

基于改进 NSGA-II 算法的水库双目标优化调度

刘 东，黄 强，杨元园，刘登峰，张连鹏，魏晓婷

(西北旱区生态水利工程国家重点实验室 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对 NSGA-II 算法选择机制的缺陷,本文提出一种更好保护优秀个体的择优方法——雄狮选择法,进而提出了一种基于雄狮选择法的改进 NSGA-II 算法——NSGA2-Pride 算法。将新算法应用于水库双目标调度问题中,结果表明,NSGA2-Pride 算法的优化调度结果优于 NSGA-II 算法的优化调度结果,其优化调度将各调度期供水强度平均值提高到 83% 以上,并将供水强度最小值从 49.13% 提升至 72.51%,改善了水库供水状况。本研究为解决水库优化调度问题提供了新的方法。

关键词: NSGA-II 算法; 雄狮选择; NSGA2-Pride 算法; 水库双目标调度

中图分类号: TV212.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)02-0176-06

Reservoir bi-objective operation optimization based on improved NSGA-II

LIU Dong, HUANG Qiang, YANG Yuanyuan, LIU Dengfeng, ZHANG Lianpeng, WEI Xiaoting

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the shortcoming in the selection mechanism of NSGA-II algorithm, this paper first propose a selection method to better protect outstanding individuals-the male lion selection, and then propose an improved NSGA-II algorithm, named NSGA2-Pride algorithm, based on the male lion selection. The new algorithm is applied to the solution of the reservoir bi-objective operation problem. Results indicate that the optimal operation results by the NSGA2-Pride algorithm are better than those by the NSGA-II. The optimal operation results by the NSGA2-Pride algorithm increase the average of water supply intensity in each scheduling period by more than 83%, raise the minimum of water supply intensity from 49.13% to 72.51%, and improve the water supply state of reservoir. This study provide a new method for reservoir operation optimization.

Key words: NSGA-II; male lion selection; NSGA2-Pride; reservoir bi-objective operation

水库优化调度^[1]是一种强约束、高维度、非线性的复杂优化问题,其难点在于选择合适的优化算法高效、快速地求解水库优化调度模型。主流的优化算法有线性规划法^[2]、非线性规划法^[3]、动态规划法^[4]、大系统分解协调法^[5]以及启发式算法^[6-8]等智能优化方法。

传统的单目标优化算法无法直接解决多目标优化问题,需通过目标赋权的方式将多目标问题转化为单目标问题来处理^[1],这样增加了模型优化计算

的主观性。而 NSGA-II 算法^[9]作为一种多目标优化算法,可直接对多目标问题进行优化求解,且其优化效果好、寻优速度快^[10],现已在水库多目标优化调度中广泛应用并取得了良好效果。Chang 等^[11]将 NSGA-II 算法应用于水库群优化调度问题中,检验了该算法在水库多目标优化调度中的可行性和有效性。刘攀等^[12]针对清江梯级水库群中长期调度问题,采用 NSGA-II 算法对梯级水库群联合调度优化模型进行求解,获得了效益更好的水库群联合优

收稿日期: 2020-01-20; 网络出版日期: 2020-05-15
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200514.1030.002.html>
基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M653882XB); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405900)
第一作者: 刘东,男,硕士生,研究方向为水资源系统工程研究。E-mail: 1947430999@qq.com
通信作者: 杨元园,男,博士,讲师,研究方向为城市水文过程和水库调度。E-mail: yuanyuanyang@xaut.edu.cn

化调度图。吴恒卿等^[13]用 NSGA-II 算法对水库群引水与供水模型进行优化求解,获得了满意的联合优化调度方案集,提高了公明供水调蓄工程的供水效率并减少了弃水量。

