

DOI: 10.7667/PSPC161317

基于模糊 DEA 理论的继电保护装置状态评价研究

杨磊, 应黎明, 王玉磊, 贾永天

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了更加科学、合理和客观地反映继电保护装置运行状态, 提出了一种基于模糊 DEA 理论的继电保护装置状态评价方法。在兼顾有效性和可行性的基础上, 结合继电保护装置的故障情况提取状态监测信息, 并与历史运行信息及其他因素相关联, 建立继电保护装置状态评价体系。引入模糊理论中评判集及模糊正态隶属度函数等概念对定性指标进行量化。在此基础上, 运用基于 α 截集解的改进模糊 DEA 模型对继电保护装置运行状态进行综合评价, 根据平均效率评价值得出其运行状态评价结果。最后, 通过算例对该方法的有效性和合理性进行了验证。

关键词: 继电保护装置; 模糊 DEA 理论; 正态隶属度函数; 状态评价; α 截集

Research on state evaluation of relay protection device based on fuzzy DEA theory

YANG Lei, YING Liming, WANG Yulei, JIA Yongtian

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to reflect the status of relay protection device more scientifically, reasonably and objectively, a state evaluation method of relay protection based on fuzzy DEA theory is proposed. Based on the consideration of the effectiveness and feasibility, combined with the fault condition of relay protection, this paper extracts state monitoring information, and associates with the historical operation information and other factors, then establishes the evaluation system of relay protection. Concepts such as the theory of fuzzy evaluation set and fuzzy Gaussian membership functions are introduced to quantify the qualitative indicators. Then the improved fuzzy DEA model based on the α cut set solution is used to evaluate the running state of relay protection device, and running state evaluation results are got by average efficiency value. Finally, the validity and rationality of the method are verified by an example.

Key words: relay protection device; fuzzy DEA theory; normal membership function; state evaluation; α cut set

0 引言

随着电网建设逐渐朝智能化和模块化的方向发展, 对于其经济性以及可靠性提出了更高的要求。电气设备的检修体制正在由传统的计划性维修模式向状态检修转变^[1]。状态检修的基础和核心任务是状态评价。继电保护装置作为保障电力系统安全稳定运行的重要设备, 国内外学者对其状态评价也做了大量的研究工作。由于设备状态评价中某些状态及性能类指标的描述语言是定性、模糊的, 工程中常用模糊综合评判的方法来进行设备状态评价^[1-3]。为了更合理、准确地反应继电保护装置运行状态, 文献[4]引入变权系数理论对继电保护模糊综合评价模型进行改进, 文献[5]对模糊评价的隶属度函数进行了分析, 比较了正态分布与三角分布隶属度函数在评价结果中的差异。

运用模糊综合评判方法进行状态评价时, 各因素的权重分配主要靠人为主观判断, 当因素较多时, 权系数往往难以适当分配^[6]。数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是著名运筹学家 A.Charnes 和 W.W.Cooper 等人以“相对效率”概念为基础, 根据多投入与多产出数据指标对相同类型的决策单元(Decision Making Units, DMU)进行相对有效性或绩效评价的一种系统分析方法^[7]。该方法以各指标数据的客观信息确定权重系数, 是一种客观赋权法, 且具有无需对数据进行无量纲处理、无需建立输入与输出之间的函数关系式等优点。但是, 传统的 DEA 评价方法要求决策单元的输入与输出必须是确定的或是可以精确量化的, 而无法处理模糊、不确定性信息。如何将模糊综合评价理论与数据包络分析相结合, 不少学者对此进行了研究, 并建立了多种模糊 DEA 评价模型^[8-10]。

本文根据实际运行中继电保护的故障情况，合理选取状态监测信息，并结合装置的历史运行状况等指标，建立继电保护状态评价体系。在此基础上，建立带权重约束的仅有输出的模糊 DEA 评价模型。实例表明，该评价模型综合了模糊理论与 DEA 理论的优点，能客观、全面和合理地反应继电保护装置的运行状态，为电网公司开展继电保护状态检修工作提供了参考依据。

