

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221558

基于改进差分进化算法的万安水库防洪优化调度

刘孟桦¹, 何中政^{2a,2b}, 盛卫荣³, 熊芳金^{1,2a}, 付吉斯^{2a,2b}, 尹恒^{2a}

(1. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌大学 a. 工程建设学院;

b. 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031; 3. 江西省水文监测中心, 江西 南昌 330002)

摘要: 水库防洪调度问题具有多阶段、非线性和多重复杂约束特性, 研究其高效稳定求解方法有助于提升其防洪优化调度效果。差分进化算法(DE)作为一种启发式智能优化方法在水库优化调度应用中效果较好, 但受其随机搜索策略影响搜索易早熟收敛陷入局部最优。为平衡DE的全局和局部搜索能力, 提出了一种改进差分进化算法(SDE), 通过考虑适应度排序的差分变异策略用于提升搜索能力, 并通过随机选择机制用于提升开发能力。相关数值试验验证了SDE收敛能力显著优于粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、差分进化(DE)、连续域蚁群优化算法(ACOR)。实例分析结果表明, SDE在可行解、计算时间、精度、稳定性和速度指标上均优于逐步优化算法(POA)和DE, 平均削峰率较POA提升0.17%~4.26%, 较DE提升0.13%~1.26%。

关键词: 万安水库; 防洪优化调度; 差分进化(DE); 最大削峰准则; 罚函数

中图分类号: TV697.1⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0054-05

1 引言

水库防洪调度是一类具有多阶段、非线性和多重复杂约束特性的复杂优化问题, 研究该问题的高效稳定求解的方法从而提升防洪优化调度效果, 具有一定的实用意义^[1]。1950年代以来, 基于运筹学的线性和非线性规划、动态规划等理论和方法涌现, 为水库优化调度从理论研究走向实际应用奠定了基础^[2]。到1990年代后, 随着计算机硬件普及和相关理论发展, 诞生了粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、差分进化(DE)、连续域蚁群优化算法(ACOR)等一系列智能算法, 相关理论研究和工程应用也在水库优化调度研究领域获得了一定程度的认可^[3]。其中, DE是一种简单且易于实现的连续域智能算法^[4], 该算法采用形如差分的随机进化策略模拟种群“优胜劣汰”的进化过程, 对复杂问题进行优化求解。目前, 应用DE已开展了大量水库优化调度相关研究, 如AHMADIANFAR I等^[5]提出了一种蝙蝠群算法和DE的混合算法, 并在水库优化调度基准测试试验中进行了应用; 邹强等^[6]针对高维度梯级水库群优化调度问题, 提出基于DE的多算法进化

策略混合框架和多核并行计算技术; HE ZHONGZHENG等^[7]针对金沙江下游梯级水库群联合发电调度问题, 提出了分区参数自适应更新策略的改进DE。DE算法虽已取得长足发展, 但仍存在随机搜索策略致使算法易早熟收敛的不足。为此, 本文提出了一种改进差分进化算法(SDE), 应用带有考虑适应度排序的变异策略提升搜索能力及随机选择机制提升开发能力, 并通过相关数值试验和实例分析检验了SDE的收敛能力, 结果可为水库防洪优化调度提供参考。

2 水库防洪优化调度模型

针对水库下游控制点进行削峰的防洪调度问题中, 考虑最大削峰准则的目标函数可表示为:

$$\min \text{Obj}_1 = \min \{ \max(Q_0^{\text{fc}}, Q_1^{\text{fc}}, Q_2^{\text{fc}}, \dots, Q_t^{\text{fc}}, \dots, Q_T^{\text{fc}}) \} \quad (1)$$

$$\min \text{Obj}_2 = \min \sum_{t=0}^T (Q_t^{\text{fc}})^2 \quad (2)$$

式中, T 为水库防洪调度时段数; Q_{t-1}^{fc} 、 Q_t^{fc} 分别为下游防洪控制点 t 时段初、末时刻流量, m^3/s 。

最大削峰准则的两种表达形式 Obj_1 和 Obj_2

收稿日期: 2022-07-29, **修回日期:** 2022-08-23

基金项目: 江西省水利厅科技项目(202223YBKT43); 江西省自然科学基金(20212BAB214065, 20224BAB204075); 国家自然科学基金(52209024)

