

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.011

考虑高耗能企业车间柔性排程的低碳工业园区双层优化调度

陈健¹, 唐志远¹, 譙傲², 刘俊勇¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 成都信息工程大学物流学院, 四川 成都 610103)

摘要:“双碳”目标下, 工业园区作为工业系统最重要、最广泛的载体, 其低碳转型势在必行。在此背景下, 文中建立一种考虑高耗能企业车间柔性排程的低碳工业园区双层优化调度模型。模型充分挖掘高耗能企业的灵活调节能力, 通过灵活调整高耗能企业的生产方案获取园区的最优低碳调度计划, 实现工业园区和高耗能企业的协调运行。首先, 工业园区作为上层计及碳交易和绿证交易成本, 以总运行成本最小为目标建立优化调度模型。然后, 下层针对园区中的高耗能企业流水车间柔性排程问题, 以最小化最大加工时间和生产成本为目标进行优化。园区运行层将由企业排程节约的部分成本作为补贴, 上下层不断协调调度方案从而达到最优目标。最后, 通过算例验证了文中所提出模型的可行性和有效性。结果表明所提方法在降低企业的生产成本、提升生产效率的同时, 可有效促进园区负荷削峰填谷, 实现工业园区的低碳经济运行。

关键词: 工业园区; 高耗能企业; 柔性排程; 碳交易; 绿证交易; 优化调度

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0112-10

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 中国正处于能源结构转型的关键阶段, 经济的可持续发展对能源结构的调整提出了迫切要求^[1-4]。工业园区是产业集聚发展的核心单元, 已成为中国经济增长的引擎, 但同时也是重要的能耗单元和碳排放大户, 对工业园区中多能资源的合理利用是实现科学精准碳减排、践行碳中和的重要途径^[5-6]。

目前已有大量关于工业园区电力调度的研究^[7-14]。文献[7]建立电、气、热、冷多能耦合的工业园区综合能源系统, 利用生命周期评价方法对园区内不同能源链的碳排放进行计算, 基于碳交易机制对工业园区进行低碳经济优化调度。文献[8]以沿海地区中需要大量蒸汽的工厂为研究对象, 建立含高温蒸汽热泵的工业园区优化调度模型, 在促进海上风电消纳的同时满足园区内的蒸汽负荷需求。文献[9]将高耗能企业作为可控负荷进行中断或转移, 在满足电网层调度计划的基础上, 以工业园区调度收益最大化为目标进行优化调度。然而, 上述文献将工业园区中的企业当成单一可控的负荷, 并未考虑工业生产过程中的具体流程和细节, 难以反映企业实际的生产情况, 所提负荷调整方案在实际工业生产中很难实现。

为解决上述问题, 文中创新性地将高耗能企业

作为灵活性可调控资源, 通过调整其车间流水调度方案进行工业园区的能量管理和优化调度。实际上, 冶金、化工、制药等高耗能流程工业中大部分采用流水作业, 大多数类似的加工生产过程可抽象为柔性流水车间排程问题 (flexible flow shop scheduling problem, FFSP), 如钢铁生产企业的炼钢、精炼、连钢、轧制^[15], 铝工业生产中采矿、配矿、氧化铝生产、铝电解、铝加工等几个工序^[16]。传统柔性排程只注重生产本身能耗和总加工时长, 并未关注其灵活性在新能源消纳、园区能量管理等方面的应用。实际上, 高耗能企业具有非常大的调控潜力, 其流水车间可操作性强、消耗能源大, 可以提供较大的可调度容量。企业通过合理的车间调度安排能够有效降低加工的总时间以及耗能, 从而提升生产效率。同时, 合理的 FFSP 调度方案能够降低生产成本, 分时电价的变化为制造企业提供了节约成本的可能^[17]。高耗能企业车间在用电高峰期使用能耗低的机器进行加工, 在非用电高峰期可以选择加工能耗高的工序, 从而充分利用资源和降低成本, 且具有一定的削峰填谷作用。不同的车间加工方案不仅影响企业的生产成本和时间, 也会改变园区的最优调度结果, 工业园区与高耗能企业流水车间互相协调各自的调度方案, 从而使双方获取更高收益, 降低运行成本, 促进园区的经济运行。

此外, 随着碳市场的影响扩大, 为促进能源可持续发展、降低温室气体排放, 引入相关政策进行积极引导和约束是非常有必要的^[18]。可再生能源

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2023YFSY0033)

配额制(renewable portfolio standard, RPS)和碳交易政策都旨在减少碳排放,刺激可再生能源发电产业的发展^[19-20]。绿证交易(tradable green certificate, TGC)机制是保障 RPS 成功实施的辅助工具,如文献[21]结合 TGC 和碳交易机制提出了一个电热耦合的园区低碳规划模型,通过仿真验证了碳交易和 TGC 对园区低碳转型的促进作用。文献[22]提出一个考虑碳交易机制和电动汽车充电负荷调节比例的工业园区模型,并对碳交易机制进行敏感性分析。但是,上述文献并未考虑工业园区企业生产过程中设备加工所产生的碳排放,通过对不同加工过程的附加碳排放量进行核算,能够更精准地实现园区节能减排。

针对上述问题,文中针对存在高耗能企业的工业园区,结合碳交易及 TGC 机制建立一个双层优化调度模型。首先,文中构建一个电、气、热多能耦合的工业园区系统模型。然后,上层以园区运行成本最低为目标建立工业园区低碳经济调度模型,下层高耗能企业以最小化生产成本和最大加工时间为目标进行 FFSP 求解,使用改进遗传算法进行上下层的迭代计算获取工业园区和高耗能企业的最优运行方案。最后,通过算例分析不同情况下的高耗能企业排程结果,以及碳交易和 TGC 机制对工业园区碳减排的作用。

1 工业园区运行架构

1.1 工业园区系统结构

文中所研究的电、气、热多能耦合工业园区系统结构如图 1 所示。工业园区中的供能设备包含热电联产(combined heating and power, CHP)机组、电锅炉、燃气锅炉、光伏机组、蓄电池和蓄热槽,负荷有热负荷、电负荷以及高耗能企业。工业园区与配电网、配气网相接,可以从上级电网和气网购入电能和天然气,也可以将剩余电量出售给电网。

