

层次分析法和模糊理论的智能电能表可靠性评估模型

王辉, 罗璇, 贾宏刚, 严欢, 岳园园

(国网陕西省电力有限公司经济技术研究院, 陕西 西安 710075)

摘要: 研究层次分析法和模糊理论的智能电能表可靠性评估模型, 提升智能电能表计量性能。选取功能性、易用性等因素为影响智能电能表可靠性指标, 构建可靠性评估指标体系, 采用层次分析法求解各评估指标主观权重, 结合客观权重对其进行修正获取综合权重; 采用模糊理论求解各评估指标之间最大隶属度, 并建立智能电能表可靠性模糊评估矩阵, 结合模糊评估矩阵和综合权重矢量, 获取智能电能表可靠性评估结果。实验结果表明, 该模型选取指标具备代表性, 可实现智能电能表可靠性评估, 且评估结果误差小。

关键词: 层次分析法; 模糊理论; 智能电能表; 可靠性评估; 最大隶属度; 模糊评估

中图分类号: TP181; TM933 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0113-05

Reliability Evaluation Model of Intelligent Watt Hour Meter Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Theory

WANG Hui, LUO Xuan, JIA Hong-gang, YAN Huan, YUE Yuan-yuan

(State Grid Shaanxi Electric Power Company Economic Research Institute, Xi'an 710075 China)

Abstract: This paper researches the reliability evaluation model of intelligent electric energy meter based on analytic hierarchy process and fuzzy theory, and improves the metering performance of intelligent electric energy meter. The factors such as functionality and ease of use are selected as the reliability indexes of smart electricity meters, and the reliability evaluation index system is constructed. The analytic hierarchy process is used to solve the subjective weight of each evaluation index, and the objective weight is combined to modify it to obtain the comprehensive weight. The fuzzy theory is used to solve the maximum membership degree among the evaluation indexes, and the fuzzy evaluation matrix of the reliability of the intelligent electric energy meter is established. The reliability evaluation results of the intelligent electric energy meter are obtained by combining the fuzzy evaluation matrix and the comprehensive weight vector. The experiment shows that the selected indicators of the model are representative, which can realize the reliability evaluation of smart electricity meters, and the evaluation result error is small.

Keywords: analytic hierarchy process; fuzzy theory; intelligent electricity meter; reliability assessment; maximum degree of membership; fuzzy evaluation

0 引言

智能电能表对智能电网中公平量测、用电安全等具有重要意义, 因此智能电能表测量结果的准确性是实现智能电网可靠运作的基础^[1]。随着智能电能表使用时间的增长, 智能电能表中一些固有模块存在自身质量问题, 影响智能电能表可靠性。智能电能表自身质量问题与智能电能表供货商有关, 其设计与制造电能表水平的参差不齐, 严重影响智能电能表可靠性。因此针对智能电能表可靠性评估非常重要, 通过智能电能表可靠性评估, 可辅助电力公司对不同智能电能表供货商进行分级管理^[2]。

众多学者为此展开激烈研究, 刘旭明等人提出 ZINB 层次贝叶斯方法评估智能电能表可靠性, 依据温度等环

境数据对电能表影响, 得出电能表可靠性置信区间, 完成智能电能表可靠性评估, 该方法可精准预测电能表特定环境的变化特征, 但该方法只研究环境因素对智能电能表可靠性影响, 影响指标选取不全面^[3]。王保帅等人提出将群体决策与层次分析法结合, 实现智能电能表可靠性评估, 该方法通过层次分析法构建判断矩阵, 采用一致性求解专家权重, 并重新分配智能电能表可靠性, 以此完成智能电能表可靠性评估, 该方法具有高效性, 但该方法评估结果主观性较强, 导致智能电能表可靠性评估结果存在误差^[4]。

层次分析法可将目标分解成多层次结构, 并以此实现目标定性与定量分析。模糊理论可将目标共同特点抽取出来并加以概括, 模糊理论内模糊评语子集与模糊评估方法, 可将目标内无法定量描述的指标因素进行定量化处理。因此本文提出层次分析法和模糊理论的智能电

*基金项目: 陕西省电力有限公司科技项目 (5226JY200008)

