

# 一类分段非线性轧机辊系系统的 奇异非混沌动力学研究<sup>\*</sup>

曾青 乐源<sup>†</sup> 李高磊

(西南交通大学力学与航空航天学院 应用力学与结构安全四川省重点实验室,成都 610031)

**摘要** 考虑一类拟周期激励的分段非线性轧机辊系系统,发现了丰富的奇异非混沌动力学现象.揭示了该系统中奇异非混沌吸引子的产生机理.通过数值结果发现有三种路径可以演变为奇异非混沌吸引子,即分形路径、阵发路径和 Heagy-Hammel 路径.通过最大李雅普诺夫指数验证其非混沌特性;采用有理数逼近无理数和相敏感函数刻画其奇异特性.

**关键词** 轧机辊系系统, 拟周期激励, 奇异非混沌吸引子, 李雅普诺夫指数, 相敏感函数

中图分类号:O313

文献标志码:A

## 引言

非光滑系统广泛存在于工程领域,近年来,由于非光滑动力系统的重要性,吸引了众多科学工作者的关注和研究<sup>[1,2]</sup>,如轧机辊系系统.轧机是实现金属轧制过程的设备,一般指完成轧制材料生产全过程的设备.由放卷机、辊压系统、驱动系统、液压系统、控制系统、拆辊装置等组成.由于要适应新的产品质量要求和提高经济效益,各种特殊结构的轧机正在快速发展中.但是在钢材板带的实际生产过程中,经常会伴随各种振动的产生,其中最主要的是轧机垂直振动,垂直振动不仅会使板带精度变差,还会严重损坏机械设备,甚至制约金属轧制工艺的进一步发展.轧机辊系的振动问题一直是影响钢铁企业生产的技术难题<sup>[3]</sup>.对轧机振动进行测试分析和理论分析,揭示轧机的动态运行特性,提出有效的抑振措施已成为钢铁行业关键问题<sup>[4]</sup>,因此,对此系统进行优化设计将会对实际应用带来重要意义.

奇异非混沌吸引子(SNAs)是介于拟周期运动和混沌运动之间的一种特殊的吸引子,在动力学中,这些吸引子被认为是介于规则性与混沌性之间

的过渡,“奇异”指的是在相平面上动力学变量的关系并不是光滑的,而是由分形组成的,即具有几何结构上的分形;“非混沌”则是指其最大李雅普诺夫指数为负,对初值没有敏感依赖性,这也是SNAs异于混沌吸引子之处;但在相图上显示的几何性质又不同于拟周期吸引子或极限环.大量研究表明 SNAs 不是在一些特殊参数值上存在的退化现象,而是在拟周期激励系统中普遍存在的一种独立于混沌与周期之外的新型运动状态<sup>[5]</sup>.

国内外学者对轧机辊系系统的动力学特性进行了大量的研究.孙恒<sup>[6]</sup>对六辊冷轧机垂直系统振动特性进行了分析,建立了垂直振动力学模型和数学模型,利用 MATLAB 计算出了系统的固有频率和主振型,获得了振型曲线,并通过仿真分析得到了上、下辊系在轧制力作用下的动态响应;马志强<sup>[7]</sup>针对轧机垂振和垂扭系统进行了特性分析和抑制振动的研究;Rigatos 等<sup>[8]</sup>针对热钢轧机系统,提出了一种非线性最优控制方法.自 1984 年 Grebogi<sup>[9]</sup>首次提出 SNAs 以来,奇异非混沌动力学一直是研究的热点之一,奇异非混沌的动力学现象为非混沌的复杂动力学提供了丰富的案例. Megavarna 等<sup>[10]</sup>通过数值和实验方法在拟周期受迫状态控

2021-04-09 收到第1稿,2021-05-14 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11672249,12072291,11732014)

