57\text{m}$ 。;

$Z_{\text{防}}$ —水库防渗体高程。根据设计,大宁水库 $Z_{\text{防}}=62.5\text{m}$ 。

由表 2.6 可以看出,10 年一遇以下的洪水发生时,不启用大宁水库,汛期水库蓄水对防洪没有影响;当发生 20 年-50 年一遇洪水时,会启用滞洪水库蓄水,但是在在大宁水库蓄满的情况下,下游的稻田、马厂水库还有 4389 万 m^3 的防洪库

容,因此对大宁水库防洪没有影响;当达到百年一遇的校核洪水时,才会启用大宁水库分洪,若预报信息发生误报时,会对水库防洪安全造成风险。

从极限风险率的角度来分析,由于汛期蓄水不超过正常水位 56.4m 高程,所以 $Z < Z_d^+$, 根据式 (4.10) 可知 $\mu_z(z)=0$, 所以由公式 (4.7) 可计算得出大宁水库汛限水位动态控制过程中的极限风险率

$$p_f = \mu_z(z) \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_{\min}}^{x_p} (x-a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x-a_0)] dx = 0$$
, 按照公式 (4.9) 给出的风险评价标准可知决策可靠。同样可以分别计算出大宁水库不同特征水位的极限风险率及其决策后果 (见表 4.1)。

表 4.1 大宁水库不同特征水位极限风险率计算成果表

特征水位	高程 (m)	极限风险率 (p_f)	决策后果
原汛限水位 (汛限水位动态控制 下限值)	48	0	可靠
正常蓄水位	56.4	0	可靠
汛限水位动态控制上 限值	57	0	可靠
最高蓄水位	58.5	0.0263	可靠
设计洪水位 (50 年一遇)	61.01	0.0704	可靠
校核洪水位 (100 年一遇)	61.21	0.0739	可靠

通过上述对大宁水库汛限水位动态控制过程中极限风险率的计算可以看出,在现有的预报条件下,水库汛期库水位在校核洪水位以内时,对水库的防洪安全不造成影响。因此在水库其他运行条件满足要求时,可采用实时降雨预报和洪水预报信息对水库汛期限限制水位进行动态控制。因此在汛期,按照 56.4m 常水位对水库进行蓄水,不会降低水库的防洪风险。

表4.2 大宁水库洪水频率计算成果表

单位: 洪峰 m^3/s
洪量亿 m^3

项目	X	C _v	C _s /C _v	P%													
				0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	75	90	95
Q _m	640	1.75	2.5	15276	11776	10304	8860	6990	5630	4330	2740	1680	820	190	128	128	128
W ₃	0.40	1.75	2.5	7.916	6.160	5.436	4.708	3.722	3.084	2.424	1.596	1.036	0.552	0.144	0.084	0.080	0.08
W ₇	0.60	1.75	2.5	11.286	8.820	7.794	6.768	5.438	4.464	3.528	2.346	1.548	0.846	0.222	0.132	0.120	0.120
W ₁₅	0.80	1.75	2.5	13.536	10.640	9.448	8.248	6.680	5.528	4.416	3.008	2.024	1.160	0.344	0.182	0.160	0.160

4.1.5 降低或规避大宁水库汛期防洪风险的几点措施

水库调度决策过程中风险是客观和必然存在的,不会以人的意志为转移,这也意味着风险是不能避免的,所以应着重对风险进行控制及采取可靠措施进行应对,降低其发生几率及危害程度,水库汛期调度时可能会产生堤防塌方、泄流量过大造成下游河道堤防冲毁、预泄后不能及时回补等风险,因此制定了以下应对措施:

(1) 针对短期预报过程中误报、漏报等预报误差,决策者要积极学习新知识和技能,总结经验、改正不足,不断提高自身科学决策能力;同时要加强对调度运行人员的培养,提高其对预报信息的分析判断能力,能够高效利用预报信息进行科学调度。

(2) 调度决策部门应当积累和研究当地流域的水文气象资料,建立全面可靠的洪水风险图^[64]。制定切合实际的防洪预案,细化风险等级,制定分级应对措施,科学指导防洪抢险工作的顺利开展。同时要及时结合社会经济发展变化情况对洪水风险图进行动态调整,保证基础信息的时效性。

