



· 能源资源的绿色低碳转化与高效利用 ·

基于分段线性化建模的城市综合能源系统优化方法

赵业博¹, 靳森嘉², 李培元², 杨力群², 唐亮³, 徐加陵¹, 刘祖明¹

1. 上海交通大学 智慧能源创新学院, 上海 200240; 2. 中国电能成套设备有限公司, 北京 100011;
3. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013

摘要 提出了一个针对城市综合能源系统的灵活优化框架, 以满足城市的能源需求, 降低城市能源系统的碳排放并提升系统的经济效益。①基于能量梯级利用原理构建了包含可再生能源的城市综合能源系统, 并考虑设备性能及经济参数受设备容量影响提出了一种新颖的更具实际意义的分区间高精度建模方法。②从系统建设可行性的角度提出了面向用户端的建设面积因子灵活约束条件, 并探讨了面积约束对系统性能的影响。③以最小化系统年度总成本和碳排放为目标, 建立集成系统设备选型、容量配置和调度方案的新型混合整数线性规划模型框架, 解决城市能源系统优化设计及调度问题。结果显示, 与设备不分段建模的基准场景相比, 系统的年度总成本降低了 59%, 温室气体排放量降低了 29%, 而采用多目标优化平衡系统的综合性能, 发现年度总成本节省 49%, 温室气体排放量减少 74%。通过引入分区间高精度建模方法和面向用户端的灵活约束条件, 优化了城市综合能源系统的设计调度策略, 为实现可持续城市能源管理提供了有效的解决方案。

关键词 可再生能源; 城市综合能源系统; 分段线性化模型; 混合整数线性规划; 多目标优化
中图分类号: TK01; TM73 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbz.2026-01-008

An integrated urban energy system optimization method based on segmented linearized modeling

ZHAO Yebo¹, JIN Senjia², LI Peiyuan², YANG Liquan², TANG Liang³,
XU Jialing¹, LIU Zuming¹

1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Power Complete Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China;

3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Ltd., Jinan 250013, China

Abstract This study presents a flexible optimization framework for urban integrated energy systems, aimed at meeting the energy demands of cities, reducing carbon emissions, and enhancing economic performance. Firstly, based on the principle of cascading energy utilization, an urban integrated energy system incorporating renewable energy sources is constructed. A novel, more practically meaningful high-precision inter-zone modeling method is proposed, considering the impact of equipment capacity on both performance and economic parameters. Secondly, from the perspective of system feasibility, a flexible constraint on the construction area

收稿日期: 2025-08-15 修回日期: 2025-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(52406189); 未来能源计划联合基金(WLNY-MS-2022-012)。

第一作者: 赵业博, 男, 硕士研究生, 从事综合能源系统运行优化研究, zhaoyebo1996@163.com。

通信作者: 刘祖明, 男, 博士, 助理教授, 从事综合能源系统运行优化研究, zmliu@sjtu.edu.cn。

factor for the user-end is introduced, and the influence of area constraints on system performance is explored. Finally, a new mixed-integer linear programming (MILP) model framework is developed, targeting the minimization of annual total costs and carbon emissions, integrating system equipment selection, capacity configuration, and scheduling. The results demonstrate that, compared to the baseline scenario with unsegmented equipment modeling, the annual total cost is reduced by 59%, and greenhouse gas emissions decrease by 29%. Furthermore, adopting a multi-objective optimization approach to balance system performance results in a 49% reduction in annual total costs and a 74% decrease in greenhouse gas emissions. By introducing the piecewise high-precision modeling method and user-oriented flexible constraints, this study innovatively optimizes the design and scheduling strategies of urban integrated energy systems, which provides an effective solution for achieving sustainable urban energy management.

Keywords renewable energy; integrated urban energy systems; segmented linearized model; mixed integer linear programming; multi-objective optimization

城市是能源消耗及碳排放大户。随着经济的不断增长,现代城市在满足自身能源需求及降低碳排放方面面临着严峻的挑战^[1]。综合能源系统(urban integrated energy system, UIES)^[2]通过多能互补可以整合电、热、冷、气等多种异质能源,可以消纳高比例的可再生能源,并显著提升系统的用能效率^[3]。UIES 已成为实现能源需求增长与碳排放降低解耦的关键技术。目前,学界对 UIES 的优化设计及调度开展了相关研究。Luo 等通过对以固体氧化物燃料电池-燃气轮机为动力的三联供系统进行建模^[4],优化了系统配置,并有效降低了峰值电力的消耗;张晓辉等基于 CHP 机组和燃气锅炉的耦合建模,将碳交易成本纳入规划模型,得出了系统的最佳容量配置,并分析了碳交易价格对系统的影响^[5];赵海彭等通过对能源转化设备的变工况特性进行耦合建模,使其系统最优配置和调度结果更具经济性^[6];Liu 等将性能衰减因素纳入设备建模,通过构建线性化高精度模型,求解出不同能源技术的最优组合及容量配置^[7]。

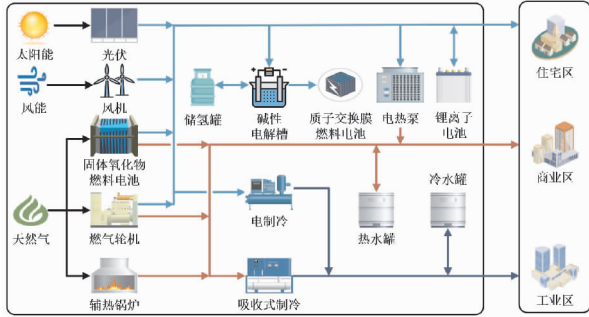
上述研究虽然解决了 UIES 的设计及调度问题,然而,它们的模型构建方法并未充分考虑不同容量的设备在运行效率、动态响应特性、可靠性以及经济性等方面的显著差异,导致设备建模精度不足,优化结果与实际设计存在偏差。这一局限对 UIES 的设计与调度策略产生影响。以燃气轮机为例,小功率区间的燃气轮机由于透平和燃烧室尺寸的限制,压缩比和透平效率相对较低,热效率较低^[8]。例如,西门子 C65 机型(65 kW)的热效率约 25%~30%^[9],且余热利用难度较高。相较而言,中高功率区间的燃气轮机得益于更高的

压缩比和余热回收系统的配置^[10],效率显著提升。例如,西门子 SGT-100 系列(500~2 000 kW)的效率可达 32%~35%^[11]。另外,不同功率区间的燃气轮机在初始投资成本、运行维护成本、启动成本与启动速度以及碳排放强度等方面均存在明显差异。由此可见,准确刻画不同额定功率设备的特性对提升综合能源系统的性能及实际适用性具有重要作用。此外,城市区域的空间资源相对稀缺,能源设备的占地需求直接受到场地条件的约束。UEIS 的优化设计需明确考虑设备安装空间的最大可用面积,以避免超出实际场地条件的不可行配置。因此,设备占地面积的精确评估不仅是系统可行性分析的必要环节,也是实现经济性优化的关键要素。

设备特性多样性与空间约束为优化设计带来了严峻挑战。一方面,需要构建能够准确表征不同额定功率设备特性的精细化模型,涵盖效率曲线、动态响应特性、经济指标及可靠性等关键参数;另一方面,容量配置过程需平衡多种设备的协同效应,通过结合灵活的调度策略实现全局优化。这导致模型的构建需同时兼顾计算效率与结果精度,避免因参数维度过高导致求解复杂度指数级增长,影响模型实际应用的可行性与时效性。为解决这些问题,本研究提出了一种线性化的建模策略,以年度总成本(total annual cost, TAC)和温室气体排放量(greenhouse gas emissions, GHG)为目标,建立了一个考虑设备特性及空间约束的混合整数多目标规划模型,以获得最优的技术组合、各类设备的容量配置、能量转换设备的出力水平及开关状态以及储能系统的充放能策略,进而解决 UIES 的优化设计问题。

