

## 考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统优化调度研究

作者姓名：	李佳阳
指导教师：	霍兆义 副教授
专业领域：	能源动力
答辩日期：	2023 年 3 月 8 日

分类号 TF04

密 级 公开

U D C 669

单位代码 10146

学 号 202085800388

# 硕士学位论文

## 考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统 优化调度研究

研究生姓名：李佳阳

指 导 教 师：霍兆义 副教授

工 作 单 位：辽宁科技大学

指 导 教 师：                    

工作单位：                    

论 文 提 交 日 期：2023 年 3 月 17 日

答 辩 日 期：2023 年 3 月 8 日

学 位 授 予 日 期：                    

授 予 单 位：                    

论 文 评 阅 人：                    

工 作 单 位：                    

论 文 评 阅 人：                    

工 作 单 位：                    

答 辩 委 员 会 主 席：徐伟 教授级高工

工 作 单 位：鞍钢集团钢铁研究院

**Study on Optimal Scheduling of gas-steam power system  
considering economic and environmental objectives**

**A thesis Submitted to  
University of Science and Technology Liaoning**

**by  
Li Jiayang  
(Majoring in Power of Energy)**

**Supervisor: Prof. Huo Zhaoyi**

**March 17, 2023**

## 中文摘要

目前,我国钢铁行业能耗高、环境污染严重,节约能源对于钢材生产实现可持续发展有着重要性。对钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的主要能源进行优化调度,能够在提升能源使用效率以及缩减能源耗散方面显有成效。由于副产煤气、蒸汽、电力都是钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的主要能源,通过研究对该系统中主要能源进行优化分配,对于钢铁企业的节能降耗具有很重要的科研价值和实际意义。

本文首先对钢铁企业的煤气系统和蒸汽动力系统的结构进行了分析,在此基础上,根据系统中各设备(包括锅炉、汽轮机及热电联产等)建立了以经济成本为目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型。

其次,利用某钢厂的煤气-蒸汽动力系统的实际生产数据,对基于经济性的煤气-蒸汽动力系统优化调度模型进行了验证。结果表明,比较优化前后的运行成本,优化后的运行成本比优化前低了 18.31%。该模型为钢铁企业煤气-蒸汽动力系统提供能源分配的优化策略,降低了企业的运行成本。此外,本文探究了能源价格的变化对优化结果的影响。

最后,提出了一种基于经济和环保目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型,考虑了副产煤气高效利用技术,并运用此模型对其进行了优化。结果表明,将环保成本引入到煤气-蒸汽动力系统中,会使整个系统的运行成本有所增加,但这样做可以把环境保护和经济效益有机地联系在一起,使钢铁企业能积极响应减排政策,增强企业的竞争能力;考虑副产煤气高效利用技术后,将系统中落后机组替换为超临界高效机组,降低了系统的经济运行成本和环保成本。该模型可以在兼顾经济和环境两方面的前提下,获取最佳的运行方案,不仅能够削减系统的运行成本和能源的消耗量,又可以减少环境污染。

**关键词: 煤气-蒸汽动力系统; 经济成本; 环保成本; 优化调度**

## ABSTRACT

At present, China's steel industry has high energy consumption and serious environmental pollution, and energy conservation is of great significance to achieve sustainable development in the steel industry. The optimization of the main energy sources in the gas and steam power system can effectively improve the efficiency of energy utilization and decrease the energy consumption. Gas, steam and electric power are the primary secondary sources of gas and steam in steel plants, Therefore, it is significant both in theory and practice to study the optimal allocation and utilization of the main energy in this system for saving energy and reducing consumption.

The structure of gas system and steam power system in iron and steel enterprises is analyzed. Based on this, Based on every device in the system, a multi-cycle mixed integer linear programming optimal scheduling model for gas steam power system is established (including boiler, steam turbine and cogeneration, etc.).

Secondly, using the actual production data of the gas-steam power system of a steel plant, the optimal scheduling model of the economical gas and steam power system is validated. The results indicate that the comparison between pre-and post-optimized operating cost is made, the operation cost after optimization is 18.31% lower than that before optimization. This model provides the optimal strategy of energy distribution for the gas-steam power system of iron and steel enterprises and reduces the operation cost of enterprises. In addition, this thesis explores the influence of energy price changes on the optimization results.

Finally, an optimal scheduling model of gas-steam power system based on economic and environmental objectives is proposed, which takes into account the high efficiency utilization of by-product gas and uses this model to optimize it. The results show that the introduction of environmental protection cost into the gas-steam power system will increase the operation cost of the whole system, but it can organically link the environmental protection and economic benefits together, so that the iron and steel enterprises can actively respond to the emission reduction policy and enhance the competitiveness of enterprises. After considering the high efficiency utilization technology of by-product gas, the backward unit in the system is replaced by supercritical efficient unit, which reduces the economic operation cost and environmental protection cost of the system. This model can obtain the best operation scheme on the premise of taking into account both economic and environmental aspects, which can not only reduce the operation cost and energy consumption of the system, but also reduce environmental pollution.

**Key Words: Gas-steam Power System, Economic Cost, Environmental Protection Costs, Optimized Scheduling**

# 目 录

1. 绪论.....	1
1.1 研究背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 本文研究内容和论文结构 .....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 论文框架.....	6
1.4 本章小节.....	7
2. 煤气-蒸汽动力系统多周期调度建模.....	8
2.1 煤气-蒸汽动力系统结构分析 .....	8
2.1.1 煤气系统.....	8
2.1.2 蒸汽动力系统.....	9
2.2 问题描述.....	10
2.3 参数定义.....	11
2.4 目标函数.....	12
2.5 约束条件.....	13
2.5.1 设备约束.....	13
2.5.2 供需约束.....	17
2.6 本章小结.....	17
3. 某钢铁企业煤气-蒸汽动力系统经济目标优化.....	18
3.1 实例概况.....	18
3.2 模型参数.....	18
3.3 模型输出结果.....	25
3.4 优化结果分析.....	28
3.5 敏感性分析.....	33
3.5.1 煤价对系统的影响.....	33
3.5.2 电价对系统的影响.....	36
3.6 本章小结.....	38
4. 考虑环保与经济目标的煤气-蒸汽动力系统优化.....	39
4.1 副产煤气高效利用技术.....	39
4.2 环保成本.....	41
4.2.1 污染物排放分析.....	41
4.2.2 环保成本计算.....	41
4.2.3 目标函数.....	43
4.3 模型输出结果.....	43

4.4 优化结果分析.....	45
4.5 本章小结.....	49
5. 结论与展望 .....	50
5.1 结论.....	50
5.2 展望.....	51
参考文献.....	52

# 1. 绪论

## 1.1 研究背景及研究意义

能源是促使人类得以存活以及发展的物质基石,是国家经济发展的一个重要组成部分。目前,能源的来源是煤炭、石油、天然气等矿物燃料,但是燃烧矿物燃料会产生二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳和烟尘,从而带来多种环境问题<sup>0</sup>。诸如,排放的二氧化硫被氧化成为三氧化硫,与水蒸气发生接触,从而容易形成硫酸雾<sup>0</sup>;大量的二氧化碳释放到大气中,这样会招致大气中的温室气体浓度飙升,从而致使温室效应更为严峻;尽管氮氧化物并非属于直接的温室气体,但其在大气中会与其他介质发生各种化学反应,以致于对臭氧层造成破坏,并且引发一系列环境问题<sup>0</sup>;同时也会导致空气中的微粒增多,微粒会从口鼻进入人体,对人体产生危害<sup>0</sup>。其次,化石燃料具有不可再生的特点,所以,消耗的能源越多,对人类的可持续发展也就越不利,随着我国经济社会秩序持续稳定发展,对能源的需求也越来越高,如今,人类正面临着两大问题,一是能源不足,二是环境污染<sup>0</sup>。图 1.1 是 2012-2021 年能源消耗结构图,从图中可以看出,近年来,我国能源消费构成的统计数字显示,煤炭消费量在逐年递减,到了 2018 年,其比重已低于 60%,且逐年递减。2012 年,清洁能源在能源消耗中所占比例为 14.5%,而到 2022 年,这一比例几乎为原来的两倍。但从整体上来看,在能源结构中还是以消耗煤炭为主,并且对油气的依赖程度较高<sup>0</sup>。所以,在探索新能源的同时,如何提高目前的能效,推动可持续发展,已成为业界与学术界的一个重要议题<sup>0</sup>。

我国矿产资源储量相对丰富,但由于人口多,人均能源占有率相对较低,能源开发困难,非常规能源勘探程度低,经济效益差,所以我国政府高度重视节能减排工作<sup>0</sup>。《完善能源消费强度和总量双控制度方案》是国家发展改革委在 2021 年颁发的,为“十四五”规划作出了具体的安排、工作原则和工作措施<sup>0</sup>。《方案》提出了到 2025 年实现能源双重控制、能源布局以及利用效率的通盘目标。至 2030 年,我国将循序渐进实现“双控”,继续减少能耗,合理地控制能耗,优化能源结构。至 2035 年,优化能源资源配置、全面节约制度日趋稳定和成熟,为我国碳排放量达到峰值后能够稳定下降提供了重要保障<sup>0</sup>。10 月 24 日,国务院发布了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,国务院 10 月 26 日印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》<sup>0</sup>。《意见》是我国政策体系的主要部分之一,其涉及党中央对于碳达峰以及碳中和的整体策略和通体安排。《方案》全面部署了碳达峰阶段。



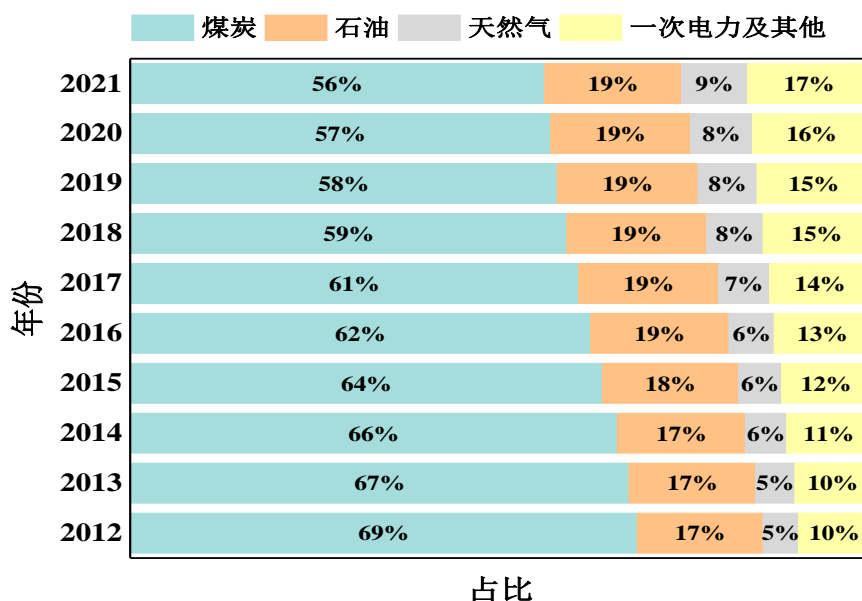


图 1.1 2012-2021 年能源消耗结构图

Fig. 1.1 Energy consumption structure chart from 2012 to 2021

钢铁工业是国家的一项重要基础工业，也是国家的国防工业。同时，我国冶金工业的发展水平也是衡量我国工业化程度的一个重要标志<sup>0</sup>。然而，钢铁行业虽然带动了国家的经济发展，但作为一个典型的资源消耗行业，它需要大量的原料、燃料，是国内能源消费最多的行业<sup>0</sup>。我国拥有大量的钢铁企业，但在国内的市场份额却很小，国内十大钢铁公司的粗钢产量只占到了全国的48%，行业的集中度也远没有达到世界平均水平，而且由于产能的分散，行业集中度也在逐年下降<sup>0</sup>。炼钢厂的能源消耗与主生产系统、煤气系统以及蒸汽动力系统的能源消耗特性相互影响<sup>0</sup>。煤是我国钢铁生产过程的重要能源载体，其主要形式有炼焦煤、喷吹煤、煤等。煤炭的利用与转换、二次能源的再利用是一个非常复杂的过程。企业节能减排的先决条件是了解其能耗结构和能耗结构，并通过技术手段达到降低设备、工艺路线和工艺水平的目的<sup>0</sup>。根据统计，中国每年的能源消耗量大约为15%，而钢铁行业的CO<sub>2</sub>排放量则超过了14%<sup>0</sup>。目前，我国钢铁行业的高能耗现象主要是由于三个原因<sup>0</sup>：首先，高炉是长流程钢厂的典型代表，高炉生产的主要是铁；再者，动力煤是钢铁生产过程的主要燃料；最后，钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中的二次能源利用率相对较低。目前的市场竞争越来越激烈，迫使各钢铁公司更加关注节能减排、强化节能控制。由于原料价格上涨，铁矿石进口成本高，环保检查日益严格<sup>0</sup>。因此，目前钢铁企业要想提高利润，必须寻求新的发展途径。在我国钢铁工业中，能耗是影响其成本与效益的主要因素<sup>0</sup>。与世界先进的钢铁公司比较，国内钢铁企业的单位吨钢能耗仍偏高。在新的历史

条件下,钢铁行业生产规模大,资源和环境问题日趋严重,为了遵循国家政策完成企业转型,必须要降低企业运行成本、提高机组效率、节约能源、减少污染物排放<sup>[9]</sup>。能源成本、能源利用效率已成为制约我国钢铁企业利润和可持续发展的重要因素。

我国钢铁企业目前存在着大量的二次能源,如煤气、蒸汽、电力等,这些都是钢铁企业的主要能源,在节约能源方面有着很大的发展空间,它们相互交织,形成了一个紧密的联系<sup>[9]</sup>。但目前我国大多数钢铁企业副产煤气利用率低下,导致大量的煤气被直接放散,不仅造成了环境污染,而且还造成了资源的浪费。换句话说,对这些二次能源的充分的、合理的循环利用,就相当于增加了钢材的产量,增加了企业的利润<sup>[9]</sup>。此外,从煤气-蒸汽动力系统的能源消耗分析,煤气、蒸汽、电力三种能量都是互相转化的,如果能够掌握三种能量的连接机制,以及三种能量的转化,就能将三种能量的互补和协同作用最大化。

然而,实现它们的最优分配并非易事,因为它涉及到许多生产单元、燃料锅炉、汽轮机以及热电联产机组,这使得蒸汽和电力之间的生产是相互制约的<sup>[9]</sup>。更重要的是,副产煤气的生成率和生产装置对副产煤气、蒸汽和电力的需求随时变化,增加了实现其最佳分配的复杂性<sup>[9]</sup>。因此,如何在不同的机组之间进行功率和蒸汽的分配,就变成了一个急需解决的难题。并且,由于在生产过程中会生成许多污染物,譬如氮氧化物、二氧化硫以及二氧化碳等。故而,为降低环境污染和提高能源利用效率,应采取切实有效的技术措施<sup>[9]</sup>。

总而言之,本文基于循环经济还有可持续发展的客观需要,建立了考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型,这对我们的理论和实际都有很大的帮助。

## 1.2 国内外研究现状

目前,我国钢铁企业对调度优化课题开展了更进一步的研讨,鉴于我国的能源形势越来越严峻;因此,我国钢铁企业对其进行了越来越多的关注<sup>[9]</sup>。钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化调度是针对系统中的各设备以及能源介质,其核心任务就是对系统中的各种能源进行优化分配,使得各能源能够有效互补,同时保证能源供应稳定,从而实现钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的运行成本、能源成本、环保成本等目标最优<sup>[9]</sup>。钢铁企业的能源煤气-蒸汽动力系统的优化调度有三种主要的建模方法,分别是数学规划法、启发式方法以及系统仿真方法<sup>[9]</sup>。数学规划法是目前最常用、也是最成熟的建立优化调度模型的方法之一,数学规划法主要有线性规划法、非线性规划法、混合整数规划法、整数规划法和动态规划法等<sup>[9]</sup>。该算法可以对优化调度问题建立准确的数学建模,并对优化调度问题进行求解。启发式算法是基于规则的排序是以某种调度规则或策略为基础的,它可以有效地

减少复杂的运算，并具有较高的实时性，但不能完全掌握全局<sup>0</sup>。仿真方法是建立实际生产模型，对实际的生产环境进行仿真分析，可以很好地解决理论上的难点，但是，仿真结果会随着模型的变化而变化<sup>0</sup>。本文，所建立的钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型没有考虑非线性因素，是一个包含整数变量的线性问题，因此使用了混合整数线性规划方法。

钢铁厂早期考虑能源问题的工作主要集中在未经优化的钢铁厂能耗、历史能效和节能潜力分析与评价的方法和模型的开发。在 2004 年，Yuen C K 等人<sup>0</sup>提出了一种基于 MILP 的多阶段 MILP 模型，该模型以最大的经济效益为目标。2007 年，Aguilar O 等人<sup>0</sup>制定了一个能源系统的基础架构，并对其进行了优化。2008 年，明德廷等人<sup>0</sup>分析、研究了煤气管网的网络结构，提出了煤气管网及其调度单元的数学模型。在此基础上，针对能耗较大的自备发电厂的生产特点，建立了热电联产系统中的多阶段联合循环经济调度模型。2010 年，Kong H 等人<sup>0</sup>提出了一种改进的多周期 MILP 模型，用于生产系统消耗可变副产气体的钢铁厂副产气体的优化分配。2011 年，张小雷等人<sup>0</sup>利用单一煤气供应很容易导致煤气超量放散这一事实，在煤气放散成本与煤气不充分损失成本总和最小的前提下，提出一种混合整数规划模型进行煤气混合优化分配。2016 年，夏新华等人<sup>0</sup>采用能量平衡和质量平衡，提出了以系统运行费用最少为优化目标的方法，同时兼顾了自备电厂的最大功率，以燃气调度为主导的高能耗自备电厂自发电的综合优化调度模型。2017 年，陈骏等人<sup>0</sup>创建了汽电耦合的多周期复合整数非线性规划模型（MINLP），以运行周期内能源消耗最少为目标，利用 LINGO 软件对其进行优化求解，得到全局最优解。这些研究主要是针对单一介质，特别是煤气优化调度方面的研究最多，虽然这些研究能够在一定程度上减少能源的消耗，改善相关的能源使用效率，但是对于整体能源系统而言，仅仅是实现了局部的最优，而不能充分发挥其转化的潜力。

近几年来，由于钢铁企业能源多，结构十分复杂，学者们从全局角度考虑，进行综合规划，强化多种能源介质的耦合和优化，从而形成了钢铁企业的多种能源协同调度方法<sup>0</sup>。在保证安全生产和能源供应稳定的情况下，将系统中的主要能源进行有效优化，通过能量转化，将各种能量的相辅相成和优化作用最大化<sup>0</sup>。2011 年，Zhang J 等人<sup>0</sup>提出了一种多周期 MILP 模型，用于钢铁厂同时优化副产煤气、蒸汽和电力的分配。2012 年，Ansari N 等人<sup>0</sup>开发了一个系统动态模型，用于评估伊朗钢铁行业未来 20 年在各种生产和出口场景下的能源消耗。2013 年，He F 等人<sup>0</sup>使用数据包络分析模型和生产率指数对 2001 - 2008 年中国钢铁行业的能源效率和产品变化进行了评估。2014 年，Lin B 等人<sup>0</sup>采用能源-经济协整法和情景分析法对 2020 年中国钢铁行业的节能潜力进行了估算。2014 年，李兵等人<sup>0</sup>建立了钢铁企业多种能源协同优化模型，对钢铁企业中三种主要能源的生产和消耗进行了耦合分析。2015 年，Zhao X 等人<sup>0</sup>指出了一种全新的综合性方法，

