DOI:10.11784/tdxbz202504015

基于改进差异创意搜索算法的主动配电网故障区段定位方法

姚　芳[1]，陆天成[1]，王希平[2,3]

(1. 河北工业大学电气工程学院，天津 300401；2. 河北水利电力学院电力工程系，沧州 100190；
3. 河北省高校交通基础设施数智化应用技术研发中心，沧州 100190)

摘　要：针对传统故障定位方法在面对复杂故障场景时容错性差、适应性弱以及效率瓶颈的难题，本文基于改进的差异创意搜索 IDCS 算法提出了一种计及不同数量分布式电源接入的主动配电网故障区段定位方法. 首先，通过改进故障电流编码方式，适应主动配电网中双向故障电流流动的特点；其次，优化开关函数的构建方法，解决了双重故障时开关节点反映错误的问题，使其能够更准确地反映开关节点的状态；再次，引入最小集理论和逼近思想，构造适应度函数，提高故障定位的精度；最后，通过 IEEE33 节点模型进行仿真实验，结果表明，所提方法在单点故障、多点故障及数据畸变情况下，故障定位准确率分别为 98.7%、97.8% 和 96.5%，平均收敛次数为 7 次，平均迭代时间为 1.521 s，相较于遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)算法等传统方法，平均迭代时间均缩短 30%以上，在定位精度和计算效率方面表现出显著优势，有效提高了主动配电网故障定位的准确性和鲁棒性，可为配电网智能化运维提供技术支撑.

关键词：主动配电网；故障定位；差异创意搜索算法；分布式电源；故障区段定位

中图分类号：TM727；TP18　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0493-2137(2026)05-0541-12

Active Distribution Network Fault Section Location Method Based on Improved Differentiated Creative Search Algorithm

Yao Fang[1]，Lu Tiancheng[1]，Wang Xiping[2,3]

(1. School of Electrical Engineering，Hebei University of Technology，Tianjin 300401，China；
2. Department of Electrical Engineering，Hebei University of Water Resources and Electric Engineering，
Cangzhou 100190，China；3. Hebei Higher Institute of Transportation Infrastructure Research and Development
Center for Digital and Intelligent Technology Application，Cangzhou 100190，China)

Abstract：To address the challenges of traditional fault location methods in complex fault scenarios，such as poor fault tolerance，weak adaptability，and efficiency bottlenecks，this paper proposed an improved differentiated creative search fault section location method for active distribution networks considering varying numbers of distributed generations(DGs). First，the approach adapted to bidirectional fault current flow characteristics in active distribution networks by modifying the fault current encoding method. Second，the switch function construction method was optimized to resolve incorrect status reflection at switching nodes during double faults，achieving more accurate state representation. Third，minimum set theory and approximation concepts were introduced to develop an enhanced fitness function，improving fault location precision. Finally，simulation experiments using the IEEE 33-node model demonstrate that the proposed method achieves accuracy rates of 98.7%，97.8%，and 96.5% for single-point faults，multi-point faults，and data distortion scenarios respectively，with an average convergence of 7 iterations and average iteration time of 1.521 s. Compared to traditional methods like genetic algorithm(GA)and particle swarm optimization(PSO) algorithm，this approach reduces average iteration time by over 30% while exhibiting superior positioning accuracy and computational efficiency. The method significantly enhances the reliability and robustness of active

收稿日期：2025-04-11；**修回日期**：2025-07-24.
作者简介：姚　芳(1972—　　)，女，博士，教授.
通信作者：姚　芳，yaofang@hebut.edu.cn.
基金项目：河北省科技计划基金资助项目(24464401D).
Supported by the Science and Technology Program of Hebei Province，China(No. 24464401D).

distribution network fault location, providing technical support for intelligent distribution network operation and maintenance.

Keywords: active distribution network; fault location; differentiated creative search algorithm; distributed generation; fault segment location

随着我国新型电力系统建设的推进,电力系统正面临着前所未有的挑战与机遇[1]. 在这一背景下,配电网作为电力系统的重要组成部分,其功能和形态正在发生深刻变化[2]. 随着分布式电源(distributed generation, DG)的大量接入以及新型负荷的出现,配电网正逐步向源网荷储融合互动的主动配电网转变. 这种转变不仅提高了配电网的供电能力和灵活性,也对配电网的运行控制和故障处理提出了更高的要求[3].

主动配电网的故障定位主要都是基于馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)检测到的故障电流信息,上传至主站监控和数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统,通过智能算法进行计算得出故障区段,主要方法有矩阵算法和人工智能算法等[4],其中矩阵算法的原理是利用 FTU 实时上传的报警信息来构建故障矩阵,并通过故障矩阵之间的异或运算以实现故障区段定位的方法[5]. 虽然矩阵算法及其改进算法原理简单并且运算速度较快,但算法的容错能力较弱,在报警信息畸变情况下容易出现误判,因此不适用于复杂且恶劣的环境[6].

目前针对主动配电网主流的人工智能算法大多是基于传统的优化算法改进或者是开发新的算法. 如改进多元宇宙算法、免疫算法、量子退火算法、遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等[7-12]. 尽管现有的故障定位方法在一定程度上能够满足配电网故障处理的需求,但在面对主动配电网的复杂结构和运行特性时,仍存在一些不足之处[12-13]. 首先,传统方法在处理双向故障电流流动时,往往难以准确判断故障区段,导致故障处理效率低下[14-15]. 其次,随着分布式电源的大量接入,在不同数量 DG 的接入情况下故障表现也有所不同[16],传统方法难以适应这种变化,尤其在面对多点故障和数据畸变时,容错能力和鲁棒性有待提高[17-20]. 对于主动配电网的故障定位应当在保证准确性、可靠性的前提下去追求定位的速度,但现有的方法并没有对二者进行很好的平衡.

针对以上定位方法的不足,本文提出了一种改进的差异创意搜索(improved differentiated creative search, IDCS)算法. 差异创意搜索(differentiated creative search, DCS)算法是一种具有突破性的优化算法,它的优点体现在解决复杂优化问题方面的高效能力,具有强大的进化能力、快速的搜索速度和出色的寻优能力以及速度与精度相结合的平衡能力[21]. 本文基于 DCS 加入了向量化评估与预计算机制,在保证准确度的前提下提高了速度,更加适用于主动配电网的应用. 通过改进故障电流编码方式,适应主动配电网中双向故障电流流动的特点. 优化开关函数的构建方法,解决了双重故障时开关节点反映错误的问题,使其能够更准确地反映开关节点的状态. 引入最小集理论和逼近思想,构造适应度函数,提高故障定位的精度. 通过多次仿真实验验证了所提方法在不同数量 DG 接入下的有效性和优越性. 结果表明,本文方法在单点故障、多点故障以及数据畸变情况下的故障定位准确率均高于其他对比算法,且具有更快的收敛速度和更短的迭代时间. 综上所述,本文研究旨在为配电网的智能化运维提供一种高效、准确的故障定位方法,以应对主动配电网在故障处理方面的挑战,提高配电网的供电可靠性和运行效率.

本文的主要研究内容和结构安排如下:首先,针对主动配电网双向故障电流特性,提出改进的故障电流编码方式;其次,分析传统开关函数在双重故障场景下的局限性,并给出优化构建方法;结合最小集理论与逼近思想构造适应度函数以提升定位精度与鲁棒性;然后,详述改进差异创意搜索算法的核心机制,阐释其向量化评估与分代预计算机制对计算效率的提升;最后,基于 IEEE33 节点模型设计多场景(单点故障、多点故障、数据畸变)仿真实验,验证所提方法在定位精度、收敛速度及抗干扰能力方面的优越性.

