

燃气加热炉燃烧控制方法的研究

左为恒, 王 彦

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 阐述了燃气加热炉的燃烧机理, 并对加热炉燃烧控制系统中采用的常规双交叉限幅控制进行了分析, 针对其在实际生产应用中当系统负荷发生变化时不能保证空气和燃气的最佳配比的问题和系统响应速度慢的问题, 提出根据系统负荷变化及响应对双交叉限幅模型中的偏置量取值进行实时修正的变偏置双交叉限幅控制。仿真结果表明, 当系统负荷变化时采用变偏置双交叉限幅控制提高了系统响应速度, 保证了燃气和空气的最佳配比, 兼顾了系统的经济性。

关 键 词: 燃气加热炉; 空燃比; 燃烧控制; 变偏置; 双交叉限幅

中图分类号: TG307; TP273 文献标识码: A

引 言

燃气加热炉具有大惯性、时变性及非线性(调节阀死区、滞环、延迟等)特性, 对于这种复杂的控制对象, 即使是经验丰富的操作工, 也很难全面考虑各种因素的影响进行准确的控制。加热炉的燃烧控制是为了追求最佳燃烧, 使燃气尽可能燃烧完全, 以及使钢坯被加热到目标温度。对加热炉燃烧控制系统来讲, 首先要求燃烧控制系统具有良好的快速性, 即控制系统跟踪负荷变化的响应速度要快; 其次要求燃烧控制系统具有良好的经济性, 即燃烧控制保证较佳的空燃比, 在保证燃料得到充分燃烧的工况下, 供给最少的空气量。双交叉限幅燃烧控制系统由于采用了燃料量与空气流量之间的相互制约^[1], 并限制过剩空气系数 μ 的瞬态变化, 从而保证加热炉具有较高的燃烧效率, 又具有良好的经济性, 同时也具有极高的安全性。但是, 双交叉限幅燃烧控制系统是用牺牲控制系统跟踪负荷变化的响应速度来换取燃料流量与空气之间相互制约, 并限制过剩空气系数 μ 的瞬态变化, 以达到节约能源的目的。对双交叉限幅燃烧控制系统的原理分析可知, 影响控制系统响应性能的主要参数是限幅中的偏置量取

值。由于双交叉限幅燃烧控制系统偏置量采用了固定常数, 偏置值越大, 变负荷时系统的响应速度越快, 但系统的经济性能会有所降低; 反之, 偏置量越小, 系统的响应速度越慢, 但系统的经济性能会有所提高。因此, 对加热炉之类的工业炉燃烧机理进行分析, 并建立良好的炉温自动控制的理论算式, 使控制系统在高效节能的工况下运行, 对实现节能降耗和降低对环境的污染有着极其重要的意义。

1 燃烧机理及控制方式

1.1 燃烧机理分析

燃气加热炉以高炉、焦炉混合煤气为燃料, 分多个控制区(一般分为: 预热段、二上段、一上段、一下段、均上段、均下段加热)。每个控制区燃烧过程是燃气的氧化过程。当燃气燃烧时, 火焰温度的高低并不由燃料数量的多少来决定, 而取决于燃料是否完全燃烧, 是否发出最大的热效率。

图 1 为助燃空气过剩率与燃烧效率及污染之间的关系。从图中可以看出, 燃烧系统的质量跟空气过剩率有很大的关系。同时, 空气过剩率可以用空气和燃气配比, 即空燃比来描述。设 μ 为剩余空气系数, λ_0 为空燃比, 其定义为:

$$\mu = \frac{\text{实际空气量}}{\text{理论计算空气量}} = \frac{F_A}{\lambda_0 F_F} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{F_A / F_{A\max}}{F_F / F_{F\max}} \quad (2)$$

式中: λ_0 —单位体积的燃料完全燃烧所需的理论空气量; F_A 、 $F_{A\max}$ —空气流量的测量值和最大值; F_F 、 $F_{F\max}$ —燃料流量的测量值和最大值。

由式(1)和式(2)可知空燃比 λ 与剩余空气系数 μ 的关系为:

$$\lambda = \frac{F_A / F_{A\max}}{F_F / F_{F\max}} = \frac{F_A}{\lambda_0 \cdot F_F} \times \frac{\lambda_0 \cdot F_{F\max}}{F_{A\max}} = \mu \cdot \beta \quad (3)$$

