

钢铁企业蒸汽动力系统经济环境多目标优化

文凯¹，张琦²，王晓坡¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，710049，西安；
2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室，110819，沈阳)

摘要：为缓解钢铁企业面临的经济环境矛盾，针对钢铁企业蒸汽动力系统（SPS），提出了涵盖上游过程污染物排放的多目标多周期混合整数非线性规划模型。考虑动态供需、分时电价、燃料结构等因素，采用运行成本的经济指标并结合生命周期评价（LCA）方法构建了环境目标函数，对钢铁企业 SPS 进行了全流程多能源的优化调度研究，通过 GAMS 和 Matlab 软件交互完成模型的求解和数据处理。仿真结果表明：该优化模型和多目标优化方法不仅可以为钢铁企业 SPS 建立合理的负荷分配方案和生产调度及电网交易计划，也能提供一种环境影响与经济成本之间的权衡运行策略。相较优化前，经济优化可使系统运行成本降低 3.75%，环境优化可使系统环境影响降低 12.21%。双目标权衡点可使环境影响降低 11.91%，运行成本降低 3.46%，经济环境效益良好。在一定范围内煤价升高能缓解经济和环境优化的矛盾，而高炉煤气的使用可以显著降低全系统运行成本，一定程度降低全系统环境影响，但将增加系统内部 CO₂、NO_x 的排放量。所得结论可为企业改善经济环境效益、深化节能减排提供一定的理论参考。

关键词：钢铁企业；蒸汽动力系统；多目标优化；生命周期评价；分时电价

中图分类号：TK01 **文献标志码：**A

DOI：10.7652/xjtuxb202111008 **文章编号：**0253-987X(2021)11-0066-11



OSID 码

Economic-Environmental Multi-Objective Optimization of Steam Power System in Iron and Steel Enterprises

WEN Kai¹，ZHANG Qi²，WANG Xiaopo¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to alleviate the economic-environmental contradiction faced by iron and steel enterprises, a multi-objective and multi-period mixed integer nonlinear programming model is proposed for the steam power system (SPS) of iron and steel enterprises, which covers the pollutant emission in the upstream process. On the basis of considering dynamic supply and demand, time-of-use electricity price, and fuel structure, the whole process multi-energy optimal dispatching of SPS in iron and steel enterprises is realized through using the economic index of operating cost and the environmental index established by life cycle assessment method (LCA). The solution and data processing of the model are completed through the interaction between GAMS platform and MATLAB. The simulation results show that the optimization model and method can establish a reasonable load distribution scheme, production scheduling and power grid

transaction plan for SPS of iron and steel enterprise, and provide a trade-off between environmental impact and economic cost. Compared with the results without optimization, economic optimization can reduce the operating cost of the system by 3.75%, environmental optimization can reduce the environmental impact of the system by 12.21%. The double-objective trade-off point can reduce the environmental impact by 11.91%, the operating cost by 3.46%, and more economic and environmental benefits are achieved. In a certain range, the increase of coal price can reduce the contradiction between economic and environmental optimization, while the use of blast furnace gas can significantly reduce the operating cost of the whole system, cut down the environmental impact of the whole system to a certain extent, but will increase the emissions of CO₂ and NO_x from the system. These results may serve as a theoretical basis for reducing economic cost and environmental impact of enterprises, and improving energy conservation and emission reduction.

Keywords: iron and steel enterprises; steam power system; multi-objective optimization; life cycle assessment; time-of-use electricity price

符号表

$M/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$ 或 $(\text{km}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	物质(蒸汽/水/燃料)流量	H	钙硫摩尔比
$\varphi/\%$	排污率	$d/\%$	炉渣中灰分占燃煤总灰分的质量分数
G/kg	污染物排放量	$D/\%$	排放气体中粉尘的质量分数
$\eta/\%$	(设备/环节)效率	$F/\%$	粉尘中可燃物质的质量分数
$h/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	焓	α	过剩空气比
P/MW	发电量	δ	燃料中 N 和产生燃料型 NO _x 的变化比
$a、b、c$	锅炉效率拟合参数	$Y/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热力型 NO _x 与快速型 NO _x 的质量浓度
$C/\text{元}$	费用	$\beta、K_0$	相关系数
$q/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$ 或 $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	燃料热值	$v/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	1 kg 燃料燃烧放出的气体量
$A/\%$	燃料灰分的质量分数	$u/\%$	炉渣中可燃物的质量分数
$S/\%$	燃料硫的质量分数	$\omega/(\text{t} \cdot \text{km}^{-3})$	燃气排放因子
$N/\%$	燃料氮的质量分数	$I/\text{元}$	炼铁工序产品经济效益
$B/\%$	燃料碳的质量分数	$V/(\text{t}$ 或 $\text{km}^3)$	炼铁工序产品量
$l/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	锅炉脱硫用的石灰石流量	$X/\%$	分配系数
$R/\%$	脱硫用石灰石碳酸钙的质量分数		

随着能源环境问题的日益严峻,钢铁企业面临的节能减排压力与日俱增^[1-2]。作为具有相当规模自备电厂的钢铁企业,其蒸汽动力系统(SPS)耦合了煤气、蒸汽、电力等多种能源^[3-4],这些能源消耗占整个钢铁企业能耗的 60%^[5]。正因为如此,能源耦合优化正逐渐成为钢铁企业进一步节能减排的重点之一。但现今绝大多数此类研究主要集中于石化行业^[6-7]。

张琦等综合考虑了富余煤气波动、蒸汽和电力的动态需求、多燃料结构、分时电价等因素,建立了钢铁企业煤气-蒸汽-电力耦合优化模型^[8]。高金彤等针对钢铁企业 SPS,考虑了能源设备、分时电价和

污染物排放等因素,分别建立了钢铁企业 SPS 的单目标和多目标耦合优化模型^[9-10]。孟华等建立了基于不同污染物环境价值的钢铁企业锅炉负荷多周期混合整数线性规划模型,并用改进的粒子群优化算法对其求解^[11]。Zeng 等建立了考虑煤气、燃料价格和分时电价的 SPS 优化模型^[12]。Zhang 等的模型额外考虑了煤气波动和安全问题,特别分析了热值约束对高炉煤气利用率的影响^[13]。

上述研究表明,聚焦钢铁企业 SPS 全流程多能源的优化调度研究不多,且考虑污染物排放的较少。同时,大多研究中污染物排放仅考虑系统本身,忽略了所需能源资源生产输送的上游过程影响。尚未发

