

李航, 李洁玉, 王远见, 等. 不确定来水条件下龙羊峡水库年末水位优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 258-264. LI H, LI J Y, WANG Y J, et al. Year-end water level optimization of Longyangxia Reservoir under uncertain inflow conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 258-264. (in Chinese)

不确定来水条件下龙羊峡水库年末水位优化

李航^{1,2}, 李洁玉^{2,3}, 王远见^{2,3}, 李江⁴, 魏光辉⁴

(1. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003;
3. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 郑州 450003; 4. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:以黄河上游多年调节水库龙羊峡及下游刘家峡水库为研究对象, 考虑来水不确定性影响, 建立梯级水库群多目标随机优化模型, 并基于理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)决策方法, 求解当年发电量与年末水位 Pareto 方案集中最佳方案, 探讨来水频率及起调水位对年末水位和发电量的影响, 验证年末期望水位保证多年调节水库发电效益的可靠性。结果表明: 在不确定来水条件下, 龙羊峡水库年末期望水位与龙羊峡水库、刘家峡水库年期望发电量之间存在竞争关系; 龙羊峡水库来水频率越低、起调水位越高时, 龙羊峡水库年末水位越高, 龙羊峡水库、刘家峡水库发电量越大; 基于提出的年末水位优化方法可大幅缩减龙羊峡水库现行调度方式下年末水位范围, 且保障发电效益的可靠性在 98% 以上。

关键词:多年调节水库; 年末水位; 龙羊峡水库; 不确定性; 随机优化调度

中图分类号: TV212; TV741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0027

多年调节水库用于调节年内及年际间不均衡的水量, 年末水位的控制关系到当年及今后多年的水库发电、供水、河道减淤等综合效益^[1]。由于来水的不确定性, 在制定中长期调度计划时多年调节水库年末水位往往难以确定, 进而影响多年调节水库径流利用率。如何根据不确定的来水情况对多年调节水库年末水位进行优化控制, 保证多年效益是研究的重点。

目前, 确定多年调节水库年末最佳水位的方法有两种。第 1 种是建立年末水位与相关影响因子间的函数关系, 通过长序列实测资料的分析验证, 确定年末最佳水位。如: 解阳阳等^[2]通过逐步回归分析方法, 率定龙羊峡水库年末水位关键影响因子, 建立 BP 神经网络预测模型预测龙羊峡水库年末水位; 毕玉晓等^[3]提取影响狮子滩水库年末水位主要因素, 通过建立来水频率与年末水位之间的线性关系确定狮子滩水库年末水位。第 2 种是构建多年调节水库多目标优化调度模型, 综合考虑水库功能需求, 进行中长期优化调度, 分析年末最佳水位。如:

Wang 等^[4]以年内发电效益最大和年末蓄能最大为目标, 分析龙羊峡水库年末水位对多年效益的影响; Lian 等^[5]考虑来水不确定性, 建立多目标优化调度模型, 对南水北调中线丹江口水库不同典型年年末水位进行计算。第 1 种方法需要大量实测数据进行参数率定, 并且历史来水情况与当前阶段来水情况的差异会使率定的参数产生偏差, 影响结果; 第 2 种方法通过建立优化调度模型求解年末水位, 可有效避免第 1 种方法的缺陷, 较为常用。

径流不确定性是影响多年调节水库年末水位控制的主要因素。随机优化方法利用径流出现概率或已知的概率分布, 对不同径流情景赋权, 求解满足约束的目标函数最大或最小期望值, 是处理径流不确定性问题的有效方法^[6-8]。多年调节水库年末水位需根据来水情况动态控制^[9], 其年末期望水位是调度方案制定的重要参考。因此, 本文将随机优化方法应用于黄河上游多年调节水库龙羊峡年末期望水位控制, 通过径流随机模拟方法, 考虑水库群多年经济效益, 建立梯级水库群多目标随机

收稿日期: 2023-08-07 修回日期: 2023-11-07 网络出版时间: 2024-03-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240319.1059.004>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200400); 国家自然科学基金项目(U2243601; U2243241); 水利部重大科技项目(SKR-2022021); 黄河水利科学研究院科技发展基金(黄科发 202220); 横向生产课题(TGJG-2023KYXM0002)

