文章编号：1000-8608(2010)01-0123-08

确定梯级水库联合防洪预报调度方式优化方法研究

张改红，王国利*，张　静，田　力

（大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连　116024）

摘要： 针对梯级水库拟定联合调度方式的复杂性，将常规优化调度和预报调度规划方式相融合，提出一种确定梯级水库联合预报调度方式的优化方法. 首先，对于选定的调度目标，采用优化手段寻求梯级水库不同频率设计洪水的最优联合调度方式，并综合分析归纳最优泄流过程的特点；其次，对各库的预报调度潜力进行分析，结合最优泄流过程的特点选择预报判别指标，在不考虑预报误差的情况下拟定理想联合预报调度规则；最后，对预报判别指标的误差进行分析，在理想联合预报调度规则的基础上制定满意的联合预报调度规则. 将该方法应用于昭平台与白龟山梯级水库，结果表明此方法在一定程度上减少了确定梯级水库联合调度方式的复杂性，为库群防洪预报调度方式研究提供了新途径.

关键词： 梯级水库；优化调度；联合预报调度；预报流量

中图分类号： TV122　　**文献标志码：** A

0　引　言

对水库实施防洪预报调度，在保证防洪安全的前提下适当抬高汛限水位是实现洪水资源安全利用的有效方式之一. 目前已对碧流河、大伙房、白龟山、于桥等水库进行了以累积净雨为判别指标的防洪预报调度方式研究[1~4]. 但这些研究都仅限于单库，没有推广到库群. 鉴于此，文献[5]对观音阁、汤河水库采用常规调度方式，葭窝水库采用预报调度方式的库群联合预报调度进行了研究. 研究中考虑了观-葭区间与下游葭-汤-辽区间的多种洪水组合，但观音阁水库未设置防洪与兴利的共用库容而没有采取防洪预报调度方式，所以实质上仍属考虑下游防洪任务的葭窝水库单库预报调度方式研究. 可见，对于实际意义上的多库联合防洪预报调度方式研究，至今开展的工作还比较少. 而我国水库大多数都处于库群中，对水库群防洪预报调度方式进行研究具有一定的理论价值和实际意义.

水库防洪预报调度方式研究的核心任务是修改原设计的调度规则而拟定新的预报调度规则. 任何水库制定预报调度规则时，都需考虑自身的防洪任务、具体的泄流能力及洪水（与气象）预报水平. 对库群而言，不仅要考虑各库的上述约束，还需考虑上游水库的调度方式对下游水库的调度方式与防洪安全的影响及如何合理协调等问题. 可见，库群的联合预报调度方式研究虽以单库理论为基础，但较单库要复杂得多. 同时，新的满意预报调度规则一般通过对多个可行的调度规则方案进行优选而得，可行规则方案集的确定多采用试算法，决策者需具有丰富的调度经验，否则，制定可行规则时盲目性较大，工作复杂.

为了尽可能为库群联合预报调度方式的确定提供客观依据，从而简化其复杂性，本文将优化调度与规划调度方式相融合，提出一种确定梯级水库联合预报调度方式的优化方法，并以昭平台和白龟山梯级水库为例进行说明.

1　确定梯级水库联合预报调度方式的优化方法

防洪预报调度方式主要是通过利用前期的水文气象信息，改善原有规划的洪水判别条件和防

收稿日期： 2008-01-15；　**修回日期：** 2009-11-02.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50479056；50979011)；辽河流域水质水量优化调配技术及示范研究课题资助项目(2009ZX07208-010).
作者简介： 张改红(1977-)，女，博士；王国利*(1964-)，男，副教授，E-mail：wanggl@dlut.edu.cn.

洪调度方式，提前泄流，以期提高水库汛限水位，实现洪水资源的高效利用. 研究的核心任务是拟定满意的预报调度规则[6].

水库防洪调度规则是通过调节不同频率的设计洪水，求得相应的水位特征值后综合分析确定的，并可用于指导水库的实时防洪调度. 就统计学而言，不同频率的设计洪水代表了在实际中相应频率洪水可能发生的最不利情形. 若制定的调度规则能较好地调节这些设计洪水，则认为其是满意的调度规则. 对梯级水库，制定联合调度规则时涉及的关联因素较多，直接进行规则寻优比较困难. 而不同频率的设计洪水过程在调度方式规划设计时是已知的，对其进行优化调度研究相对容易. 因此，调度规则最优方案的拟定可以设计洪水的优化调度为基础进行. 由此本文提出确定联合防洪预报调度规则的优化方法，主要包括 3 个模块：优化调度模块、制定理想联合预报调度规则模块、制定满意联合预报调度规则模块. 总体框架如图 1 所示.

