

高炉热风炉燃烧 CBR智能控制技术

孙进生 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高炉热风炉燃烧 CBR 智能控制技术

孙进生 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

内 容 提 要

本书从实用的角度出发,详细介绍了热风炉燃烧 CBR (基于实例的推理)智能控制策略的具体实现方法,包括控制系统的组成, CBRTC (实例推理实时控制器) 的结构、实例库的构造和知识表示、初始实例的提取和实例的检索匹配方法,热风炉送风温度和持续时间的 CBR 预测方法及以此为基础实现的热风炉系统的可变周期运行等内容。

本书可供从事高炉热风炉自动化系统研究、设计和生产维护等工作的科技人员使用,也可供大专院校的自动化、计算机应用和相关工艺专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高炉热风炉燃烧 CBR 智能控制技术/孙进生著.

—北京:冶金工业出版社,2006.10

ISBN 7-5024-4090-9

I. 高… II. 孙… III. 高炉—热风炉—燃烧控制:
智能控制 IV. TF325.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 101395 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 杨 敏 宋 良 美术编辑 李心

责任校对 杨 力 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006 年 10 月第 1 版,2006 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5 印张; 163 千字; 151 页; 1—2000 册

18.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

热风炉是高炉炼铁生产中的重要设备,承担着将煤气燃烧所产生的热量传递到高炉鼓风的关键作用。在高炉炼铁的生产工艺中,热风炉的燃烧控制是一个相当重要的部分,既要保证热风炉的出口热风温度达到工艺要求的数值,又要保证煤气的充分燃烧和热量的有效利用。

目前国内绝大多数高炉热风炉虽然都已经配置了比较完善的基础自动化设备,但除了个别从国外引进的大型高炉外,真正实用和可靠的热风炉燃烧过程的自动控制还非常罕见,尤其是在国内占较大比例的中小型高炉,其热风炉的燃烧控制几乎都是手动调节。由于受到较多人为因素的影响,热风炉的燃烧状态时好时坏,导致热风炉提供给高炉的送风温度较低,更谈不上达到节省能源和优化热风炉操作,进而更好地满足高炉生产需要的目的。因此,根据国内应用的实际情况,研制和开发适合国内热风炉系统现状、低成本、高可靠的热风炉燃烧自动控制系统,采用先进的控制策略来改善热风炉的送风效果,具有重要的现实意义。

从另一角度看,热风炉虽是一个具有本质非线性、大滞后、慢时变特性的复杂被控对象,而且随着燃烧工作环境的变化,其特性也在不断发生改变,要准确地掌握和控制热风炉的运行状态是比较困难的。但是,很多熟练的操作工却往往能根据自己长期积累的经验,通过及时、准确的调节操作,使热风炉达到令人满意的燃烧效果。可以说,在热风炉手动操作过程中,积累和记录下来的大量历史数据,以及这些数据中所蕴含的客观控制规律,为实现基于CBR方法的热风炉燃烧智能控制策略打下了坚实的基础。

基于实例的推理(case-based reasoning,简称CBR)是基于过去求解类似问题的经验获得当前问题求解结果的一种推理模式。

CBR 是对人类认知过程的仿生。与其他方法相比, CBR 能够处理不适于形式化为规则的知识, 更接近人类决策的实际过程。CBR 是一种在现实生活中被人们大量采用的思维和推理方法, 因此它的应用范围非常广泛, 目前已经有成百上千的 CBR 系统在实际应用领域中发挥着重要的作用。但迄今为止, CBR 的应用领域绝大部分都是针对非实时的对象实现的。

作者从分析热风炉燃烧历史数据的角度入手, 以在国内占较大比例的中小型高炉为背景, 系统地采用了 CBR 方法来解决热风炉燃烧的实时控制问题, 取得了较好的实际应用效果。

基于 CBR 方法的热风炉燃烧智能控制技术充分利用了现有的基础自动化设备, 控制系统的结构非常简单, 特别是 CBR 智能控制策略的实现与其他控制方法相比较, 具有简单、可靠和实用的特点, 而且由于它的实施过程不但不会影响到工厂的正常生产, 还可以通过这个过程为工厂积累和保存丰富的操作经验, 因此比较容易得到工厂管理者的认可和支持, 现场用户对它的可接受程度也比较高。另外, 这种基于 CBR 的智能控制方法还可以推广应用到其他流程工业的复杂控制对象上。

