

基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路 极端灾害风险评估模型

周林¹, 彭宇辉¹, 刘阳², 任成君¹, 孙文成¹, 张亚迪¹, 张杰¹, 陈钊¹, 李卓雯¹

(1. 国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610041; 2. 国网思极数字科技(北京)有限公司, 北京 100052)

摘要:针对现有架空输电线路极端灾害风险评估模型仅计算了风险指标的主观权重值导致评估效果不佳的问题, 提出了一种基于改进层次分析法和数据挖掘的评估模型。首先, 从输电线路的故障隐患、运行状况和自然条件3个方面出发, 建立风险评估体系层次结构; 然后, 利用层次分析法将相同层次的不同风险指标进行两两比较, 得到各风险指标的主观权重值, 再利用最小相对熵原理对主观权重值进行改进计算得到风险指标的客观权重值; 最后, 利用数据挖掘技术从历史极端灾害数据中提取出各风险指标的风险特征及风险等级, 生成风险评估模型。通过实验对比测试, 所提出的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型评估准确率为96.7%, 评估效果较好。

关键词:改进层次分析法; 数据挖掘; 架空输电线路; 极端灾害; 风险评估模型; 模型设计

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0061-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240509

An Extreme Disaster Risk Assessment Model for Overhead Transmission Lines Based on Improved Analytic Hierarchy Process and Data Mining

ZHOU Lin¹, PENG Yuhui¹, LIU Yang², REN Chengjun¹, SUN Wencheng¹, ZHANG Yadi¹,
ZHANG Jie¹, CHEN Zhao¹, LI Zhuowen¹

(1. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid SGITG Digital Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: Previous models for extreme disaster risk assessment of overhead transmission lines only calculated the subjective weight values of risk indicators, resulting in poor evaluation performance. Therefore, an extreme disaster risk assessment model for overhead transmission lines based on improved analytic hierarchy process (AHP) and data mining is designed. Firstly, based on the actual situation of overhead transmission lines, a hierarchical structure of risk assessment system is established from three aspects: fault hidden dangers, operating conditions and natural conditions of transmission lines. And then, by comparing different risk indicators at the same level in pairs, subjective weight value of risk indicators is obtained. The subjective weight value of risk indicators is calculated and improved with the principle of minimum relative entropy to obtain the objective weight value of risk indicators. Finally, data mining technology is used to extract the corresponding risk features and risk levels from historical extreme disaster data, and the corresponding risk assessment model is generated. Through experimental comparison testing, the proposed model based on improved AHP and data mining of extreme disaster risk assessment for overhead transmission lines has an accuracy of 96.7%, and the evaluation effect is good.

Key words: improved analytic hierarchy process; data mining; overhead transmission line; extreme disaster; risk assessment model; model design

0 引言

为了保证人们的用电需求能够被满足,架空输电线路的建设力度越来越大。架空输电线路分布范围极其广泛,所处自然环境极为复杂且自然灾害频发,其中雷暴、洪水、山火、暴雨等极端自然灾害的出现,将会破坏架空输电线路而严重影响到电网的稳定运行。因此,需建立架空输电线路极端灾害风险评估模型,对输电线路在运行过程中产生的风险进行评估,从而制定相应的措施降低灾害的影响。

不少研究学者针对输电线路风险评估模型展开了研究。文献[1]通过融合输电线路中多种参数数据,计算输电线路在实际运行中的安全风险,在图像数据耦合识别的作用下生成相应的多维输电线路图像数据,并对其进行模型训练得到风险指标数据;但该方法的适用性不强。文献[2]在火焰燃烧模型的作用下,分析输电线路山火跳闸的风险特征,实现输电线路的风险分布评估;实验结果表明,该方法评估时间较长。文献[3]将极端灾害在输电线路中产生的特征因子通过运算生成相应的云模型,对输电线路的动态风险进行修正,通过 Eclat (equivalence class transformation) 算法对输电线路风险指标进行关联,从而完成对输电线路极端灾害的风险评估;但实验结果表明,该方法评估效果不佳。上述风险评估模型虽然能够起到一定的评估作用,但由于多种因素的影响以及技术手段不完善,导致评估效果不佳。

