

群居蜘蛛优化算法在水文频率 曲线参数优化中的应用

吴光琼

(云南省水文水资源局 丽江分局, 云南 丽江 674199)

摘要: 利用一种新型群体智能仿生算法——群居蜘蛛优化算法(SSO)优化水文频率曲线参数,以云南省丽江仁里站和总管田站年径流量数据为例进行实例研究,分别将离差平方和准则(OLS)、离差绝对值和准则(ABS)以及相对离差平方和准则(WLS)作为SSO算法最优适应度函数对皮尔逊Ⅲ型分布参数进行优化,优化结果与粒子群优化算法(PSO)、矩法进行对比。结果表明:利用SSO算法优化仁里站和总管田站得到的OLS、ABS、WLS均优于PSO算法及矩法,比矩法提高了11%以上。SSO算法具有收敛速度快、全局寻优能力强等特点,基于SSO算法的优化适线法能够降低水文频率的分析误差,有效提高理论频率曲线与实测数据的拟合精度,是一种可行的水文频率分析方法。

关键词: 群居蜘蛛优化算法;水文频率分析;优化适线法;参数优化

中图分类号:P338.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)06-0123-04

Application of social spider optimization algorithm in parameter optimization of hydrological frequency curve

WU Guangqiong

(Lijiang Bureau of Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Lijiang 674199, China)

Abstract: The paper used a new kind of swarm intelligent bionic algorithm——communal spiders optimization (SSO) to optimize hydrologic frequency curve parameter. Taking the runoff data at Renli and Zongguan station along Lijiang of Yunnan Province as an example for case study, the paper respectively let the square error criterion (OLS), deviation of absolute value and criterion (ABS) and relative deviation square and criterion (WLS) as SSO algorithm optimal adaptation degree function to optimize Pearson type III distribution parameters. Then it compared the optimized results with that of particle group optimization algorithm (PSO) and moment method. The results show that SSO, WLS and OLS at Renli station and Zongguan station are better than PSO algorithm and ABS algorithm, the result increased by more than 11%. SSO algorithm has fast convergence speed and strong global search optimization ability and so on. Based on that the optimal curve fitting method of SSO algorithm can decrease the analysis error of hydrological frequency and effectively improve the accuracy of theoretical frequency curves with measured data fitting, so it is a feasible analysis method of hydrological frequency.

Key words: social spider optimization algorithm (SSO); hydrological frequency analysis; optimal curve fitting method; parameter optimization

水文频率计算成果的可靠性对于水利工程规划设计与防洪安全具有重要意义。我国自20世纪60年代以来一直采用皮尔逊Ⅲ型曲线(P-Ⅲ分布)对水文频率进行分析计算,其中参数估计精度的高低

对于水文频率计算成果的可靠性起着关键性作用。目前,P-Ⅲ型分布的参数估计方法较多,如极大似然估计法^[1]、积分变换矩法^[2]、最大熵原理法^[3]以及矩法、权函数法等传统适线法^[4-5]。适线法一直

是我国估计洪水频率曲线参数的主要方法,但该方法在实际应用中存在受参数初值影响较大以及求解收敛速度慢等问题^[6]。近年来,随着智能算法理论体系的不断发展,智能算法不断被尝试用于水文频率分析领域,如遗传算法^[7-8]、粒子群优化算法^[9-10]、蚁群算法^[11]、SCEM-UA 优化算法^[12]以及模拟退火算法^[13]等,在水文频率曲线参数优化中取得了较好的应用效果。群居蜘蛛优化(Social Spider Optimization, SSO)算法是文献[14]提出的一种群体智能进化算法,该算法基于群居蜘蛛中个体与群体协作行为的模拟,算法其考虑两个不同的搜索动因:雄性和雌性。按照性别,个体分属于两种不同的进化算子,并在群体内模仿不同的协作行为。该算法具有较好的收敛速度和全局搜索能力,在与 PSO 算法、人工蜂群算法众多函数极值寻优的比较中,SSO 算法显示出较大的性能优势。目前在函数优化^[14]、防洪优化调度^[15]等领域得到应用。

