

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2019.2.04

金属冶炼碳含量控制中的内模控制

潘昊天, 尤文*

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 建立了铁合金冶炼脱碳反应估计模型, 设计了基于内模控制的碳含量控制系统, 以解决扰动不可测问题。基于 Matlab 仿真平台比较了 PID 控制和内模控制效果。

关键词: 估计模型; 内模控制; AOD; PID

中图分类号: TF 325.64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2019)02-0121-04

Internal model control for carbon content in metal smelting

PAN Haotian, YOU Wen*

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: An estimation model for decarbonization reaction in iron alloy smelting process is established. An internal mode control algorithm is designed for the control system to solve the non-measurable disturbance problem. Matlab based simulation is carried to compared the control effect of the internal and PID control.

Key words: decarbonization reaction; internal model control; AOD; PID.

0 引言

氩氧精炼铁合金过程是一个复杂的高温过程, 由于各种化学反应和不可测扰动的影响, 加上其很大的滞后性、时变性, 采用常规的控制方法很难控制碳的含量, 且精度不高。对此, 提出一种内模控制算法, 并将其应用在金属冶炼碳含量控制系统中, 与传统的 PID 控制进行仿真结果比较, 验证所提方法的控制效果。

1 估计模型的建立

1.1 模型假设

由于铁水中的碳氧反应处于1 600 ℃以上的高温, 反应物[C]和[O]的扩散速率一般要低于界面化学反应速率, 所以反应物的扩散是碳氧反应的限制环节。

1.2 过程速率方程

[O]传质过程是碳氧反应限制环节。氧的传质速率为

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAE17B01)

作者简介: 潘昊天(1993-), 男, 汉族, 吉林白山人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事智能控制方向研究, E-mail: 635633269@qq.com. * 通讯作者: 尤文(1961-), 男, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事生产过程检测与智能控制方向研究, E-mail: youwen@ccut.edu.cn.

$$J_O = A\beta_O(c_O - c_O^*) \quad (1)$$

式中: J_O —— 氧的扩散速率, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$;

A —— CO 气泡表面积, m^2 ;

β_O —— 氧在铁水中的传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

c_O, c_O^* —— 分别为氧在铁水中和在气泡表面处的浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

同时, 由于碳氧反应速率等同于铁水中氧的减少速率。碳氧反应速率 J_R 为

$$J_R = -\frac{dn_O}{dt} = -\frac{d\left(\frac{[\%O] \cdot V_M \cdot \rho_M}{100M_O}\right)}{dt} = -\frac{V_M \cdot \rho_M}{100M_O} \cdot \frac{d[\%O]}{dt} \quad (2)$$

式中: J_R —— 碳氧反应速率, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$;

n_O —— 氧的物质的量, mol ;

t —— 反应时间, s ;

V_M —— 铁水体积, m^3 ;

ρ_M —— 铁水密度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

M_O —— 氧的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

在稳态条件下, 式(1)和式(2)相等, 即

$$J = -\frac{V_M \cdot \rho_M}{100M_O} \cdot \frac{d[\%O]}{dt} = A\beta_O(c_O - c_O^*) \quad (3)$$

式(3)中各参数确定如下:

1) β_O 的确定。氧在铁水中的传质系数 β_O 可由表面更新理论确定, 因为

$$\beta_O = 2\sqrt{\frac{D_e u}{\pi d}} \quad (4)$$

式中: D_e —— 氧的有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

u —— 气泡上浮速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

d —— 气泡直径, m 。

上述参数由水模拟实验研究结果所得。

2) c_O 的确定。根据浓度换算:

$$c_O = \frac{[\%O]V_M\rho_M}{100M_O} \cdot \frac{1}{V_M} (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (5)$$

$$-\frac{d[\%O]}{dt} = 2\sqrt{\frac{D_e u}{\pi d}} \frac{A}{V_M} \left\{ [\%O] - \frac{\frac{P_{CO}}{P^\theta}}{f_{(C)} \cdot f_{(O)} \cdot [\%C]_{\text{内}} \cdot K} \right\} \quad (13)$$

则式(13)可改写为

$$\frac{d[\%O]}{\{[\%O] - b\}} = -a dt \quad (14)$$

$$a = 2\sqrt{\frac{D_e u}{\pi d}} \frac{A}{V_M}$$

$$b = \frac{\frac{P_{CO}}{P^\theta}}{f_{(C)} \cdot f_{(O)} \cdot [\%C]_{\text{内}} \cdot K}$$

3) c_O^* 的确定。与确定 c_O 方法类似:

$$c_O^* = \frac{\rho_M}{100M_O} [\%O]^* \quad (6)$$

以下确定 $[\%O]^*$, 对于碳氧反应



$$\Delta G^\theta = A + \frac{BT}{K} (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad (7)$$

平衡常数:

$$K = \frac{\frac{P_{CO}}{P^\theta}}{f_{[C]} \cdot [\%C]^e \cdot f_{[O]} \cdot [\%O]^e} \quad (8)$$

