

炼镍矿热电炉配料控制的 动态模糊优化算法^①

彭小奇 梅 焮 周子民 唐 英

(中南工业大学应用物理与热能工程系, 长沙 410083)

摘 要

提出了一种实用的冶金炉配料动态模糊优化算法, 克服了以物料平衡和热平衡为基础的静态配料计算难以适应动态生产过程的缺陷。该算法自 1992 年 5 月以来一直用于我国某冶炼厂炼镍用大型矿热电炉的配料计算并取得良好效果, 获得了显著的经济效益。

关键词: 矿热电炉配料 动态模糊优化 炼镍

1 生产现场概况

我国某冶炼厂熔炼车间有三台额定功率为 16 500 kW 的炼镍用大型矿热电炉, 其主要输入、输出量有: 焙砂、石英石、焦粉、转炉返渣、电能、低镍铕及电炉渣, 如图 1 所示。焙砂为电炉熔炼的主要物料, 熔剂石英石起造渣作用, 焦粉为还原剂, 三者按适当比例入炉通电熔炼, 转炉工段吹炼高镍铕过程中产出的液态转炉渣也部分返入电炉, 电炉熔炼产出低镍铕及电炉渣。焙砂主要含 Ni、Cu、Fe、SiO₂、S、Co、CaO、MgO 等, 不同时期各成分含量变化较大, 焙砂类型主要其所含 Ni、S、Fe 决定; 石英石主要含 SiO₂, 焦粉主要含 C, 两者的成分基本保持稳定。

衡量生产状况的指标是“吨焙砂耗电量”及“电炉渣含镍量”, 两指标与配料情况及生产操作控制过程密切相关, 两指标越低, 单位产品能耗及镍在渣中的损失量越小。

由于现场检测仪表不全, 检测数据的误差

及滞后性较大, 操作控制主要依靠生产技术人员长期积累的经验完成。当操作人员技术水平较高、生产经验较丰富时, 所得生产指标通常也较为令人满意。

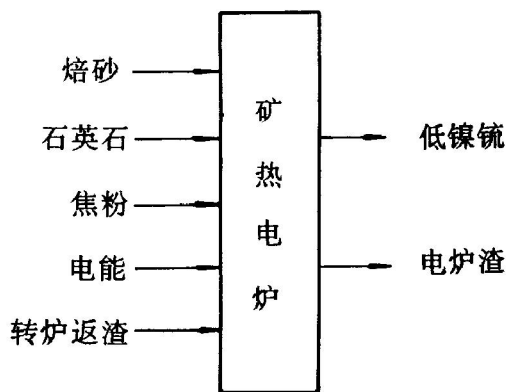


图 1 矿热电炉功能示意图

配料计算的目的是根据焙砂成分情况及要求入炉的焙砂量算出恰当的入炉石英石量、焦粉量及应消耗的电量并由此定出应施加给电炉的平均电流负荷。配料计算通常采用物料平衡和热平衡算法, 该法能准确地算出各种配料

^① 本课题得到国家自然科学基金资助; 于 1993 年 12 月 17 日收到初稿

量、产出量及需消耗的电量, 对生产有较大的指导作用, 但这种算法本质上是静态的, 难以考虑实际生产过程中发生的各种特殊情况。例如, 若由于某种原因使入炉电量未达给定值, 则会使炉子在指定时间内不能放出指定量的产出物, 下次配料必须减少入炉焙砂量并增大电量输入, 同时指定的产出量也必须在配料计算结果的基础上加上一个修正量, 这样才能适合实际生产情况。显然, 物料平衡与热平衡算法难以适应这类实际生产过程中大量发生的非正常情况下的配料计算, 因此应采用某种能考虑实际生产情况的动态算法来进行配料计算。

