

基于 IQGA 的船舶电力系统故障定位方法

郑 聪^{1,2}, 周海峰^{1,2}, 郑东强³, 林忠华³, 张兴杰⁴

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021; 4. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了快速精准定位船舶电力系统故障, 争取宝贵的船舶电力抢修时间, 提出一种改进的量子遗传算法 (improved quantum genetic algorithm, IQGA)。首先, 搭建船舶电力系统的数学模型, 把故障定位问题转化为求目标函数最优问题; 接着, 将量子计算引入遗传算法 (genetic algorithm, GA) 中, 采用双链量子比特编码方式, 改进量子旋转门的角度更新策略; 最后, 加入量子非门实现染色体变异操作, 增强算法收敛性能。仿真实验结果表明, 改进量子遗传算法能够精准定位故障区段, 并且较传统算法有着更为显著的收敛性能。

[关键词] 船舶电力系统; 故障定位; 量子遗传算法; 量子旋转门; 量子非门

[中图分类号] S 968.43

Research on Fault Location Method of Ship's Electric System Based on IQGA

ZHENG Cong^{1,2}, ZHOU Haifeng^{1,2}, ZHENG Dongqiang³, LIN Zhonghua³, ZHANG Xingjie⁴

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen, 361021, China;

3. School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021, China;

4. Navigation College, Jimei University, Xiamen, 361021, China)

Abstract: In order to quickly and accurately locate the fault of a power system and gain valuable time for ship power repair, a fault location method of ship power system based on improved quantum genetic algorithm (IQGA) was proposed. Firstly, the mathematical model of the ship power system was built, and the fault location problem was transformed into the problem of finding the optimal objective function. Secondly, the quantum computing is introduced into the genetic algorithm (GA), and the double-chain quantum bit encoding method as well as the quantum non-gate were also employed. The simulation results show that the improved quantum genetic algorithm can locate the faulty segment effectively and precisely, and has more significant convergence performance than the traditional algorithm.

Keywords: ship power system; fault location; quantum genetic algorithm; quantum revolving gate; quantum non-gate

[收稿日期] 2022-04-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51179074); 福建省自然科学基金项目 (2021J01839, 2018J01495); 产学研项目 (S20127); 福建省教育厅项目 (JAT200242, JAT170318)

[作者简介] 郑聪 (1998—), 男, 硕士生, 从事船舶电力系统故障诊断方向研究。通信作者: 周海峰 (1970—), 男, 博士, 教授, 从事智能信息处理、光机电一体化和仿生机理及节能等方面的研究。
E-mail: zhongfeng216@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

船舶电力系统是船舶系统的重要组成部分,随着船舶电网复杂程度的增加,人们对电力系统的供电稳定性提出了更高的要求^[1]。由于船舶空间有限、线路稠密、设备放置集中,作为不同于陆地的独立电力系统,一旦发生线路或设备故障,后果极其严重,所以必须在最短的时间内定位故障并排除,而人工智能技术为解决故障定位问题提供了新的思路。

目前关于电力系统故障定位的研究,主要是针对保护装置与断路器信息,采用人工智能技术进行故障位置的分析与计算。文献[2]提出了一种改进粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法和 GA 混合优化 BP 神经网络的算法,改进了 PSO 的惯性权值与学习因子,并改进了 GA 的染色体更新概率,提高了定位精度,但参数设置较多,迭代收敛慢;文献[3]提出一种 PSO 与萤火虫优化 (glowworm swarm optimization, GSO) 算法相融合的算法,能够兼备两种算法的优点,能以较快速度收敛,但仍存在精度不高、种群多样性有限的问题;文献[4]提出了一种基于 GA 优化的深度置信网络的故障诊断方法,用受限玻尔兹曼机重构误差构造适应度函数,利用 GA 优化网络偏差和权重,将整体准确率提升到 95.73%,但同时增加了收敛时间;文献[5]将电力系统故障定位问题描述为 0-1 的整数规划问题,利用量子遗传算法 (quantum genetic algorithm, QGA) 对故障定位数学模型进行求解,定位精度良好,但算法迭代时种群适应度收敛慢。

量子遗传算法利用量子比特编码来模拟种群,通过量子旋转门、量子非门等操作来更新种群,使新种群的性状质量更高,且具有全局收敛能力强、双链计算并行性等特点^[6]。同传统二进制编码方式相比,量子比特编码方式能够在极大程度上增加种群多样性,可以通过扩充种群数量达到容纳极大数量基因座信息的目的^[7]。针对以上人工智能故障定位方法存在的收敛速度慢、种群多样性低等问题,本文提出一种改进的量子遗传算法 (improved quantum genetic algorithm, IQGA) 来解决船舶电力系统故障定位问题。

