

综合考虑多目标的梯级水库优化调度模型

李国栋 白文举

山西水务集团建设投资有限公司, 山西省太原市 030006

摘要: 水库通常具有防洪、发电等多方面功能目标, 单一的调度目标已经无法满足需要。本文以长江水库为研究对象考虑了发电、航运、防洪、生态环境需求, 建立协调发电量及弃水量的梯级水库联合调度模型。结果表明: 在三峡梯级的防洪调度中, 为了确保水库大坝的安全和上游淹没损失最小, 要求水库尽可能多泄洪, 使在一次调洪中的最高水位越低越好, 而在确保下游生态和防洪要求时, 则要求水库尽可能多蓄洪, 使下泄的洪峰流量越小越好。

关键词: 梯级水库; 多目标; 优化调度; 遗传算法

DOI:10.69979/3060-8767.24.1.016

引言

水库通常具有防洪、发电、通航、发电等多方面功能效益, 各功能之间相互制约、相互影响, 传统水电站水库的调度方式通常只考虑单一的电站、目标或任务, 忽视或简化了梯级上下游水电站水库之间复杂的联系, 无法统筹协调多个调度目标以及满足水库群水资源的综合利用需求, 因此, 水库的调度方式通常只考虑单一运用于复杂流域水库群多目标优化调度决策, 虽然水库调度的多目标调度和决策方法已有一定发展, 但仍有局限性^[1]。

本文以长江江流河段为研究对象, 以三峡水利枢纽为调控主体, 根据发电、航运、防洪、生态环境需求, 建立协调发电量及弃水量的梯级水库联合调度模型, 以遗传算法求得不同典型年的最优调控策略, 为水库调度工作提供参考。

1. 研究区概况。

长江流域洪水以强降雨形成的洪水为主, 发生洪水的区域与强降雨的时间相吻合。总集水面积约 100 万平方公里的长江流域, 约有 40% 的地区受水流和地形影响没有暴雨, 大部分洪水发生在金沙江以下区域。常年降雨量大于 50 毫米的长江上游地区暴雨日数常年平均为 3~5 天, 暴雨中心频繁出现的川西盆地边缘地区最多可达 7 天。单日暴雨最大, 普遍在 200 毫米左右; 暴雨 3 天最大, 一般在 300 毫米左右。长江三峡两岸山多、坡陡、河多、槽蓄少。长江流域的暴雨形成了短则 7~10 天, 长则 1 个多月的高峰值洪水。长江出三峡后, 江面

变宽, 水流变缓, 调蓄能力增加, 退水过程长, 涨水缓慢, 如果遇到某一支流涨水, 就会出现局部涨水现象, 形成连续多次洪峰的洪水, 一次洪水过程往往在 30 天到 60 天, 甚至更长, 如果遇到某一支流涨水, 就会出现宜昌、螺山、汉口和大通等长江干流主要控制站多年平均最大洪峰流量都在 500 立方米/秒以上。宜昌站测得最大洪峰流量为 1896 年的 71000 立方米/秒, 历史调查洪峰流量为 1870 年的 105000 立方米/秒。

2. 优化调度模型

2.1 目标函数:

调度模式包括四大目标: 发电, 航运, 防洪, 生态环境。其发电对象为发电能力最大的水电站; 以满足下游航道航运经济效益的通航保证率为航运目标; 防洪目标是安全泄流和最小泄流槽下泄流量超过下游河道; 满足下游流域生态水量要求的生态环境目标。

(1) 发电目标^[2]

$$E = \max \sum_{i=1}^N A_i Q_i H_i \Delta t \quad (1)$$

式中, E 为最大发电量, kW·h; N 为时段数目; A_i 为出力系数; Q_i 为发电引用流量, m³/s; H_i 为水头, m; Δt 表示时段长度, h。

(2) 航运目标^[3]

$$Y = \max f_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i(Q_i^i) \quad (2)$$

式中, f₁ 为下游航运调度的目标函数; k_i 为通航保证

率; Q_2^i 为下泄流量, m³/s。

(3) 防洪目标^[4]

$$R_f = \min \left[\sum_{i=1}^N (\bar{Q}_i - Q_s) \right] (\bar{Q}_i > Q_s) \quad (3)$$

