

基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化

黄显峰¹, 吴志远¹, 李昌平², 刘志佳³, 颜山凯¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国华电集团有限公司福建分公司, 福建 福州 350013;
3. 华电福新能源股份有限公司池潭水力发电厂, 福建 泰宁 354400)

摘要:针对水库调度图寻优过程中的调度线形态畸变的问题,提出了改进廊道约束和改进粒子群-逐次逼近法。该方法以粒子群算法和动态规划逐次逼近法的混合算法为框架,通过引入改进廊道约束、特殊个体进化方式、外部精英集策略等改进策略来优化进化过程,使得所得解集尽可能接近多目标问题的真实 Pareto 前沿。福建省池潭水库调度图多目标优化问题的实例分析表明,该算法能有效控制寻优过程中的调度线形态畸变,具有良好的优化性能。

关键词:水库调度图;多目标优化;廊道约束;粒子群算法;逐次逼近法

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0001-07

Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA//HUANG Xianfeng¹, WU Zhiyuan¹, LI Changping², LIU Zhijia³, YAN Shankai¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Fujian Branch of China Huadian Co., Ltd., Fuzhou 350013, China; 3. Chitan Hydropower Plant, Huadian Fuxin Energy Co., Ltd., Taining 354400, China)

Abstract: An improved corridor constraint and IPSO-DPSA algorithm were proposed to solve the problem of morphological distortion of the dispatching line in the reservoir operation optimization process. Based on the hybrid algorithm of particle swarm optimization and dynamic programming successive approximation, this method optimizes the evolution process by introducing improved corridor constraints, special individual evolution mode, external elite set strategy, making the solution set as close as possible to the Pareto-optimal front of the multi-objective problem. The case study of the multi-objective optimization problem of the scheduling graph of the Chitan Reservoir shows that the algorithm can effectively control the morphological distortion of the dispatching line in the optimization process, and has good optimization performance.

Key words: reservoir operation chart; multi-objective optimization; corridor constraint; particle swarm optimization; successive approximation approach

水库调度图是指导水库合理运行的主要工具,旨在使水库的蓄放水过程符合系统目标的最大利益^[1]。常规水库调度图一般选用典型年或者长系列资料进行制定,在此基础上再通过人工进行调度线修正。这种方法规避了来水预报不确定性对水库调度的影响,但存在一定的主观性,因而存在优化的空间^[2-3]。

近年来,许多国内外学者着眼于将智能算法应用于调度图优化问题。Oliveira 等^[4]将遗传算法用于具有综合利用要求的单一水库调度图制定中;Ilich 等^[5]采用人工神经网络优化模拟模型优化了印尼某水库的调度线;尹正杰等^[6]分析了常规方法求解综合利用水库调度图存在的问题,构建了适用于水库调度图多目标优化的多目标遗传算法;徐刚等^[7]将蚁群算法应用于调度图的绘制,取得了良好

的优化效果。

虽然国内外学者对调度图优化问题进行了大量的研究工作并取得了一定进展,但现有的方法仍存在着一些瑕疵。比如,大部分现有的智能优化算法无法控制寻优过程中调度线的形态畸变,得到的调度线经常由于出现相邻控制点差异过大而不适合实际应用^[8]。而使用传统的廊道约束方法虽然一定程度上缓解了形态畸变,维持了调度线的基本形态^[9],但由于此方法缺少有效控制相邻控制点差异的技术,无法彻底解决调度线出现过大的锯齿状波动的问题^[10]。此外,目前水库调度图多目标优化研究多局限于发电方面目标的优化,无法兼顾生态等目标^[11]。因此,研究一种能够控制形态畸变程度的水库调度图多目标优化方法具有一定的价值。

本文提出了改进廊道约束下的改进粒子群-逐次逼近法(improved particle swarm optimization-dynamic programming successive approximation, IPSO-DPSA)来对水库调度图进行多目标优化,并通过池潭水库调度图优化的实例应用,验证了其求解水库调度图多目标优化问题的优越性、工程实用性以及寻优过程中的调度线形态畸变的控制能力。

1 调度图多目标优化模型

目前,调度图多目标优化的研究多局限于发电方面目标的优化,无法兼顾生态等目标。本文以发电量最大、生态保护程度最大为目标构建目标函数集,综合考虑各种约束条件,对调度图进行多目标优化。

1.1 目标函数集

a. 发电效益最大目标:

$$F_1 = \max \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T N_{m,t} \Delta t \right) \quad (1)$$

