

考虑精细化碳排放因子的平板玻璃企业 低碳需求响应方法

李明冰¹,王平欣²,夏晓东²,杨剑²,王清²,朱红霞²

(1. 山东大学电气工程学院, 济南 250061; 2. 国网山东省电力公司营销服务中心(计量中心), 济南 250001)

摘要:为解决用电侧碳排放因子选取过于粗糙的问题,进一步促进高碳排放企业用电行为的低碳化,提出一种考虑精细化碳排放因子的平板玻璃企业低碳需求响应方法。首先,以平板玻璃这一典型企业为例,通过分析平板玻璃生产的碳排放情况,建立平板玻璃企业的碳排放核算模型;然后,考虑潮流网损分摊,基于比例潮流追踪的方法,结合平板玻璃企业用电特性,对用户侧碳排放因子进行细化;最后,通过将碳排放因子与碳税结合,提出了基于碳排放因子的低碳需求响应模型,激励企业进行降碳用电行为。通过算例分析,证明了所提方法可以实现碳排放因子在时空分布层面的细化,并引导企业调整自身用电行为,挖掘其碳减排潜力。

关键词:平板玻璃企业;碳排放;碳排放因子;电力潮流追踪;需求响应

Low carbon demand response approach for the flat glass industry considering refined carbon emission factors

LI Mingbing¹, WANG Pingxin², XIA Xiaodong², YANG Jian², WANG Qing², ZHU Hongxia²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Marketing Service Center (Metrology Center), State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: In order to solve the problem that the selection of carbon emission factors on the power side is too rough, and further promote the low-carbon electricity consumption behavior of high-carbon emission enterprises, a low-carbon demand response method for flat glass manufacturers considering fine carbon emission factors is proposed. Firstly, taking flat glass as a typical manufacturer, the carbon emission accounting model of flat glass enterprises is established by analyzing the carbon emission of flat glass production. Then, considering the power flow loss allocation, based on the method of proportional power flow tracking, combined with the power consumption characteristics of flat glass enterprises, the carbon emission factors on the user side are refined. Finally, by combining carbon emission factor and carbon tax, a low-carbon demand response model based on carbon emission factor is proposed to encourage enterprises to reduce carbon electricity consumption. Through the example analysis, it is proved that the proposed method can realize the refinement of carbon emission factors in the spatial and temporal distribution level, and guide enterprises to adjust their own electricity consumption behavior and tap their carbon emission reduction potential.

Key words: flat glass manufacturers; carbon footprint; carbon emission factors; power flow tracing; demand response

0 引言

自工业革命以来,环境问题日益严峻。随着全球变暖问题的日益加剧,我国在国际上提出了“双碳”战略目标。因此,准确地估算人类活动对大气环境的影响,是制定合理减排策略的前提和基础。碳足迹作为一种新的研究方法,因其具有独特的

研究视角、简明的评价方法,已成为目前研究的热点之一^[1-2]。

平板玻璃作为典型的高耗能、高碳排放行业,在制造、运输过程中会产生大量温室气体,为了实现“双碳”目标,有必要对其碳足迹展开研究,准确测算其碳排放量,从而为企业制定碳减排方针提供理论依据。然而,鉴于地域差异、能源分布状况、生产设备类型及技术水平的不同,各平板玻璃生产企业的碳排放情况也千差万别。因此,如何实现各平板玻璃企业碳排放量的精确衡量,成为亟待解决的关键问题。

收稿日期:2025-12-15;修回日期:2026-01-20

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE145);国网山东电力公司科技项目(520633220020)

为此,诸多学者已针对具体的平板玻璃企业,开展碳足迹测度研究。文献[3]以我国日用玻璃产业为研究对象,分析其碳排放特征,并采用碳排放系数法估算2015—2020年的行业碳排放量,并据此提出了相应的碳减排措施。文献[4]通过确定碳足迹核算边界,识别碳排放源,并结合平板玻璃生产企业碳排放特点,对某平板玻璃企业各个环节的碳排放量进行了测算。文献[5]根据某平板玻璃生产企业的实际生产资料,对不同计算依据界定的碳排放进行了测算,有助于企业对自身碳排放量进行评估。然而,尽管已有研究针对具体的平板玻璃企业进行了碳排放核算工作,但在确定用电侧碳排放因子时采取了较为笼统的方法,导致无法精确衡量各企业的碳排放总量。

