

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.09.013

基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型研究

刘世涛, 杨 凯, 伍 弘, 何宁辉
(国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750011)

摘要: 受风险指标影响, 现有方法电网路径匹配效果不佳, 无法获得成本最佳路线, 因此, 设计基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型。采集电网风险区段路径数据并对其进行预处理, 采用SNM方法对数据实施二次排序与清洗。通过3D mine软件, 根据路径数据与地理特征信息构建电网风险区段路径的地理模型, 提取电网风险区段路径特征。根据获取的特征结果, 建立多维信息特征映射模型, 得出多维信息特征相斥度函数, 并采用BPSO算法优化与映射函数相应的权重值, 实现电网风险区段路径匹配。分析实验结果可知, 所设计模型能够有效躲避风险障碍, 能够得出最佳成本路线。

关键词: 多维信息特征映射; 风险区段; 路径匹配; BPSO算法; 相斥度函数; 3D mine软件

Research on Path Matching Model of Power Grid Risk Section Based on Multidimensional Information Feature Mapping

LIU Shitao, YANG Kai, WU Hong, HE Ninghui

(Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

Abstract: Due to the impact of risk indicators, the existing methods of power grid path matching are not effective and can not get the best cost route. Therefore, a multidimensional information feature mapping based power grid section path matching model is designed. Collect and preprocess the path data of power grid risk section, and the SNM method is used to sort and clean the data. Through 3D mine software, according to the path data and geographic feature information, the geographic model of power grid risk section path is constructed, and the characteristics of power grid risk section path are extracted. According to the feature results, the multidimensional information feature mapping model is established, the multidimensional information feature exclusion function is obtained, and BPSO algorithm is used to optimize the weight value corresponding to the mapping function, so as to realize the path matching of power grid risk section. Analysis of the experimental results shows that the designed model can effectively avoid the risk obstacles and get the best cost path.

Key words: multidimensional information feature mapping; section; path matching; BPSO algorithm; exclusion function; 3D mine software

0 引言

负责电能输送的输电线路是电网中极其重要的构成部分, 输电线路通常覆盖面极广, 并且大部分都处于露天环境中, 绝缘、金具、杆塔等部件既要承受日常的电能与机械作用, 还要受到多种外部环境因素的影响, 包括污染、雷电、冰雪、大风等, 这些

因素都会使线路部件出现问题, 导致线路故障的发生^[1]。一些区段由于外部环境与通道环境较差, 极易发生输电线路故障, 因而被称为电网风险区段^[2]。对于电网风险区段而言, 为了便于进行故障监控, 必须对这些区段实施路径匹配^[3]。

当前, 关于电网风险区段路径匹配的研究较为深入, 主要集中于电网风险区段路径划分方面的研

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-07-25

基金项目: 宁夏自然科学基金资助项目(基于大数据挖掘的电网设备运维检修技术研究与应用)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of Ningxia (Research and Application of Power Grid Equipment Operation and Maintenance Technology Based on Big Data Mining).

究,有学者提出一种基于气象监测的电网风险区段路径匹配模型,主要通过气象监测实现电网风险区段路径的划分,从而构建路径匹配模型;另有学者提出一种基于风险控制的电网风险区段路径匹配模型,通过电网风险区段的风险控制实现路径匹配模型的构建^[4]。但是现有方法易受风险因子的影响,存在路径匹配性能较差的问题,无法获取成本最优路径,为此提出一种基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型。