现以生命周期评价方法(LCA)建立环境指标的钢铁企业SPS多周期多目标优化研究。本文立足于钢铁企业SPS,考虑了动态供需、燃料结构、分时电价、污染物排放等问题,采用LCA方法建立环境指标,使用多目标优化的方法力求为企业提供的经济-环境的权衡运行策略。

1 蒸汽动力系统优化模型构建

一个钢铁企业的SPS通常包括几个不同的环节来提供煤气、蒸汽、电力等产品,如图1所示。钢铁企业SPS的燃料气主要是焦炉煤气(COG)和高炉煤气(BFG),它们都是典型的钢铁生产工序(焦炉炼焦、高炉炼铁)的伴生二次能源。实际情况下,为了保证能源的高效利用,这些煤气在满足燃气烧嘴一定燃料热值要求的前提下进行适当的混合得到混合煤气(MXG)。同时,该系统具有回收红焦显热的余热锅炉,这些余热将被惰性气体在干熄塔回收利用。系统产生的蒸汽可用于供热、发电并满足厂区自身需要,如若发电量超过了当期需求,则系统将把多余电量供给外部电网谋取一定收益,否则将从外网购置额外电力来弥补。

1.1 锅炉模型

本系统锅炉的数学模型^[9-10]如下。为方便表示, M_{bo} 和 h_{bo} 代表锅炉蒸汽流量和蒸汽焓,其余符号含义可见文首符号表。锅炉的质量守恒和蒸汽产量与排污量关系如下式

$$M_{bo,wt}^t = M_{bo}^t + M_{bo,p}^t \quad (1)$$

$$M_{bo,p}^t = \phi_{bo} M_{bo}^t \quad (2)$$

式中: t 代表优化周期; $M_{bo,wt}$ 表示锅炉给水量; $M_{bo,p}$ 表示锅炉排污量; ϕ 表示排污率,本文取为0.02。锅炉蒸汽的负荷约束如下式

$$M_{bo}^{\min} \leq M_{bo}^t \leq M_{bo}^{\max} \quad (3)$$

$$|M_{bo}^{t+1} - M_{bo}^t| \leq M_{bo}^{\text{change}} \quad (4)$$

一段时间内锅炉负荷应在设备允许的负荷范围内,且其变化值不得超过允许变化量。锅炉效率拟合公式及能量守恒关系如下式

$$\eta_{bo}^t = a(M_{bo}^t)^2 + bM_{bo}^t + c \quad (5)$$

$$M_{bo,wt}^t h_{bo,wt} + \eta_{bo}^t (M_{coal}^t q_{coal} + \sum_g M_g^t q_g) +$$

$$M_{bo,Rin}^t h_{bo,Rin} = M_{bo}^t h_{bo} + M_{bo,p}^t h_p + M_{bo,Rout}^t h_{bo,Rout} \quad (6)$$

a, b, c 为拟合系数, M_g 表示气体燃料的体积流量, $M_{bo,Rin}$ 和 $M_{bo,Rout}$ 表示锅炉在热蒸汽入口和出口的流量。余热锅炉模型类似,余热利用效率取为0.7。

1.2 汽轮机模型

对于简单汽轮机的运行可以用Willans线相当准确地描述^[14],而对于实际系统的汽轮机,可以用汽轮机耗量特性方程描述其能量关系,汽轮机质量守恒关系式如下

$$M_{ti}^{\text{in}} = \sum_{ex} M_{ti}^{\text{ex}} + M_{ti}^{\text{con}} \quad (7)$$

式中: M_{ti}^{in} 、 M_{ti}^{ex} 、 M_{ti}^{con} 表示汽轮机在 t 时段的进汽、抽汽和凝汽量。

汽轮机负荷约束如下

$$M_{ti}^{\text{ex},\min} \leq M_{ti}^{\text{ex}} \leq M_{ti}^{\text{ex},\max} \quad (8)$$

$$M_{ti}^{\text{in},\min} \leq M_{ti}^{\text{in}} \leq M_{ti}^{\text{in},\max} \quad (9)$$

$$P_{ti}^{\min} \leq P_{ti} \leq P_{ti}^{\max} \quad (10)$$

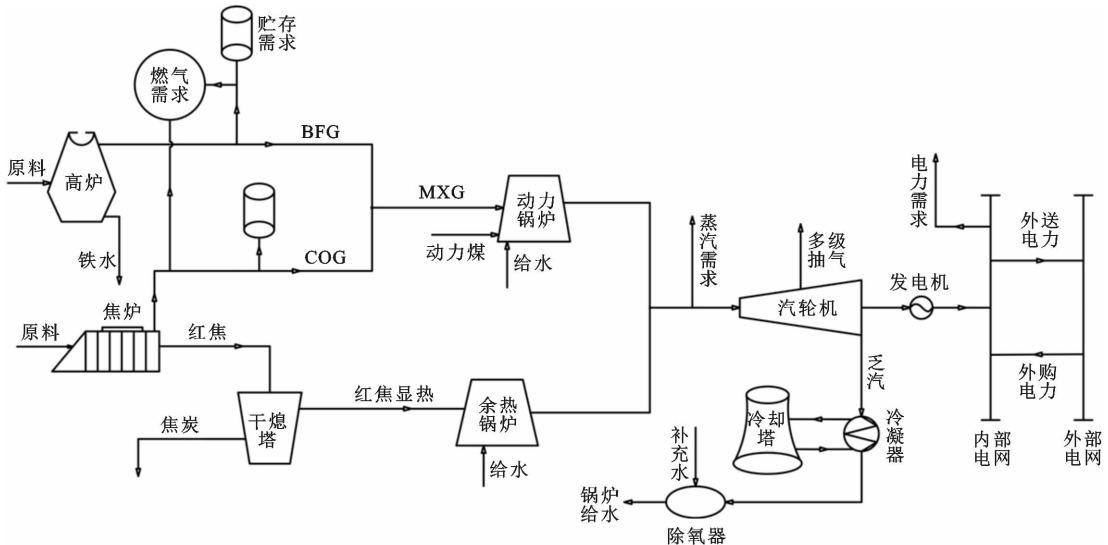


图1 钢铁企业蒸汽动力系统

Fig. 1 Schematic diagram of steam power system in iron and steel enterprises

$$|P_{ti}^{t+1} - P_{ti}^t| \leq P_{ti}^{change} \quad (11)$$

一段时间内汽轮机进汽、抽汽和产电能力不得超过设备负荷的允许范围,其产电能力变化也不得超过设备允许变化量。

汽轮机耗量特性方程如下式,可通过设备实际运行参数拟合得到

$$P_{ti}^t = f(M_{ti}^{t,ex}, M_{ti}^{t,in}, M_{ti}^{t,con}) \quad (12)$$

1.3 污染物排放模型

采用 LCA 方法来构建环境目标函数涉及的环节不仅是该系统本身,还包括其上游过程。因此要分析的不单是 SPS 产生的污染物,同时包含着为满足 SPS 运行生产上游所需提供的各类能源资源开采、加工、运输等环节造成的污染物,可以认为产生的污染物包含系统内和系统外两部分,图 2 给出了污染物排放的流程图。系统内燃煤锅炉排放模型如下^[14-15]