1 主动配电网故障区段定位原理

为实现主动配电网故障时的区段定位,需在配电网各节点部署 FTU 以采集电流信息. 当系统出现故障时,FTU 将采集到的信息传输至数据采集与监控系统,在该系统中对故障信息进行整合与分析,进而调用定位算法以实现故障的自动处理.

要想便于定位算法的调用,需要将故障区段定位问题转化为组合优化问题. 因此首先确定节点和段落的数学形式,即对节点和区段的编码;其次,找到区段和节点之间的内在联系,构建出关于区段的节点开关函数;最后,利用最小集理论和逼近思想构造适

应度函数.

与传统的配电网分级保护不同，本文提出的故障定位方法侧重于通过对故障电流信息的深度挖掘和分析，实现对故障区段的精准定位，适用于 FTU 装置能够覆盖各开关点与 DG 接入点，且支持故障电流方向检测的应用场景. 分级保护主要关注故障发生时迅速隔离故障区域，防止故障的进一步扩大，保护配电网的整体安全和稳定. 本文方法是为分级保护提供更准确的故障位置信息，以便更高效地实施保护动作，减少停电时间和停电范围，二者相辅相成，共同提升配电网的故障处理能力.

1.1　故障电流编码

配电网发生故障时，安装在配电终端与线路上的 FTU 元件会上传带有电流方向的报警信号. 将采集到的各个节点的电流信息与预设的整流电流进行比较，可以得到比较结果从而进行二进制编码. 如图 1 所示，在传统配电网发生故障时，故障电流往往从系统主电源流向故障点.

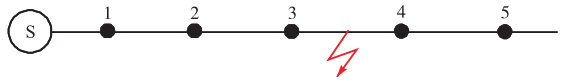


图 1　传统配电网故障示意

Fig.1　Schematic of traditional distribution network faults

用传统的编码方式此时的报警信号为[1 1 1 0 0]，符合实际故障情况. 因此，用简单的 0、1 即可对故障电流进行编码. 但在主动配电网发生故障时，随着大量 DG 的接入，故障电流的流动可能会出现双向流动的现象，如图 2 所示. 此时的报警信号为[1 1 1 1 1]，不符合实际故障情况. 节点 4 与节点 5 的故障电流是从 DG 流向故障点的，与节点 1、2、3 方向相反，而在这种编码下并未表现出来.

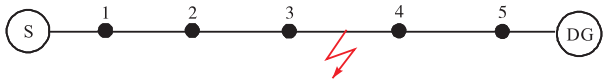


图 2　含 DG 配电网故障示意

Fig.2　Schematic of DG distribution network faults

要构造新的故障编码方式，首先需要明确含 DG 接入配电网电流的方向：本文规定系统电源流向各个 DG 或线路分支末端的方向为正方向，用 j 表示 FTU 的第 j 个安装节点，对 FTU 上传的故障电流信号 I_j 进行编码. 故障状态的判断依据是 FTU 检测到的故障电流幅值是否超过其预设的启动阈值 I_{set} 及其流动方向.

$$I_j=\begin{cases}1 & |I_j|>I_{\text{set}}\text{且故障电流方向为规定正方向}\\ 0 & |I_j|\leqslant I_{\text{set}}\\ -1 & |I_j|>I_{\text{set}}\text{且故障电流方向为规定反方向}\end{cases}\tag{1}$$

按照新的编码方式，图 2 的报警信号应为[1 1 1 −1 −1]，与实际故障情况符合且故障特征明显.

此外，DG 容量对故障检测的影响主要体现在故障电流的判断上. 当 DG 容量过大时，故障点两侧故障电流信号 I_j 特征明显且有反向故障电流出现，流向故障点；当 DG 容量过小时，可能会出现$|I_j|\leqslant I_{\text{set}}$ 的情况，但此时 DG 并不会对故障电流检测产生影响，即等同于图 1 中传统配电网故障的场景. 可见因此在考虑到故障电流反向的场景下，DG 容量并不会对故障检测产生影响，故本文对于 DG 的接入关注于接入数量上的影响.

1.2　开关函数构建

开关节点的期望状态与上、下游区段的馈线段故障状态以及下游区段的分布式电源接入状态密切相关，这些因素共同决定了开关节点的状态.

对于包含 M 个馈线区段的配电网中，用 0、1 来表示区段 i 的故障状态，记为 $x_i(i=1,2,\cdots,M)$，在故障时为 1，正常状态时为 0. 而对于常用的在主动配电网中开关节点 j 处的 FTU 的开关函数为

$$I_j^*(x)=\left[\prod_{\text{S}_1}K_{\text{S}_1}\left(1-\prod_{i_1}x_{j,\text{S}_1}(i_1)\right)\right]\prod_{q=1}^{Q}x_j(q)-\left[\prod_{\text{S}_2}K_{\text{S}_2}\left(1-\prod_{i_2}x_{j,\text{S}_2}(i_2)\right)\right]\prod_{p=1}^{P}x_j(p)\tag{2}$$

式中：Π 代表逻辑“或”运算；K_{S_1}、K_{S_2} 分别表示上、下半区内各个电源的接入状态，接入取 1，反之取 0；x_j 为开关 j 到系统电源所经过路径上的区段故障状态值；x_{j,S_1}、x_{j,S_2} 分别为开关 j 到上半区电源 S_1、下半区电源 S_2 所经过路径上的区段故障状态值；$x_j(p)$、$x_j(q)$ 分别表示开关 j 对应上、下半区中的区段故障状态值；P、Q 分别为开关 j 对应上、下半区中的馈线区段总数.

此开关函数在一般情况下能够很好地表示当前开关的状态，但是在馈线段发生双重故障且故障点距离开关节点相同距离的情况下未能很好地表示当前的开关状态.

如图 3 所示，在图中多分布式电源 DG1、DG2、DG3、DG4、DG5，对应的 K1、K2、K3、K4、K5 为对应分布式电源的开关，黑色圆点代表着各 FTU 节点，其中的黑色线段代表配电网的馈电区段. 若区段 6 和区段 13 同时发生故障，即发生了双重故障，则依照式(2)计算在节点 3 处的 FTU 开关函数，有

$$I_3^*(x)=[(1-x_1\,|\,x_2)\,|\,(1-x_2\,|\,x_9\,|\,x_{10})]\cdot(x_3\,|\,x_4\,|\,x_5\,|\,x_6\,|\,x_7\,|\,x_8\,|\,x_{11}\,|\,x_{12}\,|\,x_{13}\,|\,x_{14}\,|\,x_{15}\,|\,x_{16})-$$

$$[(1-x_3|x_4|x_5|x_6|x_7|x_8)|(1-x_3|x_{11}|x_{12}|x_{13}|x_{14})|(1-x_3|x_4|x_5|x_6|x_{16})|(1-x_3|x_{11}|x_{15})]\cdot(x_1|x_2|x_9|x_{10})=1-1=0 \tag{3}$$

