

分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

# 学 位 论 文

## 钢铁企业电力合理生产与优化研究

作者姓名：刘向斌

指导教师：杜涛教授

张琦讲师

东北大学热能与环境工程研究所

申请学位级别：硕士

学科类别：工学

学科专业名称：热能工程

论文提交日期：2012年6月20日

论文答辩日期：2012年6月26日

学位授予日期：2012年7月11日

答辩委员会主席：于庆波

评阅人：

刘云 董辉

东 北 大 学

2012年6月

**A Thesis in Thermal Engineering**



# **Study on Reasonable Production and Optimization of Electricity in Iron and Steel Enterprises**

by Liu Xiangbin

Supervisor: Professor Du Tao

Lecturer Zhang Qi

**Northeastern University**

**June 2012**

# 独创性声明

本人声明，所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：刘何斌

日期：2012.6.24

# 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年  一年  一年半  两年

学位论文作者签名：刘何斌

导师签名：李涛

签字日期：2012.6.24

签字日期：2012.7.2

# 钢铁企业电力合理生产与优化研究

## 摘 要

电力是钢铁企业生产中仅次于煤炭的重要能源之一，其地位不容忽视。在钢铁企业能源消耗结构中，因各企业工艺流程的差异，电力所占比例大致在 20%~30%，电力成本占生产总成本的 10%左右。因此，借助有效方法优化钢铁企业电力生产系统，寻找合理的电力生产与外购策略，对落实企业节能减排工作、降低企业生产成本和提高企业综合效益都具有十分重要的意义。以此为研究背景，本文分析了钢铁企业电力的生产工艺与消耗特点；建立了综合考虑电力、煤气和蒸汽的钢铁企业电力生产优化模型，并将模型应用于首钢京唐钢铁公司电力生产系统，取得了较好的优化效果。本文主要研究内容如下：

(1) 通过对钢铁企业电力生产、消耗等的深入调研，着重分析了钢铁企业现有发电技术的工艺原理与特点，并据此提出了钢铁企业的发电原则，简要分析了钢铁企业电力的消耗特点。

(2) 建立了钢铁企业电力生产优化模型。本文在对钢铁企业电力生产进行深入了解分析的基础上，综合考虑电力、煤气和蒸汽三种能源介质的联合优化，建立了具有普适性的耦合电力生产优化模型，并用 ILOG 编程求解。模型从电力生产与外购、煤气分配和蒸汽生产三个角度进行联合优化调度，为钢铁企业提供合理的电力生产与外购策略，以达到降低系统综合运行成本的目的。其中，富余煤气的优化分配和蒸汽的生产优化调度是手段，而电力的生产与外购优化调度是最终目的。

(3) 将优化模型应用于首钢京唐公司，验证了模型的有效性。本文针对首钢京唐公司实际，将提出的普适模型具体化，建立了考虑电力、煤气、蒸汽的京唐公司电力生产优化模型。通过模型求解，提出了京唐公司电力生产与外购策略，同时给出了煤气在缓冲用户之间的分配和蒸汽在生产设备之间的生产优化方案，反映出了季节性电价对模型的影响。其次，考虑峰谷分时电价对模型的影响，提出了相应的调整方案，取得了较好的优化效果。最后，讨论了钢铁企业生产中只买煤和只买电两种供电模式的经济性、合理性，并分析了外购电价和外购动力煤价格变化对两种模式经济性的影响。

**关键词：**钢铁企业；电力；优化；节能

# Study on Reasonable Production and Optimization of Electricity in Iron and Steel Enterprises

## Abstract

Electricity is one of the important energy sources second only to coal in the production of iron and steel enterprise, so the position of electricity can not be ignored. In the structure of energy consumption in the iron and steel enterprises, due to the differences of each enterprise's technological process, electricity proportion is roughly 20% to 30%, electricity costs account for about 10% of the total production cost. So, with an effective way to optimize the electricity production in iron and steel enterprises, looking for a reasonable electricity production and out-purchased strategy, have a great significance on the implementation of energy saving and emission reduction, reduction of production costs and improvement of the overall efficiency of enterprises. With this research background, this paper analyzes the electricity production process and consumption characteristics of iron and steel enterprises, proposes a electricity production optimization model for iron and steel enterprises which taking electricity, gas and steam into consideration, and the model is applied in the electricity production system of Shougang Jingtang, and a better result is gained. The main research contents of this paper are as follows:

1. The links of electricity production, out-purchased, use, etc of iron and steel companies are understood deeply, the process principles and characteristics of the existing electricity generation technologies are analyzed in detail, according to this put forward the principle of electricity generation in iron and steel enterprises, and the use characteristics of electricity are analyzed briefly.

2. The electricity production optimization model of iron and steel enterprises is established. In this paper, based on in-depth understanding of the electricity production of iron and steel enterprises, integrated considering the joint optimization of electricity, gas and steam three types energy media, established with a universal electricity production optimization model. The model is settled by the software ILOG. The model realizes joint optimization scheduling from production and out-purchased of electricity, gas distribution and

steam production three perspectives, and provides reasonable electricity production and out-purchased strategy for iron and steel enterprises, to achieve the purpose of system operating cost reduction. Among them, the optimal allocation of surplus gas and production optimization scheduling of steam is measures, but the electricity production and out-purchased optimal scheduling is the ultimate goal.

3. The optimization model is applied in Shougang Jingtang, verify the validity of the model. This paper aims at the present situation of Shougang Jingtang, embodied the universal model, established the electricity production optimization model of Jingtang company to consider the electricity, gas and steam three types energy media. Through the model solution, proposed the electricity production and out-purchased strategy of Shougang Jingtang, at the same time, the scheme of gas distribution between gas buffer user and steam production between steam production equipment is given, reflected the impact of the seasonal tariff on the model. Considered the impact of TOU to model, the corresponding schemes of adjustment are proposed, and better results are gained. Finally, discussed the economic rationality of the only-buy-coal and only-buy-power two electricity supply modes in steel production, and analyzed the impact of the purchased electricity and purchased coal prices change on the economy of the two modes.

**Key words:** iron and steel enterprises; electricity; optimization; energy conservation

# 目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	III
Abstract.....	V
目 录.....	VII
第 1 章 文献综述.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 我国钢铁工业能耗现状.....	1
1.1.2 我国钢铁工业能源结构.....	2
1.1.3 本课题的研究意义.....	2
1.2 钢铁企业电能管理的研究进展.....	3
1.2.1 国外研究与应用.....	4
1.2.2 国内研究与应用.....	4
1.3 钢铁企业电力合理生产与优化的研究进展.....	5
1.3.1 电力生产技术层面.....	5
1.3.2 电力生产优化调度层面.....	5
1.4 本文研究内容.....	7
第 2 章 钢铁企业电力生产与使用.....	9
2.1 钢铁企业电力来源.....	9
2.2 钢铁企业电力生产端.....	10
2.1.1 自备电站发电.....	11
2.1.2 余热余能发电.....	14
2.1.3 钢铁企业发电原则.....	23
2.3 钢铁企业电力消耗端.....	24

2.3.1 钢铁企业电力消耗流向.....	25
2.3.2 主生产工序用电情况.....	26
2.3.3 钢铁企业用电分析.....	27
2.3.4 钢铁企业主要电耗分析.....	28
2.4 小结.....	33
<b>第 3 章 钢铁企业电力生产优化模型.....</b>	<b>35</b>
3.1 电力生产优化模型.....	36
3.1.1 问题描述.....	36
3.1.2 模型简化与假设.....	37
3.1.3 目标函数.....	37
3.1.4 约束条件.....	38
3.1.5 参数定义.....	40
3.2 对模型的简要评价.....	42
3.2.1 适用范围.....	42
3.2.2 模型特点.....	42
3.2.3 模型用途.....	42
3.3 模型求解软件介绍.....	43
3.4 小结.....	44
<b>第 4 章 优化模型在首钢京唐公司的应用.....</b>	<b>45</b>
4.1 首钢京唐公司概况.....	45
4.2 首钢京唐公司电力生产端现状.....	45
4.2.1 自备电站发电.....	46
4.2.2 余热余能发电.....	47
4.2.3 蒸汽汽源.....	47
4.3 首钢京唐公司电力消耗端简介.....	49
4.3.1 京唐生产用电分析.....	49

4.3.2 京唐用电需求计算.....	50
4.4 首钢京唐公司电力生产优化建模.....	50
4.4.1 目标函数.....	52
4.4.2 约束条件.....	52
4.4.3 参数定义.....	57
4.5 模型求解与讨论.....	59
4.5.1 优化结果与分析.....	60
4.5.2 峰谷分时电价的影响分析.....	63
4.5.3 只买煤与只买电模式的讨论.....	66
4.6 小结.....	69
<b>第 5 章 结论</b> .....	<b>71</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>73</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>79</b>
<b>攻读学位期间发表论文情况</b> .....	<b>79</b>

# 第1章 文献综述

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 我国钢铁工业能耗现状

钢铁产业是资源密集、能耗密集、排放密集的产业。钢铁工业能源消耗占中国总能源消耗量的15.18%<sup>[1]</sup>左右，占工业部门能耗总量的15%~20%左右，在企业生产总成本中能耗费用占20%~40%<sup>[2]</sup>。我国钢铁行业高能源消耗的特点，造成高成本、高污染和高排放。其中，钢铁工业废水、粉尘、二氧化碳和二氧化硫排放量分别占全国工业污染物排放总量的10%、15%<sup>[3]</sup>、14%<sup>[4]</sup>和10%以上。我国钢铁行业平均能耗高于国际平均能耗15%左右，存在着巨大的节能减排潜力。因此在钢铁企业开展能源管理工作，研究企业生产所需能源介质的合理生产与优化调度，对节约能源、提高能源利用率和企业竞争力具有重要的意义。

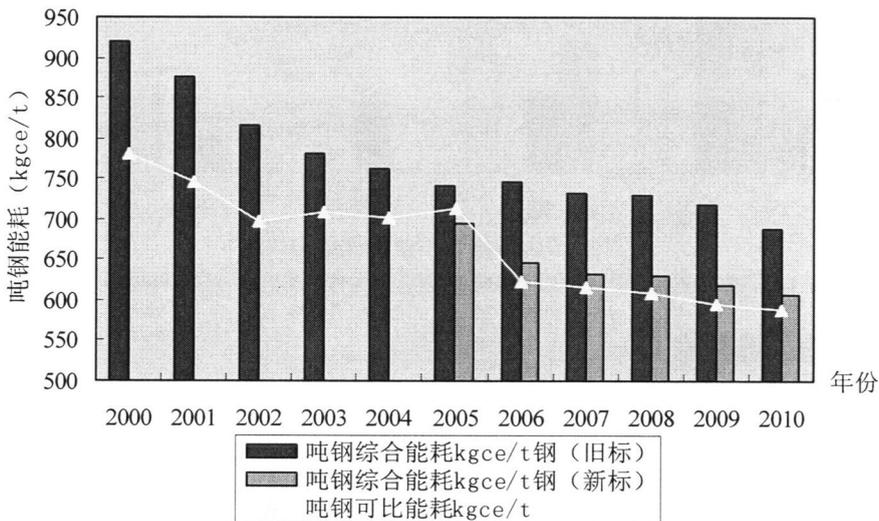


图 1.1 2000-2010 年我国钢铁工业的吨钢能耗及其变化

Fig. 1.1 Changes of energy consumption per ton steel in china iron-steel industry in 2000-2010

我国钢铁联合企业生产流程仍以高炉-转炉生产长流程为主，铁前工序能耗约占钢铁企业总能耗的60%以上；由于受废钢资源的限制，从冶炼废钢开始的短流程约占8%左右。近十年，随着技术节能、系统节能和管理节能等手段在我国钢铁工业中的广泛应用，其能耗水平整体呈现下降趋势（见图1.1）。图中，旧标是指电力折标煤系数沿用供电煤耗等价值，即 $1\text{kW}\cdot\text{h}=0.404\text{kgce}$ ；而新标则规定使用电热当量值，即 $1\text{kW}\cdot\text{h}=0.1229\text{kgce}$ 。

2006年起我国将电力折标煤系数从0.404kgce/kW·h调为0.1229kgce/kW·h，使我国有关工序能耗值均有较大幅度下降，与先前能耗数据及国外能耗情况有较大的不可比性。

### 1.1.2 我国钢铁工业能源结构

能源是钢铁生产的大动脉，我国钢铁工业用能主要以煤炭为主，电力次之。目前，我国钢铁工业的能源结构如图1.2所示，大致是：煤炭为69.9%，电力为26.4%，天然气为0.5%，油类为3.2%。对比美国、德国和日本等国外先进水平，我国钢铁工业用能结构还不甚合理，主要表现为煤炭比重和外购电量过大。这反映出我国钢铁企业一次能源利用效率和转化效率不高，二次能源的回收利用不充分，回收再用率明显偏低。

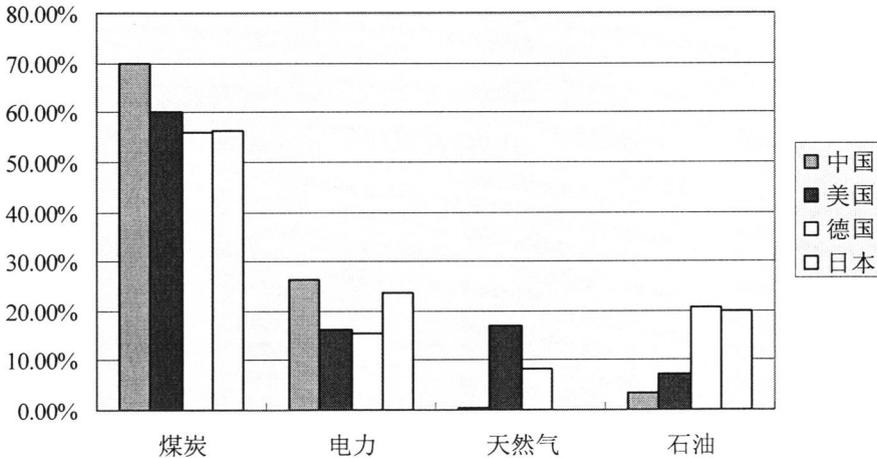


图 1.2 国内外钢铁工业能源结构对比

Fig. 1.2 The contrast of energy structure in home and abroad iron-steel industry

### 1.1.3 本课题的研究意义

钢铁企业能源消耗结构中，因各企业工艺流程的差异，电力所占比例大致在20%~30%，是钢铁企业正常生产中仅次于煤炭的重要能源之一。我国钢铁工业用电占全国总用电量的8.3%左右，而钢铁企业的电力成本占生产总成本的10%左右。可以说，电力成本已成为钢铁企业物料成本、人工成本之外最大的成本项目，直接关系到钢铁企业的经济效益和竞争力。

在大型钢铁联合企业的生产过程中，需要用到煤炭、电力、石油和天然气等一次能源介质，同时会产生多种二次能源，如电力、副产煤气和蒸汽等。钢铁企业中的副产煤气和蒸汽是与电力生产紧密相关的两种能源介质，二者的数量大小和品质高低均对电力生产的数量产生间接或直接的影响。因此，钢铁企业的电力生产系统、煤气系统和蒸汽

系统是交互联系、相互影响的,透过研究钢铁企业煤气系统和蒸汽系统的优化问题,可以间接实现电力生产系统的优化调度,从而确定企业合理的电力生产与外购方案。其中,煤气和蒸汽的优化调度是手段,而电力的合理生产与优化调度是最终要达到的目的。

钢铁企业电力来源由自发电和外购电两部分组成。其中,自发电在钢铁企业生产过程中扮演着重要的角色,实现了钢铁企业二次能源和余热余能资源的真正回收利用,而外购电则是自发电的补充。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,多余的部分送至外部电网;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。就目前我国各种规模的钢铁企业来说,通过高效回收利用钢铁生产过程中产生的各种余热余能和副产的二次能源,距离实现严格意义上的电力自用有余而外供的目标还是存在相当的差距。因此,我国钢铁企业还是处于自发电量不足以满足正常生产用电需求的局面,这就要从外部电网购买一定数量的电力来维持钢铁生产的顺利进行。钢铁企业从外部电网购买电力一般是按照电力需求侧管理的方式,即企业自身负责用电管理,严格遵从一定的用电合同,确保总用电量和动态负荷均在契约电量和负荷范围内。超出合同电量和负荷将以惩罚价格结算电费,会增加企业的用电成本,同时影响企业的用电信誉。

综上所述,研究钢铁企业的电力合理生产与优化调度,寻找企业最佳的电力生产与外购策略,对做好企业的节能减排工作、降低企业的生产成本有着重要的意义。

## 1.2 钢铁企业电能管理的研究进展

电能是任何国家的工业全面发展所必须的要素。今天,电能构成了全球范围内全年度电能消耗的30%,这个数字将随着工业用原油供应的更加紧张而增加<sup>[5]</sup>。在此形势下,因为电能管理对经济发展和环境提升的贡献,已成为一个特受关注的主题。电能管理作为一个逻辑结果和措施种类的规划,其可以被部署以减少能源消耗。电能管理(EEM)可执行于供应侧(SS)和需求侧(DS)<sup>[6]</sup>。

当前我国电能生产效率为33%左右,从能源转化效率来看,终端用户侧节约1kW·h电能相当于节约3倍左右数量的一次能源<sup>[7]</sup>。钢铁企业是大型的用电企业,大力实施电能管理,对于提高电力能效、降低生产电耗和节约用电成本具有十分重要的现实意义。国内外研究人员和学者在钢铁企业的电能管理领域做了不同程度的研究工作,并取得了许多成果。但是大部分都是针对钢铁企业电力需求侧所做的研究,比较常见的有负荷预测、负荷调度和电能优化分配等。

### 1.2.1 国外研究与应用

Goutam Dutta 等人开发了一个用于联合钢铁厂电能优化分配的混合整数线性规划模型,其考虑了容量、物料、热量、电能和氧的平衡方程式,以及生产量、产品路线、净变现、可变成本、市场需求和契约约束等。该模型不仅可以在一个电力危机事件中决策层级关闭,而且可以在每个电力可用性水平中决策优化产品结构。模型的实际应用表明,可以使出售钢材的净利润增加 58%<sup>[8]</sup>。S. Ashok 提出了一种结合了间歇式负荷特性并可通用于任何类型的流程工业的负荷模型,该模型与一个利用整数规划的最优化方程相耦合,针对不同的费率结构,在满足生产、工艺流程和储存约束的条件下可以使总的电力成本最小。模型应用于某钢厂,在最优负荷调度下,尖峰时段的需求量和电力成本显著减少,大约分别为 50%和 5.7%<sup>[9]</sup>。B. Ostadi 等人提出了一种应用于典型工厂的非线性规划模型,模型在工厂的生产运行情况表明,其可以给出工厂电能消耗的最优值及最优时间<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 国内研究与应用

上海交通大学自动化研究所的郑静等人分析了某大型钢铁企业电力负荷的特点,采用小波变换与 BP 神经网络相结合的方法,根据实际数据对其电力负荷进行了短期预测研究,结果表明建立的模型有较高的精确性,预测值能较好地逼近实际值<sup>[11]</sup>。林海英等人在对福建省钢铁企业进行调研的基础上,选取负荷特性指标对钢铁行业用电负荷特性进行分析,并研究了电价等需求侧管理手段对钢铁企业用电的影响,分析了钢铁行业需求侧管理的潜力<sup>[12]</sup>。上海宝钢股份的周佃民等人以具体钢铁企业为研究对象,通过分析钢铁企业的用电特点,提出了钢铁企业负荷管理系统的功能设计以及软件实现,系统实现了企业的负荷与电量预测,对企业自备电厂的生产具有重要的指导意义,并对一般大型工业企业具有推广价值<sup>[13]</sup>。另外,周佃民还以宝钢为背景,从发电、用电和关口平衡等方面,研究和探讨了钢铁企业自主调节自备电厂出力的可行性及相关问题,即宝钢发用电负荷优化运行研究<sup>[14]</sup>。盛刚等人同样对国内某大型钢铁企业电力负荷特点进行了分析,提出应将钢铁企业的电力负荷分为 3 种类型,即基本稳定负荷、特殊工艺负荷和与时间相关的日相似负荷,并探讨了相应的预测模型<sup>[15]</sup>。李关定结合宝钢的实际生产计划与检修计划信息,选用合适的负荷模型及负荷模拟算法,对宝钢电力负荷预测进行了校正,有效提升了负荷预测的精度<sup>[16]</sup>。

## 1.3 钢铁企业电力合理生产与优化的研究进展

### 1.3.1 电力生产技术层面

目前,国内对钢铁企业电力合理生产做了大量的工作,但都集中在如下三个方面:如何高效回收利用钢铁生产过程中的各种余热余能资源进行发电;如何利用钢铁生产过程中富余的副产煤气进行燃烧发电;以及如何灵活选用集中式、分布式或区域式等发电形式进行余热回收利用。研究上述技术和方案并大力在钢铁企业推广应用,可以实现钢铁企业生产中二次能源、余热余能资源的高效回收与转化利用,减少能源浪费和环境污染,提高企业自发电比例,减少外购电量,降低钢铁生产成本。

马钢股份公司的丁毅等人通过对现有不同发电供热机组运行状况分析研究,从能源利用效率、经济性以及可靠性等角度,探讨了钢铁冶金企业的热电发电模式,为钢铁企业建设发电机组提供了需要考虑的因素和建议<sup>[17]</sup>。中材节能发展有限公司的唐咸喜针对中小型钢铁联合企业燃烧排烟设备数量多、单台余热量小,且余热资源分散的特点,提出了区域余热发电方案,并阐述了其系统特点、技术路线,并以抚顺新钢铁有限责任公司为例,说明该技术可行,能够取得良好的经济效益及社会效益,适宜在中小型钢铁企业余热回收利用及电力生产中推广使用<sup>[18]</sup>。文献<sup>[19-23]</sup>探讨了低压饱和蒸汽发电技术、余热余能回收及发电技术及富余煤气发电技术在钢铁企业的应用特点,分析了各项技术的经济效益。另外,冶金工业规划研究院的孙浩对钢铁联合企业余热余能发电自供电比例进行了分析研究,指出钢铁联合企业在不额外购入一次能源发电的前提下“做到电力自供有余、实现外送”是不可能的结论,同时得出了全部依靠余热余能的自发电量占钢铁企业耗电量的比例上限为45%<sup>[24]</sup>的结论。李洪福等人系统分析了典型钢铁流程的能量流和具备回收利用价值的主要余热余能资源情况,提出了采用当前先进的工艺技术建立分布式电站进行回收发电,使得钢铁企业余热余能就近回收、就近输送、就近使用,以实现钢铁企业用电基本自给;而其研究结果表明,钢铁企业通过余热余能回收发电完全可以做到用电基本自给,甚至完全自给,乃至外供的结论<sup>[25]</sup>。

### 1.3.2 电力生产优化调度层面

1.3.1 小节所述都是从发电技术和发电形式的角度去研究钢铁企业的电力合理生产问题,而未涉及到利用系统节能思想和最优化理论来研究电力生产优化调度问题。近几

十年,国内外在钢铁企业的煤气系统和蒸汽系统的优化调度方面,均做出了较为深入的研究,取得了很多成果。而把电力作为如同煤气、蒸汽一样的能源介质,利用最优化理论和系统节能思想对电力生产优化调度的研究还很有限,下文就国内外在这方面的研究予以简单介绍。

Dae Sung Lee 等人应用数学规划方法,建立了用于决策钢铁企业最佳外购电量的混合整数线性规划模型(MILP)和用于获得钢铁企业自备电厂最优能源分配的非线性规划模型(NLP)。模型在几个案例中的应用结果,验证了其正确性和有效性,表明模型所提供的解决方案在满足稳定的能源供应的同时,可获得满意的节能效果<sup>[26]</sup>。

张琦等人针对钢铁富余煤气产生、储存、缓冲和使用的周期性变化,以及各周期内蒸汽、电力的供应与需求特点,采用数学规划方法,建立了以能源消耗最少、效益最优为目标函数的富余煤气、蒸汽和电力多周期耦合数学模型。模型综合考虑了煤气、蒸汽和电力等能源介质的供需变化以及生产成本、安全等约束,通过 ILOG Cplex 软件求解出模型的最优解,即可获得煤气、蒸汽和电力的最优分配方案,用以指导实际生产。在案例中的应用表明,模型能使钢铁企业富余煤气、蒸汽和电力等能源介质得到合理、安全和高效的分配,提高了能源使用效率,降低了生产费用<sup>[27]</sup>。

黄银祥以钢铁生产过程中的物料平衡和能量平衡为理论基础,结合逻辑关系算法,建立了钢铁企业电力系统仿真数学模型,包括主生产工序电力系统模型、余热余能回收电力系统模型和自发电系统模型。通过应用首钢京唐钢铁公司的生产历史数据进行仿真,对比分析不同工况下电力系统模型的仿真结果,获得了理想的结果,可以达到钢铁企业节能降耗的目的。最后,在给定的钢铁生产计划、检修计划、系统当前状态的前提下,基于已经建立的电力系统数学模型,采用单时间段单纯性线性优化方法,提出了钢铁企业的电力系统优化数学模型。模型的优化结果表明,模型可以给出满足钢铁生产过程中电力需求的最佳电力生产方案,能够节约 15% 的能源成本<sup>[28]</sup>。