$$G_{dust} = M_{coal} A (1 - \eta_{dust}) D / (1 - F) \quad (13)$$

$$G_{NO_x} = 1.63 M_{coal} (N\delta + vY) \quad (14)$$

$$v = K_0 q_{coal} (\alpha + \beta) / 4 \ 187 \quad (15)$$

$$G_{SO_2} = 1.6 M_{coal} S (1 - \eta_s) \quad (16)$$

$$G_{CO_2} = 3.667 M_{coal} B + 0.44 l R \quad (17)$$

$$l = 3.125 M_{coal} HS / R \quad (18)$$

$$M_{coal} A \left(\frac{d}{1-u} + D \frac{\eta_{dust}}{1-F} + \frac{3.430 \ 4S - 1.6SR}{0.32AR} \right) \quad (19)$$

式中: G 表示某种污染物的排放量; G_{dust} 、 $G_{ash+slag}$ 分别表示烟尘和固体废弃物(灰渣)排放量; η_{dust} 和 η_s 表示锅炉的除尘和脱硫效率。

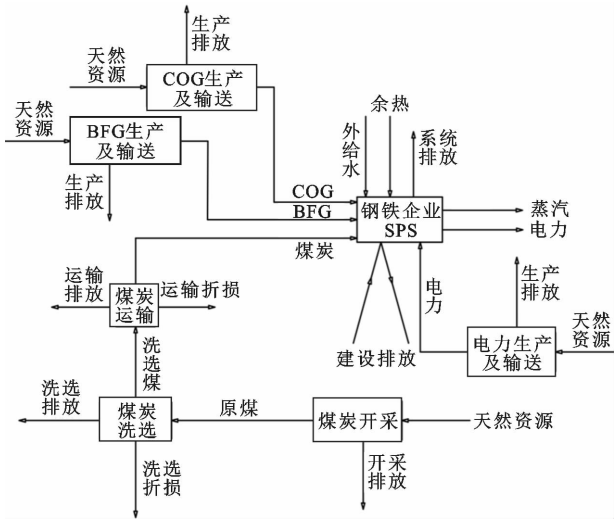


图 2 污染物排放流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pollutant discharge process

对于燃气锅炉模型,采用排放因子和燃料量的乘积来表示燃气锅炉的各类排放^[14]

$$G_g^m = \omega_g^m M_g \quad (20)$$

式中: ω 表示某燃气排放因子; m 表示污染物种类。燃气锅炉 CO_2 排放仍采用燃煤锅炉的排放模型进行计算^[8]。上游环节排放模型为

$$G_w^m = \sum_j G_j^m = \sum_j k_j^m O_j \quad (21)$$

式中: O_j 表示第 j 个环节提供的产品或服务量; k_j^m 表示 j 环节提供单位产品或服务第 m 种污染物产生量; G_w 表示系统外部污染物排放量,即上游环节污染物排放量。

SPS 产生的污染物属于系统内部污染物,由对应的排放模型计算得到。COG 生产输送、煤炭开采、煤炭运输、电力生产输送的污染物排放清单取自 eBalance 数据库。BFG 生产输送过程污染物排放需要计算,本研究将炼铁企业视作一个三产品系统,其主要产品为铁水、高炉煤气和高炉渣,可以根据污染物经济分配的方法对高炉煤气污染物进行分配^[16-17]。高炉煤气与铁水的经济效益和分配系数的关系

$$I_{BFG} = C_{BFG} \frac{q_{BFG} (V_{PRO,BFG} - V_{REC,BFG})}{10^6} \quad (22)$$

$$I_{iron} = C_{iron} V_{PRO,iron} \quad (23)$$

$$X_{BFG} = \frac{I_{BFG}}{I_{iron} + I_{BFG}} \quad (24)$$

式中: I 表示炼铁工序产品的经济效益; C_{BFG} 和 C_{iron} 表示单位 BFG 和铁水的售价; V_{PRO} 和 V_{REC} 表示产品的产生量和回收量; X 表示产品的分配系数,本研究的 BFG 污染物分配系数为 4.314%,根据炼铁工序排放清单^[18-19] 即可得 BFG 生产及输送排放。对于煤炭洗选和建设环节有关参数取值参考排放清单^[20-22],研究选取的洗煤厂清单总悬浮颗粒物(TSP)小于 PM10 的只占总 TSP 的 0.5%,并且有一半的煤矸石可以回收利用。建设环节的排放只考虑钢材造成的排放而没有考虑其他材料,煤炭运输距离设为 748 km,输送和洗选的折损系数取为 0.02 和 0.2。

1.4 目标函数

本研究经济目标函数为全系统的运行成本,该成本代表一段时间内 SPS 满足系统内外需求情况下的总支出 C ,表达式如下

$$C = \sum_{t=1}^T \left(C_{coal} M_{coal}^t + \sum_g C_g M_g^t + C_e P_{b,y}^t y^t + \right)$$

$$\sum_{bo} C_{mb} M_{bo}^t + \sum_{ti} C_{mt} P_{ti}^t - C_s P_s^t x^t \quad (25)$$

$$x^t y^t = 0 \quad x^t, y^t \in \{0, 1\} \quad (26)$$

式中: P_b 为外购电量; P_s 为外送电量; C_e 和 C_s 分别为外购和外送电价; C_{mb} 和 C_{mt} 分别为锅炉和汽轮机的维护成本。 x^t 和 y^t 为离散变量, 其目的是确立一种逻辑约束, 保证买卖电两种行为在优化模型中不会同时发生, 同时指示 t 时段系统是否存在外送或外购电的情况。当总发电量大于总需求量时, $x^t = 1, y^t = 0$, 此时送电但不买电。当总发电量小于总需求量时, $x^t = 0, y^t = 1$, 此时买电但不送电。

