

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230310

中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析

张验科, 张建新, 卢垚键, 于 强

(华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对中小水电站水库在汛期调度运行过程中常常因为调节库容小、调洪决策时间短、机组最大水头和上游库区淹没限制等特点, 而导致其汛期无论洪水量级大小常以较低水位运行造成洪水资源化效益得不到充分发挥的问题, 重点考虑预报入库洪峰流量和预报误差不确定性的影响, 以发电效益最大和防洪风险最小为目标, 建立了中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析模型, 并给出了当预报入库洪峰流量在不同范围时的汛期最优水位的求解方法。对龟都府水电站水库的验证结果表明, 当水库面临不同量级的洪水时, 通过效益和风险的协调可得到最优的运行水位, 达到小洪水时增加发电效益和大洪水时减小洪灾损失的目的, 为变化环境下中小水电站水库汛期运行调度提供了参考。

关键词: 中小水电站水库; 汛期运行调度; 多目标; 风险分析

中图分类号: TV697.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0058-05

1 引言

我国已建成各类水库 9.8×10^4 多座, 其中有 99% 以上为中小型水库^[1]。这些水库受限于调节库容较小、预报技术水平低等因素导致汛期实际运行水位大多偏低, 限制了兴利效益的发挥。目前, 大型水库提高兴利效益多基于预报开展汛期运行水位动态控制研究^[2-3], 主要集中在分期汛限水位^[4]、动态控制域分析^[5]、动态控制的效益和风险协调分析^[6]、梯级水库汛期运行水位动态控制^[7]等方面。因此, 考虑预报入库洪峰流量和预报误差不确定性等因素的影响, 开展适用于中小水电站水库汛期运行调度的方法研究, 一方面, 在面临低于设计标准的中小洪水时, 提高洪水资源利用率和增加发电量, 充分发挥水能资源利用效益; 另一方面, 在面临超设计标准的大洪水时, 提前进行预泄, 为调度人员开启闸门泄洪留有更为充裕的时间, 减小洪灾损失, 对于变化环境下中小水电站水库的调度运行管理具有重要意义。鉴于此, 本文以发电效益最大和防洪风险最小为目标, 建立了中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析模型, 利用预报入库洪峰流量信息可提高水库的发电量和减少面临大洪水时的蓄洪量, 对提

高中小水库的发电效益和防洪效益有重要的参考价值。

2 汛期运行调度控制域分析

2.1 控制域上限值的确定

中小水电站水库调节库容较小, 为了防洪安全, 在设计时一般预留了较大的泄洪能力, 因此只要汛期水位低于汛限水位, 当水库遭遇小于等于设计标准的洪水时调洪最高水位是不会超过设计洪水位的, 故控制域的上限值 Z_1 小于等于汛限水位 $Z_{\text{汛限}}$ 即可, 但受预报信息、闸门启闭延时和水电站机组运行水头的限制, 为了保证上游易淹没地区及机组运行的安全, 一般汛期水位不超过 Z_2 , 即机组水头与下游平均水位之和与正常蓄水位中的较小值。水位控制域上限值可取这两种情况下的较小者, 即:

$$Z_{\text{上限}} = \min\{Z_1, Z_2\} \quad (1)$$

2.2 控制域下限值的确定

在预报有超设计标准的大洪水来临时, 为了减少洪灾损失, 为调度人员预留更长的调度决策时间, 结合预报信息可进行适当预泄, 以腾出更多的库容来抵御超设计标准的洪水, 但此时要充分考虑到入库洪水预报误差的影响, 避免带来不必要

收稿日期: 2023-03-04, 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243224, 52279064, 52179014)

作者简介: 张验科(1983-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水资源与能源科学、风险管理与决策理论等, E-mail: ykzhang2008@163.com

的发电效益损失。假设超设计标准洪水的洪峰流量为 Q_p , 为使经实际调洪库容 V_p 调蓄后的调洪最高水位 $Z_{最高}$ 小于等于设计洪水位 $Z_{设计}$, 设计洪水位 $Z_{设计}$ 对应的水库蓄水量 $V(Z_{设计})$ 与水位控制域下限值 $Z_{下限}$ 对应的水库蓄水量 $V(Z_{下限})$ 之差应大于等于 V_p , 即:

$$\begin{cases} V_p \leq V(Z_{设计}) - V(Z_{下限}) \\ V_p = V(Z_{最高}) - V(Z_{设计}) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)得:

$$Z_{下限} \leq V^{-1}(V(Z_{设计}) - V_p) \quad (3)$$

式中, $V^{-1}(V(Z_{设计}) - V_p)$ 为根据 $V(Z_{设计})$ 与 V_p 的差值在水库的水位库容关系曲线上查找得到的临界值。

3 汛期运行调度多目标风险分析模型

3.1 目标函数

预报信息是进行汛期运行调度的关键, 由于预报等信息误差的客观存在, 获取相应效益的同时不可避免地潜藏着一定的风险。因此, 以效益最大和风险最小为目标, 建立汛期运行调度多目标风险分析模型。

