

文章编号:1006-2467(2024)01-0019-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.420

基于云模型综合相似度的电力物联网 关键技术综合评价

陈连福, 钟海旺, 谭振飞, 阮广春

(清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室;电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: 目前电力物联网关键技术应用的综合评价具有单评价对象的特点,传统评价方法无法适用.为全面评价电力物联网项目建设水平和运营成效,在综合考量电力物联网不同建设和运营阶段及其关键要素基础上,建立电力物联网关键技术综合评价指标体系,根据其单评价对象场景的特点,提出基于云模型综合相似度的评价模型.通过对逼近理想解排序方法的改造构建单评价对象的决策矩阵,提出以兼顾云模型的形状-距离综合相似度为度量,表征逼近理想解排序方法的相对贴近度,进而实现对单评价对象的精准评价.应用所提方法综合评价某电力物联网示范工程,验证了所提综合评价体系和评价方法的客观性与全面性.

关键词: 电力物联网;指标体系;云模型;云模型相似度;逼近理想解排序方法

中图分类号: TM734

文献标志码: A

Comprehensive Evaluation of Key Technologies in Power Internet of Things Based on Comprehensive Similarity of Cloud Model

CHEN Lianfu, ZHONG Haiwang, TAN Zhenfei, RUAN Guangchun

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment;

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Currently, the comprehensive evaluation of the application of key technologies in the power Internet of Things (PIoT) has the characteristics of a single evaluation object, and the traditional evaluation methods are not applicable. In order to comprehensively evaluate the technology maturity and operational effectiveness of PIoT projects, a comprehensive evaluation index for key technologies in PIoT is established to comprehensively consider the different development stages. According to the characteristics of application scenario, an evaluation model based on the comprehensive similarity of cloud model is proposed. By reforming the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method, a decision matrix for a single evaluation object is constructed, and the shape-distance comprehensive similarity of the cloud model is used as a measure to characterize the relative closeness of the TOPSIS method, and the accurate evaluation of a single object is realized. Finally, the proposed method is applied to assess a PIoT demonstration project. The results show that the proposed comprehensive evaluation index and evaluation method can objectively and comprehensively evaluate the

收稿日期:2022-10-20 修回日期:2022-12-09 录用日期:2023-02-13

基金项目:国家重点研发计划“电力物联网关键技术”(2020YFB0905900)资助项目

作者简介:陈连福(1987-),副研究员,从事电力市场、智能电网、需求侧响应等研究.

通信作者:钟海旺,副教授,博士生导师,电话(Tel.):010-62794361;E-mail:zhonghw@tsinghua.edu.cn.

comprehensive application effect of each key technology in the construction and operation stages of PIoT.

Keywords: power Internet of Things (PIoT); index system; cloud model; cloud model similarity; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS)

随着互联时代的到来,传统电网在现代化信息技术加持下被信息化、数字化、现代化等手段赋能,逐步实现了电力生产、传输、储存、交易、消费等各环节的设备及人员的状态感知、信息交互、节点互联、数据共享和技术融合,电力物联网(Power Internet of Things, PIoT)的发展格局初现端倪^[1-2]. PIoT 是能源互联网数字化、网络化、智能化的应用载体,利用传感技术、网络技术、通信技术、平台支撑技术和人工智能等现代化信息技术,实现电网中的线路、设备及人员等不同节点的互联与信息交互. PIoT 技术的发展将有效推动我国电力数字新基建、大幅提升电网的数字化和智能化水平,推动电网加速向能源互联网转型升级,助力构建清洁低碳、安全高效的能源体系^[3-5].

PIoT 技术应用的综合评价是 PIoT 发展过程中的重要环节. 构建科学合理的评价指标体系和综合评价模型,不仅能量化评价 PIoT 技术为传统物理电网带来的“技术红利”,还能客观反映高性能传感器、物联终端、自组网设备等不同设备与技术对 PIoT 的贡献程度,为未来各项 PIoT 技术的应用落地提供重要参考.

目前,对 PIoT 的电力大数据、机器学习、5G 通信、安全风险、信任机制、建设成效评价等方面已有相关研究. 文献[6]中建立了 PIoT 安全风险评价指标体系,针对主、客观赋权法的优劣,结合改进的层次分析和熵值法对指标进行组合赋权,以云计算理论为基础构建基于云模型的安全风险评估模型;文献[7]中针对 PIoT 终端信任问题,提出一种基于信息熵的信任评价方法;文献[8]中研究了 PIoT 工业大数据的特点和数据质量评价,通过可自动识别数据质量问题的算法和开发数据质量智能评价系统,提高了数据质量评价效率;文献[9]中针对 PIoT 中的业务场景,研究了 5G 通信网的能量管理机制及两者产能用能的协调互动,研究了 5G 通信与 PIoT 的融合;文献[10]中论述了深度学习技术在电力系统故障诊断、暂态稳定性分析、负荷及新能源功率预测、运行调控等领域的应用现状,结合电力系统各生产环节特点构建了深度学习技术在电力系统中的应用框架;文献[11]中针对 PIoT 增值服务模式建立了电网增值服务的科学评价体系,为电网企业集中

优势资源、科学规划和有序推进智能电网增值业务提供理论支撑;文献[12]中构建了 PIoT 建设成效的预测与评价模型,通过构建智能算法预测模型对电力无线网建设周期内指标数据进行训练,待周期结束后将真实值与预测值代入模型,分析了真实成效与预测成效产生差异的原因;文献[13]中研究了机器学习在升级电力系统优化工具方面的潜力,论述了综合建模的方法,分析了机器学习方法和优化模型之间的协调. 现有研究主要针对 PIoT 的数据^[14-15]、政策^[16]、风险^[17]等单方面评价方法开展研究,尚未有对 PIoT 的体系架构、传感技术、网络技术、平台支撑技术、智能应用以及综合效益等多维度特征进行综合评价. 此外,现有研究对 PIoT 的建设和运营技术特点考虑不够充分,一定程度上限制了评价结果的客观性和全面性,且 PIoT 关键技术的评价属于单评价对象场景,传统的评价方法无法适用,需根据其指标体系的特点构建单评价对象的评价模型.

