

DOI: 10.7667/PSPC171900

基于改进猫群算法的分布式电源优化配置

杨磊¹, 杨晓辉¹, 吴越², 温和昌¹, 朱云丰¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网吉林省电力公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 对分布式电源(DG)进行合理的选址和定容能使其经济效益最大化。目前用于解决分布式电源优化配置的大多算法都存在对控制参数依赖性过强的问题, 导致算法容易陷入局部最优解。为解决该问题, 提出了一种混沌改进的多目标猫群算法。利用混沌理论的随机性、遍历性及其规律性, 对猫群算法的参数进行调整, 使算法能快速得出全局最优解。在分析 DG 特性的基础上, 建立了考虑含分布式电源的有功网损费用最小和用户购电成本最小模型。最后, 以 PG&E69 节点配电网为例, 通过将改进算法与粒子群算法及基本猫群算法的效果对比, 验证改进算法对分布式电源优化配置问题的有效性。

关键词: 分布式电源; 改进猫群算法; 多目标优化; 混沌理论; 配电网

Research on optimized distributed generations locating based on modified cat swarm optimization

YANG Lei¹, YANG Xiaohui¹, WU Yue², WEN Hechang¹, ZHU Yunfeng¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. State Grid Jilin Electric Power Company, Changchun 130000, China)

Abstract: The rational location and capacity of Distributed Generations (DG) can maximize its economic benefit. Most of the algorithms which are used to solve the optimal configuration of distributed power supply have the problem of too strong dependence on the control parameters, which are easy to fall into the local optimal solutions. To solve the problem, this paper proposes a chaos improved cat swarm optimization algorithm. The parameters of cat swarm optimization algorithm can be adjusted by using the randomness, ergodicity and regularity of the chaos theory, which makes the algorithm get the global optimal solution quickly. Based on the detailed analysis on the characteristics of DG, a model is built to minimize active power loss cost and consumer electricity purchase cost. Finally, taking PG&E69-node distribution network as an example, this paper compares the effect of this improved algorithm with the PSO algorithm and the basic cat group algorithm to verify the effectiveness of modified cat swarm optimization algorithm to locate DG optimally.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2013AA013804), National Natural Science Foundation of China (No. 51765042, No. 61463031, and No. 61662044), and Science and Technology Support Plan of Jiangxi Province (No. 20142BBE50037 and No. 20151BBE50050).

Key words: distributed generation; modified cat swarm algorithm; multi-objective optimization; chaos theory; distribution network

0 引言

分布式电源的接入使配电网更加复杂化, 在一定程度上改变了每条支路的潮流大小及方向, 严重地影响了电网的安全、可靠运行^[1-4]。DG 的合理配

置能够有效地降低网络损耗、提高系统电能质量, 从而使系统的可靠性得到提高, 因此对 DG 的优化配置显得尤为重要^[5-9]。

目前, 已经有大量学者对分布式电源优化配置问题做了研究。文献[10]为了避免遗传算子的盲目试凑, 提出了一种基于均匀设计的改进遗传算法对分布式电源并网进行寻优计算, 改进后的算法可以较好地兼顾多目标优化 pareto 解集的多样性与速度性, 有效提高优化精度。但该算法参数设置较为复

基金项目: 国家 863 课题资助(2013AA013804); 国家自然科学基金项目资助(51765042, 61463031, 61662044); 江西省科技支撑计划项目资助(20142BBE50037, 20151BBE50050)

杂且计算速度较慢。文献[11]为减少大规模分布式电源接入对低压配电网产生的电压冲击,提出了一种基于粒子群算法的分布式电源最优接入位置和容量配置,建立了网损最小和电压变化指标最小的目标函数。但该算法计算速度慢且运行较为复杂。文献[12]以分散式风力发电为平台,考虑分散式风力发电机的接入对配电网网损及电压质量的影响,采用模拟退火遗传算法对分散式电源进行合理的选址和定容,建立了网络损耗最小和电压偏差最小的目标函数。但该算法全局搜索能力差,容易受参数的影响。文献[13]通过对信息素进行约束提出了改进型蚁群算法,该算法的优点在于其收敛精度高和速度快,并将该算法用于分布式电源的优化配置中,建立了经济成本和环境成本最小的目标函数。但该算法对各调节参数要求较高,容易对优化效果造成影响。