1 数学模型

本文基于能量梯级利用原理^[12],配置了一个可为一个小型城市商业园区提供全方位的制冷、供暖和供电服务的综合能源系统(见图 1)。



(PV: 光伏; WT: 风机; SOFC: 固体氧化物燃料电池(天然气燃料); GT: 燃气轮机; AB: 辅助燃气锅炉; HST: 储氢罐; AEL: 碱性电解槽; H₂-PEMFC: 质子交换膜燃料电池(氢气燃料); EHP: 电热泵; BTY: 锂离子电池; EC: 电制冷; ABC: 吸收式制冷; HWT: 热水罐; CWT: 冷水罐。)

图 1 城市综合能源系统结构图

Fig. 1 Configuration of an integrated energy system for urban cities

UIES 能源设备的建模采用线性化方法,将包含设备运行特性和负荷变化的非线性项进行转化,得出主要设备的模型化方程^[13]。针对同类设备容量差异及环境温度对性能的影响,建立离散化模型以提升精度。然而,精细离散化增加整数变量数量,导致模型复杂度和求解难度上升。为简化建模,将设备容量划分为若干区间,在区间内假定效率及成本参数恒定,以分段代表值替代连续变化值。此方法在降低计算负担的同时,能较好平衡模型精度与复杂度。由于 UIES 能源交易具有多种时间尺度,为精确捕捉设备运行特性和系统最优运行方案的求解,本文采用以小时为单位的建模分辨率来捕捉系统的运行情况。定义集合如下:

$$\begin{aligned} d &\in M_{DM} = \{1, 2, \dots, d\} \\ h &\in M_{HM} = \{1, 2, \dots, h\} \\ s &\in M_{SM} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: M_{DM} 为第 d 天的总集合; M_{HM} 为第 h 小时的总集合; M_{SM} 为不同额定容量区间的设备类型集合; 本文还定义了以下集合以涵盖 UIES 的所有设备。

$$\Phi = \Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \Phi_3 \cup \Phi_4$$

$$\Phi_1 = \{e \mid \text{PV, WT}\}$$

$$\Phi_2 = \{e \mid \text{GT, PEMFC, AEL}\}$$

$$\Phi_3 = \{e \mid \text{AB, EHP, ABC, EC}\}$$

$$\Phi_4 = \{e \mid \text{BTY, HST, HWT, CWT}\} \quad (2)$$

1.1 可再生能源

光伏(photovoltaic, PV)板利用太阳能发电,光伏输出功率($P_{PV}^{d,h}$)取决于其工作特性以及太阳辐照度($G^{d,h}$)和环境温度($T_{air}^{d,h}$)^[14],可表示如下:

$$\begin{cases} T_c^{d,h} = T_{air}^{d,h} + G^{d,h} \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{0.8} \right) \\ I_c^{d,h} = G^{d,h} [I_{sc} + \alpha_{PV} (T_c^{d,h} - 25)] \\ V_c^{d,h} = V_{oc} - \beta_{PV} T_c^{d,h} \\ P_{PV}^{d,h} = \frac{V_c^{d,h} I_c^{d,h}}{V_{oc} I_{sc}} P_{PV}^{nom} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{NOCT} 为电池标称工作温度; $T_c^{d,h}$ 为电池温度; $I_c^{d,h}$ 为电池工作电流; $V_c^{d,h}$ 为电池工作电压; V_{oc} 为开路电压, I_{sc} 为短路电流; P_{PV}^{nom} 为光伏标称功率; d 为典型日, h 为小时。

风力涡轮机(wind turbines, WT)将风能转化为电能。风力涡轮机的输出功率($P_{WT}^{d,h}$)直接取决于风速($v^{d,h}$)^[14], $P_{WT}^{d,h}$ 可表示如下:

$$P_{WT}^{d,h} = \begin{cases} 0, v^{d,h} < v_{ci} \text{ or } v^{d,h} > v_{co} \\ \frac{v^{d,h} - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} P_{WT}^{nom}, v_{ci} < v^{d,h} < v_r \\ P_{WT}^{nom}, v_r < v^{d,h} < v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速; P_{WT}^{nom} 为风机额定功率。

1.2 燃气轮机

燃气轮机(gas turbine, GT)是一种通过燃烧过程将化学能转换为电能的设备^[15]。燃气轮机的性能受到环境温度的显著影响。当环境温度从 15 °C 升高至 45 °C 时,其输出功率可能显著降低,降幅可达 17%^[16]。本文采用以下方程描述燃气轮机满载性能与环境温度的关系^[17]。

$$\begin{cases} \gamma_{FLP,s}^{d,h} = P_{GT,s}^{nom} (\alpha_{CFP,s} T_{air}^{d,h} + \beta_{CFP,s}) \\ \gamma_{FLEE,s}^{d,h} = \eta_{el,GT,s}^{nom} (\alpha_{CFEE,s} T_{air}^{d,h} + \beta_{CFEE,s}) \\ \gamma_{FLTE,s}^{d,h} = \eta_{th,GT,s}^{nom} (\alpha_{CFTE,s} T_{air}^{d,h} + \beta_{CFTE,s}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{GT,s}^{nom}$ 为标称电功率; $\gamma_{FLP,s}^{d,h}$ 为满载电功率; $\eta_{el,GT,s}^{nom}$ 为标称电效率; $\gamma_{FLTE,s}^{d,h}$ 为满载电效率; $\eta_{th,GT,s}^{nom}$ 为标称热效率; $\gamma_{FLTE,s}^{d,h}$ 为满载热效率。

给定燃气轮机输出电功率($P_{GT,s}^{d,h}$),可采用式

(6) 和式(7) 表征输入燃料($F_{GT,s}^{d,h}$) 和输出热功率($Q_{GT,s}^{d,h}$)。

$$F_{GT,s}^{d,h} = \frac{(a_{GT,F,s} P_{GT,s}^{d,h} + b_{GT,F,s} \xi_{CFP,s}^{d,h} P_{GT,s}^{nom} \gamma_{GT,s}^{d,h})}{(\eta_{el,GT,s}^{nom} \xi_{CFEE,s}^{d,h})} \quad (6)$$

$$Q_{GT,s}^{d,h} = \eta_{th,GT,s}^{nom} \xi_{CFTE,s}^{d,h} \frac{(a_{GT,Q,s} P_{GT,s}^{d,h} + b_{GT,Q,s} \xi_{CFP,s}^{d,h} P_{GT,s}^{nom} \gamma_{GT,s}^{d,h})}{(\eta_{el,GT,s}^{nom} \xi_{CFEE,s}^{d,h})} \quad (7)$$

式中: $\xi_{CFP,s}^{d,h}$ 为电功率环境温度修正系数; $\xi_{CFEE,s}^{d,h}$ 为电效率环境温度修正系数; $\xi_{CFTE,s}^{d,h}$ 为热效率环境温度修正系数; a, b 为燃气轮机输入参数; s 为设备的容量类型; $\gamma_{GT,s}^{d,h}$ 是一个二元变量,表示不同类型的燃气轮机在第 d 天第 h 小时是否开启以产生电能。

1.3 辅助燃气锅炉

辅助锅炉(auxiliary boiler, AB) 的输出热功率($Q_{AB,s}^{d,h}$) 和输入燃料($F_{AB,s}^{d,h}$) 可采用以下公式计算。

$$F_{AB,s}^{d,h} = \frac{a_{AB,s} Q_{AB,s}^{d,h} + b_{AB,s} Q_{AB,s}^{nom} \gamma_{AB,s}^{d,h}}{\eta_{AB,s}^{nom}} \quad (8)$$

式中: $Q_{AB,s}^{nom}$ 为辅助燃气锅炉额定热功率; $\eta_{AB,s}^{nom}$ 为辅助燃气锅炉额定热效率。

1.4 电热泵

电热泵(electric heat pump, EHP) 利用电力产生热能用以满足供暖需求^[18]。环境温度($T_{air}^{d,h}$) 会对电热泵性能的性能产生影响^[19], 其对热泵用电量的影响电能($F_{HP,s}^{d,h}$) 可用下式进行修正。

$$F_{HP,s}^{d,h} = \frac{a_{HP,s} Q_{HP,s}^{d,h} + b_{HP,s} Q_{HP,s}^{nom} \gamma_{HP,s}^{d,h}}{v_{HP,s}^{nom} (\kappa T_{air}^{d,h} + \varepsilon)} \quad (9)$$

