

引用格式:黄悦华,王朔浩,杨楠,等.基于综合赋权与云熵优化的园区综合能源系统评价[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):201-214.

Citation: HUANG Yuehua, WANG Shuohao, YANG Nan, et al. Evaluation of park integrated energy system based on comprehensive weighting and cloud entropy optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 201-214.

基于综合赋权与云熵优化的园区综合能源系统评价

黄悦华,王朔浩,杨楠,陈晨

(三峡大学电气与新能源学院,湖北宜昌 443002)

摘要:综合能源系统(integrated energy system, IES)作为能源转型中的重要环节已得到越来越多国家的广泛关注。构建一套匹配中国国情的综合能源系统评价体系和评价方法不仅能够为综合能源系统规划后评价打下基础, 以此对规划方案进行优劣排序;还能够提高综合能源系统项目的管理水平,在制定统一、完整的综合能源系统综合评价标准时提供参考。为此,首先结合园区 IES 基本特征以及运行特性,构建包含经济性、可靠性、环保性以及智能友好性 4 个方面的综合评价指标体系;然后为解决 IES 在运行中的不确定性问题,对基于传统云物元模型的综合评价体系提出云熵优化,即考虑不同评价者对模糊性的可接受程度;为解决单一赋权方法可能导致的评价结果过于主观或过于客观的问题,选择基于最小鉴别信息原理将决策实验室法与熵权法相结合的综合赋权法,并采用变权法进一步完善综合评价指标;最后通过算例分析,验证所提综合评价体系的科学正确性。

关键词:综合能源系统;云物元模型;云熵优化;最小鉴别信息原理;综合评价;变权法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.023 **中图分类号:** TM732 **文章编号:** 1673-9140(2024)04-0201-14

Evaluation of park integrated energy system based on comprehensive weighting and cloud entropy optimization

HUANG Yuehua, WANG Shuohao, YANG Nan, CHEN Chen

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: As an important part of energy transformation, integrated energy system (IES) has attracted widespread attention from more and more countries. Establishing an evaluation system and method for IES that matches China's national conditions can not only lay a foundation for post-evaluation of IES planning and rank the planning schemes accordingly, but also improve the management level of IES projects and provide a reference for formulating a unified and complete IES evaluation criterion. To this end, combining the basic characteristics and operational features of the park IES, a comprehensive evaluation index system including four aspects of economy, reliability, environmental protection, and intelligence and friendliness is constructed. Then, to address the uncertainty of IES operation, the comprehensive evaluation system based on the traditional cloud matter-element model proposes cloud entropy optimization, considering the varying degrees of acceptability of fuzziness among different evaluators. To solve the problem that the evaluation results caused by a single weighting method may be too subjective or too objective, a comprehensive weighting method combining the decision making trial and evaluation laboratory method with the entropy weight method based on the principle of minimum discrimination information is selected, and the variable weight method is used to further improve the value of comprehensive evaluation index. Finally, the scientific correctness of the proposed comprehensive evaluation system is verified through case analysis.

收稿日期:2023-05-12;修回日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金(52007103);国家电网有限公司总部科技项目(5100-202256008A-1-1-ZN)

通信作者:王朔浩(1999—),男,硕士研究生,主要从事综合能源系统研究;E-mail:806587554@qq.com

Key words: integrated energy systems; cloud matter-element model; cloud entropy optimization; principle of minimum discriminant information; comprehensive evaluation; variable weight method

在中国节能减排需求迅速增长的背景下,以打破异质能源利用界限,提高能源综合利用效率为主要特征的综合能源系统(integrated energy system, IES)^[1]发展迅速,而由于IES中各类异质能源复杂的转化和替代过程,其运行方式和规划思路较传统配电网更为复杂,从而使得现有针对配电网的评价方法无法适用^[2]。因此,需要建立更为全面的针对IES的评价模型和评价方法^[3]。

当前,大多数针对IES规划方案综合评价的研究着眼于建立评价指标体系和评价方法。在建立评价指标体系方面,文献[4]针对分布式能源从经济、能耗及环境3个方面构建评价指标体系;文献[5]分析了面向园区微电网的IES系统组成以及其运行特点,考虑经济、可靠及环保3个方面的影响因素构建指标评价模型;文献[6]考虑了区域IES内部能源之间的耦合关系,以配电系统为核心,耦合多种异质能源,从能源、配电网以及用户环节构建了指标体系;文献[7]基于热力学第一、第二定律,构建了包含一次能源消耗量、利用率、节约率、烟效率以及经济成本等5个指标的评价体系;文献[8]从IES的技术、管理层面以及外部资源支持出发,统筹“驱动力—压力—状态—影响—响应”模型构建评价指标体系;文献[9]针对配电网从效果、特征以及技术3个方面构建了3个一级指标,并在此基础上构建了33个二级指标,涵盖了配电网的经济性、社会性、可靠性、网络结构性以及智能化水平;文献[10]将工业园区IES多能互补的特征与碳排放、碳交易机制有机融合,从经济、技术和环境3个方面构建评价指标体系;文献[11]提出基于系统等效节点模型的故障后果分析方法,构建了基于蒙特卡罗模拟的IES可靠性评估方法;文献[12]构建了IES电氢异质能量系统耦合的最优负荷削减模型,从供氢可靠性水平以及设备对氢负荷缺供能量的贡献程度以及系统经济损失等方面构建了IES供氢可靠性评估指标体系。上述文献在构建评价指标体系时,大多考虑能耗、环境、经济以及可靠性等几个方面,使得最终的评价指标体系对于IES来说不够全面,会导致最终的评价结果不够完整,且多数评价指标体系仍以配电网为中心,仅仅针对电力系统,现已不再适用于日益更新的IES。

就评价方法而言,行之有效的评价方法必须能

够针对IES评价指标体系进行客观公正、科学准确的全面评价。现有的文献大多采用主、客观相结合的方式对评价指标进行赋权计算,采用层次分析法(the analytic hierarchy process, AHP)/网络层次分析法(analytic network process, ANP)进行主观权重计算,采用熵权法(the entropy weight method, EWM)^[13]/反熵权法(the anti-entropy weight method, anti-EWM)进行客观权重计算,如文献[4-6];也有采用基于加权有向图建立系统等效模型,提出离散化的能量流/烟流计算方法和能效估计方法,如文献[7];亦有基于传统云模型方法,将传统的确定性指标替换成不确定形式的云指标,如文献[8-9]。文献[10]采用决策试验与评价实验室(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)方法与客观赋权(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)法相结合的方法求解权重;文献[11]仅采用最小二乘法进行数据处理,最后采用蒙特卡罗模拟进行模型驱动;文献[12]应用马尔科夫链蒙特卡罗法实现了对IES内氢能等异质能源供给可靠性水平的准确量化。事实上,对于单一的评价方法,如AHP/EWM,其仅适用于较为简单的评价及数据较少的情况,当元素之间存在交叉影响时评价结果不太科学;同时,传统的物元分析法中在云模型的边界处未考虑不确定性,因而会使评价结果过于绝对。

综上所述,本文首先以园区IES为研究对象,在园区IES能源结构的基础上结合其运行特征,建立以经济性、可靠性、环保性以及智能友好性4个维度为基础的IES规划评价体系^[14];然后基于最小鉴别信息原理(minimum discriminant information principle, MDIP)^[15],同时采用基于DEMATEL的主观赋权法和基于EWM的客观赋权法对指标进行综合赋权^[16]。由于在IES运行过程中存在源荷不确定性,因此,构建云物元模型对规划方案进行综合评价;考虑不同评价者对于云物元模型中模糊性的可接受程度不尽相同,基于此对传统云物元模型提出改进。最后采用变权法对综合评价进一步进行完善。相比传统的IES评价,本文所提综合评价方法更加贴合现有的IES,更加全面、科学,既可兼顾同层次元素间的相互影响也可考虑系统运行的不确定性以及评价者对模糊性的可接受程度。

1 园区 IES 综合评价指标体系构成及量化

本文充分考虑园区 IES 的节能环保、协调适应及经济效益等需求,从经济性、可靠性、环保性和智能友好性 4 个方面出发,建立适用于园区 IES 规划的综合评价指标体系,综合评价指标体系如表 1 所示。