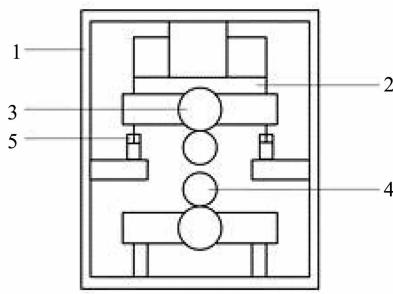
† 通信作者 E-mail:leyuan2003@sina.com

制细胞神经网络下的 MLC 电路中发现了通向奇异非混沌吸引子的两种路径,即 Heagy-Hammel 路径和分形路径,并且利用李雅普诺夫指数谱和奇异连续谱等方法进行了验证。Murali 等<sup>[11]</sup>在两个正弦驱动的 LCR 耗散振荡器共享一个共同的分段非线性模型中,发现了 SNAs 的存在。通过相空间分析、庞加莱截面、李雅普诺夫指数等数值方法对所检测到的奇异非混沌现象进行了分析,并用递归量化方法对吸引子的奇异非混沌性质进行了验证。对于轧机辊系系统的奇异非混沌动力学现象,目前国内外学者尚无研究。

本文主要研究一类非线性轧机辊系系统在垂直振动情况下的奇异非混沌动力学;建立了一类轧机辊系系统垂直振动的运动微分方程,引入三维 Poincaré 映射;发现三类通向 SNAs 的途径;并运用有理数逼近以及相敏感函数验证其奇异性。

## 1 动力学模型

轧机结构示意图如图 1 所示;从实际系统中简化出的轧机辊系动力学模型如图 2 所示:



1. 机架;2. 液压缸;3. 支承辊及其轴承座;  
4. 工作辊及其轴承座;5. 平衡缸  
1. Frame;2. Hydraulic cylinder;3. Support  
roller and its bearing seat;4. Work roller and its bearing seat;5. Balance cylinder

图 1 轧机结构示意图  
Fig. 1 Mill structure diagram

其中,  $m$  等效为上工作辊和上支承辊以及轴承座的质量;  $x$  为辊系的位移;  $k_1$  和  $c$  分别为轧辊与轧件间的等效线性弹性系数和阻尼系数;  $K_1$  是压下缸与辊系间的非线性弹性力;  $K_2$  是平衡缸与辊系间的非线性弹性力。可表示为如下形式<sup>[12]</sup>:

$$K_1 = \begin{cases} k_2 x + k_3 x^3, & x \leq 0 \\ 0, & x > 0 \end{cases}$$

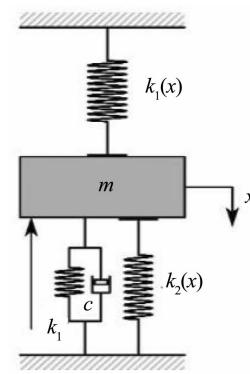


图 2 轧机辊系系统动力学模型  
Fig. 2 Dynamic model of rolling mill system

$$K_2 = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ k_4 x + k_5 x^3, & x > 0 \end{cases} \quad (1)$$

轧机系统垂直振动的运动微分方程如下:

$$m \ddot{x} + cx + k_1 x + L(x) = F_1 + F_2 \quad (2)$$

其中,  $F_1$  为受到板厚或张力等因素的扰动,  $F_2$  为施加的拟周期外扰。

$$F_1 = f \cos(\omega t),$$

$$F_2 = e \cos(\phi t) \quad (3)$$

$L(x)$  为非线性弹性力, 形式如下:

$$L(x) = \begin{cases} k_2 x + k_3 x^3, & x \leq 0 \\ k_4 x + k_5 x^3, & x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(1)可转化为

$$\ddot{x} + cx + \omega_0^2 x + 2\xi\omega_0\dot{x} + l(x) = f \cos(\omega t) + e \cos(\phi t) \quad (5)$$

其中,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1}{m}}, a_1 = \frac{k_2}{m}, a_2 = \frac{k_3}{m}, a_3 = \frac{k_4}{m}, a_4 = \frac{k_5}{m},$$

$$l(x) = \begin{cases} a_1 x + a_2 x^3, & x \leq 0 \\ a_3 x + a_4 x^3, & x > 0 \end{cases}$$

令  $\theta = \omega t$ ,  $\phi = \phi t$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = f \cos(\omega t) + e \cos(\phi t) - \omega_0^2 x - 2\xi\omega_0\dot{x} - l(x) \\ \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\phi} = \phi \end{cases} \quad (6)$$

引入三维 Poincaré 映射

$$\Pi: \Sigma \rightarrow \Sigma: \Sigma \equiv$$

$$\{(x, v, \theta) \in R \times R \times S^1 \vee \phi \bmod 2\pi = 0\} \quad (7)$$

映射方程为:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= f_1(x_n, v_n, \theta_n) \\v_{n+1} &= f_2(x_n, v_n, \theta_n) \\ \theta_{n+1} &= \theta_n + \frac{2\pi \cdot \omega}{\phi} (\bmod 2\pi)\end{aligned}\quad (8)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  由方程(6)确定,  $\phi$  取黄金分割值,  $\phi = (\sqrt{5} - 1)/2$ .

