

宋志红, 刘渊, 江生金, 等. 引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 39-47. SONG Z H, LIU Y, JIANG S J, et al. Multi-objective water optimal dispatching of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 39-47. (in Chinese)

引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度

宋志红¹, 刘渊², 江生金², 蒋恒², 方俊², 陈钊², 王永强¹, 王冬¹

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 河南省引江济淮工程有限公司, 郑州 450000)

摘要: 引江济淮工程(河南段)涉及河道、闸泵、管道和调蓄水库, 约束条件复杂, 常规的优化调度算法难以搜索可行解, 求解效率低。选用受水区缺水率平均值最小、泵站总抽水量最小和受水区缺水率标准差最小作为目标函数, 从供水保障、供水成本和公平性角度构建多目标水量优化调度模型。基于可行搜索思路, 结合逆序演算和顺序演算过程对约束条件进行处理, 引入决策系数, 通过映射关系使搜索空间保持在可行域中, 结合多目标非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms, NSGA-II)进行求解, 得到 Pareto 最优解集, 并采用熵权法进行方案优选。结果表明, 基于可行搜索的 NSGA-II 算法能够有效求解复杂调度系统的多目标优化问题, 综合考虑多个目标的最优方案相对单目标方案更加合理, 结果可为引江济淮工程(河南段)运行管理提供决策支撑。

关键词: 引江济淮工程(河南段); 可行搜索; 多目标; 水量优化调度; NSGA-II 算法

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0006

我国地域辽阔、气候类型多样、水资源时空分布不均^[1-2]。跨流域调水工程是解决区域水资源分配不均、供需矛盾突出的重要手段, 其目的是将水资源从丰水地区调入缺水地区, 从而缓解水资源短缺问题, 保障缺水地区供水安全与经济社会发展^[3-4]。引江济淮工程^[5]是沟通长江、淮河两大流域和皖豫两省的水资源配置和综合利用工程, 对于解决淮河流域及输水沿线地区水资源短缺等具有重要意义。河南段工程作为江水北送段的一部分, 通过西淝河向河南省商丘、周口地区供水, 可保障受水区城乡生活及工业生产用水安全以及改善水生态环境。

多目标水量优化调度问题是当前水资源领域的研究热点。水量调度是指通过合理运用各类水利工程, 在时间和空间上对水资源进行调节、控制和分配的活动, 是科学指导工程运行管理的重要内容, 对保障供水目标实现、调水工程效益发挥具有重要意义。引江济淮工程(河南段)涉及管道、闸泵和调蓄水库等多种输水建筑物以及输水河道, 供水调度系统复杂。此外, 调水工程水量调度往往需要考虑供水保障、供水成本以及公平性等多个调度目标,

且这些目标之间往往存在相互竞争关系, 使得求解相对困难。因此, 针对复杂调度系统多目标水量优化调度问题的研究显得尤为重要。当前研究有采用智能优化算法来求解复杂水量调度模型, 即通过优化决策变量的取值, 使目标函数在给定约束条件下达到最优, 常用的方法包括线性规划、非线性规划、动态规划法和启发式算法等^[6]。其中启发式进化算法因其具有全局优化性能、稳健性强、通用性强、求解效率高等特点在水量优化调度领域得到广泛应用, 如遗传算法^[7-8]、人工神经网络^[9]、粒子群算法^[10]和蚁群算法^[11]等。在多目标决策问题中, 应用较广的多目标智能优化算法有多目标差分演化算法^[12]、多目标遗传算法^[13]、非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms, NSGA-II)^[14-16]等。

在水量调度模型优化求解过程中, 约束条件的处理一直是智能算法的核心和难点问题^[17]。一般智能算法是通过在给定上下限的决策变量空间中进行随机搜索, 但是对于复杂调度系统, 约束条件类型和决策变量数量过多, 且各个决策变量之间存在强关联性, 导致可行空间在整个搜索空间中的比例

收稿日期: 2023-08-14 修回日期: 2023-11-03 网络出版时间: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240109.0940.008>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202300); 国家自然科学基金项目(52309002); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023398/SZ); 引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021004)

作者简介: 宋志红(1995—), 男, 安徽安庆人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: song.z.h@whu.edu.cn

很小。算法需要通过增加种群和迭代次数以实现扩大搜索,造成计算耗时较长、收敛性差,甚至无法搜索到可行解。为解决这一问题,常用的处理约束条件的方法有:将常规调度生成的解直接引入算法的初始解空间中;采用适当的修复算子,将不可行解转化为可行解,使得搜索始终在可行域内进行;在求解时引入罚函数将有约束问题转化为无约束问题。但这些方法可移植性差、求解效率偏低,收敛性也难以保证。有学者尝试将可行搜索思路与优化算法结合来提高求解效率。如:艾学山等^[18]针对梯级水库优化调度问题提出了可行搜索-离散微分动态规划(FS-DDDP)方法,其通过寻找水库优化调度过程的大量可行轨迹,以目标函数较大的几个可行轨迹作为 DDDP 方法的初始轨迹分别进行再寻优计算。王旭等^[19]提出基于可行空间搜索遗传算法的水库调度图优化模型,通过量化决策变量之间的二维拓扑关系,将搜索范围限制在可行空间之内,以达到提高搜索效率和全局优化能力的效果。明波等^[17]提出了梯级水库发电优化调度搜索空间缩减法,并与智能算法耦合,利用优化的搜索空间产生高质量的初始种群,同时使算法在更小的搜索空间内寻优,进而提升算法的搜索效率。纪昌明等^[20]在水库调度约束处理问题上引入映射思想,提出基于可行域搜索映射的动态规划算法,通过在时段可行搜索空间中进行动态规划计算,以规避无效系统状态计算,缩减算法运行时间。但这些方法主要是针对水库优化调度问题的,难以适用于涉及复杂调水工程的水量调度系统,因此需要研究涉及多类型水工程的复杂调度系统的多目标优化求解技术,以提高求解效率和精度。

