



百兆瓦级源网荷储一体化园区多时间尺度调度策略

沈钱锋^{1,2}, 白伊琳¹, 王俊月¹, 宋政湘¹, 杨 骥¹, 孟锦豪¹

(¹西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; ²中能智新科技产业发展有限公司, 北京 100120)

摘要: 随着全球能源结构向清洁低碳转型, 高比例可再生能源并网带来的随机性与波动性对电力系统平衡能力提出了严峻挑战。传统“源随荷动”调度模式难以适应大规模新能源消纳需求, 亟须探索源网荷储一体化协同调控技术。本工作以新疆某百兆瓦级工业园区为研究对象, 提出日前优化、日内滚动修正、实时逻辑修正的“三段式”多时间尺度调度策略。为高效求解该高维调度模型, 本工作设计了精英优选的粒子群优化(PSO)算法, 通过逻辑判断生成初始解并引入精英粒子筛选机制, 显著降低了寻优维度, 有效避免了局部最优。仿真表明, 所提精英优选 PSO 算法较基于逻辑初始化的 PSO 可使综合运行成本降低 2.71%; 且该策略通过多时间尺度协调控制, 综合运行成本较单一日前调度降低 26.49%。实际应用表明多时间尺度调度策略使得月弃风弃光率减少至 4.9%, 且月消纳新能源发电量可达 62200.13 MWh。本研究开发的一体化智慧调控平台有效解决了百兆瓦级工业园区新能源消纳与电力平衡难题, 为大型园区低碳转型提供了技术支持, 对推动新型电力系统建设与“双碳”目标实现具有重要意义。

关键词: 源网荷储一体化; 多时间尺度调度; 精英优选的粒子群优化; 新能源消纳; 100 MW 工业园区

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0918

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1275-17

Multi-timescale scheduling strategy for a 100 MW-level source-grid-load-storage integrated park

SHEN Qianfeng^{1,2}, BAI Yilin¹, WANG Junyue¹, SONG Zhengxiang¹, YANG Kun¹, MENG Jinhao¹

(¹School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ²China EPPEI Smart Energy Co., Ltd, Beijing 100120, China)

Abstract: With the global transition toward clean and low-carbon energy systems, the randomness and volatility associated with high-penetration renewable energy integration pose significant challenges to power system balance. Traditional "source-follows-load" dispatching models struggle to accommodate large-scale renewable energy consumption. This study focuses on a 100 MW-level source-grid-load-storage integrated industrial park in Xinjiang and proposes a three-stage multi-timescale dispatching strategy, including day-ahead optimization, intraday rolling correction, and real-time rapid-response scheduling. To efficiently solve (PSO) the resulting high-dimensional dispatch model, an elite-preferred particle swarm optimization algorithm is developed. The algorithm generates initial solutions through logical judgment and introduces an elite particle screening mechanism, which significantly reduces

收稿日期: 2025-10-15; 修改稿日期: 2025-12-01。

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划项目 (2023112806)。

第一作者: 沈钱锋 (1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为源网荷储一体化调控, E-mail: 707853681@qq.com; 通信作者: 宋政湘, 教授, 博士生导师, 研究方向为储能监测技术、绿电园区调控、智能电器等, E-mail: zxsong@mail.xjtu.edu.cn。

引用本文: 沈钱锋, 白伊琳, 王俊月, 等. 百兆瓦级源网荷储一体化园区多时间尺度调度策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1275-1291.

Citation: SHEN Qianfeng, BAI Yilin, WANG Junyue, et al. Multi-timescale scheduling strategy for a 100 MW-level source-grid-load-storage integrated park[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1275-1291.

the search dimension and effectively avoids local optima. Practical implementation demonstrates that monthly wind and solar curtailment was reduced to 4.9%, achieving renewable energy absorption of 62200.13 MWh per month. A self-developed smart control platform addresses the challenges of renewable energy integration and power balance in 100 MW-level industrial parks. This research fills the technical gap in large-scale integrated energy system regulation, provides a replicable solution for low-carbon transformation, and supports the construction of new power systems.

Keywords: source-grid-load-storage integration; multi-timescale dispatching; particle swarm optimization; renewable energy consumption; 100 MW-level industrial park

随着全球能源结构加速向清洁低碳转型,以风电、光伏为代表的可再生能源快速发展,其随机性与波动性对电力系统的安全稳定运行构成严峻挑战,传统“源随荷动”式调控模式已难以适应高比例新能源接入的需求^[1-2]。在此背景下,源网荷储一体化协同调控技术作为提升新能源消纳能力和构建新型电力系统的关键路径,已成为工程界关注的核心^[3]。该技术通过聚合电源、电网、负荷与储能等多要素资源,构建统一协调的运行机制,可显著增强系统的灵活性和调节裕度,有效支撑“双碳”目标下的能源安全与经济运行^[4-5]。

在实际应用层面,大型工业园区作为区域能源消费与调节的核心载体,源荷两侧的不确定性更为显著,亟须采取高可靠、高响应性的多时间尺度协同调度策略^[6-8]。文献[9]提出的源-荷-储多时间尺度协同优化调度策略,通过日前调度确定火电机组、储能系统和可转移负荷的调度计划,日内调度进一步优化可增减负荷和储能的实时出力,有效兼顾了运行成本最小化与应对源荷不确定性的工程需求。文献[10]研究表明,按响应特性划分需求响应资源并分尺度调度,是应对负荷预测偏差和风光出力波动的有效手段。此外,文献[11]提出的微电网多时间尺度调度策略,在特定场景下通过日前优化电动汽车充放电行为,实时利用储能和电动汽车进行灵活调节,提升了系统应对负荷不确定性的能力。文献[12]针对共享储能运营商与电动汽车充换电站,利用改进 Shapley 值实现收益公平分配。然而,针对百兆瓦级大型工业园区的实际工程需求,现有多时间尺度调度技术仍显不足。其一,日前调度窗口通常仅为 24 h,缺乏对未来更长周期(如 7 天)天气与负荷变化的全局前瞻性。这极易导致在连续阴雨后的突然大风光场景下,因未能提前腾挪储能库容

而被迫弃电,或在持续长时缺电工况下储能储备不足,难以实现跨日能量时移与平衡。其二,实时调度粒度多为 5 min 甚至更长,面对百兆瓦级园区源荷数兆瓦级的瞬时功率波动,调节滞后效应显著。这种粗粒度调度难以在秒级或分钟级内快速响应联络线功率偏差,极易打破电力平衡,甚至引发局域电网频率越限风险。其三,传统优化算法难以应对源网荷储复杂耦合模型,常见启发式算法在高维大规模场景下亦面临收敛缓慢、精度不足等问题。

在国际研究方面,欧盟 FENIX 项目探索了虚拟电厂(virtual power plant, VPP)聚合分布式资源参与市场的价值^[13-14],美国 NREL 也通过研究验证了需求侧灵活性资源在降低成本与碳排放方面的重要价值,体现出较强的前瞻性^[15]。文献[16]采用深度学习生成典型场景,对大型风光储混合系统的容量配置进行优化,以实现降低弃电率与节省年化成本的双重目标。但整体上,这些研究多停留在理论探索与中小规模示范层面,尚未形成可适用于高功率密度工业园区的系统化协同调控方案。

在国内,近年来已初步构建起以 D5000 系统与新一代调度支持平台为代表的国产化调度技术体系^[17-18]。例如,文献[19]提出的电网调度综合数据平台框架、文献[20]中关于调度自动化系统的模块化结构设计(涵盖数据采集、模型管理与权限控制),以及文献[21]对主站系统实时监控与人机交互能力的要求,均为构建大型源网荷储一体化智慧平台提供了良好的工程基础。

新型储能技术在过去十年发展迅猛,在工程应用、检测评价与标准制定等方面成果显著,已逐步实现了兆瓦级至百兆瓦级的电站化系统集成与推广应用^[22]。尽管政策驱动下源网荷储一体化项目发展迅速,文献[23]亦强调应从工程层面统筹发电侧灵活

性、负荷侧响应与储能调节能力，但目前相关技术多针对微电网或小型园区，难以适应百兆瓦级高耗能工业园区复杂的调度需求与严苛的新能源消纳目标，亟须采取更加系统化、工程化的调控解决方案^[24]。

为填补这一技术空白，本工作依托新疆地区首个百兆瓦级源网荷储一体化工业园区，围绕其运行实际，提出适用于高比例新能源场景的协同优化与智能调控方法。首先，提出并工程化设计“三段式”多时间尺度调度策略，充分利用7天预测数据的前瞻性进行日前优化调度，通过日内滚动修正应对预测更新，并创新性实施1 min级实时快速响应，以降低风光预测偏差与负荷波动对电力平衡的影响。其次，为应对高维高耦合复杂优化问题，结合逻辑判断与精英优选机制，设计改进型粒子群算法，仅对关键粒子进行迭代更新，提升在大规模场景下的求解效率与稳定性。最后，在典型工业运行场景下开展仿真验证，结果表明该策略可降低用能成本，提升新能源消纳率。所提策略依托国产化软硬件平台，构建集监测、预测与控制于一体的调控系统，实现超过99.99%的系统可用率，为后续百兆瓦级园区的推广应用提供可复制的工程范例。

