

Derivations of the Xiang River Reservoirs Operation Rule Curves Considering Flow Demand in Multiple Control Sections

Zhikai Yang¹, Yini Liu¹, Xiaoqing Zhou², Pan Liu^{1*}, Bo Ming¹, Wei Huang²

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha Hunan

Email: *liupan@whu.edu.cn

Received: Jun. 24th, 2019; accepted: Jul. 16th, 2019; published: Jul. 26th, 2019

Abstract

The construction of cascade reservoirs has greatly promoted the development and utilization of water resources in the Xiang River. However, a single reservoir operating mode is adopted between the cascades, and the various utilities of the reservoirs cannot be fully exploited. Based on the joint operation of nine hydropower stations in the Xiang River, the main objective is ensuring the ecological flow demand of control sections, and multiple targets such as water supply, irrigation and power generation are also taken into account. A multi-objective optimization model for the Xiang River's cascade reservoirs is established. The cuckoo search algorithm is used to optimize the multi-objective operating curve rules, so that the ecological guarantee rate of each control section and the downstream Changsha integrated hub is above 99%. Meanwhile, the water supply guarantee rate, the irrigation guarantee rate and the power generation guarantee rate of the cascade reservoirs are as far as possible to meet the actual production.

Keywords

Operating Rule Curves, Comprehensive Utilization Reservoir, Multi-Reservoir Operation, Cuckoo Search Algorithm, The Xiang River

考虑多控制断面流量需求的湘江水库群优化调度图研究

杨智凯¹, 刘旖旎¹, 周小青², 刘攀^{1*}, 明波¹, 黄威²

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙

Email: *liupan@whu.edu.cn

作者简介: 刘攀, 教授, 研究方向: 水文水资源。

*通讯作者。

收稿日期：2019年6月24日；录用日期：2019年7月16日；发布日期：2019年7月26日

摘要

湘江梯级水库的建设促进了水资源的开发利用，但目前各梯级间采用单一水库调度模式，水库群各目标职能无法充分发挥。本文通过对湘江流域9座水电站联合调度，以保障多控制断面生态流量需求为主要目标，兼顾供水、灌溉和发电等多目标，建立湘江梯级水库群多目标调度图优化模型。采用布谷鸟搜索算法优化多目标调度图，使得各控制断面和下游长沙综合枢纽生态供水保证率在99%以上，同时使梯级水库供水保证率、灌溉保证率和发电保证率尽量达到实际生产要求，梯级效益得到有效保障。

关键词

调度图，综合利用水库，多目标水库调度，布谷鸟搜索算法，湘江

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水库群优化调度是一个多目标、多阶段、非线性和强约束的复杂决策优化问题[1] [2]。而水库调度图作为一种指导水库运行的有效工具，具有简单、直观、操作性强等优点[3] [4]。其因而被广泛应用于水库实际调度中，作为核算水库运行效益指标、评价水库实际调度运行优劣的基本依据[5]。水库调度图的传统编制方法一般通过已有的实测水文资料或选用典型年资料，进行径流调节计算各种兴利调度线，一般需要人工修正调度线，存在一定主观性，因此存在优化的空间[6]。刘攀等采用基于历史径流资料的隐随机方法，分别建立了多年期望调度模型以及强调特定年发电风险的调度模型；采用多目标遗传算法 NSGA-II 计算程序求解，进行水库优化调度图的编制[5]。周研来等以丹江口水库为研究对象，构建了防洪、供水、发电及生态等调度目标相权衡的多目标调度图优化模型来模拟指导水库调度运行，探讨了多目标优化调度图在该水库的适用性[7]。姬晶等提出了一种生态因子 ecoflow 指标，构建了水库发电量 - 发电保证率 - 生态目标的多目标优化调度模型，并考虑了四大家鱼和中华鲟的生态流量约束，以三峡水库为研究对象，生成了多个调度方案，为同时考虑发电效益和生态效益提供了可行方案[8]。现行水库优化调度图侧重于水库运行的经济效益最大化，而不注重于考虑水库下游的生态需求，对水库群优化调度图考虑多个控制断面流量需求的研究较少。因此，本文根据实际调度需要，考虑多控制断面生态流量需求，建立流域水库群综合利用调度模型；采用智能算法布谷鸟搜索算法对模型进行求解。以湘江水库群的调度问题为研究背景，对考虑多控制断面流量需求的湘江水库群综合利用调度的优化设计问题进行研究。

2. 研究方法

2.1. 供水规则

流域水库群调度规则是用来指导各水库针对不同用水户，做出相应决策和控制整体运行效益的依据[9]。对于综合利用水库，根据其各功能的优先级，通过各功能限制供水线将调度图划分为多个调度决策区。综合利用水库一般具有生态、供水、灌溉、发电、防洪等功能，图 1 表示的是综合利用水库调度图的其中一种形式。