2 配料控制的动态优化算法

考虑到生产现场积累了大量实际生产数据, 这些数据充分反映了在各种动态情况下生产技术人员的操作控制策略, 按其中某些策略操作的结果获得了良好的生产指标, 称这类策略为优化策略, 与优化策略对应的实际生产数据组称为优选数据组。若能从生产数据中提取出优化策略, 用“如果…并且…并且…则…”这样的模糊规则表示, 则可构成配料的模糊控制规则, 所有这些规则的集合即可构成配料计算模型, 进行各种动态情况下的配料计算。由于这种模型是用模糊语言规则表示的, 因此必须利用模糊数学理论进行适当处理, 使之能进行数值计算。

基于上述设想, 令 $x_b(k)$ 、 $x_s(k)$ 、 $x_c(k)$ 、 $x_t(k)$ 、 $x_w(k)$ 、 $y_a(k)$ 、 $y_z(k)$ 分别表示第 k 班入炉的焙砂、石英石、焦粉、转炉返渣、平均电负荷量及电炉产出的低镍铈和电炉渣量; A_b^j 、 A_s^j 、 A_c^j 、 A_t^j 、 A_w^j 、 A_a^j 、 A_z^j 为焙砂、石英石、焦粉、转炉返渣、平均电负荷、低镍铈及电炉渣在论域 (即生产允许变化范围) 上的第 j 个模糊子集, 其隶属函数为图 2 所示的凸函数, $\mu(x)$ 表 x 的隶属函数值, 论域上定义的模糊子集个数 P 须根据计算对象的实际情况选定。

下面以入炉焙砂量为例介绍配料控制的动态优化算法。

参考现场操作经验, 通过对历史积累的大量生产数据进行逐步回归分析^[1]发现第 k 班入

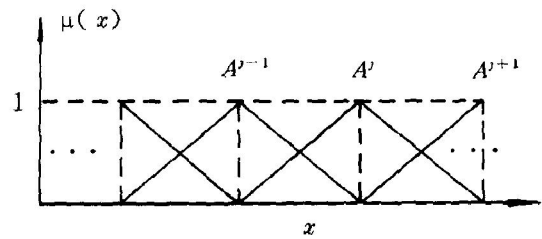


图2 模糊子集 $A^j (j = 1, 2, \dots, P)$

炉焙砂量 $x_b(k)$ 为:

$$x_b(k) = F[x_b(k-1), x_b(k-2), x_s(k-1), x_s(k-2), x_w(k-1), x_w(k-2), x_t(k-1), x_t(k-2), y_a(k-1), y_a(k-2), y_z(k-1), y_z(k-2)]$$

即 $x_b(k)$ 与前两班入炉的焙砂、石英石、电量、转炉返渣及产出的低镍铈和电炉渣量有关。因此, $x_b(k)$ 的第 i 条配料规则可用如下模糊规则表示^[2]:

如果 $x_b(k-1)$ 是 A_b^{i1} , $x_b(k-2)$ 是 A_b^{i2} ,
 $x_s(k-1)$ 是 A_s^{i1} , $x_s(k-2)$ 是 A_s^{i2} ,
 $x_w(k-1)$ 是 A_w^{i1} , $x_w(k-2)$ 是 A_w^{i2} ,
 $x_t(k-1)$ 是 A_t^{i1} , $x_t(k-2)$ 是 A_t^{i2} ,
 $y_a(k-1)$ 是 A_a^{i1} , $y_a(k-2)$ 是 A_a^{i2} ,
 $y_z(k-1)$ 是 A_z^{i1} , $y_z(k-2)$ 是 A_z^{i2}

则

$$x_b^i(k) = a_{i1}x_b(k-1) + a_{i2}x_b(k-2) + a_{i3}x_s(k-1) + a_{i4}x_s(k-2) + a_{i5}x_w(k-1) + a_{i6}x_w(k-2) + a_{i7}x_t(k-1) + a_{i8}x_t(k-2) + a_{i9}y_a(k-1) + a_{i10}y_a(k-2) + a_{i11}y_z(k-1) + a_{i12}y_z(k-2) \quad (1)$$

