

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.012

基于改进 NSGA-Ⅱ 的龙江和瑞丽江梯级水电站 联合优化调度

李伶杰¹, 王银堂¹, 马敬梅², 朱荣进¹, 胡庆芳¹, 刘 勇¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 新沂市乡镇供水有限公司, 江苏 徐州 221000)

摘要:针对 NSGA-Ⅱ 应用于梯级水电站优化调度存在大量非可行解影响寻优效率的问题, 考虑相邻阶段相互制约关系, 提出基于个体面临时段双向约束技术改进的 NSGA-Ⅱ。以龙江-瑞丽江流域的龙江水电站(上游)与瑞丽江一级水电站(下游)为例, 建立多目标联合优化调度模型, 优选典型年最优调度方案并与水电站独立调度对比。结果表明, 改进算法解决了非可行解参与进化甚至收敛于非可行 Pareto 前沿的问题; 随着来水渐枯, 典型年 Pareto 前沿范围趋于缩小, 龙江水电站汛期蓄水时间逐渐提前, 枯水期水位下降时间滞后; 与独立调度相比, 联合调度的径流补偿作用使龙江水电站发电量略有减小, 而系统总发电量增加 3.47%~10.02%, 也显著降低了瑞丽江一级水电站枯水期弃水量。

关键词:改进 NSGA-Ⅱ; 梯级水电站; 联合优化调度; 龙江水电站; 瑞丽江一级水电站

中图分类号:TV882.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0083-08

Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA-Ⅱ // LI Lingjie¹, WANG Yintang¹, MA Jingmei², ZHU Rongjin¹, HU Qingfang¹, LIU Yong¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Xinyi Township Water Supply Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

Abstract: In view of the problem that there are a large number of infeasible solutions affecting the optimization efficiency when NSGA-Ⅱ is applied to the optimal scheduling of cascade hydropower stations, considering the mutual restriction relationship between adjacent stages, an improved NSGA-Ⅱ algorithm based on the bidirectional constraint technology of individual facing period is proposed. Taking the Longjiang Hydropower Station (upstream) and the Ruilijiang I Hydropower Station (downstream) in the Longjiang-Ruilijiang Basin as examples, a multi-objective joint optimal scheduling model is established to optimize the optimal scheduling scheme in hydrological typical years, and compared with the independent scheduling of hydropower stations. The results show that the improved algorithm solves the problem that the infeasible solution participates in evolution and even converges to the infeasible Pareto front. As the incoming water dries up, the range of Pareto front tends to narrow in typical years, the storage time of Longjiang hydropower station in flood season is gradually advanced, and the decline time of water level in dry season lags behind. Compared with independent scheduling, the runoff compensation effect of joint scheduling slightly reduces the power generation of the Longjiang Hydropower Station, while the total power generation of the system increases by 3.47%~10.02%, which also significantly reduces the waste water of Ruilijiang I Hydropower Station in dry season.

Key words: improved NSGA-Ⅱ; cascade hydropower stations; joint optimal scheduling; Longjiang Hydropower Station; Ruilijiang I Hydropower Station

近年来,我国水电事业在“流域、梯级、滚动、综合”方针的引领下蓬勃发展,已形成一批大规模水

力电力互联的梯级水电站群。水电梯级开发可以充分利用上下游水库调节性能及水文、电力条件的差

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400902,2016YFC04009010);国家自然科学基金(51609140,51809252);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y519007)

作者简介:李伶杰(1992—),男,工程师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:ljli@nhri.cn

异实现互补^[1],开展梯级水电站优化调度对于提升流域或区域水资源与水能资源综合利用效益具有重要意义。

梯级水电站优化调度问题具有显著的高维、非线性、多阶段和多目标等特征,其求解难度随着系统规模扩大、复杂约束引入及目标数量增加等急剧增大^[2]。求解思路分为将多目标转为单目标问题(如权重系数法)和多目标问题直接优化求解(如分层序列法)两类^[3]。前者一般仅能获取单一最优解,无法对不同可行解各目标的优劣性进行比较,不适用于工程实际;后者考虑了各目标之间的制约关系,通过优化算法生成多个非支配可行解,以供管理者权衡决策。第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)作为一种成熟的多目标优化算法在梯级水电站或水库群优化调度领域得到了广泛应用^[4-6]。然而这类问题中前一阶段决策变量取值通常会影响到后一阶段的可行域,某些时段的可行域在搜索空间中占比很小,而 Pareto 占优机制辨识支配个体过程中无法有效区分可行解与非可行解,易出现非可行解主导进化的现象^[7-10]。针对这一问题,学界提出了将约束破坏情况作为目标函数和预缩小非可行解空间的两种改进思路。前者将约束破坏项数量作为个体目标属性,由 Pareto 占优机制判断后,可行解支配非可行解,从而避免了收敛于非可行 Pareto 前沿的问题^[7]。但这种方法增加了目标函数,导致计算复杂度增大,同时仍有大量非可行解进入优化程序;相比之下,后者更加直接有效。王学斌等^[8]考虑相邻时段之间的依赖关系,采用逐时段求取个体约束与群体约束交集的方式,缩小交叉和变异阶段的非可行空间,但这种方法仅考虑了顺时序约束下某破坏时段的修正,未顾及对后续时段的影响,同时也对连续多时段不满足约束条件的情形缺乏考虑。白涛等^[9]虽以双向约束取交集的方式生成高质量初始种群,但未排除优化过程中的非可行解。总之,对于梯级水电站优化调度,改善进化种群质量、提升多目标优化算法性能是一个开放性问题,仍有较大的探索空间。

