

# Real-Time Dynamic Control of Reservoir Flood Limited Water Level Based on the Bayesian Probabilistic Forecasting Processor\*

Xiang Li<sup>1</sup>, Shenglian Guo<sup>2</sup>, Honggang Zhang<sup>1</sup>, Dedi Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hydrology Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan  
Email: lix@cjh.com.cn

Received: Jan. 18<sup>th</sup>, 2012; revised: Feb. 25<sup>th</sup>, 2012; accepted: Mar. 9<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** A real-time dynamic control of reservoir Flood Limited Water Level (FLWL) model was proposed based on the Bayesian forecasting processor. In terms of relative high inflow forecast precisions of the Three Gorges Reservoir (TGR), the different pre-release and refill strategies were implemented according to the reservoir inflow forecasting results. On account of inflow uncertainty, the deterministic inflow forecasts were transformed to probabilistic forecasts. Case study results indicate that the proposed model can greatly increase hydropower generation compared with current operation rules. It is also shown that the proposed model could make use of the future inflow magnitudes and provide more information for decision-makers, which could be in favor real-time and dynamic control of reservoir FLWL.

**Keywords:** Flood Limited Water Level; Real-Time Dynamic Control; Bayesian Probabilistic Forecast; Three Gorges Reservoir

## 基于贝叶斯概率预报的水库汛限水位实时动态控制研究\*

李响<sup>1</sup>, 郭生练<sup>2</sup>, 张洪刚<sup>1</sup>, 刘德地<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长江水利委员会水文局, 武汉

<sup>2</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉  
Email: lix@cjh.com.cn

收稿日期: 2012年1月18日; 修回日期: 2012年2月25日; 录用日期: 2012年3月9日

**摘要:** 实时洪水预报精度较高是实施汛限水位动态控制的基础, 其不确定性又是动态控制的主要风险源。针对洪水预报不确定, 采用贝叶斯水文不确定性处理器将确定性预报转化为概率预报; 针对入库洪水预报精度较高, 建立了考虑未来洪水大小的三峡水库汛限水位实时控制模型。应用结果表明, 相对于原设计调度方案, 实时动态模型根据预报洪水大小执行不同的预蓄预泄策略, 在不增加防洪风险的前提下可显著地提高水库的发电效益。基于贝叶斯修正的概率预报能够为决策者提供更多的洪水预报信息, 有利于调度人员实施汛限水位实时动态控制运用方式。

**关键词:** 汛限水位; 实时动态控制; 贝叶斯概率预报; 三峡水库

\*基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAC56B02)和水利部公益性行业科研专项(200901001)。

作者简介: 李响(1983-), 男, 安徽颍上人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。

## 1. 引言

水库汛限水位动态控制利用现代科学提供的一切可利用的实时信息(实时的水、雨、工情, 水文气象预报信息等), 在保证水库及其上下游防洪安全的前提下, 充分利用洪水资源<sup>[1,2]</sup>。目前, 水库汛限水位实时动态控制的主要方法有预蓄预泄法和综合信息推理模式法<sup>[3]</sup>、条件概率控制法<sup>[4]</sup>、库群补偿调节法<sup>[5]</sup>、风险调度模型法<sup>[6,7]</sup>等。在实施汛限水位动态控制调度过程中, 若仅给出一种风险决策方案是不够的, 调度决策人员无法判断未来可能出现的情况。

洪水预报精度较高是开展水库汛限水位动态控制的先决基础条件, 而水文预报不确定性的客观存在亦是实施这一水库调度新理念的风险所在。水文预报不确定性尤其是水文模型输入、模型结构、参数优选等方面的不确定性研究, 已成为水文学研究的热点, 并取得了大量研究成果<sup>[8,9]</sup>。然而如何将水文预报不确定性研究的成果应用于实时水库调度, 目前类似的研究应用成果还较少<sup>[10,11]</sup>。

本文基于贝叶斯的水文不确定性处理器, 实时修正水库发布的确定性综合预报, 将其转化为概率预报结果, 建立考虑预见期洪水量级信息的水库汛限水位实时动态控制模型, 利用概率预报推求面临时刻相对合理的库水位决策值范围, 为防洪发电调度决策提供技术支持。