作者简介: 刘孟桦(1969-), 男, 副教授, 研究方向为水利工程管理, E-mail: 490201765@qq.com

通讯作者: 何中政(1992-), 男, 博士、讲师, 研究方向为复杂水资源系统建模及优化调控, E-mail: he_zz@ncu.edu.cn

在特定条件下效果相同^[8]。

此外,水库防洪优化调度还需考虑运行水位、水位变幅、流量和流量变幅等安全运行约束,即:

$$V_t = V_{t-1} + \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} - \frac{Q_{t-1} + Q_t}{2} \right) \Delta T \quad (3)$$

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad (4)$$

$$|Z_t - Z_{t-1}| \leq \Delta Z_t \quad (5)$$

$$Q_t^{\min} \leq Q_t \leq Q_t^{\max} \quad (6)$$

$$|Q_t - Q_{t-1}| \leq \Delta Q_t \quad (7)$$

$$Q_t^{\text{fc}} = Q_t' + q_t \quad (8)$$

式中, V_t 、 V_t^{\max} 、 V_t^{\min} 分别为 t 时段水库库容及其最大、最小值约束, m^3 ; I_{t-1} 、 I_t 分别为 t 时段初、末来水, m^3/s ; Q_{t-1} 、 Q_t 分别为 t 时段初、末下泄, m^3/s ; ΔT 为调度时间步长, s ; Z_t 为 t 时段运行水位; ΔZ_t 为 t 时段水位变幅限制, m ; Q_t^{\max} 、 Q_t^{\min} 分别为 t 时段下泄最大、最小值约束, m^3/s ; ΔQ_t 为水库下泄在 t 时段的变幅约束, m^3/s ; Q_t' 为水库下泄 Q_t 演进到下游控制点流量, m^3/s ; q_t 为水库到下游防洪控制点的区间来水, m^3/s 。

3 改进差分进化算法

3.1 改进差分进化算法

DE 在求解问题前需设置差分比例因子 F 、交叉率 C_{CR} 、种群规模 N_{NP} , 随后初始化种群, 重复进行差分变异、交叉和选择的种群进化过程。本文提出的改进差分进化算法(SDE)具体实施步骤如下。

步骤 1 差分变异。通过对父代种群中每个个体 $\vec{x}_{i,G}$ 实施差分变异算子, 从而生成变异个体 $\vec{v}_{i,G}$ 。经典 DE 使用“rand/1”作为差分变异算子, 该算子随机性较大, 缺乏对种群中适应度表现较好个体信息的充分利用。为此, 提出了考虑种群个体适应度顺序的差分变异策略“current to superior”, 其过程可表示为:

$$\vec{v}_{i,G} = \vec{x}_{i,G} + F_i(\vec{x}_{s_1,G} - \vec{x}_{i,G}) + F_i(\vec{x}_{s_2,G} - \vec{x}_{s_3,G}) \quad (9)$$

式中, $\vec{v}_{i,G}$ 为由 $\vec{x}_{i,G}$ 应用差分变异算子的变异个体; $\vec{x}_{i,G}$ 为第 G 代种群中的 i 号个体, 也是第 G 代的父代个体; s_1 、 s_2 、 s_3 为互不相同整数, 考虑种群个体适应度顺序的个体序号 $s_1 \in [1, N_{\text{NP}}e_{\text{Rate}}]$ 和 $s_2, s_3 \in [1, N_{\text{NP}}]$, 优先选择概率 e_{Rate} 表示 s_1 只抽取种群中个体适应度前 $N_{\text{NP}}e_{\text{Rate}}$ 个体, s_2 在种群个体适应度要优于 s_3 。