本文建立了配电网有功网损最小和用户购电成本最小的目标函数,提出了一种改进的猫群算法,将该算法应用于分布式电源的优化配置。

1 分布式电源优化配置模型

首先建立分布式电源优化配置模型,目标函数为配电网有功网损最低和用户购电成本最低,约束条件为功率平衡约束、电压约束、配电线路极限传输功率约束和 DG 装置总容量限制。

1.1 目标函数

① 以配电网有功网络损耗为目标函数

$$P_L = \sum_{k=1}^{N_b} G_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中: P_L 为配电网的有功网络损耗; 支路总数用 N_b 表示; G_k 为 i 节点及 j 节点间的第 k 条支路的电导; U_i 为 i 节点的电压幅值; U_j 为 j 节点的电压幅值; δ_{ij} 为两节点之间的电压相角差。

将网损折算成经济指标如式(2)。

$$C_L = P_L T_{\max} C_{pu} \quad (2)$$

式中: T_{\max} 为最大年负荷小时数; C_{pu} 为实时电价; C_L 为配电网的网络损耗费。

② 以用户的购电成本最小为目标函数

$$C_c = (P_w - P_{\sum DG} - \Delta P_L) T_{\max} C_{pu} = \left[P_w - P_{\sum DG} - (P_{\text{loss}} - P'_{\text{loss}}) \right] T_{\max} C_{pu} \quad (3)$$

式中: T_{\max} 为负荷的最大利用小时数; P_w 为系统的总容量; $P_{\sum DG}$ 为总的分布式电源有功输出; P_{loss} 和 P'_{loss} 分别为优化前及接入分布式电源后的有功网

损; C_{pu} 为实时电价。

③ 总目标函数

$$F(x) = \alpha_1 C_L + \alpha_2 C_c \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 为系统有功损耗费和用户购电成本费的加权和; α_1 、 α_2 均为加权系数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。加权系数随着问题的重要程度会有所变化,本文 DG 投资金额充足,因此取 α_1 为 0.6, α_2 为 0.4^[14]。

1.2 约束条件

① 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i - \sum_{j=1}^N e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} + B_{ij} e_j) = 0 \\ Q_i - \sum_{j=1}^N f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: N 为系统总的节点数; $P_i + jQ_i$ 为节点 i 的注入总功率; $\dot{U}_i = e_i + jf_i$ 为节点 i 的电压; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为两节点 i 、 j 间的导纳。

② 节点电压约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (6)$$

式中, $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ 分别为节点电压的上下限值。

③ 配电线路的极限传输功率约束为

$$P_{ij} < P_{ij, \max} \quad (7)$$

式中, P_{ij} 是节点 i 到节点 j 的传输功率。

④ DG 安装总容量限制

$$\sum_{i=1}^N P_{DGi} < \eta P \quad (8)$$

式中: η 为 0.25; P 为系统负荷总容量。

2 猫群算法

2.1 猫群算法优化机理

猫群算法是由 Chu 等人于 2006 年提出的一种仿生智能优化算法^[15-17]。该算法通过模拟生物界猫群的生活习惯来实现问题的优化求解。猫大部分时间都处于休息状态,但它们警惕性依然很高,一旦发现有猎物出现,迅速将其捕捉。根据一定的比例将猫分成两部分,搜寻模式和跟踪模式。在搜寻模式中,每个猫都在进行无目的的搜寻,然后将自己的位置复制若干次,使其产生若干个副本,并给每个副本都加一个随机的扰动,计算扰动后各个副本的适应值,比较选择其中最大的适应值作为猫最终将走向的位置。在跟踪模式中,猫将根据其当前所处位置、全局最佳位置以及更新速度等信息更新自己的位置,从而使其不断接近最佳位置^[18-20]。猫群算法中这两种模式的共同作用可以用来解决较复杂的优化问题。

2.2 猫群算法数学描述

跟踪模式下的猫模拟的是猫在猎食时跟踪目标的行为, 在优化配置问题中体现的是局部搜索。跟踪模式中的猫通过更新自己的速度更新其位置, 直到达到最佳位置。假设第*i*只猫在*D*维空间中的位置和速度表示为

$$x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,D}), i = 1, 2, 3, \dots, D \quad (9)$$

$$v_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3}, \dots, v_{i,D}), i = 1, 2, 3, \dots, D \quad (10)$$