(3) 建立运用蓄洪区洪水保险机制和风险补偿机制,对蓄滞洪区进行风险补偿。在城市规划中,严格对蓄滞洪区的规划审核力度,保证行洪通道畅通。

(4) 强化水库管理单位的技术力量,加大对大坝的监测和岁修维护工作,保证能够及时发现、分析和消除隐患,保证工程安全可靠。

4.2 水库汛限水位动态控制收益分析

4.2.1 北京市水源配置概况

为有效利用南水,提高北京市供水保障率,北京市编制了《北京市南水北调配套工程总体规划》,构建了包括密云水库至第九水厂、南水北调中线总干渠两大输水动脉;第三水厂、第八水厂、第九水厂、第十水厂、田村水厂、郭公庄水厂六大水厂;大宁调压池和团城湖调节池两个枢纽;基本沿着四环的一条供水环路和怀柔、张坊、平谷三大应急水源地的“26213”供水格局(如图4.2所示)。形成外调水与本地地表水、地下水三水联调的供水保障机制。

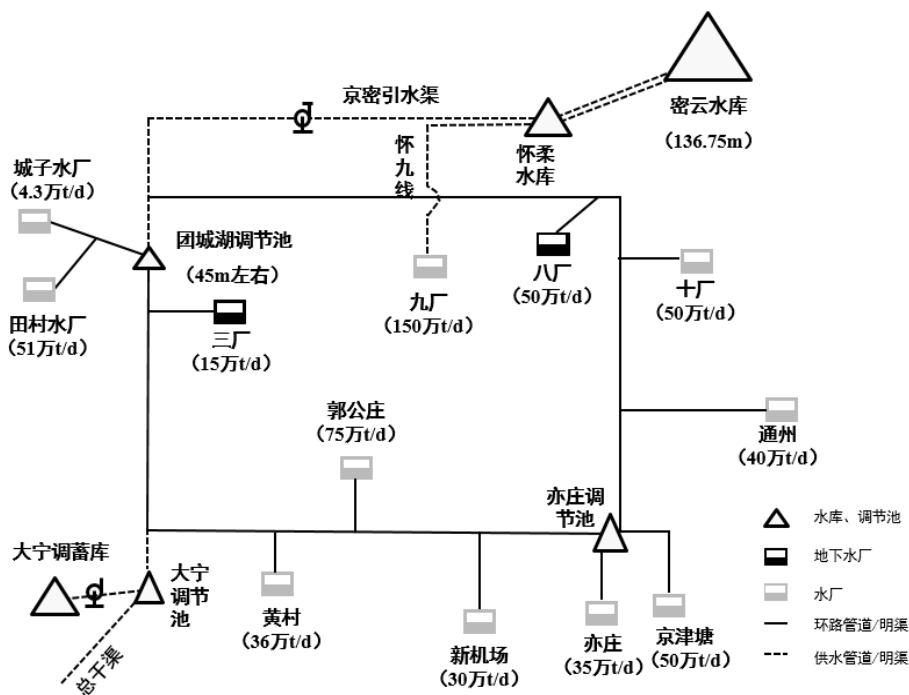


图4.2 北京市供水格局示意图

2015 年江水进京后，北京市在原有的地表及地下水资源的基础上增加了一个新的供水来源，对北京市的水资源调度提出了更高的要求。在江水进京初期，由于配套工程正在建设当中，因此北京市对江水的配置效率并不能到较高的水平。2015 年随着密云反向调蓄工程的正式投入使用，北京市供水系统对南水北调来水的综合配置的能力大大提高，当期不能被水厂消纳的来水可通过反向调蓄工程存入怀柔、密云水库，作为北京市供水保障体系中的重要保障水源，提高密云、怀柔水库的供水保障能力。

通过对北京市中心城区2006~2010年5年的自来水日供水过程线进行分析，2014 年北京市需水总量为 12.48 亿 m^3 ，其中南水北调水源参与供水的供水环路所覆盖的整个供水区域的需水量为 10.31 亿 m^3 ，全市每日平均需水量为 286.4 m^3 。

