

Research on Optimal Scheduling of
Byproduct Gas System in Iron and Steel Industry

钢铁企业副产煤系统 优化调度研究

◆ 孔海宁 / 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

钢铁企业副产煤气系统 优化调度研究

孔海宁 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

钢铁企业副产煤气系统优化调度研究/孔海宁著.

—北京: 经济科学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5141 - 7147 - 1

I. ①钢… II. ①孔… III. ①钢铁企业 - 副产品 - 煤气 - 生产调度 - 系统优化 - 研究 IV. ①TF089

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 179159 号

责任编辑: 刘 莎

责任校对: 隗立娜

责任印制: 邱 天

钢铁企业副产煤气系统优化调度研究

孔海宁 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京汉德鼎印刷有限公司印刷

三河市华玉装订厂装订

710 × 1000 16 开 12 印张 210000 字

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 7147 - 1 定价: 48.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn)

前 言

钢铁行业是我国支柱型产业，近年来在国家政策的拉动下发生了飞速发展。同时，它也是能源密集型产业，消耗的能源占全国能源总消耗量的 15%。因此，如何提高能源利用效率、降低能源浪费成为钢铁企业一个亟待解决的问题。其中副产煤气的综合利用是节能降耗的关键突破口。

副产煤气是钢铁企业在生产过程中产生的重要二次能源，占钢铁企业总能源消耗的 30%，其优化调度对于整个企业节能降耗发挥重大作用。但是，目前关于副产煤气优化调度的研究还处于起步阶段，因此对该课题的研究意义更加重大。

在此背景下，本书以钢铁企业副产煤气系统为研究对象，对其优化调度建模进行了深入研究，并将建立的优化模型应用于我国 K 钢铁企业，达到了降低钢铁企业能源消耗、减少生产成本的目的。主要研究成果包括以下几方面内容：

(1) 在对钢铁企业副产煤气系统进行深入、详细描述分析的基础上，提出了适用于钢铁企业副产煤气系统的“三系统两层面”框架。“三系统”是指根据副产煤气的工艺流程，把整个副产煤气系统划分成三个相互关联的子系统，分别定义为存储系统、产消系统和转化系统。其中产消系统中

的用户根据它们消耗煤气的不同特点分为两大类。第一类是只消耗某一种煤气的用户，这类用户的煤气消耗量无法人为进行优化调度；第二类是可以混烧两种以上煤气或者其他燃料的用户，这类用户和存储系统、转化系统的用户构成的集成系统是本研究优化调度的对象。“两层面”是指在对系统建立优化调度模型的目标函数中，要综合考虑显性成本和隐性成本两方面因素。

(2) 针对三种副产煤气的发生机理复杂、影响因素众多的特点，选取 ARMA 时间序列模型对三种煤气的产生量进行建模预测，通过算例分析验证，得到了较高的预测精度。用此模型的预测结果作为优化系统的输入值。

(3) 对产消系统中只消耗某一种煤气用户的消耗量进行建模预测。根据消耗用户的不同特点将其分为四类。分别采用时间序列方法、基于 Levenberg - Marquardt (LM) 算法的 BP 神经网络方法、平滑指数法和线性回归法对其消耗的煤气量进行建模预测，通过算例分析验证，得到了较高的预测精度。用此模型的预测结果作为优化系统的输出值。

(4) 建立了钢铁企业副产煤气系统动态优化调度模型。选取副产煤气系统生产成本最小化为目标函数，充分考虑影响副产煤气系统生产成本的所有因素，包括外购燃料成本、副产煤气的放散成本、副产煤气柜煤气量波动成本以及锅炉操作成本等；以物料守恒、能量守恒、设备操作要求等作为约束条件；采用混合整数线性规划模型建模，对副产煤气系统进行优化调度。实证分析中，将建立的优化模型应用我国 K 钢铁企业，节省 30% 的生产成本。