式中: $Q_{HP,s}^{d,h}$ 为热泵输出功率; $Q_{HP,s}^{nom}$ 为热泵额定功率; $v_{HP,s}^{nom}$ 为电热泵额定制热系数; $\gamma_{HP,s}^{d,h}$ 为二元变量,表示不同类型的电热泵在第 d 天第 h 小时是否开启以生产热能。

1.5 吸收式制冷机和电制冷机

吸收式制冷机和电制冷机分别以热能和电能为驱动力来提供制冷能力^[20]。这两类设备的应用旨在高效回收并利用系统运行过程中产生的余热及多余电能,以实现能源利用效率的最大化^[21]。其输入燃料($F_{e,s}^{d,h}$) 可通过式(10) 描述。

$$F_{e,s}^{d,h} = \frac{a_{e,s} Q_{e,s}^{d,h} + b_{e,s} Q_{e,s}^{nom} \gamma_{e,s}^{d,h}}{v_{e,s}^{nom}} \quad (10)$$

式中: $v_{e,s}^{nom}$ 为设备 e (ABC, EC) 的额定制冷系数;

$Q_{e,s}^{nom}$ 为设备 e (ABC, EC) 的额定制冷系数容量; $\gamma_{e,s}^{d,h}$ 为二元变量,表示设备 e (ABC, EC) 在第 d 天第 h 小时是否开启以产生冷能。

1.6 燃料电池

燃料电池可同时产生电能和热能^[22]。本文考虑以天然气为原料的固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC) 和以氢气为原料的质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, H₂-PEMFC)。燃料电池所需的输入能量($F_{e,s}^{d,h}$) 可通过燃料的低发热值(LHV) 表示。

$$\begin{aligned} F_{e,s}^{d,h} &= a_{e,s} P_{e,s}^{d,h} + b_{e,s} P_{e,s}^{nom} \gamma_{e,s}^{d,h} \\ Q_{e,s}^{d,h} &= \eta_{PC,s}^{nom} F_{e,s}^{d,h} \\ e &\in \{\text{SOFC}, \text{H}_2\text{-PEMFC}\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $P_{e,s}^{d,h}$ 为输出电功率; $Q_{e,s}^{d,h}$ 为输出热功率; $\eta_{PC,s}^{nom}$ 为燃料电池额定热效率; $\gamma_{e,s}^{d,h}$ 为二元变量,表示设备 e 在第 d 天第 h 小时是否开启以产生电能和热能。

1.7 碱性电解槽

碱性电解槽(alkaline electrolyzer, AEL) 利用电能制取氢气。公式(12) 用于计算从输入电能产生的燃料($F_{AEL,s}^{d,h}$; 以氢气燃料低热值计算的能量)。

$$F_{AEL,s}^{d,h} = a_{AEL,s} P_{AEL,s}^{d,h} + b_{AEL,s} P_{AEL,s}^{nom} \gamma_{AEL,s}^{d,h} \quad (12)$$

式中: $P_{AEL,s}^{d,h}$ 为输入功率; $\gamma_{AEL,s}^{d,h}$ 为二元变量,表示不同类型的电解槽在第 d 天第 h 小时是否开启。

1.8 储能系统

储能系统通过能量的存储与释放优化能源利用与系统稳定性^[23]。本文考虑了 4 类储能系统: 锂离子电池、热水罐、冷水罐和储氢罐。4 种储能系统的充、放电功率($F_{e,s}^{d,h}$ 、 $P_{e,s}^{d,h}$) 与储能状态($E_{e,s}^{d,h}$) 之间的关系可用以下公式描述^[24]。

$$\begin{aligned} E_{e,s}^{d,h} &= E_{e,s}^{d,h-1} (1 - \sigma_{e,s}) + (\eta_{e,s} F_{e,s}^{d,h} - P_{e,s}^{d,h}) \\ e &\in \{\text{BTY}, \text{HST}, \text{HWT}, \text{CWT}\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\sigma_{e,s}$ 为储能技术 e 的能量损失因子; $\eta_{e,s}$ 为储能效率。

1.9 约束条件

UIES 旨在高效满足商业区电力、制冷和供热需求,其设计与运行需遵循设备容量、运行边界、模式转换及能量平衡等约束。

1.9.1 设备容量约束

UIES 设备选择及其额定容量的确定,对于系统性能的优化具有关键作用。设备的额定容量($C_{e,s}^{nom}$) 介于最小值($C_{e,s}^{min}$) 和最大值($C_{e,s}^{max}$) 之间,如式(14) 所示。

$$X_{e,s} C_{e,s}^{min} \leq C_{e,s}^{nom} \leq X_{e,s} C_{e,s}^{max} \quad (14)$$

1.9.2 运行边界约束

设备的运行范围需限制在设计规定的范围内,超出该范围可能导致过载、故障、能效降低及设备寿命缩短,增加维护成本并影响系统稳定性^[25]。因此,该设备在任何时候产生、消耗或储存的能量都必须满足公式(15 ~ 17),其中, $I_{e,s}^{\min}$ 和 $I_{e,s}^{\max}$ 是设备的最低和最高性能水平。其计算过程如下:

$$I_{e,s}^{\min} P_{e,s}^{\text{nom}} y_{e,s}^{d,h} \leq P_{e,s}^{d,h} \leq I_{e,s}^{\max} P_{e,s,\max}^{d,h} y_{e,s}^{d,h} \quad \forall d, h, e \in \Phi_2 \quad (15)$$

$$I_{e,s}^{\min} Q_{e,s}^{\text{nom}} y_{e,s}^{d,h} \leq Q_{e,s}^{d,h} \leq I_{e,s}^{\max} Q_{e,s,\max}^{d,h} y_{e,s}^{d,h} \quad \forall d, h, e \in \Phi_3 \quad (16)$$

$$I_{e,s}^{\min} ES_{e,s}^{\text{nom}} \leq ES_{e,s}^{d,h} \leq I_{e,s}^{\max} ES_{e,s}^{\text{nom}} \quad \forall d, h, e \in \Phi_4 \quad (17)$$

此外,一个设备的爬坡速率需要限定在合理的范围,以避免性能的急剧变化,从而减少设备的磨损,延长使用寿命。因此,设备的负荷变化速率必须限制在特定的额定容量范围 $I_{e,s}$, 见式(18 ~ 20)。

$$-I_{e,s} P_{e,s}^{\text{nom}} \leq P_{e,s}^{d,h} - P_{e,s}^{d,h-1} \leq I_{e,s} P_{e,s}^{\text{nom}} \quad e \in \Phi_2 \quad (18)$$

$$-I_{e,s} Q_{e,s}^{\text{nom}} \leq Q_{e,s}^{d,h} - Q_{e,s}^{d,h-1} \leq I_{e,s} Q_{e,s}^{\text{nom}} \quad e \in \Phi_3 \quad (19)$$

$$-I_{e,s} ES_{e,s}^{\text{nom}} \leq ES_{e,s}^{d,h} - ES_{e,s}^{d,h-1} \leq I_{e,s} ES_{e,s}^{\text{nom}} \quad e \in \Phi_4 \quad (20)$$

1.9.3 设备启停约束

Φ_3 和 Φ_4 集合的设备有 4 种工作模式:开启、关闭、冷启动和热启动。冷启动和热启动是设备从关机模式过渡到开机模式的过程^[26]。由于设备在启动时可能会经历不同的启动模式,系统需要通过适当的模型来控制 and 跟踪这一过程。为了确保设备的启动符合实际运行要求且避免设备因长时间停运而出现过度磨损或效率低下等问题,同时也保证了系统的稳定性和效率,需要设定一定的条件。例如,热启动只能在设备在过去若干小时内至少运行过 1 小时的情况下进行;而如果设备的关机时间超过某一设定时长,则必须通过冷启动来重新启动设备。其数学模型表述如下:

$$y_{e,s}^{d,h} - y_{e,s}^{d,h-1} \leq ws_{e,s}^{d,h-1} + cs_{e,s}^{d,h-1} \quad \forall d, h > 1 \quad (21)$$

$$ws_{e,s}^{d,h} \leq \sum_{i=1}^{\theta_e} y_{e,s}^{d,h-i} \quad \forall d, h > \theta_e \quad (22)$$