效益目标 B :

$$\max B = \begin{cases} V(Z_{最高}, z) - V(Z_{设计}) & Q_{p预} \geq Q_{p设} \\ E(z) - E(Z_{实际}) & Q_{p预} < Q_{p设} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $V(Z_{最高}, z)$ 为水库以水位 z 起调的调洪最高水位对应的蓄水量; $V(Z_{设计})$ 为设计水位对应的蓄水量; $E(z)$ 为水库运行水位 z 时的发电效益; $E(Z_{实际})$ 为实际以低于汛限水位的水位起调时的发电效益。

风险目标 F :

$$\min F = \begin{cases} E(Z_{实际}) - E(z) & Q_p < Q_{p预}; Q_{p预} \geq Q_{p设} \\ V(Z_{最高}, z) - V(Z_{设计}) & Q_p > Q_{p预}; Q_{p预} < Q_{p设} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $Q_{p预}$ 为预报洪水的洪峰流量; $Q_{p设}$ 为设计洪水的洪峰流量。

由式(4)、(5)可看出, 效益目标和风险目标均是汛期运行水位 z 为变量的函数, 当预报发生超设计标准洪水和控制的运行水位越低时, 防洪效益增加, 发电效益损失风险亦增加; 当预报发生小于设计标准的洪水控制的运行水位越高时, 发电效益增加, 防洪效益损失风险亦增加。因此, 根据效益追求最大和风险追求最小的原则, 显然效

益目标与风险目标存在一定的矛盾关系, 符合多目标模型的特征。

3.2 约束条件

除了常规防洪调度需要的水库水量平衡关系、水库水位和下泄流量关系、水库水位和库容关系、下游水位和下泄流量关系等约束外, 增加了运行水位约束:

$$Z_{下限}(Q_{p预}) \leq z \leq Z_{上限}(Q_{p预}) \quad (6)$$

式中, z 为运行的水位; $Z_{上限}(Q_{p预})$ 、 $Z_{下限}(Q_{p预})$ 分别为当预报入库洪水洪峰流量为 $Q_{p预}$ 时水库运行调度的上限、下限水位。

3.3 求解方法

模型建立的目的是当预报预见期内有入库洪水洪峰流量 $Q_{p预}$ 的洪水发生时, 寻求效益最大和风险最小的优化运行水位 z 。假设预报入库洪水的洪峰流量为 $Q_{p预}$ 的预报误差在 $[-\epsilon, +\epsilon]$ 范围内, $Q_m[Z_{上限}(Q_{p预})]$ 为从上限水位 $Z_{上限}(Q_{p预})$ 起调时最高调洪水位刚好达到设计洪水位 $Z_{设计}$ 时的洪峰流量。因此, 根据预报的入库洪水频率所对应的洪峰流量的不同, 运行水位 z 的求解方法如下。

(1) 当预报入库洪水的洪峰流量考虑最大可能预报后仍小于 $Q_m[Z_{上限}(Q_{p预})]$ 时, 即:

$$Q_{p预}(1 + \epsilon) \leq Q_m[Z_{上限}(Q_{p预})] \quad (7)$$

表明此时洪水的量级较小, 可将水库水位控制在上限水位, 即此时会增加发电效益 $E(z) - E(Z_{实际})$, 即使实际入库洪水的洪峰流量 Q_p 大于预报入库洪水的洪峰流量 $Q_{p预}$, 由于预报误差上限的限制, $Q_p \leq Q_{p预}(1 + \epsilon)$, 可认为几乎不存在防洪风险。

