

玻璃窑炉燃烧过程自寻最优控制

钟汉枢 甘永成

(华南理工大学自动化系, 广州)

摘 要

本文论述了用微型计算机对玻璃窑炉的玻璃温度、重油流量、空气流量、重油流量与空气流量之比值等主要工艺参数进行控制的基础上, 采用步进搜索自寻最优点控制算法, 通过修改二次风(助燃风)流量与重油流量之比值, 对二次风流量进行自动搜索, 使之工作在最佳值附近, 实现燃烧过程的最优控制。

关键词: 玻璃窑炉; 燃烧过程; 自寻最优点控制; 节能。

一、概 述

我们用两台微型工业控制机以及原有常规仪表对广州灯泡厂燃烧重油马蹄焰型玻璃窑炉的工艺参数进行显示、储存、打印和报警。同时, 对玻璃温度、重油流量、空气流量、重油流量与空气流量之比值、窑内压力、玻璃液位、重油温度和火焰换向等主要工艺参数进行控制。详细内容见文献[1]。

玻璃窑炉燃烧过程最优控制是玻璃窑炉过程控制的难点和节约重油的关键。特别是重油油质多变的情况下, 更是如此。最初, 我们采用氧化锆氧分析器检测废气中的含氧量, 来控制风油之比值。因氧化锆探头安装位置的选择受诸多因素的限制和漏风的影响, 难于测出废气中含氧量的真值, 使用效果不佳。后来采用步进搜索自寻最优点控制算法, 既节省了氧化锆, 又实现了燃烧过程最优控制, 节约了重油。

二、玻璃窑炉燃烧过程的极小值特性

玻璃温度控制在给定值的条件下, 由文献[2]得知: 重油流量 G_1 与二次风流量 G_2 有如图1所示的极小值特性曲线。

图中曲线A对应于热值高的重油, 曲线B对应于热值低的重油。

由图可见, 当油质变化时, 重油流量与二次风流量的极小值特性曲线产生漂移。

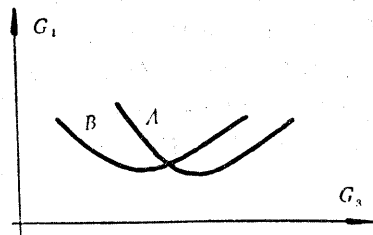


图1 重油流量 G_1 与二次风流量 G_2 的关系

三、控制 方 案

在利用原有常规仪表对窑内压力、玻璃液位、重油温度和火焰换向等进行自动调节的条件下,我们用一台 SC—841 工业控制机完成熔化区炉顶温度、风油配比和燃烧过程自寻最优的控制,其控制方框图见图2。

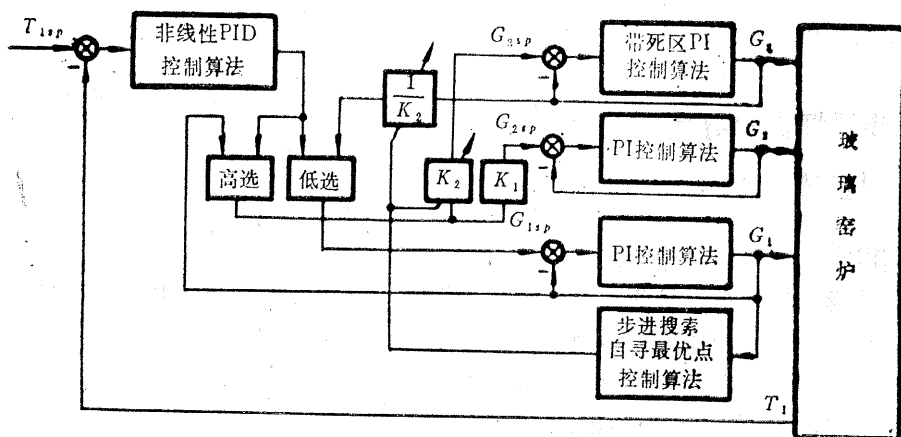


图 2 控制方框图

图中 T_1 为熔化区炉顶温度; G_1 为重油流量; G_2 为雾化风流量; G_3 为二次风流量; T_{1sp} 为熔化区炉顶温度给定值; G_{1sp} 为重油流量给定值; G_{2sp} 为雾化风流量给定值; G_{3sp} 为二次风流量给定值; $K_1 = G_2/G_1$; $K_2 = G_3/G_1$ 。

