

# 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的 优化调度方法



## 重庆大学硕士学位论文 (学术学位)

学生姓名：李 欢

指导教师：郑 忠 教 授

学科门类：工 学

学科名称：冶金工程

研究方向：冶金流程工程与智能制造优化

答辩委员会主席：白晨光 教 授

授位时间：2022 年 06 月

# **Optimal Scheduling Method for Gas-steam-electricity Conversion in Iron and Steel Enterprises**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
In Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Master's Degree of Engineering

**By**

**Huan Li**

**Supervised by Prof. Zhong Zheng**

**June, 2022**

## 摘 要

钢铁行业是高能耗、高污染行业之一，实现其节能降耗有利于行业的可持续发展。而钢铁行业的煤气、蒸汽、电力等二次能源占总能耗的 50%~60%，研究这些二次能源的转换利用不仅有利于能源系统调度和管理，实现钢铁企业节能降耗、提高经济效益，更对钢铁行业绿色发展有重要的意义。本文以降低系统运行成本和提高能源转换过程的效率为目标，以煤气-蒸汽-电力转换系统为对象，考虑煤气到蒸汽、蒸汽到电力的两步转换过程，在煤气转换为蒸汽过程中研究煤气优化分配问题，基于此在蒸汽转换为电力过程中研究蒸汽和电力优化调度问题，具体内容和结论如下：

（1）在煤气转换为蒸汽过程，锅炉的效率随其运行负荷变化，并且在实际的生产过程中各个锅炉的运行负荷分布存在差异。为了得到煤气的合理分配方案，给出了一种考虑锅炉运行负荷对锅炉转换效率影响的煤气分配方法，即在常规系统运行成本最小的基础上，再引入效率与额定效率的偏差作为目标函数，建立基于锅炉运行负荷的煤气分配模型，用 Gurobi 进行优化求解。结果表明：模型能改善并优化煤气的分配，优化后成本平均降低了 1.95%，煤气转换为蒸汽过程的效率提高了 2.87%。

（2）在蒸汽转换为电力过程，汽轮机的发电量受汽轮机进汽量、抽汽量的影响，并且生产过程对蒸汽和电力的需求存在实时变化。为了得到合理的蒸汽、自发电和外购方案，建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型，模型考虑煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能系统、煤气-蒸汽循环发电系统的集成优化。结果表明：模型能得到合理的煤气、蒸汽、电力方案，在调度周期内优化后成本降低了 5.69%，煤气转换蒸汽过程效率提高了 4.10%，蒸汽转换电力过程效率提高了 2.29%，整个煤气-蒸汽-电力转换系统的效率提高了 3.61%，自发电比提高了 7.1%。

（3）基于上述煤气-蒸汽-电力转换的优化调度研究，开发了钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型系统，该系统可实现煤气蒸汽电力数据的查询、调度模型参数配置功能、设备状态监测、调度结果的可视化展示以及相关数据的下载等。

综上所述，针对煤气-蒸汽-电力转换的优化调度问题，本文建立了基于锅炉负荷的煤气优化分配模型、考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型，实现了降低系统成本和提高能源转换过程效率的目的，基于煤气-蒸汽-电力转换的

调度方法所开发的模型系统为用户提供了辅助决策工具。

**关键词：**钢铁企业；煤气-蒸汽-电力转换系统；能源优化；能源转换效率；设备负荷

## Abstract

The steel industry is one of the industries with high energy consumption and high pollution, and realizing its energy saving and consumption reduction is conducive to the sustainable development of the industry. Secondary energy such as gas, steam, and electricity in the iron and steel industry accounts for 50% to 60% of the total energy consumption. Studying the conversion and utilization of these secondary energy sources is not only conducive to energy system dispatch and management, but also to realize energy conservation and consumption reduction in iron and steel enterprises, and improve economic efficiency. It is of great significance to the green development of the steel industry. In this paper, aiming at reducing the operating cost of the system and improving the efficiency of the energy conversion process, taking the gas-steam-electricity conversion system as the object, considering the two-step conversion process of gas to steam and steam to electricity. In the process of gas conversion to steam, the optimal distribution of gas is studied. Based on this, the optimal dispatch of steam and electricity is studied in the process of steam conversion to electricity. The specific contents and conclusions are as follows:

(1) In the process of gas-to-steam conversion, the efficiency of the boiler varies with its operating load, and in the actual production process, the operating load distribution of each boiler is different. In order to obtain a reasonable gas distribution scheme, a gas distribution method considering the effect of boiler operating load on boiler conversion efficiency is given, that is, on the basis of the minimum operating cost of the conventional system, the deviation between the efficiency and the rated efficiency is introduced as the objective function. A gas distribution model based on boiler operating load is established, and Gurobi is used to solve the optimization problem. The results show that the model can improve and optimize the distribution of gas. After optimization, the cost is reduced by an average of 1.95%, and the efficiency of the gas-to-steam process is increased by 2.87%.

(2) In the process of converting steam into electricity, the power generation of the steam turbine is affected by the steam intake and extraction volume of the steam turbine, and the demand for steam and electricity in the production process changes in real time. In order to obtain reasonable steam, self-generation and outsourcing schemes, an optimal dispatch model for gas-steam-electricity conversion considering steam power

demand is established. The model considers the integrated optimization of gas-steam-power conversion system, waste heat and waste energy system, and gas-steam cycle power generation system. The results show that the model can obtain reasonable optimization schemes for gas, steam and electricity. After optimization within the dispatch period, the cost is reduced by 5.69%, the efficiency of the gas-to-steam process is increased by 4.10%, the efficiency of the steam-to-electricity process is increased by 2.29%, and the efficiency of the entire gas-steam-electricity conversion system is increased by 3.61%, and self-generation ratio increased by 7.1%.

(3) Based on the above research on optimal scheduling of gas-steam-electricity conversion, an optimal scheduling model system for gas-steam-electricity conversion in iron and steel enterprises was developed. The system can realize the monitoring of historical data of gas, steam and electricity, the parameter configuration function of the dispatching model, the monitoring of equipment status, the visual display of dispatching results, and the downloading of relevant data. etc.

To sum up, for the optimal scheduling problem of gas-steam-electricity conversion, this paper establishes an optimal distribution model of gas based on boiler load, and an optimal scheduling model for gas-steam-electricity conversion considering changes in steam power demand. The model achieves the goal of reducing system cost and improving the efficiency of the energy conversion process. The model system developed based on the dispatching method of gas-steam-electricity conversion provides users with auxiliary decision-making tools.

**Key words:** Iron and steel enterprises; gas-steam-electricity conversion system; energy optimization; energy conversion efficiency; equipment load

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 钢铁企业二次能源概述.....	1
1.1.2 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统简介.....	3
1.2 煤气-蒸汽-电力转换优化研究现状.....	4
1.2.1 建模方法.....	5
1.2.2 系统设备效率研究.....	6
1.2.3 研究现状分析.....	9
1.3 研究内容与论文结构.....	10
1.3.1 研究目的与内容.....	10
1.3.2 论文结构.....	10
2 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统特性分析.....	13
2.1 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统网络.....	13
2.2 煤气-蒸汽-电力转换过程分析.....	13
2.2.1 煤气转换蒸汽过程分析.....	14
2.2.2 蒸汽转换电力过程分析.....	16
2.3 煤气-蒸汽-电力转换过程效率计算方法.....	18
2.3.1 转换过程并联机组效率计算方法.....	18
2.3.2 两步转换间串联机组效率计算方法.....	19
2.4 本章小结.....	20
3 基于锅炉负荷的煤气优化分配方法.....	21
3.1 问题描述.....	21
3.2 煤气优化分配模型.....	22
3.2.1 建模思路.....	22
3.2.2 符号定义.....	22
3.2.3 目标函数.....	23
3.2.4 约束条件.....	23
3.2.5 问题假设.....	24
3.2.6 模型参数.....	24
3.3 模型求解与结果分析.....	25
3.3.1 求解方法.....	25
3.3.2 优化结果.....	27
3.3.3 成本分析和设备效率分析.....	29
3.3.4 煤气蒸汽转换过程分析.....	31

3.4 本章小结.....	32
4 考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度方法 .....	33
4.1 问题描述.....	33
4.1.1 蒸汽来源.....	34
4.1.2 电力来源.....	35
4.2 钢铁企业自发电设备建模 .....	35
4.2.1 建模方法.....	35
4.2.2 汽轮机模型.....	36
4.2.3 CCPP 模型.....	38
4.2.4 余热余能模型.....	39
4.3 煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型.....	41
4.3.1 建模思路.....	41
4.3.2 符号定义.....	41
4.3.3 目标函数.....	43
4.3.4 约束条件.....	44
4.3.5 问题假设.....	45
4.3.6 模型参数.....	46
4.4 模型求解及优化结果.....	46
4.4.1 求解方法.....	46
4.4.2 模型输入.....	47
4.4.3 优化结果.....	48
4.5 结果分析.....	53
4.5.1 系统运行成本分析.....	53
4.5.2 煤气柜稳定性分析.....	53
4.5.3 设备转换效率分析.....	54
4.5.4 过程转换效率分析.....	57
4.6 本章小结.....	58
5 煤气-蒸汽-电力转换优化调度模块开发.....	59
5.1 模型系统总体设计及开发工具 .....	59
5.1.1 系统架构.....	59
5.1.2 开发环境及开发工具.....	60
5.2 数据库及功能模块设计.....	63
5.2.1 数据库设计.....	63
5.2.2 功能模块设计.....	65
5.3 模型系统模块开发.....	66
5.3.1 数据查询模块.....	66
5.3.2 系统配置模块.....	68
5.3.3 煤气-蒸汽-电力转换优化模块.....	69



5.4 本章小结.....	70
6 结论与展望.....	71
6.1 结论.....	71
6.2 展望.....	72
参考文献.....	73
附录.....	79
B. 学位论文数据集.....	79

## 1 绪 论

本章首先对钢铁企业煤气、蒸汽、电力这些二次能源进行简要介绍，归纳煤气、蒸汽、电力能源介质在钢铁企业总能耗中的占比情况，说明这些能源有效利用的重要性。其次明确煤气-蒸汽-电力系统的组成，根据煤气-蒸汽-电力之间的特点，煤气、蒸汽、电力这些二次能源有效利用需要考虑煤气-蒸汽-电力的联合调度优化。再者，从煤气-蒸汽-电力系统优化研究方法和目前煤气-蒸汽-电力系统的设备效率两方面，总结煤气-蒸汽-电力系统优化的研究现状，分析现有研究可以进一步深入之处。最后，基于研究现状、钢铁企业的实际情况提出本文的研究内容与目的。

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 钢铁企业二次能源概述

钢铁企业的二次能源是来源于钢铁企业在冶炼过程中消耗一次能源（煤炭、重油、天然气等）的同时产生的副产品，包括煤气、蒸汽、电力等，约占钢铁企业总能耗的 50%~60%<sup>[1,2]</sup>，这些能源的合理利用有利于提高能源利用率，本节对这三种主要的二次能源的特点进行了概述。

##### ①钢铁企业的二次能源——煤气

煤气是冶炼过程中产生的副产品，是指伴随钢铁生产过程而产生的各类可燃性气体<sup>[3]</sup>，包括焦炉煤气（Coke Oven Gas, COG）、高炉煤气（Blast Furnace Gas, BFG）、转炉煤气（Linz Donawitz Gas, LDG），约占钢铁企业总能耗的 30%<sup>[3]</sup>，约占余热余能总量的 68%<sup>[4]</sup>。可见，煤气在二次能源中总能耗排名榜首，作为钢铁生产制造过程中的产生的重要的二次能源之一，因此煤气有效利用率将直接反映钢铁企业的二次能源回收利用水平。BFG、COG、LDG 三种煤气的主要成分如表 1.1 所示，包括有：CO、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 等，是宝贵的碳-化工原料和冶金生产过程中的主要燃料之一<sup>[5]</sup>。三种煤气由于来源不同、各种成分含量的差异和发热量不同，因此其燃烧特性呈现不同的特点，三种煤气的详细特性如下：

1) 焦炉煤气是指炼焦用煤在焦炉中经过干馏后产生的黄褐色气汽混合物<sup>[6]</sup>。焦炉煤气的热值范围一般为 16720-18810kJ/m<sup>3</sup>，可燃成分占比 90%左右，是一种无色有臭味的气体（因为含有少量的 H<sub>2</sub>S），含氢较多（占比达 2~4%），燃烧速度快，火焰较短。如果 COG 没有净化好，将会含有较多的焦油和萘，这些物质将增加调火工作的难度，存在堵塞相关管道和管件的风险。

2) 高炉煤气是在高炉炼铁生产过程以焦炭、煤等还原剂还原铁矿石过程中副

产的可燃气体<sup>[7]</sup>，主要成分包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$ 。其特点是含尘量大、不易着火（着火温度较高）、热值低（热值为  $3300\sim 4200 \text{ kJ/m}^3$ ，在三种煤气中热值最低），由于高炉煤气惰性气体（ $\text{N}_2$ ）含量较高，燃烧时着火速度较慢并且稳定性较差。

3）转炉煤气是转炉炼钢过程中的副产品。特点是易着火，着火温度为  $600\sim 700^\circ\text{C}$ ，其主要含  $\text{CO}$ （ $50\%\sim 70\%$ ）、 $\text{CO}_2$ （ $12\%\sim 18\%$ ），其热值约为高炉煤气的 2 倍（热值为  $7117.56\sim 8373.6 \text{ kJ/m}^3$ ）。转炉煤气中含有 50% 以上的一氧化碳，若发生煤气泄露易中毒，与空气（ $\text{O}_2$ ）混合后易爆炸。

表 1.1 BFG、COG、LDG 的主要成分和相关特性

Table 1.1 Main components and related properties of BFG, COG, LDG

煤气类型 成分	BFG	COG	LDG
$\text{CO}/\%$	25.0~30.0	5~8	50.0~70
$\text{CO}_2/\%$	9.0~12.0	2~4	12.0~18
$\text{CH}_4/\%$	0.2~0.5	23~27	--
$\text{H}_2/\%$	1.5~3.0	2~4	1.0~3.0
$\text{N}_2/\%$	55.0~60.0	3~6	20.0~28.0
$\text{O}_2/\%$	0.2~0.4	3~6	0.2~1.8
着火温度（ $^\circ\text{C}$ ）	大于 700	600~650	600~700
密度/（ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）	1.29~1.30	0.45~0.48	0.2~1.8
发热量/（ $\text{kJ/m}^3$ ）	3300~4200	17580~18420	7117.56~8373.6

## ②钢铁企业的二次能源——蒸汽

蒸汽可用于供热、发电等，根据压力的不同可分为 S1 蒸汽、S2 蒸汽、S3 蒸汽。在钢铁冶炼生产过程中，蒸汽是不可缺失的能源介质，其消耗量占钢铁企业总能耗的 10% 左右<sup>[8]</sup>。钢铁企业的蒸汽主要由蒸汽转换、蒸汽输送和蒸汽使用这三个重要环节组成<sup>[9]</sup>，这些环节紧密相连、互相影响。蒸汽从转换→输送→使用整个流程是按照工序用户对 S1 蒸汽、S2 蒸汽、S3 蒸汽的需求量由其他形式的能源转换而来的，得到的三种蒸汽由相对应的 S1 蒸汽管网、S2 蒸汽管网、S3 蒸汽管网输送到用户，供给用户使用。蒸汽种类繁多，来源广泛，蒸汽消耗量随钢铁生产情况有较大波动，而蒸汽缓冲储存往往是有限的，如果蒸汽发生跟不上蒸汽消耗波动，会造成蒸汽放散或不满足钢铁生产需要，因此对蒸汽的合理调度尤为重要。三种蒸汽的产汽用户如下：

1）S1 蒸汽为高压蒸汽，压力为  $2.0\sim 2.5\text{MPa}$ ，发生用户：130t/h 燃气锅炉、启

动锅炉等，使用用户：炼钢 RH 炉等。

2) S2 蒸汽为中压蒸汽，压力为 0.8~0.9MPa，发生用户：汽轮机抽汽、启动锅炉、130t/h 燃气锅炉、干熄焦发电机组抽汽等，使用用户：焦化、炼铁、炼钢、制氧、海水淡化等。

3) S3 蒸汽为低压蒸汽，压力为 0.4~0.43MPa，发生用户：汽轮机抽汽，使用用户：海水淡化、换热站等。

### ③钢铁企业的二次能源——电力

电力是钢铁企业生产过程中所需要的重要能源，其消耗量占钢铁企业总能耗的 20% 左右<sup>[10]</sup>，为钢铁企业生产过程的正常运行提供动力支持，满足各生产工序的各生产设备、各辅助设备等的电力需求。企业的电力来源由两部分组成：外部购电和内部发电。外部供电时根据峰谷电价购买电力，峰谷电价（Peak and Valley Price, PVP）是钢铁企业通过各种能源的精细化管理。峰谷电价主要是分为三个区间段：峰价（Peak Price Period, PPP）、平价（Moderate Price Period, MPP）、谷价（Valley Price Period, VPP）。利用峰谷电价的不同做好电力避峰就谷的生产<sup>[11]</sup>，在峰价时多发电降低外购电量，是节约系统运行成本的重要手段。钢铁企业设有自发电厂（Self-Provided Power Plants, SPPPs），利用煤气、余热余能等发电，自发电不满足需求时，需要在外网购电。目前自发电比例达到了 50% 左右<sup>[12]</sup>，部分已经达到 80% 以上<sup>[13]</sup>。在钢铁企业发电设备较多，因此在生产过程中应对电力合理调度，得到最优的自发电和外购电方案。

目前钢铁企业系统节能的关键技术之一是能源优化调配<sup>[14]</sup>，是直接以能源介质为对象进行优化分配的一种先进的管理理念和方法，通过能源优化调配可以提高能源的利用率。因此针对钢铁企业煤气、蒸汽、电力等介质，可以通过一系列的能源优化方法实现其合理利用。

#### 1.1.2 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统简介

煤气-蒸汽-电力系统是一个由多能源介质和多个能源设备组成的复杂系统。图 1.1 是钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统示意图，主要包括钢铁制造流程煤气的发生与使用系统、煤气蒸汽循环发电系统、余热余能回收系统、煤气-蒸汽-电力转换系统等。煤气的发生与使用系统中主工序产生的煤气优先供给消耗煤气的生产工序使用，确保生产的顺利进行，其中产生煤气的工序有焦化、炼铁、炼钢，钢铁冶炼过程使用煤气的主工序主要有：焦化、球团、炼钢、炼铁、热轧等。煤气蒸汽循环发电系统（Combined Cycle Power Plant, CCPP）设备消耗煤气来直接发电。余热余能回收系统是回收主工序生产过程产生的余热余能来发电和抽汽，主要包括的设备有：干熄焦发电（Coke Dry Quenching, CDQ）和高炉煤气余压透平发电装置（Blast Furnace Top Gas Recovery Turbine Unit, TRT）。煤气-蒸汽-电力转换系统是

钢铁制造流程中产生的煤气在满足主工序的需求之后，用来分配给转换系统的缓冲用户，实现能源的转换，包括煤气转换为蒸汽过程、蒸汽转换为电力过程，涉及的设备有各种类型锅炉、汽轮机发电机组。煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能回收系统产生的蒸汽满足生产的蒸汽需求，并且与煤气蒸汽循环发电系统产生的电力、外部电网满足生产电力的需求。

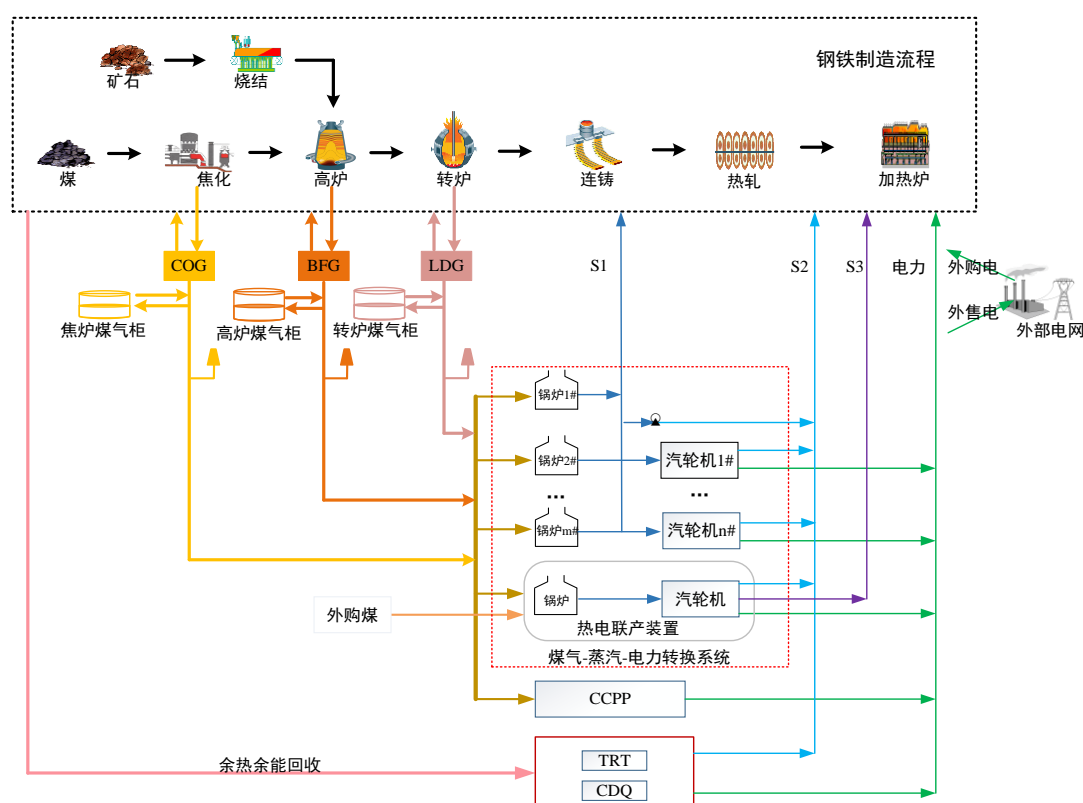


图 1.1 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统示意图

Fig.1.1 Schematic diagram of the gas-steam-electricity system in iron and steel enterprises

钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统的特点：煤气、蒸汽、电力能源介质随生产过程波动而波动，能源介质之间存在产耗、输配等多种形态；煤气-蒸汽-电力之间存在耦合特性<sup>[11,15,16]</sup>。而在煤气-蒸汽-电力转换系统中部分设备存在既消耗能源又产生能源，各能源介质为了满足工艺的需要相互协调<sup>[17,18]</sup>；缓冲用户锅炉是富余煤气利用的大户，汽轮机发电机组在自发电量也占比较大。因此将煤气、蒸汽、电力联合调度能有效的提高能源的利用率，构建能源优化模型有利于钢铁企业系统节能降耗，研究转换系统中能源的转换关系可进一步提高能源利用效率和降低成本。

## 1.2 煤气-蒸汽-电力转换优化研究现状

为了研究钢铁企业的能源合理利用情况、优化分配问题等问题，需要建立能源模型来分析企业的节能方法来解决<sup>[19]</sup>。整个钢铁企业能源系统的网络结构复杂、

密切联系,开展煤气-蒸汽-电力的转换优化研究,对提高能源利用效率和降低运行成本具有重要意义。煤气-蒸汽-电力优化调度是在生产过程中获取煤气的富余量、用户对蒸汽和电力的需求,在满足能量守恒、煤气供需平衡、设备操作等约束的前提下,明确调度目标,通过能源转换,提高多能源介质的转换效率,降低运行成本。目前在煤气-蒸汽-电力这三种能源优化方面研究已经有了一定的基础。本节将从煤气-蒸汽-电力系统的建模方法和系统设备效率的研究来进行综述。

### 1.2.1 建模方法

目前关于煤气-蒸汽-电力系统优化研究主要是数学规划类方法<sup>[20]</sup>较多。数学规划方法是指首先通过分析能源优化相关问题确定问题的决策变量和相关参数,进一步将能源优化问题描述为各个决策变量在满足各种约束条件的前提下,通过目标函数求得的最优值。数学规划方法包括单目标线性规划(Single Objective Linear Programming, SOLP)、混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)、多目标规划(Multiple Objective Programming, MOP)等。

表 1.2 煤气-蒸汽-电力系统研究方法总结

Table 1.2 Summary of research methods for gas-steam-power system

类型	代表文献	创新性
混合整数规划	杨涛 <sup>[34]</sup>	考虑能源产耗关系
	Kim 等 <sup>[35]</sup>	考虑能源需求和成本变化的情况下确定最优供应方案
	Kong 等 <sup>[36]</sup>	优化煤气在煤气系统、热电联产系统、炼钢系统的分配
	张红日 <sup>[37]</sup>	考虑钢企能量流动过程,结合能量流动网络建立模型
	Zeng 等 <sup>[38]</sup>	考虑煤气在多个设备上的分配方案
混合整数非线性	Yang 等 <sup>[39]</sup>	关于煤气分配问题建立了新的数学规划模型
	Wei 等 <sup>[22]</sup>	考虑锅炉效率与汽轮机功率的特征曲线
非线性	李雪晴等 <sup>[40]</sup>	考虑煤气、蒸汽、水、电之间的耦合关系
线性规划	Robert <sup>[41]</sup>	首先建立钢铁厂的煤气优化线性规划法模型
	张琦等 <sup>[42]</sup>	考虑能源介质的耦合关系供需变化
	贺东风等 <sup>[43]</sup>	不同工况下能源介质在设备间的分配
	翟延伟等 <sup>[44]</sup>	提出一种考虑条件预期的不确定决策模型
多目标	张琦等 <sup>[1]</sup>	考虑环境成本和经济运行成本
	郑思源 <sup>[45]</sup>	将煤气、蒸汽、电力子系统联合调度
	曾亮等 <sup>[46]</sup>	钢铁企业多能源介质的动态平衡和优化调度问题 从全局优化和系统节能角度建立模型

表 1.3 煤气-蒸汽-电力系统常见的优化目标总结

Table 1.3 Summary of common optimization objectives for gas-steam-power system

研究内容	优化目标	代表文献
优化煤气分配问题	煤气惩罚最小和购电成本最小	Zhao 等 <sup>[47]</sup>
	煤气放散、油耗、锅炉燃烧器点火次数最小	Du 等 <sup>[48]</sup>
	煤气柜柜位偏离惩罚、煤气放散成本最小	Yang 等 <sup>[49]</sup>
企业微电网自备电厂机组 及煤气消耗的计划	系统运行成本最小	Kong 等 <sup>[50]</sup>
	用电成本最小化	刘坤等 <sup>[51]</sup>
蒸汽和电力负荷分配	系统运行成本最小	曾玉娇等 <sup>[24]</sup>
能源的优化调度	能源使用成本和碳排放成本最小	Liu 等 <sup>[21]</sup>

具有代表性的煤气-蒸汽-电力系统研究方法见表 1.2 所示,目前针对煤气-蒸汽-电力系统的优化研究的模型类型主要包括线性规划模型、混合整数规划模型、多目标规划模型、非线性规划模型等。求解方法有求解软件和智能算法等,其中求解软件有 Pyomo<sup>[21, 22]</sup>、Lingo<sup>[23]</sup>、Cplex<sup>[24, 25]</sup>等,智能算法有多目标约束进化算法<sup>[26]</sup>、改进增广  $\epsilon$ -约束法<sup>[27]</sup>、启发式方法<sup>[28-30]</sup>、遗传算法<sup>[31, 32]</sup>、混合双层分解算法<sup>[33]</sup>等。表 1.3 总结了现有模型所考虑的目标函数,包括:煤气蒸汽放散最小、煤气柜柜位偏离最小、能源购买成本最低等;所考虑的约束条件有:物料平衡约束、能量转换平衡约束、煤气柜平衡约束、能源需求约束等。

由此可见,目前针对煤气-蒸汽-电力系统的优化研究,建立了很多相关模型,问题考虑也比较全面,实现能源合理利用的目的。模型的目标函数主要是考虑煤气蒸汽放散最小、煤气柜柜位偏离最小、能源购买成本最低等,这些目标函数总的而言均是针对生产过程系统总的运行成本而言。

### 1.2.2 系统设备效率研究

在煤气-蒸汽-电力转换系统中能源介质通过各个设备发生能源的转换,转换系统涉及到能源转换设备较多,如锅炉、汽轮机发电机组等,因此煤气-蒸汽-电力优化研究设备的能源守恒,按转换系统设备的效率是否恒定分为两大类:一类是由于在实际生产过程中煤气-蒸汽-电力转换系统中包括各种类型煤气、各种类型蒸汽、电力等,能源介质种类多,并且能源介质之间相互影响相互关联,所以为了简化模型考虑设备转换效率恒定;一类是根据设备效率的影响因素研究设备转换效率变化。本节将从这两方面综述煤气-蒸汽-电力转换优化的相关研究。

#### ①煤气-蒸汽-电力系统相关设备效率恒定

部分研究考虑到钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统的各种类型煤气、各种类型蒸汽、电力相对应的管网数目众多且分布较广连接方式多,煤气、蒸汽、电力之间又相互影响和关联,煤气-蒸汽-电力转换系统的设备既是产能设备又是耗能设备,实际运行情况复杂,因此为了降低模型建立的难度将煤气-蒸汽-电力转换过程的各个设备的效率设为恒定,考虑设备的能量守恒。相关研究如下:

贺东风等<sup>[43, 52]</sup>在给定锅炉和发电设备效率的情况下,考虑不同工况下对煤气、蒸汽、电力的需求量不同和轧制计划对能源调度的影响,建立线性规划模型,通过 LINGO 求解得到了轧制单元的最优排程和煤气、蒸汽、电力优化方案。马光宇<sup>[53]</sup>在富余煤气合理利用的基础上建立了电力生产系统的投入产出模型,建立了电力消耗系统的吨钢耗电成本模型。Zhao 等<sup>[54]</sup>为了优化副产煤气分配和系统运行成本,考虑锅炉惩罚因子和煤气柜惩罚因子,提出了混合整数线性规划模型,得到分配方案能够减小煤气柜柜位的波动。Zhao 等<sup>[55]</sup>建立了混合整数线性规划的分时电价下副产气体分配优化调度模型,并以两家不同钢铁企业的自发电厂为例进行了实例分析,探讨了企业的最优运营策略。Zeng 等<sup>[56]</sup>建立多时段蒸汽动力系统的优化模型,以在钢铁企业运行成本包括燃料总成本最小化,设备维护成本等为目标函数,模型考虑了富余煤气流动的变化性质,使用热力学原理进行单元建模,发电容量限制,功率和蒸汽平衡方程和斜坡速率限制,在分时电价方面还考虑了蒸汽动力系统与主电网的连接,并且提出了一种改进的粒子群优化算法,通过某钢铁厂的实绩数据验证了所提出的优化方法的有效性。刘向斌<sup>[57]</sup>考虑机组的系统发电效率亦保持不变,分析钢铁厂电力的生产过程,分别从煤气的分配问题、蒸汽的生产问题、电力的自产与外买问题将煤气、蒸汽、电力实施联合调度,考虑各个发电设备效率恒定建立钢铁企业电力的线性模型,得到了钢铁企业自发电与外购的方案,降低系统运行成本的。Zhang 等<sup>[58]</sup>考虑了每一时段的副产气体的产生和消耗的变化和低(或中)压蒸汽和电力的需求建立了炼钢过程中能量介质最优分配的数学模型。Zeng 等<sup>[38]</sup>考虑煤气-蒸汽-电力系统设备和相应的操作特性,建立了一个新的混合整数线性模型,并且当锅炉的实际运行负荷超过其设计负荷 50% 时根据锅炉负荷给定了锅炉效率。

这些优化模型着重考虑的是以整体降低系统运行成本和能耗为目标,然后在模型中通常是假设设备的效率恒定,模型方面考虑物料平衡和能量守恒等,但是在实际的生产运行过程中钢铁企业的蒸汽、电力需求存在波动,设备负荷也存在变化,故而效率存在变化。

## ②煤气-蒸汽-电力系统相关设备效率不恒定

在有关钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统优化的设备效率变化的研究中,部分研究按设备的投入产出的线性关系来考虑相关问题,部分研究按设备效率的非线性关



系来考虑问题，相关研究分别总结如下：

根据设备的特性在考虑设备效率变化的研究中，部分研究做了设备产出与投入的线性曲线来研究煤气-蒸汽-电力转换优化问题。其中曾玉娇<sup>[59,60]</sup>建立了钢铁企业电力系统与蒸汽系统集成优化调度模型，根据锅炉 BHM (Boiler Hardware Model) 模型<sup>[61]</sup>和汽轮机 THM (Turbine Hardware Model) 模型<sup>[62]</sup>，建立锅炉和汽轮机等设备的线性模型作为调度模型的约束条件之一，实现了能源的充分利用。Zhao 等<sup>[47]</sup>考虑了锅炉运行负荷对锅炉效率的影响，通过对 5 台锅炉运行数据的回归分析，建立了蒸汽产生量与锅炉运行负荷的线性模型，给出了锅炉运行负荷与效率之间的关系，表明了锅炉运行负荷对锅炉效率有很大影响，建立了考虑分时电价的混合整数线性规划模型。在考虑设备效率变化的研究中，部分学者是根据效率二次拟合曲线来研究煤气-蒸汽-电力转换优化问题。其中 Li 等<sup>[63]</sup>SPP 中的每个锅炉在容量、效率和优化运行负荷方面都有不同的特点，副产煤气的优化配置应考虑每个锅炉的特点，需要将模型与实际生产数据进行匹配，建立了各锅炉供气的二次函数模型，通过该模型得到机组供气模型，采用最小二乘法得到模型参数，利用均值定理计算了一阶偏导数二元函数的准则极值，计算了锅炉负荷的最优经济运行，得到了煤气最优分配方案。高金彤等<sup>[64]</sup>采用锅炉效率非线性拟合曲线，建立基于钢铁企业蒸汽系统混合整数非线性规划模型，得到的结果更加符合实际。Yang 等<sup>[39]</sup>采用锅炉效率与锅炉实际负荷与额定负荷之比的二次曲线，考虑煤气柜和锅炉的合理容量以及两者的关系，确定煤气柜、锅炉、煤气放散惩罚的权重系数，关于富余煤气在缓冲用户的分配建立了新的数学规划模型，为钢铁企业缓冲用户的改进提供了科学的指导。Wei<sup>[22]</sup>考虑不同类型的锅炉效率运行特性不一样，采用了锅炉效率与蒸汽的产生量的二次拟合曲线，并且针对汽轮机机组采用了汽轮机发电机组发电功率与抽汽特性的线性拟合曲线，建立的混合整数非线性规划模型，通过模型优化降低了成本。Zhang 等<sup>[65]</sup>考虑设备运行负荷、运行参数和设计尺寸影响机组的热力性能和经济性能，考虑锅炉效率与锅炉负荷的二次曲线，建立了混合整数非线性模型，在运行负荷相同的情况下，大型锅炉性能较好，而小型锅炉在负荷较高时，效率较高。Liu<sup>[21]</sup>提出能源枢纽概念，提出了能源枢纽(Energy Hub, EH)，EH 中的能量转换过程用约束条件来描述，能量设备的效率在实际运行条件下不可能是恒定的，能源设备的效率可能会随着设备负载的变化而变化，采用二次曲线拟合的方法来描述能源装置的效率与负荷之间的关系。

现有针对设备效率变化的研究中，把设备效率变化随负荷变化这一特性作为开展煤气-蒸汽-电力转换优化研究的重要组成部分，去连接煤气-蒸汽-电力之间的转换过程，即连接煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程，把设备效率随负

荷变化的关系通过线性或二次曲线来表示去作为所建立模型的约束条件，得到煤气、蒸汽、电力的优化方案，提高了设备的效率和企业的经济效益。

### 1.2.3 研究现状分析

近年来，国内外许多学者围绕煤气-蒸汽-电力转换系统的优化调度问题开展了大量的研究，实现了煤气、蒸汽、电力二次能源的合理利用，降低了系统运行成本，但是仍有可以深入之处。其中，在部分考虑设备效率恒定的研究，为生产提供了煤气、蒸汽、电力的最优分配方案，对于系统节能降耗意义重大，但是在实际生产过程中设备负荷存在变化进而影响设备效率，以锅炉为例如果锅炉效率被认为是固定的，忽略了效率会随运行负荷的变化，当锅炉处于低运行负荷时，计算出的产汽量将大于实际产汽量。因此部分研究按设备的投入产出的线性关系或者非线性关系来考虑问题，研究负荷变化影响对设备效率，降低了系统运行成本，得到了煤气、蒸汽、电力的优化方案，为后续开展煤气-蒸汽-电力转换优化的研究奠定了基础。由于煤气-蒸汽-电力转换系统存在能源从煤气到蒸汽、从蒸汽到电力的两步转换过程，要想提高煤气-蒸汽-电力转换系统的效率，就需要分别针对两步转换过程的效率研究。因此在进一步的研究中，为了提高能源利用效率和降低运行成本，在煤气转换为蒸汽过程，锅炉的效率随锅炉运行负荷变化，但是在实际的生产过程中锅炉的运行负荷分布存在差异，因此可以通过调整煤气在锅炉上的分配，使煤气转换为蒸汽过程的锅炉运行在效率较高的区间，从而提高锅炉的效率进一步提高煤气转换为蒸汽过程的效率，得到煤气的合理分配方案。在蒸汽转换为电力过程，汽轮机的效率受汽轮机的容量、负载等影响<sup>[59]</sup>，汽轮机的发电量受汽轮机进汽量、抽汽量的影响<sup>[60]</sup>。蒸汽和电力来源除转换系统外，还有煤气-蒸汽循环发电系统、余热余能系统等；满足主工序的蒸汽、电力需求也随生产运行情况变化等特点。因此在此过程蒸汽电力的合理调度有利于提高蒸汽转换为电力过程的效率，进而促进煤气-蒸汽-电力转换系统的整体优化。

因此，本文在已有煤气-蒸汽-电力转换优化调度问题建立的相关模型以及针对设备效率变化的研究的基础上，以煤气-蒸汽-电力转换系统为研究对象，基于设备负荷对转换效率的影响，在煤气转换为蒸汽过程，为了提高煤气利用效率并降低系统成本，论文给出了一种考虑锅炉运行负荷对锅炉转换效率影响的煤气分配方法，即在常规系统运行成本最小的基础上，再引入效率与额定效率的偏差作为目标函数，建立基于锅炉负荷的煤气优化分配模型；在此基础上在蒸汽转换为电力过程中，考虑煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能系统、煤气-蒸汽循环发电系统的系统集成优化和煤气柜的缓冲作用，建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型，得到煤气、蒸汽、电力的合理优化方案，从而实现煤气-蒸汽-电力转换系统效率最大，最终达到降低成本和提高能源利用率的目的。

## 1.3 研究内容与论文结构

### 1.3.1 研究目的与内容

本文以国家自然科学基金重点项目（No.51734004）“钢铁制造过程从单元到流程多尺度物质能量的高效转换与协同方法”和国家重点研发计划子项目（No.2017YFB0304005）“钢铁流程物质流与能量流智能协同调配技术”的科研项目为项目背景。为了降低系统运行成本和提高煤气-蒸汽-电力转换系统的效率，本文研究钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的优化调度方法，首先研究煤气-蒸汽-电力转换系统的转换关系，分析转换过程的设备工作原理，提出煤气转换为蒸汽过程、蒸汽转换为电力过程以及整个煤气-蒸汽-电力转换过程效率的计算方法；其次，为了提高煤气转换为蒸汽过程的转换效率，针对煤气转换为蒸汽的过程中各锅炉的热效率与锅炉运行负荷相关影响因素，建立系统成本最小和锅炉效率偏离额定效率最小的煤气优化分配模型；然后，在蒸汽转换电力过程，为了提高蒸汽转换为电力过程的转换效率和得到合理的蒸汽、自发电、外购电方案，分析钢铁企业自发电设备线性相关关系，考虑煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能系统、煤气-蒸汽循环发电系统的系统集成优化和煤气柜的缓冲作用，建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型；最后，在煤气-蒸汽-电力转换优化调度研究的基础上，根据需求开发钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的优化调度模型系统。

### 1.3.2 论文结构

本文的相关章节及研究工作如下所述，论文整体构架、各章节相关逻辑关系如图 1.2 所示。本论文各章节主要的构成如下：

第一章，绪论。首先分析煤气、蒸汽、电力这些二次能源在钢铁企业总能耗的占比情况，根据煤气-蒸汽-电力系统的特点，给出煤气-蒸汽-电力转换优化调度的原因。其次从煤气-蒸汽-电力所涉及的研究方法给出了总结以及从设备效率问题两方面综述了煤气-蒸汽-电力转换优化研究现状，分析现有研究并引出钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的优化调度问题的研究思路。

第二章，煤气-蒸汽-电力转换系统特性分析。首先从钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统的基本情况出发，分析了消耗煤气、蒸汽、电力的特点，根据煤气-蒸汽-电力系统特性给出了煤气→蒸汽→电力过程的效率计算方法，即按照设备串并联的特点计算煤气转为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程以及煤气→蒸汽→电力过程的效率。

第三章，煤气转换为蒸汽过程基于锅炉负荷的煤气优化分配模型。首先考虑煤气-蒸汽-电力系统中的锅炉热效率与锅炉负荷之间的关系，开展考虑锅炉负荷效率的钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换优化方法研究，使得可以根据生产运行情况合理调整锅炉负荷来整体提高锅炉的热效率，建立基于锅炉负荷的煤气优化分配模型，

进而达到提高煤气转换为蒸汽过程的效率和降低系统运行经济成本的目的。

第四章，考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型。在第三章的基础上，蒸汽转换为电力过程，根据蒸汽和电力的来源问题，考虑煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能、煤气-蒸汽循环发电的系统集成优化，分析自发电设备的投入产出关系。在蒸汽转换为电力过程根据蒸汽和电力的需求变化建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型，在整个系统运行成本最小的前提下，使得煤气→蒸汽→电力过程的效率最大。

第五章，钢铁企业基于煤气-蒸汽-电力转换的优化调度模型系统开发。基于煤气-蒸汽-电力转换优化模型，系统主要是对二次能源产生的实时监控，并对煤气的分配、蒸汽和电力的生产进行调度，给出合理的调度决策方案。

第六章，总结与展望。首先对全文研究内容和所得到的结果进行总结分析，然后提出本文不足之处以及下一步的研究方向。

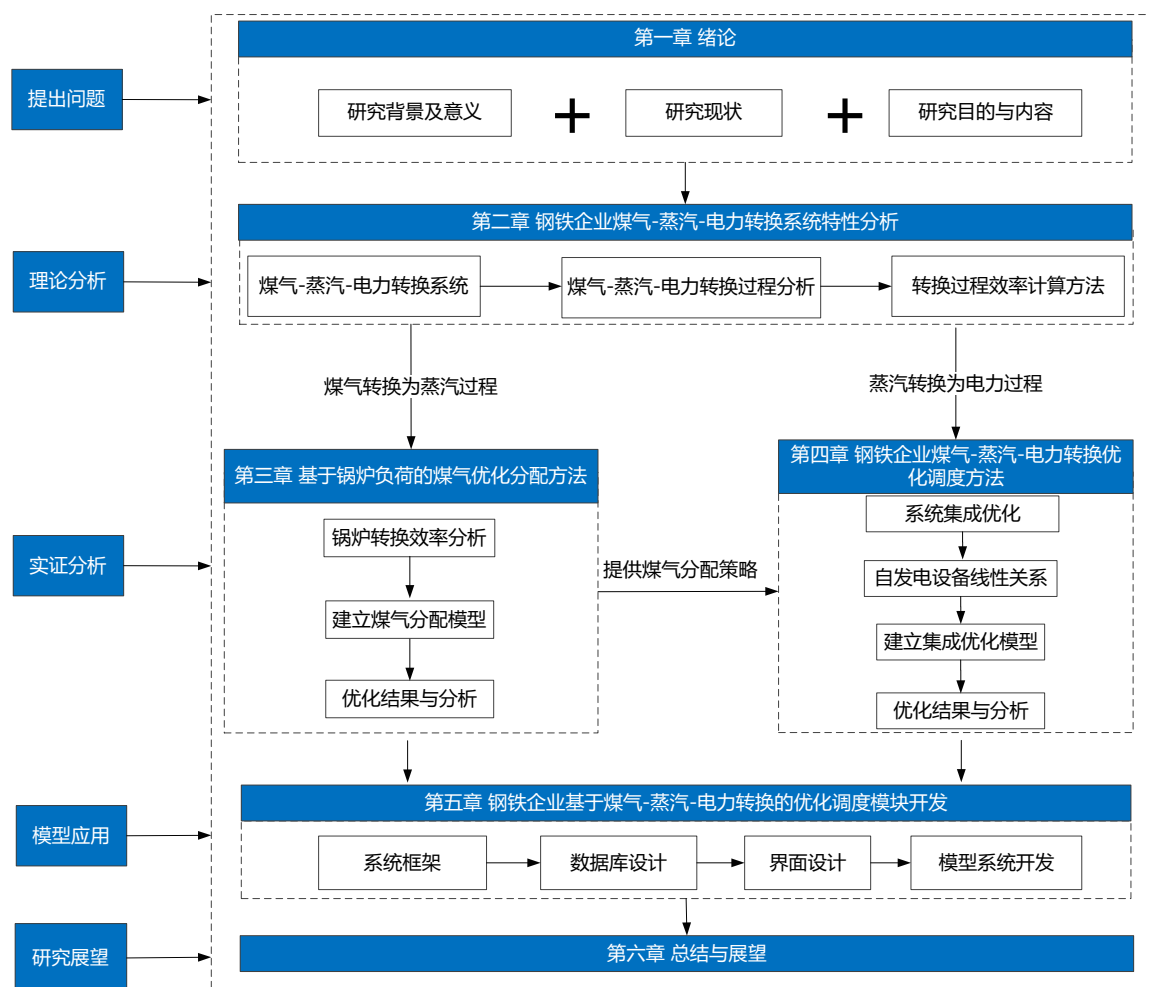


图 1.2 论文整体框架

Fig.1.2 The overall framework of the paper



## 2 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统特性分析

首先，本章介绍钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统网络的基本情况；其次分析煤气-蒸汽-电力转换系统的两步转换过程的特点以及相关设备的特性；最后定义煤气-蒸汽-电力转换系统的转换过程效率计算方法，为了本文所建模型的转换过程效率的计算提供基础。

### 2.1 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统网络

钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统分别由各种类型的煤气、各种类型的蒸汽、电力等介质和能源转换设备组成，通过消耗主工序产生的煤气在满足主工序生产之后富余的煤气通过一系列的转换来满足工艺生产过程对蒸汽、电力的需求。煤气、蒸汽、电力之间存在转换，转换方式为煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程，具有强耦合性。以某钢铁企业为例，煤气-蒸汽-电力转换系统简图如图 2.1 所示，该钢铁厂的煤气-蒸汽-电力转换系统主要的设备有：2 台启动锅炉、2 台 130T 燃料锅炉、2 座 300MW 热电联产机组（Combined Heat and Power，简称 CHP）（包含锅炉和汽轮机及配套发电机组等）、2 台汽轮机（包含配套发电机组）等。

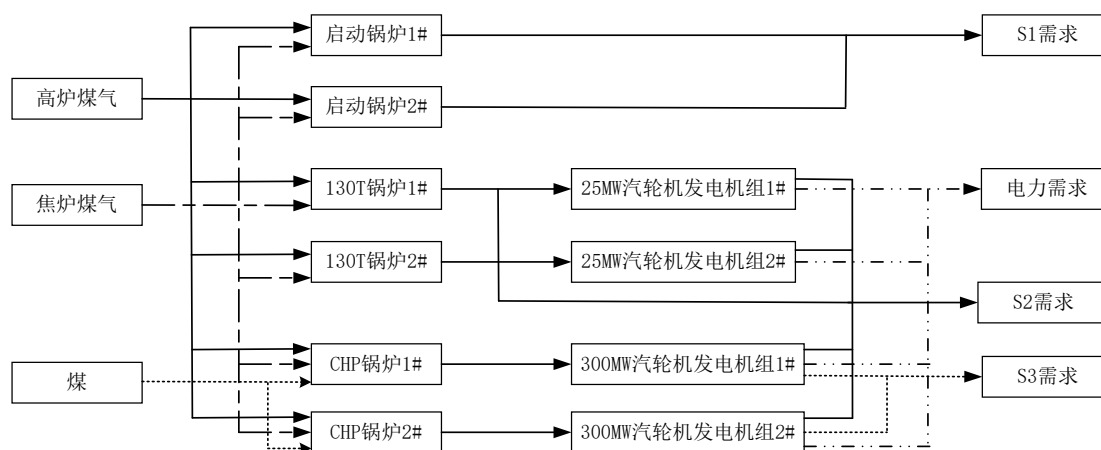


图 2.1 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统简图

Fig.2.1 Schematic diagram of gas-steam-electricity conversion system in iron and steel enterprises

### 2.2 煤气-蒸汽-电力转换过程分析

钢铁企业的煤气-蒸汽-电力转换系统中的能源输入介质包括富余煤气（焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气）、蒸汽、电力，其中三种能源之间转换关系是煤气→蒸汽→电力，具体如图 2.2 所示，即，转换一：煤气转换为蒸汽，转换设备为锅炉；转换二：高压蒸汽转换为电力，转换设备为汽轮机发电机组。

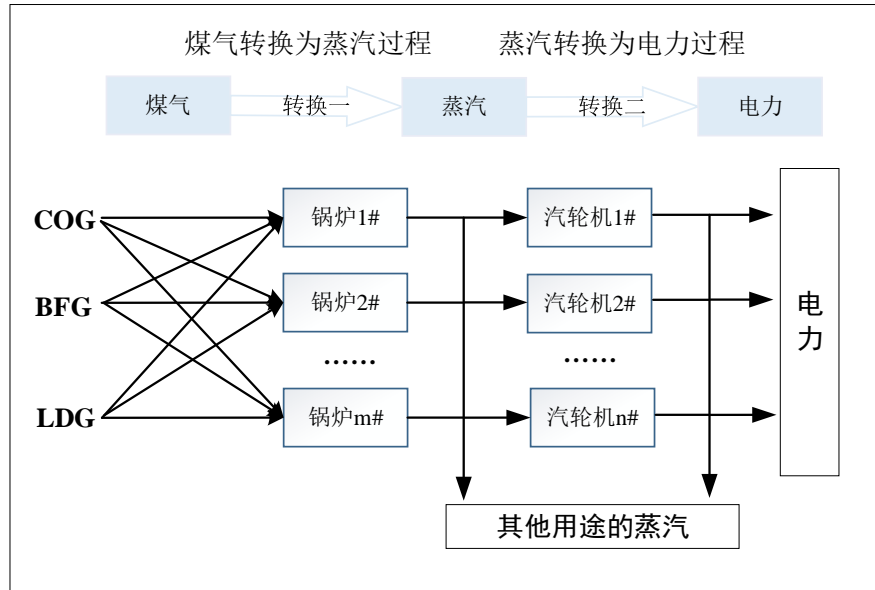


图 2.2 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换简图

Fig.2.2 Schematic diagram of gas-steam-electricity conversion in iron and steel enterprises

### 2.2.1 煤气转换蒸汽过程分析

在钢铁实际生产过程中为了提高能源的利用率、降低排放，主工序（炼铁、焦化、炼钢等）产生的煤气通过回收利用，在满足主工序的生产需要之后，剩余的煤气优先用于满足蒸汽需要和后续过程的发电，发生钢铁企业富余煤气到蒸汽过程的转换，产生的蒸汽以供后续生产使用（发电或者供热），转换用户是一个消耗煤气产生蒸汽的锅炉设备。因此须得合理分配煤气去提高煤气的利用效率，进而提高煤气转换为蒸汽过程的转换效率。虽然有少部分锅炉需要消耗煤通过化学反应来释放煤气和煤中的热量来产生蒸汽，但是所有锅炉的主流燃料为煤气，因此在该锅炉的转换过程仍然视为煤气转换为蒸汽过程。

#### ① 锅炉工作原理

锅炉按照功率分类常见的有：35T 锅炉、75T 锅炉、130T 锅炉、1025T 锅炉等（其中##T 表示锅炉功率大小，例如：35T 表示锅炉的功率为 35t/h）；按照锅炉消耗的燃料种类来分：燃气锅炉（消耗煤气、天然气等）、燃煤锅炉（消耗煤）、混烧锅炉（煤气和煤混烧）等。锅炉主要由预热器、除尘装置、风机、燃烧器、点火装置、省煤器等构成<sup>[67]</sup>。煤气转换为蒸汽的基本流程为富余煤气在预热器中加热至着火温度后送至炉膛中，发生燃烧反应放热，产生的烟气通过引风机从炉膛中排出，锅炉给水泵的水由闸阀进入省煤器，通过分散引入管水冷壁下集箱后，在炉膛四周加热，得到汽水混合物，通过引出管在锅筒内进行蒸汽和水分离，产生的饱和蒸汽由管道运输至外网或汽轮机，以利于下一步的使用。该企业的锅炉型号主要有 35t/h 的启动锅炉、130t/h 的 130T 锅炉、1025t/h 的 CHP 锅炉，各两台。

## ②钢铁企业锅炉煤气消耗情况分析

煤气-蒸汽-电力转换系统煤气转换为蒸汽过程具有消耗煤气量大的特点,利用煤气柜来平衡产消波动<sup>[68]</sup>。该企业涉及到的富余煤气为 BFG、COG,这两种煤气是因为是在生产冶炼过程中产生的相对稳定。该企业 2019 年 12 月主工序煤气的产生量与锅炉消耗总量曲线如图 2.3 所示,图中给出 6 个锅炉的焦炉煤气和高炉煤气消耗总量,由图可以计算出锅炉消耗高炉煤气的占比 33.83%,消耗焦炉煤气占比 19.29%,可见锅炉的煤气消耗量很大,这一部分煤气的合理分配有利于提高能源利用效率。

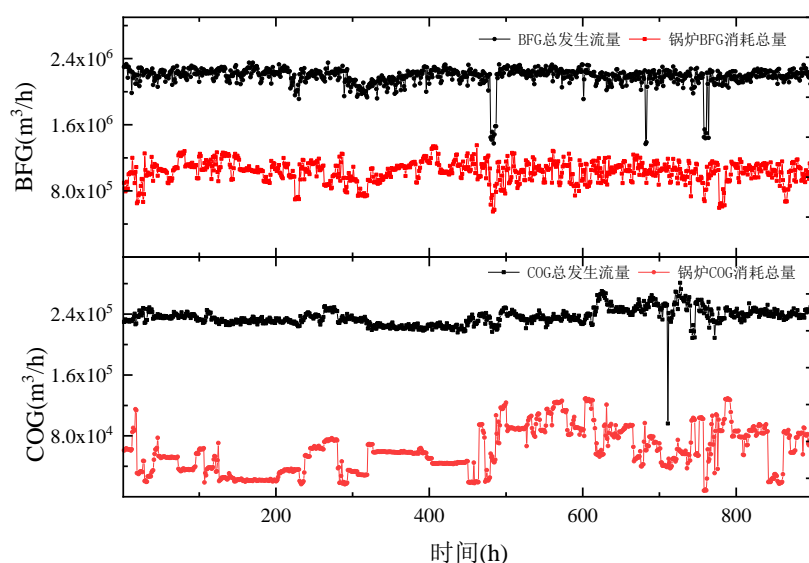


图 2.3 主工序煤气产生量与锅炉消耗总量曲线

Fig.2.3 The curve of gas production in main process and total boiler consumption

## ③锅炉效率的影响因素

由于锅炉的效率主要取决于锅炉的设计尺寸和实际的运行负荷,显然对于确定锅炉而言,影响其转换效率的就是其运行负荷。锅炉运行负荷是指燃料在锅炉中燃烧时单位时间内所释放的热量<sup>[22]</sup>。CHP 锅炉涉及到煤炭的消耗,所以 CHP 锅炉的运行负荷的计算公式与燃气锅炉不同。燃气锅炉运行负荷计算公式如(2.1),CHP 锅炉如(2.2)。以该企业 2019 年 12 月数据通过式(2.1)~(2.3),计算得到锅炉效率与锅炉运行负荷的关系如图 2.4 所示,由图可知,各个锅炉的效率随着运行负荷的增加而增大,但是在实际的生产过程中锅炉的运行负荷分布存在差异,因此通过调整煤气在锅炉上的分配,使得各个锅炉的效率均处于较高的水平,从而整体提高锅炉的热效率,进一步达到提高煤气转换为蒸汽过程的转换效率。

对于燃气锅炉(启动锅炉和 130T 锅炉):



$$D_{m,t} = \sum_g X_{g,m,t}^{gas} \times h_g^{gas} \quad (2.1)$$

对于 CHP 锅炉:

$$D_{m,t} = \sum_g X_{g,m,t}^{gas} \times h_g^{gas} + F_{buy,t}^{coal} \times h^{coal} \quad (2.2)$$

因此, 锅炉的效率计算公式如(2.3):

$$\eta_{m,t} = \frac{Z_{m,t}^{str} \times h^{str}}{D_{m,t}} \quad (2.3)$$

其中(2.1)~(2.3)中各个符号的意义如下:

- $m$  表示转换系统中锅炉的编号,  $m=1,2,\dots$ ;
- $t$  表示时段,  $t=1,2,\dots$ ;
- $g$  表示煤气的类型,  $g=1,2,3$ —1 表示 COG, 2 表示 BFG, 3 表示 LDG;
- $D_{m,t}$  表示  $t$  时段锅炉  $m$  的运行负荷, 单位:  $\text{kJ}/\text{h}$ ;
- $X_{g,m,t}^{gas}$  表示  $t$  时段  $m$  锅炉  $g$  煤气的消耗量, 单位:  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- $F_{buy,t}^{coal}$  表示  $t$  时段煤炭的购买量, 单位:  $\text{kg}/\text{h}$ ;
- $h^{coal}$  表示煤炭的热值, 单位:  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;
- $h_g^{gas}$  表示煤气  $g$  的热值, 单位:  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;
- $Z_{m,t}^{str}$  表示  $t$  时段  $m$  锅炉蒸汽的产生量, 单位:  $\text{kg}/\text{h}$ ;
- $h^{str}$  表示蒸汽的焓值, 单位:  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

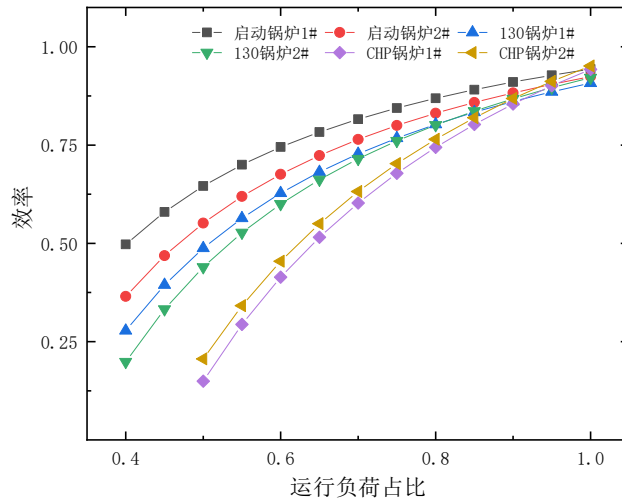


图 2.4 锅炉效率与锅炉运行负荷

Fig.2.4 Relationship between boiler efficiency and boiler operating load

### 2.2.2 蒸汽转换电力过程分析

蒸汽转换为电力过程是在煤气转换为蒸汽过程中锅炉产生的蒸汽一部分用于供热, 一部分用于汽轮机发电机组发电, 在这个过程汽轮机发电机组除了发电之

外还存在抽 S2、S3 蒸汽操作满足蒸汽需要。汽轮机的效率受汽轮机的容量、负载等影响，效率计算公式如(2.4)所示，汽轮机的发电量受汽轮机进汽量、抽汽量的影响。因此蒸汽转换为电力过程的汽轮机的进汽量和抽汽量以及发电量之间相关关系，来合理分配各个汽轮机的抽汽量使得满足电力需求。