式中: F_1 为利用调度图进行多年模拟调度得到的多年平均发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; M 为径流资料年数; T 为年内的计算时段数; $N_{m,t}$ 为第 m 年第 t 时段的出力, kW ; Δt 为计算步长, h 。

b. 生态保护程度最大目标。河道最小生态流量、适宜生态流量已知时,将多年模拟调度的生态保护程度最大化作为目标^[12]:

$$F_2 = \max \left(\frac{1}{MT} \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T R_{m,t} \right) \quad (2)$$

其中

$$R_{m,t} = \begin{cases} 0 & Q_{m,t} < Q_{e,m,t,\min} \\ 0.5 + 0.5 \frac{Q_{m,t} - Q_{e,m,t,\min}}{Q_{e,m,t,\text{pro}} - Q_{e,m,t,\min}} & Q_{e,m,t,\min} \leq Q_{m,t} \leq Q_{e,m,t,\text{pro}} \\ 1 & Q_{e,m,t,\text{pro}} < Q_{m,t} \end{cases}$$

式中: F_2 为多年平均生态保护程度; $R_{m,t}$ 为第 m 年第 t 时段的下游河道生态保护程度; $Q_{m,t}$ 为第 m 年第 t 时段的下泄流量, m^3/s ; $Q_{e,m,t,\text{pro}}$ 、 $Q_{e,m,t,\min}$ 分别为第 m 年第 t 时段的下游河道的适宜生态流量、最小生态流量, m^3/s 。

1.2 约束条件

a. 水位约束。不同类别的调度线应维持不交叉的原则,在寻优的过程中各调度线的上、下位置关系不变:

$$Z_{t,\min} \leq Z_{i-1,t} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i+1,t} \leq Z_{t,\max} \quad (3)$$

式中: $Z_{t,\min}$ 为水库死水位; $Z_{t,\max}$ 为正常蓄水位或者防洪限制水位 m ; $Z_{i,t}$ 为第 i 条调度线第 t 时段的控制点坐标, m ; $Z_{i-1,t}$ 、 $Z_{i+1,t}$ 分别为第 i 条调度线的下相邻调度线、上相邻调度线的第 t 时段的控制点坐标, m ; $i=1, 2, \dots, n$, n 为需要优化的调度线条数。

b. 发电保证率约束:

$$P_k \geq P_0 \quad (4)$$

式中: P_k 为第 k 个调度图优化方案的保证率; P_0 为给定设计保证率。

c. 水量平衡约束。在进行水库调度模拟时,使用水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + (Q_t - q_t) \Delta t \quad (5)$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 分别为第 t 时段初、末蓄水量; Q_t 、 q_t 为第 t 时段的入库流量、出库流量。

d. 流量约束。在进行水库调度模拟时,使用流量约束:

$$Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{t,\max}$ 、 $Q_{t,\min}$ 分别为第 t 时段的下泄流量上、下限, m^3/s 。

e. 出力约束。在进行水库调度模拟时,使用出力约束:

$$N_{t,\min} \leq N_t \leq N_{t,\max} \quad (7)$$

式中: $N_{t,\max}$ 、 $N_{t,\min}$ 分别为第 t 时段的水电站出力的上、下限, kW 。

上述所有变量均非负。

2 改进廊道约束下的 IPSO-DPSA 算法

针对大部分现有算法在调度图优化问题中的瑕疵,本文提出 IPSO-DPSA 算法对调度图进行多目标优化。所提算法以粒子群算法(PSO)^[13-14]和动态规划逐次逼近法(DPSA)^[15]的混合算法为框架,通过引入改进廊道约束来控制调度线的形态畸变、通过引入特殊个体进化方式、外部精英集策略来优化进化过程、强化迭代中的种群质量。

2.1 IPSO-DPSA 算法框架

调度图的优化是一个复杂的高维优化问题。在解此问题时,传统的 PSO 算法求解效率高,但容易陷入局部最优,且收敛精度较低^[16]; DPSA 可实现有效降维、收敛精度较高^[17],但求解效率低、较为依赖初始解。于是,结合两种算法的优势,本文通过对 PSO、DPSA 算法的框架的解构、重组,提出 IPSO-DPSA 算法。以某水库调度图多目标优化为例,此调度图由 L 条调度线组成,每条调度线由 H 个控制点组成,假设有 O 个目标,算法运算步骤如下:

步骤 1 算法基本参数设置。

步骤 2 进行 IPSO 粗搜索。将待优化调度线的控制点水位作为决策变量进行实数编码(编码方式见 2.2 节),生成初始种群。

步骤 3 通过长系列模拟得到各目标函数值;进行种群排序(排序方式见 2.3 节)。

步骤4 将此代的 Pareto 解集加入外部精英集 I, 并对外部精英集 I 进行维护 (具体方式见 2.4 节)。

步骤5 计算此代最优个体 g_{best} 的改进廊道约束 (廊道构建见 2.5 节, g_{best} 的选取见 2.6 节); 此代的排序较高的个体不进行进化, 其余个体通过特殊个体进化方式更新速度和位置 (具体方式见 2.6 节)。

