

引用格式: 李浩, 李黄强, 向昆, 等. 计及柔性负荷与电动船舶的港口微电网多时间尺度优化调度[J]. 中国电力, 2026, 59(6): 133–144.

Citation: LI Hao, LI Huangqiang, XIANG Kun, *et al.* Multi-time scale optimal scheduling of port microgrids considering flexible loads and electric ships[J]. Electric Power, 2026, 59(6): 133–144.

计及柔性负荷与电动船舶的港口微电网 多时间尺度优化调度

李浩¹, 李黄强², 向昆², 杨凌曦², 马辉¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院 (智慧能源技术湖北省工程研究中心), 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

Multi-time scale optimal scheduling of port microgrids considering flexible loads and electric ships

LI Hao¹, LI Huangqiang², XIANG Kun², YANG Lingxi², MA Hui¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University (Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology), Yichang 443002, China; 2. Yichang Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: To address the problems of limited wind-solar accommodation capacity and insufficient utilization of adjustable resources in port microgrids, this paper proposes a multi-time scale optimal scheduling strategy for port microgrids considering flexible loads and electric ships. Firstly, the system architecture of the port microgrid is established with consideration of adjustable resources including flexible loads and electric ships. Secondly, the response model of port flexible loads and the charging-discharging model of electric ships are constructed. On this basis, a multi-time scale optimal scheduling model is built. In the day-ahead phase, the flexible loads baseline power and electric ships scheduling plan are formulated with the goal of minimizing the system operation cost; in the intraday phase, a rolling optimization model is established, realizing the dynamic matching of source-grid-load-storage by dynamically adjusting the response strategy of flexible loads and the charging-discharging power of electric ships. Simulation results indicate that compared with the day-ahead scheduling scenarios without considering flexible loads, electric ships and energy storage, the proposed method can reduce the total operating cost of the port microgrid by 20.2% and increase the local wind power accommodation rate by 8.1 percentage points in the intraday optimization phase. Furthermore, the economic

benefits and wind power accommodation performance of the proposed method is superior to the scheduling results under single-scenario conditions, highlighting the comprehensive advantages of multi-source coordination and multi-time scale optimization.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52377191), and Natural Science Foundation of Hubei Province for General Projects (No.2024AFB584).

Keywords: flexible load; electric ship; port microgrid; day-ahead and intraday optimization

摘 要: 针对港口微电网的风光消纳能力受限与系统可调节资源利用不足等问题, 提出一种计及柔性负荷与电动船舶的港口微电网多时间尺度优化调度策略。首先, 建立考虑柔性负荷和电动船舶等可调节资源的港口微电网系统架构。其次, 构建港口柔性负荷响应模型与电动船舶充放电模型。在此基础上, 构建多时间尺度优化调度模型, 日前阶段以系统运行成本最小化为目标, 制定柔性负荷基线功率与电动船舶调度计划; 日内阶段建立滚动优化模型, 通过动态调整柔性负荷响应策略与电动船舶充放电功率, 实现源-网-荷-储动态匹配。仿真结果表明: 与未考虑柔性负荷、电动船舶与储能的日前调度场景相比, 所提方法在日内优化阶段可降低港口微电网总运行成本 20.2%, 风电就地消纳率提高 8.1 个百分点。同时, 所提方法的经济效益和风电消纳效果均优于单一场景下的调度结果, 凸显了多源协同与多时间尺度优化的综合优势。

收稿日期: 2025-07-22; 修回日期: 2026-05-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52377191); 湖北省自然科学基金面上资助项目 (2024AFB584)。

关键词：柔性负荷；电动船舶；港口微网；日前-日内优化
DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202507065

0 引言

在全球气候变化与“双碳”目标的驱动下，港口作为国际贸易枢纽与能源消耗密集区域，正加速向绿色低碳转型。风力、光伏等分布式能源的大规模接入，为港口能源系统清洁化提供了新路径^[1-4]。然而，随着港口货物吞吐量的持续攀升与电动船舶规模化应用，港口能源系统的负荷结构呈现显著复杂化趋势^[5-7]。高比例渗透下的新能源与船舶充电负荷叠加，使得港口能源系统面临多重调度挑战^[8-9]，尤其在大规模港口集群发展背景下，刚性负荷占比高、柔性资源调度潜力挖掘不足等问题，使得系统调节裕度受限^[10-11]。因此，构建港口多源协同供能体系与调度策略，对于绿色港口的经济运行、新能源高效消纳与多类型负荷的动态平衡具有重要意义。

港口中具备用电时段或功率可调性能的负荷即为柔性负荷，其灵活调节能力可缓解新能源出力波动对电网的冲击^[12-13]。电动船舶及电动汽车等均可与港口微网实现能源双向流动^[14-15]。目前，柔性负荷调度研究多聚焦于园区^[16-21]，而电动船舶调度主要围绕独立充放电场景展开，两者在港口微电网中的协同潜力尚未充分挖掘。文献^[22-23]提出了基于需求响应的园区柔性负荷分层调控方法，通过可平移负荷的时段转移与可削减负荷的功率调节，优化了风光消纳效率。文献^[24-25]提出了电动船舶灵活调度策略，协调港口微电网能量管理，并利用船舶储能实时调节电网电压，在平抑负荷波动的同时兼顾了系统稳定与设备寿命。文献^[26]将园区柔性负荷与电动汽车 V2G（vehicle-to-grid）技术结合，构建了多源协同的园区能量管理框架，在降低微电网运行成本的同时，保持了较高的柔性负荷用户满意度。然而，港口系统在模型结构、负荷运行特性和柔性资源构成方面与园区存在显著差异，调度过程会受船舶靠港计划、泊位作业节奏及物流约束的强耦合影响，因此亟须针对港口构建调度模型。

目前，对于港口能源调度的研究集中于日前阶段，日内动态修正与多时间尺度优化调度成为

深化研究的重要方向。文献^[27-28]分别构建了港口综合能源与集装箱物流协同调度模型、能流-物流全过程协同调度策略，降低了调度成本与污染排放，提高了能源与物流效率。文献^[29-30]通过博弈论与两阶段决策优化港口能源定价及泊位分配问题，提升了港口集群区域电网经济效益，保证港口能源系统稳定可靠运行。文献^[31]提出考虑交通-能源耦合特性的两层深度强化学习港口能源管理策略，将问题建模为马尔可夫决策过程，有效降低了系统运行成本并提升了港口运营效率。上述研究为港口能源调度的单时间尺度优化提供了重要基础，未来可进一步探索多时间尺度协同机制，以适配新能源出力波动与船舶充电需求的动态变化。文献^[32-33]通过多时间尺度滚动优化与碳约束机制设计，在提升系统低碳经济性方面取得显著效果，其优化调度方法在港口场景的应用具有广阔前景。

综上，本文提出了一种计及柔性负荷动态响应与电动船舶协同调度的港口微电网多时间尺度优化方法，突破了传统园区综合能源系统调度模型的局限。首先，建立涵盖柔性负荷与电动船舶等可调资源的港口多源动态架构，构建具有港口作业与能流特征的系统结构。其次，构建考虑港口物流作业约束的柔性负荷响应模型与具备能量双向流动特性的电动船舶充放电模型。在此基础上，构建多时间尺度优化调度模型，日前阶段基于风光出力预测数据，以经济性最优为目标制定柔性负荷基线调度方案与船舶充放电计划；日内阶段采用滚动时域优化策略，结合实时风光出力波动与负荷需求偏差，动态调整柔性负荷响应功率与船舶充放电时序。最后，通过多场景对比分析，验证所提方法在提升新能源消纳率、降低港口运行成本及增强系统灵活性方面的综合优势。

