

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107052

基于可拓灰云聚类—状态区间范围差异的 断路器状态评估方法*

何 晋 李维希 李智轩 孙琮岳 李光耀
(云南民族大学 电气信息工程学院 昆明 650000)

摘要: 电力设备的健康状态评估能降低设备检修的盲目性。针对目前断路器状态评估中存在的相邻状态分界点附近状态划分模糊性较高的问题,设计了一种可拓灰云聚类且考虑状态区间范围差异断路器状态评估方法。该方法以可拓云理论和灰云聚类函数作为基本理论框架,采用不同的约束范围构造最优云熵,同时将状态区间范围差异一同考虑。以某变电所真空断路器为例,预警状态下,“3En”规则构造云熵为0.671 2,“50%关联度”规则构造云熵为0.577 6,构造最优云熵为0.612 7,该方法将其整体判定为预警状态,同其他评估方法结果一致,但其隶属度上的反映更精准。实例结果分析表明,它能有效的处理断路器状态评估中的不确定性因素,具备一定的可行性与准确性。

关键词: 断路器状态评估;可拓灰云聚类模型;状态区间范围差异;云熵

中图分类号: TM561 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4054

Condition assessment method of circuit breaker based on improved extension grey cloud theory with the state range difference

He Jin Li Weixi Li Zhixuan Sun Congyue Li Guangyao
(School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650000, China)

Abstract: The health assessment of power equipment can reduce the blindness of equipment maintenance. Aiming at the problem of high ambiguity of state division near the boundary point of adjacent states in current circuit breaker state evaluation, a method for evaluating the state of circuit breaker with extension gray cloud clustering considering the difference of state interval is designed. This method uses extension cloud theory and gray cloud clustering function as the basic theoretical framework, adopts different constraint ranges to construct the optimal cloud entropy, and simultaneously considers the difference in the state interval range. Taking a vacuum circuit breaker in a substation as an example, in the early warning state, the cloud entropy constructed by the "3En" rule is 0.671 2, and the cloud entropy constructed by the "50% correlation" rule is 0.577 6. The optimal cloud entropy constructed in this paper is 0.612 7. This method will The overall judgment is an early warning state, which is consistent with the results of other evaluation methods, but its reflection on the degree of membership is more accurate. The analysis of the example results shows that it can effectively deal with the uncertain factors in the evaluation of the circuit breaker's status, and has high feasibility. At the same time, the accuracy of the evaluation results has been improved to a certain extent.

Keywords: circuit breaker condition assessment; extension gray cloud clustering theory; state range difference; cloud entropy

0 引 言

断路器能在极短时间内有效切断故障线路及元件,就电力系统的稳定运行而言,它的重要性不言而喻。对断路器进行有效的健康评估在一定程度上能减少过早或不必要

的停电检修,能降低设备检修的盲目性。

目前,国内外许多学者就电力设备状态评估展开研究。模糊综合评估以及智能算法是目前较为主流的状态综合评判方法。模糊综合评估方法其权重确定常采用层次分析法和熵权法,隶属度由灰色系统理论、证据理论、物元理论、正

收稿日期:2021-06-24

* 基金项目:国家自然科学基金(52061042)项目资助

态云模型等确定^[1-2]。文献[3]利用层次分析法确定权重再用模糊理论确定隶属度函数最后利用证据推导进行最终评估,但其赋权过于依赖专家经验。文献[4]利用模糊—DS证据理论建立中压真空断路器在线评估模型,文献[5]提出一种基于雷达图形的图形化状态评估方法,但该方法特征参量数量不超过 5 个,模型可拓性较差。文献[6]采用云物元理论进行状态评估,云模型的 En 参数只考虑了状态划分的明确性。文献[7]在参数 En 上有优化,但未考虑多次计算中存在的越界数据的不良影响。文献[8]综合灰色关联度和欧式距离计算评估样本的贴近程度进行优劣排序。文献[9]将云模型引入灰色白化权函数的表达,用灰云聚类模型进行等级评估。智能算法就传统模糊综合算法而言具备更强的分类能力,准确度也有提升。文献[10]利用 K-means++ 聚能算法建立各指标等级隶属度函数,文献[11]引入模糊神经网络改进层次分析法,文献[12]利用改进型最小二乘支持向量机进行状态评估,但都过于依赖数据量,需要大量的可靠训练样本。就断路器而言,它的结构复杂需长时间在线工作,在对其进行状态评估是无法获取全部的运行数据导致数据信息不全面,客观实际导致状态评估存在灰色性,同时,在进行状态评估时状态定性具备模糊性。目前电网等企业对于相关数据的挖掘工作还不够精细和全面,断路器很多指标参量无法实现在线测量,同时大部分智能算法的研究也不够深入。综合考量的情况下,传统算法依旧是更贴近断路器一线检修的状态评估方法。在传统断路器评估体系中,不同隶属度判定方法对体系中灰色性、模糊性的刻画侧重不同,但未考虑计算随机性影响以及相邻两状态临界点附近隶属度刻画的科学性。