但是,NSGA-II 算法自身也存在一些缺陷和有待改进之处,国内外学者对此做了大量研究并将改进算法应用于水库多目标优化调度问题中。Gong 等^[14]为使 NSGA-II 算法寻优范围集中于个体非支配区域以提高寻优效率,提出了基于加权拥挤度的改进 NSGA-II 算法,并将其运用于通用陆地模型(Common Land Model)的参数优化率定中,验证了改进算法的高效性和可行性。Zhang 等^[15]将基于加权拥挤度的改进 NSGA-II 算法应用于西江水库群联合优化调度问题中,获得了满意的年发电量、生态效益的多目标优化调度方案集。王学斌等^[16]为处理 NSGA-II 算法全局搜索能力与优化效率之间的矛盾,提出了一种基于个体约束和群体约束技术的可行空间搜索方法,并将基于此方法的改进 NSGA-II 算法应用于黄河下游梯级水库多目标优化调度问题中,提高了优化调度模型的优化效率。

针对 NSGA-II 算法的改进研究,目前多从搜索域优化和单一算子改进两方面开展,未能深入研究种群选择机制的内在联系。然而,NSGA-II 算法是以生物进化论的自然选择理论和遗传学机理为根基建立起来的优化算法,该算法的核心之一正是其“优胜劣汰”的选择机制。因此,本文通过分析 NSGA-II 算法种群进化规律,针对其在择优方面存在的缺陷,提出了一种基于雄狮选择法的双目标进化算法——NSGA2-Pride 算法,并将其应用于水库双目标优化调度问题中。

1 NSGA2-Pride 算法研究

1.1 NSGA-II 算法选择机制缺陷

NSGA-II 算法的选择机制采用联赛选择法(Tournament Selection),其择优规则为:优先比较非支配等级,非支配等级小者胜出;若二者非支配等级相同,则拥挤度大者胜出。在该择优规则中,判定个体优劣的两个指标是非支配等级和拥挤度。其中,在同一非支配层中,个体 n (除两个端点外)的拥挤度与其自身的目标函数值无关,仅由前后相邻两个个体的目标函数值的差值决定。这种拥挤度的计算方法将对部分重要个体产生不利影响,见图 1,其中 f_1 和 f_2 为两个越小越优型目标。

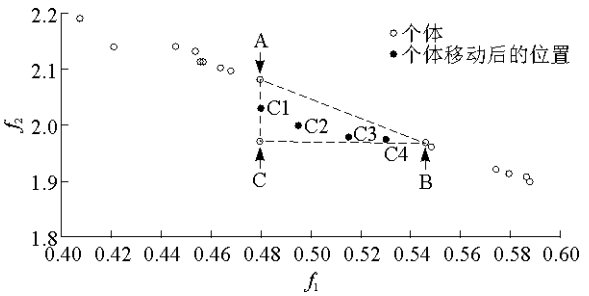


图 1 个体非支配等级和拥挤度不变情境图
Fig. 1 Scenario diagram for individuals with the same nondominated rank and crowding distance

由图 1 可知,个体 A、B、C 的非支配等级均为 1,C(0.479 4,1.972 0)的拥挤度与其自身的目标函数值无关,仅由 A(0.479 3,2.081 3)和 B(0.545 8,1.968 9)两个体目标函数值的差值决定。并且,在三角形 ABC 区域内部原先无个体存在的前提下,当个体 C 在三角形 ABC 内任意移动时,例如从 C 位置移动到 C1、C2、C3、C4 等位置处,其所对应的非支配等级和拥挤度恒不变,见表 1。故 NSGA-II 算法的选择机制无法判断哪个位置处的个体更优,但通过分析不同位置个体的支配关系,C1、C2、C3、C4 位置个体均被 C 位置个体支配,显然 C 位置比其他位置更加重要,在 C 位置处个体更优。

表 1 在不同位置处个体的优劣程度

Tab. 1 Optimization degrees of individuals at different locations

位置	目标函数值		支配关系 (与 C 比)	优劣性	NSGA-II 选择机制	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$			非支配等级	拥挤度
C	0.479 4	1.972 0	—	优	1	0.133 7
C1	0.480 0	2.030 0	被 C 支配	劣	1	0.133 7
C2	0.495 0	2.000 0	被 C 支配	劣	1	0.133 7
C3	0.515 0	1.980 0	被 C 支配	劣	1	0.133 7
C4	0.530 0	1.975 0	被 C 支配	劣	1	0.133 7