为准确高效求解引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度问题,通过考虑复杂约束下决策变量之间的强关联性,推导得到不同时段决策变量的可行区间范围,再基于映射关系引入 0~1 决策系数,耦合多目标优化算法 NSGA-II,通过对决策系数进行优化,使决策变量始终保持在可行空间内,从而实现快速求解,提高收敛效率。

1 工程概况

引江济淮工程(河南段)的主要任务是以城乡供水为主,兼顾改善水生态环境。引江济淮工程实施后,可向豫东地区的周口、商丘部分地区城乡生活及工业生产供水,保障饮水安全和煤炭、火电等重

要行业用水安全。引江济淮工程(河南段)属于江水北送的一部分。安徽省通过西淝河向河南境内输水,在豫皖两省分界处西淝河与清水河输水河道相连接。在河南境内利用清水河通过 3 级提水泵站逆流而上提水至试量闸上游,经鹿辛运河自流至鹿邑后陈楼调蓄水库,然后通过加压泵站和压力管道输送至各受水区。

工程供水范围在河南省涉及 7 个县 2 个区共 9 个供水目标,分别为周口市的郸城、淮阳、太康 3 个县,商丘市的柘城、夏邑 2 个县,商丘市梁园区、睢阳区 2 个区,以及永城和鹿邑 2 个直管县,总面积 12 114 km²。《引江济淮工程(河南段)初步设计报告准予行政许可决定书》(水许可决[2019]38 号)批复引江济淮工程向试量站断面供水 2030 规划水平年多年平均为 5.00 亿 m³,2040 规划水平年多年平均为 6.34 亿 m³。

引江济淮工程(河南段)利用清水河河道通过袁桥、赵楼和试量泵站逆流而上向上游输水至试量调蓄水库,经鹿辛运河自流至后陈楼调蓄水库,然后通过后陈楼加压泵站提水至七里桥调蓄水库,再通过七里桥加压泵站分别提水至新城调蓄水库和夏邑出水池,调蓄水库或出水池与各个分水口之间通过配套工程连接。

根据引江济淮工程(河南段)的工程总体布局以及供水范围分布情况,对与工程供水相关的对象进行概化建模,主要对象包括河道、管道、泵站、闸门、调蓄水库、分水口等。工程供水调度概化图见图 1。

2 研究方法和数据

2.1 模型构建

构建引江济淮工程(河南段)旬水量多目标优化调度模型,考虑到清水河袁桥泵站至试量泵站之间无分水口,因此调度范围以试量泵站为起点,各分水口为终点,决策变量为试量泵站、后陈楼泵站与七里桥泵站的时段抽水量以及各分水口的时段供水量,调度目标包括各受水区缺水率平均值最小、泵站总抽水量最少以及各受水区缺水率标准差最小。

2.1.1 目标函数

引江济淮工程(河南段)的主要作用是保障城乡饮水安全和行业用水安全,首要目标就是各受水区缺水最少,以受水区缺水率平均值作为一个重要的优化目标。此外,为降低供水成本,减少水量损失,提高河南省供水效率,将泵站总抽水量作为优化目

标之一。为提高受水区供水的空间均衡性,保证供水公平性,选择各受水区缺水率的标准差作为优化

目标之一。因此,综合考虑供水保障、供水成本以及公平性等多个目标进行优化调度,目标函数形式如下:

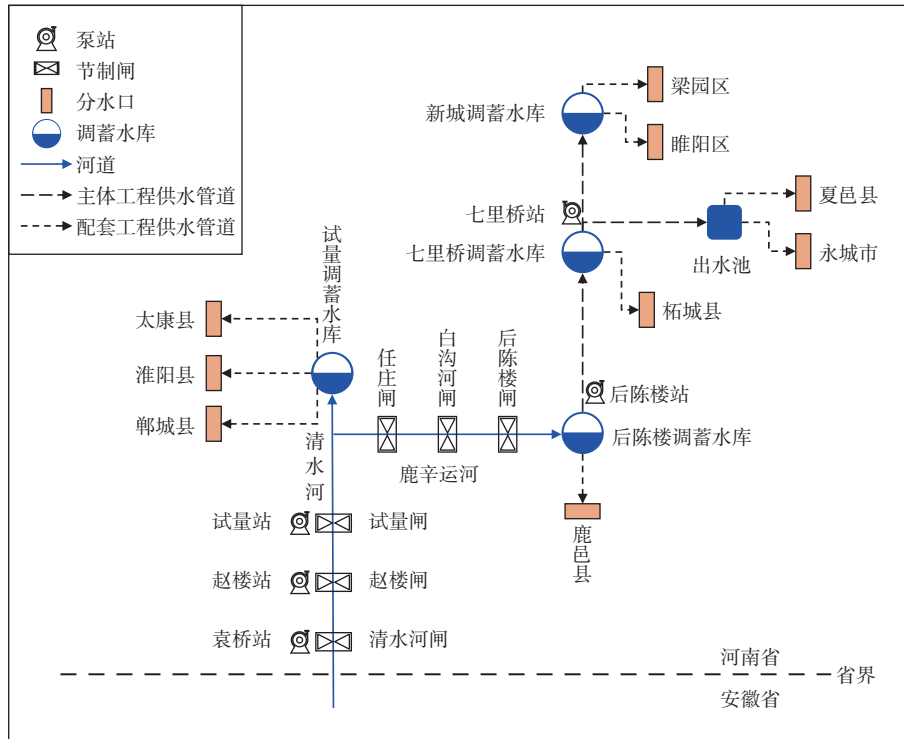


图1 引江济淮工程(河南段)水量调度系统概化

Fig. 1 Schematic diagram of the water dispatching system of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

供水保障目标。受水区缺水率平均值最小,表达式为

$$f_1 = \min \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{[Q_{d(i,t)} - Q_{s(i,t)}]}{Q_{d(i,t)}}}{N} \quad (1)$$

供水成本目标。泵站总抽水量最少,表达式为

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M Q_{b(j,t)} \Delta T_{(t)} \quad (2)$$

公平性目标。受水区缺水率标准差最小,表达式为

$$f_3 = \min \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\alpha_{(i)} - \bar{\alpha}]^2}{N}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: t 为时段序号, $t=1\sim T$; i 为受水区序号, $i=1\sim N$, $N=9$; j 为泵站序号, $j=1\sim M$, $M=3$; $Q_{d(i,t)}$ 为 t 时段 i 受水区的需水流量(指扣除当地供水后的缺水量), m^3/s ; $Q_{s(i,t)}$ 为 t 时段 i 受水区对应分水口的实际供水流量, m^3/s ; $Q_{b(j,t)}$ 为 t 时段 j 泵站的抽水流量, m^3/s ; $\Delta T_{(t)}$ 为 t 时段时长, s ; $\alpha_{(i)}$ 为 i 受水区的缺水率, $\alpha_{(i)} = \frac{\sum_{t=1}^T [Q_{d(i,t)} - Q_{s(i,t)}]}{Q_{d(i,t)}}$; $\bar{\alpha}$ 为 N 个受水区的平均缺水率。

2.1.2 约束条件

调度系统中约束主要包含各个输水部分(调蓄水库、泵站、闸门、河道、管道)设计输水能力约束和

水量平衡约束,以及批复的规划水平年供水总量约束。

设计输水能力约束。调蓄水库、泵站、闸门、河道、管道的输水流量不超过设计值。

水量平衡约束。调蓄水库水量平衡约束表达式为

$$V_{(k,t+1)} = V_{(k,t)} + [Q_{r,in,(k,t)} - Q_{r,out,(k,t)}] \Delta T_{(t)} \quad (4)$$

$$Q_{r,out,(t)} = \sum Q_{b,(t)} + \sum Q_{s,(t)} \quad (5)$$

式(4)和(5)中: k 为调蓄水库序号, $k=1\sim 4$; $V_{(k,t)}$ 表示 t 时段第 k 个调蓄水库的库容, m^3 ; $Q_{r,in,(k,t)}$ 和 $Q_{r,out,(k,t)}$ 分别表示 t 时段调蓄水库 k 的入库和出库流量, m^3/s ; $\sum Q_{b,(t)}$ 和 $\sum Q_{s,(t)}$ 分别表示 t 时段与相应调蓄水库连接的泵站抽水流量之和与分水口供水流量之和, m^3/s 。

连接闸泵及调蓄水库的各级河道和管道水量平衡约束表达式为

$$Q_{c,up,(t)} = Q_{c,down,(t)} + L_{c,(t)} \quad (6)$$

式中: $Q_{c,up,(t)}$ 和 $Q_{c,down,(t)}$ 分别表示 t 时段河道或管道上断面和下断面的流量, m^3/s ; $L_{c,(t)}$ 为 t 时段河道或管道输水损失, m^3/s 。

闸泵的水量平衡约束表达式为

$$Q_{b,in,(j,t)} = Q_{b,out,(j,t)} \quad (7)$$

式中: $Q_{b,in,(j,t)}$ 和 $Q_{b,out,(j,t)}$ 分别表示 t 时段闸泵引水流量和出水流量, m^3/s 。

供水总量约束表达式为

$$\sum_{t=1}^T Q_{b,(1,t)} \Delta T(t) \leq S_{\max} \quad (8)$$

式中: $Q_{b,(1,t)}$ 表示 t 时段试量泵站抽水流量, m^3/s ; S_{\max} 表示设计供水总量, m^3 。

此外, 决策变量(泵站抽水过程、分水口供水过程)以及状态变量(调蓄水库水位库容过程、管道、闸门输水过程等)均非负。根据《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》, 得到不同输水建筑物的设计运行规模和调度规则, 确定建筑物的流量约束条件见表 1、水库水位约束条件见表 2。试量泵站供水总量约束 2030 规划水平年多年平均为 5.00 亿 m^3 , 2040 规划水平年多年平均为 6.34 亿 m^3 。

