

文章编号: 1000-7709(2020)08-0055-04

基于改进多目标蝙蝠算法的洛河流域水库优化调度

史利杰¹, 苏律文², 杨 侃²

(1. 洛阳市节水服务中心, 河南 洛阳 471003; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了发挥水资源综合利用的最大效益, 实现水库发电和供水效益双赢的优化调度需求, 以水库发电量最大和水库下游用水区域总缺水量最小为目标建立了多目标优化调度模型。同时, 提出改进多目标蝙蝠算法(IMOBA)用于求解多目标优化调度模型, 该算法引入外部精英蝙蝠集 EBS() 来存储算法寻优过程中的非劣解, 设计一种基于混沌原理的脉冲发射率生成机制来增强算法的搜索能力, 并加入变异操作以提高算法的种群多样性。将改进多目标蝙蝠算法应用在洛河流域故县水库, 得到丰、平、枯三种典型年下的故县水库调度方案集。结果表明, IMOBA 算法合理有效且优于多目标蝙蝠算法(MOBA), 能较好地反映洛河流域故县水库的发电和供水要求。同时验证了多目标优化调度模型的可行性, 为流域水库多目标优化调度方案的制定提供了新途径。

关键词: 蝙蝠算法; 多目标优化; 水库调度; 洛河流域

中图分类号: TV697.1⁺2

文献标志码: A

1 概况

近年来, 河南省洛阳市社会经济呈持续、高速发展态势, 城市化进程不断加快。随着经济发展和人口增加, 城市用水量不断攀升。在北方缺水地区, 虽然汛期水量丰富, 但非汛期水量严重不足。洛阳市主要属于伊洛河流域, 其中洛河流域内故县水库为主要的水源地, 其水资源的合理开发调度直接关系到洛阳市水资源利用的可持续发展。故县水库总库容 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 兴利库容 $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$, 正常蓄水位 534.8 m, 极限死水位 495 m。水库汛期分为前汛期和后汛期, 7~8 月为前汛期, 9~10 月为后汛期。防洪限制水位前汛期 7~8 月为 527.3 m, 后汛期 9~10 月为 534.3 m^[1]。在缺乏流域区域统一调度的情况下, 洛阳市工农业及生活供水与水库发电用水矛盾日益突出。因此, 通过水库调控发挥水资源综合利用的最大效益, 实现多个目标的均衡就成为一个重要的问题。为此, 本文提出了一种改进多目标蝙蝠算法(IMOBA), 为获得均匀分布的 Pareto 最优前沿,

构建了外部精英蝙蝠集来存储算法寻优过程中的非劣解, 并提出了外部精英蝙蝠集的规模维护措施; 再采用基于混沌原理的脉冲发射率生成机制来提高算法的搜索性能; 最后, 加入变异操作来增强种群的多样性, 避免算法早熟; 进而将 IMOBA 算法应用于洛河流域故县水库的多目标优化调度问题中, 以期制定水库多目标优化调度方案提供理论依据。

2 面向发电和供水的水库多目标优化调度模型

2.1 目标函数

水库需考虑水库和下游用水区域用水需求, 各目标相互协调, 以求发挥水资源综合利用的最大效益。发电和供水目标具体如下。

水库总发电量 f_1 最大:

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^T N_t \Delta t = \max \sum_{t=1}^T k Q_t^{\text{LEC}} H_t \Delta t \quad (1)$$

水库下游用水区域总缺水量 f_2 最小:

收稿日期: 2020-03-08, 修回日期: 2020-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417006); 山西省水利科学技术项目计划; 云南省水利厅科技项目

作者简介: 史利杰(1963-), 男, 高级工程师, 研究方向为水资源规划与管理, E-mail: lyslj6308@163.com

通讯作者: 杨侃(1965-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水资源规划与管理, E-mail: kyang@hhu.edu.cn

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T E_t = \min \sum_{t=1}^T \begin{cases} Q_{Bt} - C_{Dt} & C_{Dt} < Q_{Bt} \\ 0 & C_{Dt} \geq Q_{Bt} \end{cases} \quad (2)$$