## 2 数值模拟

### 2.1 吸引子的演变过程

固定参数:  $a_1 = 10, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, \xi = 0.009, f = 0.5, \omega = 1, \omega_0 = 2$  时,  $e$  为控制参数, 研究系统在  $(\theta_n, x_n)$  平面上和  $(x_n, v_n)$  平面上的动力学现象. 当  $e = 0.15$  时, 在  $(\theta_n, x_n)$  平面上存在一条不变曲线, 在  $(x_n, v_n)$  平面上有一条不变圈, 则此时系统为 1 个环面(1T)的拟周期吸引子, 如图 3 所示. 当控制参数  $e$  增加到 0.34 时, 系统发生环面倍化变为 2T, 此时系统为 2T 的拟周期吸引子, 如图 4 所示. 将控制参数继续增加, 当  $e = 0.354$  时, 出现 SNA, 如图 5 所示; 其最大李雅普诺夫指数小于零 ( $\lambda_{\max} = -3.0 \times 10^{-3}$ ), 如图 7(a) 所示. 当控制参数  $e$  继续增大到 0.37 时, 系统将变为混沌状态, 如图 6 所示. 此时其最大李雅普诺夫指数为正 ( $\lambda_{\max} = 4.2 \times 10^{-3}$ ), 如图 7(b) 所示.