因此,NSGA-II 算法的选择机制无法准确判断个体优劣,这对于 C 位置处个体来说是不利的。同时,由于 C 与 A、B 连线的形状类似于断臂悬崖,本文将 C 位置处的个体称为断崖点个体。

1.2 断崖点识别技术

为保护断崖点,本文提出了断崖点识别技术。在断崖点识别技术中,优化算法的目标函数必须为越小越优型。在种群已基于指定目标函数值(以 $f_1(x)$ 为例)进行降序排列并划分狮群的基础上,断崖点识别技术的计算流程为如下。

1) 对于降序排列后的每个个体 i ,计算其斜率

K_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, pop$

①当 $i = 1, 2, \dots, pop - 1$ 时, $K_i = (f_2(i) - f_2(i + 1)) / (f_1(i) - f_1(i + 1))$ 。

②当 $i = pop$ 时, $K_{pop} = -\infty$ 。

2) 在各狮群内部优选规则

①选择斜率最小的个体作为断崖点, 进而作为雄狮。

②其余个体作为雌狮。

1.3 雄狮选择法

为弥补 NSGA-II 算法选择机制存在的缺陷, 提高算法在择优方面的能力并保证重要的断崖点个体能顺利进入父种群, 本文结合自然界中狮群成员组成的规律, 改进了 NSGA-II 算法的联赛选择法, 本文称之为“雄狮选择法”(Male Lion Selection)。雄狮选择法的三个重要参数如下, 其中种群规模为遗传算法的基本参数。

- 1) 种群规模: 一个种群内的个体总数, 用 pop 表示。
- 2) 狮群数(Pride Number): 一个种群内的狮群总数, 用 pn 表示。
- 3) 狮群规模(Pride Scale): 一个狮群内的成员总数, 用 ps 表示。

pop 、 pn 、 ps 三者之间的关系为如下:

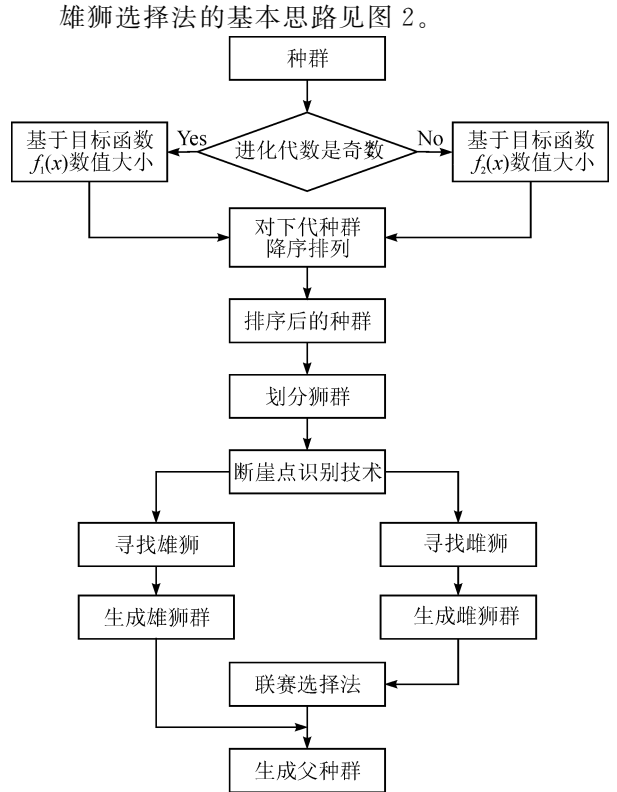
$$pop = pn \times ps \tag{1}$$


图 2 雄狮选择法流程图

Fig. 2 Flowchart of the male lion selection

对于每轮进化, 首先对生成的下代种群(经过优胜劣汰后的新种群)的全部个体, 按照指定目标函数值的大小进行降序排列。其次, 将已排序的种群按照固定的狮群规模等分成若干狮群。然后, 利用断崖点识别技术从每个狮群中识别一个断崖点作为雄狮, 并进入雄狮群, 狮群内的其余个体作为雌狮, 并进入雌狮群。最后, 雄狮群跳过联赛选择法并直接进入父种群, 而雌狮群依旧要通过联赛选择法的随机匹配竞争来争夺进入父种群的资格。在本文中, 狮群规模默认为 5。

