

水泥煅烧过程中大时滞 对象的间歇积分控制

刘 宜

(山东大学数学系, 济南)

摘 要

水泥煅烧过程中生料和煤粉流量具有较大的时滞, 所以它们是难以控制的。本文介绍一种间歇积分控制方案, 其可行性已经在实际应用中得到证实。

一、水泥煅烧过程微机控制

水泥煅烧过程控制是多变量控制^[1], 参数之间关系复杂。但可按其主要参数关系分成四个回路, 不同回路之间的参数相互影响可用各种前馈和补偿措施加以协调。

图1所示为其中生料和煤粉流量的比值控制^[2]框图。本文仅介绍这两回路的控制方案。

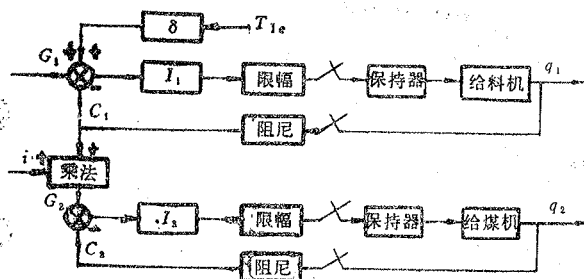


图1 生料煤粉比值控制

图中: G_1 、 G_2 ——生料、煤粉给定, $G_2 = iC_1$; i ——配比; C_1 、 C_2 ——料、煤流量采样值; q_1 、 q_2 ——料、煤流量; T_{1c} ——废气温度; δ ——前馈系数; I_1 、 I_2 ——间歇积分控制器; 阻尼——采样值递推数字滤波^[3]。

生料、煤粉流量对象均为大时滞对象, 其纯迟延时间很大。初步估算, 生料对象纯迟延时间约18秒; 后者约14秒。而惯性时间均在1秒之内, 因此可看成纯迟延对象。

二、大时滞对象间歇积分控制

所谓大时滞对象, 这里主要是指其纯迟延时间很长, 例如有的是十几秒, 甚至数十

分钟。这类对象常被称做难以控制的对象^[4]。在过程控制中经常遇到, 并且比较麻烦。因而研究大时滞对象的控制具有一定的普遍意义。

根据一般习惯, 较简单的对象可近似表为

$$G(s) = \frac{Ke^{-s}}{TS+1}, \quad (1)$$

其特征参数: K ——静态增益; T ——惯性时间; τ ——纯迟延。它们既可实测, 亦可估算。

由文献[4], 选采样周期 $T_s \geq \tau + \Delta t_c$ 。其中 Δt_c 是每个周期开始实际积分控制的时间。不失一般性, 设 $\tau/T_s = L + q$, L 为非负整数 (包括零); 而 $0 \leq q < 1$ 。根据超前扩展 Z 变换理论^[3], 零阶保持器和对象的总开环脉冲传递函数可表为

$$W(Z, \Delta) = \frac{KZ^{-L-1} [1 - e^{-\Delta T_s/T} - (e^{-T_s/T} - e^{-\Delta T_s/T}) Z^{-1}]}{1 - e^{-T_s/T} Z^{-1}}, \quad \Delta = 1 - q. \quad (2)$$

$$q=0 \text{ 时}, \quad W(Z) = \frac{KZ^{-L-1}(1 - e^{-T_s/T})}{1 - e^{-T_s/T} Z^{-1}}. \quad (3)$$

本文采用间歇积分控制解决大时滞对象问题。间歇积分的意思是: 仅在每个周期开始的 Δt_c 时间内是积分控制, 然后积分间歇, 保持控制作用在下一周期之前不变。这种方案在工业控制机普遍应用的现在是具有可能性的, 而且容易实现, 可专用来解决大时滞对象控制问题。

