

# 基于新型蝙蝠算法-投影寻踪模型的文山州水量分配方法

崔东文, 金 波

(云南省文山州水务局, 云南 文山 663000)

**摘要:**基于公平和效率原则,构建文山州水量分配指标体系和水量分配投影寻踪(PP)模型。针对 PP 模型最佳投影方向难以确定的不足,利用新型蝙蝠算法(NBA)搜寻 PP 模型最佳投影方向,构建 NBA-PP 水量分配模型对文山州 8 县(市)水量进行分配。通过 5 个典型测试函数对 NBA 算法进行仿真验证,仿真结果与基本蝙蝠算法(BA)、人工蜂群算法(ABC)、布谷鸟搜索(CS)算法和差分进化算法(DE)进行对比。结果表明:通过引入生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制的 NBA 算法能有效平衡全局搜索和局部开发能力,寻优效果优于 DE、CS、ABC 和 BA 算法,具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的收敛稳定性与收敛可靠性;NBA-PP 模型水量分配结果较目前分类权重法分配结果更科学、客观。

**关键词:**水量分配;指标体系;新型蝙蝠算法;投影寻踪;文山州

**中图分类号:**P426.616      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2017)02-0055-08

**A water allocation method based on novel bat algorithm-projection pursuit model and its application in Wenshan Autonomous Prefecture**//CUI Dongwen, JIN Bo (Wenshan Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

**Abstract:** Based on the principles of fairness and efficiency, an index system and a projection pursuit (PP) model were constructed for water allocation in Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture. The novel bat algorithm (NBA) was integrated into the PP model to solve the problem of the difficulty in determining the optimal projection direction. The established NBA-PP model was used for water allocation in eight counties in Wenshan. Five typical testing functions were used to validate the results of the NBA algorithm. The simulation results were compared with the results from the basic bat algorithm (BA), the artificial bee colony algorithm (ABC), the cuckoo search algorithm (CS), and the differential evolution algorithm (DE). The results show that the NBA algorithm can effectively balance the global search and local development abilities by introducing habitat selection strategy and the self-adaptive echo-Doppler effect mechanism. Compared with the DE, CS, ABC, and BA algorithms, the NBA algorithm performs better in optimization, and it shows a higher convergence rate, higher precision, better convergence stability, and better convergence reliability. The water allocation results using the NBA-PP model are more scientific and objective than using other classification methods.

**Key words:** water allocation; index system; novel bat algorithm; projection pursuit; Wenshan Autonomous Prefecture

区域水量分配是实行最严格水资源管理的一项重要内容,目前广泛采用的定额法、层次分析法和分类权重法<sup>[1]</sup>等方法概念清晰明确,但权重选取的主观性等问题使水量分配结果存在一定的不确定性,精度较低。如定额法以社会经济资料及用水定额为基础进行水量分配,主要遵行公平性原则,但忽略了效率性原则;层次分析法主要体现影响各分水指标的优先次序和权重,可适度兼顾公平与效率原则,但在判别分水指标优先次序时主观随意性强;分类权重法在水量分配时对不同的用水类别分别赋予不同的权重和优先次序,可适度体现各用水区域用水定

额及用水效率之间的差异,但在确定用水指标权重和优先次序时存在主观任意性。其他方法,如多因子综合分析法<sup>[2]</sup>、模糊层次分析法<sup>[3]</sup>等用于水量分配取得了不错的分配效果。投影寻踪(projection pursuit,PP)是一种高维数据的降维处理技术,通过一定的数学变换,可将高维数据变换为易于处理的包含高维空间信息的低维数据<sup>[4]</sup>,在解决小样本、超高维等问题中具有明显优势<sup>[5-6]</sup>。本文构建 PP 模型进行文山州的水资源量分配,首先需要选择一个合适的方法来优选最佳投影方向。目前,除遗传算法(GA)<sup>[7-8]</sup>、粒子群优化算法(PSO)<sup>[9]</sup>用于优化

PP 模型最佳投影方向外,也尝试将人工鱼群算法 (AFSA)<sup>[10]</sup>、人工蜂群算法 (ABC)<sup>[11]</sup>、混合蛙跳算法 (SFLA)<sup>[12]</sup>、蚁群优化算法 (ACO)<sup>[13]</sup>、鸡群优化算法 (CSO)<sup>[14]</sup> 等用于 PP 模型最佳投影方向的选取,并取得了较好的应用效果。蝙蝠算法 (bat algorithm, BA) 是剑桥大学学者 Yang<sup>[15]</sup> 于 2010 年提出的一种群体智能启发式搜索算法,该算法模仿大自然中蝙蝠通过超声波搜索、捕食猎物的生物学特性,是一种随机全局优化算法,具有模型简单、收敛速度快、可并行处理等特点。然而,BA 算法同样存在早熟收敛和易陷入局部最优解等不足。新型蝙蝠算法 (novel bat algorithm, NBA) 是 Meng 等<sup>[16]</sup> 于 2015 年基于生物学角度提出的一种优化算法,该算法在 BA 中引入了生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制,具有较好的收敛精度和全局寻优能力,在函数优化性能上优于 BA、PSO、DE 等优化算法。

本文构建新型蝙蝠算法-投影寻踪 (NBA-PP) 水量分配模型,力求对文山州水资源量进行更加科学合理分配。

1 水量分配指标体系

水量分配过程涉及范围广,属多目标多层次决策问题。本文结合区域实际,基于公平性原则和效率性原则,选取水资源可利用量、总人口、GDP 等 10 个分水指标构建水量分配指标体系,见表 1。

2 NBA-PP 水量分配模型

2.1 PP 模型

PP 模型用于水量分配简要算法过程如下<sup>[4,17-18]</sup>：

步骤 1 数据预处理。设水量分配数据集为  $\{x_{ij} \mid i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m\}$ , 为避免水量分配指标归一化后出现 0 的情形,对于正向指标采用下式进行数据处理：

$$x_{ij} = 0.1 + 0.8 \frac{x_{ij} - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}} \tag{1}$$