本文利用 SSO 算法优化水文频率曲线参数,以云南省丽江仁里站和总管田站年径流量数据为例进行实例研究,将离差平方和最小准则(OLS)、离差绝对值和最小准则(ABS)以及相对离差平方和最小准则(WLS)作为 SSO 算法最优适应度函数对皮尔逊 III 型分布参数进行优化,优化结果与 PSO 算法和矩法进行对比,旨在克服传统适线法在实际应用中存在的不足,为水文频率计算分析提供一种新的途径和方法。

1 优化模型

1.1 群居蜘蛛优化算法

群居蜘蛛(Social Spider)是一类倾向群居的蜘蛛物种,个体间保持有复杂的协作行为准则,根据雌雄执行多种任务,如捕食,交配,蜘蛛网设计及群体协作等。群居蜘蛛由个体和蜘蛛网络组成,个体分为雄性和雌性两种类别。种群依据个体雌雄分配不同的任务,个体之间通过直接或间接的协作将有用信息通过蜘蛛网络传递给群居中的其他个体,并将此信息编码成振动的强弱在个体间进行协作。振动的强弱可被群居中个体解码成不同的信息,如猎物的大小,相邻个体特征等,而振动的强度取决于蜘蛛的重量和距离。SSO 算法在真实模拟群居蜘蛛群体内不同协作行为的基础上,引入新的计算机制,有效避免了目前常规群算法中存在的早熟收敛和局部极值问题^[14]。在解决连续变量优化问题时,SSO 算法是以迭代的方式不断地寻找最优值,最重个体蜘蛛

所处的位置即优化问题的解。

假设整个搜索空间为蜘蛛网络,每个潜在解即为搜索空间中蜘蛛所处的位置。依据雄性和雌性的搜索机制,每个个体分属于两种不同的进化算子,并在群体内模仿不同的协作行为。参考文献[10],SSO 算法步骤可归纳如下:

Step1 设搜索空间的维度 n ,雌性蜘蛛 N_f ,雄性蜘蛛 N_m 以及总种群数量 N 。定义 N_f 及 N_m 为:

$$N_f = \text{floor}[(0.9 - \text{rand} \times 0.25)N] \quad (1)$$

$$N_m = N - N_f \quad (2)$$

式中:rand 为 $[0,1]$ 上的随机数;floor(\cdot) 为实数到整数的映射。

Step2 设种群 S 由 N 个蜘蛛个体组成, N 由两个子群的 F 、 M 组成。随机初始化雌性蜘蛛($F = \{f_1, f_2, \dots, f_{N_f}\}$) 和雄性蜘蛛($M = \{m_1, m_2, \dots, m_{N_m}\}$), 则 $S = \{s_1 = f_1, s_2 = f_2, \dots, s_{N_f} = f_{N_f}, s_{N_f+1} = m_1, s_{N_f+2} = m_2, \dots, s_N = m_{N_m}\}$, 定义交配半径 r 由下式表示:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (p_j^{\text{high}} - p_j^{\text{low}})}{2n} \quad (3)$$

式中: P_j^{high} 和 P_j^{low} 分别为第 j 个变量雌性蜘蛛上下限值。

Step3 计算每一个蜘蛛的重量 w_i :

$$w_i = \frac{J(s_i) - \text{worst}_s}{\text{best}_s - \text{worst}_s} \quad (4)$$

式中: $J(s_i)$ 是蜘蛛 i 所在位置对应的目标函数适应度值; $\text{best}_s = \max_{i \in \{1,2,\dots,N\}} (J(s_i))$, $\text{worst}_s = \min_{i \in \{1,2,\dots,N\}} (J(s_i))$ 。