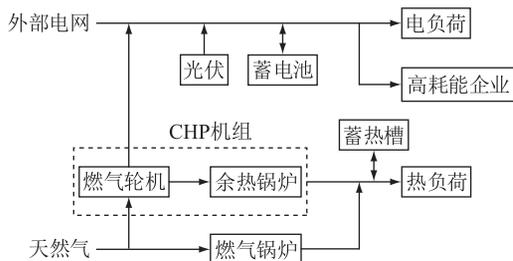


图 1 工业园区系统结构

Fig.1 Framework of the industrial park

1.2 协调运行策略

工业园区与高耗能企业的协调运行策略如图 2

所示, m 为高耗能企业生产工序总数。高耗能企业流水车间的 FFSP 结果会影响工业园区中的供能设备出力,园区层以系统运行成本最低为目标进行优化调度。目前,为改变用户的用电行为,电网一般需要给予用户一定的补偿或价格激励从而促使用户参与其调度安排^[23]。文中,园区层将由高耗能企业不同排程方案所降低的运行成本中的一部分补贴给企业,从而激励高耗能企业调节自身的排程方案参与园区能量管理。通过迭代交互,高耗能企业和园区不断协调自身的调度计划,直至双方都达到优化目标,实现企业和工业园区协调运行。

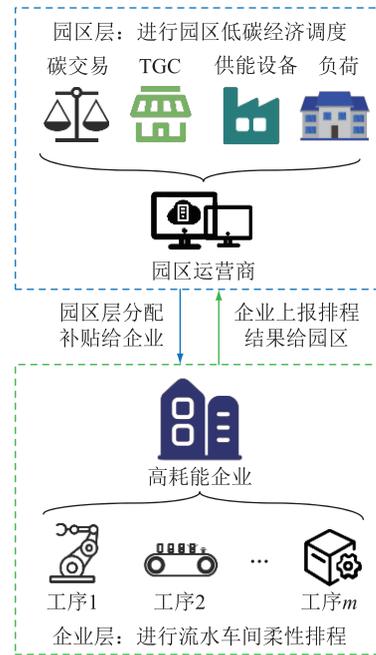


图 2 工业园区协调运行策略

Fig.2 Coordinated operation strategy for the industrial park

2 工业园区双层模型

2.1 园区层

2.1.1 目标函数

作为上层管理者的园区层的调度目标是实现园区总运行成本最低,考虑碳交易和可再生能源参与 TGC 下的工业园区目标函数^[24]如式(1)一式(3)所示。

$$\min f_1 = C_{op} + C_{CO_2} + C_{ge} + C_{om} \quad (1)$$

$$C_{op} = \sum_{t=1}^T (\delta_e(t) P_{buy}(t) - \delta_{e,sell} P_{sell}(t) + \delta_g V_{g,buy}(t)) \quad (2)$$

$$C_{om} = \sum_{z=1}^H \sum_{t=1}^T \varphi_z U_z(t) \quad (3)$$

式中: C_{op} 为园区运行成本; C_{CO_2} 为碳交易成本; C_{ge}

为 TGC 成本; C_{om} 为机组的运维成本; T 为调度周期; $\delta_e(t)$ 为 t 时段实时电价; $P_{buy}(t)$ 为 t 时段园区购电量; $\delta_{e,sell}$ 为售电价格; $P_{sell}(t)$ 为 t 时段售电量; δ_g 为天然气价格; $V_{g,buy}(t)$ 为 t 时段购气量; H 为供能设备总数; φ_z 为设备 z 的单位运维成本; $U_z(t)$ 为设备 z 在 t 时段的供电/热功率。文中忽略机组的启停成本。

(1) 碳交易机制:为限制工业园区碳排放,文中引入碳交易机制。工业园区在运行过程中有大量的温室气体排放,包括部分供能设备、外购电力及高耗能企业生产设备运行所产生的碳排放,园区系统的碳排放量计算如式(4)一式(8)所示。

$$U_C = U_B + U_G + U_E \quad (4)$$

$$U_B = \sum_{t=1}^T (a_1 P_{buy}(t) + b_1) \quad (5)$$

$$U_G = \sum_{t=1}^T (a_2 P_{g,ctb}^2(t) + b_2 P_{g,ctb}(t)) \quad (6)$$

$$P_{g,ctb}(t) = P_{CHP}(t) + H_{CHP}(t) + H_{GB}(t) \quad (7)$$

$$U_E = \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T \xi_j P_{j,ws}(t) \quad (8)$$

式中: U_C 为园区总碳排放量; U_B 、 U_G 、 U_E 分别为工业园区外购电力、供能设备和高耗能企业生产设备所产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为购电量碳排放特征系数; a_2 、 b_2 为耗气设备碳排放特征系数; $P_{g,ctb}(t)$ 为 t 时段耗气设备等效天然气利用功率和; $P_{CHP}(t)$ 、 $H_{CHP}(t)$ 分别为 t 时段 CHP 的输出电、热功率; $H_{GB}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉的产热功率; ξ_j 为工序 j 的附加碳排放系数; $P_{j,ws}(t)$ 为工序 j 在 t 时段的耗电量。

目前,碳交易市场的主要碳排放初始配额方法为无偿配额,具体计算如式(9)所示。

$$U_p = \sum_{t=1}^T (\lambda_h H_{GB}(t) + \lambda_h H_{CHP}(t) + \lambda_e P_{CHP}(t)) \quad (9)$$

式中: U_p 为初始碳配额; λ_h 、 λ_e 分别为热功率和电功率的碳配额系数。

园区参与碳交易市场的交易额是由实际碳排放量与碳排放权配额的差值决定的,故调度周期内工业园区的碳交易成本计算如式(10)所示。

$$C_{CO_2} = \varepsilon_c (U_C - U_p) \quad (10)$$

式中: ε_c 为碳交易价格系数。

(2) TGC:政府通过 TGC 机制实施 RPS,通过规定用电量中新能源电量占比最低,倒逼售电企业和电力用户出售或使用一定量的绿色电力,激发消费侧绿色用电活力^[24-25]。一方面,政府向新能源发电企业发放绿证,使其除参与电力市场外,也可以通

过出售绿证获得收益;另一方面,不满足用电中绿电配额要求的企业或用户需要从 TGC 市场购入绿证^[26]。故工业园区中参与 TGC 的成本如式(11)所示。

$$C_{ge} = \delta_{ge} \sum_{t=1}^T (\varepsilon_{ge} P_{Load}(t) + \varepsilon_{ge} P_{ws}(t) - P_{pv}(t)) \quad (11)$$