按照水利部长江水利委员会提供的 1956~1997 年 42 年的长江水量统计成果，可计算出中线一期工程年平均调水量可达 1052 亿 m^3 ，相当于以 33.35 m^3/s 的流量不间断向北京供水。取最小来水年（1978 年）、25%枯水年（1979 年）、50%平水水年（1967 年）、75%丰水年（1962 年）进行排频计算。

4.2.2 基于多水源联合调度模型的效益分析

以日尺度多水源联合调度模型为基础,以保证北京市城区 100%的供水保证率和最大限度减少弃水为目标。对大宁水库防洪需求而引致的供水成本变化进行分析。分析中采用能耗费用表示系统泵水成本^[64]。

$$C = E \times T \times p = \frac{\rho g Q H}{1000} \times T \times p \quad (4.11)$$

式中: C 表示成本(元), E 表示能耗(kw), T 表示时间(h), p 为 2011 年北京地区工业用电价格 0.995 元/(kw.h), ρ 表示水体密度(1000kg/m^3), g 表示重力加速度(m/s^2), Q 表示流量(m^3/s), H 表示水位差(m)。

(1) 不考虑大宁水库防洪需求的反向调蓄方案

反向调蓄能力实现后,大宁水库的正常蓄水位 56.4m 以上的蓄水可由原来的弃水转变为存水(图 4.3,4.4),减少了资源浪费,此时不会增加大宁水库的供水能力和供水成本,但是会增加反向输水成本。

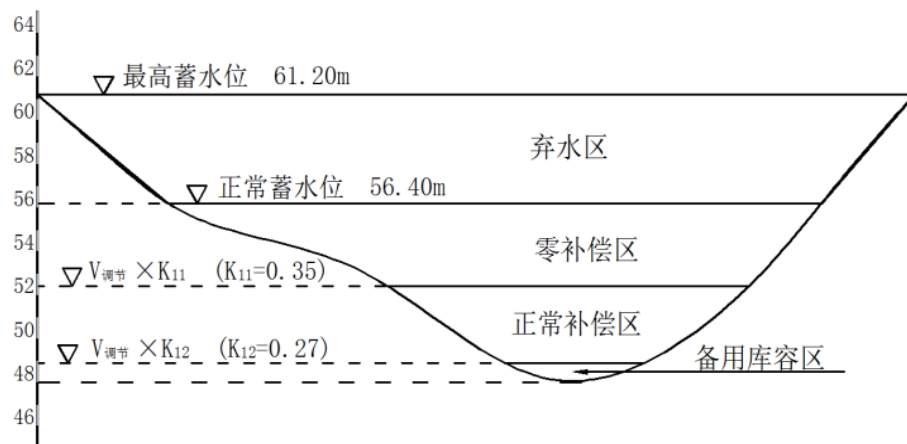


图 4.3 未启用反向调蓄工程方案下大宁水库分区图

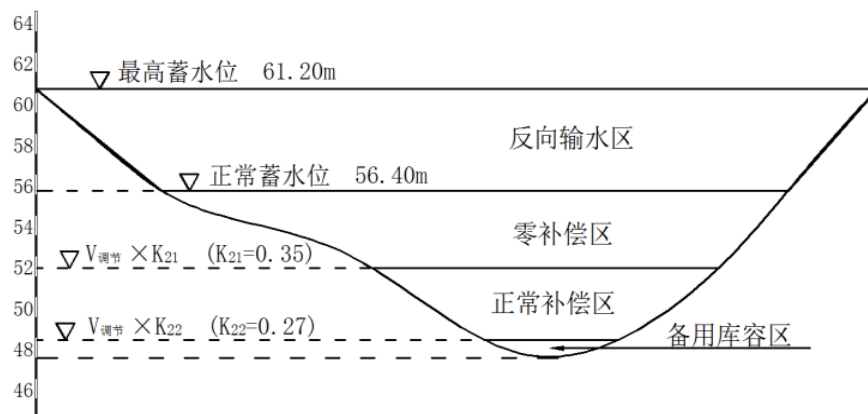


图 4.4 反向调蓄工程启用后大宁水库分区图

从模型分析成果可以看出,在不考虑大宁水库防洪需求的情况下,北京市供水保障率达到 100%,而且此时富余的水量经水库调蓄后可蓄至密怀水源区。随

着南水北调来水的增加,反向调蓄的水量也随之增加,密云水库的供水量随之减少(如表 4.3 所示)。但由于反向调蓄会产生泵水成本,因此随着南水北调来水的增加,泵水成本也会随之增加(如表 4.5 所示)。