式中, T 为调度时段总数; N_t 为水库 t 时刻出力, kW; Δt 为单个调度时长, h; k 为水库的出力系数; Q_t^{LEC} 为水库 t 时刻发电流量, m^3/s ; H_t 为水库 t 时刻平均发电水头, m; E_t 为水库 t 时刻水库下游用水区域总缺水量; Q_{Bt} 为 t 时刻水库下游用水区域需水量, m^3/s ; C_{Dt} 为 t 时刻水库可供给下游的用水量, m^3/s 。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。计算公式为:

$$S_{Vt} = S_{Vt-1} + (Q_t^{\text{IN}} - Q_t^{\text{OUT}}) \Delta t \quad (3)$$

(2) 水库下泄流量约束。计算公式为:

$$Q_t^{\min} \leq Q_t^{\text{OUT}} \leq Q_t^{\max} \quad (4)$$

$$Q_t^{\text{OUT}} = Q_t^{\text{LEC}} + Q_t^{\text{F}} \quad (5)$$

(3) 水位约束。计算公式为:

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

(4) 水库水头。计算公式为:

$$H_t = Z_t - Z_t^{\text{down}} \quad (7)$$

(5) 出力约束。计算公式为:

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max} \quad (8)$$

式中, S_{Vt} 为水库 t 时刻的蓄量, m^3 ; Q_t^{IN} 为水库 t 时刻的入库流量, m^3/s ; Q_t^{OUT} 、 Q_t^{\min} 、 Q_t^{\max} 分别为 t 时刻水库下泄流量、允许最小和最大下泄流量, m^3/s ; Q_t^{F} 为水库 t 时刻弃水流量, m^3/s ; Z_t 、 Z_t^{\min} 、 Z_t^{\max} 分别为 t 时刻水库水位、允许最小和最大水位, m; Z_t^{down} 为 t 时刻水库下游水位, m; N_t 、 N_t^{\min} 、 N_t^{\max} 分别为 t 时刻水库出力、允许最小和最大出力, kW。

3 改进多目标蝙蝠算法

3.1 外部精英蝙蝠集的构建及规模维护

多目标算法在寻优过程中会不断生成非劣解,为了存储这些非劣解,需引入精英个体保留机制,构造外部精英蝙蝠集 EBS(),设 EBS() 最多可存储 N_E 个非劣解。将第 g 代产生的非劣解 n_{exi}^g 存入 EBS() 时,步骤如下。

步骤 1 将第 g 代非劣解 n_{exi}^g 和外部精英蝙蝠集 EBS() 所有个体进行支配关系比较。保留非支配个体存放在 EBS() 中。

步骤 2 若 EBS() 中的解超过了 N_E , 则需按下式对 EBS() 进行规模维护:

$$C_{\text{Crowd}_i} =$$

$$\begin{cases} 10 \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_{\text{Fit}_{1,j}} - F_{\text{Fit}_{2,j}}}{F_{\text{Fit}_{\max,j}} - F_{\text{Fit}_{\min,j}}} \right)^2 & i = 1 \\ \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_{\text{Fit}_{i-1,j}} - F_{\text{Fit}_{i+1,j}}}{F_{\text{Fit}_{\max,j}} - F_{\text{Fit}_{\min,j}}} \right)^2 & i \in [2, N_E] \\ 10 \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_{\text{Fit}_{N_E,j}} - F_{\text{Fit}_{N_E+1,j}}}{F_{\text{Fit}_{\max,j}} - F_{\text{Fit}_{\min,j}}} \right)^2 & i = N_E + 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, C_{Crowd_i} 为第 i 个非劣个体的拥挤距离; $F_{\text{Fit}_{i,j}}$ 为第 i 个非劣个体对第 j 个优化目标的求解值; $F_{\text{Fit}_{\max,j}}$ 、 $F_{\text{Fit}_{\min,j}}$ 分别为外部精英蝙蝠集中对第 j 个优化目标的最大、最小求解值。