收稿日期: 2009-07-29 修订日期: 2009-10-22

作者简介: 左为恒(1961-), 男, 重庆人, 重庆大学副教授, 硕士生导师。

$$\beta = \frac{A_0 \cdot F_{Fmax}}{F_{Amax}} \quad (4)$$

式中： β —理论空气修正系数，一般取 0.8 ~ 1.0

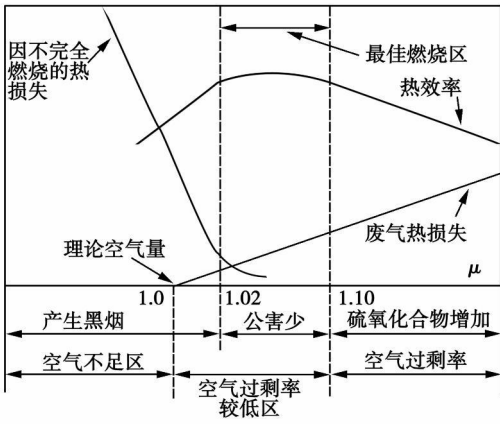


图 1 燃烧系统评估因素

从图 1 可以看出，当 μ 为 1 时，是理论上达到合理空燃比所需要的空气量。但在实际中， $\mu < 1$ 和 $1 \leq \mu < 1.02$ 分别为空气不足燃烧区域、空气过剩率较低燃烧区域。在这两个燃烧区中，会有不完全燃烧现象，这样热损失就比较大。由于不完全燃烧，将会产生大量的黑烟，污染大气环境且浪费燃气能源。但是如果处于高过剩空气燃烧区，即当 $\mu > 1.10$ 时，由于空气过剩，不但使出钢时钢坯表面的氧化铁皮增多，影响钢加热质量，而且使烟气中带走了大量的热量，使燃烧系统热效率过低，同时，过多的 O_2 会使 NO_x 和 SO_x 增加，对环保也不利。因此，在实际燃烧系统中，空气过剩率设定在过剩空气燃烧区 $1.02 \leq \mu \leq 1.1$ 是最佳的燃烧方案。

为确保燃烧控制系统在受到扰动和负荷急增或急减时，均能在空气微过剩状态下燃烧，图 2 给出了加热炉某段区温度调节与空气流量和燃气流量两个燃烧调节系统原理图，是变偏置量双交叉限幅控制系统。在稳态时，系统具有两个并联副回路的串级调节系统。其中温度控制回路作为主回路，燃气流量回路和空气流量回路并联作为副回路。交叉限幅控制是为了改善系统的动态性能，保证系统在动态过程中空燃比维持在一定的范围。

双交叉限幅燃烧控制采用对副闭环回路的空气流量控制和煤气流量控制的设定值进行限幅，通过高值和低值选择器的相互制约来防止负荷变化很快时出现燃料或空气过剩，从而避免过氧和缺氧燃烧现象的产生。这样，燃料流量和空气流量会严格地

按照一个合理的比值交替上升，使实际的空燃比保持在合理的范围之内。

图 2 中 HS1 为燃气高值选择器，其中 A 为第一输入（温度控制器 TC 输出），B 为第二输入；LS1 为燃气低值选择器，其中 C 为第一输入，D 为第二输入；HS2 为助燃空气高值选择器，其中 A 为第一输入，H 为第二输入；LS2 为助燃空气低值选择器，其中 G 为第一输入，F 为第二输入。

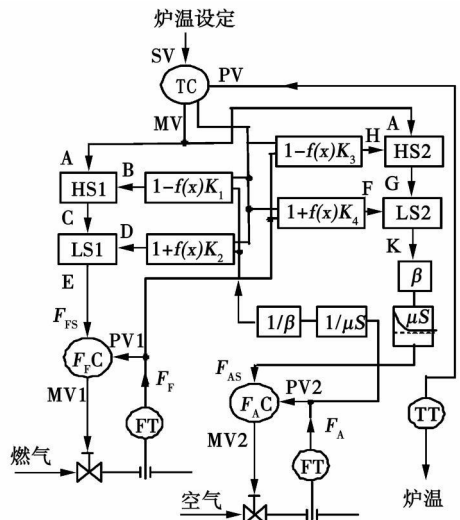


图 2 双交叉限幅控制系统结构原理图

图 3 给出了负荷扰动时，双交叉限幅系统燃气流量设定及空气流量设定的瞬态变化过程。图中偏置单元 $K_1 \sim K_4$ 意义为：

K_1 —负荷减小时，限制过氧燃烧，燃气流量设定偏值，%； K_2 —负荷增大时，限制缺氧燃烧，燃气流量设定偏值，%； K_3 —负荷减小时，限制缺氧燃烧，空气流量设定偏值，%； K_4 —负荷增大时，限制过氧燃烧，空气流量设定偏值，%； $f(x)$ —变偏置函数， x 为加热炉温度给定值和检测值之差作为变偏置函数输入量，%。

