

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201121

# 基于云模型和 D-S 证据理论的配电终端健康状态 综合评估方法

邢晓敏<sup>1</sup>, 徐海瑞<sup>1</sup>, 廖孟柯<sup>2</sup>, 曹新慧<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网新疆电力有限公司  
经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 配电终端作为重要的感知单元, 对其健康状态进行评估有利于发现终端潜在的安全隐患, 安排合理的检修计划以及保证电网安全运行。在构建全面、实用的递阶式评价指标体系基础上, 引入集成客观事物随机性与模糊性的云模型求解指标隶属度, 并对区间层次分析法(IAHP)进行改进, 以兼顾指标权重的主、客观性。随后, 基于 D-S 证据理论实现基础层指标隶属度向目标层信任度的转换, 通过信任度最大值判定终端健康状态, 并进一步分析冲突系数的分布情况, 对基础层不良状态的指标进行预警。最后, 以 20 kV 线路的馈线终端为例, 验证该定性指标隶属度求解、组合权值获取和评估过程的可行性。

**关键词:** 配电终端; 云模型; 层次分析法; 证据理论; 综合评估

## Comprehensive evaluation method of distribution terminal units health status based on a cloud model and D-S evidence theory

XING Xiaomin<sup>1</sup>, XU Hairui<sup>1</sup>, LIAO Mengke<sup>2</sup>, CAO Xinhui<sup>2</sup>

(1. School of Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;  
2. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumchi 830002, China)

**Abstract:** As an important sensing unit, the evaluation of the health status of distribution terminal units is conducive to detecting potential security risks of the terminal, arranging a reasonable maintenance plan, and ensuring the safe operation of the power grid. On the basis of building a comprehensive and practical hierarchical evaluation index system, this paper introduces a cloud model integrating the randomness and fuzziness of objective things to solve the index membership degree, and improves the Interval Analytic Hierarchy Process (IAHP) to give consideration to the subjectivity and objectivity of the index weight. Then, based on D-S evidence theory, the membership degree of the basic layer index is transformed into the trust degree of the target layer, and the terminal health status is determined by the maximum trust degree, and the distribution of the conflict coefficient is further analyzed to give early warning of the indicators of the bad state of the basic layer. Finally, taking the feeder terminal of a 20 kV line as an example, the feasibility of the qualitative index membership degree solution, combination weight acquisition and evaluation process is verified.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFB1505404).

**Key words:** distribution terminal units; cloud model; AHP; evidence theory; comprehensive evaluation

## 0 引言

随着配网建设的步伐不断加快, 配电终端覆盖率也逐年递增<sup>[1-2]</sup>。若对其继续采取定期检修或故障

后更换的方式, 不仅造成资源浪费, 还将影响供电可靠性<sup>[3]</sup>。所以, 为实现配电终端的精益化运维, 就其健康状态评估方法有待深入研究。

目前, 在对配电终端、继电保护装置及合并单元等二次设备健康状态评判的过程中, 现有方法尚存不足之处。如文献[4]利用改进的层次分析法确定

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2019YFB1505404)

配电终端的指标权重, 但需主观确定判断矩阵, 致使权重结果具有较强主观性。文献[5]采用精确性的隶属函数确定配电终端的指标隶属度, 却未考虑复杂系统的随机性。文献[6]基于信息熵对配变终端的安全态势进行评估, 但当特征的取值较多时, 信息增益会偏向取值较多的特征。文献[7]运用物元理论对二次设备健康状态进行评估, 但指标实测值超过节域范围, 则无法计算相关函数。后续, 针对二次设备评价体系内的定性指标, 文献[8]和文献[9]分别采用模糊统计和灰色理论对其隶属度进行求解。另外, 文献[10]结合层次分析法和熵权法对继电保护装置的相关指标进行组合赋权; 文献[11]引入变权理论对二次设备指标权重进行动态修正, 但在两项及以上指标发生严重偏离时, 不能较好地对各指标权重进行赋值。

因此, 本文首先结合业内专家意见、相关文献、规程和调研, 建立包括目标层、因素层和基础层在内的 3 级递阶式评价指标体系; 其次, 将配电终端的健康状态划分成严重、异常、注意和正常, 并基于云模型将标准状态等级转化为可视化的状态空间; 然后, 引入劣化度函数对定量指标实际值进行预处理, 并结合定量空间计算出定量指标隶属度, 另外, 将专家对定性指标给出的离散化分值作为样本值, 使用云发生器为其生成浮动云, 并将浮动云与定性空间的重叠程度作为定性指标隶属度; 随后, 基于区间层次分析法计算各层指标主、客观权重, 利用最小信息原理建立组合权重的目标函数, 再以拉格朗日乘子法计算出最优组合权重。最后, 为降低评估过程中的不确定性, 基于 D-S 证据理论实现指标隶属度与权重的逐级融合, 并结合因素层与目标层冲突系数的偏离情况, 判定出配电终端的最终实际状态。

### 1 指标体系构建

本文在构建评价指标体系时, 严格遵循系统性、客观性、可测性、科学性和层次性五大基本原则。结合终端自身的运行管理特点, 确定与其密切相关的 6 大类因素; 并对相关业务部门进行调研分析, 为其细化 14 个单项指标, 最后形成如图 1 所示的递阶式评价指标体系。其中,  $R$ 、 $R_1$ — $R_6$  和  $R_{11}$ — $R_{63}$  为各层指标符号,  $x_{\min}$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_{\max}$  和  $g_0$  含义后续给出。

各因素下基础层指标评价机理如下。

#### 1) 环境温、湿度 $R_1$

##### (1) 环境温度( $R_{11}$ )

终端内部损耗使终端具有一定的温度, 周围环

境温度过高或空气流动性差导致终端的热量不能及时散开, 严重时会使终端烧坏。按照 Q/GDW514 规定, 环境温度应满足  $-25\sim 55^\circ\text{C}$ 。

##### (2) 相对湿度( $R_{12}$ )

潮湿空气将使终端中的导电金属、导磁硅钢片和金属外壳锈蚀, 也会降低终端的性能和使用寿命, 甚至造成电气故障。按照 Q/GDW514 规定, 相对湿度应满足  $10\%\sim 100\%$ 。

