

Real-Time and Dynamic Control of Water Level Operating Scheme during Flood Season for the Ankang Reservoir*

Guang Yang, Shenglian Guo, Yanlai Zhou

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: 1148777255@qq.com

Received: Jun. 15th, 2013; revised: Jul. 4th, 2013; accepted: Jul. 13th, 2013

Abstract: Dynamic control of reservoir water level during flood season is one of the effective measures to solve the conflict between flood control and power generation. The dynamic control bound of water level for the Ankang reservoir is derived by risk-analysis based method, and dynamic control of water level operating scheme by considering flood forecasting information is established in this paper. By using multi-objective evaluation system which considers flood risk and power generation benefit, the dynamic control of water level operating schemes is proposed for the Ankang reservoir. Compared with the designed operation scheme, it is shown that the proposed scheme can increase hydropower generation by 2.94 MKW·h (2.88%), 1.99 MKW·h (1.65%) and 2.98 MKW·h (2.67%) in the pre-flood season, main flood season and post-flood season (7 days) without reducing flood control standards, respectively.

Keywords: Operating Water Level; Real-Time and Dynamic Control; Multi-Objective Decision; Ankang Reservoir

安康水库汛期运行水位实时动态控制方案*

杨光, 郭生练, 周研来

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: 1148777255@qq.com

收稿日期: 2013年6月15日; 修回日期: 2013年7月4日; 录用日期: 2013年7月13日

摘要: 汛期运行水位实时动态控制是协调水库防洪与兴利矛盾的一条有效措施。本文采用风险分析法推求了安康水库汛期运行水位动态控制域, 建立了考虑洪水预报信息的汛期运行水位实时动态控制模型, 并采用防洪风险和兴利效益相结合的多目标综合评价指标体系, 优选出了安康水库汛期运行水位动态控制方案。结果表明: 实时动态控制方案在不降低原防洪标准的前提下与常规调度相比, 在前汛期、主汛期和后汛期7日增加的发电量分别为2.94 MKW·h (2.88%)、1.99 MKW·h (1.65%)和2.98 MKW·h (2.67%), 效益增加较为显著。

关键词: 汛期运行水位; 实时动态控制; 多目标决策; 安康水库

1. 引言

传统的水库调度方法按规划设计的调度图运行,

*基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001002)资助。
作者简介: 杨光(1991-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生。

没有考虑气象水文预报信息, 直接由入库流量和防洪库容确定下泄流量以控制水库水位不超过汛限水位, 时刻防御可能发生的洪水, 经常导致洪水过程中受汛限水位约束而发生弃水, 洪水过后又无水可蓄的局

面,造成洪水资源的巨大浪费^[1]。在确保水库防洪安全的前提下,科学地设计与运用汛限水位,合理地利用水库防洪与兴利重叠库容,是发挥水库综合利用效益,缓解我国水资源紧缺与防洪减灾矛盾的有效手段之一^[2]。经多年的研究和实践,水库汛限水位控制理论有了很大的发展^[3],已由单一固定水位控制及分期固定水位控制发展到汛限水位动态控制阶段^[4,5]。

Murota等^[6]综合分析了影响水库汛期蓄水和弃水的主要因素,在水库汛限水位设计中引入了风险理论。周惠成等^[7]在分析防洪预报调度方式运行机理及其对水库调度影响的基础上,采用防洪风险和蓄水效益综合评价体系,确定出相对合理的汛限水位控制值。刘攀等^[8]在三峡水库运行初期,提出了防洪、发电和航运等指标体系,建立了动态汛限水位和蓄水时机优化的混合规划数学模型,运用遗传算法对该模型进行优化求解,得到了相对合理的动态汛限水位与蓄水时机方案,充分挖掘前汛期与后汛期的潜力,提高了三峡水库运行的综合效益。陈炯宏等^[9]结合洪水预报及梯级水库防洪调度信息,建立了梯级水库汛限水位的联合运用模型,寻求了综合利用效益最大的梯级水库汛限水位的联合动态控制方案,清江梯级水库应用结果表明,在不增加防洪风险的前提下可显著地提高综合利用效益。

