

DOI: 10.7667/PSPC180605

基于改进双粒子群算法的舰船电力系统网络故障重构

张兰勇^{1,2}, 孟坤¹, 刘胜¹, 李佐勇³

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 毫米波国家重点实验室(东南大学), 江苏 南京 210096;
3. 福建省信息处理与智能控制重点实验室(闽江学院), 福建 福州 350121)

摘要: 舰船电力系统环形网络故障重构本质上是带约束的多目标非线性组合优化问题。为了解决舰船电力系统发生故障时的供电恢复问题, 提出了一种改进双粒子群优化算法进行求解。此算法分为主、辅两个粒子群, 主粒子群改进了种群初始化、自适应调整惯性权重和学习因子, 提高了主粒子群算法的全局寻优能力。同时, 辅助粒子群还采用改进的混沌局部搜索策略, 增强了种群多样性及局部寻优能力, 有效地解决了粒子群算法中容易陷入局部极值的问题。通过系统仿真, 分别将几种不同的优化算法进行比较。结果表明该算法具有很高的搜索效率和寻优能力, 能有效地提高故障恢复的速度与精度, 在处理舰船电力系统网络故障重构方面具有较好的效果。

关键词: 舰船电力系统; 故障重构; 改进双粒子群算法; 混沌局部搜索

Reconstruction of ship power system network fault based on improved two particle swarm algorithm

ZHANG Lanyong^{1,2}, MENG Kun¹, LIU Sheng¹, LI Zuoyong³

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves (Southeast University), Nanjing 210096, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Information Processing and Intelligent Control (Minjiang University), Fuzhou 350121, China)

Abstract: The fault reconfiguration of the annular network of the ship power system is an essential multi-objective nonlinear combinatorial optimization problem with constraints. To solve the power supply recovery problem in case the ship power system fails, an improved two-particle swarm optimization algorithm is proposed. One is the primary particle group and another is auxiliary particle group. The primary particle group improves the population initialization and adaptively adjusts the inertia weight and the learning factor, which improves the global optimization ability of the main particle swarm algorithm. At the same time, an improved chaotic local search strategy is adopted in the auxiliary particle swarm, which enhances the diversity of the population and the ability of local optimization and effectively solves the problem of easily to fall into local extremum. The performance of the proposed algorithm is compared against several different optimization algorithms by system simulation. The results show that the algorithm has the superiority in search efficiency and optimization. The algorithm can effectively improve the speed and accuracy of fault recovery, and it shows high performance in dealing with the network fault reconfiguration of ship power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51579047), Basic Program of National Defense Technology (No. JSHS2015604C002), Open Projects of State Key Laboratory of Millimeter Waves (No. K201707), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. QC2017048), Harbin Natural Science Foundation (No. 2016RAQXJ077), and Fundamental Research Fund for Central Universities (No. HEUCF180407).

Key words: ship power system; fault reconstruction; improved double particle swarm optimization; chaotic local search

0 引言

随着计算机技术、数控技术、大功率电子技术

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51579047); 国防技术基金项目(JSHS2015604C002); 毫米波国家重点实验室开放课题项目(K201707); 黑龙江省自然科学基金(QC2017048); 哈尔滨市自然科学基金(2016RAQXJ077); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HEUCF180407)

等高新技术的飞速发展, 现代舰船逐渐向全电力推进方向发展, 舰船电力系统的地位越来越重要。舰船电力系统的安全使用并非一帆风顺, 战争对设备造成的伤害、人为的操作失误、设备在设计建造时留下的隐患等原因, 都会致使意外层出不穷, 最终使整个系统难以维持正常的运行, 轻则降低该系统的可信度, 重则致使工具设备严重毁损甚至引起供电通路阻滞, 无法保证行驶的顺利, 更无法为任务的圆满完成提供保障。对于现代舰船而言, 目前

