



基于对象属性和物元可拓的园区级综合能源系统规划方案综合评价及决策

宋志成, 李涛*

华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206

摘要: 园区级综合能源系统, 凭借其清洁性、高效性以及广泛的可推广性, 被视为应对能源与环境危机的有效方案。然而, 在构建园区级综合能源系统时, 面对多元化的评估标准, 决策者往往难以抉择出最优建设方案。鉴于此, 本文将物元可拓模型引入园区级综合能源系统规划决策中, 提出了基于物元可拓模型的园区级综合能源系统多准则规划决策框架。首先, 从园区级综合能源系统的核心属性和构成元素出发, 构建了涵盖经济、环境、能源效率、安全性及智能化水平等多维度的综合性能评价指标体系。随后, 结合模糊层次分析法与熵权法确定了各评价指标的主观与客观权重, 并应用线性加权法计算得出综合权重, 以保证评价体系的全面性与客观性。第三, 利用物元可拓模型对各个备选方案的综合性能进行了分析与排序, 量化了各方案的优劣程度。为验证所提框架的有效性, 本文选取了中国江苏省某产业园区作为实际案例进行研究。研究结果表明该模型在园区级综合能源系统规划决策中展现了优越性和稳健性。

关键词: 园区级综合能源系统; 模糊层次分析法; 物元可拓; 绩效分析; 多准则投资决策

中图分类号: TK01; TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2024)05-0511-15

引言

传统能源体系以单一能源品类实现能源供给与消费, 无法满足当前社会对能效水平、污染排放和成本

的要求^[1]。综合能源系统能够利用不同能源之间的耦合关系和智能化手段实现降低成本、提高能效的目的, 被认为是解决上述问题的重要方式之一^[2]。园区级综合能源系统 (park-level integrated energy system,

收稿日期: 2024-03-07; **修回日期:** 2024-05-03

基金项目: 国家社会科学基金重大项目: 面向国家能源安全的智慧能源创新模式与政策协同机制研究 (19ZDA081)

作者简介: 宋志成 (1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为技术经济评价、环境会计。

*李涛 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为技术经济与管理、会计理论与财务管理、环境会计与资源优化。E-mail: lm3@ncepu.edu.com (通讯作者)

引用格式: 宋志成, 李涛. 基于对象属性和物元可拓的园区级综合能源系统规划方案综合评价及决策[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(5): 511-525. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240022. CSTR: 32282.14.JES.20240022

Song Z C, Li T. Comprehensive Evaluation and Decision-Making of Park Level Comprehensive Energy System Planning Scheme Based on Object Attributes and Matter Element Extension[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(5): 511-525. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240022. CSTR: 32282.14.JES.20240022

PIES)是目前应用最为广泛的综合能源系统,包括工业园区综合能源系统、社区综合能源系统、村镇综合能源系统等^[3]。然而,其建设方案的好坏直接影响运行效果,如何实现PIES的精准投资和决策是当前亟须解决的问题之一。

综合评价是多方案投资决策的主要方法。在综合能源系统决策方面,相关学者主要从城市级、建筑级、设备耦合级等方面开展了一些综合评价研究。例如,Wang等^[4]针对城市固体废物处理方案选择问题,提出了基于区间值模糊集理论的群体多属性决策分析方法;Li等^[5]从系统经济、经济运行和环境影响三个方面,建立了三联供、地源热泵、储能系统、燃气锅炉的建筑多能源系统综合评价指标体系;袁铁江等^[6]对含有氢能的风、光能源系统提出了多尺度评价指标及其数学模型。而建筑级综合能源系统指标体系则关注建筑节能系统和设备运行性能。

此外,学者们在园区级综合能源系统领域也开展了一些研究。薛屹洵等^[7]分析了不同能效指标的差别,并结合多能特性提出适用于园区能效评估的能源综合利用率指标。陈柏森等^[8]分析了综合能源系统能源转换、分配、储存、消费等环节的结构与优势,从能源、装置、配电网和用户等环节设计了PIES的综合性能评价体系。赵国涛等^[9]基于绿色制造体系的基本理念建立指标体系,实现了对园区综合能源系统绿色化水平的评估。程江洲等^[10]从经济性、技术性、环保性三个方面提出了农业园区综合能源系统的综合评价体系。李志鹏等^[11]针对PIES的多指标评价中未考虑指标间的相互影响,提出了考虑指标间相互作用的改进妥协解排序法。

然而,现有的评价指标体系考虑经济、环境、社会等方面,无法准确反映综合能源系统的基本属性,例如智能化水平等。随着经济社会的发展,社会和国家对能源供给提出了更多的要求,不能仅仅从经济、环保、社会等几个方面粗略地评价不同能源项目的好坏^[12,13]。能源系统的建设更应该满足未来信息化发展等方面的需求^[14]。鉴于此,本文将物元可拓模型引入PIES投资决策中,以PIES为研究对象,从价值、系统、设备三个层面分析其特征,并梳理了评价

指标体系的构成;提出了经济-环境-能源-安全-智能化指标体系,并将物元可拓方法应用于PIES投资决策,建立了融合模糊层次分析法、熵权法与物元可拓的PIES决策框架,以期为园区级综合能源系统规划提供决策参考。

1 指标体系及定义

从综合能源系统服务于能源转型和建设新型电力系统的要求来看,综合能源系统需要具备清洁、低碳、高效、安全等方面的特点^[15]。从综合能源系统的基本属性来看,其具备综合化、清洁化、智能化的特点^[16]。因此,综合能源系统的评价体系应该能反映其在综合化、清洁化、智能化方面的特征和能力。从园区级综合能源系统的基本构成来看,其主要由价值层、系统层和设备层构成^[17]。价值层反映PIES的价值创造,即实现园区能源系统的经济、高效、清洁运行。因此,对其实施评价应该包括这三个方面。系统层反映综合能源系统中能源系统、控制系统等不同系统的特性。其中,能源系统表现为综合化,控制系统表现为智能化^[18]。设备层反映PIES中设备的运行状态。PIES设备层的性能主要表现为能源生产、转化设备运行性能和能源传输网络运行性能,各层级的含义和指标如图1所示。

基于上述分析,结合文献查询、专家咨询等方法,本文建立包括经济、环境、能源、安全、智能化等准则的PIES综合性能分析和评价的指标体系。该指标体系由目标层、准则层和指标层构成。准则层包括经济性能、环境性能、能源性能、安全性能、智能化性能。本文从成本、收入、发展的角度选取单位能效投资、年化运行成本、收入成本比、投资回收期;从增效减排、清洁生产的角度选取单位能耗排放量、污染物减排率、一次能源利用率、可再生能源装机占比;从能源传输效率、能源转化效率、能源利用效率等角度选取电网线损率、热/冷管网损失率、设备平均利用率、综合能效;从供能保障、供能裕度、供能稳定等选取非计划停供系数、综合电压合格率、能源自给率、供能可靠性;从智能化信息水平和智能化调