1 源网荷储一体化园区调度要求及策略整体框架

1.1 源网荷储一体化园区调度要求

本工作以新疆某百兆瓦级源网荷储一体化园区为例进行分析，包括风机、光伏、余热发电、工业硅负荷以及电池储能5部分，图1为其整体结构图。

工业制硅为高能耗产业，根据新疆维吾尔自治区发展和改革委员会发布的《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补项目示范有关工作的通知》(以下简称《通知》)^[25]，园区需每年消纳不少于2亿kWh时的新能源电力，且新能源占比不低于50%。该项目作为国内首个百兆瓦级源网荷储一体化园区，需在严格满足上述政策指标的同时，解决风光波动大与负荷刚性的匹配问题。

依据《通知》要求及相关建设规范，系统需实现“自主调峰、自我消纳”，原则上不向大电网反送电。针对持续无风无光且储能电量耗尽的极端工况，系统优先利用大电网购电进行功率支撑。仅在购电功率达到联络线物理传输限值(或变压器允许的下网功率上限)时，才强制执行削减负荷策略，

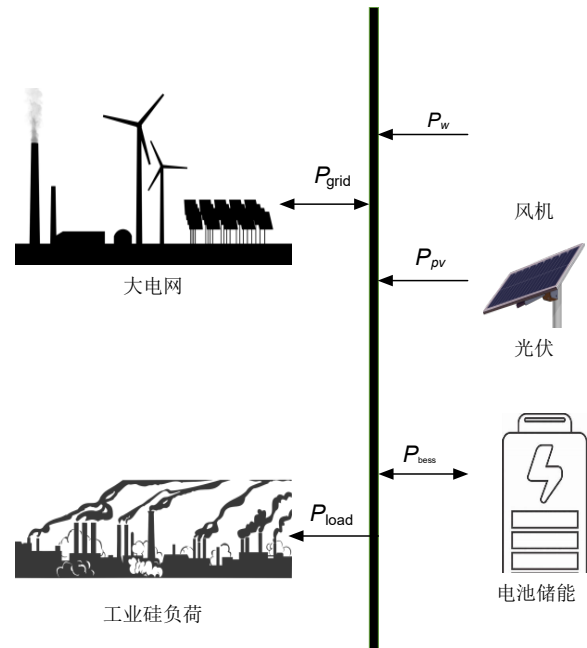


图1 源网荷储一体化园区整体结构图
Fig. 1 Source-grid-load-storage integrated industrial park overall structure diagram

以保障园区供电系统的安全稳定运行。

1.2 多时间尺度调度整体框架

本工作结合新疆电网的调度需求，日前上报次日24 h(15 min间隔)用电计划、日内(15 min间隔)滚动上报未来4 h的用电计划，根据风光等15 min精度的功率预测数据，通过优化算法得到日前、日内的各单元最优出力分配，并考虑实时与计划的差异，制定实时调度策略修正各单元出力。本工作设计的3段整体协调控制策略如图2所示。

①日前调度策略：基于后续7日风光预测功率、负荷预测功率以及余热锅炉预测功率，以一体化项目经济成本最小化为目标，在约束条件限制下通过优化算法，计算储能出力、弃风弃光预测情况和工业硅负荷调整建议，最终获得上报优化的园区用电计划曲线。

②日内调度策略：基于日内4 h风光预测功率、负荷预测功率、余热锅炉预测功率以及电网侧下发的用电计划曲线，通过每15 min滚动优化对日前的功率调度结果进行修正。

③实时调度策略：基于实时的新能源出力、储能状态、负荷需求以及电网波动要求等数据，依据实时调度策略的逻辑框图做快速逻辑判断，修正风光荷储的出力状况，对风、光、储、负荷以及电网上网功率进行优化调整。

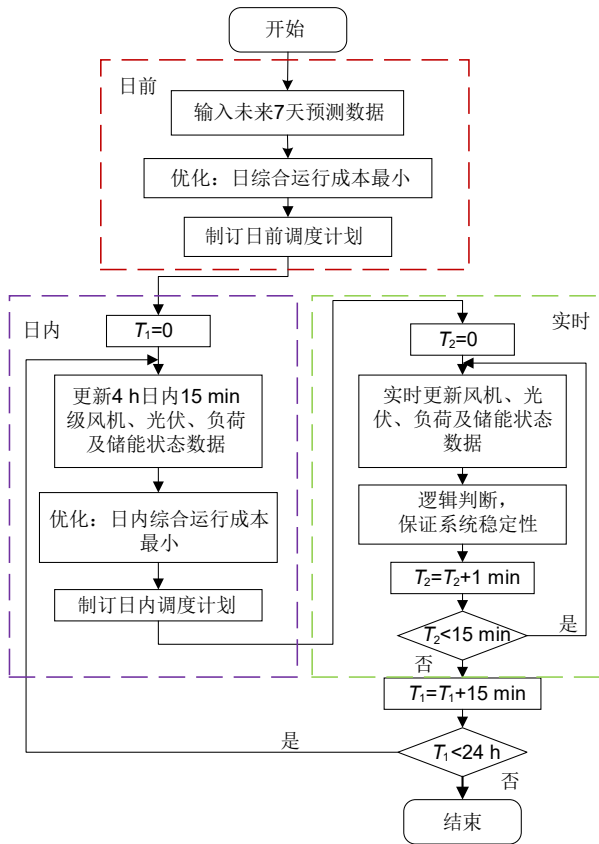


图2 日前-日内-实时多时间尺度调度策略框图

Fig. 2 Multi-timescale scheduling strategy block diagram covering day-ahead, intra-day, and real-time phases

2 源网荷储一体化园区多时间尺度调度模型

2.1 日前调度策略

为保证工业硅负荷的稳定供电和平台的安全运行,减少弃风弃光,并达到新能源消纳50%的目标,日前协调控制策略以平台综合成本最小化为目标建立目标函数,经济性指标包括电网购电成本、风力发电成本、光伏发电成本。

2.1.1 目标函数

$$\min C = C_{\text{grid}} + C_w + C_{\text{pv}} + C_{\text{load}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{\text{grid}} = \sum_{k=1}^{672} P_{\text{grid}}(k) \times \Delta t \times c_{\text{grid}}(k) \\ C_w = \sum_{k=1}^{672} P_{w_wasted}(k) \times \Delta t \times c_w \\ C_{\text{pv}} = \sum_{k=1}^{672} P_{\text{pv_wasted}}(k) \times \Delta t \times c_{\text{pv}} \\ C_{\text{load}} = \sum_{k=1}^{672} P_{\text{sub}}(k) \times \Delta t \times c_{\text{load}} \end{cases}$$

式中, C 为“一体化”平台单日电成本;

C_{grid} 为电网购电成本; C_w 、 C_{pv} 分别为风电、光伏的弃电惩罚; $P_{\text{grid}}(k)$ 为 k 时刻的购电功率; Δt 为时段长度, 此处为 15 min; $c_{\text{grid}}(k)$ 为 k 时刻的购电电价; $P_{w_wasted}(k)$ 为 k 时刻的弃风功率; c_w 为风电的单位弃电成本; $P_{\text{pv_wasted}}(k)$ 为 k 时刻的弃光功率; c_{pv} 为光伏的单位弃电成本; $P_{\text{sub}}(k)$ 为 k 时刻的负荷减载功率; c_{load} 为负荷的单位减载成本。

2.1.2 约束条件

日前协调策略的经济模型从3个方面考虑约束条件: 功率平衡约束、设备运行约束及政策约束。

(1) 功率平衡约束

$$P_{\text{load}} + P_{\text{bat}} = P_w + P_{\text{pv}} + P_{\text{hr}} + P_{\text{grid}} \quad (2)$$

式中, P_{load} 为工业硅负荷; P_{bat} 为储能功率(为正值时表示储能充电, 为负值时表示储能放电); P_w 是风电输出功率; P_{pv} 是光伏输出功率; P_{hr} 为余热锅炉出力; P_{grid} 代表与电网的交换功率。

(2) 设备运行约束

① 储能荷电状态约束

$$\text{SOC}'_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}'_{\max} \quad (3)$$

