

# 基于多源异构大数据的零碳工业园区综合能源规划方法

万智贇, 梁永全, 陈嘉亮, 卢凯彬

(广东顺德电力设计院有限公司, 广东 佛山 528300)

**摘要:**为提升零碳工业园区能源规划的效率和准确性,提出基于多源异构大数据的零碳工业园区综合能源规划方法。依据零碳工业园区综合能源系统运行结构以及运行特点,获取零碳工业园区多源异构大数据;选择改进的K均值聚类算法,融合聚类综合能源系统中各类能源的异构大数据;确定碳排放量最小以及总运行费用最小为园区综合能源规划的目标函数,并设计约束条件;采用改进的克里金(Kriging)方法求解目标函数,输出零碳工业园区综合能源规划方案。测试结果显示:聚类后数据的均衡负载离差均在0.10以下,最佳规划方案的综合能源耦合等效效率、设备利用率以及年均购电波动最大值分别为87.22%、77.69%以及923.44 kW·h·h<sup>-1</sup>,降低园区整体碳排放量,提升经济效益。

**关键词:**多源异构;大数据;融合聚类;零碳工业园区;综合能源规划;碳排放量

中图分类号: TP311.13; TM715

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0056-05

## Comprehensive energy planning method for zero carbon industrial parks based on multi-source heterogeneous big data

WAN Zhiyun, LIANG Yongquan, CHEN Jialiang, LU Kaibin

(Guangdong Shunde Power Design Institute Co., Ltd., Foshan 528300, China)

**Abstract:** To improve the efficiency and accuracy of energy planning for zero carbon industrial parks, this paper proposes a comprehensive energy planning method for zero carbon industrial parks based on multi-source heterogeneous big data. Based on the operational structure and characteristics of the comprehensive energy system in the zero carbon industrial park, it obtains multi-source heterogeneous big data of the zero carbon industrial park, chooses an improved K-means clustering algorithm to integrate heterogeneous big data of various types of energy in the comprehensive energy system for clustering, determines the minimum carbon emissions and total operating costs as the objective functions for the comprehensive energy planning of the park, and designs constraint conditions. Using the improved Kriging method to solve the objective function, it outputs the comprehensive energy planning scheme for zero carbon industrial parks. The test results show that the balanced load deviation of the clustered data is all below 0.10. The comprehensive energy coupling equivalent efficiency, equipment utilization rate, and maximum annual electricity purchase fluctuation of the best planning scheme are 87.22%, 77.69%, and 923.44 kW·h·h<sup>-1</sup>, respectively, reducing the overall carbon emissions of the park and improving economic benefits.

**Keywords:** multi source heterogeneity; big data; fusion clustering; zero carbon industrial park; comprehensive energy planning; carbon emissions

## 0 引言

工业园区综合能源指的是供电、区域供热和供冷以及多种能源转换装置形成的能源综合集成系统<sup>[1]</sup>,该系统中包含能源站、冷、热、电、气功能管网,系统的核心为能源站,该核心能够实现园区的统一、集中调度,以此满足整个园区能源的实时供需平衡<sup>[2]</sup>。该系统具备独立运行的能力,同时也可向大电网提供电能<sup>[3]</sup>。因此,园区综合能源规划需结合园区实际情况、当前用能负荷以及综合能源(风、光、电、气等)的情况以及用户需求完成<sup>[4]</sup>,目前在实际规划时,诸多规划方法均无法满足当前综合能源站的多样化供应需求,规划时对于未来储能系统和供能系统之间的协调能力考虑较少<sup>[5]</sup>,均存在一定局限性,导致综合能

源的运行调度能力的合理性较差。

文献[6]为实现能源的有效管理,提升能源的利用率,构建能量调度模型,并通过混合优化算法进行模型求解,获取能源调度方案结果;但是该方法在应用过程中,当发生不确定场景变化时,该方法的调度结果存在偏差。文献[7]为实现综合能源的利用率,以低碳为前提,实现供需平衡为目标,构建双层调度模型,实现供需双侧的联合优化;但是该方法在应用过程中,多类别能源站之间的协同效果不理想。文献[8]为实现综合能源合作规划,基于一种风险约束的多目标规划来同时对两个网络的运营成本进行建模,保证各个能源之间能够联合调度;但是该方法在应用过程中,虽较好地考虑不确定性造成的影响;但是对于碳排放的考虑不足。文献[9]为保证综合能源的规划效果,在考虑可靠性标的前提下,对能源进行规划和

\* 基金项目:广东省科技项目资助(GS20220109)

收稿日期:2024-03-28

重组,以此实现多种能源之间的可靠协同运行;但是该方法在应用过程中,过多关注能源的安全性,导致综合能源运行成本较大。

多源异构大数据是来自不通过数据源且数据格式存在差异的数据,该类数据存在源类别较多、格式差异、价值密度低等特点<sup>[10]</sup>,这些数据中含有诸多有价值的信息,可为管理和决策提供可靠依据<sup>[11]</sup>。因此,文中为实现工业园区综合能源规划,提出基于多源异构大数据的零碳工业园区综合能源规划方法。

## 1 零碳工业园区综合能源规划

### 1.1 零碳工业园区综合能源系统运行结构

为实现工业园区综合能源规划,需构建以零碳排放为特征的工业园区综合能源系统,该系统结合光伏、风机以及绿色氢能等零碳能源技术组成,以此满足用户的多样化负荷需求,并实现综合能源源网荷储一体化,零碳工业园区综合能源系统运行结构如图1所示。

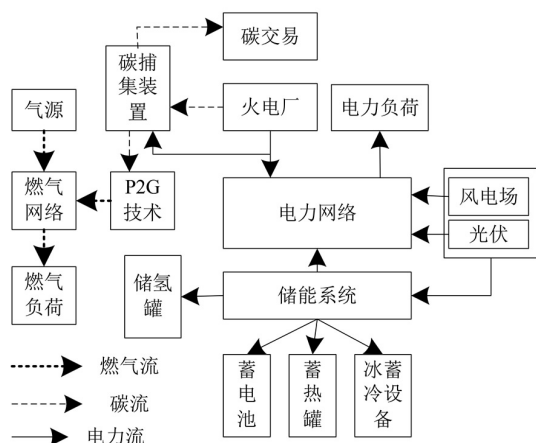


图1 零碳工业园区综合能源系统运行结构

电力网络主要用于输送电能,该电能主要由光伏、太阳能以及火电机组提供,电能供应过程中,火电机组会产生二氧化碳,系统通过碳捕集装置收集这些排放的气体,并将收集的气体作为P2G(电转气)技术的原料,通过该技术处理后,可将该气体转换为甲烷并用于燃气网络中。针对部分无法收集的二氧化碳,园区须购买碳排放权后方可进行碳排放,以此实现园区的零碳运行目标。系统中的储能系统包含蓄电池、蓄热罐以及冰蓄冷设备组成,最大程度满足用户的负荷需求,如果储能系统无法存储的多余电能则经由电解槽电解水进行处理后形成氢气,并存储至储氢罐中,为燃料电池发电提供支撑,至此得到零碳工业园区综合能源系统运行结构。

### 1.2 能源多源异构大数据的改进的K均值聚类

结合工业园区综合能源系统运行结构可知,该系统是由多能源组成,并且运行场景存在显著的不确定性,不同能源产生的数据以及运行特性也存在差异<sup>[12]</sup>,因此工业园区综合能源系统运行数据属于典型的多源异构大数据,

为保证综合能源的规划效果,需对这些多源异构大数据进行融合,保证数据的利用率。为保证综合能源系统中多源异构大数据的融合效果,文中选择改进的K均值聚类算法完成。

K均值聚类算法在进行综合能源系统中多源异构大数据融合时,需先确定初始聚类中心,如果综合能源系统中多源异构大数据集用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 表示, $M$ 表示数据数量,计算 $X$ 中任意两个数据 $x_i$ 和 $x_j$ 之间欧氏距离,其计算公式为

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^M (x_i^m - x_j^m)^2} \quad (1)$$

其中,共计 $M$ 个聚类中心, $m \in M$ 。设定距离阈值 $a_d$ ,如果聚类中心用 $\xi_1$ 表示,获取和 $\xi_1$ 之间距离大于 $a_d$ 的两个距离最近的数据定为第二个类别,其聚类中心用 $\xi_2$ 表示, $a_d$ 的计算公式为

$$a_d = \frac{\max[d(x_i, x_j)]}{2(M-1)} \quad (2)$$

依据公式(2)同理,在剩余的综合能源系统中多源异构大数据中继续进行聚类中心的确定,循环上述步骤直到获取 $M$ 个聚类中心为止。

K均值聚类算法在优化时,需计算各个数据的密度参数,以计算结果为标准,获取上述聚类中心结果中前 $m$ 个计算结果值较大的对象作为新的聚类中心,并计算数据之间的平均距离 $\bar{d}$ ,其计算公式为

$$\bar{d} = \frac{a_d}{M} \times \sum d(x_i, x_j) \quad (3)$$

$\bar{d}$ 是计算数据对象密度参数的重要依据,因此以式(3)为依据,选择任意两个数据对象之间距离 $\bar{d}$ 作为数据对象密度参数。

计算各个数据对象的密度参数 $\rho(p)$ ,其计算公式为

$$\rho(p) = \sum_{i=1}^M \zeta(\bar{d} - |p_i - p|) \quad (4)$$

式中, $p_i$ 和 $p$ 为多源异构大数据中两个随机数据对象;两者之间的距离用 $|p_i - p|$ 表示; $\zeta$ 为密度系数。

循环上述式(3)和式(4)两个步骤,直到获取 $\rho(p)$ 较大的 $m$ 个数据为止,以此确定最佳聚类中心。依据该聚类中心进行综合能源系统中多源异构大数据聚类,则多源异构数据融合聚类中心的计算公式为

$$\xi_i = - \sum_{i=1}^M T_i \rho(p) - R \quad (5)$$

式中, $T_i$ 为不同聚类中心的时间尺度; $R$ 表示综合能源系统中多源异构大数据聚类目标函数。就此实现能源多源异构大数据聚类。

### 1.3 工业园区综合能源规划模型

#### 1.3.1 工业园区综合能源规划目标函数设计

依据上述小节完成综合能源系统中多源异构大数据融合聚类后,确定工业园区综合能源规划目标函数,文中

主要从两个方面考虑,分别为零碳工业园区的碳排放量和综合能源规划全生命周期总运行费用。

由于工业园区中存在一部分无法被捕集装置收集的二氧化碳,需通过购买碳排放权后排放至大气中,因此,会产生一定的碳排放,同时也会增加综合能源规划全生命周期总运行费用<sup>[13]</sup>。所以文中最终确定碳排放量最小  $\min f_1$  以及总运行费用最小  $\min f_2$  为目标函数,两者的计算公式为

$$\min f_1 = \frac{\sqrt{(\xi_i - 1)} (F_1 X_1 + F_2 X_2 + F_3 X_3)}{3} \quad (6)$$

$$\min f_2 = \frac{\sqrt{(\xi_i + 1)}}{3} \left[ \sum_{z=1}^Z (1 + \gamma)^{n-1} C_s + \sum_{n=1}^N (1 + \gamma)^n (C_n^o + C_n^a + C_n^e) \right] \quad (7)$$

式中,  $X_1, X_2, X_3$  均为碳排放系数,依次分别对应天然气、网电以及热能;  $F_1, F_2, F_3$  以此分别表示燃气、网电以及热能3种能源的消耗量、使用量以及生产量;  $n$  表示规划的第  $n$  年;  $z$  表示规划的第  $z$  个阶段,  $Z$  为规划总阶段数;  $N$  为规划周期;  $n_z$  为第  $z$  个阶段中规划周期的第  $n_z$  年;  $\gamma$  表示贴现率;在第  $z$  个规划阶段中,设备的投入成本用  $C_s$  表示;工业园区规划的第  $n$  年中,综合能源系统的运行成本、维护成本以及碳排放权购买成本分别用  $C_n^o, C_n^a, C_n^e$  表示。

得到最终的业园区综合能源规划目标函数,以便综合能源规划最佳方案求解。

### 1.3.2 约束条件

确定目标函数后,需对目标函数确定对应的约束约束条件,这些条件式用于限制设计变量的变化范围,保证目标函数决策结果的合理性。

文中针对两个目标函数的情况,完成约束条件的设定,详细情况如下所述:

#### 1) 网络交换功率约束

因为工业园区内综合能源系和配电网以及天然气网络相连接,因此,系统和两个网络之间交换过程中,需保证交换功率保持在规定的范围内,约束公式为

$$\begin{cases} P_{PN}^{\min} \leq P_{PN,n}(t) \leq P_{PN}^{\max} \\ P_{GN}^{\min} \leq P_{GN,n}(t) \leq P_{GN}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_{PN,n}(t)$  为综合能源系统在第  $n$  年中,  $t$  时刻下与上级配电网之间的实际交换功率,其下限和上限分别用  $P_{PN}^{\min}, P_{PN}^{\max}$  表示;  $P_{GN,n}(t)$  为综合能源系统在第  $n$  年中,  $t$  时刻下与上级天然气网络之间的实际交换功率,其下限和上限分别用  $P_{GN}^{\min}, P_{GN}^{\max}$  表示。

#### 2) 园区运行能量平衡约束

工业园区综合能源系统中,能源的种类较多<sup>[14]</sup>,因此,在对其进行规划时,需保证园区中各类设备的供应能量、购买和售出能源均需和对应的负荷平衡,约束条件公式为

$$\begin{cases} P_{z1}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} P_{i,j}^i(t) + P_E(t) - P_S(t) + \min f_2 \\ P_{z2}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} Q_{i,j}^h(t) + P_H(t) + \min f_2 \\ P_{z3}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} Q_{i,j}^c(t) + P_D(t) + \min f_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中,在  $t$  时刻下,第  $i$  种设备第  $j$  台机组的供电、制热、制冷时的功率分别用  $P_{i,j}^i(t), Q_{i,j}^h(t), Q_{i,j}^c(t)$  表示;在  $t$  时刻下,综合能源系统的购电量、售电量、购热量、购冷量分别用  $P_E(t), P_S(t), P_H(t), P_D(t)$  表示;在  $t$  时刻下,园区内产生的电负荷、热负荷以及冷负荷分别用  $P_{z1}(t), P_{z2}(t), P_{z3}(t)$  表示。

#### 3) 负荷约束

园区综合能源系统中会存在一定负荷<sup>[15]</sup>,包含失电负荷  $P_{ls}$  和失热负荷  $H_{ls}$ ,同时会发生弃风弃光现象,则约束公式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{zl}(t) \leq \lambda_1 P_{z1}(t) \\ 0 \leq P_{dl}(t) \leq \lambda_2 P_{z2}(t) \\ 0 \leq P_{gl}(t) \leq \lambda_3 P_{z3}(t) \\ 0 \leq P_{et}(t) \leq \lambda_{et} [P_{pv}(t) + P_{wd}(t)] \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_{zl}(t), P_{dl}(t)$  和  $P_{gl}(t)$  分别为在  $t$  时刻下的失电负荷、失热负荷以及失冷负荷;  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda^h$  为3种失负荷的最大比例;  $P_{et}(t)$  为弃风弃光功率,其最大比例用  $\lambda_{et}$  表示;  $P_{pv}(t)$  和  $P_{wd}(t)$  分别为在  $t$  时刻下的光伏和风电功率。

依据上述小节确定零碳工业园区综合能源规划的目标函数和约束条件后,采用改进的克里金(Kriging)方法构建 Kriging 模型进行目标函数的求解,确定模型的特征粒子,并且结合修正机制在该粒子附近,获取价值最大的新粒子,并将其加入样本库中,实现样本库更新,按照上述内容,不断进行样本库更新,当其满足最大更新次数后,得到最终输出目标函数结果,此时得的参数即为实现零碳工业园区综合能源规划的最佳参数,此方法称为最优方案。

## 2 测试分析

### 2.1 测试设计

为验证文中方法的应用效果,本文以某地区的氢储能工业园区综合能源系统作为测试对象,该园区作为综合性园区(具体见图2),园区规划产业用地比例低于42%,居住和公共服务用地比例低于20%,园区内的建筑包含厂房和住宅,其主要考虑500万kW·h的年度用电量,同时满足供暖需求,碳捕集比例为12%,规划目标为降低园区内碳排放,实现园区生命周期中的零碳目标。该系统中包含内部电网、天然气网,综合能源系统能够与外部电网和电网相连接,并且系统中接入本地光伏和风电。

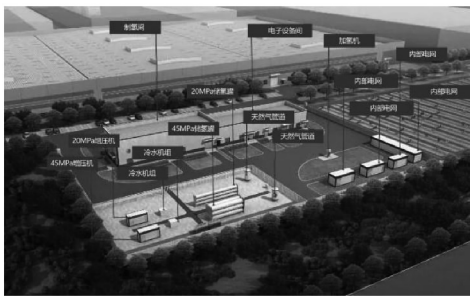


图2 氢储能工业园区示意图

## 2.2 聚类融合效果验证

### 2.2.1 均衡负载离差指标计算

文中方法在进行园区综合能源规划时,需综合能源系统中的多源异构数据进行融合聚类,以此实现能源系统中各类大数据的有效调用,保证规划方法的合理性。

因此,为验证文中方法的多源异构大数据聚类融合效果,采用均衡负载离差  $\Delta\varepsilon$  作为评价指标,该指标的取值在 0~1 之间,其值越大表示数据的聚类融合效果越差,该指标的计算公式为

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m [\delta_j - \hat{\delta}_j]^2}{m-1}} \quad (11)$$

式中,  $\delta_j$  和  $\hat{\delta}_j$  分别表示数据聚类前后的调用负载;  $m$  表示数据量。

### 2.2.2 均衡负载离差测试结果分析

依据上述公式计算文中方法在进行不同类别数据聚类时,随着数据量的逐渐增加,文中方法聚类后的  $\Delta\varepsilon$  结果,测试结果如表 1 所示。

表1 数据聚类融合均衡负载离差测试结果

数据量/条	不同数据类别的负载离差		
	3	6	9
150	0.084 4	0.091 4	0.091 1
300	0.076 9	0.090 7	0.093 4
450	0.079 3	0.092 7	0.092 8
600	0.088 6	0.090 1	0.091 5
750	0.090 7	0.093 4	0.090 9
900	0.091 1	0.091 9	0.094 4
1 050	0.092 7	0.089 8	0.092 1
1 200	0.081 9	0.087 7	0.093 7
1 350	0.091 6	0.090 1	0.090 9
1 500	0.093 8	0.089 4	0.091 1

对表 1 测试结果进行分析,当数据量条数为 600 时,第 3 类别数据的均衡负载离差为 0.088 6,第 6 类别数据的均衡负载离差为 0.090 1,第 3 类别数据的均衡负载离差为 0.091 5;数据量条数为 1 200 时,第 3 类别数据的均衡负载离差为 0.081 9,第 6 类别数据的均衡负载离差为 0.087 7,第 3 类别数据的均衡负载离差为 0.093 7;综合上表可知,在不同数据类别数量下,随着数据量的逐渐增加,采用文中方法进行数据融合聚类后,  $\Delta\varepsilon$  的结果均在 0.10 以下,其中最大值为 0.094 4。因此文中方法具备较好的应用效果,采用该方法对总能能源系统的运行数据进

行聚类后,能够更好地完成数据融合,保证数据的调用效果,为后续的规划目标的确定提供数据依据。

### 2.3 零碳工业园区综合能源规划效果指标设计

为验证文中方法的应用效果,文中采用文中方法进行该园区综合能源进行规划,为直观分析其规划效果,获取前 3 个规划输出结果,并采用综合能源耦合等值效率  $B_{PN}$  (用于描述设备的综合运行效率)、设备利用率  $B_S$  (用于描述设备的利用程度)以及年均购电波动  $\psi$  (用于描述供电的可靠性)作为测试指标,衡量各个方案规划效果,三个指标的取值在 0~100% 之间,其值越大表示应用效果越佳。

1)  $B_{PN}$  计算公式为

$$B_{PN} = \frac{\sum_{i=1}^K Q_i^{\text{out}}}{\sum_{i=1}^K Q_i^{\text{in}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中,  $Q_i^{\text{out}}$  和  $Q_i^{\text{in}}$  分别表示设备  $i$  的总体输出能量和总体输入能量;  $K$  表示设备投资总数量。

2)  $B_S$  计算公式为

$$B_S = \frac{\sum_{i=1}^K \bar{P}_i}{\sum_{i=1}^K \check{P}_i} \times 100\% \quad (13)$$

式中,  $\bar{P}_i$  和  $\check{P}_i$  分别表示设备  $i$  的平均输出功率和额定功率。

3)  $\psi$  计算公式为

$$\psi = \frac{1}{8\ 759} \sum_{t=2}^{8\ 760} (P_E(t) - P_E(t-1)) \quad (14)$$

式中,  $P_E(t-1)$  表示  $t-1$  时刻的购入电量。

依据上述 3 个公式计算文中方法进行综合能源规划后,获取 3 种最佳的规划方案结果,分别命名为方案 1、方案 2 和方案 3。

## 2.4 零碳工业园区综合能源规划效果分析

### 2.4.1 综合能源规划结果

根据 2.3 节计算各个方案中的  $B_{PN}$ 、 $B_S$  和  $\psi$  结果,如表 2 所示。

表2 综合能源规划结果

运行情景	方案	综合能源耦合等值效率/%	设备利用率/%	年均购电波动/ kW·h·h <sup>-1</sup>
供热季	1	82.46	67.85	1 103.45
	2	82.77	67.89	1 044.97
	3	87.22	77.69	923.44
供冷季	1	81.03	70.44	1 074.31
	2	81.14	71.12	1 005.85
	3	86.78	77.54	919.67

对表 2 测试结果进行分析后得出,采用文中方法进行综合能源规划后,方案 3 的规划结果最佳,其在两种运行情景

下,  $B_{PV}$  和  $B_S$  的结果最大值分别为 87.22% 和 77.69%,  $\psi$  的测试结果最小值为  $923.44 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{h}^{-1}$ , 该结果明显优于另外两种方案的规划结果。

#### 2.4.2 碳排放量计算结果

为进一步验证文中方法的应用效果, 在上述表 2 测试结果的基础上, 获取 3 种方案的碳排放量计算结果, 如图 3 所示。

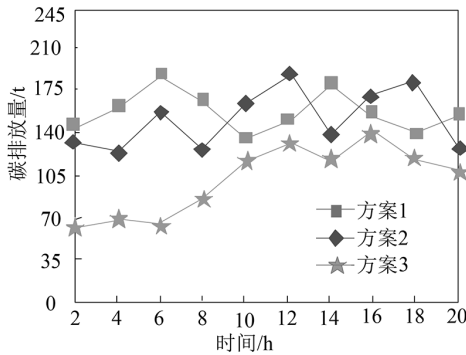


图 3 三种方案的碳排放量计算结果

对图 3 测试结果进行分析后得出: 时间为 10 h 时, 方案 1 下碳排放量为 140 t, 方案 2 下碳排放量为 168 t, 方案 3 下碳排放量为 121 t; 时间为 20 h 时, 方案 1 下碳排放量为 158 t, 方案 2 下碳排放量为 132 t, 方案 3 下碳排放量为 105 t; 上述结果表明, 规划方案中, 最佳的规划方案 3 可显著降低园区整体碳排放量, 规划结果显著优于另外两种规划方案, 因此, 该方法可结合园区的规划目标完成综合能源规划。

#### 2.4.3 运行成本测试结果

为验证文中方法的应用性, 获取文中方法规划后最佳规划结果方案的碳交易成本、火电运行成本、弃风惩罚成本、碳捕集运行成本结果, 并将该结果与园区规划前的运行成本进行对比, 测试结果如表 3 所示。

表 3 综合能源与规划前后运行成本测试结果

对比项	碳交易成本/	火电运行	弃风惩罚/	碳捕集运行	总运行
	万元	成本/万元	万元	成本/万元	
规划前	20.56	17.55	10.89	50.11	99.11
规划后	12.03	7.62	4.32	33.47	57.44

对表 3 测试结果进行分析后得出。规划前碳交易成本为 20.56 万元, 规划后碳交易成本减小为 12.03 万元; 规划前火电运行成本为 17.55 万元, 规划后碳交易成本减小为 7.62 万元; 综上可知, 园区在经过综合能源规划后, 园区的各项运行成本明显下降, 总体运行成本为 57.44 万元, 可降低园区的运行成本, 提升经济效益。

### 3 结束语

为实现工业园区综合能源的有效规划, 实现园区零碳排放, 并且保证综合能源系统运行的经济效益, 文中提出基于多源异构大数据的零碳园区综合能源规划方法。该

方法构建综合能源规划目标模型, 通过模型求解获取规划方案结果。对该方法的应用效果展开相关测试后得出: 其具备较好的应用效果, 能够满足工业园区综合能源系统的规划需求, 降低其运行成本, 并且实现零碳工业园区。

#### 参考文献

- [1] 李欣, 刘立, 黄婧琪, 等. 含耦合 P2G 和 CCS 的园区级综合能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化, 2023, 35(4):18-25.
- [2] 陈明健, 陈胜, 王异成, 等. 考虑氢能绿证的电-氢综合能源系统机会约束优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12):206-213.
- [3] 李娜, 王维, 杨家辉, 等. 基于需求侧博弈的区域综合能源服务商最优运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2):112-120.
- [4] 曾艾东, 邹宇航, 郝思鹏, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的园区工业用户综合需求响应策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(11):4352-4363.
- [5] 杨若浦, 刘佳, 曾平良, 等. 考虑多元异质源荷相关性的区域综合能源系统规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16):31-39.
- [6] 陶远超, 覃洪培, 万灿, 等. 基于概率预测的电-热综合能源系统灵活性聚合与优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21):67-78.
- [7] 李虹, 林兰心, 赵小军. 基于需求侧用户响应分析的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5):97-105.
- [8] TABAR V S, JIRDEHI M A, JORDEHI A R. A robust multi-objective joint scheduling of integrated electricity and gas grids considering high penetration of wind and solar units and flexible loads towards achieving a sustainable operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12):4613-4630.
- [9] MISHRA S, BORDIN C, WU Q, et al. Resilient expansion planning of virtual power plant with an integrated energy system considering reliability criteria of lines and towers [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(10):13726-13751.
- [10] 宋晓华, 汪鹏, 牛东晓. 基于多源异构数据融合的短期电力负荷预测[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9):59-65.
- [11] 徐澄莹, 朱旭, 窦真兰, 等. 基于数据驱动鲁棒优化的用户侧综合能源舱低碳规划[J]. 电力建设, 2022, 43(12):27-36.
- [12] 赵莎莎, 朱雅魁, 王悦. 基于大数据分析的综合能源系统负荷特性聚类分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2):10-15, 52.
- [13] 潘超, 刘继哲, 孙勇, 等. 考虑氢储一体化协同的综合能源系统低碳优化[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12):118-126.
- [14] 范文明. 基于多源异构数据的高速列车状态智能检测系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4):128-131.
- [15] 邱迪, 刘东, 高飞, 等. 基于离散混合自动机的园区综合能源系统多模式建模与日前优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1):135-147.

作者简介: 万智赞(1992—), 男, 工学学士, 工程师, 研究方向: 配电网设计、新能源技术应用。