作者简介: 李航(1999—), 男, 河北邯郸人, 主要从事水库优化调度研究。E-mail: lihng@gs.zzu.edu.cn

通信作者: 李洁玉(1993—), 女, 山东菏泽人, 工程师, 博士, 主要从事水沙调控研究。E-mail: hzlijy@163.com

优化调度模型,使用理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)决策方法^[10-11],求解不确定来水条件下龙羊峡水库年末最佳水位。

1 研究区域与数据选取

1.1 研究区域

龙羊峡水库、刘家峡水库(以下简称龙、刘水库)是黄河上游有较强调蓄能力的骨干水库,运行方式以发电为主,兼顾防洪、灌溉、防凌、养殖等^[12-13]。龙羊峡水库作为黄河上游唯一多年调节水库^[14-15],其年末水位的确定对黄河上游地区的水量分配和发电效益有着重要影响。刘家峡水库位于龙羊峡水库下游,为不完全年调节水库。两座骨干水库联合调度,在黄河上游水量调节中发挥重要作用。因此,考虑龙、刘水库联合调度,优化龙羊峡水库年末水位。

1.2 数据选取

唐乃亥站为龙羊峡水库入库控制站,张娟等^[16]指出20世纪90年代以来唐乃亥站年径流量总体呈减少趋势,同时龙羊峡水库于1989年6月投产发电,故唐乃亥站1990年后的径流序列在当前一定时期内更具代表性,以唐乃亥站1990—2018年历史实测逐月流量为样本进行随机模拟。

黄河上游龙羊峡水库与刘家峡水库相距约438 km,龙、刘水库区间共有11座串联梯级水库(包括4座大型水库、6座中型水库、1座小型水库),其总调节库容约3.88亿m³,占刘家峡水库调节库容的9.9%,调节能力弱,故不作考虑。龙、刘水库区间内黄河干流和各支流的引退水量、蒸发量、下渗量等数据资料有限,各支流实际汇入水量统计困难,故本研究将龙羊峡水库出库流量作为刘家峡水库入库流量。龙、刘水库采用蓄丰补枯的运行方式,龙羊峡水库每年最高水位一般在10月份,将11月一次年10月的1个水利年作为调度期,探明龙羊峡水库水利年年末最优控制水位,以获得多年发电效益。

2 模型建立及求解

2.1 水库入库径流过程随机模拟

径流序列作为水库群随机优化调度模型的输入项具有较大不确定性,但复杂的径流过程往往具有一定的统计规律^[17]。综合考虑来水不确定性,利用径流随机模拟方法随机生成大量符合样本总体特征的径流过程,对水库群调度方案的制定具有重要

意义^[18],步骤如下:

水库入库年径流量分布线型确定。采用P-III分布、正态分布、伽马分布、对数正态分布、广义极值分布及指数分布6种分布线型对实测年径流量进行拟合,并使用均方根误差(root mean square error, RMSE)及K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验法对6种分布线型进行筛选和检验,以获取描述历史径流序列统计特征的最优分布线型。

基于拉丁超立方采样结合蒙特卡洛法(Latin Hypercube Sampling-Monte Carlo, LHS-MC)的年径流量随机模拟。传统蒙特卡洛法在解决不确定问题时需对已知概率分布进行大量随机模拟才能避免数据过于聚集,大量模拟数据使求解效率降低^[19-20],拉丁超立方采样方法可将已知概率分布进行分层处理,在不降低数据代表性的前提下提高求解效率。因此,采用LHS-MC对径流过程进行随机模拟^[21]。根据确定的最优分布线型,基于LHS-MC进行随机抽样,生成 I 个入库年径流量,记为 $\{R_i\}, i=1,2,\dots,I$;以历史 B 个实测年径流量为参照,记为 $\{R_b^*\}, b=1,2,\dots,B$;逐一挑选与第 i 个径流量 R_i 相差最小的历史径流量,若为 R_b^* ,则根据 R_i/R_b^* ,按照同倍比放大法对第 b 个实测年径流量对应的逐月流量过程进行缩放;以此类推,得到 I 组随机逐月流量过程。