若取 $T_s > \tau + \Delta t_c$, 即 $L=0$; $q = \tau/T_s < 1$ 。积分作用系数为 K_i , 对于偏差 e 控制作用

$$\Delta m = e K_i \Delta t_c. \quad (4)$$

这一周期末的响应是 $\Delta C = K \cdot \Delta m$ 。若取

$$K_i \Delta t_c = 1/K, \quad (5)$$

响应 ΔC 可将偏差 e 在一个周期内抵消。这里假定 $T \ll T_s$, 过渡过程在一个周期内能够结束。

实现这种控制不仅需要 $T_s > \tau + \Delta t_c$, 尚需满足 (5) 式。设 $m(n)$ 、 $m(n+1)$ 分别是第 n 周期和下一周期的控制作用, 则有

$$m(n+1) = m(n) + \Delta m. \quad (6)$$

在满足 (5) 式的要求时可加大积分作用系数 K_i , 相应地压缩 Δt_c , 以便尽可能省出时间, 使积分作用在下一周期之前充分显示出来。

大量数字仿真结果 (略) 证明, 在 $T \leq 5\% \tau$ 时可完全按纯迟延对象对待; 惯性较大时这种控制效果也较好。

三、动态分析

单回路间歇积分控制框图如图 2 所示。其中 e^* 、 c^* 表示误差和输出的采样脉冲序列；而 $D(Z)$ 表示数字控制器。其积分作用可等效地看作全周期积分，积分系数 $K'_i = K_i \Delta t_c$ 。因此 $D(Z)$ 可表为：

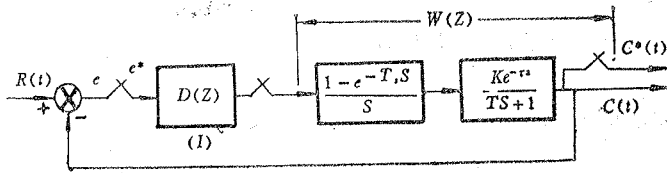


图 2 单回路控制框图

$$D(Z) = \frac{K_i \Delta t_c}{1 - Z^{-1}} \quad (7)$$

取 $P = K_i \cdot \Delta t_c \cdot K$ 为总开环增益，不失一般性，由 (2) 式可得总开环脉冲传递函数

$$\bar{W}_h(Z, \Delta) = \frac{P[1 - e^{-\Delta T_s/T} - (e^{-T_s/T} - e^{-\Delta T_s/T})Z^{-1}]Z^{-L-1}}{(1 - Z^{-1})(1 - e^{-T_s/T}Z^{-1})} \quad (8)$$

闭环：

$$\bar{W}_b(Z, \Delta) = \frac{P[1 - e^{-\Delta T_s/T} - (e^{-T_s/T} - e^{-\Delta T_s/T})Z^{-1}]Z^{-L-1}}{(1 - Z^{-1})(1 - e^{-T_s/T}Z^{-1}) + P[1 - e^{-\Delta T_s/T} - (e^{-T_s/T} - e^{-\Delta T_s/T})Z^{-1}]Z^{-L-1}} \quad (9)$$

于是特征方程为：

$$(1 - Z^{-1})(1 - e^{-T_s/T}Z^{-1}) + P[1 - e^{-\Delta T_s/T} - (e^{-T_s/T} - e^{-\Delta T_s/T})Z^{-1}]Z^{-L-1} = 0 \quad (10)$$

$$T = 0 \text{ 时}, \quad (1 - Z^{-1}) + PZ^{-L-1} = 0 \quad (11)$$

若 $L = 0$ ，则 $Z = 1 - P$ 。只需 $0 < P < 2$ 可满足稳定条件，（ Z 的根在单位圆内）。数字仿真表明， $P = 2$ 时等幅振荡； $P < 2$ 时最终稳定。

