

基于改进双曲正余弦算法与综合相似度的虚端子自动连接方法

魏艺君,熊守江

(国网江西省电力有限公司超高压分公司,江西 南昌 330029)

摘 要:现有智能变电站虚端子主要采用人工匹配,该方式存在过程繁琐、效率低、错误率高等问题,难以满足智能变电站的大规模发展,迫切要实现虚端子的自动连接。文中提出基于改进双曲正余弦算法与综合相似度的自动连接方法。该方法首先构建综合相似度模型,能够综合考虑虚端子命名元素的字符差异与语义关联;其次,构建距离权重向量优化模型,以权重向量为优化变量,最大化虚连接正确匹配数为目标函数;最后,采用改进双曲正余弦算法求解最优距离权重向量,最后以220kV变电站为案例验证所提方法显著提升了连接效率。

关键词:虚端子;权重向量;综合相似度;改进双曲正余弦;遗传算子

中图分类号:TM 631 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2025)06-0020-04

0 引言

智能变电站虚端子连接作为二次设计的核心环节,当前主要依赖人工匹配。该方式存在设计效率低、错误率高、工作量大等方面问题^[1-2]。

现有研究针对这些问题给出了一些解决方案。王文琪等人提出基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法^[3],基于编辑距离相似度,通过粒子群算法优化距离权重向量,实现结构化属性的字符级匹配。范卫东等人提出一种基于历史数据语义相似度的虚端子自动连接方法^[4],通过中文词向量技术,将每个中文词语编码为128维的数字向量,通过两个虚连接向量的余弦距离表示它们的语义相似度。然而,虚端子作为混合文本唯一标识的通信逻辑节点,其结构包含数据属性与中文描述,同时具有结构化命名规范与自然语言灵活性^[5]。这一特征导致其自动连接需同时解决数据属性的字符差异和中文描述的语义关联问题。李腾等人引入莱文斯坦距离计算虚端子相似度,通过烟花算法优化权重向量,实现虚端子自动连接^[6],但烟花算法容易陷入局部最优,故距离权重向量无法更优。

针对上述不足,文中提出基于改进双曲正余弦算法与综合相似度的虚端子自动连接方法,首先提出综合相似度模型,联合编辑距离相似度与余弦距离相似度,能够同时考虑数据属性的字符差异和功能描述的语义关联;其次运用SCHO-GO算法计算距离权重向量;最后以一个220 kV的变电站为例对所提方法进行验证。

1 虚端子自动连接匹配模型

文中提出一种综合相似度模型作为虚端子相似度量模型,该模型融合编辑距离^[3]与余弦距离^[4]两种相似度计算方法,分别针对虚端子命名中不同类型的信息特征计算相似性。通过编辑距离量化字符串类型属性(如逻辑设备LD、数据对象DO、数据属性DA等)的字符差异,借助余弦距离衡量中文描述(DES)经词向量转化后的向量相似性,再结合平衡系数与距离权重向量,将两种距离加权得到综合相似度,实现对虚端子命名规则多维度、高精度的相似性评估。式(1)为综合相似度模型。

$$d(A,B)=\beta\cdot d_{\text{edit}}(A,B)+(1-\beta)\cdot d_{\text{cos}}(A,B) \quad (1)$$

式中: A 、 B 表示两个待比较字符或中文描述; $d(A,B)$

收稿日期:2025-09-22

基金项目:主变保护跳闸矩阵校验技术研究及应用(521823250001)。

作者简介:魏艺君(1995),女,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及自动化专业研究。

表示综合距离; $d_{\text{edit}}(A, B)$ 为编辑距离; $d_{\text{cos}}(A, B)$ 表示余弦距离; β 表示平衡系数。

文中为完成虚端子匹配构建了匹配模型。 L_k 用于表示第 k 个虚端子与某匹配 IED 设备所连接的虚端子之间的连接关系,定义如下:

$$L_k = \{V_{\text{in}}^k, V_{\text{out}}^k\} = \{x_{\text{in}1}^k, x_{\text{in}2}^k, \dots, x_{\text{in}5}^k, x_{\text{out}1}^k, x_{\text{out}2}^k, \dots, x_{\text{out}5}^k\} \quad (2)$$