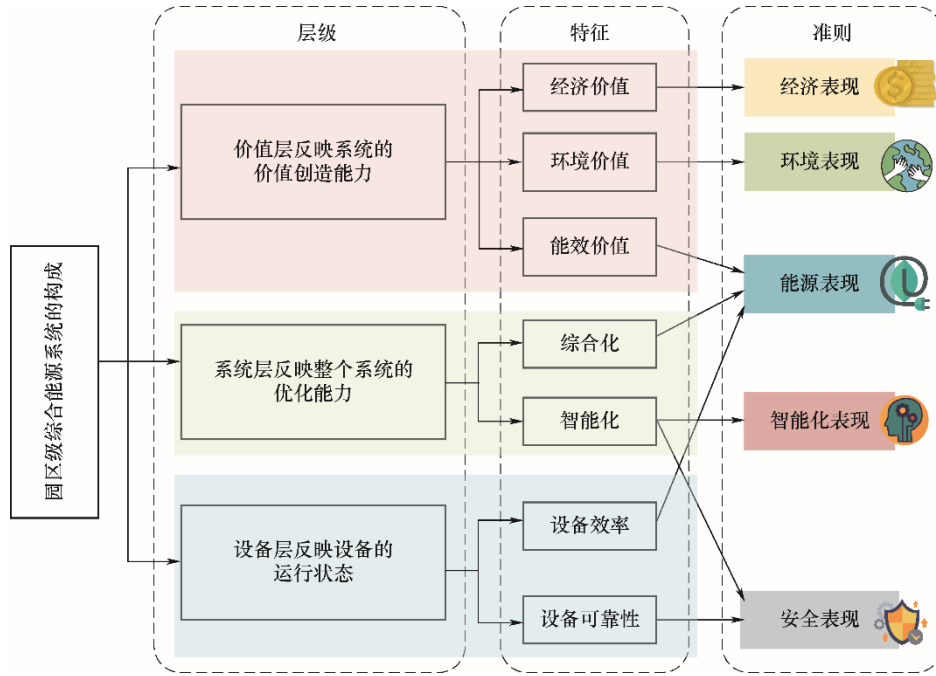


图1 园区级综合能源系统的评价指标分析

Figure 1 Analysis of evaluation indicators for park level comprehensive energy systems

度水平等角度选取智能预测准确率、智能诊断准确率、设备故障自愈能力、智能电表普及率。指标体系的搭建如表1所示。

1.1 经济性能

(1)单位能效投资。单位能效投资是指综合能源系统为满足单位负荷所产生的投资费用^[19]。

$$C_{ue} = C_{ai} / \sum (L_e + L_h + L_c) \quad (1)$$

式中, C_{ue} 为单位能效投资; L_e 、 L_h 、 L_c 分别为电、热、冷负荷; C_{ai} 为年投资总额。

(2)年化运行成本。年化运行成本是指一年内综合能源系统运行产生的总费用, 包括燃料费用、设备维护费用等。

$$C_o = C_f + C_m \quad (2)$$

式中, C_o 为年运行成本; C_f 为年燃料费用; C_m 为年设备维护费用。

(3)收入成本比。收入成本比是指综合能源系统所产生的收入与各项成本的比值。

$$r_{rc} = r_a / (C_{ai} + C_o) \quad (3)$$

式中, r_{rc} 为收入成本比; r_a 为年总收入。

(4)投资回收期。投资回收期指投资项目投产后获得的收益总额达到该投资项目投入的投资总额所需要的时间(年限)。

$$T_p = \frac{C_t}{\sum [r_a(t) - C_{ai}(t) - C_o(t)]} \quad (4)$$

式中, T_p 为投资回收期; C_t 为项目总投资。

1.2 环境性能

(1)单位能耗排放量。单位能耗排放量指一定时期内污染物排放量与该系统能源消耗量的比值^[20]。

$$r_{pe} = \frac{p_e}{E} \quad (5)$$

式中, r_{pe} 为单位能耗排放量; p_e 为系统总污染物排放当量; E 为系统能源总消耗量。

(2)污染物减排率。污染物减排率是指采用综合能源系统方案相比传统能源方案的年污染物减少的比例^[21]。

$$r_{pr} = \frac{p_t - p_e}{p_t} \quad (6)$$

式中, r_{pr} 为污染物减排率; p_t 为传统能源方案总污染物排放当量。

表1 PIES 综合性能评价的指标体系

Table 1 The index system for PIES comprehensive performance evaluation

准则层	指标层	意义
经济 (C1)	单位能效投资(C11)	反映成本情况
	年化运行成本(C12)	反映成本情况
	收入成本比(C13)	反映收入能力
	投资回收期(C14)	反映发展能力
环境 (C2)	单位能耗排放量(C21)	反映增效减排能力
	污染物减排率(C22)	反映增效减排能力
	一次能源利用率(C23)	反映清洁生产能力
	可再生能源装机占比(C24)	反映清洁生产能力
能源 (C3)	电网线损率(C31)	反映能源传输效率
	热/冷管网损失率(C32)	反映能源传输效率
	设备平均利用率(C33)	反映能源利用效率
	综合能效(C34)	反映能源转化效率
安全 (C4)	非计划停供系数(C41)	反映供能保障能力
	综合电压合格率(C42)	反映供能稳定能力
	能源自给率(C43)	反映供能裕度能力
	供能可靠性(C44)	反映供能稳定能力
智能化 (C5)	智能预测准确率(C51)	反映智能化信息水平
	智能诊断准确率(C52)	反映智能化信息水平
	设备故障自愈能力(C53)	反映智能化调度水平
	智能电表普及率(C54)	反映智能化调度水平

