

文章编号: 1001-0920(2001)03-269-04

# 步进式加热炉燃烧控制的新方法

张晶涛, 钱晓龙, 王伟, 张莉, 柴天佑

(东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 针对常规交叉限幅控制方法负荷跟踪速度低的缺点, 采用了具有快速补偿响应功能和抗积分饱和功能的改进交叉限幅燃烧控制方法; 针对炉温过程具有时变非线性的特性, 应用了自整定 PD 控制算法; 针对加热炉下加热段与上加热段炉温对象耦合干扰严重的现象, 应用了智能解耦控制方法。实际应用结果表明, 该方法可提高加热炉各段炉温的控制精度, 获得满足开轧所要求的钢坯温度, 并能保证经济燃烧和安全运行。

**关键词:** 步进式加热炉; 燃烧控制; 自整定 PD; 智能解耦

**中图分类号:** TP 18

**文献标识码:** A

## New Method for Combustion Control of Walking Beam Reheat Furnace

ZHANG Jing-tao, QIAN Xiao-long, WANG Wei, ZHANG Li, CHAI Tian-you

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The improved cross limited combustion control method with rapid compensatory response function and antiwindup function was used in order to overcome the shortcomings of low load following speed of normal cross limited control method. An auto-tuning PD control algorithm was taken in respect of the furnace temperature process that has time varying and nonlinear properties, while an intelligent decoupling control method was applied to decouple the interaction between the low heat zone and the high heat zone. The application results show that the method increases control accuracy of each zone of reheat furnace and obtains the billet temperature that start-rolling requires as well as ensures economical combustion and safety operation.

**Key words:** walking beam reheat furnace; combustion control; auto-tuning PD; intelligent decoupling

## 1 引言

步进式加热炉是轧钢行业中重要的工艺生产设备之一, 其作用是将钢坯加热后送往轧机进行轧制<sup>[1]</sup>。在加热炉控制中, 需要解决两个关键性问题:

1) 控制钢坯出炉时的最佳温度, 钢坯温度过低, 将

达不到轧制工艺的质量要求; 温度过高, 不仅浪费能源, 而且会带来不良后果。2) 实现加热炉的高效率化。不难看出, 控制钢坯以轧制质量所要求的最低温度出炉和减少炉子热损失, 是降低燃料消耗和减少钢坯烧损的有效途径<sup>[2]</sup>。因此, 最佳燃烧控制系统的基本任务是: 提高加热炉各段炉温的控制精度, 获得

收稿日期: 2000-02-18; 修回日期: 2000-05-26

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(69825106); 辽宁省优秀青年科研人才培养基金项目(963007)

作者简介: 张晶涛(1972—), 男, 辽宁大连人, 博士生, 从事自整定、智能控制等研究; 王伟(1955—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、预测控制等研究。

满足开轧所要求的钢坯温度,同时保证经济燃烧和安全运行。

在加热炉燃烧过程中,需要保证稳态情况下的空气过剩率一定,更重要的是在加热炉热负荷发生变化的动态情况下,保证空气过剩率仍维持在合适的范围内。解决上述问题通常采用交叉限幅控制方法,使系统在调节的动态过程中,保持空气、燃料的相互跟随关系,控制最佳空燃配比,但同时也导致了整体上负荷跟踪速度的降低。由于加热炉的生产节奏必须服从于轧制节奏,在轧线工况改变(掉线、停轧、待轧等)或加热钢坯品种、规格更换时,为了达到节能和减少钢坯氧化烧损的目的,要求各段炉温加快响应速度和提高控制精度,以快速准确地进入降温、保温和升温模式。

为了解决上述问题,本文采用具有快速补偿响应功能和抗积分饱和功能的改进交叉限幅燃烧控制方法,以提高燃烧系统的负荷响应速度;同时,针对炉温过程具有时变非线性的特性,应用了自整定PD控制算法;针对上加热段和下加热段炉温对象耦合干扰严重,应用了智能解耦控制方法,从而较好地完成了最佳燃烧控制系统的基本任务,从整体上提高了加热炉燃烧控制系统的控制性能。

## 2 步进式加热炉主要工艺流程及控制特点

某线材厂的加热炉为梁底组合式步进炉,装出料为侧装侧出方式。坯料由装钢机构推入炉内后,靠活动梁与固定梁组成的步进结构,依次经过下加热段、上加热段、均热段充分均匀加热,达到工艺要求的轧制温度后,由出钢机构送至轧制线上进行轧制。其主要特点是:全炉分为左均热、中均热、右均热、上加热、下加热5个温度控制段,下加热段为梁式炉,在钢坯的下部炉膛设置烧嘴,其余4段为底式炉,在钢坯的上部炉膛设置烧嘴;加热钢种主要有高碳、低碳、低合金3种,钢坯尺寸为 $115 \times 115 \times 1250$ ,产量为125t/H(MAX)。

