

点式下料铝电解槽氧化铝浓度新型估计模型^①

李 勃 · 刘业翔 黄永忠 王化章

(中南工业大学)

摘 要

采用基于机理分析获得的状态空间模型和非线性系统的自适应推广的Kalman滤波算法实现了对铝电解槽 Al_2O_3 浓度的直接估计。用虚拟噪声补偿了简化模型包含的时变误差和过程中的时变噪声。用实测数据证明了模型与算法的有效性。

关键词: 铝 电解槽 参数估计 自适应Kalman滤波 自适应控制

当前国际上先进的控制系统是通过对与 Al_2O_3 浓度有一定对应关系的参数进行在线估计来间接获取 Al_2O_3 浓度信息的,并以此为基础构成 Al_2O_3 浓度的自适应控制系统。一般采用输入-输出模型,未考虑模型误差及过程噪声的时变性。

为了改进 Al_2O_3 浓度的估计模型,我们以采用将连续下料控制策略的 160 kA 中心点式下料预焙槽为测试槽,采用机理分析与现代时间序列分析的建模理论相结合的方法,建立了基于非线性系统自适应推广的 Kalman 滤波算法的铝电解槽 Al_2O_3 浓度估计模型。该模型可实现对 Al_2O_3 浓度这一状态参数的直接估计。采用了虚拟噪声补偿技术。用实测数据证明了模型的可行性和先进性。

1 非线性系统的自适应推广的 Kalman 滤波算法

文中仅考虑带非线性观测模型的纯量系统

$$x_{k+1} = a \cdot x_k + b \cdot u_k + w_k \quad (1)$$

$$y_{k+1} = h(x_{k+1}, k+1) + v_{k+1} \quad (2)$$

这里 x_k 为状态变量, y_k 为观测变量, u_k 为输入

变量, a 和 b 为常数, h 为可微函数, w_k 和 v_k 为统计特性(即均值和方差)未知、时变且相互独立的高斯白噪声。将 h 线性化的常规方法是将其在状态 x_{k+1} 的一步预报值 $x_{k+1|k}$ 处展开成 Taylor 级数,但是当一步预报误差较大时有导致滤波发散的可能。假设在 $k \sim k+1$ 的采样间隔内 $\partial h / \partial x$ 近似不变,故采用一阶差分将观测模型线性化得

$$z_{k+1} = \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} x_{k+1} + S_{k+1} + \eta_{k+1} \quad (3)$$

其中:

$$z_{k+1} = y_{k+1} - y_k \quad (4)$$

$$S_{k+1} = -\partial h / \partial \hat{x}_k \cdot \hat{x}_k \quad (5)$$

$$\eta_{k+1} = v_{k+1} - v_k + \xi_{k+1} \quad (6)$$

上列式中 z_{k+1} 成为新的观测变量; ξ_{k+1} 用来补偿模型线性化引入的时变误差,故 η_{k+1} 成为虚拟观测噪声;显然,它也带有未知时变统计。至此,非线性系统(1)、(2)的状态估计问题转化为带未知时变噪声统计的线性系统(1)、(3)的自适应滤波问题。容易推导出其 Kalman 滤波算法为

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} \cdot \varepsilon_{k+1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = a \cdot \hat{x}_k + b \cdot u_k + q_k \quad (8)$$

$$\varepsilon_{k+1} = z_{k+1} - \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} \hat{x}_{k+1|k} - S_{k+1} - \hat{r}_k \quad (9)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} \right) [P_{k+1|k} \times \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} \right)^2 + \hat{R}_k]^{-1} \quad (10)$$

$$P_{k+1|k} = a^2 P_k + \hat{Q}_k \quad (11)$$

$$P_{k+1} = [1 - K_{k+1} \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k}] P_{k+1|k} \quad (12)$$