表 1 不同输水建筑物流量约束条件

Tab. 1 Constraint conditions of water flow of different water conveyance structures

约束对象	约束流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
试量泵站/节制闸	40.0
试量水库进水闸	9.6
任庄节制闸	30.9
白沟河节制闸	30.9
后陈楼进水闸	30.9
后陈楼泵站	22.9
七里桥泵站	20.4
后陈楼调蓄水库—七里桥调蓄水库段	22.9
管道	
七里桥调蓄水库—新城调蓄水库段	6.6
七里桥调蓄水库—夏邑段	13.8
分水口	
郸城县	3.0
淮阳县	3.3
太康县	3.3
梁园区	3.1
睢阳区	3.5
柘城县	2.5
夏邑县	2.8
永城市	11.0
鹿邑县	8.0

表 2 水库水位约束条件

Tab. 2 Constraint conditions of reservoirs' water level

调蓄水库	正常蓄水位/m	死水位/m	调节库容/ 万m^3	总库容/ 万m^3
试量	40.9	37.5	70	80
后陈楼	40.2	40.1	210	302
七里桥	46.0	42.0	143	160
新城	48.5	42.5	163	175

2.2 求解方法

2.2.1 FS-NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是 Deb 等人于 2002 年在 NSGA 的基础上发展而来的, 该算法通过引入拥挤度和拥挤度比较算子、精英保留策略以及快速非支配排序算法, 在降低计算复杂度的同时, 保证了种群多样性并提高优化结果精度, 且具有运行速度快、收敛性较好的特点, 被广泛用于多目标优化问题的求解。

在 NSGA-II 算法的初始种群生成以及进化过程中, 变量抽样空间的上下限通常为固定值。对于大多数实际问题来说, 决策变量之间都存在一定的关系, 这种固定抽样空间的方式会导致优化过程中产生大量不可行解, 显著降低了搜索效率。因此, 利用可行搜索思路, 通过引入决策系数, 建立其与决策变量之间的线性映射, 使算法始终在可行域中进行搜索, 提出基于可行搜索的非支配排序遗传算法(FS-NSGA-II)。

约束处理机制。约束条件处理一直是智能算法求解各类复杂优化问题的核心和难点问题。复杂水量调度系统包含多类多时段决策变量, 且决策变量之间存在的复杂非线性相关联系构成一种强约束。传统智能算法在给定决策变量上下限的空间中进行随机搜索, 但是复杂调水系统优化问题解的可行域占搜索空间的比重极小, 导致优化过程中必须浪费大量的计算能力在不可行解的生成和处理上, 而没有真正用于搜索最优解。算法通常需要更大的种群和更多的迭代次数以实现扩大搜索, 这就使得算法的计算耗时较长、收敛性差。

FS-NSGA-II 算法将搜索空间限制在可行域中, 极大的缩小搜索范围, 并且保证每个个体都是可行解, 有效改进算法搜索效率和收敛性。主要策略为: 首先根据输水建筑物分布和调度规则对调度系统进行概化, 基于水量平衡关系从系统末端(即分水口)逆序推算至系统始端(试量泵站)得到各节点需水过程, 再结合约束条件通过顺序演算计算出各时段决策变量的可行上下限, 对于每个决策变量, 给定一个 $[0, 1]$ 范围的决策系数, 将决策变量根据可行上下限映射至 $[0, 1]$ 空间, 通过优化决策系数, 使算法始终在决策变量可行上下限范围进行搜索, 最后根据映射关系将决策系数转换为决策变量, 进而实现 NSGA-II 算法的可行搜索和优化。可行搜索思路示意图见图 2。

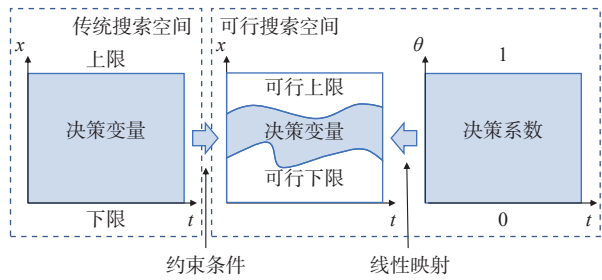


图2 可行搜索思路

Fig. 2 Schematic diagram of feasible search idea

可行域求解过程。决策变量可行域求解过程包含3部分:

逆序演算。该过程是从工程末端枢纽(各分水口)开始演算推至工程起点枢纽(试量泵站)的逆序模拟过程,主要考虑各受水区的逐时段需水量和沿程输水损失,从而倒推出工程全段所需的逐时段需水量过程,并与工程各类建筑物设计输水能力约束进行对比,取两者较小值,从而实现“以需定供”的理念。

