考虑阶梯式碳交易机制和柔性负荷的园区级综合能源系统优化调度

Hongbin Sun [a]，Xinmei Sun [a]，Lei Kou [b]，Benfa Zhang [c]，Xiaodan Zhu [d]a. 长春工程学院电气工程学院，中国长春 b. 齐鲁工业大学（山东省科学院）海洋仪器研究所，中国青岛 c. 国网松原供电公司，中国松原 d. 呼伦贝尔学院机电工程学院，中国内蒙古呼伦贝尔

文 章 信 息

文章历史： 收稿日期：2022年12月15日 修回日期：2023年2月6日 录用日期：2023年2月13日 在线发表日期：xxxx

关键词： 综合能源系统 碳交易机制 优化运行 柔性负荷 热电联产 数学模型

低碳经济摘要

为提高园区级综合能源系统（PIES）中多能耦合的利用效率，促进风电消纳并减少碳排放，构建了融合柔性负荷与碳交易机制的 PIES 低碳经济运行优化模型。首先，根据负荷响应的特点，将需求响应分为四种类型：可转移、可转时、可削减和可替代。其次，考虑园区内的热电联产耦合设备、新能源和柔性负荷，给出了 PIES 的基本架构。最后，将阶梯式碳交易机制引入系统，以运行成本最低为目标，建立了 PIES 低碳经济运行优化模型。使用 YALMIP 工具箱和 CPLEX 求解器求解算例，仿真结果表明，参与电热耦合调度以及采用柔性电负荷或热负荷，能够显著降低系统运行成本，减小负荷峰谷差并缓解用电高峰压力。.

1. 引言

随着经济和社会的快速发展，能源需求持续增长，能源危机和环境恶化等问题日益严重（Ai and Hao，2018）。以多能互联、互通互济为特征的园区级综合能源系统，通过协调优化各种能源的生产和转换形式，可以大幅提高传统能源的利用效率，并促进可再生能源的利用（Lu et al.，2021；Kou et al.，2020）。这是实现节能和低碳的重要载体之一。

现有的大多数园区级综合能源系统考虑了总体经济成本，但很少考虑碳排放造成的额外环境成本。为了减少碳排放，

碳交易机制可以同时提升系统的经济性和环境保护水平（Fan et al.，2019）。考虑园区综合能源系统的阶梯式碳交易机制，构建了一个具有

构建了以最低运行成本和最高能源效率水平为目标的模型（Ren等人，2022）。根据核电机组、火电机组和风电机组的实际产出，免费分配初始碳排放权；并结合火电机组的实际碳排放量计算碳交易成本，从而有效平衡经济效益与低碳效益（Li等人，2019）。建立了包含废弃物处理的电热气综合能源系统，并提出了一种基于碳交易机制的系统化低碳经济运行策略

（Yang等人，2021）。将阶梯式碳交易引入区域综合能源系统的经济调度模型，并证明了阶梯式碳交易机制对碳排放的抑制作用（Qiu等人，2022）。这些研究成果为综合能源系统低碳建模和碳排放测量提供了多种有效方法，但未考虑灵活性对系统优化运行的影响（Wang等人，2019）。考虑燃气轮机和燃气锅炉的实际碳排放量，构建了综合能源系统的碳交易机制。最后，建立了以能源购置成本、碳交易成本和运维成本之和最小为目标函数的综合能源系统低碳优化运行模型（Wei等人，2022b）。这些研究成果为园区综合能源系统低碳建模和碳排放测量提供了多种有效方法，但均未

负荷侧灵活性影响的系统优化运行双目标运行优化模型。

柔性负荷调度作为调节电力系统需求侧能源性能的重要手段，受到广泛关注。针对由更多能源载体生产与传输系统及互联智能能源枢纽（智能能源枢纽，SEH）构成的多能源系统，建立了以最小化电力成本和最大化用户满意度为目标的能源系统优化运行模型，并根据系统运营商发布的能源价格调整终端用户的能源消耗和内部运行计划，但仅考虑了可削减特性（Ni等人，2018；Dolatabadi and Behnam，2017；Kou等人，2022）。将柔性负荷引入主动配电网，实现了系统运行成本和网络损耗的降低（Li等人，2023；Jia等人，2018）。建立了包含分时电价机制和柔性负荷的微电网调度模型。通过规划柔性负荷用电时段，提高了配电网的用电效率和清洁能源消纳能力

（Wang等人，2017）。构建了工业综合能源系统运行架构，并建立了考虑冷、热、电需求耦合响应特性的需求响应模型（Zhao等人，2022a，b）。上述文献分析了储能和可控负荷参与综合能源系统运行调节的能力。然而，针对综合能源系统的交互需求，负荷储能资源的协同优势尚未得到充分发挥。此外，对可控负荷的响应机制、形式和约束考虑不足，未实现受调节资源的“具体措施”。另外，现有针对储能和负荷侧资源在多能源系统低碳运行中的优化模型，主要关注一次能源消耗产生的碳排放，缺乏对综合能源系统中碳排放流动和转移的分析。在当前综合能源系统低碳运行体系下，如何在现有架构基础上优化综合能源系统中的各类资源，以实现高效节能减排的目标，仍需深入研究。

上述关于用户侧柔性负荷的大多数研究仅考虑一种柔性负荷特性，而针对热负荷可控性的研究较少，且负荷特性模型尚不完善。针对上述问题，本文建立可转移、可替代、可削减和可替换电负荷模型，并将其扩展至热负荷。以园区综合能源系统为研究对象，引入碳交易模型，分析柔性负荷在园区电网中的调节机制。在电热耦合系统中建立热电联产机组、电加热设备、电热储能和柔性负荷模型，重点关注储能与柔性负荷资源。以系统运行成本与碳排放成本之和最小为目标函数，构建低碳环境下的协调运行模型。最后，通过仿真验证，在碳交易机制下，柔性负荷能够实现削峰填谷，并促进电热综合能源系统的经济性与低碳性，为电热综合能源系统的低碳经济运行提供参考。本文的主要贡献如下：

(1) 引入电热柔性负荷，建立含柔性负荷的园区级综合能源系统基本结构，在保证经济性的同时，可以提高系统对新能源的消纳能力，尤其是风能；(2) 与传统碳交易定价模型相比，阶梯式碳交易机制对碳排放具有更强的约束力，能够更好地发挥引导碳减排的作用。设置合理的碳交易参数，可以引导系统碳排放，对实现双碳目标发挥积极作用；(3) 引入碳交易机制，建立园区级综合能源系统低碳经济运行优化模型。该模型大幅提升了新能源利用效率，促进了风电消纳，并减少了碳排放。

具体章节安排如下。第一部分介绍园区级综合能源系统的总体架构及园区内设备的数学模型。第二部分介绍柔性负荷的时移特性。第三部分介绍阶梯式碳交易机制。第四部分为算例仿真，并分析仿真结果。

2. 耦合电热柔性负荷的园区级综合能源系统双边结构框架

多能互补系统的发展为中国能源发展与转型及智能电网建设注入了强大动力，使电力系统更加智能、高效。由于园区内设备种类繁多，各设备参数各异，运行情况复杂，因此有必要对各设备进行特性分析和数学建模，从而实现整个系统的优化运行。

