

文章编号: 1001-0920(2005)12-1408-03

## 基于分离方法的加热炉燃烧控制策略

杨英华, 陈晓波, 江云波

(东北大学 a 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, b 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 针对加热炉燃烧控制中普遍存在的燃气热值不稳定问题, 提出一种燃烧控制的新方案——分离控制。该方法保留了传统的温度-燃料流量串级控制, 同时按照生产率模型调节空气流量, 克服了以往串级比值燃烧控制策略无法解决的燃料热值波动时空燃比难以自动修正的缺陷。实际工业应用结果表明, 分离控制不但较好地解决了热值波动时燃烧效率问题, 而且改善了炉膛温度的控制质量。

**关键词:** 加热炉; 燃烧控制; 热值; 空燃比; 分离控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Separation-based Combustion Control Strategy for Reheating Furnace

YANG Ying-hua, CHEN Xiao-bo, JIANG Yun-bo

(a. Key Lab of Process Industry Automation of Ministry of Education, b. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: YANG Ying-hua, E-mail: yhyang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A combustion control strategy is presented to deal with the disturbance of unstable fuel caloric capacity (FCC) of metallurgic plant reheating furnaces. This method is called 'separation control', in which the temperature-gas flow cascade control loop is still kept and air flow is turned separately according to the feed-forward productivity model. The disadvantage that the ratio can not auto-tune along with FCC change of traditional cascade-ratio strategy is overcome. The separation control strategy is efficient and practical in keeping combustion efficiency and improving the control quality of chamber temperature of reheating furnace.

**Key words:** Reheating furnace; Combustion control; Caloric capacity; Ratio of air and fuel; Separation control

### 1 引言

传统的燃烧控制的目的是为了保证燃料与助燃空气流量的合理比值, 从而使其充分燃烧, 取得最高的燃烧效率。然而目前国内运行的加热炉大都采用高炉煤气和焦炉煤气的混合燃料, 其热值常常受到高炉和焦炉工作状况的影响而产生波动。当燃料热值波动时, 燃烧控制系统原有空燃比应随之进行相应的调整, 而这种自动的调整是当前燃烧控制系统很难做到的。

串级比值、双交叉限幅燃烧控制策略<sup>[1]</sup>仍是目前加热炉燃烧控制中最常见的控制方案, 该方案建立在燃料热值恒定的基础上。当混合煤气热值波动

时, 必然导致燃料流量和空气流量的不匹配。燃料热值是确定空燃比的理想方法<sup>[2]</sup>, 但热值信号的检测缺乏可信度和稳定性; 而根据烟气氧含量闭环校正空燃比<sup>[3,4]</sup>也同样因为分析仪器的耐久稳定性而鲜有实例。文献[5]等提出空燃比自寻优的方法, 这些方法在理论上虽然可行, 但在实际过程中由于随机波动和干扰的存在, 很难保证一个完整的自寻优过程, 因而也很难长期稳定运行。因此在实际应用中, 大多加热炉还是通过调火工人的实际经验手动修正空燃比。

本文从加热炉供热平衡的角度出发, 提出一种分离控制方法, 从结构上将空气和燃料流量分开进

收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-03-02

作者简介: 杨英华(1970—), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 博士, 从事复杂工业过程智能控制、过程监测与故障诊断的研究; 陈晓波(1960—), 男, 沈阳人, 教授, 硕士, 从事复杂工业过程控制、智能装置及故障诊断等研究。

行控制,有效解决了煤气热值波动时空燃比的自动调整问题

## 2 分离燃烧控制系统结构

分离燃烧控制系统的结构如图 1 所示 该系统解开了燃料和空气的基本固定的配比关系,根据燃烧系统的供热平衡和燃料中可燃物质的燃烧平衡方

程式,让供风(氧气)量跟随生产率和出钢温度设定值模型而变化,燃料需求量仍根据炉膛温度进行串级调节.通过理论分析和实践证明,这种控制方法不仅能很快地调整炉膛温度,而且能保证空燃比在合适的范围之内,同时基本保证燃烧系统工作在最佳燃烧区域内,进而确保了加热炉的燃烧效率

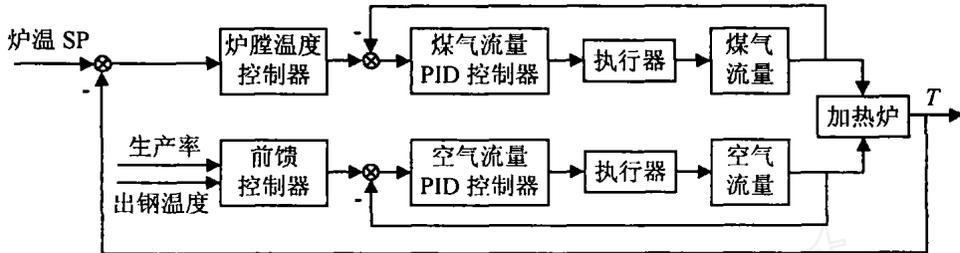


图 1 分离燃烧控制原理

### 2.1 控制系统设计的理论基础

为简化计算,在工程计算准确度允许范围内作以下假定<sup>[2,6,7]</sup>:

- 1) 对空气和烟气中的所有气体成分,包括水蒸气,都作理想气体处理;
- 2) 略去空气中微量的稀有气体和 CO<sub>2</sub>.