表 1 园区 IES 综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of IES

一级指标	二级指标	序号
经济性	项目总成本	A ₁
	综合线损率	A ₂
	综合能耗	A ₃
	能耗强度	A ₄
	综合能源利用率 ^[17]	A ₅
可靠性	综合能源 N-1 通过率	A ₆
	供能可靠率	A ₇
	配电自动化有效覆盖率	A ₈
	用户平均停止供能时间	A ₉
环保性	可再生能源装机占比	A ₁₀
	可再生能源电量占发电量比重	A ₁₁
	CO ₂ 减排率	A ₁₂
	可再生能源替代率	A ₁₃
智能友好性	用能信息采集率	A ₁₄
	综合能源用能满意度 ^[18]	A ₁₅
	综合能源服务业务发展指数	A ₁₆
	可调节负荷占比	A ₁₇

1.1 经济性指标

经济性是相当重要的考察指标,可以用来评估和衡量规划方案经济效益的好坏,还可以帮助项目决策者了解项目的可行性,并以此为基础进行 IES 项目的管理和相关决策的制定。

1) 项目总成本。指全寿命周期成本,包括该项目初期投资费用、运行成本、养护成本、故障维护成本以及废置处理成本。项目总成本能够帮助电网企业全面了解项目的成本结构,从而更好地控制成本,提高项目质量,是项目经济性的最直接反映。

① 初期投资费用(万元)为

$$C_{CI} = C_{dp} + C_{ep} + C_{ei} \quad (1)$$

式中, C_{dp} 为设计规划费; C_{ep} 为设备购置费; C_{ei} 为建筑安装工程费。

② 运行成本(万元)为

$$C_{CO} = C_{lm} + C_{dm} + C_{rm} + C_{oh} + C_{tt} \quad (2)$$

$$C_{lm} = Q_t \delta L_{line} C_p \quad (3)$$

$$\delta = (Q_l / Q_s) \times 100\% \quad (4)$$

式(2)~(4)中, C_{lm} 为运行损耗; C_{dm} 为日常维修费; C_{rm} 为检修费; C_{oh} 为大修费; C_{tt} 为技改费; Q_t 为输电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; δ 为线损率, $\%$; L_{line} 为线路长度, km ; C_p 为网损电价,元; Q_l 为线损电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_s 为供电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

③ 养护成本(万元)与初始投资费用和养护系数有关,即

$$C_{CM} = \left[\sum_{t=1}^T \frac{a_t C_{CI}}{(1+\rho)^t} \right] \cdot \mu \quad (5)$$

式中, a_t 为第 t 年的养护系数; μ 为年度等效系数; ρ 为衰减系数。

④ 故障维护成本(万元)为

$$C_{CF} = C_{ff} + C_{rr} + C_{yl} + C_{uc} \quad (6)$$

$$C_{uc} = Q_1 (1+t)^2 \gamma \quad (7)$$

式中, C_{ff} 为查找故障成本; C_{rr} 为返厂修理成本; C_{yl} 为停止供能收益损失; C_{uc} 为用户补偿损失; Q_1 为总停供能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; t 为单次故障停止供能时间, h ; γ 为停止供能补偿系数,与用户类型有关。

⑤ 废置处理成本(万元)与初期投资费用相关,即

$$C_{CD} = \frac{(c-b)C_{CI}}{(1+\rho)^T} \mu \quad (8)$$

式中, c 为残值率; b 为废置设备管理费用占比系数。

项目总成本(万元)为

$$C_{LCC} = C_{CI} + C_{CO} + C_{CM} + C_{CF} + C_{CD} \quad (9)$$

2) 综合线损率。指线路上所损失的电能占线路首段输出电能的百分比,其用来表征在 IES 传输和分配电能环节中各设备单元由于运行消耗损失的功率以及电能,这些损失会直接影响园区内 IES 的运行成本。电能损耗较大会影响整个电力网络的运行经济性,因而是重要的经济性指标。综合线损率($\%$)为

$$\Delta P = (Q_s - Q_p) / Q_s \quad (10)$$

式中, Q_s 为供电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_p 为用电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3) 综合能耗。指园区内 IES 运行过程中在统计报告期内实际消耗的各种能源的实物量,用实际各种能源消耗量折算成一次能源的总量来表示。通过计算消耗的各种能源的实物量,能够明确地掌握园区内 IES 的运行成本,有效地反映 IES 的经济效率。园区 IES 输入的一次能源消耗总量

(kgce)为

$$E_E = k_e Q_e + k_g Q_g + k_{re} Q_{re} \quad (11)$$

式中, k_e 、 k_g 、 k_{re} 分别为煤电(kgce/(kW·h))、天然气(kgce/m³)、可再生能源折标煤系数(kgce/MJ); Q_e 、 Q_g 、 Q_{re} 分别为电能(kW·h)、天然气(m³)、可再生能源输入量(MJ)。

4) 能耗强度。指园区内 IES 单位面积、人口或产值的综合能耗,也叫作单位产值综合能耗,可以用来预测园区 IES 装机容量以及经济投资效益,亦是综合能耗的直观表现,可以反映 IES 的经济效率。IES 的能耗强度(kgce/万元)为

$$P_E = E_{sum} / M_{sum} \quad (12)$$

式中, E_{sum} 为能源年耗量折算标煤当量,kgce; M_{sum} 为园区年生产总值,万元。

5) 综合能源利用率。指 IES 在运行过程中有效利用能量与实际消耗能量的比值。能够反映园区 IES 对一次能源的消耗和利用水平,故其也是重要的经济性指标。综合能源利用率(%)为

$$\eta_u = (C_c + C_h + C_e) / \sum_i W_i \quad (13)$$

式中, C_c 、 C_h 、 C_e 分别为园区的全年耗冷量、耗热量和耗电量,kJ; W_i 为系统消耗的第 i 种一次能源的能量,kJ。

1.2 可靠性指标

为确保 IES 能够安全可靠的运行,建立如下指标用以评价园区 IES 的可靠性。

1) 综合能源 N-1 通过率。指在园区 IES 中满足 N-1 的设备数与设备总数比值的百分数,表征 IES 中某个特定范围内某种类型设备的冗余程度。当设备发生故障时,会导致用户停止供能,造成各种直接或间接的损失,影响 IES 的安全稳定运行,故其是反映综合能源系统可靠性的重要指标。综合能源 N-1 通过率(%)为

$$\eta_{pr} = N_N / N_{al} \quad (14)$$

式中, N_N 为满足 N-1 的设备数; N_{al} 为设备总数。

2) 供能可靠率。指园区一年内用户获得供能时间占总供能时间的比例。园区 IES 的运行可靠程度可以用统计年限内园区消费者使用 IES 平均无供能时间来衡量,供能可靠率是表征 IES 对用户持续供能能力的重要因素。供能可靠率(%)为

$$\eta_r = (8760 - T_{ap}) / 8760 \quad (15)$$

式中, T_{ap} 为用户平均停止供能时间,h。

3) 配电自动化有效覆盖率。指园区内配电自动化有效覆盖的 10 kV 线路条数与园区内 10 kV 线

路总条数之比。其意义在于:通过对线路数据的分析判断达到故障检测、故障迅速定位的目的,从而实现故障区域的快速隔离。配电自动化有效覆盖率越高时园区 IES 运行可靠性越高,故其是反映可靠性的重要指标。配电有效化覆盖率(%)为

$$\eta_c = N_{dc} / N_{10a} \quad (16)$$

式中, N_{dc} 为配电自动化有效覆盖率的 10 kV 线路总条数; N_{10a} 为 10 kV 线路总条数。

4) 用户平均停止供能时间。指单位时间内用户因发生故障而停止供能的总时间与总用户数之比。表征系统在一年中每个用户的平均停止供能持续时间,能够反映园区 IES 停运的频率以及严重程度,故其能够有效评估 IES 的可靠性水平。用户平均停止供能时间(h)为

