

基于综合信息的汛期库水位实时动态控制方法

王本德, 袁晶瑄*

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以提高洪水资源利用率为目标, 研究利用实时水雨工情及短期雨洪预报等综合信息的汛期库水位实时动态控制方法, 即改进的预蓄预泄法. 应用实例表明, 在不降低水库上下游防洪标准的前提下, 可使桓仁水库及梯级库群的发电效益明显增加. 该综合信息的汛期库水位实时动态控制方法, 对北方水资源短缺地区调节性能较高的大型水库(水电站)汛期实时调度, 有较好的借鉴意义.

关键词: 改进的预蓄预泄法; 模糊推理; 库水位实时动态控制; 综合信息; 水库; 汛期

中图分类号: TV212 **文献标志码:** A

0 引言

进入 21 世纪, 我国北方地区水资源短缺的问题日益严重, 安全且充分利用有限洪水资源已引起人们的强烈关注. 我国北方水资源的时空分布特点为 70%~80% 的降雨发生在汛期, 具有明显的季节性特征. 我国现行的水库洪水实时调度中, 通常受设计的汛限水位约束(很多大型水库汛限水位低于兴利蓄水位), 采用设计的常规调度方式及其规则, 即严格控制起调水位不超过设计汛限水位, 以实际库水位和入库流量作为识别洪水标准和控制泄量的依据, 没有充分利用短期雨洪预报等实时信息, 导致许多北方水库汛期大量弃水, 洪水过后又无水可蓄至兴利蓄水位, 造成洪水与水能资源的浪费. 为了缓解水库防洪与兴利的矛盾, 提高现有水库调蓄作用, 实现洪水资源与水能资源安全充分利用, 基于汛期库水位实时控制新理念^[1~5], 本文研究利用洪水(退水)预报、短期降雨预报、面临时刻水库及其上下游流域实时水雨工情等综合信息的水库汛期库水位实时动态控制方法及其应用. 在不降低水库原设计防洪标准的

前提下, 提高洪水资源与水能资源的利用率, 以期对北方水资源短缺地区调节性能较高的大型水库(水电站)汛期实时调度提供借鉴.

1 基于综合信息的汛期库水位实时动态控制基本思想

汛期库水位实时动态控制的主导思想是要利用一切可利用的信息技术, 将库水位控制在一个安全经济域内, 实现防洪安全和充分利用洪水与水能资源的目标.

基于“具体情况具体分析”、“抓主要矛盾”的哲学思想, 分析一场洪水的库水位实时动态控制过程可知, 库水位控制可分为两阶段, 一是边降雨边涨洪阶段, 基本是按照批复的调度方式及其规则控制水位与泄量, 此阶段以保证水库及其上下游防洪安全为主要目标, 防洪安全是主要矛盾; 二是从最高水位值下降至下次洪水起涨(或降雨开始)水位阶段, 即洪水退水段, 此阶段是正确处理防洪安全与充分利用洪水矛盾的关键时期, 若库水位降速过小, 库水位控制过高, 将影响下次洪水安全调度, 若库水位降速过大, 控制过低, 汛末可

能蓄不到兴利蓄水位,将影响洪水资源与水能资源充分利用,此阶段要根据信息的具体变化,或防洪为主,或洪水资源利用为主.

从目前科学技术发展水平看,一场洪水水位控制的第一阶段主要可利用的信息是遥测系统提供的面临时刻水雨情信息、补偿与被补偿水库的水雨工情信息、洪水预报信息、气象部门提供的未来 12~24 h 的短时或短期降雨预报信息;第二阶段除利用面临时刻水雨情信息、补偿与被补偿水库的水雨工情信息外,主要利用洪水(退水)预报信息和未来短中期降雨预报信息.所谓可利用信息,是指信息精度满足规范要求,既可提高预见期,又不会增加控制决策的风险,这是综合信息汛期库水位实时动态控制的基础.

总之,利用一切可利用的信息技术,正确处理防洪安全与洪水资源利用的矛盾,是综合信息汛期库水位实时动态控制的主体思想.

2 基于综合信息的汛期库水位实时动态控制基本方法

2.1 基于综合信息的汛期库水位实时动态控制的改进预蓄预泄法

目前规范规定,条件允许时,水库可以采用基于洪水预报的库水位预蓄预泄方法,它的约束是一固定值,即设计的汛限水位.