设加热炉燃料为高炉煤气和焦炉煤气的混合煤气,其发热量约为 5 900~ 9 200 kJ/(N · m)<sup>3</sup>. 燃料所需空气的配比  $u$  (空燃比) 应与热值  $R_G$  呈线性关系,即  $u = KR_G$ , 其中  $K$  为常系数

从供热平衡角度分析,设加热炉的生产率为  $P$  t/h, 钢入炉时的温度为  $T_0$ , 出炉温度设定值为  $T_{SP}$ , 钢的比热为  $C_{钢}$ . 在推钢式加热炉中,由于出钢和进钢的速度一样,则单位时间内进入的钢要加热至期望值时应需吸收的热量为

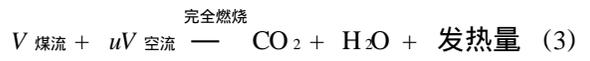
$$Q_{\text{吸热}} = C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0). \quad (1)$$

设煤气的热值为  $R_G$ , 即每立方米煤气完全燃烧时发出的热量为  $R_G$ , 则单位时间内煤气燃料完全燃烧所发出的热量为  $F_{\text{煤流}} R_G$ , 其中  $F_{\text{煤流}}$  为煤气流量. 另外, 排烟温度要带走一部分热量  $Q_{\text{排烟}}$ , 冷却水要带走一部分热量  $Q_{\text{冷却水}}$ , 再加上炉子本身不可避免的一部分热损失  $Q_{\text{损失}}$ , 包括炉门及其他不严密的地方逸出气体带走的热损失和不完全燃烧造成的热损失等等, 都要从煤气燃烧发热量来提供. 从供热需求平衡角度, 有

$$F_{\text{煤流}} R_G = C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0) + Q_{\text{排烟}} + Q_{\text{冷却水}} + Q_{\text{损失}} \quad (2)$$

设  $u$  为理论上应设定的空燃比, 即每立方米的煤气完全燃烧需要  $u \text{ m}^3$  的空气, 为保证燃烧系统工作在最佳燃烧区域内,  $u$  应随着燃料质量(与热值相关)的变化而变化. 当煤气质量好, 热值高时, 单位

体积的煤气完全燃烧需要相对多一点的空气,  $u$  要选择大一点; 反之, 要小一点



式(3)表示  $V_{\text{煤流}}$  体积的煤气完全燃烧需要  $uV_{\text{空流}}$  体积的空气, 由该式可得

$$F_{\text{空流}} = uF_{\text{煤流}} \quad (4)$$

再由式(2)有

$$F_{\text{煤流}} = [C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0) + Q_{\text{排烟}} + Q_{\text{冷却水}} + Q_{\text{损失}}] / R_G, \quad (5)$$

代入式(4)有

$$F_{\text{空流}} = u [C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0) + Q_{\text{排烟}} + Q_{\text{冷却水}} + Q_{\text{损失}}] / R_G \quad (6)$$

上面已经分析过, 空燃比  $u$  与燃料的热值  $R_G$  近似呈正比关系, 则式(6)可写成

$$F_{\text{空流}} = K [C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0) + Q_{\text{排烟}} + Q_{\text{冷却水}} + Q_{\text{损失}}] \quad (7)$$

又有

$$Q_{\text{排烟}} = C_{\text{排烟}} F_{\text{排烟}} T_{\text{排烟}}, \quad (8)$$

式中:  $T_{\text{排烟}}$  为排烟温度; 为保持炉膛压力稳定, 工程上一般取  $F_{\text{排烟}} = nF_{\text{空流}}$ , 其中  $n$  为常数<sup>[5]</sup>.

