

引用格式:黄瑞,邓汉钧,刘谋海,等.基于 KICA-CIM 的电能计量设备 HPLC 通信单元运行质量评估体系[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):84-92.
Citation: HUANG Rui, DENG Hanjun, LIU Mouhai, et al. Quality assessment system for the operation of the communication unit of the HPLC energy metering device based on KICA-CIM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 84-92.

基于 KICA-CIM 的电能计量设备 HPLC 通信 单元运行质量评估体系

黄 瑞^{1,2}, 邓汉钧^{1,2}, 刘谋海^{1,2}, 樊 芮^{1,2},
陈 浩^{1,2}, 孙辰昊³, 刘昊东³

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 智能电气量测与应用技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘 要:针对电能计量设备中高速电力线载波通信(high speed power line carrier communication, HPLC)单元现场的运行质量评估需求,提出一种基于核独立分量分析-部件关键度(kernel independent component analysis-component importance measure, KICA-CIM)多模型集成的评估方法。首先,整合分析典型客户侧计量设备本地物联应用场景、通信技术的主要性能影响因素,综合构建物联场景性能评价的普适性指标库;其次,面向运行场景中的多源、异构、高维数据环境,一方面利用 KICA 处理非线性特征并求解主成分,计算各指标的个体权重,另一方面利用 CIM 模型区别衡量各指标评价结果对整体评估效果的不同影响程度,对指标进行重要性赋权,确定每个指标的作用权重。通过组合赋权模型实施整合,实现运行质量的全面评估;最后,利用某地区电能计量设备数据,验证所提出方法的可行性和有效性,有利于改善评估结果的准确性与合理性。

关 键 词:高速电力线载波通信单元;评估体系;核独立分量分析;部件关键度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.008 **中图分类号:** TM930.7 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0084-09

Quality assessment system for the operation of the communication unit of the HPLC energy metering device based on KICA-CIM

HUANG Rui^{1,2}, DENG Hanjun^{1,2}, LIU Mouhai^{1,2}, FAN Rui^{1,2},
CHEN Hao^{1,2}, SUN Chenhao³, LIU Haodong³

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Electrical Measurement and Application Technology, Changsha 410004, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To address the operational quality assessment requirements of the high speed power line carrier communication (HPLC) unit in energy metering equipment, a multi-model integration-based assessment method utilizing KICA-CIM is proposed. Firstly, the main performance influencing factors of local internet of things (IoT) application scenarios and communication technologies of typical customer-side metering equipment are integrated and analyzed, and a universally applicable index library for performance evaluation of IoT scenarios is comprehensively constructed. Next, in the operational scenario with multi-source, heterogeneous, and high-dimensional data environment, on the one hand, kernel independent component analysis (KICA) is used to process nonlinear features and solve principal components, calculating individual weights of each indicator. On the other hand, component

收稿日期:2022-06-25;修回日期:2022-08-29

基金项目:国家电网公司科技项目(5700-202118203A-0-0-00)

通信作者:孙辰昊(1991—),男,博士,讲师,主要从事电力大数据及人工智能理论研究;E-mail:chenbaosun@csust.edu.cn

importance measure (CIM) model is utilized to distinguish and measure the different impact levels of each indicator evaluation result on the overall evaluation effect, assigning importance weights to the indicators to determine the functional weight of each indicator. Through the implementation of integrated weighting models, comprehensive assessment of operational quality is achieved. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified using data from energy metering equipment in a certain region, which contributes to improving the accuracy and rationality of the assessment results.

Key words: HPLC unit; evaluation system; KICA; CIM

在新型电力系统的建设需求下,电力大数据在电网中的覆盖日益完善,而电能计量设备在此过程中承担着重要任务。为保障数据传输这一重要环节,电能计量设备通信单元的运行效果将直接影响用电信息采集系统的数据质量和应用水平,以及该系统的安全、稳定和经济运行,甚至也直接关系供电的可靠性和电力用户用电计量的准确性。因此,作为一种以中低压电网为传输介质来高速传输数字数据的技术,目前高速电力线载波通信(high speed power line carrier communication, HPLC)单元得到了大规模推广及应用^[1-7]。为进一步提升HPLC运行效率,亟待构建一个HPLC通信单元运行质量评估体系,为设备的采购、经营以及运维等决策提供参考。

在HPLC通信单元运行质量评估体系中,目前已存在一批较成熟的评价指标。为有效、合理地进行整合以求解综合评估结果,每一个指标通常对应一个权重,因此合理地对各指标进行赋权是评估体系的关键步骤之一。在现有研究阶段,确定权重的方法大致可分为主观赋权法与客观赋权法两类。主观权重法是根据决策者(或专家)的经验主观上对各属性确定权重大小。常用的主观赋权法有专家权重法(expert investigation weight, EIW)、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、二项系数法、环比评分法等。如文献[8]针对风险评估中群决策数据的处理可靠性问题,提出专家权重对于数据处理的重要性;文献[9]提出基于AHP的地铁隧道防排水型判断系统;文献[10]综合考虑电网投资的衍生价值,提出一种基于二项式系数与变异系数的智能电网投资决策评价模型。此类方法拓展性强、适用面广,但决策者主观意愿占比过大,不确定度相对较高。客观赋权法是根据实际数据下各方案属性值差异确定权重大小。常用的客观赋权法有主成分分析法(principle component analysis, PCA)、熵权法(entropy weight, EW)、多目标规划法、离差及均方差法等。如文献[11]针对冰雹监测难和冰

