

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.009

基于萤火虫算法和熵权法的水资源优化配置

张 凯, 沈 洁

(河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100)

摘要:以经济、社会、环境综合效益最大为目标建立多目标水资源优化配置模型,利用熵权法计算得到多目标的客观权重系数,采用主观权重与客观权重相结合的方式得到综合权重,避免了仅由人的主观因素确定权重而形成的偏差,结合实例利用萤火虫算法对所建立的模型进行仿真。结果表明:萤火虫算法具有较快的收敛速度和较高的寻优性能,能有效地找到最优解,为解决复杂水资源优化配置问题提供了新思路。

关键词:萤火虫算法;熵权法;综合权重;水资源;优化配置

中图分类号:TV213 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)03-0050-04

Optimal allocation of water resources based on firefly algorithm and entropy method

ZHANG Kai, SHEN Jie

(College of Computer and Information Technology Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A multi-objective model of optimal allocation of water resources was set up based on the maximum overall goals with regard to economic, social, and environmental benefits. The objective weighting factor was obtained with the entropy method, and the comprehensive weight was obtained through a combination of subjective and objective weights, avoiding the weight distribution deviation caused by subjective factors. The firefly algorithm was used to solve the model in a case study. The results show that the algorithm has a higher convergence speed and higher capability in finding the optimal solution, and thus can provide a new method of dealing with complex optimal allocation of water resources.

Key words: firefly algorithm; entropy method; comprehensive weight; water resources; optimal allocation

随着经济社会的发展和环境的变化,水资源短缺问题日益严峻,水资源优化配置已成为水资源科学发展的必然趋势。由于水资源多目标确定的标准没有明显的界线,指标、指标权重的选择等都具有模糊性和不确定性,单项指标的评价会因遗漏有用信息而导致偏差。笔者将信息论中熵值理论应用于水资源优化配置,建立基于熵权法^[1]的多目标水资源优化配置模型,把熵权所反映的客观权重与主观权重相结合确定出综合权重,兼顾主观偏好与客观属性,使评价结果更加合理。近年来许多学者对水资源优化配置模型求解进行了深入研究^[2-6],其中智能优化算法已在该领域得到广泛应用^[4,6]。比如遗传算法^[4]、蚁群算法^[5]、粒子群算法^[6]已经被应用到

水资源优化配置模型的求解中。新的智能优化算法——萤火虫算法(firefly algorithm, FA)被提出并得到了应用^[7-9],但该算法解决水资源优化配置的研究尚较少,笔者利用可变步长萤火虫算法建立水资源优化配置模型,丰富了智能优化算法在复杂水资源优化配置中的应用。

1 多目标水资源优化配置模型

水资源优化配置的一般模型为

$$\begin{cases} Z = \max \{ F(x) \} \\ G(x) \leq 0 \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z 为综合效益最大值; $F(x)$ 为综合效益函数;

作者简介:张凯(1987—),男,硕士研究生,研究方向为水利信息化。E-mail:dxzysk@sina.com

$G(x)$ 为约束条件集; x 为决策变量。

1.1 目标函数

先把研究区分为多个不同的子区, 每个子区包含多个供水水源和多个需水用户。根据区域内各水源的供水范围, 又可将水源划分成两类^[4]: 公共水源和独立水源。不失一般性, 假设区域内有 K 个子区, 子区 k 内有 $I(k)$ 个独立水源, $J(k)$ 个用水部门, 区域内共有 M 个公共水源。水资源优化配置的最终目标是水资源与经济、社会、生态环境和谐可持续发展, 因此构建目标函数:

$$F(x) = \text{opt}[f_1(x), f_2(x), f_3(x)] \quad (2)$$

式中: $F(x)$ 为综合效益函数; $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 分别为社会效益、经济效益、环境效益函数。