## 2. 贝叶斯水文不确定性处理器

Krzysztofowicz 和 Kelly<sup>[12]</sup>在贝叶斯预报处理器的基础上, 提出了水文不确定性处理器(Hydrologic Uncertainty Processor, 简称 HUP), 其核心是通过当量正态化的方法对实测过程与预报过程进行正态分位数转化, 使得转化后时间序列的线性正态关系更加显著, 并对转化空间里的变量作线性正态假设, 根据贝叶斯公式得到转化空间里的后验密度函数, 然后还原到原始空间里求得实测过程的后验密度函数解析解。

令  $H_0$  表示预报时刻已知的实测流量,  $H_k$ 、 $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) 分别表示待预报的实际流量、确定性预报流量,  $K$  为预见期长度,  $h_0$ 、 $h_k$ 、 $s_k$  分别为  $H_0$ 、 $H_k$ 、 $S_k$  的实现值, 预见期  $k$  的实际流量  $h_k$  的后验密

度函数为

$$\phi_k(h_k | s_k, h_0) = \frac{f_k(s_k | h_k, h_0) g_k(h_k | h_0)}{\kappa_k(s_k | h_0)} \quad (1)$$

$$\kappa_k(s_k | h_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_k(s_k | h_k, h_0) g_k(h_k | h_0) dh_k \quad (2)$$

式中:  $\phi_k$  为  $h_k$  的后验密度函数;  $g_k$  表示实测流量过程的不确定性, 称为先验分布; 对于确定的  $S_n = s_n$ , 函数  $f_k$  为  $h_k$  的似然函数, 反映了预报模型的预报能力。

目前对流量先验分布和似然函数的研究还处于探索阶段<sup>[13,14]</sup>。Krzysztofowicz 和 Kelly<sup>[12]</sup>提出将先验分布与似然函数考虑成线性-正态模型, 经过转换得出后验密度函数的解析解。考虑到资料条件限制和后验密度函数应具有解析解形式, 本文对先验分布与似然函数均采用线性-正态模型<sup>[12]</sup>。

## 3. 考虑未来洪水量级的三峡水库汛限水位实时动态控制模型

刘攀等<sup>[6]</sup>通过对实时调度中可接受风险的研究, 在调度期内控制防洪风险在可接受水平内, 讨论实时调度与传统汛限水位之间的关系, 由调度期末水位耦合汛限水位, 由此建立了带有机遇约束的水库汛限水位实时动态控制模型。张改红等<sup>[7]</sup>指出, 后续起调水位是在依托短期降雨预报信息, 调度人员对后续洪水的量级大小有一定预知的基础上对其起调水位进行的动态控制期望值, 主要由上下游的不成灾水位标准对应的防洪库容和预报未来降雨的量级大小决定的。

然而, 利用短期降雨和洪水预报信息, 选择上下游不成灾水位标准来确定后续起调水位, 对于洪水历时短、防洪库容小、有效预报预见期较长的水库尚可; 对洪水历时长、防洪库容大、有效预报预见期较短的水库显然不合适。李响等<sup>[15]</sup>采用预泄能力约束法, 考虑入库洪水预报误差及洪水过程线形状不确定性两种动态控制决策风险源, 根据不同起调水位对应不同的防洪风险, 提出风险约束条件及其量化计算方法, 利用 Monte-Carlo 模拟确定三峡水库汛限水位动态控制域, 3 d 预见期的动态控制域为[145.0, 148.4]。在充分考虑预报洪水量级信息的基础上, 直接建立面临时刻库水位和未来洪水大小之间的关系式, 寻求合理的三峡水库汛期库水位实时动态控制决策。

$$Z_{t_c} = \begin{cases} Z_u & \hat{Q}_t^{\max} \leq 35000 \\ f(V(Z_u) - w) & \hat{Q}_t^{\max} > 35000 \end{cases} \quad (3)$$