$$T_{ap} = T_i / N_i \quad (17)$$

式中, T_i 为用户停止供能总时间,h; N_i 为总用户数。

1.3 环保性指标

在全球变暖和能源危机影响下,必须考虑 IES 的环保水平,因此建立如下环保性指标。

1) 可再生能源装机占比。指可再生能源发电装机容量占区域总发电装机容量的百分比。其能够体现可再生能源的利用水平,也表征了逐步摆脱煤炭、石油等化石能源依赖的水平,能够反映 IES 的环保性水平。可再生能源装机占比(%)为

$$K_p = Q_{dg} / Q_r \quad (18)$$

式中, Q_{dg} 为可再生能源装机容量,kW·h; Q_r 为区域总发电装机容量,kW·h。

2) 可再生能源电量占发电量比重。其能够反映可再生能源的实际利用情况,从侧面反映了污染物排放和发电煤耗的减少量,故其是重要的环保性指标。可再生能源电量比重(%)为

$$K_e = Q_{ep} / Q_{al} \quad (19)$$

式中, Q_{ep} 为可再生能源电量,kW·h; Q_{al} 为总装机容量,kW·h。

3) CO₂减排率。指在满足园区用户所需负荷时,园区 IES 系统产生的 CO₂ 和以化石能源为主要供能系统产生 CO₂ 排放量的差值与以化石能源为主要供能系统 CO₂ 排放量的比值。通过 CO₂ 排放率能够把握在提供相同负荷情况下园区 IES 节约的能源水平以及对环境的破坏程度,即反映 IES 的环保性水平。CO₂ 减排率(%)为

$$\eta_r = \Delta E / E_{te} \quad (20)$$

式中, ΔE 为与以化石能源为主要供能系统相比,园区 IES 满足园区用户所需负荷时对应的 CO₂ 减排

量,kg; E_{te} 为传统分产系统污染物理论排放量,kg。

4) 可再生能源替代率。指园区 IES 中可再生能源与一次能源消费的比值。可再生能源替代对环境友好,其在能源低碳绿色转型中起到了主导作用,故能够有效地反映 IES 的环保性水平。可再生能源替代率(%)为

$$\eta_E = Q_E / Q_{ic} \quad (21)$$

式中, Q_E 为电能在系统中的装机,kW·h; Q_{ic} 为总装机容量,kW·h。

1.4 智能友好性指标

智能友好性是体现 IES 的又一重要特征,例如支持用户互动、采集用能信息以及提供更优的用能方案等,为此构建针对 IES 的智能友好性指标。

1) 用能信息采集率。指实现信息采集的配变台数占配变总台数的比例。其表征了系统对用户用电数据进行采集和分析,能够快速反映用户需求,快速反映用户用电状态的互动能力,是反映 IES 智能友好性的重要指标。用能信息采集率(%)为

$$\eta_{as} = N_{as} / N_{um} \quad (22)$$

式中, N_{as} 为实现信息采集的配变台数; N_{um} 为配变总台数。

2) 综合能源用能满意度。指园区内用户对 IES 运行的满意程度(周围温度、相对湿度、电能质量等物理量等),是一个综合指标。本文采用园区内用户对于园区 IES 供热能力的满足程度来衡量综合能源用能满意度。其代表了园区内用户使用 IES 情况的真实反馈,有助于加强用户与项目建设者之间的交互,便于后期提高园区 IES 建设服务水平,是反映 IES 智能友好性的重要指标。综合用能满意度为

$$P_{PPD} = 100 - 95 \exp(-0.033 53 P_{PMV}^4 - 0.217 9 P_{PMV}^2) \quad (23)$$

式中, P_{PMV} 为园区内用户供热满足程度,是基于用户热平衡以及生理、心理感受考虑的用户热感满意度。

3) 综合能源服务业务发展指数。指综合能源服务业务发展水平,也即 IES 整体发展水平。其是综合能源服务业务收入、综合能效等目标完成率的体现,能够体现园区 IES 的智能发展水平,故其能够作为 IES 的智能友好性发展指标。综合能源服务业务发展指数为

$$I_i = (O_i / O_1) \times 60\% + (G_i / G_1) \times 40\% \quad (24)$$

式中, O_i 为 IES 收入完成值,万元; O_1 为 IES 收入目标值,万元; G_i 为单位国内生产总值能耗,kgce/万

元; G_1 为单位国内生产总值能耗目标值,kgce/万元。

4) 可调节负荷占比。指小时级可调节负荷占区域最大负荷的比例。在园区 IES 运行过程中,各种负荷会即时变化,为了保证用户能够稳定用能,可设置随时用来进行调节补充的负荷,以保证能源供需平衡,这是提高负荷灵活性的重要手段,能够根据能源供给情况以及各类用户不同的用能习惯,合理地安排各类客户的用能时间,对园区内 IES 用户较为友好,故其能够反映 IES 的智能友好性。可调节负荷占比(%)为

$$K_{al} = Q_{ha} / Q_{al} \quad (25)$$

式中, Q_{ha} 为小时级可调节负荷,kW·h; Q_{al} 为园区最大负荷,kW·h。

1.5 新型电力系统特征和核心指标

在国家相关能源政策与未来规划的指引下,中国未来能源电力系统的发展已经有了明确的方向,即实现“双碳”目标愿景,以能源转型为基本路径。在中国未来能源体系中,新型电力系统是中国能源革命过程里的重要推手,可以用安全性、灵活性、清洁性、智慧性以及互动性这 5 个特征来描述。

在此基础上,提出 5 个核心指标对基本特征进一步量化,更直观地描述新型电力系统,体现其在能源转型中的重要地位。其中,非化石能源在一次能源消费中比重可以在 A_{10} 中得到体现;非化石能源发电量在发电量中比重可以在 A_{11} 中得到体现;指标 A_{13} 则可以表征可再生能源在终端能源消费中比重;系统的总体能源利用效率则可以用 A_3 、 A_4 和 A_5 来描述;而能源电力系统碳排放总量则可以用 A_{12} 来表示。

2 园区 IES 综合评价方法

在进行 IES 综合评价的过程中,为了避免评价指标体系中的一些关联性较强的指标相互影响,使得评价指标数据具有的随机性和主观经验对各个评估等级的划分和权重的确定造成一定的影响,产生不确定性和模糊性,本文采用在处理模糊不确定性和随机性问题上表现良好的云理论,结合传统的物元分析模型来构建评估基础框架,并在此基础上对云熵参数计算方法进行改进。

2.1 综合评价方法

2.1.1 DEMATEL 法主观赋权

DEMATEL 法^[10]是一种应用图论和矩阵工具

进行系统分析的方法。该方法对研究对象内部各个指标进行分析,理清相互之间的逻辑关系,通过计算影响度和被影响度来刻画每个指标对于其他指标的影响程度。基于此,确定每个指标的原因度和中心度。

首先明确研究指标,并将各个指标之间的相互影响关系进行量化形成影响矩阵,再将影响矩阵进行标准化处理。标准化影响矩阵表示为

$$\left\{ \begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} 0 & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & 0 & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{S} \\ S &= \max \left\{ \sum_{i=1}^n p_{ij}, \sum_{j=1}^n p_{ij} \mid 1 \leq i, j \leq n \right\} \end{aligned} \right. \quad (26)$$

式中, $p_{ij} \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, 表征指标 i, j 之间的影响关系, 值越大影响程度越重; S 为标准化因子。

然后根据 $Y = X(I - X)^{-1}$ 将综合影响矩阵表示为 Y , 并由 Y 依次计算每个要素的影响度 D_i 、被影响度 C_i 、中心度 M_i 以及原因度 R_i 。

$$\left\{ \begin{aligned} D_i &= \sum_{j=1}^n t_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \\ C_i &= \sum_{j=1}^n t_{ji}, i = 1, 2, \dots, n \\ M_i &= D_i + C_i \\ R_i &= D_i - C_i \end{aligned} \right. \quad (27)$$

式中, t_{ij} 为 Y 中第 i 行第 j 列元素; t_{ji} 为 Y 中第 j 行第 i 列元素; M_i 用来评估评价对象内该指标的重要程度值越大重要程度越高; R_i 用来评估评价对象内各指标之间的影响关系。