鉴于此,本研究考虑相邻时段决策变量之间的相互制约关系,提出采用个体面临时段双向约束技术预缩小非可行搜索空间,从而改进 NSGA-II。以龙江-瑞丽江流域的龙江水电站(上游)和瑞丽江一级水电站(下游)为例,建立以水电站系统发电量最大和瑞丽江一级水电站枯水期弃水量最小为目标的联合优化调度模型,针对不同典型年(丰、平、枯和特枯)优选调度方案,比较改进前后 NSGA-II 进化

过程的差异,以期对梯级水电站优化调度问题提供新的求解思路,同时分析联合调度较独立调度对经济效益的影响,相关方案也可二者联合调度提供技术支撑。

1 梯级水电站联合优化调度模型

梯级水电站联合优化调度模型一般以水电站系统发电量最大和最小出力最大为目标函数,实际问题可根据调度需求调整。

$$F_1 = \max \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [A_m q_{m,t} (H_{sm,t} - H_{bm,t} - H_{lm,t})] \Delta t \quad (1)$$

$$F_2 = \max \left(\min_{1 \leq t \leq T} \sum_{m=1}^M N_{m,t} \right) \quad (2)$$

式中: F_1 为梯级水电站系统发电量,亿 kW·h; M 为水电站数目; m 为水电站序号; T 为调度期总时段数,本文中计算时段为月, $T=12$; t 为时段序号; A_m 为水电站 m 的出力系数; $q_{m,t}$ 为水电站 m 的发电流量, m^3/s ; $H_{sm,t}$ 、 $H_{bm,t}$ 和 $H_{lm,t}$ 分别为水电站 m 的平均坝上水位、水电站尾水位和水头损失, m ; Δt 为 t 时段的小时数,需考虑平年、闰年变化; F_2 为梯级水电站系统最小出力值, MW; $N_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段的出力, MW。

约束条件主要包括水量平衡约束、蓄水量上下限约束、发电流量上下限约束、泄流上下限约束、出力上下限约束、水电站调度期始末水位约束、其他复杂约束及非负约束等。

2 改进 NSGA-II

NSGA-II 是当前公认的最成熟的多目标优化算法之一^[8,10],然而在应用于梯级水电站优化调度时,存在大量非可行解进入种群,影响了寻优效率和 Pareto 解的收敛性。在预缩减非可行搜索空间时,需要考虑相邻阶段决策变量之间的相互制约关系,即 $t-1$ 时段末决策变量的不同取值动态影响 t 时段末的可行域,而在交叉变异环节, t 时段末可行域还受到 $t+1$ 时段取值的影响。因此,本研究提出个体面临时段双向约束技术,以改进 NSGA-II。梯级水电站优化调度决策变量一般为水库水位。个体面临时段双向约束技术是指按照顺时序和逆时序分别推算面临 t 时段的可行域,然后取交集形成可行域。顺时序方面,根据种群中每个个体的 $t-1$ 时段末库水位,考虑面临 t 时段出库流量上下限(出库流量为发电与泄流流量之和)、蓄水量上下限等约束,确定 t 时段末库水位的可行域。逆时序方面则从个体 $t+1$ 时段的决策变量取值出发,逆推面临 t 时段的

可行域。顺时序推算计算公式为

$$\begin{cases} Z_{m,t,\max} = \min \{ V_Z \{ Z_V(Z_{m,t-1}) + \\ [Q_{m,t} - (\underline{q}_{m,t} + \underline{d}_{m,t})] \Delta t \}, V_Z(\bar{V}_{m,t}) \} \\ Z_{m,t,\min} = \max \{ V_Z \{ Z_V(Z_{m,t-1}) + \\ [Q_{m,t} - (\bar{q}_{m,t} + \bar{d}_{m,t})] \Delta t \}, V_Z(\underline{V}_{m,t}) \} \end{cases} \quad (3)$$

逆时序推算计算公式为

$$\begin{cases} Z_{m,t,\max} = \min \{ V_Z \{ Z_V(Z_{m,t+1}) - \\ [Q_{m,t+1} - (\underline{q}_{m,t+1} + \underline{d}_{m,t+1})] \Delta t \}, V_Z(\bar{V}_{m,t}) \} \\ Z_{m,t,\min} = \max \{ V_Z \{ Z_V(Z_{m,t+1}) - \\ [Q_{m,t+1} - (\bar{q}_{m,t+1} + \bar{d}_{m,t+1})] \Delta t \}, V_Z(\underline{V}_{m,t}) \} \end{cases} \quad (4)$$

如果 $Z_{m,t,\min} \geq Z_{m,t,\max}$, 则停止计算, 否则继续计算:

$$Z_{m,t} = Z_{m,t,\min} + (Z_{m,t,\max} - Z_{m,t,\min})r_{\text{and}} \quad (5)$$