式中, SOC'_{\min} 、 SOC'_{\max} 分别为储能用于峰谷价差减少购电成本的荷电状态的最小、最大值。

② 储能寿命约束

本工作所研究的百兆瓦级源网荷储一体化园区, 在顶层设计中将储能系统视为与系统同寿(共同服役 Y 年)的固定资产, 不考虑中途替换。因此, 为了在储能装置运行年限内合理分配其使用强度, 避免因短期内过度使用而加速老化, 本工作采用一种动态的损耗额度分配策略, 约束储能在调度周期内的等效循环次数。该策略的核心思想是确保储能在任意时刻的累计损耗量, 始终跟踪其按平均寿命计算的理论额度: 假设目前储能系统已经运行 D 天, 为了精准量化历史损耗, 我们引入 N_d 表示第 d 天 ($d \leq D$) 的实际日等效循环次数。该数值是基于当日的实际荷电状态(SOC)曲线, 利用附录A所述的改进雨流计数法进行统计与等效折算得出的[计算过程详见附录A中式(A1)~式(A3)]。在此基础上, 计算到未来第 $D+7$ 天时, 储能按平均寿命应使用的理论总循环额度, 并减去截至目前第 D 天已经累计使用的历史额度。此差值即被设定为未来7天内允许使用的循环次数总和上限 N , 其计算公式如下:

$$N = 7 \times \frac{Z - \sum_{d=1}^D N_d}{365Y - D} \quad (4)$$

式中, Z 表示储能全寿命循环次数, 该参数依据电池厂商提供的技术参数确定(与附录A中表A1数据来源一致, 对应标准工况下的额定循环寿命); Y 表示储能运行年限。则储能寿命约束如下:

$$\sum_{i=1}^n \beta(D_{od,i}) \leq N \quad (5)$$

式中, n 表示该时间段内识别到的所有充放电循环数量; $\beta(D_{od,i})$ 为第*i*次循环对应的等效循环次数, 其具体计算方法见附录A。

③充放电功率约束

$$|P_{bat}| < P_{bat_max} \quad (6)$$

$$P_{x_min} \leq P_x \leq P_{x_max}, \quad x = \{w, pv, hr\} \quad (7)$$

式中, P_{bat_max} 为电池充放电功率上限; P_{x_min} 、 P_{x_max} 分别为发电单元出力的下限和上限。

(3) 政策约束

$$0 \leq P_{grid} \leq P_{policy} \quad (8)$$

式中, P_{policy} 为政策决定的电网允许的下网功率上限。由于电网不允许平台返送电, 因此电网允许的下网功率下限设为0。

2.1.3 经济优化模型求解算法

针对本工作构建的日前调度模型, 由于式(4)、式(5)中包含非线性约束, 模型变量间存在复杂耦合关系, 传统方法如优先级法、拉格朗日松弛法在处理此类非线性或强约束问题时往往难以兼顾计算效率与解的质量。近年来, 智能优化算法如遗传算法、蚁群算法和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)在复杂系统优化中得到广泛应用, 具备良好的全局搜索能力和工程适应性, 已在多个场景中取得较好的效果。因此, 本工作选用粒子群优化算法对调度目标进行求解, 以更好地平衡模型求解的精度与计算效率。

此外, 考虑到本工作日前调度模型基于未来7日预测数据进行优化, 变量维度较高, 常规粒子群优化算法在高维搜索空间中容易出现搜索效率低和收敛性能不稳定的问题。为提升算法在高维问题中的求解效率, 本工作在文献[26]提出的基于逻辑初始化粒子群优化算法基础上, 引入重点位置粒子的筛选机制, 通过对关键粒子进行局部寻优以实现降维, 增强整体优化性能。精英优选机制下的改进粒子群优化算法流程见图3, 所提改进粒子群优化算法的关键步骤如下。

①初始化: 随机选取粒子群初始速度, 通过简单的逻辑判断策略的结果作为粒子群初始位置。

②精英优选: 设总优化时段为 T , 将逻辑判断策略识别出的弃电、下负荷及峰谷套利等关键行为对应的粒子记为集合 A_{key} 。选取这些时段及其前后各 m 个粒子所组成的扩展集合为参与迭代的“精英粒子”集合 A_{elite} , 其数学表达如下:

$$A_{elite} = \bigcup_{t \in A_{key}} \{t - m \dots t + m\} \cap [1, T] \quad (9)$$

其余粒子位置保持逻辑判断策略结果不变, 不参与后续迭代优化。

③适应度评估: 将每个粒子的初始位置记为 p_{ibest} , 计算每个位置下粒子的适应度, 将适应度最好的位置记为 g_{best} 。

④位置与速度更新: 仅对 A_{elite} 中的粒子进行位置与速度更新, 参考标准PSO更新公式。

$$v_i = wv_i + c_1 \text{rand}() (p_{ibest} - X_i) + c_2 \text{rand}() (g_{best} - X_i) \quad (10)$$

$$X_{i+1} = X_i + v_i, \quad \forall i \in A_{elite}$$

式中, v_i 为粒子*i*的速度; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子, 通常取2; $\text{rand}()$ 为0~1之间的随机数; p_{ibest} 为一个粒子本身的最优解; g_{best} 为全局最优解; X_i 为粒子*i*的位置。

⑤计算每个粒子的适应度, 若当前位置的适应度更好, 则更新 p_{best} 和 g_{best} 。

⑥重复步骤④和⑤, 直到达到最大迭代次数。

2.2 日内调度策略

日内协调控制策略基于4 h超短期预测数据, 通过每15 min滚动优化对日前的功率调度结果进行修正。目标函数及约束条件与日前调度策略保持一致。

2.3 实时调度策略

在实时调度策略中, 源网荷储一体化大工业园区对电力平衡要求较为严格, 需要进行1 min的实时调度。考虑到实际园区运行中可能出现的复杂工况以及调度时间尺度较小, 实时调度策略需满足落地部署应用的要求, 故而选择通过逻辑判断修正日内调度计划, 降低源荷不确定性的影响。所开发的实时调度策略及其输入输出数据和逻辑框图见附录B。由于实时策略框图过于复杂, 故将其分为以下4个工况进行介绍, 实时调度策略的输入输出变量含义见附录表B1。

2.3.1 储能可控, 风光大发

在此工况下, 园区发电量大于用电量, 而源网荷储一体化园区不允许向大电网反送电。如附录图B1所示, 储能主要用于吸收电力盈余, 减小弃风弃光率。若此时处于谷电价时段且储能在保证电力平衡下仍可以充电, 则以电池储能充电功率上限进行充电。

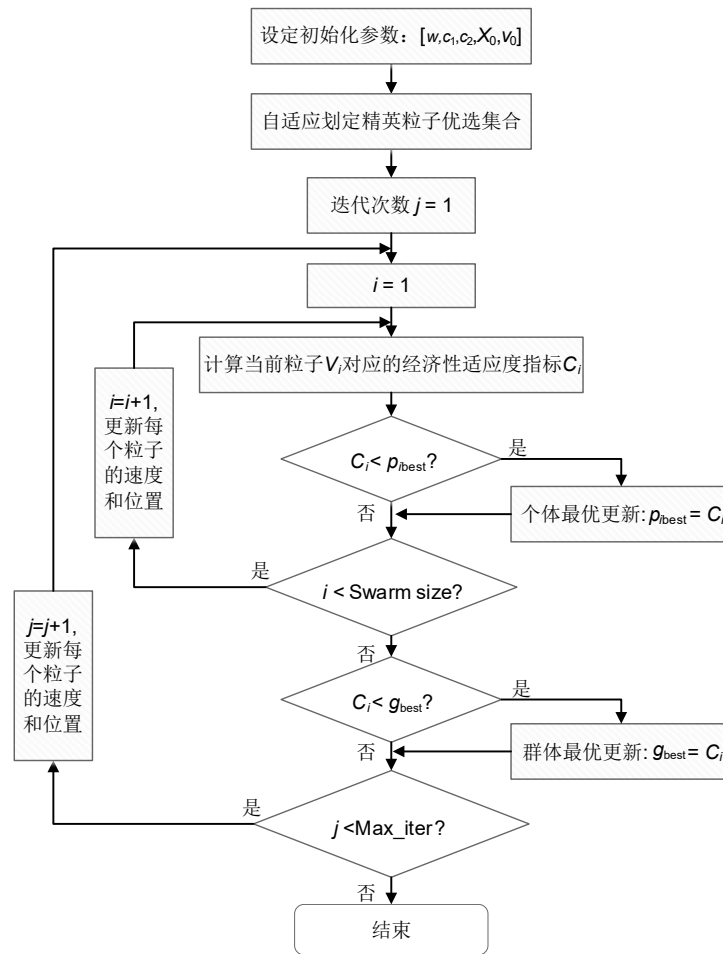


图3 精英优选机制下的改进粒子群优化算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the improved particle swarm optimization algorithm with elite selection mechanism