雹灾情不易估计的问题,将熵值法与广义回归神经网络(general regression neural network, GRNN)相结合,提出一种基于熵值法特征筛选的降雹识别方法;文献[12]基于目前主流的线损指标评价方法依赖专家评判确定指标权重,具有主观随意性大的弊端,提出了一种新的基于主成分分析法的线损指标评价方法。这类方法更加客观、稳定,在多场景或多因素环境下适应性更强,但由于通常忽视知识与经验等先验信息,可能出现偏差过大的情况。

研究者们在此基础上又将两类方法相结合。文献[13-14]结合AHP和模糊综合评估法,建立了电能计量装置综合评估模型;文献[15]针对电能计量设备研发过程中可靠性分配的实际情况,以及层次分析可靠性分配方法主观性过强的问题,聘请多位领域专家分别对智能电能表的递进层次结构模型建立判断矩阵,利用一致性比例构建专家权重,并由指标权重和专家权重形成综合权重,从而克服AHP中主观性过强的局限性;文献[16]基于所建立的电能计量设备质量评价体系,采用主客观赋权法相结合的组合优化赋权法,提出了一种电能计量设备质量多属性评估方法;文献[17]为综合评价计量自动化终端质量水平,采用改进AHP和熵权法建立计量自动化终端质量综合评价模型。以上文献能够达到主观与客观的统一,但在赋权过程中通常仅考虑了各指标自身重要度,而未计及各指标对现场运行整体可靠性的作用。

针对上述问题以及HPLC通信单元现场运行场景中多源异构非同分布的数据环境,提出一种基于多模型集成的电能计量设备HPLC通信单元现场运行质量综合评估体系。首先,建立反映HPLC通信单元现场运行质量水平的9个指标;其次,根据非线性分布数据,利用核独立分量分析(kernel independent component analysis, KICA)进行主成分计算和特征提取,以求解个体权重;此外,采用部件关键度(component importance measure, CIM)模型求解各特征的风险增长度(risk achievement worth,

RAW)得分,进而确定评估指标的作用权重;最后,采用组合赋权方法将个体权重和作用权重进行整合,从而确定各评估指标的自身影响程度以及与整体综合评分的作用程度。通过某典型客户侧计量设备本地物联应用场景的试验测试,验证本文所提出的评估体系的可行性和有效性。

1 HPLC通信单元现场运行综合评价指标

本文从设备现场运行情况维度入手,综合评价各省公司HPLC单元(含芯片)的运行质量,旨在真实反映相关设备现场运行情况。综合考虑相关厂商履约情况(供货及时率)、售后服务满意度、一次采集成功率及时长、全量数据采集完整率、事件上报准确率、全性能试验合格率、运行稳定性、停电事件上报准确率、相位识别执行率这9个指标作为评价设备质量的基础^[18]。

1) 供货及时率。

供货及时率(timeliness of supply, ToS)考察被考核厂商合同执行情况,督促厂商按合同及时完成供货。本文定义其为以被考核厂商2019年的第一个统招批次为起点至今累计供货及时情况,其公式如下:

$$R_{\text{in-time}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $R_{\text{in-time}}$ 为中央协调器(central coordinator, CCO)/站点(station, STA)的通信单元或芯片厂商以2019年的第一个统招批次为起点至今累计供货及时率; M_i 为被考核厂商2019年以来,第*i*个批次按供货通知要求时间完成到货批次登记的CCO/STA的通信单元或芯片数量; N_i 为被考核厂商2019年以来,第*i*个批次要求到货的CCO/STA的通信单元或芯片数量。

2) 售后服务满意度。

售后服务满意度(customer satisfaction rate, CSR)考核厂商售后服务情况,有助于提升厂商售后服务能力。其统计被考核厂商最近4个季度的售后服务情况,并按季度上报至国网计量中心,用 R_{sa} 表示。

3) 一次采集成功率。

一次采集成功率(one-time acquisition success

rate, OASR)指被考核厂商CCO/STA的通信单元、芯片组网、数据采集能力。本文分析主站召测一次电能表日冻结电能示值情况,定义指定周期(最小为1d)范围内通信单元、芯片的一次采集成功率 R_{acc} 如下:

$$R_{\text{acc}} = \frac{\sum_{i=1}^d M_i}{\sum_{i=1}^d N_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, R_{acc} 为CCO/STA的通信单元或芯片厂商在指定的考核时间范围*d*内召测一次电能示值的采集成功率。当 R_{acc} 为CCO通信单元的一次采集成功率时, M_i 为第*i*天一次成功召测日冻结电能示值的电能表数量,且该电能表安装了被考核厂商CCO通信单元所接入的STA通信单元; N_i 为第*i*天被考核厂商CCO通信单元所接入的STA通信单元的在运电能表数量。当 R_{acc} 为CCO芯片的一次采集成功率时,同理如上。

4) 一次采集时长。

一次采集时长(one-time acquisition duration, OAD)考核厂商CCO/STA的通信单元、芯片的路由算法合理性、数据采集能力。本文分析主站召测一次电能表日冻结电能示值情况,统计和比较当一次采集成功率到达98%时,被考核通信单元、芯片厂商所用时长,如下:

$$T_{\text{acc}} = \frac{T_{\text{min}}}{T_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中, T_{acc} 为CCO/STA的通信单元或芯片厂商通过主站召测一次电能表日冻结电能示值采集成功率达到98%的时长效率。当评价对象为CCO通信单元时, T_{min} 为所有被考核厂商中当一次采集成功率达到98%时的用时最小值,且用时越短,效率越高; T_i 为各厂商CCO通信单元一次采集成功率到达98%时的采集时长。当 T_{acc} 为CCO芯片的一次采集成功率时,同理如上。

5) 全量数据采集完整率。

全量数据采集完整率(data completeness rate, DCR)是指综合被考核厂商CCO/STA的通信单元、芯片的抗衰减、抗窄带、抗脉冲、抗频偏、抗白噪声性能以及高频数据采集功能。本文分析电能表全量(不低于24点,不高于96点)数据项的完整率情况,在指定周期(最小为1d)范围内统计通信单元、芯片厂商的采集完整率,其计算公式如下:

$$R_{v(96)} = \frac{\sum_{i=1}^d M_i}{\sum_{i=1}^d N_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{v(48)} = \frac{\sum_{i=1}^d M_i}{\sum_{i=1}^d N_i} \times 0.98 \times 100\% \quad (5)$$

$$R_{v(24)} = \frac{\sum_{i=1}^d M_i}{\sum_{i=1}^d N_i} \times 0.95 \times 100\% \quad (6)$$

6) 全检试验合格率。

全检试验合格率(qualified rate of general inspection, QRGI)是指到货CCO/STA通信单元或芯片通过流水线测试的合格情况。本文分析被考核厂商到货CCO/STA通信单元或芯片流水线全检测试情况,在指定周期范围内统计被考核厂商到货CCO/STA通信单元或芯片的全检试验合格率为

$$R_{total} = \frac{N_{succ}}{S_{total}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, R_{total} 为CCO/STA通信单元或芯片厂商的全检试验合格率; N_{succ} 为被考核厂商CCO/STA通信单元或芯片全检合格数; S_{total} 为该CCO/STA通信单元或芯片厂商所有到货的通信单元及芯片数量。

7) 运行稳定性。

运行稳定性(operational stability, OS)为被考核厂商CCO/STA通信单元或芯片运行稳定性。本文通过分析各厂商CCO/STA通信单元或芯片的运行故障情况,在指定周期范围内统计被考核厂商CCO/STA通信单元或芯片的运行稳定性,如下:

$$R_{stab} = \left(1 - \frac{N_{fault}}{N}\right) \times 100\% \quad (8)$$

$$N_{fault} = \sum_{i=1}^n N_i f(i) \quad (9)$$

式中, R_{stab} 为CCO/STA通信单元或芯片运行稳定性; N_{fault} 为CCO/STA通信单元或芯片产品故障量; N 为CCO/STA通信单元或芯片运行总数量; N_i 为第*i*年CCO/STA通信单元或芯片产品故障量; n 为运行年份; $f(i)$ 为第*i*年故障因数, $1-f(i)$ 为第*i*年允许故障因数, $f(1)=1, f(2)=0.9, f(3)=0.6, f(4)=0.4, f(5)=0.2, f(n>5)=0.1$ 。

8) 停电事件上报准确率。

停电事件上报准确率(power outage warning

performance, POWP)定义为被考核厂商STA通信单元或芯片停电事件上报深化应用功能情况。本文分析STA通信单元或芯片的停电事件上报情况,包含是否存在误报、漏报现象,统计在指定周期(最小为1d)范围内厂商的停电事件准确率。该项目指标仅适用于户表停电场景,如下:

$$R_{st} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^d M_i}{\sum_{i=1}^d N_i \cup S_i}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中, R_{st} 为STA通信单元或芯片厂商在指定的考核时间范围*d*内的停电事件准确率; M_i 为第*i*天该STA通信单元厂商综合研判为无效的停电事件; N_i 为第*i*天该STA通信单元厂商的复电事件; S_i 为供服停电事件。