式中: δ_{ge} 为绿证市场价格; ε_{ge} 为 RPS 下园区绿证配额指标系数; $P_{Load}(t)$ 为 t 时段工业园区内除高耗能企业外的电负荷; $P_{ws}(t)$ 为 t 时段高耗能企业消耗的电量; $P_{pv}(t)$ 为 t 时段光伏机组出力。

2.1.2 运行约束

(1) 功率平衡约束,工业园区运行过程中须满足电、热、气平衡。

$$P_{buy}(t) + P_{pv}(t) + P_{CHP}(t) + P_{ESd}(t) = P_{sell}(t) + P_{ESc}(t) + P_{Load}(t) + P_{ws}(t) \quad (12)$$

$$H_{CHP}(t) + H_{GB}(t) + H_{HSd}(t) = H_{HSc}(t) + H_{Load}(t) \quad (13)$$

$$V_{g,buy}(t) L_{gas} = M_{GT}(t) + M_{GB}(t) \quad (14)$$

式中: $P_{ESc}(t)$ 、 $P_{ESd}(t)$ 分别为 t 时段蓄电池的充、放电功率; $H_{HSc}(t)$ 、 $H_{HSd}(t)$ 分别为 t 时段蓄热槽的充、放热功率; $H_{Load}(t)$ 为 t 时段园区的热负荷; L_{gas} 为天然气热值; $M_{GT}(t)$ 、 $M_{GB}(t)$ 分别为 t 时段燃气轮机和燃气锅炉消耗的天然气功率(根据天然气热值转换成功率)。

(2) CHP 机组,包括燃气轮机和余热锅炉,通过燃气轮机运行发电,发电产生的余热通过余热锅炉进行回收利用向用户供热。

$$P_{CHP}(t) = \theta_{GT} M_{GT}(t) \quad (15)$$

$$H_{GT}(t) = P_{CHP}(t) (1 - \theta_{GT} - \theta_{loss}) / \theta_{GT} \quad (16)$$

$$H_{CHP}(t) = \theta_{rec} H_{GT}(t) \quad (17)$$

$$P_{CHP}(t) \leq P_{CHP}^{max} \quad (18)$$

式中: θ_{GT} 、 θ_{loss} 分别为燃气轮机的发电效率和热损失效率; $H_{GT}(t)$ 为 t 时段燃气轮机产生的热功率; θ_{rec} 为余热锅炉的热回收效率; P_{CHP}^{max} 为 CHP 机组的最大发电功率。

(3) 储能设备,园区中的蓄电池和蓄热槽运行应满足以下约束。

$$S_{ES}(t) = S_{ES}(t-1) + \eta_{ESc} P_{ESc}(t) - P_{ESd}(t) / \eta_{ESd} \quad (19)$$

$$S_{ES}^{min} \leq S_{ES}(t) \leq S_{ES}^{max} \quad (20)$$

$$S_{ES}(0) = S_{ES}(24) \quad (21)$$

$$\begin{cases} P_{ESc}(t) \leq P_{ES}^{max} \\ P_{ESd}(t) \leq P_{ES}^{max} \end{cases} \quad (22)$$

$$S_{\text{HS}}(t) = S_{\text{HS}}(t-1) + \eta_{\text{HSc}} P_{\text{HSc}}(t) - P_{\text{HSd}}(t)/\eta_{\text{HSd}} \quad (23)$$

$$S_{\text{HS}}^{\min} \leq S_{\text{HS}}(t) \leq S_{\text{HS}}^{\max} \quad (24)$$

$$S_{\text{HS}}(0) = S_{\text{HS}}(24) \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_{\text{HSc}}(t) \leq P_{\text{HS}}^{\max} \\ P_{\text{HSd}}(t) \leq P_{\text{HS}}^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $S_{\text{ES}}(t)$ 、 $S_{\text{HS}}(t)$ 分别为 t 时段蓄电池和蓄热槽的储能容量; η_{ESc} 、 η_{ESd} 分别为蓄电池的充、放电效率; η_{HSc} 、 η_{HSd} 分别为蓄热槽的充、放热效率; S_{ES}^{\max} 、 S_{ES}^{\min} 分别为蓄电池储电容量上、下限; S_{HS}^{\max} 、 S_{HS}^{\min} 分别为蓄热槽容量上、下限; P_{ES}^{\max} 、 P_{HS}^{\max} 分别为蓄电池和蓄热槽的最大功率。

(4) 燃气锅炉,其约束如式(27)、式(28)所示。

$$H_{\text{GB}}(t) = \theta_{\text{GB}} M_{\text{GB}}(t) \quad (27)$$

$$M_{\text{GB}}^{\min} \leq M_{\text{GB}}(t) \leq M_{\text{GB}}^{\max} \quad (28)$$

式中: θ_{GB} 为燃气锅炉的能量转换效率; M_{GB}^{\max} 、 M_{GB}^{\min} 分别为耗气功率上、下限。

(5) 光伏出力约束,工业园区中的光伏实际出力不超过其预测值。

$$P_{\text{pv}}(t) \leq P_{\text{f,pv}}(t) \quad (29)$$

式中: $P_{\text{f,pv}}(t)$ 为 t 时段光伏出力的预测值。

2.1.3 削峰填谷指标

为进一步验证文中所提模型的有效性,对不同场景下工业园区的削峰填谷指标进行计算。削峰填谷指标^[27]采用相邻时段内电负荷变化率的平方和进行表征,该值越小,表示削减系统负荷峰谷差的效果越好,其计算如式(30)所示。

$$F_{\text{EL}} = \frac{1}{T} \sum_{t=2}^T (P_{\text{all,L}}(t) - P_{\text{all,L}}(t-1))^2 \quad (30)$$