2.1. 基于柔性负荷参与的双边优化运行模型

本文中，园区型多能互补系统由四个主要单元构成：能源生产单元、能源转换单元、能源储存单元和能源消耗单元。其中，能源生产单元包括光伏和风电；能源转换单元包括燃气轮机、燃气锅炉和电加热机；本文中的能源储存单元主要包括电池和蓄热罐；能源消耗单元包括园区内的电负荷和热负荷。其能量流框图如图1所示。

园区的电负荷和电加热功耗主要由上级电网、光伏发电系统、风力发电系统、燃气轮机系统和储能设备提供。上级天然气网络为燃气轮机和燃气锅炉供气。

新能源通常是指太阳能、生物质能和风能等可再生能源。新能源发电技术主要通过对新能源发电的探索和利用而发展，因此其主要成本是固定设备的成本。因此，在综合能源系统中，不考虑系统能源发电的运维成本。此外，新能源发电技术使用清洁能源，排放的污染物较少，因此应尽可能采用新能源发电（Li等人，2018a，b）。对于光伏发电、风力发电等新能源发电，考虑到清洁能源的充分消纳，其发电成本较低，因此不予考虑。本文主要考虑燃气轮机、能源储存单元等可控电源的运行成本，参与容量市场的容量电价

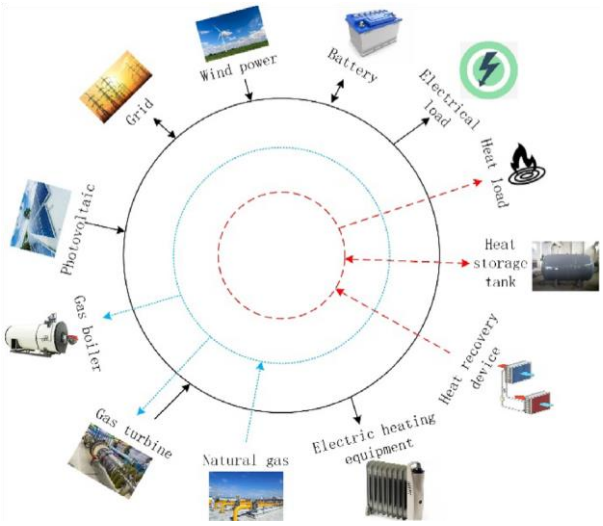


图1. 园区级综合能源系统能量循环图。

辅助服务市场，以及具备需求响应能力的负荷参与调度的补偿电价

综合能源系统 。燃气轮机是一种新型火力发电机。微型燃气轮机具有集成化程度高、燃料获取方便、能耗低等特点，主要用于分布式发电、备用电站、调峰发电等。其中，分布式发电应用广泛，例如城市商业发电，可在各地区、农村等地提供清洁可靠的电能，因此燃气轮机具有良好的发展前景。

2.2. 园区级综合能源系统能源预测模型

对于光伏发电、风力发电及其他新能源发电，在充分消纳清洁能源的情况下，发电成本较低。新能源发电技术利用清洁能源，排放的污染物较少，因此应尽可能采用新能源发电。

2.2.2. 园区综合能源系统能量转换设备模式

(1) 燃气轮机

燃气轮机通过消耗天然气产生电功率，并向园区输送电力，同时产生大量余热。这些余热可由余热锅炉利用，从而提高园区综合能源系统的热能利用率。

2.2.3. 系统优化运行中的储能设备模型

园区型多能互补系统中通常配备多种储能设备。本文选用蓄电池（SB）作为系统中的电力储能设备。通常使用荷电状态（SOC）描述储能设备的状态。

其中，SOC 为电池的荷电状态；P_d 和 P_c 分别为电池的放电功率和充电功率；P_d^{max} 和 P_c^{max} 分别为电池放电功率和充电功率的上限，该上限取设备规划的额定功率；C_{flag} 和 D_{flag} 分别表示电池充电和放电，其标志变量为0和1；η_c 和 η_d 分别为电池的充电效率和放电效率；W_{ess} 为电池容量；SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别为电池荷电状态的下限和上限；Δt 为运行优化时间。电池在每个时段只能处于一种工作状态，即充电或放电。荷电状态通常为0.15–0.95。蓄热罐的情况类似。

3. 基于低碳经济的多类型柔性负荷优化调度

根据园区未来24小时的负荷、风力发电机和光伏输出预测曲线，在满足系统运行约束的条件下，通过合理安排可控单元的出力，并辅助协调储能设备，可对柔性负荷进行移峰、转移、削减或替换，从而最大限度降低园区综合能源系统日常运行的总经济成本。

3.1. 可转移负荷

可转移负荷的供电时间可以按计划调整，但必须整体转移该负荷，且其用电时间跨越多个调度时段。假设单位调度时段为 1 h。

3.2. 可削减负荷

可削减负荷能够承受一定程度的中断或功率降低，并缩短运行时间，可根据供需情况部分或全部削减。与可转移负荷不同，削峰负荷会减少用户的用电量。采用一个取值范围为0–1的 λ 变量表示 L_{cut} 在特定时段内可削减负荷的削减状态 τ；0表示未削减，1表示 L_{cut} 在时段 τ 内已削减。

3.3. 可替代负荷

对于某类可由热能或电能直接供能的热负荷，电价较低时消耗电能，电价较高时则可直接消耗热能以满足热需求，从而实现电能与热能的相互替代。

对于上述负荷，可转移负荷和平移负荷的供电时间都可以按计划调整。二者的区别在于，平移负荷要求设备整体平移。在平移过程中，设备不能断电，且供电时间固定；也就是说，设备在平移前后的用电时段内功率固定，例如洗衣机和消毒柜。而可转移负荷在用电时段内的功率可以灵活调整，允许设备在用电时段内中断运行，且供电时间不必固定；只需满足转移前后负荷的总需求即可。例如，充电汽车的总充电量不变，但充电时间和充电功率可以灵活调整。

4. 基于碳交易机制的园区综合能源系统低碳优化运行模型

考虑碳交易机制和需求响应，构建园区综合能源系统经济性与能效的多目标优化运行模型，以提高能源利用率并减少碳排放。

4.1. 阶梯式碳交易模型

碳交易机制是通过确立法定碳排放权，并允许生产者在市场上交易碳排放权来控制碳排放。监管部门首先为各碳排放源分配碳排放权配额，生产商结合自身配额进行合理生产和排放。若实际碳排放低于分配的配额，剩余配额可在碳交易市场交易；否则，必须购买额外的碳排放配额。阶梯式碳交易机制模型主要由三部分组成：碳排放配额模型、实际碳排放模型和阶梯式碳排放交易模型（Chenet al.，2021）。

园区综合能源系统中的碳排放源主要有三类：上级购电、燃气轮机和燃气锅炉。目前，中国主要采用免费配额作为配额方法。

与传统的碳交易定价机制相比，为进一步限制碳排放，本文采用分级定价机制。阶梯式碳交易机制划分出多个碳排放权购买区间，因为园区综合能源系统必须购买更多碳排放配额。

4.2. 最小运行成本和最小碳交易成本的目标函数

考虑柔性负荷的园区综合能源系统低碳经济优化，旨在合理安排园区综合能源系统各可控单元的出力，并在满足各单元约束条件的前提下，优化调度柔性负荷。

其中，F_{NET}为与电网的交互成本；F_{DG}为新能源发电成本；F_{MT}和F_{GB}分别为燃气轮机和燃气锅炉的运行成本；F_{BAT}和F_{HST}分别为电池和蓄热罐的折旧成本；F_L为调度柔性负荷的总补偿成本；K_{NET}为当前电价；$P_{NET}(t)$为与电网交换的功率，购电为正；K_{WT}、K_{PV}、K_{MT}和K_{GB}分别为风机、光伏、燃气轮机和燃气锅炉的运行成本系数；P_{WT}、P_{PV}、P_{MT}和P_{GB}分别为风机、光伏、燃气轮机和燃气锅炉的输出功率；K_{BAT}和K_{HST}分别为电池和蓄热罐的折旧系数；$P_{BAT}(t)$和$P_{HST}(t)$分别为电池和蓄热罐的充放热能量，吸收为正。