式中:二进制变量 $y_{e,s}^{d,h}$ 表示设备 e 在 d 天 h 小时的开启($y_{e,s}^{d,h} = 1$) 和关闭($y_{e,s}^{d,h} = 0$) 状态,可用于确定设备在启动时将经历暖启动还是冷启动。界于

0 和 1 之间的连续变量($ws_{e,s}^{d,h}$ 和 $cs_{e,s}^{d,h}$) 来记录设备的启动模式,其中 $ws_{e,s}^{d,h} = 1$ ($cs_{e,s}^{d,h} = 1$) 表示设备经历热启动(冷启动) 开启。

1.9.4 安装最大面积约束

能源设备占地面积作为 UIES 优化的重要实际约束和影响因素,应在建模和优化过程中得到充分考虑,以确保系统设计的可行性和经济性。这一考量不仅受到系统实际允许的最大建设范围所限制,还需综合考虑单个设备的占地面积以及多能源设备之间的耦合性。因此,本文引入一个关键指标:面积因子 $A_{e,s}$, 以单位平方米的供能水平(单位: kW/m^2 或 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$) 来衡量。这一因子能够精准反映各能源设备的能量密度,进而为系统的优化配置提供科学依据。系统总安装面积可采用式(23) 约束。

$$\sum_{e,s} C_{e,s}^{\text{nom}} / A_{e,s} \leq A_{\text{total}} \quad (23)$$

式中: $C_{e,s}^{\text{nom}}$ 为设备的额定容量; A_{total} 为系统最大可提供安装面积。

1.10 能量平衡

UIES 必须能够满足用户的电力($L_E^{d,h}$)、制冷($L_C^{d,h}$) 和供热需求($L_H^{d,h}$)。电、冷、热的平衡方程分别见式(24 ~ 26)。

$$L_E^{d,h} \quad \forall d, h = \sum_{e,s} P_{e,s}^{d,h} - \sum_{e,s} F_{e,s}^{d,h} + \sum_s P_{\text{BTY},s}^{d,h} - \sum_s F_{\text{BTY},s}^{d,h} \quad (24)$$

式中: $\sum_{e,s} P_{e,s}^{d,h}$ 为 PV、WT、GT、SOFC 和 H_2 -PEMFC 产生的电力总和, $\sum_{e,s} F_{e,s}^{d,h}$ 为 EC、EHP、AEL 消耗的电力总和。

$$L_C^{d,h} \quad \forall d, h = \sum_s Q_{\text{ABC},s}^{d,h} + \sum_s Q_{\text{EC},s}^{d,h} + \sum_s P_{\text{CWT},s}^{d,h} - \sum_s F_{\text{CWT},s}^{d,h} \quad (25)$$

式中: $\sum_s Q_{\text{ABC},s}^{d,h}$ 和 $\sum_s Q_{\text{EC},s}^{d,h}$ 分别为 ABC、EC 总产冷量。

$$L_H^{d,h} \quad \forall d, h = \sum_{e,s} Q_{e,s}^{d,h} - \sum_s F_{\text{ABC},s}^{d,h} + \sum_s P_{\text{HWT},s}^{d,h} - \sum_s F_{\text{HWT},s}^{d,h} \quad (26)$$

式中: $\sum_{e,s} Q_{e,s}^{d,h}$ 为 GB、AB、EHP、SOFC 和 H_2 -PEMFC 的总产热量, $\sum_s F_{\text{ABC},s}^{d,h}$ 为 ABC 消耗总热量。

ABC 只能由 GT 和 AB 产生的高温热功率驱动,通过以下公式表达。

$$\sum_s Q_{\text{GT},s}^{d,h} + \sum_s Q_{\text{AB},s}^{d,h} \geq \sum_s F_{\text{ABC},s}^{d,h} \quad \forall d, h \quad (27)$$

1.11 目标函数

TAC 和 GHG 是 UIES 优化的目标函数。TAC 包括 5 个成本项,即资本支出(C^{CAPEX})、燃料成本(C^{FC})、固定运行维护成本(C^{FOMC})、可变运行维护成本(C^{VOMC})和启动成本(C^{STC})。

$$C^{\text{CAPEX}} = R_s^{\text{CRF}} \sum_{e,s} \omega_{e,s} P_{e,s}^{\text{nom}} \quad (28)$$

$$R_s^{\text{CRF}} = \frac{r(1+r)^{T_s}}{(1+r)^{T_s} - 1} \quad (29)$$

式中: $\omega_{e,s}$ 为设备单位资本支出; $P_{e,s}^{\text{nom}}$ 为设备额定容量; R_s^{CRF} 为资本回收系数; r 为年利率; T_s 为设备生命周期。

$$C^{\text{FC}} = c_{\text{NG}} \sum_{d=1}^D \Omega_d \sum_{e,s} F_{e,s}^{d,h} \quad (30)$$

$e \in \{\text{GT}, \text{AB}, \text{SOFC}\}$

式中: $F_{e,s}^{d,h}$ 为设备 e 第 d 天第 h 小时所消耗天然气; c_{NG} 为天然气价格; Ω_d 为一年中 d 类的典型日数量。

$$C^{\text{FOM}} = \sum_{e,s} \Psi_e C_{e,s}^{\text{nom}} \quad (31)$$

式中: Ψ_e 为单位固定运行维护费; $C_{e,s}^{\text{nom}}$ 为设备额定安装容量。

$$C^{\text{VOM}} = \sum_{d=1}^D \Omega_d \sum_{e,s} \left(\sum_{e \in \Phi_1 \cup \Phi_2, s} w_{e,s} P_{e,s}^{d,h} + \sum_{e \in \Phi_3, s} w_{e,s} Q_{e,s}^{d,h} \right) \quad (32)$$

式中: $w_{e,s}$ 为单位可变运行维护费。

$$C^{\text{STC}} = \sum_{d=1}^D \Omega_d \sum_{e,s} \left(\lambda_{e,s} w_{e,s}^{d,h} + \mu_{e,s} c_{e,s}^{d,h} \right) \quad (33)$$

$e \in \Phi_2 \cup \Phi_3$

式中: $\lambda_{e,s}$ 和 $\mu_{e,s}$ 分别是设备 e 在热启动和冷启动时的成本损耗。

碳排放通过天然气燃烧的二氧化碳排放量来评估,计算公式如式(34)所示,通过将燃料消耗量与天然气的碳排放强度(ε_{NG})相乘来计算二氧化碳当量的温室气体^[27]。

$$O^{\text{GHG}} = \varepsilon_{\text{NG}} \sum_{d=1}^D \Omega_d \sum_{e,s} F_{e,s}^{d,h} \quad (34)$$

$e \in \{\text{GT}, \text{AB}, \text{SOFC}\}$

式中, O^{GHG} 为系统碳排放强度。

UIES 的设计和运行优化以 TAC 和 GHG 为目标函数,基于经济成本和碳排放在实际应用中具有同等重要性的假设,双目标优化采用 1:1 的权重分配,以平衡经济性与环境友好性。首先,基于 ε -约束法引入一系列的“ ε -约束”将多目标优化问题转化为一组单目标优化问题^[28],然后,通过求解这些单目标优化问题,所获取多目标优化问题的帕累托最优解集合^[29],最后通过 TOPSIS 确