在以上研究的基础上,下面设计了基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型。根据架空输电线路的实际情况构建评估体系层次结构,利用最小相对熵改进层次分析法计算出各层次因素的权重,在数据挖掘的作用下提取相关数据特征,生成输电线路极端灾害风险评估模型。所设计的方法能够针对极端灾害条件下的输电线路进行科学合理的风险评估,并制定应对措施,减小极端灾害给输电线路带来的破坏,保障电网的稳定运行。

1 评估模型设计

1.1 建立风险评估体系层次结构

考虑到架空输电线路可能面临的不同风险来

源,需要选择与极端灾害风险相关的因素作为评估指标。同时,考虑数据的可获取性和实时性,确保所选指标的数据能够准确反映当前风险状况。另外,指标之间可能存在相关性和依赖关系,在选择指标时应综合考虑指标之间的内在联系,以获取更全面和准确的风险评估结果。因此,从输电线路的故障隐患、运行状况和自然条件 3 个方面出发,对风险评估指标进行分析,明确不同风险发生的概率和风险评估指标之间的内在联系,构建相应的风险评估体系层次结构^[4-5],如表 1 所示。

表 1 风险评估体系层次结构

目标层	准则层	指标层	指标说明		
输电线路 故障隐患	输电线路 故障隐患	输电线路故障	遭遇极端灾害次数		
		区段故障	遭遇极端灾害次数		
	输电线路 运行状况	改造后故障	所在海拔	与线路平均海拔比较	
			地形	所处的地形情况	
			地貌	所处的地貌情况	
			防洪装置情况	是否安装防洪装置	
		防雷装置情况	是否安装防雷装置		
		防火装置情况	是否安装防火装置		
		输电线路 极端 灾害 风险 评估	输电线路 极端 灾害 风险 评估	跨越水坡	线路跨越河流、 水库的情况
				保护角	线路最大电压
输电线路材质损耗	材质的使用年限				
接地电阻	与规定标准相比				
输电线路 周边 自然 条件	输电线路 周边 自然 条件	同通道线路	比较海拔、距离		
		土地利用	土地的应用情况		
		负载情况	线路的负载运行时间		
		雷电预报	是否处于落雷区域		
		洪水预报	是否处于洪水区域		
		火警报警	发生火灾能否快速报警		
		降雨量	降雨量范围		
		风速	风速范围		
气压	气压范围				
温度	温度范围				

表 1 将极端灾害风险评估问题转化成多层次监测的判断问题,为后续生成相应的风险评估模型奠定基础。

1.2 基于改进层次分析法计算指标权重

以所构建的风险评估体系层次结构作为基础,构建判断矩阵如式(1)所示。

$$T_x = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: T_x 为构建的判断矩阵; a_{ij} 为风险指标 i 与风险

指标 j 的相对重要性; n 为风险指标的数量。 a_{ij} 的取值根据不同指标的相对重要性进行判定: 当两个风险指标重要性相同时取值为 0.5; 若其中一个风险指标的重要性远小于另一个则取值为 0.1, 若远大于另一个则取值为 0.9。

利用层次分析法对各层次不同风险指标的主观权重值进行计算^[6-8]。其具体计算过程为

$$\begin{cases} w_{ij} = (w_{ix} - w_{jx})M + 0.5 \\ w_{ix} = w_y w_{iy} M \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为第 i 个风险指标 X_i 相对于第 j 个风险指标 X_j 的主观权重值; w_{ix} 、 w_{jx} 分别为风险指标 X_i 、 X_j 所在 x 层次的整体权重值; w_y 为在 y 层次的主观权重值; w_{iy} 为 X_i 在 y 层次的主观权重值; M 为层次分析函数。

利用最小熵相对原理对上述层次分析法进行改进^[9-12], 如式(3)所示。

$$\begin{cases} H(R) = -\sum_{i=1}^n P(X_i) \log_2 P(X_i) \\ \min H(R) = -\sum_{i=1}^n P(X_i) \sum_{j=1}^n P(X_j | X_i) \log_2 P(X_j | X_i) \\ M' = \min H(R) \cdot M \end{cases} \quad (3)$$