1 港口微电网系统架构设计

本文设计的港口微电网架构基于多源协同供能体系，考虑港口作业的能源-交通耦合特征，构建了包含分布式电源、储能装置、柔性负荷及电动船舶等多类型单元的多能互补结构，其结构如图 1 所示。系统电源侧由风力发电机组、光伏阵列、储能系统及主电网互联接口组成，其中风电

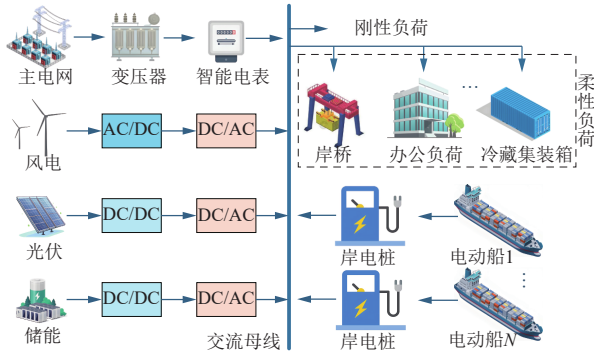


图1 港口微电网系统架构

Fig. 1 Port microgrid system architecture

与光伏通过变流器接入交流母线，满足港口清洁电力需求；储能用于平抑风光出力波动，实现能量时空转移；主电网通过计量装置与微电网互联，补充功率缺额。

负荷侧划分为刚性负荷和柔性负荷。刚性负荷必须持续供电，其用电需求不可调节；柔性负荷的用电需求具有一定弹性，可以根据微网运行情况灵活调整用电行为，将其划分为可平移、可削减及可转移3种类型^[34]，并在建模中引入作业时间窗、最小连续运行时间等约束，以反映港口负荷与物流作业的耦合特性。此外，电动船舶兼具负荷与储能双重特性，通过建立到港-离港状态变量与期望离港电量约束，描述其充放电行为及与电网的能量交互关系，使其参与调度，以增强系统灵活性。

1.1 风力发电模型

风电机组输出功率可表示为

$$P_{WT}^t = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_t \leq v_{wi} \text{ 或 } v_t > v_{wo} \\ P_{WT,N} \frac{v_t^3 - v_{wi}^3}{v_o^3 - v_{wi}^3}, & v_{wi} < v_t \leq v_o \\ P_{WT,N}, & v_o < v_t \leq v_{wo} \end{cases} \quad (1)$$

式中： P_{WT}^t 、 v_t 分别为风机 t 时刻输出功率和风速； $P_{WT,N}$ 、 v_o 分别为额定输出功率和额定风速； v_{wi} 、 v_{wo} 分别为切入和切出风速。

1.2 光伏发电模型

光伏板的输出功率可表示为

$$P_{PV}^t = P_{PV,N} (1 + \lambda(T_t - T_n)) \frac{G_t}{G_n} \quad (2)$$

式中： P_{PV}^t 为光伏板 t 时刻的输出功率； $P_{PV,N}$ 为光伏板额定输出功率； λ 为温度系数； T_t 、 T_n 分别为光伏板 t 时刻的工作温度和额定温度； G_t 、 G_n

分别为 t 时刻的光照强度和标准光照强度。

1.3 储能电池模型

储能电池在充放电过程中的荷电状态（state of charge, SOC）可表示为

$$S_{SOC}(t) = \begin{cases} (1 - \xi)S_{SOC}(t-1) + \frac{P_c(t)\eta_c}{E_s}, & \text{充电状态} \\ (1 - \xi)S_{SOC}(t-1) - \frac{P_d(t)}{E_s\eta_d}, & \text{放电状态} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_{SOC}(t)$ 为 t 时刻的荷电状态； $S_{SOC}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的荷电状态； ξ 为自放电系数； $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$ 分别为 t 时刻的充电和放电功率； η_c 、 η_d 分别为充电和放电效率； E_s 为电池额定容量。

2 可调节资源模型

2.1 柔性负荷模型

港口微电网中存在多种具有调节潜力的柔性负荷资源，如岸桥起重机、冷藏集装箱、电动堆高机等。然而，其运行特性受港口物流调度计划、作业节奏和服务约束制约。因此，为充分挖掘其调节能力，需分别针对3类典型柔性负荷构建考虑物流耦合特性的数学模型。

1) 可平移负荷。

可平移负荷指用电时间连续、用能过程中电能不可中断但总用电量不变的负荷，如岸桥、堆场吊机等作业设备，这类设备的运行调度受制于船舶靠港计划与集装箱堆存状态，存在明确的作业时间窗。

假设 $[t_1, t_2]$ 为可平移负荷调度前的用能时间， t_{sh} 为可平移负荷开始调度时间， $[t_{sh-}, t_{sh+}]$ 为可平移负荷调度后的用能时间。使用0-1变量 α_t 来表示可平移负荷在时间段 t 处的运行状态。发生负荷平移时 $\alpha_t = 1$ ，否则 $\alpha_t = 0$ 。为保证平移前后负荷的总功率保持不变，有

$$\sum_{t=t_1}^{t_2} P_t^{sh} \alpha_t = \sum_{t=t_{sh-}}^{t_{sh+}} P_t^{sh*} \quad (4)$$

式中： t_{sh-} 、 t_{sh+} 分别为可平移负荷参与调度的起止时间； P_t^{sh} 、 P_t^{sh*} 分别为 t 时刻负荷平移前后的用电功率。

可平移负荷功率上下限约束为

$$\alpha_t P_{\min}^{sh} \leq P_t^{sh} \leq \alpha_t P_{\max}^{sh} \quad (5)$$

式中： $P_{\min}^{\text{sh}}$ 、 $P_{\max}^{\text{sh}}$ 分别为可平移负荷用电功率的最小值和最大值。

2) 可削减负荷。

可削减负荷指允许在特定时段降低用电功率的负荷，如冷藏集装箱的制冷设备、港口照明系统等，通过减少用电量参与调度。

可削减负荷参与调度后时刻 t 的功率 P_t^{cut} 为

$$P_t^{\text{cut}} = (1 - \theta_t \beta_t) P_t^{\text{cut}*} \quad (6)$$

式中： θ_t 为 t 时刻的负荷削减系数， $\theta_t \in (0, 1)$ ； β_t 为0-1变量，表示负荷 t 时刻的削减状态； P_t^{cut} 为负荷参与调度前 t 时刻的功率。

参与调度的可削减负荷功率约束为

$$\beta_t P_{\min}^{\text{cut}} \leq P_t^{\text{cut}} \leq \beta_t P_{\max}^{\text{cut}} \quad (7)$$