4.3. 运行约束

(1) 负荷平衡约束
电功率和热功率满足以下负荷平衡约束（Li等人，2018a，b）。

其中，$P_{WT/PV}$和P_{pred}分别为风机/光伏的输出功率和预测输出值；$P_{MT/GB}$和P_N分别为燃气轮机/燃气锅炉的输出功率和设备额定功率。

其他能源设备约束已在上述模型中给出，此处不再赘述。

(2) 储能设备约束：
储能设备约束包括储能容量约束、充放电功率约束、充放电状态约束以及零全周期净交换功率约束：

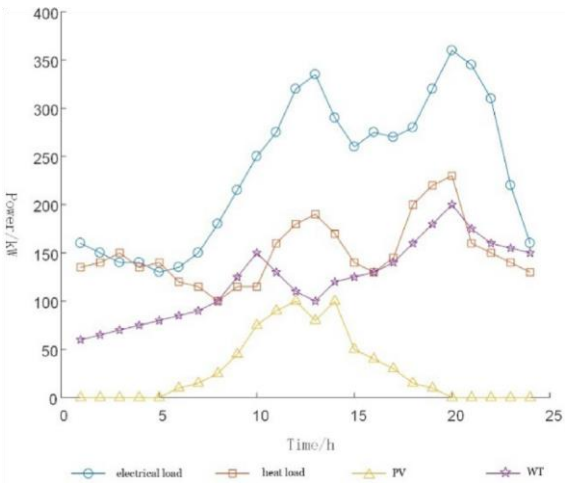


图 2. 负荷和光伏/风电出力曲线。

表 1 分时电价表（单位：¥/kWh）。

Type	峰时段	谷时段	平时段
购电价格	0.82	0.25	0.53
电价	0.65	0.22	0.45

其中，$E_{cap}(t)$和$P_{ex}(t)$分别为储能容量和充放电功率；$E_{cap,\max}$、$E_{cap,\min}$、$P_{ex,\max}$和$P_{ex,\min}$分别为储能容量和充放电功率的上下限；$S(t)$和$R(t)$分别为充放电状态，均为0–1变量。考虑到电池的使用寿命，每日充放电次数上限另行限制为8次。

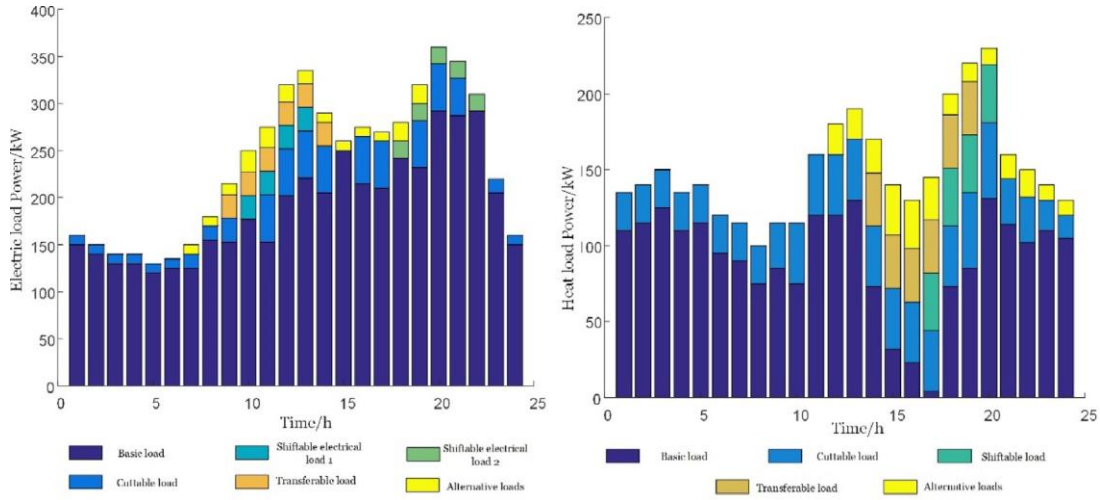
针对上述模型，本文所求解的问题属于混合整数线性规划问题。首先，分析园区系统的最优运行成本；然后，将碳交易机制下最低的碳交易成本作为目标函数；最后，在满足各项约束条件后，使用MATLAB 平台调用 YALMIP 工具箱中的 CPLEX 求解器求解该模型。

5. 案例研究

5.1. 园区综合能源系统基本数据

本文选取中国东北地区的园区综合能源系统作为研究对象。园区的结构主要包括光伏、风机、燃气轮机、燃气锅炉、热回收系统和储能设备。以次日为一个运行周期，时间间隔设为 1 h，并划分为 24 个时段。光伏和风力发电机组的出力预测以及电热负荷预测如图 2所示。从电网购电的电价如表 1所示。

灵活电/热负荷特性如表2所示。选取两种可转移电负荷。1型可转移负荷于上午10:00开始，持续4小时。可转移时间范围为00:00–21:00。2型可转移负荷于下午6:00开始，持续5小时。可转移时间范围为00:00–23:00。下午17:00开始，持续4小时。所有可转移负荷的补偿价格为0.2 ¥ kWh^{-1}。可转移电负荷功率范围为10–26.7千瓦，连续运行时间为6小时。可转移热负荷功率范围为20–36.8千瓦，连续运行时间为6小时。6小时的可转移范围和补偿成本分别为0.3 ¥ kWh^{-1}。对于削减电负荷，可持续负荷削减时间为2–5小时，负荷削减数量为8。削减时间范围为上午5:00至中午12:00。对于削减热负荷，可持续负荷削减时间为3–8小时，负荷削减数量为10。削减时间范围为上午11:00至下午17:00。替代电负荷类型的替代功率范围为10–20千瓦，替代次数为12。替代电负荷的替代范围为7:00–19:00，补偿成本为0.3 ¥ kWh^{-1}。替代热负荷类型的替代功率范围为10–33千瓦，替代次数为10。替代电负荷的替代范围为12:00–24:00，补偿成本为0.3 ¥ kWh^{-1}。



(a) Electric load distribution (b) Heat load distribution

图3. 系统优化前的用户侧负荷分布。

表2 用户侧柔性负荷参数。

负荷类型	开始时间/小时	持续时间/小时	可转移范围/小时	补偿 价格/¥ 千瓦时$^{-1}$
可转移电负荷 1	10: 00	4	[0:00～21:00]	0.2
可转移电负荷 2	18:00	5	[0:00～23:00]	0.2
可转移热负荷	17:00	4	[0:00～21:00]	0.2
负荷类型	转移功率区间 容量/kW	连续运行 时间/小时	可转移范围/小时	补偿 价格/¥ kWh^{-1}
可转移电负荷	[10 26.7]	6	[0:00～24:00]	0.3
可转移热负荷	[20 36.8]	6	[0:00～24:00]	0.3
负荷类型	连续切除时间/小时	数量 截断/天	可切除范围/小时	补偿 价格/¥ 千瓦时$^{-1}$
电负荷可减少	[2 5]	8	[5:00～12:00]	0.4
热负荷可减少	[3 8]	10	[11:00～19:00]	0.4
负荷类型	替代功率范围/kW	数量 替代次数/每	替代间隔/小时	补偿 价格/¥ kWh^{-1}
替代电负荷	[10 20]	12	[7:00～19:00]	0.3
替代热负荷	[10 33]	10	[12:00～24:00]	0.3