2.2 目标函数

目前,针对径流不确定性的水库群优化调度最常用的是随机优化方法^[22]。考虑多年调节水库当前调度期发电效益及多年发电效益的随机优化模型目标函数如下:

水库群发电量期望值最大,表达式为

$$f_1 = \sum_{i=1}^I p_i \max \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T K_n q_{n,i,t} h_{n,i,t} \Delta t \right) \quad (1)$$

式中: f_1 为随机优化目标函数1; N 为水库个数; I 为入库流量总情景数; T 为调度期时段数; K_n 为第 n 个水库综合出力系数; $q_{n,i,t}$ 为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的发电流量,m³/s; $h_{n,i,t}$ 为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的发电水头,m; p_i 为第 i 个入库流量情景出现的概率; Δt 为计算时段,月。

龙羊峡水库年末期望水位最高,表达式为

$$f_2 = \sum_{i=1}^I p_i \max Z_{\text{end},1,i} \quad (2)$$

式中: f_2 为随机优化目标函数2; $Z_{\text{end},1,i}$ 为龙羊峡水库第 i 情景的年末水位,m。

2.3 约束条件设置

根据水库群承担的防洪、防凌、供水、发电及生态等任务,模型约束条件如下:

水量平衡约束为

$$V_{n,i,t+1} = V_{n,i,t} + (Q_{in,n,i,t} - Q_{out,n,i,t})\Delta t / 10^8 \quad (3)$$

式中: $V_{n,i,t}$ 、 $V_{n,i,t+1}$ 分别表示第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段初、时段末水库的蓄水量, 亿 m^3 ; $Q_{in,n,i,t}$ 、 $Q_{out,n,i,t}$ 分别表示第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段内平均入库、出库流量, m^3/s 。

出库流量约束为

$$Q_{min,n,i,t} \leq Q_{out,n,i,t} \leq Q_{max,n,i,t} \quad (4)$$

式中: $Q_{min,n,i,t}$ 、 $Q_{max,n,i,t}$ 分别为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段允许的最小、最大出库流量, m^3/s 。

坝前水位约束为

$$Z_{min,n,i,t} \leq Z_{n,i,t} \leq Z_{max,n,i,t} \quad (5)$$

式中: $Z_{min,n,i,t}$ 、 $Z_{max,n,i,t}$ 分别为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的允许坝前下限、上限水位, m; $Z_{n,i,t}$ 为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的水库平均水位, m。

电站出力约束为

$$N_{min,n,i,t} \leq N_{n,i,t} \leq N_{max,n,i,t} \quad (6)$$

式中: $N_{min,n,i,t}$ 、 $N_{max,n,i,t}$ 分别为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的最小、最大出力, kW; $N_{n,i,t}$ 为第 n 个水库第 i 情景在第 t 时段的平均出力, kW。

非负约束: 以上所有变量均含有实际物理意义, 均为非负数。在满足上述约束条件的情况下, 采用多目标优化算法对模型进行求解^[23]。

2.4 基于 TOPSIS 方法的年末最佳水位决策

理想点法(TOPSIS)又称优劣解距离法, 适用于解决有限方案的多目标决策问题^[24]。使用 TOPSIS 决策方法对模型 Pareto 方案集进行决策, 选取权衡当年和多年效益的最优年末水位控制调度方案。

3 计算结果

3.1 径流随机模拟结果

采用 P-III 分布、正态分布、伽马分布、对数正态分布、广义极值分布及指数分布 6 种分布线型对样本数据进行拟合, 通过比较各线型 RMSE 值并进行 K-S 检验, 选取能够描述样本数据统计特征的最优分布线型, 结果见表 1, 与其他分布线型相比, 广义极值分布更能描述唐乃亥站实测年径流量的统计特征。

