doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.020
引用格式：陈莉佳，高明，华东. 考虑碳交易机制的热电联产—光热电站协同调峰优化运行[J]. 矿冶，2026，35(1)：154-162.
CHEN Lijia, GAO Ming, HUA Dong. Optimal operation of power grid coordinated peak regulation of CHP-CSP systems with carbon trading mechanisms[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 154-162.

考虑碳交易机制的热电联产—光热电站协同调峰优化运行

陈莉佳 高 明 华 东
（国网新疆电力有限公司经济技术研究院，乌鲁木齐 830000）

摘 要：在全球能源转型和应对气候变化的背景下，燃煤电厂导致的全球变暖问题以及可再生能源消纳不足的负面影响亟待解决。为此，本文建立了一种考虑碳交易机制的热电联产（燃气轮机和余热锅炉）—光热电站协同调峰优化运行模型。该模型主要聚焦于需求响应和光热电站辅助考虑余热收集的燃气轮机参与电网调峰策略研究，分析了碳交易价格和补偿系数在可交易碳配额背景下对系统运行和碳排放的影响。研究结果表明考虑综合需求响应能够实现负荷峰谷调节，降低综合能源系统的调峰需求；混合CSP-CHP的运行模式提高了可再生能源的利用率，同时减少了系统的碳排放。本研究所提出的框架使系统运行成本降低了7.5%，碳排放减少了15.6%，风能利用率提高了9.3%。

关键词：综合能源系统；混合CSP-CHP；综合需求响应（IDR）；阶梯式碳交易（LCT）
中图分类号：X32；X43 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0154-09

Optimal operation of power grid coordinated peak regulation of CHP-CSP systems with carbon trading mechanisms

CHEN Lijia GAO Ming HUA Dong
(Research Institute of Economics and Technology, State Grid Xinjiang Power Company Limited, Urumqi 830000, China)

Abstract: In the context of global energy transition and climate change mitigation, the issue of global warming caused by coal-fired power plants and the negative impacts of insufficient renewable energy integration are urgent problems that need to be addressed. To this end, a co-generation CHP-CSP, the CHP consists of gas turbine and waste heat boiler, synergistic peaking optimization operation model considering carbon trading mechanism is established in this paper. The model mainly focuses on demand response and the participation of gas turbine assisted by concentrated solar power plant in grid peaking strategy considering waste heat collection, and analyzes the impacts of carbon trading price and compensation coefficients on system operation and carbon emission in the context of tradable carbon quota. The research results show that considering integrated demand response can achieve load peak-valley regulation and reduce the peaking demand of the integrated energy system. The hybrid CSP-CHP operation mode improves the utilization rate of renewable energy and reduces system carbon emissions. The framework proposed in this study reduces system operating costs by 7.5%, carbon emissions by 15.6%, and increases wind energy utilization by 9.3%.

Key words: integrated energy system (IES); hybrid CSP-CHP; integrated demand response (IDR); laddered carbon trading (LCT)

收稿日期：2025-02-23
基金项目：国网新疆电力有限公司科技项目(SGXJJJ00NYJS2400010)
第一作者：陈莉佳，工程师，主要研究方向为新能源发电与并网等。E-mail：3044880784@qq.com

全球经济发展推动石油等化石燃料消耗增长，其燃烧产生的大量二氧化碳加剧了全球变暖，促使降低大气二氧化碳排放成为发电领域的关键任务[1-6]。提高对可再生能源的利用被视为降低碳排放的重要途径，但可再生能源的并网因自身的波动性和不稳定性受到限制[7-10]。在此背景下，综合能源系统作为一种有效解决方案，通过实现多种能源的互补与梯级利用，进一步减少了温室气体排放[11,12]。

BAHRANI和SHEIKHI提出从智能电网的需求响应向智能能源枢纽的综合需求响应（Integrated Demand Response，IDR）转变，强调了需求响应在综合能源系统中的重要性[13]。艾欣等[14]研究了电-热-气耦合系统的综合直接负荷控制，提出通过需求响应优化多能源系统的协调运行。张婕等[15]在售电商参与需求响应的背景下，提出了一种实时电价决策模型，提高了用户侧资源的利用效率。MOHSENI等[16]对可再生能源系统的投资和运行规划进行了系统性回顾，强调需求响应在应对预测不确定性中的作用。ZHANG等[17]基于双层Stackelberg博弈，研究了社区综合能源系统中的需求响应和碳交易机制。现有研究表明，需求响应和热电联产（Combined Heat and Power，CHP）的协同优化是提升综合能源系统灵活性和经济性的关键[18,19]。燃气轮机作为一种高效发电设备，在发电过程中可同步产生电力和热能。通过配备储热装置，热电联产系统能够有效提升能源利用效率，并显著增强系统的灵活性和适应性[20-22]。通过将需求响应与热电联产相结合，综合能源系统能够在满足用户需求的同时，最大化地降低碳排放并提高经济性。但现有研究在多能源耦合系统的综合优化方面仍存在不足，尤其是在和碳交易机制的结合上。本文从热电联产与需求响应协同综合能源系统的运行策略出发，研究燃气轮机-电网协同运行策略对电网调峰，新能源消纳以及碳排放的影响。

1 主要模型和减碳机制分析

1.1 CSP-CHP混合系统模型

聚光太阳能（Concentrating Solar Power，CSP）与热电联产混合系统能够解耦传统热电联产系统中“功率受限于热负荷”的特性，提升系统的调峰能力，从而增强对风电（Wind Power，WP）的消纳。CSP-CHP混合发电系统的结构如图1所示，其主要组成部分包括太阳能场（Solar Field，SF）、蓄热装置（Thermal Energy Storage，TES）、燃气轮机（Gas Turbine，GT）、余热回收锅炉（Heat Recovery Boiler，HRB）和蒸汽轮机（Steam Turbine，ST）。模型细节参考文献[23]。