1 电网风险区段路径匹配模型设计

为了实现对电网风险区段路径的匹配,提取最优路径,实现路径匹配成本最优化,基于多维信息特征映射方法设计一个路径匹配模型,模型设计原理框图见图1。

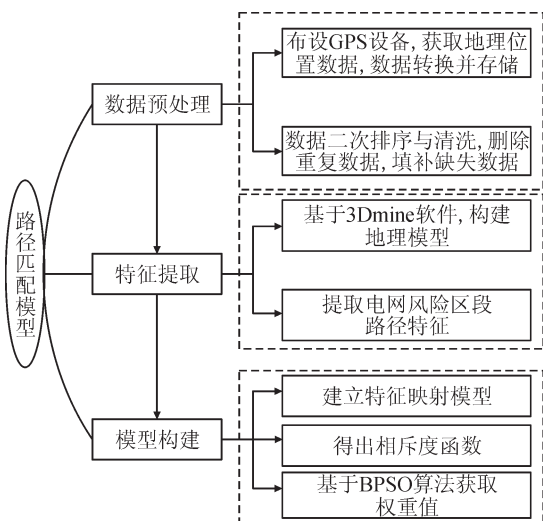


图1 电网风险区段路径匹配模型构建原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of path matching model construction in risk section of power grid

分析图1可知,在匹配模型构建过程中,通过数据预处理环节降低干扰数据的影响,以此为基础,通过3D mine软件构建地理模型,3D mine软件能够有效管理与调度地理信息数据,将地理信息数据导入到相应的数据库中,并通过柱状图等形式提取电网风险区段的路径数据。参考提取的特征构建特征映射模型,并获取各影响因子的权重值,从而实现电网风险区段路径的匹配。

1.1 数据采集与参数化表示

采集的电网风险区段路径数据为输电线路布设数据,即输电线路塔杆、站点的布设数据。在数据采集过程中,需要在该电网风险区段路径上的塔杆、站点等点状位置上布设GPS装备,以获得准确的地理位置数据,并对塔杆、站点地理位置数据进行对应,以获取输电线路的起始地理位置数据,并

通过计算获取路径长度数据^[5-6],将获取的相关数据转化为文本数据格式进行储存。

针对采集得到的数据,对数据实施二次排序,并对排序后的数据进行清洗,主要包括清洗电网风险区段路径数据中的错误数据、重复数据、缺失数据以及异常数据^[7],清洗的具体流程见图2。

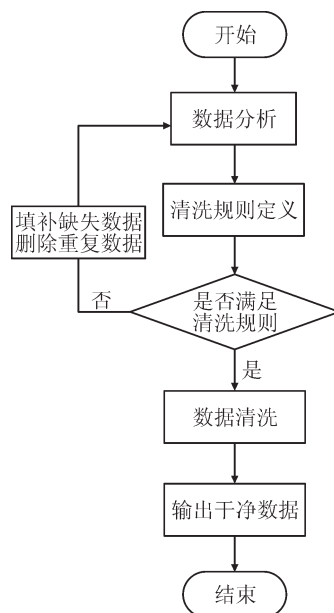


图2 数据清洗的具体流程

Fig. 2 Specific process of data cleaning

为了提高电网风险区段路径匹配的准确性,需要对采集得到数据中的错误数据、重复数据以及异常数据进行清洗,以此来降低干扰数据对路径匹配的影响,提高匹配结果的可靠性。根据图2可知,在进行数据清洗之前首先需要对数据进行初步分析,确定清洗对象,并对清洗规则进行定义。采用邻近排序算法(sorted-neighborhood method, SNM)方法制定数据清洗规则,即对数据中的关键字进行排序,并将数据格式进行统一,从而达到数据去重的效果。根据SNM法中的滑动窗口大小固定的原则,将窗口宽度设置为

$$V = \text{int}(v_1 + \frac{c_1}{v_1 + v_2}(v_i - v_j)) \quad (1)$$

式(1)中: v_1 为滑动窗口的大小; c_1 为窗口内相似数据的数量; v_i 为滑动窗口的最小宽度; v_j 为滑动窗口的最大宽度。

根据式(1)可知,随着 c_1 的变大,窗口内聚集的重复数据会变多,因此,可以通过缩短重复数据的搜索范围,实现对重复数据的进一步提取。在数据清洗过程中,将重复数据出现的概率设定为