若此时储能已无法充电且园区发电量仍旧大于用电量，则考虑弃风弃光，保障园区电力平衡。由于风力发电波动性极高，考虑优先弃风，但最低至风机最低运行功率；当风机不可控时，只能弃光。

2.3.2 储能可控,风光不足

在此工况下，园区电力缺额大于联络功率上限。如附录图B2所示，储能主要用于放电，补足电力缺额，保障园区电力平衡，减少过载惩罚。若此时处于峰电价且储能能保证电力平衡的情况下仍可以放电，则以电池储能放电功率上限进行放电。

若此时储能已无法放电且园区电力缺额仍在联络功率限值以外，则考虑削减负荷，保障园区电力平衡。

2.3.3 储能可控,风光充足

在此工况下，园区电力缺额在联络功率限值以内。如附录图B3所示，储能主要用于利用峰谷价差降低购电成本。若此时处于谷电价且储能在日内

优化中充电或者此时处于峰电价且储能在日内优化中放电，则储能实时调度指令遵循日内调度指令，充分利用日内调度策略的前瞻性。

若此时处于谷电价但储能在日内优化中放电，则以电池储能充电功率上限进行充电；若此时处于峰电价但储能在日内优化中充电，则以电池储能放电功率上限进行放电；若此时处于平电价，则电池储能既不充电也不放电。

2.3.4 储能不可控

在此工况下，若储能持续充电则将其视作恒定负荷，若储能持续放电则将其视作恒定发电单元，储能不能进行调节。如附录图B4所示，若处于风光大发，则直接弃风弃光；若处于风光不足，则直接削减负荷；若处于风光充足，则各功率单元保持不变。

3 算例分析

在本部分中，将使用3.1节中的参数。随后，

分析典型场景下的日前调度结果，对比不同优化算法的影响。然后分析多时间尺度调度策略对源荷不确定性的修正作用及经济优势。最后在新疆的百兆瓦级源网荷储一体化园区中落地实施，验证了所提多时间尺度调度策略的新能源消纳能满足政策要求。

3.1 参数设置

本工作使用 Python 开发微电网的数学模型和约束。本工作算例所用的关键数据，包括风光出力、园区负荷的典型日数据、设备装机容量(表1)以及分时电价(表2)，均来源于新疆某百兆瓦级源网荷储一体化工业园区的实际运行数据和技术资料，其中电池储能设备为磷酸铁锂电池。

表1 相关参数
Table 1 Related parameters

类型	参数	值
风力发电	装机容量/MW	205
光伏发电	装机容量/MW	60
余热发电	装机容量/MW	25
电池储能	装机容量/MWh	60
	额定功率/MW	30
	充放电效率	0.8
	惯性权重/w	0.8
PSO	学习因子 c_1	2
	学习因子 c_2	2
	精英邻域范围 m	10

表2 分时电价
Table 2 Time-of-use tariff

时段	电价/(元/kWh)
0:00—2:00	0.336
2:00—8:00	0.165
8:00—11:00	0.507
11:00—14:00	0.336
14:00—16:00	0.165
16:00—19:00	0.336
19:00—24:00	0.507

针对本工作所提的精英优选 PSO 算法，考虑到日前调度模型需优化未来 7 天 96 点数据，决策变量高达 672 维，属于高维优化问题。经多次试算，本工作设定 PSO 算法参数如下^[27-28]。

①惯性权重 $w=0.8$ ：该参数决定了粒子保持先前运动状态的能力，是平衡算法全局探索与局部开发的关键。在高维空间中，若 w 过小，粒子动能不足，极易陷入复杂的局部极值；若 w 过大，则易导

致振荡不收敛。设定 $w=0.8$ 赋予了粒子较强的全局搜索能力，有效维持了种群多样性。

②学习因子 $c_1=c_2=2$ ：该参数分别代表粒子对自身经验和群体经验的学习权重。试算表明，设定 $c_1=c_2=2$ 可均衡两权重，防止算法过早收敛于某一局部因子。

③精英邻域范围 $m=10$ ：该参数决定了对关键时段进行精细化搜索的范围。 $m=10$ 对应 2.5 h 的时间窗，恰好覆盖典型的新能源出力短时波动周期，可在显著降低计算维度的同时保证局部寻优精度。

3.2 日前调度策略结果分析

在“源网荷储一体化”园区日前调度领域，本研究突破传统日前调度仅采用 24 h 负荷预测的局限性，创新性地构建了基于 7 天多时间尺度预测数据的协同优化调度体系，可以充分发挥工业负荷时序规律性强、生产计划可追溯的特性，最大限度地利用源荷互补来提高园区经济效益。

为了能从细节方面清楚地展示日前调度策略各单元调度出力，选取未来 1 日调度结果进行分析。图 4 为典型日的日前调度策略各单元调度出力柱状图。典型日风光出力以及网电功率可以满足负荷功率需求，无需负荷减载。此典型日中风光出力较大，在 8:00—16:00 出现风光大发超过负荷功率需求的状况。故储能能在 8:00 前放电至荷电状态下限，为 8:00—10:00 储能吸纳风光发电盈余做好准备。由于储能额定容量限值，11:00—16:00 呈现出复杂的充放电工况以降低弃电量。19:00—20:00，为减少购电成本，在峰电价时段储能放电。

在应对 7 天高维预测数据带来的优化复杂度挑战方面，本研究提出精英优选粒子群算法，通过融合逻辑判断规则与动态参数调整机制，显著提升了传统 PSO 算法的全局寻优能力。相较于传统基于逻辑判断的调度规则及基于逻辑初始化的 PSO，本算法创新性地构建了双维度优化架构：在粒子初始化阶段，采用设备运行逻辑规则生成初始可行解集，确保粒子群符合“源网荷储一体化”园区调度的刚性约束；在迭代寻优阶段，引入精英粒子优选机制，即选取对目标函数影响较大的粒子集合进行优化，降低粒子群寻优维度。

图 5 展示了所提改进 PSO 在 3 个不同典型日下的收敛曲线。改进算法在早期迭代阶段即可显著降

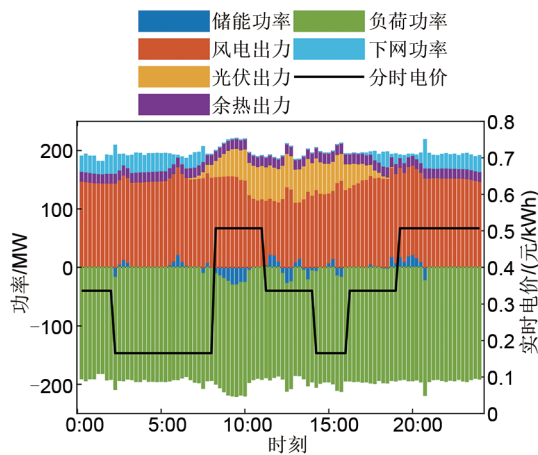


图4 典型日的日前调度策略各单元调度出力柱状图
Fig. 4 Bar chart of each unit's scheduled output in the day-ahead scheduling strategy for a typical day

低适应度值，表现出更快的收敛速度；同时，改进PSO的最终适应度值明显优于传统PSO，说明其全局搜索能力和局部收敛精度均有所提升，验证了所提改进策略在优化性能上的有效性。表3展示了3种典型日场景下的算法求解时长。结果显示，改进PSO算法大幅提升了调度问题的求解效率。

将本工作所提精英优选 PSO、基于逻辑初始化的 PSO、逻辑判断的调度结果进行对比，结果

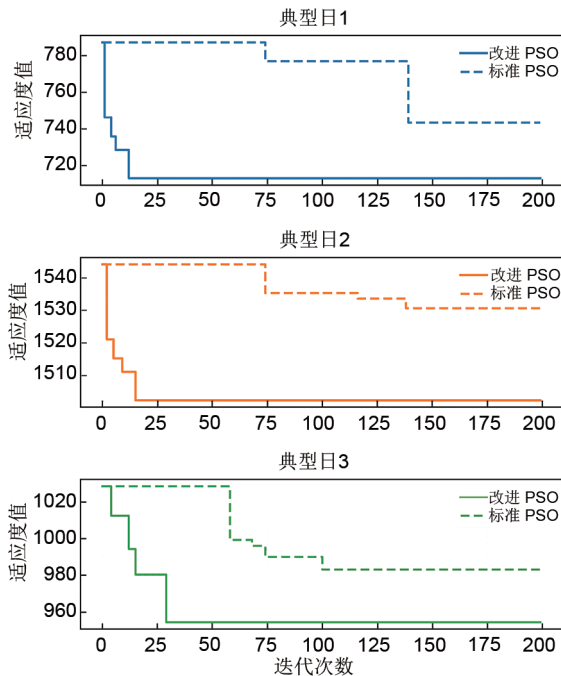


图5 改进 PSO 与标准 PSO 的收敛曲线对比
Fig. 5 Comparison of convergence curves between improved PSO and standard PSO

表3 3种典型日场景下的算法求解时长

Table 3 Solving time of the algorithm under three typical day scenarios

场景	标准 PSO	改进 PSO
典型日 1	11 min 15 s	1 min 11 s
典型日 2	11 min 53 s	1 min 35 s
典型日 3	9 min 56 s	2 min 41 s

如表4所示。对比分析可知，基于逻辑初始化的

表4 不同优化算法的调度结果

Table 4 Comparison table of dispatch results from different optimization algorithms

属性	逻辑判断	基于逻辑初始化的 PSO	精英优选 PSO
风力最大可发电量/MWh	7929.43	7929.43	7929.43
光伏最大可发电量/MWh	2404.99	2404.99	2404.99
余热发电量/MWh	2800.27	2800.27	2800.27
计划负荷用电量/MWh	32003.14	32003.14	32003.14
负荷减载量/MWh	0	0	0
弃风弃光量/MWh	269.30	226.30	216.77
弃风弃光率/%	2.61	2.19	2.10
购电成本/万元	627.43	638.99	635.26
弃风弃光惩罚/万元	1077.19	905.2	867.08
负荷减载惩罚/万元	0.00	0.00	0.00
综合运行成本/万元	1704.62	1544.19	1502.34

PSO方法通过引入智能寻优，有效跳出了单纯逻辑判断策略的局部最优陷阱。虽然该算法为提升新能源消纳而在部分时段增加了购电成本，但弃电惩罚大幅下降，验证了全局优化的必要性。在此基础上，本工作所提精英优选 PSO 算法进一步展现了其在高维求解中的卓越性能。得益于精英粒子筛选机制，该算法在迭代过程中能更精准地锁定全局最优解区域。结果表明，精英优选 PSO 策略将弃风弃光率进一步降至 2.10%，较基于逻辑初始化的 PSO (2.19%) 和逻辑判断策略(2.61%)分别降低了 4.1% 和 19.5%。在经济性方面，虽然精英优选 PSO 的购电成本(635.26 万元)因消纳需求仍高于逻辑判断策略，但其通过更精细的储能调度，成功在购电支出与弃电惩罚之间找到了更优的平衡点。最终，该策略实现了最低的综合运行成本(1502.34 万元)，较基于逻辑初始化的 PSO 算法降低了 2.71%，显著提升了园区的整体运行效益。

3.3 多时间尺度调度策略结果分析

图 6 所示为典型日的日前、日内以及实时的风光预测总功率对比图。日前、日内以及实时的趋势基本一致，但是数值差别较大。为减小源荷不确定性对调度结果的影响，提出了日前-日内-实时逐级修正的多时间尺度调度策略。

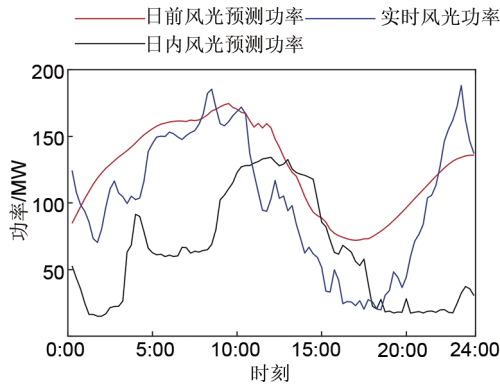


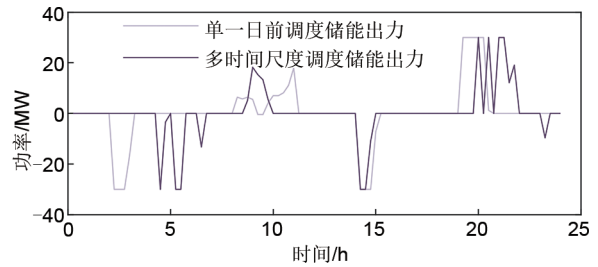
图 6 日前、日内以及实时的风光预测总功率对比
Fig. 6 Comparison of total wind and PV power forecasts across day-ahead, intra-day, and real-time horizons

表 5 多时间尺度调度及单一日前调度结果对比

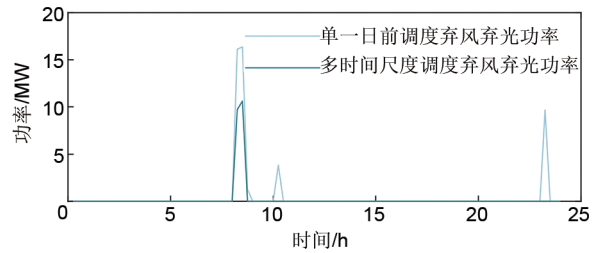
Table 5 Comparison of multi-timescale scheduling and single day-ahead scheduling results

属性	多时间尺度调度策略	单一日前调度策略
风力最大可发电量/MWh	2218.90	2218.90
光伏最大可发电量/MWh	254.18	254.18
余热发电量/MWh	403.94	403.94
计划负荷用电量/MWh	4616.44	4616.44
负荷减载量/MWh	0	0
弃风弃光量/MWh	5.09	11.81
弃风弃光率/%	0.21	0.48
购电成本/万元	54.39	54.44
弃风弃光惩罚/万元	20.36	47.24
负荷减载惩罚/万元	0.00	0.00
综合运行成本/万元	74.75	101.68

如图 7 所示，由于在 8:00—9:00 高峰电价时段实时风光功率较大，而此时段日前风光预测功率较小。若遵循单一日前调度策略，此时段储能将以较大放电功率进行放电，而多时间尺度调度策略则会减小储能放电功率，避免出现风光弃电。由于在 22:00—24:00 高峰电价时段实时风光功率较大，而此时段日前风光预测功率较小。若遵循单一日前调度策略，此时段储能不会充电，而多时间尺度调度



(a) 不同调度策略储能功率对比图



(b) 不同调度策略弃风弃光功率对比图

图 7 多时间尺度调度与单一日前调度的储能出力及弃风弃光对比图

Fig. 7 Comparative chart of energy storage dispatch and renewable curtailment in multi-timescale scheduling versus single day-ahead scheduling

策略则会吸收电力盈余，减少风光弃电量。且多时间尺度调度策略更多地利用风光发电供给负荷，减少了购电成本。故如表 5 所示，多时间尺度调度策略的购电成本及风光弃电惩罚大大减少，从而使得园区综合运行成本降低 26.49%。

综上所述，由于风光发电不确定性的影响，日前-日内-实时的多时间尺度调度策略的经济性与单一日前调度策略相比，得到了显著提升。

3.4 多时间尺度调度策略落地情况分析

本工作所提多时间尺度调度策略，已在新疆若羌百兆瓦级“源网荷储一体化”园区中落地应用。图 8 所示为园区调控平台某月某日园区风光储荷及电网下发的实际功率曲线。本工作所提多时间尺度调度策略使得园区有功功率平衡，保障了园区负荷安全稳定运行。

该新疆若羌百兆瓦级“源网荷储一体化”园区在 2025 年 3 月的风光最大可发为 42129.45 MWh，风光实发可达 40059.07 MWh，弃风弃光率仅为 4.9%。园区消纳新能源(包含余热发电)发电量 62200.13 MWh，若以此为月均消纳的新能源发电量，则年消纳新能源发电量将达 7.46 亿 kWh，不低于 2 亿 kWh，满足“源网荷储一体化”园区新能源消纳要求。

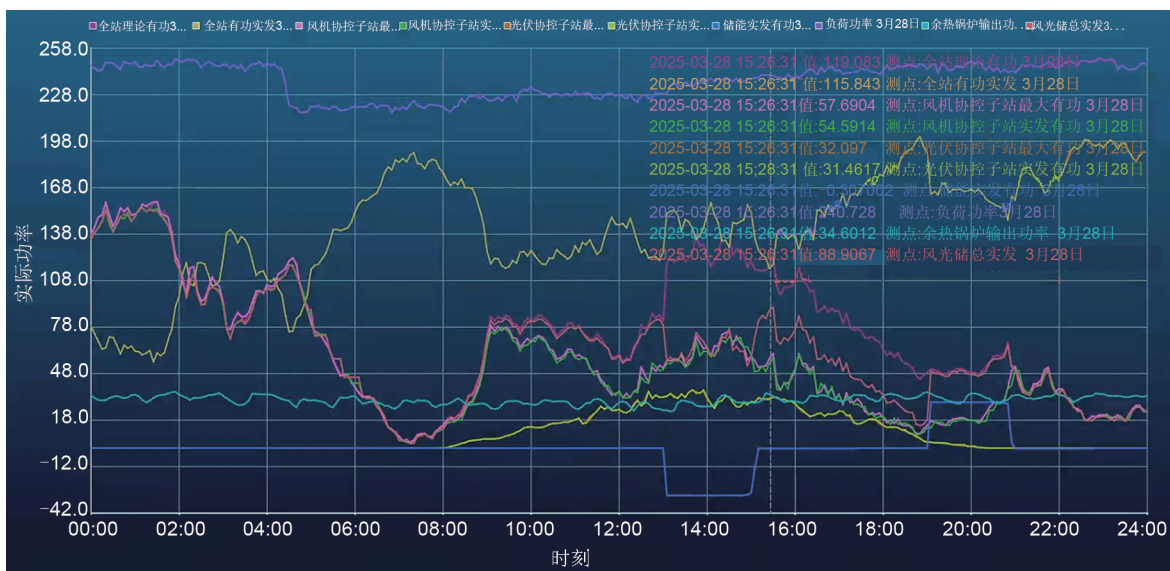


图8 调控平台的风光储荷及电网下发的实际功率曲线图

Fig. 8 Actual power curves of wind, solar, storage, load, and grid-delivered power in the dispatch platform

4 结论

随着全球能源结构向清洁低碳转型，为解决新能源就地消纳问题，推进“源网荷储一体化”园区建设。本研究通过构建日前-日内-实时的三段式多时间尺度调度策略，揭示了百兆瓦级源网荷储一体化园区在高比例可再生能源并网场景下的动态调控机制。

(1) 针对百兆瓦级园区对消纳前瞻性的要求，突破了传统24 h调度窗口的局限性，将日前调度周期拓展至未来7天。面对由此产生的高维求解难题，本工作设计的精英优选PSO算法通过逻辑初始化与精英筛选机制，有效克服了常规算法在高维空间易陷入局部最优的缺陷。仿真表明，该算法在保证求解效率的同时，较基于逻辑初始化的PSO算法进一步将综合运行成本降低了2.71%，显著提升了系统灵活性与经济性。

(2) 在典型日工况下，所提多时间尺度协调控制策略通过日前-日内-实时逐级修正风光波动与负荷偏差，比单一日前调度将综合运行成本降低26.49%，并将新能源消纳占比提升至50%以上。

(3) 相较于现有研究多集中于电源侧储能或兆瓦级微电网，本工作依托国内首个百兆瓦级源网荷储一体化工业园区示范工程，验证了所提策略在大规模协同场景下的有效性。实际运行数据显示，园区弃风弃光率降至4.9%，且单月消纳新能源发电

量可达62200.13 MWh，为高耗能产业低碳转型提供了重要参考，填补了大型工业园区级调控技术的研究空白。

值得一提的是，本策略在储能功率配置比例较低(约11%)的典型工况下仍表现出优异的调节性能。但对于储能配置比例极低(如小于10%)或负荷存在毫秒级剧烈冲击(如冶金类)的特殊场景，策略效果可能受限。未来将进一步针对高频负荷冲击平抑及不同储能配比下的适应性边界开展深入研究。

参考文献

- [1] 刘宏志, 秦晓辉. “双碳”目标与新型电力系统构建的底层逻辑[J]. 电气应用, 2025, 44(1): 8-10.
- [2] 舒印彪. 发展新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 中国电力企业管理, 2021(7): 8-9.
- [3] 俞蕴妮. 源网荷储一体化调控建设探究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(1): 1-2, 5. DOI:10.3969/j.issn.1671-1041.2025.01.001.
- [4] 发展改革委. 能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见(发改能源规〔2021〕280号)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(12): 59-62.
- [5] 韩昌文. 电力源网荷储一体化和多能互补的发展现状[J]. 青海科技, 2025, 32(1): 61-65.
- [6] 何忠阳. 考虑源荷不确定性的综合能源系统多时间尺度优化调度研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
HE Z Y. Research on multi-time scale optimal scheduling of integrated energy system considering source-load uncertainty[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [7] 王述祯. 基于i-C&CG求解算法的数据中心与储能协同规划[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 671-687. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0828.

- [8] 施婕, 彭英智, 孙伟卿. 碳流管控下的配电网储能优化运行[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3971-3980.
- [9] 杨锡勇, 张仰飞, 林纲, 等. 考虑需求响应的源-荷-储多时间尺度协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 253-260. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22119.
- [10] 陈灵. 计及调度优先级的微电网多时间尺度优化调度策略[J]. 电气传动, 2024, 54(1): 61-67, 96. DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd.24461.
- [11] 徐懂理, 徐北硕, 高瑞阳, 等. 考虑负荷不确定性的微电网多时间尺度调度策略[J]. 电工电气, 2024(8): 8-14. DOI:10.3969/j.issn.1007-3175.2024.08.002.
- [12] 成章, 于艾清, 王育飞, 等. 基于改进 Shapley 值与主从博弈的共享储能-充换电站协同运行策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 177-187.
- [13] 郭昆健, 高赐威, 严兴煜. 新型电力系统下虚拟电厂研究综述与展望[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(5): 49-57. DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2024.05.008.
- [14] 薛帅辉. 基于区块链的虚拟电厂多时间尺度优化调度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
XUE S H. Research on multi-time scale optimal scheduling of virtual power plant based on blockchain[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [15] 杨子昊. 考虑需求侧响应的多能源微电网优化[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.
YANG Z H. Research on multi-objective scheduling of multi-energy microgrid considering demand side response[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2024.
- [16] MA X M, DEVECI M, YAN J, et al. Optimal capacity configuration of wind-photovoltaic-storage hybrid system: A study based on multi-objective optimization and sparrow search algorithm[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 110983. DOI: 10.1016/j.est.2024.110983.
- [17] 刘星, 甄庆, 牛浩楠, 等. 基于 D5000 的源网荷储系统多元协调调度功能建设方案[J]. 光源与照明, 2021(4): 145-146.
- [18] 庄颖璇. D5000 系统功能及应用探析[J]. 农村电气化, 2021(11): 50-51.
- [19] 李鹏飞. 电力调控数据平台建设技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
LI P F. Research on construction technology of electric power regulation data platform[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [20] 孙艳辉, 孙俭. 电网调度技术支持系统构架及其应用现状综述[J]. 电子技术与软件工程, 2016, 5(14): 152.
- [21] 孙俭, 孙艳辉. 电网调度自动化主站系统研究综述[J]. 电子技术与软件工程, 2016, 5(13): 179.
- [22] 李相俊, 官亦标, 胡娟, 等. 我国储能示范工程领域十年(2012—2022)回顾[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2702-2712. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0381.
- [23] 黄元平, 何国彬, 杨金新, 等. 适应新型电力系统的源网荷储一体化电力平衡探究[J]. 电工技术, 2024(S2): 519-521.
- [24] WANG J Y, LYU C H, BAI Y L, et al. Optimal scheduling strategy for hybrid energy storage systems of battery and flywheel combined multi-stress battery degradation model[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99: 113208. DOI:10.1016/j.est.2024.113208.
- [25] 新疆维吾尔自治区发展和改革委员会. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补项目示范有关工作的通知[EB/OL]. (2021-05-24) [2025-11-16]. <https://solar.in-en.com/html/solar-2375991.shtml>.
- [26] 姚健, 刘爱军. 基于粒子群算法的区域综合能源优化调度方法[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(4): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2022.04.011.

-
- [27] 肖夏颖, 范传光, 郭峰, 等. 基于改进多目标粒子群算法的储能电站定容选址优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 503-514.
DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0689.
- [28] 杜巍, 沈红博, 李屹萌. 用户侧电化学储能装置经济性评估软件的开发与应用[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 310-320.