即生产与公共工程的耦合。2015 年, Zeng Y 等人<sup>0</sup>提出了考虑分时电价的钢铁厂蒸汽动力系统短期调度的广义多周期模型。2016 年, 曾亮等人<sup>0</sup>从总体优化与系统节能的观点出发, 提出了一种基于煤气、蒸汽以及电力的多介质、多周期混合优化调度的数学规划方法。2017 年, 郑忠等人<sup>0</sup>根据钢铁企业生产流程的特点, 提出了物料流和能量流协同的协同策略, 从优化信息监控、规划协同和调度三个方面进行了优化。2019 年, 梁青艳等人<sup>0</sup>基于能量流的网络化结构, 基于冶金过程工程的原理, 对能量流网络中主要工序节点的消耗回收模型和节点能耗模型进行了分析。这些研究为多能量介质协同优化问题的研究开辟了新的途径, 但目前还处在摸索阶段, 并没有在实际中得到较好的应用。

另外, 钢铁企业在生产过程中, 除了燃烧矿物燃料外, 还产生了大量的污染物。钢铁企业的煤气-蒸汽动力系统, 迫于燃烧许多的煤气和煤炭, 会排放大量的氮氧化物、二氧化碳和二氧化硫, 从而对环境造成一定的危害。在钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化调度研究中, 如何利用系统优化技术, 达到降低污染物排放的目的, 已成为国内外学者关注的焦点。

2013 年, Gibson C A 等人<sup>0</sup>在澳大利的碳排放定价的基础上, 对热电厂的设备选择和操作进行了优化。2016 年, 金侃<sup>0</sup>建立了环境设备的运营费用评估模型和主要影响因素的分析模型。同年, 张鹏飞<sup>0</sup>考虑到了  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  等主要污染物的排放量, 提出了考虑到能源系统的经济运行费用和污染费用的目标运行优化。2017 年, 邓煜<sup>0</sup>通过对试验数据的预处理, 采用 SVM 方法建立了全负荷工况下的脱硝效率的预测模型。2021 年, 文凯等人<sup>0</sup>从动态供需、分时电价、燃料结构等角度出发, 建立了包含上游工艺污染排放的多目标多周期混合整数优化模型。2022 年, 赵子潇<sup>0</sup>对燃煤电厂末端控制技术经济性进行量化分析, 并评价在较高的排放标准下所产生的控制费用。

早期, 目前已有学者将注意力集中在单一能量介质的最优分配上, 尽管这种方法可以在某种程度上减少能源的释放, 但仅仅是局部优化。目前的研究无法准确地反映出钢铁企业各装置的实际运行状态, 使得建立的模型无法与实际生产进行准确的联系。例如, 钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中, 锅炉、汽轮机等设备的负荷是随时间的变化而变化, 从而会导致机组的运行效率发生变化。此外, 钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中对污染物排放因素考虑较少, 还需在此方面进行大量研究。

本文综合考虑了环保成本及经济成本, 并且考虑了设备负荷及效率的关系, 准确地说明了系统中各设备地实际运行状况, 建立了钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的多周期混合整数线性规划模型。

## 1.3 本文研究内容和论文结构

### 1.3.1 研究内容

为了响应国家政策，实施可持续发展与实现循环经济的客观需求，以及考虑煤气、蒸汽和电力具备互相转换的特点，根据钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中各种能源介质的最优配置问题，并对系统进行了优化。根据国内外对煤气-蒸汽动力系统的研究理论及方法，和钢铁企业煤气-蒸汽动力系统目前的研究状况，全文的主要内容总结为以下三点：

(1) 分析了钢铁企业的煤气-蒸汽动力系统的结构，确定了煤气-蒸汽动力系统组成、结构和框架。描述了本文研究的钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化调度问题，设置了系统中的设备参数、目标函数和限制条件，本文对钢铁企业的煤气-蒸汽动力系统进行了优化设计。模型的目标是将总运行成本最小，将质量守恒、能量守恒、供需平衡、设备要求作为约束条件。目标是在保证能源供需稳定的前提下，在热电设备中，优化副产煤气、蒸汽和电力的分配，并对钢铁企业的主要设备进行了分析。

(2) 并以某钢厂的能源系统及实际的能量资料为例进行了实证研究。简述了该钢铁企业的具体情况以及模型中各设备的具体参数。利用 Lingo 软件对钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型进行计算求解，得到该系统中各时段三种能源在各设备中的具体优化策略。对优化调度结果进行分析，并且研究了煤炭价格以及购电价格对模型优化结果的影响。

(3) 将煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型中落后的机组替换为超临界高效机组，使得钢铁企业能进一步充分利用副产煤气，节能减排，解决环境污染。并且在钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的调度优化研究中，考虑环保成本，建立了考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型，通过 Lingo 软件实现对模型的计算求解，最后对模型的计算结果进行分析和讨论。

### 1.3.2 论文框架

按照论文的主要研究内容，即通过建立考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统优化调度问题的数学模型，对钢铁企业中的煤气、蒸汽、电力进行合理分配，实现降低能源成本，减少污染物排放的目标，确定了各章节的核心内容及其相互关系，并给出了相应的框架图，如图 1.2 所示。

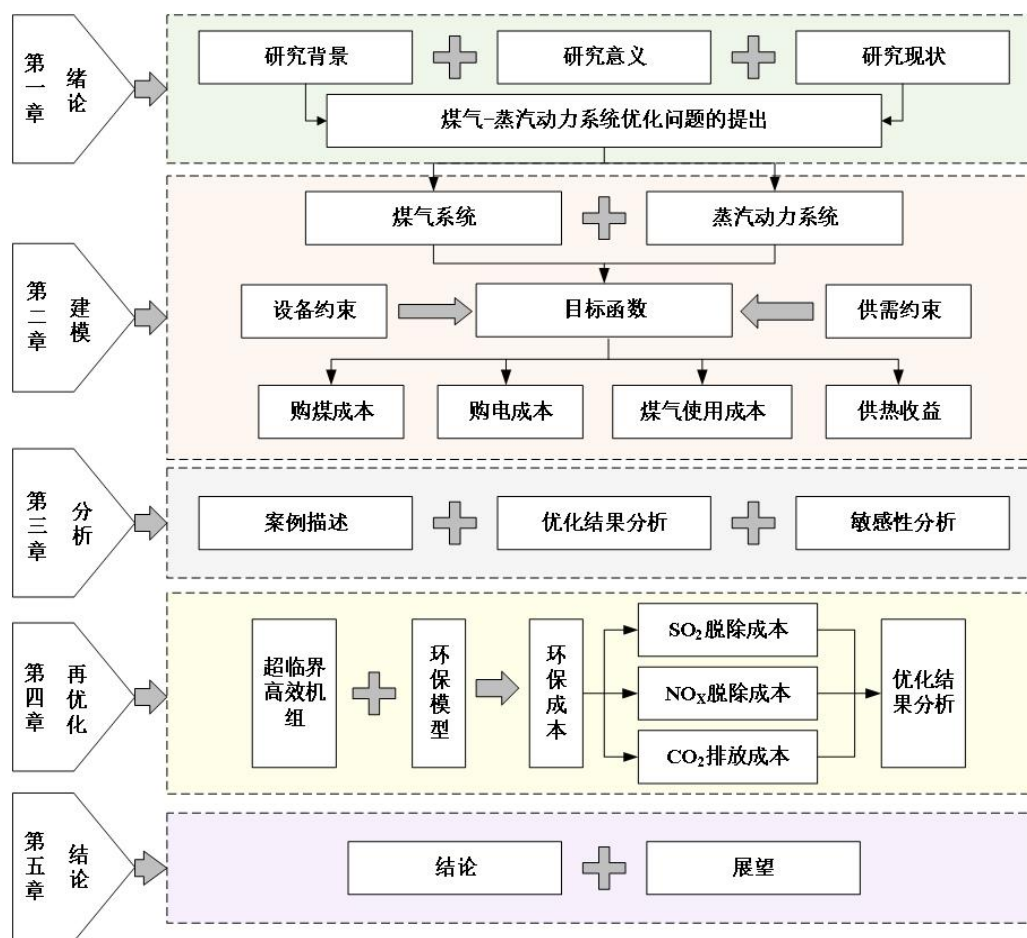


图 1.2 论文结构框图

Fig. 1.2 Thesis structure block diagram

## 1.4 本章小节

本章首先论述了钢铁企业的煤气-蒸汽动力系统调度优化问题的研究背景和研究意义，其次探究了钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的优化问题，对国内外的研究状况进行了回顾，并对论文的主要内容和结构进行了归纳。

## 2. 煤气-蒸汽动力系统多周期调度建模

优化调度是通过运用系统分析与优化技术，使其达到优化调度的目的和限制。采用该方法进行能源的调度优化，是节约能源、降低能源消耗的主要途径，并通过建立多周期的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型，能够有效地提高能源利用率，降低污染物排放。本章首先分析了钢铁企业煤气系统和蒸汽动力系统的组成结构；其次，对于煤气-蒸汽动力系统建立了一个多周期混合整数线性规划模型，在保证能源可以稳定供应以及安全生产的条件下，对钢铁企业的副产煤气、蒸汽以及电力进行优化分配，使得调度优化周期内系统总运行成本最小。

### 2.1 煤气-蒸汽动力系统结构分析

在钢铁生产中，除了消耗煤炭、燃料油、天然气等一次能源外，还产生了大量副产煤气、蒸汽、电力等二次能源，约占全国废热资源的一半，二次能源具有十分可观的开发利用价值。下面分别对煤气系统和蒸汽动力系统进行描述。

#### 2.1.1 煤气系统

在钢铁工业中，煤气系统是至关重要的一环，煤气管网、工艺阀门、除尘、气柜等都是其中重要的设备，这些设备贯穿煤气的生产、运输、分派、耗散等众多工序。对各个生产设备的副产煤气进行回收用是煤气系统的重要的作用之一，副产煤气有高炉煤气、焦炉煤气以及转炉煤气。焦炉煤气的热值较高，其热值范围在  $17000\text{--}19000\text{ kJ/Nm}^3$  之间，是钢铁企业炼焦过程中产生的，其组成成分复杂且都是可燃气体。高炉炼铁工序过程会生成高炉煤气，其具备成分繁杂、产值高的特点，不可燃气体约占气体总量的 70%，所以高炉煤气的热值比较低，其热值范围约在  $3000\text{--}3800\text{ kJ/Nm}^3$  之间。转炉炼钢工序过程会生成转炉煤气，一氧化碳的浓度会影响转炉煤气的热值，其热值范围在  $7000\text{--}8000\text{ kJ/Nm}^3$  之间。

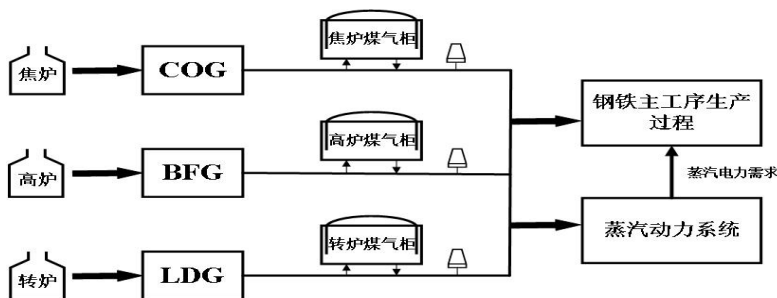


图 2.1 钢铁企业煤气系统示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of gas system of iron and steel enterprise

在煤气系统中，副产煤气被用作燃料，然后被输送到生产设备，剩余的副产煤气用于锅炉和热电联产机组（CHP）供热和发电，以满足生产所需要的蒸汽和电力，因此，它可以最大限度地利用副产品气体。由于煤气生产的变化很大，所以一般都是采用气柜来进行气量的调整，以保证燃气的正常运行。煤煤气系统示意图如图 2.1 所示。

### 2.1.2 蒸汽动力系统

蒸汽动力系统是过程式工业体系的主要部分，是连接二次能源和生产装置的“桥梁”，由热电部和蒸汽管网等组成，供应蒸汽动力的能源供应系统,主要装置有锅炉、汽轮机、凝汽机等。蒸汽动力系统以煤炭、副产煤气为燃料，当消耗燃料时释放能量，能量转化过程中产生的蒸汽和电力两种二次能源传输给生产装置。若电力过剩则售卖给电网，若电力不足则需要外购电力来满足生产装置需求。

蒸汽动力系统运行过程如图 2.2 所示。锅炉消耗副产煤气，利用生产装置产生的余热在余热回收装置中回收并利用余热将水转换成高压蒸汽；高压蒸汽进入蒸汽管网，部分蒸汽提供给汽轮机发电和抽汽生产所需要的中压、低压两种蒸汽。锅炉、汽轮机以及热电联产机组的剩余蒸汽和产生的电力提供给生产装置，来满足其热能需求。过剩的电力出售给电网获得额外利润，而电力不足以满足需求，则从电网购买电力，带来额外的能源成本。

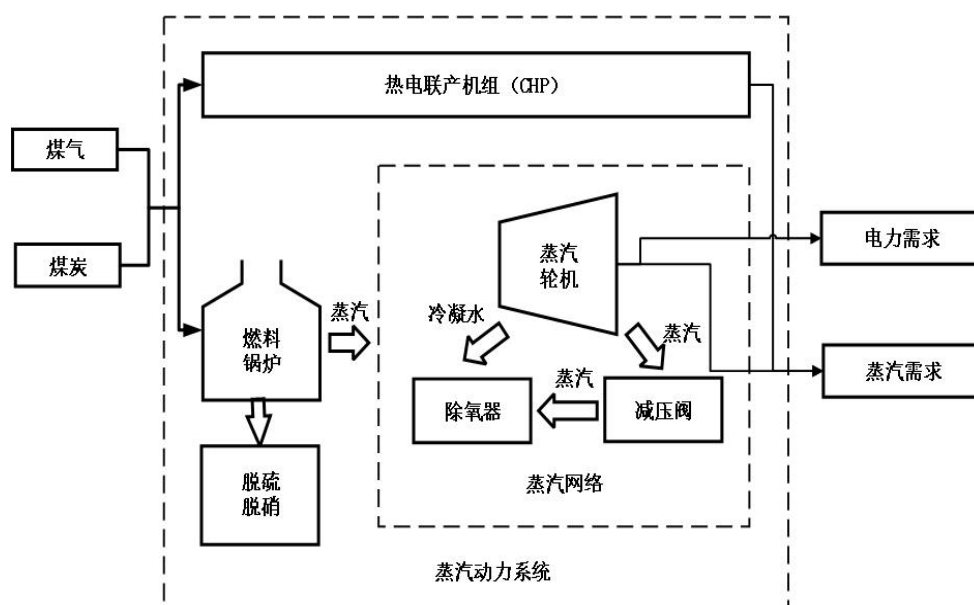


图 2.2 钢铁企业蒸汽动力系统示意图

Fig. 2.2 Schematic diagram of steam power system in iron and steel enterprise



## 2.2 问题描述

钢铁企业煤气-蒸汽动力系统调度优化问题，是针对某一特定时期内各等级蒸汽需求量、电力需求量和可用的副产气量，考虑到燃料价格、电价等因素对其综合运营成本的影响，以及满足钢铁企业的生产需求和安全稳定运行等因素情况下，使煤气系统和蒸汽动力系统间的能源进行充分转换，对系统能源进行优化分配制定最优运行策略，使得系统优化调度周期内的总运行成本最小。在优化问题中，通常使用数学规划法进行优化。数学规划法是一种理想的简化假设，为解决实际问题建立数学模型提供方法，将所优化的问题描述为目标函数和约束条件，从而利用此方法求解数学模型的到全局最优解。因此，煤气-蒸汽动力系统调度优化问题可以选择运用数学规划的方法，将调度目标总运行成本设立为目标函数，将生产过程各设备要求和能源供给需求等当作约束条件，求解模型找到满足约束的最优运行策略。

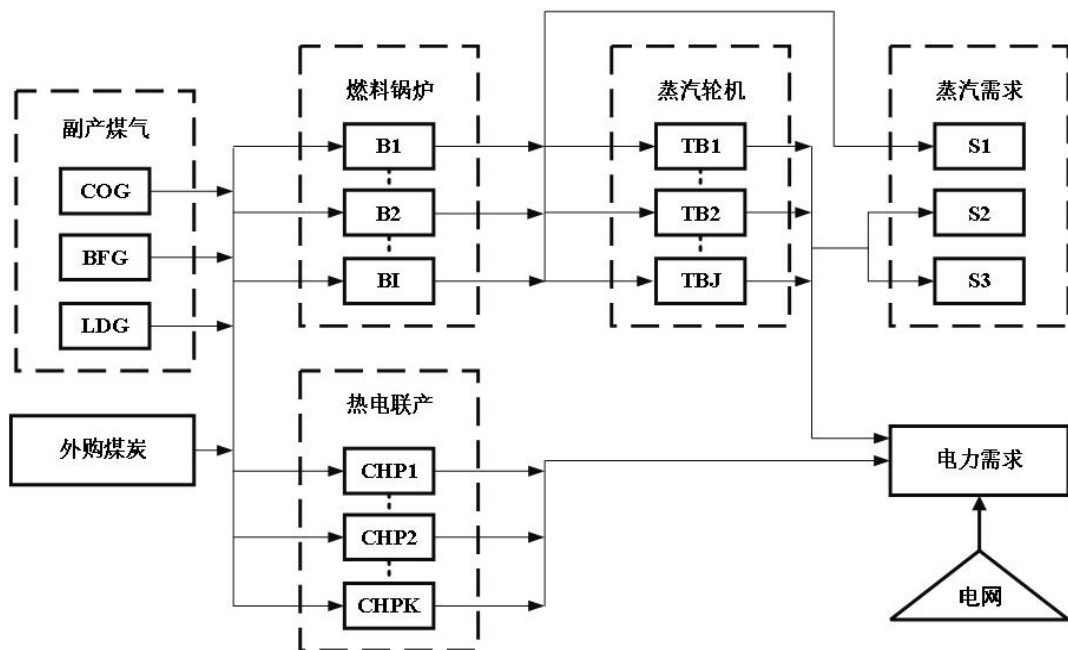


图 2.3 煤气-蒸汽动力系统优化调度模型简图

Fig. 2.3 Schematic diagram of optimal dispatching model for gas-steam power system

根据上述问题描述，钢铁企业煤气-蒸汽动力系统调度优化问题可通过图 2.3 进行表达。系统含燃料锅炉、汽轮机、热电联产机组（CHP）等。副产煤气以及煤炭等能源可作为燃料用于燃料锅炉和一些生产装置。副产煤气来自焦炉、高炉、转炉等部分生产装置，例如煤炭、电力等其它能源从外部购买。如果能够产生生产需求外过剩的电力，多余的电力则被卖给电网以获得额外的利润，

而不足的电力被购买从电网引入额外的能源成本。

但实际钢铁生产过程不是静态的，而是一个连续变化的过程，副产煤气量和蒸汽以及电力需求量都是动态变化的。不过数学规划法是对某一个时间段优化的最优结果，因此，在使用数学规划法建立数学模型的时候，需要将钢铁生产过程分为多个时段，从而对连续多个时段进行优化求解，从而完成对一个动态问题的优化。

通常用于求解调度模型的求解器有 LINGO、CPLEX、Curobi 等，其中 LINGO 求解器模型表述简单，更加易于建模和理解，并且可以同时利用多个 CPU 内核来进行快速建模；此外，LINGO 提供了广泛的数据选项，可以直接从数据库和表格中导入数据和保存数据，更易于求解。因此，本文使用 LINGO 求解器对煤气-蒸汽动力系统多周期优化调度模型进行建模和计算求解。