为了便于对优化模型进行求解, 对式(2)中的 3 个变量进行加权求和:

$$F(x) = \sum_{j=1}^3 \omega_j^* f_j(x) \quad (3)$$

式中, ω_j^* 为综合权重系数, 表示第 j 个目标相对于其他目标的重要性程度。

a. 经济效益函数 $f_1(x)$ 以区域供水带来的直接经济效益最大来表示。

$$f_1(x) = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[\sum_{i=1}^{I(k)} (e_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_{ij}^k + \sum_{m=1}^M (e_{mj}^k - c_{mj}^k) x_{mj}^k \alpha_{mj}^k \right] \beta_j^k \sigma_j^k \right\} \quad (4)$$

式中: x_{ij}^k 、 x_{mj}^k 分别为独立水源 i 、公共水源 m 给 k 子区 j 用户供水量, m^3 ; e_{ij}^k 、 e_{mj}^k 分别为独立水源 i 、公共水源 m 给 k 子区 j 用户供水的效益系数, $\text{元}/\text{m}^3$; c_{ij}^k 、 c_{mj}^k 分别为独立水源 i 、公共水源 m 给 k 子区 j 用户供水费用系数, $\text{元}/\text{m}^3$; α_{ij}^k 、 α_{mj}^k 分别为独立水源 i 、公共水源 m 给 k 子区 j 用户供水持续系数; β_j^k 为 k 子区 j 用户的权重系数; σ_j^k 为 k 子区 j 用户的用水公平系数。

b. 社会效益函数 $f_2(x)$ 采用区域总缺水量最小来间接反映社会效益。

$$f_2(x) = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} [D_j^k - (\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{m=1}^M x_{mj}^k)] \right\} \quad (5)$$

式中, D_j^k 为 k 子区 j 用户的需水量, m^3 。

c. 生态环境效益函数 $f_3(x)$ 选用重要污染物的排放量最小表示环境效益。因各地的排污情况不同, 重要污染物的选择也应有所区别, 可以选择 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、石油类、汞(Hg)等, 假设污染物总数共有 N 种。

$$f_3(x) = \min \left[0.01 \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{n=1}^N \rho_{jn}^k \theta_{jn}^k \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{m=1}^M x_{mj}^k \right) \right] \quad (6)$$

式中: ρ_{jn}^k 为 k 子区 j 用户的排放重要污染物 n 的质量浓度, mg/L ; θ_{jn}^k 为 k 子区 j 用户排放重要污染物 n 的排放系数。

1.2 约束条件

1.2.1 供水、需水约束

供水约束、需水约束可以参考文献[4]中关于模型约束条件的说明确定。

1.2.2 协调发展约束

区域发展的协调程度是反映区域可持续发展的协调状态水平的指标, 是对经济、社会、生态环境发展水平和状态相互协调程度的度量。可通过设置区域协调度最低值来约束区域发展程度:

$$\begin{cases} \mu \geq \mu_0 \\ \mu = \sqrt{\mu_1 \mu_2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \mu_1 = \begin{cases} 1.0 & \lambda \geq \lambda_0 \\ \exp[-4(\lambda - \lambda_0)^2] & \lambda < \lambda_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda = \sum_{k=1}^K u_k \xi_k \quad (10)$$

$$\xi_k = \sum_{j=1}^{J(k)} \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{m=1}^M x_{mj}^k \right) / \sum_{j=1}^{J(k)} D_j^k \quad (11)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{k=1}^K [(T_k^0/P_k^0)/(T_k/P_k)]}{e^{1-A}} \quad (12)$$

式中: μ 为区域协调度; μ_0 为区域协调度最低值; μ_1 为水资源利用与区域经济发展的协调度; μ_2 为经济发展与水环境质量改善的协调度; λ_0 为水资源利用与经济发展的最佳比值; λ 为所有子区供水量与需水量之比的加权和; ξ_k 为 k 子区供水量与需水量之比; u_k 为 λ_k 的相对权重; T_k^0 、 T_k 分别为 k 子区基准年和规划水平年的国内生产总值, 元; P_k^0 、 P_k 分别为 k 子区基准年和规划水平年的总人口, 人; A 为水环境综合指数。