9) 相位识别执行率。

相位识别执行率(phase recognition rate, PRR)表示被考核厂商STA通信单元或芯片相位识别深化应用功能情况。本文通过对网络中各STA节点的某一时刻(建议时间在通信闲时)相位识别执行情况进行监测,按周期统计相位识别执行率,如下:

$$R_{phase} = \frac{N_{succ}}{S_{total}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, R_{phase} 为STA通信单元厂商在某日的相位识别执行率; N_{succ} 为被考核厂商STA通信单元相位识别执行成功数; S_{total} 为该STA通信单元厂商所有在运通信单元数。当 R_{phase} 为STA芯片相位识别执行率时,同理如上。

2 基于KICA的个体权重求解

2.1 独立成分分析法

独立成分分析法(independent component analysis, ICA)是最近发展起来的一种方法,可以看作是PCA的推广。ICA主要针对无监督特征提取,其目的是将输入数据线性变换为不相关的分量,样本集沿该分量的分布为最小高斯分布^[19]。

假设有*m*个独立分量,表示为 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_m]$,观察到的信号为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$,则ICA的经典模型为

$$X = AY \quad (12)$$

式中, A 为待求矩阵。

ICA主要计算矩阵 W ,即 A 的逆矩阵。因此可

估计独立分量如下:

$$\tilde{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (13)$$

式中, \tilde{Y} 为 Y 的估计值。

目前, 已存在多种方法求解矩阵 \mathbf{W} 。此类学习算法大多可总结为

$$\Delta \mathbf{W} = (\mathbf{I} + g(s)\mathbf{s}^T)\mathbf{W} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{X}$; $g(s) = 1 - \frac{2}{1 + e^{-s}}$ 。在此学习过程

之前, 需预处理操作 $\tilde{\mathbf{W}}$, 即需要白化, 其目的是保证信号 X 不具有相关性。白化后的信号 I 如下:

$$\mathbf{I} = \tilde{\mathbf{W}}\mathbf{X}\mathbf{X}^T\tilde{\mathbf{W}}^T \quad (15)$$

式中, $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{\Lambda}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{V}^T$, $\mathbf{\Lambda}$ 和 \mathbf{V} 分别为 X 的协方差矩阵的特征值矩阵和特征向量矩阵。

2.2 KICA

ICA 作为一种线性化方法, 被广泛用于对线性模型进行数据冗余度约简和特征提取。然而现实环境下多数数据都是非线性分布, 无法适用线性模型^[20]。

KICA 的主要思想是首先将输入数据映射到隐式特征空间 $F: \Phi: x \in \mathbf{R}^N \rightarrow \Phi(x) \in F$ 。然后在 F 中执行 ICA, 以产生输入数据的一组非线性特征。

基于文 2.1 所述, 输入数据 X 在特征空间 F 中将被白化。白化矩阵为 $\tilde{\mathbf{W}}_\phi = (\mathbf{\Lambda}_\phi)^{\frac{1}{2}}(\mathbf{V}_\phi)^T$, 其中, $\mathbf{\Lambda}_\phi$ 、 \mathbf{V}_ϕ 为协方差矩阵 $\hat{\mathbf{C}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi(x_i)\Phi(x_i)^T$ 在 i 中的特征值矩阵和特征向量矩阵, 然后可得白化数据 X_ϕ^w :

$$X_\phi^w = (\tilde{\mathbf{W}}_\phi)^T \Phi(X) = (\mathbf{\Lambda}_\phi)^{-1} \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{K} \quad (16)$$

式中, \mathbf{K} 定义为 $K_{ij} = (\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j))$; $\boldsymbol{\alpha}$ 为 \mathbf{K} 的特征向量矩阵。经过白化变换后, 通过以下迭代算法计算公式求解, 直至 \mathbf{W}_ϕ 收敛:

$$\tilde{Y}_\phi = \mathbf{W}_\phi X_\phi \quad (17)$$

$$\Delta \mathbf{W}_\phi = \left[\mathbf{I} + \left(\mathbf{I} - \frac{2}{1 + e^{-\tilde{Y}_\phi}} \right) (\tilde{Y}_\phi)^T \mathbf{W}_\phi \right] \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{W}}_\phi = \mathbf{W}_\phi + \rho \Delta \mathbf{W}_\phi \rightarrow \mathbf{W}_\phi \quad (19)$$

式中, ρ 为一个学习常数。

根据上述算法, 测试数据 s 的特征可通过以下方式获得:

$$y = \mathbf{W}_\phi (\mathbf{\Lambda}_\phi)^{-1} \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{K}(X, s) \quad (20)$$

式中, $\mathbf{K}(X, s) = (k(x_1, s), k(x_1, s), \dots, k(x_1, s))^T$,

k 为核函数。

在上述迭代算法中, 函数 Φ 是一种隐形式。本文选择多项式内核函数形式, 其数学表达如下:

$$k(x, s) = (x \cdot s)^d \quad (21)$$

实际上, 核 ICA = 核中心化 + 核白化 + ICA。为特定的应用领域选择合适的内核函数可能很困难, 而且在很大程度上仍然是一个尚未解决的问题, 在本文中, 将在仿真中采用余弦核。