尽管碳排放主要由发电侧产生,但企业用户才是碳排放的主要责任人^[6]。从挖掘用户侧碳减排潜力的角度,诸多学者通过需求侧响应(demand response, DR)改变企业用电行为,实现企业的节能减排。文献[7—9]提出了基于价格激励的DR不确定模型,引导用户主动削峰填谷,减少了系统运行成本。现有需求响应通过电价激励引导用户削峰填谷,减少了系统运行成本并间接促进新能源消纳。然而,此类研究未考虑不同时段电源结构的碳排放差异。若用户进一步结合精细化碳排放因子调整用电时段,可在电价激励基础上减少高碳电力消费,从而间接降低系统整体碳排放强度。

基于此,本文提出了一种考虑精细化碳排放因子的平板玻璃企业低碳需求响应方法。首先,通过分析平板玻璃的生产流程,研究其碳排放情况,并建立了平板玻璃企业的碳排放核算模型;然后,以电力潮流追踪法为基础,考虑系统网损分摊,结合平板玻璃企业用电特性,对用电侧碳排放因子进行细化;最后,通过将碳排放因子与碳税结合,提出了基于碳排放因子的低碳需求响应模型,引导企业进行降碳用电行为。

1 平板玻璃生产过程的碳足迹

在平板玻璃生产过程中,碳排放主要分为3大类:一是化石燃料的燃烧所产生的排放,二是工业生产流程中直接产生的排放,三是通过能源使用 and 材料采购等间接途径引发的碳排放^[10—11],如表1所

示。各生产工序对应的碳排放如图1所示。

表1 平板玻璃企业的碳排放类型
Table 1 Types of carbon emissions in flat glass manufacturing

碳排放类型	具体排放源	设施
化石燃料燃烧排放	煤、天然气、煤焦油、石油焦等燃料燃烧排放	煤气发生炉、玻璃熔窑等
工业生产过程排放	① 原料中含有的碳酸盐在高温状态下分解产生的碳排放; ② 碳粉中的碳被氧化产生的碳排放	玻璃熔窑
间接碳排放	消耗电力、热力间接产生的碳排放	原料制备、运输、锡槽、退火窑、其他生产设备运行等

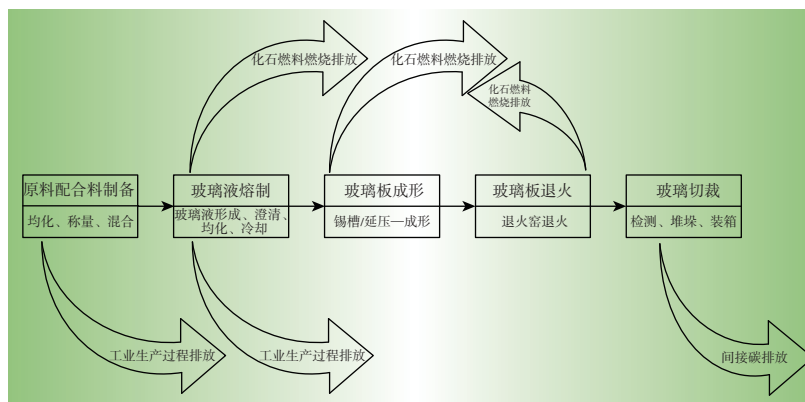


图1 平板玻璃生产中的碳排放

Fig. 1 Carbon emissions from flat glass production

2 平板玻璃企业碳排放量计算模型

平板玻璃企业产生的碳排放包括3部分,通过式(1)计算

$$E_{\text{total}} = E_{\text{d,r}} + E_{\text{pro}} + E_{\text{fu}} \quad (1)$$

式中: E_{total} 为平板玻璃企业总碳排放量; $E_{\text{d,r}}$ 为间接碳排放; E_{pro} 为工业生产过程碳排放; E_{fu} 为化石燃料燃烧碳排放。

2.1 化石燃料燃烧碳排放

化石燃料燃烧碳排放通过式(2)计算

$$E_{\text{fu}} = \sum_i^n (R_i F_{\text{fuels},i}) \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 种化石燃料的活动水平; $F_{\text{fuels},i}$ 为第 i 种化石燃料的碳排放因子。

平板玻璃生产中化石燃料的活动水平通过式(3)计算

$$R_i = N_i M_{\text{fuels},i} \quad (3)$$

式中: N_i 为第 i 种化石燃料的平均低位发热量;

