

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.011

# 大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群 多目标优化调度

孔波<sup>1</sup>,付少杰<sup>2</sup>,黄强<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室,陕西 西安 710048;  
2. 国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司,青海 西宁 810008)

**摘要:**考虑调水量、发电最大和耗能最小3个目标,建立电站-水库-泵站群多目标优化调度模型。基于参数调整策略、邻域变异和加速策略,提出了求解多目标优化调度模型的综合改进布谷鸟新算法并求解模型,获得了发电、调水、泵站耗能多目标 Pareto 解集。以引汉济渭大型复杂跨流域调水工程为实例,将该模型与模拟调度模型和 NSGA-II 算法多目标优化调度模型的结果进行比较,结果表明,该优化调度模型的发电、调水、耗能、弃水等各项指标合理,具有相对优势。

**关键词:**跨流域调水;电站-水库-泵站群;多目标优化调度模型;改进布谷鸟算法;Pareto 曲线  
**中图分类号:**TV697 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0067-06

**Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects** // KONG Bo<sup>1</sup>, FU Shaojie<sup>2</sup>, HUANG Qiang<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, China)

**Abstract:** A multi-objective optimal operation model of hydropower plant-reservoir-pumping station group is established considering three objectives: maximizing transferred water, maximizing hydropower generation and minimizing energy consumption. Based on the parameter adjustment strategy, the neighborhood variation and acceleration strategy, a new integrated and improved Cuckoo algorithm is proposed to solve the multi-objective optimization scheduling model, obtaining a multi-objective PARETO solution sets of power generation, water transfer and energy consumption of pumping stations. Taking the large and complex inter-basin water diversion project from Hanjiang to Weihe River as the research object, compared with the simulation scheduling model and NSGA-II algorithm multi-objective optimization scheduling model, the optimal dispatching model has reasonable indexes such as power generation, water transfer, energy consumption, waste water and so on, having a comparative advantage.

**Key words:** inter-basin water transfer; hydropower plant-reservoir-pumping station group; multi-objective optimal operation model; improved Cuckoo algorithm; Pareto curve

近年来,国内外专家学者对跨流域调水的水库群优化调度进行了大量研究,Afshar<sup>[1]</sup>用约束粒子群算法,求解多库联合发电调度;郑慧涛等<sup>[2]</sup>在求解梯级水库优化调度模型时使用了差分算法;王森等<sup>[3]</sup>提出了求解优化调度模型的 SCWAGA 算法;刘焯等<sup>[4]</sup>建立了以多年平均发电量最大为目标的梯级水库群优化调度模型,并提出了基于多重迭代实现高维模型降维的求解算法;王磊之等<sup>[5]</sup>构建了反

映太浦河防洪、供水、水环境需求的多目标函数,并采用蚁群优选算法优选调度方案;杨晓萍等<sup>[6]</sup>改进了布谷鸟算法的搜索能力和收敛性并使用改进的算法求解了模型;方国华等<sup>[7]</sup>采用改进的多目标量子遗传算法,运用组合赋权方法对非劣解集进行多属性决策,提出了南水北调东线工程江苏段水资源优化调度方案;吴云等<sup>[8]</sup>使用混沌变异布谷鸟算法求解了水库供水的多阶段组合优化问题;申林等<sup>[9]</sup>以

基金项目:国家自然科学基金(51879213);国家重点研发计划(2017YFC0405900)

作者简介:孔波(1983—),男,博士研究生,研究方向为水文水资源系统工程。E-mail: kongbo0000@163.com

通信作者:黄强,教授。E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn

南水北调东线工程为例,建立并求解了梯级泵站联合调度模型;高玉琴等<sup>[10]</sup>基于 NSGA-II 优化算法求解了以河流整体水文改变度最小、广义缺水指数最小为目标的水库调度规则优化模型。上述研究成果多以单一优化算法、单目标的水库群优化调度研究为主,缺乏对大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度研究。在跨流域调水工程中,往往从低位流域扬水至高位流域,如南水北调东线工程、引汉济渭跨流域调水工程等,需要修建泵站、水电站水库群,制定泵站、水电站水库群合理运行方案,以实现跨流域调水的目标。跨流域调水工程具有“抽-调-蓄-输-配”全过程耦合贯通的特点,其中电站-水库-泵站群优化调度是一个大规模、多目标、高维非线性系统工程问题,因此对其研究具有重要的学术和应用价值。