1 继电保护状态评价指标体系

1.1 状态监测信息的选取及处理

状态监测指标的选取要兼顾有效性和可行性，新一代智能变电站的试点工程可实现对装置内部部分参数的监测和收集，为继电保护状态评价提供了有利的条件。在此基础上，需要选择最能反映装置内部重要或者易故障模块状态的指标信息。经统计，实际运行中继电保护故障主要是由元器件损坏、电源损坏以及外回路故障(含纵联通道)引起的^[2,11-12]。

元器件损坏主要由运行损耗及老化等因素造成。装置内温度过高和装置电源电压波纹含量较大是造成元器件及芯片损伤的主要自然和电气因素，而经统计继电保护失效率最高的元器件主要是 CPU 板；电源插件的损坏主要是由于其电解电容电解液的挥发造成的，电解电容的寿命一般遵循“十度法则”，即温度每升高 10℃，寿命将减少一半；另外，根据文献[2]的分析，对于智能变电站继电保护装置外部回路的检测，可以通过对过程层光口及纵联通道光模块的光强进行监视来实现。

根据上述分析，本文选取的继电保护状态监测信息主要有：装置内部温度、电源输出电压、CPU 负荷率以及光模块光强。

对于装置内部温度和电源输出电压这类双向劣化指标，本文运用如图 1(a)所示的梯形劣化度函数进行量化，其中允许上限和允许下限分别是装置在运行中各状态参量指标良好值的参考范围；门限值上限和下限分别为状态参量告警值的上下限。继电保护装置的 CPU 负荷率过高会导致死机等故障，本文运用图 1(b)所示的半梯形函数对其进行量化。

需要注意的是，装置内部温度、电源输出电压以及 CPU 负荷率的实时检测值只能反映装置当下的状态，无法反映老化情况，但是其长期处于异常状态对装置的老化有很大的影响，因此在评价时将其近一段时间的平均值作为状态参量值。

光模块光强在装置运行过程中随光纤通道的劣化及插件的老化逐渐减弱，其量化如图 2 所示。

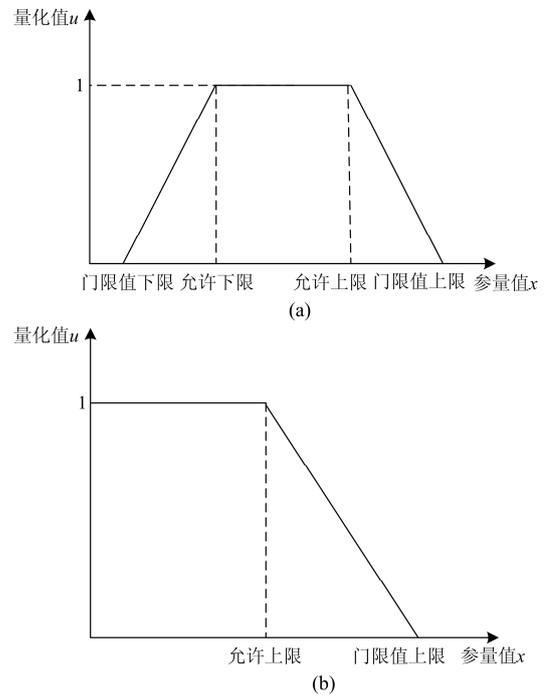


图 1 装置内部温度、电源输出电压及 CPU 负荷率的量化

Fig. 1 Quantization of internal temperature, power supply voltage and CPU load rate

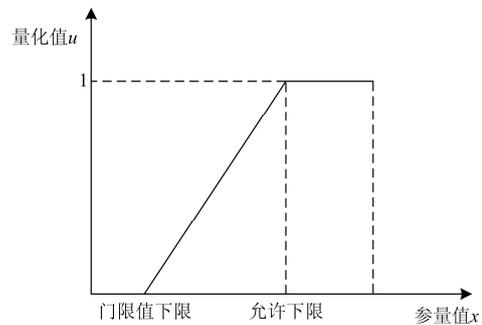


图 2 光模块光强的量化

Fig. 2 Quantization of light module intensity

1.2 状态评价体系的构建

为了尽量客观、真实、全面地反映继电保护装置的运行状态，除了考虑实时监测信息外，还需要考虑装置历史信息等其他因素，建立图 3 所示的状态评价体系。

图 3 中状态监测信息及正确动作率、装置运行时间指标比较方便直接量化，为定量指标。其中，正确动作率主要考虑保护装置本身正确动作率(RCO₁)、同型号装置正确动作率(RCO₂)以及同批次正确动作率(RCO₃)，该项指标的量化公式为

$$\text{正确动作率 } RCO = (30\% \times RCO_2 + 70\% \times RCO_3) \times RCO_1 \quad (1)$$