式中: V_{in} 代表该虚连接的输入虚端子; V_{out} 代表该虚连接的输出虚端子。输入虚端子的五个命名元素分别对应:设备中文描述(DES)、逻辑设备(LD)、逻辑节点(LN)、数据对象(DO)和数据属性(DA)。若某元素缺失,则其值为空字符串;输出虚端子 V_{out} 的五个命名元素 $V_{\text{out}1}$ 至 $V_{\text{out}5}$ 同样分别对应 DES、LD、LN、DO 和 DA。元素缺失时,同样以空字符串表示。

智能变电站的二次设备虚拟终端,分为输入虚拟终端与输出虚拟终端。根据信号类型的不同,这两类虚拟终端还能进一步细分为 GOOSE 输入/输出虚拟终端和 SV 输入/输出虚拟终端^[7]。在工程项目中可借助历史设备配置方案或设备连接实例确定待匹配的智能电子设备(IED)与其他二次侧智能电子设备(IED)之间的连接关系。如果两台智能电子设备(IED)存在连接关系,则两者的虚拟端子必须实现一一对应的匹配。因此,只要输入虚拟终端完成匹配,所有输出虚拟终端也会随之达成匹配。基于这一特性,可将待匹配智能电子设备(IED)的虚拟终端,逐一与相连接智能电子设备(IED)的虚拟终端进行对接,进而形成一组虚链接 A_{set} ,其定义如下:

$$A_{\text{set}} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1g} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{t1} & L_{t2} & \dots & L_{tg} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{V_{\text{in}}^1, V_{\text{out}}^1\} \{V_{\text{in}}^1, V_{\text{out}}^2\} \dots \{V_{\text{in}}^1, V_{\text{out}}^g\} \\ \{V_{\text{in}}^{12}, V_{\text{out}}^{12}\} \{V_{\text{in}}^{12}, V_{\text{out}}^{22}\} \dots \{V_{\text{in}}^{12}, V_{\text{out}}^{g2}\} \\ \vdots \\ \{V_{\text{in}}^t, V_{\text{out}}^t\} \{V_{\text{in}}^t, V_{\text{out}}^{2t}\} \dots \{V_{\text{in}}^t, V_{\text{out}}^{gt}\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: A_{set} 表示虚连接集合; t 表示输入虚拟终端的数量; g 表示输出虚拟终端的数量; V_{in} 和 V_{out} 分别标识智能电子设备 IED 虚拟触点的输入和输出。

基于虚连接集的生成,将待匹配的 IED 的虚端子匹配数据分为两部分:匹配数据 A_m 和训练数据 A_{in} 。配对数量中相似的数量为 M , A_m 为式(4)定义:

$$A_m = \begin{Bmatrix} L_1^1 & L_1^2 & \dots & L_1^M \\ L_2^1 & L_2^2 & \dots & L_2^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_K^1 & L_K^2 & \dots & L_K^M \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: L_K^M 表示待匹配的同类型设备 M 第 K 个虚拟终端的匹配数据。

虚连接集合 A_{set} 与匹配数据 A_m 进行顺序计算,得到所有可能虚连接与匹配数据的相似度,计算相似度与匹配结果的公式如下:

$$\begin{cases} S(L_K^i, L_K^j) = \frac{1}{1 + d(L_K^i, L_K^j) \cdot W} \\ S = \max_{\substack{1 \leq i \leq d \\ 1 \leq j \leq D}} (L_K^i, L_K^j) \end{cases} \quad (5)$$

式中: d, D 表示与虚连接最佳相匹配的样本; $S(L_K^i, L_K^j)$ 为 L_K^i 和 L_K^j 匹配数据的相似度; L_K^j 为待匹配的同类型设备 j 第 K 个虚拟终端的匹配数据; L_K^i 为待匹配的同类型设备 i 第 K 个虚拟终端的匹配数据; $d(L_K^i, L_K^j)$ 为 L_K^i 和 L_K^j 匹配数据的综合距离。 W 表示影响权重系数,由两种虚连接不同命名元素的综合距离对虚连接相似度的影响,权重向量定义如下:

$$A_{\text{set}} = [w_{\text{in}}^1, w_{\text{in}}^2, \dots, w_{\text{in}}^5, w_{\text{out}}^1, w_{\text{out}}^2, \dots, w_{\text{out}}^5] \quad (6)$$