本文针对大型复杂跨流域调水工程运行调度问题,拟建立电站-水库-泵站群多目标优化调度模型,引入参数调整策略、邻域变异策略和加速策略,提出综合改进多目标布谷鸟算法(comprehensive modified Cuckoo search, CMCS)并用其求解多目标优化调度模型,旨在解决跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度问题,丰富和发展跨流域调水工程的多目标优化调度技术,为工程运行和管理提供参考。

## 1 模型的建立

在跨流域调水工程中,当从低位水资源丰富流域调水至高位缺水流域,往往在调水流域需要修建水库、泵站和水电站,这3者中水库是核心,是跷跷板的支点,而泵站和水电站是跷跷板的两端重物,因此,为了协调电站、水库、泵站之间的博弈关系,研究复杂跨流域调水工程调度运行问题,在多调水的同时尽可能地多发电、少耗能。

### 1.1 多目标函数

跨流域调水工程最重要的任务是调水,工程所涉及的水库还会承担发电、防洪、生态等任务。本文针对跨流域调水工程运行调度问题,以多年平均水电站发电量最大、总调水量最大和泵站耗能最小为目标,建立复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度函数,其他的如防洪、生态等目标则转化为模型的约束条件。

a. 目标函数1:发电量最大。

$$E = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^I \left( \sum_{j=1}^J k_j Q_{i,j} H_{i,j} \right) \Delta t \quad (1)$$

式中: $E$ 为水电站的总发电量,亿kW·h; $I$ 为时段总数; $J$ 为水电站总个数; $Y$ 为年数; $k_j$ 为 $j$ 水电站的

出力系数; $Q_{i,j}$ 为发电流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $H_{i,j}$ 为发电水头,m; $\Delta t$ 为每个时段的小时数,如调度时段为月,则 $\Delta t$ 等于当月天数乘以24h。

b. 目标函数2:总调水量最大。

$$W = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{k=1}^K (1 - \lambda_k) w_{i,k} \right] \quad (2)$$

式中: $W$ 为水库的总调水量, $\text{m}^3$ ; $K$ 为水库数; $\lambda_k$ 为 $k$ 水库水量损失系数; $w_{i,k}$ 为 $k$ 水库 $i$ 时段的调水量, $\text{m}^3$ 。

c. 目标函数3:耗能最小。

$$P = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^I \left( \sum_{n=1}^N g \eta_n q_i h_n \right) \Delta t \quad (3)$$

式中: $P$ 为泵站多年平均耗电量,亿kW·h; $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ; $\eta_n$ 为 $n$ 泵站的效率; $q_i$ 为提水流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $h_n$ 为泵站扬程,m; $N$ 为泵站数。

### 1.2 约束条件

a. 水库水量平衡约束:

$$V_{i+1,k} = V_{i,k} + 3600(Q_{R,i,k} - Q_{C,i,k} - q_i) \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_{i+1,k}$ 为 $k$ 水库 $i$ 时段末的库容, $\text{m}^3$ ; $V_{i,k}$ 为 $k$ 水库 $i$ 时段初的库容, $\text{m}^3$ ; $Q_{R,i,k}$ 为入库流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_{C,i,k}$ 为出库流量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。

b. 库容约束:

$$V_{k,\min} \leq V_{i,k} \leq V_{k,\max} \quad (5)$$

式中: $V_{k,\min}$ 为 $k$ 水库的最小库容,通常采用死水位对应的库容; $V_{k,\max}$ 为最大库容,考虑水库的防洪功能,在非汛期本文采用最大兴利水位对应的库容,在汛期本文采用防洪限制水位对应的库容。

c. 下泄流量约束:

$$Q_{C,k,\min} \leq Q_{C,i,k} \leq Q_{C,k,\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{C,k,\min}$ 为 $k$ 水库的生态流量,一般由下游综合用水及生态基流共同确定; $Q_{C,k,\max}$ 为下游安全下泄流量,其数值视水库的入库流量、库容以及下游水利工程的防洪能力而定,本文采用库水位涨率与入库流量相结合方法判定下游安全下泄流量数值。

d. 电站出力约束:

$$N_{j,\min} \leq k_j Q_{i,j} H_{i,j} \leq N_{j,\max} \quad (7)$$

式中 $N_{j,\min}$ 、 $N_{j,\max}$ 分别为 $j$ 水电站的最小出力和最大出力。

e. 泵站功率约束:

$$0 \leq g \eta_n q_i h_n \leq P_{n,\max} \quad (8)$$

式中 $P_{n,\max}$ 为 $n$ 泵站额定功率。

f. 隧洞过流能力约束:

$$0 \leq Q_{D,i,k} \leq Q_{D,\max} \quad (9)$$

式中: $Q_{D,i,k}$ 为 $k$ 水库 $i$ 时段隧洞内流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_{D,\max}$ 为隧洞最大流量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。

g. 变量非负约束:上述所有变量均为正数。

## 2 模型求解方法及参数设置

布谷鸟搜索算法是一种基于 Lévy Flight 算子以及偏好随机游动的群体智能算法,标准布谷鸟算法的计算流程可以参考相关文献<sup>[11-13]</sup>。本文在标准布谷鸟算法基础上,通过引入参数调整策略、邻域变异策略和加速策略,提出了综合改进多目标布谷鸟算法对上述模型进行求解。

### 2.1 综合改进多目标布谷鸟算法

a. 参数动态调整策略。电站-水库-泵站群多目标优化调度解的更替可以概括为两个时期:前期由不可行解转换为可行解,后期由可行解转换为次优解。发现概率这一参数决定着算法的局部搜索能力,其值越小,算法的局部搜索能力越强;反之,其值越大,则算法的局部搜索能力越弱。在标准算法中,发现概率是一个定值,在计算后期算法的局部搜索能力较弱。本文采用余弦递减公式使发现概率随着进化的推进逐步减小,增强了算法后期的搜索能力<sup>[14]</sup>:

$$P_a = P_{a,\max} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{T_{\text{iter}} - 1}{T_{\text{max}} - 1}\right) + P_{a,\min} \quad (10)$$

式中: $P_a$  为发现概率,控制参数用其最大值  $P_{a,\max}$  和最小值  $P_{a,\min}$  表示; $T_{\text{max}}$  为最大代数; $T_{\text{iter}}$  为当前代数。

b. 邻域变异策略。邻域变异策略的变异机制如下:在计算过程中由变异步长决定算法的收敛性,其值越小,算法的收敛性越强;反之,其值越大,算法的收敛性越弱。通过邻域变异操作<sup>[14]</sup>令算法第  $t+1$  代的变异步长小于第  $t$  代的变异步长,可以提高算法的变异效率,改善算法的收敛性,本文采用余弦递减函数公式使变异步长随着进化的推进逐步减小:

$$n_{t,b_2} = n_{t,b_1} + \left[ a_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{T_{\text{iter}} - 1}{T_{\text{max}} - 1}\right) \right] \oplus \gamma \quad (11)$$

式中: $n_{t,b_1}$ 、 $n_{t,b_2}$  分别为变异前和变异后的最佳个体; $a_1$  为步长控制量; $\gamma = 1 \times d$ ,服从标准正态分布。

为了保证有利变异的出现,比较变异前后的个体的适应度值,因为算法朝着最小化优化,所以保留适应度值低的个体  $n_{t,b}$ :

$$n_{t,b} = \begin{cases} n_{t,b_1} & F(n_{t,b_1}) \leq F(n_{t,b_2}) \\ n_{t,b_2} & F(n_{t,b_1}) > F(n_{t,b_2}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $n_{t,b}$  为保留的个体; $n_{t,b_1}$ 、 $n_{t,b_2}$  分别为变异前和变异后的最佳个体; $F(n_{t,b_1})$ 、 $F(n_{t,b_2})$  分别为  $n_{t,b_1}$ 、 $n_{t,b_2}$  的适应度值。

c. 加速策略。传统水库优化调度模型求解过程需要进行多次插值运算,而每次插值计算都需要根据节点数值估计参数,计算耗时很长。加速策略

的原理为:在节点数据已知时,根据节点构造线性函数  $v = f(z)$ ,以表征实际函数  $v = g(z)$ ,可以预先确定  $v = f(z)$  的参数值,优化计算时可以直接调用参数。众所周知,直接调用参数耗时要比多次计算参数更短,同时插值和分段线性函数本质上相同,算法的计算精度一致<sup>[15]</sup>,所以节点数已知情况下,加速策略可以应用于模型求解计算。