杨力俊等人采用经济规划方法,分别建立了自备电厂最优生产经营策略模型和大用户最优购电策略模型。前者以自备电厂为研究对象,以其一年内预期售电利润最大作为目标函数来确定自备电厂的生产经营计划,即确定其产电、产热及外购电的比例,以提高自备电厂的运营效益,同时有助于降低电网的经济损失。后者以自备电厂隶属企业为研究对象,以企业一年内预期用电成本最小作为目标函数,构建其最优购电策略模型,用以找出大用户合理的购电方式,从而实现发电、供电和电力用户三者利益共赢的目的。通过具体算例求解提出的模型,得到了在落实峰谷分时电价后自备电厂的最优生产营销

计划, 以及自备电厂隶属企业的最佳购电模式, 得到的最优方案能够在保证自备电厂及其隶属企业经济运营优化的同时, 尽可能降低电网企业的售电损失, 实现三者的利益共赢<sup>[29]</sup>。

## 1.4 本文研究内容

本文以当前钢铁企业能源管理和节能减排为背景, 查阅、分析了国内外大量文献, 对钢铁企业电力生产端以及电力外购情况进行了深入的分析, 建立了具有普适性的钢铁企业耦合电力生产优化模型, 并将其应用于首钢京唐公司, 利用计算机编程求解, 提出了京唐公司电力合理生产与外购方案, 实现了钢铁企业一、二次能源和余热余能资源的合理、高效利用。本文各章节的主要内容为:

第二章, 通过对钢铁企业电力生产端和消耗端的深入调研, 分析了钢铁企业电力的生产工艺与消耗特点, 并据此提出了钢铁企业的发电原则。

第三章, 在对所描述的钢铁企业电力生产优化问题进行一定简化和提出适当假设的前提下, 建立了考虑电力合理生产与外购、以及与之相关的煤气和蒸汽的多周期混合整数规划模型, 并对模型的适用范围、特点和用途进行了简要评价。

第四章, 针对首钢京唐公司的实际情况, 将第3章建立的模型具体化, 建立考虑动力煤、煤气消耗和蒸汽生产的京唐公司电力生产优化模型, 利用计算机建模求解, 给出优化方案, 并对结果进行分析。讨论了峰谷分时电价影响下的电力生产与外购策略, 以及只买煤和只买电两种供电模式下的经济性问题。

第五章, 本文结论, 对本文的工作进行了总结。

此页不缺内容

## 第 2 章 钢铁企业电力生产与使用

现代钢铁联合企业的高炉-转炉长流程是典型的铁-煤化工过程，包括烧结/球团、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等主生产工序和能源加工转换等辅助生产工序。电力是钢铁企业这一生产流程中非常重要的二次能源，占钢铁企业总能源消耗的 20%~30%<sup>[30]</sup>，因各企业工艺流程的不同，该比例有所不同。在钢铁生产中的设备驱动、过程加热及其他众多工艺过程，都需要用到电力，几乎涉及钢铁生产的各个方面，钢铁企业电力生产与使用简图如图 2.1 所示。因此，分析研究钢铁企业的电力生产与使用对企业的电能管理和节能减排具有重要作用。

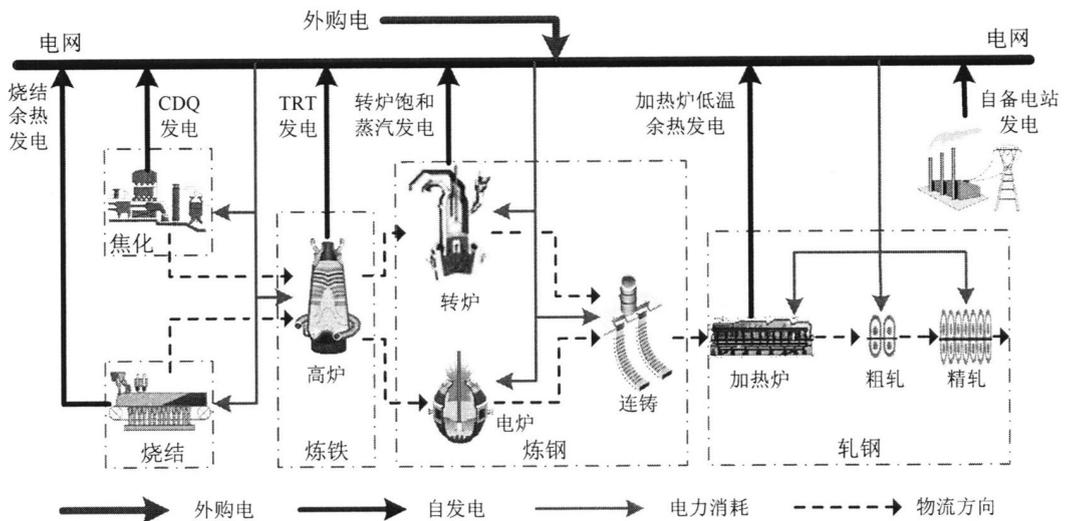


图 2.1 钢铁企业电力生产与使用简图

Fig. 2.1 The diagram of power production and use in iron and steel enterprise

### 2.1 钢铁企业电力来源

钢铁企业的电力来源由三部分组成：外购电、自备电站发电和余热余能发电。钢铁企业的自备电站发电设备包括：锅炉-汽轮机发电（BTG）机组（燃煤锅炉发电机组、全烧煤气锅炉发电机组、掺烧煤气锅炉发电机组），燃气-蒸汽联合循环发电（CCPP）机组，热电联产发电（CHP）机组等。钢铁企业的余热余能发电设备包括：干熄焦发电（CDQ）机组，高炉炉顶余压发电（TRT）机组，烧结余热发电机组，转炉饱和蒸汽发电机组，加热炉低温余热发电机组，高炉冲渣水余热发电机组等。

在本文中，为了分析问题的方便，将自备电站发电和余热余能发电统称为自发电，

以便更好的与外购电对应，研究钢铁企业生产中自发电与外购电之间的关系。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二次能源和余热余能资源的真正回收利用。外购电是自发电的补充，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。钢铁企业购买电力一般采用电力需求侧管理，即企业自身负责用电管理，严格遵照用电合同，确保总用电量和动态负荷均在约定负荷范围内。超出合同电量和负荷将以惩罚价格结算电费，会增加企业的用电成本，同时影响企业的用电信誉。

钢铁企业合理组织自备电站发电和余热余能发电，高效回收并转化利用生产过程中产生的二次能源和余热余能资源，不仅可以大大节约企业的生产成本，还可以减少环境污染。钢铁企业充分利用二次能源和余热余能资源，发挥自备电站发电和余热余能发电的现有发电能力，以此来提高企业的自发电比例，既可以降低对外部电网电能的依赖，又能够降低用电成本，而且通过对自发电的有效管理，可以促进企业本身电网运行的安全稳定性<sup>[31]</sup>。

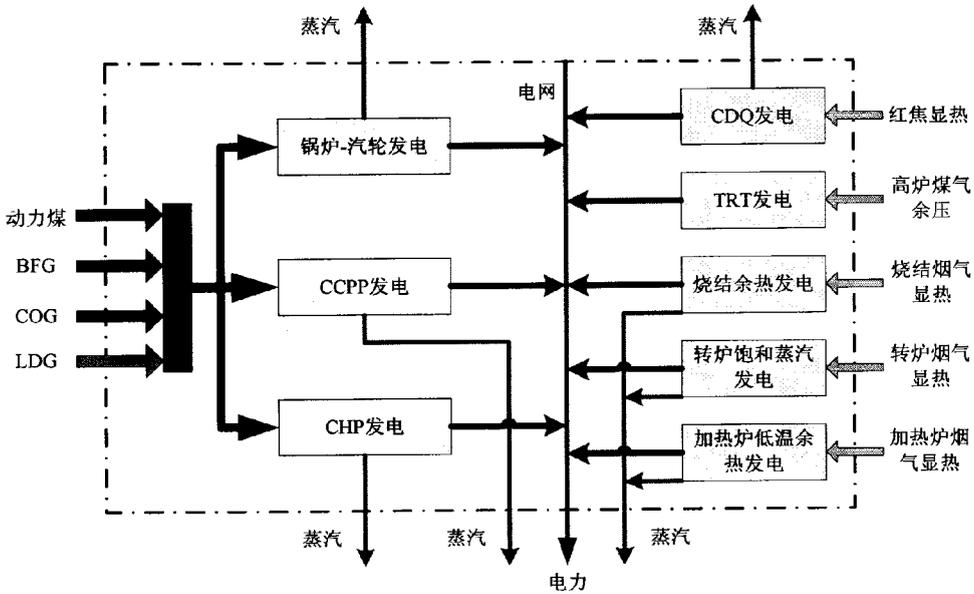


图 2.2 钢铁企业电力生产系统简图

Fig. 2.2 The diagram of power production system in iron and steel enterprise

## 2.2 钢铁企业电力生产端

钢铁企业的电力生产端主要由自备电站发电和余热余能发电组成，钢铁企业电力生产系统如图 2.2 所示。输入系统中的能量包括动力煤、三种副产煤气以及各工序余热余

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。

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。

### 2.1.1 自备电站发电

钢铁企业建立自备电站，按照自发自用自平衡的原则，来进行电力的生产和使用，也减少了企业用电受外部电网的过多影响，同时对缓解当地电网用电紧张的状况发挥着重大的作用。

自备电站发电是指通过利用钢铁生产过程中回收的二次能源如高炉煤气（BFG）、焦炉煤气（COG）、转炉煤气（LDG）以及外购一次能源（如动力煤）以燃烧的形式来发电。目前，钢铁企业的自备电站发电技术有：锅炉-汽轮机发电（简称 BTG，其又分为燃煤锅炉发电、全烧煤气锅炉发电、掺烧煤气锅炉发电），燃气-蒸汽联合循环发电（CCPP），热电联产发电（CHP）等。锅炉-汽轮发电技术属于常规发电技术，工业应用已相当成熟，本文不再予以介绍，下面着重介绍后两种发电技术的工艺原理和特点。

#### 2.1.1.1 燃气-蒸汽联合循环发电（CCPP）

CCPP 一般由高炉煤气供给系统、燃气轮机系统、余热锅炉系统、蒸汽轮机系统和发电轮机系统组成。主要设备有空气压缩机、高炉煤气压缩机、空气预热器、煤气预热器、燃气轮机、余热锅炉、发电机和励磁机等，一般分为单轴和多轴布置形式。如图 2.3 所示，CCPP 工艺流程为：经除尘加压的高炉煤气与加压的空气混合后进入燃烧室并燃烧，所产生的高温、高压燃气进入燃气透平机组膨胀做功，燃气轮机通过减速齿轮传递到汽轮发电机组发电，燃气轮机做功后的排气进入余热锅炉，产生蒸汽后进入蒸汽轮机做功，带动发电机组发电，组成燃气-蒸汽联合循环发电系统。

CCPP 具有如下工艺特点：

(1) CCPP 热效率、发电效率高，成本低，经济效益好。在不外供热时 CCPP 发电效率可达 40%~46%，目前最高可达 58%以上，并且还可以进一步提高。同规模的常规锅炉蒸汽发电效率仅为 23%~30%左右，而 CCPP 要多发出 80%左右的电。CCPP 的供电成本低，一般钢铁厂 CCPP 在回收的高炉煤气不计费用时，其供电成本仅为 0.07~0.08 元/kW·h。CCPP 的项目投资收益率在 25%以上，投资回收期一般为 3~5 年，经济效益良好<sup>[32]</sup>。

(2) 运行灵活，调峰性能好。由于 CCGP 中 70% 的电由启停灵活的燃气轮机发出，故调峰性能好，一般在 20 分钟内可带 2/3 额定负荷<sup>[33]</sup>。

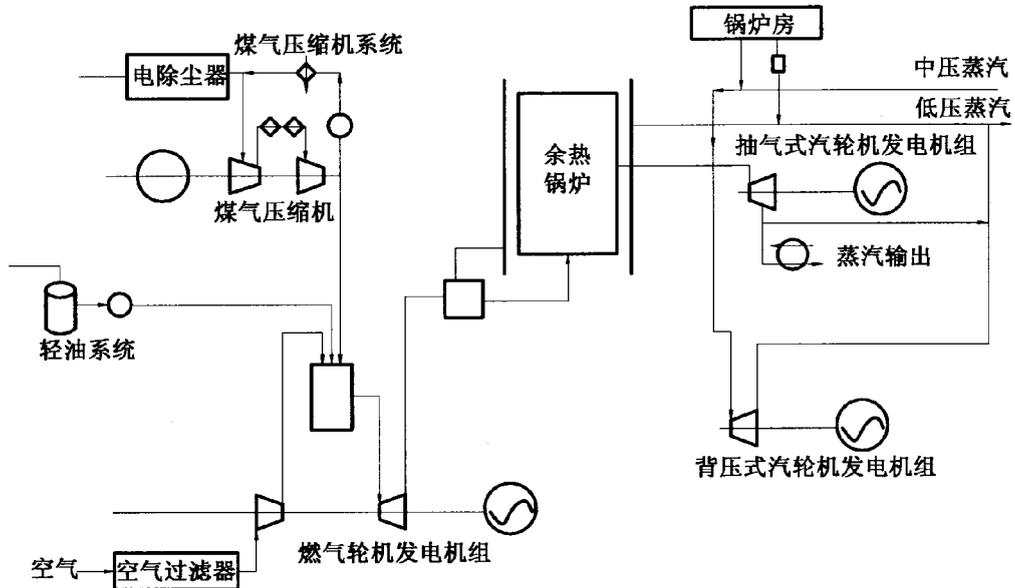


图 2.3 CCGP 工艺流程示意图  
Fig. 2.3 The diagram technological process of CCGP

(3) 节水效果显著。CCPP 为同容量常规燃煤电厂用水量的 1/3 左右。在缺水的华北、山东和西北地区有重要优势<sup>[34]</sup>。

(4) 发电环保性能好。CCPP 使用清洁燃料，基本上无烟尘污染，NO<sub>x</sub> 的产生水平也大大低于烧锅炉的常规电厂，一般达到 0.004% 以下的水平。

(5) 发电的安全性好，运行可靠性高。一般来讲，CCPP 发电设计年运行时间为 7800~8000 小时。由于燃气轮机燃烧的是洁净燃料，设备工作条件好，因此故障率低。维修时间和工作量也都大大低于锅炉蒸汽发电。

### 2.1.1.2 热电联产发电 (CHP)

热能和电能分别生产的方式，称之为热电分产。热电联产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，高品质的热能先用来发电，在热功转换过程中产生的低位热能再对外供热，把热、电生产有机地结合起来，这种生产方式就称为热电联产。图 2.4 为热电联产示意图。热电联产是已被公认的一种成熟的节能技术，它使本应排至凝汽器中放弃的蒸汽凝结热转供给热用户而不舍弃至大气中。这样就使火力发电厂的全厂热效率大幅度提高，可以由凝汽式发电状态的 25%~40% 提高至 70%~85%<sup>[35]</sup>。

热电联产用能的合理性表现为：高能高用，用来发电；低能低用，用来供热。可收

到按质供能、综合用能、能尽其用、节约能源的效果，同时，还可以减少城市的环境污染。因此，热电联产具有很强推广的广意义。

通常热电联产有两种方式：背压式和抽汽式。

背压式热电联产系统中，汽轮机的排汽压力高于大气压，设计成热用户所需的压力，蒸汽经汽轮机做功后，排汽再供给热用户使用，使蒸汽的冷凝热在热用户中得到进一步利用，代替锅炉生产新蒸汽，得到的冷凝水经过处理后再由循环水泵回供至锅炉。背压式汽轮发电机组的电负荷由热负荷决定，要求电负荷和热负荷完全匹配，因而不能同时满足热、电负荷的需要，应变能力较差，因此供热背压式机组宜用于热负荷相对稳定的场合。背压式汽轮机的排汽压力高，蒸汽的焓降较小，与排汽压力很低的凝汽式汽轮机相比，发出同样的电量，所需蒸汽量较大，但是，背压式汽轮机排汽所含的热量绝大部分被热用户所利用，不存在冷源损失，所以从燃料的热利用系数来看，背压式汽轮机装置的热效率较凝汽式汽轮机为高。

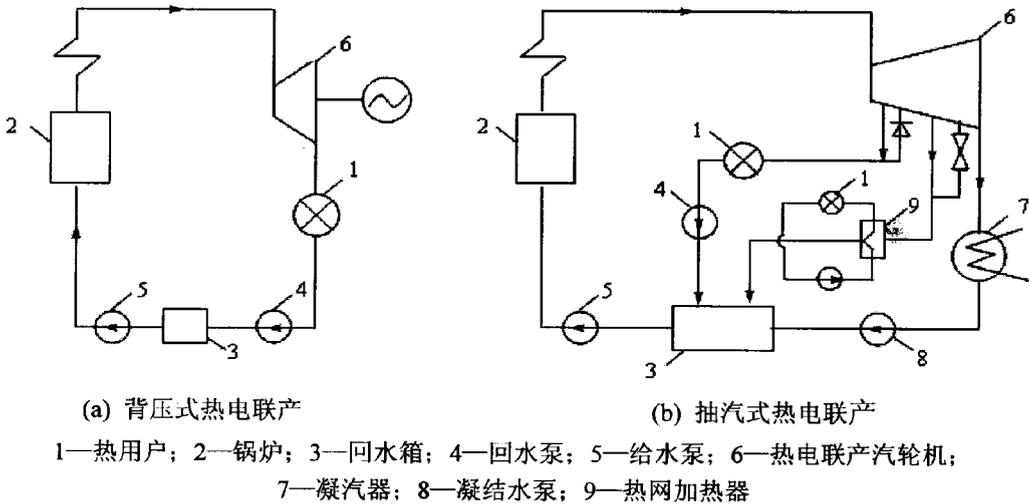


图 2.4 热电联产示意图

Fig. 2.4 Schematic diagram of cogeneration of heat and electricity

抽汽式热电联产系统，是从汽轮机中部抽出一部分经做功后尚具有一定压力的蒸汽供给热用户，其余部分继续在汽轮机内膨胀到低压，抽汽式汽轮机抽汽压力根据用户的需要和产品的要求而确定，能在一定范围内调整。抽汽式热电联产系统根据需要可以设计成一次调节抽汽式或二次调节抽汽式，具有很强的灵活性，可以同时满足用户热负荷和电负荷的需要。根据排汽压力，抽汽式热电联产系统分为抽汽凝汽式和抽汽背压式汽轮机。抽汽式热电联产方式，只有抽汽供热的那部分蒸汽才是热电联产，蒸汽实现了梯级利用，其余部分只是单纯发电，因抽汽量可根据用户的需求进行调节、应变能力强而

受到企业的广泛认可。

## 2.1.2 余热余能发电

余热余能发电则是指有效利用钢铁生产过程中的余热余压以能量转换的形式，将余热余能转换成电能。当前，我国电能生产效率 $<40\%$ ，从能源转化效率来看，钢铁企业利用回收的余热余能生产  $1\text{kW}\cdot\text{h}$  电能相当于节约近 3 倍的一次能源。如今，应用于钢铁企业的余热余能发电技术包括：干熄焦发电（CDQ），高炉炉顶余压发电（TRT），烧结余热发电，转炉饱和蒸汽发电，加热炉低温余热发电，高炉冲渣水余热发电等。下面分别介绍以上余热余能发电技术的工艺原理与特点。

### 2.1.2.1 干熄焦发电（CDQ）

干法熄焦（Coke Dry Quenching，缩写为 CDQ）简称“干熄焦”，是相对于用水熄灭炽热焦炭的传统湿熄焦而言的，其基本原理是利用冷的惰性气体（燃烧后的废气或氮气），在干熄炉中与赤热红焦换热，从而冷却熄灭红焦。如图 2.5 所示，CDQ 工艺流程为：将炼焦炉推出的大约  $1050^{\circ}\text{C}$  的赤热焦炭装入密闭的干熄炉中，在干熄炉中与炉底部通入的逆向流动的冷惰性气体（主要成分为氮气，温度  $170\sim 190^{\circ}\text{C}$ ）直接接触换热，焦炭被冷却，同时惰性气体被加热到  $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，换热后的高温惰性气体经除尘后通过余热锅炉生产蒸汽，最后将产生的余热蒸汽供钢铁企业生产和生活用户使用，或将其送往汽轮机发电。冷却后的惰性气体循环使用。

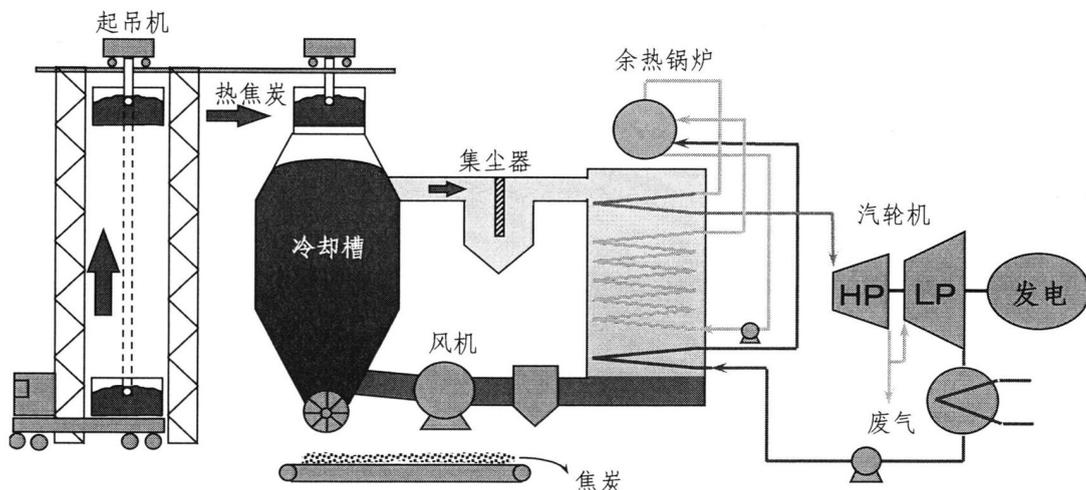


图 2.5 干熄焦（CDQ）工艺流程图

Fig. 2.5 The diagram technological process of CDQ

CDQ 的技术特点如下：

(1) 回收红焦显热与节能。平均每熄 1t 焦炭, 可回收 3.82MPa、450℃蒸汽 0.602t 左右, 发电 120kW·h, 自耗电 18kW·h<sup>[36]</sup>。据国外某公司对其企业内部炼铁系统所有节能项目的效果分析得出干熄焦装置节能占总节能的 50%。

(2) 改善焦炭质量。与常规湿熄焦相比, 采用干熄焦技术可使焦炭水分降低 3%~6%,  $M_{40}$  提高 3%~8%,  $M_{10}$  改善 0.3%~0.8%, CRI 降低 1.66%~2.52%, CSR 提高 2.56%~3.34%<sup>[37]</sup>, 焦比降低 2%~4%, 高炉生产能力提高 1%~3%, 降低强黏结性的焦、肥煤配入量 15%~20%, 这些对炼铁系统产生了明显的延伸经济效益。

(3) 减少环境污染。干熄焦利用惰性气体, 在密闭系统中将红焦熄灭, 并配备良好的除尘设施, 基本不污染环境。此外, 由于干熄焦能够产生蒸汽并可用于发电, 因此, 避免了生产等量蒸汽而燃煤对大气的污染(5~6t 蒸汽需要 1t 动力煤), 尤其减少了 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 向大气的排放。对规模 100 万 t/a 的焦化厂而言, 采用干熄焦技术, 每年可以减少 8~10 万 t 动力煤燃烧对大气的污染, 即每年至少向大气排放 144~180t 烟尘、1280~1600t SO<sub>2</sub>, 特别是少向大气排放 8~10 万 t CO<sub>2</sub>, 减少了温室效应。

(4) 节水。采用传统的湿熄焦, 每熄灭 1t 红焦要消耗 0.45t 水。而采用干熄焦后, 熄焦工序可不用水, 但设备的零星用水不可避免, 扣除这部分用水, 吨焦平均节水 0.43t/t。

(5) 投资和能耗高。目前, 干熄焦装置工程费投资在 110~120 元/t, 而传统湿熄焦装置工程费投资为 10~15 元/t。干熄焦本身能耗约为 29kW·h/t (同时, 干熄焦可回收能源 168kW·h/t), 湿熄焦约为 2kW·h/t, 但干熄焦带来的经济效益、环境效益、资源效益和节能效果完全可以抵消其投资高及本身能耗高带来的不足。

### 2.1.2.2 高炉炉顶余压发电 (TRT)

在钢铁联合企业中炼铁系统所用能耗一般要占企业总能耗的 70%左右, 其中大约 55%消耗在高炉冶炼系统上, 运行好 TRT 可以回收高炉工序电耗的 60%~65%<sup>[38]</sup>, 较大程度的实现企业的节能降耗。

高炉煤气余压透平发电装置(即 TRT—Blast Furnace Top Gas Recovery Turbine Unit, 以下简称 TRT), TRT 是利用高炉冶炼的副产品—高炉炉顶煤气具有的压力能及热能, 使煤气通过透平膨胀机做功, 将其转化为机械能, 驱动发电机或其它装置发电的一种二次能源回收装置。

高炉产生的煤气, 经重力除尘器(部分工艺为环缝)与干式除尘器, 进入 TRT 装置。经调速阀(并联入口电动蝶阀)、入口插板阀, 过煤气流量计、快切阀, 经透平机膨胀作功, 带动发电机发电。自透平机出来的煤气, 进入低压管网, 与煤气系统中减压

