

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210022

# 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估

南东亮<sup>1,2</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 张陵<sup>2</sup>, 陈凯<sup>3</sup>, 杨国生<sup>4</sup>, 张路<sup>2</sup>, 孙永辉<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 针对当前电网二次设备周期性检修效率低、评估结果过于依赖专家主观经验的问题, 提出一种基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的二次设备运行状态风险评估方法。首先, 基于 Apriori 关联规则挖掘算法筛选评估指标, 构建二次设备运行状态风险评估指标体系。其次, 采用属性层次分析法和反熵权法分别计算评估指标的主、客观权重, 并基于合作博弈模型得到组合权重。最后, 以云理论为基础构建基于云模型的二次设备风险评估模型。实例分析表明该方法简单易行, 提高了评估结果的科学性与准确性, 辅助电网二次设备运维人员制定科学合理的检修决策。

**关键词:** 二次设备; 关联规则挖掘; 组合赋权; 合作博弈; 云模型

## Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model

NAN Dongliang<sup>1,2</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>3</sup>, YANG Guosheng<sup>4</sup>, ZHANG Lu<sup>2</sup>, SUN Yonghui<sup>3</sup>  
(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** In view of the low efficiency of periodic maintenance of secondary equipment in the current power grid, and the evaluation results are too dependent on the subjective experience of experts, a risk assessment method for the operation status of secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model is proposed. First, based on the Apriori association rule mining algorithm, the evaluation index is screened, and the risk evaluation index system for the operation status of the secondary equipment is constructed. Secondly, the attribute analytic hierarchy process and the anti-entropy method are used to calculate the subjective and objective weights of the evaluation indicators, and the combined weights are obtained based on the cooperative game model. Finally, a secondary equipment risk assessment model is built based on cloud model based on cloud theory. Example analysis shows that the method is simple and easy to implement, improves the scientificity and accuracy of the evaluation results, and assists the operation and maintenance personnel of the secondary equipment of the power grid to make scientific and reasonable maintenance decisions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51667020).

**Key words:** secondary equipment; association rule mining; combination weighting; cooperative game; cloud model

## 0 引言

电网二次设备作为坚强智能电网的重要组成部分

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51667020); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题资助(2018D04005); 新疆维吾尔自治区教育厅重点项目资助(XJEDU20191009); 教育部创新团队滚动项目资助(IRT-16R633)

分, 其运行状态的安全稳定是电力系统稳定和可靠运行的坚实基础和有力保障<sup>[1-3]</sup>。随着我国智能电网建设和研究的不断深入, 电网二次设备的功能更加多样化, 相应的系统结构也越来越复杂。当前, 电网二次设备的运行维护仍以周期性计划检修为主, 该检修模式容易导致对设备的检修不足或过度检修, 影响二次设备使用寿命的同时增加了设备的检修成本。因此, 开展以二次设备运行状态风险监测

与评估为核心的状态检修变得尤为重要。

对于设备状态评估问题，完备合理的评估指标体系和科学有效的评估方法都非常重要<sup>[4-7]</sup>。当前，关于电网二次设备评估指标体系的构建，大多基于专家经验。随着各类传感器的投入使用，二次设备的运行状态监测变得更加全面和细致，相应的评估指标种类以及产生的数据量也随之增加，加重了运维人员的工作量。作为设备运行状态风险评估的首要步骤，如何进行评估指标的筛选，进而构建符合当前设备运行工况的状态评估指标体系，将直接影响到评估结果的科学合理性<sup>[8-12]</sup>。

在电力系统领域内，已有诸多学者对二次设备状态评估方法与评估模型构建进行研究<sup>[13-17]</sup>。文献<sup>[18]</sup>针对电网二次设备故障机理复杂、单一指标评估错误率高的问题，提出一种基于变权理论与梯形云模型的二次设备运行状态模糊综合评判方法。文献<sup>[19]</sup>采用改进层次分析法、反熵权法以及变异系数法相结合的主客观权重组合赋权方法来确定评估指标权重，克服了单一赋权方法的局限性，提高评估结果的准确率。文献<sup>[20]</sup>依据二次设备实时自检信息和关键历史信息建立状态评价信息模型，基于信息趋势预测和组合赋权实现对继电保护综合状态的评估。上述文献均采用主客观组合赋权法计算评估指标权重，但部分组合系数的确定方法较为模糊，对于隶属度函数的确定方法主要取决于专家经验，仍具有很强的主观性。

鉴于此，本文结合专家经验和关联规则挖掘算法，对二次设备状态评估指标进行精简和筛选，构建符合二次设备运行工况的风险评估指标体系。采用属性层次分析法和反熵权法分别计算指标主、客观权重，并通过合作博弈模型计算得到组合权重。同时以云理论为基础构建基于云模型的二次设备风险评估模型，依据最大隶属度原则得到二次设备状态评估结果。通过实际算例分析，验证了本文提出方法的有效性。