$$w = (\hat{Q}_t^{\max} - 35000) \cdot \Delta t / L \quad (4)$$

式中:  $t_c$  为面临时刻;  $Z_{t_c}$  为面临时刻库水位期望值;  $Z_u$ 、 $Z_l$  分别为汛限水位动态控制域的上下限,  $Z_{t_c} \in [Z_l, Z_u]$ ;  $\hat{Q}_t^{\max}$  为预见期内预报最大入库流量;  $f(*)$  为水位与库容关系;  $w$  为面临时刻允许预泄的水量;  $\Delta t$  为时段长;  $L$  为  $\hat{Q}_t^{\max}$  至面临时刻的预见期长度。

由式(3)和式(4)可以看出, 当预见期  $L$  内预报的最大入库流量小于  $35,000 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 说明未来  $L$  内入库洪水较小, 当前在满足电厂保证出力(499 万 kW)的要求下应尽量蓄水回充至汛限水位动态控制域上限; 预见期  $L$  内预报的最大入库流量大于  $35,000 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 在预报的最大流量入库前, 加大泄量将  $35,000 \text{ m}^3/\text{s}$  以上的部分均匀泄出, 以腾出库容应对较大洪水, 但当前库水位不低于汛限水位动态控制域下限。比如对于 1 d 预见期, 当  $\hat{Q}_t^{\max}$  大约为  $45,000 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 初步估算预泄后当前时刻库水位约为 145.0 m, 这与确定汛限水位动态控制域的边界条件一致。同时, 该实时动态控制模型简单, 便于操作。

## 4. 实例研究

### 4.1. 基于贝叶斯修正的三峡水库入库洪水概率预报

三峡水库 2003 年蓄水后, 每日 8 时滚动发布未来 1~4 d 预报入库流量, 预报成果是多个模型和人工

经验的综合结果。采用三峡水库 2003~2009 年汛期(6 月 1 日~9 月 30 日)3 d 预报和实际入库流量资料, 基于贝叶斯水文不确定性处理器, 推求三峡水库入库流量概率预报参数, 将确定性预报结果转化为概率预报成果。

边缘分布函数采用 log-Weibull 分布, 三峡水库实际入库流量先验分布、3 d 预见期预报入库流量的初始边缘分布分布如图 1、图 2 所示。图 3 描述了  $H_0$ 、 $H_3$ 、 $S_3$  之间以及  $W_0$ 、 $W_3$ 、 $X_3$  ( $W$ 、 $X$  分别为  $H$ 、 $S$  的正态分位数)之间的关系, 图中的  $H_0$ 、 $H_3$ 、 $S_3$  三个变量呈发散的趋势, 线性关系不显著; 正态转化后, 可以看出图中  $W_0$ 、 $W_3$ 、 $X_3$  三个变量之间的线性关系较  $H_0$ 、 $H_3$ 、 $S_3$  之间显著, 通过线性回归效果的显著性分析, 表明在显著水平  $\alpha = 0.05$  时, 对似然函数的线性假设基本合理。

图 4 绘出了  $X_3$  的残差序列  $\Theta_3$  的经验点据与正态分布, 通过对残差序列进行显著性分析, 表明在显著水平  $\alpha = 0.05$  的条件下, 对似然函数的残差系列假定为正态分布是合理的。

根据三峡水库实际发布的预报成果, 运用贝叶斯水文不确定性处理器可将实际发布的确定性预报转化为概率预报; 调度决策人员可以根据面临时刻的水情, 选择任一分位数的概率预报值进行防洪调度决策。2007 年 7 月 25~29 日, 三峡水库入库站寸滩来水有小幅上涨, 武隆站来水较平稳, 三峡区间 25 日无降雨, 26~27 日发生小雨, 但 28~29 日, 三峡区间连降中到大雨, 7 月 30 日 8 时较 29 日 8 时三峡水库入库流量激增至  $17,700 \text{ m}^3/\text{s}$ , 导致本场洪水洪峰和峰现时间的预报精度相对较差。图 5 给出了三峡水库

