

# 考虑生产耦合约束的 短流程炼钢用户需求响应潜力评估方法

李雄飞<sup>1</sup>, 李康平<sup>1\*</sup>, 黄淳驿<sup>2</sup>, 李正辉<sup>3</sup>, 艾芊<sup>2</sup>, 廖思阳<sup>4</sup>

- (1. 上海交通大学国家电投智慧能源创新学院, 上海市 闵行区 200240; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学电气工程学院), 上海市 闵行区 200240; 3. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海市 闵行区 200240; 4. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072)

## Demand Response Potential Estimation of EAF Steelmaking Users Considering Production Coupling Constraints

LI Xiongfei<sup>1</sup>, LI Kangping<sup>1\*</sup>, HUANG Chunyi<sup>2</sup>, LI Zhenghui<sup>3</sup>, AI Qian<sup>2</sup>, LIAO Siyang<sup>4</sup>

- (1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;  
2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China;  
3. Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute, Minhang District, Shanghai 200240, China;  
4. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Energy-intensive industrial loads, such as the electric arc furnace (EAF) steelmaking, boast significant demand response (DR) potential and have been formally recognized as an ancillary service provider. Accurate DR potential assessment forms the foundation for market participation and operational optimization, which is of great significance for enhancing the flexibility of the new power system. Current methods inadequately address production process coupling constraints while relying on single power adjustment modes, resulting in evaluation inaccuracies. This paper proposes a DR potential assessment method based on equipment-level production scheduling simulation. By considering two different regulation methods, load shifting and power curtailment, it fully taps the DR potential of EAF steelmaking. First, a resource-task network is employed to establish an EAF steelmaking production scheduling model that considers the coupling constraints of the production process. Second, with the shortest completion time as the optimization objective, the baseline scheduling scheme is determined. Finally, for price-based DR, the adjustable load boundaries of the steel plant's load are determined with electricity costs as the objectives. For incentive-based DR, the DR potential of the steel mill is evaluated with the objective of

maximizing the response during the DR period. A case study carried out in a steel plant in Hebei Province shows that the upward and downward adjustable capacities of EAF steelmaking account for 17.8% and 18.3% of the total load respectively. The total electricity cost can be reduced by 3.01% to 15.59% under time-of-use pricing and by 7.51% to 20.93% under real-time pricing, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** demand response (DR); regulation potential; steel industry; resource task network

**摘要:** 短流程炼钢等高耗能工业负荷具有巨大需求响应(demand response, DR)潜力, 已被正式纳入电力系统辅助服务提供主体。准确评估其 DR 潜力是支撑市场交易与优化调控的关键, 对提升新型电力系统灵活性具有重要意义。现有评估方法未充分考虑钢铁生产全过程的耦合约束, 且只考虑单一功率调节方式, 评估结果存在较大偏差。该文提出基于设备级生产调度模拟的 DR 潜力评估方法, 综合负荷平移与功率削减两种调节方式, 充分挖掘短流程炼钢 DR 潜力。首先, 采用资源任务网络建立考虑生产过程耦合约束的电炉炼钢生产调度模型; 其次, 以最短完工时长为目标确定基线调度方案; 最后, 针对价格型 DR, 以电费成本为目标确定钢厂负荷的可调边界。针对激励型 DR, 以 DR 时段响应量最大为目标评估钢厂 DR 时段的潜力。在河北某钢厂开展算例分析, 结果表明, 电炉炼钢上/下可调节容量分别占总负荷的 17.8% 和 18.3%, 电力总成本在分时电价下可下降 3.01%~

15.59%，实时电价下可下降 7.51%~20.93%，证明所提方法的有效性。

**关键词：**需求响应；可调潜力；钢铁工业；资源任务网络

## 0 引言

充分挖掘并高效利用负荷侧的调节潜力是提升新型电力系统运行灵活性的重要手段<sup>[1]</sup>。在诸多负荷中，钢铁是典型的高耗能工业，耗电量约占全国总用电的 10%<sup>[2]</sup>，是潜在优质的需求响应(demand response, DR)资源。根据生产工艺的不同，钢铁生产可分为长流程高炉炼钢和短流程电弧炉炼钢两类。相比于长流程炼钢，短流程炼钢的电气化程度更高，能耗相对较低，是钢铁未来的发展方向，因此，本文主要关注短流程电炉炼钢。目前，钢铁等高耗能工业负荷已被正式纳入为电力系统辅助服务的提供主体<sup>[3-4]</sup>，其可通过参与 DR 或辅助服务市场等方式参与电网运行并获得经济收益<sup>[5-6]</sup>，这为钢铁行业实现降本增效提供了新的途径。

DR 潜力评估是 DR 执行过程中的基础和关键环节。DR 潜力是指用户在电价信号或经济激励下，以基线负荷为基准削减/增加用电功率的能力<sup>[7-8]</sup>。对钢铁负荷的 DR 潜力进行准确评估是开展市场交易和优化调控的基础，高估或低估 DR 潜力都会对钢铁用户的市场交易收益直接产生负面影响，因此，准确评估短流程炼钢的 DR 潜力具有重要意义。近年来，随着电力系统灵活性短缺问题越来越突出，DR 相关研究成为学术界和工业界共同关注的热点主题，工业负荷 DR 潜力评估的研究也不断升温。现有研究根据评估的精细程度可以分为用户级和设备级两类。

用户级 DR 潜力评估方法一般通过对用户整体的负荷曲线进行建模分析，实现对工业用户 DR 潜力的粗略估计。例如，文献[9]分析德国能源密集产业需求侧管理的技术和经济调节潜力。文献[10]对不同类型工业负荷的调频潜力进行定性分析，并提出相应的潜力评估指标。文献[11]通过聚类确定工业园区内典型可调节负荷的类别，并建立不同类别用户的潜力估计模型，进而得到园区总体的调节潜力。文献[12]基于二次聚类方法挖掘工业用户用电模式，提取可中断、可转移特征，进而量化用户可调潜力。文献[13]对混凝土加工以及炼铝等高耗能工业用户的调节潜力进行综述，认为高耗能工业存在巨大调节空间。用户级评估结果一般用于发掘潜

在优质响应用户，无法为工业用户参与市场交易提供可以量化的决策依据。

设备级 DR 潜力评估方法通过对工业用户具体的生产过程进行建模，从而给出 DR 潜力的精细化评估结果。文献[14]评估给定时间段内钢铁精炼炉负荷的最大可削减功率。文献[15]考虑铜的具体生产过程，建立一个混合整数线性规划模型评估铜生产过程中的 DR 潜力。文献[16-17]分析评估炼钢中热轧环节的可调能力。文献[18]评估电解铜、电解铝以及电解氯碱工业的 DR 潜力。文献[19]分析电解氯碱生产过程并评估氯价值链在氯碱工艺中的 DR 潜力。

综上所述，尽管目前关于工业负荷 DR 潜力评估已经开展了一些有益探索，但是仍然停留在：单一设备(如钢铁大部分研究只关注电弧炉的调节潜力)和单一功率调节方式(如只关注时间平移，忽略了功率调节)层面，对生产全过程考虑还不够充分，这可能存在两个问题：1) 不考虑上/下游工序的耦合约束得到的评估结果在现实中可能不具备可行性；2) 对于具有多设备、多工序的流程工业来说，仅将单个设备/单一调节方式作为响应潜力的来源没有充分挖掘出其巨大的 DR 潜力。

为解决上述问题，本文提出一种考虑生产耦合约束的短流程炼钢 DR 潜力评估方法，评估不影响产品产量和质量前提下技术上可实现的 DR 潜力大小，至于用户是否愿意按照所评估结果进行实际调节，还需要结合具体的市场电价环境决策判断。主要创新点如下：

1) 提出一种基于设备级生产调度模拟的短流程炼钢 DR 潜力评估方法，利用资源任务网络(resource-task network, RTN)对短流程炼钢生产过程进行建模，充分考虑钢铁企业参与 DR 时的生产调度过程的耦合约束，得到满足操作可行性(不影响产量和质量)的 DR 潜力评估结果及其经济效益。

