

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190665

基于灰云证据推理规则的电力推进船舶电能质量在线评估

顾思宇, 施伟锋, 兰莹, 卓金宝, 张文保

(上海海事大学电气自动化系, 上海 201306)

摘要: 为评估和提高电力推进船舶电网的可靠性, 优化其运行策略, 提出了一种基于灰云聚类 and 证据推理相结合的电能质量在线评估方法。首先应用改进的群层次分析法与变权理论得到指标权重, 利用灰云聚类模型将评价指标转化成对应评估等级的基本信度分布。随后根据历史信息利用改进冲突度量方法衡量指标的可靠程度。最后通过证据推理规则对经可靠度和权重修正后的时域与空域指标进行信息融合, 从而得到系统实时的评估结果。仿真分析表明, 该方法能够准确地反映船舶电网实时的运行状态, 具有较强的抗干扰能力。

关键词: 电力推进船舶; 灰云聚类; 证据推理规则; 在线评估; 时空信息融合

Power quality online assessment of all-electric ship based on grey cloud evidential reasoning

GU Siyu, SHI Weifeng, LAN Ying, ZHUO Jinbao, ZHANG Wenbao

(Department of Electrical Automation, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To evaluate and improve the reliability of an electric propulsion ship power grid and optimize its operation strategy, this paper proposes an online power quality assessment method based on grey cloud clustering and evidence reasoning. First, an improved group analytic hierarchy process and variable weight theory are used to obtain the index weights. The grey cloud clustering model is used to transform the evaluation indices into the basic reliability distribution of the corresponding evaluation level. Then, based on historical information, an improved conflict measurement method is used to measure the reliability of the indices. Finally, through evidence reasoning rules, information of the time domain and the airspace corrected by reliability and weight are combined to obtain real-time evaluation results of the system. The simulation analysis shows that the method can accurately reflect the real-time operating state of the ship's power grid and has strong anti-interference ability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61503240) and Innovation Foundation for Graduates of Shanghai Maritime University (No. 2016ycx078).

Key words: electric propulsion ship; grey cloud clustering; evidential reasoning rule; online evaluation; temporal-spatial information fusion

0 引言

随着综合电力系统在船舶上的广泛应用, 大量高功率密度电力电子变换器与多样化的电气负载接入到船舶电网中, 特别是复杂工况下的电力推进子系统, 使得船舶电力系统电能质量更加难以保证。电能质量的恶化会直接影响电网的稳定性, 进而威胁到船舶的稳定运行^[1]。因此, 及时、全面、准确地监测和评估船舶电力系统的电能质量状态, 对于

及时采取应对措施、优化运行策略进而提升系统可靠性具有重要意义。

目前, 对于电能质量的评估已有较多的研究。文献[2]借助随机森林处理分类问题准确性高的特点, 建立了用于电能评估的随机森林模型, 有效地减小了评估过程中人为因素的影响。文献[3]提出了改进 TOPSIS-RSR 法, 利用 RSR 对改进理想解法的评价结果进一步分档处理, 提高对各观测点之间的区别程度。文献[4]利用灰色关联对 TOPSIS 法加以改进, 充分体现了评估过程中模糊的特点。此外, 部分文献通过雷达图^[5]、D-S 证据理论^[6-7]、灰色聚类^[8]、粗糙集^[9]等方法对电能质量进行评估。上述

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61503240); 上海海事大学研究生创新基金项目资助(2016ycx078)

方法主要利用某节点某时域内指标的采样值进行电能质量评估,但考虑到海上复杂的气象环境,船舶通常需要在不同运行工况之间动态切换,从而导致电网电能质量的不确定性和相关性更加显著;加之机舱运行环境恶劣,噪声将对电能传感器产生干扰,进而影响整体评估结果。因此,对于船舶电能质量评估需要进一步考虑实时性、不确定性与抗干扰性。证据推理规则在处理概率不确定和模糊不确定性方面具有较大的优势,它明确地区分了证据可靠性和重要性的概念,并在动态系统评估中有着广泛的应用^[10];灰云模型在处理刻画决策信息的不完全性和随机性问题有较强的能力,被广泛用于数据挖掘、变压器状态评估等领域^[11]。

鉴于此,本文提出了一种基于灰云聚类和证据推理相结合的电能质量在线评估方法。首先应用改进的群层次分析法与变权理论得到指标权重,利用灰云聚类模型将评价指标转化成对应评估等级的基本信度分布,随后根据历史信息利用改进冲突度量方法衡量指标的可靠程度,最后通过证据推理规则对经可靠度和权重修正后的时域与空域指标进行信息融合,从而得到系统实时的评估结果。仿真分析表明,该方法能够准确地反映船舶电网实时的运行状态,具有较强的抗干扰能力。

1 证据推理规则基本理论

证据推理规则是对 D-S 证据理论、证据推理方法的进一步发展与延伸,是更具有一般性的以概率推理为基础的证据合成方法^[12]。如果将多指标评估问题中各评价指标认为是证据 e_i ($i=1,2,\dots,L$) 并通过一系列评价等级来进行评价,那么这些评价等级构成了证据理论中的辨识框架,即 $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_N\}$, 证据 e_i 的信度分布可表达为

$$e_i = \{(\theta, p_{\theta,i}), \forall \theta \subseteq \Theta, \sum p_{\theta,i} = 1\} \quad (1)$$