2 水库调度实例分析

以我国北方某个以供水为主的不完全年调节水库为研究对象(水库的主要特征参数见表 2), 采用 1959 年 5 月至 2012 年 4 月共 53 年的长系列径流资料, 其中 5 月至 7 月为汛期, 以旬为计算时段, 8 月至次年 4 月为非汛期, 以月为计算时段, 共计 954 个计算时段。

表 2 水库主要特征参数

Tab. 2 Main characteristics of the reservoir

死水位/m	汛限水位/m	正常高水位/m	调节库容/亿 m ³
620	646	646	2.1

水库供水调度研究思路: 首先, 通过水库供水调度模拟模型, 统计各月或旬供水情况; 其次, 找出模拟调度中供水破坏的所有时段并输入到水库供水优化调度模型中; 接着, 确定优化调度时段及调度目标; 最后, 分别用 NSGA2-Pride 算法和 NSGA-II 算法对优化调度模型进行求解, 并对模拟、优化结果进行综合分析。

时段 i 的实际供水量 W_{gs}^i : 时段 i 内水库的出库水量 W_{out}^i 与下游用户计划需水量 W_{xs}^i 二者中的较小值。公式为如下:

$$W_{gs}^i = \min(W_{out}^i, W_{xs}^i) \tag{2}$$

时段 i 的供水强度 SI_i : 时段 i 内水库向下游用户的实际供水量 W_{gs}^i 与下游用户计划需水量 W_{xs}^i 的比值, $SI_i \in [0, 100\%]$ 。公式为如下:

$$SI_i = \frac{W_{gs}^i}{W_{xs}^i} \times 100\% \tag{3}$$

2.1 水库供水模拟调度

水库供水模拟调度模型是依据水库的水量平衡原理建立, 即在各计算时段内, 水库的来水、下游用户的需求水与水库的蓄放水量三者之间满足水量平衡方程。模拟模型从 1959 年 5 月上旬开始计算, 从死水位起调; 到 2012 年 4 月结束, 水位回到死水位, 完成首尾闭合的长系列水库调度模拟。

水库的水量平衡方程为:

$$V(t+1) = V(t) + W_{in}(t) - W_{out}(t) - V_{ss}(t)$$

(4)

水库的约束条件为水库水位和水库放水:

$$Z_{min}(t) \leq Z(t) \leq Z_{max}(t)$$
 (5)

$$W_{min}(t) \leq W_{out}(t) \leq W_{max}(t)$$
 (6)

式中: $V(t)$ 、 $V(t+1)$ 分别为 t 时段初和 $t+1$ 时段初的水库库容; $W_{in}(t)$ 、 $W_{out}(t)$ 分别为 t 时段内的入库水量和出库水量; $V_{ss}(t)$ 为水库的水量损失; $Z(t)$ 为 t 时段初的水库水位; $Z_{max}(t)$ 、 $Z_{min}(t)$ 分别为 t 时段的水位上、下限,其中 $Z_{min}(t)$ 为死水位, $Z_{max}(t)$ 在汛期为汛限水位、在非汛期为正常高水位; $W_{min}(t)$ 、 $W_{max}(t)$ 分别为 t 时段内的出库水量上、下限,其中 $W_{min}(t)$ 为生态基流, $W_{max}(t)$ 由供水和防洪任务确定。

通过对该水库进行长系列模拟调度,水库供水的历时保证率为 96.75%,从模拟结果中整理出各月或旬的供水情况,见表 3。

表 3 模拟调度中各月或旬供水情况

Tab. 3 Water supply of the simulation operation in different months or ten days

时段	汛期 /非汛期	累计破 坏次数	破坏期的供水强度/%		
			最小值	最大值	平均值
4 月	非汛期	4	66.89	95.24	78.96
5 月上旬	汛期	6	64.15	73.44	69.34
5 月中旬	汛期	2	77.18	84.53	80.86
10 月	非汛期	19	49.13	98.00	81.09
其他	——	0	100	100	100