步骤6 判断是否满足 IPSO 粗搜索阶段结束条件: 如果满足条件, 则进入步骤 8, 否则进入步骤 3。

步骤7 进行 DPSA 细搜索阶段; 设此时外部精英集 I 中有 M 个个体, 编号为 $m=1, 2, \dots, M$; 设置初始值。

步骤8 选择寻优对象: 选择外部精英集 I 中的第 m 个个体进行寻优; 采用单线优化方式^[9], 先将个体 m 代表的调度图的需优化的调度线从下向上编序, 编号为 $l=1, 2, \dots, L$, 于是个体 m 的第 l 条调度线可表示为 $(Z_{m,l,1}, Z_{m,l,2}, \dots, Z_{m,l,h}, \dots, Z_{m,l,H})$ 。

步骤9 选择目标: 以第 o 个目标为主目标, 其余目标为次目标, 寻找主目标值优于个体 m 、次目标值不劣于个体 m 的个体。

步骤10 计算第 l 条调度线的改进廊道约束; 固定除控制点 $Z_{m,l,h}$ 外的其他控制点, 在 $Z_{m,l,h}$ 的上下按增量 Δ 取离散点 (包括原点共取 3 个离散点), 其中任一点和其他所有固定点构成新的个体。

步骤11 通过长系列模拟得到 3 个个体的各目标函数值; 进行排序。

步骤12 更新 $Z_{m,l,1}, Z_{m,l,2}, \dots, Z_{m,l,H}$ 为步骤 12 求得的优化解, $h=h+1$, 如果 $h \leq H$, 则进入步骤 11, 否则进入步骤 14。

步骤13 如果对第 l 条调度线的寻优未达到规定循环次数, 则减小 Δ , 恢复 h 为初始值, 进入步骤 10; 如果达到规定循环次数, 则 $l=l+1$, 此时若 $l \leq L$, 则恢复 Δ, h 为初始值, 进入步骤 10; 若 $l > L$, 则进入步骤 14。

步骤14 将此代排序最高个体加入外部精英集 II, 并对外部精英集 II 进行维护。

步骤15 $o=o+1$, 此时若 $o \leq O$, 则恢复 Δ, l, h 为初始值, 进入步骤 10; 否则 $m=m+1$, 此时若 $m \leq M$, 则恢复 o, Δ, l, h 为初始值, 之后进入步骤 9, 若 $m > M$, 则进入步骤 17。

步骤16 结束。外部精英集 II 为调度图多目标优化解集。

2.2 编码方式

在 IPSO 粗搜索阶段, 采用控制点水位作为决策变量进行实数编码。以某水库调度图优化为例, 此调度图内 L 条调度线需要优化, 每条调度线由 H 个控制点组成。首先, 将调度图中需优化的调度线从下向上编序, 其编号有 $l=1, 2, \dots, L$ 。此时以控制点

水位作为决策变量, 对第 l 条调度线进行实数编码, 形成的向量为 $(Z_{l,1}, Z_{l,2}, \dots, Z_{l,H})$; 然后, 将各向量按调度线的编号从小到大的顺序进行串联, 最终可得到一组编码长度为 $(L \times H)$ 的个体: $(Z_{1,1}, Z_{1,2}, \dots, Z_{1,H}, Z_{2,1}, Z_{2,2}, \dots, Z_{2,H}, \dots, Z_{L,1}, Z_{L,2}, \dots, Z_{L,H})$ 。

2.3 种群排序

本文以双适应度法^[18]对种群进行排序。

在 IPSO 粗搜索阶段, 以各目标函数值作为主适应度集, 以式 (8) 作为副适应度。排序过程如下:

步骤1 计算各个个体的副适应度值, 计算方式为

$$S_0 = \begin{cases} 1 & P_i \geq P_0 \\ P_i & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_0 为副适应度值; P_i 为第 i 个个体代表的调度图优化方案的保证率; P_0 为给定设计保证率。

步骤2 以副适应度对种群进行降序排序。

步骤3 对副适应度相同的个体, 再以主适应度集进行非劣排序和拥挤距离排序^[19], 最终形成完整的种群排序结果。

在 DPSA 细搜索阶段, 以主目标值作为主适应度, 以式 (9) 作为副适应度。以 O 个目标最大化的调度图多目标优化问题为例, 此时第 1 个目标为主目标, 其余目标为次目标, 排序过程如下:

步骤1 计算各个个体的副适应度值, 计算公式如下:

$$S_0 = \begin{cases} 1 & (P_i \geq P_0) \cap (f_{i2} \geq f_{m2}) \cap \\ & (f_{i3} \geq f_{m3}) \cap \dots \cap (f_{io} \geq f_{mo}) \\ \frac{1}{O} \left(P_k + \frac{f_{i2}}{f_{m2} + f_{i2}} + \frac{f_{i3}}{f_{m3} + f_{i3}} + \right. & \text{其他} \\ \left. \dots + \frac{f_{io}}{f_{mo} + f_{io}} \right) & \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_{io} 为第 i 个个体的第 o 个目标的值; f_{mo} 为给定的第 o 个目标值, 等同于 IPSO 粗搜索阶段得到的外部精英集 I 中第 m 个个体的第 o 个目标的值。

步骤2 以副适应度进行降序排序。

步骤3 对副适应度相同的个体, 再以主适应度进行降序排序, 最终形成完整的种群排序结果。

2.4 外部精英集策略

在 IPSO 粗搜索阶段, 外部精英集 I 收纳各代的 Pareto 解集, 并通过非劣排序和小生境技术对外部精英集 I 进行维护: 首先, 对此代外部精英集 I 进行非劣排序, 剔除劣解; 保留下来的个数如果大于精英集容量, 则通过小生境技术剔除小生境适应度较小的个体, 得到维护后的外部精英集 I。小生境适应度计算公式为

$$F_{si} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_s} f_{sh}(d_{ij})} \quad (10)$$

其中

$$f_{sh}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{share}}\right)^\eta & 0 \leq d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0 & d_{ij} \geq \sigma_{share} \end{cases}$$

式中: N_s 为精英集内个体的数量; F_{si} 为个体*i*的小生境适应度; $f_{sh}(d_{ij})$ 为个体*i*和个体*j*的共享函数; d_{ij} 为个体*i*和个体*j*的目标值组成的向量的欧式距离, $d_{ij} = \|y_i - y_j\|$; σ_{share} 为事先规定的小生境半径; η 为控制共享函数形状的参数,取1或2。

在DPSA细搜索阶段,外部精英集II收纳外部精英集I中经DPSA优化后的个体,并通过同上的非劣排序和小生境技术对外部精英集II进行维护。

2.5 改进廊道约束

受设计保证率约束的影响,调度图的优化调度线与常规调度线之间调整的幅度较为有限,由此可以使用动态廊道约束来缩小寻优空间。传统的优化廊道的使用方式是以初始线为中心构造优化廊道,并以廊道为寻优空间得到优化调度线,调度线优化后不触及廊道边界则优化结束,否则以优化调度线为中心构造新廊道。这种方法虽然维持了优化调度线的基本形态,但调度线仍有可能出现过大的锯齿状波动,导致优化结果不适合实际应用。本文对廊道约束进行了改进。改进后单条调度线的廊道约束构建步骤如下:

步骤1 设定控制齿高值 Δz 。

步骤2 第*l*条调度线的控制点可表示为 $(Z_{l,1}, Z_{l,2}, \dots, Z_{l,H})$;通过 $Z_{l,h} \pm \Delta z$ 构建初始上廊道线 $(Z_{l,1} + \Delta z, Z_{l,2} + \Delta z, \dots, Z_{l,H} + \Delta z)$ 、初始下廊道线 $(Z_{l,1} - \Delta z, Z_{l,2} - \Delta z, \dots, Z_{l,H} - \Delta z)$ 。

步骤3 对第*l*条调度线进行齿高分析:判断第2至第*H*-1个控制点与相邻控制点是否形成锯齿状波动,计算齿高。齿高计算公式如下:

$$S_h = \begin{cases} \min(|Z_{l,h} - Z_{l,h-1}|, |Z_{l,h} - Z_{l,h+1}|) & (Z_{l,h} - Z_{l,h-1})(Z_{l,h} - Z_{l,h+1}) > 0 \\ 0 & (Z_{l,h} - Z_{l,h-1})(Z_{l,h} - Z_{l,h+1}) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_h 为第*h*个控制点的齿高; m ; $Z_{l,h}$ 为第*h*个控制点水位, m。

以图1为例,在寻优过程中,第*l*条调度线在 $Z_{l,h1}, Z_{l,h2}$ 附近出现了较大的锯齿状波动,通过式(11)可得齿高分别为 $(Z_{l,h1} - Z_{l,h1+1})$ 、 $(Z_{l,h2+1} - Z_{l,h2})$ 。

