

基于改进 NSGA-Ⅱ 算法的梯级水库多目标优化调度

黄显峰¹, 王 宁¹, 刘志佳², 方国华¹, 钱 骏¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 华电福新能源股份有限公司池潭水力发电厂, 福建 三明 353000)

摘要:针对在时间步长较小、计算时段数目较多时,传统智能优化算法在求解梯级水库联合优化调度问题上效率低甚至无可行解的问题,提出了一种改进 NSGA-Ⅱ 算法。该算法基于 NSGA-Ⅱ 算法框架,引入参考目标值、潜力目标值、偏移度以及变异引导算子来优化种群进化过程,强化迭代中的种群质量,使获得的解集更加接近真实的 Pareto 前沿。福建省金溪流域梯级水库多目标优化调度实例验证结果表明,改进 NSGA-Ⅱ 算法相对其他算法运算效率更高,优化结果更好,具有较好的实用性。

关键词:梯级水库;优化调度;多目标优化;改进 NSGA-Ⅱ 算法

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0051-08

Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-Ⅱ algorithm//HUANG Xianfeng¹, WANG Ning¹, LIU Zhijia², FANG Guohua¹, QIAN Jun¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Chitan Hydropower Plant Huadian Fuxin Energy Corporation Limited, Sanming 353000, China)

Abstract: Conventional intelligent optimization algorithms are inefficient or even impossible in finding feasible solutions to the cascade reservoir optimal operation calculations with small time step and a large number of calculation periods. On this basis, an improved NSGA-Ⅱ algorithm is proposed to solve the problem. Based on the framework of NSGA-Ⅱ algorithm, the improved algorithm introduces reference goal value, potential goal value, offset degree and mutation guiding operator to optimize the population evolution process and to enhance the quality of populations in the evolution process, making the solution set as close as possible to the true Pareto-optimal front. The verification results from a multi-objective optimal operation case study of cascade reservoirs in the Jinxi River Basin of Fujian Province show that the improved NSGA-Ⅱ algorithm has higher computational efficiency and better optimization results compared to other algorithms, demonstrating good practicality.

Key words: cascade reservoirs; optimal operation; multi-objective optimization; improved NSGA-Ⅱ algorithm

近年来,我国各流域具有较强调节能力的控制性梯级水库逐渐完善,流域水资源的时空调配能力不断增强,水资源开发利用方式更加多样化,流域水资源综合效益不断提高^[1]。21 世纪以来,随着我国水利工程建设的逐步完善,水库数量不断增加,已形成了一批巨型水库群,如长江上游陆续建成投产了多个梯级电站^[2-3],其中不乏调节能力较强的控制性工程,它们主要通过蓄洪补枯的方式调节利用河流水资源,发挥着防洪、发电等社会服务功能^[4]。

水库优化调度是实现水资源可持续管理的关键,不同部门在水库调度中往往有不同的目标,会因资源竞争而导致冲突^[5]。通过梯级水电站群联合调度,能够充分发挥龙头水电站的作用,提高整个梯

级水电站的水能利用率和调控的灵活水平^[6]。流域梯级水电开发的联合调度,不仅要考虑上下游水力、电力联系,处理好相关约束,还要考虑流域整体各方面的综合效益,因此,梯级水库联合优化调度是一个多目标、高维度、强约束、非线性的复杂问题。电站数量的增加、计算步长的减小进一步增加了问题的难度^[7]。随着流域梯级电站数量的增多,多目标优化中状态和决策变量计算复杂度呈指数级增大,计算时间和计算精度难以满足实际需求,寻找高效计算技术和计算方法成为研究的热点^[8]。

水库优化调度常见的算法有线性规划法^[9]、非线性规划法^[10]、动态规划法^[11]、大系统分解协调法^[12]以及启发式算法^[13-16]等。国内外许多学者也

基金项目:国家自然科学基金项目(52179012)

作者简介:黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与水库调度研究。E-mail:xfhuang@hhu.edu.cn

将智能优化算法应用于水库优化调度领域,且取得了一定成果。例如:许凌杰等^[17]提出了一种改进遗传算法,通过改进映射规则对高维问题进行降维,并提出了针对不同约束条件的自适应罚函数,对算法的收敛方式进行了改进;Baltar 等^[18]将多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法应用于多目标水库调度问题,并对解集的收敛性、多样性进行了分析;张翔宇等^[19]针对多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)在进化过程中的不足,采用拟随机 Halton 序列及自适应调整的方法对初始种群的生成方式和算法收敛方式进行了改进,并应用于小浪底水库,效果良好。