阀组并联，具体工艺流程如图 2.6 所示。该装置既回收减压阀组泄放的能量（相当于回收高炉鼓风机所需能量的 30%左右），又净化煤气、降低噪音、稳定炉顶压力，改善高炉生产的条件。这种发电方式既不消耗任何燃料，也不产生任何污染，可实现无公害低成本发电，是高炉冶炼工序的重大节能项目，经济效益十分显著，是现代国际、国内钢铁企业公认的节能环保装置。

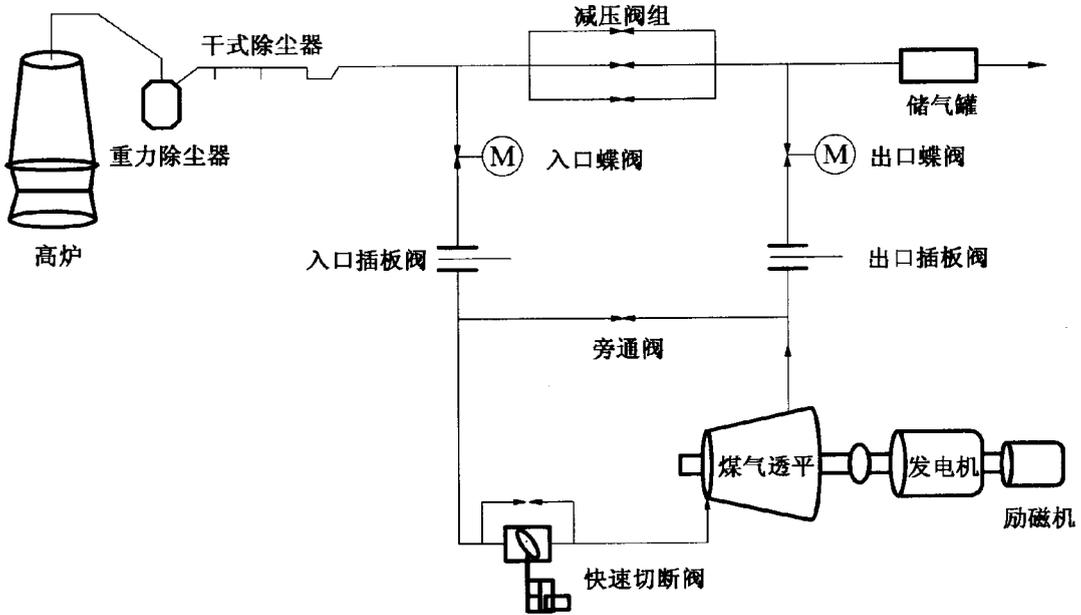


图 2.6 高炉炉顶余热发电 (TRT) 工艺流程图  
Fig. 2.6 The diagram technological process of TRT

TRT 工艺有干、湿之分，其中采用水来降低煤气温度和除尘并设置 TRT 工艺的为湿式 TRT 工艺，采用干式除尘（布袋或电除尘）并设置 TRT 工艺的为干式 TRT。以前，国内广泛采用的是湿式装置，但近些年的发展趋势是干式。干式 TRT 排出的煤气温度高，所含热量多、水分少，特别是相对湿式 TRT 可提高发电量 30%~40%<sup>[39]</sup>，因此越来越引起各方面的重视。目前，为了最大程度保证高炉的正常运行，节约水电等资源、减少除尘之后的煤气压损和温降等，并能多发电，已开发出了干湿两用 TRT 装置，已在攀钢、首钢等企业实现了良好的应用。

### 2.1.1.2.3 烧结余热发电

目前，国内烧结冷却机余热资源一般都是采用直接热利用方式，主要有：将回收的废气返回到烧结料层，作为烧结表层料保温；预热助燃空气作为电火炉的助燃风；通入二次混合机内或电火炉前预热混合料；通过余热锅炉或热管技术产生蒸汽，并网。这种简单的直接热利用造成余热资源未得到充分利用，造成资源浪费及对环境的热污染。从

能源利用的有效性和经济性角度看，将余热用来发电或作为动力直接拖动机械是最有效的利用方式。因此钢铁企业选择余热发电方式回收余热资源具有很好的实际意义。

烧结合余热发电是通过余热锅炉回收烧结机尾落矿风箱及烧结冷却机密闭段的烟气余热来生产蒸汽，并用生产出的蒸汽推动汽轮发电机组做功发电。图 2.7 为一般烧结合余热发电系统工艺流程图。

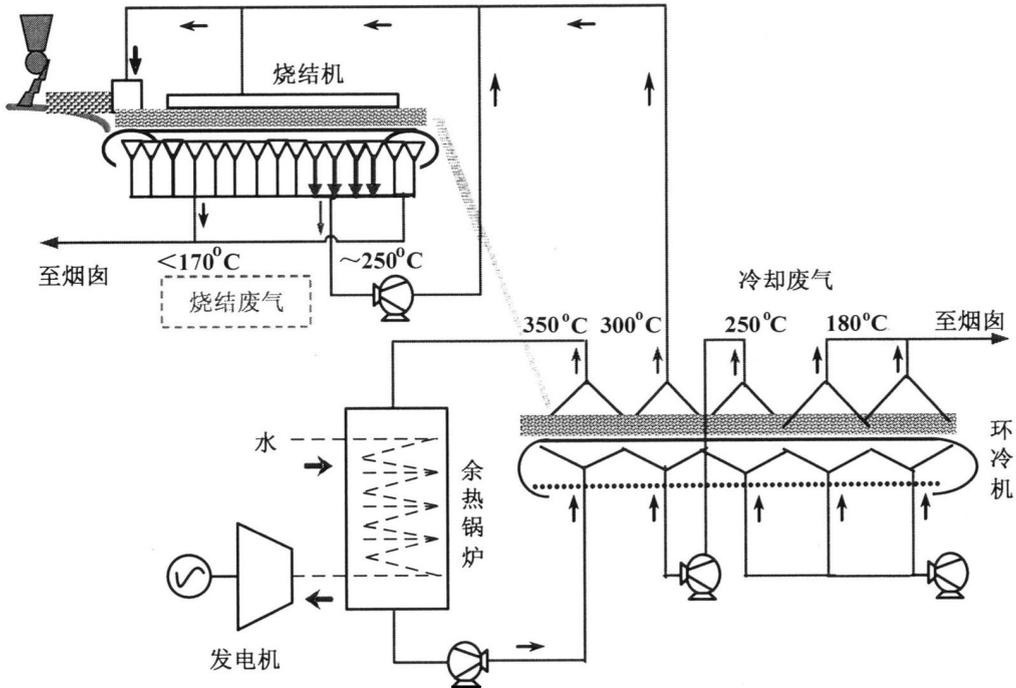


图 2.7 烧结合余热发电工艺流程图

Fig. 2.7 The diagram technological process of sintering waste heat power generation

近几年，国内烧结合余热发电发展比较成熟的系统有单压汽水系统、双压汽水系统和复合闪蒸汽水系统三种形式，下面分别进行简单介绍。

(1) 单压汽水系统的烧结合余热发电系统

单压汽水系统是指采用单压余热锅炉及单级进汽汽轮机的不补汽系统，即余热锅炉只生产一种参数的蒸汽，汽轮机只设置一个进汽口。当前单压系统配套的凝汽式汽轮机组相对比较成熟，因此单压系统具有构造简单、主体设备成熟可靠、系统运行维护简单及建设初期投资低等优点，在水泥行业得以普遍应用。但由于单压余热锅炉废气出口温度一般在 170°C 以上<sup>[40]</sup>，废气余热得不到充分利用，影响了其发电能力，因而在这三种系统中单压系统发电能力最低。

(2) 双压汽水系统的烧结合余热发电系统

双压汽水系统是指采用补汽式汽轮机的双压单级补汽系统, 余热锅炉中设置两种压力等级的汽水系统, 分别进行汽水循环, 并产生两种不同压力、温度的蒸汽, 较高压力、温度的过热蒸汽作为主蒸汽, 较低压力的过热蒸汽(或饱和蒸汽)作为低压补汽, 分别进入补汽凝汽式汽轮机, 推动汽轮机做功。由于设置了低压蒸发段、低压省煤器等受热面, 能够更多地吸收较低温度余热, 排烟温度能降到  $130^{\circ}\text{C}$ <sup>[41]</sup>左右, 比单压系统发电量明显增加, 余热利用率较高。

### (3) 复合闪蒸汽水系统的烧结合余热发电系统

复合闪蒸汽水系统是指采用补汽式汽轮机的复合闪蒸补汽系统, 烧结合余热锅炉生产主蒸汽的同时生产高温热水, 高温热水再降压闪蒸产生二次蒸汽, 二次蒸汽补入汽轮机, 推动汽轮发电机组做功发电。采用复合闪蒸系统比同条件下的单压发电汽水系统发电量增加, 并可使最终排烟温度能降到  $100^{\circ}\text{C}$ 左右。

烧结合余热发电技术在我国钢铁行业的推广实施, 虽然已对钢铁企业的节能减排做出了重大的贡献, 但现有的烧结合余热发电系统是烧结合烟气通过余热锅炉换热后直接产生过热主蒸汽推动汽轮发电机发电, 仍然存在以下问题, 亟待该领域的科研工作者解决。

①由于余热锅炉进口烟气温低, 余热锅炉产生的过热蒸汽压力和温度都较低, 发电效率低;

②由于烧结合工艺变化, 烟气温变化频繁, 致使汽轮发电机组频繁启动;

③由于春东季节环境温度低引起烧结合烟气温低, 余热锅炉产生的过热蒸汽温度达不到汽轮机要求的最低进汽温度而被迫停机, 使烧结合余热得不到充分利用;

④也有提出在余热锅炉烟气进口进行补燃提高烟气温度的方案, 虽然能提高发电能力, 但需增加大量外来能源消耗。

综上所述, 烧结合余热发电项目的实施, 虽然仍存在不少问题, 但总体来说, 该技术使钢铁企业在回收循环利用余热资源获得良好经济效益的同时, 减少了温室气体和酸性气体的排放, 减少了环境污染, 也大大改善了现场环境, 具有良好的社会效益。该技术的实际效益情况从如下济钢  $400\text{m}^2$  烧结合机冷却系统余热发电工程实例<sup>[42]</sup>即一目了然。

济钢  $400\text{m}^2$  烧结合机冷却系统余热发电系统总投资 9000 余万元, 投资回收期约 3 年(不含建设期)。该系统自 2010 年 8 月 18 日投产以来, 日发电量达  $264000\text{kW}\cdot\text{h}$ , 年可外供电量 0.82 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ , 年可节约标煤 10 万 t, 意味着年减少  $\text{CO}_2$  排放约 4 万 t, 减少  $\text{SO}_2$  排放约 300t, 减少粉尘排放约 400t。

#### 2.1.2.4 转炉饱和蒸汽发电

当前大部分钢铁企业中转炉余热锅炉生产的饱和蒸汽除供自身消耗外，还有大量剩余；同时由于全厂管网蒸汽一般为过热蒸汽，饱和蒸汽无法直接并网使用，只能对空排放或经过过热处理后并入管网，既造成能源浪费，又对环境造成热污染<sup>[43]</sup>。若采用饱和蒸汽发电，既可以充分利用饱和蒸汽，也可避免蒸汽放散造成的浪费；又能提供电能，产生新的效益。

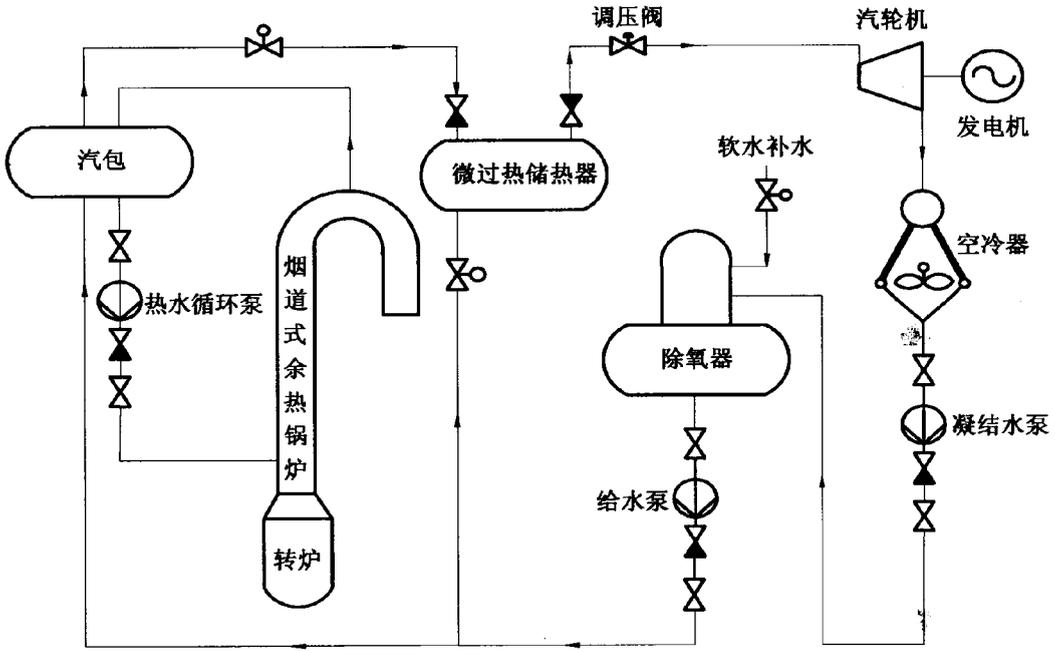


图 2.8 转炉饱和蒸汽发电工艺流程图

Fig. 2.8 The diagram technological process of converter saturated steam power generation

饱和蒸汽发电系统主要可分为余热锅炉系统、蒸汽蓄热系统、饱和蒸汽轮机发电系统、乏汽直接空冷系统和给水除氧系统，其基本流程如图 2.8。在转炉吹炼期内，烟道式余热锅炉吸收转炉烟气余热产生饱和蒸汽，饱和蒸汽送入微过热蓄热器进行充热，同时供出微过热蒸汽（过热度约为  $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ ）并经过调压阀调压至一定压力再进入汽轮机膨胀做功，驱动发动机发电；在非吹炼期，余热锅炉不生产蒸汽，调压阀前的压力不断下降，蓄热器中的饱和水降压后发生闪蒸，饱和水成为过热水，立即沸腾而自蒸发，产生连续蒸汽，经调压供汽轮机使用，完成带微过热的变压蓄热器的放热过程，从而实现转炉饱和蒸汽发电系统的连续稳定运行。在汽轮机中做完功排出的乏汽进入空冷器冷凝成冷凝水，然后经凝结水泵加压送至除氧器，与补充的软水经热力除氧后，由给水泵加压，然后一路送至余热锅炉汽包循环使用，另一路作为调节带微过热变压蓄热器水位的补充水直接进入蓄热器。整个系统按照以上工艺流程不断循环反复，实现饱和蒸汽余热

向电能的转化。

转炉饱和蒸汽发电技术因其良好的经济环保效益和可行性,正逐步在钢铁行业应用推广。据马钢生产运行实际数据统计<sup>[44]</sup>,自2007年9月该转炉饱和蒸汽发电项目顺利建成投产,截止至2009年11月,机组总运行时间14300h,累计发电6631.8万kW·h,消耗余热蒸汽45.31万t,扣除5%的厂用电331.6万kW·h,按发电价格0.56元/kW·h计算,累计发电收入3528.15万元;另外回收凝结水45.31万t,按软水价格2.4元/t计算,凝结水回收收入约108.74万元;运行管理费60万元(人力资源是内部挖潜,未增加成本,该费用主要是润滑油、低值消耗品及维修材料备件等)。由于发电所消耗的蒸汽是马钢厂区原有的汽化系统回收且富裕的低品位蒸汽,没有增加任何的蒸汽生产成本,故蒸汽消耗可不计入发电成本。综上分析,机组运行14300h,为马钢创造直接经济效益达3576.89万元,年平均直接经济效益达1590万元。

#### 2.1.2.5 加热炉低温余热发电

钢铁企业轧钢加热炉作为能耗大户直接影响着企业的生产成本。一般加热炉作为一种加热设备的热效率普遍在30%左右,能耗高、能源利用水平低,造成了大量的能源浪费。目前,通过在加热炉排烟的尾部烟道内采用空煤气预热和蓄热式燃烧等方式,只回收了部分烟气余热,回收余热能力有限,致使加热炉尾排烟温度仍在400℃以上。为了更高效的回收加热炉烟气余热,降低轧钢工序能耗和产品生产成本,为企业创造经济效益,寻求更高效的余热回收方式具有很大现实意义。采用加热炉低温余热发电技术,在加热炉尾部烟道布置余热锅炉产生蒸汽并用于推动汽轮机做功发电,可以将低品质的余热资源转换为高品质的电能,无疑可以为企业带来很好的经济效益和环境效益。另外,加热炉汽化冷却系统产生的大量余热蒸汽,除用于生产和冬季采暖外,其余的大部分蒸汽直接排放,对周边环境造成噪音及热污染,并浪费了能源。并且加热炉产生的蒸汽是余热产汽,一般为湿蒸汽,其压力不高且波动较大,属于低品质蒸汽。选择合适的低温余热发电方式实现加热炉低品质蒸汽的有效利用,对企业的节能环保也尤为重要。

加热炉低温余热发电的热源包括加热炉尾部烟道烟气余热和加热炉汽化冷却蒸汽余热。对于两种余热均可采用布置余热锅炉的有机朗肯循环发电技术,或者采用在汽轮机前布置闪蒸器的闪发电技术来回收发电<sup>[45-46]</sup>;加热炉汽化冷却蒸汽余热还可以通过将低压蒸汽直接供入动力机膨胀做功带动发电机发电的方式进行回收转化成高品质的电能。鉴于加热炉尾部烟道烟气余热发电方面的工程应用实例还未见报道,下面着重介绍加热炉汽化冷却蒸汽余热发电的工艺流程。

加热炉低温余热发电工艺流程图如图 2.9 所示。来自加热炉汽包的余热饱和蒸汽除去自用、取暖外的剩余部分通过管道流经调节阀，调节到规定压力后送入螺杆膨胀动力机膨胀做功推动发电机发电，从动力机排出的做完功降压后的蒸汽送入低压蒸汽管网供工艺设备使用。此处的动力机可以根据加热炉汽源参数情况或者具体发电工艺灵活选择汽轮机或者螺杆膨胀机。此工艺流程图源于新余钢铁公司中板余热蒸汽发电工程实例，在新钢全面论证的基础上，最终选用了螺杆膨胀动力发电方案<sup>[47]</sup>。

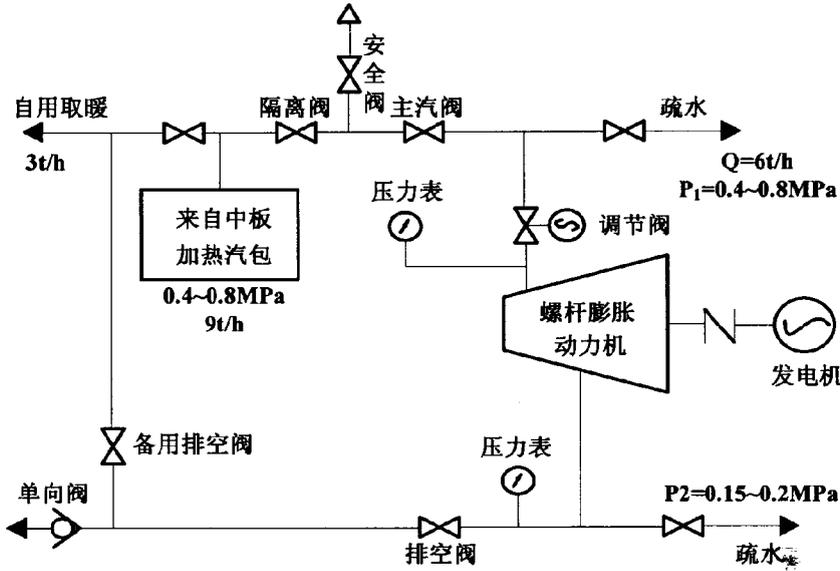


图 2.9 加热炉低温余热发电工艺流程图

Fig. 2.9 The diagram technological process of heating furnace low-temperature heat power generation

新钢中板生产线 3 座加热炉共产余热饱和蒸汽约 9t/h，压力为 0.4~0.8MPa。因生产和冬季采暖用去了约 3t/h 蒸汽后，有 6t/h 蒸汽可利用，最终采用 1 台 300kW 螺杆膨胀动力机来发电。通过将近两年的运行，取得的经济效益如下：

该项目原设计年发电量预计  $W=7200h \times 260kW=18712$  万 kW·h；实际该项目投入运行 20 个月发电量为 208 万 kW·h；折合 12418 万 kW·h/年，按 0.5 元/kW·h 计算，年发电效益 6214 万元。本项目投资 110 万元，静态投资回收期 1.76 年。

### 2.1.2.6 高炉冲渣水余热发电

在钢铁企业高炉炼铁工艺中，产生的炉渣温度大约为 1000℃，炉渣在冲渣箱内由冲渣泵提供的高速水流急冷冲成水渣并粒化，以供生产水泥之用。这一过程中能够产生大量温度在 80~95℃ 的低温热水，热水量达到几千吨每小时。研究表明，冲渣水温度越低，其炉渣制成的水泥活性越高。通常，在目前的生产工艺中，为了保证冲渣水的循环利用

效果，需要将这部分低温热水进行沉淀处理再引入空冷塔，降温到  $50^{\circ}\text{C}$  以下进行使用。降温过程中的大量余热直接放散到环境中，长期排放既浪费了能源，又对环境造成了热污染<sup>[48]</sup>。

由于高炉冲渣水具有温度低、流量大的特点，应用较为困难，现阶段除北方少数钢铁企业用于冬季采暖外，大部分企业均未利用。针对这种情况，目前认为比较可行的应用措施是利用有机工质形成双循环，吸收排放的废热水的热能，将有机工质加热成汽液两相，直接进入螺杆膨胀动力机或汽轮机，驱动发电机进行发电。

为了有效回收高炉冲渣水的低温余热，减少能源浪费，促进节能环保，为企业创造经济效益，目前，逐渐发展出了如下四种高炉冲渣水余热回收方式：冲渣水换热作浴池用水、冲渣水作采暖用水、冲渣水余热发电技术和冲渣水余热用于海水淡化技术<sup>[49]</sup>。

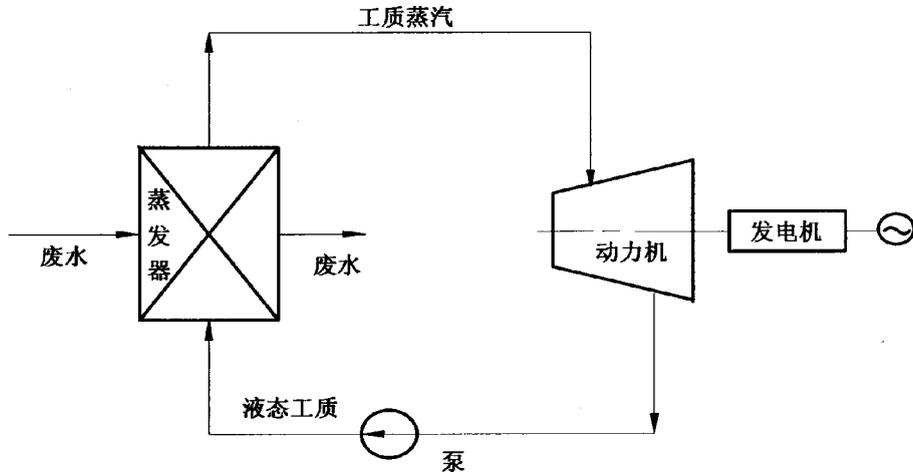


图 2.10 高炉冲渣水余热发电工艺流程图

Fig. 2.10 The diagram technological process of washing blast furnace slag water heat power generation

高炉冲渣水余热回收发电系统的工艺流程如图 2.10 所示，主要由循环工质蒸汽发生器、动力机、工质循环增压泵和发电机组成。高炉冲渣水经过沉淀去除杂质预处理后进入余热蒸汽发生器，放出热量温度降到  $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，再重新送回高炉供冲渣使用。循环工质进入余热蒸汽发生器中吸收热量汽化为  $80^{\circ}\text{C}$  左右的工质蒸汽，然后进入动力机膨胀做功，带动发电机发电，从而实现低温余热的热量转换成高品质的电能。其中，动力机本身具有减温减压的功能。液态工质在增压泵的作用下进入余热蒸汽发生器中再次吸收热量，循环往复<sup>[50]</sup>。

高炉冲渣水余热发电技术不仅节能减排，减少了炼铁工艺过程中的水资源消耗，而且还可获得高品位的电能，同时将有助于改善炼铁高炉周围的环境状况，减少工业水的

热污染，减轻工厂区热岛效应。

文献<sup>[50]</sup>以 300kW 的发电机组作为某钢铁厂的示范项目进行了设计计算。其冲渣水参数为：温度 85℃，总流量 1000t/h。该系统所选工质为 R600。为提高系统的地区普适性，文献中针对汽轮机后的冷凝器提出了风冷式机组和水冷式机组两种方案，并进行了经济性分析，结果如表 2.1 所示。

表 2.1 两种方案比较  
Tab 2.1 Contrast in two schemes

方案	风冷式	水冷式
回收的热量/kW	3898	3898
机组发电量/kW	300	300
系统总功耗/kW	177	77
净发电量/kW	123	203
发电效率/%	3.1	5.2