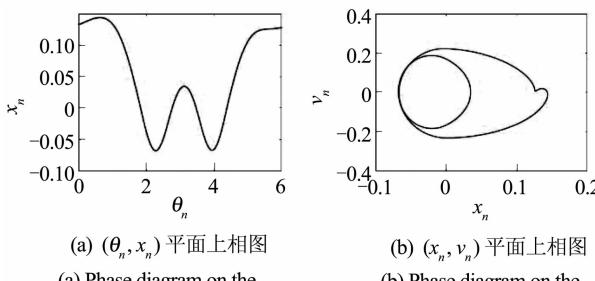


图 3 1T 环面,  $e = 0.15$   
Fig. 3 1T torus,  $e = 0.15$

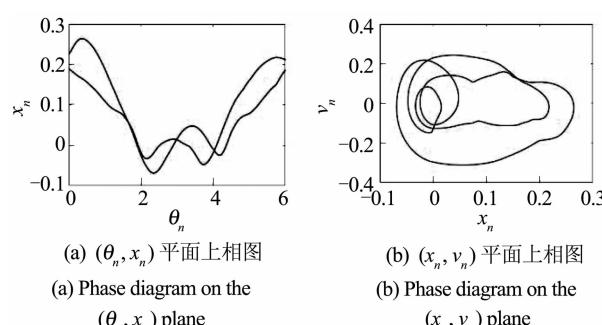


图 4 2T 环面,  $e = 0.34$   
Fig. 4 2T tori,  $e = 0.34$

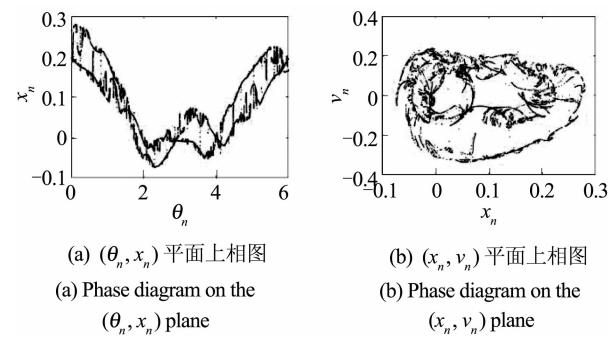


图 5 SNA,  $e = 0.354$   
Fig. 5 SNA,  $e = 0.354$

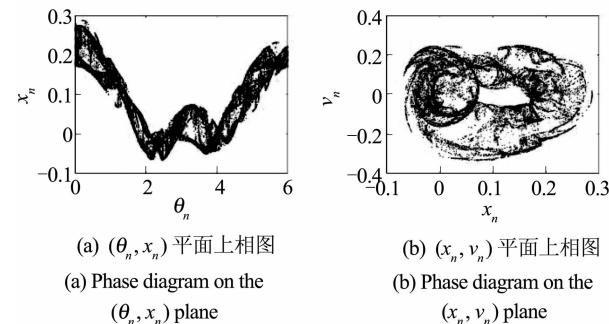


图 6  $e = 0.37$ , 混沌吸引子  
Fig. 6  $e = 0.37$ , chaotic attractors

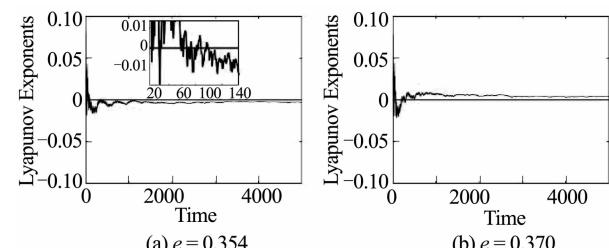


图 7 最大李雅普诺夫指数图  
Fig. 7 The largest lyapunov exponent

### 2.2 SNA 产生机制

#### 2.2.1 分形路径

分形路径是指当改变系统参数时, 周期环面逐渐产生褶皱, 然后吸引子随参数的变化越来越不光滑, 最后演变为 SNA<sup>[13]</sup>. 分形过程中, 没有明显的不稳定集. 当  $a_1 = 10, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, e = 0.405, f = 0.5, \omega = 1, \omega_0 = 2$  时,  $\xi$  为控制参数. 当  $\xi = 0.025$  时, 系统为 1T 的拟周期吸引子, 如图 8 所示; 当  $\xi$  继续减小到  $\xi = 0.0088$  时, 光滑的吸引子发生变化, 出现局部失稳现象, 在  $(\theta_n, x_n)$  和  $(x_n, v_n)$  平面上的相图均显示出明显的褶皱状态, 如图 9 所示; 当  $\xi$  减小到  $\xi = 0.0082$  时, 系统彻底失去光滑性, 此参数下的 SNA 是通过分形路径产生的, 如图 10 所示.