式中, R_f 为防洪风险指标; Q_s 表示下游河道的安全泄量, 单位为 m³/s; \bar{Q}_i 为平均泄流, 单位为 m³/s; $(\bar{Q}_i - Q_s)$ 表示下泄流量与下游河道安全泄量的差值。

(4) 环境生态目标^[4]

$$D_o = \max \left| \sum (1 - |\bar{Q}_i - Q_i^{st}| / Q_i^{st}) / N \right| \quad (4)$$

式中, D_o 表示生态流量满足度; Q_i^{st} 为对应的流量, 单位为 m³/s。

2.2 约束条件^[5-10]

(1) 入库水量平衡约束条件

$$V_{i+1} = V_i + (Q_{i+1}^r - \bar{Q}_{i+1}) \times t \times \theta \quad (5)$$

式中, V_{i+1} 与 V_i 分别表示 i+1 时段与 i 时段的库容, 单位为 m³; $Q_{i+1}^r(m+s)$ 表示 i+1 时刻的入库径流, 单位为 m³/s; t 表示时间, 单位为 s; θ 表示转换系数, 用以转换流量和水量。

(2) 入库水位约束条件

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (6)$$

式中, H_i 表示 i 时刻的水位, 单位为 m; H_{\min} 示调度期最低水位, 单位为 m; H_{\max} 表示调度期最高水位, 单位为 m。

(3) 库容约束条件

$$Z_i = f_2(V_i) \quad (7)$$

式中, Z_i 表示库水位, 单位为 m; f_2 表示库水位、库容关系。

(4) 电站发电能力约束条件

$$P^{\min} \leq 9.81 \times Q_i^{fd} \times H_i^{fd} \times \eta \leq P_i^{\max} \quad (8)$$

式中, P_{\min} 为保证出力, 单位为 kW; P_i^{\max} 为最大出力, 单位为 kW; Q_i^{fd} 为发电所需要的流量, 单位为 m³/s; H_i^{fd} 为发电所需要的水头, 单位 m; η 为电机效率。

(5) 水库泄流能力约束条件

$$Q_i^{\max} = f_3(Z_i) \quad (9)$$

式中, Q_i^{\max} 为水库最大过流能力, 单位为 m³/s; f_3 为水位、水库最大泄流能力关系。

(6) 水库日均下泄流量约束条件

$$Q_i^d \geq Q_{\min}^d \quad (10)$$

式中, Q_i^d 为日均下泄流量, m³/s; Q_{\min}^d 为日均最小下泄流量, m³/s。对三峡非汛期 $Q_{\min}^d = 5000 \text{m}^3/\text{s}$ 。

(7) 电站泄流能力约束条件

$$Q_i^{fd \max} = f_4(Z_i) \quad (11)$$

式中, $Q_i^{fd \max}$ 表为最大泄流能力, 单位为 m³/s; f_4 为水位、电站最大泄流能力关系。

(8) 调度水库初、末水位约束条件

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_x \\ Z_N &= Z_m \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, Z_x 表示初始蓄水位; Z_m 表示调度期末水位。

3. 计算方法与结果分析

3.1 计算方法

采用遗传算法(GA)的选择、交叉和变异操作求优策略。

Step1: 对参数进行设置, 包括: 调度周期、入库径流、电站基础数据等, 还有遗传算法的种群大小、进化代数、选择概率、交叉概率、变异概率。符合条件的初始种群是随机生成的。调度初期水位设为提前蓄水水位, 调度末期水位设为三峡水库防洪限制水位, 需小于正常蓄水水位, 且需大于防洪限制水位, 形成的下泄流量需小于三峡水库最大下泄流量。初始种群是在上述约束条件下由随机数量产生的。