汽轮机按照热力系统特征可分为：凝汽式汽轮机、抽汽式汽轮机、背压式汽轮机、中间再热式汽轮机；按照工作原理分为：冲动式和反冲式汽轮机，按汽轮机进汽压力可分为<sup>[69]</sup>：低压汽轮机（1.2~1.5MPa）、中压汽轮机（2~4MPa）、次高压汽轮机（5~6MPa）、高压汽轮机（6~10MPa）、超高压汽轮机（12~14MPa）、亚临界汽轮机（16~18MPa）、超临界汽轮机（22.2MPa）。

汽轮机主要由喷嘴、动叶片、叶轮和轴等组成。蒸汽转换为电力过程在汽轮机发电机组上分两步完成：首先蒸汽所携带的热能到机械能的转换，将含有一定压力和温度的蒸汽通过喷嘴膨胀加速，蒸汽的压力和温度降低，速度增加，使其热能转变为动能，然后速度较高的蒸汽由喷嘴流出，进入汽轮机的动叶通道，汽流方向得到改变（因为动叶通道呈弯曲状），动叶片受到汽流给的冲动力，在此过程由于蒸汽的推动形成了动叶旋转动力矩，从而带动主轴旋转做机械功，整个过程实现了蒸汽从热能到动能再到机械能的转换；其次蒸汽的机械能带动与汽轮机相连的同轴发电机发电，从而完成能源从蒸汽到电力转变。蒸汽的热能转变为动能的过程在喷嘴中完成是冲动式汽轮机，而在喷嘴和叶片中膨胀完成的是反动式汽轮机。汽轮机的抽汽过程是将汽轮机中一部分经做功后仍然含有一定压力的蒸汽抽出供给热用户使用的过程，其余部分的蒸汽继续在汽轮机内膨胀至低压，最后在冷凝器中冷凝成水。抽汽式汽轮机抽汽可根据用户需要和产品要求而确定，能在一定范围内调整，具有较强的灵活性，同时满足用户热负荷和电负荷的需要，抽汽量可根据用户的需求进行灵活调节<sup>[59]</sup>。该企业的汽轮机为抽汽冲动式汽轮机，功率分别为 25MW 和 300MW 的汽轮机发电机组，两种类型的设备各两台。

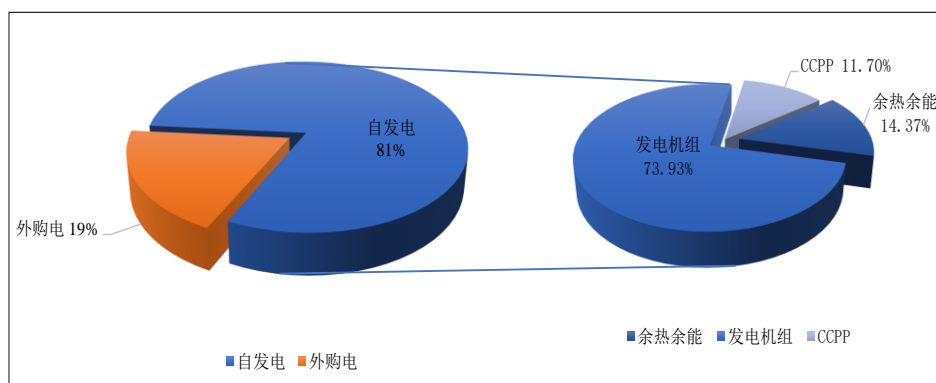


图 2.5 该企业自发电情况

Fig.2.5 The company's self-generated electricity

转换系统电力的内部发电是通过消耗蒸汽来发电，满足生产过程对电力的需求。图 2.5 是该企业 2019 年 12 月自发电的平均占比，由图可知，该企业的自发电占比为 81%，其中通过煤气转换为蒸汽再利用蒸汽发电的发电量的占比高达 73.93%。因此，转换系统中各个发电设备的蒸汽进汽量合理分配有利于发电。

$$\eta_{e,t} = \frac{P_{t,e}^{pro} \cdot h^{ele}}{S_{s_1,e,t}^{in} \cdot h_{s_1}^{steam} - \sum_S S_{t,e,S}^{out} \cdot H_S^{steam}} \quad (2.4)$$

## 2.3 煤气-蒸汽-电力转换过程效率计算方法

### 2.3.1 转换过程并联机组效率计算方法

钢铁企业煤气、蒸汽、电力的两个转换过程，锅炉和汽轮机等的连接关系如图 2.2 所示，可以看出煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转化为电力两步过程中锅炉与锅炉之间、汽轮机与汽轮机之间呈一个并联的状态（如图 2.6 所示）。因此通过能源转换过程中能源的利用程度来评价，采用热力学第一定律为基础的热量法<sup>[70,71]</sup>，在能量转换及传递过程中，热平衡式：

$$\text{输入热量} = \text{输出热量} + \text{损失热量} \quad (2.5)$$

热效率  $\eta$  定义为（效率的大小，定量的表征该过程的能源转换效果）：

$$\eta = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{供给热量}} = \frac{\text{输出热量}}{\text{输入热量}} \quad (2.6)$$

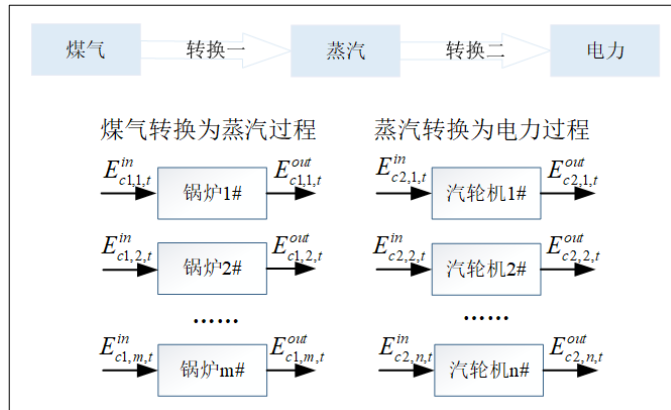


图 2.6 转换过程各设备排列示意简图

Fig.2.6 Schematic diagram of the arrangement of equipment in the conversion process

煤气-蒸汽转换过程中，各个锅炉呈并联状态的排列，根据并联机组的效率计算方法，并联机组功率的传递特点：转换过程的输入功率为各个锅炉的输入功率之和，而输出功率为各个锅炉的输出功率之和，该过程的转换效率：

$$\eta_{C1,t} = \frac{E_{c1,1,t}^{out} + E_{c1,2,t}^{out} + \dots + E_{c1,m,t}^{out}}{E_{c1,1,t}^{in} + E_{c1,2,t}^{in} + \dots + E_{c1,m,t}^{in}} = \frac{\eta_{1,t} \times E_{c1,1,t}^{in} + \eta_{2,t} \times E_{c1,2,t}^{in} + \dots + \eta_{m,t} \times E_{c1,m,t}^{in}}{E_{c1,1,t}^{in} + E_{c1,2,t}^{in} + \dots + E_{c1,m,t}^{in}} \quad (2.7)$$

在蒸汽转换为电力的过程中的各个汽轮机的排列状态与煤气转换为蒸汽的锅炉排列状态一样，均呈并联状态，在蒸汽转换为电力的过程中的整体效率计算方法与煤气转换为蒸汽类似，该过程的转换效率：

$$\eta_{C2,t} = \frac{E_{c2,1,t}^{out} + E_{c2,2,t}^{out} + \dots + E_{c2,n,t}^{out}}{E_{c2,1,t}^{in} + E_{c2,2,t}^{in} + \dots + E_{c2,n,t}^{in}} = \frac{\eta_{1,t} \times E_{c2,1,t}^{in} + \eta_{2,t} \times E_{c2,2,t}^{in} + \dots + \eta_{n,t} \times E_{c2,n,t}^{in}}{E_{c2,1,t}^{in} + E_{c2,2,t}^{in} + \dots + E_{c2,n,t}^{in}} \quad (2.8)$$

其中式(2.7)~(2.9)中各个符号的意义如下：

$m$	表示锅炉的标号；
$n$	表示汽轮机的标号；
$C1$	表示煤气转换为蒸汽过程的标号；
$C2$	表示蒸汽转换为电力过程的标号；
$E_{i,m,t}^{in}$	表示 $t$ 时段 $m$ 锅炉的输入能量，单位： $kJ$ ；
$E_{i,m,t}^{out}$	表示 $t$ 时段 $m$ 锅炉的输出能量，单位： $kJ$ ；
$E_{i,n,t}^{in}$	表示 $t$ 时段 $n$ 汽轮机的输入能量，单位： $kJ$ ；
$E_{i,n,t}^{out}$	表示 $t$ 时段 $n$ 汽轮机的输出能量，单位： $kJ$ ；
$\eta_{m,t}$	表示 $t$ 时段锅炉的热效率；
$\eta_{n,t}$	表示 $t$ 时段汽轮机机组的热效率；
$\eta_t$	表示 $t$ 时段煤气-蒸汽-电力系统的转换效率；
$\eta_{C1,t}$	表示 $t$ 时段煤气转换为蒸汽过程的过程转换效率；
$\eta_{C2,t}$	表示 $t$ 时段蒸汽转换为电力过程的过程转换效率。

### 2.3.2 两步转换间串联机组效率计算方法

在煤气-蒸汽-电力转换系统能源转换过程中，整体存在两次转换煤气到蒸汽、蒸汽到电力，两次转换过程间属于串联机组组成的机械系统，如图 2.7 所示。

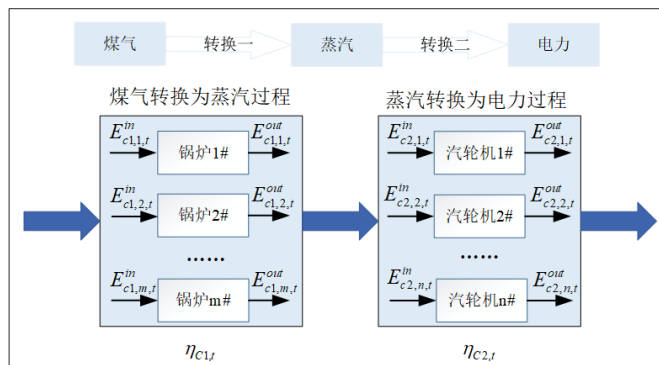


图 2.7 煤气-蒸汽-电力转换过程串联示意图

Fig.2.7 Schematic diagram of series connection of gas-steam-electricity conversion process

能源从蒸汽到电力过程的蒸汽完全式来源于煤气转换为蒸汽过程所产生的蒸汽，完全承接上一步的能源，没有外部能源的输入，煤气到蒸汽再到电力是能源的逐步转换。因此，两步转换间煤气-蒸汽-电力转换系统的总效率等于两次转换过程效率的连乘积，整个转换过程的总效率计算如式(2.9)。由式(2.7)~(2.9)，根据该企业 2019 年 12 月某天的数据计算得到煤气-蒸汽-电力转换过程效率计算结果，如图 2.8 所示，可以看出能源在转换过程中呈现逐级递减的趋势。

$$\eta_t = \eta_{C1,t} \times \eta_{C2,t} \quad (2.9)$$

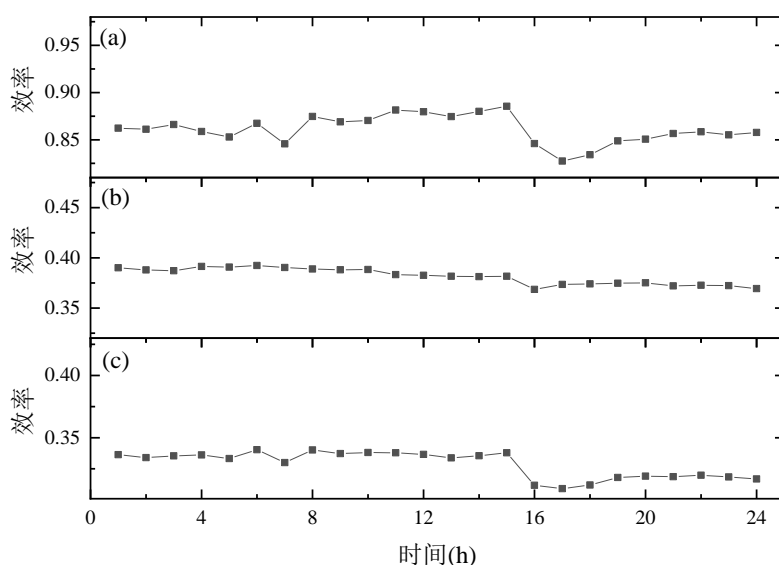


图 2.8 煤气-蒸汽-电力转换过程效率计算实例，其中(a)为煤气转换为蒸汽过程，(b)为蒸汽转化为电力过程，(c)为煤气-蒸汽-电力转换系统

Fig.2.8 Efficiency calculation example of gas-steam-electricity conversion process, in which (a) is the process of gas-to-steam conversion, (b) is the process of steam-to-electricity conversion, and (c) is the gas-steam-electricity conversion system

## 2.4 本章小结

本章进行了钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统特性分析。首先简介了煤气-蒸汽-电力转换系统的特点，定义了煤气、蒸汽、电力三种能源介质之间的转换关系为煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程。其次分析了煤气转换为蒸汽过程的设备特性和煤气消耗特点，分析了蒸汽转换为电力过程的设备特性和自发电特点。然后分析了各个转换过程设备之间的关系，结论是在煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程中各个设备之间的关系均呈并联的关系，两步转换过程之间呈串联的关系。最后，根据串并联机组效率计算方法提出了煤气转换为蒸汽过程、蒸汽转换为电力过程以及整个煤气-蒸汽-电力转换过程效率的计算方法。

### 3 基于锅炉负荷的煤气优化分配方法

基于第二章煤气-蒸汽-电力转换系统特性分析，煤气作为煤气-蒸汽-电力转换过程的起点，锅炉作为转换系统内消耗煤气的用户，煤气在锅炉上的合理分配对于整个转换过程而言起决定性作用。因此本章基于 2.2.1 节煤气转换为蒸汽过程的分析，根据锅炉效率的影响因素，建立数学模型来优化煤气的分配问题，提高锅炉的效率，从而提高煤气转换为蒸汽过程的效率。

#### 3.1 问题描述

煤气-蒸汽-电力转换过程如图 3.1 所示，在煤气转蒸汽过程中锅炉通过消耗高炉煤气和焦炉煤气（部分锅炉消耗动力煤）来产生蒸汽以供后续生产使用，图中以该企业每个类型的设备为代表来描述转换过程。在实际的生产过程中锅炉的运行负荷分布存在差异，可以通过调整煤气在锅炉上的分配，使得各个锅炉的效率均处于较高的水平，从而整体提高锅炉的热效率，进一步达到提高煤气转换为蒸汽过程的转换效率。因此，为了提高煤气利用效率并降低转换系统成本，论文给出了一种考虑锅炉运行负荷对锅炉转换效率影响的煤气分配方法，即在常规系统运行成本最小的基础上，再引入效率与额定效率的偏差作为目标函数，建立基于锅炉运行负荷的煤气-蒸汽-电力优化分配模型。针对煤气-蒸汽-电力转换系统主要考虑的设备是锅炉和汽轮机，因此电力需求主要考虑汽轮机的电力产生量，蒸汽需求主要考虑锅炉的蒸汽产生量，不考虑汽轮机抽汽和蒸汽在降温降压阀的降级蒸汽量。

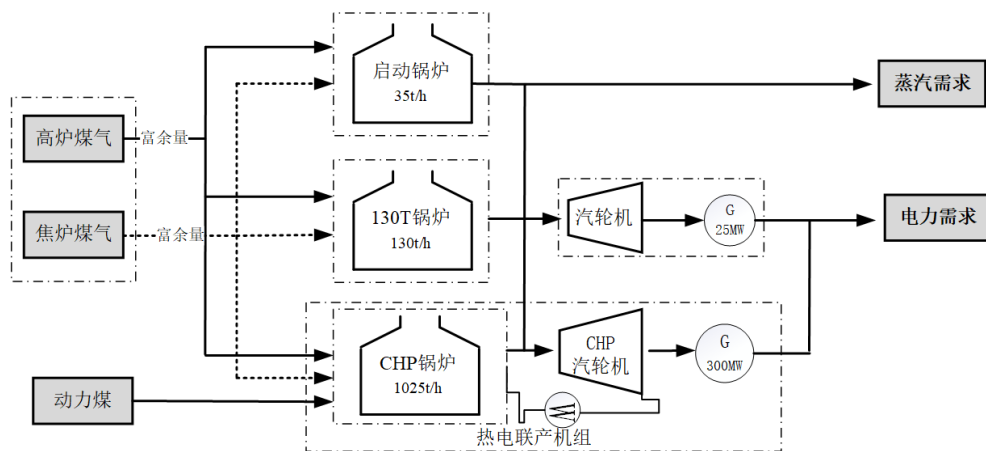


图 3.1 钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换过程示意图

Fig.3.1 Schematic diagram of gas-steam-electricity conversion process in iron and steel enterprises

## 3.2 煤气优化分配模型

### 3.2.1 建模思路

本章模型是通过合理的分配煤气来提高煤气转换为蒸汽过程的效率，为蒸汽转换为电力过程提供煤气分配策略。在煤气转换为蒸汽的过程，考虑富余煤气在锅炉上分配，蒸汽的产生量受锅炉负荷的影响，通过调整锅炉负荷来改变煤气在锅炉上的分配，从而提高副产煤气在锅炉上的利用效率，将煤气转换为蒸汽过程效率最大的目标函数表达为额定效率与设备效率的偏差最小。因此模型考虑煤气-蒸汽-电力转换系统的能源成本最小和煤气转换为蒸汽过程效率最大。约束是能源介质保供约束、投入产出约束、设备产能约束等其他约束。模型的变量是各个锅炉的煤气消耗量和蒸汽产生量，以及热电机组煤气和煤炭消耗、蒸汽和电力产生量、汽轮机的电力产生量。

### 3.2.2 符号定义

模型中涉及的参数及符号说明如下：

$m$	表示转换系统中锅炉的编号， $m=1,2,\dots$ ；
$t$	表示时段， $t=1,2,\dots$ ；
$g$	表示煤气的类型， $g=1,2,3$ —1 表示 COG，2 表示 BFG，3 表示 LDG；
$D_{m,t}$	表示 $t$ 时段锅炉 $m$ 的运行负荷，单位： $\text{kJ}/\text{h}$ ；
$X_{g,m,t}^{\text{gas}}$	表示 $t$ 时段 $m$ 锅炉 $g$ 煤气的消耗量，单位： $\text{m}^3/\text{h}$ ；
$F_{\text{buy},t}^{\text{coal}}$	表示 $t$ 时段煤炭的购买量，单位： $\text{kg}/\text{h}$ ；
$h^{\text{coal}}$	表示煤炭的热值，单位： $\text{kJ}/\text{kg}$ ；
$h_g^{\text{gas}}$	表示煤气 $g$ 的热值，单位： $\text{kJ}/\text{m}^3$ ；
$Z_{m,t}^{\text{str}}$	表示 $t$ 时段 $m$ 锅炉蒸汽的产生量，单位： $\text{kg}/\text{h}$ ；
$h^{\text{str}}$	表示蒸汽的焓值，单位： $\text{kJ}/\text{kg}$ ；
$C_{\text{buy}}^{\text{coal}}$	表示外购煤炭价格，单位：元/ $\text{kg}$ ；
$C_{\text{buy},t}^{\text{ele}}$	表示外购电价格，单位：元/ $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$P_{\text{buy},t}^{\text{ele}}$	表示 $t$ 时段外购电量，单位： $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$C_{\text{gen}}^{\text{ele}}$	表示自发电费用，单位：元/ $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$P_{\text{gen},m,t}^{\text{ele}}$	表示 $t$ 时段自发电量，单位： $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$C_g^{\text{use}}$	表示煤气使用价格，单位：元/ $\text{m}^3$ ；
$X_{g,m,t}^{\text{gas}}$	表示 $t$ 时段 $m$ 锅炉 $g$ 煤气消耗量；
$C_{\text{sale}}^{\text{ele}}$	表示外卖电价格，单位：元/ $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$P_{\text{sale},t}^{\text{ele}}$	表示 $t$ 时段外卖电量，单位： $\text{kw}\cdot\text{h}$ ；
$C_g^{\text{rel}}$	表示煤气放散价格，单位：元/ $\text{m}^3$ ；
$R_{g,t}$	表示 $t$ 时段煤气放散量，单位： $\text{m}^3/\text{h}$ ；

- $\eta_{m,rate}$  表示锅炉额定效率；  
 $G_{g,t}^{sur}$  表示  $t$  时段  $g$  煤气富余量，单位： $m^3/h$ ；  
 $D_t^{str}$  表示  $t$  时段蒸汽需求量，单位： $kg/h$ ；  
 $X_{m,t}^{str}$  表示  $t$  时段  $m$  锅炉产生的蒸汽用于发电的量，单位： $t/h$ ；  
 $G_{m,t}^{str}$  表示  $t$  时段  $m$  锅炉产生的蒸汽拿去外供的量，单位： $t/h$ 。

### 3.2.3 目标函数

模型以系统运行成本最小，目标函数之一如式(3.1)所示。

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_t C_{buy}^{coal} \cdot F_{buy,t}^{coal} + \sum_t C_{buy,t}^{ele} \cdot P_{buy,t}^{ele} + \sum_t \sum_m C_{gen,t}^{ele} \cdot P_{gen,m,t}^{ele} + \\ & \sum_t \sum_g \sum_m C_g^{use} \cdot X_{g,m,t}^{gas} - \sum_t C_{sale}^{ele} \cdot P_{sale,t}^{ele} + \sum_t \sum_g C_g^{rel} \cdot R_{g,t} \end{aligned} \quad (3.1)$$

式(3.1)中第一项为外购煤炭费用；第二项为外购电力费用；第三项为电力自发电费用；第四项为煤气使用费用；第五项为电力外卖收益；第六项为煤气放散惩。

煤气转换为蒸汽过程效率最大，目标函数之二如式(3.2)所示。

$$\text{Min } M = \sum_m \eta_{m,rate} \times D_{m,t} - Z_{m,t}^{str} \times h^{str} \quad (3.2)$$

### 3.2.4 约束条件

#### ①能源介质保供约束

钢铁企业在生产运行的过程中，为了保证生产正常进行，系统煤气、蒸汽、电力需要达到供需平衡。

##### 1) 富余煤气供给平衡

$$\sum_m X_{g,m,t}^{gas} + R_{g,t} = G_{g,t}^{sur}, \quad \forall g, t \quad (3.3)$$

##### 2) 蒸汽保供约束

$$\sum_m Z_{m,t}^{str} \geq D_t^{str}, \quad \forall t \quad (3.4)$$

$$Z_{m,t}^{str} = X_{m,t}^{str} + G_{m,t}^{str}, \quad \forall t, m \quad (3.5)$$

##### 3) 电力保供约束

$$\sum_m P_{gen,m,t}^{ele} + P_{buy,t}^{ele} \geq D_t^{ele}, \quad \forall t \quad (3.6)$$

#### ②设备投入与产出约束

##### 1) 锅炉设备约束

$$Z_{m,t}^{str} = a_m \times D_{m,t} + b_m, \quad \forall m, t \quad (3.7)$$

##### 2) 汽轮机约束

$$\eta_{m,t} \times X_{m,t}^{str} \cdot h^{str} = P_{gen,m,t}^{ele} \cdot h^{ele}, \quad \forall m, t \quad (3.8)$$

#### ③设备产能及能耗约束

##### 1) 锅炉进气能力限制和产能约束



$$X_{g,m}^{\min} \leq X_{g,m,t}^{gas} \leq X_{g,m}^{\max}, \forall m, t \quad (3.9)$$

$$0 \leq Z_{r,m,t}^{str} \leq Z_{r,m}^{\max}, \forall m, t \quad (3.10)$$

2) 发电机组额定产能约束

$$0 \leq P_{gen,m,t}^{ele} \leq P_m^{ele}, \forall m, t \quad (3.11)$$

④煤气混烧设备燃料平均热值约束

$$H_m^{\min} \leq \frac{\sum_g X_{g,m,t}^{gas} \cdot h_g^{gas}}{\sum_g X_{g,m,t}^{gas}}, \forall m, t \quad (3.12)$$

⑤其它操作约束

$$P_{buy,t}^{ele} \cdot P_{sale,t}^{ele} = 0, \forall t \quad (3.13)$$

⑥变量非负约束

$$R_{g,t} \geq 0; X_{g,m,t}^{gas} \geq 0; Z_{r,m,t}^{str} \geq 0; P_{gen,m,t}^{ele} \geq 0; P_{buy,t}^{ele} \geq 0; P_{sale,t}^{ele} \geq 0; F_{m,t}^{coal} \geq 0$$

### 3.2.5 问题假设

鉴于煤气-蒸汽-电力转换系统的涉及到的设备多、设备产用能情况较为复杂、能源介质较多，为了便于模型建立，因此作出如下假设：

①不考虑余热余能的利用；

②不考虑转换过程水的损失；

③为了简化模型并且检验煤气分配策略的有效实用性，假设蒸汽转换为电力过程的汽轮机发电机组效率恒定，且不考虑抽汽；

④煤气的热值和蒸汽的焓值假设不变；

⑤模型以主工序煤气在满足主工序需求后的煤气富余量作为模型输入，不考虑煤气柜位的变化。

### 3.2.6 模型参数

在煤气转换为蒸汽过程，基于锅炉负荷的煤气分配模型的目标函数涉及到的参数包括煤气使用费用、外购电费用、外售电费用、外购煤炭费用等，具体如表 3.1 所示，峰谷电价相关参数如 3.2 所示。约束条件中相关的参数如表 3.3 所示，包括锅炉产能、进气流量的限制等，并且针对具体锅炉通过 2019 年 12 月历史数据拟合统计得到锅炉的投入产出约束的参数。本文案例的其他计算系数，其中包括 COG、BFG、动力煤的热值分别为 17900kJ/m<sup>3</sup>、3145kJ/m<sup>3</sup>、21800kJ/kg；蒸汽的焓值为 3000kJ/kg。在峰谷电价方面，主要是分为三个区间段：峰价、平价、谷价，虽然近几年提出了峰谷平尖机制，但是目前很多企业的尖峰电价机制尚未健全，因此本文仍以实际的峰谷平机制来考虑煤气-蒸汽-电力转换优化问题。

表 3.1 模型成本相关计算参数

Table 3.1 Model cost-related calculation parameters

费用项	值
COG 使用(元/m <sup>3</sup> )	0.35
BFG 使用(元/m <sup>3</sup> )	0.04
外购煤炭(元/kg)	0.6
外售电(元/kw·h)	0.5

表 3.2 该钢铁企业的峰谷电价情况

Table 3.2 The peak and valley electricity price of the iron and steel enterprise

	峰价	谷价	平价
区间	08:00-12:00 19:00-23:00	23:00-24:00 00:00-08:00	12:00-19:00
价格(元/kw·h)	0.72	0.28	0.49

表 3.3 各个锅炉相关参数

Table 3.3 Parameters related to each boiler

锅炉	$a_m$	$b_m$	产汽范围 (t/h)	消耗 BFG 范围 (m <sup>3</sup> /h)	消耗 COG 范围 (m <sup>3</sup> /h)	锅炉额定 效率
1	0.41	-12.39	0~35	0~60000	0~10000	0.95
2	0.43	-15.52	0~35	0~60000	0~10000	0.95
3	0.44	-58.78	60~130	0~290000	0~20000	0.91
4	0.47	-67.44	60~130	0~290000	0~20000	0.91
5	0.58	-845.75	700~1025	0~400000	0~60000	0.94
6	0.56	-794.63	700~1025	0~400000	0~60000	0.94

### 3.3 模型求解与结果分析

#### 3.3.1 求解方法

##### ①求解工具

Gurobi 求解器是由美国 Gurobi 公司开发的新一代大规模数学规划优化求解器,具有较高的优化速度和精度,广泛应用于生产制造、物流、交通运输等行业,可解决连续或混合整数线性规划问题、凸目标或约束和非凸目标或约束的连续或混合整数的二次规划问题、目标或约束非线性问题、多目标规划等问题。有支持 C++、Java、python、C#、.NET、Matlab 等多种接口,支持 Windows、Linux 等多种平台,

支持 AMPL、GAMS、AIMMS 等多种建模环境。Gurobi 建模过程主要包括六部分，分别如下：（1）确定待优化问题；（2）通过 `addVar()`和 `addVars()`创建变量、`setObjective()`创建目标函数、`addConstr()`和 `addConstrs()`创建约束条件，然后读取数据库数据组合成模型，产生计算机模型对象；（3）存在于内存的一个完整数学模型；（4）通过 `optimize()`优化求解；（5）根据需要读取优化结果；（6）对结果进行分析。