### 1 二次设备风险评估指标体系构建

目前，电网二次设备的状态检修工作主要基于设备的历史运维数据实现对设备当前或未来运行状态的风险评估。因此，对二次设备历史运维数据的挖掘、应用显得尤为重要，主要表现为二次设备风险评估指标的选取。通过对某省级电网二次设备在长期运行、监测和维护过程中积累的丰富运行数据和故障检修数据进行分析，了解到二次设备运行状态风险评估相关的指标多、数据量大。因此，本文参考国家电网公司《继电保护状态检修检验规程》、

《继电保护状态评价导则》以及国内外对于二次设备风险评估的现有研究成果，并结合二次设备状态评估领域相关专家的经验，对二次设备运行状态风险评估相关参数指标进行初步整理和筛选，并根据评估指标的数据类型主要分为定性和定量两类，总计 40 余项，部分指标如表 1 所示。

表 1 二次设备风险评估指标集

Table 1 Risk assessment index set of secondary equipment

编号	评估指标	编号	评估指标	编号	评估指标
1	运行环境	7	二次回路绝缘状况	13	装置告警
2	装置温度	8	二次回路锈蚀状况	14	反事故措施执行
3	二次回路绝缘状况	9	装置对时状况	15	投运时间
4	绝对延时	10	装置电源状况	16	设备积尘状况
5	故障次数	11	超期服役	17	CPU 使用率
6	接地网状况	12	保护功能闭锁	...	...

#### 1.1 关联规则挖掘算法-Apriori

为了提高二次设备运行状态风险评估的效率和准确率，有必要对上述指标集进行进一步精简与筛选，降低评估复杂度和工作量。本文采用 Apriori 算法对二次设备运行状态风险评估指标进行相关性分析和关联规则挖掘，从而过滤掉与二次设备运行状态相关性低的指标，构建符合二次设备运行工况的风险评估体系。

Apriori 算法是由 Rakesh Agrawal 于 1994 年提出的一种关联规则挖掘算法<sup>[21-22]</sup>，核心是通过寻找目标数据集中的频繁项集来发掘事物之间的潜在关联规则。关联规则是形如  $R: X \rightarrow Y$  的蕴涵表达式，其中  $X$  和  $Y$  是不相交的项集，即  $X \cap Y = \emptyset$ 。关联规则反映了  $X$  中的项目出现时， $Y$  中项目也跟随出现的规律。为了衡量关联规则的有效性和实用性，本文选取“支持度(Support)”、“置信度(Confident)”和“提升度(Lift)”作为测度指标。

支持度表示关联规则  $R$  发生的可能性大小，是对规则重要性的衡量，即事件  $X$  和事件  $Y$  同时出现的概率：

$$Support(X \rightarrow Y) = P(XY) \tag{1}$$

置信度表示关联规则  $R$  的可信赖程度，是对规则准确度的衡量，即在事件  $X$  发生的基础上事件  $Y$  发生的概率：

$$Confidence(X \rightarrow Y) = \frac{P(XY)}{P(X)} \tag{2}$$

提升度反映了关联规则  $R$  中事件  $X$  和事件  $Y$

的相关性,  $Lift(X \rightarrow Y) > 1$  且越高表明正相关性越高,  $Lift(X \rightarrow Y) < 1$  且越低表明负相关性越高,  $Lift(X \rightarrow Y) = 1$  表明无相关性:

$$Lift(X \rightarrow Y) = \frac{P(XY)}{P(X)P(Y)} \quad (3)$$

如果关联规则  $R$  同时满足式(4)条件, 则称  $R$  为强关联规则, 即  $X$  和  $Y$  具有强相关性。

$$\begin{cases} Support(X \rightarrow Y) \geq Support_{min} \\ Confidence(X \rightarrow Y) \geq Confidence_{min} \\ Lift(X \rightarrow Y) \geq Lift_{min} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $Support_{min}$ 、 $Confidence_{min}$  和  $Lift_{min}$  分别表示关联规则需要满足的最小支持度、最小置信度以及最小提升度。

### 1.2 构建评估指标体系

基于 Apriori 算法的关联规则挖掘主要分为两步:

**Step1:** 通过扫描二次设备运行状态数据库, 产生频繁项集, 即满足最小支持度阈值的所有项集;

**Step2:** 从频繁项集中筛选出满足最小置信度和提升度的强关联规则。

本文以某省电网 2017 年到 2020 年 220 kV 及以上电压等级二次设备运行状态异常数据为例, 共计 1 359 条数据, 基于 Apriori 算法对其进行关联规则分析与挖掘。为了尽可能多地挖掘出与二次设备运行状态相关且有效的强关联规则, 通过对二次设备运行状态异常数据进行扫描和挖掘, 最终本文将 Apriori 算法中的支持度、置信度和提升度阈值分别设置为 3.0%、60%、2, 得到 28 条符合条件的强关联规则, 部分强关联规则如表 2 所示。

表 2 部分强关联规则

编号	强关联规则	支持度/%	置信度/%	提升度
1	装置温度异常→设备老化度	3.53	61.54	2.81
2	开入/开出光耦失效→开关量状态	3.61	67.12	7.60
3	通信插件光口模块异常→通道运行状态	4.12	72.73	9.69
4	SV 链路异常→采样状况	3.31	71.43	11.98
5	二次回路多点接地→二次回路绝缘状态	3.02	65.08	9.02
6	电源插件异常→装置电源状态	3.38	61.33	8.34
...	...	...	...	...