决策系数生成。随机生成一组[0, 1]范围内的决策系数。

顺序演算。对于给定时段 t ,根据逆序演算确定的试量泵站需水量,与其设计输水能力和设计供水总量比较,取三者最小值作为试量泵站抽水量上限,其下限为0,并基于决策系数得到当前时段的试量泵站抽水量,决策变量映射转换公式见式(9)。然后通过顺序演算从工程起点枢纽(试量泵站)开始演算至工程终点枢纽(各分水口),根据水量平衡关系与约束条件分别计算各决策变量的上下限范围,结合相应的决策系数,得到一组可行解,即整个工程调度过程。

$$x = x_{\min} + \theta(x_{\max} - x_{\min}) \quad (9)$$

式中: x 为决策变量; x_{\min} 和 x_{\max} 分别为 x 的可行上下限; θ 为决策系数, $\theta \in [0, 1]$ 。

2.2.2 熵权法

通过FS-NSGA-II算法得到一组工程供水调度的Pareto最优解,综合考虑受水区缺水率平均值、标准差和泵站总抽水量3个指标,采用熵权法进行方案评价,在Pareto最优解集中优选调度方案。具体步骤为:根据3个指标构建评价矩阵,归一化后确定信息熵值,再利用信息熵计算指标权重,最后得到各个方案的得分,分值最高的方案作为最优方案。综合以上,基于FS-NSGA-II优化算法和熵权法评价优选方案的框架见图3。

2.3 研究数据

研究数据主要为引江济淮工程(河南段)2030

年规划水平年各受水区逐旬需水数据(扣除当地供水,即需调水量),该部分数据是依据《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》成果,结合受水区不同水平年经济社会发展指标,在无引江济淮工程的前提下,采用定额法计算得到开展需水量、可供水量预测和供需平衡分析。图4给出了河南省受水区2030年规划水平年需水流量过程,规划2030年多年平均总需水量为26.25亿 m^3 ,总供水量为20.32亿 m^3 ,缺水率为23%,在无引江济淮工程供水情形下,受水区规划水平年水资源供需矛盾突出。

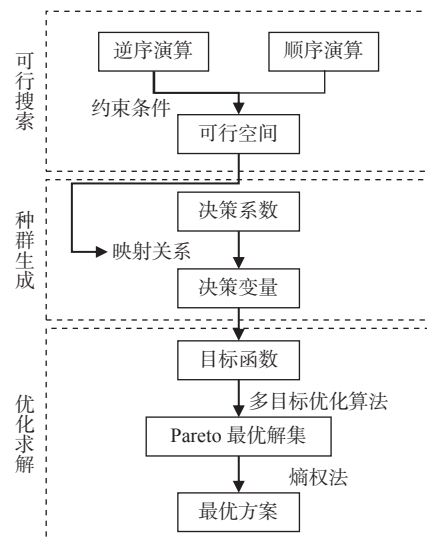


图3 水量优化调度模型求解框架

Fig. 3 Framework diagram for solving water flow optimization dispatching model

3 结果分析

3.1 Pareto 最优解集分析

采用R语言“mco”程序包^[21]中的nsga2函数进行优化计算,参数设置为:种群规模 $N = 1000$,迭代次数 $K = 200$,变异概率为0.2,交叉概率为0.8。计算时段为旬,时长为1年36旬,水库初始水位为正常蓄水位,利用FS-NSGA-II算法求解2030年规划水平年引江济淮工程(河南段)水量优化调度模型。得到面向多个优化目标的Pareto最优解集,以及其对应的目标函数值,即Pareto前沿(图5)。从图5可以看出:受水区缺水率平均值、标准差与泵站总抽水量之间均有着密切的联系,泵站总抽水量越大,缺水率平均值往往越小;缺水率标准差会随着缺水率平均值增大呈现先增大后减小的趋势,表明在缺水率平均值很小($<10\%$)或很大($>25\%$)的时候,受水区缺水率较为均衡,而缺水率平均值

在 15%~20%, 受水区缺水率标准差较大, 缺水在空间上不均衡。总体上来看, 泵站总抽水量与受水区缺水率平均值和标准差呈现竞争关系, 随着总抽水量增大, 缺水率平均值和标准差均降低。

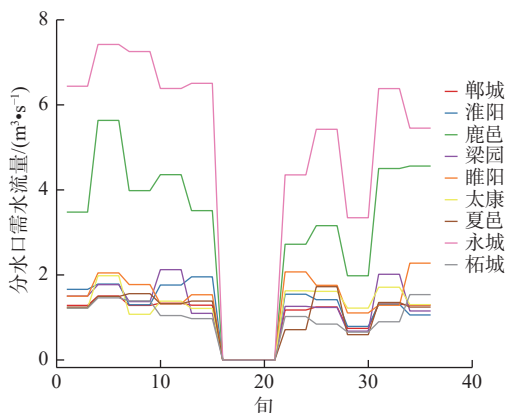


图 4 河南省受水区 2030 年规划水平年需水流量过程

Fig. 4 The water demand flow series of water receiving regions in Henan Province in the planning year of 2030