步骤4 判断调度线内最大的齿高值是否超过控制齿高值 Δz ,如果未超过 Δz ,则进入步骤5,否则对调度线、初始上下廊道线进行调整:

a. 对调度线进行调整。对所有超过控制齿高

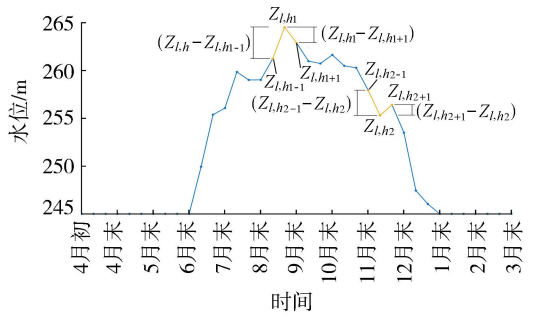


图1 第*l*条调度线的齿高计算示意图

的控制点的水位进行调整:

$$\begin{cases} Z_{l,h} = Z_{l,h} - (S_h - \Delta z) & Z_{l,h} > Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} > Z_{l,h+1} \\ Z_{l,h} = Z_{l,h} + (S_h - \Delta z) & Z_{l,h} < Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} < Z_{l,h+1} \end{cases} \quad (12)$$

调整后调度线的所有锯齿高度均在 $[0, \Delta z]$ 范围内。

b. 对上、下廊道线进行调整。当第*h*个控制点的齿高超过控制齿高值时,上、下廊道线调整公式如下:

$$b_1 = \begin{cases} (Z_{l,1} + dz, Z_{l,2} + dz, \dots, Z_{l,h-1} + dz, Z_{l,h}, Z_{l,h+1} + dz, \dots, Z_{l,H} + dz) & Z_{l,h} > Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} > Z_{l,h+1} \\ (Z_{l,1} + dz, Z_{l,2} + dz, \dots, Z_{l,h-2} + dz, Z_{l,h-1}, Z_{l,h} + dz, Z_{l,h+1}, Z_{l,h+2} + dz, \dots, Z_{l,H} + dz) & Z_{l,h} < Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} < Z_{l,h+1} \end{cases} \quad (13)$$

$$b_2 = \begin{cases} (Z_{l,1} - dz, Z_{l,2} - dz, \dots, Z_{l,h-2} - dz, Z_{l,h-1}, Z_{l,h} - dz, Z_{l,h+1}, Z_{l,h+2} - dz, \dots, Z_{l,H} - dz) & Z_{l,h} > Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} > Z_{l,h+1} \\ (Z_{l,1} - dz, Z_{l,2} - dz, \dots, Z_{l,h-1} - dz, Z_{l,h}, Z_{l,h+1} - dz, \dots, Z_{l,H} - dz) & Z_{l,h} < Z_{l,h-1} \text{ 且 } Z_{l,h} < Z_{l,h+1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: b_1, b_2 分别代表上、下廊道线。

仍以图1为例,对图1中第*l*条调度线的所有超过控制齿高值的控制点都进行以上两种调整,调整后效果如图2所示。上、下廊道线调整后,在新一代的寻优过程中,可以避免上一代过大锯齿的齿高出现继续增大的情况。

步骤5 按照调度线邻线不交叉原则,进一步对上、下廊道线进行调整,达到上廊道线不与第*l*+1条调度线交叉、下廊道线不与第*l*-1条调度线交叉的效果。

在进行IPSO粗搜索阶段,需先求出所有待优化调度线的上、下廊道线,对于不同调度线的廊道的重

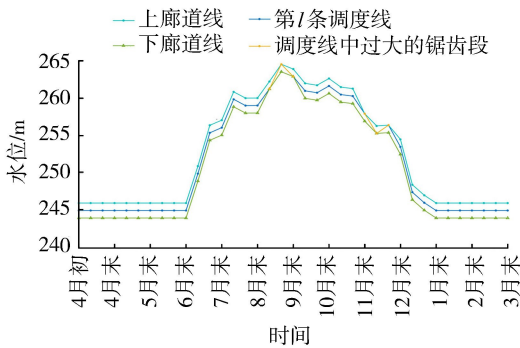


图2 上、下廊道线调整效果示意图

合部分进行平均分配,然后将所有的上、下廊道线分别进行串联,形成完整的动态寻优空间。这样的动态寻优空间可以避免在迭代中出现违背邻线不交叉原则的个体。

形成廊道后,寻优过程中如果某个体超过廊道,其超过部分的控制点的值将由对应的廊道值代替。

2.6 特殊个体进化方式

2.6.1 速度和位置的更新

在IPSO粗搜索阶段,在动态寻优空间内进行迭代时,需对各个个体进行速度和位置的更新。速度和位置的第 $k+1$ 代更新公式为

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{g1}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_{g2}^k - X_i^k) \quad (15)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (16)$$

