

融合健康指数与灰色理论的拆回 智能电能表剩余寿命评估

荆臻¹, 王莉¹, 杨梅², 闫红蕊², 郭亮³, 王者龙¹, 张加海⁴

(1. 国网山东电力科学研究院, 济南 250002; 2. 山东省计量科学研究院, 济南 250014;

3. 国网山东电力公司, 济南 250001; 4. 烟台东方威思顿电气有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要:为贯彻国家电网有限公司计量资产集约化等要求,实施拆回智能电能表维修充分利用的原则,综合利用健康指数与灰色理论,建立了拆回智能电能表剩余寿命评估模型。结合灰色理论与英国 EA 公司的电力设备健康指数计算公式,推断出拆回智能电能表的剩余寿命;根据工程经验,确定智能电能表加速寿命试验方案,利用加速寿命试验获得试验数据,验证了该方法的实用性与可行性。

关键词:拆回智能电能表;剩余寿命;健康指数;灰色理论;加速寿命试验

DOI:10. 15938/j. jhust. 2022. 01. 018

中图分类号: TM934 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2022)01-0135-06

Remaining Life Assessment of Replaced Intelligent Electric Meter Fused Health Index with Grey Theory

JING Zhen¹, WANG Li¹, YANG Mei², YAN Hong-rui², GUO Liang³, WANG Zhe-long¹, ZHANG Jia-hai⁴

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250001, China; 2. Shandong Institute of Metrology, Jinan 250014, China;

3. State Grid Shandong Electric Power company, Jinan 250001, China; 4. Yantai Dongfang Wisdom Electric Co., Ltd, Yantai 264003, China)

Abstract: To implement intensive measuring assets and other demands of SGCC, and the principle on maintenance and taking advantage of replaced intelligent electric meter, aremnant life assessment model of replaced intelligent electric meter is built by combining health index and grey theory. Remaining life can be deduced by combining grey theory and health index calculation formula of power equipment from British firm EA. An accelerated life test plan is determined according to expertise, and the proposed method is feasible and practicable by using accelerated life test data of replaced intelligent electric meter.

Keywords: replaced intelligent electric meter; remaining life; health index; grey theory; accelerated life testing

收稿日期: 2020-12-01

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(52094017001A); 国家自然科学基金(61179023)。

作者简介: 王莉(1970—), 女, 高级工程师;

杨梅(1968—), 女, 研究员。

通信作者: 荆臻(1981—), 女, 高级工程师, E-mail: 1159818989@qq.com.

0 引 言

随着国民经济的快速发展,智能电能表的检定数量、安装数量逐年增加^[1-2],每年更换或拆除的电能表数也随之增加(目前多是 8 年左右轮换)^[3],为贯彻国家电网有限公司计量资产集约化等要求,实施拆回智能电能表维修充分利用的原则,挑选出仍有利用价值的拆回电能表评估后再利用,可大幅降低智能电能表购置数量,减少电子垃圾,实现企业资源的最优配置,同时满足新旧动能转换、营商环境改造等重点改造要求。截止目前,仅有一些文献讨论了拆回智能电能表的分拣技术^[4-5],但鲜见拆回智能电能表剩余寿命预测的相关文献。因此如何科学、准确地预测拆回智能电能表的剩余寿命仍是一个难点问题^[6]。这使得有些满足运行要求的智能电能表被迫轮换,给国家和社会带来了巨大资源浪费的同时,电子污染也不容小觑。

目前,智能电能表剩余寿命预测多基于加速试验方法。文[7]研究了基于 HALT 试验的运行智能电能表剩余寿命预测方法,文[8]研究了基于分层抽样的运行智能电能表剩余寿命预测方法;以上 2 篇文献探讨了不同地区运行一年的智能电能表剩余寿命问题,并未讨论拆回电能表的剩余寿命预测。文[9]研究了基于退化试验的智能电能表服役抽检试验和剩余寿命预测方法,仅针对服役达到一定期限的智能电能表进行抽检预测。以上均未讨论服役期结束的拆回电能表剩余寿命预测问题。可见,关于智能电能表的剩余寿命问题已引起学者们的关注,但关于拆回智能电能表剩余寿命仍需解决。

