

高炉冶炼过程的混沌性辨识*

I. 饱和关联维数的确定

郜传厚 刘祥官

(浙江大学数学系, 杭州 310027)

摘要 以山东莱钢 1 号高炉和山西临钢 6 号高炉在线采集的 [Si] 时间序列为样本空间, 容量为 1000 炉数据, 利用相空间重构技术和 G-P 算法, 得出莱钢 1 号高炉和临钢 6 号高炉冶炼过程的混沌吸引子的饱和关联维数分别约为 3.36 和 3.12. 由高炉冶炼过程混沌吸引子的饱和关联维数存在且为分数, 可证明两座高炉冶炼过程存在混沌特性.

关键词 高炉冶炼, 时间序列, 相空间重构, 饱和关联维数, 混沌性

中图分类号 TF53

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)04-0347-04

CHAOTIC IDENTIFICATION OF BF IRONMAKING PROCESS

I. The Calculation of Saturated Correlative Dimension

GAO Chuanhou, LIU Xiangguan

Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Correspondent: GAO Chuanhou, Tel: (0571)87951640, E-mail: gaozhou@yahoo.com.cn

Supported by National Ministry of Science and Technology of China (No.99040422A)

Manuscript received 2003-04-02, in revised form 2003-06-30

ABSTRACT As [Si] time series of No.1 BF at Laiwu Iron and Steel Group Co. and No.6 BF at Linfen Iron and Steel Group Co. to be sample space, based on phase space reconstruction technology and G-P algorithm, the saturated correlative dimensions of chaotic attractor of Laiwu Blast Furnace Ironmaking Process and Linfen Blast Furnace Ironmaking Process are about 3.36 and 3.12, respectively. The existence of saturated correlative dimension with fraction value means there is chaos in both blast furnace ironmaking process.

KEY WORDS BF ironmaking, time series, phase space reconstruction, saturated correlative dimension, chaos

自美国气象学家 Lorenz^[1] 在 1963 年首次发现混沌以来, 混沌现象一直是国内外研究的热点, 其中混沌系统的辨识是混沌研究的基础. 混沌是非线性耗散系统中产生的一种貌似随机的不规则现象, 是非线性确定系统内在随机性的表现, 它具有对初值极端敏感性和系统长期行为不可预测性^[2]. 从混沌系统的这一本质特性出发考察高炉冶炼过程, 我们可以看到高炉炉温发展过程对初值的极端敏感性等特征, 从而定性地说明高炉系统是一种混沌系统. 本文则进一步通过相空间重构技术, 计算饱和关联维数等数据, 定量地说明高炉系统的混沌性质.

对于大多数非线性系统来说, 描述其状态变化的微分

方程常常是未知的. 实际中, 往往只能测得该系统某一或某几个变量的时间序列. 从单一的时间序列获取系统的动态信息, 在非线性的领域, 常常采用相空间重构技术. 相空间重构技术又称嵌入技术, 它是 80 年代初期由 Packard 等^[3] 首次提出并经 Takens^[4] 数学完善的. 该技术用系统的一个或几个元素的时间序列来重构相空间, 所得的新系统在拓扑结构和概率特性等本质特征上与原系统保持一致, 可通过分析研究新系统的特征来确定原系统特征. 相空间重构技术是研究非线性系统采用的重要手段.

高炉冶炼过程是一个高度复杂的非线性过程, 其运行机制十分复杂, 仅炉内发生的主要化学反应多达 108 种. 国家自然科学基金委员会在 1995 年出版的《自动化科学与技术》一书中曾经指出^[5]: “钢铁、能源、石油化工等连续生产过程往往涉及许多复杂的对象, 其中包括最常见的高炉、反应器等. 它们的运行机制都尚未弄清, 往往带有