式中: $H(R)$ 为条件熵 R 的熵; $P(X_i)$ 为第 i 个风险指标 X_i 出现的概率; $\min H(R)$ 为最小相对熵值; $P(X_j | X_i)$ 为在风险指标 X_i 存在的情况下, 风险指标 X_j 出现的概率; M' 为改进后的层次分析函数。

对层次分析法进行改进处理后, 利用改进层次分析法计算风险指标的客观权重^[13-15], 如式(4)所示。

$$\begin{cases} K = \frac{1}{I(R | F_1)} \times M' \\ a_j = \frac{(1 - e_j) \times K}{n - \sum_j e_j} \end{cases} \quad (4)$$

式中: K 为改进层次分析法的互信息量; $I(R | F_1)$ 为互信息计算函数, I 为给定 R 时 F_1 的条件熵; e_j 为风险指标 X_j 的客观权重值; a_j 为改进后的风险指标 X_j 的客观权重值。

1.3 基于数据挖掘提取风险特征及生成风险评估模型

考虑到历史极端灾害对架空输电线路的影响, 需要对历史数据进行分析和处理, 并根据处理结果, 利用数据挖掘提取相应的风险特征。提取过程如图 1 所示。

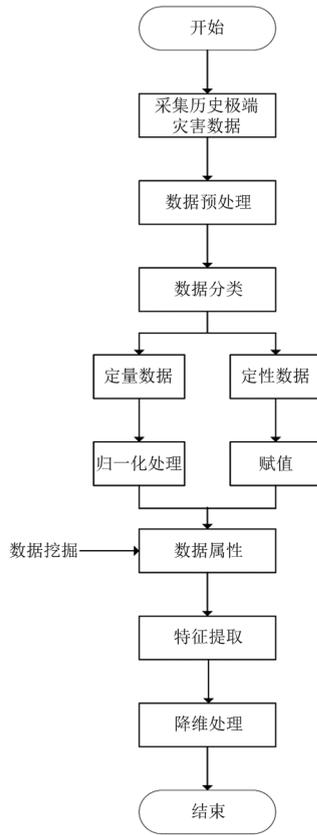


图 1 基于数据挖掘提取风险特征过程

首先, 对采集的历史极端灾害数据进行预处理, 将数据划分为定量数据和定性数据, 对定量数据进行归一化处理, 对定性数据根据严重程度进行赋值; 然后, 进行数据挖掘, 根据数据的属性提取出数据特征并进行降维处理; 最后, 根据所提取的数据特征 f , 按照表 2 所示的风险划分等级确定对应的风险等级, 为后续的风险评估奠定基础。

表 2 风险划分等级

风险等级	定性特征	定量特征
I	<0.20	1
II	0.20 ≤ f < 0.40	2
III	0.40 ≤ f < 0.70	3
IV	>0.70	4, 5

结合构建的风险指标评估体系层次结构和计算的风险指标权重值, 生成相应的风险评估模型, 如图 2 所示。

风险评估模型主要分为三大部分, 分别为信息层、融合层和目标层。信息层为架空输电线路的本身特征和输电线路周边的环境特征, 其中: 本体特征为输电线路的长度、高度等多项指标; 环境特征为输电线路所处的海拔、温度、湿度、地表类型等多项指标。这些指标互相影响, 利用第 1.2 节的改进层次

分析法计算出对应的权重值,用于后续的风险评估。在进行数据融合时,先利用数据挖掘提取出相应的风险特征,将该风险特征作为基础对输电线路进行风险评估,并确定相应的风险等级完成风险评估。

