

工业园区综合能源优化模型研究

郝 阳

宁波胜克换向器有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年6月18日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月23日

摘 要

综合能源系统作为未来实现高比例可再生能源并网的关键平台和载体, 正受到全球范围内的高度重视与快速推进。本文以综合能源系统的运行优化为核心研究内容, 针对东北某大型工业园存在的能源结构单一与浪费问题, 在其老旧园区基础上设计并构建了园区综合能源系统, 建立了能源枢纽数学模型, 提出兼顾经济性与能效性的多目标优化运行策略。在满足园区用能需求的前提下, 该策略有效降低了运维成本与二氧化碳排放量, 并显著提升了能源利用效率。通过进一步引入阶梯碳价、奖惩因子及需求响应机制, 构建综合能源系统运行优化模型, 在多源数据融合与实时调度基础上, 实现园区碳排放的进一步削减, 为推动园区“双碳”目标的实现提供了理论支撑与技术路径。

关键词

综合能源, 能源枢纽, 需求响应策略, 优化模型

An Optimization Modeling Study of the Integrated Energy Systems in Industrial Parks

Yang Hao

Ningbo Sunico Commutator Co. Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Jun. 18th, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

As a key platform for achieving high consumption of renewable energy in the future, integrated energy systems (IES) have attracted increasing global attention and are being rapidly developed. This study focuses on the operational optimization of an IES as the core research content. Aiming at the problem of single energy structure and waste in a large industrial park in Northeast China, the park

integrated energy system (PIES) is designed and constructed based on its old infrastructure. The mathematical model of the energy hub is established, and a multi-objective optimization operation strategy that takes into account economic factors and energy efficiency is proposed. The simulation results show that, on the premise of meeting the energy demand of the park, this proposed approach significantly reduces CO₂ emissions and operational costs while improving renewable energy utilization. By further introducing ladder carbon pricing, reward-and-punishment factors, and demand response strategies, an operation optimization model for IES is constructed. Based on multi-source data fusion and real-time scheduling, further reductions in carbon emissions within the park are realized, providing theoretical support and technical pathways for promoting the achievement of “dual-carbon” goals in the park.

Keywords

Integrated Energy, Energy Hub, Demand Response Strategies, Optimization Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了提高风能、水能、太阳能等可再生能源的利用效率,积极应对环境污染与气候变化挑战,推动人类社会迈向可持续发展,构建低碳、清洁、高效的综合能源管理体系已成为未来能源转型的必由之路。在此背景下,综合能源系统(Integrated Energy System, IES)正逐渐成为能源结构升级和转型的重要方向。IES 技术不仅可以融入风能、太阳能等清洁能源,还可整合冷、热、电、气等多种类型能源子系统,并通过各类耦合设备建立系统间的能量耦合关系,从而打破了传统供能系统以单一能源形式为主的规划与运行模式,不仅满足多样化负荷需求[1][2],同时具有调度灵活性、系统协同性和能源多样性等优势,显著提升了系统整体运行的经济性和能源利用效率[3]-[5],减少能源浪费,推动能源技术可持续发展[6]。

国内外针对 IES 技术已有相关的研究成果。滕云等[7]建立了基于电-热耦合系统与联合储能的多能源自治优化运行模型,通过仿真验证显著提升了风光等可再生能源的消纳能力;林文智等[8]提出了考虑需求响应不确定性的多园区协同优化调度策略,有效降低了系统运行成本并提高了运行可靠性;Lu 等[9]在构建的动态经济调度机会约束模型中引入了概率性可靠性指标,从而解决了微电网中可再生能源出力不确定的问题;汤木易等[10]则建立了分级电-热综合能源系统的双层协同优化模型,促进了不同层级系统间的能量互补与效益提升。从应用规模划分,IES 可分为跨区级、区域级与园区级,其中园区综合能源系统(Park Integrated Energy System, PIES)作为 IES 的典型落地场景[11],在实际工程中具有广泛应用前景。大型园区由于其用能负荷大、耦合特性复杂及用能峰谷差显著等特征,对系统的运行调度提出了更高要求[12]。张世翔等[13]从运行经济性、可再生能源利用率以及节能减排角度出发,对园区多能源系统的综合评价方法进行研究;陈彦奇等[14]在考虑碳交易成本的基础上,提出多阶段规划模型,分析碳交易机制对系统运行方式的影响;谭佳等[15]则以园区为对象,构建了以最小化总成本为目标的双层优化调度模型,得到了系统设备的最优运行方案,验证了低成本运行的可行性。

尽管 IES 技术在提升可再生能源利用效率、促进多能互补和实现能源系统低碳化方面展现出显著优势,但在实际工程应用中仍面临多目标优化运行调度等问题。本文将以北某大型工业园区的实际运行需求为研究对象,设计构建了一套面向可再生能源友好接入的 PIES 系统架构。该系统集成风能、太阳能

等清洁能源，促进多能源形式的协同利用，突破了传统供能系统单一能源模式的限制。同时，结合阶梯碳价机制、奖惩因子与需求响应技术，实现负荷的削峰填谷，缓解高峰时段电网压力，提升系统运行的稳定性和能源利用效率，有效应对园区存在的用能结构单一及能源浪费问题。仿真分析结果进一步验证了所提出运行调度策略在经济性和低碳性方面的优势，为实现园区绿色低碳发展提供了技术支撑。