2) 考虑负荷平移和负荷削减两种不同的功率调节方式，通过增加与功率调节相关的决策变量，将传统 RTN 模型进行拓展，进而实现短流程炼钢 DR 潜力的充分挖掘。

## 1 短流程炼钢生产过程及可调潜力来源

### 1.1 短流程炼钢生产过程介绍

典型的短流程电炉炼钢生产过程如图 1 所示，可分为初炼、脱碳、精炼、连铸和轧钢 5 道工序：

初炼是将废钢铁等装入电弧炉(electric arc furnace, EAF)中熔化;脱碳是将初炼钢水在氩氧脱碳炉(argon oxygen decarburization, AOD)中降低碳含量并调整成分;精炼则在精炼炉(ladle furnace, LF)中进行脱氧、脱硫等以提纯钢水;连铸是将精炼后的钢液注入连铸机(continuous casting, CC)模具冷却成形;最后,轧钢阶段根据需求选择轧机将铸坯轧制成合格钢材,如使用热轧机(hot rolling, HR)生产热轧钢卷。

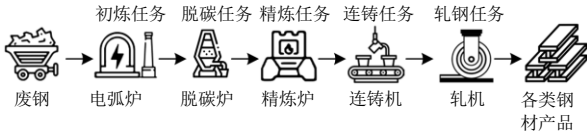


图1 典型短流程电炉炼钢生产过程示意图

Fig. 1 Typical flowsheet of EAF steelmaking process

1.2 短流程炼钢可调潜力来源

短流程炼钢的DR潜力源于两条途径:一是生产过程的调节;二是自备电厂的调节。钢铁企业生产负荷又可分为主要生产负荷和辅助生产负荷两类。主要生产负荷是指维持电弧炉、精炼炉、连铸机、轧钢机等主要生产设备运行负荷。辅助生产负荷是指各分厂水泵、传动液压泵、电炉厂风机等辅助生产设备维持运行所需负荷。主要生产负荷占比最大,也是短流程炼钢工业调节潜力的主要来源。因此,本文评估的对象是短流程钢厂主要生产负荷的DR潜力。

主要生产负荷可进一步分为可中断负荷、可削减负荷和可平移负荷。可中断负荷调节是指直接切断负荷需求以提供DR灵活性。钢铁行业作为流程型生产工业,其生产过程存在严格的工序限制,设备启动与运行时间按照生产安排提前确定,一旦工作不可随意停电。因此,本文暂不考虑短流程炼钢

生产过程中的可中断负荷。可削减负荷调节是指在DR期间减少部分功率,以满足电网的削峰需求。在短流程炼钢生产过程中,承担初炼任务的EAF可通过调整变压器分接头的位置快速灵活地改变运行功率,可调节的范围取决于EAF的耗电率和避免钢水冷却的最小功率。可转移负荷调节通过调整生产时间提供灵活性,且只进行用电的转移而总用电量不变。本文考虑的短流程炼钢各环节可调潜力来源如表1所示。

表1 本文考虑的短流程炼钢各环节可调潜力来源  
Table 1 Sources of DR potential for each segment of EAF steelmaking considered in this paper

主要设备	调控方式	负荷类型
电弧炉	开关/档位	可削减/可平移
脱碳炉	开关	可平移
精炼炉	开关	可平移
连铸机	开关	可平移
轧机	开关	可平移

2 短流程电炉炼钢DR潜力评估方法

2.1 短流程电炉炼钢DR潜力评估框架

本文将短流程炼钢的DR潜力定义为:在给定原始生产计划(负荷基线)的基础上,保证不改变产品产量和质量的前提下,能够对用电功率进行上/下调整的范围。DR潜力评估问题可以转化为在生产绩效约束下(保证产量不减少,产品质量不受影响),对原始生产计划进行重新优化再调度的问题。因此,本文提出一种基于设备级生产调度模拟的DR潜力评估方法,总体框架如图2所示。

步骤1:采用RTN建立考虑生产过程耦合约束的短流程炼钢生产调度模型。RTN用于刻画生产任务执行过程中任务及资源的动态关联关系,其不区

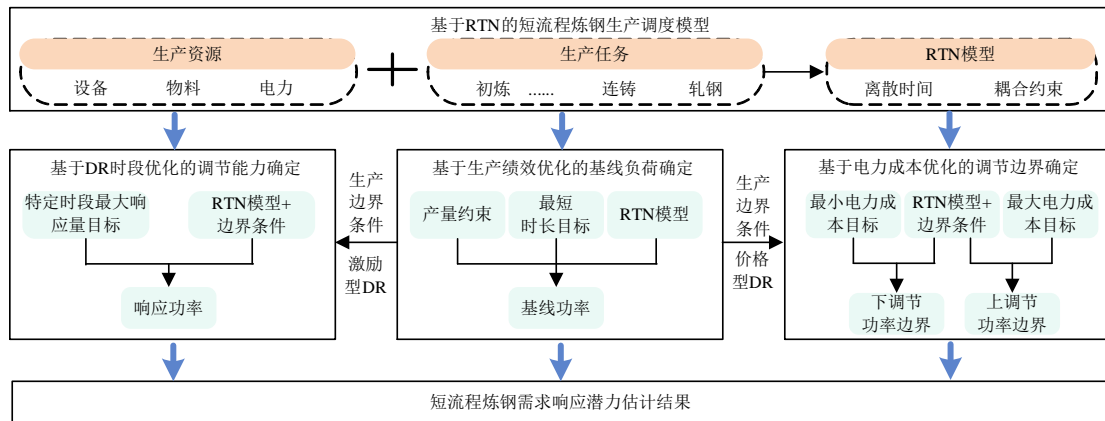


图2 短流程电炉炼钢DR潜力评估框架

Fig. 2 Assessment framework of DR potential for short-process EAF steelmaking

分任何类型的设备与生产资源，所有资源都允许在任务执行过程中被产出或消耗，非常适合处理大规模、多阶段、多并行设备的流程工业生产调度问题。

步骤 2：根据确定的调度周期和该周期内的最大产量约束，优化出最短完工时长调度方案作为基线方案，确定产量约束、初始状态约束和终止状态约束。

步骤 3：分别对价格型和激励型两种 DR 进行评估。对于价格型 DR，基于基线方案的产量约束、初始状态约束和终止状态约束，考虑电力价格优化得到最小/大电力成本调度方案，确定价格型 DR 下钢厂负荷上/下可调边界；对于激励型 DR，同样基于基线方案确定的约束条件，以 DR 时段响应量最大为目标确定激励型 DR 下钢厂的生产调度方案。

步骤 4：将步骤 2 得到的基线负荷与步骤 3 优化得到的上/下可调边界作差，即可评估得到短流程炼钢企业的 DR 潜力。

## 2.2 基于 RTN 的短流程炼钢生产调度模型

### 2.2.1 建模方法

RTN 方法常被应用于工业调度问题。本文基于

RTN 构建短流程钢厂的生产调度模型<sup>[20-22]</sup>，其结构如图 3 所示。在 RTN 模型中，生产流程被抽象为资源节点和任务节点两大类。资源节点囊括生产流程中所有具体的物质要素，涵盖原材料、中间产物(半成品)、最终产品、生产设备以及能源(如电力)等。任务节点则代表生产过程中需要执行的具体操作活动。以本文建立的模型为例，资源节点具体包括废钢原材料、成品钢材等物料，EAF、AOD、LF、CC、HR 这类生产设备，以及生产过程中耗费的电力。任务节点则包括脱碳、精炼等生产任务及脱碳至精炼的物料转运等运输任务。资源节点的状态受与之相关的任务节点执行状态的影响。任务的执行会消耗/生成与之相关的各类资源，具体通过相应物料的数量增减及相应生产设备的启停状态转换来体现。以精炼任务为例，其启动的前提条件是具备充足的输入资源(包括待精炼的半成品和电力)以及处于待使用状态的精炼炉。图 3 所示为生产调度模型中各类资源与任务之间的交互关系。值得注意的是，任务与电力资源是连续交互的，而与其他资源(如物料、设备)则为离散交互。