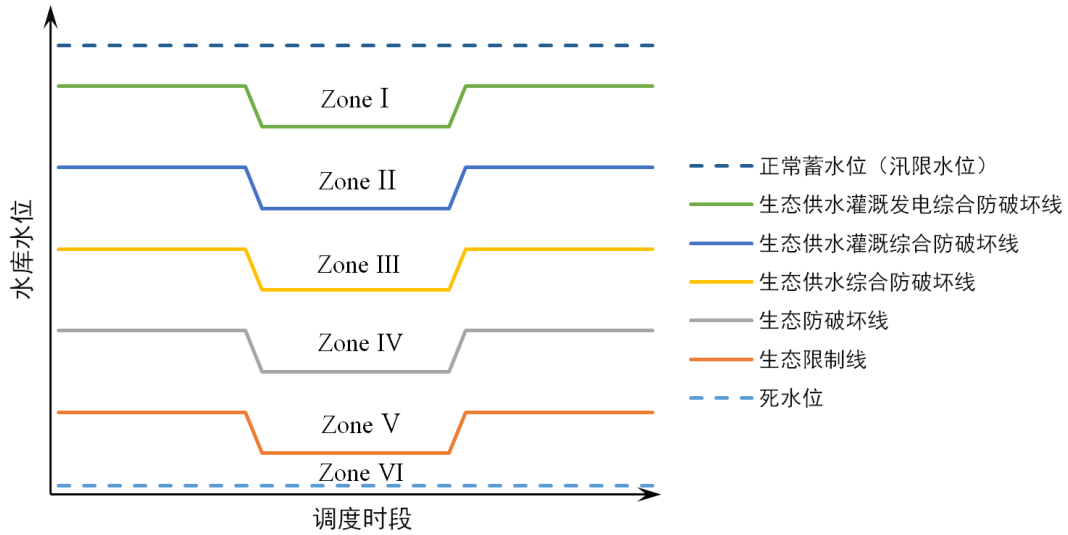


Figure 1. Example of reservoir operating rule curves for comprehensive utilization
图 1. 综合利用水库调度图示例

图 1 中, 各功能调度限制线将水库的水位划分为六个调度决策区, 各调度决策区的调度决策描述如表 1 所示。

Table 1. Description of scheduling decision-making in decision-making area of comprehensive utilization of reservoir operating rule curves

表 1. 综合利用水库调度图决策区的调度决策描述

水库水位	调度决策区内各功能相应供水决策				调度总决策
	生态需水量 $D1$	供水需水量 $D2$	灌溉需水量 $D3$	发电需水量 $D4$	
Zone I	$D1$	$D2$	$D3$	$D4(\beta4 * N_{\text{保}})$	$Max\{D1 + D2 + D3, D4(\beta4 * N_{\text{保}})\}$
Zone II	$D1$	$D2$	$D3$	$D4(N_{\text{保}})$	$Max\{D1 + D2 + D3, D4(N_{\text{保}})\}$
Zone III	$D1$	$D2$	$D3$	$D4(\beta5 * N_{\text{保}})$	$Max\{D1 + D2 + D3, D4(\beta5 * N_{\text{保}})\}$
Zone IV	$D1$	$D2$	$\beta3 * D3$	$D4(\beta5 * N_{\text{保}})$	$Max\{D1 + D2 + \beta3 * D3, D4(\beta5 * N_{\text{保}})\}$
Zone V	$D1$	$\beta2 * D2$	$\beta3 * D3$	$D4(\beta5 * N_{\text{保}})$	$Max\{D1 + \beta2 * D2 + \beta3 * D3, D4(\beta5 * N_{\text{保}})\}$
Zone VI	$\beta1 * D1$	$\beta2 * D2$	$\beta3 * D3$	$D4(\beta5 * N_{\text{保}})$	$Max\{\beta1 * D1 + \beta2 * D2 + \beta3 * D3, D4(\beta5 * N_{\text{保}})\}$

注: $D4(N)$ 表示对于发电决策为 N 时对应的发电需水量。

2.2. 模型建立

经济性和可靠性是水库运行管理的两个目标, 经济性服从可靠性是水库运行与调度必须遵循的一个基本原则。对于湘江流域以供水(生态、生活、灌溉等)为主的综合利用水库, 考虑各控制断面最小流量目标的优化调度模型是以流域内水库群为调度对象, 以水库特性和水电站特性为约束, 在满足各控制断面最小流量需求的基础上, 尽可能发挥其他兴利效益的优化模型。

2.2.1. 目标函数

1) 水库群生态供水保证率最大化, 即

$$MaxR1(T) = Max \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \frac{\#[Q_m^E(t) \geq Q_m^{ED}]}{T} \quad (1)$$