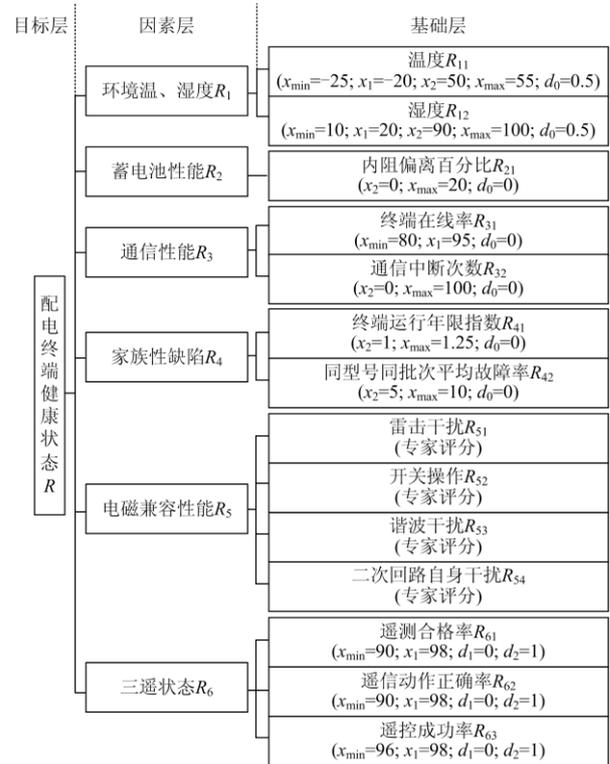


图 1 递阶式评价指标体系

Fig. 1 Hierarchical evaluation index system

#### 2) 蓄电池性能 $R_2$

与终端配套的蓄电池长期处于充放电的运行状态, 可能出现老化现象, 难以为配电开关操作、通信、数据保存提供基本保障。在巡检过程中观察蓄电池的外观, 若存在鼓包、漏液、变形等情况, 直接将其评判为严重; 若无上述情况, 对蓄电池的内阻进行检测, 且内阻偏离百分比( $R_{21}$ )应小于 20%。

$$\text{偏离百分比} = \frac{|\text{测量内阻} - \text{标称内阻}|}{\text{标称内阻}} \times 100\% \quad (1)$$

#### 3) 通信性能 $R_3$

##### (1) 终端在线率( $R_{31}$ )

用于终端信息交互的通信模块容易因网络状况不稳定、周围存在各类电磁干扰而死机, 且接触不良会导致终端在线率低。按照 Q/GDW 513 规定, 终端在线率  $\geq 95\%$ 。

$$\text{终端在线率} = \frac{\text{终端在线时长}}{\text{统计时长}} \times 100\% \quad (2)$$

#### (2) 通信中断次数( $R_{32}$ )

一个运行周期内, 通信频繁中断次数上限为 100 次, 无线中断一回记为 0.1 次, 有线中断 1 回记为 1 次。

#### 4) 家族性缺陷 $R_4$

家族性缺陷由原理、设计、材质、工艺共性因素导致, 评估时主要考察终端运行年限、同型号同批次终端的平均故障率。

##### (1) 终端运行年限指数( $R_{41}$ ):

$$\text{终端运行年限指数} = \frac{\text{累计持续运行时间}}{\text{平均运行年限}} \times 100\% \quad (3)$$

##### (2) 同型号同批次平均故障率( $R_{42}$ ):

$$\text{同型号同批次平均故障率} = \frac{\text{故障总时间}}{\text{运行总时间}} \times 100\% \quad (4)$$

#### 5) 电磁兼容性能 $R_5$

高次谐波电压通过电容耦合在终端上产生感应电压和电流, 线路发生故障和雷击时的入地电流引起对地电位升高, 雷电产生的空间电磁场以及二次回路中的感应电压和电流均会造成终端误动或毁坏。因此, 专家需结合终端的电磁兼容试验结果, 对谐波干扰( $R_{51}$ )、开关操作( $R_{52}$ )、雷击干扰( $R_{53}$ )和二次回路自身干扰( $R_{54}$ )4 种情况进行评分。

#### 6) “三遥”状态 $R_6$

##### (1) 遥测合格率( $R_{61}$ )

按照 Q/GDW 513 规定, 遥测合格率  $\geq 98\%$ ; 其中, 遥测报文中的品质描述词表明蓄电池电压或内阻、三相电压或电流、零序电压或电流测量值出现溢出或者无效, 环网柜进线和出线电流之和不为零, 均视为遥测不合格。

遥测合格率 =

$$\left(1 - \frac{\sum \text{不可用路数} \times \text{不可用小时数}}{\text{遥测总路数} \times \text{累计小时数}}\right) \times 100\% \quad (5)$$

##### (2) 遥信动作正确率( $R_{62}$ )

按照 Q/GDW 513 规定, 遥信动作正确率  $\geq 99\%$ 。

$$\text{遥信动作正确率} = \frac{\text{遥信正确动作次数}}{\text{遥信动作总次数}} \times 100\% \quad (6)$$

##### (3) 遥控成功率( $R_{63}$ ):

按照 Q/GDW 513 规定, 遥控成功率  $\geq 98\%$ ; 其中, 对于预置返校成功、执行不成功的情况, 记为 0.5 次遥控成功。

$$\text{遥控成功率} = \frac{\text{遥控成功次数}}{\text{遥控次数}} \times 100\% \quad (7)$$

## 2 基于云模型确定基础层指标隶属度

### 2.1 状态空间

状态空间的构建便于基础层指标隶属度的求解, 但需事先划分用于评判终端健康状态的等级界限区间和选取与之契合的构造方法。本文将终端的健康状态划分成严重、异常、注意和正常, 并记作  $s_k (k=1, 2, 3, 4)$ 。随后, 根据实时和历史数据, 利用威布尔分布模型<sup>[12]</sup>确定相邻状态的界限值  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$ , 从而确定第  $k$  个状态等级的界限区间  $(d_{\min}, d_{\max})_k$ , 如表 1 所示。其中,  $d_{\min}$  和  $d_{\max}$  分别为第  $k$  个界限区间的左值和右值。