目前水库汛期运行水位动态控制理论与方法已经逐步完善和成熟,并取得了一定的应用研究成果^[10,11]。国外虽然没有专门研究水库汛期运行水位动态控制方法,但在其相关领域研究的较早、成果较多。与国内相比,发达国家由于在气象水文特性、人口密度及分布、水资源供需矛盾、社会保险机制及政府管理办法等方面与我国存在很大的差异,其防洪研究重心以考虑防洪效益及生态环境效益为主^[12]。

本文研究安康水库汛期运行水位实时动态控制方案,建立方案优选评价指标体系,结合水库防洪风险率、防洪易损性、防洪可恢复性和水库发电量四项指标,优选相对合理的安康水库汛期运行水位实时动态控制方案。

2. 汛期运行水位实时动态控制模型

2.1. 风险分析模型

以年防洪标准特征值(坝前最高水位和最大下泄

流量)为基础对防洪调度过程进行风险分析,推求不同分期的汛期运行水位与防洪风险率之间的关系是确定汛期运行水位动态控制域的依据。按照原有的汛期运行水位控制方案对不同频率的年设计洪水进行调洪演算,得出对应的坝前最高水位和水库最大下泄流量作为风险指标。

假定预泄调度末发生了标准洪水,即由调度末水位 V_e 起调,在假定调度末水位与发生标准洪水相互独立的情形下,设此时水库由调度末水位 V_e 起调遇频率 P 洪水的风险率为 $R_p(V_e)$,相应的防洪风险率为:

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

$$R_p(V_{e,i}) = DF(V_{e,i})/N(V_{e,i}) \quad (2)$$

式中: $V_{e,i}$ 为实测洪水的第 i 次调度末水位, n 为场次洪水个数, $N(V_{e,i})$ 为调洪的总历时, $DF(V_{e,i})$ 为调洪中超过风险指标的历时。

2.2. 考虑未来洪水量级的汛期运行水位实时动态控制模型

根据汛期运行水位与防洪风险率之间的关系,结合水库的分期防洪调度规则,在汛期运行水位动态控制实施边界条件和控制域内,根据面临时刻水情,充分考虑预报洪水量级信息,直接建立面临时刻库水位和未来洪水大小之间的关系式,寻求合理的安康水库汛期库水位实时动态控制决策。

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

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

式中: Z_{t_c} 为面临时刻库水位期望值; Z_u 、 Z_l 分别为汛期运行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; Δt 为时段长; L 为 \hat{Q}_t^{\max} 至面临时刻的预见期长度; Q_{control} 为判断洪水量级的指标。

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 Q_{control} 时,说明未来 L 内入库洪水较小,当前在满足电厂保证出力的要求下应尽量蓄水至

汛期运行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 Q_{control} 时, 在预报的最大流量入库前, 加大泄量将 Q_{control} 以上的部分均匀泄出, 以腾出库容应对较大洪水, 但库水位不低于汛限水位。

2.3. 汛期运行水位动态控制方案优选

动态控制域上限越低, 防洪风险越小, 但发电效益也小, 洪水资源利用不充分; 动态控制域上限越高, 发电效益越大, 但防洪风险也会增加。因此, 如何选择合理的汛期运行水位的动态控制域的方案是一个多目标评价决策的问题。

2.3.1. 多目标评价指标体系

为了全面衡量安康水库实施汛期运行水位动态控制的风险, 要求风险指标体系既能协调防洪和兴利之间的矛盾, 又能反映险情发生的概率, 而且可以量化险情出现的后果, 以便采取适当的补救措施。本文采用如下指标建立多目标评价体系(见图 1)进行汛期运行水位动态控制方案优选:

1) 风险率。风险率表示下游防护对象对出现险情的可能性, 可用单位时间内出现事故的次数来表示。若洪水历时为 N , 下游防护对象出现险情的历时为 DF , 则风险率 r 为:

$$r = DF/N \quad (5)$$

2) 易损性。易损性表示大坝和下游防护对象受灾的严重程度。对于大坝, 水库水位越高, 险情越严重, 采用大坝处于险情时的水库平均水位来表示易损性; 对于下游防护对象, 水库下泄流量越大, 险情越严重, 可以采用下游防护对象处于险情时的平均流量表示易损性。