尽管已有学者研究了针对精度较高、以日甚至以小时为时间步长的调度模型的优化算法,且实用性较好,但现有的智能优化算法研究大部分还是针对以月(或旬)为时间步长、计算时段数目较少的水库优化调度问题进行的^[7,20]。水库优化调度模型的时间步长对模型的精度有很强的影响。一般来说,调度周期内时间步长越短、计算时段越多,模型的精度就越高,但同时某些强约束(如流量约束、出力约束)就更难处理,可行解生成难度也越高,算法的寻优效率也越低^[21]。因此,研究适用于求解时间步长较小、计算时段数目较多的水库优化调度问题的算法是有一定意义的。

NSGA-II 算法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,且优化效果较好、寻优速度快^[22-23]。本文在此基础上提出了改进的 NSGA-II 算法,并用福建省金溪流域梯级水库多目标优化调度实例进行验证。

1 梯级水库多目标优化调度模型

考虑防洪、发电、生态三个方面的目标,构建梯级水库多目标优化调度模型。发电、防洪、生态目标两两之间存在矛盾竞争关系:当发电效益处于相近水平时,防洪指标越好时生态目标越差;当防洪指标处于相近水平时,总发电量越大时生态目标越差;当生态目标处于相近水平时,总发电量越大时防洪指标越差。此外,防洪目标中最高水位最小目标与最大下泄流量最小目标也存在竞争性。因此,该多目标模型优化调度目标的设置是合理的、有效的。

1.1 目标函数

1.1.1 防洪目标

在进行水库调度时,防洪是一个重要目标,关系到水库上下游的安全。洪水会对区域内民众安全造成一定的威胁,因此在进行水库调度时,考虑防洪目

标是必要的。根据现有研究,防洪目标根据对象所处位置不同,可分为水库上游和下游的防洪目标:

a. 最高水位最小目标。对于水库上游防洪目标,调度期内水库上游最高水位越小,搬迁或淹没损失越小,水库安全性更高。以一个调度周期内最高水位最小为防洪目标:

$$F_1 = \min(\max Z_{it}) \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

式中: F_1 为水库上游防洪目标, m ; Z_{it} 为时段 t 水库 i 的坝前水位, m ; T 为调度期总时段数。

b. 最大下泄流量最小目标。对于水库下游防洪目标,调度期内下泄流量越小,下游受淹没的可能性和损失就越小,其安全程度就越能够得到保证。以最大下泄流量最小为防洪目标:

$$F_2 = \min(\max q_{it}) \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

式中: F_2 为水库下游的防洪目标, m^3/s ; q_{it} 为时段 t 水库 i 的下泄流量, m^3/s 。

1.1.2 发电效益目标

以一个调度周期内的梯级水库总发电量最大为发电效益目标:

$$F_3 = \max\left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M P_{it} \Delta t\right) \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (3)$$

式中: F_3 为发电效益目标, $kW \cdot h$; M 为电站数目; P_{it} 为时段 t 水电站 i 的出力, kW ; Δt 为时段 t 的小时数, h 。

1.1.3 生态目标

生态目标一般是保护河道生境及鱼类等水生生物资源^[24]。在进行梯级水库防洪优化调度时,需要考虑流域梯级水库区间的径流生态需水,模型中将生态目标转化为约束处理:

$$q_{i\min} \leq q_{it} \quad (4)$$

式中 $q_{i\min}$ 为满足下游径流生态流量需求的最小下泄流量, m^3/s 。

1.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{it} = V_{i,t-1} + (Q_{it} - q_{it}) \Delta t - E_{it} S_{it} - D_{it} \quad (5)$$

式中: $V_{i,t-1}$ 、 V_{it} 为时段 t 初、末时刻的水库蓄水量, m^3 ; Q_{it} 为时段 t 水库 i 的入库流量, m^3/s ; E_{it} 为时段 t 蒸发深度, m ; S_{it} 为时段 t 水库面积, m^2 ; D_{it} 为时段 t 渗漏损失水量, m^3 。

b. 水位限制:

$$Z_{i\min} \leq Z_{it} \leq Z_{i\max} \quad (6)$$

式中: $Z_{i\min}$ 、 $Z_{i\max}$ 分别为时段 t 允许最低和最高运行水位, m ; Z_{it} 为时段 t 的水库运行水位, m 。

c. 发电流量限制:

$$q_{i\min} \leq q_{it} \leq q_{i\max} \quad (7)$$

式中: $q_{i\min}$ 为时段 t 各水库水轮机要求的最小引水

流量, m^3/s ; q_{imax} 为时段 t 最大允许引水流量, m^3/s 。

d. 电站出力约束:

$$N_{imin} \leq N_{it} \leq N_{imax} \tag{8}$$

式中: N_{it} 为时段 t 水电站机组的出力, kW ; N_{imin} 、 N_{imax} 分别为时段 t 水电站机组允许的最小和最大出力, kW 。

e. 上下游水力联系。当梯级水库位于一条干流的上下游时, 上游水库的下泄流量将会成为下游水库的入库流量, 加上区间流量, 成为下游水库的入库总流量:

$$Q_{it} = q_{i-1,t} + Q'_{i-1,t} \tag{9}$$

式中 $Q'_{i-1,t}$ 为时段 t 时第 $i-1$ 个水库与第 i 个水库之间的区间来水, m^3/s 。

上述所有参数均为非负值。

2 改进 NSGA- II 算法

2.1 水库多目标优化调度问题分析

在水库多目标优化调度模型的水量平衡约束中, 时段 t 的水库蓄水量是由时段 $t-1$ 的水库蓄水量、时段 t 的入库流量、时段 t 的下泄流量、时段 t 的蒸发损失水量以及时段 t 的渗漏损失水量计算得到的。因此, 某一时刻的水库蓄水量与上一时刻的水库蓄水量是相互关联的, 并影响下一时刻的水库蓄水量; 同时, 每一时段的水库蓄水量和下泄流量影响多目标优化调度模型的最终结果^[25]。水库多目标优化调度模型在决策空间中, 其决策变量是相互关联的。

当多目标优化调度模型中出力、下泄流量等指标有强约束时, 解向量中各时段的约束是否发生破坏取决于这些时段的初、末时刻的水库蓄水量的差值是否合理^[26]。当某一时段的水库蓄水量发生改变时, 即使由机组型号、防洪要求等条件引出的流量约束不变, 也可能使得该时段允许的下泄流量区间发生改变, 进而影响后一时段水库蓄水量的取值区间。因此, 一个时段的约束不仅仅取决于该时段的取值, 还与其他时段相关联, 导致无法固定约束上下限来确定可行值^[27]。

上述问题导致在求解过程中, 解向量中可能会存在不满足约束的时段, 各算法在刚开始迭代时, 都有一定的约束破坏度, 代表解向量中存在约束破坏段。本文提出参考目标值和潜力目标值的概念, 能够更加合理地计算解向量的目标函数值, 从而更加准确地判断解的优劣程度。

为方便问题分析, 以某水库优化调度问题的求解过程为例, 以各时刻的水库蓄水量作为决策变量进行说明。图 1 为某次迭代过程中的一个解向量,

其中, 红色段为发生约束破坏的不可行时段, 蓝色段为可行时段。由图 1 可知, 第 2、4 时段对约束的破坏, 导致第 1、3、5 时段产生了实际上不可能存在的巨大发电流量, 从而得到了虚假的目标值, 这样可能会导致不可行解的目标值取值更优, 最终鼓励解集朝不可行域移动并形成锯齿形。目标函数值计算的合理与否, 将决定对这些解优劣程度判断的正确性。

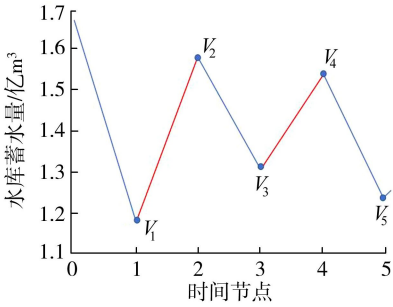


图 1 某次迭代过程中的一个解向量示意图

常见的目标函数值计算方式有罚函数法, 但其有一定的局限性。第 2 时段和第 4 时段同样是不可行过程, 但对于约束的破坏程度并不相同, 即对相邻可行时段的目标函数值影响不同, 为了更准确计算目标函数值, 需要慎重考虑罚函数的取值问题^[28]。

本文以 NSGA- II 算法为基本框架(计算步骤见文献[29]), 引入参考目标值和潜力目标值来计算目标函数值, 以此衡量解的优劣程度; 同时, 引入变异引导算子来优化进化过程, 具体改进方式见第 2.2 节。

2.2 参考目标值与潜力目标值

2.2.1 参考目标值

图 2 为某水库调度过程线, 该调度过程中存在约束破坏段, 为计算参考目标值, 要先求得一条参考调度过程线。首先, 顺时序找出不可行时段, 以该不可行时段初始节点的水库蓄水量 V_1 为起点, 根据入库流量和下泄流量的约束, 确定下一时刻水库蓄水量的上限 V_{2max} 和下限 V_{2min} , 在此基础上继续推算下一时刻蓄水量的上下限, 这个取值区间在图 2 中以灰色区域来表示; 顺时段推算直到某一时刻的取值在允许的取值范围内, 即调度过程线处于灰色区域