双交叉限幅值为：

$$\begin{cases} D = F_A \cdot \frac{1}{\mu\beta} (1 + K_2 f(x)) \\ B = F_A \cdot \frac{1}{\mu\beta} (1 - K_1 f(x)) \\ F = (1 + K_4 f(x)) \cdot F_F \\ H = (1 - K_3 f(x)) \cdot F_F \end{cases} \quad (5)$$

式中： D —不出现缺氧燃烧时，燃气流量的上限值； B —不出现过氧燃烧时，燃气流量的下限值； F —不出现过氧燃烧时，空气流量的上限值； H —不出现缺

氧燃烧时, 空气流量的下限值。

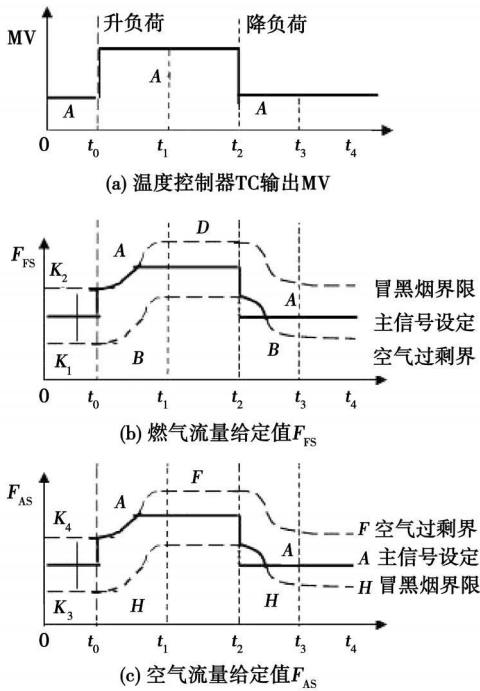


图 3 负荷扰动下各信号的过渡曲线

1.2 双交叉限幅控制系统工作原理

1.2.1 系统处于平衡状态期间

在图 3 中, $0 \sim t_0$, $t_1 \sim t_2$, $t_3 \sim t_4$ 期间, 对燃料回路有 $D > A > B$ 对空气回路有 $F > A > H$ 经 HS1、LS1、HS2、LS2 高低值选择器后有: 温度控制器 TC 输出信号 $A(MV)$ 同时作为燃气和空气流量调节器的控制信号 MV_1 、 MV_2 此时空气过剩系数等于给定值 μ_0 。

1.2.2 系统负荷突然增加时

当升负荷时, 信号 A 急剧上升, 发生正跳变, 如图 3(a) 所示。首先考虑燃气调节回路的情况, 如图 3(b) 所示。开始 $A > B$ HS 选通 A 当 A 正跳变到 $A > D$ 时, LS 选通 D A 被中断, D 作为燃气流量调节阀的控制信号, 使燃气流量随 D 值的增加而增加, 即燃气流量随空气流量的增加而增加, 交叉限制开始。当 D 增加到 $D > A$ 同时 $A > B$ HS、LS 同时选通 A A 作为燃气流量调节阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。其次考虑空气调节回路情况, 如图 3(c) 所示。开始时, $A > H$ HS 选通 A 当 A 正跳变到 $A > F$ 时, LS 选通 F A 被中断, 将 F 与空燃比 μ 的乘积作为空气流量调节阀的控制信号, 使空气流量随 F 值的增加而增加, 即空气流量随燃气流量的增加而增加, 交叉限制开始。

当 F 增加到 $F > A$ 同时 $A > H$ HS、LS 同时选通 A A 作为空气流量调节阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。至此, 升负荷的过渡过程结束。在这个动态过程中, 燃气流量和空气流量互相影响交替增加, 实现了交叉限幅的功能。

1.2.3 系统负荷突然降低时

当降负荷时, 信号 A 急剧降低, 发生负跳变, 如图 3(a) 所示。首先考虑燃气调节回路的情况, 如图 3(b) 所示。开始 $A > B$ HS 选通 A 当 A 负跳变到 $A < B$ 时, HS 选通 B A 被中断, 同时 $B < D$ LS 选通 B B 作为燃气流量调节阀的控制信号, 使燃气流量随 B 值的减小而减小, 即燃气流量随空气流量的减小而减小, 交叉限制开始。当 B 减小到 $B < A$ 时, HS 选通 A 同时 $A < D$ LS 选通 A A 作为燃气流量调节阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。其次考虑空气调节回路的情况, 如图 3(c) 所示。开始 $A > H$ HS 选通 A 当 A 负跳变到 $A < H$ 时, HS 选通 H A 被中断, 同时 $H < F$ LS 选通 H H 作为空气流量调节阀的控制信号, 使空气流量随 H 值的减小而减小, 即空气流量随燃气流量的减小而减小, 交叉限制开始。当 H 减小到 $H < A$ 时, HS 选通 A 同时 $A < F$ LS 选通 A A 作为空气流量调节阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。在这个动态过程中, 燃气流量和空气流量互相影响交替增加, 实现了交叉限幅的功能。

