

基于烟花算法计算莱文斯坦距离权重的虚端子自动连接方法

李腾,吕飞鹏,王星宇,张海洋
(四川大学 电气工程学院 成都 610000)

摘要: 目前智能变电站 IED(intelligent electronic device) 虚端子连接主要为人工连接方式,由于虚端子数目多,名称相似度高,在连接 IED 虚端子时工作量大、效率低且易出错,因此文中研究了基于烟花算法计算莱文斯坦距离权重相似度的虚端子自动连接方法。所提方法基于建立的莱文斯坦距离相似度模型,计算出虚端子相似度,建立距离权重向量优化模型,利用其他智能变电站已完成的虚连接信息,运用烟花算法训练出最佳距离权重向量,使待匹配 IED 虚端子连接成功。仿真算例表明,所提方法利用已完成的同类 IED 虚连接信息,高效、准确地将待匹配 IED 虚端子自动相连。能够有效地提高智能变电站的工作效率和可靠性。

关键词: 智能变电站; 虚端子; 莱文斯坦距离相似度; 距离权重向量; 烟花算法

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2023.11.012

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2023)11-0090-05

Virtual terminal automatic connection method for calculating Levenstein distance weight based on fireworks algorithms

Li Teng, Lv Feipeng, Wang Xingyu, Zhang Haiyang
(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: At present, intelligent electronic device (IED) virtual terminal connection of smart substation is mainly manual connection. Due to the large number of virtual terminals and high similarity of names, the workload of IED virtual terminals is large, and the efficiency is low and error-prone. Automatic connection method of virtual terminals based on firework algorithm for calculating distance weight similarity of Levinstein is proposed in this paper. This method is established based on the Levinstein distance similarity model, calculates the virtual terminal similarity, establishes a distance weight vector optimization model, uses the completed virtual connection information of other smart substations, and adopts the firework algorithm to train the optimal distance weight vector. The virtual terminal of the IED to be matched is successfully connected. Simulation examples show that this method uses the completed IED virtual connection information to automatically and efficiently connect the IED virtual terminals to be matched, which can effectively improve the efficiency and reliability of smart substations.

Keywords: smart substation, virtual terminal, Levenstein distance similarity, distance weight vector, fireworks algorithm

0 引言

传统变电站微机保护装置各个开关量、跳合闸出口都一一对应电缆连接的具体端子。数字化变电站采用 GOOSE(generic object oriented substation event) 技术后,各保护装置之间的信息交互、跳合闸出口均是基于网络传输的数字信号,在一根光纤内可以同时传输多路数字信号,为了更直观的理解 GOOSE、SV(sampled value) 信号,虚端子的概念被提出^[1-3]。目前设计院主要采用设计员通过设备厂家提供的能力描述文件(IED capability description, ICD) 得到 IED 虚端子信息,并手动制作成虚端子表来实现 IED 之间的互联的方法,然

而虚端子数量大、相似度高,导致了设计时工作量大、效率低且易出错,所以虚端子自动连接技术可以提高设计的工作效率和可靠性^[4]。

目前虚端子自动连接的研究文献较少,文献[5]提出了基于关键字匹配的虚端子自动关联方法,但此方法选取关键字的工作需要人工完成,效率不高。文献[6]提出了基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法,此方法运用粒子群算法计算权重,运算速度慢,容易陷入局部最优。本文运用烟花算法计算出最佳权重,计算速度快,准确率高,从而实现高效虚端子自动匹配连接。

1 虚端子的类型和命名格式

通过通信网络模式,虚端子可以分为 GOOSE 虚端子和 SV 虚端子。通过输入、输出方式,虚端子可以分为输入虚端子和输出虚端子。因此虚端子的类型可分为:GOOSE 输入虚端子、SV 输入虚端子、GOOSE 输出虚端子和 SV 输出虚端子。

IEC 61850 标准^[7]采用面向对象建模的方法将数据结构分为物理设备(physical device,PD)、逻辑设备(logical device,LD)、逻辑节点(logical node, LN)、数据对象(data object,DO)、数据属性(data attribute,DA)。从而使得模型里的每一个对象都具有唯一的数据索引^[8-9]。

每个虚端子都有中文描述,用来描述此虚端子代表信号的含义。按照国内 IEC 61850 实施规范的要求,GOOSE 发送和接收的数据均应采用数据属性 DA,因此内部引用地址应级联到 DA 一级,其格式为“LD/LN.DO.DA”^[10]。SV 虚端子与 GOOSE 虚端子类似。