亟待解决的问题是如何保证电力系统的稳定性及连续供电能力, 为了达到这一目标, 可以通过建立一个完备的故障自修复系统实现, 当舰船电力系统发生故障时, 该系统会迅速重新构建电力系统, 保证供电通路通畅, 提高舰船生命力^[1-3]。舰船电力系统网络故障重构的实质是在电力系统发生故障后, 对其进行重新配置, 构建一个新的供电网络。舰船供电系统网络中存在许多转换开关, 当舰船电力系统网络出现故障时, 通过切换开关的开闭状态来调节备用供电路径的导通, 从而隔离故障负载, 在符合发电机组、供电开关以及供电支路节点电压等约束限制条件下, 实现对重要负载快速恢复供电。文献[4]提出将双粒子群算法应用于舰船电网故障重构中, 主群引入伪变异策略, 辅助群采用基于爬山思想的位置更新策略。文献[5]中采用的混沌遗传算法, 相比于启发式遗传算法无论是求解精度还是收敛速度都有所提高。文献[6]应用专家系统恢复故障区域的供电, 但需要建立庞大的专家知识库, 而且知识的全部获取非常困难。文献[7]采用免疫克隆选择算法, 具有很高的搜索效率和寻优性能, 但故障恢复所用的迭代次数太多。为此, 本文将改进的双粒子群优化算法应用于舰船电力系统网络故障重构中, 通过改进算法的初始化、自适应调整参数和学习因子, 主粒子群进行全局范围搜索, 辅助粒子群采用改进的混沌局部搜索策略, 提高了种群的多样性, 有效地保障了算法的求解精度和收敛速度, 并且兼顾了全局和局部寻优能力。

1 舰船电力系统建模

1.1 典型舰船电力系统

本文所使用的是环形网络结构^[8], 如图 1 所示。

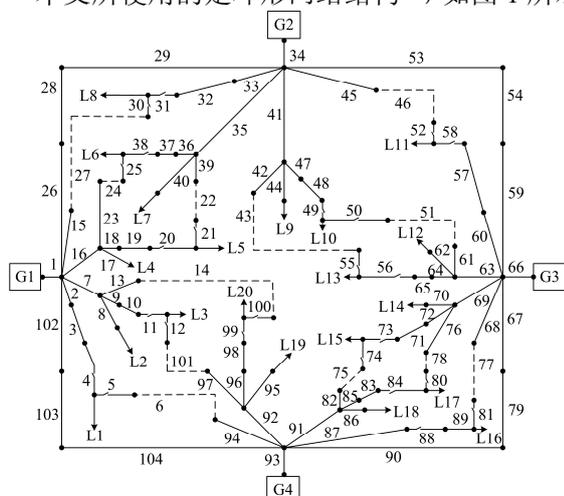


图 1 环型供电系统符号示意图

Fig. 1 Symbol representation of ring power supply system

在该网络中 G_1 — G_4 是 4 个连接着主配电板的环形网络结构的发电机组, 每一台发电机组都能够供应电力给所有的负载线路。 L_1 — L_{20} 表示 20 个负载。图 1 中“·”表示节点, 数字 1~104 为支路编号。

1.2 电力系统数学建模

1.2.1 网络重构目标函数

(1) 负荷供电量的恢复

通常舰船电力系统所承载的电路有三个级别, 其中属于重要负载的为二级别, 有两条配电路线: 正常供电和备用供电^[9]。考虑负荷优先级权重的前提下, 以故障后系统负荷恢复供电量最大化为目标, 重构目标函数为

$$\max F_1 = \alpha_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i L_{g1i} + \alpha_2 \sum_{j=1}^{N_2} x_j L_{g2j} + \alpha_3 \sum_{k=1}^{N_3} x_k L_{g3k} \quad (1)$$

式中: L_{g1i} ($i=1, 2, \dots, N_1$)、 L_{g2j} ($j=1, 2, \dots, N_2$)、 L_{g3k} ($k=1, 2, \dots, N_3$) 分别代表一、二、三级负载; N_1 、 N_2 、 N_3 为一、二、三级的负载数量, 为确定值; α_1 、 α_2 、 α_3 为加权系数。为了体现负载优先级的区别, α_1 、 α_2 设置为

$$\alpha_2 = \max \{L_{g3k}\} / \min \{L_{g2j}\} = 7 \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \times \max \{L_{g2j}\} / \min \{L_{g1i}\} = 21 \quad (3)$$

(2) 负载供电支路开关的改变次数

系统故障重构是通过控制开关的动作, 找到最快、最合适重构供电路线^[10], 开关改变次数的目标函数如式(4)所示。

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^{N_1} S_{1i} + \sum_{j=1}^{N_2} S_{2j} + \sum_{k=1}^{N_3} S_{3k} \quad (4)$$

