

点式下料铝电解槽电解质温度模型^①

李 勃 刘业翔 黄永忠 王化章

(中南工业大学冶金系, 长沙 410083)

韩 楷 杨欣荣

(中南工业大学自控系, 长沙 410083)

摘 要

为解决点式下料铝电解槽的热平衡监控问题, 提出了与采用间歇式操作方式的动态法测温装置配合使用的电解质动态平衡温度自适应预报估计模型。由于模型实现了槽热平衡体系的输出变量(电解质动态平衡温度)与输入变量(发热功率和等效下料速率)间关系的定量描述, 故可用于点式下料槽热平衡监控系统的设计。利用在 160 kA 点式下料预焙阳极铝电解槽上采集的数据验证了模型的有效性。

关键词: 铝 电解槽 电解质温度 估计模型

由于电解质具有强腐蚀性, 因此传统的接触式传感器不能长期连续正常工作, 仅用于手工检测和短期试验中。非接触式传感器又因电解槽表面覆盖着一层厚度可变的结壳而难以奏效。目前有一种已得到应用的间接检测方法是检测金属槽壳温度或侧部热流量, 但因其响应滞后时间长达 1 h, 且响应特性受到炉帮厚度变化的干扰, 只能用于槽热平衡中长期变化趋势的定性分析。为控制热平衡, 当前一些先进的控制系统中采用了基于能量平衡估算的热平衡控制模型, 但显然这只是一不精确的“开环”控制方法。为解决热平衡监控这一难题, 我们进行了动态法测温技术的研究^[1], 并已在实验室取得初步成果。动态法测温装置能将热电偶自动插入电解质熔体中, 利用短暂接触过程中所获得的电势信号的动态变化曲线来推算电势信号达稳态时所对应的电解质温度, 这便能减少热电偶与电解质的接触时间, 故可延长热电偶的使用寿命(测定次数); 但不足之处是热电偶作用寿命仍受到保护套管材质的限制, 因此测定频度需限制为每数小时 1 次才具有工

业应用价值。为了弥补这一技术的不足并实现对点式下料铝电解槽热平衡状态的实时和精确监控, 我们建立了与采用间歇式操作方式的动态法测温装置配合使用的电解质温度模型。

1 热平衡特性的分析与测试

由于电解槽炉面和炉膛结壳的厚度可随电解质温度变化而改变, 因此电解槽具有较强的自平衡能力, 加之准连续的点式下料技术和槽电压自动调节技术已得到广泛的应用, 因此以平均时间观点而言, 可将电解槽的热平衡体系视为一个“动态平衡过程”, 将电解质温度变化曲线的慢时变趋势项(即其平滑曲线)视为动态平衡温度, 并可将其视为热平衡监控参数。

影响热平衡的第一个输入变量是发热功率 Q , 它由下式计算得到

$$Q = A_p - A_r - A_c \quad (1)$$

其中, A_p 代表输入电解槽的电能, 它可由槽电压和系列电流的在线采样值计算, 即

$$A_p = U_c \cdot I \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

^① 收稿日期: 1992 年 12 月 16 日; 修回日期: 1993 年 3 月 9 日

这里, V_c 和 I 分别代表槽电压(V)和系列电流(kA)。

A_r 代表电解过程所需的电化学反应能, 应用热力学数据^[2], 可从电化学反应式推导出电解质温度为 1223 K 时 A_r 的计算式为

$$A_r = (0.441 + 1.131 r) \cdot I \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

其中, I 仍代表系列电流(kA); r 代表电流效率, 设其为可按槽出铝数据核算的常数。

A_e 代表热平衡体系以外的导线中损失的能量, 它可通过取定导线电阻 R_e ($\mu\Omega$) 而成为系列电流 I (kA) 的函数, 即

$$A_e = R_e \cdot I^2 / 1000 \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

影响热平衡的第二个输入变量是原料的添加速率。在一般情况下, 它是由过程控制系统指示的氧化铝添加速率, 但当出现能引起额外下料和散热的人工作业(换阳极和出铝)时, 这一输入变量便难于准确计算。为保证热平衡监控的连续性, 我们根据热力学数据^[2]以及现场试验将这些作业发生后的一定时间内对热平衡的影响等效为氧化铝添加速率的增大, 并由计算机自动按预定程序处理。用于补充电解质成分的物料添加因添加周期长且用量小, 也可根据热力学数据^[2]将其对热平衡的影响等效为氧化铝添加速率的增大。于是, 影响热平衡的第二个输入变量便可定义为氧化铝的“等效下料速率”。