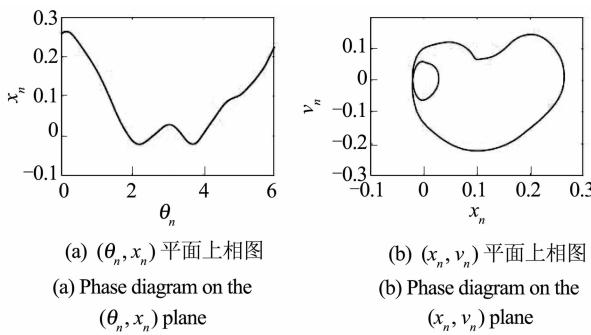


图 8 1T 环面,  $\xi = 0.025$   
Fig. 8 1T torus,  $\xi = 0.025$

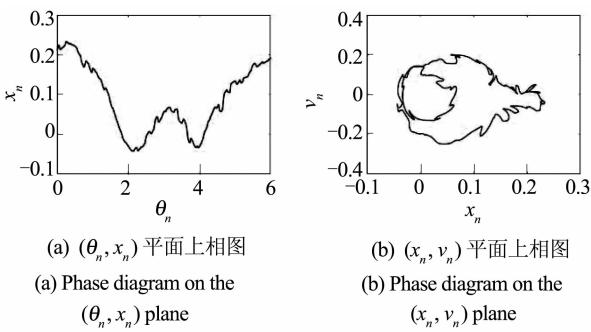


图 9 1T 环面,  $\xi = 0.0088$   
Fig. 9 1T torus,  $\xi = 0.0088$

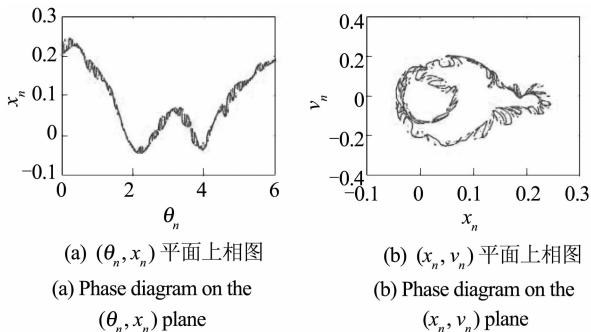


图 10 SNAs,  $\xi = 0.0082$   
Fig. 10 SNAs,  $\xi = 0.0082$

## 2.2.2 阵发路径

阵发-I型路径是由鞍结分岔产生的过渡到SNAs的一种路径<sup>[14]</sup>. 固定参数:  $a_1 = 50$ ,  $a_2 = 15$ ,  $a_3 = 4$ ,  $a_4 = 10$ ,  $\xi = 0.0099$ ,  $f = 1$ ,  $\omega = 1$ ,  $\omega_0 = 2$ ,  $e$ 为控制参数. 当 $e = 0.405$ 时,系统为1T的拟周期吸引子,如图11所示;当控制参数 $e$ 增加到0.42时,系统为阵发-I型SNAs,如图12所示. 这种路径的特点是相轨线附近有很多杂乱无序的散点聚集在其周围,但却并未出现褶皱状.

## 2.2.3 Heagy-Hammel路径

通常H-H路径是指一个周期加倍的拟周期

环面(周期为 $2n$ 环面)与它自己不稳定的母环(周期为 $2n-1$ 环面)碰撞而产生的SNAs. 碰撞将导致周期 $2n$ 环面产生褶皱,继而产生 $2n+1$ 环面. 当控制参数继续增加时,此 $2n+1$ 环面将与其母环 $2n$ 环面碰撞. 在这个过程中继续起褶,产生 $2n+2$ 环面,以此类推. 通过Heagy-Hammel路径演变为SNAs已经在几类拟周期受迫非线性动力学系统中研究过<sup>[15,16]</sup>. 当 $a_1 = 10$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = 1$ ,  $a_4 = 1$ ,  $\xi = 0.009$ ,  $f = 0.5$ ,  $\omega = 1$ ,  $\omega_0 = 2$ 时,当 $e = 0.352$ 时,系统为2T的拟周期环面,如图13所示;当 $e$ 继续增加到0.354时,2T的拟周期吸引子发生碰撞,演变为SNAs,如图14所示.