猫群算法操作过程中具有局部最优解的猫表示为

$$x_{gbest} = (x_{gbest,1}, x_{gbest,2}, x_{gbest,3}, \dots, x_{gbest,D}) \quad (11)$$

跟踪模式下的猫, 其移动位置是由其速度决定的。首先确定更新速度^[21-23]

$$v_i(n+1) = v_i(n) + c \times rand \times (x_{gbest}(n) - x_i(n)) \quad (12)$$

式中: $v_i(n+1)$ 表示更新后第*i*只猫的速度值; *c* 为一个常数; *rand* 为[0,1]的随机值。

猫的位置是通过速度变化而变化的。根据式(12)更新第*i*只猫的位置如式(13)。

$$x_i(n+1) = x_i(n) + v_i(n+1) = x_i(n) + v_i(n) + c \times rand \times (x_{gbest}(n) - x_i(n)) \quad (13)$$

式中, $x_i(n+1)$ 表示位置更新后第*i*只猫的位置。计算适应度值, 用适应度值最大的猫更新最初的猫的位置。

2.3 猫群算法改进

基本猫群算法的优点是其原理简单及设置参数少, 缺点是容易陷入局部最优、导致最优值的跟踪精度不高。

*c*的混沌运动具有丰富的时空动力学和混沌的遍历性, 可以作为优化机制, 避免优化过程中的局部最优解。混沌系统看似是随机的, 但它可由公式推导而得, 因此拥有一定的规律性^[24]。

从式(12)、式(13)可以看出, 猫群算法的参数*c*对于算法寻优有很重要的作用, 其为一个常数, 通过在一定范围内改变参数*c*的值, 可以起到提高算法全局寻优能力的作用。本文采用混沌理论对猫群算法的参数*c*进行调整, 改进之后的猫群更新公式为

$$x_i(n+1) = x_i(n) + v_i(n+1) = x_i(n) + v_i(n) + c_{x(n)} \times rand \times (x_{gbest}(n) - x_i(n)) \quad (14)$$

$$c_{x(n)} = a + x(n) \times (b - a) \quad (15)$$

$$x(n) = u \times x(n-1) \times [1 - x(n-1)] \quad (16)$$

式中: $c_{x(n)}$ 为猫群位置变量; [*a b*]为猫群位置的遍历范围; *u* 为混沌控制参数。

3 算法流程

通过改进猫群算法解决分布式电源的位置和容量问题的流程图如图1所示。步骤如下。

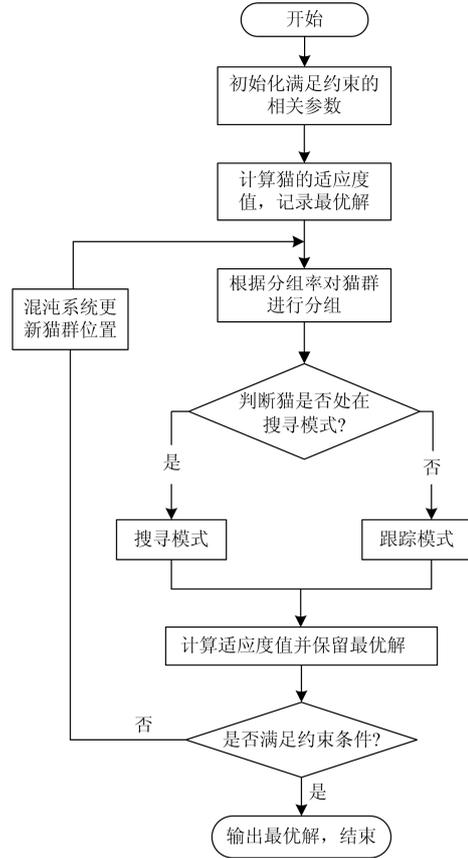


图1 基于改进猫群算法的分布式电源优化流程图
Fig. 1 Distributed generations optimization flow chart based on improved cat swarm optimization