这样, 点式下料铝电解槽热平衡体系被简化为一个二输入一输出系统, 二输入分别为发热功率(Q)和等效下料速率(F_{eq}), 输出为动态平衡温度(T_b)。

为了进行槽热平衡特性的测试, 我们选用了一台正常运行的 160 kA 点式下料预焙阳极铝电解槽为试验槽, 采用了自制的一套能对铝电解槽的槽电压、系列电流和电解质温度等工艺参数进行在线采集的数据采集系统^[3]。电解质温度的一次信号由装在氮化硅套管中的镍铬—镍硅热电偶获取。为了消除温度采集通道中的高频干扰, 采集系统在硬件和软件上均设置了低通滤波器, 并采用了较快的采样速率(1~10 s)采集原始的温度信号。为进行系统辨识实

验, 我们按伪随机二进制序列(PRBS)设计输入变量, 并分别通过调整极距和下料时间间隔来实现。经测试, 确定在常态运行条件下试验槽热平衡体系的调整时间为 60 min 左右, 时间常数为 15 min 左右, 因此取 PRBS 的 Bit 宽度及动态平衡温度估计用采样周期均为 12 min, 取每个采样周期内由数据采集系统获得的温度信号的低通滤波均值作为该周期内的动态平衡温度实测值。

2 动态平衡温度自适应预报估计模型

2.1 CAR 模型的辨识

用带受控项的自回归模型(CAR 模型)来描述槽热平衡体系, 用线性差分方程表达为

$$y(k) = \sum_{i=1}^{n_0} a_i \cdot y(k-i) + \sum_{i=0}^{n_1} b_i \cdot u_1(k-i) + \sum_{i=0}^{n_2} c_i \cdot u_2(k-i) + d + e(k) \quad (5)$$

式中 $y(k)$ 为代表动态平衡温度的输出变量; $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 为二输入变量(即受控项); d 为模型偏差(此处暂设其为常数); $e(k)$ 为零均值的高斯白噪声; n_0 、 n_1 、 n_2 分别为自回归部分和两个受控项的阶次。

设在基准发热功率 $Q = Q_0$ 和基准等效下料速率 $F_{eq} = F_0$ 下的基准动态平衡温度为 $T_0 = T_b$, 为提高模型辨识的精度, 有必要对输出变量 T_b 及输入变量 Q 和 F_{eq} 的采样序列(分别记为 $T_b(k)$ 、 $Q(k)$ 和 $F_{eq}(k)$) 作去除基值的处理, 并对 $Q(k)$ 作缩小适当倍数的处理, 即令 CAR 模型的输出和二输入为:

$$y(k) = T_b(k) - T_0 \quad (6)$$

$$u_1(k) = [Q(k) - Q_0] / 100 \quad (7)$$

$$u_2(k) = F_{eq}(k) - F_0 \quad (8)$$

式中 等效下料速率 $F_{eq}(k)$ 用取样周期 $k-1 \sim k$ 内的等效下料次数来代表; $Q(k)$ 用(1)~(4)式来计算, 但计算中使用的槽电压 V_c 和系列电流 I 用取样周期 $k-1 \sim k$ 内的平均值($V_c(k)$ 和 $I(k)$) 替代。综合(1)~(4)式可得

$$Q(k) = V_c(k) \cdot I(k) - (0.441 + 1.131r) \cdot I(k) - R_c \cdot I(k)^2 / 1000 \quad (\text{kW}) \quad (9)$$

分别用实测的 $T_b(k)$ 、 $Q(k)$ 和 $F_{eq}(k)$ 的统计均值近似代表基准值 T_0 、 Q_0 和 F_0 (近似处理引入的偏差将由模型偏差自适应修正算法来修正)。采用基于递推最小二乘法和节省原理的 CAR 模型自动辨识算法^[4], 便可利用计算机自动确定合适的模型阶次和时滞, 并拟合模型中的参数项, 最终获得节省参数的 CAR 模型。