基于此,本文融合健康指数与灰色理论评估拆回智能电能表剩余寿命,旨在解决拆回电能表剩余寿命评估的难点问题。首先对服役期满的拆回智能电能表进行分拣检测,分拣检测合格后进行误差检测,基于健康指数与灰色理论及获得的误差数据来预测拆回智能电能表剩余寿命。再对误差检测后的智能电能表进行加速寿命试验,通过加速因子及故障时间预测拆回智能电能表剩余寿命。进而验证模型的可用性。

1 智能电能表健康指数

健康指数(HI)源于英国 EA 公司,旨在反映设

备健康状态随时间变化的规律^[10],是反映设备健康状态的量化指标,取值范围 0~10,其值越低表示设备状态越好^[11-12]。

智能电能表的健康指数计算公式为

$$HI = HI_0 \times e^{B(T-T_0)} \tag{1}$$

式中,HI 为智能电能表的健康指数,当 $HI \in (0,3)$,智能电能表状态良好;当 $HI \in (3,7)$,智能电能表逐渐老化,且老化呈上升趋势;当 $HI \in (7,10)$,智能电能表严重老化,故障率明显上升。 HI_0 为智能电能表初始健康指数,一般取 0.5。 T 是与所要计算的 HI 对应的年份,可为当前年份,也可为未来年份; T_0 为与 HI_0 对应的年份,一般为智能电能表投运年份; B 为老化系数,可由式(2)计算

$$B = \frac{\ln HI - \ln HI_0}{T - T_0} \tag{2}$$

2 拆回智能电能表灰色模型

为了评估拆回智能电能表的剩余寿命,首先对拆回智能电能表进行分拣检测,即外观清洁完整且无电池失压、时钟超差等风险。考虑电流是影响智能电能表性能的最为重要因素,依据 JJG596-2012《电子式交流电能表检定规程》,功率因数取 1.0,负载电流分别 $I_{\max}$ 、 $0.5(I_{\max} - I_b)$ 、 I_b 、 $0.1I_b$ 、 $0.05I_b$,获得智能电能表的 5 组误差数据;功率因数取 0.5 L,负载电流分别 $I_{\max}$ 、 $0.5(I_{\max} - I_b)$ 、 I_b 、 $0.1I_b$ 、 $0.05I_b$,获得智能电能表的 5 组误差数据。所获得的 10 组误差数据即为 10 个评估指标。

为计算方便,依据工程经验,对分拣检测合格的拆回智能电能表的测量误差进行量化^[13],如表 1 所示。

表 1 测量误差量化标准

Tab. 1 The quantitative standard of measuring error

影响因素	量化标准			
	1	2~5	6~9	10
绝对误差	≤0.4	0.4~1	1~2	≥2

2.1 构建评估指标样本矩阵

聘请 p 个同行业专家对智能电能表的该 10 个指标进行评分,设 d_q^k 为第 $k(k=1,2,\cdots,p)$ 个评估专家对第 $q(q=1,2,\cdots,10)$ 个评估指标给出的分值,则评估指标的样本矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 & \cdots & d_1^p \\ d_2^1 & d_2^2 & \cdots & d_2^p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{10}^1 & d_{10}^2 & \cdots & d_{10}^p \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 灰色模型

由表 1, 将智能电能表的测量误差分为 4 类, 分别对应 4 个灰类, 白化权函数^[14-15] 分别为

$$f_1(d_q^k) = \begin{cases} 1, & d_q^k \in [0, 1] \\ \frac{3.5 - d_q^k}{2.5}, & d_q^k \in (1, 3.5] \\ 0, & d_q^k \in (3.5, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(d_q^k) = \begin{cases} \frac{d_q^k - 1}{2.5}, & d_q^k \in [1, 3.5] \\ \frac{7.5 - d_q^k}{4}, & d_q^k \in (3.5, 7.5] \\ 0, & d_q^k \notin (1, 3.5) \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3(d_q^k) = \begin{cases} \frac{d_q^k - 3.5}{4}, & d_q^k \in [3.5, 7.5] \\ \frac{10 - d_q^k}{2.5}, & d_q^k \in (7.5, 10] \\ 0, & d_q^k \notin (3.5, 10) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_4(d_q^k) = \begin{cases} \frac{d_q^k - 7.5}{2.5}, & d_q^k \in [7.5, 10] \\ 1, & d_q^k \in (10, +\infty) \\ 0, & d_q^k \notin [7.5, 10] \end{cases} \quad (7)$$