3 基于 CIM 的作用权重求解

CIM 主要用于决策者在维修活动的优先顺序、将系统结构和组件 (systems structures and components, SSC) 分配给分级质量保证计划、SSC 的安全分类等应用中使用重要性度量排序。其中的重要度量之一是 RAW。RAW 能够为风险评估提供参考, 故本文基于 RAW 求解各指标的作用权重。

RAW 是一种边界度量, 它提供某一基本因素可能导致的系统整体风险水平变化, 即事件发生时相关的潜在风险增加度。其数学表达为

$$I^{\text{RAW}} = R_i^+ / R_0 \quad (22)$$

式中, R_i^+ 为当部件 i 一定产生风险时系统整体风险的增长幅度; R_0 为目前的系统整体风险, 该值量化了如果假设相关基本事件完全不可靠, 系统风险将增加的因素。因此 RAW 适用于系统稳定度的检测和维护。

本文将组成部件重新定义为因素 $e_{j,k}$, 将相应的部件风险定义为当 HPLC 系统故障发生时因素 $e_{j,k}$ 同时出现的概率, 将系统整体故障风险定义为该系统中有故障发生的综合似然度。因此, RAW 可被重新定义为当因素 $e_{j,k}$ 出现即必然产生影响时, 系统整体风险的相对上升程度。相应的数学表达为

$$I^{\text{RAW}}(e_{j,k}|t_i) = \frac{1 - h(0_k, p(t_i))}{1 - h(p(t_i))} \quad (23)$$

式中, $1 - h(0_k, p(t_i))$ 表示当元素 $e_{j,k}$ 确定出现时, 故障 t_i 出现在系统中的风险; $1 - h(p(t_i))$ 表示故障 t_i 出现在系统中的风险。

目前, 系统整体风险根据系统的结构会有所不同, 而最基本的系统结构有串联和并联 2 种。其中, 任一组成部件的故障都会导致系统的故障, 当所有组成部件都相互独立时, 系统的整体故障风险可由概率学得出:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (24)$$

式中, R_i 为单个部件 i 的风险度; R_s 为系统整体风险度。

为求解式(23)中的系统整体故障风险 $1 - h(p(t_i))$, 定义数据库矩阵 $D(i, j)$ 代表数据库当日的数据, f_j 代表指标特征。本文中各个环境特征的结构为串联结构, 且假设所有环境特征都互不干涉, 则系统整体故障风险可由各部件风险的乘积来求解, 其数学表达式为

$$1 - h(p(t_i)) = 1 - \prod_{j=2}^{n+1} h(1_k, p(t_i)) = 1 - \prod_{j=2}^{n+1} \left(\frac{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) = e_{j,k}; D(i, j) \in f_j|}{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) \in f_j|} \right) \quad (25)$$

综上, RAW 的表达式表示为

$$R_{RAW} = \frac{1 - \prod_{k=1}^l \left(\frac{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) = e_{j,k}; D(i, j) \in f_j|}{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) \in f_j|} \right)}{1 - \prod_{j=2}^{n+1} \left(\frac{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) = e_{j,k}; D(i, j) \in f_j|}{\sum_{i=2}^{|k \in D_j|} |t_i \in D(i, 1); D(i, j) \in f_j|} \right)} \quad (26)$$

式中, i, j 分别为数据库中第 i 行第 j 列; n 为指标个数; k, l 代表当元素 $e_{j,k}$ 出现时第 k 个指标所对应的第 l 个范围区间。

4 组合赋权评估流程

评价指标的权重计算是评价过程中的关键步骤, 指标权重的分配在很大程度上影响评价结果的准确性。单一的评价指标很难描述 HPLC 通信单元现场电能计量设备质量的整体性能水平。因此, 选择合适有效的权重方法是评估体系的核心。本文采用组合赋权法计算评价指标的权重。首先, 采用 KICA 和 CIM 分别计算个体权重和作用权重; 然后, 利用线性加权模型计算出最优组合系数并融合个体作用权重, 得到组合评价指标权重:

$$c_i = \epsilon a_i + (1 - \epsilon) b_i \quad (27)$$

式中, ϵ 为作用偏好系数, $\epsilon \in [0, 1]$; $1 - \epsilon$ 为个体偏好系数; c_i 为第 i 个指标组合后得到的权重; a_i, b_i 分别为第 i 个指标所对应的作用权重和个体权重。