Step4 根据协作机制按式(5)移动雌性蜘蛛:

$$\begin{cases} f_i^{k+1} = f_i^k + \alpha \cdot \text{Vibc}_i \cdot (s_c - f_i^k) + \\ \quad \beta \cdot \text{Vibb}_i \cdot (s_b - f_i^k) + \\ \quad \delta(\text{rand} - 0.5), \text{ if } r_m < PF \\ f_i^{k+1} = f_i^k - \alpha \cdot \text{Vibc}_i \cdot (s_c - f_i^k) - \\ \quad \beta \cdot \text{Vibb}_i \cdot (s_b - f_i^k) + \\ \quad \delta(\text{rand} - 0.5), \text{ else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 、 β 、 δ 及 rand 均为 $[0,1]$ 上的随机数; k 为当前迭代次数; s_c 、 s_b 分别为最近个体 i 的较好重量和最佳重量;振动因子 Vibc_i 、 Vibb_i 分别由式(6)、式(7)表示:

$$\text{Vibc}_i = w_c \cdot e^{-d_{i,c}^2} \quad (6)$$

$$\text{Vibb}_i = w_b \cdot e^{-d_{i,b}^2} \quad (7)$$

式中: $w_c > w_i$; $w_b = \max_{k \in \{1,2,\dots,N\}} (w_k)$; $d_{i,j} = \|s_i - s_j\|$ 。

Step5 根据协作机制按式(8) 移动雄性蜘蛛:

$$\begin{cases} m_i^{k+1} = m_i^k + \alpha \cdot Vibf_i \cdot (s_f - m_i^k) + \\ \delta \cdot (\text{rand} - 0.5), \text{ if } w_{N_f+i} > w_{N_f+m} \\ m_i^{k+1} = m_i^k + \alpha \left(\frac{\sum_{h=1}^{N_m} m_h^k \cdot w_{N_f+h}}{\sum_{h=1}^{N_m} w_{N_f+h}} - m_i^k \right), \text{ else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: s_f 为最近雌蜘蛛个体重量; 振动因子 $Vibf_i$ 可由式(9) 表示:

$$Vibf_i = w_f \cdot e^{-d_f^2} \quad (9)$$

式中: w_f 为常量。

Step6 在交配过程中, 以每个个体重量定义交配概率, 越重的蜘蛛个体具有获得繁育后代更大的概率。本文按轮盘赌法确定概率 ps_i :

$$ps_i = \frac{w_i}{\sum_{j \in T^g} w_j} \quad (10)$$

Step7 判断是否满足停止条件, 若满足则算法结束; 否则, 返回 step3。

1.2 优化适线法

优化适线法是依据一定的适线准则, 求解与经验频率曲线配合最好的理论频率曲线统计参数的方法。按照我国水利水电工程设计洪水计算规范, 设计水文频率曲线适线准则有离差平方和最小准则(OLS)、离差绝对值和最小准则(ABS)以及相对离差平方和最小准则(WLS)。本文分别采用 OSL、ABS、WLS 3 种适线准则, 其水文频率曲线适线的目标函数数学表达式分别为:

$$S(\hat{\theta}) = \min \sum_{i=1}^n \{x_i - \bar{x}[1 + C_v \varphi(C_s, P_i)]\}^2 \quad (11)$$

$$S(\hat{\theta}) = \min \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}[1 + C_v \varphi(C_s, P_i)]| \quad (12)$$

$$S(\hat{\theta}) = \min \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}[1 + C_v \varphi(C_s, P_i)]}{x_i} \right)^2 \quad (13)$$

式中: $S(\hat{\theta})$ 为适线准则目标函数值; $\hat{\theta}$ 为待优化参数, $\hat{\theta} = [\bar{x}, C_v, C_s]$, 其中 \bar{x} 为序列均值, C_v 为变差系数, C_s 为偏态系数; n 为系列长度; x_i 为序列值; φ 为离均系数, 为 C_s 和频率 P_i 的函数, 可查 P-III 分布离均系数表或进行数值计算得到。

1.3 优化步骤

SSO 算法确定 P-III 型曲线统计参数的实现步骤如下:

Step1 设定待优化参数 $\hat{\theta} = [\bar{x}, C_v, C_s]$ 的搜寻范围, 并确定 SSO 算法的适应度函数, 本文将上述式(11)~式(13) 作为适应度函数。