其中 $\hat{q}_k$ 和 $\hat{Q}_k$ 为时变噪声 w_k 的均值和方差估值。 $\hat{r}_k$ 和 $\hat{R}_k$ 为时变噪声 η_k 的均值和方差估值。采用按极大后验原理和指数加权渐消记忆法推导的时变噪声统计估值器^[1,2], 可得次优无偏后验估值

$$\hat{q}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{q}_k + d_k (\hat{x}_{k+1} - a \hat{x}_k - u_k) \quad (13)$$

$$\hat{Q}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{Q}_k + d_k (K_{k+1}^2 \varepsilon_{k+1}^2 + P_{k+1} - a^2 P_k) \quad (14)$$

$$\hat{r}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{r}_k + d_k (z_{k+1} - \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} \hat{x}_{k+1} - S_{k+1}) \quad (15)$$

$$\hat{R}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{R}_k + d_k (\varepsilon_{k+1}^2 - P_{k+1|k} \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} \right)^2) \quad (16)$$

其中, $d_k = (1-b)/(1-b^{k+1})$, b 为遗忘因子, $0 < b < 1$ 。

通过适当地选取遗忘因子 b 并给定初值 (x_0 , P_0 , q_0 , Q_0 , r_0 , R_0), 按递推方式进行上面的自适应推广的 Kalman 滤波, 可得状态 x 的估计。并因采用了虚拟噪声补偿, 故能有效地抑制滤波的发散^[1]。

2 Al_2O_3 浓度的非线性估计模型的建立

2.1 观测模型

以表观槽电阻增量(记为 z_k)作为观测变量, 综合国内外以及我们所作的一些理论与实验研究结果^[3,4], 推导了一个具有(3)式形式的观测模型(机理模型)。重写(3)式如下:

$$z_{k+1} = \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} x_{k+1} + S_{k+1} + \eta_{k+1} \quad (3)$$

在此处, z_{k+1} 为表观槽电阻增量(即变化速率); x_{k+1} 为 Al_2O_3 浓度; S_{k+1} 的意义与(5)式中的相同; η_{k+1} 的意义与(6)式中的相同, 即它不仅包含有 z_{k+1} 的观测噪声, 而且包含有理论模型与实际过程的偏差, 因此, 设其为带有未知时变统计的白噪声; $\partial h / \partial x_k$ 为表观槽电阻 ($\mu\Omega$) 对 Al_2O_3 浓度 (wt.-%) 的偏导数。取有关工艺参数为常态值(如电解质温度为 955°C , 极距为 4.5 cm , 经过修正的阳极电流密度为 0.664 A/cm^2 , 以及电解质组成为 $\text{CR}=2.7$, $\text{CaF}_2=5\%$), 可推导出 $\partial h / \partial x_k$ 与 x_k 的关系为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_k} = & -0.638 \hat{x}_k^{-1} - 0.0706 (\hat{x}_k^{1.5} - 1.226 \hat{x}_k \\ & + 0.331 \hat{x}_k^{0.5})^{-1} + [0.105 + 0.0854(1 \\ & - 0.008 \hat{x}_k)(1 - 0.02 \hat{x}_k)^{-2.5} \\ & - 1.425(1 - 0.0121 \hat{x}_k - 0.0122 \hat{x}_k^2) \\ & \times (\hat{x}_k - 0.347)^{-2}] \\ & \times \exp(0.0207 \hat{x}_k) \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 状态模型

Al_2O_3 浓度 (x_k) 的状态模型可用类似于式(1.1)的形式简单地表达, 即

$$x_{k+1} = x_k + u_k + w_k \quad (18)$$

此处, 带有未知时变统计的白噪声 w_k 是用来补偿由估算得到的输入变量 u_k 中所包含的时变误差。 u_k 为 $k \sim k+1$ 采样间隔内增加的 Al_2O_3 浓度, 估计式为

$$u_k = \frac{UF_k - UE_k}{m_b} \times 100\% \quad (19)$$

其中, m_b 为电解质质量 (kg), 设定其为常数。 UE_k 是 $k \sim k+1$ 采样间隔时电解消耗的

Al_2O_3 量(kg), 估算式为

$$UE_k = 1.079 \times 10^{-2} \text{ CE} \cdot T \cdot I_k \quad (20)$$

这里 CE 为电流效率, 按一段时间内的出铝量确定; T 为采样间隔(min); I_k 为 $k \sim k+1$ 采样间隔内的平均电流强度(kA)。

UF_k 为 $k \sim k+1$ 采样间隔内溶入电解质中的 Al_2O_3 量(kg), 它与同一采样间隔内加入电解质中的 Al_2O_3 量(记为 UD_k)存在区别, 因为加入的 Al_2O_3 需要一定的溶解时间。我们的研究表明, UD_k 与 UF_k 的关系可近似地用一个一阶惯性型低通数字滤波器的输入与输出的关系来模拟, 即