从 PIoT 的相关技术标准出发,充分考虑 PIoT 建设、运营两个阶段的技术特点和综合效益,本文提出了 PIoT 关键技术综合评价指标体系,并以云模型(Cloud Model)和逼近理想解排序(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)方法为基础,构建基于云模型综合相似度的评价模型. 提出的评价模型以兼顾云模型形状-距离的综合相似度为度量,表征传统 TOPSIS 法中的相对贴近度,兼顾了待评价指标综合云、理想解综合云和负理想解综合云 3 个云模型之间的形状相似度和距离相似度,客观、全面地量化了 PIoT 关键技术评价指标的优劣程度.

1 PIoT 技术标准

PIoT 的相关技术标准是关键技术指标量化评价的参照依据. 世界各国、地区的合作机构及各国际标准化组织已在物联网、传感器技术及电力信息通信等领域开展了大量的研究工作,形成了相应的标准体系.

众多国际标准化组织开展了物联网标准的相关工作,其工作热点主要集中在电子标签、机器类通信、传感网、物联网和泛在网等领域,并已发布了相

应的国家、国际标准^[18]。传感器技术标准方面,输电线路感知终端、用电侧感知终端、监测装置、变电感知终端、高压开关、线缆等多种关键装备已制定了技术规范。量测类标准方面,国家标准、行业标准、企业标准等正在不断完善。智能家居方面已制定和出台了多个技术标准,主要包括自动控制设备通用技术要求、物联网智能家居设备描述方法、智能家居设备与电网间信息交互接口等标准^[19]。电力信息通信技术标准方面,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)制定了 ISO/IEC 26907《信息技术系统间通信和信息交换》系列、ISO/IEC 8208《信息技术系统间的电信和信息交换》系列、ISO/IEC 15423《信息技术自动识别和数据采集技术》系列等逾百类相关国际标准。此外,《IoT 2020: 智能安全的物联网平台》白皮书阐释了 5G 标准、下一代卫星/装置间通信传输层协议标准和物联网设备能够升级至新连接标准能力的标准,并被确立为未来信息通信领域重要的标准^[20]。

PIoT 各项技术标准为 PIoT 关键技术综合评价提供了评判依据,物联网标准、传感器技术标准、电力信息通信技术标准等相关技术标准为 PIoT 关键技术综合评价指标体系的构建和指标的量化评价提供重要参考^[21-22]。

2 PIoT 关键技术综合评价指标体系

2.1 评价指标体系构建原则

评价指标体系是由多个相互联系又相对独立的评价指标按照一定层级结构组成的有机整体。提出的 PIoT 关键技术综合评价指标体系充分考虑 PIoT 建设、运营的技术特点和综合效益并遵循简明性、独立性、代表性、差异性和可行性原则。

2.2 评价指标体系层级结构

PIoT 关键技术指标综合评价体系为 3 层 2 级结构,如图 1 所示。第 1 层为目标层;第 2 层为主题指标集层(1 级指标 A, B, ..., F);第 3 层为指标子集层(2 级指标 A_m, B_q, \dots, F_p),是主题指标集的

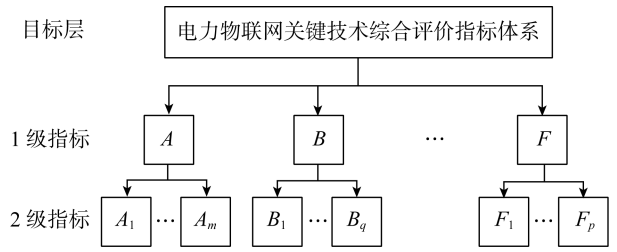


图 1 指标体系层级
Fig. 1 Hierarchy of index system

指标子集。其中,第 2 层包含体系架构技术指标、传感器技术指标、网络技术指标、平台支撑技术指标、智能应用技术指标和综合效益指标 6 个主题指标集。

2.3 评价指标体系

构建的 PIoT 关键技术指标综合评价体系由 2 级共 34 个指标构成,如图 2 所示。

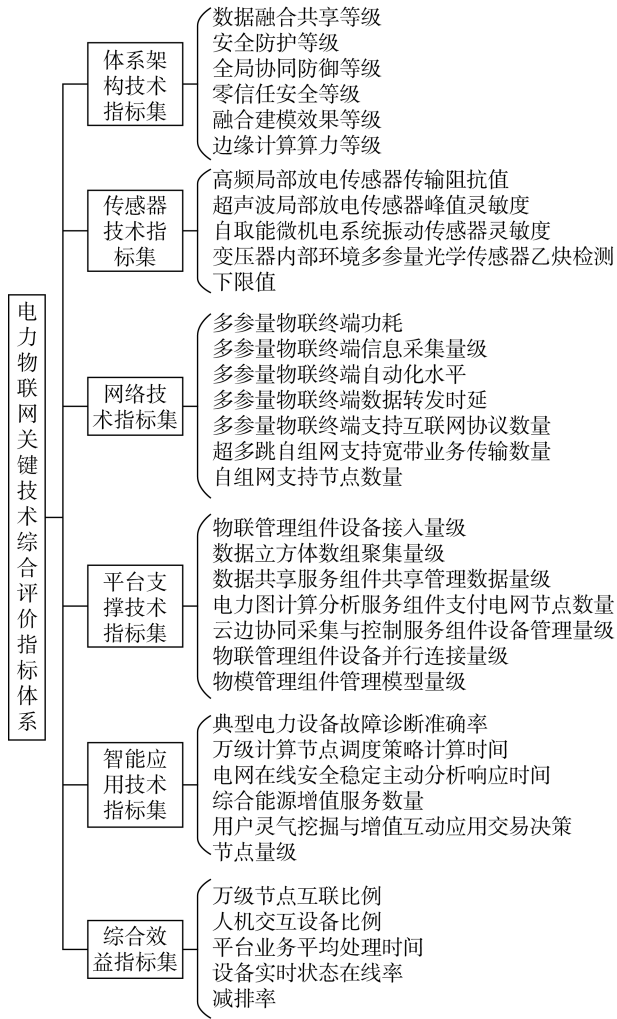


图 2 PIoT 关键技术综合评价指标体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation index for key technologies in PIoT

