热力系统

文章编号:1001 - 2060(2024)04 - 0076 - 10

考虑碳捕集利用与可再生能源的低碳综合能源系统配置优化研究

秦 宁[1],郑 诚[2],吴 啸[2]
(1. 国家能源集团江苏电力有限公司,江苏 南京 210036;
2. 大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心(东南大学 能源与环境学院),江苏 南京 210096)

摘 要:为实现传统工业部门的低碳转型,构建了集成可再生能源、电锅炉、储热以及碳捕集利用与封存(CCUS)装备的低碳综合能源系统,并提出了经济和低碳双重导向下的系统配置优化方法。应用粒子群优化算法求解获得各设备的最优配置容量及典型场景下的最优调度方案,并选取乙烯工业进行案例分析。结果表明:通过引入 CCUS 和可再生能源装备,系统碳排放减少了 57.50%,年总成本增加 15.92%;当碳价高于 109.61 元/t 时,低碳综合能源系统具有经济和低碳双重优势。

关 键 词:低碳综合能源系统;可再生能源;碳捕集利用(CCUS);乙烯工业;配置优化

中图分类号:TK221 **文献标识码**:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.04.010

[**引用本文格式**]秦 宁,郑 诚,吴 啸. 考虑碳捕集利用与可再生能源的低碳综合能源系统配置优化研究[J]. 热能动力工程,2024,39(4):76 - 85. QIN Ning, ZHENG Cheng, WU Xiao. Optimal configuration of low-carbon integrated energy system considering carbon capture utilization and renewable energy technologies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(4):76 - 85.

Optimal Configuration of Low-carbon Integrated Energy System Considering Carbon Capture Utilization and Renewable Energy Technologies

QIN Ning[1], ZHENG Cheng[2], WU Xiao[2]
(1. CHN Energy Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing, China, Post Code: 210036;
2. National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety (School of Energy and Environment, Southeast University), Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: To achieve the low-carbon transformation of traditional industrial sectors, a low-carbon integrated energy system integrating renewable energy, electric boiler, thermal storage tank and carbon capture, utilization and storage (CCUS) equipment was established to reduce carbon emissions, and an economic and low-carbon oriented configuration optimization method was proposed. Particle swarm optimization algorithm was applied to find the optimal configuration and scheduling scheme for each device under typical scenarios, and the ethylene industry was selected as a case study. The results show that by deplo-

收稿日期:2023 - 07 - 04; **修订日期**:2023 - 09 - 19

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0112800);国家自然科学基金项目(532376002);江苏省碳达峰碳中和科技创新项目(BE2022-602);中央高校基本科研业务费项目(2242023K5001,2242023K30011)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2021YFE0112800); National Natural Science Foundation of China (532376002); Carbon Peak and Carbon Neutralization Science and Technology Innovation Project of Jiangsu Province (BE2022602); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2242023K5001, 2242023K30011)

作者简介:秦 宁(1987 -),男,国家能源集团江苏电力有限公司高级工程师.

通信作者:吴 啸(1986 -),男,东南大学副教授.

ying CCUS and renewable energy device, the carbon emissions of system decrease by 57.50%, and the total annual cost increases by 15.92%; the low-carbon integrated energy system will have both economic and low carbon advantages when the carbon price exceeds 109.61 yuan per ton.

Key words: low-carbon integrated energy system, renewable energy, carbon capture, utilization and storage (CCUS), ethylene industry, configuration optimization

引　言

乙烯是石油化学工业的重要原料,但以蒸汽裂解为主要工艺的生产过程会产生大量碳排放,其每生产 1 t 乙烯排放约 1 ~ 2 t CO_2,主要来源于裂解炉的裂解气燃烧以及热力、电力消耗的间接排放[1]。2022 年全球乙烯总产能已达 2.18 亿 t,我国达到 4 675万 t[2],为实现“双碳”目标,乙烯工业低碳化改造已刻不容缓。碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)和可再生能源技术分别从末端和源头降低碳排放,是乙烯工业领域低碳改造的重要技术路径[3]。

然而,CCUS 与可再生能源的接入将乙烯工业能源系统转变为多能流耦合的低碳综合能源系统。多种能源形式及转换装备间的复杂耦合给系统的稳定、经济运行带来挑战[4]。合理的容量配置是低碳综合能源系统推广应用的重要前提,也是实现多种能源协同互补和经济高效运行的基础。魏庆[5]研究了计及可再生能源接入的综合能源系统容量配置方法,得到了系统最佳可再生容量。王相宇等人[6]提出了包含多种可再生能源、储能在内的综合能源系统,并构建混合整数线性规划模型,求解得到各设备容量配置。然而,大部分研究均聚焦于可再生能源与储能装置的容量配置,构建以系统电、热等能量平衡为约束、经济成本为目标的配置优化问题[7],缺乏考虑使用 CCUS 技术降低工业过程碳排放,并综合考虑经济和低碳性能的综合能源系统配置方法。当前已有研究探讨了在乙烯工业中部署可再生能源[8]或碳捕集[9]技术的可行性,但多为固定工况下的技术经济分析研究,难以为系统的实际运行提供指导,且单一的减排技术难以实现乙烯工业的深度减排。

为此,本文构建了包含再生能源、电锅炉、储热和 CCUS 装备的低碳综合能源系统。在此基础上,提出了经济、低碳双重导向下的系统配置优化方法,并使用粒子群优化算法对各设备最优配置容量和典型场景下最优调度方案进行求解。选取国民经济发展过程中具有重要地位、碳排放较高的乙烯生产过程作为案例,验证了所提低碳综合能源系统及其配置优化方法的有效性。