步骤 2 交叉。在通过差分变异产生 $\vec{v}_{i,G}$

后, 将种群中所有成对的 $\vec{x}_{i,G}$ 和 $\vec{v}_{i,G}$ 的每一维 j 进行交叉运算, 生成的新个体被称为试验个体 $u_{i,G}$ 。交叉运算式为:

$$u_{i,j,G} = \begin{cases} v_{i,j,G} & \text{rand}[0,1] \leq C_{\text{CR}}, \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\text{rand}[0,1]$ 为 $[0,1]$ 内的随机数; j_{rand} 为 $[1, D]$ 内的随机整数, 确保 $u_{i,j,G}$ 能从 $\vec{v}_{i,G}$ 中至少继承一维变量信息。

步骤 3 随机选择机制。经典 DE 选择是对第 G 代种群成对的 $\vec{x}_{i,G}$ 和 $u_{i,G}$ 进行比较, 表现较优的个体进入下一代。为缓解 DE 早熟收敛情形, 提出了考虑随机因素的选择机制, 防止种群较快陷入局部收敛。考虑随机因素的选择机制公式为:

$$\vec{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \vec{u}_{i,G} & \vec{u}_{i,G} \text{ 优于 } \vec{x}_{i,G} \\ \vec{u}_{i,G} & \vec{x}_{i,G} \text{ 优于 } \vec{u}_{i,G}, \text{ rand}[0,1] \leq S_{\text{SR}} \\ \vec{x}_{i,G} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

当 $u_{i,G}$ 优于 $\vec{x}_{i,G}$ 或 $\text{rand}[0,1]$ 小于随机选择概率 S_{SR} 时, $u_{i,G}$ 会替代 $\vec{x}_{i,G}$ 进入下一代种群。

参考其他文献^[7], 控制参数可设置为 $F = 0.6$ 、 $C_{\text{CR}} = 0.6$ 。差分变异策略“current to superior”考虑种群个体适应度顺序, 个体的进化会逐渐靠近优选概率 e_{Rate} 内的个体。因此 e_{Rate} 越小, 差分变异策略“current to superior”的贪婪性越强(局部搜索能力越强), 但 e_{Rate} 太小也会使得算法遭遇早熟收敛。考虑随机因素的选择机制相较传统仅比较个体表现进行比选的策略不确定性增强, 种群进化过程的多样性增加, 但随机选择概率 S_{SR} 过大会阻碍种群收敛速度。经多次测试, $e_{\text{Rate}} = 0.05$ 、 $S_{\text{SR}} = 0.1$ 较合适。综上所述, 本文提出的 SDE 算法的实施流程见图 1。

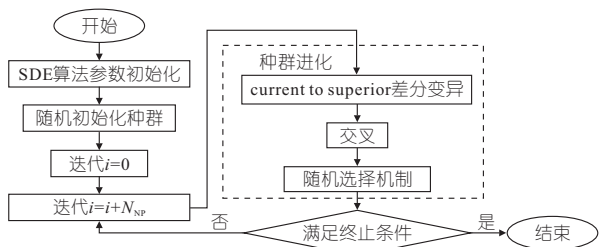


图 1 SDE 算法实施流程图

Fig. 1 Flow chart of SDE algorithm implementation

3.2 多重复杂约束处理

在水库防洪优化调度问题的约束处理中, 罚函数法应用较广泛。罚函数是根据个体统计问题

多重约束的违法程度 $\varphi_G(\vec{x})$ ，并据此对个体适应度评价增加惩罚值从而削减个体竞争优势，这使一般极小值优化问题的目标函数 $f(\vec{x})$ 被改写为：

$$\begin{cases} \min \psi(\vec{x}) = f(\vec{x}) - p(\vec{x}) \\ p(\vec{x}) = p_w [\varphi_G(\vec{x})]^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中， $p(\vec{x})$ 为根据个体 \vec{x} 对问题约束的违反程度 $\varphi_G(\vec{x})$ 计算得到的惩罚值； $\psi(\vec{x})$ 为考虑 $p(\vec{x})$ 的适应度评价函数； p_w 为 $p(\vec{x})$ 中的惩罚因子。

