

高炉炼铁过程炉温的非线性混合控制

刘祥官¹, 罗世华^{1,3}, 刘元和², 吴晓峰²

(1. 浙江大学 系统优化技术研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 莱芜钢铁集团公司, 山东 莱芜 271104;

3. 宁波大学 数学系, 浙江 宁波 315211)

摘要: 从流体动力学机理和化学反应动力学机理的交叉角度研究高炉炼铁过程炉温控制的复杂性规律, 揭示了不同动力学状态下炉内化学反应链及能耗的非线性. 基于模糊模式划分、自适应学习确定模型参数等非线性方法, 建立了炉温混合控制的偏微分方程及其控制模式, 对莱钢1号高炉《智能控制专家系统》在线采集的生产数据的仿真计算结果证明了控制方程对炉温预测控制的适用性, 命中率达到90%以上. 非线性混合控制方程为实现炼铁过程炉温预测控制的自动化奠定了模型基础.

关键词: 高炉炼铁; 过程控制; 非线性系统; 混合控制; 控制模式

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Nonlinear mixed control for silicon contents of hot metal in BF ironmaking processes

LIU Xiang-guan¹, LUO Shi-hua^{1,3}, LIU Yuan-he², WU Xiao-feng²

(1. Institute of System Optimum Technique, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. Laiwu Iron and Steel Group Corporation, Laiwu Shandong 271104, China;

3. Department of Mathematics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: The complex regularity of the silicon content of hot metal-[Si] in BF ironmaking processes is studied with hybrid mechanism of liquid dynamics and chemical reaction dynamics. Chemical reaction chain and its nonlinear energy consumption is explored, based on different hydrokinetics state. Firstly, the partial differential equation for mixed control of [Si] and its control pattern is established by some nonlinear methods, such as partition of fuzzy pattern, optimigation of parameter of every pattern with adaptive study, etc. The results of simulated computation with product data collected on-line at Laiwu BF No. 1 by intelligent control expert system (ICES) are given to show that the equation is applicable to forecast and control of [Si], the hit rate achieves over 90%. The mixed control equation established the foundation of forecast and automation control of [Si] in BF ironmaking processes.

Key words: BF ironmaking; proceeding control; nonlinear system; mixed control; control pattern

1 引言 (Introduction)

《莱钢750m³高炉智能控制专家系统》是《国家级科技成果重点推广计划》项目^[1]中由莱钢与浙江大学合作完成的一个子项. 该项目2001年投入高炉生产运行, 2002年通过技术鉴定. 专家充分肯定了具有自主知识产权的《高炉智能控制专家系统》在信息网络化、系统最优化与炉温智能控制上的技术特色及其对改善高炉指标的应用价值. 鉴定意见指出: “它的成功为我国中型以上高炉的信息化改造实现低成本高效益提供了示范. 可在大中型高炉上推广, 较之引进技术更适用于中国高炉”. 该成果

2003年获山东省科技进步二等奖.

本文在专家系统现场应用取得大量实际数据的基础上, 深入探索了炉温发展变化的强非线性、大时滞及其动力学机理, 进行了生产数据的仿真计算验证. 研究证明, 非线性的炉温控制方程和控制模式能够较好实现高炉冶炼过程炉温的自动预测控制.

2 高炉冶炼过程混合动力学机理 (Hybrid dynamics mechanism of BF ironmaking processes)

高炉炼铁过程是一个十分复杂的高温物理化学过程. 归纳各种各样的高炉冶炼过程数学模型的机

理,主要有冶金反应动力学机理,流体动力学机理,混沌动力学机理,随机动力学机理等等.本文则从不同模型机理的交叉研究中把握高炉冶炼过程建模的复杂性,从而建立起具有实际操作可控性的炉温控制方程及控制模式.