表 1 界限区间

Table 1 Boundary interval

状态等级( $s_k$ )	严重( $s_1$ )	异常( $s_2$ )	注意( $s_3$ )	正常( $s_4$ )
$(d_{\min}, d_{\max})_k$	$(0, c_1)$	$(c_1, c_2)$	$(c_2, c_3)$	$(c_3, 1)$

鉴于状态等级的划分本身就具有模糊性, 且各状态的出现又具有随机性, 为此本文以云模型<sup>[13]</sup>刻画各状态等级, 即状态云。其中, 将等级界限区间与第  $k$  个状态云的最大可能区间  $(Ex_k - 3En_k, Ex_k + 3En_k)$  形成等式关系, 如式(8)所示, 获取各状态云的期望  $(Ex_k)$  与熵  $(En_k)$ ; 并以云图雾化的极限条件<sup>[14]</sup>约束各状态云的分布范围, 如式(9)所示, 获取各状态云的超熵  $(He_k)$ 。

$$\begin{cases} Ex_k - 3En_k = d_{\min} \\ Ex_k + 3En_k = d_{\max} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} En_k = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} \\ En_k = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{6} \end{cases} \quad (8)$$

$$He_k = \frac{En_k}{18} \quad (9)$$

式中:  $Ex_k$  代表最能够反映第  $k$  个状态等级的点值;  $En_k$  代表第  $k$  个状态等级被度量的范围;  $He_k$  代表第  $k$  个状态内数据的凝聚程度。

但  $Ex_k$ 、 $En_k$ 、 $He_k$  仅是状态云图的轮廓特征值, 需结合正向云发生器<sup>[9]</sup>随机产生  $N$  个云滴  $(g, \mu_k(g))$  将其宏观呈现。其中,  $g$  与  $\mu_k(g)$  的关系如式(10)所示, 且通常产生 5 000 个云滴即可。

$$\mu_k(g) = \exp\left[-\frac{(g - Ex_k)^2}{2(En')^2}\right] \quad (10)$$

式中:  $En'$  为以  $En_k$  为期望、 $He_k$  为标准差生成的一个正态随机熵;  $g$  为以  $Ex_k$  为期望、 $En'$  为标准差生成的一个正态随机数值, 且  $g$  的类型与指标类型有关, 后续在定量空间随机产生的是劣化度, 在定性空间随机产生的是评分值;  $\mu_k(g)$  为随机数值  $g$  相对  $Ex_k$  来说隶属第  $k$  个状态的强度(本文简称强度), 当  $En' = En_k$  时,  $\mu_k(g)$  便为第  $k$  个状态云的期望曲线。

另外, 本文后续对定量和定性指标隶属度的求解方式并不一样, 故形成两类状态空间, 如图 2 和图 3 所示。其中, 为兼顾定量指标的劣化过程和设备对潜在不利因素的容忍性, 所以定量空间内的相邻状态云具有一定程度过渡趋势, 并将劣化度 0.1 和 0.9 作为转折点; 然而, 定性空间仅作为极限衡量标准, 所以定性空间内的相邻状态云彼此独立。

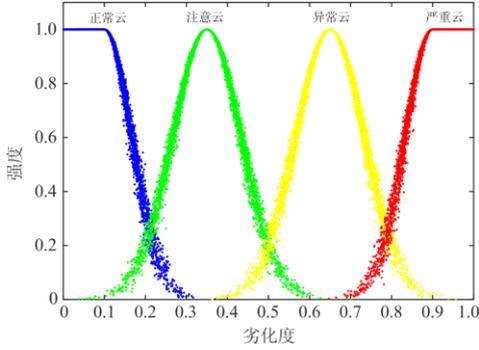


图 2 定量空间

Fig. 2 Quantitative space

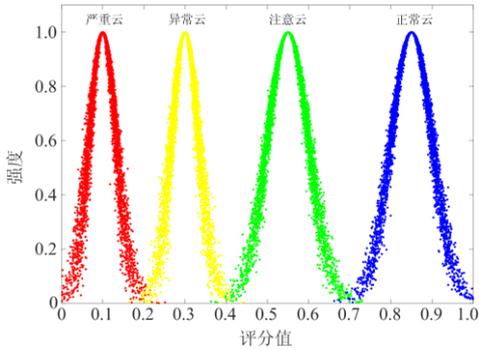


图 3 定性空间

Fig. 3 Qualitative space

## 2.2 定量指标

本文在确定定量指标隶属度前, 先引入劣化度函数对其进行归一化处理, 统一变换至[0,1]范围内。其中, 评价体系内的定量指标可分成成本型<sup>[15]</sup>(实测值越小越好)、效益型<sup>[16]</sup>(实测值越大越好)和区间型<sup>[17]</sup>(实测值越居中越好)3类, 本文以图 4 和式(11)综合表示。

$$d = \begin{cases} d_0 + \frac{1-d_0}{x_1-x_{\min}}(x-x_{\min}) & x_{\min} \leq x < x_1 \\ 1 & x_1 \leq x < x_2 \\ d_0 + \frac{d_0-1}{x_{\max}-x_2}(x-x_2) & x_2 \leq x < x_{\max} \\ 0 & x \notin [x_{\min}, x_{\max}] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x$  为定量指标实测值;  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为告警