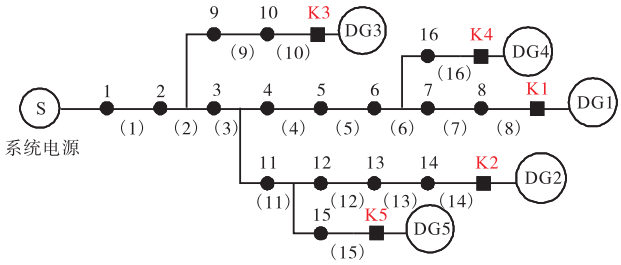


图 3　含 DG 配电网络示意

Fig.3　Schematic of the distribution network with DGs

此时节点 3 的开关函数实际值应该 1，可是计算结果为 0，这表明式(2)并不能很好地描述开关函数的期望值，会导致对故障的误判. 为了避免在这种情况下可能会出现的误判，本文对原有的开关函数进行改进，考虑到系统电源与分布式电源的主次，在原有的基础上新增了对主电源的判断环节，优化后的开关函数为

$$I_j^*(x)=\left[\prod_{S_1}K_{S_1}\left(1-\prod_{i_1}x_{j,S_1}(i_1)\right)\right]\prod_{q=1}^{Q}x_j(q)-\left[\prod_{S_2}K_{S_2}\left(1-\prod_{i_2}x_{j,S_2}(i_2)\right)\right]\prod_{p=1}^{P}x_j(p)\cdot\left\{1-\left[1-\prod_{i_0}x_j(i_0)\right]\prod_{q=1}^{Q}x_j(q)\right\} \tag{4}$$

考虑到式(2)的失效原因是由于拓扑对称，抵消导致误判. 因此对其通过增加判断，当开关节点在故障点后方时才考虑分布式电源的影响，其物理意义是强调系统电源是故障电流的主要提供者，其路径状态对开关期望值影响更大. 与式(2)不同的是，上半区电源 S_1 将不再包含系统电源，而是将系统电源部分单独在式中表现出来以保证系统电源的主导性.

同样对于区段 6 和区段 13 同时发生的双重故障，用此式对开关 3 的 FTU 状态值进行评估，有

$$I_3^*(x)=[(1-x_1|x_2)|(1-x_2|x_9|x_{10})]\cdot(x_3|x_4|x_5|x_6|x_7|x_8|x_{11}|x_{12}|x_{13}|x_{14}|x_{15}|x_{16})-0=1 \tag{5}$$

在对配电网中的电源进行系统电源与分布式电源的划分之后，系统电源的主导地位得以凸显，从而在计算 FTU 故障电流时能有效避免误判现象的发生.

1.3　适应性函数选取

配电网故障定位的最终目的是找出发生故障的相应设备. 为了使由故障引发的所有过流状态信息与各监测点上传的故障电流跨越状态信息之间的差异达到最小化，合理的选取故障区段定位函数也就是优化问题中的目标函数，是实现故障区段准确定位的关键.

传统的适应性函数为

$$f(x)=\sum_{j=1}^{n_1}\left(|C_j(x)-C_j^*(x)|\right) \tag{6}$$

式中：$f(x)$ 为多值函数，是配电网故障位置的实际值与开关状态函数预测值之间的偏差；n_1 为配电网馈线开关的总数；$C(x)$ 为配电网故障开关状态位置信息实际值；$C^*(x)$ 为预测值.

为了更好地对故障区段进行准确的定位，防止对配电网的故障位置进行漏判或者误判，引入“最小集”概念，在多个解同时出现时，对于故障区段越少的情况解的出现概率越高，即在可能的解中集中选取故障区段最少的解. 因此本文考虑到线路的状态信息并对传统的适应性函数进行了修改，修改后的故障区段定位的适应性函数为

$$f(x)=M-\left(\sum_{j=1}^{n_1}|C_j(x)-C_j^*(x)|+\omega\sum_{j=1}^{n_1}x_j\right) \tag{7}$$

式中：M 是为了将原本的适应性函数从求解最小值问题转化为求解最大值问题，因此取值尽可能地取大，本文中取 100；$\sum_{j=1}^{n_1}x_j$ 为故障区段的信息和；ω 为防误判系数，增强了容错性，一般取值在[0，1]之间，本文中取 0.5.

2　基于 IDCS 的主动配电网故障定位算法

2.1　差异创意搜索算法

差异创意搜索算法是一种元启发式的搜索算法，其灵感来源于在人类社会团队中知识获取的差异化与团队中个人的创造性的差异化. 与传统的差异进化方法相比，DCS 将独特的知识获取过程与创造性的现实主义范式相结合，从而改变优化策略. 该算法通过将个体分为高绩效者、平均绩效者和低绩效者，为每个个体分配不同的责任和学习计划，以促进个体的成长和贡献. DCS 利用发散思维策略结合现有知识和林尼克(Linnik)分布来模拟高绩效者的创新过程，以避免过早收敛，同时采用聚合思维策略结合团队领导者的知识和随机成员的贡献来优化解的质量. 此外，回顾评估过程帮助算法跟踪改进个体并识别最佳解，从而推动整体性能的提升. DCS 在多种基准测试和实际应用中表现出色，展示了其在探索与利

用之间的良好平衡以及对复杂优化问题的适应性.

如图 4 所示，DCS 主要围绕如下 3 个核心流程构建.

（1）差异化知识获取（differentiated knowledge acquisition，DKA）：此过程将团队分为 3 个类别并为团队个体量身定制学习计划，促进个体的成长和贡献.

（2）创造性现实主义：此过程利用现有的知识、创造力和想象力来促进个体创新. 它采用高绩效者的发散思维和一般绩效者的收敛思维.

（3）回顾性评估（retrospective assessment，RA）：此过程用于监视判断表现者的进步并确定表现最好的个体并记录，此过程为下次迭代提供了必要的数据，用于提升团队整体的绩效.

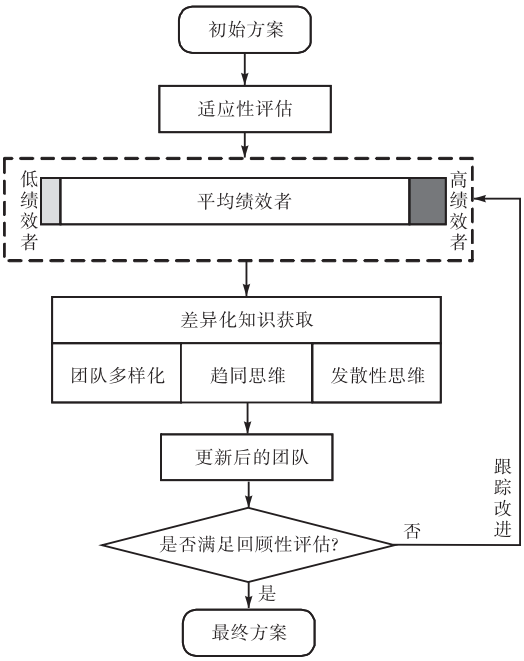


图 4　差异性创意搜索算法运行流程

Fig.4　Flow chart of DCS algorithm operation

2.1.1　差异化知识获取

在 DCS 中，优化的开始将从一组候选解（团队成员）$\boldsymbol{X}$ 开始，代表一组候选的故障区段状态组合解，这些解将在优化问题的上界 U_{b} 和下界 L_{b} 之间随机生成，而每次得到的解则被视为每次迭代过程的近似最优解. 团队 $\boldsymbol{X}$ 为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,D-1} & x_{1,D} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ x_{N_{\mathrm{P}}-1,1} & \cdots & x_{N_{\mathrm{P}}-1,D-1} & x_{N_{\mathrm{P}}-1,D} \\ x_{N_{\mathrm{P}},1} & \cdots & x_{N_{\mathrm{P}},D-1} & x_{N_{\mathrm{P}},D} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{X}_i=\left[x_{i,1},x_{i,2},x_{i,3},\cdots,x_{i,D}\right]$ 表示在 $\boldsymbol{X}$ 的第 i 个具体候选解，$x_{i,D}$ 表示 $\boldsymbol{X}_i$ 的第 D 个元素（维度）；N_{P} 表示候选解的个数（总体大小）；D 表示优化问题的维数，对应于配电网的馈线区段总数.

