

高炉冶炼过程的混沌性解析^{*}

郜传厚^{1)†} 周志敏²⁾ 邵之江¹⁾

¹⁾ 浙江大学控制科学与工程系系统工程研究所 杭州 310027)

²⁾ 浙江大学数学系 杭州 310027)

(2004 年 7 月 2 日收到 2004 年 10 月 27 日收到修改稿)

根据 Grassberger 和 Procaccia 提出的 Kolmogorov 熵计算方法,以山东莱芜钢铁集团公司 1 号高炉和山西临汾钢铁集团公司 6 号高炉测得的铁水硅含量时间序列为样本,计算了各自的 Kolmogorov 熵分别为 $(0.1453 \pm 0.0151) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(0.1553 \pm 0.0140) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$, 并估计了两座高炉铁水硅含量可预测的时间尺度分别约为 6.88 和 6.44 h. 由 Kolmogorov 熵均为大于零的有限值,定量地说明了这两座高炉冶炼过程具有混沌性,同时提出用 Kolmogorov 熵值大小来诊断高炉炉况.

关键词:混沌, Kolmogorov 熵, 高炉冶炼过程, 铁水硅含量

PACC: 0545

1. 引 言

高炉提供了从铁矿石还原铁的有效方法,它利用焦炭将铁从其氧化物中还原出来,产品是用于进一步炼钢所需要的铁水^[1]. 高炉冶炼过程是一个极其复杂的过程,其运行机制目前仍未弄清,往往带有非线性、时滞、高维、大噪声等特性. 长期以来,多是将高炉冶炼过程视为随机过程加以建模和控制^[2-5]. 但非线性动力学的研究表明,一些看起来貌似随机的过程实际并不是随机的而是混沌的. 而且高炉本身是一个集传热与化学反应耦合的开放体系,其输出状态可能具有混沌性. 因此尝试从混沌动力学的角度研究高炉冶炼过程不失为一个可行的方法. 首先须对高炉冶炼过程的混沌性进行解析.

混沌是自然界中一类普遍现象,它具有对初值极端敏感、不可预测、不可分解、稠密的周期点等特性. 通常描述系统动力学行为是否具有混沌性的方法主要有 5 种,即准相图、Poincaré 截面、Kolmogorov (K) 熵、饱和关联维数和 Lyapunov 指数法. 其中 K 熵是刻画混沌系统的一个重要的量,它是系统无序程度的量度,其数值可用来区分周期运动($K=0$)、混沌运动($K>0$ 的有限值)、随机运动($K \rightarrow \infty$). 在混沌运动中, K 熵越大,信息的损失速率越大、系统的

混沌程度越大,系统也就越复杂^[6]. 同时, K 熵作为系统正的 Lyapunov 指数和的下界,可对系统行为的预测尺度进行度量^[7].

本文选取山东莱芜钢铁集团公司(莱钢)1 号高炉和山西临汾钢铁集团公司(临钢)6 号高炉采集的铁水硅含量时间序列为样本,基于相空间重构技术^[8,9],计算了两座高炉冶炼过程的 K 熵,进而确定其混沌性. 随后对高炉铁水硅含量的可预测时间尺度进行了度量.

2. 关联积分法计算 Kolmogorov 熵

从时间序列计算 Kolmogorov 熵的方法主要有两种,即 Schouten 等^[6]提出的最大似然估计法和 Grassberger 等^[10]提出的关联积分算法. 关联积分算法中 Kolmogorov 熵定义如下:对于具有自由度为 F 的动力系统,假设 F 维的相空间可用一系列尺度为 ϵ^F 的盒子来划分,考察动力系统在奇异吸引子上的轨道

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t)], \quad (1)$$

每隔时间 Δt 去测量系统的状态. 设 $P(i_1, i_2, \dots, i_d)$ 是 $\mathbf{x}(t = \Delta t)$ 在盒子 i_1 中, $\mathbf{x}(t = 2\Delta t)$ 在盒子 i_2 中, \dots , $\mathbf{x}(t = d\Delta t)$ 在盒子 i_d 中的联合概率,则 Kolmogorov 熵定义为

^{*} 国家重点基础研究发展规划 批准号: 2002CB312200 资助的课题.