式中, $(\theta, p_{\theta,i})$ 为证据 e_i 被评为等级为 θ 的置信度。若 $p_{\theta,i} > 0$, 则称 $(\theta, p_{\theta,i})$ 为该证据的焦点。

当已知证据 e_i 的重要性权重 w_i ($0 \leq w_i \leq 1$) 和可靠性因子 r_i ($0 \leq r_i \leq 1$), 其加权信度分布可表示为

$$m_i = \left\{ (\theta, m_{\theta,i}), \forall \theta \subseteq \Theta; (P(\Theta), m_{P(\Theta),i}) \right\} \\ m_{\theta,i} = \begin{cases} 0, \theta = \emptyset \\ c_{r,w,i} w_i p_{\theta,i}, \theta \subseteq \Theta, \theta \neq \emptyset \\ c_{r,w,i} (1-r_i), \theta = P(\Theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $m_{\theta,i}$ 为考虑证据 e_i 可靠性与权重对等级 θ 的支持程度; 为保证 $\sum_{\theta \subseteq \Theta} m_{\theta,i} + m_{P(\Theta),i} = 1$ 成立, 采用

$c_{r,w,i} = 1 / (1 + w_i - r_i)$ 为归一化因子。

当有 L 条独立证据由以上加权信度表示, 那么前 i 条证据的加权信度分布的正交合成结果为

$$\begin{cases} m_{\theta,e(i)} = [m_1 \oplus \dots \oplus m_i](\theta) = \\ \begin{cases} 0, \theta = \emptyset \\ \frac{\hat{m}_{\theta,e(i)}}{\sum_{D \subseteq \Theta} \hat{m}_{D,e(i)} + \hat{m}_{P(\Theta),e(i)}}, \theta \neq \emptyset \end{cases} \\ \hat{m}_{\theta,e(i)} = [(1-r_i)m_{\theta,e(i-1)} + m_{P(\Theta),e(i-1)}m_{\theta,i}] + \\ \sum_{B \cap C = \theta} m_{B,e(i-1)}m_{C,i} \\ \hat{m}_{P(\Theta),e(i)} = (1-r_i)m_{P(\Theta),e(i-1)} \end{cases} \quad (3)$$

合成 L 条证据后对等级 θ 的支持信度可以表达为

$$p_{\theta} = p_{\theta,e(L)} = \begin{cases} 0, \theta = \emptyset \\ \frac{\hat{m}_{\theta,e(L)}}{\sum_{B \subseteq \Theta} \hat{m}_{B,e(L)}} \theta \subseteq \Theta, \theta \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

2 船舶电能质量在线评估模型

2.1 评估指标体系建立

船舶电力系统与陆上电力系统相比, 是一种自主, 灵活的低容量电力系统^[13]。在动态条件下, 电源电压的均方根值和频率的偏差与其标称值相比总是达到较高值。由于船舶电力系统的负载数量和功率不断增加, 不仅给船舶电网带来了大量的谐波, 而且电压波动、瞬态现象和电网三相不平衡也变得越来越严重。由于船舶电力系统的特殊性, 一些大功率负荷(如推进电机)的功率与船舶电力系统的容量相当, 因此大容量负荷的切入需要多台发电机组的并联运行, 进而产生发电机组之间功率分配的问题。此外, 大容量电力电子设备和系统的应用也导致了电能质量的恶化。

综合以上分析并结合中国、美国船级社和波兰船级社电能质量相关标准^[14-15], 本文将电能质量评价因素分为电压质量、频率质量、电流质量和功率质量这四大类别, 选取在线监测数据作为评估指标, 建立相应船舶电能质量指标体系, 如表 1 所示。

为了消除由电能质量指标数据量纲不一致对评估结果的影响, 引入相对劣化度以表征电能指标当前实测值与标准限值相比的相对劣化程度。

$$g(x) = \begin{cases} 0, x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1, x > x_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $g(x)$ 为相对劣化度; x 为实测值; x_{\max} 和 x_{\min} 分别为表 1 中对应的标准限值。

表 1 电能质量指标体系及其标准限值

Table 1 Power quality assessment system and its standard limits

目标层	因素层	指标层	限值/%
船舶 电能 质量	电压质量 x_1	电压偏差 x_{11}	+6, -10
		三相不平衡 x_{12}	3
		电压谐波 x_{13}	10
		电压波动 x_{14}	±20
	频率质量 x_2	频率偏差 x_{21}	±5
		频率波动 x_{22}	±10
	电流质量 x_3	电流谐波 x_{31}	10
		有功功率分配系数 x_{41}	±15
	功率质量 x_4	无功功率分配系数 x_{42}	±10

