

工业过程中一类时变模型的 建立与控制方法研究

李宛州 王京春

(清华大学自动化系 北京 100084)

(E-mail: lwz@tsinghua.edu.cn, wang-jc@tsinghua.edu.cn)

摘要 电渣重熔过程是典型的时变系统. 电渣重熔炉冶炼质量高的原因在于过程熔速控制均匀. 本文通过现场运行数据采集与仿真分析, 详细解析了电渣重熔炉过程中诸多参数之间的相互关系, 提出并实现了电渣重熔炉的时变系统模型, 并成功的应用于邢台机械轧辊集团铸钢厂美国康萨克 15 吨电渣炉技改项目上. 通过现场 6 个月的实际运行, 控制效果良好, 部分参数甚至优于原控制系统.

关键词 电渣重熔炉, 时变系统, 变参数调节器, 建模

中图分类号 TP227

A Class of Time-varying Models for a Kind of Industrial Process and Its Control Methodology

LI Wan-Zhou WANG Jing-Chun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

(E-mail: lwz@tsinghua.edu.cn, wang-jc@tsinghua.edu.cn)

Abstract The electro-slag refining process is a typical time-varying system. The reason that ESR furnace has very high metallurgy quality is that the melt rate could be equably controlled. In this paper, we collected and analyzed the running data from the locale, and then gave the relationship between those parameters of the ESR process. Based on it we represented a method of building a time-varying system model and successfully practiced it on the project of reconstructing the 15t Consarc ESR in a plant of XingTai Metallurgical Roller Group. After 6 months' operation on the locale, the new control system worked well and even gained some control features better than the old one.

Key words Electro-slag refining furnace, time-varying system, controller with parameter varying, modeling

1 引言

电渣重熔技术是在通电状态下, 将作为原料的自耗电极在水冷结晶器保护的渣池中熔化并重新结晶, 以生产纯净的特殊钢和合金钢的特种冶金生产工艺. 图 1 的 (a) 是工作原理, (b) 是等效电路. 电渣重熔生产过程的控制要点是保证自耗电极的熔速均衡, 使自耗

收稿日期 2005-4-6 收修改稿日期 2005-10-14
Received April 6, 2005; in revised form October 14, 2005

Copyright © 2006 by Editorial Office of Acta Automatica Sinica. All rights reserved.

电极熔化的线速度相对于其质量处于一个非常低的水平, 有利于熔池中的非金属杂质凝聚和上浮, 以及使得熔化之后, 从电极顶部锥体脱离自耗电极形成的液态金属, 滴到液态渣池中的精练介质得到充分处理. 因此, 熔速控制是高质量电渣重熔技术的关键.

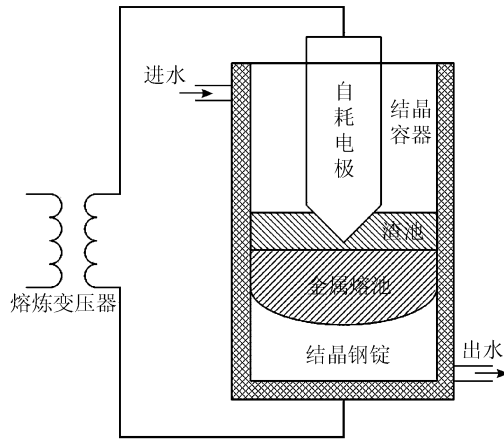


图 1 (a) 电渣炉工作原理

Fig. 1 (a) The basic configuration for an electro-slag refining (ESR) furnace

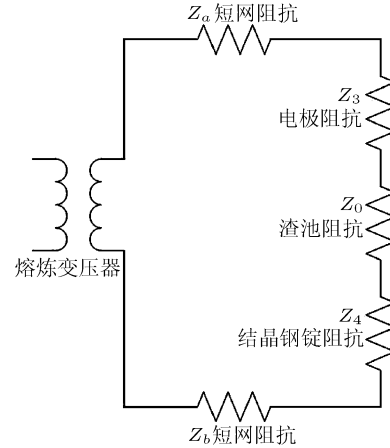


图 1 (b) 电渣炉等效电路

Fig. 1 (b) The basic circuit diagram for the ESR furnace

2 熔速控制的串级调节结构

电渣炉的熔速 (Melting rate, MR) 控制是通过控制熔炼电流实现的. 由于电渣炉的热惯性比较大, 当检测到由于熔炼变压器的输入电流的扰动而导致的熔速变化后, 再通过 PID 调节器抑制电流扰动的话, 此期间的电流变化可能已经造成了熔速出现大幅偏差, 因而无法达到熔炼过程稳定熔速的要求. 尤其在补缩期阶段, 电极剩余重量小而熔速变化快, 熔速的波动极易造成熔炼质量不合格.