式中： $P_{\min}^{\text{cut}}$ 、 $P_{\max}^{\text{cut}}$ 分别为可削减负荷功率的最小值和最大值。

为了保证负荷削减的合理性，将削减约束的时间和次数设置为

$$\begin{cases} t_{\min}^{\text{cut}} \leq \sum_{t=1}^{t+t_{\text{cut}}-1} \beta_t \leq t_{\max}^{\text{cut}} \\ \sum_{t=1}^T \beta_t \leq N_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： t_{cut} 为削减时长； $t_{\min}^{\text{cut}}$ 、 $t_{\max}^{\text{cut}}$ 分别为最小、最大连续削减时间； $N_{\max}$ 为最大削减次数； T 为调度周期。

3) 可转移负荷。

可转移负荷指总用电量不变，但用电过程中可中断、可分时段运行的负荷，如港口电动汽车充电桩、电动堆高机，通过分散用电时段参与调度。

对于参与调度的可转移负荷，负荷在参与调度前后的总功率保持不变，即

$$\sum_{t=t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} P_t^{\text{trans}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{trans}*} \quad (9)$$

式中： P_t^{trans} 、 $P_t^{\text{trans}*}$ 分别为时刻 t 发生负荷转移前后的用电功率； t_{begin} 、 t_{end} 分别为可转移负荷参与调度前的起止时间。

如果不限制负荷转移，则会有负荷转移到多个单一时间段，外在表现为设备的频繁启停，因此需要对转移负荷的最小运行持续时间进行约束，即

$$\sum_{t=1}^T \gamma_t \geq T_{\min}^{\text{trans}} \quad (10)$$

式中： γ_t 为0-1变量，表示负荷 t 时刻的转移状态； $T_{\min}^{\text{trans}}$ 为转移负荷最小运行持续时间。

其传输的功率约束为

$$\gamma_t P_{\min}^{\text{trans}} \leq P_t^{\text{trans}} \leq \gamma_t P_{\max}^{\text{trans}} \quad (11)$$

式中： $P_{\min}^{\text{trans}}$ 、 $P_{\max}^{\text{trans}}$ 分别为可转移负荷功率的最小值和最大值。

2.2 电动船舶模型

定义船舶 i 的在港状态为 $B_i(t)$ 。船舶靠港前和离港后，船舶的在港状态为 $B_i(t) = 0$ ；靠港时，对应的状态为 $B_i(t) = 1$ 。因此，船舶 i 的在港状态为

$$B_i(t) = \begin{cases} 0, & t \in [1, T_i^a] \\ 1, & t \in (T_i^a, T_i^d] \\ 0, & t \in (T_i^d, T] \end{cases} \quad (12)$$

式中： T_i^a 、 T_i^d 分别为船舶的到港时间和离港时间。

在调度周期内船舶只抵达港口一次，离开港口后不再返回，即

$$B_i(t) \geq B_i(t+1), \quad t \in [T_i^a, T-1] \quad (13)$$

电动船舶当前的荷电状态 E_t^{es} 为

$$E_t^{\text{es}} = \frac{C_{\text{es}}(t)}{C_{\text{es}}} \times 100\% \quad (14)$$

式中： $C_{\text{es}}(t)$ 为 t 时刻电动船舶电池电量； C_{es} 为电动船舶电池额定容量。

充放电模型为

$$E_{t+1}^{\text{es}} = E_t^{\text{es}} + \left(\eta_c^{\text{es}} P_t^{\text{ch}} - \frac{P_t^{\text{dis}}}{\eta_d^{\text{es}}} \right) \Delta t \quad (15)$$

式中： P_t^{ch} 、 P_t^{dis} 分别为电动船舶 t 时刻的充电和放电功率； η_c^{es} 、 η_d^{es} 分别为充电和放电效率； Δt 为单位调度时长。

3 多时间尺度优化调度模型

3.1 日前优化调度模型

3.1.1 目标函数

以经济成本最小化为目标，制定柔性负荷基线功率与电动船舶充电计划，目标函数 F 为

$$F = \min(C_{\text{buy}} + C_{\text{op}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{lc}} + C_{\text{es}}) \quad (16)$$

式中： C_{buy} 、 C_{op} 、 C_{loss} 、 C_{lc} 、 C_{es} 分别为购电成

本、设备运维成本、弃风弃光惩罚成本、柔性负荷补偿成本和电动船舶补偿成本。

1) 购电成本为

$$C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{T_1} c_e P'_{\text{grid}} \Delta t_1 \quad (17)$$

式中： c_e 为主电网分时电价； P'_{grid} 为 t 时刻从主电网的购电功率； T_1 为日前调度周期； Δt_1 为时间步长。

2) 设备运维成本为

$$C_{\text{op}} = \sum_{t=1}^{T_1} \sum_{i \in S} \delta_i P'_i \Delta t_1 \quad (18)$$

式中： S 为设备集合； δ_i 为设备 i 单位发电量的维护成本； P'_i 为 t 时刻设备 i 的功率。

3) 弃风弃光惩罚成本为

$$C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}}^{\text{WT}} \sum_{t=1}^{T_1} P_{\text{loss}}^{\text{WT}} \Delta t_1 + c_{\text{loss}}^{\text{PV}} \sum_{t=1}^{T_1} P_{\text{loss}}^{\text{PV}} \Delta t_1 \quad (19)$$

式中： $P_{\text{loss}}^{\text{WT}}$ 、 $P_{\text{loss}}^{\text{PV}}$ 分别为弃风和弃光功率； $c_{\text{loss}}^{\text{WT}}$ 、 $c_{\text{loss}}^{\text{PV}}$ 分别为弃风和弃光惩罚系数。

4) 柔性负荷补偿成本为

$$\begin{cases} C_{\text{lc}} = C_{\text{shift}} + C_{\text{cut}} + C_{\text{trans}} \\ C_{\text{shift}} = c_{\text{cost}}^{\text{shift}} \sum_{t=t_{\text{sh}}^-}^{t_{\text{sh}}^+} (\alpha_t P_t^{\text{sh}}) \Delta t_1 \\ C_{\text{cut}} = c_{\text{cost}}^{\text{cut}} \sum_{t=1}^{T_1} [\beta_t (P_t^{\text{cut}} - P_t^{\text{cut}*})] \Delta t_1 \\ C_{\text{trans}} = c_{\text{cost}}^{\text{trans}} \sum_{t=1}^{T_1} (\gamma_t P_t^{\text{trans}}) \Delta t_1 \end{cases} \quad (20)$$

式中： C_{shift} 、 C_{cut} 、 C_{trans} 分别为可平移负荷、可削减负荷、可转移负荷的补偿成本； $c_{\text{cost}}^{\text{shift}}$ 、 $c_{\text{cost}}^{\text{cut}}$ 、 $c_{\text{cost}}^{\text{trans}}$ 分别为可平移负荷、可削减负荷、可转移负荷的补偿系数。

5) 电动船舶补偿成本为

$$C_{\text{es}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_1} c_{\text{cost}}^{\text{es}} |P_i^{\text{es}}(t)| \Delta t_1 \quad (21)$$

式中： N 为参与调度的电动船舶数量； $c_{\text{cost}}^{\text{es}}$ 为电动船舶储能电池补偿系数； $|P_i^{\text{es}}(t)|$ 为 t 时刻电动船舶 i 充放电功率的绝对值。