由表 3 可知,在模拟调度中,共有 31 个计算时段供水遭到破坏,并集中出现在 4 个时期。其中,10 月供水破坏的次数最多,累计达 19 次,且破坏期供水强度的最小值仅为 49.13%;5 月上旬破坏期供水强度的最小值和最大值分别不足 65%和 75%,平均值不足 70%;4 月和 5 月中旬的供水亦有不同程度的破坏,其他时期供水无破坏情况。

2.2 水库供水优化调度

本文不直接采用长系列 954 个时段进行优化调度,而是将长系列分为 57 个优化时段和 897 个非优化时段。具体步骤是:先找出模拟调度中供水破坏的 31 个时段,再基于各破坏时段分别向前延伸 1 个时段(若破坏时段 T 的前一时段也为破坏时段,则时段 T 不延伸),最后将破坏时段和延伸时段组合成优化时段。如此能有效避免进化算法在优化时段过多时陷入局部最优解。

水库供水优化调度模型的调度规则是,非优化时段,水库以尽量满足计划需水量进行供水;优化时段,水库以尽量满足打折需水量进行供水。

1) 决策变量

本文采用需水量打折系数 K ($K \in [0,1]$) 作为优化调度的决策变量。为提高优化模型的寻优效率,将 K 的下限由 0 提高到模拟调度中供水强度的最小值 49.13%。水库的打折需水量为:

$$W_{xs}^{K_j} = K_j \times W_{xs}^j$$
 (7)

式中: $W_{xs}^{K_j}$ 为优化时段 j 的打折需水量; W_{xs}^j 为优化时段 j 的计划需水量; K_j 为优化时段 j 的需水量打折系数, $K_j \in [49.13\%, 100\%]$ 。

2) 目标函数

为解决模拟调度中个别时段供水强度过低的问题,并改善优化时段总体的供水情况,本模型设置了两个优化调度目标。

目标 1:各优化时段的供水强度最小值最大,函数 f_1 为:

$$f_1 = \max(\min(SI_j)), j = 1, 2, \dots, 57$$
 (8)

目标 2:各优化时段的供水强度平均值最大,函数 f_2 为:

$$f_2 = \max(\frac{\sum_{j=1}^{57} SI_j}{57})$$
 (9)

式中: j 为优化时段。

由于相邻优化时段的可用库容之间存在一定的矛盾,且相邻时段该水库下游的计划需水量大小又不相同,从而导致优化时段供水强度的最小值和平均值之间存在反比例关系。因此,两个优化目标的设置是合理的、有效的。

3) 约束条件

优化模型的水量平衡方程、水库约束与模拟模型一致;此外,应满足决策变量约束:

$$49.13\% \leq K_j \leq 100\%$$
 (10)

式中: K_j 为优化时段 j 对应的决策变量,亦为需水量打折系数。

2.3 调度结果分析

采用 NSGA-II 算法和 NSGA2-Pride 算法分别求解水库供水双目标优化调度模型,种群规模均为 100,并以最大进化代数 2 000 代作为算法的终止条件,分别独立进行 10 次优化计算。两种算法对各目标的平均优化结果和平均计算耗时见表 4,其中,两个目标均为越大越有型。

表 4 平均优化结果和平均计算耗时

Tab. 4 Average optimization results and computing time

算法	目标 1		目标 2		平均耗时/min
	最小值/%	最大值/%	最小值/%	最大值/%	
NSGA2-Pride	64.36	72.09	89.14	90.11	54.15
NSGA-II	63.78	72.48	88.37	90.03	46.43

由表 4 可知如下结论。

1) 从各目标极值的平均优化结果来看,除目标 1 最大值外,其余目标极值的平均优化结果均为 NSGA2-Pride 算法的优化结果大于 NSGA-II 算法的优化结果。