2.4 典型指标说明

2.4.1 体系架构技术类指标集 体系架构技术类指标集是表征 PIoT 基础架构安全防护性能、协同防御能力、物理数字融合建模效果和边缘计算能力的综合性指标集。其中,数据融合共享等级用于表征 PIoT 架构多源异构数据的融合共享程度;安全防护等级用于衡量 PIoT 的可信认证、信任评估、态势感知、协同防御等功能的安全等级;全局协同防御等级用于衡量 PIoT 架构各层级网络检测技术、数据安

全技术、网络接入安全技术的协同联动、协同防御应用效果;零信任安全等级指标用于衡量 PIoT 零信任身份标识及认证技术对 PIoT 终端、用户、应用和流量的强认证应用效果;融合建模效果等级指标用于衡量 PIoT 的设备运行、系统控制、行为决策等融合建模业务的应用效果;边缘计算的算力等级指标用于衡量 PIoT 对海量异构数据等信息就地处理的计算能力^[23]。

2.4.2 传感器技术类指标集 传感器技术类指标集是用于表征 PIoT 中所部署传感器的综合性能。其中,高频局部放电传感器、超声波局部放电传感器是局部放电检测系统的核心部件,其检测灵敏度直接决定检测系统的整体性能。微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)传感器是采用微电子和微机械加工技术制造得到的新型传感器,具有体积小、质量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点,其检测灵敏度对检测系统的整体性能十分重要。运行变压器油中溶解微量乙炔气体含量能有效反映变压器内部的过热与放电故障,多参量光学传感器检测是实现变压器在线监测的有效手段,其乙炔检测下限值反映传感器的检测灵敏度^[24]。

2.4.3 网络技术类指标集 网络技术类指标集是表征 PIoT 中物联终端信息采集、分析、处理、传输能力和 PIoT 异构网络的网络空间智能化、网络融合性能的综合性指标集^[25]。其中,多参量物联终端功耗指标用于衡量 PIoT 中物联终端运行功耗水平;多参量物联终端信息采集量级衡量物联网终端对电气量、环境量和状态量的采集综合能力;多参量物联终端自动化水平表征物联网终端对感知设备实现自动链接、自动注册及自动配置的“即插即用”的应用效果;多参量物联终端数据转发时延反映物联网终端对所采集数据的转发和处理能力;超多跳自组网具有自组织、自愈合等特点,其支持的宽带业务传输数量、自组网支持节点数量是表征超多跳自组网自组织能力的重要参数^[26]。

2.4.4 平台支撑技术类指标集 平台支撑技术类指标集是表征 PIoT 平台对海量异构终端接入与管控能力的综合性指标集^[27-28]。数据立方是一种用于数据分析与索引的技术架构,针对大数据的处理器可以对元数据进行任意多关键字实时索引。其中,数据立方体数组聚集量级用于表征 PIoT 平台对多路数组的高性能存储与处理能力。电力图计算分析服务是基于图数据库节点的 PIoT 节点并行处理技术,其组件支持的电网节点数量用于表征电力图计

算分析服务能力^[29]。

2.4.5 智能应用指标集 智能应用指标集是表征 PIoT 运营阶段的电力业务场景智能应用的综合性指标集。其中,典型电力设备故障诊断率指 PIoT 中输电、变电、保护和配电等环节典型电力设备的故障诊断准确率;万级计算节点调度策略计算时间用于衡量 PIoT 中源网荷储自主智能调控技术在万级计算节点规模下的调度策略计算时间,表征调度策略的执行效果;电网在线安全稳定主动分析响应时间表征 PIoT 的安全稳定主动分析能力;综合能源增值服务数量用于衡量 PIoT 综合能源多元服务的应用规模^[30]。用户数据挖掘与增值互动应用交易决策节点量级用于衡量 PIoT 用户数据挖掘与增值互动的应用规模。

2.4.6 综合效益指标集 综合效益指标集是衡量 PIoT 运营阶段对电网运行和社会效益贡献的综合性指标集。其中,万级节点互联比例指 PIoT 中实现节点信息联通、数据交互以及挂载设备可调、可控的节点数量占比,用以表征 PIoT 项目中电力系统各个环节万物互联的程度;人机交互设备比例指 PIoT 中实现人机信息交互的设备占比,用以表征 PIoT 项目中电力系统设备的智能化程度;平台业务平均处理时间指 PIoT 项目中信息平台对电力业务的数据获取、处理及提供数据服务等全业务流程的平均处理时间,用以衡量 PIoT 信息高效处理的程度;设备实时状态在线率指 PIoT 中实现设备同时在线监测、查询的设备数量占比,用以表征 PIoT 状态全面感知的数字化程度。减排率多指 CO₂ 减排率^[31],即与传统系统相比,PIoT 工程范围内综合能源在输出相同冷热电量时对应的 CO₂ 减排量与传统化石能源供应系统 CO₂ 排放量的比值,即

$$\epsilon_R = \frac{\Delta E}{E_{ml}} \quad (1)$$

式中: ϵ_R 为减排率; E_{ml} 为统计期内传统系统污染物理论排放量; ΔE 为统计期内 PIoT 工程范围内综合智慧能源在输出相同冷热电量时对应的 CO₂ 减排量。

3 基于云模型综合相似度的评价模型

针对 PIoT 单评价对象场景的特点,提出了基于云模型综合相似度的评价模型,该评价模型以云模型和传统 TOPSIS 法为基础,通过云模型进行组合赋权、合理构建单评价对象决策矩阵,并结合兼顾云模型形状-距离的综合相似度对传统 TOPSIS 模型进行改造。首先,所提出的基于云模型综合相似度

的评价模型能为 PIoT 关键技术评价场景提供多种主观、客观赋权,合理的决策指标组合赋权方式弥补了单一赋权带来的不足,有利于 PIoT 关键技术复杂应用场景下的评价;其次,通过科学的构建单评价对象的决策矩阵,使得传统 TOPSIS 法克服了面对单评价对象场景的不足;最后,提出的评价模型以兼顾云模型形状-距离的综合相似度为度量,用以表征 TOPSIS 法中的相对贴进度,兼顾了待评价指标综合云、理想解综合云和负理想解综合云 3 个云模型之间的形状相似度和距离相似度,能全面反映 PIoT 关键技术评价指标的优劣程度。

3.1 基于云模型的组合权重确定

评价模型中的主观赋权方法种类数量记作 a_1 ,客观赋权方法种类数量记作 a_2 ,构建权重矩阵:

$$\mathbf{W} = \{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_a\} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \cdots & w_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{a,1} & \cdots & w_{a,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a 为组合权重的总数量, $a_1 + a_2 = a$; n 为待评价指标的数量; \mathbf{W}_i 为第 i 种赋权方式计算下的权重矩阵, $i = 1, 2, \dots, a$; $w_{i,j}$ 为第 i 种赋权方式计算下的第 j 个待评价指标的权重, $i = 1, 2, \dots, a, j = 1, 2, \dots, n$.