采用高压内混式热风油烧嘴,燃料为重油;采用过热蒸汽雾化,空气助燃。在加热炉入口处安装一个热电阻,用来测量钢坯入炉温度 $T_{in}$ ;在加热炉出口处安装一个红外测温仪,用来测量钢坯出炉温度 $T_{out}$ ;在加热炉各加热段安装5个热电偶,用来测量各段炉温 $T_{1m} \sim T_{5m}$ 。

## 3 改进交叉限幅控制方法(均热段)

加热炉燃烧控制通常采用并行串级控制方法或双交叉限幅燃烧控制方法。并行串级控制方法比较简单、实用,负荷跟踪速度较快,但在动态特性变化频繁的过程中,不能保持空气、燃料的较好跟随关系,难以实现最佳空燃配比。而双交叉限幅燃烧控制方法则能保证最佳空燃配比的实现,但同时也导致了整体上负荷跟踪速度的降低。这一现象在均热段燃烧控制中表现得尤为明显。为此,本文采用具有快速补偿响应及抗积分饱和功能的双交叉限幅燃烧控制方法。

### 3.1 具有快速补偿响应功能的交叉限幅控制方法

双交叉限幅燃烧控制的响应速度受燃料流量控制和空气流量控制响应速度的制约,取决于其中响应较慢一方(通常是空气流量控制)的响应速度。在炉温设定值动态优化设定的燃烧系统中,这一问题显得尤为突出。通常的解决方法是当炉温设定值的变化率较大时,取消双交叉限幅功能,代之以串级并行控制。本文采用的方法是在现有的双交叉限幅燃烧控制的基础上增加一快速响应功能,以改善空气流量控制系统的响应速度。

这种控制方法主要思想是:在正常状态下,采用双交叉限幅燃烧控制方法;当负荷大幅度升降,其变化超过响应速度较快的燃料系统限制的能力时,燃料系统限制环节的输入输出之差经动特性补偿、方向性增益补偿和补偿量限制环节后,与空气系统限制环节的输出相加,此信号作为空气流量控制系统的设定值实行强制性前馈作用,以此来加快空气系统的响应速度,迅速解除对燃料系统的限制作用。

图1为抗积分饱和和快速响应型交叉限幅燃烧控制的功能构成图。其中,A为炉温调节器的输出,B和D分别为根据空气流量测量值求得的黑烟界限和空气过剩界限,C和E分别为根据燃料流量测量值求得的黑烟界限和空气过剩界限, $k_1 \sim k_4$ 为偏置系数, $\beta$ 为量程修正系数, $\mu_s$ 为空气过剩率设定值。

### 3.2 具有抗积分饱和功能的交叉限幅控制方法

双交叉限幅燃烧控制在跟踪设定值变化时,能保证实际的空气过剩率在限定的范围内,使系统处于最佳燃烧区。但这种方法的限制作用会使主温度调节器出现积分饱和,其结果将造成过渡过程的超调,使控制品质下降。为了防止主调节器的积分饱和,需要对主调节器实行积分分离。当燃料限制环节的输入输出之差与主调节器的积分作用增量极性相