本书从实用的角度出发, 详细介绍了热风炉燃烧 CBR 智能控制策略的具体实现方法, 包括控制系统的组成, CBRTC 实时控制器的结构、实例库的构造和知识表示、初始实例的提取和实例的检索匹配方法, 热风炉送风温度和持续时间的 CBR 预测方法和以此为基础实现的热风炉系统的可变周期运行等内容。

本书可供从事高炉热风炉自动化系统研究、设计和生产维护等工作的科技人员使用, 也可供大专院校的自动化、计算机应用和相关工艺专业的师生参考。

由于水平有限, 书中的疏漏或错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。

孙进生

hitsun@sina.com

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
冶金原燃料生产自动化技术	马竹梧 编著	58.00
炼铁生产自动化技术	马竹梧 编著	46.00
冶金企业管理信息化技术	漆永新 编著	56.00
连铸及炉外精炼自动化技术	蒋慎言 编著	52.00
热工测量仪表(第3版)	张 华 等编	38.00
计算机控制系统	顾树生 等编	29.00
自动控制原理(第4版)	王建辉 等编	32.00
自动控制原理习题详解	王建辉 主编	18.00
自动检测和过程控制(第3版)	刘元扬 主编	36.00
现代控制理论(英文版)	井元伟 等编	16.00
自动控制系统(第2版)	刘建昌 主编	15.00
机电一体化技术基础与产品设计	刘 杰 等编	38.00
高炉炼铁过程优化与智能控制系统	刘祥官 等著	28.00
轧制过程的计算机控制系统	赵 刚 等编	25.00
基于神经网络的智能诊断	虞和济 等著	48.00
工业企业电气调整手册	刘春华 主编	165.00
智能控制原理及应用	张建民 等编	29.00
自动检测技术(第2版)	王绍纯 主编	26.00
过程检测控制技术与应用	朱晓青 主编	34.00
工厂供电系统继电保护及自动装置	王建南 主编	35.00
电力拖动自动控制系统(第2版)	李正熙 等编	30.00
电力系统微机保护	张明君 等编	16.00
电路实验教程	李书杰 等编	19.00
电子产品设计实例教程	孙进生 等编	20.00
电工与电子技术	李季渊 等编	26.00
单片机实验与应用设计教程	邓 红 等编	28.00

目 录

1 绪论	1
1.1 高炉热风炉工艺	1
1.2 热风炉的燃烧控制问题	4
1.3 国外研究和应用现状	4
1.4 国内研究和应用现状	6
1.5 热风炉燃烧控制的研究和应用现状分析	12
1.6 本书的主要内容	13
2 热风炉基础自动化系统及数据通讯接口	16
2.1 热风炉逻辑控制及工艺参数检测要求	16
2.2 热风炉基础自动化系统的组成	19
2.3 热风炉自动化系统的数据通讯接口	24
2.4 本章小结	36
3 热风炉历史数据分析及最佳空燃比的确定	37
3.1 引言	37
3.2 造成热风温度偏低的人为因素	37
3.3 历史数据的采集方法	41
3.4 最佳空燃比的离线确定方法	46
3.5 最佳空燃比的在线确定方法	54
3.6 本章小结	55
4 基于实例推理的实时控制器——CBRTC	56
4.1 CBR 的基本概念	56
4.2 CBR 的应用实例	58