收稿日期: 2023-12-08

能表可靠性评估模型,用来提高智能电能表可靠性。

1 智能电能表可靠性评估模型

1.1 基于层次分析法的指标权重计算

层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)通过建立多层次结构将各项复杂指标划分成为有序且具有相关性的指标,层次分析法通过将指标因素之间的重要性进行两两比较,优化各指标之间权重赋值过程,增加多指标之间决策判断的客观性与逻辑性^[5]。层次分析法可依据相对标度将各定性与定量智能电能表可靠性指标融合,统一主观和客观、定量与非定量智能电能表可靠性指标测度标准。层次分析法计算智能电能表可靠性评估指标权重流程如下:

(1) 构建智能电能表可靠性评估指标体系

智能电能表内包括计量采样、通信、保存等多样化模块,各模块内数据复杂性较高,但模块内部少部分模块可靠性数据不足,因此本文通过分析影响智能电能表可靠性的多种因素,实现智能电能表可靠性评估。通过层次分析法将影响智能电能表可靠性因素与其各模块相关联,得出智能电能表可靠性评估指标体系,如图1所示。

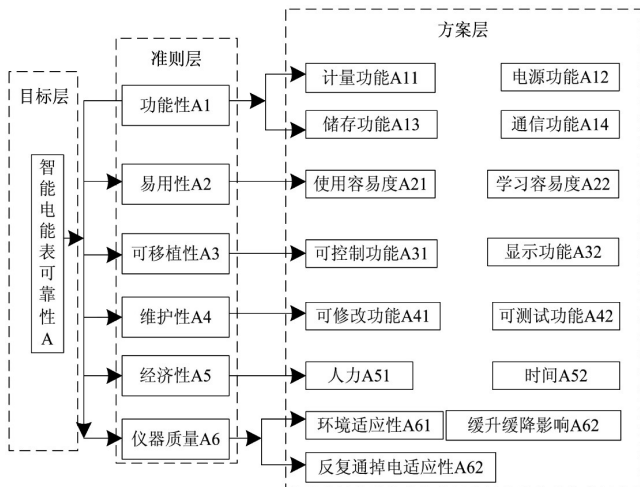


图1 智能电能表可靠性评估指标体系

将智能电能表可靠性评估体系第一层设为目标层;第二层设为准则层,表示影响智能电能表可靠性评估因素的一级指标,主要包括功能性、易用性和经济性等;第三层设为方案层,表示影响智能电能表可靠性评估因素的二级指标,其中包括计量单位、存储、环境适应性和通信等15个二级指标。

(2) 构建智能电能表可靠性评估指标判断矩阵

依据智能电能表可靠性评估指标体系内各指标之间相互支配联系,构建各指标的两两对比判断矩阵。通过客观实际状况,采用Saaay1-9标度法评定智能电能表可靠性评估指标体系内各指标判断矩阵相应重要性,结果

如表1所示。其中: i 和 j 分别代表智能电能表可靠性评估指标。

表1 Saaay1-9标度法

重要性分值	含义
1	i 与 j 两因素相比,两者同样重要
3	i 与 j 两因素相比, i 比 j 略微重要
5	i 与 j 两因素相比, i 比 j 明显重要
7	i 与 j 两因素相比, i 比 j 强烈重要
9	i 与 j 两因素相比, i 比 j 极端重要
倒数	j 与 i 相比的结果等于 i 与 j 相比的倒数

(3) 计算单层指标权重

依据判断矩阵判定智能电能表可靠性评估指标体系内单层同级因素影响程度,即为单层评估指标权重。判断矩阵公式为:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: A 为单层指标判断矩阵, a_{nm} 表示单层指标内第 n 个一级指标中的第 m 个二级指标。当任意数 $i, j, k=1, 2, \dots, n$ 时,满足 $a_{ik}=a_{ij}a_{jk}$,则说明判断矩阵 A 为一致性矩阵。依据最大特征根方法求解 A 的最大特征根 λ_{max} ,将 λ_{max} 代入 $AW=\lambda_{max}W$ 公式中,求解特征向量 W ,特征向量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$,其中 w_n 表示智能电能表可靠性评估指标体系内指标在相对层的权重值。

