

Dynamic Control of Pankou Reservoir Water Level during Flood Season

Jiabo Yin¹, Song Liu², Yongguang Hu², Fuqiang Dong², Qiang Song²

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Bureau of Danjiangkou Water Resources Management, Danjiangkou

Email: JiaboYn@whu.edu.cn

Received: Sep. 23rd, 2014; revised: Sep. 29th, 2014; accepted: Oct. 7th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The determination of dynamic control domain of reservoir water level during flood season is one of the important issues for both reservoir operation and water conservancy. The flood control task and operation rule of Pankou reservoir has been changed several times, which leads to low flood control water level and waste water resources during flood season. According to current reservoir operation rules, the flood control water level is derived by the Runge-Kutta numerical solution method. It is shown that the flood control water level during main flood season can be increased from 347.6 m to 350.9 m without reducing flood prevention standards. Based on 6 h flow forecasting information and pre-discharge operation, the interval of dynamic control water level is estimated and ranges from 350.9 m - 351.5 m subjected to the constraints without increasing flood control risks. The dynamic control of water level during flood season can significantly increase comprehensive benefits of the Pankou reservoir.

Keywords

Flood Control Level, Forecasting and Pre-Discharge, Risk Analysis, Numerical Solution, Dynamic Control, Pankou Reservoir

潘口水库汛期水位动态控制研究

尹家波¹, 刘松², 胡永光², 董付强², 宋强²

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

作者简介: 尹家波(1992-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究工作。

²丹江口水利枢纽管理局, 丹江口
Email: JiaboYn@whu.edu.cn

收稿日期: 2014年9月23日; 修回日期: 2014年9月29日; 录用日期: 2014年10月7日

摘要

潘口水库从规划设计到建成发电, 防洪任务多次变更。目前设计的汛限水位较低, 造成汛期雨洪资源的浪费, 导致水库在汛后不能蓄水到正常蓄水位, 影响了兴利效益。本文建立了汛期水位动态控制模型, 包括汛限水位寻优模块、预报预泄法分析模块和风险分析模块。在汛限水位寻优模块中, 通过改进的龙格-库塔(Runge-Kutta)数值解法进行调洪演算, 结果表明水库主汛期的汛限水位可以由原来的347.6 m提高至350.9 m。采用预报预泄法分析模块和风险分析模块, 考虑6 h洪水预报信息, 计算求得潘口水库的汛限水位动态控制约束域为350.9 m~351.5 m。实现潘口水库汛期水位动态控制, 可以显著地提高综合利用效益。

关键词

汛限水位, 预报预泄, 风险分析, 数值解法, 动态控制, 潘口水库

1. 引言

在汛期, 水库水位保持在设计汛限水位运行, 以随时抵御可能来临的洪水; 当出库流量超过下游防洪安全泄量时, 水库开始拦蓄洪水使库水位抬高, 洪水过后, 库水位应尽快降低至原设计汛限水位以抵御下次洪水[1]。目前我国水库广泛应用的单一或分期汛限水位控制(也可称为汛限水位静态控制)是一种以不变应万变的防洪策略, 即无论来水情况如何, 汛期都保持在汛限水位以下运行, 以预留一定的防洪库容, 从而保证水库达到设计的防洪标准[2]。这种汛限水位静态控制方法, 往往导致水库在汛期不敢蓄水, 汛后又无水可蓄的局面, 造成了洪水资源的浪费[3]。开展水库汛期水位动态控制实践, 可在不降低水库防洪标准的前提下, 显著提高洪水资源利用效率[4]。随着水文气象预报技术的提高, 国内学者关于水库汛期水位动态控制的研究有了较快的发展。李玮等[5]开展了考虑预报误差规律的动态控制研究, 结果显示可提高隔河岩水库的发电效益; 刘攀等[6]建立了基于风险分析的水库汛期水位动态控制约束域模型, 并以三峡水库为研究背景, 探讨了水库汛期水位动态控制约束域问题; 陈炯宏等[7]开展了汛期水位动态控制防洪极限风险的研究。确定合理的汛期水位动态控制约束域, 是开展汛期水位动态控制的重要课题。(说明: 从2013年开始, 国内把“汛限水位动态控制”更名为“汛期水位动态控制”。)