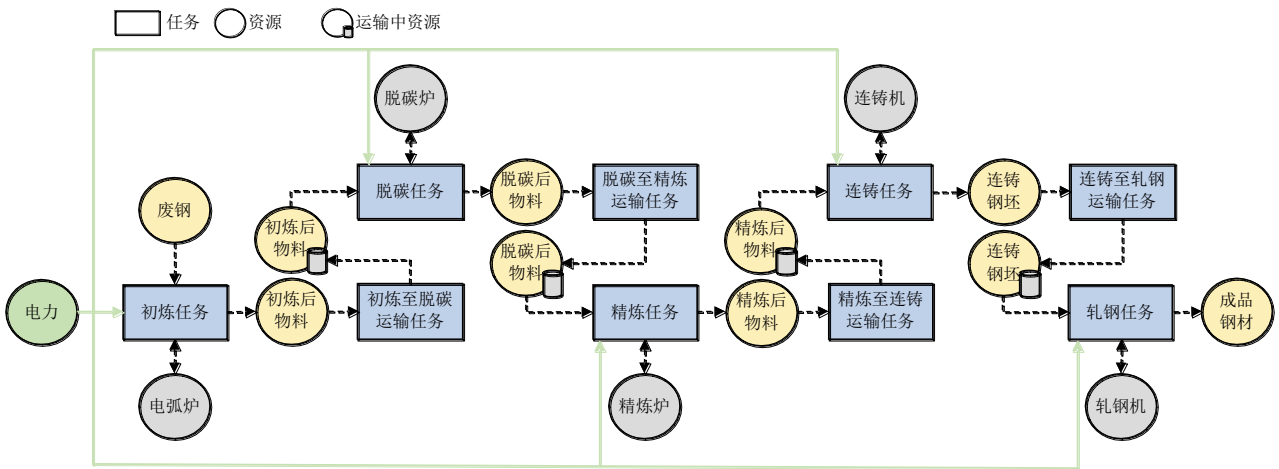


图 3 短流程电炉炼钢生产调度 RTN 模型

Fig. 3 RTN model for short-process EAF steelmaking production scheduling

在 RTN 模型中，任务执行与资源状态紧密耦合，形成联系紧密的生产序列。例如，成品钢材作为最终产品，由 HR 对连铸钢坯的加工而成。而连铸钢坯又是连铸任务执行的产物。通过记录各类资源生产与消耗的数量建模整个生产调度流程。

### 2.2.2 RTN 模型构建

本文模型根据电力市场与需求响应市场的时间分辨率进行离散化处理，以 15 min 的间隔将连续的生产调度时间分割为长度均匀的离散时间网格。基于此，RTN 通过追踪并计算每个时间点上各类资

源的状态(数量)构建生产流程模型<sup>[22]</sup>，如式(1)–(3)所示。

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} (\mu_{r,i,\theta} N_{i,t-\theta} + \nu_{r,i,\theta} \xi_{i,t-\theta}) + \pi_{r,t}, \quad \forall r \in R, \forall t \in T, \forall i \in I \quad (1)$$

$$R = \{EAF, m_{EAF,out}, m_{AOD,in}, AOD, m_{AOD,out}, m_{LF,in}, LF, m_{LF,out}, m_{CC,in}, CC, m_{CC,out}, m_{HR,in}, HR, m_{HR,out}, EP\} \quad (2)$$

$$I = \{M, H_{MD}, D, H_{DL}, L, H_{LC}, C, H_{CR}, S_R\} \quad (3)$$

式中： $T$  为所有离散时间点的集合； $I$  为所有任务的

集合;  $R$  为所有资源的集合, 包括生产设备、生产物料和电力设备 3 大类。其中, 生产设备包括 EAF、AOD、LF、CC、HR; 生产物料包括初炼产出物料  $m_{EAF,out}$ 、等候脱碳物料  $m_{AOD,in}$ 、脱碳产出物料  $m_{AOD,out}$ 、等候精炼物料  $m_{LF,in}$ 、精炼产出物料  $m_{LF,out}$ 、等候浇铸物料  $m_{CC,in}$ 、浇铸产出物料  $m_{CC,out}$ 、连铸钢坯  $m_{HR,in}$  和钢材产品  $m_{HR,out}$ ;  $I$  为所有任务的集合, 其中, 包括生产任务(初炼  $M$ 、脱碳  $D$ 、精炼  $L$ 、连铸  $C$ 、轧钢  $S_R$ )以及运输任务(初炼与脱碳之间的运输任务  $H_{MD}$ 、脱碳与精炼之间的运输任务  $H_{DL}$ 、精炼与连铸之间的运输任务  $H_{LC}$ 、连铸与轧钢之间的运输任务  $H_{CR}$ )。

$R_{r,t}$  为资源  $r$  于  $t$  时刻的数量;  $\tau_i$  为任务  $i$  的持续时长;  $\theta$  为任务执行期间的相对时间点; 常数项  $\mu_{r,i,\theta}$ 、 $v_{r,i,\theta}$  分别为任务  $i$  执行期间资源  $r$  在时间点  $\theta$  生产/使用的数量, 其中,  $\mu_{r,i,\theta}$  为该资源被使用或产出的固定量,  $v_{r,i,\theta}$  为受生产工艺或具体操作等外在因素影响, 资源  $r$  的消耗量/产量存在浮动;  $N_{i,t}$  为任务  $i$  在时间点  $t$  启动与否的二元变量, 当  $N_{i,t}=1$  时表示任务启动;  $\xi_{i,t}$  为任务  $i$  在时间点  $t$  的执行状况; 通过组合常数项  $\mu_{r,i,\theta}$ 、 $v_{r,i,\theta}$  和变量项  $\xi_{r,i,t-\theta}$  建模任务  $i$  在各时刻对资源  $r$  的需求量, 同时利用  $N_{i,t}$  控制任务的启动; 参数  $\pi_{r,t}$  为在时间为  $t$  时, 外界环境提供资源  $r$  的数量, 如原料供应/消耗对应  $\pi_{r,t}$  大于/小于 0。

通过设置不同的参数  $\mu_{r,i,\theta}$  和  $v_{r,i,\theta}$ , 可以建模出各种情况, 如图 4 所示。例如, 当任务  $i$  执行需要暂时使用设备  $D$ , 则资源  $D$  与任务  $i$  的参数可以表示为  $\mu_{D,i,0}=-1$ ,  $\mu_{D,i,\tau_i}=1$ ,  $v_{D,i,\theta}=0$ ; 当任务  $i$  执行需要消耗/生产固定数量的物料  $B/F$ , 则资源  $B/F$  的使用/产出的参数可以表示为  $\mu_{B,i,\theta}<0/\mu_{F,i,\theta}>0$ ,  $v_{B,i,\theta}=0$ ,  $v_{F,i,\theta}=0$ ; 当任务  $i$  执行需要消耗/生产可变数量的物料  $A/E$ , 则资源  $A/E$  的使用/产出的参数可以表示为

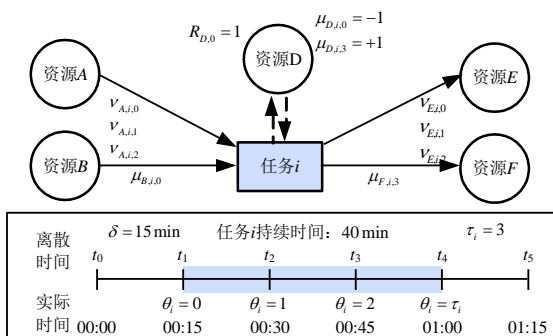


图 4 RTN 模型表示方式(以任务  $i$  为例)  
Fig. 4 RTN representation of an exemplary task  $i$

$$\mu_{A,i,\theta}=0, \mu_{E,i,\theta}=0, v_{A,i,\theta}<0/v_{E,i,\theta}>0.$$

在各时刻, 模型都需要对资源的数量加以限制, 如正在运行的设备不能超过设备数量, 约束如式(4)所示。

$$R_{r,t}^{\min} \leq R_{r,t} \leq R_{r,t}^{\max}, \quad \forall (r,t) \in R \times \{1, \dots, T\} \quad (4)$$

式中  $R_{r,t}^{\max}$  与  $R_{r,t}^{\min}$  分别为  $t$  时刻资源  $r$  的上、下限。

此外, 模型通过  $N_{i,t}$  和任务操作范围对任务运行状态加以限制, 如任务生产时炉次大小需要满足设备要求。

$$V_i^{\min} N_{i,t} \leq \xi_{i,t} \leq V_i^{\max} N_{i,t}, \quad \forall (i,t) \in I \times \{1, \dots, T\} \quad (5)$$

式(1)–(5)对基本任务的操作时长、物料需求进行了定义。而介于短流程电炉炼钢的工艺特殊性, 还需引入额外的约束条件。

在批量生产模式下, 中间产物(如铸坯)在设备间转运时, 需严格控制其在设备外的暴露时间。过长的等待会导致铸坯温度下降, 进而影响产品质量。为此, 建立最大等待时间约束:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T R_{m_{AOD,in},t} \leq \frac{d_{H_{MD}}}{\delta} \\ \sum_{t=1}^T R_{m_{LF,in},t} \leq \frac{d_{H_{DL}}}{\delta} \\ \sum_{t=1}^T R_{m_{CC,in},t} \leq \frac{d_{H_{LC}}}{\delta} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d_{H_{MD}}$ 、 $d_{H_{DL}}$ 、 $d_{H_{LC}}$  分别为运输任务  $H_{MD}$ 、 $H_{DL}$ 、 $H_{LC}$  的最大持续时间;  $\delta$  为离散时间节点的时间间隔。