证明判断矩阵 A 合理性的方法是通过一致性检验,减少各指标之间对比时评分不等比现象。通过分析比较判断矩阵 A 的一致性比例指标 CR 完成一致性检验,当 CR 结果小于0.1时,则判断矩阵 A 一致性检验结果合格。 CR 表达式为:

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中: CI 表示一致性指标, $CI=(\lambda_{max}-n) \cdot (n-1)^{-1}$, RI 是随机一致性指标。

(4) 计算总体指标权重

智能电能表可靠性评估指标体系内同级各因素对总体指标相对重要性权重为总体指标权重。设第 $k-1$ 层指标与总体指标对应的权重向量为 $w_{a^{k-1}}=(w_{a_1^{k-1}}, w_{a_2^{k-1}}, \dots, w_{a_n^{k-1}})$,第 k 层将第 $k-1$ 层的第 i 个指标作为准则, m 个指标得到的指标权重向量为 $w_{b_i^k}=(w_{b_1^k}, w_{b_2^k}, \dots, w_{b_m^k})$,第 k 层在第 $k-1$ 层的第 i 个指标下 m 个指标相对总体目标的总体指标权重为:

$$w_{a_i^k} = w_{a_i^{k-1}} \times w_{b_i^k} \quad (3)$$

一致性检验总体指标权重,设第 $k-1$ 层第 i 个指标为准则的一致性指标为 CI_i^{k-1} ,总体指标平均 RI 为 RI_i^{k-1} ,第 k

层总体一致性指标、随机一致性以及一致性比例指标为：

$$\begin{cases} CI^k = \sum_{i=1}^n w_{a_i^{k-1}} CI_i^{k-1} \\ RI^k = \sum_{i=1}^n w_{a_i^{k-1}} RI_i^{k-1} \end{cases} \quad (4)$$

$$CR^k = CI^k / RI^k \quad (5)$$

当 CR^k 结果小于0.1时,说明第 k 层总体指标一致性检验结果合格。判断智能电能表可靠性评估指标内各指标是否重要的依据是各指标的总权重数值。

1.2 基于模糊理论的指标隶属度获取

模糊综合评价法(fuzzy comprehension evaluation method, FCE)是依据现实生活中绝大多数模糊性现象设计的评估方法^[6]。通过模糊理论内模糊评语子集与模糊评估方法,将智能电能表可靠性评估指标体系内无法定量描述且概念模糊的指标进行定量化处理,模糊理论方法既保障了智能电能表可靠性评估的主观与客观因素,又能体现智能电能表可靠性评估流程与智能电能表可靠性评估指标量化的模糊性。模糊理论的基础是隶属度函数,该函数表示模糊集合的一种表现形式,在模糊理论内具有重要作用^[7-9]。智能电能表可靠性评估指标内的定性指标隶属度函数与评估指标的评语相关。因此在求解隶属度函数之前需确定智能电能表可靠性评估指标评语集。依据智能电能表实际运行状况将智能电能表可靠性等级共分为5个等级,即智能电能表可靠性评估指标评语集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\}$,该集合内评语反映智能电能表可靠性从高到低分别为优秀、良好、中等、比较差、非常差,评语等级从高到低对应的分数分别为:100-90、90-80、80-60、60-40、40-0。智能电能表可靠性评估指标内的定量指标包括电源、计量、存储等,通过指派方法计算定量指标隶属函数。智能电能表可靠性评估指标分为指标数值越大越好与指标数值越小越好两种类型,分别计算这两种类型隶属度函数。智能电能表可靠性评估指标越小越好的隶属函数为:

$$C(x) = \begin{cases} 1 & x \leq c \\ f(x) & x > c \end{cases} \quad (6)$$

式中: c 为常数,非增函数为 $f(x)$, $0 \leq f(x) \leq 1$ 。

智能电能表可靠性评估指标越大越好的隶属函数为:

$$C'(x) = \begin{cases} 1 & x \leq c' \\ f'(x) & x > c' \end{cases} \quad (7)$$

式中: c' 为常数,非减函数为 $f'(x)$ 。

智能电能表可靠性评估指标内的定性指标包括控制、通信等。针对定性指标无法直接求解隶属度函数,可根据专家评分的方式判断定性指标隶属度。设对于某个

智能电能表的可靠性评估指标通过专家评分的总个数为 h ,被专家评分智能电能表可靠性评估指标属于评语等级 $V_i(i=1,2,\dots,5)$ 的频数为 l_i , $\sum_{i=1}^5 l_i = h$ 。 $f_i = l_i \times h^{-1}$ 是被评分的定性指标属于评语等级 V_i 的隶属度。求解被评分定性指标对应评语集 V 的单因素隶属度矩阵为:

$$\hat{C}(x) = [l_1 \times h^{-1}, l_2 \times h^{-1}, \dots, l_5 \times h^{-1}] \quad (8)$$

1.3 AHP和FCE的智能电能表可靠性评估模型

通过AHP方法确定智能电能表可靠性评估指标权重,FCE方法确定智能电能表可靠性隶属度矩阵来建立智能电能表可靠性评估模型,AHP方法求解的智能电能表可靠性评估指标权重存在一些主观性,该方法反映评估者主观意识,客观性和针对性较差。因此需将AHP方法的评估指标权重优化,增强评估的客观性。智能电能表可靠性评语内包括5个评语等级,等级1的评估指标为最优,评语数值越大,对应的评语等级越低。设单项指标 x_{ij} 对应的隶属度为 c_{ij}^s ,根据智能电能表可靠性评语等级的特点,最大隶属度为:

$$c_{ij} = \max(c_{ij}^s) \quad (9)$$

评语等级数量为 s ,当智能电能表可靠性评语等级处于中等以上,说明智能电能表应用正常。 c_{ij} 数值越小,智能电能表可靠性评估指标越低。通过指标越低对智能电能表可靠性影响越大的原则,智能电能表可靠性评估指标权重也应增大,因此客观权重的定义为:

$$\beta_{ij} = \frac{(c_{ij})^{-1}}{\sum_j (c_{ij})^{-1}} \quad (10)$$

当 x_{ij} 指标内 c_{ij} 等于0, β_{ij} 等于1时,其他指标的权重值等于0。

评估权重需同时注意客观性与主观性,因此将客观性与主观性结合组成综合权重为:

$$\eta_{ij} = \frac{w_{ij} \beta_{ij}}{\sum_j w_{ij} \beta_{ij}} \quad (11)$$

式中:AHP方法获得的各指标权重为 w_{ij} 。

构建指标评估矩阵的方法是首先评估单指标,然后通过隶属度函数,求解指标评估矩阵为:

$$R = (r_{ij})_{n \times s} \quad (12)$$

式中: r_{ij} 表示单指标评估向量,指标数目为 n , $n=(1,2,\dots,15)$ 。

采用综合权重运算方法求解综合权重矢量为:

$$\eta = (\eta_{ij})_{o \times n} \quad (13)$$

智能电能表可靠性评估结果为:

$$P = \eta \circ R \quad (14)$$

式中:模糊合成算子是 \circ 。

2 实验分析

验证智能电能表可靠性评估模型有效性,选取某地区某厂商生产的单相智能电能表为评估对象。单相智能电能表可计量普通用户使用的220V电源,可通过数据界面远程管理用户购电信息。单相智能电能表额定电压220V,额定电流为5A,额定功率50Hz,采用RS485通信接口,单个智能电能表外形尺寸为128×95×82mm。为测试本文评估模型有效性,将本文模型选取的智能电能表可靠性评估指标的累计贡献度进行分析,若该智能电能表可靠性评估指标累计贡献度大于85%以上,说明所选取指标可完全作为智能电能表可靠性评估指标。将图1中智能电能表可靠性评估指标内方案层评估指标从上到下依次排序,序号为1-15,统计各可靠性评估指标累计贡献度,结果如图2所示。通过图2可知,15项智能电能表可靠性评估指标累计贡献度均超过85%,其中有5项智能电能表可靠性评估指标超过90%,6项智能电能表可靠性评估指标累计贡献度接近100%,15项智能电能表可靠性评估指标累计贡献度均超过设定累计贡献度的门限。实验说明:本文模型中15个评估指标均可起到智能电能表可靠性评估作用,后续实验可采取以上15个指标用作智能电能表可靠性评估。