1 改进的量子遗传算法

1.1 量子比特编码

IQGA 采用量子态概率幅编码方式的编码方案,使量子比特可以同时处在两个量子态的线性叠加态中。参考了文献[8],其形式为: $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, 且 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。其中 α 、 β 称为量子态的概率幅, $|\alpha|^2$ 为量子态是 $|0\rangle$ 的概率, $|\beta|^2$ 为量子态是 $|1\rangle$ 的概率。在基于量子态概率幅二进制编码方式中,将一个量子位定义为 $[\alpha \ \beta]^T$, 则 m 个量子比特系统可用概率幅表示为:

$$q' = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_m \end{bmatrix}^T。$$

此为单个染色体的编码方式, m 个量子比特系统可同时对 $2m$ 个基因座状态进行描述。

1.2 量子旋转门

量子旋转门是 IQGA 实现染色体更新的重要途径,其主要原理是根据最优染色体的基因性状,调整量子门的旋转角方向 $\varphi(\alpha_i, \beta_i)$ 与旋转角度大小 $\Delta\theta_i$, 使得概率幅向着最优染色体基因性状方向演化。IQGA 采用量子旋转门更新策略实现染色体的动态更新,参考了文献[9],具体调整操作为:

$$U(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix}。$$

更新过程为:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i' \\ \beta_i' \end{bmatrix} = U(\theta_i) \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}。$$

其中: $[\alpha_i' \ \beta_i']^T$ 和 $[\alpha_i \ \beta_i]^T$ 分别表示更新后和更新前染色体的第 i 位量子位。

1.3 量子旋转角改进策略

量子旋转角方向选择策略如表 1^[10] 所示, x_i 为当前染色体的第 i 个基因座, x_{best_i} 为当前最优染色体的第 i 个基因座, $f(x)$ 为当前染色体的适应度值, $f(\text{best})$ 为当前最优染色体的适应度值。

表 1 量子门旋转角方向选择策略^[10]

Tab. 1 Quantum gate rotation angle direction selection strategy

x_i	x_{best_i}	$f(x) > f(\text{best})$	$\varphi(a_i, \beta_i)$				$\Delta\theta_i$
			$a_i\beta_i > 0$	$a_i\beta_i < 0$	$a_i = 0$	$\beta_i = 0$	
0	0	FALSE	0	0	0	0	0
0	0	TRUE	0	0	0	0	0
0	1	FALSE	+1	-1	0	± 1	0.01π
0	1	TRUE	-1	+1	± 1	0	0.01π
1	0	FALSE	-1	+1	± 1	0	0.01π
1	0	TRUE	+1	-1	0	± 1	0.01π
1	1	FALSE	0	0	0	0	0
1	1	TRUE	0	0	0	0	0

标准 QGA 是根据提前预设的固定量子旋转门旋转角度的通用性策略来对种群的各个量子位进行更新, 该策略的种群更新方向与程度不受种群性状的影响, 难以达到最佳更新效果。据于此, 本研究提出根据全局最优染色体适应度值与当前染色体适应度值之间的差异来调整量子旋转门的旋转角度大小, 不断更新方向与程度, 并以以下策略动态更新量子旋转门的旋转角度, 即:

$$\Delta\theta_i = [c \times \text{rand}() \times |Z(\text{best}) - f(x_i)| + \omega^{(i)}] \times 0.04\pi.$$

其中: c 为学习因子; $\text{rand}()$ 为随机数; $Z(\text{best})$ 为迭代到目前为止拥有最优适应度的个体; $f(x_i)$ 为当前种群的第 i 个个体; $\omega^{(i)}$ 为惯性因子。本策略摒弃了传统更新量子旋转门旋转角度与性状无关的通用性策略, 根据全局最优染色体适应度值与当前染色体适应度值之间的差异来动态调整量子旋转门的旋转角度大小。

1.4 量子变异

IQGA 算法通过量子非门来实现染色体变异操作, 以变异概率为基准, 选择最优量子染色体的若干量子位进行量子非门变换。这种变异操作实质上是对两条基因链上的量子位概率幅进行旋转变换, 从而使两条基因链能够同时变异。参考了文献 [11], 其变异过程可表示为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{ij} \\ \sin \theta_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_{ij} \\ \cos \theta_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_{ij}) \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{ij}) \end{bmatrix}.$$

其中, $[\cos \theta_{ij} \quad \sin \theta_{ij}]^T$ 表示第 i 个量子染色体的第 j 个量子位。

2 IQGA 故障定位

2.1 数据监测

为在故障定位过程中能及时获取信息, 本文提出将无线传感网络 (wireless sensor network, WSN) 技术^[12] 引入动作信息的监测中。在各断路器节点处设置无线传感器监测节点, 监测节点对无线传感器获取的信息进行综合调理、滤波等处理操作后再传送到汇聚基站, 汇聚基站负责完成无线传感器节点与后台数据处理中心之间通信协议的转换。WSN 网络拓扑结构如图 1 所示。