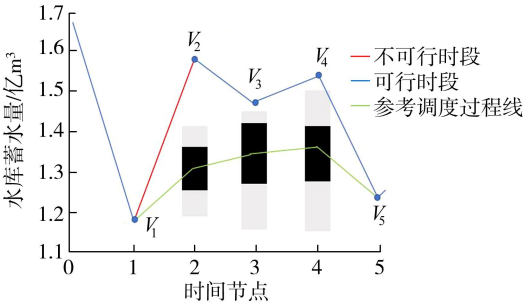


图 2 水库调度过程线示意图

内时,再以该时段末的蓄水量 V_5 为起点,向前推算上一时刻水库蓄水量的上限 $V_{4\max,f}$ 和下限 $V_{4\min,f}$,并以此推算出上一时刻的取值区间,该取值范围在图中以黑色区域来表示,取黑色区域的中点作为各时间节点的取值,依次向前推算,直至达到最初的起点 V_1 ,此时可以得到图 2 所示绿色调度过程线,该调度过程计算的目标函数值即为参考目标值。

由于顺时序寻找可行解过程未必与逆时序的相同,所以绿色过程线也不一定是可行解,但是相比于上方红色过程线,其可信度已经大幅提升,将此绿色过程线计算所得目标值称为参考目标值 P_c ,也就是如果将初始不可行解改造成可行解,近似可以取得的目标值。原调度过程线在计算目标函数值时,不可行时段存在虚假值,参考目标值在一定程度上削弱了虚假值对目标值的影响,更加接近真实值,因此参考目标值可以作为评价该过程线优劣的参考标准。

2.2.2 潜力目标值

潜力目标值 P_q ,即通过前述罚函数法对不可行解进行目标值计算所得的结果,但是为了使结果更具可靠性,必须考虑不可行解远离可行域的距离,离可行域越远时其罚函数取值应越大。本文引入偏移度这一概念,表示不可行取值与合理范围的偏移比例,可以显示该时段对约束的破坏严重程度。每一个不可行时段计算得到一个偏移值,整个调度周期的偏移值之和称为偏移度。偏移值 φ_t 和偏移度 φ 的计算公式分别为

$$\varphi_t = |\Delta V_t|/V_t \quad (10)$$

$$\varphi = \sum_{t=1}^T |\varphi_t| \quad (11)$$

式中: $|\Delta V_t|$ 为在时段 t 水库蓄水量值与合理范围的差值绝对值, m^3 ; V_t 为时段 t 的水库蓄水量, m^3 。

由式(10)和式(11)可见,偏移值携带了解向量时段 t 的约束破坏信息,偏移度则可以显示解向量在整个调度周期内的偏移约束的程度。在使用时,偏移值提供了一个包含约束破坏信息的操作对象,方便研究者观察某解向量的约束被破坏的时段和程度,为进一步分析约束被破坏的成因提供依据;同时,由于偏移值计算公式的特性,已经将解向量分解为可行段和不可行段(元素非零为不可行,零为可行)。

潜力目标值和参考目标值都可以在一定程度上反映解的质量,因此本文将两者加权求和作为最终值。权重采用偏移度来确定,偏移度越大时,该解距离可行域越远,其真实性越差,潜力目标值的占比就越低,最终目标函数值计算公式如下:

$$P = wP_q + (1 - w)P_c \quad (12)$$

其中

$$w = 1 - (\varphi/T)$$

式中: P 为最终目标函数值, $kW \cdot h$; w 为潜力目标值的权重。

2.3 变异引导算子

引入变异引导算子,可以优化进化过程,将解向量引导向可行解移动,强化迭代中的种群质量。变异引导过程见图 3,当不可行值处于可行范围上方时,决策变量超出了允许上限,应该引导其向下变异;当处于可行范围下方时,决策变量低于下限,应该引导其向上变异;如果处于可行范围内,则为合理值,但为了与前后不可行值相靠近以减小约束破坏程度,应联系相邻时段的状态引导其变异。