Step2 初始化算法参数。参数初始化。设置种群规模 N , 迭代次数 T , 阈值 PF , 雌性蜘蛛上下限系数 P_j^{high} 及 P_j^{low} , 算法搜索空间。

Step3 SSO 算法寻优操作。按上述 SSO 算法进行最优个体寻优, 直至满足算法迭代终止条件。

Step4 输出最优个体值和全局极值, 即最优蜘蛛个体所处的空间位置 $\hat{\theta} = [\bar{x}, C_v, C_s]$ 及所对应的适应度值 $S(\hat{\theta})$, 算法结束。

2 实例应用

本文收集了云南省丽江马过河仁里站 1967 - 2013 年和五郎河总管田站 1959 - 2013 年的实测年径流量资料进行水文频率分析, 并对序列进行“三性”分析, 使其符合水文频率分析计算要求。基于 MatlabR2011b 软件环境, 依据上述优化步骤, 利用 SSO 算法确定 P-III 型曲线统计参数, 并与 PSO 算法及矩法参数计算结果进行对比。其中, SSO 算法参数设置如下: 最大迭代次数 $T = 100$, 种群规模 $N = 50$; 阈值 $PF = 0.55$, $P_j^{high} = 0.9$, $P_j^{low} = 0.65$; \bar{x} 搜索空间为 $[0, 100]$; C_v, C_s 搜索空间为 $[0, 10]$ 。PSO 算法参数设置为: 最大迭代次数 $T = 100$, 种群规模 $N = 50$; 惯性因子 $\omega = 0.7298$, 局部学习因子、全局学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, 个体速度限制为 $[-5, 5]$; 搜索空间为 $[0, 100]$; C_v, C_s 搜索空间为 $[0, 10]$ 。各算法参数计算结果见表 1, 并给出 SSO 与 PSO 算法进化过程对比图 1~6。

(1) 从表 1 可以看出, 利用 SSO 算法优化仁里站和总管田站得到的 OLS、ABS、WLS 结果均优于 PSO 算法及矩法。对于仁里站, 基于 OSL 准则、ABS 准则、WLS 准则的 SSO 算法目标函数值分别为 8.1099、15.5447、0.1006, 精度分别比矩法提高了 16.7%、11.2%、32.4%; 对于总管田站, 基于 OSL 准则、ABS 准则、WLS 准则的 SSO 算法目标函数值分别为 54.1506、32.9667、0.0492, 精度分别比矩法提高了 22.7%、13.9%、16.9%。表明采用 SSO 算法优化 P-III 型曲线参数可以有效提高理论频率曲线与实测数据的拟合精度, 获得比传统适线法更好的适线效果。

(2) 从图 1~6 来看, 无论是仁里站还是总管田站, 基于 OSL 准则、ABS 准则、WLS 准则的 SSO 算法比 PSO 算法具有更快的收敛速度和更优的全局寻

优能力。SSO算法在进化到第10~30代时就收敛到全局最优解,而PSO算法需要进化到第60~90

代时才收敛到相对全局最优解,表明SSO算法具有较高的收敛精度和全局寻优能力。

表1 SSO算法与PSO算法、传统适线法适线结果比较

适线准则	算法	仁里站				总管田站			
		均值 $\bar{x}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变差系数/ C_V	偏态系数/ C_S	$S(\hat{\theta})$	均值 $\bar{x}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变差系数/ C_V	偏态系数/ C_S	$S(\hat{\theta})$
OLS	SSO	10.195	0.339	0.594	8.1099	28.171	0.350	0.717	54.1506
	PSO	10.198	0.340	0.589	8.1164	28.185	0.350	0.704	54.2023
	矩法	10.150	0.340	0.650	9.7352	28.030	0.350	0.630	70.0615
ABS	SSO	10.273	0.345	0.729	15.5447	28.267	0.355	0.742	32.9667
	PSO	10.253	0.342	0.723	15.6068	28.272	0.354	0.735	33.0048
	矩法	10.150	0.340	0.650	17.5000	28.030	0.350	0.630	38.2700
WLS	SSO	10.166	0.342	0.665	0.1006	28.113	0.349	0.672	0.0492
	PSO	10.192	0.339	0.624	0.1018	28.110	0.349	0.678	0.0494
	矩法	10.150	0.340	0.650	0.1490	28.030	0.350	0.630	0.0592