式中: V_i^k 为第 k 代的个体 i 的速度向量; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为加速度因子,在此算法中 $c_1 > c_2$; r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 的随机数; X_i^k 为第 k 代的个体 i 的位置向量; P_{g1}^k 、 P_{g2}^k 为第 k 代种群的排序较高的两个个体对应的位置向量,选取方式如下:

a. 当此代种群的非劣解集只包含边界个体时,即非劣解的拥挤距离均为无穷大,则选取边界个体中的两个个体;并以其中随机一个个体作为此代的最优个体 g_{best} ,其位置向量作为 P_{g1}^k ;剩下一个个体的位置向量作为 P_{g2}^k 。

b. 当此代种群的非劣解集包含除边界个体外的其他个体时,则从排序较高的个体中随机选取两个个体;并以其中随机一个个体作为此代的最优个体 g_{best} ,其位置向量作为 P_{g1}^k ;剩下一个个体的位置向量作为 P_{g2}^k 。

2.6.2 变异方式

个体发生变异时,计算公式为

$$X_i^{k+1} = X_i^k + (b_1 - b_2) \alpha \beta \quad (17)$$

式中: b_1 、 b_2 分别代表上、下廊道线; α 为 $[-r, r]$ 内随机数, r 为小于1的正数,决定了变异的幅度; β 为一向量,其元素为 $[0, 1]$ 内随机数,元素的个数与 b_1 、 b_2 的元素个数相等。

由于IPSO的进化机制,进化过程中可能出现某些个体的部分控制点超过优化廊道。其超过部分的控制点值将由对应的廊道值代替,以保证所有个体都在动态寻优空间之内。

3 实例分析

池潭水库位于福建省境内金溪流域,坝址控制流域面积4766 km²,总库容8.7亿m³,是金溪干流梯级开发的龙头水库。电站装机3台,总装机容量200 MW,保证出力36.4 MW,水库正常蓄水位275 m,死水位245 m,具有不完全年调节能力。本文以1982—2018年共37年的长系列逐日径流系列资料作为调度图长系列模拟资料,对池潭水库调度图进行优化。

3.1 改进廊道约束优化的效果

为评价IPSO-DPSA算法的改进廊道约束在调度线形态畸变方面的控制能力,以发电量最大为目标的池潭水库调度图优化问题为例,分别采用无廊道约束、传统廊道约束、改进廊道约束(控制齿高值为1.2 m)3种方案进行对比分析。3种方案只进行上、下基本调度线的IPSO粗搜索阶段的寻优,结果如表1所示,3种方案的优化下基本调度线对照图如图3所示。

表1 3种方案的IPSO粗搜索阶段寻优结果

调度图方案	多年平均发电量/ 亿 kW·h	历时 保证率/%	相对原方案的 发电量增加 比例/%
原调度图方案	5.019	98.098	0.000
无廊道约束方案	5.230	98.098	4.207
传统廊道约束方案	5.187	98.187	3.348
改进廊道约束方案	5.186	98.187	3.319

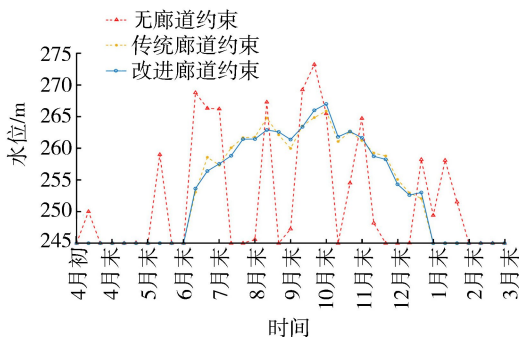


图3 3种方案优化下基本调度线对照

由图3可见,以调度线的每个时段控制点作为优化变量时,由于径流资料的限制和最优化目标对应的关键控制点不唯一^[10],无廊道约束方案的优化调度线形态畸变严重,出现了大量不规则的锯齿状波动。虽然其长系列模拟所得的发电量较大,但由于严重的形态畸变,其优化结果已不适合作为调度图进行使用。传统廊道约束方案的优化调度线虽然

维持了调度线的基本形态,但仍出现了众多的锯齿状波动,整体较不规则、难以使用。对比之下,改进廊道约束方案的多年平均发电量与传统廊道约束方案相近,但其优化调度线较传统廊道约束方案却更平滑,其优化结果较为适合作为调度图进行使用。