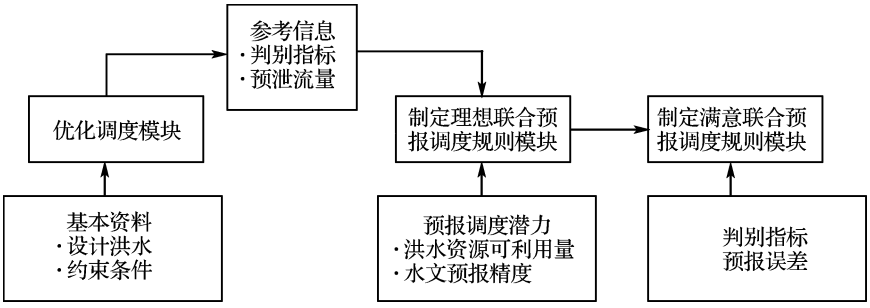


图 1 拟定联合防洪预报调度规则优化方法框架

Fig. 1 Framework for optimizing the joint operation rules with flood forecast information

1.1 优化调度

对不同频率设计洪水进行优化调度，主要目的是为制定预报调度规则提供参考依据，尽量高效地寻求可行方案.

汛期时，为了给后期防洪预留防洪库容，要求调度时占用的防洪库容越小越理想. 在此，以各库所需占用的最大防洪库容之和最小为目标寻求最佳联合泄流方式，具体计算模型如下：

目标函数

$$\min V = \min\left\{\sum_{i=1}^{n}\max_{t=0,1,\cdots,T}(V_i(t))\right\} \tag{1}$$

约束条件

(1) 水量平衡约束

$$V_i(t) = V_i(t-\Delta t) + \int_{t-\Delta t}^{t}[q_i^{\mathrm{in}}(t-\Delta t) - q_i(t-\Delta t)]\mathrm{d}t \tag{2}$$

(2) 关联平衡

$$q_{i+1}^{\mathrm{in}}(t) = q_{il}(t-t') + q_{i+1}^{qj}(t) \tag{3}$$

(3) 泄流能力约束

$$q_i(t) \leqslant Q_i^*(Z) \tag{4}$$

(4) 防洪标准约束

$$q_i(t) \leqslant Q_{ip}^* \tag{5}$$

$$Z_i(t) \leqslant Z_{ip}^* \tag{6}$$

(5) 非负约束

$$Z_i(t) \geqslant Z_{i0} \tag{7}$$

$$q_i(t) \geqslant Q_{i0} \tag{8}$$

式中：n 为水库数目；T 为洪水过程历时；V 为调节一场洪水各库所需占用的最大防洪库容之和；$V_i(t)$ 为 t 时刻水库 i 所占用的防洪库容；$q_i^{\mathrm{in}}(t)$、$q_i(t)$ 分别为 t 时刻水库 i 的入流和泄流量；t' 为水库 i 演进至下游水库入流断面的历时；$q_{il}(t)$ 为水库 i 以 $q_i(t)$ 经 t' 后演进至下游水库的流量；$q_{i+1}^{qj}(t)$ 为 t 时刻水库 i 与下游水库 $i+1$ 之间的区间流量；Q_i^* 为水库 i 在水位 Z 时的最大泄流能力；Q_{ip}^*、Z_{ip}^* 分别为水库 i 对应 p 设计洪水的泄量和库水位约束；$Z_i(t)$ 为 t 时刻水库 i 的水位；Z_{i0} 为水库 i 的汛限水位；Q_{i0} 为水库 i 的发电流量.

目前，最优化方法主要有线性规划法、非线性规划法、动态规划法、网络流规划法、逐次优化算法、遗传算法和微粒群算法等[7~9]. 本文借助遗传算法对不同频率的设计洪水进行优化调度. 遗传算法是一种高度并行随机搜索的自适应组合优化算法，在搜索过程中不易陷入局部极小，全局寻优能力强. 主要求解步骤如下：

(1) 进行初始化设置. 包括：种群大小取 100，

交叉概率取 0.95，变异概率取 0.95，以及各变量的边界约束条件.

(2)根据个体参数，生成上游水库的泄流变量，模拟下游水库相应的最优泄流方式，计算所需的最大防洪库容和.

(3)判断是否为最大迭代次数.若不是，计算个体适应度，选取前 s 个优秀个体，继续进行遗传、交叉、变异得到新个体，重复步骤(2)；若是，输出最优解，计算结束.