2) 水库群生活供水保证率最大化, 即

$$MaxR2(T) = Max \sum_{t=1}^T \sum_{k1=1}^{K1} \frac{\#[Q_{k1}^L(t) \geq Q_{k1}^{LD}]}{T} \quad (2)$$

3) 水库群灌溉供水保证率最大化, 即

$$MaxR3(T) = Max \sum_{t=1}^T \sum_{k2=1}^{K2} \frac{\#[Q_{k2}^I(t) \geq Q_{k2}^{ID}(t)]}{T} \quad (3)$$

4) 水库群发电保证率最大化, 即

$$MaxR4(T) = Max \sum_{t=1}^T \sum_{k3=1}^{K3} \frac{\#[P_{k3}(t) \geq P_{k3}^{firm}]}{T} \quad (4)$$

5) 水库群总发电量最大化, 即

$$MaxP(T) = Max \sum_{t=1}^T \sum_{k3=1}^{K3} P_{k3}(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中: $R1(T)$ 、 $R2(T)$ 、 $R3(T)$ 和 $R4(T)$ 分别为流域水库群整体的生态供水保证率、生活供水保证率、灌溉供水保证率和发电保证率; $P(T)$ 为流域水库群的总发电量; t 和 T 分别为调度时期内时段编号和总时段数; m 和 M 分别为流域内生态流量控制断面编号和总断面数; $k1$ 、 $k2$ 、 $k3$ 、 $K1$ 、 $K2$ 和 $K3$ 分别为流域内具有生活供水功能的水库编号、具有灌溉功能的水库编号、具有发电功能的水库编号、具有生活供水功能的水库总数、具有灌溉功能的水库总数和具有发电功能的水库总数。 $Q_m^E(t)$ 和 Q_m^{ED} 分别为生态流量控制断面 m 第 t 时段的流量和最小需水流量; $Q_{k1}^L(t)$ 和 Q_{k1}^{LD} 分别为水库 $k1$ 第 t 时段生活供水流量和需水流量; $Q_{k2}^I(t)$ 和 $Q_{k2}^{ID}(t)$ 分别为水库 $k2$ 第 t 时段的灌溉供水流量和需水流量; $P_{k3}(t)$ 和 P_{k3}^{firm} 分别为水库 $k3$ 第 t 时段的出力及其保证出力。

2.2.2. 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V_k(t) = V_k(t-1) + (Q_{in}^k(t) - Q_{out}^k(t)) \Delta t \quad (6)$$

2) 流量平衡约束

$$Q_{in}^{k+1}(t) = Q_{out}^k(t) + q^{k+1}(t) \quad (7)$$

3) 水库水位约束

$$Z_{min}^k(t) \leq Z_n(t) \leq Z_{max}^k(t) \quad (8)$$

4) 泄流能力约束

$$Q_{out}^k(t) \leq Q_{max}^k(t) \quad (9)$$

5) 电站出力约束

$$P^k(t) \leq P_{max}^k(t) \quad (10)$$

6) 调度线形状约束, 指各调度线不交叉

$$L_{x-1}^k \leq L_x^k \quad (11)$$

式中: $Q_{in}^k(t)$ 和 $Q_{out}^k(t)$ 分别为第 t 时段水库 k 的入库和下泄流量; Δt 为计算时段长度(旬或月); $q^{k+1}(t)$ 为第 t 时段水库 $k+1$ 和水库 k 的区间入流; $V_k(t)$ 为第 t 时段初水库 k 的库容; $Z_n(t)$ 、 $Z_{min}^k(t)$ 和 $Z_{max}^k(t)$ 分别为第 t

时段初水库 k 的水位、最小和最大允许水位； $Q_{\max}^k(t)$ 为第 t 时段水库 k 的允许下泄流量的上限； $P^k(t)$ 为第 t 时段水库水电站 k 的出力； $P_{\max}^k(t)$ 为第 t 时段水库水电站 k 的允许出力的上限； L_{x-1}^k 、 L_x^k 分别为水库 k 的相邻两条调度线， x 为调度线编号。

2.3. 模型求解

2.3.1. 布谷鸟搜索算法

布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search, CS)是由 Yang 和 Deb 受布谷鸟的巢寄生行为启发，于 2009 年提出的一种启发式算法[10]。CS 以鸟类的飞行轨迹特征为参考设计莱维飞行(Lévy flights)机制进行全局搜索，以布谷鸟的寄生行为习性为参考，设计了一定替代概率的局部更新机制，实施包括整体全局更新、随机个体更新的偏好随机游动更新[11][12]。

本文应用改进的布谷鸟搜索算法[13]：

1) 引入动态发现概率解决进化后期种群质量高，容易陷入局部最优解的问题。区别于固定发现概率，动态发现概率在搜索后期增大，以增加种群进化强度；

2) 引入自适应动态步长，在搜索初期，解集改变比例大，因此莱维飞行步长需较大以保持全局搜索，提高寻优效率。在搜索后期，新解改变越来越小，趋向于短距离搜索，精细化寻优，则莱维飞行步长自适应变小。