式中: $Z_{m,t,\max}$ 、 $Z_{m,t,\min}$ 分别为水电站 m 在 t 时段末库水位可行域上限、下限; V_Z 、 Z_V 分别为由蓄水量查库水位、由库水位查蓄水量的函数, 可通过拟合库容曲线得到解析式或线性插值双向查算; $Z_{m,t-1}$ 、 $Z_{m,t}$ 、 $Z_{m,t+1}$ 为水电站 m 在 $t-1$ 、 t 、 $t+1$ 时段末库水位, m ; $Q_{m,t}$ 、 $Q_{m,t+1}$ 分别为水电站 m 在 t 、 $t+1$ 时段的入库流量, m^3/s ; $\bar{q}_{m,t}$ 、 $\underline{q}_{m,t}$ 、 $\bar{q}_{m,t+1}$ 、 $\underline{q}_{m,t+1}$ 分别为水电站 m 在 t 、 $t+1$ 时段发电流量上下限, m^3/s ; $\bar{d}_{m,t}$ 、 $\underline{d}_{m,t}$ 、 $\bar{d}_{m,t+1}$ 、 $\underline{d}_{m,t+1}$ 分别为水电站 m 在 t 、 $t+1$ 时段泄流流量(弃水)上下限, m^3/s ; $\bar{V}_{m,t}$ 、 $\underline{V}_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段水库蓄水量上下限, 万 m^3 ; r_{and} 为服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

利用个体面临时段双向约束技术对 NSGA-II 的改进, 主要体现在初始化、交叉和变异阶段。

a. 初始化阶段。首先, 根据调度期初始水位, 按照式(3)顺时序推算第 1 时段末水位的可行域, 随机生成所有个体该时段末水位; 然后, 根据不同个体第 1 时段末水位, 确定每个个体第 2 时段末水位的顺时序可行域, 随机确定该时段末水位, 重复这一步骤, 得到所有个体 1、2、 $\dots$ 、 $T-2$ 时段末水位 ($T-2$ 时段之前仅采用顺时序推算公式确定可行域)。 $T-1$ 时段末水位受到调度期末水位和 $T-2$ 时段末水位的双重影响, 取顺时序可行域与逆时序

可行域的交集为可行域, 从而生成符合所有约束条件的初始种群。

b. 交叉阶段。采用单点交叉方式生成新个体, 然后反推个体各时段出库流量, 若个体全部时段出库流量均落在上下限范围内, 即为可行解, 否则个体不满足约束条件。针对不满足约束的时段, 取顺时序和逆时序可行域的交集得到可行域上下限, 随机生成时段末水位, 若时段末水位大于(小于)可行域上限(下限), 则以可行域上限(下限)值作为交叉后水位^[8]。

c. 变异阶段。在确定多变异基因点位后, 依次计算各基因点位的可行域(双向可行域的交集), 在可行域内随机选取变异值, 从而生成变异个体。当变异基因点位连续时, 需要测试新变异个体的可行性(方法同交叉阶段), 若诊断出部分时段水位不满足约束, 则进一步采用个体面临时段双向约束技术修正, 直至新变异个体为可行解。

3 研究区概况与数据资料

龙江-瑞丽江流域纵跨中缅边境, 位于 $97^{\circ}28'E \sim 98^{\circ}46'E$, $23^{\circ}40'N \sim 25^{\circ}10'N$, 云南省腾冲市高黎贡山西麓至芒市河汇合处称为龙江, 芒市河口以下至缅甸伊洛瓦底江称为瑞丽江。龙江水电站位于云南省德宏州芒市境内龙江干流的下游河段, 是龙江-瑞丽江流域规划的第 13 个梯级电站(中国境内最后一级), 坝址控制流域面积 $5\,758\text{ km}^2$, 具有年调节性能^[11]。瑞丽江一级水电站位于缅甸北部掸邦境内瑞丽江干流上, 紧邻中缅边界, 出中国国境进入缅甸后约 30 km , 控制流域面积 $12\,595\text{ km}^2$, 是瑞丽江干流规划 3 个梯级中的第一级, 具有日调节性能^[12]。龙江水电站和瑞丽江一级水电站工程特性参数见表 1。

收集整理了龙江水电站 1960—2017 年水文年(6 月至翌年 5 月)逐月入库流量, 由于瑞丽江一级水电站无入库流量监测数据, 参考可行性研究报告推算了龙江和瑞丽江一级水电站(以下简称为龙—瑞水电站)区间的天然径流序列^[12]。对于龙江水电站, 经频率分析选择 1999 年、2008 年、2011 年和 2002 年分别作为丰($P=25\%$)、平($P=50\%$)、枯

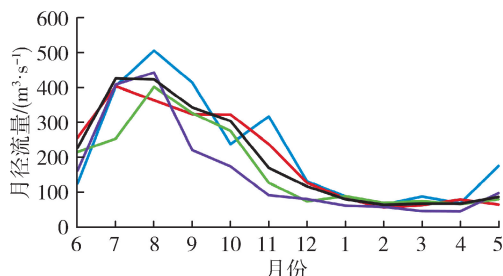
表 1 龙江水电站和瑞丽江一级水电站工程特性参数

Table 1 Engineering characteristic parameters of Longjiang Hydropower Station and Ruilijiang I Hydropower Station