为了增长预见期,充分利用洪水(退水)预报及短中期降雨预报等信息,本文的综合信息汛期库水位实时动态控制采用了改进的预蓄预泄方法,其约束水位是随汛期分期或洪水过程分阶段而在一约束域内变化.本方法依据水量平衡原理,其基本公式为

$$\omega_{yx} = \sum_{t=t_{cu}}^{t_{cu}+T_y} [q_{out}(t) - Q_{in}(t)] \times \Delta t \quad (1)$$

式中: ω_{yx} 为面临时刻 t_0 允许预蓄的水量; $Q_{in}(t)$ 为有效预见期 T_y 内预报的入库流量过程; $q_{out}(t)$ 为有效预见期 T_y 内预报的可能下泄的流量过程,即 $q_{out}(t) + Q_{qj}(t) \leq q_{an}$, q_{an} 为下游防护点安全流量, $Q_{qj}(t)$ 为下游区间预报洪水过程; Δt 为计算时段长; t_{cu} 为实施库水位实时动态控制的起始时

刻, $t_{cu} = t_0 + T_{cu}$, t_0 为作业预报的时间,即当前时刻, T_{cu} 为信息传递、预报作业、决策、开闸等时间之和; T_y 为考虑综合信息后的有效预泄时间.

求得 ω_{yx} 后,可由式(2)推求当前时刻允许预蓄的水位 $Z_d(t_0)$,即

$$Z_d(t_0) = f(V(Z_d^-) + \omega_{yx}) \leq Z_d^+ \quad (2)$$

式中: $f(*)$ 为库容与水位的关系. 库水位实时动态控制约束域为 $[Z_d^-, Z_d^+]$, Z_d^- 、 Z_d^+ 分别为库水位实时动态控制域的下限与上限值.

2.2 汛期库水位动态控制模糊推理模式

改进的预蓄预泄方法实施过程需确定一个安全约束域 $[Z_d^-, Z_d^+]$. 本文采用考虑多种信息的模糊推理模式法,此法是在分析影响库水位实时动态控制各种因子的基础上,把调度人员的多年控制经验、汛期分期确定的汛限水位、考虑洪水预报的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,面临时刻的各种信息,称为“小前提”,通过模糊推理方法,给出满意的库水位实时动态控制约束域,以此指导水库蓄或泄. 其一是分析影响因子,即各种可利用的信息;其二是建立逻辑推理关系,即推理模式. 模糊推理模式原理、方法及求解详见文献[3].

基于“if-then”规则的模糊推理的一般结构模式可表示为

$$\text{if } A_{i1} \text{ and } A_{i2} \text{ and } \cdots \text{ and } A_{im} \text{ then } Z_{di}$$

式中: A_{ij} 为模式 i 影响因子 j 的数值, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, n 为推理模式数, m 为影响因子数; Z_{di} 为模式 i 的库水位实时动态控制约束域.

3 桓仁水库实例

3.1 问题提出

桓仁水库是浑江梯级电站的龙头,流域面积为 10 364 km². 70% 的雨量集中在汛期 6~9 月,大洪水发生在 7 月下旬~8 月中旬. 一次天气过程造成的暴雨历时较短,致使大部分洪水呈单峰型,涨水历时较短,1 d 左右,退水历时较长,6 d 左右.

桓仁水库是以发电、防洪兼顾其他综合利用

的不完全年调节水库. 千年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核, 水库总库容为 $34.6 \times 10^8 \text{ m}^3$. 汛限水位和兴利蓄水位均为 300.0 m. 装机容量 222.5 MW, 满发流量 $480 \text{ m}^3/\text{s}$. 桓仁库区耕地补偿标准洪水频率 10%, 坝上洪水位为 303.0 m, 控制泄量为 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. 根据多年调度实践, 虽然兴利蓄水位为 300.0 m, 汛末最高水位可以控制不超淹没高程 303.0 m.

下游梯级均为日调节水电站. 回龙山水库位于桓仁水库下游 44 km, 是浑江干流梯级开发中的第二级, 装机容量为 72 MW, 百年一遇洪水设计, 五百年一遇洪水校核, 汛限水位和兴利蓄水位均为 221.0 m, 满发流量 $330 \text{ m}^3/\text{s}$. 太平哨水库位于桓仁水库下游 76 km, 是浑江干流梯级开发的第三级, 百年一遇洪水设计, 千年一遇洪水校核, 装机容量为 161 MW, 满发流量 $540 \text{ m}^3/\text{s}$.

桓仁水库现行的洪水调度原则是采用保持主汛期汛限水位 300.0 m、后汛期汛限水位 301.0 m 的单值静态控制方法. 由 1972~1995 年共 24 a 的水库运行资料知, 年均弃水量为 $4.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中 50% 受汛限水位单值静态控制约束. 因此, 有必要在保证防洪安全的前提下, 根据水库上下游实时和预报的水雨工情等综合信息, 研究汛期库水位实时动态控制, 提高洪水资源与水能资源的利用率.

目前桓仁水库洪水预报调度系统稳定快捷, 降雨发生后几分钟内可给出预报结果, 并据机组运行及闸门开启做出未来库水位变化趋势. 桓仁流域水情自动测报系统运行稳定, 畅通率高, 洪水

(退水) 预报方案精度达到甲级水平, 完全满足水库调度和防洪度汛的实际需要, 具备了库水位实时动态控制研究与应用的基础条件.

3.2 桓仁流域洪水(退水)预报可利用性

(1) 洪水预报方案精度

据《桓仁水库洪水预报方案集》^[6], 制定洪水预报方案选用了 1954~1965 年 37 场洪水资料. 产流方案采用降雨径流相关图法, 预报合格率 92%; 汇流方案采用经验单位线法, 合格率 90%, 按规范要求为甲级方案. 由 1966~2005 年 42 场洪水检验原洪水预报方案, 径流深检验预报合格率为 85.7%, 洪峰检验预报合格率为 94.9%, 峰现时间检验合格率为 89.7%. 参与模拟和检验预报的洪水次数近 80 次, 说明桓仁水库洪水预报方案具有较高的稳定性与可靠性.

(2) 退水预报方案精度

桓仁水库 7 d 退水预报方案的模拟精度为甲级^[6]. 由 1966~2005 年的 21 场实测洪水检验预报, 7 d 退水预报检验合格率为 100%. 桓仁水库 7 d 退水预报方案精度为甲级.

3.3 桓仁流域短期降雨预报可利用性

(1) 短期降雨预报精度

以通化气象台发布的 1999~2005 年 6、7、8、9 月的桓仁流域未来 24 h 降雨预报资料(共 854 d)为样本, 用统计学的方法计算预报的确率、漏报率、空报率等^[7,8], 结果见表 1. 因中雨及以上量级的降雨预报发布次数共 100 次, 暂可不用其统计信息.

表 1 桓仁流域未来 24 h 降雨预报精度分析
Tab. 1 The precision analysis of rainfall forecasting during the future 24 h in Huanren basin

预报量级	预报总次数	统计项目	实际降雨发生的次数及频率					确率/%	空报率/%	漏报率/%
			<0.1 mm	0.1~9.9 mm	10.0~24.9 mm	25.0~49.9 mm	≥50.0 mm			
无雨	352	发生次数	307	43	0	1	1	87.2	0	12.8
		频率/%	87.2	12.2	0	0.3	0.3			
小雨	402	发生次数	116	219	51	16	0	54.5	28.8	16.7
		频率/%	28.8	54.5	12.7	4.0	0			

(2) 流域实际日降雨量分布规律

进一步分析桓仁流域汛期实际日降雨量的分布规律,给决策者提供调度的“外延”信息.气象台漏报误差分布规律符合偏态 P-III 型.用适线法求得未来 24 h 无雨和小雨预报流域实际日降雨量频率分布见表 2.

由表 2 知,预报未来 24 h 无雨,发生中雨及以上量级降雨的频率约为 1%(即平均预报 100 次无雨,实际发生 1 次),发生大雨及以上量级的频率为 0.1%,发生暴雨及以上量级的频率小于 0.01%. 预报未来 24 h 小雨,发生中雨及以上量级降雨的频率约为 10%,发生大雨及以上量级的频率约为 3%,发生暴雨及以上量级的频率为 0.2%.

可见,桓仁流域未来 24 h 无雨和小雨预报精度较高,可利用于汛期洪水实时调度中.

表 2 桓仁流域未来 24 h 无雨和小雨预报实际日降雨量频率分布

Tab. 2 The frequency distribution of real rainfall for the future 24 h no rainfall and shower forecasting in Huanren basin

发生频率/%	降雨量/mm	
	无雨	小雨
0.01	40.3	85.7
0.05	30.1	68.3
0.1	25.3	60.2
0.2	21.0	52.8
1	11.7	35.7
3.3	8.1	28.7
10	1.6	13.3
50	0	1.7
95	0	0

(3) 未来 24 h 降雨预报误差对洪水退水期调度的影响

对桓仁入库洪水退水段模拟调洪计算,未来 24 h 无雨和小雨预报漏报时,由表 3 中的入库始退流量和起调水位,最大泄量不超过 4 000 m³/s(水库第一级控泄流量),调洪高水位不会超过 303.0 m(桓仁水库耕地补偿水位),不会降低水库上下游的防洪标准.

3.4 桓仁库水位实时动态控制方法

基于综合信息的库水位实时动态控制的起用

条件:桓仁水库处于汛期洪水退水段,面临时刻库水位在 300.0~303.0 m,入库始退流量小于 4 000 m³/s,控泄流量不超过 4 000 m³/s.

表 3 未来 24 h 降雨预报误差对洪水退水段调度的影响分析

Tab. 3 The impact analysis of the future 24 h rainfall forecasting errors in flood regression period

利用信息	频率 0.01% 的降雨量/ mm	起调	入库始	调洪高	最大泄量/
		水位/m	退流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	水位/m	(m ³ ·s ⁻¹)
未来 24 h 无雨预报	40.3	300.0	4 000	300.00	≤4 000
		302.0	4 000	302.00	
		303.0	4 000	303.00	
未来 24 h 小雨预报	85.7	300.0	4 000	300.53	≤4 000
		302.0	4 000	302.51	
		302.5	4 000	302.98	

汛期库水位实时动态控制约束域可用模糊推理逻辑语言表示为

①汛期涨洪阶段,按照原设计的防洪调度方式及其规则放流,以保证水库上下游的防洪安全.

②洪水退水段,若桓仁流域未来 24 h 有无雨或小雨预报信息,主汛期(07-10~08-20)库水位可控制在 300.5~301.5 m;后汛期,无雨预报,库水位可控制在较高水位 302.0~303.0 m,小雨预报,库水位可控制在较高水位 301.5~302.5 m.

③洪水退水段,若桓仁流域未来 24 h 有中雨或大雨预报信息,主汛期库水位按照下限值 300.0~300.5 m 控制;后汛期库水位可控制在 301.0~301.5 m.

④洪水退水段,若预报桓仁流域未来 24 h 有暴雨,库水位可相机降至原汛限水位.

实时洪水调度过程中,考虑桓仁水库泄洪能力、发电、下游河道安全泄量,以及下游回龙山等梯级发电,基于综合信息采用改进的预蓄预泄方法,即式(1)、(2),确定桓仁放水策略.

3.5 实例分析

(1) 次洪结果

桓仁水库 2005 年汛期连续两场洪水过程的常规调度、实际调度以及基于综合信息的库水位实时动态控制等调度过程见图 1,调洪结果见表 4. 由图 1 和表 4 知:

- ①常规调度方式由面临时刻库水位控制泄流,调洪过程中泄流量变化大,闸门控制频繁.弃水多,未能有效利用洪水资源.
- ②实际调度考虑了洪水预报信息,增长了洪水调度的预见期,出流比较均匀,较常规调度方式,库水位抬高,发电增加 143×10^4 kWh,弃水减少 239×10^6 m³.
- ③基于综合信息的库水位实时动态控制方式,调洪高水位比实际调度抬高 0.76 m,且出流

均匀,泄流量较小,有利于水库系统稳定运行.较实际调度,发电增加 $1\,604\times 10^4$ kWh(若 1 度电售价 0.25 元,增加经济效益 400 万元),弃水减少 173×10^6 m³;较常规调度方式,发电增加 $1\,747\times 10^4$ kWh,弃水减少 412×10^6 m³.下游回龙山水库较实际调度多发电 36×10^4 kWh(增加经济效益 9 万元),较常规调度方式多发电 353×10^4 kWh.太平哨水库装机容量是回龙山的 1.2 倍,其发电效益更显著.

