新型储能技术在可再生能源系统中的应用专刊

计及需求响应与碳交易的高原数据中心复合式压缩空气储能系统协同优化策略

张兴业，陈晓弢，李晓康，朱昱豪，海　昕，梅生伟
（青海大学能源与电气工程学院，青海 西宁 810016）

摘 要：针对高原地区数据中心柴油发电机备用成本高、碳排放量大及新能源消纳压力突出等问题，本研究提出一种计及综合需求响应与阶梯式碳交易的复合式压缩空气储能综合能源系统协同优化调度策略。首先，以满足数据中心多能流供能需求为目标，构建以压缩空气储能为能量枢纽的综合能源系统，实现压缩热回收与多能协同利用。其次，引入可转移、可替代和可削减三类负荷响应机制，并建立阶梯式碳交易模型，以购能、运维、需求响应补偿和碳交易成本之和最小为目标，构建混合整数线性规划模型。最后，以高原地区某数据中心产业园为算例，设置四种场景进行对比。结果表明，同时引入需求响应机制与阶梯式碳交易后，系统可根据分时电价、新能源出力及碳成本变化优化设备运行，促进多能负荷削峰填谷。与两种机制均未引入的场景相比，系统总运行成本降低了3840元，碳排放量减少了3.651 t，降幅分别为6.72%和8.09%。所提策略可有效提升系统经济性、低碳性和运行灵活性，为高原地区数据中心产业园优化运行提供了理论参考。

关键词：综合能源系统；需求响应；阶梯式碳交易；压缩空气储能
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0601
中图分类号：TM 732　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（2026）11-4562-12

A collaborative optimization strategy for plateau data centers with hybrid compressed air energy storage considering demand response and carbon trading

ZHANG Xingye, CHEN Xiaotao, LI Xiaokang, ZHU Yuhao, HAI Xin, MEI Shengwei
(School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: To address the high standby costs of diesel generators, substantial carbon emissions, and growing challenges in integrating renewable energy at data centers in plateau regions, this study proposes a collaborative optimal scheduling strategy for an integrated energy system that incorporates hybrid compressed air energy storage, integrated demand response, and stepped carbon trading. First, an integrated energy system is developed with compressed air energy storage as an energy hub to satisfy the data center's multi-energy demands, enabling compression heat recovery and the coordinated utilization of multiple energy carriers. To enhance the system's operational flexibility, three types of demand

收稿日期：2026-07-13；修改稿日期：2026-08-13。
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U22A20224）。
第一作者：张兴业（2002—），男，硕士研究生，研究方向为压缩空气储能系统，E-mail：13623178731@163.com；通信作者：陈晓弢，教授，研究方向为新型储能技术、综合能源系统优化调度，E-mail：chenxiaotao@qhu.edu.cn。
引用本文：张兴业, 陈晓弢, 李晓康, 等. 计及需求响应与碳交易的高原数据中心复合式压缩空气储能系统协同优化策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(11): 4562-4573.
Citation：ZHANG Xingye, CHEN Xiaotao, LI Xiaokang, et al. A collaborative optimization strategy for plateau data centers with hybrid compressed air energy storage considering demand response and carbon trading[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(11): 4562-4573.

response, namely shiftable, substitutable, and curtailable loads, are incorporated into the model, along with a stepped carbon trading mechanism. A mixed-integer linear programming model is then formulated to minimize overall operating costs, including energy procurement, operation and maintenance, demand response compensation, and carbon trading costs. Finally, a data center industrial park in a plateau region is used as a case study, and four comparative scenarios are designed to evaluate the effects of the proposed mechanisms. The results demonstrate that the joint implementation of demand response and stepped carbon trading enables the system to coordinate equipment operation in response to time-of-use electricity prices, renewable energy availability, and carbon costs, thereby facilitating peak shaving and valley filling of multi-energy loads. Compared with the scenario in which neither mechanism is implemented, the proposed strategy reduces total operating costs by CNY 3, 840 and carbon emissions by 3.651 t, corresponding to reductions of 6.72% and 8.09%, respectively. These findings indicate that the proposed strategy can simultaneously improve economic performance, support low-carbon operation, and enhance operational flexibility, providing a theoretical reference for the optimal operation of data center industrial parks in plateau regions.

Keywords: integrated energy system; demand response; stepped carbon trading; compressed air energy storage

在“碳达峰、碳中和”目标与能源转型的背景下，作为数字时代重要支柱的数据中心，正面临着规模扩张带来的能耗与碳排放量增大的挑战[1]，而引入可再生能源已成为其实现可持续发展的关键举措[2-4]。综合能源系统（integrated energy system，IES）包含可再生能源与储能装置，能以较高的能源利用率满足数据中心冷、热、电负荷需求，是其能源供应系统低碳转型的重要方案[5]。在IES的储能形式中，压缩空气储能（compressed air energy storage，CAES）不但具有天然的多能流联供特性，还具备装机容量灵活、生命周期长以及较低的度电成本等优势[6-8]，正成为数据中心储能系统的优选方案。

在IES深入推进可再生能源消纳与碳排放治理的进程中，仅靠供给侧的结构优化已难以满足系统高效且低碳的运行要求。通过调动负荷侧的调节潜力来促进供需动态平衡，已成为当前研究的重要方向。需求响应（demand response，DR）技术依托自身的负荷形态调节能力，推动供给侧与需求侧的动态适配，优化负荷的峰谷分布特征，为系统经济高效运行提供了内生动力[9]。目前许多国内外学者就IES的DR开展了广泛的研究。文献[10]提出一种计及综合需求响应的多主体主从博弈调度策略，提高了系统运行总利润与负荷侧响应的主动性。文献[11]构建了一种基于演化博弈的双层协同优化模型，通过动态定价引导用户需求响应，有效提升了系统运营商收益。文献[12]提出一种基于风光出力与负荷供需关系的动态定价机制，并证明该机制有效促进风光就地消纳并提高系统运行收益。文献[13]提出一种考虑多不确定性和需求响应的综合能源系统两阶段鲁棒优化调度模型，分别从运营商和用户侧构建需求响应模型，并引入用户心理因素描述其响应度，建立以系统运行成本最低为目标的优化模型，实现了系统鲁棒、经济与低碳的平衡优化。然而，上述研究主要聚焦于通过内部负荷管理优化系统运行，普遍未将外部政策环境，特别是碳交易机制对系统调度决策的约束与引导作用纳入考量。

随着碳交易市场的建立与完善，碳排放已成为IES优化调度中不可忽视的成本要素。将外部碳约束引入内部优化调度，是实现系统低碳转型的另一关键维度。在此方面，文献[14]提出了融合阶梯式碳交易的沿海城市综合能源系统优化调度模型，有效降低了系统总运行成本与碳排放。文献[15]构建了阶梯碳交易与全生命周期碳排放分析的综合能源系统优化模型，并以系统总成本最低为目标，实现

了碳排放削减，并有效提升了系统经济性。文献[16]提出一种基于碳交易-绿色证书联合交易机制的区域综合能源系统低碳经济调度模型，其调度策略能有效降低碳排放、扩大可再生能源上网空间并提升系统经济性。文献[17]提出碳交易机制下光热电站参与的综合能源系统两阶段鲁棒优化配置与运行模型，考虑源侧出力和荷侧需求不确定性，仿真表明该模型能有效减少系统容量配置波动、降低综合调度成本，并兼顾低碳性与经济性。这些研究充分说明了碳交易机制在引导IES低碳运行方面的重要作用，但其效果往往依赖于系统自身的灵活调节能力。如何为同时面临负荷波动与碳约束双重压力的IES提供可靠的物理支撑，成为亟待解决的问题。