2. 综合能源系统模型

该工业园区位于中国东北某市，具备一定的光伏发电潜力和风力资源。园区以制造业为主，能源消费结构较为单一，且生产结构高度耦合，主要依赖外购电力与蒸汽，两者合计约占总能源消耗的 99%以上，且整体能源需求量较大，为 PIES 的引入与应用提供了良好的基础条件。与传统能源系统相似，PIES 同样涵盖冷、热、电、气等多类能源形式。然而，PIES 通过多种能源转换实现电力、热力、制冷与天然气等能源间的耦合与转换，以电为主导能源，促进各类能源系统之间的协调运行、互联互通与互补协同，突破了传统能源系统“孤立运行、分散规划”的局限。因此，其建模重点在于终端能源系统中的能量转换与储能过程的精确描述与优化[16]。

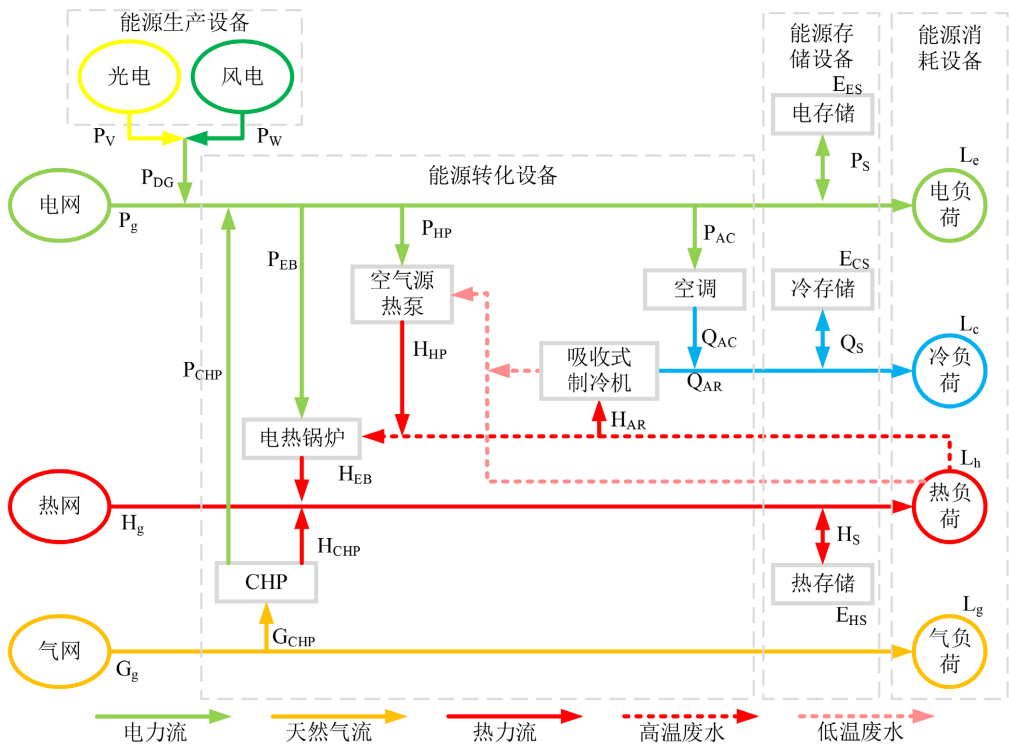


Figure 1. System structure diagram of IES in the park
图 1. 园区综合能源系统结构示意图

基于园区实际供能关系所构建的 PIES，其运行设备可分为四大类：能源生产设备、能量转换设备、能量储存设备以及能源消耗设备[17]。其中，能源生产设备以电网与蒸汽热网为主干支撑，补充天然气供应网络，并引入风力发电与光伏发电等分布式可再生能源；能量转化设备包括热电联产机组(Combined Heating and Power, CHP)、吸收式制冷机(Absorption Refrigerator, AR)、电热锅炉(Electric Boiler, EB)以及空气源热泵(Air Source Heat Pump, ASHP)等；能量储存设备采用铅酸电池实现电能存储，利用导热油介质进行热能存储，采用水作为冷储能介质；能源消耗设备涵盖园区内各类用能终端负荷设备，其能源系

统结构如图 1 所示。

2.1. 能源转化设备模型

热电联产(Combined Heat and Power, CHP)机组作为综合能源系统核心的能源转化机组[18], 其电热耦合特性的数学模型如下:

$$\begin{cases} H_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP}}^h V_{\text{gas}} Q_{\text{gas}} / 3600 \\ P_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP}}^e V_{\text{gas}} Q_{\text{gas}} / 3600 \\ H_{\text{CHP}} \leq H_{\text{CHP}}^{\max} \\ P_{\text{CHP}} \geq k_{\text{down}} H_{\text{CHP}} \\ P_{\text{CHP}} \leq k_{\text{up}} H_{\text{CHP}} + P_{\text{CHP}}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{CHP} 、 H_{CHP} 分别是 CHP 的发电功率与制热功率; $H_{\text{CHP}}^{\max}$ 为 CHP 的制热最大功率; $P_{\text{CHP}}^{\max}$ 为 CHP 的发电最大功率; η_{CHP}^e 、 η_{CHP}^h 分别是 CHP 的电效率、热效率; V_{gas} 为消耗的天然气体积, m^3 ; Q_{gas} 为天然气的热值, 一般取 $36000 \sim 40000 \text{ kJ/m}^3$; k_{up} 、 k_{down} 分别为 CHP 电热耦合区间的上限斜率与下限区间。

