

钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度研究



重庆大学硕士学位论文

(专业学位)

学生姓名：舒永朋

指导教师：郑 忠 教 授

专业学位类别：工程（冶金工程）

研究方向：冶金信息与系统工程

答辩委员会主席：梁小平 教授

授位时间：2020 年 7 月

Research on gas steam power coordinated dispatching in iron and steel enterprises



A Thesis Submitted to Chongqing University
In Partial fulfillment of the requirement for
Professional Degree

By

Yongpeng Shu

Supervised by Prof. Zhong Zheng

July , 2020

摘 要

钢铁企业能源消耗巨大，污染排放严重，节能降耗是实现钢铁企业可持续发展的重要举措。通过协同调度各种能源、资源的合理使用，可以提高能源利用水平，降低能耗。煤气、蒸汽、电力是钢铁企业能源系统中重要的三种二次能源，并且相互之间存在转换，通过研究煤气、蒸汽、电力三种能源的协同转换和优化使用，对于推进钢铁企业节能减排和降低能源成本具有重要的理论指导和实际应用意义。论文主要研究内容如下：

首先，分析了钢铁企业能源系统中煤气系统、蒸汽系统、电力系统的结构以及煤气、蒸汽、电力之间的转换方式，三种能源的主要转换方式为煤气转蒸汽、蒸汽转电力、煤气转蒸汽和电力。基于锅炉、汽轮机和热电机组，建立了描述三类转换的能源输入输出数学模型。计算得到三种能源转换设备的效率分别为 0.82、0.85、0.72，为调度模型的建立提供参数支持。

然后，建立了基于数学规划方法的煤气-蒸汽-电力协同调度模型。综合考虑煤气、蒸汽和电力的协同关系，以全天能源成本最小为目标函数，以能源介质保供、热量守恒、设备运行等数学和工艺要求为约束条件。其目的是确保能源稳定供应和安全生产的前提下，优化富余煤气在热电设备上的分配以及蒸汽和电力在生产设备上的分配。将模型优化结果与实际值和参照值对比检验了模型的准确性和有效性。

最后，以某钢铁企业能源系统和实际能源数据对模型进行实例分析。利用 ILOG CPLEX 软件对模型进行编程求解，得到了富余煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备上的优化分配方案。通过与优化前未考虑煤气、蒸汽、电力协同调度的分配方案相比，优化后全天能源总费用减少了 39.5 万元，比优化前降低了 6.6%，从经济性角度考虑，优化后的煤气、蒸汽和电力分配方案更合理。此外，还讨论了分时电价和煤炭价格变化对模型的影响，实验结果表明模型能够根据分时电价和煤炭价格合理的调整自发电量和外购电量。

关键词：钢铁企业；节能降耗；煤气-蒸汽-电力；协同；调度

Abstract

The energy consumption of iron and steel enterprises is huge, and the pollution discharge is serious. Energy saving is an important measure to realize the sustainable development of iron and steel enterprises. Through the reasonable use of various energy and resources, the level of energy utilization can be improved and energy consumption can be reduced. Gas, steam and electricity are three important secondary energy sources in the energy system of iron and steel enterprises, and there are mutual conversion. It has important theoretical guidance and practical significance to promote energy conservation and emission reduction and reduce energy cost of iron and steel enterprises by studying the coordinated conversion and rational use of gas, steam and electricity. The main contents of this paper are as follows:

Firstly, the paper analyzes the structure of gas system, steam system and electric power system in the energy system of iron and steel enterprises and the conversion mode between gas, steam and electric power. The main conversion modes of the three kinds of energy are gas to steam, steam to electric power, gas to steam and electric power. Based on the boiler, steam turbine and thermoelectric unit, the mathematical model of energy input and output describing three kinds of conversion is established. The efficiency of three kinds of energy conversion equipment is 0.82, 0.85 and 0.72 respectively, which provides parameter support for the establishment of scheduling model.

Then, a gas steam power coordinated dispatching model based on mathematical programming method is established. Considering the synergism of gas, steam and electricity, the objective function is to minimize the energy cost in the whole day, and the physical and technological requirements such as energy medium supply guarantee, heat conservation and equipment operation are taken as constraints. Its purpose is to optimize the distribution of surplus gas in thermal power equipment and the distribution of steam and electricity in production equipment on the premise of ensuring stable energy supply and safe production. The accuracy and validity of the model are verified by comparing the optimization results with the actual and reference values.

Finally, the energy system and actual energy data of an iron and steel enterprise are used to verify the model. Using ILOG CPLEX software to program and solve the model, the optimal allocation scheme of surplus gas, steam and power on each energy

conversion equipment is obtained. After optimization, the total energy cost of the whole day is reduced by 395000 yuan, 6.6% lower than before. From the economic point of view, the optimized gas, steam and power distribution scheme is more reasonable. In addition, the influence of time-sharing price and coal price change on the model is also discussed. The experimental results show that the model can reasonably adjust the self generating capacity and purchased power according to the time-sharing price and coal price.

Key words: steel enterprise, energy conservation and consumption reduction, gas steam power, energy conversion, coordinated scheduling

目 录

| | |
|---------------------------|-----|
| 中文摘要..... | I |
| 英文摘要..... | III |
| 1 绪 论..... | 1 |
| 1.1 研究背景及意义..... | 1 |
| 1.1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.1.2 研究意义..... | 4 |
| 1.2 钢铁企业煤气、蒸汽、电力..... | 5 |
| 1.2.1 钢铁企业煤气..... | 5 |
| 1.2.2 钢铁企业蒸汽..... | 5 |
| 1.2.3 钢铁企业电力..... | 6 |
| 1.3 钢铁企业能源调度概述..... | 7 |
| 1.3.1 调度相关概念..... | 7 |
| 1.3.2 钢铁企业能源调度方法..... | 7 |
| 1.4 钢铁企业能源调度现状..... | 9 |
| 1.4.1 单一能源质调度..... | 9 |
| 1.4.2 多能源协同调度..... | 9 |
| 1.4.3 煤气-蒸汽-电力协同调度..... | 9 |
| 1.4.4 存在问题及课题提出..... | 10 |
| 1.5 论文研究内容和结构..... | 11 |
| 1.5.1 研究内容..... | 11 |
| 1.5.2 论文结构..... | 11 |
| 2 煤气、蒸汽、电力转换分析..... | 13 |
| 2.1 煤气、蒸汽、电力系统结构分析..... | 13 |
| 2.1.1 煤气系统..... | 13 |
| 2.1.2 蒸汽系统..... | 14 |
| 2.1.3 电力系统..... | 15 |
| 2.2 煤气-蒸汽-电力耦合系统特点分析..... | 16 |
| 2.2.1 能源系统与生产系统相互关联..... | 17 |
| 2.2.2 煤气、蒸汽、电力存在相互转换..... | 17 |
| 2.2.3 煤气是三种能源之间转换的起点..... | 18 |
| 2.3 煤气、蒸汽、电力转换分析..... | 18 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 2.3.1 能源转换方式分析..... | 18 |
| 2.3.2 能源转换数学模型..... | 19 |
| 2.3.3 转换设备效率计算..... | 21 |
| 2.4 本章小结..... | 23 |
| 3 钢铁企业煤气-蒸汽-电力调度模型..... | 25 |
| 3.1 煤气、蒸汽、电力调度建模..... | 25 |
| 3.1.1 问题描述 | 25 |
| 3.1.2 模型假设与简化..... | 26 |
| 3.1.3 参数和变量定义..... | 27 |
| 3.1.4 优化目标及意义..... | 29 |
| 3.1.5 目标函数 | 29 |
| 3.1.6 约束条件 | 30 |
| 3.2 模型特点..... | 32 |
| 3.3 模型主要考虑的问题..... | 32 |
| 3.3.1 分时电价 | 32 |
| 3.3.2 工序余压余热 | 33 |
| 3.3.3 煤炭价格 | 33 |
| 3.4 模型求解..... | 33 |
| 3.4.1 CPLEX 介绍..... | 33 |
| 3.4.2 调度执行步骤 | 34 |
| 3.5 模型测试..... | 35 |
| 3.6 本章小结..... | 37 |
| 4 某钢铁企业煤气-蒸汽-电力调度实例分析 | 39 |
| 4.1 研究对象概况..... | 39 |
| 4.2 该企业煤气、蒸汽、电力系统介绍..... | 40 |
| 4.3 该企业煤气蒸汽电力调度模型..... | 42 |
| 4.3.1 目标函数 | 44 |
| 4.3.2 约束条件 | 44 |
| 4.4 模型参数..... | 46 |
| 4.5 模型输入数据..... | 49 |
| 4.6 计算与分析..... | 50 |
| 4.6.1 模型输出结果 | 50 |
| 4.6.2 优化结果分析 | 54 |
| 4.6.3 煤气、蒸汽和电力调度分析..... | 55 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| 4.6.4 分时电价对优化结果的影响 | 59 |
| 4.6.5 煤价变化对优化结果的影响 | 60 |
| 4.7 本章小结 | 62 |
| 5 结论与展望 | 63 |
| 5.1 结论 | 63 |
| 5.2 展望 | 64 |
| 参考文献 | 65 |
| 附 录 | 71 |
| A. 攻读硕士学位期间参与的科研项目 | 71 |
| B. 学位论文数据集 | 71 |
| 致 谢 | 73 |

1 绪 论

本章首先从国家经济发展战略和钢铁企业面临的高耗能挑战两个方面,说明节能降耗是新时代中国钢铁工业可持续发展的内在需要和必然选择。然后介绍了钢铁企业‘既用能亦产能’的特点,明确了节能降耗之于钢铁企业摆脱困境的重要意义,指出钢铁企业应充分利用自产的二次能源,挖掘自身节能潜力,加强能源管控。最后,针对钢铁企业能源调度这一问题,对国内外相关学者的研究进行了文献综述,详细总结了能源调度常用的方法,分析了钢铁企业能源调度的现状和存在问题,提出钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度研究这一问题,进而给出了全文整体的研究思路和所做的主要工作。

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

能源是人类社会赖以生存的基石。随着经济的发展,各行各业对能源的需求日益增加,能源短缺和环境污染已经成为 21 世纪人类面临的两大难题,它严重制约着人类社会的可持续发展。除了探索开发新的能源,如何提高现有能源利用效率和实现能源可持续发展是当今工业界和学术界共同关注的话题^[1]。我国是一个能源大国,却不是一个能源强国,在人均能源占有量以及单位 GDP 能源消耗量的等方面与发达国家有着非常明显的差距,所以我国政府高度重视节能减排工作。为此,国家能源局在《能源发展“十三五”规划》明确提出了消费总量和消费强度“双控制”的目标,到 2020 年将能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤以内,单位 GDP 能耗下降 15% 以上^[2]。环保部专门印发《关于实施工业污染源全面达标排放计划的通知》,要求 2017 年底前各地要完成对钢铁、火电等 8 个行业开展污染物排放超标问题整治任务^[3]。

钢铁工业是典型的高耗能、高污染行业,是节能减排重点关注领域。钢铁工业是国家工业化的基础,在近十几年的快速发展中,取得了举世瞩目的成就,粗钢产量逐年攀升,钢铁产量已经连续 20 多年稳居世界第一,但由此产生的能源消耗也是相当惊人的。据统计,钢铁工业每年的能源消耗量约占中国能源总消耗的 15% 左右^[4],占全国工业能源消耗总量的 22% 左右^[5],钢铁工业 CO₂ 排放量占我国 CO₂ 排放总量的 14% 以上^[6,7]。我国钢铁企业能耗高的主要原因有三方面^[8]: ①以高炉为代表的长流程钢铁企业普遍存在,钢铁生产中 90% 以上的铁水由高炉产生; ②钢铁生产过程使用的主要燃料和还原介质是煤; ③二次能源利用水平总体较低,与世界先进水平还有一定差距。在资源环境约束日益严峻的形势下,钢铁工业由

于产量规模大，资源环境问题更加突出，面临着巨大的节能减排压力，迫切需要转变发展模式，走低能耗、高能效的可持续发展道路。近年来，国家将节能减排作为宏观调控、推进供给侧结构性改革和淘汰落后产能的重点。在“十二五”和“十三五”期间，随着钢铁制造主体工艺的优化、能耗高的落后工艺设备的逐步淘汰，二次能源、余热余能回收利用力度的不断加大，以及越来越多的企业能源中心的建设等，钢铁企业节能降耗的效果逐渐显现出来。图 1.1 为钢铁行业 2000 年以来的能源消耗情况^[9]，钢铁能耗在 2014 年达到最高峰 6.93 亿吨标准煤后，呈现逐年下降的趋势，到 2017 年，钢铁能耗占比下降到 20.71%，和 2009 年的能耗占比相比，取得了很大的进步。虽然节能降耗的发展势头良好，但是我国钢铁企业能源消耗和排放总量仍然居高不下，在降低能源成本、提高能源调度水平以及完善能源综合管理等方面还需进一步加强。

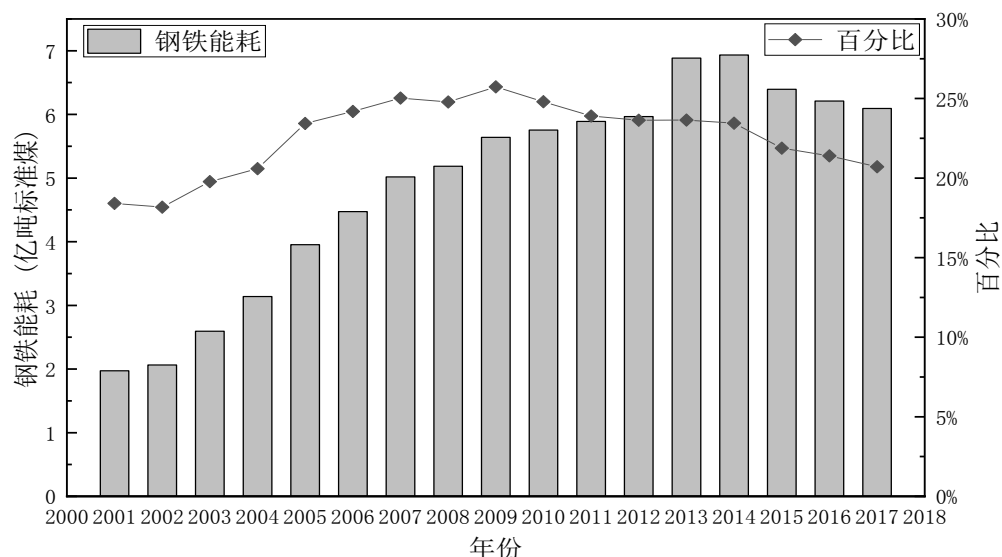


图 1.1 钢铁行业能源消耗情况

Fig. 1.1 Energy consumption of iron and steel industry

其次，激烈的市场环境促使钢铁企业重视降低能源成本，加强能源管控。自 2014 年国内钢铁行业首次出现全行业亏损以来，钢铁行业经历了去产能、兼并重组等一系列改革，自 2017 年以来，国内钢材市场价格虽然有所回暖，但是企业的经营利润还是不太乐观，面临的竞争和生存的压力依然很大。加之原料价格攀升、市场需求疲软、铁矿石进口成本居高不下，以及环保核查日渐严格等因素的影响，可以说，在当前市场环境下，钢铁企业单靠产品盈利是比较艰难的，所以需要谋求新的发展出路。钢铁企业能源消耗是影响钢铁生产成本和利润的重要因素，约占生产成本的三分之一^[10]。与世界上发达国家的钢铁企业相比，我国钢铁企业的平均吨钢能耗依然较高，大概高出 15% 左右；日本大型钢铁企业的能源成本一

般占吨钢生产成本的 14%~16%，而我国钢铁企业平均在 30%左右^[11]。若能有效的控制能源消耗，则能极大的降低钢铁企业的能源成本，提高企业综合效益，从而在激烈的市场竞争中处于不败之地，因此需要重视降低能源消耗。目前我国的各大钢铁企业都在积极采取各种措施来解决能源消耗过大问题，如图 1.2 所示，根据开放尺度可将钢铁企业节能分为五个范畴：①设备节能，通过淘汰落后低能效设备，提高现有设备热效率和工艺水平，企业装备不断向大型化、现代化迈进。②工序节能，通过改造旧厂或新建厂房，使得钢铁企业生产工序流程不断向一体化方向发展，如铁水一罐制、连铸坯热装热送。③技术节能，通过采用各种新技术来提高能源的二次利用，推动钢铁企业不断降低生产能耗。④管理节能，通过加强企业的能源管控水平，建设能源中心，开发能源调度系统等。⑤系统节能，系统节能^[12]在所有节能范畴中级别最高，它强调从整体上衡量系统的能效，推进企业各流程集成运行^[13,14]，从而发挥系统具有的整体涌现性^[15,16]。

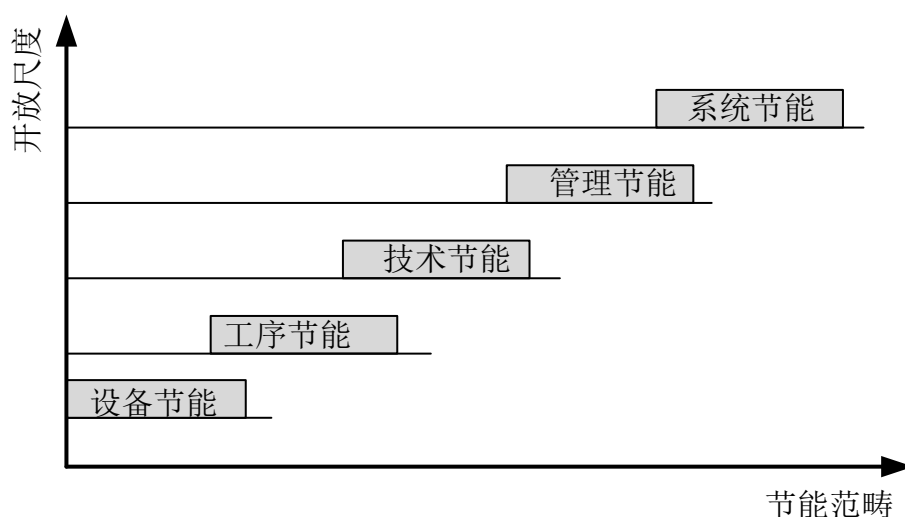


图 1.2 钢铁企业不同尺度下的节能范畴

Fig. 1.2 Main means of energy saving in iron and steel enterprises

当前，我国设备工序节能和技术节能的水平同世界先进水平的差距正在逐渐缩小，甚至赶超，而真正与世界先进国家的差距主要在管理节能和系统节能上^[17]。不过同时也说明，管理节能和系统节能还有很大的节能潜力，管理节能将是推动我国钢铁企业节能的重要发展途径。因此，钢铁企业迫切需要在信息化基础上提高智能化水平，通过建立更加实用和适用的优化调度模型和开发适应生产实际的能源调度系统来增强能源管理水平。

最后，钢铁企业二次能源丰富，具有巨大的节能潜力。钢铁生产过程会产生大量的煤气、余热蒸汽、电力等二次能源，它们都是钢铁企业能源系统的重要组

成部分,其消耗量约占钢铁企业总能耗的 50%~60%^[18]。因此可以说,充分合理的回收利用这些二次能源,其意义等同于提高钢铁产量和生产利润。另外,从钢铁企业整体的用能情况来看,煤气、蒸汽和电力系统之间是相互衔接的,煤气、蒸汽、电力三种能源之间也存在相互转换,若能把握三种能源系统的衔接机理和三种能源之间的转换方式,从整体上统筹优化,可以充分发挥不同能源的互补特性和协同效应,会在更大范围内实现能源系统资源优配置,原因在于:①钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统是一个紧密耦合的整体,单独的研究某一种能源介质的优化调度,就人为的割裂了各种能源之间本来就存在的相互作用和转换关系,不能形成煤气、蒸汽、电力产供用的统筹规划和集成解决方案,从而大大降低了能源整体的优化配置效果和利用效率,因此,有必要考虑三种介质的转换关系,进行综合调度;②通过煤气向蒸汽和电力转换,可以满足钢铁生产过程对蒸汽和电力的必要需求;③降低外购电成本是能源管理的工作重点,煤气在满足主工序的使用需求之后,有相当一部分富余煤气可以用于发电,从而大幅减少企业外部购电成本。目前我国钢铁行业自发电比例整体上已经达到 50%,但是各个企业参差不齐,先进的已达 80%以上^[19],差的 50%还不到,所以提升空间还非常大。

1.1.2 研究意义

综上所述,在新形势下,节能降耗逐渐成为钢铁企业应对危机、摆脱困境和实现可持续发展的必然选择,提高能源系统的运行水平将发挥核心作用,成为先进钢铁企业核心竞争力的标志,而不同能源之间的协同转换和耦合互动是钢铁企业能源系统优化运行的关键。只是单一的研究某种能源介质优化调度,在生产、传输、存储等方面存在能源利用水平较差、能源管理效率较低、信息沟通不畅等数学障碍和技术缺陷,会造成大量的浪费和资源配置不合理,而研究钢铁企业多能源介质之间的协同调度则能促进不同能源系统的深度耦合,煤气、蒸汽、电力不再是隔离的“孤岛”。三种能源介质通过转换可以互补利用,既可以为能源系统调节能源供需平衡提供“软托盘”,也可以使得钢铁企业的用能户在选择使用的能源时,具有更大的灵活性。

本文所研究的煤气-蒸汽-电力协同调度问题,是钢铁企业管理节能和系统节能范畴的关键技术之一,不仅能有效解决单一能源介质优化调度无法化解的矛盾,也是实现复杂能源系统整体优化的必然选择和前进方向。通过优化调配可以从能源系统整体上把握并利用煤气、蒸汽和电力三种能源介质的产生、消耗和转换关系,在满足生产对能源质量和数量的前提下,充分促进煤气向生产效益增大的方向转换,有助于钢铁企业提高二次能源利用水平和能源管理效率,减少外购能源成本和能源放散,从而增加企业经济效益和社会效益,推动钢铁企业同时向‘绿

色化’和‘智能化’发展。

1.2 钢铁企业煤气、蒸汽、电力

钢铁企业生产过程中，在消耗煤炭、重油等一次能源的同时也会产生大量的煤气、余热蒸汽、电力等二次能源^[20]，它们同样是钢铁企业能源系统的重要组成部分，约占钢铁企业能源总消耗量的 50~60%，具有很大的利用价值。下面分别介绍这三种二次能源的相关性质和特点。

1.2.1 钢铁企业煤气

煤气是钢铁企业最重要的二次能源，钢铁生产过程消耗的煤炭资源中约有 60% 转化为了煤气^[21]，具体包括炼焦产生的焦炉煤气、炼铁产生的高炉煤气和炼钢产生的转炉煤气，三种煤气的资源总量可达到 10GJ/吨钢，相当 340kg 的标准煤，约占钢铁企业各类能源消耗的 30%。与其它能源相比，煤气的产生无需花费企业额外的费用，具有较大的利用空间。三种煤气的基本性质^[22]如表 1.1 所示：

表 1.1 三种煤气的基本性质

Table 1.1 Basic properties of three by-product gas

| 种类 | 主要成分及含量 | 热值 | 占比 | 特征 |
|---------------|--------------------------|------------------------------|-----|-------------|
| 焦炉煤气 (COG) | H ₂ : 50~60% | 17000~18855kJ/m ³ | 29% | 高等热值 低毒性 |
| | CH ₄ : 25~27% | | | |
| | CO: 6~7% | | | |
| 高炉煤气 (BFG) | CO: 25~30% | 3000~3800kJ/m ³ | 64% | 低等热值 高毒性 |
| | CO ₂ : 14~16% | | | |
| | N ₂ : 50~60% | | | |
| 转炉煤气 (LDG) | CO: 25~90% | 7500~8000kJ/m ³ | 5% | 中等热值 高毒性 |
| | CO ₂ : 25~30% | | | |
| | N ₂ : 15~25% | | | |

焦炉煤气，简称 COG，是钢铁生产在焦化工序产生的副产品，它的主要成分是氢气、一氧化碳和甲烷，因可燃成分较多，在三种副产煤气中热值最高。焦炉煤气发生率的影响因素有很多，既受炼焦原煤自身质量的影响，也受焦化工艺操作的影响，平均吨焦产量大概为 300~350m³。高炉煤气，简称 BFG，是钢铁生产在高炉炼铁工序中产生的副产品，它是焦炭或煤等还原剂在高温下还原铁矿石或其它炼铁原料时产生的，从高炉炉顶排出。它的主要成分是氮气和一氧化碳，因为可燃成分少，所以热值比较低，但是高炉煤气的产量较大，是三种副产煤气中产量最多的煤气，吨铁产量可以达到 1800~3100m³ 左右。转炉煤气，简称 LDG，是钢铁生产在炼钢工序产生的副产品，它是氧气在高炉中与铁水中的碳元素发生

氧化反应产生的。转炉煤气主要成分是 CO 和 CO₂，其发热量与 CO 浓度有关，一般为 7000~8000kJ/m³ 左右，热值处于中等水平。转炉煤气的产生通常与转炉炼钢吹氧操作密切相关，吨钢回收量约为 60~105m³，产量较小，在副产煤气中约占 5% 左右，主要用于各种加热炉。

1.2.2 钢铁企业蒸汽

蒸汽是钢铁企业生产和生活不可或缺的能源。根据对部分大中型企业的统计，在钢铁企业的能源结构中，蒸汽的消耗量占钢铁企业总能耗的 10% 左右^[23]，而可回收利用的余热蒸汽量也很大，占企业能耗的 7% 左右。钢铁企业新产蒸汽主要由热电厂及各种余热锅炉提供，少部分来自汽轮机组的抽汽，统计北方多个钢铁企业一年的蒸汽产生情况得知，新产蒸汽中约 75% 源于热电厂，约 25% 源于余热锅炉^[24]。按照压力和温度的不同，钢铁企业蒸汽通常又分为高压蒸汽（S1）、中压蒸汽（S2）和低压蒸汽（S3），相应的形成各自的管网，三种蒸汽的性质特点如表 1.2 所示。其中高压蒸汽和中压蒸汽主要是来自钢厂自备电站锅炉，低压蒸汽主要有两部分的来源，一部分来自各个生产工序回收的余热蒸汽，产量比较稳定，通常会被优先利用，另一部分是来自各种热电机组中的汽轮机抽汽。钢铁企业回收的蒸汽在保障了主工序生产需求之后，大部分会用于汽轮机组发电，以尽可能发挥蒸汽资源的价值。