通过对不同频率的设计洪水进行优化模拟调度，求得相应的最优泄流过程，进而综合分析这些泄流过程的特点，为制定联合预报调度规则时选取判别指标及确定相应值提供依据.

1.2　制定理想联合预报调度规则

所谓理想联合预报调度规则是制定的预报调度规则不考虑实际调度时预报判别指标可能产生的误差，假定预报洪水过程与实际洪水过程完全吻合.防洪预报调度规则选取的判别指标通常是汇流预报的“洪峰流量”、产流预报的“累积净雨”或短期降雨预报的“晴雨”信息.这 3 类指标的信息预见期依次增长，但预报精度却依次降低，由此引起的调度风险可能相应逐渐增加.选取何种指标来实现在保证防洪安全的前提下增加效益，不同水库应根据具体情况而定.所选指标应遵循以下 3 个原则：一是预报精度满足规范要求；二是具有代表性和外包性，对所有洪水类型均适合；三是能灵敏识别最佳泄流方式的特点.

在制定联合预报调度规则时，考虑上游水库的泄流将与区间洪水汇合，形成下游水库的入库洪水，因而先上游水库再下游水库拟定联合调度规则，各库遵循从低级到高级标准洪水逐级调节的原则.具体的制定理想联合调度规则流程如图 2 所示.

在图 2 中，可行规则方案的优劣以其调节不同频率设计洪水的泄流过程与优化调度的相应值之间的贴近度表示，贴近度越大方案越优.贴近度的计算式如下：

$$\rho^{*}=\max\{\rho\}=\max\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\left[(R_{ip_k}^{\mathrm{f}})^2+(R_{ip_k}^{\mathrm{v}})^2\right]\right\} \tag{9}$$

$$R_{ip_k}^{\mathrm{f}}=1-\frac{\sum_{t=1}^{T}\{c_i[y_{ip_kc}(t)-y_{ip_k0}(t)]\}^2}{\sum_{t=1}^{T}[y_{ip_k0}(t)-\overline{y}_{ip_k0}]^2} \tag{10}$$

$$R_{ip_k}^{\mathrm{v}}=1-\frac{V_{ip_k}-V_{ip_k}^{*}}{V_{ip_k}^{*}} \tag{11}$$

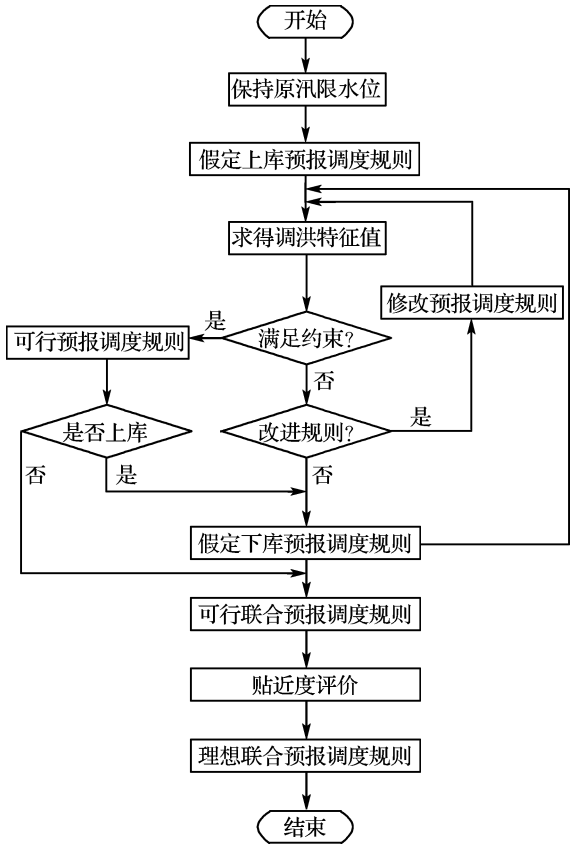


图 2　理想联合预报调度规则制定流程图

Fig. 2　Flowchart for making ideal joint operation rules with flood forecast information