在初始化随机解生成之后，将对每个 $\boldsymbol{X}_i$ 进行评估，得到其目标值或适应度值，随后将 $\boldsymbol{X}$ 中的个体按照适应度值从大到小进行排序，随着迭代的进行更新最优个体.

DKA 与差分进化（differential evolution，DE）相比更多关注获取新知识的速度，并且它以不同的方式影响着个体而不是如 DE 一般的随机影响. 这些影响可以分为以下 3 种类型.

（1）单一维度的变化：该变化指新知识的获取只影响个人理解的一个属性或者“维度”的情况，即仅随机改变候选解中某一个区段的状态.

（2）一半维度的变化：在这种情况下新获取的知识边缘会影响个体大约一半的知识边缘部分，即随机改变候选解中约一半区段的状态.

（3）全部维度的变化：新获取的知识会影响个体知识或者技能的所有方面，即表示完全随机生成一个新的候选解.

个体对新知识的吸收程度存在显著差异性特征，即知识获取过程对个体的影响维度呈现非均匀分布特性：部分个体仅表现出单一维度的知识更新，而其他个体则可能产生半数乃至全部维度的认知重构. 这种差异化现象反映了知识获取过程中的个体特异性，为后续的个性化学习策略设计提供了基础，便于快速地寻找到最准确的故障区段.

2.1.2　创造性现实主义

创造性现实主义是指既利用团队中高绩效者的发散思维去体现创造性探求未知解，又利用到一般绩效者的趋同思维去加快解的收敛速度.

（1）趋同思维.

该思维的体现依赖于最佳执行者的知识库，并结合当前两名团队成员的随机贡献，在生成的方案中多样性和收敛性都得到了提升，这也反映了不同团队成员之间的相互作用. 该策略的公式为

$$v_{i,d}=wx_{\mathrm{best},d}+\lambda_t(x_{r_2,d}-x_{i,d})+\omega_{i,t}(x_{r_1,d}-x_{i,d}) \tag{9}$$

式中：x_{best} 为当前迭代中表现最好的个体（即当前被认为最符合实际情况的故障区段组合）；d 表示该最优个体所处的第 d 位；x_{r_1} 与 x_{r_2} 均是从涵盖高绩效个体在内的全部个体及非高绩效个体中经随机抽取而得，引导种群向更可能正确的故障组合方向收敛；d 表示在这些被挑选出的个体中所处的第 d 个元素位置；加权因子 w 用来调节最佳向量（x_{best}）的影响，其

默认值为 1,不同的值代表着成员对团队领导知识的认可,如果不为 1,则该成员可能会偏离领导者的策略而采用创新的方法;λ_t 系数控制着在团队中,个体的认知受到同伴影响的程度,越大表明越容易受到影响,越小表明受影响越小越关注自身,系数随着迭代的进行而减小,个体也随之更加的关注自身;$\omega_{i,t}$ 系数表示第 i 个个体在第 t 次迭代时的状态,它表明个体获得知识的潜力,也就是情绪、兴趣、环境对个体的影响,$\omega_{i,t}$ 为(0, 1)上的随机数,较高的系数表明能从队友那里获得更多的知识,较小的系数表明对学习积极性的减少.

(2) 发散思维.

发散思维是指能够对问题产生多样化、创造性解决方案,从而避免陷入局部最优解,也是高绩效者的特征. 该策略的表达式为

$$v_{i,d} = x_{r_1,d} + L_{\mathrm{K}}(\alpha,\sigma) \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{v}_{i,d}$ 是现有知识 x_{r1} 和创造性元素 $L_{\mathrm{K}}(\alpha, \sigma)$ 的混合,$v_{i,d}$ 为实验向量 $\boldsymbol{v}_i$ 上的第 d 个元素;$L_{\mathrm{K}}(\alpha, \sigma)$ 为控制参数为α和σ的 Linnik 分布随机数生成器;α为形状参数,是正值影响分布的整体形式,而σ尺寸参数也为正值,影响着分布的分散. Linnik 分布与一般使用的 Lévy 分布相比,增加了在探索空间时探索不太频繁区域的可能性,因此使方案更加拥有创新性.

2.1.3 回顾性评估

回顾性评估是团队探索过程中的关键环节,它通过制定评估标准来衡量团队的成效,并通过分析过往的绩效数据来确定改进的方向. 这一过程主要涵盖两个部分:一是选择机制;二是对最佳表现者的跟踪机制.

选择机制的表达式为

$$X_{i,t+1} = \begin{cases} V_{i,t} & f(V_{i,t}) \leqslant f(X_{i,t}) \\ X_{i,t} & f(V_{i,t}) > f(X_{i,t}) \end{cases} \tag{11}$$

式中:$X_{i,t+1}$ 表示在第 $t+1$ 次迭代时 $\boldsymbol{X}$ 中的第 i 个个体;$V_{i,t}$ 表示 $X_{i,t}$ 的实验成员;$X_{i,t}$ 表示第 t 次迭代的第 i 个个体;$f(V_{i,t})$ 和 $f(X_{i,t})$ 分别为 $V_{i,t}$ 和 $X_{i,t}$ 的客观评价值. 在故障定位问题中,这意味着比较新、旧两种区段状态组合假设哪个更符合实际观测到的 FTU 数据,保留适应度更好(值更小或转化后更大)的解进入下一代种群.

最佳表现者的跟踪机制方程为

$$X_{\mathrm{best},t} = \begin{cases} X_{i,t+1} & f(X_{i,t+1}) < f(X_{\mathrm{best},t}) \\ X_{\mathrm{best},t} & f(X_{i,t+1}) \geqslant f(X_{\mathrm{best},t}) \end{cases} \tag{12}$$

式中:$X_{\mathrm{best},t}$ 表示第 t 次迭代中的最佳表现,代表算法当前找到的最优故障区段定位结果,即目标值最低的个体 $X_{i,t+1}$;$X_{i,t+1}$ 表示 $t+1$ 次迭代时 $\boldsymbol{X}$ 中的第 i 个个体;$f(X_{i,t+1})$ 和 $f(X_{\mathrm{best},t})$ 分别为 $X_{i,t+1}$ 和 $X_{\mathrm{best},t}$ 的客观评价值.

2.2 DCS算法的改进

在 DCS 算法的原始方案中,种群评估与随机参数生成采用逐个体迭代处理的方式,这种实现策略在解决高维优化问题时面临显著的计算效率瓶颈,不太适用于节点日益增多的配电网络. 因此提出基于矩阵运算的向量化评估方法与预计算机制对 DCS 算法进行改进,在严格保持算法数学等价性的前提下,显著提升了算法执行效率.

在 DCS 算法的实现中,种群初始化、边界约束处理及适应度评估均通过嵌套循环完成,这种实现方式会导致 3 个层面的效率损失:①频繁的函数调用引入额外步骤;②非连续内存访问降低 CPU 缓存利用率;③随机数生成器重复调用产生冗余计算. 针对这些问题,本文采用了张量运算重构核心计算流程:首先将种群矩阵视为二阶张量,利用 MATLAB 的隐式展开机制实现种群初始化的向量化计算;其次设计批量边界约束处理函数,通过逻辑矩阵索引一次性完成所有越界个体的修正;最后采用数组映射函数实现适应度评估的隐式并行化,在保持评估顺序一致性的同时避免显式循环.

设种群矩阵为 $\boldsymbol{P}$,其中第 i 行向量 $\boldsymbol{P}_i$ 表示第 i 个个体的位置,D 为种群的维度,N 为种群个数.

原始初始化的过程可表示为逐个个体生成,即

$$\boldsymbol{P}_t = \boldsymbol{L} + r_i \odot (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{L}) \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{L} = [L_1\ L_2\ \cdots\ L_D]$为各维度下界向量;$\boldsymbol{U} = [U_1\ U_2\ \cdots\ U_D]$为各维度上界向量;$\boldsymbol{r_i} = [r_{i1}\ r_{i2}\ \cdots\ r_{iD}]$,$r_{ij} \sim u[0, 1]$;$\odot$表示逐元素乘法.

改进后的向量化形式为

$$\boldsymbol{P}_t = \boldsymbol{L} \otimes \boldsymbol{1}_N + r_i \odot (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{L}) \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{1}_{\mathrm{N}} = [1\ 1\ \cdots\ 1]^{\mathrm{T}}$,全 1 列向量,维度为 D;$\otimes$表示广播加法(Broadcasting),将 $\boldsymbol{L}$ 扩展为 $N \times D$ 矩阵.

针对算法中频繁使用的随机参数,本文提出分代预计算策略. 在每代迭代开始时,预先计算本代所需的全部随机数,包括知识获取率判定值 η_{q}、维度选择索引 j_{rand} 及社会影响因子 $\omega_{i,t}$ 等关键参数. 该策略通过以下 3 个途径提升效率:

(1) 减少随机数生成器调用次数达 $O(N_{\mathrm{P}})$量级;

(2) 改善内存访问的局部性,提升 CPU 缓存命中率;

（3）支持基于矩阵掩码的并行条件判断.

实验表明，该预计算机制使随机参数相关计算耗时降低 38.7%，且通过柯尔莫哥洛夫检验证实其统计特性与原始实现完全一致.

为验证改进方法的等效性，本文从理论和实验两个层面进行验证：在理论层面，证明边界约束处理公式（(种群规模 + 边界)/2）在两种实现中具有严格的数学等价性；在实验层面，对 1×10^6 个随机样本的测试显示，新方法所得解的 L2 范数相对误差小于 1×10^{-15}. 实际测试表明，在 CEC2017 测试函数集上，改进后的 DCS 算法在 30 维问题时获得 35.2% 的平均加速比，且最优解标准差降低 4.1%，证实了该方法在提升计算效率的同时保持了算法的优化性能.

2.3　IDCS算法在主动配电网故障定位中的应用

主动配电网故障区段定位的核心在于求解最优的故障区段状态组合，该问题可形式化为一个高维离散组合优化问题. 其中决策变量 $\boldsymbol{X}=[x_1, x_2, \cdots, x_T]$ 表示所有馈线区段的假设故障状态，$x_i=1$ 表示假设区段 i 发生故障，$x_i=0$ 表示假设区段 i 正常，T 为配电网馈线区段总数. 目的是使决策变量基于第 1.3 节构造的适应度函数最大化，适应度函数越大表示假设的故障状态组合 x 越符合实际观测数据.

基于 IDCS 的主动配电网区段定位步骤如下.

步骤 1　读取主站 SCADA 系统中 FTU 设备上传的节点故障电流状态信息，并根据节点数量，生成节点的故障电流实际值 $C_j(x)$.

步骤 2　初始化参数，读取种群规模、高绩效者的比例、问题的维度以及最大迭代次数等参数.

步骤 3　随机初始化种群并计算初始种群的目标函数值，得到高绩效者的数量，设计概率常数 $p_c=0.5$.

步骤 4　根据当前迭代次数与最大迭代次数的关系，开始进行迭代.

步骤 5　根据当前馈线段的故障运行状态与期望故障电流的状态函数，生成故障电流期望值 $C_j^*(x)$.

步骤 6　将故障电流实际值 $C_j(x)$ 与故障电流期望值 $C_j^*(x)$ 通过适应性函数计算出其评价函数值.

步骤 7　将每个个体按照其评价函数值从大到小进行排列，并记录第一个个体为最佳表现者 $\boldsymbol{X}_{\text{best}}$.

步骤 8　计算出种群中每一个个体的知识差距系数 $\varphi_{i,t}$ 和知识获取率 $\eta_{i,t}$，并自适应更新个体的知识. 执行 IDCS 算法的核心操作（差异化知识获取、创造性现实主义）

差异化知识获取根据个体绩效（高、中、低），对个体进行不同维度的更新，探索新的故障状态组合.

创造性现实主义结合当前最优解的信息（趋向思维）和随机扰动（发散思维），引导种群向更优解区域移动并保持多样性.

步骤 9　计算新个体的适应度值并排序，重新记录最佳表现者 $\boldsymbol{X}_{\text{best}}$.

步骤 10　若满足终止条件，则输出最佳表现者，否则返回到步骤 4.

3　仿真分析

本次仿真借助 MATLAB 平台，针对当前分布式电源渗透率不断攀升这一背景，构建 IEEE33 节点配电网模型，并接入 4 个分布式电源，模拟不同数量 DG 接入的配电网运行场景.

其结构如图 5 所示，其中 L1 ~ L33 为所检测的 33 个馈线区段，S1 ~ S33 为所检测的 33 个 FTU 节点，K1 ~ K4 为各分布式电源接入配电网的开关，Ki = 1 为接入，Ki = 0 为断开. 分别使用本文 IDCS 算法、GA、鲸鱼优化算法（whale optimization algorithm，WOA）、PSO 算法和改进的多元宇宙优化（improved multi-verses optimization，IMVO）算法[4]以及增强性粒子群优化（binary particle swarm optimization，

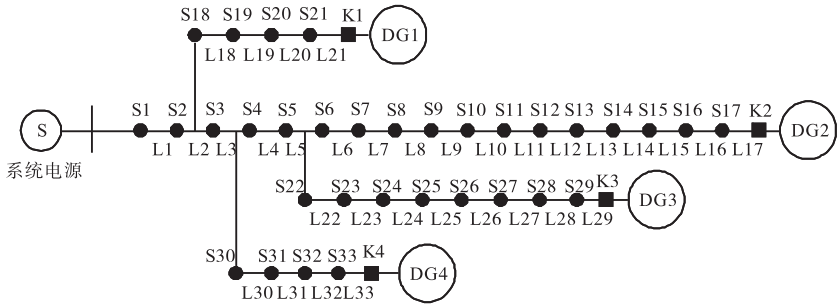


图 5　IEEE33 节点含 DG 配电网络示意

Fig.5　Schematic of the IEEE 33-node distribution network with DGs

BPSO)算法进行比较. 在不同数量的分布式电源接入配电网的情况下,对单点、多点故障进行多次仿真对比分析,在定位的准确率、平均的收敛次数、以及迭代时间 3 个维度上对算法的性能进行评估. 初始化参数设定如下:变量个数 33,种群数量为 60,最大迭代次数为 50.

