

原子力显微镜微悬臂梁的混沌运动控制*

陈玲莉 谢勇 谭宁 王丁旺

(西安交通大学航天航空学院, 西安 710049)

摘要 通过数值模拟方法分析了原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)微悬臂梁的混沌运动与分岔特性,研究了“时间延迟反馈控制”、“周期信号控制”分岔特性和混沌运动控制参数的取值范围,以及同一周期轨道不同控制参数的值域. 研究结果对复杂系统非线性动力学行为分析和混沌运动控制提供了有意义的理论参考,同时对控制原子力显微镜主要构件的运动和改善其测量精度,具有工程实用价值.

关键词 微悬臂梁, 分岔, 混沌控制

引言

混沌运动是一种非常普遍的非线性动力学现象,由于混沌运动具有初值敏感性和长时间发展趋势的不可预见性,混沌控制就成为混沌应用的关键. 混沌运动能否被人为地控制,特别是能否用常规的控制方法来控制,长期以来一直是人们关心的课题.

原子力显微镜(AFM)以其高分辨、制样简单、操作易行等特点备受关注,并已在生命科学、材料科学等领域发挥了重大作用,极大地推动了纳米科技的发展. 在原子力显微镜的系统中,所要检测的力是原子与原子之间的范德华力. 所以在系统中使用微小悬臂梁(cantilever)来检测原子之间力的变化量,微悬臂梁是原子力显微镜的关键部件之一,其功能是把作用在探针上的力转化为可用其它方法来检测的位置偏移. 微悬臂工作时的变形会直接影响测量的结果和测量的精度. 尤其当原子力显微镜用来扫描高分辨率成像材料表面相貌以及对针尖与样品间相互作用力进行检测时,微悬臂梁的微小变形都会对检测结果产生质的影响. 因此研究微悬臂梁在工作时候的非线性动力学行为对原子力显微镜的测量精度具有重要意义.

本文参考文献[1]中的原子力显微镜微悬臂梁系统的数学模型,通过数值模拟,研究了原子力显微镜微悬臂梁系统的非线性动力学行为,应用非线性控制理论中的“时间延迟反馈控制”及“周期信号控制”方法,对微悬臂梁系统的混沌运动实施了有效控制,目

的在于寻求一种适合微悬臂梁系统中混沌行为的有效控制方法. 数值模拟证明原子力显微镜微悬臂梁系统中的混沌运动是可控的,所用控制方法是有效的. 研究结果不仅为复杂系统非线性动力学行为分析和混沌运动控制提供了有意义的理论参考,同时对改善原子力显微镜测量精度,具有重要的工程实用价值.

1 AFM 微悬臂梁混沌运动分析

参考文献[1]中 AFM 微悬臂梁的数学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -x - \frac{d}{(\alpha + x)^2} + \frac{\sigma^6 d}{30(\alpha + x)^8} + \gamma \cos \omega t - \delta y \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,令其它参数不变($\sigma = 0.3, d = \frac{4}{27}, \alpha = 1.2, \omega = 1.0, \delta = 0.04$),通过数值模拟得到系统随参数 γ 的分岔图,如图 1 所示.

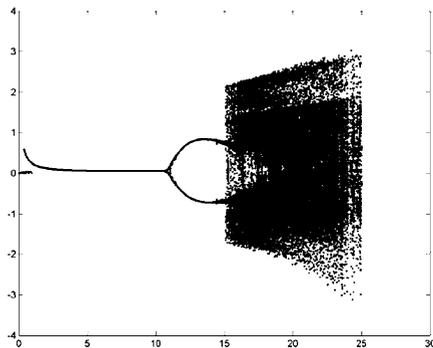


图1 系统(1)随扰动参数 γ 的分岔图

Fig. 1 Bifurcation diagram of system (1) as a function of perturbation parameter γ