本文以潘口水库为研究对象, 在不降低潘口水库自身防洪标准、不影响潘口水库在汉江中下游防洪系统中发挥作用的前提下, 针对潘口水库的自身特点和当前汛期调度存在的问题, 建立汛期水位动态控制模型, 以期进一步挖掘潘口水库的综合利用效益。

2. 潘口水库概况

潘口水库位于湖北省竹山县境内的堵河支流潘河口上游1.2 km的河段上, 下距竹山县城约13 km, 距下游的黄龙滩水库约107.7 km, 距堵河河口135.7 km, 距十堰市约162 km, 是堵河干流两河口以下梯级开发的“龙头”水库。控制流域面积为8950 km², 约占堵河流域面积的71.6%, 是堵河干流开发的控制性工程。潘口水电站于2007年10月28日正式开工, 2011年9月8日正式蓄水, 2012年2月首台机

组投产发电[8]。潘口水库具备年调节能力,水库的主要设计参数如表 1 所示,流域枢纽工程如图 1 所示。

潘口水库在可研设计阶段,为了提高下游黄龙滩大坝的防洪标准,在 355.00 m 以上设置了 2.11 亿 m³ 防洪库容,相应防洪高水位为 358.40 m。2008 年 7 月,国务院以国函[2008]62 号文批复了《长江流域防洪规划》,该规划提出按丹江口水库汛期调度方式工作,在遭遇 1935 年同大洪水(相当于百年一遇)时,丹江口水库超蓄防洪高水位 171.7 m 的库容为 3.6 亿 m³~3.9 亿 m³,要求潘口水库在主汛期预留 4 亿 m³ 的防洪库容,配合丹江口水库为汉江中下游防洪,于是在 355.0 m 以下设置了 4.0 亿 m³ 防洪库容,相应的汛限水位为 347.6 m。通过近几年的工程实际运用发现,按汛限水位 347.6 m 运行,常导致水库在汛期不敢蓄水,在汛后无水可蓄,大大降低了水库的兴利效益。原汛限水位设计方案中,对丹江口水库超蓄库容的估算较模糊,没有给出准确的超蓄水量值。另外,未考虑正常蓄水位以上的 2.11 亿 m³ 的防洪库容与正常蓄水位以下的 4.0 亿 m³ 防洪库容存在重复利用的空间,导致现有的汛限水位设置过低。即潘口水库在 355.0 m 以上为黄龙滩水电站预留的 2.11 亿 m³ 防洪库容,也可拦蓄进入丹江口水库的洪水。本文考虑这两部分防洪库容重复使用的可能性,依据潘口水库当前应用的汛期调度规则,开展主汛期的汛限水位和动态控制研究。

3. 研究方法和模型

本文提出的汛期水位动态控制模型的总体结构见图 2,主要包括:汛限水位寻优模块、预报预泄法分析模块和风险分析模块三部分。汛限水位寻优模块是依据当前的汛期调度规则,采用改进的四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)数值解法对潘口水库不同频率的设计洪水过程进行调洪演算,确定能满足大坝防洪安全的汛限水位值;预报预泄法分析模块是考虑有效预见期内的降雨、洪水预报,依据预见期内的泄流能力确定动态控制约束域上限水位的初始值;风险分析模块是通过风险分析,在低于动态域上限初始值

Table 1. Characteristic parameters of the Pankou Reservoir

表 1. 潘口水库特征参数表

死水位/m	正常蓄水位/m	汛限水位/m			防洪高水位/m	设计洪水水位/m	校核洪水水位/m	总库容(亿 m ³)	调节库容(亿 m ³)	防洪库容(亿 m ³)
		汛前期	主汛期	汛后期						
330	355	-	347.6	-	358.40	357.14	360.82	23.38	11.2	6.11