① 初始化符合约束条件的猫群体位置, 处于[*a b*]区间, 设置猫群优化算法的群体大小为*N*, 分组率为*MR*。

② 根据猫群的初始位置(各负荷节点的初始注入功率), 计算猫群体适应度值, 选取并记录种群中适应度最大的猫。

③ 根据分组率*MR*随机将猫群分组, $MR = \text{跟踪模式下的猫的数量} / \text{总猫数}$ 。

④ 优化后的搜寻模式。复制猫个体, 将复制好的个体存入记忆池 *SMP* 中。

⑤ 优化后的跟踪模式。整个猫所经历的最佳位置是目前搜索的最佳解决方案, 猫群体及时更新其移动速度, 从而更新其位置。

⑥ 计算更新后的猫群适应度值并记录下适应度值最大的猫的位置。

⑦ 判断约束条件是否满足, 如果满足最优解输出, 结束程序; 否则, 利用混沌控制策略对猫群算法参数进行更新, 重复流程②—⑦进行寻优迭代处理。

4 算例分析

本文以PG&E69节点配电系统为例, 如图2所示。该系统总有功负荷及无功负荷为3 802.19 kW和2 694.60 kvar, 其基准容量的大小为10 MVA, 设定节点1作为电源节点, 系统首端基准电压大小为12.66 kV。将各分布式电源看作负的PQ节点处理, 功率因数取0.9, 单位电价=0.65元/kWh。

初始化参数设置如下, 猫群群体大小为 $N=30$, 分组率 $MR=0.2$, $SMP=2$, $u=4$; 分布式电源待选安装节点的编号可为2~69, 有68个, 其安装范围为0~0.6 MVA。

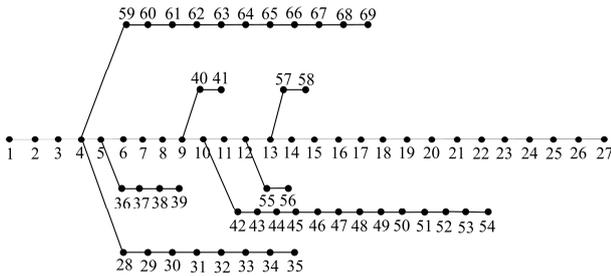


图2 IEEE69节点配电系统
Fig. 2 IEEE69 node distribution system

4.1 效果对比

对粒子群算法(PSO)、猫群算法(CSO)、改进猫群算法(改进CSO)3种算法算例结果(表1)对比可知, DG的最佳接入位置为14、50、55及61号节点。采用本文改进算法对DG进行优化, 可将有功网损由224.94 kW下降到133.57 kW, 优化后的有功网损下降率为40.6%, PSO算法及CSO算法的下降率分别为

表1 不同算法下PG&E69节点配电系统测试算例结果

Table 1 Test results of PG&E69 node distribution system under different algorithms

算法	DG(位置和容量)	网损/kW	购电成本/万元
未接 DG	—	224.94	557.25
PSO	14(350) 50(420)	145.08	443.37
	55(440) 61(430)		
CSO	14(360) 50(410)	138.18	441.27
	55(400) 61(420)		
改进 CSO	14(340) 50(410)	133.57	336.38

注: 表中DG(位置和容量)一列中, 括号外的数字为分布式电源的安装位置, 括号里面的数字为分布式电源容量(单位: kVA)

35.5%和38.6%; 购电成本方面, 3种算法都能降低购电成本, 未接DG之前, 购电成本为557.25万元, 接入DG后采用本文算法的购电成本为443.37万元, 优化后的购电成本下降率为39.6%, PSO算法及CSO算法的购电成本下降率分别为20.4%和20.8%; 对比3种算法的下降率可知, 改进CSO算法的优化效果最明显。

分布式电源的加入将对电压有一定的影响, 表2记录了3种算法对系统进行测试的平均电压和最低电压。通过对比分析可得, 3种算法均可提高节点电压的最低值, 本文改进算法的节点电压最低值分别为0.951 6 p.u.和0.958 5 p.u., 3种算法均提高了系统整体节点电压水平, 但很明显本文改进算法的效果最明显。

表2 不同算法的节点电压对比

Table 2 Node voltage comparison of different algorithms

电压	优化前	PSO	CSO	改进 CSO
最低电压/p.u.	0.910 5	0.951 6	0.958 9	0.963 2
平均电压/p.u.	0.948 5	0.965 5	0.969 3	0.978 9