(5) 将环境成本引入到副产煤气系统优化调度模型中，

建立了基于环境成本的钢铁企业副产煤气系统绿色优化调度模型。模型在考虑生产成本的基础上，综合考虑了副产煤气放散、燃烧排放和外购燃料燃烧排放所带来的环境成本。实证分析中，将基于环境成本的绿色优化调度模型与第 6 章优化模型对比，总成本节约了 1.3%。

最后，对本书的研究所取得的成果进行了总结，并对本领域未来的研究方向进行了展望。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.1.1 我国能源消耗发展	1
1.1.2 钢铁企业能源消耗发展	2
1.1.3 钢铁企业节能降耗途径	3
1.1.4 副产煤气系统研究意义	4
1.2 研究现状及问题提出	5
1.3 研究目的、思路和方法	6
1.3.1 研究目的和思路	6
1.3.2 研究方法	7
1.4 研究内容和技术路线	8
1.4.1 研究内容	8
1.4.2 技术路线	10
第2章 文献综述	12
2.1 引言	12
2.2 钢铁企业副产煤气利用技术创新	12
2.2.1 高炉煤气利用技术创新	13
2.2.2 焦炉煤气利用技术创新	13

2.2.3 转炉煤气利用技术创新	15
2.3 钢铁企业副产煤气能源中心的建立	15
2.4 钢铁企业副产煤气系统优化调度的研究	17
2.4.1 副产煤气产生量、消耗量预测研究	18
2.4.2 副产煤气优化调度研究	22
2.5 我国大型钢铁企业副产煤气利用和优化调度现状	28
第3章 钢铁企业副产煤气系统分析	31
3.1 引言	31
3.2 钢铁企业生产工艺介绍	32
3.3 副产煤气系统分析	36
3.4 副产煤气系统“三系统两层面”框架的构建	39
3.4.1 “三系统”的构建	39
3.4.2 “两层面”的构建	41
3.4.3 “三系统两层面”框架的构建	42
3.5 本章小结	44
第4章 钢铁企业副产煤气产生量的预测模型	45
4.1 引言	45
4.2 离群数据挖掘	46
4.2.1 数据挖掘	47
4.2.2 离群数据挖掘的概念	48
4.2.3 离群数据挖掘的一般方法	48
4.3 常用的预测方法介绍	49
4.3.1 直观预测法	49
4.3.2 回归分析法	49
4.3.3 灰色系统预测法	50
4.3.4 指数平滑法	51

4.3.5 多层递阶回归分析法	51
4.3.6 时间序列法	52
4.3.7 神经网络法	52
4.3.8 模糊理论法	53
4.3.9 小波分析法	53
4.3.10 预测方法小结	54
4.4 煤气发生影响因素及模型选择	54
4.4.1 焦炉煤气的发生机理及影响因素	54
4.4.2 高炉煤气的发生机理及影响因素	56
4.4.3 转炉煤气的发生机理及影响因素	57
4.4.4 预测方法选择	58
4.5 ARMA 时间序列预测方法	59
4.5.1 ARMA 基本模型概述	59
4.5.2 ARMA 时间序列预测步骤	61
4.5.3 ARMA 时间序列建模小结	66
4.6 实证分析	66
4.6.1 焦炉煤气产生量预测模型的建立	67
4.6.2 高炉煤气产生量预测模型的建立	71
4.6.3 转炉煤气产生量预测模型的建立	76
4.7 本章小结	80
第5章 钢铁企业副产煤气消耗量的预测模型	81
5.1 引言	81
5.2 副产煤气消耗的预测模型的建立	81
5.2.1 副产煤气消耗用户分类	81
5.2.2 第一类消耗用户建模	82
5.2.3 第二类消耗用户建模	84
5.2.4 第三类消耗用户建模	87