(2) 当预报的入库洪水的洪峰流量考虑最大可能预报误差后大于 $Q_m[Z_{上限}(Q_{p预})]$, 但小于设计洪水的洪峰流量 $Q_{设}$ 时, 即:

$$Q_m[Z_{上限}(Q_{p预})] < Q_{p预}(1 + \epsilon) \leq Q_{设} \quad (8)$$

表明此时洪水的量级虽未超设计标准, 但由于预报误差的存在, 在获取发电效益 $E(z) - E(Z_{实际})$ 时, 面临水库调洪最高水位可能超过设计洪水位而造成防洪效益损失 $V(Z_{最高}, z) - V(Z_{设计})$ 的风险。此时, 可分 3 种情况: ①当带来的防洪效益损失远大于增加的发电效益, 则应以前者为主要目标, 即防洪效益损失应为 0, 此时可将水库水位控制在以 $Q_{p预}(1 + \epsilon)$ 所确定的上限水位, 即 $z = Z_{上限}[Q_{p预}(1 + \epsilon)]$; ②当带来的防洪效益损失的数量级和增加的发电效益的数量级相近时, 则应在 $[Z_{上限}[Q_{p预}(1 + \epsilon)], Z_{上限}(Q_{p预})]$ 的

范围内,寻求使以下目标函数最大的运行水位 z , 即:

$$\max(B - F) = \max\{[E(z) - E(Z_{\text{实际}})] - [V(Z_{\text{最高}}, z) - V(Z_{\text{设计}})]\} \quad (9)$$

③ 当带来的防洪效益损失远小于增加的发电效益时,则应以后者为主要目标,此时可将水库水位控制在以 $Q_{\text{P预}}$ 所确定的上限水位,即 $z = Z_{\text{上限}}[Q_{\text{P预}}]$ 。

(3) 当预报的入库洪水的洪峰流量考虑最大可能预报误差后大于设计洪水的洪峰流量 $Q_{\text{设}}$ 时,即:

$$Q_{\text{P预}}(1 + \epsilon) > Q_{\text{设}} \quad (10)$$

此时洪水量级已较大,一般均转入以防洪为主,应根据是否考虑误差将库水位 z 控制在对应水位下限 $[Z_{\text{下限}}[Q_{\text{P预}}(1 + \epsilon)], Z_{\text{下限}}[Q_{\text{P预}}]]$ 内。

4 算例分析

4.1 水库概况

龟都府水电站水库为青衣江干流梯级开发的第六级,总库容 $2\ 060 \times 10^4 \text{ m}^3$,调节库容 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$,设计洪水标准 50 年一遇,相应的洪峰流量为 $13\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$;校核洪水 500 年一遇,相应的洪峰流量为 $17\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。作为以发电为主的不完全日调节型水库,汛限水位 534 m,设计洪水位 538.19 m,但为了防洪安全,实际运行水位长期维持在 533 m 附近,小洪水时的水能资源利用效益得不到充分发挥。水情预报信息由当地水文局根据《水文情报预报规范》^[8] 提供,汛期不同时间段的洪水预报误差具有不同的范围,由于该水电站缺乏长期有效的洪水预报资料,要考虑汛期不同时间段的预报误差较难,因此洪峰预报误差按规范中对合格预报方案的精度要求范围 $[-20\%, 20\%]$ 考虑。

4.2 水位控制

根据水电站按调度规则的满发流量发电时对应的下游水位 520.4 m 和机组最大运行水头 13.4 m,可确定 $Z_1 = 534 \text{ m}$ 、 $Z_2 = 533.8 \text{ m}$,根据式(1)可知, $Z_{\text{上限}} = \min\{Z_1, Z_2\} = 533.8 \text{ m}$ 。根据调洪规则当水库遭遇洪水时库水位可在 533 m 以下消落 0~0.5 m,因此以 532.5 m 作为水位控制域的下限,即 $Z_{\text{下限}} = 532.5 \text{ m}$ 。

4.3 结果与分析

根据式(7)可算得 $Q_m[Z_{\text{上限}}(Q_{\text{P预}})] = 10\ 108.3 \text{ m}^3/\text{s}$,根据式(8)可得 $Q_{\text{设}}/1.2 = 11\ 250 \text{ m}^3/\text{s}$,因此可将 $Q_{\text{P预}}$ 在 $[0, 10\ 108.3]$ 、 $(10\ 108.3, 11\ 250]$ 、 $(11\ 250, 13\ 500]$ m^3/s 三个区域内分别讨论。由于汛期水位控制时增加的发电效益主要

体现在入库流量小于全部机组满发流量时的水头效益增加量,为了突出方法的优越性,假设整个汛期 5 月 1 日~9 月 30 日共 153 d 的预报入库洪峰流量分别单独出现在 3 个区间内,进行相应的效益和风险分析。