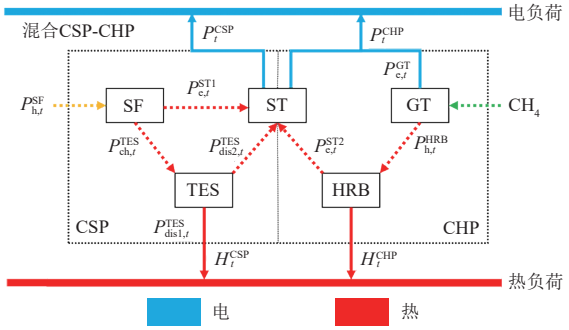


图1 CSP-CHP混合发电系统的结构

Fig. 1 Structure of CSP-CHP hybrid power generation system

1.1.1 混合CSP-CHP的能量流

混合CSP-CHP系统中的能量平衡关系由式（1）~式（9）约束条件描述。

$$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{SF}}+l^{\mathrm{NG}}Q_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}}h^{\mathrm{GT}}=E_t^{\mathrm{TES}}-(1-g^{\mathrm{TES}})E_{t-1}^{\mathrm{TES}}+P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{ST1}}/h^{\mathrm{CSP}}+P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}}+P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{HRB}} \tag{1}$$

$$E_t^{\mathrm{TES}}=(1-\gamma^{\mathrm{TES}})E_{t-1}^{\mathrm{TES}}+P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{TES}}\eta_{\mathrm{ch}}^{\mathrm{TES}}+(P_{\mathrm{dis1},t}^{\mathrm{TES}}+P_{\mathrm{dis2},t}^{\mathrm{TES}})/\eta_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{TES}} \tag{2}$$

$$P_t^{\mathrm{CSP}}=P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{ST1}}+P_{\mathrm{dis2},t}^{\mathrm{TES}}\eta^{\mathrm{CSP}} \tag{3}$$

$$P_t^{\mathrm{CHP}}=P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{ST2}}+P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}} \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{HRB}}=P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{ST2}}/\eta^{\mathrm{CHP}}+H_t^{\mathrm{CHP}} \tag{5}$$

$$H_t^{\mathrm{CSP}}=P_{\mathrm{dis1},t}^{\mathrm{TES}} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{SF}}=\eta^{\mathrm{SF}}S^{\mathrm{SF}}D \tag{7}$$

$$\lambda^{\mathrm{NG}}G_t^{\mathrm{GT}}\eta^{\mathrm{GT}}=P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}}+P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{HRB}} \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{HRB}}=kP_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}} \tag{9}$$

1.1.2 混合CSP-CHP的净输出

混合CSP-CHP装置的净输出功率和热量范围如下所述，其中蓄热（Thermal Energy Storage，TES）的最大和最小可用容量由式（10）约束条件限定。约束条件式（11）~式（13）确保充电和放电功率在安全阈值范围内。热电联产的运行范围由式（14）约束条件加以规定。

$$E_{\min}^{\mathrm{TES}}\leqslant E_t^{\mathrm{TES}}\leqslant E_{\max}^{\mathrm{TES}} \tag{10}$$

$$U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{ch,min}}^{\mathrm{TES}}\leqslant P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{TES}}\leqslant U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{ch,max}}^{\mathrm{TES}} \tag{11}$$

$$U_{\mathrm{dis1},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{dis1,min}}^{\mathrm{TES}}\leqslant P_{\mathrm{dis1},t}^{\mathrm{TES}}\leqslant U_{\mathrm{dis1},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{dis1,max}}^{\mathrm{TES}} \tag{12}$$

$$U_{\mathrm{dis2},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{dis2,min}}^{\mathrm{TES}}\leqslant P_{\mathrm{dis2},t}^{\mathrm{TES}}\leqslant U_{\mathrm{dis2},t}^{\mathrm{TES}}P_{\mathrm{dis2,max}}^{\mathrm{TES}} \tag{13}$$

$$k_1H_t^{\mathrm{CHP}}\leqslant P_t^{\mathrm{CHP}}\leqslant k_2H_t^{\mathrm{CHP}} \tag{14}$$

1.1.3 混合CSP-CHP的减碳机制

CSP-CHP混合系统通过降低CHP机组的热功率输出，利用CSP子系统的灵活性调节CHP的“功率

受限于热负荷”的特性。这不仅提高了系统的灵活性，还通过增加风电的消纳量，实现了以零碳风电替代传统火电机组发电，从而有效减少碳排放。

1.2 综合需求响应模型

根据综合需求响应的基本概念和管理范围，需求响应可根据其属性分为四类：固定负荷、可调整负荷、可转移负荷和可替代负荷。固定负荷是完全适应用户需求的不可控负荷，在时间或能耗方式上不受系统修改。可调整负荷和可转移负荷主要用于削峰填谷，用户可以通过调整用电时间，错开自身用电高峰与电网用电高峰。可替代负荷是一种在高需求时段可以减少对电力需求的峰值负荷。

1.2.1 可调整负荷响应模型

针对加热和冷却电力传输的滞后性，以及用户在加热过程中对温度感知的不精确性，可通过在特定温度范围内进行调节，实现对热/冷负荷的灵活响应。可调整负荷仅改变用电的时序，不改变用户的总用电量。它能够承受特定的中断或功率降低，从而缩短负荷的运行时间。根据供需动态变化，可调整负荷可能会部分或全部减少。可调整负荷响应模型可以表述为：

$$\begin{cases} L_{i,t}=\overline{L}_{i,t}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}} \\ L_{i,t,\min}^{\mathrm{cut}}\leqslant\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}}\leqslant L_{i,t,\max}^{\mathrm{cut}} \end{cases} \tag{15}$$

式中，i表示可调整负荷所涉及的能量类型；$L_{i,t}$和$\overline{L}_{i,t}$表示需求响应前后能量负荷的类型；$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}}$表示在时间$t$内，第$i$类负荷的调整量；$L_{i,t,\min}^{\mathrm{cut}}$表示$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}}$的下限值；$L_{i,t,\max}^{\mathrm{cut}}$表示$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}}$的上限值。