2.3 智能电能表灰色评估系数及评估权

对于评估指标 X_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, 3$), 由式(8), 可求出第 N ($N = 1, 2, \dots, 4$) 个评估灰类的灰色评估系数 $X_{i,N}$ 。

$$X_{i,N} = \sum_{k=1}^p f_N(d_q^k) \quad (8)$$

将式(8)代入式(9), 可求出各评估灰类的总灰色评估系数 X_i 。

$$X_i = \sum_{N=1}^4 X_{i,N} \quad (9)$$

则第 N 个评估灰类的灰色评估权 $r_{i,N}$ 为

$$r_{i,N} = \frac{X_{i,N}}{X_i} \quad (10)$$

3 各评估指标权重

考虑各指标对评估结果的影响程度不同, 采用 AHP^[16] 计算智能电能表各层的评估指标权重, 步骤

如下:

1) 构建每个因子的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。每次取两个指标 a_i, a_j , 采用 Saaty 方法进行比较^[17], 比较结果记为 a_{ij} 。如果 a_i, a_j 重要度相同, 比较结果为 1, 如果 a_i 比 a_j 稍微重要, 比较结果为 3, 如果 a_i 比 a_j 明显重要, 比较结果为 5, 如果 a_i 比 a_j 非常重要, 比较结果为 7, 如果 a_i 比 a_j 极端重要, 比较结果为 9, 反比较则取倒数, 即 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。将比较结果列为矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 且 $a_{ii} = 1$ ^[18-19]。则可识别出各指标对上一层因子的重要程度。

2) 一致性检验。为验证各指标权重有效性, 由式(11), 对矩阵 A 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

式中, CI 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A 的最大特征根; n 为矩阵阶数; RI 为平均随机一致性指标, 当 n 为从 1 到 10 的正整数, 相应的 RI 值为 0, 0.058, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49。

当 $CR < 0.1$, 则判断矩阵 A 有效, 否则需重新建立判断矩阵, 直到 $CR < 0.1$ 。

3) 对评估矩阵 A 进行列规格化, 得到矩阵 A' 。

由式(12), 将矩阵 A 列规格化, 得矩阵 $A' = (a'_{ij})_{n \times n}$

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{l=1}^n a_{lj}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

4) 将矩阵 A' 按行相加得 $w'_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij}, i = 1, 2, \dots, n$, 记 $W' = [w'_1, w'_2, \dots, w'_n]^T$ 。

5) 将向量 W' 规格化, 即 $w_i = \frac{w'_i}{\sum_{k=1}^n w'_k}, i = 1, 2, \dots, n$, 规格化向量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, 即为特征矩阵 A 的特征向量。

4 智能电能表剩余寿命

由改进模糊层次分析法, 得到 2 个健康指数的权重 w_i ($i = 1, 2$), 由式(13)可得到健康指数 HI'

$$HI' = \sum_{i=1}^2 w_i |C_i| \quad (13)$$

式中, C_i 为加速寿命试验误差测量值。

取 $HI_{com} = \max(HI, HI')$, 运行到 t 时刻, 智能电能表的剩余寿命为

$$\Delta T = \frac{\ln 7 - \ln HI_{com}}{B} \quad (14)$$

5 拆回智能电能表的加速寿命试验方案

为验证所提出模型的可用性,依据工程经验,选用 Peck 温-湿模型对拆回智能电能表进行温度和湿度加速寿命试验^[20]。试验环境温度为 75℃,湿度为 85%,电压为 U_n ,电流为 I_b ,功率因数分别为 1.0、0.5 L。加速因子可由下式计算。

$$AF = \exp \left[\frac{E_a}{k} \times \left(\frac{1}{T_{normal}} - \frac{1}{T_{stress}} \right) \right] \times \left(\frac{RH_{stress}}{RH_{normal}} \right)^n$$

(15)

式中: E_a 为激活能(eV); k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; RH 为相对湿度; $n=2$ 。