2.2 指标权重获取

为了更好地反映船舶电网的运行状态, 评估过程中权重的确定至关重要。将改进的群 AHP 法与变权理论相结合, 既避免了单一专家决策的片面性, 又体现了评价指标在综合评价中的主动参与。

2.2.1 基于改进群 AHP 法的常权求取

改进群 AHP 法是将改进 AHP 法^[16]与群体决策相结合来确定权重。该方法引入最优传递矩阵, 避免了对各专家判断矩阵进行一致性检验, 增加了评估效率; 借鉴相对贴适度思想, 对多位专家的主观判断进行集结, 使评估结果更加全面。具体步骤如下所述。

1) 根据建立的层次结构, 各专家通过比较同一层次各个指标的相对重要性得出比较矩阵 $A_k = (a_{ij})$ 。其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{指标 } i \text{ 优于指标 } j \\ 0, & \text{指标 } i \text{ 洞等于指标 } j \\ 1, & \text{指标 } i \text{ 劣于指标 } j \end{cases} \quad (6)$$

2) 计算重要性排列指数 r_i , 并构造判断矩阵 B 。

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{(r_i - r_j)(r_{\max}/r_{\min} - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1, & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{(r_i - r_j)(r_{\max}/r_{\min} - 1)}{r_{\max} - r_{\min}} + 1 \right]^{-1}, & r_i < r_j \end{cases} \quad (7)$$

式中: 排列指数 $r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$; r_{\max} 与 r_{\min} 分别为 r_i 的最大最小值。

3) 通过判断矩阵 B 对最优传递矩阵 C 进行求解。

$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\lg \frac{b_{ik}}{b_{jk}} \right) \quad (8)$$

4) 结合求取对应于拟优一致矩阵 D 的最大特征值的特征向量, 并归一化, 得到不同指标的权重。

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_{ij}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_{ij}}, d_{ij} = 10^{c_{ij}} \quad (9)$$

5) 对各专家的指标权重进行集结, 通过对每位专家给出的指标权重的相似性 d_{ij} 来对专家的重要性进行判断。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{s=1}^n (w_{is} - w_{js})^2} \quad (10)$$

式中: w_{is} 与 w_{js} 分别为专家 i 与专家 j 通过改进 AHP 法得出的指标权重。

6) 计算专家 i 与其他专家的相对相似程度 c_i 。

$$c_i = \frac{d_i^0}{d_i^0 + d_i^*} \quad (11)$$

式中: d_i^0 与 d_i^* 分别为专家 i 与其余专家之间最高与最低相似度。

7) 集合各专家的主观指标权重 ω^0 。

$$\omega^0 = (w_1, w_2, \dots, w_m) \times v^T \quad (12)$$

式中: w_m 为第 m 个专家的主观权重; v^T 为各专家相似度归一化值。

2.2.2 基于变权理论的常权修正

船舶复杂的运行工况势必会导致各评价指标的劣化度随着运行状态的变化而发生改变。鉴于此, 本文在常权确定的基础上引入变权理论^[17]对各层评判指标权重进行动态修正。

对于指标层中的评估指标, 其变权值可表示为

$$W_{ij} = \omega_{ij}^0 S_{ij}(x_{ij}) / \sum_{j=1}^m \omega_{ij}^0 S_{ij}(x_{ij}) \quad (13)$$

对于因素层中的评估指标, 其变权值可表达为

$$W_i = \omega_i^0 \max_{1 < j < m} (S_{ij}(x_{ij})) / \sum_{i=1}^n \omega_i^0 \max_{1 < j < m} (S_{ij}(x_{ij})) \quad (14)$$

式中: $S_{ij}(x_{ij})$ 为第 i 个因素第 j 个指标的状态变权函数; ω_i^0 为第 i 个因素的常权。对于电能质量评估而言, 当某一电能质量指标劣化度很高时, 即使其原始权重较小也会显著降低总体效能, 需要对其进行惩罚; 动态变权不能完全脱离常权限制, 惩罚强度要与常权大小对应。基于以上两个原则, 本文参考文献[17]构造惩罚型状态变权函数。

$$S_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} e^{\omega_{ij}^0 \alpha (x_{ij} - \beta)}, & x_{ij} > \beta \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: x_{ij} 与 ω_{ij}^0 分别为第 i 个因素第 j 个指标的标准值与常权; β 为变权起始点; α 为惩罚强度。

2.3 基本信度分布获取

基本信度分布函数的构建是利用证据推理规则进行信息融合的关键。由于船舶复杂的运行工况，电能质量指标数据包含了很大的不确定性与模糊性。传统的灰色聚类仅考虑了信息的不完全性，忽略了模糊性和随机性^[18]。为此，本文将云模型理论引入白化权函数构造过程中，充分发挥云模型在处理随机性、模糊性方面的优势，提高整体评估的可信度。

2.3.1 灰云模型参数设置

设 U 是一个论域，则白化权函数在论域上的分布称为白化权灰云，简称灰云。灰云的数字特征可表示为 $(Ex, C_{\min}, C_{\max}, En, He)$ ^[19]。其中：期望 Ex 表示灰云的重心，即隶属度为 1 的点； C_{\min} 和 C_{\max} 分别为灰云的左右边界；熵 En 表示灰云边界的模糊程度的大小；超熵 He 表示灰云边界的随机程度大小。对应的数学关系表示如下：

$$\begin{cases} Ex = (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ En = (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ He = 0.01 \end{cases} \quad (16)$$