其中 $x_b^i(k)$ 是第 i 条配料规则在第 k 班的输出, $a_i (i = 1, 2, \dots, 12, i = 1, 2, \dots, m, m$ 为 $x_b(k)$ 的配料规则数) 是配料计算模型中待定的参数。令

$$X = \begin{bmatrix} x_b(k-1) & x_b(k-2) & x_s(k-1) & x_s(k-2) & x_w(k-1) & x_w(k-2) & x_t(k-1) & x_t(k-2) & y_a(k-1) & y_a(k-2) & y_z(k-1) & y_z(k-2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta_i = [a_1^i \ a_2^i \ a_3^i \ a_4^i \ a_5^i \ a_6^i \ a_7^i \ a_8^i \ a_9^i \ a_{10}^i \ a_{11}^i \ a_{12}^i]^T \quad (3)$$

则(1)式可改写成:

$$x_b(k) = X \cdot \theta_i \quad (4)$$

给定一组生产数据 X , 可由各条配料规则输出的 $x_b^i(k) (i=1, 2, \dots, m)$ 加权平均得第 k 班入炉焙砂量 $x_b(k)$ 为:

$$x_b(k) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot x_b^i(k) / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (5)$$

加权系数 λ_i 为:

$$\begin{aligned} \lambda_i = & A_6^{i1}[x_b(k-1)] \wedge A_6^{i2}[x_b(k-2)] \wedge \\ & A_2^{i1}[x_s(k-1)] \wedge A_2^{i2}[x_s(k-2)] \wedge \\ & A_w^{i1}[x_w(k-1)] \wedge A_w^{i2}[x_w(k-2)] \wedge \\ & A_t^{i1}[x_t(k-1)] \wedge A_t^{i2}[x_t(k-2)] \wedge \\ & A_d^{i1}[y_d(k-1)] \wedge A_d^{i2}[y_d(k-2)] \wedge \\ & A_z^{i1}[y_z(k-1)] \wedge A_z^{i2}[y_z(k-2)] \end{aligned} \quad (6)$$

“ $\wedge$ ”表示模糊逻辑的“与”运算, $A_6^{i1}[x_b(k-1)]$ 表示 $x_b(k-1)$ 对模糊子集 A_6^{i1} 的隶属函数值, 其他与此类似。

将(4)式代入(5)式得

$$\begin{aligned} x_b(k) = & \frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} X \cdot \theta_1 + \frac{\lambda_2}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} X \cdot \theta_2 \\ & + \dots + \frac{\lambda_m}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} X \cdot \theta_m \end{aligned} \quad (7)$$

令

$$X_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} X \quad (8)$$

$$X' = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_m] \quad (9)$$

$$\theta = [\theta_1^T \ \theta_2^T \ \dots \ \theta_m^T] \quad (10)$$

则(7)式可改写为:

$$x_b(k) = X' \cdot \theta \quad (11)$$

(11)式即为第 k 班入炉焙砂量的计算公式。称 θ 为参数向量, X' 为新息向量, 它由第 l 组数据经(2)、(6)、(8)、(9)式计算而得, 为常数向量。

以吨焙砂耗电量及电炉渣含镍量为性能指标从生产数据中优选 N 组不同数据 ($N \geq 12$ m), 求出每组数据对应的 $X' (l=1, 2, \dots, N)$; 将 N 组数据及 X' 代入(11)式可得 N 个含参数