Figure 1. Project in drainage basin

图 1. 流域枢纽工程

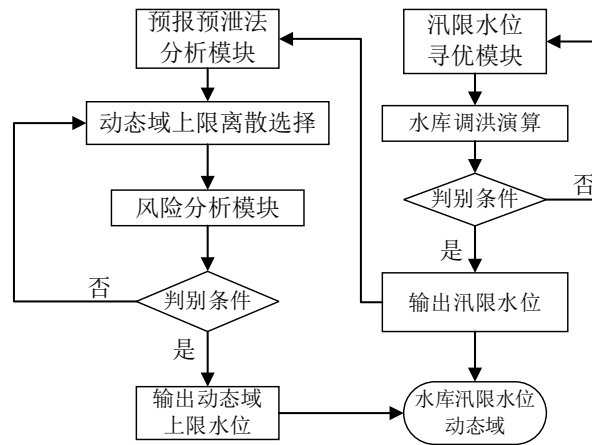


Figure 2. Flowchart of dynamic control water level during flood season for the Pankou reservoir

图 2. 潘口水库汛期水位动态控制模型的总体结构

的范围内，以不提高防洪风险率为前提，求得最优的动态域上限水位值。

3.1. 汛限水位寻优模块

对死水位与正常蓄水位之间范围的水位进行离散，将不同的离散水位设置为汛期起调水位，用不同频率的设计洪水过程进行调洪演算。对每一个频率的设计洪水过程，均可得到不同的离散水位所对应的最高调洪水位。某一起调水位下，最高调洪水位不超过对应频率的设计最高水位，则满足防洪要求。选取满足防洪要求的最高起调水位，为汛限水位，并将它作为动态域下限水位。

采用改进的四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)数值解法对潘口水库进行调洪演算。文献[8]中运用龙格-库塔解法的实质是对如下微分方程式进行求解，即：

$$dV(Z)/dt = I(t) - q(Z) \quad (1)$$

式中： $V(Z)$ 为库水位为 Z 时的库容， m^3 ； Z 为时间 t 的函数， m ； $I(t)$ 为 t 时刻的入库流量， m^3/s ； $q(Z)$ 为库水位为 Z 时泄水建筑物的泄流能力， m^3/s ；可以在水位~泄流量关系曲线上查得。

实际调度中，水库要满足下游防洪要求，同时要承担整个流域防洪体系的任务，水库的允许泄流量，在某些时段还要受其他水库的影响。为此，本文引入考虑时间 t 的泄流函数，提出改进的四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)数值解法，如下：

$$dV(Z)/dt = I(t) - Q(Z, t) \quad (2)$$

$$Q(Z, t) = \text{Min}(q(Z), q_d(Z), q(t)) \quad (3)$$

式中： $q_d(Z)$ 为库水位为 Z 时为保证下游防洪安全的允许最大泄流量； $q(t)$ 为时间为 t 时，由于水库间协调调度等因素的允许最大泄流量； $Q(Z, t)$ 为库水位为 Z ，时间为 t 时的实际泄量。

若已知第 n 时段的平均入库流量为 \bar{I}_n ， n 时段初的入库流量为 I_{n-1} ，水位为 Z_{n-1} ，库容为 V_{n-1} ，时段初的泄流量为 $Q(Z, t)$ ， n 时段末的入库流量为 I_n ，应用改进的四阶精度的 Runge-Kutta 数值解法求解式(2)，可得 n 时段末的库容为：

$$V_n = V_{n-1} + (h_n/6) [k_1 + 2(k_2 + k_3) + k_4] \quad (4)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = I_{n-1} - Q(Z(V_{n-1}), t-1) \\ k_2 = \bar{I}_n - Q(Z(V_{n-1} + k_1 h_n / 2), t) \\ k_3 = \bar{I}_n - Q(Z(V_{n-1} + k_2 h_n / 2), t) \\ k_4 = I_n - Q(Z(V_{n-1} + k_3 h_n / 2), t) \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中： $Z(V)$ 为库容 V 对应的库水位； h_n 为第 n 时段的时段长； $n=1,2,\dots,N$ ； N 为调洪计算的总时段数。