$M_{\text{fuels},i}$ 为第 i 种化石燃料的消耗量。

平板玻璃生产中化石燃料的碳排放因子通过式(4)计算

$$F_{\text{fuels},i} = \frac{44}{12} J_{\text{fuels},i} O_i \quad (4)$$

式中: $J_{\text{fuels},i}$ 为第 i 种化石燃料的单位热值含碳量; O_i 为第 i 种化石燃料的碳氧化率; 44/12 为 CO_2 与 C 的摩尔质量比。

2.2 工业生产过程碳排放

工业生产过程碳排放主要包括两类: 一是原料配料中碳粉氧化造成的碳排放, 二是原料碳酸盐如石灰石、纯碱等分解产生的碳排放。

因此, 平板玻璃生产过程碳排放计算如下

$$E_{\text{Pro}} = E_{\text{Pro1}} + E_{\text{Pro2}} \quad (5)$$

式中: E_{Pro1} 为由原料中碳酸盐分解产生的碳排放; E_{Pro2} 为由原料中碳粉氧化产生的碳排放。

原料中碳酸盐分解产生的碳排放通过式(6)计算

$$E_{\text{Pro1}} = \sum_i (\theta_i M_{\text{carbonate},i} F_{\text{carbonate},i}) \quad (6)$$

式中: $M_{\text{carbonate},i}$ 为第 i 种碳酸盐消耗的质量; $F_{\text{carbonate},i}$ 为第 i 种碳酸盐的碳排放因子; θ_i 为第 i 种碳酸盐的煅烧比例。

计算碳粉氧化产生的碳排放如下

$$E_{\text{Pro2}} = \gamma M_c J_c \quad (7)$$

式中: E_{Pro2} 为碳粉氧化产生的碳排放; M_c 为碳粉消耗质量; J_c 为碳粉中碳的含量; γ 为二氧化碳和碳的质量比。

2.3 间接碳排放

平板玻璃企业生产过程中消耗电力、热力间接产生的碳排放通过式(8)计算

$$E_{\text{d,r}} = D_d F_d + D_r F_r \quad (8)$$

式中: $E_{\text{d,r}}$ 为外购电、外购蒸汽隐含产生的碳排放; D_d 为平板玻璃企业外购电量; D_r 为平板玻璃企业外购蒸汽量; F_r 为蒸汽的碳排放因子; F_d 为电力的碳排放因子。

3 基于电力潮流追踪的碳排放因子细化

3.1 碳排放因子定义

电网碳排放因子指电网覆盖区域单位电量所产生的碳排放量^[12-13], 其数值与新能源机组在发电侧所占的比重、火电机组的能源类型有关。而节点碳排放因子是指电力系统中某一节点在单位时间内、每消耗或生产 1 kWh 电能所直接或间接产生的二氧化碳排放量, 反映了该节点电力来源的碳排放强度, 更精准地体现局部电力结构和传输影响。

本文在计算发电侧碳排放因子时, 仅考虑发电设施在运行过程中因消耗燃料而产生的直接碳排放。对于光伏、风电等可再生能源机组, 其运行阶段碳排放因子为零。

3.2 考虑网损分摊的节点碳排放因子细化

(1) 电力潮流追踪

本文采用的电力潮流追踪是按照比例分摊^[14], 以节点为基本跟踪单位, 即节点各出线潮流在进线中的分布按照进线功率比例分配; 节点进线潮流在出线中的分布按照出线比例进行分配, 各节点满足功率平衡约束。

(2) 节点碳排放因子计算

不考虑网损, 电力系统中的任意节点 i 有

$$P_i = \sum_{j \in \beta_i} P_{j,i} + P_{G,i} \quad (9)$$

式中: $P_{j,i}$ 为由节点 j 流入节点 i 的功率; $P_{G,i}$ 为流入节点 i 的发电机功率; P_i 为节点 i 的流入功率; β_i 为与节点 i 相连的节点的集合。

令 $N_{ij} = |P_{j,i}|/P_j$, 则

$$P_i - \sum_{j \in \beta_i} N_{ij} P_j = P_{G,i} \quad (10)$$

将其变形为矩阵形式

$$\mathbf{C}_u \mathbf{P} = \mathbf{P}_G \quad (11)$$

式中: $\mathbf{P}_G$ 为发电机功率列向量; $\mathbf{P}$ 为 n 个节点总流入功率列向量; $\mathbf{C}_u$ 为 $n \times n$ 阶回溯矩阵, 元素为

$$C_{u(i \times j)} = \begin{cases} 1 & j=i \\ -N_{ij} & j \in \beta_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