步骤 3 重复步骤 1~2,直到第 g 代产生的非劣解 n_{exi}^g 全部进行了判断筛选。

当非劣解数目超过存储规模 N_E 时,每加入一个新个体均计算拥挤度距离,删除拥挤距离最小的个体。即采取一种“ $N_E + 1$ ”^[2]的方式对 EBS() 规模进行维护来保持非劣解集的分布均匀性。首先需将外部精英蝙蝠集 EBS() 中 $N_E + 1$ 个非劣解根据第 j 个优化目标值进行大小顺序排列。为了保持外部精英蝙蝠集的种群多样性,需优先保留位于外部精英蝙蝠集两端的解,尽量选择淘汰中间位置的个体。拥挤距离计算公式见式(9)。

3.2 混沌脉冲发射率生成机制

将 Sinusoidal 映射^[3]用于蝙蝠算法的脉冲发射率 r_j ,使它成为 $0 \sim 1$ 之间的混沌数。Sinusoidal 映射混沌变量生成方式为:

$$x_j^{g+1} = \mu (x_j^g)^2 \sin(\pi x_j^g) \quad g = 1, 2, \dots, g_{\max} \quad (10)$$

式中, x_j^g 为混沌变量; μ 为控制参数; j 为种群中蝙蝠个体的编号; g 为算法迭代次数; g_{\max} 为最大迭代次数。

当 $\mu = 2.3$ 、 $x_j^0 = 0.7$ 时,式(10)可简化为 $x_j^{g+1} = \sin(\pi x_j^g)$ ($g = 1, 2, \dots, g_{\max}$)。

生成 $(0, 1)$ 区间内 N_P 个不同的初始值(N_P 为种群规模),根据式(10)进行迭代可产生 N_P 个轨迹互不相同的混沌序列,然后将混沌变量赋值给脉冲发射率 r_j^g 。

3.3 变异操作

在迭代后期种群多样性降低,算法极易陷入局部最优解。为了增加种群多样性,使算法恢复搜索能力,又增加了变异操作。首先设定变异率 W ,然后根据下式对外部精英蝙蝠集随机选择的 $W N_E$ 个非劣个体进行变异操作:

$$X_{j,\text{EAS}}^g = X_{R_1,\text{EAS}}^g + \delta (X_{R_2,\text{EAS}}^g - X_{R_3,\text{EAS}}^g) \quad (11)$$

式中, $X_{j,\text{EAS}}^g$ 为第 g 代变异产生的新个体; $X_{R_1,\text{EAS}}^g$ 、 $X_{R_2,\text{EAS}}^g$ 、 $X_{R_3,\text{EAS}}^g$ 分别为第 g 代从外部精英蝙蝠集 EBS() 中任选的 3 个非劣个体; δ 为