1　系统介绍

针对乙烯生产过程中裂解炉及燃油锅炉产生的大量碳排放,本文提出针对乙烯工业的低碳综合能源系统结构如图 1 所示。乙烯工业能源系统主要包括蒸汽动力系统、燃油锅炉和废热锅炉。蒸汽动力系统主要由不同等级蒸汽管网、汽轮机和减温减压器组成[10]。蒸汽分为 4 个等级:超高压蒸汽(Super-high-pressure Steam, SS)、高压蒸汽(High-pressure Steam, HS)、中压蒸汽(Medium-pressure Steam, MS)和低压蒸汽(Low-pressure Steam, LS)。SS 主要由废热锅炉回收裂解气高温余热产生,不足部分由燃油锅炉补充。汽轮机共有 7 台(T1 ~ T7),T1 ~ T3 分别消耗各级蒸汽用于驱动裂解气、乙烯和丙烯压缩机,T4 ~ T7 则用于驱动汽动泵(U4 ~ U7)以输送乙烯工厂的物流。为保证安全生产,每台汽动泵都配有 1 台备用电动泵(M4 ~ M7),当蒸汽不足或汽动泵出现故障时,电泵将启动并立即取代汽动泵。通过对汽动泵和电动泵进行调度,可以进一步发掘系统节能空间。3 个减温减压阀(L1 ~ L3)用于调节各级蒸汽平衡。

部署化学吸收碳捕集设备对烟气中的 CO_2 进行吸收。捕获的 CO_2 被运输封存,或与裂解炉副产氢气合成甲醇,不足的氢气可由外部化工厂购买。此外,为了减少因蒸汽和电力需求造成的间接碳排放,

引入风力发电机组和太阳能集热器两种可再生供能设备为系统供能。为保证可再生能源波动下乙烯厂的长期稳定供能,在系统中部署电锅炉、储热设备等灵活可调的装置。此外,将碳捕集系统作为柔性负载,通过其灵活运行增强系统的适应性。系统不足的电和热(HS、MS、LS)可从外部电网和热网购买,多余的电和热则直接切除,以避免配置过多可再生能源。

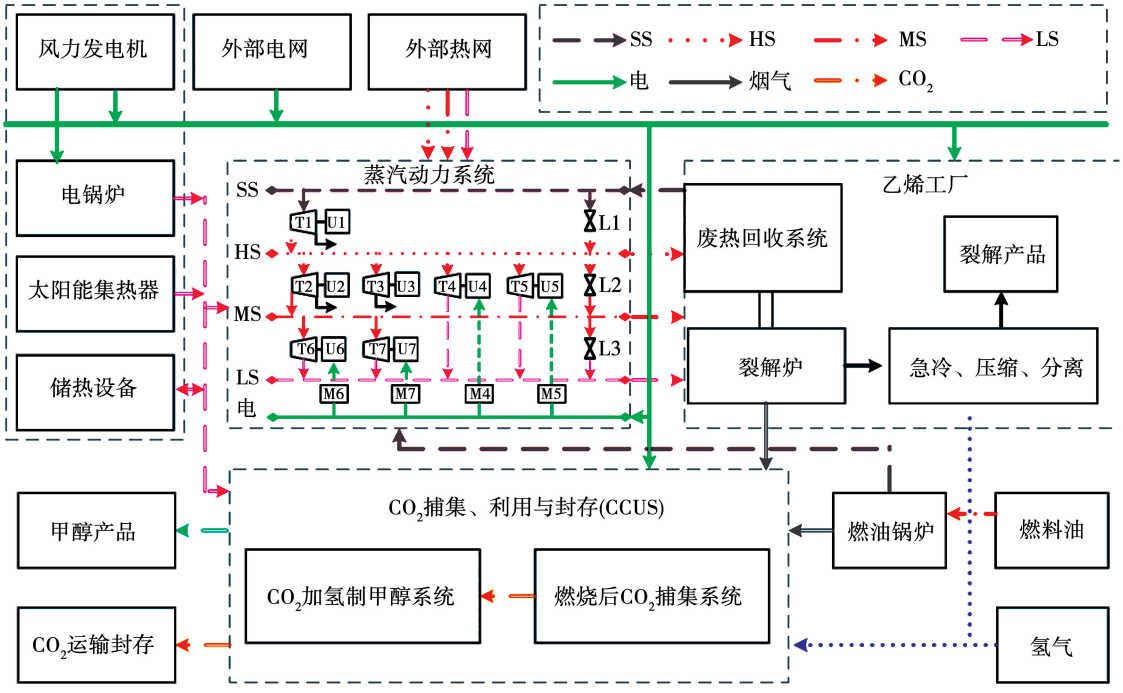


图 1 乙烯工业低碳综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of low-carbon integrated energy system of ethylene industry

1.1 蒸汽生产系统

蒸汽生产系统由废热锅炉和燃油锅炉组成。废热锅炉用于回收裂解气高温余热产生 SS。燃油锅炉在废热锅炉产生的 SS 不足时满足供热需求,其模型可表示为[11]:

$$F_{\mathrm{f}}\mathrm{LHV}_{\mathrm{f}}\eta_{\mathrm{OB}} = F_{\mathrm{OB}}^{\mathrm{SS}}(h^{\mathrm{SS}} - h^{\mathrm{w}}) \tag{1}$$

式中:F_{f},$F_{\mathrm{OB}}^{\mathrm{SS}}$—锅炉消耗燃料和产生 SS 的质量流量,kg/h;$\mathrm{LHV}_{\mathrm{f}}$—燃料低位热值,kJ/kg;$\eta_{\mathrm{OB}}$—锅炉效率;$h^{\mathrm{ss}}$,$h^{\mathrm{w}}$—SS 和水的焓值,kJ/kg。

1.2 蒸汽动力系统

1.2.1 汽轮机

汽轮机将蒸汽中的热能转化为机械能,改变其抽汽流量是维持蒸汽管网中不同等级蒸汽平衡的重要手段。汽轮机模型可表示为[12]:

$$P_{\mathrm{T}} = F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{in}}h_{\mathrm{T}}^{\mathrm{in}} - F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{ext}}h_{\mathrm{T}}^{\mathrm{ext}} - F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{out}}h_{T}^{\mathrm{out}} \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{in}} = F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{ext}} + F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{out}} \tag{3}$$

式中:P_{T}—汽轮机的输出功率,kW;$F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{in}}$,$F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{ext}}$,$F_{\mathrm{T}}^{\mathrm{out}}$—汽轮机的进汽、抽汽和排汽的质量流量,kg/h;$h_{\mathrm{T}}^{\mathrm{in}}$,$h_{\mathrm{T}}^{\mathrm{ext}}$,$h_{\mathrm{T}}^{\mathrm{out}}$—汽轮机的进汽、抽汽和排汽的焓值,kJ/kg。