船舶电力系统发生故障后, 会导致相关继电保护装置和断路器动作。监测节点第一时间对各个断路器在主保护、第一后备保护、第二后备保护时段的开关量信息进行采集, 断路器状态信息被监测节点经过多跳路由传输至汇聚基站, 由数据处理中心对信息进行协同式处理与计算, 对故障位置进行准

确定。针对船舶电力系统中电力设备与布线密集的特点,将 WSN 技术引入断路器的无线实时集群监测中,有以下三点优势:

- 1) 减少不必要的布线需求,节约布线成本;
- 2) 保证数据采集的实时性、及时性;
- 3) 避免因线路老化而出现上报信息失真的问题,保障数据准确性。

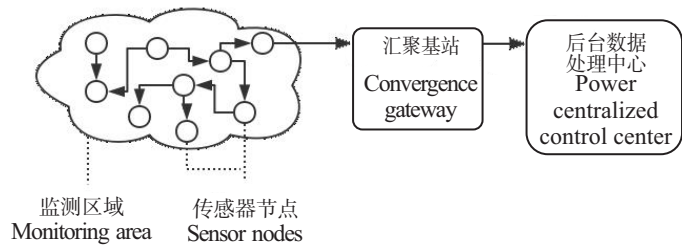


图1 WSN拓扑结构

Fig.1 Wireless sensor network topology

2.2 算法概述

将船舶电力系统中的多个元件及线路等作为节点,节点的故障运行状态即为 IQGA 算法中种群的个体性状,根据种群个体性状来生成船舶电力系统的期望故障阵列。当船舶电力系统出现故障时,由 WSN 节点监测到的各个断路器在主保护、第一后备保护、第二后备保护时段的开关量状态,上报通过开关函数生成各个节点断路器的期望故障阵列。以算法种群个体对应节点的断路器期望故障阵列与监测设备收集到的断路器实际故障阵列之间的相似程度作为评价函数,以此为迭代依据来不断更新种群,经过量子旋转门更新、量子非门变异等种群更新操作后,若满足迭代条件,则输出全局最优种群个体,其性状为当前船舶电力系统各个节点的运行状态,从而定位故障元件。

2.3 开关函数

建立船舶电力系统开关函数数学模型的基本思想,是在收集继电保护装置的动作信息(保护装置信息、动作信息、跳闸信息等)的基础上,可将故障定位问题描述为 0-1 的整数规划问题,生成期望故障阵列。

如图 2 所示,假设系统中共有 5 个元件 A、L1、B、L2、C(元件状态依次记为 $S_1 \sim S_5$)可作为节点;6 个断路器 D1~D6;7 个主保护:母线元件 A 处的的主保护 A_m ,母线元件 B 处的主保护 B_m ,母线元件 C 处的主保护 C_m ,线路元件 L1 处靠近母线元件 A 侧的主保护 L_{1Am} ,线路元件 L1 处靠近母线元件 B 侧的主保护 L_{1Bm} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 B 侧的主保护 L_{2Bm} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 C 侧的主保护 L_{2Cm} ;4 个第一后备保护:线路元件 L1 处靠近母线元件 A 侧的第一后备保护 L_{1Ap} ,线路元件 L1 处靠近母线元件 B 侧的第一后备保护 L_{1Bp} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 B 侧的第一后备保护 L_{2Bp} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 C 侧的第一后备保护 L_{2Cp} ;4 个第二后备保护:线路元件 L1 处靠近母线元件 A 侧的第二后备保护 L_{1Aq} ,线路元件 L1 处靠近母线元件 B 侧的第二后备保护 L_{1Bq} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 B 侧的第二后备保护 L_{2Bq} ,线路元件 L2 处靠近母线元件 C 侧的第二后备保护 L_{2Cq} (保护状态依次记为 $r_1 \sim r_{15}$)。主保护时段断路器动作原理为:以 r_1 为例,当母线 A 故障时,则主保护 r_1 动作,使断路器 D1、D2 动作;第一后备保护时段断路器动作原理为:以 r_8 为例,当线路 L1 故障时,主保护时段 L_{1Am} (r_4) 中断路器 D2 拒动,则第一后备保护 r_8 动作,使断路器 D2 动作;第二后备保护(保护相邻元件)时段断路器动作原理为:以 r_{12} 为例,当母线 B 发生故障,断路器 D3 在第一后备保护阶段拒动,则第二后备保护 r_{12} 动作,使断路器 D2 动作。