1.2.2 可转移负荷响应模型

可转移负荷是指负荷的一部分能够在时间上进行灵活调整，以响应能源价格波动，从而实现峰值负荷的转移，同时保持整体能源需求相对稳定。具体而言，可转移负荷是根据分时电价对用电时间进行调整的那部分负荷，其调整过程不会显著改变总能源需求。这种负荷的调整通常涉及根据预设计划改变电源的使用时序，且需要在多个调度周期内完成整个负荷的转移。可转移负荷响应模型可表述为：

$$\begin{cases} L_{i,t}=\overline{L}_{i,t}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}} \\ \Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}}=\overline{L}_{i,t}\sum_{t'=1}^{T}\left[E_i(t,t')(c_{i,t}-\overline{c}_{i,t})/\overline{c}_{i,t}\right] \\ 0\leqslant\left|\Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}}\right|\leqslant L_{i,t,\max}^{\mathrm{sft}} \end{cases} \tag{16}$$

式中，$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}}$表示在时间$t$内，第$i$类负荷的转移量；$\Delta L_{i,t,\max}^{\mathrm{sft}}$表示$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}}$的上限值；$E_i$是能源价格弹性矩阵，相关数据参考文献[24]；$c_{i,t}$和$\overline{c}_{i,t}$分别表示可转移负荷在需求响应前后的能源价格。

1.2.3 可替代负荷响应模型

可替代负荷是指可以通过其他能源形式替代以满足能源需求的负荷，主要涉及住宅和商业用户，常见设备包括空调、炉灶和加热设备等。可替代负荷响应模型可表述为：

$$\begin{cases} L_{i,t}=\overline{L}_{i,t}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{rpl}} \\ 0\leqslant\left|\Delta L_{i,t}^{\mathrm{rpl}}\right|\leqslant L_{i,t,\max}^{\mathrm{rpl}} \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} L_{\mathrm{e},t} \\ L_{\mathrm{h},t} \\ L_{\mathrm{c},t} \\ L_{\mathrm{g},t} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \overline{L}_{\mathrm{e},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{h},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{c},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{g},t} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 & k_{\mathrm{he}} & k_{\mathrm{ce}} & k_{\mathrm{ge}} \\ k_{\mathrm{eh}} & 0 & k_{\mathrm{ch}} & k_{\mathrm{gh}} \\ k_{\mathrm{ec}} & k_{\mathrm{hc}} & 0 & k_{\mathrm{gc}} \\ k_{\mathrm{eg}} & k_{\mathrm{hg}} & k_{\mathrm{cg}} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{L}_{\mathrm{e},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{h},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{c},t} \\ \overline{L}_{\mathrm{g},t} \end{bmatrix} \tag{18}$$

式中，$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{rpl}}$表示在时间$t$内，第$i$类负荷的替代量；$L_{i,t,\max}^{\mathrm{rpl}}$表示$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{rpl}}$的上限值；$k_{ij}$表示能源$i$和能源$j$之间的替代转换效率，$k_{ij}$=−1/$k_{ji}$。

1.2.4 综合需求响应模型

综合需求响应模型可通过整合式(15)~式(18)约束条件构建，具体为如下所示：

$$L_{i,t}=\overline{L}_{i,t}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{DR}}=\overline{L}_{i,t}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{cut}}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{sft}}+\Delta L_{i,t}^{\mathrm{rpl}} \tag{19}$$

式中，$\Delta L_{i,t}^{\mathrm{DR}}$表示其中，表示综合需求响应的负载变化。

根据电价的实时波动，将高峰期的一部分电力负荷转移到低谷期，以实现削峰填谷，如图2所示。这一过程可以减少因联合循环发电厂净出力不足而导致的高碳机组出力增加，其效果等同于采用零碳的风力发电替代高峰时段的高碳机组出力，进而降低综合能源系统的碳排放。

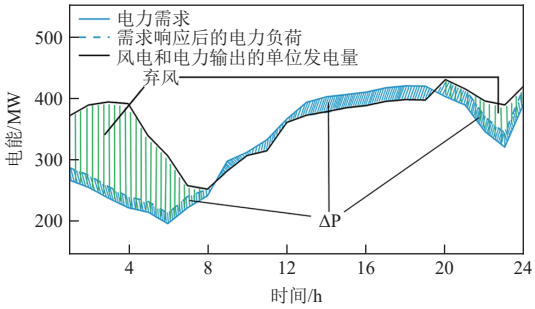


图2 需求响应的低碳机理分析

Fig. 2 Analysis of the low-carbon mechanism of DR.

2 LCT模型下的低碳经济调度模型

2.1 目标函数

本文的目标函数是最小化综合能源系统日常运营的总成本，包括用户侧灵活负荷优化后的运维成本、碳交易成本、风电弃风罚款以及补偿成本，具体见式(20)：

$$C=\min(C^{\mathrm{om}}+C^{\mathrm{buy}}+C^{\mathrm{WPC}}+C^{\mathrm{dr}}+C^{\mathrm{CO_2}}) \tag{20}$$

式中，C表示系统运行的总成本，包括设备维护成本C^{om}、能源采购成本C^{buy}、弃风罚款成本C^{WPC}、需求响应成本C^{dr}和碳排放罚款成本$C^{\mathrm{CO_2}}$。

2.1.1　设备维护成本

碳捕获发电厂（Carbon Capture Power Plants，CCPP）的运营成本与其成本系数之间存在非线性关系，具体如式（22）约束条件所示。

$$C^{\mathrm{om}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}c_n^{\mathrm{om}}P_{t,n}+\sum_{t=1}^{T}C_t^{\mathrm{TP}} \tag{21}$$

$$C_t^{\mathrm{TP}}=\sum_{t=1}^{T}\begin{bmatrix}\lambda_{\mathrm{coal}}\left(a^{\mathrm{TP}}(P_t^{\mathrm{TP}})^2+b^{\mathrm{TP}}P_t^{\mathrm{TP}}+c^{\mathrm{TP}}\right)+\\ \left(U_t^{\mathrm{TP}}(1-U_{t-1}^{\mathrm{TP}})S^{\mathrm{TP}}\right)\end{bmatrix} \tag{22}$$

