



电弧炉炼钢过程终点自适应预报 及专家操作指导系统

张俊杰

王顺晃

(上海冶金设备总厂, 200090)

(北京科技大学自动化系, 100083)

摘 要

本文基于炼钢过程的正常生产数据, 建立了终点自适应预报及带有知识库的预测操作指导系统。该方法的应用有助于克服炼钢过程中的盲目性, 使操作策略规格化和科学化, 既可降低能耗又可提高终点目标命中率。该系统可推广到过程特别复杂、变化缓慢的工业对象中。

关键词: 电弧炉炼钢, 自适应预报, 预测操作指导, 自学习。

一、引 言

电弧炉炼钢是冶金行业中较为复杂的生产过程, 它的冶炼过程分为熔化期、氧化期、还原期三个阶段。其中氧化期的冶炼过程更为错综复杂, 千变万化, 操作难度大, 它的主要任务是确保钢液中含碳量、含磷量和温度达到要求的终点目标值。因而决定在此阶段建立预测操作指导系统, 实现炼钢过程最佳操作策略。

本文以上海冶金设备总厂 5^T 电弧炉为背景, 采用 50 组实际生产数据, 建立预测操作指导系统。

二、氧化期冶炼过程预报模型^[1]

氧化期冶炼过程可以简化如图 1 所示。这是一个三输入三输出系统。设三输出之间



图 1 氧化期冶炼过程简化框图

互不影响, 则可进一步简化为三输入单输出模型。为计算方便采用增量模型。

$$A(z^{-1})y(t) = \sum_{j=1}^3 B_j(z^{-1})u_j(t - d_j) + C(z^{-1})e(t) \quad (1)$$

其中 $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$

$B_j(z^{-1}) = b_{j0} + b_{j1} z^{-1} + \dots + b_{jn_b} z^{-n_b}$

$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c}$

u_i 表示 i 个输入, $y(t)$ 表示输出, d_j 为时延, $e(t)$ 为零均值白噪声. 设 $A(z^{-1})$, $C(z^{-1})$ 的零点都在单位圆内, 则最优预报 $\hat{y}(t+k/t)$ 为 t 时刻前已知信息条件下 $y(t+k)$ 的条件期望, 据文献[2]有如下递推公式:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+k/t) = & - \sum_{i=1}^{n_a} a_i y(t+k-i/t) + \sum_{j=1}^3 \sum_{i=0}^{n_{bj}} b_{ji} u_j(t+k-d_j-i) \\ & + \sum_{i=k}^{n_c} e(t+k-i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $e(t+k-i)$ 表示在 $t+k-i$ 时刻预报误差, 当 $k-i \leq 0$ 时,

$$\hat{y}(t+k-i/t) = y(t+k-i).$$

本文采用递推增广最小二乘法实时辨识系统参数. 令

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + e(t) \quad (3)$$

$$\theta(t) = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_{10}, b_{11}, \dots, b_{1n_b}, b_{20}, b_{21}, \dots, b_{2n_b}, b_{30}, b_{31}, \dots, b_{3n_b}, c_1, c_2, \dots, c_{n_c}]^T$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1), \dots, y(t-n_a), u_1(t-d_1), \dots, u_1(t-d_1-n_{b1}), u_2(t-d_2), \dots, u_2(t-d_2-n_{b2}), u_3(t-d_3), \dots, u_3(t-d_3-n_{b3}), e(t-1), \dots, e(t-n_c)]$$

若(3)式中用 $\hat{e}(t)$ 代替 $e(t)$ 则

$$\hat{e}(t) = y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \phi^T(t) = & [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u_1(t-d_1), \dots, \\ & u_1(t-d_1-n_{b1}), u_2(t-d_2), \dots, u_2(t-d_2-n_{b2}), \\ & u_3(t-d_3), \dots, u_3(t-d_3-n_{b3}), \hat{e}(t-1), \dots, \hat{e}(t-n_c)] \end{aligned}$$

$\hat{\theta}(t-1)$ 为参数向量上一次估计值, 则可推出增广最小二乘的递推算法:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t+1)\hat{e}(t+1) \quad (4)$$

$$\hat{e}(t+1) = y(t+1) - \phi^T(t+1)\hat{\theta}(t)$$

$$K(t+1) = \frac{P(t)\phi^T(t)}{\lambda + \phi^T(t+1)P(t)\phi(t)}$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda} [P(t) - K(t+1)\phi^T(t+1)P(t)]$$

每当获得一次新的输入输出量测量值, 则进行参数估计, 将新的参数估计值代入(2)式, 递推计算 $\hat{y}(t+1/t) \dots \hat{y}(t+k/t)$.