式中： $x_{ij}$  为第  $i$  个分水区域第  $j$  个分水指标值； $x_{jmax}$ 、 $x_{jmin}$  分别为第  $j$  个分水指标的最大、最小值； $n$ 、 $m$  分别为分水区域总数及分水指标数目。

步骤 2 构造投影指标函数。PP 方法就是将  $m$  维数据  $\{x_{ij} \mid j=1,2,\cdots,m\}$  综合成  $a=(a_1,a_2,\cdots,a_m)$  为投影方向的一维投影值  $z_i$ ：

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \tag{2}$$

式中  $a$  为单位长度向量。

步骤 3 优化投影指标函数。将搜寻最优投影方向问题转化为非线性最优求解问题,即：

$$\begin{cases} \max Q(a) = S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \quad a_j \in [0,1] \end{cases} \tag{3}$$

式中： $S_z$  为投影值  $z_i$  的标准差； $D_z$  为投影值  $z_i$  的局部密度。 $S_z$ 、 $D_z$  表达式参见文献<sup>[14,18]</sup>。

步骤 4 计算投影值。将最佳投影方向  $a$  代入式(2)得到投影值  $z_i$ 。

2.2 BA 算法

BA 算法所模仿的蝙蝠利用超声波来探测、定位、捕食猎物等一系列行为可抽象为蝙蝠的速度、位置更新和响度、脉冲速率更新两个过程<sup>[19-20]</sup>。设搜索空间为  $D$  维,第  $i$  只蝙蝠在  $t$  时刻第  $j$  维空间中的位置为  $x_{t,ij}$ ,速度为  $v_{t,ij}$ ,则在  $t+1$  时刻的位置  $x_{t+1,ij}$  和速度  $v_{t+1,ij}$  更新公式为

$$\begin{aligned} f_{ij} &= f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})R \\ v_{t+1,ij} &= v_{t,ij} + (x_{t,ij} - x_*)f_{ij} \end{aligned} \tag{4}$$

其中  $x_{t+1,i} = x_{t,i} + v_{t+1,i}$  (5)

式中： $f_{ij}$  为第  $i$  只蝙蝠在第  $j$  维空间当前时刻发出的脉冲频率,  $f_{ij} \in [f_{\min}, f_{\max}]$ ； $x_*$  为当前最优解； $R$  为  $(0,1)$  范围内的随机数。

蝙蝠在接近目标的过程中,会适时调整超声波的响度与脉冲频率。蝙蝠  $i$  的脉冲响度  $A_i$  和发射

表 1 水量分配指标体系

| 原则    | 指标                 | 单位       | 含 义                             |
|-------|--------------------|----------|---------------------------------|
| 公平性原则 | 水资源可利用量 $C_1$      | 亿 $m^3$  | 正向指标,区域水资源供给总量                  |
|       | 总人口 $C_2$          | 万人       | 正向指标,表征区域人口规模大小                 |
|       | GDP $C_3$          | 亿元       | 正向指标,表征区域经济规模大小                 |
|       | 农业有效灌溉面积 $C_4$     | 万 $hm^2$ | 正向指标,一般年景下可进行正常灌溉的面积            |
|       | 水利实施供水能力 $C_5$     | 亿 $m^3$  | 正向指标,表征区域水利实施供水能力大小             |
|       | 年度用水总量 $C_6$       | 亿 $m^3$  | 正向指标,表征年度区域实际用水量大小              |
| 效率性原则 | 人均综合用水量 $C_7$      | $m^3$    | 正向指标,总用水量与总人口的比值,表征区域人均综合用水水平   |
|       | 农业用水比重 $C_8$       | %        | 负向指标,农业用水量与总用水量的比值,表征区域节水潜力大小   |
|       | 万元 GDP 用水量 $C_9$   | $m^3$    | 负向指标,工业用水量与工业增加值的比值,表征区域工业用水水平  |
|       | 农田灌溉水利用系数 $C_{10}$ |          | 正向指标,灌溉净用水量与渠首取水量的比值,表征区域农业用水水平 |

注:由于文山州生态用水量仅占年度用水总量的 0.3% 左右,故生态用水指标未在该指标体系中反映。

速率  $r_i$  可按下式进行更新:

$$A_{t+1,i} = \alpha A_{t,i} \quad (6)$$

$$r_{t+1,i} = r_{0,i} [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (7)$$

式中:  $\alpha, \gamma$  为常量,  $0 < \alpha < 1, \gamma > 0$ ;  $A_{t,i}, A_{t+1,i}$  分别为第  $t$  次迭代和第  $t+1$  次迭代时蝙蝠发射脉冲的音量;  $r_{t+1,i}$  为蝙蝠个体  $i$  在第  $t$  次迭代时的脉冲速率;  $A_i = 0$  时, 意味着蝙蝠  $i$  刚刚发现一只猎物。在当  $t \rightarrow \infty$  时,  $A_{t,i} \rightarrow 0, r_{t,i} \rightarrow r_{0,i}$ 。

### 2.3 NBA 算法

自然界中, 蝙蝠能随着生境的不同而调整自己的超声波脉冲参数, 这使它们能在多个生境中有效地活动。NBA 算法引入了生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制, 使算法对高维空间具有更强的适应力。

除 BA 算法理想化规则外, NBA 算法补充了以下 2 个理想化规则<sup>[16]</sup>: ①所有蝙蝠可以在不同的生境中觅食, 这取决于随机选择; ②所有蝙蝠都可以在回声多普勒效应中进行补偿, 并依据目标接近程度自适应地调整补偿率。

设种群规模为  $N$  的蝙蝠在  $D$  维搜索空间进行觅食, NBA 算法的简要数学描述如下:

**a. 生境选择策略。**蝙蝠生境的选择模型是基于量子行为与机械行为之间的选择, 选择随机决定,  $P \in [0, 1]$  代表选择的阈值, 若随机数  $R < P$ , 则蝙蝠将选择量子行为, 在更广阔的空间中觅食; 否则, 蝙蝠将选择机械行为, 在有限的范围内觅食。①蝙蝠的量子行为: 具有量子行为特性的蝙蝠能在大范围内寻找目标, 取  $P = 0.5$ , 其在  $t+1$  时刻的位置可以表述如下:

$$x_{t+1,ij} = \begin{cases} g_{t,j} + \theta |M_{t,j} - x_{t,ij}| \ln\left(\frac{1}{R}\right) & R < 0.5 \\ g_{t,j} - \theta |M_{t,j} - x_{t,ij}| \ln\left(\frac{1}{R}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $g_{t,j}$  为  $t$  时刻最佳蝙蝠位置;  $\theta$  为收缩膨胀系数;  $M_{t,j}$  为第  $t$  时刻平均适应度函数值,  $M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t,ij}$ 。②蝙蝠的机械行为: 基于多普勒效应, 第  $i$  只蝙蝠在  $t+1$  时刻第  $j$  维空间中的位置和速度更新公式为

$$v_{t+1,ij} = w v_{t,ij} + (g_{t,j} - x_{t,ij}) f_{ij} \quad (9)$$

$$x_{t+1,ij} = x_{t,ij} + v_{t,ij} \quad (10)$$

其中  $f_{ij} = \frac{c + v_{t,ij} f_{ij}^*}{c + v_{t,ij}} \left(1 + C_i \frac{g_{t,j} - x_{t,ij}}{|g_{t,j} - x_{t,ij}| + \varepsilon}\right)$   
 $f_{ij}^* = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) R$

式中:  $w$  为惯性权重系数;  $\varepsilon$  为较小常数, 避免分母为 0;  $C_i \in [0, 1]$ , 0 表示不进行回声多普勒效应补

偿, 而 1 表示完全补偿;  $c$  为声速,  $c = 340 \text{ m/s}$ ;  $v_{t,ij}^*$  为  $t$  时刻全局最优位置上的速度, 但不超过  $c$ 。

**b. 蝙蝠的多普勒效应机制。**蝙蝠在接近目标时, 会增加脉冲发射频率、降低音量以增强局部搜索的精准度。位置调整后每只蝙蝠的新位置可按下式进行更新:

$$x_{t+1,ij} = g_{t,j} [1 + R(0,1)] \quad R(0,1) > r_i \quad (11)$$

$$\sigma^2 = |A_{t,i} - A_i| + \varepsilon \quad (12)$$

式中:  $R(0,1)$  为满足平均值为 0、标准差为 1 的高斯分布的随机数;  $A_i$  为  $t$  时刻所有蝙蝠的平均音量。

**c. 更新频率判定系数  $G$ 。**脉冲响度和脉冲发射率的更新频率判定系数  $G$  是 NBA 算法中的重要参数, 表示当所有蝙蝠在迭代次数达到判定系数  $G$  时尚未搜索到比前一次更好的位置时所采取的音量和脉冲发射率更新方式。若  $G$  设置过小, 则不利于算法快速收敛到全局最优; 而  $G$  若设置过大, 可能使算法陷入局部最优, 这里建议  $G$  的取值范围在区间  $[2, 50]$ 。

### 2.4 NBA-PP 水量分配实现步骤

NBA-PP 模型水量分配实现步骤可归纳如下:

**步骤 1** 构建水量分配指标体系, 利用式 (1) 进行指标一致性处理。

**步骤 2** 确定目标函数。由于 NBA 算法是求解极小值, 因此将式 (3) 的倒数作为目标函数, 以下式作为适应度函数:

$$\begin{cases} \min Q'(a) = 1/(S_z D_z) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \quad a_j \in [0, 1] \end{cases} \quad (13)$$

**步骤 3** 初始化算法参数。设置蝙蝠数目  $N$ 、最大迭代次数  $T$ 、生境选择概率  $P$ 、惯性权重  $w$ 、多普勒效应补偿率  $C$ 、收缩膨胀系数  $\theta$ 、音量和脉冲发射率的更新频率  $G$  以及 BA 算法中的最大发射速率  $r_{0,i}$ 、最大脉冲响度  $A_{0,i}$ 、发射速率增加系数  $\gamma$ 、脉冲响度衰减系数  $\alpha$ 、脉冲频率范围  $[f_{\min}, f_{\max}]$ 。令  $t=0$ , 设定算法终止条件, 并在解空间内随机初始化蝙蝠初始位置  $x_{t,ij}$  ( $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, D$ )。