距离权重向量能够量化不同命名元素对综合相似度的影响,通过距离权重向量计算匹配相似度,可比较各个虚端子的相似度,最终找出最大相似度的虚连接及其对应匹配样本。

2 计算权重向量

在虚连接的综合距离计算中,虚端子的各命名元素对整体相似度存在不同影响,需要使用距离权重向量 W 来量化不同元素的作用程度。为实现更精准的相似度匹配计算,文中融合了编辑距离与余弦距离这两种距离计算方式,以此综合考虑命名元素的特征。考虑到同类 IED 训练数据中,虚端子命名及虚连接具有命名重复的特点且连接关系具备正确性,文中基于这些训练数据构建了权重向量优化模型。该模型以权重向量作为优化参数,同时设定了合适的目标函数,进而运用 SCHO-GO 算法对权重优化模型进行求解,最终获得距离权重向量的最优解。

假设训练数据集 A_{in} 同类 IED 的数量为 R ,根据匹配模型,在所有 IED 中任选其一作为待匹配设备,

其余 $R-1$ 个 IED 的虚连接构成其配对集。每一个虚连接都表示为 L_k , 而与正确 IED 匹配的虚连接集合则设为 D_c , 定义函数:

$$f(L_k(W)) = \begin{cases} 0, & L_k(W) \in D_M(W) \cap L_k(W) \in D_c \\ 1, & L_k(W) \in D_M(W) \cap L_k(W) \notin D_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f(L_k(W))$ 被用来判定 IED 匹配结果是否满足原有的虚连接数据为; L_k 为第 k 个虚拟连接; $D_M(W)$ 为被选中 IED 的虚连接数据。

函数 W 用于判断 IED 匹配结果是否符合虚连接数据, 并基于此建立优化模型的目标函数。该优化模型如式(8)所示。

$$\max G(W) = G(w_1, w_2, \dots, w_{12}) = \sum_{\forall L_k(W) \in D_M(W)} f(L_k(W)) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{10} w_i = 1 \\ 0 \leq w_i \leq 0.3, i = 1, 2, \dots, 10 \end{cases}$$

式中: w_i 为对应权重; $\forall L_k(W)$ 为任意第 k 个虚拟连接。

目标函数 $G(W)$ 是最大化 $f(L_k(W))$ 的总和, 即在求解的距离权重向量 W 下, 使得尽可能多的虚连接匹配结果能够满足原有的虚连接数据, 约束条件则是各元素距离权重的上、下限。

双曲正弦余弦优化算法 (sinh cosh optimizer, SCHO) 是 J Bai 于 2023 年提出的一种新型元启发式算法, 与粒子群算法等类似, SCHO 同样属于基于种群的优化算法^[8]。SCHO 算法的提出源于双曲正弦 (sinh) 和双曲余弦 (cosh) 函数的特性。该算法主要包含五个步骤, 分别是初始化阶段、探索阶段、开发阶段、有界搜索策略以及切换机制。在初始化阶段, 生成一系列随机的初始解; 在探索阶段, 算法通过特定公式实现位置更新; 在开发阶段, 在较优解种局部精细搜索; 有界搜索过程中, 在缩小的空间内重新生成候选解; 最后通过切换机制动态平衡探索与开发。

SCHO 算法虽基于双曲函数的数学特性, 在探索与开发平衡方面表现不错, 并具有较快的搜索速度与较强的寻优能力, 但它仍易过早收敛和陷入局部最优。为此, 文中将遗传算子引入双曲正弦余弦算法, 提出一种改进的 SCHO-GO 算法, 以增强全局搜索能力。具体来说, 在 SCHO 的探索阶段和有界搜索策略中引入遗传算子, 通过对当前最优解和次优解进行变异、交叉、选择操作, 扩大潜在搜索空间的范围。变异、交叉、选择操作为:

变异操作: 对当前种群中每个解向量的每个维度分 $[0, 1]$ 内的随机数 r_1, r_2 , 将其与预设变异率 ρ_1 比较; 若随机数小于 ρ_1 , 则从预定义的 y 或 z 向量中选择元素更新旧向量, 变异公式如下:

$$y_{Mu} = \begin{cases} P_0 & , r_1 > \rho_1 \\ y & , \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$z_{Mu} = \begin{cases} P_0 & , r_2 > \rho_1 \\ z & , \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_0 是当前解向量; y, z 为预定义的变异候选向量; ρ_1 变异率; y_{Mu}, z_{Mu} 表示变异操作后的子代;

交叉操作: 基于变异后的解向量, 通过随机权重系数 θ 和 θ' 进行线性组合生成新后代, 如式(11):

$$\omega_c = \theta \cdot y_{Mu} + (1 - \theta') \cdot z_{Mu} \quad (11)$$

式中: ω_c 交叉操作后的子代。

选择操作: 采用差分进化策略, 比较父代与子代的适应度值, 通过贪婪选择保留更优解, 公式如下:

$$P_{0_{t+1}}^i = \begin{cases} y_{Mu} & , f(y_{Mu}) < f(P_0^i) \\ z_{Mu} & , f(z_{Mu}) < f(P_0^i) \\ \omega_c & , f(\omega_c) < f(P_0^i) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{0_{t+1}}^i$ 表示第 $t+1$ 代第 i 个解向量; f 为适应度函数; P_0^i 表示第 i 代父代解。

SCHO-GO 算法的流程如图 1 所示。

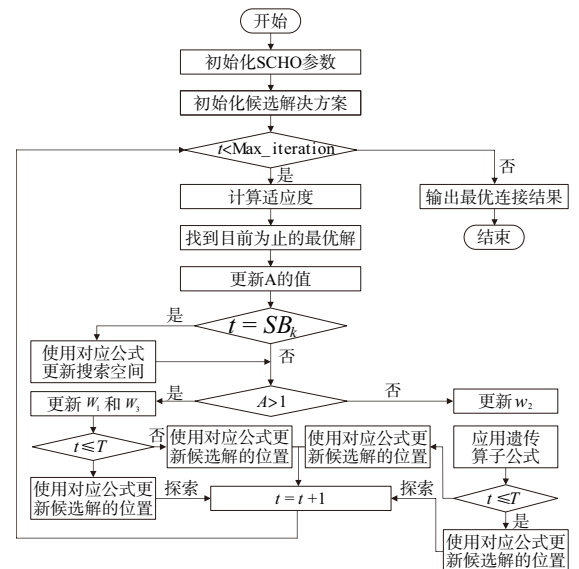


图1 SCHO-GO 算法流程图

3 算例验证与分析

以 220 kV 变电站为例, 该变电站配备两台三相

双绕组负载调压变压器,电压等级为220/10 kV,在电压等级220 kV侧,采用了单母线分段接线方式,共设有6回出线;在电压等级10 kV侧,则采用单母线接线方式,并设有16回出线。另外,变电站还安装了3台无功功率补偿器电容器和2台站用变压器。智能变电站各设备的详细信息如表1所示。

表1 智能变电站各设备的详细信息

序号	设备名称	设备型号	安装位置
1	主变保护	RCS-978TD1-DA-GCN	预制舱
2	主变测控	RCS-9705A-DA-1	预制舱
3	220 kV线路保护装置	RCS-931DA-GCN	预制舱
4	220 kV母线分段保护装置	RCS-9651A-DA-GCN	预制舱
5	10 kV备自投切换装置	RCS-9705A-DA-4	预制舱
6	220 kV母线测控	RCS-978TD1-DA-GCN	预制舱
7	主变非电量保护	RCS-2212MA	智能柜
8	220 kV间隔	RCS-2241MA-DA-GZK	智能柜
9	220 kV线路间隔	RCS-2241MA-DA-GZK	智能柜
10	220 kV母线分段间隔	RCS-2241MA-DA-GZK	智能柜
11	220 kV母联间隔	RCS-2241MA-DA-GZK	智能柜
12	主变低压侧间隔	RCS-2241MA-DA-GZK	智能柜

根据文中所提模型,使用SCHO-GO算法得到最优距离权重向量。每个匹配的智能电子设备(IED)可选择30个同类型的虚拟连接数据作为匹配集和训练集。然后将虚拟连接样本集分为训练样本集(包含10个IED)和匹配样本集(包含20个IED)。通过使用所提模型与方法,求解得到220 kV主变压器保护的距離权重向量。所得的权重向量为:

$$W=[0.174,0.103,0.037,0.168,0.062,0.021,0.085,0.131,0.183,0.073]^T$$

此次选择需匹配的输入虚拟终端和输出虚拟终端的数量为30个,完成所有匹配所耗时长为3 s,准确率达到100%。如表2和图2所示,与FWA和SCHO算法相比,在所训练的IED数量下SCHO-GO算法表现为准确率最高且训练时间最短。由此得出,文中提出的自动虚拟终端连接方法是更优的。变电站中部分智能电子设备(IED)的虚拟终端自动连接结果如表3所示。根据表3中的虚端子匹配结果,不同制造商生产的同类型智能电子设备(IED)的虚拟端子命名存在较小差异,以第8个虚拟端子为例,自动匹配结果和样本匹配结果分别为“C相保护电压2MUSV01/UCTVTR1.Vol1”和“保护电压C相2MUSV/TVTR12.VolChB”。然而,在IEC 61850标准规定下,借助虚拟连接数据集,每个输入虚拟端子仍能正确连接到对应的输出虚拟端子,从而确保自动连接结果的正确性。

表2 不同算法准确率对比表

算法	准确率/%
FWA	95.4
SCHO	98.6
SCHO-GO	100

表3 部分虚端子自动匹配结果

序号	输入虚端子	自动连接的输出虚端子	安装位置
1	MU 额定延时PISV01/SVING-GIO1.DelayTrTime	额定延时MUSV01/LLNO.Delay-TrTime	额定延时时间MUSV/LLNO DelayTrTime
2	A相保护电流PISV01/SVING-GIO4.SAVI1.CurInst	A相保护电流MUSV01/PATCTR1.Amp1	保护电流A相MUSV TCTR1.Amp
3	B相保护电流PISV01/SVING-GIO4.SAVI2.CurInst	B相保护电流MUSV01/PBTCTR1.Amp1	保护电流B相MUSV TCTR2.Amp
4	C相保护电流PISV01/SVING-GIO4.SAVI3.CurInst	C相保护电流MUSV01/PCTCTR1.Amp1	保护电流C相MUSV TCTR3.Amp
5	断路器位置PIGO01/GOING-GIO1.DPCSO1.stVal	断路器位置RPIT01/XC-BR1.Pos.stVal	断路器位置RPIT/Q0XCBR1 Pos.stVal
6	A相保护电压PISV01/SVING-GIO3.SAVI1.VolInst	A相保护电压2MUSV01/UATVTR1.Vol1	保护电压A相2MUSV TVTR10.Vol
7	B相保护电压PISV01/SVING-GIO3.SAVI2.VolInst	B相保护电压2MUSV01/UBTVTR1.Vol1	保护电压B相2MUSV TVTR11.Vol
8	C相保护电压PISV01/SVING-GIO3.SAVI3.VolInst	C相保护电压2MUSV01/UCTVTR1.Vol1	保护电压C相2MUSV TVTR12.VolChB

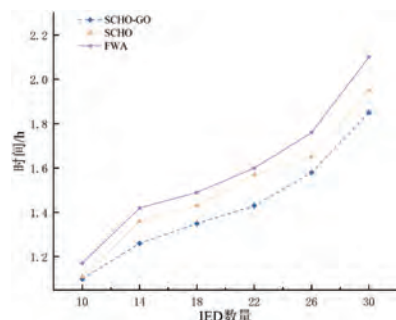


图2 不同算法随IED数量增加的耗时对比图

4 结语

文中提出了一种基于SCHO-GO算法与综合相似度的虚端子自动连接方法。通过构建融合编辑距离与余弦距离的综合相似度模型,有效量化了虚端子命名中字符差异与语义关联,进而建立以距离权重向量为优化变量、以正确匹配数最大为目标的优化模型,并采用融合遗传算子的SCHO-GO算法进行高效求解。以220 kV变电站为实例的验证表明,所提方法在30个虚端子匹配中耗时仅3 s,准确率达到100%,显著提升了连接效率与准确性。本方法在IEC 61850标准命名规范清晰、数据属性完整的工程场景中表现出色,为智能变电站虚端子自动化连接提供了可靠解决方案。未来,面向更大规模或数据质量不高的应用场景,需要进一步进行研究。(下转第28页)