1.2.2 减温减压器

减温减压器可以将蒸汽管网中的高温高压蒸汽调节至所需的低温低压蒸汽,以满足不同等级蒸汽的需求。其能量和质量平衡方程如下[13]:

$$F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{out}}h_{\mathrm{L}}^{\mathrm{out}} = F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{in}}h_{\mathrm{L}}^{\mathrm{in}} + F_{\mathrm{L,w}}^{\mathrm{in}}h_{\mathrm{L,w}}^{\mathrm{in}} \tag{4}$$

$$F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{out}} = F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{in}} + F_{\mathrm{L,w}}^{\mathrm{in}} \tag{5}$$

式中:$F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{in}}$,$F_{\mathrm{L}}^{\mathrm{out}}$,$F_{\mathrm{L,w}}^{\mathrm{in}}$—减温减压器入口,出口蒸汽和减温水的质量流量,kg/h;$h_{\mathrm{L}}^{\mathrm{in}}$,$h_{\mathrm{L}}^{\mathrm{out}}$,$h_{\mathrm{L,w}}^{\mathrm{in}}$—减温减压器入口、出口蒸汽和减温水的焓值,kJ/kg。

1.3 可再生能源

1.3.1 风力发电机组

风机输出功率与风速的关系为[14]:

$$P_{WT}=\begin{cases}0, & v<v_{ci}\text{ 且 }v\geqslant v_{co}\\ P_{WT}^{r}\times\dfrac{v^3-v_{ci}^3}{v_r^3-v_{ci}^3}, & v_{ci}\leqslant v\leqslant v_{co}\\ P_{WT}^{r}, & v_r<v<v_{co}\end{cases}\tag{6}$$

式中:P_{WT},P_{WT}^{r}—风机实际输出功率和额定功率,kW;v—轮毂高度处的风速,m/s;v_{ci},v_{co},v_r—风机的切入风速、切出风速以及额定风速,m/s。

1.3.2　太阳能集热器

槽式太阳能集热器用于收集光热生产低压蒸汽 LS,产生的热量与蒸汽量可由下式计算[15]:

$$H_{SHC}=S_{SHC}\eta_{SHC}G\tag{7}$$

$$H_{SHC}=F_{SHC}^{LS}(h^{LS}-h^{w})\tag{8}$$

式中:H_{SHC}—太阳能集热器收集到的热量,kW;S_{SHC}—太阳能集热器面积,m^2;η_{SHC}—光学效率;G—光照强度,kW/m^2;F_{SHC}^{LS}—太阳能集热器产生的 LS 质量流量,kg/h;h^{LS}—LS 比焓,kJ/kg。

1.4　碳捕集、封存与利用

1.4.1　化学吸收碳捕集

基于 gCCS©仿真平台开发了 30% 乙醇胺溶剂化学吸收碳捕集系统的机理模型[16]。为便于计算,其电耗和热耗简化计算公式如下:

$$P_{PCC}=\lambda_{PCC}^{P}\times m_{PCC}^{CO_2}\tag{9}$$

$$H_{PCC}=\lambda_{PCC}^{H}\times m_{PCC}^{CO_2}\tag{10}$$

式中:P_{PCC},H_{PCC}—碳捕集系统消耗的电功率和热功率,kW;λ_{PCC}^{P},λ_{PCC}^{H}—捕集单位质量 CO_2 的电耗和热耗,kW/kg;$m_{PCC}^{CO_2}$—单位时间内的 CO_2 捕集量,kg。

1.4.2　CO_2 加氢制甲醇

利用捕获的 CO_2 与裂解炉副产氢气或外购氢气可以合成甲醇产品。基于 Aspen plus©仿真平台开发了 CO_2 加氢制甲醇系统的机理模型[16],其电耗可按下式简化计算:

$$P_{CHM}=\lambda_{CHM}^{P}\times m_{CH_3OH}\tag{11}$$

式中:P_{CHM}—制甲醇系统消耗的电功率,kW;λ_{CHM}^{P}—生产单位甲醇的电耗,kW/kg;m_{CH_3OH}—单位时间内生产的甲醇量,kg。

1.5　电转热和储热设备

1.5.1　电锅炉

电锅炉作为备用蒸汽源,将多余可再生电力转化为低压蒸汽。电锅炉能量转换模型可表示为[17]:

$$H_{EB}=\eta_{EB}P_{EB}\tag{12}$$

$$H_{EB}=F_{EB}^{LS}(h^{LS}-h^{w})\tag{13}$$

式中:H_{EB},P_{EB}—电锅炉的制热功率和耗电功率,kW;η_{EB}—电锅炉效率;F_{EB}^{LS}—电锅炉产生 LS 的质量流量,kg/h;h^{LS},h^{w}—LS 和锅炉给水比焓。

1.5.2　储热罐

储热罐用于储存低压蒸汽,其热能充、放过程模型可表示为[18]:

$$Q_{TESS}^{t}=Q_{TESS}^{t-1}+\eta_{TESS}^{c}H_{TESS}^{c,t}-\frac{H_{TESS}^{d,t}}{\eta_{TESS}^{d}}\tag{14}$$

式中:Q_{TESS}^{t},Q_{TESS}^{t-1}—储热罐在 t 和 $t-1$ 时刻的储热量,kW·h;$H_{TESS}^{c,t}$,$H_{TESS}^{d,t}$—储热罐的充、放热功率,kW;η_{TESS}^{c},η_{TESS}^{d}—储热罐充、放热效率。

2　低碳综合能源系统配置优化

2.1　目标函数

为实现系统的经济低碳运行,构建体现系统年总成本的优化目标函数:

$$\min O_{all}=O_{inv}+O_{mai}+O_{ene}+O_{emi}+O_{cut}-O_{CH_3OH}\tag{15}$$

式中:O_{all}—年总成本;O_{inv}—设备年化投资成本;O_{mai}—设备维护成本;O_{ene}—能源购买成本,包括购买燃料油电、热和氢气的成本;O_{emi}—碳交易成本;O_{cut}—电,热切除惩罚成本;O_{CH_3OH}—甲醇产品收益;以上参数单位均为元。