分析结果表明，该 300kW 的发电机组可回收的热量为 14033250KJ/h，合计 3898kW，有效利用低温热水 96t/h。若采用发电效率稍高的水冷式系统，将 1000t/h 的冲渣水余热完全回收，可并联 10 台相同的机组，那么该系统净发电功率可达到 2030kW，取系统年运行时间为 7000h，则年发电量为 14210000kW·h，产生的经济效益将是非常可观的。而且，不管采取哪种方案，该低温余热回收系统的投资回收期都比较短，进口的风冷式系统回收期最长也只有 2.1 年。水冷式系统初投资较低，投资回收期较短，但运行过程需要补充一定的冷却水。风冷式系统净发电量较少，但不需要冷却水，比较适合干旱缺水地区。因此，用户完全可以根据自身要求选择不同系统，且都可以取得较好的经济收益。

### 2.1.3 钢铁企业发电原则

钢铁企业一般通过回收余热余能资源、燃烧富余的副产煤气和外购动力煤来发电，实现其他能源向电能的转换。钢铁企业生产中会伴生大量的余热余能资源和煤气，若任其随意放散而不加以充分回收、高效利用，会造成大量的能源浪费和严重的环境污染。于钢铁企业的电力生产来说，这无疑会增加外购动力煤成本，进而使发电成本增加，对企业是不合理的。综合前文的分析可知，钢铁企业为了合理的组织电力生产，应遵循如下发电原则：在保证生产工艺蒸汽需求和煤气刚性用户用气需求的情况下，优先高效利用生产过程中回收的余热余能和副产煤气进行发电，不足的部分再由自备电站外购动力

煤来燃烧发电，或者直接从外部电网购买电力进行补充。

在遵循上述发电原则的情况下，钢铁企业的电力生产又涉及如下两个层面的内容：从能量来源层面可以分为自备电站发电和余热余能发电；从发电形式层面来说，存在集中式发电和分布式发电两种形式。后者是相对于前者中的余热余能发电而言的，主要指如何利用余热蒸汽进行发电，即采用集中式发电或分布式发电。

余热蒸汽的集中式发电和分布式发电形式各有利弊。集中发电可以节约空间、节省一次性投资，有利于集中管理。但是，从能量合理利用的角度讨论，并网后集中发电使高品质蒸汽产生较大贬值，余热蒸汽的远距离输送造成蒸汽压力损失和温降，最终使发电效率降低，经济效益受到很大影响。分布式发电具有就近回收、就近输送、就近使用等优点，若余热资源量充足，则可以实现余热的高效转化，余热蒸汽可以得到充分利用。但是，若余热资源量小，会造成系统运行不稳定、发电效率降低，小机组的重复建设使投资增大，总体经济效益大打折扣，合适程度受到质疑。针对此种矛盾可根据不同钢铁企业的余热资源和布局特点，对集中式和分布式两种发电形式进行折中考虑，采取按工序区域或余热品味划分成若干相对集中的独立电站，所产生的蒸汽通过各自管网汇集，集中向发电系统供汽，亦即采用区域式发电。区域式发电方案正好可以兼顾集中式和分布式发电的优点，避免二者的上述缺陷，取得良好的经济效益。

因此，根据不同钢铁企业的具体布局和余热资源特点，综合考虑，灵活选择集中式、分布式或者区域式发电形式，将不同品位的余热蒸汽转化为统一形式的电能，使余热余能转化率高、输送效率高、使用效率高，实现余热蒸汽的充分利用。具体遵循原则如下：

(1) 对于余热资源量充足的大型钢铁企业，选择分布式发电，实现余热余能的就近回收、就近输送、就近使用；

(2) 对于余热资源量较小的中小型钢铁企业，选择区域式或集中式发电，实现余热余能的集中利用和管理。

## 2.3 钢铁企业电力消耗端

钢铁企业生产和外购电力主要为了满足钢铁生产过程中各个工序的工艺要求和企业办公、生活的需求。各工序因工艺流程、操作功能和设备配置各异，对电力的需求量都不同，即使在同一工序，电力需求量也会因生产工艺和产品品种不同而不同。而且，各个工序电力的用途也存在很大差异，有的作为热源用于加热，有的作为动力源用于驱动，有的则作为光源用于照明，等等。其中，有的工序中的某些设备在运行时可以用其

他能源介质来代替电能，例如高炉鼓风可以采用汽动鼓风代替电动鼓风、转炉炼钢抽真空可以采用以蒸汽作为动力源的蒸汽喷射泵代替以电力作为动力源的干式真空泵等，而绝大部分工艺只能使用电力。

钢铁企业的电力消耗贯穿于钢铁生产的各个方面，从照明、生活、办公到各大型装备的顺利运行都离不开电力的供应，因此，钢铁企业电力消耗端是一个庞大复杂并交互影响的用电网络。本文将钢铁企业的电力消耗端按生产工序流程划分为：焦化用电，烧结用电，球团用电，炼铁用电，炼钢用电，轧钢用电，能源加工与转换用电和其他辅助用电。其中，能源加工与转换用电包括燃气、制氧、鼓风、热电、空压站、换热站、供水等，其他辅助用电包括生活临供、原料加工、道路照明、办公运输和线路损失等。

### 2.3.1 钢铁企业电力消耗流向

钢铁企业是高耗能产业，据统计，我国钢铁工业能耗占全国工业总能耗的 15%左右，年用电量占全国年总用电量的 8.36%左右。钢铁企业能源成本占生产总成本的 30%左右，其中电能成本占总生产成本的 10%左右<sup>[51]</sup>。

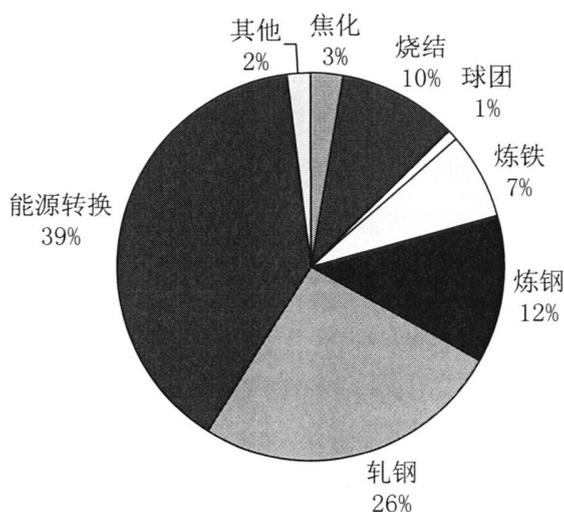


图 2.11 钢铁企业各工序用电比例

Fig. 2.11 Percentage chart of electricity consumption in various production process of iron-steel enterprise

从钢铁企业各工序电力消耗来看，钢铁企业各工序用电比例如图 2.11。从图中可以看出，钢铁企业生产中能源加工与转换环节电力消耗量最大，占 39%；其次是轧钢工序占 26%；炼钢工序次之，占 12%；其余由大到小依次为烧结 10%，炼铁 7%，焦化 3%，其他 2%，球团 1%。其中，炼钢工序中转炉炼钢电力消耗占 9.9%、电炉炼钢电力消耗

占 2.1%，轧钢工序中各环节电力消耗份额从大到小依次为热轧带钢 10.5%、冷轧带钢 6.2%、高线 3.2%、中厚板 1.4%。

### 2.3.2 主生产工序用电情况

#### (1) 焦化工序

焦化工序消耗的能量约占钢铁企业总能耗的 7%~8%。焦化工序将原料场的煤经过炼焦过程变为焦炭，同时产生副产品焦炉煤气。焦化工序是整个生产过程中污染比较大的一个工序，能量容易流失，为了提高能源的利用效率，通常会加入余热回收设备，如干熄焦余热发电机组（CDQ）。焦化过程中，焦化工序耗电主要来源于：配煤车间里的备贮煤、粉碎、配煤及除尘的耗电；炼焦车间里的炼焦、熄焦、筛运焦、装煤除尘、出焦除尘和筛运焦除尘耗电；回收车间里的冷凝鼓风、氨回收、苯回收、脱硫、脱氰、脱萘等工序和酚氰污水处理的耗电。

#### (2) 烧结工序

烧结工序将铁矿粉、溶剂（石英、云屑、生石灰）、燃料（焦粉、煤粉）、工业副产品（炉灰、杂料等）加入水以后进行配料，经过多次混合，布料、铺料，最后点火，烧结成块。烧结过程中烧结机、环冷机的烟气余热可以通过低温余热发电技术加以有效回收利用。烧结工序耗电的环节主要为从烧结生产系统的熔剂、燃料破碎开始，原料运输、工艺过程的混料、烧结机、环冷机、烧结矿破碎、筛分到成品烧结矿皮带机进入炼铁厂为止及烧结脱硫，各种动力提供设备所消耗的电。

#### (3) 炼铁工序

炼铁系统是冶金系统最大的耗能工序，占总能耗的 60%<sup>[52]</sup>。炼铁工序将原料场里的块矿，焦炉里烧制的焦炭，烧结工序制成的烧结矿，球团工序产生的球团矿混合在一起进入高炉料仓经高炉高温冶炼出铁水和渣铁，以及副产品高炉煤气，由于高炉内温度比较高，炉顶将产生很大气压，具有大量的余压能量，通过 TRT 发电，可以将余压能转换成电能，提高能源的利用率。同时，对于高炉冲渣水的显热可以通过高炉冲渣水余热发电来充分回收。炼铁工序所消耗的电主要来自高炉工艺生产系统里原燃料供给、高炉本体、热风炉、煤粉喷吹系统、渣铁处理、煤气系统等各种提供动力设备所消耗的电。

#### (4) 转炉工序

转炉工序是将石灰、氧气、铁水、合金料、废钢等加入转炉内，利用化学反应产生的热量为自身反应提供维持反应所需要的温度，一般 20 分钟为一炉次，转炉炼出合格

的钢水，产生渣和转炉煤气副产品。该过程中可以采用转炉烟道饱和蒸汽余热发电技术回收转炉烟道烟气余热。其耗电主要是转炉生产系统里的铁水预处理、倒罐站、转炉本体、渣处理系统、钢包烘烤、煤气回收与处理系统等所消耗的电能。

#### (5) 电炉工序

电炉工序是将石灰石、白云石及铁合金与废钢、氧气一起送入电炉经加热，发生化学反应生产合格钢水以及渣。电炉在冶炼过程中会产生大量的热烟气，烟气的显热占总炼钢能耗的13%~20%<sup>[53]</sup>，可以用电炉烟气余热发电技术进行回收。其电的消耗在于电炉生产系统的废钢预热和处理、原料的烘烤和干燥及供给、电炉本体、渣处理、钢包烘烤等环节所消耗的电能。

#### (6) 精炼工序

精炼工序常用的有LF精炼、CAS精炼、RH精炼等，将钢水中颗粒物，含硫等杂质进一步粉碎，去除，使得钢水的成分更纯。精炼工序的耗电是从钢水进入精炼工位开始，经过精炼炉的真空系统、除尘器、精炼、钢水精炼完成出精炼工位进入铸区为止精炼各个生产系统消耗的电能。

#### (7) 连铸工序

连铸工序将钢水送入浇铸系统进行浇铸，然后冷却、切割的一个过程。其电能的消耗主要是连铸主生产系统的中间包烘烤系统、浇铸系统、切割系统、铸坯冷却系统等生产系统所消耗的电。

#### (8) 热轧工序

热轧工序是将铸坯送到加热炉进行加热，然后进行粗轧，再进行精轧，最后冷却，这其中加热炉内产生的烟气及汽化冷却系统的低压饱和蒸汽可以余热回收发电。其消耗的电主要为热轧主生产系统从铸坯进入热轧工序直至热轧成品进入下一道工序或出厂的全过程等消耗的电。

### 2.3.3 钢铁企业用电分析

钢铁企业主要的用电设备，归纳起来，有以下几种：

(1) 电动鼓风：电动鼓风机为高炉提供炼铁用风，其容量一般来说较大，是钢铁企业耗电的重要组成部分。

(2) 制氧机：制氧机是钢铁企业中的用电大户，单台容量达到几万kW。

(3) 电炉：在钢铁企业中，电炉是炼钢中的重要环节，其频繁地开启对电网冲击

较大，直接影响到企业的最大负荷。

(4) 轧机：轧机一般包括热轧和冷轧 2 个部分，其电力消耗一般占大型混合钢铁企业总耗电量的 1/3 左右。

除了以上大型设备，在钢铁企业中广泛应用着的风机、水泵、空气压缩机等设备，也是钢铁生产过程中的主要耗电单元。钢铁企业在其实际生产过程中，可以根据具体工艺要求的不同对这些设备进行变频改造，从而提升一定的节电空间。

### 2.3.4 钢铁企业主要电耗分析

通过本节前三部分对钢铁企业电力消耗流向、各主要工序用电情况的介绍，可以看出钢铁企业安全生产中上至每个工序、下至各个设备都离不开电力的正常供应，并且不同的生产工序、生产工艺的耗电情况各不相同，耗电量有大有小，影响电耗的因素也存在很大差异。《钢铁产业发展政策》要求将吨钢能耗能降到 700kgce/t 钢以内，按照电力在钢铁工业能耗中占 23%推算，如果仍然采用 0.404kgce/kW·h 的等价折标煤系数，分解后的钢铁工业平均吨钢电耗应当在 400kW·h/t 钢内，这个指标包括外购电和余热余能自发电。实际上，国内钢铁企业平均吨钢电耗基本在 500kW·h/t 钢左右<sup>[54]</sup>。据文献 2006 年统计数据<sup>[55]</sup>，我国钢铁企业各主要工序平均吨钢电耗见表 2.2，炼焦、烧结、高炉、转炉等的吨材电耗是扣除 CDQ、TRT 等余热余能发电之后的净电耗。

表 2.2 我国钢铁企业各主要工序平均吨钢电耗 (kW·h/t)

Tab 2.2 Average power consumption per ton steel of various main process in China iron-steel enterprise

炼焦	烧结	高炉	转炉	电炉	热轧	冷轧	高线	钢管	中厚板
36.9	39.6	16.4	50.1	427	96.4	146.9	115	187.8	81.1

从表 2.2 可以看出，电炉和热轧是钢铁企业生产中的两个主要耗电大户，二者的电力消耗对钢铁企业的电力平衡产生很大的影响，为此本文着重分析电炉和热轧电耗的影响因素。

#### 2.3.4.1 电炉炼钢电耗

电炉是钢铁生产中的一种大功率的电热能量转换装置，属于钢铁企业中的耗电大户。电炉炼钢在钢铁流程中的功能在于将冷废钢加工成为成分和温度合格的钢水，其中包括了供能和冶金两方面的操作。就当前一般的工程技术水平而言，电炉炼钢工序在流程中有两个主要特征：电炉炼钢过程是间歇性操作，冶炼周期一般约为 60min，为保证连铸工序能实现多炉连浇，电能、化学能和物理能的输入应与之匹配；电炉炼钢提供的

合格钢水是保证下游各工序高效、流畅运行的物质基础，电炉炼钢的生产率应与热轧生产率相匹配。

电炉炼钢是电能消耗大户，降低电炉冶炼电耗能有效节约能源，降低电炉冶炼成本，提高企业经济效益。电炉炼钢的节能实际是提高单位能量实现物质转换的效率，节电实质上是提高单位电能生产的合格钢水量<sup>[56]</sup>。

当前，我国钢铁工业中电炉炼钢的实际吨钢电耗一般在 200~400kW·h/t，考虑炉料结构等影响因素之后的折算吨钢电耗为 370~430kW·h/t。通常，电炉炼钢电耗受原料质量与管理（原料质量是影响电耗的客观因素，而原料管理是影响电耗的主观因素）、装料方式与配比、各冶炼阶段（熔化期、氧化期、精炼期）的配电情况、冶炼工艺和管理水平等的影响<sup>[57]</sup>。电炉炼钢吨钢电耗随着炉料中热铁水配比、电炉变压器利用系数和电炉炉容利用系数的增加而降低。吨钢电耗与炉容利用系数及变压器利用系数之间的显著线性相关关系，表明电炉炼钢随着冶炼速率的提高、生产节奏的加快，电耗降低。据有关估计，电炉炼钢的炉料中热铁水配比增加 1%，相应吨坯电耗减少 5.17kW·h<sup>[58]</sup>。

2002 年，Kohle 总结推出了如下电炉冶炼电耗理论分析公式<sup>[59]</sup>：

$$W_R = 375 + 400\left(\frac{G_E}{G_A} - 1\right) + 80\frac{G_{DRI/HBI}}{G_A} - 50\frac{G_{shr}}{G_A} - 350\frac{G_{HM}}{G_A} + 1000\frac{G_Z}{G_A} + 0.3(T_A - 1600) + (t_S + t_N) - 8M_G - 4.3M_L - 2.8M_G + W_N \quad (2.1)$$

式中： $W_R$ —电耗，kW·h/t；

$G_E$ —电路装入量，t；

$G_A$ —电炉出钢量，t；

$G_{DRI}$ ， $G_{HBI}$ ， $G_{shr}$ ， $G_{HM}$ ， $G_Z$ —直接还原铁量、热压块铁量、修磨料等易熔物料量、加入铁水量、渣量，t；

$T_A$ —出钢温度，℃；

$t_S$ —通电时间，min；

$t_N$ —断电时间，min；

$M_G$ —烧嘴吹入天然气量，m<sup>3</sup>/t；

$M_L$ —氧枪吹氧量，m<sup>3</sup>/t；

$W_N$ —能量损失值, kW·h/t。

从能量平衡的角度考虑, 电炉冶炼周期可以用以下公式计算:

$$t = t_S + t_N \tag{2.2}$$

$$t_S = (60W_R \cdot W \times 60) / (S \cdot \eta \cdot \cos\phi + P_c + P_d) \tag{2.3}$$

式中:  $W$ —出钢量, t;

$S$ —视在输入功率, MVA;

$\eta$ —电炉电能利用率;

$\cos\phi$ —功率因数;

$P_c, P_d$ —电炉的化学能、物理热换算成电功率, kW。

由式 (2.1) ~ (2.3) 可知, 提高吨钢输入功率, 并提高电炉电能利用率, 可缩短通电时间, 降低电耗; 增大吹氧量, 增加热装铁水比例, 可减少电耗; 此外, 减少电炉断电时间, 可以缩短电炉冶炼周期, 减少能量损失, 降低电耗。因此优化供电曲线、合理用氧、优化铁水热装技术以及缩短冶炼周期是降低电炉电耗的有效途径。

优化电炉供电曲线, 可以提高电炉变压器利用率和电炉电能利用率; 优化电炉吹氧技术, 能够提高电炉化学能输入; 优化电炉铁水热装技术, 可以有效利用物理热和化学热; 缩短电炉冶炼周期, 可以减少热能损失。通过以上方法最终可实现电炉炼钢电耗的降低。宝钢不锈钢分公司不锈钢电炉中应用冶炼电耗综合控制方法, 有效降低了冶炼电耗, 提高了电炉生产率; 在现有技术条件下, 加入 50% 的脱磷铁水时, 电炉冶炼 304 钢种电耗降至 330kW·h/t<sup>[60]</sup>。

#### 2.3.4.2 热轧电耗

轧钢厂实行节能降耗是降低生产成本、提高经济效益的重要途径, 而轧钢电耗是轧钢能源消耗的重要组成部分, 应用于热轧的每一道工序, 包括加热炉、粗轧、精轧、冷却水系统、照明等。热轧吨钢电耗作为热轧工序能耗之一, 是一项体现轧钢综合能耗的重要技术经济指标。钢铁生产中为了降低轧钢吨钢电耗, 可以采取提高设备负荷率、合理选择电机容量、减少设备空转率、加强用电管理和辅助用电合理化等措施。另外, 还可以从产品生产的工艺技术指标与产品规格尺寸等方面入手, 深入探讨影响轧钢电耗的内在因素与变化规律。文献<sup>[61-62]</sup>通过对轧制生产指标与产品生产规格等数据特点的分

析, 找出了影响热轧吨钢电耗  $y$  的 7 个因素: 生产量  $x_1(t/d)$ 、平均延伸系数  $x_2$ 、平均压下量  $x_3(mm)$ 、平均轧件宽度  $x_4(mm)$ 、平均裁剪质量  $x_5(kg/d)$ 、初始长度  $x_6(mm)$  和轧制速度  $x_7(\text{个数}/\text{min})$ 。其中, 后四个因素的定义和特点如下:

### (1) 延伸系数

由于原料(钢坯)经过加热塑性提高, 变形抗力降低, 轧制时可增大变形量, 因此用延伸系数来表征影响吨钢电耗的指标之一, 即轧件最终长度与原始长度之比:

$$\mu = L_n / L_0 \quad (2.4)$$

式中:  $\mu$  为总延伸系数;  $L_n$  为轧件最终长度, mm;  $L_0$  为轧件原始长度, mm。

### (2) 压下量

在轧制过程中轧件的高、宽、长三个尺寸都发生变化。轧制后轧件的高度减少量叫做压下量, 即:

$$\Delta h = H - h \quad (2.5)$$

式中:  $\Delta h$  为压下量, mm;  $H$  为轧件轧制前高度, mm;  $h$  为轧件轧制后高度, mm。

轧制时轧件在高度方向受压, 金属向长度和宽度方向流动即产生延伸和宽展, 压下量愈大, 相应的延伸和宽展也愈大。

### (3) 轧件宽度

随着轧件宽度的增加, 接触面积增大, 变形区的金属在横向流动的阻力增加, 导致宽展量减小。为了达到目标宽度, 需要增加单位轧制压力, 相应的机组需做更多的功, 消耗更多的电力。

### (4) 裁剪质量

将成卷的原材料纵向剪切成所需宽度的卷料(在这个过程中, 轧件会损失一部分质量), 裁剪质量(又叫轧件质量)就是指钢坯轧后的质量。开卷机、纵剪机、胀紧装置、收卷机等组成的生产线会消耗一定的电力, 当然与裁剪质量的多少有关。

### (5) 轧件初始长度

轧件初始长度变化范围很大, 在很大程度上影响着能耗的分布与变化。

### (6) 轧制速度

轧制速度可以表示为单位时间(例如每 min)内轧制的钢板数。轧制速度越高, 摩擦系数越低, 从而能量的消耗越少。

对以上因素作通径分析，得出热轧工序中，吨钢电耗的主要影响因素及排序依次为生产量、延伸系数及压下量。在实际生产中，要降低吨钢电耗，应提高生产量，减少压下量，基本保持延伸系数。为预测热轧工序中的吨钢电耗，曹阳等人基于以上通径分析的结果，取生产量、平均延伸系数、平均压下量、平均轧件宽度四个参数，建立了如下吨钢电耗多元非线性回归分析预测模型：

$$E = Ax_1^\alpha x_2^\beta x_3^\gamma x_4^\theta \tag{2.6}$$

式中：A， $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ ， $\theta$  为回归待定系数。

该模型可以用来描述在相似的生产条件及操作参数下各因素对吨钢电耗的影响规律。在合理的生产工艺条件下，设定的轧件宽度越小，其吨钢电耗越低，当生产量为 18t/d 时，轧件宽度每减少 200mm，可平均节约电耗 1.60%。

除上述方法外，曹阳等人还采用主成分分析法对以上热轧吨钢电耗影响因素的统计数据进行了处理和分析，得到了前 3 个主成分的表达式，并在此基础上建立了热轧吨钢能耗的多元线性回归模型。通过与未经过处理的原始数据建立的模型进行对比，证明主成分分析法分析后的模型具有良好的预测效果。

就轧钢工作的生产组织而言，影响轧钢电耗的主要因素有：轧钢生产率与生产均衡度。文献<sup>[63]</sup>中刘焱等人利用数理统计方法分析筛选了某钢厂的生产数据，并通过最小二乘法进行了回归分析，研究了轧钢生产均衡度和生产率对轧钢电耗的影响。研究得出：提高轧钢生产均衡度与适当提高轧钢生产率均可降低轧钢电耗；当轧钢生产率与生产均衡度均变化时，生产均衡度对轧钢电耗的影响要远远大于生产率对轧钢电耗的影响，提高生产均衡度带来的节能效果更为明显。因此，钢铁生产中为了达到更好的节能效果，在组织轧钢生产时，一方面要合理地提高生产率，使加热炉和轧机的工作点移向经济区；另一方面要尽量提高轧钢生产的均衡度，这不仅对机械设备有利，而且可以取得更大的节能效益。

以上轧钢生产均衡度是衡量企业在统计期内轧钢生产的实际生产率与平均生产率吻合程度的指标。它的定义式如下：

$$J = \left[ 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 m}}{n\bar{P}} \right] \times 100\% \tag{2.7}$$

式中：J—生产均衡度，%；

$P_i$ —第  $i$  时间范围内的实际生产率, 单位产品/h;

$\bar{P}$ —统计期内的平均生产率, 单位产品/h,  $\bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i / n$ ;

$n$ —统计期的时间长度, h;

$m$ —统计期内实际生产率发生变化的次数。

轧钢生产率是指连续生产时, 单位时间内轧制出的合格产品的质量。它的定义式如下:

$$A = \frac{\sum_{t=1}^T P_t}{T} \tag{2.8}$$

式中:  $A$ —轧钢生产率, t/h;

$P_t$ —第  $t$  时间范围内的实际生产量, t;