最后, 由 M_i 确定主观权重:

$$w_{zi} = M_i / \sum_{i=1}^n M_i \quad (28)$$

2.1.2 EWM 客观赋权

EWM 能够深刻反映指标的区分能力、确定较好的权重, 并且赋权更加客观、有理论依据以及可信度也更高。具体计算方法如下。

选取原始数据矩阵 R , 设由 m 个评价方案、 n 项评价指标构成的评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, r_{ij}$ 为第 i 个评价对象的第 j 个评价值)。计算第 j 项指标下第 i 个评价对象的特征比重 p_{ij} , 并计算第 j 项指标的熵值 e_j 、差异系数 g_j , 确定第 j 项指标权重系数 w_{kj} 。

$$\left\{ \begin{aligned} p_{ij} &= r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij} \\ e_j &= -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \\ g_j &= 1 - e_j \\ w_{kj} &= e_j / \sum_{j=1}^m e_j \end{aligned} \right. \quad (29)$$

由上述 DEMATEL 和 EWM 可以分别求得主、客观权重向量 $w_z = \{w_{z1} \ w_{z2} \ \cdots \ w_{zn}\}^T$ 、 $w_k = \{w_{k1} \ w_{k2} \ \cdots \ w_{kn}\}^T$ 。

2.1.3 基于 MDIP 的组合赋权法

MDIP 指的是评价者在仅收集到部分统计信息时, 通过将先验分布和目标分布的鉴别信息最小作为目标函数对已收集到的数据进行处理分析, 在此基础上, 目标分布在满足多种约束条件下最接近于概率分布。

为了减小 DEMATEL 法造成的主观性差异和 EWM 带来的客观性差异, 基于 MDIP 将综合评价指标的主客观权重相结合, 以达到综合评价科学准确的目的, 建立组合权重模型求解综合权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。

1) 基于 MDIP 设定目标函数。

$$\left\{ \begin{aligned} \min F(w) &= \sum_{i=1}^n \left(w_i \ln \frac{w_i}{w_{zi}} + w_i \ln \frac{w_i}{w_{ki}} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n w_i &= 1, w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right. \quad (30)$$

2) 构建拉格朗日函数对其进行求解。设 $L =$

$$\sum_{i=1}^n \left(w_i \ln \frac{w_i}{w_{zi}} + w_i \ln \frac{w_i}{w_{ki}} \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right), \text{ 则}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial w_i} &= 2 \ln w_i + 2 - \ln w_i^2 + \lambda = 0, \\ & \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \sum_{i=1}^n w_i - 1 = 0 \end{aligned} \right.$$

当式(30)中综合权重最接近主客观组合权重时, 2个鉴别信息的和最小, 则第 i 个指标的组合权重为

$$w_i = \sqrt{w_{zi} w_{ki}} / \sum_{j=1}^n \sqrt{w_{zj} w_{kj}} \quad (31)$$

2.2 云物元模型

云物元模型由云滴和物元共同构成, 其中云滴代表指标的定性概念, 物元是将待研究对象、对象的特征以及对象的数量联系在一起的整体, 将物元表示为矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

式中, N 为待研究对象; c 为对象的特征; v 为对象的数量。

将传统物元 $R=(N, c, v)$ 中的 v 值用正态云 (E_x, E_n, H_e) 替代即得到云物元模型^[19], 其中, E_x 为指标定性概念的期望值, 是云滴中最能反映指标实际数据的中心点; E_n 是云滴中满足正态分布的中心点, 将其形容为熵; H_e 用来衡量云滴中数据的差异程度, 将其形容为超熵, 通过 E_x, E_n, H_e 共同刻画云滴的不确定性以及模糊性。

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & c_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (33)$$

本文中事物 N 即代表园区 IES, c_n 为选取的综合评价指标, (E_x, E_n, H_e) 则用来描述 c_n 的优劣程度。

2.3 基于云关联度的综合评价方法

云物元模型的模糊性是以云关联度^[20]的随机性表现出来的, 因此, 需要通过统计结果对事物进行综合评价。根据所建立的评价指标体系中各指标的特点, 令样本数据 x 为一个云滴, 并根据构建的标准云模型通过 N 次蒙特卡罗模拟, 生成一个服从期望为 E_n 、超熵值为 H_e 的正态随机数 E'_n , 并由此计算各评估指标数据所对应等级的云关联度, 即

$$P_{jk} = \exp[-(x_j - E_x)^2 / 2(E'_n)^2] \quad (34)$$

式中, p_{jk} 为第 j 项评估指标值 x_j 与第 k 等级的云关联度; E'_n 为第 k 等级时的期望。

根据式(34)可计算出评价指标体系中各指标对应等级的云关联度, 将 p_{jk} 整理为矩阵形式:

$$P = (p_{j \times k})_{n \times m} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{pmatrix} \quad (35)$$

式中, P 为云关联度矩阵; n 为评价指标的个数; m 为评价指标的评价等级数。

根据 P 和 $W_w = \omega P$ 可求得综合判断向量 W_w , 其中, ω 为各评价指标的综合权重向量。综合评估值为

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^m b_k k}{\sum_{k=1}^m b_k} \quad (36)$$

式中, b_k 为综合判断向量 W_w 的分量。

在求解云关联度的过程中, 为了减少随机性和不确定性对 E'_n 带来的影响, 可采用 N 次蒙特卡罗模拟来求解, 最终求得综合评价值的数学期望 η_x 为评价指标的综合评价值; 综合分析 N 次蒙特卡罗模拟所得到的综合评价结果, 给出其 80% 的置信区间 L , 即

$$\eta_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i(x) \quad (37)$$

$$\eta_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i(x) - \eta_x)^2} \quad (38)$$

$$L = [\eta_x - 1.282\eta_n, \eta_x + 1.282\eta_n] \quad (39)$$

式(37)~(39)中, η_x, η_n 分别为综合评价值 η 的数学期望与方差; 1.282 为正态分布 80% 置信区间对应的中位数。

2.4 云熵参数优化计算方法

由式(33)可以看出, 求解云物元模型时主要是求出 E_x, E_n 和 H_e , 即

$$E_x = (c_{\max} + c_{\min}) / 2 \quad (40)$$

$$H_e = E_n / 10 \quad (41)$$

对于 E_x, E_n, H_e 这 3 个参数, 在求解过程中最应关注的是熵值 E_n , 其是云滴中满足正态分布的中心点, 求解 E_n 可以用来刻画评价者对于指标接受程度的模糊性。对于 E_n 目前有 2 种主要的计算方式^[21]: ①基于“3 E_n ”原则的云熵计算方法; ②基于“50% 关联度”原则的云熵计算方法。计算式分别为

$$E_{n1} = (c_{\max} - c_{\min}) / 6 \quad (42)$$

$$E_{n2} = (c_{\max} - c_{\min}) / 2.355 \quad (43)$$

式(42)、(43)分别是基于“3 E_n ”和基于“50% 关联度”原则的熵值计算式。这 2 个式子的区别仅是云熵计算式分母取值的不同, 其实际意义在于, 进行云物元评价时分母决定了评价等级界限处划分的清晰与否。“3 E_n ”原则代表的是等级界限处划分的明确性, 而“50% 关联度”原则则代表的是等级界限处划分的模糊性。 E_n 计算公式为

$$E_n = (c_{\max} - c_{\min}) / d \quad (44)$$

从式(44)可以看出, 分子 $c_{\max} - c_{\min}$ 为定值, 起影响作用的是分母 d , 即云模型的模糊程度随着 d 取值的变化而变化。本文将云滴落在 $[c_{\min}, c_{\max}]$ 外的概率定义为评价者的模糊可接受程度 D 。取 $E_x = 0, E_n = 2, H_e = 0.2, N = 3\ 000$, 并通过蒙特卡罗模拟得到若干个模糊可接受程度与云熵分母对应的点 $(D,$

d),将 D 与 d 之间对应关系拟合成曲线 $D(d)$,如图1所示,随着 d 的增大 D 随之减小, $D(d)$ 整体上近似呈现“此消彼长”趋势。

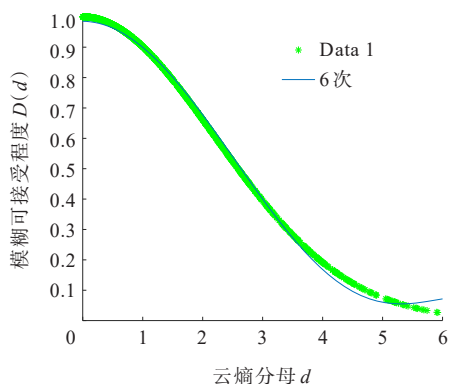


图1 模糊接受度 D 与云熵计算分母 d 拟合曲线

Figure 1 Fitting curve between fuzzy acceptance D and cloud entropy calculation denominator d