相比于标准布谷鸟算法,本文提出的综合改进多目标布谷鸟算法,通过动态调整发现概率这一参数,加快了后期局部搜索能力;通过诱导每代的最佳个体变异提高了变异效率,增强了种群活力,改善了算法的收敛性;通过简化插值计算在保证计算精度的同时减少了耗时。综合改进多目标布谷鸟算法计算多目标模型的流程如图 1 所示。

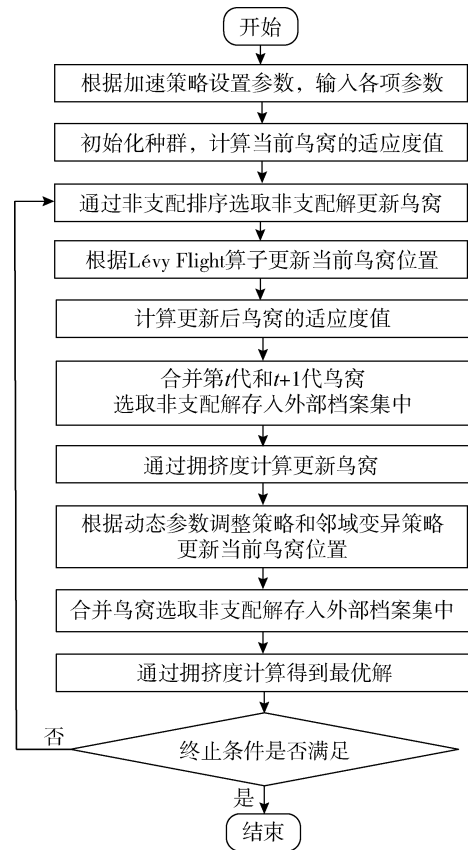


图 1 综合改进多目标布谷鸟算法流程

Fig. 1 Comprehensive improvement of multi-objective Cuckoo algorithm flow

### 2.2 算法的参数设置

在模型计算中,种群规模是指任意一代中的个体总数,规模越大越可能找到全局解,但运行时间也相对较长,本文种群规模  $N_{\text{max}} = 100$ ,最大迭代次数设置为  $T_{\text{max}} = 800$ 。根据调水工程的水力联系以及现有的水库调度规则,以泵站提水流量作为算法的优化变量,调度时段长可取月、旬等不同时间尺度,本文选择月为调度时段长。根据文献<sup>[14]</sup>,发现概

率的控制参数  $P_{a,\min}$  取值 0.1,  $P_{a,\max}$  取值 0.73。

### 3 实例验证

#### 3.1 研究区概况及资料

引汉济渭大型复杂跨流域调水工程由黄金峡和三河口水库、水电站、泵站群及输水工程组成。从汉江调水至陕西省关中地区<sup>[16]</sup>, 调水工程水库、水电站和泵站群的相关参数见表 1, 调度节点见图 2。

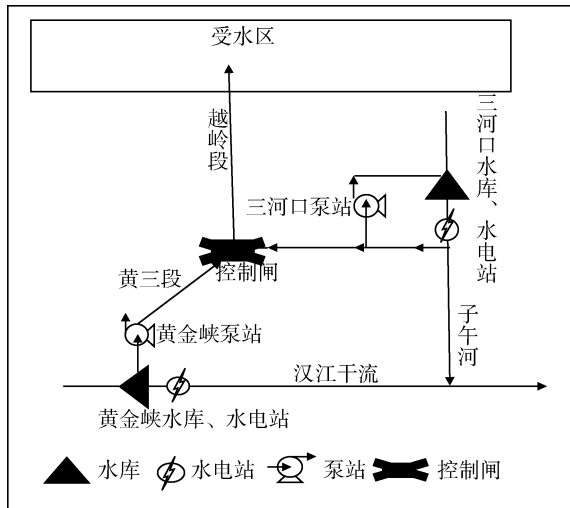


图 2 引汉济渭调水工程调度节点

Fig. 2 Dispatching node of Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project

选用两个水库 1963—2009 年的径流资料, 水文年为当年 7 月到次年 6 月。调水工程多年平均调水量 15 亿  $m^3$ , 黄金峡水库为季调节水库, 下游生态流量<sup>[17]</sup>为 25  $m^3/s$ ; 三河口水库为多年调节水库, 下游生态流量为 2.71  $m^3/s$ , 生态流量保证率为 90%, 隧洞设计流量  $Q_{D,\max}$  为 70  $m^3/s$ 。