* 国家科技部重大推广项目 No.99040422A 资助

收到初稿日期: 2003-04-02, 收到修改稿日期: 2003-06-30

作者简介: 郜传厚, 男, 1975 年生, 博士生

非线性、分布参数等特征,并有着强烈的随机特性。”多年以来,浙江大学作为《国家级科技成果重点推广计划》项目“高炉炼铁优化专家系统”的技术依托单位,在高炉炉温预测和控制等方面做了很多工作,为深入探索炉况控制规律而对炉内物理、化学与流体力学过程的混沌性进行了探索。目前,国内外对高炉混沌性的探索一般局限于定性描述,而表征系统具有混沌行为的定量指标,如分数维关联维数、正 Lyapunov 指数、正 Kolmogorov 熵等却未见报道。本文通过具有代表性的中型高炉(380—750 m³)在线检测的 [Si] 时间序列对高炉冶炼过程进行相空间重构,分析重构空间的混沌性,进而证明高炉冶炼过程的混沌性,其结果对高炉炼铁过程的优化与智能控制具有重要的理论指导价值。

1 高炉冶炼过程的相空间重构^[3,4]

高炉操作方针要求“安全、顺行、稳定、均衡”,高炉炉温是体现这些要求的重要指标。由于高炉冶炼过程的复杂性和高温密闭状态,要精确掌握炉内的温度分布尚不可能;而炉温作为高炉炉缸热状态的指示,在目前尚没有在线直接检测炉缸铁水物理温度(简称:物理热)的一次检测元件情况下,一般用铁水含硅量 [Si](简称:化学热)来间接反映炉缸的热状态。这样,对铁水含硅量 [Si] 的正确预测和优化控制就成为高炉工长操作技术的核心。本文以山东莱芜钢铁厂 1 号高炉 2001 年 6—8 月份的 [Si] 序列和山西临汾钢铁厂 6 号高炉 2001 年 3—5 月份的 [Si] 序列为样本空间,容量为 1000 炉数据,采样间隔时间平均为 120 min,利用相空间重构技术,分析高炉冶炼过程的混沌性。原始时间序列如图 1 所示。

利用重构相空间延迟坐标法,对原始 [Si] 时间序列

$$[Si]_1, [Si]_2, [Si]_3, \dots, [Si]_n$$

取滞后时间为 τ 、嵌入维数为 m 进行分组,得到重构相空间中的矢量点为

$$Z_j = ([Si]_j, [Si]_{j+\tau}, [Si]_{j+2\tau}, \dots, [Si]_{j+(m-1)\tau})^T \quad (1)$$

式中 $j=1, 2, 3, \dots, N$, $N = n - (m-1)\tau$, n 表示原始样本空间容量, N 表示嵌入空间中点的个数。重构相空间时,矢量点 Z_j 应该保持相互独立。如果滞后时间 τ 和嵌入维数 m 选择合适,则矢量点 Z_j 可保持相互独立,嵌入空间就可以在拓扑等价意义上重现原系统的动态特性,如再现原系统的吸引子的关联维数和 Lyapunov 指数等。同时为了确保嵌入后的状态与原状态保持拓扑共扼,要求样本空间容量 $n > 2m + 1$ 。

1.1 滞后时间 τ 的确定

在进行相空间重构时,考虑到系统状态变量信息的丢失,首先需要确定滞后时间 τ 。Takens 定理^[4]认为,嵌入效果在数据点无限时,与滞后时间 τ 无关,因此对 τ