CAES作为一种大容量、长寿命的储能技术，能够实现电能的时移和多能流的联供，为解决上述问题提供了理想的物理载体。文献[18]基于混合整数线性规划，提出了含CAES的冷热电联供微网的优化调度模型，并在我国某试点工厂进行实证研究，结果表明该模型具有良好的经济性。文献[19]提出了一种CAES的双层规划方法，外层以日均总成本最小化为优化目标，采用粒子群算法对各设备容量进行优化，内层以总运行成本最低为优化目标，采用序列二次规划法对系统运行策略进行优化，有效降低了系统的投资与运行总成本。文献[20]建立了以含CAES的IES运行成本最低为目标的优化调度模型，考虑CAES与IES电能和热能的交互，有效降低了系统运行成本。然而，这些研究多将CAES作为独立的储能单元进行经济优化，鲜有将其置于需求响应与碳交易协同框架下，深入探讨其如何作为“能量枢纽”统筹供需平衡、降低碳排放的系统性研究。

综上，当前针对IES的优化调度研究，或侧重于通过需求侧管理实现内部挖潜，或聚焦于引入碳交易机制应对外部约束，或致力于提升CAES的运行经济性，而将三者置于同一框架下进行协同优化的研究目前尚属空白。本研究提出了一种复合式CAES能量枢纽模型，该模型协同考虑了阶梯式碳交易机制与负荷侧需求响应，旨在实现系统低碳运行与经济优化的双重目标。为验证协同优化策略相较于已有方法的优势，本研究在算例分析中设置了4组对比场景，其中场景2（仅引入DR）可对应文献中仅考虑需求响应的典型调度方法，场景3（仅引入碳交易）可对应文献中仅考虑碳交易的调度方法。通过对4组对比场景进行仿真分析，结果表明，所提出的模型能够有效协调系统供需平衡，同时还兼顾了经济运行与低碳环保，验证了其重要的理论与应用价值。

1 复合式CAES能量枢纽模型

1.1 系统架构

与传统建筑相比，数据中心用能具有鲜明特点，需实现24 h不间断运行，且功耗集中度显著高于常规建筑，对能源供应系统的可靠性与稳定性提出了严苛标准。通常，数据中心园区包含数据机房和办公生活两大功能区域。其中，数据机房的核心要求在于持续稳定的电力支持与高效制冷，其全年的电力负荷与制冷需求保持相对恒定，受季节变化等因素影响较小；而热负荷需求则主要来源于办公与生活区域。结合数据中心的负荷特点及可持续发展目标，本研究构建的以CAES为能量枢纽的综合能源系统架构如图1所示。

该系统是一个集多类型能源输入、转换与耦合设备于一体的综合能源体系，涵盖能源生产、转换、存储与需求侧响应等多个单元。在传统冷热电联供系统的基础上，引入了太阳能与风能等可再生能源，显著降低了对传统化石能源的依赖。电负荷主要由风电（wind power，WP）、光伏（photovoltaic，PV）以及热电联产机组（combined heat and power，CHP）提供，电网作为补充电源，进一步保障供电的可靠性与稳定性。系统还配置了CAES单元，可在新能源发电高峰期或电价低谷期储存电能，用于紧急情况下的数据中心供电，同时压缩过程中产生的压缩热可直接为生活区提供热能，膨胀阶段所需要的热量则由光热集热器提供。冷负荷主要依靠吸收式制冷机（absorption chiller，AC）与电制冷机（electric chiller，EC）满足。热负荷由余热回收系统与CAES产生的压缩热承担，燃气锅炉（gas boiler，GB）用于补充余热不足时的热量缺口。为进一步提升系统运行的灵活性，系统还设置了蓄冰槽与蓄热槽，以实现能量的高效储存与调配。整体来看，系统在能源生产环节集成了WP、PV与上级电网；在能源转换环节，通过CHP、GB与CAES实现多类型能源的耦合与转化；在能源存储环节配置多种储能设备；在能源需求侧则涵盖了

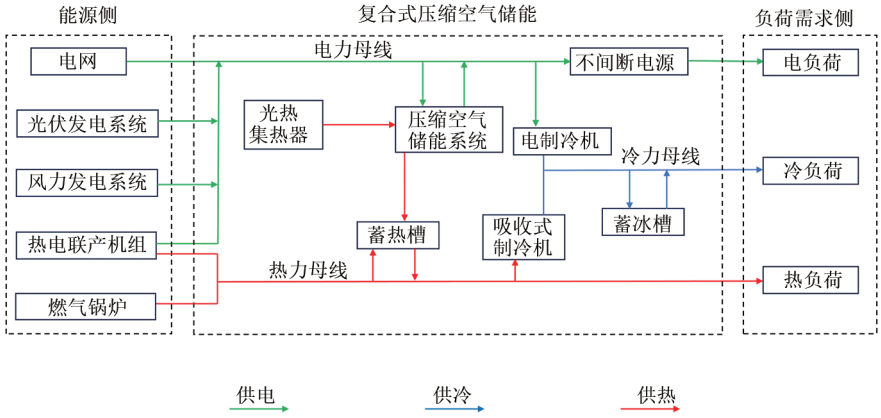

图1　能源枢纽结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the energy hub structure

电、热、冷综合响应负荷。通过引入DR，系统能平滑负荷波动，促进电、热、冷能源的协同优化，从而在满足用户负荷需求的同时，有效提升系统运行的稳定性、经济性与低碳性。

1.2　能量枢纽主要设备模型

（1）热电联产系统CHP建模

$$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}(t)=\eta_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas}}(t) \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}(t)=\eta_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}\frac{P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}(t)}{r_{\mathrm{CHP}}} \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas,\,min}}\leqslant P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas}}(t)\leqslant P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas,\,max}} \tag{3}$$

$$\Delta P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas,\,min}}\leqslant P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas}}(t)-P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas}}(t-1)\leqslant \Delta P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas,\,max}} \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}$、$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}$分别为CHP在$t$时刻产生的电功率与热功率；$\eta_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{e}}$、$\eta_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{h}}$分别为CHP产生电功率与余热回收的效率；$r_{\mathrm{CHP}}$为回收前的电热比；$P_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{gas}}(t)$表示$t$时刻输入CHP的天然气功率。

（2）燃气锅炉GB建模

GB与CHP一样，也是以天然气为燃料的热能供应设备，当CHP与CAES压缩热无法满足负荷侧的热能需求时则由燃气锅炉进行补充供应，燃气锅炉的模型为

$$Q_{\mathrm{GB}}^{t}=\eta_{\mathrm{GB}}g_{\mathrm{GB}}^{t}q^{\mathrm{gas}} \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{GB}}(t)=Q_{\mathrm{GB}}^{t}/\Delta t \tag{6}$$

式中，$P_{\mathrm{GB}}(t)$为t时刻燃气锅炉的热输出功率；Q_{GB}^{t}为t时刻燃气锅炉产生的热能；η_{GB}为燃气锅炉产生热能的效率；g_{GB}^{t}为t时刻燃气锅炉的天然气消耗量；q^{gas}表示天然气热值。

（3）电制冷机EC建模

电制冷机的制冷功率$P_{\mathrm{EC}}^{\mathrm{c}}(t)$为

$$P_{\mathrm{EC}}^{\mathrm{c}}(t)=\mathrm{COP}_{\mathrm{EC}}P_{\mathrm{EC}}(t) \tag{7}$$

式中，$P_{\mathrm{EC}}(t)$为t时刻电制冷机输入功率；$\mathrm{COP}_{\mathrm{EC}}$为电制冷机性能系数。

（4）吸收式制冷机AC建模

吸收式制冷机的制冷功率$P_{\mathrm{AC}}^{\mathrm{c}}(t)$为

$$P_{\mathrm{AC}}^{\mathrm{c}}(t)=\mathrm{COP}_{\mathrm{AC}}H_{\mathrm{AC}}(t) \tag{8}$$

式中，$H_{\mathrm{AC}}(t)$为t时刻吸收式制冷机的输入功率；$\mathrm{COP}_{\mathrm{AC}}$为吸收式制冷机性能系数。

（5）压缩空气储能系统CAES建模

为了简化分析，假设压缩机和膨胀机的等熵效率恒定。压缩空气储能系统的能量分析基于热力学第一定律，描述了各部分能量传递和能量转换的过程。压缩机压缩功率计算式为

$$P_{\mathrm{CAES,\,C}}^{t}\eta_{\mathrm{c}}=m_{\mathrm{c}}^{t}\frac{\gamma}{\gamma-1}R_{\mathrm{g}}\cdot\sum_{n=1}^{k-1}\left[T_{\mathrm{c},k,\mathrm{in}}\left(\beta_{\mathrm{c},k}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}-1\right)+T_{\mathrm{c},n,\mathrm{in}}\left(\beta_{\mathrm{c},n,t}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}-1\right)\right] \tag{9}$$

式中，$P_{\mathrm{CAES,\,C}}^{t}$表示压缩机在$t$时段内的工作功率；$\eta_{\mathrm{c}}$表示压缩机的运行效率；$m_{\mathrm{c}}^{t}$表示压缩机在$t$时段内通过的空气质量流量；$\gamma$表示理想空气的比热容；$R_{\mathrm{g}}$表示理想空气常数；$n$表示压缩机和膨胀机的级数；$T_{\mathrm{c},k,\mathrm{in}}$、$T_{\mathrm{c},n,\mathrm{in}}$分别表示$k$级和末级压缩机入口处理想空气的温度；$\beta_{\mathrm{c},k}$表示额定运行状态下的$k$级压缩机的压缩比；$\beta_{\mathrm{c},n,t}$表示末级压缩机在$t$时段内的压缩比。

膨胀机的输出功率为

$$P_{\mathrm{CAES,\,G}}^{t}=\eta_{\mathrm{g}}m_{\mathrm{g}}^{t}\frac{\gamma}{\gamma-1}R_{\mathrm{g}}\sum_{j-1}^{n}T_{\mathrm{g},j,\mathrm{in},t}\left(1-\beta_{\mathrm{g},j}^{\frac{-\gamma-1}{\gamma}}\right) \tag{10}$$

式中，$P_{\mathrm{CAES,\,G}}^{t}$表示膨胀机在$t$时段内的功率；$\eta_{\mathrm{g}}$表示膨胀机运行效率；$m_{\mathrm{g}}^{t}$表示膨胀机在$t$时段内通过的空气质量流量；$T_{\mathrm{g},j,\mathrm{in},t}$表示$j$级膨胀机入口处理想空气的温度；$\beta_{\mathrm{g},j}$表示额定运行状态下$j$级膨胀

机的膨胀比。

CAES 装置主要通过换热器进行储热罐和压缩机、膨胀机之间的热能交换，在此基础上本研究所设计的光热集热器只用于给膨胀机供热。CAES 储气罐、换热器、储热罐及光热集热系统数学模型见文献[20-21]。

2 综合低碳需求响应模型

2.1 需求响应机制

本研究所构建的低碳需求响应模型主要包括电能、热能与冷能负荷的基本负荷和响应调节负荷。基本负荷旨在满足数据中心产业园区内日常生活需求与数据中心机组工作需求，而响应调节则基于系统的分时价格与补偿机制，包括可转移型负荷（shiftable load，SL）、可替代型负荷（replaceable load，RL）和可削减型负荷（curtailable load，CL）。各类需求响应调节负荷量均以响应前的实际基础负荷为基准，并受相应响应调节负荷比例的约束。其中，SL 和 CL 采用价格弹性矩阵表征用户用能行为对能源价格变化的响应特性，其响应调节负荷量由基础负荷、可响应比例、需求弹性系数及响应前后能源价格变化共同确定。RL 则以实际基础负荷及可替代负荷比例为基础，根据不同能源的等效用能成本确定替代方向，当能源间等效成本差达到设定阈值时，优先采用等效成本较低的能源替代成本较高的能源；当成本差未达到阈值时不实施替代，以避免能源价格小幅波动引起频繁切换。因此，各类需求响应调节负荷量均与实际基础负荷水平相关，不会脱离用户实际用能需求进行任意调节。此外，系统运行过程中，还通过实施阶梯式碳交易机制来进一步限制系统的碳排放量，从而促进低碳响应的优化和整体系统的可持续发展。

（1）SL 需求响应成本模型

SL 在系统运行中具有特定的时间调节范围，用户可以依据不同时段的分时电价，主动调整原定的用电计划，将原有负荷从某一时段转移至其他时段，同时保持总能耗不变。这类负荷对于 IES 具有积极意义，可以增强系统调控灵活性，最终实现削峰填谷的效果，从而促进电力系统稳定经济运行[22]。

$$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}} = c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}} \sum_{t=1}^{T} \lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}}(t) \left| P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{sl}}(t) - P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{sl}}(t) \right| \tag{11}$$

$$P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{sl}}(t) - P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{sl}}(t) = W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{sl}} P_{\mathrm{i,0}}(t) \sum_{j=1}^{T} \varepsilon_{\mathrm{i},tj}^{\mathrm{sl}} \frac{p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}(j) - p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(j)}{p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(j)} \tag{12}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \left[P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{sl}}(t) - P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{sl}}(t) \right] = 0 \tag{13}$$

式中，$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}}$为负荷转移后的补偿成本；$c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}}$为负荷进行转移后的单位补偿价格；$\lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}}(t)$为 0~1 的变量，$\lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{sl}} = 1$表示系统进行了负荷转移；$P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{sl}}(t)$、$P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{sl}}(t)$分别为系统 t 时刻进行负荷转移前后的负荷功率；$W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{sl}}$为可转移负荷比例；$P_{\mathrm{i,0}}(t)$为需求响应前基础负荷；$\varepsilon_{\mathrm{i},tj}^{\mathrm{sl}}(t)$为 t 时段负荷关于 j 时段能源价格的交叉弹性系数；$P_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}(j)$、$P_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(j)$分别为需求响应和响应前的能源价格；式(13)表示系统负荷在转移周期内的负荷转移总量为 0[23]。

（2）RL 需求响应成本模型

RL 是指在 IES 中，能够通过多能耦合与转换机制在不同能源形式之间实现动态替代的负荷，当不同能源间的等效用能成本差达到设定阈值时，通过成本较低的能源替代成本较高的能源，在满足用户用能需求的同时提高系统运行经济性。

$$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}} = c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}} \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}}(t) \tag{14}$$

$$P_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}}(t) = \begin{cases} W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{rl}} P_{\mathrm{i,0}}(t), & \Delta p_{\mathrm{eq}} \geqslant \delta \\ 0, & \Delta p_{\mathrm{eq}} < \delta \end{cases} \tag{15}$$

式中，$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}}$为利用能源进行替代后的补偿成本；$c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}}$为系统进行负荷替代后的单位补偿价格；$P_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{rl}}(t)$为 t 时刻各能源间进行替代的负荷量。$W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{rl}}$为可替代负荷比例；$P_{\mathrm{i,0}}(t)$为需求响应前基础负荷；$\Delta p_{\mathrm{eq}}(t)$为 t 时刻不同能源之间的等效用能差；δ为能源替代阈值。

（3）CL 需求响应成本模型

CL 的核心功能是通过价格机制调节用户能耗，平衡能源系统供需以提升能效。

$$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}} = c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}} \sum_{t=1}^{T} \lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}}(t) \left[P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{cl}}(t) - P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{cl}}(t) \right] \tag{16}$$

$$P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{cl}}(t) - P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{cl}}(t) = \begin{cases} W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{cl}} P_{\mathrm{i,0}}(t) \varepsilon_{\mathrm{i},tt}^{\mathrm{cl}} \dfrac{p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}(t) - p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(t)}{p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(t)}, & p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}(t) > p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(t) \\ 0, & p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}(t) \leqslant p_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}(t) \end{cases} \tag{17}$$

式中，$C_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}}$为负荷进行削减后的补偿成本；$c_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}}$为系统各类型负荷进行削减后的单位补偿价格；$\lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}}(t)$为 0~1 的变量，$\lambda_{\mathrm{e,r}}^{\mathrm{cl}} = 1$表示系统进行了负荷削减；$P_{\mathrm{e,a}}^{\mathrm{cl}}(t)$、$P_{\mathrm{e,b}}^{\mathrm{cl}}(t)$分别为系统 t 时刻进行负荷削减前后的负荷功率；$W_{\mathrm{i}}^{\mathrm{cl}}$为可削减负荷比例；$P_{\mathrm{i,0}}(t)$为需求响应前基础负荷；$\varepsilon_{\mathrm{i},tt}^{\mathrm{cl}}(t)$为 t 时段的自

价格弹性系数；$P_i^a(t)$、$P_i^b(t)$分别为需求响应和响应前的价格。

2.2　阶梯式碳交易机制

针对本研究的IES，其温室气体排放主要来源于CHP、GB及从上级能源网购能3部分。在系统优化调度过程中，需统筹调控碳排放量，以兼顾运行经济性与环保性。为进一步精细化控制碳排放水平，本研究引入阶梯式碳交易机制。该机制区别于传统固定碳价模式，通过划分不同阶梯区间实施差别定价，系统所需购买的碳排放配额越多，对应交易单价越高。

$$F_C = \sum_{t=1}^{T}\left[F_C^{CHP}(t) + F_C^{GB}(t) + F_C^{BUY}(t)\right] \tag{18}$$

$$P_C = \sum_{t=1}^{T}\left[P_C^{CHP}(t) + P_C^{GB}(t) + P_C^{BUY}(t)\right] \tag{19}$$

$$E_C = P_C - F_C \tag{20}$$

式中，F_C、P_C分别为系统的碳配额与碳排放量；E_C为参与阶梯式碳交易的碳排放量；$F_C^{CHP}(t)$、$P_C^{CHP}(t)$分别表示t时刻CHP设备的碳配额与碳排放量；$F_C^{GB}(t)$、$P_C^{GB}(t)$分别表示t时刻GB设备的碳配额与碳排放量；$F_C^{BUY}(t)$、$P_C^{BUY}(t)$分别表示t时刻从上级能源网购能所产生的碳配额与碳排放量。

3　IES优化运行模型构建

3.1　目标函数

本研究在IES中同时引入需求响应机制与阶梯式碳交易机制，构建以系统总运行成本最低为优化目标的调度模型。该模型旨在通过合理安排各可控单元的出力，在满足系统运行约束的前提下实现经济调度，其目标函数为

$$F = \min\sum_{t=1}^{24}\left(C_{op\text{-}B} + C_{op\text{-}G} + C_{op\text{-}M} + C_{op\text{-}C} + C_{op\text{-}D}\right) \tag{21}$$

式中，$C_{op\text{-}B}$为购电成本；$C_{op\text{-}G}$为燃气成本；$C_{op\text{-}M}$为设备运维成本；$C_{op\text{-}C}$为阶梯式碳交易成本；$C_{op\text{-}D}$为需求响应成本。针对不同对比场景，式(21)中的成本项根据相应机制的启用情况进行调整，其中，考虑综合需求响应时计入需求响应补偿成本$C_{op\text{-}D}$，并采用响应后的冷、热、电负荷进行优化调度；不考虑综合需求响应时$C_{op\text{-}D}$=0，并采用响应前的原始负荷进行调度。考虑阶梯式碳交易时计入碳交易成本$C_{op\text{-}C}$，不考虑阶梯式碳交易时$C_{op\text{-}C}$=0。具体场景设置见4.1节。

（1）购电成本

$$C_{op\text{-}B} = E_{grid}\cdot P_{grid} \tag{22}$$

式中，E_{grid}为电网购电量；P_{grid}为分时电价。

（2）燃气成本

$$C_{op\text{-}G} = P_{gas}\cdot\left[\frac{P_{CHP}^{e}(t)}{k_{gas}\cdot\eta_{CHP}^{e}} + \frac{P_{GB}(t)}{k_{gas}\cdot\eta_{GB}}\right] \tag{23}$$

式中，P_{gas}为天然气价格；$P_{CHP}^{e}(t)$为热电联产系统发电功率；k_{gas}为燃气热；η_{CHP}^{e}为热电联产系统的发电效率；$P_{GB}(t)$为燃气锅炉的产热功率；η_{GB}为燃气锅炉的热效率。

（3）设备运维成本

$$C_{op\text{-}M} = \sum_{i=1}^{24}\left[\lambda_i P_i(t)\right] \tag{24}$$

式中，λ_i为设备的单位运行维护成本；$P_i(t)$为设备输出功率。

（4）阶梯式碳交易成本

$$C_{op\text{-}C} = \begin{cases} \alpha E_C, & E_C \le I \\ \alpha(1+\lambda)(E_C - I) + \alpha I, & I < E_C \le 2I \\ \alpha(1+2\lambda)(E_C - 2I) + \alpha(1+\lambda)I + \alpha I, & 2I < E_C \le 3I \\ \alpha(1+3\lambda)(E_C - 3I) + \alpha(1+2\lambda)I \\ \quad +\alpha(1+\lambda)I + \alpha I, & 3I < E_C \end{cases} \tag{25}$$

式中，α为碳交易价格；I为碳排放区间；λ为价格增长幅度。

（5）响应补偿成本

$$C_{op\text{-}D} = C_{e,r}^{sl} + C_{e,r}^{rl} + C_{e,r}^{cl} \tag{26}$$

3.2　约束条件

（1）电功率平衡

$$P_{load}(t) = P_{PV}(t) + P_{WP}(t) + P_{Buy}(t) + P_{CHP}^{e}(t) + P_{CAES}^{dis}(t) - P_{CAES}^{cha}(t) - P_{EC}(t) \tag{27}$$

式中，$P_{Buy}(t)$为购电功率；$P_{CAES}^{dis}(t)$、$P_{CAES}^{cha}(t)$分别为压缩空气储能系统放电与充电功率。

（2）热功率平衡

$$P_{h\text{-}load}(t) = P_{CHP}^{h}(t) + \eta_c P_{CAES}^{cha}(t) + P_{GB}(t) + P_{HS}^{dis}(t) - P_{HS}^{cha}(t) - H_{AC}(t) \tag{28}$$

式中，η_c为压缩热回收系数；$P_{HS}^{dis}(t)$、$P_{HS}^{cha}(t)$分别为蓄热罐放热与储热功率。

（3）冷功率平衡

$$P_{c\text{-}load} = P_{EC}^{c}(t) + P_{AC}^{c}(t) \tag{29}$$

为进一步明确调度模型的优化对象及主要决策变量，对系统中的关键调度变量进行了归纳，如表1所示。其中，基础冷负荷、热负荷、电负荷、分时电价及天然气价格等作为已知输入参数，各设备运行功率及需求响应调节量作为主要决策变量，

表1 优化调度中的关键自由变量

Table 1 Key free variables in optimal dispatch

变量类别	关键自由变量	物理含义	变量类型
外部购能	$P_{Buy}(t)$	t时刻从上级电网购入的电功率	连续变量
燃气设备	$P^{e}_{CHP}(t)$、$P^{h}_{CHP}(t)$、$P_{GB}(t)$	CHP产电、产热功率与GB产热功率	连续变量
CAES	$P^{cha}_{CAES}(t)$、$P^{dis}_{CAES}(t)$	CAES压缩储能与膨胀释能功率	连续变量
蓄热单元	$P^{cha}_{HS}(t)$、$P^{dis}_{HS}(t)$	蓄热罐的储热功率与放热功率	连续变量
制冷设备	$P^{c}_{EC}(t)$、$P^{c}_{AC}(t)$	电制冷机与吸收式制冷机的供冷功率	连续变量
需求响应调节量	SL、RL、CL对应的负荷调整量	电、热、冷负荷的转移、替代与削减量	连续变量
可再生能源	$P_{PV}(t)$、$P_{WP}(t)$	光伏、风电实际消纳功率	连续变量

由优化模型统一求解。

4 算例分析

本研究选取高原地区某数据中心产业园作为算例，包含PV、WP、CHP、GB、CAES、EC和AC等单元。调度周期为24 h，以1 h为一个时段，基于MATLAB中配置的Yalmip工具箱构建混合整数线性规划模型，通过CPLEX求解器进行算例求解，并根据结果使用MATLAB生成可视化数据与图形，以展示调度周期内的功率变化。图2为该地区采用的分时电价与天然气价格，本研究算例中主要设备的效率及能量转换参数如表2所示。

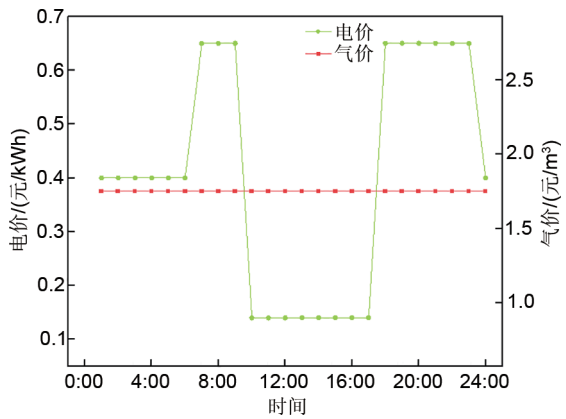

图2 典型日的分时电价与天然气价格

Fig. 2 Time-of-use electricity price and natural gas price on a typical day

4.1 情景设置及结果

为验证综合需求响应与阶梯式碳交易机制对IES经济、低碳运行的影响，本研究设置了4种对比场景并分别进行独立优化求解。各场景的系统结构、设备参数、能源价格及运行约束等条件均保持一致，仅综合需求响应和阶梯式碳交易机制的启用状态不同。具体场景设置如下：

表2 系统各设备主要效率及能量转换参数

Table 2 Main efficiency and energy conversion parameters of system equipment

参数名称	符号	数值
热电联产机组发电效率	η^{e}_{CHP}	0.40
热电联产机组余热回收效率	η^{h}_{CHP}	0.90
燃气锅炉热效率	η_{GB}	0.90
电制冷机性能系数	COP_{EC}	4.00
吸收式制冷机性能系数	COP_{AC}	1.50
压缩热回收系数	η_{c}	0.80

场景1，引入综合需求响应机制与阶梯式碳交易机制。

场景2，引入综合需求响应机制，但不引入阶梯式碳交易机制。

场景3，不引入综合需求响应机制，但引入阶梯式碳交易机制。

场景4，不引入综合需求响应机制，不引入阶梯式碳交易机制。

表3 不同场景系统调度结果

Table 3 System dispatch results under different scenarios

项目	场景1	场景2	场景3	场景4
总成本/万元	5.334	5.544	5.491	5.718
购能成本/万元	2.479	2.499	2.749	2.785
需求响应成本/万元	0.119	0.119	0	0
运维成本/万元	0.548	0.518	0.517	0.464
碳交易成本/万元	2.188	2.408	2.225	2.469
实际总碳排放量/吨	41.480	41.966	44.301	45.131

各场景下调度结果如表3所示，由表3可知，在场景1与场景2的对比中，因为场景2未引入阶梯式碳交易，所以系统以最低购能成本与运维成本为目标进行决策，但是此决策方案会增加碳排放

量，系统不得不额外购买碳排放配额用以抵消大量的碳排放，故导致系统总成本增加了2100元，碳排放量增加了0.486 t，因此场景2不仅增加了碳排放还进一步推高了系统的总成本，不利于系统运行的经济性与环保性。由场景1与场景3对比可知，由于综合需求响应机制利用了分时能价调整系统供需用能行为，用户得以根据用能需求调整用能时间与用能方式，调动了用户参与负荷调节的积极性。虽然场景3无需考虑需求响应成本，但其总成本仍比考虑综合需求响应机制的情况下高出1570元，碳排放量增加了2.821 t，说明引入综合需求响应机制，系统经济性与低碳性均得到改善。由场景1与场景4对比可知，引入综合需求响应机制与阶梯式碳交易机制后，系统总运行成本降低了3840元，碳排放量减少了3.651 t。上述对比结果表明，本研究所提协同优化策略（场景1）相较于仅考虑需求响应的调度方法（场景2）和仅考虑碳交易的调度方法（场景3），在运行成本和碳排放方面均具有明显优势。这说明引入综合需求响应机制与阶梯式碳交易机制可有效兼顾系统运行的经济性与环保性，验证了需求响应与阶梯碳交易协同优化的必要性。

4.2 结合综合需求响应与阶梯式碳交易的设备出力分析

在综合能源系统优化调度中，以场景1为基础，系统在分时能源价格与需求响应补偿机制的协同作用下，对电、热、冷三类负荷进行了差异化调控，有效引导用户侧参与系统运行调节。需求响应前后的电负荷对比图与电负荷变化量如图3和图4所示，需求响应前后的热负荷对比图与热负荷变化量如图6和图7所示，需求响应前后的冷负荷对比图与冷负荷变化量如图9和图10所示。各类负荷的响应调节效果在负荷平衡图（图5、图8、图11）中得到了进一步验证，充分体现了需求响应与阶梯式碳交易协同机制在提升系统运行灵活性与低碳性方面的显著作用。

由图3~图5可知，新能源发电出力在中午时段达到峰值，因此在11:00—16:00期间，系统电负荷主要由新能源发电满足。此时，系统通过优化调度降低内燃机出力，同时适当提高了用户侧用电功率，并实施电负荷的存储，以提高新能源消纳率。此外，系统还在电价较低的时段增加了从电网的购电量，将富余电能存储于CAES中。CAES储备的电力可在紧急情况或高电价情况下进行供电，从而有效增强对突发性电力需求的快速响应能力，并降低系统运行成本。在高电价时段，系统则通过

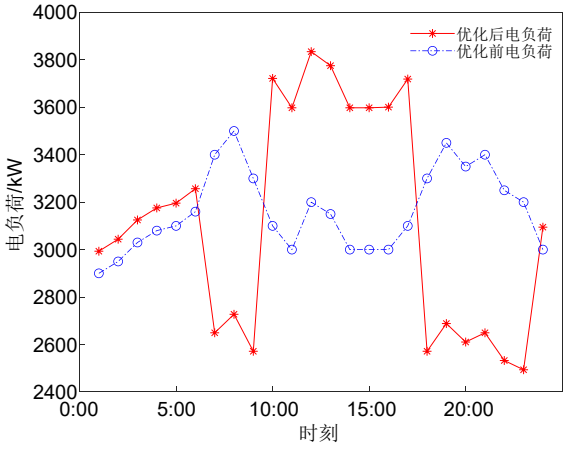

图3 需求响应前后电负荷对比

Fig. 3 Comparison of electric load before and after demand response

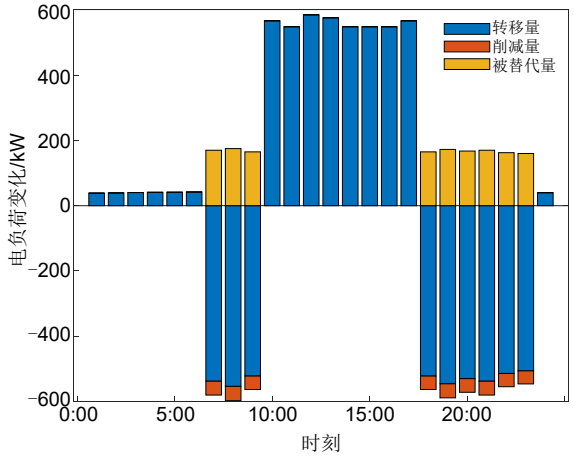

图4 电负荷需求响应变化量

Fig. 4 Electric load change due to demand response

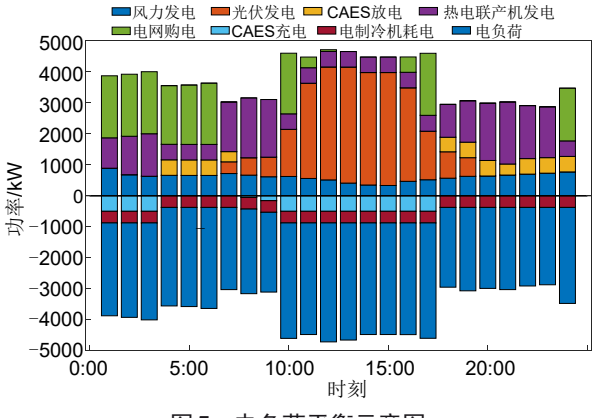

图5 电负荷平衡示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electric load balance

CAES 释能，并同步实施用电负荷的转移、削减与替代，从而实现系统运行的经济性与低碳性。

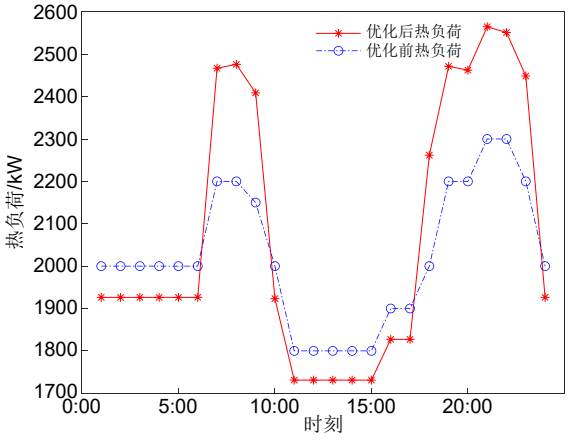

图 6 需求响应前后热负荷对比

Fig. 6 Comparison of heat load before and after demand response

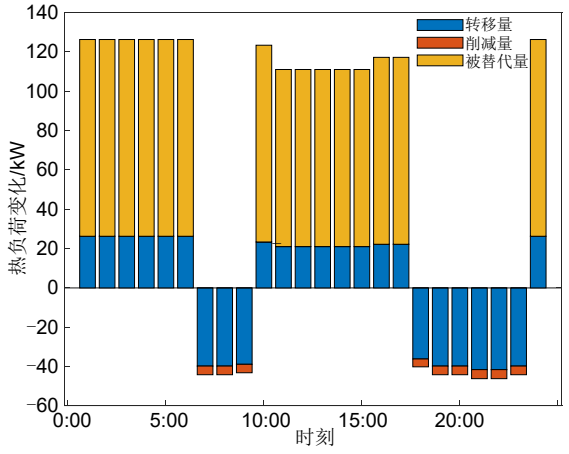

图 7 热负荷需求响应变化量

Fig. 7 Heat load change due to demand response

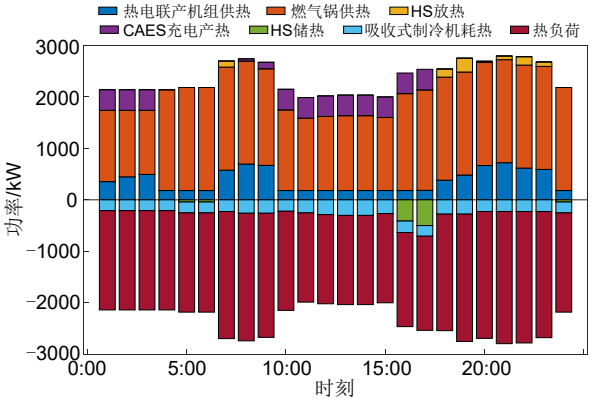

图 8 热负荷平衡示意图

Fig. 8 Schematic diagram of heat load balance

由图 6~图 8 可知，在 7:00—9:00 及 19:00—23:00 用电高峰时段，系统通过分时电价及价格补贴等机制，引导用户以热负荷替代电负荷，以降低系统运行成本，因此上述时段的热负荷需求有所增加。在 1:00—6:00、10:00—17:00 以及 24:00 时段，由于电价相对便宜，系统通过需求侧响应促使用户用电负荷代替热负荷，有效削减了部分热负荷需求，减少 CHP 机组出力，从而降低碳排放与运行成本，同时 CAES 在压缩储电阶段也会产生压缩热，此部分热量可直接用于生活区的热需求，进一步降低了系统的运行成本。系统在满足热负荷供需平衡的前提下，通过对热负荷的转移、替代与削减，实现了用户用热时段的合理再分配，进而提升了系统的调节能力。

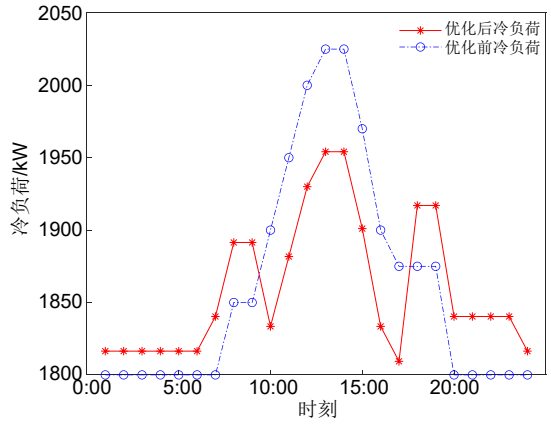

图 9 需求响应前后冷负荷对比

Fig. 9 Comparison of cooling load before and after demand response

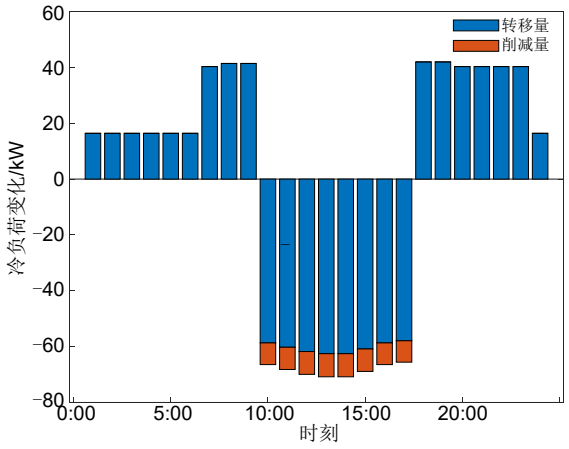

图 10 冷负荷需求响应变化量

Fig. 10 Cooling load change due to demand response

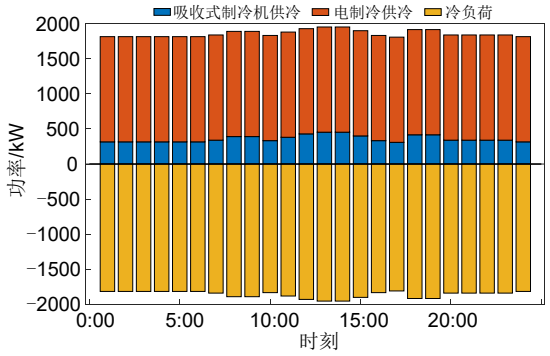

图 11　冷负荷平衡示意图

Fig. 11　Schematic diagram of cooling load balance

由图 9~图 11 可知，在冷负荷高峰时段，系统通过需求响应机制引导用户积极响应，对冷负荷进行灵活调节，有效削减并转移了部分高峰期的用冷需求，从而降低系统运行成本。由于冷负荷需求主要用于数据中心机组的降温，因此本研究不考虑冷负荷的替代，通过负荷的转移与削减，用户的用冷时段得到合理再分配，有效降低了用能峰谷差。在保障冷负荷供需平衡的同时，该机制进一步增强了系统的调节能力，提升了整体运行的经济性与灵活性。

4.3　阶梯式碳交易机制对系统碳排放的影响分析

为进一步分析阶梯式碳交易机制对系统碳排放及调度结果的影响，选取场景 3 和场景 4 进行对比，两种场景的区别仅在于场景 3 包含阶梯式碳交易机制，场景 4 不包含阶梯式碳交易机制，其余条件均相等。两场景下电网购电、热电联产机组和燃气锅炉三类主要碳排放源的逐时实际碳排放情况如图 12 和图 13 所示。

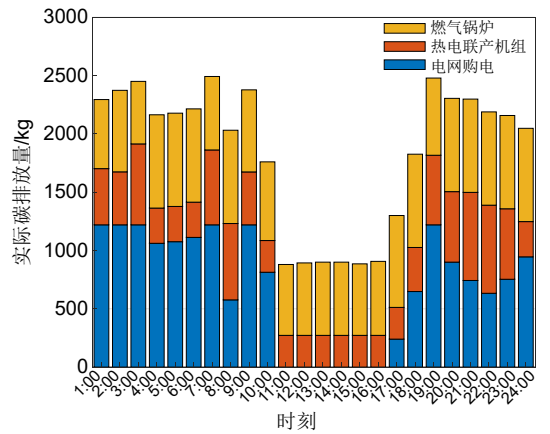

图 12　场景 3 主要碳排放源逐时实际碳排放

Fig. 12　Hourly actual carbon emissions from major emission sources in scenario 3

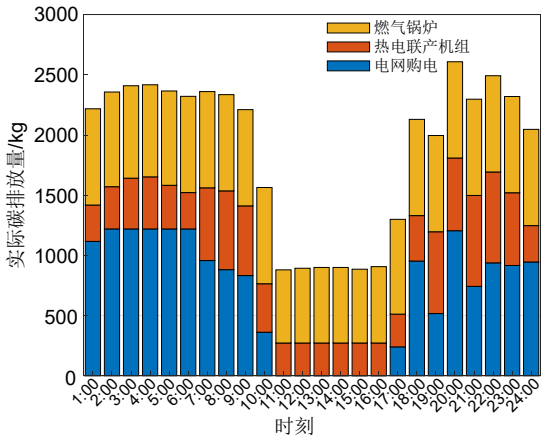

图 13　场景 4 主要碳排放源逐时实际碳排放

Fig. 13　Hourly actual carbon emissions from major emission sources in scenario 4

由图可知，引入阶梯式碳交易机制后，系统各碳排放源的调度分配发生变化。场景 3 的实际总碳排放量为 44.301 t，较场景 4 的 45.131 t 减少 0.830 t。其中，场景 3 中电网购电和 CHP 的累计碳排放较场景 4 略有增加，而燃气锅炉累计碳排放由 18.026 t 下降至 17.020 t，减少约 1.006 t，是系统总碳排放降低的主要来源。结果表明，阶梯式碳交易机制通过将碳排放成本纳入优化调度，改变不同供能单元之间的出力分配，抑制高碳供能方式的使用，从而发挥低碳调度的引导作用。

5　结　论

本研究针对高原地区数据中心的用能特性与新能源消纳困境，提出了一种复合式 CAES 能量枢纽模型，协同考虑综合需求响应与阶梯式碳交易机制，旨在实现系统经济运行与低碳排放的双重目标。通过设置 4 种对比场景进行仿真分析，得出以下主要结论：

（1）所构建的复合式 CAES 能量枢纽模型能够有效协调系统内多类型能源的生产、转换与存储，在满足数据中心冷、热、电负荷需求的同时，显著提升系统的运行灵活性与供能可靠性。