Step2: 对群体进行评估。适应度函数的选择采用惩罚函数的方法, 将当前种群中最优秀的个体用排序法保存为最优化的搜索解法。

Step3: 自选动作。根据个体在种群中的适应程度, 通过排序法, 受选择概率阈值的控制。

Step4: 十字交叉进行。Step3 选择的个体会受交叉概率阈值控制, 判断是否采用均匀算术交叉产生新的交叉个体。

Step5: 变盘操作。对个体的某些基因是否进行非

均匀变异操作,用概率阈值进行控制。

Step6:判断终止。不满足终止条件时返回 Step2。

3.2 结果分析

本计算资料来自文献^[11-17],计算结果为保证出力与枯水年份年发电量的逆比关系更为明显。理由是:在给定用水枯水期的水库调度中,如果保证出力越大,就要求水库为这部分出力预留更多的库容,水库可利用的库容就会减少,年发电量和通航条件就越小;反之,保证出力越小,水库可利用的库容就越大,年发电量和生态条件也就越大,如果保证出力越大,水库可利用的库容保证出力不随发电量增加而减少,当调度期间来水量较多、水库调节能力较大、水库可充分调节来水时。

尽管保证出力随发电量变化很小,但在枯水期,仍有一定幅度的改变,显示出动力不足的状况。理由是:三峡水库是季调水库,又有防洪、航运、生态等方面的限制,再加上三峡流域来水的时间和空间分别很不均匀,因此在汛期会产生弃水、枯水期却出力不足的情况下,不能在时间上完全重新分配年内来水。

在三峡梯级防洪调度中,为确保水库大坝安全,确保上游淹没损失最小,在确保下游生态和防洪要求时,要求水库尽可能多泄洪,使最高水位在一次调洪中越低越好,使洪峰下泄流量越小越好。

4. 结论

建立梯级水库联合调度模型,统筹发电、航运、防洪、生态等,以不同典型年份的遗传算法求得调控的最优方略。在三峡梯级防洪调度中,为确保水库大坝安全,确保上游淹没损失最小,在确保下游生态和防洪要求时,要求水库尽可能多泄洪,使最高水位在一次调洪中越低越好,使洪峰下泄流量越小越好。

参考文献

[1]魏晓雯. 鱼类繁衍期三峡水库多目标优化调度模型及应用[D]. 北京:华北电力大学,2020.
[2]徐国宾,王健,马超. 耦合水质目标的三峡水库非汛期多目标优化调度模型[J]. 水力发电学报,2011,30(3):78-84.
[3]刘晓神. 金沙江下游梯级水电站发电与航运优化调度研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.

[4]赵明. 考虑汛期鱼类繁衍需求的三峡水库多目标优化调度策略研究[D]. 天津:天津大学,2017.
[5]郭建斌,梁翔,杨沾,等. 考虑动态出力系数的某水库优化调度模型及应用[J]. 水电能源科学,2022,40(2):79-83.
[6]徐刚,舒远丽,任玉峰,等. 基于深度学习的三峡水库实时防洪调度模型[J]. 水力发电学报,2022,41(3):60-69.
[7]吴月秋. 梯级水库群多目标优化调度方案决策及风险分析研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.
[8]张余龙. 长江上游水库群一维水动力模型应用及其与水文、调度模型耦合研究[D]. 华中科技大学,2021.
[9]杨冬. 水库调度中的多目标优化问题的研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
[10]杨娜,梅亚东,于乐江. 考虑天然水流模式的多目标水库优化调度模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):85-89.]
[11]查港. 长江上游大规模水库群联合防洪调度研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
[12]王权森. 长江上游水库群防洪系统全景调度及风险评估与决策方法[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
[13]魏晓雯. 鱼类繁衍期三峡水库多目标优化调度模型及应用[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.
[14]张继鹏. 三峡水库水沙多目标调控模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.
[15]张忠波. 三峡与金沙江下游梯级水库群发电优化调度研究[D]. 天津:天津大学,2014.
[16]王俊娜. 改善三峡水库非汛期水质的调度方式研究[D]. 天津:天津大学,2008.
[17]屈亚玲. 三峡梯级水库多目标联合优化调度模型研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
李国栋 1983.05 汉族,忻州市忻府区 副高职称 科技创新中心主任 太原理工大学研究生 研究方向:水库河道清淤,固废资源生态转化
万家寨水务控股集团有限公司科技研发项目 (SWJT-2022-4):智慧水务调峰节能控制系统研究。