3) 可恢复性。可恢复性表示下游防护对象遭遇险情后, 从事故状态返回到正常状态的能力和速度, 用平均成灾历时的倒数来描述。

$$\beta = NF / \sum_{i=1}^{NF} T(i) \quad (6)$$

式中: β 为防洪险情的可恢复性; NF 为出现险情的次数; $T(i)$ 为第 i 次出现险情的历时。

4) 兴利效益。水利工程一般兼有航运、防洪、养殖、旅游等多项效益, 这里采用发电量表示兴利效益。

2.3.2. 熵权法确定综合权重

熵(Entropy)的概念源于热力学, 它最先由 Shan-

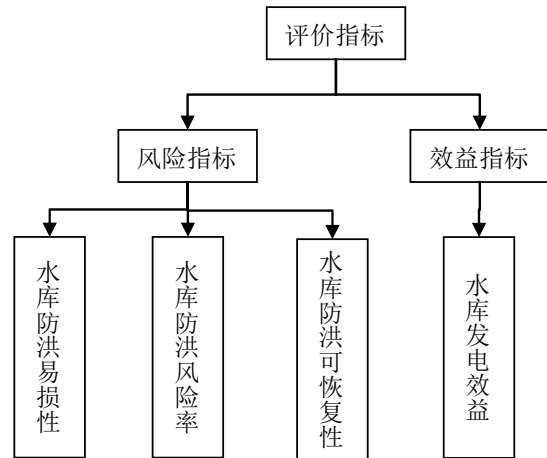


Figure 1. Multi-objective evaluation system of dynamic control of water level operating schemes

图 1. 汛期运行水位动态控制方案多目标评价体系

non 引入信息论。在信息系统中, 信息熵是信息无序状态的度量, 信息熵越大, 信息的无序度越高, 其信息的效用价值越小, 反之, 信息的熵值越小, 信息的无序度越低, 其信息的效用价值越大。熵权法确定综合权重的步骤如下。

1) 构建 n 个可行方案, m 个评价指标的由决策特征值组成的决策特征矩阵 $X = \{x_{ij}\}$, 其中

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m。$$

2) 为了统一评价各指标的优劣情况, 采用式(7)和式(8)对决策特征矩阵 X 进行规范化处理, 得到标准化决策矩阵 $Y = \{y_{ij}\}$ 。

对于成本型指标, 越小越优, 如风险率和易损性。计算公式为:

$$y_{ij} = (x_j^{\max} - x_{ij}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (7)$$

对于效益型指标, 越大越优, 如风险率和易损性。计算公式为:

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_j^{\min}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (8)$$

式中: x_{ij} 为规范化处理前方案 i 的指标 j 的决策特征值; y_{ij} 为规范化处理后方案 i 指标 j 的属性值; x_j^{\max} 和 x_j^{\min} 分别为规范化处理前各个方案中第 j 指标的最大值和最小值。

3) 对标准化决策矩阵作归一化处理, 即

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

则 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 表示方案 i 的标准评价向量。

4) 根据相对信息熵方法, 计算第 j 指标的熵值 H_j

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad (10)$$

式中: $0 \leq H_j \leq 1$; 为使 $\ln r_{ij}$ 有意义, 假定当 $r_{ij} = 0$ 时, $r_{ij} \ln r_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

5) 计算第 j 个指标的差异系数 c_j , 即

$$c_j = 1 - H_j, j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

6) 计算指标权重

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^m c_j}, j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

则 $W_j = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 即为指标的归一化权重向量。

对于第 i 个方案, 将规范化属性值权重累加, 得到该方案的综合评价值 A_i

$$A_i = \sum_{j=1}^m w_j y_{ij} \quad (13)$$

综合评价价值 A_i 越大, 方案相对越优。根据综合评价值对各个方案相对优劣进行排序, 从而优选出较优的水库汛期运行水位动态控制域方案。

3. 实例分析

3.1. 安康水库

安康水利枢纽是一座以发电为主, 兼有航运、防洪、养殖、旅游等多项综合效益的大型水利水电工程, 位于汉江干流上游陕西省安康市境内, 坝址火石岩位于安康市城西 18 km 处, 控制流域集水面积 35,700 km², 多年平均径流量 192 亿 m³。安康水库为不完全年调节水库, 总库容 32 亿 m³, 其中, 死库容为 9.08 亿 m³, 兴利库容为 16.77 亿 m³, 最大调洪库容为 9.8 亿 m³, 死水位 305 m, 正常蓄水位 330 m, 防洪限制水位 325 m。水库主要建筑物按千年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核, 设计洪水位 333.1 m, 校核洪水位 337.33 m。