由于水库调度问题不同约束条件反映物理量的量级和量纲不同，需针对不同约束统计违反程度和设置惩罚因子，增加了问题的求解难度。为此，基于前期研究成果梯级水库群统一流量约束及其约束违反程度评价指标^[9]，可将水位、水位变幅、流量等约束通过水量平衡进行换算，获得仅针对下泄流量的约束作为水库防洪调度的统一流量约束 $[\underline{Q}_i, \overline{Q}_i]$ ，建立水库防洪调度统一流量约束违反程度评价指标，应用该指标进行罚函数约束处理，步骤简单且易于操作。

4 试验分析

4.1 万安水库后汛期防洪调度运行方式

万安水库坝址在万安县城以上约 2 km，库区系山地狭谷，坝址以下系丘陵地带，下游系冲积平原。大坝坐落在赣江中游上段，水库汛后蓄水位为 96 m，汛限水位和死水位均为 85 m，防洪高水位 93.6 m，总库容 $11.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，防洪库容 $5.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是赣江干流的主要控制性工程之一。水库汛期为 4~9 月，其中，主汛期为 4 月 1 日~6 月 20 日，后汛期为 6 月 21 日~9 月 30 日，后汛期运行水位按动态控制，在后汛期洪水来临前，将库水位预泄至 93.5 m 以下。

表 2 SDE 和其他 4 种算法求解 50 维测试函数结果统计

Tab. 2 Statistical results of SDE and other four algorithms for solving 50 dimensional test functions

测试函数	SDE		DE		PSO		GA		ACOR	
	最优值	成功频率	最优值	成功频率	最优值	成功频率	最优值	成功频率	最优值	成功频率
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
f_1	0.00	50.00	0	49	0	2	8.70×10^{-3}	0	0.00	50
	0.00	0.00	0	0	2.30×10^{-9}	2.93×10^{-9}	2.14×10^{-2}	6.21×10^{-3}	0.00	0.00
f_2	0.00	50.00	1.95×10^{-9}	0	1.09×10^{-10}	0	$1.17 \times 10^{+3}$	0	0	11
	0.00	0.00	5.09×10^{-9}	1.63×10^{-9}	8.25×10^{-9}	1.13×10^{-8}	$3.12 \times 10^{+3}$	$1.26 \times 10^{+3}$	$7.37 \times 10^{+6}$	$2.10 \times 10^{+7}$
f_3	0.00	50.00	$4.28 \times 10^{+1}$	0	$1.55 \times 10^{+1}$	0	$1.85 \times 10^{+1}$	0	8.73×10^{-1}	0
	0.00	0.00	$4.33 \times 10^{+1}$	2.74×10^{-9}	$7.83 \times 10^{+1}$	$4.09 \times 10^{+1}$	$1.33 \times 10^{+2}$	$4.83 \times 10^{+1}$	$5.54 \times 10^{+3}$	$2.13 \times 10^{+3}$
f_4	0.00	50.00	1.15×10^{-6}	0	1.49×10^{-6}	0	1.81×10^{-2}	0	0	6
	0.00	0.00	1.64×10^{-6}	3.20×10^{-7}	6.68×10^{-6}	3.22×10^{-6}	2.67×10^{-2}	4.20×10^{-3}	$1.74 \times 10^{+1}$	7.03
Wilcoxon 秩和检验(+ / ≈ / -)										
与 SDE 相比										
			(3/1/0)		(4/0/0)		(4/0/0)		(3/1/0)	

4.2 数值测试验证 SDE

选用文献[7]中的 4 个测试函数(表 1)进行检验，对比 DE、SDE、PSO、GA、ACOR 5 种算法的计算结果。当结果与全局最优解偏差小于 1×10^{-10} ，可认为算法已全局收敛。问题维度 $D = 50$ ，5 种算法 N_{NP} 均为 100，最大评价次数为 $10\,000D$ ，独立重复运行 50 次。Wilcoxon 秩和检验^[10](显著性 $p < 0.05$)用于评价不同算法比较结果，符号“+”、“-”、“≈”表示显著优于、劣于和没有差别。对比分析中还加入 DE、GA、PSO、ACOR 的优化结果，见表 2。由表 2 可知，SDE 是数值测试结果中唯一全部获得最优解的算法，这表明 SDE 搜索能力优于 DE、GA、PSO、ACOR，改进策略合理有效。