范围左、右值;  $x_1$  和  $x_2$  分别为允许范围的左、右值;  $d$  为劣化度;  $d_0$  为告警范围的下限值。

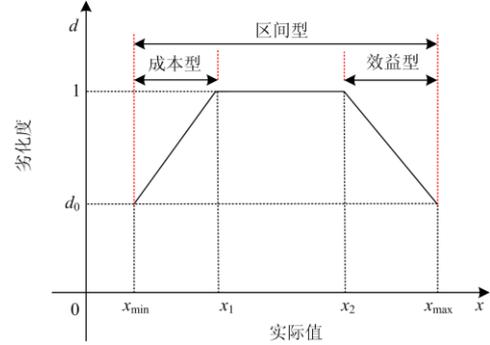


图 4 指标类型

Fig. 4 Indicator type

在计算出劣化度以后, 将其结果代入定量空间内各状态云的期望曲线式(12), 便可求其隶属度。

$$r_k^{(1)} = \exp\left[-\frac{(d - Ex_k)^2}{2(En_k)^2}\right] \quad (12)$$

式中,  $r_k^{(1)}$  为定量指标在第  $k$  种状态的隶属度。

## 2.3 定性指标

与定量指标不同, 定性指标隶属度要结合现场巡检情况与试验结果, 由专家凭经验给出评分后才能进一步确定。本文为削弱单个专家的主观性影响, 邀请  $h$ (本文  $h=12$ )位专家进行评分; 然后以逆向云发生器(即式(13)一式(15))从离散化的评分结果中提取数字特征值, 并结合正向云发生器对其直观呈现, 其结果称作浮动云, 如图 5 所示。浮动云的云滴越离散, 表明专家的分歧程度越大。

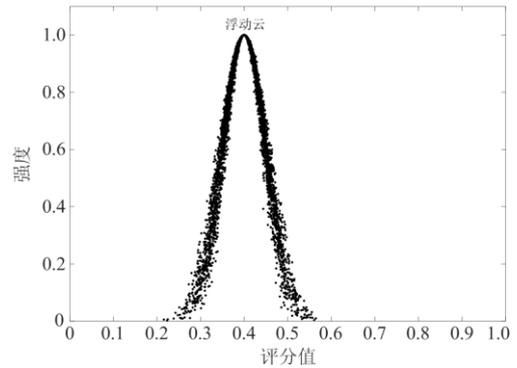


图 5 浮动云

Fig. 5 Floating cloud

$$Ex_f = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h p_j \quad (13)$$

$$En_f = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h |p_j - Ex_f| \quad (14)$$

$$He_f = \sqrt{\frac{1}{h+1} \sum_{j=1}^h (p_j - Ex_f)^2 - (En_f)^2} \quad (15)$$

式中:  $p_j$  为第  $j$  位专家给出的评分(1 分制);  $Ex_f$ 、 $En_f$ 、 $He_f$  分别为浮动云的期望、熵和超熵。

同时, 鉴于云模型的雾化性质(式(16))适用于群体认知的共识性判定, 将其作为判别群体专家评分结果是否合理的临界条件; 如不满足, 则重新评分。

$$He_f < En_f/3 \quad (16)$$

由于浮动云与空间内第  $k$  种状态云的重叠程度(如图 6)越大, 表明二者相关性越强, 从而本文用式(17)计算浮动云与第  $k$  种状态云的重叠面积  $O_k$ , 如图 6 中  $O_2$  和  $O_3$  分别是浮动云与异常云和浮动云与注意云的重叠面积; 并将标准化的  $O_k$  作为定性指标隶属度, 如式(18)所示。

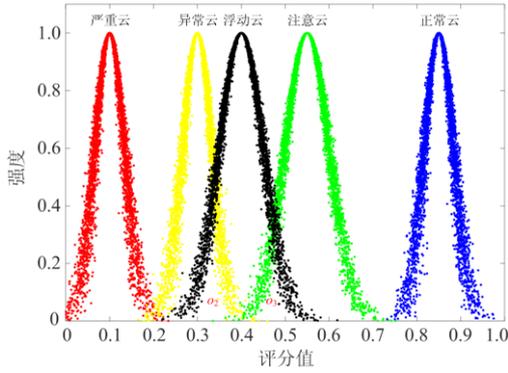


图 6 浮动云与各状态云的重叠情况

Fig. 6 Overlap of floating cloud and each state cloud

$$O_k = \begin{cases} \int_{-\infty}^{p_0} u_f dt + \int_{p_0}^{+\infty} u_k dt & p_0 < Ex_f \\ \int_{-\infty}^{p_0} u_k dt + \int_{p_0}^{+\infty} u_f dt & Ex_f \leq p_0 \end{cases} \quad (17)$$

$$r_k^{(2)} = \frac{2O_k}{\sqrt{2\pi(En_f + En_k)}} \quad (18)$$

式中:  $r_k^{(2)}$  为定性指标在第  $k$  种状态的隶属度, 但需注意的是  $r_k^{(1)}$  和  $r_k^{(2)}$  只是对定量和定性两类指标隶属度的区分, 后续均以  $r_k$  表示某指标在第  $k$  个状态等级的隶属度;  $u_f$  和  $u_k$  分别为浮动云和定性空间内第  $k$  个状态云的期望曲线;  $p_0$  为两曲线的交点值。

### 3 改进的区间层次分析法

由于区间层次分析法在两两比较指标相对重要性时, 采用区间数描述, 较大程度上弥补了精确性数值的缺陷, 便于表达专家的意见, 且兼顾指标的主、客观权重, 已广泛用于评估之中<sup>[18-19]</sup>, 篇幅所

限, 仅给出该方法流程图, 如图 7 所示。

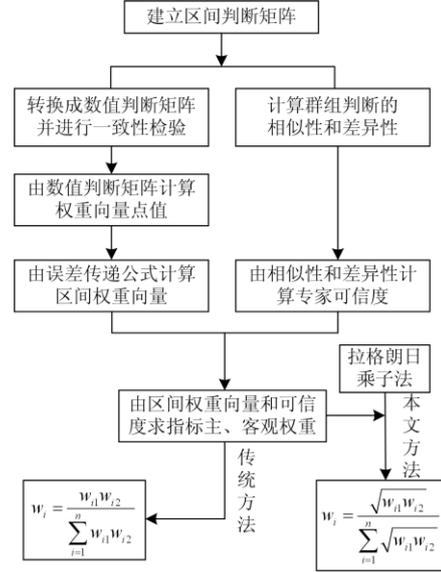


图 7 区间层次分析法流程图

Fig. 7 IAHP flow chart

本文为避免主、客观权重在组合后出现倾向性偏离, 保证指标的组合权重与主、客观权重都较为接近, 以最小鉴别原理<sup>[19]</sup>建立目标函数, 如式(19)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^n (w_i) \cdot (\ln \frac{w_i}{w_{i1}}) + \sum_{i=1}^n (w_i) \cdot (\ln \frac{w_i}{w_{i2}}) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i > 0$$