式中: $P_{\text{all,L}}(t)$ 为 t 时段的总电负荷。

2.2 企业层

企业的 FFSP 是一类典型的组合优化问题,一般可以描述为: n 个工件有 m 道加工工序,每道工序有 M_j 台不相同的并行机器,且每台机器加工时间和单位时间能耗有所不同。由于工业机器和电器在加工过程中通常不能完全关闭,即使机器处于待机模式也会消耗电能,所以每台机器的能耗由加工能耗和待机能耗两部分组成^[28]。参考文献[29],文中设置的高耗能企业运行目标是减少最大加工时间和降低生产成本,企业的目标函数及车间运行的约束条件为:

$$\min f_2 = \max C_{ijk} + [\delta_e(t) P_{\text{ws}}(t) - \zeta(C_0 - C_{\text{op}})] \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^{M_j} N_{jk} = n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (32)$$

$$C_{ijk} x_{ijk} \leq S_{i(j+1)k} x_{i(j+1)k} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (33)$$

$$C_{ijk} x_{ijk} = S_{ijk} x_{ijk} + P_{ijk} x_{ijk} \quad (34)$$

$$C_{\lambda jk} x_{\lambda jk} \leq S_{(\lambda+1)jk} x_{(\lambda+1)jk} \quad (35)$$

$$\sum_{k=1}^{M_j} x_{ijk} = 1 \quad (36)$$

$$P_{\text{ws}}(t) = \sum_{k=1}^{M_j} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ijk} P_{ijk} y_{ijkt} + \sum_{k=1}^{M_j} \sum_{j=1}^m K_{jk} I_{jk} z_{jkt} \quad (37)$$

式中: C_{ijk} 为工件 i 在工序 j 的机器 k 上的结束加工时刻; C_0 为工业园区初始运行成本; ζ 为补贴系数; M_j 为第 j 道工序的可用机器数; N_{jk} 为在工序 j 的机器 k 上加工的工件数量; n 为加工工件数; x_{ijk} 取值为 0 或 1, 1 表示工件 i 安排在工序 j 的机器 k 上加工; S_{ijk} 为工件 i 在工序 j 的机器 k 上的开始加工时刻; P_{ijk} 为工件 i 在工序 j 的机器 k 上的加工时间; E_{ijk} 为工件 i 在工序 j 的机器 k 上的单位时间加工能耗; K_{jk} 为工序 j 的机器 k 的单位时间待机能耗; λ 、 $\lambda+1$ 为同一台机器上相邻的两个加工工件; y_{ijkt} 取值为 0 或 1, 1 表示工件 i 在 t 时段内安排在工序 j 的机器 k 上加工; I_{jk} 为工序 j 的机器 k 的待机时间; z_{jkt} 取值为 0 或 1, 1 表示 t 时段无工件安排在工序 j 的机器 k 上加工。

式(31)表示目标函数;式(32)表示分配给每道工序所有可用机器的工件数之和为 n ;式(33)表示每个工件下一阶段的作业必须在上一阶段完成后才能开始;式(34)表示任何工件的完成时间取决于其在某机器上的处理时间和开始时间;式(35)表示每台机器在同一时间仅能处理一个工件,即工序 j 的机器 k 上加工的第 $\lambda+1$ 个工件的开始加工时间,必须大于或等于该机器上一个工件的加工完成时间;式(36)表示每个工件每道工序的加工只能分配给一台机器;式(37)表示中高耗能企业的总耗电量由各加工机器的能耗与待机机器的能耗相加所得。

由于最大加工时间和生产成本的量纲不同,参考文献[30]所使用的方法,对最大加工时间和生产成本函数进行标么化处理。

用 v_1 和 v_2 指代目标函数中的 2 个目标:

$$v_1 = \max C_{ijk} \quad (38)$$

$$v_2 = \delta_e(t) P_{\text{ws}}(t) - \zeta(C_0 - C_{\text{op}}) \quad (39)$$

对 v_1 和 v_2 进行标么化处理,转化为 V_1 和 V_2 。

$$V_1 = \frac{v_1 - v_{1,\max}}{v_{1,\max} - v_{1,\min}} \quad (40)$$

$$V_2 = \frac{v_2 - v_{2,\max}}{v_{2,\max} - v_{2,\min}} \quad (41)$$

式中: $v_{1,\max}$ 、 $v_{1,\min}$ 分别为 v_1 取得的最大值和最小

值; $v_{2,max}$ 、 $v_{2,min}$ 分别为 v_2 取得的最大值和最小值。

通过上述方法将原目标函数式(31)转换为:

$$\min f_2 = \mu V_1 + (1 - \mu) V_2 \quad (42)$$

式中: μ 为最大加工时间权重系数,取值区间为 $[0, 1]$,其值越高表示目标函数中最大加工时间的权重越高,最大加工时间对 FFSP 排程结果的影响越大。文中选取 $\mu=1$,即生产成本权重为 0 情况下的园区运行成本作为 C_0 。

2.3 模型求解

由于需要进行工件工序的复杂排列组合,使用商业求解器如 CPLEX 进行计算耗时较长,大多使用启发式算法进行 FFSP 的求解^[31]。其中,改进遗传算法具有较强的鲁棒性和全局寻优能力,适合较复杂的调度问题^[32],故文中参考文献[33]采用改进遗传算法进行所提模型的计算。具体计算流程图如图3所示。图中, u 为迭代次数; g 为算法的最大迭代次数。

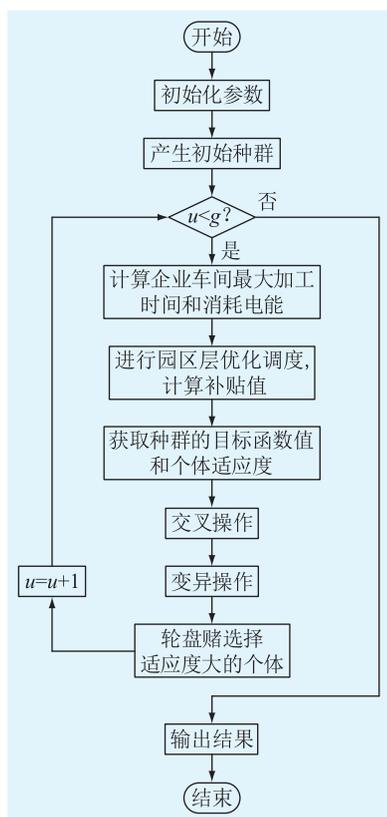


图3 模型求解流程

Fig.3 Model solving procedure

首先,产生企业层的初始种群,给出工件工序的分配情况,从而计算出高耗能企业的最大加工时间、生产成本以及消耗电能。然后,在车间排程的基础上园区运行层进行优化调度,由式(1)一式(29)可知园区层的优化调度问题是一个二次约束规划模型,可直接使用 CPLEX 求解器进行计算。园