式中，c_n^{om}表示每个子系统的维护成本系数；a^{TP}，b^{TP}和c^{TP}表示CCPP的成本系数；λ_{coal}表示煤炭的价格；S^{TP}表示启动—停止成本。

2.1.2　能源采购成本

燃气的采购成本如式（23）所示：

$$C^{\mathrm{buy}}=\sum_{t=1}^{T}c_t^{g}G_t^{g} \tag{23}$$

式中，c_t^{g}表示分别代表燃气的采购价格。

2.1.3　风电弃风惩罚成本

风电弃风惩罚成本如式（24）所示：

$$C^{\mathrm{WPC}}=\sum_{t=1}^{T}c_{\mathrm{WPC}}P_t^{\mathrm{WPC}} \tag{24}$$

式中，c_{WPC}表示风电弃风惩罚成本系数；P_t^{WPC}表示在时间段t内的风电弃风量。

2.1.4　需求响应成本

需求响应成本见式（25）：

$$\begin{cases}C^{\mathrm{dr}}=C^{\mathrm{cut}}+C^{\mathrm{sft}}\\ C^{\mathrm{cut}}=c^{\mathrm{cut}}P^{\mathrm{cut}}\\ C^{\mathrm{sft}}=c^{\mathrm{sft}}P^{\mathrm{sft}}\end{cases} \tag{25}$$

式中，C^{cut}和C^{sft}分别表示可以调整和转移的负载需求响应的补偿成本；c^{cut}表示可调整负荷的成本；P^{cut}表示总可调整负荷；c^{sft}表示可转移负荷的成本；P^{sft}表示总可转移负荷。

2.1.5　碳排放惩罚成本

本文采用传统的碳交易方法，具体为：

$$C^{\mathrm{CO_2}}=\sum_{t=1}^{T}c^{\mathrm{CS,CO_2}}G_t^{\mathrm{CS,CO_2}}+\sum_{t=1}^{T}C_t^{\mathrm{LCT,CO_2}} \tag{26}$$

式中，$c^{\mathrm{CS,CO_2}}$表示单位碳封存成本；$C_t^{\mathrm{LCT,CO_2}}$表示系统在时间t内的碳交易成本。

2.2　阶梯式碳交易模型

2.2.1　碳排放计算模型

本文的碳排放主要来源于两个方面：一是热力发电厂燃煤所产生的碳排放，二是燃气轮机发电所产生的碳排放。相关模型为：

$$\begin{cases}T_t^{\mathrm{CO_2}}=T_t^{\mathrm{GT}}+T_t^{\mathrm{CCPP}}-T_t^{\mathrm{CCS}}\\ T_t^{\mathrm{GT}}=e_{\mathrm{g}}^{\mathrm{GT}}(P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}}+P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{HRB}})\\ T_t^{\mathrm{TP}}=e_{\mathrm{g}}^{\mathrm{TP}}P_t^{\mathrm{GN}}\end{cases} \tag{27}$$

式中，$T_t^{\mathrm{CO_2}}$表示在时间t内，综合能源系统的总碳排放量；T_t^{GT}表示燃气轮机的碳排放量；$e_{\mathrm{g}}^{\mathrm{GT}}$表示燃气轮机的碳排放系数，本文中取0.927；$T_t^{\mathrm{TP}}$表示热力发电厂的碳排放量；$e_{\mathrm{g}}^{\mathrm{TP}}$表示热力发电厂的碳排放系数，本文中取0.970。

2.2.2　碳配额分配模型

目前，尽管国内电力行业主要采用免费配额的方式，但本研究中该系统的碳配额将基于基线技术进行确定。相关模型为：

$$\begin{cases}T_t^{\mathrm{free}}=T_t^{\mathrm{GT,free}}+T_t^{\mathrm{TP,free}}+T_t^{\mathrm{WP,free}}\\ T_t^{\mathrm{GT,free}}=\delta_{\mathrm{GT}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{GT}}\\ T_t^{\mathrm{TP,free}}=\delta_{\mathrm{TP}}P_t^{\mathrm{TP}}\\ T_t^{\mathrm{WP,free}}=\delta_{\mathrm{WP}}P_t^{\mathrm{WP}}\end{cases} \tag{28}$$

式中，T_t^{free}表示在时间t内，系统的碳排放配额；$T_t^{\mathrm{GT,free}}$表示燃气轮机的碳排放定额；δ_{GT}表示燃气轮机的碳配额系数，文中取0.7；$T_t^{\mathrm{TP,free}}$表示热力发电厂的碳排放定额；δ_{TP}表示热力发电厂的碳配额系数，文中取0.7；$T_t^{\mathrm{WP,free}}$表示风力发电厂的碳排放定额；δ_{WP}表示风力发电厂的碳配额系数，文中取0.7。

因此，LCT市场实际涉及的碳排放量可表示为：

$$T_t^{\mathrm{a}}=T_t^{\mathrm{CO_2}}-T_t^{\mathrm{free}} \tag{29}$$

2.2.3　阶梯式碳交易成本计算模型

目前，尽管国内电力行业主要采用免费配额的方式，但本研究中该系统的碳配额将基于基线技术进行确定。相关模型为：

$$C_t^{\mathrm{LCT,CO_2}}=\begin{cases}m(1+3g)(T_t^{\mathrm{a}})-m(1+3g)L,T_t^{\mathrm{a}}\leqslant -2L\\ m(1+2g)(T_t^{\mathrm{a}})-m(1+2g)L,-2L\leqslant T_t^{\mathrm{a}}\leqslant -L\\ m(1+g)(T_t^{\mathrm{a}}),-L\leqslant T_t^{\mathrm{a}}\leqslant 0\\ m(T_t^{\mathrm{a}}),0\leqslant T_t^{\mathrm{a}}\leqslant L\\ m(1+\tau)(T_t^{\mathrm{a}}-L)+mL,L\leqslant T_t^{\mathrm{a}}\leqslant 2L\\ m(1+2\tau)(T_t^{\mathrm{a}}-2L)+m(2+\tau)L,T_t^{\mathrm{a}}\geqslant 2L\end{cases} \tag{30}$$