2.1 高炉冶炼过程的流体动力学模型 (Hydrokinetics model of BF ironmaking processes)

从流体动力学角度考察高炉的冶炼过程,它包括由炉顶装入的原燃料在高温物理化学条件下形成的“下降流体”运动,也包括由风口进入的鼓风、喷煤以及化学反应形成的“上升流体”运动.反映流体动力学普遍规律的是以下三大方程^[2,3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = k\rho, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = F - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p, \quad (2.2)$$

$$P = f(\rho). \quad (2.3)$$

其中:(2.1)为连续性方程,反映质量守恒规律;(2.2)为流体运动方程,反映在重力 F 与压差作用下的运动规律;(2.3)是物态方程,反映压力 P 与流体密度 ρ 的函数关系. k 为增长因子, ∇ 为Hamilton算子, v 为流体运动速度向量,并且:

$$\operatorname{div}(\rho v) = \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z}, \quad (2.4)$$

$$(v \cdot \nabla)v = \left(v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right) (v_x, v_y, v_z), \quad (2.5)$$

$$\operatorname{grad} P = \left(\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (2.6)$$

在炉况顺行条件下我们可进一步简化模型,只考虑流体在高炉轴向 z 上的运动速度 LS 而忽略径向 r 及环向 θ 上的运动速度,那么方程(2.1)(2.2)可以简化为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho LS}{\partial z} = k\rho, \quad (2.1^*)$$

$$\frac{dLS}{dt} = F - \frac{1}{\rho} \frac{FQ}{FF}. \quad (2.2^*)$$

式中: FQ 为风量, FF 为透气性指数,按照炼铁工艺计算的定义是:透气性指数 = 风量/压差,即 $FF = FQ/\operatorname{grad} P$.

综合以上方程可知,在高炉冶炼过程中,与流体运动规律密切相关的变量是料速 LS ,风量 FQ ,透气性 FF ,压差 $\operatorname{grad} P$ 以及流体密度 ρ .五项参数中四项参数可以实时采集与计算,我们据此选择它们作为随后建立的控制方程的输入变量,而流体密度无法在线检测.

2.2 高炉冶炼过程的化学反应动力学模型^[4] (Chemical reaction dynamics model of BF ironmaking processes)

需要特别指出的是:高炉冶炼过程的化学反应是在流体运动中的化学反应,因而有别于实验室静态环境下的化学反应.从数学建模角度可以把炼铁过程高炉内发生的100多种主要化学反应^[4],抽象建立广义化学反应方程式:

$$(A + B = F + G + \Delta Q \cap (ST \text{ and } P \text{ and } D))_i, \quad (2.7)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$ 表示各种不同的反应过程, A, B 代表反应物, F, G 代表生成物, ΔQ 是反应过程的热效应(放热或吸热),而 $(ST \text{ and } P \text{ and } D)$ 是该项化学反应能够进行所必须具备的起始温度 ST 、压力 P 和浓度 D 条件,即约束条件.这样,在高炉内的反应场中,无数的化学反应过程或者因约束条件满足而发生,或者因约束条件不满足而难以进行.从数学规划的模型角度分析,它构成了一个十分特殊的数学规划问题,是微观的大规模的动态的线性规划问题.

为了具体地分析化学反应代数方程(2.7)与流体动力学微分方程(2.1)~(2.3)之间的复杂关联,这里从100多种化学反应方程式中选出有代表性的12种反应方程式^[5],如表1所示.其中散度 $\operatorname{div}(\rho v)$ 是对化学反应过程气体体积(密度)是否发生变化的判别式.气体体积不变、增加或减少的判别式依次为 $\operatorname{div}(\rho v) = 0$, $\operatorname{div}(\rho v) > 0$ 或 $\operatorname{div}(\rho v) < 0$.

2.3 混合动力学模型下高炉冶炼过程的复杂性分析 (Complex regularity of BF ironmaking processes based on hybrid dynamics model)

2.3.1 高炉冶炼过程炉温控制复杂性 (Complexity of silicon content control in BF ironmaking processes)

流体动力学微分方程(2.1)~(2.3)和化学反应动力学代数方程(2.7)构成了高炉冶炼过程的混合动力学模型.所谓“混合动力学”是指流体动力学与化学反应动力学的交叉.从模型中看到:流体动力学模型是从宏观角度反映高炉冶炼过程的物质运动规律,是物理学规律;而化学反应动力学模型则是从微观角度反映物质结构的变化规律,是化学规律.两者的交互作用带来了更复杂的混沌规律,即随机性规律中隐含的确定性规律^[6].