4.3	从专家控制器到实例推理控制器	64
4.4	智能控制发展的简单回顾	67
4.5	控制系统应用中遇到的现实问题	68
4.6	基于实例控制的主要优点	70
4.7	基于实例控制的必要条件和特殊性	72
4.8	本章小结	73
5	热风炉燃烧智能控制系统的总体结构	74
5.1	引言	74
5.2	热风炉燃烧制度的选择	75
5.3	热风炉燃烧控制的几个量化问题	76
5.4	热风炉燃烧过程的分阶段控制策略	77
5.5	单个热风炉的燃烧控制方法	78
5.6	热风炉燃烧控制系统的网络体系	80
5.7	热风炉燃烧控制系统的组成	80
5.8	热风炉系统的协调控制	83
5.9	本章小结	86
6	热风炉燃烧的 CBRTC 智能控制策略	88
6.1	CBRTC 的实施过程	88
6.2	CBRTC 实例库的构造和实例的知识表示	90
6.3	热风炉燃烧 CBRTC 实例抽取方法	95
6.4	CBRTC 实例检索和特征权重确定方法	104
6.5	结合规则推理的实例推理控制器 CBRTC/RBR	108
6.6	CBRTC/RBR 的实际调节效果	111
6.7	热风炉燃烧 CBR 智能控制系统的特点	115
6.8	本章小结	116
7	热风炉送风温度预测及可变周期运行	118
7.1	引言	118
7.2	热风温度预测 CBR 实例库和实例的知识表示	118
7.3	热风温度趋势的 CBR 步骤	121

7.4	热风温度 CBR 预测方法的特点	121
7.5	热风温度趋势预测结果和分析	123
7.6	热风炉系统的可变周期运行	125
7.7	本章小结	129
8	热风炉燃烧 CBR 智能控制策略的编程要点	131
8.1	引言	131
8.2	力控软件的内置数据表	132
8.3	建立热风炉燃烧 CBRTC 的内置数据表	135
8.4	力控软件的动作脚本	137
8.5	使用动作脚本完成 CBRTC 的推理过程	138
	参考文献	146

1 绪 论

1.1 高炉热风炉工艺

高炉是冶炼生铁的炉子。自然界中的铁大多是以铁的氧化物形态存在于铁矿石中，高炉炼铁就是用还原的方法从铁矿石中提取铁。

一个高炉炼铁生产系统主要包括高炉本体、上料装置、除尘设备和热风炉 4 个部分，系统组成如图 1-1 所示。其中高炉本体是一种逆流化

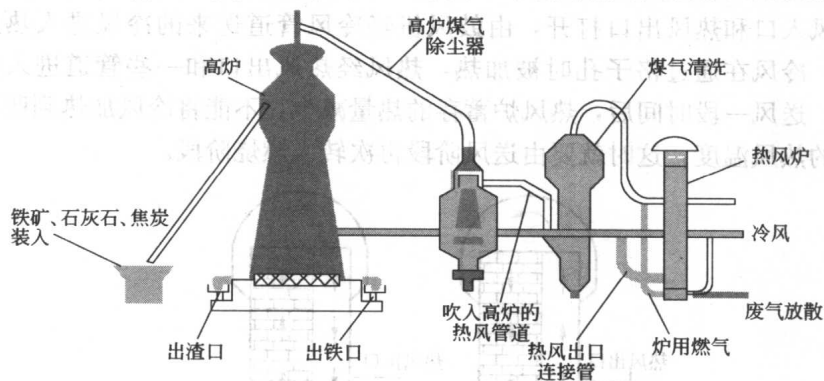


图 1-1 高炉生产系统组成示意图

学反应器，主要作用是将焦炭、铁矿石和熔剂等固体炉料高温熔化成铁水。生产时从高炉炉顶装入铁矿石（包括烧结矿、球团矿、块矿等）、燃料（主要是焦炭）和熔剂（石灰石、白云石、硅石、锰矿等）等，从高炉下部的风口鼓进热风。在高温下焦炭及可燃喷吹物（如重油、煤粉等）燃烧生成一氧化碳和氢气以及固体碳，将铁矿石中的氧夺取出来，从而得到铁。这个过程就叫还原过程。还原出来的铁水从出铁口放出。铁矿石和焦炭中的杂质与加入炉内的熔剂结合生成炉渣，从出渣口排出。还原过程中产生的煤气从炉顶导出，经过除尘处理后，供热风炉、转炉、焦炉、加热炉等作燃料用^[1]。

热风炉是炼铁生产过程中的重要设备之一，它供给高炉热风的热量约占炼铁生产耗热的 $1/4$ 。热风炉的主要作用是把鼓风加热到高炉要求的温度，是一种按“蓄热”原理工作的热交换器。蓄热式热风炉是循环周期性工作的，在它的一个循环工作周期中，可分为燃烧阶段和送风阶段。