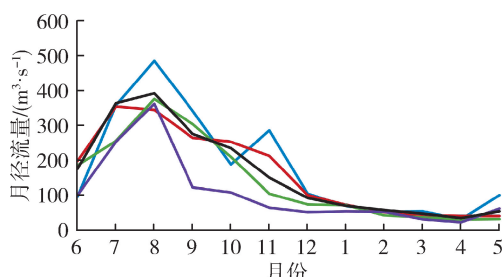
水电站	特征水位(黄海基面)/m			总装机容量/MW	出力系数	保证出力(90%)/MW
	正常蓄水位	汛限水位	死水位			
龙江水电站	872	870.5	845	260(1~3 号为 80 MW, 4 号为 20 MW)	8.6(1~3 号) 7.8(4 号)	68.5
瑞丽江一级水电站	725	717.0	717	600	9.068	174.8

($P = 75\%$)和特枯($P = 90\%$)典型年。对于同一河流不同站点或不同区间,由于其径流特性不完全一样,通常出现同频不同年、同年不同频的现象。目前,通常以一个调节性能较好、调节周期较长的水电站入库径流为主选择典型年,作为该梯级统一的典型年。因此,龙—瑞区间典型年与龙江水电站保持一致,各典型年的年内径流分配过程如图1所示。

— 丰水年 — 平水年 — 枯水年 — 特枯年 — 多年平均



(a) 龙江水电站



(b) 龙—瑞区间

图1 不同水文典型年的月平均径流过程

Fig.1 Monthly mean runoff in different hydrological typical years

4 模型求解与结果分析

4.1 计算条件设置

a. 目标函数。根据水电站管理部门间的协议,龙江水电站在枯水期(12月至翌年5月)发电调度应努力避免或减轻瑞丽江一级水电站产生弃水或来水严重不足的情况;同时,龙江水电站也需兼顾自身的发电效益。因此,本研究将龙—瑞水电站系统发电量最大(式(1))和瑞丽江一级水电站枯水期弃水量最小(式(6))作为目标函数。

$$D_{\text{瑞}} = \min \sum_{t=t_1}^{t_2} d_{2,t} \Delta t \quad (6)$$

式中: $D_{\text{瑞}}$ 为瑞丽江一级水电站枯水期最小弃水量,万 m^3 ; $d_{2,t}$ 为瑞丽江一级水电站 t 时段的弃水流量, m^3/s ; t_1 、 t_2 分别为枯水期起止时间,即12月和翌年5月。

b. 约束条件及工程参数。①龙江水电站:下限水位为死水位845 m,主汛期(6—8月)上限水位取

汛限水位870.5 m,后汛期和枯水期(9月至翌年5月)则以正常蓄水位872 m控制。最小发电流量不得低于下游生态环境需水 $29.11 \text{ m}^3/\text{s}$;最大引水能力为 $406.53 \text{ m}^3/\text{s}$;最大下泄流量取校核洪水位对应的泄量;1~3号机组总装机容量为240 MW,4号生态机组为20 MW。调度期始末水位均为死水位845 m。除常规约束外,龙江水电站还需考虑水头与出力的组合应避免落入振动区间。②瑞丽江一级水电站:按径流式电站处理,只考虑利用水头发电,不考虑调蓄作用,水位过程恒定。根据2018年水库汛期调度运用计划,控制水位汛期为722 m,枯水期为725 m。最大发电引水能力 $229.14 \text{ m}^3/\text{s}$,最大下泄流量取校核洪水位时泄量,最大出力为600 MW。调度期始末水位均为死水位717 m。

c. 优化算法参数。经多次试验确定改进NSGA-II的种群规模取100,交叉概率 P_c 为0.5,变异概率 P_m 取0.1,最大迭代次数为1500。总调度期为12个月,始末水位给定,决策变量为中间11个月龙江水电站的月末水位。

4.2 改进NSGA-II的效果

为分析NSGA-II改进前后对梯级水电站优化调度的影响,图2以丰水年为例,给出了Pareto解(即100个非劣方案)进化过程的比较,其横坐标为龙—瑞水电站系统总发电量,纵坐标为瑞丽江一级水电站枯水期弃水量。由图2可知,当迭代到100次时,改进前NSGA-II的Pareto解中仅包含少量可行解(红色圈内),而改进后NSGA-II的所有Pareto解均为可行解;当迭代到500次时,Pareto前沿已初步形成;迭代到1000次时,改进前NSGA-II收敛于非可行解前沿和可行解前沿两个部分,而改进后NSGA-II能够得到丰水年的可行Pareto前沿。可见,改进后NSGA-II通过采用个体面临时段双向约束技术使进化过程中所有个体均满足约束限制,消除了非可行解进入程序的可能,显著提高了种群质量,从而收敛于可行Pareto前沿。但改进NAGA-II在交叉和变异阶段增加了双向约束计算、可行解判断及修正程序,导致单次迭代时间平均比改进前多0.61 s,计算效率仍有待提高。

4.3 来水变化对联合优化调度的影响

图3为基于改进NSGA-II的平、枯和特枯典型年联合优化调度的Pareto前沿(100个非劣方案按照系统发电量递增的顺序排列)。结合图2可知,丰水年和平水年情景下,Pareto前沿呈现出龙—瑞水电站总发电量增大的同时,瑞丽江一级水电站枯水期弃水量增加,这主要是由于当系统发电量达到一定水平,系统发电量继续增加需通过龙江水电站