(1) 当预报入库洪水的洪峰流量小于 $10\ 108.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时。此时洪水的量级较小,可将水库水位控制在控制域的上限水位 533.8 m 运行,增加发电量 $625.47 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增加了约 2.8%。由于考虑最大误差 20% 后调洪最高水位也不会超过设计洪水位 538.19 m,因此可认为不存在防洪风险,运行水位在 533.0、533.8 m 的汛期发电量变化过程见图 1。由图 1 可知,发电量的增加主要出现在入库流量小于电站满发流量 $622.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,而当入库流量大于 $622.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,发电量未增加,当入库流量大于 $2\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,出于机组安全运行的考虑,机组已停机,所以发电量为零。

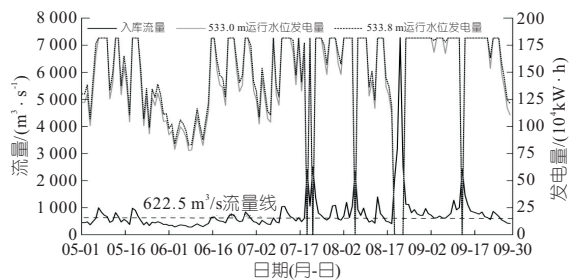


图 1 小洪水时 533.0、533.8 m 运行水位下发电量变化过程

Fig. 1 Change process of power generation with operating water level at 533.0 m and 533.8 m of small flood

(2) 当预报入库洪峰流量位于 $(10\ 108.3, 11\ 250.0]$ m^3/s 时。在考虑预报误差后,获取发电效益的同时存在水库调洪最高水位可能超过设计洪水位而造成防洪效益损失的风险,此时需在增加的发电效益和带来的防洪效益损失之间进行优化从而得到最优运行水位,为了方便理解,将预报的入库洪水的洪峰流量在 $10\ 108.3 \sim 11\ 250.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间离散取值后计算结果见表 1。

表 1 不同预报入库洪峰流量时的水位优化计算结果
Tab. 1 Optimized calculation results of dynamic control of water level when different forecasts of peak flow into reservoir

洪峰流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	上限 水位/m	发电量 / $(10^4 \text{ kW} \cdot \text{h})$	增发量 / $(10^4 \text{ kW} \cdot \text{h})$
10 108.3	533.80	22 397.25	625.47
10 200.0	533.73	22 343.92	572.14
10 400.0	533.59	22 234.71	462.93
10 600.0	533.45	22 125.49	353.72
10 800.0	533.31	22 016.28	244.50
11 000.0	533.17	21 907.07	135.29
11 250.0	533.00	21 771.78	0

由表 1 可看出,随着预报入库洪峰流量的增加,上限水位、发电量和增发发电量均呈逐渐减小的趋势,此时不存在风险损失。因此,当带来的防洪效益损失远大于增加的发电效益时,可依据预报的入库洪峰流量查询得到对应的上限水位作为此时的运行水位,如当预报的入库洪峰流量为 $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,应将水库的水位控制在 $533.31\ \text{m}$ 为宜。当带来的防洪效益损失远小于增加的发电效益时,则应以发电为主,此时可将水库水位控制在以预报入库洪峰流量优化计算的上限水位,由于此种情况下的最大值 $11\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$ 仍小于 $12\ 130\ \text{m}^3/\text{s}$,因此受水电站最大工作水头的限制,应将水库水位控制在 $533.8\ \text{m}$ 为宜。当带来的防洪效益损失的数量级和增加的发电效益的数量级相近时,则应在预报入库洪峰流量及其偏大最大误差时分别对应的上限水位区间内寻求式(9)的效益差值的最大值,此时可根据效益和风险的对比关系确定决策者满意的控制水位,为方便起见,同样以预报入库洪峰流量为 $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 为例,其对应的上限水位为 $533.8\ \text{m}$,而其考虑偏大 20% 的误差后对应的上限水位为 $533.31\ \text{m}$,以电价 $0.2\ \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和每万立方米的效益损失为 5 万元计算,根据式(9)计算的结果见表 2、图 2。由表 2 可看出,当运行水位从 $533.31\ \text{m}$ 变化到 $533.80\ \text{m}$ 时,增发效益和蓄洪水量均呈递增趋势

表 2 预报入库洪峰流量为 $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时不同运行水位对应的发电效益和风险对比