式中，m表示阶梯式碳交易市场中的阶梯式碳交易基价；g表示补偿系数；τ表示价格增长率；L表示碳排放当量区间。

2.3　约束条件

2.3.1　功率平衡约束

在综合能源系统中必须满足燃气、供热、制冷和

电力的能量平衡要求，如式(31)所示。

$$\begin{cases} P_t^{GN}+P_t^{WT}+P_t^{CHP}+P_t^{CSP}=P_t^{L,dr}+P_t^{EC}+P_t^{P2H} \\ H_t^{CHP}+H_t^{CSP}+H_t^{P2H}=H_t^{L,dr}+H_t^{AC} \\ C_t^{ER}+C_t^{AC}=C_t^{L,dr} \\ G_t^{buy}=G_t^{L,dr}+G_t^{GT} \end{cases} \tag{31}$$

2.3.2 聚光太阳能单位约束

聚光太阳能单位约束如本文的第2.1节所示。

2.3.3 聚光太阳能单位约束

热电联产单位约束如本文的第2.1节所示。

2.3.4 热能单位约束

$$U_t^{TP}P_{min}^{TP}\leqslant P_t^{TP}\leqslant U_t^{TP}P_{max}^{TP} \tag{32}$$

$$-RD^{TP}\leqslant P_t^{TP}-P_{t-1}^{TP}\leqslant RU^{TP} \tag{33}$$

式中，U_t^{TP} 表示热能在时间 t 的启停状态变量；RD^{TP} 表示热能旋转储备的下限约束值；RU^{TP} 表示热能旋转储备的上限约束值。

2.3.5 综合需求响应约束

热电联产单位约束如本文的第2.2节所示。

2.3.6 风力涡轮机约束

风力涡轮机约束见式(34)。

$$\begin{cases} P_t^{WT}=P_t^{WP}+P_t^{WPC} \\ 0\leqslant P_t^{WT}\leqslant P_{max}^{WT} \\ 0\leqslant P_t^{WP}\leqslant P_t^{WT} \end{cases} \tag{34}$$

式中，P_t^{WT} 表示时段 t 内风力涡轮机的预测输出；P_t^{WP} 表示时段 t 内的风电功率；P_t^{WPC} 表示时段 t 内的风电功率缩减；P_{max}^{WT} 表示风力涡轮机的最大输出约束。

2.3.7 热量转换约束

热量转换约束约束见式(35)。

$$\begin{cases} H_t^{P2H}=\eta^{P2H}P_t^{P2H} \\ 0\leqslant P_t^{P2H}\leqslant P_{max}^{P2H} \end{cases} \tag{35}$$

式中，H_t^{P2H} 表示时段 t 内电加热(P2H)输出的热功率；η^{P2H} 表示电热转换效率；P_t^{P2H} 表示时段 t 内P2H消耗的电功率；P_{max}^{P2H} 表示P2H的最大输出功率约束。

2.3.8 冷量转换约束

本文涉及两种主要的冷能转换装置：电冰箱和吸收式冷水机，相关约束条件见式(36)~(37)：

$$\begin{cases} C_t^{ER}=\eta^{ER}P_t^{ER} \\ 0\leqslant C_t^{ER}\leqslant C_{max}^{ER} \end{cases} \tag{36}$$

$$\begin{cases} C_t^{AC}=\eta^{AC}H_t^{AC} \\ 0\leqslant C_t^{AC}\leqslant C_{max}^{AC} \end{cases} \tag{37}$$

式中，C_t^{ER} 表示时段 t 内电制冷(ER)输出冷量的功率；η^{ER} 表示ER的转换效率；P_t^{ER} 表示时段 t 内ER消耗的电功率；C_{max}^{ER} 表示ER的最大输出功率约束。C_t^{AC} 表示时段 t 内吸收式冷水机(AC)输出冷量的功率；η^{AC} 表示AC的转换效率；P_t^{AC} 表示时段 t 内AC消耗的电功率；C_{max}^{AC} 表示AC的最大输出功率约束。

2.3.9 能源采购约束

本文中，能源采购仅涉及天然气采购，其约束条件为：

$$0\leqslant G_t^{buy}\leqslant G_{max}^{buy} \tag{37}$$

式中，G_{max}^{buy} 表示系统的最大燃气购买量。

3 算例分析

3.1 仿真场景及基础参数

本文的研究对象是中国北方的一个综合能源示范园区，该系统以每小时为调度时间间隔，连续运行24小时。式(22)约束属于混合整数二次约束规划(MIQCP)问题，因为其包含二次约束。为了求解全局最优解，采用MATLAB/YALMIP调用CPLEX求解器进行求解。本文研究了风力发电量的利用率、CO_2排放量、运营成本以及不同运行模式下的系统各项指标。随后，基于相应的决策方法，确定了最佳调度方案。其中，负荷水平的预测曲线如图3所示；直接法向照明和风速的预测曲线如图4所示。