可见,IPSO-DPSA 算法的改进廊道约束能有效控制寻优过程中的调度线形态畸变,具有较好的实用性。

3.2 多目标优化计算结果

以长系列模拟资料为基础,采用 IPSO-DPSA 算法对调度图多目标优化模型进行寻优。设置外部精英集 I、外部精英集 II 容量均为 15,控制齿高值为 1.2 m,设计历时保证率为 98.10%。图 4 显示了多目标优化结果。表 2 根据发电量由大至小、生态保护程度由小至大的顺序列出了调度图多目标优化结果的典型方案,其中方案 1 为发电最大方案,方案 6 为生态保护程度最大方案。

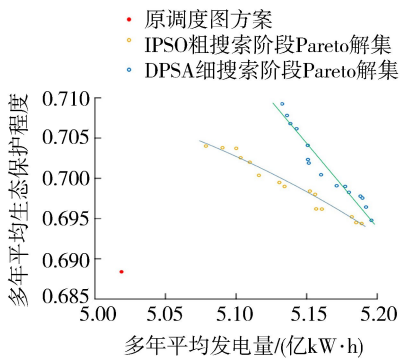


图 4 多目标优化结果

表 2 调度图典型方案集

调度图方案	多年平均发电量/亿 kW·h	多年平均生态保护程度	历时保证率/%
原调度图方案	5.019	0.688	98.10
方案 1	5.196	0.695	98.26
方案 2	5.188	0.698	98.23
方案 3	5.177	0.699	98.23
方案 4	5.160	0.700	98.26
方案 5	5.152	0.702	98.24
方案 6	5.139	0.707	98.22

由图 4 可见,在 IPSO 粗搜索阶段,算法所得解集较原调度图方案已经有了较大程度的优化,且具有良好的多样性,但仍有一定的优化空间,为后续 DPSA 细搜索阶段提供了较为优秀的初始解,解决了 DPSA 因无良好的初始解而收敛性能降低的问题。在 DPSA 细搜索阶段,算法对 IPSO 粗搜索阶段所得解集进行了进一步的寻优,所得解集更加逼近真实 Pareto 前沿,具有较好的收敛性,解决了 IPSO 算法的收敛性较差的问题。可见,IPSO-DPSA 算法一定程度上规避了传统的 PSO 算法和 DPSA 算法的

不足;在解调度图优化问题时,IPSO-DPSA 算法相对两种算法具有一定的优势。

由图 4 和表 2 可知,优化后,发电最大方案的多年平均发电量为 5.196 亿 kW·h,较原调度图方案提高了 3.51%;生态保护程度最大方案具有 0.707 的多年平均生态保护程度,较原调度图方案提高了 2.76%;且 IPSO-DPSA 算法所得解集具有良好的多样性。可见 IPSO-DPSA 算法在调度图多目标优化问题中表现优秀,具有良好的优化性能。

为进一步验证 IPSO-DPSA 算法在调度图优化问题中的实用性,选取原调度图方案、IPSO-DPSA 算法所得的发电最大的方案以及生态保护程度最大的方案进行以平水年径流数据为基础的调度测试。计算结果如表 3 所示。

表 3 平水年各方案调度结果

调度图方案	发电量/亿 kW·h	平均生态保护程度	历时保证率/%
原调度图方案	5.338	0.733	98.63
发电最大方案	5.519	0.751	100.00
生态保护程度最大方案	5.479	0.752	100.00

由表 3 可知,发电量最大方案在平均生态保护程度优于原调度方案的同时,其发电量较原调度图方案提高了 3.39%;生态保护程度最大方案在发电量优于原调度方案的同时,其平均生态保护程度较原调度图方案提高了 2.59%。可见,将 IPSO-DPSA 算法的优化调度图方案指导于实际年份的水库调度,可以得到较原调度方案更优的结果。

4 结论

针对大部分现有算法在水库调度图优化问题中的瑕疵,本文以 PSO 算法和 DPSA 算法的混合算法为框架,通过引入改进廊道约束、特殊个体进化方式、外部精英集策略等改进策略,提出了 IPSO-DPSA 算法。通过实例分析,证明了所提算法的改进廊道约束能有效控制寻优过程中的调度线形态畸变,具有较好的实用性;证明了所提算法在调度图多目标优化问题中具有良好的优化性能,其解集具有良好的收敛性、多样性,较为适合进行实际应用。

参考文献:

[1] OSTADRAHIMI L, MARIÑO M A, AFSHAR A. Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach[J]. Water Resources Management, 2012, 26(2): 407-427.