当云熵计算分母为6时即采用“ $3E_n$ ”原则进行计算,此时对于模糊程度极其不能接受,在等级边界处划分极为明确。对图1中的曲线采用6次多项式进行拟合,可得到 $D(d)$ 的表达式为

$$D(d) = -(2.371x^6 + 1.330x^5) \times 10^{-5} + (25.66x^4 + 4.350x^3) \times 10^{-4} - (86.41x^2 + 2.182x) \times 10^{-3} + 98.54 \times 10^{-2} \quad (45)$$

本文所采用的云熵参数优化计算方法综合考虑云熵分母 $d=6$ 时(此时模糊可接受程度 $D(d)=0.025$)等级边界极为明确和云熵分母 $d=2.355$ 时(此时模糊可接受程度 $D(d)=0.55$)等级边界较为模糊的情况。兼顾明确性和模糊性,选择模糊接受度为0.20,其实际意义:最多可以有20%原本不属于本等级的评价对象因系统运行时的不确定性而误判到本等级。此时 $d=4$,此时的云熵计算公式如下:

$$E_n = (c_{\max} - c_{\min}) / 4 \quad (46)$$

以1组综合能源 $N-1$ 通过率数据为例,分别采用“ $3E_n$ ”、“50%关联度”以及本文所提的云熵参数优化计算原则进行云熵计算,求得等级正态云模型,如图2所示(5条曲线表征综合能源 $N-1$ 通过率的优劣情况,从左至右依次为严重、较严重、正常、良好、优秀)。

由图2可知,基于“ $3E_n$ ”原则计算的正态云模型,各个等级区间之间间隔清晰,突出了划分的明确性,从而导致忽视了等级边界处的模糊性;基于“50%关联度”原则计算的正态云模型,各个等级区间之间界限极为模糊,等级边界处的分明性不能兼顾,会导致由于系统不确定性产生的等级区间误判

增多;基于云熵参数优化原则计算的正态云模型,在等级边界处兼顾了上述2种方法的优点,既考虑了明确性也照顾到了模糊性。

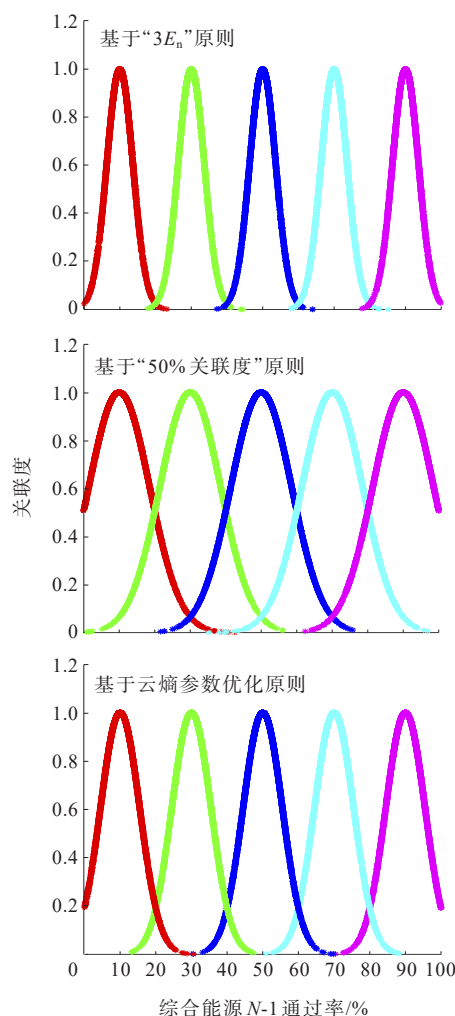


图2 基于3种云熵计算方法的正态云模型

Figure 2 Normal cloud model based on three cloud entropy calculation methods

2.5 变权综合评价

根据 $W_w = wP$ 求得综合判断向量 $W_w = [W_{w1}, W_{w2}, \dots, W_{wn}]$,将 $W_{wj} (j=1, 2, \dots, 5)$ 定义为云综合关联度。当 $W_{wj} = \max W_{wj}$ 时,认为系统的综合等级为 j 。如图2所示的指标评价结果仍有可能存在同属于2个不同等级的情况,这是由于园区IES包含多种能源设备、能流复杂且用户有着不同的用能需求,在其运行过程中存在不确定性,难以兼顾各方面需求。

由式(34)所示自然指数函数可知云关联度 $p_{jk} \in [0, 1]$,当评价指标不属于该级别范围时,其对于该级别的云关联度 $P_{jk} = 0$ 。不同于传统云物元模型的负关联度,这些 $P_{jk} = 0$ 的评价指标在计算云综

合关联度时不再具有“改善”作用,对不属于该级别的云关联度不会产生影响。这样会导致评价结果出现偏差,究其原因是,当某一指标过于优秀或过于恶劣时,仅考虑了其在本等级界限内的优秀或恶劣情况,没有兼顾其不属于该级别的影响,即所谓的“长板效应”。

为了更进一步减小出现某一指标同属于 2 个等级的情况带来的误差,引入变权理论^[22]以此来“改善”各评价指标的均衡度,对其加以限制,尽量减少极个别指标值的优秀或严重造成评价整体结果出现偏差的情况。

定义 1 若 $\delta_j: [0, 1]^m \rightarrow [0, 1] (j=1, 2, \dots, m)$

满足: ① 归一性: $\sum_{j=1}^m \delta_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1$; ② 连续性: $\delta_j(x_1, x_2, \dots, x_m) (j=1, 2, \dots, m)$ 关于每个变元 x_j 连续; ③ 改善性: $\delta_j(x_1, x_2, \dots, x_m) (j=1, 2, \dots, m)$ 关于每个变元 x_j 单调下降; 则称 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$ 为一组改善性变权。

定义 2 设 $\phi_j(t) \in C^2(0, 1] (j=1, 2, \dots, m)$ 且 $\phi_j(t) \geq 0$ 以及 $\phi_j''(t) \geq 0$ 这 2 个约束条件都能满足, 则

$G(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m \phi_j(x_j) (j=1, 2, \dots, m)$ 为改善

型均衡函数; $\delta_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \delta_j^{(0)} \frac{\partial G}{\partial x_j} / \sum_{k=1}^m \left(\delta_k^{(0)} \frac{\partial G}{\partial x_k} \right)$

为 $G(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 的改善型变权模式, 其中 $\sum_{k=1}^m \delta_k^{(0)} = 1, \delta_j^{(0)} \geq 0$ 。

将改善基准定义为评价指标 x_i 到其相应等级 j 的界限中心距离, 为解决忽视不属于该云等级界限内的“短板效应”, 将改善标准定义为距离界限中心越近其相对权重越小。构建常见的改善性变权为

$$h_{ij} = |x_i / H_{ij} - 1|^{-1} \quad (47)$$

$$W'(x_1, x_2, \dots, x_m) = w_i^{(0)} h_{ij}^{\alpha-1} / \sum_{i=1}^n w_i^{(0)} h_{ij}^{\alpha-1},$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (48)$$

式中, W' 为经过改善性变权后得出的变权向量; α 为改善系数, 其值越大评价者对均衡程度要求越低, 反之要求越高, 依照本文评价者对模糊度的要求选取 $\alpha = 0.5$ 。