基于权重矩阵计算生成各指标的正态云组合权重 $C_W = (E_x, E_n, H_e)$, 计算方式如下:

$$\bar{W} = \left(\frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,1}, \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,2}, \dots, \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,n} \right) \quad (3)$$

$$D = \left(\frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \left| w_{i,1} - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,1} \right|, \dots, \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \left| w_{i,n} - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,n} \right| \right) \quad (4)$$

$$S^2 = \left(\frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a \left(w_{i,1} - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,1} \right)^2, \dots, \frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a \left(w_{i,n} - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a w_{i,n} \right)^2 \right) \quad (5)$$

$$C_W = \begin{cases} E_x = \bar{W} \\ E_n = \sqrt{\pi/2D} \\ H_e = \sqrt{|S^2 - E_n^2|} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{W} 为指标权重的样本均值; D 为权重样本的一阶绝对中心距; S^2 为权重样本方差; (E_x, E_n, H_e) 为云模型数字特征的 3 个参数, E_x 为云滴在论域空间分布的期望; 熵 E_n 是关于期望的偏差, 表征信息的模糊性; 超熵 H_e 为 E_n 的熵, 是不确定性度量, 由熵的随机值和模糊性共同决定^[12].

3.2 改进型逼近理想解排序模型的构建

在我国 PIoT 建设的最初阶段, PIoT 关键技术

综合评价的场景大多仅含有单一评价对象, 传统 TOPSIS 法无法实现 PIoT 关键技术评价方案的客观评价. 提出一种改进型的 TOPSIS 法, 通过科学构建评价指标决策矩阵, 克服传统 TOPSIS 法面对单评价对象场景的不足. 所提出的改进型的 TOPSIS 法根据国内外物联网标准、电力信息通信技术标准、传感器技术标准、电网互联标准、智能电网标准、可再生能源标准、PIoT 标准体系架构等相关的技术标准, 或专家咨询法确定指标决策矩阵的最优向量和合格向量, 实现对 PIoT 关键技术评价指标的对标决策.

(1) 构建决策矩阵. 针对 PIoT 单评价对象场景的特点, 对传统的 TOPSIS 法进行改进, 构建含有 PIoT 实际指标向量 \mathbf{A}_1 、最优指标向量 \mathbf{A}_2 和合格指标向量 \mathbf{A}_3 共 3 个向量的 $3 \times n$ 阶决策矩阵:

$$\mathbf{X}_{3 \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: \mathbf{A}_2 和 \mathbf{A}_3 基于 PIoT 相关技术标准或 Delphi 专家咨询法确定.

(2) 数据归一化. 构造标准归一化矩阵 $\mathbf{Y}_{3 \times n}(y_{ij})$, 对于极大型评价指标其每个元素表示为

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq x_j^+ \\ \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-}, & x_j^- < x_{ij} < x_j^+ \\ 0, & x_{ij} \leq x_j^- \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, n$.

对于极小型评价指标其每个元素表示为

$$y_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \geq x_j^+ \\ \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-}, & x_j^- < x_{ij} < x_j^+ \\ 1, & x_{ij} \leq x_j^- \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, n$.

构造理想解和负理想解, 通过标准归一化矩阵可得出理想解向量 $\mathbf{Y}_+ = [y_{21} \ y_{22} \ \cdots \ y_{2n}]$, 负理想解向量 $\mathbf{Y}_- = [y_{31} \ y_{32} \ \cdots \ y_{3n}]$.

构造理想解综合云, 基于理想解向量 \mathbf{Y}_+ 对 n 个指标的正态云组合权重 $C_W = (E_x, E_n, H_e)$ 进行聚合, 得到理想解综合云:

$$C^+ = \begin{cases} E_x^+ = \sum_{j=1}^n y_{2j} E_{x_j} \\ E_n^+ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2j} E_{n_j}^2} \\ H_e^+ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2j} H_{e_j}^2} \end{cases} \quad (10)$$

构造负理想解综合云,基于负理想解向量 Y_- 对 n 个指标的正态云组合权重 $C_w = (E_x, E_n, H_e)$ 进行聚合,得到负理想解综合云:

$$C^- = \begin{cases} E_x^- = \sum_{j=1}^n y_{3j} E_{x_j} \\ E_n^- = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{n_j}^2} \\ H_e^- = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_{e_j}^2} \end{cases} \quad (11)$$

构造待评价指标的综合云,基于归一化待评价指标向量 $[y_{11} \ y_{12} \ \cdots \ y_{1n}]$ 对 n 个指标的正态云组合权重 $C_w = (E_x, E_n, H_e)$ 进行聚合,得到待评价指标的综合云:

$$C = \begin{cases} E_x = \sum_{j=1}^n y_{1j} E_{x_j} \\ E_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1j} E_{n_j}^2} \\ H_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1j} H_{e_j}^2} \end{cases} \quad (12)$$

3.3 兼顾云模型形状-距离综合相似度的相对贴程度

云模型的相似度有形状相似度和距离相似度两个维度的度量.形状相似度反映云模型之间不确定度的相似程度,距离相似度反映云模型之间的距离远近程度^[32].相对贴程度是 TOPSIS 模型中表征评价对象优劣的依据,基于云模型的形状相似度和距离相似度构建了 TOPSIS 模型的相对贴程度.

正态云模型的形状相似度是对其不确定度的相似情况的度量,两朵云的不确定度越接近则形状相似度越大.当两朵云的熵值差距越大时,其形状相似度则越小.两朵云的形状相似度^[33]表示为

$$\text{Sim}_s(C_i, C_j) = \frac{\min\{\sqrt{E_{n_i}^2 + H_{e_i}^2}, \sqrt{E_{n_j}^2 + H_{e_j}^2}\}}{\max\{\sqrt{E_{n_i}^2 + H_{e_i}^2}, \sqrt{E_{n_j}^2 + H_{e_j}^2}\}} \quad (13)$$

且云模型的形状相似度满足 $0 \leq \text{Sim}_s(C_i, C_j) \leq 1$.

距离相似度是对两个云模型距离的远近程度的度量.两个云模型的期望之间的距离记为 $d = |E_{x_i} - E_{x_j}|$; 两朵云的熵分别为 E_{n_i}, E_{n_j} , 则 $\theta = d/[3(E_{n_i} + E_{n_j})]$ 为期望之间的相对距离;两朵云熵的比值记为 $E_{n_i}/E_{n_j} = k$.

两朵云的期望曲线的重叠面积为 $S(d)$,则两朵云的距离相似度表示为

$$\text{Sim}_d = \frac{S(d)}{S(0)} \quad (14)$$

式中: $S(0)$ 为 $d = 0$ 时的重叠面积,满足 $0 \leq$

$\text{Sim}_d(C_i, C_j) \leq 1$. 两朵云的距离相似度是关于 θ 的函数,且函数 $\text{Sim}_d(\theta)$ 的对应关系由两朵云熵的比值 k 决定,当 k 一定时, θ 和函数 Sim_d 的对应关系一定. $\theta_0 = 3 |E_{n_i} - E_{n_j}|/[3(E_{n_i} + E_{n_j})]$ 为函数 $\text{Sim}_d(\theta)$ 的一个拐点.文献[32]中对 θ 和函数 Sim_d 的关系进行了高斯曲线拟合,满足曲线形式为

$$y = a' \times \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right] \quad (15)$$

拟合的相关参数结果详见附录表 A1,则两朵云的距离相似度表示为

$$\text{Sim}_d(C_i, C_j) = \text{Sim}_d(\theta) = a' \times \exp\left[-\left(\frac{\theta-b}{c}\right)^2\right] \quad (16)$$

式中: a', b, c 为系数.

提出用待评价指标综合云分别与理想解综合云、负理想解综合云的形状-距离综合相似度来构建 TOPSIS 模型相对的贴程度,相对贴程度 r 综合考虑了待评价指标综合云、理想解综合云和负理想解综合云 3 个云模型之间的形状相似度和距离相似度,能够全面反映 PIoT 关键技术评价指标的优劣程度.所构建的相对贴程度满足 $0 < r < 1$,评价指标取值范围合理,相对贴程度 r 在有限区间 $(0, 1)$ 内能够直观表征综合指标的优劣程度.相对贴程度 r 越大,表示与理想水平越近,反之则越远.其公式可以表示为

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{Sim}_d(C, C^+) + \text{Sim}_s(C, C^+)}{\text{Sim}_d(C, C^+) + \text{Sim}_d(C, C^-) + \text{Sim}_s(C, C^+) + \text{Sim}_s(C, C^-)} \right) \quad (17)$$

式中: $\text{Sim}_d(C, C^+)$ 为待评价指标综合云与理想解综合云的距离相似度; $\text{Sim}_s(C, C^+)$ 为待评价指标综合云与理想解综合云的形状相似度; $\text{Sim}_d(C, C^-)$ 为待评价指标综合云与负理想解综合云的距离相似度; $\text{Sim}_s(C, C^-)$ 为待评价指标综合云与负理想解综合云的形状相似度.

3.4 评价模型计算流程

基于云模型综合相似度评价模型的计算流程如图 3 所示.首先,分别构造待评价方案的决策矩阵和权重矩阵,其中组合赋权的权重矩阵包含 a_1 种主观赋权和 a_2 种客观赋权;其次,对决策矩阵进行归一化处理,并构造理想解和负理想解;同时,根据权重矩阵计算权重样本均值 \bar{W} 、一阶绝对中心距 D 、样本方差 S^2 ,从而得到正态云组合权重的数字特征 (E_x, E_n, H_e) .然后,依托于正态云组合权重,并根据理想解、负理想解和待评价指标分别构造理想解综合

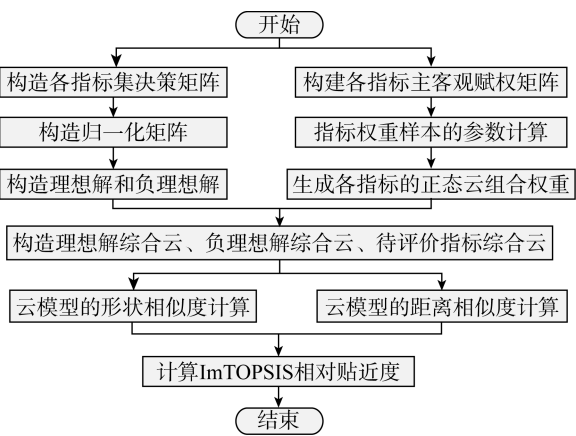


图 3 计算流程图

Fig. 3 Flow chart of calculation

云、负理想解综合云和待评价指标综合云.最后,分别计算待评价指标综合云、理想解综合云和负理想解综合云 3 个云模型之间的形状相似度和距离相似度,得到所构建的相对的贴度,完成综合评价.

4 算例分析

以我国天津市在建的某 PloT 示范工程项目为例,对所提评价方法进行测试和验证.根据相关技术标准 and 专家经验,假定 PloT 关键技术综合评价指标体系中各 2 级评价指标的具体参数如表 1 所示,将应用提出的基于云模型综合相似度的评价模型对其进行全面评价.

表 1 PloT 关键技术方案指标

Tab. 1 Index of key technical scheme of PloT

指标集	指标	指标名称	指标值	最优值	合格值
体系架构技术类 指标集	1	数据融合共享等级	10	10	6
	2	边缘计算算力等级	10	10	6
	3	融合建模效果等级	10	10	6
	4	零信任安全等级	10	10	6
	5	全局协同防御等级	9	10	6
	6	安全防护等级	10	10	6
传感器技术类指 标集	7	高频局部放电传感器传输阻抗值/(mV·mA ⁻¹)	21	22	18
	8	超声波局部放电传感器峰值灵敏度/(dB·V·m·s ⁻¹)	88	90	80
	9	自取能 EMS 振动传感器灵敏度/(mV·g ⁻¹)	108	110	100
	10	变压器内部环境多参量光学传感器乙炔检测下限值/(μL·L ⁻¹)	1.25	1	1.50
网络技术类指标 集	11	多参量物联终端功耗/kW	0.10	0.1	0.2
	12	多参量物联终端信息采集量级	10	10	6
	13	多参量物联终端自动化水平	10	10	6
	14	多参量物联终端数据转发时延/ms	0.10	0.10	0.15
	15	多参量物联终端支持互联网协议数量	41	41	30
	16	超多跳自组网支持宽带业务传输数量	60	60	50
	17	自组网支持节点数量	1 200	1 200	1 000
平台支撑技术类 指标集	18	物联管理组件设备接入量级	10	10	6
	19	物联管理组件设备并行连接量级	9	10	6
	20	物模管理组件管理模型量级	8	10	6
	21	云边协同采集与控制服务组件设备管理量级	10	10	6
	22	电力图计算分析服务组件支持电网节点数量	10	10	6
	23	数据共享服务组件共享管理数据量级	10	10	6
	24	数据立方体数组聚集量级	8	10	6
	25	典型电力设备故障诊断准确率/%	95	100	80
智能应用技术类 指标集	26	万级计算节点调度策略计算时间/s	25	24	30
	27	电网在线安全稳定主动分析响应时间/min	3	3	6
	28	综合能源增值服务数量	38	40	30
	29	用户数据挖掘与增值互动应用交易决策节点量级	10	10	6
综合效益指标集	30	万级节点互联比例/%	80	100	70
	31	人机交互设备比例/%	75	100	60
	32	设备实时状态在线率/%	85	100	60
	33	平台业务平均处理时间/s	2	1	10
	34	减排率/%	4	5	1

算例将层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和熵权法 (Entropy Weight Method, EWM) 2 种主观权重及主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 权重法和客观赋权法 (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC) 2 种客观权重进行组合赋权, 各指标的主

客观赋权值如附录表 A2 所示. 根据权重矩阵计算权重样本均值 \bar{W} 、一阶绝对中心距 D 、样本方差 S^2 , 从而得到正态云组合权重的数字特征, 各指标正态云组合权重如表 2 所示. 根据 PIoT 关键技术综合评价指标体系中各二级评价指标构建决策矩阵, 并构造归一化矩阵, 得到理想解向量和负理想解向量.

表 2 各指标正态云组合权重
Tab. 2 Normal cloud combination weight of each index

指标	正态云组合权重	指标	正态云组合权重
1	(0.007 32, 0.007 76, 0.002 01)	18	(0.023 77, 0.011 98, 0.007 16)
2	(0.021 88, 0.015 21, 0.006 56)	19	(0.027 68, 0.016 99, 0.009 00)
3	(0.017 51, 0.018 27, 0.006 12)	20	(0.017 03, 0.017 74, 0.010 48)
4	(0.006 15, 0.004 08, 0.002 07)	21	(0.043 22, 0.053 87, 0.020 13)
5	(0.021 25, 0.007 14, 0.002 76)	22	(0.067 67, 0.055 52, 0.002 64)
6	(0.009 33, 0.006 02, 0.001 06)	23	(0.006 22, 0.003 89, 0.001 09)
7	(0.005 98, 0.002 42, 0.000 54)	24	(0.038 65, 0.033 42, 0.005 26)
8	(0.033 25, 0.031 58, 0.017 42)	25	(0.027 21, 0.014 23, 0.003 74)
9	(0.047 79, 0.043 95, 0.021 87)	26	(0.052 63, 0.048 32, 0.025 18)
10	(0.040 16, 0.037 70, 0.018 00)	27	(0.029 68, 0.018 66, 0.004 46)
11	(0.052 59, 0.066 01, 0.024 98)	28	(0.020 00, 0.014 09, 0.002 45)
12	(0.048 67, 0.022 01, 0.002 72)	29	(0.011 96, 0.008 79, 0.004 65)
13	(0.033 08, 0.020 62, 0.008 01)	30	(0.025 43, 0.018 44, 0.008 16)
14	(0.020 66, 0.014 57, 0.007 50)	31	(0.018 22, 0.013 47, 0.006 63)
15	(0.028 43, 0.014 05, 0.004 83)	32	(0.045 62, 0.018 28, 0.002 93)
16	(0.019 64, 0.014 30, 0.005 21)	33	(0.040 42, 0.028 21, 0.016 14)
17	(0.023 09, 0.017 47, 0.005 79)	34	(0.067 81, 0.038 77, 0.017 57)

分别基于理想解向量、负理想解向量和归一化待评价指标向量对 n 个指标的正态云组合权重 $C_w = (E_x, E_n, H_e)$ 进行聚合, 得到理想解综合云、负理想解综合云和待评价指标的综合云. 进而, 分别计算上述 3 个综合云模型之间的形状相似度和距离相似度, 得到该 PIoT 工程关键技术综合评价的贴进度 $r=0.811\ 8$. 理想解综合云、负理想解综合云和待评价指标的综合云图如图 4 所示. 可知, 理想解综合云的熵比负理想解的熵大, 云滴的离散程度大, 理想解综合云的形状比负理想解综合云的形状更宽. 从云形状角度, 待评价指标综合云的形状与理想解综合云的形状更接近; 从云距离角度, 待评价指标综合云与理想解综合云的期望曲线具有一个交点, 待评价指标综合云与理想解综合云的距离更接近. 待评价指标综合云的形状与理想解综合云的形状相似度高, 且与理想解综合云的距离远大于与负理想解综合云的距离, 证明待评价指标与理想解的有较高的贴进度.

