

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190359

# 基于犹豫模糊矩阵的变电站自动化设备检修优先级决策

彭熹<sup>1</sup>, 王佳文<sup>2</sup>, 李振文<sup>3</sup>, 崔卓<sup>1</sup>, 杨旭<sup>4</sup>, 钟鸣<sup>5</sup>, 李龙<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000;  
3. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410000; 4. 国网北京市电力公司综合能源服务有限公司,  
北京 100000; 5. 国网湖南省电力有限公司常德供电公司, 湖南 常德 415000)

**摘要:** 检修条件有限的情况下, 检修优先级决策是合理制定检修计划及最优化检修效果的基础。综合考虑检修经济性与运行可靠性, 构建优先级决策指标集并提出各个指标的量化方法, 以此对检修任务的检修成本及运行风险展开量化评估。在此基础上引入基于指标相关性等因素建立的指标权重确定模型, 结合反映决策者模糊意见的犹豫模糊矩阵, 解决权重确定的模糊性和实时性问题。最后, 通过算例对比验证了所提方法的有效性, 可为调度人员合理编排检修计划提供决策依据。

**关键词:** 变电站自动化设备; 检修成本; 运行风险; 犹豫模糊矩阵; 优先级决策

## Substation automation equipment maintenance priority decision based on hesitation fuzzy matrix

PENG Xi<sup>1</sup>, WANG Jiawen<sup>2</sup>, LI Zhenwen<sup>3</sup>, CUI Zhuo<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>4</sup>, ZHONG Ming<sup>5</sup>, LI Long<sup>3</sup>

(1. State Grid Hunan Maintenance Co., Changsha 410000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China;  
4. State Grid Beijing Electric Power Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Beijing 100000, China;  
5. State Grid Changde Power Supply Co., Changde 415000, China)

**Abstract:** The maintenance priority decision is the basis of establishing the maintenance plan and optimizing the effect of maintenance under the condition where the maintenance condition is limited. Based on the comprehensive consideration of economy of maintenance and reliability of operation, the priority decision index set is constructed. The quantitative methods of each indicator are proposed to quantitatively evaluate the maintenance cost and operational risk of maintenance task. On this basis, an index weight determination model based on the correlation between indicators is introduced. Combining index weight determination model with the hesitant fuzzy matrix reflecting the fuzzy opinions of decision makers, it can solve the fuzziness and real-time problem of determination for index weight. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a comparison of examples. This method can provide decision-making basis for scheduling personnel to reasonably arrange the maintenance plan.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51722701).

**Key words:** substation automation equipment; maintenance cost; operational risk; hesitant fuzzy matrix; priority decision

## 0 引言

1970年, 美国杜邦公司首先倡导状态检修(Condition Based Maintenance, CBM), 包括设备状态监测、状态评估以及检修决策<sup>[1]</sup>。相比定期计划检修, 状态检修根据设备的自身状态以及当前电力系统的运行状态做出检修决策, 可以有效避免设备检

修不及时或检修过度等问题<sup>[2]</sup>。

检修决策即根据状态监测结果制定合理的检修任务优先级排序。在检修人员无法同时处理所有当前检修任务的情况下, 优先级决策允许更有效地利用检修资源以及最小化系统运行的风险与成本<sup>[3-4]</sup>。检修任务优先级决策问题是多属性决策问题, 即基于多种属性指标建立合适的优化模型计算优先级得分。因此, 首先必须确保指标能较为客观和准确地反映检修任务的重要性和紧迫性。文献[5]考虑设备

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51722701)

情况, 采用设备历史工况、检修状况以及运行情况作为检修优先级评价指标; 文献[6-7]选取以可靠性为中心的决策指标, 包括故障损失、故障概率、检修成本等; 文献[8]从设备和检修成本出发, 提出了设备重要度、故障排除时间及检修资源需求度等评价指标; 文献[9]将设备重要度量化为设备可用工作时间, 并将检修行为对系统、环境造成的影响纳入考量。目前所采用的指标面向范围较为单一, 没有综合考虑变电站自动化设备的全过程变化性及特殊性, 检修经济性和运行风险性等因素, 影响检修决策的客观和准确性。

其次, 确定指标权重是解决优先级决策问题的必要环节。目前采用的指标权重确定方法主要分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法三类<sup>[10-12]</sup>, 然而这些方法都忽略了决策者在度量时往往会给出几个相近的可能隶属度结果, 即决策者的犹豫模糊态度。犹豫模糊集作为模糊集的推广, 允许同一隶属度包含多个不同的值, 从而能够反映决策者们的犹豫模糊态度<sup>[13-14]</sup>。同时, 变电站自动化设备的状态, 如其中的 CPU 设备负载情况等随系统运行实时发生变化从而影响指标权重的确定, 因此指标权重确定存在实时性和模糊性问题。