环境目标函数是 LCA 方法计算得到的一个加权综合指标。本研究考虑了 SPS 自身为满足系统供需产生的环境影响以及供给系统的电力、燃料和建设材料等生产和输送环节产生的环境影响。该影响可以分为 6 种类型, 包括全球变暖 (GW)、酸化 (AC)、富营养化 (EP)、健康威胁 (Hh)、固体废弃物污染 (SW)、烟尘污染 (Sad)。环境目标函数^[22-23]如下式

$$E_1 = \sum_n E_2(n) \quad (27)$$

$$E_2(n) = E_3(n) Z_1(n) \quad (28)$$

$$E_3(n) = \frac{E_4(n)}{Z_2(n)} \quad (29)$$

$$E_4(n) = 300 \sum_t \sum_m E_4(n)^{t,m} \quad (30)$$

$$E_4(n)^{t,m} = \sum_j G(n)_j^{t,m} Z_3(n)^m \quad (31)$$

式中: E_1 表示最终的加权综合指标; n 代表环境影响类型; $E_2(n)$ 表示某种影响类型的加权指标; $E_3(n)$ 表示某种影响类型的标准化指标; $Z_1(n)$ 表示某种影响类型的权重因子; $E_4(n)$ 表示某种影响类型的等效指标; $Z_2(n)$ 表示某种影响类型 1990 年的等效指标; $Z_3(n)^m$ 表示能引起第 n 种类型环境影响的第 m 种污染物的等效因子; $G(n)_j^{t,m}$ 表示引起第 n 种类型环境影响的第 m 种污染物在 t 时段 j 环节的排放量, 有关的计算因子均可查取^[22]。

1.5 约束条件

本研究考虑的质量与能量守恒约束暨锅炉和汽轮机模型, 同时忽略系统密封性的影响。除此之外的供需约束如下。燃气供需约束为

$$\sum_{bo} M_{bo,g} \leq M_{g,give}^t \quad (32)$$

$$M_{bo,g}^{\min} \leq M_{bo,g} \leq M_{bo,g}^{\max} \quad (33)$$

任何时间段内燃气总消耗量不得超过供应量, 且锅炉供气量必须在设备允许范围之内。

蒸汽和电力供需约束为

$$\sum_{bo} M_{bo}^{t,pre} + \sum_{ti} M_{ti}^{t,pre,ex} = M_{need}^{t,pre} \quad (34)$$

$$P_{need}^t = \sum_{ti} P_{ti}^t + P_b^t y^t - P_s^t x^t \quad (35)$$

式中: $M_{bo}^{t,pre}$ 表示锅炉在 t 时段内产出的处于不同温度和压力状态的蒸汽量, pre 表示蒸汽状态, 不同的温度或压力蒸汽状态不同; $M_{ti}^{t,pre,ex}$ 表示汽轮机在 t 时段内抽出的处于不同温度和压力状态的蒸汽量; P_{need} 表示系统电力需求量。电力和蒸汽在任何时刻都应保证处于供需平衡。同时, 燃气锅炉对混合煤气热值有一定要求, 其热值不应低于 $4\ 180\ \text{kJ/m}^3$ 。热值约束如下式

$$\frac{q_{COG} M_{bo,COG}^t + q_{BFG} M_{bo,BFG}^t}{M_{bo,COG}^t + M_{bo,BFG}^t} \geq q_g^{\min} \quad (36)$$

优化模型需保证各变量大于等于 0。

2 优化结果及影响因素分析

本文以图 3 所示的某钢铁联合企业蒸汽动力系统为研究对象, HP、MP、LP 分别表示高压、中压、低压蒸汽管网, EL 和 WG 表示电力和水力管网, 其中高压、中压和低压蒸汽的温度和压力分别为 (708 K, 3.5 MPa)、(513 K, 1.0 MPa) 和 (443 K, 0.4 MPa), 系统其他参数可见文献[8-10]。优化的决策变量包括各锅炉燃料量和产汽量, 各汽机进汽凝汽和各级抽汽量、发电量以及电网电力交易量等。

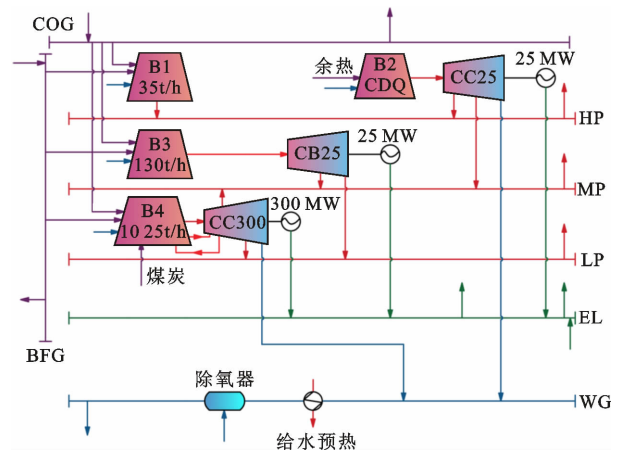


图3 某钢铁企业蒸汽动力系统结构图

Fig. 3 A system structure diagram

系统每日污染物最大排放量按照有关国家标准^[24], 取系统正常运转时的污染物合格排放量为最大限量, 表 1 给出了优化周期内系统的供应需求量。对于所建立的单目标和多目标优化模型, 本研究的计算环境为 2.60 GHz Intel(R) Core(TM) i7-

表 1 系统各时段供应需求量

Table 1 Supply and demand of the system in each period

周期	COG 供应量 /km ³	BFG 供应量 /km ³	余热供应量 /GJ	电力需求量 /(MW·h)	HP 需求量 /t	MP 需求量 /t	LP 需求量 /t
T1	28.85	338.25	481.95	263.00	34.00	119.25	170.75
T2	27.75	358.25	492.76	271.00	35.00	115.25	179.75
T3	25.75	340.50	483.50	283.75	32.00	110.25	182.50
T4	26.75	330.50	487.20	292.75	34.00	105.25	182.50
T5	29.15	327.25	441.89	311.75	33.50	117.25	176.50
T6	29.25	315.25	437.56	320.65	35.50	120.25	176.50
T7	24.46	314.50	439.86	307.45	34.25	112.00	181.50
T8	25.39	320.50	447.53	283.50	33.25	102.00	184.50
T9	27.67	327.75	453.67	274.50	32.50	103.00	185.75
T10	29.32	329.75	465.42	254.50	34.50	102.00	185.75
T11	27.50	321.62	448.57	255.25	35.50	105.75	179.00
T12	27.40	315.93	525.78	255.25	31.50	109.75	189.00
T13	29.50	302.50	522.14	270.25	33.50	111.50	175.00
T14	24.75	297.50	536.57	250.25	34.50	105.50	185.00
T15	27.60	310.50	487.36	264.75	32.50	104.50	184.75
T16	27.33	329.75	476.21	284.00	33.50	102.50	184.75
T17	25.60	308.50	482.13	295.50	34.25	109.75	186.00
T18	21.25	301.50	484.94	320.50	33.25	111.75	186.00
T19	23.97	315.70	483.56	310.75	32.25	105.75	183.75
T20	25.50	324.50	503.24	291.75	31.25	101.75	173.75
T21	26.30	330.50	524.27	275.40	33.50	107.25	176.75
T22	25.25	319.50	443.79	262.50	35.50	112.25	166.75
T23	24.10	311.00	454.20	252.90	34.00	110.00	156.50
T24	22.15	309.00	493.32	248.60	32.00	105.00	146.50