**步骤 4** 计算蝙蝠个体的适应度函数值, 保存当前群体中最佳位置  $g_{t,j}$ 。

**步骤 5** 若  $R < P$ , 则利用式 (8) 更新蝙蝠个体位置  $x_{t,ij}$ ; 否则, 利用式 (9) (10) 更新蝙蝠个体飞行速度  $v_{t,ij}$  和空间位置  $x_{t,ij}$ 。

**步骤 6** 若  $R > r_i$ , 则利用式 (11) (12) 更新蝙蝠个体位置  $x_{t,ij}$ 。

**步骤 7** 若更新位置后蝙蝠  $i$  优于群体中最佳蝙蝠, 则替换最佳蝙蝠个体, 并根据式 (6) (7) 调整脉冲响度  $A_i$  和发射速率  $r_i$ 。

**步骤 8** 若在更新频率  $G$  内最佳位置  $g_{t,j}$  得不到改善,则随机在 $[0.85,0.9]$  区间重新初始化脉冲响应度  $A_i$  和发射速率  $r_i$ 。

**步骤 9** 计算蝙蝠个体的适应度函数值,找到并保存当前最佳位置  $g_{t,j}$ 。判断算法是否满足终止条件,若满足,则转到步骤 10;否则,令  $t=t+1$ ,重复执行步骤 5~9。

**步骤 10** 输出最优蝙蝠所处空间位置,即最佳投影方向  $a$ 。

**步骤 11** 将最佳投影方向  $a$  代入式(2)求得各县(市)最佳投影值  $z_i$ ,将  $z_i$  归一化处理即为各县(市)水量分配权重,该权重乘以总分配水量即为各县(市)水量分配结果。

3 算法对比分析

针对 10 维优化问题,选用 5 个典型 10 维测试函数(表 2)对 NBA、BA、ABC、CS 和 DE 算法的寻优结果进行对比分析,见表 3 和图 1。表 2 中 sphere、rosenbrock、sumsquares 为单峰函数,可以测试算法开发能力的强弱;griewank、ackley 为多峰函数,搜寻范围内具有多个极值点,算法易陷入局部极值而找不到全局最值,可以测试算法的探索能力的强弱。各种算法参数设置:BA 算法  $N=50$ 、 $T=1\,000$ 、 $r_{0,i}=0.5$ 、 $A_{0,i}=0.25$ 、 $\gamma=0.9$ 、 $\alpha=0.9$ 、 $[f_{\min},f_{\max}]=[0,2]$ ; NBA 算法  $P\in[0.5,0.9]$ 、 $w\in[0.4,0.9]$ 、 $C\in[0.3,0.9]$ 、 $\theta\in[0.5,1]$ 、 $G=10$ ;  $r_{0,i}\in[0,1]$ 、 $A_{0,i}\in$

表 2 测试函数

| 函数         | 表达式                                                                                                                                               | 搜索范围         | 理论最小值 |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|
| Sphere     | $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D x_i^2$                                                                                                              | $[-100,100]$ | 0     |
| Griewank   | $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$                                     | $[-600,600]$ | 0     |
| Rosenbrock | $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D [100(x_{i+1} - x_i^2) + (x_i - 1)^2]$                                                                               | $[-30,30]$   | 0     |
| Sumsquares | $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D ix_i^2$                                                                                                             | $[-100,100]$ | 0     |
| Ackley     | $f(\mathbf{x}) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{D}\sum_{i=1}^D x_i^2}\right) - \exp\left[\frac{1}{D}\sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i)\right] + 20 + e$ | $[-32,32]$   | 0     |

表 3 各方法寻优结果对比

| 函数         | 算法  | 最优值                  | 最劣值                   | 平均值                   | 标准差                  | 成功率/% |
|------------|-----|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------|
| Sphere     | NBA | 0                    | $2.95\times10^{-300}$ | $1.64\times10^{-301}$ | 0                    | 100   |
|            | BA  | $4.82\times10^{-7}$  | $1.27\times10^{-6}$   | $7.17\times10^{-7}$   | $1.76\times10^{-7}$  | 0     |
|            | ABC | $4.71\times10^{-15}$ | $4.29\times10^{-12}$  | $6.40\times10^{-13}$  | $9.61\times10^{-13}$ | 100   |
|            | CS  | $2.83\times10^{-29}$ | $9.39\times10^{-28}$  | $3.03\times10^{-28}$  | $2.21\times10^{-28}$ | 100   |
|            | DE  | $5.31\times10^{-10}$ | $1.22\times10^{-10}$  | $2.93\times10^{-10}$  | $2.62\times10^{-10}$ | 100   |
| Griewank   | NBA | 0                    | 0                     | 0                     | 0                    | 100   |
|            | BA  | $5.91\times10^{-2}$  | 0.6007                | 0.2238                | 0.2403               | 0     |
|            | ABC | 0.1717               | 0.3619                | 0.2688                | $4.88\times10^{-2}$  | 0     |
|            | CS  | $1.09\times10^{-2}$  | $6.66\times10^{-2}$   | $3.05\times10^{-2}$   | $1.53\times10^{-2}$  | 0     |
|            | DE  | 0                    | 0                     | 0                     | 0                    | 100   |
| Rosenbrock | NBA | 0                    | $3.83\times10^{-28}$  | $5.57\times10^{-29}$  | $8.43\times10^{-29}$ | 100   |
|            | BA  | 0.0241               | 14.0558               | 1.9587                | 3.7924               | 0     |
|            | ABC | 3.9198               | 4.6463                | 4.2907                | 0.1704               | 0     |
|            | CS  | $7.51\times10^{-3}$  | 2.5221                | 0.6540                | 0.6541               | 0     |
|            | DE  | $4.68\times10^{-2}$  | 4.7530                | 1.4029                | 1.2690               | 0     |
| Sumsquares | NBA | 0                    | 0                     | 0                     | 0                    | 100   |
|            | BA  | $1.37\times10^{-6}$  | $3.63\times10^{-6}$   | $2.47\times10^{-6}$   | $6.08\times10^{-7}$  | 0     |
|            | ABC | $2.75\times10^{-14}$ | $1.68\times10^{-11}$  | $3.38\times10^{-12}$  | $4.12\times10^{-12}$ | 100   |
|            | CS  | $5.54\times10^{-29}$ | $1.71\times10^{-26}$  | $2.74\times10^{-27}$  | $3.78\times10^{-27}$ | 100   |
|            | DE  | $1.51\times10^{-42}$ | $9.03\times10^{-41}$  | $2.33\times10^{-41}$  | $2.50\times10^{-41}$ | 100   |
| Ackley     | NBA | $4.44\times10^{-15}$ | $4.44\times10^{-15}$  | $4.62\times10^{-15}$  | $1.58\times10^{-30}$ | 100   |
|            | BA  | 6.4915               | 12.1104               | 8.5281                | 7.7472               | 0     |
|            | ABC | $5.36\times10^{-7}$  | $1.57\times10^{-5}$   | $3.89\times10^{-6}$   | $3.60\times10^{-6}$  | 0     |
|            | CS  | $2.74\times10^{-13}$ | $1.73\times10^{-10}$  | $2.31\times10^{-11}$  | $4.10\times10^{-11}$ | 100   |
|            | DE  | $4.44\times10^{-15}$ | $4.44\times10^{-15}$  | $4.44\times10^{-15}$  | $1.58\times10^{-30}$ | 100   |