3.2. 预报预泄法分析模块

预报预泄法是在洪水调度中充分考虑降雨及洪水预报信息，提前泄流，为即将入库的洪水腾出防洪库容，其基本思想是：在洪水预见期内有多大泄流能力就将汛期水位向上浮动多少[9]。本文以汛限水位寻优模块获得的汛限水位，作为下限水位，建立预报预泄法分析模型，求得汛期水位动态域的上限水位。预报预泄法分析模型如下：

目标函数：

$$\max Z'_u = (Z_d + \Delta Z_1) \quad (6)$$

约束条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Z_1 \leq f(W_{out} - W_{in}) \\ W_{out} = Q_c \cdot T_c \\ T_c = t_1 - t_2 \\ W_{in} = \sum_{t_2}^{t_1} I(t) \Delta t \end{array} \right\} \quad (7)$$

式中： Z'_u 为预报预泄法推求的动态域上限值； Z_d 为汛限水位； ΔZ_1 为在确定的汛限水位 Z_d 以上浮动增值； $f(*)$ 为预泄量对应的水库水位转换函数； W_{out} 为有效预泄时间内的下泄洪量； W_{in} 为有效预泄时间内的入库洪量； Q_c 为下游允许的安全泄量； T_c 为有效预泄时间； t_1 为极限预泄时间； t_2 为信息传递时间、预报作业时间、决策时间、开闸时间； $I(t)$ 为入库流量过程。

3.3. 风险分析模块

水库汛期水位动态控制属于实时调度的范畴，本质是以不降低水库的防洪标准为前提的风险调度。如图3所示，将整个动态控制划分为涨水阶段预泄、次洪中原定防洪规则调洪以及退水阶段回充三个阶段。

涨水阶段的预泄调度为：假定当前时刻为 t_1 ，预见到时刻 t_2 将发生超过下游安全泄量 Q_c 的入库洪水，

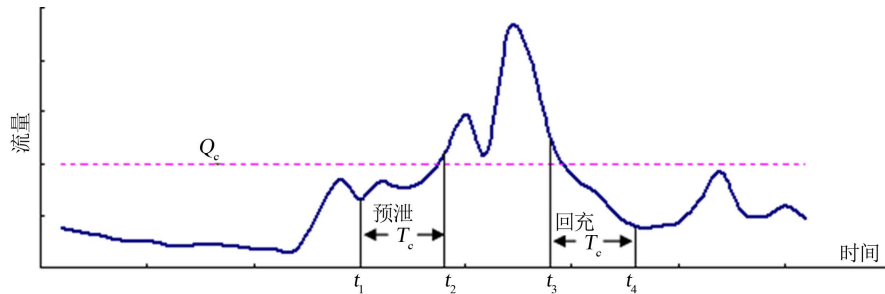


Figure 3. The pre-discharge and refill operation of reservoir

图3. 水库预泄和回充示意图

立即开始以安全泄量 Q_c 进行预泄, 至 $t_2 - 1$ 时刻将水库水位降低到 Z_e 。退水阶段的回充调度为: 如果当前时刻为 t_3 , 预见 $t_3 \sim t_4$ 的入库流量都在 Q_c 以下, 则可以在满足发电航运等其他效益的基础上进行水库回充。

本文采用汛限水位寻优模块求得的汛限水位 Z_d , 以预报预泄法分析模块得到的动态域上限值 Z'_u 作为边界条件, 对 $[Z_d, Z'_u]$ 范围内的水位状态进行离散, 从风险分析的角度建立动态域上限寻优模型。以上限水位最大为目标函数:

$$\max Z_{up} = f(V_u) \quad (8)$$

约束条件有:

$$R_p(V_u) \leq R_p^0 \quad (9)$$

$$f'(Z_d) \leq V_u \leq f'(Z'_u) \quad (10)$$

$$V_e = V_u + \int_t^{t+T_c} I(t) dt - Q_c \cdot T_c = V_u + \sum_{i=t}^{t+T_c} I_i \times \Delta t - Q_c \cdot T_c \quad (11)$$

$$R_p(V_u) = \int R_p(V_e) P(V_e) dV_e = \sum_{i=1}^n P(V_{e,i}) R_p(V_{e,i}) \quad (12)$$