显然, 克服这类扰动的一个有效方法是采用串级控制系统, 这也是电渣炉控制精度高的一个主要原因. 熔速串级控制系统如图 2 所示. 系统采用高精度电子秤测量熔炼过程中自耗电极熔化率, 计算出再结晶体重量生长速度的实际变化量, 进而与工艺曲线设定值比较得到熔速偏差. 主 PID 控制器根据熔速偏差计算熔炼电流的给定值, 并作为副调节器的设定值输出, 从而构成主调节回路^[1,2].

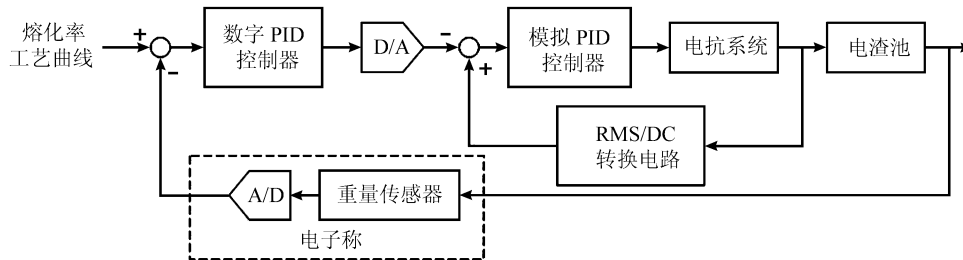


图 2 某电渣炉熔速控制系统

Fig. 2 Melting rate control system for an ESR furnace

串级系统的副调节器为 PI 调节器, 其被调参量是来自熔炼变压器初级的电流反馈, 在电流的扰动对熔速产生影响之前, 首先在副环将其抑制在工艺设定值内.

3 现场数据分析

电渣炉可以等效成由短网电阻、自耗电极电阻、渣阻和结晶钢锭电阻的串连电路. 随着熔炼过程的进行, 自耗电极的电阻在减小而结晶钢锭电阻在增加, 但两者并不同步. 此期间假设渣池电阻被摆动电路控制之后保持恒定. 以某日熔炼参数为例, 熔炼期初始电导大约是 $28000/50=560$, 到补缩期末尾电导是 $10000/40=250$. 电导变化曲线可以近似成一个线性关系, 它反映了电渣炉是一个时变系统^[3~5]. 图 3 给出了熔炼过程中主 PID 调节器的积分系数与自耗电极重量之间的变化关系. 可以看出积分系数的变化趋势与电极熔化产生的重量递减趋势保持一致. 其中, 积分系数后期的剧烈爬升阶段对应着熔炼进入补缩阶段所产生的重量快速变化阶段.

图 4 是现场记录的各参数随时间变化关系. 从图中观察积分小范围的变化规律是: 当熔化率偏差增大时, 积分系数在大趋势背景下, 叠加有一个相应的增加量, 使得对偏差的增量调节速度进一步加快; 反之, 当偏差减小时, 积分系数的增量也相应减小. 而从图中可以看出比例系数增大使实际熔速增加, 比例系数减小使实际的熔速减小. 假设原系统的控制规律是, 根据上一个时刻或者上几个时刻熔速设定值和熔速实际值的偏差情况, 决定比例系数的调节趋势.