10750H,搭载 GAMS 平台以及 Matlab 软件。采用 GAMS/LINDOGlobal 求解器求解并集成 ϵ 约束法^[25]用于多目标分析。

2.1 经济单目标优化

图 4 给出了优化结果的外购外送电量随分时电价的变化关系,表 2 给出了优化前后各项成本间的

比较,其中外送电收益为负表征系统通过外送电减少的运行成本。可以发现,优化后该系统每天节约运行成本 101 950 元,占原运行成本的 3.75%。在满足外界对电力和蒸汽需求的情况下,系统选择购买更少的煤炭,买煤成本降低 22.41%,而购气成本上升了 24.34%。系统自身发电量和设备负荷降低,使得维护成本下降了 13.23%。外购电增加而外送电减少,得到了一种峰送谷买的优化电网交易策略。

2.2 环境单目标优化

图 5 给出了不同优化策略环境指标的关系,其中单位 PE 表示标准人当量,视作一种环境影响量度。由图 5 可以看出,采用经济或环境优化对总环境影响(涵盖 SPS 自身和上游过程)都有改善,但主要集中于 GW、SW 和 Sad,而对其他类型改善程度较小。这些类型仅靠系统本身调度可能难以优化,造成它们的污染物集中于系统必须的能源资源中,应同时考虑系统上游环节优化或设备升级才有可能

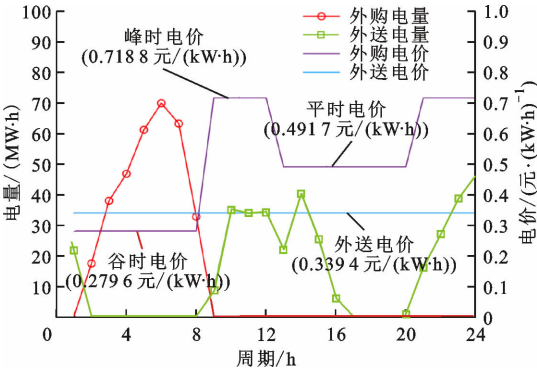


图 4 分时电价与买卖电量关系曲线

Fig. 4 Relationship between time-of-use electricity price and electricity trading quantity

获得改善。

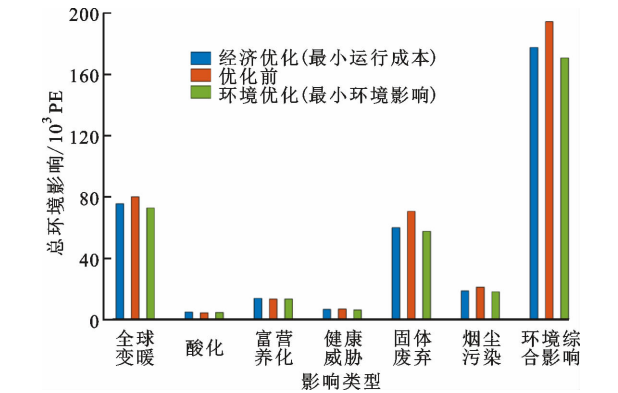


图 5 优化前后各环境影响对比

Fig. 5 Comparison of environmental impacts before and after optimization

表 3 给出了经济和环境单目标优化后运行成本的变化。在环境优化下,系统相对于经济优化购煤成本减少 3.64%,购气成本减少 0.82%,维护成本减少 3.75%,外购电成本减少 1.04%。外送电量在这种情况下为 0,变化率为 100%,因为需求以外的电力生产不能为系统创造环境收益。由此带来总成本上升 1.14%,一年多支出8 922 000元。但系统环境指标有较大改善,与优化前相比降幅为 12.21%,与经济优化相比,降幅为 3.91%,可见该方案对环境影响有较好的改善能力。结合两种优化结果对比分析容易发现,相较于优化前环境优化能改善系统经济性,而经济优化也能降低系统环境影响,但始终不能实现二者最优,两者之间存在特殊的矛盾和联系。

表 2 运行成本单目标优化前后各项成本汇总

时期	成本/万元					总成本/万元
	购煤成本	购气成本	维护成本	外购电成本	外送电成本	
优化前	199.940	44.494	61.885	1.506	−36.306	271.519
优化后	155.140	55.324	53.692	9.216	−12.048	261.324
变化量	−44.800	10.830	−8.193	7.710	24.258	−10.195

表 3 环境影响单目标优化前后各项成本汇总

时期	成本/万元					总成本/万元
	购煤成本	购气成本	维护成本	外购电成本	外送电成本	
经济最优化	155.140	55.324	53.692	9.216	−12.048	261.324
环境最优化	149.490	54.870	51.676	8.262	0	264.298
变化量	−5.650	−0.454	−2.016	−0.954	12.048	2.974

2.3 多目标优化

从上述的单目标优化中可以发现,想要经济和环境指标兼得是不可能的,减少运行成本可能会以增加不合理的环境影响为代价。因此在实际设计中,有必要进行双目标优化来找到经济效益和环境影响之间的一种权衡。

图 6 给出了双目标优化的求解结果,以帕累托曲线的形式体现。图 6 中 A、B、C 分别代表最优经济点、权衡点、最优环境点。可以发现,当系统处于最小运行成本状态时,在优化模型中运行成本的小幅增加就能使得环境影响显著下降。但当环境影响下降到 B 点后,其改善就变得困难,进一步降低环境影响需要支付越发高昂的经济成本。因此认为 B 点是本系统经济和环境的最佳权衡点,其相较优化前运行成本降低 3.46%,环境影响下降 11.91%,在保证企业经济效益的同时也能尽可能避免环境污染。总之,引入 LCA 构建的环境指标参与优化,能