2.3.2 等级灰云白化权函数构建

参考已有的研究成果将电能质量评价等级由高至低分为优秀、良好、注意、合格与警告共 5 个等级，各评价指标所对应的等级区间如表 2 所示。

表 2 电能质量评估指标等级区间

Table 2 Power quality assessment index level interval				
θ_1 (优秀)	θ_2 (良好)	θ_3 (注意)	θ_4 (合格)	θ_5 (警告)
[0.0.33]	[0.17.0.5]	[0.33.0.67]	[0.5.0.83]	[0.67.1]

根据表 2 中关于电能质量评估指标等级定义，给出如下对应等级的灰云白化权函数。若第 i 个因素第 j 个指标隶属于等级 θ_1 ，相应的灰云白化权函数可以表达为

$$f_{ij}^n(x_{ij}) = \begin{cases} e^{-\frac{(x_{ij}-Ex)^2}{2(En)^2}}, x_{ij} \in [C_{\min}, Ex], n=1 \\ 1, x_{ij} \in [Ex, C_{\max}] \\ 0, x_{ij} \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases} \quad (17)$$

若隶属于等级 θ_2 、 θ_3 或 θ_4 ，相应的灰云白化权函数可以表达为

$$f_{ij}^n(x_{ij}) = \begin{cases} e^{-\frac{(x_{ij}-Ex)^2}{2(En)^2}}, x_{ij} \in [C_{\min}, C_{\max}], n=1,2,3 \\ 1, x_{ij} \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases} \quad (18)$$

若隶属于等级 θ_5 ，相应的灰云白化权函数可以表达为

$$f_{ij}^n(x_{ij}) = \begin{cases} 1, x_{ij} \in [C_{\min}, Ex] \\ e^{-\frac{(x_{ij}-Ex)^2}{2(En)^2}}, x_{ij} \in [Ex, C_{\max}], n=5 \\ 0, x_{ij} \notin [C_{\min}, C_{\max}] \end{cases} \quad (19)$$

式中： x_{ij} 为第 i 个因素第 j 个指标的标准化值； En 为以 En 为期望， He 为标准差的随机数。基于云模型的白化权函数如图 1 所示。

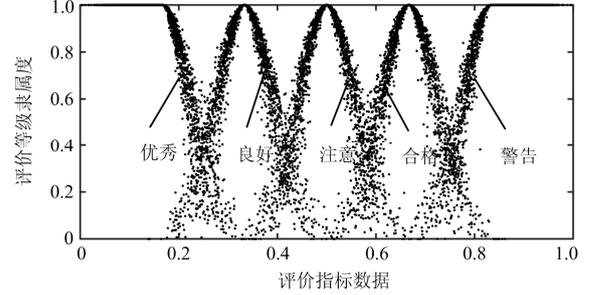


图 1 不同等级灰云白化权函数分布

Fig. 1 Distribution of normal grey cloud whitening-weight functions in different grades

2.3.3 基本信度分布求取

将评价指标数据代入所构造的灰云模型即可求得指标数据对各个等级的聚类系数(即云滴)。由于灰云模型的随机性，每次计算所产生的灰色云滴会集中在一定的范围里，因此需要对产生的所有云滴进行平均处理并归一化。

$$\begin{aligned} f_{ij}^n(x) &= (f_{ij1}^n(x) + f_{ij2}^n(x) + \dots + f_{ijq}^n(x)) / q \\ f_{ij}^n(x) &= f_{ij}^n(x) / \sum_{n=1}^5 f_{ij}^n(x) \end{aligned} \quad (20)$$

式中： $f_{ij}^n(x)$ 和 $f_{ij}^n(x)$ 分别为平均和归一化灰云聚类系数； $f_{ijq}^n(x)$ 表示第 q 次计算的灰云聚类系数，为保证运算效率，本文取 $q=500$ 。

结合各因素的指标权重，所得的最终聚类系数可作为评价因素的基本信度分布 $p_i(\theta_n)$ ，即证据理论中的一组证据。

$$p_i(\theta_n) = \sum_{j=1}^m f_{ij}^n(x_{ij}) \cdot W(x_{ij}) \quad (21)$$

式中， $W(x_{ij})$ 为第 i 个因素第 j 个指标的变权权重。

2.4 指标可靠性获取

为了有效衡量评价指标的受干扰程度，可利用证据间的冲突度加以度量，其中基于 Einstein 算子改进冲突度量方法相较于传统方法在表征证据之间的冲突程度上更加全面^[20]。

2.4.1 基于 Einstein 算子改进冲突度量方法

证据冲突主要来自于不同证据间焦元没有交集

与相同焦元的差异, 因此可利用证据之间向量差的绝对值累加构成两个证据之间的差异性程度。对于焦元 $\theta_n (1 \leq n \leq N)$, 其差异信息行向量 M_n 表示为

$$M_n = [-m_1(\theta_n)m_2(\theta_1), \dots, |m_1(\theta_n) - m_2(\theta_n)|, \dots, -m_1(\theta_n)m_2(\theta_N)] \quad (22)$$