表 1 分布线型选取及检验结果

Tab. 1 Distribution line selection and test results

拟合检验	P-III 分布	正态分布	伽马分布	对数正态分布	广义极值分布	指数分布
RMSE	0.210 5	0.362 1	0.283 8	0.242 2	0.196 3	1.215 7
K-S 检验	通过	通过	通过	通过	通过	未通过

以 1990—2018 年唐乃亥站 29 年实测年径流量序列作为样本, 综合考虑模型求解质量及计算效率, 使用 LHS-MC 法随机生成唐乃亥站 200 个年径流量。以实测年径流量为参照, 按照同倍比放大法对逐月流量过程进行缩放, 得到 200 个随机逐月流量过程, 作为模型的输入数据。对模拟序列与原序列统计参数进行对比, LHS-MC 法随机模拟与实测序列统计参数相对误差在 10% 以内, 表明随机样本具有代表性, 见表 2。

表 2 不同年径流量序列统计参数结果

Tab. 2 Results of statistical parameters for different annual runoff series

年径流量序列	均值	变差系数	偏态系数
实测序列	182.800	0.252	0.865
LHS-MC法随机模拟序列	182.301	0.230	0.862

3.2 不确定来水情况下随机优化结果分析

龙羊峡水库 10 月份多年平均水位约为 2 590 m, 刘家峡水库 10 月份多年平均水位约 1 728 m, 本案

例以此为两水库起调水位。刘家峡水库年末水位限制为历史实测最高、最低水位(1 733~1 720 m)。计算龙羊峡水库年末水位和龙、刘水库年发电量的 Pareto 方案集。由此构建决策矩阵, 使用 TOPSIS 决策方法选取最佳调度方案, 见图 1。

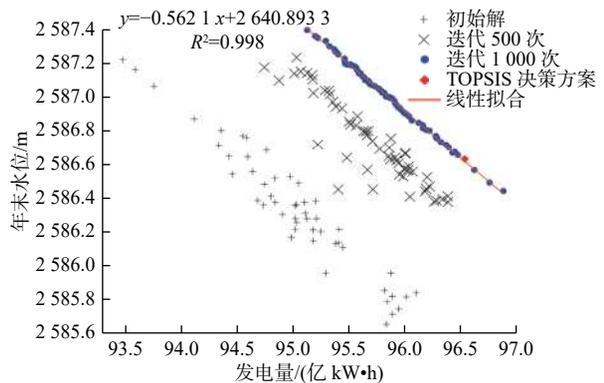


图 1 Pareto 方案求解迭代计算过程

Fig. 1 Calculation process of Pareto solution iterative

由图 1 可知, 使用多目标优化算法设定 50 个种群, 迭代 1 000 次寻优计算后, 龙羊峡水库年末水位

与龙、刘水库年发电量存在良好的线性负相关关系,说明龙、刘水库梯级电站当年发电量期望值与龙羊峡水库年末期望水位之间存在竞争关系,发电量总体期望值范围为 95.14 亿~96.89 亿 kW·h,对应龙羊峡水库年末期望水位范围为 2 586.45~2 587.41 m。

龙羊峡水库年末水位对次年的经济效益影响主要体现为发电量,依据电当量原理^[25],以年末水位计算年末蓄能,将年发电量和年末蓄能作为决策指标,使用 TOPSIS 方法对上述 Pareto 方案集中各调度方案进行决策。决策方案对应的龙羊峡水库月均水位过程期望值和龙、刘水库逐月发电量期望值及其分布见图 2,当龙羊峡水库以 2 590 m 为起调水位时,其年末期望水位为 2 586.64 m,对应年发电量期望值为 96.54 亿 kW·h,对应年末蓄能为 29.494 亿 kW·h。此方案全年水位过程符合龙羊峡水库蓄丰补枯的调度策略:本年 11 月至次年 5 月发电量可维持在 7 亿 kW·h 左右,水库水位逐渐下降;6 月份来水量增多,下泄水量稍大,发电量较之前略高,水库水位开始升高;7—9 月在满足汛限水位控制的前提下大量蓄水,提升发电效益;9 月 16 日起开始逐步向正常蓄水位过渡。