表3 不同场景的优化结果。

场景	总成本 ¥/kWh	碳排放 /kg	负荷峰谷差 heat /kW	电负荷峰-谷 差/kW
1	2946.4	4362.2	120	212
2	1583.6	2754.1	82	137
3	1476.5	2229.5	79	141
4	1006	1458.2	79	156

5.2. 仿真结果分析

5.2.1. 情景对比分析

为比较和分析四种情景的经济与环境效益，求解每种情景下园区的综合能源系统调度模型，调度结果如表3所示。

表3中四种情景的优化调度结果表3 显示，优化调度后，场景2的总成本相比场景1降低了46.3%。这是因为考虑了柔性负荷的灵活调度能力，从而降低了系统成本。由于电热负荷在峰时段和谷时段存在差异，园区选择合理且更经济的购能时间以降低成本；场景3在场景2的基础上成本降低了6%，这是因为场景3考虑了可替代负荷，电热负荷可以相互替代。在购能高峰时段，可替代负荷能够将部分电负荷转化为热负荷；在购能低谷时段，则能够将电负荷转化为热负荷，从而进一步降低高峰时段电负荷和能源购买成本。与场景1相比，场景4的总成本下降了65.9%，碳排放下降了67%。这是柔性负荷与碳交易协同优化的结果。引入碳交易机制后，园区拥有基本的碳排放权，可以抵消部分碳排放成本，从而降低成本。场景4与场景2和场景3进行比较。