由图可见:

1. 炉顶温度与重油流量组成非线性 PID 串级调节, 达到了追温快、超调小、控制精度高之目的。

主回路采用非线性不完全微分型的 PID 算法

$$e(i) \geq C, \quad G_{1sp}^{(i)} = G_{1max} \quad (3.1)$$

$$e(i) < C, \text{ 执行 PID 算法, 算出 } G_{1sp}(i)$$

$$e(i) = T_{1sp} - T_1(i) \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

其中 C 为给定常值; G_{1max} 为重油流量的最大值。

副回路采用 PI 算法。

2. 雾化风流量与重油流量按比值调节。为克服非线性和不对称给控制带来的困难, 采用分段控制。控制算法如下:

$$G_i < G_{1sp} \leq G_{i+1} \quad (3.3)$$

$$G_{2sp} = \begin{cases} K'_1 \cdot G_i^F & (\text{东油枪工作时}) \\ K'_1 \cdot G_i^W & (\text{西油枪工作时}) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

其中 G_1, G_1^E, G_1^W 为给定常值; K_1 为修正系数。

3. 二次风流量与重油流量按比值调节。用步进搜索自寻最优点控制算法对二次风流量与重油流量之比值 K_2 进行修正, 使风油配比系统工作在最优运转点。

4. 利用高低选算法, 确保系统在动态调节中, 实现先加二次风, 后加重油; 反之, 则先减重油, 后减二次风。以获得充分燃烧, 使烟囱不冒黑烟。

四、步进搜索自寻最优点控制算法^[3,4]

1. 工作原理

玻璃窑炉燃烧过程自寻最优控制, 就是在控制玻璃温度、窑内压力、玻璃液位和重油温度为给定值的条件下, 自动寻找使重油流量为最小值的二次风流量, 使燃烧系统工作在最优工作点。工作原理如图3所示。

G_3 为输入量 (控制量), G_1 为输出量 (控制指标)。设系统某一时刻工作在 D 点。燃烧特性曲线 $G_1 = f(G_3)$ 在 M 点有一个极小值, 这个极小值正是希望的最优工作点。步进搜索的任务是由工作点 D 出发, 逐步地将工作点引向 M 点。为此, 先将 K_2 减小 ΔK_2 (即 G_3 减小 ΔG_3), 系统工作点将移往 $(G_{3d} - \Delta G_3, G_{1d} - \Delta G_1)$ 。取 ΔK_2 为常值, 显然, $\Delta G_1 / \Delta G_3$ 的大小和方向近似为曲线 $G_1 = f(G_3)$ 在 G_{3d} 的梯度

$$\left. \text{grad} f(G_3) \right|_{G_{3d}} \simeq \frac{G_1(G_{3d} - \Delta G_3) - G_1(G_{3d})}{\Delta G_3} \quad (4.1)$$

因为曲线 $G_1 = f(G_3)$ 只有一个极小值, 则上式的符号唯一地确定最优工作点 M 相对于 D 点的方位。例如, 若 $\text{grad} f(G_3)$ 在 G_{3d} 点值为正, 则最优工作点 M 将位于 D 点的左边, 否则最优工作点 M 将位于 D 点的右边。

于是, 根据增量 ΔG_1 的大小和正负, 便可决定 K_2 的调整方向和大小, 调节规律为

$$\Delta K_2 = K \cdot \text{sign}(\Delta G_1) \quad (4.2)$$

2. 搜索步长的选择

本系统采用等步长寻优算法。由图5可见, 在最优点附近燃烧特性曲线接近抛物线

$G_1 = a \cdot G_3^2$ 。在稳态情况下, 搜索损失 D^* 为

$$\frac{1}{2} a \cdot \Delta K_2^2 \geq D^* \geq \frac{1}{4} a \cdot \Delta K_2^2 \quad (4.3)$$

由于燃烧特性曲线斜率变化不大, 且考虑到每隔30分钟自动寻优一次, 起始点离最优点较近。同时, 我们采用二次风流量与重油流量之比值 K_2 为直接输入量, 二次风流量 G_3 为间接输入量, 这使寻优时间大为缩短, 并在重油油质不变的条件下, 燃烧系统稳定工