由式(7)和式(8)可得

$$F_{\text{空流}} = \frac{K}{1 - KnC_{\text{排烟}}T_{\text{排烟}}} \times [C_{\text{钢}} P (T_{SP} - T_0) + Q_{\text{冷却水}} + Q_{\text{损失}}] \quad (9)$$

加热炉形成后,  $Q_{\text{冷却水}}$  主要受加热炉生产节奏的影响,  $Q_{\text{损失}}$  主要受加热炉工作温度的影响. 在生产节奏和产品类型比较稳定的情况下(此时也是生产率  $P$  稳定的阶段), 这两个热量基本保持不变, 而  $T_{\text{排烟}}$  也基本稳定

由式(9)可知, 供风需求量是生产率  $P$  和出钢

温度  $T_{SP}$  设定值的函数 可见,按照这一模型得到的空气流量是最合理的空气流量值 即当生产率和出钢温度设定不变时,供风量可以保持不变 即使此时出现炉温波动,如果是由于燃烧造成的,就说明燃料的热值发生了变化,这时只需将燃料量调整合适,炉温自然可以稳定回来

当钢种不变时,出钢温度设定不变,空气流量随生产率的变化而变化;燃料随温度的波动按照串级控制策略进行相应的调整 当供热平衡时(炉温基本稳定),燃料和空气流量之间仍然保持着理论空燃比的关系

## 2.2 工作过程分析

当煤气的质量较差时,可燃气体组成成分将降低,热值下降,按照原来的空燃比将不能保证最佳燃烧,实际燃烧中将有一部分多余的空气,这样会导致炉膛温度下降 由于流量仍采用串级控制回路,为保证炉膛温度,势必会增加煤气流量,这样,实际的空燃比将会减少,这完全符合热值下降会导致实际空燃比减少的规律 燃烧系统仍能维持最佳燃烧或次最佳燃烧状态 反之亦然,当煤气质量好时,将导致炉膛温度升高,煤气的流量将会相应地减少,实际的空燃比增加,使系统维持在最佳燃烧或次最佳燃烧状态

## 3 应用实例

安阳钢铁公司三轧厂 2<sup>#</sup> 蓄热式加热炉采用三段式连续加热炉工艺,分别为加热一段、加热二段和均热段,加热能力为 70 t/h 采用分散蓄热燃烧技术,各个加热段的炉温分别独立控制 每个加热段有 8 对换向烧嘴,该 8 对烧嘴作为一个独立的换向单元 由于采用混合煤气为燃料,其热值经常随用户用气情况而波动,给常规温度控制带来很大麻烦 针对该加热炉特点,对均热段和二加热段采用了分离控制方案,即空气跟随生产率模型,煤气跟随炉温串级控制 图 2 为某班生产记录曲线 其中:曲线 ① 为生产率,② 为煤气流量,③ 为空气流量,④ 为实际炉温,⑤ 为炉温设定值.

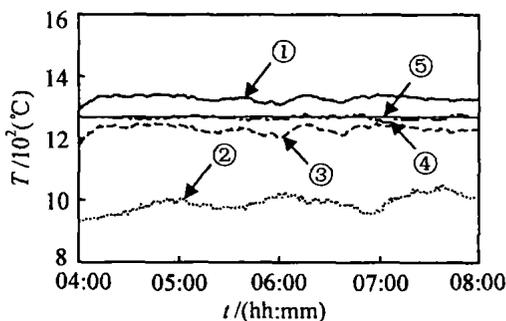


图 2 炉温控制历史曲线

## 4 控制结果分析

从图 2 中可以看出,分离燃烧控制方法明显地提高了系统的响应速度,使炉膛温度能很快地跟随设定值的变化而变化 当加热炉的生产负荷发生变化时,从热平衡的角度,供风流量马上跟着变化 当煤气的热值和生产率有波动时,煤气流量的变化幅值并不是很大,而且煤气流量和风流量的即时空燃比也基本合理. 从一个时间段来看,空燃比有一定的波动,显然,在 5:00 之前,空燃比较大,而在 5:00 ~ 8:00 之间,空燃比逐渐变小. 事实上,在前一段时间,煤气的质量较好,热值较高,单位体积的煤气中需氧量较大;而在后一段时间里,煤气的质量较差,热值较低,单位体积的煤气中的需氧量较少.

分离控制方案简单易行,易于现场实施和维护 实际运行结果也证明,采用分离控制方法特别是在燃料热值波动时效果明显优于常规控制方案 炉温的控制误差一般在  $\pm 10$  之内,节能效果较好,自动投运率大于 99%,有效解决了煤气热值不稳给炉温自动控制带来的困难

## 参考文献 (References)

- [1] Facco Giuseppe, Petersen Michael E, Schurko Robert J, et al. State of the Art Slab Reheating Furnaces at Dofasco [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1990, 67(1): 27-36
- [2] 王应时. 燃烧过程数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1986  
(Wang Y S. *Numerical Calculation of Combustion Process* [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1986)
- [3] Teng Hsisheng, Huang Ta-Sung. Control of NO<sub>x</sub> Emissions Through Combustion Modifications for Reheating Furnaces in Steel Plants [J]. *Fuel*, 1996, 75(2): 149-156
- [4] 曹世海. 加热炉燃烧控制系统的几项改进措施 [J]. *冶金自动化*, 2002, 24(4): 48-50  
(Cao S H. Improvements of Conventional Combustion Control System for Reheating Furnace [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2002, 24(4): 48-50)
- [5] 朱宏祥, 温治, 徐海, 等. 空气燃料比自寻优技术在加热炉中的应用 [J]. *北京科技大学学报*, 2003, 25(2): 139-142  
(Zhu H X, Wen Z, Xu H, et al. Application of Feedforward and Feedback Optimization Technique for Air/Fuel Ratio to Heating Furnace [J]. *J of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(2): 139-142)