## ②求解环境及原理

本模型运行环境是 64 位 Window10 操作系统处理器 Intel(R) Core(TM) i7-10710U CPU @1.10GHz 1.61GHz，采用的编程语言为 C#，以周期 T 为 24h（周期间隔为 1h）的能源数据以及各种设备参数作为模型的输入数据，如图 3.2 所示和如图 3.3 所示分别给出的是主要的能源数据，包括富余煤气量（高炉煤气、焦炉煤气），蒸汽需求量和电力需求量，采用 Gurobi 求解器进行模型求解。本章模型是多目标模型，根据 Gurobi 对多目标模型的求解原理，设置目标函数的优先级，本模型目标函数一的优先级高于目标函数二，因此针对多目标模型先求出目标一的解集，然后针对目标一的解集中再挑选满足目标二的解，从而得出实例 24h 的煤气-蒸汽-电力的转换优化方案。

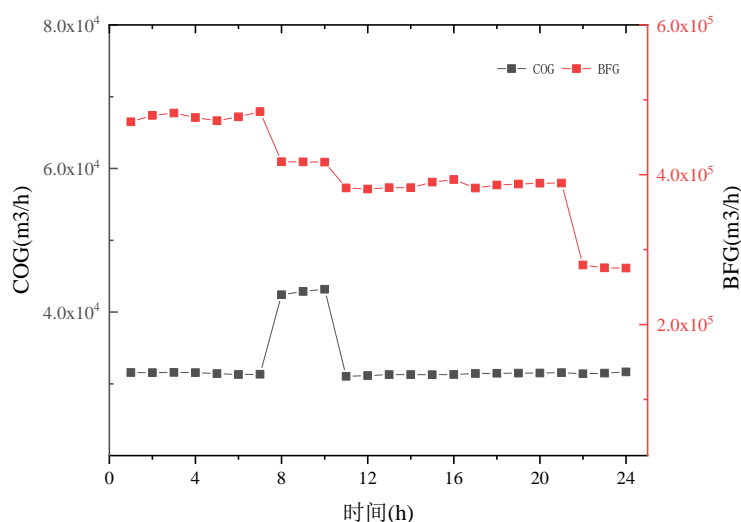


图 3.2 高炉煤气和焦炉煤气富余量

Fig.3.2 BFG and COG surplus

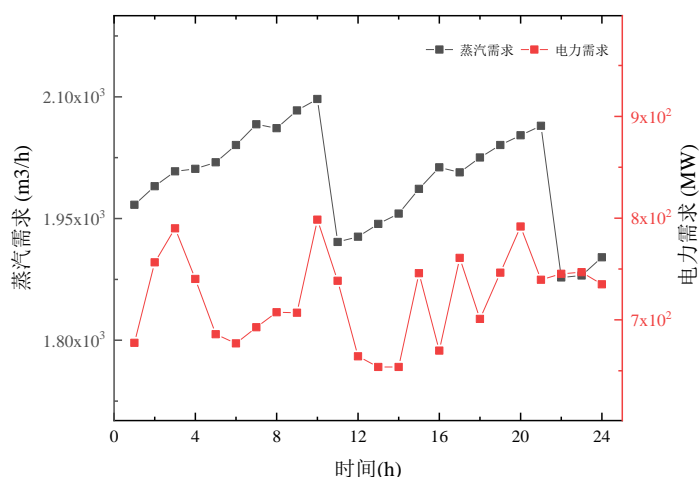


图 3.3 蒸汽和电力需求量

Fig.3.3 Steam and electricity demand

### 3.3.2 优化结果

以该企业煤气-蒸汽-电力转换系统为研究对象，根据 2019 年 12 月某一天 24 小时的实际运行数据，采用煤气转换为蒸汽过程基于锅炉负荷的煤气分配模型，模拟计算了煤气-蒸汽-电力转换系统的煤气优化分配问题，模型计算得到能源介质的优化结果。焦炉煤气、高炉煤气在三种类型锅炉上的分配方案分别如图 3.4、图 3.5 所示反映了焦炉煤气和转炉煤气在三种设备上的时段分配情况。可以看出在优化后的分配方案中，启动锅炉、130T 锅炉和 CHP 锅炉设备在不同时段均有所消耗焦炉煤气和高炉煤气，并且两种煤气的放散为 0，优化后为了满足蒸汽需求该时段 130 锅炉 1#所消耗的 COG 多余该设备的其他时段，BFG 低于该设备的其他时段，这一结果跟煤气的富余量和蒸汽电力的需求量相关。

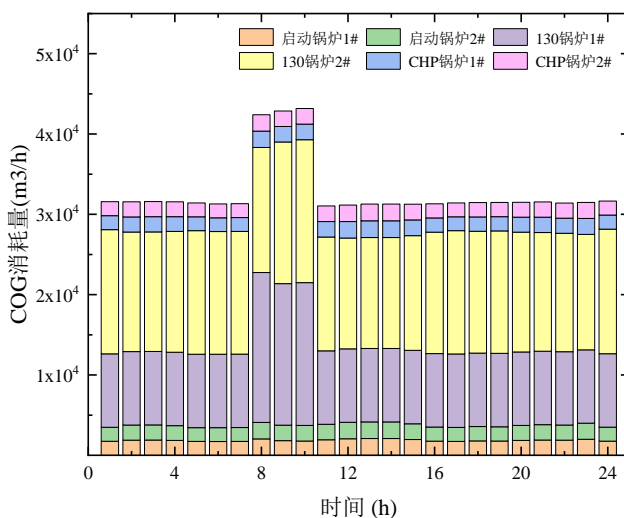


图 3.4 各个锅炉焦炉煤气的消耗量

Fig.3.4 Consumption of COG for each boiler

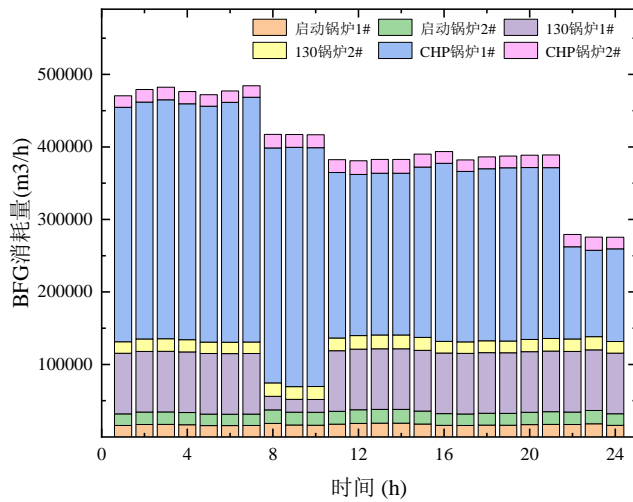


图 3.5 各个锅炉高炉煤气的消耗量

Fig.3.5 Consumption of BFG for each boiler

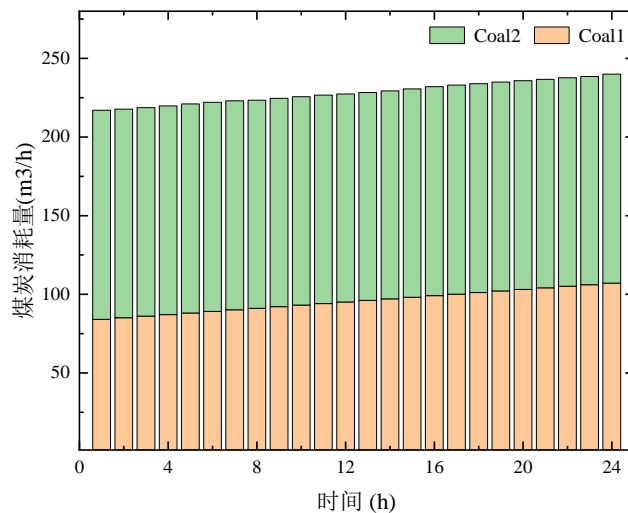


图 3.6 CHP 设备煤炭耗量

Fig.3.6 Coal consumption of CHP equipment

CHP 锅炉的煤炭消耗量如图 3.6 所示，由图可知 CHP 锅炉 2#的煤炭消耗量明显多于 CHP 锅炉 1#，是因为 CHP 锅炉 2#的高炉煤气消耗较少。启动锅炉、130T 锅炉和 CHP 蒸汽产生量如图 3.7 所示，其中启动锅炉的全部蒸汽、130T 锅炉的部分蒸汽用于外供，130T 锅炉的另外一部分蒸汽和 CHP 锅炉产生的蒸汽用于汽轮机发电机组发电满足用电需求。25MW 汽轮机发电机组和 300MW 发电机组的发电量如图 3.8 所示。

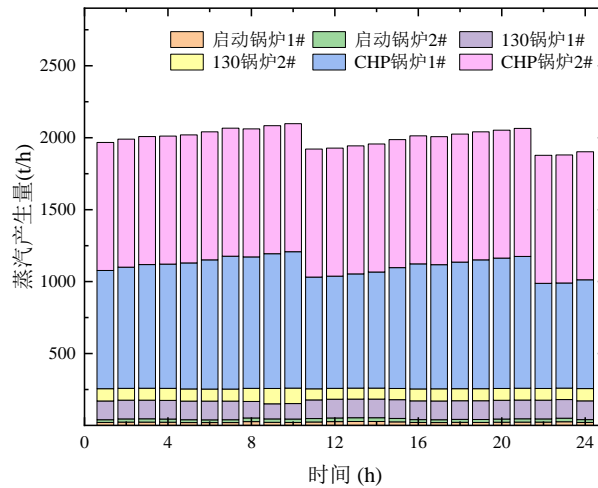


图 3.7 各设备的蒸汽产生量

Fig.3.7 Steam generation by equipment

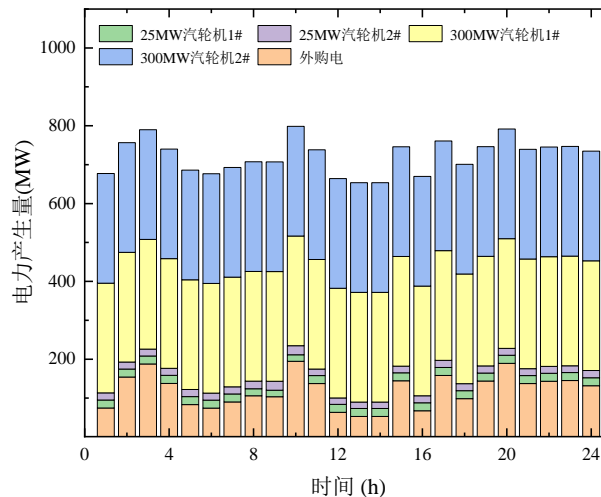


图 3.8 各设备的电力产生量

Fig.3.8 Electricity generation of each device

### 3.3.3 成本分析和设备效率分析

将模型优化后的方案与生产实际数据进行比较可知，综合考虑煤气-蒸汽-电力的转换优化方法，通过改善锅炉的运行负荷，合理进行富余煤气分配，降低系统总的成本，实现煤气的自产自消和充分利用。这也进一步说明了钢铁企业通过热电转换设备来协调煤气、蒸汽和电力协调关系的重要性。

模型优化前后成本对比如图 3.9 所示（优化前由钢厂实际数据计算所得），优化效果显著，对于整个调度周期而言，优化后整个周期成本降低了 1.16%。若本模型不考虑设备运行负荷与额定负荷的偏差这个目标函数，只考虑成本这一个目标函数，优化后成本降低了 0.22%，可见考虑了偏差后，体现了本模型的有效性。各

个锅炉的效率分别如图 3.10~图 3.12 所示，优化后锅炉整体的效率比优化前提高，优化后各个锅炉整体效率变化为 4.08%，-0.03%，7.69%，-5.78%，2.82%，3.39%。由图可知，部分锅炉在某个时刻存在优化后效率降低的情况，但是对该时刻来看其他锅炉的效率提高了，提高了整体锅炉的效率。各个锅炉的效率变化情况分为两类：（1）130T1#锅炉、CHP1#锅炉、CHP2#锅炉的优化后效率变化平稳，平均效率分别为 90.77%、86.90%、89.58%；（2）启动锅炉 1#效率变化范围小于优化前，其余锅炉的波动与优化前相差不大。因此，转换系统在满足蒸汽电力需求基础上实现了煤气的合理分配，进一步体现了煤气分配策略的可行性。

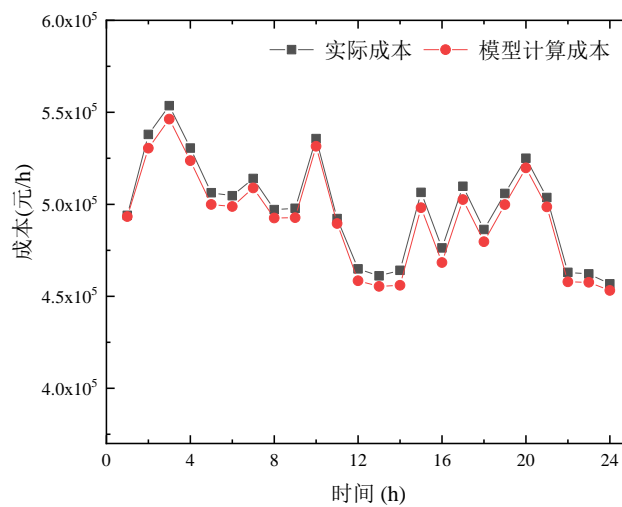


图 3.9 系统成本的对比

Fig.3.9 Comparison of system costs

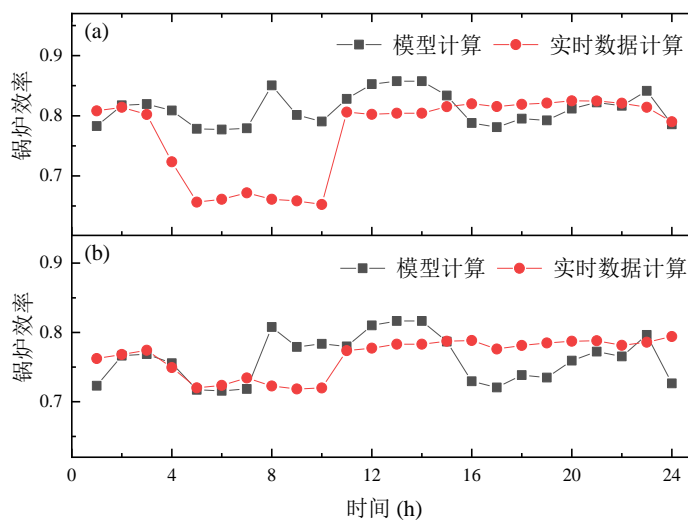


图 3.10 启动锅炉优化前后效率对比，其中(a)为启动锅炉 1#，(b)为启动锅炉 2#

Fig.3.10 Efficiency comparison before and after the optimization of the start-up boiler, where (a) is the start-up boiler 1#, (b) is the start-up boiler 2#

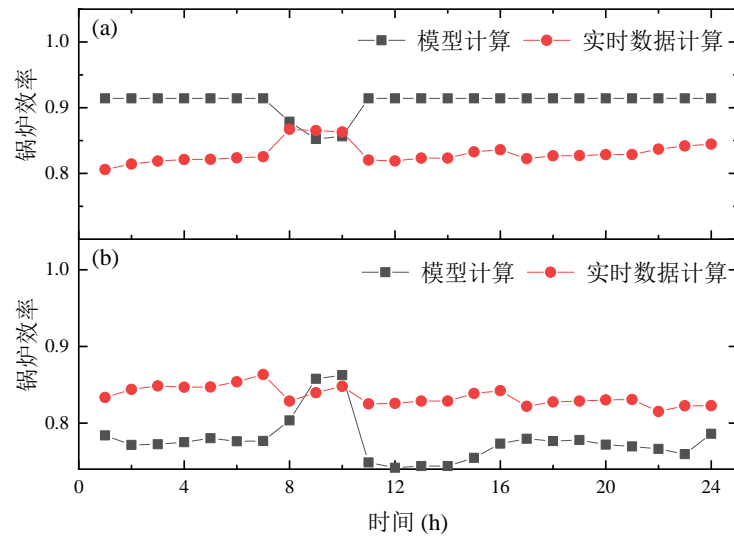


图 3.11 130T 锅炉优化前后效率对比，其中(a)为 130T 锅炉 1#，(b)为 130T 锅炉 2#

Fig.3.11 Efficiency comparison of 130T boiler before and after optimization, in which (a) is 130T boiler 1#, (b) is 130T boiler 2#

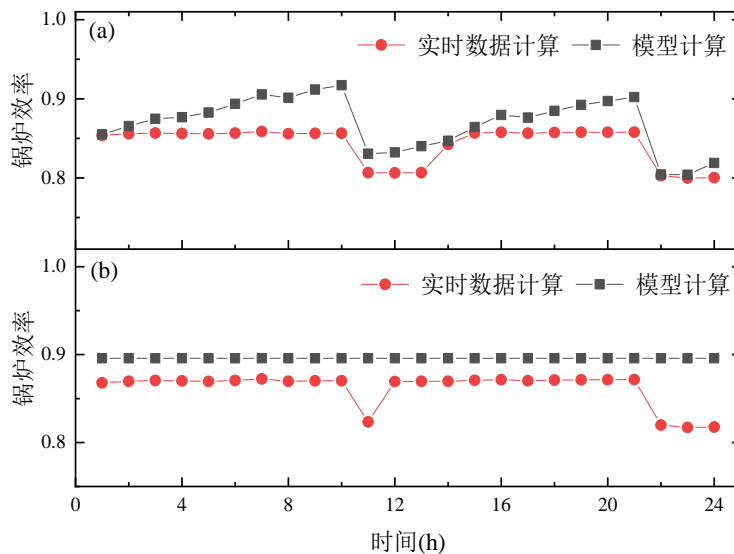


图 3.12 CHP 锅炉优化前后效率对比，其中(a)为 CHP 锅炉 1#，(b)为 CHP 锅炉 2#

Fig.3.12 Efficiency comparison of CHP boilers before and after optimization, where (a) is CHP boiler 1#, (b) is CHP boiler 2#

### 3.3.4 煤气蒸汽转换过程分析

根据章节 2.3.1 煤气转换为蒸汽过程各个锅炉之间属于并联关系，因此根据式 (2.7) 计算得到的优化周期内煤气转换为蒸汽过程的转换效率，如图 3.13 所示。由图可知在采用了煤气分配策略之后煤气转换为蒸汽过程的转换效率提高了 2.87%，说明了转换系统煤气分配策略的有效实用性。



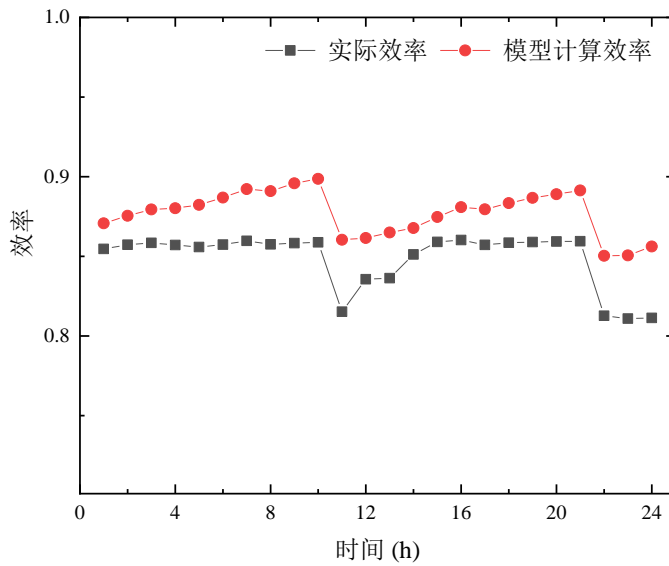


图 3.13 煤气转换为蒸汽过程的效率优化前后对比

Fig.3.13 Before and after efficiency optimization of gas-to-steam conversion

### 3.4 本章小结

本章根据对煤气-蒸汽-电力转换过程的分析，针对煤气转换为蒸汽的过程中煤气分配问题，以及各锅炉的热效率与锅炉运行负荷相关影响因素，建立了系统成本最小和锅炉负荷偏离额定负荷最小的多目标优化模型，所得主要结论如下：

①提出了考虑锅炉负荷效率的煤气-蒸汽-电力转换优化方法，即煤气分配问题需要使锅炉的运行负荷在合理范围以尽可能提高锅炉的热效率，从而实现煤气的高效利用。

②以该钢铁企业 2019 年 12 月某天 24 小时的煤气-蒸汽-电力系统相关能源实际情况数据为实例，进行了模型计算与实例的比较分析，研究表明：模型可以得到富余煤气在各设备上的优化分配方案，以及各锅炉系统的蒸汽、电力的生产优化方案，经模型优化后，整个系统成本降低了 1.14%，煤气转换为蒸汽过程的效率提高了 2.87%。

## 4 考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度方法

通过富余煤气的优化分配和蒸汽的生产优化为手段,使得电力的生产与外购优化调度为目的。因此本章在第三章煤气分配策略的前提下,为了得到合理的蒸汽调度方案、自发电和外购电方案,除了考虑煤气转换为蒸汽过程的汽轮机发电之外,还考虑钢铁企业其他自发电设备的系统集成优化,建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型。

### 4.1 问题描述

在蒸汽转换为电力过程中,根据电力需求和蒸汽需求来发电以及产汽满足生产需要,但是钢铁企业的蒸汽和电力来源不只是蒸汽转换为电力过程,还有通过其他自发电设备满足需求。钢铁厂发电的设备除了煤气-蒸汽-电力转换系统中的汽轮机发电机组之外,还有余热余能发电、煤气-蒸汽循环发电等。根据消耗能源类型和发电设备将钢铁企业的自发电分为<sup>[72-74]</sup>:一类是煤气-蒸汽-电力转换系统中的蒸汽转换为电力过程的汽轮机发电机组发电,如 25MW 汽轮机发电机组等,以消耗煤气转换为蒸汽过程锅炉产生的蒸汽通过汽轮机发电机组来产生电力;一类是煤气-蒸汽循环发电;还有一类是利用工序制造单元中产生的余热余压发电等。

能源成本通常占钢铁企业总成本的 20%~30%<sup>[75]</sup>,因此节约能源系统运行成本显得尤为重要。满足企业生产的电力需求由自发电和外购电两部分构成,并且外购电是在自发电不能满足需求的前提下选择外购,为了得到合理的外购电方案和降低成本,应该考虑其他的自发电方式,得到电力的分配方案。在蒸汽转换为电力过程中,不同设备用蒸汽和发电量分配不充分,降低效率,增加运行成本,影响煤气-蒸汽-电力系统的转换效率。因此,本章在第三章的煤气转换为蒸汽过程的研究基础上,为了提高煤气-蒸汽-电力转换系统的转换效率和降低运行成本,在蒸汽转换为电力过程考虑钢铁企业的煤气-蒸汽-电力转换系统、余热余能系统、煤气-蒸汽循环发电系统的集成优化,建立考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型。

针对第 2.1 章节的钢铁企业煤气-蒸汽-电力-转换系统并且结合某钢厂的实际情况,考虑其他发电设备,得出钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统网络图如图 4.1,系统网络包含的设备有:启动锅炉两座、130T 锅炉两座、CHP 两座(包含相对应的锅炉和 300MW 汽轮机发电机组)、25MW 汽轮机发电机组两座、CDQ 一座、TRT 设备三座、CCPP 设备一座。

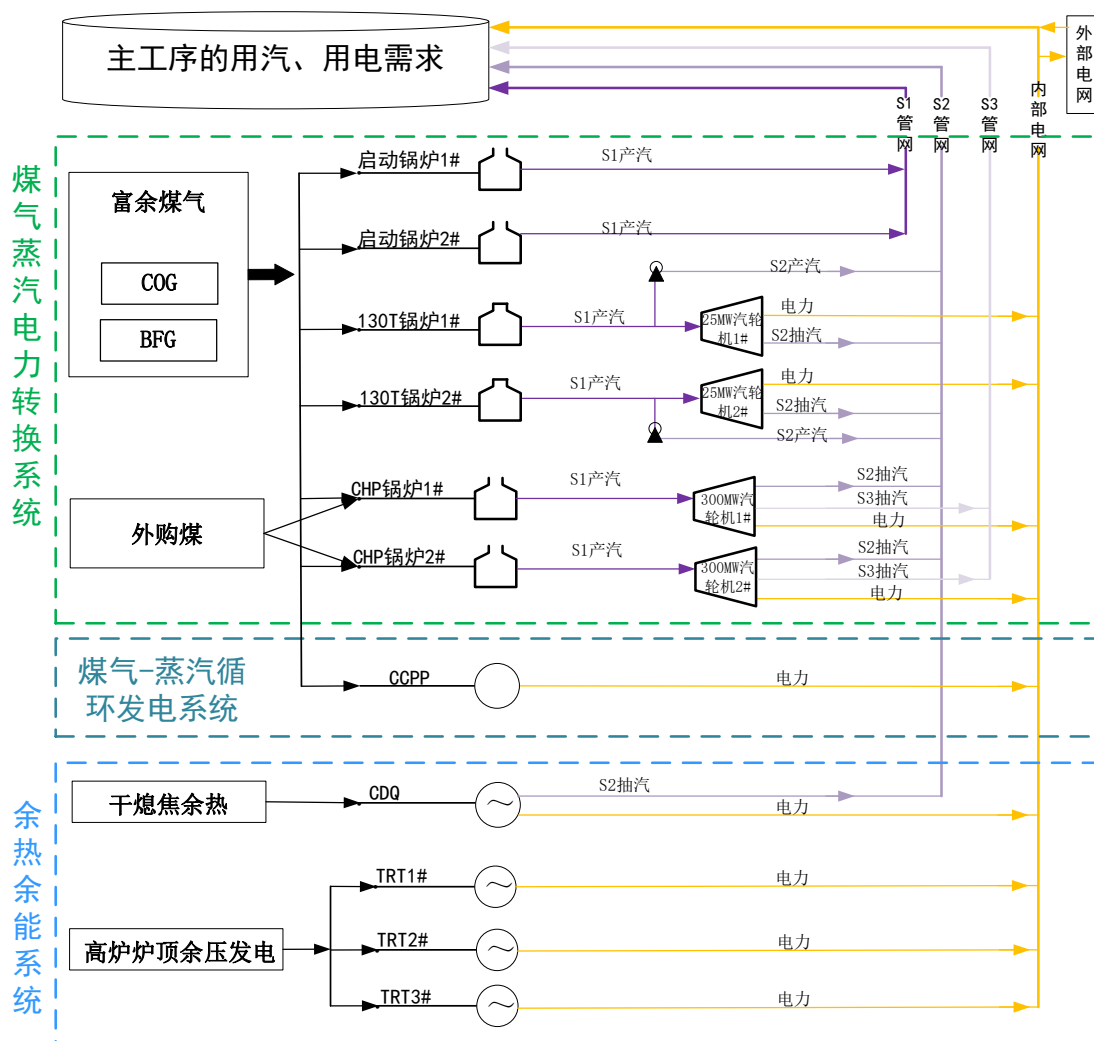


图 4.1 煤气-蒸汽-电力系统网络图

Fig.4.1 Gas-steam-electricity system network diagram

#### 4.1.1 蒸汽来源

蒸汽网络的主要特点如下：（1）蒸汽的转换环节较多，如：煤气转换为蒸汽、汽轮机抽汽、余热余能过程抽汽等，并且蒸汽的用户遍布整个钢铁厂故而呈现分布不集中、蒸汽管网路线较长和分布广的特点；（2）消耗蒸汽的用户较多，各个时刻随着生产情况的变化对蒸汽的需求量也不同，因此对于蒸汽生产过程蒸汽的波动也较大；（3）由于蒸汽的种类不一样，而且像汽轮机发电机组等这样的生产电力的设备在消耗高压蒸汽的同时也能产生其他类型的蒸汽，造成了蒸汽供给过程的更加复杂。因此，针对蒸汽的特点，凸显进行优化调度研究的必要性，得到蒸汽的方案，有利于蒸汽的合理生产。根据图 4.1 可以看出该钢铁企业的 S1、S2、S3 蒸汽的来源，其中（1）S1 蒸汽来源：启动锅炉 1#、启动锅炉 2#；（2）S2 蒸汽来源：130T 锅炉 1#、130T 锅炉 2#、25MW 汽轮机 1#、25MW 汽轮机 2#、300MW

汽轮机 1#、300MW 汽轮机 2#、CDQ、CCPP1#; (3) S3 蒸汽来源: 300MW1#、300MW2#。

### 4.1.2 电力来源

钢铁企业电力网络由自发电网和外部国家电网组成, 当自发电满足需求生产和生活需求时, 企业就不需要从外部电网购电; 当自发电不能满足需求时, 则需要和外部电网联合来满足需求。因此, 需要合理优化调度方案来发电, 降低外购电量。图 4.1 可以看出该钢铁企业的自发电来源: 25MW 汽轮机 1#、25MW 汽轮机 2#、300MW 汽轮机 1#、300MW 汽轮机 2#、CCPP、CDQ、TRT1#、TRT2#、TRT3#。

## 4.2 钢铁企业自发电设备建模

### 4.2.1 建模方法

在实际生产过程中, 电力的产生量与蒸汽等存在相关关系, 以汽轮机为例, 发电量的多少与高压蒸汽的进汽量有关, 即设备间的投入产出关系, 因此本文采用回归分析来描述钢铁企业自发电设备的相关关系。多元线性回归模型的简介、模型系数的估计方法、模型检验和模型系数检验方法如下。

#### ①多元线性回归模型简介

假设随机变量  $Y$  和  $m$  个解释变量  $X_1, X_2, \dots, X_m$  相关, 且根据回归函数(4.1), 可以得到多元线性回归模型(4.2)。

$$E(Y | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_m = x_m) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m \quad (4.1)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon, E\varepsilon = 0, D\varepsilon = DY = \sigma^2 \quad (4.2)$$