若 $\mathbf{C}_u$ 是可逆矩阵, 则有

$$\mathbf{P} = \mathbf{C}_u^{-1} \mathbf{P}_G \quad (13)$$

对于任意节点的负荷

$$\mathbf{P}_L = \text{diag}(\mathbf{B}) \mathbf{P} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为负荷系数行向量, 其中的元素为

$$B_i = \begin{cases} \frac{P_{L,i}}{P_i} & \text{且 } i \in \beta_L \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: β_L 为负荷节点集合; $P_{L,i}$ 为节点 i 的负荷。

负荷的功率表示成发电机组功率的线性组合为

$$\mathbf{P}_L = \mathbf{B} \mathbf{C}_u^{-1} \mathbf{P}_G \quad (16)$$

负荷节点的总碳排放量表示为

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{B} \mathbf{C}_u^{-1} \text{diag}(\mathbf{C}_G) \mathbf{P}_G \quad (17)$$

式中: $\mathbf{C}_G$ 为发电机度电碳排放因子向量。

因此, 平板玻璃企业所在节点的碳排放因子为

$$F_{\text{glass}} = \text{diag}(\mathbf{B}) \mathbf{C}_u^{-1} \text{diag}(\mathbf{C}_G) \mathbf{P}_G / P_{\text{glass}} \quad (18)$$

此外, 平板玻璃厂可以利用余热发电, 实现部分电力的零碳排放, 从而降低平板玻璃厂的碳排放

因子。平板玻璃厂余热发电主要通过熔窑废气余热回收实现。余热发电功率与熔窑热负荷呈正相关

$$P_{co} = 0.22Q_{\text{exhaust}}(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})/1000 \quad (19)$$

式中： Q_{exhaust} 为烟气流量； T_{in} 和 T_{out} 分别为余热锅炉进出口温度。

平板玻璃厂电力消耗导致的碳排放 E_d 通过式(20)计算

$$E_d = (P_{\text{glass}} - P_{co})F_{\text{glass}} \quad (20)$$

式中： P_{glass} 为平板玻璃企业总的用电量； P_{co} 为平板玻璃企业的余热发电量。

(3) 考虑网损分摊的节点碳排放因子修正

电力系统碳排放本质来源是负荷侧的用户消费,因此,电力系统网络损耗也是由用户需求产生的,需要将网损等效到负荷侧,把由网损引起的碳排放分摊给负荷侧用户。

各节点分摊网损后的等效有功负荷为

$$P_{L,i}^g = \frac{P_{L,i}^g}{P_i^g} P_i^g \approx \frac{P_{L,i}}{P_i} P_i^g = \frac{P_{L,i}}{P_i} \sum_{k=1}^n [C_u^{-1}] P_{G,k} \quad (21)$$

式中： $P_{L,i}^g$ 为将网损分摊后的节点 i 的等效负荷； P_i^g 为将网损分摊后的各节点等效注入功率； P_i 和 $P_{L,i}$ 分别为忽略网损的各节点注入功率和负荷。

因此,考虑网损分摊后的节点碳排放因子为

$$F_{L,i} = \text{diag}(\mathbf{B})\mathbf{C}_u^{-1} \text{diag}(\mathbf{C}_G)P_G/P_{L,i} \quad (22)$$

4 用户侧低碳需求响应方法

4.1 电力碳税

碳税是以减少碳排放为目的,依据碳排放量进行计税,征收范围包括大中型企业和普通居民用户。本文假设采用碳税机制对用电碳排放进行定价,以激励用户低碳用电。假设碳税税率为 $10 \text{ 元}/t$,用户用电碳税为

$$w(t) = \frac{P_{L,i}(t)}{1 - \eta_{\text{loss}}} F_{L,i}(t) \alpha \quad (23)$$

式中： $P_{L,i}(t)$ 为 t 时段负荷功率； $F_{L,i}(t)$ 为 t 时段负荷所在节点的碳排放因子,通过3.2节的方法计算得到； η_{loss} 为电能传输损耗率； $w(t)$ 为 t 时段负荷碳税费用； α 为用电碳税税率。