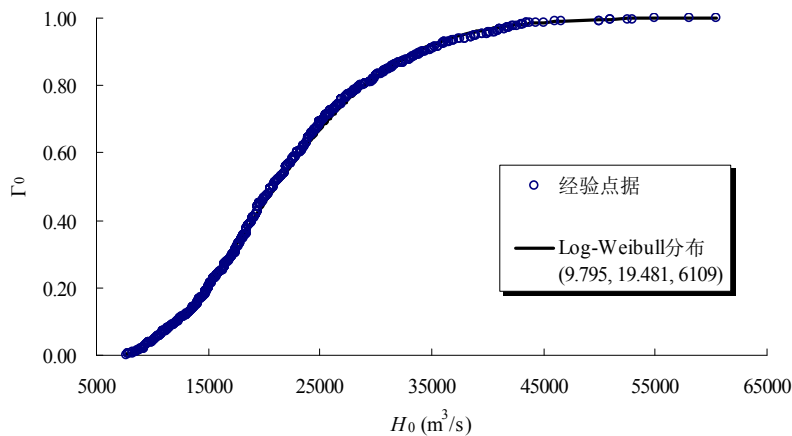


Figure 1. Empirical distribution and fitted Log-Weibull marginal prior distribution of TGR actual inflow  
图 1. 三峡水库实际入库流量先验分布