进而结合国家电网公司新修订企业标准《继电保护状态评价导则》和二次设备运维专家的经验, 对挖掘出的强关联规则进行去重、分析和整理。以表 2 中第一条关联规则“装置温度异常→设备老化度”为例, 该条规则的支持度、置信度以及提升度均满足预设的阈值, 表明因装置温度异常导致设备老化, 最终造成设备发生故障的这一连锁反应在近几年的二次设备故障记录中经常出现, 应当引起重视。因此选择设备老化度作为二次设备运行状态的评估指标。

通过对强关联规则进行综合分析, 得到对电网二次设备运行状态影响较大的指标, 并依据各个指标的性质将其分为检测型状态量、改进型状态量、可靠性及失效风险状态量三类, 最终得到二次设备运行状态风险评估指标体系如图 1 所示。

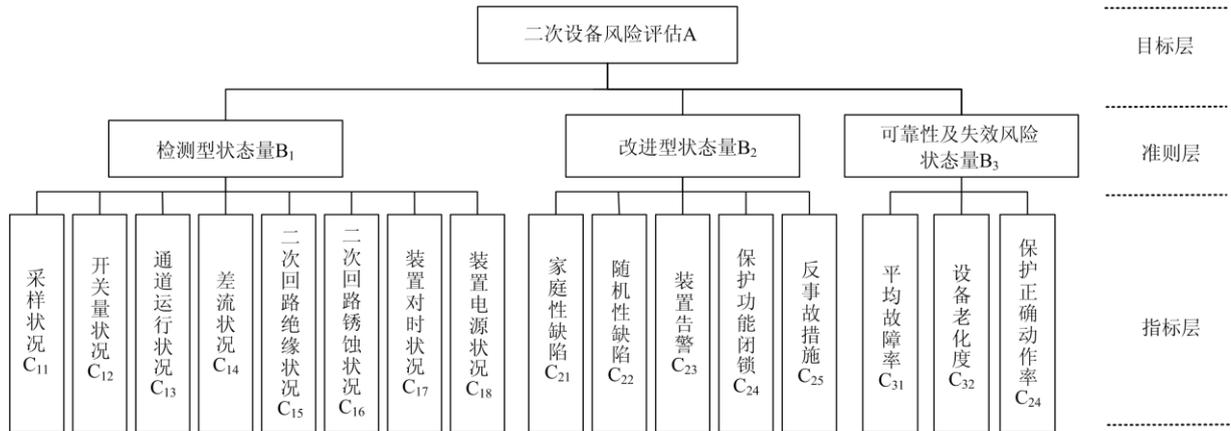


图 1 二次设备运行状态风险评估指标体系

Fig. 1 Risk assessment index system of secondary equipment operation status

### 1.3 风险等级划分

根据国家电网公司关于二次设备状态检修的准

则、规范以及领域内专家经验, 将二次设备运行状态风险等级分为“正常状态”、“注意状态”、“异常

状态”和“严重状态”四个等级，与之对应的评语集为  $V = [v_1, v_2, v_3, v_4]$ 。二次设备风险等级评分范围及相应检修决策如表 3 所示。

表 3 二次设备风险等级划分

设备风险等级	评分范围	检修决策
正常状态 $v_1$	[0.8,1]	设备状态量化值处于稳定且在规程规定的标准限值内，可正常运行，不安排检修，只需开展正常的巡视和监测
注意状态 $v_2$	[0.5,0.8]	设备状态量化值变化趋势朝接近标准限值方向发展，但未超过标准限值，应该加强巡视和监测，查出故障后结合一次设备检修周期，统一安排检修
异常状态 $v_3$	[0.2,0.5]	设备状态量化值变化较大，已接近或略微超过标准限值，应监视运行，并适时安排停电检修
严重状态 $v_4$	[0,0.2]	设备状态量化值严重超过标准限值，需要立即安排停电检修

## 2 组合赋权确定指标权重

目前已知的指标权重确定方法主要分为三类：主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。主观赋权法也称专家赋权法，即综合领域内专家经验，按照对各指标的重视程度来确定相应权重，其中决策者的主观因素对结果的影响是不可忽略的。客观赋权法是基于数据之间的关系来确定指标权重，具有一定的数学理论依据，但其通用性和可参与性差，当数据本身偏差较大时，容易出现权重与实际不符的情况。因此，单一的赋权方法计算得到的指标权重不具备合理性和全面性。为克服单一赋权法的局限性，本文采用基于合作博弈的组合赋权法，综合考虑专家主观经验和客观数据的内在信息规律对评估指标进行合理赋权。

### 2.1 AHM 确定主观权重

属性层次模型(Attribute Hierarchy Model, AHM)是在层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)的基础上提出的一种无结构决策方法<sup>[23]</sup>。AHM 和 AHP 在指标权重计算的结果上基本一致，但相较于 AHP，AHM 简化了权重计算过程且无需进行一致性检验，使得指标主观权重的获取更加简便易行，具有一定的实用性。运用 AHM 计算指标主观权重分为以下三步：