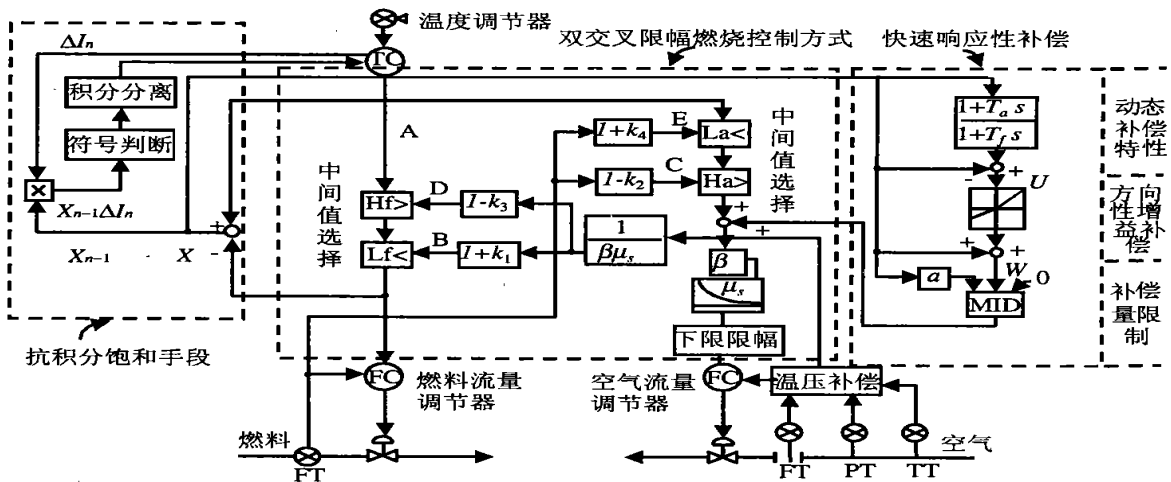


图 1 抗积分饱和、快速响应型交叉限幅燃烧控制的功能构成

同时, 即积分动作处于进一步扩大限制作用的方向时将被强行停止。

采用的方法是: 当  $X_{n-1}\Delta I_n > 0$  时, 停止积分动作。 $X_{n-1}$  为燃料限制环节的输入输出之差的前次值,  $\Delta I_n$  为主调节器的积分作用增量的本次值。

若  $X_{n-1}\Delta I_n > 0$ , 则意味着前次是有限制作用的, 且本次有积分增量输出,  $X_{n-1}$  与  $\Delta I_n$  符号相同, 即积分增量的作用方向是处于扩大限制作用的方向, 这时应停止积分动作。具有抗积分饱和功能的交叉限幅燃烧控制的基本功能构成亦如图 1 所示。

以双交叉限幅燃烧控制方法为基本框架, 在此基础上增加快速补偿响应及抗积分饱和功能, 保证了燃烧控制系统的均热段在实现节能和环保的同时, 安全而迅速地跟踪加热炉负荷的变化要求。

#### 4 智能解耦自整定 PD 控制方法 (加热段)

针对某厂加热炉的下加热段炉温与上加热段

炉温耦合较强的实际, 本文对这两个炉温对象进行了智能解耦, 既对控制量施行实时在线动态解耦, 又对设定值优化施行智能解耦。针对下加热段炉温对象非线性强、滞后大、烟温扰动频繁, 常规串级 PD 难以获得良好控制品质的特点, 本文结合增益裕度和相角裕度 (GPM) 设计以及积分平方误差 (ISE) 设计的优点, 在加热段炉温控制器中采用了自整定 PD 控制算法<sup>[3,4]</sup>。应用结果表明, 采用基于 ISE-GPM 准则的自整定 PD 控制算法, 加热段炉温控制器能够满足复杂多变的工况变化, 具有较好的鲁棒性及控制性能。

下加热段炉温智能解耦自整定 PD 控制系统框图如图 2 所示。其中的智能解耦控制器由设定值优化解耦模块和动态前馈补偿解耦模块构成。设定值优化解耦模块根据上、下加热段炉温设定值优化模块给出的当前时刻炉温设定值的变化情况, 应用智能解耦思想, 分别将下一时刻的炉温预设值回馈给这两个炉温设定值优化模块, 炉温设定值优化模块在此基础上给出该段下一时刻的炉温优化设定

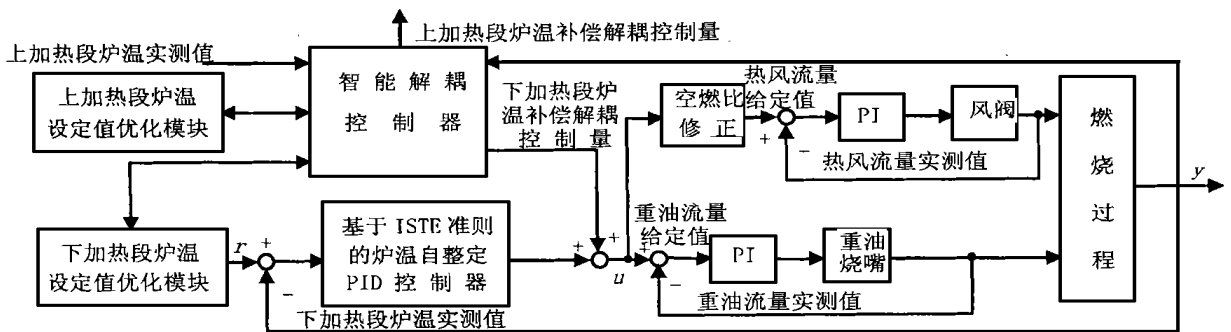


图 2 下加热段炉温智能解耦自整定 PD 控制系统框图

值,例如:

```
IF 上加热段炉温设定值增加 10
THEN 下加热段炉温预设值增加 5 ;
IF 下加热段炉温设定值减少 10
THEN 上加热段炉温预设值减少 20 。
```