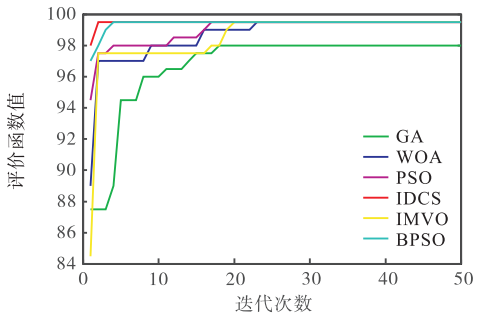
3.1　单点故障仿真

分别针对在不同数量的分布式电源投入情况下的单点故障进行区段定位实验,对单点故障定位仿真作 4 种情况研究,如表 1 所示,不同算法对比迭代图如图 6 所示.

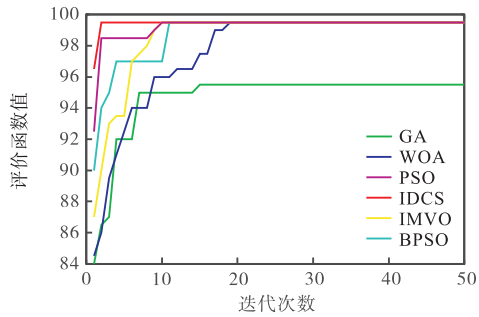
表 1　单点故障仿真结果

Tab.1　Simulation results of single-point fault

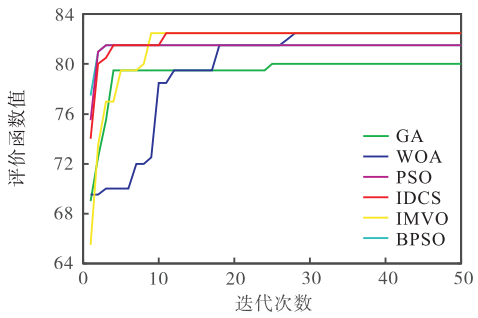
[K1,K2,K3,K4]	故障区段	FTU 检测上传结果	定位输出数据
[1,0,0,0]	L9	[1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,−1,−1,−1,−1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	L9
[1,1,0,0]	L26	[1,1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,]	L26
[1,1,1,0]	L18	[1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,0,0,0,0]	L18
[1,1,1,1]	L4	[1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1]	L4



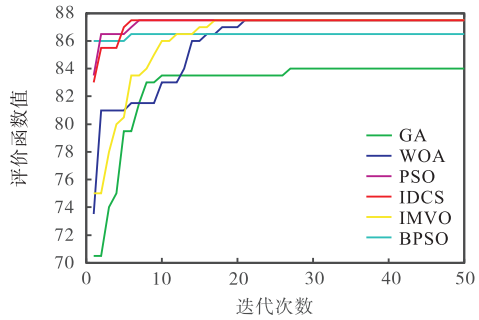
(a) [K1,K2,K3,K4] = [1,0,0,0]



(b) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,0,0]



(c) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,0]



(d) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,1]

图 6　单点故障不同算法迭代曲线

Fig.6　Iterative curves of different algorithms for single-point fault

仿真结果表明,在不同数量 DG 接入的条件下,IDCS 算法在单点故障定位中均展现出优异的性能. 如表 2 所示,通过对各算法进行多次重复实验,IDCS 算法在定位准确率(98.7%)、收敛速度(平均 7 次迭代)和计算效率(1.521 s)等关键指标上均显著优于对比算法,验证了 IDCS 算法在复杂配电网络环境下兼具快速响应和高精度的优越性.

表 2　单点故障定位多种算法对比

Tab.2　Comparison of multiple algorithms for single-point fault location

使用算法	平均收敛次数	平均准确率/%	平均迭代时间/s
IDCS	7	98.7	1.521
GA	20	56.8	2.456
IMVO	11	95.6	1.732
PSO	22	85.0	3.705
BPSO	15	87.5	2.493
WOA	21	90.2	3.012

3.2　多点故障仿真

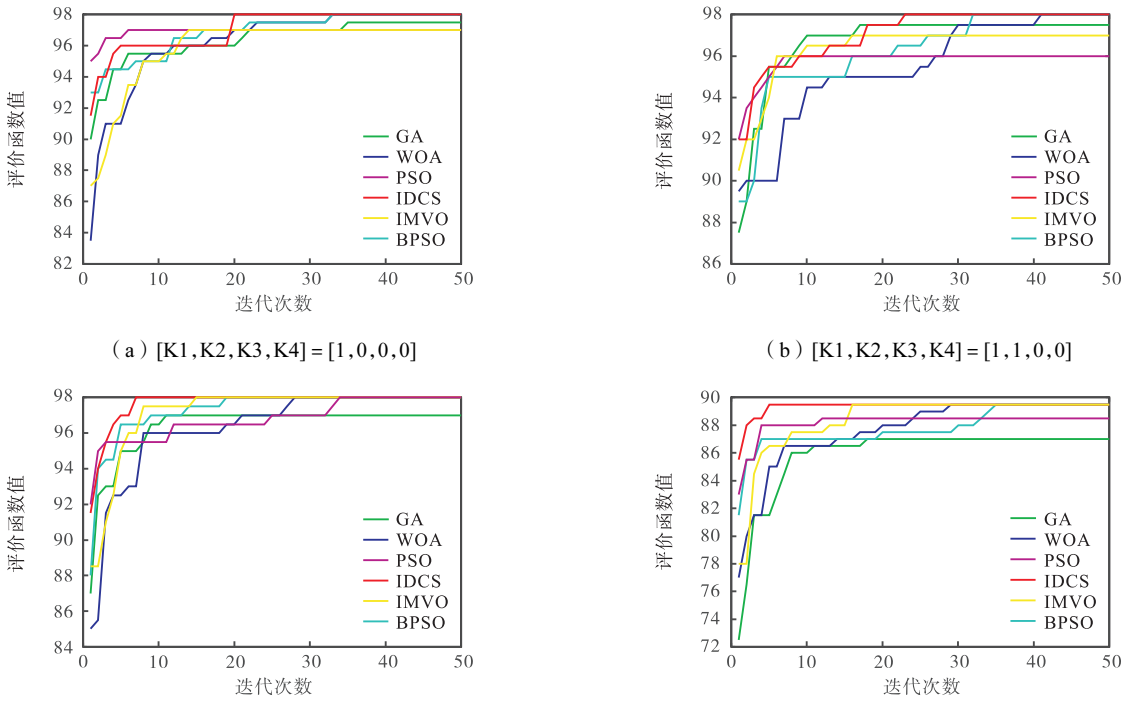
针对不同数量的分布式电源接入条件下的多点故障场景进行了系统性仿真分析,如表 3 所示,各算法性能指标均为多次重复实验的平均值,以确保结果

的统计显著性. 为验证开关函数在特殊故障模式下的鲁棒性，实验设计纳入了空间距离相近的故障区段组合. 图 7 所示的算法对比迭代曲线表明，在复杂故障场景下，所提方法仍保持稳定的收敛特性.

表 3　多点故障定位仿真结果

Tab.3　Simulation results of multi-point fault location

[K1,K2,K3,K4]	故障区段	FTU 检测上传结果	定位输出数据
[1,0,0,0]	L7、L19、L25	[1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,−1,−1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	L7、L19、L25
[1,1,0,0]	L3、L20、L28	[1,1,1,−1−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,1,−1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0]	L3、L20、L28
[1,1,1,0]	L21、L24、L31	[1,1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,0,0]	L21、L24、L31
[1,1,1,1]	L8、L24	[1,1,1,1,1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1]	L8、L24



（a）[K1,K2,K3,K4] = [1,0,0,0]　（b）[K1,K2,K3,K4] = [1,1,0,0]

（c）[K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,0]　（d）[K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,1]

图 7　多点故障不同算法迭代曲线

Fig.7　Iterative curves of different algorithms for multi-point fault

为评估不同算法的性能差异，本文通过多次仿真实验进行对比分析，迭代结果如表 4 所示. 实验结果表明，在多点故障工况下，IDCS 算法在收敛速度和定位精度方面均表现出显著优势. 通过对开关函数进行优化改进后，该算法能够准确表征多点故障的期望值，有效避免了传统方法的误判问题，从而在故障定位精度和计算效率两方面均实现了性能提升.

表 4　多点故障定位多种算法对比

Tab.4　Comparison of multiple algorithms for multi-point fault location

使用算法	平均收敛次数	平均准确率/%	平均迭代时间/s
IDCS	12	97.8	1.895
GA	17	72.5	3.156
IMVO	15	80.3	2.432
PSO	20	60.7	3.654
BPSO	22	83.5	2.554
WOA	25	85.5	3.252

3.3　鲁棒性分析

在实际工程应用中，FTU 可能因设备故障导致上传至 SCADA 系统的数据出现畸变，主要表现为两种典型模式.

（1）信息漏报：即异常状况下 FTU 元件上报的信息为 0.

（2）信息误报：即异常状况下 FTU 元件上报信息的方向错误或正常情况下进行故障上报.

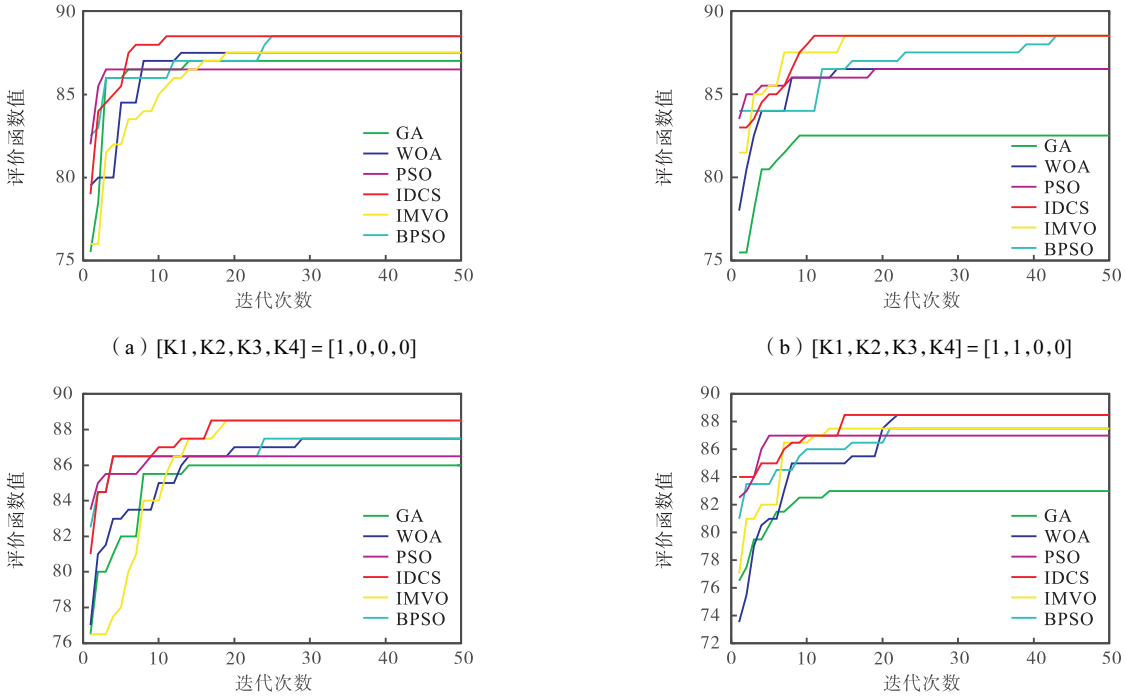
为验证算法的工程适用性，本研究针对不同数量 DG 接入下的单点及多点故障场景，系统评估了 IDCS 算法在数据畸变条件下的定位性能. 如表 5 所示，通过对比实验分析表明，IDCS 算法在数据畸变

情况下仍保持稳定的故障定位能力,其性能优势如图 8 的迭代曲线所示.

表 5　数据畸变下仿真结果

Tab.5　Simulation results under data distortion

[K1,K2,K3,K4]	故障区段	畸变位置	FTU 检测上传结果	定位输出数据
[1,0,0,0]	L9	节点 6	[1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,−1,−1,−1,−1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	L9
[1,1,0,0]	L3、L20、L28	节点 5、15	[1,1,1,−1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,−1,−1,1,1,1,−1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0]	L3、L20、L28
[1,1,1,0]	L18	节点 10、17	[1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,0,−1,−1,−1,−1,−1,−1,0,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,0,0,0,0]	L18
[1,1,1,1]	L8、L24	节点 4、20	[1,1,1,−1,1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,1,1,−1,1,1,1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1,−1]	L8、L24



(a) [K1,K2,K3,K4] = [1,0,0,0]　　(b) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,0,0]

(c) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,0]　　(d) [K1,K2,K3,K4] = [1,1,1,1]

图 8　数据畸变下不同算法迭代曲线

Fig.8　Iterative curves of different algorithms under data distortion

为验证算法在非理想条件下的性能表现,本研究对 IDCS 算法及对比算法(包括 GA、IMVO 算法、PSO 算法等)在数据畸变场景下进行了多组重复仿真实验. 表 6 所示的迭代结果表明,在存在 FTU 信息漏报和误报等数据畸变情况下,IDCS 算法仍能保持稳定的定位性能.

IDCS 算法通过改进的适应度函数设计,引入防误判系数和最小集理论,有效降低了数据畸变对定位结果的影响,向量化评估机制确保了算法在信息不完整情况下的计算效率,使得 IDCS 算法在实际工程应用中具有更好的适应性,能够应对配电网运行中常见的测量误差和通信干扰问题. 该算法在数据畸变条件下的平均定位准确率达到 96.5%,平均收敛次数仅为 9 次,平均迭代时间为 1.312 s,显著优于其他对比算法. 这一结果充分证明了 IDCS 算法在信息不完整和错误数据干扰下仍能保持优异的鲁棒性,实现了快速准确的故障定位.