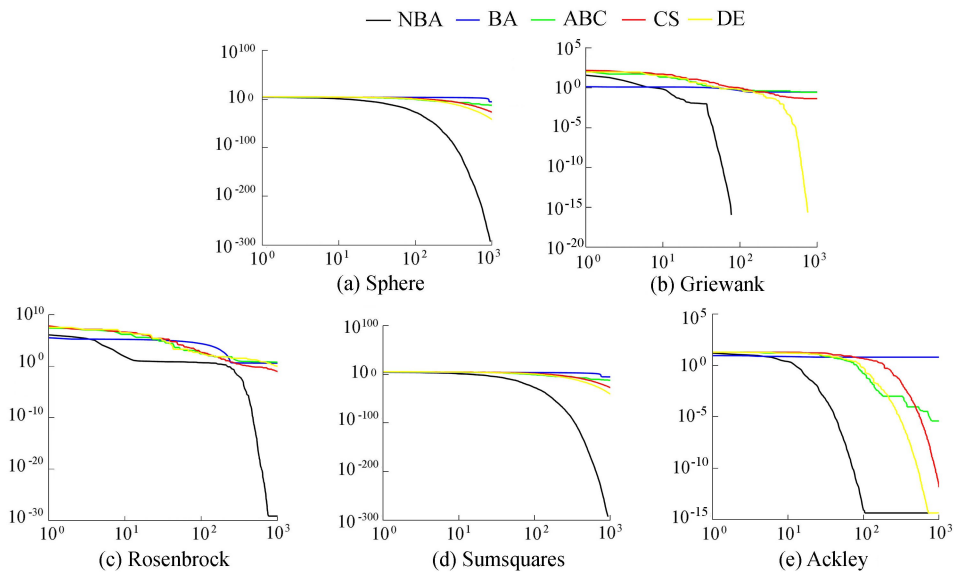


图1 各函数寻优测试曲线

$[0, 2]$ , 其余参数设置同 BA 算法; ABC 算法  $T=1000$ , 种群规模为 50, 局部循环次数为 60; CS 算法最大迭代次数为 1000, 鸟窝位置数为 25、发现概率为 0.25; DE 算法  $T=1000$ , 种群规模为 50, 上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2, 交叉率为 0.2。

用 M 语言编程对表 2 中 5 个测试函数重复进行 20 次寻优计算。从最优值、最劣值、平均值、标准差和计算成功率 5 个方面对 5 种算法进行评估, 其中寻优平均值反映算法在运行至最大迭代次数时可以达到的求解精度, 标准差反映算法的收敛稳定性, 成功率反映算法在指定精度条件下的优化可靠性。当满足下式时寻优计算结束:

$$|F - F^*| < 1 \times 10^{-10} \quad (14)$$

式中:  $F$  为函数的理论值;  $F^*$  为上述寻优计算得到的函数值。

**a.** 从表 3 来看, 对于 Sphere 函数, NBA 算法寻优精度优于 DE、CS、ABC 和 BA 算法(对比的各算法优化效果由优至劣, 下同)至少 250 个数量级以上; 对于 Griewank 函数, NBA 和 DE 算法均寻获函数的理论值, 寻优效果远远优于 CS、ABC 和 BA 算法; 对于病态单峰 Rosenbrock 函数, NBA 算法寻优精度优于 CS、DE、BA 和 ABC 算法至少 30 个数量级以上, 具有较强的算法开发能力; 对于 Sumsquares 函数, NBA 算法寻优获得了理论最优值, 寻优效果远远优于 DE、CS、ABC 和 BA 算法; 对于 Ackley 函数, NBA 和 DE 算法寻优效果相同, 寻优精度优于 CS、ABC 和 BA 算法 4 个数量级以上。比较表明, NBA 算法具有较强的探索能力, 在各测试函数的寻优比较中表现出较高的精度和全局寻优能力, 能有效克服 BA 算法陷入局部最优的不足。

**b.** NBA 算法对于 5 个测试函数的寻优成功率

均为 100%, 表现出较好的可靠性。综合比较而言, NBA 算法优化效果优于 DE、CS、ABC 和 BA 算法。

**c.** 仅就 NBA 与 BA 算法比较来看, NBA 算法通过引入生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制, 大大提高了算法的优化性能, 避免陷入局部极值, 获得了较好的局部与全局搜索能力。

**d.** 从图 1 可以看出, NBA 算法具有较好的收敛速度和极值寻优能力。对于 Griewank 和 Ackley 函数, NBA 和 DE 算法极值寻优结果相同, 但从图 1(b) 和图 1(e) 来看, NBA 算法的收敛速度明显优于 DE 算法。

经过对比分析, 验证了通过引入生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制的 NBA 算法能有效平衡全局搜索和局部开发能力, 对于 10 维优化问题具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的收敛稳定性与收敛可靠性。

## 4 文山州水量分配

### 4.1 文山州概况

文山州位于云南省东南部, 全州总面积 31456 km<sup>2</sup>, 辖文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁 7 县 1 市。境内河流分属红河流域和珠江流域, 多年平均径流深 501 mm, 水资源总量 157.7 亿 m<sup>3</sup>。2013 年云南省分解并下达文山州 2015 年、2020 年和 2030 年用水总量控制目标分别为 11.02 亿 m<sup>3</sup>、12.77 亿 m<sup>3</sup> 和 13.37 亿 m<sup>3</sup>。同年文山州完成所辖 8 县(市)2015 年、2020 年和 2030 年用水总量控制目标的分解任务。2014 年, 文山州用水总量 9.13 亿 m<sup>3</sup>, 其中, 农业、工业和生活用水量分别为 6.50 亿 m<sup>3</sup>、1.13 亿 m<sup>3</sup> 和 1.10 亿 m<sup>3</sup>, 分别占用水总量的 71.2%、12.4% 和 12.1%, 农业用水仍是文山