两套动力学模型错综复杂的关联,导致了铁水含硅量 $[\text{Si}]$ 极为复杂的变化,以至国内外许多文献都把这种错综复杂的变化完全作为随机动力学范畴

的问题进行建模处理.其结果是所建立的炉温发展的预测控制方程,在炉温控制波动状况下命中率不高,因此无法实现高炉冶炼过程炉温的自动预测控制.

我们在混合动力学模型的基础上,建立起能较好地反映高炉生产实际的控制方程(3.1),并通过多种非线性方法对其做出有效的“粗糙求解”.

表1 对流体动力学模型参数有显著影响的主要反应类型

Table 1 Main reaction style that affected the parameter of hydrokinetics model markedly

反应类型	反应方程式	div(ρv)	热效应/($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	反应起始条件
⑩ 间接还原	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	=0	8.87	141℃
⑨ 间接还原	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	=0	-4.99	240℃
⑧ 间接还原	$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	=0	+13.6	300℃
⑧ 直接还原	$6\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} = 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	>0	-10.98	390℃
⑦ 直接还原	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 6\text{FeO} + \text{CO}_2$	>0	-51.78	750~800℃
⑥ 直接还原	$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	>0	-152.2	800~850℃
⑤ 直接还原	$2\text{FeO} + \text{C} = 2\text{Fe} + \text{CO}_2$	>0	-145.6	850~900℃
④ 碳熔损反应	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$	>0	-165.8	焦炭 800~850℃
③ 二次燃烧	$1/2\text{O}_2 + \text{CO} = \text{CO}_2$	<0	+283.4	风口燃烧带
② 不完全燃烧	$1/2\text{O}_2 + \text{C} = \text{CO}$	>0	+125.5	风口燃烧带
① 完全燃烧	$\text{O}_2 + \text{C} = \text{CO}_2$	=0	+408.8	风口燃烧带
① 硅还原	$(\text{SiO}_2) + 2\text{C} = [\text{Si}] + 2\text{CO}$	>0	-635.1	1350~1550

2.3.2 不同化学反应种类导致的流体动力学状态变化的例证 (Cases which explain that different chemical reactions induces different hydrokinetics states)

从流体动力学角度分析表1中12种有代表性的化学反应方程式,按照反应过程的反应物与生成物中气体体积变化情况进行分类,可以分为:

1) 反应过程气体体积不变,即散度 $\text{div}(\rho v) = 0$,如完全燃烧方程①,间接还原方程⑨⑩;此时,物态方程 $p = f(\rho)$ 不变.

2) 反应过程气体密度增加,即散度 $\text{div}(\rho v) > 0$,如不完全燃烧方程②,碳熔损方程④ 气体体积加倍;或气体从无到有,突然增加,由下降流体中的氧化物和炭,反应生成上升气体,如直接还原方程⑤⑥⑦⑧和硅还原方程①;此时物态方程 $p = f(\rho)$ 局部范围压力增大,透气性变差.在直接还原场合,虽上升流体运动速度减慢,但下降流体却料速加快.

3) 反应过程气体体积减少,即散度 $\text{div}(\rho v) < 0$,如二次燃烧方程③的气体体积减少50%.这种情况多发生在风量与喷煤的组合调控中,导致炉温的复杂变化.

这样,在炉内不同条件下发生的化学反应将引起流体动力学参数的改变,这是代数方程的分类导致微分方程具有不同的非线性特征.当然,按照气体体积变化的简单分类还应该再细化,才能够足以反映炉温 $[\text{Si}]$ 的变动复杂性.

2.3.3 不同流体动力学状态下的化学反应链及其非线性能耗 (Chemical reaction chain and its nonlinear energy consumption based on different hydrokinetics states)

所谓反应链是指在高炉反应场中,一连串的化学反应连续进行时,前一种反应的生成物是后一种反应的反应物,直到最终完成铁的还原.这一串反应就是我们关心的反应链.

从表1中可以举出若干简化的反应链来说明铁还原过程能耗的非线性.

