

基于 SEOA 算法的水库调度优化配置模型应用研究

陈哲¹, 杨侃¹, 吴云², 汤梓杰¹, 张天衍¹, 赵友成³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 山西水利职业技术学院, 山西运城 044004; 3. 句容水利农机局, 江苏句容 212400)

摘要: 针对水库调度配置中求解最小缺水量的问题, 采用社会情感优化算法 (SEOA 算法), 并在生成初始种群和算法收敛速度两方面进行改进, 最后将改进后的算法运用到东榆林水库。结果表明: 改进后的 SEOA 算法在水库调度最小缺水量问题中具有效率高、计算量少、寻优能力强的优点, 有着一定的实用价值。

关键词: 水库调度; 最小缺水量; 社会情感优化算法 (SEOA); 直线优化; 动态情绪阈值

中图分类号: TV697.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0170-06

Application research on optimal configuration model of reservoir scheduling based on SEOA algorithm

CHEN Zhe¹, YANG Kan¹, WU Yun², TANG Zijie¹, ZHANG Tianyan¹, ZHAO Youcheng³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng 044004, China; 3. Jurong Bureau of Water Conservancy and Agricultural Machinery, Jurong 212400, China)

Abstract: Aiming at the problem of solving the minimum water shortage in the reservoir dispatching configuration, the social sentiment optimization algorithm (SEOA algorithm) was adopted, and the initial population and the convergence speed of the algorithm were improved, and the new algorithm was applied to the Dongyulin Reservoir. The results showed that the improved SEOA algorithm has the advantages of high efficiency, low computational complexity and strong searching ability in the problem of minimum water shortage in reservoir scheduling, which has practical values.

Key words: reservoir scheduling; minimum water shortage; social sentiment optimization algorithm (SEOA); straight line optimization; dynamic emotional threshold

1 研究背景

在最小缺水量的水库调度中, 旨在寻找水库的最佳调度过程来满足水库下游水资源配置时的缺水量最小。水库的优化调度在对下游的水量调配过程中, 可以有效地取得最优的调度过程线。目前一般的优化算法分为两种类型, 一种是以动态规划^[1]为主的数学规划方法。随着所要求解问题的难度和复杂性的提高以及计算规模的逐渐扩大, 动态规划等数学方法会出现“维数灾害”这样标志化的问题。针对这一问题, 学者们进行了许多研究, 比如负荷分配、逐步优化等一系列降维的方法^[2], 随着科学技

术的不断发展和计算机的普及也让这个问题得以缓解^[3]。另一种则是以遗传算法等为代表的启发式优化算法^[4], 这些方法一般都是以随机生成个体为开始, 很好地处理了数学规划方法的维数灾害问题。在进一步的发展中, 学者们对优化算法也进行了进一步的改进, 如陈梁等^[5]对遗传算法的初始种群进行调整, 使用贪婪算法产生初始种群; 又如陈丹丹等^[6]使用图像拼接寻找最佳缝合线来减少计算量。但始终存在着局部收敛的问题。

社会情感优化 (SEOA) 算法由我国学者崔志华提出, 其代表了一种新型的模拟人类社会群体行为的智能优化算法, 算法收敛效率更高^[7]。本文将采

收稿日期: 2019-03-17; 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 山西省水利科学技术研究与推广项目; 云南省水利厅科技项目; 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2012CB417006); “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2009BAC56B03)

作者简介: 陈哲 (1995-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向为水库调度、水电站经济运行。

通讯作者: 杨侃 (1965-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水库调度、水电站经济运行。

用社会情感算法来解决水库调度最小缺水量问题,并且根据算法的个体生成以及收敛速度的问题,尝试进行直线优化和动态阈值改进,通过计算实例对该算法的模型性能进行探讨,并提出有效度函数对算法进行评价。