为满足钢铁生产流程中任务执行的连续性要求, 引入任务衔接约束。该约束规定生产任务完成后, 其后续运输任务必须无延迟启动, 以保证生产运输任务的连贯性。而其体现在 RTN 模型中, 则为后一任务对前一任务所产生资源的即时消耗, 如式(7)所示。

$$R_{r,t} = 0, \quad \forall t \in T, \forall r \in \{m_{EAF,out}, m_{AOD,out}, m_{LF,out}\} \quad (7)$$

短流程电炉炼钢生产流程中部分设备存在进一步调节空间, 如 EAF 可通过调整变压器分接头位置调整功率大小。为了将这一部分调节过程纳入考虑, 模型中为涉及 EAF 的初炼任务设置多种功率档位<sup>[23]</sup>, 如图 5 所示。

为了保证初炼任务中 EAF 在同一时刻只处在一个档位, 需要满足约束式(8)。

$$\sum_{g=1}^G \sum_{t \in T} N_{M_g,t} = 1 \quad (8)$$

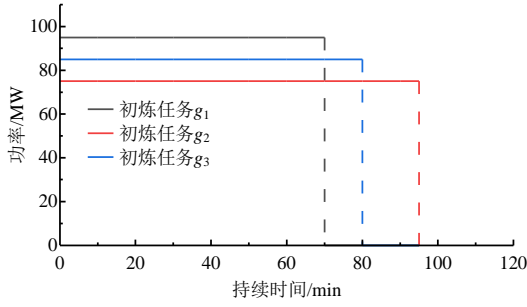


图 5 功率挡位示意图

Fig. 5 Schematic diagram of power range

式中： $\mathcal{G}$  为功率挡位的集合； $g$  为挡位的索引。

通过上述模型可以将用户在时刻  $t$  消耗的电力功率表示为式(9)–(10)。

$$P_t = P_{\text{EAF},t} + P_{\text{AOD},t} + P_{\text{LF},t} + P_{\text{CC},t} + P_{\text{HR},t} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_t = \sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} (\mu_{\text{EP},i,\theta} N_{i,t-\theta} + v_{\text{EP},i,\theta} \xi_{i,t-\theta}), \forall t \in T \\ P_{\text{EAF},t} = \sum_{\theta=0}^{\tau_M} (\mu_{\text{EP},M,\theta} N_{M,t-\theta} + v_{\text{EP},M,\theta} \xi_{M,t-\theta}), \forall t \in T \\ P_{\text{AOD},t} = \sum_{\theta=0}^{\tau_D} (\mu_{\text{EP},D,\theta} N_{D,t-\theta} + v_{\text{EP},D,\theta} \xi_{D,t-\theta}), \forall t \in T \\ P_{\text{LF},t} = \sum_{\theta=0}^{\tau_L} (\mu_{\text{EP},L,\theta} N_{L,t-\theta} + v_{\text{EP},L,\theta} \xi_{L,t-\theta}), \forall t \in T \\ P_{\text{CC},t} = \sum_{\theta=0}^{\tau_C} (\mu_{\text{EP},C,\theta} N_{C,t-\theta} + v_{\text{EP},C,\theta} \xi_{C,t-\theta}), \forall t \in T \\ P_{\text{HR},t} = \sum_{\theta=0}^{\tau_{\text{SR}}} (\mu_{\text{EP},\text{SR},\theta} N_{\text{SR},t-\theta} + v_{\text{EP},\text{SR},\theta} \xi_{\text{SR},t-\theta}), \forall t \in T \end{array} \right. \quad (10)$$

式中： $P_t$  为  $t$  时刻钢厂负荷； $\pi_t$  为  $t$  时刻电力价格； $P_{\text{EAF},t}$  为  $t$  时刻 EAF 负荷； $P_{\text{AOD},t}$  为  $t$  时刻 AOD 负荷； $P_{\text{LF},t}$  为  $t$  时刻 LF 负荷； $P_{\text{CC},t}$  为  $t$  时刻 CC 负荷； $P_{\text{HR},t}$  为  $t$  时刻 HR 负荷。对于电力资源，各设备在各时段的电力消耗量参照式(1)可简化为式(9)。

### 2.3 基于生产调度模拟的 DR 潜力评估方法

根据 2.1 节对 DR 潜力的定义，DR 潜力评估的核心在于确定基线调度方案和生产计划调整后的调度方案。本文评估了短流程炼钢用户参与价格型和激励型两种不同 DR 的响应潜力，但是无论哪种 DR，都需要确定基线负荷。为此，本文在不考虑 DR 情况下以生产绩效最优为目标确定基线调度方案并得到生产产量。对于价格型 DR，将基线调度方案确定的产量作为约束条件，分别以电力成本最小和电力成本最大为优化目标，优化得到两种不同生产再调度方案，分别评估钢厂在这两种调度方案下的价格型 DR 潜力大小。对于激励型 DR，将基线调度方案确定的产量作为约束条件，以 DR 时段

响应量最大为优化目标，优化得到特定时段最大响应量再调度方案，评估特定时段钢厂存在的最大 DR 潜力。

#### 1) 基线调度方案。

钢厂的首要目标是完成生产任务，因此，基线调度方案是以给定的生产资源(包括物料和设备)完成给定生产任务的时间最短为优化目标(即最短完工时长)。然而，由于 RTN 模型中没有单独表示时间的变量，只有针对时间的索引，因此，需要将最短完成时长这一优化目标进行等效转化。本文中，任务衔接是严格约束的，钢材产量的累计数量是随时间推进而递增的。如果生产任务更早完成，则累积的产量在整个时间范围内会更大。因此，本文以最大化所有时段的钢材产品的数量之和为目标函数来得到与最短完工时长相同的优化结果，其目标函数如式(11)–(12)所示。

$$\max \sum_{t \in T} R_{m_{\text{HR},\text{out}},t} \quad (11)$$

$$R_{m_{\text{HR},\text{out}},T} = R_{m_{\text{HR},\text{out}},T}^{\max} \quad (12)$$

式中  $T$  为调度周期，其对钢厂的产量会有较大影响，由于钢厂某些生产环节是长时间连续进行的，生产调度周期过短会使某些生产环节无法在一个调度周期内完成，从而导致产量下降，而生产调度周期过长又会使整个调度问题变得过于复杂而难以求解，因此，需要确定合理的生产调度周期以实现计算复杂度和生产产量的平衡，本文将在 3.1.1 节详细讨论调度周期该如何选取； $R_{m_{\text{HR},\text{out}},T} = R_{M_{\text{HR},\text{out}},T}^{\text{ref}}$  为资源钢坯在生产调度周期结束时刻的数量； $R_{m_{\text{HR},\text{out}},T}^{\max}$  为调度周期结束时刻的最大产量。

#### 2) 价格型 DR 的潜力评估。

短流程炼钢用户的 DR 潜力可通过式(13)计算。

$$\Delta P_t = P_t^* - P_t^{\text{ref}} \quad (13)$$

式中： $P_t^{\text{ref}}$  为基线方案下  $t$  时刻钢厂的负荷有功功率； $P_t^*$  为其他调度方案下  $t$  时刻钢厂的负荷有功功率； $\Delta P_t$  为  $t$  时刻钢厂的 DR 潜力，其为正数时表示上调潜力，为负数为下调潜力。

①最小电力成本调度方案。本方案考虑电力价格随时间的变化，在完成与基线方案相同产量的情况下优化钢厂一个调度周期内的最小电力成本，目标函数如式(14)所示。

$$\min \sum_{t \in T} P_t \pi_t \quad (14)$$

式中  $\pi_t$  为  $t$  时刻的电力价格。

②最大电力成本调度方案。本方案同样考虑电价的影响,在完成与基线方案相同产量的情况下优化钢厂一个调度周期内的最大电力成本,目标函数如式(15)所示。

$$\max \sum_{t \in T} P_t \pi_t \quad (15)$$

上述调度方案需满足产量约束以保证产量与基线方案相同,如式(16)所示。同时,为了保证调度周期的循环可持续性,还需要满足初始状态约束和终止状态约束,使调度周期开始时和结束时的资源状态相同,如式(17)、(18)所示。

$$R_{m_{HR,out},T} = R_{m_{HR,out},T}^{ref} \quad (16)$$

$$R_{r,0} = R_{r,0}^{ref}, \forall r \in R \quad (17)$$

$$R_{r,T} = R_{r,T}^{ref}, \forall r \in \{EAF, m_{EAF,out}, m_{AOD,in}, AOD, m_{AOD,out}, m_{LF,in}, LF, m_{LF,out}, m_{CC,in}, CC, m_{CC,out}, m_{HR,in}, HR, EP\} \quad (18)$$