1) 第Ⅰ类反应链.记为①→④→2×⑨,由此得到化学反应变换群 $(\text{O}_2, 2\text{C}, 2\text{FeO}) \rightarrow (2\text{Fe}, 2\text{CO}_2) \cap (\Delta Q1, -\Delta Q4, \Delta Q9)$,它表示在反应物 $(\text{O}_2, 2\text{C}, 2\text{FeO})$ 条件下,完成第Ⅰ类反应链得到了生成物 $(2\text{Fe}, 2\text{CO}_2)$,同时得到热传输向量 $(\Delta Q1, -\Delta Q4, \Delta Q9)$,既有放热,也有吸热.并且还还原出2 mol 铁需要消耗 2 mol 炭.这时吨铁的炭单耗为 $D_I = 12/56 \times 1000 = 214 \text{ kg/t}$,称为炭单耗基数 D_0 .

2) 第Ⅱ类反应链.记为①→②→⑨,由此得到变换群为 $((3/2)\text{O}_2, 2\text{C}, \text{FeO}) \rightarrow (\text{Fe}, 2\text{CO}_2) \cap (\Delta Q1, \Delta Q2, \Delta Q9)$.此时 2 mol 炭只还原得到1 mol 铁,因此炭单耗是 $2 D_0$.但是,此时的热传输向量完全是放热,充沛的热量有利于硅的还原.

第Ⅰ类与第Ⅱ类反应链在炭单耗上的显著差异,原因在于化学反应的途径不同.其实际工艺背景是风口燃烧带的工作状态不同,在于炉温的初始状

态以及与鼓风-喷煤组合状态不同造成的。

3) 两类反应链的线性组合, 记为 $\alpha(I) + (1 - \alpha)(II)$ 。

在炉内某种流体动力学条件下, 两类反应链都同时大量发生, 此时铁的炭单耗计算公式是:

$$D = D_0(2 - \alpha).$$

显然在表1中, 不同反应链的炭单耗应当进一步考虑 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ 的长反应链情况, 应当考虑直接还原度与间接还原度等等, 限于版面, 这里不一一展开。但是, 作为在流体动力学条件下铁还原能耗非线性的证明, 以上3类反应链的炭单耗计算已经完全可以说明高炉冶炼过程存在能耗的非线性规律。这种规律是无法在线检测的。但是, 在《高炉智能控制专家系统》中, 通过系统优化模块在线计算可以得到^[7]。

3 炉温混合控制方程的建立与非线性方法“粗糙求解”(Mixed control equation of Silicon content and its nonlinear rough solution)

3.1 基于混合动力学机理上的混合控制方程 (Mixed control equation of Silicon content based on hybrid dynamics mechanism)

根据以上对“混合动力学”的论述可知, 高炉炼铁过程存在着流体动力学参数与化学反应参数之间的“耦合”关系。考虑到炼铁工艺过程参数的可检测性和可控性的实际情况, 结合第2节中的相关理论研究, 我们选择料速指数 LS , 透气指数 FF , 风量指数 FQ 和喷煤指数 PM 作为炉温预测控制模型的输入变量, 它们是影响炉温的关键量(之所以舍弃了一些相关性较弱的输入变量是因为它们对炉温的影响较小, 如果都纳入模型会人为带进大量的噪声, 反而影响模型精度)。模型的输出变量当然是 $[Si]$ 值(由于无法直接测量高炉内铁水的温度, 目前业界均用铁水硅的含量来表征高炉炉温的状态)。建立在混合动力学机理上的混合控制偏微分方程如下:

$$\frac{d[Si]}{dt} = L(t) \frac{\partial bLS}{\partial t} + F(t) \frac{\partial bFF}{\partial t} + Q(t) \frac{\partial bFQ}{\partial t} + M(t) \frac{\partial bPM}{\partial t}, \quad (3.1)$$

式(3.1)中: $\frac{\partial bFQ}{\partial t}$ 是铁水含硅量 $[Si]$ 的变动值, bLS, bFF, bFQ 和 bPM 分别为料速指数 LS , 透气指数 FF , 风量指数 FQ 和喷煤指数 PM 的百分比变化率函数, 而 $L(t), F(t), Q(t)$ 和 $M(t)$ 分别是它们的影

响系数, 是非线性函数, 随炉温及各项指数的不同条件而变化。

方程(3.1)中 $[Si]$ 是反映化学反应动力学状态的因变量, FQ 与 PM 是流体动力学的控制变量, 而 LS 与 FF 既是化学反应动力学的状态变量, 也是流体动力学的状态变量。