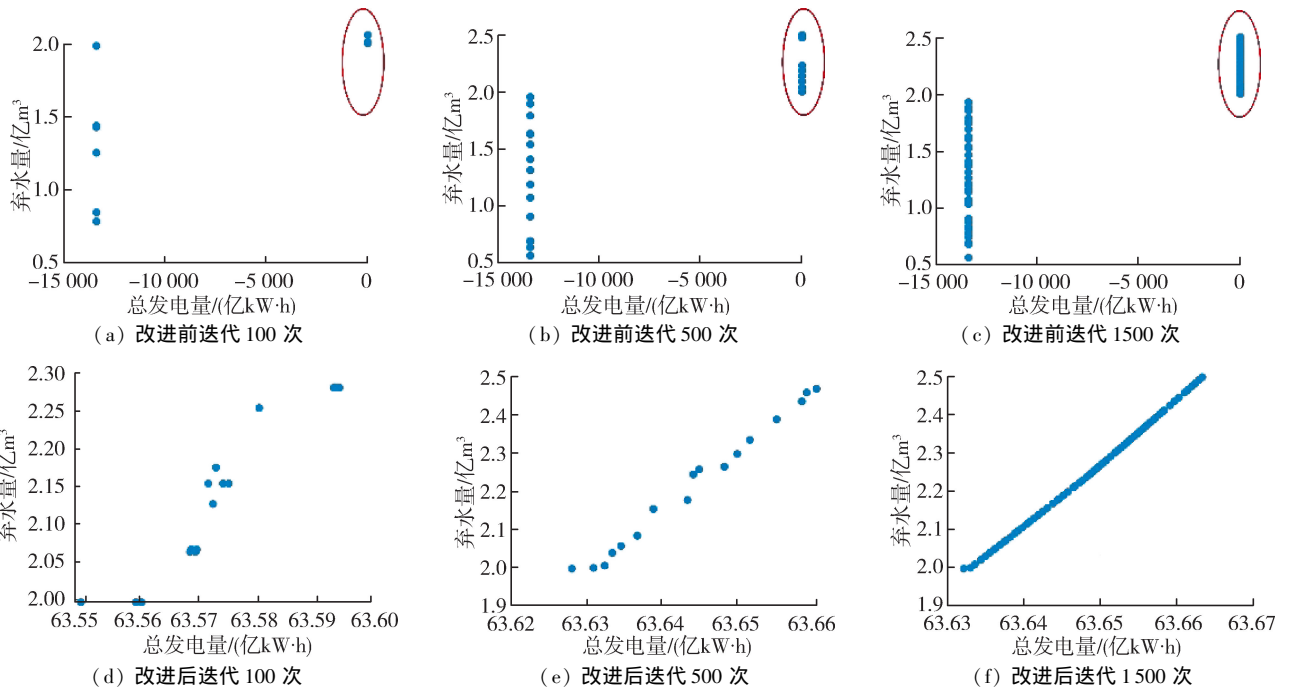


图2 基于改进前和改进后 NSGA - II 的丰水年 Pareto 解进化过程的比较

Fig.2 Comparison of evolutionary process of Pareto solutions based on NSGA - II before and after improved

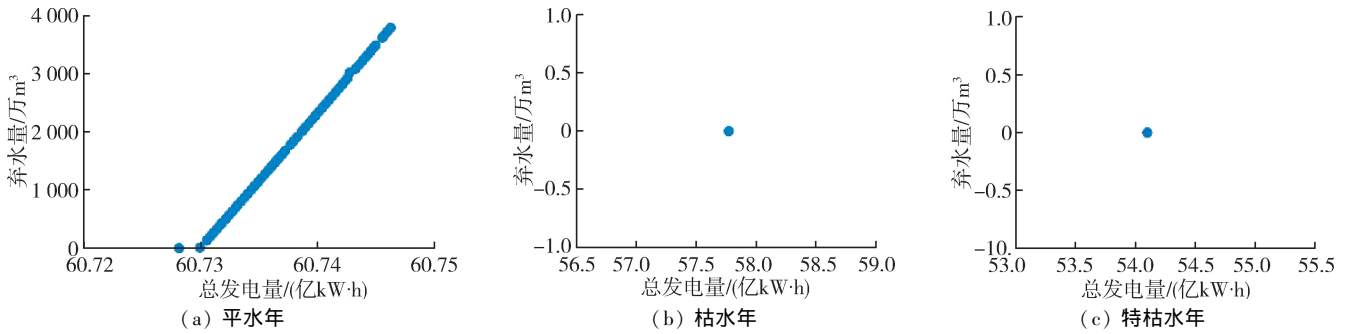


图3 不同水文典型年联合优化调度的 Pareto 前沿

Fig.3 Pareto front of joint optimal scheduling in different typical hydrological years

增大枯水期放水实现,从而导致瑞丽江一级水电站枯水期弃水量增加。枯水年情景的 Pareto 前沿仅有一个点(100 个 Pareto 解重合),表明该调度方案支配所有发电量不超过 57.77 亿 kW·h 的其他方案。特枯水年的 Pareto 前沿与枯水年类似。因此,从不同频率典型年联合优化调度的 Pareto 前沿来看,随着来水渐枯,龙江水电站枯水期加大放水、增大发电的变化空间逐渐缩小,相应的 Pareto 前沿范围也趋于缩小。

根据上述分析,枯水年和特枯水年最优调度方案具有唯一性。对于丰水年和平水年,存在多个 Pareto 方案,可根据各方案不同方面的模拟效果进行综合评估。采用 TOPSIS 方法^[13-15],考虑各方案系统发电效益 $E_{总}$ 、龙江水电站年发电量 $E_{龙}$ 、瑞丽江一级水电站年发电量 $E_{瑞}$ 、龙江水电站全年弃水量 $D_{龙}$ 和瑞丽江一级水电站枯水期弃水量 $D_{瑞}$ 等 5 个指