为解决上述问题, 本文提出一种基于犹豫模糊矩阵的变电站自动化设备检修优先级决策方法。首先按照差异性与系统性相结合的原则, 综合考虑检修成本与运行风险, 构建了由检修时间、设备可用性、检修费用、检修资源需求度、故障概率、故障损失、检修状况以及状态评价八个因素组成的决策指标集并提出量化方法; 引入基于犹豫模糊矩阵的指标权重确定模型, 反映决策者的犹豫模糊态度并通过实时修改犹豫模糊矩阵达到实时决策的效果, 从而解决指标权重确定过程中存在的实时性和决策态度模糊性问题。

## 1 犹豫模糊检修优先级决策流程

本文提出的变电站自动化设备犹豫模糊检修优先级决策方法流程如图 1 所示。

设有  $m$  个变电站自动化设备检修任务,  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  为检修任务集;  $n$  个优先级决策指标,  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  为优先级决策指标集。下面给出该方法的具体实现步骤。

步骤 1 建立变电站自动化设备检修任务优先级决策指标集, 对各项指标进行分析和量化, 形成指标值矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ ,  $a_{ij}$  为检修任务  $V_i$  对应指标  $U_j$  的指标值。

步骤 2 为了消除各指标量纲、类型不同对计算

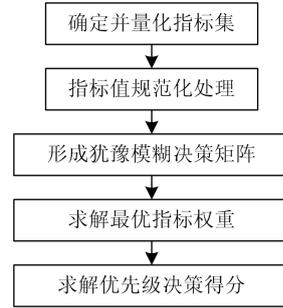


图 1 犹豫模糊决策方法流程图

Fig. 1 Flow chart of hesitant fuzzy decision method

结果造成的影响, 对指标值矩阵  $A$  进行规范化处理。遵循检修任务负指标值越大, 优先级越靠后; 正指标值越大, 优先级越靠前的原则, 可得规范化处理公式为

$$g_{ij}^+ = \frac{a_{ij}}{\max_i(a_{ij})} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$g_{ij}^- = \frac{\min_i(a_{ij})}{a_{ij}} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $g_{ij}^+$  为正指标;  $g_{ij}^-$  为负指标。

由此形成指标值规范矩阵:  $G = (g_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 3 决策者对检修任务  $V_i$  在指标  $U_j$  下的可能隶属度给出不同决策结果, 得犹豫模糊决策矩阵。

步骤 4 应用基于犹豫模糊矩阵的权重确定模型求指标权重矩阵  $w'$ 。

步骤 5 根据式(3)求各检修任务的优先级决策矩阵  $Z$ ,  $Z_i$  越大, 检修任务  $V_i$  的优先级越靠前。

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)^T = G \cdot w' \quad (3)$$

## 2 优先级决策指标集

本文构建的变电站自动化设备检修优先级决策指标集如图 2 所示。检修成本考虑时间成本和经济成本两类因素, 其中时间成本包括检修时间以及设备可用性, 经济成本包括检修费用与检修资源需求度, 两者结合较为全面地反映检修设备的重要性与完成检修任务的成本。运行风险包括预期故障情况和当前设备状况, 故障概率与故障损失结合反映设备预期故障情况, 检修状况与状态评价结合反映设备当前状况。

### 2.1 检修成本

(1) 检修时间  $U_1$ 。检修时间是指设备从开始检修到排除故障且能够投入运行所需的时间。保证安全、可靠的供电服务是电力系统运行的基本要求, 只有在有限的时间内完成尽可能多的检修任务才最