(3)一次能源利用率。一次能源利用率是指能源系统中一次能源消耗占总能源消耗的比重。

$$r_o = \frac{E_p}{E} \quad (7)$$

式中, r_o 为一次能源利用率; E_p 为一次能源使用总量。

(4)可再生能源装机占比。可再生能源装机占比是反映可再生能源装机占能源总装机的比例。

$$r_r = \frac{S_r}{S_a} \quad (8)$$

式中, r_r 为可再生能源装机占比; S_r 、 S_a 分别为系统可再生能源装机容量、系统总装机容量。

1.3 能源性能

(1)电网线损率。电网线损率指的是电力网络中损耗的电能占电力供应总量的比重。

$$r_{el} = \frac{e_{lost}}{e} \quad (9)$$

式中, r_{el} 为电网线损率; e 为电能传输总量; e_{lost} 为损失的电能。

(2)热/冷管网损失率。热/冷管网损失率指综合能源系统热、冷传输网络能量损失的比重^[22]。

$$r_{hc} = \frac{h_{lost} + c_{lost}}{h + c} \quad (10)$$

式中, r_{hc} 为热/冷管网损失率; h 、 c 分别为管网热、冷能源传输总量; h_{lost} 、 c_{lost} 分别为损失的热、冷能。

(3)设备平均利用率。设备平均利用率是指综合能源系统内设备实际工作时长和计划工作长时的比值。

$$\eta_u = \frac{T_n}{T_0} \quad (11)$$

式中, η_u 为设备平均利用率; T_0 为单位计划工作时长; T_n 为设备的实际工作时长。

(4)综合能效。综合能效是能源系统产生的有效能与输入的有效能的比值^[23]。

$$\eta_e = \frac{U_E}{S_E} \quad (12)$$

式中, η_e 为综合能效; U_E 为能源系统产生的有效能; S_E 为能源系统输入的有效能。

1.4 安全性能

(1)非计划停供系数。非计划系统停供系数是指在评估期内能源系统非计划停供时间占总运行时间的比重。

$$T_{of} = \frac{T_s}{T} \quad (13)$$

式中, T_{of} 为非计划系统停供系数; T_s 为系统非计划停运时长; T 为统计期间时长, h 。

(2)综合电压合格率。综合电压合格率指实际运行电压在允许电压偏差范围内累计运行时间与总运行时间之比。

$$\eta_q = \frac{T_q}{T} \quad (14)$$

式中, η_q 表示客户综合电压合格率; T_q 代表电压合格累计时长, h 。

(3)能源自给率。能源自给率指综合能源系统所

消费的能源总量中, 由自身供给的能源所占的比重^[24]。

$$\eta_s = \frac{E_s}{E} \quad (15)$$

式中, η_s 为能源自给率; E_s 表示该综合能源系统自身提供的能源总量。

(4) 供能可靠性。供能可靠性是指综合能源系统向用户供应能源占用户总需求能源的比重。

$$\eta_r = 1 - \frac{E_r}{L_c + L_h + L_c} \quad (16)$$

式中, η_r 为供能可靠性; E_r 为能源供给的缺额。

1.5 智能化性能

在投资阶段, 智能预测准确率、智能诊断准确率、系统故障自愈能力等指标的数据无法通过历史数据获得, 因此采用专家评分法进行定性分析。

(1) 智能预测准确率。智能预测准确率用以衡量区域系统进行风力、光伏等发电出力预测以及电力需求预测等的准确程度。

(2) 智能诊断准确率。智能诊断准确率是指智能设备系统故障诊断正确数量与故障诊断实际数量的比值。

(3) 系统故障自愈能力。系统故障自愈能力是指智能调控系统将问题元件从系统中隔离或从故障状态恢复到正常运行状态的能力^[25]。

(4) 智能电表普及率。智能电表普及率指智能电表的安装数量占需要智能电表总数的比例。

$$\eta_{sm} = \frac{N_{sm}}{N_s} \quad (17)$$

式中, η_{sm} 为智能电表普及率; N_{sm} 表示智能电表的安装数量; N_s 表示需要智能电表的总数。

2 决策方法和框架

2.1 决策方法

本文采用模糊层次分析法确定主观权重, 采用熵权法确定客观权重, 采用线性加权法确定综合权重, 使用物元可拓模型对备选方案进行排序。

2.1.1 权重的确定 (1) 模糊层次分析法。本文采用

基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法确定主观权重^[26-27], 主要步骤如下。模糊互补矩阵采用 0.1~0.9 标度法对各层次因素的重要性进行评价。对决策问题的各个因素进行两两比较后, 形成模糊互补矩阵如式(18)。

$$Y = (y_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & 1 & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, Y 为模糊互补矩阵; y_{ij} 为模糊互补矩阵中位于第 i 行 j 列的元素; n 为评价指标数量。

式(19)变换得模糊一致判断矩阵。

$$y'_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n y_{ik} - \sum_{k=1}^n y_{jk}}{2n} + 0.5 \quad (19)$$

式中, y'_{ij} 为模糊一致判断矩阵中位于第 i 行 j 列的元素。

$$s_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n y'_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^n \left(\left(\prod_{j=1}^n y'_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中, s_i 为指标 i 的主观权重。

(2) 熵权法。熵权法是通过计算指标的信息熵来衡量数据的信息量, 是确定权重的客观方法^[28]。其计算过程如下。

① 建立初始评价矩阵, 见式(21)。

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, X 为初始评价矩阵; x_{ij} 为备选方案 i 在指标 j 的值; m 为备选方案数。

② 归一化, 见式(22)。

$$\theta_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (22)$$

式中, θ_{ij} 为 x'_{ij} 归一化后的数据。

③计算权重, 见式(23)。

$$v_j = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \theta_{ij} \ln \theta_{ij} / \sum_{j=1}^n \left(1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \theta_{ij} \ln \theta_{ij} \right), \quad (23)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

式中, v_j 为指标 j 的客观权重。

(3)权重组合方法, 见式(24)。

$$w_j = \alpha v_j + \beta v_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

式中, w_j 为指标 j 的组合权重; α 、 β 分别为主观权重和客观权重的权重关系系数。

2.1.2 评价方法 物元可拓法是在复杂系统中化解次要矛盾, 解决主要矛盾和关键性难题的有力手段^[29,30]。其计算过程如下。

(1)构建综合能源系统物元矩阵, 见式(25)。

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_{11} & \cdots & V_{1m} \\ & C_2 & V_{21} & \cdots & V_{2m} \\ & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & C_n & V_{n1} & \cdots & V_{nm} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中, R 为物元矩阵; N 为评价对象; C 为评价指标; V 代表特征值; n 为评价指标数量; m 为备选方案数量。

(2)确定经典域和节点域的物元矩阵。经典域物元矩阵见式(26)。

$$R_j = \begin{bmatrix} Q_1 & \cdots & Q_z \\ C_1 & (a_{11}, b_{11}) & \cdots & (a_{1z}, b_{1z}) \\ C_2 & (a_{21}, b_{21}) & \cdots & (a_{2z}, b_{2z}) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_n & (a_{n1}, b_{n1}) & \cdots & (a_{nz}, b_{nz}) \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, (a_{nz}, b_{nz}) 为评价指标 n 的评价等级 z 的范围。节点域物元矩阵见式(27)。

$$R_p = \begin{bmatrix} N & C_1 & (a_{11}, b_{1z}) \\ & C_2 & (a_{21}, b_{2z}) \\ & \cdots & \cdots \\ & C_n & (a_{n1}, b_{nz}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中, R_p 为节点域物元矩阵; (a_{n1}, b_{nz}) 为评价指标 n 的节域的范围。

(3)计算相关系数和相关度, 见式(28)~式(30)。

$$K_{ij}(V_{ij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(V_{ij}, V_{oi})}{|V_{oi}|} & V_{ij} \in V_{oi} \\ \frac{\rho(V_{ij}, V_{oi})}{\rho(V_{ij}, V_{pi}) - \rho(V_{ij}, V_{oi})} & V_{ij} \notin V_{oi} \end{cases} \quad (28)$$

$$\rho(V_{ij}, V_{oi}) = \left| V_{ij} - \frac{1}{2}(b_{ik} + a_{ik}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ik} - a_{ik}) \quad (29)$$

$$\rho(V_{ij}, V_{pi}) = \left| V_{ij} - \frac{1}{2}(b_{pi} + a_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (30)$$

式中, $K_{ij}(V_{ij})$ 表示评价对象 j 对应指标 i 的相关度; V_{ij} 表示综合能源系统物元矩阵中评价对象 j 对应指标 i 的值; V_{oi} 表示评价指标 i 对应评价等级 z 的经典域; V_{pi} 表示评价指标 i 的节点域; a_{ik} 为评价指标 i 对应评价等级 k 取值范围的下限; b_{ik} 为评价指标 i 对应评价等级 k 取值范围的上限; a_{pi} 为评价指标 i 对应节点域的下限; b_{pi} 为评价指标 i 对应节点域的下限。

(4)计算综合相关度, 见式(31)。

$$K_j = \sum_{i=1}^n w_i K_{ij}(V_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (31)$$

式中, K_j 为备选方案 j 的综合相关度。当 $K_j > 0$, 表示评价对象符合标准对象范围的要求。当 $-1 < K_j < 0$ 时, 表示评价对象不符合标准对象的要求, 但具有转化为标准对象的潜力, 数值愈大, 越易转化。当 $K_j < -1$ 时, 表示评价对象不符合标准对象的要求, 且不具备转化为标准对象的潜力。

2.2 决策框架

本文在总结前人研究逻辑和思路的基础上, 建立PIES四阶段的综合评价框架(图2), 步骤如下:

(1)建立评级指标体系。根据政策、文献、评价对象特征, 以及专家建议, 建立园区级综合能源系统评价指标体系。本文从经济性能、环境性能、能源性能、安全性能、智能化性能五个方面建立PIES综合性能评价的指标体系。