对于本文的试验槽, 取动态平衡温度的采样周期 $t_s = 12 \text{ min}$, 根据统计结果取 $T_0 = 958^\circ\text{C}$, $Q_0 = 400 \text{ kW}$, $F_0 = 2 \text{ 次}/12 \text{ min}$ 。CAR 模型辨识结果为

$$y(k) = a_1 \cdot y(k-1) + a_2 \cdot y(k-2) + b_0 \cdot u_1(k) + b_1 \cdot u_1(k-1) + b_2 \cdot u_1(k-2) + c_0 \cdot u_2(k) + c_1 \cdot u_2(k-1) + d + e(k) \quad (10)$$

式中 参数为

$$[a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, d] = [1.075, -0.199, 3.694, -1.330, 0.276, -0.124, -0.204, -0.174]$$

2.2 动态平衡温度的多步预估与预估误差

获得 CAR 模型后, 令模型中的白噪声项 $e(k) = 0$, 便可用之以多步预报方式估计电解质的动态平衡温度。不失一般性, 这里仍用通式即(5)式进行讨论, 可得预估式:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{n_0} a_i \cdot \hat{y}(k-i) + \sum_{i=0}^{n_1} b_i \cdot u_1(k-i) + \sum_{i=0}^{n_2} c_i \cdot u_2(k-i) + d \quad (11)$$

其中 $\hat{y}(k-i)$ [$i = 0, 1, \dots, n_0$] 为 $y(k-i)$ 的预估值。

当将上式右侧中的 $\hat{y}(k-i)$ [$i = 1, 2, \dots, n$] 全部用已知的 $y(k-i)$ 取代时, 便是一步预估的情况, 否则为多步预估。当进行多步预估时, 由于量测噪声、环境的干扰, 过程的时变性以及迭代运算引起的误差积累会导致预估值与真实值的偏差逐渐增大, 因此有效预估步数是有限的。对于我们的试验槽, 采用(10)式进行递推预估发现, 在基本正常的槽况下, 递推预估步数在 20 步(对应 4 h)之内时, 预估偏

差一般在 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 之内。因此, 可将动态法测温的平均间隔时间定为 4 h, 即每隔 4 h 左右, 便需利用动态法测温提供的观测值来重新设置预估的起点并提供用于模型参数自适应修正的信息。

由于动态法测温的间隔时间远大于温度预估的采样周期, 因此动态法测温所提供的观测便不足以用来修正 CAR 模型中的全部参数, 而只能修正模型中某个关键的参数。研究表明, 预估误差的大部分可归于模型偏差 d 的时变性。例如, 当电解槽综合传热系数发生变化使基准输入 Q_0 和 F_0 对应的基准温度由 T_0 变化到 $T_0 + \Delta T_0$ 时, 在假定 CAR 模型中除 d 以外的参数均不变的前提下, 模型偏差 d 将变为:

$$d + [1 - \sum_{i=1}^{n_0} a_i] \cdot \Delta T_0$$

2.3 CAR 模型偏差 d 的自适应修正

设动态法测温间隔为温度预估周期 t_s 的 m 倍, 并设在 k 时刻已获得 d 的估值为 $\hat{d}(k)$, 于是用 CAR 模型即(11)式从 $k+1$ 时刻递推预估到 $k+m$ 时刻获得的 $y(k+m)$ 的预估值 $\hat{y}(k+m)$ 为

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+m) = & \sum_{i=1}^{n_0} a_i \cdot \hat{y}(k+m-i) + \sum_{i=0}^{n_1} b_i \cdot u_1(k+m-i) + \sum_{i=0}^{n_2} c_i \cdot u_2(k+m-i) + \hat{d}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

设在 $k+m$ 时刻动态法测温装置给出一个测定值, 去除基值 T_0 后为 $T_d(k+m)$, 用它作为 $y(k+m)$ 的观测值, 并设观测噪声为零均值独立的高斯白噪声[记为 $\xi(k+m)$], 即:

$$T_d(k+m) = y(k+m) + \xi(k+m) \quad (13)$$

再设模型偏差 d 的变化服从广义随机游动模型, 即

$$d(k+m) = d(k) + w(k+m) \quad (14)$$

其中 $w(k+m)$ 假定为零均值的独立的高斯白噪声

利用上述假设后, 采用稳态 Kalman 滤波原理从(5)式、(12)~(14)式推导出模型偏差的自适应修正算法为

$$\hat{d}(k+m) = \hat{d}(k) + K_f \cdot [T_d(k+m) - \hat{y}(k+m)]/k_m \quad (15)$$