其中 ρ 为根据调度规则和最佳泄流计算的贴近度；m 为规划的标准设计洪水频率总次数，如 0.01% 标准设计洪水对应的频率为 0.01%，次数为 1；p_k 为某一规划设计洪水对应的频率；$R_{ip_k}^{\mathrm{f}}$、$R_{ip_k}^{\mathrm{v}}$ 分别为水库 i 依据制定的联合预报调度规则调节 p_k 设计洪水与最佳泄流过程和所需最大防洪库容的贴近程度；$y_{ip_kc}(t)$ 为 t 时刻水库 i 依据制定的联合预报调度规则调节 p_k 设计洪水的泄流量；$y_{ip_k0}(t)$ 为 t 时刻水库 i 相应 p_k 设计洪水寻求的最佳泄流过程；$\overline{y}_{ip_k0}$ 为水库 i 相应 p_k 设计洪水最佳泄流过程的平均值；c_i 为水库 i 依据制定的联合预报调度规则调节设计洪水与最佳泄流过程的偏差程度惩罚系数，建议当偏差为负时，$0<c_i<1$，当偏差为正时，$1<c_i<2$，具体数值取决于水库 i 的泄流方式对下游控制点防洪安全的影响程度；V_{ip_k} 为水库 i 依据制定的联合预报调度规则调

节 p_k 设计洪水的所需最大防洪库容；$V^*_{ip_k}$ 为水库 i 对应的 p_k 设计洪水依据最佳泄流方式调节所需的最大防洪库容.

1.3 制定满意联合预报调度规则

制定联合预报调度规则的目的在于指导实时调度.在实际调度中，预报信息不可避免地存在预报误差.而理想联合预报调度规则没有考虑判别指标可能产生的预报误差，因而须对其进行修正.

通过对历史数据进行模拟预报，统计分析预报误差可能产生的范围，给理想联合预报调度规则的判别指标增加一定的安全余度.参照《水文情报预报规范》中对预报精度的要求，一般取预报指标的 20%相对误差对应值作为安全余度，若预报误差可能产生范围的边界值明显小于此值，则取边界值作为安全余度，即得满意的联合预报调度规则.

2 应用实例

2.1 研究背景

昭平台水库和白龟山水库是沙颍河漯河以西防洪工程体系的重要组成部分，昭平台水库位于白龟山水库上游 51 km 处，两者形成梯级水库.昭平台水库建成于 1959 年，控制流域面积 1 430 km^2，总库容 6.88×10^8 m^3，100 a 一遇洪水设计，1 000 a 一遇洪水校核，汛限水位 167.0 m，正常蓄水位 169.0 m.白龟山水库建成于 1960 年，流域面积 2 740 km^2，其中昭白区间控制流域面积 1 310 km^2，总库容 9.22×10^8 m^3，防洪标准为 100 a 一遇洪水设计，2 000 a 一遇洪水校核，汛限水位 102.0 m，正常蓄水位 103.0 m.

昭平台水库和白龟山水库的洪水预报方案精度较高，都达到了甲级水平，以 1998 年昭平台和白龟山水库的实际洪峰均大于 1 000 m^3/s 的一场洪水过程为例，昭平台水库洪量和洪峰的预报精度分别为 92%和 95%，白龟山水库的预报精度分别为 90%和 83%，可见两库的预报信息可靠性较高；且遥测系统运行稳定，为水库实施防洪预报调度提供了信息支撑.

目前昭平台水库和白龟山水库均采用常规调度方式运行.文献[10]对白龟山水库以累积净雨为判别指标的预报调度方式进行了研究，将汛限水位抬高至 102.60 m.经分析昭平台水库泄流方式对昭-白两库所需占有防洪库容的影响可知，对两库进行联合调度仍有效益潜力可挖.

基于两库原调度规划设计的防洪要求，为使联合防洪预报调度规则不增加额外的调度风险，要求不同频率洪水的调洪最高水位不超过原规划设计的相应值，最大泄流量满足下游防洪目标的要求.根据水库自身的设计标准及上下游的防洪目标，昭平台水库的约束条件为(1)上游退赔高程为调节 5%标准洪水不超过 174.80 m；(2)1%标准设计洪水的调洪最高水位不超过 177.60 m；(3)0.1%校核洪水的调洪最高水位不超 180.70 m；(4)由于白龟山水库的校核洪水位为 0.05%标准，在此将昭平台水库 0.05%标准洪水的调洪最高水位定为不超过保坝水位 181.0 m.

白龟山水库的约束条件为(1)下游防洪控制点沙河漯河防洪标准为 2%洪水，安全泄量 3 000 m^3/s；(2)1%洪水的调洪最高水位不超过 106.19 m；(3)0.05%洪水的调洪最高水位不超过 109.56 m.