(2)数据收集。根据所建立的指标体系, 搜集专家打分数据和项目数据。

(3)确定指标权重。综合权重是通过计算每个指标的主客观权重得到的。主观权重由模糊层次分析法确定, 客观权重由熵权法确定。

(4)排序。使用物元可拓方法对各备选方案进行综合评分计算, 根据评分结果对备选方案排序。

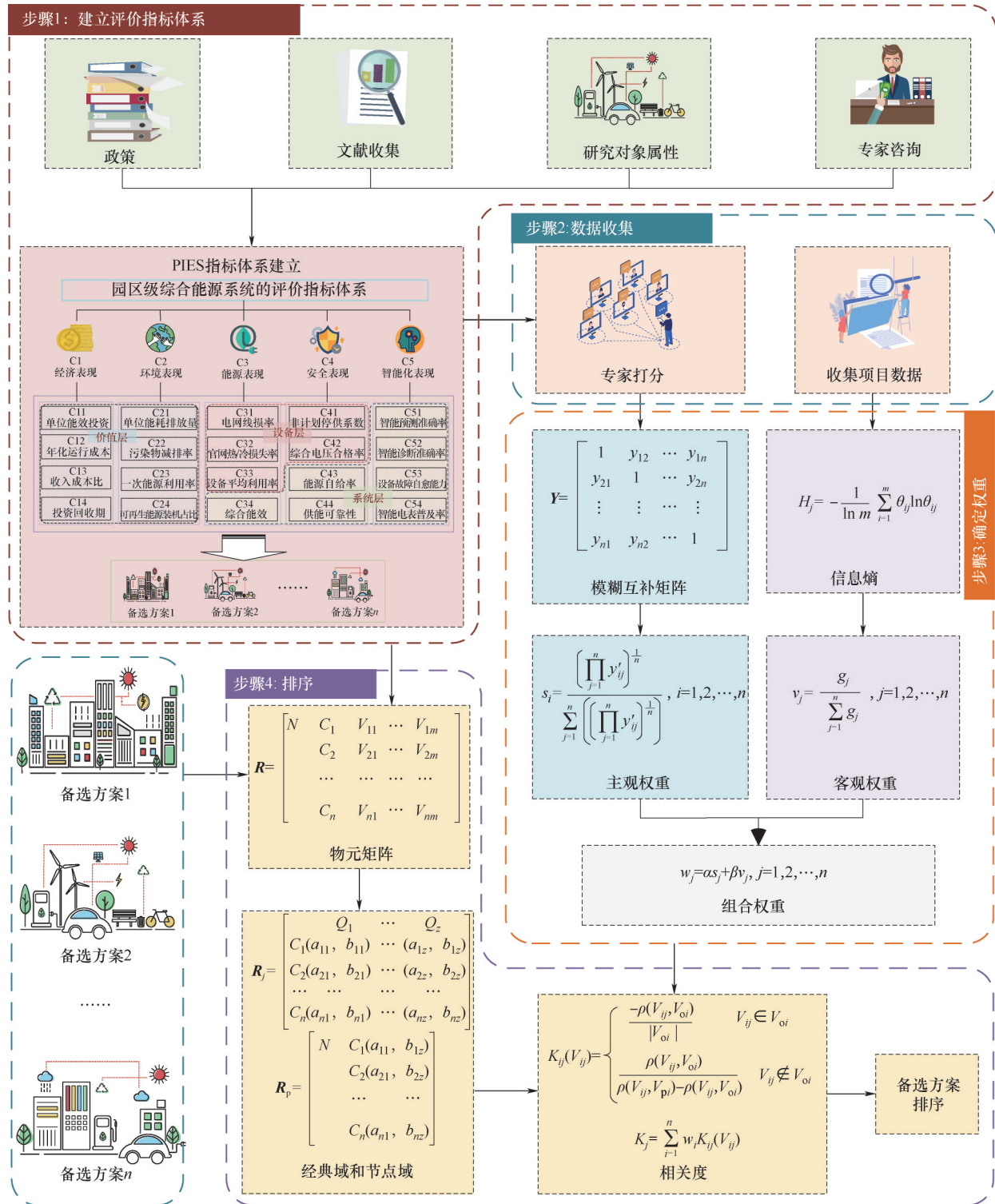


图2 PIES的综合评价框架

Figure 2 The comprehensive evaluation framework of PIES

3 案例研究

3.1 案例介绍

本文以中国江苏省某地产业园区为对象进行案例研究。该园区占地面积约 36 km^2 , 用地种类较为多样, 包括居住、商业、工业、办公行政、医疗、教育和公共设施等。电、热、冷负荷最大分别为 19、12 和 31 MW , 年平均辐射强度 140 W/m^2 , 年平均风速 4.6 m/s 。此外, 该园区地热田面积达 35 km^2 , 地热水储量 822 亿 m^3 。根据当地的资源情况, 设计者提出了四种能源备选的建设方案, 图3所示为备选方案的能源结构。

3.2 数据的采集及权重的计算

本文构建的PIES综合评价体系包括 17 个定量指标和 3 个定性指标。其中, 17 个定量指标的数值可以

通过计算获得, 3 个定性指标的数值通过 5 名专家打分的方式获得。这些专家均为在本领域, 具有 10 年以上工作经验的教授。此外, 主观权重和客观权重的权重关系系数分别为 0.7、0.3。原始数据如表 2 所示。

由表 2 可知, 准则层 C1~C5 的主观权重分别为 0.2120、0.1960、0.2000、0.1920、0.2000, 组合权重分别为 0.1996、0.2581、0.1968、0.1823、0.1633。

3.3 综合评价值的计算及排序

(1)确定经典域和节点域。根据现有综合能源项目的情况、政府和相关行业的相关标准, 并结合四个备选项目的基础数据, 本文将各指标划分为 I、II、III 3 个等级, 并确定其经典域和节点域。等级 I、II、III 分别代表优秀、一般、差。经典域和节点域数据如表 3 所示。

(2)计算各指标相关度。表 4 所示为评价指标与等

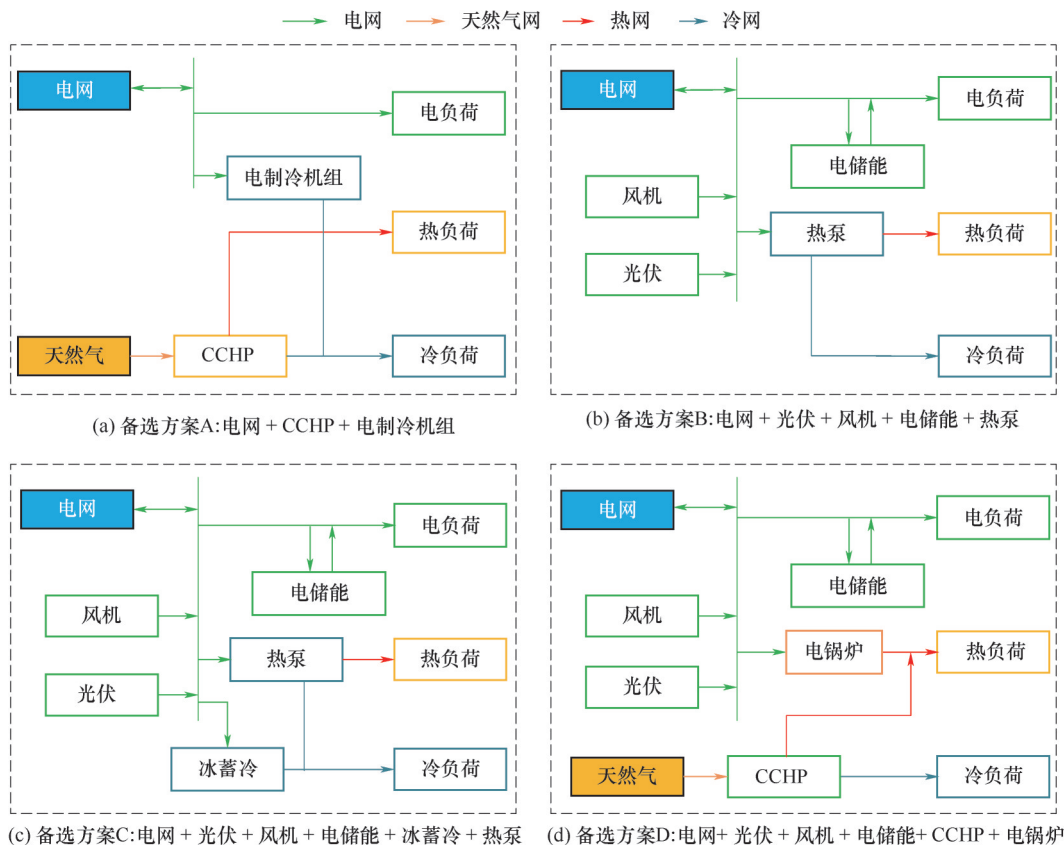


图3 备选方案的能源结构

Figure 3 The energy structure of alternative solutions

表2 基础数据与权重计算

Table 2 Basic data and weight calculation

指标	备选方案 A	备选方案 B	备选方案 C	备选方案 D	模糊层次分析法					熵权法		组合权重	
					准则层	权重	指标	数值	权重	数值	权重		
C11	0.27	0.37	0.31	0.35	C1	0.2120	C11	0.2437	0.0517	0.9949	0.0448	0.1996	
C12	582	418	423	420			C12	0.2312	0.0490	0.9921	0.0694		0.0551
C13	1.13	1.19	1.23	1.21			C13	0.2625	0.0557	0.9996	0.0032		0.0399
C14	12.4	9.87	8.80	9.68			C14	0.2625	0.0557	0.9940	0.0530		0.0549
C21	0.60	0.43	0.41	0.51	C2	0.1960	C21	0.2943	0.0577	0.9916	0.0735	0.2581	
C22	0.07	0.10	0.12	0.09			C22	0.2564	0.0502	0.9869	0.1153		0.0697
C23	0.42	0.53	0.65	0.63			C23	0.2246	0.0440	0.9900	0.0881		0.0572
C24	0.17	0.29	0.21	0.26			C24	0.2246	0.0440	0.9856	0.1263		0.0687
C31	0.50	0.40	0.42	0.43	C3	0.2000	C31	0.2249	0.0450	0.9974	0.0229	0.1968	
C32	0.19	0.17	0.22	0.25			C32	0.2563	0.0513	0.9923	0.0673		0.0561
C33	0.78	0.67	0.65	0.64			C33	0.2688	0.0538	0.9977	0.0205		0.0438
C34	0.46	0.65	0.71	0.58			C34	0.2500	0.0500	0.9911	0.0782		0.0585
C41	0.03	0.02	0.02	0.02	C4	0.1920	C41	0.2500	0.0480	0.9921	0.0696	0.1823	
C42	0.23	0.36	0.31	0.35			C42	0.2249	0.0432	0.9898	0.0892		0.0570
C43	0.96	0.97	0.96	0.97			C43	0.2625	0.0504	1.0000	0.0001		0.0353
C44	0.93	0.94	0.97	0.96			C44	0.2625	0.0504	0.9999	0.0010		0.0356
C51	0.66	0.78	0.83	0.88	C5	0.2000	C51	0.2626	0.0525	0.9960	0.0348	0.1633	
C52	0.80	0.94	0.93	0.95			C52	0.2500	0.0500	0.9983	0.0148		0.0394
C53	0.80	0.90	0.87	0.90			C53	0.2186	0.0437	0.9992	0.0071		0.0327
C54	0.54	0.59	0.64	0.67			C54	0.2689	0.0538	0.9976	0.0210		0.0440

表3 经典域和节点域

Table 3 Classic domain and node domain

指标	经典域			节点域	指标	经典域			节点域
	优	中	差			优	中	差	
C11	(0.2, 0.3)	(0.3, 0.4)	(0.4, 0.5)	(0.2, 0.5)	C33	(0.75, 0.85)	(0.65, 0.75)	(0.55, 0.65)	(0.55, 0.85)
C12	(350, 450)	(450, 550)	(550, 650)	(350, 650)	C34	(0.65, 0.75)	(0.55, 0.65)	(0.45, 0.55)	(0.45, 0.75)
C13	(1.2, 1.3)	(1.1, 1.2)	(1.0, 1.1)	(1.0, 1.3)	C41	(0.015, 0.020)	(0.020, 0.025)	(0.025, 0.030)	(0.015, 0.030)
C14	(5, 10)	(10, 15)	(15, 20)	(5, 20)	C42	(0.35, 0.45)	(0.25, 0.35)	(0.15, 0.25)	(0.15, 0.45)
C21	(0.4, 0.5)	(0.5, 0.6)	(0.6, 0.7)	(0.4, 0.7)	C43	(0.98, 1)	(0.97, 0.98)	(0.95, 0.97)	(0.95, 1)
C22	(0.10, 0.15)	(0.05, 0.10)	(0, 0.05)	(0, 0.15)	C44	(0.95, 0.97)	(0.93, 0.95)	(0.91, 0.93)	(0.91, 0.97)
C23	(0.6, 0.7)	(0.5, 0.6)	(0.4, 0.5)	(0.4, 0.7)	C51	(0.8, 0.9)	(0.7, 0.8)	(0.6, 0.7)	(0.6, 0.9)
C24	(0.25, 0.30)	(0.20, 0.25)	(0.15, 0.20)	(0.15, 0.30)	C52	(0.94, 1)	(0.85, 0.94)	(0.75, 0.85)	(0.75, 1)
C31	(0.35, 0.40)	(0.40, 0.45)	(0.45, 0.50)	(0.35, 0.50)	C53	(0.90, 0.95)	(0.85, 0.90)	(0.80, 0.85)	(0.80, 0.95)
C32	(0.15, 0.20)	(0.20, 0.25)	(0.25, 0.30)	(0.15, 0.30)	C54	(0.65, 0.75)	(0.55, 0.65)	(0.45, 0.55)	(0.45, 0.75)

级的相关度及隶属等级。指标与某一等级的相关度越高, 指标与该等级的隶属等级越高。

(3)计算综合相关度和等级。通过计算备选方案与评价等级之间的综合相关度, 判断备选方案的隶属

表4 评价指标与等级的相关度及隶属等级
Table 4 The correlation and membership level between evaluation indicators and levels