表 6　数据畸变下多种算法对比

Tab.6　Comparison of multiple algorithms under data distortion

使用算法	平均收敛次数	平均准确率/%	平均迭代时间/s
IDCS	9	96.5	1.312
GA	15	60.5	2.556
IMVO	13	83.6	1.665
PSO	11	76.7	3.658
BPSO	21	81.4	5.621
WOA	17	82.2	3.335

需要说明的是,本文所提方法的核心机制同样适用于单相接地故障的区段定位. 接地故障电流虽幅

值特征与相间故障不同，但其方向性流动规律（由电源流向故障点）与本文改进的故障电流编码机制（式(1)）所依据的物理本质一致. 该编码能有效捕捉接地故障引起的零序电流方向变化（上游正向、下游反向或零）. 同时，优化构建的开关函数（式(4)）及融合最小集理论与防误判系数的适应度函数（式(7)），其设计并不依赖于故障电流的绝对幅值，而是基于网络拓扑结构和开关/区段状态逻辑关系，故对包含接地故障在内的、具有明确方向性特征的故障类型均具有适用性. 并且方法的鲁棒性设计（如适应度函数中的防误判项）进一步确保了在接地故障电流微弱或数据存在畸变时的定位可靠性.

4　结　语

本研究针对主动配电网复杂场景下故障定位精度不足的问题，提出了一种基于 IDCS 算法的故障区段定位方法. 通过重构故障电流双向编码机制以适配双向电流流动特性，优化开关函数构建以消除双重故障场景下的误判，并引入最小集理论构造适应度函数以增强容错性，IDCS 算法在 IEEE33 节点模型的仿真实验中展现出显著优势. 实验结果表明：在单点故障、多点故障及数据畸变场景下，IDCS 算法的平均定位准确率分别达到 98.7%、97.8% 和 96.5%，相较于 GA、PSO 算法等传统方法，其平均迭代时间缩短 30% 以上，验证了算法在处理多源干扰及复杂网络拓扑中的普适性. 与现有研究相比，IDCS 通过向量化评估与分代预计算机制突破了高维优化效率瓶颈，在保障定位精度的同时实现了计算速度的平衡，有效弥补了传统方法在容错性与适应性上的不足.

参考文献：

［1］ 国家发展改革委，国家能源局. 关于新形势下配电网高质量发展的指导意见［J］. 大众用电，2024，39(3)：8-11.
National Development and Reform Commission，National Energy Administration. Guiding opinions on the high-quality development of distribution networks under the new situation［J］. Popular Utilization of Electricity，2024，39(3)：8-11(in Chinese).

［2］ 文劲宇，周　博，魏利屾. 中国未来电力系统储电网初探［J］. 电力系统保护与控制，2022，50(7)：1-10.
Wen Jinyu，Zhou Bo，Wei Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China［J］. Power System Protection and Control，2022，50(7)：1-10(in Chinese).

［3］ Li Y J，Wei X T，Lin J H，et al. A robust fault location method for active distribution network based on self-adaptive switching function［J］. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2023，148：109007.

［4］ 郑　聪，周海峰，郑东强，等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究［J］. 电力系统保护与控制，2023，51(2)：169-179.
Zheng Cong，Zhou Haifeng，Zheng Dongqiang，et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm［J］. Power System Protection and Control，2023，51(2)：169-179(in Chinese).

［5］ 郑　涛，马　龙，李博文. 基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位［J］. 电网技术，2021，45(10)：3926-3935.
Zheng Tao，Ma Long，Li Bowen. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction［J］. Power System Technology，2021，45(10)：3926-3935 (in Chinese).

［6］ 徐　彪，尹项根，张　哲，等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位［J］. 电力系统自动化，2019，43(5)：152-158.
Xu Biao，Yin Xianggen，Zhang Zhe，et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm［J］. Automation of Electric Power Systems，2019，43(5)：152-158(in Chinese).

［7］ 陈　奎，张　云，王洪寅，等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位［J］. 电力系统保护与控制，2017，45(24)：57-62.
Chen Kui，Zhang Yun，Wang Hongyin，et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm［J］. Power System Protection and Control，2017，45(24)：57-62(in Chinese).

［8］ Bi Z Q，Yang X T，Wang B N，et al. Quantum annealing algorithm for fault section location in distribution networks［J］. Applied Soft Computing，2023，149：110973.

［9］ Zeng P，Cui S J，Song C H，et al. A multiagent deep deterministic policy gradient-based distributed protection method for distribution network［J］. Neural Computing and Applications，2023，35(3)：2267-2278.

［10］ 陈　婷. 基于 FTU 检测方法在含 DG 配电网故障区段定位的应用综述［J］. 电气应用，2020，39(4)：30-

37.
Chen Ting. Application summary of FTU detection method in fault location of distribution network with DG[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(4): 30-37(in Chinese).

[11] 王丰华，穆 卡，张 君，等. 基于参数修正的输电线路双端不同步测距方法[J]. 电力自动化设备，2018，38(8)：95-101.
Wang Fenghua, Mu Ka, Zhang Jun, et al. Asynchronous two-terminal fault location method of transmission line based on parameter modification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 95-101(in Chinese).

[12] 麦章渠，曾 颖，张禄亮，等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的有源配电网故障定位[J]. 智慧电力，2022，50(11)：104-111.
Mai Zhangqu, Zeng Ying, Zhang Luliang, et al. Fault location of active distribution network based on improved Harris Hawks optimization algorithm[J]. System Protection & Recovery, 2022, 50(11): 104-111 (in Chinese).

[13] 郑 涛，沈文韬，陈 冉，等. 基于柔性互联装备主动控制的配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备，2024，44(12)：35-41.
Zheng Tao, Shen Wentao, Chen Ran, et al. Fault location method for distribution network based on active control of flexible interconnected equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 35-41(in Chinese).

[14] 李振钊，王增平，张玉玺，等. 基于升维线性规划的主动配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(24)：122-132.
Li Zhenzhao, Wang Zengping, Zhang Yuxi, et al. Fault section location method for active distribution network based on linear programming with ascending dimension[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 122-132(in Chinese).

[15] 朱革兰，李松奕，兰金晨，等. 基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备，2021，41(1)：34-40，68.
Zhu Gelan, Li Songyi, Lan Jinchen, et al. Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 34-40, 68(in Chinese).

[16] 徐俊俊，曹冬磊，王志伟，等. 内嵌物理知识学习的主动配电网态势异常信号检测与溯因[J/OL]. 中国电机工程学报，https：//doi. org/10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 242133，2024-12-31.
Xu Junjun, Cao Donglei, Wang Zhiwei, et al. A framework of anomaly signal detection and abduction analysis in active distribution network situation based on embedded physics knowledge learning[J/OL]. Proceedings of the CSEE, https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242133, 2024-12-31(in Chinese).

[17] 张雪松，马 啸，章雷其，等. 有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备，2020，40(2)：76-84.
Zhang Xuesong, Ma Xiao, Zhang Leiqi, et al. Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 76-84(in Chinese).

[18] Cheng L, Wang T, Wang Y. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 1-11.

[19] 邱 彬，罗添元，宁 博，等. 基于 BAS-IGA 的含分布式电源配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报，2021，33(2)：8-14.
Qiu Bin, Luo Tianyuan, Ning Bo, et al. Fault location of distribution network with distribution generations based on BAS-IGA[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 8-14(in Chinese).

[20] 刘 蓓，汪 飒，陈 春，等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报，2013，28(5)：280-284.
Liu Bei, Wang Feng, Chen Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284(in Chinese).

[21] Duankhan P, Sunat K, Chiewchanwattana S, et al. The differentiated creative search(DCS): Leveraging differentiated knowledge-acquisition and creative realism to address complex optimization problems[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 252: 123734.

(责任编辑：孙立华)