2.2 昭-白梯级水库联合预报调度方式

2.2.1 优化调度 根据式(1)～(8)及昭-白梯级水库的具体约束条件分别对昭平台与白龟山水库同频率和昭-白区间与白龟山水库同频率两种地区组合的不同频率设计洪水进行寻优调度.昭平台与白龟山水库同频率组合时 20 a 一遇设计洪水的优化调度与常规调度对比如图 3 和 4 所示.

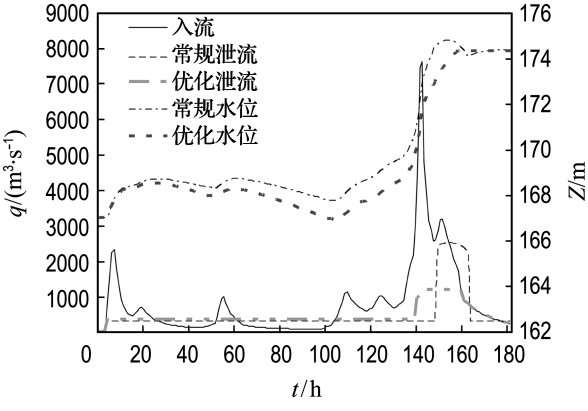


图 3 昭平台水库 5%设计洪水常规与优化调度对比

Fig. 3 Comparison of the results between conventional rule and optimal rule for the design flood of the frequency as 5% of Zhaopingtai reservoir

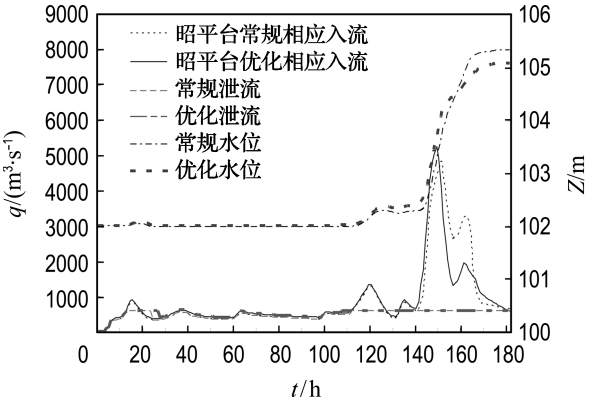


图 4　白龟山水库 5%设计洪水常规与优化调度对比

Fig. 4　Comparison of the results between conventional rule and optimal rule for the design flood of the frequency as 5% of Baiguishan reservoir

由图 3 和 4 可知，昭平台水库和白龟山水库洪水过程均是多峰型，主峰偏后；经优化调度两库的调洪最高水位较常规调度分别降低了 0.48 m 和 0.22 m. 根据图 3 中优化泄流过程可得，将昭平台水库在主峰起涨前的泄流 300 m^3/s 提高到 364 m^3/s，不仅能将主峰起涨时库水位回落至汛限水位，腾空防洪库容，且与区间洪水汇合流量不超过白龟山水库 20 a 一遇泄流标准 600 m^3/s.

同理可知，昭平台水库 50 a 一遇、100 a 一遇、2 000 a 一遇设计洪水，在主峰起涨前控制预泄流量分别为 456、506 和 963 m^3/s，可使库水位回落至汛限水位，此可作为昭平台水库制定预报调度规则时确定预泄流量的参考信息；对不同频率设计洪水实施优化调度时，第一个洪峰起涨时即开始预泄，因而所选取的预报判别指标应能灵敏判断洪水过程的多峰特征. 对白龟山水库所选取指标应能尽早判别洪量量级，提前改变泄流量，则可减小所需防洪库容.

2.2.2　理想联合预报调度规则　昭平台水库和白龟山水库的设计洪水是以 1955 年为典型的，根据图 5 和 6 中对 1955 年典型洪水的产汇流预报情况可知，昭平台水库与昭-白区间的洪水总量、最大洪峰和峰现时间的预报相对误差均为 0，3 d 洪量和 5 d 洪量的相对误差分别为 0.8%和 2.8%，产汇流预报精度较高. 因而选取累积净雨、预报峰前洪量和预报流量作为洪水量级的判别指标均满足预报精度要求. 但考虑到白龟山水库的入库洪水受昭平台泄流方式影响较大，对应的累积净雨时程分配也随之不固定，因此选择预报流量作为判断洪水量级的判别指标. 昭平台水库和白龟山水库均为大型水库，洪量对调洪起控制作用，经统计不同标准设计洪水的洪峰和洪量关系见表 1. 由表 1 可知，对于不同量级的洪水过程，昭平台水库和白龟山水库的洪峰与峰前量的比例基本一致，因而选取洪峰流量作为判别指标是合理的.