向量 θ 的线性方程, 这些方程可写成如下矩阵形式:

$$\begin{aligned} [x_b(k_1) \ x_b(k_2) \ \dots \ x_b(k_N)]^T \\ = [X^1 \ X^2 \ \dots \ X^N]^T \theta \end{aligned} \quad (12)$$

$$X_b = [x_b(k_1) \ x_b(k_2) \ \dots \ x_b(k_N)]^T \quad (13)$$

$$\Phi = [X^1 \ X^2 \ \dots \ X^N]^T \quad (14)$$

则(12)式可写成:

$$X_b = \Phi \cdot \theta \quad (15)$$

X_b 、 Φ 均为常数矩阵, Φ 提供配料计算所需信息, 故称 Φ 为信息矩阵。

利用参数估计的最小二乘法^[1]可求得配料计算公式(11)式中的参数向量 θ 为:

$$\theta = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T X_b \quad (16)$$

同理可分别求出第 k 班入炉石英石、焦粉、转炉返渣、平均电负荷及低镍钨、电炉渣放出量, 从而获得全套配料计算公式。

因推导过程中所用数据均是经过优选的实际生产数据, 故由所得配料计算公式给出的配料方案也是优化的配料方案。

3 配料自适应控制算法

为使前述配料算法能自动总结最新的配料优化策略以适应与生产有关的因素如电炉结构参数等的缓慢时变, 应该利用生产过程中产生的最新优选数据来构造新的配料控制规则, 以其取代已失效的规则, 然后重新计算 θ , 使配料计算公式能反映最新的配料优化策略。求新的 θ 时, 若用(16)式求解, 则工作量及重复计算量均较大, 计算耗时较长, 故笔者在实践中采用限定记忆的最小二乘递推算法^[1]求解新 θ 。

另外, 因焙砂成分不稳定, 不同类型焙砂应使用不同的配料计算公式, 故笔者在实践中首先用模糊聚类分析法^[3]将焙砂按含 Ni、Fe、S 量分为 q 类, 针对每类焙砂建立一套配料算法。又因生产现场焙砂成分数据滞后约两个班次, 故在用(11)式计算配料前, 先对即将入炉的焙砂成分进行预测^[4], 然后对预测结果进行模糊聚类分析, 确定焙砂类型, 最后选用相应

的公式完成配料计算。

配料的动态模糊优化及自适应算法流程见图3。

4 实际应用

笔者应用本文提出的方法为某冶炼厂熔炼车间的 16 500 KW 炼镍用矿热电炉开发了一套计算机配料计算系统, 该系统作为熔炼车间计算机辅助控制系统的一部分于 1992 年 5 月正式投入生产现场使用, 在现场运行一年后于

1993 年 5 月通过专家鉴定。将 1992 年 7 月、8 月生产情况与 1991 年同期比较得:

(1) 电炉渣平均含镍量由 0.247% 降至 0.233%。

正常生产时, 每台电炉每天产渣约 600 t, 车间有三台电炉, 故每天可从渣中多回收镍:

$$0.014\% \times 600 \times 10^3 \times 3(\text{台}) = 252 \text{ kg}$$

(2) 吨焙砂耗电量平均降低 18 kWh。

正常生产时, 每台电炉每天熔炼焙砂约 540 t, 故每天可节电:

$$18 \times 540 \times 3(\text{台}) = 29\ 160 \text{ kWh}$$

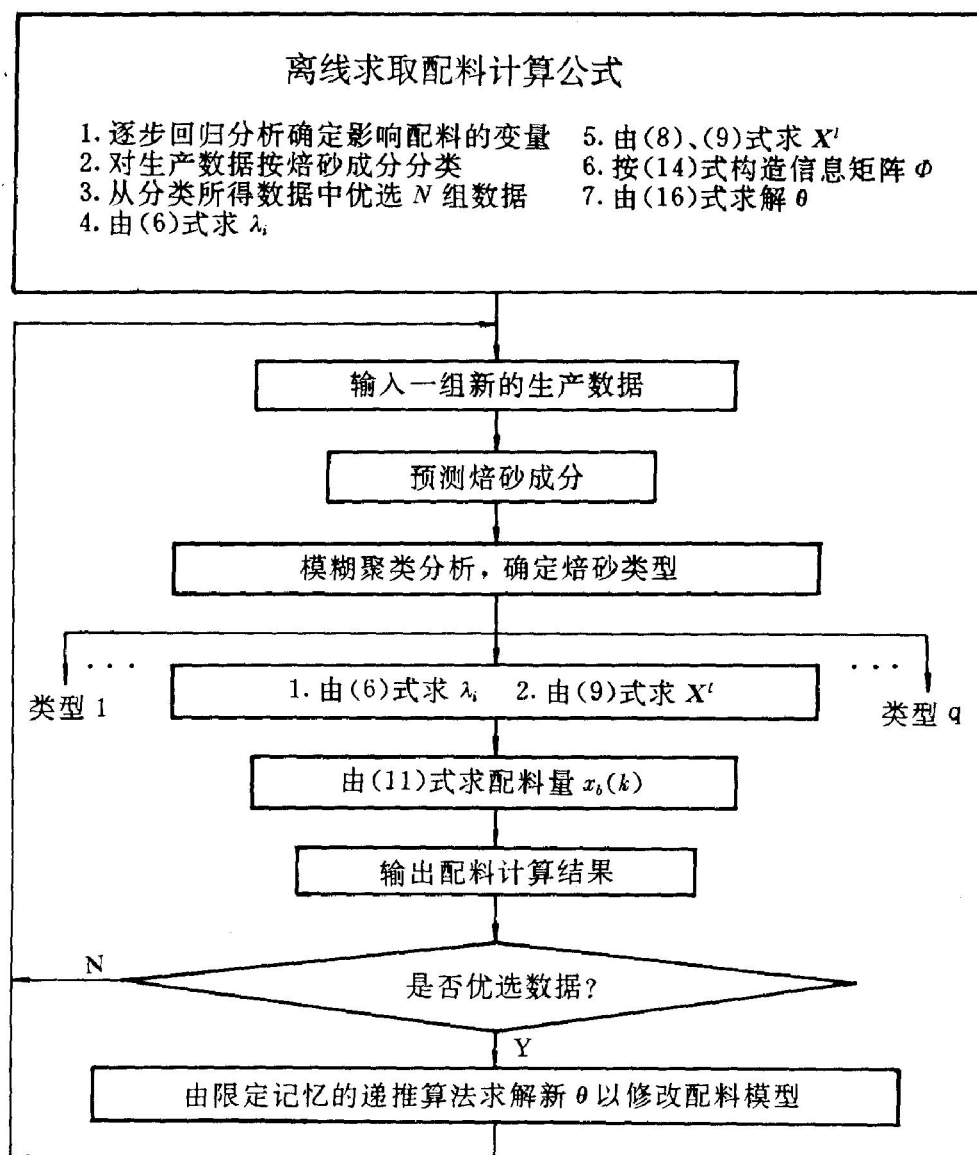


图3 配料动态模糊优化及自适应算法流程图

5 结论

(1)本文提出的矿热电炉配料控制的动态模糊优化算法克服了以物料平衡和热平衡为基础的静态配料计算难以适应动态生产过程的缺陷,对实际生产过程具有良好的自适应性和很强的实用性。

(2)实际应用结果表明,本文提出的方法在生产现场切实可行,由其给出的配料的优化控制策略能有效地指导生产,降低能耗,提高资源利用率,从而获得显著的经济效益。

* 注:本课题还得到金川资源综合利用技术开发中心的经费支持,在此谨致诚挚的谢意。

参考文献

- 1 吴广玉,系统辨识与自适应控制(上册). 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987,222—230,111—124.
- 2 Takagi T, Sugeno K. IEEE TRANSACTION ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, 1985, SMC—15(1):116—132.
- 3 李安华,吴达,模糊数学基础及其应用. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1986,151—161.
- 4 Peng Xiaoqi, Zhou Jiemin, Mei Chi. Proceedings of the International Conference on Mining and Metallurgy of Complex Nickel Ores, Jinchang, China, 1993, 444—447.