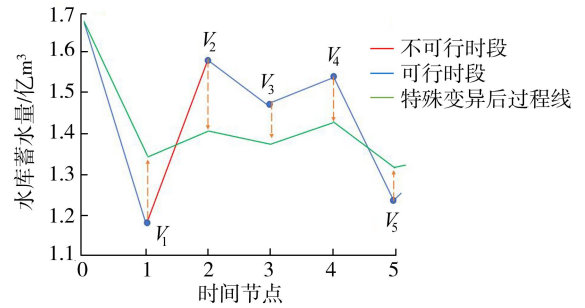


图 3 特殊变异操作示意图

a. 当变异点在可行范围内时,变异点有一定概率在其所在的时间节点将解向量增加或减少一定的变异值,公式如下:

$$m_1 = \begin{cases} (\varphi_{1,0}, \dots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,1}, \varphi_{n+1,0}, \dots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon < \varepsilon_1 \\ (\varphi_{1,1}, \dots, \varphi_{n-1,1}, \varphi_{n,1}, \varphi_{n+1,0}, \dots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon_1 \leq \varepsilon < \varepsilon_2 \\ (\varphi_{1,0}, \dots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,1}, \varphi_{n+1,1}, \dots, \varphi_{T,1}) & \varepsilon \geq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$x_2 = \begin{cases} x_1 - \alpha m_1 (V_1 - V_2) & \varepsilon < \varepsilon_2 \\ x_1 + \alpha m_1 (V_1 - V_2) & \varepsilon \geq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: m_1 为可行时段内变异点的变异引导算子; $\varphi_{t,0}, \varphi_{t,1}$ 分别为数字 0、1,决定了第 t 时间节点最终是否发生变异,0 代表不发生变异,1 代表发生变异; ε 为 $[0,1]$ 内的随机数; x_1, x_2 分别为变异前、后的解向量; α 为 $(0,1)$ 内的随机数,决定了变异值的大小; V_1, V_2 分别为各时间节点的蓄水量的上、下限组成的向量; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 均为 $[0,1]$ 内的参数。

b. 当变异点在可行范围上方时,变异点在其所在的时间节点将解向量减少一定的变异值,公式如下:

$$m_2 = \begin{cases} (\varphi_{1,0}, \dots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,1}, \varphi_{n+1,0}, \dots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon < \varepsilon_3 \\ (\varphi_{1,0}, \dots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,0}, \varphi_{n+1,0}, \dots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon \geq \varepsilon_3 \end{cases} \quad (15)$$

$$x_2 = x_1 - \alpha m_2 (V_1 - V_2) \quad \varepsilon < \varepsilon_3 \quad (16)$$

式中: m_2 为变异点在可行范围上方时变异引导算子; ε_3 为 $[0,1]$ 内的参数。

c. 当变异点在可行范围下方时,变异点在其所在的时间节点将解向量增加一定的变异值,公式如下:

$$m_3 = \begin{cases} (\varphi_{1,0}, \cdots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,1}, \varphi_{n+1,0}, \cdots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon < \varepsilon_4 \\ (\varphi_{1,0}, \cdots, \varphi_{n-1,0}, \varphi_{n,0}, \varphi_{n+1,0}, \cdots, \varphi_{T,0}) & \varepsilon \geq \varepsilon_4 \end{cases} \quad (17)$$

$$x_2 = x_1 + \alpha m_3 (V_1 - V_2) \quad \varepsilon \geq \varepsilon_4 \quad (18)$$

式中: m_3 为变异点在可行范围下方时变异引导算子; ε_4 为 $[0,1]$ 内的参数。

2.4 改进 NSGA-II 算法求解梯级水库多目标优化调度模型的步骤

- 步骤 1 设置算法的各项基本参数。
- 步骤 2 采用各水库各时间节点的蓄水量作为决策变量,生成初始种群。
- 步骤 3 根据初始种群的非支配序(等级)及拥挤距离,对初始种群个体排序,以排序结果选取前 n 个个体,计算参考目标值和潜力目标值。
- 步骤 4 对选取的 n 个个体进行选择、交叉,并通过变异引导算子进行变异操作,得到第一代临时子群,计算参考目标值和潜力目标值。
- 步骤 5 将第一代临时子群与初始种群合并,根据非支配序(等级)及拥挤距离,对合并后的种群进行排序,选取前 n 个个体,作为第一代最终子群。
- 步骤 6 循环步骤 3~5,直至达到最大迭代次数,退出循环,得到末代种群。

3 实例验证

3.1 研究区概况

金溪是闽江上游的二级支流,位于北纬 $26^{\circ}24' \sim 27^{\circ}07'$ 、东经 $116^{\circ}30' \sim 117^{\circ}56'$ 之间,流域面积 7201 km^2 ,全长 253 km 。金溪流域共有 9 座水电站,池潭水电站是金溪流域梯级开发的龙头电站,装机容量为 200 MW ,其中 2 台机组额定出力为 50 MW ,2018 年新增第三台机组,单机 100 MW ,坝址

控制流域面积 4766 km^2 ,占金溪流域面积的 66.2% ,水库总库容 8.7 亿 m^3 。池潭水电站以下河段的梯级开发方案为 8 级,即良浅、大言、黄潭、孔头、范厝、高唐、漠武和贵岭水电站,其中,仅池潭水电站具有不完全年调节能力,其他无调节能力,整体调节性能差。梯级水电站基本参数见表 1。