式中:  $R_{m_{HR,out},T}^{ref}$  为基线方案求得的钢厂一个调度周期内的最大产量;  $R_{r,0}^{ref}$  为基线方案开始时的资源状态;  $R_{r,T}^{ref}$  为基线方案终止时的资源状态。

为了表征短流程炼钢用户在一个调度周期内平均的价格型 DR 潜力大小,本文构造两个指标:

$$\Delta \bar{P}^+ = \sum_t \Delta P_t^+ / (\sum_t P_t^{ref}) \quad (19)$$

$$\Delta \bar{P}^- = \sum_t \Delta P_t^- / (\sum_t P_t^{ref}) \quad (20)$$

式中:  $\Delta \bar{P}^+$  和  $\Delta \bar{P}^-$  分别为平均上调潜力和平均下调潜力,以相对于基线负荷大小的比例表示;  $\Delta P_t^+$  为 DR 潜力时间序列中为正数的部分;  $\Delta P_t^-$  为 DR 潜力时间序列中为负数的部分。

### 3) 激励型 DR 的潜力评估。

短流程炼钢用户参与激励型 DR 的响应潜力同样可通过式(13)计算。在完成与基线方案相同产量的前提下,本文将钢厂在 DR 时段  $T_{DR}$  的响应量最大为优化目标来确定激励型 DR 下钢厂的生产调度方案,目标函数如式(21)所示。

$$\max \sum_{t \in T_{DR}} \Delta P_t \quad (21)$$

与价格型 DR 潜力评估相同,激励型 DR 调度方案需满足式(16)~(18)表示的约束。需要说明的是,本文仅评估技术层面可实现的响应潜力,这一

潜力是否能被激发出来取决于外部的激励补偿价格,只有当激励补偿大于生产调整额外产生的成本后才能激发这一潜力。

## 3 算例分析

下文将通过一个短流程电炉钢厂算例分析其生产调度过程中的 DR 可调潜力及潜在经济收益。算例分析在一台主频为 2.50 GHz 的 Intel(R) Core(TM) i5-13400 CPU 的计算机上进行,程序基于 MATLAB R2023a 开发,优化求解器为 Gurobi 9.5.2。

### 3.1 算例设置

以河北某电炉钢厂为例,分析其在分时电价和实时电价两种情况下的 DR 可调潜力及收益。分时电价信号如附表 A1 所示<sup>[24]</sup>。实时电价数据来自于 2023 年 7 月份 PJM 实时电能市场区域输电组织 (regional transmission organization, RTO) 节点边际价格<sup>[25]</sup>,并以当年 7 月 31 日的汇率进行换算,人民币兑美元的汇率为 7.14。为了同步生产调度与电网日前调度,选择离散时间间隔  $\delta$  为 15 min。运输任务的最大持续时间设置为 30 min。调度模型中每个任务的操作时间和资源需求是固定的,任务相关参数如附表 A2—A5 所示<sup>[23-24,26]</sup>。考虑到钢铁行业一般采用 3 班 24 h 连续工作制,因此,本文设定钢厂持续工作且原材料持续供应。由于不同成品的轧钢任务的操作工艺完全不同,本文建模仅针对较为常见的热轧钢卷任务。

### 3.2 价格型 DR 潜力分析

#### 3.2.1 场景设置

为了分析对比短流程钢厂在不同电价机制和不同设备调控方式下的 DR 潜力,本文设置如下 4 个场景。

场景 1: 短流程钢厂在分时电价下仅通过平移负荷参与 DR,不考虑 EAF 功率可调。

场景 2: 短流程钢厂在实时电价下仅通过平移负荷参与 DR,不考虑 EAF 功率可调。

场景 3: 短流程钢厂在分时电价下通过平移负荷及改变 EAF 挡位参与 DR。

场景 4: 短流程钢厂在实时电价下通过平移负荷及改变 EAF 挡位参与 DR。

在众多参数中,生产调度周期对钢铁企业产量有较大影响。本文分析了生产计划调度周期的选择对工厂可以完成的成品钢平均每小时产量的影响。

由于钢铁生产任务持续时间较长，短周期的调度方案限制了调度周期内可以完成的成品钢炉次，进而导致工厂平均每小时产量降低。例如，以 1d 为调度范围，如果 1d 最多可以完成 14.7 个炉次的生产任务，但由于额外的炉次任务没有办法完整地在这 1d 内完成，只能完成 14 个炉次任务。而把调度范围拉长时，工厂的平均小时产量更高。

由图 6 可知，平均小时产量已经逐渐接近极限 (168h)，因此，后续分析均选择 1 周时长作为调度周期。一炉次生产 100t 成品钢，1 周总产量为 12 900t 成品钢。

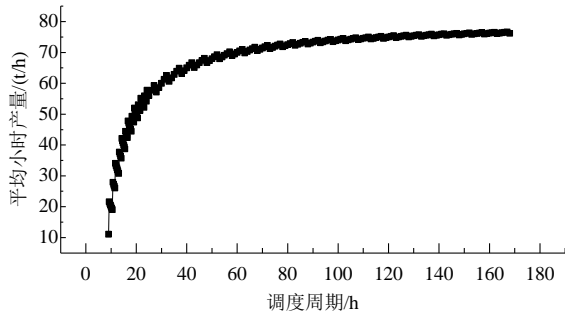


图 6 调度周期的选择对最终平均小时产量的影响

Fig. 6 Impact of the chosen scheduling horizon on the average hourly production of final steel products

### 3.2.2 场景 1 与 2 钢厂负荷 DR 潜力分析

本节将最小电力成本调度方案与基线方案和最大电力成本调度方案(最坏情况)进行比较，并确定 DR 潜力。比较 3 种方案的 1 周总电力成本，其中，分时电价下最小电力成本调度方案 1 218.79 万元，基线方案 1 240.71 万元，最坏情况 1 333.57 万元；实时电价下最小电力成本调度方案 588.69 万元，基线方案 621.82 万元，最坏情况 677.16 万元。

分时电价下，考虑 DR 的最小成本调度方案相比基线方案电力成本下降 1.77%，相比最坏情况下下降 8.61%。实时电价下，考虑 DR 的最小成本调度方案相比基线方案电力成本下降 5.34%，相比最坏情况下下降 13.07%。

图 7—9 比较了基线方案与最小/最大用电成本方案 1 周内 在 分 时 与 实 时 电 价 情 况 下 的 电 力 耗 耗 情 况。最小用电成本调度方案将生产转移到价格更低的时段。实时电价下转移的负荷总计 4.45 GW·h，占总负荷的 20.50%。即对比基线方案增加和减少的总负荷分别为+4.45 和-4.45 GW·h。分时电价下峰时段持续时间较长，受限于生产任务，调度时无法完全避开峰时段。同时，相比分时电价，实时电价的峰谷差更大，而峰谷持续时间较短。对于负荷调节来说更容易避开用电高峰。

图 10 所示为基线方案与最小用电成本方案在用电量和累计产量上的差异。用电量上，可以明显看出，通过负荷的平移，钢厂可以在一段时间内减少或增加负荷。例如在几个电价高峰时段(170—173 时段、454—457 时段等)，最小用电成本方案的用电量明显更小；累计产量上，在起初一段时间内(31 个时段，共 7.75 h)产量相同。然而，以 454—457 时段为分界点，在此之前最小用电方案的产量在大部分时间内比基线方案少，但是用电量更多，在此之后则相反。这是因为在分界点之前，最小用电方案完成了更多耗电高的初炼任务和更少的轧钢任务。说明在这 1 周内，最小用电成本方案在不影响任务完成的前提下将部分产量进度后移，从而将用电量集中在平均电价更低的时段。用电量和累计产

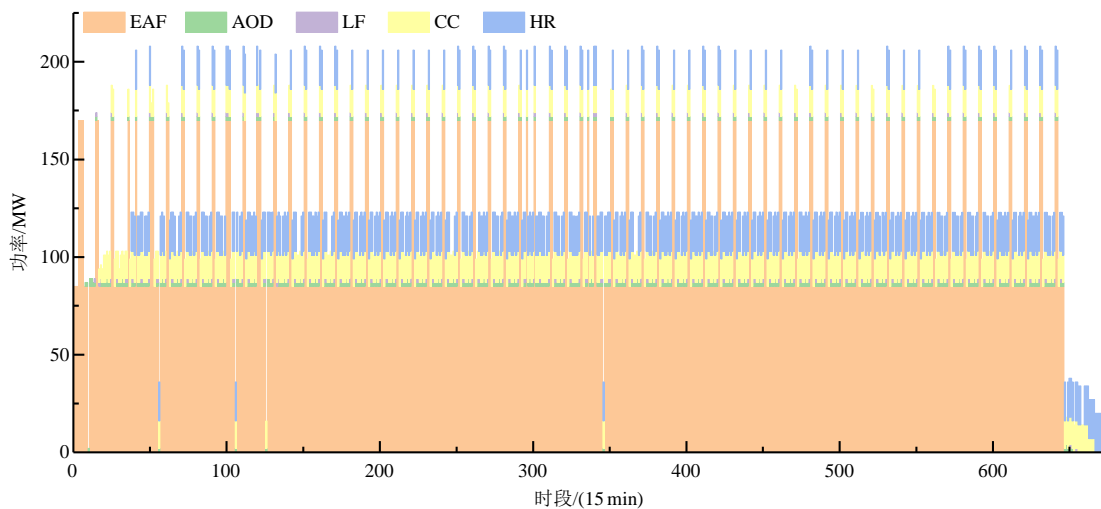


图 7 基线方案下钢铁生产用电量

Fig. 7 Electricity consumption of steelmaking under the reference scheme

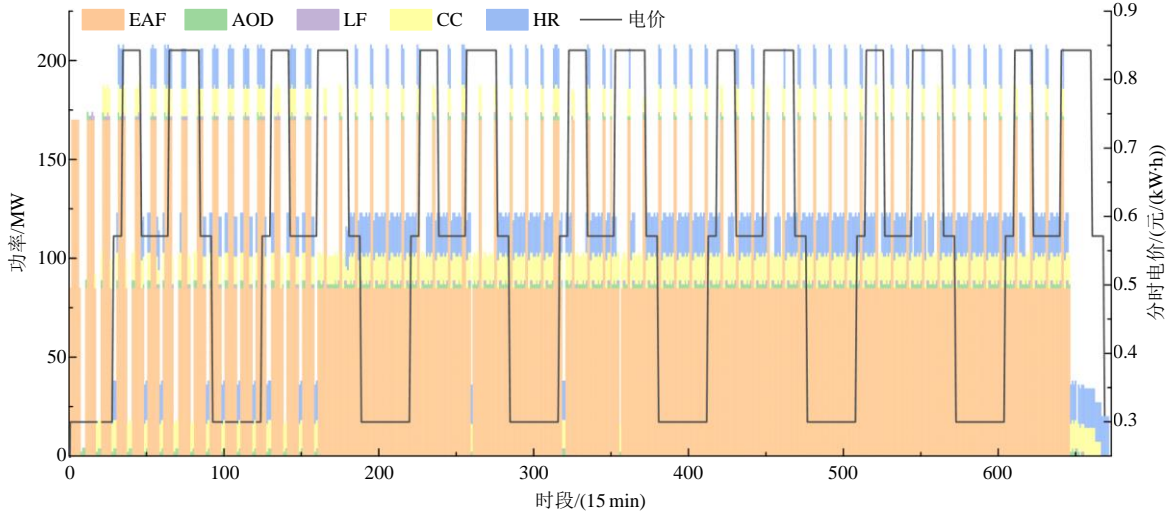


图8 最小用电成本调度方案下钢铁生产用电量(分时电价)

Fig. 8 Electricity consumption for steelmaking under the minimum electricity cost scheme (time-of-use tariff)

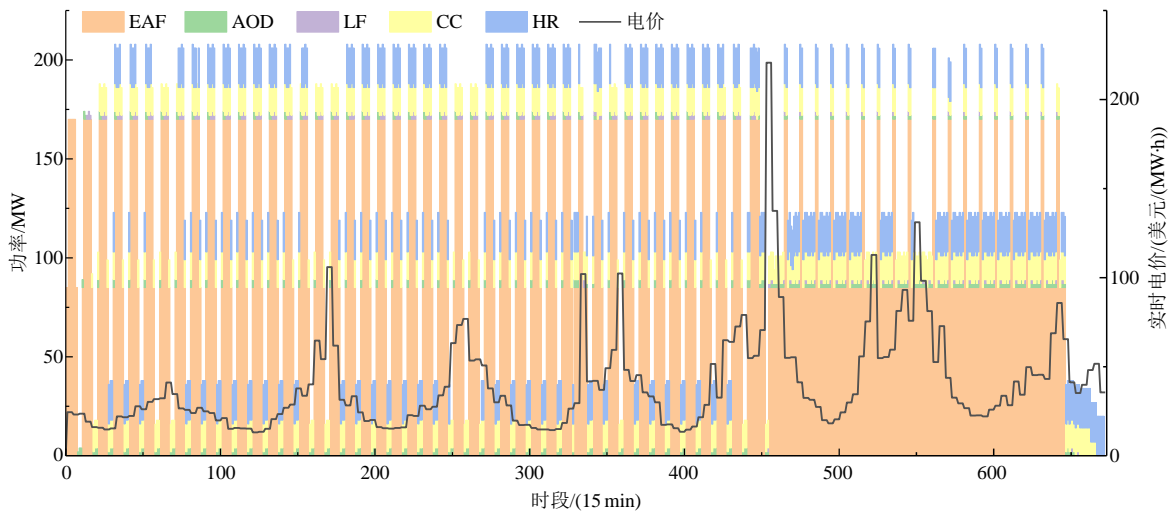


图9 最小用电成本调度方案下钢铁生产用电量(实时电价)

Fig. 9 Electricity consumption for steelmaking under the minimum electricity cost scheme (real-time tariff)

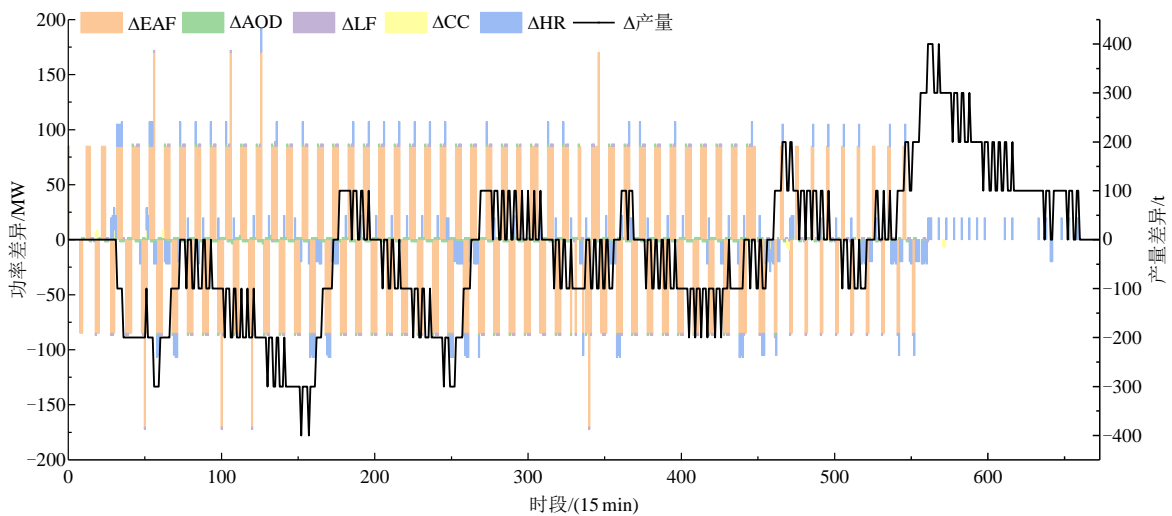


图10 基线调度方案和最小用电成本调度方案的电力消耗差异和产量差异(实时电价)

Fig. 10 Electricity consumption variance and production variance between the reference scheme and the minimum electricity cost scheme (under real-time tariffs)

量的变化表明,短流程电炉炼钢的生产过程存在调节空间。通过调节生产计划,钢厂可以依据外部信

息(如电价等)在特定时段减少或增加负荷,形成调节空间。钢厂也可以分配产量,将生产集中到平均电价更低的时段。

为了分析特定任务存在的 DR 潜力,图 11 所示为单个任务的用电设备在不同调度方案下的具体电力成本。由图 11 可知,由于 EAF 和 HR 的功率较高,他们的最高和最低电力成本差异最大。