基于上述讨论,本文基于可拓灰云聚类提出一种考虑相邻状态区间范围差异的断路器运行状态评估方法。我国电网主要使用真空断路器以及 SF₆ 断路器,本文以中压真空断路器作为主要讨论对象。首先选取振动信号(vibration signal, VS)、电寿命(electrical endurance, EE)、真空度(vacuum density, VD)、隔离触头温度(contact temperature, T)指标参量构建以可拓云理论与灰云聚类函数为理论框架的可拓灰云聚类模型,模型中的参数云熵融合了模糊理论和灰色理论的优点,在一定程度上能平衡状态划分的明确性。其次合理将状态区间范围差异大小加入模型中,能提高相邻状态区间分界点附近的状态划分的明确性。最后通过横向对比不同评估方法验证了该方法的可行性。

1 可拓灰云聚类模型

1.1 正态云模型

在正态云模型(Ex, En, He)中 Ex 表示区间中心值。 En 为云熵值,反映出隶属度横向变化的模糊性。 En 参数改变对云模型的影响如图 1 所示,当参数 En 增大,云模型在横向变化的趋势减小,即实测值随着参数 En 变化偏离

该状态的隶属度变化趋势减小,两相邻状态划分的明确性降低,模糊性增大。 He 反映了云熵 En 的不确定性:当 En 恒定时, He 的改变将使得“云”变厚或变薄,实测值对于该状态隶属度变化在纵向范围内波动,云滴的凝聚程度会发生变化。 En 和 He 的改变都会在不同程度上对实测值的隶属度造成影响,但 En 的改变将最大程度影响实测值的隶属度改变,也将影响相邻两状态判定的模糊性和明晰性^[13]。

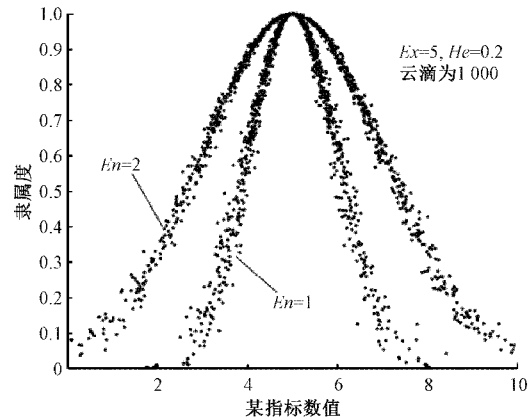


图 1 改变云熵正态云模型变化示意图

目前 En 参数主要有以下两种计算方法^[14-15]:

1) “50%关联度”法则

灰云白化权函数的隶属度是基于云模型和白化权函数的构造确定的,其中云模型是隶属度刻画的核心,白化权函数侧重表现形式。状态区间分界点隶属于本状态的概率为 50%,该规则对于等级划分的模糊度较高,对于相邻两状态分界点一定范围内的数据区间来讲,隶属度刻画过于模糊,缺乏状态划分的明确性。具体计算如下:

$$En = \frac{\|L_x - R_x\|}{2.3548} \quad (1)$$

式中: $\|L_x - R_x\|$ 为状态区间长度。

2) “3En”极限法则

云模型本质上符合高斯分布的特点,如果对于等级划分的明确性要求很高,采用“3En”极限法则构造参数 En ,根据高斯分布的特点,99.7%的云滴落在区间 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 上,反映在隶属度层面,如果实测数据值不属于该状态等级区间范围,那么其对该状态的隶属度将变得非常小,可以忽略,计算方法如下:

$$En = \frac{\|L_x - R_x\|}{6} \quad (2)$$

1.2 可拓灰云聚类模型

据可拓物元分析的思想,对断路器进行状态评估时建立评估模型 $R = \{N, C, V\}$,其中 N 为分析对象, C 为分析对象的特征, V 为特征分量^[16]。用灰云聚类模型(Ex, En, He)代替特征分类 V ,则构成可拓灰云聚类评估模型。灰云聚类模型(Ex, En, He)中白化权函数的变形式分为上