综上所述, 其综合评估流程如图 1 所示。

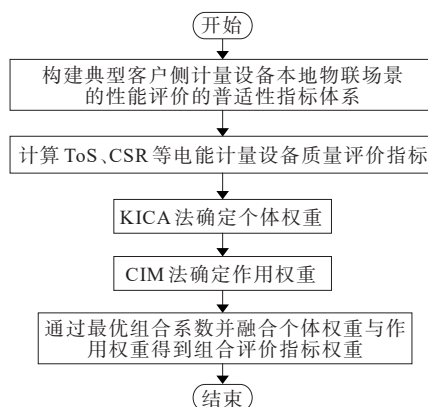


图 1 综合评估流程

Figure 1 Comprehensive evaluation flow chart

5 算例分析

本文基于中部某地区范围内多个区块中在运 HPLC 通信单元的运行数据进行算例仿真。其中, 样本数据以天为采集单位周期。

一方面, 依据信息有效程度实施指标的个体权重衡量。通过 KICA 模型将标准化的输入数据样本集进行主成分计算, 以衡量各特征的信息有效程度。本文选用累计百分比表示主成分方差量, 即特征的信息量, 故求解的累计方差百分比为该特征的累计贡献率, 可用于确定各主成分分值。总计 9 组指标特征的累计贡献率具体如图 2 所示。由图 2 可知, 以工程经验的 95% 为限, 共计需 7 个主成分才可满足数据信息含量需求, 论证了在此综合评价系统中, 不适宜进行数据降维。此外, 以其中某日的数据为例求解当日各特征的个体权重, 结果如图 3 所示。

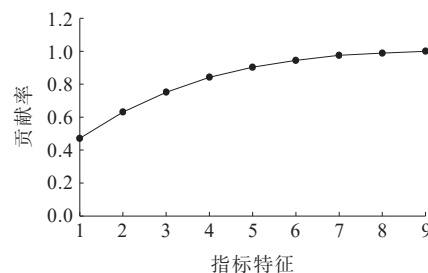


图 2 各特征累计方差百分比

Figure 2 Cumulative variance percentage of each feature

另一方面, 基于各指标针对整体运行质量的影响程度衡量指标的作用权重。根据 CIM 模型, 求解各特征的 RAW 得分, 用于衡量当计及该指标即该指标发挥作用时, 整体运行状态评估结果的变化趋势及幅度。同理, 以其中某日数据为例求解当日各指标的作用权重, 结果如图 4 所示。

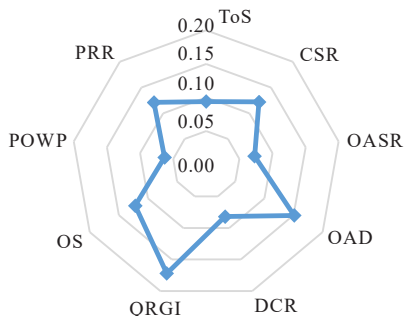


图3 通信单元物联性能综合评估个体权重

Figure 3 The individual weights for the comprehensive evaluation of the communication unit's IoT performance

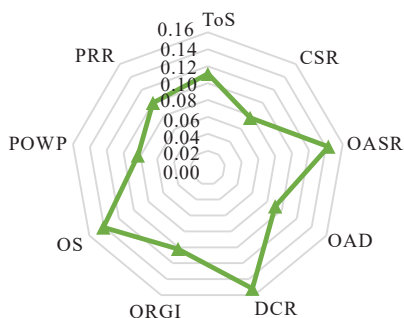


图4 通信单元物联性能综合评估作用权重

Figure 4 The functional weights for the comprehensive assessment of the communication unit's IoT performance

结合以上结果,依据上文所述的组合赋权模型进行整合。为避免过程中潜在主观性倾斜,本文取作用偏好系数为0.5,以平衡2种权重比重。此外,为降低随机性误差,本文将综合考虑数据集中所有日期评估结果,以日均组合权重作为最终输出结果。基于上述2点,运行状态综合评估结果如图5所示。

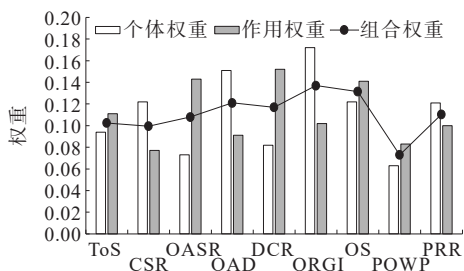


图5 通信单元物联性能综合评估组合权重

Figure 5 The combined weights for the comprehensive assessment of the communication unit's IoT performance

1) 各指标的个体权重和作用权重分布并不直接相关,且不同特征间还存在一定差异。因此,采用单一权重衡量方法势必忽略其他影响因素,继而

影响评价结果。而组合权重介于个体权重和作用权重之间,可避免单一评估视角的片面性,因此具有一定优势。

2) 在各指标中,一次采集时长、全检试验合格率以及运行稳定性的组合权重相对较大,即能够更大程度地影响HPLC通信单元运行评估效果,同时可为下一步综合评价方案的提升提供参考。

最后,将综合评估结果与已知评价结果实施对比,以检验所提出KICA-CIM评估模型性能。其中,仿真验证采用十重交叉验证方式,以75%数据样本作为训练集,10%作为验证集,15%作为测试集。