2) 从平均计算耗时来看,NSGA2-Pride 算法的平均计算耗时比 NSGA-II 算法的平均计算耗时长 16.63%。

从两种算法各自 10 次的水库优化调度结果中,分别选取优化结果最好的 1 次,见图 3。

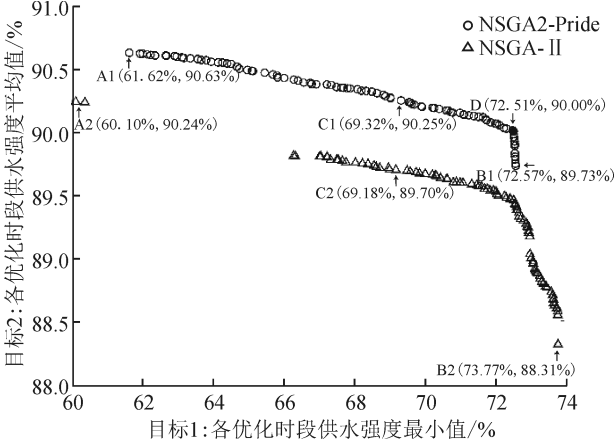


图 3 最佳优化结果的 Pareto 前沿面

Fig. 3 Pareto front of the optimal results

由图 3 可知如下结论。

1) 对两个目标的极值分析,A1 在两个目标极值上均高于 A2 的对应值;B1 在目标 2 的极值上高于 B2 的对应值,但由于目标 1 和目标 2 之间存在反比例关系,因此 B1 在目标 1 极值上低于 B2 的对应值是可以接受的。

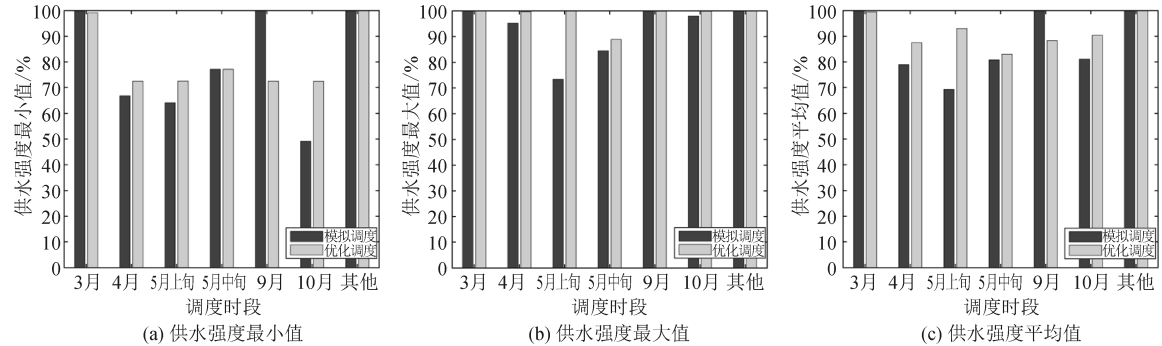


图 4 破坏期的供水情况

Fig. 4 Water supply during the shortage period

2) 对单目标数值相近的解分析,以 A2、C1、C2 为例,在目标 2 上 C1 与 A2 数值相近且 C1 略大于 A2,但在目标 1 上 C1 比 A2 大 9.22%,C1 明显优于 A2;同理,C1 明显优于 C2。

3) 对 Pareto 前沿面的形状分析,虽然 NSGA-II 算法 Pareto 前沿面分布更广泛,但是其总体分布位置偏低,并且在前沿面的左上部分连续性遭到了严重破坏,而 NSGA2-Pride 算法 Pareto 前沿面总体分布位置更高,连续性更好。

综上所述,NSGA2-Pride 算法 Pareto 前沿面整体优于 NSGA-II 算法 Pareto 前沿面,NSGA2-Pride 算法 Pareto 前沿面对应的最优解集整体也要优于 NSGA-II 算法对应的最优解集。