目前智能变电站均按照 IEC 61850 协议面向对象进行建模,但并没有明确定义如何建模,即没有明确物理设备、逻辑设备和逻辑节点间的具体包含关系。因此,国家电网有限公司 2010 年发布了《IEC 61850 工程继电保护应用模型》,细化了模型具体划分和命名规则,进一步对厂商的虚端子实现进行规范^[11]。但目前国内智能变电站仍处于发展阶段,规范中对具体实施留有一定的自由度,导致了不同生产厂家设计的虚端子有一定的差异,模型内部也有所差异。虚端子的设计与命名并没有完全统一。

综上所述,基于国家电网公司和 IEC 61850 的规范,各个设备生产厂商所生产的虚端子仍有一定的差异性,不能够直接比对现实虚端子进行匹配,因此需要更加智能的虚端子匹配方法。

2 基于莱文斯坦距离相似度模型

根据虚端子命名特点,本文运用莱文斯坦距离来计算虚端子之间的相似度。最终选出最大相似度的虚连接作为匹配结果。

2.1 莱文斯坦距离相似度定义

莱文斯坦距离,又称 Levenshtein 距离,是编辑距离的一种,1965 年由俄罗斯科学家弗拉基米尔·莱文斯坦提出。具体是指两个字符串之间,由一个转成另一个所需要的最少操作次数。可行编辑操作包括:

- 1) 将一个字符替换为另一个字符;
- 2) 插入一个字符;
- 3) 删除一个字符。

当两个字符串的莱文斯坦距离越小,说明两个字符串的相似度越高^[12]。本文用 $D(a, b)$ 来表示字符串 a 和 b 的距离。定义为:

$$I = \{E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_m\}$$

式中 I 为智能变电站中所有的虚连接; E_k 为此智能变电站中第 k 个 IED 设备; E_m 为此智能变电站一共有 m 个 IED 设备。

其中 E_k 可以表示如下:

$$E_k = \{L_1, L_2, \dots, L_k, \dots, L_n\}$$

式中 L_k 为 E_k 这个 IED 设备中的第 k 个虚连接; L_n 为 E_k 这个 IED 设备中一共有 n 个虚连接。其中 L_k 可以表示为:

$$L_k = \{V_{in}^k, V_{out}^k\} = \{x_{i1}^k, x_{i2}^k, x_{i3}^k, x_{i4}^k, x_{i5}^k, x_{o1}^k, x_{o2}^k, x_{o3}^k, x_{o4}^k, x_{o5}^k\}$$

式中 V_{in}^k 为第 k 个虚连接的输入虚端子; V_{out}^k 为第 k 个虚连接的输出虚端子; $x_{i1}^k - x_{i5}^k$ 为输入虚端子 5 个属性,依次为 DES(虚端子描述)、LD(逻辑设备)、LN(逻辑节点)、DO(数据对象)和 DA(数据属性),同理输出虚端子的五个属性为 $x_{o1}^k - x_{o5}^k$ 。当 DA 为空属性时,可为空字符串。

任意两个字符串 L_i, L_j 的相似度可以表示为:

$$s(L_i, L_j) = \frac{1}{D(L_i, L_j) \cdot W} \quad (1)$$

式中, $D(L_i, L_j)$ 为虚连接 L_i 和 L_j 的莱文斯坦距离行向量,可表示为:

$$D(L_i, L_j) = [D(x_{i1}^{L_i}, x_{i1}^{L_j}), D(x_{i2}^{L_i}, x_{i2}^{L_j}), \dots, D(x_{o5}^{L_i}, x_{o5}^{L_j})]$$

W 为权重向量,可表示为:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_{10}]^T \text{ 且 } \sum_{n=1}^{10} w_n = 1.$$

距离权重表示虚端子每个属性占总体重要性的比重,权重值可以通过与已连接的同类 IED 虚连接进行训练得到。

2.2 匹配模型

根据实际智能变电站 IED 连接方式可知,IED 输出虚端子和输入虚端子一一对应,将所有的虚端子分为输出虚端子和输入虚端子两部分,仅对输入虚端子进行匹配,当输入虚端子匹配完成也代表着输出虚端子匹配完成。