大程度地保障变电站自动化系统的安全可靠运行<sup>[15-16]</sup>。因此在相同条件下应优先完成该指标值较低的检修任务。

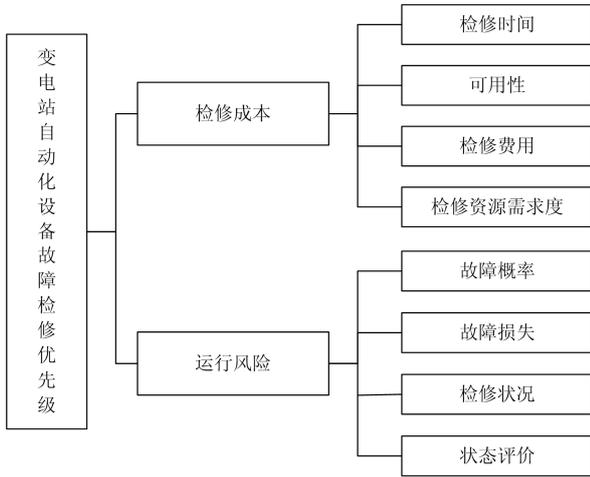


图2 优先级决策指标集

Fig. 2 Set of priority decision indicators

(2) 可用性 $U_2$ 。可用性反映待检修设备的使用率，以待检修设备在无故障期间的使用时长占比来定量计算<sup>[9]</sup>。该指标在不同的变电站自动化设备中差异较大，如数据通信网关机等设备的可用性远高于备用电源等设备，因此需要考虑该指标对检修优先级的影响。

以年为时间尺度，则可用性=设备每年使用时间/设备每年无故障时间。可用性高的设备对系统而言重要性较高，因此相同条件下应优先完成该指标值较高设备的检修任务。

(3) 检修费用 $U_3$ 。检修费用包括设备从开始检修到排除故障且能够投入运行所需的人工与设备费用。在相同条件下应优先完成该指标值较低的检修任务，以确保当前预算能完成尽可能多的检修任务。

(4) 检修资源需求度 $U_4$ 。检修资源需求度指检修资源需求量占检修资源总量的比例，用于量化不同检修任务对检修资源的类型与数量的需求，计算公式如式(4)所示。

$$a_{i4} = \sum \frac{M_{iD}}{N_D} \quad (4)$$

式中： $M_{iD}$ 表示检修任务 $V_i$ 对第 $D$ 种检修资源的需求量； $N_D$ 表示 $D$ 类型检修资源的总量。

## 2.2 运行风险

(1) 故障概率 $U_5$ 。设备故障概率与设备健康指数存在如式(5)的指数关系<sup>[17]</sup>。

$$a_{i5} = K \cdot e^{C \cdot HI_i} \quad (5)$$

式中： $K$ 为比例系数； $C$ 为曲率系数，可利用统计

数据反演求出；检修任务 $V_i$ 对应设备的健康指数 $HI_i$ 在0~10的范围内，0表示最佳状态，10表示最差状态。

(2) 故障损失 $U_6$ 。电网运行状态与设备工况的实时变化性使得在不同时段安排同一检修任务造成的故障损失不同。采用期望停电损失定量描述由于停电进行变电站自动化设备检修而造成用户用电量减少的期望值，并以此量化故障损失<sup>[3]</sup>。具体计算公式如式(6)所示。

$$a_{i6}(tf) = (E + L)I_i(tf) \quad (6)$$

式中： $a_{i6}(tf)$ 为 $tf$ 时段内执行检修任务 $V_i$ 造成的故障损失； $E$ 为单位电价； $L$ 为用户单位缺电损失； $I_i(tf)$ 为 $tf$ 时段内停电执行检修任务 $V_i$ 造成的供电量期望缺失，计算方法参考文献[3]。

(3) 检修状况 $U_7$ 。根据文献[5]，检修情况包含反措情况与定检情况。其量化公式如式(7)所示。

$$a_{i7} = \frac{F_i T_i}{\sum_{i=1}^m F_i \sum_{i=1}^m T_i} \quad (7)$$

式中： $F_i$ 为检修任务 $V_i$ 对应的未完成反措事件数量； $T_i$ 为检修任务 $V_i$ 对应设备的当前与上次定检的时间间隔。

(4) 状态评价 $U_8$ 。通过模糊评价方法获得待检修设备的状态评价指标值<sup>[18]</sup>。考虑变电站自动化设备状态特征值多变以及考虑计算量，本文采用“正常”、“注意”、“轻度故障”以及“故障”四个评语等级并将数字1~4分别分配给每个评语等级。评语等级定义如下。

正常：状态特征值稳定且处于良好范围内，设备正常运行。

注意：状态特征值接近或略超出规定阈值，但设备可维持稳定的正常运行。

轻度故障：状态特征值接近或略超出规定阈值，状态出现明显波动，设备无法维持稳定的正常运行。

故障：状态特征值明显超出规定阈值，设备无法运行。

## 3 基于犹豫模糊矩阵的指标权重确定模型

文献[13]提出犹豫模糊决策矩阵的概念，记作

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中：犹豫模糊元 $h_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ )由几个 $[0, 1]$ 的数组成，表示检修任务 $V_i$ 在指标 $U_j$ 下的