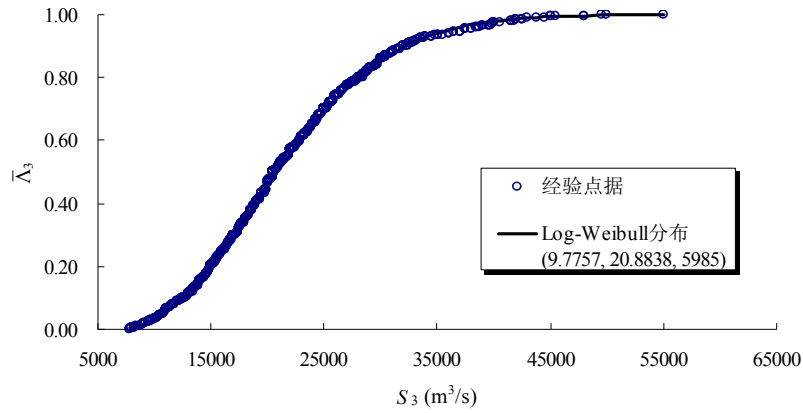


Figure 2. The initial marginal  $\bar{\Lambda}_3$  of  $S_3$

图 2.  $S_3$  的初始边缘分布  $\bar{\Lambda}_3$

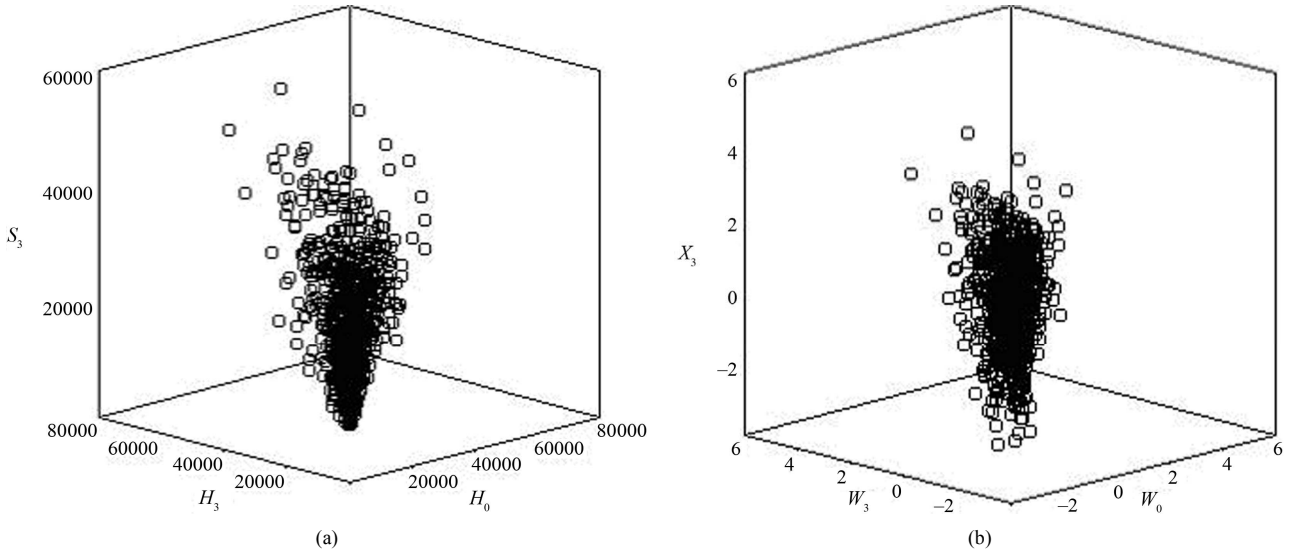


Figure 3. Construction and validation of the 3-day lead-time likelihood function: (a) Original space; (b) Transformed space

图 3. 3 d 预见期似然函数的构建检验: (a)原始空间; (b)转换空间

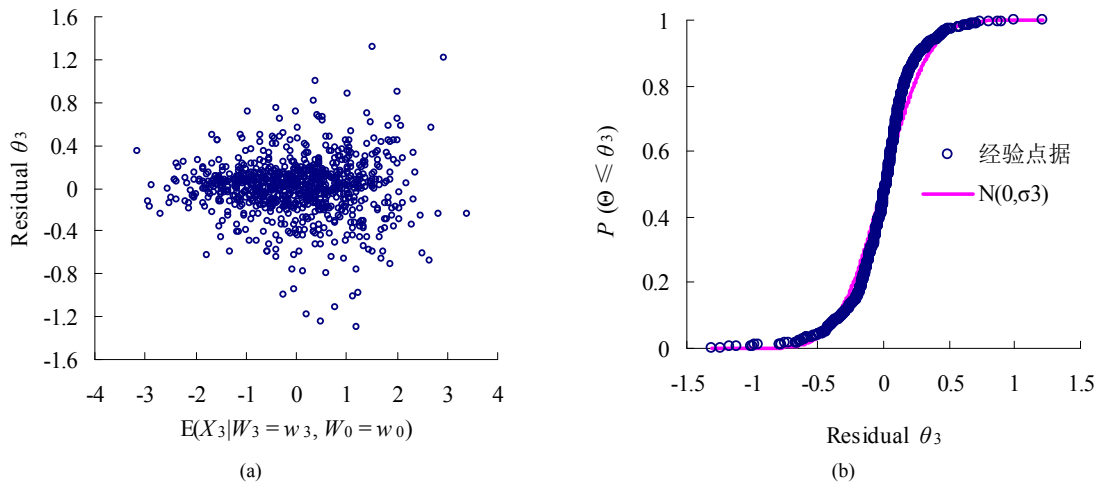


Figure 4. Validation of the normal-linear model for  $X_3$  on  $W_3$ : (a) Homoscedasticity of dependence; (b) Normality of residuals