式中 K_f 为修正因子 ($K_f < 1$), 它具有稳态 Kalman 滤波增益的意义; $T_d(k+m)$ 为 $k+m$ 时刻动态法测温提供的观测值; $\hat{y}(k+m)$ 为 CAR 模型在 $k+m$ 时刻的预估值; K_m 是由下列迭代式计算的:

$$K_m = \sum_{i=1}^{n_0} a_i \cdot K_{m-i} + 1,$$

$$\text{当 } m \leq i \text{ 时, 取 } K_{m-i} = 0 \quad (16)$$

式中 n_0 为 CAR 模型自回归部分的子阶

2.4 预估起点的重新设置

用 $T_d(k+m)$ 修正模型偏差 d 后, 还需用之重新设置用于下一轮(即 $k+m+1 \sim k+2m$ 时间内)动态平衡温度预估的起始值 $\hat{y}(k+m-i)$ [$i=0, 1, \dots, n_0$].

由于在 $k+m$ 时刻已将 $k+1 \sim k+m$ 时间内的模型偏差 d 的估值由 $\hat{d}(k)$ 修正为 $\hat{d}(k+m)$, 因此由(11)式可推导出 $\hat{y}(k+m-i)$ 的第一次校正值为

$$\hat{y}_1(k+m-i) = \hat{y}(k+m-i) + K_{m-i} \times [\hat{d}(k+m) - \hat{d}(k)] \quad (17)$$

式中 K_{m-i} 仍由(16)式表达的算法迭代计算。

因动态法测温在 k 和 $k+m$ 两时刻的观测值所提供的新息分别为

$$\varepsilon(k) = T_d(k) - \hat{y}_1(k) \quad (18)$$

$$\varepsilon(k+m) = T_d(k+m) - \hat{y}_1(k+m) \quad (19)$$

所以可将 $k+m-i$ 时刻对应的新息按下式近似计算:

$$\varepsilon(k+m-i) = \varepsilon(k) + (m-i)/m \cdot [\varepsilon(k+m) - \varepsilon(k)],$$

$$0 < i < m \quad (20)$$

于是, 仿效稳态 Kalman 滤波可得 $y(k+m-i)$ 的第二次校正值为

$$\hat{y}_2(k+m-i) = \hat{y}_1(k+m-i) + \alpha \cdot \varepsilon(k+m-i) \quad (21)$$

式中 修正因子 α 可由试验确定为合适的常数 ($\alpha < 1$), 但当在 $k \sim k+m$ 时间内发生了阳极更换、手动給料等人工作业或阳极效应等异常情况时, 因 $\hat{y}(k+m)$ 的可信度过低, 故取 $\alpha =$

1, 使预估起点的重新设置完全取决于动态法测温的观测值。

分别用 $k+m+1$ 、 $\hat{y}_2(k+m+1-i)$ 和 $\hat{d}(k+m)$ 取代 CAR 模型(11)式中的 k 、 $\hat{y}(k-i)$ 和 d , 便实现了预估起点的重新设置。

2.5 动态平衡温度自适应预报估计模型的整体构成

综合以上所述, 可将电解质动态平衡温度自适应预估模型归纳于图1中。

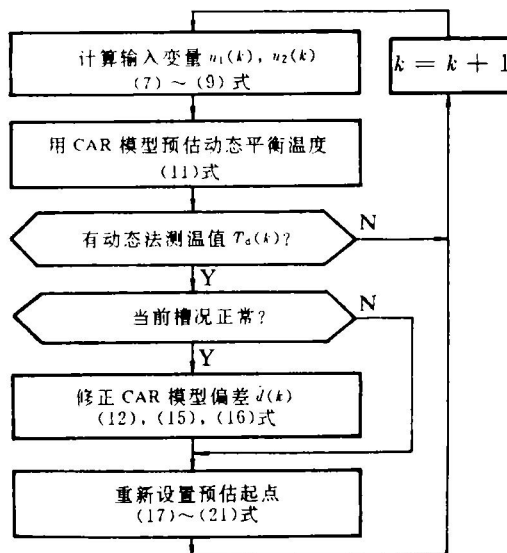


图1 动态平衡温度自适应预报估计模型的整体构成

3 模型的验证

由于动态法测温试验未能与温度模型试验一道进行, 为了验证模型, 我们以 4 h 为抽样间隔, 抽取数据采集系统的原始温度采样值来模拟动态法测温值。离线试验证明, 该模型能解决槽况基本正常情况下(即除阳极效应及其后 1 h 左右的时间内, 以及槽况严重异常之外)的动态平衡温度估计问题, 估计偏差一般在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 之内。图2给出了一个验证实例。