上述公式中: Z_{up} 为动态域上限水位值; V_u 为库容; $f(\cdot)$ 为水位~库容关系函数; $R_p(V_u)$ 为上限水位对应的库容为 V_u 时, 遇频率 P 洪水的风险率; R_p^0 为汛限水位为 Z_d 时, 按照原调度方法遇频率 P 洪水的风险率; $f'(\cdot)$ 为库容~水位关系函数; 有效预见期长度为 T_c 。式(11)中的 V_e 为根据预泄能力控制法, 上限水位对应的库容 V_u 降低至调度末的库容; I_i 为第 i 时段的入库流量。式(12)中的 $P(V_e)$ 为以 V_u 为上限时, 根据各次历史实测洪水计算, 得到的水库预泄调度末水位 V_e 的经验频率曲线; $V_{e,i}$ 为实测洪水的第 i 次调度末水位; n 为场次洪水个数; $R_p(V_e)$ 为水库由调度末水位 V_e 起调, 遇频率 P 洪水的风险率。

4. 计算结果分析

采用 1950~2003 年共 54 年的径流资料, 选取潘口坝址发生实测最大洪水的 1980 年 6 月, 和汉江干流和堵河发生洪水遭遇的 1975 年 8 月为典型洪水过程, 依据潘口汛期的调度规则, 主要是依据丹~碾区间的预报流量和潘口的入库流量决策水库的防洪蓄水时机, 分别采用不同调度方式¹。以 0.05 m 为步长, 将可行域的汛限水位依照汛限水位寻优模块所述进行逐步搜索, 并模拟计算, 图 4 为给出了潘口水库的调洪高水位与汛限水位的变化曲线。

如图 4 所示, 350.9 m 开始起调时, 遇千年一遇洪水, 水库最高调洪水位为 357.13 m, 没有超过设计洪水位 357.14 m; 遇万年一遇洪水, 水库最高调洪水位为 360.79 m, 没有超过校核洪水位 360.82 m。因此, 潘口水库主汛期的汛限水位取 350.9 m, 相较于原设计方案, 增加了 1.704 亿 m^3 。本文认为原设计方案未考虑潘口水库为黄龙滩水库预留的 2.11 亿 m^3 防洪库容与给丹江口预留的 4 亿 m^3 防洪库容可重叠使用的因素, 导致汛限水位的设计值偏低。

堵河潘口以上洪水主要由西源泗河来水和南源官渡河来水组成。泗河水文控制站新洲至潘口的洪水传播时间约 5 h, 官渡至潘口的洪水传播时间约 6 h。根据降雨径流资料分析, 潘口以上流域降雨后产、汇流时间大约为 6~11 h²。潘口水库水雨情预报系统完备, 洪水预报系统经过 2012 年~2013 年汛期的试运行, 并进行了完善, 目前运行正常。根据 1980 年~2007 年 28 年实测降水量成果, 选取场次降水 70 次进

¹长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 湖北省堵河潘口水电站 2014 年度汛期调度运用计划[R]. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2014, 51-52.

²中南勘测设计研究院. 湖北省堵河潘口水电站可行性研究报告[R]. 长沙: 中南勘测设计研究院, 2006, 2-61.