4 讨论

4.1 来水频率对年末水位和发电量的影响

在 3.2 节确定的决策方案中,选取丰水年(频率 25%)、平水年(频率 50%)和枯水年(频率 75%)为典型年,其逐月水位过程和发电量见图 2。如图 2(a)所示,在相同起调水位下,丰、枯水年龙羊峡水库水位和期望水位在 3 月份出现明显差异,且从 11 月一次年 10 月,不同来水频率下水位差异逐渐增大,平水年水位过程与期望水位过程差异较小。随着来水频率增加,龙羊峡水库年末水位降低。如图 2(b)所示,不同典型年的发电量与期望发电量差异在 6—10 月份较为明显,主要由于龙羊峡水库入库流量和水位差异较大。总体来看,来水越丰龙羊峡水库逐月水位越高,龙羊峡水库年末水位越高,龙、刘水库总发电量越大。

4.2 起调水位对年末水位和发电量的影响

根据历史运行资料,龙羊峡水库 10 月末水位在 2 570~2 600 m,每隔 10 m 设置 4 种龙羊峡水库起调水位情景,其余条件同 3.2 节。基于随机优化模型及 TOPSIS 方法,求解最优逐月期望水位和发电量见图 3,以此探究龙羊峡水库起调水位对其年末期望水位和龙、刘水库发电量期望值的影响。

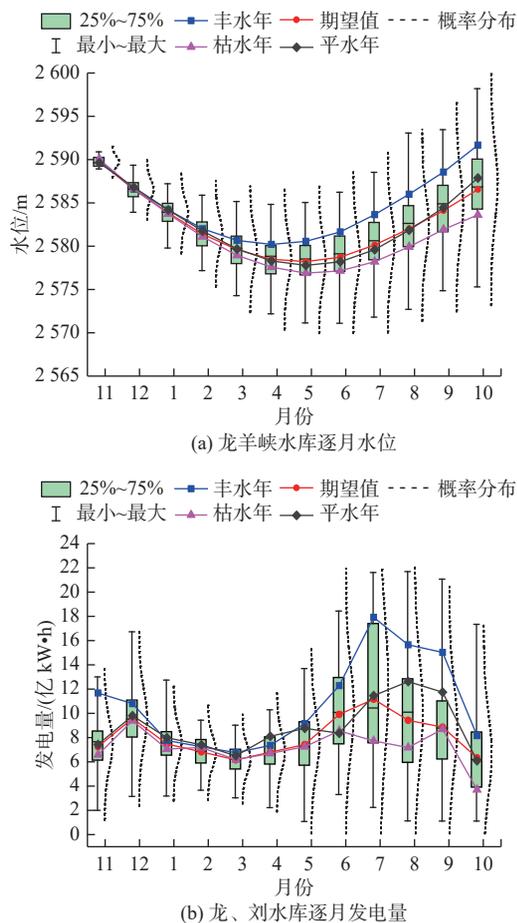


图 2 TOPSIS 决策方案结果

Fig. 2 TOPSIS decision solution

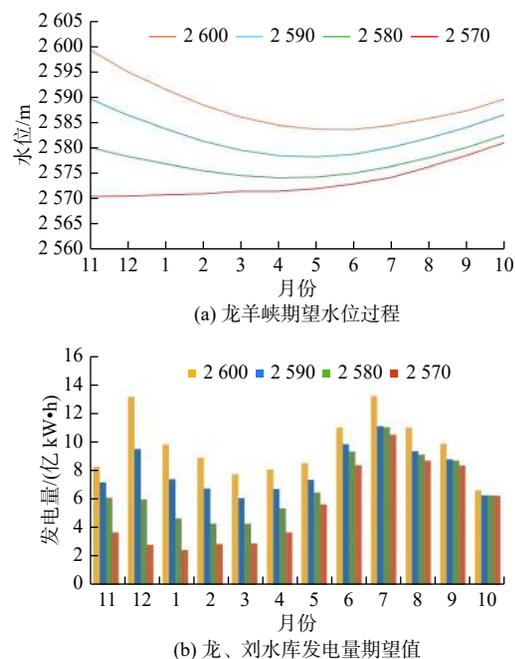


图 3 不同起调水位下水位过程和发电量对比

Fig. 3 Comparison of water level process and power generation under different starting water level