5.2.5 第四类消耗用户建模	97
5.3 实证分析	98
5.3.1 烧结炉消耗量的预测	98
5.3.2 焦炉消耗量的预测	100
5.3.3 高炉热风炉消耗量的预测	102
5.3.4 居民等其他小型零散用户焦炉煤气 用量的预测	104
5.4 本章小结	106
第6章 钢铁企业副产煤气多周期动态优化调度建模	107
6.1 引言	107
6.2 有关调度的预备知识	107
6.2.1 调度算法	108
6.2.2 调度算法的比较	115
6.3 混合整数线性规划 (MILP)	116
6.4 钢铁企业副产煤气系统优化调度模型的建立	120
6.4.1 模型的假设	120
6.4.2 优化目标的选取及影响因素	121
6.4.3 目标函数的确定	122
6.4.4 约束条件	125
6.4.5 建模小结	132
6.5 实证分析	132
6.6 本章小结	141
第7章 基于环境成本的副产煤气系统绿色优化调度建模	142
7.1 引言	142
7.2 环境成本预备知识	143
7.3 钢铁企业副产煤气系统环境成本	144

7.3.1 副产煤气系统环境成本的构成	144
7.3.2 副产煤气系统环境成本的计算	144
7.4 基于环境成本副产煤气系统优化模型的建立	146
7.4.1 目标函数的建立	146
7.4.2 约束条件	149
7.5 实证分析	150
7.6 本章小结	152
第8章 结论.....	153
8.1 研究总结	153
8.2 研究展望	155
参考文献.....	158

第 1 章

绪 论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 我国能源消耗发展

我国自从 1979 年实施改革开放政策以来，国民经济得到了快速发展，国内生产总值（GDP）年平均增长率接近 10%。2010 年我国 GDP 达到 39.8 万亿元，已经超越日本，成为世界第二经济大国。伴随着经济的飞速发展，我国能源消耗也逐年增加，2014 年成为世界第一大能源消耗国^[1]。图 1-1 是我国 1980~2013 年一次能源消耗总量图。从中可以发现，1980~2013 年我国能源消耗量从 6.0 亿吨标准煤增加到 38.5 亿吨标准煤。尤其是从 2002 年以来，能源消耗增加十分明显。同时，我国的百万美元 GDP 能耗比世界平均水平高很多，和世界先进国家差距非常明显。2012 年，我国单位 GDP 能耗是世界平均水平的 2.5 倍、美国的 3.3 倍、日本的 7 倍，同时高于巴西、墨西哥等发展中国家^[2]。通过以上数据可以看出，能源消耗量巨大是限制我国经济发展的最大瓶颈。节能降耗，实现可持续发展是我国经

济发展的必由之路。

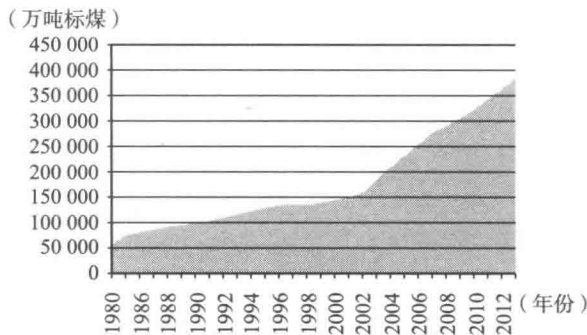


图 1-1 中国一次能源消费总量 (1980 ~ 2013 年)