[†] E-mail: gaouchou@yahoo.com.cn

$$K = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} P(i_1, i_2, \dots, i_d) \times \ln P(i_1, i_2, \dots, i_d). \quad (2)$$

在实际计算 K 时,直接对(2)式计算很困难,通常用二阶 Renyi 熵 K_2 来近似 K . K_2 保持了 K 的主要性质,仍然可以用来区分周期运动、混沌运动、随机运动. q 阶 Renyi 熵定义为

$$K_q = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\Delta t} \frac{1}{q-1} \times \ln \left(\sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} P^q(i_1, i_2, \dots, i_d) \right). \quad (3)$$

Grassberger 和 Procaccia^[10] 得出,当 $q > q'$ 时, $K_q > K_{q'}$, 所以 $K_2 < K_1$, 其中 K_1 为 Kolmogorov 熵 K , K_2 为二阶 Renyi 熵. 当 $K_2 > 0$ 时, 必可推出 $K > 0$. 所以在通常情况下可以用 K_2 值来判断系统的混沌性. 根据(3)式可将 K_2 写为

$$K_2 = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\Delta t} \ln \left(\sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} P^2(i_1, i_2, \dots, i_d) \right). \quad (4)$$

Grassberger 和 Procaccia^[10] 得出, K_2 熵与关联积分 $C_d(\varepsilon)$ 关系为

$$K_2 = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\Delta t} \ln C_d(\varepsilon). \quad (5)$$

当采样时间间隔 Δt 固定时, (5) 式可写为

$$K_2 = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\Delta t} \ln C_d(\varepsilon). \quad (6)$$

(6) 式中关联积分 $C_d(\varepsilon)$ 定义^[11] 为

$$C_d(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \delta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \quad (7)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为 Heaviside 函数, ε 为尺度, N 为相空间中点的个数. 由于

$$C_d \propto \varepsilon^{D_2}, \quad (8)$$

结合(5)式有

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} C_d(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_2} \exp(-K_2 d\Delta t). \quad (9)$$

若暂时不考虑(9)式比例号左端的极限, 在重构为 d 维和 $m+d$ 维下分别有

$$C_d(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_2} \exp(-K_2 d\Delta t), \quad (10)$$

$$C_{m+d}(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_2} \exp(-K_2(m+d)\Delta t). \quad (11)$$

(10) 和(11)式相除可得

$$K_{2,d}(\varepsilon) = \frac{1}{m\Delta t} \ln \frac{C_d(\varepsilon)}{C_{m+d}(\varepsilon)}. \quad (12)$$

当 $d \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$ 时可得

$$\lim_{\substack{d \rightarrow \infty \\ \varepsilon \rightarrow 0}} K_{2,d}(\varepsilon) = K_2. \quad (13)$$

3. 数值计算结果

在实际生产中测得的原始时间序列

$$\{x_i = x(t_0 + (i-1)\Delta t)\} \quad (i = 1, \dots, n), \quad (14)$$

式中, t_0 为采样初始时间, Δt 为采样时间间隔. 利用相空间重构技术^[8] 和 Takens 嵌入定理^[9] 将其嵌入到维数为 d 、时滞为 τ 的状态空间中去, 则 d 维状态空间中的点可表示为

$$x_j = \{x_j, x_{j+\tau}, \dots, x_{j+(d-1)\tau}\} \quad (j = 1, \dots, N), \quad (15)$$

式中 $N = n - (d-1)\tau$.

以莱钢 1 号高炉铁水硅含量时间序列(炉号为 25039—26038)和临钢 6 号高炉铁水硅含量时间序列(炉号为 1082—2081)为样本空间, 容量为 1000 炉数据, 采样时间间隔平均为 2 h. 原始时间序列如图 1 所示.

文献[12]分析了这两类样本, 得出它们的最优时

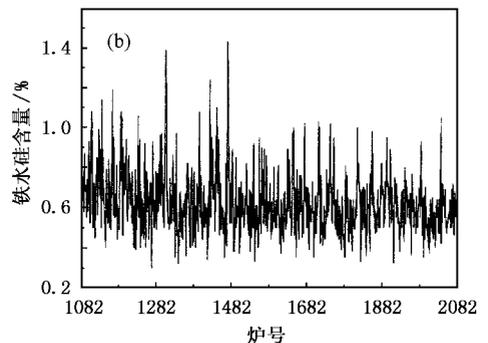
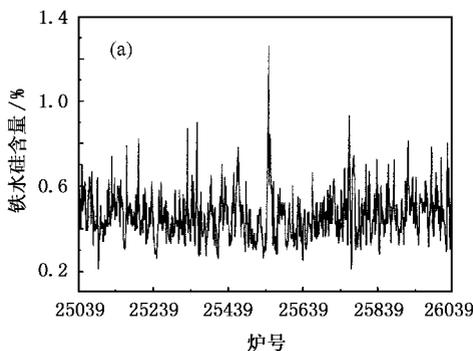


图 1 莱钢 1 号高炉(a)和临钢 6 号高炉(b)铁水硅含量时间序列图

滞均为 6. 因此, 根据 (7) 式可计算相应的关联积

分, 如图 2 所示.