2 研究方法

2.1 模型建立

2.1.1 目标函数 以调度期内的水库下游缺水量最少作为目标函数:

$$\min f = \sum_{t=1}^T (N_t - S_t) \quad (1)$$

式中: T 为调度段时期,月; N_t 为第 t 时段的总需水量, m^3 ; S_t 为第 t 时段的总供水量, m^3 。

2.1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (Q_t - J_t - M_t) \cdot T_t \quad (2)$$

式中: V_{t+1} 、 V_t 为第 t 时段末、初水库蓄水量, m^3 ; Q_t 、 J_t 、 M_t 为第 t 时段的入库流量,弃水流量和损失流量, m^3/s 。

(2) 水位约束

$$Z_{\min,t} \leq Z_t \leq Z_{\max,t} \quad (3)$$

式中: $Z_{\min,t}$ 、 Z_t 、 $Z_{\max,t}$ 分别为第 t 时刻下限水位、计算水位、上限水位, m 。

(3) 流量约束

$$q_{\min,t} \leq q_t \quad (4)$$

式中: $q_{\min,t}$ 、 q_t 分别为最小下泄流量、计算下泄流量, m^3/s 。

(4) 调度期初、末控制水位约束:

$$Z_s = Z_s^*, Z_e = Z_e^* \quad (5)$$

式中: Z_s 、 Z_s^* 、 Z_e 和 Z_e^* 分别为调度期初计算水位、起调水位、期末计算水位和期末控制水位, m 。

2.2 社会情感优化算法

在人类社会中,由于各个人不同的遭遇和不同的情绪特征,每个人往往会采取不同的行为以获得不同的评价^[8-9]。其数学表述如下:

步骤 1: 种群的初始化。假设种群规模为 H , 维度为 D , X_j^i 为第 i 代种群的第 j 个 ($j = 1, 2, \dots, H$) 个体位置:

$$X_j^i = (z_{j,1}^i, z_{j,2}^i, \dots, z_{j,t}^i, \dots, z_{j,T+1}^i) \quad (6)$$

式中: z_j^i 表示第 i 代种群在第 j 个个体的位置,即第 i 次计算所得的第 j 个时刻的水位点。

由于初始种群在整个搜索空间内随机分布,则初始种群个体生成如下式:

$$z_{jd}^0 = z_d^{\min} + \text{Rand}[0,1] \cdot (z_d^{\max} - z_d^{\min}) \quad (7)$$

式中: z_d^{\max} 、 z_d^{\min} 分别为该 d 维搜索空间的最大值与最小值,即上限水位与下限水位; $\text{Rand}[0,1]$ 表示在 $[0,1]$ 区间的一个随机数。

随后生成初始种群情绪指数 Em_j^0 :

$$Em_j^0 = 1 \quad (8)$$

式中: Em_j^0 为初始个体种群的第 j 个个体的情绪指数,即为生成的初始库水位点在第 j 个位置时的情绪指数。

步骤 2: 社会评价。根据每一个个体所处位置进行社会评价计算,计算所得的最优值记录为社会种群历史最优社会评价,同理最劣值为社会种群历史最差社会评价。个体的最优社会评价记录为该个体的历史最优社会评价,并记录上述社会评价的相应位置^[8-10]。模型建立时采用罚函数法将目标函数公式(1)进行改造,作为本数学模型的社会评价:

$$\min f = \sum_{t=1}^T (N_t - S_t + \sum_{y=1}^Y p_y(O_{t,y}))$$

$$p_y(O_{t,y}) = \begin{cases} \partial_y^u(O_{t,y} - O_{t,y}^u)^{\beta_y^u} & O_{t,y} > O_{t,y}^u \\ 0 & O_{t,y}^d < O_{t,y} < O_{t,y}^u \\ \partial_y^d(O_{t,y} - O_{t,y}^d)^{\beta_y^d} & O_{t,y} < O_{t,y}^d \end{cases} \quad (9)$$