上述升降负荷过程中, 燃气流量给定值的上下限限幅曲线 (B 、 D 值曲线) 及空气流量给定值的上下限限幅曲线 (H 、 F 值曲线) 并不是平滑过渡的, 而是随变偏置函数 $f(x)$ 值的变化而上下波动, 也就是随加热温度偏离给定值的大小而变化。当加热炉温度测量值与给定值的差值增大时, $f(x)$ 值也会增大, 系统加大偏置范围, 使系统跟踪负荷变化的速度提高。反之, 当加热炉温度测量值与给定值的差值减小时, $f(x)$ 值也会减小, 系统减小偏置范围, 使系统经济性提高。由此分析得知, 系统变负荷时, 本控制系统兼顾了系统经济性能和快速响应性能。 $f(x)$ 的取值同时受过剩空气系数 μ 的允许范围限制。

2 变偏置双交叉限幅控制系统仿真

由于变偏置函数 $f(x)$ 的取值范围是受过剩空气系数 μ 的允许范围限制的, 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统就是在兼顾系统经济性和响应性能的情况下, 寻求偏置量的最佳取值范围。仿真实验的目

的也就是确定偏置函数 $f(x)$ 的最佳取值范围以供实际应用借鉴。图 4 中依次对应表 1 所给的 4 组不同的偏置函数 $f_1(x) \sim f_4(x)$ 值时, 所得到的仿真曲线。图中以加热炉温度给定值的阶跃变化作为系统扰动, K 参数取值为 $K_1 = K_2 = 1.2$ $K_3 = K_4 = 0.6$ 表 1 中 $X = (SV - PV) / SV$

表 1 偏置函数取值 (%)

X	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$
-100	8	12	16	20
-50	7	10	14	18
-10	6	8	12	16
-8	5	7	10	14
-6	5	6	9	14
-3	4	5	8	12
0	4	5	8	12
3	4	5	8	12
6	5	6	9	14
8	5	7	10	14
10	6	8	12	16
50	7	10	14	18
100	8	12	16	20

图 4 中每组曲线: (1) 为空气过剩系数 μ 曲线; (2) 为加热炉温度给定值 SV 控制输出值 A 燃气流量给定值 F_{FS} B D 曲线; (3) 为加热炉温度给定值 SV 温度控制输出值 A 空气流量给定值 F_{AS}

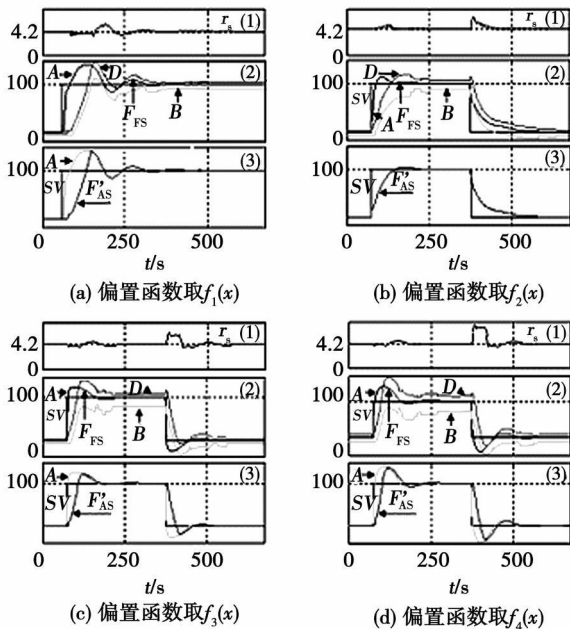


图 4 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统仿真曲线

从 4 组仿真实验曲线可以看出, 过剩空气系数 μ 的波动范围随着偏置函数 $f(x)$ 值的增加而增大,

也就是系统的经济性随着偏置函数 $f(x)$ 值的增加而降低, 与原理分析一致; 控制系统的过渡过程时间随着偏置函数 $f(x)$ 值的增加而减小, 其系统跟踪负荷变化的速度也随着偏置函数 $f(x)$ 值的增加而增加, 与理论分析一致。从兼顾变偏置双交叉限幅燃烧控制系统的经济性和快速响应性能的观点出发, 结合 4 组仿真实验曲线可得出变偏置函数 $f(x)$ 值的最佳取值范围介于 $f_2(x) \sim f_3(x)$ 之间。变偏置双交叉限幅控制系统可以用于燃气加热炉控制系统, 也可用于负荷变化较大的锅炉燃烧控制系统, 但对于不同的控制系统还需根据实际情况对偏置函数 $f(x)$ 的取值范围进行调整。