本文不追求一般性结论的完善，并由于已按 $T_s \geq \tau + \Delta t_c$ 选择采样周期，因此不再讨论 $L \geq 1$ 的情况。

在 $P = 1$ ， $L = 0$ ， $T = 0$ 时，可得到 $\bar{W}_b(Z, \Delta) = Z^{-1}$ 。闭环系统相当于纯迟延环

节 $e^{-T_s} S$ 。

取 $P=1$; $L=0$, 对于 $T \neq 0$ 的对象, 如果 $T_s = \tau + \Delta t_c$, 并使 $\Delta t_c \ll \tau$, 例如 $\Delta t_c = 0.1\tau$, 则 $\Delta = 1 - \tau/T_s = 0.091$ 。在 $T \leq 0.05\tau$ 时 $T_s/T \geq 22$ 。可计算出 $W_b(Z, \Delta) \doteq Z^{-1}$, 仍十分接近纯迟延对象。数字仿真也证明这一事实。

取 $P=1$; $L=0$, 对于 $T=0.5\tau$ 的对象, 可算出 $Z_{1..2} = 0.1225 \pm j0.12$; $T=T_s$ 时, $Z_{1..2} = 0.385 \pm j0.254$ 。仍然稳定。

通过计算, 还可得到: 在 $P=1$; $L=0$ 时, 只要 $T \leq 0.05\tau$, 就没有超调; 在 $T=0.3\tau$ 时最大超调量为 0.0328, 一个周期后波动幅度便小于 0.03; 在 $T=0.5\tau$ 时, 最大超调量为 0.102, 三个周期后也不再超过 3%; 但当 $T \geq T_s$ 后, 最大超调量大于等于 0.21, 就不符合一般要求了。

大量数字仿真结果(略)已证明了上述结论。由此可知, 在 $T \leq 0.3\tau$ 时, 本方案可行。

四、实际应用和结果分析

本方案曾用于诸城水泥厂的机立窑煅烧过程微机控制, 效果优于数字 PID。其拖动部份采用可控硅整流调速系统。通过调节导通角控制煤、料流量。为便于调节开环增益, 在控制回路中串接一个电位器, 以使 K 值与数字控制相适应。

生料最大流量 330 公斤/分; 额定值 220 公斤/分; 纯迟延 18 秒; 惯性时间小于 1 秒。数字 PID 参数是: 比例度 200%; 积分时间 6 秒; 微分时间 2 秒。在额定值附近随机扰动引起的波动幅度为 $-12 \sim 11.5$ 公斤/分。采用本方案, $T_s = 22$ 秒; $\Delta t_c = 4$ 秒; $K_i = 0.5$ 。调节电位器使开环增益约在 0.5 左右, 满足(5)式, 波动幅度可降到 ± 6.5 公斤/分之内。

煤粉控制的随机波动幅度也可由 ± 3 公斤/分, 减少到 ± 1.0 公斤/分。(额定值是 24 公斤/分。)

但由于非线性影响, 开环增益 K 不守恒, 信号变大后 K 变小, 不能始终满足(5)式。因此偏离额定值运行时, 随机波动变大。但仍优于 PID。

为充分发挥本方案优点, 应尽力保持增益 K 值不变。或采用自适应控制, 使 K_i 与 K 的变化相适应, 自动地始终满足(5)式。

参 考 文 献

- [1] (美) C.L. 史密斯著, 邵惠鹤等译, 数字计算机过程控制, 石油工业出版社, 北京, (1982), 199~208。
- [2] 王骥程主编, 化工过程控制工程, 化学工业出版社, 北京, (1981), 35~65。
- [3] 顾兴原著, 计算机控制系统, 冶金工业出版社, 北京, (1981), 85~89, 143~146。
- [4] (美) F.G. 欣斯基著, 方崇智译, 过程控制系统, 化学工业出版社, 北京, (1982), 6~8, 124~126。

The Integral Control in Sub-interval of Sample Period for Large Time-lag Object in the Process of Cement Calcination

Liu Yi

(Department of Mathematics, Shandong University, Jinan)

Abstract

In the process of cement calcination, large time-lag exists in both the flow of raw material and the flow of coal powder. This makes them difficult to be controlled. In this paper an integral control scheme is presented. The feasibility has been shown by its application to practical production.