3.1.2 约束条件

1) 功率平衡约束为

$$P'_{\text{grid}} + P'_{\text{WT}} + P'_{\text{PV}} = P'_{\text{ld}} + P'_{\text{fl}} + P'_{\text{ess}} + P'_{\text{es}} + P_{\text{loss}}^{\text{WT}} + P_{\text{loss}}^{\text{PV}} \quad (22)$$

式中： P'_{WT} 、 P'_{PV} 分别为 t 时刻风电功率和光伏发电功率； P'_{ld} 为 t 时刻刚性负荷功率值； P'_{fl} 为 t 时刻柔性负荷功率值； P'_{ess} 为 t 时刻的储能系统出力， $P'_{\text{ess}} > 0$ 表示储能充电， $P'_{\text{ess}} < 0$ 表示储能放电； P'_{es} 为 t 时刻的电动船舶出力， $P'_{\text{es}} > 0$ 表示船舶充电， $P'_{\text{es}} < 0$ 表示船舶放电。

2) 风光出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{\text{WT}} \leq P_{\text{WT}}^{\text{pre}} \\ 0 \leq P'_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV}}^{\text{pre}} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $P_{\text{WT}}^{\text{pre}}$ 、 $P_{\text{PV}}^{\text{pre}}$ 分别为 t 时刻风电和光伏发电的预测功率。

3) 电网交互功率约束为

$$P_{\text{grid}}^{\text{min}} \leq P'_{\text{grid}} \leq P_{\text{grid}}^{\text{max}} \quad (24)$$

式中： $P_{\text{grid}}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{grid}}^{\text{max}}$ 分别为从主电网购电的最小和最大功率。

4) 储能运行约束。

储能运行约束主要包括储能充放电互斥约束、充放电功率约束、荷电状态约束、能量平衡约束等。

$$\begin{cases} \mu_{\text{ess}}^{\text{ch}} + \mu_{\text{ess}}^{\text{dis}} \leq 1 \\ 0 \leq P'_{\text{ch}} \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P'_{\text{dis}} \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \\ S_{\text{SOCess}}^{\text{min}} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOCess}}^{\text{max}} \\ S_{\text{SOC}}(T_1) = S_{\text{SOC}}(0) \end{cases} \quad (25)$$

式中： $\mu_{\text{ess}}^{\text{ch}}$ 和 $\mu_{\text{ess}}^{\text{dis}}$ 为0-1变量，分别代表储能的充电状态和放电状态； $P_{\text{ch}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{max}}$ 分别为储能充电和放电功率的最大值； $S_{\text{SOCess}}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{SOCess}}^{\text{min}}$ 分别为储能荷电状态的最大值和最小值； $S_{\text{SOC}}(T_1)$ 和 $S_{\text{SOC}}(0)$ 分别为储能最终电量和初始电量。

5) 电动船舶约束。

电动船舶约束主要包括船舶充放电互斥约束、充放电功率约束、荷电状态约束、离港期望电量约束等。

$$\begin{cases} \mu_{\text{es},i}^{\text{ch}} + \mu_{\text{es},i}^{\text{dis}} \leq 1 \\ P_{\text{es},i}^{\text{min}} \leq P'_{\text{es}} \leq P_{\text{es},i}^{\text{max}} \\ S_{\text{SOCes},i}^{\text{min}} \leq S_{\text{SOCes},i} \leq S_{\text{SOCes},i}^{\text{max}} \\ S_{\text{SOCes},i}^{\text{end}} \geq S_{\text{SOCes},i}^{\text{want}} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $\mu_{\text{es},i}^{\text{ch}}$ 、 $\mu_{\text{es},i}^{\text{dis}}$ 分别为电动船舶 i 的充电状态和放电状态； $P_{\text{es},i}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{es},i}^{\text{max}}$ 分别为电动船舶 i 充放电功率

率的最小值和最大值； $S_{SOCes,i}^{\max}$ 、 $S_{SOCes,i}^{\min}$ 分别为电动船舶 i 储能电池荷电状态的最大值和最小值； $S_{SOCes,i}^{\text{end}}$ 为电动船舶 i 离港时刻的电量； $S_{SOCes,i}^{\text{want}}$ 为电动船舶 i 的期望电量。

3.2 日内优化调度模型

3.2.1 目标函数

日内调度基于短期风光预测数据和负荷实际需求对日前计划进行动态修正，进行时间尺度为 15 min 的 4 h 滚动优化，以解决新能源出力随机波动与负荷预测偏差问题。

在保障系统运行稳定性的前提下，通过日内滚动优化最小化港口运行总成本，相比日前阶段总成本需考虑设备出力变动所导致的额外调度成本，目标函数 f_1 为

$$\begin{cases} f_1 = \min(C_{\text{buy}} + C_{\text{op}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{lc}} + C_{\text{es}} + C_{\text{in}}) \\ C_{\text{in}} = \sum_{t=1}^{T_2} \sum_{i \in S} \rho_i |P_{i,\text{in}}^t - P_{i,\text{ref}}^t| \end{cases} \quad (27)$$

式中： C_{in} 为设备出力变动成本； T_2 为日内调度周期； $P_{i,\text{ref}}^t$ 、 $P_{i,\text{in}}^t$ 分别为设备 i 的日前计划功率和日内实际功率； ρ_i 为设备 i 的单位变动奖励或惩罚系数。其余各成本的计算公式与日前调度类似。

3.2.2 约束条件

由于日内调度的时间尺度从 1 h 变为 15 min，故部分约束条件发生了改变。除了考虑日前调度的相关约束，还要考虑设备出力偏差约束和储能荷电状态偏差约束，即

$$\begin{cases} |P_{i,\text{in}}^t - P_{i,\text{ref}}^t| \leq \sigma_i P_{i,\text{max}} \\ |S_{SOCes,i}^{\text{in}}(t) - S_{SOCes,i}^{\text{ref}}(t)| \leq \xi_{\text{ess}} S_{SOCes,i}^{\text{max}} \end{cases} \quad (28)$$

式中： σ_i 为设备 i 的偏差约束因子； $P_{i,\text{max}}$ 为设备 i 的最大功率； $S_{SOCes,i}^{\text{ref}}(t)$ 、 $S_{SOCes,i}^{\text{in}}(t)$ 分别为储能日前计划荷电状态和日内实际荷电状态； ξ_{ess} 为储能的荷电状态偏差因子。

3.3 模型求解过程

本文构建了以港口微电网运行成本最小化为目标的多时间尺度优化调度模型。为了提高模型的求解速度，将模型转化为混合整数线性规划问题，并通过 MATLAB 调用 Gurobi 11.0 求解器进行求解。模型求解流程如图 2 所示。

