

## 基于灰色模型的转炉炼钢终点预报研究\*

谢书明 高宪文 柴天佑

东北大学自动化研究中心 沈阳 110006

**摘 要:** 准确预报转炉炼钢的终点钢水温度及碳含量,对于提高终点命中率具有重要意义。作者采用灰色系统模型及线性回归补偿模型建立了转炉炼钢终点钢水温度及碳含量预报模型,并对一座 180 t 转炉的实测数据进行了仿真,其结果与实际值接近,这表明该方法是切实可行并有效的。

**关键词:** 炼钢,转炉,钢水温度,碳含量,灰色系统

**中图分类号:** TF345

## BOF Endpoint Prediction Based on Grey Model

Xie Shuming Gao Xianwen Chai Tianyou

Northeastern University Shenyang 110006

**ABSTRACT** The accurate predictions of the temperature and carbon content of molten steel at BOF endpoint are of great importance to raising the hitting ratio of endpoint. The temperature and carbon content of molten steel at BOF endpoint are modeled by means of GM (1, 1) and compensation of linear regression. The practical data of an 180 t converter are simulated. The results are close to the practical values and show that the method is practicable and effective.

**KEY WORDS** steelmaking, BOF, molten steel temperature, carbon content, grey system

转炉炼钢的目的就是使吹炼过程结束时达到要求的目标钢水温度及碳含量。由于转炉炼钢是一个非常复杂的多元多相高温物理化学过程,其间存在很多难以定量的因素,而且难以获得准确适时的检测信息,从而决定了转炉炼钢不能采用一般过程控制对被调整量进行连续调节的控制方法。正是由于这一特点,使得转炉炼钢终点预报显得尤为重要。准确预报转炉炼钢终点钢水温度及碳含量,可以及时调整加入的原材料、辅助材料及耗氧量,从而提高终点命中率。

转炉炼钢终点预报模型分为两种,即静态模型和动态模型<sup>[1]</sup>。静态模型以多元回归分析为主,配合参数自适应运算。动态模型则是一种递推算法,它不需要保存过去的历史数据。文献[2, 3]根据炉气分析信息分别采用卡尔曼滤波法和自适应最小二乘法对转炉炼钢终点碳含量进行估算。由于目前炉气分析

精度较低,因而这两种方法的估算精度受到一定的影响,同时无法预报终点钢水温度。采用自适应方法预报终点钢水温度和碳含量<sup>[4]</sup>,要求建立受控自回归滑动平均(CARMA)模型并能实现参数的在线辨识,而且计算量很大。近年来,随着神经网络技术的不断发展,尤其是它具有能够逼近任意非线性函数的能力,使其应用越来越广泛。文献[5, 6]采用BP网对转炉炼钢终点钢水温度及碳含量进行预报,取得了比较好的结果。但是,由于BP网收敛速度慢,容易陷入局部极值点,因而给实时应用带来一定困难。1982年,邓聚龙提出灰色系统建模方法<sup>[7]</sup>,将原始数据进行累加处理,使原来离乱的数列(灰色数列)变得比较有规律,然后建立系统的模型。灰色系统建模不需要大量的数据,计算量小,尤其适合各种预报<sup>[8]</sup>,因而得到了非常广泛的应用。本文作者应用灰色系统建模方法对转炉炼钢终点钢水温度及碳含

\* 国家自然科学基金资助项目;“九五”国家科技攻关项目

谢书明,男,36岁,博士; 收稿日期:1998-07-09;修订日期:1999-04-02

量进行预报,并采用线性回归进行补偿,仿真结果令人满意,这证明该方法是切实可行的。

## 1 单变量一阶灰色模型

部分信息已知、部分信息未知的系统称为灰色系统。灰色系统理论是研究解决灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论。传统建模方法都是直接使用已有数据来建立系统模型,然后利用这个模型对系统未来输出做出预测。