安康水库的防洪调度规则如下:

1) 当 $Q_\lambda \leq 12,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $Q_{\text{泄}} = Q_\lambda$;

2) 当 $12,000 \text{ m}^3/\text{s} < Q_\lambda \leq 15,100 \text{ m}^3/\text{s}$, 且水库水位 $z \leq 326 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = 12,000 \text{ m}^3/\text{s}$; $z > 326 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = Q_\lambda$;

3) 当 $15,100 \text{ m}^3/\text{s} < Q_\lambda \leq 17,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 且 $z > 326 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = Q_\lambda$;

4) 当 $17,000 \text{ m}^3/\text{s} < Q_\lambda \leq 21,500 \text{ m}^3/\text{s}$, 且 $326 \text{ m} < z \leq 328 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = 17,000 \text{ m}^3/\text{s}$; $z > 328 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = Q_\lambda$;

5) 当 $21,500 \text{ m}^3/\text{s} < Q_\lambda \leq 24,200 \text{ m}^3/\text{s}$, 且 $z > 328 \text{ m}$ 时, $Q_{\text{泄}} = Q_\lambda$;

6) 当 $Q_\lambda > 24,200 \text{ m}^3/\text{s}$, 泄洪设备全部闸门打开, 按泄流能力敞泄。

考虑下游安康市城区的防洪, 有如下控泄标准: 发生 5 年一遇洪水时, $Q_\lambda \geq 15,100 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{泄}} = 12,000 \text{ m}^3/\text{s}$; 发生 20 年一遇洪水时, $Q_\lambda \geq 21,500 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{泄}} \leq 17,000 \text{ m}^3/\text{s}$; 考虑上游襄渝铁路的防洪标准: 发生 100 年一遇洪水时, $z \leq 330.0 \text{ m}$ 。

选取 1983 年作为典型年, 按照推求的设计洪水参数进行同频率放大, 采用设计的汛期运行水位 325 m 作为起调水位进行调洪演算, 得到 100 年一遇、50 年一遇、20 年一遇及 10 年一遇的最大出库流量和最高库水位, 作为安康水库应对中小洪水的年防洪标准特征值如表 1 所示。

3.2. 基于风险分析法确定安康水库汛期运行水位动态控制域

李妍清等^[13]建议将安康水库的汛期分为四期: 5 月 1 日~6 月 20 日为前汛期; 6 月 21 日~7 月 31 日为夏汛期; 8 月 1 日~8 月 20 日为过渡期; 8 月 21 日~10 月 31 日为秋汛期。对夏汛期和过渡期进行整合, 将安康水库的汛期分为前汛期(5 月 1 日~6 月 20 日)、主汛期(6 月 21 日~8 月 20 日)和后汛期(8 月 21 日~10 月 31 日)。根据安康水库汛期不同时段来水量级的不同, 采用拟定的分期防洪调度规则, 取洪水预报有效预见期 6 h, 以降低原年最大设计标准为原则, 在预见期内能预泄至分期汛限水位为条件, 得到综合的安康水库汛期运行水位动态控制域, 如表 2 所示。

3.3 安康水库汛期运行水位实时动态控制及效益分析

由于安康水库场次洪水过程一般不超过 7 日, 为选择完整的洪水过程进行调度, 选取 1956 年~2011 年前汛期、主汛期和后汛期的 7 日实测流量资料, 根据基于风险分析的安康水库汛期运行水位动态控制域

Table 1. Flood routing results based on design flood hydrographs with different return periods
表 1. 不同重现期设计洪水过程的调洪结果表

年防洪标准	最大洪峰流量(m ³ /s)	最大下泄流量(m ³ /s)	坝前最高水位(m)	控制泄流量(m ³ /s)	控制最高水位(m)
100 年一遇	30,000	26,300	330.00	-	330
50 年一遇	28,900	24,000	329.32	-	-
20 年一遇	23,000	17,000	329.12	17,000	-
10 年一遇	19,700	17,000	328.20	17,000	-

Table 2. The dynamic control bounds of water level operation based on risk analysis
表 2. 基于风险分析确定的汛期运行水位动态控制域

分期	分期汛限水位(m)	汛期运行水位上限(m)	汛期运行水位下限(m)
前汛期	328	328.7	328
主汛期	325	326.6	325
后汛期	327	328.6	327