利用 Jousselme 距离中的矩阵 D , 行向量 D_n 定义为

$$D_n = \left[\frac{\theta_1 \cap \theta_n}{\theta_1 \cup \theta_n}, \dots, 1, \dots, \frac{\theta_N \cap \theta_n}{\theta_N \cup \theta_n} \right] \quad (23)$$

通过构造差异度矩阵 MN , 证据之间的差异因子 df 可以表示为

$$df = \log_3(a - 2 + MN) \quad (24)$$

式中, $MN = \sum_{n=1}^N M_n D_n^T$ 。

单独采用差异因子 df 并不能有效地表征证据之间的冲突。因此, 还要从整体上考虑证据之间的相似性。利用模糊理论中的最大最小法则, 证据之间的相关系数 cp 可以定义为

$$cp(m_1, m_2) = \begin{cases} 0, (\theta_n)_{\max}^{m_1} \cap (\theta_n)_{\max}^{m_2} \neq \varphi \\ \frac{\sum_{n=1}^N \min(m_1(\theta_n), m_2(\theta_n))}{\sum_{n=1}^N \max(m_1(\theta_n), m_2(\theta_n))}, \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

利用 Einstein 算子, 冲突因子 cf 可以表示为

$$cf(m_1, m_2) = \frac{df(m_1, m_2) + cp(m_1, m_2)}{1 + df(m_1, m_2)cp(m_1, m_2)} \quad (26)$$

式中: m_1 和 m_2 是辨识框架上的两个基本信度函数。

2.4.2 指标可靠性计算

对于第 k 时刻的输入证据, 当受到噪声干扰时, 其信度分布会有突然的变化, 势必会与前 n 个时刻的证据有较大的冲突, 造成平均冲突值的增大。据此, 可将平均冲突值来表征第 k 时刻指标的可靠性。

$$R_i(k) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{n} \sum_{k'=k-n}^{k-1} cf(m_i^{k'}, m_i^{k'}) & R_i(k) < b \\ 1, \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

式中: m_i^k 为第 i 个因素第 k 时刻的基本信度分布; 为了兼顾灵敏度与可靠性, 取 $b = 0.25$ 。

2.5 基于证据推理规则的时空信息融合模型

对于电能质量在线评估而言, 某时刻的评估结果不仅取决于该时刻系统的所有输入信息, 也与上一时刻的评估结果密切相关。因此, 根据时空信息递归分布无反馈融合模型^[21], 综合考虑因素层指标的可靠性与权重, 利用证据推理规则对各因素及各时刻的基本信度分布(证据)进行融合, 如图 2 所示。该模型主要分为两个阶段的融合过程。

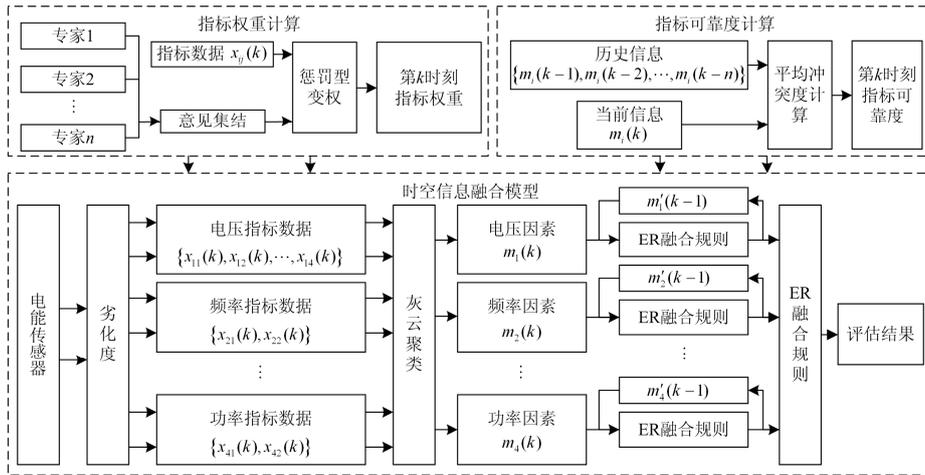


图 2 在线电能质量评估模型结构

Fig. 2 Structure of the online power quality assessment model

首先, 确定当前信息与历史信息的时间权重 $\omega'_i(k)$ 与 $\omega'_i(k-1)$, 根据 2.4 节计算的指标可靠性因子 $R_i(k)$ 和 $R_i(k-1)$ 利用证据推理规则对各因素层指标信息进行时域融合。

$$m'_i(k) = m_i(k) \oplus m'_i(k-1), i=1, 2, 3, 4 \quad (28)$$

式中: $m'_i(k)$ 与 $m'_i(k-1)$ 分别为第 k 与第 $k-1$ 时刻第 i 个因素的累积加权信度分布; $m_i(k)$ 为第 k 时刻第 i 个因素的加权信度分布。