表 1.2 三种蒸汽的性质和特点

Table 1.2 Properties and characteristics of three kinds of steam

| 蒸汽类型 | 压力和温度范围 | 主要来源及特点 |
|----------|---------------------------|--|
| 高压蒸汽（S1） | 2.0~3.8MPa 280~450℃ | 主要由锅炉提供，数量相对较少，结构简单 |
| 中压蒸汽（S2） | 0.78~1.27MPa, 170~280℃ | 供气源较多，来源广泛（锅炉、热电机组、CDQ、各主工序等），结构相对比较复杂 |
| 低压蒸汽（S3） | 0.3~0.78MPa 142~170℃ | 主要由 130T 锅炉和热电机组抽汽提供，产量少 |

1.2.3 钢铁企业电力

电力也是钢铁企业生产中非常重要的能源之一，几乎所有工序生产环节都需要电力的支持。在钢铁企业能源消耗结构中，电力消耗约占企业总能耗的 20%~30%^[25]，电力成本占生产成本的 10% 左右^[26]。钢铁企业使用的电力一般包括自发电和外购电两部分构成。其中，自发电在钢铁企业生产过程中起着重要的作用，它是由钢铁企业二次能源和余压余热资源转换而来，而外购电力则是自发电的有

力补充和保障。钢铁企业的自发电力主要是充当缓冲调节自身用电负荷的作用，在绝大多数时候主要用于满足企业自身用电需求，只有在极少数电价处于峰谷时段或者是当自发电量超过企业自身用电需求时，才会将多余的部分供入外部电网；当自发电量小于企业自身用电需求时，不足部分从外部电网购买。不过目前国内还没有听到报道说有钢铁企业完全实现了电力自产自供，大多数钢铁企业还是处于自发电力不足而需要外购电力补充的局面。

1.3 钢铁企业能源调度概述

1.3.1 调度相关概念

“调度”一词最早出现在 20 世纪 50 年代的应用数学理论中，由 Jackson^[27]提出，用于解决生产制造行业中的生产计划问题和调度问题。广义的调度是指，在一定外界环境和条件的共同约束下，为特定对象或目标设计流程，并确定各任务在流程的先后顺序和时间安排的过程^[28,29]。从数学规划的角度来说，调度问题可以表述为在等式或不等式的约束下，对目标函数进行的优化问题，实现可用资源的有效配置，以达到一个或多个指标的最优化^[30]。

经过几十年的发展，调度理论的研究不断改进和完善，日益向各种综合交叉学科发展，而且调度方法的应用领域也不断拓宽，一些新的调度理论与方法不断涌现并扩展到众多领域，已经成为管理科学、应用数学、运筹学、工程技术等领域共同研究的热点。调度是提升企业管理能力的重要手段，在当前的市场经济时代，对企业或行业提高生产效率和效益具有重要的意义。近些年，随着全世界对能源问题的日益重视，对能源的精细化管理和高效利用逐渐成为各行各业共识，特别是高耗能行业，格外关注能源的优化利用，大都建有自己的能源管理中心对所用能源进行优化调度，并配套设计相应的能源调度系统。

过去，钢铁企业调度优化的研究主要在生产调度^[31-34]，但随着能源局势的紧张和环保压力的日益加剧，能源调度愈来愈得到国内外钢铁企业的重视。能源调度是调度理论在能源领域的一个新的实践和应用，是钢铁企业中区别于生产调度外的又一类广泛的调度问题。钢铁企业能源调度研究的对象是能源系统中的各种能源介质及产耗设备，主要目的还是在于合理的分配各种能源、资源，实现各种能源的高效互补利用，在确保安全生产和保证能源稳定供给的前提下，使生产与能源供需、管网压力、设备能力等多种因素达到动态平衡，实现能源系统运行成本、放散成本和外销收益等若干目标的优化^[35]。

1.3.2 钢铁企业能源调度方法

能源调度是能源管理的核心内容和关键技术，而调度研究的核心内容和重点是调度方法^[36,37]。随着相关科学和优化技术的发展，调度理论的研究逐渐多元化

和复杂化,目前钢铁企业能源调度建模及算法总的可以分为三类:数学规划法,启发式方法,系统仿真方法。数学规划^[38]是调度问题中应用最为广泛,而且十分成熟的一种方法,具体可分为线性规划、非线性规划、混合整数规划、整数规划和动态规划等。数学规划方法能够建立调度问题的精确数学模型,在理论上是可以求得优化问题的最优解。但是利用数学规划方法对实际问题进行建模的难点在于模型建立的准确性和实际问题中相关模型参数获取的可能性。启发式方法^[39]是一种基于直观或经验构造的算法,在可接受的时间和空间方位内给出待优化问题的一个可行解,效率高、实用性好,单纯的启发式方法不需要太多的计算就能得到合理的调度方案,但由于启发式方法主要依据经验,缺少确定性的数学描述,无法保证调度方案的最优性和可行性,并且难以评估调度结果。系统仿真方法是一种试探性和实验性的方法,通过对仿真模型的运行来收集数据,并运用这些数据分析实际系统的性能和状态,但是开展系统仿真实验的条件往往比较苛刻,且仿真实验成本较高,因此应用范围不及数学规划方法和启发式方法广泛。

在钢铁企业能源调度建模方面,混合整数线性规划(MILP)方法是运用得最为广泛的方法。1980年,Robert等^[40]率先用线性规划法建立了某钢铁厂的煤气优化调度模型,使得该钢铁厂的副产煤气得以合理利用;Akimoto等^[41]在Robert的基础上,建立了一种混合整数规划模型,并通过过程计算机的能源管理系统来优化钢铁企业发电厂的煤气供应系统,模型相对简单,考虑约束较少;Kim等^[42]在Akimoto的基础上提出了钢铁生产过程煤气供应系统全厂多周期优化的MILP新模型。后续学者大都是在Kim教授的模型基础上,考虑不同的实际条件和影响因素,对模型不断完善。Kong等^[43]综合考虑了所有煤气用户的生产特征,结合系统的蒸汽、电力需求,以最小化系统运行成本为目标建立了副产煤气的MILP优化调度模型。在此基础上,Kong等^[44]又进一步考虑了煤气放散和燃烧带来的环境治理成本,建立系统运行成本和环境成本最小的多目标副产煤气绿色MILP优化调度模型。施灿涛等^[45]根据煤气使用特性对用户单元进行分类,并根据用类别和现实生产条件确定目标函数和约束条件,构建了考虑煤气放散、短缺量和煤气柜位偏差量最小化的MILP模型。Zhao等^[46]在建立了副产煤气优化调度MILP模型的基础上,使用灵敏度分析方法系统分析了目标惩罚因子对调度结果的影响;Zhao等^[47]考虑分时电价对副产煤气调度过程的影响,建立了以煤气柜波动处罚及购电成本最小的MILP模型。

此外,系统仿真也是解决副产煤气协同调度的有效方法。孙彦广等^[48]综合考虑了能源系统与生产系统的耦合关系,建立了钢铁企业物质流与能量流集成的网络模型,然后通过动态仿真方法确定能源系统数学规划模型的动态约束边界条件。在模型求解方面,主要使用CPLEX、Gurobi、LINGO等数学优化求解器求解调度

模型, 或者使用粒子群算法^[49]、遗传算法^[50]等进化算法对较为复杂的能源调配模型进行优化求解。

1.4 钢铁企业能源调度现状

1.4.1 单一能源质调度

钢铁企业能源调度一直是国内外学者研究的热点, 许多学者都做出了大量的工作, 但都主要集中在煤气^[51-56]、蒸汽^[57-59]、电力^[60-63]、氧气^[64-66]等单一介质的研究, 尤其以煤气优化调度研究见多。单一能源介质调度通常是围绕某一种能源介质, 从能源系统局部出发, 研究该能源的供需平衡和优化调度, 以达到某一种或某几种优化指标。这种研究方法在建模时考虑的对象少, 问题边界较为明确, 模型易于实现, 能够在一定程度上减少了能源放散, 提高了相关能源的利用效益, 但是对于整个能源系统而言, 只是实现了局部优化, 没有发掘能源转换价值潜力。所以, 钢铁企业能源系统在节能方面仍有很大的优化空间。

1.4.2 多能源协同调度

多能协同调度是综合考虑多种不同能源的协同、互补和转换关系, 集成多种能源系统进行联合调度, 特别是在电力领域应用较为广泛^[67-71], 并取得了不错的应用效果。近年来, 研究者们逐渐认识到, 钢铁企业能源众多, 能源系统结构复杂, 要解决好能源调度问题需要从系统整体出发, 统筹规划, 加强各种能源介质之间的耦合优化, 提出了钢铁企业多能协同调度的理念。钢铁企业多能协同调度是在单一能源调度的基础上, 将煤气、蒸汽、电力等多种能源介质有机耦合, 在确保安全生产和能源稳定供给的前提下, 通过能源转换, 充分发挥不同能源的互补特性和协同效应, 在更大范围内实现钢铁企业能源系统的资源优化配置, 最大可能提高煤气、蒸汽等多能源介质内部“消化”能力、减少外购能源使用, 从而提高能源利用效率和系统综合能效。

1.4.3 煤气-蒸汽-电力协同调度

在钢铁企业多能源协同调度方面, 孙彦广等^[72]提出多能源介质协同优化的理念, 以提升能源中心的调控水平, 实现钢铁企业能源系统的高效有序运行。罗先喜等^[73]提出将全流程优化控制和系统节能思想用于钢铁企业能源管理, 为能源优化调度研究指明了方向, 但这些成果都聚焦在理论层面, 对具体实践的指导不多。Zeng 等^[74]放眼钢铁企业能源系统全局, 综合考虑能源动态需求、分时电价、锅炉开关、发电机爬坡速率以及煤气柜波动惩罚等多种因素, 建立了煤气-蒸汽-电力等多介质多周期混合优化调度的数学模型, 实现了多种能源介质的最优分配。但是模型过于复杂, 参数过多, 在实际中应用并不友好。张琦等^[75]以钢铁企业煤气、蒸汽、电力为研究对象, 在模型中加入环境成本因素, 建立了煤气-蒸汽-电力系统

耦合的单目标和多目标优化模型。最后通过 CPLEX 软件求解模型,得到在满足企业蒸汽、电力需求和最大程度利用副产煤气的能源分配方案。杨涛^[76]针对钢铁企业中大型设备停机、故障等工况对能源系统影响较大这个问题,将工况作为能源预测和调度问题的切入点,研究和分析了煤气、蒸汽、电力在多种异常工况下的不平衡情况和优化调度。实例分析表明调度结果能够按照异常工况发生时段做出合理的调整,最终使得煤气转化为蒸汽和电力的过程中发电效益最大。贺东风等^[77]通过分析不同生产工况下能源介质在各个调节设备间的分配情况,以系统运行能源成本最小为目标函数,建立钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统在不同工况下的耦合优化调度模型,优化结果表明所建模型能够适应不同工况变化,并且得到富余煤气在缓冲用户之间的优化分配,以及缓冲用户对蒸汽和电力生产的实时调度方案。李兵等^[78]综合考虑钢铁企业煤气、蒸汽、电力生产与消耗之间的耦合关系,建立了钢铁企业多能源协同优化模型,并基于分级递阶思想,将该模型分解成煤气系统与热电系统两部分进行优化。曾亮等^[79]针对钢铁企业多能源介质的动态平衡和优化调度问题,基于全局优化和系统节能思想,建立了煤气-蒸汽-电力等多介质多周期混合优化调度的数学规划模型,应用多目标优化的思想,将这一复杂的约束优化问题转化为具有两个目标的多目标优化问题进行求解。鲁晓旭等^[80]通过对实际煤气系统中不同生产负荷情况的简化,针对钢铁企业某工序设备的不同生产负荷,采用数学规划的方法,建立了优化分配的数学模型,通过对煤气系统计算仿真得到缓冲设备中副产煤气的最合理优化分配方案。近两年,也有学者从物质流与能量流协同角度来研究钢铁企业能源优化问题。孙彦广等^[81]提出了基于物质流能量流协同的钢铁企业能源系统管控技术,并进行了仿真实验案例分析。郑忠等^[82]针对钢铁企业现有信息化系统,提出钢铁制造过程的物质流和能量流协同方法。梁青艳等^[83]从能量流网络结构出发,构建了不同能量流网络节点的动态输入输出模型,并以钢铁实际生产数据进行了能量流网络节点输入输出动态仿真。这些研究为解决多能源介质协同优化问题提供了新的思路,不过目前都还仅处于探索的阶段,在实践中尚未看到相对成熟的应用。

1.4.4 存在问题及课题提出

综上所述,钢铁企业能源调度是提升钢铁企业能源利用效益的重要手段,备受钢铁企业重视,许多学者做出了大量的研究。传统能源调度研究较多集中在煤气、蒸汽、电力等单一能源介质调度研究上,单一的研究某种能源介质优化调度,一定程度上可以减少相关能源放散,但只实现了局部的优化,在生产、传输、存储等整体用能方面存在能源利用水平较差、能源管理效率较低、信息沟通不畅等诸多缺陷,会造成大量的能源浪费和资源配置不合理。近年来,在系统节能思想及系统工程理论的指导下,国内学者们逐渐转向对钢铁企业多能源介质协同优化

的研究。已有研究多从煤气、蒸汽、电力耦合关系角度出发,考虑不同的影响因素或者约束条件来研究三种能源介质的协同调度问题,却缺少对煤气、蒸汽、电力三者转换关系的研究。钢铁企业煤气系统、蒸汽系统、电力系统是一个不可分割的综合系统,各系统既有自身的运行规律,也有相互之间的转换规律。通过分析各能源系统组成并把握不同能源之间的转换方式可以为多能协同优化研究提供必要的前提。因此需要弄清楚煤气系统、蒸汽系统、电力系统之间的衔接关系以及煤气、蒸汽、电力三者之间具体的转换方式,把握三者的转换规律,从而为实现钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度建模做好理论基础。

基于文献综述和存在问题,本文提出“钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度研究”的研究课题。课题紧紧围绕以煤气为核心的能源转换问题,开展钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度研究,旨在促进钢铁企业煤气、蒸汽、电力三种能源在不同设备上的合理转换和优化分配,从而实现能源的高效利用,对于推进钢铁企业节能减排和降低能源成本具有重要的理论指导和实际应用意义。

1.5 论文研究内容和结构

1.5.1 研究内容

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”的科研项目为研究背景,立足于钢铁行业“节能降耗,降本增益”的现实需求,从钢铁企业能源系统多能源介质、多耦合形式的现实出发,结合钢铁企业煤气、蒸汽、电力相互转化、互补互济的特点,提出“钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度”这一现实问题进行研究。论文主要研究内容可归纳如下:

①分析了钢铁企业能源系统中煤气系统、蒸汽系统、电力系统的结构以及煤气、蒸汽、电力之间的转换方式,三种能源的主要转换方式为煤气转蒸汽转电力、煤气转蒸汽和电力。

②基于锅炉、汽轮机和热电机组等特定设备,建立了描述三类转换的能源输入输出数学模型,根据设备历史能源输入输出数据,计算得到三种能源转换设备的效率。

③建立了基于数学规划方法的煤气-蒸汽-电力协同调度模型。模型以全天能源成本最小为目标函数,以能源介质保供、热量守恒、设备运行等数学和工艺要求为约束条件。其目的是确保能源稳定供应和安全生产的前提下,优化富余煤气在热电设备上的分配以及蒸汽和电力在生产设备上的分配。

④以某钢铁企业能源系统和实际能源数据对模型进行实例验证分析。利用

ILOG CPLEX 软件对模型进行编程求解,得到了富余煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备上的优化分配方案。讨论了分时电价和煤炭价格变化对模型优化结果的影响。

1.5.2 论文结构

论文希望建立一种以煤气为核心的煤气-蒸汽-电力协同调度模型,指导钢铁企业合理的分配煤气、蒸汽和电力的使用,从而减少能源放散和外购,节约能源成本。论文结构如图 1.3 所示。

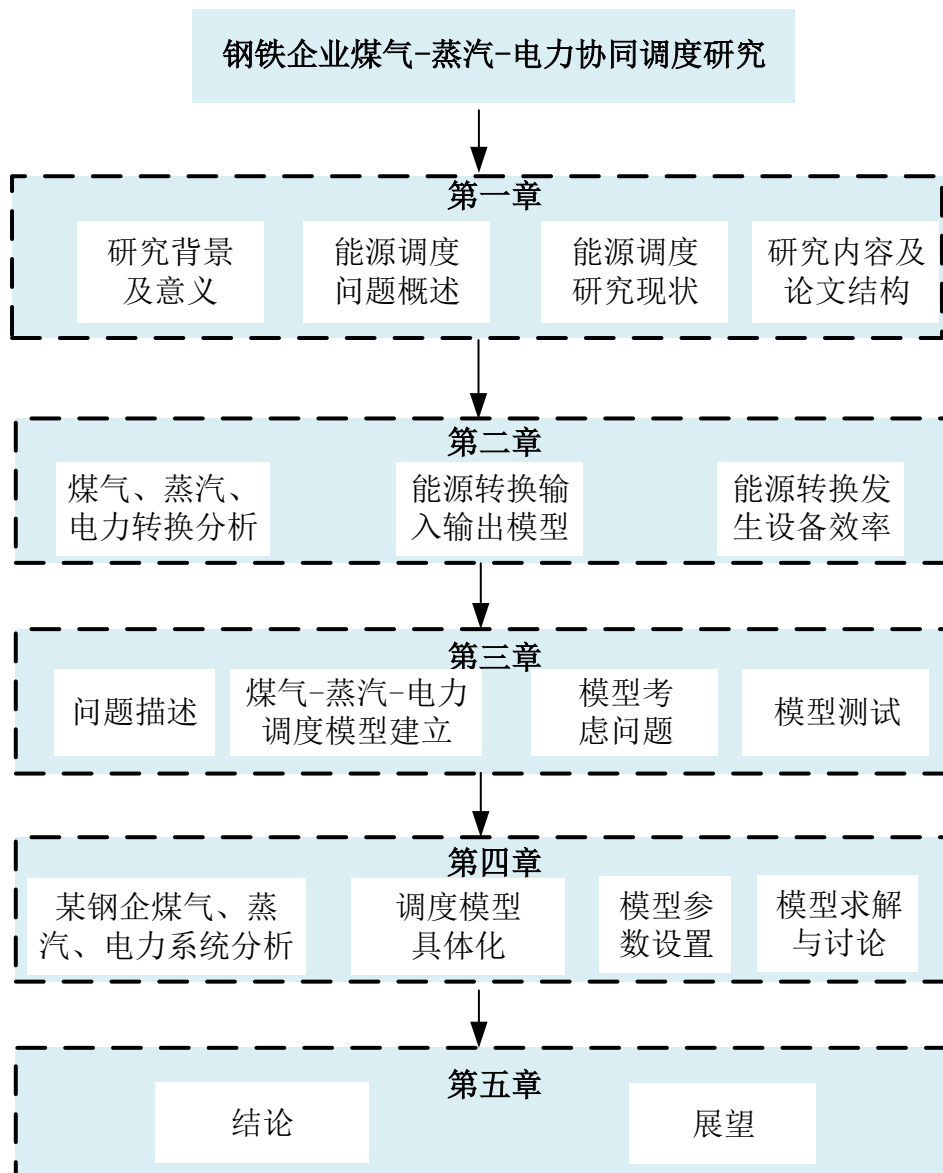


图 1.3 论文结构示意图

Fig. 1.3 The schematic diagram of this Paper structure

2 煤气、蒸汽、电力转换分析

钢铁企业煤气、蒸汽、电力系统结构复杂，涉及的能源种类较多，而且相互之间存在密切的转换，使得煤气-蒸汽-电力协同调度较为困难。但反过来讲，也正是因为煤气、蒸汽、电力之间存在转换才为钢铁企业开展三种能源的协同调度研究提供基础，因此，有必要对煤气、蒸汽、电力之间的转换进行分析。本章首先分析了钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统的组成结构，通过对三种能源系统结构的了解，进一步分析了煤气-蒸汽-电力耦合系统的特点和煤气、蒸汽、电力之间的转换方式，将三种能源之间的转换方式总结为煤气转蒸汽、蒸汽转电力、煤气转蒸汽和汽电三种类型。最后，基于锅炉、汽轮机和热电机组，建立了描述三类转换方式的能源输入输出数学模型，并利用实际能源输入输出数据计算了各能源转换设备的效率。

2.1 煤气、蒸汽、电力系统结构分析

钢铁生产是铁矿石通过一系列化学和数学变化，以获得钢铁产品的过程，在这个过程中需要消耗多种能源介质，同时也会产生一些二次能源，所有的这些能源介质和它们的产耗设备以及输送管网共同组成了钢铁企业的能源系统。在钢铁能源系统中，存在多种能源分系统及其输送线路，主要包括煤气系统、蒸汽系统、电力系统、气体动力系统和热能系统。这些系统中分别包含着各自的产能设备和用能设备，共同交织在一起，形成一个复杂的能源网络。不同能源介质既在自己的系统管网中独立运行，也存在相互之间的转换，特别是煤气、蒸汽、电力三种能源之间的转换颇为密切，通过分析它们的系统组成结构有助于提高对煤气、蒸汽、电力系统相互衔接的认知。下面重点分析钢铁企业能源系统中煤气系统、蒸汽系统和电力系统的组成结构。

2.1.1 煤气系统

煤气系统是钢铁企业能源系统的重要组成部分之一，在钢铁企业中起着重要的作用。各种副产煤气从产生、回收、存储、输送到消耗共同构成了钢铁企业煤气系统，大体上包括煤气产出、煤气存储和煤气消耗三个环节，图 2.1 所示，为钢铁企业典型的煤气系统示意图。煤气系统主要用于回收生产过程中的副产煤气，并将其作为燃料稳定地输送给生产环节各能耗设备，而富余煤气则用于自备电厂发电和产蒸汽，以满足主工序过程对蒸汽和电力必要需求，从而实现煤气的充分利用。在实际生产中，由于高炉换炉和转炉间接性吹氧的生产特点，煤气产生量波动较大，通常采用煤气柜、放散塔等设备来平衡煤气波动、稳定管网压力。煤

气柜还有一个重要的作用就是作为调度过程的调节手段，来进行移峰填谷，促进煤气发电。不同企业因所处环境和自身特点不同，煤气系统在内部结构上存在一定差异。

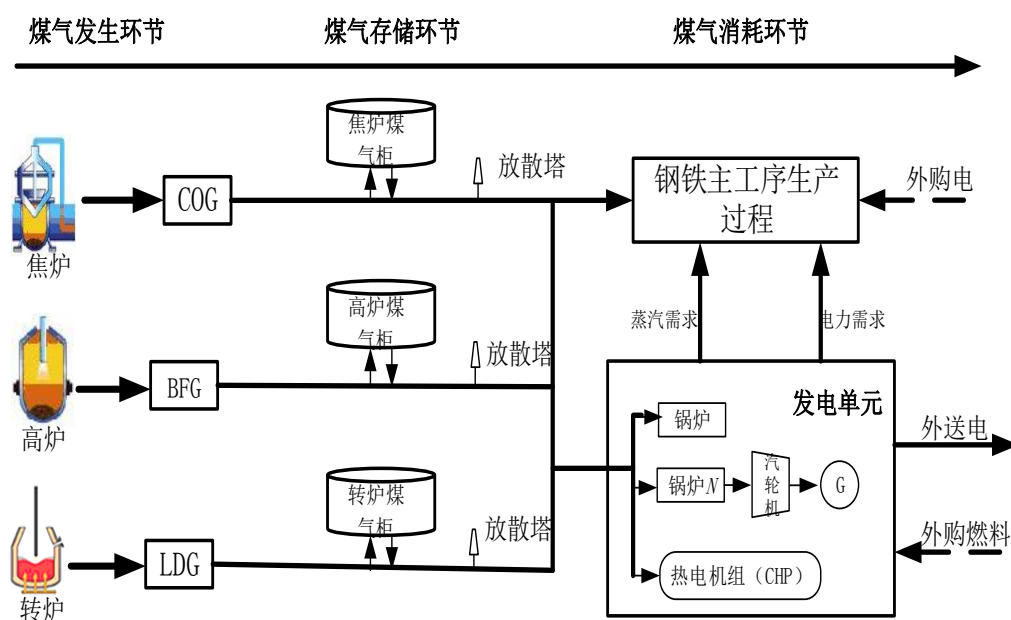


图 2.1 钢铁企业典型煤气系统示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of typical gas system in iron and steel enterprises

2.1.2 蒸汽系统

钢铁企业生产过程中，很多工序都会释放大量的热能资源，这些热能资源绝大部分以蒸汽的形式发生，对这些蒸汽回收并加以利用，这就形成了钢铁企业的蒸汽系统。钢铁企业蒸汽主要由蒸汽锅炉、各种余热锅炉以及热电联产机组（CHP）产生。钢铁企业蒸汽系统如图 2.2 所示，它由 3 个重要的环节组成^[84]，即蒸汽的转换发生环节、蒸汽输送环节和蒸汽的使用环节。蒸汽的转换发生环节是把不同形式的能量通过锅炉或余热锅炉转换为生产工艺所需的蒸汽；输送环节是通过蒸汽管网将蒸汽输送至不同的蒸汽用户；蒸汽的使用环节主要分为主工序使用和发电使用，它的使用又决定了蒸汽的产生情况，一般来说主工序使用蒸汽比较固定，而发电使用的蒸汽则是跟随外界发电负荷呈现波动变化。一般来说，钢铁企业蒸汽系统具有如下特点^[85]：