#### 1) 构造比较判断矩阵

采用 1~9 比例标度法表示指标之间的相对重要程度，通过领域内专家打分得到比较判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，具体标度和含义如表 4 所示。

表 4 1~9 比例标度的含义

相对重要程度	标度
指标 $i$ 与指标 $j$ 同等重要	1
指标 $i$ 比指标 $j$ 稍微(不)重要	3(1/3)
指标 $i$ 比指标 $j$ 明显(不)重要	5(1/5)
指标 $i$ 比指标 $j$ 强烈(不)重要	7(1/7)
指标 $i$ 比指标 $j$ 极端(不)重要	9(1/9)
介于相邻标度值间重要	2,4,6,8
介于相邻标度值间不重要	1/2,1/4,1/6,1/8

#### 2) 计算属性判断矩阵

通过公式(5)将比较判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  转化为属性判断矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times n}$ ：

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{2K}{2K+1} & (a_{ij} = K, i \neq j) \\ \frac{1}{2K+1} & (a_{ij} = \frac{1}{K}, i \neq j) \\ 0.5 & (a_{ij} = 1, i \neq j) \\ 0 & (a_{ij} = 1, i = j) \end{cases} \quad (5)$$

式中， $K$  为大于等于 2 的正整数。

#### 3) 确定主观权重

指标主观权重计算公式为

$$W_c = (W_{C(1)}, W_{C(2)}, \dots, W_{C(n)})^T \quad (6)$$

$$W_{C(i)} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中， $W_{C(i)}$  表示第  $i$  个指标的相对属性权重。

### 2.2 反熵权法确定客观权重

反熵权法是相对于熵权法的一种客观赋权方法，其有效避免了传统熵权法对指标差异度敏感性较大所导致的部分指标权重过大或过小的极端情况<sup>[24]</sup>。基于反熵权法确定指标客观权重的具体实施步骤如下：

#### 1) 指标数据归一化

本文构建的二次设备运行状态风险评估指标体系中所考虑的指标依据数据特征可分为两类：定性和定量。其中，定性指标数据需要设备运维人员现场检测与记录，包括二次设备的锈蚀、老化状况等。结合设备实际检测情况，依据运维人员和专家经验对定性指标进行打分，打分区间为[0,1]，且指标分值越接近 1，则二次设备状态越优。对于具有确定数值的定量指标数据，本文结合指标性质将其分为效益型和成本型两类进行归一化处理。

效益型又称越大越优型，即指标数据越大表示设备状态越好，如平均可用度、正确动作率等：

$$x^{\bullet} = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

成本型又称越小越优型, 即指标数据越小表示设备状态越好, 如采样误差、对时误差等:

$$x^{\bullet} = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、式(9)中:  $x$  为指标实际值;  $x_{\min}$  为指标的最小极限值;  $x_{\max}$  为指标的最大极限值;  $x^{\bullet}$  为指标归一化后的值。

### 2) 计算反熵

结合预处理后的指标数据构建一个有  $m$  组数据和  $n$  个评估指标的评价矩阵  $\mathbf{X} = [x_{ij}^{\bullet}]_{m \times n}$ , 根据反熵定义式计算各指标反熵:

$$u_{ij} = \frac{x_{ij}^{\bullet}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}^{\bullet}} \quad (10)$$

$$h_i = -\sum_{j=1}^n u_{ij} \ln(1 - u_{ij}) \quad (11)$$

### 3) 确定客观权重

将反熵进行归一化处理后的值作为各指标的客观权重:

$$w_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \quad (12)$$

## 2.3 基于合作博弈的组合赋权法

本文引入合作博弈模型, 旨在将主、客观权重赋值方法进行组合, 兼具专家主观经验和实际客观数据规律, 通过极小化最优权重与基本权重之间的偏差使得评估指标权重的赋值更加科学合理<sup>[25]</sup>。

首先将由 AHM 和反熵权法得到的指标权重向量  $\mathbf{W}_1$ 、 $\mathbf{W}_2$  进行任意线性组合:

$$\mathbf{W} = \alpha_1 \mathbf{W}_1^T + \alpha_2 \mathbf{W}_2^T \quad (13)$$

基于合作博弈的思想, 以组合权重  $\mathbf{W}$  与  $\mathbf{W}_1$  和  $\mathbf{W}_2$  的离差极小化为目标, 对组合系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  进行优化, 目标函数为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^2 \alpha_k \mathbf{W}_k^T - \mathbf{W}_k \right\|_2 \quad (14)$$

根据矩阵微分性质, 将式(14)转化为求解线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_1^T & \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2^T \\ \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_1^T & \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_1^T \\ \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

对式(15)求得的最优组合系数进行归一化处理得到组合权重

$$\mathbf{W} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \mathbf{W}_1^T + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \mathbf{W}_2^T \quad (16)$$

## 3 基于云模型的二次设备风险评估模型

云模型是用语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间的双向认知模型, 用以反映自然语言中概念的不确定性, 构成定性和定量之间的相互映射<sup>[26-27]</sup>。相较于传统模糊评价中依靠专家先验知识给定或通过统计方法求得的隶属度函数, 云模型能很好地反映出评估指标数据中的模糊性与随机性, 使得评价结果更加准确合理。