灰色系统模型是将原始数据进行累加生成,使原来无规律的数据变成一组单调递增有规律的数据,然后用一个指数函数拟合,即用一阶微分方程来描述。

灰色模型 (Grey Model, 简称 GM 模型) 是灰色系统理论的基本模型。GM (1, 1) 模型, 即单变量一阶灰色模型, 其建模步骤如下:

① 给定系统在  $i$  时刻的一组输出值:

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (1)$$

② 将初始数据进行一次累加运算 (AGO), 得到新的数列:

$$x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (2)$$

其中  $x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m)$

③ 根据数列  $x^{(1)}$  建立如下的一阶微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

其中  $\hat{a} = [au]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$

$$B = \begin{bmatrix} -0.5[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] \\ -0.5[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] \\ \vdots \\ -0.5[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_N = [x^{(0)}(2) \quad x^{(0)}(3) \quad \dots \quad x^{(0)}(n)]^T$$

④ 从第 3 步可以得到一阶微分方程的解:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (4)$$

式 (4) 可以检验拟合值的精度, 也可以对未来时刻进行预测。由式 (4) 得出的输出值为递增值 (即对应于累加生成的数据), 并非真实输出值。要得到真实输出值还应该对这些数据还原, 即进行累减生成。累减生成的基本关系为:

$$\hat{x}^{(0)}(1) = \hat{x}^{(0)}(1) \quad (5)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (k=2, 3, \dots, n, n+1, \dots)$$

## 2 终点预报模型

设转炉炼钢终点钢水温度或碳含量的实际测量

值为  $x^{(0)}(i) (i=1, 2, \dots, n)$  则根据上述灰色系统的建模方法, 可以建立终点钢水温度及碳含量的 GM (1, 1) 模型, 从而得到转炉炼钢终点钢水温度或碳含量的计算值  $\hat{x}^{(0)}(k) (k=1, 2, \dots, n, n+1, \dots)$  不过, 任何一种基于统计分析的建模方法都不可能完全拟合原有的实际值, 必然存在一定的误差。为了提高预报精度, 可以通过修正或补偿的方法使模型尽可能与原有实际值拟合。

影响转炉炼钢终点钢水温度及碳含量的因素很多。上面所建立的终点钢水温度及碳含量的灰色系统模型实际上仅考虑了各个输入变量对钢水温度或碳含量的综合效果, 并没有完全反映出每个输入量的具体影响效果, 而每个因素对钢水温度及碳含量影响的程度不同, 影响的规律也不同。这里, 基于炼钢期间副枪检测信息, 采用线性回归的方法, 对 GM (1, 1) 模型所产生的拟合误差进行补偿, 以提高模型精度。

设  $\Delta x(k) = \hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k) (k=1, 2, \dots, n)$  为通过 GM 模型得到的终点钢水温度或碳含量与实际钢水温度或碳含量的差值。回归变量选择副枪测得的钢水温度  $x_1$ , 副枪测得的钢水碳含量  $x_2$ , 铁水装入量  $x_3$ , 废钢装入量  $x_4$ , 补吹氧气量  $x_5$  及补吹时加入的冷却剂量  $x_6$ , 从而可以建立如下线性回归补偿模型:

$$\Delta X = X\beta \quad (6)$$

其中  $\Delta X = [\Delta x(1) \quad \Delta x(2) \quad \dots \quad \Delta x(n)]^T$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_6(1) \\ 1 & x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_6(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1(n) & x_2(n) & \dots & x_6(n) \end{bmatrix}$$

$$\beta = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_6]^T$$

由于各回归变量的值相差很大, 有可能使回归系数差别加大或使矩阵接近奇异, 因此需对原始数据进行标准化处理, 令:

$$\bar{x}_i(j) = \frac{x_i(j) - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, \dots, n)$$

$$\Delta \bar{x}(j) = \frac{\Delta x(j) - \bar{\Delta x}}{\sigma_{\Delta x}} \quad (7)$$

其中  $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i(j)$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n [x_i(j) - \bar{x}_i]^2}$$