(1) 燃烧阶段。将热风炉内的格子砖烧热，也叫加热或烧炉阶段。如图 1-2a 所示，此时热风炉的冷风入口和热风出口关闭，将煤气和空气按一定的比例从燃烧器送入，通过煤气燃烧将热风炉内的格子砖加热，燃烧产生的烟气（也称废气）由烟气出口经过烟道从烟囱排掉，这样一直将热风炉加热到需要的蓄热程度，然后转入送风阶段。

(2) 送风阶段。将由鼓风机吹来的冷风加热后（一般在 $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 之间）送入高炉。如图 1-2b 所示，此时燃烧器和烟气出口关闭，冷风入口和热风出口打开，由鼓风机经冷风管道送来的冷风进入热风炉，冷风在通过格子孔时被加热，热风经热风出口和一些管道进入高炉。送风一段时间后，热风炉蓄存的热量减少，不能将冷风加热到所要求的热风温度，这时就要由送风阶段再次转入燃烧阶段。

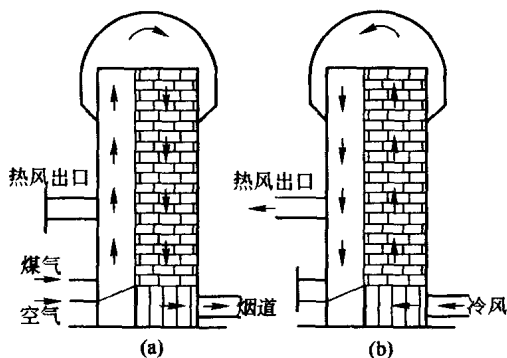


图 1-2 热风炉的工艺过程
(a) 燃烧阶段；(b) 送风阶段

蓄热式热风炉的工作原理，简言之就是在燃烧过程中由热风炉内的格子砖将热量储备起来，当转为送风后，格子砖又将热量传给冷风，把冷风加热后送至高炉炼铁。其实质是将煤气燃烧产生的热量以格子砖为媒介传给高炉鼓风的过程。

为了满足高炉炼铁过程对连续高温热风的需求，一般有 3~4 座热风炉轮流交替地送风。对每座热风炉而言，它的运行方式是一种“序批式”（sequential batch）的生产过程^[2]，而几座热风炉交替地配合运行，则产生了连续的热风提供给高炉本体。热风炉送风的交替方式称为热风炉的送风制度。送风制度有 3 种，分别是：