根据图1的分岔情况,可以选取 γ 值分别为10、11,得到了系统周期1和周期2的轨道及对应的Lyapunov指数,如图2、图3所示。

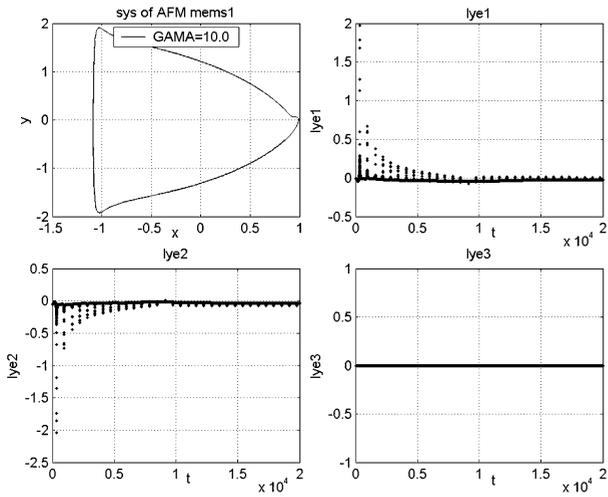


图2 $\gamma = 10$ 系统相图(周期1)及 Lyapunov 指数

Fig.2 Phase portrait (period-1 case) and Lyapunov exponents when $\gamma = 10$

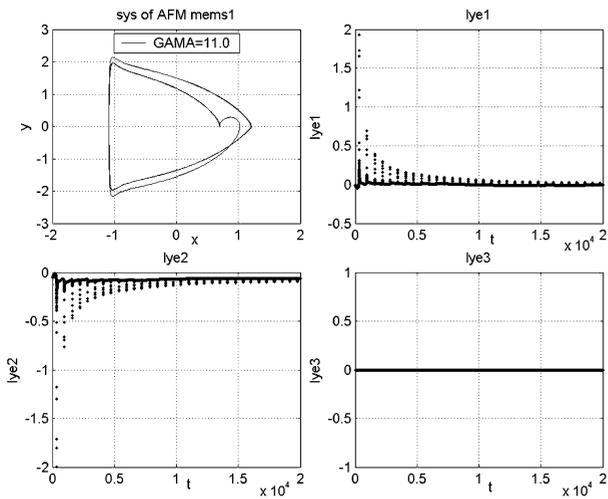


图3 $\gamma = 11$ 系统相图(周期2)及 Lyapunov 指数

Fig.3 Phase portrait (period-2 case) and Lyapunov exponents when $\gamma = 11$

当 $\gamma = 20$ 时,系统处于强混沌态,此时 $\sigma_1 > 0$,如图4所示。

本文试图通过“时间延迟反馈控制”和“周期信号控制”方法,寻求系统混沌运动的有效控制方法。主要思想是:先研究受控系统随不同控制参数的分岔特性,再根据控制参数的分岔特性选择适当的周期轨道控制参数,最后将系统控制到低周期轨道上。

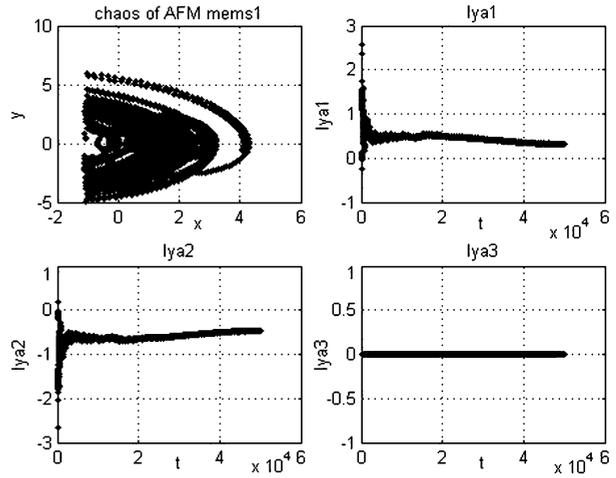


图4 $\gamma = 20$ 系统混沌态及 Lyapunov 指数($\sigma_1 > 0$)

Fig.4 Chaotic state and Lyapunov exponents when $\gamma = 20$ ($\sigma_1 > 0$)

2 时间延迟反馈控制

2.1 受控系统数学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -x - \frac{d}{(\alpha+x)^2} + \frac{\sigma^6 d}{30(\alpha+x)^8} + \gamma \cos \omega t - \delta y - K \cdot D(t) \end{cases}$$

$$D(t) = y(t) - y(t - \tau) \quad (2)$$

式(2)中: K 为控制刚度,具有很宽的取值范围。 $D(t)$ 为时间延迟反馈信号, τ 为反馈信号延迟时间。

2.2 受控系统(2)随控制参数的分岔特性

取系统混沌参数 $\gamma = 20$,系统其它参数不变,研究受控系统(2)随控制参数 K 和 τ 的分岔特性,如图5所示。

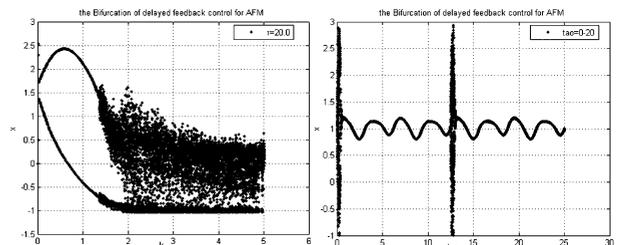


图5 受控系统(2)随控制参数随 K 和 τ 的分岔特性

Fig.5 Bifurcation properties of the controlled system (2) versus the control Parameters K and τ