其中  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$  是回归系数,  $\varepsilon$  是随机误差;

#### ②模型参数估计

模型参数估计的方法为最小二乘估计, 估计步骤分五步完成。

Step1: 选择样本

取  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}, y_i), i = 1, 2, \dots, n$  为多元线性回归模型(4.2)的样本, 因此满足(4.3)的关系式:

$$\begin{cases} y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_m x_{im} + \varepsilon_i, E\varepsilon_i = 0, D\varepsilon_i = \sigma^2, i = 1, 2, \dots, n, \\ \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \text{ 相互独立} \end{cases} \quad (4.3)$$

Step2: 确定经验线性回归方程

设  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)^T$  的估计是  $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_m)^T$ , 则式(4.4)为经验线性回归方程。

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \dots + \hat{\beta}_m x_m \quad (4.4)$$

Step3: 得到样本与经验线性回归的残差平方和的计算公式

残方差平方和  $Q(\hat{\beta})$  :

$$Q(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{i1} - \hat{\beta}_2 x_{i2} - \cdots - \hat{\beta}_m x_{im} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$= \|Y - X\hat{\beta}\|^2 = Y^T Y - 2Y^T X\hat{\beta} + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta}.$$

Step4: 得到参数最小二乘估计的计算方法

$\beta$  的最小二乘法估计是使  $Q(\hat{\beta})$  达到最小的  $\hat{\beta}$ , 即  $\min Q(\hat{\beta})$  的最优解。

Step5: 计算出  $\beta$  的最小二乘估计

### ③回归方程检验

#### 1) 回归模型的显著检验

通过采用回归平方和  $S_R^2$  在总和平方和  $S_T^2$  所占比例  $R^2$  来衡量  $X_1, X_2, \dots, X_m$  的线性函数对  $Y$  的影响程度, 称  $R^2$  为样本判定系数如式(4.6), 反映  $Y$  受线性回归函数部分影响的大小。

$$R^2 = \frac{S_R^2}{S_T^2} = 1 - \frac{S_E^2}{S_T^2}, \quad R^2 \in [0, 1] \quad (4.6)$$

$R^2$  越接近 1, 表明线性回归部分对  $Y$  的影响越大, 相关性越高;  $R^2$  越接近 0, 表明线性回归部分对  $Y$  的影响越小, 相关性越小。选择  $R$  为检验统计量时  $H_0$  的拒绝域为(4.7)。

$$H_0 = \{r > r_{\alpha}(n-m-1)\}. \quad (4.7)$$

#### 2) 回归系数的显著检验

多元线性回归模型显著不能保证  $X_i$  中的每个变量对  $Y$  的影响都显著的, 因此需要对  $X_i$  中的每个变量进行显著性检验。选择采用  $t$  检验法去检验回归模型系数的显著性, 其中检验统计量为式(4.8), 拒绝域为式(4.9)

$$T_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\sqrt{c_{ii} \hat{\sigma}}} \quad (4.8)$$

$$H_0 = \left\{ |t_i| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m-1) \right\}. \quad (4.9)$$

### 4.2.2 汽轮机模型

汽轮机效率随汽轮机的容量、负载和操作条件等因素的不同而发生变化<sup>[59]</sup>, 因此在研究汽轮机的过程中, 研究考虑效率的变化, 为了简化模型, 根据式(4.2), 利用该企业 2019 年 12 月的实际运行数据, 得到回归得到汽轮机的能耗模型, 如式(4.10)~(4.13), 其中  $Y$  表示汽轮机的发电机的功率, 其中对于 300MW 汽轮机  $X_1, X_2, X_3$  分别表示汽轮机进汽流量和抽 S2 蒸汽量、抽 S3 蒸汽量; 对于 25MW 汽轮机,  $X_1, X_2$  分别表示汽轮机锅炉进汽流量和抽汽量。

300MW 汽轮机 1#的多元回归方程如式(4.10), 相关参数如表 4.1:

$$Y = 0.2613X_1 - 0.0101X_2 + 0.4328X_3 + 30.1843 \quad (4.10)$$

300MW 汽轮机 2#的多元回归方程如式(4.11)，相关参数如表 4.2:

$$Y = 0.2243X_1 + 0.0490X_2 + 0.3662X_3 + 51.5968 \quad (4.11)$$

25MW 汽轮机 1#的多元回归方程如式(4.12)，相关参数如表 4.3:

$$Y = 0.0855X_1 - 0.0771X_2 + 13.2033 \quad (4.12)$$

25MW 汽轮机 2#的多元回归方程如式(4.13)，相关参数如表 4.4:

$$Y = 0.0999X_1 - 0.0541X_2 - 10.2605 \quad (4.13)$$

表 4.1 300MW 汽轮机 1#的回归模型参数统计

Table 4.1 Parameter statistics of regression model of 300MW1#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.2613	0.01452	17.9947
$\beta_2$	-0.0101	0.0987	-0.1022
$\beta_3$	0.4328	0.10781	4.0146
$\beta_0$	30.1843	15.0156	2.0102
残方差平方	157.6475	--	--
$R^2$	0.9992	--	--

表 4.2 300MW 汽轮机 2#的回归模型参数统计

Table 4.2 Parameter statistics of regression model of 300MW2#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.2343	0.0127	18.4898
$\beta_2$	0.0490	0.0562	0.8723
$\beta_3$	0.3662	0.0498	7.3604
$\beta_0$	51.5968	10.7610	4.7948
残方差平方	49.2310	--	--
$R^2$	0.9991	--	--

表 4.3 25MW 汽轮机 1#的回归模型参数统计

Table 4.3 Parameter statistics of regression model of 25MW1#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.0855	0.0012	71.5718
$\beta_2$	-0.0771	0.0064	-11.9745
$\beta_0$	13.2033	0.1516	87.1068
残方差平方	43.0592	--	--
$R^2$	0.9178	--	--

表 4.4 25MW 汽轮机 2#回归模型参数统计

Table 4.4 Parameter statistics of regression model of 25MW2#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.0999	0.0024	41.9257
$\beta_2$	-0.0541	0.0050	-10.8188
$\beta_0$	10.2605	0.1661	61.7652
残方差平方	44.5456	--	--
$R^2$	0.9150	--	--

### 4.2.3 CCGP 模型

煤气-蒸汽循环发电是由燃气轮机和蒸汽轮机组合的联合发电装置，基本原理是消耗高炉煤气和焦炉煤气来发电，其中第一步发电前的准备工作包括高炉煤气的处理和空气的处理，在煤气处理方面，一是煤气采用电除尘的方式给煤气除尘，二是煤气经过煤气加压机加压；在空气处理方面，一是过滤空气，把空气经过空气过滤器过滤，二是处理过的空气经过空气加压机加压。第二步将除尘与加压后的煤气和过滤与加压的空气混合后送入燃烧室燃烧（其中燃烧器采用焦炉煤气点火），经过一系列的化学反应产生高温高压的烟气进入燃气透平机组做功通过齿轮转动带动发电机组发电，与此同时该过程产生的高温烟气进入锅炉产生蒸汽，然后蒸汽进入汽轮机发电机组发电，即为煤气-蒸汽循环发电过程。煤气-蒸汽循环发电具有降低排放，运行比较灵活和调峰性能好的特点。

为了描述 CCGP 的电力产生量与煤气的消耗量的关系，根据式(4.2)，利用该企业 2019 年 12 月的历史实际数据，得到 CCGP 的多元线性回归模型，见式(4.14)，其中  $Y$  表示 CCGP 的发电机的功率， $X_1$ ,  $X_2$  分别表示 COG 消耗量和 BFG 消耗量。

CCGP 的多元回归方程如式(4.14)，相关参数如表 4.5:

$$Y = 0.0013X_1 + 0.0004X_2 - 44.8176 \quad (4.14)$$

表 4.5 CCGP 的回归模型参数统计

Table 4.5 Parameter statistics of regression model of CCGP

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.0013	5.81968E-5	21.9142
$\beta_2$	4.1758E-4	2.29193E-6	182.1960
$\beta_0$	-44.8176	0.1729	-259.1064
残方差平方	8022.8628	--	--
$R^2$	0.9970	--	--

#### 4.2.4 余热余能模型

广义的余热余能是指以环境温度为基准，所研究的系统排出的热量载体可释放的热量，在实际情况中由两部分组成：一是可再利用热量；二是不可再利用热量<sup>[76]</sup>。将这一定义对应到企业中去余热资源是指：在生产制造流程中，各种消耗能源的生产设备或产品所排出或携出的有回收价值的热能或压力等级<sup>[77]</sup>。钢铁制造流程中的余热流<sup>[78]</sup>指：在钢铁制造流程（炼铁—炼钢—精炼—连铸—轧制等）中，各种用能设备及产品排出或携出的有回收价值的显热和潜热等。可见，回收利用这些设备在生产制造过程产生的余热余能可以更好的提高钢铁企业能源利用率。

钢铁企业在生产制造过程具有工序多、工艺复杂、设备繁多的特点，因此会产生多种形式的余热，如果好好的加以利用，会减少排放的压力和降低生产过程的成本。目前钢铁企业余热余能的用途主要有：用来利用余热发电和抽蒸汽满足生产需要等。常见的余热余能利用手段有干熄焦发电和高炉煤气余压透平发电等。

##### ①干熄焦发电

干熄焦发电是由干熄炉、余热锅炉、提升机、牵引装置、除尘装置等组成，基本原理是通过冷的惰性气体与赤热红焦在干熄炉中发生热量交换来冷却红焦的过程，然后利用熄焦气中的高温来发电和产生蒸汽，相比于传统的利用喷淋冷却水的湿熄焦工艺来说，湿熄焦会有较高的  $\text{CO}_2$  排放和热损失。

为了描述 CDQ 设备电力产生量与抽汽量的关系，根据式(4.2)，利用该企业 2019 年 12 月的历史实际数据，得到 CDQ 的多元线性回归模型，见式(4.15)，其中  $Y$  表示 CDQ 的发电机的功率， $X_1$  分别表示 CDQ 抽汽量。

CDQ 的多元回归方程如式(4.15)，相关参数如表 4.6：

$$Y = 0.2521X_1 + 15.8081 \quad (4.15)$$

表 4.6 CDQ 回归模型参数统计

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.1425	9.0881E-4	156.7522
$\beta_0$	19.8741	0.0982	161.0060
残方差平方	8476.1668	--	--
$R^2$	0.99508	--	--

##### ②高炉煤气余压透平发电

高炉煤气余压透平发电装置是由煤气透平机、发电机组、励磁装置等构成，



基本原理是利用高炉炼铁过程中高炉运行产生高压风，所以在高炉炉顶形成的高炉炉顶煤气的压力比较高，煤气经过透平发电膨胀机的做功，能量到压力能及热量到机械能再到电能的转化，在发电过程中既没有影响高炉煤气的生产质量和正常利用，还能够保持炉顶压力，因此高炉煤气在通过 TRT 发电后可作为气体燃料直接供应于锅炉以及其他外供单位。目前，TRT 是中国国内最领先的冶金节能环保设备。

为了描述 TRT 设备的发电量与煤气流量的关系，根据式(4.2)，利用该企业 2019 年 12 月的历史实际数据，得到 TRT 的多元线性回归模型如式(4.16)~(4.18)，由于发电过程中煤气的压降较稳定，只考虑发电量与煤气流量的关系，其中  $Y$  表示 TRT 发电机的功率， $X_1$  分别表示煤气流量。

TRT1#的多元回归方程如式(4.16)，相关参数如表 4.7:

$$Y = 0.5193X_1 + 0.5700 \quad (4.16)$$

TRT2#的多元回归方程如式(4.11)，相关参数如表 4.8:

$$Y = 0.4523X_1 + 1.27 \quad (4.17)$$

TRT3#的多元回归方程如式(4.18)，相关参数如表 4.9:

$$Y = 0.4997X_1 + 1.3139 \quad (4.18)$$

表 4.7 TRT1#的回归模型参数统计

Table 4.7 Parameter statistics of regression model of TRT1#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.5193	0.5193	0.0027
$\beta_0$	0.5700	0.1143	4.9894
残方差平方	16405.60	--	--
$R^2$	0.9744	--	--

表 4.8 TRT2#回归模型参数统计

Table 4.8 Parameter statistics of regression model of TRT2#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.4523	8.38407E-4	539.4357
$\beta_0$	1.27	0.6367	0.3061
残方差平方	9412.8296	--	--
$R^2$	0.9938	--	--

表 4.9 TRT3#回归模型参数统计

Table 4.9 Parameter statistics of regression model of TRT3#

	数值	标准误差	t 值
$\beta_1$	0.4997	0.0021	239.8558
$\beta_0$	1.3139	0.099	13.2723
残方差平方	16405.5980	--	--
$R^2$	0.9505	--	--

### 4.3 煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型

#### 4.3.1 建模思路

本文煤气-蒸汽-电力转换过程研究主要分为两部分,在第一步转换过程中,通过调整各个锅炉上的负荷来优化该过程的转换效率,使得该转换过程整体处于高效率的运行状态;在第二步转换过程中通过在满足蒸汽电力需求的前提下根据煤气蒸汽调度策略调整各个汽轮机上的负荷来优化该过程的转换效率,使得该转换过程整体处于高效率的运行状态;两步之间属于串联关系,各个设备之间属于并联关系,第一步的优先级高于第二步。因此,本章通过建立转换优化模型,得到煤气、蒸汽、电力的合理方案,分别提高两步转换过程的效率,从而提高整个煤气-蒸汽-电力转换系统的效率。

在煤气-蒸汽-电力转换系统中,目标函数首先为了保障系统安全、经济的运行以系统运行成本最小,其次是煤气转换为蒸汽过程锅炉与额定效率的偏差最小,最后是蒸汽转换为电力过程中汽轮机与额定效率的偏差最小。由于煤气作为两步转换的起点的特点,三个目标函数的优先级依次递减。约束包括蒸汽、电力能源介质保供约束,煤气能源介质保供约束(考虑煤气柜的缓冲作用),考虑系统集成优化的煤气转换蒸汽过程的锅炉投入产出约束、蒸汽转换为电力过程的汽轮机投入产出约束、煤气-蒸汽循环发电约束、余热余能设备发电约束等。因此建立多目标数学规划模型,在确保能源稳定供应和生产安全的前提下,优化富余煤气在各个锅炉上的分配,同时考虑蒸汽和电力在不同产汽和产电设备上的需求保障,使得调度周期内整个转换系统的能源成本最小和能源利用效率最大。

#### 4.3.2 符号定义

模型涉及到的符号包括标识参数类、决策变量/模型输出类、模型输入类、模型参数类、成本参数类、设备参数类,具体的符号如下。

##### ①参数标识类

- $t$  表示当前调度时段的代号,  $t = 1, 2, \dots$ ;  
 $m$  表示消耗煤气的设备,  $m = 1, 2, \dots$ ;

$e$	表示汽轮机发电的设备, $e=1,2,\dots$ ;
$f$	表示余热余能发电设备的编号, $f=1,2,\dots$ ;
$c$	表示煤气-蒸汽循环发电设备的编号, $c=1,2,\dots$ ;
$d$	表示消耗动力煤设备的编号, $d=1,2,\dots$ ;
$s$	表示蒸汽类型的编号, $s=1,2,3$ ; 其中 1 表示高压蒸汽 S1, 2 表示中压蒸汽 S2, 3 表示低压蒸汽 S3;
$g$	表示煤气类型的编号, $g=1,2,3$ —其中 1 表示 BFG, 2 表示 COG, 3 表示 LDG;
$l$	表示煤气柜设备编号, $l=1,2,\dots$ ;
$L$	表示煤气柜单元;
$V$	表示煤气的体积, 单位: $m^3/h$ 。

## ②决策变量/模型输出类

$G_{t,m,g}^{gas}$	表示 $t$ 时段 $m$ 设备 $g$ 种煤气的消耗量, 单位: $m^3/h$ ;
$G_{t,c,g}^{gas,cir}$	表示 $t$ 时段 $c$ 循环发电设备 $g$ 种煤气的消耗量, 单位: $m^3/h$ ;
$G_{t,g}^{rel}$	表示 $g$ 种煤气的放散量, 单位: $m^3/h$ ;
$S_{t,m,s}^{st}$	表示 $t$ 时段 $m$ 设备 $s$ 种蒸汽的产生量, 单位: $kg/h$ ;
$P_{t,e}^{pro}$	表示 $t$ 时段 $e$ 设备电力的产生量, 单位: $kW \cdot h$ ;
$P_{t,f}^{pro,res}$	表示 $t$ 时段余热利用 $f$ 设备电力的产生量, 单位: $kW \cdot h$ ;
$P_{t,c}^{pro,cir}$	表示 $t$ 时段循环发电 $c$ 设备电力的产生量, 单位: $kW \cdot h$ ;
$P_t^{pur}$	表示 $t$ 时段电力的外购量, 单位: $kW \cdot h$ ;
$P_t^{sale}$	表示 $t$ 时段电力的外卖量, 单位: $kW \cdot h$ ;
$W_{t,d}^{coal}$	表示 $t$ 时段 $d$ 设备的煤炭消耗量, 单位: $kg/h$ ;
$S_{t,e,S_1}^{in}$	表示 $t$ 时段 $e$ 设备高压蒸汽的进汽量, 单位: $kg/h$ ;
$S_{t,e,S_2}^{out}$	表示 $t$ 时段 $e$ 设备中压蒸汽的抽汽量, 单位: $kg/h$ ;
$S_{t,e,S_3}^{out}$	表示 $t$ 时段 $e$ 设备低压蒸汽的抽汽量, 单位: $kg/h$ ;
$S_{t,f,S_2}^{out,res}$	表示 $t$ 时段余热余压设备 $f$ 中压蒸汽的抽汽量, 单位: $kg/h$ ;
$D_{m,t}$	表示 $t$ 时段 $m$ 设备的运行负荷, 单位: $kJ/h$ ;
$L_{l,g,t}$	表示 $g$ 煤气对应的煤气柜, 单位: $m^3$ 。

## ③模型输入类

$V_{g,t}^{use}$	表示主工序 $t$ 时段 $g$ 煤气的使用量, 单位: $m^3/h$ ;
$V_{g,t}^{gen}$	表示主工序 $t$ 时段 $g$ 煤气的产生量, 单位: $m^3/h$ ;
$G_{t,g}^{dem}$	表示 $t$ 时段 $g$ 种煤气的富余量, 单位: $m^3/h$ ;
$S_{t,s}^{dem}$	表示 $t$ 时段 $s$ 种蒸汽的需求量, 单位: $kg/h$ ;
$E_{t,e}^{dem}$	表示 $t$ 时段电力的需求量, 单位: $kW \cdot h$ ;

$L_{l,g,t}^{up}$  表示  $g$  煤气对应的煤气柜在平衡位的上偏移量, 单位:  $m^3$ ;  
 $L_{l,g,t}^{Dn}$  表示  $g$  煤气对应的煤气柜在平衡位的下偏移量, 单位:  $m^3$ 。

#### ④模型参数类

$H_g^{gas}$  表示  $g$  种类型煤气的热值, 单位:  $kJ/m^3$ ;  
 $H_m^{gas}$  表示  $m$  设备的煤气混烧的最低热值, 单位:  $kJ/m^3$ ;  
 $H_s^{steam}$  表示  $s$  种类型蒸汽的焓值, 单位:  $kJ/kg$ ;  
 $H_s^{steam}$  表示  $s$  种类型蒸汽的焓值, 单位:  $kJ/kg$ ;  
 $H_e^{ele}$  表示电力的折算热值, 单位:  $kJ/kW \cdot h$ ;  
 $H_{mix}^{gas}$  表示煤气的混合热值, 单位:  $kJ/m^3$ 。

#### ⑤成本类

$C_{pur,t}^{coal}$  表示外购煤炭的价格, 单位: 元/kg;  
 $C_{pro,t}^{ele}$  表示自发电的成本, 单位: 元/kg;  
 $C_{sale,t}^{ele}$  表示外卖电的成本, 单位: 元/kg;  
 $C_{pur,t}^{ele}$  表示外购电的价格, 单位: 元/kg;  
 $C_{g,t}^{rel}$  表示  $g$  煤气的放散成本, 单位: 元/ $m^3$ ;  
 $C_{s,t}^{st}$  表示  $s$  蒸汽的使用成本, 单位: 元/ $m^3$ ;  
 $C_{g,t}^l$  表示煤气柜波动惩罚, 单位: 元/ $m^3$ 。

#### ⑥设备参数类

$L_{l,g}^{max}$  表示  $g$  煤气对应的煤气柜的最大容积, 单位:  $m^3$ ;  
 $L_{l,g}^{min}$  表示  $g$  煤气对应的煤气柜的最小容积, 单位:  $m^3$ ;  
 $L_{l,g}^{nor}$  表示  $g$  煤气对应的煤气柜的平衡柜位, 单位:  $m^3$ ;  
 $P_e^{ele}$  表示发电设备  $e$  的额定功率, 单位:  $kW \cdot h$ ;  
 $P_n^{st}$  表示产生蒸汽设备  $n$  的额定功率, 单位:  $t/h$ ;  
 $M_{s,m}^{st}$  表示设备  $m$  产生  $s$  蒸汽的最大能力, 单位:  $t/h$ ;  
 $M_{m,g}^{max}$  表示设备  $m$  消耗  $g$  种煤气的最大进口流量, 单位:  $m^3/h$ ;  
 $M_{m,g}^{min}$  表示设备  $m$  消耗  $g$  种煤气的最小进口流量, 单位:  $m^3/h$ ;  
 $P_{c,rate}^{cir}$  表示设备  $c$  发电的额定功率, 单位:  $kW \cdot h$ ;  
 $P_{f,rate}^{res}$  表示设备  $f$  发电的额定功率, 单位:  $kW \cdot h$ ;  
 $\eta_{m,rate}^{boiler}$  表示设备  $m$  消耗煤气产生蒸汽的额定效率;  
 $\eta_{e,rate}^{tur}$  表示设备  $e$  消耗蒸汽产生电力的额定效率。

### 4.3.3 目标函数

模型以煤气-蒸汽-电力系统运行成本和过程转换效率为目标函数, 模型的目标函数有三个分别是: 系统运行成本最小、煤气转换为蒸汽过程的效率最大、蒸汽转换为电力过程效率最大。

目标函数之一：

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_d C_{pur,t}^{coal} \cdot W_{t,d}^{coal} + C_{pur,t}^{ele} \cdot P_t^{pur} + \sum_e C_{pro,t}^{ele} \cdot (P_{t,e}^{pro} + P_{t,f}^{pro,res} + P_{t,c}^{pro,cir}) - \\ & C_{sale,t}^{ele} \cdot P_t^{sale} + \sum_g \sum_m C_{g,t}^{gas} \cdot (G_{t,m,g}^{gas} + \sum_c G_{t,c,g}^{gas,cir}) + \sum_g C_{g,t}^{rel} \cdot G_{t,g}^{rel} + \\ & \sum_s C_{s,t}^{st} \cdot S_{t,m,s}^{st} + \sum_g \sum_{l=1}^L C_{g,t}^l \cdot |L_{l,g,t} - L_{l,g}^{nor}| \end{aligned} \quad (4.19)$$

式(4.19)第一项为消耗的外购煤炭成本，第二项为外购电成本，第三项为自发电成本；第四项为外卖电收益，第五项为煤气使用成本，第六项为煤气放散成本，第七项为蒸汽的使用成本，第八项为煤气柜位偏离平衡柜位惩罚。

目标函数之二：

$$\text{Min } M_1 = \sum_m \eta_{m,rate}^{boiler} \cdot D_{m,t} - S_{t,m,S_1}^{st} \cdot H_{S_1}^{steam} \quad (4.20)$$

在蒸汽转换电力的过程中，考虑汽轮机的进汽和抽蒸汽的影响，为了实现该转换过程的效率最大，实现蒸汽的合理分配，建立蒸汽转换效率最大的目标函数表达为与额定效率的偏差最小，如式(4.21)。

目标函数之三：

$$\text{Min } M_2 = \sum_e \eta_{e,rate}^{tur} \cdot (S_{t,e,S_1}^{in} \cdot H_{S_1}^{steam} - \sum_S S_{t,e,S}^{out} \cdot H_S^{steam}) - P_{t,e}^{pro} \cdot H_e^{ele} \quad (4.21)$$

#### 4.3.4 约束条件

##### ①煤气、蒸汽、电力满足生产需求约束

钢铁企业在生产运行的过程中，煤气的富余量、蒸汽的需求量、电力的需求量是主工序的生产或需求变化而变化的，因此，这些需要得到保障才能保证生产的正常运行。

煤气物料守恒约束如式(4.22)：

$$L_{l,g,t} = L_{l,g,t-1} + V_{g,t}^{gen} - V_{g,t}^{use} - G_{t,g}^{rel} - \sum_m G_{t,m,g}^{gas} - \sum_c G_{t,c,g}^{gas,cir}, \forall g, t \quad (4.22)$$

S1 蒸汽的需求保供约束如式(4.23)：

$$S_{t,S_1}^{dem} = \sum_m S_{t,m,S_1}^{st}, \forall t \quad (4.23)$$

S2 蒸汽的需求保供约束如式(4.24)：

$$S_{t,S_2}^{dem} = \sum_m (S_{t,m,S_1}^{st} - S_{t,m,S_1}^{in}) + \sum_e S_{t,e,S_2}^{out} + \sum_f S_{t,f,S_2}^{out,res}, \forall t \quad (4.24)$$

S3 蒸汽的需求保供约束如式(4.25)：

$$S_{t,S_3}^{dem} = \sum_e S_{t,e,S_3}^{out}, \forall t \quad (4.25)$$

电力的需求保供约束，外售电和外购电不能同时发生，如式(4.26)：

$$\begin{aligned} E_{t,e}^{dem} = & \sum_e P_{t,e}^{pro} + \sum_f P_{t,f}^{pro,res} + \sum_c P_{t,c}^{pro,cir} + P_t^{pur} + P_t^{sale}, \forall t \\ & P_t^{pur} \cap P_t^{sale} = 0 \end{aligned} \quad (4.26)$$

## ②煤气转换为蒸汽过程

锅炉设备约束:

$$S_{t,m,s}^{st} = a_m \cdot D_{m,t} + b_m, \forall m, t \quad (4.27)$$

锅炉消耗煤气的进气能力限制:

$$M_{m,g}^{\min} \leq G_{t,m,g}^{gas} \leq M_{m,g}^{\max}, \forall g, t, m \quad (4.28)$$

锅炉产生蒸汽的产能约束:

$$0 \leq S_{t,m,s}^{st} \leq P_n^{st}, \forall m, t \quad (4.29)$$

## ③蒸汽转换为电力过程

汽轮机设备约束:

$$P_{t,e}^{pro} = e_e + f_e \cdot S_{t,e,S_1}^{in} + g_e \cdot S_{t,e,S_2}^{out} + h_e \cdot S_{t,e,S_3}^{out}, \forall e, t \quad (4.30)$$

汽轮机发电机组发电的产能约束:

$$0 \leq P_{t,e}^{pro} \leq P_e^{ele}, \forall e, t \quad (4.31)$$

## ④余热余能设备

CDQ 设备约束:

$$P_{t,f}^{pro,res} = p_f + q_f \cdot S_{t,f,S_2}^{out,res}, \forall f, t \quad (4.32)$$

TRT 设备约束:

$$P_{t,f}^{pro,res} = u_f + v_f \cdot V_{t,i}^{gen}, \forall f, t \quad (4.33)$$

余热余能设备产能约束:

$$0 \leq P_{t,f}^{pro,res} \leq P_{f,rate}^{res}, \forall f, t \quad (4.34)$$

## ⑤CCPP 设备

CCPP 设备约束:

$$P_{t,c}^{pro,cir} = x_c + \sum_g y_c^g \cdot G_{t,c,g}^{gas,cir}, \forall c, t \quad (4.35)$$

CCPP 产能约束:

$$0 \leq P_{t,c}^{pro,cir} \leq P_{c,rate}^{cir}, \forall c, t \quad (4.36)$$

## ⑥设备燃料混烧的平均热值约束

$$\frac{\sum_g G_{t,m,g}^{gas} \cdot H_g^{gas}}{\sum_g G_{t,m,g}^{gas}} \geq H_m^{gas}, \forall t, m \quad (4.37)$$

## ⑦模型决策变量为正约束

$$G_{t,m,g}^{gas} \geq 0, G_{t,g}^{rel} \geq 0, S_{t,m,s}^{st} \geq 0, P_{t,e}^{pro} \geq 0, P_{t,c}^{pro,cir} > 0, P_{t,f}^{pro,res} > 0, P_t^{pur} \geq 0, P_t^{sale} \geq 0, W_{t,d}^{coal} \geq 0, S_{t,e,S_1}^{in} \geq 0, S_{t,e,S_2}^{out} \geq 0, S_{t,e,S_3}^{out} \geq 0, S_{t,f,S_2}^{out,res} > 0, D_{m,t} \geq 0$$

## 4.3.5 问题假设

针对煤气-蒸汽-电力转换系统的各个设备的特性以及煤气、蒸汽、电力能源介质之间相互关联与影响,并且在实际过程中情况更加复杂,因此,为了简化模型,

作出如下假设：

- ①不考虑系统中水的损失；
- ②模型只考虑蒸汽、电力满足用户蒸汽和电的需求，不考虑蒸汽、电力在用户需求端的分配问题；
- ③煤气的热值和蒸汽的焓值均保持不变；
- ④不考虑煤气、蒸汽、电力在输送过程中的损失。

#### 4.3.6 模型参数

考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型的目标函数和约束条件涉及的煤气柜相关参数如表 4.10 所示、发电设备相关参数如表 4.11 所示、抽汽设备相关参数如表 4.12 所示。S1 蒸汽、S2 蒸汽、S3 蒸汽的焓值分别为 3300kJ/kg、3000 kJ/kg、2750 kJ/kg。