需要指出的是: 方程(3.1)中的各项指数并非实时检测的工艺参数值。例如, 风量是实时检测值, 而风量指数则是根据 Fourier 卷积函数得到的计算值。其计算公式是

$$F(g) = \int_{t_0}^{t_0+T} g(t) \omega(t) dt, \quad \text{式中} \int_{t_0}^{t_0+T} \omega(t) dt = 1.$$

之所以对工艺参数进行指数化预处理, 这是因为在冶炼1炉铁的2h中, 各项工艺参数的调控和变动对炉温影响的时效是非线性的, $\omega(t)$ 是时效函数, 并且不同变量的时滞也不同。

另一方面, 在方程(3.1)中, 由于 $[Si]$ 是每炉铁才有一个化验值, 是离散变量; 而 LS, FF, FQ, PM 都是可以连续检测的状态变量与控制变量, 因此, 需要对采样数据进行离散化处理, 把连续型微分方程改写为离散的差分方程

$$\begin{aligned} \Delta[Si](n) &= [Si](n) - [Si](n-1) = \\ &L(n) \frac{LS(n) - LS(n-1)}{LS(n-1)} + F(n) \frac{FF(n) - FF(n-1)}{FF(n-1)} + \\ &Q(n) \frac{FQ(n) - FQ(n-1)}{FQ(n-1)} + P(n) \frac{PM(n) - PM(n-1)}{PM(n-1)}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

于是建立起炉温的变动与冶炼过程的状态变量-控制变量的变动之间的差分方程。

3.2 混合控制方程的“粗糙求解”^[8,9] (Rough solving process for the mixed control equation)

精确求解方程(3.2)在现有条件下是困难的, 但根据生产实际, 用前一炉的硅值 ($[Si]_{(n-1)}$) 作为方程的初始边界条件, 对模型输入和输出变量做模糊模式划分, 对每一组输入变量的值, 可以粗糙地归入输入变量的某种模式, 再通过对历史数据的学习训练可以确定对应模式下方程的系数, 进而求出模型输出变量的值。从数学角度分析, 这也是对非线性差分方程(3.2)按照不同情况进行线性化处理, 在同一类操作模式中, 各变量的系数函数各自作为常数处理。但这样做会带来弊端, 即系统新的信息无法及时体现在模型中, 一段时间以后模型的预测命中精度就会明显下降。为此, 设计一定的时间间隔让学习数据动态更新, 系统通过自适应学习从新确定每一模式下的系数 $L(n), F(n), Q(n)$ 和 $M(n)$, 这样

就大大提高了模型的适应性和预测精度。

经过对各种方案的反复探索与对比,根据莱钢高炉生产实际数据建立的状态变量与控制变量的模式分类如表2所示。

表2 状态变量与控制变量的模式分类表

Table 2 Domain partitions of state variables and control variables

模式代码	-B	-A	+A	+B
[Si](n-1)	< 0.30	0.30 ~ 0.45	0.45 ~ 0.60	≥ 0.60
料速指数 bLS	-20 ~ -10	-10 ~ 0	0 ~ 10	10 ~ 20
风量指数 bFQ	-20.0 ~ -1.2	-1.2 ~ 0	0 ~ 1.2	1.2 ~ 20.0
喷煤指数 bPM		< 0	≥ 0	
透气指数 bFF		全	程	

表2中, -B, -A, +A, +B表示各项指数的变化范围,它们组成的向量表示操作模式。例如:向量 $(X_1, X_2, X_3, X_4) = ([Si], LS, FQ, PM) = (+A, +A, +A, +A)$ 表示在 $[Si] \in [0.45 \sim 0.60]$ 和料速指数 $bLS \in [0 \sim 10.0]$ 情况下,执行保持风量指数平稳 $bFQ \in [0 \sim 1.2]$ 和增加喷煤指数 $(bPM \geq 0)$ 的方案是达到炉温优化控制的方案。调控值则由混合控制方程计算得到。