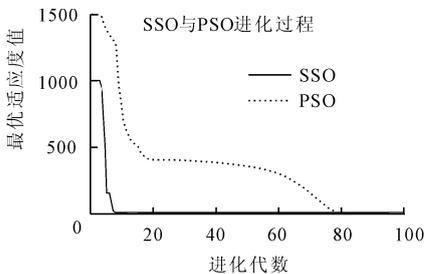


图1 仁里站进化过程图(OLS 准则)

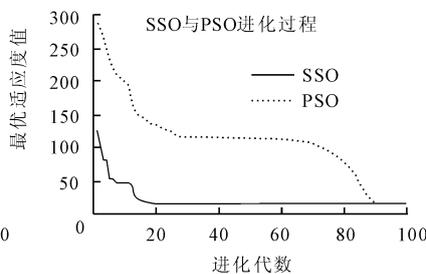


图2 仁里站进化过程图(ABS 准则)

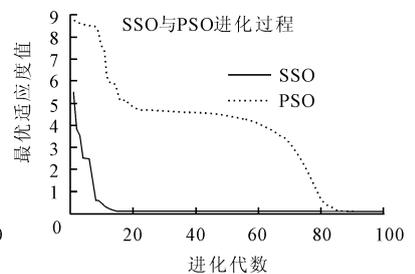


图3 仁里站进化过程图(WLS 准则)

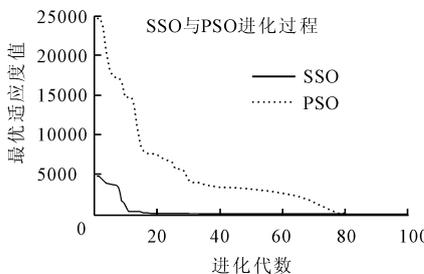


图4 总管田站进化过程图(OLS 准则)

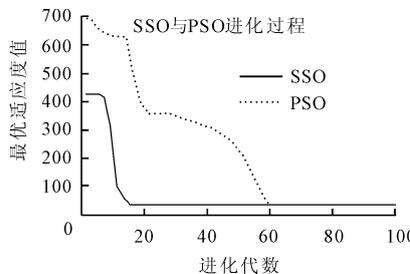


图5 总管田站进化过程图(ABS 准则)

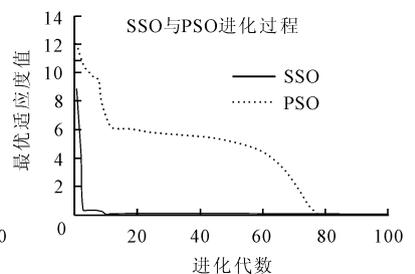


图6 总管田站进化过程图(WLS 准则)

(3)从优化结果来看,基于OSL准则、ABS准则、WLS准则的P-Ⅲ型曲线参数寻优结果略有差异,因此在实际应用中可依据需要选择适合的适线准则。

3 结 语

利用一种全新的仿生群体智能算法——SSO算法优化水文频率曲线参数,以云南省丽江仁里站、总管田站年均流实测数据为例进行实例研究,并与PSO算法及矩法进行对比,结果表明:

(1)SSO算法具有收敛速度快、收敛精度高和全局寻优能力强等特点。利用SSO算法寻优P-Ⅲ型曲线参数,实现了P-Ⅲ型曲线参数 \bar{x}, C_V, C_S 的

自动确定,有效提高了理论频率曲线与实测数据的拟合精度,为水文频率计算分析提供一种新的途径和方法。

(2)从两个实例应用效果来看,基于OSL准则、ABS准则、WLS准则的SSO算法的模拟精度均比矩法提高了11%以上,保证了水文频率曲线参数的优选质量,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 余洪悦,贺信. P-Ⅲ曲线的极大似然估计及应用[J]. 人民长江, 2012, 43(6): 21-23.

- 布[J]. 抚顺石油学院学报, 1997, 17(3): 27-30+63.
- [5] 庄健, 王洪臣, 刘国华, 等. 曝气密度对曝气系统充氧性能的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7): 50-54.
- [6] Gimbut J, Rielly C D, Nagy Z K. Modelling of mass transfer in gas-liquid stirred tanks agitated by Rushton turbine and CD-6 impeller: a scale-up study [J]. Chemical engineering research and design, 2009, 87(4): 437-451.
- [7] Achouri R, Mokni I, Mhiri H, et al. A 3D CFD simulation of a self-inducing Pitched Blade Turbine Downflow[J]. Energy conversion and management, 2012, 64(12): 633-641.
- [8] Yang Ning, Wu Zongying, Chen Jianhua, et al. Multi-scale analysis of gas-liquid interaction and CFD simulation of gas-liquid flow in bubble columns[J]. Chemical engineering science, 2011, 66(14): 3212-3222.
- [9] 于江忠, 单继宏, 孙毅, 等. 微孔曝气器膜片最优开孔数的数值模拟[J]. 机械制造, 2014, 52(1): 10-12.
- [10] 肖柏青, 张法星, 戎贵文. 气泡尺寸对曝气池内气液两相流数值模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2006-2010.
- [11] Simonnet M, Gentric C, Olmos E, et al. CFD simulation of the flow field in a bubble column reactor: Importance of the drag force formulation to describe regime transitions [J]. Chemical engineering and processing: process intensification, 2008, 47(9-10): 1726-1737.
- [12] 吴莹莹. 氧化沟流场和溶解氧 CFD 模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [13] 张士乔, 尹则高, 毛根海. 弯曲圆形管道紊流的数值模拟[J]. 水力发电学报. 2005, 24(3): 61-65.
- [14] 周俊波, 刘洋. FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [15] Zhang D, Deen N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: a study of closures for turbulence and interface forces[J]. Chemical engineering science, 2006, 61(23): 7593-7608.
- [16] Dhotre M T, Niceno B, Smith B L. Large eddy simulation of a bubble column using dynamic sub-grid scale model [J]. Chemical engineering journal, 2008, 136(2-3): 337-348.

(上接第126页)

- [2] 张明, 柏绍光. 对数正态分布参数估计的积分变换矩法应用[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 21-23.
- [3] 肖可以, 宋松柏. 最大熵原理在水文频率参数估计中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 197-205.
- [4] 金光炎. 水文频率分析述评[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 319-327.
- [5] 谢平, 郑泽权. 水文频率计算有约束加权适线法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 49-52.
- [6] 周爱霞, 张行南. 优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 38-39.
- [7] 韩振英. 遗传优化电子适线法推算最大设计洪峰流量[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(1): 44-47.
- [8] 任伯帜, 龙腾锐. P-III型分布参数估计的改进混合遗传优化适线法[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(4): 85-85+89.
- [9] 刘力, 周建中, 杨俊杰, 等. 粒子群优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 水文, 2009, 29(2): 21-23.
- [10] 姚德仓, 宋松柏. 设计洪水频率曲线的粒子群优化适线法研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 112-115.
- [11] 李宏伟, 宋松柏. 蚁群算法在水文频率曲线参数计算中的应用[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 38-40.
- [12] 陈南祥, 甘甜, 杜青辉. SCEM-UA 优化算法在水文频率分析中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 210-214.
- [13] 宋松柏, 康艳. 3种智能优化算法在设计洪水频率曲线适线法中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 205-209.
- [14] Cuevas E, Cienfuegos M, Zaldívar D, et al. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider, Expert Systems with Applications, 2013, 40(16): 6374-6384.
- [15] 王文川, 雷冠军, 尹航, 等. 基于群居蜘蛛优化算法的水库防洪优化调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 48-51.