图 4. 残差系列  $\Theta$  及其正态分布: (a)独立同方差; (b)残差正态性

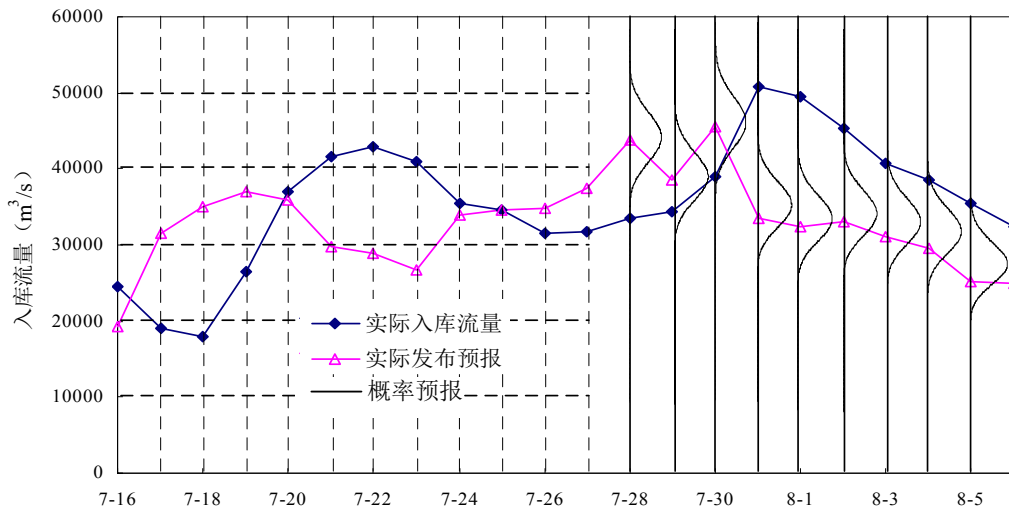


Figure 5. Deterministic and probabilistic forecast of inflow hydrograph in TGR for 20070731 flood  
图 5. 三峡水库 20070731 场次洪水预报成果对比图

20070731 场次洪水实际发布预报和贝叶斯概率预报结果, 对于三峡区间来水量较大的入库洪水, 预报的不确定性较大, 可选择较大分位数的概率预报, 降低由于入库流量预报偏小而带来的防洪调度风险。

表 1 给出了 3 d 预见期的确定性预报结果(水库发布预报结果)与 HUP 概率预报结果(后验密度的均值)的相对误差合格率  $QR$  以及径流总量相对误差  $RE$ , 可以看出: 概率预报结果较水库发布预报结果,  $QR$  提高不大,  $RE$  明显降低; 概率均值预报结果与确定性预报成果差别不大, 主要原因是由于先验分布与似然函数的假定不尽合理以及参数估计误差等。HUP 虽然对水文模型的输出结果进行改进与提高, 但并不对模型结构作任何修改和假定。HUP 是预报者和决策者之间的桥梁, 提供了待预报流量的后验密度函数, 使得预报人员可以定量地、以概率分布的形式描述水文预报的不确定性, 它的贡献始终是正面的。

#### 4.2. 三峡水库汛限水位实时动态控制实例

采用三峡水库汛期日均入库流量和实际发布的确定性入库流量预报过程, 实施考虑未来 3 d 洪水预报信息的汛限水位实时动态控制。三峡水库从围堰发电期到初期运行期、正常运行期, 每年的防洪调度方案不尽相同; 虽然水利部于 2009 年批复了三峡水库优化调度方案, 但目前仍处于研究、验证阶段; 三峡水库 2003 年 6 月以来的实际调度中, 不仅要考虑荆江河段和城陵矶附近的防洪需要, 还要考虑水库

Table 1. Comparison of deterministic and probabilistic forecasting results

表 1. 确定性预报与概率预报结果对比表

类别	确定性预报	概率预报
$QR(\%)$	92.11	92.93
$RE(\%)$	-2.51	-1.13

泥沙淤积、下游抗旱供水和河道生态、通航等方面因素, 情况非常复杂。考虑到防洪调度规则的一致性和调度结果的可比性, 三峡水库汛限水位实时动态控制结果只与原设计调度方案的结果进行对比。将三峡水库入库流量概率预报结果作为实时动态控制模型的预报输入, 20070731 场次洪水调度过程如图 6 所示, 结果见表 2。

表 2 表明, 对于 20070731 场次洪水, 若采用 50% 分位点预报入库流量结果(与确定性预报入库流量接近), 动态控制调度模型较原设计调度方案, 可增发电量 46,728 kWh(增幅 5.64%), 弃水量减少了 20.56 亿  $m^3$ , 洪水资源利用率提高了 1.12%。若以 95% 分位点预报入库流量进行调度, 20070731 场次洪水(最大日均流量 50,900  $m^3/s$ )的起调水位由 146.0 m 降低至 145.4 m。可见, 当入库洪水较大时, 采用 95% 分位点进行实时动态控制更加安全, 亦符合调度决策人员心理。同时, 根据上游干支流水雨情和三峡区间降雨情况, 也可选择不同的分位点进行实时调度决策。考虑到防洪安全和防洪调度人员决策心理, 对于三峡水库主汛期的防洪调度, 建议前汛期和主汛期采用 95%