$$Bc_i = \sum_{i=1}^n B(g_i, h_i) \partial \quad (2)$$

式(2)中: g_i 为预测值; h_i 为实际值; δ 为决策函数。利用式(2)将滑动窗口缩小, 从而避免对重复数据进行无用处理。

根据窗口调整结果, 对错误数据、重复数据、缺失数据以及异常数据的属性权值进行设置, 将关键属性权值设定为1, 非关键属性权值设定为0, 对数据属性权值大小进行依次排列, 并对其进行属性判断

$$X_i^j = \frac{A_i V \times B c_i}{T} \quad (3)$$

根据式(3)判断数据之间是否存在属性值相似的情况, 如果属性值相似, 那么可以判断为重复数据, 可以对其进行删除。

采集得到的电网风险区段路径数据中, 除了存在重复数据之外, 还存在缺失数据, 假设经过电网风险区段路径的整体数据集为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, 通过式(4)对数据集中的目标数据进行提取

$$G_{ik} = \left(\frac{G_i + G_k}{T} \right) \times X_i^j \quad (4)$$

式(4)中: G_i 代表数据流经的节点; G_k 代表节点之间的相关系数。综合式(3)、(4)实现对电网风险区段路径数据中重复数据的清洗与缺失数据的填补。

依据数据清洗结果进行数据参数化表示, 定义电网布设路径中塔杆的数量集合为 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 其中, w_n 表示第 n 个塔杆。 $0 < n < N$, N 表示塔杆总量; 定义站点的数量集合为 $j = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$, 其中, j_n 表示第 n 个站点。电网规划路径中的站点分为已有站点和在建站点, 前者用 j_r 表示, 后者用 j_z 表示, 则 r 代表考虑已有站点位置的电网络径规划难度, z 表示考虑在建站点位置的电网络径规划难度。根据上述定义得出电网络径初始信息为

$$\tau = (w_n + j_n) \times \varphi_{wj} \quad (5)$$

式(5)中, φ_{wj} 表示风险因子影响系数。

1.2 提取电网风险区段路径特征

通过3D mine软件, 根据电网风险区段路径的布设数据、电网风险区段路径的地理信息、该地区的气象信息以及输电线路及厂站的脆弱性构建电网风险区段路径的地理模型, 并数据参数化表示结果为基础提取电网风险区段路径特征^[8]。

$$\varphi_{od}(t) = \tau \times \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \varphi_i(t) \quad (6)$$

式(6)中, OD 代表地形三维图单元; k 代表路径内全部输电线路; t 代表站点信息单元; ε_i 代表地区气象风险等级信息单元, 其以电网风险区段路径内以气象灾害的实际风险等级为依据进行划分; φ_i 代

表气象灾害等级预警可视化单元^[9]。根据式(6)获取某区间发生风险的概率

$$P_{ab} = \int_a^b \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \varphi_i(t) dt \quad (7)$$

式(7)中: a 代表该路径上的厂站、气象站点、塔杆位置等坐标信息; b 代表该路径的风险指数信息。

根据构建的电网风险区段路径地理模型获取该路径的地形图, 并通过3D mine软件对该路径地表的DTM(digital ground model)模型进行生成。将获取的该路径上的厂站、气象站点、塔杆位置坐标信息与塔杆的风险指数信息输入到构建的DTM模型中, 通过3D mine软件对该模型实施赋值处理^[10]。其次, 通过3D mine软件的估值功能, 以各塔杆的风险指数信息与气象观测点的实际气象信息为依据对各输电线路的实际风险指数与气象风险等级进行估值, 并对各站点的实际风险等级进行估值^[11]。