$$UF_k = (1 - T/T_f) \cdot UF_{k-1} + T/T_f \times UD_k \quad (21)$$

这里, T 仍为采样间隔; T_f 为溶解时间常数, T_f 与电解槽工艺条件及物料的溶解性能有关, 我们用试验确定其为一个合适的常数 ($T_f = 10$ min 左右)。

UD_k 按 $k \sim k+1$ 采样间隔内打壳下料器的下料次数乘以每次的设定下料量近似计算

$$UD_k = NB_k \cdot W_f \quad (22)$$

式中 NB_k 为下料次数; W_f 为下料设定量。

3 保证滤波收敛和提高浓度估计精度的措施

3.1 表观槽电阻的预滤波处理

$$R_n = (V_n - \varepsilon) / I_n \quad (23)$$

式中 V_n , I_n 分别为时刻 n 处的槽电压、系列电流采样值; R_n 便成为对应时刻的表观槽电阻采样值; ε 为代表表观反电动势的设定常数。依据我们针对测试槽所作的理论与试验研究, 取定 $\varepsilon = 1.60$ 。

R_n 中包含着由铝液波动、阳极气体排放、系列电流波动、打壳下料时的机械搅动等引起的快时变噪声。在我们的测试槽中, 由铝液波动引起的噪声的方差最大, 其频率成分常在 $0.01 \sim 0.04$ 之间。因为方差较大的快时变噪声的存在, 所以若不预先进行低通滤波处理, 将导致浓度估计发散。因此我们以三阶低

通 Butterworth 模拟滤波器为原型, 按双线性变换原理^[6]设计的三阶低通数字滤波器对 R_n 进行滤波。该滤波器的性能是, 通带上限频率(记为 f_p)处的衰减为 3 dB; 取阻带起始频率为 2 倍的 f_p , 则阻带内最小衰减 ≥ 18 dB, 转移函数表达式为

$$H(z) = (1+z^{-1})^3 / \{[(c+1)-(c-1) \cdot z^{-1}] \times [(c^2+c+1)-2(c^2-1)z^{-1} + (c^2-c+1)z^{-2}]\} \quad (24)$$

式中 z 代表传递函数的复变量; 常数 c 由通带上限频率 f_p 及采样间隔 T 确定

$$c = \text{ctg}(\pi f_p T) \quad (25)$$

由于 Al_2O_3 浓度相对而言为慢时变参数, 因此取浓度估计所需的采样间隔为 2 min。根据香农采样定理, 槽电阻的采样间隔需小于 60 s。在本试验中, 我们采用了 $T = 1 \sim 10$ s 的采样间隔, 并选用 $f_p = 1/400$ Hz 作为(24)式的滤波器的通带上限频率。试验表明, 滤波性能良好。再按浓度估计的采样间隔(2 min)对滤波器的输出序列进行抽样后, 计算出一阶差分作为浓度估计模型的观测量(z_k)。

3.2 表观槽电阻异常时的处理

为避免表观槽电阻的异常导致浓度估计的发散, 在预处理算法中设立了一个判断表观槽电阻异常变化的环节。在出现异常时暂停自适应 Kalman 滤波, 而仅用状态模型即(18)式进行浓度的预报, 在异常状态消失后, 恢复滤波估计。

3.3 特定控制策略的采用

国际上一些先进的铝电解槽计算机控制系统采用了一些富有成效的提高 Al_2O_3 浓度间接估计精度的控制策略。本文提出的模型中, 重要的控制策略有以下几点。

(1) Al_2O_3 浓度工作区设置在表观槽电阻对 Al_2O_3 浓度变化反映敏感(即 $\partial h / \partial x$ 较大)的低浓度区。对于我们的测试槽, 合适的浓度工作区为 $1.8\% \sim 3.5\%$ 。