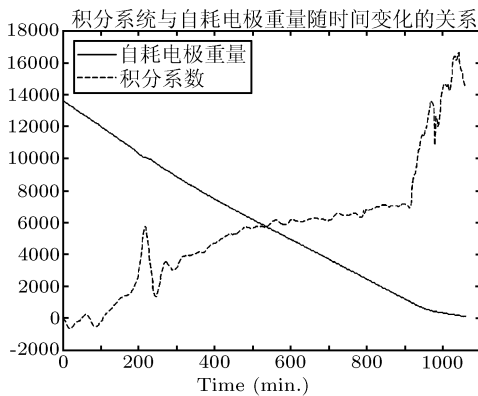


图 3 积分系数与自耗电极重量之间的关系
Fig. 3 Comparing integral parameter of the Consarc controller with the weight of self-consumption electric pole

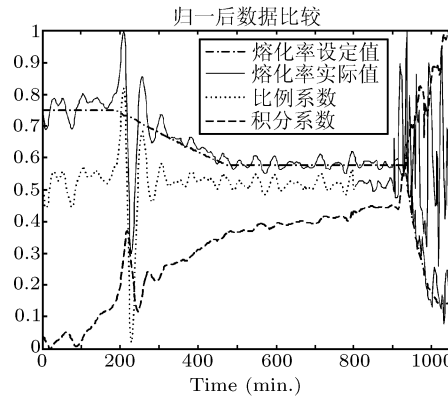


图 4 熔化率与比例、积分系数之间的关系
Fig. 4 Comparing melting rate with proportion and integral parameters of the Consarc controller

4 时变系统的参数估计

通过对归一化数据分析, 可以得到熔化率实际值和比例系数之间的变化趋势几乎完全一致, 说明两者之间仅仅相差一个系数. 据此可以在比例系数与熔化率之间建模. 而积分系数的变化率与熔化率实际值的变化趋势也是一致的. 推论是, 用积分系数的差分与熔化率之间的时变关系建模, 其方法与比例系数的建模方法相同. 据此关系可以建立积分系数模型.

由于现场电网谐波的原因, 电流存在随机干扰, 产生的熔化率突变会造成积分系数突变, 需要在实际的模型中引入高阶修正因子.

电渣重熔炉过程的控制器时变参数递推关系如下

$$K_p(k) = (1 - \alpha_K)K_p(k-1) + \alpha_k f_p(MR_s - MR_m)$$

$$T_I(k) = (1 - \alpha_I)T_I(k-1) + \alpha_I f_I(MR_s - MR_m) \quad (1)$$

其中 MR_s 为熔速的设定值, MR_m 为熔速的测量值. f_p 和 f_i 分别是比例和积分参数时变函数关系, α_K 和 α_I 分别是比例和积分参数模型平滑系数.

采用 CARIMA(受控自回归积分滑动平均模型) 的估计方法, 对包括副回路在内的广义对象进行建模

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})\omega(t)/\Delta \quad (2)$$

$A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 是后移算子 z^{-1} 的多项式. $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示模型输入和输出. $\Delta = 1 - z^{-1}$ 表示差分算子. 这里假定被控对象时延 $d = 1$. 若 $d > 1$, 则只需令 $B(z^{-1})$ 多项式中的前 $d - 1$ 项系数为零. $\omega(t)$ 为干扰信号. 在现场的干扰主要都是随机干扰, 比如电子称称重不准确, 或者外界强磁场引起的电流波动. 简单起见把干扰看成白噪声, 并令 $C(z^{-1}) = \Delta$, 则

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{n_a} y(t-n_a) + b_0 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + \omega(t) \quad (3)$$

或者表示为

$$y(t) = X(t-1)^T \theta_0 + \omega(t) \quad (4)$$

其中

$$X(t-1)^T = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, -u(t-n_b)], \theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, \dots, b_{n_b}]^T$$

令 $\varepsilon(t) = y(t) - X(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)$, 其中 $\hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_{n_a}(t), \hat{b}_0(t), \dots, \hat{b}_{n_b}(t)]^T$. 考虑到对象参数带有慢时变特性, 采用具有遗忘因子的递推最小二乘算法, 即

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-2)X(t-1)\varepsilon(t)}{\rho + X(t-1)^T P(t-2)X(t-1)} \quad (5)$$

其中 $P(t-1) = \frac{1}{\rho} \left[P(t-2) - \frac{P(t-2)X(t-1)^T P(t-2)}{\rho + X(t-1)^T P(t-2)X(t-1)} \right]$, ρ 是遗忘因子, 取 $\rho = 0.95$, $P(-1)$ 为任意正定阵.