限、适中、下限测度 3 类。以适中测度模型为例，灰云白化权函数计算所得期望隶属度白化值为^[17 18]：

$$f(x) = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2En^2}\right], x \in [L_x, R_x] \quad (3)$$

将计算结果的波动约束在某一范围内，即“En”的变化幅度在 $[En - \alpha He, En + \alpha He]$ ，则灰云聚类隶属最大关联度及最小关联度如式(4)~(5)所示：

$$f_{\max}(x) = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2(En + \alpha He)^2}\right] \quad (4)$$

$$f_{\min}(x) = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2(En - \alpha He)^2}\right] \quad (5)$$

为兼顾区间划分的明确性及模糊性，采用“50%关联度-1He”与“3En 规则-2He”两种约束条件构造灰云聚类模型。根据两种模型的最大、最小关联度以及状态区间的范围大小进行参数“En”的构造。设 $C(50\% - 1He)_{\min}$ 为“50%关联度-1He”约束条件下最小隶属度白化权值，设

$C(3En - 2He)_{\max}$ 为“3En 关联度-2He”约束条件下最大隶属度白化权值， C_{op} 为最优参数灰云聚类模型的期望隶属度，则两种隶属度值与期望值隶属度 C_{op} 的偏差为 ΔC ：

$$\Delta C = \frac{1}{2}[C(50\% - 1He)_{\min} - C_{op}]^2 + \frac{1}{2}[C(3En - 2He)_{\max} - C_{op}]^2 \quad (6)$$

通过式(6)计算出 ΔC 后据式(7)构造相邻两状态区间的 En_{op} 参数决策模型：

$$\begin{cases} \min \Delta C(En_{op}) = \sum_1^n \Delta C \\ S. T. \dots En_{2He}^{3En} \leq En_{op} \leq En_{1He}^{50\%} \end{cases} \quad (7)$$

文献[5]给出的各指标状态区间如表 1 所示，选取振动信号参数进行可拓灰云聚类模型构建，振动信号可拓灰云模型参数如表 2 所示。

表 1 断路器各指标状态区间

状态	VS	EE	VD	T
良好	0~0.423 0	0~0.133 0	0~0.143 0	0~0.250 0
一般	0.423 0~0.712 0	0.133 0~0.520 0	0.143 0~0.572 0	0.250 0~0.500 0
预警	0.712 0~0.904 0	0.520 0~0.700 0	0.572 0~0.858 0	0.500 0~0.750 0
故障	0.904 0~1	0.700 0~1	0.858 0~1	0.750 0~1

表 2 振动信号可拓灰云模型

状态	良好	一般	预警	故障
云模型	(0.211 5, 0.129 2, 0.005 0)	(0.567 5, 0.091 6, 0.005 0)	(0.808 0, 0.058 7, 0.005 0)	(0.952 0, 0.029 0, 0.005 0)

以振动信号的良好状态和一般状态为例。良好状态左半侧的隶属度无需考虑，良好状态右半区间长度是一般状态左半区间长度的 1.46 倍，那么将区间分界点隶属良好状态的程度降低，将良好状态右侧分界点灰云聚类隶属度期望降为原期望值的 0.827 6 倍，将一般状态右侧分界点灰云聚类隶属度期望增加为原期望值的 1.208 倍。设当 En 变化 k 倍时，隶属度变化与 En 的变化通过以下公式求出：

$$f_{ch}(x) = \exp\left[-\frac{(x - En)^2}{2(kEn)^2}\right] \quad (8)$$

$$f_{ch}(x) = \left\{ \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2En^2}\right] \right\}^{\frac{1}{k^2}} \quad (9)$$