(2) 为保证浓度估计精度, 必须保持输入信号(u_k)有足够强度, 为此须定期或交替安排“欠量”下料与“过量”下料。浓度控制的目标是

维持浓度的变化范围不超过设定的工作区。尤其是在浓度估值高于上限时,需立即安排“欠量”下料,使浓度估值返回工作区,因为表观槽电阻增量对浓度的偏导数($\partial h / \partial x$)在 4.4% 浓度附近存在一个零点,而且浓度高于 4% 后将会因沉淀导致槽底电压升高,造成浓度的观测模型显著偏离实际过程。

(3) 为了校验浓度估计值,尤其是当估计值频繁地高于工作区上限时,需定期停止下料,等待阳极效应,利用浓度向阳极效应发生的临界浓度趋近时所引起的表观槽电阻快速上升来校验浓度估值。对受测槽型的大量测试表明,在一定工艺条件下,阳极效应发生的临界浓度一般在 1.0%~1.2% 的狭窄范围内,因此当临近阳极效应引起的表观槽电阻跃升使浓度估值达到甚至低于临界浓度时,便取临界值作为新的滤波估计起点,并迅速使下料转为“过量”下料,以避免阳极效应真正发生。

(4) 在进行浓度估计的同时,按质量平衡计算方式计算“参考浓度” C_k ,计算式是

$$C_{k+1} = C_k + u_k \quad (26)$$

这里, u_k 同于状态模型即式(18)中的输入变量。比较浓度估值 $\hat{x}_k$ 与“参考浓度” C_k , 当发现恒向偏差时,先用上述定期安排的阳极效应等待过程来校验浓度估值,然后通过修正下料器的参数 W_f 值(参见(22)式)来修正由 W_f 偏离实际值所引起的输入变量 u_k 的计算误差,以提高其后的浓度估计精度。

4 模型的验证

用某厂 160 kA 中间点式下料预焙槽作为测试槽,用自制的铝电解槽工艺参数微机采集系统^[5]获得大量实测数据,然后对本文介绍的模型与算法的可行性进行了离线验证。图 1 给

出的是其中一次试验的部分结果,实测值与模型估计值吻合良好。

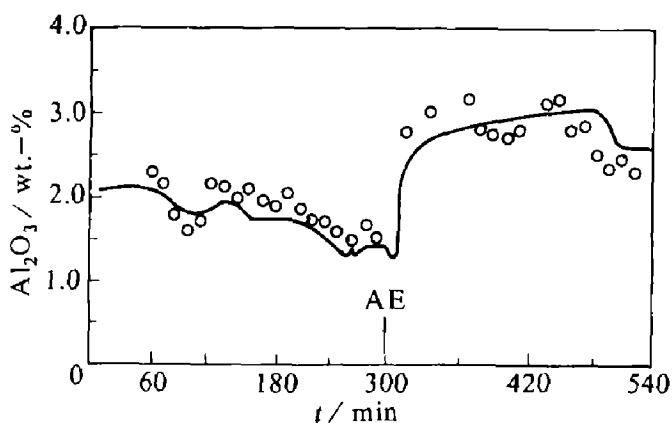


图 1 Al_2O_3 浓度实测值与估计曲线

——估计曲线; ○—实测值; AE—阳极效应

5 结论

从机理分析出发可建立铝电解槽的 Al_2O_3 浓度估计模型。采用虚拟噪声补偿技术可补偿简化的模型所包含的时变误差和过程中的时变噪声。用非线性系统的自适应推广的 Kalman 滤波算法并配用一些特定的预处理算法和控制策略可实现对 Al_2O_3 浓度的实时估计。

参考文献

- 1 邓自立, 王建国. 自动化学报, 1987, 9, 13(5): 375-379.
- 2 邓自立, 王建国. 信息与控制, 1988, 1: 1-4.
- 3 Cell Voltage. In: The 7th International Course on Process Metallurgy of Aluminium, (挪威), 1988.
- 4 李 劫 等. 见: 第五届全国铝电解学术会议论文集, 1992.
- 5 李 劫, 黄永忠, 刘业翔. 轻金属, 1992, 9: 21-26.
- 6 宗孔德, 胡广书. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1988. 6.