## 2.3 参数定义

表 2.1 模型符号列表

Tab. 2.1 List of the model symbols

符号	含义
$t$	优化周期, $t=1,2,\dots,T$
$u$	生产装置编号
$i$	锅炉编号
$q$	不同种类燃料编号
$j$	汽轮机编号
$k$	热电联产机组编号
$r$	不同等级蒸汽编号

表 2.2 模型参数列表

Tab. 2.2 List of the model parameter

参数	含义	单位
$\tau_t$	优化周期 $t$ 的时间长度	h
$\eta_i$	锅炉的热效率	%
$HV_q$	不同种类燃料热值	$\text{kJ/Nm}^3$
$H_r^{stm}$	不同等级蒸汽焓值	$\text{kJ/kg}$
$H^H$	给水焓值	$\text{kJ/kg}$

$\eta_j$	汽轮机热效率	%
$P_{jt}$	汽轮机发电功率	MW
$H_j^{exh}$	汽轮机排汽焓值	kJ/kg
$HC^p$	电量	kWh
$\eta_k$	热电联产机组热效率	%
$P_{kt}$	热电联产机组发电功率	MW
$F_{iqt}$	各时段锅炉不同燃料消耗量	kNm <sup>3</sup> /h
$F_{irt}$	各时段锅炉产生不同等级蒸汽量	t/h
$F_{jrt}^{in}$	不同时段汽轮机入口蒸汽量	t/h
$F_{jrt}^{out}$	不同时段汽轮机出口蒸汽量	t/h
$F_{jt}^{exh}$	各时段汽轮机排汽量	t/h
$F_{krt}$	各时段热电联产机组产生蒸汽量	t/h
$F_{kqt}$	各时段热电联产机组不同燃料消耗量	kNm <sup>3</sup> /h

## 2.4 目标函数

总体而言,钢铁企业优化调度的目标主要囊括为以下几个方面:第一,是保证钢铁企业生产过程中的能源供需。优化调度的前提是应该保证钢铁企业能满足稳定的能源供应,保证生产装置正常运行。第二,是经济目标。钢铁企业应提高企业的经济效益,充分利用二次能源来满足钢铁企业对蒸汽和电力的需求,使得降低外购能源成本,提高钢铁企业经济效益。第三,是环保目标。钢铁行业是一种典型的资源密集型行业,它需要大量的原料、燃料和能源,对钢铁企业优化调度应该将二次能源充分利用,从而降低能源消耗和环境污染。这三个目标是钢铁企业调度优化通常考虑的目标,实际上,钢铁企业可量体裁衣制定符合企业实际情况的目标,以准确调控能源。

在副产煤气过剩的情况下,主要工艺中符合设计用户的副产煤气使用要求,目标是经济运行成本和环保成本最小,也就是总运行成本最小。为了实现上述最佳目标,避免过度决策,将能源供需设置为限制性条件,可以计算出该数学模型的系统最低的运行成本。

本文研究的钢铁企业煤气-蒸汽动力系统在生产装置供需稳定的前提下,应选择经济目标作为调度优化的目标,首先建立考虑经济目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型。且为了减少变量,将能源供需设置为约束条件,设立以各时段运行阶段总运行成本最少为目标的数学模型。总运行成本涵盖了煤炭采购成本、煤气使用成本、电力采购成本以及供热收益。总运行成本计算由公式 2.1 表

示。

$$TOC = C_{coal} + C_{electricity} - C_{heating} \quad (2.1)$$

$$C_{coal} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (C_q \cdot F_{iqt} \cdot \tau_t) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (C_q \cdot F_{kqt} \cdot \tau_t) \quad (2.2)$$

$$C_{electricity} = \sum_{t=1}^T (C_t^{exp} \times P_t^{exp} \times \tau_t) - \sum_{t=1}^T (C_t^{imp} \times P_t^{imp} \times \tau_t) \quad (2.3)$$

$$C_{heating} = \sum_{t=1}^T \sum_{q \in Q_g} (C_h \cdot F_{irt} \cdot HV_q \cdot \tau_t) \quad (2.4)$$

其中，煤炭采购成本、煤气使用成本、电力采购成本以及供热收益由式(2.2) - (2.4)表示。

## 2.5 约束条件

根据钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的特点，模型需要满足一定的约束条件。在建立系统数学模型时，将约束条件分为设备约束以及供需约束。

### 2.5.1 设备约束

为了保证生产的稳定和安全，钢铁企业的各种生产设备、转换设备和消耗设备都有相应的额定工况。

#### 2.5.1.1 燃料锅炉

钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中，主要采用动力煤、高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气等作为锅炉的燃料。燃料锅炉通常用于通过将燃料或燃料混合物燃烧释放热量经转化，生产水和蒸汽以满足钢厂的生产和发电需要。图2.4为典型锅炉的能流图，为使锅炉的模型更加合理，需要考虑质量平衡约束、能量平衡约束、锅炉产汽量约束以及煤气量约束。

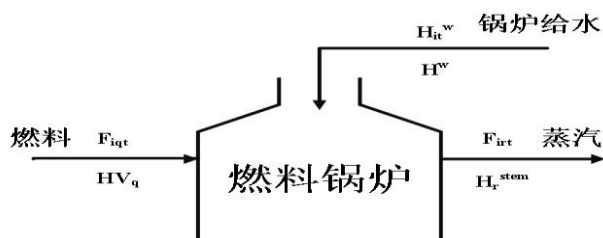


图 2.4 典型锅炉的能流图

Fig. 2.4 Energy flow diagram of a typical boiler

## 1) 燃料锅炉质量平衡约束

燃料锅炉每个时段的出口蒸汽总量与其给水总量相等。该约束由式 2.5 所表示。

$$\sum_r (F_{irt} \cdot \tau_t) = F_{it}^w \cdot \tau_t \quad \forall i, t \quad (2.5)$$

## 2) 燃料锅炉能量平衡 (煤气转化为蒸汽)

$$\sum_{r=1}^R (F_{irt} \cdot \tau_t \cdot H_r^{stm}) - F_{it}^w \cdot H^w \cdot \tau_t = \eta_i \cdot \left[ \sum_{q=1}^Q (F_{iqt} \cdot \tau_t) \right] \quad \forall i \notin I_k, t \quad (2.6)$$

## 3) 产汽量约束

燃料锅炉产生的不同等级的蒸汽产量必须在一定上下限范围内。该约束由不等式 2.7 所表示。

$$F_{ir}^{\min} \leq F_{irt} \leq F_{ir}^{\max} \quad \forall i \notin I_k, r, t \quad (2.7)$$

## 4) 煤气量约束

当煤气转为蒸汽时, 燃料锅炉入口副产煤气流量不应超过锅炉能承担的上限。该约束由不等式 2.8 所表示。

$$F_{iqt} \leq F_{iq}^{\max} \quad \forall i \notin I_k, q \in Q^g \quad (2.8)$$

## 5) 热值约束

钢铁企业煤气-蒸汽动力系统通常使用混合煤气作为燃料, 因此在燃烧混合煤气时, 混合煤气总热值必须满足燃料锅炉对煤气要求的最低热值, 使得锅炉能够正常运行。该约束由不等式 2.9 所表示。

$$\sum_{q \in Q^g} (F_{iqt} \cdot \tau_t \cdot HV_q) \geq \left[ \sum_{q \in Q^g} (F_{iqt} \cdot \tau_t) \right] \cdot HV_i^{\min} \quad \forall i \notin I_k, t \quad (2.9)$$

其次, 锅炉的热效率主要取决于其设计尺寸和实际运行负荷。燃料供应量以及蒸汽负荷的变化使得锅炉负荷会偏离设计工况。因此约束条件还需考虑不同工况下锅炉效率的变化, 即锅炉效率与小时热量之间的关系。

## 2.5.1.2 汽轮机

在钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中, 配备不同类型的汽轮机, 汽轮机主要可以分为三类: 背压式汽轮机、凝汽式汽轮机和抽汽式汽轮机。其中, (1) 背压式汽轮机排出的蒸汽超过大气压, 可以用来提供热力或提供电力, 其产生的电力与热负荷有关, 因此背压式汽轮机无法同时供热和供电。背压式汽轮机用作供电接替电厂的中压和低压锅炉的时候, 这样既可以增加发电量, 又可以改善热效率。

背压式汽轮机一般与凝汽式汽轮机并行工作，其电力来自于凝汽式汽轮机，以满足系统的需要。(2) 而凝汽式汽轮机，在蒸气膨胀的过程中，将所有的热量都集中在凝汽器上凝结成水。排气在凝结过程中，体积大幅减小，使得汽轮机降低排气压力，使汽轮机热效率得到改善。(3) 抽汽式汽轮机将高压蒸汽膨胀做功成中、低压蒸汽。从中抽出的蒸汽称为抽汽，可用于满足工业用汽要求，抽气汽轮机既能提供电力又能供热。抽汽式汽轮机可分为抽凝式汽轮机和抽汽背压式汽轮机。抽凝式汽轮机的末级蒸汽被称为排汽，由于排汽的焓值低，通常在锅炉中冷凝作为给水使用。

图 2.5 表示典型汽轮机的能流图，在建立合理的汽轮机模型时，应考虑质量平衡约束、能量平衡约束以及发电量约束。

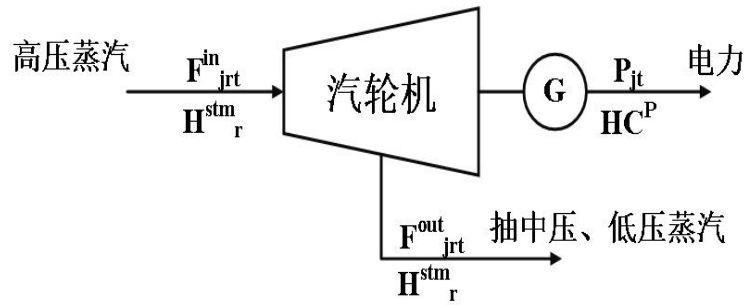


图 2.5 典型汽轮机的能流图

Fig. 2.5 Energy flow diagram of a typical turbine

### 1) 汽轮机质量平衡约束

在每一个时段内，汽轮机的出汽量应该等于它的进汽量。应该注意的是，对于背压式汽轮机来说，没有向冷凝器排放蒸汽，此时汽轮机排气量为零；对于凝汽式汽轮机来说，所有的蒸汽都流入了凝汽器，因此汽轮机出口流量为零。该约束由式 2.10 所示。

$$\sum_r (F_{jrt}^{in} \cdot \tau_t) = \sum_r (F_{jrt}^{out} \cdot \tau_t) + F_{jt}^{exh} \cdot \tau_t \quad \forall j, t \quad (2.10)$$

### 2) 汽轮机能量平衡（蒸汽转化为电力）

$$P_{j,t} \cdot \tau_t \cdot HC^P = \eta_j \cdot \left[ \sum_{r=1}^R (F_{jrt}^{in} \cdot \tau_t \cdot H_r^{stm}) - \sum_{r=1}^R (F_{jrt}^{out} \cdot \tau_t \cdot H_r^{stm}) - F_{jt}^{exh} \cdot \tau_t \cdot H_j^{exh} \right] \quad \forall j, t \quad (2.11)$$

### 3) 发电功率约束

汽轮机的发电功率必须在一定上下限范围内。该约束由不等式 2.12 所表示。

$$P_j^{\min} \leq P_{jt} \leq P_j^{\max} \quad \forall j, t \quad (2.12)$$

### 2.5.1.3 热电联产机组

典型的热电联产机组包括燃料锅炉、热回收锅炉、汽轮机、燃气轮机和其他热回收和蒸汽产生装置。热电联产机组将发电产生的热量用于工业制造，以最大限度地利用能源。由于传统发电机的效率仅为 30% 左右，近 70% 的燃料能转化为无用的热量，该机组可以重复利用工业中 30% 的热能。近年来，人们对热电联产装置的建模进行了大量的研究。虽然这些模型可以跟踪热电联产机组中每个部件的不同运行模式，但它们过于复杂，无法用于调度优化。模型中引入了热电联产机组中发电功率与发电热效率的特性曲线。根据目标企业的运行数据，建立了发电热效率的二次拟合曲线。在建立合理的热电联产机组模型时，应考虑能量平衡约束、煤气量约束、燃料热值约束以及发电功率约束。

#### 1) 热电联产机组能量平衡约束

$$P_{kt} \cdot \tau_t \cdot HC^P + \sum_{r=1}^R (F_{krt} \cdot \tau_t \cdot H_r^{stm} - F_{krt} \cdot \tau_t \cdot H^H) = \eta_k \cdot \left[ \sum_{i \in I_k} \sum_{q=1}^Q (F_{iqt} \cdot \tau_t \cdot HV_q) \right] \quad \forall k, t \quad (2.13)$$

#### 2) 煤气量约束

在每个时段内，向热电联产机组供应的副产煤气总量应在一定的下限和上限范围内。该约束由不等式 2.14 所表示。

$$F_{kq}^{\min} \cdot \tau_t \leq \left( \sum_{i \in I_k} F_{iqt} \right) \cdot \tau_t \leq F_{kq}^{\max} \cdot \tau_t \quad \forall k, t, q \in Q^g \quad (2.14)$$

#### 3) 发电功率约束

热电联产机组的发电功率必须在一定上下限范围内。该约束由不等式 2.15 所表示。

$$P_k^{\min} \leq P_{kt} \leq P_k^{\max} \quad \forall k, t \quad (2.15)$$

#### 4) 热值约束

混合煤气总热值必须满足热电联产机组对煤气要求的最低热值，使得机组能够正常运行。该约束由不等式 2.16 所表示。

$$\sum_{i \in I_k} \sum_{q \in Q^g} (F_{iqt} \cdot \tau_t \cdot HV_q) \geq HV_k^{\min} \cdot \left[ \sum_{i \in I_k} \sum_{q \in Q^g} (F_{iqt} \cdot \tau_t) \right] \quad \forall k, t \quad (2.16)$$

### 2.5.2 供需约束

钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中，副产煤气、蒸汽以及电力的需求因时间而异，只有满足钢铁企业生产需求的情况下，才能保证能源的最佳利用。

#### 1) 副产煤气供需平衡

每个时段锅炉和热电联产机组的煤气消耗总量应等于副产煤气供应量，副产煤气主要有焦炉煤气、高炉煤气以及转炉煤气。该约束由 2.17 所示。

$$\sum_{q \in Q^g} (F_{igt} \cdot \tau_t \cdot HV_q) = D_{qt}^{dem} \quad \forall q, t \quad (2.17)$$

#### 2) 蒸汽供需平衡

每个时段锅炉和热电联产机组长生的不同等级的蒸汽总量应和生产装置以及汽轮机蒸汽需求量相等。该约束由式 2.18 所示。

$$\sum_{i \in I_k} (F_{irt} \cdot \tau_t) + \sum_{k=1}^K (F_{krt} \cdot \tau_t) + \left[ \sum_{j=1}^J (F_{jrt}^{out} \cdot \tau_t) - \sum_{j=1}^J (F_{jrt}^{in} \cdot \tau_t) \right] = D_{rt}^{dem} \quad \forall r, t \quad (2.18)$$

#### 3) 电力供需平衡

发电机组（即汽轮机以及热电联产）的总发电量必须满足各时段生产机组的用电需求。该约束由式 2.19 所示。

$$\sum_{j=1}^J (P_{jt} \cdot \tau_t) + \sum_{k=1}^K (P_{kt} \cdot \tau_t) + P_t^{imp} = P_t^{dem} + P_t^{exp} \quad \forall t \quad (2.19)$$

## 2.6 本章小结

本章建立了钢铁企业煤气-蒸汽动力了系统调度优化数学模型。首先，分析了钢铁企业煤气系统及蒸汽动力系统的结构及建立数学模型的理论 and 优化方法。其次，对钢铁企业煤气-蒸汽动力系统调度优化问题进行描述，建立了钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的数学模型。其中，模型包括参数定义、目标函数以及约束条件，模型还囊括了钢铁企业煤气-蒸汽动力系统各种主要设备的参数。



### 3. 某钢铁企业煤气-蒸汽动力系统经济目标优化

钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的调度优化研究，最佳的生产运行策略可以直接影响钢铁企业的经济效益。本章利用已建立的考虑经济目标的煤气-蒸汽动力系统调度优化数学模型，可以提高能源效率，减少能源浪费，增加节能空间。调度优化模型在保证能源可以稳定供应以及安全生产的条件下，以经济运行为目标，对钢铁企业的副产煤气、蒸汽以及电力进行优化分配，使得调度优化周期内系统总运行成本最小。

#### 3.1 实例概况

根据钢铁企业的煤气系统和蒸汽动力系统的结构及特点，建立了钢铁企业考虑经济目标的煤气-蒸汽动力系统优化调度模型，现将该模型运用到国内某大型钢铁企业。

该企业能源系统分为动力厂 A 和动力厂 B，动力厂 A 包括 2 台 220t/h 煤气、煤粉混烧 9.8MPa 高温高压锅炉（B1 和 B2），2 台 220t/h 纯烧煤气 9.8MPa 高温高压锅炉（B3 和 B4），并且配套 2 台 25MW 前置发电机组（TB1 和 TB2）以及 2 台 25MW 纯凝机组（TB3 和 TB4）；2 台 75t/h 纯烧煤气 3.4MPa 锅炉（B5 和 B6）；2 台 220t/h 煤气、煤粉混烧 9.8MPa 高温高压锅炉（B7 和 B8），配套 1 台 25MW 纯凝发电机组（TB5）和 1 台 25MW 背压机组（TB6）。关于 B7 和 B8 两台锅炉，非采暖季节运行 1 台锅炉纯烧煤气锅炉（B7 或 B8）和 25MW 纯凝发电机组运行；采暖季节，运行 1 台锅炉混烧（B7 或 B8）和 25MW 背压机组运行，发电并供热。动力厂 B 由三台热电联产机组（CHP1-CHP3）组成。锅炉能生产出高、中压蒸汽，并利用减温减压器和汽轮机把高、中压蒸汽降低到中低压。

#### 3.2 模型参数

该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统主要以高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、煤为主要原料。其燃料热值由表 3.1 所示。

表 3.1 燃料热值

Tab. 3.1 Calorific value of fuel

燃料	BFG	COG	DLG	COAL
热值（kJ/Nm <sup>3</sup> ）	3560	17900	7200	20908.28

表 3.2 为该企业煤气-蒸汽动力系统中产生高压蒸汽、中压蒸汽以及低压蒸汽的焓值。

表 3.2 蒸汽焓值

Tab. 3.2 Steam enthalpy

蒸汽	高压蒸汽 S1	中压蒸汽 S2	低压蒸汽 S3	锅炉给水
焓值 (kJ/kg)	3450	3232	2990	105.38

表 3.3 是该钢铁企业锅炉消耗煤气流量的范围以及锅炉的产汽能力。

表 3.3 锅炉参数

Tab. 3.3 The boiler parameters

参数	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
BFG (kNm <sup>3</sup> /h)	0~30	0~30	0~400	0~400	—	—	—	—
COG (kNm <sup>3</sup> /h)	0~25	0~25	0~20	0~20	—	—	—	—
蒸汽 (t/h)	0~220	0~220	0~200	0~220	0~75	0~75	0~200	0~200

表 3.4 是该钢铁企业汽轮机发电功率及产汽范围。

表 3.4 汽轮机参数

Tab. 3.4 Steam turbine parameters

参数	TB1	TB2	TB3	TB4	TB5	TB6
电力 (MW)	0~25	0~25	0~25	0~25	0~25	0~25
中压蒸汽 S2 (t/h)	—	—	0~250	0~250	—	—
低压蒸汽 S3 (t/h)	—	—	0~170	0~170	—	—
效率 (%)	96	96	96	96	96	96