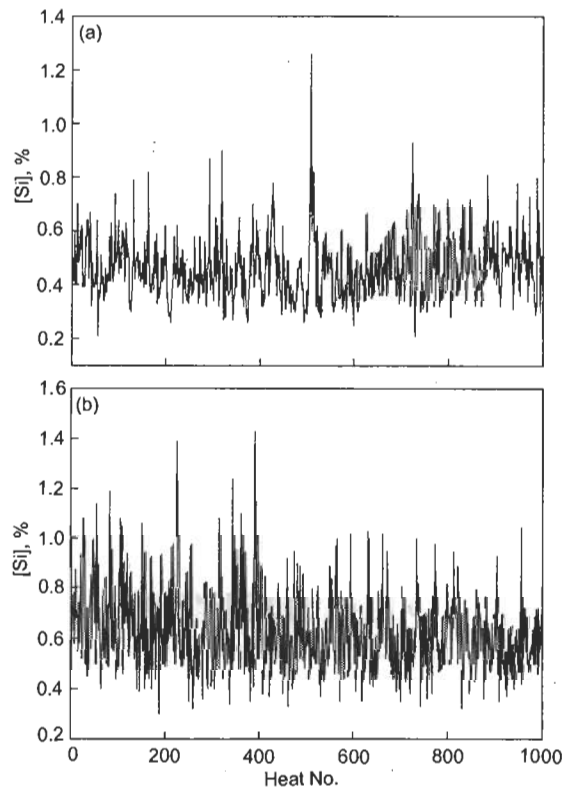


图 1 莱钢 1 号和临钢 6 号高炉 [Si] 时间序列图

Fig. 1 [Si] time series of No. 1 BF at Laiwu (a) and No. 6 BF at Linfen (b) Iron and Steel Group Co

并没有要求。但在实际重构时, τ 的选取对重构有很大的影响。 τ 太大,不相关误差大; τ 太小,吸引子不能充分展开,冗余误差大^[6]。同时,文献^[7]也指出, τ 太大,不易收敛;太小则不易反映细节情况。因此在实际操作时,须确定最佳的滞后时间 τ 。确定最佳滞后时间 τ 的方法有很多,本文采用自相关函数法来确定最佳滞后时间。自相关函数能够确定时间序列在不同时刻取值的相互依赖关系,特别是可以表示信号 $x(t)$ 与其自身作了一段延迟之后的 $x(t+\tau)$ 的相似程度^[8]。为确保重构相空间中的矢量点保持相互独立,这种相似性越差越好,所以可通过自相关函数最接近 0 点的方法来确定最佳滞后时间。针对具体的 [Si] 时间序列,自相关函数定义如下:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} ([Si]_t - \overline{[Si]})([Si]_{t+k} - \overline{[Si]})}{\sum_{t=1}^n ([Si]_t - \overline{[Si]})^2} \quad (2)$$

式中 r_k 表示第 k 阶自相关系数, $\overline{[Si]}$ 为序列 $[Si]_t$ 的均值。对莱钢和临钢的原始 [Si] 序列,根据式 (2) 定义可分别得出相应的自相关系数 r_k 和 k 的变化关系图(图 2)。

从图 2 可看出,两座高炉的 [Si] 序列,当 $k=6$ 时, r_k 最接近 0 点,所以取滞后时间 $\tau=6$ 。其物理意义是:当出铁到第 6 炉时,第 1 炉的硅值对该炉的硅值没有影响,也即到第 6 炉时,第 1 炉的硅值信息将丢失。因此,

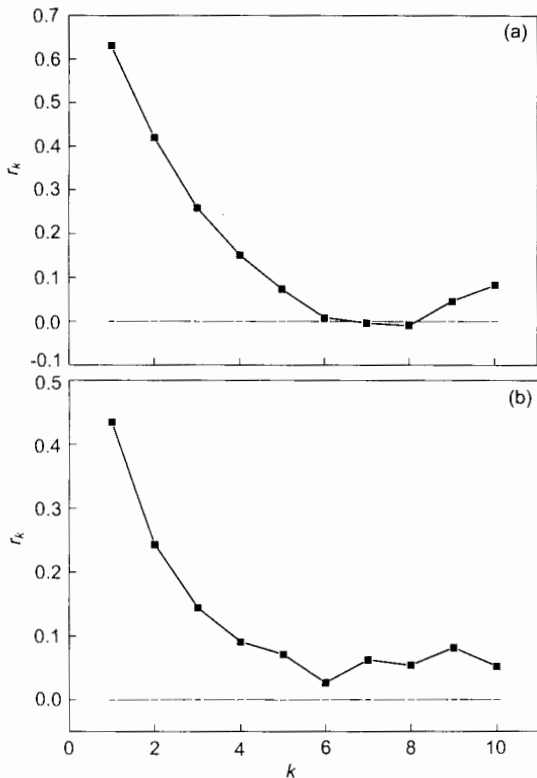


图2 莱钢1号和临钢6号高炉自相关系数图

Fig.2 Autocorrelation coefficient of No.1 at Laiwu (a) and No.6 at Linfen (b) Iron and Steel Group Co