变异系数,是(0,1)之间的随机数。

变异操作完成后再对外部精英蝙蝠集进行更新及维护。

3.4 算法流程

IMOBAl 算法流程见图 1。

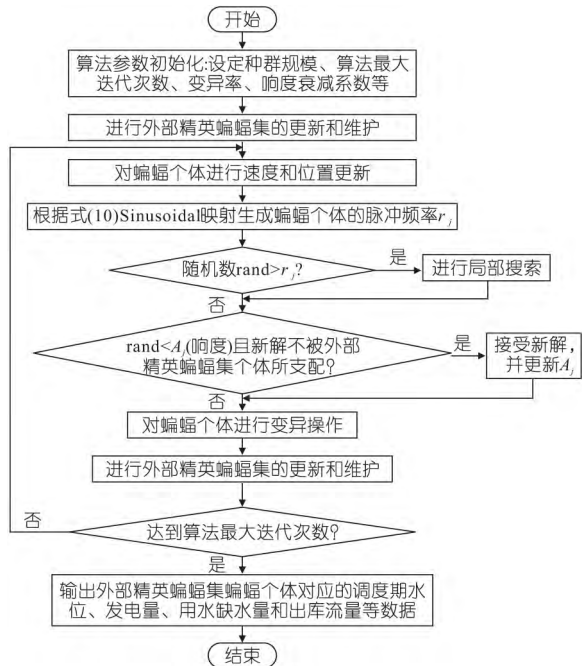


图 1 IMOBAl 算法流程

Fig.1 Flowchart of IMOBAl algorithm

4 故县水库优化调度

4.1 数据与参数选取

根据《洛阳市水资源调查》、《洛阳市各县(市)用水总量控制指标》、《洛阳市水资源公报》和相关行业发展规划预测洛阳市生活、生产和农业等部

门的需水量,然后按用水区域供水范围进行整理,得到规划水平年 2030 年来水频率分别为 $P=20\%$ (丰水年)、 $P=50\%$ (平水年)、 $P=75\%$ (枯水年)时的需水过程。分析得水库下游用水区域总需水量=农业用水量+生活用水量+第二产业用水量+第三产业用水量。丰、平、枯典型年来水资料见表 1。

表 1 水库来水资料

Tab.1 Reservoir inflow m^3/s

月 份	丰水年 (2011 年)	平水年 (2014 年)	枯水年 (2008 年)	月 份	丰水年 (2011 年)	平水年 (2014 年)	枯水年 (2008 年)
7	12.945	6.853	27.412	1	12.945	7.995	11.041
8	24.366	16.752	14.848	2	11.041	7.615	9.137
9	304.962	175.134	15.610	3	11.803	7.615	12.564
10	38.073	25.889	21.321	4	10.280	16.752	12.945
11	55.586	17.513	14.848	5	16.752	12.183	11.422
12	41.118	16.371	12.183	6	9.518	8.376	10.280

IMOBAl 算法参数设置种群规模 $N_p=300$, 外部精英蝙蝠集规模 $N_E=20$, 算法最大迭代次数 $g_{max}=200$, 变异率为 0.2, 频率 F 在 0~1 之间变化, 响度 A 从 1 减小到 0, 响度衰减系数 $\alpha=0.9^{[4]}$ 。在运用 IMOBAl 算法求解调度模型时, 对故县水库水位 $Z_{j,t}^g$ 进行编码, 并与 IMOBAl 算法中蝙蝠位置相对应。则种群中第 j 个个体可表示为 $X_j^g=\{Z_{j,1}^g,Z_{j,2}^g,\cdots,Z_{j,t}^g,\cdots,Z_{j,T}^g\}$, 其中 g 表示迭代次数, t 为调度时刻。调度期为一年, 调度时长为一个月。

4.2 结果与分析

采用 IMOBAl 算法和 MOBA 算法求解多目标优化调度模型, 得到各来水频率下故县水库调度方案集(表 2), 调度结果见图 2。选取折中方案 11, 得到各典型年时故县水库调度过程线, 见图 3。

表 2 IMOBAl、MOBA 算法在各典型年的调度方案集

Tab.2 Non-dominated schemes obtained by three methods in different hydrological years

方 案	IMOBAl						MOBA					
	发电量/($10^8 kW \cdot h$)			缺水量/ $10^8 m^3$			发电量/($10^8 kW \cdot h$)			缺水量/ $10^8 m^3$		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
1	2.919 0	1.670 0	0.897 1	14.863 1	37.788 4	37.492 0	2.907 8	1.657 9	0.892 1	15.824 2	36.825 2	37.692 6
2	2.917 1	1.669 0	0.895 7	13.420 4	36.910 7	36.517 2	2.907 4	1.657 5	0.890 7	15.209 0	36.461 9	36.234 0
3	2.915 9	1.668 5	0.893 9	12.614 3	36.278 4	35.529 8	2.907 0	1.656 4	0.889 0	14.662 1	36.223 9	35.681 8
4	2.914 4	1.667 7	0.892 3	12.085 1	35.752 8	34.528 5	2.906 5	1.655 2	0.888 1	14.003 0	36.019 0	35.212 2
5	2.912 6	1.666 6	0.891 2	11.448 8	35.212 7	33.921 5	2.905 9	1.654 0	0.887 2	13.447 5	35.770 2	34.388 3
6	2.910 5	1.665 6	0.889 8	10.872 6	34.740 6	33.279 6	2.904 9	1.651 4	0.886 1	12.456 2	35.462 5	34.163 0
7	2.909 5	1.664 6	0.889 0	10.194 8	34.245 7	32.751 2	2.904 3	1.650 2	0.885 2	11.779 6	35.081 1	33.232 7
8	2.907 4	1.663 3	0.888 1	9.607 1	33.676 1	32.227 6	2.903 3	1.649 1	0.883 5	11.198 4	34.823 6	32.786 1
9	2.905 2	1.661 7	0.886 5	9.088 9	33.394 6	31.438 0	2.901 3	1.648 5	0.882 7	10.658 2	34.631 6	32.558 0
10	2.903 3	1.657 9	0.885 4	8.956 8	33.205 4	30.963 2	2.900 0	1.647 2	0.882 1	10.541 5	34.176 3	32.133 1
11	2.902 0	1.655 9	0.884 6	8.764 9	32.808 1	30.436 4	2.898 5	1.646 0	0.881 2	10.286 7	33.850 9	31.857 0
12	2.900 0	1.654 1	0.883 0	8.528 8	32.565 1	29.980 3	2.896 2	1.644 8	0.880 4	10.045 0	33.476 3	31.580 9
13	2.898 7	1.653 1	0.881 1	8.364 8	32.302 5	29.743 3	2.894 2	1.644 2	0.879 0	9.552 8	33.036 9	30.978 4
14	2.897 2	1.651 9	0.879 8	8.183 8	31.988 9	29.416 5	2.893 4	1.643 0	0.877 5	9.234 6	32.724 9	30.655 7
15	2.896 5	1.650 7	0.877 2	7.788 6	31.640 8	29.183 9	2.892 2	1.642 6	0.875 4	9.060 7	32.425 6	30.257 9
16	2.895 1	1.647 8	0.875 1	7.161 3	31.394 7	28.908 8	2.892 0	1.641 4	0.872 9	8.626 7	32.065 6	30.100 3
17	2.893 1	1.644 8	0.872 8	6.956 2	31.285 3	28.760 5	2.890 5	1.640 1	0.870 5	8.065 8	31.705 4	29.910 0
18	2.891 7	1.641 5	0.869 8	6.813 2	31.195 2	28.760 4	2.890 1	1.639 3	0.869 1	7.421 0	31.576 1	29.818 4
19	2.889 7	1.638 9	0.867 6	6.631 2	31.150 6	28.704 0	2.889 2	1.637 2	0.868 2	7.314 8	31.293 2	29.498 9
20	2.888 4	1.636 2	0.866 0	6.510 1	31.065 8	28.635 2	2.887 7	1.635 3	0.867 2	6.965 4	31.138 3	29.365 4

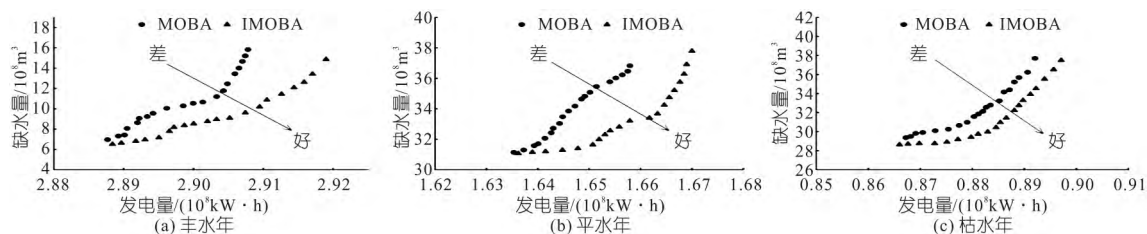


图 2 IMOBA 和 MOBA 算法在各典型年时的非劣解集比较

Fig.2 Comparison of Pareto optimal fronts of different methods in different hydrological years

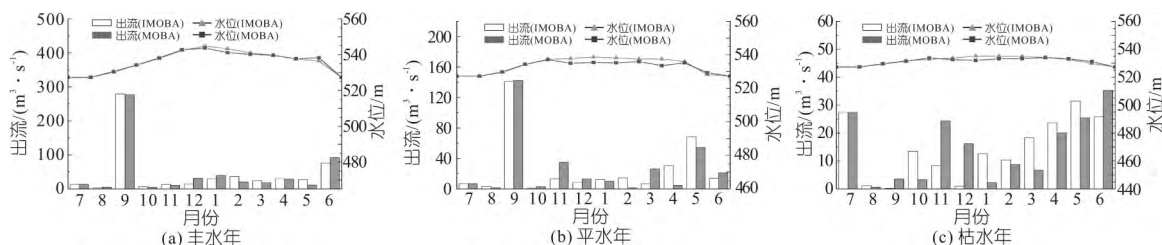


图 3 方案 11 各典型年时的故县水库调度过程线

Fig.3 Reservoir operation processes of Guxian Reservoir in different hydrological years of scheme 11

由图 2 可看出,水库调度多目标优化问题可通过 IMOBA 和 MOBA 算法求解。同时,丰、平、枯三个典型年时多目标优化问题的两个目标函数之间存在着竞争关系,发电量越大,水库下游用水区域的总缺水量也越大。丰水年年发电量大于平水年,枯水年年发电量最小。此外,当求解洛河流域的多目标问题时,MOBA 算法得到的 Pareto 非劣前沿被 IMOBA 算法所支配,说明当获得相同的年发电量时 IMOBA 算法可带来更少的缺水。如丰水年时 IMOBA 算法的方案 8 和 MOBA 算法的方案 2 中年发电量均为 $2.9074 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,然而 IMOBA 的缺水为 $9.6071 \times 10^8 \text{ m}^3$,少于 MOBA 算法得到的缺水 $15.2090 \times 10^8 \text{ m}^3$,说明 IMOBA 算法优于 MOBA 算法。同时,IMOBA 的非劣解分布范围比 MOBA 更广,说明 IMOBA 在解的多样性方面表现的更好。

由图 3 可看出,故县水库水位丰水年最高,洛河流域 7~8 月为前汛期,9~10 月为后汛期,需控制水位在防洪限制水位以下。丰水年和平水年 9 月的出库流量均很大,是因为选取的丰水年和平水年分别为 2011、2014 年,这两年的 9 月入库水量分别为 304.962 、 $175.134 \text{ m}^3/\text{s}$,远大于其他月份;各典型年时的水库调度过程线满足洛河流域多目标问题的约束条件,由此验证了 IMOBA 算法的正确性。

5 结论

a.构建了一个同时考虑年发电量最大和水库下游用水区域总缺水量最小的复杂多目标优化调度模型,为了求解多目标优化调度模型,提出了改进的多目标蝙蝠算法(IMOBA),将 IMOBA 算法应用于河南省洛阳市洛河流域故县水库,与 MOBA 算法比较,验证了 IMOBA 算法的多样性和优越性。

b.比较典型年下缺水最少方案(方案 20),发现在丰水年 IMOBA 算法比 MOBA 算法得到的缺水少 $0.4553 \times 10^8 \text{ m}^3$,同时发电量增加 $0.0007 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$;比较典型年下发电量最多的方案(方案 1),发现在枯水年 IMOBA 算法比 MOBA 算法得到的发电量增加 $0.005 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,同时缺水少 $0.2006 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。可见,与 MOBA 相比,IMOBA 算法可在产生相同年发电量的情况下减少水库下游用水区域的缺水。

参考文献:

- [1] 史艳华. 基于河流健康的水库调度方式研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2008.
- [2] 卢有麟. 流域梯级大规模水电站群多目标优化调度与多属性决策研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [3] GANDOMI A H, XIN-SHE YANG. Chaotic bat algorithm [J]. Journal of computational science, 2014, 5(2): 224-232.
- [4] XIN-SHE YANG. Bat algorithm for multi-objective optimisation[J]. International journal of bio-inspired computation, 2011, 3(5): 267-274.