2 综合权重系数

水资源优化配置是多目标优化问题, 怎样区分实际模型中不同目标的重要性, 就是要确定多目标的权重系数。熵权法是由综合指标的重要性和指标提供的信息量这两方面来确定各指标的最终权重的, 是客观权重。本文采用主观和客观相结合的方式确定水资源多目标的权重系数, 称之为综合权重系数。求解各指标综合权重系数的过程为

a. 构造 m 个待评项目, n 个评价指标, 形成原始数据矩阵 X :

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

b. 对矩阵 X 归一化得到矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中, r_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值, $r_{ij} \in [0, 1]$ 。

对于大者为优的收益性指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (15)$$

而对于小者为优的成本性指标:

$$r_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (16)$$

c. 计算第 j 个指标下第 i 个项目的指标值的概率:

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (17)$$

d. 计算第 j 个指标的熵值 e_j :

$$e_j = -\lambda \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (18)$$

其中

$$\lambda = \frac{1}{\ln m} \quad (19)$$

e. 计算第 j 个指标的熵权 ω_j :

$$\omega_j = (1 - e_j) / \sum_{k=1}^n (1 - e_k) \quad (20)$$

$$0 \leq \omega_j \leq 1 \quad \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$$

f. 确定指标的综合权重。熵权是客观权重,而主观权重可以反映专家组对评价指标的偏好。将两者结合既可反映客观情况,又可以体现专家组对评价指标的偏好。假设评估者将主观权重确定为 $\alpha_j, j=1, 2, \dots, n$, 结合指标的熵权 ω_j 就可以得到指标 j 的综合权重 ω_j^* :

$$\omega_j^* = \frac{\alpha_j \omega_j}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \omega_i} \quad (21)$$

3 萤火虫算法

萤火虫算法是由 YANG^[7] 于 2008 年提出的一种新型智能优化算法,来源于对萤火虫群体行为的简化和模拟。在萤火虫算法中,每个萤火虫代表问题的一个可行解,并把解的适应度表征为该萤火虫的亮度(荧光素值),每次迭代每个萤火虫在其感知范围内搜索比自身亮的个体构建邻域集并以轮盘赌的方式随机向其移动,所有萤火虫移动完后,根据自身邻域集大小更新各自感知半径,同时更新亮度进入下一轮迭代。通过多次迭代,萤火虫将聚集在多个较亮个体周围。以连续函数优化为例说明可变步

长萤火虫算法步骤如下:

步骤 1: 设定算法参数如最大迭代次数等。在解空间内随机构建 $m \in N$ 个可行解 $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_m$, 其中 $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}), 1 \leq i \leq m$, 它们分别对应 m 个萤火虫的位置。

步骤 2: 初始化萤火虫 i 的初始亮度 $l_i(t)$ (t 为算法迭代次数) 为目标函数 $f(\vec{x})$ 在该处的函数值(萤火虫的适应度); $l_i(t) = f(\vec{x}_i)$, 初始化感知半径 $r_i(t)$ 为适当的随机数。

步骤 3: 萤火虫 i 按式(22)构建比自身亮的个体的领域集 N_i :

$$N_i(t) = \{x_j \mid l_j(t) < l_i(t), \|\vec{x}_j(t) - \vec{x}_i(t)\| < r_i(t)\} \quad (22)$$

$$\|\vec{x}_j(t) - \vec{x}_i(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (23)$$

步骤 4: 萤火虫 i 通过概率 p_{ij} 以轮盘赌的方式向领域集 N_i 中的萤火虫 j 移动:

$$p_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad j \neq i \quad (24)$$