1) 日前阶段以 24 h 为调度周期，时间尺度为 1 h。主要利用预测信息来制定整体的调度计划。首先收集未来一天的风光发电预测数据、负

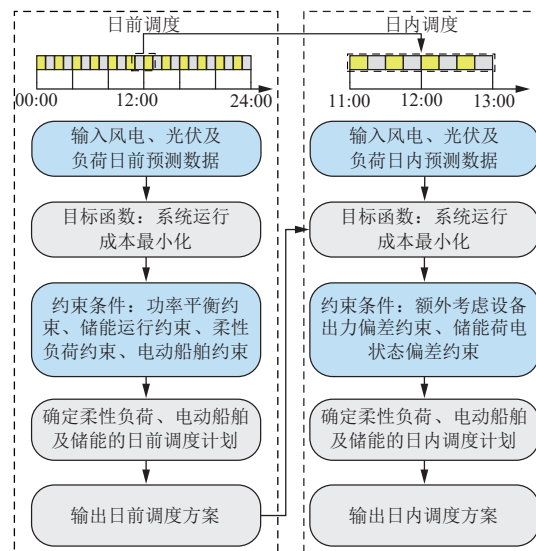


图 2 日前-日内优化调度策略

Fig. 2 Day-ahead-intraday optimal scheduling strategy

荷预测数据以及电动船舶的到港计划等信息。然后通过求解日前优化调度模型的目标函数，在满足各种约束条件的情况下，确定柔性负荷、电动船舶及储能的调度计划。

2) 日内阶段以 4 h 为调度周期，时间尺度为 15 min 进行滚动优化，实时获取风光发电的实际出力、负荷的实时变化等信息，并与日前制定的计划进行对比。根据实时信息和预测误差，通过求解日内优化调度模型的目标函数，在满足日内约束条件的情况下，对柔性负荷、电动船舶及储能的调度计划进行动态调整，减少预测误差带来的弃电和高价购电情况。

4 算例分析

4.1 算例概况

本文以南方某港口为例进行研究。港口一天的风光预测及负荷预测数据如图 3 所示，柔性负荷预测数据如图 4 所示。港口一天内共有 6 艘电动船舶停泊，船舶的到港和离港时间、停泊时间等参数见表 1，电网的分时电价 (time-of-use, TOU) 见表 2，其他参数见表 3。为了验证本文所提融合柔性负荷调节与电动船舶需求响应的协同优化调度方法的有效性，设置以下 4 个场景进行分析。

1) 场景 1：未考虑柔性负荷、电动船舶与储能参与调度，实现系统基础运行优化；

2) 场景 2：仅考虑柔性负荷参与调度，不包

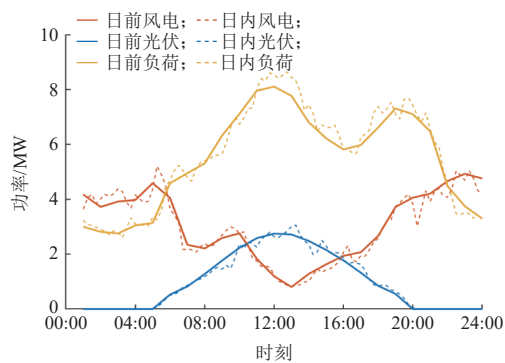


图3 风光及负荷预测数据

Fig. 3 Wind-solar and load forecasting data

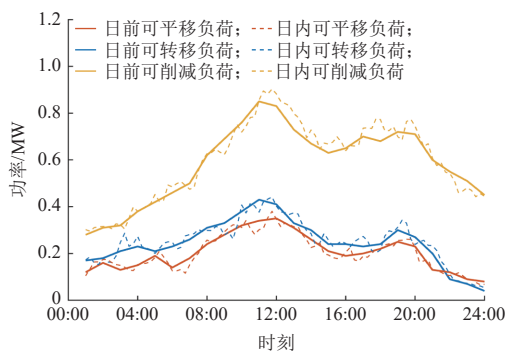


图4 柔性负荷预测数据

Fig. 4 Flexible load forecasting data

表1 电动船舶参数

Table 1 Parameters of electric ships

船舶编号	到港时间	离港时间	船舶容量/kW	到港电量	充电功率/kW
1	01:00	08:00	2400	0.17	400
2	02:00	12:00	2500	0.16	
3	04:00	13:00	2680	0.19	
4	08:00	17:00	2940	0.17	500
5	11:00	19:00	3000	0.20	
6	14:00	24:00	3200	0.19	600

表2 分时电价

Table 2 Time-of-use price

时段	区间	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
峰时段	08:00—12:00	1.10
	18:00—22:00	
平时段	07:00—08:00	0.70
	12:00—18:00	
谷时段	22:00—次日08:00	0.40

含电动船舶与储能协同；

3) 场景3：考虑电动船舶与储能的协同调度，但不包含柔性负荷参与；

表3 其他参数
Table 3 Other parameters

参数	数值
风电装机容量/MW	5
光伏装机容量/MW	2.5
弃光惩罚系数	0.3
弃风惩罚系数	0.3
最大削减次数	8
可平移负荷补偿系数	0.1
可转移负荷补偿系数	0.15
可削减负荷补偿系数	0.2
电动船舶补偿系数	0.2
储能容量/MW	2
储能充放电功率/kW	500
储能充放电效率	0.95
储能初始电量	0.5
储能荷电状态最小值	0.10
储能荷电状态最大值	0.95
船舶充放电效率	0.95
船舶离港期望电量	0.8
船舶荷电状态最小值	0.10
船舶荷电状态最大值	0.95

4) 场景4：同时考虑柔性负荷、电动船舶与储能的多源协同调度，即本文所提策略。

通过对比各场景下的日前与日内调度结果，分析不同调度策略的经济成本、风光消纳率，以验证本文所提多源协同与多时间尺度优化调度方法在经济性与新能源消纳能力方面的综合优势。

4.2 日前调度分析

由表4日前优化调度结果可知，场景1未引入港口柔性负荷、电动船舶与储能参与调度，总成本最高，弃风率达9.2%，表明该场景下风电资源利用不足且系统经济性较差；场景2引入柔性负荷后，总成本下降6.0%，弃风率降低至7.2%，但柔性负荷补偿成本和运维成本有所增加，说明柔性负荷通过需求侧调节提升了风电消纳能力，但需权衡补偿成本；场景3考虑电动船舶和储能调度，总成本较场景1下降14.9%，弃风率大幅降至1.8%，且储能损耗成本和电动船舶补偿成本的引入未明显增加总成本，表明电动船舶的灵活性调度可有效平抑功率波动；场景4协同优化两类资源后，总成本最低，较场景1降低18.6%，弃风

率下降至 1.3%，表明协同调度通过时空互补显著降低了外购电需求，同时风电消纳率达到最优。尽管场景 4 的柔性负荷补偿成本和运维成本较高，但整体经济性仍优于单一调度场景。验证了所提方法在降低系统总成本、提升可再生能源利用率方面的协同效应，为港口微电网多资源协同调度提供了理论依据。

表 4 日前优化调度结果				
Table 4 Day-ahead optimal scheduling results				
项目	场景1	场景2	场景3	场景4
总成本/元	56601.1	53189.0	48147.1	46078.7
购电成本/元	43876.7	38336.2	35932.2	30974.9
设备运维成本/元	9553.0	9719.3	10166.9	10206.5
储能损耗成本/元	0	0	712.6	712.6
弃风弃光惩罚成本/元	3171.4	2478.4	613.6	448.5
柔性负荷补偿成本/元	0	2655.1	0	3033.0
电动船舶补偿成本/元	0	0	721.8	703.2
弃风率/%	9.2	7.2	1.8	1.3

针对不同场景下的港口微电网调度策略及其运行效果，本文通过多维度对比分析揭示了系统灵活性提升的优化路径，结果如图 5~8 所示。系统运行结果主要反映各资源在预测条件下的全局经济性和协同能力，为后续日内滚动优化提供参考基准。