附录 A 雨流计数法电池寿命模型

电池寿命受多种因素影响，如环境温度、湿度及放电深度(depth of discharge, DoD)等。为了对电池在多重因素下的寿命衰减程度进行量化，本项目考虑 DoD 这一主要影响因素，通过雨流计数法提取电池充放电循环特征，进而计算其等效循环寿命。基于电池厂商提供的放电深度 D_{od} 与循环次数 N_c 关系(表 A1)，采用四次多项式进行曲线拟合，得到

$$N_c = 290443D_{od}^4 - 761395D_{od}^3 + 717190D_{od}^2 - 292246D_{od} + 48583 \tag{A1}$$

若第 i 次电池放电深度为 $D_{od,i}$ ，根据雨流计数法识别结果，其对应的等效循环寿命记为 $N_c(D_{od,i})$ ，对应的等效循环次数可表示为

$$\beta(D_{od,i}) = \frac{N_c(D_{od,1})}{N_c(D_{od,i})} \tag{A2}$$

附录 B 实时调度策略框图

表 A1 锂电池循环寿命与放电深度关系表

Table A1 Corresponding relationship between cycle-life and depth of dis-charge of Li-ion battery

放电深度/%	循环寿命/次	放电深度/%	循环寿命/次
10	26300	60	4050
20	11800	70	3750
30	7950	80	2890
40	5850	90	2630
50	4720	100	2280

式中， $N_c(D_{od,1})$ 表示在完全充放电(即放电深度为 100%)条件下的循环寿命。

基于上述结果，历史第 d 天的日等效循环次数 N_d 可通过对当日所有识别到的循环进行累加得到

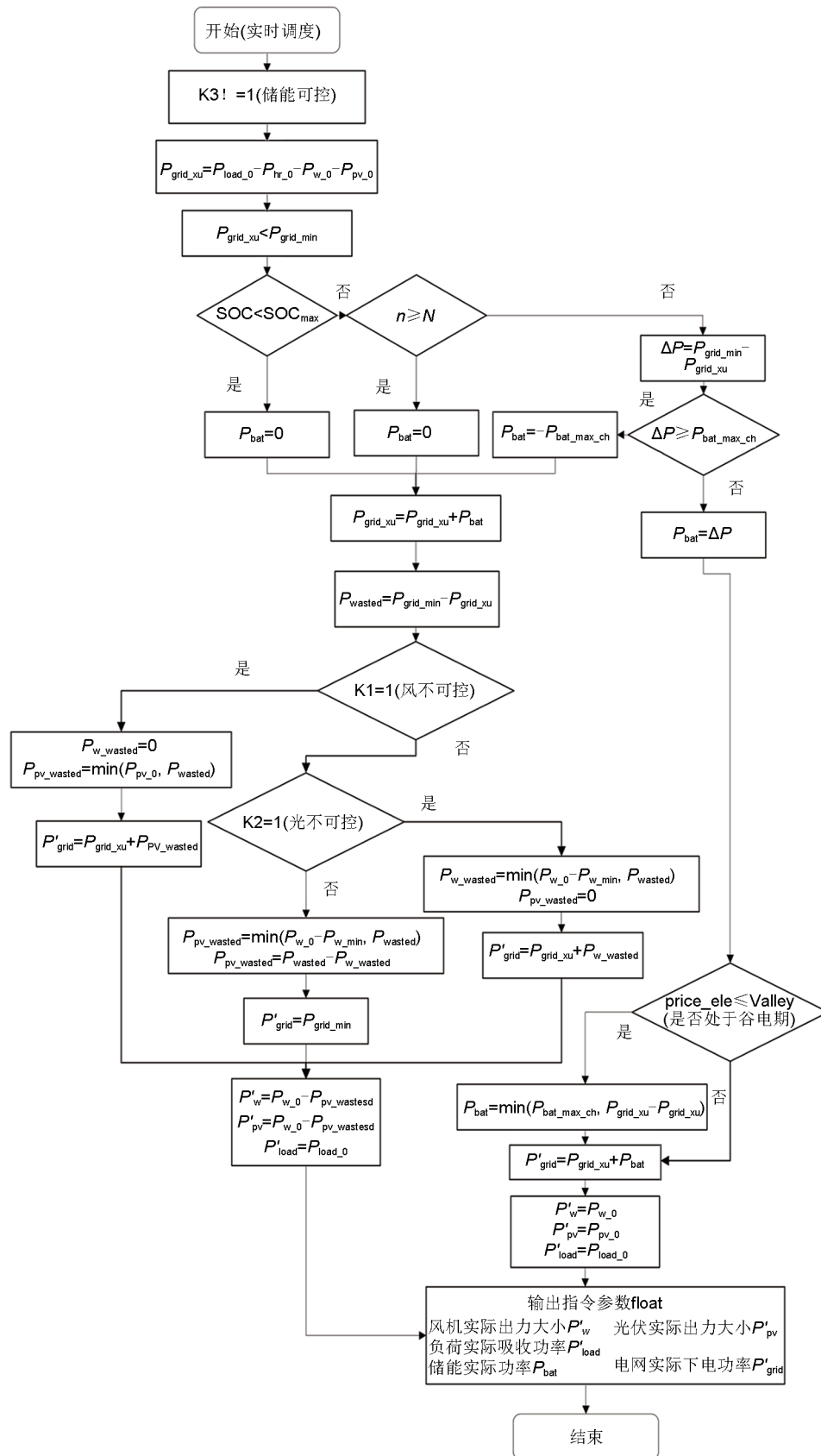
$$N_d = \sum_{i=1}^{n_d} \beta(D_{od,i}) \tag{A3}$$

式中， n_d 为第 d 天识别到的充放电循环总数。

表 B1 实时调度策略的输入输出变量含义

Table B1 Definitions of input-output variables for real-time scheduling strategy

数据类型	变量	含义
输入	$P_{w,0}$	风机出力(最大)
	$P_{pv,0}$	光伏出力(最大)
	$P_{load,0}$	负荷功率
	$P_{hr,0}$	余热锅炉输出功率
	$P_{bat,0}$	储能功率初始值(超短期优化结果)
	SOC	储能 SOC
	ele_price	阶梯电价
	$P_{bat_max_ch}$ 、 $P_{bat_max_dis}$	储能充放电功率上限
	P_{w_pv}	电网调度风光总指令
	$P_{bat_realltime}$	储能实时功率
	N	储能最大当日等效循环次数
	P_{grid_max}	下网功率上限
	P_{grid_min}	下网功率下限
	C_{bat}	储能容量
	SOC_{min} 、 SOC_{max}	储能 SOC 限制
	输出	P_{w_min}
Valley		谷电价
Peak		峰电价
P_w		风机实际出力
P_{pv}		光伏实际出力
P_{load}		负荷实际功率
P_{bat}		储能实际功率
P_{grid}	电网实际下网功率	



图B1 储能可控，风光大发实时框图

Fig. B1 Real-time block diagram for dispatchable energy storage and high-output wind-PV generation