表 4.3 各方案不同典型年各水源供水量

(单位: 亿 m^3)

年份	南水北调来水	反向调蓄		密云水库供水	
		基本方案	考虑防洪	基本方案	考虑防洪
最小来水年	3.31	0.00	0.23	6.74	6.95
枯水年	7.72	0.89	1.02	3.45	3.60
平水年	9.95	1.65	1.66	2.02	2.06
丰水年	11.63	2.38	2.36	1.05	1.05
最大来水年	13.73	3.43	3.40	0.03	0.04

(2) 考虑大宁水库防洪需求的反向调蓄方案

由于大宁水库防洪需要,根据其汛期调度规则,水库在汛期需要空库度汛,即汛期库水位需降至 48m 高程。此时大宁水库完全充当滞洪水库的功能,在汛期的可调蓄能力降为 0。因此在南水北调来水增加的情况下,反向调蓄的水量也会随之增加。而密云水库供水水量随着南水北调来水的增加而减少(如表 4.3 所示)。

通过模型研究发现,考虑大宁水库防洪后,在确保供水保证率 100% 的目标的情况下,由于大宁水库受汛限水位静态控制的原因而丧失调蓄功能,系统会发生弃水情况,弃水量在平水年最大可达 1388.19 万 m^3 (见表 4.4),弃水过程主要发生在从汛前腾库迎汛开始至汛期结束(见图 4.5),水库调蓄能力最低的时间段。此时富余南水只能通过反向调蓄存蓄于密怀水源区,超过反向调蓄输送能力的部分只能被弃掉。

表 4.4 考虑防洪时各个典型年弃水情况

考虑防洪方案	弃水总量 (万 m^3)	弃水天数 (天)
最小来水年	1030.80	20
枯水年	580.01	29
平水年	1388.19	16
丰水年	0	0
最大来水年	0	0

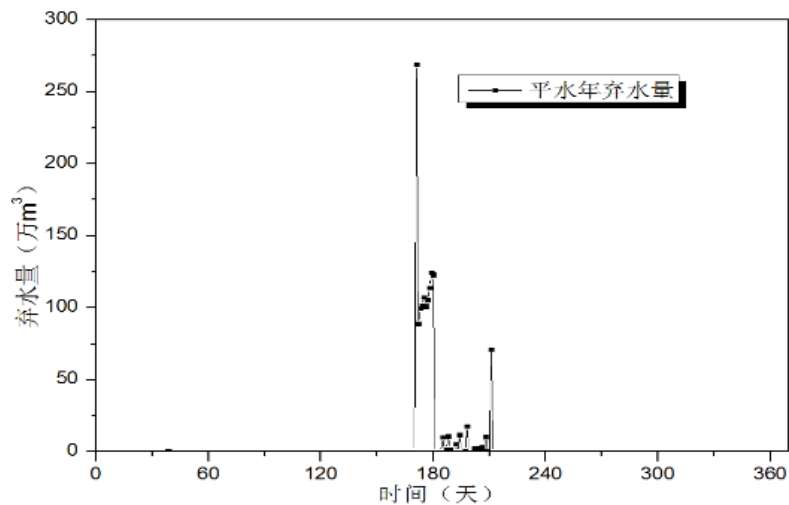


图 4.5 考虑防洪方案弃水过程线图（平水年）

4.2.3 大宁水库动态控制效益分析

根据上述分析出的调度水量，使用公式（4.11）对考虑大宁水库防洪需求的反向调蓄方案和不考虑大宁水库防洪需求的反向调蓄方案进行调度成本分析可以得出每个典型年的调度成本（见表 4.5）。