标。首先基于熵权法计算指标权重^[13],结果显示丰水年和平水年所有方案的瑞丽江一级水电站发电效益权重接近于 0,不符合实际情况。为此,本研究结合实际需求,考虑各指标重要性给出推荐权重,分别为 0.30、0.25、0.25、0.10、0.10。据此计算各方案 TOPSIS 相对贴近度,如图 4 所示。由于系统和两座水电站各自发电效益权重较大,图 4 中也显示发电效益较大方案的 TOPSIS 相对贴近度较高,以相对贴近度最大为原则,推荐丰水年最优调度方案为方案 89,平水年最优调度方案为方案 99。表 2 为不同典型年推荐最优调度方案的效益指标。丰水年系统总发电量为 63.66 亿 kW·h,龙江水电站发电量为 11.72 亿 kW·h,龙江水电站全年仅有少量弃水,瑞丽江一级水电站枯水期弃水量为 2.44 亿 m³;随着来水变枯,各发电效益指标相应降低,瑞丽江一级水电站枯水期弃水量明显减少;特枯水年系统总发电

量降低至 54.10 亿 kW · h, 龙江水电站发电量为 8.74 亿 kW · h, 瑞丽江一级水电站枯水期无弃水。

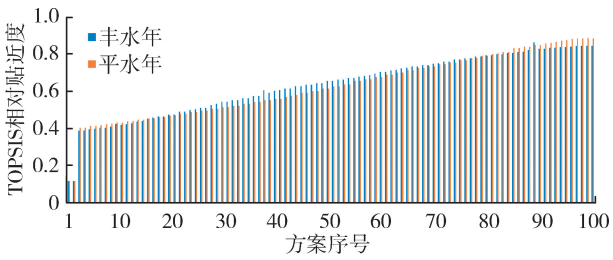


图4 丰水年与平水年各调度方案的 TOPSIS 相对贴近度

Fig.4 Relative closeness coefficient of TOPSIS of scheduling schemes in wet and normal years

图5 为不同典型年的推荐最优调度方案及其发电出力,可见,丰水年7—9 月来水明显较大,蓄水时间较其他典型年明显偏迟,10 月才达到正常蓄水位,到枯水期,库水位开始下降时间提前了 2 月。平、枯和特枯水年在后汛期及枯水期的水位过程差异较小,但特枯水年7—8 月来水大于平水年,枯水年,所以汛期蓄水时间也有所偏迟。总体上,随着来水变枯,汛期开始蓄水时间逐渐提前,枯水期库水位开始下降时间滞后。龙江水电站发电流量过程则与

表2 不同水文典型年联合调度推荐最优方案的评价指标

典型年	$E_{总}/(亿\ kW \cdot h)$	$E_{龙}/(亿\ kW \cdot h)$	$E_{瑞}/(亿\ kW \cdot h)$	$D_{龙}/亿\ m^3$	$D_{瑞}/亿\ m^3$
丰水年	63.66	11.72	51.94	0.25	2.44
平水年	60.75	11.43	49.32	0	3.73
枯水年	57.77	9.79	47.98	0	0
特枯水年	54.10	8.74	45.36	0	0

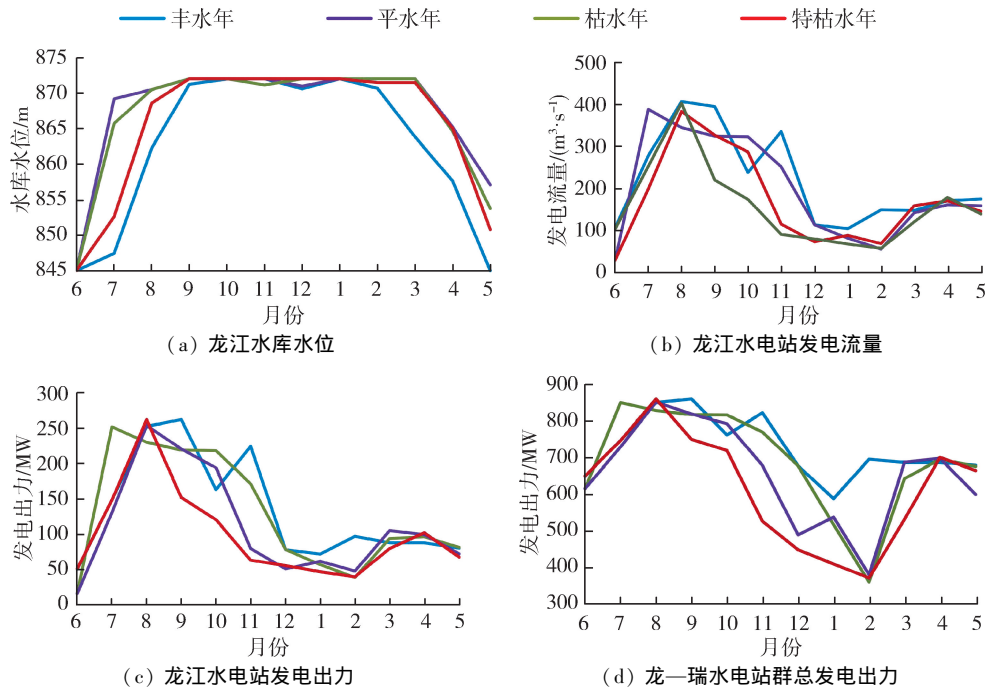


图5 不同水文典型年推荐的最优调度方案及发电出力

Fig.5 Recommended optimal scheduling schemes and power generation in different typical hydrological years