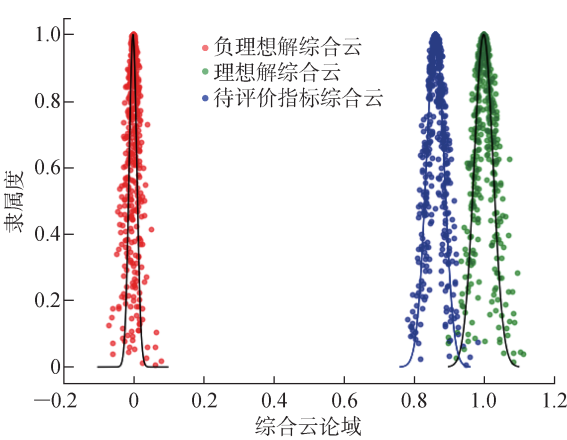


图 4 PIoT 关键技术综合云图
Fig. 4 Comprehensive cloud map of key technologies of PIoT

算例分析表明, 提出的基于云模型综合相似度的评价模型, 能够对 PIoT 关键技术指标方案进行主、客观权重多种组合赋权, 保证了综合评价的客观性和公平性; 并通过分析计算理想解综合云、负理想

解综合云和待评价指标综合云的形状相似度和距离相似度,能够客观、全面量化待评价指标与理想解的贴近程度;综合评价过程科学、客观,该模型的评价结果可视化程度较高,利于 PIIOT 关键技术综合评价的工程实践。

5 结语

基于 PIIOT 建设阶段的体系架构技术、传感器技术、网络技术、平台支撑技术和运营阶段的智能应用以及综合效益 6 个维度构建了 PIIOT 关键技术综合评价指标体系。根据 PIIOT 关键技术评价指标体系的结构特点及单评价对象场景的特征,提出基于云模型综合相似度的评价模型,该模型能够为 PIIOT 关键技术评价场景提供多种主观、客观赋权,弥补了单一赋权的不足,通过科学构建单评价对象的决策矩阵克服了传统 TOPSIS 法面对单评价对象场景的不足。所提出的评价模型以兼顾云模型形状-距离的综合相似度为度量,用以表征 TOPSIS 法中的相对贴近度,兼顾了待评价指标综合云、理想解综合云和负理想解综合云 3 个云模型之间的形状相似度和距离相似度,能全面地刻画出 PIIOT 关键技术评价指标与理想解的贴近程度,实现了单评价对象的精准评价。算例分析表明,所提评价指标体系的二级 34 个评价指标,通过基于云模型综合相似度评价模型的计算,可以对 PIIOT 关键技术建设和运营阶段的综合效果进行科学合理的量化分析和可视化展示,将为 PIIOT 的应用和实施提供评价方法的参考与指导。

附录见本刊网络版(xuebao.sjtu.edu.cn/article/2024/1006-2467-58-01-0019.shtml)

参考文献:

[1] 国家电网有限公司. 国家电网公司能源互联网规划[EB/OL]. (2021-04-27) [2022-10-10]. http://www.cpn.cn/news/yaowen/202104/t20210427_1375907_wap.html.
State Grid Corporation of China. Energy internet planning of state grid corporation of China [EB/OL]. (2021-04-27) [2022-10-10]. http://www.cpn.cn/news/yaowen/202104/t20210427_1375907_wap.html.

[2] 何奉禄,陈佳琦,李钦豪,等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart

grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.

[3] 汪洋,苏斌,赵宏波. 电力物联网的理念和发展趋势[J]. 电信科学, 2010, 26(Sup. 3): 9-14.
WANG Yang, SU Bin, ZHAO Hongbo. The concept and development trend of electric power Internet of things [J]. Telecommunications Science, 2010, 26 (Sup. 3): 9-14.

[4] 马薇. 世界物联网标准“中国造”: 访国家物联网基础标准工作组总体组组长沈杰博士 [N]. 新华日报, 2018-08-13(5).
MA Wei. World Internet of Things standards “Made in China”—Interview with Dr. Shen Jie, head of the national Internet of Things basic standards working group [N]. Xinhua Daily, 2018-08-13 (5).

[5] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 847-870.

[6] 何永贵,刘江. 基于组合赋权-云模型的电力物联网安全风险评估[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4302-4309.
HE Yonggui, LIU Jiang. Electric Internet of Things security risk assessment based on combined weighting-cloud model [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4302-4309.

[7] 翟峰,冯云,程凯,等. 基于信息熵的多源电力物联终端设备信任度评价方法[J]. 中国电力, 2022, 55 (5): 158-165.
ZHAI Feng, FENG Yun, CHENG Kai, et al. Information entropy based multi-source power IoT terminal equipment trust degree evaluation method [J]. Electric Power, 2022, 55(5): 158-165.

[8] 张东东,郑波,吴月超,等. 电力物联网大数据质量智能评价技术与实现[J]. 通信电源技术, 2020, 37 (4): 46-47.
ZHANG Dongdong, ZHENG Bo, WU Yuechao, et al. Power Internet of Things big data quality intelligent evaluation technology and implementation [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(4): 46-47.

[9] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: Application analysis and research prospects [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.