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta x(j)$$

$$e = \sum_{j=1}^n [x(j) - \Delta \bar{x}]^2$$

经过上述变换后,式(6)变成:

$$\Delta X' = X' \alpha \tag{8}$$

其中  $\Delta X' = [\Delta x'(1) \ \Delta x'(2) \ \cdots \ \Delta x'(n)]^T$

$$X' = \begin{bmatrix} x_1'(1) & x_2'(1) & \cdots & x_6'(1) \\ x_1'(2) & x_2'(2) & \cdots & x_6'(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1'(n) & x_2'(n) & \cdots & x_6'(n) \end{bmatrix}$$

$$\alpha = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_6]^T$$

应用最小二乘法可以求得  $\alpha$ ,即:

$$\alpha = (X'^T X')^{-1} X'^T \Delta X' \tag{9}$$

从而得到对误差进行补偿的线性回归模型。

根据 GM(1,1)模型得到的值及经过线性回归得到的对误差的补偿值,可以得到转炉炼钢终点钢水温度及碳含量的拟合值与未来炉次的预报值。即:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^{(0)}(k) + \Delta x(k) \tag{10}$$

其中  $\hat{x}(k)$ 为拟合值 ( $1 \leq k \leq n$ )和预报值 ( $k > n$ );  $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为由 GM(1,1)模型得到的值; $\Delta x(k) = \hat{x}_x(k) - \hat{x}(k) + \Delta \bar{x}(k)$ 为经过线性回归得到的对误差的补偿值。

在转炉炼钢中,随着炼钢炉次的增加,炉衬逐渐变薄,氧枪头逐渐烧损,即氧气流股发生变化,同时

各个炉次加入的原材料和辅助材料成分也不尽相同,为了适应这些情况,上述建模过程中采用新息模型<sup>[7]</sup>,也就是在每炉钢炼完之后,将最新这炉钢的数据加到建模所用的原始数列中,同时去掉最前边一炉钢的数据,以保持数据量不变,而且加入的最新数据是该炉钢在冶炼过程中没有出现较大异常情况的炉次(也就是未发生大的溢渣和喷溅等情况的炉次),以确保预报精度

### 3 仿真结果与分析

对某厂 180 t 转炉的 60 炉实测数据进行了仿真。取其中 40 炉数据建立转炉炼钢终点钢水温度及碳含量模型,对其余 20 炉进行预报。仿真过程中采用新息模型,即首先用前 40 炉数据建模,对第 41 炉作出预报,然后再将第 41 炉的实际数据加到用于建模的数据中,同时去掉第 1 炉的数据,对第 42 炉作出预报,依此类推,从而得到其余 20 炉的预报,结果示于图 1。当预报误差在  $|\Delta t| \leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $|\Delta C| \leq 0.04\%$  时,钢水温度命中率为 80%,碳含量命中率为 85%,碳含量和温度同时命中率为 75%。从此结果可以看出,利用该模型得到的预报结果与实际值比较接近,这说明该方法具有较高的预报精度。

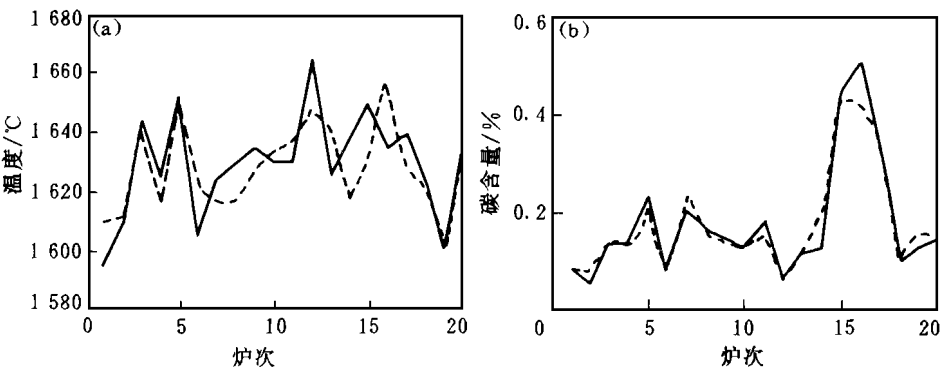


图 1 终点预测值与实际值比较  
——预测值; —— 实际值

Fig. 1 Comparison between the predictive and practical values at the endpoint

### 4 结 语

由于采用了新息模型,本文提出的基于 GM(1,1)和线性回归补偿的转炉炼钢终点预报模型可以反映转炉炼钢随着炉次增加而出现的各种因素对终点钢水温度及碳含量的影响。另外,建模所需数据少、