调水工程的运行方式是: 生态优先、调水其次、发电最后, 即利用余水发电。在满足黄金峡、三河口水库下游生态流量要求的前提下, 优先调用黄金峡水库水量, 三河口水库水量作为补充; 如果黄金峡水库调水量小于需求, 三河口水库自流补水至控制闸; 如果黄金峡水库调水量大于需求, 富余水量由三河口泵站提水存蓄到三河口水库。

#### 3.2 调度结果分析

以黄金峡泵站提水流量作为算法的优化变量,

调度时段长为月, 种群规模为 100, 最大迭代次数为 800, 采用综合改进多目标布谷鸟算法 (CMCS) 求解本文建立的电站-水库-泵站群多目标优化调度模型, 在满足生态流量条件下, 依据长系列资料得到了发电量、总调水量、耗电量的 Pareto 解集, 如图 3 所示。

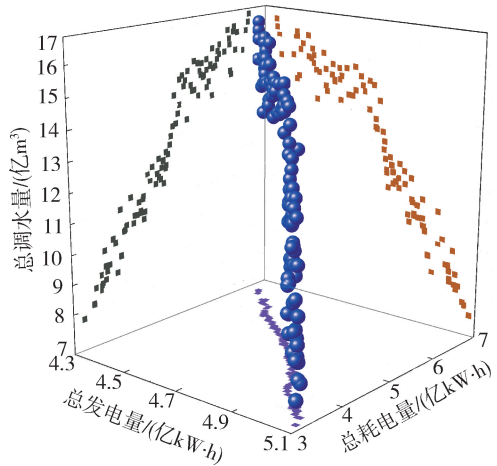


图 3 多目标调度模型 Pareto 曲线

Fig. 3 Pareto curve of multi-objective scheduling model

图 3 中蓝色代表优化调度的解集, 绿色代表优化调度的解对应的总调水量与总耗电量的关系, 紫色代表优化调度的解对应的总发电量与总耗电量的关系, 黄色代表优化调度的解对应的总调水量与总发电量的关系, 当调水量增加时, 黄金峡泵站提水流量增多, 泵站的能耗增加, 三河口水库自流供水也增多, 三河口水电站发电增多。由于调水增加, 三河口发电的增益低于黄金峡水电站发电量的下降值, 故整个系统的净发电量呈现减少趋势。图 3 显示的发电量、调水量与泵站耗能的变化, 符合复杂跨流域调水工程电站、水库、泵站调度运行规律, 表明本文建立的模型计算结果合理。

为了验证本文模型的合理性、优越性等, 将本文模型求解得到的调度结果 (调水量满足多年平均 15 亿  $m^3$  且发电量最大同时耗能量最小的结果) 与模拟调度模型结果和使用 NSGA-II 算法求解的多目标优化调度模型的结果<sup>[18-19]</sup>对比, 对比结果汇总表 2。

表 2 中 3 个模型的结果均满足生态流量和多年

表 1 引汉济渭调水工程相关参数

Table 1 Related parameters of Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project

水库	水库特征参数					电站特征参数					泵站特征参数					
	总库容/ 亿 $m^3$	兴利 库容/ 亿 $m^3$	平均径 流量/ 亿 $m^3$	正常蓄 水位/m	死水 位/m	装机容 量/MW	出力/ MW	设计 流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	水头/ m	平均发 电量/ 亿 $kW \cdot h$	装机 台数	设计 流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	装机 容量/ MW	设计 扬程/ m	最低运 行水位/ m	最高运 行水位/ m
黄金峡	2.29	0.9192	77.5	450	440	135	8.6	435.30	36.5	3.63	7	70	130	116	440	450
三河口	7.10	6.49	9.7	643	558	45	2	72.71	82.8	1.06	3	18	27	98.76	602.91	642.26

表2 模型的调度结果

Table 2 Scheduling results of model

模型	水库	水量/亿 m <sup>3</sup>						电量/(亿 kW·h)		
		入库	出库	发电	弃水	至受水区	至三河口	发电量	耗电量	净发电量
本文模型	黄金峡	66.36	56.98	44.21	12.77	8.71	0.67	3.81	4.04	-0.23
	三河口	8.61	9.28	8.41	0.87	6.33		2.02	0.3	1.72
	总计	74.97	66.26	52.62	13.64	15.04	0.67	5.83	4.34	1.49
模拟调度模型	黄金峡	66.36	55.52	42.57	12.95	10.31	0.53	3.67	4.67	-1.00
	三河口	8.61	9.24	7.73	1.51	4.71		1.86	0.24	1.62
	总计	74.97	64.76	50.3	14.46	15.02	0.53	5.53	4.91	0.62
多目标优化调度模型	黄金峡	66.36	56.78	43.72	13.06	8.89	0.71	3.77	4.13	-0.36
	三河口	8.61	9.32	8.45	0.87	6.19		1.96	0.32	1.64
	总计	74.97	66.1	52.17	13.92	15.08	0.71	5.73	4.45	1.28