表 4.10 煤气柜相关参数

Table 4.10 Related parameters of gas holders

	柜容(万 m <sup>3</sup> )	中间柜位(万 m <sup>3</sup> )	偏离惩罚(元/m <sup>3</sup> )
高炉煤气	30	15	0.02
焦炉煤气	15	7.5	0.25

表 4.11 设备额定发电功率相关参数

Table 4.11 Parameters related to equipment rated power generation

设备类型	CCPP	CDQ	TRT
额定功率 (MW)	110	30	36.5

表 4.12 设备抽汽范围

Table 4.12 Equipment extraction range

蒸汽种类	25MW 发电机组	300MW 发电机组	干熄焦发电
S2 蒸汽 (t/h)	0~60	0~80	0~60
S3 蒸汽 (t/h)	--	0~110	--

## 4.4 模型求解及优化结果

### 4.4.1 求解方法

本模型的求解方法同第三章基于锅炉负荷的煤气-蒸汽-电力转换优化模型的求解方法，均采用 Gurobi 求解器求解，其中本章模型含有三个目标函数，目标函

数的优先级依次递减。模型求解的具体步骤如下：

第一步：确定原始煤气柜柜位；

第二步：读取模型的目标函数，依次读取模型的三个目标函数；

第三步：读取模型的约束条件，依次读取满足模型的约束条件；

第四步：读取模型的输入，以原始煤气柜柜位、主工序煤气的产生量、主工序煤气的消耗量、蒸汽需求量、电力需求量作为模型的输入；

第五步：模型求解，得到煤气、蒸汽、电力的优化结果；

第六步：以上一次的优化结果的煤气柜柜位作为模型的输入，转到第二步，循环直到调度周期结束。

#### 4.4.2 模型输入

图 4.2、图 4.3、图 4.4 作为煤气-蒸汽-电力转换优化模型的输入数据，其中图 4.2 是该企业 2019 年 12 月的某一天焦化过程和高炉炼铁过程产生的焦炉煤气、高炉煤气的量的总和以及主工序在冶炼过程对焦炉煤气、高炉煤气的消耗量，由图可知高炉煤气的产生和消耗量明显大于焦炉煤气并且存在波动；图 4.3 是该企业 2019 年 12 月的某一天在生产过程中对 S1 蒸汽、S2 蒸汽、S3 蒸汽三种蒸汽的需求量；图 4.4 是该企业 2019 年 12 月的某一天生产过程所需要的电量。

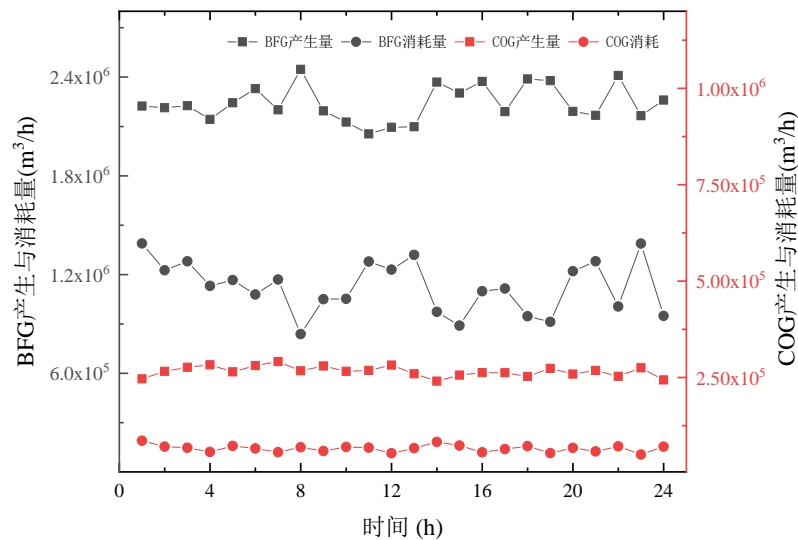


图 4.2 主工序煤气的产生量与消耗量

Fig.4.2 The production and consumption of gas in the main process



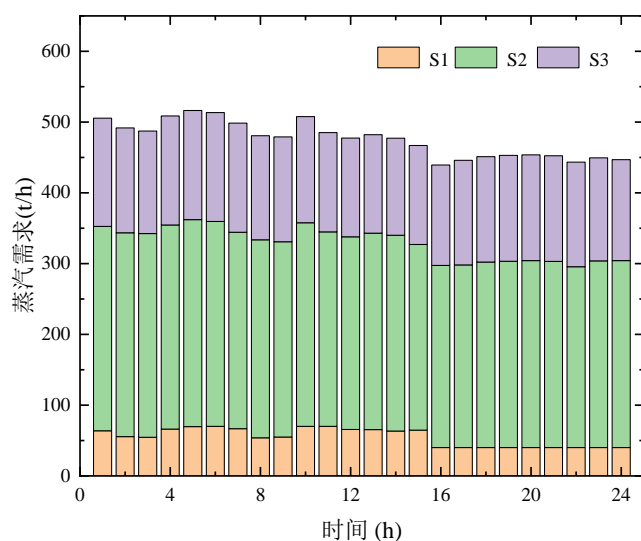


图 4.3 蒸汽需求量

Fig.4.3 Steam Demand

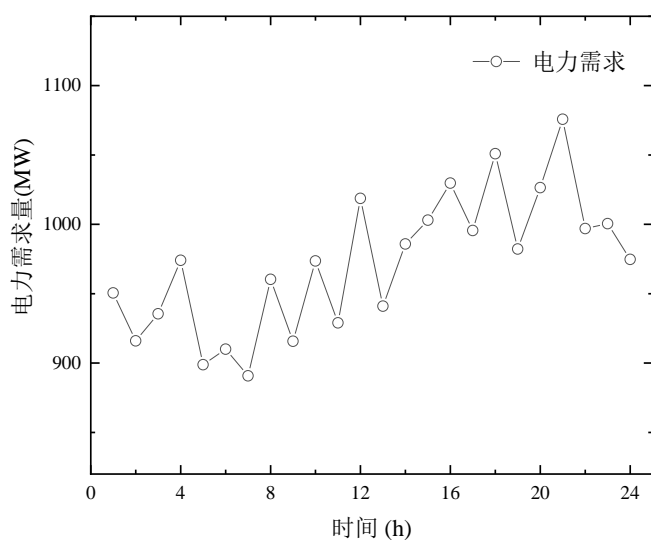


图 4.4 电力需求量

Fig.4.4 Electricity Demand

### 4.4.3 优化结果

#### ①焦炉煤气和高炉煤气分配方案

焦炉煤气和高炉煤气的分配方案如图 4.5、图 4.6 所示。针对焦炉煤气和高炉煤气的分配方案，首先是煤气优化分配 CHP 锅炉 1#、CHP 锅炉 2#产汽能力大的设备、其次是 CCGP 设备、再者是产汽能力次之的 130T 锅炉 1#、130T 锅炉 2#、最后是产汽能力最小的启动锅炉 1#、启动锅炉 2#。

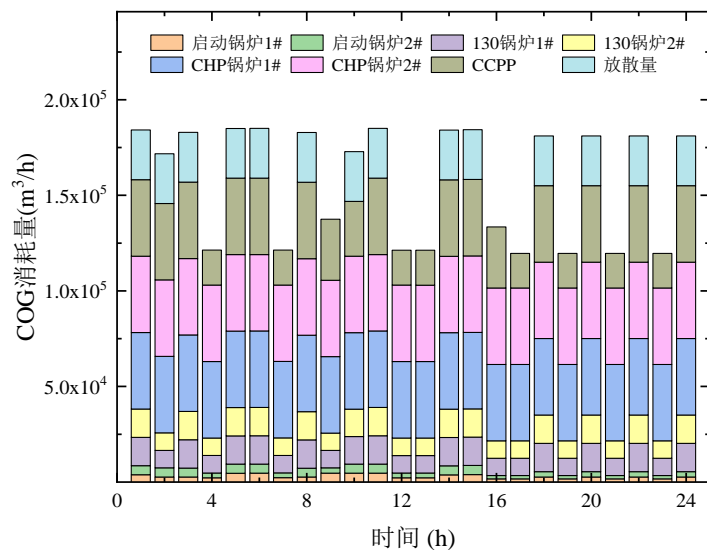


图 4.5 各设备焦炉煤气消耗量

Fig.4.5 Coke oven gas consumption of each equipment

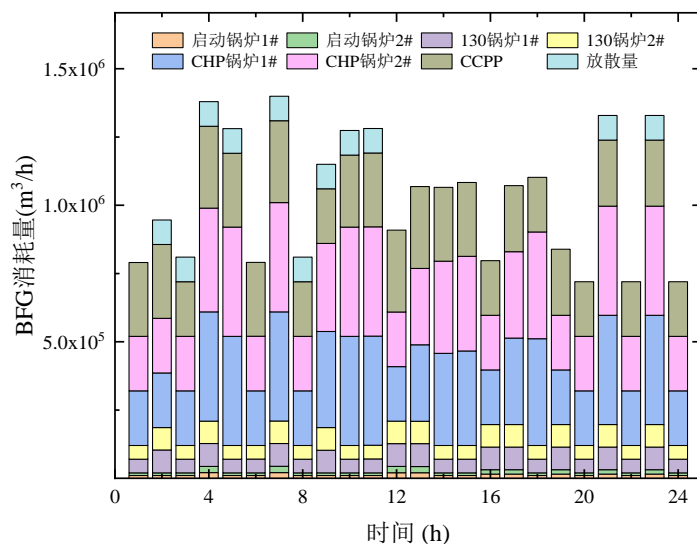


图 4.6 各设备高炉煤气消耗量

Fig.4.6 Blast furnace gas consumption of each equipment

## ②煤炭分配方案

对于消耗煤炭的 CHP 锅炉 1#、CHP 锅炉 2# 的煤炭分配方案如图 4.7 所示。由图可知两个设备的煤炭分配方案几乎一致，那是因为在调度周期内两个设备的平均效率相差不大。

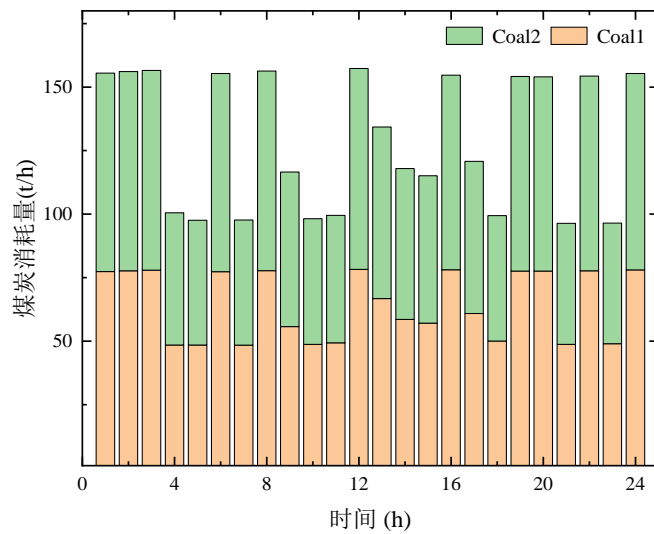


图 4.7 各设备煤炭消耗量

Fig.4.7 Coal consumption of each equipment

### ③S1、S2、S3 蒸汽优化结果

S1 蒸汽的调度结果如图 4.8 所示，可知两个启动锅炉的平均产汽量分别为 26.08t/h、28.68t/h，前半调度周期内两个锅炉的产汽量较高，而后半调度周期产汽量则较少，这是与生产过程对 S1 蒸汽的需求量相关，体现了按需生产的原则，不产生多余的蒸汽。

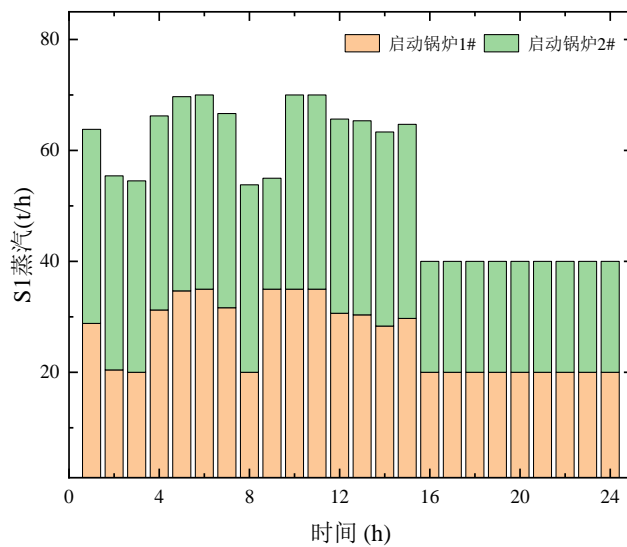


图 4.8 S1 蒸汽的调度方案

Fig.4.8 Scheduling scheme for S1 steam

S2 蒸汽的分配方案如图 4.9 所示，S2 蒸汽具有需求量大特点，所以要满足

S2 蒸汽的需求需要多个设备配合。抽汽顺序是余热余能优先抽汽、其次是 25MW 汽轮机发电机组、最后是 300MW 发电机组，在图中可以看出 130T 锅炉的产生蒸汽量为 0t/h（考虑到需要满足电力需求因此 130T 锅炉产生的蒸汽均用于 25MW 汽轮机发电），而其他设备的抽汽量都是处于一个相对稳定的值，调度周期内平均抽汽量 51.92t/h、51.92t/h、60t/h、60t/h、50/h，两台 25MW 汽轮机发电机组对满足 S2 蒸汽的需求量做出了较大的贡献，降低了 CDQ 设备和两台 300MW 汽轮机发电机组抽汽的压力，有利于产生更多的电能。

S3 蒸汽的调度方案如图 4.10 所示，可以看出 300MW 发电机组在调度周期内抽 S3 蒸汽的量几乎一致，是由于两个设备的发电效率几乎一致。

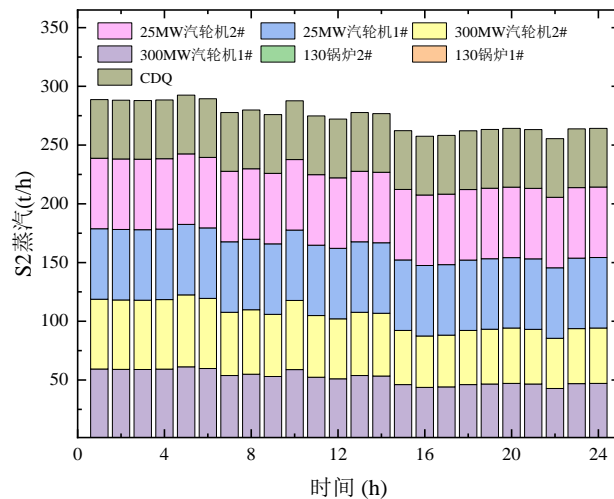


图 4.9 S2 蒸汽的调度方案

Fig.4.9 Scheduling scheme of S2 steam

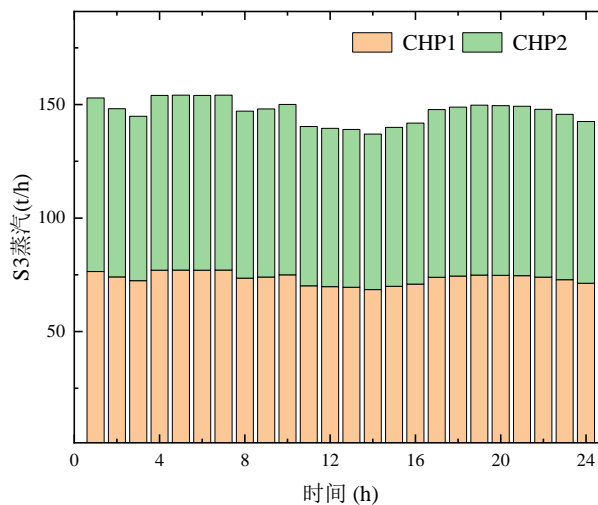


图 4.10 S3 蒸汽的调度方案

Fig.4.10 Scheduling scheme of S3 steam

#### ④电力调度结果

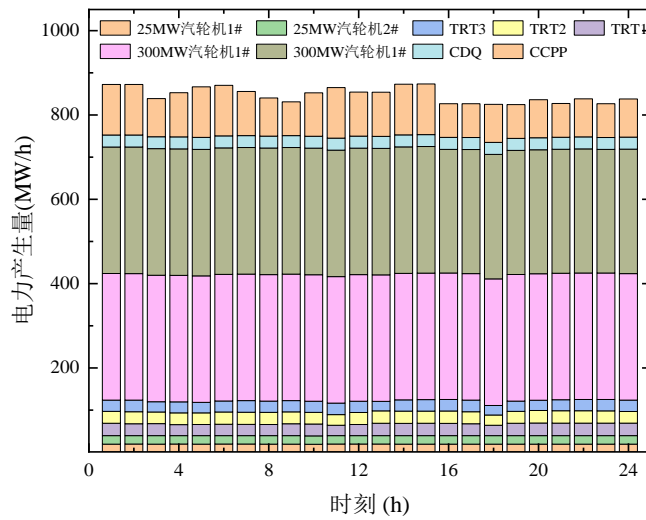


图 4.11 电力的调度方案

Fig.4.11 Power dispatch scheme

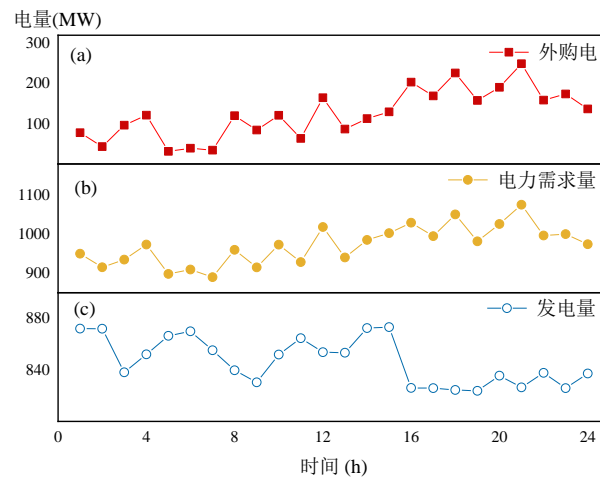


图 4.12 自发电量、外购电、电力需求对比，其中(a)为外购电量，

(b)为系统电力需求量，(c)为系统自发电量

Fig.4.12 Comparison and comparison of self-generated electricity, purchased electricity, and electricity demand, where (a) is the purchased electricity, (b) is the system electricity demand, and (c) is the system's self-generated electricity

电力调度方案如图 4.11 所示，峰价时段为  $T=3-7、14-18$ ，平价时段为  $T=8-13$ ，谷价时段为  $T=1-2、19-24$ 。各个设备的发电能力几乎保持不变处于一个满发的状态，除了 CCPP 设备与煤气的分配量相关。各时段的用电需求和最优发电量如图 4.12 所示，外购电量与电力需求量变化趋势一致，并且在峰价时，企业对电力需

求量达到高峰,外购电量也达到高峰,各个时段平均外购电量为:峰价为 116.54MW、谷价为 148.51MW、平价为 106.93MW,优化后自发电占比提高了 7.1%。即使各个设备满发也不能满足企业的电力需求,自发电成本低于外购电(任何时段)成本,因此为了满足电力需求,因此需要还需要一定的外购电量,实现了电力的合理生产方案和最优的外购策略。考虑钢铁企业除了汽轮机发电机组之外的发电装置,使得钢铁企业得到的电力调度方案更加完善。

## 4.5 结果分析

### 4.5.1 系统运行成本分析

煤气-蒸汽-电力转换系统的成本优化情况如图 4.13 所示,优化前为企业实际生产的成本,从图中可以看出模型优化后在调度周期内降低了系统各个时刻的成本,跟模型计算成本相比成本平均降低了 26210.37 元/h,比实际成本降低了 5.69%。系统运行成本在峰价时段( $T=14-18$ )优化前系统成本远高于其他时段,说明了考虑煤气、蒸汽、电力合理分配的重要性,以及模型所得的自发电和外购电方案的可行性。

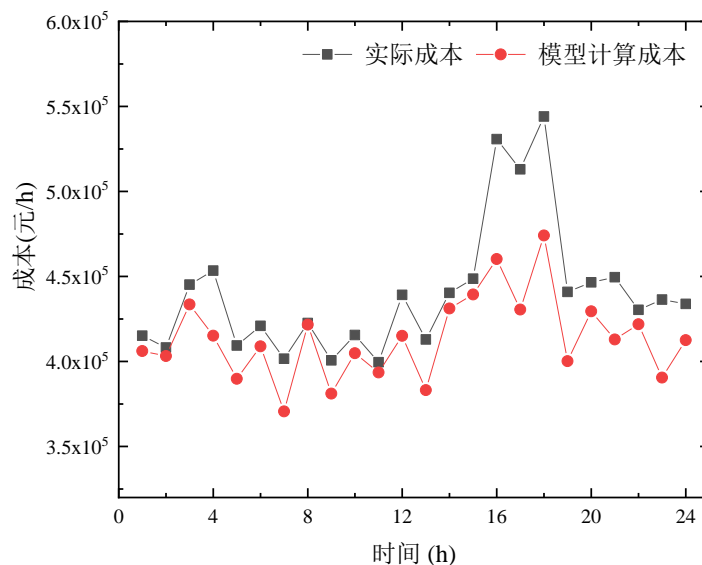


图 4.13 系统运行成本优化前后对比

Fig.4.13 Comparison before and after system operating cost optimization

### 4.5.2 煤气柜稳定性分析

高炉煤气柜和焦炉煤气柜的柜位变化对比图如图 4.14 所示,由图可知优化前后高炉煤气柜柜位、焦炉煤气柜的柜位变化趋势几乎一致,并且高炉煤气柜 1#与

高炉煤气柜 2#的柜位波动一致是因为没有考虑煤气管网的压降和两个煤气柜的位置，模型优化后煤气柜偏离中间柜位的程度更小。

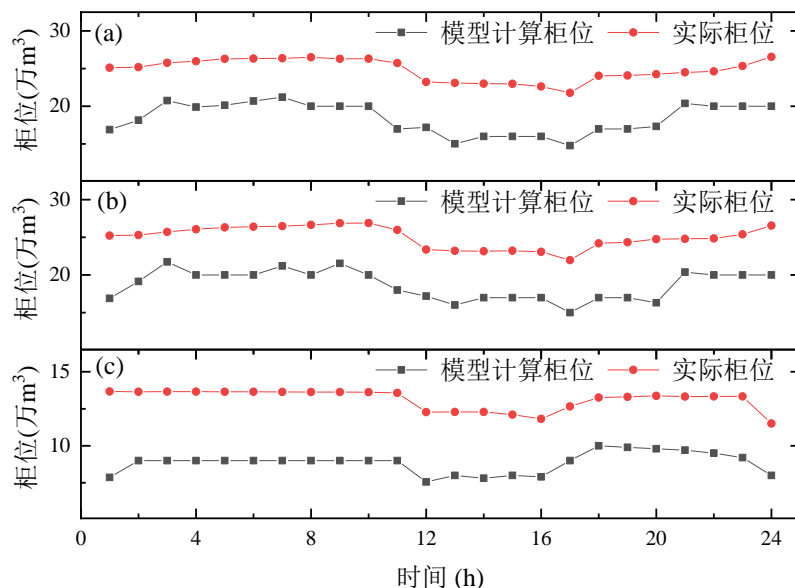


图 4.14 煤气柜柜位优化前后对比，其中(a)为高炉煤气柜 1#，(b)为高炉煤气柜 2#，  
(c)为焦炉煤气柜 1#

Fig.4.14 Comparison before and after optimization of gasholder level, in which (a) is BFG gasholder 1#, (b) is BFG gasholder 2#, and (c) is COG gasholder 1#

### 4.5.3 设备转换效率分析

在煤气转换为蒸汽过程涉及到的设备是三种不同型号的锅炉（启动锅炉、130T 锅炉、CHP 锅炉），每种型号有两个锅炉，总数量为六个，在转换过程中设备间呈并列关系，详细内容见章节 2.3。煤气转换为蒸汽过程作为煤气-蒸汽-电力转换系统的第一次转换过程，这个过程效率对于煤气-蒸汽-电力转换系统的起决定性因素。由煤气转换为蒸汽过程的效率计算方法（如式(2.7)所示）和锅炉效率计算公式（如式(2.3)所示）可知，因此在煤气转换为蒸汽过程煤气的合理分配尤为重要。根据煤气-蒸汽-电力转换优化模型的优化结果和历史实际数据计算出优化前后启动锅炉、130T 锅炉、CHP 锅炉的效率变化分别如图 4.15 所示、图 4.16、图 4.17 所示，在调度周期内，六个锅炉的效率分别平均提高了 7.56%、10.45%、7.38%、6.84%、2.07%、4.44%，优化效果显著。各个设备的效率变化情况分两类：一类是 130T 锅炉 1#、130T 锅炉 1#、CHP 锅炉 1#、CHP 锅炉 2#四个锅炉的效率处于几乎不变的水平，调度周期内平均效率为 91.06%、92.34%、90.08%、91.24%；一类是启动锅炉 1#、启动锅炉 2#锅炉的平均效率提高，部分时刻优化后效率略低于优

化前，调度周期内平均效率为 83.04%、82.76%；整体而言，优化后各个锅炉的煤气的分配量比较稳定，减少锅炉煤气消耗的波动，进一步减少了煤气柜的波动。

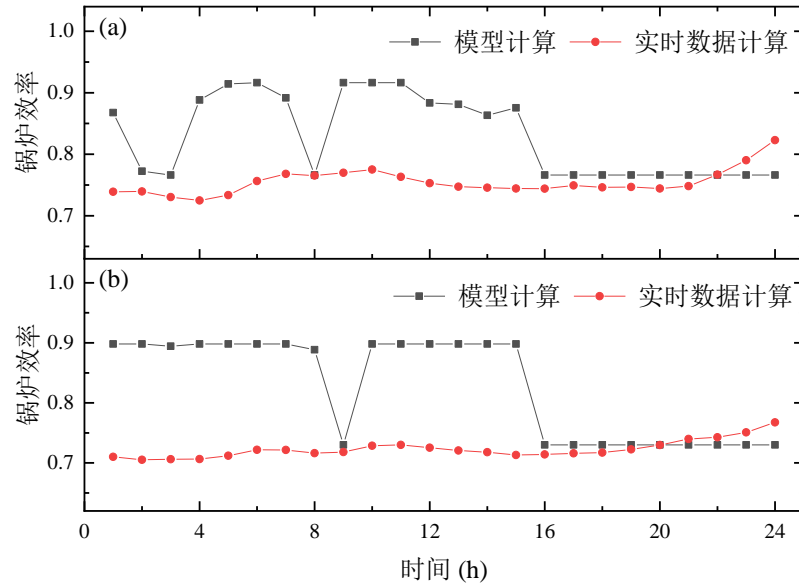


图 4.15 启动锅炉优化前后对比，其中(a)为启动锅炉 1#，(b)为启动锅炉 2#

Fig.4.15 Comparison before and after the optimization of the start-up boiler, where (a) is the start-up boiler 1#, (b) is the start-up boiler 2#

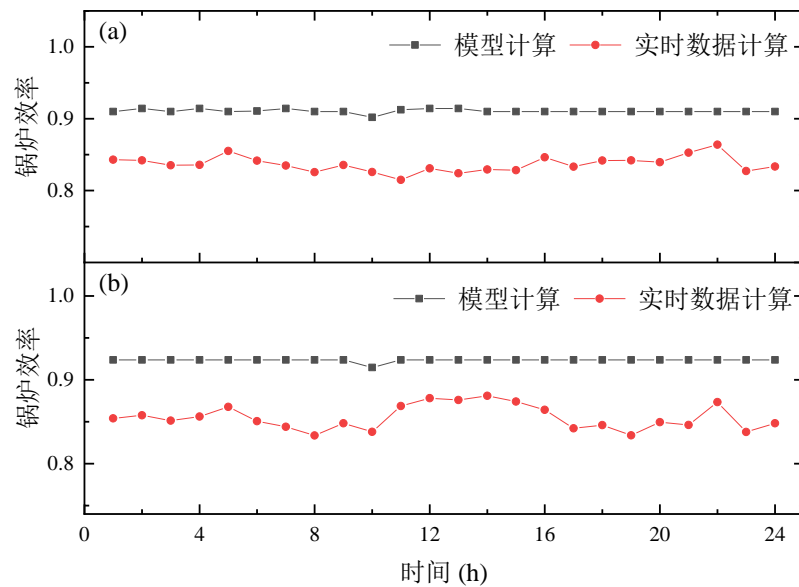


图 4.16 130T 锅炉优化前后对比，其中(a)为 130T 锅炉 1#，(b)为 130T 锅炉 2#

Fig.4.16 Comparison before and after optimization of 130T boiler, in which (a) is 130T boiler 1#, (b) is 130T boiler 2#



