基于双交叉限幅的热风炉燃烧控制系统设计与实现*

高士臣[1], 丁 阳[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司计量中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 包头钢铁(集团)有限责任公司信息服务中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章在简述热风炉工艺流程的基础上, 重点介绍了双交叉限幅控制的原理及实现方法, 设计出基于双交叉限幅并行串级燃烧控制系统。实际应用表明, 该系统能够实现热风炉的燃烧、送风自动控制, 大幅提升热风炉燃烧效率和控制精度, 使热风炉能够安全、高效运行。

关键词: 热风炉; 燃烧控制; 双交叉限幅
中图分类号: TF578; TP273 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2020)05-0081-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.05.024

Design and Implementation for Combustion Control System of Hot Blast Stove Based on Double Cross-limiting

Gao Shi-chen[1], *Ding Yang*[2]

(1. *Measurement Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Information Service Center of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is mainly introduced the principle and implementation method of double cross-limit control as well as the parallel cascade combustion control system based on double cross-limiting is designed on the basis of briefly elaborating the technological process of hot blast furnace. The practical applications show that the automatic control for combustion and blowing-in of hot blast stove can be realized as well as the combustion efficiency and control accuracy of hot blast stove are greatly improved with the system so that hot blast stove can operate safely and efficiently.

Key words: hot blast stove; combustion control; double cross-limiting

热风炉燃烧使用的能源主要是高炉煤气。强耦合、非线性、强扰动、变化幅度大是热风炉燃烧过程的几大难点。某钢企有7座高炉, 炉况长期稳定性差, 煤气热值波动频繁, 其结果会出现两种情况: 第一种情况是空燃比波动时大时小, 当空燃比过大时, 拱顶温度上升时间长, 热风炉加热时间就会变长, 蓄热时间过长, 影响热风炉送风风温导致不达标; 第二种情况是空燃比过小, 燃烧不充分, 浪费能源, 造成污染[1]。由于热风炉在工业生产中的这些特点及风温高低对高炉的特殊意义, 难以用一个简单的, 单纯的经验法控制热风炉的燃烧过程, 所以有必要设计安全、高效的热风炉燃烧控制系统。

* **收稿日期**: 2020-06-08
作者简介: 高士臣(1967-), 男, 河南省汤阴县人, 硕士, 正高级工程师, 现从事自动化仪表的研究与应用工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 热风炉工艺流程介绍

热风炉是炼铁送风系统中最重要的设备，它的作用就是把来自于鼓风机加压后的冷空气经过热交换变成温度达到1 000 ℃左右的热风，热风通过热风管道送入高炉炉膛，在炉膛中制造高温高压，在高温高压的作用下焦炭、铁粉、煤粉之间相互作用，在炉内上升的过程中与铁矿石发生化学还原反应，去除铁矿石中的氧元素，得到铁。目前，用于炼铁的热风炉主要有内燃式、外燃式、顶燃式，其中最为常用的是外燃式热风炉。

外燃式热风炉的主工艺控制流程是煤气支管内主成分高炉煤气所组成的混合煤气和空气支管内的助燃空气混合后进入陶瓷燃烧器，在燃烧室内进行燃烧，产生大量的高温烟气，高温烟气携带大量能量经过对流和辐射把能量传递到炉内的耐火材料表面和内部。燃烧结束后，热风炉各个相关阀门动作从烧炉状态转移至焖炉状态，大量的冷风进入蓄热室吸收耐火材料上的能量变成温度达到1 000 ℃以上的热风。热风温度达标后相关阀门动作，把热风炉的焖炉状态变为送风状态，把热风送入高炉本体。在热风温度下降到一定水平后，相关阀门继续动作，把送风状态的热风炉变回焖炉状态排出废气，之后又打开相关阀门把煤气和空气送入燃烧室在进行燃烧、循环工作。

2 热风炉燃烧控制方案

2.1 热风炉燃烧控制方案

由于单座热风炉送风是不连续的，不能提供持续、稳定的热风支持高炉生产，实际应用中一般采用多座热风炉交叉并联的送风方式(如图1)，就是把4座热风炉分为2个大组，每组热风炉交叉送风，其送风时间错开半个周期，保证每一组热风炉中都有一座炉送风。4座热风炉，各炉内部状态均错开整个周期的1/4，两烧两送，不断换炉，不断循环，充分利用4座热风炉实现连续送风[2]。