令 $u_1(t) = U_1(t) - U_1(t-1)$, $u_2(t) = U_2(t) - U_2(t-1)$, $u_3(t) = U_3(t) - U_3(t-1)$, $y(t) = Y(t) - Y(t-1)$. 其中 $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $Y(t)$ 分别表示截止 t 时间总吹氧量、供电量、矿石加入量和含碳量(或温度、含磷量), 则可以得到输出量绝对值预报公式:

$$Y(t+k) = Y(t+k-1) + \hat{y}(t+k/t) \quad (5)$$

三、预测操作指导系统^[3]

根据上述电弧炉炼钢氧化期终点自适应预报及炼钢实际运行情况和工人操作经验, 建立控制规则知识库, 推理决策机构, 控制模式自学习等环节如图 2 所示。由氧化期初态

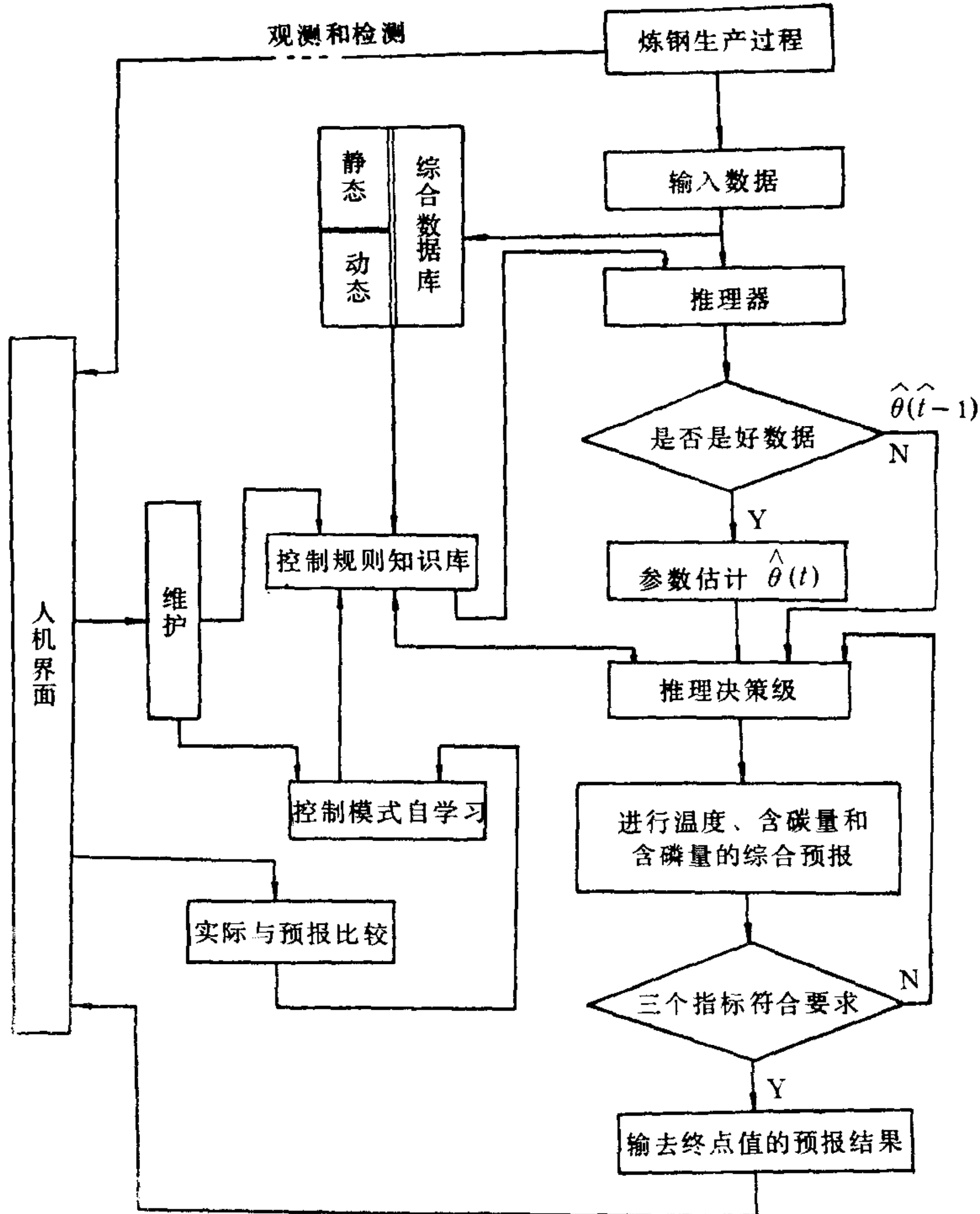


图 2 预测操作指导系统框图 图中输去为输出

化验得到钢液温度 (T), 含碳量 (C), 含磷量 (P), 给出相应的控制策略。随着冶炼过程时间推移, 不断进行冶炼过程终点自适应预报, 得到即时钢液的 T, C, P , 由知识库中事实和规则进行正向推理匹配, 寻找相应控制策略, 即应加入吹氧量、电量和矿石投入量, 并在人机界面上显示当前控制策略, 指导工人不断进行量的调整, 直到达到合格的目标值。为了便于理解, 现将图 2 中主要环节作一简要说明。