[10] 周念成,廖建权,王强钢,等. 深度学习在智能电网

- 中的应用现状分析与展望[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(4): 180-191.
- ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, WANG Qiang-gang, *et al.* Analysis and prospect of deep learning application in smart grid[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(4): 180-191.
- [11] 张继佳, 沈志宏, 蒋翊. 基于泛在电力物联网增值服务模式评价[J]. **电力需求侧管理**, 2019, 21(6): 44-47.
- ZHANG Jijia, SHEN Zhihong, JIANG Yi. Model evaluation of value-added service based on ubiquitous power Internet of Things[J]. **Power Demand Side Management**, 2019, 21(6): 44-47.
- [12] 张建. 电力物联网建设成效预测及评价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- ZHANG Jian. Research on forecast and evaluation model of construction effect of electric power Internet of Things[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [13] RUAN G C, ZHONG H W, ZHANG G L, *et al.* Review of learning-assisted power system optimization[J]. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, 2020, 7(2): 221-231.
- [14] 张国云, 孔令号, 杨伯青, 等. 基于电力大数据模糊评价的综合能源项目挖掘优选策略[J]. **电力需求侧管理**, 2021, 23(2): 85-89.
- ZHANG Guoyun, KONG Linghao, YANG Boqing, *et al.* Mining and optimal selection strategy of integrated energy project based on fuzzy evaluation of power big data[J]. **Power Demand Side Management**, 2021, 23(2): 85-89.
- [15] 李刚, 焦亚菲, 刘福炎, 等. 联合采用熵权和灰色系统理论的电力大数据质量综合评估[J]. **电力建设**, 2016, 37(12): 24-31.
- LI Gang, JIAO Yafei, LIU Fuyan, *et al.* Comprehensive evaluation of big data quality in power systems with entropy weight and grey system theory[J]. **Electric Power Construction**, 2016, 37(12): 24-31.
- [16] 曾鸣, 王雨晴, 闫彤, 等. 基于泛在电力物联网平台的可再生能源政策评估系统设计及模型研究[J]. **电网技术**, 2019, 43(12): 4263-4273.
- ZENG Ming, WANG Yuqing, YAN Tong, *et al.* System design and model research of renewable energy policy evaluation system based on platform of ubiquitous power Internet of Things[J]. **Power System Technology**, 2019, 43(12): 4263-4273.
- [17] 孙明, 苏毅方, 邵先军, 等. 基于数据挖掘的配电网线路台风故障影响分级评价[J]. **浙江电力**, 2019, 38(10): 78-83.
- SUN Ming, SU Yifang, SHAO Xianjun, *et al.* Grading evaluation of typhoon fault impact on distribution lines based on data mining[J]. **Zhejiang Electric Power**, 2019, 38(10): 78-83.
- [18] 汤国龙, 朱朝阳, 汪洋, 等. 电力物联网技术标准体系研究[J]. **电力信息与通信技术**, 2020, 18(1): 54-59.
- TANG Guolong, ZHU Chaoyang, WANG Yang, *et al.* Studies on standard system for electric Internet of Things[J]. **Electric Power Information and Communication Technology**, 2020, 18(1): 54-59.
- [19] 雷煜卿, 全杰, 张树华, 等. 能源互联网感知层技术标准体系研究[J]. **供用电**, 2021, 38(7): 14-20.
- LEI Yuqing, TONG Jie, ZHANG Shuhua, *et al.* Research on technical standard system of energy Internet sensing layer[J]. **Distribution & Utilization**, 2021, 38(7): 14-20.
- [20] 李国庆, 成龙, 王振浩, 等. 电力物联网技术标准体系初探[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(3): 1-9.
- LI Guoqing, CHENG Long, WANG Zhenhao, *et al.* Preliminary study on standard framework of Power Internet of Things[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(3): 1-9.
- [21] 杨林, 张玉英. 我国部分物联网关键技术标准体系进展[J]. **中国标准导报**, 2015(4): 49-52.
- YANG Lin, ZHANG Yuying. Progress of some standard systems of the key technology of Internet of Things in China[J]. **China Standards Review**, 2015(4): 49-52.
- [22] 马君华, 张东霞, 刘永东, 等. 能源互联网标准体系研究[J]. **电网技术**, 2015, 39(11): 3035-3039.
- MA Junhua, ZHANG Dongxia, LIU Yongdong, *et al.* Study on standard framework of energy Internet[J]. **Power System Technology**, 2015, 39(11): 3035-3039.
- [23] 国际电工委员会. IoT 2020: 智能安全的物联网平台(中英文版)[M]. 国家电网公司国际合作部, 全球能源互联网研究院有限公司, 南瑞集团公司, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2018: 66-70.
- International Electrotechnical Commission. IoT 2020: Smart and secure IoT platform[M]. Translated by International Cooperation Department of State Grid Corporation of China, Global Energy Internet Research Institute Co., Ltd., and Nari Group, *et al.* Beijing: China Electric Power Press, 2018: 66-70.
- [24] 朱虹, 孙广芝, 王淑敏. 传感器及传感数据分类与描述标准化研究[J]. **标准科学**, 2018(12): 126-129.
- ZHU Hong, SUN Guangzhi, WANG Shumin. Research on classification and description standardization of sensors and sensing data[J]. **Standard Science**, 2018(12): 126-129.
- [25] WANG J J, XIAO M, CHEN Y Q, *et al.* Energy efficiency optimization for ubiquitous power Internet of

Things[J]. **Journal of Physics: Conference Series**, 2019, 1346(1): 012050.

[26] CENELEC. Communication networks and systems in substations. Specific Communication Service Mapping (SCSM)-mappings to MMS: IEC 61850-8-1 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Electro-technical Standardization, 2011.

[27] 卢东祁, 张乾, 徐一洲, 等. 面向电力物联网的终端设备适配接入研究[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(Sup. 2): 72-76.

LU Dongqi, ZHANG Qian, XU Yizhou, *et al.* Terminal equipment adaptive access for power Internet of Things[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(Sup. 2): 72-76.

[28] NIU X D, SHAO S J, XIN C, *et al.* Workload allocation mechanism for minimum service delay in edge computing-based power Internet of Things[J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 83771-83784.

[29] 张晶, 李彬, 戴朝波. 全球能源互联网标准体系研究[J]. **电网技术**, 2017, 41(7): 2055-2063.

ZHANG Jing, LI Bin, DAI Chaobo. Study on standard system for global energy interconnection[J]. **Power System Technology**, 2017, 41(7): 2055-2063.

[30] KONG X Y, SUN F Y, HUO X X, *et al.* Hierarchical optimal scheduling method of heat-electricity integrated energy system based on Power Internet of Things[J]. **Energy**, 2020, 210: 118590.

[31] 王永真, 张靖, 潘崇超, 等. 综合智慧能源多维绩效评价研究综述[J]. **全球能源互联网**, 2021, 4(3): 207-225.

WANG Yongzhen, ZHANG Jing, PAN Chongchao, *et al.* Multi-dimensional performance evaluation index review of integrated and intelligent energy[J]. **Journal of Global Energy Interconnection**, 2021, 4(3): 207-225.

[32] 汪军, 朱建军, 刘小弟. 兼顾形状-距离的正态云模型综合相似度测算[J]. **系统工程理论与实践**, 2017, 37(3): 742-751.

WANG Jun, ZHU Jianjun, LIU Xiaodi. An integrated similarity measure method for normal cloud model based on shape and distance[J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**, 2017, 37(3): 742-751.

[33] 汪军, 朱建军, 覃朗. 基于云模型熟悉相似度的协同过滤推荐算法[J]. **计算机工程与科学**, 2017, 39(11): 2102-2108.

WANG Jun, ZHU Jianjun, QIN Lang. A collaborative filtering recommendation algorithm based on familiarity similarity of cloud model[J]. **Computer Engineering & Science**, 2017, 39(11): 2102-2108.

(本文编辑:李博文)