$$Q_M(t) = \sum_k D_b(t, k) \times Z_e^m(k) - P_{ab} \quad (8)$$

式(8)中: Z 代表风险系数; e 代表气象风险等级。

将各站点的实际风险等级信息输入到DTM模型中, 并通过3D mine软件, 绘制目标区域电网布设路径三维地图, 见图3。

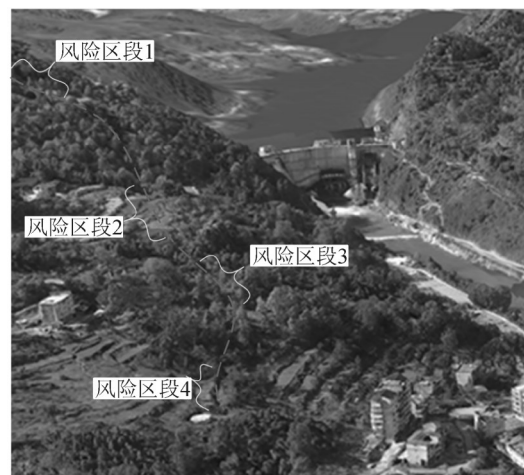


图3 目标区域电网布设路径三维地图

Fig. 3 Three dimensional map of power grid layout path in the target area

图3中, 考虑地形地貌、污秽条件、电缆架空高度以及铁塔运输难度等指标将该区域划分为4个风险区段, 根据各站点的实际风险等级对DTM模型实施上色渲染处理^[12]。通过构建的电网风险区段路径的地理模型能够提取该地区的地貌特征、气象特征、输电线路、塔杆、站点特征以及风险等级特征。

1.3 多特征融合的最优路径选取

根据提取的电网风险区段路径特征, 构建多维信息特征映射模型^[13]。

1.3.1 多维信息特征相斥度函数

在多维信息特征映射模型中, 布设路径中塔杆数量集合 w 与站点数量集合 j 之间存在映射关系 l , 该映射关系用 v 表示, 设任意 $x \in w, y \in j$, 则塔杆数量集合 w 与站点数量集合 j 的映射关系可以表示为 $w \rightarrow j$, 并得到站点数量集合 j 在映射关系下的子函数 l_z 。在映射关系下, 得出电网路径初始信息特征

$$\tau' = \begin{cases} \sum_{n=1}^w w_n \\ \sum_{n=1}^j j_n \end{cases} \quad (9)$$

子函数 l_z 表示集合 j 在映射关系 l 下的子函数数值, 其包括原电网风险区段路径、目标电网风险区段路径、原电网风险区段路径与目标电网风险区段路径之间的形状相似度以及原电网风险区段路径与目标电网风险区段路径之间的形状差异度。

根据上述构建的子函数得出多维信息特征相斥度函数, 并得出与之相对应的权重值, 并采用BPSO算法优化与映射函数相应的权重值^[14]。

相似度函数的数学表达式为

$$P_{F_i F_j}(k) = \frac{\tau_{F_i}(k) [S_{EN}(F_i, F_j)]^\beta}{\sum_{j=1}^m (k) \tau_{F_j}(k) [S_{EN}(F_i, F_j)]^\beta - Q_M(t)} \quad (10)$$

式(10)中, F_i 代表原电网风险区段路径; F_j 代表目标电网风险区段路径; $\tau_{F_i}(k)$ 代表目标电网风险区段路径上存在的多特征信息素; $\tau_{F_j}(k)$ 代表原电网风险区段路径 F_i 上存在的多特征信息素; $S_{EN}(F_i, F_j)$ 代表原电网风险区段路径与目标电网风险区段路径之间的形状相似度; β 代表原电网风险区段路径与目标电网风险区段路径之间的形状相似度影响转移概率的具体数值^[15]。通过式(7)得到的目标电网风险区段路径上存在的多特征信息素的具体数值, 进行计算

$$\tau_{F_j}(k) = \sum_k^p \Delta \tau_{F_j}(1 - \rho) \quad (11)$$

式(11)中: p 代表目标电网风险区段路径与原电网风险区段路径的匹配度; ρ 代表在路径匹配中所产生的多特征的实际信息素增量, 其计算公式为

$$\Delta \tau_{F_j} = \begin{cases} Q & Q \geq 1 \\ 0 & \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, Q 表示在选择目标电网风险区段路径 F_j 时信息素的实际增量值, 当 $\Delta \tau_{F_j}$ 为0时, 表示不选择该段路径。