在实际生产中对炉温的预测一般是“一步预测”或“二步预测”，对5炉以后的铁水含硅量是无法进行预测的。

1.2 最小嵌入维数 m 的确定

根据求得的 τ ，由 G-P 算法^[9]，可计算重构相空间的关联积分 $C_m(r)$ ，其定义如下：

$$C_m(r) = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \delta(r - |Z_i - Z_j|) \quad (3)$$

式中 N 为重构相空间中点个数， δ 为 Heaviside 函数

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$|Z_i - Z_j|$ 表示重构相空间中矢量点 Z_i 和 Z_j 间的欧氏距离， r 是任选的距离。 $C_m(r)$ 的物理意义是 m 维相空间中所有两相点距离小于 r 的概率。

G-P 算法认为，当 N 足够大、 r 足够小时，存在标度律

$$C_m(r) = A \times r^{D_z} \quad (5)$$

也即

$$\ln C_m(r) = \ln A + D_z \times \ln(r) \quad (6)$$

式中 A 为常数， D_z 为关联维数，它是嵌入维数 m 的函数。若系统是混沌的，则当 m 足够大时， $D_z(m)$ 将不再随 m 的增大而增大，此时所对应的 m 值即为最小嵌入维数，对应的 $D_z(m)$ 即为吸引子的饱和关联维数。

根据求得的 τ ，选取 $m=2, 3, 4, \dots, 11$ 进行相空间重构，考察 $\ln C_m(r)$ 随 $\ln(r)$ 的变化关系，如图3所示。

从图可看出，当 m 分别为8和7时，莱钢样本空间和临钢样本空间中的 $\ln C_m(r)$ 随 $\ln(r)$ 的变化斜率基本不再变化，故可认为 $m=8$ 为莱钢1号高炉冶炼过程重构空间的最小嵌入维数； $m=7$ 为临钢6号高炉冶炼过程重构空间的最小嵌入维数。其物理意义是：描述莱钢1号高炉冶炼至少需要8个独立变量，而描述临钢6号高炉冶炼过程则至少需要7个独立变量。两者差异的原因来自两座高炉容积上的差异，即750 m³高炉比380 m³高炉需要更多的独立变量描述其混沌特性。在研究多因素影响的非线性复杂系统中，嵌入维数的确定为建模中选取变量的个数提供了参照标准，而不必将各种相关影响因素都纳入一个系统方程中。

文献[10]曾针对莱钢1号高炉，建立了描述炉温动态控制的偏微分方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{Si}]}{\partial t} &= \frac{\partial[\text{Si}]}{\partial LS} \frac{\partial LS}{\partial t} + \frac{\partial[\text{Si}]}{\partial \text{PMB}} \frac{\partial \text{PMB}}{\partial t} + \\ &\frac{\partial[\text{Si}]}{\partial FL} \frac{\partial FL}{\partial t} + \frac{\partial[\text{Si}]}{\partial FW} \frac{\partial FW}{\partial t} + \frac{\partial[\text{Si}]}{\partial FF} \frac{\partial FF}{\partial t} + \\ &\frac{\partial[\text{Si}]}{\partial \text{TLC}} \frac{\partial \text{TLC}(t - \tau_1)}{\partial t} \end{aligned} \quad (7)$$