将整个优化过程 12 个月划分为 6 个周期，表 3.5 为每个周期的具体时间长度。本文在 MILP 模型中引入了锅炉和热电联产机组的效率特性曲线。锅炉在实际使用中的运行状况是非常复杂的，往往会偏离设计工作条件，而设计单位和生产厂家通常仅给出额定的设计效率。同一机组的实际热效率常常与设计值有很大差异，而实际工作条件的改变会对其热效率有很大的影响，所以该模型的变工况特性必须通过实算得出。根据该企业的运行数据，利用锅炉负荷与锅炉效率的关系拟合成线性方程，建立了锅炉效率和热电联产机组发电效率的二次拟合曲线。图 3.1-3.4 为该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的锅炉效率与小时热量之间的关系，即锅炉效率的拟合曲线。

表 3.5 各周期时间长度

Tab. 3.5 Length of each period

周期	1	2	3	4	5	6
时间长度 (h)	1416	1464	1464	1464	1464	1488

其中图 3.1 为 220t/h 煤气、煤炭混烧锅炉（B1、B2）的小时热量和锅炉热效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.1 所示。

$$\eta_1 = 8.71594 \times 10^{(-6)} \times x_1^2 - 0.00113 \times x_1 + 87.52475 \quad (3.1)$$

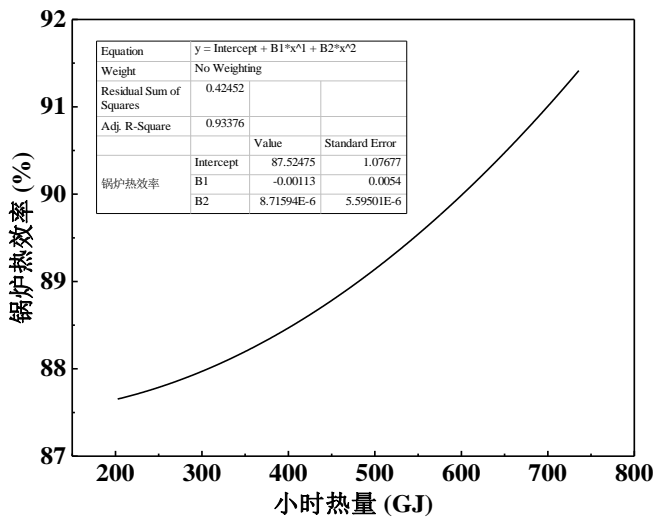


图 3.1 220t/h 燃煤锅炉（B1、B2）效率与小时热量的关系

Fig. 3.1 Relationship between efficiency and heat of 220t/h boiler

图 3.2 为 220t/h 纯烧煤气锅炉（B3、B4）的小时热量和锅炉热效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.2 所示。

$$\eta_2 = (-1.4436) \times 10^{(-6)} \times x_2^2 + 0.01505 \times x_2 + 81.10937 \quad (3.2)$$

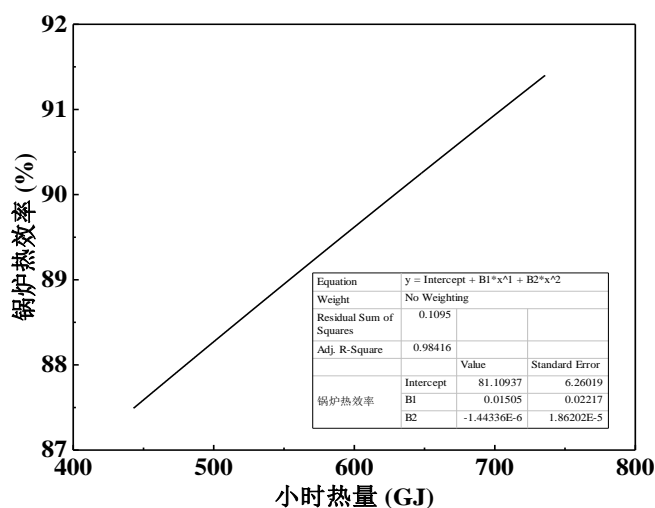


图 3.2 220t/h 燃气锅炉（B3、B4）效率与小时热量的关系

Fig. 3.2 Relationship between efficiency and heat of 220t/h boiler

图 3.3 为 75t/h 纯烧煤气锅炉（B5、B6）的小时热量和锅炉热效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.3 所示。

$$\eta_3 = 4.54478 \times 10^{(-5)} \times x_3^2 + 0.00533 \times x_3 + 87.64906 \quad (3.3)$$

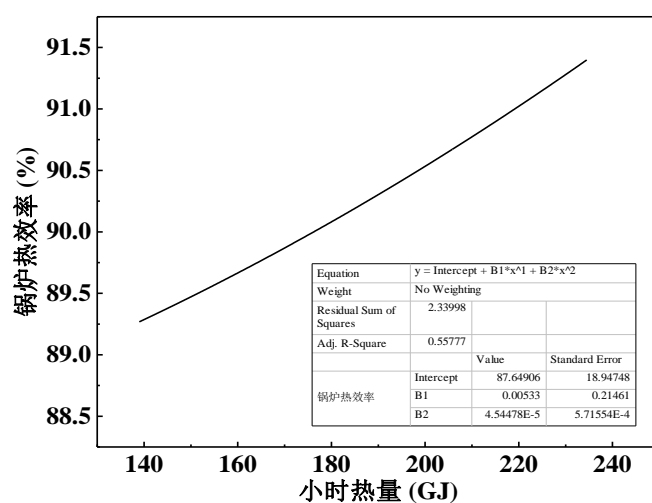


图 3.3 75t/h 燃气锅炉（B5、B6）效率与小时热量的关系

Fig. 3.3 Relationship between efficiency and heat of 75t/h boiler

图 3.4 为 220t/h 煤气、煤炭混烧锅炉（B7、B8）的效率拟合曲线，拟合公式如式 3.4 所示。

$$\eta_4 = (-2.1654) \times 10^{(-5)} \times x_4^2 + 0.03727 \times x_4 + 75.69966 \quad (3.4)$$

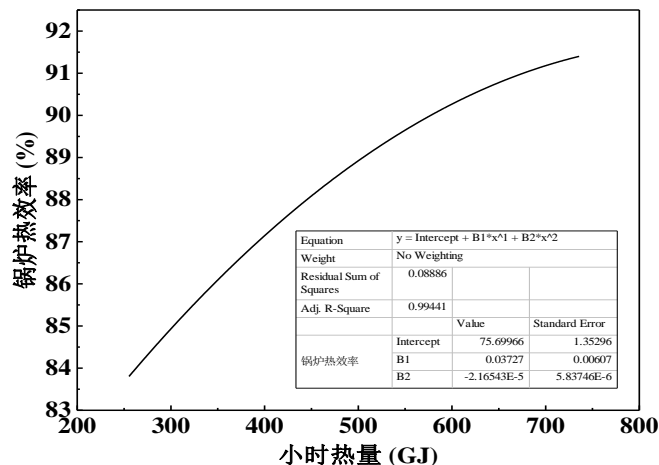


图 3.4 220t/h 燃煤锅炉（B7、B8）效率与小时热量的关系

Fig. 3.4 Relationship between efficiency and heat of 220t/h boiler

动力厂 B 的三台热电联产机组（CHP1-CHP3）的平均负荷和发电效率的关系，即热电联产机组发电效率的拟合曲线，分别由图 3.5-3.7 所示。其中图 3.5 为热电联产机组 CHP1 平均负荷和发电效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.5 所示。

$$\eta_5 = 0.00497 \times x_5^2 - 0.63492 \times x_5 + 47.33058 \quad (3.5)$$

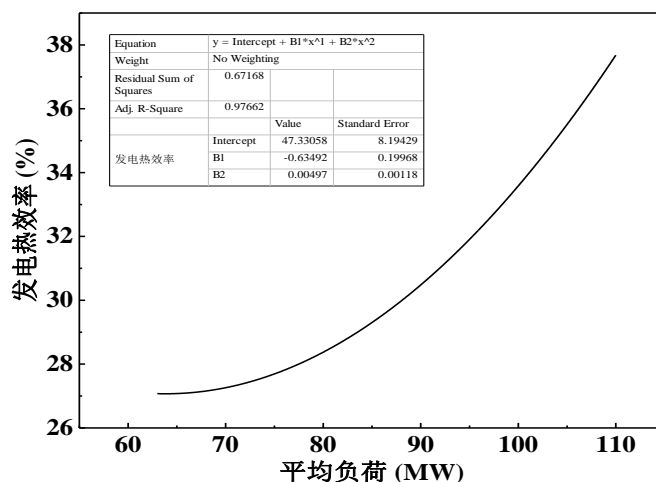


图 3.5 CHP1 机组平均负荷与发电效率的关系

Fig. 3.5 Relationship between average load and generation efficiency of CHP1 unit

图 3.6 为热电联产机组 CHP2 平均负荷和发电效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.6 所示。

$$\eta_6 = (-0.00307) \times x_6^2 + 0.6867 \times x_6 - 0.78552 \quad (3.6)$$

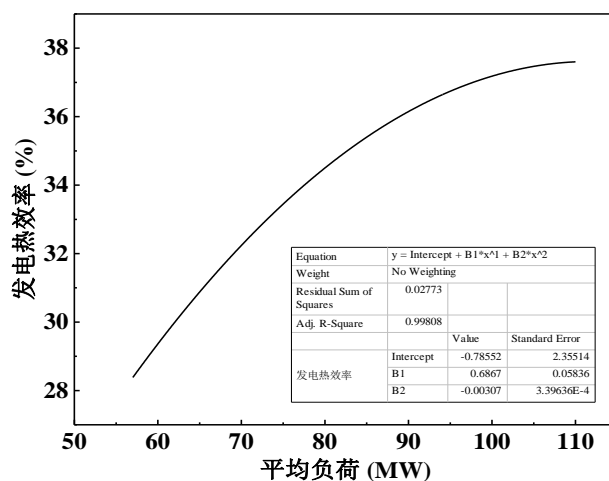


图 3.6 CHP2 机组平均负荷与发电效率的关系

Fig. 3.6 Relationship between average load and generation efficiency of CHP2 unit

图 3.7 为热电联产机组 CHP3 平均负荷和发电效率的拟合曲线，拟合公式如式 3.7 所示。

$$\eta_7 = 7.53162 \times x_7^2 - 0.00313 \times x_7 + 26.18751 \quad (3.7)$$

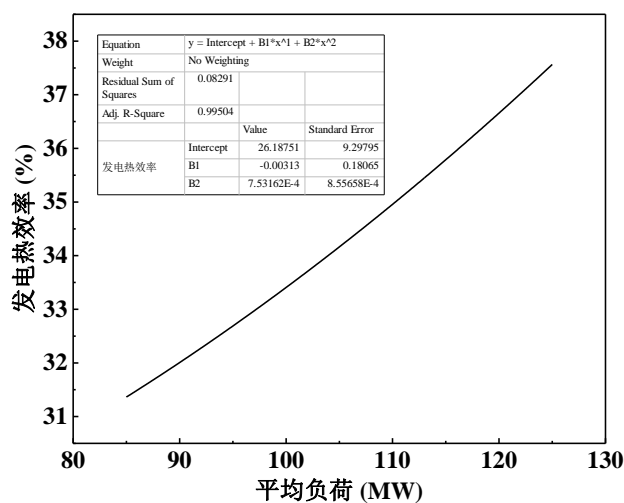


图 3.7 CHP3 机组平均负荷与发电效率的关系

Fig. 3.7 Relationship between average load and generation efficiency of CHP3 unit

表 3.6 是该企业煤气-蒸汽动力系统中所涉及几种能源的价格包括煤炭价格、煤气价格、外购电力价格、出售电力价格以及供热收益。考虑到煤气的使用价值,本文设置了煤气的价格。并且在优化调度过程中,若副产煤气不能产生足够的蒸汽和电力提供给生产工序,则应购买煤炭,通过燃烧煤炭提供给生产工序足够的蒸汽和电力,或外购电量以满足需求,此时应考虑煤炭及外购电量的成本;反之,若燃烧副产煤气产生的电量足以满足生产工序的需求,则可以将剩余的电力出售给电网,因此本文还考虑了电力出售成本;此外,还考虑了供热收益。

表 3.6 各类能源价格

Tab. 3.6 Energy prices of all types

项目	价格
煤炭 (元/t)	670
BFG (元/GJ)	18
COG (元/GJ)	105
LDG (元/GJ)	22
电力购买 (元/kWh)	0.50
电力出售 (元/kWh)	0.20
供热 (元/GJ)	52

表 3.7 各时段副产煤气量以及蒸汽和电力的需求量

Tab. 3.7 By-production of gas and demand for steam and electricity during each period

周期	BFG (GJ/h)	COG (GJ/h)	LDG (GJ/h)	S2 (t/h)	S3 (t/h)	电力 MW
T1	948.80	1003.40	582.69	339.70	337.35	474.05
T2	1135.00	1037.25	535.89	358.70	92.30	407.26
T3	1085.80	1086.45	535.89	346.30	98.35	498.87
T4	1085.80	1086.45	535.89	295.40	104.75	476.95
T5	872.20	1080.00	582.69	357.15	186.90	519.79
T6	940.98	1011.22	582.69	410.10	358.50	545.99

表 3.7 是该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统优化调度模型中,各时段副产煤气量以及蒸汽和电力需求量。其中,副产煤气量是指满足生产工序后,煤气-蒸汽动力系统的副产煤气消耗量;蒸汽和电力需求量则是指钢铁生产过程中所需要蒸汽

和电力的量，也就是煤气-蒸汽动力系统中的各个设备所要产生的电力以及蒸汽量，假若热电设备产生的电力无法满足生产工序需求，还需加上从电网购买的电量。本文将以上该钢铁企业一年的运行数据当作煤气-蒸汽动力系统调度优化模型的输入数据，利用模型求解，从而得到调度优化时段内的最优运行策略。

### 3.3 模型输出结果

将上一节的 6 个时段所需的能源需求量和各个设备的参数作为输入数据输入优化调度模型中，并且利用 LINGO 软件对模型编程求解。该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统优化调度模型中将 12 个月优化时间划分为 6 个连续生产周期的多周期调度优化模型，其中包含 140 个约束、110 个变量以及 19 个二元变量，计算环境为 Windows10 操作系统，2.40GHz Intel(R) Core(TM)i5-6200U 的处理器，运行时间为 15 分钟左右。该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的调度优化结果由表 3.8-3.15 表示。

表 3.8 优化前后各项运行成本对比

Tab. 3.8 Comparison of operation costs before and after optimization

项目	优化前（万元）	优化后（万元）
煤炭采购成本	36206.60	70670.07
BFG 使用成本	15950.57	15950.57
COG 使用成本	96665.92	96665.92
LDG 使用成本	10777.38	10777.38
外购电力成本	119855.22	50845.64
供热收益	78441.20	78441.20
总运行成本	203776.37	166468.38

表 3.8 详述了该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统优化前后的煤炭采购成本、高炉煤气使用成本、焦炉煤气使用成本、转炉煤气使用成本、外购电力成本、供热收益以及总运行成本。

表 3.9 表述了 2 台混烧煤气、煤粉锅炉（B1、B2）中各个周期高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气以及动力煤四种燃料的具体分配；和 2 台纯烧煤气锅炉（B3、B4）各个周期高炉煤气、焦炉煤气及转炉煤气的具体分配。其中副产煤气的单位为  $\text{km}^3/\text{h}$ ；动力煤的单位为  $\text{t/h}$ 。

表 3.10 表述了 2 台纯烧煤气锅炉（B5、B6）中各个周期高炉煤气、焦炉煤



气及转炉煤气三种燃料的具体分配。表 3.11 为 2 台混烧煤气、煤粉锅炉（B7、B8）各个周期四种燃料的具体分配。表 3.12 为 3 台热电联产机组（CHP1、CHP2、CHP3）各个周期高炉煤气、焦炉煤气以及动力煤的具体分配，3 台机组的燃料均没有转炉煤气。

表 3.13 阐述了该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统内 8 台锅炉优化后各个周期的产汽量。系统中汽轮机和热电联产机组优化后各个周期的发电量以及外购电量由表 3.14 表示。其中锅炉产汽量的单位为 t/h；发电量及外购电量的单位为 MW。基于实际运行数据对锅炉和热电联产机组效率的特性方程，得到各时段锅炉和热电联产机组效率如表 3.15 所示。

表 3.9 220t/h 锅炉（B1-B4）各类燃料分配

Tab. 3.9 (B1-B4) Boiler fuel distribution

周期	B1				B2				B3			B4		
	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG	BFG	COG	LDG
T1	30.00	0	80.93	5.52	0	0	0	33.70	0	0	0	0	0	0
T2	30.00	0	69.84	0	30.00	15.21	0	20.37	0	0	0	0	0	0
T3	30.00	16.98	0	18.85	30.00	6.35	49.63	0.84	0	0	0	0	0	0
T4	30.00	0	74.43	2.46	30.00	22.70	0	13.97	0	0	0	0	0	0
T5	0	0	80.93	8.60	0	22.34	0	19.38	0	0	0	0	0	0
T6	0	0	0	38.50	0	0	19.99	31.62	0	0	0	68.33	0	31.27

表 3.10 75t/h 燃气锅炉（B5-B6）各类燃料分配

Tab. 3.10 (B5-B6) Boiler fuel distribution

周期	B5			B6		
	BFG	COG	LDG	BFG	COG	LDG
T1	18.50	10.65	0	18.50	10.65	0
T2	18.71	8.76	4.59	0	0	0
T3	0	4.36	24.80	0	0	0
T4	0	0	0	0	0	0
T5	0	0	0	0	0	0
T6	18.50	10.65	0	0	2.40	29.67

表 3.11 220t/h 锅炉（B7-B8）各类燃料分配

Tab. 3.11 (B7-B8) Boiler fuel distribution

周期	B7				B8			
	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG	煤
T1	0	0	0	0	0	0	0	31.36
T2	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T3	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T4	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T5	0	0	0	0	0	0	0	31.36
T6	0	0	0	0	0	0	0	31.36

表 3.12 热电联产机组各类燃料分配

Tab. 3.12 Fuel distribution of CHP units

周期	CHP1			CHP2		CHP3		
	BFG	COG	煤	BFG	COG	BFG	COG	煤
T1	0	0	50.34	121.09	34.75	78.43	0	43.94
T2	15.00	0	47.78	145.10	29.97	80.00	4.00	40.25
T3	15.00	0	47.78	150.00	29.00	80.00	4.00	40.25
T4	15.00	5.00	43.50	150.00	29.00	80.00	4.00	40.25
T5	15.00	5.00	43.50	150.00	29.00	80.00	4.00	40.25
T6	0	0	50.34	97.49	39.44	80.00	4.00	40.25

表 3.13 锅炉产汽量

Tab. 3.13 Steam production of the boiler

周期	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
T1	220.00	190.29	0	0	75.00	75.00	0	176.76
T2	163.14	220.00	0	0	75.00	0	0	112.86
T3	220.00	159.16	0	0	75.00	0	0	112.86
T4	187.29	220.00	0	0	0	0	0	112.86
T5	207.29	220.00	0	0	0	0	0	176.76
T6	220.00	220.00	0	121.84	75.00	75.00	0	176.76

表 3.14 各机组发电量及外购电量

Tab. 3.14 Power generation and purchased power of each unit

周期	CHP1	CHP2	CHP3	TB1	TB2	TB3	TB4	TB5	TB6	外购电量
T1	110.00	110.00	125.00	25.00	0	21.73	0	0	25.00	120.70
T2	110.00	110.00	125.00	25.00	0	15.86	0	25.00	0	59.27
T3	110.00	110.00	125.00	25.00	0	16.70	0	25.00	0	150.11
T4	110.00	110.00	125.00	25.00	0	16.46	0	25.00	0	128.41
T5	110.00	110.00	125.00	25.00	0	14.44	0	0	25.00	173.10
T6	110.00	110.00	125.00	25.00	0	22.18	14.52	0	25.00	178.93

表 3.15 各时段锅炉和热电联产机组效率

Tab. 3.15 Efficiency of boiler and CHP units

周期	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B8	CHP1	CHP2	CHP3
T1	91.41	91.41	81.11	88.49	91.40	91.40	90.17	37.63	37.60	37.56
T2	91.11	91.41	81.11	81.11	91.40	91.40	86.68	37.63	37.60	37.56
T3	91.41	91.41	81.11	81.11	91.40	91.40	86.68	37.63	37.60	37.56
T4	91.41	90.05	81.11	81.11	91.40	91.40	86.68	37.63	37.60	37.56
T5	90.70	91.41	81.11	81.11	91.40	91.40	90.17	37.63	37.60	37.56
T6	91.41	91.41	88.10	88.10	91.40	91.40	90.17	37.63	37.60	37.56

### 3.4 优化结果分析

本节将通过以下两个方面对该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的经济目标的调度优化模型的计算结果进行详细的分析和讨论：第一，煤气-蒸汽动力系统中副产煤气、蒸汽和电力三种能源的调度优化进行分析，具体分析和讨论各设备中能源分配情况，得到能源优化的策略；第二，对比并分析优化前后煤炭采购成本、副产煤气使用成本、外购电力成本、供热收益以及总运行成本的变化。

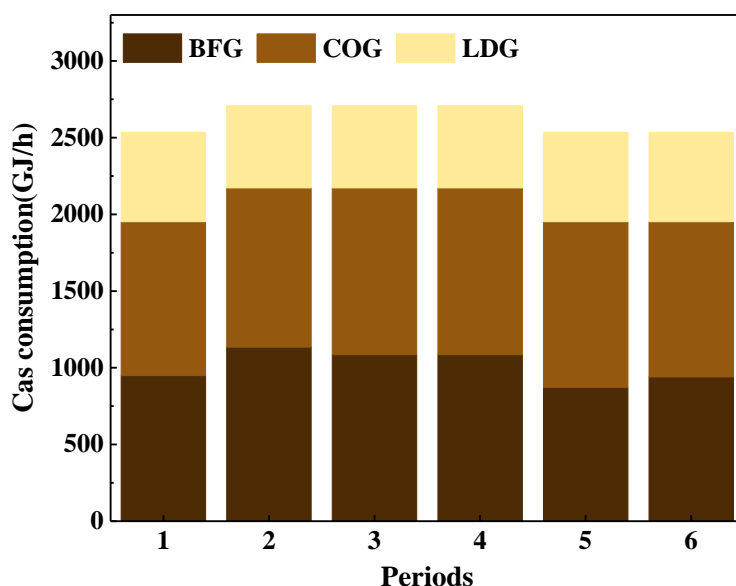


图 3.8 系统副产煤气消耗量

Fig. 3.8 Byproduct gas consumption of the system

首先, 对该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中的三种主要能源 (副产煤气、蒸汽和电力) 的调度优化进行分析。图 3.8 为系统各时段副产煤气的消耗量, 可以看出, 高炉该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中高炉煤气和焦炉煤气消耗量较多, 并且各时期高炉煤气、焦炉煤气以及转炉煤气的变化幅度不大。高炉煤气的具体分配情况如图 3.9 (a) 所示, 燃烧高炉煤气的机组主要有动力厂 A 的锅炉 B1、B2、B5 还有动力厂 B 三台热电联产机组, 其中 CHP2 机组的高炉煤气消耗量最大, 其次是 CHP3 机组。焦炉煤气的具体分配情况如图 3.9 (b) 所示, CHP2 机组焦炉煤气消耗量最大。煤炭的具体分配情况如图 3.10 所示, 混烧煤气、煤炭的机组均燃烧煤炭, 其中仅有锅炉 B7 和 B8 只燃烧煤炭。由此可知, 由于 CHP2 机组的燃料只有副产煤气来产生电力, 所以三台热电联产机组中 CHP2 机组的高炉煤气和焦炉煤气消耗量最多; 而热电联产机组的煤气和煤炭的消耗量均比锅炉消耗量高, 则是因为热电联产的发电量均高于锅炉, 系统优先选择发电量高的机组发电。另外, 可以观察到, 副产煤气在不同时段下略有波动, 这是因为模型的副产煤气分配原则是优先分配副产煤气供给效率高的机组, 使其生产蒸汽。可以看出, 8 台锅炉中, B1 和 B2 两台锅炉的总燃料消耗量最多, 是由于锅炉 B1 和 B2 的平均效率高于其他锅炉, 锅炉平均效率分别为 90.82% 和 90.90% 锅炉。

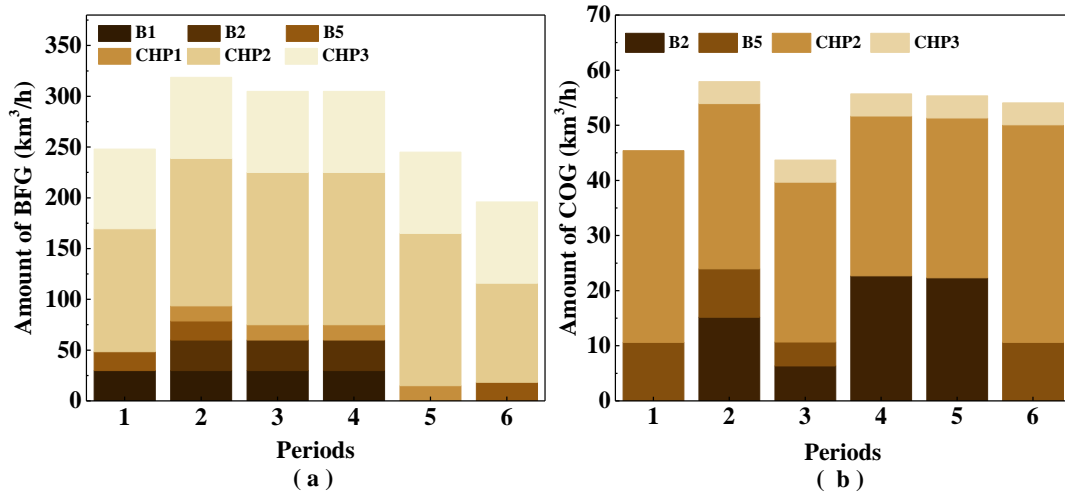


图 3.9 各设备高炉煤气及焦炉煤气的优化分配：（a）BFG；（b）COG

Fig. 3.9 The optimal distribution of BFG and COG in units: (a) BFG; (b) COG

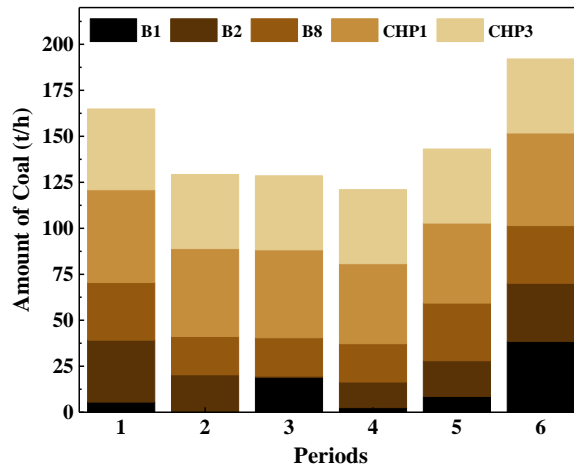


图 3.10 锅炉和热电联产机组煤的优化分配

Fig. 3.10 The optimal distribution of Coal in boilers and CHP units

锅炉和汽轮机产汽速率如图 3.11 (a)、(b)、(c) 所示，可以看出，高压蒸汽 S1 主要由锅炉 B1 和 B2 以及锅炉 B8 产生，锅炉平均产汽量分别为 202.95t/h、204.90 t/h 和 144.81 t/h，并且，在 TB1 和 TB5 中，高压蒸汽主要用于生产中压蒸汽 S2、低压蒸汽 S3 以及发电。中压蒸汽 S2 由两台锅炉 B5 和 B6 以及背压式汽轮机 TB1 产生，TB1 在各时段产生中压蒸汽 S2 的速率较为稳定，而两台 75t/h 锅炉（B5 和 B6）的效率较低，各时段的产汽量也较不稳定。两台 75t/h 锅炉 B5 和 B6 的平均产汽量均分别为 50 t/h 和 25 t/h，汽轮机 TB1 平均排汽量分别为 379.16 t/h，故中压蒸汽 S2 主要由 TB1 产生，且主要用于纯凝机组 TB3 和 TB4 产生低压蒸汽 S3 以及发电。低压蒸汽 S3 由纯凝机组 TB3、TB5 以及 TB6 产生，

汽轮机平均排气量分别为 79.59 t/h、26.43 t/h 和 88.38 t/h，低压蒸汽 S1 主要由纯凝机组 TB2 和 TB6 产生。另外，锅炉 B1 和 B2 负荷趋近于满负荷来生产蒸汽，表明模型的蒸汽优化分配原则是优先使用产汽效率高的设备进行产汽为系统稳定提供蒸汽来源。

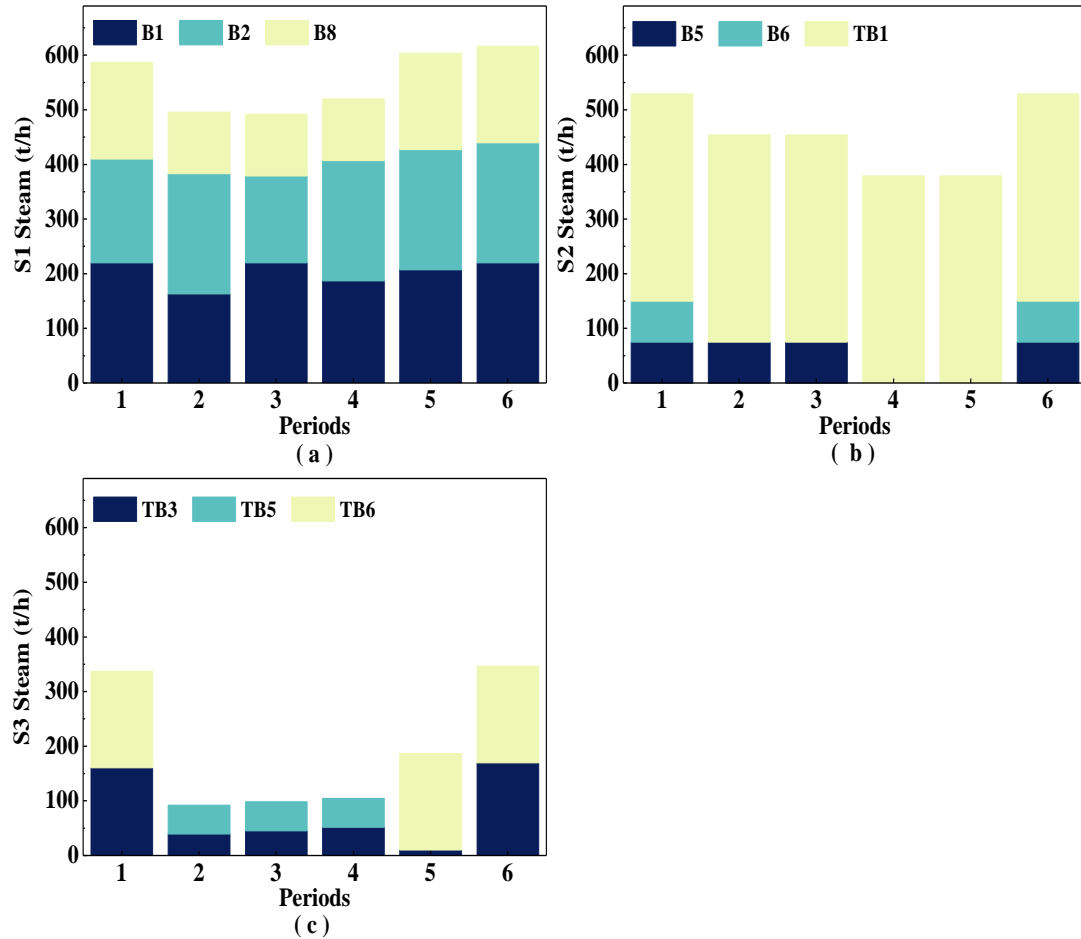


图 3.11 锅炉和汽轮机产汽速率：（a）S1；（b）S2；（c）S3

Fig. 3.11 Optimal steam generation rates from boilers and turbines: (a) S1; (b) S2; (c) S3

各时段的电力需求和最佳发电量如图 3.12 所示。可以发现，模型中用于发电的设备有热电联产机组以及汽轮机两种设备，且三台热电联产机组（CHP1-CHP3）、TB1、TB5 以及 TB6 三台机组均为满负荷运行，但各时段自发电量均小于系统的电力需求，需要外购电量满足需求，且各个时段各设备的发电量基本一致。这表明，模型的优化原则是优先使用效率高的设备发电和尽可能多的自发电满足需求。优化后自发电量为 3638504.46MWh，供电量为 3084389.58MWh，外购电量为 1185104.81MWh，供电量较优化前增加了 687285.19MWh，外购电力成本也因此降低了 69009.58 万元。

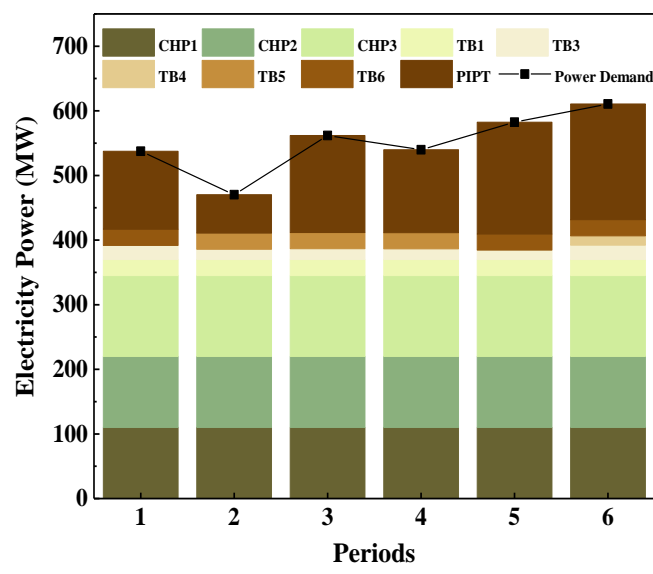


图 3.12 各发电机组电力需求和最佳发电率

Fig. 3.12 Optimal electricity generation rates and electricity demand

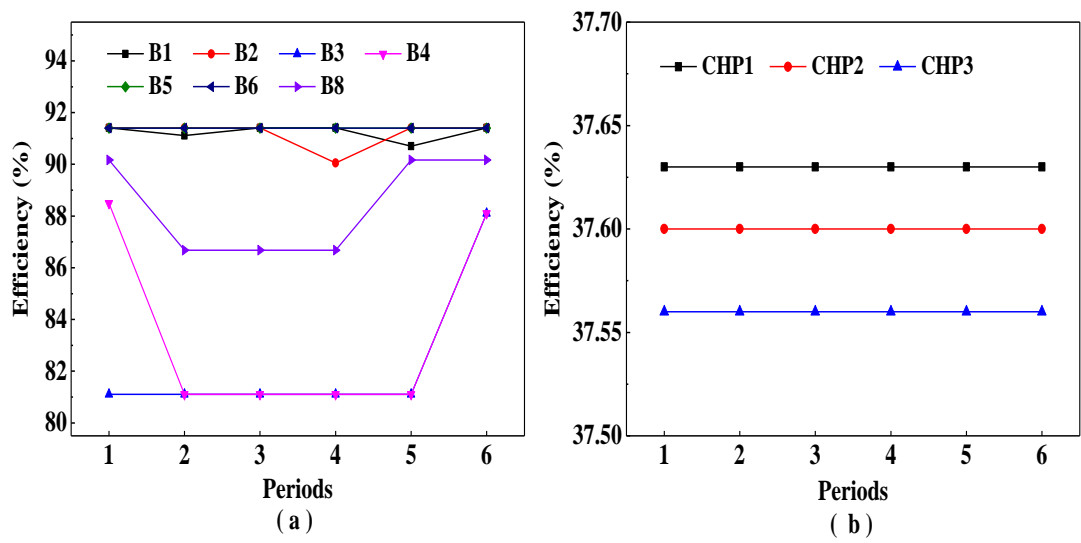


图 3.13 锅炉和热电联产机组效率：（a）锅炉效率；（b）热电联产效率

Fig. 3.13 Efficiency of boilers and CHP units: (a) Efficiency of boilers ; (b) Efficiency of CHP

为了优化调度模型更接近实际生产过程，根据该企业的运行数据，建立了锅炉和热电联产机组效率的二次拟合曲线。锅炉和热电联产的最佳效率如图3.13（a）、（b）。锅炉B1、B2以及B5的平均效率较高，效率分别是90.82%、90.90%和90.15%。优先考虑这三台锅炉，可以减少整体燃料的使用，使系统燃料效率最大化。另外，由于配备的汽轮机有背压式汽轮机，锅炉产生的蒸汽全部用于满足

需求。这就导致了锅炉蒸汽流量产生变化,进而也会影响锅炉效率。

其次,在系统电力和蒸汽需求量一定的条件下,对系统进行优化调度,整体性对优化结果展开分析。由表 3.8 中可知,该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统副产煤气的使用成本和供热成本不变,这是因为系统需求量不变。且优化前后均没有多余的电力出售给电网,故而优化前后电力出售成本均为零。此外,还可以看出,优化前后对比最为明显的是外购电力成本和煤炭采购成本。优化前,系统未考虑煤气-蒸汽动力系统中能源的综合优化,且系统产生的电力远不足生产装置所需的电力,为满足需求全部从电网购买,故而外购电力成本过高。优化后,综合考虑了煤气-蒸汽动力系统中副产煤气、蒸汽和电力的优化,以副产煤气为燃料,充分发挥其生产蒸汽的作用,再通过发电机组产生电力,使得系统没有多余的副产煤气放散并且使系统产生更多的电力来满足生产装置的需求。所以,外购电量削减,外购电量成本也有所缩减,外购电力成本由优化前 119855.22 万元减少为 50845.64 万元,减少了 69009.58 万元。为了满足系统的电力需求,模型选择购买更多的动力煤作为燃料提供给锅炉,使其产生更多的蒸汽用来发电,因此,煤炭采购成本有所增加,煤炭采购成本由优化前 36206.6 万元增加到 70670.07 万元,较优化前增加了 34463.47 万元。优化后系统的总运行成本降低了,总运行成本由优化前 203776.37 万元减少为 166468.38 万元,降低了 37307.99 万元,和优化前相比降低了 18.31%,调度优化效果明显。

通过以上论述,利用多周期混合整数规划方法,建立了以经济成本为目标的钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的调度优化模型,进一步验证了系统对能源的优化调度至关重要,并且能切实有效的节约能源成本和降低企业的运行成本。

### 3.5 敏感性分析

能源交易价格是影响能源交易总量的重要参数。因此,有必要对能源价格变化的影响进行评估。本节讨论了煤炭价格以及电价对所建立的煤气-蒸汽动力系统优化调度模型的影响。

#### 3.5.1 煤价对系统的影响

由上述优化结果可知,该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统仅靠副产煤气作为燃料无法满足系统的蒸汽以及电力需求,因此在整个优化周期内,各时段均需要外购煤炭及外购电力来满足系统自身需求,保证系统能够稳定运行。实际上,煤的价格会根据市场情况而变动,从而影响模型的优化结果。为探究煤价变动对模型优化结果的影响,在其余参数不变的情况下,分别设置煤价为 300 元/t、400 元/t、500 元/t、600 元/t、700 元/t、800 元/t、900 元/t、1000 元/t 时,对优化调度模型进行计算求解。



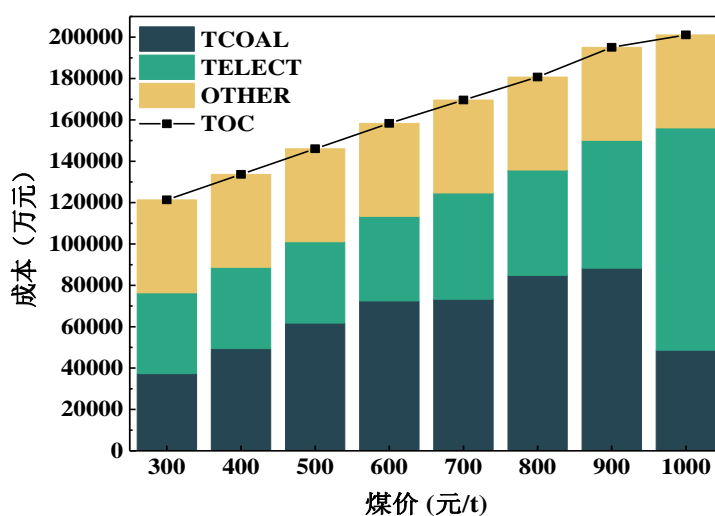


图 3.14 煤价与各项成本的关系

Fig. 3.14 Efficiency of boilers and CHP units

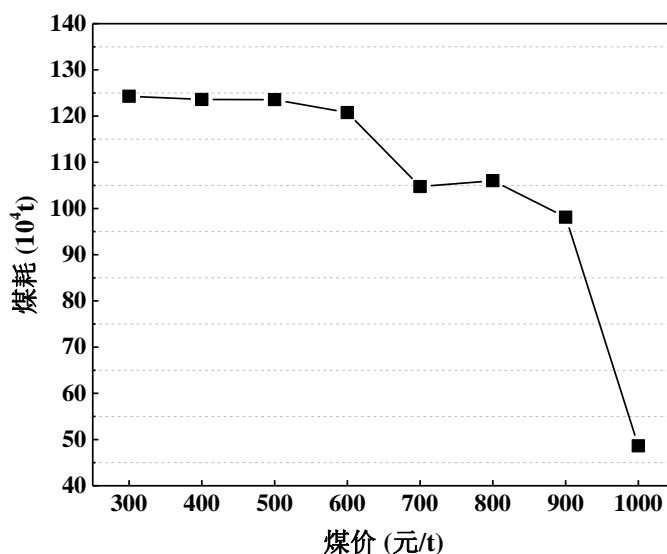


图 3.15 煤价与煤耗的关系

Fig. 3.15 Efficiency of boilers and CHP unit

图 3.14 为各项能源成本及总运行成本随购煤价格变化的情况。由图可知，总运行成本涵盖了购煤成本、购电成本以及其他成本构成。其中，其他成本涵盖副产煤气使用成本以及供热收益，由于系统的副产煤气消耗量以及供热量一定，故其他成本保持不变。从图中不难看出，随着煤炭价格的增高，总运行成本也随之增加；当煤价超过 900 元/t 时，购电成本大幅增加，且超过煤炭购买成本。从图 3.15 煤价变化与煤耗的关系中可知，煤炭价格增高时，煤炭的消耗量随之减

少，且当煤价超过 900 元/t 时，煤耗大幅减少。这就说明当煤炭价格增大时，模型选择适当的减少消耗煤炭，当煤炭价格过高甚至高于购电价格时，而模型则是通过购买电力的方式来实现系统的电力需求。

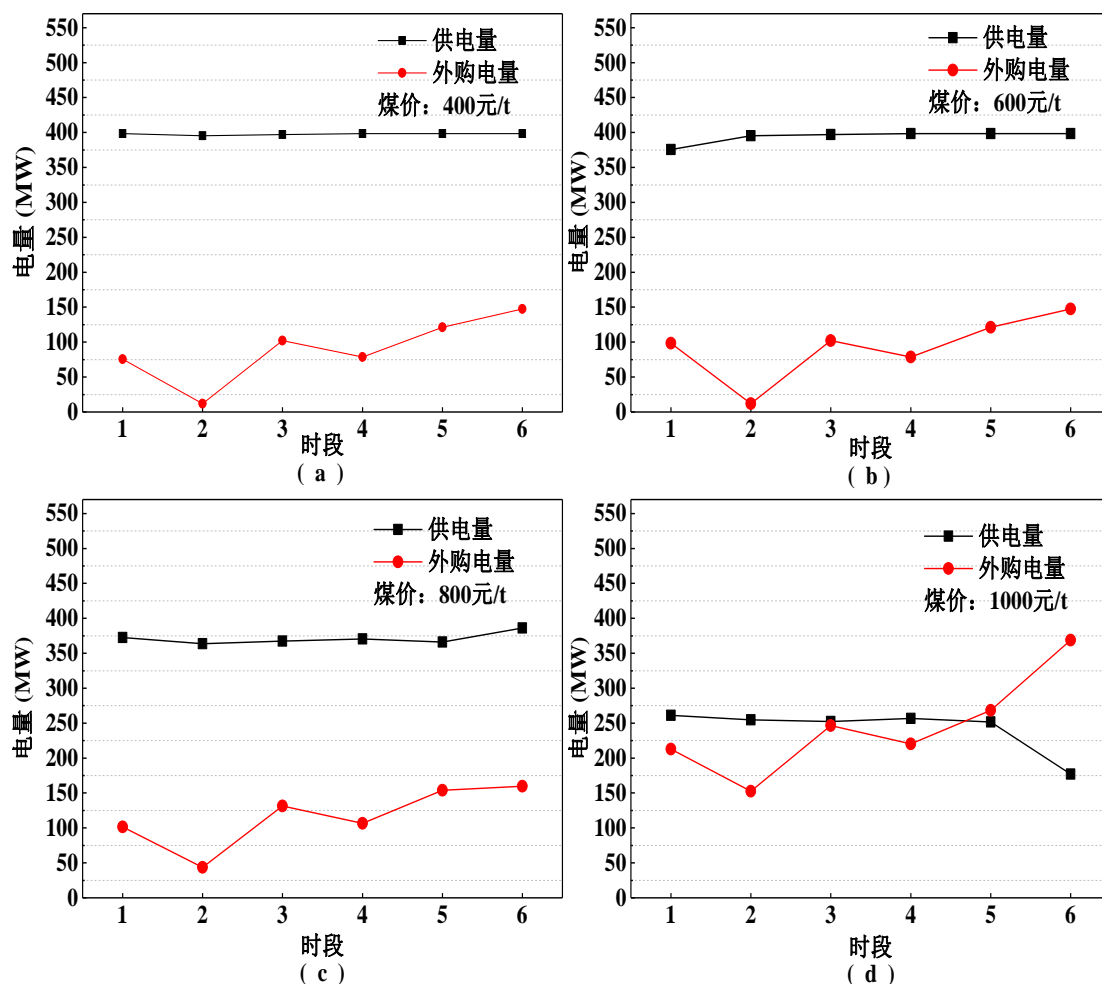


图 3.16 煤价与供电量及外购电量的关系：(a) 400 元/t；(b) 600 元/t；(c) 800 元/t；(d) 1000 元/t

Fig. 3.16 Relationship between coal price and power supply and purchased electricity:

(a) 400 ¥/t; (b) 600 ¥/t; (c) 800 ¥/t; (d) 1000 ¥/t

图3.16为煤炭价格在400元/t、600元/t、800元/t、1000元/t的情况下，煤价对供电量和外购的电量的影响。从图中可以看出，当煤价上升时，系统的供电量有逐渐减少的趋势，外购电量则逐渐增加；并且当煤炭价格为1000元/t时，出现外购电量超过供电量的情况，此时系统主要以副产煤气作为各设备的燃料进行发电，并没有完全通过外购电力满足系统需求。结果表明，该模型在不同煤价的条件下，可以得到最优的运行策略，验证了该模型的实用性。

### 3.5.2 电价对系统的影响

优化结果显示，系统除了外购煤炭满足需求外，各个运行周期均需额外购买电力满足系统需求。因此，还需探究电价对煤气-蒸汽动力系统的优化结果的影响。分别将电价预置为 0.2 元/kWh、0.3 元/kWh、0.4 元/kWh、0.5 元/kWh、0.6 元/kWh、0.7 元/kWh、0.8 元/kWh，对优化调度模型进行计算求解。

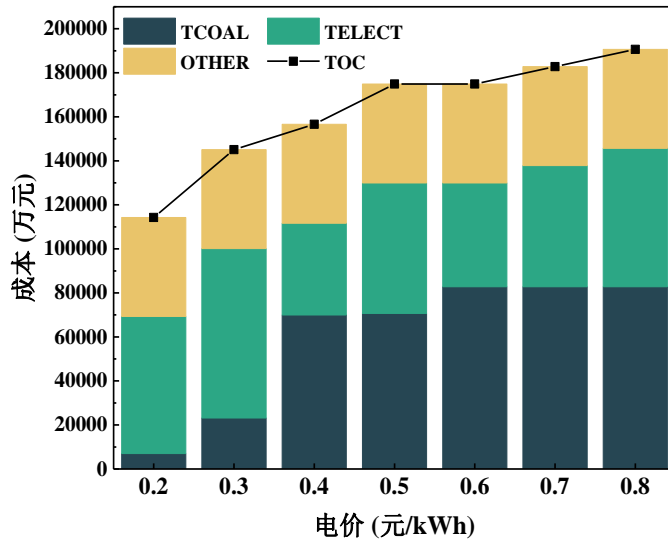


图 3.17 电价与各项成本的关系

Fig. 3.17 The relationship between electricity price and various costs

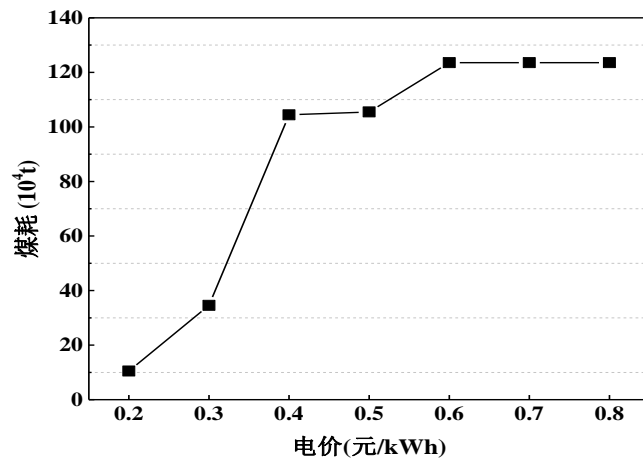


图 3.18 电价与煤耗的关系

Fig. 3.18 The relationship between electricity price and coal consumption

图 3.17 为各项能源成本及总运行成本随电价变化的情况；图 3.18 为煤耗随

电价变化的情况。随着电价的增高，总运行成本也随之增加。当电价小于 0.4 元/kWh 时，电价远小于煤炭价格，外购电量成本远大于购煤成本，并且煤耗极小；当电价处于 0.4 元/kWh 和 0.7 元/kWh 之间时，煤炭消耗量有所增加，且购煤成本大于外购电量成本；而当电价大于 0.7 元/kWh 时，电价大于煤价，煤耗不变，仅外购电量成本增加，使得总运行成本增加。由此说明，当电价极小时，模型选择通过外购电量满足系统的电力需求；而当电价较大和煤炭价格对系统的影响相当时，系统优先通过购买煤炭自产电力满足需求。

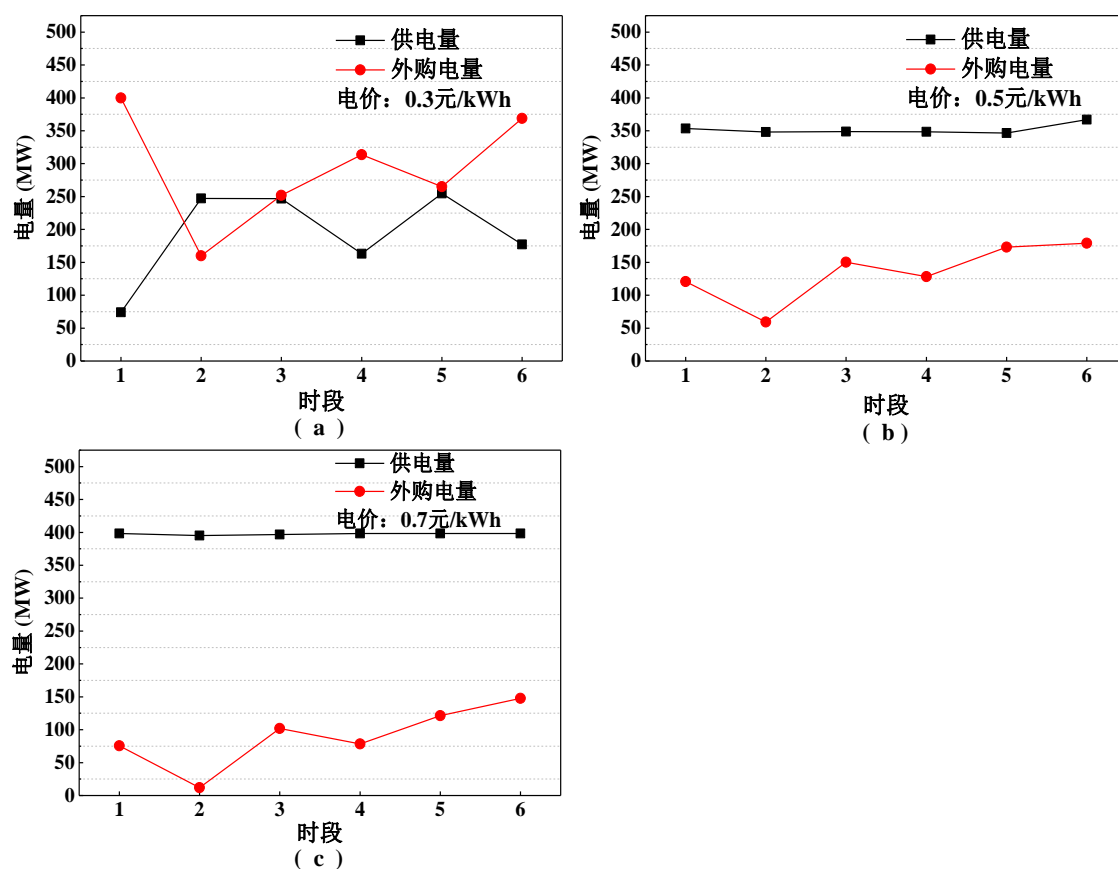


图 3.19 电价与供电量及外购电量的关系：（a）0.3 元/kWh；（b）0.5 元/kWh；（c）0.7 元/kWh

Fig. 3.19 The relation between electricity price and electricity supply and purchased electricity:

(a) 0.3 ¥/kWh; (a) 0.5 ¥/kWh; (a) 0.7 ¥/kWh

图3.19为电价分别为0.3元/kWh、0.5元/kWh、0.7元/kWh时，电价对供电量和外购的电量的影响。当电价为0.3元/kWh时，供电量小于外购电量；当电价在0.5元/kWh时，供电量大于外购电量且有小幅度变化；当电价为0.7元/kWh时，供电量保持不变，仅有外购电量有小幅度增加。供电量和与上述煤耗变的化趋势一致，而外购电量则与之相反，这是由于副产煤气不足以满足发电需求，需要外购

煤炭用来自产电力使各设备进行高负荷运转。综上所述,该模型在不同电价条件下,可以得到最优的运行策略,验证了该模型的实用性。综合上述,该模型可以根据不同的电价对供电量和外购电量进行合理的调节,从而达到降低外购电量、增加企业经济效益的目的。

### 3.6 本章小结

本章通过某钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的实际运行数据,验证了第二章建立的考虑经济性的多周期混合整数线性规划模型的有效性和实用性。首先,简述了该钢铁企业的具体情况以及模型中各设备的具体参数。其次,利用 Lingo 软件对建立的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型进行编程求解,得到该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中各优化周期内副产煤气、蒸汽和电力在各设备中的具体优化策略。最后,对优化调度结果进行分析并对能源价格的变化对优化结果的影响进行了探究,并得到以下三点结论。

(1) 比较优化前后的运行成本,优化后的运行成本为 166468.38 万元,较优化前降低了 37307.99 万元,和优化前相比低了 18.31%。煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型是有效的,可以为钢铁企业煤气-蒸汽动力系统提供能源分配的优化策略,从而降低企业运行成本。

(2) 本章所建立的煤气-蒸汽动力系统优化调度模型的优化策略是系统中的热电设备优先使用生产过程中产生的副产煤气来产生系统所需的蒸汽和电力,尽量做到自给自足。并且为了减少外购电力的成本,发电设备最大限度的发电以满足需求;当副产煤气不足时,则通过购买煤炭以系统满足需求。

(3) 当煤价相对较低时,模型通过购买煤炭以自发电力满足需求;当煤价过高时,模型则通过外购电力满足需求,从而减少运行成本。当电价的变化有利于总成本的降低时,电价改变才会对不同情况下的发电产生影响,模型才会改变运行策略,通过外购电量满足电力需求;否则模型优先自产电力,电价的变化对煤耗影响较小,仅会改变外购电力成本。

## 4. 考虑环保与经济目标的煤气-蒸汽动力系统优化

根据我国发布的相关政策,要尽快促使煤炭发电企业替换落后的供应侧结构性改革,尽快替换落后燃煤发电机组。所以,本章在已建立的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型中将落后的机组替换为超临界高效机组,使得钢铁企业能进一步充分利用副产煤气,节能减排,解决环境污染。另外,在钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的调度优化研究中,考虑环保成本,更能全面准确的体现系统的实际运行情况。因此,建立的考虑经济目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型基础上,考虑环保目标对系统进行优化。这既能促进钢铁行业的可持续发展,又能与我国的绿色发展思想相一致,并承担起保护环境的社会责任。

### 4.1 副产煤气高效利用技术

系统按照“以气定电、自发自用”的原则,利用高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气,取代目前的低效的燃气锅炉,对钢铁企业生产产生的副产品进行循环利用。其中,高炉煤气在钢铁企业中的应用主要是作为供暖用的燃料,用来发电;焦炉气是高温工业炉常用的燃料,也可作为城镇燃气使用;转炉煤气一般是在工业窑炉中使用,也是在其它燃气锅炉中使用。随着煤气回收利用水平的提高,以及节能降耗工作的深入和能源使用的结构调整,淘汰落后产能,将会有大量副产煤气供锅炉使用。利用钢铁企业副产煤气生产电力的技术已列于国家《资源综合利用企业所得税优惠目录(2021年版)》中,《能源中长期发展规划纲要(2004~2020)》明确提出,钢铁企业要以自备电厂为主,以发电为主,促进钢铁行业的节能减排。超临界机组全厂热效率高于亚临界机组,在边界条件一致的条件下,超临界机组热耗率更小,在现有的富余煤气量下,经济效益十分显著。

根据该钢铁企业燃气平衡情况,停运2台220t/h煤气锅炉(B3和B4),以及配套的一台25MW的背压机组(TB3)和一台25MW纯凝发电机组(TB4),停运发电容量总计50MW。动力厂B停运两台110MW发电机组(CHP1和CHP2),停运发电机组总容量270MW。并且停运两台不能达到超低排放的75t/h燃气锅炉(B5和B6)。并且,新建两台135MW超临界发电机组(CLJ1和CLJ2)。充分利用副产煤气,治理煤气排放,造成本地区的环境污染,同时为企业提升了自备电力,降低钢铁产能能源成本。

锅炉主蒸汽压力为25.4MPa,过热蒸汽温度为605℃,汽轮机进口压力为24.2MPa,进汽温度为600℃;这样,在过热器出口到透平机进口处的压降达到了4.96%,而主汽温高于汽轮机的标称进汽温度。《大中型火力发电厂设计规范》(GB 50660-2011)、《火力发电厂节能设计规范》(GB/T 51106-2015),其中,锅炉过热器出口至透平机进口处的压差,不得超过蒸汽机的额定进汽压力的5%,

这一点,应符合《大中型火力发电厂设计规范》;在超临界情况下,过热器出口的温度应比汽轮机的额定进汽温度高 $5^{\circ}\text{C}$ 以上。

超临界锅炉的具体参数,如表 4.1 所示。

表 4.1 超临界锅炉的具体参数

Tab. 4.1 Parameters of supercritical boiler

主要技术参数	数值
锅炉最大连续蒸发量	420t/h
过热器出口蒸汽压力	25.4MPa
过热蒸汽温度	$605^{\circ}\text{C}$
省煤器进口压力	29MPa
再热蒸汽流量	359.74t/h
再热蒸汽进/出口压力	5.531/5.281MPa
再热蒸汽进/出口温度	372/603 $^{\circ}\text{C}$
给水温度	$295.9^{\circ}\text{C}$
锅炉热效率	90.5%

汽轮机的具体参数,如表 4.2 所示。

表 4.2 超临界机组汽轮机的具体参数

Tab. 4.2 Parameters of steam turbine for supercritical units

主要技术参数	数值
额定功率	135MW
主汽门前蒸汽压力	24.2MPa
主汽门前蒸汽温度	$600^{\circ}\text{C}$
再热蒸汽流量 (THA 工况)	316t/h
再热蒸汽热段压力 (THA 工况)	4.47MPa
再热蒸汽热段温度 (THA 工况)	$600^{\circ}\text{C}$
抽汽压力	0.7 MPa
抽汽温度	$313^{\circ}\text{C}$
抽汽流量	150~250 t/h
排汽压力	4.9kPa

## 4.2 环保成本

### 4.2.1 污染物排放分析

环保成本是指钢铁企业在生产过程中造成环境问题,出于对环境负责的原则对企业生产过程为实现环保目标所产生的成本。钢铁企业在生产过程中燃烧化石燃料会产生  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  以及  $\text{CO}_2$  等污染物,从而会破坏生态系统、影响人类健康减少使用化石燃料是有效降低污染物排放的重要手段,虽然现如今有不少新能源可供选择,但由于其使用成本高、效率低等原因,短时间内新能源还无法代替化石能源。因此,可以通过节能减排技术和能源监管技术将这种风险降至最低。我国先后出台了一系列环保治理政策,例如《火电厂大气污染物排放标准》、《国务院大气污染防治十条措施》与《大气污染防治行动计划》、《环境保护经济责任制》等。

然而,如果忽略钢铁企业运营过程中产生的环保成本,则会低估钢铁企业煤气-蒸汽动力系统总运行成本。将环保成本计入钢铁企业的总运行成本,既能真实、客观地反映出石化公司的可持续发展,也能承担起保护环境的责任。同时,也能让相关部门更好地了解公司在环保工作中所取得的成果,从而为环保部门作出准确的评价。政府面临着来自社会各界的压力,要求所有的公司都必须提供有关的财务报告,以了解公司的环境污染状况,并通过全面的环境保护来制定相关的法律和政策来改善社会的环境。

### 4.2.2 环保成本计算

该钢铁企业采用的是干法脱硫技术(FGD),采用了消石灰和氯化物的反应原理,将吸收剂和脱硫灰的进料口改为在吸附塔的上端烟道,其作用如下:第一,吸收和回收的脱硫灰与烟气中的二氧化硫等酸性气体进行反应;第二,是采用烟气余热对灰渣进行快速烘干;第三,是在  $120^\circ\text{C}$  以上的烟气中,将消石灰与氯离子进行反应,形成具有较低吸湿性、不易凝结的碱性氯化钙( $\text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )。烟气与吸收剂、循环脱硫灰进行预混合,通过吸收塔底部的文丘里管,通过气流将吸收剂和循环脱硫灰在流化床中得到充分的脱硫,经吸收塔顶部横向排放,再送入脱硫除尘器。干法脱硫技术工艺简单、无污水、无污酸处理等问题,且能源消耗低,有利于烟道排气,无“白烟”,无二次加温,无腐蚀性。脱硫系统主要是由吸收塔、喷水雾化装置等设备组成,塔体内部无活动构件,具有低损耗、高寿命、低维修率等特点。

为了满足污染物排放标准,达到国家《火电厂污染物排放标准(GB13223-2011)》中的  $\text{SO}_2$  排放浓度和现有超低排放的要求。二氧化硫的脱除成本如式 4.1 - 4.3 所示。



$$C_{SO_2} = \Delta E_m \cdot P_{SO_2} \quad (4.1)$$

$$\Delta E_m = F_{igt} \cdot V_q \cdot C_{SO_2,out} \cdot \eta_{SO_2} \quad (4.2)$$

$$E_{SO_2} = F_{igt} \cdot V_q \cdot C_{SO_2,out} \quad (4.3)$$

$\Delta E_m$  为脱除量, kg;  $P_{SO_2}$  为单位脱硫成本, 元/kg;  $V_q$  为烟气流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;  $C_{SO_2,out}$  为  $\text{SO}_2$  出口浓度,  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;  $\eta_{SO_2}$  为脱硫效率, %。

脱硝技术主要有选择性催化还原技术 (SCR) 和选择性非催化还原技术 (SNCR)。其中, 选择性非催化还原技术 (SNCR), 具有投资小、运行成本低等优点, 但该工艺具有反应温度区间窄、不能适应燃料、负载的变化, 并且对喷氨量有一定限制, 因此 SNCR 脱硝效率不高, 通常低于 50%, 而且随着锅炉负荷的不同而变化; 另外, SNCR 具有高的氨氮摩尔比和较高的氨气逃逸率, 对下游装置有很大的影响, 所以 SNCR 脱硝技术在 100 MW 以下的机组中是常用的, 目前国际上使用这种方法的大型锅炉还不多见。选择性催化还原技术 (SCR), 技术成熟、氨逃逸率低, 不会影响炉内燃烧, 脱硝效率较高, 可以超过 90%, 反应温度一般在  $300 \sim 400^\circ\text{C}$ , 可以用于大型燃煤锅炉中, 目前应用最广泛的是选择性催化还原技术 (SCR)。

该钢铁企业烟气脱硝以技术先进、工艺成熟和经济合理为原则, 选取 SCR 烟气脱硝技术。该钢铁企业的脱硝系统由以下设备组成: 稀释风机、尿素供应泵、尿素蒸发器。该装置以尿素作为脱硝反应剂, 以尿素为原料。为了满足污染物排放指标, 需要对锅炉排放物进行严格控制。锅炉  $\text{NO}_x$  的出口浓度不大于  $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。氮氧化物的脱除成本如式 4.4 – 4.6 所示。

$$C_{NO_x} = \Delta E_m \cdot P_{NO_x} \quad (4.4)$$

$$\Delta E_m = F_{igt} \cdot V_q \cdot C_{NO_x,out} \cdot \eta_{NO_x} \quad (4.5)$$

$$E_{NO_x} = F_{igt} \cdot V_q \cdot C_{NO_x,out} \quad (4.6)$$

$P_{NO_x}$  为单位脱硝成本, 元/kg;  $C_{NO_x,out}$  为  $\text{NO}_x$  出口浓度,  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;  $\eta_{NO_x}$  为脱硝效率, %。

生产钢铁过程中, 碳是主要的元素, 所以会生成大量的二氧化碳并排放到空气中, 导致空气污染。为了验证二氧化碳减排技术的有效性, 对钢铁企业  $\text{CO}_2$  排放量的精确计算特别重要。本文中, 参照《温室气体排放核算与报告要求》中所建议的计算方法, 对  $\text{CO}_2$  排放量进行计算。这种计算方法不考虑碳元素在过程中的流动, 而从整体层面上计算钢铁生产产生的二氧化碳排放量。二氧化碳排放成本如式 4.7 所示。

$$C_{CO_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^Q \left[ C_c \times (HV_q \times F_{igt}) \times \left( CC_q \times OF_q \times \frac{44}{12} \right) \times \tau_t \right] \quad (4.7)$$

$C_c$  为单位排放  $CO_2$  成本元/t;  $CC_q$  为燃料单位热值含碳量, t;  $OF_q$  燃料氧化率, %。

#### 4.2.3 目标函数

本章在第三章建立的考虑经济目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型基础上, 考虑环保目标对系统进行优化。总运行成本包括煤炭采购成本、外购电力成本、副产高炉煤气使用成本、副产焦炉煤气使用成本、副产转炉煤气使用成本、供热收益、二氧化硫及氮氧化物脱除成本和二氧化碳排放成本。目标函数由式 4.8 表示。

$$TOC = C_{coal} + C_{electricity} - C_{heating} + C_{SO_2} + C_{NO_x} + C_{CO_2} \quad (4.8)$$

#### 4.3 模型输出结果

能源需求量保持不变, 将新建机组和为停运机组的设备参数作为输入数据, 输入到考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型中, 再利用 LINGO 软件对模型编程求解。该钢铁企业改造后的煤气-蒸汽动力系统的调度的优化结果由表 4.3-4.7 所示。

表 4.3 为改造后的各项运行成本, 包括煤炭采购成本、煤气使用成本、外购电力成本、供热收益、二氧化硫和氮氧化物的脱除成本、二氧化碳的排放成本以及系统的总运行成本。

表 4.3 改造后各项运行成本

Tab. 4.3 The operation cost after the transformation

项目	改造后 (万元)
煤炭采购成本	59669.70
BFG 使用成本	15950.57
COG 使用成本	96665.92
LDG 使用成本	10777.38
外购电力成本	38924.81
供热收益	78441.20
总运行成本	143547.18

表 4.4-4.6 分别表述了动力厂 B 中 1 台热电联产机组 (CHP3)、1 台超临界高效机组 (CLJ1) 以及动力厂 A 中 2 台 220t/h 纯烧煤气锅炉 (B1、B2)、1 台超临界高效机组 (CLJ2); 2 台 220t/h 锅炉 (B7、B8) 中, 各个周期高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气以及动力煤四种燃料的具体分配情况。其中副产煤气的单位为  $\text{kNm}^3/\text{h}$ ; 动力煤的单位为  $\text{t/h}$ 。

该钢铁企业改造后的煤气-蒸汽动力系统中, 各发电机组优化后各个周期的具体发电量以及外购电量由表 4.7 表示。其中发电量及外购电量的单位为 MW。

表 4.4 动力厂 B 各机组的燃料分配

Tab. 4.4 Fuel distribution for each unit of the second power plant

周期	CHP3				CLJ1		
	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG
T1	0	20.70	0	39.57	0	29.58	80.93
T2	0	30.38	0	31.28	0	59.36	6.89
T3	0	30.38	0	31.28	0	32.19	74.43
T4	0	30.38	0	31.28	158.96	30.52	0
T5	0	20.70	0	39.57	106.66	8.36	80.93
T6	0	20.70	0	39.57	106.66	40.92	0

表 4.5 锅炉各类燃料分配

Tab. 4.5 Boiler fuel distribution

周期	B1				B2				CLJ2		
	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG
T1	0	0	0	31.94	0	0	0	38.50	106.66	37.57	0
T2	0	0	0	38.50	0	0	0	24.96	158.96	0	67.53
T3	0	0	0	38.50	0	0	0	33.04	158.96	27.16	0
T4	0	0	0	28.48	0	0	0	38.50	0	28.84	74.43
T5	0	0	0	38.50	0	0	0	34.82	0	58.78	0
T6	0	0	0	33.67	0	0	0	38.50	0	26.23	80.93

表 4.6 锅炉各类燃料分配

Tab. 4.6 Boiler fuel distribution

周期	B7				B8			
	BFG	COG	LDG	煤	BFG	COG	LDG	煤
T1	0	0	0	0	0	0	0	31.36
T2	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T3	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T4	0	0	0	0	0	0	0	20.83
T5	0	0	0	0	0	0	0	31.36
T6	0	0	0	0	0	0	0	31.36

表 4.7 各机组发电量及外购电量

Tab. 4.7 Power generation and purchased power of each unit

周期	CHP3	CLJ1	TB1	TB3	TB5	TB6	CLJ2	外购电量
T1	125.00	135.00	25.00	13.95	0	25.00	115.23	72.57
T2	125.00	135.00	23.65	0	25.00	0	123.81	11.83
T3	125.00	135.00	22.83	0	25.00	0	123.14	104.81
T4	125.00	135.00	25.00	19.47	25.00	0	122.45	63.73
T5	125.00	135.00	23.55	0	0	25.00	127.432	121.10
T6	125.00	135.00	25.00	0	0	25.00	114.97	157.52

## 4.4 优化结果分析

本节将对该钢铁企业考虑经济和环保目标的煤气-蒸汽动力系统超临界高效机组再优化的计算结果进行详细的分析和讨论。

首先，对煤气-蒸汽动力系统超临界机组调度优化模型中副产煤气、蒸汽和电力调度优化进行分析。图 4.1(a)、(b)、(c)分别为煤气-蒸汽动力系统中各机组在各个周期的副产煤气的具体分配情况；图 4.2 为系统中各机组在各个周期煤的具体分配情况。从图中可以看出，2 个超临界锅炉的主要燃料是高炉、焦炉煤气和转炉煤气，而其他机组则主要通过外购煤炭作为燃料，产生系统所需的蒸汽和电力。由于超临界机组具备燃料消耗量低，发电效率高，且污染物排放量低的优点，这说明煤气-蒸汽动力系统的调度优化原则是，将生产过程中产生的副产煤气优先供给于 2 台发电效率高的超临界高效机组，使得超临界机组进行满负荷发

电, 以满足系统的电力需求; 剩余的副产煤气供给于其余机组, 当副产煤气消耗完后, 则通过外购煤炭作为燃料, 以满足系统所需的蒸汽和电力。

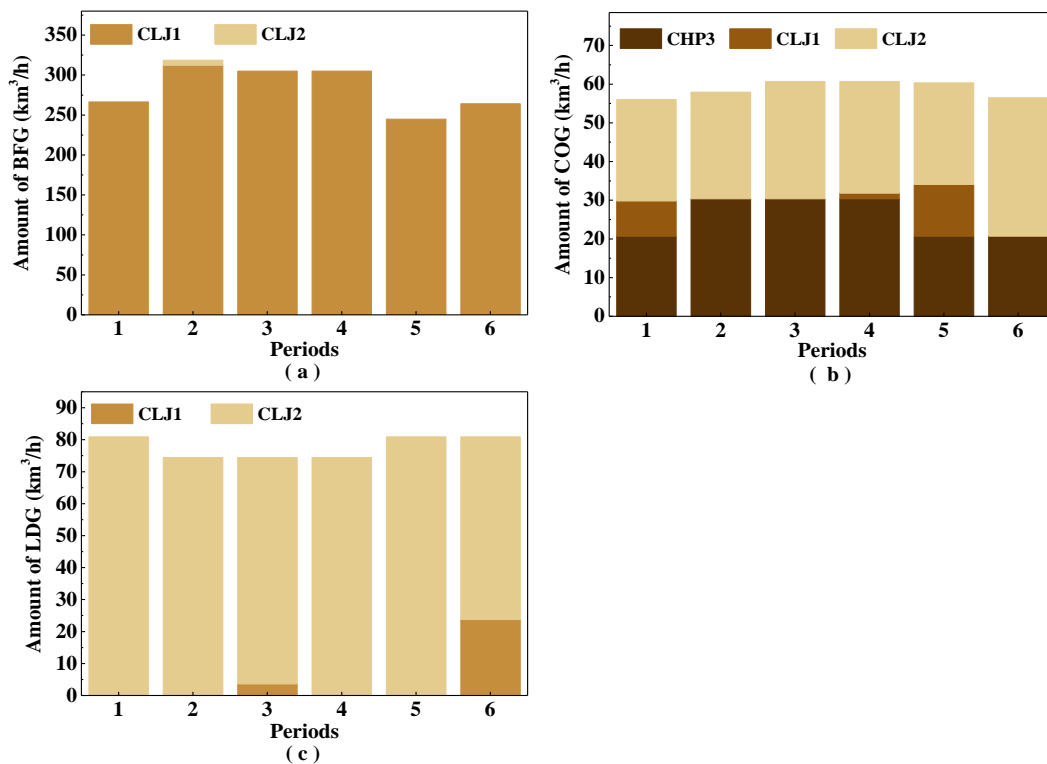


图 4.1 煤气的优化分配: (a) BFG; (b) COG; (c) LDG

Fig. 4.1 Optimal distribution of gas: (a) BFG; (b) COG; (c) LDG

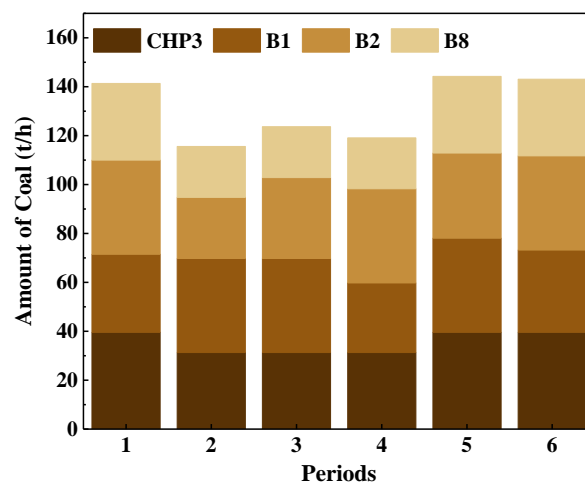


图 4.2 煤的优化分配

Fig. 4.2 Optimal distribution of coal

各时段的电力需求和发电量如图 4.3 所示。可以发现，模型中用于发电的设备有动力厂 B 中 1 台热电联产机组（CHP3）和 1 台 135MW 超临界机组；2 台背压机组（TB1 和 TB5）以及 2 台纯凝机组（TB2 和 TB6）和 1 台 135MW 超临界机组。可以看出，CHP3、TB5、TB6 及 CLJ1 机组均为满负荷发电，而 CLJ2 机组除了发电还供热，因此没有满负荷发电。各时段自发电量均小于系统的电力需求，需要外购电量满足需求，但于再优化前相比，外购电量有所减少。

从表 4.3 可以看出，在煤气消耗量和供热量一致的情况下，将该钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中落后机组替代为超临界高效机组后，煤炭采购成本、外购电力成本，以及运行成本均有所减少。其中煤炭采购成本较改造前减少了 9003.10 万元，电力采购成本减少了 14031.72 万元，运行成本减少了 23034.82 万元，比改造前减少了 7.2%，优化效果显著。从各机组的燃料消耗量可以看出，煤气、煤炭混合燃烧的锅炉都燃烧煤炭，使得更高效的超临界锅炉燃烧副产煤气，和其他燃气锅炉相较，超临界机组以较低的燃料消耗量，产生更多的电力来满足系统需求。

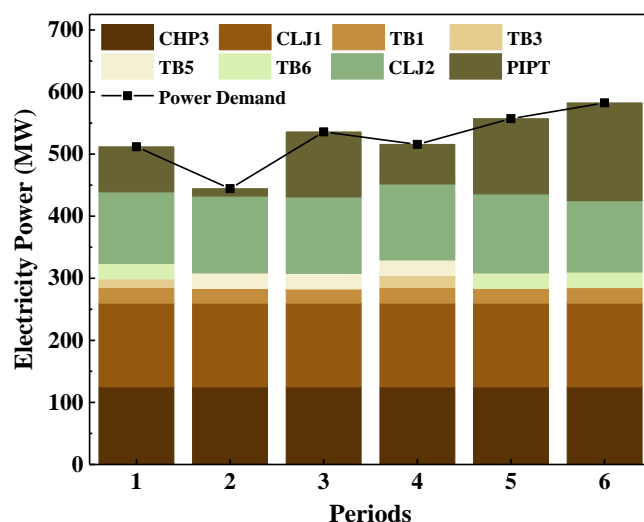


图 4.3 各发电机组电力需求和发电功率

Fig. 4.3 Optimal electricity generation rates and electricity demand

其次，在系统电力和蒸汽需求量与的再优化前一致的条件下，对煤气-蒸汽动力系统进行再优化，对优化结果整体进行分析。从表 4.3 中可以看出，该系统副产高炉煤气、副产焦炉煤气和副产转炉煤气使用成本和供热成本不变，这是因为系统需求量不变。且改造前后均没有多余的电力出售给电网，故而改造前后电力出售成本均为零。此外，还可以看出，改造前后煤炭采购成本、外购电力成本以及总运行成本均有所减少。改造后，煤炭采购成本为 59669.70 万元，较改造前减少了 11000.37 万元。改造后自发电量为 3818202.28MWh，较改造前增加

了 179717.56MWh; 供电量为 3490993.46MWh, 较改造前增加了 406601.07MWh; 外购电量为 778496.14MWh, 较改造前减少了 406605.86MWh, 外购电力成本也因此降低了 11920.83 万元。不考虑环保成本, 系统的总运行成本为 143547.18 万元, 较改造前减少了 22921.20 万元, 降低了 13.77%, 考虑副产煤气高效利用技术再优化效果显著。

另外, 本文在钢铁企业煤气-蒸汽动力系统考虑副产煤气高效利用技术的再优化模型中考虑了环保成本, 进一步反映钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的实际运行情况。环保成本包括二氧化硫、氮氧化物的减排成本以及二氧化碳的排放成本。其中脱硫单位脱除成本为 4.4 元/kg; 脱硝单位脱除成本为 5.0 元/kg; 二氧化碳单位排放成本为 48 元/t。

改造前后二氧化硫和氮氧化物的脱除成本、二氧化碳排放成本及考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的总运行成本由表 4.8 所示。不难看出, 考虑环保成本后的优化模型的总运行成本为 165659.48 万元, 比未考虑环保目标模型的总运行成本增加了 22112.30 万元。虽然将环保成本考虑到煤气-蒸汽动力系统后, 总运行成本有所增加, 但却对钢铁企业减少污染物排放和承担环境保护的责任有重要意义。

表 4.8 改造前后各项环保成本对比

Tab. 4.8 Comparison of environmental protection costs before and after renovation

项目	改造前 (万元)	改造后 (万元)
SO <sub>2</sub> 脱除成本	560.00	357.54
NO <sub>x</sub> 脱除成本	1155.75	697.16
CO <sub>2</sub> 排放成本	23658.05	21057.60
总运行成本	191842.18	165659.48

此外, 对比改造前后煤气-蒸汽动力系统模型的各项环保成本, 二氧化硫和氮氧化物脱除成本、二氧化碳排放成本以及总运行成本均有所降低。改造后, 二氧化硫脱除成本为 357.54 万元, 与改造前相比降低了 202.46 万元; 氮氧化物脱除成本为 697.16 万元, 与改造前相比降低了 458.59 万元; 二氧化碳排放成本为 21057.60 万元, 较改造前降低了 2600.45 万元; 总运行成本由 191842.18 万元降至 165659.48 万元, 降低了 26182.70 万元。改造后的超临界高效装置能有效地改善烟气脱硫、脱硝, 从而减少 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放, 同时也满足了超低排放的要求。另外, 二氧化碳排放包含了钢铁企业消耗矿物燃料燃烧过程产生的二氧化碳排放以及钢铁企业外购电力所对应的二氧化碳的排放。改造前后, 煤气消耗量一致, 且改造后煤气-蒸汽动力系统调度模型大幅降低了煤炭消耗量以及外购电量, 因

此,改造后的模型大幅降低了二氧化碳排放量以及二氧化碳排放成本。

综上所述,本章所建立的考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统优化模型,实现了钢铁企业“以气定电、自发自用”的目标,有效降低了企业的能源成本及污染物排放量,减少了二氧化硫以及氮氧化物的脱除成本和二氧化碳的排放成本,达到了企业超低排放的要求。

## 4.5 本章小结

目前,我国的能源形势正处于经济发展与环保双重压力的背景下。化石能源还是世界上最主要的能源之一,燃烧化石能源是环境问题的一个重要组成部分。在钢铁企业中,煤气-蒸汽动力系统消耗大量能源,但是,它也是一个重要的污染源。关于国家有关节能减排的政策,本章把模型中部分落后机组替换为超临界高效机组,进一步充分利用副产煤气,节能减排,解决环境污染。另外,在能源利用率、经济性、环境保护等方面,引入环保成本对钢铁企业煤气-蒸汽动力系统进行优化调度也是非常必要的。

(1) 介绍了副产煤气高效利用技术的优势,详细描述了本文建立的超临界高效机组的具体参数。

(2) 简述了环保成本的定义,提出了一种环保成本的具体计算方法,并且提出了考虑经济与环保目标的混合整数线性多周期优化调度模型。该模型考虑了二氧化硫和氮氧化物的脱除成本以及二氧化碳的排放成本,还考虑了污染物排放量的限制约束。

(3) 针对某钢铁企业煤气-蒸汽动力系统的具体情况,建立了考虑经济与环保目标的煤气蒸汽动力系统的优化调度模型,同时考虑了副产煤气高效利用技术,并应用此模型进行了优化调度,得到了该钢铁企业在整个优化周期中的最佳运行策略。结果表明,将环保成本纳入到煤气-蒸气动力系统后,系统总运行成本有所增加,但是通过这种方式可以将环保与企业的经济效益密切联系在一起,使钢铁企业能积极响应减排政策,为了增强自己的市场竞争能力,企业会想方设法的改进节能技术以降低环境成本;再者,本章考虑副产煤气高效利用技术后,系统的经济运行成本较优化前降低了 22921.20 万元,环保成本降低了 3261.50 万元,总运行成本降低了 26182.70 万元,模型对系统的优化效果明显。利用本文所建立的模型能够获得考虑经济与环保目标下,钢铁企业的最优运行策略,有效降低企业的经济成本以及环保成本,与此同时能够降低钢铁企业污染物排放。



## 5. 结论与展望

### 5.1 结论

合理利用和优化二次能源，是推动企业节能、减少能耗、节约能源的关键。根据钢铁企业的实际情况，本文提出了一种兼顾经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型。通过对钢铁企业煤气系统和蒸汽动力系统中的能源转换进行了分析，运用数学规划法基于建立的经济目标优化模型，首先对该模型进行了可行性与有效性的评估，并对其主要影响因素进行了分析。其次，将落后的机组替换为超临界高效机组，且针对钢铁企业的污染问题，提出了考虑环保与经济目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型。以下是本文的主要研究成果：

（1）对钢铁企业的煤气系统和蒸汽动力系统的结构进行了分析，在此基础上，根据系统中各设备（包括锅炉、汽轮机及热电联产等）本文提出一种基于经济性的多周期混合整数线性规划的优化调度方法。该模型以各能源消耗设备上的煤气、蒸汽、电力的输出作为决策变量，以系统在整个生产过程中的总运行成本最少为目标函数，同时考虑能源的保供、设备的产能消耗、能源转换热量的控制。该模型的主要目的是在确保能源供应和生产安全的前提下，对副产煤气、蒸汽和电力的生产进行了优化，从而达到最大限度地降低系统能耗。

（2）利用某钢厂的煤气-蒸汽动力系统的实际生产数据，对基于经济性的煤气-蒸汽动力系统优化调度模型进行了验证，并对能源价格的变化对优化结果的影响进行了探究。结果表明，该模型为钢铁企业煤气-蒸汽动力系统提供能源分配的优化策略，降低企业运行成本。比较优化前后的运行成本，优化后的运行成本为166468.38万元，较优化前降低了37307.99万元，和优化前相比低了18.31%。同时，本文还分析了煤价以及电价变动对该模型的影响。结果表明，在煤价格比较低的情况下，该模式采用了购买煤炭的方式来实现自发电；在煤炭价格偏高的情况下，利用外部的电能来满足市场的需要，降低了运行成本。只有在电价变动有利于降低总成本的前提下，电价变动会对不同条件下的发电产生影响，从而使该模式在一定程度上改变运行方式，以满足电网的需要；另外，模式以自主发电为主，电价变动对煤耗的影响很小，只会使外部发电成本发生变化。

（3）在此基础上，提出了一种基于经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的优化调度模型，同时考虑了副产煤气高效利用技术，并运用此模型对其进行了优化。结果表明，将环保成本引入到煤气-蒸汽动力系统中，会使整个系统的总运行成本增加，但这样做可以把环境保护和经济效益联系在一起，从而使钢铁企业积极相应节能减排相关政策，承担环境保护的社会责任，增强企业的竞争能力；此外，考虑副产煤气高效利用技术，将落后的机组替换为超临界高效机组后，系

统的经济运行成本较优化前降低了 22921.20 万元,环保成本降低了 3261.50 万元,总运行成本降低了 26182.70 万元,模型对系统的优化效果明显。该模型可以在兼顾经济和环境两方面的前提下,获得了能够有效降低生产成本和能源消耗的最佳生产运行优化策略,又可以减少污染。

## 5.2 展望

本文提出了一种考虑经济与环保目标的煤气-蒸汽动力系统的多周期优化调度模型。然而,钢铁企业煤气-蒸汽动力系统是一个繁杂的系统工程,然而本文所提出的调度方法仍存在一些不足之处,为使其更好地发挥其功能,未来的工作重点可以放在以下几点:

第一,提升模型的普适性。本文根据国内某钢铁企业的实际运行数据,建立了系统的优化调度模型,将其用于钢铁企业的生产调度,结果表明,该方法是可行的。但该模型不具备普适性,应该从企业实际生产的复杂性以及可行性出发,使模型能够更好地反映钢铁企业的实际状况,并使得模型可对大多数钢铁企业进行优化调度。

第二,引入钢铁企业其他二次能源。本文主要研究了钢铁企业煤气-蒸汽动力系统中的煤气、蒸汽、电力三种主要能源,但系统中还有其他二次能源未被考虑,例如水、氧气等。虽然其他二次能源对系统影响较小,但若能将全部二次能源引入优化调度模型中,更能提高企业的能效、降低企业运行成本。

第三,进一步细化环保成本的计算。由于环保成本具备复杂性、不确定性等特点,本文中的对环保成本的计算进行了简化,若充分考虑污染物脱除过程的成本,例如,污染物脱除过程中催化剂、还原剂成本以及污染物脱除设备的电费等,如此更能全面准确的体现系统的实际运行情况。

## 参考文献

- [1] 杨猛, 任春颖. 钢铁企业煤气系统利用节能分析[J]. 冶金能源, 2020, 39(04): 49-52.
- [2] 环保部实施工业污染源全面达标排放计划[J]. 化工时刊, 2016, 30(12): 22.
- [3] 陈颖. 火电厂氮氧化物排放浓度影响因素与控制思考[J]. 清洗世界, 2022, 38(10): 52-54.
- [4] 席胜伟. 大气污染危害性分析及治理途径[J]. 科技情报开发与经济, 2006(12): 153-154.
- [5] 张建良, 尉继勇, 刘征建, 徐润生. 中国钢铁工业空气污染物排放现状及趋势[J]. 钢铁, 2021, 56(12): 1-9.
- [6] 程子墨. 新形势下我国煤炭洗选加工现状及展望[J]. 煤炭加工与综合利用, 2022, (01): 20-26.
- [7] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- [8] 杨茜. 新时期钢铁企业环保现状分析及对策研究[J]. 冶金管理, 2022, (12): 71-74.
- [9] 向敏. 完善能耗双控制度 推进能源高质量发展——《完善能源消费强度和总量双控制度方案》解读[J]. 中国电业, 2021, (10): 24-27.
- [10] 发改委发文完善能源消费强度总量双控制度[J]. 纸和造纸, 2021, 40(05): 57-58.
- [11] 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见[N]. 陕西日报, 2022-08-25(003).
- [12] 九部门印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》[J]. 中国环境监察, 2022, (08): 9.
- [13] 徐国平, 张如月, 曾慕成. 中国钢铁工业循环经济发展现状及趋势[J]. 工业安全与环保, 2007, (09): 4-7.
- [14] 蒋育翔, 黄全福, 洪小和. 钢铁企业能源及相互关系研究[J]. 经济问题探索, 2011, (01): 125-129.
- [15] 张立宏, 蔡九菊, 杜涛. 生态化钢铁企业生产流程的构建与应用[C]. 中国金属学会. 2005 中国钢铁年会论文集(第2卷). 中国金属学会: 中国金属学会, 2005: 790-793.
- [16] 刘文仲. 中国钢铁工业智能制造现状及思考[J]. 中国冶金, 2020, 30(06): 1-7.
- [17] 王天营, 宫芳, 沈菊华. 中国能源利用效率变动对环境影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(S2): 74-77.
- [18] 李杨. 钢铁企业提升能源效率的分析与对策[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(01): 6-18.
- [19] 杨珊, 崔伟, 杨雪. 通过剖析达钢二次能源综合利用分析钢铁行业节能减排潜力

- [J]. 四川环境, 2011, 30(03): 99-103.
- [20] 栾绍峻, 吴秀婷. 钢铁企业煤气预测与调度优化系统[J]. 冶金经济与管理, 2018, (06): 17-21.
- [21] 丁皓, 郭新有. 关于我国钢铁工业二次能源利用的思考[J]. 科技进步与对策, 2004, (10): 102-104.
- [22] 谢升, 李辉, 许立松, 田硕硕, 张琦. 钢铁企业煤气系统优化调度研究[C]. 中国金属学会能源与热工分会, 东北大学. 第十届全国能源与热工学术年会论文集. 中国金属学会能源与热工分会, 东北大学: 中国金属学会能源与热工分会, 2019: 152-158.
- [23] 蔡九菊, 孙文强. 中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J]. 钢铁, 2012, 47(05): 1-8.
- [24] 温燕明, 李洪福. 钢铁流程能源转换功能价值深度开发研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(01): 28-39.
- [25] 张琦, 提威, 杜涛, 蔡九菊. 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.
- [26] 王维兴. 钢铁企业二次能源回收利用评述[J]. 中国钢铁业, 2017, (09): 27-28.
- [27] 孙彦广, 梁青艳, 李文兵, 贾天云. 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.
- [28] 张琦, 马家琳, 高金彤, 倪团结, 李辉. 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.
- [29] 唐志永, 孙子罕. 关于实现低碳绿色炼钢的若干设想[C]. 中国金属学会 (The Chinese Society for Metals), 宝钢集团有限公司 (Baosteel Group Corporation). 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 中国金属学会 (The Chinese Society for Metals), 宝钢集团有限公司 (Baosteel Group Corporation): 中国金属学会, 2015: 1749.
- [30] 陈洪冰. 践行新发展理念推动钢铁工业绿色低碳发展[J]. 冶金管理, 2021, (08): 4-8.
- [31] 曾亮, 梁小兵, 欧燕, 叶理德. 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]. 中国金属学会. 2014 年全国冶金能源环保生产技术会文集. 中国金属学会: 中国金属学会, 2014: 261-276.
- [32] 余建军, 张定超, 周铭新. 生产调度研究综述[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(17): 13-17.
- [33] 中国数学规划学科发展概述[J]. 运筹学学报, 2014, 18(01): 1-8.
- [34] 李豆豆. 生产调度的启发式规则研究综述[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(02): 51-56.
- [35] 赵梓焱, 李思怡, 刘士新, 刘硕, 赵亚峰. 钢铁生产过程动态调度综述[J]. 冶金自动化, 2022, 46(02): 65-79.
- [36] Yuen C K, Wai H C, Haruo S. Short-term site-wide maintenance

scheduling[J].Computers Chemical Engineering, 2004, 28(1-2):91-102.

[37] Aguilar O, Perry S J, Kim J K, et al. Design and optimization of flexible utility systems subject to variable conditions: Part 1: Modelling framework [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2007, 85(8A): 1136-1148.

[38] 明德廷, 李娟, 尹怡欣. 钢铁企业煤气优化调度模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, (06): 1575-1578.

[39] Kong H, Qi E, Li H, Li G, Zhang X. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant. Appl Energy 2010;87(7):2156-63.

[40] 张小雷, 张颜颜, 唐立新. 钢铁企业煤气混合优化分配模型[J]. 系统工程学报, 2011, 26(05): 710-717.

[41] 夏新华, 高宗和, 徐帆, 郑涛, 戴则梅. 基于煤气调度的高耗能企业自备电厂发电优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 160-167.

[42] 陈骏, 周伟国, 王海. 钢铁企业蒸汽系统多周期优化策略[J]. 化工进展, 2017, 36(05): 1589-1596.

[43] 何仲潇, 徐成司, 刘育权, 华煌圣, 董树锋. 考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(06): 69-74.

[44] 韩宇, 彭克, 王敬华, 徐丙垠, 李俊格, 赵曰浩. 多能协同综合能源系统协调调控关键技术研究现状与展望[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 81-87.

[45] 徐玮, 曹敬. 探析多能协同下的综合能源系统协调调度策略[J]. 应用能源技术, 2019, (03): 31-33.

[46] 李楠, 黄礼玲, 张海宁, 张祥成, 马雪, 樊伟, 林宏宇, 邢通, 谭忠富. 考虑多能需求响应的电热互联系统协同调度优化模型[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(05): 142-154.

[47] Zhang J, Wang G. Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector. Energy 2008;33(4):525-37.

[48] Ansari N, Seifi A. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. Energy 2012;43(1):334-43.

[49] He F, Zhang Q, Lei J, Fu W, Xu X. Energy efficiency and productivity change of China's iron and steel industry: accounting for undesirable outputs. Energy Policy 2013;54(54):204-13.

[50] Lin B, Wang X. Promoting energy conservation in China's iron & steel sector. Energy 2014;73:465-74.

[51] 李兵, 郝勇生, 彭兴, 殷捷, 王建勇. 全国冶金自动化信息网 2014 年会论文集 [C]. 全国冶金自动化信息网,《冶金自动化》杂志社:《冶金自动化》杂志社, 2014: 166-169.

[52] Zhao X, Bai H, Lu X, Shi Q, Han J. A MILP model concerning the optimization of penalty factors for the short-term distribution of byproduct gases produced in the iron and steel

making process. Appl Energy 2015;148(2):142-58.

[53] Zeng Y, Sun Y. Short-term scheduling of steam power system in iron and steel industry under time-of-use power price. Int J Iron Steel Res 2015;22(9): 795-803.

[54] 曾亮, 梁小兵, 欧燕, 叶理德. 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.

[55] 郑忠, 黄世鹏, 龙建宇, 高小强. 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.

[56] 梁青艳, 孙彦广. 基于能源网络节点输入输出模型的能量流动态仿真[J]. 冶金自动化, 2019, 43(03): 17-24.

[57] Gibson C A, Meybodi M A, Behnia M. Optimisation and selection of a steam turbine for a large scale industrial CHP(combined heat and power) system under Australia's carbon price [J]. Energy Policy;2013,61(11):291-307.

[58] 金侃. 燃煤电站环保装备运行成本效益研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[59] 张鹏飞. 石化企业蒸汽动力系统优化调度研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[60] 邓煜. 火电机组脱硫脱硝系统优化运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

[61] 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.

[62] 赵子潇. 长三角地区燃煤机组多污染物末端控制成本研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.