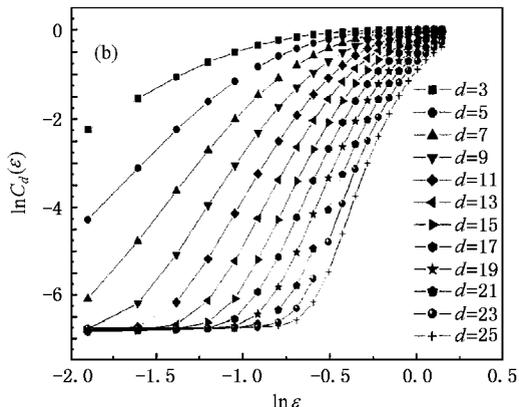
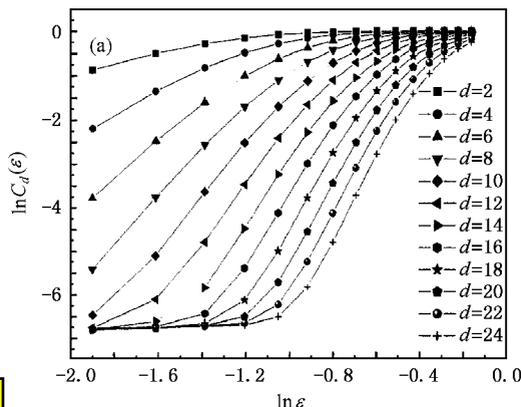


图 2 莱钢 1 号高炉 (a) 和临钢 6 号高炉 (b) 关联积分图

考察图 2 中曲线的无标度区域, 按 (12) 式计算

得到的 Kolmogorov 熵, 如图 3 所示.

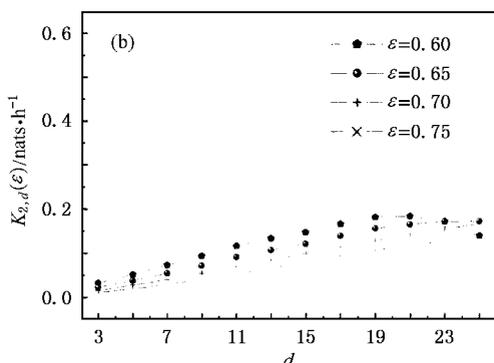
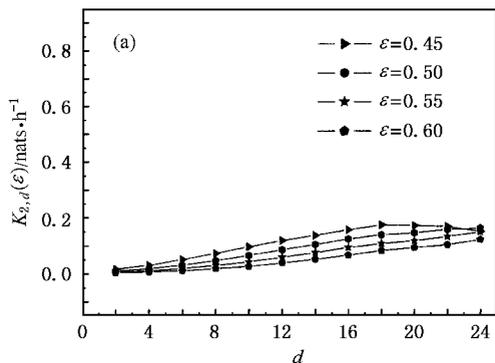


图 3 莱钢 1 号高炉 (a) 和临钢 6 号高炉 (b) 的 Kolmogorov 熵

从图 3 可看出, 随着嵌入维数 d 的增大, 莱钢 1 号高炉和临钢 6 号高炉的 K_2 熵亦即 K 熵大致趋向于定值 $(0.1453 \pm 0.0151) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(0.1553 \pm 0.0140) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$. 由 K 熵为大于零的有限值可知这两座高炉冶炼过程具有混沌性, 比较两个 K 熵值可知临钢 6 号高炉冶炼过程混沌性强于莱钢 1 号高炉.

高炉冶炼过程混沌性的确定, 为混沌理论应用于高炉冶炼过程打下了基础, 并取得了一定的成效^[13].

4. 可预测时间尺度的度量

文献 [7] 指出, K 熵可作为正的 Lyapunov 指数和 $\sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$ 的下限值, 即满足

$$K_2 < K \leq \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i. \quad (16)$$

正的 Lyapunov 指数和是表示系统演化过程中可能具有的不可预测性的度量, 而其倒数 $T = 1 / \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i$ 却是表征系统行为可预报性的时间尺度. 因此可用

$$T = 1 / \sum_{\lambda_i > 0} \lambda_i \approx 1 / K_2 \quad (17)$$

来估计高炉铁水硅含量的可预测的时间尺度. 计算得到两座高炉的可预测时间尺度分别约为 6.88 和 6.44 h, 考虑到采样的时间间隔, 则莱钢 1 号高炉和临钢 6 号高炉的可预测炉数均大致为 3 炉, 3 炉之后的状态难以预测. 其物理意义是: 用混沌预测方法对这两座高炉铁水硅含量进行 1—3 步预测在理论上均是可行的.