入库流量、水库蓄水过程密切相关。平水年和枯水年 6 月库水位大幅抬升,发电流量明显小于丰水年和特枯水年,而水位上升至汛限水位或正常蓄水位之后,发电流量主要取决于入库流量;平、枯和特枯水年 12 月至翌年 2 月维持高水位运行,发电流量较小,翌年 3 月至翌年 5 月水位逐渐降低后,发电流量趋于增大。龙江水电站及龙—瑞水电站群总发电出力过程与发电流量过程类似。

4.4 联合调度与独立调度效果的对比

对于龙江水电站典型年独立优化调度,以年发电量最大为目标函数,属于有约束的单目标优化调度问题,采用具有全局寻优能力的 SCE-UA 算法求解^[16]。龙江水电站独立调度最优方案调度效果仍采用上述 5 个指标进行评价,并与联合优化调度进行比较,如表 3 所示。由表 3 可知,与独立调度相比,联合调度情景下龙江水电站发电量除枯水年略有增加外,其余 3 种典型年均小于独立调度情形,减幅为 0.44% ~ 2.82%,其中丰水年减幅略大;虽然龙江水电站经济效益有较小损失,但瑞丽江一级水电站发电量明显增大,增幅为 4.33% ~ 13.43%,从而使系统发电效益增加 3.47% ~ 10.02%。从弃水

表3 不同水文典型年独立调度与联合调度最优方案评价指标比较

Table 3 Comparison of evaluation indexes between independent scheduling and joint optimal scheduling scheme in different typical hydrological years

典型年	$E_{\text{总}}$		$E_{\text{龙}}$		$E_{\text{瑞}}$		$D_{\text{龙}}/\text{亿 m}^3$		$D_{\text{瑞}}/\text{亿 m}^3$	
	独立/ (亿 kW·h)	相对 增幅/%	独立/ (亿 kW·h)	相对 增幅/%	独立/ (亿 kW·h)	相对 增幅/%	独立	绝对减幅	独立	绝对减幅
丰水年 1999 年	57.86	10.02	12.06	-2.82	45.79	13.43	0.02	-0.23	8.42	5.98
平水年 2008 年	58.71	3.47	11.48	-0.44	47.23	4.43	0	0	3.23	2.86
枯水年 2011 年	55.76	3.60	9.77	0.20	45.99	4.33	0	0	2.16	2.16
特枯水年 2002 年	49.65	8.96	8.88	-1.58	40.77	11.26	0	0	3.59	3.59

注:表中相对增幅与绝对减幅均指联合调度方案评价指标相比于独立调度的变化。

量来看,联合调度使瑞丽江一级水电站枯水期弃水量大幅降低,减幅为 2.16~5.98 亿 m^3 ,到枯水年和特枯水年可基本实现不弃水;总体上瑞丽江一级水电站枯水期弃水量减少越多,增发电量也越大。

以丰水年为例,分析独立调度与联合调度最优方案中龙江水电站出库流量及发电出力的差异,如图 6 所示。

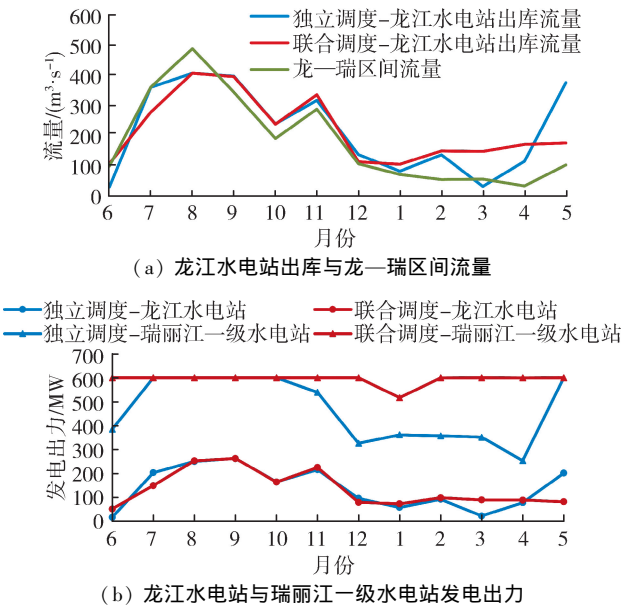


图 6 丰水年独立调度与联合调度最优方案的出库流量与发电效益对比

Fig. 6 Comparison of outflow and power generation between independent scheduling and joint optimal scheduling scheme in wet year

由图 6 可知,在独立调度条件下,龙江水电站追求自身发电量最大,汛期 6 月出库流量明显偏小,枯水期出库流量极不均匀,翌年 5 月下泄流量接近 $400 \text{ m}^3/\text{s}$,远超过其他枯水月份。而在联合调度条件下,最优方案翌年 5 月的出库流量明显降低,加大了 6 月和翌年 1 月至翌年 4 月的出库流量,有效缓解了相应时段龙—瑞区间径流偏枯的问题,总体上龙江水电站出库流量与龙—瑞区间径流丰枯的互补性明显增强,枯水期出库径流量也趋于均匀。龙江