指标	备选方案A			备选方案B			备选方案C			备选方案D		
	I	II	III	等级	I	II	III	等级	I	II	III	等级
C11	0.300	-0.300	-0.650	I	-0.350	0.300	-0.188	II	-0.083	0.100	-0.450	II
C12	-0.660	-0.320	0.320	III	0.320	-0.320	-0.660	I	0.270	-0.270	-0.635	I
C13	-0.350	0.300	-0.187	II	-0.083	0.100	-0.450	II	0.300	-0.300	-0.650	I
C14	-0.245	0.480	-0.260	II	0.026	-0.026	-0.513	I	0.240	-0.240	-0.620	I
C21	-0.500	0.000	0.000	II	0.300	-0.700	-0.850	I	0.100	-0.900	-0.950	I
C22	-0.300	0.400	-0.222	II	0.000	0.000	-0.500	II	0.400	-0.400	-0.700	I
C23	-0.900	-0.800	0.200	III	-0.350	0.300	-0.188	II	0.500	-0.500	-0.750	I
C24	-0.800	-0.600	0.400	III	0.200	-0.800	-0.900	I	-0.400	0.200	-0.143	II
C31	-1.000	-1.000	0.000	III	0.000	0.000	-0.500	I	-0.222	0.400	-0.300	II
C32	0.200	-0.200	-0.600	I	0.400	-0.600	-0.800	I	-0.222	0.400	-0.300	II
C33	0.300	-0.300	-0.650	I	-0.400	0.200	-0.143	II	-0.500	0.000	0.000	II
C34	-0.950	-0.900	0.100	III	0.000	0.000	-0.500	I	0.400	-0.600	-0.800	I
C41	-0.600	-0.200	0.200	III	-0.300	0.400	-0.222	II	0.400	-0.400	-0.700	I
C42	-0.600	-0.200	0.200	III	0.100	-0.100	-0.550	I	-0.222	0.400	-0.300	II
C43	-0.667	-0.500	0.500	III	-0.333	0.000	0.000	II	-0.667	-0.500	0.500	III
C44	-0.605	-0.210	0.210	III	-0.234	0.440	-0.280	II	0.075	-0.925	-0.963	I
C51	-0.700	-0.400	0.400	III	-0.143	0.200	-0.400	II	0.300	-0.300	-0.650	I
C52	-0.737	-0.500	0.500	III	0.000	0.000	-0.600	II	-0.125	0.111	-0.533	II
C53	-1.000	-1.000	0.000	III	0.000	0.000	-0.500	II	-0.300	0.400	-0.222	II
C54	-0.550	-0.100	0.100	III	-0.300	0.400	-0.222	II	-0.083	0.100	-0.450	II

等级。表5所示为备选方案的综合相关度、隶属等级以及排序。

由表5可知, 备选方案A、B、C、D分别属于等级Ⅲ、Ⅰ、Ⅰ、Ⅰ。按照隶属等级和综合相关度大小方案的排序为 $C > D > B > A$ 。因此, 投资决策者可以选择建设备选方案C。

3.4 分析与讨论

(1)权重系数敏感性分析。在本文所提出的PIES决策框架中, 主、客观权重系数可能会在实际决策环境中发生变化。通过分析权重系数变动对决策结果的影响, 可以验证所提出框架的稳健性和有效性。

不同权重偏好下PIES备选方案的排名变化见图4。从图中可以看出, 当权重系数发生波动时, 备选方案C始终占据首位, 备选方案A始终排在最后。无论权重偏好如何变化, 备选方案C的综合性能均优于其他方案, 这说明所提出框架的稳健性较好。

(2)权重变动敏感性分析。本节分别对5个准则层和20个指标的权重进行调整, 以分析决策结果对权重变化的敏感性。所有准则或者指标的权重将增加或减少10%、20%。同时, 为了保证所有指标的权重之和始终为1, 在调整权重时进行标准化处理。

图5所示为调整5个准则的权重后最大综合相关

度和排序结果的变化情况。线段斜率越大表示该方案对该指标的敏感性越大。调整5个准则的权重后, 各方案均呈现出了不同的敏感程度。但是, 各方案的最终排序没有发生变化。

(3)等级划分敏感性分析。本节通过调整等级划分数量和经典域范围, 分析决策结果对等级划分的敏感性。调整主要是将节点域上下界分别扩大5%、10%、15%, 并根据扩大后的节点域分别平均划分为3、4、5个等级。等级数量和经典域范围调整后的结果如图5所示。

由图6可知, 等级数量和经典域范围调整后, 各方案的最大综合相关度呈现出不同的变化趋势。从总体上来看, 备选方案C和备选方案D总是排名第一, 说明它们优于其他方案。随着等级划分数量的增加, 备选方案D的优势更加显著。当等级数量为3、4时, 备选方案C的优势随着调整比例的增大而减弱, 备选方案D则相反。

4 结论

为了给园区级综合能源系统建设的决策者提供有效的决策支持, 本文提出了模糊层次分析法-熵权-物元可拓的园区综合能源系统决策框架, 该决策框架的

表5 备选方案的综合相关度、隶属等级及排序

Table 5 The comprehensive correlation and membership level of alternative solutions

备选方案	I	II	III	最大相关度	等级	排序
备选方案A	-0.5080	-0.2918	0.0211	0.0211	Ⅲ	4
备选方案B	-0.0350	-0.0478	-0.4739	-0.0350	I	3
备选方案C	0.0357	-0.1732	-0.5039	0.0357	I	1
备选方案D	-0.0152	-0.0630	-0.4482	-0.0152	I	2

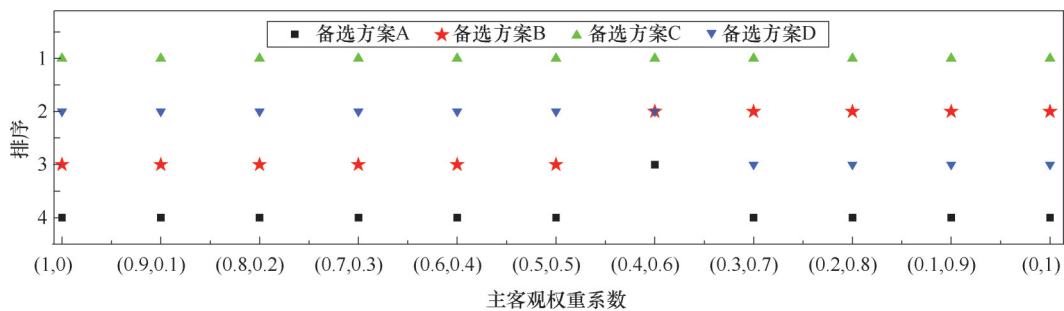


图4 不同权重偏好下PIES备选方案的排名变化

Figure 4 Ranking changes of PIES alternative solutions under different weight preferences