2.2 双交叉限幅控制理论的串级调节法原理

基于双交叉限幅控制理论的的热风炉燃烧串级调节方式，可以实现热风炉燃烧自动控制以及高效交叉并联送风。根据热风炉的燃烧周期、煤气热值以及风温的要求，设定拱顶温度，并设定相应烧炉期间煤气流量(大约60 000 m^3/h)，设定相应的空燃比(式1)，实现自动调节。

$$空燃比=\frac{空气流量设定值}{煤气流量设定值} \quad (1)$$

在双闭环串级控制基础上增加燃烧过程中空气过剩系数的上限限幅控制，就形成了双交叉限幅控制，用以防止在热风炉燃烧过程末期负荷减小时的空气过剩。在双交叉限幅的控制下，不论热风炉在燃烧过程中空气负荷如何，实际空气过剩率都会被限制在规定范围内。空气负荷随着燃烧过程变动时，空气过剩系数可以控制在1.06的最佳燃烧区域，使空燃比也保持在最佳燃烧区内，最大限度的利用燃烧高炉煤气的热量，提升热效率，最终达到稳定热风炉风温的目的。

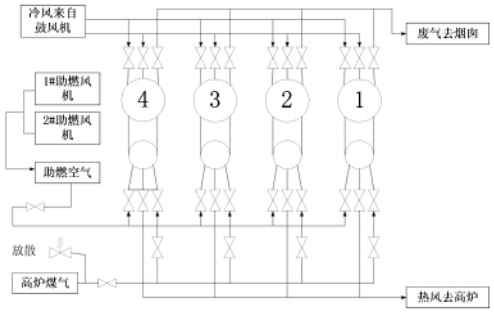


图1 4座热风炉工艺流程图

热风炉控制方案核心采用双交叉并行串级控制燃烧方案，其拥有4个运算单元，包含μ_3、μ_2两个负偏差系数，μ_1、μ_4两个正偏差系数，HSC_1、HSC_2两个高选器，LSC_1、LSC_2两个低选器，控制原理如图2所示。

由空气流量的测量值AIR AI和负偏置μ_3确定煤气流量的下限值β；由空气流量的测量值AIR AI和正偏置μ_1确定煤气流量的下限值γ；由煤气流量的测量值BFG AI和正偏置μ_4确定了空气流量的上限值β′；由煤气流量的测量值BFG AI和副偏置μ_4确定了空气流量的下限值γ′。

在具体工作中空气流量的设定由煤气量和空燃比决定，煤气流量的设定值和拱顶温度、废气温度相关。在不同的升温阶段，煤气流量的设定值不尽相同，燃烧负荷急剧上升时，α信号不断增大，与信号β通过LSC_2比较后选择小信号β′，β′与γ′在高选器HSC_2中比较选择大信号β′，空气流量取按煤气流量确定的上限值，使空气流量随着燃烧过程的加速领先煤气流量增加，全力保证燃烧，快速升温但是不超过空气流量上限值；同时进行的还有随着拱顶

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度信号 α 的增加，α 与 β 在 HSC_1 中比较，选择较大信号 α，α 与 γ 在 LSC_1 中再进行比较选择较小的 γ，作为煤气流量给定值，使保证快速燃烧的煤气供应值应不超过最大煤气流量，避免了拱顶温度超过设计温度，废气温度过高。反馈的煤气、空气流量测量信号经过温压补正，使控制更加精准。双交叉限幅控制能够在热风炉燃烧周期内始终保证空燃比在最佳范围内，保证各个燃烧阶段热风炉各项参数在正常范围内变化。