考虑大宁水库防洪和不考虑大宁水库防洪两个边界条件下，利用日尺度多水源联合调度模型对南水枯、平、丰、最大、最小等典型来水年的系统用水成本进行分析，可以发现在满足供水保证率 100% 目标的情况下，当考虑大宁水库防洪边界的情况下，系统会产生弃水，有时高达每年一千多万方，按照南水北调来水的口门水价 3 元/m³ 计算，弃水成本最高可高达 4165 万元；反向调蓄水量及泵水成本随着南水北调来水的增加而增加，在考虑大宁水库防洪边界的情况下，反向调蓄泵水成本将较不考虑大宁水库防洪边界时增加 100~500 万元；在考虑大宁水库防洪边界的情况下总的系统调度成本最高可增加 4283 万元。

而在大宁水库实现汛限水位动态控制后，汛期水库可蓄水至正常蓄水位，即相当于不考虑防洪边界的情况。此时可为北京市水源调度系统降低最高达 4000 万元的成本。

表 4.5 启用反向调蓄工程方案和考虑防洪方案不同典型年调度成本
(单位: 万元)

年份	弃水成本		反向调蓄成本		总成本	
	启用反向 调蓄工程	考虑防洪	启用反向 调蓄工程	考虑防洪	启用反向 调蓄工程	考虑防洪
最小来水年	0	3092	0	543	0	3635
枯水年	0	1740	1888	2214	1888	3954
平水年	0	4165	3507	3625	3507	7790
丰水年	0	0	5082	5229	5082	5229
最大来水年	0	0	7305	7515	7305	7515

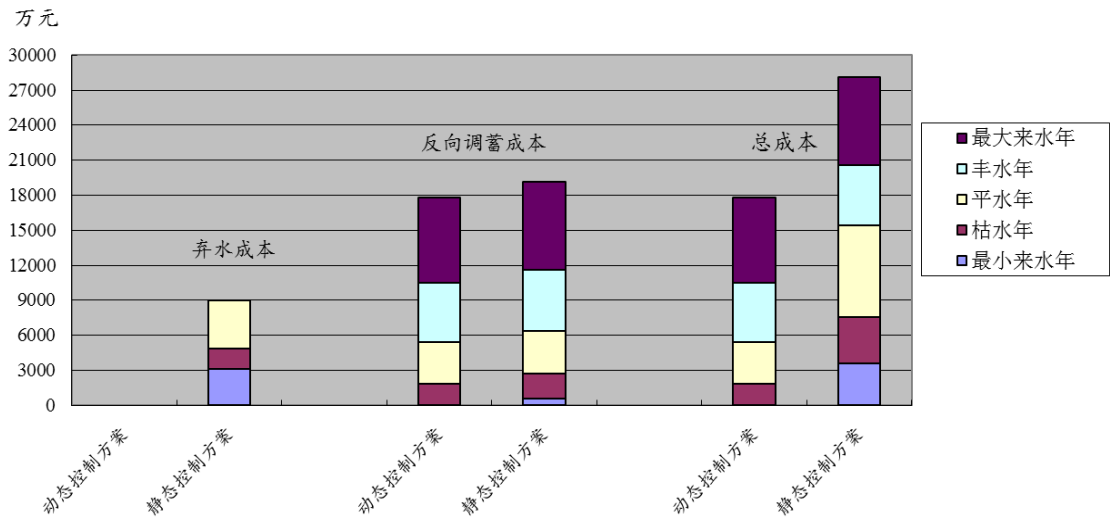


图 4.6 动态控制方案和静态控制方案不同典型年调度成本对比图

4.3 本章小结

本章主要研究了水库汛限水位动态控制方案的风险及收益问题。论文论述了风险内涵，分析了影响水库安全的风险因素，将预报信息误差作为主要风险源进行研究。进而经过对各种分析方法的对比，确立了极限风险率作为衡量和判断风险的主要指标，依据当下行业通用的风险评价指标对量化结果进行评价，可确定出各决策方案的可靠程度，同时针对风险提出一系列切实可行的应对措施。根据计算求得水库汛期正常蓄水位 56.4m 时在现有的预报水平下该控制方案对应的 $p_f = 0$ ，这就说明利用预蓄预泄法对汛限水位进行动态控制可安全地实现汛期正常蓄水。