年末期望水位 [图 3(a)] 对比可见,随着起调水位的降低,年末期望水位也随之降低。2 600 m 起调

水位对应年末期望水位最高,为 2 589.7 m, 2 570 m 起调水位对应年末期望水位最低,为 2 581.1 m,说明起调水位是年末期望水位的影响因素之一。由图 3(b)可知,起调水位主要影响非汛期的水量调度过程及发电量。起调水位越高时,非汛期倾向于消落更高的水位以增加发电量;起调水位越低时,非汛期更倾向于维持水头。起调水位为 2 570 m 时,龙羊峡水库 11 月一次年 10 月为蓄水过程,以获得更高的年末水位,保障未来的发电量。4 种起调水位情景下龙羊峡水库年末期望水位范围在 2 581.1~2 589.7 m,所以从总体效益期望最大角度考量,龙羊峡水库年末最佳水位应控制在 2 580~2 590 m。实际调度运行条件下龙羊峡水库 10 月末水位在 2 570~2 600 m,基于随机优化方法可将 30 m 范围缩减为 10 m。

4.3 年末期望水位可靠性验证

以连续 2 个水利年为例,设置丰、平、枯两两组合的 9 种来水情景和 2 种发电量计算模式,探讨随机优化调度求得的年末期望水位对保证多年发电

效益的能力。

模式 1:以 2 590 m 和 1 728 m 分别作为龙、刘水库第 1 年的起调水位;采用 3.2 节确定的年末期望水位(2 586.64 m)和 1 728 m 分别作为龙、刘水库第 1 年的年末水位和第 2 年的起调水位;以 2 580 m 和 1 728 m 分别作为龙、刘水库第 2 年的年末水位。模式 2:以 2 590 m 和 1 728 m 分别作为龙、刘水库第 1 年的起调水位;以 1 728 m 作为刘家峡水库第 1 年的年末水位和第 2 年的起调水位;以 2 580 m 和 1 728 m 分别作为龙、刘水库第 2 年的年末水位。两种模式 9 种情景计算结果见表 3。2 种模式两库的计算第 1 年起调水位和第 2 年年末水位均相同,区别为是否在第 1 年末采用年末期望水位进行水位控制。在不同来水情景下,模式 2 计算的发电量即为该情景两个水利年理论最大发电量,计算模式 1 发电量与模式 2 发电量的比值,即可得出采用年末期望水位对保障多年发电效益的可靠性。9 种来水情景中,模式 1 发电量略小于模式 2 发电量,以年末期望水位对龙羊峡水库年末水位进行控制时,两年发电量的可靠性均在 98% 以上。

表 3 不同来水情景 2 种计算模式发电量对比

Tab. 3 Comparison of power generation of two calculation modes under different water inflow scenarios

情景设置	模式1发电量/ 亿kW·h	模式1第1年 年末水位/m	模式2发电量/ 亿kW·h	模式2第1年 年末水位/m	年末水位差值/ m	发电量差值/ 亿kW·h	可靠性/%
丰-丰	230.189 9		232.150 1	2 584.17	2.47	1.960 2	99.16
丰-平	218.017 1		219.983 1	2 584.07	2.57	1.966 0	99.11
丰-枯	203.765 6		206.608 2	2 583.79	2.85	2.842 6	98.62
平-丰	218.115 2		219.465 0	2 583.71	2.93	1.349 8	99.38
平-平	205.703 0	2 586.64	206.434 0	2 583.01	3.63	0.731 0	99.65
平-枯	191.451 5		192.416 4	2 580.23	6.41	0.964 9	99.50
枯-丰	204.647 5		204.683 8	2 581.98	4.66	0.036 3	99.98
枯-平	192.235 3		192.981 6	2 579.25	7.39	0.746 3	99.61
枯-枯	177.983 8		178.760 6	2 579.23	7.41	0.776 8	99.57