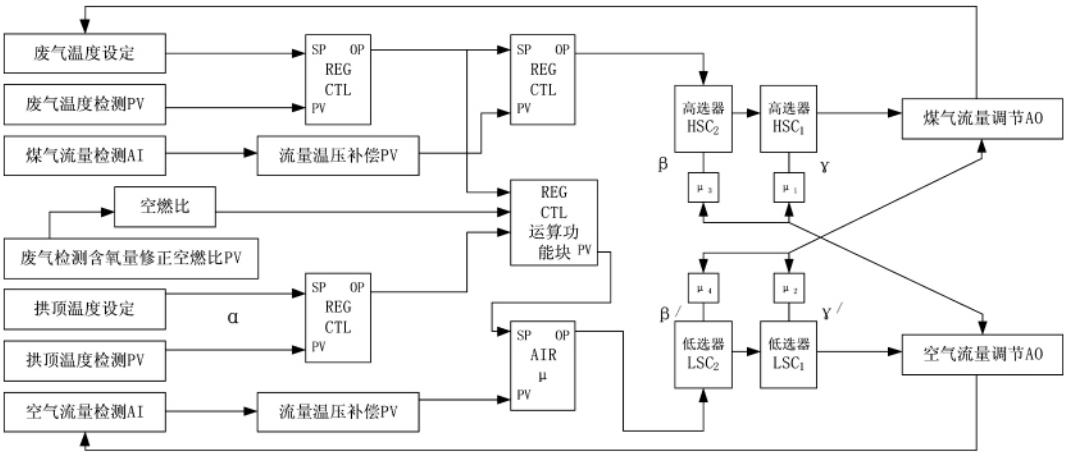


图 2　热风炉双交叉限幅并行串级燃烧控制原理图

系统设计为废气均压加交叉并联送风，采用全自动换炉，全自动换炉就是操作员只设定送风时间，送风倒计时结束之后程序自动启动换炉，以烧炉温度为闭环控制点，哪组哪台的热风炉先达到热风设定温度，哪座热风炉送风。例如说第一大组的一号炉目前是“送风”，送风时间结束之后程序对一号炉自动发出“送转焖”指令，同组的二号炉与一号炉连锁，看到一号炉“送转焖”，程序对二号炉发出“燃转焖”命令也开始换炉，第一大组动作后同样的第二大组也开始动作，四台热风炉循环工作，始终保持“两烧两送”的送风模式。

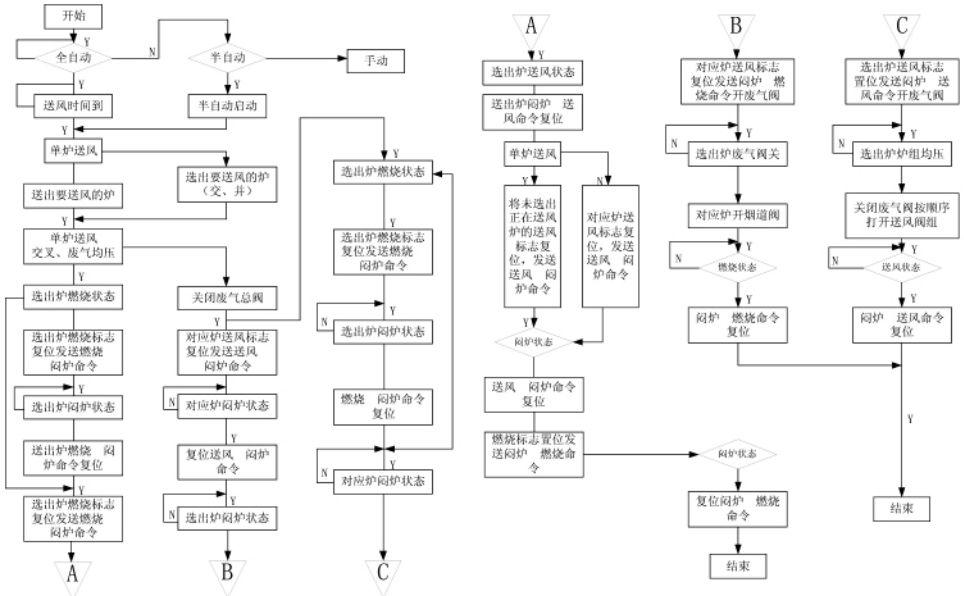


图 3　全自动控制顺序功能图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现场生产中各种情况瞬息万变,各种高炉本体波动、机械设备损坏等因素都会时刻打破理想状态,因为当故障一个或几个一起到来的时候,全自动换炉系统不能自动处理相关问题,这时候需要人工干预处理问题,所以在全自动的基础上添加一个“半自动”换炉方式,半自动换炉可以根据四座热风炉中某一座热风炉在燃烧状态下的废气温度和炉顶温度都达到和超过了设定窗口内的设定值来激发换炉指令,换炉指令达到后需要操作人员根据系统提示手工点击换炉开始换炉。当现场问题检修结束、工况正常稳定后,由半自动换炉切换至全自动换炉模式。正常的工作状态是全自动换炉时间为主,半自动换炉时间为辅。图3为全自动换炉控制顺序功能图。