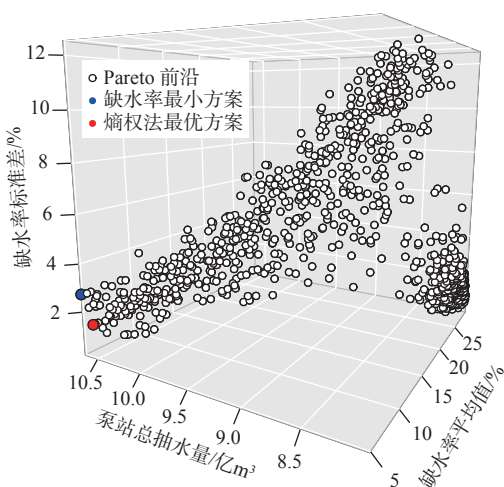


图 5 Pareto 前沿分布

Fig. 5 Distribution of Pareto front

3.2 方案评价比选

基于受水区缺水率平均值、泵站总抽水量和缺水率标准差 3 个评价指标, 采用熵权法进行调度方案的评价比选。根据熵权法确定的 3 个指标权重分别为 0.568、0.207 和 0.225, 受水区缺水率平均值权重最大, 这与供水保障为首要目标的原则相一致。泵站总抽水量和缺水率标准差的权重相当, 供水成本和公平性目标是在保证供水安全的前提下, 尽可能地减小运行成本和提高供水空间均衡性为次要目标。在 Pareto 最优解集中, 选择缺水率最小方案(方案一)和根据熵权法评价得分最高方案(方案二)进行比选, 图 5 中蓝色和红色圆点分别展示了缺水率最小方案和熵权法最优方案在 Pareto 前沿面中的

位置, 表 3 给出了不同方案下的评价指标值和熵权法得分。可以发现方案二的缺水率平均值相对方案一略有增加, 但泵站总抽水量和缺水率标准差均比方案一减少, 其中, 泵站总抽水量减少了约 200 万 m³, 标准差相对降低了约 50.2%。

表 3 不同方案评价指标值及熵权法得分

Tab. 3 Evaluation criteria value and score of entropy weight method in different schemes

方案	缺水率平均值/%	泵站总抽水量/亿m ³	缺水率标准差/%	得分
(一)缺水率最小	4.88	10.66	2.75	72.88
(二)熵权法最优	5.68	10.64	1.33	73.52

图 6 展示了 2 种方案下各受水区的缺水率及其距平。从图 6 可以看出: 方案一不同受水区之间缺水率差异较大, 其中梁园缺水率最小为 1.85%, 而永城市缺水率达到 10.40%; 方案二不同受水区的供水在空间上相对均衡, 缺水率范围在 4.32%~8.52%, 其中永城市缺水率相对方案一降低了约 2%。永城市在引江济淮工程(河南段)受水区中面积最大, 需水量(需调水量)也最大, 其生产总值和人均 GDP 也是受水区中最高, 且永城市是我国重要的煤炭能源基地, 工业用水需要得到保障。因此, 选择缺水空间均衡性更高的方案二作为引江济淮工程(河南段)最优调度方案。

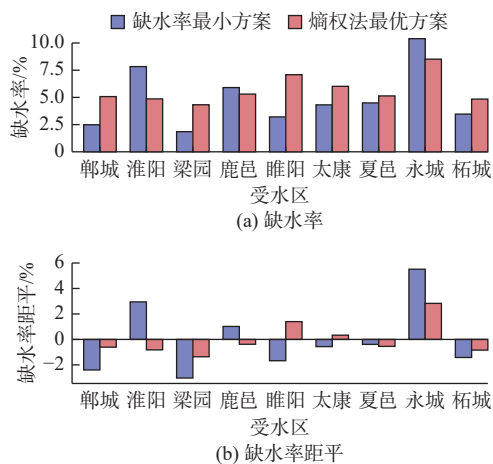


图 6 受水区缺水率及其距平

Fig. 6 The water shortage rate and its anomaly of the water destination regions

3.3 最优调度方案分析

以 2030 年规划水平年为例, 针对熵权法确定的最优调度方案进行分析。图 7 是 2030 年规划水平年 4 个调蓄水库的蓄水量变化过程。从图 7 可以看出: 调度方案充分发挥了水库的调蓄作用, 试量、后陈楼和七里桥调蓄水库蓄水量波动较为明显, 其中

试量调蓄水库在3月下旬和5月下旬以及8—11月蓄水量变化较大;后陈楼和七里桥调蓄水库在1月下旬以及5月份均有较大的利用,后陈楼调蓄水库在8—11月蓄水量也有一定波动,七里桥调蓄水库在8月中旬蓄水量明显减少;新城调蓄水库蓄水量在2月和5月中旬有较大的变化,其他时段水库基本维持在正常蓄水位。根据《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》,调蓄水库库容是按满足县区8~10 d供水考虑,尽管以旬尺度进行调度模拟,调蓄水库在调度过程中会出现单个时段达到死水位的情况,但在下一个时段能够及时蓄满,并不会出现长时间低水位运行的情形,避免了出现紧急情况无水可用的风险,保障了用水安全。