随后, 用拉格朗日乘法<sup>[21]</sup>优化得到指标的组合权重, 如式(20)。

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{i1} w_{i2}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_{i1} w_{i2}}} \quad (20)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  个指标的组合权重;  $w_{i1}$  和  $w_{i2}$  分别为第  $i$  个指标的主观和客观权重;  $n$  为指标个数。

### 4 综合评判

现有的模糊合成算子<sup>[22]</sup>缺乏对不确定性因素的考虑, 所以本文以D-S证据理论<sup>[23-24]</sup>实现指标权重和隶属度的融合。在证据融合前, 先规范评估对象的识别框架  $\theta = \{\text{严重状态、异常状态、注意状态、正常状态、不确定状态}\} = \{A_t\}$ ,  $t=1,2,3,4,5$ ; 之后, 将每个指标当作一个证据, 并以广义模糊数为其构造基本置信度指派函数<sup>[25]</sup>, 考虑到各证据的重要程度又存在差异, 因此, 本文又增设重要因子对其修正, 如式(21)所示。

$$m_i(A_t) = \begin{cases} \beta_i \frac{r_{ik}}{\sum_{k=1}^4 r_{ik} + (1 - \max\{r_{ik}\})} & t \in [1, 4] \\ 1 - \sum_{k=1}^4 m_i(k) & t = 5 \end{cases} \quad (21)$$

其中,

$$\beta_i = \lambda_i \frac{w_i}{w_{\max}} \quad (22)$$

式中:  $r_{ik}$ 为第*i*个指标在第*k*种状态的隶属度;  $m_i(A_t)$ 为第*i*个指标在 $\theta$ 内的信任度;  $\beta_i$ 为第*i*个证据的重要因子;  $\lambda_i$ 为优先可信度系数, 通常取0.9;  $w_{\max}$ 为组合权重最大值。

然后, 基于合成规则对证据进行逐级融合:

$$m(B_t) = \frac{\sum_{\cap A_t = B_t, t \leq i \leq 5} \prod m_i(A_t)}{1 - K} \quad (23)$$

$$K = \sum_{\cap A_t \neq \emptyset, t \leq i \leq 5} \prod m_i(A_t) \quad (24)$$

式中:  $m(B_t)$ 为某层指标融合至上一层指标的信任度, 且 $B_t$ 与 $A_t$ 的识别框架一致;  $K$ 为证据的冲突系数, 当 $K < 1$ 时, 证据才能融合。

同时, 本文设定偏离系数解决基础层指标出现不良状态, 却在最终融合结果中无法显现的问题。

$$\delta_a = |K_{R_i} - K_R| \quad (25)$$

式中:  $K_{R_i}$ 和  $K_R$ 分别为因素层指标( $R_i$ )冲突系数和目标层指标( $R$ )冲突系数, 由式(24)求得;  $\delta_a$ 为因素层第  $a$  个指标的偏离系数, 若  $\delta_a > 0.05$ , 则将第  $a$  个指标的状态作为终端最终状态, 否则将目标层融合结果内的最大值作为终端最终状态, 并按表 2 的策略制定检修计划。

表 2 检修策略

最终状态	严重状态	异常状态	注意状态	正常状态
检修策略	立即安排 停电检修	优先安排 停电检修	在运行周期 内检修	延长维修

## 5 算例分析

为验证本文所提方法的可行性, 以某地区 20 kV 线路上的馈线终端为例, 判断出该终端的健康状态, 并结合各部分计算结果表明优势所在。篇幅所限, 仅列出部分数据。其中, 基于区间层次分析法计算出基础层指标的主、客观权重结果, 以及由文献[26]提出的乘法集成法和本文方法(式(20))求得的组合权重结果如表 3。

从表 3 可以看出本文方法所求组合权重均在主、客观权重所限范围内, 但在乘法集成法中: 除

表 3 基础层指标权重结果

指标	主观	客观	乘法集成法	本文
$R_{11}$	0.498 1	0.428 1	0.426 2	0.461 8
$R_{12}$	0.501 9	0.571 9	0.573 8	0.536 2
$R_{21}$	1	1	1	1
$R_{31}$	0.512	0.504 2	0.516 2	0.508 1
$R_{32}$	0.488	0.495 8	0.483 8	0.491 9
$R_{41}$	0.663 2	0.610 7	0.755 4	0.637 9
$R_{42}$	0.336 8	0.389 3	0.244 6	0.362 1
$R_{51}$	0.205 7	0.228	0.182 2	0.216 5
$R_{52}$	0.201	0.198	0.154 6	0.199 5
$R_{53}$	0.324 7	0.243	0.306 5	0.281
$R_{54}$	0.338 7	0.271	0.356 6	0.303
$R_{61}$	0.333 3	0.200 2	0.197 3	0.258 9
$R_{62}$	0.333 1	0.335 7	0.330 6	0.334 9
$R_{63}$	0.333 7	0.478 6	0.472 1	0.406 2

$R_{53}$ 、 $R_{63}$  外均发生倾向性偏离。

另外, 由式(11)和式(18)分别计算出基础层定量和定性指标隶属度如表 4 所示; 同时, 为表明本文所求定性指标隶属度的可行性和优越性, 又列出专家  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  的评分值和传统方法(即模糊统计和灰色理论)对其所求结果, 分别如表 5 和 6 所示。

通过表 6 不难发现三种方法下  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  最临近的状态等级完全一致, 但本文便于直观判定 4 个指标临近的状态等级, 如图 8—图 11。另外, 从表 6 还能看出模糊统计和灰色理论将  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  出现的可能性完全分配给 4 个已设定好的状态等级, 即  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  隶属度之和均归