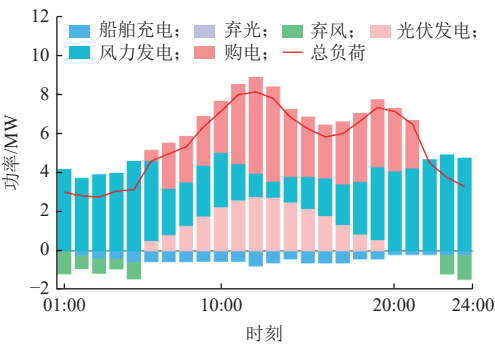


图 5 场景 1 日前优化调度结果
Fig. 5 Day-ahead optimal scheduling results of scenario 1

场景 1 中，船舶靠泊后直接与港口微电网相连，且柔性负荷不可调度。此时系统完全依赖主电网购电，缺乏动态调节能力，导致风电出力高峰时段产生显著的弃风现象，而负荷高峰时段需高价购电，导致系统整体运行效率低下。

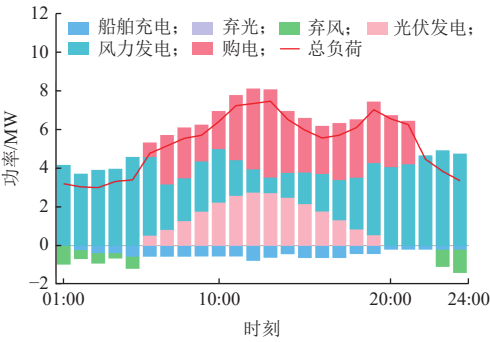


图 6 场景 2 日前优化调度结果
Fig. 6 Day-ahead optimal scheduling results of scenario 2

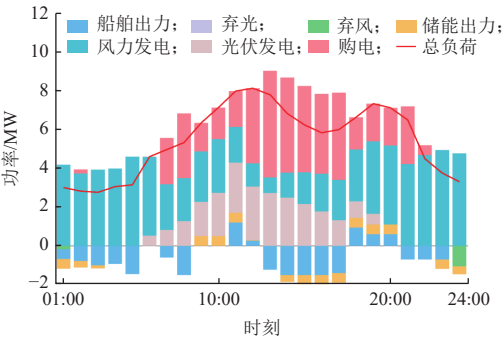


图 7 场景 3 日前优化调度结果
Fig. 7 Day-ahead optimal scheduling results of scenario 3

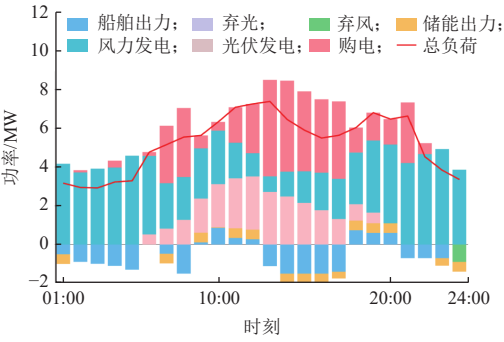


图 8 场景 4 日前优化调度结果
Fig. 8 Day-ahead optimal scheduling results of scenario 4

场景 2 引入柔性负荷参与调度，港口内部通过能源管理系统执行分时电价驱动的负荷平移策略，在电网负荷高峰时段削减可调负荷功率并转移至低谷期，降低系统峰谷差达 23.2%，弃风量减少约 21.9%，改善了系统对可再生能源的消纳率。

场景 3 融合电动船舶与储能系统，船舶和储能在低电价期间充电，在高电价期间放电，通过“源-储”协同响应机制并利用电价差实现能量时

空转移，峰谷差较场景1降低6.1%，弃风量减少80.7%，凸显了储能与分布式电源协同调度的经济价值。

场景4通过引入柔性负荷、电动船舶与储能的多源协同优化，实现了系统调度功率平衡与资源互补，系统调节灵活性显著提升，峰谷差较场景1降低16.2%，弃风量减少87.8%。总体来看，多源协同优化通过多层次资源整合与策略联动，充分挖掘了系统灵活性。

4.3 日内调度分析

日内滚动优化以15 min为时间尺度，显著提升了系统应对新能源出力波动与负荷偏差的能力。日内优化调度结果如表5所示，场景1在日内阶段的总成本较日前阶段降低5.7%，弃风率减少0.9个百分点，表明日内调度对于提高经济性和促进新能源消纳的积极作用；场景2通过柔性负荷的需求响应，总成本较日前阶段降低5.3%，弃风率降至6.3%，但柔性负荷补偿成本显著增加，表明短期负荷调节对经济性的双重影响；场景3中，船舶储能基于实时电价信号充放电，总成本较日前阶段降低1.2%，弃风率降至1.4%，但频繁充放电会导致出力变动成本上升，表明单一资源调度的局限性；场景4通过柔性负荷、电动船舶与储能的互补响应，总成本较日前阶段降低2.0%，弃风率降低至1.1%，且补偿成本较单一场景更均衡。此外，场景4的购电成本较场景1下降27.0%，出力变动成本虽高于其他场景，但新能源实时消纳率提升至98.9%，表明系统通过动态调节在成本与新能源消纳间实现了平衡。

针对不同场景下的港口微电网日内优化调

表 5 日内优化调度结果				
Table 5 Intraday optimal scheduling results				
项目	场景1	场景2	场景3	场景4
总成本/元	53 370.9	50 394.5	47 560.1	45 165.7
购电成本/元	40 743.3	34 761.4	35 414.7	29 742.0
设备运维成本/元	9 537.1	9 705.1	10 114.9	10 134.5
储能损耗成本/元	0	0	717.0	719.2
出力变动成本/元	213.9	310.8	367.6	462.2
弃风弃光惩罚成本/元	2 876.6	2 177.1	469.7	387.7
柔性负荷补偿成本/元	0	3 440.1	0	3 216.1
电动船舶补偿成本/元	0	0	478.2	504.0
弃风率/%	8.3	6.3	1.4	1.1

度，通过实时数据驱动的滚动优化策略，验证了短期预测波动和实时调整对系统经济性与灵活性的影响。相较于文献[35]的双层调度方法，本文通过日前-日内两阶段滚动优化，实现了在新能源出力不确定条件下的动态修正与多源协同响应，有效提升了调度策略对时变运行环境的适应能力，结果如图9~12所示。