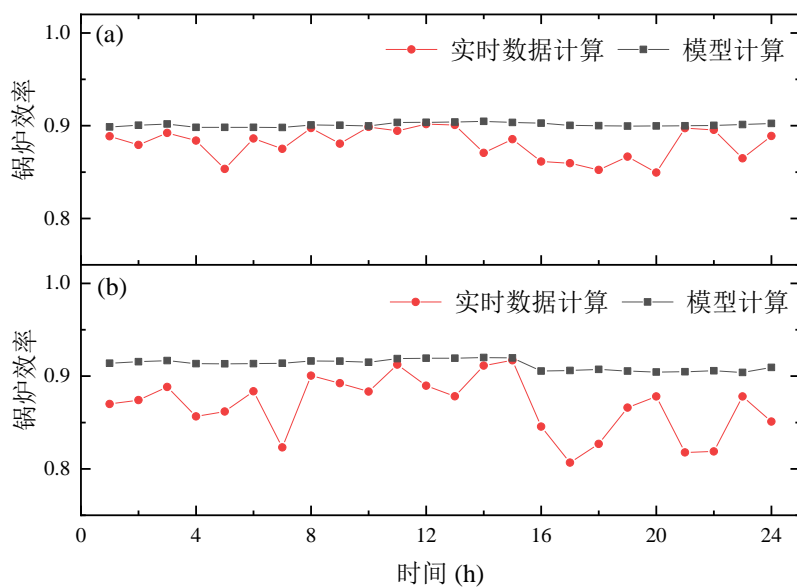


图 4.17 CHP 锅炉优化前后对比，其中(a)为 CHP 锅炉 1#，(b)为 CHP 锅炉 2#

Fig.4.17 Comparison of CHP boilers before and after optimization,  
where (a) is CHP boiler 1#, (b) is CHP boiler 2#

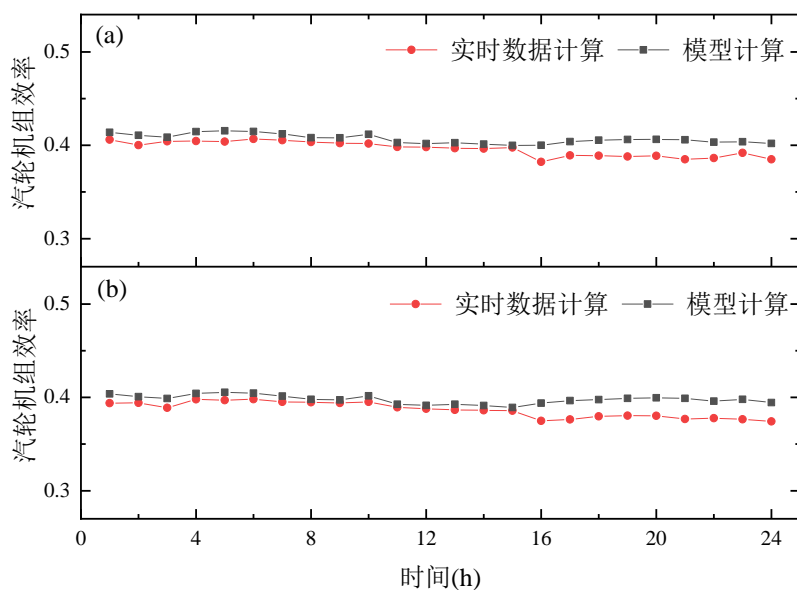


图 4.18 300MW 发电机组优化前后对比，其中(a)为 300MW 发电机组 1#，  
(b)为 300MW 发电机组 2#

Fig.4.18 Comparison of 300MW generator sets before and after optimization, in which (a) is  
300MW generator set 1#, (b) is 300MW generator set 2#

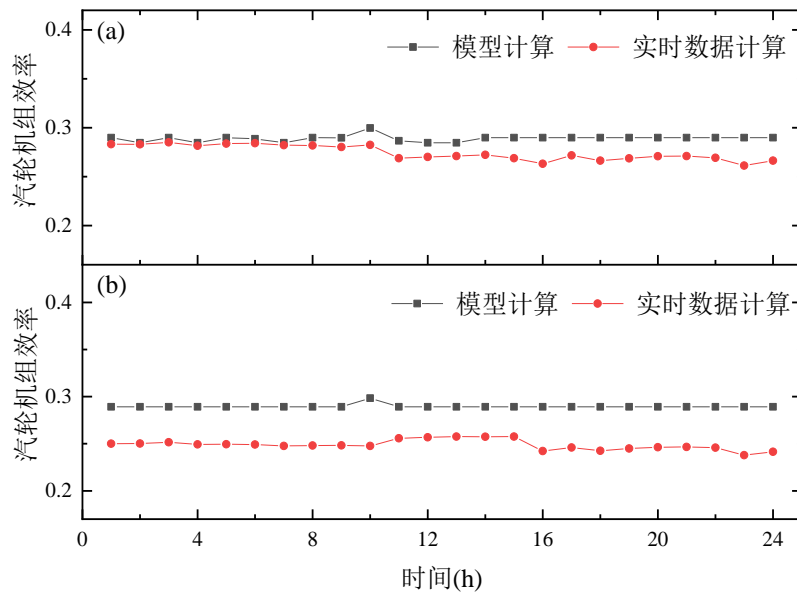


图 4.19 25MW 汽轮机组优化前后对比, 其中(a)为 25MW 汽轮机组 1#,  
(b)为 25MW 汽轮机组 2#

Fig.4.19 Comparison before and after optimization of 25MW steam turbine unit, in which (a) is  
25MW steam turbine unit 1#, (b) is 25MW steam turbine unit 2#

蒸汽转换为电力过程作为煤气-蒸汽-电力转换系统的第二次转换, 该过程和煤气转换为蒸汽过程一样, 设备间呈现并联机组的特点。通过调整各设备的进汽量、抽汽量来提高各个汽轮机发电机组的效率。蒸汽转换为电力过程涉及两种类型的汽轮机发电机组 (300MW 汽轮机组、25MW 汽轮机组), 每种类型设备为 2 座, 总共四座, 根据煤气-蒸汽-电力转换优化模型的优化结果和历史实际数据计算出优化前后 300MW 汽轮机组、25MW 发汽轮机组的效率变化分别如图 4.18 所示、图 4.19 所示, 优化前后汽轮机发电机组的效率整体均处于一个较平稳的水平, 四个汽轮机发电机组的效率分别平均提高了 1.05%、1.11%、1.45%、4.08%。

#### 4.5.4 过程转换效率分析

由章节 2.3 煤气-蒸汽-电力转换过程分为两步煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程, 这两个过程之间呈串联状态, 两步转换过程之内各设备均呈现并联分布的特点。根据式(2.7)、式(2.8)、式(2.9), 根据煤气-蒸汽-电力转换模型优化结果和历史实际数据计算优化前后煤气转换为蒸汽过程的转换效率、蒸汽转换电力过程的转换效率、煤气-蒸汽-电力转换系统的转换效率如图 4.20 所示, 由图可以看出从煤气到蒸汽再到电力过程转换效率逐渐降低, 与能源转换在转换过程中呈能级递减的趋势吻合; 另外经计算在一个调度周期内优化后煤气转换为蒸汽过程的转换效率、蒸汽转换电力过程的转换效率分别提高了 4.10%、2.29%, 整个煤气-蒸汽-电力转换系统的转换效率提高了 3.61%。

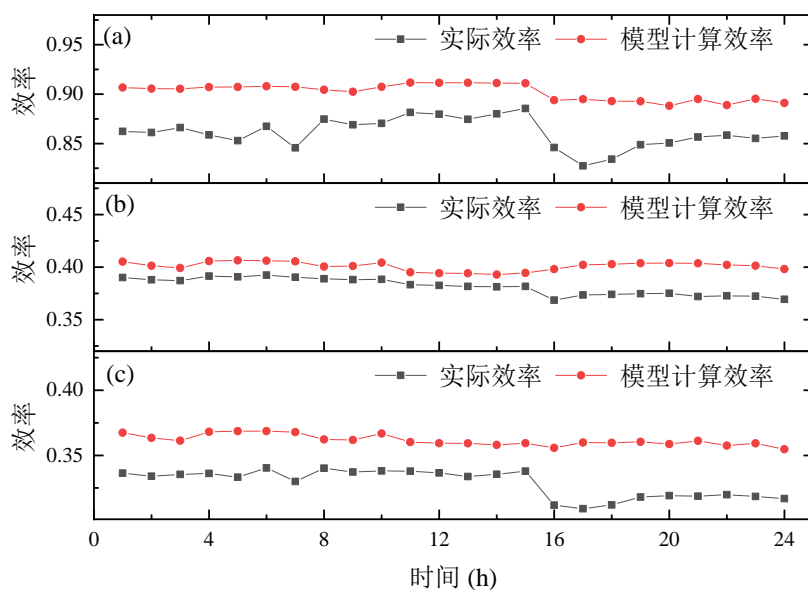


图 4.20 过程转换效率优化前后对比，其中(a)为煤气转换为蒸汽过程，  
(b)为蒸汽转化为电力过程，(c)为煤气-蒸汽-电力转换系统

Fig.4.20 Comparison of process conversion efficiency before and after optimization, in which (a) is the process of gas-to-steam conversion, (b) is the process of steam-to-electricity conversion, and (c) is the gas-steam-electricity conversion system

## 4.6 本章小结

本章考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型研究。首先，为了得到合理的蒸汽调度方案、自发电和外购电方案，除了考虑煤气转换为蒸汽过程的汽轮机自发电设备之外，还考虑钢铁企业其他自发电设备，根据各设备的特点，得到了自发电设备的多元线性回归模型；其次，分析了钢铁企业自发电、蒸汽的来源，建立了考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型，利用求解器 Gurobi 得到解。通过模型计算结果与实际计算结果对比所得结论如下：基于煤气-蒸汽-电力转换优化模型得到煤气的分配方案、蒸汽的调度方案和电力的调度方案。优化后成本降低了 5.69%，煤气转换蒸汽过程效率提高了 4.10%，蒸汽转换电力过程效率提高了 2.29%，整个煤气-蒸汽-电力系统的效率提高了 3.61%，自发电占比提高了 7.1%。

## 5 煤气-蒸汽-电力转换优化调度模块开发

在钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的背景下，本文第二章分析了煤气、蒸汽、电力转换过程以及转换过程的效率计算方法；第三章研究了基于锅炉负荷的煤气优化分配方法；第四章在第三章的基础上研究了考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度方法。因此，在前三章的基础上，本章以国内某钢铁厂的煤气-蒸汽-电力转换设备为对象开发了基于煤气-蒸汽-电力转换的优化调度系统。本系统能够实现煤气、蒸汽、电力单一能源介质的产耗情况监测和煤气-蒸汽-电力转换优化调度等功能，为生产实际提供一个辅助决策工具。

### 5.1 模型系统总体设计及开发工具

#### 5.1.1 系统架构

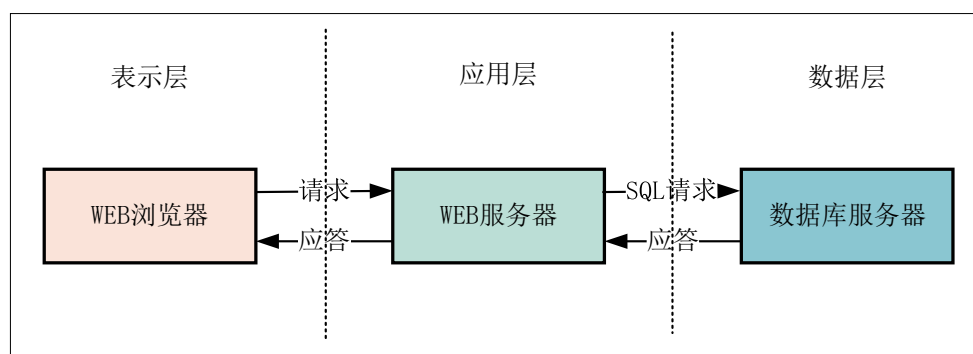


图 5.1 B/S 架构图

Fig.5.1 B/S Architecture Diagram

本文煤气-蒸汽-电力转换优化调度子系统的整体架构是 B/S 架构（Browser/Server, 浏览器/服务器），整体架构如图 5.1 所示包含三层架构，从左到右依次是表示层（User Interface, UI）、应用层（Business Logic Layer, BLL）、数据层（Data Access Layer, DAL）。表示层是即用户在使用过程中打开浏览器所呈现的操作界面，当浏览器端发生点击等事件时浏览器向服务器发送请求，服务器端处理之后将响应结果返回给浏览器端，浏览器将结果可视化。应用层是 WEB 服务器完成与浏览器、数据库服务器的对接，负责处理业务逻辑，并且将处理结果返回给表示层进行可视化表示。数据层是负责实现对数据库的读写功能以及管理功能，可以直接操作数据。本系统的具体的逻辑是当浏览器端发生加载、点击等操作后，服务器将接收到浏览器端的请求指令，服务器根据指令类别按照与之相

对应的功能模块，在数据层完成对数据的增加、删除、修改、查找等操作，并且作出应答。

### 5.1.2 开发环境及开发工具

本模型系统是依托 MicroSoft Visual Studio 2019 开发平台采用 C#、HTML、CSS、JavaScript 编程语言开发的，所用的操作系统为 Windows10，数据库为本地数据库 Oracle 11g，前后端交互的方法为 Ajax 方法，系统采用的框架 ASP.NET。各种开发工具和编程语言的介绍如下：

#### ①C#编程语言

C#是微软公司于 2000 年 6 月推出的一种面向对象的全新语言，具有语法简单、较好的兼容性等主要特点。由于 C#是为了配合 .NET 战略才推出的，所以 C#的语言体系都是建立在 .NET 的框架上，具有强大的安全性机制，与 .NET 是相辅相成的关系。C#具有支持很多 Web 标准（如 HTML、XML 等）的优势，有利于本系统开发，降低系统不兼容情况的发生。

#### ②HTML 语言

HTML 语言是呈现 WEB 浏览器端界面内容的一种语言。本系统的前端部分的开发平台 Visual Studio Code 来编写，HTML 由 Head 部分和 Body 部分构成，其中 Head 部分包含了文档的网页编码格式、文档标题、引用的 CSS 文件等，Body 部分包含了界面的布局、自定义的功能函数（如引入 JavaScript 文件，向后端发送请求、接收后端传来的数据等）。

#### ③CSS 语言

CSS（Cascading Style Sheets, CSS）语言指层叠样式表，用于定义 HTML 中元素的大小、位置、颜色等属性，可以很大程度上提高工作效率避免在 HTML 中重复定义。

#### ④JavaScript 语言

JS（JavaScript, JS）是 Web 的脚本编程语言，特点是在运行过程中不用先编译，可以逐行的解释，可以插入 HTML 的编程代码，并且还能应用于服务器、PC 端、手机端等。本系统引用的外部 JS 库有：jQuery(功能设计代码库)、Echart(数据可视化图标库)、bootstrap table(表格组件库)等。HTML、CSS、JavaScript 的关系如图 5.2 所示，在 HTML 文件的 Head 头部中利用<Link>标签引入所需要的 CSS 文件，实现在 Body 主体部分的元素的属性设置；并且在 Body 主体部分通过<Script>标签引入 JavaScript 文件，去定义部分函数的功能。

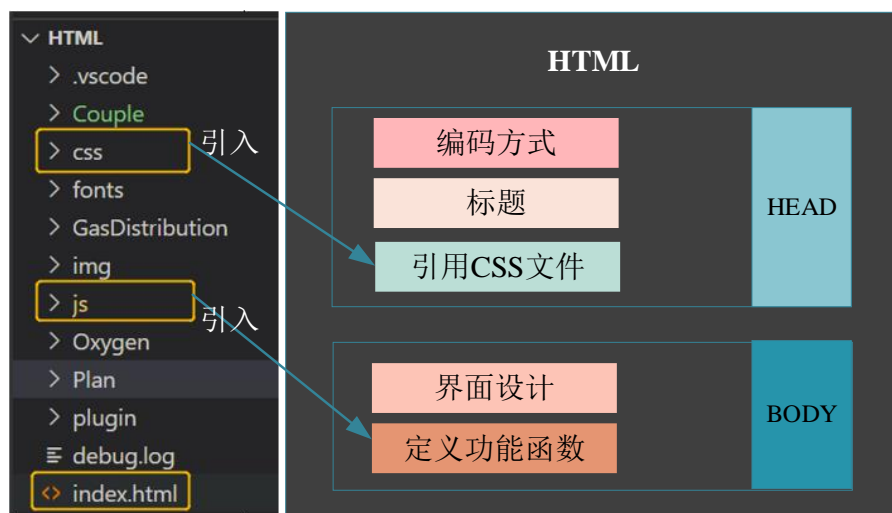


图 5.2 HTML/CSS/JavaScript 的关系

Fig.5.2 Relationship between HTML/CSS/JavaScript

### ⑤ Ajax 技术

Ajax (Asynchronous Javascript And XML, Ajax) 是一种用以搭建 Web 应用程序的技术, 特点是高效和交互性好。其工作原理是: 当浏览器端发生页面加载、点击某个按钮等事件时, 首先是由 JavaScript 创建 XMLHttpRequest 对象 (浏览器接口), 其次是将该对象向 Web 服务器发送请求, 最后是 Web 服务器将响应发送回网页, 由 JavaScript 读取并执行浏览器端事件的动作。请求的方式分为同步请求和异步请求, 请求-响应的方法: (1) 通过 select 向服务器索取数据的 Get 方法; (2) 通过 insert 向服务器提交数据的 Post 方法; (3) 通过 update 向服务器发送数据并更新 Put 方法; (4) 通过 delete 向服务器发送数据并删除 Delete 方法。本系统就是基于以上四种请求-响应的方法并且视情况选择请求方式和 ASP.NET 框架下的 API 接口, 去实现前端和后端的数据交互功能。

### ⑥ ASP.NET

ASP.NET 是微软公司推出的基于 .NET Framework 的新一代脚本语言, 是 ASP (Active Server Pages, ASP) 创新与增强后的升级版, 因此又被称为 ASP+。本系统的项目方案构成如图 5.3 所示, 主要包括有: 引用—项目引用外部的资源库 (如模型求解软件 Gurobi 的 dll 文件、Oracle 数据库的 dll 文件等)、Common—数据库通用操作类 (如数据库的增删改查)、Controller—前后端交互的接口、Data—数据处理方法、Entity—数据库表对应的实体类、HTML—前端开发、Web.config—配置文件等, 可以看出本系统的页面逻辑和业务逻辑是分开的, 代码程序与显示内容也是分离的。本系统基于 ASP.NET 强大网站开发功能、代码撰写的特点, 使得复杂系统网页开发变得更加容易, 代码更加简洁。



图 5.3 MicroSoft Visual Studio 2019 开发平台下的项目构成

Fig.5.3 Project composition under the development platform of MicroSoft Visual Studio 2019

### ⑦IIS 服务

互联网信息服务（Internet Information Services, IIS），即 IIS 服务，是一种网页服务的组件。IIS 服务由各种针对不同情况的服务器组成，包括：Web 服务器在 IIS 中针对网页浏览服务；FTP 服务器为支持 FTP（File Transfer Protocol, FTP）协议的服务器，在 IIS 中针对文件传输服务；NNTP 服务器为支持 NNT（Network News Transfer Protocol, NNTP）协议的服务器，在 IIS 中针对新闻服务；SMTP 服务器为支持 SMTP（Simple Mail Transfer Protocol, SMTP）协议的服务器，在 IIS 中用以邮件发送；综上所述，IIS 的功能就是提供信息服务。

### ⑧Oracle 数据库

Oracle 数据库是来自于甲骨文公司推出的一种关系数据库管理系统，是目前最热门的客户/服务器的数据库之一，被大多数工厂所采用的数据库。本系统为了存储数据方便，使用了 Oracle 开发的第三方软件——PLSQL Developer，建立各类数据表和数据存储与管理，通过 C#语言建立接口实现系统对数据表的增、删、改、查等功能，PLSQL Developer 界面如图 5.4 所示。



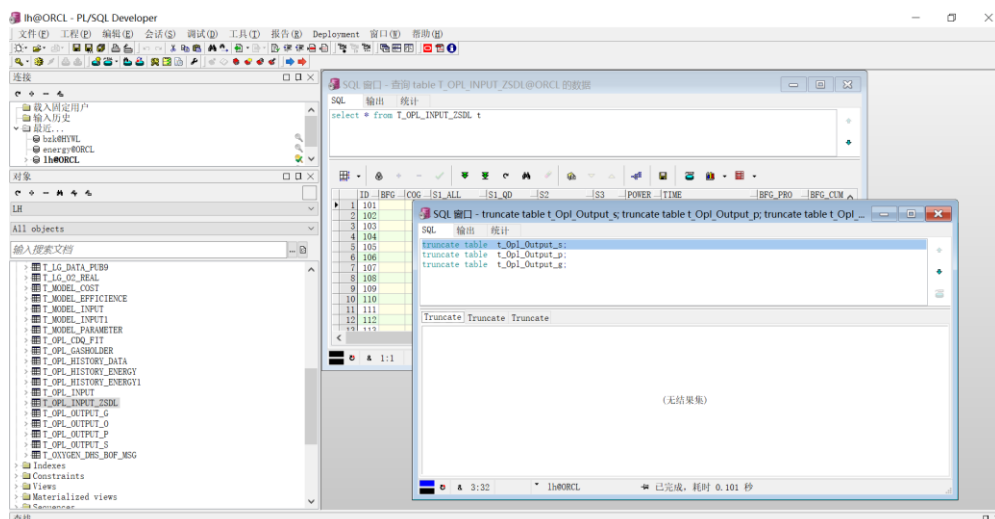


图 5.4 PLSQL Developer 界面

Fig.5.4 PLSQL Developer interface

## 5.2 数据库及功能模块设计

### 5.2.1 数据库设计

煤气-蒸汽-电力转换优化系统中存在多种能源介质和多种设备,在系统的开发过程中会有多次的对数据库进行操作,因此合理的数据库设计方案对于系统运行显得尤为重要。本系统的开发过程数据库主要是用来存储三种能源介质的数据系统涉及到的参数、煤气-蒸汽-电力转换过程的优化调度结果等。三种能源介质相关表主要是存储主工序煤气的产生和消耗量、蒸汽的产生和消耗量、电力的产生和消耗量和存储所计算的三种能源介质的模型输入数据,如表 5.1 所示。系统参数相关表主要是存储煤气的热值、蒸汽的焓值、煤气的使用成本、煤气柜波动惩罚、发电成本、购电成本(峰谷电价)/售电收益等,如表 5.2 所示。煤气-蒸汽-电力转换过程的优化调度结果相关表包含煤气-蒸汽-电力转换过程煤气的分配方案、蒸汽的调度结果、电力的调度结果,如表 5.3 所示。煤气-蒸汽-电力转换过程的优化调度结果分析相关表包括煤气-蒸汽-电力转换过程的成本(包括煤气使用成本、柜位波动惩罚、煤气放散惩罚、发电成本、购电成本/外售收益等)、煤气-蒸汽-电力在转换过程中各个阶段的效率(包括煤气转换蒸汽过程的转换效率、蒸汽转换为电力过程的转换效率、煤气-蒸汽-电力系统的转换效率),如表 5.4 所示。本系统的数据关系图如图 5.5 所示。



表 5.1 能源数据相关表

Table 5.1 Energy data related table

表名	作用
T_OPL_HISTORY_GAS	存储煤气的产耗和煤气柜位
T_OPL_HISTORY_STEAM	存储蒸汽的产耗
T_OPL_HISTORY_POWER	存储电力的产耗和购/售量
T_OPL_HISTORY_INPUT	存储模型输入数据

表 5.2 系统参数相关表

Table 5.2 System parameter related table

表名	作用
T_PARAMETER_GAS	存储三种煤气的热值、使用成本、柜位波动惩罚、 煤气放散惩罚
T_PARAMETER_STEAM	存储蒸汽的焓值、使用成本
T_PARAMETER_POWER	存储发电成本、峰谷电价、外售电价格

表 5.3 模型优化调度结果相关表

Table 5.3 Related table of model optimization scheduling results

表名	作用
T_OPL_OUTPUT_GAS	存储三种煤气的分配方案
T_OPL_OUTPUT_STEAM	存储三种蒸汽的调度方案
T_OPL_OUTPUT HOLDER	存储各种煤气柜的柜位
T_OPL_OUTPUT_POWER	存储电力的调度方案，包括自发电量、 外购电量、外售电量

表 5.4 模型结果分析相关表

Table 5.4 Model result analysis related table

表名	作用
T_OPL_OUTPUT_COST	存储煤气-蒸汽-电力转换过程的各项成本
T_OPL_OUTPUT EFFICENCY	存储煤气转蒸汽、蒸汽转电力、 煤气-蒸汽-电力整个过程的效率

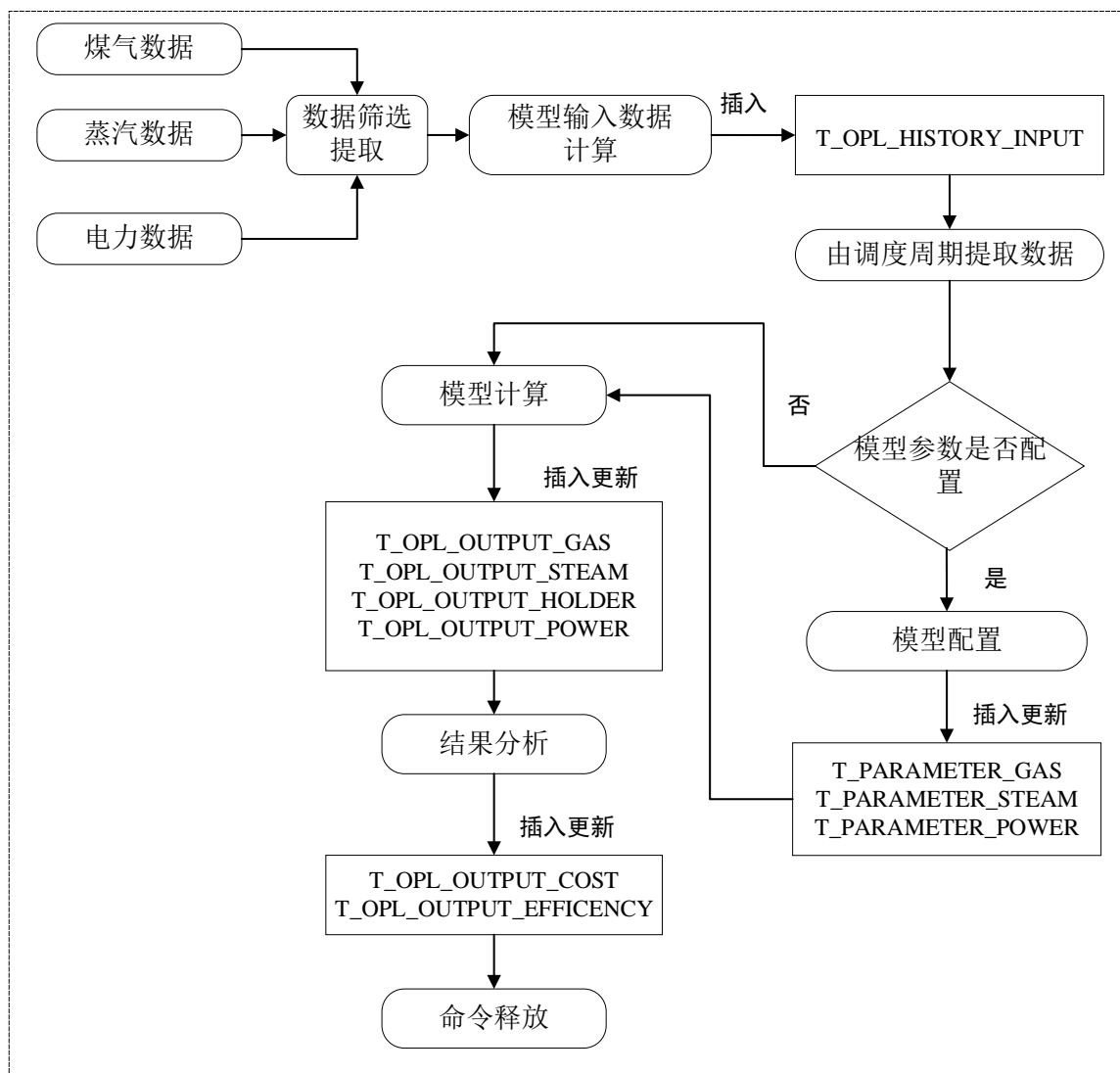


图 5.5 数据关系图

Fig.5.5 Data relationship diagram

### 5.2.2 功能模块设计

基于第二至四章煤气-蒸汽-电力转换优化调度的研究内容开发了煤气-蒸汽-电力转换系统，开发该系统的目的是对生产过程中煤气、蒸汽、电力的产耗量实时监控、对调度方案的可视化展示以及模型的可调整性。为了降低系统开发的难度系数和复杂程度，采用模块化的方法开发，将该系统的功能设计为三部分，如图 5.6 所示，分别是煤气、蒸汽、电力的实时监控模块、煤气-蒸汽-电力转换优化调度模块、参数设置模块。

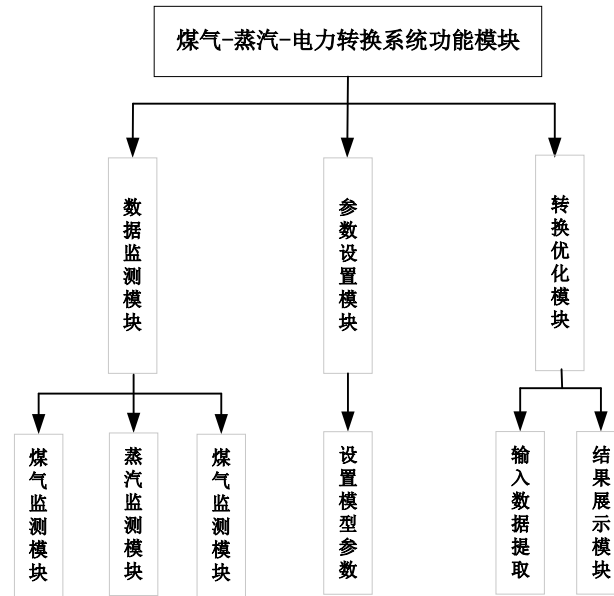


图 5.6 煤气-蒸汽-电力系统功能设计

Fig.5.6 Functional Design of Gas-Steam-Power System

## 5.3 模型系统模块开发

### 5.3.1 数据查询模块

数据查询模块主要由煤气相关数据监测界面、蒸汽相关数据监测界面、电力相关数据监测界面，分别如图 5.7、图 5.8、图 5.9 所示。针对煤气相关数据监测界面，通过选择想要查询的时间段，然后点击“查询”按钮得到煤气-蒸汽转换过程启动锅炉、130T 锅炉、CHP 锅炉、CCPP 等设备高炉煤气和焦炉煤气的消耗量，此外用户还可以点击“翻页”按钮查询目标时间点或时间端的值。在该界面还能计算出煤气-蒸汽-电力转换优化模型的输入数据（在制造流程中主工序高炉煤气产生量和消耗量、焦炉煤气产生量和消耗量），点击“计算”按钮即可得到，并且可以点击“导出表”按钮将计算结果保存到 EXCEL 表中，用户可自行按需分析处理；另外在计算结果子界面的右上角有一个下载标识，用户可以点击该标识直接保存该计算结果的统计图。针对蒸汽相关数据监测界面，同样是通过选择想要查询的时间段，然后点击“查询”按钮得到 25MW 汽轮机发电机组、300MW 汽轮机发电机组、CDQ 等设备的煤气转换为蒸汽过程蒸汽的产生情况或者蒸汽转换为电力过程消耗蒸汽和抽汽情况，同时还能计算出煤气-蒸汽-电力转换优化模型的输入数据（S1 蒸汽需求量、S2 蒸汽需求量、S3 蒸汽需求量），其他功能同煤气历史监测界面。针对电力相关数据监测界面，也是通过确定时间段，然后点击“查询”按钮得到 25MW 汽轮机发电机组、300MW 汽轮机发电机组、CDQ、CCPP、TRT 等设备蒸汽转换为电力过程或者其他发电设备的电力产生情况，同时还能计算出煤气-蒸汽-电力转换优化模型的输入数据（电力需求量），其他功能同煤气相关监测界面。



图 5.7 煤气数据监测界面

Fig.5.7 Gas data monitoring interface

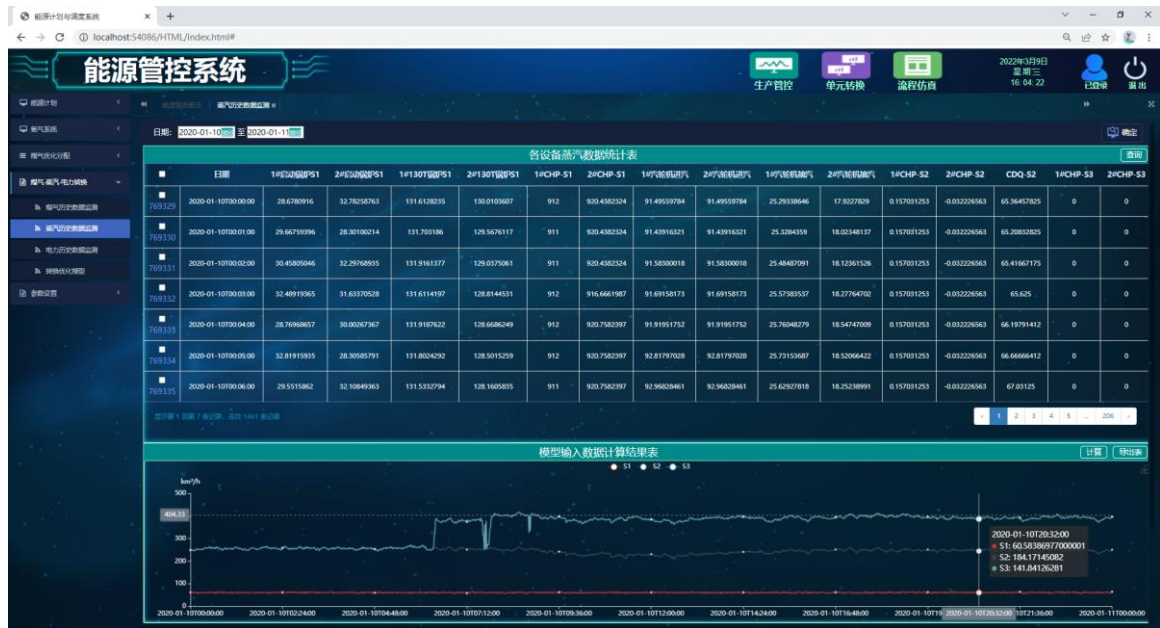


图 5.8 蒸汽数据监测界面

Fig.5.8 Steam data monitoring interface

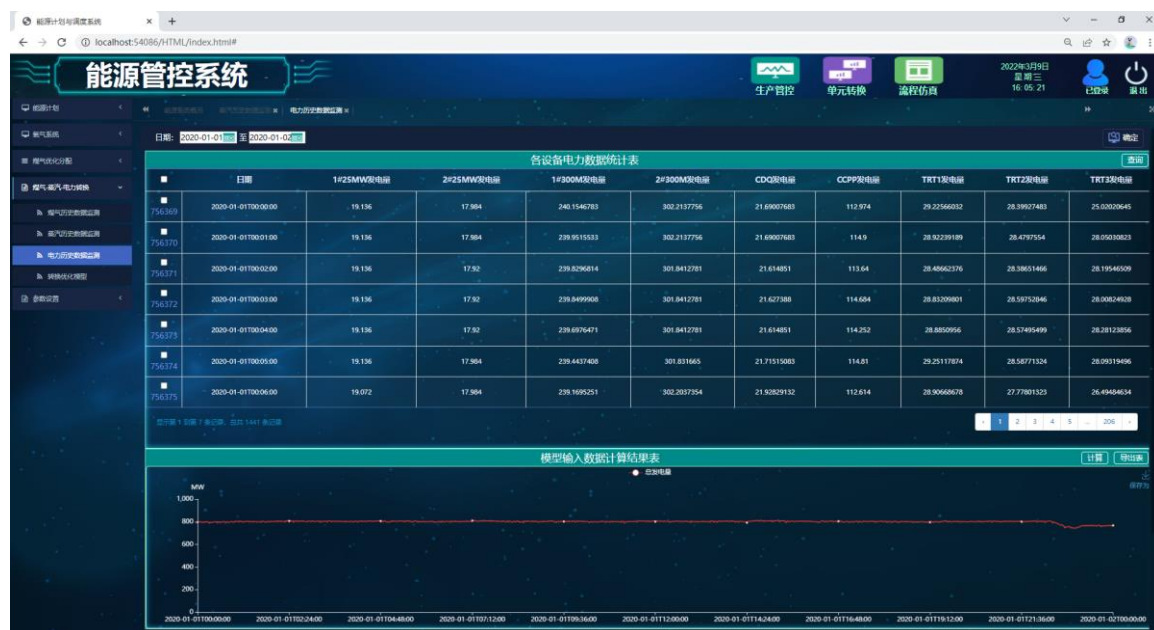


图 5.9 电力数据监测界面

Fig.5.9 Power data monitoring interface

### 5.3.2 系统配置模块

系统配置模块由模型输入表子模块、参数设置子模块、设备状态子模块组成，如图 5.10 所示。由于通常煤气-蒸汽-电力转换优化模型是以一个或者多个调度周期来优化求解的，因此设置了模型输入表子模块以便于确定模型的输入，基本操作是选定好调度周期后，点击“查询按钮”得到模型的输入。参数设置模块主要是由高炉煤气使用成本、焦炉煤气使用成本、高炉煤气柜位波动惩罚、焦炉煤气柜位惩罚、自发电成本、外售电价格、峰谷电价等构成，煤气-蒸汽-电力转换优化模型的首要目标即是煤气-蒸汽-电力系统运行成本最小，但是随着市场价格的波动这些参数存在随市场变化的可能，设置这个模块能更好地计算系统的运行成本，提高调度的准确性。在设置好相关成本参数后点击“保存”按钮后会弹出一个提示“参数设置成功！”的弹窗，如图 5.11 所示。设备状态展示由两个表盘展示锅炉状态和汽轮机的状态，设备正常状态显示“设备正常”，设备异常状态时则显示“设备异常”。参数设置模块的操作流程为：（1）确定调度周期；（2）获取调度周期内模型的输入；（3）若是参数值变化设置各个参数值并保存，若是没有变化就以界面展示的值进行模型成本计算；（4）观察设备状态；完成这些流程后等待下一阶段的操作。

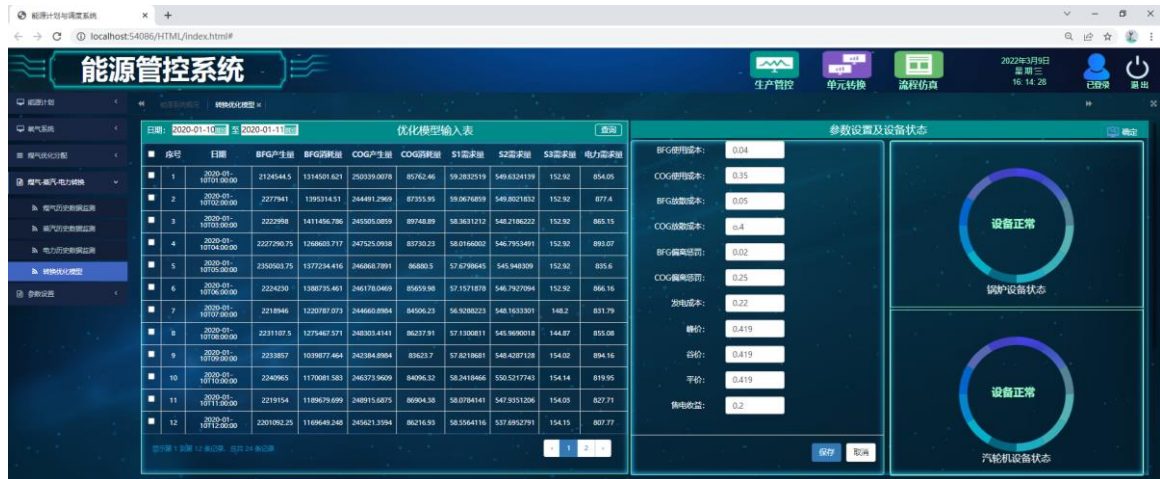


图 5.10 系统配置界面

Fig.5.10 System configuration interface



图 5.11 参数保存成功弹窗

Fig.5.11 Parameter save successfully pop-up window

### 5.3.3 煤气-蒸汽-电力转换优化模块

煤气-蒸汽-电力转换优化模块是承接在参数设置模块之后进行模型的求解，该部分由优化结果和转换优化模型效果分析两部分组成，如图 5.12 所示。优化结果部分是对煤气-蒸汽-电力转换优化模型的可视化展示，包括煤气的优化分配方案（各个设备高炉煤气、焦炉煤气的消耗）、蒸汽的优化调度方案、电力调度方案，点击“求解”按钮即可得到优化结果，并且可以将优化结果直接下载。转换优化模型效果分析部分主要是对模型优化效果的评价的可视化展示，包括运行运行成本、转换过程效率、煤气柜位变化，点击“分析”按钮即可得到。





图 5.12 模型优化结果及分析界面

Fig.5.12 Model optimization results and analysis interface

## 5.4 本章小结

本章基于第二至第四章提出的优化策略和建立的煤气-蒸汽-电力转换优化模型，以某钢铁企业的煤气-蒸汽-电力系统为基准，开发了基于 B/S 架构的钢铁企业基于煤气-蒸汽-电力转换的优化调度系统。系统可实现对煤气、蒸汽、电力数据监控功能、监测转换系统设备的状态、设置设备模型参数、求解模型以及查看模型优化效果等功能，还可以下载需要的数据或者优化结果。基于煤气-蒸汽-电力转换优化模型可以给出煤气分配方案、蒸汽调度结果、电力调度结果，给用户提供了决策方案。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

钢铁企业煤气、蒸汽、电力等二次能源合理的利用,有利于提高二次能源的利用率,对钢铁企业的节能减排工作的开展和降低运行成本具有重要意义。本文进行钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的优化调度方法研究,构建了基于锅炉负荷的煤气分配模型和考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型。首先通过对钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统分析以及文献的调研,总结出煤气-蒸汽-电力系统目前的研究进展和存在的问题;其次以煤气-蒸汽-电力转换系统为研究对象,分析了煤气-蒸汽-电力转换过程的效率计算方法;然后建立了两个优化模型,一方面在煤气转换为蒸汽过程,建立了基于锅炉负荷的煤气优化分配模型;另一方面在蒸汽转换为电力过程,建立了考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型;最后开发了钢铁企业基于煤气蒸汽电力转换的优化调度模型系统。基于以上研究内容,主要研究结论如下:

①针对煤气-蒸汽-电力转换系统的特点和转换方式,提出了转换过程的效率计算方法。首先,根据煤气-蒸汽-电力转换系统的特点,将钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统转换过程分为煤气转换为蒸汽过程、蒸汽转换为电力过程。然后,分析了各个转换过程设备之间的关系,结论是在煤气转换为蒸汽过程和蒸汽转换为电力过程中各个设备之间的关系均呈并联的关系,两步转换过程之间呈串联的关系。最后,提出了利用串并联机组效率计算方法计算煤气转换为蒸汽过程、蒸汽转换为电力过程的转换效率以及整个煤气-蒸汽-电力转换系统的效率。

②在煤气转换为蒸汽过程,建立了基于锅炉负荷的煤气分配多目标模型,优化后系统的运行成本平均比优化前降低了 1.95%,煤气转换为蒸汽过程的效率提高了 2.87%。首先,根据锅炉效率随锅炉负荷变化的特点,建立了基于锅炉负荷的煤气-蒸汽-电力转换的优化分配多目标模型。其次,在模型中以煤气-蒸汽-电力系统运行成本最小和煤气运行负荷与额定负荷的偏差最小作为优化目标;将各个锅炉的煤气消耗量和蒸汽产生量、汽轮机蒸汽消耗和电力产生量等作为决策变量;约束考虑设备投入与产出约束、能源介质保供约束、设备产能及能耗约束等;通过 Gurobi 求解各决策变量的值。最后,以某企业的实绩数据进行测试计算,结果显示,优化后系统的运行成本平均比优化前降低了 1.95%,煤气转换为蒸汽过程的效率提高了 2.87%,得到了煤气优化分配方案,为考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型研究提供基础。



③在蒸汽转换为电力过程,建立了考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型,优化后成本降低了 5.69%,煤气转换蒸汽过程效率提高了 4.10%,蒸汽转换电力过程效率提高了 2.29%,整个煤气-蒸汽-电力系统的效率提高了 3.61%。首先,钢铁企业自发电设备的多元线性回归模型,建立了考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型。其次,在模型中以煤气-蒸汽-电力系统运行成本最小、煤气转换为蒸汽过程效率最大、蒸汽转换为电力过程效率最大作为优化目标;煤气放散量、锅炉煤气消耗量和蒸汽产量、汽轮机发电量和抽汽量、以及其他设备的发电量和抽汽量等作为模型的决策变量;以主工序煤气的产生量和消耗量、S1 蒸汽需求量、S2 蒸汽需求量、S3 蒸汽需求量、电力需求量作为模型的输入,在各设备产能限制和能源保供等约束的限制下通过 Gurobi 求解器求得决策变量的值。最后,优化结果表明:在调度周期内,优化后成本降低了 5.69%,煤气转换蒸汽过程效率提高了 4.10%,蒸汽转换电力过程效率提高了 2.29%,整个煤气-蒸汽-电力系统的效率提高了 3.61%,优化后自发电占比提高了 7.1%。

④以钢铁企业的煤气-蒸汽-电力转换的优化调度方法研究为基准,开发了钢铁企业基于煤气蒸汽电力转换优化调度系统,为用户提供了辅助决策工具。该系统可以实现煤气、蒸汽、电力相关数据监测功能和煤气-蒸汽-电力转换优化调度功能。此外在煤气-蒸汽-电力转换优化调度功能模块可以实现模型的配置功能、调度结果可视化展示,并通过展示界面直观的呈现模型的调度优化效果,并且整个系统支持模型相关数据的查询、下载等功能。

## 6.2 展望

本文对钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换系统的优化调度的研究,目前所建立的模型和开发的系统仍存在有待优化的地方,主要可以在以下几个方面优化改进:

①基于锅炉负荷的煤气优化分配模型方面。对煤气分配问题,简化了基于锅炉负荷的煤气优化分配模型,在模型的输入方面考虑的是调度周期内煤气的富余量,后续可以考虑与主工序煤气生产和消耗过程衔接。

②考虑蒸汽电力需求的煤气-蒸汽-电力转换优化调度模型方面。在目标函数系统运行成本中,简化模型对煤气柜偏离中间柜位的惩罚值。若要进行下一步研究需要按照煤气柜位偏离中间柜位的程度设定惩罚。

③开发的钢铁企业基于煤气蒸汽电力转换优化调度系统方面。本文基于建立的模型开发了钢铁企业基于煤气蒸汽电力转换优化调度系统,但目前主要是在本地数据库对系统功能进行了离线测试和检验,后续系统的实际应用还需要进一步测试、分析和完善。

## 参考文献

- [1] 张琦, 马家琳, 高金彤, 等. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统耦合优化及应用[J]. 化工学报, 2018,69(07):3149-3158.
- [2] 文凯, 张琦, 王晓坡. 钢铁企业蒸汽动力系统经济环境多目标优化[J]. 西安交通大学学报, 2021,55(11):66-76.
- [3] 申银花. 基于MIND方法的钢铁企业能耗优化模型及应用[D]. 东北大学, 2015.
- [4] 上官方钦, 干磊, 周继程, 等. 钢铁工业副产煤气资源化利用分析及案例[J]. 钢铁, 2019,54(07):114-120.
- [5] 高雯雯, 吴复忠, 王文豪. 钢铁企业煤气优化利用方法研究[J]. 现代机械, 2010(01):86-89.
- [6] 王一坤, 雷小苗, 邓磊, 等. 可燃废气利用技术研究进展(I):高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气[J]. 热力发电, 2014,43(07):1-9.
- [7] 张琦, 蔡九菊, 吴复忠, 等. 高炉煤气在冶金工业的应用研究[J]. 工业炉, 2007(01):9-12.
- [8] 盛春阳. 基于数据的钢铁企业二次能源系统预测方法及应用[D]. 大连理工大学, 2014.
- [9] 李佳佳. 钢铁企业蒸汽系统优化调度[D]. 天津理工大学, 2016.
- [10] 张小雷. 钢铁企业能源配置计划问题研究[D]. 东北大学, 2012.
- [11] 徐化岩. 钢铁流程物质流、能量流的信息表征及应用研究[D]. 钢铁研究总院, 2019.
- [12] 何坤, 王立. 中国钢铁工业生产能耗的发展与现状[J]. 中国冶金, 2021,31(09):26-35.
- [13] 李洪福, 温燕明. 钢铁流程煤基能量高效转换与钢-电联产模式[J]. 钢铁, 2018,53(10):95-102.
- [14] 孙彦广, 梁青艳, 李文兵, 等. 基于能量流网络仿真的钢铁工业多能源介质优化调配[J]. 自动化学报, 2017,43(06):1065-1079.
- [15] 徐化岩, 杨涛. 钢铁企业能源介质预测模型及应用[J]. 冶金自动化, 2019,43(01):59-63.
- [16] 徐化岩, 杨涛. 钢铁企业能源优化调度模型及应用[J]. 冶金自动化, 2019,43(2):35-41.
- [17] 郑忠, 黄世鹏, 李曼琛, 等. 钢铁制造流程的物质流和能量流协同优化[J]. 钢铁研究学报, 2016,28(04):1-7.
- [18] 郑忠, 黄世鹏, 龙建宇, 等. 钢铁智能制造背景下物质流和能量流协同方法[J]. 工程科学学报, 2017,39(01):115-124.
- [19] 王建军. 钢铁企业物质流、能量流及其相互关系研究与应用[D]. 东北大学, 2007.
- [20] 宋军. 钢铁企业煤气系统动态预测与优化调配研究[D]. 东北大学, 2011.
- [21] Liu S, Xie S, Zhang Q. Multi-energy synergistic optimization in steelmaking process based on energy hub concept[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2021,28(08):1378-1386.

- [22] Wei Z, Zhai X, Zhang Q, et al. A MINLP model for multi-period optimization considering couple of gas-steam-electricity and time of use electricity price in steel plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2020,168:114834.
- [23] Zhao X, Bai H, Qi S. Optimization and Management of Byproduct Gas Distribution in Steel Mills Under Time-of-Use (TOU) Electricity Price[C]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2016:99-106.
- [24] 曾玉娇. 钢铁企业蒸汽-电力系统多时段优化调度[C]. 第25届中国过程控制会议, 2014:1-8.
- [25] 田永华. 钢铁企业蒸汽合理利用及优化分配研究[D]. 东北大学, 2011.
- [26] 曾亮, 梁小兵, 欧燕, 等. 基于多目标—约束优化进化算法的能源综合调度[J]. 计算机集成制造系统, 2016,22(11):2668-2678.
- [27] 高金彤, 倪团, 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.
- [28] 谢升, 李辉, 许立松, 等. 钢铁企业煤气系统优化调度研究[C]. 第十届全国能源与热工学术年会, 2019:1-7.
- [29] 贺东风, 李宗华, 胡正彪. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统复合调度方法[J]. 冶金能源, 2021,40(02):3-8.
- [30] Zhao J, Liu Q, Wang W, et al. Hybrid neural prediction and optimized adjustment for coke oven gas system in steel industry.[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2012,23(3):439-450.
- [31] 闫雷. 复杂系统多能源介质的优化调度[D]. 东南大学, 2017.
- [32] 李智, 苏福永, 温治, 等. 遗传算法的改进及在钢铁企业煤气调度中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014,35(05):645-649.
- [33] Mitra S, Pinto J M, Grossmann I E. Optimal multi-scale capacity planning for power-intensive continuous processes under time-sensitive electricity prices and demand uncertainty. Part II: Enhanced hybrid bi-level decomposition[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014,65:102-111.
- [34] 杨涛. 多工况钢铁企业煤气-蒸汽-电力耦合系统优化调度研究[D]. 冶金自动化研究设计院, 2017.
- [35] Kim J H, Yi H, Han C, et al. Plant-wide multiperiod optimal energy resource distribution and byproduct gas holder level control in the iron and steel making process under varying energy demands[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2003,15:882-887.
- [36] Haining K, Ershi Q, Hui L, et al. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant[J]. Applied Energy, 2009,87(7):2156-2163.
- [37] 张红日. 钢铁企业热电系统多工况优化调度研究[D]. 大连理工大学, 2021.

- [38] Zeng Y, Xiao X, Li J, et al. A novel multi-period mixed-integer linear optimization model for optimal distribution of byproduct gases, steam and power in an iron and steel plant[J]. Energy, 2018,143:881-899.
- [39] Yang J, Cai J, Sun W, et al. Optimal allocation of surplus gas and suitable capacity for buffer users in steel plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,115:586-596.
- [40] 李雪晴, 詹守权, 刘伟. 多能源介质耦合优化系统模型的开发及应用[J]. 鞍钢技术, 2020(03):66-70.
- [41] Markland R E. Improving fuel utilization in steel mill operations using linear programming[J]. Journal of Operations Management, 1980,1(2):95-102.
- [42] 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(03):753-758.
- [43] 贺东风, 鲁晓旭, 冯凯, 等. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统耦合优化调度[J]. 钢铁, 2018,53(07):95-104.
- [44] 翟延伟, 吕政, 赵珺, 等. 多能流系统合作协同的不确定多目标决策[J]. 控制理论与应用, 2019:1-9.
- [45] 郑思源. 工业无线现场总线在钢铁行业能源管理的应用研究[D]. 北方工业大学, 2020.
- [46] 曾亮, 梁小兵, 欧燕, 等. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力等多介质多周期混合优化调度模型及算法[C]. 2014年全国冶金能源环保生产技术会, 2014:252-267.
- [47] Zhao X, Bai H, Shi Q, et al. Optimal scheduling of a byproduct gas system in a steel plant considering time-of-use electricity pricing[J]. Applied Energy, 2017,195:100-113.
- [48] Du T, Liu X, Pang X. Byproduct Gas Optimal Distribution Model and Its Application for Iron and Steel Enterprises[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,58(60):816-821.
- [49] Yang J, Cai J, Sun W. Optimal allocation of surplus gas and suitable capacity for buffer users in steel plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,115:586-596.
- [50] Haining K, Ershi Q I, Shu Guang H E, et al. MILP Model for Plant-Wide Optimal By-Product Gas Scheduling in Iron and Steel Industry[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010,17(7):34-37.
- [51] 刘坤, 高峰, 翟桥柱. 考虑负荷及煤气量不确定性的企业微电网自发电调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(13):2063-2070.
- [52] 贺东风, 刘平泽, 冯凯, 等. 钢铁企业轧制计划与能源调度协同优化[J]. 中国冶金, 2019,29(04):75-80.
- [53] 马光宇. 钢铁联合企业电力系统分析与优化研究[D]. 东北大学, 2014.
- [54] Zhao X, Bai H, Lu X, et al. A MILP model concerning the optimisation of penalty factors for the short-term distribution of byproduct gases produced in the iron and steel making process[J].

- Applied Energy, 2015,148:142-158.
- [55] Zhao X, Bai H, Hao J. Research on the load shifting potential of on-site power plants with byproduct gasholders in steel enterprises under time-of-use power price[J]. Energy Procedia, 2017,142:2704-2710.
- [56] Zeng Y, Sun Y. Multiperiod optimal planning of steam power system for steel plants under time-of-use power price: Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014[C]. IEEE, 2014:4875-4880.
- [57] 刘向斌. 钢铁企业电力合理生产与优化研究[D]. 东北大学, 2012.
- [58] Zhang Q, Ti W, Cai J, et al. Multi-Period Optimal Distribution Model of Energy Medium and Its Application[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011,18(8):37-41.
- [59] 曾玉娇. 钢铁企业电力系统有功和无功优化调度问题的研究[D]. 钢铁研究总院, 2015.
- [60] Zeng Y, Sun Y. Short-term Scheduling of Steam Power System in Iron and Steel Industry under Time-of-use Power Price[J]. 2015,9(22):795-803.
- [61] Shang Z G, Kokossis A. A Transshipment Model for the Optimisation of Steam Levels of Total Site Utility System for Multiperiod Operation[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004,28(09):1673-1688.
- [62] Mavromatis S, Kokossis A. Hardware composites: A new conceptual tool for the analysis and optimisation of steam turbine networks in chemical process industries - Part I: Principles and construction procedure[J]. Chemical Engineering Science, 1998,53(7):1405-1434.
- [63] Li H, Wang J, Wang H, et al. An optimal method for prediction and adjustment on gasholder level and self-provided power plant gas supply in steel works[J]. Journal of Central South University, 2014,21(7):2779-2792.
- [64] 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.
- [65] Zhang Q, Zhao T, Ni T. Optimization models for operation of a steam power system in integrated iron and steel works[J]. Energy Sources, 2021,43(09):1100-1114.
- [66] 倪团结. 钢铁企业煤气—蒸汽—电力系统建模及优化研究[D]. 东北大学, 2018.
- [67] 王俊鹏. 燃气锅炉燃烧控制系统设计[D]. 内蒙古科技大学, 2019.
- [68] 施琦, 赵贤聪, 白皓, 等. 钢铁企业副产煤气短周期优化调度模型[J]. 钢铁, 2016,51(08):81-89.
- [69] 史月涛, 丁兴武, 盖永光. 汽轮机设备与运行[M]. 中国电力出版社, 2008.
- [70] 杨义波, 张燕侠, 杨作梁, 等. 热力发电厂[M]. 中国电力出版社, 2005.
- [71] 张燕侠. 热力发电厂[M]. 中国电力出版社, 2014.
- [72] 丁鸽. 基于能量流网络的钢铁企业能效分析[D]. 冶金自动化研究设计院, 2015.
- [73] 刘精宇, 殷瑞钰, 蔡九菊. 钢铁企业电力节点网络的研究和应用[J]. 中国冶金,

2012,22(07):40-46.

[74] 刘精宇, 蔡九菊, 杨靖辉. 钢铁联合企业发电模式的研究[J]. 中国冶金, 2013,23(01):50-53.

[75] 郑玉清, 翟大平, 杜万生, 等. 运用系统节能技术实现煤气向发电高效转换[J]. 冶金动力, 2014(05):19-22.

[76] 陈文威, 李沪萍. 热力学分析与节能[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[77] 杜辰伟. 烧结烟气余热发电(火用)分析与过热器管寿命计算[D]. 昆明理工大学, 2020.

[78] 孙文强. 钢铁制造流程中物质流与能量流优化及其协同运行基础研究[D]. 东北大学, 2013.



## 附 录

## B. 学位论文数据集

关键词		密级		中图分类号	
钢铁企业；煤气-蒸汽-电力转换系统；能源优化；能源转换效率；设备负荷		公开		TF31	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类别		学位级别	
重庆大学	10611	学术学位		硕士	
论文题名		并列题名		论文语种	
钢铁企业煤气-蒸汽-电力转换的优化调度方法				中文	
作者姓名	李欢	学号		201909021094	
培养单位名称		培养单位代码			
重庆大学		10611			
学科专业	研究方向	学制		学位授予年	
冶金过程	冶金流程工程与智能制造优化	3 年		2022	
论文提交日期	2022 年 06 月	论文总页数		94	
导师姓名	郑忠	职称		教授	
答辩委员会主席		白晨光			
电子版论文提交格式					
文本（√）    图像（）    视频（）    音频（）    多媒体（）    其他（）					