1. 综合数据库

它分为静态和动态数据库。静态数据库是存储一些系统运行过程中不变数据; 动态数据库是存储系统的模型参数和推理过程的中间结果。

2. 控制规则知识库

它由事实和规则构成。事实是系统咨询过程中的信息,如本炉次当前的冶炼时间,熔化末期炉内状态及已加入的控制量等。规则是领域专家提供的专门知识,本文采用产生式规则如:

IF 钢液含磷为 0.03~0.04% THEN 矿石投入量为料重 1.5%;

IF 钢液温度偏高 THEN 增加电功率;

⋮

IF 钢液碳偏高 THEN 增加吹氧量;

本文共采用 200 多条规则。

3. 推理和决策

由预报器给出终点钢水 T, C, P , 结合综合数库和控制规则知识库, 通过正向推理, 反复测试, 寻找当前可用规则, 不断修改控制策略, 进行量的调整, 直到找到一条从初始状态到目标状态解的路径, 使钢水由不合格初态到合格终态的操作过程。求解的目标是寻找控制策略 P_i 使钢液由不合格初态 $\varphi_0(T_0, C_0, P_0)$ 到合格终态 $\varphi_f(T_f, C_f, P_f)$ 的映射, 即使 $\varphi_0 \xrightarrow{P_i} \varphi_f$ 成立。

4. 控制模式自学习

所谓自学习是规则库和环境相互作用中不断使自身得到修改和完善。本文采用统计学习方法, 认为某规则以一定概率成立, 概率越大, 规则越可信。它利用实际操作结果与预测结果相近出现的统计频率, 近似规则成立的概率, 则有:

$$P_i = \frac{R}{R + F} \quad (6)$$

式(6)中 P_i 为 i 组规则成立的概率, R, F 为预测系统准确和错误程度, 即

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (7)$$

R_i, F_i 的具体取法为:

IF $|\varepsilon(i)| \leq r_1$: $R_i = 2, F_i = 0$

IF $r_1 < |\varepsilon(i)| < r_2$: $R_i = 1, F_i = 1$

IF $|\varepsilon(i)| > r_2$: $R_i = 0, F_i = 1$

其中:

$$r_1 \text{ 为 } \begin{cases} \text{吹氧时间误差: } |\Delta t| \leq 3 \text{ 分钟} \\ \text{矿石加入量误差: } |\Delta w| \leq 15 \text{ 公斤} \\ \text{供电量误差: } |\Delta P_e| \leq 100 \text{ 度} \end{cases}$$

$$r_2 \text{ 为 } \begin{cases} \text{吹氧时间误差: } |\Delta t| \leq 5 \text{ 分钟} \\ \text{矿石加入量误差: } |\Delta w| \leq 25 \text{ 公斤} \\ \text{供电量误差: } |\Delta P_e| \leq 150 \text{ 度} \end{cases}$$

定义 $P_i < 0.5$ 则对 i 组规则进行修正。通过自学习控制模式, 使控制规则集内容不断完善更新, 更接近于实际情况, 为更好推理决策创造条件。

四、预测操作指导系统运行结果

1991年1月本系统对上海冶金设备总厂5^T电弧炉50炉实际生产数据进行模拟在线预报取得较好效果。如果取温度误差为 $\pm 20^{\circ}\text{C}$, 含碳量为 ± 0.05 , 含磷量为0.003, 则三者同时命中率为63.3%, 单个命中率为86.8%。在在线预报基础上又进行预测操作指导系统模拟在线测试, 结果表明: 矿石加入量误差带小于 ± 10 公斤, 吹氧量时间小于 ± 5 分钟, 耗电量小于 ± 50 度, 而且专家预测值比人工操作实际值更接近于理想值, 完全满足现场生产要求。为实现规范化和科学化炼钢提供条件。

参 考 文 献

- [1] Keyser, R., A. R. Van Cauwenberghe, A Self-tuning Multistep Predictor Application, *Automatica*, 17(1981).
- [2] 邓自立等, 动态系统分析及其应用——建模、滤波、预报、控制的新方法和程序, 辽宁科学技术出版社, 1985.
- [3] Saridis, G. N., Toward the Realization of Intelligent Control, *Proc. IEEE*, 67 (1979).

TERMINAL ADAPTIVE PREDICATION AND EXPERT DIRECTING OPERATION FOR THE STEELMAKING PROCESS OF ELECTRIC ARC FURNACE

ZHANG JUNJIE

(Shanghai Metallurgy Equipment General Factory, 200090)

WANG SHUNHUANG

(Dept. of Automation, Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100083)

ABSTRACT

In this paper, the construction of terminal adaptive predication and predicative directing operation with knowledge base are discussed by ordinary data for the steelmaking process. This method is useful to overcome blindness of the steelmaking process. It could be useful for the normalization for operative strategy. This method is effective to decrease energy consumption, and increase final percentage of success. This system can be applied to other kind of process control.

Key words: the steelmaking of electric arc furnace; adaptive predication; predication directing operation; self-learning.