州第一用水大户。文山州所辖 8 县(市)用于水量分配的用水指标见表 4。

| 表 4 文山州所辖行政区水量分配指标数据 |                    |                  |                 |                     |                    |
|----------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| 县(市)                 | $C_1/\text{亿 m}^3$ | $C_2/\text{万人}$  | $C_3/\text{亿元}$ | $C_4/\text{万 hm}^2$ | $C_5/\text{亿 m}^3$ |
| 文山市                  | 7.01               | 47.3             | 176.6           | 1.748               | 2.46               |
| 砚山县                  | 4.61               | 48.3             | 99.0            | 2.004               | 1.58               |
| 西畴县                  | 2.41               | 25.8             | 25.2            | 0.696               | 0.61               |
| 麻栗坡县                 | 4.91               | 29.0             | 46.2            | 0.910               | 0.96               |
| 马关县                  | 6.12               | 38.0             | 68.9            | 1.274               | 1.27               |
| 丘北县                  | 7.28               | 48.3             | 53.1            | 1.715               | 1.82               |
| 广南县                  | 10.90              | 80.7             | 81.1            | 2.044               | 2.05               |
| 富宁县                  | 8.59               | 41.8             | 66.6            | 0.950               | 2.00               |
| 县(市)                 | $C_6/\text{亿 m}^3$ | $C_7/\text{m}^3$ | $C_8/\%$        | $C_9/\text{m}^3$    | $C_{10}$           |
| 文山市                  | 1.36               | 287.5            | 50.4            | 70.0                | 0.52               |
| 砚山县                  | 1.30               | 269.2            | 66.9            | 71.0                | 0.53               |
| 西畴县                  | 0.446              | 168.3            | 51.3            | 74.5                | 0.51               |
| 麻栗坡县                 | 0.80               | 282.8            | 82.8            | 69.0                | 0.51               |
| 马关县                  | 0.96               | 252.6            | 70.8            | 71.0                | 0.52               |
| 丘北县                  | 1.21               | 250.5            | 83.1            | 72.0                | 0.52               |
| 广南县                  | 1.67               | 206.9            | 77.6            | 75.0                | 0.52               |
| 富宁县                  | 1.35               | 323.0            | 76.0            | 75.3                | 0.52               |

4.2 水量分配模型求解

根据 NBA-PP 水量分配模型实现步骤,采用式(1)归一化后的各县(市)指标构造投影指标函数,并利用 NBA 算法求解 PP 模型最佳投影方向。将 NBA 算法连续运行 5 次,进化过程见图 2,5 次计算得到的各用水指标最佳投影方向均为  $a=(0.2503, 0.2593, 0.3681, 0.4185, 0.4074, 0.3581, 0.2156, 0.2500, 0.2583, 0.2993)$ , 最佳适应度值均为 0.00417818685499。将此最佳投影方向代入式(2),得到 8 县(市)水量分配的投影值  $z_i$  分别为 2.2515、1.8758、0.5376、0.8765、1.3024、1.4149、1.9154、1.4369,将  $z_i$  归一化处理后即为各县(市)水量分配权重,分别再乘以 2015 年、2020 年和 2030 年用水总量控制指标即可得到文山州各县(市)2015 年、2020 年和 2030 年水量分配结果。将分配结果与目前文山州“三条红线”控制指标水量分配所采用的

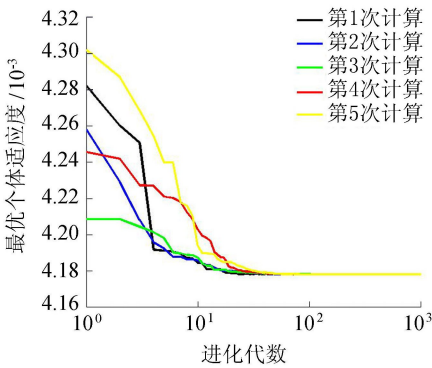


图 2 NBA 算法 5 次计算进化过程

分类权重法分配结果进行对比,见表 5。

| 表 5 文山州 8 县(市)水量分配结果 亿 m <sup>3</sup> |               |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 县(市)                                  | NBA-PP 水量分配模型 |        |        | 分类权重法  |        |        |
|                                       | 2015 年        | 2020 年 | 2030 年 | 2015 年 | 2020 年 | 2030 年 |
| 文山市                                   | 2.14          | 2.48   | 2.59   | 1.91   | 2.27   | 2.33   |
| 砚山县                                   | 1.78          | 2.06   | 2.16   | 1.57   | 1.68   | 1.77   |
| 西畴县                                   | 0.51          | 0.59   | 0.62   | 0.61   | 0.71   | 0.79   |
| 麻栗坡县                                  | 0.83          | 0.96   | 1.01   | 0.94   | 1.04   | 1.09   |
| 马关县                                   | 1.24          | 1.43   | 1.50   | 1.13   | 1.26   | 1.31   |
| 丘北县                                   | 1.34          | 1.56   | 1.63   | 1.56   | 1.56   | 1.78   |
| 广南县                                   | 1.82          | 2.11   | 2.21   | 1.81   | 2.30   | 2.45   |
| 富宁县                                   | 1.36          | 1.58   | 1.65   | 1.49   | 1.73   | 1.79   |