Tab. 2 Comparison of power generation benefits and risks corresponding to different operating water levels when forecast peak flow of reservoir is $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$

运行水位/m	发电量	增发电量	增发效益/万元	蓄洪水量/ $10^4\ \text{m}^3$	风险损失/万元	效益差值/万元
533.31	22 006.33	234.55	46.91	8.14	40.70	6.21
533.40	22 084.52	312.74	62.55	10.36	51.80	10.75
533.50	22 162.70	390.92	78.18	13.08	65.40	12.78
533.60	22 240.88	469.10	93.82	16.42	82.10	11.72
533.70	22 319.07	547.29	109.46	20.46	102.30	7.16
533.80	22 397.25	625.47	125.09	25.25	126.25	-1.16

注:发电量、增发电量单位均为 $10^4\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

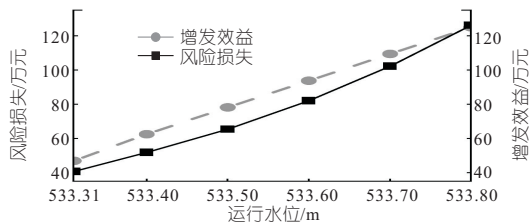


图 2 预报入库洪峰流量为 $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时增发效益、风险损失与运行水位的关系

Fig. 2 Relationship between additional benefit, risk loss and operating water level when forecast peak flow of reservoir is $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$

势,验证了式(4)中效益目标函数和式(5)中风险目标函数的对立关系。同时,由图 2 可看出,当水位为 $533.5\ \text{m}$ 时增发效益与风险损失的差值最大,因此当预报入库洪峰流量为 $10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时应将水位控制在 $533.5\ \text{m}$ 为宜。

(3)当预报的入库洪水的洪峰流量大于 $11\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$ 时。考虑预报误差后洪水的量级可能超过设计洪水标准,应以防洪为主。可将水库水位控制在合适的变动区间内,为保证防洪安全,水库水位一般会尽可能维持下限水位,以预报的入库洪峰流量从 $11\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 至 $13\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 计算得到不同的预报入库洪峰流量时的控制下限水位和相对于维持 $533\ \text{m}$ 时减少的蓄洪量,见表 3。

表 3 不同预报入库洪峰流量时的下限水位和减少的蓄洪量

Tab. 3 Lower limit water level and reduced amount of flood storage in different forecasts of peak flow

洪峰流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	上限水位/m	下限水位/m	汛限水位蓄洪量/ $10^4\ \text{m}^3$	下限水位蓄洪量/ $10^4\ \text{m}^3$	减少蓄洪量/ $10^4\ \text{m}^3$
11 300	533.80	532.96	257.68	247.70	9.98
11 500	533.80	532.82	207.55	159.37	48.17
11 700	533.80	532.68	327.02	240.65	86.37
11 900	533.80	532.54	448.31	323.74	124.57
12 100	533.80	532.50	236.13	99.41	136.72
12 300	533.70	532.50	337.05	200.33	136.72
12 500	533.60	532.50	247.86	111.15	136.72
12 700	533.50	532.50	306.98	170.26	136.72
12 900	533.40	532.50	335.55	198.83	136.72
13 100	533.30	532.50	197.44	60.72	136.72
13 300	533.20	532.50	378.39	241.67	136.72
13 500	533.00	532.50	174.46	37.75	136.72

由表 3 可看出,当预报入库洪峰流量从 $11\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 变化至 $13\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,为了尽可能地减小风险和洪灾损失,应以防洪为主,一般尽可能维持下限水位,而下限水位随着预报入库洪峰流量的增大而降低,相应减少的蓄洪量也更大,防洪效益也越显著。

综上所述,传统预泄能力约束法(经计算,水位在 $533.8\ \text{m}$ 时的风险率约为 8.2%)一般不推荐将库水位控制在 $533.8\ \text{m}$,但当预报入库洪峰小于 $10\ 108.3\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,可将水库维持在 $533.8\ \text{m}$ 增加发电效益,面临超设计标准洪水时还可将库水位降至 $532.5\ \text{m}$ 以减小洪灾损失,优势明显。