5 结论

多年调节水库年末水位的确定是水库优化调度领域较难解决的问题,以龙、刘水库为例,建立不确定性来水条件下多年调节水库年末最佳水位确定方法,并探讨来水频率和起调水位对年末水位和多年发电效益的影响,结果表明:

不确定来水条件下,龙、刘水库梯级电站当年发电量期望值与年末蓄能之间存在竞争关系,发电量总体期望值范围为 95.14 亿~96.89 亿 kW·h,对应龙羊峡水库年末期望水位范围为 2 586.45~2 587.41 m。

不同来水频率下,6—10 月龙羊峡水库水位及龙、刘水库发电量差异较大;来水频率越低,龙羊峡水库年末水位越高,龙、刘水库发电量越大。

起调水位对非汛期发电量影响较大,基于随机优化保证总体效益最大时,龙羊峡水库年末最佳水位应控制在 2 580~2 590 m,相对于实际运行情况,年末水库控制范围大幅缩减。

以随机优化得到的最佳年末期望水位对龙羊峡水库年末水位进行控制时,保障发电效益的可靠性在 98% 以上。

参考文献:

- [1] 夏致远,钟平安,徐斌,等.基于专家系统的多年调节水库年消落水位优选[J].水力发电学报,2019,38(4):87-95. DOI: 10.11660/slfdbx.20190409.
- [2] 解阳阳,王义民,黄强.龙羊峡水库年末水位控制与汛期弃水研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):223-227,234. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.01.004.
- [3] 毕玉晓,陈森林,涂晶晶,等.狮子滩水库期末蓄水水位控制规则研究[J].中国农村水利水电,2013(9):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2013.09.001.
- [4] WANG J L, HUANG W B, MA G W, et al. Determining the optimal year-end water level of a multi-year regulating storage reservoir: A case study[J]. Water Science Technolgy Water Supply, 2016, 16(2): 284-294. DOI: 10.2166/ws.2015.138.
- [5] LIAN J J, SUN X Z, MA C. Multi-year optimal operation strategy of Danjiangkou Reservoir after dam heightening for the Middle Route of the South-North Water Transfers Project[J]. Water Science Technolgy Water Supply, 2016, 16(4):961-970. DOI: 10.2166/ws.2016.010.
- [6] 刘寒青,赵勇,李海红,等.基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):34-41,137. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0005.
- [7] 刘强,钟平安,徐斌,等.三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):62-70. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.05.010.
- [8] 叶舟,周旦娜,陈芳.基于网络流模型利用台风雨资源的舟山岛地下水调度研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):18-30. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.002.
- [9] 蒋志强,廖想,纪昌明,等.两河口水库三种年末消落水位控制方式研究[J].水力发电学报,2021,40(1):43-53. DOI: 10.11660/slfdbx.20210105.
- [10] 崔思梦,吴梦洋,王小军,等.基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J].水利学报,2023,54(8):967-977. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230022.
- [11] 王杰,李占玲.基于熵权的TOPSIS综合评价法在大气环流模式优选中的应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):14-21. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0023.
- [12] 贺顺德,宋伟华,崔鹏,等.龙羊峡水库现状防洪运用条件及汛限水位论证[J].人民黄河,2020,42(6):22-26,36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.005.
- [13] 沈利平,贾怀森,姬生才,等.刘家峡水库汛限水位动态控制研究[J].西北水电,2018(2):16-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2018.02.004.
- [14] 尚文绣,许明一,尚弈,等.龙羊峡水库调度对径流的影响及蓄补水规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):451-458. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0045.
- [15] 袁梦玲,刘昌伟,袁占荣,等.龙羊峡拱坝垂直位移变化规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):1010-1018. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0100.
- [16] 张娟,王幼慧,孙洪保.黄河唐乃亥以上地区径流量变化分析[J].水资源与水工程学报,2004(3):68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1672-643X.2004.03.018.
- [17] 刘欣欣,马细霞,程旭,等.月径流随机模拟序列优选方法[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):468-477. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0047.
- [18] 胡尧,舒征宇,李黄强,等.基于网格化产汇流的径流式小水电发电负荷预测[J].水利水电技术(中英文),2022,53(11):146-154. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.11.014.
- [19] 张建波,张忠伟,杨洋.改进拉丁超立方蒙特卡洛模拟[J].吉林大学学报(信息科学版),2018,36(4):452-458. DOI: 10.19292/j.cnki.jdxxp.2018.04.015.
- [20] 马杰,余泽蕾,王胜蓝,等.基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J].环境科学,2023,44(10):5666-5678. DOI: 10.13227/j.hjlx.202211064.
- [21] 徐琬莹,付飞,吕建华,等.基于LHS-MC青岛市工业源VOCs排放清单及不确定性[J].环境科学,2021,42(11):5180-5192. DOI: 10.13227/j.hjlx.202103148.
- [22] 周建中,杨佩瑶,覃晖,等.水库(群)随机优化调度研究进展与展望[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):19-26. DOI: 10.13245/j.hust.220803.
- [23] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X, et al. An indicator based multi-objective evolutionary algorithm with reference point adaptation for better versatility[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, PP(99). DOI: 10.1109/TEVC.2017.2749619.
- [24] 李星,左其亭,韩淑颖,等.塔里木河流域水资源适应性利用能力评价及调控[J].水资源保护,2021,37(2):63-68. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.010.
- [25] 何俊仕,林洪孝.水资源规划及利用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