注:净发电量负值表示调水过程中耗电量大于发电量。

平均调水 15 亿 m<sup>3</sup> 的要求,由表 2 可知:①本文模型与模拟调度模型相比,调水量增加 0.02 亿 m<sup>3</sup>,弃水减少 0.82 亿 m<sup>3</sup>,电站发电量增大 0.3 亿 kW·h,泵站耗能减小 0.57 亿 kW·h,净发电量增大 0.87 亿 kW·h;②本文模型(3 个目标)与多目标优化调度模型(2 个目标)相比,调水减少了 0.04 亿 m<sup>3</sup>,弃水减少 0.28 亿 m<sup>3</sup>,电站发电量增大 0.1 亿 kW·h,泵站耗能减小 0.11 亿 kW·h,净发电量增大 0.21 亿 kW·h。

图 4 为本文模型两个水库调水量长系列结果。由图 4 可见,本文模型调水量最大的年份为 1975 年,总调水量 17.38 亿 m<sup>3</sup>;最小的年份为 2002 年,总调水量 9.4 亿 m<sup>3</sup>;在 56 年长系列调度中调水量小于 15 亿 m<sup>3</sup> 的年份为 9 年,优于模拟调度模型(23 年)和多目标优化调度模型(16 年)。

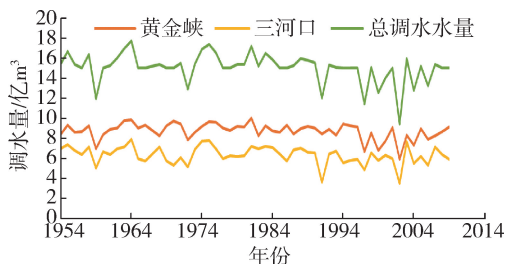


图 4 黄金峡水库和三河口水库调水量  
Fig. 4 Water regulation of Huangjinxia reservoir and Sanhekou reservoir

通过综合比较,本文基于改进布谷鸟算法求解的电站-水库-泵站群多目标优化调度模型,调水量不满足 15 亿 m<sup>3</sup> 的年份减少、发电量增大、耗能量减小、弃水量减小,与模拟调度模型和相关文献建立的多目标优化调度模型相比,本文模型水资源利用效率更高,具有相对优势。

## 4 结 语

考虑跨流域调水工程的“抽-调-蓄-输”全过程,以调水量、发电最大和耗能最小为目标,建立大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调

度模型,基于参数调整策略、邻域变异和加速策略,提出了综合改进布谷鸟算法。采用本文建立的模型和提出的算法,绘制了引汉济渭大型复杂跨流域调水工程的多目标调度的 Pareto 曲线,获得了发电量、调水量、耗电量 3 个目标的 Pareto 解集,3 个目标的博弈关系,符合复杂跨流域调水工程电站、水库、泵站联合调度运行规律,表明本文建立的模型计算结果合理。本文模型与模拟调度模型和相关文献建立的多目标优化调度模型的结果相比,调水量不满足 15 亿 m<sup>3</sup> 的年份减少、发电量增大、耗能量减小、弃水量减小,具有相对优势,可以为引汉济渭工程运行管理提供参考。

但本文的研究结果在生产实际应用中也存在一些问题,如,模型结果为以月为时段的中长期调度,没有考虑洪水、干旱等特殊情况下工程对水资源的调节作用。可以进一步研究这些特殊时期的调度,充分发挥引汉济渭大型复杂跨流域调水工程的功能。