2.3 受控系统(2)的周期轨道

根据图5分岔,分别取控制参数 $k = 0.7$ 和 $\tau = 10$ 、 $k = 0.7$ 和 $\tau = 8$ 、 $k = 0.05$ 和 $\tau = 5$ 、 $k = 0.7$ 和 $\tau = 3$ 可以得到周期轨道,如图6所示。

当然根据图5中也可取其它控制参数,同样可得到低周期轨道,可见系统低周期轨道控制参数的取值范围非常宽广,这对实际应用很有参考价值。

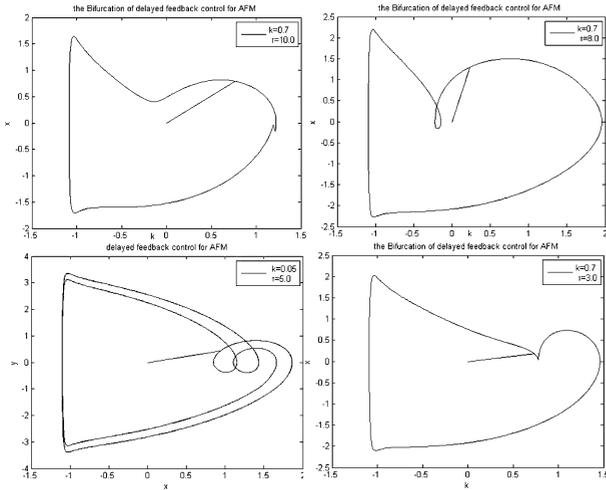


图6 时间延迟反馈控制系统(2)的周期轨道

Fig.6 Periodic trajectories attained by the time-delayed feedback control for the controlled system (2)

3 “周期信号控制”系统的混沌运动

3.1 受控系统数学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -x - \frac{d}{(\alpha + x)^2} + \frac{\sigma^6 d}{30(\alpha + x)^8} + \gamma \cos \omega t - \delta y + k \text{ozhli} \end{cases}$$

$$k \text{ozhli} = A \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (3)$$

式(3)中 $k \text{ozhli} = A \cos(\omega_1 t + \varphi)$ 为周期控制信号.

3.2 控制参数 φ 分岔特性

文献[2]指出,当 $\omega_1 \neq \omega$ 时,控制信号的相位 φ 对控制效果会产生很大影响.因此本文主要研究控制信号相位 φ 对受控系统(3)的影响,图7和图8为控制信号相位 φ 的分岔图,可以看出系统在许多参数区域均可控制为低周期轨道.

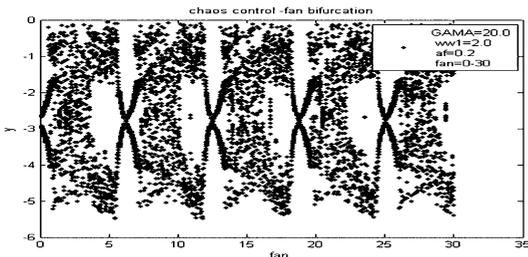


图7 受控系统(3)随控制信号相位的分岔图

Fig.7 Bifurcation diagram versus the phase of the control signal in the controlled system (3)

从图8“局部区域分岔细化图”可以更准确的确定周期轨道控制参数,如 $\varphi = 25.05$ 等.

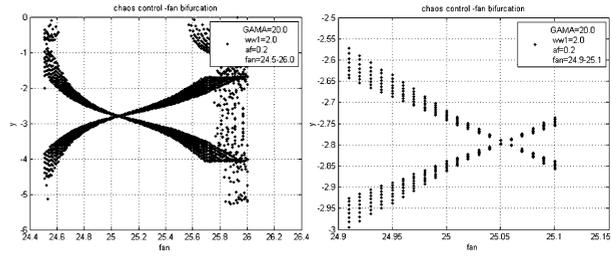


图8 图7局部区域分岔细化图

Fig.8 Enlargement of local area in Figure 7

3.3 周期信号控制系统(3)的周期轨道

根据图7和图8控制信号相位 φ 的分岔特性,分别选取不同的控制参数,如取 $af = 0.2, \varphi = 6.1, 12.3, 25.05, af = 0.25, \varphi = 1.57$ 等可以得到不同的周期轨道,如图9所示.