5 结论

a. 龟都府水电站预报入库洪峰流量小于 $10\ 108.3\ \text{m}^3/\text{s}$ 和大于 $11\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,可分别增加发电量约 $625.47\times 10^4\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 和减少蓄洪量约 $136.72\times 10^4\ \text{m}^3$;当位于两者之间时可根据不同运行水位时的效益和风险选择合适的运行水位。

b. 本文模型可充分利用入库洪峰流量预报信

息,给出了中小水电站水库面临不同量级洪水时的运行调度方法,达到了在中小洪水时增加发电效益和大洪水时减小洪灾损失的目的,对于变化环境下洪水资源化提供了一种可行的方法。

c. 由于中小水电站水库装机容量和满发流量一般较小,汛期运行调度增加的发电效益主要体现在小洪水时增加的发电水头上,减小的洪灾损失主要体现在遭遇超设计标准洪水时通过预泄为调度人员争取更多时间上。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[2] 张验科, 张佳新, 俞洪杰, 等. 考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J]. 水力发电学报, 2019,38(9):64-72.

[3] 王渤权, 李红刚, 艾显仁, 等. 基于动态可行域的梯级水库群优化调度研究[J]. 水电能源科学,

2022, 40(11):64-67,59.

[4] 张永波, 唐莉, 祝雪萍, 等. 气候突变对水库汛期分期及调度的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2):67-69,81.

[5] 郑玉婷, 王丽萍, 谢宇韬, 等. 改进的 VIKOR 决策模型在大隆水库汛期水位动态控制中的应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 38-41.

[6] LIU YUAN, JI CHANGMING, WANG YI, et al. Consideration of streamflow forecast uncertainty in the development of short-term hydropower station optimal operation schemes: a novel approach based on mean-variance theory[J]. Journal of cleaner production,2021, 304:126929.

[7] 顿晓晗, 周建中, 张勇传, 等. 水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 209-217, 224.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范: GB/T 22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社,2009.

Multi-objective Risk Analysis for Operation Scheduling of Medium and Small Hydropower Station Reservoirs in Flood Season

ZHANG Yan-ke, ZHANG Jian-xin, LU Yao-jian, YU Qiang

(School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the fact that the reservoirs of medium and small hydropower stations usually operate at a lower level during the flood season because of the smaller regulating reservoir capacity, short decision time for flood regulation, maximum head of the unit and inundation limitation of the upstream reservoir area, etc., the flood resource utilization benefit is not fully utilized during the flood season regardless of the magnitude of the flood. The multi-objective risk analysis model for flood operation and scheduling of medium and small hydropower reservoirs is established with the objective of maximizing the power generation benefit and minimizing the flood risk, and the solution method for the optimal flood level is given when the forecasted incoming flood flow is in different ranges. The results show that when the reservoir faces different levels of floods, the optimal operation level can be obtained by coordinating the benefits and risks to increase the power generation benefits during small floods and reduce the flood losses during large floods, which provides a reference for the flood operation and scheduling of medium and small hydropower reservoirs under changing environment.

Key words: medium and small hydropower stations; flood operation and scheduling; multi-objective decision; risk analysis

(上接第 108 页)

Water Hammer Prevention of Floating Pumping Station Water-conveying System Under Large Range Variable Water Source Level

YAN Li-li¹, WANG Mei-fang¹, LI Ling-ling¹, TONG Bao-lin¹, GAO Yu-yang², LIU Zhi-yong²

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For the pump-stopping water hammer prevention of the floating pumping station water-conveying system, in addition to ensure the safety of the pump unit and the pipeline, the impact of the water hammer pressure on the movable rocker pipe and the floating boat should be considered to ensure the stability of the floating boat. The numerical simulation of the pump-stopping transient of a floating pumping station water-conveying system under large range variable water source level was conducted. The results show that the lowest inlet water level is the most unfavorable condition for water hammer prevention. Under the condition that the pump outlet valve refuses to close, if the unit's reverse speed exceeds the standard and the maximum reverse flow is reached within 3 s after the pump-stopping. The axial-flow check valve is recommended for the pump outlet valve considering the valve driving capacity requirements, the unit reverse speed and water hammer pressure. In the water hammer protection scheme of "pump outlet axial-flow check valve + air chamber on shore + intermediate check valve + hammer-prevention air valve", the axial-flow check valve ensures that the pump unit does not reverse, the air chamber and air valve reduce the maximum water hammer pressure and improve the negative pressure condition in the pipeline, and the intermediate check valve reduces the pressure oscillation amplitude and oscillation time in the pump outlet and rocker pipe. Therefore, the water hammer prevention problem in the floating pumping station water-conveying system is effectively solved.

Key words: pump-stopping water hammer prevention; floating pumping station; large range variable water source level; pump outlet valve style; intermediate check valve; air chamber