资料来源：国家统计局。

1.1.2 钢铁企业能源消耗发展

钢铁工业是我国最重要的基础工业，是国民经济的支柱产业之一，近几年在需求拉动和国家政策支持下得到了快速发展。我国粗钢产量连续数年位居世界第一，2014 年已达 8.227 亿吨。与此同时，钢铁产业一直是我国能源消耗大户。近年来，虽然通过结构调整和技术进步，在节能降耗、减少污染物排放方面取得了显著成效，但由于年钢产量持续高速增长，资源消耗和污染物排放总量仍呈增长趋势。数据显示，钢铁产业消耗的能源占全国工业部门能源消费总量的 20%，占全国能源总消耗量的 15%。2013 年我国重点钢铁企业能耗总量为 2.86 亿吨标准煤，比 2009 年增长约 20%^[1,2]。与具有国际领先水平的日本钢铁企业相比，我国吨钢平均能耗高出 15%；在吨钢生产成本中能源成本所占比例方面，我国企业的平均水平在 30% 左右，部分企业甚至超过了 40%，而日本大型钢铁企业的比例在 14% ~ 16%^[3,4]。由此可以看出我国钢铁企业节能工作已是处于十分严峻的态势。针对我国钢铁工业普遍存在

平均能源效率低、各企业能源消耗水平发展不平衡、能源浪费严重等状况。我国冶金部向全国钢铁企业下发了能源调查报告,把钢铁企业节能降耗放在了重要战略位置。如何提高能源利用效率、节约资源已经成为发展钢铁工业的重要任务之一。其不仅有利于降低生产成本,提高企业市场竞争力,增加企业经济效益,也有利于环境保护和可持续发展。

1.1.3 钢铁企业节能降耗途径

目前我国各大钢铁企业对于节能降耗十分重视,积极采取措施来解决能耗过大的问题,归纳起来主要包括三个方面:

1. 提高现有设备和工艺技术水平 (例如提高设备热效率)
2. 采用各种新技术提高能源的二次利用 (例如余热余压发电)
3. 加强企业能源管理水平,建立自动化能源优化调度系统 (例如建立副产煤气优化调度系统)

目前来看,随着我国钢铁企业科学技术水平不断进步,设备不断改造升级,前两个方面与世界先进水平相差不大。而真正与世界先进国家的差距主要在能源管理水平。虽然我国各大钢铁企业均设有能源中心,但更多的职能是进行能源结算。目前我国各大钢铁企业还没有完善的能源优化调度体系,能源调度还是采用人工凭经验调度,存在严重的滞后性,导致大量能源浪费。其中最为明显就是副产煤气系统。

副产煤气是钢铁企业在生产钢铁产品的同时产生的重要二次能源,占企业总能源消耗的30%左右。钢铁企业生产所用煤炭的热值有34%会转换为副产煤气。由于副产煤气产生和消耗的连续性和不规律性,如果没有好的优化调度方法,就会造成副产煤气的放散和不足。我国目前钢铁企业副产煤气的平均放散率达到5.76%,而世界

先进国家副产煤气平均放散率只有 1%，差距十分明显。仅这一项差距就使得我国钢铁吨钢能耗增加 5%^[5]。由此看来，对副产煤气系统的研究对于整个钢铁企业节能降耗至关重要，也是目前的研究热点。因此，本书将会对钢铁企业副产煤气系统进行研究，建立副产煤气优化调度模型。

1.1.4 副产煤气系统研究意义

因为钢铁企业副产煤气自身产生、消耗不稳定的特点，使得对钢铁企业副产煤气的动态优化调度模型的研究变得更加困难。毋庸置疑，运用数学模型对钢铁厂副产煤气系统进行优化，对发展钢铁生产、降低能源消耗和产品成本是一种强有力的手段和途径，具有重大的理论意义和现实意义。

本研究的理论意义：由于国内外对钢铁企业副产煤气的动态优化调度还处于起步阶段，目前还没有成形的理论基础。本书首先以副产煤气系统为研究对象，站在整体的视角对其进行系统分析，采用不同的数学和统计学方法对副产煤气的产生、存储、消耗等各个过程进行分析，达到集成优化策略，建立副产煤气系统优化调度模型，为钢铁企业副产煤气系统优化调度研究建立了坚实的理论基础。