根据清华大学多水源联合调度模型的研究分析表明不考虑大宁水库防洪时，北京市多水源联合调度模型可以很好地满足不缺水不弃水的目标^[49]。而考虑大

宁水库的防洪调度时会发生弃水,而且会使密云水库供水量和系统运行成本增加,增加幅度较大。反向调蓄水量及泵水成本随着南水北调来水的增加而增加,在考虑大宁水库防洪边界的情况下,反向调蓄泵水成本将较不考虑大宁水库防洪边界时增加 100~500 万元;在考虑大宁水库防洪边界的情况下总的系统调度成本最高可增加 4000 万元。如果水库汛限水位实现动态控制,可在汛期实现常水位蓄水,较原有的静态汛限水位控制来说则会减少因考虑大宁水库防洪而增加的弃水成本和反向调蓄成本,此时可为北京市水源调度系统降低最高达 4000 万元的成本。同时由于大宁水库汛期调蓄功能的充分发挥,进一步提高北京市的供水保障体系的可靠性。

第5章 总结与展望

5.1 总结

水库汛限水位的动态控制可以优化水库水资源调度模式,在不降低水库调度运行安全的前提下,可有效提高水资源的利用效率,协调发挥水库的兴利和减灾的功能。论文第二章、第三章主要介绍了汛限水位动态控制的方法和动态控制过程中风险分析的理论知识及计算方法。第四章着重采用应用较为成熟和广泛的“预蓄预泄”分析方法对大宁水库的汛限水位动态控制决策值进行了计算,得出以下成果:

(1)大宁水库汛限水位可抬高至57m高程。此时在没有大到暴雨的情况下,可为水库多蓄1993万 m^3 的调蓄量,按照北京市286.4万 m^3 的日需水量,在干线故障的情况下单独依靠大宁水库可为北京市提供7天的供水量,将为干线应急抢修争取到宝贵的时间。

(2)利用降雨预报信息时,虽然对与大宁水库汛限水位动态控制相关的大雨及以上量级降雨预报精度的研究较少,但水库汛限水位动态控制域上限值确定时,以实际降雨发生后洪峰到达大宁水库的最短时间而非24小时降雨预报时间作为对有效预泄时间构成部分,因此现有大雨预报信息的精度对汛限水位动态控制方案的可信度影响不大。

(3)在现有预报条件下,充分考虑降雨和洪水预报过程中发生误报、漏报等情况,大宁水库汛期常水位蓄水的极限风险率 $p_f=0$,说明运用降雨和洪水预报进行大宁水库汛限水位动态控制的方法是安全可行的。

(4)如果水库汛限水位实现动态控制,可在汛期实现常水位蓄水,较原有的静态汛限水位控制来说则会降低因考虑大宁水库防洪而增加的补水成本和反向调蓄成本。

5.2 展望

论文在对汛限水位动态控制方案的分析中还存在不足之处,需要经过水库的实际运行继续总结优化。

(1)论文汛限水位动态控制的分析只采用了“预蓄预泄”作为分析方法,较为单一,需在今后的工作中采用其他多元的分析方法加以分析和对比印证,以求得更为科学的决策依据。

(2) 水库建成以来未经历实际洪水的考验, 水库的洪水预报方案尚不够完善, 随着水库的运行及实际雨水情资料的积累, 不断完善洪水预报方案及运行方案, 为汛期的运行决策提供更为精准安全的指导。

(3) 在风险的分析中, 只以降雨和洪水预报作为主要因子, 在水库汛期调度过程中还存在着许多客观或者主观方面的其他影响因子, 其对动态控制安全性的影响也是极为显著的, 因此在今后的研究中应该不断总结调度运行经验, 在风险分析中采用多因子分析方法, 为水库的调度运行决策给出更为安全可靠的调度运行方案。