由四项变量的组合分析可知,这样建立起来的

操作模式分类共有128种控制模式。按照表2对生产实际数据进行分类的结果表明,通常生产中常用的控制模式约30种,按照组合分析得到的128种模式中,大约有40种模式生产上是不可行的或必须尽力避免的。例如,在低硅初始条件下加大风量的操作,这种组合方式在生产中是绝对禁止的。因此通过专家知识规则建立和方程(3.2)能够自动求解达到最佳控制炉温下风量与喷煤的调控量。

3.3 莱钢1号高炉实际数据的仿真(Simulated computation with product data collected on-line at Laiwu BF No.1)

按照混合控制方程对实际生产数据进行仿真计算,得到图1的计算结果。这是莱钢1号高炉2002年36214号~36263号的连续生产的50炉数据。我们定义铁水含硅量的控制计算值与实际值之差的绝对值 ≤ 0.1 为该炉预报“命中”。然后在图1“命中”一栏中赋值1,否则赋值为0。同时,如果控制计算值与实际值相比升降的方向与炉温发展实际升降方向一致,称为控制预报“成功”,在图1的“成功”一栏赋值1,否则为0。从图1看到:混合控制方程计算结果的命中率达到98%,成功率达到92%。这个计算结果比起随机动力学机理下的其它模型计算得到的命中率和成功率要高得多。

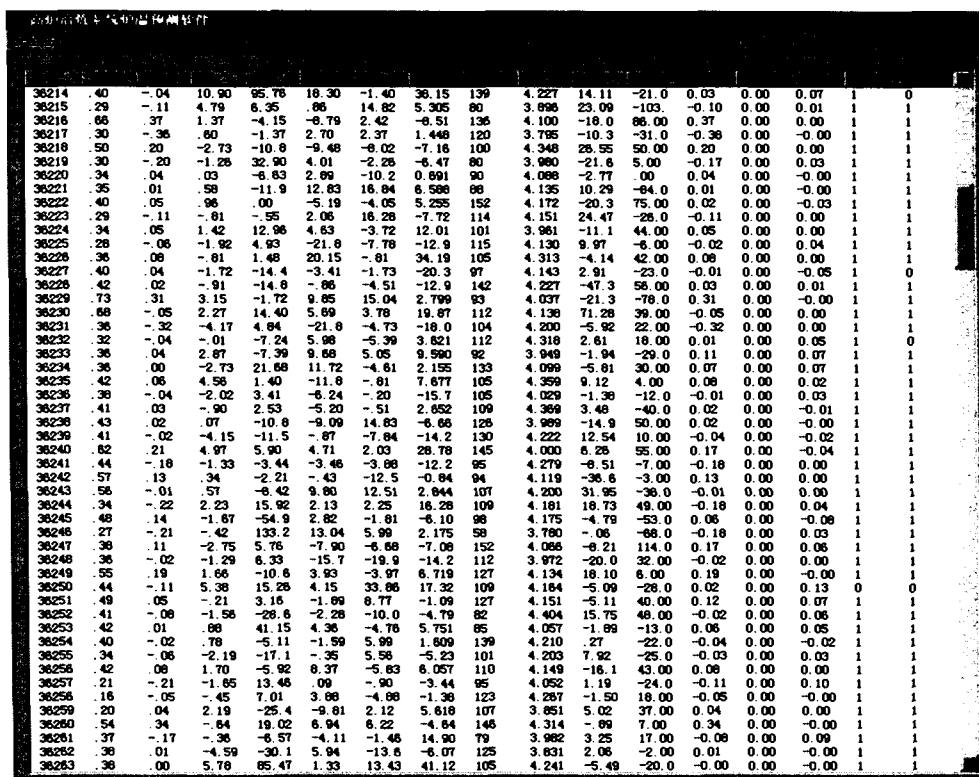


图1 炉温([Si])混合控制差分方程的仿真计算结果

Fig. 1 Emulation results of Silicon content based on mixed control difference equation

特别需要指出的是在图1的第36216~36219号连续4炉的冶炼过程中,炉温的控制变动十分剧烈,[Si]的升降值依次为: +0.37, -0.36, +0.20, -0.20. 在其它预测模型下,如时间序列模型,神经网络模型,BAYES网络模型等,在炉温平稳下预测命中率高,但是,对如此强烈的控制变动都无法预测命中. 然而炉温混合控制方程的计算结果却很好反映了工长对炉温的控制规律.