可能隶属度。

$S_{ij}$  为  $h_{ij}$  的得分函数, 反映犹豫模糊元  $h_{ij}$  中可能隶属度的平均值水平<sup>[19]</sup>。定义如式(9)所示。

$$S_{ij} = \frac{1}{l_{ij}} \sum_{x \in h_{ij}} x \quad (9)$$

式中:  $x$  为犹豫模糊元  $h_{ij}$  中的元素;  $l_{ij}$  为犹豫模糊元  $h_{ij}$  中元素  $x$  的个数。

$B_{ij}$  为  $h_{ij}$  的变异度, 反映犹豫模糊元  $h_{ij}$  中可能隶属度的离散程度<sup>[20]</sup>。定义如式(10)所示。

$$B_{ij} = \frac{1}{l_{ij}} \sqrt{\sum_{x_b, x_c \in h_{ij}} (x_b - x_c)^2} \quad (10)$$

式中,  $x_b, x_c$  为犹豫模糊元  $h_{ij}$  中的不同元素。

欧式距离可量化个体之间的差异<sup>[21]</sup>。将  $h_{ij}$  中的元素由大到小排列,  $h_{ij}^k$  表示  $h_{ij}$  中第  $k$  大的元素。则犹豫模糊元  $h_{pj}$  与  $h_{qj}$  之间的欧式距离  $d(h_{pj}, h_{qj})$  为

$$d(h_{pj}, h_{qj}) = \sqrt{\frac{1}{\max(l_{pj}, l_{qj})} \sum_{k=1}^{\max(l_{pj}, l_{qj})} |h_{pj}^k - h_{qj}^k|^2} \quad (11)$$

决策者的态度分为风险偏好、中立和风险厌恶三类, 风险偏好态度下指标  $j$  与指标  $t$  的相关性系数  $r_{jt}$  如式(12)所示<sup>[22]</sup>。

$$r_{jt} = \frac{\sum_{i=1}^m (\frac{1}{l_i} \sum_{k=1}^{l_i} h_{ij}^k \cdot h_{it}^k)}{\max \left\{ \sum_{i=1}^m (\frac{1}{l_i} \sum_{k=1}^{l_i} (h_{ij}^k)^2), \sum_{i=1}^m (\frac{1}{l_i} \sum_{k=1}^{l_i} (h_{it}^k)^2) \right\}} \quad (12)$$

设  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  为权重向量, 考虑各决策方案之间的公平竞争、各指标对决策所起的作用以及指标的分布与排列, 可引入权重计算模型为

$$\begin{cases} \max f(Q) = \alpha \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} w_j + \\ \frac{\beta}{m} \sum_{j=1}^n \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} w_j + \gamma \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt}) w_j; \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n w_j^2 = 1, 0 \leq w_j \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\alpha, \beta, \gamma$  为平衡系数, 满足  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$  且  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ , 决策者可根据各表达式的意义进行取值, 本文取  $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ , 保证较为全面、公平、客观的评价。

对式(13)运用拉格朗日辅助函数, 得

$$L(Q, \xi) = f(Q) + \frac{1}{2} \xi (\sum_{j=1}^n w_j^2 - 1) \quad (14)$$

对  $w_j$  和  $\xi$  分别求偏导, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_j} = \alpha \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} + \\ \frac{\beta}{m} \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} + \gamma \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt}) + \xi w_j = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi} = \frac{1}{2} (\sum_{j=1}^n w_j^2 - 1) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由此解得指标权重  $w_j$  为

$$w_j = \frac{\alpha \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} + \frac{\beta}{m} \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} + \gamma \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt})}{(\sum_{j=1}^n (\alpha \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} + \frac{\beta}{m} \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} + \gamma \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt}))^2)^{1/2}} \quad (16)$$

对  $w_j$  进行归一化处理, 可得

$$w'_j = \frac{\alpha \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} + \frac{\beta}{m} \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} + \gamma \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt})}{\sum_{j=1}^n (\alpha \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S_{ij} + B_{ij}} + \frac{\beta}{m} \sqrt{\sum_{1 \leq p, q \leq m} d^2(h_{pj}, h_{qj})} + \gamma \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt}))} \quad (17)$$

## 4 算例分析

### 4.1 指标值处理

某变电站有 4 个自动化设备检修任务, 根据第 2 小节的决策指标量化方法计算实时指标值, 采用式(1)和式(2)对实时指标值进行规范化处理, 简化计算过程可得各指标的规范值如表 1 所示。