式中， LS, FF, TLC, PMB, FL 和 FW 分别表示状态变量（料速、透气性、铁量差）和控制变量（喷煤比、风

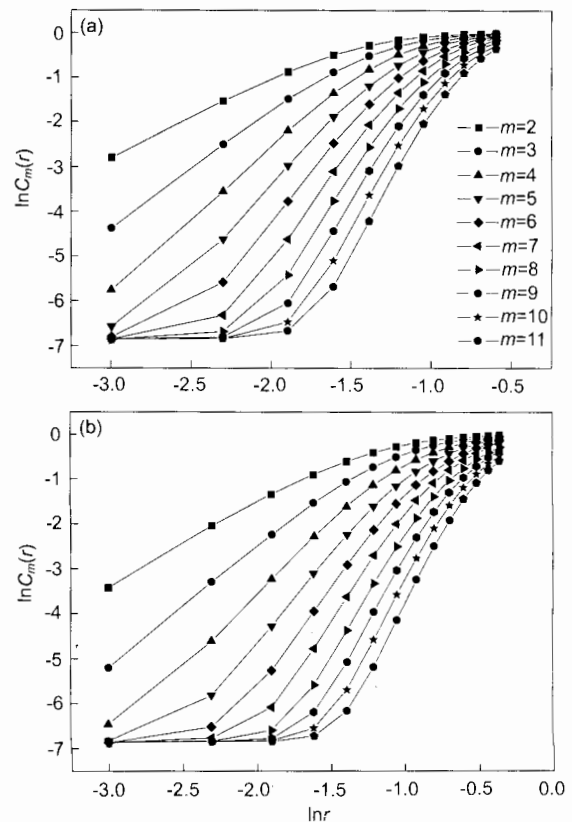


图3 莱钢1号和临钢6号高炉关联积分图

Fig.3 Correlative integral of No.1 BF at Laiwu (a) and No.6 BF at Linfen (b) Iron and Steel Group Co

量、风温)。该方程用了 7 个独立变量来描述高炉炉温的变化, 实践表明, 该方程在生产中取得初步应用成效并在实践中逐步完善。最小嵌入维数分析为该方程的进一步完善提供了理论依据。如果按照最小嵌入维数 $m=8$, 那么方程应当再引入一个变量, 例如将煤气利用率 (MQ) 引入该方程, 建立 8 变量的炉温动态控制数学模型, 可望进一步改善炉温的动态控制。

1.3 饱和关联维数的确定

高炉冶炼过程作为一个混沌系统, 存在着不同结构的混沌吸引子。对高炉冶炼过程系统优化计算可以看到, 在不同吸引子下, 冶炼过程的能耗 (焦比) 相差很大^[11]。饱和关联维数一方面反映了混沌吸引子结构的复杂性, 另一方面反映了混沌吸引子的信息量。它的确定不仅对混沌信号的相空间重构有重要影响, 而且也可以用它来刻画吸引子几何结构的特征。

对图 3 中各条曲线用最小二乘法拟合, 可得关联维数 $D_z(m)$ 随嵌入维数 m 的变化关系曲线, 见图 4。莱钢 1 号高炉冶炼过程在 $m=8$ 时, 相空间运行轨迹开始收敛到一个约为 3.36 维的吸引子上; 而临钢 6 号高炉冶炼过程在 $m=7$ 时, 运行轨迹开始收敛到一个约为 3.12 维的吸

引子上。

2 结论及意义

利用相空间技术, 以山东莱钢 1 号高炉和山西临钢 6 号高炉在线采集的 [Si] 时间序列为样本空间, 容量为 1000 炉数据, 对相应冶炼过程进行相空间重构, 得出嵌入空间的最佳滞后时间 τ 、最小嵌入维数 m 、饱和关联维数 D_z 的结果分别为 6, 8, 3.36 和 6, 7, 3.12。

最佳滞后时间 τ 的确定, 明确了 [Si] 信息损失的时间尺度。最小嵌入维数 m 的确定, 为建立高炉冶炼过程确定性方程选取参数个数提供了参照标准。如对莱钢 1 号高炉, 在实际建模时, 可建立 8 参数确定性方程来描述系统行为的变化, 而对临钢 6 号高炉则可尝试建立 7 参数的确定性方程。同时, 饱和关联维数 D_z 的存在且为分数, 说明这两座高炉冶炼过程具有混沌性, 这为进一步用混沌理论来分析研究高炉冶炼进程以及炉温的混沌预测与动态控制开辟了一条新路。