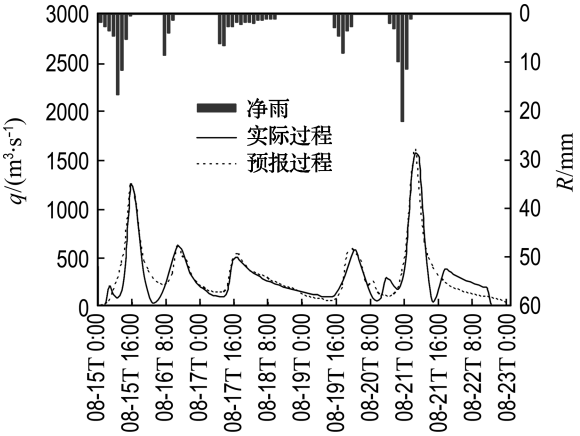


图 5　昭平台水库典型洪水的预报过程

Fig. 5　The forecast process of the typical flood in Zhaopingtai reservoir

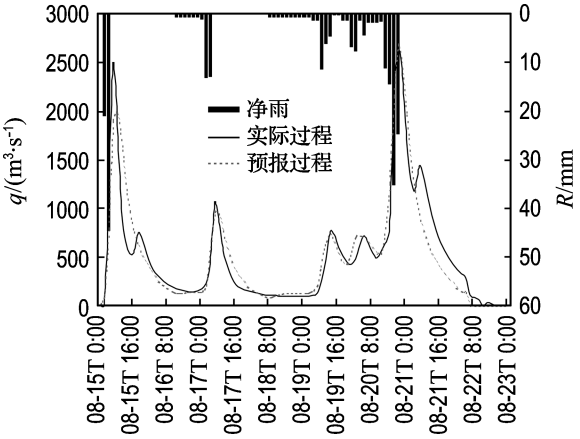


图 6　昭-白区间典型洪水的预报过程

Fig. 6　The forecast process of the typical flood in the region between Zhaopingtai reservoir and Baiguishan reservoir

表 1 昭平台水库和白龟山水库不同标准设计洪水洪峰-洪量关系

Tab. 1 Relationship between peak flows and flood volumes for different design standards in Zhaopingtai reservoir and Baiguishan reservoir

重现期/a	昭平台水库			昭-白区间		
	洪峰/($m^3 \cdot s^{-1}$)	峰前量/10^6 m^3	洪峰/峰前量	洪峰/($m^3 \cdot s^{-1}$)	峰前量/10^6 m^3	洪峰/峰前量
20	7 629	197	39	6 015	158	39
50	9 971	252	39	8 005	210	39
100	11 783	293	40	9 541	250	39
2 000	21 166	547	39	17 290	509	34

实时调度是前向滚动决策的过程,在此选取下一时段(1 h 为一个时段)的预报流量作为两库洪水量级的判别指标,另从安全角度考虑,以当前时刻的入库洪量和坝前水位作为辅助的洪水量级判别指标.

根据昭平台水库的优化调度结果得出,20 a 一遇、50 a 一遇、100 a 一遇、2 000 a 一遇设计洪水在主峰起涨前分别控制预泄流量为 364、456、506 和 963 m^3/s,可使库水位回落至汛限水位;且均在第 4 个时段时达到第一个洪峰,流量分别为 2 313、2 964、3 461 和 6 755 m^3/s. 由此可得,100 a 一遇及以下设计洪水的第一洪峰量级与预泄流量大致为同一量级,经与白龟山水库进行模拟联合调度,得出昭平台水库的预泄流量取 400 m^3/s,可保证白龟山水库的汛限水位在主峰起涨时回落至汛限水位,不影响白龟山水库的后期防洪;2 000 a 一遇设计洪水的第一洪峰流量比 10 a 一遇设计洪水的主峰流量 5 320 m^3/s 还要大,可按照 10 a 一遇标准洪水的泄流标准进行控制.

白龟山水库的下游防洪任务重大,泄流标准比较严格,在此不增加预泄流量.