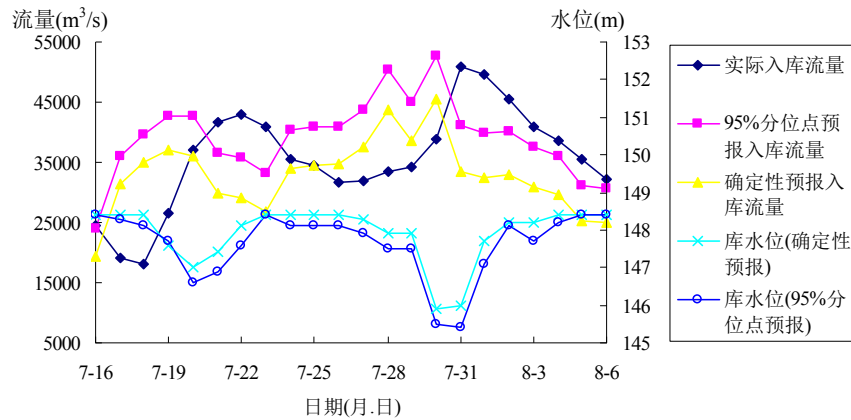


Figure 6. Operation process of TGR inflow hydrograph based on different forecasts  
图 6. 三峡水库 2007 年某场洪水调度过程对比图

Table 2. Operation results of TGR for 20070731 flood with 3 d lead-time forecasts  
表 2. 三峡水库 20070731 场次洪水调度结果表(3 d 洪水预报预见期)

场次洪水	20070731			
	原设计调度方式	动态控制调度方式		
调度方式		5%分位点	50%分位点	95%分位点
最大入库流量(m³/s)		50,900		
最大出库流量(m³/s)	50,900	50,546	50,490	51,229
最高库水位(m)	145.00	148.4	148.4	148.4
来水量(亿 m³)		677.20		
弃水量(亿 m³)	223.46	215.32	215.90	215.34
洪水资源利用率(%)	67.00	68.21	68.12	68.20
发电量(kWh)	828,072	878,064	874,800	872,904
增发电量(kWh)	-	49,992	46,728	44,832
增加率(%)	-	6.04	5.64	5.41

分位点进行实时动态控制调度(尤其对于三峡区间洪水较大时, 预报精度相对较差), 后汛期可以采用 5% 分位点进行调度。

原设计调度方案根据面临时刻来水情况和库水位控制下泄流量, 在荆江河段流量超安全泄量 56,700 m³/s 前, 入库流量来多少泄多少。由于在绝大部分的时间里来水均小于下游安全泄量, 导致洪水资源的利用率偏低。汛限水位实时动态控制模型不仅要考虑洪水预报信息, 还要根据预报洪水量级大小来控制预泄流量。当预报将发生大洪水时, 迅速降低库水位(到分期汛限水位)和腾空库容; 当预报流量低于 35,000 m³/s 时, 三峡水库水位可始终保持在汛限水位动态控制域的上限运行。

三峡水库汛限水位实时动态控制模型能够考虑未来洪水量级信息, 根据预报洪水大小进行预泄回

充。然而, 洪水预报误差不可避免, 当确定性预报误差较大时(尤其当预报最大入库流量低于 35,000 m³/s, 而实际入库流量大于 35,000 m³/s 时, 没有采取预泄决策而是继续保持库水位在动态控制域的上限), 这在一定程度上会增加防洪风险, 增强决策者对于实施汛限水位实时动态控制的疑虑。贝叶斯概率预报对水库发布的综合多个预报模型的确定性预报进行修正, 给出未来入库流量的概率分布, 使得调度人员可以对预报流量的不确定性进行预判, 增加实时动态控制决策的科学性。