移动公式为

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + s \left(\frac{\vec{x}_j(t) - \vec{x}_i(t)}{\|\vec{x}_j(t) - \vec{x}_i(t)\|} \right) \quad (25)$$

式中, s 为移动步长。

为了提高搜索速度,更快搜索寻优,采用可变步长的迭代方法, s 按照式(26)调整步长:

$$s(t) = s_{\max} e^{g_t} \quad (26)$$

$$c = \frac{1}{t_{\max}} \ln \left(\frac{s_{\min}}{s_{\max}} \right) \quad (27)$$

式中: g_t 和 $t_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数; $s_{\max}$ 和 $s_{\min}$ 分别为 s 的最大值和最小值。

步骤 5: 萤火虫按照式(28)更新感知半径:

$$r_i(t+1) = \min\{r_i, \max[0, r_i(t) + \beta(n_i - |N_i(t)|)]\} \quad (28)$$

式中: β 为动态决策域更新率; n_i 为邻域集内包含的萤火虫群数目的阈值; $N_i(t)$ 为集合所包含元素个数。

步骤 6: 萤火虫按照式(29)更新亮度:

$$l_i(t+1) = (1 - \rho)l_i(t) + \gamma f(\vec{x}_i(t+1)) \quad (29)$$

式中: ρ 为荧光素挥发因子, $\rho \in (0, 1)$; γ 为荧光素更新因子, $\gamma \in (0, 1)$; $f(\vec{x}_i(t))$ 为萤火虫 i 的适应度。

步骤 7: 如迭代达到规定次数或当前最优解符

合期望,算法完成,否则执行步骤3。

4 实例分析

以安徽省茨淮新河工程管理局所在地蚌埠市怀远县区域内水资源优化配置为例,计算多目标的综合权重,用可变步长萤火虫算法对建立的模型进行求解,并与基本遗传算法求解结果进行比较。

4.1 综合权重系数确定

要得到经济、社会、环境的综合权重,则评价项目为经济、社会、环境,对于评价指标本文以国民经济不同行业为依据,参照国家统计局列出的国民经济行业分类(包括农、林、牧、渔业,制造业、建筑业、金融业等),调查并统计各行业对经济、社会、环境的贡献值,从而确定单因子隶属度,得到单因子评价矩阵,以此作为原始数据计算熵值、熵权,得到客观权重;再通过专家打分取平均值的方式得到主观权重。按照上文介绍的方法计算得到的熵值、熵权、综合权重如表1所示。

表1 多目标效益权重

目标	熵值	熵权	综合权重
经济效益	0.506 1	0.285 2	0.303 1
社会效益	0.905 3	0.504 2	0.491 4
环境效益	0.363 0	0.210 6	0.205 5

4.2 模型参数确定

首先结合区域内实际情况确定模型中参数,部分参数可以参考文献[4]中关于模型参数确定的说明来确定。萤火虫算法中最大迭代次数取2 000次,荧光素挥发因子取0.4,荧光素更新因子取0.6,动态决策域更新率取0.08。

4.3 模型求解结果及分析

根据往年的供水量与需水量历史数据资料,通过指标分析法对2015年、2025年、2035年的供水量与需水量进行预测。给定相同水资源优化配置模型初始参数值,分别用基本遗传算法和可变步长萤火虫算法在2015年75%保证率下对本例求解综合效益最优值(为了便于观察综合效益用相对值表示)。实验结果表明,两种算法平均分别需迭代1 470次和1 010次左右才能获得稳定最优解,两种算法结果比较见图1。图1表明平均情况下,可变步长萤火虫算法在水资源优化配置模型求解中比基本遗传算法收敛速度快。

利用萤火虫算法求解不同水平年不同保证率下的水资源优化配置模型。限于篇幅本文只列出各水平年50%、75%保证率下水资源优化配置结果(表2)。由表2可见,相同水平年在50%、75%保证率下,综合效益整体呈现上升趋势,说明水资源优化配置结果在经济、社会、环境方面朝更加和谐的方向发