表 1 数值测试中 10 个测试函数

Tab. 1 10 test functions in numerical test

函数名	测试函数	可行域	最优值
Sphere	$f_1 = \sum_{i=1}^D x_i^2$	$[-100, 100]^D$	0
Schwefel(1.2)	$f_2 = \sum_{i=1}^D (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	$[-100, 100]^D$	0
Rosenbrock	$f_3 = \sum_{i=1}^{D-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	$[-30, 30]^D$	0
Ackley	$f_4 = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp((1/n) \cos(2\pi x_i)) + 20 + e$	$[-32, 32]^D$	0

4.3 SDE 求解水库防洪调度问题

选取水位为优化变量，并采用实数编码，随机初始化包含 N_{NP} 个个体的种群，然后开展迭代寻优，以最大削峰准则(式(1))为目标函数求解水库防洪优化调度问题。求解水库防洪调度问题的实施步骤如下：①确定算法的种群规模等参数，惩罚因子 $p_w = 10$ ；②随机初始化种群，计算初始种群适应度；③通过差分变异、交叉和选择更新种群；

④若达到最大评价次数停止计算并输出最优结果,否则跳转至前一步骤。

实例分析中选择 SDE、DE、逐步优化算法(POA)进行比较。POA 中水位离散精度设定为 0.01 m,初始解通过随机生成;SDE、DE 算法最大评价次数为 30 000 次。以“199207”、“201907”两场 50 年一遇典型洪水作为输入,吉安站洪峰流量分别为 19 335.51、20 334.09 m³/s,时间步长为 6 h,设定流量变幅约束为 6 000 m³/(s·6 h),水位变幅约束为 1.5 m/(6 h)。

表 3 为 SDE、DE、POA 计算得到的吉安站洪峰流量和削峰率统计结果,图 2 为“201907”洪水过程下 DE 和 SDE 收敛过程。由表 3、图 2 可知:①POA 在“199207”、“201907”两场洪水计算中分别有 11、8 次(50 次独立重复试验)无法计算出可行解,而 DE、SDE 均可得到可行解;②POA、DE、SDE 平均计算时间分别为 2、1、1 s;③从吉安站洪峰流量及标准差指标来看,SDE 的收敛精度和稳定性优于 DE,DE 优于 POA;④结合图 2 收敛过程来看,SDE 约在 9 000 评价次数时收敛到最优解,DE 直到 30 000 评价次数时收敛结果仍劣于 SDE。综上所述,相比 DE 和 POA,SDE 在收敛可行解、计算时间、收敛精度、收敛稳定性和收敛速度指标均表现最优,可作为水库防洪优化调度高效且稳定的求解工具。

表 3 吉安站洪峰流量和削峰率统计结果

Tab. 3 Statistical results of peak discharge and peak clipping rate of Jian station

设计洪水	指标	吉安站洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)		
		POA	DE	SDE
199207	最优	17 052.47	16 925.57	16 765.89
	均值	17 589.21	17 008.77	16 766.68
	最劣	18 804.40	17 115.00	16 767.86
	极差	1 751.92	189.42	1.97
	标准差	278.00	43.93	0.46
	失败次数	11.00	0	0
	平均削峰率/%	9.03	12.03	13.29
	平均计算时间/s	2.17	0.93	0.91
201907	最优	17 737.03	17 747.84	17 736.67
	均值	17 771.65	17 764.54	17 736.67
	最劣	17 903.87	17 784.80	17 736.67
	极差	166.84	36.96	2.27×10 ⁻⁷
	标准差	52.81	9.31	3.84×10 ⁻⁸
	失败次数	8.00	0	0
	平均削峰率/%	12.60	12.64	12.77
	平均计算时间/s	2.54	1.32	1.31

4.4 两种最大削峰准则目标函数优化效果对比

采用 SDE 算法探讨最大削峰准则的两种表达形式(式(1)最大洪峰流量最小(记为 Obj₁)和式(2)洪水过程流量平方和最小(记为 Obj₂))的实际应用效果。选取“199207”洪水过程作为输入,SDE 算法参数参照已有的设置,优化结果见