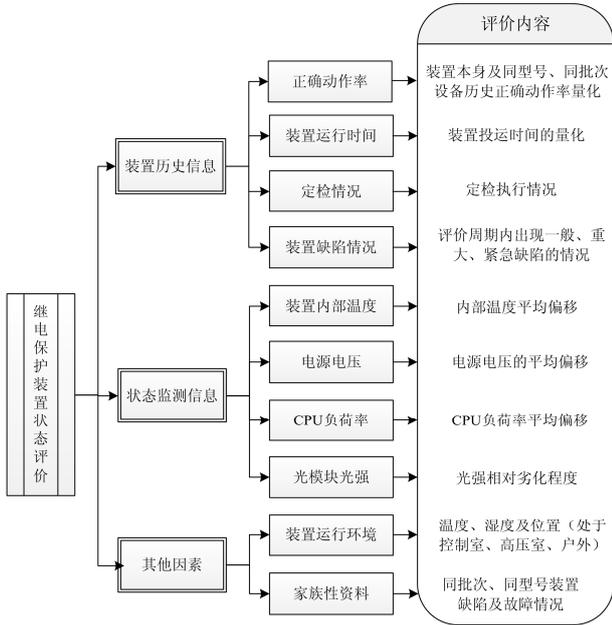


图3 继电保护装置状态评价体系

Fig. 3 State evaluation system of relay protection device

对于装置运行时间，本文采用图4所示的函数量化。

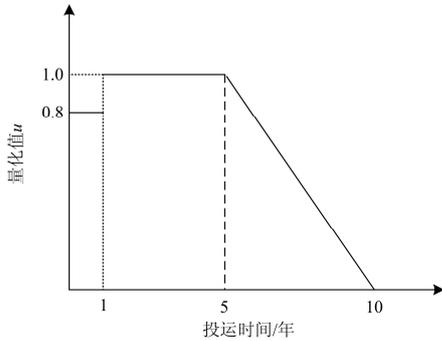


图4 运行时间的量化

Fig. 4 Quantization of the running time

评价体系中的其他指标，包括定检情况、装置缺陷情况、运行环境及家族性资料是定性、模糊指标，本文引入模糊理论对其进行量化分析。

2 模糊数据包络分析模型及其应用

2.1 模糊理论因素集、评判集及隶属度函数的确定

模糊理论(Fuzzy Logic)是 L.A.zadeh 教授提出的运用数学方法描述边界不清楚事物的理论^[13]。在继电保护装置状态评价体系中，具有模糊性的指标主要有定检情况、装置缺陷情况、运行环境以及家族性资料，相应的因素集即为上述4个指标，记作 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 。考虑专家意见以及电网继电保护运维人员的经验，本文将各评价因素状态分为良好、一般、注意、异常、严重异常5个等级，相应

的评判集记为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。

模糊理论量化的关键是确定各定性指标对于统一评判集的隶属度函数。工程中常用的隶属度函数分布主要有三角形、梯形、正态和岭形等。相比于其他函数，模糊正态隶属度函数可以较好地设设备状态特征信息和性能相关联，能有效、恰当地反应设备当前的运行状态^[5]，其表达式为

$$r(u) = e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中： $r(u)$ 为参量 u 的隶属度； μ 为分布期望值； σ 为高斯函数的宽度。根据高斯函数的特性，函数曲线下 99.73% 的可信度在 μ 的 3 个标准差 (3σ) 之内，通常采用 6σ 作为每个隶属度函数的定义域。为了方便进行分析计算，将因素集中的参量统一为越大越优型。其各类评语的隶属度曲线如图5所示。