其中,年化投资成本的计算式如下:

$$O_{inv}=\sum_{k=1}^{K}o_{inv,k}R_k\delta\tag{16}$$

$$\delta=\frac{(r+1)^y-1}{r(r+1)}\tag{17}$$

式中:$o_{inv,k}$—设备 k 的单位容量投资成本;R_k—设备 k 的容量;δ—资金回收率;y—设备服务年限;r—年利率。

维护成本的计算方式如下:

$$O_{mai}=d\sum_{t=1}^{24}\sum_{k=1}^{K}o_{mai,k}(P_k^t+H_k^t)\tag{18}$$

式中:d—1 年中的运行天数;$o_{mai,k}$—设备 k 的单位运维成本;P_k^t,H_k^t—设备 kt 时刻的发电或制热功率。

能源购买成本的计算式如下:

$$O_{ene} = d\sum_{t=1}^{24}(o_f m_f^t + o_{ele}P_{pur}^t + o_{steam}H_{pur}^t + o_{H_2}m_{H_2}^t) \tag{19}$$

式中：o_f，o_{ele}，o_{steam}，o_{H_2}—购买燃油、电、热和氢气的单价；m_f^t，P_{pur}^t，H_{pur}^t，$m_{H_2}^t$—t 时刻购买燃油、电、热和氢气的量。

碳交易成本的计算式如下：

$$O_{emi} = d\cdot o_{emi}\sum_t(A^t + e_p P_{pur}^t + e_h H_{pur}^t - m^t CEA) \tag{20}$$

式中：o_{emi}—碳交易单价；A^t—t 时刻系统实际碳排放量，kg；e_p，e_h—外部电网和热网购买电和热的碳强度系数；m^t—乙烯产量，kg；CEA—单位乙烯生产的碳配额系数。

电、热切除惩罚成本的计算式如下：

$$O_{cut} = o_{cut}^p\sum_{t=1}^{24}P_{cut}^t + o_{cut}^h\sum_{t=1}^{24}H_{cut}^t \tag{21}$$

式中：P_{cut}^t，H_{cut}^t—第 t 时切除的电和热功率，kW；o_{cut}^p，o_{cut}^h—对应的惩罚系数。

甲醇产品收益的计算方式如下：

$$O_{CH_3OH} = o_{CH_3OH}\sum_{t=1}^{24}m_{CH_3OH}^t \tag{22}$$

式中：o_{CH_3OH}—甲醇单价，元/kg；$m_{CH_3OH}^t$—第 t 时甲醇产量，kg。

2.2 约束条件

由于可再生能源出力具有波动性，在系统配置涉及的运行优化中，需考虑可再生出力的逐时变化，系统在典型日 24 h 内均需满足下列能量平衡和设备平衡约束。

2.2.1 能量平衡约束

各汽轮机（$i=1\sim7$）及其备用电机需满足过程机械功率的需求，如下式所示：

$$x_{Ti}^t M_{Ti}^t + (1 - x_{Ti}^t)M_{Pi}^t = M_{Ui}^t \tag{23}$$

式中：M_{Ti}^t，M_{Pi}^t，M_{Ui}^t—第 t 时汽轮机 Ti 和备用电机 Pi 提供的机械功率及相应功率需求，kW；x_{Ti}^t—汽轮机启停状态的 0～1 变量。

电功率平衡如下式所示：

$$P_{WT}^t + P_{pur}^t = P_{load}^t + P_{EB}^t + P_{PCC}^t + P_{CHM}^t + P_{cut}^t + \sum_{i=4}^{7}(1 - x_{Ti}^t)M_{pi}^t \tag{24}$$

式中：P_{WT}^t—t 时刻风机的发电功率，kW；P_{pur}^t，P_{cut}^t—购买和切断的电功率，kW；P_{load}^t—乙烯工厂的电负荷；P_{EB}^t，P_{PCC}^t，P_{CHM}^t—电锅炉，碳捕集和制甲醇的耗电量，kW。

蒸汽管网中各等级蒸汽质量平衡如下：

$$F_{WHRS}^{SS,t} + F_{OB}^{SS,t} = F_{T1}^{in,t} + F_{L1}^{in,t} \tag{25}$$

$$F_{T1}^{ext,t} + F_{L1}^{out,t} + F_{pur}^{HS,t} = F_{load}^{HS,t} + F_{cut}^{HS,t} + F_{T2}^{in,t} + F_{T3}^{in,t} + x_{T4}^t F_{T4}^{in,t} + x_{T5}^t F_{T5}^{in,t} + F_{L2}^{in,t} \tag{26}$$

$$F_{T2}^{ext,t} + F_{L2}^{out,t} + F_{pur}^{MS,t} = F_{load}^{MS,t} + F_{cut}^{MS,t} + x_{T6}^t F_{T6}^{in,t} + x_{T7}^t F_{T7}^{in,t} + F_{L3}^{in,t} \tag{27}$$

$$\sum_{i=4}^{7}x_{Ti}^t F_{Ti}^{out,t} + F_{L3}^{out,t} + F_{SHC}^{LS,t} + F_{EB}^{LS,t} + F_{pur}^{LS,t} + F_{TESS}^{d,t} = F_{load}^{LS,t} + F_{cut}^{LS,t} + F_{PCC}^{LS,t} + F_{TESS}^{c,t} \tag{28}$$

式中：$F_{WHRS}^{SS,t}$，$F_{OB}^{SS,t}$—第 t 时废热锅炉，燃油锅炉产生的 SS 蒸汽量，kg/h；F_{pur}^t，F_{cut}^t 和 F_{load}^t—第 t 时相应购买、切断的蒸汽量以及负荷需求，kg/h；$F_{TESS}^{c,t}$，$F_{TESS}^{d,t}$—储热罐充、放的 LS 质量流量，kg/h。