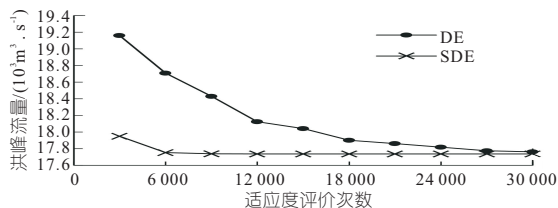


图 2 “201907”洪水过程下 DE 和 SDE 收敛过程图

Fig. 2 Convergence process of DE and SDE under “201907” flood process

表 4。由表 4 可知,最大削峰准则的两种表达形式的优化效果不同,Obj₁ 目标优化结果在洪峰流量比 Obj₂ 少 2.87%,在流量平方和上比 Obj₂ 大 1.44%,在削峰率比 Obj₂ 提高 3.03%。

表 4 最大削峰准则两种目标函数表达下优化结果

设计洪水	设计洪水吉安站洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	指标	优化模型	
			Obj ₁ 为优化目标	Obj ₂ 为优化目标
199207	19 335.51	Obj ₁	16 766.35	17 247.46
		Obj ₂	4.87×10 ⁹	4.80×10 ⁹
		削峰率/%	13.29	10.80

图 3 为“199207”洪水过程下的调度过程。由图 3 可知:①Obj₁ 优化目标主要关注洪峰,10~12 时段大幅拦蓄洪水,降低了下游吉安站洪峰流量;但对于非洪峰影响时段过程(21~33 时段)调控效果一般。②Obj₂ 优化目标关注流量平方和,所以 1~3 时段也存在小幅度拦蓄洪水,10~13 时段拦蓄洪水速率慢于 Obj₁ 优化过程,在洪峰流量指标上劣于 Obj₁ 优化结果。

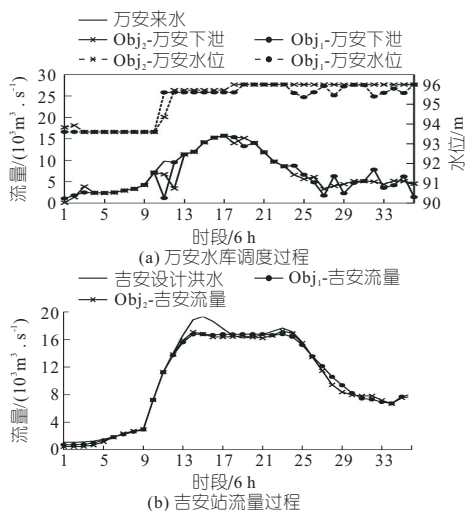


图 3 “199207”洪水过程下两种最大削峰准则调度过程

Fig. 3 Two maximum peak shaving criteria scheduling processes under “199207” flood process

5 结论

a. 提出一种带有考虑适应度排序的差分变异策略和随机选择机制的改进差分进化算法

(SDE)。在包含 4 个测试函数的数值试验中, SDE 全部搜索到了全局最优解, 搜索性能显著优于参与比较的 DE、GA、PSO、ACOR。

b. 在解决带有时滞非线性特性的水库防洪优化问题时, 相比 DE 和 POA, SDE 在收敛可行解、计算时间、收敛精度、收敛稳定性和收敛速度指标均表现最优。

c. 分析了最大削峰准则的两种表达形式在水库防洪优化调度中的效果, 针对削峰率指标来看, 推荐使用洪峰流量最小指标作为目标函数。

参考文献:

[1] 许俊杰,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): 59-62,153.

[2] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报,2019,50(1): 25-37.

[3] 吴梦烟,杨侃,吴云,等. 基于改进烟花算法的汾河水库优化调度模型研究[J]. 水电能源科学,2020,38(5):71-75.

[4] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over

continuous spaces[J]. Journal of global optimization,1997,11(4): 341-359.

[5] AHMADIANFAR I, ADIB A, SALARIJAZI M. Optimizing multireservoir operation; hybrid of bat algorithm and differential evolution[J]. Journal of water resources planning and management, 2016, 142(2): 05015010.