## 参考文献:

- [1] AFSHAR M H. Extension of the constrained particle swarm optimization algorithm to optimal operation of multi-reservoirs system [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 51(4): 71-81.
- [2] 郑慧涛,梅亚东,胡挺,等.改进差分进化算法在梯级水库优化调度中的应用[J].武汉大学学报(工学版), 2013, 46(1): 57-61. (ZHENG Huitao, MEI Yadong, HU Ting, et al. Improved differential evolution algorithm and its application to optimal operation of cascade reservoirs [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(1): 57-61. (in Chinese))
- [3] 王森,程春田,武新宇,等.自适应混沌整体退火遗传算法在水电站群优化调度中的应用[J].水力发电学报, 2014, 33(5): 63-71. (WANG Sen, CHENG Chuntian, WU Xinyu, et al. Application of self-adaptive chaos whole

- annealing genetic algorithm to optimal operation of hydropower station groups [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 63-71. (in Chinese)
- [4] 刘焯, 钟平安, 郭乐, 等. 基于多重迭代算法的梯级水库群调度图优化方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 85-88. (LIU Ye, ZHONG Ping'an, GUO Le, et al. Operation chart optimization method of cascade reservoirs based on multiple iteration algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 85-88. (in Chinese))
- [5] 王磊之, 胡庆芳, 戴晶晶, 等. 面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 61-68. (WANG Leizhi, HU Qingfang, DAI Jingjing, et al. Research on multi-objective joint operation of Taipu River oriented to water supply safety of Jinze Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 61-68. (in Chinese))
- [6] 杨晓萍, 黄瑜珈, 黄强. 改进多目标布谷鸟算法的梯级水电站优化调度[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 12-21. (YANG Xiaoping, HUANG Yujia, HUANG Qiang. Refined multi-objective Cuckoo search algorithm for optimal dispatch of cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 12-21. (in Chinese))
- [7] 方国华, 郭玉雪, 闻昕, 等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))
- [8] 吴云, 陆晓, 杨侃, 等. 基于混沌变异布谷鸟算法的水库供水优化调度[J]. 水力发电, 2019, 45(10): 84-87. (WU Yun, LU Xiao, YANG Kan, et al. Joint dispatching optimization for water supply reservoirs based on chaotic mutation Cuckoo search algorithm [J]. Water Power, 2019, 45(10): 84-87. (in Chinese))
- [9] 申林, 马罗扣, 王肇优. 梯级泵站引水多水库水资源联合优化调度研究[J]. 陕西水利, 2019, 3(3): 41-46. (SHEN Lin, MA Luokou, WANG Zhaoyou. Study on joint optimization scheduling of reservoir & water resources of more water from by step pumping station [J]. Shaanxi Water Resources, 2019, 3(3): 41-46. (in Chinese))
- [10] 高玉琴, 周桐, 马真臻, 等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))
- [11] 贺兴时, 李娜, 杨新社, 等. 多目标布谷鸟搜索算法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(4): 731-737. (HE Xingshi, LI Na, YANG Xinshe, et al. Multi-objective Cuckoo search algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 731-737. (in Chinese))
- [12] 兰少峰, 刘升. 布谷鸟搜索算法研究综述[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(4): 1063-1067. (LAN Shaofeng, LIU Sheng. Overview of research on Cuckoo search algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(4): 1063-1067. (in Chinese))
- [13] 贺淼, 阮奇, 郑晓桂, 等. 自适应布谷鸟搜索算法[J]. 计算机与应用化学, 2013, 31(8): 961-968. (HE Miao, RUAN Qi, ZHENG Xiaogui, et al. Adaptive Cuckoo search algorithm [J]. Computers and Applied Chemistry, 2013, 31(8): 961-968. (in Chinese))
- [14] 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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese))
- [15] 明波, 黄强, 王义民, 等. 水库群优化调度模型求解加速策略研究[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 63-69. (MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Study on acceleration strategy for optimizing reservoir operation model of multi-reservoir systems [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 63-69. (in Chinese))
- [16] 刘斌. 引汉济渭工程总体布局[J]. 中国水利, 2015(14): 76-79. (LIU Bin. Overall layout of Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project [J]. China Water Resources, 2015(14): 76-79. (in Chinese))
- [17] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [18] 杜小洲, 白涛, 马旭, 等. 引汉济渭工程调水区水库群调水模式研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 2-7. (DU Xiaozhou, BAI Tao, MA Xu, et al. Study on water transfer mode of reservoir group within water-transferring region for Hanjiang-to-Weihe river valley water diversion project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8): 2-7. (in Chinese))
- [19] 武连洲. 引汉济渭工程调水区并联水库多目标调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

(收稿日期: 2020-07-23 编辑: 彭桃英)