请专家对 4 个变电站自动化设备检修任务满足各指标的可能隶属度进行评估, 将每个犹豫模糊元中的元素从大到小排列, 得到犹豫模糊决策矩阵如表 2 所示。

### 4.2 最优权重计算

将所有检修任务视为一组检修任务, 根据式(17)求得归一化后的指标权重矩阵为

$$w'_1 = (0.1253, 0.1246, 0.1260, 0.1217, \\ 0.1266, 0.1171, 0.1286, 0.1301)^T \quad (18)$$

将前三个检修任务视为一组检修任务, 重复上述计算步骤求得归一化后的指标权重矩阵为

$$w'_2 = (0.1211, 0.1108, 0.1194, 0.1226, \\ 0.1631, 0.1094, 0.1235, 0.1302)^T \quad (19)$$

由式(3)分别求得两组检修任务的优先级得分并进行比较, 结果如表 3。

表 1 优先级决策指标规范值

Table 1 Specification value of priority decision indicator

检修任务	检修时间 $U_1$	可用性 $U_2$	检修费用 $U_3$	检修资源需求度 $U_4$	故障概率 $U_5$	故障损失 $U_6$	检修状况 $U_7$	状态评价 $U_8$
$V_1$	1.00	0.63	1.00	1.00	0.30	0.44	0.18	0.25
$V_2$	0.66	1.00	0.70	0.67	0.16	1.00	0.82	0.50
$V_3$	0.14	0.50	0.33	0.20	0.37	0.65	1.00	1.00
$V_4$	0.89	0.35	0.5	0.38	1.00	0.79	0.30	0.75

表 2 犹豫模糊决策矩阵

Table 2 Hesitant fuzzy decision matrix

检修任务	指标集							
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$
$V_1$	{0.80, 0.85, 0.90}	{0.5, 0.55, 0.60}	{0.70, 0.70, 0.80}	{0.90, 0.95, 0.95}	{0.25, 0.30, 0.35}	{0.40, 0.45, 0.50}	{0.15, 0.20, 0.25}	{0.25, 0.25, 0.25}
$V_2$	{0.60, 0.65, 0.70}	{0.70, 0.70, 0.80}	{0.60, 0.60, 0.65}	{0.70, 0.75, 0.75}	{0.15, 0.20, 0.25}	{0.80, 0.85, 0.90}	{0.75, 0.80, 0.85}	{0.55, 0.55, 0.60}
$V_3$	{0.15, 0.15, 0.20}	{0.35, 0.40, 0.40}	{0.15, 0.20, 0.25}	{0.25, 0.30, 0.35}	{0.35, 0.40, 0.45}	{0.60, 0.65, 0.70}	{0.80, 0.85, 0.90}	{0.90, 0.95, 0.95}
$V_4$	{0.80, 0.85, 0.85}	{0.20, 0.25, 0.30}	{0.30, 0.40, 0.40}	{0.40, 0.45, 0.50}	{0.80, 0.85, 0.90}	{0.75, 0.80, 0.80}	{0.25, 0.30, 0.35}	{0.75, 0.80, 0.85}

表 3 检修任务综合得分与优先级排序

Table 3 Comprehensive score and prioritization of maintenance tasks

检修任务	优先级得分		检修优先级排序	
	第一组	第二组	第一组检修	第二组检修
	检修任务	检修任务	任务	任务
$V_1$	0.6	0.58		
$V_2$	0.68	0.66		
$V_3$	0.53	0.52	$V_2 > V_4 > V_1 > V_3$	$V_2 > V_1 > V_3$
$V_4$	0.62	—		

4.3 优先级决策结果比较与分析

对比两组结果可以发现，在不同的检修任务组合下，各指标权重以及各检修任务的优先级得分发生了明显变化，说明该决策方法的优先级得分结果能够较为灵敏地随着检修任务的变化而改变，符合检修决策的实时性需求。

在指标权重及优先级得分发生明显变化的情况下，检修任务  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  的优先级决策顺序没有发生改变，说明了本方法的有效性和合理性。

5 结论

本文提出了基于犹豫模糊矩阵的变电站自动化设备检修优先级决策方法。按照系统风险与检修成本双重优化的原则，在细化时间、经济成本和预期故障、当前情况等因素的基础上，提出包含八个指标的决策指标集并提出量化方法。考虑权重确定的