### 3.1 云模型基本理论

设  $U$  是一个用精确数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的一个定性概念, 若定量值  $x$  满足:

- 1)  $x \in U$ ;
- 2)  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现;
- 3)  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  是有稳定倾向的

随机数。

则  $x$  在定量论域  $U$  上的分布称为云, 每个  $x$  称为一个云滴。

云模型用期望  $E_x$  (Expected Value)、熵  $E_n$  (Entropy) 和超熵  $H_e$  (Hyper Entropy) 三个数字特征来整体表征一个概念, 记为  $C(E_x, E_n, H_e)$ , 具体含义及计算公式如表 5 所示。

表 5 云模型数字特征

Table 5 Digital characteristics of cloud model		
数字特征	含义	计算公式
$E_x$	定性概念的基本确定性度量, 是云滴在论域空间分布中的数学期望	$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ( $x_i$ 为样本观测值; $n$ 为样本个数)
$E_n$	定性概念的不确定度量, 由概念的模糊性与随机性共同决定	$E_n = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n  x_i - \bar{x} $
$H_e$	熵的不确定度量, 反映了熵的离散程度	$H_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - E_n^2}$

对于存在双边约束  $[C_{\min}, C_{\max}]$  的指标等级划分问题,  $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  分别表示指标属于某一等级区间的上下边界值, 云模型期望值为该等级的中心值。由于边界值是从一种状态到另一种状态的过渡值,

同属于两种不同的状态，所以其隶属于两个状态等级的确定度相等。云模型的参数可采用式(17)确定。

$$\begin{cases} E_x = (C_{\max} + C_{\min}) / 2 \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min}) / 2.355 \\ H_e = 0.005 \end{cases} \quad (17)$$

### 3.2 确定风险评价矩阵

通过云模型将二次设备风险评估指标量化，按照表 6 计算各指标所对应的云模型特征参数  $C(E_x, E_n, H_e)$ 。以二次设备状态风险等级划分为例，绘制相应的评价标准云如图 2 所示。

表 6 云模型参数特征确定方法

Table 6 Method for determining cloud model parameter characteristics

特征参数	指标 区间			
	$[0, x_1]$	$[x_1, x_2]$	$[x_2, x_3]$	$[x_3, 1]$
$E_x$	0	$\frac{x_1 + x_2}{2}$	$\frac{x_2 + x_3}{2}$	1
$E_n$	$\frac{x_1 - 0}{2.355}$	$\frac{x_2 - x_1}{2.355}$	$\frac{x_3 - x_2}{2.355}$	$\frac{1 - x_3}{2.355}$
$H_e$	0.005	0.005	0.005	0.005

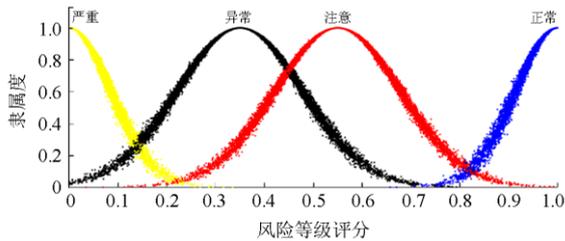


图 2 评价标准云

Fig. 2 Evaluation standard cloud

将指标归一化后的值带入式(18)，计算各指标属于不同风险等级的隶属度  $r = [r_1, r_2, r_3, r_4]$ 。

$$\begin{cases} E_n^* = NORM(E_n, H_e) \\ r = \exp\left[-\frac{(x^* - E_x)^2}{2(E_n^*)^2}\right] \end{cases} \quad (18)$$

对于无法直接量化的定性指标，结合二次设备现场实际运行状态和专家经验对指标进行评分，并根据式(19)求得定性指标属于各风险等级的隶属度值。

$$r_j = \frac{n_j}{N} \quad (19)$$

其中： $n_j$  为判定属于风险等级  $j$  的专家数； $N$  为总的专家数。

将各指标隶属度矩阵进行组合，获得指标层风险评价矩阵  $R$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{24} \\ \vdots & \vdots & r_{ij} & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & r_{k4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中： $k$  为评估指标的个数； $r_{ij}$  表示第  $i$  个指标属于状态风险等级  $j$  的隶属度值。