(下转第 82 页)

- A. Gaussian process regression for forecasting battery state of health[J]. Journal of power sources, 2017, 357: 209-219.
- [8] 马发民, 张林, 王锦彪. 粒子群算法的改进及其在优化函数中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(7): 1252-1255.
- [9] BONYADI M R, MICHALEWICZ Z. Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review[J]. Evolutionary computation, 2017, 25(1): 1-54.

Deformation Prediction Model of High Arch Dam Based on Particle Swarm Optimization and Gaussian Process Regression and Its Application

ZHANG Heng¹, LIU Chun-gao²

(1. Jilin Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changchun 130021, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the deformation problem of high arch dam, this paper presents a prediction model of high arch dam deformation by using particle swarm optimization to optimize the parameters of Gauss process regression. Based on the characteristics of Gauss process regression, the low-dimensional nonlinear relationship can be projected into the high-dimensional linear space through the kernel function, and the Gauss process regression model is used to characterize the nonlinearity between water pressure, temperature, time and other factors and the dam deformation. At the same time, aiming at the problem of low efficiency in solving the hyper-parameters of the Gaussian process regression model in iteration process, particle swarm optimization algorithm is adopted to search the hyper-parameters of the model, which improves the solution efficiency. The fitting prediction results of radial displacement of a high arch dam show that the Gaussian process regression model based particle swarm optimization can better represent the relationship between input factors and deformation, and predict the deformation of dam body as well as the error is within the allowable range of engineering. Thus, the method can be applied to the prediction and analysis of dam deformation.

Key words: high arch dam; deformation; Gaussian process regression; particle swarm optimization; prediction model

(上接第 32 页)

Lateral Hyporheic Exchange Process in Stratified Soil

HU Shu-heng¹, ZHU Xin-li², JIANG Qi-hao¹, ZHANG Zhong-tian¹, JIN Guang-qiu¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to study the effect of layered soil medium on the exchange of lateral sub-surface flow in riparian zone, the influence of layered soil medium on the exchange of groundwater and lateral subsurface flow was studied by field experiment and numerical simulation. The results show that the existence of layered soil medium has a certain influence on groundwater, the existence of silt layer has a great influence on the exchange of groundwater in riverbed, and the existence of embankment seepage prevention hinders the exchange of groundwater between riparian water and lateral groundwater.

Key words: lateral hyporheic exchange; stratified soil; silt; embankment anti-seepage

(上接第 58 页)

An Improved Multi-objective Bat Algorithm for Reservoir Operation in Luohe River

SHI Li-jie¹, SU Lv-wen², YANG Kan²

(1. Luoyang Water-saving Service Center, Luoyang 471003, China; 2. College of Hydrology and Water

Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to maximize profits of comprehensive utilization of water resources and realize optimal operation of power generation and water supply, a multi-objective operation model was established by maximizing power generation and minimizing the total shortage of water in the lower reaches of reservoir area. The improved multi-objective bat algorithm (IMOB) was proposed to solve the multi-objective optimal scheduling model. In IMOB, the external elite bat set EBS() was added to preserve non-dominant solutions. Meanwhile, a pulse emission rate based on chaos theory was adopted to enhance the searching ability of the algorithm. Furthermore, the mutation operation was designed to improve population diversity. The IMOB was applied to Guxian Reservoir in Luohe River Basin to obtain operation schemes in different hydrological years. The results show that the IMOB algorithm outperforms the multi-objective bat algorithm (MOBA). The results are reasonable and effective, and it can better reflect the power generation and supply requirements of Guxian Reservoir in Luohe River Basin. The feasibility of multi-objective operation model is verified, which provides an effective approach for solving the multi-objective optimal scheduling problem.

Key words: bat algorithm; multi-objective optimization; reservoir operation; Luohe River Basin