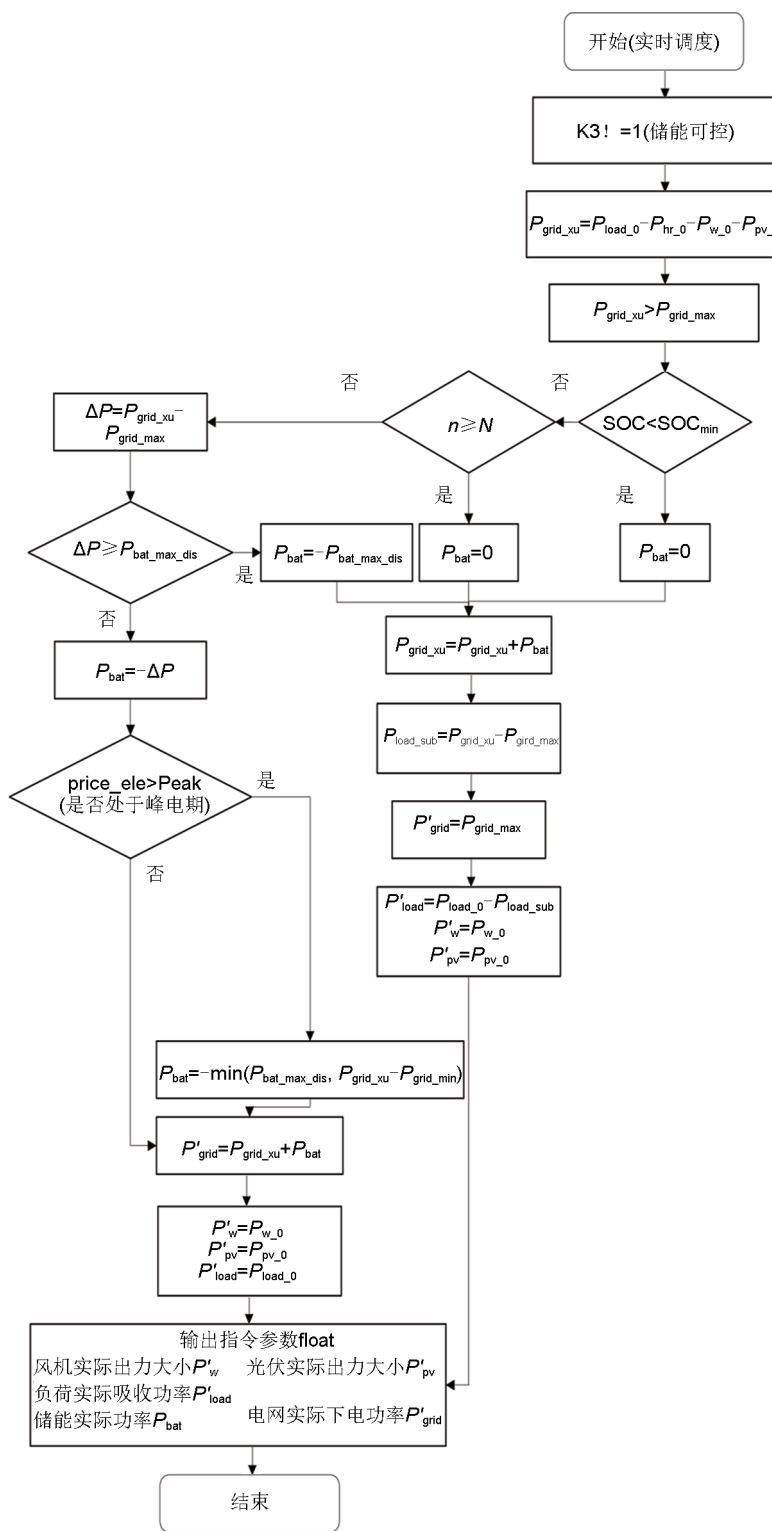
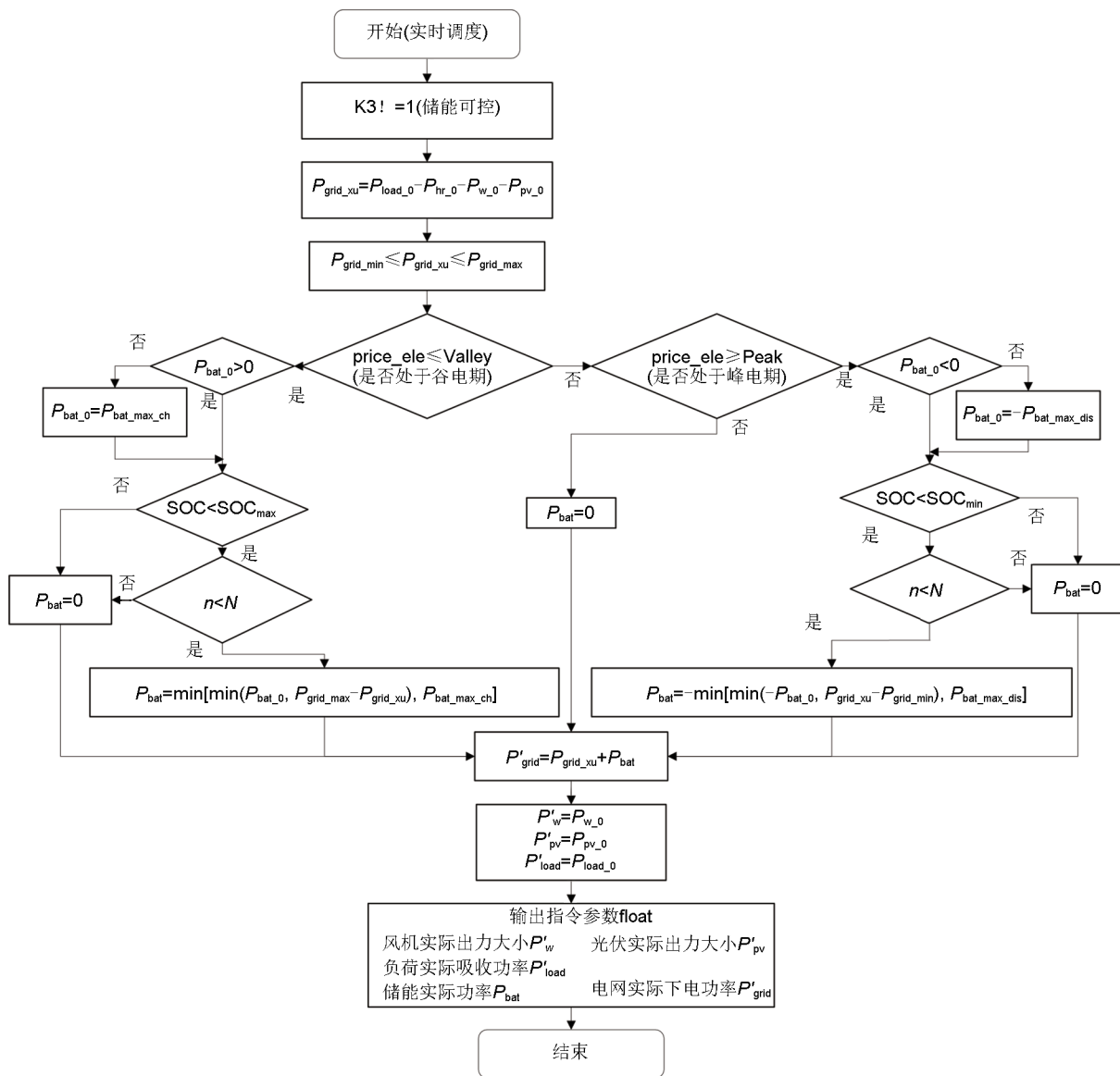


图 B2 储能可控，风光不足实时框图

Fig. B2 Real-time block diagram for dispatchable energy storage and low-output wind-PV generation



图B3 储能可控，风光充足实时框图

Fig. B3 Real-time block diagram for dispatchable energy storage and ample wind-PV generation

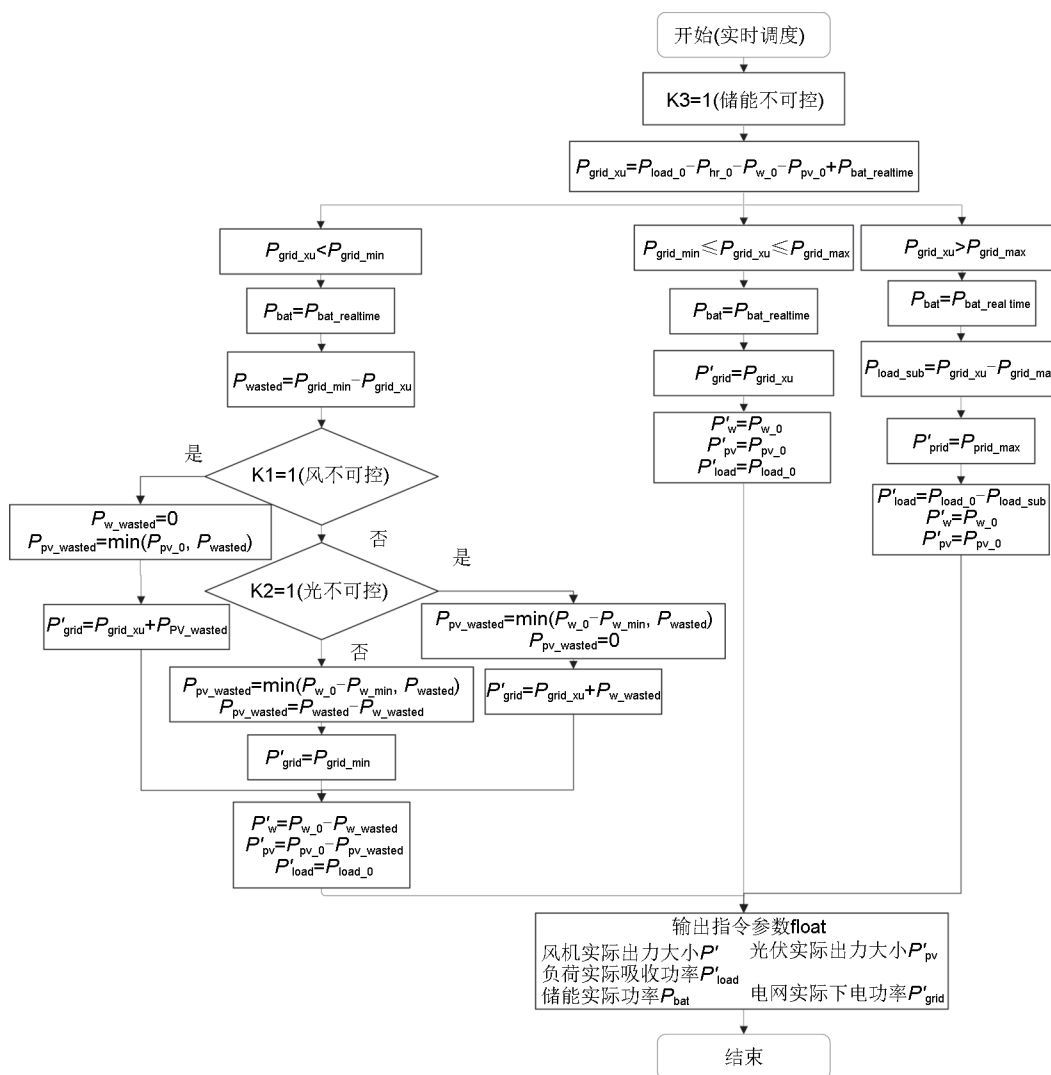


图 B4 储能不可控实时框图

Fig. B4 Real-time block diagram for undispachable energy storage