(见表 2), 考虑未来 6 h 洪水预报信息(考虑预报误差)进行汛期运行水位的实时动态控制, 得到库水位变化过程和出流过程。

利用汛期运行水位实时动态控制和常规调度的调度结果, 结合安康水库机组出力特征曲线等资料, 分别计算安康水库多年平均 7 日发电量。出力 N 和发电量 W 的计算公式分别为

$$N = 9.81\eta QH_{\text{净}} = KQH_{\text{净}} \quad (14)$$

$$W = N\Delta t \quad (15)$$

式中: N 为出力, 单位为 KW; η 为水电站的总效率, 常把 9.81η 近似记作一个常数 K , K 称为出力系数, 安康水库为大型水库, K 取 8.5; Q 为发电流量, 单位为 m³/s; $H_{\text{净}}$ 为上下游净水头差, 单位为 m; W 为发电量, 单位为 KW·h; Δt 为出力 N 的历时, 单位为 h。

对两种调度方式计算的发电效益进行统计比较, 如表 3 所示。

3.4. 安康水库汛期运行水位动态控制方案优选

把前汛期、主汛期、后汛期的汛限水位上下限分别进行等间距离散成 10 个值, 作为 10 种汛期运行水位动态控制域备选方案, 经分析计算, 各方案的特征值如表 4 所示。

根据熵权法得出各个指标相应的权重 W

$$W = (0.1304, 0.1397, 0.1849, 0.3468, 0.1982)$$

得出 10 个方案的综合评价价值 A 。

Table 3. Annually average of 7-day operation benefits for the Ankang reservoir (MKW·h)
表 3. 安康水库多年平均 7 日实时调度效益表(MKW·h)

	前汛期	主汛期	后汛期	合计
常规调度	101.89	120.75	111.7	334.33
汛期运行水位动态控制	104.82	122.74	114.68	342.24
增加发电量	2.94	1.99	2.98	7.91
增加百分比(%)	2.88	1.65	2.67	2.36

$$A = (0.69, 0.67, 0.80, 0.73, 0.64, 0.56, 0.36, 0.33, 0.26, 0.20)$$

由综合评价价值 A 可以看出: 20 个方案的优劣排序为(3,4,1,2,5,6,7,8,9,10)。根据最优方案, 前汛期、主汛期和后汛期的汛期运行水位分别为 328.16 m, 325.36 m 和 327.36 m, 和原调度方案相比, 效益分别增加 2.62%、0.01%和 2.12%, 平均增加 1.51%。

经分析可知, 安康水库主汛期来水最大, 所以防洪压力最大, 其调度方案也最应偏于安全而不是效益, 从优选方案主汛期的效益增加方面正好说明了这一点。虽然主汛期效益增加甚微, 但由于有前汛期和后汛期效益增加显著, 所以整个汛期平均效益增加较为显著(为 1.51%), 能够被生产部门接受。

4. 结论

利用风险约束条件及其量化分析方法, 将洪水不确定性、风险分析与汛期运行水位动态控制域的确定

Table 4. The characteristic values of comprehensive evaluation index of dynamic control of Ankang reservoir water level during flood season
表 4. 安康水库汛期运行水位动态控制方案综合评价指标特征值

序号	动态控制域上限(m)			风险率 (%)	易损性		可恢复性	兴利效益 发电量(MKW·h)
	前汛期	主汛期	后汛期		水位(m)	流量(m ³ /s)		
1	328.00	325.00	327.00	1.96	327.42	14,610	0.1304	113.03
2	328.08	325.18	327.18	1.98	327.51	14,639	0.1301	113.13
3	328.16	325.36	327.36	2.00	327.56	14,622	0.1410	113.26
4	328.23	325.53	327.53	2.01	327.62	14,713	0.1370	113.39
5	328.31	325.71	327.71	2.04	327.71	14,742	0.1296	113.52
6	328.39	325.89	327.89	2.06	327.77	14,784	0.1240	113.63
7	328.47	326.07	328.07	2.09	327.87	14,949	0.1113	113.75
8	328.54	326.24	328.24	2.12	327.95	14,936	0.1088	113.87
9	328.62	326.42	328.42	2.17	328.03	15,054	0.1084	113.96
10	328.70	326.60	328.60	2.24	328.24	15,106	0.1089	114.08