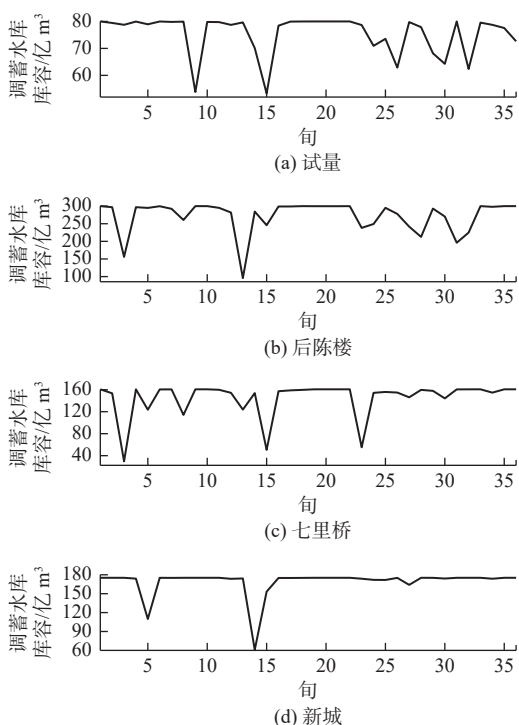


图7 调蓄水库蓄水量变化过程

Fig. 7 The change of reservoir water storage capacity

图8展示了试量、后陈楼和七里桥3个泵站的抽水过程,2030年规划水平年中3个泵站总抽水量分别为5.00亿、3.04亿、2.60亿 m^3 ,其中试量泵站总抽水量按2030年规划水平年多年平均设计供水控制。根据《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》给出的工程调度原则,汛期防控洪水风险,当河道水位过高时停止引水,且6—7月份受水区基本不缺水,需水由当地水供给,因此6—7月份泵站抽水为 $0 m^3/s$ 。整体上3个泵站抽水过程较为一致,在输水阶段(除6—7月),试量、后陈楼和七里桥3个泵站的平均抽水流量分别为19.28、11.74、 $10.02 m^3/s$ 。

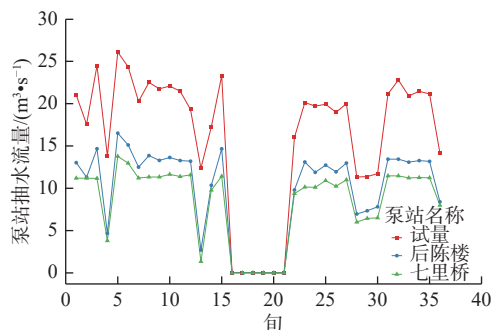


图8 泵站抽水过程

Fig. 8 Pumping process of pumping station

4 讨论

本文提出一种可行搜索策略,并与多目标优化算法耦合,用以优化过程中约束条件的处理,使得随机搜索保持在可行空间中,提高搜索效率,为复杂调度系统多目标水量优化调度问题的求解提供一个有效工具。传统优化算法的搜索空间一般是给定决策变量的上下限,在整个空间中进行搜索,对于决策变量过多且存在复杂关联的问题,其可行域空间较小,算法通常需要花费大量时间去处理不可行解,甚至出现无法搜索到可行解的情况。通过引入决策系数,结合逆序和顺序演算过程,根据水量平衡和约束条件,根据输水顺序依次计算出各决策变量上下限,通过线性映射,将决策系数映射至决策变量可行空间,优化算法通过在决策系数的0~1空间中进行搜索寻优,实现决策变量的可行搜索。以后陈楼泵站时段抽水流量为例,图9展示了优化算法传统搜索和可行搜索空间的对比,可以发现决策变量可行搜索空间为蓝色带状区域,只占传统搜索空间的2.1%,表明可行搜索策略能够有效提高求解效率。

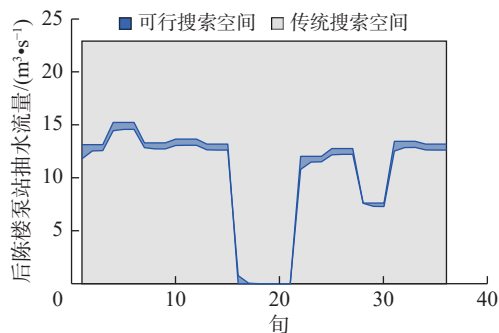


图9 优化算法搜索空间对比

Fig. 9 Comparison in searching space of optimizing algorithm

5 结论

本文针对引江济淮工程(河南段)水量多目标优化调度问题,考虑供水保障、供水成本和公平性3个目标,基于可行搜索思路,结合多目标非支配排

序遗传算法,通过引入决策系数,使搜索过程限制在可行域中,实现了复杂调度系统的多目标优化调度求解,并获取了 Pareto 最优解集,最后采用熵权法对调度方案进行评价优选。结果表明,基于可行搜索的 NSGA-II 优化算法能够快速有效对调度模型进行求解,提高了求解效率,并有效避免了复杂约束条件导致的无法搜索到可行解的困境。此外,基于熵权法优选的最优方案相较缺水率最小方案具有更好的空间均衡性,综合考虑了供水保障、供水成本和公平性多个目标的最优调度方案相对单一目标更加合理,能够防止为实现单一目标最优而牺牲其他目标效益的情况。本文提出的可行搜索策略为复杂调度系统多目标水量优化调度问题求解提供了思路,可为调水工程实际运行管理提供决策支撑。

参考文献:

- [1] LI P, QIAN H. Water resources research to support a sustainable China[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2018, 34(3): 327-336. DOI: 10.1080/07900627.2018.1452723.
- [2] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China: 7311[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51. DOI: 10.1038/nature09364.
- [3] 谷丽雅, 侯小虎, 张林若. 浅谈国外跨流域调水工程现状、机遇和挑战[J]. *中国水利*, 2021(11): 61-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2021.11.040.
- [4] 王加虎, 殷荣胜, 李丽, 等. 沪灞河流域城市橡胶坝群景观流量补水调度研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 152-160. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.015.
- [5] 左其亭, 杨振龙, 路振广, 等. 引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 39-47, 75. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0005.
- [6] 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. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.04.013.
- [7] 王超, 孔令仲, 朱双, 等. 考虑湖泊调蓄的引江济淮工程旬水量调度方案[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1109-1116. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0109.
- [8] 郑姣, 杨侃, 倪福全, 等. 水库群发电优化调度遗传算法整体改进策略研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(2): 205-211. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.02.015.
- [9] 刘攀, 郭生练, 庞博, 等. 三峡水库运行初期蓄水调度函数的神经网络模型研究及改进[J]. *水力发电学报*, 2006(2): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2006.02.018.
- [10] 郭旭宁, 雷晓辉, 李云玲, 等. 跨流域水库群最优调供水过程耦合研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(7): 949-958. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150865.
- [11] 纪昌明, 喻杉, 周婷, 等. 蚁群算法在水电站调度函数优化中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(20): 103-107.
- [12] ROBI T, FILIPI B. DEMO: Differential evolution for multiobjective optimization[C]//International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31880-4_36.
- [13] CHEN L, MCPHEE J, YEH W W G. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5): 1082-1093. DOI: 10.1016/j.advwatres.2006.10.001.
- [14] 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. DOI: 10.1109/4235.996017.
- [15] 谢云东, 章四龙, 王红瑞, 等. 基于NSGA-II算法的碛碛水电站多目标调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(3): 207-211. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.03.032.
- [16] 朱迪, 周研来, 陈华, 等. 考虑分级防洪目标的梯级水库汛控水位调度模型及应用[J]. *水利学报*, 2023, 54(4): 414-425. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220360.
- [17] 明波, 黄强, 王义民, 等. 梯级水库发电优化调度搜索空间缩减法及其应用[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(10): 51-59. DOI: 10.11660/slfdb.20151007.
- [18] 艾学山, 冉本银. FS-DDDP方法及其在水库群优化调度中的应用[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2007(1): 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3893.2007.01.004.
- [19] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.01.011.
- [20] 纪昌明, 马皓宇, 李传刚, 等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 649-661. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180018.
- [21] MERSMANN O. MCO: multiple criteria optimization algorithms and related functions[M/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=mco>.

Multi-objective water optimal dispatching of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section)

SONG Zhihong¹, LIU Yuan², JIANG Shengjin², JIANG Heng², FANG Jun², CHEN Zhao²,
WANG Yongqiang¹, WANG Dong¹

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Henan Water Diversion Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The multi-objective water optimal dispatching problem is the current research hotspot in the field of water resources. The Henan section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project involves a variety of water conveyance structures such as river channels, pipelines, gate pumps, and storage reservoirs, making the water supply scheduling system complex. Water scheduling for water diversion projects often needs to consider multiple scheduling objectives such as water supply assurance, energy consumption, and fairness. These objectives generally have competing relationships, making the problem relatively difficult to solve. Therefore, research on multi-objective optimization scheduling of water quantity for complex water diversion projects is particularly important.

Current research adopts intelligent optimization algorithms to solve complex water scheduling models. These algorithms optimize the values of decision variables to achieve the optimal objective function under given constraints. In the process of water optimal dispatching models, handling constraints has always been a challenging problem for intelligent algorithms. Conventional intelligent algorithms perform random searches in the decision variable space within given upper and lower bounds. However, for complex scheduling systems, with numerous types of constraints and decision variables, and strong correlations among them, the feasible space is relatively small compared to the entire search space. This requires algorithms to increase iteration numbers to expand the search, resulting in longer computation time, poor convergence, and even the inability to find feasible solutions. To address this problem, a feasible search approach-based multi-objective optimization method is proposed to solve the multi-objective water optimization scheduling problem for the Henan section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project.

The minimizing water shortage rate, total pumping volume of pump stations, and standard deviation of water shortage rate in the water destination regions are selected as objective functions, aiming to construct a multi-objective water volume optimization scheduling model from the perspectives of water supply security, energy consumption, and fairness. Based on the feasible search approach, combined with the process of reverse calculation and forward calculation, the constraints were addressed by involving the decision coefficients and maintaining the search space within the feasible domain through mapping relationships. The multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was utilized for the model solution, generating the Pareto optimal solution set. The entropy weight method was employed for scheme selection. A comparison was made between the scheme with the minimum water shortage rate and the scheme with the highest evaluation score based on the entropy-based weight method. Although the average water shortage rate of the optimal scheme based on the entropy-based weight method was relatively higher than that of the scheme with the minimum water shortage rate, the total pumping volume and the standard deviation of the water shortage rate were reduced. The total pumping volume decreased by approximately 2 million m³, and the standard deviation decreased by approximately 50.2%, respectively. Considering multiple objectives comprehensively, the optimal scheme with a higher balance of water shortage spatial distribution and lower energy consumption based on the entropy weight method was chosen as the optimal scheduling scheme. The results show that the NSGA-II algorithm based on the feasible search can effectively solve the multi-objective optimization problem of complex scheduling systems. The optimal schemes considering multiple objectives are more reasonable than single-objective schemes, providing decision support for the operation and management of the Henan section.

Key words: Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section); feasible search; multi-objective; water optimal dispatching; NSGA-II algorithm