(1) 两烧一送制，适用于配置 3 座热风炉的高炉，其作业示意图如图 1-3 所示。

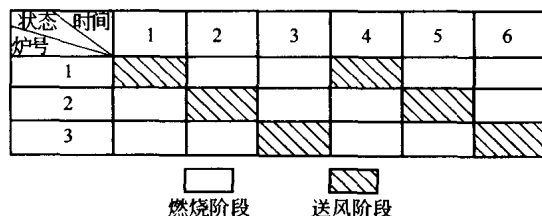


图 1-3 两烧一送制度作业示意图

(2) 交叉并联送风（两烧两送制），适用于具有 4 座热风炉的高炉，其作业示意图如图 1-4 所示。

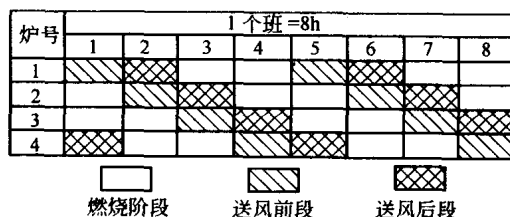


图 1-4 交叉并联送风制度作业示意图

(3) 半并联送风，适用于配置 3 座热风炉的高炉，其作业示意图如图 1-5 所示。

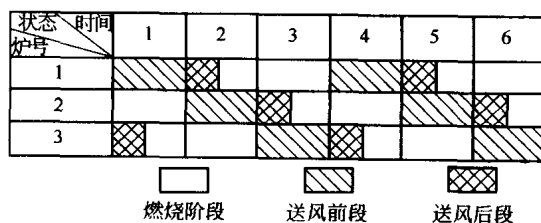


图 1-5 半并联送风制度作业示意图

1.2 热风炉的燃烧控制问题

热风炉是高炉炼铁生产中的重要设备，它承担着将燃烧煤气所产生的热量传递到高炉鼓风的关键作用。高炉炼铁使用高温是当今世界高炉炼铁技术发展的方向。据统计，热风温度每提高 100°C ，可降低焦比 $4\%\sim 7\%$ ，同时可增产 $3\%\sim 5\%$ ，还可允许增加喷吹煤粉 40kg/t 铁或增加喷吹重油 25kg/t 铁，相应地进一步降低了焦比。随着氧煤强化炼铁新工艺的推广应用，高炉对高温的需求更加迫切，因此热风炉在高炉生产中的地位越来越重要^[1]。

在高炉炼铁的生产工艺中，热风炉的燃烧控制是一个相当重要的部分，它既要保证热风炉的出口热风温度达到工艺要求的数值，又要保证煤气的充分燃烧和热量的有效利用。

热风炉的控制任务主要包括两大部分，即燃烧过程控制和设备的逻辑连锁控制。根据文献介绍和作者掌握的情况，目前国内绝大多数高炉热风炉虽然都已经配置了比较完善的基础自动化设备，但却仅仅实现了包括自动换炉在内的逻辑控制功能，除了个别从国外引进的大型高炉（如宝钢的 1 号、2 号、3 号高炉），真正实用和有效的热风炉燃烧过程的自动控制非常罕见，尤其是在国内占较大比例的中小型高炉（容积 800m^3 以下），其热风炉的燃烧控制几乎全部是手动操作（或通过 HMI 实现的 PC 手动）。由于受到很多人为因素的影响，热风炉的燃烧状态时好时坏，导致热风炉提供给高炉的送风温度较低，更谈不上达到节省能源和优化热风炉操作，进而更好地满足高炉生产需要的目的。因此，根据国内应用的实际情况，研制和开发适合国内热风炉系统现状、低成本、高可靠的热风炉燃烧自动控制系统，采用自动控制手段来改善热风炉的送风效果具有非常现实的意义。

1.3 国外研究和应用现状

国外热风炉燃烧控制技术有数学模型与人工智能两种方式^[3~5]。

1.3.1 数学模型方式

数学模型方式开始于 20 世纪 70 年代末，从简到繁，逐步完善和提高了精确度。在国外，数学模型仍然是解决热风炉燃烧优化控制的主要

方法。其中有代表性的实用优化控制数学模型主要是以下 3 种：

(1) 日本川崎钢铁公司千叶厂 5 号高炉热风炉的优化系统。它包括热水准管理、热风炉自动换炉优化、拱顶温度和废气温度管理。热水准管理就是送风炉热水准达到零时自动换炉，以节约燃料及提高热风炉效率。由于热水准计算较为复杂，故以先送风的炉子的冷风调节阀开到某一角度时作为零值，即如果不进行换炉，热风温度就不足以维持在规定值上。热风炉是定时换炉的，时间设定应使其在换炉时热水准减为零，由于到达热水准为零的时间与送风温度和送风量有关，故按此而算出所需的设定时间，并考虑切换几个周期以后进行修正。它是通过修正投入燃料量数值来使换炉时热水准为零的。拱顶温度管理是为了保护热风炉拱顶砌体和强化加热过程，其方法是：在加热开始，即拱顶温度未达到上限时，以最合适的空燃比使燃烧温度最高，以使拱顶温度迅速升到规定值，此后逐步改变超量空气系数以使拱顶温度不超过规定值。废气温度太高将表征热效率下降和对格子砖支承的金属会被烧坏，因此废气温度达到上限时就应停止加热（即所谓焖炉等待送风），故需进行废气温度管理，其方法是：观察测得的废气温度上升曲线的外延趋势，如果未到换炉时间就已达到上限（均为计算得出），就应改变燃料量使废气温度上升曲线减缓而正好在换炉时刻达到燃烧终点。