目前传统CCO/STA通信单元客观评价主要通过直接赋权,其计算方法如下:

$$R = [(aR_{in-time} + cR_{acc} + dT_{acc} + eR_v + fR_{total} + gR_{stab} + hR_{st} + iR_{phase}) \times 100 + bR_{sa}] / 9 \quad (28)$$

式中, a、b、c、d、e、f、g、h、i为上述各指标权重系数,可根据实际经验选取,本文均设为1。

为验证所提方法的改进效果,本文将KICA-CIM分别与标准CIM以及从传统直接赋值的方法进行对比,结果如表1所示。此外,KICA-CIM还将与4种典型主观/客观赋权法:EIW、EW、AHP与PCA,分别实施对比,结果见表2。同理,2组仿真对比均依据数据集中所有日期评价效果的整合,所得结果如表1所示。

表1 评估模型内部对比

评估方法	日均准确率
KICA-CIM	0.903 1
CIM	0.855 2
直接赋值	0.679 2

表2 评估模型外部对比

评估方法	日均准确率
KICA-CIM	0.903 1
EIW	0.777 1
EW	0.860 2
AHP	0.849 5
PCA	0.808 4

由表1、2可得,相较其他2种评估模型,所提出KICA-CIM模型在性能上具有一定优势。在表1中,相较CIM方法,KICA-CIM具备计及不同方面的组合权重架构,能够适应复杂数据环境;而相比直接赋值,KICA-CIM能够显著降低主观性设置所造成的误差。在表2中,KICA-CIM组合模型能够兼顾主观、客观赋权各自的优势,在评估效果上体现一定程度的提升。

6 结语

为有效应对电能计量设备HPLC通信单元现场运行情况下的多源异构高维数据环境,本文提出了一种基于KICA-CIM的多模型集成HPLC通信单元运行质量评估体系,以实现科学合理评估。本文的主要工作如下。

1) 建立了HPLC物联性能评价指标体系。该评价指标体系涵盖供货及时率、售后服务满意度、一次采集成功率等9个方面,全面描述了通信单元现场运行性能水平,适用于HPLC性能的安全评价。

2) 采用KICA-CIM组合赋权法计算出评价指标的量化得分,分别求解个体权重与作用权重,基于双维度对HPLC物联性能进行综合评价,避免单一方法的局限性,并适应复杂数据环境。

3) 通过实际数据应用测试,证明该方法能够有效地评价HPLC的运行性能水平,反映设备的实际运行状况,并对电能计量设备状态评估和维护策略产生积极影响。

参考文献:

[1] KIEDROWSKI P, SAGANOWSKI Ł. Method of assessing the efficiency of electrical power circuit separation with the power line communication for railway signs monitoring[J]. *Transport and Telecommunication Journal*,2021,22(4):407-416.

[2] MILLER D, MIRZAEVA G, TOWNSEND C D, et al. The use of power line communication in standalone microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*,2021,57(3): 3029-3037.

[3] 唐学军,谭忠富,李智威,等.基于AHP-熵权法的配电网设备资产运检成本优化配置模型[J]. *电力建设*,2022, 43(10):166-172.

TANG Xuejun, TAN Zhongfu, LI Zhiwei, et al. AHP-entropy weight method based optimal allocation of operation and maintenance cost of distribution network

equipment assets[J]. *Electric Power Construction*,2022, 43(10):166-172.

[4] 邵方静,宋晓林,刘坚,等.动态电能计量算法研究综述 [J]. *电测与仪表*,2023,60(4):1-10.

SHAO Fangjing, SONG Xiaolin, LIU Jian, et al. A review on dynamic energy metering algorithms[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2023,60(4): 1-10.

[5] 王强钢,周亦尧,廖建权,等.直流配电网电能质量研究综述[J]. *电力系统自动化*,2023,47(7):193-207.

WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*,2023,47(7): 193-207.

[6] 黄志鹏,李黄强,舒征宇,等.基于配电自动化故障管理的配电网扩展规划方法[J]. *智慧电力*,2022,50(4):66-72.

HUANG Zhipeng, LI Huangqiang, SHU Zhengyu, et al. Expansion planning method of distribution system based on distribution automation fault management[J]. *Smart Power*,2022,50(4):66-72.

[7] 热依娜·马合苏提,周玮,彭飞翔,等.考虑端对端交易与预测误差的配电网实时能量平衡策略[J]. *电力系统保护与控制*,2023,51(23):1-15.

Reyina·MAHESUTI, ZHOU Wei, PENG Feixiang, et al. Real-time energy balancing strategy for distribution networks considering peer-to-peer trading and prediction errors[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(23):1-15.

[8] 王素娟,雷正保,赵建.汽车碰撞安全风险决策中基于复合聚类的群决策专家权重确定方法[J]. *振动与冲击*, 2014,33(7):73-78+85.

WANG Sujuan, LEI Zhengbao, ZHAO Jian. Expert-weight determination method in group decision-making based on composite clustering for automobile-crash-safety risk decision-making[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2014,33(7):73-78+85.