依据制定联合预报调度规则流程图 2 和式(9)、(10)与式(11),拟定理想联合预报调度规则如下:

(1)昭平台水库

①若预报 1 h 后流量大于 300 m^3/s 则控泄 300 m^3/s;否则,来多少泄多少;②若预报 1 h 后流量大于 1 000 m^3/s 则控泄 400 m^3/s;③当入库洪量大于 200×10^6 m^3,若预报 1 h 后流量大于 5 400 m^3/s (10 a 一遇标准),当昭-白区间预报 3 h 后流量大于 5 000 m^3/s,则控泄 400 m^3/s,当昭-白区间预报 3 h 后流量小于 5 000 m^3/s,则控泄 1 100 m^3/s;或当前水位高于 174.44 m 时,控泄 1 100 m^3/s;④当入库洪量大于 270×10^6 m^3,若预报 1 h 后流量大于 7 650 m^3/s(20 a 一遇标准),当昭-白区间预报 3 h 后流量大于 7 000 m^3/s,则控泄 1 500 m^3/s,当昭-白区间预报 3 h 后流量大于 5 000 m^3/s,则控泄 2 000 m^3/s,当昭-白区间预报 3 h 后流量小于 5 000 m^3/s,则控泄 3 000 m^3/s;⑤当入库洪量大于 330×10^6 m^3,若预报 1 h 后流量大于 10 000 m^3/s(50 a 一遇标准),则控泄 3 000 m^3/s;⑥当库水位高于 180.7 m(500 a 一遇标准),则敞泄.

(2)白龟山水库

①若预报 1 h 后组合入库流量大于 600 m^3/s,则控泄 600 m^3/s;否则,来多少泄多少;②若预报 1 h 后组合入库流量大于 6 800 m^3/s 且入库洪量大于 214×10^6 m^3 时,或当库水位高于 105.38 m,则控泄 3 000 m^3/s(20 a 一遇标准);③若预报 1 h 后组合入库流量大于 9 500 m^3/s 且入库洪量大于 263×10^6 m^3 时,或当库水位高于 105.9 m,则敞泄;④若预报 1 h 后组合入库流量大于 11 000 m^3/s 且入库洪量大于 300×10^6 m^3 时,或当库水位高于 106.19 m,则增开北干渠.

2.2.3 制定满意的联合预报调度规则 考虑到预报信息存在误差,在此对理想调度规则的各判别指标增加了一定的幅度. 昭平台水库和白龟山水库 1967～1991 年 12 场洪水的预报统计结果表明其洪峰流量预报误差范围为 0～870 m^3/s,在此预报流量误差取 900 m^3/s. 据此制定的满意联合预报调度规则见表 2.

3 联合预报调度规则的合理性分析

昭平台和白龟山水库的联合预报调度规则选取下一时段的预报流量、入库洪量和库水位作为判别指标,预报调度的误差主要是预报流量. 当流

量预报偏小时，对下游不会造成额外风险，同样预报调度规则以库水位作为另一判别指标，即使预报偏小，也会按照库水位控制泄流，不会增加水库防洪风险；当流量预报偏大时，由于采用入库洪量作为判别洪水的辅助指标，确保已入库洪量与退水阶段的入库洪量之和满足相应设计标准洪量，且对预报流量增加了一定的误差允许值，此对下游防洪风险也是非常小的.

昭平台水库预报调度规则相对于常规规则增加了一个预泄流量 400 m^3/s，此流量远小于昭平台、白龟山区间河道泄流能力，此控制泄量只是要求上游水库共同承担防洪任务，分担部分防洪库容. 增加这个预泄指标并不存在额外风险，还可提前预泄，因而是合理的.

经模拟调度，采用联合预报调度规则调节不同频率设计洪水，昭平台水库和白龟山水库的起调水位可由原设计 167.00 m 与 102.00 m 分别抬高至 168.20 m 和 102.80 m，具体调洪特征值见表 3. 由表 3 可知，当昭平台水库和白龟山水库的起调水位为 168.20 m 和 102.80 m 时，采用联合预报调度方式调节各频率设计洪水对应的调洪最高水位和最大泄流量均满足相应的约束条件. 由此可得，采用联合预报调度规则可同时将昭平台水库的汛限水位由 167.00 m 抬高至 168.20 m，增加蓄水量 31.48×10^6 m^3；白龟山水库汛限水位由 102.00 m 抬高至 102.80 m，较文献[7]中的白龟山水库单独采用预报调度方式的汛限水位上限值 102.60 m 抬高了 0.20 m，相对于原规划的调洪结果增加蓄水量约 50.40×10^6 m^3.