水库出库径流调整后,龙江水电站翌年 5 月发电出力降低幅度超过 50%,同时该年 6 月和翌年 3 月的发电出力大幅增加,全年发电量有小幅降低。但对于瑞丽江一级水电站,翌年 1—5 月出力大幅提升,与此同时由于入库流量趋于均匀,枯水期弃水量显著降低。通过对比分析,认识到联合优化调度情景下,龙江水电站调度方案充分考虑了下游龙—瑞区间来水的丰枯变化,径流补偿作用明显,均化了瑞丽江一级水电站入库径流,从而降低了枯水期无效弃水,有助于实现水量与水能资源效益的最大化。

5 结 论

a. 改进 NSGA-Ⅱ 有效解决了原方法存在大量非可行解参与进化,甚至可能收敛于非可行 Pareto 的问题,丰富了梯级水电站优化调度方案的求解方法。

b. 随着来水变枯,典型年 Pareto 前沿范围趋于缩小,龙江水电站汛期蓄水时间逐渐提前,枯水期水位下降时间滞后,系统及各电站发电量逐步降低,瑞丽江一级水电站枯水期弃水量明显减小。

c. 与独立调度相比,联合调度使龙江水电站出库流量与龙—瑞区间径流量丰枯的互补性明显增强。龙江水电站发电量略有减小,而瑞丽江一级水电站发电量明显增大,系统总发电量增幅为 3.47%~10.02%,同时显著改善了瑞丽江一级水电站枯水期大量弃水的问题。

参考文献:

- [1] 马昱斐,钟平安,徐斌,等.基于全微分法的多主体梯级水电站群联合调度增益归因及分配[J].水利学报,2019,50(7):881-893. (MA Yufei, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. An attribution and allocation method of synergistic benefit from joint operations of multi-stakeholder cascade hydropower station system based on total differential method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(7): 881-893. (in Chinese))
- [2] 赵志鹏,廖胜利,程春田,等.梯级水电站群中长期优化

- 调度的离散梯度逐步优化算法[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1243-1253. (ZHAO Zhipeng, LIAO Shengli, CHENG Chuntian, et al. Discrete gradient progressive optimality algorithm for mid-long-term optimal operation of multi-reservoir system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1243-1253. (in Chinese))
- [3] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638. (CHEN Yueyun, MEI Yadong, CAI Hao, et al. Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 628-638. (in Chinese))
- [4] 何向阳, 周建中, 张勇传, 等. 基于改进 NSGA-II 的梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(6): 715-719, 739. (HE Xiangyang, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Multiobjective optimal dispatching of cascade hydropower stations using improved NSGA-II [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(6): 715-719, 739. (in Chinese))
- [5] 牛文静, 申建建, 程春田, 等. 耦合调峰和通航需求的梯级水电站多目标优化调度混合搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2331-2341. (NIU Wenjing, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. A hybrid search method for multi-objective optimization operations of cascaded hydropower plants with peak load regulation and navigation demands[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2331-2341. (in Chinese))
- [6] 贾一飞, 董增川, 卞佳琪, 等. 黄河上游水库群多目标优化调度研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 41-45, 50. (JIA Yifei, DONG Zengchuan, BIAN Jiaqi, et al. Research on multi-objective optimal operation of the cascade reservoirs of the Upper Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(1): 41-45, 50. (in Chinese))
- [7] 牛文静, 冯仲恺, 程春田, 等. 梯级水电站群并行多目标优化调度方法[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 104-112. (NIU Wenjing, FENG Zhongkai, CHENG Chuntian, et al. Parallel multi-objective optimal operation of cascaded hydropower system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 104-112. (in Chinese))
- [8] 王学斌, 畅建霞, 孟雪姣, 等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 135-145. (WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2): 135-145. (in Chinese))
- [9] 白涛, 畅建霞, 黄强, 等. 基于可行搜索空间优化的电力市场下梯级水电站短期调峰运行研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 90-95. (BAI Tao, CHANG Jianxia, HUANG Qiang, et al. Short-term peaking operation of cascade hydropower stations in power market based on feasible search space optimization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 90-95. (in Chinese))
- [10] 王旭, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 基于可行空间搜索遗传算法的水库调度图优化[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 26-34. (WANG Xu, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Reservoir operation chart optimization searching in feasible region based on genetic algorithms [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 26-34. (in Chinese))
- [11] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 龙江水电站枢纽工程可行性研究报告[R]. 长春: 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 2005.
- [12] 中国水利水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 缅甸瑞丽江水电站可行性研究报告[R]. 昆明: 中国水利水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2008.
- [13] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese))
- [14] 张社荣, 尚超, 王超. 基于 IAHP 扩展 TOPSIS 法引水隧洞实时风险识别[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 15-20. (ZHANG Sherong, SHANG Chao, WANG Chao. Real-time safety risk identification of water diversion tunnel based on IAHP and extended TOPSIS methods[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 15-20. (in Chinese))
- [15] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [16] 余佳, 焦铮, 苏哲, 等. 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 155-161. (YU Jia, JIAO Zheng, SU Zhe, et al. Construction scheme optimization of diversion tunnel considering influence of risk factors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 155-161. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-01-03 编辑: 王芳)