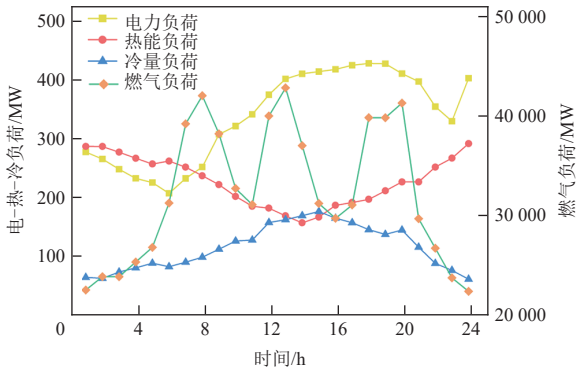


图3 负荷水平的预测曲线

Fig. 3 Predicted curves for load level

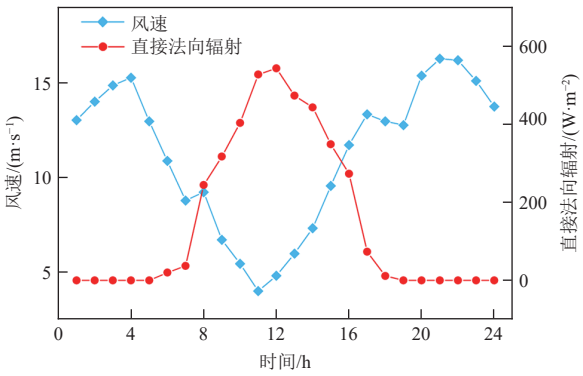


图4 直接法向照明和风速的预测曲线

Fig. 4 Predicted curves for direct normal illumination and wind speed

3.2 调度结果分析

本研究聚焦于中国北方的一个综合能源示范园区。为深入分析，研究设计了表1三种运行模式，旨在对比和评估碳捕获与封存（CCS）设备与需求响应耦合对综合能源系统的影响，结果见表2。此外，除表1中列出的主要变量外，三个模型的其他条件均保持一致。

表1 不同案例的操作模式设置

Table 1 Operating mode settings for different cases

案例	情况
案例1	Hybrid CSP-CHP
案例2	Hybrid CSP-CHP，仅包括电力需求响应
案例3	Hybrid CSP-CHP，综合需求响应

表2 不同情况下的调度优化结果比较

Table 2 Comparison of scheduling optimization results for different cases

案例	总成本/元	风电利用率/%	碳排放量/t
案例1	7 092 923	80.30	5 725.04
案例2	6 892 854	84.32	5 508.95
案例3	5 986 474	89.60	5 295.18

案例1：在1:00-9:00和22:00-23:00时间段，综合能源系统出现了显著的风电弃用现象，如图5所示。这种现象的主要原因如下：首先，传统电厂为保障系统的稳定性和安全性提供备用容量，从而限制了机组的下调能力；其次，热电联产的“功率受限于热负荷”运行特性导致发电功率的最小下限受到限制。图6显示了聚光太阳能在11:00-13:00、15:00-21:00和24:00提供热能输出，这在一定程度上缓解了热电联产“热决定功率”特性对系统的不利影响。

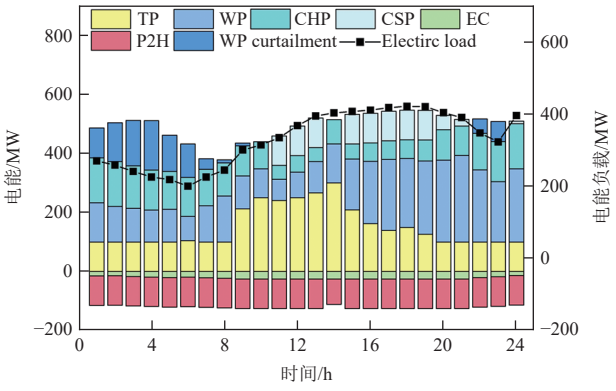


图5 案例1中的电能调度结果

Fig. 5 Electrical energy scheduling outcomes in Case 1

案例2：综合能源系统在1:00-7:00和22:00-23:00期间出现了显著的风电弃用现象，如图7所示。案例2与案例1相比，风电利用率有所提高。这是因为电价对需求响应的影响，通过将负荷从高峰时段转移到低谷时段，有效降低了系统的总运营成本。此外，由于早晚风速较高而中午风速较低，风电弃用现象通常在这些时段较为集中。因此，引入电力需求响应可以实现电负荷的削峰填谷，通过对电负荷时移有效提高系统对风电的消纳能力。

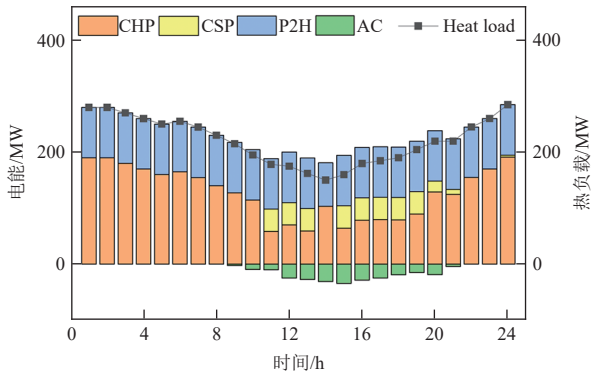


图6 案例1中的热能调度结果

Fig. 6 Heat energy scheduling outcomes in Case 1

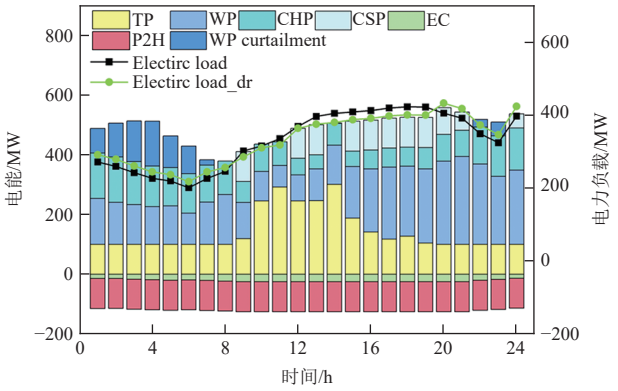


图7 案例2中的电能调度结果

Fig. 7 Electrical energy scheduling outcomes in Case 2

然而，在电价高峰期，电力需求的变化并不一致。这种不一致主要是由于最大电力负载容量的限制，使得在任何给定时刻，可转移的电力负载是有限的。此外，总负荷在转移前后必须保持不变，这导致在某些时段（如20:00-22:00），尽管处于电价高峰期，转移后的负荷仍需增加，以维持整体负荷的稳定性。因此，虽然需求响应可能无法最大限度地降低系统的总运营成本，但它仍然能够在一定程度上有效降低这些成本。