然后, 取平均可靠因子 $R'_i(k) = \frac{1}{k} \sum_{k'=1}^k R_i(k')$, 根

据 2.2 节计算出的指标权重利用证据推理规则对因素层指标累积时域信息进行空域融合。

$$m(k) = m'_1(k) \oplus \dots \oplus m'_4(k) \quad (29)$$

式中, $m(k)$ 为第 k 时刻总体因素的加权信度分布。

最后, 利用式(4)将 $m(k)$ 转化为基本信度分布, 此时的电网运行状态可以描述为

$$S(k) = \{(\theta_n, p_n), n = 1, 2, \dots, 5\} \quad (30)$$

式中, p_n 表示评价个体被评为等级为 θ_n 的置信度。

为了获得与分配的评估等级等价的数值评估结果, 电网运行状态 $S(k)$ 的期望效用定义为

$$u(S(k)) = \sum_{n=1}^5 p_{\theta_n} u(\theta_n) \quad (31)$$

式中: $u(\theta_n)$ 为等级为 θ_n 的期望效用值, 根据上文中确定的等级, 本文取 $u(\theta_n) = 25 \cdot (5 - n), n = 1, 2, \dots, 5$ 。

3 算例分析

为了验证本文评估方法的有效性, 对某全电船 Simulink 仿真模型进行在线电能质量评估。其中: 发电单元由 30 MVA/4.16 kV/60 Hz 燃气轮发电机组与 5 MVA/4.16 kV/60 Hz 柴油发电机组构成; 电气负载包含了 11.5 MVA 基本负载与 6 MVA 日常负载; 推进单元由 20 MVA 主推进器与 1 MVA 侧推器组成。根据建立的评估体系, 对船舶某一典型运行工况以 0.1 s 采样率共采集到 400 组数据, 经式(1)归一化后的采集数据如图 3 所示。其中: 第 1~10 s 为主推进器加速阶段; 第 10 s 全速前进; 第 20~30 s 为主推进器减速阶段; 第 30 s 启动侧推器; 为验证

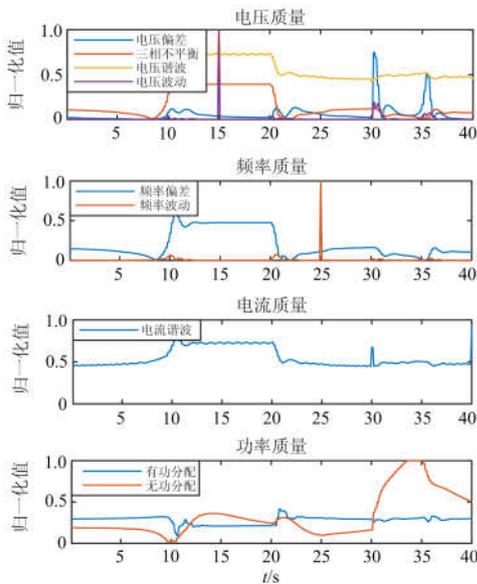


图 3 电能质量指标归一化曲线

Fig. 3 Power quality index normalized curve

本方法的鲁棒性, 在第 15 s 和 25 s 设定了相应的干扰信号。

根据 2.2 节所提出的改进群 AHP 法, 整合专家意见, 并根据实际运行情况进行变权处理。各层次常权如表 3 所示。以功率质量为例, 各指标的变权如图 4 所示。与初始常权相比, 动态修正后的权重可以较为贴切地反映出电网实际的运行状况, 提高了较差指标在综合评价中的影响。

表 3 各层指标常权值

Table 3 Index weight value of each layer

因素层	指标层	常权值
电压质量 x_1	电压偏差 x_{11}	0.462 3
	三相不平衡 x_{12}	0.113 5
	电压谐波 x_{13}	0.152 7
	电压波动 x_{14}	0.271 5
频率质量 x_2	频率偏差 x_{21}	0.750 0
	频率波动 x_{22}	0.250 0
电流质量 x_3	电流谐波 x_{31}	1
功率质量 x_4	有功分配 x_{41}	0.551 6
	无功分配 x_{42}	0.448 4