表 4 基础层指标隶属度

指标	严重	异常	注意	正常
$R_{11}$	0	0	0.064 7	0.711 6
$R_{12}$	0	0	0.056 1	0.754 8
$R_{21}$	0	0	0.040 5	0.842 7
$R_{31}$	0	0	0.054 5	0.763 3
$R_{32}$	0	0	0.041 8	0.835 3
$R_{41}$	0	0	0.066 6	0.702 7
$R_{42}$	0	0	0.068 4	0.693 8
$R_{51}$	0	0	0.008 9	0.680 3
$R_{52}$	0	0	0.009 4	0.550 9
$R_{53}$	0	0	0.716 4	0.004 6
$R_{54}$	0	0.023	0.513 5	0
$R_{61}$	0	0	0	1
$R_{62}$	0	0	0.044 4	0.82
$R_{63}$	0	0	0	1



表 5 专家对  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  的评分结果

Table 5 Experts' scores of  $R_{51}$ ,  $R_{52}$ ,  $R_{53}$  and  $R_{54}$

评分	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$
$R_{51}$	0.78	0.72	0.89	0.84	0.85	0.79	0.76	0.78	0.83	0.82	0.86	0.79
$R_{52}$	0.74	0.78	0.76	0.85	0.8	0.88	0.8	0.77	0.85	0.78	0.77	0.75
$R_{53}$	0.51	0.58	0.59	0.55	0.53	0.59	0.63	0.62	0.66	0.6	0.61	0.54
$R_{54}$	0.52	0.48	0.45	0.43	0.49	0.45	0.52	0.47	0.45	0.44	0.53	0.6

表 6 模糊统计、灰色理论和本文方法对  $R_{51}$ 、 $R_{52}$ 、 $R_{53}$  和  $R_{54}$  隶属度的求解结果

Table 6 Results of membership degree of  $R_{51}$ ,  $R_{52}$ ,  $R_{53}$  and  $R_{54}$  by fuzzy statistics, grey theory and our method

方法	模糊统计 <sup>[8]</sup>				灰色理论 <sup>[9]</sup>				本文方法(重叠度)			
	$\mu_1(g)$	$\mu_2(g)$	$\mu_3(g)$	$\mu_4(g)$	$\mu_1(g)$	$\mu_2(g)$	$\mu_3(g)$	$\mu_4(g)$	$\mu_1(g)$	$\mu_2(g)$	$\mu_3(g)$	$\mu_4(g)$
$R_{51}$	0	0	0	1	0	0	0.211 5	0.788 5	0	0	0.008 9	0.680 3
$R_{52}$	0	0	0	1	0	0	0.288 6	0.711 4	0	0	0.009 4	0.550 9
$R_{53}$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0.716 4	0.004 6
$R_{54}$	0	0.333 3	0.666 7	0	0	0.424 2	0.575 8	0	0	0.023	0.513 5	0

一化，而由于现有状态等级划分并不细致，状态空间模型与实际模型之间存在偏差，且专家仅在某状态出现的最大可能范围内以精确性数值表示而忽略剩余状态出现的情况。鉴于以上考虑，本文利用浮动云与定性空间的重叠程度来降低上述因素的干扰，使得所求结果较为保守，且不会影响对基础层指标最终实际状态的准确判别。

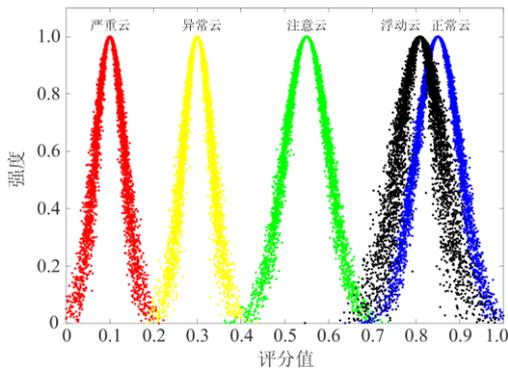


图 8  $R_{51}$  临近正常状态

Fig. 8  $R_{51}$  approaching normal state

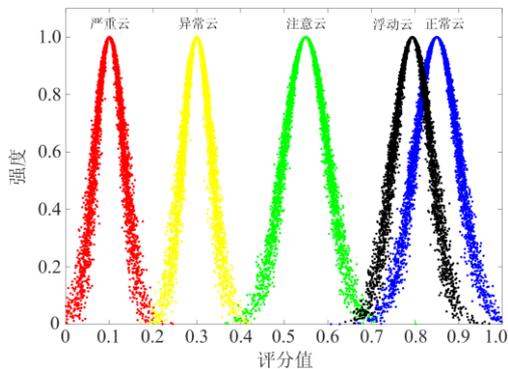


图 9  $R_{52}$  临近正常状态

Fig. 9  $R_{52}$  approaching normal state

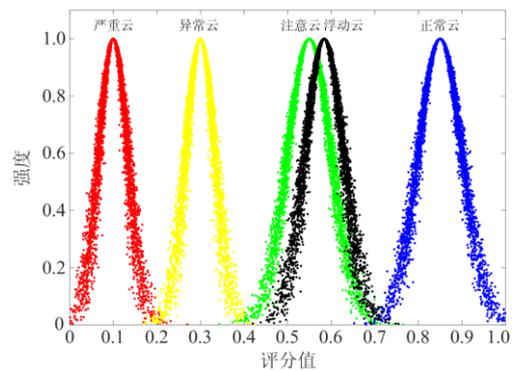


图 10  $R_{53}$  临近注意状态

Fig. 10  $R_{53}$  approaching attention state

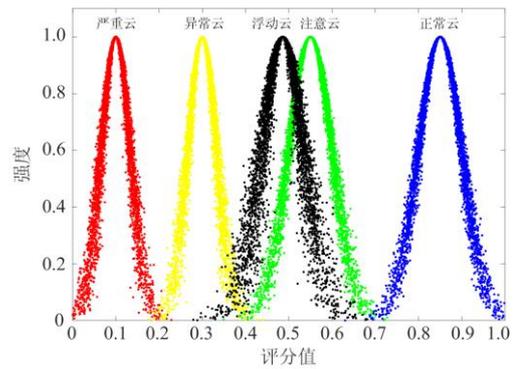


图 11  $R_{54}$  临近注意状态

Fig. 11  $R_{54}$  approaching attention state

此外，基于表 3 和 4，利用式(20)和式(23)计算出因素层指标的相关参数见表 7。

结合表 7，并经式(23)便可计算出目标层的  $m(B)=\{0, 0.0001, 0.0077, 0.9885, 0.0037\}$ ，依据信任度最大原则判定该终端整体处于正常状态(0.988 5)，而注意状态(0.007 7)和异常状态(0.000 1)