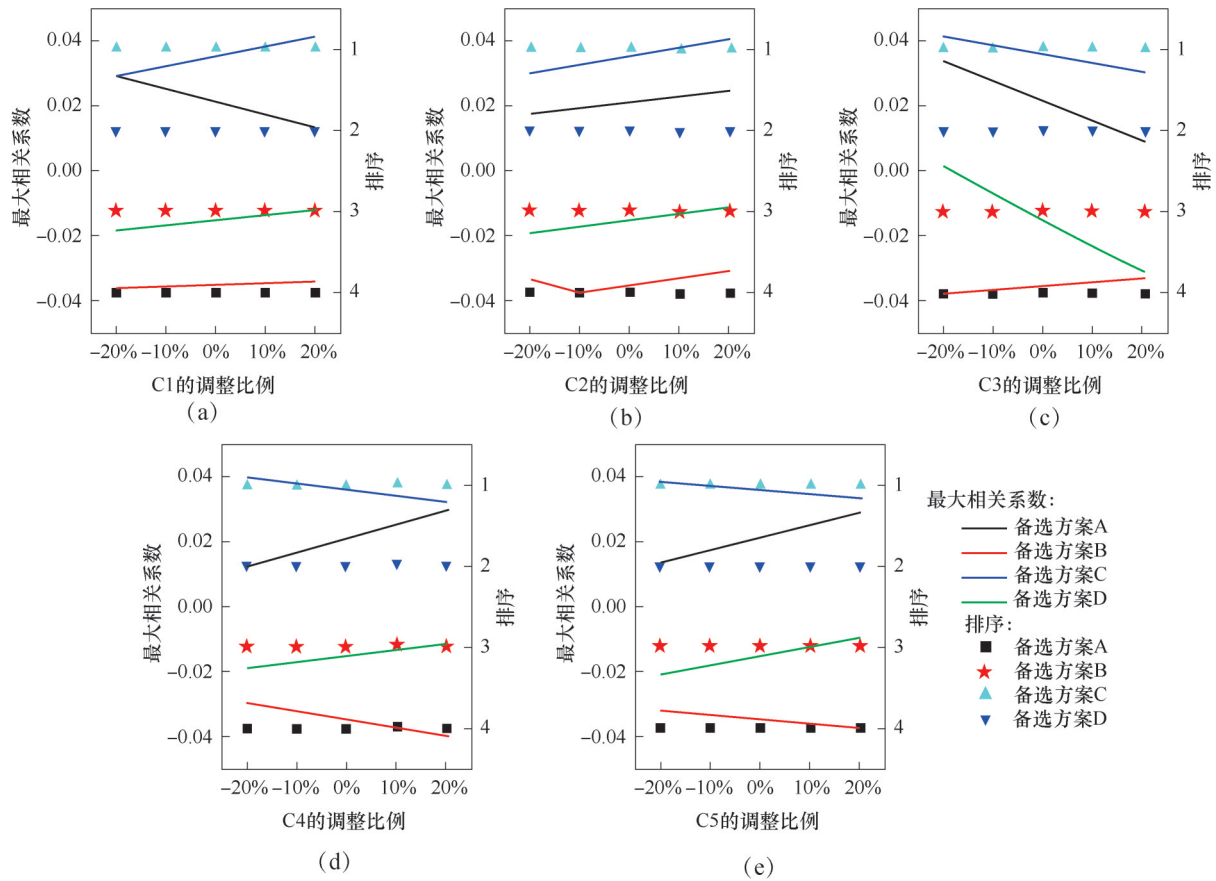


图5 调整5个准则的权重后最大综合相关度和排序结果的变化

Figure 5 Changes in maximum comprehensive correlation and ranking results after adjusting the weights of 5 criteria

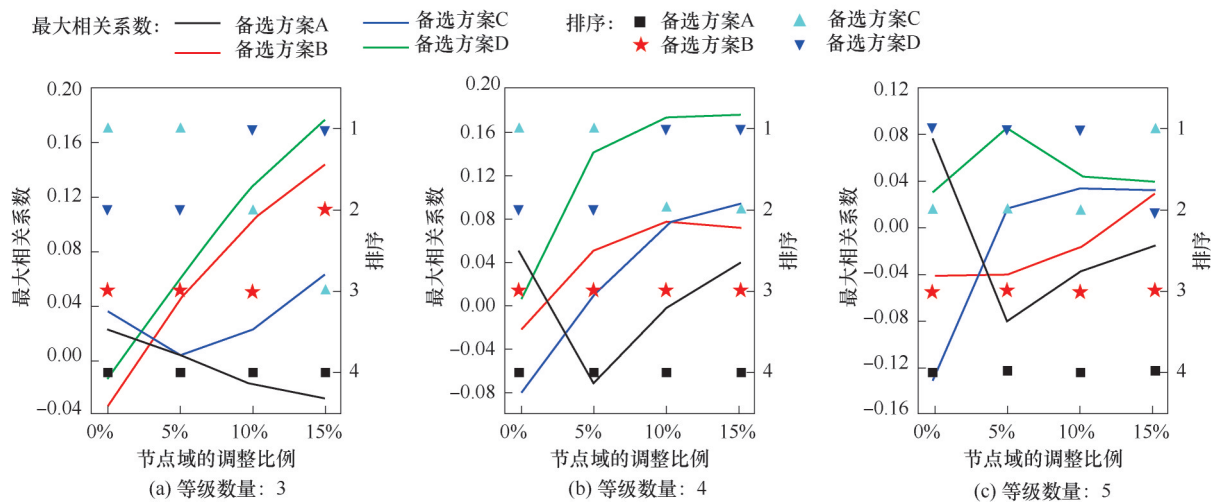


图6 等级数量和经典域范围调整后最大综合相关度和排序结果的变化

Figure 6 Changes in the maximum comprehensive correlation and ranking results after adjusting the number of levels and the range of classical domains

评价体系包括经济、环境、能源、安全、智能化5个方面。最后通过一个PIES为案例验证了框架的有效性。结论如下:

(1)在指标体系中, 环境性能具有最大的综合权重(0.2581), 经济、能源、安全、智能化的综合权重分别为0.1996、0.1968、0.1823、0.1633。价值层、系统层、设备层的综合权重分别为0.4576、0.2926、0.2498。

(2)采用模糊层次分析法和熵权法作为加权方法, 结合物元可拓法, 构建了园区级综合能源系统综合性评价模型。评价结果表明, 采用光伏、风力发电、

热泵、储能等设备往往能获得较好的综合性能。

(3)通过对案例的敏感性分析发现, 主客观权重系数变动、指标权重变动20%以内不会对决策结果产生影响, 等级划分变动对决策结果的影响较大。

本文从园区级综合能源系统的基本构成入手梳理评价指标, 引入了智能化准则以及单位能效投资、综合能效等指标, 为园区级综合能源系统以及其他能源系统的决策问题提供了参考。但由于所选的评价指标可能并不全面, 权重的确定以及物元等级的划分也存在不足, 这将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
Zeng M, Liu Y X, Zhou P C, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 122-128, 171.
Sun H B, Guo Q L, Wu W C, et al. Integrated energy management system with multi-energy flow for energy internet: Design and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 122-128, 171.
- [3] Wang Y L, Ma Y Z, Song F H, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 205: 118022.
- [4] Wang Z F, Ren J Z, Goodsite M E, et al. Waste-to-energy, municipal solid waste treatment, and best available technology: Comprehensive evaluation by an interval-valued fuzzy multi-criteria decision making method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 887-899.
- [5] Li J, Xu W, Feng X M, et al. Comprehensive evaluation system for optimal configuration of multi-energy systems[J]. Energy and Buildings, 2021, 252: 111367.
- [6] 袁铁江, 高玲玉, 谢永胜, 等. 基于氢能的风-火耦合多能系统设计与综合评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 227-233, 255.
Yuan T J, Gao L Y, Xie Y S, et al. Design and comprehensive evaluation of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 227-233, 255.
- [7] 薛屹洵, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 面向多能协同园区的能源综合利用率指标[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 117-123.
Xue Y X, Guo Q L, Sun H B, et al. Comprehensive energy utilization rate for park-level integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 117-123.
- [8] 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 B S, Liao Q F, Liu D C, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182.
- [9] 赵国涛, 钱国明, 丁泉, 等. 园区综合能源系统绿色化水平评价方法研究[J]. 油气与新能源, 2023, 35(2): 53-61.
Zhao G T, Qian G M, Ding Q, et al. Study on evaluation method of the green development level concerning the comprehensive energy system in the park[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(2): 53-61.
- [10] 程江洲, 冯梦婷, 李欣, 等. 基于组合赋权逼近理想解排序法——物元可拓模型的农业园区综合能源系统评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12892-12899.
Cheng J Z, Feng M T, Li X, et al. Evaluation of integrated energy system in agricultural park based on combination weighting TOPSIS-MEE model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12892-12899.
- [11] 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 Z P, Wang J X, Zhou H W, 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.