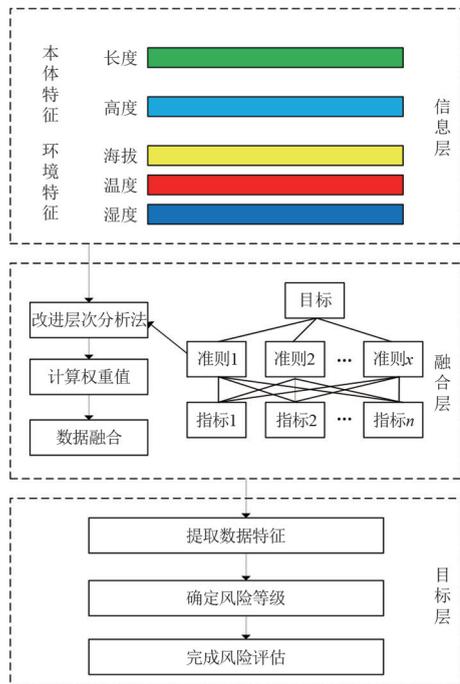


图 2 架空输电线路极端灾害风险评估模型

2 实验测试

2.1 实验准备

为验证所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型在实际应用中的效果,进行了相关实验测试。

以某架空输电线路为实验对象,使用 NI LabVIEW 软件创建数据采集 VI 与硬件设备通信,进行历史数据的采集。采集到的数据直接保存到计算机的数据库中。使用 LabVIEW 的数据处理工具箱和函数库对采集到的原始数据进行去除噪声、滤波、数据对齐和校准等操作,再通过分析和算法模块实现特征提取。得到的历史数据特征提取结果如图 3 所示。

同时,对某架空输电线路的风险指标权值进行计算,结果如表 3 所示。

为提高实验的可信度,设置了相应的对照实验将所建模型与其他评估模型进行对比。其中:所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 1;文献 [3] 的基于

改进云模型和多因素权重分析的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 2;文献 [16] 的基于物元可拓的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 3。

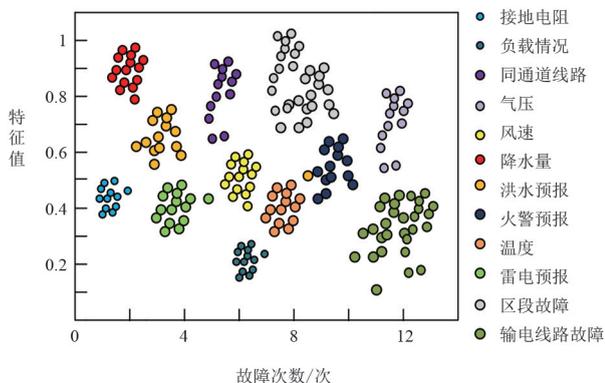


图 3 历史数据的特征提取结果

表 3 某架空输电线路风险指标权重值

序号	风险指标	指标权重值
1	输电线路故障	0.600 0
2	区段故障	0.400 0
3	所在海拔	0.076 1
4	地形	0.076 1
5	地貌	0.076 1
6	防洪装置情况	0.080 7
7	防雷装置情况	0.080 7
8	防火装置情况	0.080 7
9	改造后故障	0.085 2
10	跨越水坡	0.089 8
11	保护角	0.088 2
12	输电线路材质损耗	0.089 8
13	接地电阻	0.087 4
14	同通道线路	0.089 4
15	土地利用	0.088 4
16	负载情况	0.087 9
17	雷电预报	0.195 2
18	洪水预报	0.195 2
19	火警报警	0.195 2
20	降雨量	0.177 5
21	风速	0.177 5
22	气压	0.177 5
23	温度	0.215 0
24	输电线路故障隐患	0.250 0
25	输电线路运行状况	0.425 0
26	周边自然条件	0.325 0

2.2 实验结果与讨论

为验证3种风险评估模型在实际应用中的效果,以3种模型的风险评估准确率作为评价指标,对比3种模型的性能。实验中,随机抽取某输电通道架空输电线路的30次不同风险等级的数据样本,分别利用3种模型进行风险等级评估,并将各模型的风险评估结果与实际结果相对比,通过式(5)计算出模型评估的准确率。

$$Q = \frac{P_1}{P} \quad (5)$$

式中: Q 为模型风险评估的准确率; P_1 为评估正确的实验次数; P 为实验次数。统计结果如图4所示。

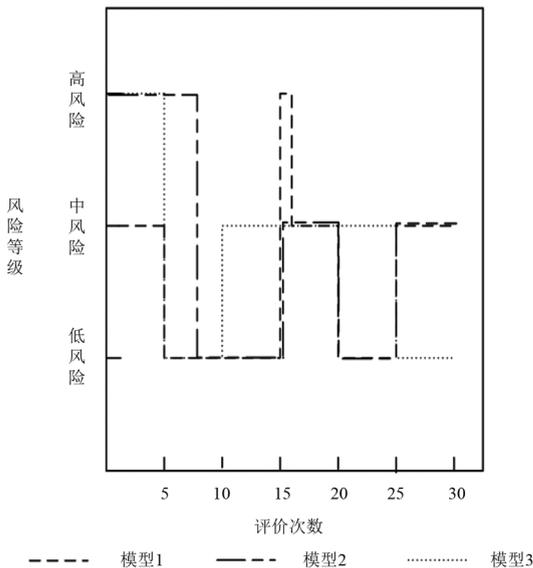


图4 3种模型的风险评估结果

如图4所示,在对某输电通道架空输电线路进行30次风险评估的过程中,3种模型的评估结果与实际结果均存在一定差异,其中:模型1的评估结果与实际结果差异不大,评估准确率为96.7%;模型2的评估效果较差,评估准确率为80%;模型3的评估准确率为50%。可见,模型1的评估准确率最高。这是因为所设计模型结合了改进的层次分析法和数据挖掘技术,综合考虑了主观和客观因素,使评估结果更全面和准确,避免了仅依赖主观权重带来的评估效果不佳的问题。同时通过两两比较不同风险指标,得到了风险指标的判断矩阵,从而捕捉到多个影响因素之间的相对重要性关系,可更全面地考虑不同因素对极端灾害风险的影响,降低了主观性的偏差。因此,所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型在实际

应用中效果最好,能够准确评估架空输电线路的风险情况,保障架空输电线路的正常运行。

3 结论

综上所述,架空输电线路中出现的极端灾害受到多种因素的影响,因此上面从多个角度出发,建立了相应的风险评估体系层次结构,利用层次分析法构建了风险评估指标的判断矩阵并计算出各层次风险指标的主观权重和客观权重,再利用数据挖掘提取出的输电线路历史数据中的特征确定输电线路的风险等级。在实际应用中,所设计的风评估模型评估效果较好,能够根据输电线路的实际情况针对极端灾害进行分析处理,并制定相应的防护措施,提高输电线路面对极端灾害时的反应能力。所设计的方法还存在些许不足,如在实验测试中仅对单一的输电线路进行评估,导致实验结果具有偶然性,在之后的研究中将采集多个样本进行评估处理。

参考文献

- [1] 徐昌前,王东,苏峰,等.基于图像数据耦合识别的输电线路安全风险评估方法[J].计算机科学,2023,50(S1):803-808.
- [2] 周恩泽,樊灵孟,黄勇,等.基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J].电网技术,2022,46(7):2778-2785.
- [3] 杜平,张小军,许永新,等.基于改进云模型和Eclat算法的输电线路极端灾害风险评估[J].现代电力,2021,38(5):483-491.
- [4] 宋耐超,王瑞琦,李明明,等.多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):65-71.
- [5] 冯学斌,侯继勇,武健,等.基于环境参量和主成分分析的OPGW光缆状态风险评估方法[J].光通信技术,2021,45(10):44-47.
- [6] 张兰,王光霞,安利,等.基于改进层次分析法的遥感影像压缩质量评价[J].测绘与空间地理信息,2023,46(4):8-12.
- [7] 寇昆湖,刘登攀,钱峰,等.基于改进层次分析法的无人机作战效能评估方法研究[J].舰船电子工程,2023,43(2):110-114.
- [8] 陈冲,刘星桥,段文勇,等.基于改进层次分析法和模糊综合评价的哺乳母猪环境舒适性评估[J].农业工程技术,2022,42(27):108.

(下转第75页)

line fault detection, diagnosis and location in large-scale multi-machine power systems [J]. Measurement, 2021, 177:109330.

[6] 叶鑫杰,兰生,肖思捷,等.基于小波包能量熵和 DBN 的 MMC-HVDC 输电线路单极接地故障定位方法[J].南方电网技术,2021,15(2):82-91.

[7] WANG X H, ZHOU P, PENG X G, et al. Fault location of transmission line based on CNN-LSTM double-ended combined model[J].Energy Reports,2022,8(S5):781-791.

[8] 杨玉萍,吴浩,田海鹏等.高压直流输电线路单端智能故障定位方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(9):120-129.

[9] ZHANG F, LIU Q Y, LIU Y L, et al. Novel fault location method for power systems based on attention mechanism and double structure GRU neural network [J]. IEEE Access, 2020, 8: 75237-75248.

[10] 张晓炜. 基于深度学习的混合直流系统故障诊断方法研究[D].北京:北京交通大学,2022.

[11] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.

[12] 段建东,李浩,雷阳,等.利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3833-3842.

[13] 卞景艺,刘秀丽,徐小力,等.基于多尺度深度卷积

神经网络的故障诊断方法[J].振动与冲击,2021,40(18):204-211.

[14] LANDOLA F, MOSKEWICZ M, KARAYEV S, et al. Densenet: Implementing efficient convnet descriptor pyramids[R/OL].[2023-05-09].DOI: 10.48550/arXiv.1404.1869.

[15] HAN Kai, WANG Yunhe, TIAN Qi, et al. GhostNet: more features from cheap operations [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-19, 2020, Seattle, USA. IEEE, 2020: 1577-1586.

[16] GREFF K, SRIVASTAVA R K, KOUTNIK J, et al. LSTM: a search space odyssey[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(10): 2222-2232.

[17] 邵庆祝,谢民,王同文,等.基于深度随机配置网络的电网故障诊断方法[J].控制工程,2022,29(12): 2213-2220.

作者简介:

陈伟哲(1999),男,硕士研究生,研究方向为交直流混联电网故障诊断;

宋弘(1973),男,硕士,教授,研究方向为电力系统故障诊断;

吴浩(1980),男,博士,教授,研究方向为电力系统保护与控制。(收稿日期:2023-11-07)

(上接第 65 页)

[9] 陈祉如,郭亮,杜艳,等.基于改进层次分析法的电能计量系统综合评价[J].山东大学学报(工学版),2022,52(6):167-175.

[10] 云玉新,赵富强,张磊,等.结合相关系数及改进层次分析法的油浸式变压器质量评估[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(5):203-210.

[11] 沙金,郑斯斯.基于改进层次分析法的工程教育认证课程毕业要求达成度评价[J].大众科技,2022,24(2):129-132.

[12] 熊文祥,陈永刚.基于集对可拓和改进层次分析法的铁路通信系统安全评估[J].计算机系统应用,2022,31(2):285-290.

[13] 孟建佛,王双银,张静怡,等.基于改进层次分析法的小水电生态环境影响评价[J].水利与建筑工程学报,2022,20(1):103-107.

[14] 李银久,李秋华,焦树林.基于改进层次分析法、CRITIC 法与复合模糊物元 VIKOR 模型的河流健康评价[J].

生态学杂志,2022,41(4):822-832.

[15] 王晓天,张英华,秦挺鑫,等.基于熵值法改进层次分析法马拉松急救能力评价模型的构建[J].中国安全生产科学技术,2021,17(9):169-174.

[16] 周恩泽,黄勇,向淳,等.基于物元可拓的输电线路山火风险评估模型[J].南方电网技术,2022,16(1):145-154.

作者简介:

周林(1971),男,高级工程师,从事输变电工程技术管理工作;

彭宇辉(1972),男,高级工程师,从事输变电工程建设和运行管理工作;

刘暘(1989),女,高级工程师,从事输变电信息化项目建设管理和运行维护工作;

任成君(1987),男,高级工程师,从事输变电设备技术管理工作;

孙文成(1985),男,高级工程师,从事输变电工程建设和运行管理工作。

(收稿日期:2023-11-03)