$T$ —生产总时间, h。

## 2.4 小结

本章首先介绍了钢铁企业的电力来源, 即外购电、自备电站发电和余热余能发电(二者统称为自发电), 简述了自发电和外购电之间的相互关系, 指出了钢铁企业合理组织自发电、调节外购电的意义所在; 接着介绍了钢铁企业电力生产端由自备电站发电和余热余能发电组成, 详细介绍和分析了两种发电方式所包括的现有技术形式及各自的工艺原理与应用特点, 并据此提出了钢铁企业的发电原则, 为后面章节研究钢铁企业的电力生产与优化作了铺垫; 最后, 因本文主要研究钢铁企业的电力生产情况, 故只对电力消耗端进行了简单介绍, 依据钢铁企业电力消耗流向分析了各工序用电比例, 介绍了主生产工序用电情况, 进行了简单的用电分析, 并对电炉炼钢电耗和热轧电耗两大主要钢铁电耗进行了详细分析。

此页不缺内容

## 第3章 钢铁企业电力生产优化模型

钢铁企业电力生产优化的目的是：在给定的钢铁生产配置和状态下，为满足生产过程中的电力需求，企业应尽量优先使用生产中副产的二次能源（副产煤气）和回收的余热余能（余热、余压）来发电，在仍然无法满足的情况下，再外购动力煤供自备电站燃烧发电，之后若仍未满足，则从当地电网外购电量，从而确保生产顺利进行。钢铁企业电力生产优化要求有效错开高负荷设备的运行，削峰填谷，尽可能错峰生产，同时优先充分利用余热余能发电和自备电站发电，尽量减少外购电力的使用，考虑计划内、计划外用电和峰值用电的电价不同。

常用的能源介质系统优化方法有数学规划法、启发式方法等。

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。从实际问题中建立数学模型一般有以下三个步骤<sup>[64]</sup>：

- (1) 根据影响所要达到目的的因素找到决策变量。
- (2) 由决策变量和所要达到目的之间的函数关系确定目标函数。
- (3) 由决策变量所受的限制条件确定决策变量所要满足的约束条件。

数学规划模型的求解方法比较多，包括单纯型法、分支定界法、梯度下降法、内点法等。这些方法的缺点在于难以体现实际环境的复杂性和随机性，并且对于大规模优化问题的表示一般会形成 NP 完全问题。此外，由于对实际问题的模型求解极为复杂，涉及的约束条件和变量较多，已经不能手工的进行计算。许多对于该问题的求解软件，如 LINGO、LINDO、ILOG 等软件的出现和逐渐成熟，解决了这个问题，不但求解准确而且运算速度快。

本文在确保能源稳定供应和正常生产安全进行的前提下，利用数学规划方法，建立考虑富余煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的生产调度的数学优化模型，优化副产煤气的消耗结构和蒸汽的生产结构，进而实现电力生产结构的优化与外购的合理化。研究钢铁企业电力的合理生产与优化，对于充分利用二次能源和余热余能，减少煤气、蒸汽的放散浪费和环境污染，提高能源综合利用效率和企业竞争力，保持生产中整体电力负荷的相对稳定，以及降低企业生产成本等都具有现实意义。

### 3.1 电力生产优化模型

优化调度问题的目标是，在给定生产计划、检修计划、系统当前状态的前提下，基于已知电力系统网络，确定满足生产需求的最佳电力生产与外购方案。该问题可描述成数学规划的形式：将优化调度目标表示成目标函数，把保证正常生产、设备自身参数条件限制和电力平衡稳定供给等众多条件作为约束条件。钢铁企业的生产过程是一个动态变化着的过程，而数学规划方法求解只能给出在某一时间段的优化结果，并且某些变量状态（如管网状态）还与上一时间段的状态有关。为此，利用数学规划方法建模过程中，需要对实际的动态钢铁生产过程问题进行动静态处理。这里将动态变化的钢铁生产过程分割成很多时间段，进而转化成多个时间段问题。然后，利用数学规划方法求解每一个时间段问题则可以看作是静态的，而求解连续多个时间段问题，最终又可使其表现为一个动态问题。

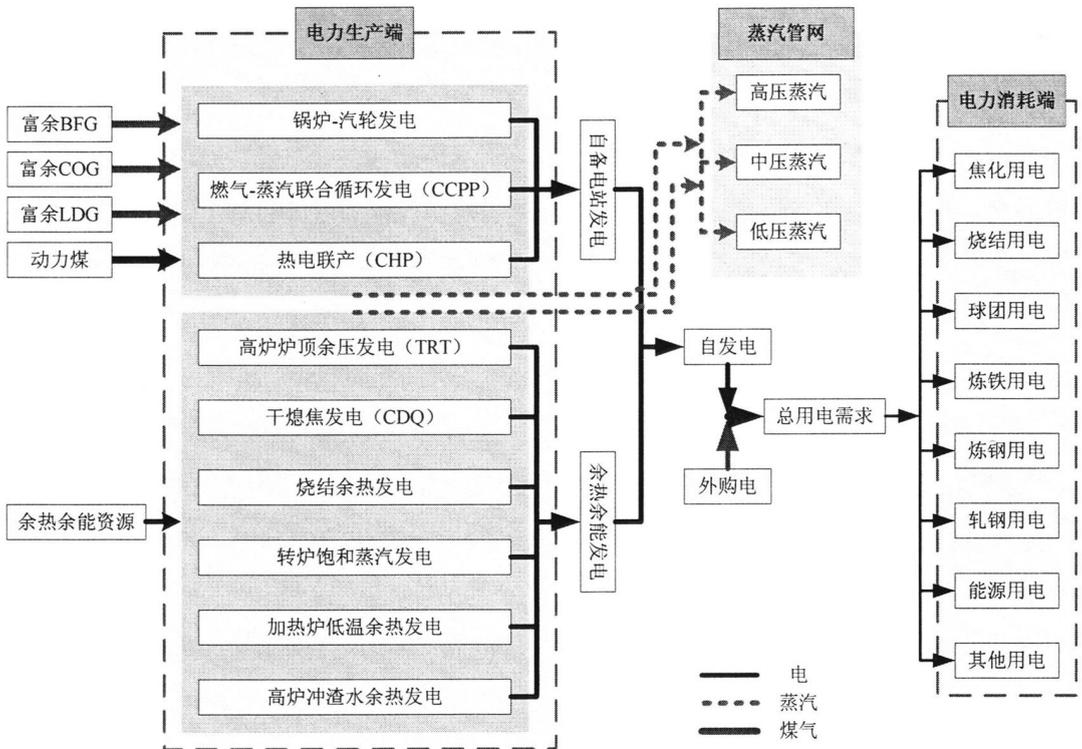


图 3.1 钢铁企业电能系统示意图

Fig. 3.1 The schematic illustration of electrical energy system in iron and steel enterprise

#### 3.1.1 问题描述

钢铁企业电能系统分为电力生产端和电力消耗端，其中电力生产端包括两种电力生

产方式，即自备电站发电和余热余能发电。电力生产端与消耗端对应的具体发电环节与电力用户情况详见图 3.1。钢铁企业的电能系统庞大复杂，电力来源、转换与输配环节和终端用户众多，几乎涉及钢铁生产的各个方面，因此，钢铁企业制定合理的电力生产计划和外购电策略，寻找最佳的自发电和外购电比例，对保证生产的正常、安全顺行所需的电力供应显得尤为重要。钢铁企业的产、用电情况与生产计划、检修计划、产品结构、工艺特点、装备水准、供配电网络、外部电网电价、余热余能及副产能源资源量、外购一次能源价格（如动力煤等）和能源管理水平等众多因素有关，复杂程度很高，这就给电力的优化调度带来了很大困难。为简化问题，本文选择在满足钢铁企业正常生产的电力需求、蒸汽需求和煤气需求的情况下，以电力生产端为研究对象，讨论煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的生产调度情况，从而研究电力的合理生产与优化问题，寻找钢铁企业的最优电力生产与外购策略。

### 3.1.2 模型简化与假设

钢铁企业的电力生产端涉及多种发电、产汽设备，其特性参数互不相同，又与煤气系统、蒸汽系统等既相互关联又相互影响，实际运行情况错综复杂，这给优化建模带来了一定的困难。为此，本文对优化模型提出如下假设：

（1）模型只考虑电力生产端的发电优化调度，而不深入研究需求侧的用电分配；

（2）在给定的生产状况下，煤气刚性用户的消耗量不变，从而模型只考虑煤气在缓冲用户（燃气发电设备、蒸汽锅炉）之间的优化分配，不考虑钢铁生产过程中煤气在刚性用户之间的最优分配问题；

（3）在给定的生产状况下，认为蒸汽用户的需求量是个定值，所以本文只研究蒸汽在相关发电环节以及蒸汽生产环节之间的生产优化调度问题，而不考虑在蒸汽用户之间的优化分配与使用过程中的能级损失等情况；

（4）实际钢铁生产过程中，锅炉效率随锅炉负荷的变化而变化，但对模型优化结果的影响很小，因此假设模型中锅炉热效率在不同时间段是恒定的，同理假设设备发电效率、余热回收效率、汽轮机效率恒定不变，从而机组的系统发电（热）效率亦保持不变，汽轮机发电与抽汽量也近似认为是线性关系；

（5）假设各时间段煤气和蒸汽的热值都是固定不变的。

### 3.1.3 目标函数

建立 P 个周期考虑电力合理生产与外购, 以及与之相关的煤气和蒸汽的多周期混合整数规划模型。根据实际需求, 目标函数是包括外购电费用、自发电费用、外购动力煤费用、消耗煤气费用、蒸汽生产综合费用和煤气放散惩罚费用等的系统综合运行成本最小。目标函数表达式如下:

$$\begin{aligned} MinS = & \sum_t C_{buy,t}^{ele} \cdot E_t^{buy} + \sum_t \sum_m C_{gen,m}^{ele} \cdot E_{m,t}^{gen} + \sum_t \sum_m C^{coal} \cdot f_{m,t} \\ & + \sum_t \sum_i \sum_m C_i^{gas} \cdot F_{m,i,t} + \sum_t \sum_k \sum_m C_{m,k}^{ste} \cdot Q_{m,k,t} + \sum_t \sum_i C_i^{Gas} \cdot F_{i,t}^{Gas} \end{aligned} \quad (3.1)$$

上述目标函数在满足相关约束条件的情况下, 求得的系统综合运行成本最小值即为函数的最优值。式中, 第一项为外购电费用, 当自发电不能满足生产需求或者当发电机组出现故障时存在从外部电网的购电费用; 第二项为自发电费用; 第三项为外购动力煤费用, 保证燃煤锅炉或掺烧煤气锅炉的燃料需求以维持稳定的热负荷; 第四项为设备消耗煤气费用; 第五项为设备蒸汽生产综合费用; 最后一项为煤气放散惩罚费用, 本文认为煤气放散浪费的煤气成本应比正常使用的要高, 因此煤气惩罚价格较大。

### 3.1.4 约束条件

约束条件反映了实际运行条件下外界对系统的要求以及系统内部各个物理量之间的联系。结合钢铁企业实际生产情况, 得出电力生产优化问题通常包括以下几类约束条件。

#### 3.1.4.1 能源需求约束

钢铁企业各生产工序在不同周期对电力、蒸汽和煤气等二次能源的需求量是不同的, 要优先满足这些能源的需求, 才能保证各工序的正常运行。

##### (1) 电力需求约束

$$\forall t, \sum_m E_{m,t}^{gen} + E_t^{buy} \geq D_t^{ele} \quad (3.2)$$

##### (2) 蒸汽需求约束

$$\forall k,t, \sum_m Q_{m,k,t} \geq D_{k,t}^{ste} \quad (3.3)$$

##### (3) 煤气平衡约束

$$\forall i,t, \sum_m F_{m,i,t} + F_{i,t}^{Gas} = B_{i,t} \quad (3.4)$$

#### 3.1.4.2 设备容量约束

各种能源转换、存储和消耗设备都有其额定工作范围, 各发电、产汽设备的工作范

围可以根据实际情况设定上下限。

(1) 设备额定发电量约束

$$\forall m, E_{m,t}^{gen} \leq E_m \quad (3.5)$$

(2) 设备产汽能力约束

设备抽汽量约束：

适用于可从汽轮机抽汽的发电设备，诸如自备电站锅炉、CDQ等。

$$\forall m, Q_{m,k,t} \leq A_{m,k} \quad (3.6)$$

设备产汽量约束：

针对蒸汽锅炉、余热资源产汽设备等。

$$\forall m, \sum_k Q_{m,k,t} \leq A_m \quad (3.7)$$

### 3.1.4.3 热量平衡约束

钢铁企业的电力生产受煤气、蒸汽、动力煤、余热资源量三者影响很大，它们之间既相互联系又彼此影响，为此通过建立各设备的近似热量平衡关系式来寻找它们之间的最优调度关系。钢铁企业的电力生产系统由自备电站发电设备和余热余能发电设备组成，此外，钢铁企业会配置数台蒸汽锅炉，用于消纳富余煤气来生产蒸汽，弥补余热回收蒸汽之外的蒸汽缺口，因而建立自备电站发电环节、余热余能发电环节和蒸汽锅炉三类热量平衡关系式。

(1) 自发电环节的热量平衡约束

$$\forall m, E_{m,t}^{gen} \cdot h^{ele} + \sum_k Q_{m,k,t} \cdot h_k^{ste} = \eta_m (\sum_i F_{m,i,t} \cdot h_i^{gas} + f_{m,t} \cdot h^{coal}) \quad (3.8)$$

(2) 余热余能回收发电环节的热量平衡约束

$$\forall m, E_{m,t}^{gen} \cdot h^{ele} + \sum_k Q_{m,k,t} \cdot h_k^{ste} = \eta_m \cdot R_{m,t} \quad (3.9)$$

(3) 蒸汽锅炉的热量平衡约束

$$\forall m, \sum_k Q_{m,k,t} \cdot h_k^{ste} = \eta_m \cdot \sum_i F_{m,i,t} \cdot h_i^{gas} \quad (3.10)$$

以上式中， $\eta_m$  对于发电设备来说是系统发电效率，对于产汽设备则为系统热效率； $R_{m,t}$  在各个余热余能资源回收环节所代表的意义不同，例如，在 CDQ、烧结、转炉、加热炉中分别代表红焦显热、烧结烟气显热，转炉烟气显热、加热炉烟气显热。

### 3.1.4.4 汽轮机组发电与抽汽量关系约束

汽轮机是系统中调整蒸汽、电力平衡的重要手段，由前面的假设，汽轮机发电与抽汽量之间认为是线性关系。

$$\forall m, t, E_{m,t}^{gen} + \sum_k q_k \cdot Q_{m,k,t} = E_m^{gen} \cdot a \quad (3.11)$$

其中， $q_k$  为蒸汽折电量系数； $0 \leq a \leq 1$ ，用于确定汽轮机的负荷。

### 3.1.4.5 煤气缓冲用户的调节范围约束

锅炉作为钢铁企业煤气缓冲用户之一，其种类不一，其中，纯烧煤气的锅炉和掺烧煤气的煤粉锅炉最为典型。煤气炉有最低负荷和最高负荷的限制，煤气只能在这个范围内调节。煤粉炉则可以根据煤气的富余情况调整煤粉的实用量。CCPP 调节范围比较大，由于自身能力的限制煤气也在一个范围内变化。因此煤气缓冲用户应满足如下约束条件。

$$\forall m, i, F_{m,i}^{min} \leq F_{m,i,t} \leq F_{m,i}^{max} \quad (3.12)$$

### 3.1.4.6 变量非负约束

保证所有连续变量不小于零。

$$E_{m,t}^{buy} \geq 0, E_t^{buy} \geq 0, f_{m,t} \geq 0, F_{m,i,t} \geq 0, Q_{m,k,t} \geq 0, F_{i,t}^{Gas} \geq 0。$$

## 3.1.5 参数定义

目标函数和约束条件中各参数变量所代表的意义和单位列在表 4.1 中。式中所有参数的单位均以下表中为准。

表 3.1 模型中用到的变量的含义及单位  
Tab 3.1 Meanings and units of variables in the model

符号	含义	单位
P	调度周期个数	-
t	调度周期 (t=1, 2, ..., P)	-
m	发电与蒸汽生产设备	-
i	煤气种类 (BFG, COG, LDG)	-
k	蒸汽种类 (S1, S2, S3)	-
参数	含义	单位
$C_{buy,t}^{ele}$	t 时间段的外购电价格	元/kW·h

$C_{gen,m}^{ele}$	设备 m 的自发电价格	元/kW·h
$C^{coal}$	外购动力煤价格	元/t
$C_i^{gas}$	i 煤气的价格	元/m <sup>3</sup>
$C_{m,k}^{ste}$	设备 m 产生 k 蒸汽的成本	元/t
$C_i^{Gas}$	i 煤气的惩罚价格	元/m <sup>3</sup>
$D_t^{ele}$	t 时间段的电力需求量	kW·h
$D_{k,t}^{ste}$	t 时间段的 k 蒸汽需求量	t/h
$B_{i,t}$	t 时间段 i 煤气的富余量	m <sup>3</sup> /h
$E_m$	设备 m 的额定发电量	kW
$A_{m,k}$	设备 m 的抽汽能力	t/h
$A_m$	设备 m 的产汽能力	t/h
$F_{m,i}^{min}$	设备 m 燃煤气 i 的调节下限	m <sup>3</sup> /h
$F_{m,i}^{max}$	设备 m 燃煤气 i 的调节上限	m <sup>3</sup> /h
$h^{ele}$	电的热值	kJ/kW·h
$h_k^{ste}$	k 蒸汽的热值	kJ/kg
$h_i^{gas}$	i 煤气的热值	kJ/m <sup>3</sup>
$h^{coal}$	动力煤的热值	kJ/kg
$\eta_m$	设备 m 的系统发电（热）效率	%
$R_{m,t}$	设备 m 在 t 时间段回收余热余能资源的热量值	kJ/h
<b>连续变量</b>	<b>含义</b>	<b>单位</b>
$E_t^{buy}$	t 时间段的外购电量	kW
$E_{m,t}^{gen}$	设备 m 在 t 时间段的发电量	kW

$f_{m,t}$	设备 m 在 t 时间段的动力煤耗量	t/h
$F_{m,i,t}$	设备 m 在 t 时间段的 i 煤气消耗量	m <sup>3</sup> /h
$Q_{m,k,t}$	设备 m 在 t 时间段的 k 蒸汽产生量	t/h
$F_{i,t}^{Gas}$	t 时间段的 i 煤气放散量	m <sup>3</sup> /h

## 3.2 对模型的简要评价

### 3.2.1 适用范围

不同的钢铁企业因生产规模大小不一,其工艺流程和装备配置于相似中又存在很大差异,又受二次能源和余热余能资源数量大小、工艺蒸汽需求和电力需求等因素的影响,不同钢铁企业的电能系统配置情况不一,复杂程度互异。但综合来看,不同规模、类型的钢铁企业之间的电力生产端配置都存在很大的相通性,无非是根据各自生产特点对现有各种自备电站发电技术和余热余能发电技术的搭配。因此,本章提出的电力生产优化模型是一种适用于任何规模钢铁企业的普适模型,试图跳出以往各种能源介质优化模型只能适用于特定钢铁企业的窠臼。

针对一个指定规模的钢铁企业,利用该优化模型进行电力生产与外购优化分析时,只需按照该钢铁企业电力生产端的具体配置,将各发电设备、产汽设备等逐一考虑,明确各设备的煤气、动力煤消耗和电力、蒸汽生产等能源介质的产耗关系,使该钢铁企业的电力生产优化问题具体化,再对具体问题进行深入的分析研究,找出钢铁企业电力的合理生产方案与外购策略。

### 3.2.2 模型特点

上述钢铁企业电力生产优化模型是通过研究煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的最优生产情况,来实现钢铁企业的电力生产优化调度,最终为企业找出最佳的电力生产与外购方案。因此,该模型的特点表现为其是一种综合考虑钢铁企业的电力、煤气和蒸汽三种能源介质的耦合优化模型,其中,富余煤气的优化分配和蒸汽的生产优化调度是手段,而电力的生产与外购优化调度是最终目的。

### 3.2.3 模型用途

通观上文分析,在满足钢铁企业正常生产的电力需求、蒸汽需求和煤气需求的情况下,建立综合考虑电-蒸汽-煤气三种能源介质的电力生产优化模型,试图通过研究缓冲用户之间的富余煤气优化分配和蒸汽生产设备之间的蒸汽生产调度,寻找合理的电力生产方案和最佳的外购策略。这是本文提出的钢铁企业电力生产优化模型的首先想要解决的问题。

其次,在给定钢铁企业生产状况的基础上,模型可以用于讨论峰谷分时电价对企业电力生产和外购的影响,通过对模型的求解,分别给出峰、平、谷电价下的电力生产与外购方案以及最优的煤气分配和蒸汽生产情况。

另外,模型还可以用于:研究钢铁企业只买电不买煤模式和只买煤不买电模式的经济性问题;研究生产过程中的余热资源只用于生产蒸汽和只用于发电两种形式的合理性问题等。本章不做模型的具体简化和求解,将在下章结合一个实际的钢铁企业予以详细讨论。

综上,研究钢铁企业的电力生产与优化调度,获得企业的最优煤气分配、蒸汽生产、电力生产及外购策略,可以指导钢铁企业合理利用一次能源(动力煤)、副产二次能源(副产煤气)和余热余能资源(余热、余压)进行电力、蒸汽生产,决策企业从当地电网的外购电量,节省电费成本以减少企业的综合生产成本,并为钢铁企业的节能减排工作服务。

### 3.3 模型求解软件介绍

数学规划模型可以描述极为复杂的实际问题。利用优化算法,应用程序能迅速找到这些问题模型的解决方案。ILOG CPLEX 软件是专门用于求解最优化问题的软件,它的计算速度非常快,可以解决现实世界中许多大规模的问题,并利用现在的应用系统快速提交可靠的解决方案。这一特点可以从它在全球各地的使用情况和能在极端苛刻条件下应用的现状得到完全证明。它能够处理有数百万个约束(Constraint)和变量的问题,而且一直刷新数学规划的最高性能记录。所有 ILOG CPLEX 算法都与最新的预处理紧密集成,不需要任何特殊用户干预,就能将较大规模的问题变成小规模的问题,缩短求解时间。每个优化器都有许多调整性能的选项。用户可以根据特定问题的需要,对性能进行相应的调整。

ILOG CPLEX 能够以最快的速度最可靠地实现基本算法,以解决困难的数学优化问题。CPLEX 提供灵活的高性能优化程序,解决线性规划(Linear programming)、二次方

程规划 (Quadratic programming)、二次方程约束规划 (Quadratically constrained programming) 和混合整型规划 (Mixed integer programming) 问题。

本文用 ILOG CPLEX 软件开发建模, 对钢铁企业电力生产优化问题进行求解, 经计算机运行证实, 该模型可用于解决钢铁联合企业电力生产优化问题, 以追求电力生产的合理性与电力外购的经济性。本模型为钢铁联合企业制定静态的电力生产规划, 确定最佳电力生产与外购方案以及系统分析提供了有利工具。

### 3.4 小结

本章在对所描述的钢铁企业电力生产优化问题进行一定简化和提出适当假设的前提下, 建立了考虑电力合理生产与外购、以及与之相关的煤气和蒸汽的多周期混合整数规划模型。模型的目标函数是包括外购电费用、自发电费用、外购动力煤费用、消耗煤气费用、蒸汽生产综合费用和煤气放散惩罚费用等的系统综合运行成本最小。模型考虑了能源需求、设备容量、热量平衡、汽轮机组发电与抽汽量关系、煤气缓冲用户的调节范围和变量非负等约束条件。随后, 对提出的钢铁企业电力生产优化模型的适用范围、特点和用途进行了简要评价, 并简单介绍了模型的求解软件 ILOG CPLEX。

## 第 4 章 优化模型在首钢京唐公司的应用

### 4.1 首钢京唐公司概况

首钢京唐钢铁公司是纳入国家“十一五”规划纲要的重点工程项目，由首钢和唐钢共同投资兴建，是结合首钢搬迁和唐山地区钢铁工业调整，在曹妃甸建设的一个具有国际先进水平的钢铁联合企业。项目计划总投资 677 亿元，一期工程于 2008 年 10 月和 2010 年底分两个阶段建成投产，形成建设规模为生铁 898.15 万吨/年、钢坯 970 万吨/年、钢材 912.82 万吨/年的现代化钢铁联合企业。

首钢京唐公司项目建设内容包括主体工程和辅助工程两大部分。主体工程包括四座 70 孔 7.63m 大型焦炉，两台 500m<sup>2</sup> 烧结机，一条 504m<sup>2</sup> 带式焙烧机球团生产线，两座 5500m<sup>3</sup> 高炉，两座 300 吨脱磷转炉，三座 300 吨脱碳转炉，一座双工位 LF 精炼炉，两套 RH 钢水真空精炼装置，两台 2150mm 和一台 1650mm 双流板坯连铸机，2250mm、1580mm 热连轧机组各一套，2230mm、1700mm、1550mm 冷连轧机组各一套；辅助工程有：一个大型综合料场，两个 30 万吨级矿石专用泊位、一个 10 万吨级和 15 万吨级散货泊位、11 个 1-5 万吨级成品码头泊位及相关铁路及汽运配套设施。图 4.1 为京唐公司主要生产流程及设备。