也存在微弱信任度, 于是继续观测因素层指标是否存在不健康状态。通过表 7 结果发现该层的  $R_5$  正处于注意状态(0.578 6), 结合表 4 最终发现  $R_{53}$ (0.716 4) 和  $R_{54}$ (0.513 5) 均处于注意状态, 且二者的信任度均超过 50%, 而二者的注意状态却未在最终结果中体现出来。同时, 与现有的模糊综合评判法<sup>[27]</sup>对比, 同样有类似情况发生, 如图 12 所示, 二者的最终融合结果不仅都显示终端处于正常状态, 也均会忽略基础层  $R_{53}$  和  $R_{54}$  已出现注意状态的情况。分析发现, 这是由于大部分基础层指标处于同一状态等级, 且有较高的隶属度(如表 4, 除  $R_{53}$  和  $R_{54}$  外, 剩余基础层指标都处于正常状态, 且隶属度均高于 50%), 并在融合过程中初值较高的隶属度又被不断叠加, 因而导致  $R_{53}$  和  $R_{54}$  的注意状态被隐藏。所以, 如果仅

以融合结果的最大值判断终端状态, 会忽略基础层指标处于不健康状态的可能性。

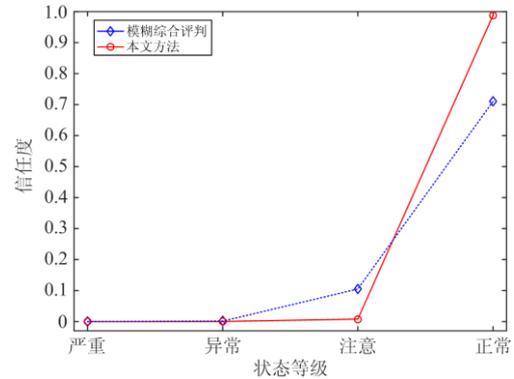


图 12 目标层融合结果

Fig. 12 Target layer fusion result

表 7 因素层相关参数

Table 7 Factor level related parameters

指标	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
组合权重 $w_i$	0.182 3	0.196 8	0.106 9	0.095 6	0.197 3	0.221 1
严重 $m(B)$	0	0	0	0	0	0
异常 $m(B)$	0	0	0	0	0.005 9	0
注意 $m(B)$	0.039 8	0.038 9	0.026	0.050 9	0.578 6	0.001 4
正常 $m(B)$	0.818	0.809 9	0.888 6	0.717 2	0.258 9	0.982 4
不确定度	0.142 2	0.151 2	0.085 4	0.231 8	0.156 6	0.016 2

因此, 本文通过冲突系数的分布情况实现对基础层不健康状态指标的预警, 避免以上情况的发生。如图 13 所示, 以融合至目标层( $R$ )冲突系数(0.943 3)为基准值, 以  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  和  $R$  的冲突系数与基准值比较,  $R_5$  的冲突系数偏离基准值较为严重(0.137=0.9433-0.8063), 这表明  $R_5$  下的基础层指标出现了不健康状态, 且结合表 4 可以发现  $R_{53}$  和  $R_{54}$

也确实出现不良状况, 为避免二者对终端的持续性影响, 需在运行周期内将其消除。

## 6 结论

1) 本文在区间型层次分析法的基础上, 以拉格朗日乘子法对组合权重寻优, 避免了主、客观权重在组合后出现倾向性偏离, 并保证了组合后的结果与组合前主、客观权重均较为接近。

2) 本文通过引入云模型的雾化条件, 从客观上校验了群体专家主观评分的合理性, 且对离散化分值进行特征提取, 实现了定性指标实际分布(即浮动云)与标准分布(即定性空间)的直观比较, 并通过实例分析表明了二者重叠程度作为定性指标隶属度的可行性。

3) 本文通过 D-S 证据理论替代传统模糊合成算子融合指标隶属度与权重, 在凸显终端健康状态的同时, 又根据冲突系数的分布情况避免了基础层指标不健康状态无法显现的情况, 具备预警能力。

## 参考文献

[1] 罗凤章, 杨文涛, 张天宇, 等. 配电自动化数据传输有碍对配电系统供电可靠性的影响[J]. 电力系统自动化,

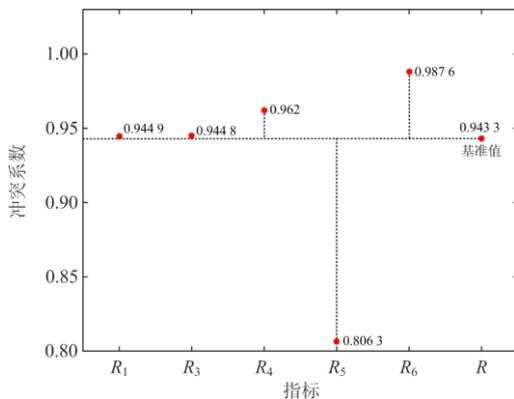


图 13 融合至因素层和目标层指标的冲突系数

Fig. 13 Conflict coefficient of indicators integrating into factor level and target level

