



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106295228 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(21)申请号 201610761669.1

(22)申请日 2016.08.29

(71)申请人 西安科技大学

地址 710054 陕西省西安市雁塔路58号

(72)发明人 刘飞 刘彬 刘浩然 姜甲浩
李鹏(74)专利代理机构 西安铭泽知识产权代理事务
所(普通合伙) 61223

代理人 俞晓明

(51)Int.Cl.

G06F 19/00(2011.01)

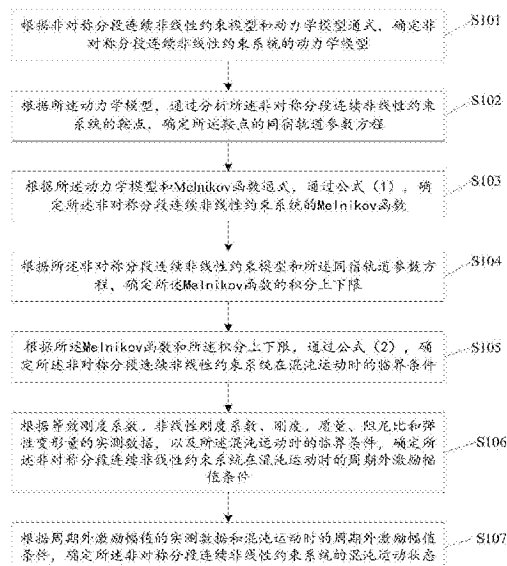
权利要求书5页 说明书14页 附图4页

(54)发明名称

一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法

(57)摘要

本发明公开了一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,涉及分段非线性约束下的动力学系统振动行为预测技术领域,用以解决一类分段非线性约束作用的振动系统混沌运动状态的判断的问题。该方法:根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;根据动力学模型,通过分析非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定鞍点的同宿轨道参数方程;根据动力学模型和Melnikov函数通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;根据非对称分段连续非线性约束模型和同宿轨道参数方程,确定Melnikov函数的积分上下限;根据Melnikov函数和积分上下限,确定非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件。



1. 一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,其特征在于,包括:

根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;

根据所述动力学模型,通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定所述鞍点的同宿轨道参数方程;

根据所述动力学模型和Melnikov函数通式,通过公式(1),确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;

根据所述非对称分段连续非线性约束模型和所述同宿轨道参数方程,确定所述Melnikov函数的积分上下限;

根据所述Melnikov函数和所述积分上下限,通过公式(2),确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件;

根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据,以及所述混沌运动时的临界条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件;

根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态;

公式(1)如下所示:

$$M(t_0) = \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) + \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)$$

公式(2)如下所示:

$$\left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1$$

其中, t_0 为初始时间, 且为任意实数; $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$,

$$Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt, \quad Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt, \quad Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt,$$

$$J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_1) - \sinh(\sqrt{\chi} t_1) + \sinh(\sqrt{\chi} t_1) \cosh(\sqrt{\chi} t_1))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_1)},$$

$$J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_2) + \sinh(\sqrt{\chi} t_2) - \sinh(\sqrt{\chi} t_2) \cosh(\sqrt{\chi} t_2))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_2)},$$

$$t_1 = \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_2/\sqrt{-2(k+\kappa_1)/\gamma_1}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}, \quad t_2 = \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_1/\sqrt{-2(k+\kappa_3)/\gamma_3}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}, \quad e_1 \text{ 和 } e_2$$

为弹性变形量, ζ 为阻尼比, $q\sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$, κ_1 , κ_2 和 κ_3 为等效刚度系数, γ_1 , γ_2 和 γ_3 为非线性刚度系数, t_1 和 t_2 分别为 Melnikov 函数的积分上下限, $x = -\mu(k+\kappa_2)$ 。

2. 如权利要求1所述的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法, 其特征在于, 所述根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式, 确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型, 包括:

所述非对称分段连续非线性约束模型, 由下式确定:

$$G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases}$$

所述非对称分段连续非线性约束模型在分段点具有连续性的条件为:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases}$$

所述动力学模型, 由下式确定:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t)$$

其中, x 为约束条件下的位移, $\dot{x}$ 为 x 的一阶导数, $\ddot{x}$ 为 x 的二阶导数, $G(x)$ 为约束力。

3. 如权利要求1所述的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法, 其特征在于, 所述根据所述动力学模型, 通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点, 确定所述鞍点的同宿轨道参数方程, 包括:

根据所述动力学模型确定所述动力学模型的状态方程, 所述动力学模型的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon \left(\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x} \right) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases}$$

根据所述动力学模型的状态方程, 确定所述非对称分段连续非线性约束系统的 Hamilton 函数, 所述 Hamilton 函数为:

$$H(x, y) = \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{2}\omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2}\mu\kappa_1 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2}\mu\kappa_2 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2}\mu\kappa_3 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases}$$

当所述Hamilton函数满足 $H(x, y) = 0$, 根据所述非对称分段连续非线性约束系统不同约束情形下中心点的位置, 通过下式确定所述鞍点的同宿轨道参数方程:

$$\begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ \mp (k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix}$$

其中, $\dot{y}$ 为 y 的一阶导数, ε 为常数, 且 $0 < \varepsilon < 1$, $i = 1, 2, 3$ 。

4. 一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置, 其特征在于, 包括:

第一确定单元, 用于根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式, 确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;

第二确定单元, 用于根据所述动力学模型, 通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点, 确定所述鞍点的同宿轨道参数方程;

第三确定单元, 用于根据所述动力学模型和Melnikov函数通式, 通过公式(1), 确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;

第四确定单元, 用于根据所述非对称分段连续非线性约束模型和所述同宿轨道参数方程, 确定所述Melnikov函数的积分上下限;

第五确定单元, 用于根据所述Melnikov函数和所述积分上下限, 通过公式(2), 确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件;

第六确定单元, 用于根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据, 以及所述混沌运动时的临界条件, 确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件;

第七确定单元, 用于根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件, 确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态;

公式(1)如下所示:

$$\begin{aligned} M(t_0) = & \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) \\ & + \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4) \end{aligned}$$

公式(2)如下所示:

$$\left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1$$

其中, t_0 为初始时间, 且为任意实数; $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$,
 $Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt$, $Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt$, $Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt$,
 $J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} \left(\cosh^3(\sqrt{\chi} t_1) - \sinh(\sqrt{\chi} t_1) + \sinh(\sqrt{\chi} t_1) \cosh(\sqrt{\chi} t_1) \right)}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_1)}$,
 $J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} \left(\cosh^3(\sqrt{\chi} t_2) + \sinh(\sqrt{\chi} t_2) - \sinh(\sqrt{\chi} t_2) \cosh(\sqrt{\chi} t_2) \right)}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_2)}$,
 $t_1 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_2/\sqrt{-2(k+\kappa_1)/\gamma_1})}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}$, $t_2 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_1/\sqrt{-2(k+\kappa_3)/\gamma_3})}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}$, e_1 和 e_2

为弹性变形量, ζ 为阻尼比, $q \sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$, κ_1 , κ_2 和 κ_3 为等效刚度系数, γ_1 , γ_2 和 γ_3 为非线性刚度系数, t_1 和 t_2 分别为 Melnikov 函数的积分上下限, $x = -\mu(k + \kappa_2)$ 。

5. 如权利要求4所述的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置, 其特征在于, 所述第一确定单元具体用于:

所述非对称分段连续非线性约束模型, 由下式确定:

$$G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases}$$

所述非对称分段连续非线性约束模型在分段点具有连续性的条件为:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases}$$

所述动力学模型, 由下式确定:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t)$$

其中, x 为约束条件下的位移, $\dot{x}$ 为 x 的一阶导数, $\ddot{x}$ 为 x 的二阶导数, $G(x)$ 为约束力。

6. 如权利要求4所述的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置,其特征在于,所述第二确定单元具体用于:

根据所述动力学模型确定所述动力学模型的状态方程,所述动力学模型的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon (\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x}) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases}$$

根据所述动力学模型的状态方程,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Hamilton函数,所述Hamilton函数为:

$$H(x, y) = \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{2}\omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2}\mu\kappa_1 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2}\mu\kappa_2 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2}\mu\kappa_3 x^2 + \frac{1}{4}\mu\gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases}$$