① 蒸汽生产渠道多样，包括动力锅炉、电站锅炉、汽轮机抽汽和钢铁生产过程各工序的余热锅炉等。

② 蒸汽发生源多，各工序的蒸汽用户更多，对蒸汽的品质需求不同，用量变

化波动大。

③ 消耗的燃料结构复杂，既有煤炭，也有各种煤气和工序余热资源。

④ 蒸汽管网复杂、输送距离远，蒸汽气源相对集中，而蒸汽用户却较为分散，所以需要远距离输送，蒸汽管网纵横交织，错综复杂。

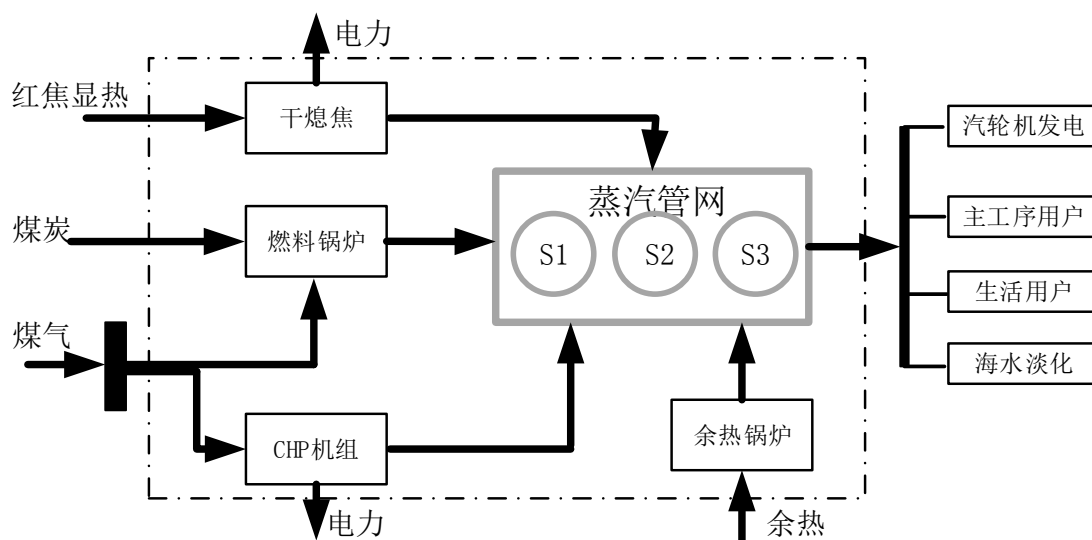


图 2.2 钢铁企业蒸汽系统示意图

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

2.1.3 电力系统

钢铁企业电力系统如图 2.3 所示，由外购电、自备电站发电和余压余热发电三部分组成。为了分析问题的方便，本文将自备电站发电和余压余热发电统称为自发电，与外购电对应。钢铁企业自发电量主要用于满足企业自身的用电需要，当自发电量超过企业自身用电需求时，多余的部分送上外部电网；当自发电量小于企业自身用电需求时，短缺的部分从外部电网购买。自发电在钢铁企业生产过程中扮演着重要的角色，它们实现了钢铁企业富余煤气和余压余热资源的真正回收利用。自发电是外购电的有力补充，其存在是为了既满足钢铁企业生产过程中的电力需求，又尽量减少电量消耗。

随着多能协同和综合能源系统的联动发展，为提高能源综合利用效率和降低用电成本，我国钢铁企业逐渐提高了对自发电的关注，尤其是煤气发电和余热发电，并开始开展钢铁企业用电自给可行性探讨^[86]。自“十一五”以来，钢铁企业煤气发电和余热发电水平发展迅速，很多大型钢铁企业都花费巨额资金建造了装机容量与自身负荷相当的自备电厂。钢铁企业建造自备电厂主要有两个目的，一是通过燃烧炼焦、炼铁和炼钢工序产生的富余煤气产生蒸汽和电力，满足生产主

工序对蒸汽和电力的必要需求，降低用电成本；另一个更重要的目的是用高于社会电厂的投入，形成双电源供电模式，生产过程所需电能由自备电厂和电网同时供给，获得企业内部工序的供电稳定性^[87]。因此，自备电厂往往是钢铁企业重要组成部分，也是钢铁企业重要的利润增长点，具有举足轻重的作用。

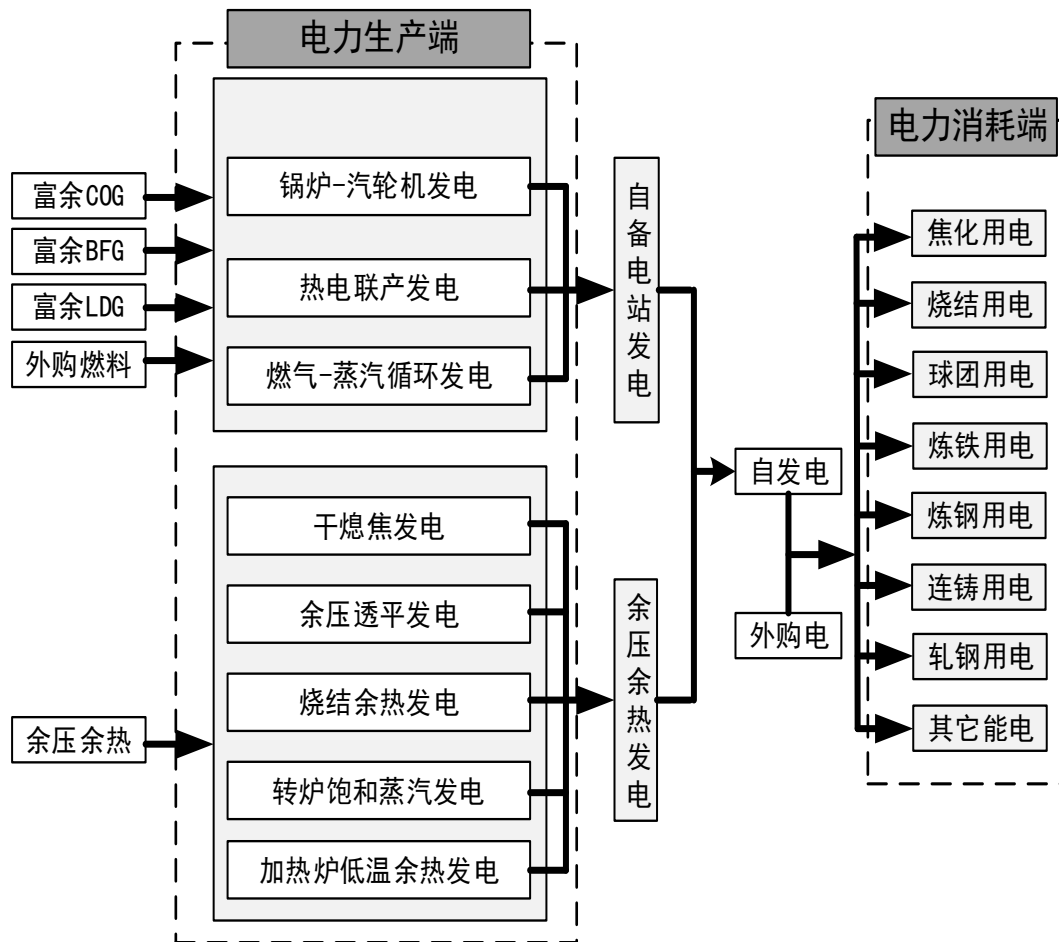


图 2.3 钢铁企业电力系统示意图

Fig. 2.3 Power system diagram of iron and steel enterprises

2.2 煤气-蒸汽-电力耦合系统特点分析

钢铁企业能源系统是由多种能源介质和多个设备组成的大规模复杂系统，与企业的生产系统相互关联，形成你中有我、我中有你的纵横交错格局。一方面能源系统设备繁多，有的设备既是产能户也是用能户，且与多种能源介质关联；另一方面，能源系统涉及的能源种类较多，这些能源介质不仅各自存在产耗、储存、缓冲和输配等多种形态，而且相互之间存在频繁的转换、替代等关联关系，这使得整个钢铁企业能源系统网络结构紧密耦合、错综复杂^[88]。钢铁企业能源系统网络结构如图 2.4 所示，下面从三个方面来具体说明钢铁企业煤气-蒸汽-电力耦合

系统的特点。

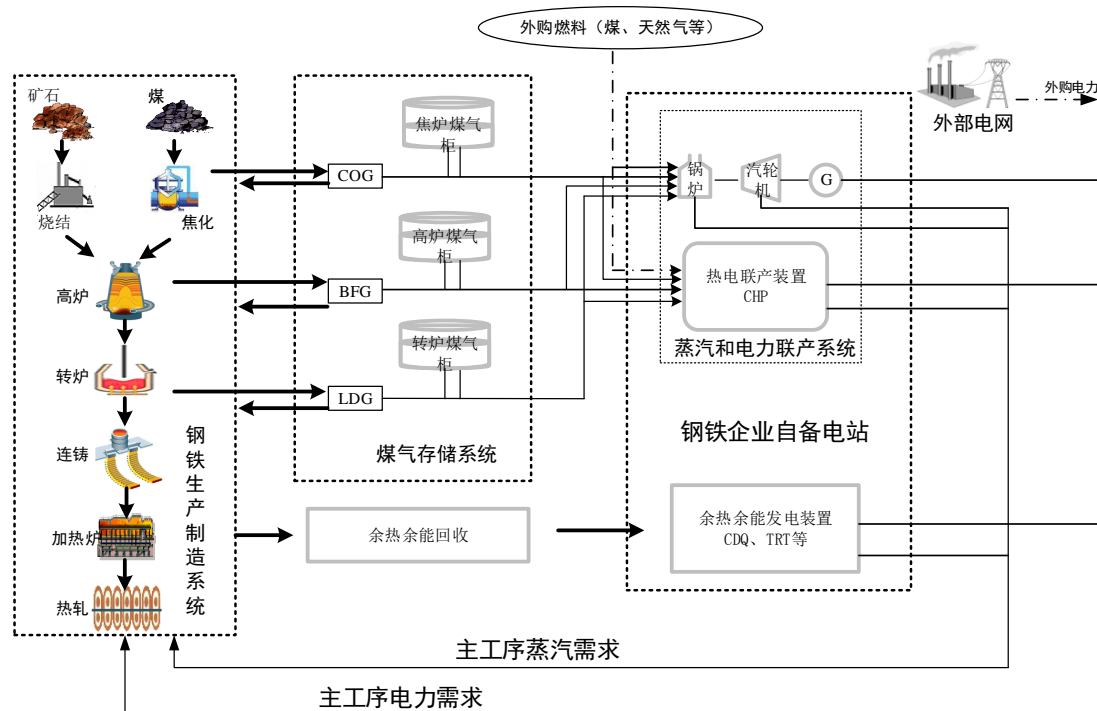


图 2.4 钢铁企业煤气-蒸汽-电力耦合系统

Fig. 2.4 Gas steam power coupling system in iron and steel enterprises

2.2.1 能源系统与生产系统相互关联

在钢铁企业中，能源介质的产生和消耗与生产工艺紧密衔接，每种工序、设备都与多种能源介质关联、相互交叉，很多回收的二次能源介质和余热余能直接用于钢铁生产过程；特别是副产煤气，通常作为优质的燃料，广泛用于能源系统发电、生产蒸汽，可以最大限度的减少能源消耗。同时，能源系统为生产系统正常运行保驾护航，以满足钢铁加工过程的能源需要为前提，并加强对钢铁生产过程中的各种能源介质的管理，以及系统用能与产能的协调平衡和优化匹配^[89]。因此说，能源系统与生产系统的关系既独立又相互联系，需要寻求钢铁企业生产系统与能源系统相协调的响应机制，才能加强用能与产能的协调平衡与优化分配，从而促进能源按需供给。

2.2.2 煤气、蒸汽、电力存在相互转换

钢铁企业中的煤气、蒸汽和电力是紧密相关的三种能源介质，相互之间可以通过能源转换设备进行转换，煤气可以用于产生蒸汽，蒸汽可以发电，各种热电机组将三者耦合在一起。当煤气波动时，通过调整发电量保证煤气、蒸汽的平衡；当蒸汽波动时，通过调整发电量以保证蒸汽的平衡；由于电可以与外部电网自由交易，所以认为电是自动平衡的。通过研究富余煤气在热电用户之间的优化分配

和蒸汽生产设备之间的蒸汽生产调度，间接可以找到合理的电力生产方案和最佳的外购策略。因此说，煤气和蒸汽的优化调度是手段，而电力的合理生产和优化调度是最终目的，三种能源必须综合起来协同调度。

2.2.3 煤气是三种能源之间转换的起点

煤气作为钢铁企业最重要的二次能源，是煤气、蒸汽、电力三种能源转换的起点，煤气的富余量直接决定了与蒸汽和电力的转换发生情况，最终影响蒸汽和电力的供给。从钢铁企业的经济效益来说，在煤气充足时，就要充分促进煤气向蒸汽和电力转换，减少煤气放散并提高发电效益；在煤气不足时，要优先保供，通过外购其他替代能源来弥补煤气的短缺量，保证主工序生产过程对蒸汽和电力的必要需求。考虑到实际钢铁生产过程中主工序生产的煤气需求总量较为固定，煤气在绝大多时间都是富余的，所以本文主要研究煤气富余情况下的煤气、蒸汽、电力的优化分配和供需问题。

综上所述，钢铁企业能源系统与生产系统你中有我，我中有你，不可分割；煤气、蒸汽和电力相互转换，必须统筹起来，综合调度。通过分析煤气、蒸汽和电力之间的转换方式，将为下一步开展煤气、蒸汽、电力协同调度研究提供必要的基础。

2.3 煤气、蒸汽、电力转换分析

2.3.1 能源转换方式分析

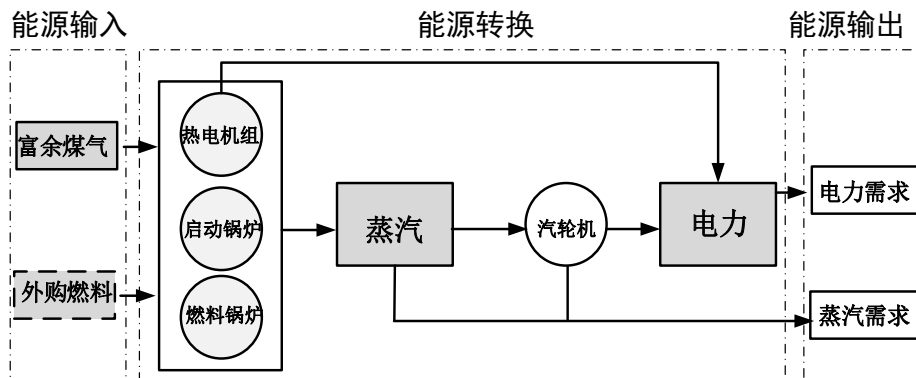


图 2.5 钢铁企业煤气、蒸汽和电力转换示意图

Fig. 2.5 Schematic diagram of gas, steam and power conversion in iron and steel enterprises

通过对钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统结构和特点的分析可知，钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统是一个不可分割的综合系统，煤气、蒸汽和电力也是紧密相关的三种能源介质，既有自身的运行规律，也有相互之间的转换规律。通过简化和抽象，得出煤气、蒸汽、电力协同转换示意图，如图 2.5 所

示根据实际情况将整个转换系统分为能源输入、能源转换、能源输出三个部分。系统输入的能源包括三种富余煤气、外购燃料和余热余压资源，通过能源转换输出不同品质的蒸汽和电力。从中可以看出，最基本的能源转换形式有三种：一是煤气转换为蒸汽，二是蒸汽转换为电力，三是煤气转换为汽电。三种转换都集中在以锅炉、汽轮机和热电机组为代表的热电设备所组成的能源转换节点上，可以说，正是这些能源转换设备才将三种能源介质紧密的耦合在一下。下面将基于这些能源转换设备建立每一种能源转换方式的输入输出数学模型。

2.3.2 能源转换数学模型

① 煤气转蒸汽

钢铁企业中煤气转蒸汽主要发生在锅炉设备上。锅炉是钢铁企业必不可少的一种动力设备，同时也是作为一种重要的供热设备，为钢铁企业自备电厂提供稳定的汽源。它是利用副产煤气或者煤炭等燃烧所释放的热能或工业生产中的余热等热能加热水，产生具有一定压力和温度的蒸汽以满足主工序生产用户对蒸汽的需求。按锅炉的燃料可分为全烧煤气锅炉、全烧煤炭锅炉、煤气与煤炭（通常使用煤粉）混烧锅炉等。其中煤气与煤炭混烧锅炉是最为典型的一种锅炉，使用时具有较强的灵活性。煤气和煤炭在一定的范围内可以相互替换，当煤气短缺时，可以减少锅炉煤气的消耗量，但为了保障蒸汽和电力的需求，就必须增加煤炭燃烧量；当煤气充足时，应该充分利用煤气来减少煤炭的使用量，从而灵活地调节煤气平衡，减少煤气放散，增加企业效益。图 2.6 所示为典型全烧煤气锅炉的能源输入输出数学模型示意图。

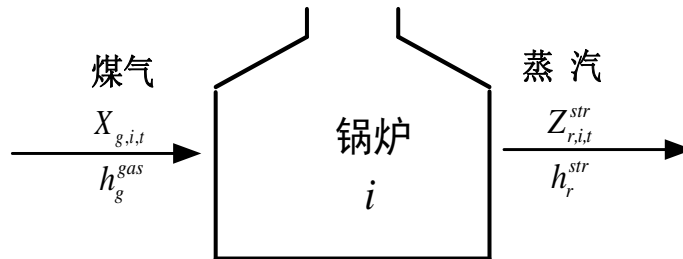


图 2.6 全烧煤气锅炉能源输入输出示意图

Fig. 2.6 Schematic diagram of energy input and output of fuel boiler

根据能量守恒可得煤气转换为蒸汽的能源输入输出模型表达式：

$$\eta_i \cdot \sum_g X_{g,i,t} \cdot h_g^{gas} = \sum_r Z_{r,i,t}^{str} \cdot h_r^{str} \quad (2.1)$$

式中， $X_{g,i,t}$ 代表 t 时段锅炉 i 中 g 煤气的消耗量； $Z_{r,i,t}^{str}$ 代表 t 时段锅炉 i 中 r 等级蒸汽产生量， h_g^{gas} 为煤气 g 的热值； h_r^{str} 表示 r 等级蒸汽的焓值， η_i 为锅炉的效

率。

② 蒸汽转电力

钢铁企业蒸汽转电力主要发生在汽轮机上。汽轮机是一种以蒸汽为动力介质，并将蒸汽的热能转化为机械能的动力装置，广泛用于火力发电厂和钢铁企业的自备电厂。它通常与锅炉、发电机配套使用，形成锅炉-汽轮机发电机组，简称 BTG。高温高压蒸汽穿过固定喷嘴成为加速的气流后喷射到叶片上，使装有叶片排的转子旋转，从而带动发电机对外做功。根据内部结构的不同，又分为背压式汽轮机、凝汽式汽轮机和抽汽式汽轮机三类。由于抽气式汽轮机在钢铁企业中使用较多，因此本文选择抽气式汽轮机来表达能源在汽轮机上的转换。图 2.7 所示为汽轮机的能源输入输出数学模型示意图。

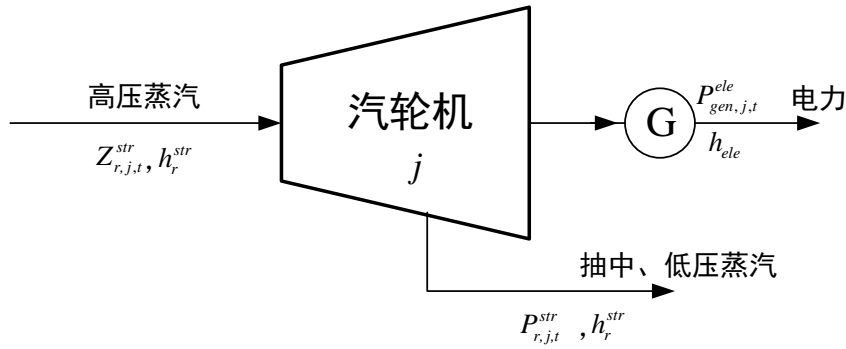


图 2.7 汽轮机能源输入输出示意图

Fig. 2.7 Schematic diagram of turbine energy input and output

根据能量守恒可得蒸汽转换为电力的能源输入输出模型表达式：

$$\eta_j \cdot (Z_{r,j,t}^{str} \cdot h_r^{str} - P_{r',j,t}^{str} \cdot h_{r'}^{str}) = P_{gen,j,t}^{ele} \cdot h_{ele} \quad (2.2)$$

式中， $Z_{r,j,t}^{str}$ 代表 t 时段汽轮机 j 中 r 等级蒸汽消耗量； $P_{r',j,t}^{str}$ 为 t 时段汽轮机 j 中 r' 等级蒸汽抽汽量； $P_{gen,j,t}^{ele}$ 为 t 时段汽轮机 j 的发电量； h_r^{str} 、 h_{ele} 分别为所抽 r' 等级蒸汽和所发电力的焓值， η_j 为汽轮机的效率。

③ 煤气转蒸汽和电力

钢铁企业中煤气同时转蒸汽和电力，主要发生在热电联产机组上。热电联产简称 CHP，又称汽电共生，是相对于热电分产而言的，即动力设备同时对外供应电能和热能，高品位的热能先用来发电，在能源转换过程中产生的低位热能再用来对外供热，从而把热、电生产有机地结合起来，所以这种生产方式就称为热电联产。现在热电联产已经成为一种公认的节能技术，在大型钢铁企业的自备电厂中得到广泛使用。热电联产机组通常包括燃料锅炉、余热锅炉、汽轮机、燃气轮

机和发电机组等一系列设备单元，内部结构较为复杂。可以将整个热电机组看成是一个黑箱，只需要知道总的能源输入和输出即可，至于内部具体如何转换则不予考虑。图 2.8 所示为热电联产机组能源输入输出数学模型示意图。

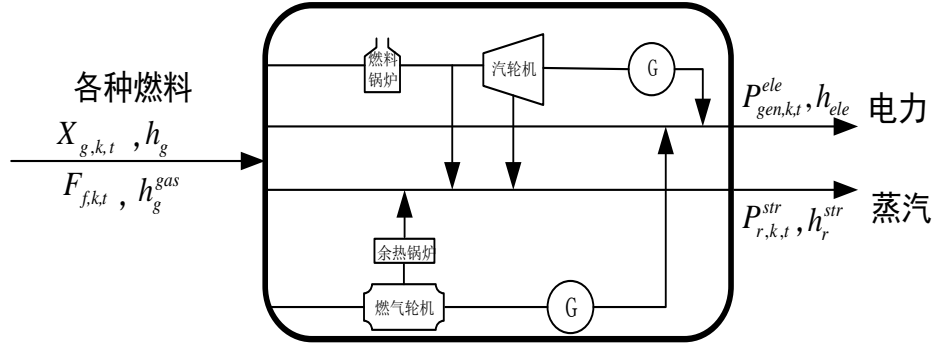


图 2.8 热电联产发电机组能源输入输出示意图

Fig. 2.8 Schematic diagram of energy input and output of CHP

根据能量守恒可得煤气转换为蒸汽和电力的能源输入输出模型表达式：

$$\eta_k \cdot \sum_g X_{g,k,t} \cdot h_g^{gas} + \sum_f F_{f,k,t} \cdot h_f = \sum_r P_{r,k,t}^{str} \cdot h_r^{str} + P_{gen,k,t}^{ele} \cdot h_{ele} \quad (2.3)$$

式中， $X_{g,k,t}$ 代表 t 时段热电机组 k 中富余煤气 g 消耗量， $F_{f,k,t}$ 代表 t 时段热电机组 k 中外购燃料 f 的消耗量， $P_{r,k,t}^{str}$ 代表 t 时段锅炉 k 中所抽 r 等级蒸汽量， $P_{gen,k,t}^{ele}$ 为 t 时段热电机组 k 的发电量， η_k 为热电机组的效率。

2.3.3 转换设备效率计算

煤气、蒸汽、电力在不同能源转换设备上发生转换，需要考虑设备的效率，以此来确定能源分配以及转换的优先级。同时，设备效率在一定程度上也反映了能源介质的转换效率。在 2.3.2 节中，基于特定的能源转换设备，分别建立了描述三种转换的能源输入输出模型表达式，对其变换可以分别得到锅炉、汽轮机和热电机组三种设备的效率计算公式。

① 锅炉效率计算公式

$$\eta_i = \frac{\sum_r Z_{r,i,t}^{str} \cdot h_r^{str}}{\sum_g X_{g,i,t} \cdot h_g^{gas}} \quad (2.4)$$

② 汽轮机效率计算公式

$$\eta_j = \frac{P_{gen,j,t}^{ele} \cdot h_{ele}}{(Z_{r,j,t}^{str} \cdot h_r^{str} - P_{r,j,t}^{str} \cdot h_{r'}^{str})} \quad (2.5)$$

③ 热电机组效率计算公式

$$\eta_k = \frac{\sum_r P_{r,k,t}^{str} \cdot h_r^{str} + P_{gen,k,t}^{ele} \cdot h_{ele}}{\sum_g X_{g,k,t} \cdot h_g^{gas} + \sum_f F_{f,k,t} \cdot h_f} \quad (2.6)$$

在工业生产中，设备的转换效率往往会随着使用时间呈现衰减趋势，直接使用设备出厂时的效率值，虽然在理论上是合理的，但是在实际中就可能出现“失之毫厘差之千里”的现象，造成能源分配偏差较大。通过实际的能源输入输出数据，计算各能源转换设备在上（前）一个调度周期的能源转换效率平均值来作为设备在下（后）一个调度周期的效率值，这样会更接近真实情况。因此本文从案例企业能源报表中分别提取各转换设备在上一个调度周期的能源输入输出数据，计算各个设备的转换效率。下面仅以启动锅炉为例，说明煤气在锅炉上转换为蒸汽的效率计算过程，蒸汽转换为电力和煤气转换为汽电的效率计算方法相同。表 2.1 为某大型钢铁企业启动锅炉在 2018 年 4 月某一调度周期连续 24 个时段的能源输入输出数据。

表 2.1 不同时段锅炉的能源输入输出数据

Table 2.1 Energy input and output data of boilers in different periods

| 时段 | 输入能源 | | 输出能源 | |
|----|------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | COG (km ³) | BFG(km ³) | S1 蒸汽(t) | S2 蒸汽(t) |
| 1 | 53 | 1246 | 293 | 1144 |
| 2 | 124 | 782 | 311 | 1189 |
| 3 | 58 | 1065 | 418 | 1079 |
| 4 | 84 | 1012 | 356 | 1143 |
| 5 | 86 | 457 | 391 | 1131 |
| 6 | 155 | 240 | 389 | 1037 |
| 7 | 167 | 326 | 400 | 1028 |
| 8 | 136 | 732 | 402 | 1069 |
| 9 | 26 | 1041 | 398 | 779 |
| 10 | 117 | 739 | 397 | 957 |

续表 2.1:

| 时段 | 能源输入 | | 能源输出 | |
|----|------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | COG (km ³) | BFG(km ³) | S1 蒸汽(t) | S2 蒸汽(t) |
| 11 | 152 | 349 | 396 | 867 |
| 12 | 171 | 332 | 396 | 1010 |
| 13 | 80 | 335 | 57 | 797 |
| 14 | 63 | 110 | 170 | 765 |
| 15 | 64 | 214 | 80 | 771 |
| 16 | 66 | 361 | 32 | 870 |
| 17 | 90 | 675 | 388 | 934 |
| 18 | 132 | 842 | 397 | 1054 |
| 19 | 81 | 791 | 401 | 975 |
| 20 | 60 | 1139 | 399 | 955 |
| 21 | 30 | 1065 | 387 | 1052 |
| 22 | 45 | 1051 | 389 | 967 |
| 23 | 39 | 1089 | 393 | 963 |
| 24 | 61 | 708 | 353 | 819 |

根据式 (2.7)

$$\eta = \frac{1}{T} \sum_i \eta_i \quad (2.7)$$

计算可以得到锅炉的转换效率为 0.82，同样的方法可以得到 130T 锅炉、汽轮机和热电联产机组的转换效率分别为 0.85，0.72。

2.4 本章小结

本章主要分析了钢铁企业煤气、蒸汽和电力之间的转换方式，并计算了三种能源转换发生所在设备的效率。通过分析煤气系统、蒸汽系统和电力系统的组成结构及其耦合特点，将三种能源间的转换总结为煤气转蒸汽、蒸汽转电力、煤气转蒸汽和电力三种类型。基于特定的能源转换设备，建立了描述不同转换的能源输入输出数学模型，并利用实际能源输入输出数据计算了三种能源转换设备的效率分别为 0.82、0.85、0.72。本章计算得到的能源转换设备效率将用作后文调度模型参数。

3 钢铁企业煤气-蒸汽-电力调度模型

能源优化调度是钢铁企业节能降耗的重要手段,通过建立煤气-蒸汽-电力协同调度模型,可以有效的提高能源利用水平,减少能源放散,增大节能空间。本章在分析钢铁企业煤气、蒸汽、电力系统组成结构和煤气、蒸汽、电力转换方式基础之上,利用数学规划方法,建立综合考虑煤气、蒸汽和电力三种能源介质在能源转换设备上协同分配的优化调度模型。模型目的是在确保能源稳定供应和生产安全的前提下,优化富余煤气在热电热备上的分配以及蒸汽和电力需求负荷在产汽、产电设备上的分配,使得调度周期内系统能源成本最小。

3.1 煤气-蒸汽-电力调度建模

3.1.1 问题描述

钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度问题,是在给定生产计划和设备检修计划前提下,根据未来一段时间蒸汽需求量、电力需求量以及当前可用的富余煤气量,考虑分时电价、燃料价格等因素对生产本的影响,在满足蒸汽和电力需求、生产设备能力及安全稳定运行条件等一系列约束条件下,充分发掘三种能源之间的转换潜能,确定调度周期煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备的优化分配以及外购燃料计划和电力交易计划,使得调度周期内系统的能源成本最小。数学规划法在优化问题中被广泛应用。数学规划法是基于某些理想化的简化假设,为实际问题建立合理的数学模型,将优化问题表达为目标函数和一系列约束条件的形式,通过数学方法求解模型得到优化问题的全局最优解或最优解的界^[26]。显然,煤气-蒸汽-电力调度问题可以描述成数学规划的形式,将调度目标设置成目标函数,将保证生产安全、设备安全和能源稳定供给的众多的数学和物理工艺要求作为约束条件。模型求解就是寻找目标函数的极值,最终找到一组满足约束条件的最佳煤气、蒸汽和电力分配方案。

根据上面的问题描述,同时结合第 2 章的煤气、蒸汽、电力转换分析,钢铁企业煤气、蒸汽、电力优化调度问题可以通过图 3.1 形象的表达出来。根据实际能源产耗情况,图中标出了各个设备能源消耗和产出种类,并用不同的线条表示它们的走向。为了便于表达和后续编程求解,图中的启动锅炉用 QB 表示,燃料锅炉用 RB 表示,热电联产机组用 CHP 表示,干熄焦发电机组用 CDQ 表示,高炉余压透平发电机组用 TRT 表示,并且假设这五种热电设备都有若干台,编号为 1#,2#...N#,主工序余热回收工序用 1,2...N 表示。

综上所述,在确保钢铁企业主工序正常生产的蒸汽需求、电力需求的前提下,

建立综合考虑煤气、蒸汽和电力三种能源介质协同调度的数学规划模型，试图通过研究富余煤气在热电用户之间的优化分配，寻找最佳的蒸汽和电力需求负荷生产方案，这是本文提出的钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同优化模型首要解决的问题。由于钢铁生产过程是一个动态变化的连续过程，煤气的富余量以及蒸汽和电力的需求都是随时间动态变化的，然而数学规划方法通常给出的优化方案是某一段时间的优化结果（能源分配方案），并且某些变量状态还与上一段时间的状态有关。因此，利用数学规划方法建模时，需要对钢铁实际动态生产过程进行静态化处理。通常是将周期内动态连续变化的钢铁生产过程分割成多个时段，每一个时段长度根据具体情况确定，从而转化成一个多时段问题。然后，利用数学规划方法求解每个时段就可以看作是静态的，而求解连续多个时段问题，最终又可使其表现为一个动态问题。

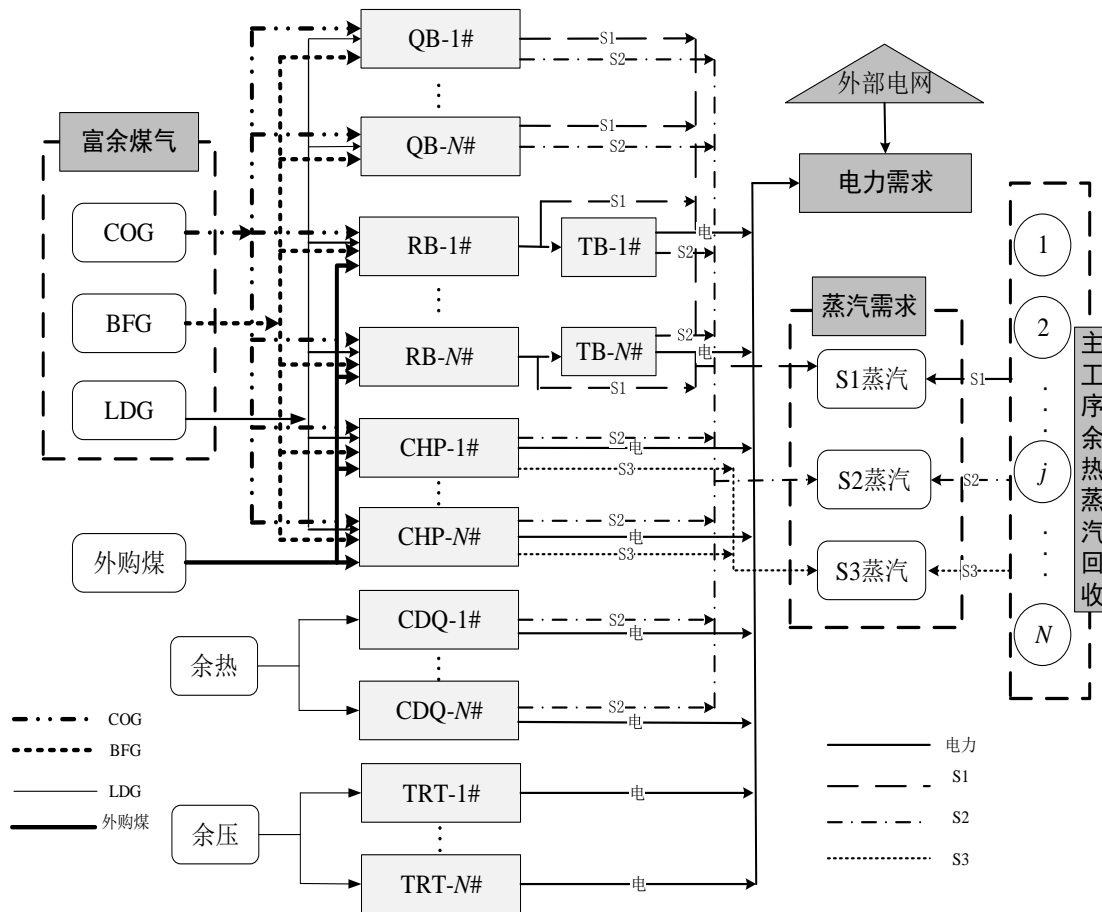


图 3.1 煤气、蒸汽、电力优化调度模型简图

Fig. 3.1 Schematic diagram of gas, steam and electric power optimal dispatching model

3.1.2 模型假设与简化

由于煤气-蒸汽-电力系统涉及到复杂的生产工艺流程和各种用能、产能、转换

设备单元,影响各设备单元能源产耗的因素较多,实际运行情况比较复杂,这给优化建模带来较大困难。根据建模需求和现实可行性,在建立调度模型之前,做出如下简化和假设:

①在给定生产条件下,煤气在主工序用户的消耗量不变,模型不考虑煤气在主工序用户的最优分配问题,或者认为主工序用户上的调度已完成,直接将富余煤气作为研究的起始点,只研究富余煤气在各能源设备上的消耗和转换。

②在给定生产条件下,假设主工序用户蒸汽需求量已知,所以本文考虑蒸汽生产负荷在相关发电环节以及蒸汽生产环节之间的优化调度问题,而不考虑蒸汽在主工序用户上的具体使用。

③在给定条件下,假设主工序用户的电力需求量已知,模型只考虑电力生产负荷在发电设备上的优化分配,而不考虑电力需求侧的用电分配。

④不考虑能源在输送过程中的损失,如煤气热值损耗和蒸汽等级降低等,认为各间段煤气和蒸汽的热值都是固定不变的。

⑤假设煤是唯一的外购能源。

3.1.3 参数和变量定义

表 3.1 模型符号列表

Table 3.1 List of the model symbols

| 符号 | 符号含义 |
|-------|-----------------------|
| t | 调度周期, $t=1,2,\dots,T$ |
| T | 调度周期个数 |
| m | 发电和蒸汽生产设备编号 |
| g | 煤气类型编号, $g=1,2,3$ |
| r | 蒸汽类型编号, $r=1,2,3$ |
| j_1 | 消耗焦炉煤气的设备编号 |
| j_2 | 消耗高炉煤气的设备编号 |
| j_3 | 消耗转炉煤气的用户编号 |
| w_1 | 产生 S1 蒸汽的设备编号 |
| w_2 | 产生 S2 蒸汽的设备编号 |
| w_3 | 产生 S3 蒸汽的设备编号 |

表 3.1 中煤气编号 1 代表焦炉煤气, 2 代表高炉煤气, 3 代表转炉煤气; 蒸汽编号 1 代表高压蒸汽, 2 代表中压蒸汽, 3 代表低压蒸汽。

表 3.2 模型参数列表

Table 3.2 List of the model parameter

| 参数 | 参数含义 | 单位 |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| $D_{r,t}^{str}$ | t 时段内主工序用户 r 等级蒸汽的需求量 | t/h |
| $G_{g,t}^{sur}$ | t 时段内煤气 g 的富余量 | m^3/h |
| D_t^{ele} | t 时段内主工序用户的电力需求量 | $kW \cdot h$ |
| C_g^{rel} | 煤气 g 的放散惩罚系数 | $元/m^3$ |
| C_g^{use} | 煤气 g 的使用费用 | $元/m^3$ |
| C_{buy}^{coal} | 外购煤炭价格 | $元/kg$ |
| C_{gen}^{ele} | 自产电力成本 | $元/kg$ |
| $C_{buy,t}^{ele}$ | t 时段内外购电价格 | $元/kW \cdot h$ |
| $C_{sale,t}^{ele}$ | 电力外卖价格 | $元/kW \cdot h$ |
| P_m | 设备 m 的额定发电量 | $kW \cdot h$ |
| $Z_{r,m}^{max}$ | 设备 m 的产生 r 蒸汽的最大能力 | t/h |
| $X_{g,m}^{\min}$ | 设备 m 消耗 g 煤气的最小进口流量 | m^3/h |
| $X_{g,m}^{\max}$ | 设备 m 消耗 g 煤气的最大进口流量 | m^3/h |
| η_m | 设备 m 的能源转换效率 | —— |
| h_g^{gas} | g 煤气的热值 | kJ/m^3 |
| h_r^{ele} | r 蒸汽的热值 | kJ/kg |
| h^{coal} | 煤炭的热值 | kJ/kg |
| h^{ele} | 电力的折算热值 | $kJ/kW \cdot h$ |
| H_m^{\min} | 煤气混烧设备最低热值要求 | kJ/m^3 |

表 3.3 模型变量列表

Table 3.3 List of the model variables

| 变量 | 变量含义 | 单位 |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $R_{g,t}$ | 调度时段 t 内煤气 g 的放散量 | m^3/h |
| $X_{g,m,t}^{gas}$ | 设备 m 在 t 时段内煤气 g 的消耗量 | m^3/h |
| $Z_{r,m,t}^{str}$ | 设备 m 在 t 时段的 r 蒸汽的产生量 | t/h |
| $P_{gen,m,t}^{ele}$ | 设备 m 在 t 时段的发电量 | $\text{kW} \cdot \text{h}$ |
| $P_{gen,t}^{ele}$ | t 时段总的发电量（计算变量） | $\text{kW} \cdot \text{h}$ |
| $P_{buy,t}^{ele}$ | 调度时段 t 内外购电量 | $\text{kW} \cdot \text{h}$ |
| $P_{sale,t}^{ele}$ | 为调度时段 t 的外卖电量 | $\text{kW} \cdot \text{h}$ |
| $F_{m,t}^{coal}$ | 设备 m 在 t 时段的煤炭消耗量 | kg |
| $F_{buy,t}^{coal}$ | 在 t 时段外购煤炭量（计算变量） | kg |

3.1.4 优化目标及意义

一般地，可以将钢铁企业能源调度优化目标分为三个层次：

首先是能源保供目标。任何能源优化调度问题首先应该确保能源稳定供给，保证生产正常进行，通过各种调控措施，达到能源供需平衡，这也是能源优化的基础目标。

其次是节能环保目标。能源放散严重一直是钢铁企业能耗较高的一个重要原因，能源调度应在确保能源保供的前提下，最大限度使用钢铁企业自产能源，以减少能源浪费和环境污染。

最后是经济效益目标。在实现了能源保供和节能环保目标后，钢铁企业更关注的是企业整体经济效益的提升，通过煤气、蒸汽、电力的内部转化来满足企业对蒸汽和电力的需求，以减少外购能源和外购电力，提升企业整体效益。

以上三个层次的目标是钢铁企业能源调控的常见优化目标，实际中生产，钢铁企业应根据自身具体的情况选择不同的调控目标，以便能源的精准调控。

3.1.5 目标函数

在煤气富余的情况下，主工序刚性用户的煤气使用要求已经得到满足，应选择能源保供（蒸汽和电力）、节能环保和经济效益最大作为调控目标。为兼顾上述

多个优化目标，避免决策变量太多，将能源保供目标转化为约束条件，将能源放散施以惩罚转化为能源放散损失，从而建立包括外购煤炭费用、外购电费用、自发电成本费用、电力外卖收益、煤气使用费用和煤气放散费用在内的系统能源成本最小为目标函数的数学模型。假设模型为 T 个调度周期的数学优化分配问题，目标函数如式 (3.1) 所示。

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

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罚。考虑煤气使用费用是因为煤气本身具有价值，除用作产蒸汽和发电外还可用于煤气资源化以产生其它效益。

3.1.6 约束条件

根据能源保供以及要确保系统安全、设备产能、能量守恒等要求，调度模型需要满足一定的约束条件。本文考虑的约束有：能源介质保供约束、能量平衡约束、设备产能和耗能上下限约束等。

① 能源介质保供约束。

钢铁企业在不同时间，煤气富余量以及蒸汽和电力的需求量是动态变化的，能源优化要保证这些能源的需求，才能保证生产正常进行。

1) 煤气供需平衡

对于富余煤气，每个时段消耗煤气加上放散的煤气量等于每个时段富余煤气的供应量且消耗煤气总量应小于或等于富余煤气供应量。

$$\sum_m X_{g,m,t}^{gas} + R_{g,t} = G_{g,t}^{sur}, \quad \forall g, t \quad (3.2)$$

2) 蒸汽保供约束

对于蒸汽，各时段不同等级的蒸汽产生总量应大于等于其在该时段的需求量。

$$\sum_m Z_{r,m,t}^{str} \geq D_{r,t}^{str}, \quad \forall r, t \quad (3.3)$$

3) 电力保供约束

对于电力，各时段自产电力和外购电力之和应大于等于该时段电力需求量。

$$\sum_m P_{gen,m,t}^{ele} + P_{buy,t}^{ele} \geq D_t^{ele}, \quad \forall t \quad (3.4)$$

② 热量平衡约束

根据热力学第一定律，能源从一种形式转换成另一种形式的过程中，始终保持能量守恒。本文所研究的煤气、蒸汽、电力协同调度是建立在煤气、蒸汽和电力相互转换的基础之上，因此需要满足能量平衡约束。可是在实际生产中，能源转换不可避免的存在一些不可统计的能量损失（如炉渣、废气），因此只能建立近似的热量平衡关系式来寻找三者之间的优化调度关系。根据第 2 章对能源转换方式的分类，分别建立煤气转换为蒸汽、蒸汽转换为电力、煤气转换为蒸汽和电力三个环节的热量平衡约束。

1) 煤气转换为蒸汽热量平衡约束

$$\eta_m \cdot (\sum_g X_{g,m,t}^{gas} \cdot h_g^{gas} + F_{m,t}^{coal} \cdot h^{coal}) = \sum_r Z_{r,m,t}^{str} \cdot h_r^{str}, \forall m, t \quad (3.5)$$

2) 蒸汽转换为电力热量平衡约束

$$\eta_m \cdot (X_{r,m,t}^{str} \cdot h_r^{str} - \sum_r P_{r,m,t}^{str} \cdot h_r^{str}) = P_{gen,m,t}^{ele} \cdot h^{ele}, \forall m, t \quad (3.6)$$

3) 煤气转换为蒸汽和电力热量平衡约束

$$\eta_m \cdot (\sum_g X_{g,m,t}^{gas} \cdot h_g^{gas} + F_{m,t}^{coal} \cdot h^{coal}) = \sum_r Z_{r,m,t}^{str} \cdot h_r^{str} + P_{gen,m,t}^{ele} \cdot h^{ele}, \forall m, t \quad (3.7)$$

③ 设备产能及能耗约束

为了保证生产运行稳定和安全，钢铁企业能源系统中，各种生产、转换、消耗设备都有其额定功率工作范围。本文主要考虑煤气消耗用户进气限制、蒸汽产能、发电机组额定功率这几种能源转换设备的运行能力约束。

1) 煤气消耗用户进气能力限制

在煤气转换为蒸汽的过程中，进入锅炉的煤气流量不应该超出锅炉所能承受上限，同时要满足锅炉供热的最小流量要求，该约束可以被定义为不等式（3.8）。

$$X_{g,m}^{min} \leq X_{g,m,t}^{gas} \leq X_{g,m}^{max}, \forall m, t \quad (3.8)$$

2) 蒸汽发生设备的产能约束

设备产汽量约束，像启动锅炉和 130T 锅炉都有最大产汽量限制，有些发电设备在蒸汽需求紧张的时候可以在一定范围抽汽。该约束可以被定义为不定式（3.9）。

$$0 \leq Z_{r,m,t}^{str} \leq Z_{r,m}^{max}, \forall m, t \quad (3.9)$$

3) 发电机组额定发电能力约束

$$0 \leq P_{gen,m,t}^{ele} \leq P_m^{ele}, \forall m, t \quad (3.10)$$

④ 混烧设备燃料平均热值约束

钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统普遍使用混合煤气，并建有煤气混合站，例如燃料锅炉，它们在设计的时候就具备混合燃烧不同燃料的能力，它们可以在一定程度上调节能源使用的灵活性，在混合燃烧不同煤气时必须满足锅炉对煤气热值最低要求，锅炉才能做功，该约束可被定义为不等式（3.11）。

$$H_m^{\min} \leq \frac{\sum_g X_{g,m,t}^{gas} \cdot h_g^{gas}}{\sum_g X_{g,m,t}^{gas}}, \quad \forall m, t \quad (3.11)$$

⑤ 其它操作约束

一般而言，在同一调度时段内，钢铁企业要么购电，要么售电，购电和售电不能同时发生，因此可建立如式（3.12）所示的约束。

$$P_{buy,t}^{ele} \cdot P_{sale,t}^{ele} = 0, \quad \forall t \quad (3.12)$$

⑥ 变量非负约束

模型中的变量都大于等于 0。

$$R_{g,t} \geq 0; \quad X_{g,m,t}^{gas} \geq 0; \quad Z_{r,m,t}^{str} \geq 0;$$

$$P_{gen,m,t}^{ele} \geq 0; \quad P_{buy,t}^{ele} \geq 0; \quad P_{sale,t}^{ele} \geq 0; \quad F_{m,t}^{coal} \geq 0$$

3.2 模型特点

本文所建立的煤气-蒸汽-电力调度模型主要目的是为实现钢铁企业富余煤气优化分配以及蒸汽和电力的合理生产，在保证能源供应和系统安全的前提下，使得调度周期系统能源成本最小。但本质上是通过优化富余煤气在不同热电转换设备上的分配和优化蒸汽在发生设备之间的生产调度，从而实现钢铁企业的自发电力的优化生产，最终为钢铁企业提供一种最佳的富余煤气分配方案、最佳的蒸汽和电力生方案，以及外购电力和外购煤炭方案，从而减少外购能源，降低能源成本。因此说，该模型的特点表现为一种综合考虑钢铁企业的煤气、蒸汽和电力三种能源介质的协同优化模型。其中，富余煤气的优化分配和蒸汽的生产调度是手段，而电力的生产与外购优化调度是最终目的，三种能源通过热电转换设备进行互动并耦合在一起。

3.3 模型主要考虑的问题

3.3.1 分时电价

分时电价作为供电公司调节用户错峰用电的一种常用手段，对高耗能企业控

制用电成本和供电公司控制电网稳定运行都具有重要的影响。通常是供电公司根据电网的负荷变化，给不同时段划定不同的电价，以鼓励和引导用户合理安排用电时间，达到良好的削峰填谷效果，从而缓解电网负荷峰值过高的压力，提高社会电力资源的利用效率。

在钢铁企业中，分时电价对煤气、电力、蒸汽协同调度的影响，主要体现在它通过目标函数来调整发电设备的发电量、状态以及运行时段，从而影响到相关能源在发电设备上的分配和转换。上述目标函数中既有外购电成本，也有自发电收益，而这两项都与分时电价有关。要想使得目标函数能源成本最小，就需要想办法减少外购电成本，增加发电收益。在用电高峰时段电价比较高时，尽可能多用富余煤气增加自发电，以减少外购电，在用电低谷时段电价低，要尽可能多用外购电，以降低自发电成本。

3.3.2 工序余压余热

钢铁生产会消耗了大量的能源，同时也会产生大量的余压余热资源。这些余压余热资源通过特定的设备也会产生蒸汽和电力，例如焦化工序可以通过干熄焦发电和产蒸汽、炼铁工序可利用高炉余压进行发电、炼钢工序转炉产生高温烟气也可通过余热锅炉回收进行发电等等，可以说这些余压余热资源遍布于整个钢铁生产流程中。充分利用从各个生产工序回收余压余热资源，一方面可以降低工序能耗，提高钢铁企业总体能源利用效率，另一方面也能为企业提供一定的蒸汽和电力。它们同样参与到蒸汽网络和电力网络中，供给主工序生产过程使用。因此，在煤气-蒸汽-电力调度优化时，不仅要关注热电转换设备上产生的蒸汽和电力，还需要将由主工序余压余热资源产生的蒸汽和电力考虑进来，统筹优化。

煤炭价格

3.3.3 煤炭价格

本文中假设煤炭是唯一的外购能源，因此没有别的外购能源（不算电力），当富余煤气不够发电需求时，只能外购煤炭来进行补充。因此，煤炭价格将成为影响能源成本的重要因素之一。事实上，不同煤炭因品质、市场环境等不同，价格也会差异很大，市场上工业用煤吨价一般在 320~980 元左右，不同的煤价条件下，模型的优化结果不同，所以需要考虑煤炭价格对模型的影响，据此制定符合经济效益的能源调度方案。本文将在第 4 章讨论和分析煤炭价格对模型优化结果的影响。

3.4 模型求解

3.4.1 CPLEX 介绍

本文建立的钢铁企业煤气、蒸汽和电力调度模型为数学规划模型，它由一个

多元的目标函数和一系列的等式或不等式约束条件构成，涉及的模型变量和约束条件较多，其求解过程为寻求目标函数极值的过程。为了能在较短时间内得到有效的调度方案，本文采用 ILOG CPLEX 软件对模型进行编程求解。

ILOG CPLEX 是 IBM 公司开发的专门用于求解最优化问题的软件包，它的计算速度非常快，提供了灵活的、高性能的优化器^[90,91]，可以解决现实世界中许多大规模复杂问题，如线性规划、二次规划、二次约束规划以及混合整数规划等问题，并利用现在的应用系统快速提交可靠的解决方案。CPLEX 求解线性规划和混合整数线性规划问题，能够处理数以百万计的变量和约束条件，并分别为不同类型的问题设置了相应的求解器。CPLEX 组件库提供了与不同开发平台交互的 API 接口，开发人员通过组件库从其他编程语言调用 CPLEX 中的算法，具有很强的可移植性。常见的组件库包括 C、C++、java、matlab 和 .net 接口。也可以直接使用 ILOG CPLEX 软件自带的建模语言 OPL 调用 ILOG CPLEX 算法，而 OPL 无疑是调用 CPLEX 最方便的建模工具，它有两个优点，一是 OPL 与 C++ 等高级语言不同，它不是面向对象的编译型语言，而是解释性、描述性语言。它支持的数据结构丰富，有效缩短了建模时间。二是 OPL 程序主要包括模型与数据两部分，模型写在文件.mod 里面，而数据则可写在文件.dat 里，彼此分离，便于对数据进行重构。可以先使用简单的数据调试模型，待模型经调试可行后，再直接连接到实际数据进行优化。而且 OPL 可以和多种电子表格、数据库软件结合使用，实现数据高效传输。用 OPL 开发模型文件与数据文件是利用 CPLEX 求解数学规划模型的关键。CPLEX 编程主要步骤如下：

- ① 根据实际问题，建立准确的数学模型。
- ② 将数学模型转化为 OPL 语言表达，编写模型文件。包括定义基础数据变量、定义模型调度决策变量、设定模型目标函数、设定约束条件和定义输出变量五个部分内容。
- ③ 将模型所需要的各种能源数据和设备参数按照规范录入到数据文件，设计模型数据文件，。
- ④ 在模型文件中配置数据文件，以供模型文件进行运行求解。

3.4.2 调度执行步骤

本文所建的煤气-蒸汽-电力调度模型按图 3-2 所示流程图执行。首先根据实际生产设备输入模型初始参数，配置得到初始调度模型；然后通过生产计划获取调度时间，并且从能源数据库中获取数据对模型变量进行初始化赋值，最后利用 CPLEX 软件对模型进行编程求解，得到煤气、蒸汽和电力的优化分配方案。如果模型计算无解，则先检查输入的变量初始数据是否在各能源转换设备的产/耗能范围之内，若是没有问题就再分析模型配置是否正确。实际操作发现绝大数的代码

运行错误原因都出在数据初始化和模型配置这两个方面，因此，在求解模型出现问题时可以考虑先分析这方面时候存在问题。若是模型有解则输出煤气、蒸汽、电力调度结果并对其进行分析。

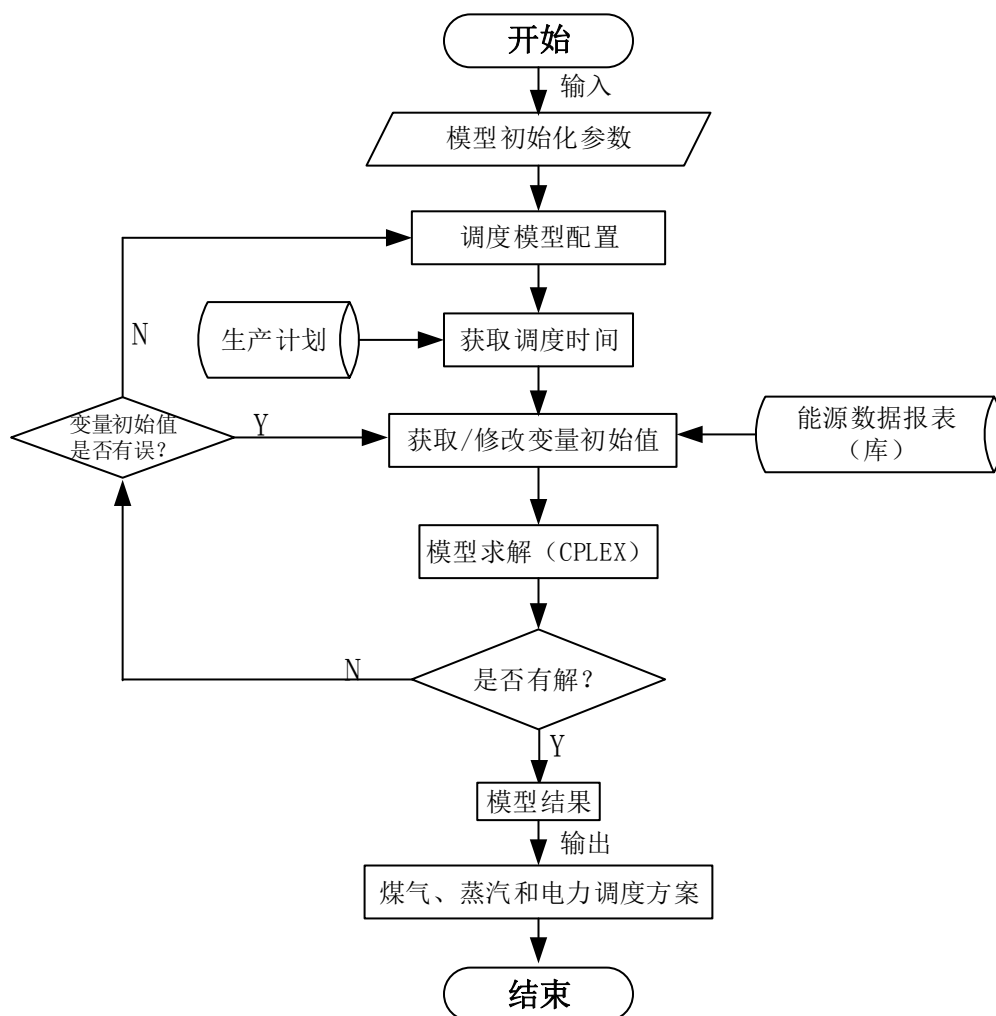


图 3.2 模型调度流程图

Fig. 3.2 Scheduling flow chart of the model

3.5 模型测试

由章节 1.3 知，利用数学规划方法对实际问题进行建模的难点在于模型建立的准确性和实际问题中相关模型参数获取的可能性。本文结合钢铁企业能源系统实际特点，建立了综合考虑煤气、蒸汽和电力协同调度的数学规划模型。通过与其他人的模型优化结果对比，可以间接的证明所建模型的准确性。因此，本文利用文献^[92]中某钢厂在一天 24 小时的煤气富余量、蒸汽需求量、电力需求量数据以及设备参数来测试所建调度模型的准确性。

该文献中的模型以某钢厂的蒸汽-电力系统为研究对象，系统中包括燃料锅炉、

干熄焦发电机组、热电联产机组和抽汽式汽轮机组成；系统的能源输出包括余热蒸汽、焦炉煤气、高炉煤气和燃料煤，能源输出包括三种等级的蒸汽和电力；该模型将一天分为 24 个时段，每个时段 1 小时，该模型输入数据表给出了各个时段的煤气供应量和蒸汽、电力需求量。本文选择了该文献模型输入数据表中 5 个时段（ P_1 、 P_6 、 P_{12} 、 P_{18} 、 P_{24} ）的煤气、蒸汽、电力数据作为模型测试数据，见表 3.4 所示。模型参数取与文献中^[92]相同数值，利用表 3.4 中数据进行了 5 次独立实验，为了表达方便，将本文的模型记为测试模型，其优化结果对应记为测试值；将文献中的模型记为参照模型，其优化结果对应记为参照值，将文献中优化前的能源成本记为实际值。求解得到各次测试的能源成本和各设备上的能源分配方案。各能源设备上的能源分配方案结果如表 3.5 所示。

表 3.4 模型测试数据

Table 3.4 The data of model test

| Number of tests | COG | BFG | S1 | S2 | S3 | Ele |
|-----------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Testdata1 | 53.53 | 535.51 | 68.08 | 232.02 | 72.88 | 706.28 |
| Testdata6 | 41.40 | 591.34 | 66.46 | 227.09 | 75.43 | 692.70 |
| Testdata12 | 41.19 | 434.83 | 69.25 | 211.31 | 95.31 | 590.32 |
| Testdata18 | 49.33 | 490.65 | 65.41 | 204.20 | 94.43 | 627.63 |
| Testdata24 | 47.94 | 544.32 | 66.00 | 216.08 | 90.16 | 672.49 |

图 3.3 为测试模型优化值与参照模型优化值和实际值的对比情况。

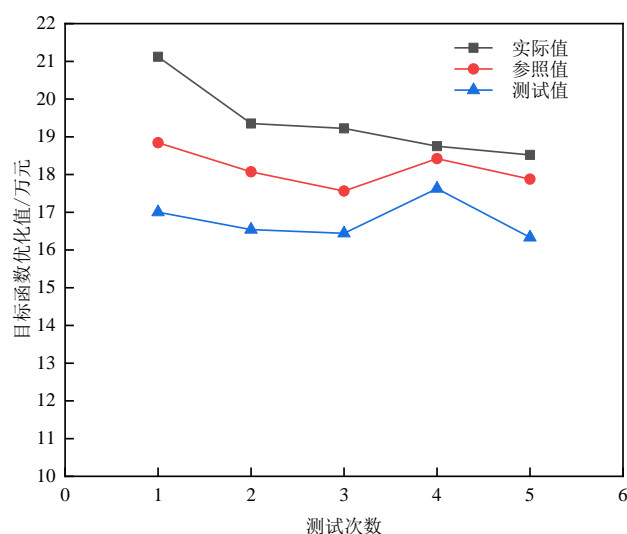


图 3.3 测试模型与参考模型优化结果对比

Fig. 3.3 Comparison of model test and reference model optimization results

从图 3.3 可以看出测试模型优化值与参照模型优化值变化趋势一致, 5 次优化结果分别为 17.01 万元、16.54 万元、16.44 万元、17.63 万元、16.33 万元, 在优化数值上均低于参考模型优化值和实际值, 可计算各次优化结果相比于参照模型优化结果的降低程度 ω :

$$\omega = \left[\frac{Z_o - Z_1}{Z_o} \right] \times 100\% \quad (3.13)$$

式中 Z_o 、 Z_1 分别为参照模型优化值和测试模型优化值。

根据式(3.13)分别计算 5 次测试的降低程度分别为: 9.8%、8.5%、12.1%、9.7%、8.6%。各次测试能源成本平均降低程度为 9.7%。由此可以说明所建模型在优化结果准确性上是可信的。

表 3.5 模型测试优化分配结果

Table 3.5 Model test optimization allocation results

| 设备 | 启动锅炉 | | | 130t 锅炉 | | | CHP | | | | CDQ | |
|-------|------|------|------|---------|-------|-----|-------|-------|------|-------|-----|-----|
| 能源 | COG | BFG | S1 | COG | BFG | S2 | COG | BFG | S2 | Ele | S2 | Ele |
| test1 | 10 | 36.7 | 68.1 | 20 | 103.8 | 130 | 25.5 | 394 | 42.1 | 528.3 | 57 | 60 |
| test2 | 4.8 | 60 | 66.5 | 14 | 131.3 | 130 | 21.8 | 400 | 37.1 | 509.7 | 53 | 60 |
| test3 | 10 | 38.2 | 39.3 | 20 | 125.4 | 130 | 11.2 | 271 | 21.9 | 407.3 | 49 | 60 |
| test4 | 10 | 33.4 | 69.3 | 20 | 124.3 | 130 | 19.33 | 332.8 | 14.2 | 444.6 | 60 | 60 |
| test5 | 4.69 | 60 | 66 | 20 | 120.3 | 130 | 23.25 | 364 | 26.1 | 489.4 | 60 | 60 |

上述测试结果表明模型能够得到可行解, 能够在满足实际生产和安全要求等等约束的前提下, 运行求解得到煤气、蒸汽和电力在各个设备上的优化分配方案, 因此所建模型是准确的。下一章将进一步讨论模型在钢铁企业实际生产中的应用效果。

3.6 本章小结

本章建立了钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度模型。首先, 通过问题描述和模型假设, 构建了煤气-蒸汽-电力协同调度模型示意图。然后, 根据模型示意图生成的设备连结及能源转换信息, 以系统全天能源成本最小为目标函数, 以能源介质保供、热量守恒、设备运行等数学和工艺要求为约束条件, 建立了综合考虑煤气、蒸汽、电力协同调度的多时段数学规划模型。模型目标函数包括外购煤炭费用、外购电费用、自发电成本费用、煤气使用费用、电力外卖收益和煤气放惩罚等六

项费用。最后，对模型的特点、模型主要考虑的问题和模型求解软件 ILOG CPLEX 进行了简要的说明和介绍，最后对模型进行了测试，通过与参照值和实际值对比，得出所建模型是准确可信的。

4 某钢铁企业煤气-蒸汽-电力调度实例分析

考虑到实际钢铁生产过程中，煤气在绝大多数时间都是有富余的，所以本文优先研究煤气富余情况的煤气优化分配和蒸汽、电力供需问题。本章以国内某大型钢铁企业为研究对象，首先分析该钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统的结构，明确各系统调度对象的范围。在此基础上，结合该厂的实际数据和设备参数，将第3章所建调度模型具体化。然后，利用 ILOG CPLEX 对模型进行求解，得到富余煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备上的优化分配方案。将所求结果与钢铁企业实际生产情况进行对比，验证模型的有效性和优化性。最后，分析了分时电价和煤炭价格对模型的影响。

4.1 研究对象概况

本章以国内某大型钢铁企业为研究对象，来分析模型的应用效果。该企业主要生产流程及主体设备如图 4.1 所示。

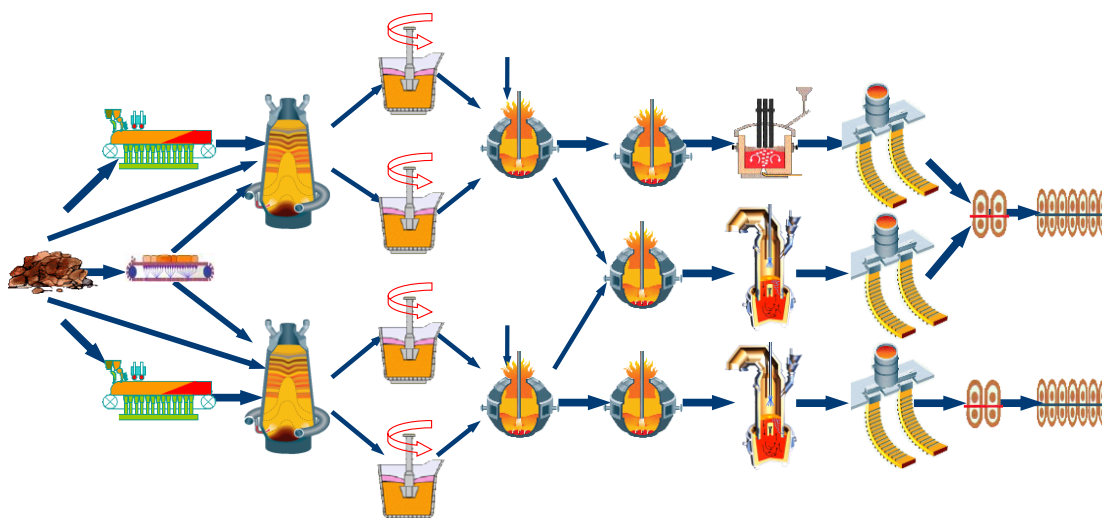


图 4.1 该企业主要的生产流程及设备

Fig. 4.1 The main production process and main equipment of enterprise

该钢铁企业设备繁多，能源系统结构复杂，具备年产钢坯 970 万吨、钢材 912.82 万吨的能力。其中主体工艺设备包括：4 座 70 孔 7.63 米大型焦炉及配套的干熄焦设施，2 台 550 平方米烧结机，1 台 504 平方米球团带式焙烧机，2 座 5500 立方米大型高炉；2 座 300 吨脱磷转炉、3 座 300 吨脱碳转炉、1 座 LF 精炼炉、2 座 CAS 精炼炉、2 套 RH 钢水真空精炼炉、2 台 2150 毫米双流板坯连铸机和 1 台 1650 毫米双流板坯连铸机；2250 毫米、1580 毫米热连轧机组各一套，2230 毫米、1700

毫米、1420 毫米酸洗—冷轧联合机组各一套以及配套的连续退火机组、罩式退火、热镀锌、横切机组生产线等。

4.2 该企业煤气、蒸汽、电力系统介绍

通过实地调研和查阅该企业的能源操作手册，得到该钢铁企业的煤气系统、蒸汽系统和电力系统的设备单元组成结构。

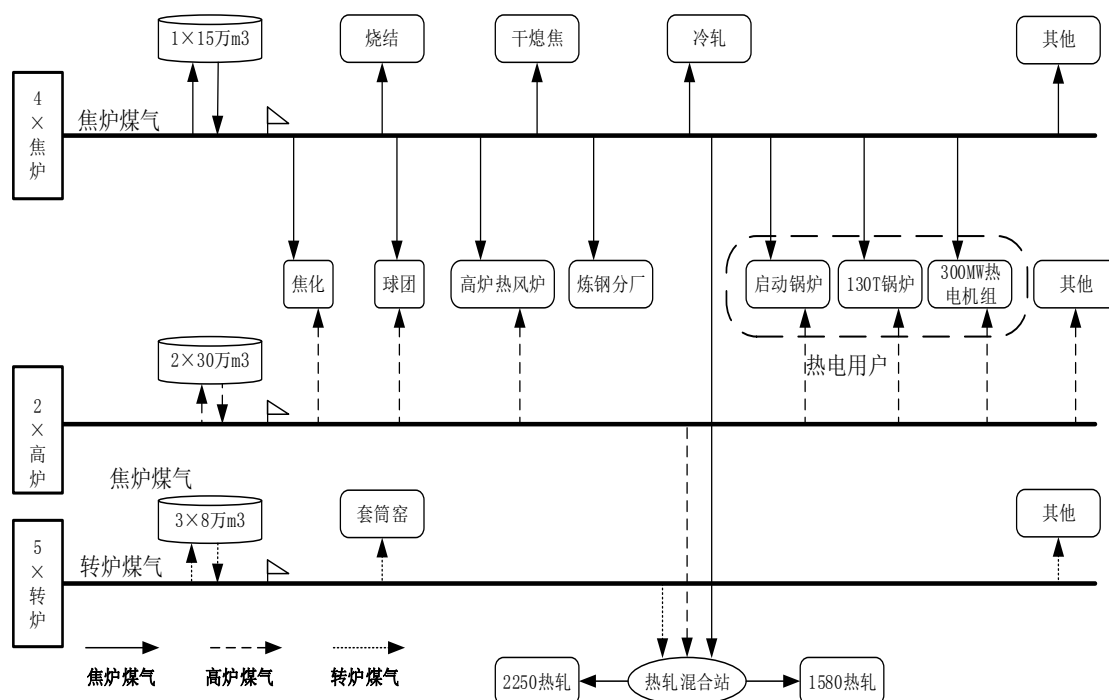


图 4.2 该钢铁企业煤气系统结构图

Fig. 4.2 Structural diagram of gas system in the iron and steel enterprise

该钢铁企业的煤气系统结构如图 4.2 所示。回收的煤气主要来自生产中的焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气。煤气用户分为主工序用户和热电用户。主工序用户包括焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、热轧、冷轧等；热电用户包括 2 台启动锅炉、2 台 130T 的燃料锅炉和 2 套 300MW 热电联产（CHP）发电机组。煤气系统在保证主工序的煤气使用需求后，剩余的煤气主要送往热电用户，用于产生蒸汽和发电。其中，焦炉煤气主要用于焦化、球团、炼铁、炼钢、启动锅炉和热电机组；高炉煤气主要用于热风炉、焦化、热轧、启动锅炉和热电机组；转炉煤气主要用于套筒窑和热轧混合站，而没有用于热电用户进行产蒸汽和发电，所以在后文的能源调度中将不考虑转炉煤气，只考虑富余焦炉煤气和富余转炉煤气的调度。由于主工序用户在生产计划给定和生产状况稳定的情况下，消耗的煤气量一般变化不大，因此本文中没有考虑主工序用户的煤气调度，认为主工序的煤气调度已

经完成，直接以富余煤气作为本文研究的起点，只研究富余煤气在各个热电用户上的转换和分配。

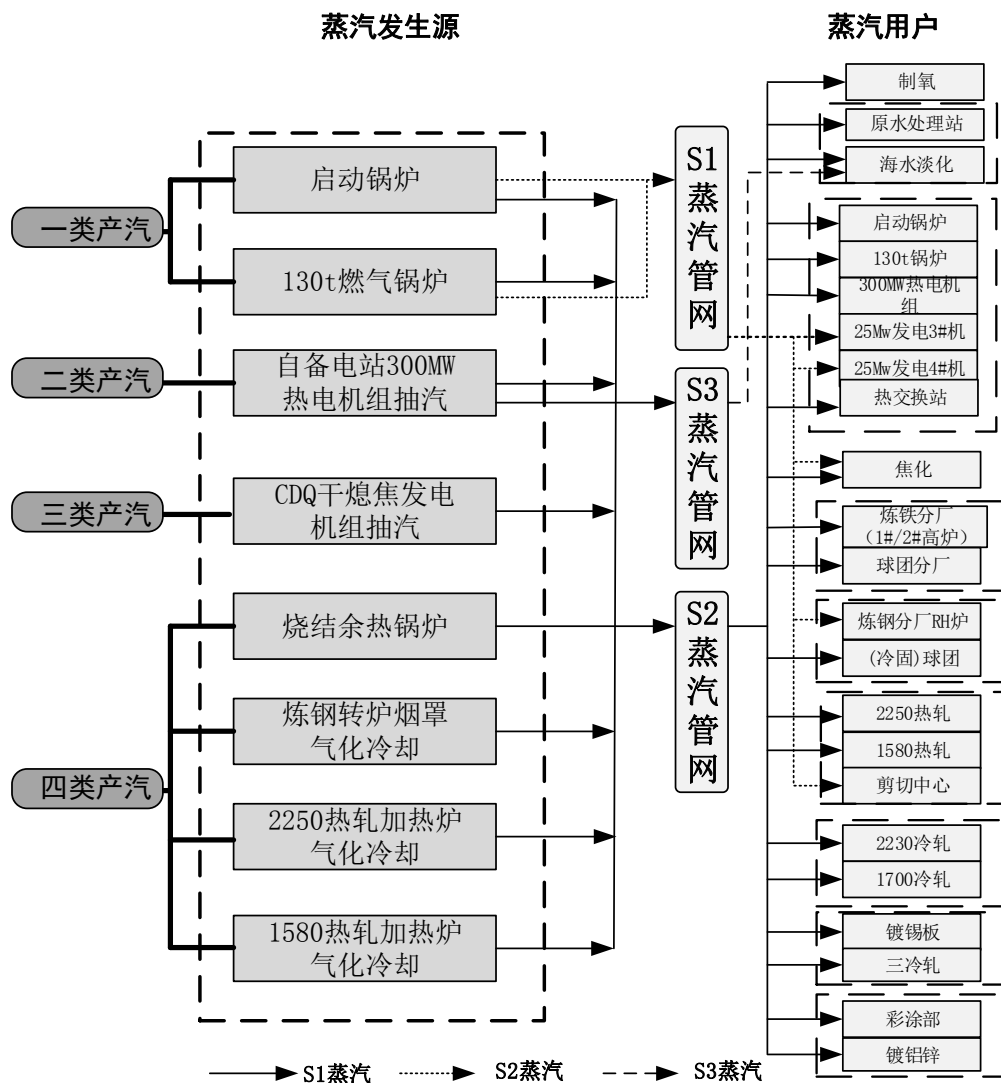


图 4.3 该钢铁企业蒸汽系统结构图

Fig. 4.3 Structural diagram of steam system of the iron and steel enterprise

该钢铁企业蒸汽系统结构如 4.3 所示。蒸汽产生主要有 8 种来源，按照来源可分为四类，一是启动锅炉和 130t 燃料锅炉，这类蒸汽通常作为稳定的供汽源为用户提供蒸汽；二是 300MW 热电联产（CHP）机组抽汽；三是干熄焦发电机组抽汽；四是主工序生产余热，包括烧结余热锅炉、转炉氧气罩汽化冷却、1580 热轧加热炉汽化冷却和 2250 热轧加热炉汽化冷却。

蒸汽的主要用户可分为主工序用户和热电用户。钢铁企业通常遵循优先保证主工序蒸汽需求和优先使用工序回收的余热蒸汽的原则，由于主工序用户的蒸汽

需求量作为约束性条件必须保证供应，且给定生产状况下主工序回收的余热也比较稳定，蒸汽按满负荷生产。因此，主工序生产过程中产生的蒸汽以及用于主工序生产过程的蒸汽都将不作为调度对象，只考虑蒸汽需求负荷在前三类蒸汽发生设备上的分配以及用于发电消耗的蒸汽。

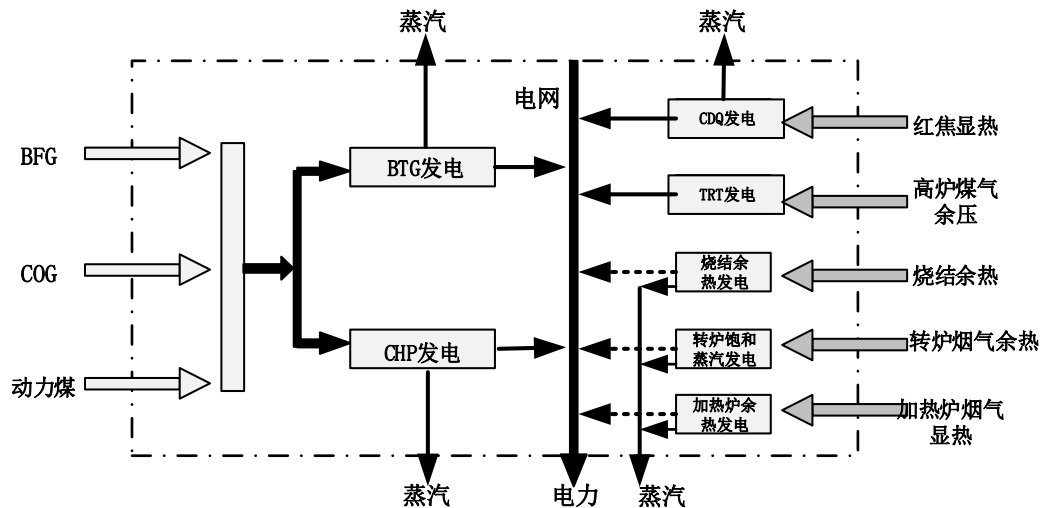


图 4.4 该钢铁企业自发电生产系统结构图

Fig. 4.4 Power production system structure diagram of the iron and steel enterprise

该钢铁企业自发电生产系统结构如图 4.4 所示，系统中的输入能源包括动力煤、两种富余煤气以及各种工序余热余能资源，通过转换设备输出电力和不同品质的蒸汽，供企业生产、生活使用。电力生产单元主要有四种发电机组，包括 2 座干熄焦发电机组（CDQ）、2 座高炉余压透平发电机组（TRT）、2 座汽轮机发电机组（BTG）和 2 座 300MW 热电联产发电机组（CHP）。另外，该企业虽然建设有烧结、转炉、轧钢等余热发电装备，但一直未曾用来发电，只是用来回收蒸汽，所以本文没有将它们纳入电力生产系统，仅以虚线表示它们在系统中的发电位置。电力的消耗用户主要是主工序的各种生产用户，由于主工序用户的电力需求作为约束条件必须保供，因此，本文只考虑电力需求负荷在各发电机组上的分配，不考虑电力在各主工序用户上的具体使用分配。

4.3 该企业煤气蒸汽电力调度模型

通过对该钢铁企业煤气系统、蒸汽系统、电力系统各自结构的介绍和分析，按照 3.1 节同样中的方法，可绘制出该钢铁企业的煤气-蒸汽-调度模型简图，如图 4.5 所示。本文涉及的调度单元主要为煤气-蒸汽-电力系统中的能源转换设备，包括 2 台启动锅炉、2 台 130t 燃料锅炉、2 台汽轮机及配套发电机组、2 座 300MW

热发电机组、2 座干熄焦发电机组、2 座 TRT 发电机组、2 台烧结余热锅炉、2 座转炉氧气罩汽化冷却装置、1580 热轧加热炉汽化冷却和 2250 热轧加热炉汽化冷却装置。因为相同设备各种参数和运行能力都相同，为了便于标记和建模，将相同设备进行统一编号， $m=1,2,3,4,5$ 。具体的调度对象为各能源转换设备上消耗和产生的能源介质。对煤气系统来说就是各种锅炉和发电机组消耗的煤气，对蒸汽系统就是锅炉产的蒸汽和发电机组抽汽量以及用于发电消耗的蒸汽，对电力系统就是发电机组消耗的煤气、蒸汽以及产生的蒸汽。

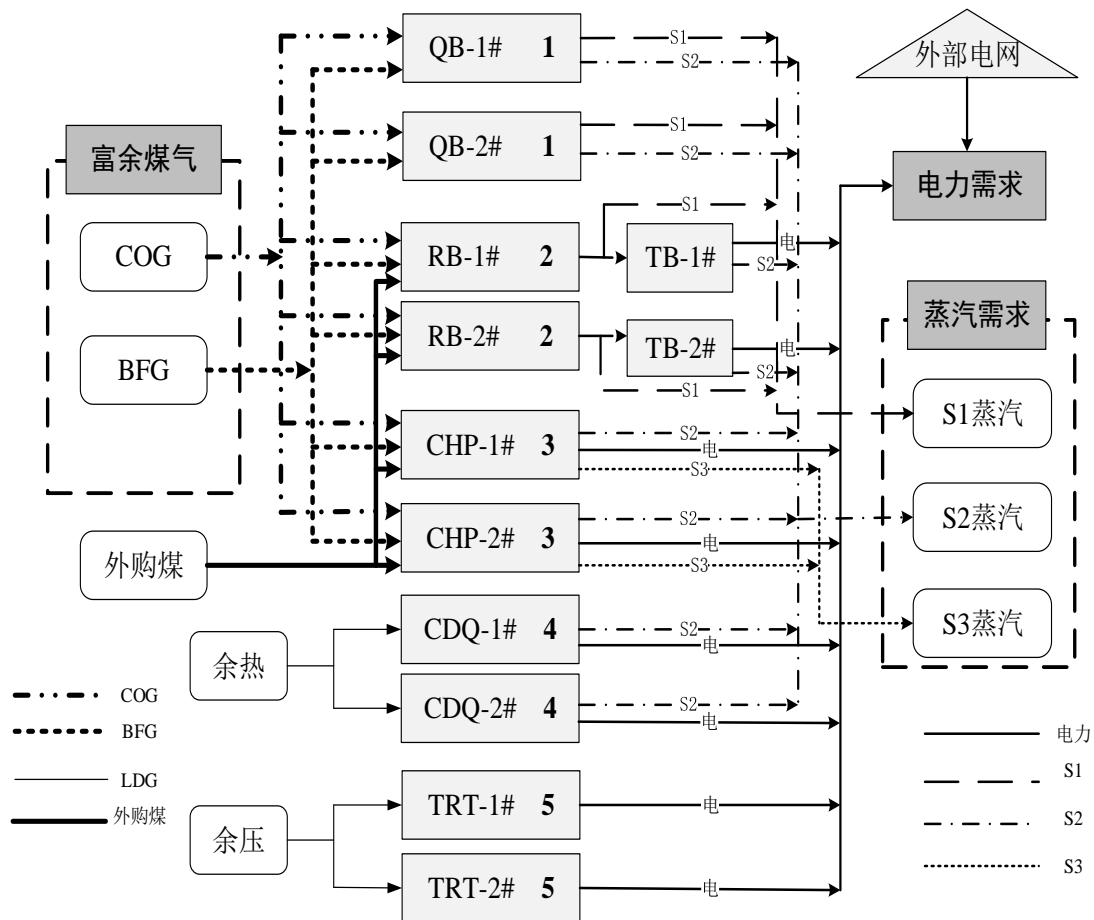


图 4.5 该钢铁企业煤气-蒸汽-电力调度模型示意图

Fig. 4.5 Schematic diagram of gas steam power dispatching model of the enterprise

由于在调研时没能顺利获取到该企业余压余热资源的回收数据，故本文在统筹考虑工序余压时仅将 CDQ 和 TRT 仅作为调度支配单元，并假设主工序供给它们的余压余热资源能够满足其产蒸汽和发电的生产要求，而且认为其发电量和产蒸汽量均在各自产能上下限之间受模型自动调节，因此在下文约束条件中并没出现 CDQ 和 TRT 的热量平衡约束。

4.3.1 目标函数

煤气、蒸汽、电力协同调度的目的在于指导钢铁企业合理的利用煤气、蒸汽、电力三种二次能源，降低能源消耗，在保证能源稳定供给和安全生产的前提下，充分发掘三种能源介质的内部转换潜能，确定最佳的富余煤气分配方案、蒸汽和电力生产方案，使得调度周期内系统能源成本最低。根据第3章确定该企业煤气、蒸汽和电力调度模型的目标函数如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_t C_{\text{buy}}^{\text{coal}} \cdot F_{\text{buy},t}^{\text{coal}} + \sum_t C_{\text{buy},t}^{\text{ele}} \cdot P_{\text{buy},t}^{\text{ele}} + \sum_t \sum_m C_{\text{gen},t}^{\text{ele}} \cdot P_{\text{gen},m,t}^{\text{ele}} + \\ & \sum_t \sum_g \sum_m C_g^{\text{use}} \cdot X_{g,m,t}^{\text{gas}} - \sum_t C_{\text{sale}}^{\text{ele}} \cdot P_{\text{sale},t}^{\text{ele}} + \sum_t \sum_g C_g^{\text{rel}} \cdot R_{g,t} \end{aligned} \quad (4.1)$$

式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罚。

4.3.2 约束条件

根据实际运行情况和设备组成建立适用于该企业的模型约束条件，包括能源介质保供约束、热量平衡约束、设备产能约束和设备运行约束等。

① 能源保供约束

1) 富余煤气供需平衡

焦炉煤气：

$$\sum_{j1} X_{l,j1,t}^{\text{gas}} + R_{l,t} = G_{l,t}^{\text{sur}}, \forall t \quad (4.2)$$

高炉煤气：

$$\sum_{j2} X_{2,j2,t}^{\text{gas}} + R_{2,t} = G_{2,t}^{\text{sur}}, \forall t \quad (4.3)$$

2) 蒸汽保供约束

S1 蒸汽：

$$\sum_{w1} Z_{l,w1,t}^{\text{str}} \geq D_{l,t}^{\text{str}}, \forall t \quad (4.4)$$

S2 蒸汽：

$$\sum_{w2} Z_{2,w2,t}^{\text{str}} \geq D_{2,t}^{\text{str}}, \forall t \quad (4.5)$$

S3 蒸汽：

$$\sum_{w3} Z_{3,w3,t}^{\text{str}} \geq D_{3,t}^{\text{str}}, \forall t \quad (4.6)$$

3) 电力保供约束

$$\sum_m P_{gen,m,t}^{ele} + P_{buy,t}^{ele} \geq D_t^{ele}, \forall t \quad (4.7)$$

② 热量平衡约束

1) 启动锅炉热量平衡约束

$$\eta_1 \cdot (\sum_g X_{g,1,t}^{gas} \cdot h_g^{gas} + F_{1,t}^{coal} \cdot h^{coal}) = \sum_r Z_{r,1,t}^{str} \cdot h_r^{str}, \forall t \quad (4.8)$$

2) 130T 锅炉热量平衡约束

$$\eta_2 \cdot (\sum_g X_{g,2,t}^{gas} \cdot h_g^{gas} + F_{2,t}^{coal} \cdot h^{coal}) = \sum_r Z_{r,2,t}^{str} \cdot h_r^{str}, \forall t \quad (4.9)$$

3) 300MW 热电机组热量平衡约束

$$\eta_3 \cdot (\sum_g X_{g,3,t}^{gas} \cdot h_g^{gas} + F_{3,t}^{coal} \cdot h^{coal}) = \sum_r Z_{r,3,t}^{str} \cdot h_r^{str} + P_{gen,3,t}^{ele} \cdot h^{ele}, \forall t \quad (4.10)$$

③ 设备运行能力约束

1) 缓冲用户煤气用量限制

启动锅炉:

$$X_{g,1}^{min} \leq X_{g,1,t}^{gas} \leq X_{g,1}^{max} \quad (4.11)$$

130T 锅炉:

$$X_{g,2}^{min} \leq X_{g,2,t}^{gas} \leq X_{g,2}^{max} \quad (4.12)$$

CHP 机组:

$$X_{g,3}^{min} \leq X_{g,3,t}^{gas} \leq X_{g,3}^{max} \quad (4.13)$$

2) 蒸汽生产设备产能约束

启动锅炉:

$$0 \leq Z_{r,1}^{str} \leq Z_{r,1}^{max} \quad (4.14)$$

130T 锅炉:

$$0 \leq Z_{r,2}^{str} \leq Z_{r,2}^{max} \quad (4.15)$$

CHP 机组:

$$0 \leq Z_{r,3}^{str} \leq Z_{r,3}^{max} \quad (4.16)$$

CDQ 机组:

$$0 \leq Z_{r,4}^{str} \leq Z_{r,4}^{\max} \quad (4.17)$$

3) 发电机组额定发电能力约束

BTG 机组:

$$0 \leq P_{gen,2,t}^{ele} \leq P_2 \quad (4.18)$$

CHP 机组:

$$0 \leq P_{gen,3,t}^{ele} \leq P_3 \quad (4.19)$$

CDQ 机组:

$$0 \leq P_{gen,4,t}^{ele} \leq P_4 \quad (4.20)$$

TRT 机组:

$$0 \leq P_{gen,5,t}^{ele} \leq P_5 \quad (4.21)$$

④ 混烧设备平均热值最低约束

锅炉中混合燃烧煤气需要满足其最低热值要求。

$$H_m^{\min} \leq \frac{\sum_g X_{g,m,t}^{gas} \cdot h_g^{gas}}{\sum_g X_{g,m,t}^{gas}}, \quad m=1,2 \quad \forall t \quad (4.22)$$

⑤ 其它操作约束

买电和售电不可同时发生约束。

$$P_{buy,t}^{ele} \cdot P_{sale,t}^{ele} = 0, \quad \forall t \quad (4.23)$$

⑥ 变量非负约束

模型中设置的变量都大于等于 0

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

4.4 模型参数

在上一节对该企业的煤气、蒸汽、电力协同调度问题进行了具体化的数学建模，但模型中还有很多参数需要从钢铁企业实际生产设备获取。通过查阅相关文

献和该企业的能源操作手册，确定了模型的各种参数，表中同种型号设备的参数相同。

表 4.1 为该企业三种煤气用户消耗煤气流量限范围。

表 4.1 设备消耗煤气流量范围

Table 4.1 Flow range of gas consumed by equipment

| 煤气种类 | 启动锅炉 | 燃料锅炉 | CHP |
|--------------------------------|---------|----------|----------|
| 焦炉煤气 (m^3/h) | 0~10000 | 0~20000 | 0~60000 |
| 高炉煤体 (m^3/h) | 0~60000 | 0~290000 | 0~400000 |

表 4.2 为该企业四种发电设备额定发电功率。

表 4.2 设备额定发电功率

Table 4.2 Rated power of equipment

| 设备类型 | BTG | CHP | CDQ | TRT |
|-----------|-----|-----|-----|------|
| 额定功率 (MW) | 25 | 300 | 30 | 36.5 |

表 4.3 为该企业四种设备的产汽能力范围。

表 4.3 设备产汽、抽汽范围

Table 4.3 Capacity of steam production and extraction of equipment

| 蒸汽种类 | 启动锅炉 | 燃料锅炉 | 热电机组 | 干熄焦 |
|------------------------|------|-------|-------|------|
| S1 蒸汽 (t/h) | 0~35 | 0~130 | —— | —— |
| S2 蒸汽 (t/h) | 0~35 | 0~130 | 0~80 | 0~60 |
| S3 蒸汽 (t/h) | —— | | 0~110 | |

表 4.4 为三种煤气的使用价格和放散惩罚，考虑煤气在实际中的使用价值和煤气放散对环境造成的不良影响，在目标函数中设置煤气的使用价格和放散惩罚，为使富余煤气尽可能的被利用，减少放散，煤气放散惩罚应高于煤气使用费用。

表 4.4 三种煤气使用价格和放散惩罚

Table 4.4 Use price and release penalty of three kinds of gas

| 煤气种类 | 使用价格 ($\text{元}/\text{m}^3$) | 惩罚系数 ($\text{元}/\text{m}^3$) |
|------|--------------------------------|--------------------------------|
| 焦炉煤气 | 0.35 | 0.4 |
| 高炉煤气 | 0.04 | 0.05 |
| 转炉煤气 | 0.08 | 0.1 |

表 4.5 为本文所研究的几种能源介质的价格成本。当富余煤气不足以满足钢铁生产过程对蒸汽和电力的需求时，需要通过外购煤炭来产生蒸汽和发电，或者直接从电网购买电力，这时需要考虑它们的成本；当富余煤气所发电力能够满足自身需求时，就可以将多余向外部用户出售，以获取收益，所以本文考虑了发电成本和外售收益。

表 4.5 各种能源的价格或成本

Table 4.5 Price or cost of various energy sources

| 费用项 | 价格或成本 |
|-------------|-------|
| 外购煤炭（元/kg） | 0.6 |
| 自发电（元/kW.h） | 0.22 |
| 外售电（元/kW.h） | 0.5 |

表 4.6 为该钢铁企业所在地区的峰平谷分时电价。分时电价作为供电公司调节用户错峰用电的一种常用手段，对供电公司控制电网稳定运行和高耗能企业控制用电成本都具有重要的影响。通过给予不同时段以不同的电价，引导用户自发进行用电管理，从而达到电网公司和钢铁企业“双重”的削峰填谷效果。

表 4.6 该钢铁企业所在地区的分时电价

Table 4.6 Time share tariff of the region where the steel enterprise is located

| 时段 | 时间区间 | 电价（元/kW h） |
|------|-------------|------------|
| 峰价时段 | 08:00-12:00 | 0.7188 |
| | 19:00-23:00 | |
| 平价时段 | 12:00-19:00 | 0.4917 |
| 谷价时段 | 23:00-24:00 | 0.2796 |
| | 00:00-08:00 | |

表 4.7 为两种混合燃烧焦炉煤气和高炉煤气锅炉的平均热值最低限制。

表 4.7 混烧设备平均热值要求

Table 4.7 Requirements for average calorific value of mixed firing equipment

| 混烧设备 | 混烧燃料 | 最低热值（kJ/m ³ ） |
|---------|---------|--------------------------|
| 启动锅炉 | COG+BFG | 4600 |
| 130T 锅炉 | COG+BFG | 4600 |

表 4.8 为本文所研究的几种能源介质热值,取值均为企业实际使用的经验热值。

表 4.8 各能源介质热值参数

| 能源 | 热值或焓 | 单位 |
|-------|-------|-------------------|
| COG | 17000 | kJ/m ³ |
| BFG | 3500 | kJ/m ³ |
| S1 蒸汽 | 3600 | kJ/kg |
| S2 蒸汽 | 3000 | kJ/kg |
| S3 蒸汽 | 2850 | kJ/kg |
| 动力煤 | 21800 | kJ/kg |
| 电 力 | 3600 | kJ/kw h |

由于不同能源设备的能源转换效率不同,在实际能源系统优化时,应根据能源转换效率确定优先级,能源转换效率高的设备优先级高,以保证能源使用效益最大化。例如调度工作人员可以通过优化峰平谷时段煤气在不同效率发电机组的分配,以提高发电效益。表 4.9 为该钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统中所涉及的几种能源转换设备的效率,由第 2 章计算得到。

表 4.9 几种能源转换设备的效率

| 设备类型 | 能源转换类型 | 效率 |
|---------|---------|------|
| 启动锅炉 | 煤气转换为蒸汽 | 0.82 |
| 130t 锅炉 | 煤气转换为蒸汽 | 0.85 |
| BTG 机组 | 蒸汽转换为电力 | 0.75 |
| CHP 机组 | 煤气转换为汽电 | 0.73 |

4.5 模型输入数据

本文采用该钢铁企业 2018 年 4 月某一天 24 个小时(时段)的能源数据作为模型的输入数据,见表 4.10。输入数据包括焦炉煤气富余量、高炉煤气富余量、三种蒸汽的需求量和电力的需求量。其中,煤气富余量是指各种煤气产生量减去主工序用户煤气的消耗量之后剩余进入煤气-蒸汽-电力转换系统的煤气量;蒸汽的需求量是指主工序用户的需求量,也就是热电设备要生产的蒸汽量;电力的需求量是指主工序用户对电力的需求量,也就是热电设备需要生产加上外购的电量。

通过模型求解可以得出这 24 个时段的煤气、蒸汽和电力最优分配方案。

表 4.10 各时段煤气富余量及蒸汽和电力的需求量

Table 4.10 Gas surplus and demand of steam and electricity in different periods

| 时段 | 煤气富余量 | | 蒸汽需求量 | | | 电力需求量(MW) |
|----|-------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| | COG(km ³ /h) | BFG(km ³ /h) | S1(t/h) | S2(t/h) | S3(t/h) | |
| 1 | 53.53 | 610.53 | 68.04 | 232.69 | 241.13 | 688.93 |
| 2 | 54.92 | 633.66 | 65.46 | 234.29 | 252.96 | 677.81 |
| 3 | 53.19 | 675.09 | 68.50 | 246.89 | 252.84 | 676.02 |
| 4 | 54.33 | 675.6 | 68.00 | 243.9 | 256.44 | 668.85 |
| 5 | 50.49 | 677.47 | 69.29 | 233.59 | 261.5 | 664.32 |
| 6 | 41.40 | 665.14 | 66.46 | 228.01 | 249.93 | 667.07 |
| 7 | 41.01 | 594.15 | 67.75 | 214.65 | 266.38 | 665.94 |
| 8 | 39.67 | 608.76 | 68.88 | 223.47 | 269.93 | 673.91 |
| 9 | 37.43 | 624.93 | 68.46 | 232.9 | 274.5 | 671.62 |
| 10 | 29.66 | 559.66 | 67.25 | 224.19 | 272.95 | 672.69 |
| 11 | 29.85 | 524.34 | 68.25 | 216.18 | 273.38 | 653.39 |
| 12 | 41.19 | 508.93 | 69.25 | 211.56 | 270.23 | 668.61 |
| 13 | 49.38 | 600.75 | 63.96 | 211.39 | 269.31 | 666.82 |
| 14 | 51.22 | 644.82 | 64.46 | 211.59 | 270.63 | 661.79 |
| 15 | 50.32 | 652.94 | 64.96 | 211.76 | 264.58 | 653.35 |
| 16 | 50.39 | 657.07 | 66.46 | 209.96 | 270.09 | 673.62 |
| 17 | 49.34 | 661.99 | 67.41 | 207.63 | 269.15 | 673.74 |
| 18 | 49.33 | 566.29 | 65.41 | 204.24 | 273.68 | 655.73 |
| 19 | 50.53 | 544.33 | 64.58 | 208.12 | 269.08 | 671.34 |
| 20 | 45.10 | 555.21 | 68.68 | 206.24 | 268.18 | 666.24 |
| 21 | 42.69 | 629.45 | 68.67 | 201.28 | 268.52 | 659.96 |
| 22 | 47.71 | 665.50 | 68.17 | 213.39 | 268.44 | 643.83 |
| 23 | 46.64 | 656.22 | 67.67 | 207.11 | 262.02 | 635.66 |
| 24 | 47.94 | 619.95 | 66.00 | 216.08 | 265.54 | 638.96 |

4.6 计算与分析

4.6.1 模型输出结果

将表 4.10 中 24 个时段的煤气富余量、蒸汽和电力需求量数据以及各种设备参

数输入调度模型，利用 ILOG CPLEX 软件对模型进行编程求解。模型共有 41 个约束、21 个变量、57 个系数，计算环境为 Windows7 操作系统，3.40GHz Intel(R)Core(TM)i7-4790 的处理器，8G 运行内存，模型计算机求解时间小于 5 秒。计算得到的煤气、蒸汽和电力优化调度结果经整理后分别列于表 4.11、表 4.12、表 4.13。表中煤气单位是 km^3/h ，蒸汽单位是 t/h ，电力单位是 MW，煤单位是 t/h 。

表 4.11 不同时段富余煤气优化分配结果

Table 4.11 Optimal distribution results of surplus gas in different periods

| 时段 | 启动锅炉 | | 130T 锅炉 | | 300MW 热电机组 | | |
|----|-------|-------|---------|--------|------------|--------|-------|
| | COG | BFG | COG | BFG | COG | BFG | Coal |
| 1 | 10.00 | 36.78 | 20.00 | 206.39 | 23.53 | 367.34 | 57.97 |
| 2 | 10.00 | 33.54 | 20.00 | 206.39 | 24.92 | 393.73 | 52.55 |
| 3 | 5.34 | 60.00 | 18.21 | 215.09 | 29.65 | 400.00 | 49.84 |
| 4 | 5.21 | 60.00 | 18.10 | 215.6 | 31.02 | 400.00 | 47.02 |
| 5 | 5.54 | 60.00 | 17.72 | 217.47 | 27.23 | 400.00 | 48.03 |
| 6 | 5.07 | 58.75 | 20.00 | 206.39 | 16.33 | 400.00 | 54.03 |
| 7 | 5.14 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 14.87 | 327.76 | 66.95 |
| 8 | 10.00 | 37.83 | 20.00 | 206.39 | 9.67 | 364.54 | 69.25 |
| 9 | 10.00 | 37.30 | 20.00 | 206.39 | 7.43 | 381.24 | 70.43 |
| 10 | 5.01 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 4.65 | 293.27 | 95.02 |
| 11 | 5.27 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 4.58 | 257.95 | 84.96 |
| 12 | 5.53 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 15.66 | 242.54 | 80.73 |
| 13 | 4.16 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 25.22 | 334.36 | 57.93 |
| 14 | 4.29 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 26.93 | 378.43 | 48.46 |
| 15 | 4.42 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 25.90 | 386.55 | 45.14 |
| 16 | 4.81 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 25.58 | 390.68 | 50.03 |
| 17 | 5.05 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 24.29 | 395.60 | 49.66 |
| 18 | 4.54 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 24.79 | 299.90 | 60.06 |
| 19 | 4.32 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 26.21 | 277.94 | 66.58 |
| 20 | 5.38 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 19.72 | 288.82 | 88.20 |
| 21 | 5.38 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 17.31 | 363.06 | 95.38 |
| 22 | 5.25 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 22.46 | 399.11 | 93.46 |
| 23 | 5.12 | 60.00 | 20.00 | 206.34 | 21.52 | 389.83 | 90.62 |
| 24 | 4.69 | 60.00 | 20.00 | 206.39 | 23.25 | 353.56 | 96.24 |

表 4.12 不同时段蒸汽生产负荷优化分配结果

Table 4.12 Results of optimal distribution of steam production load in different periods

| 时 段 | 启动锅炉 | | 130T 锅炉 | | 300MW 热电机组 | | CDQ |
|--------|-------|------|---------|--------|------------|-------|-------|
| | S1 | S2 | S2 | S3 | S2 | S3 | S2 |
| 1 | 68.04 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 42.69 | 61.13 | 60.00 |
| 2 | 65.46 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 44.29 | 72.96 | 60.00 |
| 3 | 68.50 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 56.89 | 72.84 | 60.00 |
| 4 | 68.00 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 53.90 | 76.44 | 60.00 |
| 5 | 69.29 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 43.59 | 81.50 | 60.00 |
| 6 | 66.46 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 38.01 | 69.93 | 60.00 |
| 7 | 67.75 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 24.65 | 68.38 | 60.00 |
| 8 | 68.88 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 33.47 | 89.93 | 60.00 |
| 9 | 68.46 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 42.90 | 94.50 | 60.00 |
| 10 | 67.25 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 34.19 | 92.95 | 60.00 |
| 11 | 68.25 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 26.18 | 93.38 | 60.00 |
| 12 | 69.25 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 21.56 | 90.23 | 60.00 |
| 13 | 63.96 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 21.39 | 89.31 | 60.00 |
| 14 | 64.46 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 21.59 | 90.63 | 60.00 |
| 15 | 64.96 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 21.76 | 84.58 | 60.00 |
| 16 | 66.46 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 19.96 | 90.09 | 60.00 |
| 17 | 67.41 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 17.63 | 85.15 | 60.00 |
| 18 | 65.41 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 14.24 | 93.68 | 60.00 |
| 19 | 64.58 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 18.12 | 89.08 | 60.00 |
| 20 | 68.68 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 19.71 | 88.18 | 60.00 |
| 21 | 68.67 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 11.28 | 88.52 | 60.00 |
| 22 | 68.17 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 23.39 | 88.44 | 60.00 |
| 23 | 67.67 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 17.11 | 82.02 | 60.00 |
| 24 | 66.00 | 0.00 | 130.00 | 180.00 | 26.08 | 85.54 | 60.00 |

表 4.13 不同时段电力生产负荷优化分配结果

Table 4.13 Optimal distribution results of power production load in different periods

| 时段 | BTG 发电机组 | CHP 发电机组 | CDQ 发电机组 | TRT 发电机组 | 外购电量 |
|----|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 50.00 | 390.00 | 60.00 | 73.00 | 115.93 |
| 2 | 50.00 | 401.98 | 60.00 | 73.00 | 92.83 |
| 3 | 50.00 | 403.00 | 60.00 | 73.00 | 90.02 |
| 4 | 50.00 | 362.50 | 60.00 | 73.00 | 123.35 |
| 5 | 50.00 | 386.22 | 60.00 | 73.00 | 95.10 |
| 6 | 50.00 | 372.57 | 60.00 | 73.00 | 111.50 |
| 7 | 50.00 | 385.71 | 60.00 | 73.00 | 97.23 |
| 8 | 50.00 | 396.36 | 60.00 | 73.00 | 94.55 |
| 9 | 50.00 | 481.24 | 60.00 | 73.00 | 7.38 |
| 10 | 50.00 | 481.13 | 60.00 | 73.00 | 8.56 |
| 11 | 50.00 | 470.39 | 60.00 | 73.00 | 0.00 |
| 12 | 50.00 | 472.76 | 60.00 | 73.00 | 12.85 |
| 13 | 50.00 | 448.68 | 60.00 | 73.00 | 35.14 |
| 14 | 50.00 | 432.54 | 60.00 | 73.00 | 46.25 |
| 15 | 50.00 | 413.50 | 60.00 | 73.00 | 56.85 |
| 16 | 50.00 | 445.45 | 60.00 | 73.00 | 45.17 |
| 17 | 50.00 | 447.86 | 60.00 | 73.00 | 42.88 |
| 18 | 50.00 | 434.31 | 60.00 | 73.00 | 38.42 |
| 19 | 50.00 | 450.41 | 60.00 | 73.00 | 37.93 |
| 20 | 50.00 | 474.39 | 60.00 | 73.00 | 9.25 |
| 21 | 50.00 | 469.39 | 60.00 | 73.00 | 7.57 |
| 22 | 50.00 | 452.21 | 60.00 | 73.00 | 8.62 |
| 23 | 50.00 | 442.12 | 60.00 | 73.00 | 10.54 |
| 24 | 50.00 | 450.60 | 60.00 | 73.00 | 5.36 |

表 4.11 反映了焦炉煤气和转炉煤气在三种热电转换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 锅炉和热电机组三种设备在不同时段均有所消耗焦炉煤气和高炉煤气, 其中, 热电机组是高炉煤气的最大消耗用户, 约占富余高炉煤气的 57% (各时段消耗量平均占比); 130T 锅炉是焦炉煤气的主要消耗用户, 约占富余焦炉煤气的 45%; 启动锅炉在各个时段稳定的消耗

高炉煤气；外购煤炭的消耗主要是在热发电机组上，其它设备均不消耗。

表 4.12 反映了 S1、S2、S3 蒸汽需求负荷在启动锅炉、130T 锅炉、300MW 热带机组和干熄焦（CDQ）发电机组上的生产分配情况。可以看出在优化后的分配方案中启动锅炉只产生 S1 蒸汽；130T 锅炉以最大产汽能力同时大量产生 S1 蒸汽和 S2 蒸汽，约占所需蒸汽的 60%和 67%；300MW 热发电机组同时产生少量的 S2 蒸汽和 S3 蒸汽；干熄焦发电机组稳定的产生 S2 蒸汽。

表 4.13 反映了电力生产负荷在 BTG、CHP、CDQ、TRT 四种发电机组的生产分配情况。可以看出在在优化后的分配方案中，CHP 发电机组是最主要的发电设备约占所需电力的 65%，这与它是最大的富余煤气消耗用户的实际情况相符合。BTG、CDQ 和 TRT 发电机组都以最大发电能力生产一定的电力。而外购电力占所需电量的 7.5%左右。

下面对模型优化求解的结果进行分析和讨论，主要分析和讨论四方面的内容：①优化效果总体分析，讨论在给定富余煤气量、蒸汽和电力需求量的情况下，模型优化前后的能源成本变化状况。②煤气、蒸汽和电力调度分析，主要讨论煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备上的分配状况，得出能源优化分配的原则。③分时电价对模型的影响分析，主要讨论分峰、平、谷分时电价是如何影响自发电、外购电和外购煤调度的。④煤炭价格对模型的影响，主要讨论不同煤炭价格下，模型优化结果中的自发电量和外购电量的组成情况。

4.6.2 优化结果分析

为验证所建模型的优化性，将优化后的能源成本与优化前的能源成本进行比较。图 4.6 所示为各调度周期优化前后能源成本的对比情况。

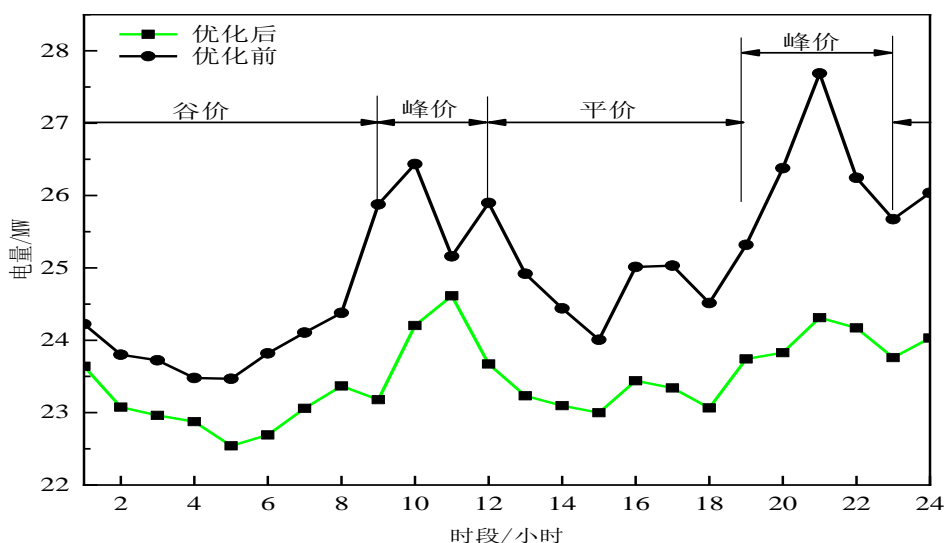


图 4.6 各时段系统能源成本优化前后对比

Fig. 4.6 Comparison of system energy cost before and after optimization in each period

优化前的能源分配方案没有考虑煤气、蒸汽和电力之间的协同调度, 富余煤气除用作供热外全部外卖, 所需电力全部从外部电网购买, 系统能源成本等于煤气使用费用减去煤气外卖收益, 加上外购电力费用。优化后的能源分配方案考虑了煤气、蒸汽和电力之间的协同调度, 富余煤气被充分使用, 所需蒸汽得到满足, 所需电力能够根据分时电价来决定自产或是外购。可知优化后每一个调度时段能源成本都有所降低, 特别是在外部电价处于峰价时段(8:00~12:00 和 19:00~23:00), 优化程度更大, 当 $t=21$ 时, 单时段降低最大为 12.1%。

另外, 根据每个时段煤气使用费用、煤气放散惩罚、自发电费用、外购煤炭费用和外购电力费用, 可以得到调度周期 24 时段各费用项目的总费用, 并与优化前的各项费用对比, 进行分析和说明。优化前后各项费用对比如表 4.14 所示。

表 4.14 优化前后各项费用对比

Table 4.14 Cost comparison before and after optimization

| 费用项目 | 优化前 | 优化后 |
|------------|------------|------------|
| 使用煤气费用 (元) | 401279.92 | 980052.20 |
| 煤气外卖收益 (元) | -578772.28 | 0 |
| 煤气放散惩罚 (元) | 0 | 0 |
| 自发电费用 (元) | 0 | 3246610.40 |
| 外购煤炭费用 (元) | 0 | 971130.96 |
| 外购电费用 (元) | 6481824.18 | 411182.51 |
| 合计 (总费用) | 6304331.82 | 5608976.07 |

从表 4.14 可以看出, 优化后全天能源总费用减少了 39.53 万元, 比优化前降低了 6.6%, 优化效果较为显著。还可以看优化前后能源费用项目差别最大的地方在外购电力费用和自产电力费用上。优化前的方案中没有考虑煤气、蒸汽和电力的综合优化, 煤气除用作供热外直接外卖, 收益较低, 没有发掘富余煤气发电的价值潜力, 而且所需电力全部外购, 成本较高; 优化后的方案中, 综合考虑了煤气、蒸汽和电力的协同优化, 促进了煤气向蒸汽和电力转换, 既满足了企业自身生产对蒸汽和电力的必要需求, 也减少了外购电力, 从而大大减少能源总费用, 实现煤气的自产自消和充分利用, 达到节能降耗的目的。通过上述对比, 进一步说明了钢铁企业通过热电转换设备来协调煤气、蒸汽和电力调度关系的重要性。

4.6.3 煤气、蒸汽和电力调度分析

① 富余煤气优化分配分析

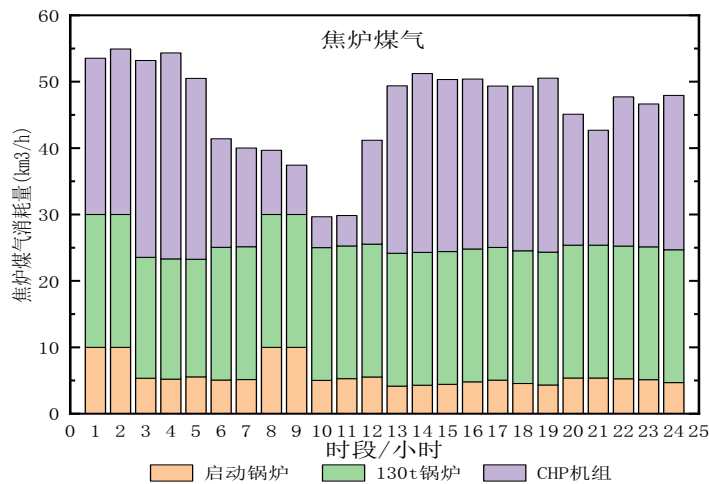


图 4.7 焦炉煤气优化分配图

Fig. 4.7 Optimized distribution of coke oven gas

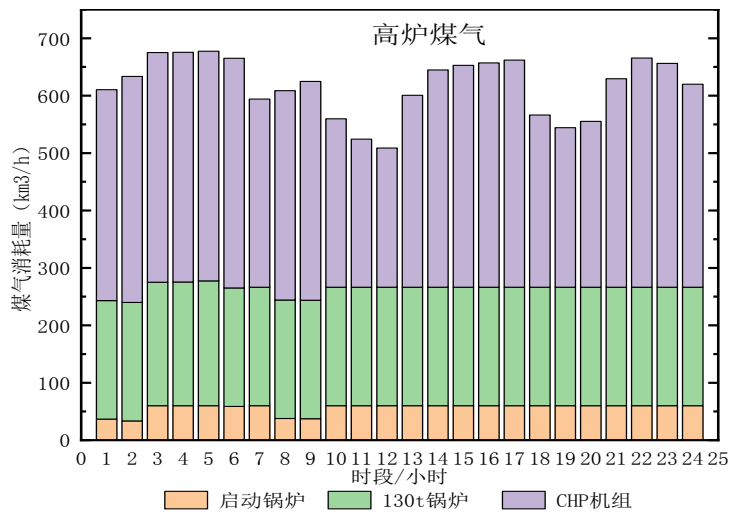


图 4.8 高炉煤气优化分配图

Fig. 4.8 Optimized distribution of blast furnace gas

图 4.7 和图 4.8 分别为焦炉煤气和高炉煤气在三种热电设备上的分配情况。从图中可以看出，焦炉煤气和转炉煤气作为锅炉的主要燃料在各时段均按一定的比例稳定供应，而热电机组作为焦炉煤气和转炉煤气的最大消耗用户，煤气消耗随时间波动较大，在峰价时段，煤气消耗大幅度减少。一方面是由于锅炉转换效率较高，会被优先分配富余煤气以保证其满负荷生产蒸汽，剩余的煤气才供给 CHP 机组发电或抽蒸汽；另一方面是由于该时段富余煤气减少，而热电机组作为煤炭的唯一用户可以通过调节煤炭的使用量来保证该时段的蒸汽和发电负荷需求。

② 蒸汽生产调度分析

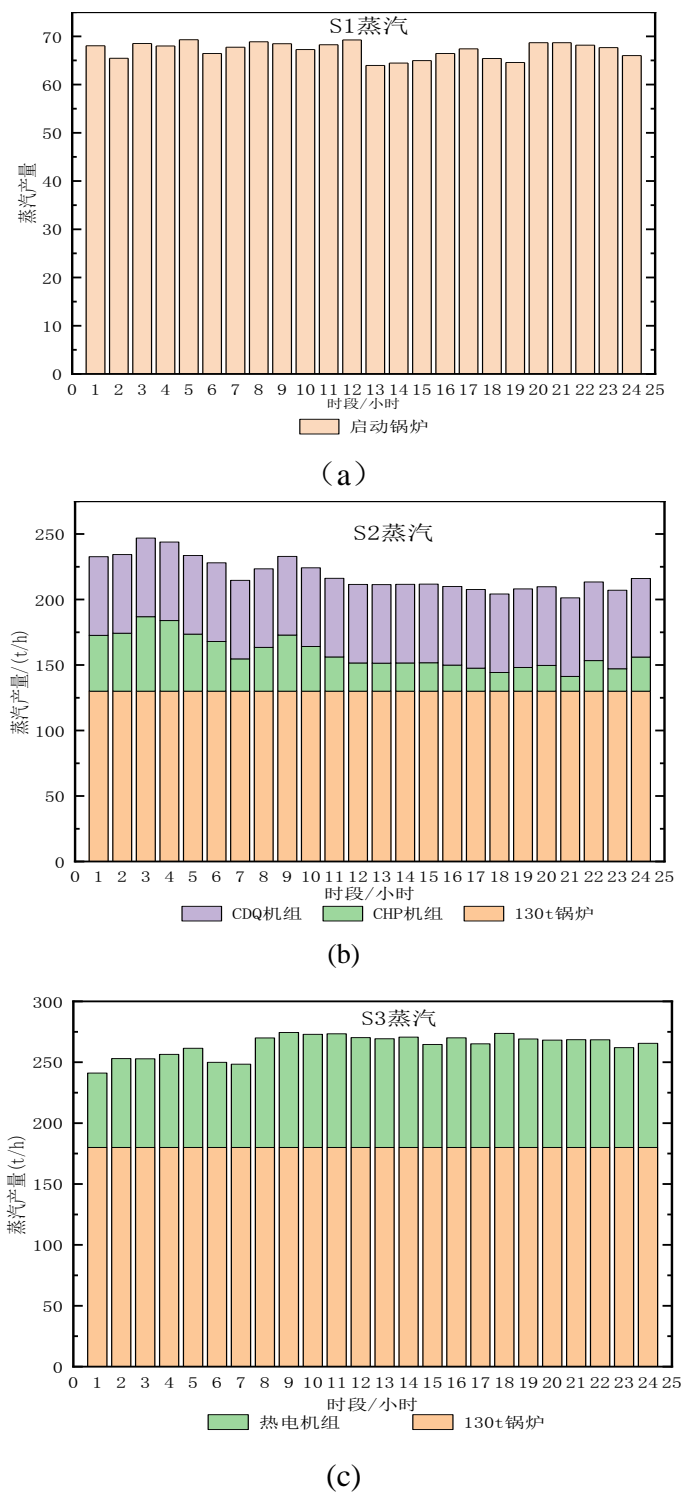


图 4.9 蒸汽需求生产调度图

Fig. 4.9 Steam demand production scheduling chart

图 4.9 (a)、(b)、(c) 分别为 S1 蒸汽、S2 蒸汽、S3 蒸汽生产负荷调度示意图。可以看出 S1 蒸汽全部由启动锅炉生产；S2 蒸汽主要由 130t 锅炉生产；S3 蒸汽主要由 130t 锅炉和 CDQ 机组稳定供应，S2 蒸汽和 S3 蒸汽均有部分由 CHP 机

组抽汽进行补充。而且可以看出，两种锅炉和 CDQ 机组都几乎以满负荷的状态生产蒸汽，说明优化后蒸汽的生产遵循优先使用工序余压余热资源的原则，其次是产汽效率较高的锅炉作为稳定的供汽源来进行供汽，最后仍不满足的部分才由热电机组抽汽来补充，符合理论分析和生产实际。

② 电力生产调度和外购分析

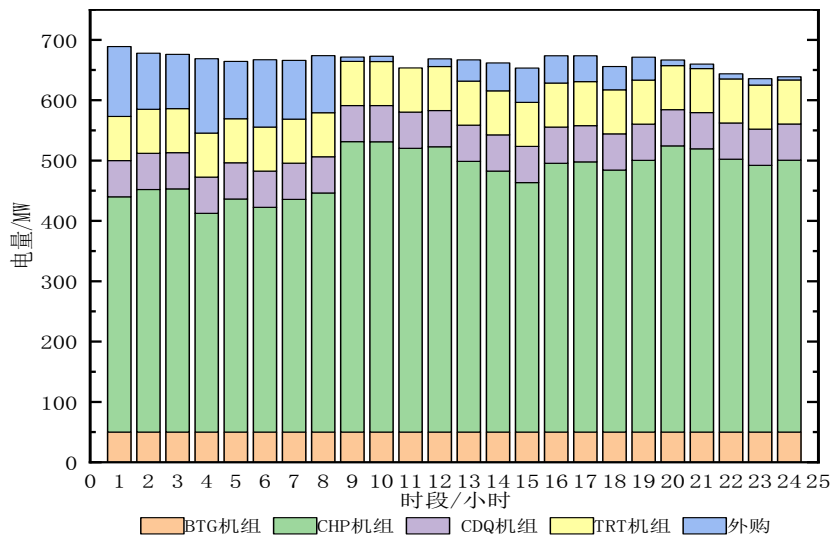


图 4.10 电力需求生产调度图

Fig. 4.10 Power demand production scheduling chart

本模型中涉及到 BTG、CHP、CDQ 和 TRT 四种发电设备，生产所需电力由这四种发电设备自产或者外购来进行供应。图 4.10 显示了电力生产负荷在四种设备上的分布以及外购电力情况，可以看出，CDQ、TRT 和 BTG 在所有时段均处于满负荷发电状态，这说明了模型遵循了优先使用余压余热资源发电和设备效率高的设备优先发电、多发电的原则来分配电力生产负荷。另外，从图中也可以看出 CDQ 和 TRT 在各个时段的发电量均保持不变，不受分时电价的影响，而 CHP 发电和外购电则随着分时电价呈现出周期性的变化，因此得出结论，分时电价主要影响 CHP 发电机组的发电出力状况，从而影响外购电力的比例，而对 CDQ 和 TRT 等余压余热发电影响较小。

综上所述，所建调度模型能够实现钢铁企业煤气、蒸汽和电力的合理分配和优化调度，并且遵循如下原则：首先，利用工序余压余热资源来产蒸汽和发电；其次，让设备效率较高的锅炉优先消耗富余煤气为生产过程提供蒸汽，不足部分再由 CHP 机组抽汽来补充，从而确保 CHP 机组尽量多发电；最后，给锅炉分配之后剩余的煤气则由 CHP 机组消耗进行发电或者抽汽，剩余煤气如果不能满足 CHP 机组对热负荷需求则外购煤炭进行补充。

4.6.4 分时电价对优化结果的影响

本文根据该钢铁企业所在地市场电价的变化情况,将每天 24 小时电价分为峰价时段(8:00~12:00 和 19:00~23:00)、平价时段(12:00~19:00)、谷价时段(23:00~24:00 和 0:00~7:00)进行研究,对应电价分别为 0.7988 元/kW.h、0.4917 元/kW.h 和 0.2796 元/kW.h。根据能源优化结果绘制不同时段自发电、外购电和外购煤炭的变化情况,如图 4.11 所示。通过分析可以得出以下五点结论:

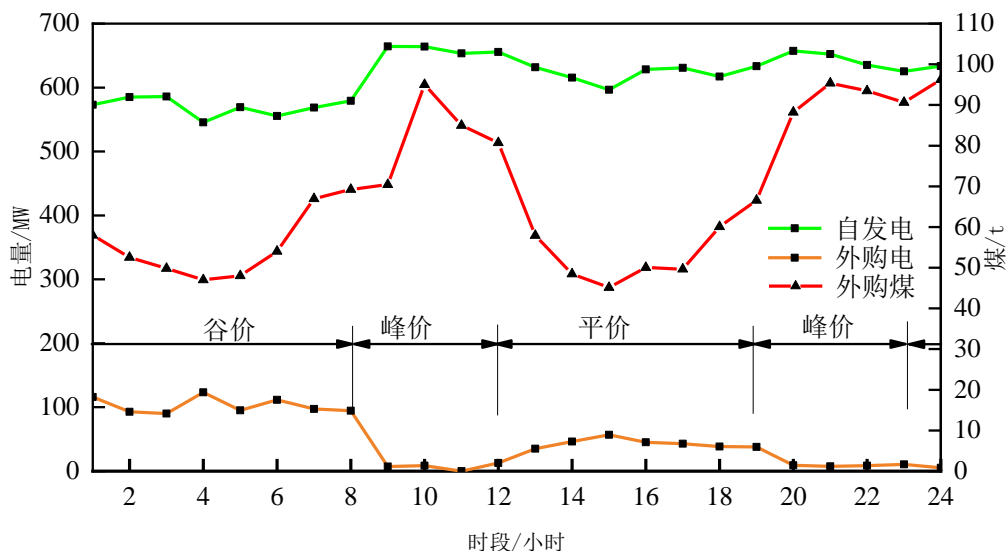


图 4.11 不同时段自发电、外购电和外购煤的变化情况

Fig. 4.11 Changes of self generation, purchased power and purchased coal in different periods

① 外购电量与自产电量变化规律相反,而自发电量和外购煤量变化规律基本一致,且两者都与图 4.6 中各时段的能源成本变化趋势一致,说明了自发电量和外购电量是影响能源成本的重要因素,钢铁企业应重视自发电和外购电的合理配置,制定符合企业经济效益的电力交易计划。

② 谷价时段,自发电量和外购煤量明显减少,外购电量增加,但企业用电仍以自产电力为主,外购电力仅占 15% 左右。

③ 平价时段,自发电量和外购电量都维持在常规水平,波动较小。

④ 峰价时段,自发电量和外购煤量明显增多,而外购电量减少,在 $t=11$ 时,外购电量为 0,所需电力全部由企业自产电力供应,与理论分析相符。由于富余煤气不能完全满足增加发电的需求,此时因为要增加自产电力,就需要增加外购动力煤以维持热电设备高负荷运行,因此外购煤量随自产电量增加而增加。

⑤ 所有时段自发电量均高于外购电量,自发电为钢铁企业提供主要的电力,外购电力仅作为补充。

综上分析,所建调度模型能够根据外部电网的分时电价合理的调整自产电力

数量和外购电力数量，有效的减少外购能源，提高企业经济效益，证明了模型的实用性。钢铁企业可以据此制定不同时段电力自产和电力外购计划，在用电高峰时段，应优先利用生产回收的余热余能、富余煤气，甚至外购煤炭，在设备发电能力允许范围内尽可能多发电，减少高价外购电量。而在用电低谷时段，应在兼顾富余煤气利用、蒸汽保供的前提下，尽量减少自发电量，增加低价外购电量，从而节约外购煤炭，降低能源成本。

4.6.5 煤价变化对优化结果的影响

从表 4.11 或者图 4.11 可以看出，各个时段均有外购电和外购煤炭(除 $t=11$ 外)，说明该钢铁企业依靠富余煤气发电和余压余热发电还不能完全满足自身的用电需求。因此就需要外购电力或者外购煤炭进行自主发电以保证电力需求。上文已经在煤炭价格固定(0.6 元/kg)的情况下分析了分时电价对模型优化方案的影响。实际中，外购煤炭的价格也会随着市场条件变化而波动,从而对模型优化结果产生影响。为了解煤炭价格变化对模型优化结果的影响，设计以下两个实验方案

① 首先设计实验分析煤价对能源成本的影响。根据市场动力价格一般在 0.32~0.98 元/千克之间波动，分别选取了煤炭价格为 0.3 元/kg、0.4 元/kg、0.5 元/kg、0.6 元/kg、0.7 元/kg、0.8 元/kg、0.9 元/kg、1 元/kg 的 8 组数据对模型进行优化计算，模型其余参数保持不变。得到系统每天的能源成本如图 4.12 所示。

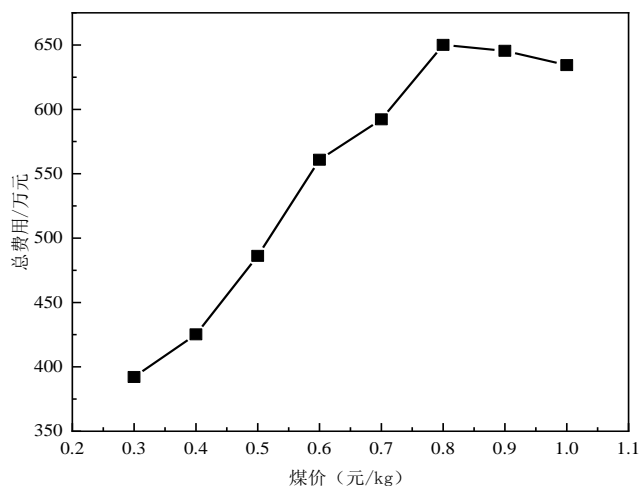


图 4.12 不同煤价下的能源总费用

Fig. 4.12 Total energy cost under different coal prices

从图中可以看出，随着外购煤炭价格的增加，由于发电成本提高，企业全天的能源总费用也在逐渐增加，当煤炭价格大于 0.8 元后（已大于市场最高电价 0.7188），全天能源总费用不再继续增加，反而出现下降，说明此时模型开始更多的直接外购电力，而减少自发电量和外购煤炭，从而保持企业能源费用稳定在一

定的水平。

② 在上述实验基础上进一步设计实验方案分析煤价对自发电量和外购电量的影响。分别选取煤价为 0.4 元/kg、0.6 元/kg、0.8 元/kg、1 元/kg 的 4 组数据对模型进行优化计算，其中煤价为 0.6 元/kg 时的自发电量和外购电量已经在模型初始结果中得到（见图 4.11），不必再计算。最后得到不同煤价下自发电量和外购电量的构成情况，如图 4.13 所示。

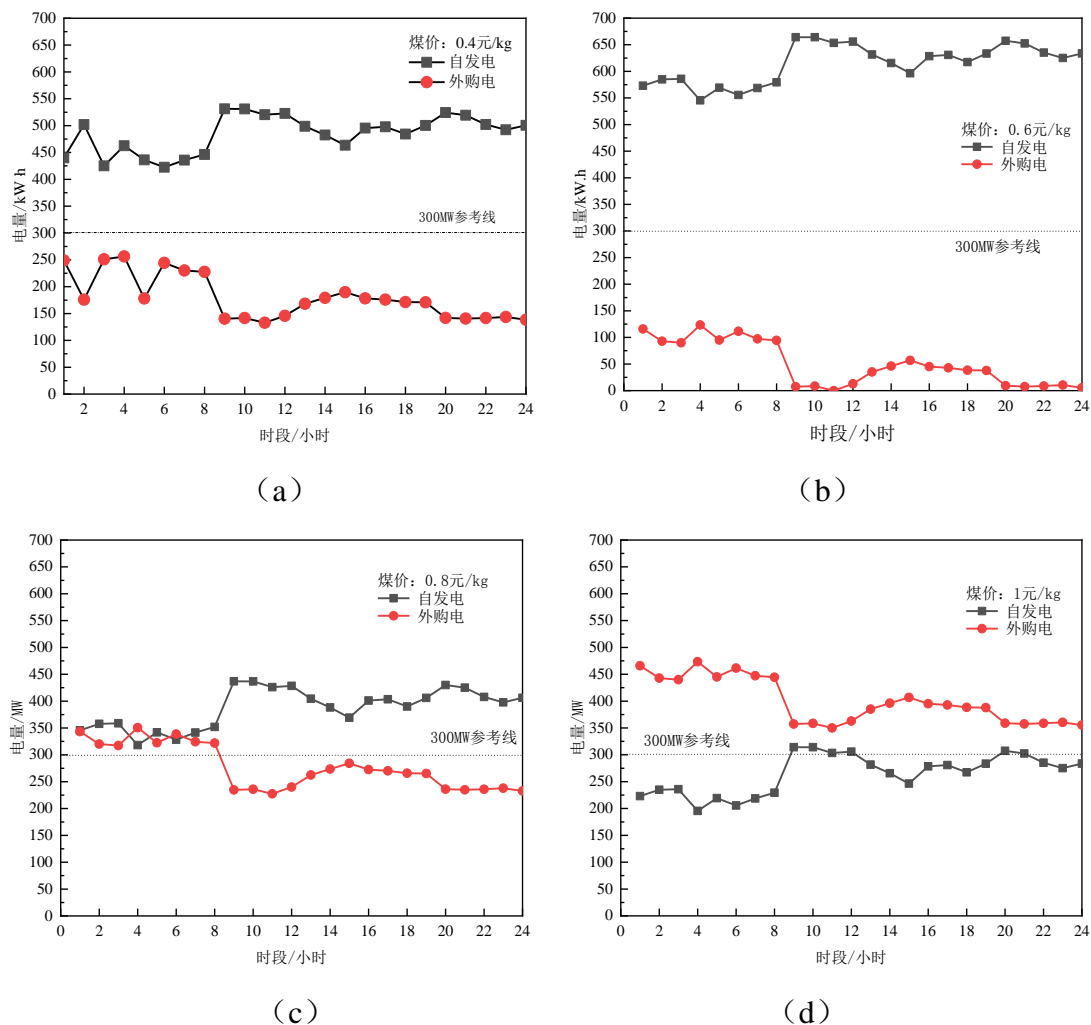


图 4.13 不同煤价下的自发电量和外购电量

Fig. 4.13 Spontaneous electricity and purchased electricity under different coal prices

分析图 4.13 可知，在煤价较低时，企业以自发电为主，随着煤价的升高，自发电量逐渐减少，外购电量逐渐增加，当煤炭价格等于 1 元时，外购电量已将大于自发电量，由于余压余压发电成本远低于外购电价，全程以近乎满负荷的状态进行发电，所以企业所需电力中仍然有一定数量的自发电而没有全部外购电力。此外，从图中也可以看出，随着煤价的升高，虽然自发电减少，但模型依然能够

根据分时电价来调节自发电量，保持着在峰价时段自产，谷价时段外购的总体趋势，由此说明了模型能够获得不同煤价下最合理的电力生产方案，体现了模型的实用型。

4.7 本章小结

本章以国内某钢铁企业实际能源系统和实际能源数据为例，对模型的有效性和实用性进行了实例验证。首先介绍了该企业的基本情况，系统分析了该钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统的结构，明确了各系统的调度对象和范围。然后结合该企业的实际情况，将第 3 章所建模型具体化，建立了针对该企业的煤气-煤气-蒸汽电力协同调度模型，最后，利用 ILOG CPLEX 软件对模型进行编程求解，得到了富余煤气、蒸汽和电力在各能源转换设备上的优化分配方案，并对优化结果进行了分析和讨论，得出如下三点结论：

① 案例优化结果表明所建模型在理论上是有效的和优化的，能够为钢铁企业提供合理的煤气、蒸汽、电力分配方案，减少外购能源，降低能源成本。

② 通过煤气、蒸汽和电力调度分析，得出了煤气、蒸汽和电力协同调度的基本原则。既在用电高峰时段，优先利用生产回收的余热余能供应蒸汽，其次是富余煤气，在设备发电能力允许范围内尽可能多发电，减少高价外购电量，如若煤气不足可外购煤炭补充；而在用电低谷时段，应在兼顾富余煤气利用、蒸汽保供的前提下，尽量减少自发电量，增加低价外购电量，从而节约外购煤炭，降低能源成本。

③ 分时电价主要影响 CHP 发电机组的发电出力状况，从而调整外购电力的比例，而对 CDQ 和 TRT 等余压余热发电影响较小。

④ 煤价对模型的影响主要是通过影响自发电成本来起作用的。在煤价较低时，钢铁企业通过购买更多的煤炭以提高自产电力，在煤价较高时会更多的选择直接购买电力以减少能源成本。

5 结论与展望

5.1 结论

钢铁企业二次能源的合理使用和优化,对于推进企业节能减排和降低能源成本具有重要意义。本文讨论了钢铁企业煤气、蒸汽和电力三种主要二次能源的协同调度问题。通过对钢铁企业煤气系统、蒸汽系统和电力系统的充分调研和对煤气、蒸汽、电力相互转换的深入分析,明确了煤气系统、蒸汽系统和电力系统之间的衔接机理以及煤气、蒸汽和电力之间的转换规律;基于数学规划方法,建立了钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度模型,利用某钢铁企业实际能源数据和设备参数验证了模型的有效性。论文的主要工作和研究结论如下:

① 通过对煤气、蒸汽和电力三种能源的转换分析,将三者之间的转换方式归纳为煤气转蒸汽、蒸汽转电力和煤气转蒸汽和电力三种类型。基于锅炉、汽轮机和热电机组,建立了描述三种转换方式的能源输入输出数学模型,计算了三种能转换设备的效率分别为 0.82,0.85,0.72,为调度模型建立提供参数支持。

② 建立了煤气-蒸汽-电力协同调度数学模型,并对模型进行了变量、目标和约束分析。模型以煤气、蒸汽和电力在各能源产耗设备上的消耗量和生产量为决策变量,以系统在调度周期内能源成本最低为目标函数,将能源保供、设备产能耗能,能源转换热量守恒等作为约束条件。模型主要目的是在确保能源稳定供应和生产安全的前提下,优化富余煤气分配以及蒸汽和电力需求生产调度,使得调度周期内系统能源成本最小。

③ 为验证所建模型的有效性,以某钢铁企业能源系统和实际能源数据对模型进行实例实验。通过对该企业能源系统结构的分析,将所建模型具体化,模型输入数据为企业 2018 年 4 月的某一天 24 小时各个时段的富余煤气量以及蒸汽和电力的需求量。利用 ILOG CPLEX 求解该模型,得到了能够满足企业生产和设备安全的煤气、蒸汽和电力优化分配方案,通过与优化前未考虑煤气、蒸汽、电力协同调度的分配方案相比,优化后全天能源总费用减少了 39.5 万元,比优化前降低了 6.6%,从经济角度考虑,优化后的煤气、蒸汽和电力分配方案更合理。此外,还讨论了分时电价和煤炭价格变化对模型的影响,实验结果表明模型能够根据分时电价和煤炭价格合理的调整自发电量和外购电量。

本文的研究结果表明,所建立的煤气-蒸汽-电力协同调度模型能够为钢铁企业合理分配富余煤气和优化蒸汽和电力生产提供可行的决策指导。也可供其他行业复杂系统多能源介质协同调度参考和借鉴。

5.2 展望

本文以钢铁企业煤气、蒸汽、电力三种重要二次能源介质为研究对象，开展钢铁企业煤气、蒸汽、电力协同调度相关研究。通过案例实验分析，证明了所建模型的有效性。但是文中给出的调度模型还有一定的局限性，为了更好的发挥模型的作用，未来可以从以下两方面进行改进和完善：

① 钢铁企业能源系统结构复杂，涉及的能源介质众多，且不同钢铁企业能源系统结构差异悬殊，所以各钢铁企业通常都是根据自身特点进行研究。本文也是基于某具体钢铁企业实际能源系统和能源数据验证了模型的有效性，所给出的案例分析不具有代表性，而且模型存在很多的简化。因此针对钢铁企业煤气-蒸汽-电力协同调度模型而言，还需要考虑实际生产过程的复杂性和可操作性，向更能体现钢铁企业能源系统实际情况与提高模型适应钢铁企业共性特征的目标发展。

② 本文所建立的煤气-蒸汽-电力协同调度模型在求解时需要人工录入数据和编程求解，适应性程度和智能化程度较低。因此，下一步需要结合钢铁生产实际，开发综合集成多种能源介质优化调度的智能化管理系统，将模型嵌入系统当中，并设计数据接口与实际生产系统数据库进行交互，才能适应钢铁企业多能协同的需要。

参考文献

- [1] 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, 000(019): 1-8.
- [2] 国家发展改革委. 国家能源局关于印发能源发展“十三五”规划的通知[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.htm 2017-01-17.
- [3] 环保部, 《关于实施工业污染源全面达标排放计划的通知》, 环保监察[2016]172 号.
- [4] 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.
- [5] 卢鑫, 白皓, 赵立华等. 钢铁企业能源消耗与 CO₂ 减排关系[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(12): 1445-1452.
- [6] 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.
- [7] 唐志永, 孙予罕. 关于实现低碳绿色炼钢的若干设想[C]. 中国上海: 中国钢铁年会暨宝钢学术年会, 2015: 17-49.
- [8] 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, 195(06): 19-23.
- [9] 中华人民共和国国家统计局能源数据. 分行业能源消费总量 [EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> 2020-6-12.
- [10] 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.
- [11] 崔辉. 钢铁企业煤气集中优化控制与调度技术开发[J]. 天津科技, 2008, (04): 9-10.
- [12] 韩丽辉, 苍大强. 钢铁企业的能源系统集成[J]. 冶金能源, 2008,(05): 6-9+12.
- [13] 张琦, 蔡九菊, 沈峰满. 钢铁企业系统节能减排过程集成研究进展[J]. 中国冶金, 2011, 21(01): 3-6.
- [14] 李鹏梅. 我国钢铁企业系统节能实践[J]. 中国科技投资, 2013, (01): 61-64.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 孔海宁. 钢铁企业副产煤气系统优化调度研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [18] 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.
- [19] 中国钢铁工业协会. 钢铁工业节能减排水平评价与“十二五”可持续发展战略[C]. 中国北

- 京: 中国钢铁工业协会, 2011: 23-29.
- [20] 杨晓东, 张玲. 钢铁工业能源消耗和二次能源利用途径及对策[J]. 钢铁, 2000, (12): 64-68.
- [21] 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.
- [22] 张立宏, 蔡九菊. 钢铁企业蒸汽系统的现状分析及改进措施[J]. 冶金能源, 2006, (05): 7-10.
- [23] 田永华. 钢铁企业蒸汽合理利用及优化分配研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [24] 苏震. 钢铁企业节电途径探析[J]. 河南冶金, 2009, 17(02): 22-24.
- [25] 孙浩, 涂序彦. 钢铁厂电力系统的节能型重构研究[J]. 节能, 2006, (02): 13-14.
- [26] 刘向斌. 钢铁企业电力合理生产与优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [27] Jackson J R. Simulation research on job shop production [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1957, 4(4): 287-295.
- [28] 江文德. 钢铁企业能源动态平衡和优化调度问题研究和系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [29] 徐俊刚, 戴国忠, 王宏安. 生产调度理论和方法研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2004, (02): 257-267.
- [30] 王晓颖. 钢铁企业副产煤气动态优化调度问题的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [31] 唐立新, 杨自厚, 王梦光. 基于准时制的炼钢-连铸生产调度问题研究[J]. 自动化学报, 1998, (01): 11-16.
- [32] 郑忠, 朱道飞, 高小强. 钢厂炼钢-连铸生产调度及重计划方法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(7): 820-824.
- [33] 俞胜平, 柴天佑. 开工时间延迟下的炼钢-连铸生产重调度方法[J]. 自动化学报, 2016, 042(003): 358-374.
- [34] 刘倩, 杨建平, 王柏琳等. 基于“炉-机对应”的炼钢-连铸生产调度问题遗传优化模型[J]. 工程科学学报, 2020, 42(05): 645-653.
- [35] 聂秋平. 钢铁企业能源实绩平衡与优化调度策略及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [36] 钱晓龙, 唐立新, 刘文新. 动态调度的研究方法综述[J]. 控制与决策, 2001, (02): 141-145.
- [37] 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.
- [38] 范玉妹, 徐尔, 赵金玲. 数学规划及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 03.
- [39] Neumann Klas, Schneider Welf G. Heuristic algorithms for job-shop scheduling problems with stochastic precedence constraints[J]. Annals of Operations Research, 1999, 92: 45-63.
- [40] Markland, Robert. E. Improving fuel utilization in steel mill operations using linear programming[J]. Journal of Operations Management, 1980, 1(2): 95-102.
- [41] Akimoto K, Sannomiya N, Nishikawa Y, et al. An optimal gas supply for a power plant using a

- mixed interger programming model[J]. Automatic, 1991, 27(3): 513-518.
- [42] Kim J. H., Yi H. S., Han C. A novel MILP model for plantwide multiperiod optimization of byproduct gas supply system in the iron- and steel-making process[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2003, 81(A8): 1015-1025.
- [43] Kong Haining, Qi Ershi, Li Hui, Li Gang, Zhang Xing. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant[J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2156-2163.
- [44] Kong Hai-ning, Qi Er-shi, He Shu-guang, Li Gang. 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.
- [45] 施灿涛, 刘自升, 李铁克等. 钢铁企业副产煤气优化调度问题模型及算法[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(02): 26-32.
- [46] Zhao Xiancong, Bai Hao, Shi Qi, Lu Xin, Zhang Zhihui. Optimal scheduling of a byproduct gas system in a steel plant considering time-of-use electricity pricing[J]. Applied Energy, 2017, 195: 100-113.
- [47] Zhao Xiancong, Bai Hao, Lu Xin, Shi Qi, Han Jiehai. 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.
- [48] 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.
- [49] 黄文燕. 钢铁企业能源管理系统及其能耗预测的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [50] 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, (05): 645-649.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] LI L, LI H J. Forecasting and optimal probabilistic scheduling of surplus gas systems in iron and steel industry[J]. Journal of Central South University, 2015: 22(4): 14-37.
- [54] 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.
- [55] 赵贤聪, 白皓, 李宏煦等. 钢铁生产过程富余煤气动态优化分配模型[J]. 工程科学学报, 2015, 37(01): 97-106.
- [56] 施琦, 赵贤聪, 白皓. 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.
- [57] 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.
- [58] 高金彤, 倪团结, 张琦. 钢铁企业蒸汽动力系统多目标优化[J]. 冶金能源, 2018, 37(01): 3-8.
- [59] 李佳佳. 钢铁企业蒸汽系统优化调度[D]. 天津: 天津理工大学, 2016.
- [60] 郝飞, 高权, 姜彬等. 钢铁企业智能电力调度集成系统研究及应用[J]. 冶金自动化, 2013, 37(04): 33-38.
- [61] 马光宇. 钢铁联合企业电力系统分析与优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [62] 郝飞, 高权, 姜彬等. 钢铁企业智能电力调度集成系统研究及应用[J]. 冶金自动化, 2013, 37(04): 33-38.
- [63] 夏新华, 高宗和, 徐帆. 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.
- [64] 陈聪, 赵均, 邵之江. 钢铁企业氧气管网的平衡与调度研究[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(09): 1089-1094.
- [65] 张子阳, 孙彦广, 马湧. 基于改进单纯形法的钢铁企业氧气系统优化调度研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(23): 189-194.
- [66] 徐靖淳. 钢铁行业氧气消耗预测与调度优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [67] 程海花, 寇宇, 周琳等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 61-70.
- [68] 李楠, 黄礼玲, 张海宁. 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.
- [69] 韩宇, 彭克, 王敬华. 多能协同综合能源系统协调控制关键技术研究现状与展望[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 81-87.
- [70] 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.
- [71] 何仲潇, 徐成司, 刘育权. 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.
- [72] 孙彦广. 钢铁企业能量流网络信息模型及多种能源介质动态调控[C]. 中国九江: 2010年全国能源环保生产会议文集, 2010: 68-74.
- [73] 罗先喜, 苑明哲, 徐化岩等. 面向钢铁企业的先进能源管理系统研究新进展[J]. 信息与控制, 2011, 40(06): 819-828.
- [74] Zeng Yujiao, Xiao Xin, Li Jie, Sun Li, Floudas Christodoulos A., Li Hechang. 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.
- [75] 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.
- [76] 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]. 北京: 冶金自动化研究设计院. 2017.
- [77] 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.
- [78] 李兵, 郝勇生, 彭兴,等. 钢铁企业多能源协同优化模型研究[C]. 中国北京: 全国冶金自动化信息网会, 2014: 166-169.
- [79] 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.
- [80] 鲁晓旭, 贺东风, 冯凯. 不同生产负荷下副产煤气调度建模和仿真[J]. 冶金能源, 2018, 37(02): 3-6.
- [81] 孙彦广. 基于物质流能量流协同的钢铁企业能源系统管控技术[C]. 中国上海: 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集, 2010: 17-99.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 张立宏, 蔡九菊, 杜涛. 钢铁企业蒸汽系统的现状分析及改进措施[J]. 中国冶金, 2007, (01): 50-53.
- [85] 田永华. 钢铁企业蒸汽合理利用及优化分配研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [86] 李洪福, 温燕明, 孙德民. 钢铁企业用电自给可行性探讨[J]. 钢铁, 2010, 45(01): 99-103.
- [87] 周佃民, 李关定. 宝钢集团能效电厂的应用[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(02): 32-34.
- [88] 曾亮, 梁小兵, 欧燕. 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.
- [89] 郑忠, 陈开. 钢铁能源管理系统与流程网络系统节能技术展望[C]. 中国厦门: 2010 年全国能源与热工学术年会, 2010: 241-246.
- [90] 孙岚. CPLEX 在优化调度中的应用[J]. 福建电脑, 2005, (11): 42-43.
- [91] 蒋争明, 关青苗. 基于 CPLEX 和 C++语言求解优化问题的过程[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(23): 49-50.
- [92] 曾玉娇, 孙彦广. 钢铁企业蒸汽-电力系统多时段优化调度[C]. 中国大连: 第 25 届中国过程控制会议论文集, 2014: 836-843.

附 录

A. 攻读硕士学位期间参与的科研项目

- [1] 国家自然科学基金面上项目 (No.51474044) “炼钢厂生产实时调度的动态网络建模及调度策略优化方法”。
- [2] 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”。
- [3] 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”。

B. 学位论文数据集

| | | | | | |
|---|-----------|--------|--|--------------|--|
| 关键词 | | 密级 | | 中图分类号 | |
| 钢铁企业；节能降耗；煤气-蒸汽-电力；协同；调度 | | 公开 | | TF | |
| 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 | 专业学位 | | 硕士 | |
| 论文题名 | | 并列题名 | | 论文语种 | |
| 钢铁企业煤气-蒸汽-电力 协同调度研究 | | | | 中文 | |
| 作者姓名 | 舒永朋 | 学号 | | 201709131197 | |
| 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 | |
| 冶金工程 | 冶金信息与系统工程 | 3 | | 2020 | |
| 论文提交日期 | 2020. 07 | 论文总页数 | | 86 | |
| 导师姓名 | 郑忠 | 职称 | | 教授 | |
| 答辩委员会主席 | | 梁小平 教授 | | | |
| 电子版论文提交格式 | | | | | |
| 文本（√） 图像（） 视频（） 音频（） 多媒体（） 其他（） | | | | | |

致 谢

六月维夏，山有嘉木。疫情渐散，山城再次生机盎然，中国再次生机盎然！在这个美好的季节，我正在实验室补充着论文的最后工作，心中却越往事千年。随着毕业季的来临，意味着我生命中最纯美的学生时代即将结束。尽管百般不舍，但这一天终究会在熙熙攘攘的喧嚣中决绝的来临，虽然天空没有留下鸟儿的翅膀，但我已经飞过，因此我毫不遗憾。

三年时光，弹指一挥间。此刻，关于重庆、关于重庆大学，皆涌上心头。我把青春的尾巴留在了嘉陵江畔，而这三年无疑是我人生中最刻骨铭心的一段经历，充满了酸甜苦辣，更有收获和成长。毕业之际，心中莫不百感交集，或兴奋、或怅然、或期待、或惶恐……，就像一杯烧沸的酒在心中不停的翻腾。今文之将结，业之将终，余心不胜感激，谨向所有在硕士研究生期间指导、帮助、关心我的老师、同门、亲人和朋友们表达最诚挚的谢意！

首先我要感谢我的导师郑忠教授。郑老师学识渊博，治学严谨，对待工作一丝不苟，教导学生严慈相济，先做人，后立事，这些精神品质无一不深刻的影响着我。三年前，我有幸来到郑老师门下，奈何我天资愚钝，而又跨科入学，门墙忝列，始入门，七窍仅通三窍。承蒙郑老师孜孜教诲、循循善导，方启吾之愚智，每每思之，莫不感怀。今年囿于疫情，我的论文迟迟不得推进，然，郑老师却不厌其烦，朝日督促，我才有了坚持下去的动力。其苦口婆心之真、之切，终难忘矣。在此，向郑老师致以最诚挚的感谢和崇高的敬意，祝愿我的导师郑忠教授绿水青山春常驻，桃李芬芳满天涯。

感谢高小强、蒋胜龙、陈红生、张开天（博后）、李稷（博后）等老师在我硕士研究生工作期间给予的帮助和指导。五位老师在学术研究、实际工作方面，都给予我深深的启迪和教益，让我受益颇深。

感谢徐兆俊、呼万哲、黄世鹏、冯玲等博士师兄师姐对我学习的指导和帮助。感谢范计鹏、卢义、王永周（博士）、连小圆（博士）、张开（博士）、贺坤（博士）、黄宏继、何徐、林宏宇、李东方、沈薪月、王蕾、郝卫平、李欢、唐则吉、唐伟、王成、张鏐等众多兄长弟妹的一路相伴。忆往昔，数学建模我们挑灯夜战，虎峰山上我们携手同游，导师家里我们共沐春风，师兄答辩我们把酒言欢，和你们在一起的三年，是我人生的重要部分，亦从你们身上学到很多优秀的品质。今当远行，实在难舍，但同门之情，永远难忘。就像路遥先生在《平凡的世界》中说的：“学生时代的生活啊，将永远鲜活地保持在每个人一生的记忆之中，即使我们进入垂暮之年，我们也常常会把记忆的白帆，驶回到那金色的年月里……”，今且不

言何时见，且放白鹿青崖间，盼君个个能登天，俯瞰银河枕星颜！

同行三年，还要感谢田慧、邓凡、李冲、梁佳俊四位室友的朝夕相伴，三年相伴，最是平凡却又最是深情，感谢你们喊了我三年的鹏哥，让我甚感荣幸。感谢研团委办公室的所有成员，有了你们，让我在重庆大学有了除课题组以外的第二个小家庭。感谢姣姣、成杰、石新、姚利、陈毅、树东、金倍等众多好友的相携相助，结识你们，人生便又多了一片云彩。

感谢养育我的父母和支持我的家人，离乡求学，而今七载，是你们一直以来的理解、默默付出和鼓励，才撑起了我逐梦蓝天的翅膀。特别是我的父亲，已垂垂老矣，却依然像老牛一样为我们家默默耕耘，他的精神是我心中永远不倒的红旗。还有我的两个哥哥，一个心系我生活，一个宽我以格局。谢谢你们，我爱你们，今后我会继续努力，固守初心，向阳而行。愿你们万胜如意，身体康安！

感谢党和国家。我是一个来自农村的孩子，多年来一直享受党和国家的各种关怀和照顾，才有幸读完大学和研究生。遥想当年，不禁感叹，“昔日放牛郎，今朝变凤凰”，没有党和国家的好政策，我想我很难改变自己的命运。而今完成学业，定当努力工作，服务社会，报效国家。

写到这里，还有一个人要感谢，那就是自己！感谢自己曾经的选择，感谢自己一直以来的坚持，余心之所善，虽九死不悔。毕业不过是人生之一站，走上社会才是真的考验，未来路漫漫，还需上下求索，勇往直前。

缱绻烟云，岁月拨弦，三年一梦，再踏新途。借用网上一句话，送给所有我认识的或者不认识的 2020 届毕业的校友们，愿我们长夜里总有梦想发亮，秋收春耕；愿我们在人海中常有良友相伴，长乐未央；愿我们爱的人，此生平安喜乐，所求皆如愿，所行化坦途，多喜乐，长安宁。2020 年注定是不平凡的一年，我们共同经历了抗“疫”一课，中国将全面建成小康社会。在这个伟大的历史节点上，我们注定是不平凡的一届毕业生。曾子曰：“士不可以不弘毅，任重而道远”，如今我们就要奔赴祖国大江南北，愿我们秉承重大校训，做新时代建功立业人。

本文在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”的共同资助下完成，特致谢意！

最后，衷心感谢在百忙之中参与本次论文评审和答辩的各位专家、教授！

舒永朋

二〇二〇年六月 于重庆