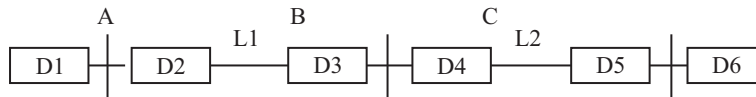


图2 简化系统线路图

Fig.2 The diagram of the simplified system

IQGA 算法的每个种群个体性状 $[S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5]$ 表示一组元件的故障运行状态,当元件故障时取值为 1,否则为 0。再由表 2 所示的期望函数生成各断路器在各级保护期间的期望故障阵列,其中 D_{mi}^* 、 D_{pi}^* 、 D_{qi}^* 分别表示第 i 个断路器在主保护、第一后备保护、第二后备保护期间的期望动作状态。

表2 各级保护所对应的断路器期望函数

Tab.2 Expected function for protection of the corresponding breakers

保护状态 Protection status	对应保护中断路器期望函数 Breaker expected function
r_1	$D_{m1}^* = S_1 \quad D_{m2}^* = S_1$
r_2	$D_{m3}^* = S_3 \quad D_{m4}^* = S_3$
r_3	$D_{m5}^* = S_5 \quad D_{m6}^* = S_5$
r_4	$D_{m2}^* = S_2$
r_5	$D_{m3}^* = S_2$
r_6	$D_{m4}^* = S_4$
r_7	$D_{m5}^* = S_4$
r_8	$D_{p2}^* = S_2(1 - D_{m2})$
r_9	$D_{p3}^* = S_2(1 - D_{m3})$
r_{10}	$D_{p4}^* = S_4(1 - D_{m4})$
r_{11}	$D_{p5}^* = S_4(1 - D_{m5})$
r_{12}	$D_{q2}^* = 1 - [1 - S_3(1 - D_{m3})(1 - D_{p3})][1 - S_4(1 - D_{m3})(1 - D_{p3})(1 - D_{m4})(1 - D_{p4})]$
r_{13}	$D_{q3}^* = 1 - [1 - S_1(1 - D_{m2})(1 - D_{p2})]$
r_{14}	$D_{q4}^* = 1 - [1 - S_5(1 - D_{m5})(1 - D_{p5})]$
r_{15}	$D_{q2}^* = 1 - [1 - S_3(1 - D_{m4})(1 - D_{p4})][1 - S_2(1 - D_{m3})(1 - D_{p3})(1 - D_{m4})(1 - D_{p4})]$

2.4 评价函数

船舶电力系统发生故障后,会导致相关继电保护装置和断路器动作,从而切断故障区域。通过监测设备将各个断路器在主保护、第一后备保护、第二后备保护时段的动作情况收集起来;再根据各级保护数量设立贡献因子,将报警信号的故障表示为目标函数的最大化问题;并以算法种群个体对应节点求出的断路器期望故障阵列与监测设备收集到的断路器实际故障阵列之间的相似程度,作为评价函数。评价函数可作为算法评价种群质量高低的依据,即为适应度函数,表示为:

$$E(S) = W - [f_1 \times \sum_{i=1}^{n_D} |D_{mi} - D_{mi}^*(S)| + f_2 \times \sum_{i=1}^{n_D} |D_{pi} - D_{pi}^*(S)| + f_3 \times \sum_{i=1}^{n_D} |D_{qi} - D_{qi}^*(S)|]。$$

其中: W 表示为极大值(这里设为 10^2),引入 W 确保 $Fitness(S)$ 恒正,将问题转化为最大值优化问题; S 表示一个 n 维向量,表示算法的每个种群个体性状所代表的一组元件的故障运行状态; n_D 表示断路器的总数目; D_{mi} 、 D_{pi} 、 D_{qi} 分别表示在主保护、第一后备保护、第二后备保护时段第 i 个断路器的实际运行状态; D_{mi}^* 、 D_{pi}^* 、 D_{qi}^* 分别表示第 i 个断路器在主保护、第一后备保护、第二后备保护期间的期望动作状态; f_1 、 f_2 、 f_3 分别表示主保护、第一后备保护、第二后备保护贡献因子,由各级保护数量与总保护数量之比决定。

2.5 算法定位流程

基于 IQGA 算法的船舶电力系统故障定位流程如下:

Step 1: 读取 WSN 节点监测到的断路器等元件在主保护、第一后备保护、第二后备保护期间的实际运行状态信息,生成断路器实际故障阵列 $[D_{mi} \quad D_{pi} \quad D_{qi}]^T$ 。