4.2 用户侧低碳需求响应模型

低碳需求响应是指为负荷侧提供不同时段电能价格及碳排放因子信息,用户依据不同时段用电带来的电能费用以及碳税费用,对自身用电行为进行调整的需求响应^[15]。

用户希望自身用电成本越低越好,因此以改变负荷带来的成本最低为目标

$$\min \Delta H = \sum_{t=1}^T (\Delta P_z(t) - \Delta P_j(t)) \left(h(t) + \frac{F_{L,i}(t) \alpha}{1 - \eta_{\text{loss}}} \right) \Delta t \quad (24)$$

式中： ΔH 为费用增加量,包括用户电费增加量和电力碳税增加量； $\Delta P_z(t)$ 和 $\Delta P_j(t)$ 分别为 t 时段负荷增加量和减少量； $h(t)$ 为 t 时段电价。

负荷调整用电行为应满足如下约束。

(1) 负荷增、减量的上、下限约束。

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_z(t) \leq u_1(t) \Delta P_z^{\text{max}}(t) \\ 0 \leq \Delta P_j(t) \leq u_2(t) \Delta P_j^{\text{max}}(t) \end{cases} \quad (25)$$

(2) 负荷不能同时增、减约束。

$$u_1(t) + u_2(t) \leq 1, u_1(t) \in \{0, 1\}, u_2(t) \in \{0, 1\} \quad (26)$$

(3) 负荷增、减平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T \Delta P_z(t) = \sum_{t=1}^T \Delta P_j(t) \quad (27)$$

式中： $\Delta P_z^{\text{max}}(t)$ 和 $\Delta P_j^{\text{max}}(t)$ 分别为 t 时段负荷增加量和减少量的上限； $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 均为0-1变量,负荷增加时 $u_1(t)$ 取1,负荷减少时 $u_2(t)$ 取1。

5 算例分析

5.1 碳排放因子计算结果

以改进的IEEE30节点系统为测试算例,如图2所示,验证所提考虑企业用电特性的用电侧碳排放因子细化方法的有效性。各节点负荷、发电机组、线路参数见文献[16]。设置以下3种场景,不同场景下计算得到的碳排放因子如图3所示。

场景1:统一使用区域电网碳排放因子；

场景2:不考虑企业用电特性的碳排放因子；

场景3:考虑企业用电特性的碳排放因子。

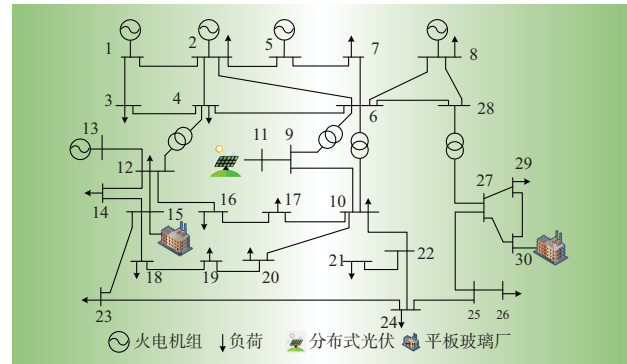


图2 系统拓扑

Fig. 2 System topology

在不考虑企业用电特性时,网损按统一原则分摊至各负荷,并据此计算节点碳排放因子;而在考虑企业用电特性时,针对节点15和30的平板玻璃厂,在基于潮流追踪的碳排放因子模型中将其自发电视为本地零碳电源,优先满足节点自身部分负

荷,从而减少对外购高碳电力的依赖,直接降低该节点的等效碳排放因子。如图3所示,场景3中节点15和30的碳排放因子显著下降,其余多数节点碳排放因子也有不同程度降低。这主要源于企业通过余热余能回收实现部分电能自给,降低了对以火电为主的高碳电力的需求,进而减少了全网碳排放总量,体现为各节点碳排放因子的普遍下降。

本文采用潮流追踪法计算碳排放因子,能够反映其时空分布特性。相比统一的电网平均碳排放因子,该方法基于不同时段与区域的能源结构,在时空维度进行细化,可提供节点级别的精准碳排放数据。在此基础上,本文进一步考虑企业特性,将平板玻璃厂余热发电纳入核算,实现了碳排放因子的更精细化测算。