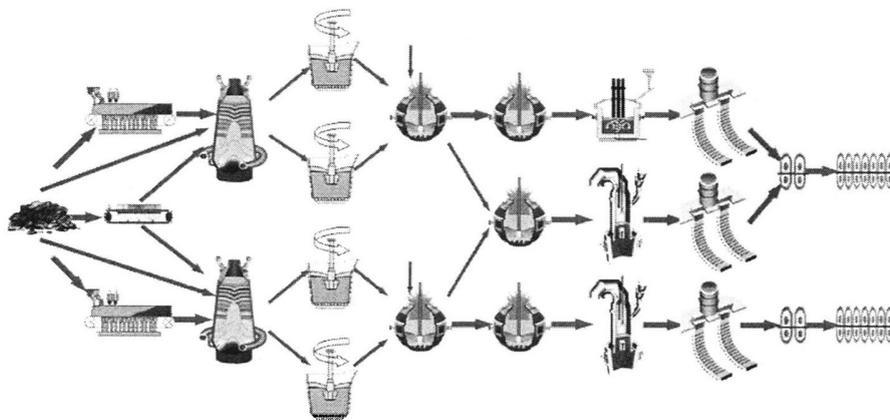


图 4.1 京唐公司主要生产流程及设备

Fig. 4.1 Main production process and devices of Shougang Jingtang

### 4.2 首钢京唐公司电力生产端现状

首钢京唐公司有两种电力来源：自发电和外购电。其中，自发电包括自备电站发电和余热余能发电两部分。自备电站配备两座 300MW 燃煤-燃气发电机组和两套 150MW

燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP), 余热余能发电来源于两套 35MW 干熄焦发电机组 (CDQ) 和两套 36.5MW 高炉炉顶余压发电机组 (TRT)。钢铁企业电力生产离不开蒸汽, 不仅发电量、发电效率的大小与蒸汽数量和品质密切相关, 而且很多发电机组在输出电力的同时还从汽轮机组抽汽外供不同参数的蒸汽。为此, 本文把京唐各蒸汽汽源不管发电与否, 均纳入电力生产端的范畴, 予以综合考虑。

首钢京唐公司的蒸汽管网有三种蒸汽: S1 为中压蒸汽, 2.0~3.8MPa, 450℃; S2 蒸汽参数为 0.78~1.27MPa, 170~280℃; S3 为低压蒸汽, 0.3~0.78MPa, 142~170℃。S1 蒸汽主要由启动锅炉和 130t 锅炉提供蒸汽, 数量相对较少, 结构简单。S3 低压蒸汽主要由 130t 锅炉和自备电站 300MW 汽轮机抽汽提供。S2 蒸汽比较复杂, 供汽源多, 包括烧结、转炉、热轧, CDQ 汽轮机抽汽或减温减压蒸汽, 启动锅炉、130t 锅炉, 以及自备电站汽轮机抽汽; 有时 S2 蒸汽还会作为 S3 蒸汽的补充, 替换 S3 蒸汽降级使用, 故 S2 蒸汽最为复杂, 研究难度较大。

#### 4.2.1 自备电站发电

##### (1) 燃煤-燃气发电

京唐公司自备电站有两座 300MW 发电机组, 对应 2 台自然循环、一次中间再热的亚临界锅炉。锅炉为 100%燃烧煤粉的锅炉, 具有同时掺烧 0~30% (为热量百分比, 掺烧比例设计为 20%) 约 0~200000Nm<sup>3</sup>/h 高炉煤气及 0~17500Nm<sup>3</sup>/h 焦炉煤气的的能力; 转炉煤气在炉前混入高炉煤气母管中, 混入量为 0~10000Nm<sup>3</sup>/h。锅炉的额定蒸发量为 960t/h, 锅炉的最大连续蒸发量为 1025t/h, 最大负荷时, 主蒸汽出口压力 17.5MPa, 温度 541℃。锅炉按 100%燃动力煤设计, 在额定蒸发量下的总燃煤量为 111.01t/h, 效率为 93.86%; 在最大连续蒸发量下的总燃煤量为 117.87t/h, 效率为 93.75%。锅炉按 80%动力煤+20%高炉煤气设计, 在额定蒸发量下的总燃煤量为 92.79t/h, 高炉煤气量为 181.9×10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>/h, 效率为 91.43%; 在最大连续蒸发量下的总燃煤量为 98.71t/h, 高炉煤气量为 193.48×10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>/h, 效率为 91.33%。高炉煤气热值为 3066 kJ/m<sup>3</sup>, 焦炉煤气热值为 15910~17900 kJ/m<sup>3</sup>, 转炉煤气热值为 7536 kJ/m<sup>3</sup>。

汽轮机额定功率为 300MW, 最大计算功率为 340MW, 额定主蒸汽压力为 16.7MPa, 温度 537℃。汽轮机设有两级抽汽, S2 抽汽为不可调抽汽, 抽汽压力 1MPa, 单台最大抽汽量为 80t/h, 且在汽轮机负荷大于 220MW 时才能进行 S2 抽汽; S3 抽汽为可调节抽汽, 抽汽压力 0.3~0.5MPa, 单独抽 S3 蒸汽的最大抽汽量为 400t/h, 若设计单台抽汽量

为 110t/h 时,可同时抽 S2 蒸汽 30t/h。目前京唐公司汽源充足,自备电站作为后备汽源,很少进行抽汽。

(2) 燃气-蒸汽联合循环发电 (CCPP)

京唐公司现配置有两套 150MW 燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP),但生产中因故未能投入运行,其运行参数等相关情况未从企业获得,在此不详细介绍。

4.2.2 余热余能发电

(1) 干熄焦发电 (CDQ)

京唐公司现有四座 70 孔 7.63m 焦炉,焦炉每孔炭化室全焦产量 44.03t,2 座焦炉小时全焦产量 239.9t/h,配备 2×260t/h 干熄焦 (CDQ) 设备,两台自然循环的高温高压余热锅炉,2×25MW 双抽凝汽式汽轮机,2×30MW 发电机。单台余热锅炉设计能力为:蒸汽参数为 9.5±0.2MPa、540±5℃ (蒸汽参数正常最大可达到 9.8MPa、541℃),额定蒸发量为 134t/h,最大蒸发量为 151t/h,吨焦回收蒸汽量 528~565kg/t 焦。按年工作 8280h 计,年可回收高压蒸汽约 222 万 t。CDQ 机组有两级抽汽,S1 抽汽为 2.6MPa,最大抽汽量为 50t/h;S2 抽汽为 1MPa,最大抽汽量为 60t/h,作为生产用 S2 蒸汽调节汽源。另有减温减压装置,机组故障或蒸汽量不够时,余热锅炉产汽直接经减温减压后外供而不进入汽轮机,蒸汽降级使用,造成能源浪费。目前启动锅炉蒸汽不够,CDQ 余热蒸汽减温减压后外供,外供量大约 100t/h。

(2) 高炉炉顶余压发电 (TRT)

表 4.1 TRT 工艺的技术参数  
Tab 4.1 Technical parameters of TRT

性能参数	单位	TRT 运行点	
		干气 120℃	干气 150℃
透平轴端出力	kW	28800	30750
透平出口温度	℃	35.7	47.4
发电机效率	%	97.5	97.6
发电机出力	kW	28090	30010
发电机功率因数	%	85	85

京唐公司现有 2×5500m<sup>3</sup> 高炉,分别采取旋风和布袋纯干式高炉煤气除尘装置,配备 2×36.5MW 高炉炉顶余压发电机组 (TRT)。为充分回收炉顶余压余能,根据上游工

艺条件, TRT 同样采用全干式系统。运行以来, 吨铁发电量达到  $50\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$  铁, 最高日发电量达  $31323\text{kW}\cdot\text{h}$ , 最高日平均发电量达  $29536\text{kW}\cdot\text{h}$ 。TRT 工艺的技术参数如表 4.1 所示。

### 4.2.3 蒸汽汽源

这里专指京唐公司除过以上发电设施供气源之外, 其他的蒸汽来源, 包括启动锅炉、130t 锅炉、烧结回收、转炉回收和热轧回收。

#### (1) 启动锅炉

京唐公司配置有两台中温中压锅炉, 单台锅炉额定蒸发量  $35\text{t}/\text{h}$ , 设计热效率 95%。锅炉以高、焦煤气为燃料, 点火时使用天然气。锅炉有 8 个高炉煤气烧嘴, 高炉煤气压力  $10\text{kPa}$  左右, 流量  $26000\text{m}^3/\text{h}$ ; 还有 2 个焦炉煤气烧嘴, 起稳燃作用, 焦炉煤气压力  $6.2\text{kPa}$  左右, 流量  $1300\text{m}^3/\text{h}$ 。其具有生产 S1 和 S2 两种品质蒸汽的能力, 蒸汽参数分别是  $3.82\text{MPa}$ ,  $450^\circ\text{C}$  和  $0.8\sim 1.27\text{MPa}$ ,  $250^\circ\text{C}$ 。锅炉最低运行负荷为  $15\text{t}/\text{h}$  左右。目前启动锅炉为非满负荷运行, 产汽量达设计值的 40%~100%, 1#锅炉产汽  $27.6\text{t}/\text{h}$ ,  $2.33\text{MPa}$ 、 $311^\circ\text{C}$ ; 2#锅炉产汽  $29.5\text{t}/\text{h}$ ,  $1.99\text{MPa}$ 、 $327^\circ\text{C}$ 。

#### (2) 130t 锅炉

京唐公司配置有两台 130t/h 锅炉, 燃烧富余的高炉煤气, 最大燃烧能力为  $300000\text{m}^3/\text{h}$ , 并采用焦炉煤气稳燃, 最大燃烧能力为  $20000\text{m}^3/\text{h}$ 。同时, 该锅炉作为稳定的主要供汽源, 生产 S1 和 S2 两种品质的蒸汽, 生产的蒸汽参数和启动锅炉相同, 所产 S1 蒸汽和启动锅炉生产 S1 蒸汽主要供 RH 精炼炉使用, 生产 S2 蒸汽主要供海水淡化降级使用。

#### (3) 烧结回收

首钢京唐钢铁公司烧结车间配置  $2\times 500\text{m}^2$  烧结机,  $2\times 580\text{m}^2$  鼓风环冷机, 年产 1015.3 万 t 烧结矿 (台时产量  $2\times 641\text{t}/\text{h}$ )。为了回收环冷机烟气余热, 配置 2 台双压余热锅炉, 设计每台生产  $1.0\text{MPa}$  S2 饱和蒸汽  $40\text{t}/\text{h}$ ,  $0.3\text{MPa}$  S3 饱和蒸汽  $9\text{t}/\text{h}$ , 目前很少达到。按年工作  $7920\text{h}$  计, 年可回收蒸汽 77.6 万 t。余热产生蒸汽, 一部分自用, 用于机头混合料预热, 大约  $15\text{t}/\text{h}$ , 其余外供管网, 因此可以认为只是 S2 汽源, 外供蒸汽约  $40\text{t}/\text{h}$ 。

#### (4) 转炉回收

首钢京唐钢铁公司炼钢车间生产规模为年产钢水 927.5 万 t, 建有两座 300t 顶底复吹脱磷转炉、三座 300t 顶底复吹脱碳转炉。为了回收炼钢过程产生的高温烟气, 每座转炉配备 1 套转炉汽化冷却设施。在余热锅炉中产生  $2.0\sim 4.0\text{MPa}$  饱和蒸汽 74.2 万 t, 蒸

汽回收量约 80kg/t 钢。转炉双联生产, 平均产汽量约 100t/h, 最大产汽量 116.1t/h, 部分供 RH 精炼炉使用, 剩余外供 S2 管网。

#### (5) 热轧回收

首钢京唐公司现有 2250mm 和 1580mm 两条热轧线。两条热轧线对应 4 座加热炉, 均是 3 用 1 备, 加热炉底均有汽化冷却装置, 产生 0.8~1.3MPa 饱和蒸汽, 每个加热炉产汽约 10t/h, 共产汽 30t/h 左右, 实际产量与炉子状态、燃料消耗等有密切关系, 所产余热蒸汽主要内部使用: 冬季水处理系统拌热保温以及夏季制冷等, 用量极小, 小于 10t/h, 其余则供入管网, 因此也可以认为只是 S2 汽源, 外供蒸汽约 60t/h。

#### (6) 冷轧回收

首钢京唐钢铁厂共有 1550mm、1700mm、2230mm 三个冷轧车间。各冷轧车间内设有退火机组, 其烟道上可配置低压余热锅炉, 共计可产低压蒸汽约 35t/h, 年回收蒸汽约 23 万 t。热轧和冷轧回收蒸汽属于品质较低的低温余热蒸汽, 后文模型优化分析中将二者统一为轧钢回收 S2 蒸汽来处理, 并认为外供蒸汽约为 60t/h。

### 4.3 首钢京唐公司电力消耗端简介

电力消耗贯穿于京唐公司钢铁生产的各个方面, 从照明、生活、办公到各大、小型装备的顺利运行都离不开电力的供应, 因此, 钢铁企业电力消耗端是一个庞大复杂并相互影响的用电网络。京唐公司的电力消耗端主要分为生产用电单元和能源辅助设施用电单元。生产用电单元包括: 原料运输、原料储存与加工、焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、热轧和冷轧等。能源辅助设施用电单元包括: 能源中心、能源加工与转换、高炉鼓风、给排水、制氧、海水淡化、通讯及生活辅助设施等。

#### 4.3.1 京唐生产用电分析

按照京唐行政部门的划分, 并依据生产关联度将京唐的用电单元归纳为以下生产工序, 它们是: 焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢(转炉、连铸、LF 炉、套筒窑)、热轧、冷轧、能源加工与转换(燃气、制氧、鼓风、热电、空压站、换热站和供水等)及其他辅助工序(生活临供、原料加工、道路照明、办公运输和线路损失等)。

图 4.2 是京唐 2010 年 2 月上述各生产工序耗电量比例图。由图中生产工序的用电分析可以看出, 京唐公司能源加工与转换工序用电量占企业总用电量的 45%, 将近一半, 热轧工序以 12% 的用电量居于第二位, 其次是炼钢工序占 11%, 其余工序所占的用电比

例由大到小依次为烧结 10%、炼铁 7%、冷轧 6%、焦化 5%、其他辅助工序 3%和球团 1%。其中，能源加工与转换工序中制氧、鼓风三者耗电量所占比例最大，分别占本工序的 42%、30%。

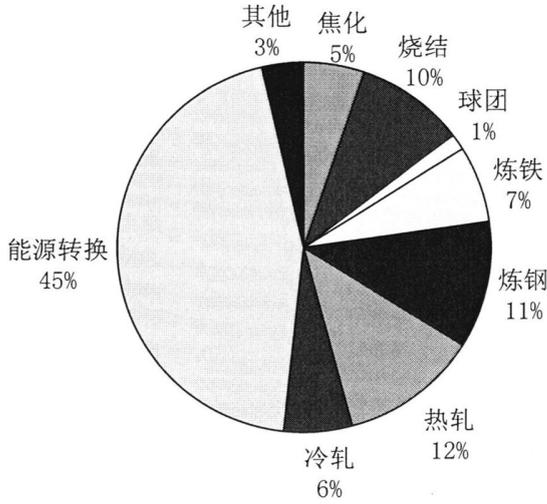


图 4.2 首钢京唐各工序用电比例图

Fig. 4.2 Percentage chart of electricity consumption in various production process of Shougang Jingtang

### 4.3.2 京唐用电需求计算

4.3.1 小节的京唐用电分析及本章 4.5 节的模型求解与讨论中，离不开京唐公司在某个统计期内各工序以及总的电力需求量。本文参考京唐公司能源平衡表和电量报表中的统计数据，按照上小节用电分析中所划分与归纳的生产工序，计算在统计期 t 内的用电量，计算简图见图 4.3，电力需求量计算方程为：

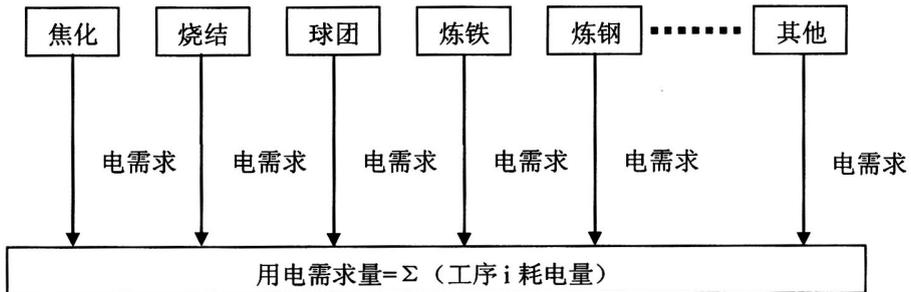


图 4.3 电力需求量计算简图

Fig. 4.3 Diagram of power demand calculation

$$D(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) + x_5(t) + \dots + x_n(t) \tag{4.1}$$

式中， $D(t)$  为京唐公司在统计期  $t$  内的电力需求总量 (kW·h)， $x_1(t)$ 、 $\dots$ 、 $x_n(t)$  为各个生产工序在统计期  $t$  内的电力需求量 (kW·h)。

### 4.4 首钢京唐公司电力生产优化建模

根据 4.2 节介绍的首钢京唐公司电力生产端情况，假设烧结、转炉、轧钢工序皆配置有相应的余热发电设备，按照第 3 章提出的方法，建立京唐公司电力生产优化模型。模型的目的是在给定的钢铁生产状态下，通过研究富余煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的最佳生产情况，确定满足生产需求的最佳电力生产与外购方案，使得企业电力生产系统的综合运行成本最低。

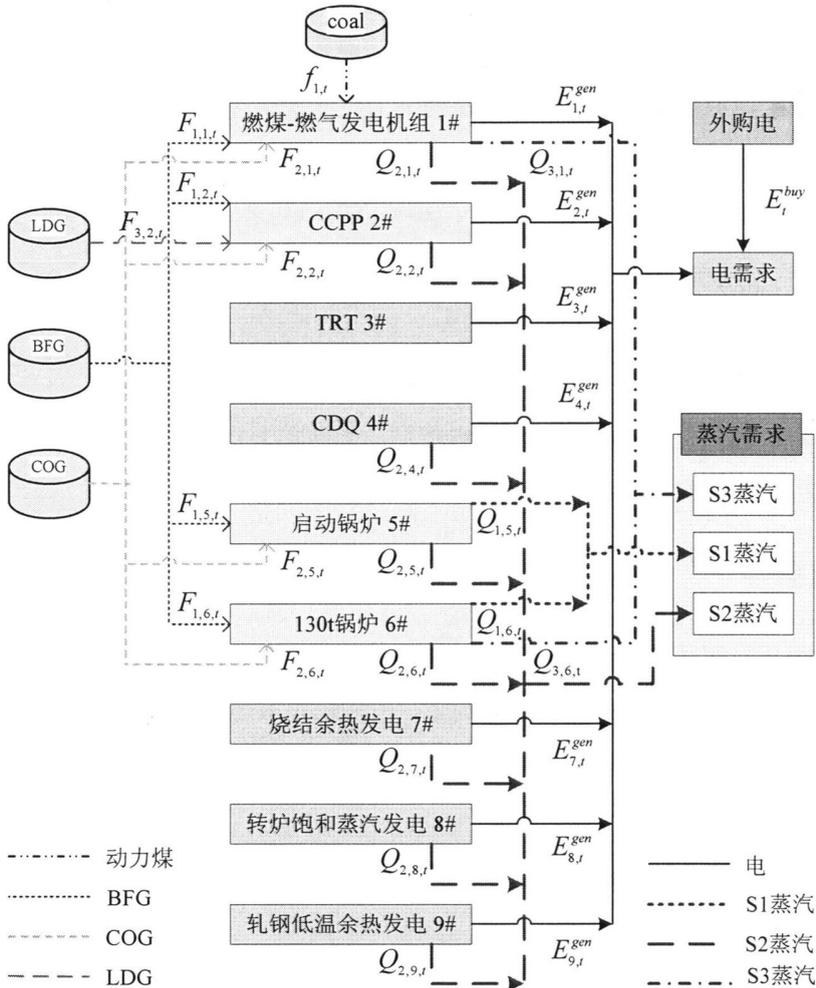


图 4.4 京唐公司电力生产优化模型

Fig. 4.4 Optimized model of power production in Shougang Jingtang

为了更准确的评价电力生产的合理与否以及寻找最佳的外购电关系，在考虑电力合理生产与优化的问题中，同时考虑了与之紧密相关的煤气消耗和蒸汽生产对电力生产的影响。根据首钢京唐公司的实际情况，绘制考虑动力煤、煤气消耗和蒸汽生产的京唐公司电力生产优化模型简图 4.4。本文为后续建模及分析问题清晰方便起见，如图所示，对涉及的发电与蒸汽生产设备进行统一的编号，标明了各设备的能源消耗和产出种类，并用不同的线型绘出了各自的走向，明确了相关变量的设置情况。

#### 4.4.1 目标函数

电力生产优化调度的目的是指导钢铁企业合理利用一次能源（动力煤）、副产二次能源（副产煤气）和余热余能资源（余热、余压）进行电力生产，决策企业从当地电网的外购电量，减少企业电力生产系统的综合运行成本。在满足钢铁生产电力需求的前提下，由第三章的研究内容，结合京唐公司的电力生产优化模型图，得到京唐公司电力生产优化模型的目标函数如下：

$$\begin{aligned}
 MinS = & \sum_t C_{buy,t}^{ele} \cdot E_t^{buy} + \sum_t \sum_m C_{gen,m}^{ele} \cdot E_{m,t}^{gen} + \sum_t C^{coal} \cdot f_{1,t} + \sum_t \sum_i C_i^{Gas} \cdot F_{i,t}^{Gas} \\
 & + (\sum_t \sum_{j1} C_1^{gas} \cdot F_{1,j1,t} + \sum_t \sum_{j2} C_2^{gas} \cdot F_{2,j2,t} + \sum_t \sum_{j3} C_3^{gas} \cdot F_{3,j3,t}) \\
 & + (\sum_t \sum_{w1} C_{1,w1}^{ste} \cdot Q_{1,w1,t} + \sum_t \sum_{w2} C_{2,w2}^{ste} \cdot Q_{2,w2,t} + \sum_t \sum_{w3} C_{3,w3}^{ste} \cdot Q_{3,w3,t})
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

式中，依次包括外购电费用、自发电费用、外购动力煤费用、煤气放散惩罚费用、消耗煤气费用以及蒸汽生产综合费用。

#### 4.4.2 约束条件

结合京唐公司实际情况建立模型的约束条件，分别为能源需求约束、设备容量约束、热量平衡约束、煤气缓冲用户调节范围约束、汽轮机组发电与抽汽量关系约束以及变量非负约束。

##### 4.4.2.1 能源需求约束

满足京唐钢铁生产过程中对电力和蒸汽的需求，以及保证煤气平衡。

##### (1) 电力需求约束

京唐自发电和外购电要保证企业钢铁生产中的电力需求。

$$E_{1,t}^{gen} + E_{2,t}^{gen} + E_{3,t}^{gen} + E_{4,t}^{gen} + E_{7,t}^{gen} + E_{8,t}^{gen} + E_{9,t}^{gen} + E_t^{buy} \geq D_t^{ele} \tag{4.2}$$

(2) 蒸汽需求约束

保证各汽源生产的蒸汽量能满足生产过程中的蒸汽需求。

S1 蒸汽需求:

$$Q_{1,5,t} + Q_{1,6,t} \geq D_{1,t}^{ste} \quad (4.3)$$

S2 蒸汽需求:

$$Q_{2,1,t} + Q_{2,2,t} + Q_{2,4,t} + Q_{2,5,t} + Q_{2,6,t} + Q_{2,7,t} + Q_{2,8,t} + Q_{2,9,t} \geq D_{2,t}^{ste} \quad (4.4)$$

S3 蒸汽需求:

$$Q_{3,1,t} + Q_{3,6,t} \geq D_{3,t}^{ste} \quad (4.5)$$

(3) 煤气平衡约束

各缓冲用户的煤气使用量与放散量之和应等于对应种类的煤气富余量。

高炉煤气 (BFG) 平衡:

$$F_{1,1,t} + F_{1,2,t} + F_{1,5,t} + F_{1,6,t} + F_{1,t}^{Gas} = B_{1,t} \quad (4.6)$$

焦炉煤气 (COG) 平衡:

$$F_{2,1,t} + F_{2,2,t} + F_{2,5,t} + F_{2,6,t} + F_{2,t}^{Gas} = B_{2,t} \quad (4.7)$$