从图 2 可以看出,BNA 算法连续 5 次计算均迭代至 100 次就收敛到了全局最优解,且 5 次计算优化结果完全一致,再次验证了 NBA 算法具有较好的收敛速度、全局寻优能力和稳健性能。从最佳投影方向优化结果来看,农业有效灌溉面积和水利实施供水能力指标权重最大,其对水量分配影响也最大;其次为 GDP 和年度用水总量指标;剩余水资源可利用量等 6 个指标权重在 0.2500~0.2993 之间,对水量分配的影响相对较小。NBA-PP 模型水量分配结果与分类权重法分配结果存在差异,原因在于:①分类权重法仅考虑各县市 2012 年用水总量、水利工程设计供水能力,并适当兼顾各州市社会、经济发展潜力,指标偏少;②由于文山州水资源监控能力建设滞后,各县市用水量普遍采用定额法确定,与实际用水存在偏差;③分类权重法赖于社会、经济等指标的预测结果,由于总人口、GDP 等数据预测结果往往偏离实际较大,因此造成水量分配结果存在差异。从表 5 来看,2015 年除文山市、砚山县和丘北县外,其余各县两种方法的分配结果相差在 0.1 亿 m<sup>3</sup> 左右。由于文山市、砚山县经济社会较为发达,经济总量、灌溉面积等较大,水量分配结果比分类权重法分配结果多 0.2 亿 m<sup>3</sup> 左右;而从经济规模、年度用水总量等分水指标来看,丘北县水量分配结果比分类权重法分配结果少 0.22 亿 m<sup>3</sup>,更合理。从 2020 年分配结果来看,除文山市和砚山县外,其余各县两种方法的分配结果相差在 0.1 亿 m<sup>3</sup> 左右。从 2030 年分配结果来看,两种方法的分配结果差异较大,原因在于分类权重法依赖于经济社会等指标的预测结果,由于预测结果往往偏离实际较大,因此造成水量分配结果不尽科学合理。

当然,表 4 中水量分配指标均属动态指标,在实际应用中应注意适时调整指标数据,以期获得更加科学合理的水量分配结果。

5 结 论

- a. 基于公平和效率原则构建的符合区域实际的水量分配指标体系对于实行最严格水资源管理“三条红线”控制指标分解具有一定的参考意义。
- b. 通过引入生境选择策略及自适应补偿回声多普勒效应机制的 NBA 算法能有效平衡全局搜索和局部开发能力,具有较快的收敛速度、较高的寻优精度和较好的收敛稳定性与收敛可靠性。寻优效果优于 DE、CS、ABC 和 BA 算法,具有较好的应用前景。
- c. 在本文的应用中,利用 NBA 算法搜寻 PP 模型最佳投影方向,连续 5 次均获得完全相同的寻优结果,不但提高了水量分配模型的分配精度,而且为解决 PP 模型最佳投影方向提供了一种新的途径和方法。
- d. 从水量分配结果来看,NBA-PP 模型可以获得比分类权重法更科学合理的水量分配结果。在实际应用中,可根据各区域实际增加或减少水量分配指标,以及通过适时调整指标数据,以获得更科学合理且满足各分水区域要求的水量分配结果。

参考文献:

[ 1 ] 孔琼菊,方国华. 修河流域水量分配方案研究[J]. 人民长江, 2009, 40 ( 1 ): 27-30. ( KONG Qiongju, FANG Guohua. Water distribution plan of Xiu River[J]. Yangtze River, 2009, 40 ( 1 ): 27-30. ( in Chinese) )

[ 2 ] 程孟孟,陈进. 多因子综合分析模型在赣江水量分配中的应用[J]. 人民长江, 2011, 42 ( 21 ): 50-52. ( CHENG Mengmeng, CHEN Jin. Integrated multi-factor analysis model used in the Gan River water allocation[J]. Yangtze River, 2011, 42 ( 21 ): 50-52. ( in Chinese) )

[ 3 ] 郭巧玲,黄葵,杨琳洁. 黑河干流中游水量分配研究[J]. 人民黄河, 2013, 35 ( 1 ): 36-38. ( GUO Qiaoling, HUANG Kui, YANG Linjie. Study on water allocation in the middle reaches of Heihe River[J]. Yellow River, 2013, 35 ( 1 ): 36-38. ( in Chinese) )

[ 4 ] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[ 5 ] 崔东文. 正弦余弦算法-投影寻踪水污染物总量分配模型[J]. 水资源保护, 2016, 32 ( 6 ): 75-81. ( CUI Dongwen. Sine cosine algorithm-projection pursuit model for water pollutant load allocation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 ( 6 ): 75-81. ( in Chinese) )

[ 6 ] 崔东文,金波. 基于 WDO-PP 模型的文山州近 10 年水资源承载力评价[J]. 水利经济, 2016, 34 ( 6 ): 43-49. ( CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of carrying capacity of water resources of Wenshan Prefecture in latest 10 years

based on WDO-PP model [ J ]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34 ( 6 ): 43-49. ( in Chinese) )

[ 7 ] 王柏,张忠学,李芳花,等. 基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28 ( 2 ): 84-89. ( WANG Bai, ZHANG Zhongxue, LI Fanghua, et al. Comprehensive evaluation of regulated deficit irrigation using projection pursuit model based on improved double chains quantum genetic algorithm [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 ( 2 ): 84-89. ( in Chinese) )

[ 8 ] 王婷,方国华,刘羽,等. 基于最严格水资源管理制度的初始水权分配研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24 ( 11 ): 1870-1875. ( WANG Ting, FANG Guohua, LIU Yu, et al. Research of initial water rights allocation based on the most stringent water resources management system [ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 ( 11 ): 1870-1875. ( in Chinese) )

[ 9 ] 陈广洲,汪家权,解华明. 粒子群算法在投影寻踪模型优化求解中的应用[J]. 计算机仿真, 2008, 25 ( 8 ): 159-161. ( CHEN Guangzhou, WANG Jiaquan, XIE Huaming. Particle swarm optimization for solving projection pursuit model application [ J ]. Computer Simulation, 2008, 25 ( 8 ): 159-161. ( in Chinese) )