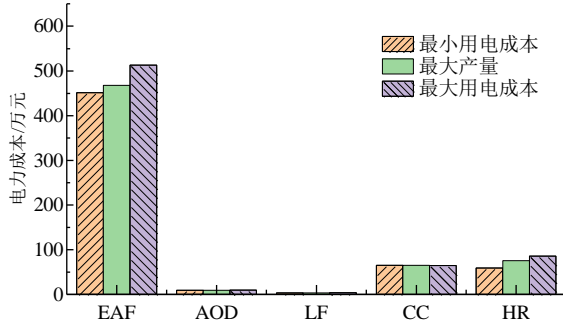


图 11 特定任务不同方案下的用电成本(实时电价)  
Fig. 11 Electricity cost of the specific tasks under different schemes (real-time tariffs)

### 3.2.3 场景 3 与 4 钢厂负荷 DR 潜力分析

使用与 3.2.2 节相同的方式比较在考虑 EAF 功率调节的情况下,基线方案与最小/最大用电成本方案 1 周内分时与实时电价情况下的电力消耗情况。其中,分时电价下最小电力成本调度方案 1 149.28 万元,基线方案 1 184.90 万元,最大电力成本调度方案 1 361.54 万元;实时电价下最小电力成本调度方案 550.28 万元,基线方案 594.98 万元,最大电力成本调度方案 695.94 万元。分时电价下,考虑 DR 的最小成本调度方案相比基线方案电力成本下降 3.01%,相比最坏情况下下降 15.59%。实时电价下,考虑 DR 的最小成本调度方案相比基线方案电力成本下降 7.51%,相比最坏情况下下降 20.93%。

最小用电成本调度方案将生产转移到价格更优惠的时间,并减少了总用电量。对比基线方案增加和减少的总负荷分别为-3.78 和+3.70 GW·h。分别占总负荷的 18.30%和 17.80%。

### 3.2.4 不同场景下用电成本对比

表 2 所示为 3 种方案在 4 种场景下的吨钢用电成本。由表 2 可知,在考虑 EAF 功率调节时,最小用电成本方案相较于基线方案和最坏情况用电成本下降幅度更大。

对比总用电量,同样以最小用电成本方案运行,考虑 EAF 功率调节时,总用电量为 20.66 GW·h;不考虑时,总用电量为 21.74 GW·h。考虑 EAF 功率调节时的用电量更少。

表 2 各场景下的吨钢用电成本对比

Table 2 Comparison of electricity costs per ton of steel in different scenarios

调度方案	最小用电成本/(元/t)	基线方案/(元/t)	最大用电成本/(元/t)
场景 1	944.8	961.79	1 033.78
场景 2	456.35	482.03	524.93
场景 3	890.91	918.53	1 055.46
场景 4	426.57	461.22	539.49

### 3.3 激励型 DR 潜力分析

对于激励型 DR,用户更关注 DR 时段存在的调节能力。中国各省份的 DR 时间通常出现在用电负荷晚高峰时段,持续时间一般在 2h 左右,因此,将 DR 时段设置为 16:00—18:00,使用基线调度方案确定未参与 DR 时的日常生产负荷,使用特定时段最大响应量方案确定响应后的生产负荷,来计算用户理论上存在的技术调节能力,功率响应结果如图 12 所示。由图 12 可知,用户的再调度方案使负荷在 DR 时段有明显下降。激励型 DR 下的生产调度方案如图 13 所示,结合图 12 与 13 可知,再调度方案将功率最高的 EAF 往前平移,并将部分轧钢

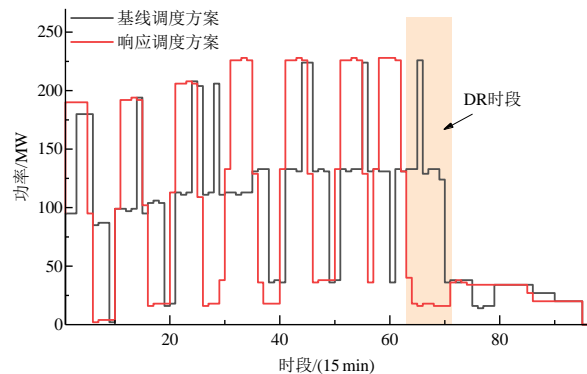


图 12 激励型 DR 下电炉炼钢的功率响应曲线

Fig. 12 Maximum response capacity scheme of EAF steelmaking under incentive-based DR

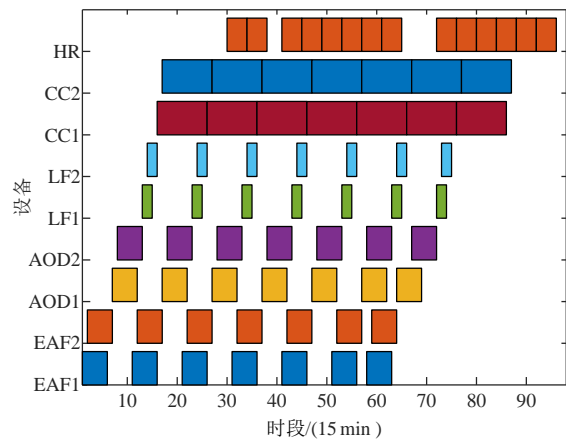


图 13 激励型 DR 下电炉炼钢的生产调度方案甘特图  
Fig. 13 Gantt chart of the production scheduling scheme for EAF steelmaking under incentive-based DR

任务延后,在DR时段实现了功率下降。整理各时段响应量如表3所示。

表3 各时段技术调节潜力  
Table 3 Technical adjustment potential in each time period

响应时段	响应量/(MW·h)
16:00—17:00	132.25
17:00—18:00	90

## 4 结论

准确评估短流程电炉炼钢用户的DR潜力是开展后续市场交易和优化调控的基础。针对现有评估方法没有充分考虑短流程炼钢生产过程耦合约束和不同功率调节方式导致评估结果不准确的问题,本文提出基于设备级生产调度模拟的DR潜力评估方法,并考虑了负荷平移和功率削减两种不同的调节方式,实现了短流程炼钢DR潜力的充分挖掘,通过在河北某钢厂的实际数据集上开展仿真分析,得到的结论如下:

1) 在维持总产量不变的前提下,电炉炼钢在1周的调度周期内上/下可调容量分别占总负荷的17.8%和18.3%。电力总成本在分时电价情况下下降3.01%~15.59%,实时电价情况下下降7.51%~20.93%。证明短流程钢铁参与DR具有巨大的经济潜力。

2) 电炉炼钢的核心耗电设备EAF拥有最大的DR潜力。相比于不考虑EAF功率调节的调度方案,考虑EAF功率调节后电力消耗下降4.97%,可以进一步降低电力成本。

进一步工作可从以下几个方面展开。

1) 本文评估了分时电价和实时电价下钢厂的价格型DR潜力。但现实中,钢厂可能需要面对不确定的电力价格,可以在考虑实时电价不确定性的情况下研究钢厂负荷DR潜力。

2) 本文主要针对短流程炼钢主要生产负荷存在的可调节潜力进行了评估。现实中,钢厂内还会配备自备电厂。可以在考虑自备电厂的情况下研究钢厂负荷DR潜力。

## 参考文献

[1] 祝东,陈武晖,郭小龙,等.蓄热电采暖与需求响应协同消纳风电的混合时间尺度调度策略[J].中国电机工程学报,2025,45(12):4728-4740.  
ZHU Dong, CHEN Wuhui, GUO Xiaolong, et al. Hybrid time scale scheduling strategy for thermal storage electric heating and demand response to synergize wind power

consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4728-4740(in Chinese).

[2] 国家统计局.分行业电力消费总量[EB/OL]. [2024-04-21]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C0>.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委等部门关于印发《电力需求侧管理办法(2023年版)》的通知[EB/OL]. (2023-09-15)[2024-06-27]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927\\_1360902.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360902.html).

[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委国家能源局关于印发《电力负荷管理办法(2023年版)》的通知[EB/OL]. (2023-09-07)[2024-06-27]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927\\_1360904.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360904.html).

[5] 廖思阳,谢濠聪,徐箭,等.面向需求侧市场化响应交易细则的高耗能负荷需求响应控制策略[J].中国电机工程学报,2025,45(5):1645-1658.  
LIAO Siyang, XIE Haocong, XU Jian, et al. Demand response control strategy for high-energy-consuming loads aligned with demand-side market response transaction rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1645-1658(in Chinese).