CS 的具体计算步骤如下：

1) 随机生成 N 个序列，其中每个序列包括 r 座水库的 n 个关键节点时间空间信息编码，初始化种群；

2) 计算当前所有种群的适应度，并筛选出最优种群；

3) 莱维飞行更新。根据莱维飞行全局步长公式(12)更新当前鸟窝位置，计算更新后的适应度值。若更新后的子代鸟窝支配父代鸟窝，则父代鸟窝被子代鸟窝替换，反之不替换。

$$X_i^{l+1} = X_i^l + \alpha \oplus L(\lambda)$$

$$L(\lambda) = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} (X_i^l - X_{best}^l) \quad (12)$$

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2)$$

$$\sigma_u^2 = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \sigma_v^2 = 1 \quad (13)$$

式中： X_i^l 表示第 l 代中的第 i 个体， X_{best}^l 表示第 l 代最优秀的个体； $L(\lambda)$ 表示全局随机搜索步长，服从 Lévy 分布 $L(\lambda) \sim u = l^{-\lambda}, 1 < \lambda \leq 3$ ， u, v 服从正态分布。 α 为步长控制参数，控制全局搜索的范围。

$$\alpha_0^{l+1} = \alpha_0^l \cdot \exp(K(r-T)) \quad (14)$$

式(14)为自适应动态步长， K 为变化率， r 为新解改变的比例， T 此处取 0.3，因此，当 r 大于 0.3 时， $\alpha_0^{l+1} > \alpha_0^l$ ，保持全局搜索，当新解改变越来越小时，趋向于局部搜索；则最终第 l 代个体 i 更新为：

$$X_i^{l+1} = X_i^l + \alpha_0^l \frac{\sigma_u^2 \cdot u}{|v|^{1/\beta}} (X_i^l - X_{best}^l) \quad (15)$$

4) 偏好随机游动更新。根据一定发现概率 P_a 随机选取一部分鸟窝，局部更新个体。生成一个随机数并与发现概率 P_a 对比，若随机数小于 P_a 则更新该个体。

$$x_i^{l+1} = x_i^l + \gamma \cdot H(P_a - \varepsilon) \otimes [x_j^l - x_k^l] \quad (16)$$

式中： x'_i, x'_j, x'_k 分别为 l 轮迭代，任意选取的 3 个种群个体； $H(P_a - \varepsilon)$ 为赫维赛德函数，当 $P_a - \varepsilon > 0$ 时，函数值等于 0，当 $P_a - \varepsilon < 0$ 时，函数值等于 1，当 $P_a - \varepsilon = 0$ 时，函数值等于 0.5。本文采用式(17)的动态自适应概率，增加后期种群进化强度，新个体的生成方法如下：

$$P_a = 0.1 \cdot \cos \left[\frac{(N_{iter} - 1)\pi}{2(N_{final} - 1)} \right] + 0.1 \quad (17)$$

式中： N_{iter} 、 N_{final} 分别表示算法的当前迭代次数和总迭代次数。 $\varepsilon, \gamma \in [0, 1]$ ，服从均匀分布；

- 5) 计算种群适应度，记录当前最优解，进行下一轮迭代；
- 6) 满足迭代终止条件后，终止迭代，输出寻优结果。

2.3.2. 调度线编码

假设流域有 r 座水库，每座水库有 s 条调度线，每条调度线包括 n 个关键节点参与编码，其中每个关键点包括时间空间二维信息，因此每座水库包括 $s \cdot n$ 个时间编码和 $s \cdot (n+1)$ 个空间编码(始末水位一致)，第 j 座水库第 i 条调度线编码方式如下：

$$suq(j, i) = \left[\underbrace{(t_{j,i}^1, \dots, t_{j,i}^n)}_{\text{time}}, \underbrace{(Z_{j,i}^1, \dots, Z_{j,i}^n, Z_{j,i}^{END})}_{\text{water level}} \right] \quad (18)$$

式中： $suq(j, i)$ 表示第 j 座水库第 i 条调度线编码， $t_{j,i}^n$ 表示第 j 个水库第 i 条调度线第 n 个关键点的时间坐标， $Z_{j,i}^n$ 表示第 j 座水库第 i 条调度线第 n 个关键点的水位坐标， $Z_{j,i}^{END}$ 表示第 j 座水库第 i 条调度线始末水位坐标。将 r 座水库序列串联构成一个布谷鸟种群序列，则第 ii 个鸟巢的编码方式为：

$$nest(ii) = \left\{ \underbrace{[suq(1,1), \dots, suq(1,s)]}_{\text{reservoir 1}}, \dots, \underbrace{[suq(j,1), \dots, suq(j,i), \dots, suq(j,s)]}_{\text{reservoir j}}, \dots, \underbrace{[suq(r,1), \dots, suq(r,s)]}_{\text{reservoir r}} \right\} \quad (19)$$