3.2 计算结果与分析

针对金溪流域梯级电站多目标优化调度问题,以平水年径流数据为基础,以日为时间步长将调度期划分为 365 个时段,分别利用粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、NSGA-II 算法以及改进 NSGA-II 算法寻找上文所述的梯级水库多目标优化调度模型的可行解。各算法求解可行解结果见表 2,偏移度下降曲线见图 4,其中偏移度是指最终解集的最小偏移度。

采用多目标动态规划算法(MODP)、MOPSO、MOGA、NSGA-II 以及改进 NSGA-II 算法分别求解多目标问题的 Pareto 解集。取多次计算所得解集中各目标函数最优值的平均值描述算法的优化水平。计算结果见表 3。

采用 MOPSO、MOGA 以及改进 NSGA-II 算法分别求解多目标问题,得到各算法的典型调度方案集,结果见表 4。

从表 2 和图 4 可以看出,改进 NSGA-II 算法在模型求解时,运算时间仅用了 807.46 s ,相较于其他算法效率更高,且偏移度下降趋势较快,能够更早地进入可行域,表现优秀,优势明显。除改进 NSGA-II 算法外的其余算法的偏移度下降速度均在迭代至 1600 次前就已经开始减缓,且偏移度越小,下降曲线越缓、下降速度越慢。

模型将生态目标转化为约束,各算法所得解集均能满足生态目标。从表 3 可以看出,除改进 NSGA-II 算法外,其余算法寻优效率低下。MOPSO 算法运行时间比 MODP、NSGA-II、MOGA 算法更短,表现相对优秀;MODP 算法用时最长;改进 NSGA-II 算法速度最快,效率最高。同时,在多次计

表 1 金溪流域梯级水电站基本参数

水电站	正常蓄水位/m	死水位/m	汛限水位/m	总库容/万 m^3	装机容量/MW	调节性能	最小生态流量/(m^3/s)
池潭	275.0	245.0	273.0	87000	200.0	不完全年调节	23.60
良浅	211.2	209.2	211.2	1795	30.0	无	23.77
大言	197.8	196.3	197.8	1943.6	32.0	无	25.05
黄潭	193.8	191.3	193.8	1951	32.0	无	25.82
孔头	175.8	174.0	175.8	3310	40.5	无	26.68
范厝	161.0	160.0	161.0	3180	39.6	无	28.81
高唐	146.0	144.8	146.0	4990	42.0	无	33.09
漠武	133.0	128.8	133.0	4891	42.0	无	34.43
贵岭	130.0	123.8	130.0	5010	42.0	无	35.66

表 2 各算法求解可行解结果

算法	偏移度	迭代次数	运行时间/s
PSO	48.36	20 000	1 067.85
GA	28.67	20 000	1 862.49
NSGA-II	34.58	20 000	1 184.52
改进 NSGA-II	0	20 000	807.46

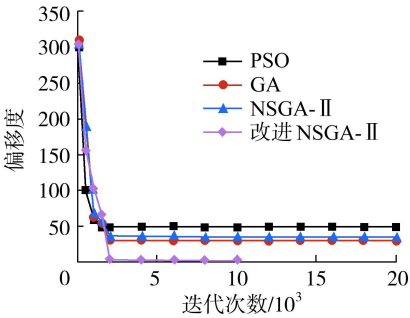


图 4 各算法偏移度下降曲线

表 3 各算法计算结果汇总

算法	多次计算所得解集中各目标函数最优值的平均值			运算时长/s	迭代次数
	发电效益/ (亿 kW·h)	最高水位/m	最大下泄流 量/(m³/s)		
MODP	19.9	275.01	2 127.12	67 328.59	500 000
MOPSO	20.4	275.13	2 980.66	26 697.95	500 000
MOGA	20.9	275.00	2 408.43	46 549.36	500 000
NSGA-II	21.3	275.04	2 644.57	29 703.58	500 000
改进 NSGA-II	25.6	275.00	1 326.49	20 196.47	500 000

表 4 各算法的典型调度方案集

算法	方案	发电效益/ (亿 kW·h)	最高水位/m	最大下泄 流量/(m³/s)
MOPSO	发电量最大方案	20.6	275.22	3 298.52
	最高水位最小方案	20.5	275.22	3 294.95
	最大下泄流量最小方案	19.9	275.37	3 027.44
MOGA	发电量最大方案	21.2	275.08	3 032.27
	最高水位最小方案	19.6	275.00	2 796.63
	最大下泄流量最小方案	19.4	275.00	2 725.36
改进 NSGA-II	发电量最大方案	25.8	276.00	2 969.14
	最高水位最小方案	24.9	275.00	2 677.98
	最大下泄流量最小方案	22.3	276.00	1 847.42