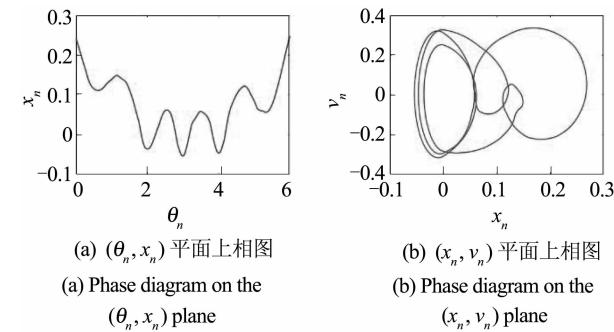


图 11 1T 环面,  $e = 0.405$   
Fig. 11 1T torus,  $e = 0.405$

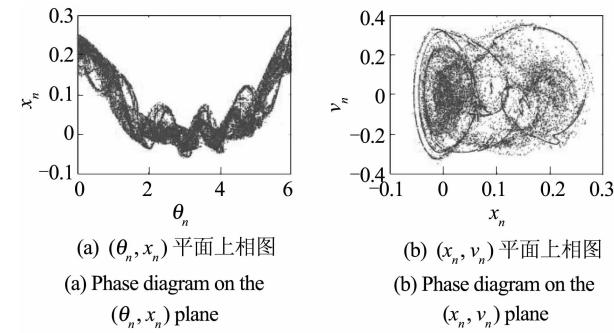


图 12 SNAs,  $e = 0.42$   
Fig. 12 SNAs,  $e = 0.42$

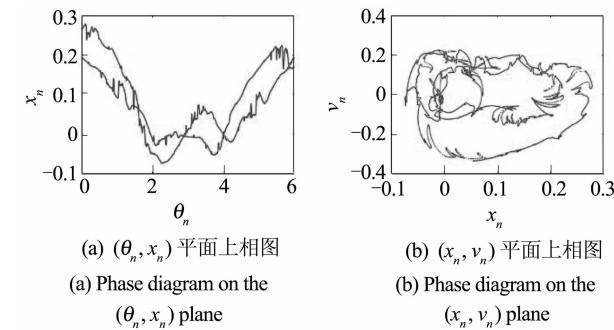


图 13 2T 环面,  $e = 0.352$   
Fig. 13 2T tori,  $e = 0.352$

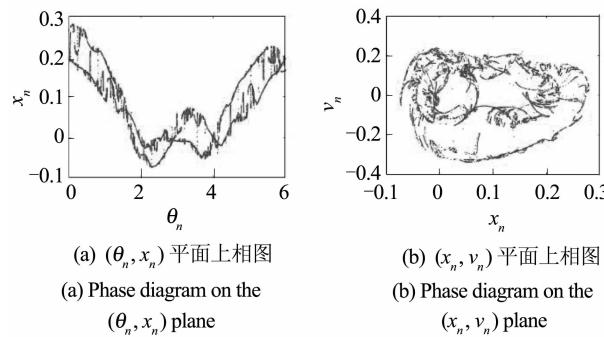


图 14 SNA,  $e = 0.354$   
Fig. 14 SNA,  $e = 0.354$

### 3 奇异性验证方法

#### 3.1 有理数逼近

每一个无理数都可由有理数去逼近到任何想要的精度,即有理数在实数中是稠密的<sup>[17]</sup>. 当系统的某个参数变化时,有理数逼近无理数在研究向SNAs演变的过程中是非常有用的方法<sup>[18]</sup>. 利用无理数的连分数表示可得到其有理近似. 使用连分数,可以表示出所有实数. 对于有理数来说,可表示为有限连分数,对于无理数来说,可无限逼近. 对于黄金比例值  $\phi = (\sqrt{5} - 1)/2$  的连分数可以用斐波那契数列逼近<sup>[19]</sup>,具体表达式为:  $\phi_k = F_{k-1}/F_k$ , 其中,  $F_k = 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$  通过有理数逼近无理数验证其奇异性,取  $\phi_k$  分别为  $89/144, 377/610, 610/987, 28657/46368$ , 如图 15 所示. 当  $\phi_{13} = 89/144$  时,可以观测到在  $(x_n, v_n)$  平面上吸引子有稳定且可数的周期点,当  $k$  继续增加时,在  $(x_n, v_n)$  平面上的周期点数明显增加;  $\phi_{25} = 28657/46368$  时,与 SNAs 近乎一致. 当阶数  $k$  趋近于无穷时,相平面上的点也趋于无穷,且逼近的吸引集是非光滑的,不具有分段可微性,即为 SNAs<sup>[20]</sup>. 结果表明,阶数越高,吸引子的几何特性越接近 SNAs.

#### 3.2 相敏感函数

采用吸引子对相位的导数可验证奇异性. 这种方法是基于吸引子对外力相位具有敏感性<sup>[21]</sup>.

$$S_i^N = (\partial f_i)/\partial \theta \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

其中,  $N$  为迭代的次数. 从任意初始值开始迭代,  $S_i^N$  也可表示为:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta} \approx S_i^N = \sum_{k=1}^{N-n_0} \left| \frac{f_i(k+n_0) - f_i(k)}{\theta(k+n_0) - \theta(k)} \right| \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

其中,  $k + n_0 \leq N$ ,  $f_i(k)$  是对  $f_i$  的第  $k$  次迭代. 令  $N$  次迭代后  $S_i^N$  的最大值为  $\gamma_i^N$ , 有:

$$\max \{S_i^N\} = \gamma_i^N \quad (11)$$

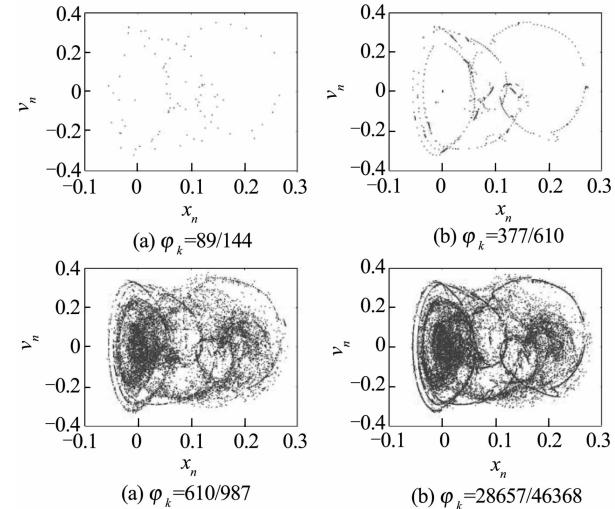


图 15  $(x_n, v_n)$  平面上有理数逼近 SNA  
Fig. 15 Rational approximation of the SNA in the  $(x_n, v_n)$  plane