式中: Y 为处理的约束变量数目,即总水位点的个数; $p_y(*)$ 为对第 y 项约束的罚函数, ($y = 1, 2, \dots, Y$), $O_{t,y}^d$ 、 $O_{t,y}$ 、 $O_{t,y}^u$ 分别为 t 时刻第 y 个位置约束的下限水位、计算水位和上限水位 ($t = 1, 2, \dots, T + 1$); ∂_y^u 、 ∂_y^d 、 β_y^u 、 β_y^d 分别为超过上、下限水位时的惩罚系数与惩罚指数。

步骤 3: 情绪指数更新。将第 i 代种群的第 j 个当前社会评价 F_j^i 与该个体的历史最优社会评价 $F_{j,best}^i$ 按下公式(10)对水位点的情绪指数进行更新:

$$Em_j^{i+1} = \begin{cases} Em_j^i - \Delta & F_j^i < F_{j,best}^i \\ 1 & F_j^i = F_{j,best}^i \\ 0 & Em_j^{i+1} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: Δ 为情绪指数迭代参数。

步骤 4: 个体位置更新。初始种群的所有个体情绪指数都为 1,个体认为此次迭代结果正确,则学习方向即为吸取社会评价最差的 L 个个体的经验教训,即更新方向为远离社会评价最差的 L 个个体的位置:

$$z_{jd}^1 = z_{jd}^0 - b_1 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot \sum_{s=1}^L (badz_{md}^0 - z_{jd}^0) \quad (11)$$

式中： b_1 为向差个体学习的控制因子； $badz_{md}^0$ 为初始水位点中差个体中第 m 个水位点在第 d 维中的位置 ($m = 1, 2, \dots, L$)。

当迭代到第 i 代 ($i = 1, 2, \dots, i_{max}$)，个体间的情绪指数产生了明显的差异，根据个体情绪指数与情绪阈值 Th_1 、 Th_2 的关系，将个体分为3种不同的类型进行不同的更新策略：

(1) $Em_j^i < Th_1$ ，个体情绪低落，向种群历史最优社会评价价值的位置靠近，同时远离 L 个拥有历史最差的社会评价价值个体的位置：

$$z_{jd}^{i+1} = z_{jd}^i - b_1 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot \sum_{s=1}^L (badz_{md}^i - z_{jd}^i) + b_2 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot (bestz_d^i - z_{jd}^i) \quad (12)$$

式中： z_{jd}^i 、 z_{jd}^{i+1} 分别为第 i 代、第 $i+1$ 代种群第 j 个水位点在第 d 维的位置； b_2 为种群历史最优个体的影响因子， $bestz_d^i$ 为截至第 i 代，种群历史最优社会评价价值在第 d 维的位置。

(2) $Th_1 < Em_j^i < Th_2$ ，此时个体情绪平和，通过经验和教训向自身的历史最优评价价值的位置靠近：

$$z_{jd}^{i+1} = z_{jd}^i - b_1 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot \sum_{s=1}^L (badz_{md}^i - z_{jd}^i) + b_2 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot (bestz_d^i - z_{jd}^i) + b_3 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot (\sin glebestz_d^i - z_{jd}^i) \quad (13)$$

式中： b_3 为个体学习自身最优历史经验的影响因子； $\sin glebestz_d^i$ 为截至第 i 代，第 j 个水位点的历史最优社会评价价值在第 d 维的位置。

(3) $Em_j^i > Th_2$ ，此时个体情绪高涨，主要以自我反思和远离历史最差评价价值的位置的策略为主：

$$z_{jd}^{i+1} = z_{jd}^i - b_1 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot \sum_{s=1}^L (badz_{md}^i - z_{jd}^i) + b_3 \cdot \text{Rand}[0,1] \cdot (\sin glebestz_d^i - z_{jd}^i) \quad (14)$$