算中,改进 NSGA-II 算法所得解集的发电效益最大目标的最优值的平均值达到了 25.6 亿 kW·h,最高水位最小目标的最优值的平均值达到了 275.00 m,最大下泄流量最小目标的最优值的平均值达到了 1 326.49 m³/s,均优于其他算法所得结果,可见改进 NSGA-II 算法的优化水平较高。

从表 4 可以看出,改进 NSGA-II 算法进行优化调度后,发电量最大的方案可以使总发电量达到 25.8 亿 kW·h;最高水位最小的方案的最高水位为 275.00 m;最大下泄流量最小的方案可以使最大下泄流量达到 1 847.42 m³/s,多个方案优于其他算法。改进 NSGA-II 算法性能优秀,所得 Pareto 解集为水库调度决策提供了多种可靠方案。

4 结 语

针对传统智能优化算法在求解梯级水库多目标优化调度问题时寻优效率低的问题,基于 NSGA-II 算法的框架,通过引入参考目标值、潜力目标值、偏移度以及变异引导算子等改进策略,提出了改进 NSGA-II 算法,并用金溪流域梯级水库群多目标优化调度算法进行了验证。结果表明,改进 NSGA-II 算法效率高、运算快,得到的解集也优于其他算法,具有较好的实用性。相对其他的传统智能优化算法,改进 NSGA-II 算法虽然优化效果较好,但运算效率还可以进一步提高,且变异算子的设置方式会对运算效率和解集质量有一定的影响,因此下一步待解决的问题是如何合理设置变异方式,进一步提高其运算效率和解集质量,以及如何结合优秀算法追求更好的变异处理形式及优化效果。

参考文献:

[1] 董增川,陈牧风,倪效宽,等.考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240.(DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3):233-240. (in Chinese))

[2] 张长征,李洪梅.基于可变模糊评价法的小型水库运行管理评价研究[J].水利经济,2023,41(6):30-36.(ZHANG Changzheng, LI Hongmei. Study on the evaluation of small reservoir operation and management based on variable fuzzy evaluation method[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(6):30-36. (in Chinese))

[3] 康玲,周丽伟,李争和,等.长江上游水库群非线性安全度防洪调度策略[J].水利水电科技进步,2019,39(3):1-5.(KANG Ling, ZHOU Liwei, LI Zhenghe, et al. Nonlinear safety degree flood control strategy of multi-reservoirs in upper Yangtze River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3):1-5. (in Chinese))

[4] 吉小盼,谭平,刘园,等.长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J].水利水电科技进步,2022,42(5):8-14.(JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):8-14. (in Chinese))

[5] SHARIFAZARI S, SADAT-NOORI M, RAHIMI H, et al. Optimal reservoir operation using Nash bargaining solution and evolutionary algorithms [J]. Water Science and

- Engineering, 2021, 14(4): 260-268.
- [6] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36. (CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36. (in Chinese))
- [7] 吴志远, 黄显峰, 李昌平, 等. 基于分段粒子群算法的梯级水库多目标优化调度模型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 145-154. (WU Zhiyuan, HUANG Xianfeng, LI Changping, et al. Multi-objective optimal dispatch model of cascade reservoirs based on piecewise particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3): 145-154. (in Chinese))
- [8] 马光文, 张永锋. 水电现货竞价关键技术研究进展[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 1-11. (MA Guangwen, ZHANG Yongfeng. Advances on key technologies of spot bidding for hydropower [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(8): 1-11. (in Chinese))
- [9] NEEDHAM J T, WATKINS JR 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.
- [10] PENG C S, BURAS N. Practical estimation of inflows into multireservoir system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(5): 331-334.
- [11] 赵铜铁钢, 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 Tongtiegang, 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. (in Chinese))
- [12] 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, 18(5): 112-117. (TIAN Fengwei, XIE Jiancang. A new way to solve cascade hydropower reservoirs operation with large scale system analysis [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998, 18(5): 112-117. (in Chinese))
- [13] 王森, 马志鹏, 李善综, 等. 基于 Fork/Join 多核并行框架的梯级水库群优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 48-54. (WANG Sen, MA Zhipeng, LI Shanzong, et al. Optimal operation of cascaded reservoirs based on Fork/Join multi-core parallel framework [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 48-54. (in Chinese))
- [14] 崔东文. 鲸鱼优化算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 72-76. (CUI Dongwen. Application of whale optimization algorithm in reservoir optimal operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 72-76. (in Chinese))
- [15] 黄显峰, 吴志远, 李昌平, 等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 1-7. (in Chinese))
- [16] 王新, 王超, 马芳平, 等. RiverWare 软件在水库兴利调度研究中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(1): 35-42. (WANG Xin, WANG Chao, MA Fangping, et al. Application of RiverWare software in research reservoir benefit operation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(1): 35-42. (in Chinese))
- [17] 许凌杰, 董增川, 肖敬, 等. 基于改进遗传算法的水库群防洪优化调度[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 59-62. (XU Lingjie, DONG Zengchuan, XIAO Jing, et al. Optimal operation of flood control for reservoir group based on improved genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3): 59-62. (in Chinese))
- [18] BALTAR A M, FONTANE D G. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(3): 257-265.
- [19] 张翔宇, 董增川, 马红亮. 基于改进多目标遗传算法的小浪底水库优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 65-68. (ZHANG Xiangyu, DONG Zengchuan, MA Hongliang. Study on optimization operation of Xiaolangdi Reservoir based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(1): 65-68. (in Chinese))
- [20] 白涛, 徐燕, 孙宪阁, 等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 101-108. (BAI Tao, XU Yan, SUN Xian'ge, et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 101-108. (in Chinese))
- [21] 纪昌明, 马皓宇, 彭杨. 面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究[J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1441-1452. (JI Changming, MA Haoyu, PENG Yang. Research on evolutionary algorithms for multi-objective optimal operation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1441-1452. (in Chinese))
- [22] 方国华, 李智超, 钟华昱, 等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply

- balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对漳沱河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):99-108. (in Chinese))
- [25] 黄显峰,钱骏,颜山凯,等. 基于改进灰狼算法的梯级电站中长期优化调度[J]. 水力发电, 2022, 48(12): 70-73. (HUANG Xianfeng, QIAN Jun, YAN Shankai, et al. Joint medium and long-term optimal scheduling of cascade hydropower stations based on improved gray wolf algorithm [J]. Water Power, 2022, 48(12):70-73. (in Chinese))
- [26] 蔡卓森,戴凌全,刘海波,等. 基于支配强度的 NSGA-Ⅱ改进算法在水库多目标优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(11): 999-1007. (CAI Zhuosen, DAI Lingquan, LIU Haiibo, et al. Application of improved NSGA-Ⅱ algorithm based on dominance strength in multi-objective operation of cascade reservoirs [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(11): 999-1007. (in Chinese))
- [27] 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. (in Chinese))
- [28] 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))
- [29] 蒋浩,唐欢容,郑金华. 一种基于快速排序的快速多目标遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(30): 46-48. (JIANG Hao, TANG Huanrong, ZHENG Jinhua. A fast multi-objective genetic algorithm based on quick sort [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(30): 46-48. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 06 - 20 编辑:俞云利)

(上接第 30 页)

- [24] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3:satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10:1903-1925.
- [25] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared-based evaporative stress index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4):1057-1074.
- [26] OTKIN J A, ZHONG Y, HUNT E D, et al. Development of a flash drought intensity index [J]. Atmosphere, 2021, 12(6): 741.
- [27] DIAZ V, CORZO-PÉREZ G A, VAN LANEN H A J, et al. An approach to characterise spatio-temporal drought dynamics [J]. Advances in Water Resources, 2020, 137: 103512.
- [28] WANG A, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soil moisture drought in China, 1950-2006 [J]. American Meteorological Society, 2011, 24(13): 3257-3271.
- [29] XU Kai, YANG Dawen, YANG Hanbo. et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253-264.
- [30] ZHANG Yuqing, YOU Qinglong, MAO Guangxiong, et al. Flash drought characteristics by different severities in humid subtropical basins: a case study in the Gan River Basin, China [J]. Journal of Climate, 2021, 34(18): 7337-7357.
- [31] CHOU C, NEELIN J D, CHEN C, et al. Evaluating the “rich-get-richer” mechanism in tropical precipitation change under global warming [J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 1982-2005.
- [32] FORD T W, LABOSIER C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 414-423.
- [33] 刘懿,朱烨,张林齐,等. 骤发干旱前期气象驱动条件及可模拟性分析[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 497-507. (LIU Yi, ZHU Ye, ZHANG Linqi, et al. Precedent meteorological driving forces of flash drought and their feasibility for flash drought simulation [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 497-507. (in Chinese))
- [34] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2823-2829.
- [35] MO K C, LETTENMAIER D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1169-1184.
- [36] YUAN Xing, WANG Linying, WU Peili, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4661.

(收稿日期:2023 - 05 - 31 编辑:熊水斌)