2.2. 能源存储设备模型

储能设备运行原理类似, 其数学模型如下式:

$$\begin{cases} E_{\text{is}}^t = (1 - \mu_i) E_{\text{is}}^{t-1} + \eta_{\text{in}}^i P_{\text{in}}^i(t) - \frac{P_{\text{out}}^i(t)}{\eta_{\text{out}}^i} \\ 0 \leq P_{\text{in}}^i(t) \leq U_{\text{in}}^i P_{\text{in,max}}^i \\ 0 \leq P_{\text{out}}^i(t) \leq U_{\text{out}}^i P_{\text{out,max}}^i \\ E_{\text{min}}^{\text{is}} \leq E_{\text{is}}^t \leq E_{\text{max}}^{\text{is}} \\ 0 \leq U_{\text{in}}^i + U_{\text{out}}^i \leq 1 \\ U_{\text{in}}^i, U_{\text{out}}^i \in \{0,1\} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i 分别表示电、热、冷三类储能设备; E_{is}^t 为 i 类储能设备在 t 时刻的剩余能量; μ_i 为 i 类储能设备的自损耗系数; η_{in}^i 、 η_{out}^i 分别为 i 类储能设备的充、放能效率; $P_{\text{in}}^i(t)$ 、 $P_{\text{out}}^i(t)$ 分别为 i 类储能设备的充、放能功率; $P_{\text{in,max}}^i$ 、 $P_{\text{out,max}}^i$ 为 i 类储能设备的充、放能功率上限值; $E_{\text{max}}^{\text{is}}$ 、 $E_{\text{min}}^{\text{is}}$ 为 i 类储能设备存储能量的上、下限; U_{in}^i 、 U_{out}^i 为 i 类储能设备的充、放能状态标识位。

另外, 储热和储冷系统需要依赖鼓风机和水泵与外界进行交互, 鼓风机与水泵的耗电功率表示如下:

$$\begin{cases} P_{\text{HS}}^t = \xi_{\text{HS}} P_{\text{out}}^h(t) \\ P_{\text{CS}}^t = \xi_{\text{CS}} P_{\text{out}}^c(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_{HS}^t 与 P_{CS}^t 分别为储热与储冷的鼓风机与水泵的耗电功率; ξ_{HS} 与 ξ_{CS} 分别为储热与储冷的单位放能功率对应的鼓风机与水泵耗电系数。

2.3. 能量枢纽平衡模型

在现有综合能源系统建模理论中, 能源枢纽模型因其结构清晰、通用性强, 被学术界广泛采用并持续发展。该模型的核心思想在于通过数学函数关系描述输入与输出之间的耦合转换过程[1]。其基本表示形式为: $\mathbf{L} = \mathbf{C}\mathbf{P}$, 其中 $\mathbf{P}$ 代表能量枢纽的输入载体矢量; $\mathbf{L}$ 代表能量枢纽的输出载体矢量; $\mathbf{C}$ 是耦合矩阵。PIES 内能源转化设备的输入输出矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} P_{\text{CHP}} \\ H_{\text{CHP}} \\ H_{\text{EB}} \\ H_{\text{HP}} \\ Q_{\text{AR}} \\ Q_{\text{AC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{\text{CHP}}^e V_{\text{gas}} / 3600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_{\text{CHP}}^h V_{\text{gas}} / 3600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{\text{EB}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{COP}_{\text{HP}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{COP}_{\text{AR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{COP}_{\text{AC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{gas}} \\ P_{\text{EB}} \\ P_{\text{HP}} \\ H_{\text{AR}} \\ P_{\text{AC}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， H_{EB} 是电热锅炉的发热功率； H_{HP} 为空气源热泵输出的制热量； Q_{AR} 为吸收式制冷机输出的制冷量； Q_{AC} 是空调的制冷功率； η_{EB} 是电热锅炉的热效率； COP_{HP} 为空气源热泵的制热性能系数； COP_{AR} 为吸收式制冷机的制冷系数； COP_{AC} 是空调的制冷的性能系数； P_{EB} 是电热锅炉耗电功率； P_{HP} 为提供给空气源热泵的电量； H_{AR} 为提供给吸收式制冷机的热量； P_{AC} 是提供给空调的电量。

2.4. 负荷侧需求响应模型

需求响应在不改变用户的实际能源需求与用户的舒适度的情况下，有效地转移负荷峰谷，提升能量枢纽的供需能力。本文选择建立在峰谷平电价基础上通过弹性系数矩阵耦合，促使园区用电负荷由尖峰价位到低谷价位转移。其公式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta L_1^e \\ \Delta L_1^e \\ \vdots \\ \Delta L_T^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_T \end{bmatrix} \mathbf{D}_e \begin{bmatrix} \Delta \omega_1^e / \omega_1^e \\ \Delta \omega_2^e / \omega_2^e \\ \vdots \\ \Delta \omega_T^e / \omega_T^e \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， ΔL_t^e 是 t 时刻园区电负荷的功率变化量； P_t 是 t 时刻园区电负荷功率； $\mathbf{D}_e$ 是电价弹性系数矩阵； ω_t^e 是 t 时电价； $\Delta \omega_t^e$ 是 t 时电价变化量。其中，弹性电价系数矩阵如表 1 所示。