过程有机结合起来,建立了基于风险分析的安康水库汛期运行水位动态控制域确定模型;在分期汛期运行水位的基础上,推求了安康水库分期汛期运行水位动态控制域;并建立了考虑未来预报洪水量级信息的汛期运行水位实时动态控制模型对安康水库 56 年的 7 天洪水进行实时动态控制,同时采用防洪风险和兴利效益相结合的多目标综合评价指标体系,利用熵权法确定指标权重,优选出了安康水库汛期运行水位动态控制方案,主要结论如下:

1) 基于风险分析法推求的安康水库汛期运行水位动态控制方法不会降低原有防洪标准。

2) 根据预报洪水大小执行不同的预蓄预泄策略,与常规调度相比,在前汛期、主汛期和后汛期 7 日增加的发电量分别为 2.94MKW·h (2.88%)、1.99 MKW·h (1.65%)和 2.98 MKW·h (2.67%),效益显著。

3) 安康水库在前汛期、主汛期和后汛期的汛期运行水位上限分别取 328.16 m, 325.36 m 和 327.36 m,与常规调度相比,该方案可兼顾防洪效益,发电量平均增加 1.51%。

参考文献 (References)

[1] 王本德, 周惠成, 张改红, 等. 水库汛限水位动态控制方法研究发展现状[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(3): 43-45.
 WANG Bende, ZHOU Huicheng, ZHANG Gaihong, et al. Review on the dynamic control of reservoir normal level in flood season. South-to-North Water Transfers and Water Science and

Technology, 2007, 5(3): 43-45. (in Chinese)

[2] 王本德, 周惠成. 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.
 WANG Bende, ZHOU Huicheng. Reservoir flood water level dynamic control theory and its application. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006. (in Chinese)

[3] 李玮, 郭生练, 刘攀. 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.
 LI Wei, GUO Shenglian and LIU Pan. A reservoir dynamic flood limited water level control method based on real-time forecasting information. Water Power, 2005, 31(1): 66-70. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 周惠成, 李丽琴, 胡军, 等. 短期降雨预报在汛限水位动态控制中的应用[J]. 水力发电, 2005, 31(8): 22-26.
 ZHOU Huicheng, LI Liqin, HU Jun, et al. Dynamic control of reservoir normal level in flood season based on short-term rainfall forecast. Water Power, 2005, 31(8): 22-26. (in Chinese)

[6] MUROTA, A., ETOH, T. Application of the EQUI-risk line theory to the design of a detention reservoir. Natural Disaster Science, 1984, 6(1): 17-30.

[7] 周惠成, 张改红, 王本德, 等. 基于防洪预报调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电, 2006, 32(5): 14-17.
 ZHOU Huicheng, ZHANG Gaihong, WANG Bende, et al. Study on adjusting the limited level of reservoir during flood season based on flood control forecast. Water Power, 2006, 32(5): 14-17. (in Chinese)

[8] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 86-91.
 LIU Pan, GUO Shenglian, Wang Caijun, et al. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in Three Gorges Project. Shuilixuebao, 2004, 35(7): 86-91. (in Chinese)

[9] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 梯级水库汛限水位联合运用和动态控制研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 55-61.
 CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Joint operation and dynamic control of flood limited water levels for cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31

- (6): 55-61. (in Chinese)
- [10] 王才君, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡水库汛期调度不确定性分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(2): 71-74.
WANG Caijun, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Analysis of uncertainty of three gorges reservoir operation during flood seasons. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28(2): 71-74. (in Chinese)
- [11] 朱元牲. 基于风险分析的防洪研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(4): 1-8.
ZHU Yuansheng. Flood defense based on risk analysis. Journal of Hohai University, 2001, 29(4): 1-8. (in Chinese)
- [12] 周之豪, 沈曾源, 施熙灿, 等. 水利水能规划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1986.
ZHOU Zhihao, SHEN Zengyuan, SHI Xican, et al. Planning of water resources and hydropower. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1986. (in Chinese)
- [13] 李妍清, 郭生练, 周研来, 等. 汉江安康水库流域汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2013, 2(1): 64-99.
LI Yanqing, GUO Shenlian, ZHOU Yanlai, et al. Identification of flood seasonality for the Ankang reservoir basin. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(1): 64-99. (in Chinese)