4 结论(Conclusion)

通过对高炉冶炼过程流体动力学机理与化学反应动力学机理的分析,特别是对两种动力学机理的交叉分析,建立了高炉冶炼过程炉温混合控制方程,并用模糊模式划分、自适应学习确定模型参数等非线性方法给出方程的“粗糙求解”. 莱钢生产数据验证证明方程不仅机理上具有建模的科学性,而且具有实践的可行性与可靠性. 从而使高炉冶炼过程的炉温控制向着模型自动计算坚实地推进了一步.

当然,除了混合控制方程之外,高炉炼铁过程的控制方程还包括由变料引发的时滞控制;铁量差与冶炼时间引起的随机修正控制;以及由混沌动力学规律引起的混沌控制等,它们综合组成高炉冶炼过程的智能控制. 其结果使《高炉智能控制专家系统》^[10]不仅具有系统优化挖掘生产潜力的功能,而且具备了在线自动计算控制量,实现炉温最优预测控制的功能. 这一功能的完善提高,必将有力地推进大型高炉应用国产的《高炉智能控制专家系统》.

参考文献(References):

- [1] 国家科技部.《国家科技成果重点推广计划》技术依托单位证书:中国,99040422A[P]. 1999.
(National Ministry of Science and Technology. Grand plan that popularizes national technological accomplishment emphasized; China, 99040422A[P]. 1999.)
- [2] 沈颐身,李保卫,吴懋林. 冶金传输原理基础[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
(SHEN Yishen, LI Baowei, WU Maolin. Basic Principle of Metallurgy Transfers [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.)
- [3] 归柯庭,汪军,王秋颖. 工程流体力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
(GUI Keting, WANG Jun, WANG Qiuying. Engineering Hydrodynamics [M]. Beijing: Science Press, 2003.)

- [4] 肖兴国,谢蕴国. 冶金反应工程学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.
(XIAO Xingguo, XIE Yunguo. Basic of Metallurgical Reaction Engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.)
- [5] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
(ZHOU Chuandian. Technology Manual of BF Ironmaking [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.)
- [6] 邵传厚,刘祥官. 高炉冶炼过程的混沌性辨识[J]. 金属学报, 2004,40(4):347-350.
(GAO Chuanhou, LIU Xiangguan. Chaotic identification of BF ironmaking process [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(4): 347-350.)
- [7] 刘祥官,刘芳. 高炉炼铁过程优化与智能控制系统[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
(LIU Xiangguan, LIU Fang. Optimum and Intelligent Cybernetics of BF Ironmaking Processes [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.)
- [8] 陈谋,姜长生,吴庆亮. 基于非线性控制方法的倒立摆混合控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 684-688.
(CHEN Mou, JIANG Changsheng, WU Qingxian. Inverted pendulum system control based on nonlinear control method [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(5): 684-688.)
- [9] 修智宏,任光,张运杰. 输入采用标准模糊划分的模糊控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 1015-1019.
(XIU Zhihong, REN Guang, ZHANG Yunjie. Systematic design of fuzzy control systems with standard fuzzy partition inputs [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 1015-1019.)
- [10] 刘祥官,刘元和,罗登武. 莱钢750m³高炉智能控制专家系统[J]. 钢铁, 2002, 37(8): 18-22.
(LIU Xiangguan, LIU Yuanhe, LUO Dengwu. Intelligent expert system on No. 1 BF at LaiWu iron and steel Group Co [J]. Iron & Steel, 2002, 37(8): 18-22.)

作者简介:

刘祥官 (1943—),男,教授,运筹学与控制论专业博士生导师,国家级中青年有突出贡献专家,主要研究复杂工业系统的建模与优化、工业数学应用等, E-mail: xgliu@zju.edu.cn;

罗世华 (1975—),男,浙江大学博士研究生,宁波大学讲师,研究领域为非线性系统数学建模、模糊逻辑, E-mail: luoshihua@nbu.edu.cn;

刘元和 (1945—),男,高级工程师,原莱钢技术中心主任,炼铁专业技术带头人;

吴晓峰 (1962—),男,高级工程师,莱钢自动化部副主任,自动化专业技术带头人.