Table 1. Elastic electricity price coefficient matrix
表 1. 弹性电价系数矩阵

时段	尖	峰	平	谷
尖	-0.15	0.02	0.05	0.03
峰	0.02	-0.15	0.01	0.04
平	0.05	0.01	-0.15	0.02
谷	0.03	0.04	0.02	-0.15

2.5. 奖罚因子碳交易机制

传统交易定价方式通常采用阶梯式碳价机制，计算公式如(6)所示：

$$C_{\text{CO}_2} = c \begin{cases} |G_c| & |G_c| < g \\ (1+\alpha)|G_c| & g < |G_c| < 1.5g \\ (1+2\alpha)|G_c| & 1.5g < |G_c| < 5g \\ (1+3\alpha)|G_c| & 5g < |G_c| \end{cases} \quad (6)$$

式中， C_{CO_2} 阶梯碳交易价格； c 为碳交易基本价格； G_c 为交易的碳排放配额； α 为价格增长率； g 为碳配额区间长度。

为了更有效地约束 IES 的碳排放，并打破只提升超出低档部分的碳交易模式，本文提出一种创新的定价策略，设置奖惩因子，其碳交易价格要求如表 2 所示。

Table 2. Ladder carbon transaction cost
表 2. 阶梯碳交易成本

梯级	阶梯碳交易价格	碳排放约束
1	$-cG_{\max} - c(1+\gamma)(G_{\text{all}} - G_{\max})$	$G_C \leq G_{\text{all}} - G_{\max}$
2	$-cG_C$	$G_{\text{all}} - G_{\max} \leq G_C \leq G_{\text{all}}$
3	$c(G_C - G_{\text{all}})$	$G_{\text{all}} \leq G_C \leq G_{\text{all}} + G_{\max}$
4	$cG_{\max} + c(1+\gamma)(G_C - G_{\text{all}} - G_{\max})$	$G_{\text{all}} + G_{\max} \leq G_C \leq G_{\text{all}} + 2G_{\max}$
5	$cG_{\max} + c(1+\gamma)(G_C - G_{\text{all}} - G_{\max}) + c(1+2\gamma)(G_C - G_{\text{all}} - 2G_{\max})$	$G_{\text{all}} + 2G_{\max} \leq G_C \leq G_{\text{all}} + 3G_{\max}$

注： G_{all} 为 IES 碳排放配额； $G_{\max}$ 为允许超额极限值； c 为碳交易基本价格； γ 为奖惩因子对应价格增长率。

2.6. 约束条件

电能平衡约束满足如下关系，

$$\begin{cases} P_{\text{grid}} + P_{\text{CHP}} + P_{\text{DG}} + P_{\text{S}} = P_{\text{HP}} + P_{\text{AC}} + P_{\text{EB}} + P_{\text{HS}} + P_{\text{CS}} + L_{\text{e}} \\ P_{\text{DG}} = P_{\text{w}} + P_{\text{PV}} \\ P_{\text{S}} = P_{\text{out}}^{\text{e}} - P_{\text{in}}^{\text{e}} \end{cases} \quad (7)$$

式中， P_{grid} 为电网购电功率； P_{CHP} 为 CHP 系统发电功率； P_{DG} 为新能源发电功率； P_{S} 为储电系统充放电功率和； P_{HP} 为空气源热泵耗电功率； P_{AC} 为空调耗电功率； P_{EB} 为电热锅炉耗电功率； P_{HS} 和 P_{CS} 分别为储热和储冷系统鼓风机与水泵的耗电功率； P_{PV} 和 P_{w} 分别为新能源光伏和风力发电功率； P_{in}^{e} 、 $P_{\text{out}}^{\text{e}}$ 分别为储电系统充、放电功率； L_{e} 为园区生产或生活消耗的电功率。

热能平衡约束满足如下关系，

$$\begin{cases} H_{\text{grid}} + H_{\text{EB}} + H_{\text{CHP}} + H_{\text{S}} = H_{\text{YH}} + L_{\text{h}} \\ H_{\text{S}} = P_{\text{out}}^{\text{h}} - P_{\text{in}}^{\text{h}} \end{cases} \quad (8)$$

式中， H_{grid} 为热网购热功率； H_{CHP} 为 CHP 系统发热功率； H_{EB} 为电热锅炉发热功率； H_{S} 为储热系统充放热功率代数； P_{in}^{h} 、 $P_{\text{out}}^{\text{h}}$ 分别为储热系统充、放热功率； L_{h} 为园区生产或生活消耗的热功率； H_{YH} 为废水的余热功率总和。

天然气平衡约束满足如下关系，

$$G_{\text{grid}} = G_{\text{CHP}} + L_{\text{g}} \quad (9)$$

式中， G_{grid} 为天然气网购气功率； G_{CHP} 为 CHP 系统消耗的天然气功率； L_{g} 为园区生产或生活消耗的天然气功率。

冷能平衡约束满足如下关系，

$$\begin{cases} Q_{\text{AR}} + Q_{\text{AC}} + Q_{\text{S}} = L_{\text{c}} \\ Q_{\text{S}} = P_{\text{out}}^{\text{c}} + P_{\text{in}}^{\text{c}} \end{cases} \quad (10)$$

式中， Q_{AR} 为吸收式制冷机的制冷功率； Q_{AC} 为中央空调制冷功率； Q_{S} 为储冷系统充放冷功率代数； P_{in}^{c} 、 $P_{\text{out}}^{\text{c}}$ 分别为储冷系统充、放冷功率； L_{c} 为园区生产或生活消耗的冷功率。

2.7. 目标函数

建立的综合能源系统以经济性成本最低进行目标优化，其中经济成本又包含一次能源成本与综合能源系统日常维护成本，同时也需考虑弃用清洁能源的惩罚成本以及环境成本。

1) 能源成本。模型中能源成本主要来源于电力系统中从电网购电的费用、热力系统中高温蒸汽的采购成本, 以及天然气系统中天然气的购买支出, 优化运行的目标函数为,

$$C_D^i = \omega_i I_{\text{grid}}^i \quad (11)$$

$$C_D = \sum C_D^i \quad (12)$$

式中, i 表示电、热、气三类能源; I_{grid} 为电力、热力、天然气采购功率; ω_i 分别为三种能源的单价; C_D 为一次能源消费金额代数和。

2) 维护成本。综合能源维护成本主要考虑能源设备(CHP 系统、吸收式制冷机、电热锅炉、空气源热泵、空调与储能系统)日常工作维护费用, 其目标函数为:

$$C_J^n = \psi^n P_n \quad (13)$$

$$C_J = \sum C_J^n \quad (14)$$

式中, n 表示不同能源设备; ψ^n 为不同能源设备维护单价; P_n 为不同能源设备使用功率; C_J 为维护成本金额代数和。

根据公式(12)与(14)相加, 可获得目标函数为:

$$C_Z = C_D + C_J \quad (15)$$

式中, C_Z 为综合能源系统消费总和。

3) 惩罚成本。园区使用新能源发电, 为提高清洁能源利用率, 加入弃用清洁能源成本 C_P , 具体计算为:

$$C_P = \chi (P_{PV}^S - P_{PV} + P_W^S - P_W) \quad (16)$$

式中, χ 为弃用清洁能源惩罚系数; P_{PV} 、 P_W 分别为新能源光伏、风力发电系统需求的电功率; P_{PV}^S 、 P_W^S 为光伏系统、风力发电系统最大发电功率。

4) 环境成本。环境成本在 PIES 低碳调度时需要考虑各设备的碳交易配额、碳排放量和允许的超额量, 并根据表 2 计算碳交易成本与碳排放成本。考虑各设备的碳交易成本 C_{C1} , 具体为:

$$C_{C1} = C_{CO_2} \left(\lim \bar{S}_{PIES} - \sum_i g_i P_i \right) \quad (17)$$

式中, C_{CO_2} 为阶梯碳交易价格; $\lim \bar{S}_{PIES}$ 为 PIES 碳排放配额极限, 其取值范围在 BP 神经网络预测碳排放配额进行超额量配置; g_i 为各设备的配额分配系数; P_i 为各设备消耗功率。

PIES 与外界能源交互主要是向电网、热网与气网购买能源, 其造成了碳排放成本 C_{C2} , 具体为:

$$C_{C2} = C_{CO_2} (\varepsilon_e P_{\text{grid}} + \varepsilon_h H_{\text{grid}} + \varepsilon_g G_{\text{grid}}) \quad (18)$$

式中, ε_e 、 ε_h 、 ε_g 分别为电力、热力、天然气的标准煤系数。

根据公式(17)和(18)相加即为环境成本 C_C :

$$C_C = C_{C1} + C_{C2} \quad (19)$$

根据公式(15)、(16)和(19), 可获得目标函数为:

$$C_T = [\tau_1 (C_Z + C_P) + \tau_2 C_C \gamma x_{\text{year}} /] 365 \quad (20)$$

式中, τ_1 、 τ_2 分别为经济目标和低碳目标在总目标中的占比, 满足 $\tau_1 + \tau_2 = 1$; x_{year} 为年平均碳排放配额量。

3. 仿真结果与分析

3.1. 基本参数

仿真过程中所需的碳交易运行参数和电网电价参数如下表 3 和表 4 所列，其中园区采用两部制电价执行方式，分尖、峰、平、谷四个电价区间。

Table 3. Carbon trading operational parameters

表 3. 碳交易运行参数

参数/单位	参数值	参数/单位	参数值
奖惩因子	0.15	惩罚系数/(元/kWh)	0.36
碳交易基本价格/(元/kgce)	0.064	电力标准煤系数/(kgce/kWh)	0.1229
天然气标准煤系数/(kgce/m ³)	1.21	蒸汽标准煤系数/(kgce/t)	128.6
经济目标占比	0.5	低碳目标占比	0.5

Table 4. Time-of-use price

表 4. 电网分时电价

时段	峰谷类型	电价
00:00~05:00	谷	0.296
05:00~07:00	平	0.559
07:00~12:00	峰	0.821
12:00~17:00	平	0.559
17:00~19:00	尖	1.018
19:00~21:00	峰	0.821
21:00~22:00	平	0.558
22:00~24:00	谷	0.296

3.2. 负荷分析

工业园区在典型日的能源出力情况如图 2 所示。从电功率平衡图 2(a)可见，园区综合能源系统的用电需求主要由风力发电系统与电网购电共同满足，CHP (热电联产)机组提供的电力居于其次。除满足电力负荷外，系统还需为电热锅炉供能，而电热锅炉通常具有较大的电耗。由于 CHP 机组采用“以热定电”的运行策略，其电功率输出受到热负荷需求与电热锅炉运行状态的双重制约。在电价处于低谷时段，为降低运行成本，系统优先提高电热锅炉的运行功率以覆盖热负荷需求，相应地减少 CHP 机组的出力；而在电价处于高峰时段且园区热负荷增加时，为实现电热协同供应，CHP 机组需同时提供电能和热能，因此维持较高的出力水平以满足双重负载。此外，从出力变化趋势可以看出，系统在不同电价时段动态调整各类设备的运行策略，实现了可再生能源优先利用、电价敏感响应与冷热电协同的有效统一，从而提升了系统整体运行的经济性与能效水平。

图 2(b)显示了园区的热功率平衡图。园区热力系统的主要热源为电热锅炉与 CHP 系统，外部热力网的购热量为零，表明园区热力系统实现了独立运行(即孤岛模式)。在热负荷方面，除常规供热外，吸收式制冷机是主要的热能消耗设备之一。制冷机利用工业生产过程中余热进行驱动，从而实现以热制冷，不仅提高了能源利用效率，也有效降低了系统运行成本，体现了冷热联供的协同优化效应。由图 2(c)的冷功率平衡图可知，园区的冷负荷主要由溴化锂吸收式制冷机满足。在冷负荷较小时，系统优先启用吸收式制冷机制冷，以充分利用余热资源、降低电力消耗，实现低碳与节能的目标。这种冷负荷响应策略有效增强了能源系统的经济性与柔性调控能力。图 2(d)显示了园区的天然气功率平衡图。园区的天然气供应路径较为单一，全部由上级天然气管网供给。在使用端，天然气主要供 CHP 机组运行使用，用于热电

联产过程的燃料输入。由于天然气仅用于 CHP 系统，其采购量与消耗量基本相等，体现出系统内部天然气资源流动路径的高度集中性。这种结构在简化调度模型的同时，也提示优化策略需关注 CHP 机组的运行效率与负荷匹配问题，以进一步提升综合能源系统的整体性能。

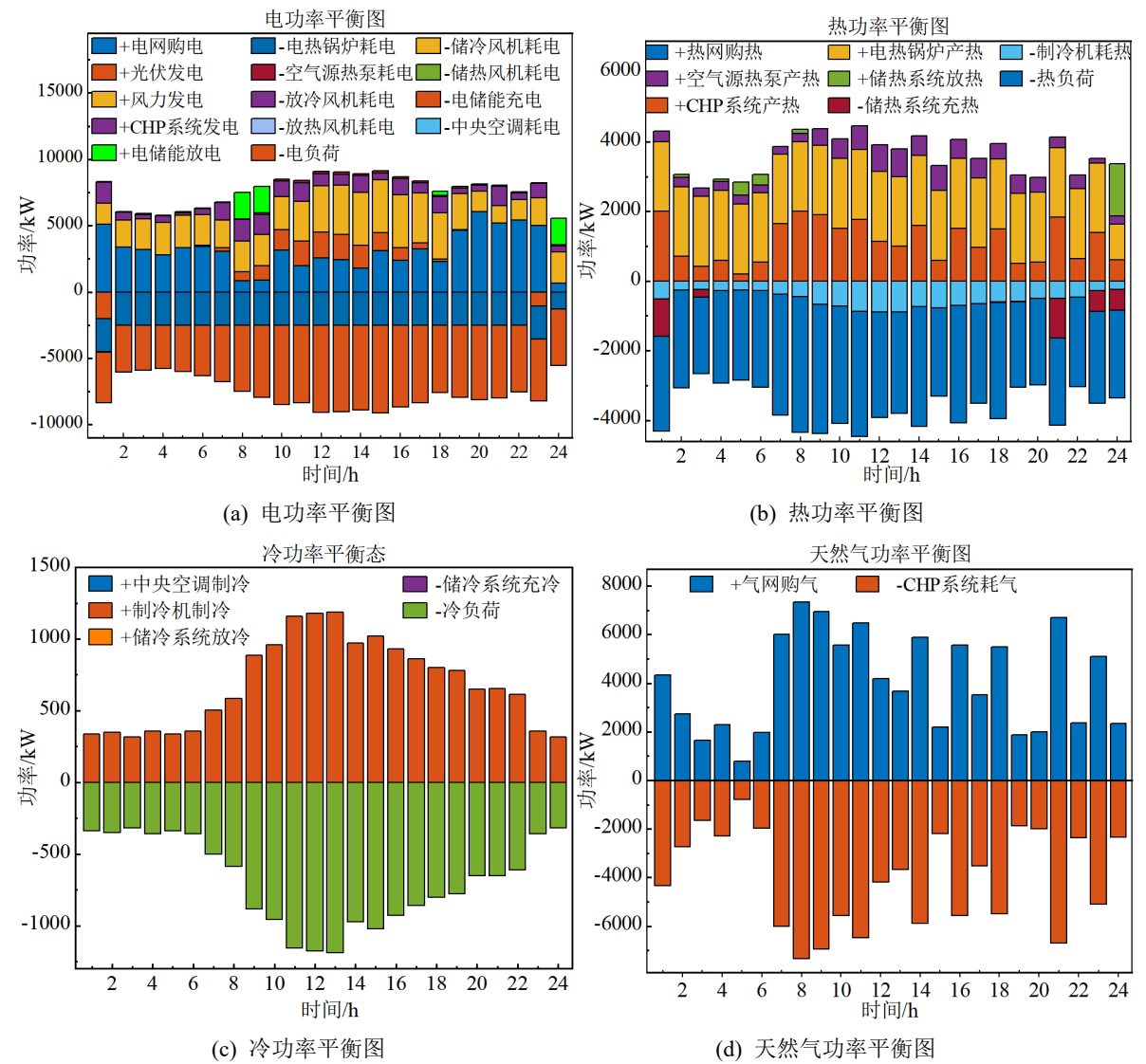


Figure 2. Cold-heat-electric-gas power balance diagram in typical day
图 2. 典型日冷 - 热 - 电 - 气功率平衡图

3.3. 运行成本分析

鉴于园区综合能源系统的运行分析涵盖了典型日与全年两个时间尺度，本文在运行成本评估中亦采用相应的划分方法，分别开展典型日运行成本分析与全年运行经济性评估，以全面反映系统在不同时间尺度下的运行特性与优化效果。

典型日的碳排放量与运行成本如图 3 所示。图中显示，在典型日的能源运行平衡情况下，未采用综合能源系统(PIES)的园区，其碳排放量和运行成本均显著高于引入 PIES 的园区。无论是否纳入碳交易机制与需求响应策略，PIES 均表现出明显的减排与降本优势。这充分表明，PIES 不仅能够有效降低园区的碳排

放，有助于实现国家“双碳”目标，还能显著优化能源结构，提高能源利用效率，从而降低整体运行成本，彰显了综合能源系统在推动绿色可持续发展中的关键作用。表 5 比较了在考虑与未考虑碳交易及需求响应两种情景下，园区综合能源系统(PIES)的碳排放量及运行成本。结果显示，纳入碳交易与需求响应机制的 PIES 在碳排放量方面较未纳入机制的系统降低了 7.37%，体现了显著的减排效果；然而，其运行成本相较于未纳入机制的系统增加了 5.8%，反映出在实现碳减排目标的同时，系统运行成本存在一定程度的上升。

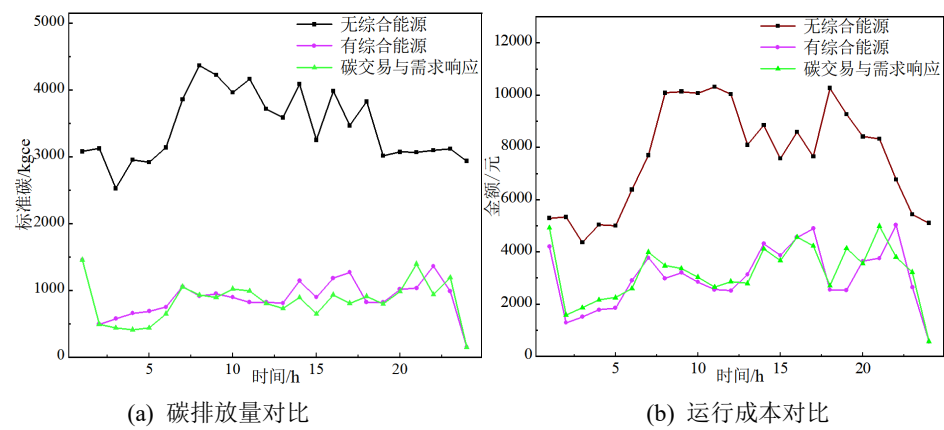


Figure 3. Carbon emissions vs. operating costs chart in typical day
图 3. 典型日碳排放量与运行成本对比图

Table 5. Carbon emissions vs. operating costs table in typical day
表 5. 典型日碳排放量与运行成本对比表

场景	碳排放量/tce	运行成本/元
有碳交易与需求响应	19.94	77157.92
无碳交易与需求响应	21.53	72909.28

全年的碳排放量与运行成本如图 4 所示。图中显示，与典型日分析结果一致，未采用 PIES 的园区在碳排放量和运行成本方面均明显高于采用 PIES 的园区，进一步印证了 PIES 在提升能源系统性能方面的显著优势。此外，园区的碳排放量和运行成本在春季和冬季明显高于夏季和秋季，尤其是冬季，主要归因于低温导致热能需求大幅增加。图 4(a)同时也表明 PIES 在碳排放量较高的季节展现出更为显著的减排效果。

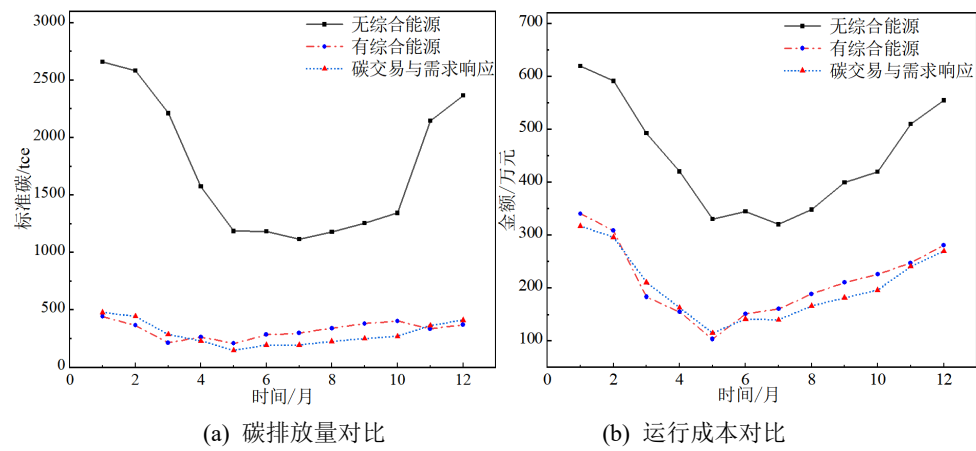


Figure 4. Carbon emissions vs. operating costs chart in the year
图 4. 全年碳排放量与运行成本对比图

表 6 对比了有无碳交易与需求响应时，园区的碳排放量及运行成本。数据显示，全年尺度下，考虑碳交易与需求响应机制的 PIES 系统，其碳排放量较未考虑相关机制的系统降低了 10.36%，减排效果显著；而在运行成本方面，与典型日情况不同，纳入碳交易与需求响应的系统运行成本较未纳入系统降低了 4.62%。这一结果表明，随着运行时间的延长，考虑碳交易和需求响应的 PIES 在实现碳减排的同时，还能有效降低运行成本，体现出其在长期运行中的综合优势。

Table 6. Carbon emissions vs. operating costs table in the year
表 6. 全年碳排放量与运行成本对比表

场景	碳排放量/tce	运行成本/万元
有碳交易与需求响应	3487.18	2435.90
无碳交易与需求响应	3890.06	2554.00

4. 结论

本文针对东北某工业园区的具体能源问题，构建了多能互补的 PIES 系统模型，以经济性、低碳性及用户用能舒适度为优化目标，开展多目标运行优化研究。研究表明，首先通过引入光伏、风力等分布式新能源发电系统，降低了园区对传统能源的依赖；同时，增加能源存储设备促进了清洁能源的高效消纳，实现了削峰填谷，缩小峰谷差，显著提升了系统的经济运行性能。其次基于 PIES 能量平衡模型，结合经济性与低碳性构建多属性评价指标体系，仿真结果显示，与当前园区运行状况相比，PIES 优化管理不仅显著减少了园区碳排放量，还大幅度降低了运行成本，实现了能源的清洁高效利用和碳排放的有效减排。最后，模型进一步引入碳交易与需求响应机制，结合阶梯碳价、奖惩因子及需求响应策略，有效引导系统实现碳交易权的低碳高效运行。仿真表明，相较于未纳入碳交易与需求响应机制的原始 PIES，考虑相关机制后，全年碳排放量降低了 10.36%，运行成本下降了 4.62%，进一步验证了该优化策略在促进绿色低碳发展与提升经济效益方面的显著成效。

参考文献

[1] 张伊宁. 考虑需求响应的能源互联网优化运行研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[2] 姚翼鹏. 考虑源荷不确定性的综合能源系统综合评价指标优化运行研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.

[3] 刘自发, 张子腾. 考虑多主体博弈的配电网源网荷储协同规划[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5046-5058.

[4] 高章鹏. 面向园区微网的综合能源系统优化配置与运行研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2019.

[5] 杜云飞. 区域能源互联网多能互补及能量路由优化策略研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[6] DOE, USA (2003) “Grid 2030”: A National Vision for Electricity’s Second 100 Years. United States Department of Energy, Office of Electric Transmission and Distribution, 17-39.

[7] 滕云, 孙鹏, 罗桓桓, 等. 计及电热混合储能的多源微网自治优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5316-5324+5578.

[8] 林文智. 考虑需求响应不确定性的多园区综合能源系统分布式协同优化调度[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.

[9] Lu, X. and Wang, J. (2017) A Game Changer: Electrifying Remote Communities by Using Isolated Microgrids. *IEEE Electrification Magazine*, 5, 56-63. <https://doi.org/10.1109/mele.2017.2685958>

[10] 汤木易. 考虑多利益主体的电热综合能源系统协同运行研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[11] Mendes, G., Ioakimidis, C. and Ferrão, P. (2011) On the Planning and Analysis of Integrated Community Energy Systems: A Review and Survey of Available Tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4836-4854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.067>

-
- [12] Bagherian, M.A., Mehranzamir, K., Pour, A.B., Rezaia, S., Taghavi, E., Nabipour-Afrouzi, H., *et al.* (2021) Classification and Analysis of Optimization Techniques for Integrated Energy Systems Utilizing Renewable Energy Sources: A Review for CHP and CCHP Systems. *Processes*, **9**, Article 339. <https://doi.org/10.3390/pr9020339>
 - [13] 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.
 - [14] 陈彦奇. 园区综合能源系统规划及运行优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2023.
 - [15] 谭佳. 面向需求响应的园区综合能源系统分析与优化配置[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2023.
 - [16] 林紫菡. 电-气互联综合能源系统低碳经济运行与优化配置[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
 - [17] 邓杰, 姜飞, 王文烨, 等. 考虑动态能效模型的园区综合能源系统梯级优化运行[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1027-1039.
 - [18] 方绍凤, 周任军, 许福鹿, 等. 考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 50-57.