参考文献

- [1] 高训宇, 郑建华, 卢静, 等. 北京市水资源结构变化及其驱动力分析[J]. 北京水务, 2008(5):10-13.
- [2] 张彤. 南水北调中线工程对北京市供水风险初探[J]. 北京水利, 2002(006):13-15.
- [3] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 水库汛限水位确定方法评述与展望[J]. 水力发电, 2005,31(1):66-70.
- [4] 郭生练. 水库调度综合自动化系统[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [5] US Army Corps OF Engineers. HEC-5, simulation of flood control and conservation systems, User's manual version 8.0[M]. Hydrologic Engineering center, October, 1998.
- [6] 辽宁省水利厅. 防洪调度新方法及应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 2007.
- [7] 大连理工大学, 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 水库防洪预报调度方法及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [8] 胡四一, 高波, 王忠静, 等. 海河流域洪水资源安全利用-水库汛限水位的确定与运用[J]. 中国水利, 2002, (10):105-108.
- [9] 邱瑞田, 王本德, 周惠成. 水库汛期限制水位控制理念与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1):68-72.
- [10] 王本德, 周惠成, 王国利. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [11] 孙秀玲, 曹升乐. 水库动态汛限水位过程线研究[J]. 水库管理技术, 1996, (6):9-11.
- [12] 曹永强, 倪广恒, 王本德, 等. 利用年内洪水统计特性计算设计洪水和分期汛限水位新方法[J]. 大连理工大学学报, 2005, 5(5):740-744.
- [13] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4):496-503.
- [14] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 基于预报及库容补偿的水库汛限水位动态控制研究[J]. 水文, 2006, 26(6):11-16.
- [15] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2):22-28.
- [16] 万俊, 陈惠源. 考虑预报预泄时白盆珠水库汛期蓄水运用方式研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1):10-13.
- [17] 张百川. 水文预报在梅山水库汛期分期蓄洪控制中的运用[J]. 大坝与安全, 2003, (5):14-15.
- [18] 刘子慧, 吴泽宇. 改善丹江口水库防洪限制线探讨[J]. 人民长江, 2001, 32(9):18-20.

- [19] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 水库汛限水位实时动态控制模型研究[J]. 水力发电, 2005, (1): 8-11.
- [20] 罗高荣. 水利工程经济评价分析方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [21] Alferd H S, Wilson H tang. Probality Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II, Decision, Risk and Reliability, John Wiky and Sons, NewYork, 1984.
- [22] (美)德克斯坦 L. 等编. 吴媚玲等译. 水资源工程能够可靠性与风险[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [23] 曹永强. 汛限水位动态控制方法研究及其风险分析[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2003.
- [24] Hasam Yazieigil, Houek Mark H. The effects of risk and reliability on optimal reservoir design. Water Resources Ball, 1984, 20(3).
- [25] Yazicigil H, Houck M H, Toebe G H. Daily operation of a multipurpose reservoir systems[J]. Water Resources, 1983, 19(3):727-738.
- [26] Anselmo V, Galeati G, Palmirei S, et al. Flood risk assessment using a integrated hydrological and hydraulic modeling approach: a case study [J]. J Hydrol, 1996, 175:533-554.
- [27] 董前进, 曹广晶, 王先甲, 等. 水库汛限水位动态控制风险分析研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2006, 29(3):85-89.
- [28] Bouma J J, Francois D, Troch P. Risk assessment and water management [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20:141-151.
- [29] Shin H J, Jung Y H, Kim T, et al. Uncertainty analysis of the risk of failure for generalized logistic distribution[C]. KABBES K C. Proceedings of the World Environment and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habit. Florida: ASCE, 2007.
- [30] 冯平, 韩松, 李健. 水库调整汛限水位的风险效益综合分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 451-456.
- [31] 冯平, 韩松. 提高水库汛限水位的防洪风险分析[J]. 天津大学学报, 2007, 40(5): 525-529.
- [32] 冯平, 王仲珏, 刘增明. 长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J]. 水利学报, 2007, 38(11):1388-1392.
- [33] 黄强, 沈晋, 李文芳, 等. 水库调度的风险管理模式[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14 (3):230-235.
- [34] 黄强, 苗隆德, 王增发. 水库调度中的风险分析及决策方法[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(4):6-10.
- [35] 傅湘, 纪昌明. 水库汛期调度的最大洪灾风险率研究[J]. 水电能源科学, 1998 年第 6 期.
- [36] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强. 水库洪水调度中的风险分析方法[J]. 水文, 2001, 21(3):1-3.