则得出当 En 变化 k 倍时，隶属度变为原值的 $1/k^2$ ，当我们计算 En 变化对应的隶属度，必须先求出 En 不变时的隶属度，变化后的云模型中参数 He 保持不变，设原隶属度为 $f(x)$ ，变化后的隶属度 $f_{ch}(x)$ 为：

$$f_{ch}(x) = f(x)^{\frac{1}{k^2}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{k^2} = \log_{f(x)} f_{ch}(x) \quad (11)$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\log_{f(x)} f_{ch}(x)}} \quad (12)$$

按照式(10)~(12)结合表 2 所给的相关参数进行振动信号的长度差异-可拓灰云聚类模型构造，所得模型参数如表 3 所示，隶属度变化如图 2 所示。

表 3 振动信号区间长度差异可拓灰云模型

状态	左侧云	右侧云
良好	(0.211 5, 0.129 2, 0.005 0)	(0.211 5, 0.120 9, 0.005 0)
一般	(0.567 5, 0.085 4, 0.005 0)	(0.567 5, 0.096 1, 0.005 0)
预警	(0.808 0, 0.060 9, 0.005 0)	(0.808 0, 0.055 4, 0.005 0)
故障	(0.952 0, 0.030 5, 0.005 0)	(0.952 0, 0.029 0, 0.005 0)

根据本方法构造真空度、电寿命、隔离触头温度添加状态区间长度差异的最优灰云聚类模型参数如表 4~6 所

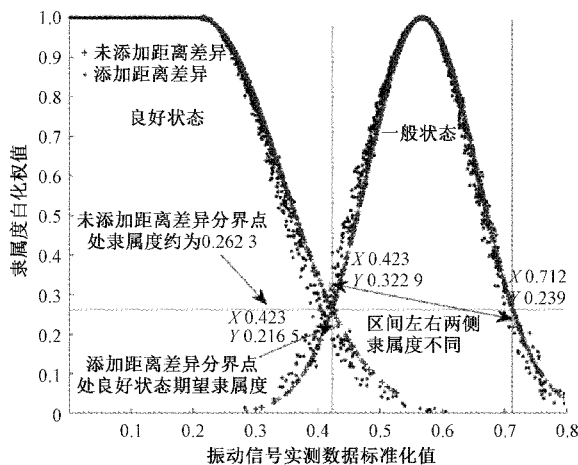


图 2 振动信号添加状态区间长度差异隶属度变化示意图

示。隔离触头温度的 4 个状态区间长度一致,则无需进行区间距离长度差异的“En”参数修正。

表 4 真空度区间长度差异-最优云熵云模型参数

状态	左侧云	右侧云
良好	(0.071 5, 0.044 2, 0.005 0)	(0.071 5, 0.048 6, 0.005 0)
一般	(0.357 0, 0.116 4, 0.005 0)	(0.357 0, 0.125 0, 0.005 0)
预警	(0.714 0, 0.091 7, 0.005 0)	(0.714 0, 0.073 5, 0.005 0)
故障	(0.925 8, 0.041 9, 0.005 0)	(0.925 8, 0.043 6, 0.005 0)

表 5 电寿命区间长度差异-最优云熵云模型参数

状态	左侧云	右侧云
良好	(0.066 5, 0.040 9, 0.005 0)	(0.066 5, 0.044 6, 0.005 0)
一般	(0.316 5, 0.101 2, 0.005 0)	(0.316 5, 0.105 2, 0.005 0)
预警	(0.600 0, 0.064 8, 0.005 0)	(0.600 0, 0.063 5, 0.005 0)
故障	(0.850 0, 0.088 4, 0.005 0)	(0.850 0, 0.093 8, 0.005 0)

表 6 隔离触头温度区间长度差异-最优云熵云模型参数

状态	云模型
良好	(0.125 0, 0.076 8, 0.005 0)
一般	(0.370 5, 0.076 8, 0.005 0)
预警	(0.625 0, 0.076 8, 0.005 0)
故障	(0.875 0, 0.076 8, 0.005 0)

2 算例仿真与方法对比

本文将文献[19]提供的某地区变电所两组 12 kV 的真空断路器现场运行参数和文献[8]给出的晋城某矿井 10 kV 高压配电装置内真空断路器作为待评样本,相关指标数据如表 7 所示。按照文献[20]所提供的方法将权重设置为: $\omega = [0.2787, 0.2893, 0.2347, 0.1973]$ 。由于云理论本身的随机性,仍然可能存在少数计算结果超出极限范围,因此利用中心极限定理对计算结果进行二次处理可以加强状态评估的科学性。