1.3.2 基于BPSO算法的映射函数权重值优化

根据多维信息特征相斥度函数提取结果, 采用

熵权法求取影响电网路径匹配的指标权重, 首先, 对各个指标进行标准处理^[16], 根据处理结果计算各指标的信息熵, 计算公式为

$$E = -\ln(n) \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (13)$$

根据计算所得各指标权重值, 运用BPSO算法进行权重优化, 求取最优值, 以此来实现路径最优匹配。BPSO算法在权值优化中采用动态非线性调整权重值的方法实现权值最优化, 具体公式为

$$\theta = (1 - e^{-h})(1 - t)(\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (14)$$

式(14)中: $\theta_{\max}$ 代表权重的最大值; $\theta_{\min}$ 代表权重的最小值; h 代表迭代次数。

同时, 为了提高路径匹配模型的实际应用价值, 以风险和距离为综合成本^[17-22], 建立成本最佳目标函数, 根据目标函数实现风险区段路径的成本最小化, 目标函数表达式为

$$f(x) = \theta \sum_{i=1}^N L(F_i, F_j) - (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (15)$$

求解式(15)得到路径匹配成本的最小值, 实现路径的有效匹配。

综上分析, 通过设计的电网风险区段路径匹配模型得出电网风险区段路径的相关信息, 并通过权重优化得出最佳权重值, 从而实现了路径的最优匹配。

2 实验验证

为验证所设计基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型的有效性, 进行仿真实验分析, 实验中的数据均采用MATLAB软件进行处理。

2.1 实验参数与环境设计

虚拟仿真平台的具体参数见表1。

表1 计算机虚拟仿真平台参数

Table 1 Parameters of computer virtual simulation platform

名称	参数
CPU	AMD R5 3550H
硬盘	2T 固态硬盘
显卡	NVIDIA GeForce GTX1650
内存	16G
操作系统	Windows 10

在上述实验条件下, 对设计的基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型匹配性能进行实验验证。

2.2 实验结果分析

为了方便研究, 根据图3中的目标区域电网布设路径三维地图, 绘制目标区域电网路径平面示意

图,见图4。

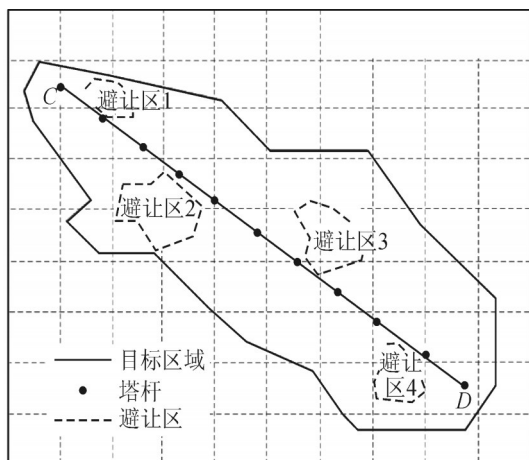


图4 目标区域电网路径平面示意图

Fig. 4 Power grid route plan of target area

图4中:C点表示起始点;D点表示终止点。根据图4可知,理想条件下,电网布设路径可以有效避开避让区域,塔杆分布均匀,并且起始点与终止点之间的距离最短。根据图4的平面图,采用所提方法进行路径匹配,得到的匹配结果见图5。

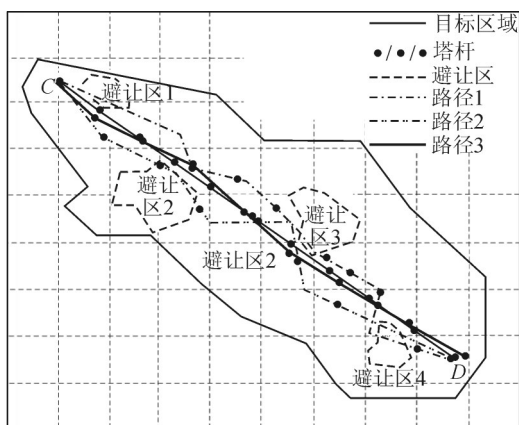


图5 路径匹配结果

Fig. 5 Path matching results

根据图5可知,在存在多个避让区的条件下,生成了多条匹配路径,其中,路径1、2为未经过所提方法优化得出的路径匹配结果,根据路径1、2可知,两条路径仅能避开部分避让区,且塔杆布设点没有形成一定的规律性,相比较而言,运用所提方法优化后,得出的路径3有效躲避了障碍区域,且塔杆布设较为规律,说明该路径是考虑风险路段各项因素后得到了最佳路径,验证了该模型匹配结果的可靠性。这是由于该模型在数据清洗的基础上,通过3D mine 软件,构建了电网风险区段路径的地理模型,通过该模型获取了电网风险区段路径特征,结合多维信息特征映射模型对电网风险区段路径进行匹配,实现了电网风险区段路径的有效匹配。

为了进一步验证该模型的匹配效果,在电网风险区段路径过程中考虑综合因子,综合因子即把影响电网路径规划的因子以数据的形式进行综合考虑,得到路径匹配的综合成本。由于各影响因素的影响程度不同,根据1.3.2节中信息熵的计算结果,求得各个指标的具体权重,结果见表2。

表2 各影响因子权重值

Table 2 Weight value of each influence factor

指标因子	地貌条件	污秽条件	覆冰状况	气象因子	当地路况
权重值	0.203	0.215	0.198	0.182	0.202

得到各影响因子的权重后再通过栅格计算器计算,得到综合成本。

以上述计算结果为基础,验证所提方法能够获得成本最佳路线,结果见图6。

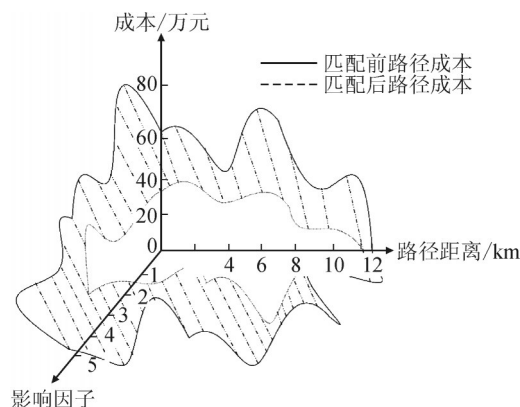


图6 成本最路径选取

Fig. 6 Cost path selection

分析图6可知,运用所提方法进行匹配后成本得到了大幅度的降低,说明该方法可以避开高成本区,形成绕过高成本区域的匹配路径,得到成本最优路径匹配结果,结合图6可知,所提方法设计的匹配结果可以有效避开高成本建设区,充分验证了该方法的合理性。这是由于该方法通过建立多维信息特征映射模型,得出了多维信息特征的相斥度函数,并在考虑影响因子的前提下,采用BPSO算法优化与映射函数相应的权重值,从而得到了成本最优路径。

为了全面验证文中设计模型的有效性,以基于气象监测的电网风险区段路径匹配模型(方法1)和基于风险控制的电网风险区段路径匹配模型(方法2)作为对比方法进行路径匹配,在对比过程中以式(15)构建的目标函数为衡量指标,测试不同方法的路径长度,得出的结果见图7。

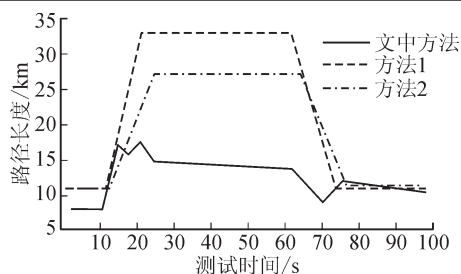


图7 不同方法的路径长度对比结果

Fig. 7 Path length comparison results of different methods

由图7可知,采用文中设计模型在路径匹配过程中路径的长度明显低于方法1、2的长度,说明该模型获取的实际距离最短,其最小值仅为7 km,充分说明该模型可以有效避让障碍物与障碍区域,能够降低线路布设成本,具有一定的实际应用价值。

综上所述可知基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型得到的路径成本效果最佳,并且能够有效抑制外在因素的干扰,说明该模型的路径匹配性能较优。

3 结语

为降低路径匹配成本,实现成本最优化,提出基于多维信息特征映射的电网风险区段路径匹配模型。该模型通过数据清洗解决了无效数据的干扰,并通过3D mine软件获取电网风险区段的信息,在此基础上,通过多维信息特征映射结合BPSO算法实现权重值的优化。实验结果表明,通过该模型的应用实现了路径匹配性能的提升,能够获取成本最优路径,说明该模型对于电网风险区段的路径搜寻与监测有很大意义,接下来将以文中研究成果为基础,对多层架构电网进行研究,进一步优化模型的应用效果。

虽然该模型能够满足一般需求,但是仅将原电网风险区段路径与目标电网风险区段路径之间的形状相似度视为信息素,虽然已初具合理性,但仍需考虑实际电网风险路段的最短距离,以此来进一步提升该模型的路径匹配效果。

参考文献:

- [1] 简洲,陆佳政,郭俊,等. 电网多火点山火灾害灭火装备优化调配模型[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2324-2330.
JIAN Zhou, LU Jiazheng, GUO Jun, et al. Optimal dispatch model of fire extinguishing equipment for electric grid under wild fire disaster with multiple fire points[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2324-2330.
- [2] 李正红,丁晓兵,冯宝成,等. 基于HSR环网的“花瓣”型配电网区域自备投系统研究及应用[J]. 中国电力, 2019,

52(8):64-70.

LI Zhenghong, DING Xiaobing, FENG Baocheng, et al. Research and application of regional power grid auto transfer system for the petal-shape distribution networks based on HSR network[J]. Electric Power, 2019, 52(8):64-70.

- [3] 朱文广,廖志军,刘洪,等. 考虑需求响应与高比例可再生能源接入的主动配电网扩展规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5):84-91.
ZHU Wenguang, LIAO Zhijun, LIU Hong, et al. Power load forecasting based on similar-data selection and improved gradient boosting decision tree[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(5):84-91.
- [4] 钱海明,张印,王春林,等. 利用能量函数和主动轮廓模型提取道路边缘线[J]. 遥感信息, 2018, 33(4):16-21.
QIAN Haiming, ZHANG Yin, WANG Chunlin, et al. Extraction of road edge lines from remote sensing images based on energy function and snake model[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(4):16-21.
- [5] 李咸善,邹芳,李鑫燕,等. 独立微电网微源多目标分层优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10):176-184.
LI Xianshan, ZOU Fang, LI Xinyan, et al. Multi-objective hierarchical optimal configuration method for microsources of stand-alone microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10):176-184.
- [6] 马飞龙,张宝群,宫成,等. 考虑风电不确定性的多区电力系统分散式随机调度方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11):68-74.
MA Longfei, ZHANG Baoqun, GONG Cheng, et al. Decentralized stochastic dispatch approach for multi-area power system considering wind power uncertainty[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11):68-74.
- [7] 陈碧云,周恒旺,李滨. 考虑微网市场交易影响的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18):43-53.
CHEN Biyun, ZHOU Hengwang, LI Bin. Reliability analysis of distribution network considering impact of market transaction in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):43-53.
- [8] 覃海,姬源,周川梅,等. 计及控制设备动作次数约束的三阶段动态无功优化算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9):179-186.
TAN Hai, JI Yuan, ZHOU Chuanmei, et al. Three-stage dynamic reactive power optimization algorithm considering constraints of control device action times[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):179-186.
- [9] 陈敬德,盛戈崑,吴继健,等. 大数据技术在智能电网中的应用现状及展望[J]. 高压电器, 2018, 54(1):35-43.
CHEN Jingde, SHENG Gehao, WU Jijian, et al. Application status and prospect of big data technology in smart grid[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):35-43.

- [10] 严学文, 高伟, 张稳稳, 等. 基于相电流特征的配电网单相断线区段定位新方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 76-81.
YAN Xuewen, GAO Wei, ZHANG Wenwen, et al. A novel fault segment location method of single-phase disconnection fault in distribution network based on phase current characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3):76-81.
- [11] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 161-172.
TONG Xiaoyang, ZHANG Shaoxun. Grey relational degree based fault section location and type recognition method for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4):161-172.
- [12] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于MOPSO的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6):46-53.
WU Fan, ZHAO Jinqian, ZHU Bin, et al. Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6):46-53.
- [13] 姜惠兰, 陈娟, 张驰. 基于改进Karrenbauer变换的有源配电网故障定位新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11):43-47.
JIANG Huilan, CHEN Juan, ZHANG Chi. New fault location method for active distribution network based on improved karrenbauer transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(11):43-47.
- [14] 盛彩英, 席唱白, 钱天陆, 等. 浮动车轨迹点地图匹配及插值算法[J]. 测绘科学, 2019, 44(8):106-112.
SHENG Caiying, XI Changbai, QIAN Tianlu, et al. Study of map-matching and interpolation algorithm of floating car data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(8): 106-112.
- [15] 郑伟, 胡长斌, 丁丽, 等. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3):177-184.
ZHENG Wei, HU Changbin, DING Li, et al. Research on distributed control of microgrid based on multi-agent system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3):177-184.
- [16] 刘佳, 程浩忠, 刘盾盾, 等. 不确定因素耦合下输电网风险规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 11-20.
LIU Jia, CHENG Haozhong, LIU Dundun, et al. Review of risk-based transmission network planning under coupled uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):11-20.
- [17] 张林垚, 吴桂联, 贾双瑞, 等. 一种配电网层间供电能力匹配度评价方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14):40-45.
ZHANG Linyao, WU Guilian, JIA Shuangrui, et al. An evaluation method for matching degree of power supply between layers in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14):40-45.
- [18] 杨丽君, 常雪婷, 曹玉洁, 等. 基于多代理系统的智能配电网分散协调恢复策略[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2):19-29.
YANG Lijun, CHANG Xueting, CAO Yujie, et al. Multi-agent system based decentralized coordinated recovery strategy for smart distribution grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2):19-29.
- [19] 江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1345-1351.
JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345 - 1351.
- [20] 唐泽洋, 周鲲鹏, 曹侃, 等. 基于配电网运行数据的线变关系校验方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1059-1068.
TANG Zeyang, ZHOU Kunpeng, CAO Kan, et al. Substation area topology verification method based on distribution network operation data[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1059-1068.
- [21] 孙强, 李向东, 刘翔, 等. 一流城市配电网综合评估方法研究[J]. 广东电力, 2020, 30(5):26-34.
SUN Qiang, LI Xiangdong, LIU Xiang, et al. Research on evaluation method for first-class city distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(5):26-34.
- [22] 黄彦璐, 林跃欢, 罗俊平, 等. 基于谐波分次检测与重复控制的配电网电能治理装置设计[J]. 广东电力, 2020, 30(5):35-43.
HUANG Yanlu, LIN Yuehuan, LUO Junping, et al. Design of distribution network compensation device based on selective harmonic detection and repetitive control algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(5):35-43.

刘世涛(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路六防、外绝缘技术等(E-mail: pinggou324309@163.com)。

杨凯(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为输电线路智能运检及外绝缘配置校核技术等。

伍弘(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为输电线路防鸟害及防污闪技术、外绝缘技术等。

何宁辉(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备在线监测技术、网络数据融合技术等。