场景1日内阶段仍沿用日前固定调度计划，无法实时响应风光出力波动。尽管总成本和弃风率较日前阶段有所降低，且峰谷差降低7.9%，但

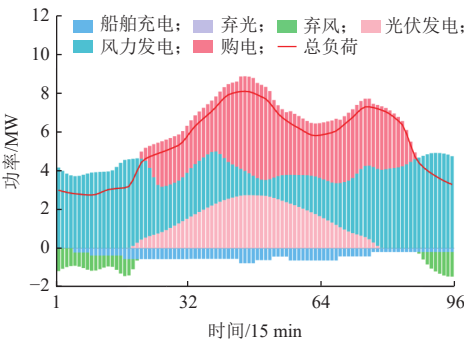


图 9 场景1日内优化调度结果
Fig. 9 Intraday optimal scheduling results of scenario 1

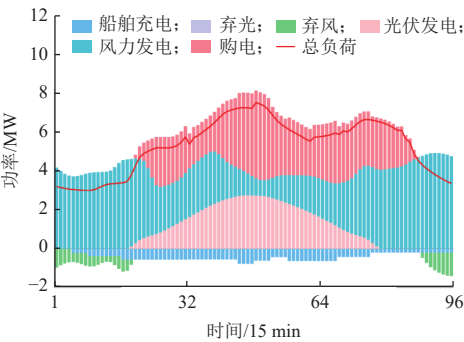


图 10 场景2日内优化调度结果
Fig. 10 Intraday optimal scheduling results of scenario 2

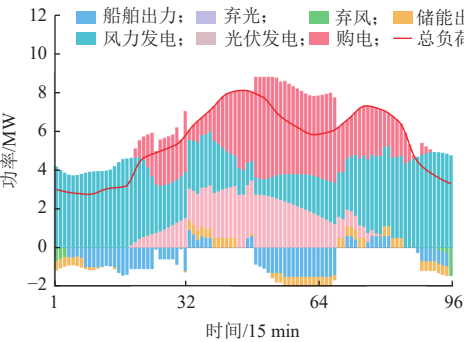


图 11 场景3日内优化调度结果
Fig. 11 Intraday optimal scheduling results of scenario 3

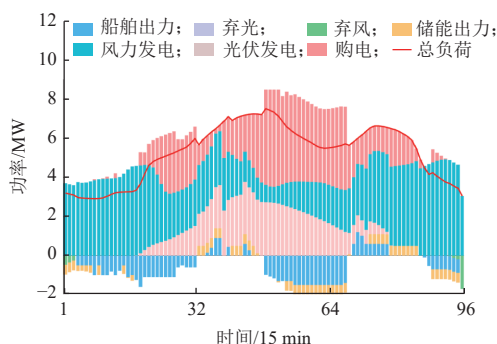


图 12 场景 4 日内优化调度结果

Fig. 12 Intraday optimal scheduling results of scenario 4

系统仍完全依赖主电网购电，在 08:00—12:00 电价峰时段购电会显著增加经济成本。

场景 2 通过柔性负荷的实时响应动态调节负荷曲线，总成本和弃风率较日前阶段进一步降低，同时，系统峰谷差较场景 1 降低 16.2%，验证了需求侧资源对短时功率波动的平抑能力。但因频繁调整导致出力变动成本较场景 1 上升 45.3%，柔性负荷补偿成本较日前阶段增长 29.6%。

场景 3 中电动船舶基于实时电价进行充放电调节，储能系统平抑出力波动。虽然电价谷时段船舶和储能充电，电价峰时段船舶和储能放电能显著降低运行总成本，但船舶和储能的频繁启停使得出力变动成本较场景 1 上升 41.8%，且峰时段放电集中，谷时段充电需求激增，易加剧峰谷差。

场景 4 通过多源协同响应机制，在电价峰时段调用柔性负荷调节以及船舶和储能放电，使日内阶段的购电成本和总成本大幅下降，与日前调度场景 1 相比，系统总运行成本降低 20.2%，风电就地消纳率提高 8.1 个百分点，与文献 [35] 提出的双层协调优化方法相比，本文模型进一步融合了柔性负荷、电动船舶与储能的多源协同机制，并在多时间尺度下实现动态优化与预测修正，体现出更强的调度灵活性与场景适用性。综上，本文方法在港口微电网建模的物理合理性、调度策略的动态响应性以及综合运行性能方面均具有显著优势。

5 结论

本文针对港口微电网风光消纳能力受限与系统可调节资源利用不足等问题，提出一种计及柔

性负荷与电动船舶的港口微电网多时间尺度优化调度策略，主要结论如下。

1) 构建涵盖柔性负荷与电动船舶等可调节资源的港口微电网多源协同供能体系。柔性负荷模型引入港口物流作业约束，电动船舶充放电模型考虑到港-离港状态变量与期望离港电量约束，实现了负荷弹性调节与储能时空转移能力的协同优化。

2) 设计多时间尺度优化调度策略。日前阶段以经济性最优制定基线调度计划；日内阶段通过滚动优化修正策略。仿真结果表明，协同调度能显著降低港口总运行成本并提升新能源消纳率。

3) 多场景对比验证协同调度的综合优势。与仅用柔性负荷、电动船舶和储能场景相比，多源协同场景总成本降幅更大，弃风率更低。

研究表明，所提方法通过多资源融合与多时间尺度优化，有效提升了港口微电网经济性与灵活性。未来可进一步研究人工智能技术在大规模港口集群复杂需求中的应用。

参考文献:

- [1] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统 (一): 典型系统结构与关键问题 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 114-135.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality(part I): typical topology and key problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 114-135.
- [2] 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 考虑移动氢能存储的港口多能微网两阶段分布鲁棒优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3078-3093.
HOU Hui, GAN Ming, WU Xixiu, et al. Two-stage distributionally robust optimal scheduling for port multi-energy microgrid considering mobile hydrogen energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3078-3093.
- [3] 侯慧, 谢应彪, 甘铭, 等. 冷能梯级利用的港口多能微网双层不确定性经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 205-215.
HOU Hui, XIE Yingbiao, GAN Ming, et al. Bi-layer uncertainty economic scheduling for port multi-energy microgrid with cascade utilization of cold energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 205-215.
- [4] 袁裕鹏, 袁成清, 徐洪磊, 等. 我国水路交通与能源融合发展路径探析 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 184-194.