因为氧的传质为限制性环节, 所以在反应界面处的氧浓度 $[\%O]^*$ 与碳氧反应平衡时的氧浓度 $[\%O]^e$ 相等, 即

$$[\%O]^e = [\%O]^* \quad (9)$$

另外, 同样是因为氧的传质是限制性环节, 所以碳浓度存在下列关系:

$$[\%C]^e = [\%C]^* = [\%C]_{\text{内}} \quad (10)$$

式中: $[\%C]_{\text{内}}$ —— 铁水内部碳的浓度。

将式(9)和式(10)代入式(8), 得

$$[\%O]^* = \frac{\frac{P_{CO}}{P^\theta}}{f_{[C]} \cdot [\%C]_{\text{内}} \cdot f_{[O]} \cdot K} \quad (11)$$

将式(11)代入式(6), 得

$$c_O^* = \frac{\rho_M}{100M_O} [\%O]^* = \frac{\rho_M}{100M_O} \cdot \frac{\frac{P_{CO}}{P^\theta}}{f_{[C]} \cdot [\%C]_{\text{内}} \cdot f_{[O]} \cdot K} \quad (12)$$

再将式(3)~式(5)代入式(12), 得

$$\ln \frac{[\%O] - b}{[\%O]_0 - b} = -at \quad (15)$$

整理得 t 时刻铁水中的碳氧关系式为

$$[\%O] = \{[\%O]_0 - b\} \exp(-at) + b \quad (16)$$

将确定的模型参数代入式(16)并进行拉普拉斯变换, 有:

$$\frac{C(s)}{X(s)} = -\frac{0.000\ 004\ 93}{50s + 1} \quad (17)$$

2 内模控制及控制器设计

2.1 内模控制器

控制器应为 $G_{IMC}(s) = 1/\hat{G}_p(s)$, 如果 $\hat{G}_p(s)$ 含有延迟环节或右半平面零点, 导致推理控制器 $G_i(s)$ 含有右半平面极点或物理上的超前项, 此时, 需串联一个滤波器 $G_f(s)$, 则

$$G_i(s) = \frac{G_f(s)}{\hat{G}_p(s)} \quad (18)$$

若 $\hat{G}_p(s)$ 具有如下形式:

$$\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p+}(s) \hat{G}_{p-}(s) e^{-\tau s} \quad (19)$$

其中

$$\hat{G}_{p+}(s) = \prod_{i=1}^m (T_i s - 1) \quad (20)$$

包含了 $\hat{G}_p(s)$ 中全部右半平面上的零点。则滤波器可设计为:

$$G_f(s) = \frac{\hat{G}_{p+}(s) e^{-\tau s}}{\hat{G}_{p+}(0) (T_f s + 1)^n} \quad (21)$$

式中: $\hat{G}_{p+}(0)$ —— $\hat{G}_{p+}(s)$ 的静态增益;

n —— $\hat{G}_{p-}(s)$ 的分母与分子 s 多项式的阶次之差;

T_f —— 滤波器时间常数。

考虑了滤波器以后的实际推理控制器为

$$G_i(s) = \frac{1}{\hat{G}_{p+}(0) \hat{G}_{p-}(s) (T_f s + 1)^n} \quad (22)$$

2.2 内模控制特点

内模控制结构框图如图 1 所示。

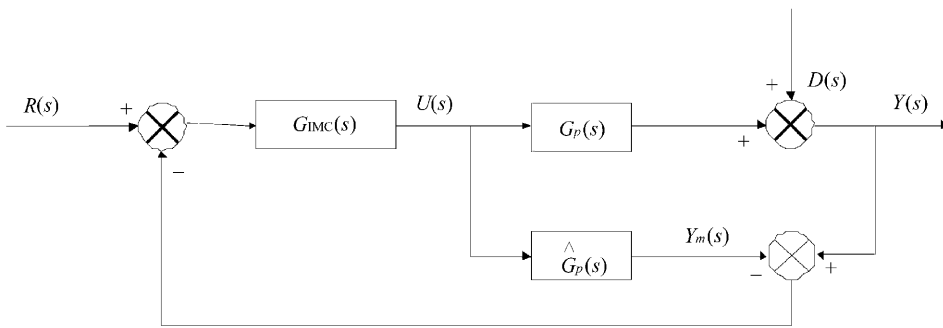


图 1 内模控制系统结构框图

1) 当 $R(s) = 0, D(s) \neq 0$ 时, 假若模型准确, 即 $\hat{G}(s) = G_p(s)$ 时, 由图 1 可见, $\hat{D}(s) = D(s)$ 。由于 $R(s) = 0$, 故可得

$$Y(s) = D(s) [1 - G_{IMC}(s) G_p(s)] = D(s) [1 - G_{IMC}(s) \hat{G}(s)] \quad (23)$$