待匹配 IED 虚端子信息及名称可根据设备生产商提供的 ICD 文件提取得到。将得到的输入虚端子和输出虚端子分别定义为 $V_{in} = \{V_{in}^1, V_{in}^2, \dots, V_{in}^n\}$ 、 $V_{out} = \{V_{out}^1, V_{out}^2, \dots, V_{out}^m\}$,其中 n 为输入虚端子和输出虚端子的个数。

对待匹配 IED 的任意输入虚端子 $V_{in}^k (1 \leq k \leq n)$ 与每个输出虚端子都可能存在连接关系,所以每个输入虚端子有 n 种连接可能性。 n 个输入虚端子则有 $n \times n$ 个连接可能性。因此定义待匹配集如下:

$$P = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{Bmatrix} =$$

$$\left. \begin{matrix} \{ P\{V_{in}^1, V_{out}^1\}, \{V_{in}^1, V_{out}^2\}, \dots, \{V_{in}^1, V_{out}^n\} \\ \{V_{in}^2, V_{out}^1\}, \{V_{in}^2, V_{out}^2\}, \dots, \{V_{in}^2, V_{out}^n\} \\ \vdots \\ \{V_{in}^n, V_{out}^1\}, \{V_{in}^n, V_{out}^2\}, \dots, \{V_{in}^n, V_{out}^n\} \end{matrix} \right\}.$$

将同类 IED 已知虚端子连接数据分为训练集 T 和匹配集 M 。设匹配集 M 中虚端子连接对数为 m , 则 M 可表示为:

$$M = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$$

将 P 中的虚端子连接与 M 中的虚端子连接两两进行对比计算, 得到 P 中与 M 相似度最大的虚连接, 如下:

$$s(L_{ki}, L_{j'}) = \max_{\substack{1 \leq i' \leq n \\ 1 \leq j' \leq m}} s(L_{ki}, L_{j'}) = \max_{L_{ki} \in P, L_{j'} \in M} \frac{1}{1 + D_{L_{ki}, L_{j'}} \cdot W} \quad (2)$$

由此可以得到输入虚端子 V_{ki} 对应的虚连接为 L_{ki} 。同理, P 中其余所有输入虚端子的虚连接也能一一找出。

3 基于烟花算法的距离权重向量计算

本文运用莱文斯坦距离来计算两个虚连接的相似程度。由于两个虚端子不同属性的莱文斯坦距离对莱文斯坦相似度的程度不同, 并且同类 IED 设备的虚端子相似度非常大, 所以提出权重向量作为待匹配 IED 的优化参数。运用烟花算法对权重向量目标函数进行求解, 得到最优权重向量。

3.1 距离权重向量优化模型

设 IED 训练集中同类 IED 有 N 个, 任意选取其中一个 IED 设备作为待匹配的 IED, 剩下 $N - 1$ 个 IED 设备作为匹配集。通过烟花算法生成权重向量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_{10}]^T$ 和前文的匹配模型得到待匹配集的输入虚端子和输出虚端子的连接情况, 记为 $J_p(W)$ 。匹配完成后的任意一个虚连接记为 $L_k(W)$ 。由于训练集的虚端子连接信息由已连接 IED 设备中提取出来, 所以可看作为全正确连接, 记为 J_A 。定义函数 $f(L_k(W))$ 满足如下:

$$f(L_k(W)) = \begin{cases} 1 & L_k(W) \in J_p(W) \cap L_k(W) \in J_A \\ 0 & L_k(W) \in J_p(W) \cap L_k(W) \notin J_A \end{cases} \quad (3)$$

即 $f(L_k(W))$ 为在给定距离权重下训练匹配得到的虚连接结果与样本虚连接对比。最终使在所求的距离权重下达到正确的虚连接数达到最大, 所以目标函数 $G(W)$ 还需满足以下优化模型:

$$\begin{aligned} \max G(W) &= G(w_1, w_2, \dots, w_{10}) = \\ \sum_{\forall L_k(W) \in J_p(W)} f(L_k(W)) & s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^{10} w_i = 1 \\ 0 \leq w_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, 10 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 烟花算法求解方案

本文采用烟花算法来求解距离权重向量优化模型。烟花算法 (fireworks algorithm, FWA) 是一种灵感来自于夜空中烟花爆炸的群体智能算法^[13-16]。烟花算法具有很强的局部爆发性, 同时烟花种群能在全局搜索和局部搜索能力达到一个平衡, 使得寻优效率非常高。烟花算法具体流程图如图 1 所示。