案例3：在案例2的基础上，本案例进一步引入了综合需求响应。与案例2相比，风电弃用现象在1:00-6:00和22:00-23:00期间显著减少，风电利用率有所提高，如图8所示。这主要得益于热需求响应的作用。图9展示了热需求响应受到热能价格的影响，使得热负荷在1:00-8:00和20:00-24:00期间降低，同

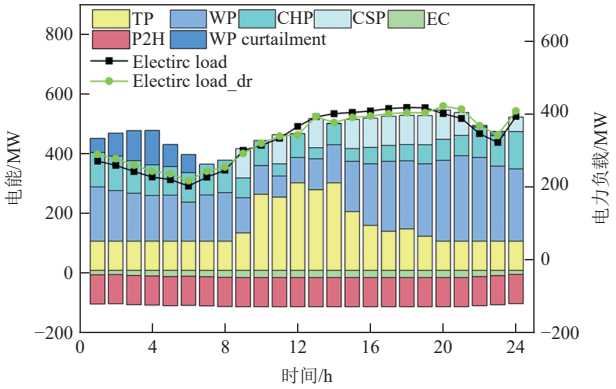


图8 案例3中的电能调度结果

Fig. 8 Electrical energy scheduling outcomes in Case 3

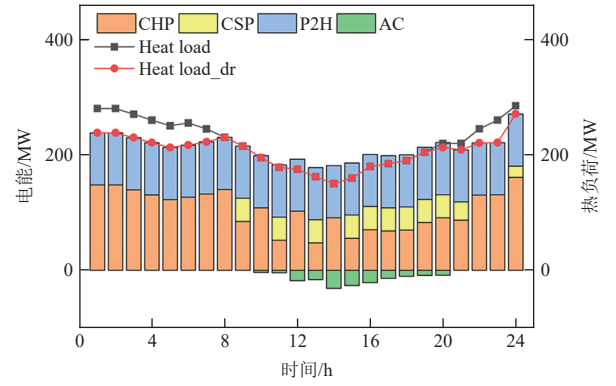


图9 案例3中的热能调度结果

Fig. 9 Heat energy scheduling outcomes in Case 1

时热电联产产生的热量也相应减少。由于热电联产的“功率受限于热负荷”特性，虽然热电联产的发电量有所减少，但风电的消纳能力得到改善。

然而，在热需求方面，8:00-20:00期间的热负荷在需求响应前后并未发生变化。这一现象的原因在于可转移负荷与可替代负荷的相互抵消。此外，该时段内的停滞热负荷不仅抑制了因CHP热量输出增加而导致的功率输出上升，还避免了其对其他能源消耗空间的侵占。同时，停滞热负荷也减少了因CHP产品扩张所需的天然气采购成本和碳排放的增加。这些结果充分证明了该模型的经济性和低碳性。

三个案例体现了从基础约束到电力响应，再到综合响应的优化路径。其中，案例1的弃风率高达19.70%，主要受限于机组刚性调节特性；案例2引入电力需求响应，弃风率下降了4.02%，但仍受到最大负载容量的限制；案例3进一步引入热-电耦合的综合需求响应，其弃风率进一步降至10.40%，验证了多能协同的增效作用。数据表明，综合需求响应案例3较单一电力响应案例1，碳排放量降低7.5%，日常运营成本降低15.6%，风电利用率提升9.3%，有效优化了风电的消纳能力和降低了日常运营的成本。

4 结论

传统情况下考虑燃气轮机余热收集参与综合能源系统负荷调峰时，热电联产机组的“以热定电”特性会降低新能源的消纳水平，增加不必要的碳排放和运行成本，针对这一问题，本文提出了基于热电联产与需求响应的燃气轮机—电网协同调峰优化运行调度方法。通过对三个不同操作模式设置的案例的结果分析，得出以下结论：

1）在用户侧引入IDR模型，能够有效地平滑负荷曲线。该模型以电力负荷和热负荷为决策主体，引导用户参与需求响应，减少峰谷负荷差异，缓解热电联产“以热定电”特性及设备压力导致的弃风，优化能源供应与系统运行。

2）本研究提出的优化模型显著降低了碳排放和运营成本。与基准模型相比，碳排放量降低7.5%，日常运营成本降低15.6%，风电利用率提升9.3%，有效优化了风电的消纳能力。

3）将IDR与CSP-CHP相结合，显著减轻了系统调峰压力，降低了运营成本和弃风率。同时，源端与需求端的最优调度协同作用，提升了综合能源系统的经济性和低碳性能。

本研究为应用CSP-CHP的IES低碳经济调度提供了理论依据和参考值。然而，研究仅考虑了热储能，未涉及其他储能形式。因此，未来研究可进一步探讨多种储能形式的协同优化，以进一步提升IES的性能。

参考文献

[1] CRIPPA M, GUIZZARDI D, BANJA M, et al. CO_2 emissions of all world countries[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.

[2] YAZHOU S, KAI Z, YAN Z, et al. Characterisation of distributed combustion of reformed methanol blends in a model gas turbine combustor[J]. Energy, 2023, 272: 127149.

[3] CUSWORTH D H, THORPE A K, MILLER C E, et al. Two years of satellite-based carbon dioxide emission quantification at the world's largest coal-fired power plants[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, 23: 14577-14591.

[4] 张学友，王海北，MA Hao. 我国铅冶炼行业双碳目标实现方法[J]. 矿冶，2024, 33(1): 1-13.
ZHANG X Y, WANG H B, MA H. Methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in China's lead smelting industry[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 1-13.

[5] 张鸽，张弛，林星杰，等. 双碳背景下铜尾矿综合利用方向

探讨[J]. 矿冶, 2024, 33(4): 600-606.
ZHANG G, ZHANG C, LIN X J, et al. Discussion on the comprehensive utilization of copper tailings under the background of dual carbon[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(4): 600-606.

[6] YE J, YAN L, LIU X, et al. Economic feasibility and policy incentive analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in coal-fired power plants based on system dynamics[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(13): 37487-37515.