表 7 指标实测数据标准化值

断路器	VS	EE	VD	T
1	0.231 0	0.234 0	0.286 0	0.125 0
2	0.750 0	0.500 0	0.800 0	0.325 0
3	0.913 0	0.294 0	0.457 0	0.425 0
4	0.327 0	0.318 0	0.486 0	0.375 0
5	0.654 0	0.071 0	0.235 0	0.270 0

断路器 1 的相关指标参量如表 8 所示,其状态判定为一般状态。对比各指标实测标准化数据与等级区间可以看出,断路器 1 的振动信号、隔离触头温度均处于良好状态,电寿命及真空度处于一般状态。断路器 1 的实际检修记录显示其投运 2 个月内切断过 3 次短路电流,其中最大短路电流为 37.5 kA,经历 3 次高频耐受电压。真空灭弧室在过电压和短路电流造成的高温下已有磨损,按正常计划检修即可,表明其实际情况同评估结果一致。

表 8 断路器 1 指标参量

指标状态	VS	EE	VD	T	状态灰云聚类分量
良好	0.995 0	0.002 3	0.002 0	0.999 0	0.465 5
一般	0.005 0	0.997 7	0.998 0	0.001 0	0.524 4
预警	0	0	0	0	0
故障	0	0	0	0	0

断路器 2 的相关指标参量如表 9 所示,状态判定为预警状态。其振动信号处于预警状态区间,电寿命处于一般状态和预警状态零界点,真空度为预警状态,隔离触头处于一般状态。实际上断路器 2 投运时间较长,设备老化程度明显需要加强监控,表明其实际情况同评估结果一致。

表 9 断路器 2 指标参量

指标状态	VS	EE	VD	T	状态灰云聚类分量
良好	0	0	0	0.041 7	0.008 2
一般	0.206 9	0.421 1	0	0.958 3	0.368 5
预警	0.793 1	0.578 9	0.955 4	0	0.612 7
故障	0	0	0.044 6	0	0.010 5

就断路器 2 而言,“3En”规则结合权重计算后,注重划分的鲜明性,判定其处于预警状态的隶属度过大;“50%”关联度规则注重等级划分边界点处的模糊性,评估结果的明确性有所降低,采用距离差异-最优云熵模型刻画其状态现状,融合了两者的优缺点,但由于其本身 3 个指标都已经非常接近或出于预警状态,将其整体判定为预警状态,在隶属度上反映更加科学合理,通过比对断路器的隶属关系大小,如表 10 所示,也可以看出采用中心极限定理,对可拓灰云模型计算的数据进行二次处理,也提高了准确性。

表 10 3 种云熵计算方法评估结果

状态	“3En”	“50%”	最优 En
H1	0	0	0.008 2
H2	0.328 8	0.422 4	0.368 5
H3	0.671 2	0.577 6	0.612 7
H4	0	0	0.010 5

文献[19]方法只考虑到信息不足的灰色性影响,只有客观赋权方案,同时没有考虑到状态等级划分的模糊性,文献[5]采用雷达图进行状态评估,其赋权方法单一,没有体现指标权重两两对比的模糊性;文献[17]所构造的隶属度为传统的三角形白化权模型,本文采用灰云理论作为隶属度模型,可以体现状态分界点隶属度的模糊性和随机性,同其他评估方法对比的结果如表 11 所示。

表 11 基于不同方法的评估结果比较

方法对比	文献[21]	文献[5]	文献[22]	本文方法
断路器 1	一般	良好	一般	一般
断路器 2	预警	预警	预警	预警
断路器 3	预警	一般	预警	一般
断路器 4	一般	一般	一般	一般
断路器 5	预警	一般	一般	一般