Step 2: 初始化 IQGA 参数,如种群规模、种群维度(即节点总数)、最大迭代代数、贡献因子大小等。

Step 3: 初始化双链量子比特种群,对算法进行量子比特编码,每个种群个体代表着一组元件的故障运行状态。

Step 4: 迭代开始,根据种群个体性状即元件故障运行状态,和各级保护与断路器的对应期望函

数,生成各个断路器在各级保护期间状态的期望故障阵列 $[D_{mi}^* \ D_{pi}^* \ D_{qi}^*]^T$ 。

Step 5: 根据实际故障阵列与期望故障阵列,通过评价函数 $Fitness()$ 计算每个总群个体的适应度函数值,并记录历史最优的种群个体及其适应度函数值。

Step 6: 根据历史最优的种群个体及其适应度函数值,使用改进的量子旋转门对双链量子比特种群进行更新。

Step 7: 使用量子非门对量子位进行种群变异操作,更新种群。

Step 8: 若满足迭代条件,则输出全局最优种群个体即船舶电力系统实际故障运行状态,定位故障元件,算法迭代结束;否则返回 Step 4。

3 仿真实验与分析

基于 MATLAB 平台,搭建如图 2 所示的系统模型,仿真验证本方法的可行性。系统包含 5 个元件 ($S_1 \sim S_5$), 15 个保护 ($r_1 \sim r_7$ 为主保护、 $r_8 \sim r_{11}$ 为第一后备保护、 $r_{12} \sim r_{15}$ 为第二后备保护) 和 6 个断路器 ($D1 \sim D6$)。故障定位算例分为单点和组合两组。用标准量子遗传算法和本研究改进的量子遗传算法做迭代对比仿真实验,相关初始化参数设定如下: 种群规模 $N=30$; 种群维度及元件数量为 5; 最大迭代数为 100; 主保护、第一后备保护及第二后备保护的贡献因子分别为 7/15、4/15、4/15。

根据算例中各断路器在主保护、第一后备保护及第二后备保护时段的动作信息,模拟 WSN 设备监测环节,将断路器动作信息输入算法作为预设值。每个算例连续进行 50 次,记录两种优化算法在相同参数及预设值下的平均准确率、收敛代数数和迭代时间。取其中最能代表整体水平的算法迭代曲线,绘制成为算例的算法迭代对比图。

3.1 单点故障

根据主保护、第一后备保护、第二后备保护时段的断路器动作,以及故障元件类型,对单点故障进行分类,结果见表 3。以算例 1 为例: WSN 设备检测到断路器 $D3$ 、 $D4$ 在主保护动作时段动作,即 $D_m = [0,0,1,1,0]$; 在第一后备保护动作时段没有断路器动作,即 $D_p = [0,0,0,0,0]$; 在第二后备保护动作时段没有断路器动作,即 $D_q = [0,0,0,0,0]$; 定位结果为元件 B 故障,即 $S = [0,0,1,0,0]$ 。单点故障算例 1~算例 7 的算法迭代对比结果见图 3~图 9,单点故障算例整体的平均准确率、平均收敛代数、平均迭代时间如表 4 所示。

表 3 线路系统故障定位结果

Tab. 3 Results of faults location of the line system

单点 算例 Single case	主保护 Main protection	第一后备保护 The first backup protection	第二后备保护 The second backup protection	故障 元件 Faulty element	组合 算例 Combinded case	主保护 Main protection	第一后备保护 The first backup protection	第二后备保护 The second backup protection	故障 元件 Faulty element
1	D3、D4	—	—	B	1	D1、D2	D4、D5	—	A、L2
2	D4、D5	—	—	L2	2	D3、D4	D5、D6	—	B、C
3	—	D1、D2	—	A	3	D1	D2、D3	—	A、L1
4	—	D2、D3	—	L1	4	D3、D4	D5	—	B、L2
5	—	—	D3	A	5	D5、D6	—	D3	A、C
6	—	—	D2	B	6	—	D2、D3	D5	L1、B
7	—	—	D4	C	7	—	—	D4	C