本研究的现实意义：主要体现在经济效益和社会效益两方面。本书研究是以天津市科技支撑计划重大项目为研究题目。所建立的钢铁企业副产煤气优化调度模型在我国 K 钢铁企业加以应用，可以节省年生产成本 4 000 余万元。我国目前有各类钢铁企业 3 000 家，其中重点钢铁企业 112 家，除少数企业信息化比较超前以外，其他企业都可能成为潜在用户，市场规模在 100 家左右，每年可为国家节省大笔资金。因此，该项目所开发的钢铁企业副产煤气集中优化控制调度系统产业化前景良好，此为经济效益。而在国家大力提倡绿色钢铁，节能降耗，实现可持续发展的今天，副产煤气系统优化调度研究可以提

高副产煤气利用率和减少副产煤气放散,实现企业节能减排,将会带来巨大的社会效益。

1.2 研究现状及问题提出

钢铁企业副产煤气系统是工艺复杂的系统,对其进行优化调度比较困难。目前来说,国内外对钢铁企业副产煤气系统研究还处于初级阶段,研究成果会在本书第2章文献综述中进行详细介绍。但总体来看,前人的研究仍存在问题,可以归纳如下:

(1) 关于优化对象范围的选取不够明确。很多研究往往只针对副产煤气的部分系统进行研究,比如在副产煤气柜和锅炉中的煤气分配,而没有考虑副产煤气在钢铁生产过程中作为燃料的分配情况。也就是只实现了煤气的局部优化,没有实现在副产煤气在整个系统的优化调度。

(2) 对于待优化的煤气系统,有自己的输入(煤气的发生量)和输出(煤气的消耗量)部分。在前人研究中,这部分是假设为已知的。这与实际的生产过程是不相符的。这部分数据不仅是未知的,而且会根据生产过程有很大的波动。如果假设为已知,就不能对煤气系统进行实时的优化。

(3) 如果将副产煤气的发生量和消耗量的预测作为优化的基础和前提,随之而来的问题就是用什么方法对其进行预测。前人已经有单独针对煤气的发生和消耗进行预测的研究。但仅仅是针对其中某种煤气或者某个消耗用户,还没有形成通用的体系。这是由于副产煤气产生机理复杂,影响副产煤气产生量的因素众多,因此,对副产煤气产生量进行准确的预测十分困难。同时,副产煤气的消耗用户众多,而每个用户对副产煤气的消耗的特点也不尽相同,因此就很难对所有的副产煤气消耗用户进行消耗量的预测。

(4) 在建立副产煤气优化调度模型时,很多学者只考虑了一些影响优化结果的显性成本,而忽视了隐性成本。事实上,隐性成本也会对系统的优化调度结果产生较大影响,是研究中需要考虑的。

(5) 钢铁企业的能耗巨大,对环境污染极其严重。目前国家在大力提倡可持续发展的形势下,对废物排放也开始采取了相应的惩罚措施加以治理。前人的优化研究往往是出于生产经济性的角度去考虑,而忽视了环境污染问题带来的成本。

本书将针对前人研究中存在的问题展开研究。

1.3 研究目的、思路和方法

1.3.1 研究目的和思路

针对上述钢铁企业副产煤气系统优化调度研究存在的问题,本书拟定如下研究目标:以钢铁企业副产煤气整体系统为研究对象,针对我国钢铁企业副产煤气调度存在的问题,在深入研究我国钢铁企业副产煤气能耗现状的基础上,充分学习借鉴国内外现有本领域和相关领域的科研成果,通过工厂实地调研、理论研究和实证分析,综合应用运筹学、工业工程、系统分析和统计学的相关理论知识,就副产煤气的产生、消耗的预测和优化调度展开系统研究,构建我国钢铁企业副产煤气整体系统的供需预测模型和动态优化调度模型,实现副产煤气整体系统的优化调度,降低我国大、中、小型钢铁企业的副产煤气的排放,以达到降低钢铁企业能源消耗和生产成本的目的。

基于以上研究目标,本书的主要研究思路如下: