

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241282

基于 OCC-IEGC 模型的矿山综合能源系统运行效益评价

王雨晴^{1,2}, 闫朝臣^{1,2}, 王昭贞², 郭浩楠², 王俐英², 曾鸣¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 华北电力大学(保定)经济管理系, 河北 保定 071000)

摘要: 矿山综合能源系统(mine integrated energy system, MIES)作为支撑煤矿绿色发展的重要途径, 合理有效地对其运行效益进行评价是促进其发展的必要前提。然而, MIES 运行效益评价一方面需要考虑能-煤流的强耦合关系, 另一方面还需要应对系统运行不确定性对于评价结果准确性的影响, 鉴于此, 提出一种基于最优聚类系数的改进可拓灰云模型(optimal clustering coefficient based improved extension gray cloud, OCC-IEGC)的 MIES 运行效益评价框架。首先, 考虑 MIES 生态特性, 基于驱动力-压力-状态-影响-响应(driving-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型建立 MIES 运行效益评价指标体系, 并应用云雾化权重筛选方法获得具有最优合理性的组合权重。其次, 构建基于可拓灰云的 MIES 运行效益评价模型, 削弱系统运行不确定性及评价过程中的主观性和模糊性对评价结果的影响, 并采用最优灰云聚类系数提高评价结果的可靠性。最后, 通过算例验证所提指标体系和评价模型的有效性。

关键词: 矿山综合能源系统; 运行效益评价; 改进可拓灰云模型; 最优聚类系数; 云雾化权重筛选

Operation benefit evaluation of mine integrated energy systems based on OCC-IEGC model

WANG Yuqing^{1,2}, YAN Chaochen^{1,2}, WANG Zhaozhen², GUO Haonan², WANG Liying², ZENG Ming¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Department of Economic Management, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071000, China)

Abstract: The mine integrated energy system (MIES) is an important approach for supporting the green development of coal mines. Conducting a reasonable and effective evaluation of its operation benefits is a necessary prerequisite for promoting its development. However, evaluating the operation benefits of MIES requires not only consideration of the strong coupling between energy and coal flows, but also addressing the influence of operational uncertainties on the accuracy of the evaluation. To address these challenges, a MIES operation benefit evaluation framework is proposed based on the optimal clustering coefficient-based improved extension grey cloud (OCC-IEGC) model. First, considering the ecological characteristics of MIES, an evaluation index system is established based on the driving-pressure-state-impact-response (DPSIR) model, and the cloud-weighted selection method is applied to obtain an optimal rational combination weights. Second, the MIES operation benefit evaluation model based on the extensive grey cloud theory is constructed to mitigate the influence of system operational uncertainty, subjectivity and ambiguity during the evaluation process, while the optimal clustering coefficients are used to further improve the reliability of the evaluation results. Finally, the effectiveness of the proposed index system and evaluation model is verified through case studies.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62133015).

Key words: mine integrated energy system; operation benefit evaluation; improved extensive grey cloud model; optimal clustering coefficients; cloudy weight screening

0 引言

在“双碳”目标下, 推动煤炭清洁高效生产是

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62133015); 河北省自然科学基金项目资助(G2022502004); 中央高校基金项目资助(2023MS156)

能源低碳转型发展的重要任务之一。为此, 国家发展改革委出台的《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中明确指出“完善煤炭清洁开发, 建立煤矿绿色发展长效机制”^[1]。在此背景下, 矿山综合能源系统(mine integrated energy system, MIES)作为一种煤炭生产与清洁能源利用相耦合的新型能源系统, 通过充分利用煤矿区域的可再生能

源及煤炭生产过程中产生的煤矸石、瓦斯等衍生能源,为煤炭低碳生产与煤矿绿色发展提供了一种可行的解决方案^[2]。目前已有矿山开始探索建设 MIES,然而良好的系统运行效益是大范围推广 MIES 建设的基础^[3]。因此,当前亟需考虑矿山实际用能中生产与能源系统紧密耦合的特性,从系统整体的角度对 MIES 的运行效益开展科学评价。

目前已有国内外学者围绕 MIES 运行效益评价开展了一系列研究。在评价指标体系方面,文献[4]深入分析了综合能源系统的结构和特点,文献[5]则强调各能源子系统间的耦合关系,从经济性、社会性、环保性等角度构建运行效益评价指标体系。在此基础上,计及能效因素对系统运行的影响,文献[6]采用吨煤电耗、文献[7]提出能源转化效率等指标衡量运行效益。鉴于“绿色矿山”建设的重要性,文献[8]提出共伴生矿产资源综合利用率、固废处理综合利用,文献[9]补充污染物排放、矿山单位生产能耗等评价指标,全面评估矿山生态建设成效。在评价方法方面,文献[10]运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)及标准间相关性方法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC),文献[11]则采用 AHP-熵权法为指标赋权,两者均有效弥补了单一赋权方法的不足,并结合多属性决策法对综合能源系统进行综合评价,提升了评价结果的准确性。针对可再生能源出力随机性所带来的系统运行不确定性问题,文献[12]采用具有等级界限的物元可拓模型,显著提升了系统实际运行效益评估的准确性和可靠性。然而,考虑到物元可拓模型界限划分的过程具有一定的主观性和模糊性,文献[13]进一步在传统物元可拓模型基础上引入云模型,将确定的评价界限模糊化。此外,文献[14]将灰云模型引入评价方法中,将传统确定性指标替换成灰云指标,以削弱评价等级信息的模糊性与隶属等级的不确定性对结果的影响。综上所述,现有研究主要集中在针对 MIES 能源系统运行效益的评价,鲜有研究考虑 MIES 中能-煤流的深度耦合,将煤炭生产效益以及能-煤流的协同运行效益纳入评价指标体系。此外,虽然现有研究在构建评价模型时考虑了系统运行不确定性的影响,但鲜有研究考虑专家在指标界限划分时所具有的主观性和模糊性。

鉴于此,本文从能-煤流耦合的角度构建 MIES 运行效益评价指标体系,并考虑系统运行的不确定性及评价过程中的主观性和模糊性,基于最优聚类系数的改进可拓灰云模型(optimal clustering coefficient based improved extension gray cloud, OCC-IEGC),构建 MIES 运行效益评价模型。首先,基于 MIES 系统

架构及其特性分析,通过常用于生态评价的驱动力-压力-状态-影响-响应(drivers pressures states impacts responses, DPSIR)模型建立 MIES 运行效益评价指标体系;其次,采用多种主、客观赋权方法构建指标权重库,并应用云雾化方法筛选具有最优合理性的组合权重;再次,采用物元可拓模型削弱系统运行不确定性的影响,并利用灰云模型处理不确定性和随机性的优势,对物元可拓模型进行改进,以解决评价界限划分具有模糊性的问题,同时选取两种常用灰云熵算法计算最优灰云聚类系数以提升评价结果的准确性;最后,以国内某矿山综合能源系统工程项目作为算例进行仿真分析,验证了所提评价指标体系与模型的有效性。

1 MIES 基本架构及特性

1.1 MIES 基本架构

MIES 是针对煤矿生产场景,充分利用煤矿瓦斯、乏风等衍生资源,以及风、光等可再生能源所构建的一个典型而又独特的工业综合能源系统。其在结构上与传统综合能源系统相比,不仅涵盖能源系统,还包含煤炭生产系统,两者紧密耦合、协调运行, MIES 架构如图 1 所示。

煤炭生产系统涵盖煤炭开采、运输、选煤等全过程,主要由井下综采工作面 and 井上选煤厂构成。煤炭生产会产生巨大的电、热、冷负荷需求,其中电负荷主要为采煤、选煤、皮带运输、井下照明、井下排水、井下通风、瓦斯抽采等用电需求,热负荷主要为冬季井口防冻保温,冷负荷则主要为夏季保障井下温度适宜的供冷需求。同时,在井下开采的过程中产生包含大量热能的乏风、瓦斯、涌水,在井上选煤过程中产生废弃的煤矸石,这些丰富的矿山衍生能源可以为能源系统提供基本能量源。

能源系统主要利用可再生能源和衍生能源供给满足生产系统的负荷需求。具体来说,能源系统充分利用风、光、地热、空气热等可再生能源,通过风电、光伏、地源热泵、水源热泵等装置为生产系统供给电能及热能。同时,为了充分利用生产系统产生的衍生能源,能源系统配置水源热泵通过抽采井下涌水为生产系统供给热能;配置乏风氧化装置、煤矸石发电装置、燃气轮机,综合利用乏风、煤矸石、瓦斯为生产系统供给电能。此外,为了满足生产所需的冷、热负荷需求,能源系统配置了电制冷机、吸收式制冷机、燃气锅炉等装置。在此基础上,能源系统还配置了电、热储能装置,并在能量不足时外购能源,从而应对可再生能源波动带来的能源供给不足或过剩,提高能源利用的经济性。

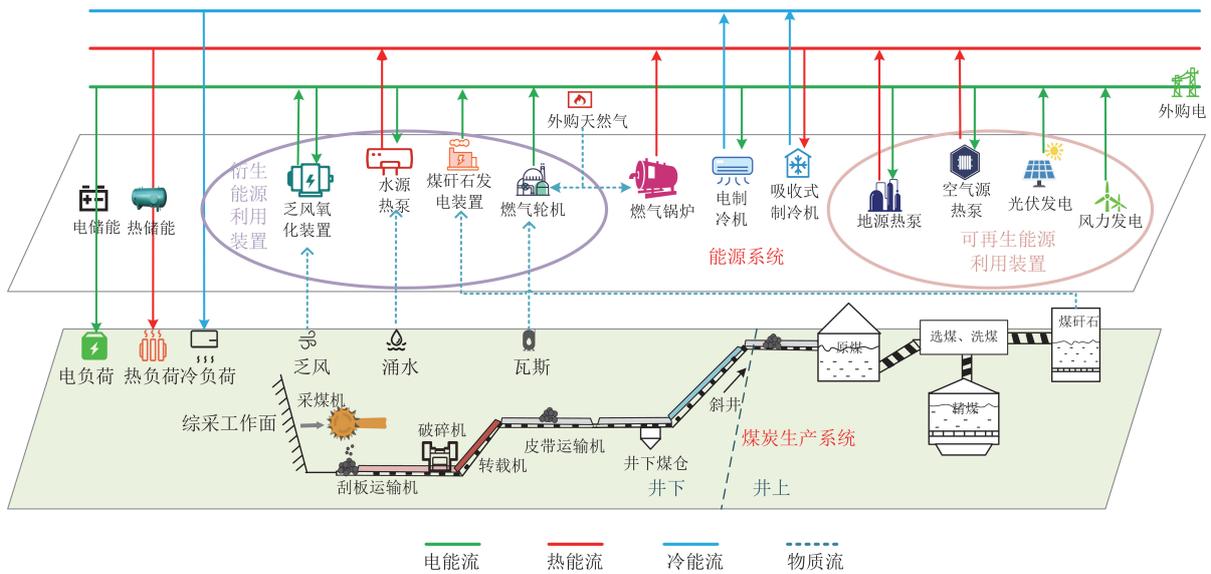


图 1 MIES 架构图

Fig. 1 Architecture of MIES

1.2 MIES 特性分析

MIES 与传统综合能源系统相比,一方面其对不同类型能源具有严格的刚性需求:在电负荷方面,矿山生产的低死亡率红线要求极高的安全性,对井下照明和生产设备供电等的可靠性需求严苛;在热、冷负荷方面,井下高地压、高地热和瓦斯并存使得工作环境极其恶劣,因此矿井冬季需要保温、夏季需要制冷以保证环境适宜,要求供热(冷)必不可少^[15]。另一方面,MIES 中能流-煤流紧密耦合,具有典型的“内、外共生”生态特性。

1) 内部共生性: MIES 中能源系统内部通过多种能量转换设备实现了不同品位、不同来源能量的耦合,使电热冷气等能量形式共同存在于能源系统中进行交互互补,实现了能量的梯级利用,具有鲜明的内部共生性。

2) 外部共生性: MIES 中能源系统需要向生产系统提供高可靠性的电、热、冷负荷以保障矿山的安全生产。生产系统的主要产物是煤炭,其流量与能耗密切相关。通过灵活调整运输机带速和设备检修周期可以优化生产能耗,同时井下和地面煤仓可作为虚拟储能配合运输机的灵活调度,使得能流调度和煤流优化相协调,在保证煤炭产量的同时提高能效。具体来说,在可再生能源、衍生能源过剩或电价低谷时,提高运输机皮带速率,消耗更多的电能进行运输和储存,反之则降低皮带速率或进行设备维护以减少能源消耗。另外,生产系统会产生大量的低品位衍生能源,其可作为能量源向能源系统供应, MIES 中能源系统与生产系统之间互济互助、

协调共生,具有明显的外部共生性。

2 MIES 运行效益评价指标体系及赋权方法

2.1 基于 DPSIR 模型的 MIES 运行效益评价指标体系

考虑 MIES 具有的生态特性,本文引入常用于生态效益评价的因果回路模型,即 DPSIR 模型,构建 MIES 运行效益评价指标体系。MIES 运行效益的驱动抑制关系如图 2 所示。当可再生能源出力波动时,系统可靠性压力增加;为维持系统的安全可靠性需要增加化石能源及外购能源的使用,使得碳排放及污染物排放增加,导致系统运行环境压力变大;同时系统的能源结构改变、能源自给能力减弱使系统运行状态发生变化,进而导致系统成本变化;为了维持可再生能源出力波动时的系统可靠性,可增加灵活性调节资源,即提升系统灵活调节性。因此,本文用系统运行安全可靠表示驱动力(D),系统运行环境压力表示压力(P),系统运行状态表示状态(S),系统成本表示影响(I),系统灵活调节性表示响应(R),从以上 5 个方面选取指标构建指标体系,如表 1 所示。

2.1.1 系统安全可靠

安全生产作为矿山发展的基础和保障,系统的安全可靠性对于矿山的正常生产意义重大。由于矿下的主要用能形式为电能,保证井下生产用电的高可靠性是 MIES 实现最佳运行效益的首要条件。因此,本文选用综合电压合格率^[16]、综合频率合格率^[17]、三相不平衡度^[18]指标评价系统的电能可靠性,以最大程度地表征系统的安全可靠性。

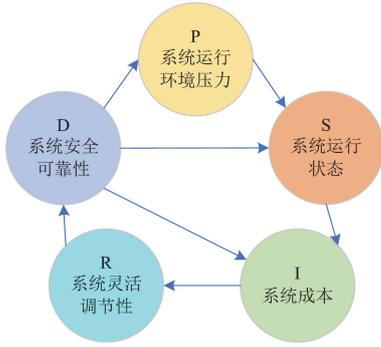


图 2 基于 DPSIR 模型的 MIES 运行效益评价指标关系回路图

Fig. 2 Relational loop of MIES operation benefit evaluation indicators based on DPSIR model

表 1 MIES 运行效益评价指标体系

Table 1 MIES operation benefit evaluation index system

一级指标	二级指标
驱动力(D) 系统安全可靠 C ₁	综合电压合格率 C ₁₁
	综合频率合格率 C ₁₂
	三相不平衡度 C ₁₃
压力(P) 系统运行环境压力 C ₂	碳排放强度 C ₂₁
	烟尘排放强度 C ₂₂
	氮氧化物排放强度 C ₂₃
	二氧化硫排放强度 C ₂₄
状态(S) 系统运行状态 C ₃	能源自给率 C ₃₁
	衍生能源利用率 C ₃₂
	能耗强度 C ₃₃
	可再生能源渗透率 C ₃₄
	能源转换效率 C ₃₅
影响(I) 系统成本 C ₄	单位时间煤炭产量 C ₃₆
	系统碳排放成本 C ₄₁
	系统运行成本 C ₄₂
	单位煤炭生产成本 C ₄₃
	单位煤炭生产能源成本 C ₄₄
响应(R) 系统灵活调节性 C ₅	单位供能成本 C ₄₅
	可调容量占比 C ₅₁
	电能备用容量 C ₅₂
	热能备用容量 C ₅₃

2.1.2 系统运行环境压力

矿山的开采对于环境具有持续破坏性，低碳开采是践行绿色矿山的首要原则，降低系统运行的环境压力是实现 MIES 最佳运行效益的重要目标，本文选取碳排放及主要污染物排放强度为评价指标，即单位煤炭生产的排放量，包含：碳排放强度^[6]、烟尘排放强度、氮氧化物排放强度、二氧化硫排放强度^[19]。

2.1.3 系统运行状态

MIES 系统理想运行状态是能-煤流深度耦合，通过高比例的衍生能源和可再生能源消纳最大限度地实现能源自给，结合能源转化效率的提升达到节能降耗的要求。因此，本文选用能源自给率^[20]、衍生能源利用率、能耗强度、可再生能源渗透率^[4]、能源转化效率^[7]评价系统运行状态。此外，可将实际生产中部分具有灵活性的用能环节作为柔性可调负荷提高 MIES 运行的灵活性和经济性，但是在对矿山可调负荷进行优化调度时不能对生产产生过大影响。因此，选用单位时间煤炭产量衡量煤炭生产能力，以此量化评估矿山生产效率，间接评估矿山系统运行的经济性。

1) 衍生能源利用率

衍生能源利用率表征 MIES 对矿山衍生能源的消纳能力，如式(1)所示。

$$C_{32} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (1)$$

式中：Q_u、Q_s 分别为衍生能源利用量和生产量。

2) 能耗强度

能耗强度通常定义为单位 GDP 的能源消费量，鉴于 MIES 的经济产出主要以煤炭产量反映，本文将能耗强度定义为单位煤炭产量的能源消耗量，表征 MIES 的能源利用效率，如式(2)所示。

$$C_{33} = \frac{Q_{consume}}{Q_{coal}} \quad (2)$$

式中：Q_{consume} 为能源消耗量；Q_{coal} 为煤炭产量。

2.1.4 系统成本

MIES 的运行要保障经济效益、环境效益，同时考虑能-煤流耦合效益即生产系统与能源系统的协调程度，确保系统成本最优。因此，本文选用以下指标评价系统成本：系统碳排放成本^[3]、系统运行成本、单位煤炭生产成本、单位煤炭生产能源成本、单位供能成本^[6]。

1) 系统运行成本

系统运行成本 C₄₂ 定义为能源系统运行成本 C_{eo} 和煤炭生产系统运行成本 C_{mo} 的总和。

$$\begin{cases} C_{42} = C_{eo} + C_{mo} \\ C_{eo} = C_{eoo} + C_{ep} \\ C_{ep} = \sum_{t=1}^T \sum_{\xi \in \{e,g,h\}} c_{\xi,t} P_{\xi,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中：C_{eoo} 为设备运维成本；C_{ep} 为购能成本；c_{ξ,t}、P_{ξ,t} 分别为系统第 ξ 种用能设备在第 t 时段的实时购能价格及能量；e,g,h 分别表示电能、气能、热能。

2) 单位煤炭生产成本

单位煤炭生产成本表征 MIES 生产的经济性, 如式(4)所示。

$$C_{43} = \frac{C_{42}}{Q_{\text{coal}}} \quad (4)$$

3) 单位煤炭生产能源成本

单位煤炭生产能源成本指标表征能源系统与生产系统的耦合协调程度, 如式(5)所示。

$$C_{44} = \frac{C_{\text{co}}}{Q_{\text{coal}}} \quad (5)$$

2.1.5 系统灵活调节性

MIES 需要具备一定的系统灵活调节能力, 以应对可再生能源出力的波动。本文将可调容量占比^[21]、电能备用容量、热能备用容量^[22]作为衡量系统灵活调节性效益的评价指标。

2.2 基于云雾化权重筛选的组合赋权方法

目前, 指标赋权通常采用组合权重法以充分融合主客观因素的影响^[9]。然而, 组合权重方式多样且主要依赖人为选取, 无法量化其合理性。鉴于此, 本文构建指标的组合权重云, 通过反映云滴密集程度的超熵值判断组合权重的合理性, 筛选超熵值最低组合权重云, 得到合理性隶属度下随机性最小的组合权重。具体流程如图 3 所示。

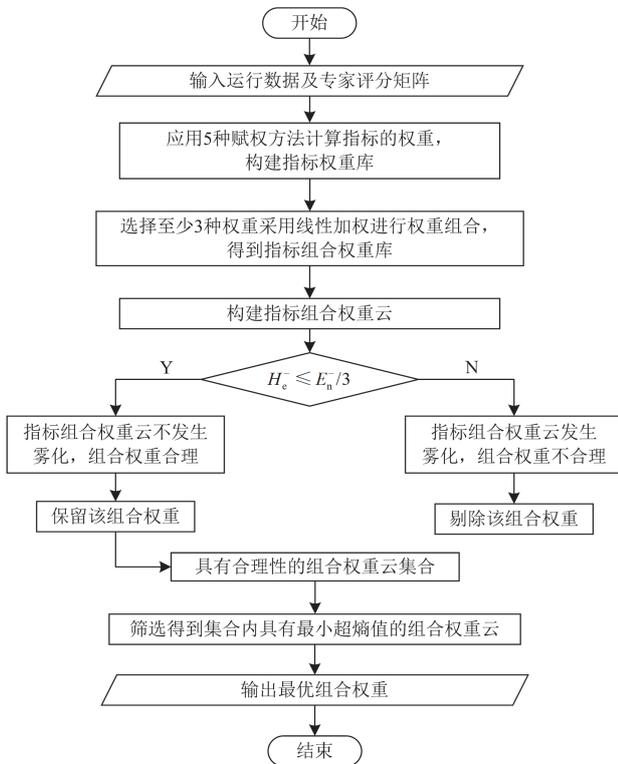


图 3 基于云雾化权重筛选的组合赋权方法流程图

Fig. 3 Flowchart of combination weighting method based on cloudy weight screening

1) 建立指标权重库

综合考虑主观、客观因素的作用, 采用 5 种不同的主客观权重计算方法为 MIES 运行效益评价指标建立指标权重库, 包括: CRITIC 权重法^[10]、层次分析法^[11]、熵权法^[21]、变异系数法^[23]、G1 法^[24]。

2) 建立指标组合权重库及组合权重云

为了消除单一赋权方法的权重偏差, 选择 3 种以上的权重采用线性加权计算组合权重, 得到指标组合权重库。再次, 构造各组合权重的权重云 (E_x^-, E_n^-, H_c^-), 其中 E_x^- 为指标组合权重云的期望, E_n^- 为指标组合权重云的熵值, 反映其不确定性, H_c^- 为指标组合权重云的超熵, 反映熵的不确定性。参数计算如式(6)所示。然后, 判断权重云是否发生雾化现象, 即组合权重是否合理, 其中雾化的临界条件为 $H_c^- = E_n^-/3$ 。具体而言, $H_c^- = E_n^-/3$ 时发生雾化现象证明组合权重不合理, 反之不发生雾化现象即组合权重具有合理性。

$$\begin{cases} E_x^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \\ E_n^- = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\omega_i - E_x^-| \\ H_c^- = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\omega_i - E_x^-)^2 - (E_n^-)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为计算组合权重时, 选取权重库不同赋权方法的个数; ω_i 为第 i 种方法的权重值。

3) 筛选最优合理性组合权重

通过超熵值筛选所得组合权重云, 超熵值越小云滴越密集, 指标权重合理性隶属度的随机性越小, 证明组合权重合理性越优, 当超熵值 H_c^- 最小时获得最优合理性组合权重 W 。

3 基于 OCC-IEGC 的评价模型

3.1 评价模型框架

为了提升评价结果的准确性和合理性, 本文选取具有等级界限的物元可拓模型弱化系统运行不确定性对评价结果准确性的影响, 并结合适用于处理指标等级边界具有模糊性和随机性问题的灰云模型, 对物元可拓模型进行改进得到可拓灰云模型, 削弱评价过程中主观因素对指标界限判断及评价结果合理性的影响。

其中, 灰云模型的计算中灰云熵作为状态等级模糊度的度量指标, 其取值最为关键, 直接影响灰云聚类系数的可靠性, 即指标等级判别的准确性。然而, 现有灰云熵计算方法中“ $3E_n^-$ ”在等级划分

时强调分明性，“50%”方法则强调模糊性，两种方法得到的灰云聚类系数可能会产生冲突的判定结论。因此，本文基于现有的两种灰云熵计算方法分别计算得到灰云聚类系数，再采用博弈论思想将上述两种灰云聚类系数融合得到最优灰云聚类系数，从而保证评价结果的准确性且兼顾两种方法的优势，即同时考虑了等级划分的分明性和模糊性。本文提出基于 OCC-IEGC 的 MIES 运行效益评价模型，评价流程如图 4 所示。

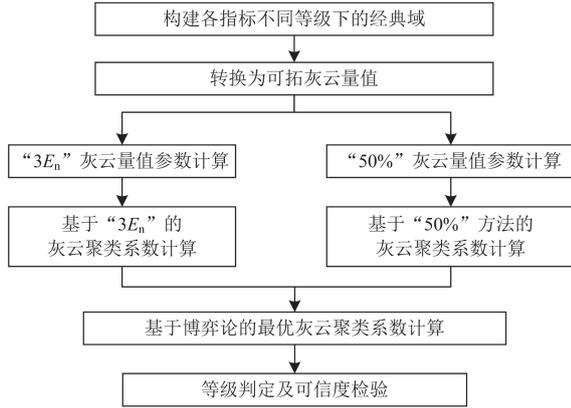


图 4 评价流程图

Fig. 4 Flowchart of evaluation

3.2 可拓灰云基本物元

在 MIES 运行效益评价中，系统运行状态具有不确定性，专家主观确定的判断区间具有模糊性和随机性。传统物元可拓模型中利用采样数据计算得到的确定性评价指标界限显然不能完全反映其特性。因此，本文将物元可拓模型中的等级界限双约束空间 $V = [C_{\min}, C_{\max}]$ 转换为灰云模型 (E_x, E_n, H_e) ，构建可拓灰云模型，从而完成确定性的信息向不确定性的转换。可拓灰云基本物元 R_k 如式(7)所示。

$$R_k = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ N & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： E_{xj} 、 E_{nj} 、 H_{ej} 分别表示评价对象 N 中评价指标 C_j 关于等级 k 的期望、熵和超熵。灰云量值 (E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}) 为评价指标 C_j 关于等级 k 的云描述。

3.3 可拓灰云量值参数

在可拓灰云中，灰云熵值 E_n 作为评价等级模糊性的量度，可以表现评价等级所有接受的数值范围，深刻影响着评价结果的准确性。目前，广泛使用的灰云熵算法主要有两种，以云滴分布概率不同分为“ $3E_n$ ”和“50%”两种。具体来说，“ $3E_n$ ”灰云

熵法中，灰云滴落在 $(E_x - 3E_n, E_x + 3E_n)$ 区间内的概率为 99.74%，其各等级灰云图的云滴分布在各等级边界以内，等级划分具有分明性和严苛性；“50%”灰云熵法中，灰云滴落在两个相邻等级边界的隶属度各为 50%，其各等级经典域划分具有一定的重叠性和模糊性^[25]。

3.4 最优灰云聚类系数

灰云聚类系数表示指标属于等级灰类的概率，其值越大表示该等级的隶属度越高。由于不同等级划分方法得到的灰云量值参数不同，计算等级灰云聚类系数时会得出不同的结果，易导致评价结果的冲突。因此，本文兼顾等级划分的分明性和模糊性，基于两种方法的灰量值参数分别计算灰云聚类系数，并提出基于博弈论的最优灰云聚类系数算法。

1) 灰云聚类系数计算

灰云白化权函数通过其函数曲线趋势和离散点值，反映了评估对象在特定取值范围内隶属于某一灰类的概率或倾向程度^[14]。

将既有 MIES 运行效益评价指标的量化结果代入灰云白化权函数，计算各指标在 k 个等级下的白化值，作为 MIES 运行效益评价中该指标的灰云聚类系数。其中，灰云白化权函数中含随机变量，求解灰云聚类系数时所获结果存在不同。因此，将每次结果视为一个灰云滴，其平均值视为最终的灰云聚类系数，如式(8)所示。

$$F_{ij,k}(x) = [f_{ij1,k}(x) + f_{ij2,k}(x) + \dots + f_{ijq,k}(x)]/q \quad (8)$$

式中： $F_{ij,k}(x)$ 为指标 x_{ij} 在第 k 等级的灰云聚类系数； $f_{ijq,k}(x)$ 为指标 x_{ij} 在第 q 次计算中的结果， q 值越大随机性越小，本文取 $q = 1000$ 。

2) 基于博弈论的最优灰云聚类系数计算

设通过 Z 种灰云量值参数算法求得第 j 个指标第 k 个等级的灰云聚类系数，为等级灰云聚类系数向量 $u_F = (u_{F1}, u_{F2}, \dots, u_{Fk})$ ，其中 $F = (1, 2, \dots, Z)$ 。设 Z 种灰云聚类系数向量的线性组合系数为 α_F ，由此得到等级灰云聚类系数矩阵 U ，如式(9)所示。

$$U = \sum_{F=1}^Z \alpha_F \cdot u_F^T \quad (9)$$

根据博弈论对线性组合系数 α_F 进行优化，如式(10)所示。

$$\min \left\| \sum_{F=1}^Z \alpha_F \cdot u_F^T - u_i^T \right\|_2, (i=1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式中： u_i 表示第 i 种灰云量值参数算法求得的灰云聚类系数矩阵。为得到多个灰云聚类系数的最优组合，以离差极小化为目标建立目标函数，如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^k \left| \left(\sum_{F=1}^Z \alpha_F \cdot \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_F^T \right) - \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_i^T \right| \\ \text{s.t. } \alpha_F > 0, \sum_{F=1}^Z \alpha_F^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

利用拉格朗日乘子法求得唯一最优解 α_F , 如式(12)所示。

$$\alpha_F = \frac{\sum_{i=1}^k \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_F^T}{\sqrt{\sum_{F=1}^Z \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_F^T \right)^2}} \quad (12)$$

3.5 评价等级评定及得分

通过将可拓等级灰云聚类系数矩阵 \mathbf{U} 与云雾化筛选最优合理性集成权重向量 \mathbf{W} 相乘得到综合评价结果向量 \mathbf{B} , 如式(13)所示。

$$\mathbf{B} = \sum \mathbf{W}\mathbf{U} \quad (13)$$

根据最大隶属度原则确定评价等级, 令 $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_m]$, $b_k (k=1, \dots, m)$ 为第 k 个等级的评价结果, m 为等级划分个数。当 $b_k = \max(b_1, b_2, \dots, b_m)$ 时, k 即为 MIES 运行效益评价指标等级。

各个指标综合得分由各等级评价结果 b_k 和赋值 t_k 的乘积之和表示, 等级 [I, II, III, IV, V] 对应赋分 [30, 55, 75, 85, 100], 如式(14)所示。

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^m t_k b_k \quad (14)$$

式中: s_{ij} 为第 i 层第 j 个指标的得分。

待评价方案综合得分由各一级指标的得分相加得到, 如式(15)所示。

$$s = \sum_{i=1}^5 s_i \quad (15)$$

式中: s 为方案综合得分; s_i 为第 i 层指标得分。

3.6 置信度检验

计算指标数据和相应等级灰云聚类系数中存在随机因素影响, 因此本文选择重复进行 T 次运算得到综合得分的期望值 E 和标准差 σ , 进而计算置信度 θ 判别评价结果的可信程度, 其值越大表示综合得分的离散程度越小、置信度越高。

$$E = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_T}{T} \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (s_t - E)^2} \quad (17)$$

$$\theta = \left(1 - \frac{\sigma}{E} \right) \times 100\% \quad (18)$$

式中: T 取值为 100; s_t 为第 t 次运算得到的方案综

合得分。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文选取山西省某实际矿山综合能源系统作为评价对象, 该矿山煤炭年产量为 280 万~300 万 t, 平均出煤量约为 8000 t/天, 其中能源设备配置情况见附录 A 表 A1^[20,26]。MIES 的能源供应与用能需求具有显著的季节性特征: 冬季由于井口保温和生活区采暖需求增加, 热负荷显著提高, 系统运行以热电联产为核心, 此时风电利用率较高, 光伏发电的出力会因日照强度的减弱而受到明显制约; 夏季高温环境下井下制冷与设备冷却需求增加, 冷负荷与电负荷均大幅提高, 此时光伏发电达到全年峰值, 而风电因季风减弱产能下降; 过渡季冷热负荷均衡, 以生产用电为主, 可再生能源发电趋于稳定。

为深入分析“内、外共生”特性下 MIES 能源系统与煤炭生产系统的协同运行效益, 本文结合 MIES 产能、用能的季节性特征, 针对文献[20]中不同季节及工况下的 MIES 运行方案展开运行效益评价, 其中以方案 6 为例的具体指标数据见附录 A 表 A2, 方案设置如表 2 所示。

表 2 运行方案

Table 2 Operational program

季节	运行方案	是否考虑煤炭生产柔性调度	是否考虑衍生能源及可再生能源梯级利用
冬季	方案 1	×	×
	方案 2	√	×
	方案 3	√	√
夏季	方案 4	×	×
	方案 5	√	×
	方案 6	√	√
过渡季	方案 7	×	×
	方案 8	√	×
	方案 9	√	√

4.2 综合评价过程及结果

4.2.1 评价等级划分

调研 10 位煤炭生产技术专家, 根据该 MIES 的规划规模和专家意见将评价指标等级分为 {I, II, III, IV, V} 5 个级别, 其中等级越高代表该方案下的指标性能评价越优, 指标等级界限划分如表 3 所示。

4.2.2 指标权重确定

依据专家意见及各方案的评价指标值, 通过多种权重计算方法得到指标权重库, 从权重库中选取 3 种及以上的权重进行云雾化权重融合, 得到融合效果较优的组合赋权方法及其 H_c 均值如表 4 所示。

表 3 部分指标等级界限划分
Table 3 Delineation of hierarchical boundaries for selected indicators

指标等级	I	II	III	IV	V
C_{11}	(2.6,3]	(2,2.6]	(1.2,2]	(0.6,1.2]	[0,0.6]
C_{21}	(200,250]	(150,200]	(75,150]	[25,75]	[0,25]
C_{31}	(0,30%]	(30%,50%]	(50%,75%]	(75%,90%]	(90%,100%]
C_{41}	(4.5,7]	(3.5,4.5]	(2.5,3.5]	(1.5,2.5]	[0.8,1.5]
C_{51}	(0,5%]	(5%,20%]	(20%,40%]	(40%,75%]	(75%,100%]

表 4 融合效果较优的组合赋权方法及其 H_c^- 均值
Table 4 Combined weighting methods with better fusion results and their H_c^- means

组合赋权方法	熵权 +	AHP +	G1 +	AHP +	熵权 +
	CRITIC +	G1 +	AHP +	变异 +	G1 +
指标 H_c^- 均值	0.041	0.024	0.023	0.021	0.017
	变异	变异	CRITIC	CRITIC	变异

其中，“熵权法 + G1 法 + 变异系数法”的 H_c^- 均值最小，即融合效果最优，该组合赋权方法下的指标权重如表 5 所示。由表 5 可知，系统运行状态和

表 5 指标权重值

Table 5 Indicator weight values

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重
C_1	0.1268	C_{11}	0.0437
		C_{12}	0.0423
		C_{13}	0.0408
C_2	0.1460	C_{21}	0.0413
		C_{22}	0.0334
		C_{23}	0.0357
		C_{24}	0.0360
C_3	0.2994	C_{31}	0.0477
		C_{32}	0.0510
		C_{33}	0.0509
		C_{34}	0.0554
		C_{35}	0.0455
		C_{36}	0.0489
C_4	0.2767	C_{41}	0.0632
		C_{42}	0.0561
		C_{43}	0.0588
		C_{44}	0.0510
		C_{45}	0.0476
C_5	0.1512	C_{51}	0.0483
		C_{52}	0.0521
		C_{53}	0.0508

系统成本权重最大，这是因为 MIES 的运行目标是最大限度地消纳可再生能源和衍生能源、提高能源利用效率从而实现系统效益的增长。

4.2.3 评价结果分析

各方案的综合得分和一级指标得分，如图 5 所示。各季节下考虑能-煤流协同运行，即考虑煤炭生产柔性调度、衍生能源及清洁能源梯级利用对运行效益有显著的提升，且夏季运行效益明显优于冬季及过渡季，因此夏季能-煤流协同运行的方案 6 整体评分最高，且其各维度效益评价均较优。

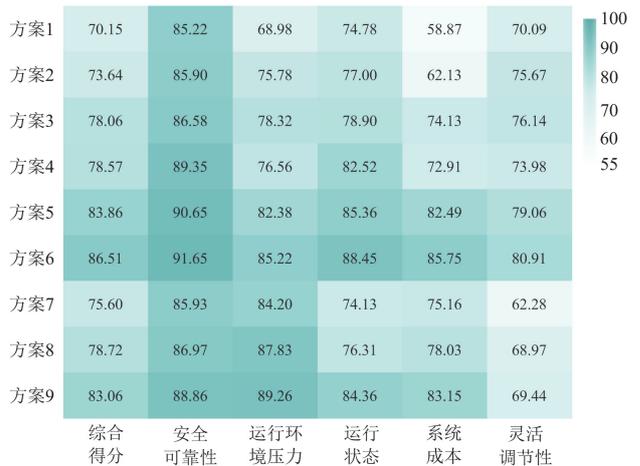


图 5 各方案评价结果热力图

Fig. 5 Heat map of evaluation results of different schemes

1) MIES 能-煤流协同运行效益分析

夏季不同工况下 MIES 运行的各二级指标的得分情况如图 6 所示。

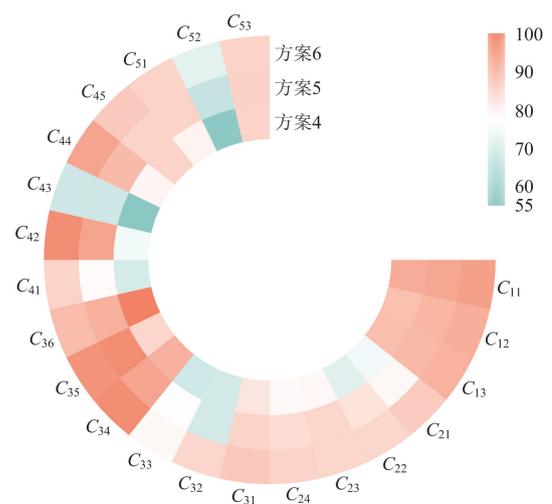


图 6 夏季 MIES 不同工况下各二级指标得分情况

Fig. 6 Scores for each secondary indicator of MIES under different operating conditions in summer

由图 5 和图 6 可以看出,考虑能-煤流协同运行对 MIES 各个维度上的运行效益均有提升,其二级指标得分普遍也有显著提高,具体而言:

(1) 考虑煤炭生产柔性调度,可显著优化系统运行状态,从而有效地降低系统运行成本和环境压力。方案 5 对比方案 4 的可再生能源渗透率和能源转换效率分别提升了 1.94%和 3.41%,由此可见煤流运输设备作为灵活性的电负荷,其负荷侧需求可随电源侧供给协同变化保障优先消纳可再生能源,可有效提高能源转化效率、降低污染物排放强度,从而优化系统运行状态、降低环境压力;煤流运输设备利用电价峰谷差和可再生能源出力波动调整皮带转速可减少外购电量和平均购电成本,使方案 5 比方案 4 的单位煤炭生产成本和能源成本分别降低了 3.14%和 6.90%,进而降低了系统运行成本。

(2) 考虑衍生能源和可再生能源的梯级利用,在提升计及煤炭生产柔性调度所优化的效益之上,还可以进一步提升系统灵活调节性。衍生能源和可再生能源按照能源需求和能质逐级多次利用,使方案 6 对比方案 5 衍生能源和可再生能源渗透率提高了 6.40%和 2.18%,从而促进能源自给率提升 1.80%,由此系统运行状态得分得到大幅提升。能源利用率的提升同时减少了外部购能的需求,使单位煤炭生产能源成本和碳排放强度进一步降低了 7.09%和 5.25%,从而降低了系统运行成本、缓解了环境压力。方案 6 充分调度 MIES 中的能源设备,增大了系统电备用容量,有效提升了系统灵活调节能力。

2) MIES 不同季节运行效益分析

不同季节下考虑能-煤流协同的运行方案各二级指标得分情况如图 7 所示。

由图 7 可以看出,各二级指标在夏季的得分普遍较优,春秋过渡季次之,冬季最差,具体而言:

(1) 夏季的能源特征与负荷特性使其运行状态效益普遍优于其他季节。其中,能源自给率的二级指标得分最高,可再生能源渗透率和能源转换效率较优,但能耗强度较差。主要由于夏季有较高的制冷需求,其间接转化为电能需求。而在夏季白天有充足的太阳能、夜间也有风能相补充,可再生能源渗透率高达 91.93%,其发电量与电负荷需求基本同步,间接地提升系统整体的能源转换效率和能源自给率。但夏季负荷峰谷差较大、气温较高,各类设备长时间运行后需要冷却散热产生额外的能量损耗,因此夏季能耗强度较其他季节平均高 60.44%。

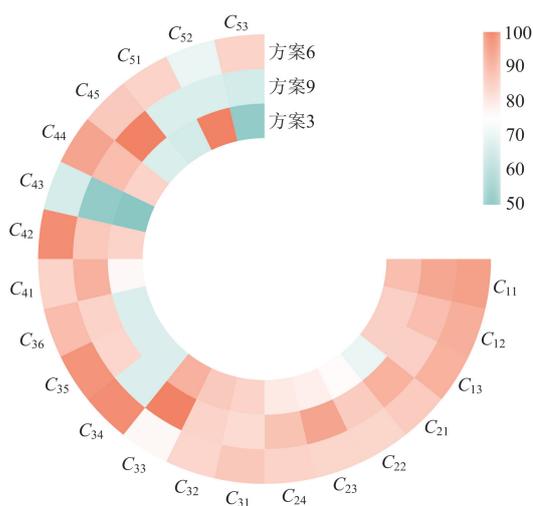


图 7 不同季节 MIES 能-煤流协同运行方案下各二级指标得分情况

Fig. 7 Scores for each secondary indicator under the MIES energy-coal flow synergistic operation scheme in different seasons

(2) 冬季系统成本效益远低于夏季和过渡季,二级指标中碳排放成本、单位煤炭生产成本和供能成本受季节影响较为显著。夏季和过渡季 MIES 中设备维护难度相对其他季节低,其运行效率更高,由此提升了煤炭的生产效率,与冬季相比单位煤炭生产成本效益平均增长了 19.17%。同时,夏季和过渡季的可再生能源利用条件较好,资源相对充足,与冬季相比系统单位供能成本效益提升了 39.29%。因此,冬季的生产、供能成本高于其他季节,在 3 个季节中系统成本效益最劣。另外,冬季热负荷需求与夏季相比扩大 71.34%,仅靠热泵供能难以满足需求,所以需要外购更多的天然气通过燃气锅炉转化为热负荷,导致污染物的排放量快速增长。因此,冬季时系统运行环境压力和系统碳排放成本效益相对较差。

4.3 置信度检验

4.3.1 可拓灰云模型置信度检验

为验证本文所提 OCC-IEGC 模型在评价 MIES 运行效益的有效性,选取常用于不确定性问题评价的可拓云模型和灰云模型作为参照对象,计算不同模型下方案 6 的综合得分及置信度,如表 6 所示。

表 6 基于不同云模型方案 6 综合得分及置信度

Table 6 Composite score and confidence level of scheme 6 based on different cloud models

评价模型	置信度/%	得分
可拓云模型	90.22	88.57
灰云模型	92.9	84.60
OCC-IEGC 模型	96.85	86.51

由表 6 可知, OCC-IEGC 模型的置信度优于其他评价方法。在可拓云模型的评价流程中, 正态随机过程导致云关联度计算具有不确定性, 单次计算结果直接用于等级评定, 影响了评价结果的准确性。相比之下, 灰云模型通过引入白化权函数, 并采用多次计算聚类系数后取均值的方式, 有效降低了评价结果的随机性, 从而在置信度上较可拓云模型有所提升。然而, 灰云模型在特征值参数选择方面表现出单一性, 未能充分应对 MIES 内部结构及运行机制的复杂情况, 导致其在评价 MIES 运行效益时与 OCC-IEGC 模型相比有所不及。

4.3.2 灰云聚类系数算法置信度检验

为验证本文所提最优灰云聚类系数方法的合理性和有效性, 以方案 6 为例分别应用“ $3E_n$ ”、“50%”和最优灰云聚类系数方法进行 MIES 运行效益评价, 不同方法下的方案综合评价得分与置信度如表 7 所示。计算系统运行状态维度下的各二级指标得分, 并基于指标评分等级界限划分标准(见附录 A 表 A3)确定各二级指标所处等级, 结果如表 8 所示。

表 7 不同灰云聚类系数算法下方案 6 综合得分及置信度

Table 7 Composite score and confidence level of scheme 6 based on different grey cloud clustering coefficients

评价方法	置信度/%	得分
“ $3E_n$ ”	94.15	89.54
“50%”	93.70	81.31
最优灰云聚类系数	96.85	86.51

表 8 基于不同灰云聚类系数算法的系统运行状态二级指标得分及等级

Table 8 Score and grade of the second-level index of the system operation status based on different grey cloud clustering coefficients

评价方法		C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{36}
“ $3E_n$ ”	得分	90.00	88.00	75.00	98.00	98.00	85.00
	等级	V	V	III	V	V	V
“50%”	得分	82.13	79.58	80.16	90.12	85.25	87.57
	等级	IV	IV	IV	V	IV	V
最优灰云	得分	86.86	84.54	79.26	96.67	95.47	88.61
	等级	IV	IV	IV	V	V	V

由表 7 和表 8 可知, 最优灰云聚类系数方法所得评分处于“ $3E_n$ ”和“50%”方法所得评分之间, 且置信度显著高于其他两种方法, 这是由于最优灰云聚类系数方法同时兼顾等级划分的分明性和模糊性特点, 相较于传统方法能有效提升计算精度和置信度。“ $3E_n$ ”方法等级界限划分分明且互不交叉,

尤其忽视了当评价指标值处于较高等级时其界限的模糊性, 对于数据的波动性和不确定性包容度较低, 因此其计算所得评分偏大。例如能源自给率指标即 C_{31} , 其指标值为 91.4%, 大于第 IV 等级的右界限 (85%), 小于第 V 等级的右界限 (100%), 虽然其指标值更靠近第 IV 等级, 但由于“ $3E_n$ ”方法在等级界限划分的绝对性使该指标归属于第 V 评价等级, 从而使其计算得分偏大; 而“50%”方法在评价界限划分时过于模糊, 指标实测值的隶属等级易向相邻等级拓展, 因此其计算评分普遍偏小。最优灰云聚类系数方法所得评分处于“ $3E_n$ ”和“50%”方法所得评分之间, 该方法的计算结果更贴近真实情况, 其计算精度与置信度均处于较高水平, 在合理性与准确性方面较对比方法表现更优。

5 结论

本文深入分析 MIES 特性, 采用 DPSIR 模型构建评价指标体系以更全面地表征系统的生态性, 并构建 OCC-IEGC 模型来处理系统运行的不确定性和专家评判过程中的模糊性对结果的影响。经过算例分析, 得出以下结论。

- 1) DPSIR 模型能有效识别影响系统运行效益的关键指标, 从而全面地反映系统的生态特性。
- 2) 基于云雾化权重筛选的组合赋权方法可以定量评估指标组合权重的合理性, 有效削弱主观因素对组合赋权方法选择的影响。
- 3) 季节环境因素显著影响 MIES 运行效益, 通过能-煤流协同优化调度, 显著提升权重占比最大的系统碳排放成本效益和单位煤炭生产成本效益, 最大化系统运行效益。

4) OCC-IEGC 模型通过物元可拓模型削弱了系统运行不确定性的影响, 利用灰云模型处理模糊性问题的优势减少了评价过程的误差, 结合最优云熵算法提高结果可信度, 具有较强的适应性和可靠性。

附录 A

表 A1 MIES 能源设备配置情况

Table A1 MIES energy equipment configuration

设备	额定功率/MW	设备	额定功率/MW
光伏发电设备	45.00	电制冷机	0.40
风力发电设备	22.50	吸收式制冷机	0.40
煤矸石发电装置	25.00	储能设备	0.20
燃气轮机	2.50	水源热泵	0.30
乏风氧化装置	0.15	空气源热泵	0.30
燃气锅炉	0.35	地源热泵	0.30

表 A2 方案 6 评价指标数据

Table A2 Evaluation indicator values of scheme 6

二级指标	数值	二级指标	数值
$C_{11}/\%$	0.37	$C_{35}/\%$	55.19
$C_{12}/\%$	98.5	$C_{36}/(\text{t/h})$	356.89
$C_{13}/\%$	98.92	$C_{41}/\text{万元}$	2.81
$C_{21}/(\text{kg/t})$	13.01	$C_{42}/\text{万元}$	115.07
$C_{22}/(\text{kg/t})$	8.62	$C_{43}/(\text{元/t})$	239.98
$C_{23}/(\text{kg/t})$	1.97	$C_{44}/(\text{元/t})$	134.35
$C_{24}/(\text{kg/t})$	0.54	$C_{45}/(\text{元/kWh})$	0.24
$C_{31}/\%$	91.4	$C_{51}/\%$	43.85
$C_{32}/\%$	52.61	C_{52}/kW	6025.98
$C_{33}/(\text{kWh/kg})$	5.171	C_{53}/kW	7041.57
$C_{34}/\%$	34.76	—	—

表 A3 指标评分等级界限划分标准

Table A3 Criteria for delineating the boundaries of the indicator rating scale

等级	I	II	III	IV	V
指标评分	[0, 30]	(30, 55]	(55, 75]	(75, 85]	(85, 100]

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. [2022-01-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
- [2] HUANG Hongxu, LIANG Rui, LÜ Chaoxian, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system[J]. *Applied Energy*, 2021, 290.
- [3] HU Hejuan, SUN Xiaoyan, ZENG Bo, et al. Enhanced evolutionary multi-objective optimization-based dispatch of coal mine integrated energy system with flexible load[J]. *Applied Energy*, 2022, 307.
- [4] 德格吉日夫. 园区综合能源系统源荷储协同优化及效益评价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021. DEGEJIRIFU. Research on source load storage collaborative optimization and benefit evaluation model for park integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [5] LENG Yajun, PENG Dan, ZHANG Huan. Integrated energy system evaluation method based on dimensionality reduction and indexes updating with incomplete information[J]. *Energy*, 2023, 277.
- [6] 梁睿, 张鹤, 袁乐童, 等. 煤流-潮流协同的矿山供电系统低碳优化运行[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2245-2257. LIANG Rui, ZHANG Ge, YUAN Letong, et al. Low carbon optimal operation for mine power supply system with coordinated coal-power flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2245-2257.
- [7] 张佳欣. 考虑需求侧响应的综合能源系统优化调度[D]. 北京: 华北电力大学, 2023. ZHANG Jiixin. Optimal scheduling of integrated energy systems with demand-side response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [8] 杨玮, 薛梦鸽, 龙涛, 等. 基于 DPSIR 模型的黄金行业绿色矿山建设综合评价研究[J]. *黄金科学技术*, 2023, 31(4): 635-645. YANG Wei, XUE Mengge, LONG Tao, et al. Comprehensive evaluation of green mine construction in gold industry based on DPSIR model[J]. *Gold Science and Technology*, 2023, 31(4): 635-645.
- [9] 邓博, 杨玮. 基于组合赋权-模糊评价法的绿色矿山建设评价[J]. *工业安全与环保*, 2024, 50(1): 66-71, 76. DENG Bo, YANG Wei. Evaluation of green mine construction based on combination weighting fuzzy evaluation method[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2024, 50(1): 66-71, 76.
- [10] NIE Yonghui, QIU Yu, YANG Annan, et al. Risk-limiting dispatching strategy considering demand response in multi-energy microgrids[J]. *Applied Energy*, 2024, 353.
- [11] 李志伟, 赵雨泽, 吴培. 碳交易机制下绿氢蓝氢协调优化对综合能源系统的影响评估[J/OL]. *太阳能学报*: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10.19912/j.02540096.tynxb.20230936. LI Zhiwei, ZHAO Yuze, WU Pei. Impact assessment of coordinated optimization of green hydrogen and blue hydrogen on integrated energy system under carbon trading mechanism[J/OL]. *Acta Energetica Solaris Sinica*: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10.19912/j.02540096.tynxb.20230936.
- [12] 宋晓华, 苏雨菁, 张露, 等. 基于改进物元可拓模型的农村综合能源系统效益评价[J]. *价格理论与实践*, 2022(2): 170-174. SONG Xiaohua, SU Yujing, ZHANG Lu, et al. Benefit evaluation of rural comprehensive energy system based on improved matter-element extension model[J]. *Price: Theory & Practice*, 2022(2): 170-174.
- [13] 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.
- [14] 盛四清, 张佳欣, 李然. 基于组合赋权与灰云模型的综合能源系统需求响应效益评价[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(2): 41-54. SHENG Siqing, ZHANG Jiixin, LI Ran. Demand response benefit evaluation of integrated energy system based on combination weighting and gray cloud model[J].

- Journal of North China Electric Power University, 2024, 51(2): 41-54.
- [15] 胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 等. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 827-835.
HU Hejuan, SUN Xiaoyan, ZENG Bo, et al. Multi-time-scale interval optimal dispatch of coal mine integrated energy system considering source-load uncertainty[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 827-835.
- [16] LI Fan, YANG Jiarui, SHEN Shuyi, et al. Adaptability evaluation of power grid planning scheme based on improved AHP-CRITIC-TOPSIS with high proportion of renewable energy[C] // 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology, May 5-7, 2023, Kunming, China: 623-630.
- [17] ELWAKIL M M, EI ZOGHABY H M, SHARAF S M, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-21.
- [18] 王升花. 煤矿供电系统电能质量综合评价[J]. 工矿自动化, 2017, 43(2): 86-89.
WANG Shenghua. Comprehensive evaluation of power quality of coal mine power supply system[J]. Journal of Mine Automation, 2017, 43(2): 86-89.
- [19] 董梅. 低碳城市试点政策的工业污染物净减排效应—基于合成控制法[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(5): 16-30.
DONG Mei. Analysis of the net emission reduction effect of the industrial pollutants in low-carbon pilot cities—based on synthetic control method[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(5): 16-30.
- [20] 曾博, 胡品端, 王涵, 等. 基于 NSBM-DEA 的矿山综合能源系统能效评估方法[J/OL]. 太阳能学报: 1-12 [2024-09-20]. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1845.
ZENG Bo, HU Pinduan, WANG Han, et al. Energy efficiency evaluation method of mine integrated energy system based on NSBM-DEA[J/OL]. Acta Energetica Solaris Sinica: 1-12[2024-09-20]. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1845.
- [21] 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 Pengxiang, QIN Zhenkun, GUO Dongxu, et al. Comprehensive energy flexibility evaluation index system and evaluation model [J]. Distributed Energy, 2023, 8(6): 66-76.
- [22] 李晓露, 徐婉云, 柳劲松, 等. 考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 58-68.
LI Xiaolu, XU Wanyun, LIU Jinsong, et al. Adjustable power domain aggregation method for demand-side resources considering temporal correlation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 58-68.
- [23] 严康, 陆艺丹, 覃芳璐, 等. 配电网用户侧异构电力物联设备网络风险量化评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 64-76.
YAN Kang, LU Yidan, QIN Fanglu, et al. Network security risk assessment of UPIDs in the distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 64-76.
- [24] 邹阳, 黄煜, 俞豪奕, 等. 融合频谱特性与聚类云-证据推理的油纸绝缘老化程度诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 105-114.
ZOU Yang, HUANG Yu, YU Haoyi, et al. Diagnosis of oil-paper insulation aging degree by fusing spectral properties and clustered cloud-evidence reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 105-114.
- [25] 刘云鹏, 许自强, 付浩川, 等. 采用最优云熵改进可拓云理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 397-405.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, FU Haochuan, et al. Insulation condition assessment method of power transformer based on improved extension cloud theory with optimal cloud entropy[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 397-405.
- [26] 黄宏旭, 梁睿, 张小彤, 等. 计及碳约束下的煤矿综合能源系统多目标配置双层优化[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1731-1742.
HUANG Hongxu, LIANG Rui, ZHANG Xiaotong, et al. Two-stage multi-objective deployment optimization approach of coal mine integrated energy system considering carbon emission constraints[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1731-1742.

收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2024-12-31

作者简介:

王雨晴(1994—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为综合能源系统、电力经济; E-mail: wangyuqingncepu@foxmail.com

闫朝臣(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统、能源电力经济; E-mail: chance_yan@foxmail.com

王俐英(1997—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为综合能源系统、综合需求响应。E-mail: 18811337200@163.com

(编辑 张颖)