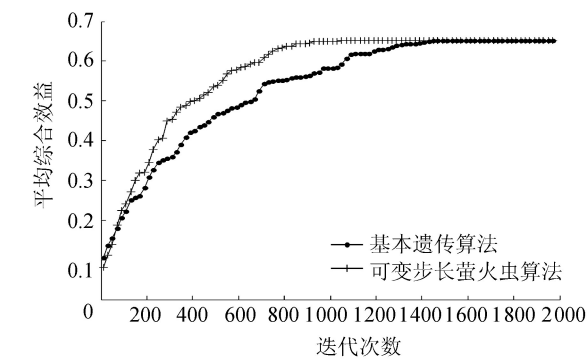


图1 2015年75%保证率下两种算法求解平均综合效益最优值比较

展。同时可以看出2015年、2025年和2035年的社会效益(即需水量)呈增大趋势,由于实际供水量并无多大变化,直接导致缺水率增大,这就迫切需要通过节约用水、科学调水等措施减少水资源浪费,提高水资源利用效率和效益,实现水资源可持续利用和经济社会可持续发展的最终目标。

表2 不同水平年50%、75%保证率下水资源优化配置结果

保证率/%	水平年	经济效益/万元	社会效益/万m ³	环境效益/万t	缺水率/%	综合目标效益
50	2015	16 851.42	605.47	41.70	1.21	0.582 3
	2025	20 692.07	862.75	52.33	6.07	0.699 5
	2035	23 709.65	1083.64	59.64	9.74	0.864 4
75	2015	21 384.45	785.29	54.25	2.08	0.651 5
	2025	27 477.00	1 387.30	68.29	7.47	0.760 3
	2035	31 593.11	1 630.88	76.94	10.86	0.922 5

5 结 语

对建立的多目标水资源优化配置模型利用熵权法确定客观权重,并采用主客观相结合的方式得到多目标的综合权重系数,兼顾了主观偏好与客观属性,加深了熵权法的应用。另外笔者首次采用了萤火虫算法对水资源优化配置模型进行优化计算,萤火虫算法简单、收敛速度快,并且优化配置结果合理可行,丰富了复杂水资源优化配置研究的方法与思路。但对于模型与算法中参数的精度和灵敏性还需要进行分析,如模型或算法中选取的参数发生变化,计算结果是否会有明显的改变,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 章穗,张梅,迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010,7(1):34-42. (ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical search during the 10th five-year of China[J]. Chinese Journal of Management, 2010,7(1):34-42. (in Chinese))

(下转第63页)