(2) 德国西门子的热风炉优化数学模型。它有一个所谓“热流计算模型”，其原理是在保证安全的基础上取得最高效率。热风炉的操作中，在所需风温和风量的条件下，用多大煤气量加热，什么时间换炉才能获得最高效率和最经济的指标是其主要目标。该数学模型是首先把热风炉的全部热损失，包括表面、换炉和废气的热损失计算出来，再列出热风炉的工作循环式，最后求出每个循环的效率，后者可给出 Q_H 、 t_H 与效率 h 的关系曲线（ Q_H 为热气体的量， t_H 为燃烧时间），由此曲线可以看出有一个最高效率 h 的点，此点亦可由公式求出。此外，燃烧期的瞬时煤气流量要同送风的炉子的风负载（混风温度 T_B 、空气比热容 c_L 、冷风流量 Q_K ）成正比，和煤气发热值 H 及效率 h 成反比。这就是说，瞬时输入必须以能量输出为基础，经一定的计算公式，求出最佳加热用煤气流量。

(3) 日本钢铁公司（新日铁）的热风炉气体流量设定数学模型。该模型使用效果不错，我国宝山钢铁公司也引进了，并在其 1 号、2 号和

3号高炉使用。该模型是针对燃用高炉煤气（简称BFG，与转炉煤气LDG混合的煤气称BFGM）和焦炉煤气（COG，其流量可变，且不低于其满量程的20%）以及助燃空气的三孔燃烧器的热风炉的。

此模型的设计思路是：对热风炉进行燃烧管理和设备管理。前者是根据要存储下次送风所需的恰当热量，计算燃烧过程所需的煤气流量和空气流量。后者是从热风炉设备安全管理角度出发，管理热风炉最高温度部分，也就是筑炉结构最困难处的拱顶温度和炉算子的温度控制，它控制高热值的COG，即改变其与BFG的混合比，从而控制拱顶温度，在废气温度管理期间，BFG的流量将逐步减小，使废气温度和金属炉算温度不超过上限值。

热风炉数学模型还有多种^[6~8]，各家的观点虽不尽相同，但总的一点是要使送风的热风炉加热到规定能量的水准而设定所需的煤气流量，以获得最经济的热效率指标。

1.3.2 人工智能控制方式

以日本川崎钢铁公司千叶厂6号高炉的热风炉燃烧自动控制系统为代表。在热风炉作业中，要保护设备而需控制格子砖温度分布，此外，为了使能耗最小而需在燃烧时对煤气流量作最优设定。前者除了保护拱顶使其不超上限温度外，由于硅变形点为3500℃以下，为防止达到此温度时硅砖膨胀而破裂，还需在送风末期控制这一温度。过去热风炉煤气等流量自动设定主要是按热平衡和检测数据来计算送风终了时的蓄热量，但没有足够精确度的残热推断和温度分布的数学模型，为此还需手动设定。千叶厂6号高炉把多元观测信息和操作工的经验知识结合而组成热风炉流量设定模糊控制系统，其控制流程如图1-6所示^[3~5]。

1.4 国内研究和应用现状

对热风炉燃烧优化控制技术，国内有关高等院校和研究院所都有研究，但主要是进行理论推导、建立数学模型以及仿真试验等研究。在实际应用上，只有宝钢从日本钢铁公司引进了热风炉气体流量设定数学模型，并在其1号、2号、3号高炉上使用。由于热风炉燃烧控制对象的复杂性和多样性，采用常规的系统建模、分析和控制方法难以对它进行有效的控制，因此人们尝试采用更先进的控制方法来解决热风炉的燃烧