步骤5：判断终止。若满足终止条件，则迭代终止，输出种群最优解；反之，令 $i = i + 1$ ，进行下一步迭代，重复步骤2~5，直到满足终止条件。

2.3 社会情感优化算法的改进

如前文所述，新型智能优化算法大多都存在一定的缺陷，例如计算中收敛速度不稳定、易出现局部最优解等问题，作为新型智能优化算法的社会情感算法也是如此，由此针对此问题提出两种对于SEOA算法的优化^[11-12]。

2.3.1 初始种群的直线优化 基本的智能算法对于初始种群的生成大多偏向于随机，这对于算法的收敛速度影响较大，故针对生成初始个体方法的不足，提出直线优化过程。

“初始种群直线优化”即生成的初始个体采用相同的位置在各个维度上均采用上、下界的平均值生成初始个体：

$$z_{jd}^0 = \frac{(z_d^{\min} + z_d^{\max})}{2} \quad (15)$$

式中： z_d^{\max} 、 z_d^{\min} 表示该 d 维搜索空间的最大值与最小值，即上限水位和下限水位。

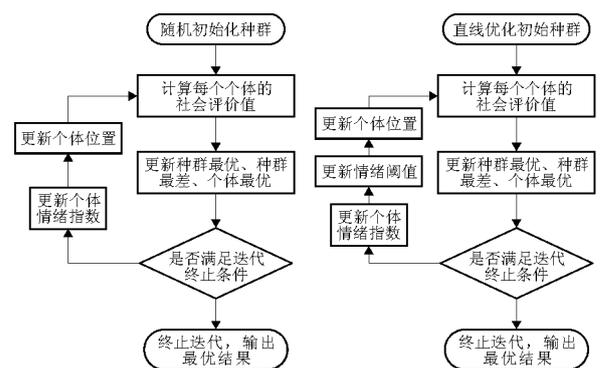
基于公式(15)生成的初始个体在进行迭代计算过程中向两边扩散计算，更利于最优解的收敛，从而有利于全局收敛。

2.3.2 情绪阈值的动态设计 基本的社会情感优化算法的情绪阈值在计算过程中并不会发生变化，这样设计的优点是计算过程简单，但在实际的操作过程中收敛速度偏慢，故提出对情绪阈值进行动态设计，以解决收敛速度不足的问题。

情绪阈值的动态设计操作为在进行第 i 次迭代计算的过程中将个体的情绪指数进行排序，取排序为 $[j/3]$ 处的个体情绪值为 Th_1 ，取排序为 $[2j/3]$ 的个体情绪值为 Th_2 ，这样在计算的过程中可以使种群个体更有效地进行策略选择。

$$Th_i = \begin{cases} Em_{[j/3]} & i = 1 \\ Em_{[2j/3]} & i = 2 \end{cases} \quad (16)$$

图1为改进前后社会情感优化算法的流程对比。



(a) 基本社会情感优化算法

(b) 改进社会情感优化算法

图1 改进前后社会情感优化算法的对比流程图

2.3.3 求解步骤 采用改进的社会情感优化算法解决水库调度最小缺水量问题的具体步骤如下：

步骤1：初始化。初始参数的确定包括种群规模 H 、情绪指数初始阈值 Th_1 、 Th_2 、情绪迭代参数 Δ 、最大迭代次数 k_{max} 、学习因子 b_1 、 b_2 、 b_3 和差个体数 L 等等。

采用水库的水位作为调度决策变量，对算法的个体进行实数编码。对于调度时段为 T 的水库调度最小化问题，第 i 代种群的第 j 个个体 Z_j^i 按照公式(6)进行编码。

规定各个搜索维度的上、下限为水库调度中的上限水位和下限水位,生成的初始个体及之后的计算个体必须在上下限之间,按照公式(15)生成初始个体,水库调度期初水位和末水位按照约束条件公式(5)进行取值,初始的情绪指数按照公式(8)进行取 1。

步骤 2:社会评价价值计算。由于水库调度中的约束条件往往是非线性的,所以采用罚函数法,根据公式(9)进行各个社会评价价值的计算。记录每一次计算的目标函数值以及所要利用的各个社会评价价值,并记录上述的调度过程曲线^[13]。

步骤 3:情绪指数更新。首先判断当前值是否为个体最优社会评价价值,再根据公式(10)更新个体情绪值。

步骤 4:情绪阈值更新。在计算完所有的个体情绪值后,对所计算的情绪值进行排序,并按照公式(16)选取个体进行情绪阈值更新。

步骤 5:个体位置更新。根据公式(11)~(14),利用上述记录的 3 个社会评价价值对个体进行位置更新,更新后的个体若超过上限水位则取上限水位,若低于下限水位则取下限水位。

步骤 6:判断终止。判断迭代次数是否达到最大迭代次数 k_{max} ,若小于 k_{max} ,则令 $k = k + 1$ 重复步骤 2 ~ 6 直到 k_{max} ,停止迭代,输出最优水位调节过程以及最小缺水量结果。

3 实例分析

3.1 研究区域概况

本文以山西大水网的第一横地区的上游的东榆林水库作为计算区域。东榆林是一座以灌溉为主,

兼顾防洪的中型水库,总库容 $6\ 500 \times 10^4\ m^3$,最大泄流量 $2\ 811\ m^3/s$,校核洪水位 $1\ 042.1\ m$,死水位 $1\ 035\ m$ ^[14]。水库位于桑干河干流上游,上接引黄工程流域。由于山西地区总体缺水,在引黄补给的同时,东榆林水库通过对上游来水进行调节来达到对下游山阴县、怀仁县以及应县的持续供水。由于地区缺水,将对 2020 年的水库调度方案进行规划计算。研究区范围示意图见图 2,供水系统结构概化图见图 3。

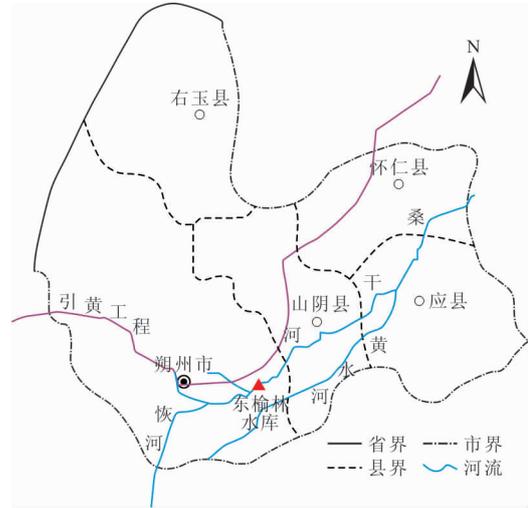


图 2 研究区范围示意图

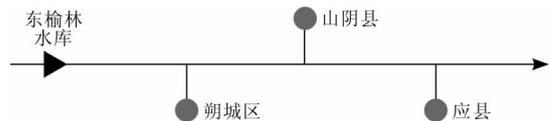


图 3 供水系统结构概化图

3.2 需水量预测结果

通过回归分析法预测得到 2020 年的需水量,见表 1。

表 1 东榆林水库下游 3 区县 2020 年需水量预测

$10^4\ m^3$

区县及 保证率/%	农业需水			生活需水			第二产业		
	2016 年	2017 年	2020 年	2016 年	2017 年	2020 年	2016 年	2017 年	2020 年
朔城区 75	8092	8268	8717	1588	1668	2003	885	907	968
山阴县 75	6675	6825	7231	698	735	889	902	933	1018
应县 75	6052	6179	6528	983	1034	1246	2185	2272	2510
区县及 保证率/%	第三产业			生态需水			总需水量汇总		
	2016 年	2017 年	2020 年	2016 年	2017 年	2020 年	2016 年	2017 年	2020 年
朔城区 75	1184	1290	1606	330	344	391	12079	12477	13685
山阴县 75	544	592	738	155	162	184	8974	9247	10060
应县 75	548	597	743	212	222	252	9980	10304	11279

3.3 优化配置结果

通过模型建立计算所得3个区县2020年的用水量月分配情况如表2所示。

表2 3区县2020年用水量月配置预测结果 10^4 m^3

月份	朔城区	山阴县	应县
1	217.4	159.8	179.1
2	108.7	79.9	89.6
3	679.3	499.3	559.8
4	2037.8	1497.9	1679.4
5	1630.2	1198.3	1343.5
6	1358.5	998.6	1119.6
7	2717.0	1997.2	2239.2
8	2037.8	1497.9	1679.4
9	326.0	239.7	268.7
10	434.7	319.6	358.3
11	1358.5	998.6	1119.6
12	679.3	499.3	559.8

由于采用折线图表示库水位调度曲线与实际较为接近,故对改进 SEOA 算法的调度结果进行展示,如图4所示。

3.4 算法性能分析

采用遗传算法、基本 SEOA 算法和改进 SEOA 算法分别对模型进行求解,使用动态规划算法求得问题在同等精度下的精确解,通过指标数 η 来判别算法性能:

$$\eta = \frac{n}{\sum_{t=1}^T (U_t - J_t)^2 \cdot T_z \cdot k_n} \quad (17)$$

式中: T_z 为实行所有计算所需要的时间, min; T 为总计算时刻数; U_t, J_t 分别为 t 时刻计算所得的最小缺水量以及同等精度下的最小缺水量的精确解, m^3 ; n 为迭代次数; k_n 为该迭代次数下的修正参数 ($n = 1 \sim 10$ 取 1.1, $n = 10 \sim 100$ 取 1.3, $n > 100$ 取 1.5)。该函数使用前提为初始个体精度以及分段时长相同的情况才可以用来比较。

经过多次试算后选取的参数如表3所示。

表3中 k_{\max} 可以进行变化以探求有效度是否能够有效地判别算法性能。

对每种算法采取了20次独立的计算,以保证计算结果具有一定的代表性,以统计所得出的最优值、平均值、标准差及耗时作为评价指标。

在处理器为 Intel i5 - 8500、4G 内存、window7 操作系统的条件下进行数据计算,所得到的3种算法各个评价指标值如表4所示。

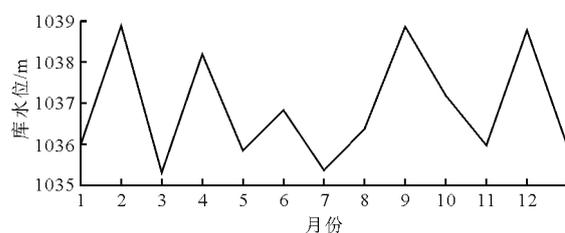


图4 2020年预测库水位调度曲线(改进 SEOA 算法)

表3 3种算法的参数选取

算法	通用参数		特有参数									
	G	k_{\max}	Th_1	Th_2	Δ	L	b_1	b_2	b_3	n_1	n_2	n_3
遗传算法	500	100								0.8	0.7	0.5
SEOA	500	100	0.3	0.8	0.1	5	0.2	2	1.7			
改进 SEOA	500	100			0.1	5	0.2	2	1.7			

表4 3种算法的各评价指标数据比较

算法	最优值/ m^3	平均值/ m^3	标准差	耗时/min	η
遗传算法	2631773	2631780	32	23.6	0.00414
SEOA	2631775	2631781	52	15.6	0.00348
改进 SEOA	2631773	2631775	12	20.2	0.00967

相比于传统的以动态规划为代表的数学规划方法,SEOA 算法与遗传算法等智能算法能够很好地避免维数灾难这一问题。对于计算结果,在迭代次

数为100的情况下,SEOA 算法也能够给出和精确解十分接近的结果,而改进的 SEOA 算法能够很好地收敛于动态规划计算所得的精确解,具有一定的

代表性。

对于3种算法的有效度函数 η 进行计算比较,改进SEOA算法 η 值最高,在同等精度计算的过程中相较于另外两个算法有着一定的优势,同时 η 对于算法的性能表达具有一定的代表性。