3 结 论

对燃气加热炉的燃烧控制策略—双交叉限幅控制进行了深入的研究, 得出结论为:

(1) 当加热炉负荷发生变化时, 常规的双交叉限幅控制是通过限制系统燃气、空气流量变化速度来保证最佳的空燃比, 但这样降低了系统的响应速度。本研究提出的加热炉温度控制实际值和设定值之间的偏差量大小来设定偏置函数, 进而改变双交叉限幅中的偏置量取值, 建立变偏置双交叉限幅控制系统。此系统能始终保持在最佳的燃烧控制状态下工作, 即有较快的系统响应速度。

(2) 偏置函数取值是依据实验选择一组系统性能表现最优的函数值建立温度—偏置函数取值表确定的。系统在运行中, 根据计算温度偏差直接查表确定偏置函数取值, 减少了系统运算时间, 提高了系统运行速度。

(3) 变偏置双交叉限幅系统是对常规双交叉限幅系统中的偏置取值进行改进, 算法简单, 同时保证燃气和空气的最佳配比, 达到节能环保的目的。

参考文献:

- [1] 胡祖宝. 偏差比例双交叉限幅控制在生产中应用 [J]. 控制工程, 2004 11(5): 392-393
- [2] 左为恒, 李昌春. 型钢燃气加热炉燃烧机理及控制方式研究 [J]. 自动化技术与应用, 2008 27(1): 21-23.
- [3] 林 敏, 丁金华, 田 涛. 计算机控制系统及工程应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [4] 渝 央. 燃烧控制技术及其发展 [J]. 自动化与仪器仪表, 2003 84(1): 57-61.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005

(编辑 陈 滨)

汽包水位晃荡水动力学模型的实验验证 = Experimental Verification of a Hydrodynamic Model Featuring the Sloshing of a Drum Water Level [刊, 汉] / CAO Xiaoling, LU Kai-xuan (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076), LU Yongwen, SUMING (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 539 ~ 542

To verify the effectiveness of a hydrodynamic model featuring the sloshing of a drum water level developed was a hydrodynamic mechanism model showing the sloshing of the drum water level and designed and set up was a test rig according to the test requirements. On this basis, an experimental study was performed. The research results show that the test results regarding the sloshing of the drum water level are basically in agreement with the calculated ones in terms of the fluctuation period with the numerical error within a range of $\pm 10\%$. In terms of the fluctuation amplitude and phase position, a certain error exists between the test results and calculated ones. However, such an error falls within a range of $\pm 20\%$, meeting the demands of the research work and laying a necessary foundation for setting up a complete model featuring the sloshing of the drum water level. Key words: combined cycle heat recovery steam generator; drum water level sloshing; hydrodynamic model; modularization modeling

燃气加热炉燃烧控制方法的研究 = Study of the Methods for Controlling the Combustion in a Fuel Gas Heating Furnace [刊, 汉] / ZUO Wei-heng, WANG Yan (National Key Laboratory on Safety and New Technologies for Power Transmission and Distribution Equipment Items and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 543 ~ 546

Described was the combustion mechanism of a fuel gas heating furnace and analyzed was the conventional dual-crossed limited amplitude control adopted by the combustion and control system of the furnace. In the light of such problems in the practical production and applications as incapable of guaranteeing the optimum air and fuel gas ratio and slow in the response speed of the system during its load change, the authors proposed a variable bias dual-crossed limited amplitude control, of which the value taken as the bias in the dual-crossed limited amplitude model was real time corrected according to the load change and response of the system. The simulation results show that the adoption of the variable control in question during load changes of the system can enhance its response speed, thus guaranteeing the optimum air and fuel gas ratio and concurrently achieving a good cost effectiveness of the system. Key words: fuel gas heating furnace; air/fuel ratio; combustion control; variable bias; dual-crossed limited amplitude

新型干煤粉气流床气化炉的气化特性研究 = Study of the Gasification Characteristics of a New Type Dry Pulverized-coal GFB (Gas Fluidized Bed) Gasifier [刊, 汉] / TANG Zhi-guo (College of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei Institute of Technology, Hefei, China, Post Code: 230009), MA Pei-yong, LI Yong-ling, LIN Qi-zhao (Department of Thermal Science and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power