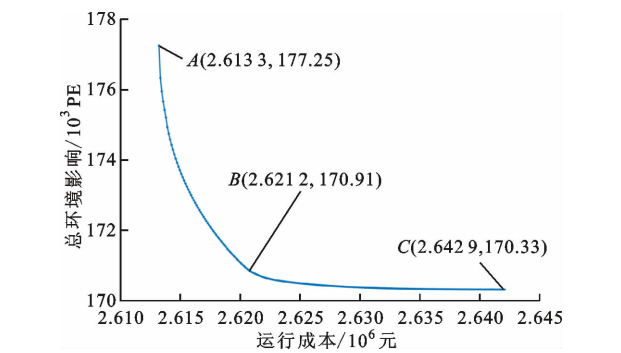


图 6 双目标优化的帕累托曲线

Fig. 6 Pareto curve of double-objective optimization

综合考虑到系统自身和其上游过程,未附加经济因素,可以切实反映全系统的环境效益,便于企业达到经济环境利益最大化。

2.4 灵敏度分析

2.4.1 煤价变化对优化结果的影响 图 7 给出了不同优化策略运行成本 and 环境影响随煤价的变化。图 8 给出了不同优化策略电网交易计划随煤价的变化,图 9 给出了煤价变化对双目标优化的影响。由图 7 可知,煤价上升,不同优化策略运行成本逐渐提高。对于环境优化,煤价上升不会改变系统的运行状态,其运行成本与煤价成线性变化,环境影响不变。经济优化的运行状态会因煤价发生调整,这在环境影响变化中能较好的反映,根据不同的斜率,曲线可分为 5 段。第 1 段虽然煤价升高,但其价格对于系统仍可承受,且使用煤炭较为划算,运行策略未改变。第 2 段由于煤价升高超过阈值,优化策略试图减小使用煤炭造成的经济损失,因此减少了煤炭用量转而使用更多污染较小的煤气。当煤价位于第 3 段,系统必然在煤价继续走高时使用更多煤气,但煤气量的使用受到煤气供应和高焦混合煤气热值的约束,存在一个相对极限,使得环境影响下降速率减小。第 4、5 段环境影响随煤价升高逐渐减小并趋于

稳定,原因是过高的煤价已经使得系统开始大幅调整电网交易策略和负荷分配方案来满足外界的热电需求,不过这种调度能力和交易潜力有一定限度,某些煤炭需求不可避免。当煤炭价格在 900 元/t 以上时系统已经不能再减少燃煤量,优化潜力已基本用尽,现行的优化策略不再随煤价变化,系统环境影响最终稳定。

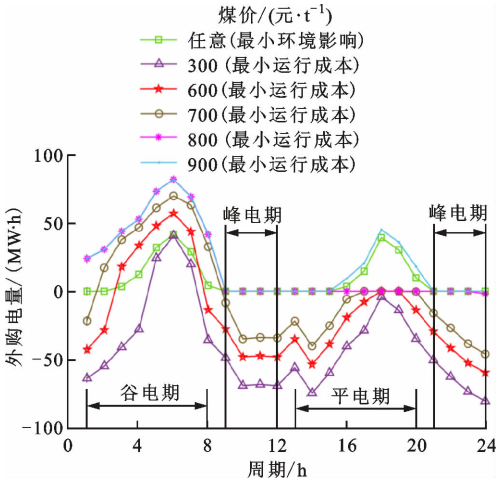
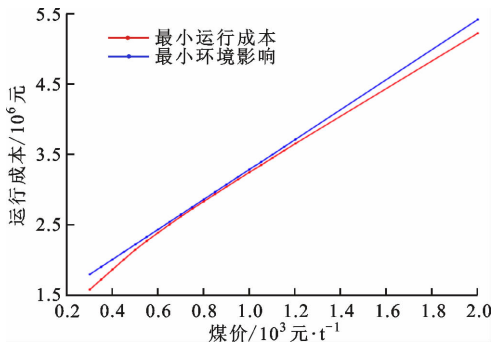
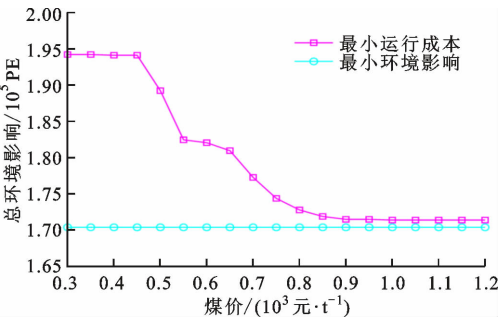


图 8 不同优化策略电网交易计划随煤价的变化
Fig. 8 The change of grid trading plan with coal price under two optimization strategies

由图 8 可以看出,煤价变化不会改变环境优化的电网交易策略,而经济优化的电网交易策略则受到显著影响。随着煤价升高,系统外送电量逐渐减少而外购电量逐渐增加,但整体上保持着峰送谷买的趋势。由图 9 可知,随着煤价升高,运行成本上下限升高很快,环境影响下限未变而上限下降明显。这说明在一定范围内随着煤价升高环境优化和经济优化的矛盾在减小,模型优化潜力在下降,经济和环境优化的运行状态在接近。但这绝不表示煤价足够高就能解除这种矛盾,相反当煤价超过一定值时该



(a) 优化运行成本



(b) 优化环境影响

图 7 系统运行成本及环境影响随煤价的变化
Fig. 7 Variation of operating cost and environmental impact of two strategies with coal price

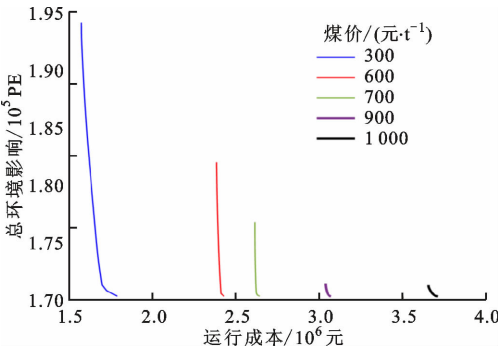


图 9 煤价变化对双目标优化的影响
Fig. 9 Influence of coal price on double-objective optimization