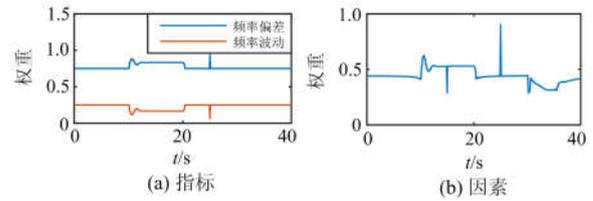


图 4 频率指标权重

Fig. 4 Frequency index weight

根据 2.4 节所提出的指标可靠度计算方法, 取历史信息时间长度 $n = 5$, 得出各因素的可靠程度。其中功率因素的动态可靠度与平均可靠度如图 5 所示。

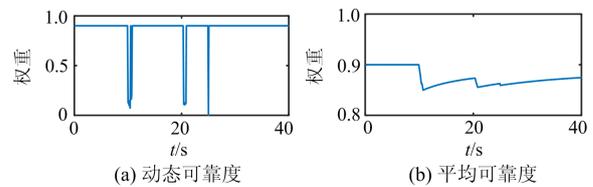


图 5 频率因素可靠度

Fig. 5 Frequency factor reliability

根据 2.3 节所提出的灰云聚类方法, 结合指标权重, 形成各评价因素的证据, 经期望效用转换的评价结果如图 6(a) 所示。

假定当前信息与历史信息的时间权重同等重要, 即 $\omega'_i(k) = \omega'_i(k-1) = 1/2$, 结合实时指标可靠度, 应用 ER 融合规则进行融合。融合得到各因素时域融合信息评估结果如图 6(b) 所示。由于考虑了历史信息与指标的可靠度, 与初始评估结果相比, 评估结

果更加平稳且有效地减小了干扰数据对其的影响。

计算指标的平均可靠度, 结合指标权重, 应用ER融合规则分别融合每个时刻多个因素的时域融合信息, 即可获得电网运行状态的评价结果。为了对比本方法的准确度与抗干扰性能, 这里引入不考虑证据可靠度的D-S证据理论方法^[22], 经期望效用转换的评价结果如图7所示。

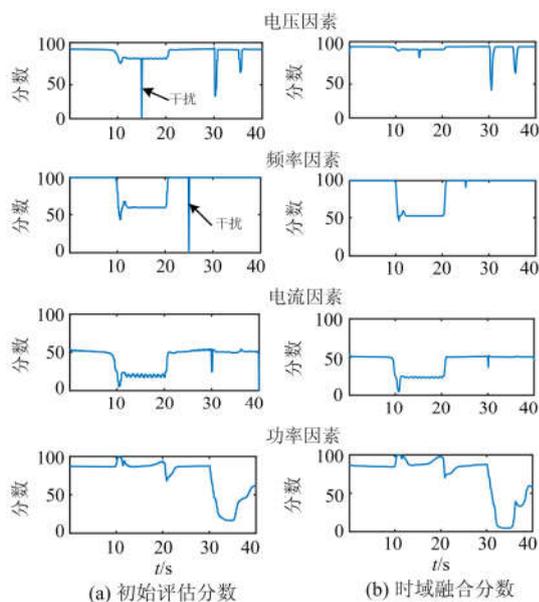


图6 各因素评估结果

Fig. 6 Evaluation of each factor

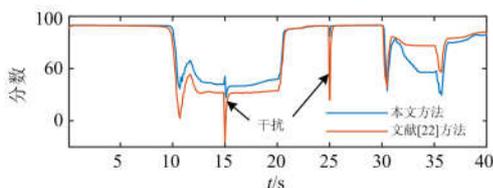


图7 电能质量评估结果

Fig. 7 Power quality assessment results

由图7可知: 随着推进电机加速运行, 两种方法的评估结果在10~20s出现了较大幅度的衰减, 这是由于大功率推进电机的驱动系统在全负荷运行时会产生很大的电压电流谐波, 进而对整体电能质量产生影响^[23](如图3所示)。而后, 在第30s与第36s左右评估结果又分别出现两次衰减并伴随着一定程度的下降趋势, 这是由于侧推电机在启动与停止时会对电网造成了很大的冲击^[23]; 基于异步电机的特性, 产生的较大无功功率会对电网的无功分配产生一定影响。在对应第15s与第25s的数据扰动时, 对比两种方法的评估结果, 本文提出的考虑指标可靠度的时空信息融合方法能更好地抑制干扰数据对评估结果的影响, 特别是第25s时与不考虑证

据可靠度的传统证据推理方法的评估结果比较更为明显, 其差值达到了30%以上。错误的评估结果可能会影响机组人员的错误判断进而产生无法挽回的后果。综上所述, 本文所提出的综合评估方法能够有效反映船舶电网的实际运行状态并具有良好的鲁棒性, 可以减少实际中扰动对评估结果的影响。

4 结论

本文根据实际电力推进船舶电网的运行特点, 提出了一种基于灰云聚类和证据推理相结合的电能质量在线评估方法。该方法的优势在于不仅充分考虑了等级划分的模糊性, 而且考虑了指标信息的动态重要性与可靠性, 并充分利用了证据推理对不确定信息处理的能力对船舶电能质量进行在线评估。通过对某舰船的电能质量仿真数据进行测试, 结果表明本文所提出的方法能够实时反映船舶电网的运行状态, 且抗干扰能力强、评估结果可靠, 可为进一步提升船舶电网可靠性提供参考。