2.2.2 设备运行约束

除能量平衡约束外，各设备运行状态也需要满足各自约束条件以保证系统的安全运行：

$$\min \leqslant (P_{WT}^t, P_{EB}^t, F_{Ti,}^{ext,t}, F_{Ti}^{out,t}, F_{Lj}^{out,t}, H_{OB}^t, H_{SHC}^t, H_{TESS}^{cha,t}, H_{TESS}^{dis,t}, CR_t) \leqslant \max \tag{29}$$

式中：CR_t—碳捕集系统的碳捕集率，定义如下：

$$CR_t = \frac{F_{PCC}^{CO_2,t}}{F_{fg}^{CO_2,t}} \tag{30}$$

式中：$F_{fg}^{CO_2,t}$，$F_{PCC}^{CO_2,t}$—t 时刻烟气中 CO_2 流量和捕集量，kg/h。

此外，储热罐在一个调度周期结束时的热量应与初始时刻相同，以确保调度的可重复性：

$$H_{TESS}^1 = H_{TESS}^{24} \tag{31}$$

2.3 求解方法

配置优化问题采用粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法求解。PSO 为一种启发式优化算法，通过模拟鸟群觅食行为发展而来。粒子通过不断循环迭代，寻找全局最优解[19]。配置优化问题求解过程如图 2 所示。

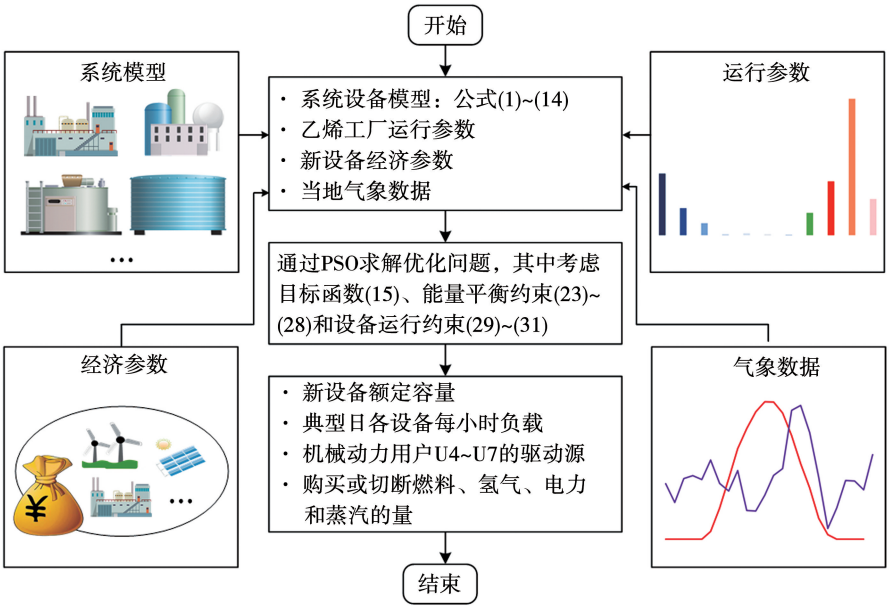


图 2　配置优化求解过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of configuration optimization solution process

3　结果与分析

3.1　参数设置

选取某地年产 30 万 t 的乙烯工厂为研究对象，其典型工况的关键运行参数如表 1 所示。新增设备经济参数及相关市场参数见表 2 和表 3。

表 1　乙烯工厂关键运行参数[8,20]

Tab. 1 Key operating parameters of ethylene plant[8,20]

参　数	数　值
U1 负荷/kW	24 930
U2 负荷/kW	10 904
U3 负荷/kW	4 835
U4 负荷/kW	297
U5 负荷/kW	731
U6 负荷/kW	347
U7 负荷/kW	88
电负荷/kW	904 8
高压蒸汽(HS)流量/kg·h^{-1}	21 727
中压蒸汽(MS)流量/kg·h^{-1}	55 176
低压蒸汽(LS)流量/kg·h^{-1}	14 661
废热锅炉超高压蒸汽(SS)产量/kg·h^{-1}	162 610
副产氢气流量/kg·h^{-1}	0.9657
烟气质量流量/kg·s^{-1}	123.60
CO_2 质量浓度/%	12.16

表 2　新增设备经济参数[21,22]

Tab. 2 Economic parameters of new equipment[21,22]

项　目	投资成本	维护成本
风力发电机	7 500 元/kW	0.012 元/kW
太阳能集热器	500 元/m^2	0.008 元/kW
电锅炉	520 元/kW	0.008 元/kW
储热罐	40 元/(kW·h)	0.002 元/(kW·h)
碳捕集	45 元/t	90 元/t
CO_2 加氢制甲醇	1 750 元/t	160 元/t

表 3　用于配置优化的经济和排放参数[23,24]

Tab. 3 Economic and emission parameters for configuration optimization[23,24]

参　数	数　值
燃油价格/元·kg^{-1}	1.37
电价/元·(kW·h)$^{-1}$	0.55
外购高压蒸汽(HS)价格/元·kg^{-1}	0.173 6
外购中压蒸汽(MS)价格/元·kg^{-1}	0.158 0
外购低压蒸汽(LS)价格/元·kg^{-1}	0.122 9
碳交易价格/元·t^{-1}	50
氢气价格/元·t^{-1}	10 000
甲醇价格/元·t^{-1}	3 000
燃油碳强度系数	3.223 3
外购电碳强度系数	1.06
外购高压蒸汽(HS)碳强度系数	0.199 1
外购中压蒸汽(MS)碳强度系数	0.181 1
外购低压蒸汽(LS)碳强度系数	0.172 6
CO_2 运输封存成本/元·t^{-1}	50

碳强度系数:外购单位能源排放的 CO_2 量。

3.2 配置优化结果

优化求解得到乙烯工业低碳综合能源系统的各设备配置如表 4 所示。在引入 CCUS 后,系统部署大量可再生能源、电转热和储热为乙烯生产及 CCUS 设备供能。

表 4 配置优化结果

Tab. 4 Configuration optimization results

参 数	数 值
风力发电机发电功率/MW	86.90
太阳能集热器面积/m^2	98 424.51
电锅炉制热功率/MW	39.55
储热罐容量/MW·h	247.07
碳捕集产能/$t \cdot h^{-1}$	32.51
CO_2加氢制甲醇产能/$t \cdot h^{-1}$	5.15