由图 3 可知,对 NSGA2-Pride 算法最优解集分布状况进行分析可得,目标 1 的极差达到 10.95%,远大于目标 2 的极差 0.90%。并且,D 作为 NSGA2-Pride 算法 Pareto 前沿面的转折点,相对于 A1,D 以较小的目标 2 损失换来了目标 1 的大幅增加;相对于 B1,D 以较小的目标 1 损失换来了目标 2 较大幅度增加。同时,NSGA2-Pride 算法的解集整体优于 NSGA-II 算法的解集。因此,本文选择 NSGA2-Pride 算法最优解集中的 D 作为制定水库供水优化调度方案的依据。其中,最优解 D 对应的供水情况见表 5,模拟调度与优化调度中破坏期的供水情况见图 4。

表 5 优化调度各月或旬供水情况

Tab. 5 Water supply of the optimization operation in different months or ten days

时期	汛期/非汛期	累计破坏次数	破坏期的供水强度/%		
			最小值	最大值	平均值
3 月	非汛期	4	99.14	99.99	99.51
4 月	非汛期	7	72.55	99.69	87.47
5 月上旬	汛期	6	72.56	99.95	93.04
5 月中旬	汛期	2	77.18	88.85	83.02
9 月	非汛期	19	72.55	99.86	88.30
10 月	非汛期	19	72.51	99.86	90.42
其他	—	0	100	100	100

由图 4 和表 5 可知如下结论。

1) 优化调度共有 57 个供水破坏时段,其对应的供水历时保证率为 94.03%,略低于模拟调度的供水历时保证率 96.75%,说明优化调度对水库供水的整体不利影响较小。

2) 图 4(a)中,从供水强度最小值来看,除 9 月外,其余月旬的优化结果整体优于模拟结果,其中在模拟调度下 10 月供水强度最小值仅为 49.13%,而优化调度将其大幅提升至 72.51%。

3) 图 4(b)中,从供水强度最大值来看,各月旬的优化结果整体优于模拟结果,其中 5 月上旬供水强度最大值的模拟调度结果仅为 73.44%,而优化调度结果为 99.95%。

4) 图 4(c)中,从供水强度平均值来看,除 9 月外,其余月旬的优化结果整体优于模拟结果,其中 5 月上旬供水强度平均值的模拟调度结果仅为 69.34%,而优化调度结果为 93.04%。

总体来看,优化调度提高了供水强度的最小值和平均值,并让供水强度的变化过程更加平稳,从而降低了供水强度的大幅波动对下游生产生活的不利影响。

3 结 论

本文通过分析种群进化规律,进而提出 NSGA2-Pride 算法,为研究优化算法提供了新角度和新思路。通过研究,本文得到如下结论。

1) 针对 NSGA-II 算法选择机制的缺陷,提出了一种基于雄狮选择法的改进 NSGA-II 算法——NSGA2-Pride 算法。

2) 在水库调度问题中,NSGA2-Pride 算法的优化结果整体优于 NSGA-II 算法的优化结果。

3) 分析了 NSGA2-Pride 算法优化结果中的一个最优解,基于该最优解的优化调度将各调度期供水强度平均值提高到 83%以上,并将供水强度最小值从 49.13%提升至 72.51%,改善了水库供水状况。

由此可知,该算法对解决双目标优化问题具有广阔的应用前景。目前,NSGA2-Pride 算法仅建立了 2 个目标数学模型,尚未建立起 3 个目标乃至更多目标的数学模型。因此,如何高效解决大于 2 个目标的多目标优化问题,并将其与水库优化调度结合,将是今后研究的难点和重点。

参考文献:

[1] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进

展与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):496-503.

GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 496-503.

[2] NEEDHAM J T, JR WATKINS D W, LUND J R, et al. Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines Rivers[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(3): 118-127.

[3] PENG Chengshuang, BURAS N. Practical estimation of inflows into multireservoir system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(5): 331-334.

[4] 赵钢铁,雷晓辉,蒋云钟,等. 水库调度决策单调性与动态规划算法改进[J]. 水利学报,2012,43(4): 414-421.

ZHAO Tongtiengang, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Monotonicity in operation decision of reservoir and improved dynamic programming algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 414-421.