[ 10 ] 丁红,刘东,李陶. 基于改进人工鱼群算法的三江平原投影寻踪旱情评价模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26 ( 12 ): 84-88. ( DING Hong, LIU Dong, LI Tao. Projection pursuit model for evaluating drought based on improved artificial fish swarm algorithm of Sanjiang Plain [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 ( 12 ): 84-88. ( in Chinese) )

[ 11 ] 赵建强,戴青松,陈必科,等. 基于人工蜂群-投影寻踪法的南方某河水质综合评价研究[J]. 节水灌溉, 2014 ( 8 ): 49-52. ( ZHAO Jianqiang, DAI Qingsong, CHEN Blike, et al. Comprehensive evaluation of river water quality in southern China based on artificial bee colony-projection pursuit [ J ]. Water Saving Irrigation, 2014 ( 8 ): 49-52. ( in Chinese) )

[ 12 ] 王明昊,董增川,马红亮. 基于混合蛙跳与投影寻踪模型的水资源系统脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2014 ( 9 ): 31-35. ( WANG Minghao, DONG Zengchuan, MA Hongliang. Assessment of water resources system vulnerability based on shuffled frog leaping algorithm and projection pursuit model [ J ]. Water Resources and Power, 2014 ( 9 ): 31-35. ( in Chinese) )

[ 13 ] 候景伟,孔云峰,孙九林. 蚁群算法在需水预测模型参数优化中的应用[J]. 计算机应用, 2012, 32 ( 10 ): 2952-2956. ( HOU Jingwei, KONG Yunfeng, SUN Jiulin. Application of ant colony algorithm for parameter optimization of water demand prediction model [ J ]. Journal of Computer Applications, 2012, 32 ( 10 ): 2952-2956. ( in Chinese) )

- [14] 崔东文. 鸡群优化算法-投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展, 2016, 35(2): 16-23. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of flood and drought disasters based on chicken swarm optimization algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 35(2): 16-23. (in Chinese))
- [15] YANG Xinshe. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[C]//GONZALEZ J R, PELTA D A. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 65-74.
- [16] MENG Xianbing, GAO X Z, LIU Yu, et al. A novel bat algorithm with habitat selection and Doppler effect in echoes for optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42: 6350-6364.
- [17] 余航, 王龙, 文俊, 等. 基于投影寻踪原理的云南旱灾评估[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8): 267-270. (YU Hang, Wang Long, WEN Jun, et al. Assessment on drought disaster in Yunnan Province based on the principle of projection pursuit method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(8): 267-270. (in Chinese))
- [18] 崔东文, 郭荣. SSO-PP 模型在水源地安全保障达标评价中的应用[J]. 水利经济, 2015, 33(5): 8-13. (CUI Dongwen, GUO Rong. Application of SSO-PP model in security standard evaluation of water sources[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(5): 8-13. (in Chinese))
- [19] 刘长平, 叶春明. 具有 Lévy 飞行特征的蝙蝠算法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(3): 240-246. (LIU Changping, YE Chunming. Bat algorithm with the characteristics of Lévy flights[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(3): 240-246. (in Chinese))
- [20] 李煜, 马良. 新型全局优化蝙蝠算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(9): 225-229. (LI Yu, MA Liang. Bat-inspired algorithm: a novel approach for global optimization[J]. Computer Science, 2013, 40(9): 225-229. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-12-29 编辑: 郑孝宇)

(上接第 36 页)

- [5] 张亮, 李志川, 张学伟, 等. 垂直轴潮流能水轮机研究与利用现状[J]. 应用能源技术, 2011(9): 1-7. (ZHANG Liang, LI Zhichuan, ZHANG Xuewei, et al. The status of research and application of vertical axis tidal turbine[J]. Applied Energy Technology, 2011(9): 1-7. (in Chinese))
- [6] 张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状 2013[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 53-68. (ZHANG Liang, LI Xinzong, GENG Jing, et al. Tidal current energy update 2013[J]. Advances in new and Renewable Energy, 2013, 1(1): 53-68. (in Chinese))
- [7] 王树杰, 鹿兰帅, 李冬, 等. 潮流发电帆翼式柔性叶片水轮机实验研究[J]. 海洋工程, 2009, 27(1): 83-89. (WANG Shujie, LU Lanshuai, LI Dong, et al. Experimental investigation on sail-winged flexible blade turbine[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(1): 83-89. (in Chinese))
- [8] 李凤来, 张亮, 张洪雨, 等. 70 kW 潮流电站水轮机研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [9] 盛其虎, 罗庆杰, 张亮. 40 kW 潮流电站载体设计[C]//中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会成立大会暨第一届学术讨论会论文集. 杭州: 中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会, 2008: 159-168.
- [10] 张楠. 漂浮式潮流电站叶轮与锚泊系统设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [11] 张亮, 孙科, 罗庆杰. 潮流水轮机导流罩的水动力设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(7): 734-737. (ZHANG Liang, SUN Ke, LUO Qingjie. Hydrodynamic design of diversion cover for a tidal-stream hydro turbine[J]. Journal of Harb in Engineering University, 2007, 28(7): 734-737. (in Chinese))
- [12] 罗庆杰, 张亮, 孙科. UDF 控制滑移网格方法在摆线式直叶水轮机性能预报中的应用[C]//中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会成立大会暨第一届学术讨论会文集. 杭州: 中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会, 2008: 124-132.
- [13] 付士凤, 李龙, 邓力, 等. 基于滑移网格的垂直轴潮流水轮机的三维数值模拟[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 140-143. (FU Shifeng, LI Long, DENG Li, et al. CFD simulation of vertical axis tidal turbine based on sliding mesh[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 140-143. (in Chinese))
- [14] 李允武. 海洋能源开发[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [15] 胡玉仙. 基于 FLUENT 软件的泵站进出水流道流动模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [16] 周俊波. Fluent 6.3 流场分析: 从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- (收稿日期: 2015-12-15 编辑: 熊水斌)