实时性，基于反映决策者不同意见的犹豫模糊矩阵引入权重优化模型，减小决策者模糊态度对决策结果的影响。本文所提方法可实现指标权重的实时更新，便于及时调整检修任务优先级决策结果。

参考文献

[1] 赵强. 基于物联网技术的电力设备状态检修[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
ZHAO Qiang. Condition based maintenance of power equipment based on internet of things technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[2] 焦振毅, 任建文, 王力, 等. 电网智能设备检修辅助决策系统的设计与实现[J]. 智慧电力, 2012, 40(11): 54-57.  
JIAO Zhenyi, REN Jianwen, WANG Li, et al. Design and implementation of intelligent condition-based maintenance assistant decision-making system for grid equipment[J]. Smart Power, 2012, 40(11): 54-57.

[3] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32.  
PAN Lezhen, LU Guoqi, ZHANG Yan, et al. Optimization of equipment condition maintenance decision based on risk comprehensive evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 28-32.

[4] 刘小弟, 朱建军, 张世涛, 等. 考虑属性权重优化的犹豫模糊多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 297-302.  
LIU Xiaodi, ZHU Jianjun, ZHANG Shitao, et al. Hesitant fuzzy multi-attribute decision making method based on

- optimization of attribute weights[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(2): 297-302.
- [5] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(5): 48-52.  
WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(5): 48-52.
- [6] AMIR H E, MAHMUD F. New considerations in modern protection system quantitative reliability assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2213-2222.
- [7] LOPES I S, SENRA P, et al. Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling[C] // *IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management*, 2018, Bangkok, Thailand: 2102-2106.
- [8] 管翔, 张仕新, 陈春良, 等. 基于多属性决策的装备维修任务优先级分类方法[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2017, 31(1): 21-24.  
ZAN Xiang, ZHANG Shixin, CHEN Chunliang, et al. Priority sorting method for equipment maintenance task based on multi-attribute decision making[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2017, 31(1): 21-24.
- [9] RATNAYAKE R M, ANTOSZ K. Development of a risk matrix and extending the risk-based maintenance analysis with fuzzy logic[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 182: 602-610.
- [10] WANG H. Research on multi-objective 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.
- [11] 肖繁, 王紫薇, 张哲. 基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 74-83.  
XIAO Fan, WANG Ziwei, ZHANG Zhe. Study on maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 74-83.
- [12] LIU H C, YOU J X, YOU X Y, et al. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 28(C): 579-588.
- [13] TORRA V. Hesitant fuzzy sets[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6): 529-539.
- [14] CHEN N, XU Z, XIA M. Correlation coefficients of hesitant sets and their applications to clustering analysis[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(4): 2197-2211.
- [15] 祁桂刚, 黎灿兵, 曹一家. SVC 和 TCSC 控制器间动态交互影响分析[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(7): 65-69.  
QI Guigang, LI Canbing, CAO Yijia. Analysis on the dynamic interaction of SVC and TCSC controllers[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(7): 65-69.
- [16] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [17] HUGHES D. Condition based risk management (CBRM)—enabling asset condition information to be central to corporate decision making[C] // *Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management*, 2006, Gold Coast, Australia: 1212-1217.
- [18] 李正明, 钱露先. 基于统计特征与概率神经网络的变压器局部放电类型识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 55-60.  
LI Zhengming, QIAN Luxian. Type recognition of partial discharge in power transformer based on statistical characteristics and probabilistic neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 55-60.
- [19] XIA M, XU Z. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52(3): 395-407.
- [20] 朱丽, 朱传喜, 张小芝. 基于粗糙集的犹豫模糊多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1335-1339.  
ZHU Li, ZHU Chuanxi, ZHANG Xiaozhi. Method for hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on rough sets[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1335-1339.
- [21] LIAO H, XU Z. A VIKOR-based method for hesitant fuzzy multi-criteria decision making[J]. *Fuzzy Optimization & Decision Making*, 2013, 12(4): 373-392.
- [22] XU Z, XIA M. On distance and correlation measures of hesitant fuzzy information[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2011, 26(5): 410-425.  
XIA M, XU Z, CHEN N. Some hesitant fuzzy aggregation operators with their application in group decision making[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2013, 22(2): 259-279.

收稿日期: 2019-03-30; 修回日期: 2019-07-23

作者简介:

彭熹(1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为自动化控制, 智能运检和人工智能;

王佳文(1995—), 女, 通信作者, 学士, 研究方向为电力系统分析、状态检修; E-mail: wjw-hnu@foxmail.com

李振文(1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 周金梅)