[2] 刘攀,张文选,李天元. 考虑发电风险率的水库优化调度图编制[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 252-259. (LIU Pan, ZHANG Wenxuan, LI Tianyuan. Derivations of risk-based reservoir operation rule curves[J]. Journal of

- Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4):252-259. (in Chinese))
- [3] 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 Pingan, 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))
- [4] OLIVEIRA R, LOCKS D P. Operating rules for multi-reservoir system [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839-852.
- [5] ILICH N, SIMONOVIC S P, AMRON M. The benefits of computerized real-time river basin management in the Malahayu reservoir system [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(1): 55-64.
- [6] 尹正杰, 胡铁松, 吴运卿. 基于多目标遗传算法的综合利用水库优化调度图求解 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6):40-44. (YIN Zhengjie, HU Tiesong, WU Yunqing. Deriving multipurpose reservoir operating rule curves using multi-objective genetic algorithms [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2005, 38(6):40-44. (in Chinese))
- [7] 徐刚, 夏甜. 基于改进与优化调度图的梯级电站联合调度 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3):44-49. (XU Gang, XIA Tian. Joint dispatching of cascade hydropower station based on improved and optimized reservoir operation chart [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3):44-49. (in Chinese))
- [8] KANGRANG A, CHALEERAKTRAKOON C. Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves [J]. American Journal of Applied Sciences, 2007, 4(2):73-79.
- [9] 张阳, 钟平安, 徐斌, 等. 基于廊道约束的水库调度图优化遗传算法 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6):13-17. (ZHANG Yang, ZHONG Pingan, XU Bin, et al. Optimization of reservoir operation chart based on genetic algorithm using constraint of grid [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6):13-17. (in Chinese))
- [10] 杨延伟, 陈森林, 黄馗, 等. 考虑光滑性约束的水库发电调度图优化方法研究 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(8):133-136. (YANG Yanwei, CHEN Senlin, HUANG Kui, et al. Study on optimal reservoir operation rule curves considering smooth constraint [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 133-136. (in Chinese))
- [11] 王旭, 庞金城, 雷晓辉, 等. 水库调度图优化方法研究评述 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5):71-75. (WANG Xu, PANG Jincheng, LEI Xiaohui, et al. Overview of reservoir operation chart optimization [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5):71-75. (in Chinese))
- [12] 方国华, 丁紫玉, 黄显峰, 等. 考虑河流生态保护的水电站水库优化调度研究 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(7):1-9. (FANG Guohua, DING Ziyu, HUANG Xianfeng, et al. Optimization of hydropower reservoir operation considering river ecological protection [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7):1-9. (in Chinese))
- [13] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//IEEE International Conference Neural Networks. Icn95-international conference on neural networks. IEEE, 1995: 1942-1948.
- [14] 邓显羽, 彭勇, 叶碎高, 等. 粒子群算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5):90-94. (DENG Xianyu, PENG Yong, YE Suigao, et al. Review on application of particle swarm optimization to operation of reservoirs (groups) [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(5):90-94. (in Chinese))
- [15] WHITE D J. Dynamic programming, Markov chains, and the method of successive approximations [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1963, 6(3): 373-376.
- [16] 彭安帮, 彭勇, 许钦, 等. 基于改进 PSO 算法的跨流域水库群联合调度图优化 [J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(4):406-413. (PENG Anbang, PENG Yong, XU Qin, et al. Optimization of joint operating rule curves for inter-basin multi-reservoir system based on modified PSO algorithm [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(4):406-413. (in Chinese))
- [17] 张铭, 王丽萍, 安有贵, 等. 水库调度图优化研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(3):5-7. (ZHANG Ming, WANG Liping, AN Yougui, et al. Optimizing study on reservoir operation chart [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2004, 37(3):5-7. (in Chinese))
- [18] 黄迪, 徐刚, 向红艳, 等. 基于改进差分进化算法的水火电短期优化调度 [J]. 水力发电, 2017, 43(5):76-80. (HUANG Di, XU Gang, XIANG Hongyan, et al. Short-term dispatch study of hydrothermal power systems based on enhanced differential evolution [J]. Water Power, 2017, 43(5):76-80. (in Chinese))
- [19] 李中凯, 谭建荣, 冯毅雄, 等. 基于拥挤距离排序的多目标粒子群优化算法及其应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2008(7):1329-1336. (LI Zhongkai, TAN Jianrong, FENG Yixiong, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on crowding distance sorting and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008(7): 1329-1336. (in Chinese))

(收稿日期:2020-03-17 编辑:郑孝宇)