表 2　拟定的满意联合预报调度规则

Tab. 2　Satisfactory joint operation rules with flood forecast information

昭平台水库					白龟山水库			
水位/m	入库洪量/10^6m^3	预报流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	区间流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	控泄流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	水位/m	入库洪量/10^6m^3	预报组合流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	控泄流量/($m^3\cdot s^{-1}$)
		>300		300			>600	600
		>2 000		400		>214	>7 500	3 000
	>200	>6 500	<5 000	1 100	>105.38			3 000
	>200	>6 500	>5 000	400		>263	>10 500	敞泄
>174.44				1 100				敞泄
	>270	>9 000	<5 000	3 000		>300	>12 000	增开北干渠
	>270	>9 000	7 000～5 000	2 000	>106.19			增开北干渠
	>330	>9 000	>7 000	1 100				
	>330	>11 000		3 000				
>180.70				全敞泄				

注：白龟山水库的预报组合流量即为昭平台水库演进流量与区间预报流量之和

表 3　以昭平台水库 168.20 m 和白龟山水库 102.80 m 起调采用联合预报调度规则的调洪结果

Tab. 3　The results from the joint operation rules with flood forecast information at the initial levels 168.20 m and 102.80 m for Zhaopingtai reservoir and Baiguishan reservoir respectively

重现期/a	昭平台水库		白龟山水库			
	最高库水位/m	水位约束/m	最高库水位/m	最大泄流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	水位约束/m	泄量约束/($m^3\cdot s^{-1}$)
20	174.80	174.80	105.36	600	105.38	
50	175.82		105.50	3 000	105.90	3 000
100	177.60	177.60	105.90	6 081	106.19	
2 000	180.95	181.00	109.56	7 302	109.56	

4 结 语

本文所提出的寻优规划法通过将优化方法与规划调度方式相融合,使梯级水库在规划联合防洪预报调度方式时选取预报判别指标和确定相应值有据可依,在一定程度上简化了规划梯级水库联合预报调度方式的复杂程度和难度,为库群防洪预报调度方式研究提供了新思路.此方法仅是将优化方法应用于规划调度方式阶段的探索性研究,今后在优化调度与规则制定时的人机交互,及不同优化目标为规划调度方式提供的信息如何处理等问题仍需进一步深入探讨.

参考文献:

[1] 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运用[M]. 北京:中国水利电力出版社,1996:86-94

[2] 周惠成,张改红,袁晶瑄. 基于防洪预调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电,2006,**32**(5):14-17

[3] 翟宜峰,侯召成,曹永强. 水库防洪分类预报调度设计方法研究[J]. 水力发电学报,2006,**25**(2):74-77

[4] 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,2006

[5] 周惠成,董四辉,王本德,等. 水库群联合防洪预报调度方式及汛限水位研究[J]. 大连理工大学学报,2006,**46**(3):401-406
(ZHOU Hui-cheng, DONG Si-hui, WANG Ben-de, *et al*. Study of combined flood control forecast operation manner and limited water level in reservior group [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2006, **46**(3):401-406)

[6] 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,2006:69-72

[7] 都金康,李 罕. 防洪水库(群)洪水优化调度的线性规划方法[J]. 南京大学学报,1995,**31**(2):301-309

[8] 梅亚东. 梯级水库防洪优化调度的动态规划模型及解法[J]. 武汉水利电力大学学报,1999,**32**(5):10-12

[9] 王少波,解建仓,孔 珂. 自适应遗传算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利学报,2006,**37**(4):480-485

[10] 大连理工大学,河南省水利勘测设计院,等. 河南省白龟山水库汛限水位设计与运用研究报告[R]. 大连:大连理工大学,2004:80-95

Optimal method to establish joint flood control operation rules with flood forecast information for cascade reservoirs

ZHANG Gai-hong, WANG Guo-li*, ZHANG Jing, TIAN Li

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Combining conventional optimal operation and forecast dispatch, an optimal method is proposed to simplify the process of determining the optimal joint flood control operation rules with flood forecast information for cascade reservoirs. First, for the operation target the optimal joint operation rules based on the hydrographs are sought to minimize the occupied flood volumes for controlling the various design floods, and the characteristics of the optimal set of operation rules are analyzed and concluded. Next, the indexes for judging flood frequency are ascertained and the ideal joint flood operation rules are drawn up in terms of forecast peak flow but with no consideration of peak flow forecast error. Last, the satisfactory joint operation rules are determined by taking into account of flow forecast errors for various design floods based on ideal joint forecast operation rules. An application is given to the Zhaopingtai and Baiguishan cascade reservoirs. The application results indicate that this method simplifies the process of determining the joint flood control operation rules with flood forecast information for cascade reservoirs. It's a new approach to solve this kind of optimal problems.

Key words: cascade reservoirs; optimal operation; union forecast operation; forecast flow