定理理解^[30]式(35 ~ 37)。

$$D_{i,\min} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{i,j}^{\text{norm}} - f_j^{\text{nadir}})^2} \quad (35)$$

$$D_{i,\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{i,j}^{\text{norm}} - f_j^{\text{ideal}})^2} \quad (36)$$

$$\Gamma_i = \frac{D_{i,\min}}{D_{i,\min} + D_{i,\max}} \quad (37)$$

式中: f^{norm} 为帕累托解的归一化形式; f_j^{ideal} 为最优解; f_j^{nadir} 为最劣解; $D_{i,\min}$ 和 $D_{i,\max}$ 分别为帕累托解与最劣解的距离和与最优解的距离; Γ_i 为帕累托解与理想解的相对接近度。

2 算例分析

本文采用中国天津市的气象数据进行案例分析。为在维持模型规模适度的同时最大限度的捕捉商业区全年能源需求的变化趋势,本文选取了 8 个具有代表性的典型日来表征全年每小时的能源需求变化^[31]。这些典型日包括 4 个季节性平均日,以及一个最大供暖日、一个最大用电日、一个最大制冷日和一个最大能耗日(即电力、制冷和供暖需求的总和),这种方法可以最大限度的反映商业区实际能源需求的变化情况。模型通过 GAMS 环境构建并调用 Gurobi 求解器进行求解。

2.1 算例概况

图 2 展示了商业区电负荷、热负荷和冷负荷的详细数据。表 1 详细列出了设备效率参数,表 2 提供了设备线性化系数与运行参数的具体数值,表 3 则展示了各个设备的面积因子设置。

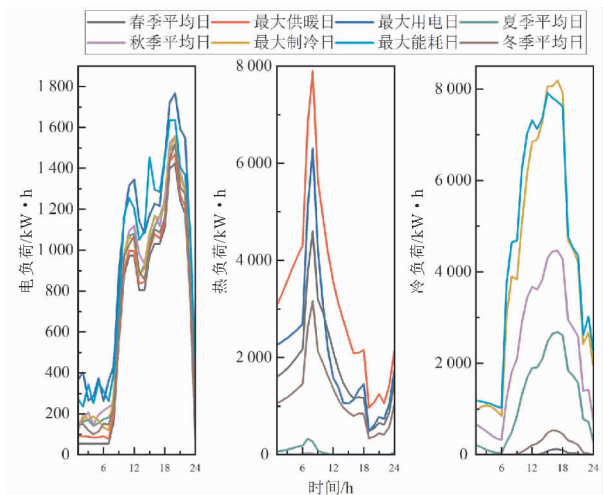


图 2 电热冷负荷

Fig. 2 Power, heating and cooling loads

表 1 设备效率参数表

Tab. 1 Equipment efficiency parameters

参数	小型	中型	大型
$\eta_{\text{th,GT},s}^{\text{nom}}$	0. 25	0. 32	0. 40
$\eta_{\text{el,GT},s}^{\text{nom}}$	0. 30	0. 35	0. 40
$\eta_{\text{AB},s}^{\text{nom}}$	0. 88	0. 90	0. 93
$\text{COP}_{\text{HP},s}^{\text{nom}}$	3. 00	3. 20	3. 80
$\eta_{\text{FC},s}^{\text{nom}}$	0. 40	0. 45	0. 55

表 2 设备线性化系数与运行参数表

Tab. 2 Equipment linearization coefficients and operating parameters

参数	a	b	$l^{\min}$	$l^{\max}$	l_r
燃气轮机	0. 776 8	0. 226 2	0. 3	1	0. 5
	0. 922 1	0. 082 4			
燃气锅炉	0. 563 2	0. 429 7	0. 2	1	0. 3
电热泵	0. 713 2	0. 252 2	0. 3	1	0. 4
吸收式制冷机	0. 921 2	0. 0364 4	0. 2	1	0. 3
电制冷机	0. 877 5	0. 0981 7	0. 3	1	0. 4
固体氧化物 燃料电池	2. 824 9	-0. 132 9	0. 2	1	0. 5
氢气-质子交 换膜燃料电池	2. 563 9	-0. 115 7	0. 2	1	0. 5
电解槽	0. 516 3	0. 0196 8	0. 2	1	0. 5
电池	-	-	0	1	0. 3
热水箱	-	-	0	1	0. 4
冷水箱	-	-	0	1	0. 4
储氢罐	-	-	0	1	0. 4

表 3 面积因子参数

Tab. 3 Area factor parameters

单位: kW/m²

$A_{e,s}$	小型	中型	大型
燃气轮机	29. 1	45. 8	105. 1
燃气锅炉	420. 3	516. 5	650. 5
固体氧化物燃料电池	194. 7	194. 7	194. 7
吸收式制冷机	73. 8	110. 8	143. 9
电热泵	213. 1	275. 9	359. 2
电解槽	19. 2	19. 2	19. 2
氢气-质子交换 膜燃料电池	194. 7	194. 7	194. 7
电池 ^a	3 000. 0	3 000. 0	3 000. 0
热水箱 ^a	2 000. 0	2 000. 0	3 000. 0
冷水箱 ^a	2 000. 0	2 000. 0	3000. 0
储氢罐 ^a	3 000. 0	3 000. 0	3000. 0

注:^a 单位 kW·h/m²。

2.2 优化结果讨论

为探究设备分段化建模对系统优化结果的影响,本文在基准场景的基础上拓展算例分析,基准场景采用常规建模方法进行优化求解,即假设所有设备在不同额定功率范围内具有一致的效率曲线及动态性能,此类建模方式的简化特性,能够减少参数输入和建模复杂度,而分段线性化建模则进一步细化为 3 个不同的容量区间(小型、中型、和大型)进行建模。分段线性化建模导致模型的方程数量从基础场景的 46 422 个增加到 134 614 个,决策变量数目从 25 480 个增加到 74 088 个,优化求解时间显著延长,但结果的可靠性与实际可行性均有所提升,表 4 详细展示了不同场景的最佳技术组合及对应的最佳容量。相较于基准场景的优化结果,分段场景优化结果的能源设备种类明显减少,仅涵盖 8 种不同类型的能源设备,设备选择更为集中。特别是辅助燃气锅炉,涵盖了 3 种不同的容量规格。

表 4 系统最优配置容量

Tab. 4 Optimal system configuration capacity

单位: kW

设备	基准 场景	分段场景		
		小型	中型	大型
光伏	396	-	183	-
风机	-	-	-	-
燃气轮机	2 210	-	1 205	-
燃气锅炉	1 000	305	741	1 311
电热泵	566	-	-	-
吸收式制冷机	2 531	-	-	2 500
电制冷机	1 351	150	-	-
固体氧化物 燃料电池	691	-	-	-
氢气-质子交换 膜燃料电池	117	-	-	-
电解槽	84	-	-	-
储氢罐 ^a	3 009	-	-	-
电池 ^a	100	-	-	4 000
热水箱 ^a	10 404	-	-	20 000
冷水箱 ^a	40 000	-	26 000	32 000

注:^a 单位 kW·h。

此外,分段线性化建模场景最优配置的设备选择更具科学性,且能够充分满足用户端负荷需求。优化场景的年度总成本仅为 137. 52 万美元,相较于基准场景降低了 59%,见图 3。同时,碳排放量也从 4 642. 1 t 减少至 3 273. 1 t,降幅达 29%。算例结果表明,采用设备分段化建模进行容量与调度同步优化能够有效地规避了系统的过

度设计,减少了系统投资成本和碳排放量。尽管常规建模方法在求解速度上具有优势,但分段化建模更适用于规划设计阶段,特别是对于大规模的城市综合能源系统,能够提供更科学的设备选型与布局策略。