行预报检验, 预报项目的精度评定用合格率表示, 降雨径流关系合格率为 95.7%。潘口水库 6 h 内的坝址洪水预报误差合格率 $QR = 87.5%$, 达到国家水情预报规范的甲级标准, 预报精度满足汛期水位动态控制的要求。

主汛期平均入库流量为 $304 \text{ m}^3/\text{s}$, 为安全考虑将主汛期入库流量定为 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。主汛期按照原防洪调度规则进行调度, 为了充分挖掘汛限水位的潜力, 本文采用 20 年一遇洪水时的下泄流量 $6386 \text{ m}^3/\text{s}$, 本文取 $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。开闸时间和决策时间等延误时间取 0.5 h。依照预报预泄法分析模块的方法, 求得动态域上限值为 352.9 m。

以 350.9 m 作为起调水位进行调洪演算, 得到原定防洪标准特征值, 作为主汛期需要满足的防洪风险率标准。以 0.05 m 为步长, 分别对 350.9 m~352.9 m 范围内的水位进行离散, 各设计洪水进行调洪演算, 以不超过年防洪设计标准为依据, 可得到汛期水位 - 防洪风险率关系图, 如图 5、图 6 所示。依照风险分析模块的计算方法, 得到的汛期水位动态控制域结果如表 2 所示。

由图 5 和图 6 可知, 汛期水位提高时, 防洪风险率可能保持不变, 但它们呈单调递增关系。由表 2 可知, 利用 6 h 洪水预报预见期, 汛期水位动态控制上限若为 351.5 m, 可以 100% 预泄至分期汛限水位 350.9 m; 上限若为 351.6 m, 预泄至 350.9 m 的概率为 94.3%。根据风险控制的边界条件, 6 h 洪水预报预见期的动态控制域上限取 351.5 m。

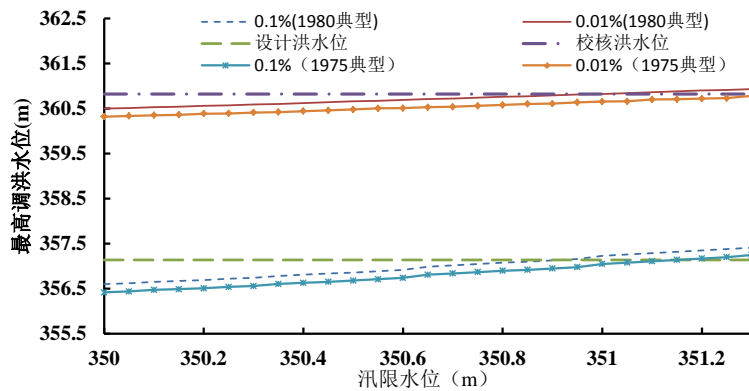


Figure 4. Relationship between the highest flood routing level and flood control water level of Pankou reservoir

图 4. 潘口水库的最高调洪水位 - 汛限水位关系曲线

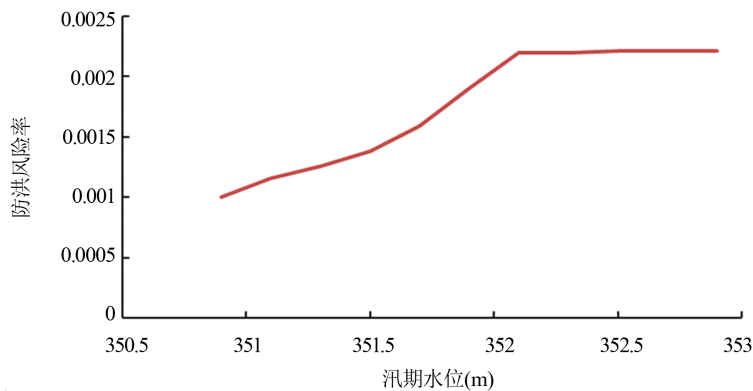


Figure 5. The relationship between water level and flood control risk more than 0.1% during main flood season

图 5. 主汛期水位超年 0.1% 标准的防洪风险

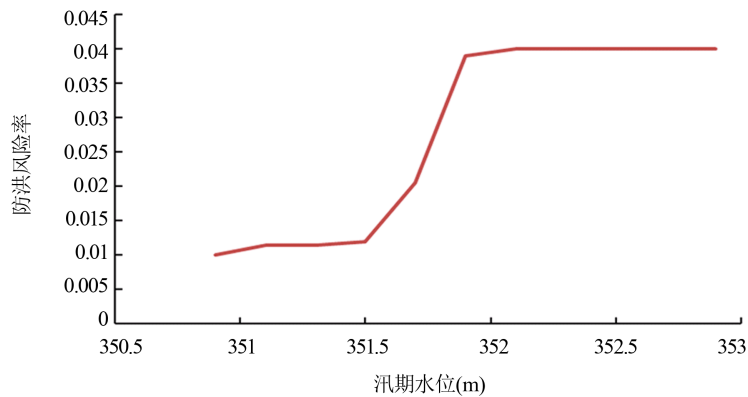


Figure 6. The relationship between water level and flood control risk more than 1% during main flood season