3 结 论

本文在以往学者的基础上,侧重于断路器状态评估中存在的相邻状态分界点附近状态划分的明晰性。基于可拓灰云聚类模型,可以对相邻状态分界点附近的隶属度进行模糊刻画体现了状态隶属的随机性。对于云模型参数 En 的构造结合了状态划分的分明性与模糊性,利用不同规则的 En 参数构造,选取了不同随机性的 En 波动约束范围,构造融合参数 En。融合参数 En 本质上对与相邻状态分界点出的隶属度刻画是一致的,但是对于不同状态区间来讲,如果该状态区间长度与相邻状态区间长度有明显的差异,那么状态分界点处的数据对于相邻两状态的隶属度应该有一定程度的差异性。本文采取一定的方法刻画

相邻两状态区间长度差异使得最终的结果更加科学有效。

参考文献

- [1] 韦惠慧,刘向军. 断路器状态评估方法综述[J]. 电器与能效管理技术,2019(15):59-64.
- [2] 苗飞,任建文,汤国庆,等. 基于灰色聚类与证据合成的变压器状态评估[J]. 高压电器,2016,52(3):50-55.
- [3] 杜文妍,蒋伟,周明,等. 基于模糊理论与证据推理方法的断路器状态评估模型[J]. 现代电子技术,2017,40(7):179-182,186.
- [4] 李海英,冯冬,宋建成. 中压真空断路器的模糊证据理论在线状态评估模型[J]. 高压电器,2013,49(1):40-45.
- [5] 李海英,冯冬,宋建成. 中压真空断路器状态的雷达图法评估模型[J]. 电网技术,2013,37(7):2053-2059.
- [6] 郑涛,卢婷. 基于云物元分析理论的真空断路器运行状态综合评判方法[J]. 华东电力,2014,42(4):645-649.
- [7] 刘云鹏,许自强,付浩川,等. 采用最优云熵改进可拓云理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术,2020,46(2):397-405.
- [8] 李济沅,邱玉婷,于竞哲,等. 基于灰色关联度和 TOPSIS 的真空断路器运行状态综合评估[J]. 高压电器,2017,53(3):242-247.
- [9] 黎育红,陈玥. 基于灰云白化权函数的洪水灾害综合等级评估[J]. 自然灾害学报,2013,22(1):108-114.
- [10] 邓聪颖,叶波,苗建国,等. 基于 K-means++ 聚类与概率神经网络的数控机床变位姿态动态特性模糊评估[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):227-235.
- [11] 林静,王海忠,贾碧州. 基于改进层次分析法的电力营销状态评估及预警模型研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):19-25.
- [12] 何怡刚,李凯伟,朋张胜,等. 基于改进最小二乘支持向量机的 IGBT 模块键合线状态评估方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):170-176.
- [13] 曲广龙,杨洪耕. 基于梯形云模型的电能质量数据关联性挖掘方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):145-150.
- [14] YUE CH. The comprehensive ranking evaluation of flood disaster based on grey-cloud whitening-weight function [C] Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011,4:1932-1934.
- [15] FANG H M, LIU Y Y, GUO Y, et al. Navigation condition evaluation based on grey-cloud whitening-weight function clustering theory[C]. 2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology(ICCT), 2015:87-91.
- [16] 常怡东,张开轩,金潇. 基于物元可拓理论的高压断路器状态评估方法[J]. 高压电器,2017,53(9):107-113.
- [17] 陆胜辉,黄华,田兴明. 混合型中心点三角白化权函数

- 灰评估法在样板工地评选中应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(12): 261-262.
- [18] 王雁凌, 张雪佼, 阎敬民. 基于变权灰云模型的风电场并网技术性综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3546-3551.
- [19] CERTA A, HOPPS F. A dempster-shafer theory-based approach to the failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: Application to the propulsion system of a fishing vessel[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 159: 69-79.
- [20] 杨凡, 何晋, 王泉, 等. 相对熵赋权法下中压真空断路器状态的灰云—模糊熵评估模型[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 204-210.
- [21] GUO J W, WANG Y, XIE P. Fuzzy theory application in the evaluation of high-voltage circuit breaker state[C]. 2013 International Conference on Computational and Information Sciences, 2013: 829-831.
- [22] 陈朋永, 宋晓磊, 陈云飞, 等. SF₆ 高压断路器运行状态模糊综合评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 171-176.

作者简介

何晋, 工学博士, 教授, 主要研究方向为电力系统、电力设备状态评估、模式识别等。

E-mail: 1050182296@qq.com

李维希(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为断路器故障诊断、状态评估等。

E-mail: 1261053700@qq.com