低碳综合能源系统与原系统的经济成本如表 5 所示。相比于原系统,低碳能源系统的经济成本提高了 1 976 万元(15.92%),主要由于 CCUS 与可再生供能等设备的投资成本高昂。可再生能源的部署降低了购买燃油、电和热的成本,也降低了由此带来的碳排放成本。尽管部署了光热、电转热和储热,但由于碳捕集的巨大热耗,系统仍需从外部热网购买部分蒸汽,保证系统稳定运行。CO_2加氢制甲醇工艺则为低碳综合能源系统带来了可观的利润,但由于现阶段外购氢气价格较高,消耗的氢气完全来自于裂解炉副产品。相比原系统,低碳能源系统的年碳排放量减少了 384.89 t(57.50%)。

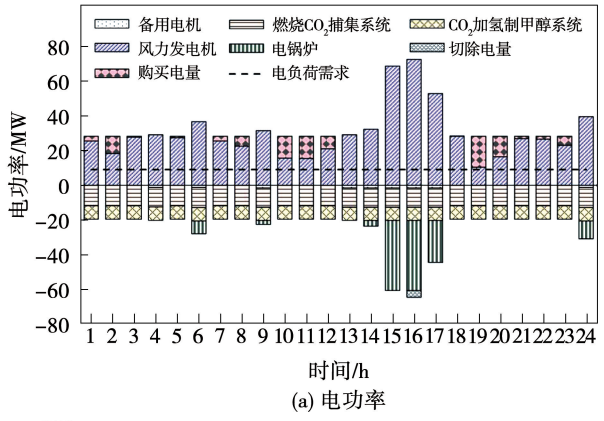
表 5 系统经济成本对比(亿元)

Tab. 5 Comparison of economic costs of low-carbon integrated energy system and original system(100 million yuan)

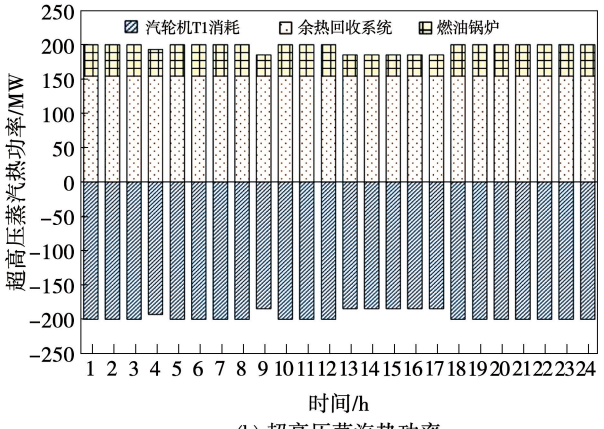
项 目	原能源系统	低碳能源系统
年总成本	1.240 9	1.438 5
年化投资成本	0	1.549 9
维护成本	0.137 8	0.584 4
燃油成本	0.404 3	0.368 6
购电成本	0.431 0	0.186 6
购热成本	0	0.157 3
碳交易成本	0.256 1	0.061 3
甲醇产品收益	0	-1.319 5
电热切除惩罚	0.015 1	0.001 5

3.3 运行优化结果

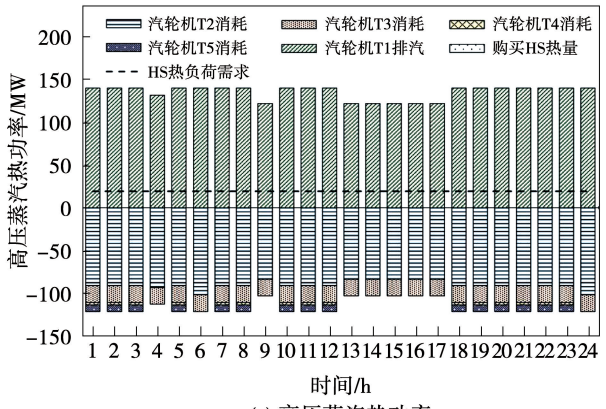
乙烯工业低碳综合能源系统在典型日的电、热调度情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,系统电力需求主要由风机提供,少量不足部分由外部电网提供。U4 ~ U7 的机械功率需求大部分时间由汽轮机 T4 ~ T7 提供,电动机 M4 ~ M7 仅在风力充足时使用以减少蒸汽消耗。大部分多余风电通过电锅炉转化为低压蒸汽 LS,但由于储热罐容量的限制,仍有少量弃风现象出现。超高压蒸汽 SS 主要由废热锅炉提供,不足部分由燃油锅炉补充。高压蒸汽 HS 和中压蒸汽 MS 则完全从汽轮机 T1 和 T2 抽汽,不需从外部购买。CCUS 的部署极大增加了 LS 的需求。在 8 ~ 17 时,光照充足,LS 主要由太阳能集热器产生,多余部分储存于储热罐中。夜间没有光照时,LS 则由储热罐、汽轮机 T4 ~ T7、减温减压阀 L3 和外部热网共同提供。电锅炉和储热罐的使用提高了可再生能源的利用率,并减少了购电和购热需求。