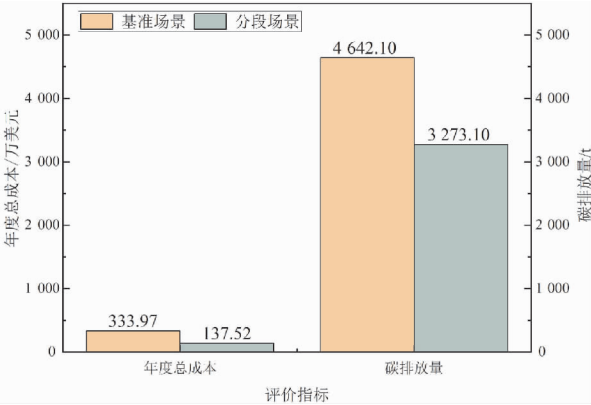


图 3 基准场景和分段场景优化结果对比

Fig. 3 Comparison of optimization results between base and segmented scenarios

图 4 进一步揭示了两个场景的成本结构差异。其中,设备的资本支出降低了 71%,主要是因为精细化建模后的设备配置更有针对性和高效,有效避免了过度设计,通过精确的需求匹配和设备性能评估,减少不必要的冗余配置。可变运行维护费用减少了 63%,主要得益于设备运行状态和启动模式的优化,从而提高了设备利用效率,降低了不必要的停机时间和能源消耗。燃料费用和启动成本分别降低了 29% 和 23%。相比之下,

固定维护费用的减少幅度较小,仅为 6%。

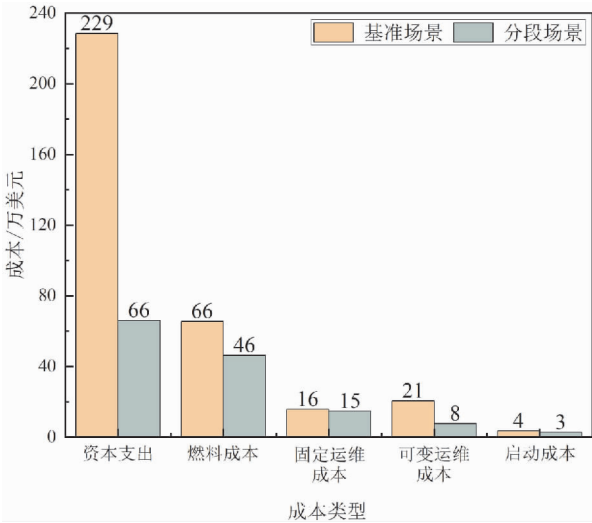


图 4 基准场景和分段场景成本结构对比

Fig. 4 Comparison of cost structure between base and segmented scenarios

针对该大规模的混合整数线性规划问题,本研究采用 Gurobi 求解器中的内点法,确定各设备的最优安装容量的同时,还进一步优化了设备的逐时开关状态、启停策略及功率输出水平,得到了电力、热能和冷能的最优调度方案,如图(5~7)所示。图中,左轴表示各设备的功率输出水平,右轴则反映了电力、热能与冷能负荷的变化,以及储能系统的状态变化。通过这些调度方案,系统能够高效地满足不同用户的负荷需求,并显著提升整体运行效率。