矛盾就不再减小而是处于不可调和的状态。

2.4.2 高炉煤气使用量对优化结果的影响 图10给出了不同优化策略运行成本和环境影响与BFG使用上限的关系,图11给出了BFG使用上限与系统内部污染物排放的关系,图12给出了BFG使用上限对双目标优化的影响。由图10可知,限制每时段的BFG使用上限对系统运行成本影响较大,随着BFG使用上限增加,不同优化策略的运行成本都在下降,这表明BFG具有良好的经济效益,但其使用受到热值约束,当BFG使用量超过供给量70%时,COG的供给量已经难以满足热值约束的条件。同时,随着BFG使用上限的增加,经济和环境优化的环境影响整体都处于下降趋势,这说明使用BFG可以改善全系统的环境效益。不过其改善程度并不如预想中一样明显,这极大程度上归结于本研究考虑了BFG的生产输送过程,它作为炼铁企业一种具有经济价值的副产品,必须承担创生这些经济价值所造成的污染。

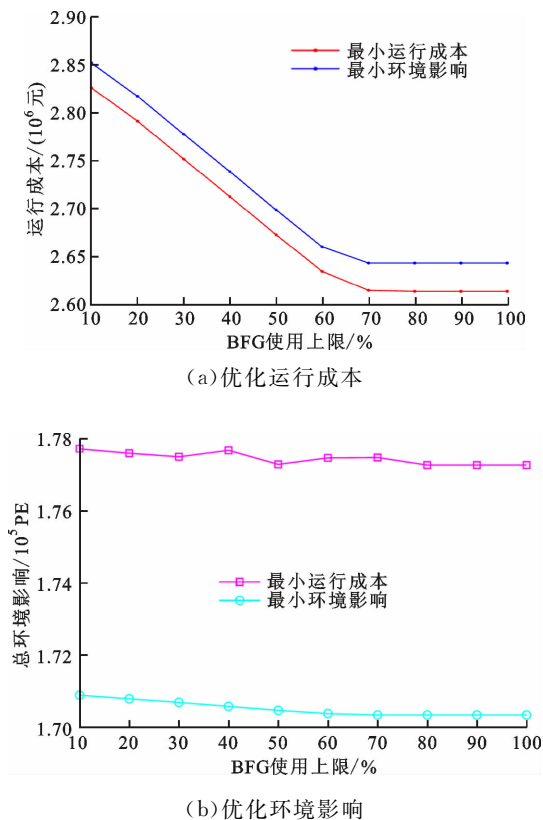
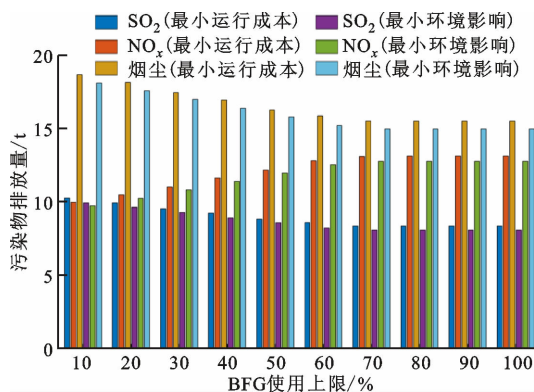


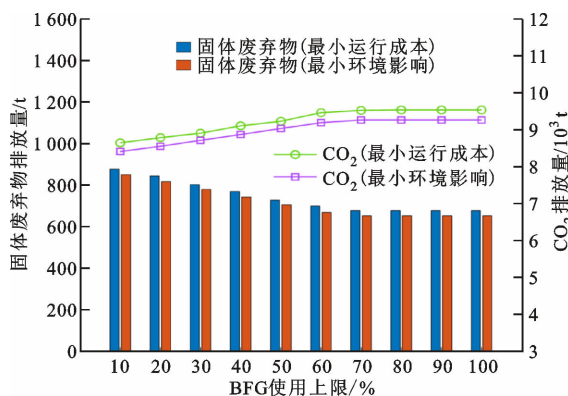
图10 不同优化策略运行成本和环境影响随BFG使用上限的变化

Fig. 10 Variation of operating cost and environmental impact of two optimization strategies with upper limit of BFG usage

化策略系统内部 SO_2 、烟尘、固体废弃物排放量下降,而 CO_2 和 NO_x 排放量上升。其中燃煤量下降是 SO_2 、烟尘及固体废弃物减少的主要原因,而 NO_x 和 CO_2 排放的增加则是由于BFG燃用量的增大,因为BFG是一种低热值高耗量、高烟气产生量、高含氮量的气体燃料,它的燃烧贡献了系统内部近一半的 NO_x ,同时其提供相同热量产生的 CO_2 要比其他燃料多得多。



(a) 与系统内部 SO_2 、 NO_x 和烟尘排放的关系



(b) 与系统内部 CO_2 、固体废弃物排放的关系

图11 BFG使用上限与系统内部污染物排放的关系

Fig. 11 Relationship between upper limit of BFG usage and internal pollutant emission of the system

由图12可以发现,随着BFG使用上限的增加,优化曲线有向左下方移动的趋势,权衡点的运行成本 and 环境影响有一定程度的减小,这说明使用BFG能改善全系统的经济环境效益。同时,BFG使用上限变化不会影响该优化模型的优化潜力,不论哪一种比例的供给,系统都能找到运行的最佳权衡点,但当BFG供给较少时,最佳权衡点的环境影响和运行成本将会不可避免地升高。

3 结论

针对钢铁企业SPS,结合分时电价、燃料结构和

由图11可知,随BFG使用上限的增加,不同优

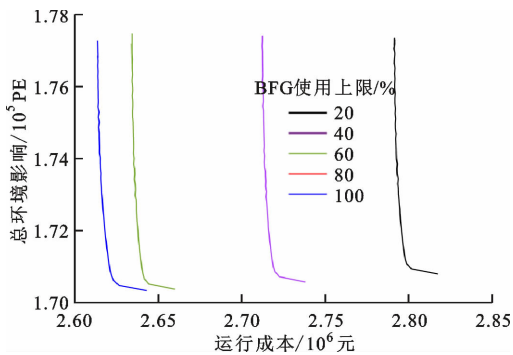


图 12 BFG 使用上限对双目标优化的影响

Fig. 12 Influence of upper limit of BFG usage on double-objective optimization

污染物排放等变化因素,采用运行成本的经济指标和 LCA 方法建立的环境指标,构建了 SPS 全流程多周期混合整数非线性规划(MINLP)模型,依托 GAMS 平台和 Matlab 交互对其进行了单目标和多目标优化。结果表明:较优化前,单目标优化可减少系统运行成本 3.75%或降低环境影响 12.21%,而多目标优化可同时改善两者,使其分别降低 3.46%和 11.91%。优化模型能适应系统供需的变化,制定合理的电网交易策略和负荷分配方案从而实现单目标最优或多目标权衡。LCA 构建的环境指标作为全系统环境影响的一种度量,无需掺杂经济因素,能同时涵盖系统自身和上游过程,可以更真实地反映经济和环境的权衡关系。灵敏度分析显示,在一定范围内煤价升高能降低经济和环境优化的矛盾,而 BFG 的使用可以显著减少系统的运行成本,同时减少系统内部烟尘、固废和 SO₂ 排放,但 CO₂ 和 NO_x 的排放将增加。然而在 LCA 的视角下,全系统权衡点环境影响仍随 BFG 用量的增加有所下降。暨从整个系统来看,使用 BFG 仍是一种经济且相对环保的运行策略。有关分析和结论可以为钢铁企业 SPS 未来节能减排增收和优化调度运行提供参考。