- [12] 许刚, 郭子轩. 考虑用户比价行为的综合需求响应低碳优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1043-1054.
Xu G, Guo Z X. Low-carbon optimization strategy of integrated demand response considering user's price comparison behavior[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1043-1054.
- [13] 李涛, 马裕泽, 宋志成, 等. 考虑电-热储能协同的综合能源系统规划优化研究[J]. 运筹与管理, 2024, 33(2): 9-16.
Li T, Ma Y Z, Song Z C, et al. Study on integrated energy system planning optimization considering electric-thermal energy storage synergy[J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(2): 9-16.
- [14] 黄悦华, 刘兴韬, 张磊, 等. 基于C藤Copula及条件风险价值的综合能源系统灵活爬坡优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9411-9423.
Huang Y H, Liu X T, Zhang L, et al. Flexible ramping optimal scheduling of integrated energy system based on C-vine Copula and conditional value at risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9411-9423.
- [15] 曾鸣, 张硕. 我国“十四五”能源体系建设情况分析[J]. 中国电力企业管理, 2023(25): 65-67.
Zeng M, Zhang S. Analysis on the construction of China's energy system in the tenth five-year plan[J]. China Power Enterprise Management, 2023(25): 65-67.
- [16] 潘婷, 许彦斌, 李华, 等. 综合能源行业政产学研协作演化仿真[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(3): 683-700.
Pan T, Xu Y B, Li H, et al. Evolution simulation of government-industry-university-research collaboration for integrated energy industry[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(3): 683-700.
- [17] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
Zhou X X, Chen S Y, Lu Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [18] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
Qu X Y, Wu M, Li Q, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153-163.
- [19] 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 L T, Cheng L, Li R, 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.
- [20] 赵鹏翔, 覃振坤, 郭东旭, 等. 综合能源灵活性评价指标体系与评估模型[J]. 分布式能源, 2023, 8(6): 66-76.
Zhao P X, Qin Z K, Guo D X, et al. Evaluation index system and evaluation model of comprehensive energy flexibility[J]. Distributed Energy, 2023, 8(6): 66-76.
- [21] 江城, 饶尧, 胡文博, 等. 基于大数据的综合能源系统能效对标方法研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 1078-1082, 1087.
Jiang C, Rao Y, Hu W B, et al. Research on energy efficiency benchmarking method of integrated energy system based on big data[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 1078-1082, 1087.
- [22] 孙秋野, 任一平, 刘子铭, 等. 基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2106-2121.
Sun Q Y, Ren Y P, Liu Z M, et al. Review of energy trilemma research of integrated energy system based on entropy theory[J]. Control and Decision, 2023, 38(8): 2106-2121.
- [23] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
Liu X O, Ge S Y. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18.
- [24] 吴芳柱, 田园. 基于中低压交直流配电网的工业园区综合能源系统设计探索[J]. 电器与能效管理技术, 2023(6): 44-50.
Wu F Z, Tian Y. Design and exploration of integrated energy system for industrial parks based on medium and low voltage AC/DC distribution networks[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(6): 44-50.
- [25] 杜若芸, 牛东晓, 余敏, 等. 基于博弈论和模糊灰色投影的农村综合能源系统MCDA评估[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 580-588.
Du R Y, Niu D X, Yu M, et al. MCDA evaluation of rural comprehensive energy system based on game theory and fuzzy grey projection[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 580-588.
- [26] Reig-Mullor J, Pla-Santamaria D, Garcia-Bernabeu A. Extended fuzzy analytic hierarchy process (E-FAHP): A general approach[J]. Mathematics, 2020, 8(11): 2014.
- [27] Seddiki M, Bennadi A. Multi-criteria evaluation of renewable energy alternatives for electricity generation in a residential building[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 110: 101-117.

- [28] 王岚清, 杨刚, 原郭文. 一种基于差异熵赋权法的无人机能力评估方法[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2024(2): 91-99.
Wang L Q, Yang G, Yuan G W. An UAV capability evaluation method based on differential entropy weighting[J]. Missiles and Space Vehicles, 2024(2): 91-99.
- [29] 唐朝晖, 刘美丽, 刘金平, 等. 基于泡沫图像特征和物元可拓模型的锑浮选工况识别[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1485-1490.
Tang Z H, Liu M L, Liu J P, et al. Performance recognition of antimony flotation based on froth image features and matter-element extension model[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1485-1490.
- [30] 崔春生, 赖锴, 陈婕. 基于基元理论的内容推荐算法研究[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(10): 1209-1218.
Cui C S, Lai K, Chen J. Research on content-based recommendation of ec based on basic element theory[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(10): 1209-1218.

Comprehensive Evaluation and Decision-Making of Park Level Comprehensive Energy System Planning Scheme Based on Object Attributes and Matter Element Extension

Song Zhicheng, Li Tao*

School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract: With rapid economic and population growth, energy shortages and pollution have become global issues. Building an efficient, low-carbon, and economical energy system and achieving energy transformation has become a consensus among countries around the world. Integrated energy systems are considered one of the important ways to address the aforementioned issues. The park level integrated energy system includes industrial park integrated energy system, community integrated energy system, village integrated energy system, *etc.*, and is currently the most widely used. It is also considered as the specific physical carrier of the energy Internet. In addition, the construction plan of the park level integrated energy system directly affects its operational effectiveness. The existing research on park level integrated energy systems mainly focuses on planning and configuration, operation optimization, energy scheduling, and there is no unified standard and decision-making framework for investment and evaluation. How to achieve accurate investment and decision-making in park level integrated energy systems is currently one of the urgent problems that need to be solved. In view of this, this article introduces the matter element extension model into the planning and decision-making of park level integrated energy systems, and proposes a multi criteria planning and decision-making framework for park level integrated energy systems based on the matter element extension model. Firstly, starting from the basic attributes and composition of the park level integrated energy system, the characteristics of the park level integrated energy system were analyzed, and the composition of the evaluation index system was sorted out. And based on this, establish an integrated performance evaluation system that includes criteria such as economy, environment, energy, security, and intelligence. In the indicator system, indicators such as intelligence rate, unit energy input, unit energy consumption emissions, and comprehensive energy efficiency have been introduced. Secondly, the fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method are used to determine the subjective and objective weights of the indicators, and the linear weighting method is used to determine the comprehensive weights. Thirdly, the matter element extension model was introduced into investment decision-making, and a framework for enterprise investment decision-making based on fuzzy analytic hierarchy process-entropy weight-matter element extension model was established. Finally, a certain industrial park in Jiangsu Province, China was selected as an example for verification. The research conclusion is as follows: (1) In the indicator system, the comprehensive weight of environmental performance is the highest (0.2581). The comprehensive weights of the value layer, system layer, and device layer are 0.4576, 0.2926, and 0.2498, respectively. (2) The evaluation results indicate that using photovoltaics, wind power generation, heat pumps, and energy storage can often achieve good overall performance. (3) Through sensitivity analysis of the case, it was found that changes in the subjective and objective weight coefficients and changes in indicator weights within 20% do not have an impact on the decision results, while changes in levels have a significant impact on the decision results.

Keywords: park-level integrated energy system; fuzzy analytic hierarchy process; matter-element extension; performance analysis; multi-criteria investment decision