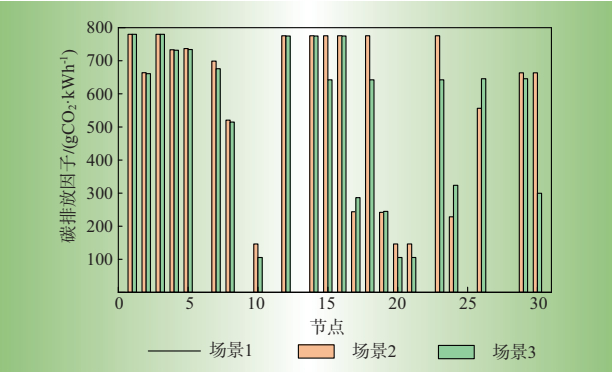


图3 不同场景下的节点碳排放因子
Fig. 3 Nodal carbon emission factors for different scenarios

5.2 低碳需求响应结果

以位于节点15的平板玻璃厂为例,构建以下5种场景验证本文所提基于碳排放因子的低碳需求响应方法的有效性。分时电价如表2所示。

- 场景1:不考虑需求响应;
- 场景2:基于电价的需求响应;
- 场景3:基于碳税(采用不考虑企业用电特性的碳排放因子)的需求响应;
- 场景4:基于碳税(采用考虑企业用电特性的碳排放因子)的需求响应;
- 场景5:综合电价-碳税(采用考虑企业用电特性的碳排放因子)的需求响应。

表2 分时电价
Table 2 Time-of-use electricity price

时段	时刻	价格/(元·kWh ⁻¹)
平段	01:00—10:00、16:00—17:00、 23:00—24:00	0.74
高峰段	21:00—22:00	1.08
尖峰段	18:00—20:00	1.23
谷段	11:00、15:00	0.40
深谷段	12:00—14:00	0.30

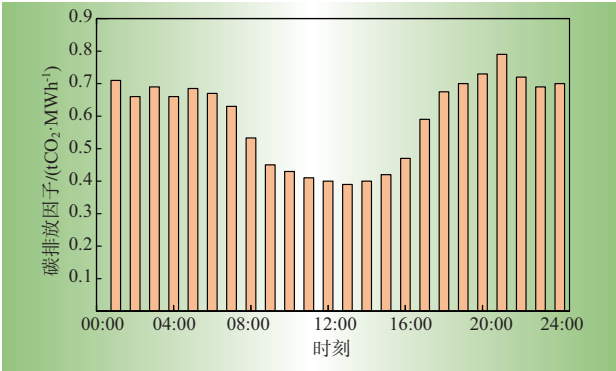


图4 节点15一天24时刻的碳排放因子情况
Fig. 4 Node 15 carbon emission factors at 24 hours a day

表3 不同场景下的用电成本及碳排放量
Table 3 Electricity costs and carbon emissions across different scenarios

场景	用电成本/万元	碳排放量/tCO ₂
1	14.15	111.12
2	13.25	106.69
3	13.01	100.07
4	13.05	98.23
5	12.09	92.31

图4展示了节点15一天24时刻的碳排放因子动态变化情况。图4中18:00—20:00时段因火电功率增加,碳排放因子显著升高;12:00—14:00时段因光伏功率占比提升,碳排放因子降至最低,体现了精细化碳排放因子在时间维度的差异性。

由表3可知:场景1不考虑需求响应,源荷缺乏互动,导致用电成本最高且碳排放量最大。场景2引入电价型需求响应,通过价格信号引导负荷转移,在提升经济性的同时降低碳排放,用电成本较场景1降低6.36%,碳排放减少4.43 tCO₂。场景3采用碳税型需求响应,依据碳排放因子引导用电时段调整,进一步强化低碳效益,碳排放较场景1降低11.05 tCO₂,用电成本亦下降1.14万元。场景4在场景3基础上,计入平板玻璃厂余热自发电作为本地零碳电源,降低了节点实时碳排放因子,从而在碳税机制下增强了负荷调节潜力,碳排放较场景3再降1.84 tCO₂,证明考虑企业自发电可更有效激励其低碳用电行为。

上述分析表明:场景2电价型需求响应通过转移电价高峰负荷提升了经济性,但低碳效益有限;场景3、场景4碳税型需求响应以碳排放因子为导向转移用电时段,强化了低碳性,却未能充分发挥经济潜力。场景5综合电价与碳税信号,同步优化用电的经济成本与碳成本,实现了经济性与低碳性的协同提升-其碳排放量较场景1、场景2分别降低

18.81 tCO₂与14.38 tCO₂,用电成本分别减少2.06万元与1.16万元。因此,本文所提综合需求响应方法可在调度中兼顾经济与低碳目标,具备良好的实用价值。