3 算例分析

3.1 参数设置

为验证本文综合评价体系的有效性, 选取东部沿海某园区作为实例进行分析。用能系统所需的

能源类型主要有电、热、冷负荷。根据园区 IES 架构和特点选取 5 组评价方案, 如表 2 所示。

表 2 5 种园区 IES 规划方案

方案	燃气轮机	燃气锅炉	电锅炉	电制冷	风电机组	光伏
1	12.5	2.5	2.1	1.8	2.4	0.0
2	12.5	2.5	2.1	1.8	0.0	2.4
3	12.5	0.0	4.8	1.8	1.0	1.0
4	12.5	4.8	0.0	1.8	1.0	1.0
5	12.5	2.5	8.4	1.8	1.0	1.0

表 2 中方案 1、2 用来比较风电和光伏机组的差异, 方案 3、4 用来比较燃气锅炉和电锅炉的差异, 方案 5 采用的主要热源为电锅炉^[23]。以不同规划方案的参数取值代表系统运行的不确定性, 例如: 方案 1 中风电机组容量设置为 2.4 MW, 而光伏容量为 0.0, 此时园区 IES 无光伏接入; 方案 2 中风电机组容量设置为 0.0, 而光伏容量为 2.4 MW, 此时园区 IES 无风电接入。方案 1、2 分别代表园区 IES 的 2 种不同运行工况, 通过 2 种运行工况的差异体现 IES 运行中的不确定性。

根据式(1)~(25)计算求得 5 种规划方案的指标计算结果, 如表 3 所示。

表 3 5 种规划指标计算结果

方案	A ₁ /万元	A ₂ /%	A ₃ /kgce	A ₄ /(kgce·万元 ⁻¹)	A ₅ /%	A ₆ /%
1	8 123.20	3.4	6 230	201	73	74
2	8 498.50	4.2	5 982	186	71	71
3	9 203.40	3.6	5 402	192	68	64
4	8 345.30	3.9	6 874	179	65	69
5	7 629.80	3.3	5 873	211	64	62

方案	A ₇ /%	A ₈ /%	A ₉ /h	A ₁₀ /%	A ₁₁ /%	A ₁₂ /%
1	81	92	7.82	81	82	45
2	76	81	8.41	79	80	42
3	64	78	12.33	63	64	32
4	66	85	13.24	62	68	30
5	68	75	11.68	61	73	35

方案	A ₁₃ /%	A ₁₄ /%	A ₁₅ /%	A ₁₆ /%	A ₁₇ /%
1	40	100	92	85	83
2	38	100	90	83	80
3	25	98	82	72	75
4	24	99	84	71	77
5	28	100	81	74	79

3.2 综合评价结果

3.2.1 指标权重确定

根据表 3 各规划方案指标的计算结果并采用本

文所提DEMATEL法求解主观权重。根据式(26)~(28)求出各指标主观权重,如表4所示。

表4 各指标主观权重

Table 4 Subjective weight of each index

指标	影响度 D	被影响度 C	中心度 $D+C$	权重
A ₁	1.113	0.000	1.113	0.167
A ₂	0.170	0.021	0.191	0.028
A ₃	0.129	0.112	0.241	0.036
A ₄	0.129	0.112	0.241	0.036
A ₅	0.199	0.130	0.330	0.050
A ₆	0.279	0.063	0.343	0.052
A ₇	0.304	0.241	0.545	0.082
A ₈	0.176	0.107	0.283	0.043
A ₉	0.168	0.731	0.731	0.110
A ₁₀	0.182	0.063	0.244	0.037
A ₁₁	0.182	0.063	0.244	0.037
A ₁₂	0.042	0.342	0.384	0.058
A ₁₃	0.042	0.342	0.384	0.058
A ₁₄	0.069	0.127	0.196	0.030
A ₁₅	0.021	0.652	0.673	0.100
A ₁₆	0.000	0.135	0.304	0.046
A ₁₇	0.119	0.083	0.202	0.030

根据表3各规划方案指标的计算结果并结合本文所提EWM求解客观权重。根据式(29)求出各指标客观权重,如表5所示;基于MDIP对主、客观权重进行综合,如图3所示;根据式(30)、(31)计算得到综合权重,如表6所示。

表5 各指标客观权重

Table 5 Objective weight of each index

指标	信息熵 e	信息效用 d	权重
A ₁	0.832	0.168	0.040 3
A ₂	0.819	0.181	0.043 6
A ₃	0.834	0.166	0.039 9
A ₄	0.814	0.186	0.044 7
A ₅	0.817	0.183	0.044 1
A ₆	0.775	0.225	0.054 1
A ₇	0.702	0.298	0.071 8
A ₈	0.755	0.245	0.058 9
A ₉	0.732	0.268	0.064 6
A ₁₀	0.590	0.41	0.098 7
A ₁₁	0.783	0.217	0.052 2
A ₁₂	0.731	0.269	0.064 6
A ₁₃	0.667	0.333	0.080 1
A ₁₄	0.84	0.160	0.038 5
A ₁₅	0.695	0.305	0.073 5
A ₁₆	0.662	0.338	0.081 2
A ₁₇	0.796	0.204	0.049 2

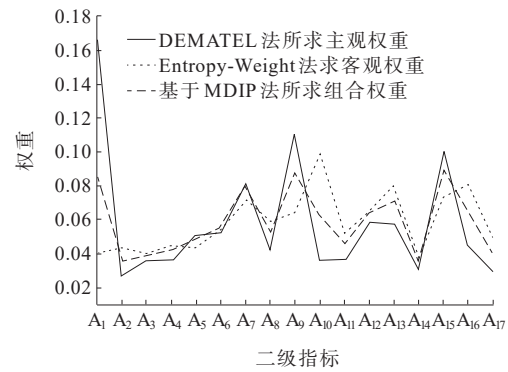


图3 指标权重赋权结果

Figure 3 Results of weighting indexes

表6 综合权重计算结果

Table 6 Calculation results of comprehensive weight indexes

指标	综合权重	指标	综合权重
A ₁	0.085 514	A ₁₀	0.062 992
A ₂	0.036 421	A ₁₁	0.045 810
A ₃	0.039 506	A ₁₂	0.063 805
A ₄	0.041 815	A ₁₃	0.071 049
A ₅	0.048 947	A ₁₄	0.035 426
A ₆	0.055 287	A ₁₅	0.089 365
A ₇	0.079 982	A ₁₆	0.063 706
A ₈	0.052 459	A ₁₇	0.040 047
A ₉	0.087 869		

由图3可知,使用DEMATEL法进行赋权时投资成本所占权重最大,与主观上项目立项时投资成本优先考虑相一致;EWM赋权结果中可再生能源装机占比权重值最大,其信息熵值最小,变异程度最大,提供的信息量也最多。综合后的权重值起伏均在正常范围内,数据正常未出现明显波动。综合赋权法将主、客观赋权的优缺点融合在一起,既平衡了评价者对不同指标的主观重视程度也考虑了指标数据的客观真实。

由表6可计算得出各一级指标的综合权重,如表7所示,其中可靠性指标综合权重最高,智能友好性指标综合权重最低,与实际情况相符。

表7 一级指标综合权重

Table 7 Comprehensive weights of first-level indexes

一级指标	综合权重	一级指标	综合权重
经济性(A ₁ ~A ₅)	0.252	环保性(A ₁₀ ~A ₁₃)	0.244
可靠性(A ₆ ~A ₉)	0.276	智能友好性(A ₁₄ ~A ₁₇)	0.228

3.2.2 规划方案总体评价结果

根据改进的云物元模型并结合式(34)~(39),

计算求得各规划方案综合评价价值和基于 80% 的置信区间。在此基础上通过 3 000 次蒙特卡罗模拟,从整体上对各个方案进行评价分析,并将各方案的综合评分以 80% 置信区间表示,如表 8 所示。

表 8 5 种规划方案综合评分

Table 8 Comprehensive scores of five planning schemes

方案	本文方法综合评分 80% 置信区间	方案	本文方法综合评分 80% 置信区间
1	[3.958, 4.012]	4	[2.872, 2.898]
2	[3.672, 3.778]	5	[3.312, 3.458]
3	[3.464, 3.386]		