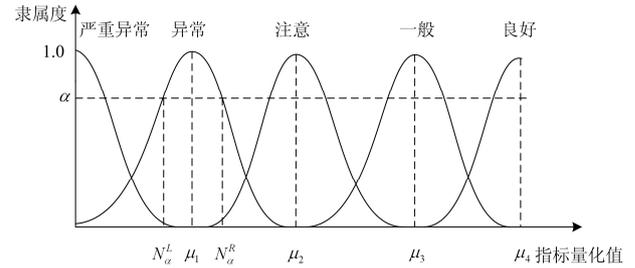


图5 模糊正态分布隶属度计算模型

Fig. 5 Model of membership in fuzzy normal distribution

以指标严重异常及注意隶属度函数为例，其计算模型如式(3)、式(4)所示。

$$r_{严重异常}(u) = \begin{cases} 0 & u \leq 0 \\ e^{-\frac{u^2}{2\sigma_0^2}} & 0 < u \leq \mu_1 \end{cases}, \quad \sigma_0 = \frac{\mu_1}{3} \quad (3)$$

$$r_{注意}(u) = \begin{cases} e^{-\frac{(\mu_2-u)^2}{2\sigma_{21}^2}} & \mu_1 < u \leq \mu_2, \quad \sigma_{21} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{3} \\ e^{-\frac{(u-\mu_2)^2}{2\sigma_{22}^2}} & \mu_2 < u \leq \mu_3, \quad \sigma_{22} = \frac{\mu_3 - \mu_2}{3} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 模糊数据包络分析模型

DEA 是运筹学的延伸领域，它将工程效率的概念推广到多输入、多输出系统的效率评价中，运用数学中的分形规划模型计算各决策单元(DMU)相对于生产前沿面(即由最小投入和最大产出为目标的 Pareto 最优解构成的面)的偏离程度评价相对效率，通过最优化的过程确定权重，在避免主观因素、简化算法、减少误差等方面具有很强的优越性。

DEA 理论中应用最为广泛的一个模型是由 Charnes、Cooper 和 Rhodes 于 1978 年提出的 CCR

模型^[14]。其假设有 n 个相互独立的决策单元 $DMU_j(j=1, 2, \dots, n)$ ，每个决策单元有 m 种投入 $\mathbf{x}_j=(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ 和 s 种产出 $\mathbf{y}_j=(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$ ，则第 $k(1 \leq k \leq n)$ 个决策单元的相对效率评价模型为

$$\begin{cases} \max & \frac{\mathbf{u}^T \mathbf{y}_k}{\mathbf{v}^T \mathbf{x}_k} = E_k \\ \text{s.t.} & \frac{\mathbf{u}^T \mathbf{y}_j}{\mathbf{v}^T \mathbf{x}_j} \leq 1, j=1, 2, \dots, n \\ & \mathbf{u} \geq 0, \mathbf{v} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ ， $\mathbf{u}=(u_1, u_2, \dots, u_s)^T$ 分别为输入和输出的权系数； E_k 为 DMU_k 的相对效率评价指标， $0 \leq E_k \leq 1$ 。模型(5)为分式规划问题，求解较为困难。令 $t = \frac{1}{\mathbf{v}^T \mathbf{x}_k}$ ， $\boldsymbol{\xi} = t\mathbf{v}$ ， $\boldsymbol{\mu} = t\mathbf{u}$ (Charnes-Cooper 变换)，将其转化为一个等价的线性规划模型^[7]：

$$\begin{cases} \max & \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{y}_k = E_k \\ \text{s.t.} & \boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{x}_j - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{y}_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \\ & \boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{x}_k = 1 \\ & \boldsymbol{\zeta} \geq 0, \boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

传统的 DEA 效率评价模型要求所有的输入和输出指标均为一个准确的数值，而继电保护状态评价体系中有很多模糊指标，难以精确描述；其次，运用 DEA 理论一般选择越小越好的指标作为输入指标，越大越好的指标作为输出指标，而本文在指标量化时，已将其统一为越大越优型；此外，传统的 DEA 评价模型中各指标的权重系数均以输入输出为基础，以各决策单元最有利的方向选取，结果可能造成某项评价指标权重过大或者过小，与实际情况不相符，也无法反映决策者的主观偏好，因此，需要对模型中各评价指标的权重进行约束。基于上述 3 个方面的考虑，参照文献[15]，建立仅有输出的带权重约束的模糊 DEA 评价模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^m \omega_i \tilde{y}_{ik} = E_k \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^m \omega_i \tilde{y}_{ij} \leq 1, j=1, 2, \dots, n \\ & \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\omega} \leq \mathbf{b} \\ & \omega_i \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\tilde{y}_{ij}(i=1, 2, \dots, s)$ 为模糊输出变量，即各指标量化值； $\boldsymbol{\omega}=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 为各评价指标权重系数变量； \mathbf{C} 为 $n \times m$ 维的系数矩阵(n 是权重约束条件的个数)； $\mathbf{b}=(b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ 为常数向量。

2.3 模糊 DEA 模型的求解方法

关于有效生产前沿与模糊决策单元的相对有效性评价问题，文献[16]已经进行了分析。模糊 DEA 模型的求解一般有模糊数排序准则和 α 截集的方法。相比于只能处理 L-R 型模糊数的排序准则法， α 截集充分考虑了模糊数在其支撑集范围内取不同置信水平因素，适用范围更广。本文运用 α 截集的方法对模型(7)进行求解。

假设某模糊评价指标的量化值对应的模糊数为 \tilde{N} ， $r_{\tilde{N}}(x)$ 为该指标在某模糊评语下的隶属度函数，则其 α 截集 $N_\alpha = \{x | x \in R, r_{\tilde{N}}(x) \geq \alpha\}$ 是实数域上的一个区间范围，记为 $N_\alpha = [N_\alpha^L, N_\alpha^R]$ ，其中 N_α^L ， N_α^R 分别代表区间的左右边界， $0 \leq \alpha \leq 1$ 。如图 4 所示，当 α 值增加时，模糊规划的可行域会减小；反之， α 值减小，则模糊规划的可行域会增加。

根据 DEA 评价的含义，在置信水平 α 给定的条件下，决策单元 k 的最大 DEA 效率评价价值必然对应于 $Y_{k\alpha}^R$ 和 $Y_{j\alpha}^L$ ，即取被评价决策单元 DMU_k 各指标的 α 截集区间上界，同时取其他决策单元 $j(j \neq k)$ 各指标 α 截集区间下界，其表达式为

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ik})_\alpha^R = (E_k)_\alpha^R \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ik})_\alpha^R \leq 1 \\ & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ij})_\alpha^L \leq 1, j=1, 2, \dots, n, j \neq k \\ & \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\omega} \leq \mathbf{b} \\ & \omega_i \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

模型(8)为 α 截集下决策单元 DMU_k 最乐观模糊 DEA 评价模型(O-FG)，其最优解记为 $(E_k)_\alpha^R$ 。

相应地，当被评价决策单元 DMU_k 和参考决策单元的各评价指标分别取 $Y_{k\alpha}^L$ 和 $Y_{j\alpha}^R$ 时，得到在给定的置信水平下 DMU_k 最悲观的模糊 DEA 模型(P-FG)及最小效率评价价值 $(E_k)_\alpha^L$ ，其表达式为

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ik})_\alpha^L = (E_k)_\alpha^L \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ik})_\alpha^L \leq 1 \\ & \sum_{i=1}^m \omega_i (y_{ij})_\alpha^R \leq 1, j=1, 2, \dots, n, j \neq k \\ & \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\omega} \leq \mathbf{b} \\ & \omega_i \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

模型(8)和(9)分别是原模糊 DEA 模型(7)在 α 截集下的极大值规划和极小值规划。在此基础上, 运用重心法求得不同置信水平下各决策单元的平均效率评价值 \bar{E}_k , 其表达式为

$$\bar{E}_k = \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i \left((E_k)_{\alpha_i}^L + (E_k)_{\alpha_i}^R \right)}{2 \cdot \sum_{i=1}^k \alpha_i} \quad (10)$$

式中, $\alpha_i = i/k$, k 为事先指定的取点数量。

2.4 模糊 DEA 模型在继电保护状态评价中的应用

运用模糊 DEA 理论对继电保护装置状态进行综合评价的具体步骤为:

1) 对在线监测信息、正确动作率及运行时间定量指标进行量化; 同时根据装置历史运行状况及定检等信息, 结合专家和运维人员的经验, 确定各定性指标(定检情况、装置缺陷情况、家族性资料以及装置运行环境)在评判集中的等级。

2) 初步确定各评价指标的权重, 并对其进行模糊化处理, 本文选用权重值上下浮动 20% 的区间信息作为各指标的权重约束条件。

3) 在对各继电保护装置进行状态评价时, 引入一个理想的运行状态良好的同类型保护装置, 该装置各项指标均为理想化的最大值。

4) 将各模糊评价 DMU 的各定性指标隶属度函数取 α 截集, 得到其模糊区间值, 并与已经量化好的定量指标一起输入模糊 DEA 评价模型(8)和(9), 分别得到在不同置信水平 α 下的 $(E_k)_{\alpha}^L$ 及 $(E_k)_{\alpha}^R$, 并画出各 DMU 评价效率随 α 的变化图像。

5) 通过公式(10)得出的平均有效性评价指数 \bar{E}_k 的大小确定各继电保护装置的运行状态。根据相关专家经验, 其状态评价标准如表 1 所示。

表 1 继电保护装置状态评价标准

\bar{E}_k	0.9~1.0	0.8~0.89	0.70~0.79	0.60~0.69	0.60 以下
评价结果	良好状态	一般状态	注意状态	异常状态	严重异常

3 算例分析

以某地区 220 kV 智能变电站运行中的 5 台线路保护装置(DMU₂、DMU₃、DMU₄、DMU₅、DMU₆, 其中, DMU₃ 和 DMU₄ 为同厂家、同批次、同型号装置)为例, 运用本文构建的模糊 DEA 评价模型对其运行状态进行评估。其中, DMU₁ 为理想化的运行状态良好的相同电压等级下的同类型保护装置。以下状态评价指标: 装置内部温度(y_1)、电源电压(y_2)、CPU 负荷率(y_3)、光模块光强(y_4)、正确动作

率(y_5)、装置运行时间(y_6)、定检情况(y_7)、装置缺陷情况(y_8)、家族性资料(y_9)以及装置运行环境(y_{10}), 量化后结果如表 2 所示。

表 2 各 DMU 指标量化结果

Table 2 Quantitative results of each DMU index

决策单元	评价指标									
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}
DMU ₁	1.00	1.00	1.00	1.00	100%	1	v_1	v_1	v_1	v_1
DMU ₂	1.00	0.93	0.90	0.95	100%	1	v_2	v_1	v_2	v_1
DMU ₃	0.88	0.90	0.85	0.78	100%	0.8	v_2	v_2	v_2	v_1
DMU ₄	0.80	0.85	0.78	0.75	100%	0.8	v_2	v_1	v_2	v_1
DMU ₅	0.73	0.75	0.80	0.70	90%	0.4	v_1	v_3	v_2	v_3
DMU ₆	0.68	0.70	0.60	0.68	75%	0.4	v_2	v_3	v_2	v_3

根据历史经验, 确定图 5 中的指标量化值 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 分别为 0.25、0.5、0.75、1。由专家 and 实际运维工作人员经验, 初步确定继电保护装置各状态评价指标权重分别为: $A = \{0.15 \ 0.12 \ 0.12 \ 0.20 \ 0.10 \ 0.05 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.05 \ 0.05\}$, 本文以该权重向量上下浮动 20% 作为模糊 DEA 模型各指标的权重约束条件, 如表 3 所示。

表 3 评价指标权重约束

Table 3 Weight constraint of evaluation indexes

指标集	权重约束	指标集	权重约束
y_1	[0.12, 0.18]	y_6	[0.04, 0.06]
y_2	[0.096, 0.144]	y_7	[0.064, 0.096]
y_3	[0.096, 0.144]	y_8	[0.064, 0.096]
y_4	[0.16, 0.24]	y_9	[0.04, 0.06]
y_5	[0.08, 0.12]	y_{10}	[0.04, 0.06]

将各 DMU 的指标量化值代入求解模型(8)和(9), 并在置信度 α 分别取 0~1.0 时, 得到其效率评价值及平均有效性评价结果 \bar{E}_k , 如表 4 所示。

在不同置信度水平下, 各 DMU 悲观和乐观模糊 DEA 效率评价结果分别如图 6(a)、图 6(b)所示。

根据各 DMU 平均效率评价值 \bar{E}_k , 参照表 1 得出待评价继电保护装置 DMU₂ 运行状态为“良好”, DMU₃ 和 DMU₄ 运行状态为“一般”, DMU₅ 运行状态为“注意”, DMU₆ 运行状态为“异常”。该状态评价结果可指导电网公司二次设备运维管理人员制定相应的差异化运维策略, 比如: 对于运行状态较差的继电保护装置 DMU₅, 需要对其过程层光回路及装置的光口模块进行重点检查, 以免由光模块故障造成装置停运; 对于继电保护装置 DMU₆, 需要对其 CPU 板件及光模块光强进行重点检查, 必要时可更换插件。

表 4 各 DMU 相对效率评价结果

Table 4 Relative efficiency evaluation results of DMUs

	DMU ₁	DMU ₂	DMU ₃	DMU ₄	DMU ₅	DMU ₆
0	[1,1]	[0.8937, 0.9757]	[0.8044, 0.9126]	[0.7842, 0.8837]	[0.6882, 0.7898]	[0.6090, 0.7332]
0.1	[1,1]	[0.9082, 0.9670]	[0.8190, 0.8950]	[0.8005, 0.8728]	[0.7050, 0.7781]	[0.6235, 0.7114]
0.2	[1,1]	[0.9145, 0.9639]	[0.8254, 0.8874]	[0.8083, 0.8681]	[0.7122, 0.7732]	[0.6298, 0.7036]
0.3	[1,1]	[0.9186, 0.9618]	[0.8300, 0.8824]	[0.8135, 0.8650]	[0.7170, 0.7699]	[0.6339, 0.6984]
0.4	[1,1]	[0.9222, 0.9600]	[0.8338, 0.8790]	[0.8179, 0.8623]	[0.7210, 0.7671]	[0.6375, 0.6940]
0.5	[1,1]	[0.9249, 0.9587]	[0.8368, 0.8764]	[0.8213, 0.8603]	[0.7242, 0.7650]	[0.6402, 0.6906]
0.6	[1,1]	[0.9282, 0.9570]	[0.8404, 0.8737]	[0.8254, 0.8578]	[0.7280, 0.7623]	[0.6435, 0.6864]
0.7	[1,1]	[0.9311, 0.9556]	[0.8436, 0.8714]	[0.8291, 0.8556]	[0.7314, 0.7600]	[0.6464, 0.6828]
0.8	[1,1]	[0.9340, 0.9541]	[0.8468, 0.8690]	[0.8327, 0.8534]	[0.7347, 0.7577]	[0.6500, 0.6792]
0.9	[1,1]	[0.9384, 0.9522]	[0.8509, 0.8660]	[0.8374, 0.8512]	[0.7390, 0.7548]	[0.6547, 0.6745]
1.0	[1,1]	[0.9483, 0.9483]	[0.8596, 0.8596]	[0.8473, 0.8473]	[0.7486, 0.7486]	[0.6646, 0.6646]
\bar{E}_k	1.0	0.9439	0.8578	0.8422	0.7459	0.6650

4 结论

对于新一代智能变电站的继电保护装置，其部分状态量已成为可观测指标，对其进行分析和量化可反映设备当前各主要功能部件的运行状况及劣化趋势，从而分析预测装置可能出现的故障。本文在此基础上，合理提取状态监测信息，并结合装置历史运行状况及其他因素，建立较为完善的继电保护状态评价体系。对于不能直接量化的定量指标，引入模糊理论中的评判集及模糊正态隶属度函数等概念进行量化。DEA 理论是以“相对效率”概念为基础对决策单元的相对有效性进行评价，传统的 DEA 评价模型不能处理模糊信息，且未能有效地反映决策者的主观偏好，本文对此进行了改进，建立带权重约束的仅有输出的模糊 DEA 综合评价模型，并运用 α 截集对该模型进行了求解，通过各 DMU 的平均效率评价值得到其运行状态评价结果。实例证明，该模型具有模糊信息处理及 DEA 理论的客观赋权、简化计算等优势，可较为准确地反映设备的实际运行状态，为状态检修工作提供参考依据。

参考文献

- [1] 彭志峰, 杨明玉. 基于变权理论的继电保护状态评价方法[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 92-96.
- [2] 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.
- [3] 侯艾军. 继电保护状态评价方法及其在检修决策中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [4] 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): 45-50.
- [5] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函

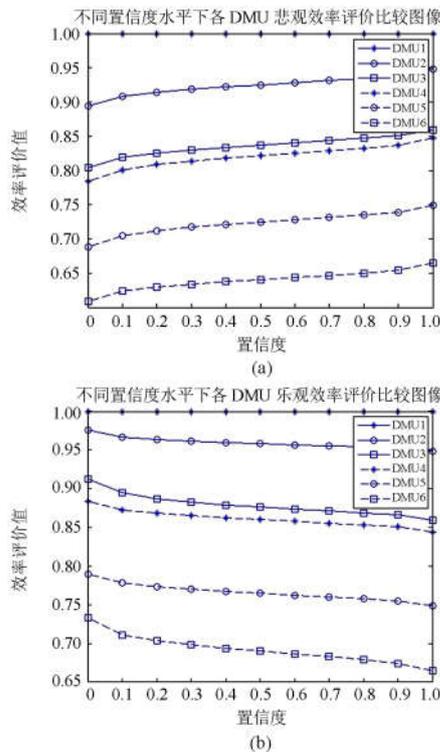


图 6 各 DMU 悲观和乐观模糊 DEA 效率评价结果
Fig. 6 Pessimistic and optimistic fuzzy DEA efficiency evaluation results of DMUs

- 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] 马占新, 任慧龙, 戴仰山. 基于模糊综合评判方法的 DEA 模型[J]. 模糊系统与数学, 2001, 15(3): 61-67.
- MA Zhanxin, REN Huilong, DAI Yangshan. DEA model based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2001, 15(3): 61-67.
- [7] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] LERTWORASIRIKUL S, FANG S C, JOINES J A, et al. Fuzzy data envelopment analysis (DEA): a possibility approach[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 139: 379-394.
- [9] 李志亮, 陈世权, 吴今培. 基于模糊数变换的 DEA 模型与应用[J]. 模糊系统与数学, 2004, 18(4): 64-71.
- LI Zhiliang, CHEN Shiquan, WU Jinpei. DEA model and its application based on fuzzy number transformation[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2004, 18(4): 64-71.
- [10] 马占新. 广义数据包络分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
- CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [12] 师元康, 姜振超, 安寸然. 智能变电站继电保护装置状态评估实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 119-125.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, AN Cunran. Research on practical state evaluation of protection device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 119-125.
- [13] 刘含香. 模糊数学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] CHARNES A, COPPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2: 429-444.
- [15] 刘英平, 高新陵, 沈祖诒. 基于模糊数据包络分析的产品设计方案评价研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(11): 2099-2104.
- LIU Yingping, GAO Xinling, SHEN Zuyi. Product design schemes evaluation based on fuzzy DEA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(11): 2099-2104.
- [16] 皇朝峰. 基于模糊 DEA 的高校办学效益评价方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- HUANG Chaofeng. Research on evaluation method of cost-effectiveness of IHEs based on fuzzy DEA[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-09-24

作者简介:

杨磊(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力二次设备成本评价、继电保护设备状态评价及风险评估等;

应黎明(1965—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 长期从事输变电设备状态评价、电力市场、变压器降噪研究及教学工作; E-mail: lmying@whu.edu.cn

王玉磊(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护可靠性及风险评估等。

(编辑 张爱琴)