

文章编号:1672-9331(2021)04-0083-06

基于人工蜂群算法的供水泵站系统节能研究

李志鹏,王 阳,刘 灿,彭 枫

(长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了降低供水泵站系统的运行能耗,利用4个标准测试函数对遗传算法(genetic algorithm,GA)、粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)和人工蜂群算法(artificial bee colony,ABC)进行寻优测试。测试结果表明,无论是收敛速度还是优化精度,ABC算法较PSO算法和GA算法都有极大的优势。基于目标电耗理论,建立以单位产量电耗最少为目标函数的优化调度模型,并将该模型应用于供水泵站系统的节能研究中。运用ABC算法对所建模型进行寻优计算,得出供水泵站系统的优化运行方案。对该方案的可行性和经济性进行评估,证明了ABC算法的优越性及其在泵站优化方面的实用价值。

关键词: 人工蜂群算法;寻优测试;目标电耗;供水泵站;运行方案;节能优化

中图分类号: TH3

文献标志码: A

Research on energy saving of water supply pumping station system based on artificial bee colony algorithm

LI Zhi-peng, WANG Yang, LIU Can, PENG Feng

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of water supply pumping station system, the optimization tests of genetic algorithm(GA), particle swarm optimization(PSO) algorithm and artificial bee colony(ABC) algorithm were carried out by using four standard test functions. The test results show that the ABC algorithm has great advantages over the PSO algorithm and the GA algorithm in both convergence speed and optimization accuracy. Based on the target power consumption theory, an optimal scheduling model with the minimum power consumption per unit output as the objective function was established, and this model was applied to study the energy saving of the water supply pumping station system. The ABC algorithm was used to optimize the model to obtain the optimized operating scheme of water supply pumping station system. The feasibility and economy of the scheme were evaluated to prove the superiority of the ABC algorithm and its practical value in pumping station optimization.

Key words: artificial bee colony algorithm; optimization test; target power consumption; water supply pumping station; operating scheme; energy saving optimization

收稿日期:2020-06-16

基金项目:湖南省科技创新计划项目(2018TP2012)

通讯作者:李志鹏(1962—),男,教授,主要从事流体动力工程多相流动理论与应用方面的研究。

E-mail:1379448@163.com

近年来,我国供水系统的建设得到了快速发展,但在节能运行管理方面仍然与发达国家存在一定差距。研究表明,美国 100 个供水系统的平均电耗为 $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,我国则为 $4.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。因此,我国供水系统能耗高的问题亟待解决^[1]。相关资料显示,泵站运行电费通常占自来水制水成本的 40%~70%,消耗的电能占全国水泵机组总能耗的 21%以上^[2-3]。YAZDI 等^[4]对城市排水泵站系统的优化运行进行了研究,在考虑降雨随机性的基础上,利用新的混合和声搜索算法对优化模型进行计算求解,得到了系统最优的调度方案,提升了泵站的运行效率;OLSZEWSKI^[5]针对带有并联离心泵的复杂泵系统提出了一种优化分析方法,建立了一个四泵并联的泵站试验模型,并提出了 3 种优化控制策略,结果表明系统功耗最低的优化策略最节能;ZHANG 等^[6]基于从真实泵站系统收集到的测量数据,讨论了数据挖掘方法在污水泵送系统中的优化应用,并配置了 4 种能源优化模型,发现使用优化模型可以节约 6%~14% 的能源。由此可见,泵站的节能降耗意义重大。近年来,随着计算机技术的飞速发展,人工智能算法发展迅速。其中,ABC 算法最早由 KARABOGA 等^[7-8]完整提出,他们详细分析了该算法的寻优性能,通过基准数值测试函数对该算法进行了适用性测试,并对 ABC 算法的性能影响因素进行了分析研究,结果表明 ABC 算法可以有效解决带有约束条件的优化问题;KEFAYAT 等^[9]将 ABC 算法和蚁群算法进行有效结合后应用在分布式能源系统的规模设置和优化布局上,最大限度地减少了污染物排放、电力损耗,提高了

电压的稳定性,降低了成本。由于人工智能算法不仅对优化模型没有过多限制,还可以处理不连续、不可微、多维、高度非线性等问题,并具有良好的并行计算能力,已被广泛应用于泵站优化调度的研究中。

本研究主要对 ABC 算法进行了性能寻优测试,并将该算法与目标电耗控制技术相结合,应用于供水泵站的节能优化调度当中。通过与其他算法进行对比及对工程实例进行节能改造,证明该方法在泵站的节能优化调度中具有优越性和较好的适用性。

1 模型建立

1.1 目标函数

假设供水泵站指标参数为 (Q_e, H_e) ,其中 Q_e 为泵站系统所需流量, H_e 为泵站系统所需扬程。系统一共配置了 n 台水泵,其中前 m 台水泵为恒速水泵,第 $m+1$ 台至第 n 台为调速水泵。泵站的运行优化可以描述为:在满足用户所需流量和扬程的条件下,使每台水泵都高效运行,同时所耗电量最少。建立基于泵站电耗最少的优化运行数学模型如下:

$$\min W = \sum_{i=1}^n w_i \frac{H_i}{367 \eta_i} \quad (1)$$

式中: W 为泵站单位产量电耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; n 为水泵总台数; w_i 为水泵的状态因子; H_i 为水泵的扬程, m ; η_i 为水泵系统的整体运行效率。

由水泵相似定律 $Q_i/Q = s_i$, $H_i/H = s_i^2$ (s_i 为调速比),泵站系统优化运行的数学模型可变换为:

$$\min W = \sum_{i=1}^m w_i \frac{a_0 + a_1 Q_i + a_2 Q_i^2 + a_3 Q_i^3}{367(c_0 + c_1 Q_i + c_2 Q_i^2 + c_3 Q_i^3) \eta_2 \eta_3} + \sum_{i=m+1}^n w_i \frac{a_0 s_i^2 + a_1 Q_i s_i + a_2 Q_i^2 + a_3 Q_i^3 / s_i}{367[c_0 + c_1 (Q_i / s_i) + c_2 (Q_i / s_i)^2 + c_3 (Q_i / s_i)^3] \eta_2 \eta_3 \eta_4} \quad (2)$$

1.2 约束条件

1) 扬程约束。

$$H_i = H_e, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

2) 流量约束。

为了确保水泵在高效率区间内运行,水泵的流量也必须在一定的约束范围内变化。

$$w_i = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 台水泵停止} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 台水泵运行} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$Q_e = \sum_{i=1}^n w_i q_i \quad (5)$$

$$q_{\min} < q_i < q_{\max}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

当 $i = 1, 2, \dots, m$ 时,定速泵高效区的流量限制条件为:

$$\begin{cases} q_{\min} = q_{ai} \\ q_{\max} = q_{bi} \end{cases} \quad (7)$$

式中: q_{ai}, q_{bi} 分别为额定转速下第 i 台水泵基本性能曲线上高效区左、右端点的流量。

变速泵高效工作区流量的约束条件为:

$$q_{\min} = \begin{cases} q_{va} \sqrt{\frac{H_e}{H_0 - \delta_0 q_{va}^2}}, & H_e \geq s_{\min}^2 (H_0 - \delta_0 q_{va}^2) \\ \sqrt{\frac{s_{\min}^2 H_0 - H_e}{\delta_0}}, & H_e < s_{\min}^2 (H_0 - \delta_0 q_{va}^2) \end{cases} \quad (8)$$

$$q_{\max} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_0 - H_e}{\delta_0}}, & H_e \geq (H_0 - \delta_0 q_{vb}^2) \\ q_{vb} \sqrt{\frac{H_e}{H_0 - \delta_0 q_{vb}^2}}, & H_e < (H_0 - \delta_0 q_{vb}^2) \end{cases} \quad (9)$$

3) 调速比约束。

$$s_i = 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$s_i \in [s_{\min}, 1], i = m + 1, m + 2, \dots, n \quad (11)$$

2 ABC 算法的寻优过程与性能优势

2.1 ABC 算法的寻优过程

ABC 算法是一种模拟蜂群采蜜过程的新型群体智能优化方法。根据分工不同,可将蜂群分为:引领蜂、跟随蜂和侦查蜂^[10-12]。

2.1.1 蜂群初始化阶段

在此阶段,初始化 ABC 算法的参数,例如:种群规模、最大迭代次数、变量维数、停止限制次数等。在开始搜索前,所有蜜蜂都是侦查蜂,对区域内的蜜源没有任何认知,并在蜂巢附近随机搜索蜜源。

假设待优化的函数是 D 维,在可行解空间内随机生成 N 个蜜源 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$,则 x_{ij} 可表示为:

$$x_{ij} = x_{\min,j} + r(x_{\max,j} - x_{\min,j}), \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D \quad (12)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个蜜蜂对应解的第 j 维变量; r 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

此外,每个蜜源的适应度为:

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) \geq 0 \\ |1 + |f(x_i)||, & f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $f(x_i)$ 为目标函数。

按照从大到小的顺序对适应度值进行排序,将适应度值较高的一半蜜蜂视为引领蜂,另一半视为跟随蜂。

2.1.2 引领蜂搜索阶段

可行解空间中的每一个蜜源只能由一只引领蜂采集,蜜源的数量和引领蜂的数量相等且一一对应。当引领蜂重新回到蜜源位置进行采集时,会在该蜜源位置的附近区域搜索新蜜源。引领蜂搜索新蜜源的公式为:

$$v_{ij} = x_{ij} + (2r - 1)(x_{ij} - x_{kj}), \quad i, k = 1, 2, \dots, N/2, \text{ 且 } k \neq i; j = 1, 2, \dots, D \quad (14)$$

式中: v_{ij}, x_{ij} 分别为新、旧蜜源。 r 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

计算 v_{ij} 与 x_{ij} 的适应度值,并进行比较。根据贪婪选择规则,保留适应度值更高的蜜源,以保证计算结果向全局最优解靠近。

2.1.3 跟随蜂搜索阶段

在引领蜂外出采蜜的过程中,跟随蜂在蜂巢附近等待,引领蜂采蜜回来后通过跳“8”字舞来和跟随蜂分享其搜索到的蜜源信息。通过观察引领蜂所分享的各个蜜源信息,跟随蜂以一定的概率在引领蜂中选择一只搜索到较高质量蜜源的引领蜂,跟随其前往该蜜源附近搜索新蜜源。跟随蜂选择引领蜂的概率为:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (15)$$

式中: f_i 为第 i 个引领蜂搜索到的蜜源的适应度值; P_i 为第 i 个引领蜂搜索到的蜜源的适应度值与所有引领蜂搜索到的蜜源的适应度总值的比。 P_i 越大说明蜜源质量越好,可行解的质量也就越高。

2.1.4 侦查蜂搜索阶段

在 ABC 算法中预先设置停止限制次数。当一个蜜源被多次采集,但解的质量仍未更新时,该蜜源就会被放弃,对应的引领蜂会转变成侦查蜂,并再次随机选择一个新的蜜源。这主要是为了防

止蜂群的多样性下降而导致陷入局部极值点,同时还可以提高 ABC 算法搜索全局最优值的能力。

2.2 ABC 算法的性能优势

为了检验 ABC 算法的优越性,选取优化领域的 4 个标准测试函数 Sphere,Rosenbrock,Rastrigin,Ackley 对 ABC,PSO,GA 算法进行测试,并采用平均值和最优值来评价各算法的性能。每种算法独立运行 20 次并得到 20 个最优值,取这 20 个最优值的平均值来衡量算法的精度和稳定度。各测试函数及算法对应的优化结果见表 1,各测试函数及算法对应的收敛过程如图 1 所示。

分析表 1 和图 1 可以看出,相对于 PSO 算法和 GA 算法,ABC 算法的寻优结果最佳,收敛速度最快,能够很快地收敛到理论最优值,且具有跳出局部极小值的能力,可以有效地用于多变量、多模态函数的优化。

表 1 各测试函数及算法对应的优化结果

Table 1 Corresponding optimization results of each test function and algorithm

函数	算法	最优值	平均值	理论最优值
Sphere	PSO	0.006 45	0.011 210	0
	GA	72.260 00	131.070 000	
	ABC	1.23E-14	1.66E-14	
Rosenbrock	PSO	272.209 00	381.434 800	0
	GA	103.463 00	160.554 400	
	ABC	0.010 50	0.037 290	
Rastrigin	PSO	6.890 00	10.814 440	0
	GA	13.046 30	26.098 110	
	ABC	1.14E-14	9.89E-14	
Ackley	PSO	1.96E-07	4.03E-07	0
	GA	4.29E-03	0.009 124	
	ABC	4.04E-14	6.25E-14	

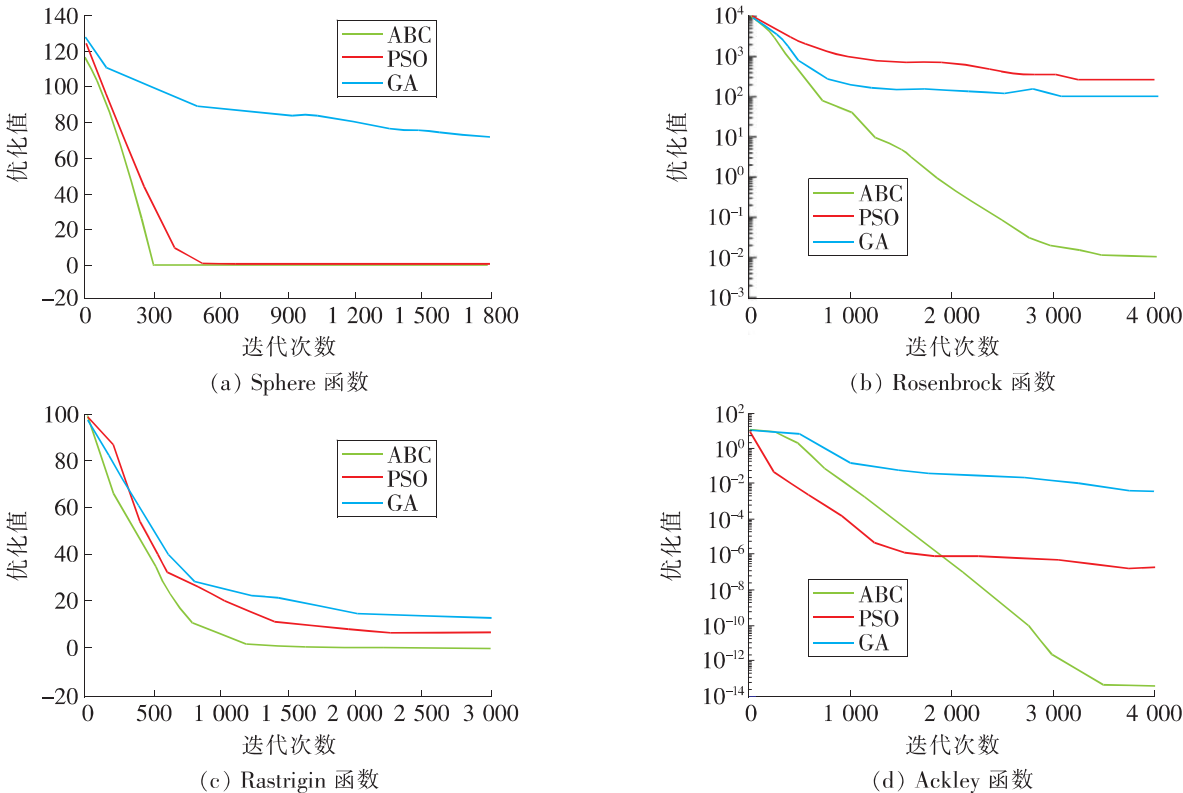


图 1 各测试函数及算法对应的收敛过程

Fig. 1 Convergence process of each test function and algorithm

3 工程案例

3.1 工程概况

在某钢铁企业循环冷却供水系统中,锅炉给水泵站系统配有 1[#],2[#],3[#],4[#] 4 台同型号并联运行的给水泵。一般情况下,两台水泵运行,两台

备用。因锅炉需求的供水流量变化较大,故采取的调节方式为水泵出口阀门调节。泵站的主要工作是向锅炉补充用水,年运行时间为 7 200 h。利用锅炉供水系统自带的精密压力表及超声波流量计对锅炉供水系统进行现场测试,以 1[#] 水泵为例,采集 4 个典型工作点现场运行的性能参数,结果见表 2。

表 2 1# 水泵现场运行的性能参数

Table 2 Field operation performance parameters of pump 1#

典型工 作点	泵流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	泵扬程/ m	轴功率/ kW	泵效率/ %	年运行 时间/h	单位产量电耗/ (kW·h·m ⁻³)
1	54.95	1 489.2	1 105.71	21.21	3 600	20.138
2	98.90	1 509.6	1 205.47	35.49	1 440	12.200
3	137.36	1 530.0	1 304.72	46.16	1 440	9.507
4	233.52	1 540.2	1 388.89	74.20	720	5.954

3.2 泵站系统的优化计算

本次优化有两种方案,一种为 1# 水泵变频调速运行、2# 水泵恒速运行的单调速方案,另一种为 1# 和 2# 水泵都变频调速的全调速方案。其中,2# 水泵在单调速方案下恒速运行时效率偏低,而在全

调速方案下,1# 和 2# 水泵均能在高效区工作,且 2# 水泵单调速方案下的单位产量电耗比全调速方案下的高。在满足扬程、流量、调速比等约束条件下,用上述泵站电耗最少的优化运行数学模型对两种方案进行优化计算,并得到如表 3~4 所示的优化结果。

表 3 第一种方案的优化结果

Table 3 Optimization results of the first scheme

供水指标				1# 水泵(变速)		2# 水泵(恒速)	
$Q_e/$ (m ³ ·h ⁻¹)	$H_e/$ m	状态 因子	调速 比 s_i	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位产量电耗/ (kW·h·m ⁻³)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位产量电耗/ (kW·h·m ⁻³)
167.21	1 546.40	1 000	0.72	167.21	6.249 4	0	0
185.09	1 543.40	1 000	0.79	185.09	6.207 9	0	0
222.11	1 536.20	1 000	0.90	222.11	6.031 2	0	0
260.41	1 521.19	1 000	0.99	260.41	5.856 8	0	0
325.14	1 547.10	1 100	0.73	164.61	6.359 8	160.54	8.402 6
429.67	1 539.20	1 100	0.80	194.03	6.086 9	235.64	6.172 7
480.00	1 529.10	1 100	0.91	229.03	5.959 4	250.97	5.965 7

表 4 第二种方案的优化结果

Table 4 Optimization results of the second scheme

供水指标				1# 水泵(变速)		2# 水泵(恒速)	
$Q_e/$ (m ³ ·h ⁻¹)	$H_e/$ m	状态 因子	调速 比 s_i	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位产量电耗/ (kW·h·m ⁻³)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	单位产量电耗/ (kW·h·m ⁻³)
167.21	1 546.40	1 000	0.72	167.21	6.249 4	0	0
185.09	1 543.40	1 000	0.79	185.09	6.207 9	0	0
222.11	1 536.20	1 000	0.90	222.11	6.031 2	0	0
260.41	1 521.19	1 000	0.99	260.41	5.856 8	0	0
325.14	1 547.10	1 100	0.71	162.57	6.302 6	162.57	6.302 6
429.67	1 539.20	1 100	0.88	214.83	6.070 1	214.83	6.070 1
480.00	1 529.10	1 100	0.94	240.00	5.931 6	240.00	5.931 6

分析表 3~4 可知,当系统需求的供水流量小于 325.14 m³/h 时,系统打开 1# 水泵的变频调速进行调节就可以满足供水需求;当系统需求的供水流量增大至 325.14 m³/h 时,系统需同时打开 1# 和 2# 水泵的变频调速才能满足供水需求。

改造前系统平均单位产量的电耗为 11.949 8 kW·h/m³,单调速改造后系统平均单位产量的电耗为 6.329 2 kW·h/m³,全调速改造后系统平均

单位产量的电耗为 6.095 4 kW·h/m³,两种改造方案的节电率 E_1 和 E_2 分别为:

$$E_1 = \frac{11.949\,8\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3 - 6.329\,2\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3}{11.949\,8\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3} \times 100\% = 47.04\%$$

(16)

$$E_2 = \frac{11.949\,8\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3 - 6.095\,4\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3}{11.949\,8\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3} \times 100\% = 48.99\%$$

(17)

与改造前的阀门调节相比,这两种调速方案基于目标电耗对泵站的运行进行了优化改造,使各水泵都在高效区工作,实现了供水泵站适应系统需求变化的精细化调节和节能降耗的目标,证明这两种调速方案是可行的、有效的。但全调速方案比单调速方案的节电率略高一点,如果考虑改造费用等问题,单调速方案有着更高的经济性。

4 结论

1) 选取4个标准函数分别对GA, PSO, ABC算法进行性能测试,结果表明无论是收敛速度还是优化精度,ABC算法较PSO算法和GA算法都有极大的优势。

2) 本研究针对泵站系统实际运行能耗较高的情况,从泵站优化运行方面进行了目标电耗的节能研究;基于单位产量电耗最少的优化模型,初步确定两种节能方案,并利用ABC算法和数值计算软件进行了求解。计算结果显示,在选择单调速方案时节电率可以达到47.04%,节能效果较明显,说明ABC算法在泵站优化运行的计算中具有适用性和有效性,该结果对其他供水泵站的节能改造和优化运行具有借鉴意义。

本研究运用ABC算法对供水泵站的节能优化模型进行了求解计算。随着群体智能优化算法研究的飞速发展,人工蜂群算法的寻优机制过于贪婪、后期收敛速度慢等缺点逐渐凸显,今后可将人工蜂群算法和其他智能算法相结合进行改进研究。

〔参考文献〕

- [1] 钱遇. 城市供水系统节能问题分析[J]. 中国设备工程, 2017(13): 199-200.
QIAN Yu. Analysis of energy saving problems of urban water supply system[J]. China Equipment Engineering, 2017(13): 199-200.
- [2] 姜乃昌. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 56-57.
JIANG Nai-chang. Water pump and water pump station[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006: 56-57.
- [3] 王立. 我国泵系统节能的现状与发展前景[J]. 水泵技术, 2012(1): 28-30.
- WANG Li. Current status and development prospects of energy saving of pump systems in my country[J]. Water Pump Technology, 2012(1): 28-30.
- [4] YAZDI J, CHOI H S, KIM J H. A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 11: 101-112.
- [5] OLSZEWSKI. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps[J]. Applied Energy, 2016, 178: 527-539.
- [6] ZHANG Z J, KUSIAK A, ZENG Y H, et al. Modeling and optimization of a wastewater pumping system with data-mining methods[J]. Applied Energy, 2016, 164: 303-311.
- [7] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony(ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [8] KARABOGA D, BASTURK B. On the performance of artificial bee colony(ABC) algorithm[J]. Apply Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.
- [9] KEFAYAT M, ARA A L, NIAKI S A. A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 92(3): 149-161.
- [10] 马卫, 孙正兴. 基于精英蜂群搜索策略的人工蜂群算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2 299-2 305.
MA Wei, SUN Zheng-xing. Artificial bee colony algorithm based on elite bee colony search strategy[J]. Computer Applications, 2014, 34(8): 2 299-2 305.
- [11] 王圃, 郑成, 杨俊. 基于改进人工蜂群算法的供水泵站优化运行研究[J]. 给水排水, 2017, 53(6): 126-130.
WANG Pu, ZHENG Cheng, YANG Jun. Research on optimized operation of water supply pump station based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Water Supply and Drainage, 2017, 53(6): 126-130.
- [12] 刘伟, 周邵萍, 李长龙, 等. 基于人工蜂群算法的矿山泵机组运行优化[J]. 流体机械, 2018, 46(1): 56-61.
LIU Wei, ZHOU Shao-ping, LI Chang-long, et al. Optimization of mine pump unit operation based on artificial bee colony algorithm[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(1): 56-61.