3.2.3 规划方案各级指标结果及分析

计算评价指标体系各一级指标的综合评分,以此比较各个规划方案在经济性、可靠性、环保性和智能友好性等方面的优劣,结果如图 4 所示。

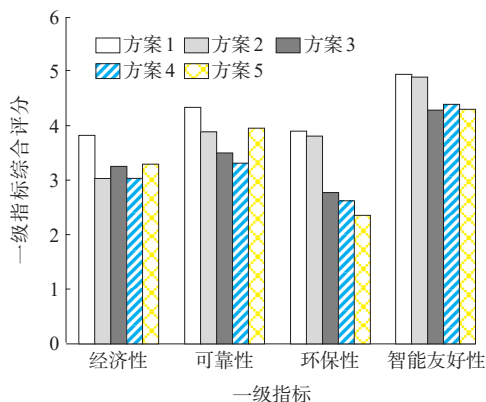


图 4 5 种规划方案一级指标评分

Figure 4 First-level index scores of five planning schemes

由图 4 可以看出,无论是在经济性、可靠性、环保性亦或是智能友好性评分方面,对比方案 1、2,方案 1 均占优。事实上,在设置参数时该园区选取的是东部沿海某园区,基于地区资源禀赋,可利用的风力资源充足,对比光伏机组受天气影响严重,且前期投资高,在该园区投资风电优势比较明显,可以充分利用清洁能源,在未来可再生能源发展中占据重要地位。

比较方案 3、4 可知,方案 3 除了智能友好性评分略低于方案 4 外,其他方面的评分均优于方案 4。事实上,在设置参数时方案 3 是选取投资电锅炉,方案 4 是选取投资燃气锅炉。在使用过程中,燃气锅炉的燃烧会有一些的热量损失,使用效率低于电锅炉。由于燃气锅炉在燃烧过程中会产生许多有害气体,会造成环境的污染,故环保性略差。

在经济性和环保性方面方案 5 表现较好。前期投产时电锅炉无额外的附属设备,安装成本较低。对比电锅炉与燃气锅炉,燃气锅炉需要考虑更多环保性措施,故电锅炉的投资成本是优于燃气锅炉的。从长远角度以及当前低碳绿色的大趋势来看,电锅炉的经济性是优于燃气锅炉的,电锅炉对环境更为友好,电锅炉更符合环保需要。综上,考虑该园区位于东部沿海地区,有稳定的电源供应且为了响应国家节能环保的号召,该园区应加大风电机组的投入,逐步将燃气锅炉替代成电锅炉,以实现经济、环保效益最大化。

3.3 改进算法对比分析

基于文 2.4 所述的 2 种最常见的云熵 E_n 计算方法,选用“ $3E_n$ ”原则进行云熵计算,根据计算结果对算例进行分析,并以此计算结果作为对照,说明云熵改进算法的优点。此时云熵计算分母 $d=6$,计算公式如下:

$$E_n = (c_{max} - c_{min}) / 6 \quad (49)$$

将云熵分母 $d=6$ 代入图 1 中,可得此时模糊可接受程度 $D(d) = 0.025$,此时的实际意义是,最多可以允许 2.5% 原本不属于本等级的评价对象因系统运行时的不确定性而误判到本等级,体现了“ $3E_n$ ”原则划分的明确性。

根据云熵分母 $d=6$ 所确定的云物元模型,结合式(32)~(37),通过 3 000 次蒙特卡罗模拟计算求得综合评价价值和基于 97.5% 的置信区间($L = [\eta_x - 1.96\eta_n, \eta_x + 1.96\eta_n]$),对应的正态分布中位数为 1.96)。此时以 97.5% 置信区间表示各方案综合评分,并与优化算法采用的 80% 置信区间作比较,如表 9 所示,可知使用本文所提云熵优化算法和传统方法评价排序由优至劣顺序不尽相同,采用云熵优化算法的顺序依次为 1、2、5、3、4;采用传统方法的顺序依次为 1、2、3、4、5。

表 9 规划方案采用不同云熵计算方法综合评分对比

Table 9 Comprehensive scores of different cloud entropy calculation methods

方案	优化算法综合评分 80% 置信区间	传统方法综合评分 97.5% 置信区间
1	[3.958, 4.012]	[4.035, 4.235]
2	[3.672, 3.778]	[4.040, 4.193]
3	[3.464, 3.386]	[3.558, 3.756]
4	[2.872, 2.898]	[3.335, 3.629]
5	[3.312, 3.458]	[2.974, 3.280]

由表7可知,智能友好性综合权重值最低,对评价结果影响最小;结合图4各规划方案的一级指标综合评分以及表9对比结果可知:优化算法结果更贴近真实情况,而传统算法对规划方案的评分结果偏差过大。究其原因是,传统算法依据“ $3E_n$ ”原则进行计算时对等级边界的判定极为严格。当出现某一指标特别优或者特别劣时,会导致评分结果出现失真,此时只考虑了等级分界处的分明性,未考虑模糊性,没有很好地兼顾系统运行时的不确定情况。综上,本文所提云熵优化算法对于传统算法来说,具有一定的改善作用且能够兼顾传统方法的优缺点。

3.4 赋权方法对比分析

在针对综合能源系统进行综合评价时,仍有许多评价方法只考虑了使用单一的主观赋权法或是客观赋权法来进行指标赋权计算。这样会造成评价结果具有较强的主观随意性或是受样本数据限制与实际情况有偏差。为了对比分析本文所提的综合评价方法,现以单一的主观或客观赋权法进行计算比较。

1) 以单一的主观赋权法即DEMATEL法结合云物元评价为例。由表4可知各指标主观权重值,将其代入式(35)、(36)中可求得综合评估值(此处不再进行 N 次蒙特卡罗计算求其期望与方差),求得评估值如表10所示。

表10 DEMATEL法求得的综合评估值
Table 10 Comprehensive evaluation values obtained by DEMATEL

方案	评估值	方案	评估值	方案	评估值
1	3.80	3	3.43	5	3.34
2	3.91	4	3.29		

根据该评价方法求得的综合评估值,方案2为最佳方案,结合图4看出这与实际情况不符。究其原因,对指标进行赋权的过程中缺乏对指标数据的客观性处理分析,忽略了原始数据,使得评价结果过于依赖主观判断,最终造成评价结果出现较大偏差。

2) 以单一的客观赋权法即EWM结合云物元评价为例。由表5可知各指标客观权重值,将其代入式(35)、(36)中可求得综合评估值(此处不再进行 N 次蒙特卡罗计算求其期望与方差),求得评估值如表11所示。

表11 EWM求得的综合评估值
Table 11 Comprehensive evaluation values obtained by EWM

方案	评估值	方案	评估值	方案	评估值
1	4.25	3	3.39	5	3.60
2	4.02	4	3.41		

根据该评价方法求得的综合评估值,方案3为最差方案,结合图4看出这亦与实际情况不符,但对比单一的主观赋权法,其考虑了实际样本数据,与真实情况更接近。究其与实际情况仍不符的原因是,对指标进行赋权的过程中未考虑评价者的主观接受程度,满足不了评价者的预期。

综上,只有兼顾主观性和客观性的综合评价方法,才能使得最终评价结果更科学可靠,并且能最大程度满足主观评价者的预期。

3.5 综合评价指标变权分析

以方案1为例计算IES综合评价指标变化权重。方案1的云关联度矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.65 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.90 & 0.76 \\ 0 & 0 & 0.26 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.26 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0.14 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0.26 \\ 0 & 0 & 0 & 0.09 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0.90 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.19 & 0.19 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.19 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0.66 \\ 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.44 \end{bmatrix}$$

根据 $W_w = wP$,将方案1各指标的综合权重向量代入,得到方案1的云综合关联度 $W_{wj} = [0.00664 \ 0.0892 \ 0.1858 \ 0.2492]$,由 $W_{wj} = \max W_{wj}$ 可知方案1的综合评价等级为等级四。由式(47)、(48)及云关联度矩阵可求出方案1变权向量 $W' = [0.00344 \ 0.0951 \ 0.2559 \ 0.2938]$ 。此时方案1的综合评价等级为等级五。分析对比可知,综合评价等级一的权重值不变,等级二的权重值变小,等级三、四、五的权重值均变大。说明所选指标中处于等级二内的有一些过于靠近指标等级的界限中