[9] 骆建军,雷刚,华福才.基于AHP的地铁隧道防排水型式设计及应用研究[J]. *现代隧道技术*,2017,54(1):24-30.

LUO Jianjun, LEI Gang, HUA Fucui. On the AHP-based design and application of waterproofing and drainage for subway tunnels[J]. *Modern Tunnelling Technology*,2017, 54(1):24-30.

[10] 程智余,朱晓虎,李建青.基于改进ELECTRE法的电网规划投资多准则融合决策方法[J]. *中国电力*,2022,55 (11):59-65.

CHENG Zhiyu, ZHU Xiaohu, LI Jianqing. A multi-criteria fusion decision-making method for power grid planning investment based on improved ELECTRE method[J]. *Electric Power*,2022,55(11):59-65.

- [11] 李鹏,嵇佳丽,丁倩雯.基于熵值法特征筛选的GRNN降雹识别[J].气象,2021,47(7):854-861.
LI Peng, JI Jiali, DING Qianwen. GRNN hail recognition based on entropy method and feature fusion [J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(7): 854-861.
- [12] 陆嘉铭,高洁.基于主成分分析法的线损指标评价[J].华东电力,2014,42(9):1817-1820.
LU Jiaming, GAO Jie. Index evaluation of line loss based on principal component analysis[J]. East China Electric Power, 2014, 42(9): 1817-1820.
- [13] 张鼎衢,林国营,宋强,等.基于灰色理论及模糊层次分析法的电能计量装置状态评估[J].电测与仪表,2019,56(11):134-139+152.
ZHANG Dingqu, LIN Guoying, SONG Qiang, et al. State assessment of electric energy metering device based on grey theory and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 134-139+152.
- [14] 程瑛颖,吴昊,杨华潇,等.电能计量装置状态模糊综合评估及检验策略研究[J].电测与仪表,2012,49(12):1-6.
CHENG Yingying, WU Hao, YANG Huaxiao, et al. Fuzzy comprehensive status evaluation on electric energy metering device and test strategy research[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(12): 1-6.
- [15] 王保帅,尹家悦,胡珊珊,等.基于层次分析法和群体决策的智能电能表可靠性分配技术研究[J].电测与仪表,2021,58(12):169-174.
WANG Baoshuai, YIN Jiayue, HU Shanshan, et al. Research on reliability allocation technology of smart meter based on analytic hierarchy process and group decision-making[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 169-174.
- [16] 李发亮,刘国亮,张良,等.基于FC-AHP的电能计量系统改造项目评价模型[J].电子测量技术,2018,41(3):22-27.
LI Faliang, LIU Guoliang, ZHANG Liang, et al. The evaluation model of energy measurement system reconstruction project based on FC-AHP[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(3): 22-27.
- [17] 何艺,秦丽娟.基于改进AHP和熵权法的计量自动化终端质量综合评价研究[J].电测与仪表,2015,52(23):58-62.
HE Yi, QIN Lijuan. Research on comprehensive assessment of metering automation terminal quality based on the improved AHP and entropy method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 58-62.
- [18] 吴争荣,俞小勇,董旭柱,等.基于状态估计的配电网实时态势感知与评估[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(3):140-145.
WU Zhengrong, YU Xiaoyong, DONG Xuzhu, et al. Real-time situation awareness and evaluation of distribution network based on state estimation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(3): 140-145.
- [19] 贾春阳,李卫华,李小春,等.基于ICA的变化检测新方法[J].光电工程,2013,40(12):39-43.
JIA Chunyang, LI Weihua, LI Xiaochun, et al. A novel change detection method using independent component analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(12): 39-43.
- [20] ZHONG H, LIU J X, WANG L M, et al. Bearing fault diagnosis based on kernel independent component analysis and antlion optimization[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(16): 3573-3587.

(上接第73页 Continued from page 73)

- [24] 文波,秦文萍,韩肖清,等.基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J].电网技术,2015,39(4):892-898.
WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [25] GU Y J, LI W H, HE X N. Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2328-2337.
- [26] 卢宇,姜崇学,汪楠楠,等.柔性直流电网站间协调控制功能及稳控配合研究[J].电气技术,2022,23(4):63-69.
LU Yu, JIANG Chongxue, WANG Nannan, et al. Research on inter-station coordinated control and stability control cooperation in flexible DC grid[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(4): 63-69.
- [27] 刘英培,崔汉阳,梁海平,等.考虑直流电压稳定的VSC-MTDC附加频率自适应下垂控制策略[J].电网技术,2020,44(6):2160-2168.
LIU Yingpei, CUI Hanyang, LIANG Haiping, et al. Additional frequency adaptive droop control strategy considering DC voltage stability for VSC-MTDC system [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2160-2168.
- [28] 曾蕊,李保宏,江琴,等.级联型混合直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J].电力工程技术,2022,41(2):60-66.
ZENG Rui, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Adaptive droop control strategy of cascaded hybrid HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 60-66.