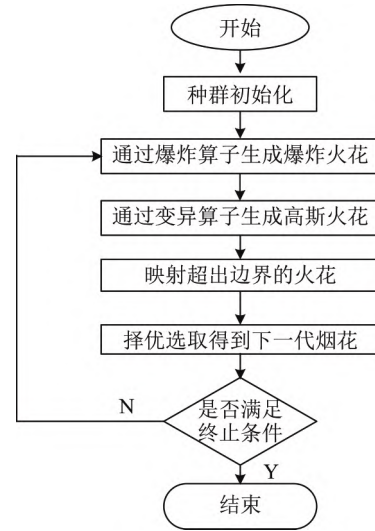


图 1 烟花算法流程图

Fig. 1 Fireworks algorithm flow chart

本文将目标函数的解 $W = [w_1, w_2, \dots, w_{10}]$ 设置为烟花算法中一个 10 维烟花的位置 $X = [x_1, x_2, \dots, x_{10}]$ 。具体步骤如下:

1) 初始化种群: 初始化对象包括烟花数目 ($N = 100$)、烟花位置维度 ($D = 10$)、变异火花数 ($M = 5$)、爆炸数目 ($En = 6$)、爆炸半径 ($Er = 5$)、爆炸数目限制因子 ($a = 0.3$ $b = 0.6$) 和迭代次数 $T = 100$ 。

2) 爆炸算子: 在烟花算法中, 烟花 X_i 爆炸产生的火花的个数为 En_i , 表示如下:

$$En_i = m \times \frac{Y_{worst} - f(X_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (Y_{worst} - f(X_i)) + \varepsilon} \quad (5)$$

式中, m 为常数; Y_{worst} 为目前种群中最差适应度值; $f(X_i)$ 为烟花 X_i 的适应度值; ε 为一个极小的正常数, 避免除以零的操作^[17]。同时, 为了防止火花数目过多或过少, 需要对其进行修正, 修正如下:

$$En_i = \begin{cases} \text{round}(am) & En_i < am \\ \text{round}(bm) & En_i > bm \quad a < b < 1 \\ \text{round}(En_i) & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数; a 和 b 为给定的限制因子。

烟花 X_i 爆炸范围半径为 Er_i , 表示如下:

$$Er_i = \hat{Er} \frac{f(X_i) - Y_{best} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(X_i) - Y_{best}) + \varepsilon} \quad (6)$$

式中, \hat{Er} 为初始设定最大爆炸范围半径; Y_{best} 为目前种群中最好适应度值。

3) 变异算子: 运用高斯变异来产生变异火花, 以此来增加种群多样性。初始化时设定变异火花数为 M 个, 即 X_j^k 为第 j ($j = 1, 2, \dots, M$) 个、 k ($k = 1, 2, \dots, z$) 维的变异火花, 表示为:

$$X_j^k = X_j^k \text{Gau}(1, 1)$$

式中, $\text{Gau}(\cdot)$ 为高斯函数。

当爆炸或变异产生的爆炸算子或变异算子超出最大范围时, 需要对其进行位置的映射, 映射规则如下:

$$X_i^k = X_{\min}^k + |X_i^k| \bmod (X_{\max}^k - X_{\min}^k) \quad (7)$$

式中, X_{\max}^k 和 X_{\min}^k 为火花取值范围的最大值和最小值。

4) 选择策略: 烟花算法采用的是保留精英策略, 适应度最好的烟花保留到下一代, 剩下的个体采用轮盘赌的方法进行选取^[18]。选取的概率为 p , 表示如下:

$$p(x_i) = \frac{R(X_i)}{\sum_{j=1}^k R(X_j)} \quad (8)$$

$$R(X_i) = \sum_{j=1}^K d(X_i, X_j) = \sum_{j=1}^K \|X_i - X_j\| \quad (9)$$

式中, $R(X_i)$ 为个体 X_i 与其他个体的距离总和; $d(X_i, X_j)$ 为个体 X_i 与个体 X_j 的欧式距离; K 为算子爆炸和变异产生的火花总数。

5) 终止条件: 设置一个最大的迭代次数, 当迭代完成后, 得到的距离权重向量即为选取的 IED 距离权重向量。

为了使实验结果根据一般性, 可以随机选取多个同类 IED 进行多次实验, 将多个距离权重向量的平均值作为最终的向量。

结合上文, 虚端子自动匹配模型的全部流程如图 2 所示。

4 算例验证与分析

文中通过 python 程序提取了 10 个不同智能变

电站 SCD 文件中的虚端子信息。为了使算例结果更具有一般性, 本次算例选取 220 kV 母线测控装置的虚端子信息进行匹配。根据上述方法, 随机选取其中一个作为待匹配 IED, 其余 IED 虚连接作为样本虚连接数据。将样本虚连接数据分为训练集和匹配集进行训练, 算出最终距离权重向量。