区层将节省的部分成本作为补贴返回给企业,从而获取种群的目标函数值和个体适应度。最后,通过交叉、变异和选择操作,不断迭代直至获取最优种群,输出工业园区和高耗能企业的调度方案。

3 算例分析

3.1 参数设置

为验证文中所提考虑流水车间的工业园区低碳优化调度模型的合理性,文中以一个典型工业园区为例进行仿真分析。文中所研究的工业园区中有一个汽车发动机生产企业,参考文献[34]中的实例,加工 5 批工件,每批工件都有 3 道加工工序,加工机器的实际加工时间如表 1 所示。各机器单位时间加工能耗如表 2 所示,机器的单位时间待机能耗如表 3 所示。3 道工序的附加碳排放系数分别为 0.236、0.185、0.258 kg/(kW·h);园区给高耗能企业的补贴系数 ζ 为 30%。企业计划加工时间和园区调度周期为 1 d。图 4 为工业园区的光伏出力和除高耗能企业外的电、热负荷预测值。分时电价如表 4 所示,园区内相关系统参数如表 5 所示,其中碳排放参数参考文献[35]。改进遗传算法具体参数设置如下:种群容量 $P_s = 100$;最大迭代次数 $g = 200$;交叉、变异的概率分别为 $P_c = 0.9$ 、 $P_m = 0.2$ 。由于改进遗传算法具有不确定性,处理中为了尽量减少小概率结果的影响,可以进行多次实验取平均值^[28]。文中每组实验进行 5 次,选择其中目标函数值的中位数方案作为实验结果。

表 1 加工时间

批次	工序 1			工序 2		工序 3		
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈
1	2	2	3	4	5	2	3	2
2	6	5	4	4	2	3	4	5
3	4	3	4	6	5	3	6	5
4	5	2	4	5	3	4	7	6
5	6	5	4	5	4	4	5	7

表 2 机器单位时间加工能耗

批次	工序1			工序 2		工序 3		
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈
1	480	530	420	500	400	430	340	400
2	380	400	450	450	700	600	480	350
3	550	680	500	380	470	750	470	520
4	400	700	480	420	660	680	320	470
5	350	420	500	450	550	550	480	400

表3 机器单位时间待机能耗

Table 3 Standby energy consumption per unit time of the machine

机器	待机能耗/(kW·h)	机器	待机能耗/(kW·h)
Q ₁	20	Q ₅	20
Q ₂	15	Q ₆	10
Q ₃	10	Q ₇	20
Q ₄	15	Q ₈	15

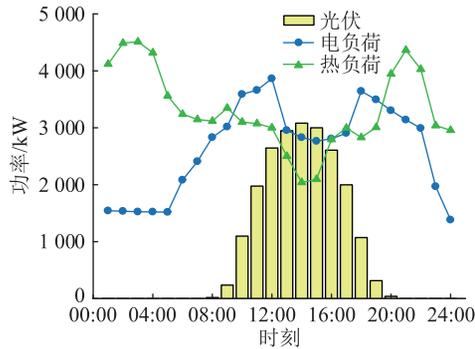


图4 光伏出力 and 除企业外的电、热负荷预测值
Fig.4 Forecasting values of photovoltaic output, electric and heat loads

表4 分时电价

Table 4 Time-of-use electricity price

价格分类	时段	价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]
购电价格	00:00—06:00、 23:00—24:00	0.50
	06:00—13:00、 19:00—23:00	1.21
	13:00—19:00	0.73
售电价格	00:00—24:00	0.45

表5 工业园区相关参数

Table 5 Related parameters of the industrial park

参数	取值	参数	取值
$\delta_g / (\text{元} \cdot \text{m}^{-1})$	27	θ_{CB}	0.9
θ_{CT}	0.35	θ_{loss}	0.15
$P_{CHP}^{max} / \text{kW}$	2 000	M_{CB}^{max} / kW	2 200
$S_{ES}^{min} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	400	$S_{HS}^{min} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	300
$S_{ES}^{max} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	2 000	$S_{HS}^{max} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	1 500
P_{ES}^{max} / kW	600	P_{HS}^{max} / kW	450
δ_{ge}	0.15	ε_{ge}	18%
a_1	1.08	a_2	0.000 8
b_1	0.02	b_2	0.04
$\varepsilon_c / (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.252	$\lambda_h, \lambda_c / [\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.648

3.2 调度结果分析

两种算法在 $\mu = 0.5$ 情况下的计算结果对比如表6所示。文中所提改进遗传算法与 CPLEX 结合的方法求解模型耗时约为 8.62 s, 对比使用 CPLEX

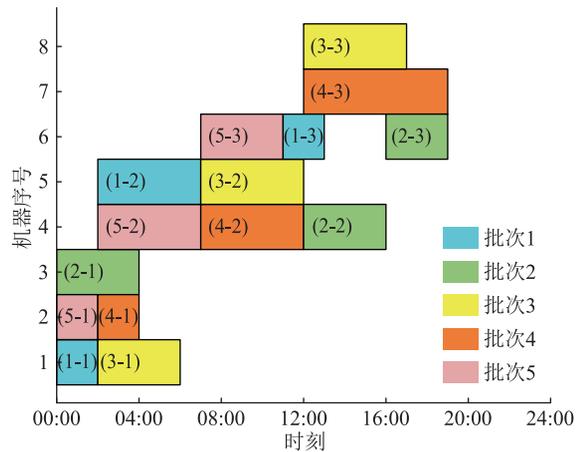
求解双层模型需要 58.53 s, 具有很高的求解效率, 两种算法的计算结果也较接近。

表6 不同算法计算结果对比

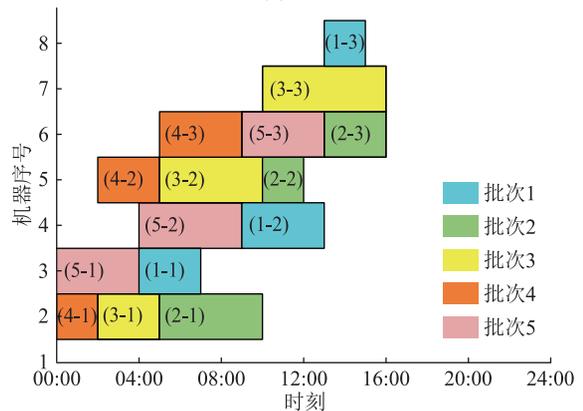
Table 6 Comparison of the results of different algorithms