[6] 邹强,鲁军,周超,等. 基于并行混合差分进化算法的梯级水库群优化调度研究[J]. 水力发电学报,2017,36(6):57-68.

[7] HE ZHONGZHENG, ZHOU JIANZHONG, QIN HUI, et al. Long-term joint scheduling of hydropower station group in the upper reaches of the Yangtze River using partition parameter adaptation differential evolution[J]. Engineering applications of artificial intelligence,2019,81:1-13.

[8] 钟平安. 流域实时防洪调度关键技术研究与应用[D]. 南京:河海大学,2006.

[9] HE ZHONGZHENG, ZHOU JIANZHONG, XIE MENGFEI, et al. Study on guaranteed output constraints in the long term joint optimal scheduling for the hydropower station group[J]. Energy, 2019, 185:1210-1224.

[10] CORTINA-BORJA M. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures[J]. Journal of the royal statistical society series A, 2012, 175(3): 829-829.

Optimal Operation of Flood Control in Wan'an Reservoir Based on Improved Differential Evolution Algorithm

LIU Meng-hua¹, HE Zhong-zheng^{2a,2b}, SHENG Wei-rong³, XIONG Fang-jin^{1,2a}, FU Ji-si^{2a,2b}, YIN Heng^{2a}
(1. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China; 2a. School of Infrastructure Engineering; 2b. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Hydrological Monitoring Center of Jiangxi Province, Nanchang 330002, China)

Abstract: The reservoir flood control operation problem has the characteristics of multi-stage, nonlinear and multiple complex constraints. The research of solution method will help to improve the effect of flood control optimal operation. Differential evolution algorithm (DE) has a good effect in the application of reservoir optimal operation, but it is prone to premature convergence and fall into local optimum due to the random search strategy. In order to balance the global and local search ability of DE, this paper proposed an improved differential evolution algorithm SDE, which is used to improve the search ability by considering the differential mutation strategy of fitness ranking and to improve the development ability by random selection mechanism. The related numerical experiments verified that the SDE convergence is significantly better than that of the DE, GA, PSO, and ACOR. The results of case study show that the SDE is better than POA and DE in terms of the feasible solution, calculation time, accuracy, convergence stability and speed. The average flood-peak rate of the SDE is 0.17%-4.26% higher than the POA, and is 0.13%-1.26% higher than the DE.

Key words: Wan'an reservoir; optimal operation of flood control; differential evolution (DE); maximum flood-peak rate criterion; penalty function

(上接第 90 页)

Analysis of Foundation Stress Behavior and Remedial Scheme of Concrete Asphalt Core Wall Dam

XU Jia¹, CUI Xi-can², ZHANG Xing-xing^{3a,3b}, ZHANG Ling-kai², WANG Da-yong⁴
(1. Xinjiang Water Resources and Ecological Water Conservancy Research Center (Academician Expert Workstation), Urumqi, 830000 China; 2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3a. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin; 3b. Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. Heilongjiang Sanjiang Construction Management Co., Ltd., Harbin 150036, China)

Abstract: Based on the finite element method, this paper numerically analyzes the stress behavior and its adverse effects when diaphragm of dam foundation axis shifts downstream during operation, and proposes remedial measures and reference critical values. The results show that when the axis does not shift, diaphragm of dam foundation is only subjected to bending moment and produces local tensile stress, but its influence is not obvious. When the axis is shifted downstream and the offset is less than 30 cm, diaphragm of dam foundation is subjected to the combined action of pressure and bending moment, resulting in stress concentration and adverse effects. In the case of no other processing, when the axis does not shift and the offset is less than 15 cm, it can be temporarily not processed; If the axis offset to the downstream is more than 15 cm and not more than 27 cm (measured maximum offset), in the subsequent construction, the concrete base needs to be widened downstream at least 20 cm, which can reduce the tensile stress extreme of diaphragm of dam foundation and weaken the stress concentration, so as to improve the stress behavior of diaphragm of dam foundation. The finite element simulation provides a reference for the safety evaluation and treatment measures when diaphragm of dam foundation is eccentric.

Key words: concrete asphalt core wall dam; diaphragm of dam foundation; stress behavior; finite element simulation