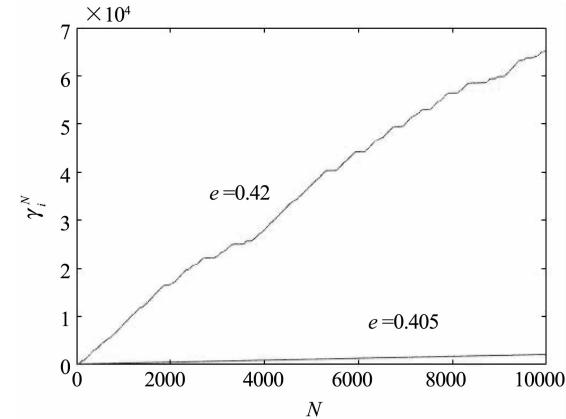


图 16 相敏感函数图  
Fig. 16 Diagram of phase sensitivity function

当  $N \rightarrow \infty$  时,几何性质表现为若  $\gamma_i^N$  无穷大,则  $S^N \rightarrow \infty$ ,则说明吸引子非光滑,具有奇异性;若  $\gamma_i^N$  有界,则不具有奇异性. 图 16 为系统分别在控制参数  $e = 0.42$  和  $e = 0.405$  的相敏感函数;当  $e = 0.42$  时,  $\gamma_i^N$  趋于无穷大,此时系统为 SNAs,当  $e = 0.405$  时,不具有奇异性.

### 4 结论

本文研究了一类拟周期激励的单自由度分段非线性轧机辊系系统,发现在这类非光滑系统中存在多种路径可以产生奇异非混沌吸引子;即分形路径、阵发路径以及 Heagy-Hammel 路径. 奇异非混沌

的性质通过相图、李雅普诺夫指数、有理数逼近和相敏感函数进行验证。本文的结论可为非光滑动力学系统中的混沌控制提供理论依据,避免此系统长期工作在混沌状态,以致板带精度降低,产生巨大噪声,甚至损坏设备。