选取3种算法最优的一次迭代过程展示各个算法与迭代次数之间的关系作图5,以比较3种算法的收敛快慢。

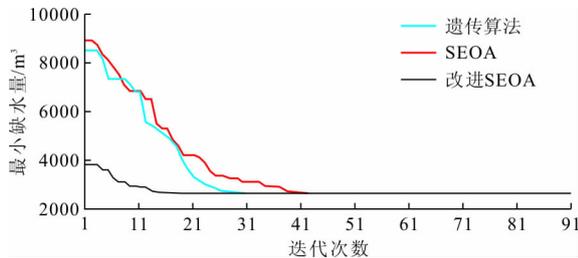


图5 3种算法最小缺水量计算进化过程曲线比较

由图5可见,普通的SEOA算法对于计算个体的收敛速度比不上智能的遗传算法,但经过初始个体和情绪阈值的改进,收敛速度大为增加,并且计算出的结果也更加接近精确解。

4 结论

本文通过采用SEOA算法对于东榆林水库地区进行最小缺水量问题的计算,并针对算法的初始种群的生成和情绪阈值的确定进行改进,取得了以下的成果和结论:

(1)SEOA算法作为新型的智能优化算法,能够很好地解决传统数学规划方法在求解问题较为复杂情况下的维数灾害问题,其初期收敛速度与其他传统启发式算法大致相同,同时能够得到较好的全局最优解。

(2)改进的SEOA算法在初始种群的生成上有着一定的优势,并且通过对于情绪阈值的更新,在同等迭代次数的情况下,达到全局最优解的可能性更高。与普通的SEOA算法相比,收敛速度有效增加,取得的计算结果更加准确,有着一定的实用价值。

(3)通过回归分析法以及水库蓄水容量曲线计算,成功预测了2020年朔州市3区县的需水量,得到了缺水量最小的水库水位调度曲线以及3区县的水资源优化配置,在解决实际问题中有着一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 王森,马志鹏,李善综,等. 梯级水库群优化调度并行动态规划方法[J]. 中国农村水利水电,2017(11):204-207.
- [2] 向凌,周建中,杨敬涛. 一种消除动态规划法中维数灾的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2004(3):76-78.
- [3] 叶小卉. 用面向对象数据库系统管理高校学生信息的探讨[J]. 计算机光盘软件与应用,2012(12):10+12.
- [4] 王建群,焦钰. 狼群算法的改进及其在水库优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(2):161-167+173.
- [5] 陈梁,宫礼坤,张明媚. 基于改进遗传算法的RGV动态调度模型[J]. 经贸实践,2018(23):270.
- [6] 陈丹丹,方发明,刘惠燕. 一种基于改进动态规划的最佳拼接线搜索方法[J]. 计算机应用与软件,2018,35(10):211-216+237.
- [7] 李旭明. 基于小世界模型的社会情感优化算法及应用研究[D]. 太原:太原科技大学,2012.
- [8] 徐月春. 情感选择方式的策略研究[D]. 太原:太原科技大学,2012.
- [9] 李雪岩,李雪梅,李学伟,等. 基于情绪参照点的多主体自组织路径选择模型[J]. 系统管理学报,2017,26(2):259-267+276.
- [10] 刘强,钟平安,陈宇婷,等. 梯级水电站优化调度的改进社会情感优化算法[J]. 水力发电学报,2018,37(1):21-30.
- [11] 魏战红. 社会情感优化算法及其在电力系统无功优化中的应用研究[D]. 太原:太原科技大学,2011.
- [12] 陈永静. 社会情感优化算法在团簇结构优化中的应用研究[D]. 太原:太原科技大学,2011.
- [13] 王俊艳. 基于社会情感算法的分类模型设计[J]. 电子技术与软件工程,2015(1):187.
- [14] 翟王娟. 东榆林水库除险加固措施简述[J]. 山西水利,2015(8):27-28+45.