Year-end water level optimization of Longyangxia Reservoir under uncertain inflow conditions

LI Hang^{1,2}, LI Jieyu^{2,3}, WANG Yuanjian^{2,3}, LI Jiang⁴, WEI Guanghui⁴

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 3. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, MWR, Zhengzhou 450003, China; 4. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841000, China)

Abstract: Multi-year regulation reservoirs are used to regulate the unbalanced water volume within and between years, and year-end water level control is linked to the overall benefits of the current year and the following several years. The water level at the end of the year is typically not fixed because of the unpredictability of natural inflow. It is worth studying how to optimize the year-end water level of multi-year regulation reservoirs based on the uncertainty of inflow to ensure their long-term comprehensive benefits.

Taken the multi-year regulating Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir in the upper reaches of the Yellow River as a case study, the year-end water level is optimized under uncertain inflow conditions. The Latin Hypercube Sampling-Monte Carlo (LHS-MC) method was applied to generate random reservoir inflows. On this basis, a multi-objective stochastic optimization model for cascade reservoirs considering the uncertain inflow was established. The best scheme from the Pareto solution set of the current-year power output and the year-end water level was obtained based on the TOPSIS decision-making method. The effects of runoff frequency and initial water level on year-end water level and power output were investigated, and the reliability of year-end expected water level on multi-year power output was verified.

The results show that the initial water levels of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir are 2,590 m and 1,728 m, respectively, the total expected power output ranges from 9.514 billion kW·h to 9.689 billion kW·h, and the year-end water level of Longyangxia Reservoir ranges from 2,586.45 m to 2,587.41 m. The higher the year-end water level, the less power is generated. The water level of Longyangxia Reservoir and the power generation of the cascade reservoirs differ greatly from June to October under different inflow frequencies. The lower the frequency of runoff and the higher the initial water level of Longyangxia Reservoir, the higher the year-end water level of Longyangxia and the higher the power output of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoirs. The optimal year-end water level of Longyangxia Reservoir should be controlled between 2,580 m and 2,590 m based on the stochastic optimization model, which is a significant reduction from the actual operation. When the optimal year-end expected water level obtained by stochastic optimization is used to control Longyangxia Reservoir, the reliability of guaranteeing the power output benefit is above 98%.

Overall, under the uncertainty inflow scenarios, there is a competitive relationship between the annual estimated power output of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir and the year-end expected water level of Longyangxia Reservoir. The main determinants of Longyangxia Reservoir's year-end water level are the reservoir's inflow frequency and initial water level. This approach has a high degree of reliability and significantly narrows the range of year-end water level under the existing dispatching mechanism.

Key words: multi-year regulating reservoir; year-end water level; Longyangxia Reservoir; uncertainty; stochastic optimal operation