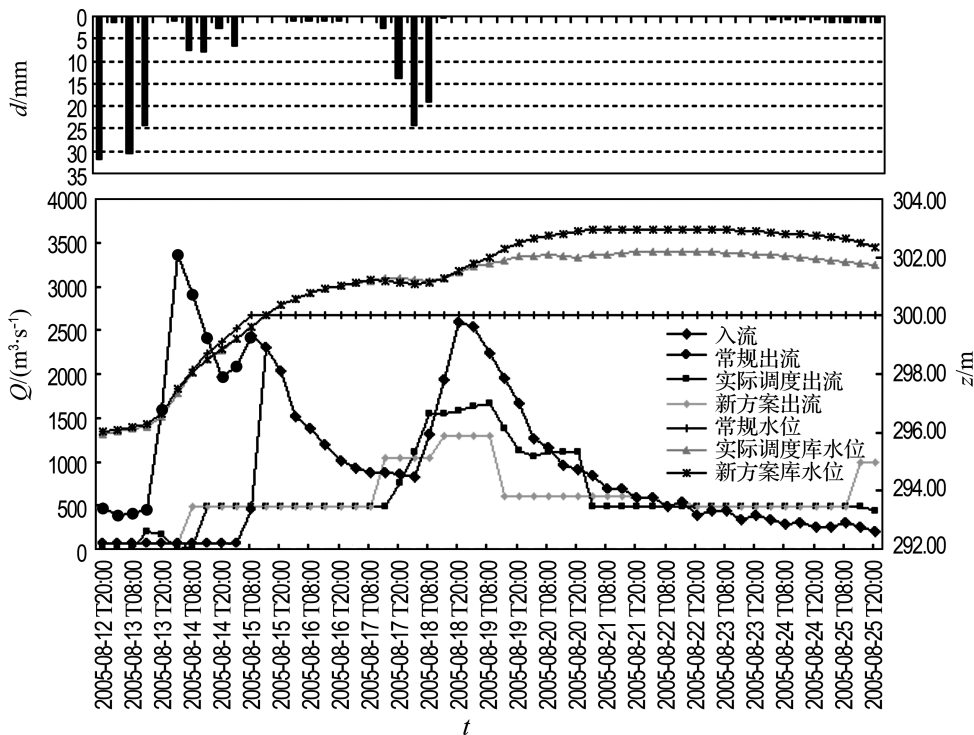


图 1 桓仁水库次洪水三种调度方式调洪过程对比图

Fig. 1 Flood regulation processes of three different operation modes in Huanren Reservoir

表 4 桓仁水库次洪水三种调度方式调洪结果

Tab. 4 The flood regulation results of three different operation modes in Huanren Reservoir

调度方式	水库	最大出流/ (m ³ ·s ⁻¹)	最高 水位/m	末水位/m	发电量/ 10 ⁴ kWh	弃水量/ 10 ⁶ m ³
常规调度	桓仁	2 580	300.00	300.00	4 823	535
	回龙山				1 607	625
实际调度	桓仁	1 660	302.19	301.75	4 966	296
	回龙山				1 924	381
动态控制	桓仁	1 300	302.95	302.33	6 570	123
	回龙山				1 960	324

(2) 年均效益

由桓仁水库实际运行资料知,桓仁水库年均发电 3.5×10^8 kWh.

由 1995~2005 年共 11 a 桓仁水库逐日入库流量资料以及桓仁水库兴利调度图,长系列模拟计算多年发电效益.汛期库水位实时动态控制方式较实际调度,年均发电增加 0.1×10^8 kWh(年均增加经济效益 250 万元).

4 结 语

基于综合信息的水库汛期库水位实时动态控制方法,转变了传统的汛限水位静态控制的观念,在保证水库及上下游防洪安全的前提下,能充分利用洪水资源和水能资源,获得较大经济效益.若北方水资源短缺地区调节性能较高的大型水库(水电站),其水雨情自动测报系统运行状况稳定,流域短期降雨预报信息可利用,水库的洪水预报方案和退水预报方案为乙级以上,则本文的研究成果可为此类水库汛期库水位实时动态控制做参考.

参考文献：

[1] 邱瑞田,王本德,周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(1):68-72

[2] 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

[3] 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, 1994

[4] 程春田,王本德. 短期气象降雨预报在水库防洪调度中的可行性分析[J]. 大自然探索, 1994(4):86-91

[5] 刘 浦. 水口电站汛期电力调度优化研究[J]. 水利科技, 2003(2):4-7

[6] 桓仁发电厂. 桓仁水库洪水预报方案集[R]. 通化:桓仁发电厂, 1998

[7] 王本德,朱永英,张改红,等. 应用中央气象台 24 h 降雨预报的可行性分析[J]. 水文, 2005, 25(3):30-34

[8] 林明智,毕宝贵,乔 林. 中央气象台短期降雨预报水平初步分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(4):392-399

Real-time dynamic operation of reservoir water levels during flood season based on integrated information

WANG Ben-de, YUAN Jing-xuan*

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

Abstract: In order to improve flood water utilization rate during flood season, a real-time dynamic operation of reservoir water levels called improved pre-storage & pre-discharge method is presented, in which real-time information of flood, rainfall, engineering and short-term flood and rainfall forecast issue is studied synthetically. Through its application to Huanren Reservoir and gradient reservoir group, and compared with the originally designed flood operation of reservoir, the results show that the real-time dynamic operation method based on integrated information can increase hydropower generation without increasing flood risk. The method is feasible and practical, and it can also be applied to other reservoirs, especially to the large-scale reservoir or hydropower station for real-time operation in the water shortage region of North China.

Key words: improved pre-storage & pre-discharge method; fuzzy reasoning; real-time dynamic operation of reservoir water level; integrated information; reservoir; flood season