假设“模型可倒”, 即

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{\hat{G}_p(s)} \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)得

$$Y(s) = 0 \quad (25)$$

式(25)表明, 不管 $D(s)$ 如何变化, 对 $Y(s)$ 的影响为零, 说明设计的控制器是克服扰动的理想控制器。

2) 当 $\hat{G}_p(s) \neq G_p(s)$, 在设定值阶跃扰动作用下, 系统输出的稳定偏差为

$$R(0) - Y(0) = \left[1 - \frac{\hat{G}_p^{-1}(0) \hat{G}_p(0)}{\hat{G}_p^{-1}(0) G_p(0)} \right] R(0) = 0 \quad (26)$$

在阶跃不可测扰动作用下, 系统输出的稳态偏差为

$$Y(0) = 0 \quad (27)$$

式(26)和式(27)表明, 不管模型有什么误差, 系统输出总是稳态无偏。

3 内模控制和 PID 控制的仿真

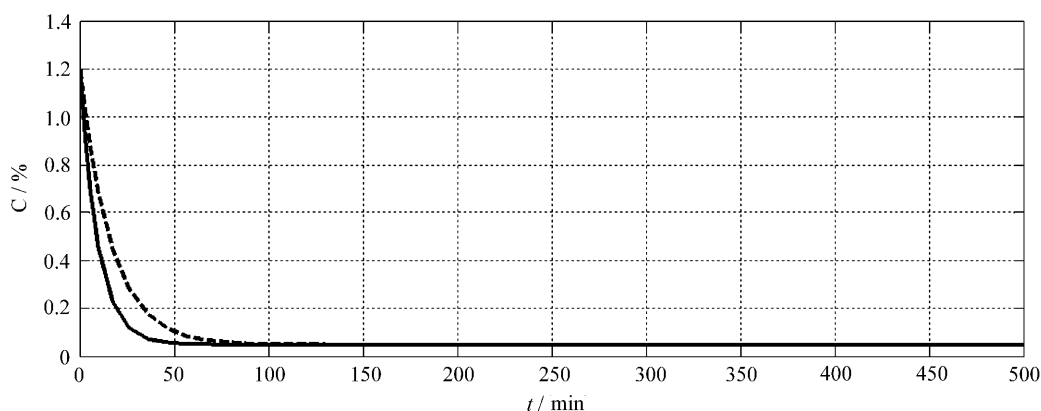
3.1 模型参数选取

T_f 值的选取不能太大也不能太小, 太大影响系统响应速度, 太小又不能兼顾系统的鲁棒性。最终选取 $T_f = 40$ 时内模控制的碳含量控制系统。

3.2 内模控制与 PID 控制效果比较

当控制对象不变,系统无扰动输入且输入阶跃信号,利用 Matlab 的 Simulink 仿真平台搭建

系统仿真框图,将内模控制与 PID 控制结果进行比较,输出波形如图 2 所示。



实线——内模控制输出响应曲线;虚线——PID控制输出响应曲线

图 2 阶跃信号作用下内模控制和 PID 控制仿真曲线

内模控制响应速度优于 PID 控制,很快进入稳定状态。

4 结 语

在氩氧精炼铁合金过程中,建立估计模型并运用内模控制方法可有效解决扰动不可测的控制问题,通过与 PID 控制进行仿真对比得出结果,内模控制在含有不可测扰动的碳含量控制对象上,响应速度与鲁棒性都优于 PID 控制。

参考文献:

- [1] 杨兴钥,尤文.基于推理控制的氩氧精炼铁合金终点碳控制[J].长春工业大学学报,2016,37(6):544-549.
- [2] 杨兴钥.氩氧精炼铁合金终点控制策略的研究[D].长春:长春工业大学电气与电子工程学院,2017.
- [3] 马海涛.氩氧精炼低碳铬铁生产过程数学模型的建

立及控制策略的研究[D].长春:长春工业大学电气与电子工程学院,2011.

- [4] 江虹,王宏志.氩氧精炼低碳铬铁终点碳含量预测模型[J].长春工业大学学报,2016,37(6):692-695.
- [5] 魏季和,曹英.不锈钢 AOD 精炼过程数学模拟[J].炼钢,2004,20(3):50-53.
- [6] 舒杰辉,魏季和.侧顶复吹 AOD 精炼过程的数学模拟[J].内蒙古科技大学学报,2012,31(2):23-35.
- [7] 常峰,旷文珍,陆帅.内模控制在温度控制传感器系统中的应用[J].传感器与微系统,2016,35(5):149-153.
- [8] 翟奕博,刘锁清,李军红.模糊内模 PID 控制在湿法脱硫系统中的应用[J].控制系统,2017,32(11):40-44.
- [9] 李旭,赵军,郭瑞君.内模控制在过热蒸汽温度控制中的应用[J].内蒙古电力技术,2016,34(5):1-5.
- [10] 王伟,张晶涛,柴天佑.PID 参数先金正定方法综述[J].自动化学报,2000,26(3):347-355.