(下转第 1414 页)

中,神经网络的平均训练时间仅为120 s,这在传统神经网络训练中是不可能实现的,而且所构造的神经网络的正确识别率也是可接受的.因此,本文算法同样也适合于高维模式识别问题

## 6 结 语

本文利用RBF神经元模型的几何解释,提出一种新的基于构造型神经网络分类学习算法,算法几何意义明确,实现容易,不但对于低维的双螺旋曲线的识别率为100%,而且对于高维的图像识别也表现出良好的识别能力,这与传统的神经网络算法相比,具有明显的优势. BP算法不仅不能保证对于训练样本的高识别率,而且当训练到一定程度时,经常会遇到“Over-Fitting”的问题.本文算法之所以表现出良好的分类能力,关键在于它是从数据本身出发去逼近其分布的几何轮廓,而且实验也证明了本文算法的有效性

## 参考文献(References)

- [1] Mao J, Jain K. Artificial Neural Networks for Feature Extraction and Multivariate Data Projection [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1995, 6(2): 296-317.
- [2] Song H H, Lee S W. A Self-organizing Neural Tree for Large-set Pattern Classification [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1998, 9(5): 369-380
- [3] Yuan J L, Fine T L. Neural-network Design for Small Training Sets of High Dimension [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1998, 9(1): 266-280
- [4] Mukhopadhyay S, Roy A, Kim L S. A Polynomial Time Algorithm for Generating Neural Networks for Pattern Classification: Its Stability Properties and Some Ttest Results [J]. *Neural Comput*, 1993, 5(2): 317-330
- [5] Chen Q C. Generating-shrinking Algorithm for Learning Arbitrary Classification [J]. *Neural Networks*, 1994, 7(9): 1477-1489
- [6] 王守觉,王柏南. 人工神经网络的多维空间几何分析及其理论[J]. *电子学报*, 2002, 30(1): 1-4
- (Wang S J, Wang B N. A Analysis and Theory of High-dimensional Space Geometry for Artificial Neural Networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(1): 1-4)
- [7] Hopfield J J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities [A]. *Proc Natl Acad Sci [C]*. USA, 1982, 79(8): 2554-2558
- [8] Rujan P, Marchand M. A Geometric Approach to Learning in Neural Networks [A]. *Proc IJCNN '89 [C]*. Washington DC, 1989, 2: 105-110
- [9] Ramacher U, Wesseling M. A Geometric Approach to Neural Network Design [A]. *Proc IJCNN '89 [C]*. Washington DC, 1989, 2: 147-1154
- [10] Zhang L, Zhang B. A Geometrical Representation of M-P Neural Model and Its Applications [J]. *J of Software*, 1998, 9(5): 334-338
- [11] 黄国宏,邵惠鹤. 一种新的基于神经网络覆盖分类算法[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(10): 1165-1168  
(Huang G H, Shao H H. A New Classification Method Based on Neural Network Covering Algorithm [J]. *J of Image and Graphics*, 2004, 9(10): 1165-1168)
- [12] Singh S. 2D Spiral Pattern Recognition with Possibilistic Measures [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1998, 19(2): 141-147.
- [13] Baum E B, Lang K J. Constructing Hidden Units Using Examples and Queries [A]. *Neural Information Processing [C]*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1991: 904-910
- [14] Chen Q C, David W Thomas, Mark S Nixon, et al. Generating-shrinking Algorithm for Learning Arbitrary Classification [J]. *Neural Networks*, 1994, 7(9): 1477-1489.
- [15] Fahman S E, Lebiere C. The Cascade-correlation Learning Architecture [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1990, 2: 524-532

(上接第1410页)

- [6] 毕春长,李柠,黄道. 钢坯加热炉仿真系统研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(4): 663-666.  
(Bi C C, Li N, Huang D. Simulation System of Billet Reheating Furnace [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(4): 663-666)
- [7] 青格勒,程素森,杨天钧,等. 步进梁式加热炉内的板坯温度场数值模拟[J]. *北京科技大学学报*, 2004, 26(2):

165-168

(Qing G L, Cheng S S, Yang T J, et al. Numerical Simulation for the Temperature Field of Slabs Heated in a Walking Beam Type of Reheating Furnace [J]. *J of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 26(2): 165-168)