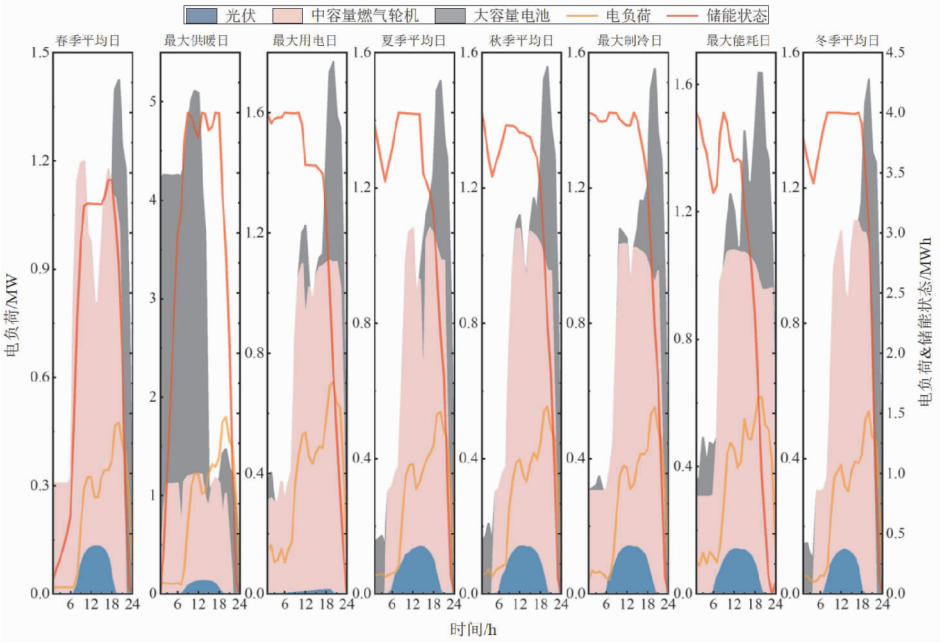


图 5 电负荷调度方案

Fig. 5 Power generation of UIES

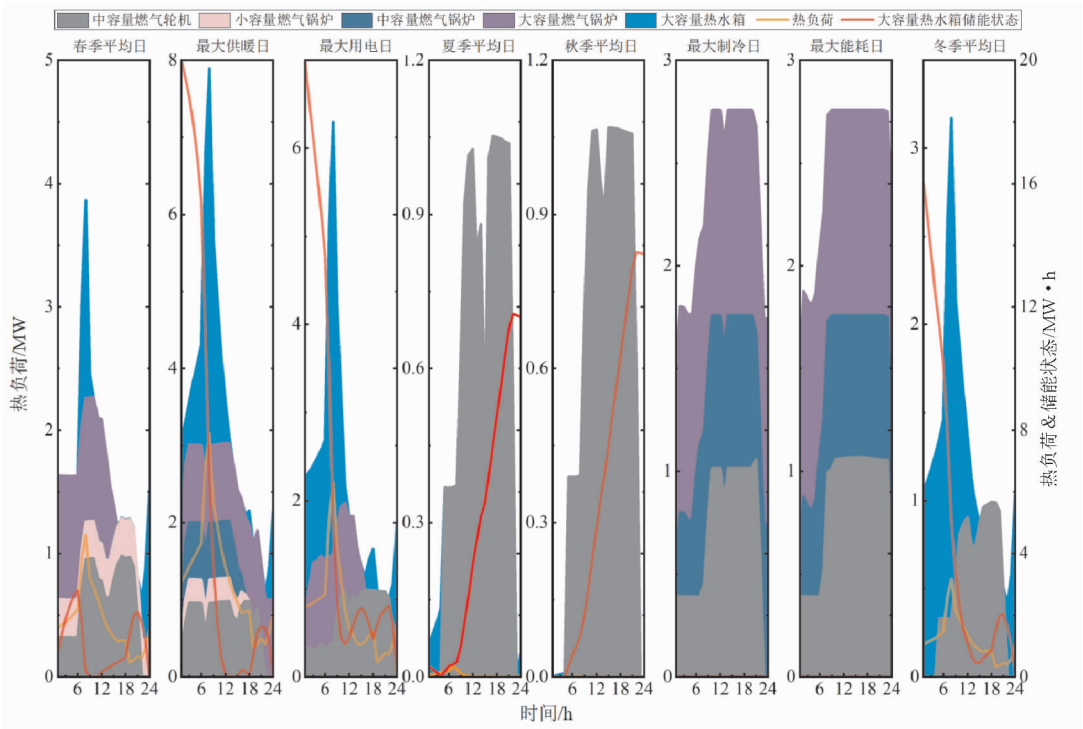


图 6 热负荷调度方案

Fig.6 Heating generation of UIES

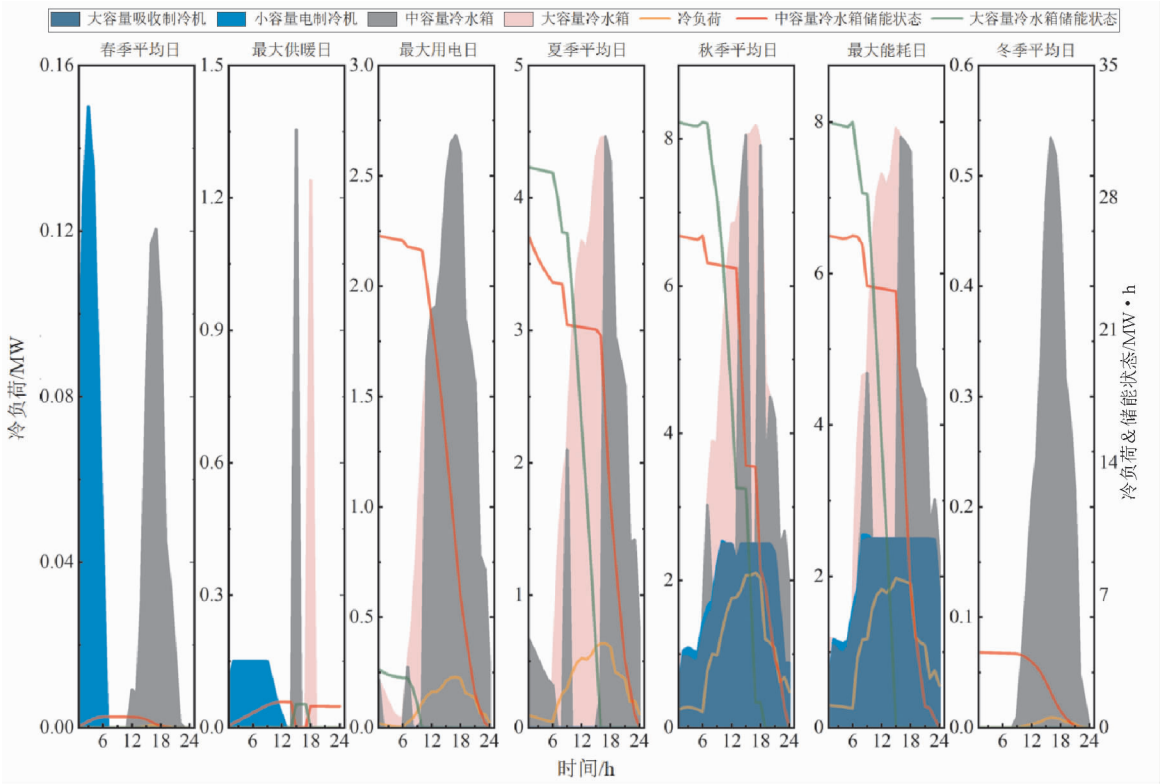


图 7 冷负荷调度方案

Fig.7 Cooling generation of UIES

2.3 面积约束讨论

UIES 在设计与建设过程中通常受地理位置、环境等多方面因素造成设备可用占地面积存在巨

大的差异性。为研究设备占地面积对系统设计的影 响,我们进一步引入了系统最大占地面积约束,并以 10 m^2 为步长,深入研究了不同约束面积对

系统经济和环境效益的影响。从图 8 可知,随着最大系统面积的逐渐缩小,系统设备配置更倾向于选择占地面积较小的清洁能源和储能系统。这种选择趋势一定程度上可降低系统的碳排放,但也导致 UIES 的 TAC 增长。特别地,当最大总面积从 200 m² 降至 160 m² 时,系统的 TAC 和 GHG 均保持不变。当最大总面积减少至 150 m² 时,虽然 TAC 出现了小幅增长,但 GHG 几乎未受影响。当最大总面积进一步缩减至 140 m² 时,TAC 和 GHG 均出现了显著增长。随着最大可用总面积的持续减少,面积约束对 TAC 和 GHG 的影响愈发显著。特别是在最大总面积为 130 m² 时,相较于无面积约束的情况,系统 TAC 增加了 9.67%,而 GHG 则降低了 30.9%。这些结果表明,能源系统的优化设计,除了考虑经济和环境效益外,还需充分考虑实际可用面积对系统配置和性能的影响,以实现更为全面和科学的决策。

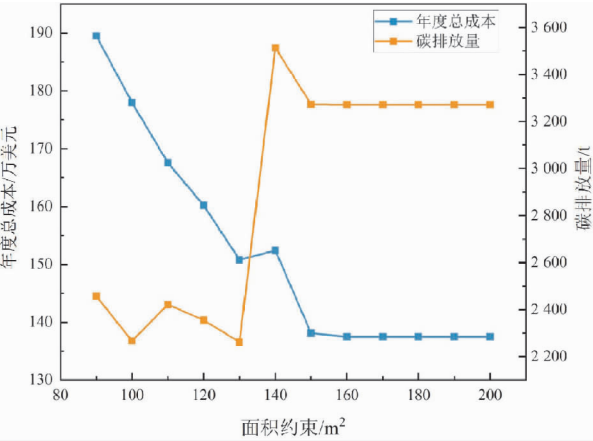


图 8 不同面积约束对系统经济及环境性能的影响
Fig.8 Effects of different area constraints on system economic and environmental performance

2.4 双目标优化

以设备的分段线性化建模为基础,进一步考虑了面积约束,并进行了双目标优化分析。图 9 展示了系统 TAC 与 GHG 之间的帕累托前沿。从图中可以清晰地观察到,随着 GHG 的减少,TAC 呈现单调递增的趋势。这表明对于研究的案例,不存在能够同时最小化 TAC 和 GHG 的单一解决方案。所有展示的解决方案均为非劣质的,即它们同样为最优解,因为降低 TAC 必然伴随着 GHG 的增加。值得注意的是,随着可再生能源渗透率的提高和储能系统容量的增加,实现进一步的碳减排需要投入更昂贵的系统成本。特别是当碳排放量减少至 970 t/a 时,成本曲线出现了显著的斜

率变化。图中最优点对应的 TAC 为 169.4 万美元,GHG 为 1 200 t,双目标优化的最优配置结果见表 5。我们推荐的最佳方案,相较于仅优化 TAC 的方案,温室气体排放量减少了 63%,而 TAC 仅增加 23%;而相较于基准场景,年度总成本减少了 49%,同时温室气体排放量显著减少了 74%。因此,该方案在经济和环境效益上均展现出较高的吸引力和可行性。

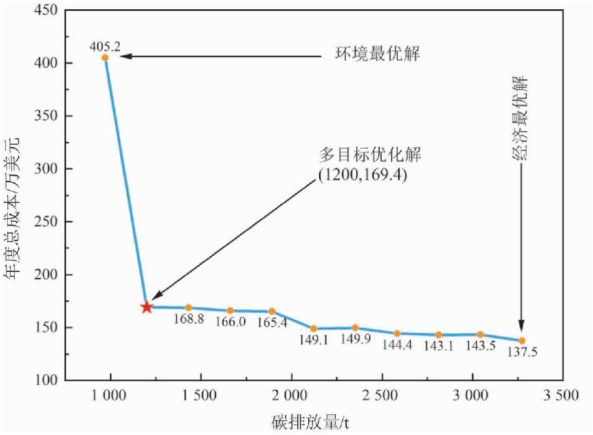


图 9 双目标优化结果
Fig.9 Bi-objective optimization results

表 5 双目标优化系统最优配置容量
Tab.5 Optimal system configuration capacity under bi-objective optimization 单位:kW

设备	小型	中型	大型
光伏	—	1 000	—
燃气锅炉	200	967	2 032
吸收式制冷机	—	2 000	—
电制冷机	281	—	—
氢气-质子交换膜燃料电池	180	—	—
电解槽	482	—	—
储氢罐 ^a	—	—	12 391
电池 ^a	—	3 075	5 000
热水箱 ^a	1 000	—	16 764
冷水箱 ^a	—	26 000	34 730

注:^a 单位 kW·h。

3 结论

本文提出了一种新颖的 UIES 设备分区间建模方法,实现了对 UIES 的高精度建模,并探讨了加入系统最大面积限制对 UIES 的影响,具体结

论如下。

1) 本文提出的 UIES 设备分区间建模方法, 由于能更精细地表征不同大小设备的性能与成本关系, 有效控制了 UIES 的设备资本支出、运行费用、燃料费用以及碳排放量, 实现了显著的经济与环境效益。具体而言, 相较于基准场景, 优化场景年度总成本降低了 59%, 同时碳排放量减少了 29%。

2) 本文发现特定面积约束对系统的经济性和环境指标具有不可忽视的影响, 当最大系统面积减小时, 系统配置更倾向于选择占地面积较小的清洁能源和储能系统, 同时系统的经济性和环境指标也会发生明显改变。这一发现对于可用面积有限的系统建设工程的前期规划具有重要的指导意义。

3) 本文通过实施双目标优化策略, 成功地在 UIES 的环境效益与经济性之间达成了有效的平衡, 获得了最佳的系统设计方案, 结果表明仅需增加 23% 的年度总成本, 即可减少 63% 的碳排放量。

本研究基于确定场景进行优化, 未完全考虑风能、太阳能的不确定性及时调度的复杂性, 未来研究将致力于提升建模精度, 探索动态优化方法以适应实时能源系统调度的需求。

参考文献

[1] 刘强, 邓旭, 王博文, 等. “一带一路”沿线国家能源部门气候变化减缓技术需求评估[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 675-683.
LIU Q, DENG X, WANG B W, et al. Climate change mitigation technology needs assessment for energy sector in countries along the Belt and Road[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 675-683.