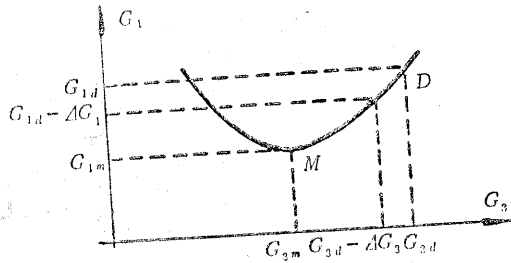


图3 步进搜索自寻最优点控制算法工作原理

作在最优点。因此,我们选取了能克服干扰影响(例如,电动执行机构的死区和不对称等)的较小步长 ΔK_2 , 即使搜索损失 D^* 较小, 又使搜索时间不长。此算法简单, 易于实现, 且效果好。

3. 控制算法

$$\Delta K_2(i) = \begin{cases} -K & i=1 \\ K \cdot \text{sign}[\Delta G_1(1)] & i=2 \\ -K \cdot \text{sign}[\Delta K_2(2)] \cdot \text{sign}[\Delta G_1(i-1) - C \cdot \text{sign}(\Delta K_2(2))] & i=3, 4, \dots \end{cases} \quad (4.4)$$

$$K_2(i) = K_2(i-1) + \Delta K_2(i) \quad i=1, 2, \dots \quad (4.5)$$

其中 K, C 为给定常值, $\Delta G_1(i) = G_1(i) - G_1(i-1) \quad i=1, 2, \dots$

4. 控制程序流程方框图(见图4)

五、稳定运转设计

使二次风流量的改变和重油流量的测试结果如实反映窑炉的燃烧特性, 且又不影响窑炉工况, 这是实现玻璃窑炉燃烧过程自寻最优控制系统稳定运转的关键。为此, 我们采取了如下措施。

1. 控制玻璃温度、玻璃液位、窑内压力和重油温度为给定值;

2. 选 K_2 为直接输入量, G_3 为间输接入量;

3. 对重油流量的采样值进行数字滤波处理;

4. 在控制算法中, 加进给定常值, 使系统工作在最优工作点偏右附近小区间, 确保充分燃烧;

5. 每当火焰换向时, 玻璃温度稳定在给定值后, 便从上次的工作点出发, 开始自动寻优。且当系统工作点落在最优点时, 停止寻优;