场景3的成本比场景4高出31.9%，场景2的成本比场景4高出36.5%，因为场景2和场景3未引入碳交易机制。需要支付购买全部碳排放配额的完整成本。

5.2.2. 柔性负荷对优化运行的影响

场景1未考虑柔性负荷参与系统运行。各能源的出力图如图4所示，电热负荷分布图如图3所示。

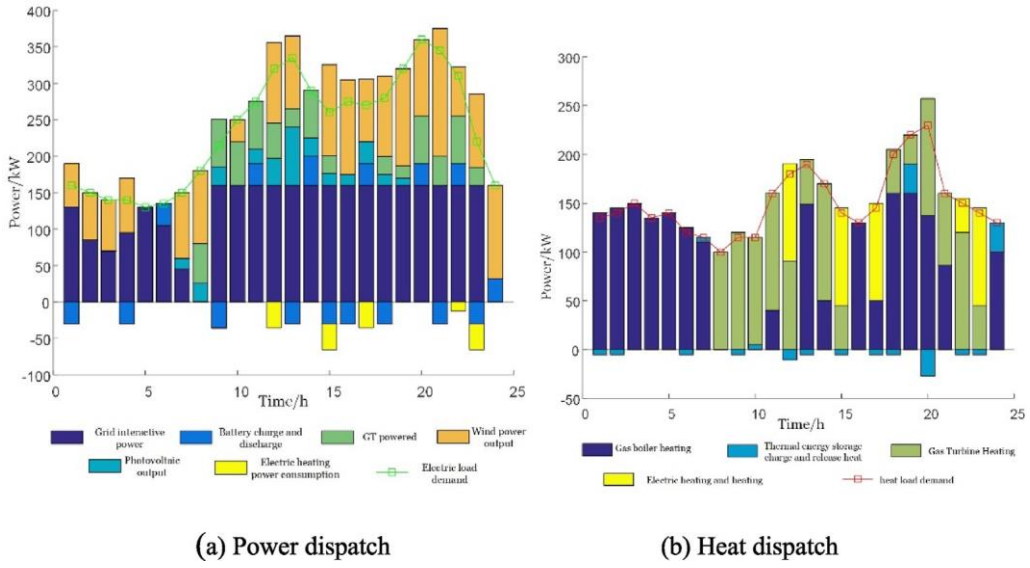


图4. 场景1系统优化后各能源的输出。

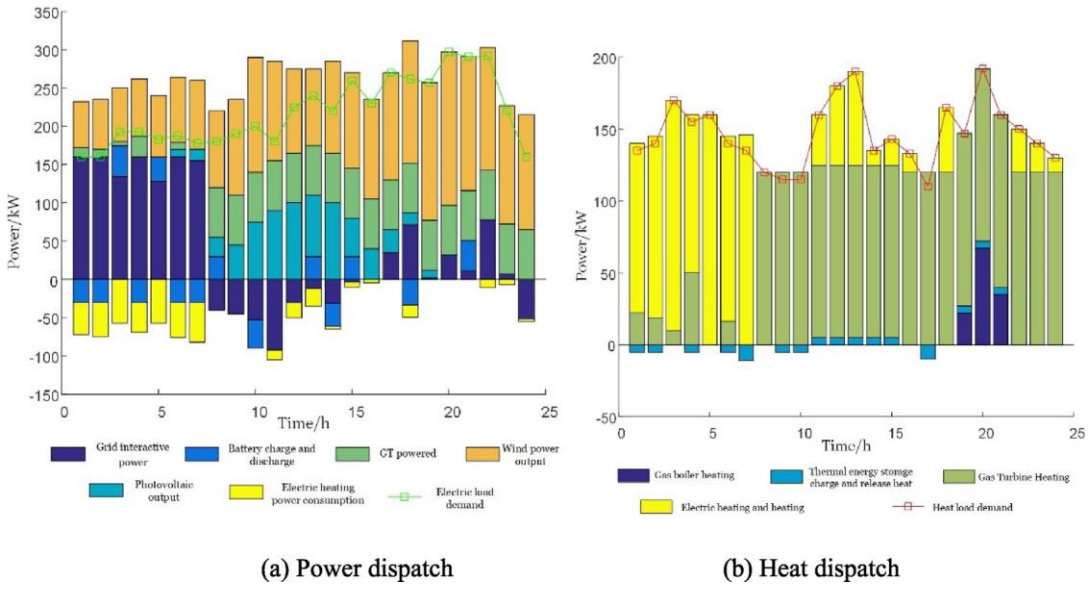


图5. 场景2系统优化后各能源的输出。

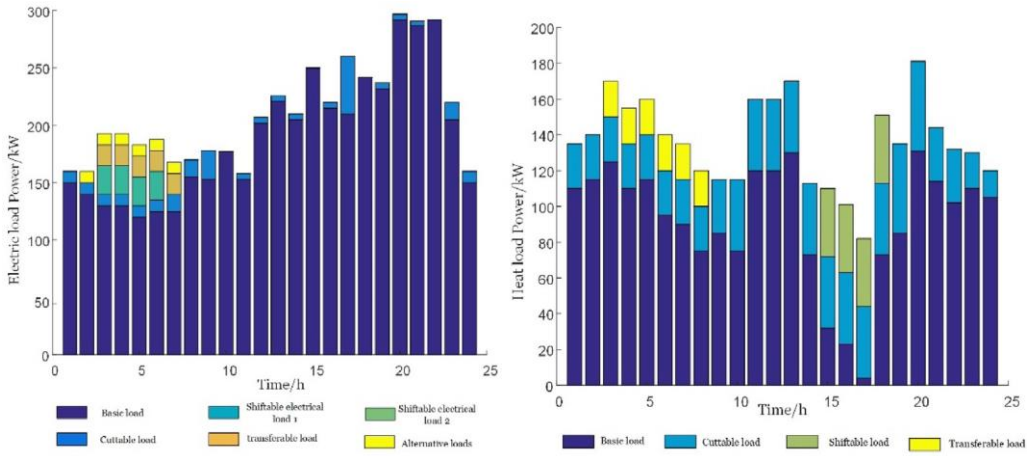
图4和图5展示了场景1和场景2中系统优化运行后各能源的出力情况。从图4(a)可以看出，在场景1中，由于未考虑加入任何柔性负荷，用户的用电行为主要集中在11: 00–16: 00和19: 00–22: 00。这两个时段也属于电价峰时段。在00: 00–00: 08的电价低谷时段，电网购电量较少，场景1的弃风现象严重，增加了系统的运行成本。在场景2中，将柔性负荷加入系统进行优化运行。图3(a)展示了优化前用户侧的负荷分布：在00: 00–08: 00时段，所需电负荷处于低水平，该时段的电价也属于低谷时段，购电价格为0.25 ¥/kWh。对图5(a)中场景2能源出力的分析表明，光伏机组在00: 00–08: 00时段没有出力。此时，风力发电机组的运维成本为0.52 ¥/kWh，高于购电价格，因此优先采用电网供电，光伏机组在00:09之前没有出力。此时，燃气轮机处于以热定电模式。图3(b)显示，00:00–08:00时段的热负荷总量高于该时段的电负荷总量，因此会产生过剩电力。过剩电力仅够为电池充电；这两个

00等），燃气轮机提供热量，多余的热量由热能储存系统收集，并在热负荷高峰时段释放；热能储存有助于系统削峰填谷。

根据系统优化后各能源的输出结果（见图4和图5）以及优化后的负荷分布（见图3和图6），增加柔性负荷可以有效降低综合能源系统的总运行成本和负荷峰谷差。

图6和图7分别展示了场景2和场景3中系统优化运行后的负荷分布。这两个场景中的新能源和燃气轮机输出基本相同，因此成本和碳排放有所不同。其主要原因是，与场景2相比，场景3在现有柔性负荷（包括可转移负荷、可削减负荷和可转移负荷）的基础上增加了电负荷和热量可替代负荷。

对比图6与图3并结合我们的分析可知，对于柔性电负荷，在19:00–21:00、16:00–17:00和11:00–14:00期间会削减电负荷；这些时段也是电价的峰时段。可削减电力负荷的削减特性见表2。可转移负荷1从11:00–14:00转移至03:00–06:00，可转移负荷2从18:00–22:00转移至03:00–07:00，而平移负荷整体上从电价峰时段转移至电价低谷时段。转移结果也符合



(a) Electrical load (b) Heat load

图6。场景2下系统优化后用户侧各类负荷的分布。

11:00–15:00 和 19:00–22:00 时段，且新能源充足，因此可以充分利用风光资源，以节约系统运行成本。

对于热负荷，大部分热量由燃气轮机提供，蓄热罐、电加热设备和热回收系统作为补充。 图5(b)显示，在00:00–00:08时段，燃气锅炉和蓄热罐供热减少了燃气轮机的供热量；燃气轮机采用热电联产运行模式，也使其供热量降低。此外，发电量也随之减少，而燃气轮机发电量的减少会影响电力调度；因此，系统可以在电价较低时从电网购入更多电力，并由电池吸收多余电量，从而降低该时段电力调度的运行成本。从 图6(a)可见，11:00–16:00和19:00–22:00这两个时段分别是用电高峰时段和电价高峰时段，燃气轮机满负荷运行可同时弥补电力短缺。从 图6(b)可见，在热负荷较低的时段（00:0o–00:02、08:00–10:00、14:00–17:

平移负荷的特性。可转移负荷从09:00–14:00转移至02:00–07:00。可转移负荷和可转移负荷的具体特性如表2所示。根据分析结果可知，平移过程中，可转移负荷1和可转移负荷2的总时段数保持不变，转移持续时间和总耗电量也没有变化。尽管这些方面均未发生变化，转移负荷的总耗电量却有所减少，因此可转移负荷比可转移负荷更灵活。对比图7 与图3，即场景3与场景2可知，场景3中可转移负荷、可转移负荷和可削减负荷的调度情况与场景2基本相似。优化前，可替代电负荷均匀分布在08:00–20:00的13个时段内；优化后，在12:00–14:00和18:00–19:00的电价峰时段，可替代电负荷由热负荷替代。同样，在00:00–08:00的电价低谷时段，部分热负荷由电负荷替代。通过协调各类柔性负荷，负荷曲线变得更加平滑，实现了削峰

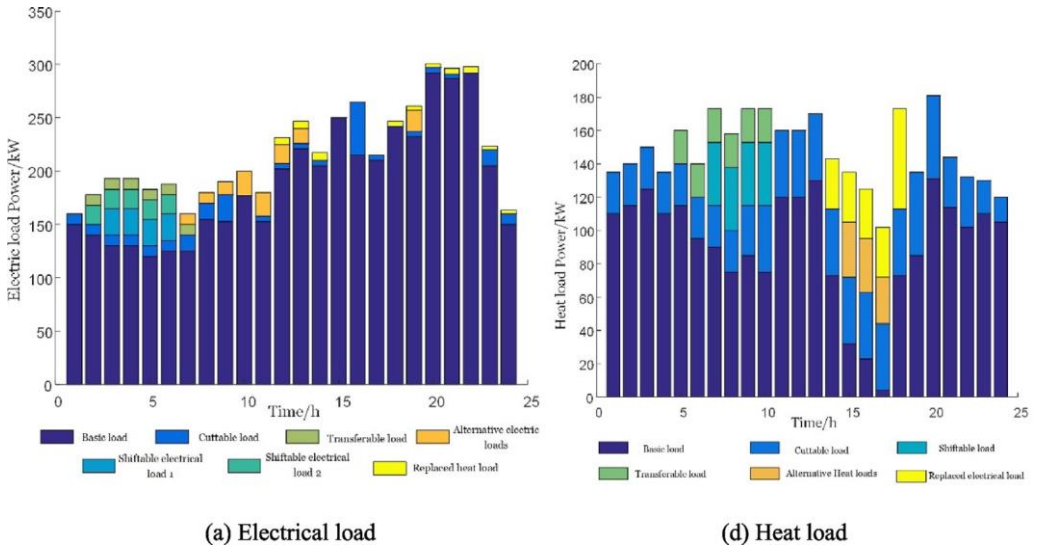
填谷的目标，进一步缓解了用电峰值带来的压力。

通过上述对比分析可知，在场景2和场景3中增加柔性负荷参与系统的优化调度，能够有效降低负荷的峰谷差。多种类型负荷的协同参与可以充分发挥多能互补的优势，灵活实现源荷互动。