[2] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
WU J Z. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.

[3] FATEMEH B, HOSSEIN S, SADEGH M S, et al. Multi-Period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.

[4] LUO X J, FONG K F. Development of integrated demand and supply side management strategy of multi-

energy system for residential building application[J]. Applied Energy, 2019, 242: 570-587.

[5] 张晓辉, 刘小琰, 钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6132-6142.
ZHANG X H, LIU X Y, ZHONG J Q, et al. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load Uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6142.

[6] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573-589.
ZHAO H P, MIAO S H, LI C, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 573-589.

[7] LIU Z M, LI M Q, KRAFT M, et al. Simultaneous design and operation optimization of renewable combined cooling heating and power systems[J]. AIChE Journal, 2020, 66(12): e17039.

[8] 沈思远, 宗超, 季晨振, 等. 微小型燃气轮机燃烧室模块化方法适用性的数值研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 56-64.
SHEN S Y, ZONG C, JI C Z, et al. Numerical study on applicability of modeling methods for micro gas turbine combustion chamber[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 56-64.

[9] GUNERHAN A, ALTUNTAS O, CALISKAN H. Analyzing the influence of feedstock selection in pyrolysis on aviation gas turbine engines: A study on performance, combustion efficiency, and emission profiles[J]. Energy, 2024, 306: 132513-132513.

[10] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 214-223.
LI Z W, ZHAO S Q, LIU J S. Based on chance-constrained goal programming coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 214-223.

[11] FRANK J. BROOKS F J. GE Gas turbine performance characteristics[J]. GE Power Systems, 2024, GER 35671H.

[12] 周步祥, 夏海东, 臧天磊. 考虑能量梯级利用的园区综合能源系统站网协同规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 20-27.

- ZHOU B X, XIA H D, ZANG T L. Station and network coordinated planning of park integrated system considering energy cascade utilization energy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(1): 20-27.
- [13] 李立钦, 石庆鑫, 王月汉, 等. 计及高阶方程分段线性化的港口电-氢综合能源系统优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(12): 21-28.
- LI L Q, SHI Q X, WANG Y H, et al. Optimal scheduling of electricity-hydrogen integrated port energy system considering piecewise linearization of high order equations[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(12): 21-28.
- [14] 吕玉坤, 赵润一, 周庆文, 等. 环境因素对光伏组件的温度及输出特性影响研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(11): 194-203.
- LYU Y K, ZHAO R Y, ZHOU Q W, et al. Investigation on influence of environmental factors on temperature and output characteristics of solar PV modules[J]. *Aeta energiae solaris sinica*, 2024, 45(11): 194-203.
- [15] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 2-13.
- CHENG H Z, HU X, WANG L, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 2-13.
- [16] LIU Z M, KARIMI I A, HE T B. A novel inlet air cooling system based on liquefied natural gas cold energy utilization for improving power plant performance[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 187: 41-52.
- [17] LIU Z M, KARIMI I A. Gas turbine performance prediction via machine learning[J]. *Energy*, 2020, 192: 116627-116627.
- [18] 杨德友, 西禹霏, 蔡国伟, 等. 电热泵与燃气锅炉辅助方式下电-热-风耦合调度策略研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(10): 2986-2993.
- YANG D Y, XI Y F, CAI G W, et al. Study on coupling dispatch of combined power-heat-wind system with electric heat pump and gas-fired boiler[J]. *Aeta energiae solaris sinica*, 2019, 40(10): 2986-2993.
- [19] 郝俊红, 冯晓龙, 杨云溪, 等. 分布式换能系统的概念、架构与规划分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3885-3897.
- HAO J H, FENG X L, YANG Y X, et al. Conception, architecture and planning analysis of distributed energy conversion system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3885-3897.
- [20] 卞一帆, 谢丽蓉, 杨建宾, 等. 计及弃风的“电气互补-冷热联供”模式研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(4): 311-317.
- BIAN Y F, XIE L R, YANG J B, et al. Study on mode of "electricity and gas complementation" and "cooling and heating combined supply" considering wind curtailment[J]. *Aeta energiae solaris sinica*, 2022, 43(4): 311-317.
- [21] 许小刚, 嵇晓鹏, 周楠楠, 等. 光-气-储互补的综合能源系统全生命周期优化研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(7): 60-72.
- XU X G, JI X P, ZHOU N N, et al. Research on whole life cycle optimization of integrated energy system with complementary solar, gas, and storage[J]. *Aeta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(7): 60-72.
- [22] 彭黎菊, 李爽, 史翊翔, 等. 首都住宅建筑燃料电池热电联供系统建模与能量供需分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3905-3916.
- PENG L J, LI S, SHI Y X, et al. Simulation study of fuel cell CHP system and energy demands analysis for residential buildings in Beijing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3905-3916.
- [23] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [24] LIU Z M, ZHAO Y R, WANG X N. Long-term economic planning of combined cooling heating and power systems considering energy storage and demand response[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115819.
- [25] 张苏涵, 顾伟, 俞睿智, 等. 综合能源系统建模与仿真: 综述、思考与展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(17): 1-21.
- ZHANG S H, GU W, YU R Z, et al. Modeling and simulation of integrated energy system: Review, reflection, and prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(17): 1-21.
- [26] 卫志农, 张清松, 赵静波, 等. 电力系统线性化模型研究综述与改进[J]. *电网技术*, 2017, 41(9): 2919-2927.
- WEI Z N, ZHANG Q S, ZHAO J B, et al. Review and improvement of power system linearization models[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 2919-2927.

[27] 高波,李飞,史轮,等. 基于实时碳强度评估的社区综合能源系统低碳互动管理策略[J]. 上海交通大学学报,2025,59(5):580-591.
GAO B, LI F, SHI L, et al. A low-carbon interactive management strategy for community integrated energy system based on real-time carbon intensity assessment [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2025, 59(5): 580-591.

[28] 李志伟,赵书强,李东旭,等. 基于改进 ϵ -约束与采样确定性转化的电力系统日前调度机会约束模型快速求解技术[J]. 中国电机工程学报,2018,38(16):4679-4691,4973.
LI Z W, ZHAO S Q, LI D X, et al. Fast solving of day-ahead power system scheduling chance-constrained model based on improved ϵ -constrained and deterministic transform by sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4679-4691, 4973.

[29] 盛四清,范林涛,李兴,等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):51-57.
SHENG S Q, FAN L T, LI X, et al. Multi-objective planning of distribution network based on pareto optimality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15):51-57.

[30] 蒋晨,缪书唯. 基于 TOPSIS 法的风速概率分布评价方法[J]. 太阳能学报,2023,44(8):499-508.
JIANG C, LIAO S W. Evaluation method for wind speed probability distribution based on topsis method [J]. Aeta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(8): 499-508.

[31] 崔全胜,白晓民,董伟杰,等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报,2019,39(17):4967-4981,5279.
CUI Q S, BAI X M, DONG W J, et al. Joint optimization of planning and operation in user-side multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 4967-4981, 5279.

(编辑 邵煜)