4.2 算法性能对比

为了说明本文算法的收敛性, 图3是分别采用PSO、CSO、改进CSO算法所得到的69节点配电系统网损优化的收敛曲线。由图可以很清晰地看出, 本文算法收敛速度是最快的, 在迭代40次后网损值就基本趋于稳定, CSO算法和PSO算法收敛更慢, CSO算法及PSO算法分别迭代了75次和120次才趋于稳定。在网损方面, 本文算法网损也是最小的, 最终稳定值为133.57 kW, PSO算法和CSO算法网损分别为145.08 kW和138.18 kW。本文改进算法不仅收敛速度最快, 而且网损值也最小, 对分布式电源的优化效果很明显。

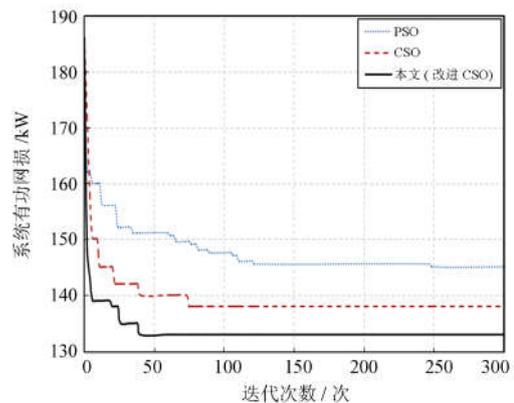


图3 不同算法的系统网损对比

Fig. 3 System network loss contrast of different algorithms

5 总结

本文建立了有功网损最小和用户购电成本最小的数学模型, 提出了一种将混沌索搜策略运用到猫群算法中的改进算法, 并将其运用到分布式电源的优化配置中。通过对PG&E69节点配电系统的测试, 将其与PSO算法和基本CSO算法进行对比, 验证了采用改进CSO算法求解DG优化配置问题的有效性。

参考文献

- [1] GUPTA P, PANDIT M, KOTHA RI D P. A review on optimal sizing and siting of distributed generation system: integrating distributed generation into the grid[C] // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 4-7, 2007, Vigo, Spain: 1-6.
- [2] 阎鼎, 包海龙, 程浩忠, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 16-20.
YAN Ding, BAO Hailong, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of maximum distributed generation capacity in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 16-20.
- [3] 罗煜, 吴杰康, 简俊威, 等. 基于机会约束规划的多类型分布式电源容量与布点优化方法[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 34-42.
LUO Yu, WU Jiekang, JIAN Junwei, et al. Optimization method for multi-type dg capacity and stationing based on chance constraint programming[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 34-42.
- [4] 吴鸣, 于辉, 熊雄. 分布式电源接入配电网的基本原则[J]. 供用电, 2017, 34(12): 32-38.
WU Ming, YU Hui, XIONG Xiong. Basic Principles for integration of distributed generation into power distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(12): 32-38.
- [5] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.
CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.
- [6] 杨欣晔, 杨嘉炜, 邓靖雷. 基于光学优化算法的分布式电源选址与定容[J]. 供用电, 2018, 35(11): 66-71.
YANG Xinye, YANG Jiawei, DENG Jinglei. Locating and sizing of distributed generation based on optics inspired optimization(OIO)[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(11): 66-71.
- [7] 田贺平, 孙舟, 王伟贤, 等. 考虑节能效益的企业分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 38-47.
TIAN Heping, SUN Zhou, WANG Weixian, et al. Enterprises distributed power optimization allocation considering energy-saving benefit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 38-47.
- [8] 赵琦, 管霖, 吕耀棠, 等. 储能电站在含光伏电源配电网中的优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 1-7.
ZHAO Qi, GUAN Lin, LÜ Yaotang, et al. Optimized configuration of energy storage power station in distribution network with photovoltaic power[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 1-7.
- [9] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [10] 包广清, 杨国金, 杨勇, 等. 基于改进遗传算法的分布式电源并网优化配置[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(16): 251-256.
BAO Guangqing, YANG Guojin, YANG Yong, et al. Improved genetic algorithm-based optimal planning for grid-connected distributed generation[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(16): 251-256.
- [11] 兰佳, 徐斌, 刘红新, 等. 基于粒子群算法的分布式电源接入位置及容量寻优[J]. 供用电, 2016, 33(10): 81-85.
LAN Jia, XU Bin, LIU Hongxin, et al. Optimization of integration location and capacity research of distributed power generation based on particle swarm optimization algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(10): 81-85.
- [12] 杨珺, 张闯, 黄旭, 等. 基于模拟退火遗传算法的分散式风电选址定容[J]. 东北电力技术, 2014(2): 6-11.
YANG Jun, ZHANG Chuang, HUANG Xu, et al. Siting and sizing of distributed wind generation based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014(2): 6-11.
- [13] 王宗礼, 李明, 陈建, 等. 基于改进蚁群算法的分布式电源容量优化配置[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 51-55.
WANG Zongli, LI Ming, CHEN Jian, et al. Optimal siting and sizing of DGs based on improved ant colony algorithm[J]. Electric Power, 2016, 49(9): 51-55.