算法	计算时间/s	企业加工 时间/h	园区运行 成本/元
改进遗传算法+CPLEX	8.62	19	84 711.3
CPLEX	58.53	19	85 238.7

在 $\mu = 0.5$ 和 $\mu = 1$ 两种情况下的高耗能企业 FFSP 结果甘特图如图5所示, 在图中每个方格为某批工件的某个工序安排, 括号中前面的数字代表批次, 后面的数字代表工序, 如图5(a)所示机器1上最先开始的是批次1工件的工序1, 排程安排中最后结束的是批次2和批次4工件的工序3。



(a) $\mu=0.5$



(b) $\mu=1$

图5 FFSP 结果甘特图

Fig.5 Gantt charts of FFSP results

从图5中可以看出, $\mu = 0.5$ 即优化目标中最大加工时间和用电成本的权重相同情况下加工时间为 19 h, 而 $\mu = 1$ 下加工时间为 16 h。在 $\mu = 1$ 时, 高耗能企业的排程只考虑最小加工时间, 故选择的排程方案加工时间最短, 选择的加工机器用时短但耗能大。如工件1的工序2, 在 $\mu = 1$ 的方案中 09:00

开始在机器 4 上加工 4 h,而在 $\mu = 0.5$ 的方案中 02:00 开始在机器 5 上加工 5 h。在 $\mu = 0.5$ 时,考虑上经济性的指标,对比 $\mu = 1$ 情况下许多工件的加工顺序发生了变化,并且有的工序选择了耗时更长的机器,在不影响交工的前提下降低了生产成本。

在 $\mu = 0.5$ 的 FFSP 方案基础上园区电、热调度结果如图 6 所示。从图中可以看出,工业园区中的热负荷由 CHP 机组和燃气锅炉提供。由于 CHP 机组能够同时提供热功率和电功率,在电能和热能需求都较高的时段,CHP 机组是供能的重要单元。上午,蓄电池在电价低的 00:00—02:00 和 05:00—06:00 时段进行充电,在高电价的 07:00—10:00 时段进行放电;随即蓄电池在 13:00—16:00 进行充电,并在晚高峰时段进行放电。蓄电池的充放电行为满足园区内的电负荷需求,有效地降低了园区的运行成本。从 08:00 开始,随着光伏出力的增加,工业园区的购电量随之降低;在光伏出力的高峰期 12:00—16:00 内,园区的外购电量为 0,并且在满足热负荷的同时有多余电量供给蓄电池充电。

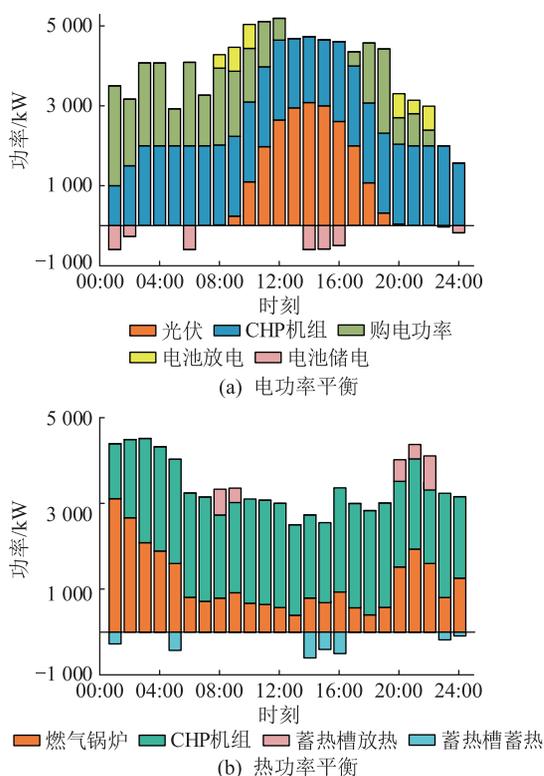


图 6 工业园区的电、热调度结果

Fig.6 Results of electricity and heat dispatching in the industrial park

不同权重下的园区调度结果如表 7 所示,从表中可以看出,随着加工时间权重的降低,企业加工时间增加,但是工业园区运行成本大幅降低,高耗能企业获得了更多的补贴从而有效减少了生产成

本。同时,以 $\mu = 1$ 情况下的削峰填谷指标为基准,在 $\mu = 0.2$ 时园区削峰填谷指标最低,高耗能企业的流水车间排程所提供的削峰填谷效果最好。不同的企业 FFSP 方案能够为园区提供不同的削峰填谷效果,合理选择加工机器能够削减园区负荷的峰谷差。园区可以通过选择不同的加工时间权重进行企业流水车间加工调整,合适的车间调度方案能够提高企业生产效率、降低生产成本,同时削减园区负荷峰谷差,降低园区总运行成本,提升工业园区运行经济性。

表 7 不同目标权重下高耗能企业和工业园区调度结果

Table 7 Dispatch results of high-energy-consuming enterprise and industrial park under different target weights

μ	加工时间/h	生产成本/元	企业获得补贴/元	园区运行成本/元	园区削峰填谷	
					指标/ [(kW) ² ·h]	对比/ %
1	16	25 682.4	0	89 095.5	291 147.9	
0.7	17	23 062.0	799.6	86 430.3	258 390.7	-11.25
0.5	19	21 003.5	1 315.3	84 711.3	236 972.4	-18.61
0.2	21	20 332.3	1 397.2	84 438.1	219 577.3	-24.58
0	22	18 485.2	1 875.1	82 845.0	277 675.5	-4.63

3.3 工业园区碳排放分析

在 $\mu = 0.5$ 时考虑碳交易和 TGC 前后工业园区的运行成本和碳排放量,如表 8 所示。

表 8 考虑碳交易和 TGC 前后的工业园区运行结果

Table 8 The results of the industrial park operation before and after considering carbon trading and TGC

是否考虑碳交易	是否考虑 TGC	总运行成本/元	高耗能企业附加碳排放/kg	总碳排放量/kg
否	否	78 361.5	6 583.2	86 504.3
是	否	85 414.7	6 253.6	77 583.0
否	是	77 258.0	6 479.3	85 421.1
是	是	84 711.3	6 147.7	76 690.4

从表 8 中可以看出,单独引入 TGC 机制后,园区内富余的绿电配额随绿证出售,在获得收益的同时降低了园区碳排放;引入碳交易和 TGC 机制后,工业园区的总运行成本增加了 8.10%,高耗能企业生产所产生的碳排放量减少了 6.62%,园区总碳排放量降低了 11.35%。增加碳交易和 TGC 机制后,由于企业获得补贴与园区总成本相关,故高耗能企业的车间排程结果也会受其碳排放量影响;园区内单位供能碳排放更低的 CHP 机组承担了更多的供热功率,其输出电功率也随之上升,蓄电池充放电行为频率上升,降低了工业园区内的总碳排放量。调度结果对比分析表明,文中所提的基于碳交易和 TGC 的工业园区优化调度模型提高了园区节能减

排的积极性,促进了园区能源的充分利用,实现了园区低碳运行。

4 结论

文中针对存在高耗能企业的工业园区,基于对企业精细的车间调度安排,提出了一种考虑其柔性流水车间的低碳工业园区双层优化调度。以存在一个汽车发动机生产企业的工业园区为例进行研究分析,得到的结论如下:

(1) 所提出的模型能够在同时满足企业和园区运行要求的条件下给出低碳经济的调度方案,对园区内多能资源合理利用,促使高耗能企业和工业园区协调运行;

(2) 考虑高耗能企业的精确车间安排有助于提高企业生产效率、降低企业的用能成本,在工业园区中起到一定的削峰填谷作用,且提升了园区运行的经济性;

(3) 通过工业园区碳排放分析,碳交易和 TGC 机制的引入,在增加一部分成本的有效降低园区内的碳排放量,促进了工业园区碳中和发展。

文中尚未考虑可再生能源出力和电、热负荷的不确定性,将在未来的工作中研究考虑源、荷不确定性的工业园区日前与实时相结合的优化调度,为企业和园区提供更好的运行策略。

参考文献:

- [1] 胡博,孙铠彬,邵常政,等. 面向全过程碳足迹的园区综合能源系统碳感知与优化方法[J]. 高电压技术,2022,48(7):2495-2504.
HU Bo, SUN Kaibin, SHAO Changzheng, et al. Carbon perception and optimization method of the integrated community energy system oriented to the whole process carbon footprint[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2495-2504.
- [2] 毕锐,王孝淦,袁华凯,等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(12):122-132.
BI Rui, WANG Xiaogan, YUAN Huakai, et al. Robust dispatch of a hydrogen integrated energy system considering double side response and carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 122-132.
- [3] 赵北涛,刘光宇,韩东升. 考虑氢能耦合及阶梯碳交易的综合能源系统多时间尺度低碳优化调度[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(3):35-46.
ZHAO Beitao, LIU Guangyu, HAN Dongsheng. Multi-time-scale low-carbon optimal scheduling of integrated energy systems considering hydrogen energy coupling and ladder carbon trading [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 35-46.
- [4] 罗昊,王长江,王建国. 面向数字孪生的电气综合能源系统可用输电能力计算[J]. 电力建设,2023,44(11):113-127.
LUO Hao, WANG Changjiang, WANG Jianguo. Calculation of available transmission capacity of electricity-gas integrated energy system for digital twin[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 113-127.
- [5] FENG J C, YAN J Y, YU Z, et al. Case study of an industrial park toward zero carbon emission[J]. Applied Energy, 2018, 209:65-78.
- [6] 张亮,李章溢,裴玮,等. 基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制[J]. 电力工程技术,2021(3):106-113.
ZHANG Liang, LI Zhangyi, PEI Wei, et al. Tie-line power control method for an industrial park based on integrated demand response [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021 (3): 106-113.
- [7] 李嘉祺,陈艳波,陈来军,等. 工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J]. 高电压技术,2022,48(8):3190-3200.
LI Jiaqi, CHEN Yanbo, CHEN Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3190-3200.
- [8] 唐成虹,王靖韬,曾博,等. 计及含蒸汽热泵工业园区能量品位转换的综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化,2023,47(2):191-199.
TANG Chenghong, WANG Jingtao, ZENG Bo, et al. Optimal dispatch for integrated energy considering energy grade conversion in industrial park with steam heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 191-199.
- [9] 智勇,郭帅,何欣,等. 面向智慧工业园区的双层优化调度模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(1):31-38,101.
ZHI Yong, GUO Shuai, HE Xin, et al. Bilevel optimal dispatch model for smart industry district [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 31-38, 101.
- [10] 张淑婷,陆海,林小杰,等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术,2021,47(1):93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.
- [11] GU H F, LI Y, YU J, et al. Bi-level optimal low-carbon economic dispatch for an industrial park with consideration of multi-energy price incentives[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114276.
- [12] 张磊,郑丹,卢天林,等. 考虑工业园区 CHP 机组动态约束的低碳经济调度[J]. 电力建设,2022,43(12):122-130.
ZHANG Lei, ZHENG Dan, LU Tianlin, et al. Low-carbon economic dispatching in industrial park considering dynamic constraints of CHP units [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 122-130.
- [13] 梁硕,王艳松. 基于改进云物元模型的工业园区综合能源系统规划方案评价[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(9):165-176.
LIANG Shuo, WANG Yansong. Evaluation of an integrated energy system planning scheme for an industrial park based on an improved cloud matter-element model[J]. Power System Pro-