转炉煤气 (LDG) 平衡:

$$F_{3,2,t} + F_{3,t}^{Gas} = B_{3,t} \quad (4.8)$$

4.4.2.2 设备容量约束

各设备的发电能力和产汽能力是有限的, 都有其额定工作容量或最大工作量, 对于图 4.4 来说, 包括如下设备容量约束。

(1) 设备额定发电量约束

各设备的发电量小于自身的发电容量。

燃煤-燃气发电机组:

$$0 \leq E_{1,t}^{gen} \leq E_1 \quad (4.9)$$

燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP):

$$0 \leq E_{2,t}^{gen} \leq E_2 \quad (4.10)$$

高炉炉顶余压发电机组 (TRT):

$$0 \leq E_{3,t}^{gen} \leq E_3 \quad (4.11)$$

干熄焦发电机组 (CDQ):

$$0 \leq E_{4,t}^{gen} \leq E_4 \quad (4.12)$$

烧结余热发电机组:

$$0 \leq E_{7,t}^{gen} \leq E_7 \quad (4.13)$$

转炉饱和蒸汽发电机组:

$$0 \leq E_{8,t}^{gen} \leq E_8 \quad (4.14)$$

轧钢低温余热发电机组:

$$0 \leq E_{9,t}^{gen} \leq E_9 \quad (4.15)$$

(2) 设备产汽能力约束

各设备的产汽量小于自身的额定蒸发量或最大抽汽量。

1) 汽轮机抽汽量约束

燃煤-燃气发电机组:

$$Q_{2,1,t} \leq A_1 \quad (4.16)$$

$$Q_{3,1,t} \leq A_2 \quad (4.17)$$

燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP):

$$Q_{2,2,t} \leq A_3 \quad (4.18)$$

干熄焦发电机组 (CDQ):

$$Q_{2,4,t} \leq A_4 \quad (4.19)$$

2) 蒸汽锅炉额定蒸发量约束

启动锅炉:

$$Q_{1,5,t} + Q_{2,5,t} \leq A_5 \quad (4.20)$$

130t 锅炉:

$$Q_{1,6,t} + Q_{2,6,t} + Q_{3,6,t} \leq A_6 \quad (4.21)$$

3) 余热资源产汽量约束

烧结:

$$Q_{2,7,t} \leq A_7 \quad (4.22)$$

转炉:

$$Q_{2,8,t} \leq A_8 \quad (4.23)$$

轧钢:

$$Q_{2,8,t} \leq A_9 \quad (4.24)$$

#### 4.4.2.3 热量平衡约束

为了寻找各设备在煤气、动力煤、余热资源消耗和电力、蒸汽生产之间的最优调度关系,本文采用近似的热量平衡进行分析,包括自发电环节、余热余能发电环节以及蒸汽锅炉的热量平衡。

(1) 自发电环节的热量平衡约束

燃煤-燃气发电机组:

$$E_{1,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,1,t} \cdot h_2^{ste} + Q_{3,1,t} \cdot h_3^{ste} = \eta_1 (F_{1,1,t} \cdot h_1^{gas} + F_{2,1,t} \cdot h_2^{gas} + f_{1,t} \cdot h^{cool}) \quad (4.25)$$

燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP):

$$E_{2,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,2,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_2 (F_{1,2,t} \cdot h_1^{gas} + F_{2,2,t} \cdot h_2^{gas} + F_{3,2,t} \cdot h_3^{gas}) \quad (4.26)$$

(2) 余热余能发电环节的热量平衡约束

高炉炉顶余压发电机组 (TRT):

$$E_{3,t}^{gen} \cdot h^{ele} = \eta_3 \cdot R_{3,t} \quad (4.27)$$

式中,  $R_{3,t}$ —透平机入口煤气携带的能量, kJ/h。

干熄焦发电机组 (CDQ):

$$E_{4,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,4,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_4 \cdot R_{4,t} \quad (4.28)$$

式中,  $R_{4,t}$ —红焦显热, kJ/h。

烧结余热发电机组:

$$E_{7,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,7,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_7 \cdot R_{7,t} \quad (4.29)$$

式中,  $R_{7,t}$ —烧结烟气显热, kJ/h。

转炉饱和蒸汽发电机组:

$$E_{8,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,8,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_8 \cdot R_{8,t} \quad (4.30)$$

式中,  $R_{8,t}$ —转炉烟气显热, kJ/h。

轧钢低温余热发电机组:

$$E_{9,t}^{gen} \cdot h^{ele} + Q_{2,9,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_9 \cdot R_{9,t} \quad (4.31)$$

式中,  $R_{9,t}$ —加热炉烟气显热, kJ/h。

(3) 蒸汽锅炉的热量平衡约束

启动锅炉:

$$Q_{1,5,t} \cdot h_1^{ste} + Q_{2,5,t} \cdot h_2^{ste} = \eta_5 (F_{1,5,t} \cdot h_1^{gas} + F_{2,5,t} \cdot h_2^{gas}) \quad (4.32)$$

130t 锅炉:

$$Q_{1,6,t} \cdot h_1^{ste} + Q_{2,6,t} \cdot h_2^{ste} + Q_{3,6,t} \cdot h_3^{ste} = \eta_6 (F_{1,6,t} \cdot h_1^{gas} + F_{2,6,t} \cdot h_2^{gas}) \quad (4.33)$$

这里,  $\eta_m$  对于发电设备为系统发电效率, 而对于只生产蒸汽的设备则为系统热效率, 出于编程求解方便起见用同一个符号表示。

4.4.2.4 汽轮机组发电与抽汽量关系约束

由 4.4.2.3 所述的设备热量平衡约束尚不足以确定燃煤-燃气发电机组、CCPP 发电机组及 CDQ 发电机组的发电量与抽汽量之间的准确关系, 为此有必要引入各自的汽轮机组发电量与抽汽量之间的数量关系约束。

燃煤-燃气发电机组:

$$E_{1,t}^{gen} + 275 \times Q_{2,1,t} + 175 \times Q_{3,1,t} = E_1^{gen} \cdot a \quad (4.34)$$

燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP):

$$E_{2,t}^{gen} + 275 \times Q_{2,2,t} = E_2^{gen} \cdot b \quad (4.35)$$

干熄焦发电机组 (CDQ):

$$E_{4,t}^{gen} + 275 \times Q_{2,4,t} = E_4^{gen} \cdot c \quad (4.36)$$

其中,  $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq b \leq 1$ ,  $0 \leq c \leq 1$ , 用于确定汽轮机的负荷。

4.4.2.5 煤气缓冲用户的调节范围约束

钢铁企业的煤气缓冲用户受其热负荷的限制, 都有各自的煤气流量调节范围, 煤气用量只能在这个范围内调节, 因此, 各煤气缓冲用户应满足如下约束。

(1) 燃煤-燃气发电机组

高炉煤气 (BFG):

$$F_{1,1}^{\min} \leq F_{1,1,t} \leq F_{1,1}^{\max} \quad (4.37)$$

焦炉煤气 (COG):

$$F_{2,1}^{\min} \leq F_{2,1,t} \leq F_{2,1}^{\max} \quad (4.38)$$

(2) 燃气-蒸汽联合循环发电机组 (CCPP)

高炉煤气 (BFG):

$$F_{1,2}^{\min} \leq F_{1,2,t} \leq F_{1,2}^{\max} \tag{4.39}$$

焦炉煤气 (COG):

$$F_{2,2}^{\min} \leq F_{2,2,t} \leq F_{2,2}^{\max} \tag{4.40}$$

转炉煤气 (LDG):

$$F_{3,2}^{\min} \leq F_{3,2,t} \leq F_{3,2}^{\max} \tag{4.41}$$

(3) 启动锅炉

高炉煤气 (BFG):

$$F_{1,5}^{\min} \leq F_{1,5,t} \leq F_{1,5}^{\max} \tag{4.42}$$

焦炉煤气 (COG):

$$F_{2,5}^{\min} \leq F_{2,5,t} \leq F_{2,5}^{\max} \tag{4.43}$$

(4) 130t 锅炉

高炉煤气 (BFG):

$$F_{1,6}^{\min} \leq F_{1,6,t} \leq F_{1,6}^{\max} \tag{4.44}$$

焦炉煤气 (COG):

$$F_{2,6}^{\min} \leq F_{2,6,t} \leq F_{2,6}^{\max} \tag{4.45}$$

#### 4.4.2.6 变量非负约束

模型中设置的变量都不小于零。

$$E_t^{buy} \geq 0, E_{m,t}^{gen} \geq 0, f_{1,t} \geq 0, F_{1,j1,t} \geq 0, F_{2,j2,t} \geq 0, F_{3,j3,t} \geq 0, Q_{1,w1,t} \geq 0, Q_{2,w2,t} \geq 0,$$

$$Q_{3,w3,t} \geq 0, F_{t,t}^{Gas} \geq 0。$$

#### 4.4.3 参数定义

模型中变量的设置情况列于表 4.2 中。

表 4.2 模型中变量的含义和单位

Tab 4.2 Meanings and units of variables in the model

符号	含义	单位
P	调度周期个数	-
t	调度周期 (t=1, 2, ..., P)	-

m	发电与蒸汽生产设备	-
s	蒸汽生产设备	-
w1	S1 蒸汽生产设备	-
w2	S2 蒸汽生产设备	-
w3	S3 蒸汽生产设备	-
j1	消耗高炉煤气 (BFG) 设备	-
j2	消耗焦炉煤气 (COG) 设备	-
j3	消耗转炉煤气 (LDG) 设备	-
i	煤气种类 (BFG, COG, LDG)	-
k	蒸汽种类 (S1, S2, S3)	-
参数	含义	单位
$C_{buy,t}^{ele}$	t 时间段的外购电价格	元/kW·h
$C_{gen,m}^{ele}$	设备 m 的自发电价格	元/kW·h
$C^{coal}$	外购动力煤价格	元/t
$C_i^{gas}$	i 煤气的价格	元/m <sup>3</sup>
$C_{1,w1}^{ste}$	S1 蒸汽生产成本	元/t
$C_{2,w2}^{ste}$	S2 蒸汽生产成本	元/t
$C_{3,w3}^{ste}$	S3 蒸汽生产成本	元/t
$C_i^{Gas}$	i 煤气的惩罚价格	元/m <sup>3</sup>
$D_t^{ele}$	t 时间段的电力需求量	kW·h
$D_{k,t}^{ste}$	t 时间段的 k 蒸汽需求量	t/h
$B_{i,t}$	t 时间段 i 煤气的富余量	m <sup>3</sup> /h
$E_m$	设备 m 的额定发电量	kW
$A_s$	设备 s 的蒸汽生产能力	t/h
$F_{m,i}^{min}$	设备 m 燃煤气 i 的调节下限	m <sup>3</sup> /h

$F_{m,i}^{\max}$	设备 m 燃煤气 i 的调节上限	$m^3/h$
$h^{ele}$	电的热值	$kJ/kW \cdot h$
$h_k^{ste}$	k 蒸汽的热值	$kJ/t$
$h_i^{gas}$	i 煤气的热值	$kJ/m^3$
$h^{coal}$	动力煤的热值	$kJ/t$
$\eta_m$	设备 m 的系统发电（热）效率	%
$R_{m,t}$	设备 m 在 t 时间段回收余热余能资源的热量值	$kJ/h$
连续变量	含义	单位
$E_t^{buy}$	t 时间段的外购电量	$kW$
$E_{m,t}^{gen}$	设备 m 在 t 时间段的发电量	$kW$
$f_{1,t}$	1#设备在 t 时间段的动力煤耗量	$t/h$
$F_{1,j1,t}$	设备 j1 在 t 时间段的高炉煤气消耗量	$m^3/h$
$F_{2,j2,t}$	设备 j2 在 t 时间段的焦炉煤气消耗量	$m^3/h$
$F_{3,j3,t}$	设备 j3 在 t 时间段的转炉煤气消耗量	$m^3/h$
$Q_{1,w1,t}$	设备 w1 在 t 时间段的 S1 蒸汽产量	$t/h$
$Q_{2,w2,t}$	设备 w2 在 t 时间段的 S2 蒸汽产量	$t/h$
$Q_{3,w3,t}$	设备 w3 在 t 时间段的 S3 蒸汽产量	$t/h$
$F_{i,t}^{Gas}$	t 时间段的 i 煤气放散量	$m^3/h$

## 4.5 模型求解与讨论

鉴于没能顺利获取首钢京唐公司电力生产端的最新配置情况和最新生产状况下的能耗数据等，故本文的分析研究均选用其 2011 年 2 月的统计数据。统计期内，京唐公司的 CCGP 发电机组未投入运行，后文的讨论分析中将其不纳入考虑范畴；烧结、转炉、轧钢余热资源只配备有蒸汽生产设施，还未建设相应的余热蒸汽发电装备，在本文分析

中也仅仅将其作为蒸汽汽源考虑。另外，模型编程及后文分析中，为简便明了起见，将燃煤-燃气发电机组简称为热电，高炉炉顶余压发电机组和干熄焦发电机组分别用其英文名称缩写 TRT 和 CDQ 表示。

利用 ILOG CPLEX 软件对上述优化模型进行编程，将所有与京唐公司实际生产有关的电力、煤气和蒸汽数据，以及各设备相关参数代入优化模型程序中运行求解。模型一共有 38 个约束、29 个变量、79 个非零系数，模型的计算机求解时间在 10 秒钟左右。

下面利用该模型具体计算和讨论三方面的内容：(1) 在给定的正常钢铁生产状况下，分析煤气在缓冲用户之间的最优分配和蒸汽在生产设备之间的最佳生产情况，进而确定合理的电力生产与外购策略；(2) 在现有生产的基础上，讨论峰谷分时电价对电力生产与外购的影响，分别给出峰、平、谷电价下的电力生产与外购方案，同时，给出最优的煤气分配和蒸汽生产情况；(3) 分析只买煤不买电和只买电不买煤两种供电模式的经济性、合理性问题，并分别提出两种模式下的最优煤气分配和蒸汽生产策略。

### 4.5.1 优化结果与分析

在京唐公司正常钢铁生产状况及给定工艺的电力需求、蒸汽需求和煤气刚性需求情况下，模型计算所得某一时段的优化分配方案与现有生产状况的对比情况列于表 4.3。从表中可以看出优化后，夏季系统运行成本为 33.79 万元/h，比优化前节约成本 7.03%，约为 2.56 万元/h；冬季系统运行成本为 32.67 万元/h，比优化前节约成本 10.13%，约为 3.68 万元/h，优化效果比较明显。

表 4.3 模型优化结果对比  
Tab 4.3 Comparison of optimal result of the model

符号	含义	现实值	优化值（夏）	优化值（冬）	单位
$E_{1,t}^{gen}$	热电发电量	349374	405700	330000	kW
$E_{3,t}^{gen}$	TRT 发电量	29463	32987	32987	kW
$E_{4,t}^{gen}$	CDQ 发电量	49500	51411	46846	kW
$E_t^{gen}$	自发电量总计	428337	439398	409833	kW
$E_t^{buy}$	外购电量	145230	93865	163734	kW
$f_{1,t}$	热电外购动力煤量	79	98.18	97.293	t/h

$F_{1,1,t}$	热电燃 BFG	340000	4000000	4000000	$m^3/h$
$F_{1,5,t}$	启动锅炉燃 BFG	53000	52000	52000	$m^3/h$
$F_{1,6,t}$	130t 锅炉燃 BFG	230000	213300	213300	$m^3/h$
$F_{2,1,t}$	热电燃 COG	28000	30309	29593	$m^3/h$
$F_{2,5,t}$	启动锅炉燃 COG	2500	2489.7	2399.2	$m^3/h$
$F_{2,6,t}$	130t 锅炉燃 COG	1900	4181.7	4987.6	$m^3/h$
$F_{1,t}^{Gas}$	BFG 放散量	42300	0	0	$m^3/h$
$F_{2,t}^{Gas}$	COG 放散量	4580	0	0	$m^3/h$
$Q_{1,5,t}$	启动锅炉产 S1	50	11.231	0	t/h
$Q_{1,6,t}$	130t 锅炉产 S1	20	58.769	70	t/h
$Q_{2,1,t}$	热电抽汽 S2	0	0	0	t/h
$Q_{2,4,t}$	CDQ 抽汽 S2	100	31.231	36.924	t/h
$Q_{2,5,t}$	启动锅炉产 S2	20	58.769	70	t/h
$Q_{2,6,t}$	130t 锅炉产 S2	40-50	0	83.076	t/h
$Q_{2,7,t}$	烧结回收 S2	40	80	80	t/h
$Q_{2,8,t}$	转炉回收 S2	100	100	100	t/h
$Q_{2,9,t}$	轧钢回收 S2	60	60	60	t/h
$Q_{3,1,t}$	热电抽汽 S3	0	18.769	113.08	t/h
$Q_{3,6,t}$	130t 锅炉产 S3	220	201.23	106.92	t/h
S	目标值	363481	337926	326658	元/h

(1) 电力生产与外购分析

模型中包括热电、TRT 和 CDQ 三台自发电设备，从表 4.3 的优化结果可以看出，模型给出了京唐公司钢铁生产中的电力合理生产与最佳外购方案。夏季，钢铁生产用电

需求大, 外购电价较高取 0.5 元/kW·h, 优化结果表明, 自发电量增加而外购电量减少。冬季, 钢铁生产用电需求小, S2 蒸汽需求量增加 100t/h, 外购电价较低取 0.35 元/kW·h, 优化结果表明, 为满足增加的蒸汽需求, 热电和 CDQ 发电量均减少, 电力需求缺额由价格较低的外购电来补充。优化模型一方面提供了冬、夏两季的电力合理生产与外购方案, 同时又反映出季节电价对钢铁企业电力生产与外购策略的影响。

### (2) 蒸汽生产分析

优化后, 不论夏季、冬季, 烧结、转炉和轧钢均满负荷生产蒸汽, 其中, 转炉和轧钢回收的 S2 蒸汽量不变, 这是因为供给的余热资源量恒定; 烧结回收的 S2 蒸汽量比优化前增大一倍, 是因为优化前只有一台余热锅炉正常运行, 而优化值是按照烧结所提供的余热资源量来计算得出。启动锅炉和 130t 锅炉在优化后也满负荷生产, 蒸汽生产总量保持额定蒸发量, 只是产汽比例较优化前发生了变化。优化后, CDQ 抽汽量由原来的 100t/h 减少到 30t/h 左右, 实现了少抽汽而多发电; 热电由原来的不抽汽变为抽部分 S3 蒸汽, 夏季抽汽量增加较小, 而冬季因为蒸汽需求量增大热电抽汽量增大较多, 达到了 113.08t/h。总之, 优化后, 蒸汽生产遵循余热资源优先供汽, 其次是产汽效率较高的蒸汽锅炉供汽, 最后仍不满足正常生产的蒸汽需求时才由热电抽汽或 CDQ 抽汽来补充, 符合理论分析与实际生产情况。

### (3) 煤气分配分析

优化后, 冬、夏季热电的 BFG、COG 消耗量均增加, 动力煤耗量也分别增加 18.29t/h 和 19.18t/h; 启动锅炉的 BFG、COG 消耗量均有小幅度的减少; 130t/h 锅炉的 BFG 消耗量减少, 而 COG 消耗量却大幅度的增加。为了满足企业的蒸汽需求, 两种蒸汽锅炉应优先分配煤气以保证其满负荷生产, 剩余的煤气则供给热电使用以维持热电机组发电与产汽的负荷需求, 不足的热量则由外购动力煤来供应, 优化结果与此理论分析原则相吻合, 并实现了煤气的零放散。

综上分析, 优化模型可以实现: 首先, 烧结、转炉、轧钢等低温余热资源优先供应蒸汽; 其次, 蒸汽锅炉优先分配煤气, 以保证蒸汽锅炉能够高负荷产汽, 优先于自备电站供应蒸汽, 至此若还不能满足生产的蒸汽需求, 则由自备电站和 CDQ 抽汽来补充, 从而确保自备电站和 CDQ 尽量多发电; 最后, 剩余的煤气输配给自备电站进行消纳发电或同时外供蒸汽, 如不能满足其运行热负荷则外购动力煤予以补充。即按照如下原则分配煤气、生产电力和蒸汽: 烧结、转炉、轧钢等低温余热资源优先供汽; 接着蒸汽锅炉优先消纳煤气来供应蒸汽, 剩余的煤气由自备电站来消纳, 不满足其负荷的部分外购

动力煤予以补充；其次，若还未满足蒸汽需求，则由 CDQ 抽汽或者自备电站抽汽来补充，否则，CDQ 和自备电站全力发电。这样，反映到电力生产上就是尽量合理分配燃料资源、利用高品质的蒸汽多发电，避免煤气放散损失和蒸汽的降级使用。

### 4.5.2 峰谷分时电价的影响分析

峰谷分时电价 (Time of Use, 缩写为 TOU) 是指根据电网的负荷变化情况，将每天 24 小时划分为高峰、平段、低谷等多个时段，对各时段分别制定不同的电价水平，以鼓励用电客户合理安排用电时间，削峰填谷，提高电力资源的利用效率。本文在给定的钢铁生产基础上，应用该优化模型，分析钢铁企业实施峰谷分时电价后电力生产与外购的变化情况。将钢铁企业一天的用电情况分为高峰、平段和低谷三个时段进行研究，取峰、平、谷电价比为 5:3:1，外购电价分别为 1.0 元/kW·h、0.6 元/kW·h 和 0.2 元/kW·h。峰谷分时电价下的优化结果列于表 4.4。优化方案表明，优化后峰、平、谷时段的系统运行成本分别降低了 7.97%、6.51%和 24.20%。

表 4.4 峰谷分时电价结果对比  
Tab 4.4 Results comparison of TOU

符号	含义	实际值	峰电	平电	谷电	单位
$C_{buy,t}^{ele}$	t 时间段的外购电价格	0.5	1.0	0.6	0.2	元/kW·h
$E_{1,t}^{gen}$	热电发电量	349374	489170	423600	304200	kW
$E_{3,t}^{gen}$	TRT 发电量	29463	32987	32987	32987	kW
$E_{4,t}^{gen}$	CDQ 发电量	49500	51411	51411	51411	kW
$E_t^{gen}$	自发电量总计	428337	573567	507999	388597	kW
$E_t^{buy}$	外购电量	145230	0	65568	184970	kW
$f_{1,t}$	热电外购动力煤量	79	130.22	105.05	59.218	t/h
$F_{1,1,t}$	热电燃 BFG	340000	377070	400000	400000	m <sup>3</sup> /h
$F_{1,5,t}$	启动锅炉燃 BFG	53000	52000	52000	52000	m <sup>3</sup> /h
$F_{1,6,t}$	130t 锅炉燃 BFG	230000	236230	213300	213300	m <sup>3</sup> /h

$F_{2,1,t}$	热电燃 COG	28000	34490	30309	30309	$m^3/h$
$F_{2,5,t}$	启动锅炉燃 COG	2500	2489.7	2489.7	2489.7	$m^3/h$
$F_{2,6,t}$	130t 锅炉燃 COG	1900	0	4181.7	4181.7	$m^3/h$
$F_{1,t}^{Gas}$	BFG 放散量	42300	0	0	0	$m^3/h$
$F_{2,t}^{Gas}$	COG 放散量	4580	0	0	0	$m^3/h$
$Q_{1,5,t}$	启动锅炉产 S1	50	11.231	11.231	11.231	t/h
$Q_{1,6,t}$	130t 锅炉产 S1	20	58.769	58.769	58.769	t/h
$Q_{2,1,t}$	热电抽汽 S2	0	0	0	0	t/h
$Q_{2,4,t}$	CDQ 抽汽 S2	100	31.231	31.231	31.231	t/h
$Q_{2,5,t}$	启动锅炉产 S2	20	58.769	58.769	58.769	t/h
$Q_{2,6,t}$	130t 锅炉产 S2	40-50	0	0	0	t/h
$Q_{2,7,t}$	烧结回收 S2	40	80	80	80	t/h
$Q_{2,8,t}$	转炉回收 S2	100	100	100	100	t/h
$Q_{2,9,t}$	轧钢回收 S2	60	60	60	60	t/h
$Q_{3,1,t}$	热电抽汽 S3	0	18.769	18.769	18.769	t/h
$Q_{3,6,t}$	130t 锅炉产 S3	220	201.23	201.23	201.23	t/h
S	目标值	363481	334504	339821	275517	元/h

在用电高峰时段，外购电价高达 1.0 元/kW·h，而热电、TRT 和 CDQ 的自发电价格均低于 0.4 元/kW·h，显然从经济角度考虑，应尽可能多的使用自发电而少用外购电。优化模型计算结果显示，热电、CDQ 都以较高的负荷发电，外购电量为零，生产中的所有用电需求均由自发电来供应，与理论分析相符。此时，热电使用外购动力煤量增加至 130.22t/h，以维持其在较高负荷运行。热电、启动锅炉和 130t 锅炉三者之间的煤气消耗量也随之发生了一定程度的变化，130t 锅炉只消耗 BFG 而不消耗 COG，其节省出来的 COG 全部由热电来消纳，煤气放散量为零。

在平段电价 0.6 元/kW·h 时，外购电价仍然是自发电价的将近 2 倍，模型优化结果表明，企业用电仍以自发电为主，外购电仅占 11.4%。为实现能源综合成本最低，热电发电量相比高峰时段降低 13.4%，外购电量由高峰时段的 0kW 增加 65568kW，热电外购动力煤量随之下降 25.17t/h，三种富余煤气在热电、启动锅炉和 130t 锅炉三者之间进行了重新分配，煤气仍旧保持零放散。

低谷时段，外购电价较低，与自发电价持平或者更低，从经济用电角度看，企业应该多用外购电而限制自发电的使用与生产，模型所给结果无疑与之符合。从表 4.4 可见，热电保持大约 50%的运行负荷，发电量比实际值下降 12.9%，外购电比例达到 32.2%。燃料分配方面，热电外购动力煤量下降到最低水平 59.218t/h，煤气分配、放散情况与平电时段保持一致，没有变化。

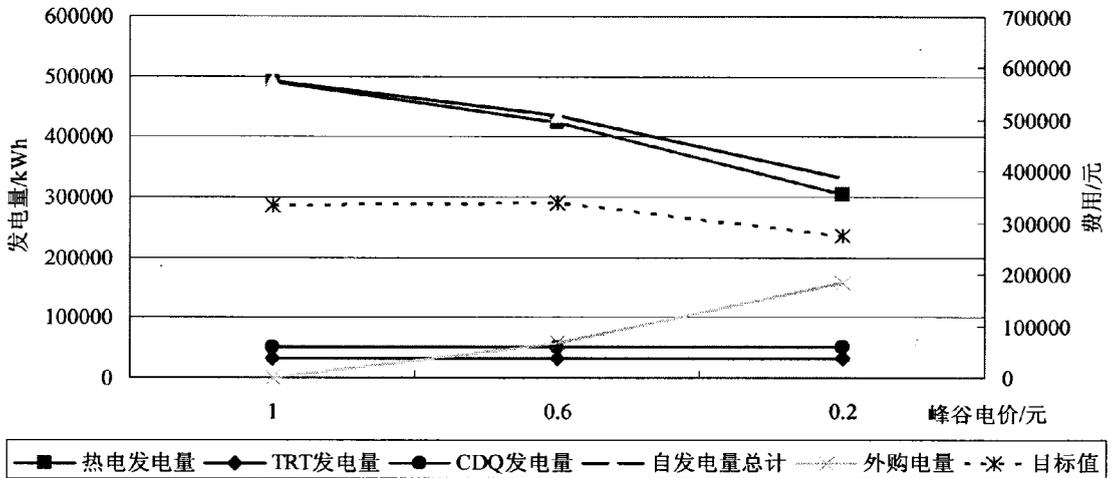


图 4.4 峰谷分时电价对模型的影响  
Fig. 4.4 Influence of TOU to the mode

图 4.4 为峰谷分时电价下，自发电量、外购电量以及系统运行成本的变化情况。从图中可以看出，峰、平、谷三个时段 TRT 和 CDQ 发电量保持不变，不受峰谷分时电价的影响；热电发电量受峰谷分时电价的影响较大，随电价降低而逐渐减小，与之相应的自发电总量亦随之降低，而外购电量则增加。造成前者的原因是，一方面供给 TRT 和 CDQ 的余热余能资源量一定，另一方面分析中采用的蒸汽需求量不变，则峰、平、谷时段各蒸汽生产设备的蒸汽生产量保持不变，从而 CDQ 的发电与抽汽量关系亦保持恒定。除非蒸汽需求量发生某种程度的变化，引起各蒸汽生产设备之间的蒸汽生产情况发生改变，才会导致 CDQ 发电与产汽量的重新分配。所以，峰谷分时电价对钢铁企业电力生产的影响主要体现在自备电站发电方面，而对余热余能发电产生的影响很小，即由

自备电站发电来调节企业自发电量 and 外购电量的比例关系。

综上所述,在峰谷分时电价政策下,钢铁企业在用电峰、平时段,应优先利用生产中的余热余能、副产煤气、甚至外购动力煤,在发电设备能力允许的情况下多发电,最大程度的提高自发电量、减少高价外购电量,甚至实现全部自发、零外购;而在用电低谷时段,在维持自备电站发电设备低负荷正常运行而不停机的前提下,尽量降低自备电站发电量,多外购低价电量,减少发电辅助用煤,从而降低能源成本。

#### 4.5.3 只买煤与只买电模式的讨论

钢铁企业生产中的用电需求量大,单靠回收余热余能发电和回收的副产煤气燃烧发电获得的自发电量远远达不到企业的供电要求,如第一章所述,目前,通过回收余热余能和副产二次能源发电最多只能满足企业 50%的用电需求。这就引出了剩余 50%的电力需求如何供应的问题。钢铁企业一般都是在在外购动力煤供自备电站发电的同时又从当地电网外购部分电量来保持生产的电力需求,但是长期以来在钢铁行业一直存在另外两种争论,即下面要讨论的只买煤不买电和只买电不买煤两种供电模式的合理性和经济性问题。只买煤不买电模式是指钢铁企业只从市场购进动力煤供自备电站发电,结合余热余能及副产二次能源发电,通过完全自发电而不外购电量的形式来满足生产用电需求。只买电不买煤模式是指钢铁企业除余热余能及副产二次能源发电获得的自发电量以外,剩余的部分用电量全部从外部电网购买。下文只买煤不买电和只买电不买煤两种模式分别简称为只买煤和只买电,而且只买煤模式必须是在钢铁企业自备电站的燃煤能力允许的条件下才成立。

##### (1) 优化结果对比

在京唐现有正常生产的基础上,应用该数学模型,可以得出只买煤和只买电两种供电模式的优化结果,这里外购动力煤价格和外购电价格分别为 440 元/t、0.5 元/kW·h,具体对比结果列于表 4.5。从表中可以看出,只买煤模式下,外购动力煤 130.22t/h,企业全部用电需求完全由自发电来满足,热电发电量达 489170kW;只买电模式下,利用余热余能及副产二次能源发电所获得的自发电量为 234337kW,占总用电量的 40.85%,其中,热电发电量为 149930kW,相当于 2×300MW 发电机组中只有一台接近 50%负荷运行,而剩余的 59.15%用电量则全部外购,外购电量为 339230kW。模型还提供了两种供电模式下的最优煤气分配和蒸汽生产情况,列于表 4.5。只买煤和只买电两种供电模式下系统运行成本分别为 33.45 万元/h、32.81 万元/h,与系统的实际运行成本相比较分

别下降 7.97%、9.74%。由此可见，在外购电价和外购动力煤价格分别为 0.5 元/kW·h、440 元/t 时，只买电模式对于钢铁企业来说经济性较好，比只买煤模式可以多节省 1.92% 的运行成本，折合人民币约 0.64 万元/h。值得注意的是，此处系统运行成本中没考虑发电机组的投资建设成本、运行维护成本、环保治理费用等等附加成本，所以只买煤模式的实际运行成本在本文理论计算值的基础上还要多出一部分附加成本，而只买电模式则不存在类似的附加费用。综上所述，钢铁企业选择只买电模式要比选择只买煤模式更合理、更经济。

表 4.5 两种模式优化结果对比  
Tab 4.5 Results comparison of optimal result of the two modes

符号	含义	现实值	只买煤	只买电	单位
S	目标值	363481	334504	328091	元/h
$E_{1,t}^{gen}$	热电发电量	349374	489170	149930	kW
$E_{3,t}^{gen}$	TRT 发电量	29463	32987	32987	kW
$E_{4,t}^{gen}$	CDQ 发电量	49500	51411	51411	kW
$E_t^{gen}$	自发电量总计	428337	573567	234337	kW
$E_t^{buy}$	外购电量	145230	0	339230	kW
$f_{1,t}$	热电外购动力煤量	79	130.22	0	t/h
$F_{1,1,t}$	热电燃 BFG	340000	377070	400000	m <sup>3</sup> /h
$F_{1,5,t}$	启动锅炉燃 BFG	53000	52000	52000	m <sup>3</sup> /h
$F_{1,6,t}$	130t 锅炉燃 BFG	230000	236230	213300	m <sup>3</sup> /h
$F_{2,1,t}$	热电燃 COG	28000	34490	30309	m <sup>3</sup> /h
$F_{2,5,t}$	启动锅炉燃 COG	2500	2489.7	2489.7	m <sup>3</sup> /h
$F_{2,6,t}$	130t 锅炉燃 COG	1900	0	4181.7	m <sup>3</sup> /h
$F_{1,t}^{Gas}$	BFG 放散量	42300	0	0	m <sup>3</sup> /h
$F_{2,t}^{Gas}$	COG 放散量	4580	0	0	m <sup>3</sup> /h

$Q_{1,5,t}$	启动锅炉产 S1	50	11.231	11.231	t/h
$Q_{1,6,t}$	130t 锅炉产 S1	20	58.769	58.769	t/h
$Q_{2,1,t}$	热电抽汽 S2	0	0	0	t/h
$Q_{2,4,t}$	CDQ 抽汽 S2	100	31.231	31.231	t/h
$Q_{2,5,t}$	启动锅炉产 S2	20	58.769	58.769	t/h
$Q_{2,6,t}$	130t 锅炉产 S2	40-50	0	0	t/h
$Q_{2,7,t}$	烧结回收 S2	40	80	80	t/h
$Q_{2,8,t}$	转炉回收 S2	100	100	100	t/h
$Q_{2,9,t}$	轧钢回收 S2	60	60	60	t/h
$Q_{3,1,t}$	热电抽汽 S3	0	18.769	18.769	t/h
$Q_{3,6,t}$	130t 锅炉产 S3	220	201.23	201.23	t/h
S	目标值	363481	334504	328091	元/h

(2) 电价和煤价对模型的影响

上述分析是基于外购电价 0.5 元/kW·h 和外购动力煤价格 440 元/t 时的经济性情况，实际上工业用外购电价和外购动力煤价格一般不是固定的，二者的改变会对两种模式的经济性、合理性产生很大的影响。为此，下面试图分析外购电价和外购动力煤价格对系统运行费用的影响。

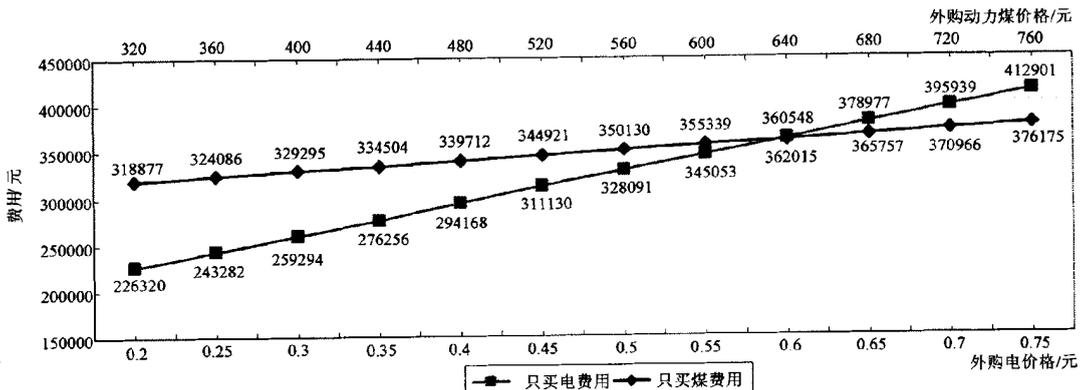


图 4.5 电价和煤价对模型的影响

Fig. 4.5 Influence of electricity price and coal price to the mode

利用本章建立的模型计算不同电价和煤价时两种供电模式的系统运行费用,对得到的两组数据进行分析,找出两种模式下系统运行费用近似相等时的电价值,并以此电价为基准点来进行分析。本文为了更直观的说明问题,在得到电价基准点后,建立了适合本问题的特定坐标系,将电价和煤价变化时的系统运行费用变化趋势反映在同一坐标图中,结果如图 4.5 所示。

外购电价一般在 0.2~1.5 元/kW·h 之间变化,市场动力煤价格随煤质的不同在 320~760 元/t 之间浮动。从图 4.5 中可以看出,当外购电价大于 0.6 元/kW·h 时,只买电模式因成本太高已不再经济合理,而只买煤模式对企业来说经济性较好,且动力煤价格越低经济性越好;当电价小于 0.6 元/kW·h 时,只买电模式的系统运行费用明显低于各动力煤价格下只买煤模式的系统运行成本,且外购电价格越低只买电模式越合理。所以,钢铁企业中只买煤和只买电两种模式的经济性、合理性应视外购电价和动力煤价格的改变而灵活选择、区别对待。

## 4.6 小结

本章首先简要介绍了首钢京唐公司电力生产端和消耗端的基本情况,为后续的电力生产优化建模与分析理清了脉络;其次,按照第 3 章提出的方法,建立了考虑动力煤、煤气消耗和蒸汽生产的京唐公司电力生产优化模型,旨在指导京唐公司合理利用一次能源(动力煤)、副产二次能源(副产煤气)和余热余能资源(余热、余压)进行电力生产,决策企业从当地电网的外购电量,减少企业电力生产系统运行费用;最后,利用 ILOG CPLEX 软件对京唐公司电力生产优化模型进行了编程求解,讨论与分析了如下三方面内容:

(1) 在给定的正常钢铁生产状况下,模型给出了京唐公司合理的电力生产与外购策略,以及煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的最佳生产情况,优化后可节约运行成本 7%~10%,验证了模型的有效性;

(2) 在京唐公司现有生产的基础上,讨论了峰谷分时电价对模型的影响,分别给出了峰、平、谷电价下的电力生产与外购方案,得出峰谷分时电价对钢铁企业电力生产的影响主要体现在自备电站发电方面,而对余热余能发电产生的影响很小;

(3) 通过模型分析了只买煤和只买电两种供电模式的经济性、合理性,分别提出了两种模式下的最优煤气分配和蒸汽生产策略,同时,分析了外购电价和外购动力煤价格变化对两种模式经济性的影响。

此页不缺内容

## 第5章 结论

钢铁企业电力的合理生产与优化,对于企业推进节能减排和降低生产成本有重要意义。本文通过对国内钢铁企业电力生产与消耗的充分调研,剖析了钢铁企业电力生产端所涉及的各种发电技术的工艺原理与特点,并据此提出了钢铁企业的发电原则,针对电力消耗端做了简单的用电特点分析;建立了钢铁企业电力生产优化模型,解决了电力合理生产与优化的问题,提出了最优的电力生产与外购策略,同时给出了最优的富余煤气优化分配和蒸汽生产情况;利用所建模型对京唐公司电力生产与外购进行优化调度,降低了系统运行成本,达到了预期效果。通过这些研究工作,得到的主要结论如下:

(1) 建立了综合考虑钢铁企业的电力、煤气和蒸汽三种能源介质并具有普适性的耦合电力生产优化模型,实现了钢铁企业电力生产与外购、煤气分配和蒸汽生产的联合优化调度。其中,富余煤气的优化分配和蒸汽的生产优化调度是手段,而电力的生产与外购优化调度是最终目的。

(2) 针对首钢京唐公司的实际情况,将提出的普适模型具体化,使用 ILOG 软件建模与求解,得到优化后可节约运行成本 7%~10%,给出了京唐公司电力的合理生产与外购策略、以及煤气在缓冲用户之间的优化分配和蒸汽在生产设备之间的最佳生产情况,并反映出了季节性电价对模型的影响,验证了模型的有效性。

(3) 在京唐公司现有生产的基础上,分析了峰谷分时电价对模型的影响,给出了峰、平、谷电价下的电力生产与外购方案,得出峰谷分时电价对钢铁企业电力生产的影响主要体现在自备电站发电方面,而对余热余能发电产生的影响很小;另外,优化方案表明,优化后峰、平、谷时段的系统运行成本分别降低了 7.97%、6.51%和 24.20%。

(4) 利用所建立的优化模型,针对首钢京唐公司实际,在外购电和动力煤价格分别为 0.5 元/kW·h、440 元/t 时,分析了只买煤和只买电两种供电模式的经济性,得出选择只买电模式要比选择只买煤模式更经济合理,可以多节省 1.92%的运行成本;同时,分析了外购电价和外购动力煤价格变化对两种模式经济性的影响。

此页不缺内容

## 参考文献

1. 王维兴. 钢铁工业能源现状和管理[J], 河北钢铁工业发展循环经济高层论坛, 2006: 56-65.
2. 邱东, 王龙山, 王甲福. 钢铁企业能源综合优化模型的研究[J], Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.
3. 韩丽辉, 苍大强. 钢铁企业能源系统集成[J], 冶金能源, 2008, 27 (5): 6-11.
4. 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, 1: 125-130.
5. S. Ashok, R. Banerjee. Load-management applications for the industrial sector[J], Applied Energy, 2000, 66:105-111.
6. Afua Mohamed, Mohamed Tariq Khan. A review of electrical energy management techniques: supply and consumer side (industries)[J], Journal of Energy in Southern Africa, 2009, 20(3):14-21.
7. 何培育. 钢铁企业用电合理化研究[J], 电气时代, 2009: 62-63.
8. Goutam Dutta, Gopal P. Sinha, P. N. Roy. A Linear Programming Model for Distribution of Electrical Energy in a Steel Plant[J], International Transactions in Operational Research, 1994, 1(1): 17-29.
9. S. Ashok. Peak-load management in steel plants[J], Applied Energy, 2006, 83: 413-424.
10. B. Ostadi, D. Moazzami, K. Rezaie. A non-linear programming model for optimization of the electrical energy consumption in typical factory[J], Applied Mathematics and Computation, 2007, 187: 944-950.
11. 郑静, 杜秀华, 史新祈. 大型钢铁企业电力负荷的短期预测研究[J], 电力需求侧管理, 2004, 6 (1): 18-21.
12. 林海英, 李建荣, 宣菊琴, 等. 钢铁行业负荷特性及需求侧管理潜力分析[J], 华东电力, 2005, 33 (11): 53-57.
13. 周佃民, 李凯, 李关定, 等. 钢铁企业负荷管理系统设计与实现[J], 电力需求侧管理, 2008, 10 (1): 28-30.
14. 周佃民. 钢铁企业发用电经济运行体系研究[D], 上海: 上海交通大学, 2007.
15. 盛刚, 孙彦广, 梁青艳. 钢铁企业电力负荷分析与预测模型的探讨[J], 冶金自动化,

2011: 676-679.

16. 李关定. 宝钢电力系统负荷预测[D], 沈阳: 东北大学, 2010.
17. 丁毅, 罗武龙, 史德明, 等. 冶金热电发电模式探讨[J], 冶金能源, 2010, 29 (2): 6-11.
18. 唐咸喜. 中小型钢铁联合企业区域余热发电技术的工程应用[J], 机电信息, 2011.
19. 朱能闯. 钢铁企业低压饱和蒸汽发电技术应用[J], 中国水运, 2008, 8 (7): 121-122.
20. 周玉磊. 低压饱和蒸汽发电技术在冶金企业的应用[J], 冶金动力, 2009.
21. 范书昌. 钢铁企业余热余能回收及发电技术的探讨[J], 莱钢科技, 2009.
22. 苏震, 申江. 钢铁企业余热余能转换或替代电能的途径[J], 电力需求侧管理, 2008.
23. 李冰. 余热发电技术应用及前景[J], 中国钢铁业, 2009.
24. 孙浩. 钢铁联合企业余热余能发电自供电比例研究[J], 中国钢铁, 2005.
25. 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 (1): 99-103.
26. Dae Sung Lee, Dae Ryook Yang, In-Beum Lee, Kun Soo Chang. Development of Models for the Prediction of Electric Power Supply-Demand and the Optimal Operation of Power Plants at Iron and Steel Works[J], KACC, 1992, 10:106-111.
27. 张琦, 提威, 杜涛, 等. 钢铁企业富余煤气-蒸汽-电力耦合模型及其应用[J], 化工学报, 2011, 62 (3): 753-758.
28. 黄银祥. 钢铁企业电力系统能源仿真模型研究[D], 北京: 冶金自动化研究设计院, 2010.
29. 杨力俊, 谭忠富, 党育军. 平衡电网与自备电厂之间经济利益的策略研究[J], 华北电力大学学报, 2005, 32 (1): 72-76.
30. 苏震. 钢铁企业节电途径探析[J], 河南冶金, 2009, 17 (2): 22-24.
31. 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(2): 32-35.
32. 刘旭, 孙明庆. 钢铁厂燃用低热值煤气燃气-蒸汽联合循环发电装置探讨[J], 钢铁技术, 2003, 3: 37-46.
33. 王绍文, 杨景玲, 贾勃. 冶金工业节能与余热利用技术指南[M], 北京: 冶金工业出版社, 2010.
34. 张怀东, 李志全, 贾文君, 等. 邯钢 CCGP 发电技术的选择与应用[J], 能源研究与利用, 2006, 6: 38-42.

35. 杨玉军. 我国热电联产的发展趋势[J], 中国能源, 2004, 26(10): 31-33.
36. 张昆华. 昆钢干熄焦工艺的运行效益分析[J], 燃料与化工, 2011, 42 (3): 21-25.
37. 徐延刚. 本钢焦炉干熄焦装置节能环保效果分析[J], 冶金能源, 2010, 29 (1): 17-20.
38. 刘振均, 李海波. 高炉提高 TRT 发电实绩[J], 钢铁, 2005, 8 (40): 11-15.
39. 韩渝京, 曹勇杰. 首钢 3 号高炉余压发电设计特点与生产实践[J], 冶金动力, 2007, 3: 47-50.
40. 路晓雯. 烧结合余热发电系统火用分析及蒸汽系统优化[D], 唐山: 河北理工大学, 2010.
41. 徐树伟, 彭益成, 刘志斌, 等. 钢铁企业烧结合余热发电技术发展探讨[J], 工业锅炉, 2010, 5: 45-51.
42. 黄伟, 刘冬梅. 济钢 400m<sup>2</sup> 烧结合机冷却系统余热发电[J], 上冻冶金, 2011, 33 (3): 46-49.
43. 王毅, 刘旭. 钢铁厂饱和蒸汽发电系统及设备研究[J], 钢铁技术, 2006, 2: 52-55.
44. 陈道海, 裴永红. 转炉汽化饱和蒸汽发电技术的研究与应用[J], 冶金动力, 2010, 4: 41-45.
45. 曹先常. 轧钢低品位余热资源综合梯级利用研究[J], 宝钢技术, 2011: 15-20.
46. 钱洪, 钱兴善, 曹春华. 轧钢板车间加热炉低品位烟气有机郎肯循环余热发电系统 [P], 中国: CN 202001071 U, 2011.10.05.
47. 赵春禾, 周昌勇. 轧钢加热炉低品质余热蒸汽发电实践[J], 江苏冶金, 2008, 36 (2): 56-57.
48. 耿春景, 李汛, 朱强. 高炉冲渣水发电项目的可行性研究[J], 节能技术, 2005, 23 (3): 238-232.
49. 贾希存, 陈素君. 高炉冲渣余热回收的可行性分析[J], 山东冶金, 2010, 32 (2): 17-20.
50. 程云, 李菊香. 高炉冲渣水余热回收的可行性研究[J], 低温与超导, 2009, 38 (3): 78-81.
51. 孙浩, 涂序彦. 钢铁厂电力系统的节能型重构研究[J], 节能, 2006: 13-16.
52. 陈光, 陆钟武, 蔡九菊, 等. 宝钢能源优化模型的研究[J], 冶金能源, 2003, 22 (1): 5-9.
53. 刘亚平, 邹公平. 炼钢电炉余热发电实践[J], 工业锅炉, 2011: 43-47.
54. 孙浩. 钢铁厂能源转化功能及电能系统优化分析[J], 中国钢铁业, 2009, 9: 19-22.

55. 田敬龙. 十大钢电力消耗分析及节点对策[J], 冶金能源, 2008, 27 (3): 3-7.
56. 李峰. 电弧炉炼钢技术的国内外现状及发展趋势[J], 宽厚板, 2003, (12): 128.
57. 温桂桂. 电炉炼钢电耗分析和节电潜力[J], 江西能源, 1998, 1: 40-41.
58. 李士奇, 张汉东, 陈煜, 等. 电弧炉炼钢流程的能量状况[J]. 钢铁, 2006, 41 (8): 24-28.
59. S. KOHLE. Recent improvements in modeling energy consumption of electric arc furnaces[J], Proc. 7th Europe Electric Steelmaking Conf. , 2002:1305-1314.
60. 祝方义. 不锈钢电炉冶炼电耗技术分析[J], 宝钢技术, 2005, 4: 9-13.
61. 曹阳, 杨洁, 刘焱, 等. 热轧吨钢电耗影响因素的通径分析和多元回归[J], 冶金能源, 2010, 29 (1): 6-9.
62. 曹阳, 杨洁, 张旭. 主成分分析法在热轧吨钢电耗回归预测模型中的应用[J], 能源技术, 2010, 31 (1): 1-4.
63. 刘焱, 曹阳, 周慧鑫, 等. 轧钢生产均衡度与生产率对轧钢电耗的影响分析[J], 冶金自动化, 2010, S2: 156-159.
64. Thomas F Edgar. Optimization of Chemical Processes[M], New York: McGraw-Hill, c1988. 2001, 78-80.

## 致 谢

值此论文完成之际，首先感谢我的导师杜涛教授。杜老师治学态度严谨，对工作一丝不苟，学识渊博，思维敏捷，分析问题眼光独到且富于远见。杜老师的学识和人品，让我深深地钦佩和敬仰。在整个研究生学习阶段，不论在学习和生活各方面都得到了导师无微不至的关怀和照顾。在此，谨向导师表示衷心的感谢和深深的敬意！

特别感谢张琦老师。张老师平易近人、诲人不倦，工作态度细致认真，无论在学术研究、实际工作，还是在为人处世中，都给我深深的教益和启迪。张老师在我的学习和生活中，悉心指点，关怀备至，在论文的整个撰写过程中给予了我良多指导，提出了许多有价值的意见，指引我顺利的完成了论文！

论文的完成也离不开实验室其他老师的指导与帮助，感谢蔡老师、董老师给予我的指导，他们在实验室集体汇报中为我提出当时存在的问题和今后改进的思路，为我的学习指点迷津！

感谢本实验室的孙文强等博士生和杨鑫秋、姬立胜、杨见博、石天、杨凡等全体同学，在两年的研究生学习生活中，他们给予了我诸多帮助。

感谢热能 2010 级硕士 8 班（含工程热物理、热能工程、低温与制冷工程 3 个专业）全体同学、国家环境保护生态工业重点实验室全体研究生陪伴我共同渡过了这段美好的岁月，在此一并致谢！

感谢我的父母和亲友，他们一直以来关爱和支持着我，为我顺利的完成学业创造良好的环境，付出了许多心血！

刘向斌

2012 年 6 月

此页不缺内容

## 攻读学位期间发表论文情况

1. Du Tao, Liu Xiangbin, Pang Xinglu. Byproduct Gas Optimal Distribution Model and Its Application for Iron and Steel Enterprises[A]. Applied Mechanics and Materials Vols. 58-60, 2011: 816-821.