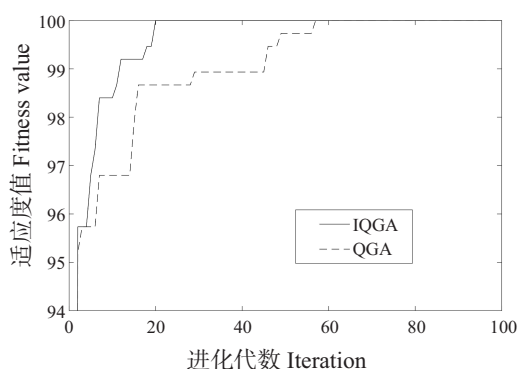


图3 单点故障算例1的算法迭代图

Fig.3 Algorithm iteration diagram of single point fault example 1

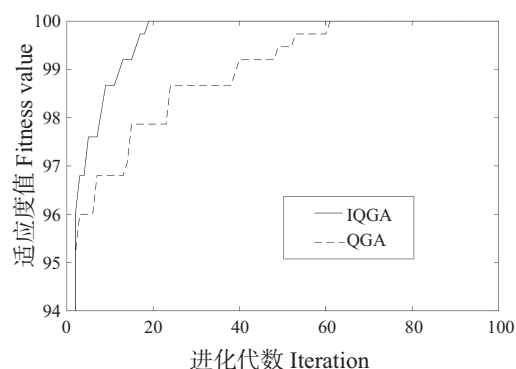


图4 单点故障算例2的算法迭代图

Fig.4 Algorithm iteration diagram of single point fault example 2

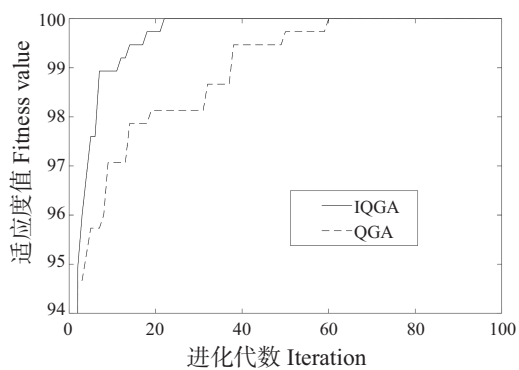


图5 单点故障算例3的算法迭代图

Fig.5 Algorithm iteration diagram of single point fault example 3

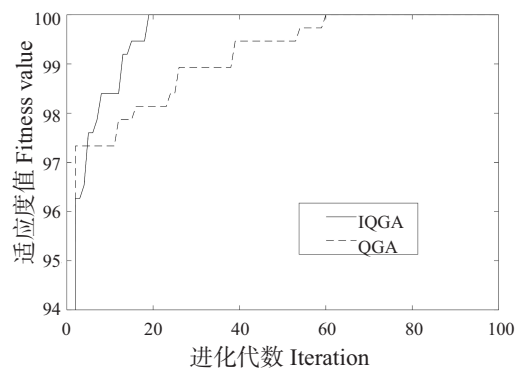


图6 单点故障算例4的算法迭代图

Fig.6 Algorithm iteration diagram of single point fault example 4

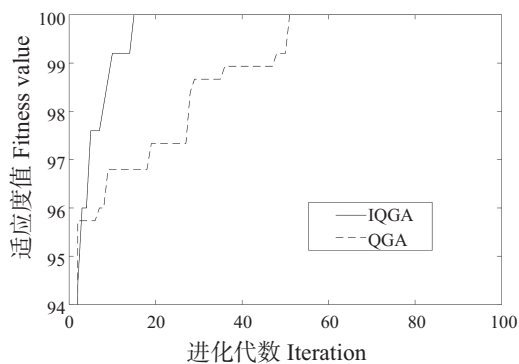


图7 单点故障算例5的算法迭代图

Fig.7 Algorithm iteration diagram of single point fault example 5

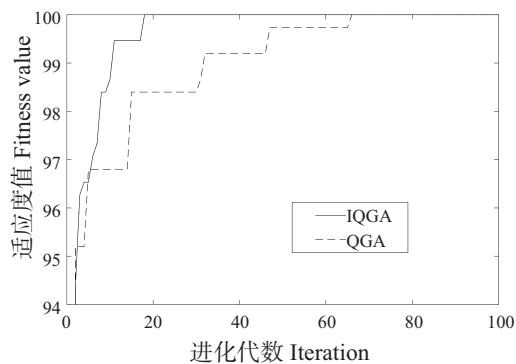


图8 单点故障算例6的算法迭代图

Fig.8 Algorithm iteration diagram of single point fault example 6

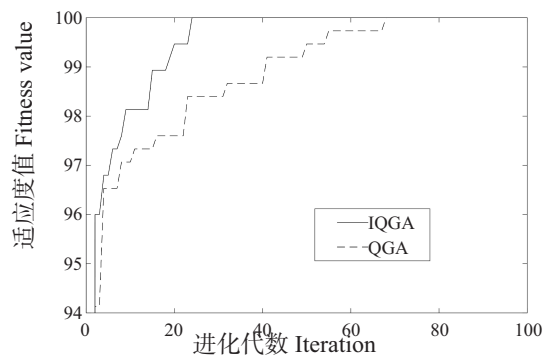


图9 单点故障算例7的算法迭代图

Fig.9 Algorithm iteration diagram of single point fault example 7

表4 单点故障算法迭代结果

Tab.4 Iteration results from single point failure algorithm

算法 Algorithm	平均定位准 确率 Average positioning accuracy/%	平均收敛 代数 Average convergence quantity	平均迭代时 间 Average convergence time/s
IQGA	96.2	20	0.358
QGA	74.3	63	0.823