5.3 碳排放量计算结果

下面以位于节点15的平板玻璃厂2024年2月4日的生产数据进行验证分析。

表4 平板玻璃企业生产数据
Table 4 Flat glass manufacturer data

项目名称	数据
原料中碳粉消耗量/t	0.24
石灰石消耗量/t	67.66
白云石消耗量/t	122.68
纯碱消耗量/t	181.12
消耗电量/MWh	246.25
余热发电/MWh	56.89

平板玻璃企业碳排放量计算模型的输入量为各种化石燃料的消耗量、碳酸盐的消耗量、碳粉的消耗量及用电量,经过运算得到化石燃料燃烧排放、工业生产过程排放和间接碳排放。

平板玻璃厂2024年2月4日化石能源使用量及相关参数见表5。

表5 平板玻璃厂2024年2月4日能源使用量及相关参数
Table 5 Flat glass factory energy consumption and related parameters for february 4, 2024

能源种类	液化天然气	燃料油	天然气	石油焦	柴油
使用量/t	12.54	26.00	14.48	28.83	1.49
低位发热量/(tC·t ⁻¹)	44.200	41.816	389.310	32.500	42.652
单位热值含碳量/(tC·GJ ⁻¹)	0.017 20	0.021 10	0.015 32	0.027 50	0.020 20
碳氧化率	0.980	0.990	0.995	1.000	0.990
碳排放量/t	34.25	83.29	314.97	94.46	4.65

根据式(2)一式(4),计算化石燃料燃烧排放量。常见碳酸盐原料的碳排放因子见表6。

表6 常见碳酸盐原料的碳排放因子
Table 6 Default values of carbon emission factors for common carbonate feedstocks

矿石名称	碳排放因子
石灰石	0.439 71
白云石	0.477 32
纯碱	0.414 92

根据式(5)一式(7),计算工业生产过程碳排放。平板玻璃厂2024年2月4日购入热力及碳排放因子见表7。

表7 平板玻璃厂2024年2月4日购入热力及碳排放因子
Table 7 Flat glass factory purchased heat energy and carbon emission factors on february 4, 2024

指标	热力
消耗量/GJ	3 412.72
排放因子/(tCO ₂ ·MWh ⁻¹)	0.015 4
碳排放量/t	52.56

根据式(8),计算间接产生的碳排放量。2024年2月4日企业总碳排放量见表8。

表8 平板玻璃厂2024年2月4日碳排放量
Table 8 Flat glass factory carbon emissions for february 4, 2024

t	化石燃料燃烧排放	工业生产过程排放	间接碳排放	总量
	531.62	164.35	174.23	870.20

由表8可知,2024年2月4日平板玻璃厂的碳排放总量为870.20 t,化石燃料燃烧、工业生产过程、消耗电力热力3部分产生的碳排放量分别为531.62 t、164.35 t以及174.23 t。这表明平板玻璃企业的碳排放量及其强度受化石燃料燃烧以及电力、热力消耗所产生的碳排放显著影响。因此,企业应加速推进低碳高效能源利用体系的构建,严格限制煤炭等化石燃料的消耗,持续优化当前以煤炭为核心的能源消费模式。同时,需大力促进可再生能源技术的研发与应用,提升风电、光伏在电力供应中的比例,实现能源结构的优化升级。

6 结束语

本文提出了一种考虑精细化碳排放因子的平板玻璃企业低碳需求响应方法。经过仿真分析,得到以下结论:

- (1) 提出的基于潮流追踪的碳排放因子细化方法,考虑了企业的用电特性,可以实现碳排放因子在时空分布层面的细化。
- (2) 提出的平板玻璃企业碳排放计算模型,可以对直接和间接碳排放进行精确计算,帮助企业掌握每日生产的碳排放情况,有效制定减碳措施。
- (3) 提出的基于碳排放因子的低碳需求响应方法,能够引导企业调整自身用电行为,充分挖掘了企业用户的碳减排潜力。

未来将探索更多影响平板玻璃企业碳排放的因素和机制,以实现更加全面、准确的碳排放计量和分析。D

参考文献:

- [1] 柴超,刘松阳,孔维康,等.考虑绿证交易的虚拟电厂运行策略优化研究[J].电力需求侧管理,2024,26(5):100-105.
CHAI Chao, LIU Songyang, KONG Weikang, et al. Operation strategy optimization of virtual power plant considering green card transaction [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(5): 100-105.
- [2] CHEN R, ZHANG R, HAN H. Where has carbon footprint research gone? [J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106 882.
- [3] YANG Y, QU S, CAI B, et al. Mapping global carbon footprint in China [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2 237.
- [4] 宁可,孙晓峰,王均光.我国日用玻璃行业碳排放特征及减排措施[J].环境科学研究,2022,35(7):1 752-1 758.
NING Ke, SUN Xiaofeng, WANG Junguang. Carbon emission characteristics and emission reduction measures of domestic glass industry in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(7): 1 752-1 758.
- [5] 刘韬,张翼,闫浩春,等.平板玻璃生产企业碳排放核查案例分析[J].玻璃,2016,43(12):20-25.
LIU Tao, ZHANG Yi, YAN Haochun, et al. Estimation case analysis of carbon emission from flat glass factories [J]. Glass, 2016, 43(12): 20-25.
- [6] 李晋梅,尹靖宇,武庆涛,等.平板玻璃企业碳排放计算依据对比及实例分析[J].玻璃,2017,44(9):3-6.
LI Jinmei, YIN Jingyu, WU Qingtao, et al. Carbon dioxide emission calculation comparison and example analysis of flat glass enterprises [J]. Glass, 2017, 44(9): 3-6.
- [7] 潘廷哲,王宗义,杨晨,等.面向电力需求响应的工业园区综合能源系统优化调控研究[J].电力需求侧管理,2024,26(6):62-67.
PAN Tingzhe, WANG Zongyi, YANG Chen, et al. Research on optimal dispatching of industrial parks integrated energy system for demand-side response [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6): 62-67.
- [8] ZHENG S, SUN Y, LI B, et al. Incentive-based integrated de-mand response for multiple energy carriers considering behavioral coupling effect of consumers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3 231-3 245.
- [9] WANG L, HOU C, YE B, et al. Optimal operation analysis of integrated community energy system considering the un-certainty of demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3 681-3 691.
- [10] 常维东,李刚,汤骅,等.浅析玻璃行业实现碳中和的路径[J].玻璃,2023,50(11):21-27.
CHANG Weidong, LI Gang, TANG Hua, et al. Analysis on the path of realizing carbon neutrality in glass industry [J]. Glass, 2023, 50(11): 21-27.
- [11] 何峰,王健,金明芳,等.中国平板玻璃工业碳减排途径分析研究[J].玻璃,2023,50(2):1-7.
HE Feng, WANG Jian, JIN Mingfang, et al. Analysis and research on carbon reduction approaches of the flat glass industry in China [J]. Glass, 2023, 50(2): 1-7.
- [12] 胡昊靖,朱曼.平板玻璃行业低碳发展的几种措施[J].建材世界,2022,43(5):82-85.
HU Haojing, ZHU Man. Several measures for low-carbon development of sheet glass industry [J]. The World of Building Materials, 2022, 43(5): 82-85.
- [13] 魏夕凯,谭效时,阮嘉桐,等.2005—2021年区域和省级电网碳排放因子研究[J].气候变化研究进展,2024,20(3):337-350.
WEI Xikai, TAN Xiaoshi, RUAN Jiatong, et al. Research on carbon emission factors of regional and provincial power grids from 2005 to 2021 [J]. Climate Change Research, 2024, 20(3): 337-350.
- [14] 刘广一,王继业,汤亚宸,等.电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程[J].电网技术,2024,48(1):12-28.
LIU Guangyi, WANG Jiye, TANG Yachen, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12-28.
- [15] 江友华,肖丁元,杨金婉,等.耦合居民显性与隐性信息的需求响应潜力评估精细画像方法[J].供用电,2025,42(9):65-76.
JIANG Youhua, XIAO Dingyuan, YANG Jinwan, et al. Precision portrait method for demand response potential assessment by coupling residents' explicit and implicit information [J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(9): 65-76.
- [16] WANG P, JING Z, ZHANG Z, et al. Accounting for carbon emission factors measured by electricity users with proportional power flow tracking considering industry characteristics [C]// 2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). IEEE, 2023: 1 115-1 120.

作者简介:

李明冰(2000),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为电力系统低碳优化调度;

王平欣(1986),男,山东济南人,硕士,高级工程师,研究方向为电能计量与采集技术;

夏晓东(1979),男,山东济南人,硕士,高级工程师,研究方向为综合能源、电能计量、电力营销技术。

(责任编辑 方德康)