参考文献:

[1] ZHANG Yuejun, HAO Junfang, SONG Juan. The CO₂ emission efficiency, reduction potential and spatial clustering in China's industry: evidence from the regional level [J]. *Applied Energy*, 2016, 174: 213-223.

[2] KARALI N, XU Tengfang, SATHAYE J. Developing long-term strategies to reduce energy use and CO₂ emissions-analysis of three mitigation scenarios for iron and steel production in China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(5):

699-719.

[3] HE Feng, ZHANG Qingzhi, LEI Jiasu, et al. Energy efficiency and productivity change of China's iron and steel industry: accounting for undesirable outputs [J]. *Energy Policy*, 2013, 54: 204-213.

[4] 王懿, 芦永明. 钢铁企业能量流网络研究现状与发展趋势 [J]. *冶金能源*, 2016, 35(3): 3-8, 64.

WANG Yi, LU Yongming. Research situation and future trends of energy flow network in iron and steel enterprises [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2016, 35(3): 3-8, 64.

[5] 张琦, 提威, 杜涛, 等. 钢铁企业富余煤气-蒸汽-电力耦合模型及其应用 [J]. *化工学报*, 2011, 62(3): 753-758.

ZHANG Qi, TI Wei, DU Tao, et al. Coupling model of gas-steam-electricity and its application in steel works [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2011, 62(3): 753-758.

[6] 张鹏飞, 赵浩, 荣冈, 等. 考虑生产成本和环境成本的蒸汽动力系统多目标运行优化 [J]. *化工学报*, 2016, 67(3): 715-723.

ZHANG Pengfei, ZHAO Hao, RONG Gang, et al. Multi-objective optimization for steam power system considering production cost and environmental cost [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 67(3): 715-723.

[7] TSAY M T. Applying the multi-objective approach for operation strategy of cogeneration systems under environmental constraints [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2003, 25(3): 219-226.

[8] 张琦, 马家琳, 高金彤, 等. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力耦合优化及应用 [J]. *化工学报*, 2018, 69(7): 3149-3158.

ZHANG Qi, MA Jialin, GAO Jintong, et al. Coupled optimization modeling and application of fuel gas-steam-power system in integrated iron and steel works [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2018, 69(7): 3149-3158.

[9] 高金彤, 倪团结, 张琦. 钢铁企业蒸汽动力系统多目标优化 [J]. *冶金能源*, 2018, 37(1): 3-8.

GAO Jintong, NI Tuanjie, ZHANG Qi. Multi-objective optimization for steam power system in iron and steel works [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2018, 37(1): 3-8.

[10] 高金彤, 倪团结, 张琦. 钢铁企业蒸汽动力系统优化 [J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4301-4307.

GAO Jintong, NI Tuanjie, ZHANG Qi. Optimization

- for steam power system in iron and steel works [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(11): 4301-4307.
- [11] 孟华, 王建军, 王华, 等. 基于环境成本的钢铁企业自备电厂锅炉负荷优化模型 [J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(12): 28-34.
- MENG Hua, WANG Jianjun, WANG Hua, et al. Optimal model of boiler load based on environmental costs in self-provided power plant of iron and steel works [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(12): 28-34.
- [12] ZENG Yujiao, SUN Yanguang. Short-term scheduling of steam power system in iron and steel industry under time-of-use power price [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(9): 795-803.
- [13] ZHANG Qi, ZHAO Tao, NI Tuanjie, et al. Optimization models for operation of a steam power system in integrated iron and steel works [J]. Energy Sources: Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 2021, 43(9): 1100-1114.
- [14] LUO Xianglong, ZHANG Bingjian, CHEN Ying, et al. Operational planning optimization of multiple interconnected steam power plants considering environmental costs [J]. Energy, 2012, 37(1): 549-561.
- [15] 方品贤, 江欣, 奚元福. 环境统计手册 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985: 53-62.
- [16] MESSAGIE M, BOUREIMA F, MERTENS J, et al. The influence of allocation on the carbon footprint of electricity production from waste gas: a case study for blast furnace gas [J]. Energies, 2013, 6(3): 1217-1232.
- [17] 杨建新, 王寿兵, 徐成. 生命周期清单分析中的分配方法 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 285-288.
- YANG Jianxin, WANG Shoubing, XU Cheng. Allocation rule in life-cycle inventory [J]. China Environmental Science, 1999, 19(3): 285-288.
- [18] 梁凯铭. 基于 LCA 的清洁生产审核方法研究: 以炼铁企业为例 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 27-29.
- [19] 周和敏, 周子衿. 基于流程的钢铁生产过程环境负荷分析与优化 [J]. 中国材料进展, 2016, 35(3): 187-196.
- ZHOU Hemin, ZHOU Zijin. Analysis and optimization of environmental impact on process-based steel production [J]. Materials China, 2016, 35(3): 187-196.
- [20] 王飞. 基于生命周期评价方法的洗煤厂洗选工艺研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016: 22-26.
- [21] 卢萌. 基于 SimaPro 对洗煤工艺生命周期评价的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017: 21-23.
- [22] ZHANG Qi, GAO Jintong, WANG Yujie, et al. Exergy-based analysis combined with LCA for waste heat recovery in coal-fired CHP plants [J]. Energy, 2019, 169: 247-262.
- [23] LUO Xianglong, HU Jiahao, ZHAO Jun, et al. Multi-objective optimization for the design and synthesis of utility systems with emission abatement technology concerns [J]. Applied Energy, 2014, 136: 1110-1131.
- [24] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 2-3.
- [25] BERUBE J F, GENDREAU M, POTVIN J Y. An exact ϵ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: application to the traveling salesman problem with profits [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(1): 39-50.

(编辑 武红江)