### 5. 结论

洪水预报是实施水库汛限水位实时动态控制的基础和先决条件, 其不确定性直接影响实时控制决策。针对三峡水库入库流量预报精度较高, 建立了考

考虑未来预报洪水量级信息的汛限水位实时动态控制模型, 根据预报来水大小实施不同的预蓄预泄决策; 在不增加水库防洪压力的前提下, 可显著地提高水库的发电效益。针对洪水预报结果的不确定性, 采用贝叶斯水文不确定性处理器将水库发布的确定性预报转化为概率预报, 为实时动态控制决策提供有力支持。尽管贝叶斯概率预报能够考虑洪水不确定性信息, 但其本身也存在诸多不确定性, 随着资料系列的延长, 需要进一步研究入库流量先验分布和似然函数的形式。

## 参考文献 (References)

- [1] 周惠成, 王本德. 水库汛限水位动态方法研究[M]. 辽宁: 大连理工大学出版社, 2006.  
ZHOU Huicheng, WANG Bende. Research on dynamic control of reservoir normal elevation in flood season. Liaoning: Dalian University of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 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. Key technological problems of dynamic control of flood limited water level for Three Gorges Reservoir. Beijing: Chinese Water Resources and Hydropower Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 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.  
GUO Shenglian, LIU Pan. Suggestion of promoting dynamic control mechanism of water level of reservoir in flood season. China Water Resources, 2008, 9: 1-3. (in Chinese)
- [4] YUN, R., SINGH, V. P. Multiple duration limited water level and dynamic limited water level for flood control, with implication on water supply. Journal of Hydrology, 2008, 354: 160-170.
- [5] 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.  
LI Wei, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Dynamic control model for limiting level during flood season of cascade reservoirs operation. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 22-28. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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, 29(1): 51-55.  
ZHANG Gaihong, ZHOU Huicheng, WANG Bende, et al. Real-time dynamic control of the limited water level of reservoir in flood period and its risk analysis. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 29(1): 51-55. (in Chinese)
- [8] BEVEN, K., BINLEY, A. Future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279-298.
- [9] 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 274-281.  
LIANG Zhongmin, DAI Rong and LI Binquan. A review of hydrological uncertainty analysis based on Bayesian theory. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 274-281. (in Chinese)
- [10] 刘艳丽, 王国利, 周惠成. 洪水预报不确定性分析及其在水库调度决策中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 92-96.  
LIU Yanli, WANG Guoli and ZHOU Huicheng. Uncertainty analysis of flood forecasting and its application to reservoir operation. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 92-96. (in Chinese)
- [11] MEDIERO, L., GARROTE, L. and MARTÍN-CARRASCO, F. A probabilistic model to support reservoir operation decisions during flash floods. Hydrological Science Journal, 2007, 52(3): 523-537.
- [12] KRZYSZTOFOWICZ, R., KELLY, K. S. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting. Water Resources Research, 2000, 36(11): 3265-3277.
- [13] 李向阳, 程春田, 林剑艺. 基于 BP 神经网络的贝叶斯概率水文预报模型[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 354-359.  
LI Xiangyang, CHENG Chuntian and LIN Jianyi. Bayesian probabilistic forecasting model based on BP ANN. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 354-359. (in Chinese)
- [14] 邢贞相, 芮孝芳, 崔海燕, 等. 基于 AM-MCMC 算法的贝叶斯概率洪水预报模型[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1500-1506.  
XING Zhengxiang, RUI Xiaofang, CUI Haiyan, et al. Bayesian probabilistic flood forecasting model based on adaptive metropolis-MCMC algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12): 1500-1506. (in Chinese)
- [15] 李响, 郭生练, 刘攀, 万民, 刘心愿. 考虑入库洪水不确定性的三峡水库汛限水位动态控制域研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 49-55.  
LI Xiang, GUO Shenglian, LIU Pan, WAN Min and LIU Xinyuan. The dynamic control bound of flood limited water level considering inflow uncertainty in Three Gorges Reservoir. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 49-55. (in Chinese)