- tection and Control, 2023, 51(9):165-176.
- [14] 孙诗洁,叶承晋,郭超,等. 考虑工业用户生产特性的精细化用电管控模型及实证研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6):44-54.
SUN Shijie, YE Chengjin, GUO Chao, et al. Refined electricity consumption management and control model considering the production characteristics of industrial users and its empirical study[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6):44-54.
- [15] 杜利珍,王震,柯善富,等. 混合流水车间调度问题的果蝇优化算法求解[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12):1480-1485.
DU Lizhen, WANG Zhen, KE Shanfu, et al. Fruit fly optimization algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problems [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12):1480-1485.
- [16] 吴秀丽,崔琪. 考虑可再生能源的多目标柔性流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(11):2792-2807.
WU Xiuli, CUI Qi. Multi-objective flexible flow shop scheduling problem with renewable energy[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(11):2792-2807.
- [17] LUO H, DU B, HUANG G Q, et al. Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 146(2):423-439.
- [18] MENG X, YU Y N. Can renewable energy portfolio standards and carbon tax policies promote carbon emission reduction in China's power industry[J]. Energy Policy, 2023, 174:113461.
- [19] 肖谦,陈晖,张宇宁,等. 碳税对我国宏观经济及可再生能源发电技术的影响:基于电力部门细分的CGE模型[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8):3672-3682.
XIAO Qian, CHEN Hui, ZHANG Yuning, et al. The impacts of carbon tax on China's macro-economy and the development of renewable energy power generation technology; based on CGE model with disaggregation in the electric power sector [J]. China Environmental Science, 2020, 40(8):3672-3682.
- [20] 王骥鑫,卢保通,王蓓蓓,等. 配额制背景下基于区块链的可再生能源电力追踪方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23):11-19.
WANG Qixin, LU Baotong, WANG Beibei, et al. Blockchain-based renewable energy power tracking method in background of renewable portfolio standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23):11-19.
- [21] 曾慧,杜源,李涛,等. 考虑碳交易与绿证交易的电-热耦合园区低碳规划[J]. 综合智慧能源, 2023(2):22-29.
ZENG Hui, DU Yuan, LI Tao, et al. Low-carbon planning of a park-level integrated electric and heating system considering carbon trading and green certificate trading[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023(2):22-29.
- [22] 肖秋瑶,杨骥,宋政湘. 考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4):1392-1401.
XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4):1392-1401.
- [23] WANG L, HOU C Q, YE B, et al. Optimal operation analysis of integrated community energy system considering the uncertainty of demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4):3681-3691.
- [24] 崔杨,沈卓,王铮,等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12):4508-4516.
CUI Yang, SHEN Zhuo, WANG Zheng, et al. Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificate-carbon emission equivalent interaction mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12):4508-4516.
- [25] 骆钊,秦景辉,梁俊宇,等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):248-255.
LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):248-255.
- [26] 袁桂丽,刘培德,唐福斌,等. 计及绿色电力证书与碳交易制度的“源-荷”协调优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6):190-195.
YUAN Guili, LIU Peide, TANG Fubin, et al. Source-load coordination optimal scheduling considering green power certificate and carbon trading mechanisms [J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(6):190-195.
- [27] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2):1-7.
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Economic dispatch approach of RIES for electric vehicle and heat pump to promote wind power accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):1-7.
- [28] 尹瑞雪,吴拓,李洪丞. 低碳目标下的柔性流水车间调度及节能优化[J]. 机械设计与制造, 2023, 386(4):281-286.
YIN Ruixue, WU Tuo, LI Hongcheng. Flexible flow shop scheduling and energy saving optimization strategy under low carbon target [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, 386(4):281-286.
- [29] LI X X, TANG H T, YANG Z P, et al. Integrated optimization approach of hybrid flow-shop scheduling based on process set [J]. IEEE Access, 2020, 8:223782-223796.
- [30] 胡伟,杨梓俊,王瑾然,等. 园区综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1):13-20.
HU Wei, YANG Zijun, WANG Jinran, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system in the industry park [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1):13-20.

- [31] 余斌煌. 柔性流水车间调度问题综述[J]. 现代制造工程, 2022(9):154-162,71.
YU Binhuang. Review on flexible flow shop scheduling[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(9):154-162,71.
- [32] 徐雪. 基于改进粒子群遗传混合算法的车间调度研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
XU Xue. Research on job shop scheduling based on improved particle swarm genetic hybrid algorithm[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [33] 刘博,袁欣,明新国. 基于遗传算法和变邻域搜索的柔性作业车间同步调度方法[J]. 机械设计与研究,2021,37(1):177-182,189.
LIU Bo, YUAN Xin, MING Xinguo. A novel method for flexible job shop scheduling based on genetic algorithm and variable neighborhood search[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(1):177-182,189.
- [34] 周辉仁,唐万生,魏颖辉. 柔性 Flow-Shop 调度的遗传算法优化[J]. 计算机工程与应用,2009,45(30):224-226,233.
ZHOU Hui ren, TANG Wansheng, WEI Yinghui. Optimize flexi-

- ble Flow-Shop scheduling using genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(30):224-226,233.
- [35] 顾欣,王琦,胡云龙,等. 基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. 电网技术,2022,46(4):1464-1475.
GU Xin, WANG Qi, HU Yunlong, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrids integrated energy system based on Nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(4):1464-1475.

作者简介:



陈健

陈健(1999),男,硕士在读,研究方向为工业园区能量管理及优化调度(E-mail: chenjian223@stu.scu.edu.cn);

唐志远(1992),男,博士,副研究员,研究方向为电力系统控制及规划运行、工业园区能量管理及优化调度等;

譙傲(1992),女,博士,讲师,研究方向为低碳能源配置策略。

Bi-level optimal dispatching of low-carbon industrial park considering flexible shop scheduling in high-energy-consuming enterprise

CHEN Jian¹, TANG Zhiyuan¹, QIAO Ao², LIU Junyong¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Logistics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103, China)

Abstract: Under the 'dual-carbon' goal, industrial parks, as the most important and extensive carriers of industrial systems, must undergo low-carbon transformation. In this context, this paper establishes a bi-level optimal dispatching model of low-carbon industrial park considering flexible scheduling of high-energy-consuming enterprises' production workshops. The model fully exploits the flexible adjustment ability of high-energy-consuming enterprises, obtains the optimal low-carbon scheduling plan of the park by flexibly adjusting the production scheme of high-energy-consuming enterprises to realize the coordinated operation of the industrial park and high-energy-consuming enterprises. Firstly, the upper layer establishes an optimal scheduling model with the objective of minimizing the total operating cost, taking into account carbon trading and tradable green certificate costs. Then, the lower layer focuses on the flexible scheduling problem of the high-energy-consuming enterprise's production workshops within the industrial park, aiming to minimize the maximum completion time and cost. The cost savings achieved by enterprise scheduling at the operational layer are used as subsidies. The upper and lower layers continuously coordinate and schedule plans to achieve the optimal objective. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed model are verified through case studies. The proposed approach not only reduces production costs and improves production efficiency but also effectively promotes load balancing, realizing the low-carbon operation of the industrial park.

Keywords: industrial park; high-energy-consuming enterprise; flexible scheduling; carbon trading; tradable green certificate; optimal dispatching

(编辑 李栋)