图 6. 主汛期水位超年 1% 标准的防洪风险

Table 2. Dynamic control water level results during main flood season

表 2. 主汛期水位动态控制结果

方案	上限(m)	下限(m)	预泄至下限的概率 (%)	超 0.1% 标准 风险率	超 1% 标准 风险率	超 2% 标准 风险率	超 5% 标准 风险率
分期方案	350.9	350.9	—	0.001	0.01	0.02	0.05
1	351.1	350.9	100	0.001	0.01	0.02	0.05
2	351.3	350.9	100	0.001	0.01	0.02	0.05
3	351.5	350.9	100	0.001	0.01	0.02	0.05
4	351.6	350.9	94.3	0.00116	0.014	0.0227	0.0515
5	351.7	350.9	89.25	0.00126	0.0143	0.0256	0.0529

5. 结语

本文建立了水库汛期水位动态控制模型，采用改进的四阶龙格-库塔数值解法调洪演算推求汛限水位；考虑 6 h 的预报信息，由预报预泄分析模块和风险分析模块，求解得到潘口水库汛期水位动态域为 350.9 m~351.5 m。关于潘口水库、黄龙滩水库和丹江口水库的联合调度问题，有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范(SL-2006)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. Ministry of Water Conservancy of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects (SL 2006). Beijing: China Water Resources & Hydropower Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 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, 31(1): 8-11. LIU Pan, GUO Shenglian, WANG Caijun, et al. Real-time dynamic control model for reservoir flood limit water level operation. Water Power, 2005, 31(1): 8-11. (in Chinese)
- [3] 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. QIU Ruitian, WANG Bende and ZHOU Huicheng. New idea for controlling the limited elevation of reservoirs in the flood season. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 68-72. (in Chinese)
- [4] 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. GUO Shenglian, LI Xiang, LIU Xinyuan, et al. Study on key technique of dynamic control of flood limited water level in Three Gorges Reservoir. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 李玮, 郭生练, 刘攀等. 水库汛限水位动态控制方法研究及其应用[J]. 水力发电, 2006, 32(3): 8-12.

- LI Wei, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. A reservoir dynamic flood limited water level control method based on real-time forecasting information. *Water Power*, 2006, 32(3): 8-12. (in Chinese)
- [6] 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.
LIU Pan, GUO Shenglian, LI Xiang, et al. Deriving the interval of reservoir dynamic flood control water level based on risk analysis. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(4): 1-5. (in Chinese)
- [7] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀等. 汛限水位动态控制的防洪极限风险分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 5(6): 38-40, 59.
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Extreme risk analysis of flood season limited water level. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 5(6): 38-40, 59. (in Chinese)
- [8] 梁犁丽, 袁林山, 胡宇丰等. 潘口水库调蓄作用对黄龙滩大坝的防洪安全影响[J]. *水电能源科学*, 2003, 31(3): 58-61, 231.
LIANG Lili, YUAN Linshan, HU Yufeng, et al. Impact of Pankou reservoir operation on flood control safety of Huanglongtan dam. 2003, 31(3): 58-61, 231. (in Chinese)
- [9] 王国利, 梁国华, 王本德等. 基于预报信息和泄流能力约束的库水位动态控制方法与应用[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(4): 28-31, 38.
WANG Guoli, LIANG Guohua, WANG Bende, et al. Dynamic operation of reservoir normal elevation based on rainfall forecast and constrained pre-discharge capacity and its application. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4): 28-31, 38. (in Chinese)