参考文献

- [1] 王琦, 宋晓东, 邢剑, 等. 舰船电力系统中智能电网技术的应用浅析[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(2): 72-74, 96. WANG Qi, SONG Xiaodong, XING Jian, et al. Application of smart grid technology in ship power system[J]. Chinese Ship Research, 2012, 7(2): 72-74, 96.
- [2] 李树卿, 陈鼎, 仇群辉, 等. 基于随机森林的电能质量综合评估[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 81-87. LI Shuqing, CHEN Ding, QIU Qunhui, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on random forest[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 81-87.
- [3] 邱玉婷, 李济沅, 邓旭, 等. 基于改进TOPSIS-RSR法的电能质量综合评价[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 44-50. QIU Yuting, LI Jiyuan, DENG Xu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on improved TOPSIS-RSR method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 44-50.
- [4] 李杰. 基于合作博弈和改进TOPSIS的电能质量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 109-115. LI Jie. Research on power quality assessment method based on cooperative game and improved TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 109-115.
- [5] 刘蓉晖, 王毅超. 基于改进雷达图法与高斯隶属度相结合的电能质量综合等级评估[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 69-74. LIU Ronghui, WANG Yichao. Comprehensive quality assessment of power quality based on improved radar chart method and gaussian membership degree[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 69-74.

- [6] 邓焱, 徐栋杰, 刘文泽. 基于支持概率距离的电能质量综合评估方法[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 63-69.
DENG Wei, XU Dongjie, LIU WENZE. A comprehensive evaluation method of power quality based on supporting probability distance[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(9): 63-69.
- [7] 黄沁悦, 周福林, 刘双玲, 等. 基于区间灰色证据组合模型的电能质量评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 8-15.
HUANG Qinyue, ZHOU Fulin, LIU Shuangling, et al. A power quality assessment method based on interval grey evidence combination model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 8-15.
- [8] SACASQUI M, LUYO J, DELGADO A. A unified index for power quality assessment in distributed generation systems using grey clustering and entropy weight[C] // 2018 IEEE ANDESCON, August 22-24, 2018, Santiago de Cali, Colombia: 1-4.
- [9] 蒋亚坤, 李文云, 赵莹, 等. 粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 1-7.
JIANG Yakun, LI Wenyun, ZHAO Ying, et al. Comprehensive evaluation of quality performance of power grid operation based on rough set and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 1-7.
- [10] 赵福均, 周志杰, 胡昌华, 等. 基于证据推理的动态系统安全性在线评估方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1950-1961.
ZHAO Fujun, ZHOU Zhijie, HU Changhua, et al. On-line evaluation method of dynamic system security based on evidence reasoning[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(11): 1950-1961.
- [11] 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 evaluation method for secondary equipment of intelligent substation based on grey theory and cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 105-111.
- [12] YANG Jianbo, XU Dongling. Evidential reasoning rule for evidence combination[J]. Artificial Intelligence, 2013, 205: 1-29.
- [13] MINDYKOWSKI J. Power quality on ships: today and tomorrow's challenges[C] // 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), October 16-18, 2014, Iasi, Romania: 1-18.
- [14] American Bureau of Shipping. Rules for building and classing, steel vessels[S]. ABS, 2008.
- [15] Polish register of shipping technical requirements for shipboard power electronic systems[S]. 2006.
- [16] SI Xiulin, LI Dawei. An improvement analytic hierarchy process and its application in teacher evaluation[C] // 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, June 15-16, 2014, Hunan, China: 169-172.
- [17] 张壮, 李琳琳, 魏振华, 等. 基于变权-投影灰靶的指控系统动态效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 801-809.
ZHANG Zhuang, LI Linlin, WEI Zhenhua, et al. Dynamic effectiveness evaluation of accusation system based on variable weight-projection grey target[J]. System Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 801-809.
- [18] 杨哲, 杨侃, 刘朗, 等. 组合赋权模糊熵-灰云聚类二维河流健康评价[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(5): 90-94.
YANG Zhe, YANG Kan, LIU Lang, et al. Combined weighted fuzzy entropy-gray cloud clustering two-dimensional river health assessment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 46(5): 90-94.
- [19] 蔡红梅, 陈剑勇, 苏浩益. 基于灰云模型的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 151-155.
CAI Hongmei, CHEN Jianyong, SU Haoyi. Fault diagnosis of power transformer based on grey cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 151-155.
- [20] 李军伟, 刘先省, 胡振涛. 基于 Einstein 算子的证据冲突度量方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2659-2664.
LI Junwei, LIU Xiansheng, HU Zhenhao. Evidence conflict measurement method based on Einstein operator[J]. System Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2659-2664.
- [21] HONG L, LYNCH A. Recursive temporal-spatial information fusion with applications to target identification[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2): 435-445.
- [22] 张玉振, 吉兴全, 于永进, 等. 基于时空信息融合的矿用变压器绝缘状态评估方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9): 75-82.
ZHANG Yuzhen, JI Xingquan, YU Yongjin, et al. A method for insulation state assessment of mining transformers based on time and space information fusion[J]. Industry and Automation, 2017, 43(9): 75-82.
- [23] LIU Wenzhao, TARASIUK T, GORNIAK M, et al. Power quality assessment in real shipboard microgrid systems under unbalanced and harmonic AC bus voltage[C] // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 4-8, 2018, San Antonio, TX, USA, 2018: 521-527.

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

顾思宇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与电能智能调度; E-mail: 596500091@qq.com

施伟锋(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统控制与优化。E-mail: wfshi@shmtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)