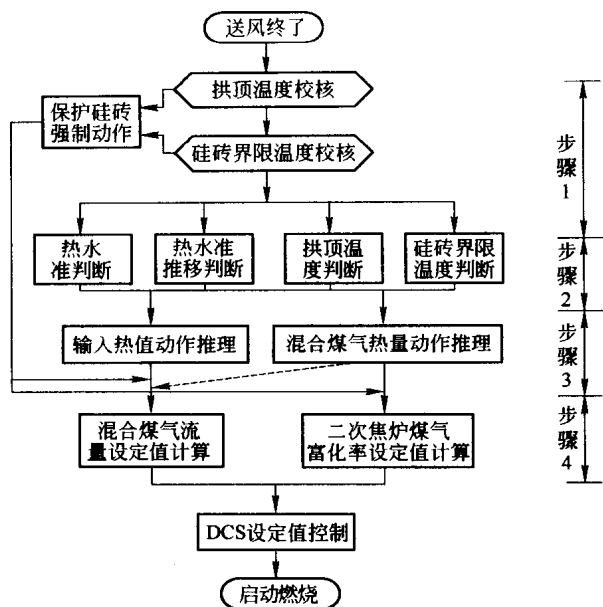


图 1-6 日本川崎钢铁公司热风炉模糊控制模型流程图

控制问题。

近几年国内文献报道的与热风炉燃烧先进控制方法相关的研究和应用成果简要介绍如下。

1.4.1 高炉热风炉燃烧控制专家系统^[4]

该系统设计的依据主要是：1) 根据工艺要求。2) 根据工厂的实践。3) 高炉热风炉操作方法及操作规程规范。4) 全面考虑热风炉自动化，即不仅包括自动换炉，还需考虑自动燃烧及两者的关系。5) 从剩余蓄热量出发，考虑优化与降低能耗。6) 参考国外热风炉设定数学模型的出发点。7) 考虑热风炉的加热和送风的热传导、热交换等工艺理论。8) 为节能和提高风温创造条件而需考虑各种影响因素。9) 考虑减轻劳动强度而需全自动化控制。

(1) 总方框图。按照上述系统设计依据组成混合型专家系统，其方框图如图 1-7 所示。

(2) 系统配置。该系统采用的是二级自动化的结构，即基础自动化级和过程自动化级。硬件：基础自动化级（执行自动换炉和数据采集

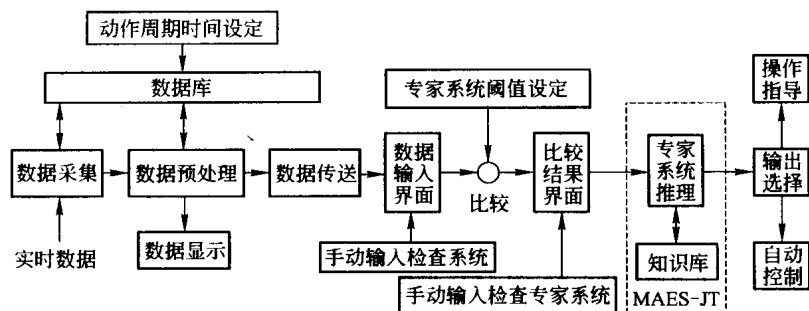


图 1-7 混合型专家系统方框图

等用)使用德国西门子公司的 S5-115U 型或其他型号的 PLC。过程自动化级(执行优化设定用)使用工业控制计算机(或个人计算机),硬件配置: Pentium III CPU, 内存 128MB, 硬盘 10GB 以上。软件: Windows NT 操作系统, Visual Basic 6.0, MAES-JT 专家系统开发工具。

(3) 专家系统。该系统使用了商品化的专家系统开发工具——MAES-JT, 故修改、删除、增添容易, 且可靠性和可维护性良好, 编制规则容易。它采用产生式规则, 即 If...Then...Else 形式。该系统共设有 80 多条规则。由于热风炉要求实时在线控制, 要求专家系统为确定性输出(MAES-JT 专家系统开发工具的推理有 3 种方式: 即可信度为独立的、按一定公式综合的; 可信度为平均的; 可信度为“是”或“否”的), 为此不能有多多个可信度不同的输出, 而应为单个可作为控制决策的输出, 故在规则编制上应在 If...项加上某些否定的条件。该系统共设规则 100 多条。

1.4.2 不检测废气残氧的模糊控制^[9]

实现热风炉燃烧自动控制的关键是随着煤气压力和质量的波动, 并根据热风炉的不同状态进行煤气流量和空气流量的实时调整, 空气流量的调整可以转化为对空燃比的调整。该方法参照了热风炉的人工燃烧操作经验, 所构成的模糊控制器包括两个部分: 根据拱顶温度调节的最佳空燃比模糊控制器和根据废气温度调节的最佳煤气流量模糊控制器。最佳空燃比模糊控制器分成两个阶段: 初期和后期, 分别采用不同的控制