3.2 组合故障

根据主保护、第一后备保护、第二后备保护时段的断路器动作, 以及不同故障元件组合进行组合故障分类 (见表 3)。以算例 1 为例: WSN 设备检测到断路器 D1、D2 在主保护动作时段动作, 即 $D_m = [1, 1, 0, 0, 0]$; 断路器 D4、D5 在第一后备保护时段动作, 即 $D_p = [0, 0, 0, 1, 1]$; 在第二后备保护动作时段没有断路器动作, 即 $D_q = [0, 0, 0, 0, 0]$; 定位结果为元件 A、L2 故障, 即 $S = [1, 0, 0, 1, 0]$ 。组合故障算例 1 ~ 算例 6 的算法迭代对比见图 10 ~ 图 15, IQGA 和 QGA 算法的组合故障算例整体的平均准确率、平均收敛代数、平均迭代时间分别为 95.6%、22、0.342 s 和 73.1%、77、0.847 s。

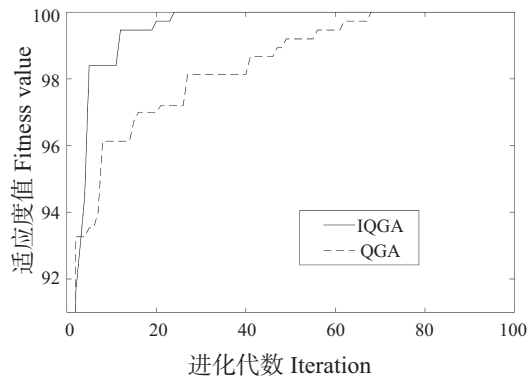


图10 组合故障算例1的算法迭代图

Fig.10 Algorithm iteration diagram of combined fault example 1

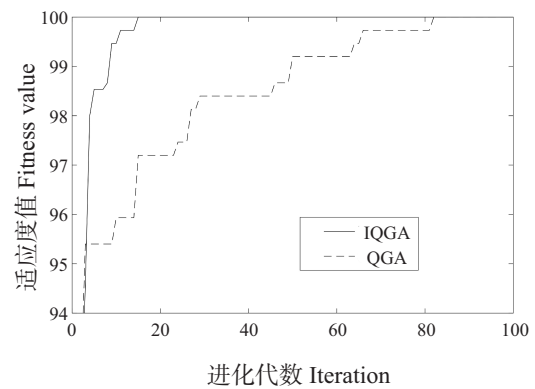


图11 组合故障算例2的算法迭代图

Fig.11 Algorithm iteration diagram of combined fault example 2

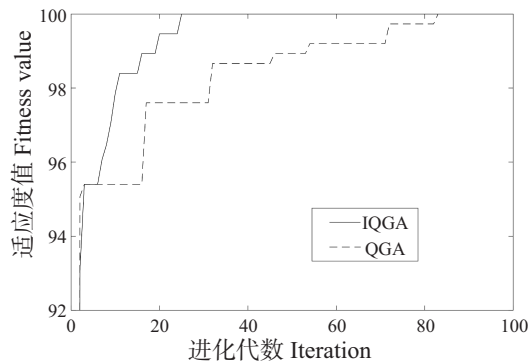


图12 组合故障算例3的算法迭代图

Fig.12 Algorithm iteration diagram of combined fault example 3

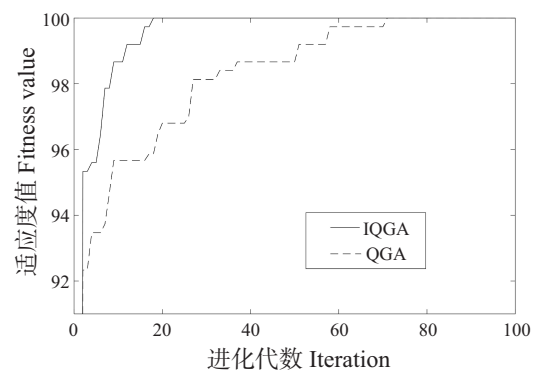


图13 组合故障算例4的算法迭代图

Fig.13 Algorithm iteration diagram of combined fault example 4

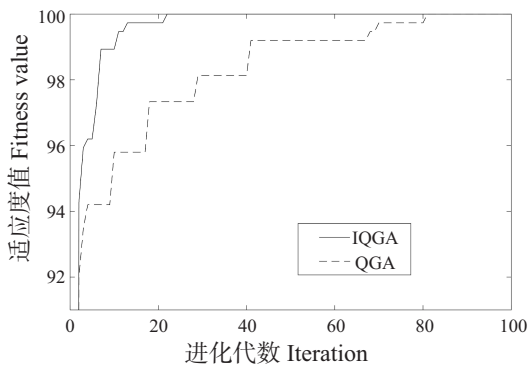


图14 组合故障算例5的算法迭代图

Fig.14 Algorithm iteration diagram of combined fault example 5

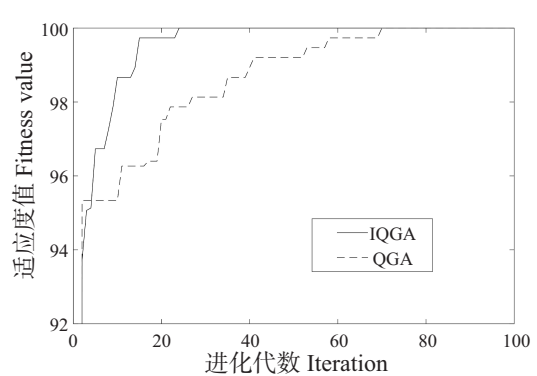


图15 组合故障算例6的算法迭代图

Fig.15 Algorithm iteration diagram of combined fault example 6

3.3 实验分析

根据上述单点及组合故障仿真实验结果可知:采用两种算法对预设的同一位置的故障进行定位实验,标准 QGA 在单点故障状态下平均收敛代数为 63 代左右,在组合故障状态下平均收敛代数为 77 代左右,出现了迭代次数随故障点数量增加而增加的现象,且收敛速度慢、全局搜索能力弱,很难跳出局部最优解,导致准确率低下;反观 IQGA 在单点及组合故障状态下,均能够在 20 代左右迭代至最优,且缩短了收敛速度,准确率也较改进前有较大提升。

综上所述,IQGA 算法能够高效定位船舶电力系统中的单点及组合故障,且与标准 QGA 算法相比较,优势明显,有着更快的收敛速率与定位速率,能够更好地适应船舶电力系统的故障定位问题。

4 结论