- YUAN Yupeng, YUAN Chengqing, XU Honglei, *et al.* Pathway for integrated development of waterway transportation and energy in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 184–194.
- [5] 林森, 文书礼, 朱森, 等. 海港综合能源系统低碳经济发展研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1364–1386.
- LIN Sen, WEN Shuli, ZHU Miao, *et al.* Review on low-carbon and economic development of seaport integrated energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(4): 1364–1386.
- [6] GONG N B, LIANG C J, WANG Y, *et al.* Research on dynamic energy scheduling of port microgrid system considering fluctuations of renewable energy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2025, 210: 111542.
- [7] 邵能灵, 王萧博, 黄文焘, 等. 港口综合能源系统低碳化技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3749–3763.
- TAI Nengling, WANG Xiaobo, HUANG Wentao, *et al.* Review of low-carbon technology for integrated port energy systems[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3749–3763.
- [8] GABRIELII C, GAMMELSTER M, MEHAMMER E B, *et al.* Energy systems integration and sector coupling in future ports: a qualitative study of Norwegian ports[J]. *Applied Energy*, 2025, 380: 125003.
- [9] ZHANG Y, LIANG C J, SHI J, *et al.* Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2022, 313: 118856.
- [10] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(二): 能源-交通融合中的柔性资源与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 950–969.
- FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, *et al.* Port integrated energy systems toward carbon neutrality(II): flexible resources and key technologies in energy-transportation integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 950–969.
- [11] ZHAO W N, MA K, YANG J, *et al.* A risk-averse logistics-energy coordination optimization strategy for port energy system considering demand response program[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 231: 110297.
- [12] 俞拙非, 刘菲, 刘瑞环, 等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 132–144.
- YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, *et al.* Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. *Electric Power*, 2022, 55(4): 132–144.
- [13] 王钦, 陈业夫, 蔡新雷, 等. 考虑柔性负荷和阶梯型碳交易的低碳经济优化调度策略[J]. 广东电力, 2024, 37(1): 76–85.
- WANG Qin, CHEN Yefu, CAI Xinlei, *et al.* Optimization scheduling strategy for low-carbon economy considering flexible loads and tiered carbon trading[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(1): 76–85.
- [14] 侯慧, 谢应彪, 赵波, 等. 能源与交通耦合的港口多能微网优化调度综述[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(3): 50–63.
- HOU Hui, XIE Yingbiao, ZHAO Bo, *et al.* Review of optimal scheduling for port multi-energy microgrid with energy and transportation coupling[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(3): 50–63.
- [15] 张晴. 考虑在港船舶的港口综合能源系统日前优化调度[D]. 大连: 大连海事大学, 2024.
- ZHANG Qing. Day-ahead optimal dispatch for port integrated energy system considering berthing ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024.
- [16] 高月芬, 员成博, 孔凡鹏, 等. 需求响应激励下耦合电转气、碳捕集设备的综合能源系统优化[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 32–41.
- GAO Yuefen, YUN Chengbo, KONG Fanpeng, *et al.* Optimization of integrated energy system coupled with power-to-gas and carbon capture and storage equipment under demand response incentive[J]. *Electric Power*, 2024, 57(4): 32–41.
- [17] 张俊成, 黎敏, 刘志文, 等. 基于改进交替方向乘子法的配电网柔性负荷分层集群调控方法[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 140–147.
- ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, *et al.* Hierarchical cluster control method for flexible load in distribution network based on improved alternating direction multiplier method[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 140–147.
- [18] 郭琦, 陈孟晓, 余佳微, 等. 考虑负荷灵活调节潜力的分布式能源系统能量管理策略[J]. 中国电力, 2025, 58(8): 60–68.
- GUO Qi, CHEN Mengxiao, YU Jiawei, *et al.* Energy management strategy for distributed energy systems considering the regulation capability from flexible loads[J]. *Electric Power*, 2025, 58(8): 60–68.
- [19] 王辉, 董宇成, 夏玉琦, 等. 考虑阶梯碳-绿证互认与重力储能的矿区综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(7): 54–67.
- WANG Hui, DONG Yucheng, XIA Yuqi, *et al.* Optimal scheduling of coal mine integrated energy systems considering stepped carbon-green certificate mutual recognition and gravity energy storage[J]. *Electric Power*, 2025, 58(7): 54–67.
- [20] 史训涛, 孙健, 肖小兵, 等. 计及柔性负荷资源的分布式智能电网安全域建模[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(20): 69–82.
- SHI Xuntao, SUN Jian, XIAO Xiaobing, *et al.* Modeling of distributed smart grid security region considering flexible load resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(20): 69–82.

- [21] 肖茂然, 曾程, 张震, 等. 计及源荷储的多台区负载均衡协同调控方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(9): 26–32.
- XIAO Maoran, ZENG Cheng, ZHANG Zhen, *et al.* Load balancing cooperative dispatching and control method considering source-load-storage in multiple transformer areas[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(9): 26–32.
- [22] 李若琼, 司宇杰, 杨承辰, 等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度 [J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116–129.
- LI Ruqiong, SI Yujie, YANG Chengchen, *et al.* Day-ahead and intra-day low-carbon optimal scheduling of new power system source-load considering flexible load[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 116–129.
- [23] 蒋梓骏, 向月, 谈竹奎, 等. 计及需求响应的高比例清洁能源园区储能容量优化配置 [J]. 中国电力, 2023, 56(12): 147–155, 163.
- JIANG Zhaojun, XIANG Yue, TAN Zhukui, *et al.* Optimal allocation of energy storage capacity in high proportion clean energy parks considering demand response[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 147–155, 163.
- [24] TAO Y C, QIU J, LAI S Y, *et al.* Flexible voyage scheduling and coordinated energy management strategy of all-electric ships and seaport microgrid[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(3): 3211–3222.
- [25] SUN X Z, QIU J, TAO Y C. Two-stage robust voltage control strategy for seaport microgrids with health-aware all-electric ships[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3742–3755.
- [26] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69–79.
- YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, *et al.* Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69–79.
- [27] PU Y, LIU H M, WANG J, *et al.* Collaborative scheduling of port integrated energy and container logistics considering electric and hydrogen-powered transport[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4345–4359.
- [28] 张沈习, 宋琪, 程浩忠, 等. 考虑能流-物流耦合的港口综合能源系统规划关键技术及挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7616–7635.
- ZHANG Shenxi, SONG Qi, CHENG Haozhong, *et al.* Key technologies and challenges on planning of port integrated energy system considering energy flow-logistics coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7616–7635.
- [29] SUN Y T, GUO Y J, ZHANG Q, *et al.* Berth allocation and energy scheduling for all-electric ships in seaport microgrid: a Stackelberg game approach[J]. Energy, 2025, 322: 135640.
- [30] 徐先峰, 鲁婉琪, 王俊哲, 等. 基于多目标蜣螂优化算法的泊位分配与能量调度联合优化方法 [J]. 交通信息与安全, 2024, 42(5): 111–123.
- XU Xianfeng, LU Wanqi, WANG Junzhe, *et al.* A joint optimization method for berth allocation and energy scheduling based on non-dominated sorting dung beetle optimizer[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(5): 111–123.
- [31] SONG T W, FU L J, ZHONG L L, *et al.* Two-layer deep reinforcement learning based port energy management strategy considering transportation-energy coupling characteristics[J]. Energy, 2025, 318: 134659.
- [32] 王辉, 周珂锐, 吴作辉, 等. 含电转气和碳捕集耦合的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 中国电力, 2024, 57(8): 214–226.
- WANG Hui, ZHOU Kerui, WU Zuohui, *et al.* Multi-time scale optimal scheduling of integrated energy system coupling power-to-gas and carbon capture system[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 214–226.
- [33] ZHU X X, HU M, XUE J F, *et al.* Research on multi-time scale integrated energy scheduling optimization considering carbon constraints[J]. Energy, 2024, 302: 131776.
- [34] 陈庆斌, 杨耿煌, 耿丽清, 等. 考虑源荷不确定性和柔性负荷的综合能源系统低碳运行调度 [J]. 太阳能学报, 2025, 46(4): 183–192.
- CHEN Qingbin, YANG Genghuang, GENG Liqing, *et al.* Low-carbon operation scheduling of integrated energy system considering source-load uncertainty and flexible loads[J]. Acta Energetica Sinica, 2025, 46(4): 183–192.
- [35] 贾俊国, 陈晓楠, 房鑫炎, 等. 基于多源融合的船岸供电系统协调运行优化策略 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 108–114.
- JIA Junguo, CHEN Xiaonan, FANG Xinyan, *et al.* Research on coordinated operation optimization of ship-shore power supply system based on multi-source fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 108–114.



李浩

作者简介:

李浩 (2003), 男, 硕士研究生, 从事综合能源系统规划研究, E-mail: 2146899427@qq.com;

马辉 (1985), 男, 通信作者, 副教授, 从事新能源系统控制与规划研究, E-mail: mahuizz119@126.com.

(责任编辑 许晓艳)