试验样本量不少于 30,试验前检测试验样本所

有功能,并对每台智能电能表进行编号,试验过程中实时监测智能电能表计量精度,并记录;记录每台故障智能电能表的故障记录,例如编号、出现的时间、故障现象。试验过程中,通过记录故障时间、故障现象,推断出智能电能表的剩余寿命的同时,还可找出智能电能表的薄弱环节(不是本文主要讨论内容)。

6 应用实例

现有一批拆回单相智能电能表,已在现场运行 7 年,分拣检测合格,随机抽取样本 80 台,覆盖 15 个生产厂家,对抽取样本进行编号。首先对 80 个样本进行数据采集,得到 80 组数据信息,如表 2 所示。再采用第 5 节加速寿命试验方案对 80 个样本进行加速寿命试验,并记录相应的数据信息。

表 2 某单相智能电能表测试数据
Tab. 2 The test data of a single phase intelligent electric meter

序号 i	误差测试值									
	1.0					0.5L				
	I_{max}	$0.5(I_{max}-I_b)$	I_b	$0.1I_b$	$0.05I_b$	I_{max}	$0.5(I_{max}-I_b)$	I_b	$0.2I_b$	$0.1I_b$
1	0.040	0.030	0.057	0.153	0.294	-0.090	-0.055	-0.007	0.070	0.201
2	-0.160	-0.125	-0.082	0.073	0.172	-0.239	-0.180	-0.140	0.021	0.141
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0.190	0.236	0.267	0.275	0.294	0.110	0.160	0.214	0.229	0.256

* 1.0 和 0.5L 为功率因数

现以第 1 台智能电能表为例进行寿命预测,过程如下:

聘请 5 名本行业专家依据表 2 对智能电能表运行状态进行打分,建立智能电能表评估矩阵 D_1 :

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据本文第 3 小节,构建智能电能表的判别矩阵 A_1 、 A_{11} 、 A_{12} 。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{2} & 6 & 8 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{2}{3} & 3 & 4 \\ 2 & \frac{3}{2} & 1 & 4 & 5 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{2} & 4 & 6 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{2}{3} & 2 & 3 \\ 2 & \frac{3}{2} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

将 A_1 、 A_{11} 、 A_{12} 分别列规格化,得

$$A'_1 = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.75 \\ 0.25 & 0.25 \end{bmatrix}$$
$$A'_{11} = \begin{bmatrix} 0.263\,7 & 0.393\,4 & 0.191\,1 & 0.413\,8 & 0.4 \\ 0.131\,9 & 0.196\,7 & 0.254\,8 & 0.206\,9 & 0.2 \\ 0.527\,5 & 0.295\,1 & 0.382\,2 & 0.275\,9 & 0.25 \\ 0.044\,0 & 0.065\,6 & 0.095\,5 & 0.069\,0 & 0.1 \\ 0.033\,0 & 0.049\,2 & 0.076\,4 & 0.034\,5 & 0.05 \end{bmatrix}$$
$$A'_{12} = \begin{bmatrix} 0.255\,3 & 0.375 & 0.185\,2 & 0.381 & 0.352\,9 \\ 0.127\,7 & 0.187\,5 & 0.246\,9 & 0.190\,5 & 0.176\,5 \\ 0.510\,6 & 0.281\,3 & 0.370\,4 & 0.285\,7 & 0.294\,1 \\ 0.063\,8 & 0.093\,8 & 0.123\,5 & 0.095\,2 & 0.117\,6 \\ 0.042\,6 & 0.062\,5 & 0.074\,1 & 0.047\,6 & 0.058\,8 \end{bmatrix}$$

分别将矩阵 A'_1 、 A'_{11} 、 A'_{12} 各行相加,得

$$W'_1 = [1.5, 0.5]^T$$
$$W'_{11} = [1.662\,1, 0.990\,3, 1.730\,6, 0.374\,0, 0.243\,1]^T;$$
$$W'_{12} = [1.549\,4, 0.929\,0, 1.742\,1, 0.493\,9, 0.285\,6]^T$$

将 W'_1 、 W'_{11} 、 W'_{12} 规格化,得

$$W_1 = [0.75, 0.25]^T;$$
$$W_{11} = [0.332\,4, 0.198\,1, 0.346\,1, 0.078\,4, 0.048\,6]^T;$$
$$W_{12} = [0.309\,9, 0.185\,8, 0.348\,4, 0.098\,8, 0.057\,1]^T$$

由 D_1 、式(8)~式(10),其组合权重为

$$W_Z = [0.332\,4, 0.198\,1, 0.346\,1, 0.078\,4, 0.048\,6, 0.309\,9, 0.185\,8, 0.348\,4, 0.098\,8, 0.057\,1]^T$$

通过一致性检验后,再由式(13)计算出拆回智能电能表的健康指数为 $HI' = 0.425\,5$ 。

由式(2),若期望寿命按 15 年计算,则 $B = 0.175\,94$ 。

由式(1), $HI = 1.713\,3$ 。

故, $HI_{com} = 1.713\,3$ 。

由式(14)计算出拆回智能电能表的剩余寿命为 $\Delta T \approx 8$ 年。

由式(15),在高温/高湿(75℃,湿度为 85%)环境下,加速老化时间 1 h 相当于寿命为 37.118 h。查找加速寿命试验数据,1 号表故障时间为 1 870 h,可估算出剩余寿命约为 7.9 a,与模型预测结果基本吻合。

同理,可预测其他智能电能表剩余寿命。

其余 79 组数据中,有 7 组预测值较低,在加速寿命试验过程中较早出现超差现象,经两种方式对比,结果基本吻合。

智能电能表已经运行 7 a,总体指标仍趋于正常,通过本模型评估拆回智能电能表剩余寿命约为 8 a,与期望寿命 15 a 一致。随着电子技术的发展,电子元器件可靠性的提高及制作工艺的进步,智能电能表寿命评估基本符合实际运行情况,所以可认为该评估模型有效。

7 结 论

本模型以英国 EA 公司的设备健康指数公式为基础,结合灰色理论,建立了融合健康指数与灰色理论的拆回智能电能表剩余寿命评估模型。给出了对拆回智能电能表进行加速寿命试验方法。利用加速寿命试验获得的试验数据与本文算法结果基本一致,算法对拆回智能电能表的再利用具有一定的指导意义。模型易于计算,便于工程应用,相比加速寿命试验,节省时间与成本。同时,加速寿命试验过程中发现智能电能表超差、壳体变形等问题,对提升智能电能表可靠性具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献:

[1] 吴蕊,张安勤,田秀霞,等. 基于改进 K-means 的电力数据异常检测算法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020, (4):79.

WU Rui, ZHANG Anqin, TIAN Xiuxia, et al. Anomaly Detection Algorithm Based on Improved K-means for Electric Power Data [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2020, (4):79.

[2] 韦琦,杨明. 改进神经网络算法的智能电网短期负荷预测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 24(1):65.

WEI Qi, YANG Ming. Short Term Load Forecasting Based on Improved Neural Network Algorithm[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 24(1):65.

[3] 郑安刚,张密,曲明钰,等. 基于贝叶斯网络的智能电能表故障类型预测[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21):143.

- ZHENG Angang,ZHANG Mi,QU Mingyu, et al. Prediction of the Fault Type of Smart Meters Based on the Bayesian Network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018,55(21):143.
- [4] 疏奇奇,杨乐. 拆回电能表自动化分拣技术研究[J]. 电工技术, 2018,(4):58.
- SHU Qiqi, YANG Le. Research on Automatic Sorting Technology of Dismantled Electric Meters[J]. Electric Engineering, 2018,55(21):143.
- [5] 李霖,张红,荆臻,等. 拆回智能电能表复核分拣机器人研制[J]. 山东电力技术, 2017,44(233):26.
- LI Lin,ZHANG Hong,JING Zhen,et al. The Development of the Smart Meter Checking and Sorting Robot[J]. Shandong Dianli Jishu, 2017,44(233):26.
- [6] 庄磊,方旭,黄珂迪,等. 在运智能电能表批量剩余寿命预判方法[J]. 电测与仪表, 2020,57(12):142.
- ZHUANG Lei,FANG Xu,HHUANG Kedi, et al. Prediction Method for Batch Residual Life of Smart Electricity Meter in Operation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12):142.
- [7] 张蓬鹤,张帆,黄加羽,等. 基于 HALT 试验的运行智能电能表剩余寿命预测方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(6):76.
- ZHANG Penghe,ZHANG Fang,HUANG Jiayu, et al. Study on the Residual Life Prediction of Smart Meters for Operation by HALT Test[J]. Automation & Instrumentation, 2019(6):76.
- [8] 于海波,李贺龙,何娇兰. 基于加速退化试验的智能电能表服役抽检试验和乘余寿命预测方法[J]. 电测与仪表, 2019(17):128.
- YU Haibo,LI Helong,HE Jiaolan. Service Sampling Test and Remaining Life Prediction Method of Smart Meter Based on Accelerated Degradation Test[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019(17):128.
- [9] 张蓬鹤,张帆,陈思禹. 基于分层抽样的运行智能电能表剩余寿命预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019(5):148.
- ZHANG Penghe,ZHANG Baoliang,CHEN Siyu. Study on the Life Prediction Method of Smart Meters for Operation Based on Stratified Sampling [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019(5):148.
- [10] 梁博渊,刘伟,杨欣桐. 变压器健康状况评估与剩余寿命预测[J]. 电网与清洁能源, 2010,26(11):37.
- LIANG Boyuan, LIU Wei, YANG Xintong. Transformer Condition Assessment and Residual Life Prediction[J]. Power System and Clean Energy, 2010,26(11):37.
- [11] 杨春波,陶青,张健,等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(10):104.
- YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment Status Evaluation Based on Comprehensive Health Index[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(10):104.
- [12] 杜江,申畅,程法庆,等. 基于健康指数的电力变压器剩余寿命评估研究[J]. 变压器, 2018,55(10):30.
- DU Jiang, SHEN Chang, CHENG Faqing, et al. Remnant Life Assessment of Power Transformer Based on Health Index [J]. Transformer, 2018,55(10):30.
- [13] 李贺龙,于海波,何娇兰. 基于数据融合方法的智能电能表运行剩余寿命预测[J]. 电测与仪表, 2019,56(18):126.
- LI Helong, YU Haibo, HE Jiaolan. Remaining Life Prediction of Smart Meter Based on Data Fusion Method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(18):126.
- [14] PEI Lingling, WANG Zhengxin. An Optimized Grey Cluster Model for Evaluating Quality of Labor Force[J]. Journal of Software, 2013, 8(10):2489.
- [15] JIAN Lirong, ZHAO Huanhuan, LIU Yong, et al. Civil Aircraft Suppliers Selection Based on Grey Target and Grey Cluster Decision Method[C]// Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2014: 1691.
- [16] 刘从法,罗日成,雷春燕,等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力设备自动化, 2013, 33(6):104.
- LIU Congfa, LUO Richeng, LEI Chunyan, et al. Power Transformer Condition Assessment Based on AHP Greyfixed-weight Clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):104.
- [17] 赵峰,李硕. 基于熵权和灰关联度的变压器故障诊断[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(1): 57.
- ZHAO Feng, LI Shuo. Fault Diagnosis in Transformer Based on Entropy Weighted and Grey Incidence[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(1): 57.
- [18] 刘萍,李云鹤. 基于 AHP 的城市会展经济综合实力评价研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010,15(2):115.
- LIU Ping, LI Yunhe. Research of Comprehensive Strength Evaluation of Cities Conference and Exhibition Economy Based on AHP [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2010,15(2):115.
- [19] 周真,孙中元,刘芳,等. 基于 AHP 的生产企业风险级别分类模型研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010,15(1):103.
- ZHOU Zhen, SUN Zhongyuan, LIU Fang, et al. Study of Risk Grade Classification Model for Enterprises Based on Analytical Hierarchy Process[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2010,15(1):103.
- [20] 陈金涛,朱彬若,张垠,等. 智能电能表的加速退化试验方案研究[J]. 电测与仪表, 2018,55(3):104.
- CHEN Jintao, ZHU Binruo, ZANG Yin, et al. Research on the Accelerated Degradation Test Scheme of Smart Meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018,55(3):104.

(编辑:王 萍)