本文提出一种基于 IQGA 的船舶电力系统故障定位方法。在数据监测模块采用 WSN 技术进行故障信息采集;根据船舶电力系统的特点搭建数学模型,构建开关函数,以评价函数作为算法迭代依据;算法模块对种群进行双链量子比特编码,改进了量子旋转门的旋转角度大小变化策略;最后利用量子非门进行种群变异操作。通过对改进前后的算法进行对比实验分析,IQGA 拥有更为显著的收敛性能。但如何将基于 WSN 技术的船舶故障信息监测进行实船验证,需进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1]陈诗涛,卢俊杰,王静绮,等.船舶电力系统暂态稳定性的仿真与对比分析[J].舰船电子工程,2021,41(1):67-72,153.
- [2]李超,薛士龙.改进 GA-PSO 算法的船舶电力系统故障诊断[J].科学技术与工程,2019,19(28):372-377.
- [3]尤晓亮,何广军,田德伟,等.电力系统故障诊断的萤火虫和粒子群混合算法研究[J].计算机测量与控制,2015,23(10):3344-3346,3353.
- [4]TAO C X,WANG X,GAO F Y,et al. Fault diagnosis of photovoltaic array based on deep belief network optimized by genetic algorithm[J]. 中国电气工程学报(英文),2020,6(3):106-114.
- [5]侯新国,王家林.舰船电力系统量子遗传算法的故障诊断方法研究[J].船电技术,2013,33(12):1-4.
- [6]陈恒宇,丁唯一,殷寰宇,等.基于量子遗传算法的回焊炉参数设定[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2021,35(9):248-255. DOI:10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.09.031.
- [7]梁云飞.基于改进型量子遗传算法的无线传感器网络定位研究[D].赣州:江西理工大学,2013.
- [8]王旭海.基于改进量子遗传算法的含分布式电源配电网故障区段定位方法的研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [9]梁昌勇,柏桦,蔡美菊,等.量子遗传算法研究进展[J].计算机应用研究,2012,29(7):2401-2405.
- [10]邱航,汤红波,游伟,等.NFV 中基于量子遗传算法的网络服务扩展算法[J].通信学报,2022,43(11):44-52.
- [11]张宇献,陈向文,钱小毅.基于双链量子遗传优化的分类规则挖掘算法[J].沈阳工业大学学报,2021,43(1):61-66.
- [12]MOSTAFAEI H,MONTIERI A,PERSICO V,et al. A sleep scheduling approach based on learning automata for WSN partial coverage[J]. Journal of Network and Computer Applications,2017,80:67-78.
- [13]周昕,殷芸辉.基于遗传算法的电力系统故障诊断[J].盐城工学院学报(自然科学版),2005,18(4):18-21.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)