（2）引入阶梯式碳交易机制可有效约束系统的碳排放。通过差异化碳价引导，系统在优化调度中主动控制 CHP 与 GB 等高碳设备的出力，促使实际碳排放量显著下降，验证了该机制在促进低碳运行方面的有效性。

（3）综合需求响应机制依托分时能源价格与补

偿激励，充分调动用户侧调节潜力，通过电、热、冷负荷的转移、削减与替代，平滑负荷曲线、削峰填谷，在保障供需平衡的同时降低系统运行成本。

（4）阶梯式碳交易与综合需求响应的协同作用进一步提升了系统整体性能。仿真结果表明，同时引入两种机制的运行场景（场景1）相比无任何机制的场景（场景4），系统总运行成本降低3840元，碳排放量减少3.651 t，充分验证了所提模型在经济性与环保性方面的双重优势。

综上，本研究提出的复合式CAES能量枢纽模型结合需求响应与阶梯式碳交易协同优化的综合能源系统调度策略可以满足低碳经济的要求，为清洁能源禀赋地区的数据中心园区实现低碳化、经济化运行提供了可行的技术路径与理论参考。

参 考 文 献

[1] 卢洪明, 刘先锋, 周舟, 等. 机器学习方法的云数据中心能耗模型研究[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(9): 1966-1973.
LU H M, LIU X F, ZHOU Z, et al. Research on energy consumption model of cloud data center based on a machine learning method[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2023, 44(9): 1966-1973.

[2] Department of Energy's (DOE) Office of Fossil Energy and Carbon Management (FECM). Transitioning to net-zero carbon emissions [J]. Chemical Engineering Progress, 2022, 118(9): 30.

[3] WANG J S, REN X X, ZHANG S, et al. Co-optimization of configuration and operation for distributed multi-energy system considering different optimization objectives and operation strategies[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120655. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120655.

[4] Duben A J. Tools and weapons: The promise and the peril of the digital age[J]. Computing reviews, 2021(1): 62.

[5] 任效效, 李小龙, 薛凯, 等. 数据中心多能互补分布式能源系统设计与运行优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 93-104.
REN X X, LI X L, XUE K, et al. Research on the design and operation optimization of distributed multi-energy systems for data centers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 93-104.

[6] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1295-1301.
ZHANG W L, GU H, ZHANG C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1295-1301.

[7] CHEN L J, ZHENG T W, MEI S W, et al. Review and prospect of compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 529-541. DOI: 10.1007/s40565-016-0240-5.

[8] 陈晓弢, 王国华, 司杨, 等. 改进的光热复合压缩空气储能系统设计方案及其仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 20-26.CHEN X T, WANG G H, SI Y, et al. Improved design scheme of solar thermal compressed air energy storage system and its simulation analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 20-26.

[9] 葛鑫鑫, 付志扬, 徐飞, 等. 面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 129-146.
GE X X, FU Z Y, XU F, et al. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 129-146.

[10] 严干贵, 陈佰会, 王佳琪, 等. 计及综合需求响应的综合能源系统主从博弈优化调度策略[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(4): 46-55, 85.
YAN G G, CHEN B H, WANG J Q, et al. Master-slave game optimal scheduling strategy of integrated energy system considering integrated demand response[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(4): 46-55, 85.

[11] 彭爽, 杨仁增, 何旺. 计及用户需求响应的电热综合能源系统博弈优化策略[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(1): 123-129.
PENG S, YANG R Z, HE W. Game optimisation strategies for electricity and heat integrated energy systems accounting for user demand response[J]. Intelligent Computer and Applications, 2025, 15(1): 123-129.

[12] 李振坤, 游胜苒, 李景岳, 等. 计及动态定价机制和需求响应的社区综合能源系统优化运行[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 56-63.
LI Z K, YOU S R, LI J Y, et al. Optimized operation of community integrated energy systems considering dynamic pricing mechanism and demand response[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 56-63.

[13] 张玉, 曾繁敏, 林意杰, 等. 考虑多不确定性和需求响应的综合能源系统鲁棒优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(9): 688-695.
ZHANG Y, ZENG F M, LIN Y J, et al. Research on robust optimal scheduling of integrated energy systems considering multiple uncertainties and demand response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(9): 688-695.

[14] 石晓琳, 刘天羽. 计及阶梯碳交易及热电比的沿海城市综合能源系统优化调度[J]. 上海电机学院学报, 2024, 27(5): 280-285.
SHI X L, LIU T Y. Optimization and scheduling of integrated energy systems in coastal cities considering tiered carbon trading and heat-to-power ratio[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2024, 27(5): 280-285.

[15] 王亚茹, 于源. 考虑奖惩阶梯碳交易的综合能源系统优化运行研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2024, 20(4): 7-14.
WANG Y R, YU Y. Research on optimal operation of integrated energy system considering reward and punishment ladder carbon trading[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2024, 20(4): 7-14.

[16] 杨晓辉, 邓叶恒, 王晓鹏, 等. 基于碳交易-绿色证书联合交易机制的含CHP-CCS-P2G耦合的区域综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 244-254.
YANG X H, DENG Y H, WANG X P, et al. Low-carbon economic

dispatching of regional integratedenergy system with CHP-CCS-P2G coupling based on carbontrade-green certificate joint trading mechanism[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(6): 244-254.

[17] 曾贤强, 张奕, 王晓兰. 碳交易机制下光热电站参与的综合能源系统配置与优化运行研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 300-309.
ZENG X Q, ZHANG Y, WANG X L. Research on integrated energy system configuration and optimal operation of concentrating solar power plant participation under carbon trading mechanism[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 300-309.

[18] LI Y W, YAO F X, ZHANG S X, et al. An optimal dispatch model of adiabatic compressed air energy storage system considering its temperature dynamic behavior for combined cooling, heating and power microgrid dispatch[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104366. DOI:10.1016/j.est.2022.104366.

[19] XU X, HU W H, CAO D, et al. Designing a standalone wind-diesel-CAES hybrid energy system by using a scenario-based bi-level programming method[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211: 112759. DOI:10.1016/j.enconman.2020.112759.

[20] 门家凯, 邱建龙, 陈向勇. 基于先进绝热压缩空气储能的区域综合能源系统优化策略[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(3): 361-367.
MEN J K, QIU J L, CHEN X Y. Integrated energy optimization strategy based on advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(3): 361-367.

[21] 龚阁阳, 陈晓弢, 麻林瑞, 等. 计及碳交易机制和需求响应的生物质与光热耦合压缩空气储能系统优化策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2754-2763.
GONG G Y, CHEN X T, MA L R, et al. Optimization strategy of biomass and solar thermal coupled compressed air energy storage system considering carbon trading mechanism and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2754-2763.

[22] 鄢仁武, 陈王东方. 考虑阶梯式碳交易和需求响应的综合能源优化调度[J]. 电气开关, 2025, 63(6): 7-15.
YAN R W, CHEN W. Integrated energy optimisation scheduling considering stepped carbon trading and demand response[J]. Electric Switchgear, 2025, 63(6): 7-15.

[23] 张海峰, 李晓华, 周兴华. 考虑需求响应与碳交易的综合能源系统优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(5): 218-226.
ZHANG H F, LI X H, ZHOU X H. Optimization scheduling strategy of integrated energy system considering demand response and carbon trading[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 218-226.