动态前馈补偿解耦模块根据上、下加热段的炉温设定值及实测值等信息,依据现场积累的专家经验知识,分别给出适当的对应加热段的炉温补偿解耦控制量,以使上加热段与下加热段之间由于炉温偏差动态变化引起的影响降至最低。

## 5 工业应用效果

某线材厂于1994年对全线进行技术改造,在轧线和加热炉控制中引进美国REC公司的AUTOMAX集散系统。该系统是一个多功能的工业控制系统,具有分散实时控制、支持WINDOWS平台、便于与上位机通信、易于扩展等特点,在传动系统控制中应用较广。用AUTOMAX集散系统控制加热炉在国内外尚属首次。

图3为中均热段采用常规并行串级控制方法的炉温曲线(虚线)和采用具有快速补偿响应及抗积分饱和功能的改进交叉限幅控制方法的炉温曲线(实线)。在10min处加设定值阶跃(设定值由1100变为1130),在30min处加燃油量扰动阶跃(油量阀位瞬时增加10%)。工业实验结果表明,采用具有快速补偿响应功能和抗积分饱和功能的改进交叉限幅控制方法,中均热段炉温对象负荷跟踪速度较快(跟踪时间由5min减少到2min),抗干扰能力较强(燃油量内扰几乎没有影响),并取得了较好的控制精度(全过程中动态偏差由 $\pm 28$ 减少到 $\pm 6$ )。图4为下加热段采用常规并行串级控制方法的炉温曲线(虚线)和采用智能解耦自整定PD控制方法的炉温曲线(实线)。在5min处加设定值阶跃(设定值由700变为670),在30min处加燃油量扰动阶跃(油量阀位瞬时增加10%),在40min处上加热段加设定值阶跃(由1090变为1120)。工业实验结果表明,采用智能解耦自整定PD控制方法,下加热段炉温对象负荷跟踪速度较快(跟踪时间由6min减少到3min),控制精度较高(全过程中动态偏差由 $\pm 30$ 减少到 $\pm 5$ ),鲁棒性较强(燃油量内扰几乎没有影响),有效地克服了与上加热段之

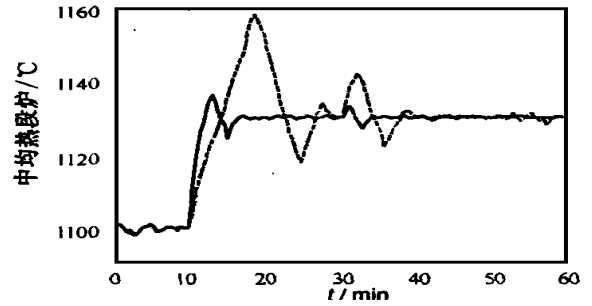


图3 中均热段炉温曲线

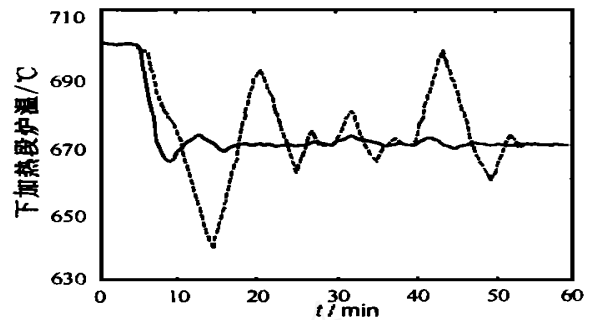


图4 下加热段炉温曲线

间的耦合作用(几乎不受上加热段设定值变化的影响)。

## 6 结 语

本文针对某线材厂步进式加热炉燃烧控制提出一种新的控制方法,在均热段应用具有快速补偿响应功能和抗积分饱和功能的改进交叉限幅控制方法,在加热段应用智能解耦自整定PD控制方法。实际应用结果表明,该方法可提高步进式加热炉各段炉温的控制精度,有效地保证经济燃烧和安全运行,基本达到了最佳燃烧控制的目的。

### 参考文献:

- [1] 吕勇哉. 工业过程模型化及计算机控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1986
- [2] 蒋炯, 吕勇哉, 杨永耀. 步进式加热炉经济燃烧操作的研究开发与实现[J]. 信息与控制, 1989, 18(3): 29-35
- [3] Astrom K J, T Haggglund. Automatic tuning of PD controllers [M]. 2nd Edn. Instrument Society of America, 1995
- [4] Ho W K, L M K W, Xu W. Optimal gain and phase margin tuning for PD controllers [J]. Automatica, 1998, 34(8): 1009-1014