- 2018, 42(19): 10-17.  
LUO Fengzhang, YANG Wentao, ZHANG Tianyu, et al. Influence of distribution automation data transmission errors on power supply reliability of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 10-17.
- [2] 韩国政, 徐丙垠, 张俊涛, 等. IEC 61850 的 XMPP 映射方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 147-152.  
HAN Guozheng, XU Bingyin, ZHANG Juntao, et al. Method of IEC 61850 mapping to XMPP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 147-152.
- [3] 刘远龙, 潘筠, 王玮, 等. 用于泛在电力物联网的配电变压器智能感知终端技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 140-146.  
LIU Yuanlong, PAN Jun, WANG Wei, et al. Research on intelligent sensing terminal technology of a distribution transformer for ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 140-146.
- [4] 张磐, 凌万水, 郑悦, 等. 基于模糊层次分析法的配电自动化运行评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 72-77.  
ZHANG Pan, LING Wanshui, ZHENG Yue, et al. Research on the evaluation method of distribution automation operation based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(22): 72-77.
- [5] 龚方亮, 牟龙华, 郭文明, 等. 基于 D-S 证据理论的配电终端状态诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 30-36.  
GONG Fangliang, MU Longhua, GUO Wenming, et al. D-S evidence theory based condition diagnosis for distribution terminal units[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 30-36.
- [6] 刘东奇, 曾祥君, 王耀南. 基于信息熵的智能配电变压器终端安全态势评估[J]. 南方电网技术, 2020, 14(1): 18-23.  
LIU Dongqi, ZENG Xiangjun, WANG Yaonan. Security situation assessment of intelligent distribution transformer terminal unit based on information entropy[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(1): 18-23.
- [7] 王从威, 吕飞鹏, 张海翔. 改进物元模型在继电保护状态评估中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 55-60.  
WANG Congwei, LÜ Feipeng, ZHANG Haixiang. Application of improved matter-element model to state evaluation of relay protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 55-60.
- [8] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41.  
LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [9] 叶远波, 谢民, 黄太贵, 等. 基于灰色理论和云模型的智能变电站二次设备状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 105-111.  
YE Yuanbo, XIE Min, HUANG Taigui, et al. A state assessment method for intelligent substation secondary equipment based on grey theory and cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 105-111.
- [10] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 162-168.  
XU Changbao, WANG Yulei, ZHAO Lijin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of intelligent substation relay protection system state based on information trend prediction and combination weighting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 162-168.
- [11] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.  
SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [12] 齐波, 张鹏, 徐茹枝, 等. 基于分布模型的变压器差异化预警值计算方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2290-2298.  
QI Bo, ZHANG Peng, XU Ruzhi, et al. Calculation method on differentiated warning value of power transformer based on distribution model[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2290-2298.
- [13] MA Zhenzhen, ZHANG Shitao. Risk-based multi-attribute decision-making for normal cloud model considering pre-evaluation information[J]. IEEE Access, 2020, 8: 153891-153904.
- [14] 高溥, 王寅杰, 李宗刚, 等. 无确定度逆向云模型新算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(8): 2262-2265.  
GAO Pu, WANG Yinjie, LI Zonggang, et al. Novel algorithm of backward cloud model without certainty[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(8): 2262-2265.
- [15] 戴志辉, 刘媛, 邱小强, 等. 基于变权重模糊综合评判法的保护装置状态评价[J]. 电测与仪表, 2020, 58(4): 150-157.

- DAI Zhihui, LIU Yuan, QIU Xiaoqiang, et al. Condition evaluation approach of protective devices based on fuzzy comprehensive evaluation with variable weight[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 58(4): 150-157.
- [16] 孙辉, 张国庆, 高博, 等. 采用组合赋权法的智能变电站继电保护设备状态模糊综合评估[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(7): 23-28.
- SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment status in intelligent substations based on combination weighting method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(7): 23-28.
- [17] 刘万勋, 于琳琳, 张丽华, 等. 基于 AHP 和多级模糊综合评判的电网发展水平评估[J]. *智慧电力*, 2020, 48(5): 80-85.
- LIU Wanxun, YU Linlin, ZHANG Lihua, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(5): 80-85.
- [18] 阿辽沙 叶, 祝恩国, 成倩, 等. 用电设备安全评估的改进区间层次分析法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2015, 27(1): 32-36.
- ALIAOSHA Ye, ZHU Enguo, CHENG Qian, et al. Improved interval analytic hierarchy process method for electrical equipment safety assessment[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2015, 27(1): 32-36.
- [19] 李建林, 马会萌, 田春光, 等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2707-2714.
- LI Jianlin, MA Huimeng, TIAN Chunguang, et al. Selection scheme of electrochemical energy storage based on interval analytic hierarchy process method[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2707-2714.
- [20] SUN Lingjie, MA Zhao, SHANG Yuwei, et al. Research on multi-attribute decision-making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(15): 3855-3864.
- [21] LIN Haijun, WANG Lucai, YU Jingrong, et al. Nonlinear error compensation for load cells based on the optimal neural network with an augmented Lagrange multiplier[J]. *IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, 2015, 64(11): 2580-2862.
- [22] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.
- [23] 梁辰, 孙建文, 王兰玉, 等. 应用聚类和证据理论实现变电站保护压板状态校核[J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2343-2349.
- LIANG Chen, SUN Jianwen, WANG Lanyu, et al. Application of clustering and evidence theory to checking the status of substation protection platen[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2343-2349.
- [24] WANG Huifang, LIN Dongyang, QIU Jian, et al. Research on multiobjective group decision-making in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment based on D-S evidence theory[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 1035-1045.
- [25] 邓勇, 韩德强. 广义证据理论中的基本概率指派生成方法[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(2): 34-38.
- DENG Yong, HAN Deqiang. Methods to determine generalized basic probability assignment in generalized evidence theory[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(2): 34-38.
- [26] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 17-23, 32.
- PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 17-23, 32.
- [27] 李娜, 刘丽霞, 赵一航, 等. 基于模糊最优最劣和模糊综合评价方法的电网企业市场化业务竞争环境综合评估[J]. *智慧电力*, 2019, 47(12): 59-65.
- LI Na, LIU Lixia, ZHAO Yihang, et al. Competitive environment assessment of market business of power grid corporation using Fuzzy best-worst method and comprehensive evaluation method[J]. *Smart Power*, 2019, 47(12): 59-65.

收稿日期: 2020-09-12; 修回日期: 2020-11-16

作者简介:

邢晓敏(1973—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为配电网可靠性分析与预测; E-mail: Teacherxing@163.com

徐海瑞(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网可靠性分析与预测。E-mail: 927699374@qq.com

(编辑 周金梅)