2) 数据预处理需确保样本群体一致性与可比性,应选取不少于30台同型或结构相近开关的色谱数据,并考虑制造工艺、仪器差异,进行误差补偿;同时需控制负荷波动、统一油温等运行参数,以消除气体溶解与逸散行为差异,保证数据准确可比、统计可靠。

3) 真空有载分接开关油色谱分析推荐采样操作产气速率基线比较,同时研究提出以 $H_2/TDHG$ 比值作为故障警示值,并据此推导出不同型号开关色谱分析数据的预警阈值,实现更精准的状态评估与故障诊断。

参考文献:

[1] 张德明. 变压器真空有载分接开关 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[2] 荀华、郭红兵. 一起油浸式真空有载分接开关绝缘油色谱异常分析[J]. 山西电力, 2020(01): 37-41.

[3] IEEE Power and Energy Society. IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers: IEEE Std C57.139TM-2015 [S]. USA New York: Sponsored by the Transformers Committee. 2015.

[4] 国家能源局. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.

[5] 国家能源局. 电力变压器用真空有载分接开关使用导则: DL/T 1538—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[6] 国家能源局. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[7] 张志广, 孟建英, 郭红兵. 真空有载分接开关油中溶解气体限值研究与应用[J]. 内蒙古电力技术, 2020.38(03): 70-73.

(上接第19页)

参考文献:

[1] 钱丽莹, 徐昊. 电力系统继电保护三误常见问题研究[J]. 电气技术与经济, 2023(08): 280-282.

[2] 夏东升, 马宏忠, 刘宝稳, 等. 基于DSP和ARM的便携继电保护测试仪设计[J]. 自动化仪表, 2016, 37(05): 90-95.

[3] 侯建武, 姜天岳, 范瑞凝, 等. 一种新型继电保护测试仪设计[J]. 中国科技信息, 2023(06): 83-85.

[4] 李熙芸, 覃云奕, 宋益, 等. 基于国产核心芯片的单兵继电测试设备设计[J]. 长江信息通信, 2022, 35(01): 87-91.

[5] 穆石磊, 刘建锋, 江玉蓉, 等. 基于PSCAD故障数据的数字继电保护测试仪设计[J]. 上海电力学院学报, 2016, 32(02): 6.

[6] 王浩, 李刚, 张鹏. 双向TVS二极管在继电保护设备过压防护中的应用[J]. 电力电子技术, 2024, 58(03): 142-145.

[7] 张伟, 刘敏, 赵亮. 变电站弱电回路抗干扰设计与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(02): 189-194.

[8] 陈洋, 周明, 吴涛. 继电保护测试仪常用防护方案的性能对比[J]. 电气应用, 2024, 43(07): 98-102.

(上接第23页)

参考文献:

[1] 高磊, 闫培丽, 阮思烨, 等. 基于相似度计算的学习型模板库在虚回路设计和校验中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(07): 205-212.

[2] 张锋, 张朔严, 乔利红, 等. 基于知识图谱的变电站配置文件智能校核技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(04): 64-72.

[3] 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(01): 346-352.

[4] 范卫东, 冯晓伟, 董金星, 等. 基于历史数据语义相似度的

智能变电站虚端子自动连接[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 179-186.

[5] 牛健, 刘海涛, 赫嘉楠, 等. 基于规则库的SCD文件虚回路隐患自动核查技术[J]. 河北电力技术, 2023, 42(06): 48-52.

[6] 李腾, 吕飞鹏, 王星宇, 等. 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[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 90-94.

[7] 史卓鹏, 孔祥敏, 魏佳红, 等. 基于K-近邻加权算法的智能站虚端子自匹配方法[J]. 计算机科学, 2025, 52(增刊1): 353-358.

[8] Jianfu Bai, Yifei Li, Mingpo Zheng, et al. A sinh cosh optimizer[J]. Knowledge-based systems, volume 282, 2023, 111081, ISSN 0950-7051.