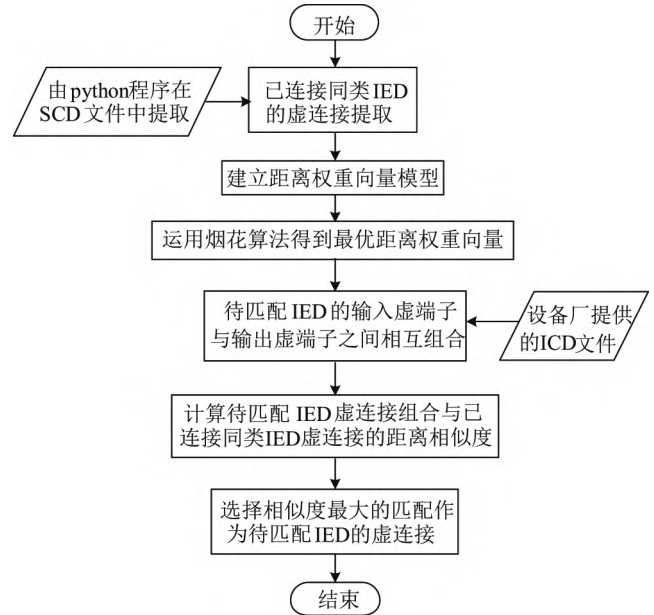


图 2 自动匹配流程图

Fig. 2 Flow chart of automatic matching

通过烟花算法对优化模型求解, 最终得到距离权重为:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_{10}]^T = [0.0185, 0.0928, 0.1577, 0.1135, 0.1289, 0.0280, 0.0119, 0.1512, 0.1224, 0.1751]^T$$

整个训练花费时间约为 2.5 h, 虽然比人工连接一个 IED 虚端子花费时间多, 但是当样本选择适当时, 此时计算出的距离权重向量可以用在以后类似的 IED 虚端子连接上。因此, 更应该关注的是虚端子的匹配时间。本次选取的待匹配 IED 输入虚端子和输出虚端子均为 65 个, 全部匹配完毕耗时 2 s, 准确率达到了百分之百。对比人工手动进行虚端子连接, 效率有所提高, 得出本文提出的虚端子自动连接方法是可行的。部分自动匹配结果如表 1 所示。

表 1 部分自动匹配结果
Tab. 1 Partial automatic match results

序号	输入虚端子	输出虚端子	正确虚连接
1	220 千伏 I 母智能终端/CPU 板温度 PI-GO/GOINGGIO17. AnIn1. mag. f	220 千伏 I 母智能终端/CPU 板温度 RPIT/GOMeasGGIO1. AnIn1. mag. f	PIGO/GOINGGIO17. AnIn1. mag-RPIT/GOMeasGGIO1. AnIn1. mag. f
10	220 千伏母线合并单元 A/板 1 光口 1 发送光功率 PIGO/GOINGGIO17. AnIn10. mag. f	220 千伏母线合并单元 A/板 1 光口 1 发送光功率 MUGO/SCL19. LigIntes. mag. f	PIGO/GOINGGIO17. AnIn10. mag. f-MUGO/SCL19. LigIntes. mag. f

5 结束语

文中利用其他智能变电站的同类样本虚连接信息,构建了优化模型,利用烟花算法计算出虚端子距离权重向量,通过计算待匹配 IED 与样本 IED 虚连接莱文斯坦距离相似度实现了待匹配 IED 输入虚端子和输出虚端子的自动连接。通过算例说明文中提出的方法能够快速、准确地完成虚端子自动连接。