采用加入控制加权的函数作为误差控制, 这样可以限制控制增量 $\Delta u(t)$ 的剧烈变化, 尤其是减少对象参数的突变产生的大电流冲击.

$$J = \sum_{i=N_0}^{N_1} [\hat{y}(k+i) - y_r(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(j)(\Delta u(t+i-1))^2 \quad (6)$$

其中 $\Delta u(t+i) = 0$, $i = N_u, \dots, N_1$, 表示在 N_u 步后控制量不再变化. N_0 是最小预测时域, N_1 是最大预测时域, N_u 是控制时域, $\lambda(j)$ 是控制加权序列, 一般设 $\lambda(j)$ 为常数, $N_0 = 1$.

5 结论

电渣炉电控系统的核心是建立电渣炉时变系统的主 PID 调节器的变参数模型. 只有准确的计算与设定熔化率相应的电流值, 才能控制重熔过程中自耗电极熔化的线速度始终保持稳定. 图 5 是参数建模之后, 输入现场记录的熔化率实际值所得的模型输出与同步记录的康萨克比例系数 P 和积分系数 I 的比较测试结果. 数据记录间隔 2 分钟, 在全程 20 小时的熔炼过程中跟踪效果非常好.

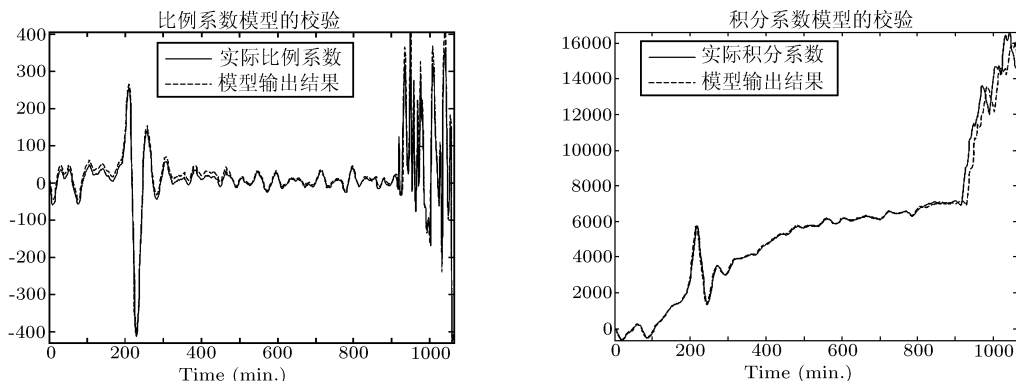


图 5 (a) 模型输出的 P 系数和康萨克的 P 系数比较 图 5 (b) 模型输出的 I 系数和康萨克的 I 系数比较

Fig. 5 (a) Comparing proportion parameter from the model with the one from the Consarc controller

Fig. 5 (b) Comparing integral parameter from the model with the one from the Consarc controller

邢台机械轧辊集团铸钢分厂的康萨克 15 吨电渣重熔炉引进于上世纪 90 年代中期, 长时间的运行已经造成设备老化, 经常出现故障, 严重影响了生产. 通过电控系统的改造, 全面升级了软硬件系统, 建立了 PID 控制器的变参数模型, 实现了对于电渣重熔过程的自动化控制. 系统投用半年来运行稳定, 保持甚至提高了电渣炉熔炼质量.

References

- 1 Li Wan-Zhou, Wang Jing-Chun, Lin Yan-Sheng. Development of voltage swing control system of 15t Consarc ESR furnace. *Special Steel*, 2005, **26**(5): 42~43
- 2 Jin Yi-Hui. Process Control. Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 103~116
- 3 Lu Xi-Cai. Determination of ESR process control parameters. *Journal of Northeast Institute of Technology*, 1983, **35**(2): 105~115
- 4 Lu Xi-Cai. A model for electrode melting in ESR process. *Journal of Northeast Institute of Technology*, 1985, **42**(1): 51~61
- 5 Lu Xi-Cai. Voltage regulation method and power change of electro-slag remelting furnace. *Special Steel*, 2002, **23**(5): 29~30

李宛洲 博士, 副教授, 研究方向为计算机控制和数字信号处理.

(LI Wan-Zhou Ph.D., associate professor, his research interests include control theory and engineering and signal process.)

王京春 博士, 副教授, 研究方向为流程行业生产系统综合自动化等.

(WANG Jing-Chun Ph.D., associate professor. His research interests include process modeling, process control theory and engineering.)