5.2.3. 碳交易机制与柔性负荷的综合作用

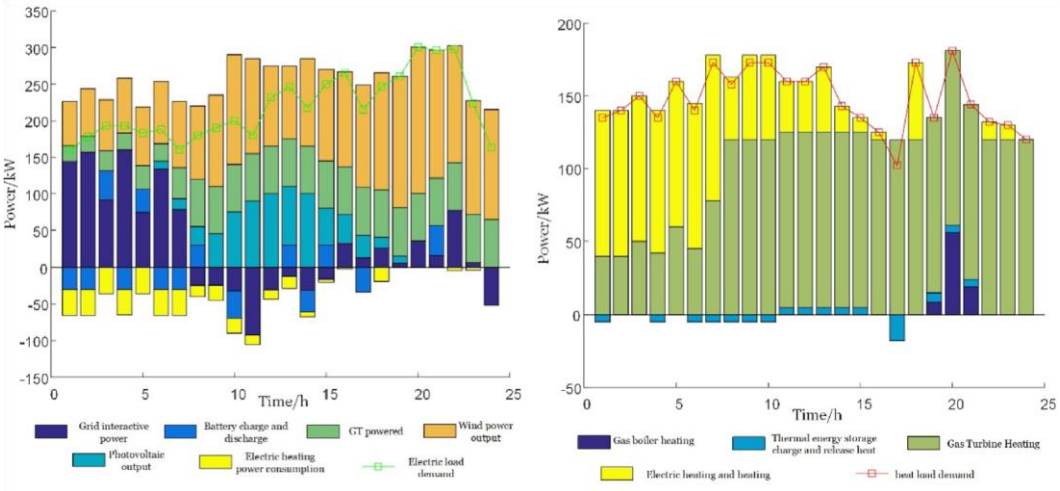
为验证引入碳交易对综合能源系统的影响，对场景3和场景4的调度结果进行分析，可以得到引入碳交易前后各场景中每种能源的输出情况，如图8所示。

场景4考虑柔性负荷和碳交易机制参与系统优化运行。调度结果如图 9所示。 图 9（b）显示，燃气轮机始终以满功率供热。在供热高峰期，使用电加热设备补充热量，多余的热量则被收集到蓄热设备中。当供热