[5] 田峰巍,解建仓. 用大系统分析方法解决梯级水电站群调度问题的新途径[J]. 系统工程理论与实践,1998(5):112-117.

TIAN Fengwei, XIE Jianchang. A new way to solve cascade hydropower reservoirs operation with large scale system analysis [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998(5): 112-117.

[6] 张双虎,黄强,黄文政,等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. 西安理工大学学报,2006,22(3):229-233.

ZHANG Shuanghu, HUANG Qiang, HUANG Wenzheng, et al. Linking simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(3): 229-233.

[7] 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(3):341-349.

MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yiming, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo Search[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015(3): 341-349.

[8] 马川惠,李瑛,黄强,等. 基于 Spark 的水库群多目标调度粒子群并行化算法[J]. 西安理工大学学报,2018,34(3):309-313.

MA Chuanhui, LI Ying, HUANG Qiang, et al. Parallel particle swarm optimization algorithm based on Spark multi-objective optimal scheduling of reservoir group[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(3): 309-313.

(下转第 213 页)

- and electron microscopy[J]. *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics*, 1973, 11(11): 2153-2171.
- [19] YAGI T, TATEMOTO M. A fluorine-19 NMR study of the microstructure of vinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymers[J]. *Polymer Journal*, 1979, 11(6), 429-436.
- [20] YAGI T, TATEMOTO M, SAKO J. Transition behavior and dielectric properties in trifluoroethylene and vinylidene fluoride copolymers[J]. *Polymer Journal*, 1980, 12(4): 209-223.
- [21] SUN Qianqian, XIA Weimin, LIU Yang, et al. The dependence of acoustic emission performance on the crystal structures, dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties of the P(VDF-TrFE) sensors[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(5): 975-983.
- [22] ZHOU Zhenji, LI Jinglei, XIA Weimin, et al. Enhanced piezoelectric and acoustic performances of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) films for hydro-acoustic applications[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, 22(10): 5711-5722.
- [23] XIA Weimin, SUN Qianqian, XIN Junhong, et al. Comparisons of ferroelectric and dielectric behavior of polyvinylidene fluoride and polyvinylidene fluoride trifluoroethylene[C]//2019 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF), Lausanne, Switzerland, 2019: 1-3.
- [24] 周振基,夏卫民,孙倩倩,等. 单向拉伸对 P(VDF-HFP)膜结晶相、介电和储能特性的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2018, 34(2): 216-222.
- ZHOU Zhenji, XIA Weimin, SUN Qianqian, et, al. Uniaxial-stretching induced crystal phase transition and its effect on dielectric and energy storage properties of the P(VDF-HFP) copolymer films[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 34(2): 216-222.
- [25] OR S W, CHAN H L W, CHOY C L. P(VDF-TrFE) copolymer acoustic emission sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 80(3): 237-241.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 181 页)

- [9] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]//International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2000.
- [11] CHANG L C, CHANG F J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1/2): 12-20.
- [12] 刘攀,郭生练,郭富强,等. 清江梯级水库群联合优化调度图研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(7): 63-66.
- LIU Pan, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Derivation of the optimal operating curve rules for Qingjiang cascade reservoirs[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2008, 36(7): 63-66.
- [13] 吴恒卿,黄强,徐炜,等. 基于聚合模型的水库群引水与供水多目标优化调度[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 140-146.
- WU Hengqing, HUANG Qiang, XU Wei, et al. Multi-objective optimal operation for multi-reservoirs for water diversion and supply by using aggregation model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 140-146.
- [14] GONG Wei, DUAN Qingyun, LI Jianduo, et al. Multiobjective adaptive surrogate modeling-based optimization for parameter estimation of large, complex geophysical models[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(3), 1984-2008.
- [15] ZHANG Jingwen, WANG Xu, LIU Pan, et al. Assessing the weighted multi-objective adaptive surrogate model optimization to derive large-scale reservoir operating rules with sensitivity analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 613-627.
- [16] 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, 156.
- 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, 156.

(责任编辑 王绪迪)