[6] 张逸,孙守铨,廖思阳,等.基于机理数据混合驱动的钢铁企业生产短流程功率模型[J].中国电机工程学报,2025,45(18):7098-7110.  
ZHANG Yi, SUN Shouquan, LIAO Siyang, et al. A mechanism-data hybrid-driven power model for short-process steel production[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7098-7110(in Chinese).

[7] 王飞,李美颐,张旭东,等.需求响应资源潜力评估方法、应用及展望[J].电力系统自动化,2023,47(21):173-191.  
WANG Fei, LI Meiyi, ZHANG Xudong, et al. Assessment methods for demand response resource potential and their application and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 173-191(in Chinese).

[8] 杨雪莹,祁兵,祁琪,等.计及用户意愿的温控负荷热参数辨识与主动平衡控制方法[J/OL].中国电机工程学报,2025,1-17[2026-02-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250515.1300.002>.  
YANG Xueying, QI Bing, QI Qi, et al. A method for thermal parameter identification and active balancing control of thermostatically controlled loads considering user willingness[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025, 1-17[2026-02-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250515.1300.002>(in Chinese).

[9] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 432-441.

- [10] 聂世豪, 陈磊, 闵勇, 等. 工业负荷参与一次调频潜力与特性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3994-4004. NIE Shihao, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Potential and characteristic analysis on participation of industrial load in primary frequency regulation[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3994-4004 (in Chinese).
- [11] 范宇辉, 姜婷玉, 黄奇峰, 等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 41-49. FAN Yuhui, JIANG Tingyu, HUANG Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 41-49(in Chinese).
- [12] 冉博路, 张姝, 黄河, 等. 基于二次聚类的工业用户负荷可调节潜力特征提取与综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 157-168. RAN Bolu, ZHANG Shu, HUANG He, et al. Feature extraction and comprehensive evaluation method of load adjustable potential for industrial users based on secondary clustering[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 157-168(in Chinese).
- [13] GOLMOHAMADI H. Demand-side management in industrial sector: a review of heavy industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 156: 111963.
- [14] 王强, 孙文强, 徐宪东, 等. 钢包精炼炉(LF)作为可削减负荷的灵活性评估[J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(2): 150-156. WANG Qiang, SUN Wenqiang, XU Xiandong, et al. Quantification of flexibility of ladle furnaces in iron and steel industry as cuttable load[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2022, 21(2): 150-156(in Chinese).
- [15] RÖBEN F T C, LIU Diran, REUTER M A, et al. The demand response potential in copper production[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 362: 132221.
- [16] 蔡云帆, 徐宪东, 余晓丹, 等. 面向调峰需求的热轧负荷可调能力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 1-12. CAI Yunfan, XU Xiandong, YU Xiaodan, et al. Evaluation method for adjustable power capacity of hot rolling loads for peak-regulation demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 1-12(in Chinese).
- [17] GONG Feixiang, CHEN Songsong, TIAN Shiming, et al. Integrated scheduling of hot rolling production planning and power demand response considering order constraints and TOU price[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(14): 2840-2851.
- [18] GERMSCHIED S H M, MITSOS A, DAHMEN M. Demand response potential of industrial processes considering uncertain short-term electricity prices[J]. AIChE Journal, 2022, 68(11): e17828.
- [19] KLAUCKE F, HOFFMANN C, HOFMANN M, et al. Impact of the chlorine value chain on the demand response potential of the chloralkali process[J]. Applied Energy, 2020, 276: 115366.
- [20] SU Pengfei, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Multi-objective scheduling of a steelmaking plant integrated with renewable energy sources and energy storage systems: balancing costs, emissions and make-span[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139350.
- [21] PANTELIDES C C. Unified frameworks for optimal process planning and scheduling[C]//Proceedings of the Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations. New York: CACHE Publications, 1994: 253-274.
- [22] 闫越, 冯皓然, 郭逸涵, 等. 面向低碳需求响应的短流程钢铁企业最优用电策略[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 90-100. YAN Yue, FENG Haoran, GUO Yihan, et al. An optimal electricity consumption strategy for steel enterprises with short processes in the context of low-carbon DR[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 90-100(in Chinese).
- [23] ZHANG Xiao, HUG G, HARJUNKOSKI I, et al. Cost-effective scheduling of steel plants with flexible EAFs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 239-249.
- [24] 王海博. 计及钢铁生产短流程需求响应潜力的供需互动调度策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2022. WANG Haibo. Research on supply-demand interaction dispatching strategy considering demand response potential of short production process of steel enterprises [D]. Jinan: Shandong University, 2022(in Chinese).
- [25] PJM. Data miner 2[EB/OL]. (2024-02-24)[2025-05-06]. <https://nicholasinstitute.duke.edu/energy-data-resources/pjm-data-miner>.
- [26] 涂夏哲, 徐箭, 廖思阳, 等. 考虑过程控制的钢铁工业负荷用能行为分析与功率特性建模[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 114-120. TU Xiazhe, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Process controlling based energy consumption behavior analysis and power characteristic modeling for iron and steel industry[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 114-120(in Chinese).

## 附录 A

表 A1 钢铁企业分时电价

Table A1 Time-of-use tariff signals to the steel corp

时段	峰	平	谷
区间划分	8:30—11:30、 16:00—21:00	7:00—8:30、11:30— 16:00、21:00—23:00	23:00—7:00
电价/(元/(kW·h))	0.843 8	0.572 2	0.300 7

表 A2 设备数量与功率

Table A2 Equipment number and power

设备	额定功率/MW	一炉次容量/t	数量
EAF	95	100	2
AOD	2	100	2
LF	2	100	2
CC	7	100	2
HR	20	100	1

表 A3 任务资源交互参数

Table A3 Task-resource interaction parameters of various tasks

任务	资源	$\mu_{r,i,\theta}$			$\nu_{r,i,\theta}$	
		$\theta=0$	$\theta$	$\theta=\tau_i$	$\theta=0$	$\theta=\tau_i$
$M_1$	EAF	-1	0	1	0	0
	$m_{EAF,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-75	-75	0	0	0
$M_2$	EAF	-1	0	1	0	0
	$m_{EAF,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-85	-85	0	0	0
$M_3$	EAF	-1	0	1	0	0
	$m_{EAF,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-95	-95	0	0	0
$D$	AOD	-1	0	1	0	0
	$m_{AOD,in}$	0	0	0	-1	0
	$m_{AOD,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-2	-2	0	0	0
$L$	LF	-1	0	1	0	0
	$M_{LF,in}$	0	0	0	-1	0
	$M_{LF,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-2	-2	0	0	0
$C$	CC	-1	0	1	0	0
	$M_{CC,in}$	0	0	0	-1	0
	$M_{CC,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-7	-7	0	0	0
$S_R$	HR	-1	0	1	0	0
	$M_{HR,in}$	0	0	0	-1	0
	$M_{HR,out}$	0	0	0	0	1
	电力设备	-20	-20	0	0	0

表 A4 运输任务资源交互参数

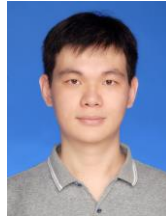
Table A4 Task-resource interaction parameters of transportation tasks

任务	资源	$\mu_{r,i,\theta}$	
		$\theta=0$	$\theta=1$
$H_{MD}$	$m_{EAF,out}$	-1	0
	$m_{AOD,in}$	0	1
	运输设备 1	-1	1
$H_{DL}$	$m_{AOD,out}$	-1	0
	$M_{LF,in}$	0	1
	运输设备 2	-1	1
$H_{LC}$	$M_{LF,out}$	-1	0
	$M_{CC,in}$	0	1
	运输设备 3	-1	1
$H_{CR}$	$M_{CC,out}$	-1	0
	$M_{HR,in}$	0	1
	运输设备 4	-1	1

表 A5 任务持续时间

Table A5 Task duration

任务	持续时间/min	任务	持续时间/min
$M_1$	95	L	30
$M_2$	80	$H_{LC}$	10
$M_3$	70	C	150
$H_{MD}$	10	$H_{CR}$	10
$D$	75	SR	60
$H_{DL}$	5	—	—



李雄飞

在线出版日期: 2025-07-22。

收稿日期: 2024-12-19。

作者简介:

李雄飞(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为需求响应, terryxf@sjtu.edu.cn;

\*通信作者: 李康平(1992), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为虚拟电厂、电力预测, kangpingli@sjtu.edu.cn;

黄淳驿(1993), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力市场、共享储能等, h\_chunyi@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)