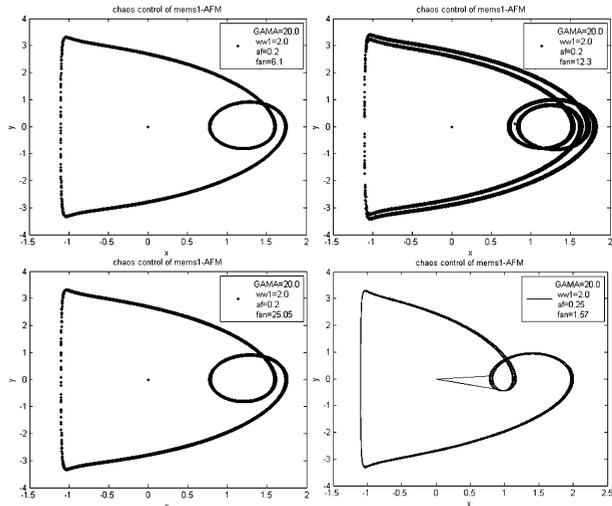


图9 受控系统(3)的周期轨道

Fig.9 Periodic trajectories for the controlled system (3)

当然也可取其它控制参数,同样可得到周期轨道.可见本文所用两种控制方法对AFM微悬臂梁的混沌运动控制是有效的,而且控制参数的值域是很宽的.

4 结论

- (1)对任何受控系统均可采用“控制参数分岔方法”研究低周期轨道的参数区域.
- (2)用本文的控制方法将系统控制到低周期轨道非常容易,但控制到期望的高周期轨道难度较大.
- (3)需进一步开发研究其它的控制方法(如遗传神经网络控制方法等),将系统控制到高周期轨道上或所期望的任意周期轨道上.

参 考 文 献

- 1 M Bassio, L Giarre, M Dahleh, I Mezić. Complex dynamics in a harmonically excited lennard-jones oscillator; Microcantilever – sample interaction in scanning probe microscopes. *Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control*, 2000, 122: 240 ~ 245
- 2 胡刚, 萧井华, 郑志刚. 混沌控制. 上海教育出版社, 2000 (Hu Gang, Xiao Jinghua, Zheng Zhigang. Chaos control. Publishing House of Shanghai Scientific and Technological Education, 2000 (in Chinese))
- 3 E Ott, C Grebogi, J A Yorke. Controlling chaos. *Phvs. Rev. Lett.*, 1990, 64: 1196 ~ 1199
- 4 U Dressler, G Nitsche. Controlling chaos using time delay coordinates. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68: 1 ~ 4
- 5 T Shinbrot, C Grebogi, E Ott, J A Yorke. Using small perturbations to control chaos. *Nature*, 1993, 363: 411 ~ 417
- 6 陈玲莉, 谭宁, 黎红岗, 梁欧. 改进遗传神经网络控制混沌运动的研究. *动力学与控制学报*, 2009, 7(1): 24 ~ 28 (Chen Lingli, Tan Ning, Li Honggang Liang Ou. Study on chaos control with one improved genetic neural network. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(1): 24 ~ 28 (in Chinese))

CONTROLLING CHAOTIC MOTION IN THE MICROCANTILEVER OF AN ATOMIC FORCE MICROSCOPY*

Chen Lingli Xie Yong Tan Ning Wang Dingwang

(School of Aerospace, Xi'an Jiaotong Univeristy, Xi'an 710049, China)

Abstract Chaotic motion in the cantilever of an atomic force microscopy and its bifurcation properties were investigated by the method of numerical simulation, and the range of the control parameter was examined for two control methods, respectively, i. e. , time-delayed feedback control and periodic signal control. Furthermore, the ranges of different control parameters for periodic orbits with the same period were also considered. The research results provide significant theoretical reference for the analysis of the nonlinear dynamical behavior in complex systems and the control of chaotic motion. Simultaneously our results are valuable in engineering applications for controlling the motion of main component of an atomic force microscopy and improving its measurement accuracy.

Key words microcantilever, bifurcation, chaos control