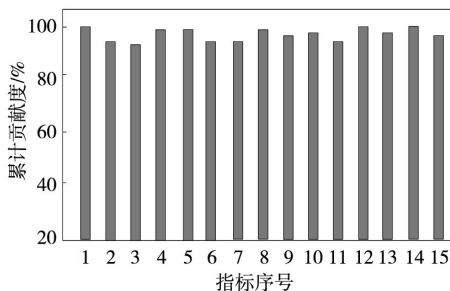


图2 智能电能表可靠性评估指标累计贡献度

实验选取该厂商生产的某一个单相智能电能表,为利用本文模型完成对该单相智能电能表的模糊评估,需采用隶属度函数求解实验中该单相智能电能表隶属度函数,依据该电能表隶属度函数建立模糊评估矩阵。实验以智能电能表可靠性评估指标中功能性评估指标为例进行详细分析,实现对单相智能电能表的可靠性评估,利用本文模型将智能电能表功能性评估指标内二级指标进行两两对比,建立模糊评估矩阵如下所示。

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.0323 & 0.3300 & 0 & 0 \\ 0.2414 & 0.3412 & 0.2718 & 0.0913 \\ 0 & 0.2520 & 0.3981 & 0 \\ 0 & 0.3743 & 0.2077 & 0 \end{pmatrix}$$

采用本文模型中层次分析法求解以上智能电能表二级指标主观权重值为: $W_1=(0.46,0.2,0.36,0.2)$ 。

根据以上权重可知,该智能电能表功能性评估指标最大隶属度、客观权重和综合权重为:

$$c_1=(0.8599,0.4605,0.6822,0.7413)$$

$$\beta_1=(0.2315,0.3610,0.2681,0.2531)$$

$$\eta_1=(0.3758,0.2687,0.3591,0.0909)$$

该智能电能表功能性评估指标模糊评估向量为: $P_1=(0.1974,0.3926,0.6458,0.2276)$ 。

通过以上步骤同理计算该智能电能表其他5项指标模糊评估向量,最终构建该智能电能表综合评估向量,并求解该智能电能表可靠性各阶段指标综合权重为: $\eta=(0.6561,0.2633,0.2917,0.2264,0.1391,0.0563)$

以此求解该智能电能表可靠性综合评估结果为: $P=(0.1721,0.3147,0.4616,0.1324,0.0546,0.0376)$

依据本文模型中最大隶属度可知,该智能电能表可靠性评分为98.7,该智能电能表可靠性为优秀。

实验验证本文模型评估智能电能表的实用性,设置该单相智能电能表可靠性要求为:整表自验收合格之日起运作年限不小于8年,8年内该智能电能表可靠性不低于95%。将本文模型评估后智能电能表可靠性与设置数据进行比较,结果如图3所示。通过图3可知,本文模型评估智能电能表可靠性与该智能电能表可靠性曲线幅度基本重合,误差很小,本文模型评估结果与实际可靠性等级均处于同一空间;在该智能电能表运作年限为4年时,该智能电能表可靠性均未低于99%,4年到7年该智能电能表可靠性逐渐下降,可靠性最低数值为97.4%。实验说明:本文模型的智能电能表可靠性评估精确度高,可满足智能电能表可靠性要求,实用性强,可为智能电能表可靠性评估提供有效支持。

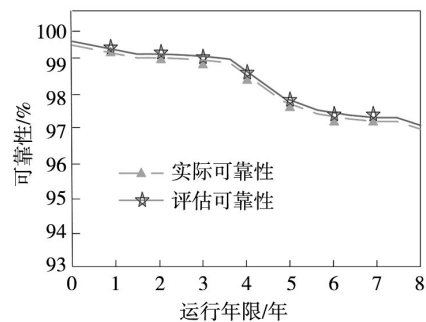


图3 智能电能表可靠性

3 结束语

创建层次分析法和模糊理论的智能电能表可靠性评估模型,提升智能电能表可靠性。采用层次分析法建立

(下转第125页)