心,界限划分得过于明显,这样会使得在计算综合关联过程中的“短板问题”被掩盖,从而导致计算结果不准确,因此有必要对其进行改善性计算,使其权重降低。而对于等级三、四、五中这些指标就很好地兼顾了对于等级界限处的模糊性和明确性,故其权重得以升高。在采用本文所提改进的云物元模型进行计算后,可通过变权法进一步对综合评价指标进行改善性修正,使得最终结果更加科学、精确。

4 结语

IES作为能源互联网中的重要一环具有广阔的发展前景。为了匹配中国国情,为以后的IES项目建设提供指导和建议,本文基于云熵优化后的云物元模型对园区IES的规划方案进行综合评价。

1) 所构建的综合评价指标体系包含的指标较多,目的是对典型园区IES不同规划方案进行评价。对于其他形式的IES具有一定的参考意义,但相关指标仍需进一步斟酌是否增删,且随着当前政策与形势变化也需将新型电力系统的5个指标面纳入考虑范畴。

2) 所采用的云熵优化算法与传统的物元评价相比,以云滴出发至云关联度,考虑模糊性并最终反映到系统运行的不确定性上,并采用变权法对云综合评价模型进一步改进,对于传统物元评价有一定的改善作用。本文所选赋权方法是基于MDIP将DEMATEL和EWM相结合形成综合赋权法,减少了主观或客观对于评价结果的影响,使得评价结果更加科学、准确。

3) 在当前环保节能的大环境下,应该尽可能地按照实际情况匹配相应的新能源,以实现环境的友好,进一步推动可再生能源发展。

4) 在IES的规划方案方面,本文存在一定的不足之处,有待后续研究中加以深化。

参考文献:

- [1] 潘华,高旭,姚正,等.计及储能效益的综合能源系统利益分配机制研究[J].智慧电力,2022,50(5):25-32.
PAN Hua,GAO Xu,YAO Zheng,et al.Benefit allocation of integrated energy system considering energy storage benefit[J].Smart Power,2022,50(5):25-32.
- [2] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等.基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):65-74.
ZHENG Yunping,JIAO Chunlei,YASHAR Tuerhong,et al.Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation [J].High Voltage Apparatus,2023,59(7):65-74.
- [3] 蔡颖凯,张冶,曹世龙,等.面向综合需求响应的综合能源系统优化调度[J].电网与清洁能源,2022,38(9):65-72.
CAI Yingkai,ZHANG Ye,CAO Shilong,et al.Optimal scheduling of the integrated electricity and natural gas system considering the integrated demand response[J].Power System and Clean Energy,2022,38(9):65-72.
- [4] 蒋燕,李秀峰,高道春,等.面向区域综合能源系统的电—气负荷联合预测研究[J].电测与仪表,2023,60(5):154-158.
JIANG Yan,LI Xiufeng,GAO Daochun,et al.Research on combined forecasting of electricity-gas load for regional integrated energy system[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(5):154-158.
- [5] 张世翔,吕帅康.面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J].电网技术,2018,42(8):2431-2439.
ZHANG Shixiang,LÜ Shuaikang.Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid[J].Power System Technology,2018,42(8):2431-2439.
- [6] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等.区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J].电力系统自动化,2018,42(4):174-182.
CHEN Baisen,LIAO Qingfen,LIU Dichen,et al.Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J].Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):174-182.
- [7] 田立亭,程林,李荣,等.基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6471-6483.
TIAN Liting,CHENG Lin,LI Rong,et al.A multi-scenario energy efficiency evaluation method for district multi-energy systems based on weighted directed graph [J].Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6471-6483.
- [8] 马丽叶,张涛,卢志刚,等.基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J].电工技术学报,2022,37(11):2789-2799.
MA Liye,ZHANG Tao,LU Zhigang,et al.Comprehensive evaluation of regional integrated energy system based on variable weight extension cloud model[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(11):2789-2799.
- [9] 罗宁,贺墨琳,高华,等.基于改进的AHP-CRITIC组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):86-96.
LUO Ning,HE Molin,GAO Hua,et al.Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC combination weighting and an extension evaluation model[J].Power System Protection and Control,2021,49(16):86-96.
- [10] 梁硕,王艳松.基于改进云物元模型的工业园区综合能

- 源系统规划方案评价[J].电力系统保护与控制,2023,51(9):165-176.
- LIANG Shuo, WANG Yansong. Evaluation of an integrated energy system planning scheme for an industrial park based on an improved cloud matter-element model[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(9):165-176.
- [11] 彭寒梅,彭紫洁,苏永新,等.基于LSSVM的电—气区域综合能源系统短期可靠性评估[J].电力系统自动化,2023,47(4):69-77.
- PENG Hanmei, PENG Zijie, SU Yongxin, et al. Short-term reliability evaluation of electricity-gas regional integrated energy system based on least squares support vector machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(4):69-77.
- [12] 任洲洋,王皓,李文沅,等.基于氢能设备多状态模型的电氢区域综合能源系统可靠性评估[J].电工技术学报,2023,38(24):6744-6759.
- REN Zhouyang, WANG Hao, LI Wenyuan, et al. Reliability evaluation of electricity-hydrogen regional integrated energy systems based on the multi-state models of hydrogen energy equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023,38(24):6744-6759.
- [13] 罗毅,李昱龙.基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J].电网技术,2013,37(1):77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013,37(1):77-81.
- [14] 闻旻.综合能源系统规划方案的综合评价方法研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- WEN Min. Research on comprehensive evaluation of integrated energy system planning[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [15] 谷卫星,王婷婷,张鹏,等.基于组合赋权和TOPSIS的配电网CPS系统脆弱性评估[J].华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(1):56-66+131.
- GU Weixing, WANG Tingting, ZHANG Peng, et al. Vulnerability assessment of distribution network CPS system based on combination empowerment and TOPSIS [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023,50(1):56-66+131.
- [16] 李志鹏,王建喜,周洪伟,等.计及多指标间相互影响的园区综合能源系统规划评价方法[J].电力建设,2022,43(10):98-110.
- LI Zhipeng, WANG Jianxi, ZHOU Hongwei, et al. Evaluation method for park-level integrated energy system planning considering the interaction of multiple indices[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 98-110.
- [17] 李志鹏,王建喜,周洪伟,等.计及多指标间相互影响的园区综合能源系统规划评价方法[J].电力建设,2022,43(10):98-110.
- LI Zhipeng, WANG Jianxi, ZHOU Hongwei, et al. Evaluation method for park-level integrated energy system planning considering the interaction of multiple indices[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 98-110.
- [18] 王永真,张靖,潘崇超,等.综合智慧能源多维绩效评价指标研究综述[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.
- [19] 刘荡荡.基于云物元模型与可变模糊集的电能质量综合评估方法研究[D].合肥:安徽大学,2020.
- LIU Dangdang. Research on power quality comprehensive evaluation method based on cloud matter-element model and variable fuzzy set[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [20] 马雨叶,丁荣荣,卢志刚,等.基于可拓云模型的配电网经济运行综合评价及灵敏度分析[J].电工电能新技术,2016,35(7):8-16.
- MA Liye, DING Rongrong, LU Zhigang, et al. Comprehensive evaluation and sensitivity analysis for economic operation of distribution network based on extension cloud theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016,35(7):8-16.
- [21] 禹洪波,袁婉玲,汪敏,等.基于非对称贴近度证据云物元模型的电力变压器综合状态评估方法[J].电网技术,2021,45(9):3706-3713.
- YU Hongbo, YUAN Wanling, WANG Min, et al. Comprehensive condition assessment of power transformer based on asymmetric nearness degree evidence cloud matter-element model[J]. Power System Technology, 2021,45(9):3706-3713.
- [22] 杜江,孙铭阳.基于变权灰云模型的变压器状态层次评估方法[J].电工技术学报,2020,35(20):4306-4316.
- DU Jiang, SUN Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(20):4306-4316.
- [23] 蒋明喆,成贵学,赵晋斌.考虑动态荷储策略的综合能源系统双层规划模型[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):44-57.
- JIANG Mingzhe, CHENG Guixue, ZHAO Jinbin. Double-deck planning model of integrated energy system in consideration of dynamic load energy storage strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5):44-57.