6. 合理选择 ΔK_2 , 使寻优工作不致于因为干扰影响而遭到破坏, 且又不影响窑炉工况的稳定运转。

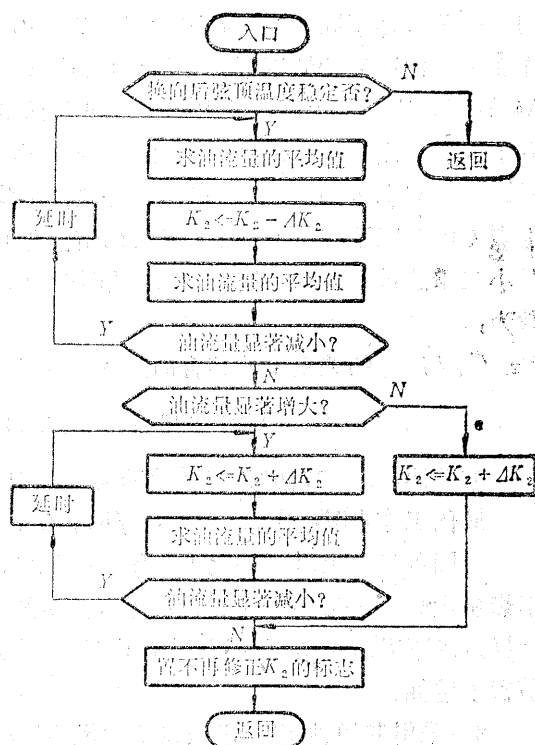


图4 控制程序流程方框图

六、应用效果

1. 控制熔化区炉顶温度 $1500 \pm 3^\circ\text{C}$, 火焰辐射温度 $1600 \pm 10^\circ\text{C}$ 。

2. 现场试验的自寻最优控制搜索过程如图五所示。

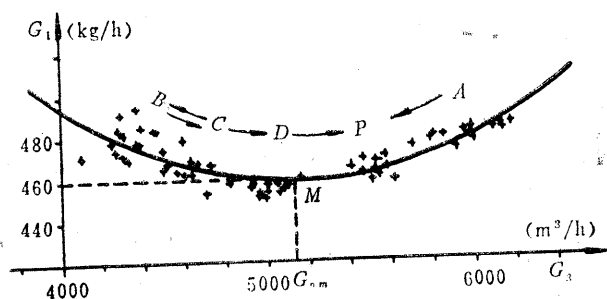


图 5 自寻最优控制搜索过程

考虑到厂每次购进的重油油质大不相同，基本上可分为好、一般和差三种。我们分别对应于三种不同油质，做了如下试验。火焰换向时，人为增大 K_2 值，让系统起始工作在风油比过量的情况下，计算机自动寻优。从记录数据看，除了系统稳定工作时的 K_2 值不同外，寻优过程基本相同，搜索2至3步后停止寻优。随后，我们对一般油质，做了双向寻优的试验。火焰换向时，人为增大 K_2 值，计算机自动寻优；下次火焰换向时，人为减小 K_2 值，计算机自动寻优。试验时，每10秒记录一组 G_1 、 G_3 值，每个工作点（即对应于每个 K_2 值）记录15组。我们对双向寻优试验，选取了75组数据，采用最小二乘法进行多项式回归^[6]，从而得到拟合的二次曲线（图中实线所示）。有关参数为：

G_1 与 G_3 的关系式（拟合曲线）

$$G_1 = 1187.48844 - 0.2835443G_3 + 2.7621 \times 10^{-5}G_3^2$$

方差比： $F = 77.03$ ，查 F 检验表知，拟合方程是高度显著的，可信度大于 99%。

最优工作点 M ： $G_{3m} = 5133(\text{m}^3/\text{h})$ ， $G_{1m} = 460(\text{kg}/\text{h})$

由图可见，采用风油比 K_2 为直接输入量，虽然干扰使 G_1 、 G_3 值是波动的，但并不影响燃烧系统自动寻优的稳定运行，系统的稳定工作点 P 位于最优点 M 的右侧附近。这样，既不用氧化锆氧分析器测出废气中的含氧量，又使燃烧系统工作在最优点附近，节省了重油。

3. 采用非线性 PID 串级调节和燃烧过程自寻最优控制后，与常规仪表控制比较，经济效益显著。拉管机日出料量提高 0.68 吨，直管废品率下降 3.09%，泡壳废品率下降 2.75%，平均节油 4.5%，一年节油 190 吨，每年为厂增加总效益 20 多万元。

致谢 涂其桷教授认真审阅了本文，提出了宝贵意见，特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Zhong Han-shu; Gan Yong-cheng; Xu Jian-min; Yuan Yong-zhan, Microcomputer Process Control System for the End-fired Oil-buring Glass Furnace, Proceedings of the Symposium on Measurement and

Control 24th-26th November, Hong Kong, (1987) 1—6.

- 〔2〕 孙承绪、陈润生、孙晋涛、詹美瑶, 玻璃窑炉热工计算及设计, 中国建筑工业出版社, 北京, (1983).
- 〔3〕 钱学森、宋 健, 工程控制论下册, 科学出版社, 北京, (1981).
- 〔4〕 戴绪愚, 自寻最优控制, 科学出版社, 北京, (1986).
- 〔5〕 上海师范大学数学系概率统计教研组编, 回归分析及其试验设计, 上海教育出版社, (1978).

Optimalizing Control of the Burning Process for the End-fired Oil-buring Glass Furnace

Zhong Hanshu, Gan Yongcheng

(Department of Automation, South China University of Technology, Guangzhou)

Abstract

Based on the microcomputer control of major process parameters, such as the furnace temperature, the oil flow, the combustion air flow and the ratio between them, a stepwise optimalizing control algorithm was introduced. By adjusting the ratio between the combustion air flow and the oil flow, the combustion air flow was searched automatically and was kept about its optimal value in operation. The optimal control of the burning process was obtained.

Key words—Glass furnace; Burning process; Optimalizing control; Economization in energy utilization