3 双交叉限幅燃烧控制的实现

3.1 硬件设计

系统由 Honeywell C300DCS、Rockwell ControlLogix L7X PLC、工业总线以及以太网构成,系统架构如图4所示。

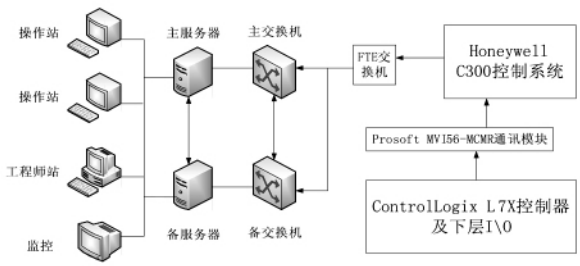


图4 系统结构图

其中 ControlLogix L7X 控制器系统下挂冗余 ControlNet 网络构成的以 DI/DO 为主的 I/O,AB PLC 系统通过冗余 ControlNet 直接控制阀门、水泵开关和电机起停,向上通过冗余 EtherNet/IP 以太网与主交换机相连,完成 PLC 程序保存、下载功能。通过 ProSoft MVI56 - MCMR 通讯模块完成与 Honeywell C300 控制器的互联,通过 485 硬线完成数据交互。Honeywell C300 DCS 通过冗余 FTE 网络经 FTE 交换机由以太网与主交换机相连,完成与 Honeywell Experion PKS 过程知识系统的互联。AB 系统和 C300 系统采集和交换的所有数据全都通过主交换机全部向上经过以太网进入 Honeywell 服务器。Honeywell 服务器内安装全部的 Honeywell Experion。

在主交换机向后方向全部布置防火墙,保证上层平台数据安全,自动化硬件设备及各级网络与服务器全部采用冗余。最上层设置多台操作员站、一台双网卡工程师站、调度室远程监视器、一台网络打印机,使工程师只用这一台主机就能通过服务器完成两种设备下位机程序编译、维护,上位机画面编制、发布,网络优化维护等功能,各种所需数据从 Honeywell 服务器直接抓取,使操作员能直观使用操作员站上工程师制作的控制画面控制热风炉,并能用网络打印机实时打印画面和报表,方便操作人员和调度员分析数据、解决实际生产问题。

3.2 软件实现

按层级主要分为以下4个阶段。

(1) 底层数据交换阶段: 优点是其软件工具由硬件网关厂家 Prosoft 开发,与 AB 版卡外形一致,能直接使用 AB 背板,与 Rslogix 5000 控制软件相兼容,可直接组态。

(2) 控制层面: 控制软件由 AB Rslogix 5000 控制软件与 Honeywell Experion PKS 控制软件共同编写,按照控制方案确定的顺序功能图用 T 型图编写控制程序,实现换炉自动控制以及基于双交叉限幅理论的自动燃烧控制。

(3) 系统层面: 主要由 Honeywell Experion PKS 过程控制软件完成操作画面制作,web 远程桌面访问登陆,权限设置。

(4) 数据库层面: 采用 Oracle 11g 作为开发环境,用 pl/sql developer 作为开发工具,从 Experion PKS 数据库中抽取热风炉关键数据,再利用报表系统进行展示和把热风炉关键数据添加到高炉总报表上。

4 结束语

根据热风炉工艺流程及控制要求,编制出可以用于自动换炉控制的顺序功能图,将双交叉限幅与自动换炉相结合,设计出一个完整的基于双交叉限幅的热风炉燃烧自动控制方案。实际应用表明,无论在稳定运转状态还是过度状态,均能维持高精度的空气过剩率,达到安全、高效、节能的目的,保证了热风炉生产的高效运行。

参 考 文 献

[1] 柏洪升,董立峰,徐淑婉. 高炉热风炉自动控制系统[J]. 软件,2010,(7):60-61.

[2] 李明党. 高炉热风炉优化控制技术[J]. 冶金能源,2015,34(2):61-64.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net