[14] 周勇, 陈家俊, 姜飞, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置研究[J]. 现代电力, 2014, 31(5): 54-58.
ZHOU Yong, CHEN Jiajun, JIANG Fei, et al. Research on optimized distributed generations locating based on modified firefly algorithm[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(5): 54-58.

[15] 马知也, 施秋红. 猫群算法研究综述[J]. 甘肃广播电视大学学报, 2014(2): 41-45.
MA Zhiye, SHI QiuHong. A survey of cat swarm algorithm[J]. Journal of Gansu Radio & TV University, 2014(2): 41-45.

[16] 吴颖茂, 李林, 马邦雄. 猫群算法求解阻塞流水线车间调度问题[J]. 信息技术, 2014(12): 37-39, 43.
WU Yingmao, LI Lin, MA Bangxiong. Solving the blocking flow shop scheduling problem using cat swarm optimization[J]. Information Technology, 2014(12): 37-39, 43.

[17] 马邦雄, 叶春明. 基于改进量子猫群算法的流水线车间调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(17): 34-37.
MA Bangxiong, YE Chunming. Research of flow-shop scheduling problem based on quantum cat swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(17): 34-37.

[18] 聂晓华, 王薇. 基于猫群算法的光伏阵列多峰 MPPT 控制策略[J]. 电力电子技术, 2016, 50(10): 39-41, 48.
NIE Xiaohua, WANG Wei. Cat swarm optimization for MPPT of PV array under complex application environments[J]. Power Electronics, 2016, 50(10): 39-41, 48.

[19] 刘琼, 范正伟, 张超勇, 等. 基于多目标猫群算法的混流装配线排序问题[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 333-342.
LIU Qiong, FAN Zhengwei, ZHANG Chaoyong, et al. Mixed model assembly line sequencing problem based on multi-objective cat swarm optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 333-342.

[20] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏 MPPT 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6103-6110.
NIE Xiaohua, WANG Wei. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6103-6110.

[21] 王光彪, 杨淑莹, 冯帆, 等. 基于猫群算法的图像分类研究[J]. 天津理工大学学报, 2011, 27(增刊 1): 35-39.
WANG Guangbiao, YANG Shuying, FENG Fan, et al. Research of image classification based on cat swarm optimization[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2011, 27(Z1): 35-39.

[22] 吴伟林, 周永华. 基于差分演化与猫群算法融合的群体智能算法[J]. 计算技术与自动化, 2014, 33(4): 78-83.
WU Weilin, ZHOU Yonghua. The swarm intelligent algorithm based on the combination of differential evolution and cat swarm optimization algorithms[J]. Computing Technology and Automation, 2014, 33(4): 78-83.

[23] 杨进, 郑允, 马良. 改进的猫群算法求解 TSP[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3607-3610.
YANG Jin, ZHENG Yun, MA Liang. Improved cat swarm optimization for solving traveling salesman problem[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(12): 3607-3610.

[24] 李娟, 杨琳, 刘金龙, 等. 基于自适应混沌粒子群算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26-31.
LI Juan, YANG Lin, LIU Jinlong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 26-31.

收稿日期: 2017-12-31; 修回日期: 2018-03-08

作者简介:

杨 磊(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源与微电网; E-mail: 1405165240@qq.com

杨晓辉(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为工业控制、智能控制、电力电子在新能源中的应用; E-mail: yangxiaohui@ncu.edu.cn

吴 越(1965—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为低碳电力技术与电网企业管理。

(编辑 葛艳娜)