参考文献

- [1] 高亚栋,朱炳铨,李慧,等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5): 124-127.
Gao Yadong, Zhu Bingquan, Li Hui, et al. Research on Application of "Virtual Terminal" Design Method in Digital Substation [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 124-127.
- [2] 张沛超,高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术,2006,30(24): 73-77.
Zhang Peichao, Gao Xiang. System Structure of Digital Substation [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- [3] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术,2006,30(23): 67-71.
Gao Xiang, Zhang Peichao. Main Features and Key Technologies of Digital Substation [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [4] 孟正华. 智能变电站虚端子设计初探[J]. 科技情报开发与经济,2012,22(7): 138-140.
Meng Zhenghua. A Preliminary Study on the Design of Virtual Terminals in Smart Substations [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2012, 22(7): 138-140.
- [5] 陈盼,林传伟,汤惠芳,等. 基于关键字匹配的虚端子自动关联方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(18): 132-137.
Chen Pan, Lin Chuanwei, Tang Huifang, et al. Automatic Association Method of Virtual Terminal Based on Key Character Matching [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 132-137.
- [6] 王文琪,胡炎,赵娜,等. 基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法[J]. 电网技术,2018,42(1): 346-352.
Wang Wenqi, Hu Yan, Zhao Na, et al. Automatic connection method of virtual terminals based on distance weight vector optimization model [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 346-352.
- [7] TC57 IE. IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation[S]. International Electrotechnical Commission Std, 2010.
- [8] Vadiati M, Ghorbani M A, Ebrahimi A R, et al. Future trends of substation automation system by applying IEC 61850 [C]//IEEE. 43rd International Universities Power Engineering Conference. 2008, Padova, Italy: 1-4.
- [9] 张扬,郭庆来,吴文传,等. 数字化变电站保护设备建模及其应用[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(2): 16-23.
Zhang Yang, Guo Qinglai, Wu Wenchuan, et al. Modeling and Application of Digital Substation Protection Equipment [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(2): 16-23.
- [10] 滕安. 基于 IEC61850 技术的智能变电站二次回路安全隔离措施研究[D]. 华北电力大学,2017.

- [11] Q/GDW 396—2009, IEC 61850 工程继电保护应用模型[S].
- [12] 姜华,韩安琪,王美佳,等. 基于改进编辑距离的字符串相似度求解算法[J]. 计算机工程,2014,40(1): 222-227.
Jiang Hua, Han Anqi, Wang Meijia, et al. An Algorithm for Solving String Similarity Based on Improved Editing Distance [J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 222-227.
- [13] 谭莹,郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报,2014,9(5): 515-528.
Tan Ying, Zheng Shaoqiu. Research Progress of Firework Algorithms [J]. Journal of Intelligent Systems, 2014, 9(5): 515-528.
- [14] 归伟夏,陆倩,苏美力. 关于系统级故障诊断的烟花-反向传播神经网络算法[J]. 电子与信息学报,2020,42(5): 1102-1109.
Gui Weixia, Lu Qian, Su Meili. A Fireworks Algorithm-Back Propagation Fault Diagnosis Algorithm for System-level Fault Diagnosis [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(5): 1102-1109.
- [15] 周冬,陈阜东,邹红波,等. 基于改进烟花算法的可再生能源动态经济调度分析[J]. 智慧电力,2019,47(5): 59-64, 77.
Zhou Dong, Chen Fudong, Zou Hongbo, et al. Dynamic Economic Scheduling for Renewable Energy Based on Improved Fireworks Algorithm [J]. Smart Power, 2019, 47(5): 59-64, 77.
- [16] 薛裕颖,张祥银,张国梁,等. 基于量子行为烟花算法的移动机器人路径规划及平滑[J]. 控制理论与应用,2019,36(9): 1398-1408.
Xue Yuying, Zhang Xiangyin, Zhang Guoliang, et al. Path planning and smoothing based on quantum-behaved fireworks algorithm for mobile robot [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(9): 1398-1408.
- [17] 沈永良. 基于改进烟花算法的 SVM 特征选择和参数优化的研究[D]. 安徽大学,2018.
- [18] 韩守飞,李席广,拱长青. 基于模拟退火与高斯扰动的烟花优化算法[J]. 计算机科学,2017,44(5): 257-262.
Han Shoufei, Li Xiguang, Gong Changqing. Firework optimization algorithm based on simulated annealing and Gaussian disturbance [J]. Computer Science, 2017, 44(5): 257-262.

作者简介:



李腾(1995—)男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护与控制。Email: 489631801@qq.com

吕飞鹏(1968—)男,硕士生导师,教授,研究方向为电力系统微机保护与控制。Email: fp.lu@tom.com

王星宇(1991—)男,硕士研究生,研究方向为继电保护与智能变电站技术。Email: 570503271@qq.com

张海洋(1994—)男,硕士研究生,研究方向为智能变电站二次系统、继电保护。Email: 473400922@qq.com

收稿日期:2020-04-13; 修回日期:2021-04-27
(王家隆 编发)