式中: S_{1i} 、 S_{2j} 、 S_{3k} 为一、二、三级负载开关。

(3) 发电机效率均衡

在电力系统网络重构时, 要考虑发电机工作效率的高低, 防止某一台发电机突然出现过低的工作效率。因此将发电机效率均衡作为目标函数之一, 可表示为

$$\min F_3 = \min \frac{PG_i}{PG_{im}} \quad (5)$$

式中: PG_i 为发电机实际功率; PG_{im} 为发电机额定功率。

为了在重构中同时考虑这 3 个目标, 本文使用加权求和的方法把这 3 个目标统一在同一个目标函数中。利用归一化处理, 可得总的目标函数为

$$\max F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 \quad (6)$$

式中: F_1 、 F_2 、 F_3 为子目标函数; w_1 、 w_2 、 w_3 为

加权系数,且满足如式(7)所示的关系式。

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (7)$$

如果不能达到约束条件要求,那么将 F 的数值设定为 0,在本文中选取 $w_1 = 0.8$ 、 $w_2 = 0.15$ 、 $w_3 = 0.05$,修改 w_1 、 w_2 、 w_3 的数值时要按照实际的需求。

1.2.2 网络重构约束条件

(1) 电力系统网络结构约束

对于拥有正常和备用两条供电路径的一级、二级负载,在同一时间点只能导通一条^[11]。可描述为

$$\sum_{k \in \Omega_i} (1 - z_k) = \sum_{l \in \Omega_i} (1 - z_l) \quad (8)$$

式中: Ω_i 为开关集合; z_k 、 z_l 为一级、二级负载的供电情况。

(2) 系统容量限制

在重构过程中,要限制系统中的容量,不能造成容量过载^[12],则有

$$\sum_{i=0}^m x_{ij} S_i \leq M_j \quad (9)$$

式中: $x_{ij} = 0$ 或 $x_{ij} = 1$ 表示负载和支路或者支路和配电板之间是否连接; S_i 表示支路的用电量。

(3) 考虑节点电压约束以及系统的支路电流限制^[13],有

$$I_i \leq I_{\max}, V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (10)$$

2 粒子群算法的优化改进

粒子群算法在实践操作过程中体现了速度快捷的基本特点,比较适用于低维空间的函数优化。但是随着问题维数的不断增加,基本粒子群优化算法的性能受到一定的影响,很容易导致运算过程陷入僵局,难以达到最优解。舰船电力系统网络故障重构是一个多目标、多约束的非线性组合优化问题,将普通粒子群算法应用在故障重构问题中,容易存在陷入局部极值、收敛精度低等缺陷^[14-15]。因此,针对舰船电力系统故障重构的特点,本文通过对普通粒子群算法进行改进,提出了改进双粒子群优化算法。

2.1 种群混沌初始化

混沌运动具有规律性、遍历性和随机性的特点^[16]。考虑到舰船电力系统重构的快速性要求,若使用普通粒子群算法对其进行初始化,算法的收敛速度可能会因为部分群体偏离最优解而受到影响,不仅增加了搜索时间,还使得寻找到最优解的概率降低^[17]。因此本文在粒子群初始化算法中加入了混沌运动,采取的是混沌序列的方法,此方法能够提

高粒子搜索的多样性和遍历性。采用帐篷映射混沌映射模型对种群展开初始化,提高了算法的收敛速度。混沌映射算子的迭代公式为

$$\alpha_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 2\alpha_{ij}^t, \alpha_{ij}^t \in [0, 0.5] \\ 2 - 2\alpha_{ij}^t, \alpha_{ij}^t \in (0.5, 1] \end{cases} \quad (11)$$

式中: t 为迭代数量; $i=1, 2, \dots, N$, N 为种群大小; $j=1, 2, \dots, D$, D 为基本粒子的维度; α_{ij}^t 为第 i 个基本粒子的第 j 维分量上的混沌未知数。

2.2 自适应参数调整策略

(1) 自适应惯性权值调整方法

惯性权值 w 能够描述上一代粒子对现在粒子速度产生的影响,不仅能够使粒子的速度产生变化,还能够平衡算法的寻优能力。增大 w 可以提高整体搜寻能力,减小 w 的值可以增强局部精确寻找能力。实验研究表明, w 的取值设定在 0.4~0.9 最为合适^[18-19]。为了使 w 能够根据实际问题而动态调整其大小,并且能够使粒子具有均衡的全局与局部搜索能力,本文提出了依照基本粒子的适应度而调节 w 大小的方式。对每一个粒子的适应度值使用反正切函数进行处理,将数值限定在 $[-1, 1]$ 内,由此可以使得变量是对称的,并且这样能够反映出每个粒子在种群中的适应度地位,处理方法如式(12)所示。

$$f_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \quad (12)$$

$$fstd_i = 2 \times \tan^{-1}(f_i / f_{\text{avg}}) / \pi \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, N 为种群大小; f_{avg} 为基本粒子群的平均适应值; $fstd_i$ 为粒子的适存度; f_i 为第 i 个基本粒子的适应值。

以式(13)作为前提,通过逻辑斯蒂函数公式, w 大小依照适应度转变。开始时期基本粒子的适应度很低,由于要尽快找到最优解存在区域, w 需要不断提高,从而令基本粒子得到更大的寻找速率,展开整体寻找;接着在算法持续迭代之后,基本粒子的适应度在大多数状况下相对较优,这时基本粒子需要展开大规模的寻找,惯性权重不断缩小,从而使基本粒子展开详细搜索。 w 随着适应度值不断变化,对粒子速度产生了影响,进而加强了算法的整体与局部寻优能力。粒子的惯性权重的运算方法如式(14)所示。

$$w_i = w_{\max} - \frac{a}{1 + e^{fstd_i}} \quad (14)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, N 为种群大小; w_{\max} 为最大值; a 为惯性因子, a 的取值为 0~1。

(2) 自适应学习因子调整方法

学习因子 c_1 、 c_2 与粒子的移动方向和速度有着密切的相关性, c_1 表示基本粒子的自我搜寻能力, c_2 表示群体学习能力。通常情况下数值取为 2, 但是具体取值也可能呈现出波动的特点, 一般取值为 $[0,4]$ ^[20-21]。如果学习因子缺少变化, 就会容易导致粒子陷入局部极值, 因此本文通过自适应动态调整学习因子, 来避免粒子陷入局部极值。算法开始时粒子要具有较大的自我搜寻能力, 目的是让粒子偏向自己的最优值学习, 增强全局搜索能力。而随着算法运行, 粒子要具有比较强的社会学习能力, 即向群体的最优值靠拢, 增强局部搜寻能力。可通过式(15)、式(16)对学习因子进行调整, 可表示为

$$c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \left(\frac{t}{T_{\max}} \right) \quad (15)$$

$$c_2 = c_{2\min} + (c_{2\max} - c_{2\min}) \left(\frac{t}{T_{\max}} \right) \quad (16)$$

式中: $c_{1\max}$ 、 $c_{1\min}$ 、 $c_{2\max}$ 、 $c_{2\min}$ 分别为学习因子 c_1 、 c_2 的最大取值、最小取值; t 为当前迭代数量; T_{\max} 为最大迭代数量。

2.3 辅助粒子群局部搜索策略

混沌系统的特征之一就是遍历性, 它能够使算法在最合适解的邻近处进行 m 次遍历, 即 m 次无重复的部分搜寻。与随机搜寻相比, 此策略具有更强的方向性和确定性, 这样能快速地找到临近的更优解, 提高了局部搜索效率, 进而提高了算法的整体寻优能力^[22]。因此本文在辅助粒子群中引入了混沌局部搜索策略。

在种群混沌初始化开始后, 分为主粒子群和辅助粒子群, 两个子群协同进化。主群大部分负责整体性的搜寻, 致力于提高整体寻优能力; 辅助粒子群采用混沌局部搜索策略, 展开多样性的寻找。算法首先对适应度进行排列, 找出一些优良粒子, 接着无规则地选择其中一个, 取代式(17)内的整体最佳值, 这样可以使基本粒子追寻不一样的最优个体并展开寻找, 而不是全部追寻整体最优个体, 增强了种群的多样性及局部搜索能力, 最后两个子群间的数据交换是由整体最佳值来完成的。

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad j=1,2,\dots,d \quad (17)$$

$$v_i(t+1) = w_i v_i(t+1) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (best_k(t) - x_i(t)) \quad (18)$$

式中: $x_{ij}(t+1)$ 代表粒子位置; $v_{ij}(t+1)$ 代表粒子速度; $p_i(t)$ 代表最优解; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $best_k(t)$ 是随机选中的第 k 个优秀粒子。

混沌局部搜索步骤如下。

(1) 生成随机变量。设定 $k=0$, 随机出现一个在

$(0, D)$ 的正整数 m , 表示对 m 维分量展开混沌寻找, 随机出现一个 $[0,1]$ 的未知数 α_{ij}^k 。

(2) 出现局部解。将 α_{ij}^k 代入初始式(11)中生成变量 α_{ij}^{k+1} , 并在第 i 个粒子的附近出现一个局部解, 可表示为

$$x_{ij}^* = x_{ij}^* \alpha_{ij}^{k+1}, \quad \text{其中 } j=1,2,\dots,m \quad (19)$$

(3) 约束条件判断。判断 x_{ij}^* 有没有满足约束要求, 并把数值限制在未知数范围内。

(4) 适应度运算。运算 x_{ij}^* 的适应度, 若局部解优越, 则使用局部解; 若没有出现一个比原来粒子更优的解, 则舍掉这个局部解, 否则 $k=k+1$, 返回 2)。

2.4 改进双粒子群优化算法实现具体步骤

(1) 编码。系统故障重构的解是众多开关的组合。对一、二级负载进行 0、1、2 编码, 0 代表供电开关断开, 1 表示正常路线输电, 2 表示备用路线输电; 对三级负载展开 0、1 编码, 0 代表输电开关断开, 1 代表正常路线输电。这样的编码形式能够减少编码数字, 增强运算正确率。

(2) 参数初始化。对种群规模、主粒子群和辅助粒子群的规模、最大迭代次数 T 、 c_1 和 c_2 、最大惯性权重 w_{\max} 、惯性因子 a 以及混沌迭代数量等参数进行初始化, 参数数值的设定在第 3 节中有详细介绍。

(3) 种群混沌初始化。通过上面的帐篷映射混沌映射函数分别对基本粒子群进行混沌初始化, 得到基本粒子的初始方位和初始速率。

(4) 适应度函数值运算, 惯性权值、学习因子运算。计算两个粒子群初始适应度值, 并将粒子的方位数据同时收入到记忆库里面, 明确粒子最佳方位 P_i 和群体最佳方位。通过式(13)以及式(14)可以得出惯性权值的大小, 通过式(15)、式(16)可以得出学习因子的大小。

(5) 种群更新。对于主粒子群, 按照速率式(20)和位置式(17)展开更新, 对于辅助粒子群, 按照位置式(17)和速率式(18)展开更新。单独运算两个基本粒子群里面所有基本粒子的适应度, 并明确个体最佳方位和群体最佳方位。

$$v_i(t+1) = w_i v_i(t+1) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (best_k(t) - x_i(t)) \quad (20)$$

(6) 混沌局部搜索。依照式(11)展开部分寻找, 分析是否得到最佳适应度值或最大混沌迭代数量, 若得到其中一个, 寻找完毕后, 转至(7), 否则转至(4)。

(7) 判断(6)得出的结果是否满足算法终止条件。本文把最大迭代次数当作终止条件, 如果满足

条件, 则立即停止, 输出最佳适应度、负载开关编码, 否则就转到(5)继续展开迭代。

2.5 粒子群的离散化处理

对于本文电网模型来说, 为了使算法应用于电网故障重构中, 需要对连续的变量进行离散化处理^[23]。

根据基本粒子位置更新式(17), 得出 X_{id}^{t+1} 对应的连续值, 按照设定的 3 个区间分别对应 0、1、2 这 3 个值。

有正常有备用: $(-\infty, 0.5) \rightarrow 0, [0.5, 1.5] \rightarrow 1,$
 $(1.5, +\infty) \rightarrow 2$

有正常无备用: $(-\infty, 0.25) \rightarrow 0, [0.25, +\infty) \rightarrow 1$

无正常有备用: $(-\infty, 1) \rightarrow 0, [1, +\infty) \rightarrow 2$

无正常无备用: $(-\infty, +\infty) \rightarrow 0$

离散化处理时, 将连续值转换为离散值, 离散值代表开关的切换, 并将相应的切换动作转换为负载供电状态: 离散值为 0, 代表负载处于失电状态; 离散值为 1, 代表负载为正常供电状态; 离散值为 2, 代表负载为备用供电状态。

3 仿真结果分析

本文采用如图 1 所示的环形网络结构, 其各个负载属性见表 1。假设支路 10 和支路 69 出现故障, 使用 Matlab 语言编写故障重构程序进行模拟仿真, 为了进一步说明本文提出的优化算法的优越性, 将该算法与参考文献中提及的混沌遗传算法、双粒子群算法、免疫克隆选择算法进行模拟仿真, 并将结果进行了对比, 比较结果见表 2。

初始化参数的设置如下: 主种群规模 $N_A=100$,

辅助种群规模 $N_B=100$, 种群维数 $D=20$, 迭代次数 $T_{max}=100$, 惯性权重 $w_{max}=0.9$, $w_{min}=0.4$, 学习因子 $c_{1max}=c_{2max}=2.5$, $c_{1min}=c_{2min}=0.5$, 惯性因子 $a=0.5$, 混沌迭代次数 $t_{max}=10$ 。

图 2 是改进双粒子群算法的重构仿真图。

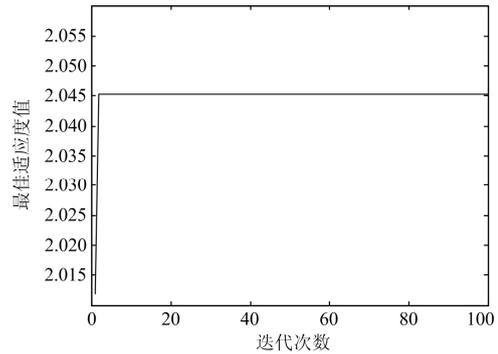


图 2 最佳适应度值变化图

Fig. 2 Change of best fitness value

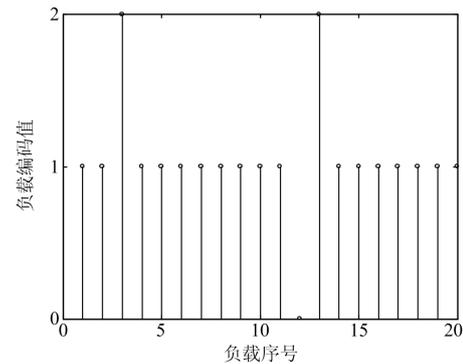


图 3 全局最优解编码

Fig. 3 Global optimal coding

表 1 系统中负载等级及工作电流

Table 1 Load levels and operating current in the system

负载	电流/A	等级	负载	电流/A	等级	负载	电流/A	等级	负载	电流/A	等级
L1	70	1	L6	100	1	L11	225	1	L16	100	1
L2	120	3	L7	80	3	L12	205	3	L17	205	2
L3	200	2	L8	325	1	L13	110	2	L18	200	2
L4	150	3	L9	185	3	L14	72	3	L19	165	3
L5	160	2	L10	44	2	L15	87	2	L20	30	2

表 2 几种优化算法重构结果比较

Table 2 Comparison of several optimization algorithm reconstruction results

算法	混沌遗传算法	粒子群算法	免疫克隆选择算法	改进双粒子群算法
收敛到最优解概率 P/%	90	100	100	100
最优个体	10211111111021121111	11211111111021121111	11211211111021212111	11211111111021111111
最佳恢复计划	L3、L13 改备用路径供电, L2、L12 卸载	L3、L13、L16 改备用路径 供电, L12 卸载	L3、L13、L6、L15、 L17 改备用路径供电, L12 卸载	L3、L13 改备用路径供电, L12 卸载
最小开关数量	4	4	6	3
收敛的最早代数	17	3	14	2

图 2 表示最优粒子的适应度值变化情况, 可以看出在第 2 代就找到了最佳适应度值, 并趋于稳定; 图 3 给出了全局最优解的编码情况, 编码为 112111111102111111, 可以看出最小开关数量为 3 次。从仿真结果可以得出改进双粒子群算法的可行性。

从表 2 中可以得出, 改进双粒子群优化算法收敛到最优解的概率为 100%, 高于混沌遗传算法的 90%, 保证了本文研究的优化算法应用在网络重构中的稳定性; 在算法收敛的最早迭代次数上, 改进双粒子群算法为 2 次, 而另外三种算法分别在第 17 次、3 次、14 次迭代才能收敛到全局最优, 在迭代次数上具有明显的优势; 改进双粒子群算法的最小开关数量为 3 次, 优于另外三种算法。通过上述分析可以反映出改进双粒子群算法在解决舰船电网故障重构问题上具有优越性。

通过以上对比能够得出, 改进双粒子群算法能够始终保证收敛到最优解, 并且此算法的最少开关次数和收敛代数优于混沌遗传算法、粒子群算法和免疫克隆选择算法, 这对于舰船电力系统网络故障恢复来说是非常重要的。因此, 本文提出的改进双粒子群优化算法在处理舰船电力系统网络故障重构方面具有较好的效果。

4 结论

本文针对舰船电力系统网络故障重构, 建立了舰船电力系统网络的数学模型, 提出了改进双粒子群优化算法, 该算法通过混沌初始化、自适应调整参数和学习因子、混沌局部搜索策略, 提高了算法的寻优能力和收敛精度, 保障了系统故障重构的稳定性与快速性, 并与其他算法进行了对比。仿真结果表明, 改进双粒子群优化算法在收敛到最优解的概率、收敛迭代次数和最少开关数量上具有明显的优越性, 可以迅速地、稳定地提供一个较好的恢复方案。

参考文献

- [1] 胡亮灯, 叶志浩, 方明, 等. 舰船综合电力系统智能保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 94-99.
- [2] 毕大强, 张芳, 曾祥君, 等. 船舶直流区域配电网的故障恢复研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 60-65.
- [3] 张芳, 毕大强, 曾祥君, 等. 船舶环形配电网无通道保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 84-89.
- [4] 楚玉华, 黄巧亮. 基于双粒子群算法的船舶电力系统网络重构[J]. 电子设计工程, 2017, 25(5): 37-41.
- [5] 何祖军, 王文明, 刘维亭. 基于混沌遗传算法的舰船区域配电系统故障恢复算法[J]. 船电技术, 2008, 28(6): 380-382.
- [6] SRIVASTAVA S K, BUTLER K L, SARMA N D R. Shipboard power restored for active duty[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3): 16-23.
- [7] 王敏, 刘维亭. 免疫克隆选择算法在船舶电力系统故障恢复中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 19-23.
- [8] ZHANG L, SUN J, GUO C. A novel Multi-objective discrete particle swarm optimization with elitist perturbation for reconfiguration of ship power system[J]. Polish Maritime Research, 2017, 24: 79-85.
- [9] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [10] 张威, 施伟锋, 胡红钱. 船舶区域配电系统全智能体重构及其优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 9-15.

- shipboard zonal power systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 9-15.
- [11] 苏适, 周立栋, 陆海, 等. 基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 34-41.
SU Shi, ZHOU Lidong, LU Hai, et al. Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 34-41.
- [12] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
QI Zheng, ZHANG Shoukui, LI Zhi, et al. Dynamic service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 31-38.
- [13] JIN H L, SONG J Y, KIM D W, et al. Particle swarm optimization algorithm with intelligent particle number control for optimal design of electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(2): 1791-1798.
- [14] SHARIATZADEH F, KUMAR N, SRIVASTAVA A K. Optimal control algorithms for reconfiguration of shipboard microgrid distribution system using intelligent techniques[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 474-482.
- [15] GONG Y J, LI J J, ZHOU Y, et al. Genetic learning particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(10): 2277-2290.
- [16] SALEH A A, ADAIL A S, WADOUD A A. Optimal phasor measurement units placement for full observability of power system using improved particle swarm optimisation[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2017, 11(7): 1794-1800.
- [17] 唐娜, 张公让, 李磊. 自适应混沌搜索的双粒子群优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(9): 2421-2428.
TANG Na, ZHANG Gongrang, LI Lei. Double particle swarm optimization algorithm of self-adaption and chaos search[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(9): 2421-2428.
- [18] BEZERRA J R, BARROSO G C, LEAO R P S, et al. Multiobjective optimization algorithm for switch placement in radial power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 545-552.
- [19] LI P, XU D, ZHOU Z Y, et al. Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 66-73.
- [20] KURU L, OZTURK A, KURU E, et al. Determination of voltage stability boundary values in electrical power systems by using the chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64(15): 873-879.
- [21] 张子泳, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 1-10.
ZHANG Ziyong, ZHANG Menglin, LI Sha. Environmental/economic power dispatch based on multi-objective particle swarm constraint optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 1-10.
- [22] 穆杉. 基于智能重构算法的舰船电力系统研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(22): 55-57.
MU Shan. Research on ship power system based on intelligent reconfiguration algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(22): 55-57.
- [23] JIN T, LI H. Fault location method for distribution lines with distributed generators based on a novel hybrid BPSOGA[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2016, 10(10): 2454-2463.

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-07-09

作者简介:

张兰勇(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为信息科学与控制工程; E-mail: zlyalf@sina.com

孟坤(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制理论. E-mail: mengkun9523@126.com

(编辑 许威)