5. 结 论

1) 本文根据 Grassberger 和 Procaccia 所提出的

Kolmogorov 熵的计算方法,以莱钢 1 号高炉和临钢 6 号高炉采集的铁水硅含量数据为样本,计算得出两座高炉冶炼过程的 K 熵分别为 $(0.1453 \pm 0.0151) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(0.1553 \pm 0.0140) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$. 由 K 熵为大于零的有限值可知这两座高炉冶炼过程具有混沌性,且临钢 6 号高炉混沌性强于莱钢 1 号高炉. 这为混沌理论用于高炉冶炼过程打下了基础.

2) 莱钢 1 号高炉和临钢 6 号高炉的可预测时间尺度分别约为 6.88 和 6.44 h. 因此按照 2 h 出 1 炉铁的采样周期,对两座高炉的铁水硅含量数值预报进行 1—3 步预测在理论上均是可行的.

3) Kolmogorov 熵作为混沌系统状态的度量标尺,其大小在不同的动力系统、不同的时间序列中并不同,因此可根据 K 熵的大小来判断系统状态的复杂程度^[14]. 在高炉冶炼过程中,可通过动态计算铁水硅含量时间序列的 K 熵值,动态地判断高炉冶炼过程的复杂程度,进而诊断高炉炉况,帮助高炉工长及早采取有效措施避免炉况的失常,为实际生产作出指导.

感谢浙江大学系统优化技术研究所提供原始生产数据.

-
- [1] Miyano T, Kimoto S, Shibuta H *et al* 2000 *Physica D* **135** 305
- [2] Claude S 1967 *Ironmaking Proc. Metall. Soc. AIME* **21** 66
- [3] Pandit S M, Clum J A, Wu S M 1975 *Ironmaking Proc. Metall. Soc. AIME* **34** 403
- [4] Singh H, Sridhar N V, Deo B 1996 *Steel Res.* **67** 521
- [5] Yao B, Yang T J, Ning X J 2000 *J. Univ. Sci. Technol. Beijing* **7** 269
- [6] Schouten J C, Takens F, Bleek C M 1994 *Phys. Rev. E* **49** 126
- [7] Kantz H, Schreiber T 2001 *Nonlinear Time Series Analysis* (Beijing : Tsinghua University Press) p198
- [8] Packard N H, Grutchfield J P, Farmer J D *et al* 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 712
- [9] Takens F 1981 *Lect. Notes. Math.* **898** 366
- [10] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Phys. Rev. A* **28** 2591
- [11] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [12] Gao C H, Liu X G 2004 *Acta Metall. Sin.* **40** 347 (in Chinese)
[郜传厚、刘祥官 2004 金属学报 **40** 347]
- [13] Gao C H, Zhou Z M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4092 (in Chinese)
[郜传厚、周志敏 2004 物理学报 **53** 4092]
- [14] Cai J P, Li Z, Song W T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1871 (in Chinese)
[蔡觉平、李 赞、宋文涛 2003 物理学报 **52** 1871]

Chaotic analysis for blast furnace ironmaking process^{*}

Gao Chuan-Hou¹⁾ Zhou Zhi-Min²⁾ Shao Zhi-Jiang¹⁾

¹⁾*Institute of Systems Engineering, Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

²⁾*Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

(Received 2 July 2004 ; revised manuscript received 27 October 2004)

Abstract

Based on the algorithm of Kolmogorov entropy presented by Grassberger and Procaccia, as the time series data of silicon content in molten iron of No.1 BF at Laiwu and No.6 BF at Linfen Iron and Steel Group Cos. to be as samples, their Kolmogorov entropy are computed to be $(0.1453 \pm 0.0151) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$ and $(0.1553 \pm 0.0140) \text{ nats} \cdot \text{h}^{-1}$, and the time scales of forecasting in both BFs are estimated to be about 6.88 and 6.44 h respectively. Since the value of Kolmogorov entropy is finite and positive, there is chaos in both blast furnace ironmaking processes, and the idea that Kolmogorov entropy may be used to judge the condition of BF is presented.

Keywords : chaos, Kolmogorov entropy, blast furnace ironmaking process, silicon content in molten iron

PACC : 0545

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2002CB312200).