- [37] 王本德, 梁国华, 程春田. 防洪实时风险调度模型及应用[J]. 水文, 2000, 20(6):4-8.
- [38] 周惠成, 王本德, 王国利, 等. 水库汛限水位动态控制方法研究[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2006.
- [39] 郭生练, 刘攀. 建立水库汛限水位动态控制推进机制的建议[J]. 中国水利, 2008, 9:1-3.
- [40] 刘攀, 郭生练, 李响, 等. 基于风险分析确定水库汛限水位动态控制约束域研究[J]. 水文, 2009, 29(4):1-5.
- [41] 张改红, 周惠成, 王本德, 等. 水库汛限水位实时动态控制研究及风险分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1):51-55.
- [42] 周惠成, 李伟, 张弛. 水库汛限水位动态控制方案优选研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4):27-32.
- [43] 冯平, 徐向广, 温天福, 等. 考虑洪水预报误差的水库防洪控制调度风险分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(3):47-51.
- [44] 范子武, 姜树海. 水库汛限水位动态控制的风险评估[J]. 水利水运工程学报, 2009, (3):21-27.
- [45] 向立云. 洪水资源与洪水资源化刍议[J]. 中国水利水电科学研究院院报, 2000, (1).
- [46] 北京市永定河管理处. 永定河水旱灾害[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [47] 中国南水北调工程建设委员会办公室. 北京市南水北调配套工程总体规划[Z]. 北京市: 中国水利水电出版社, 2003.
- [48] 北京市永定河防汛指挥部办公室. 北京市永定河防洪预案汇编[Z]. 2014.
- [49] 北京市水务局, 北京市水利规划设计研究院, 清华大学, 北京市水文地质工程地质大队, 北京市水利科学研究所. 南水北调来水与当地水资源实时联合调度关键技术研究技术总结报告[R]. 2011.
- [50] 曹永强, 殷峻暹, 胡和平. 水库防洪预报调度关键问题研究及应用[J]. 水利学报, 2005, (1): 51-53.
- [51] 水利部水利信息中心. 中华人民共和国行业标准 水文情报预报规范[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [52] 大连工学院水利系水工教研室, 大伙房水库工程管理局编. 水库控制运用[M]. 北京: 水利出版社, 1986.
- [53] 王本德, 周惠成. 可利用丰满气象台短期降雨预报时效分析[J]. 水利管理技术, 1999, (2).
- [54] 北京市水文总站. 官厅山峡区间洪水预报方案[Z]. 2015.
- [55] 王本德, 周惠成, 王国利, 等. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [56] 郭生练, 李响, 刘心愿, 等. 三峡水库汛限水位动态控制关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.

- [57] 张晋新. 水库汛限水位动态控制方法及风险研究[D]. 河海大学硕士学位论文, 2008.
- [58] 朱小凯. 汛限水位控制的极限风险分析[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2002.
- [59] 武鹏林, 霍德敏, 马存信, 等. 水利计算与水库调度[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [60] L.A.Zadeh, Fuzzy sets, Information and control. 1965(8).
- [61] 于川. 风险经济学导论. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [62] 王丽萍, 傅湘. 洪灾风险及经济分析[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [63] 施熙灿. 水利工程经济 (第三版) [M]. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [64] Can Shengle & Yun Ruan. Study on Reservoir's Limit Water Levels during Flood Season [M]. Proceedings of International Symposium on Hydrology Water Resources and Environment Development and Management in Southeast Asia and the Pacific, 1998.
- [65] 徐福. 南水北调来水调蓄工程方案的比较与建议[J]. 北京水务, 2012, (1):9.

致 谢

衷心感谢导师田富强副教授的悉心指导和帮助。导师严谨的科研态度、丰富的理论知识和实践经验让我受益终身。同时感谢导师两年来在学术和研究上给予我无私地指导，在生活上给予我温暖地关怀和帮助。

感谢刘大根教授的悉心指导和帮助。导师丰富的实践管理经验让我获益匪浅，同时感谢导师对我生活和学习的关怀和帮助。

在清华大学学习研究期间，承蒙水利系各位老师和同学的热心指导与帮助，不胜感激。

感谢班主任潘淑红老师，您对我们无微不至的关怀和指导我将一直铭记在心。

感谢工硕班所有的同学，感谢一路走来你们的关怀和帮助，让我感受到家庭般的温暖。

感谢我的父母和亲人，感谢你们对我温暖的关怀和支持，给了我前进的动力和勇气。

再次感谢一路走来，所有关心和帮助过我的老师、朋友和同学们，祝你们健康快乐。

胡晓斌

2016年3月于北京

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