参考文献

- [1] Lorenz E N. *J Atmospheric Sci*, 1963; 20: 130
- [2] Huang R S. *Chaos and its Application*. Hubei: Wuhan University Press, 2001: 112
(黄润生. 混沌及其应用. 湖北: 武汉大学出版社, 2001: 112)
- [3] Packard N H, Grutchfield J P, Farmer J D, Shaw R S. *Phys Rev Lett*, 1980; 45(9): 712
- [4] Takens F. *Lecture Notes in Mathematics*, 1981; 898: 366
- [5] Committee of National Natural Science Foundation of China. *Automatic Science and Technology—The Research Report on Development Stratagem of Natural Science Subject*. Beijing: Science Press, 1995: 132
(国家自然科学基金委员会. 自动化科学与技术—自然科学学科发展战略调研报告. 北京: 科学出版社, 1995: 132)
- [6] Rosenstein M T, Collins J J, De Luca C J. *Physica D*, 1994; 73(1): 82
- [7] Jang Y D, Wu Z Q, Chen Y Q, Jiang Y. *J University of Science and Technology Beijing*, 2002; 24(3): 295
(江亚东, 吴竹涛, 陈因硕, 江月. 北京科技大学学报, 2002; 24(3): 295)
- [8] Zhong K D, Hu G S. *Digital Signal Disposal*, Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 117
(宗孔德, 胡广书. 数字信号处理, 北京: 清华大学出版社, 1988: 117)
- [9] Grassberger P, Procaccia I. *Physica D*, 1983; 9(3): 189
- [10] Liu X G, Liu X Z, Jiang M H, Wu X F, Chen Y M, Zhang X J, Chen T J. *Metallurgical Industry Automation*, 2002; 26(6): 15
(刘祥官, 刘显著, 蒋美华, 吴晓峰, 陈玉明, 张晓军, 陈铁军. 冶金自动化, 2002; 26(6): 15)
- [11] Liu X G, Liu F. *Optimization and Intelligent Control System of BF Ironmaking Process*, Beijing: Metallurgy Industry Press, 2003: 51
(刘祥官, 刘芳. 高炉炼铁过程优化与智能控制系统, 北京: 冶金工业出版社, 2003: 51)

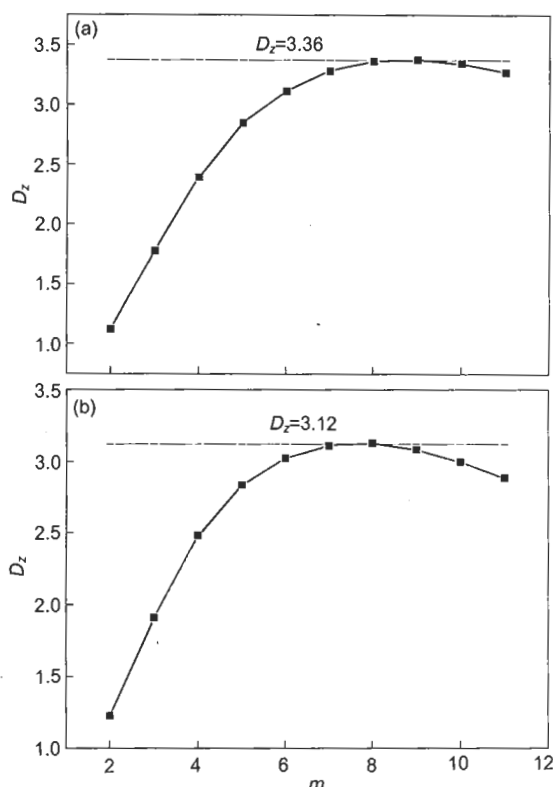


图 4 莱钢 1 号和临钢 6 号高炉饱和关联维数图

Fig.4 Saturated correlative dimension of No.1 BF at Laiwu (a) and No.6 BF at Linfen (b) Iron and Steel Group Co