[7] 杨毅. 含大规模可再生能源的电力系统频率稳定性分析及控制策略[J]. 电工技术, 2024(增刊2): 334-339.
YANG Y. Frequency stability analysis and control strategy of power systems containing large-scale renewable energy[J]. Electric Engineering, 2024(Sup.2): 334-339.

[8] 林其友, 王艳杰, 杨乐新. 含可再生能源并网的电力系统稳定裕度研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 129-134.
LIN Q Y, WANG Y J, YANG L X. A study on the stability margin of the power system with renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 129-134.

[9] 李天晨, 尹建政, 张大伟, 等. 基于水电站储能技术的可再生能源并网策略研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 677-679.
LI T C, YIN J Z, ZHANG D W, et al. Research on renewable energy grid integration strategy based on hydropower station energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 677-679.

[10] 张垚. 共生视角下分布式可再生能源开发规模及配置优化模型[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
ZHANG Y. Development scale and allocation optimization model of distributed renewable energy from symbiotic perspective[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023.

[11] 齐先军, 蒋中琦, 张晶晶, 等. 考虑碳捕集与综合需求响应互补的综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 133-141.
QI X J, JIANG Z Q, ZHANG J J, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering complementation of carbon capture and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 133-141.

[12] 吕祥梅, 刘天琪, 刘绚, 等. 考虑高比例新能源消纳的多能源园区日前低碳经济调度[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1586-1597.
LYU X M, LIU T Q, LIU X, et al. Low carbon economic dispatch of multi-energy park considering high proportion of renewable energy[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1586-1597.

[13] BAHARNI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.

[14] 艾欣, 陈政琦, 孙英云, 等. 基于需求响应的电-热-气耦合系统综合直接负荷控制协调优化研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1160-1171.
AI X, CHEN Z Q, SUN Y Y, et al. Study on integrated DLC coordination optimization of electric-thermal-gas coupling system considering demand response[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1160-1171.

[15] 张婕, 孙伟卿, 刘唯. 考虑需求响应收益的售电商实时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 492-504.
ZHANG J, SUN W Q, LIU W. Real time pricing considering demand response revenue of electricity sellers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 492-504.

[16] MOHSENI S, BRENT A C, KELLY S, et al. Demand response-integrated investment and operational planning of renewable and sustainable energy systems considering forecast uncertainties: a systematic review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112095.

[17] ZHANG M, YANG J, YU P, et al. Dual-Stackelberg game-based trading in community integrated energy system considering uncertain demand response and carbon trading[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105088.

[18] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 447-461.
CUI Y, ZENG P, WANG Z, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 447-461.

[19] 罗毅, 邱实. 基于负荷侧响应的含储热热电联产的风电消纳模型[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 90-96.
LUO Y, QIU S. A wind power consumption model of CHP with thermal energy storage based on demand response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 90-96.

[20] 余秀月, 陈灵, 范润生, 等. 600 MW供热汽轮机热力计算优化与灵活出力挖掘分析[J]. 汽轮机技术, 2025, 67(1): 13-16.
YU X Y, CHEN L, FAN R S, et al. Thermal calculation optimization and flexible output potential analysis of 600 MW cogeneration steam turbine[J]. Turbine Technology, 2025, 67(1): 13-16.

[21] 吕成洵, 袁亚强, 索延帅, 等. 烧结煤层气喷吹装备设计及对生产的影响分析[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 88-92.
LYU C X, YUAN Y Q, SUO Y S, et al. Design of sintering coalbed methane injection equipment and analysis of its influence on production[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 88-92.

[22] 丁振宇, 孙帆, 刘建华, 等. 计及管网蓄热的供热机组双向调峰能力研究[J]. 汽轮机技术, 2025, 67(1): 57-62.
DING Z Y, SUN F, LIU J H, et al. Investigation on the

bidirectional peak regulation capabilities of cogeneration units as considering the heat storage of heating pipeline networks[J]. Turbine Technology, 2025, 67(1): 57-62.

[23] LI X, LI T, LIU L, et al. Operation optimization for integrated energy system based on hybrid CSP-CHP considering power-to-gas technology and carbon capture system[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 391: 136119.

[24] KIRSCHEN D S, STRBAC G, CUMPERAYOT P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.

《矿冶》执行主编郭利杰入选“首都高端领军人才聚集培养工程”

近日，北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会公布2025年北京高层次创新创业人才支持计划“首都高端领军人才聚集培养工程”（简称“高聚工程”）科技创新领军人才入选名单，矿冶集团矿山工程研究所副所长、《矿冶》执行主编郭利杰入选。



郭利杰，正高级工程师、博士生导师，现任矿冶集团矿山工程研究所副所长（主持工作）、国家金属矿绿色开采国际联合研究中心副主任、《矿冶》执行主编，长期致力于金属矿绿色开采技术创新与应用研究，在深部金属矿高效连续开采技术、废石尾砂胶结充填技术、全尾砂膏体稳态充填技术、矿山充填体强度设计理论与方法、矿冶固废充填胶凝材料制备理论与技术等方面取得系列创新成果，并在国内外矿山推广应用。依托国际标准化组织矿业技术委员会（ISO TC82）主导组建矿山尾矿充填国际标准工作组，担任两项国际标准研制召集人，积极推动我国矿山充填技术规范成为国际通用标准。获省部级/行业科技奖励一等奖9项，主编国家标准1部，发表论文200余篇，授权发明专利30余件。

据了解，北京市“高聚工程”科技创新领军人才是北京市科委、中关村管委会为深入实施新时代人才强国战略的重大部署，旨在围绕新一代信息技术、集成电路、医药健康、智能装备、节能环保、新材料、人工智能等战略性新兴产业以及未来产业领域，加速集聚、培养造就一批一流科技领军人才和创新团队，促进前沿引领技术、颠覆性技术创新和重大科技成果在京转化落地，加快推动新质生产力形成，实现首都高质量发展。（王爱平）