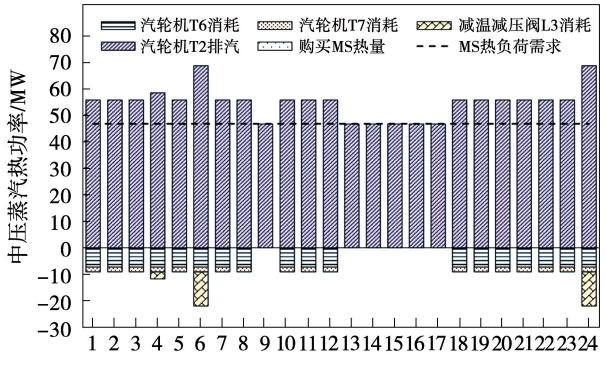
(a) 电功率



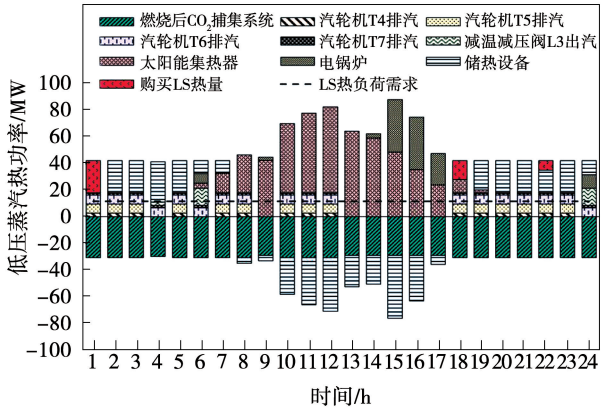
(b) 超高压蒸汽热功率



(c) 高压蒸汽热功率



(d) 中压蒸汽热功率



(e) 低压蒸汽热功率

图 3　典型日调度结果

Fig. 3 Scheduling results during typical day

系统典型日的碳排放和捕集率如图 4 所示。由于碳捕集能耗较高,且当前阶段碳价较低,故捕集率维持在设定范围的下限 50%。但由于燃油锅炉负荷波动及购电购热引起的间接碳排放变化,碳排放在全天中也不恒定。低碳综合能源系统全天碳排放为 877.82 t,碳捕集量为 768.51 t。

储热罐在典型日的运行状况如图 5 所示。白天光照充足时,多余的 LS 储存至储热罐中,夜间释放以满足乙烯工厂及碳捕集系统的热量需求。

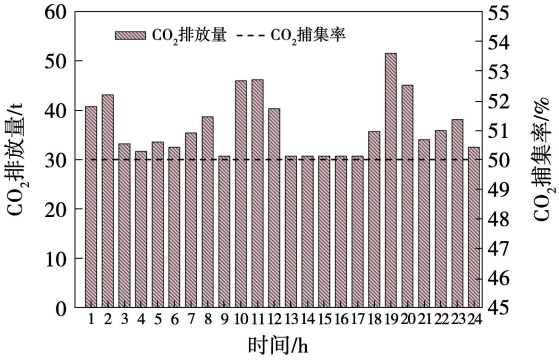


图 4　典型日 CO_2 排放量及捕集率

Fig. 4 CO_2 emissions and capture rate during typical day

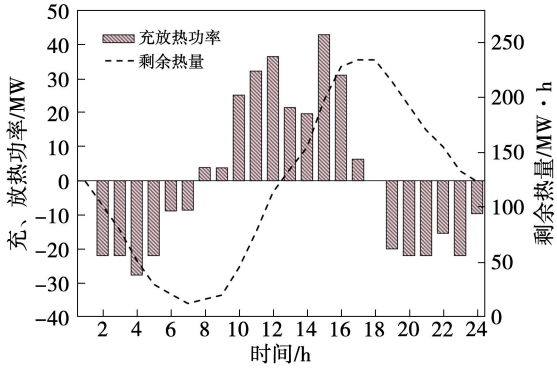


图 5　典型日储热罐运行状况

Fig. 5 Operation state of thermal storage tank during typical day

3.4　碳交易价格对容量配置的影响

制定合理的碳交易政策是推动乙烯工业低碳转型的重要政策手段。随着环境形势日益严峻,碳交易价格也势必不断提高。因此,本节研究碳价变化对乙烯工业低碳综合能源系统容量配置和运行成本的影响。不同碳价下的系统配置结果如表 6 所示。由表 6 可知,随着碳价的提高,风机、光热和辅助设备电锅炉、储热罐的容量均持续增加,以减少使用燃油锅炉和购电、购热造成的碳排放。然而由于 CCUS 的投资和运营成本较高,碳捕集装机容量在碳价超过 200 元/t 时才开始增加。由于现阶段氢气价格较高,碳价提高并未推动 CO_2 加氢制甲醇容量的增加。

表 6 不同碳价下各设备容量

Tab. 6 Capacity of each device under different CO_2 prices

碳价/元·t^{-1}	风力发电机发电功率/MW	太阳能集热器面积/m^2	电锅炉制热功率/MW	储热罐容量/MW·h	碳捕集产能/t·h^{-1}	CO_2加氢制甲醇产能/t·h^{-1}
50	86.90	98 424	39.55	247.07	32.51	5.15
80	87.54	99 127	40.11	276.94	32.51	5.15
110	88.62	108 119	40.91	298.28	32.51	5.15
140	90.88	113 275	42.06	318.47	32.51	5.15
170	91.33	117 513	42.65	336.44	32.51	5.15
200	92.06	120 390	42.94	356.98	33.71	5.15

不同碳价下乙烯工业低碳综合能源系统与原系统的年总成本如图 6 所示。由图 6 可知,随着碳价的攀升,两个系统的年总成本均持续增加。然而,由于低碳能源系统的碳排放较低,其增速较慢。当碳价高于 109.61 元/t 时,低碳综合能源系统相比于原系统将具有经济和低碳双重优势。

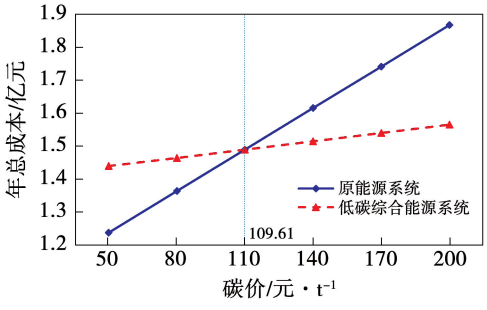


图 6 不同碳价下的系统年总成本对比

Fig. 6 Comparison of total annual costs of systems under different CO_2 prices

4 结 论

构建了集成碳捕集与利用、风力发电、太阳能集热、电锅炉和储热罐的低碳综合能源系统,提出了以经济和低碳为导向的系统配置优化方法。采用粒子群优化算法求解优化问题获得了各新增设备的最优配置容量和典型场景下的最优运行调度方案。选取碳排放较高的乙烯生产过程进行案例分析,主要结论如下:

(1) 与原能源系统相比,低碳综合能源系统以年总成本增加 15.92% 为代价,减少了 57.50 的碳排放;

(2) 通过协调 CCUS 和电锅炉、储热罐等低碳设备的灵活运行,低碳综合能源系统可以在可再生供能波动下实现乙烯厂的稳定供能;

(3) 碳价对系统配置和运行成本的影响较大,当碳价高于 109.61 元/t 时,低碳综合能源系统将具有经济、低碳双重优势。

参考文献:

[1] 何盛宝,侯雨璇,王红秋. 双碳目标下乙烯生产技术发展趋势[J]. 现代化工,2022,42(8):60 – 64.
HE Sheng-bao, HOU Yu-xuan, WANG Hong-qiu. Development trend of ethylene production technology under "carbon emission peaking" and "carbon neutrality" target[J]. Modern Chemical Industry,2022,42(8):60 – 64.