- 及综合评价[J]. 自然资源学报,2014,29(3): 454-465. (LIU Bintaο, TAO Heping, KONG Bo, et al. Research on the water resource security and its temporal-spatial distributions of Yunnan Province, China [J]. Journal of Natural Resources,2014,29(3): 454-465. (in Chinese))
- [2] 顾世祥,谢波,周云,等. 云南水资源保护与开发研究[J]. 水资源保护,2007,23(1):91-94. (GU Shixiang, XIE Bo,ZHOU Yun,et al. Water resources protection and utilization in Yunnan Province [J]. Water Resources Protection,2007,23(1):91-94. (in Chinese))
- [3] 余兴奎,何士华,高飞. 云南省水资源利用效率评价[J]. 中国农村水利水电,2012(3): 87-91. (YU Xingkui, HE Shihua, GAO Fei. Evaluating on the efficiency of utilization of water resources in Yunnan Province[J]. China Rural Water and Hydropower,2012(3):87-91. (in Chinese))
- [4] 解明恩,程建刚. 云南气象灾害特征及成因分析[J]. 地理科学,2004,24(6):721-726. (XIE Mingen, CHENG Jiangang. Characteristics and formation mechanism of weather disasters in Yunnan Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24 (6): 721-726. (in Chinese))
- [5] 尤卫红,何大明,段长春. 云南纵向岭谷地区气候变化对河流径流量的影响[J]. 地理学报,2005,60(1): 95-105. (YOU Weihong, HE Daming, DUAN Changchun. Climate change of the longitudinal range-gorge in Yunnan and its influence on the river flows[J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(1): 95-105. (in Chinese))
- [6] 张先起,刘慧卿. 云南省水资源基本状况及供需水预测研究[J]. 人民长江,2008,39(12): 12-14. (ZHANG Xianqi, LIU Huiqing. Study on prediction of water resources and the basic situation of supply and demand of water resources in Yunnan Province[J]. Yangtze River, 2008,39(12):12-14. (in Chinese))
- [7] 张学波,舒小林,詹建立. 云南省水资源现状及可持续利用问题探析[J]. 云南地理环境研究,2006,18(2): 53-57. (ZHANG Xuebo,SHU Xiaolin,ZHAN Jianli. The analysis on situation and sustainable use problems of Yunnan Province water resources[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2006, 18 (2): 53-57. (in Chinese))
- [8] 童彦,朱海燕,施玉. 云南省水资源利用的时空变化特征与区域差异分析[J]. 国土与自然资源研究,2014(5):12-16. (TONG Yan,ZHU Haiyan,SHI Yu. Analysis on the characteristic of water resources utilization and regional differences in Yunnan Province [J]. Territory & Natural Resources Study, 2014 (5): 12-16. (in Chinese))
- [9] 云南省地方志编撰委员会. 云南省省志(地理志)[M]. 昆明:云南人民出版社,1998.
- [10] 朱武,俞婷. 云南省水资源保护存在的问题及对策[J]. 水利发展研究,2014(3):32-36. (ZHU Wu, YU Ting. Problems and countermeasures of the protection of water resources in Yunnan Province [J]. Water Resources Development Research,2014(3):32-36. (in Chinese))

(收稿日期:2015-04-30 编辑:彭桃英)

(上接第53页)

- [2] 吴泽宁,索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报,2004,23(2):1-5. (WU Zening, SUO Lisheng. Advance about study of water resources optimal distribution [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2004,23(2):1-5. (in Chinese))
- [3] CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin, LAI Guoyou, et al. Optimal allocation of water resources in Guangzhou City, South China [J]. Journal of Environmental Science and Health,2006,41(7): 1405-1419.
- [4] 周丽. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[D]. 郑州:郑州大学. 2002.
- [5] 刘玘玘,汪妮,解建仓,等. 基于蚁群算法的水资源优化配置博弈分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(8):205-211. (LIU Honghong, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Game analysis on optimization allocation of water resources based on ant colony algorithm [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science),2014,42(8):205-211. (in Chinese))
- [6] 张玲,徐宗学,张志果. 基于粒子群算法的水资源优化配置[J]. 水文,2009,29(3):41-45. (ZHANG Ling, XU Zongxue, ZHANG Zhiguo. Rational allocation water resources based on particle swarm optimization[J]. Journal of China Hydrology, 2009,29(3):41-45. (in Chinese))
- [7] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms [M]. Beckington: Luniver Press,2008: 83-96.
- [8] 刘长平,叶春明. 一种新颖的仿生群智能优化算法:萤火虫算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(9):3295-3297. (LIU Changping, YE Chunming. Novel bioinspired swarm intelligence optimization algorithm: firefly algorithm [J]. Application Research of Computers, 2011, 28 (9): 3295-3297. (in Chinese))
- [9] 郁书好,杨善林,苏守宝. 一种改进的变步长萤火虫优化算法[J]. 小型微型计算机系统,2014,35(6):1396-1400. (YU Shuhao, YANG Shanlin, SU Shoubao. An improved glowworm swarm optimization algorithm with changing step [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014,35(6):1396-1400. (in Chinese))

(收稿日期:2015-04-28 编辑:徐娟)