### 3.3 二次设备风险评估

二次设备运行状态风险评价流程如图 3 所示。

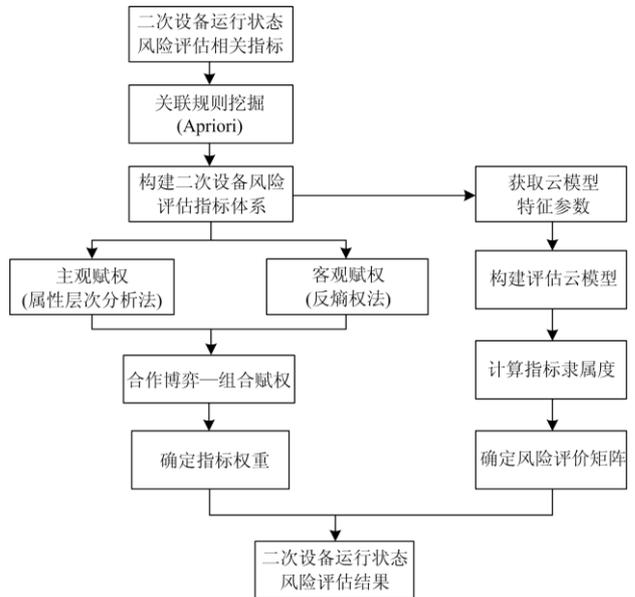


图 3 二次设备状态评估流程图

Fig. 3 Flow chart of secondary equipment status assessment

为了充分衡量各指标对二次设备运行状态的影响，采用加权平均算子对二次设备运行风险进行分层综合评估。首先基于合作博弈的主、客观组合赋权法确定指标层权重向量  $W_1$ ，由云模型确定风险评价矩阵  $R$ ，计算得到准则层风险评估结果  $Z$ ；再将  $Z$  作为准则层风险评价矩阵，结合准则层权重向量  $W_2$  得到目标层评估结果  $P = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ 。根据最大隶属度原则，取目标层评估结果中的  $p_{\max}$  所对应的状态等级作为对二次设备当前运行状态风险的评估等级。

$$\begin{cases} Z = W_1 \cdot R \\ P = W_2 \cdot Z \end{cases} \quad (21)$$

## 4 算例分析

以某省电网 220 kV 及以上电压等级的线路保护设备为评估对象，依据本文所构建的运行状态风

险评估指标体系, 本文列举了四个状态评估周期内 行状况, 如表 7 所示, 基于组合赋权-云模型对线路 相关定性数据的专家打分情况和定量数据的设备运 保护设备运行状态进行风险评估。

表 7 线路保护设备运行数据

Table 7 Operation data of line protection equipment

编号	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>
1	3.2%	0.86	0.54	0.02	128	0.3	4	0.88	0.51	0.42	0.29	0.57	65%	0.2	0.23	99.0%
2	2.9%	0.87	0.61	0.03	130	0.28	3	0.87	0.49	0.39	0.25	0.58	59%	0.2	0.22	98.9%
3	3.0%	0.81	0.62	0.02	133	0.37	5	0.84	0.45	0.38	0.31	0.55	70%	0.1	0.25	99.2%
4	3.1%	0.90	0.58	0.03	131	0.35	2	0.82	0.48	0.41	0.32	0.60	66%	0.2	0.26	99.3%

#### 4.1 计算指标权重

1) 采用属性层次模型 AHM 确定指标主客观权重, 邀请电力设备运维专家对线路保护设备评估指标进行重要度打分, 以改进型状态量指标权重计算为例, 构造比较判断矩阵 A<sub>2</sub>:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 4 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1/4 & 2 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式(5)将比较判断矩阵 A<sub>2</sub> 转换为属性判断矩阵 B<sub>2</sub>:

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 6/7 & 4/5 & 8/9 & 6/7 \\ 1/7 & 0 & 1/2 & 1/5 & 4/5 \\ 1/5 & 1/2 & 0 & 6/7 & 4/5 \\ 1/9 & 4/5 & 1/7 & 0 & 6/7 \\ 1/7 & 1/5 & 1/5 & 1/7 & 0 \end{bmatrix}$$

最后, 由式(7)计算各指标相对属性权重得到改进型状态量指标权重矩阵 W<sub>1-B<sub>2</sub></sub>:

$$W_{1-B_2} = [0.34 \quad 0.164 \quad 0.236 \quad 0.191 \quad 0.069]$$

表 8 指标层组合权重

Table 8 Combination weights of indicator layers

指标层	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>
组合权重	0.017 7	0.030 8	0.222 3	0.127 0	0.070 0	0.221 9	0.079 9	0.232 9
指标层	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>33</sub>
组合权重	0.246 5	0.188 2	0.200 9	0.203 7	0.160 7	0.299 7	0.513 9	0.186 4

表 9 准则层组合权重

Table 9 Combination weight of criterion layer

准则层	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
组合权重	0.697 4	0.283 2	0.019 4

#### 4.2 线路保护设备评估结果

基于云模型对线路保护设备状态评估指标进行量化分析, 获取各指标对应的云模型参数。根据式(18)、式(19)分别求取定量和定性评估指标数据属于

同理, 计算可得检测型状态量指标权重矩阵 W<sub>1-B<sub>1</sub></sub>, 可靠性及失效风险状态量指标权重矩阵 W<sub>1-B<sub>3</sub></sub>, 目标层指标权重矩阵 W<sub>1-A</sub> 如下:

$$W_{1-B_1} = [0.0496 \quad 0.0535 \quad 0.1847 \quad 0.1357 \quad 0.1122 \quad 0.1856 \quad 0.0908 \quad 0.1879]$$

$$W_{1-B_3} = [0.3143 \quad 0.5524 \quad 0.1333]$$

$$W_{1-A} = [0.5524 \quad 0.3333 \quad 0.1143]$$

2) 对线路保护设备运行状态指标数据进行归一化后, 根据式(10)~(12)计算各指标反熵权值, 由此得到指标层和准则层客观权重矩阵:

$$W_{2-B_1} = [0.0719 \quad 0.0694 \quad 0.1584 \quad 0.1418 \quad 0.1417 \quad 0.1602 \quad 0.0984 \quad 0.1564]$$

$$W_{2-B_2} = [0.1180 \quad 0.2214 \quad 0.1526 \quad 0.2212 \quad 0.2867]$$

$$W_{2-B_3} = [0.2411 \quad 0.3595 \quad 0.3994]$$

$$W_{2-A} = [0.4219 \quad 0.3784 \quad 0.1997]$$

3) 通过合作博弈模型均衡主、客观指标权重, 指标组合权重如表 8 所示。

将指标层和准则层权重值分别带入式(15)和式(16)进行求解, 最终得到组合权重如表 9 所示。

不同状态风险等级的隶属度值, 得到线路保护设备指标层风险评判矩阵 R。并由 Z = W<sub>1</sub> · R 计算线路保护设备准则层评估结果 Z<sub>B<sub>1</sub></sub>, Z<sub>B<sub>2</sub></sub> 和 Z<sub>B<sub>3</sub></sub>, 组合得到准则层状态风险评价矩阵 Z。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{B_1} \\ Z_{B_2} \\ Z_{B_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0184 & 0.0782 & 0.7212 & 0.1882 \\ 0.0232 & 0.0761 & 0.3782 & 0.5225 \\ 0.0452 & 0.1721 & 0.2782 & 0.5045 \end{bmatrix}$$

同理,由准则层组合权重矩阵 $W_2$ 和风险评价矩阵 $Z$ 计算得到线路保护设备整体运行状态评估结果 $P=[0.0203 \ 0.0794 \ 0.6155 \ 0.2890]$ ,综合评估结果云模型如图4所示。依据最大隶属度原则可

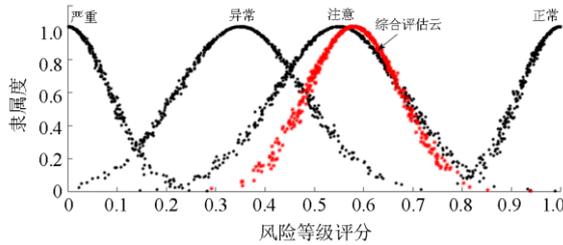


图4 线路保护设备综合评估云模型

Fig. 4 Cloud model for comprehensive evaluation of line protection equipment

以判断线路保护设备当前状态为“注意”,与设备运维专家评估结果以及设备实际运行状况相符。

### 4.3 评估算法对比

为验证本文所提评估算法的有效性和先进性,另选用3种不同评估模型进行对比试验,评估结果如表10所示。根据前两组对比试验结果可见,单一指标赋权法具有片面性,容易出现评估结果与实际不一致的情况。而基于组合赋权-三角形隶属度函数的评估模型虽然能够得出与实际情况相一致的评估结果,但评估风险等级隶属于“注意”和“异常”的概率相差无几,所以对于设备状态的辨识较为模糊,容易导致判断错误。

表10 模型评估结果对比

Table 10 Comparison of model evaluation results

序号	评估模型	评估风险等级隶属度				评估结果	实际结果
		正常	注意	异常	严重		
1	AHM-云模型	0.123 2	0.196 7	0.434 4	0.245 7	异常	注意
2	反熵权-云模型	0.092 1	0.323 2	0.411 3	0.173 4	异常	注意
3	(AHM+反熵权)-三角形隶属度函数	0.093 6	0.417 3	0.405 6	0.083 5	注意	注意

## 5 结论

针对传统电网二次设备定期检修模式的局限与不足,文本提出一种基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估方法,结论如下:

1) 基于 Apriori 算法对评估指标集进行关联分析与挖掘,构建精简完备的电网二次设备运行状态风险评估指标体系。

2) 采用基于合作博弈模型的主客观权重组合赋权法,得到二次设备评估指标组合权重,同时考虑专家主观经验和客观数据实际,计算流程简单可行。

3) 构建基于云模型的二次设备风险评估模型,兼顾状态评估分析过程中的随机性与模糊性,通过考虑随机性使得评估结果更为准确。

本文以线路保护设备为例进行运行状态风险评估,评估过程及结果表明,该方法提高了评估效率,可及时有效地为电网二次设备状态检修工作提供科学指导,同时对继电保护大数据的管理和应用有一定的促进作用。

### 参考文献

[1] 蒋航,刘进,熊俊,等.基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):97-103.

JIANG Hang, LIU Jin, XIONG Jun, et al. Research on the risk assessment of protection setting based on real-time information of line secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 97-103.

[2] NAN Dongliang, WANG Weiqing, MAHFOUD R J, et al. Risk assessment of smart substation relay protection system based on Markov model and risk transfer network[J]. Energies, 2020, 13(7).

[3] 刘一民,章家欢,杨心平,等.基于宏观微观的继电保护设备评估体系构建方法[J].电网技术,2020,44(8):3090-3096.