[2] 王子宗,刘 罡,王振维. 乙烯丙烯生产过程强化技术进展及思考[J]. 化工进展,2023,42(4):1669 – 1676.
WANG Zi-zong, LIU Gang, WANG Zhen-wei. Progress and reflection on process intensification technology for ethylene/propylene production[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023,42(4):1669 – 1676.

[3] CHEN Xian-hao, WU Xiao, LEE KY. The mutual benefits of renewables and carbon capture: Achieved by an artificial intelligent scheduling strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2021,233:113856.

[4] 杨 允,刘鹏坤,向艳蕾. 有蓄能的多能互补耦合系统优化配置研究[J]. 热能动力工程,2021,36(1):108 – 116.
YANG Yun, LIU Peng-kun, XIANG Yan-lei. Optimal configuration of multi-energy complementary systems with storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(1): 108 – 116.

[5] 魏 庆. 计及可再生能源接入的综合能源系统容量配置与运行优化[D]. 北京:华北电力大学,2020.

WEI Qing. Capacity allocation and operation optimization of integrated energy system with renewable energy access[D]. Beijing: North China Electric Power University,2020.

[6] 王相宇,任洪波,吴　琼,等. 面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J]. 热能动力工程,2022,37(7):136－145.
WANG Xiang-yu,REN Hong-bo,WU Qiong,et al. Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable energy system facing carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(7):136－145.

[7] 渠敬河,刘新刚,赵洪峰,等. 基于燃气轮机富氧辅助供能的风电耦合化工系统容量优化配置[J]. 科学技术与工程,2023,23(1):213－219.
QU Jing-he,LIU Xin-gang,ZHAO Hong-feng,et al. Capacity optimization of wind-power coupled chemical system based on gas turbine oxygen-enriched auxiliary energy supply[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(1):213－219.

[8] SHEN Fei-fei,WANG Xiao-qiang,HUANG Ling-xiang,et al. Modeling and optimization of a large-scale ethylene plant energy system with energy structure analysis and management[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2019,58(4):1686－1700.

[9] HU Gui-hua,LI Xiao-xu,LIU Xiao-yan,et al. Techno-economic evaluation of post-combustion carbon capture based on chemical absorption for the thermal cracking furnace in ethylene manufacturing[J]. Fuel,2023,331:125604.

[10] QIAN Qi-ming,LIU Hua,HE Chang,et al. Sustainable retrofit of petrochemical energy systems under multiple uncertainties using the stochastic optimization method[J]. Computers & Chemical Engineering,2021,151:107374.

[11] WANG Feng-yuan,ZHANG Shuai,LYU Chen-yu,et al. Optimal design of solar-assisted steam and power system under uncertainty[J]. Journal of Cleaner Production,2022,336:130294.

[12] LI Ze-qiu,DU Wen-li,ZHAO Liang,et al. Modeling and optimization of a steam system in a chemical plant containing multiple direct drive steam turbines[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2014,53:11021－11032.

[13] HOSSAIN M A,POTA H R,SQUARTINI S,et al. Energy scheduling of community microgrid with battery cost using particle swarm optimisation[J]. Applied Energy,2019,254:113723.

[14] GABRIELLI P,GAZZANI M,MARTELLI E,et al. Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage[J]. Applied Energy,2018,219:408－424.

[15] 廖霈之. 燃煤电站 CO_2 捕集系统建模与优化控制[D]. 南京:东南大学,2020.
LIAO Pei-zhi. The dynamic modelling and flexible operation of coal-fired power plant integrated with post-combustion carbon capture process[D]. Nanjing:Southeast University,2020.

[16] XI Han,WU Xiao,CHEN Xian-hao,et al. Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality[J]. Applied Energy,2021,295:117069.

[17] LI Jun-hua,FU Ying-nan,LI Cui-ping,et al. Improving wind power integration by regenerative electric boiler and battery energy storage device[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2021,131:107039.

[18] CHEN Xian-hao,QIU Ruo-han,WU Xiao. Multi-timescale capacity configuration optimization of energy storage equipment in power plant-carbon capture system[J]. Applied Thermal Engineering,2023,227:120371.

[19] 刘　荣,荀志国,吕　青,等. 基于 PSO 算法的供热系统锅炉集群运行参数优化[J]. 热能动力工程,2020,35(2):26－31.
LIU Rong,XUN Zhi-guo,LYU Qing,et al. Optimization of operation parameters of heating system boiler cluster based on PSO algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):26－31.

[20] SHEN Fei-fei,ZHAO Liang,DU Wen-li,et al. Large-scale industrial energy systems optimization under uncertainty:A data-driven robust optimization approach[J]. Applied Energy,2020,259:114199.

[21] WANG Qi-peng,HAN Xiao,ZHAO Liang,et al. Sustainable retrofit of industrial utility system using life cycle assessment and two-stage stochastic programming[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2022,10(41):13887－13900.

[22] XI Han,LIAO Pei-zhi,WU Xiao. Simultaneous parametric optimization for design and operation of solvent-based post-combustion carbon capture using particle swarm optimization[J]. Applied Thermal Engineering,2021,184:116287.

[23] SHEN Fei-fei,ZHAO Liang,DU Wen-li,et al. Data-driven stochastic robust optimization for industrial energy system considering renewable energy penetration[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2022,10(11):3690－3703.

[24] XI Han,ZHU Ming-juan,LEE K Y,et al. Multi-timescale and control-perceptive scheduling approach for flexible operation of power plant-carbon capture system[J]. Fuel,2023,331:125695.

(丛　敏　编辑)