计算量小,因而完全可以用于转炉炼钢终点钢水温度和碳含量的控制

#### 参 考 文 献

1 潘德惠. 数学模型的统计方法. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1986

2 张润宇,肖 兵,张文弟. 自动化学报,1993,19(3): 381

3 李彦平,潘德惠. 控制与决策,1988,19(2): 7

4 王顺晃,杜大川,刘宏才,等. 北京科技大学学报,1992,14(5): 563

5 丁 容,刘 浏. 钢铁,1997,32(1): 22

6 Yun S Y, Chang K S I& SM, 1996, (8): 37

7 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987

8 Chen Chaokuang, Tien Tzuli. International Journal of System Science, 1997, 20(7): 683

。技术推广。

预应力钢丝的生产工艺与装备

Technology and Equipment for Production

of Prestress Steel Wire

预应力钢丝 (PC钢丝)是国家倡导的高效钢材,一般可节省钢材 20%~30%。它不仅被用作高强度预应力混凝土离心管桩的主筋材料,也是江河桥梁、多层工业厂房、污水处理工程及水利工程的重要钢筋材料。目前,全国虽然已有大小 20 多家 PC 钢丝的生产厂,总的设计年生产能力约 20 万 t,但由于各种原因,实际生产仅 2 万 t 左右,管桩生产厂每年需用的 1 t~12 万 t PC 钢丝大部分仍需从日本、韩国和澳大利亚进口。为满足国内市场需要及完全立足国内生产自给、节约外汇,钢铁研究总院与浙江嘉善、常州及山东烟台等地的厂家合作,研制成功了具有良好点焊与锻锻性能的 PC 钢丝,并承建投产了 3 条 PC 钢丝的生产线。经过宁波浙东水泥制品厂等使用,这些厂家生产的  $\phi 2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  凹螺纹管桩钢筋产品性能达到 JISG3109-88 要求,基本接近日本实物水平,具有国内先进水平。投产的工艺装备完全立足国内,造价只有进口设备的 1/3。

经大量试验对比,选用 30MnSiV 钢,其化学成分(质量分数)为: C 0.26%~0.32%, Mn 1.4%~1.5%, Si 0.7%~0.9%,  $V\leq 0.10\%\sim 0.11\%$ ,  $S\leq 0.014\%$ ,  $P\leq 0.016\%$ 。产品主要力学性能是:抗拉强度  $\sigma_b\geq 1\,420\text{ MPa}$ ,屈服强度  $\sigma_s\geq 1\,275\text{ MPa}$ ,伸长率  $A_{50}\geq 5\%$ ,应力松弛 $\leq 1.5\%$  (10 h)或 $\leq 3.0\%$  (1 000 h)。

该工艺装备的特点是:①冷轧成形生产线采用 Y 型三辊拉轧减径工艺,除生产预应力高强度钢丝外,还可以一线两用,生产冷轧带肋钢筋;②采用新的组合机械除锈装置(即机械弯曲剥壳-旋转矫直除锈-钢丝刷除锈)及其生产工艺;③热处理生产线采用中频、超音频感应加热淬火、回火工艺。超音频装置采用国内最新研制的全固态电路,节电效果好;④除锈、减径、刻痕、连续拉拔一次成形;⑤采用倒立式拉拔机,一次完成拉拔与收线。

据估算,到 2000 年,我国混凝土用高强度大直径凹螺纹钢筋的年消耗量将达到 50 万 t 左右,故本成果所开发的工艺及装备有很好的推广应用前景。

有意者请与本刊编辑部联系。