(a) Electrical load (d) Heat load

图7. 场景3中系统优化后用户侧各类负荷的分布。



(a) Power dispatch (b) Thermal dispatch

图8. 场景3中系统优化后各能源的输出。

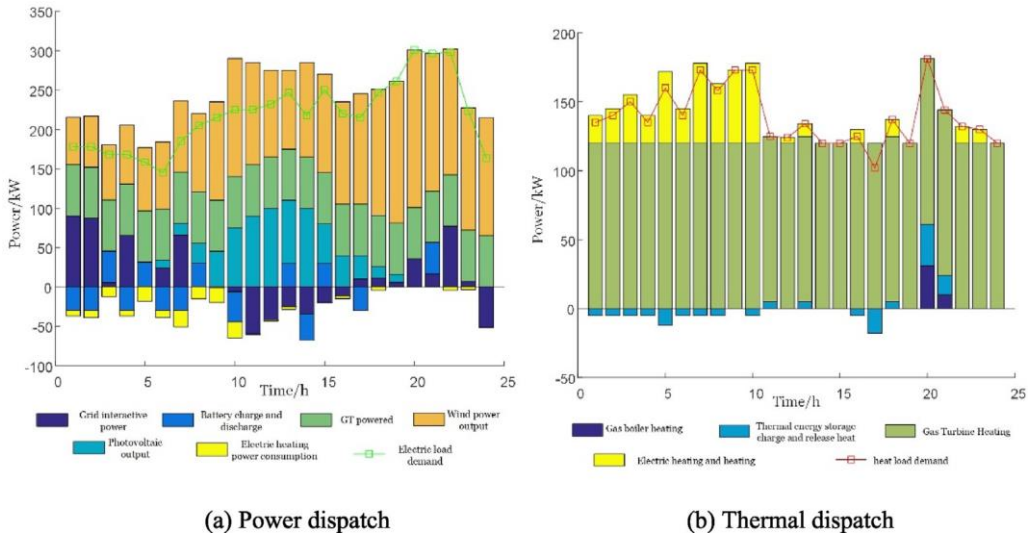


图 9. 场景4中系统优化后各能源的输出。

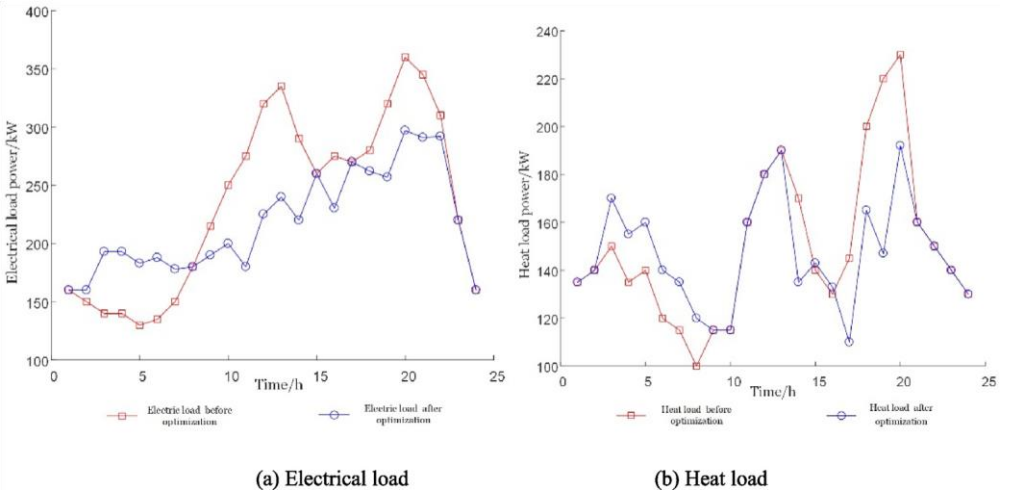


图 A.1. 场景2中系统优化前后的负荷分布曲线对比。

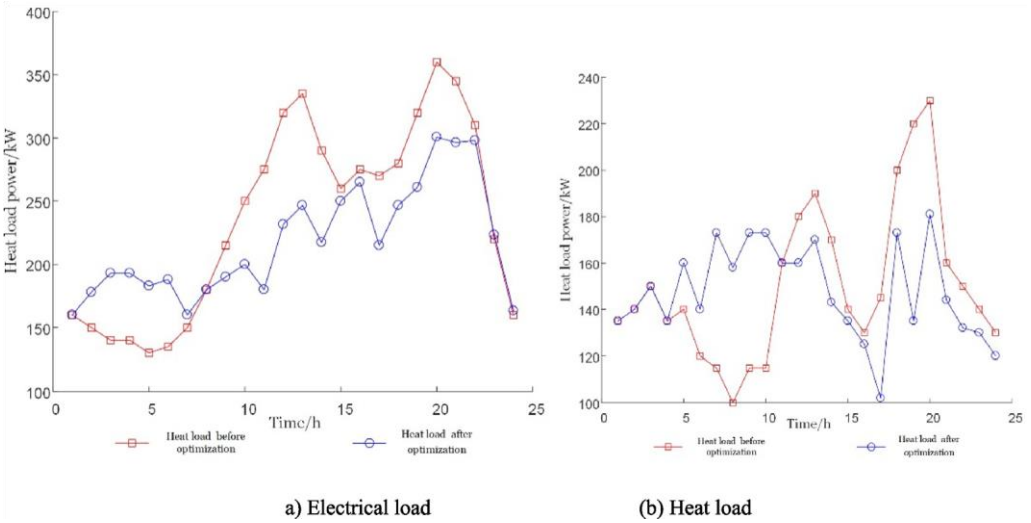
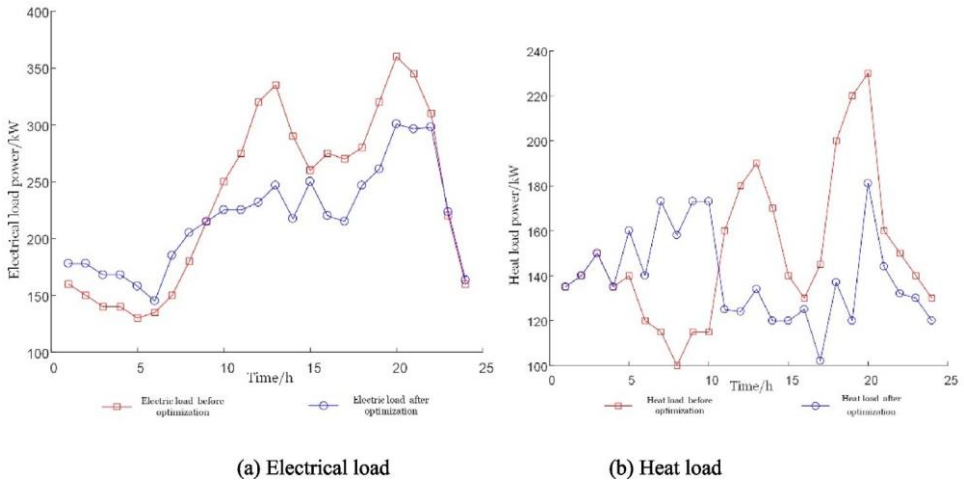
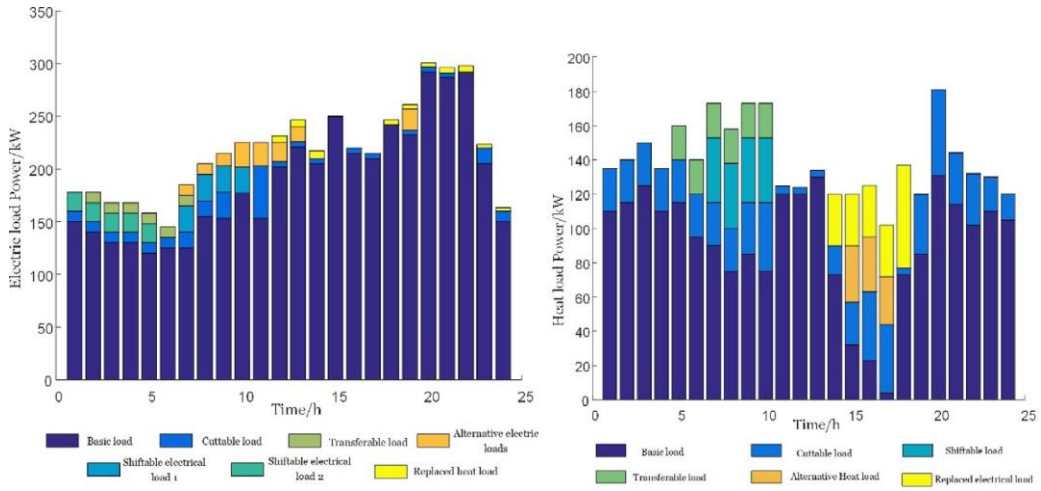


图 A.2. 场景3中系统优化前后的负荷分布曲线对比。不足时，会进行补充热量，热能储存循环的总供电次数为 8。对比 图 8 和 9，燃气管网在用电峰时段运行，燃气轮机采用以热定电模式。燃气轮机满负荷运行，可以向电网出售更多电力或将其储存在电池中。减少购电行为



(a) Electrical load (b) Heat load

图A.3. 场景4中系统优化前后的负荷分布曲线对比。



(a) Electrical load (b) Heat load

图A.4. 系统优化运行后场景4的负荷分布。

这种行为相当于减少碳排放，可将多余的碳配额出售给电网，从而改善环境效益并降低运行成本。图 9(a)表明，在 11:00–14:00 用电高峰时段，系统在完全消纳新能源的情况下，可将多余的电能反向输送至电网；场景4在整个时段内的供电主要来自新能源。能源消耗达到最大值，在保护环境的同时节省了系统的运维成本。场景3和场景4中的电池均发挥了削峰填谷的作用，而场景4更倾向于利用新能源为电池充电，并在用电峰时段合理利用电池为用户负荷供电。

综上分析，碳交易机制能够合理引导园区系统朝低碳发展方向迈进，并优化园区综合能源系统的结构。柔性负荷的参与能够使系统灵活调度各类能源的出力，实现源荷之间的良性互动。基于各自优势对二者进行协同优化，能够综合考虑综合能源系统的环保性与经济性，实现园区低碳经济运行的目标。

6. 结论

本文针对引入风电、光伏等新能源的园区级综合能源系统，在基本系统架构的基础上，揭示了电热柔性负荷对园区级综合能源系统优化运行的影响；将阶梯式碳交易机制引入系统运行优化，构建了 PIES 低碳经济优化模型。通过比较不同场景下园区级综合能源系统的调度优化结果，基于仿真结果得出以下结论：

(1) 充分考虑电热软负荷对需求侧负荷调节的影响，可以引导用户及时调整用能时间，实现削峰填谷，有效提升系统的经济性、环保性和新能源利用率。(2) 与传统碳交易模型相比，阶梯式碳交易机制对碳排放的约束力更强，能够更好地引导减排，充分发挥碳交易市场的调节能力，并解决环境污染问题。

(3) 在碳交易机制下，考虑柔性负荷不仅可以将高价时段的部分负荷转移至低价时段，并减少部分负荷用能，还能实现用户侧电能与热能的相互替代，平滑负荷曲线；同时，灵活选择能源购买方式可以有效协调系统的运行经济性与低碳性能。