LIU Yimin, ZHANG Jiahuan, YANG Xinping, et al. Construction method of relay protection equipment evaluation system based on macro and micro[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3090-3096.

[4] 杨国生,戴飞扬,王文焕,等.基于灰度关联法和TOPSIS法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J].中国电力,2019,52(2):94-103.

YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm for relay protection status assessment based on gray correlation method and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.

[5] TAVAKOLI M, NAFAR M. Human reliability analysis in maintenance team of power transmission system

- protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 270-282. DOI: 10.1186/s41601-020-00176-6.
- [6] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58. XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [7] 吴瞻宇, 董明, 王健一, 等. 基于模糊关联规则挖掘的电力变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 157-163. WU Zhanyu, DONG Ming, WANG Jianyi, et al. Fault diagnosis of power transformer based on fuzzy association rules mining[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 157-163.
- [8] 王洪彬, 曾星星, 张友强, 等. 智能变电站二次设备状态的灰色层次聚类评估[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(3): 28-36. WANG Hongbin, ZENG Xingxing, ZHANG Youqiang, et al. Grey hierarchical clustering assessment of secondary equipment status in smart substations[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(3): 28-36.
- [9] 盛海华, 王德林, 马伟, 等. 基于大数据的继电保护智能运行管控体系探索[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 168-175. SHENG Haihua, WANG Delin, MA Wei, et al. Exploration of intelligent operation management system of relay protection based on big data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 168-175.
- [10] 吴俊杰, 陈程, 程林, 等. 基于模糊综合评价法的智能变电站二次设备状态评价研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 72-76. WU Junjie, CHEN Cheng, CHENG Lin, et al. Research on the state evaluation of secondary equipment in smart substation based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 72-76.
- [11] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 538-548. CHEN Xingtian, XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, et al. A big data simplification method for evaluation of relay protection operation state[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 538-548.
- [12] 刘映尚, 陶文伟, 周凯, 等. 基于变权物元可拓模型的二次设备状态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 80-85. LIU Yingshang, TAO Wenwei, ZHOU Kai, et al. Comprehensive evaluation of secondary equipment status based on variable weight matter-element extension model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 80-85.
- [13] 高磊, 宋亮亮, 杨毅, 等. 基于多参量模型的智能变电站二次设备状态评估方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 210-215. GAO Lei, SONG Liangliang, YANG Yi, et al. The state assessment method and application of secondary equipment in smart substation based on multi-parameter model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 210-215.
- [14] 王晓飞, 南东亮, 张彦军, 等. 继电保护设备全寿命周期质量智能预警系统的研发[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(7): 50-55. WANG Xiaofei, NAN Dongliang, ZHANG Yanjun, et al. Research and development of intelligent early warning system for life cycle quality of relay equipment[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(7): 50-55.
- [15] 徐岩, 王士铭, 刘婧妍, 等. 继电保护装置的一种新型评估方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 119-124, 136. XU Yan, WANG Shiming, LIU Jingyan, et al. A new evaluation method for relay protection devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 119-124, 136.
- [16] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127. ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.
- [17] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [18] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77. WANG Yueyue, CHEN Minzhou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [19] 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, 34.

- SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the state of relay protection equipment in smart substations using combined weighting method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(7): 23-28, 34.
- [20] 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 the state of intelligent substation protection system based on information trend prediction and combination weighting[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(1): 162-168.
- [21] 张延旭, 胡春潮, 黄曙, 等. 基于 Apriori 算法的二次设备缺陷数据挖掘与分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(19): 147-151, 163.
- ZHANG Yanxu, HU Chunchao, HUANG Shu, et al. Data mining and analysis method of secondary equipment defects based on Apriori algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(19): 147-151, 163.
- [22] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(1): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [23] 孙向宇, 晁涛, 王松艳, 等. 基于灰色层次属性模型的评估指标综合方法[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(2): 699-706.
- SUN Xiangyu, CHAO Tao, WANG Songyan, et al. Comprehensive evaluation index method based on gray hierarchical attribute model[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(2): 699-706.
- [24] 张海瑞, 韩冬, 刘玉娇, 等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(11): 24-29.
- ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yujiao, et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy method[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(11): 24-29.
- [25] 赵红. 智能变电站二次设备状态评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- ZHAO Hong. Research on status evaluation method for smart substation secondary equipments[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [26] 黄翔, 王凌云, 王泉, 等. 基于直觉模糊 VIKOR 法的电力变压器部件风险优先级评估[J]. *高压电器*, 2020, 56(12): 177-183.
- HUANG Xiang, WANG Lingyun, WANG Quan, et al. Risk priority evaluation of power transformer parts based on intuitionistic fuzzy VIKOR method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(12): 177-183.
- [27] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(2): 32-35.
- LIU Changyu, LI Deyi, PAN Lili. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(2): 32-35.

收稿日期: 2021-01-07; 修回日期: 2021-03-02

作者简介:

南东亮(1985—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制、数据分析与挖掘; E-mail: ndl\_hhu@126.com

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源并网控制; E-mail: wwq59@xju.edu.cn

张陵(1969—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: dlxjdky@126.com

(编辑 葛艳娜)