## 参 考 文 献

- 1 李双宝,马茜茜,张伟. 非光滑系统全局动力学 Melnikov 方法的研究进展. 动力学与控制学报, 2020, 18(2):9~20 (Li S B, Ma Q Q, Zhang W. Research progress in Melnikov method for global dynamics of non-smooth system. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(2):9~20 (in Chinese))
- 2 刘喻,张思进,殷珊. 高速切削过程中颤振现象的二自由度非光滑模型分析. 动力学与控制学报, 2018, 16(4):350~355 (Liu Y, Zhang S J, Yin S. Analysis on chatter vibration of a two-degree-of-freedom non-smooth system in high-speed cutting progress. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(4):350~355 (in Chinese))
- 3 Nizioł J, Światoński A. Numerical analysis of the vertical vibrations of rolling mills and their negative effect on the sheet quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162:546~550
- 4 薛亮. 1580 精轧机组 F2 轧机动力学建模及稳定性研究[硕士学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2020:1~58 (Xue L. Dynamic modeling and stability study of F2 mill of 1580 finishing mill [Master Thesis]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020:1~58 (in Chinese))
- 5 沈云柱. 非光滑系统奇异非混沌动力学研究[硕士学位论文]. 济南大学, 2020, 10:1~55 (Shen Y Z. Strange nonchaotic dynamics in nonsmooth systems [Master Thesis]. Ji'nan: University of Jinan, 2020, 10:1~55 (in Chinese))
- 6 孙恒. 六辊冷轧机垂直系统振动研究. 海峡科技与产业, 2020(2):45~47 (Sun H. Six-roll cold mill vertical system vibration research. *Strait Technology and Industry*, 2020 (2): 45~47 (in Chinese))
- 7 马志强. 冷带轧机振动特性分析及抑制研究[硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019:5~45 (Ma Z Q. Vibration characteristics analysis and suppression of cold strip mill [Master Thesis]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019:5~45 (in Chinese))
- 8 Rigatos G, Zervos N, Siano P, et al. Non-linear optimal control for the hot-steel rolling mill system. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 2019, 1(3):97~107
- 9 Grebogi C, Ott E, Pelikan S, et al. Strange attractors that are not chaotic. *Physica D, Nonlinear Phenomena*, 1984, 13(1~2):261~268
- 10 Megavarna E P, Inbaballi M, Murali K, et al. Strange non-chaotic attractors in a state controlled-cellular neural network-based quasiperiodically forced MLC circuit. *Pramana*, 2018, 91(1):1~17
- 11 Murali K, Philominathan P. Strange nonchaotic attractors in oscillators sharing nonlinearity. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2019, 118: 83~93
- 12 侯东晓,刘彬,时培明,等. 分段非线性轧机辊系系统的分岔行为研究. 振动与冲击, 2010, 29(12):132~135 (Hou D X, Liu B, Shi P M, et al. Study on the fork behavior of segmented nonlinear mill roller system. *Vibration and Shock*, 2010, 29(12):132~135 (in Chinese))
- 13 Li G L, Yue Y, Xie J, et al. Strange nonchaotic attractors in a nonsmooth dynamical system. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2019, 78:1~10
- 14 张永祥,俞建宁,褚衍东,等. 一类新电路系统的奇怪非混沌吸引子分析. 河北师范大学学报(自然科学版), 2008(6):753~757 (Zhang Y X, Yan J N, Chu Y D, et al. Strange nonchaotic attractors in a new circuit system. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition)*, 2008 (6): 753~757 (in Chinese))
- 15 Ditto W L, Spano M L, Savage H T, et al. Experimental observation of a strange nonchaotic attractor. *Physical Review Letters*, 1990, 65(5):533~536
- 16 Bulsara A R, Zhou T, Moss F. Observation of a strange nonchaotic attractor in a multistable potential. *Physical Review A*, 1992, 45(8):5394~5400
- 17 邢家省,苏克勤,张愿章. 有理数逼近实数的表示方式及应用. 河南科学, 2007(5):710~713 (Xing J S, Su K Q, Zhang Y Z. The Expression and application of rational number approximate to real number. *Henan Science*, 2007 (5): 710~713 (in Chinese))
- 18 Feudel U, Kuznetsov S, Pikovsky A. Strange nonchaotic attractors: Dynamics between order and chaos in quasiperiodically forced systems. *World Scientific*, 2006 (4):29~43
- 19 Li G L, Yue Y, Li D H, et al. The existence of strange nonchaotic attractors in the quasiperiodically forced Ricker family. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2020, 30(5):1~9
- 20 Pikovsky A S, Feudel U. Characterizing strange nonchaotic attractors. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 1995, 5(1): 253~260
- 21 Li G L, Yue Y, Xie J, et al. Multistability in a quasiperiodically forced piecewise smooth dynamical system. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2020, 84:1~20

## RESEARCH ON STRANGE NONCHAOTIC DYNAMICS OF PIECEWISE NONLINEAR ROLLING MILL SYSTEM<sup>\*</sup>

Zeng Qing Yue Yuan<sup>†</sup> Li Gaolei

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** Considering a class of quasi-periodic excited piecewise nonlinear rolling mill system, a wealth of singular and nonchaotic dynamic phenomena are discovered. In this system, we mainly study generation mechanism of strange nonchaotic attractors and verification of the singularity of attractors. It is found through numerical methods that three routes can evolve into strange nonchaotic attractors, namely fractal route, intermittency route and Heagy-Hammel route. The largest Lyapunov exponent is used to verify its nonchaotic characteristics, and its strange property is verified by a rational number approximation to irrational number and phase sensitivity function.

**Key words** rolling mill system, quasi-periodic excitation, strange nonchaotic attractor, the largest Lyapunov exponent, phase sensitivity function

Received 9 April 2021, Revised 14 May 2021.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(11672249,12072291,11732014).

† Corresponding author E-mail:leyuan2003@sina.com