最后需指出: (1) 模型在实际应用中的估计精度将在很大程度上取决于动态法测温的精度; (2) 模型并不需要动态法测温间隔 m 为常数, 故动态法测温可选在输入变量较平稳的时

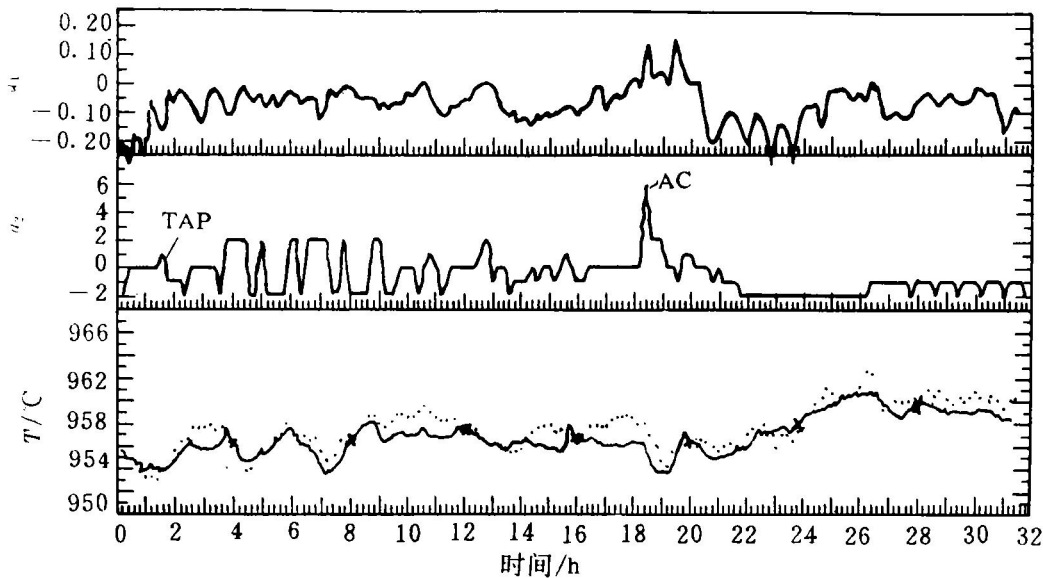


图2 电解质动态平衡温度的估计曲线与实测值

u_1 —取决于发热功率 Q 的输入变量; u_2 —取决于等效下料速率 F_{eq} 的输入变量;

×—模拟的动态法测温点;点线—动态平衡温度实测值;实线—动态平衡温度预估曲线;

TAP—出铝时刻;AC—阳极更换时刻;电解质组成: $CR \approx 2.7$, $CaF_2 \approx 5$;

原始信号采样周期=1s;温度估计采样周期=12min

刻进行,以使其测定值尽量接近实际的动态平衡温度,从而提高模型的预估精度;(3)以平均时间观点而言,只要动态法间断测温的误差均值为零,便可保证动态平衡温度估计的无偏性。

4 结论

(1)建立了与采用间歇式操作方式的动态法测温装置配合使用的电解质动态平衡温度自适应预报估计模型。模型由双进单出(DISO)CAR模型、CAR模型偏差的自适应修正算法以及预估起点的重新设置算法构成。

(2)用实测数据所作的验证表明:模型具有相当理想的估计精度,它能利用动态法间断测定(每数小时一次)的温度值校正模型中存在

的慢时变偏差,故对槽热平衡特性的慢时变过程具有一定的自适应能力。

(3)由于模型实现了系统的输出变量(电解质动态平衡温度)与输入变量(发热功率和等效下料速率)间关系的定量描述,故可用于槽热平衡监控系统的设计。参数估计法与动态测温法相结合可成为解决点式下料铝电解槽热平衡监控问题的一条有效途径。

参考文献

- 1 王化章,刘业翔等. CN91106724. 8. 1991.
- 2 邱竹贤. 铝冶金物理化学. 上海:上海科学技术出版社, 1985.
- 3 李 劼,黄永忠,刘业翔. 轻金属, 1992, (9): 21—26.
- 4 邓自立,郭一新. 现代时间序列分析及其应用. 北京:知识出版社, 1989. 32—40.