式中： $nest(ii)$ 表示第 ii 个鸟巢的编码序列。

2.3.3. 调度图模拟

根据多目标的重要程度设置不同权重，将多目标问题转化为单目标最优化问题，对生态、灌溉、供水、发电等多目标的调度图模拟结果线性加权，作为进化算法的适应度函数值。

3. 研究实例

3.1. 流域概况

湘江又称湘水，地处长江之南，洞庭水系以东，是长江中游南岸重要支流之一。湘江是湖南省最大的河流，流域面积 9.46 万 km^2 ，流经 64 个县市区，包括长沙、湘潭、株洲、衡阳的全部区域，于全州附近汇入罗江和灌江。年径流量 696.1 亿 m^3 ，蕴藏水能资源 521.7 万千瓦，其中湖南省占总水能的 90%，约 470.7 万千瓦，水能资源丰富[14]。湘江干流及以下河段规划了九级梯级开发，本文研究对象为其中的 9 座水利枢纽，洣天河水库、双牌水库、欧阳海水库、东江水库、青山垌水库、洮水水库、酒埠江水库、水府庙水库、株树桥水库等。9 座水库均具有发电、生态目标，东江、水府庙、株树桥水库具有供水职能，除东江水库外所有水库均具有灌溉职能，水库群的拓扑图如图 2。本文数据输入包括：1) 1980~2010 年各水库的入库径流日资料；2) 1980~2010 年湘江流域各片区区间入流日资料；3) 1980~2010 年灌溉需水过程旬资料；4) 各水库下游生态需水资料。为了匹配资料与调度的时间尺度，将入库径流和区间入流日资料整理为旬资料，采用旬尺度调度。

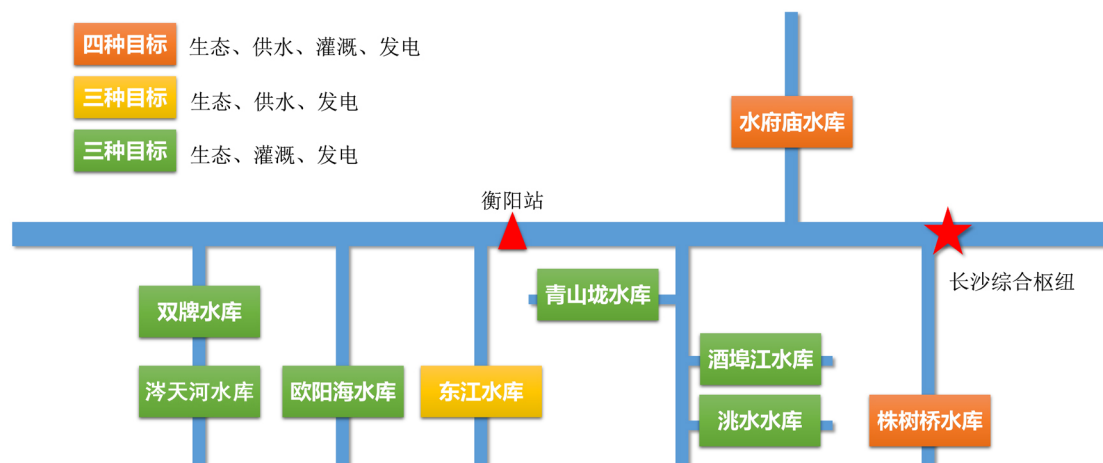


Figure 2. The topological map of reservoirs in the study basin
图 2. 研究流域水库群拓扑图

3.2. 结果与分析

3.2.1. 调度图

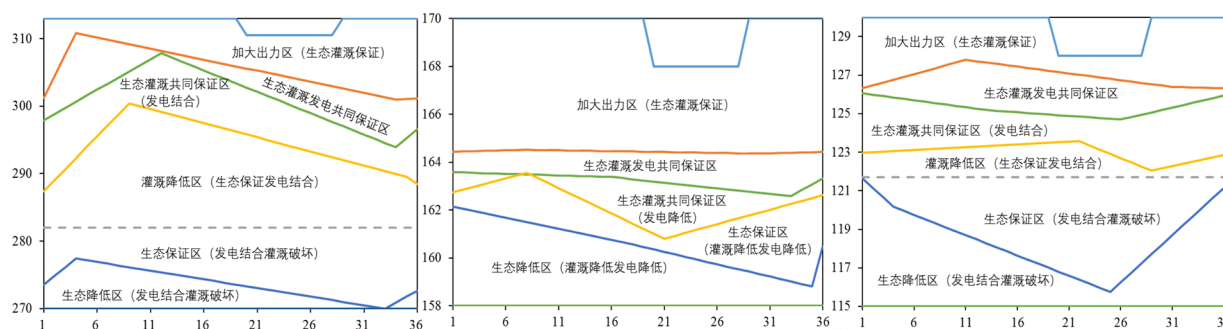
根据流域资料，建立综合利用多目标优化模型，基于模拟优化湘江水库群调度图，采用布谷鸟搜索算法求解。由于各个水库的功能不同，各水库共涉及生态供水灌溉发电综合防破坏线、生态供水灌溉综合防破坏线、生态供水综合防破坏线、生态灌溉综合防破坏线、生态防破坏线、生态限制线、生态供水发电综合防破坏线、生态灌溉发电防综合破坏线等 8 种类型调度线。

各水库的综合利用调度图优化结果如图 3 所示。图中从左至右依次是洵天河水库、双牌水库、欧阳海水库、酒埠江水库、东江水库、洵水水库、青山垌水库、水府庙水库和株树桥水库综合利用调度图。

3.2.2. 生态调度结果

考虑多控制断面流量需求的湘江水库群优化调度的首要任务是保证生态断面的供水流量尽可能满足，生态供水的优先级最高。在此基础上，再尽可能综合纳入供水、灌溉和发电等兴利任务。如图 4 所示为湘江流域各生态控制断面的最小流量需求和采用优化的调度图调度的长系列生态供水统计结果。

从图 4 中可以看出，各水库控制断面的最小生态流量保证率普遍较高，基本达 99% 以上，说明采用优化的调度图模拟调度，其结果能够较好的满足流域内各控制断面的生态流量供水需求。对于下游重要城市长沙，其供水需水量为 387 m³/s，而采用优化的调度图对流域内各水库模拟调度，计算得长沙断面的生态供水保证率达 99.73%，满足实际要求长沙断面生态供水保证率 99% 的目标。因此，优化的调度图能有效指导流域内水库群的运行调度，满足多个控制断面的生态流量的供水需求。



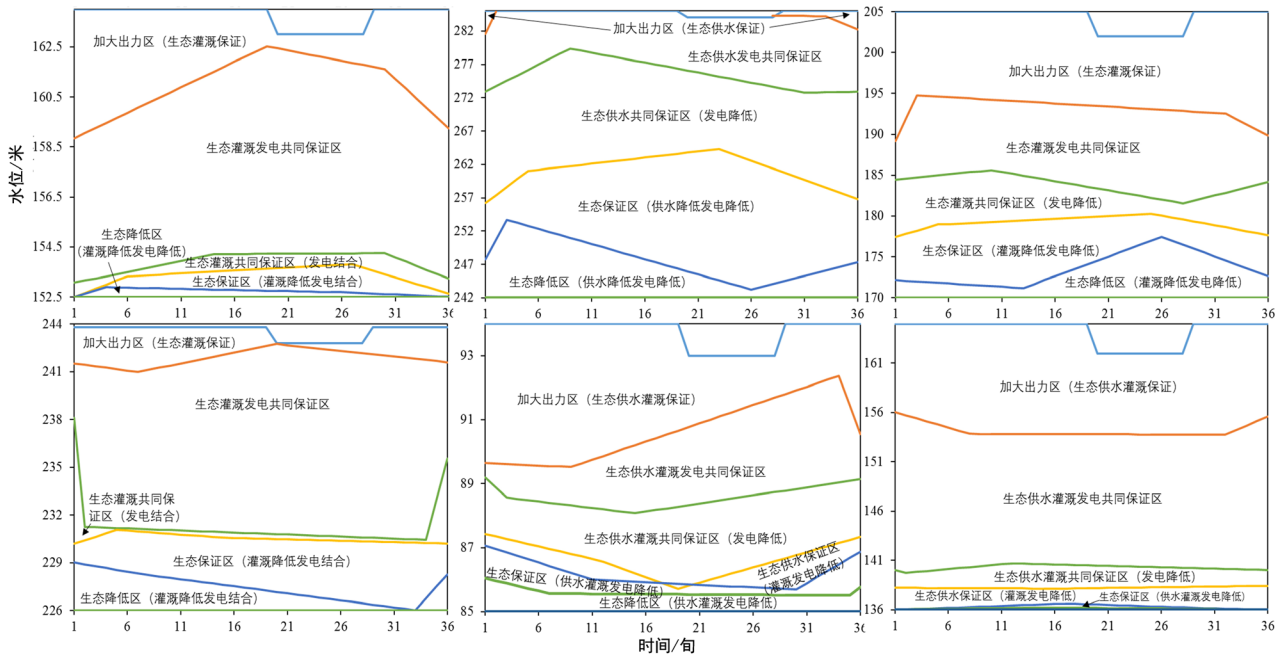


Figure 3. Results of reservoir operating rule curves for comprehensive utilization in the Xiang River
图 3. 湘江流域综合利用调度图优化结果

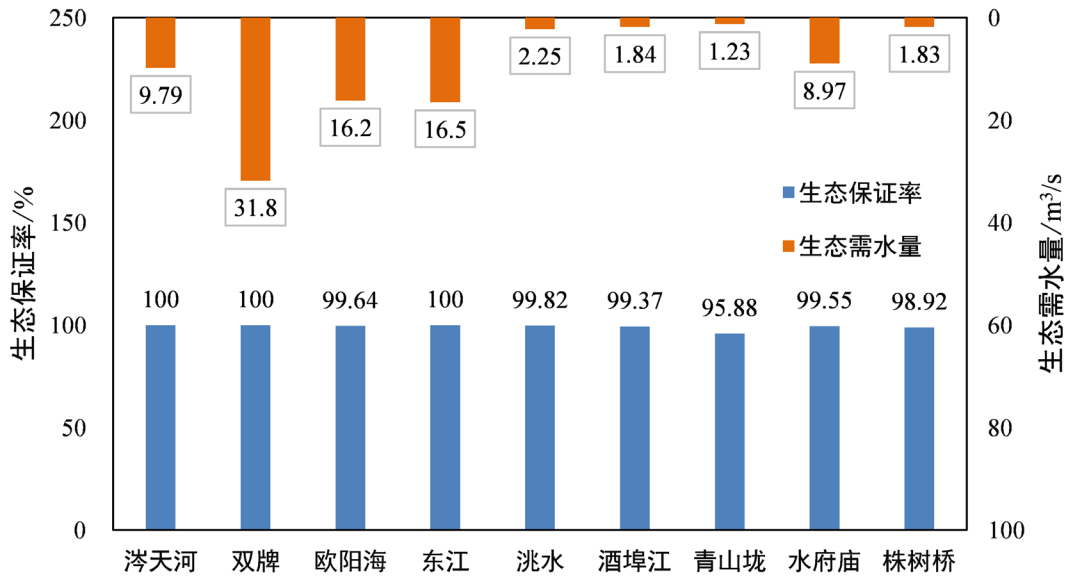


Figure 4. Results of minimum flow demand of ecological control sections and optimal operation in the Xiang River
图 4. 湘江流域各生态控制断面的最小流量需求和优化调度结果

3.2.3. 其他兴利目标调度结果

对于综合利用水库群，湘江流域内水库群在满足多个控制断面生态流量的供水需求的基础上，应根据兴利任务的优先级，尽可能发挥其余兴利功能。表 2 给出了采用优化的湘江水库群调度图进行长系列模拟调度的其他兴利目标的指标统计结果，可知：

1) 对于具有供水任务的水库，东江水库的供水保证率达 100%，说明所有时段的供水需求全部得到满足，供水效益较好。而对于水府庙水库，供水保证率为 98.92%，满足实际要求供水保证率 97% 的目标。

Table 2. Statistics on results of other objectives of reservoirs in the Xiang River
表 2. 湘江水库群其他兴利目标调度结果统计

水库	供水保证率	灌溉保证率	发电保证率	年平均发电量(亿 kWh)
涇天河	/	100%	100%	0.84
双牌	/	99.91%	97.22%	1.87
欧阳海	/	99.64%	100%	0.67
东江	100%	/	67.38%	10.13
洮水	/	99.10%	99.01%	1.11
酒埠江	/	83.24%	83.87%	0.37
青山垅	/	59.95%	25.45%	0.06
水府庙	98.92%	86.74%	94.27%	0.58
株树桥	76.34%	80.82%	58.15%	0.39

注：“/”表示水库无该项兴利任务。

2) 对于具有灌溉任务的水库，涇天河水库和洮水水库的灌溉设计保证率为 85%，其余六座水库的灌溉设计保证率均为 90%。从表 2 的统计结果可知，8 个有灌溉任务的水库中，有一半水库的灌溉保证率达到灌溉设计保证率的要求。由于灌溉的优先级稍低，所以较难保证所有水库的灌溉保证率都能得到满足。其中，位于上游的涇天河、双牌、欧阳海和洮水四座水库的灌溉保证率接近 100%，灌溉满足情况较好。而下游的水库灌溉满足情况普遍劣于上游水库。

3) 对于流域内的所有水库，都具有发电的功能，但该功能的兴利优先级在每座水库中都是最低的。从表 2 中可以看出，各水库多年平均发电量多数都较小。对于发电保证率，涇天河、双牌、欧阳海、洮水和水府庙五座水库均在 90%以上。由于各水库在发挥生态、供水和灌溉功能后，其发电的用水量将得到削减，发电效益在一定程度上会被削弱。但对于 9 座水库中装机最大的东江水库，其装机容量为 560 MW，接近所有水库装机总容量的 1/2。其设计多年平均发电量为 9 亿 kWh，模拟调度结果为 10.13 亿 kWh，发电效益良好。

综合以上结果，优化的水库群综合利用调度图在满足多个控制断面生态流量需求的基础上，可以尽可能让水库发挥供水、灌溉和发电等兴利任务，显示了该优化的水库群综合利用调度图的合理性与有效性。

4. 结语

湘江水能资源丰富，梯级水库群联合多目标调度能充分利用各梯级间的补偿作用，充分利用水库群的水能资源，同时益于保护生态环境。

1) 本文将布谷鸟搜索算法应用于梯级水库多目标调度图优化中，通过引入动态发现概率和自适应步长改进算法，实例结果验证了布谷鸟搜索算法在梯级水库多目标调度图优化问题中收敛速度快，具有有效性。

2) 本文通过优化调度图，保障湘江梯级 9 座水电站以及下游长沙综合枢纽的生态供水保证率基本均在 99%以上，满足多控制断面最小生态流量目标，基本符合湘江生态供水需求。

3) 本文通过梯级水库联合调度，实现了在保障生态流量目标的基础上，尽可能发挥供水效益、灌溉效益和发电效益，充分开发梯级水库的综合职能效益，提出的调度模型具有可行性。

基金项目

湘水科计[2016] 194-19 和湘水科计[2016] 194-24 资助。

参考文献

[1] ZHOU, Y., GUO, S., CHANG, F., et al. Boosting hydropower output of mega cascade reservoirs using an evolutionary algo-

- rithm with successive approximation. *Applied Energy*, 2018, 228: 1726-1739. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.078>
- [2] 王本德, 周惠成, 卢迪. 我国水库(群)调度理论方法研究应用现状与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 337-345.
WANG Bende, ZHOU Huicheng and LU Di. The state-of-the-art review in the theory research and its application of multi-reservoir system operation in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 337-345. (in Chinese)
- [3] LIU, P., GUO, S., XU, X., et al. Derivation of aggregation-based joint operating rule curves for cascade hydropower reservoirs. *Water Resources Management*, 2011, 25(13): 3177-3200. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9851-9>
- [4] MING, B., LIU, P., CHANG, J., et al. Deriving operating rules of pumped water storage using multiobjective optimization: Case study of the han to wei interbasin water transfer project, China. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143: 05017012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000828)
- [5] 刘攀, 张文选, 李天元. 考虑发电风险率的水库优化调度图编制[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 252-259.
LIU Pan, ZHANG Wenxuan and LI Tianyuan. Derivations of risk-based reservoir operation rule curves. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(4): 252-259. (in Chinese)
- [6] 王旭, 庞金城, 雷晓辉, 等. 水库调度图优化方法研究评述[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 71-75.
WANG Xu, PANG Jincheng, LEI Xiaohui, et al. Overview of reservoir operation chart optimization. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010, 8(5): 71-75. (in Chinese)
- [7] 周研来, 郭生练, 李雨, 等. 多目标调度图对气候变化的自适应研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 6-10.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, LI Yu, et al. Multipurpose reservoir operating rule curves adapt to climate change. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(2): 6-10. (in Chinese)
- [8] 姬晶. 三峡水库下游水文情势分析及生态调度研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2017.
JI Jing. Research on flow regime and ecological operation of downstream Three Gorges Reservoir. Master's Degree Thesis. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [9] ZENG, X., HU, T., GUO, X., et al. Water transfer triggering mechanism for multi-reservoir operation in inter-basin water transfer-supply project. *Water Resources Management*, 2014, 28(5): 1293-1308. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0541-2>
- [10] 明波, 黄强, 王义民. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库长期优化调度研究[J]. 水利水电快报, 2015, 36(4): 9-13.
MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir long-term operation optimization based-on improved Cuckoo Search. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2015, 36(4): 9-13. (in Chinese)
- [11] 明波, 黄强, 王义民, 等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 341-349.
MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo Search. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese)
- [12] YANG, X., DEB, S. Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(6): 1616-1624. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.026>
- [13] 杨辉华, 谢谱模, 张晓凤, 等. 求解多目标优化问题的改进布谷鸟搜索算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1600-1608.
YANG Huihua, XIE Pumo, ZHANG Xiaofeng, et al. Improved cuckoo search algorithm for multi-objective optimization problems. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(8): 1600-1608. (in Chinese)
- [14] 张妙弟. 中国国家地理百科全书 6 河南、湖北、湖南[M]. 北京: 北京联合出版公司, 2016.
ZHANG Miaodi. China national geographic encyclopedia episode 6 Henan, Hubei, Hunan. Beijing: Beijing United Publishing Company, 2016. (in Chinese)