后续研究应进一步考虑源荷不确定性和设备变工况等实际特征，以建立更加完善的数学模型并制定调度策略。

参考文献

Ai, Qian, Hao, Ran, 2018. 综合能源系统多能互补与优化的关键技术及挑战。《电力系统自动化》42 (4), 2–10. http://dx.doi.org/10.7500/AEPS20170927008, 46. Chen, Jinpeng, Hu, Zhijian, Chen, Yingguang, Chen, Jiabin, Chen, Weinan, Gao, Mingxin, Lin, Mingrong, Du, Yixing, 2021. 考虑阶梯式碳交易机制和电制氢的综合能源系统热电优化。《电力自动化设备》41 (09), 48–55. http://dx.doi.org/10.16081/j.epae.202109032. Dolatabadi, A., Behnam, Mohammadi-Ivatloo, 2017. 电力与需求响应中智能能源枢纽的随机风险约束调度。Presence Wind Appl. 《热能工程》123, 4049. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.069。Fan, Mengqi, Liu, Jianfeng, Zhu, Zhenghang, 2019. 考虑电转气的电气综合能源系统低碳经济调度。《水电能源科学》37 (10), 204–208, doi: 1000-7709(2019)10-0204-05. Jia, Xianping, Zou, Xiaosong, Yuan, Xufeng, Xiong, Wei, 2018. 柔性负荷下主动配电网优化模型研究。《电测与仪表》55 (13), 46–52, 116, doi: 1001- 13901(2018)13-0046-07.Kou, Lei, Li, Yang, Zhang, Fangfang, et al., 2022. 海上智能风电场监测、运行与维护综述。《传感器》22 (8), 2822. http: // dx.doi.org/10.3390/s22082822。Kou, Lei, Liu, Chuang, wei Cai, Guo, et al., 2020. 基于具有暂态合成特征的深度前馈网络的三相PWM整流器故障诊断。《ISA Transactions》101, 399 407– 。Li, Xudong, Ai, Xin, Hu, Junjie, Zhou, Boyu, Lin, Zhangsui, 2019. 考虑碳交易机制的核电-热电-虚拟电厂三阶段调峰策略。《电网技术》43 (07), 2460–2470. http://dx.doi.org/10.13335/j.1000- 3673.pst.2018.2133。Li, Y., Han, M., Shahidehpour, M., et al., 2023. 考虑综合需求响应和不确定可再生能源出力的社区综合能源系统数据驱动分布鲁棒调度。《应用能源》335, 120749. Li, Y., Li, J., Wang, Y., 2022a. 可再生能源隐私保护时空场景生成：一种联邦深度生成学习方法。《IEEE工业信息学汇刊》18 (4), 2310–2320. Li, Y., Wang, B., Yang, Z., et al., 2022b. 基于斯塔克尔伯格博弈的多社区综合能源系统不确定环境下分层随机调度。《应用能源》308, 118392.Li, Y., Wang, B., Yang, Z., et al., 2022c. 不确定环境下支持综合需求响应的社区综合能源系统优化调度。《IEEE工业应用汇刊》58 (2), 2640–2651. http://dx.doi.org/10. 1016/j.apenergy.2021.118392。Li, Y., Wang, J., Zhao, D., et al., 2018a. 热电联产经济排放调度的两阶段方法：结合多目标优化与综合决策。《能源》162, 237–254. Li, Y., Yang, Z., Li, G., et al., 2018b. 多主体场景下，配备电动汽车换电站的孤岛微电网优化调度：一种基于实时电价的双层规划方法。《应用能源》232, 54–68.Lu, Jiawei, Zhang, Shenxi, Cheng, Haozhong, et al., 2021. 考虑互联互通与交互的区域级综合能源系统规划综述。《中国电机工程学报》41 (12), 4001–4021. http://dx.doi.org/10.13334/j. 0258-8013.pcsee.201592。Ni, Linna, Liu, Weijia, Wen, Fushuan, et al., 2018. 考虑综合需求响应和多元化储能设备的电力、天然气和热力系统优化运行。《现代电力系统与清洁能源》6 (3), 423437。Qiu, Bin, Song, Shaoxin, Wang, Kai, et al., 2022. 考虑需求响应和阶梯式碳交易机制的区域综合能源系统优化运行。《Proc. CSU- EPSA》34 (5), 87–95. http://dx.doi.org/10. 13335/j.1000-3673.pst.2018.2133. Ren, Dejun, Liu, Zifa, Gao, Feng, Gao, Chang, Song, Guangxiong, 2022. 考虑碳交易机制和需求响应的园区综合能源系统电热协同运行优化。《热力发电》51 (03), 119–130. http://dx.doi.org/10.19666/j.rlfd.202109173. Shan, Xinwen, Tang, Hao, Fan, Lei, Wang, Shenliang, Han, Dong, 2021. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度研究。《自动化仪表》(06), 104–107. http://dx.doi.org/ 10.14016/j.cnki.1001-9227.2021.06.104。

Shuai, Xuanyue, Ma, Zhicheng, Wang, Xiuli, Guo, Hui, Zhang, Han, 2022. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微电网优化运行研究 [J/OL]. 电网技术 http://dx.doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2191, 1-12 [2022-06] -01.Tao, Jing, Xu, Wu, Li, Yilin, Huo, Yiwen, Zhang, Enmu, 2019. 基于多目标算法的冷热电联供综合能源系统运行优化。科学技术与工程19 (33), 200–205.Wahbah, M., Feng, S., Elfouly, T.H.M., et al., 2020. 基于根变换局部线性回归的太阳辐照度概率密度估计。《IEEE电力系统汇刊》35 (1), 652–661. http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2930699。Wang, Lingyun, Ma, Qiwei, Xu, Jiayang, 2017. 基于多智能体系统的微电网需求响应交互式定价优化模型。可再生能源35 (6), 905–911, doi: 1671- 5292(2017)06-0905-07。Wang, Zesen, Shi, Yan, Tang, Yanmei, et al., 2019. 考虑生命周期评价能源链和碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行能效分析。《中国电机工程学报》39 (6), 1614–1626. http://dx.doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180754，+1858。Wei, Zhenbo, Ma, Xinru, Guo, Yi, Wei, Pingan, Lu, Bingwen, Zhang, Haitao, 2022b. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行。电力建设43 (01), 1–9. Xiwang, Abuduwayiti, Lyu, Haipeng, Chao, Qin, 2022. 基于非合作博弈理论的风光氢微电网优化容量配置。电力工程技术41 (02), 110–118。Xue, Kaiyang, Chu, Ying, Ling, Zi, Li, Zilin, 2019. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度。可再生能源37 (08), 1206–1213. http://dx.doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019. 08.016. Yang, Huanhong, Xie, Mingyang, Huang, Wentao, et al., 2021. 包含废弃物处理的城市综合能源系统低碳经济运行。《电网技术》45 (9), 3545–3552. http://dx.doi.org/10. 13335/j.1000-3673.pst.2018.2133. Zhao, Haipeng, Miao, Shihong, Li, Chao, Zhang, Di, Tu, Qingyu, 2022a. 考虑冷、热、电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究。中国电机工程学报42 (02), 573–589. http://dx.doi.org/10. 13334/j.0258-8013.pcsee.201942。Zhao, Haipeng, Miao, Shihong, Li, Chao, et al., 2022b. 考虑冷、热、电需求耦合响应特性的园区级综合能源系统优化运行策略研究。《中国电机工程学报》42 (2), 573–589, doi: 0258-8013(2022)02-0573-16。

延伸阅读

黄文轩, 刘道兵, 李世春, 李伟峰, 包志扬, 袁烨, 2022. 双碳目标下考虑电转气和需求响应的综合能源系统双层优化 [j/ol]. 《电测与仪表》1-11 [2022-07] -28, http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220124. 0834.002.html. Li, Y., Han, M., Yang, Z., 等, 2021. 面向电动汽车充电站的社区综合能源系统调度：协调灵活需求响应与可再生能源不确定性的双层方法. IEEE Trans. Sustain. Energy 12 (4), 2321–2331. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro. 2021.129840. 魏振波, 马欣如, Cuo, Yi, WEI, Pingan, 卢炳文, 张海涛 , 2022a. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行 . Electric Power Constr. 43 (01), 1–9. http://dx.doi.org/10.12204/.issn.1000- 7229.2022.01.001. 张晓辉, 刘晓燕, 钟佳庆, 2020. 考虑奖惩阶梯式碳交易和电热转移负荷不确定性的综合能源系统规划. 中国电机工程学报 40 (19), 6132–6142. http://dx.doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191302.张志霞, 赵梦凯, 王辉, Zhihua, Wensheng, Zhang, 2021. 一种适用于不确定性云任务调度问题的高效区间多目标进化算法. Inform. Sci. 583, 56–72.