当所述Hamilton函数满足 $H(x, y) = 0$,根据所述非对称分段连续非线性约束系统不同约束情形下中心点的位置,通过下式确定所述鞍点的同宿轨道参数方程:

$$\begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ \mp (k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix}$$

其中, $\dot{y}$ 为 y 的一阶导数, ε 为常数,且 $0 < \varepsilon \ll 1$, $i = 1, 2, 3$ 。

一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及分段非线性约束下的动力学系统振动行为预测技术领域,更具体的涉及一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法。

背景技术

[0002] 工程实践中的承载结构常常会因为弹性预紧变形受到一类分段非线性约束作用,主要表现为在弹性元件组成的承载结构中,当受到静态载荷作用时,承载结构中的弹性元件会产生相应的弹性初始变形,当受到的载荷作用发生动态变化时,弹性预紧变形的交替恢复使得系统所受约束不断发生变化,系统受到这类分段非线性约束的作用会出现分岔、混沌等运动状态,处在混沌运动状态的动力学系统的行为对初值敏感而且混乱、无序,这将对系统的稳定性构成威胁。比如在金属加工领域,作为主要工艺的板带轧制过程中会由于液压压下系统的固液弹性模量差异较大,在较大压力作用下液压油产生的预紧变形在振动过程中就不可忽略。这些预紧弹性变形的交替恢复就会导致辊系所受到的约束不断发生变化,进而出现复杂的非线性现象,不仅威胁系统运行稳定性,还会造成轧制产品质量缺陷。然而,目前对于这一类分段非线性约束作用的振动系统的混沌运动状态的判断尚未有所研究。

[0003] 综上所述,现有技术中,存在一类分段非线性约束作用的振动系统的混沌运动状态的判断尚未有所研究的问题。

发明内容

[0004] 本发明实施例提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,用以解决一类分段非线性约束作用的振动系统的混沌运动状态的判断的问题。

[0005] 本发明实施例提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,包括:

[0006] 根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;

[0007] 根据所述动力学模型,通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定所述鞍点的同宿轨道参数方程;

[0008] 根据所述动力学模型和Melnikov函数通式,通过公式(1),确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;

[0009] 根据所述非对称分段连续非线性约束模型和所述同宿轨道参数方程,确定所述Melnikov函数的积分上下限;

[0010] 根据所述Melnikov函数和所述积分上下限,通过公式(2),确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件;

[0011] 根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据,以及所述混沌运动时的临界条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件;

[0012] 根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态;

[0013] 公式(1)如下所示:

$$[0014] \quad M(t_0) = \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) + \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)$$

[0015] 公式(2)如下所示:

$$[0016] \quad \left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1$$

[0017] 其中, t_0 为初始时间, 且为任意实数; $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$, $Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt$, $Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt$, $Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt$, $J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_1) - \sinh(\sqrt{\chi} t_1) + \sinh(\sqrt{\chi} t_1) \cosh(\sqrt{\chi} t_1))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_1)}$,

$$J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_2) + \sinh(\sqrt{\chi} t_2) - \sinh(\sqrt{\chi} t_2) \cosh(\sqrt{\chi} t_2))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_2)},$$

$$t_1 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_2/\sqrt{-2(k+\kappa_1)/\gamma_1})}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}, \quad t_2 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_1/\sqrt{-2(k+\kappa_3)/\gamma_3})}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}, \quad e_1 \text{ 和 } e_2$$

为弹性变形量, ζ 为阻尼比, $q \sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$, κ_1 , κ_2 和 κ_3 为等效刚度系数, γ_1 , γ_2 和 γ_3 为非线性刚度系数, t_1 和 t_2 分别为 Melnikov 函数的积分上下限, $x = -\mu(k+\kappa_2)$ 。

[0018] 较佳地, 所述根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式, 确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型, 包括:

[0019] 所述非对称分段连续非线性约束模型, 由下式确定:

$$[0020] \quad G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0021] 所述非对称分段连续非线性约束模型在分段点具有连续性的条件为:

$$[0022] \quad \begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases}$$

[0023] 所述动力学模型,由下式确定:

$$[0024] \quad \ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t)$$

[0025] 其中,x为约束条件下的位移, $\dot{x}$ 为x的一阶导数, $\ddot{x}$ 为x的二阶导数,G(x)为约束力。

[0026] 较佳地,所述根据所述动力学模型,通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定所述鞍点的同宿轨道参数方程,包括:

[0027] 根据所述动力学模型确定所述动力学模型的状态方程,所述动力学模型的状态方程为:

$$[0028] \quad \begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon (\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x}) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases}$$

[0029] 根据所述动力学模型的状态方程,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Hamilton函数,所述Hamilton函数为:

$$[0030] \quad H(x, y) = \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2} \mu \kappa_1 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_2 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_3 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0031] 当所述Hamilton函数满足H(x, y)=0,根据所述非对称分段连续非线性约束系统不同约束情形下中心点的位置,通过下式确定所述鞍点的同宿轨道参数方程:

$$[0032] \quad \begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ \mp (k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix}$$

[0033] 其中, $\dot{y}$ 为y的一阶导数, ε 为常数,且 $0 < \varepsilon \ll 1$, $i=1,2,3$ 。

[0034] 本发明实施例提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置,包括:

[0035] 第一确定单元,用于根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;

[0036] 第二确定单元,用于根据所述动力学模型,通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定所述鞍点的同宿轨道参数方程;

[0037] 第三确定单元,用于根据所述动力学模型和Melnikov函数通式,通过公式(1),确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;

[0038] 第四确定单元,用于根据所述非对称分段连续非线性约束模型和所述同宿轨道参数方程,确定所述Melnikov函数的积分上下限;

[0039] 第五确定单元,用于根据所述Melnikov函数和所述积分上下限,通过公式(2),确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件;

[0040] 第六确定单元,用于根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据,以及所述混沌运动时的临界条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件;

[0041] 第七确定单元,用于根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态;

[0042] 公式(1)如下所示:

$$M(t_0) = \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) + \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)$$

[0044] 公式(2)如下所示:

$$\left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1$$

[0046] 其中, t_0 为初始时间,且为任意实数; $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$,

$Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt$, $Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt$, $Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt$,

$$J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_1) - \sinh(\sqrt{\chi} t_1) + \sinh(\sqrt{\chi} t_1) \cosh(\sqrt{\chi} t_1))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_1)}$$

$$J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_2) + \sinh(\sqrt{\chi} t_2) - \sinh(\sqrt{\chi} t_2) \cosh(\sqrt{\chi} t_2))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_2)}$$

$$t_1 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_2/\sqrt{-2(k+\kappa_1)})/\gamma_1}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}, \quad t_2 = \frac{\operatorname{arcsech}(-e_1/\sqrt{-2(k+\kappa_3)})/\gamma_3}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}, \quad e_1 \text{ 和 } e_2$$

为弹性变形量, ζ 为阻尼比, $q \sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$, κ_1 , κ_2 和 κ_3 为等效刚度系数, γ_1 , γ_2 和 γ_3 为非线性刚度系数, t_1 和 t_2 分别为Melnikov函数的积分上下限, $x = -\mu(k+\kappa_2)$ 。

[0047] 较佳地,所述第一确定单元具体用于:

[0048] 所述非对称分段连续非线性约束模型,由下式确定:

$$[0049] \quad G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0050] 所述非对称分段连续非线性约束模型在分段点具有连续性的条件为:

$$[0051] \quad \begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases}$$

[0052] 所述动力学模型,由下式确定:

$$[0053] \quad \ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t)$$

[0054] 其中,x为约束条件下的位移, $\dot{x}$ 为x的一阶导数, $\ddot{x}$ 为x的二阶导数,G(x)为约束力。

[0055] 较佳地,所述第二确定单元具体用于:

[0056] 根据所述动力学模型确定所述动力学模型的状态方程,所述动力学模型的状态方程为:

$$[0057] \quad \begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon (\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x}) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases}$$

[0058] 根据所述动力学模型的状态方程,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Hamilton函数,所述Hamilton函数为:

$$[0059] \quad H(x, y) = \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2} \mu \kappa_1 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_2 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_3 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0060] 当所述Hamilton函数满足 $H(x, y) = 0$,根据所述非对称分段连续非线性约束系统不同约束情形下中心点的位置,通过下式确定所述鞍点的同宿轨道参数方程:

$$[0061] \quad \begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ \mp (k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix}$$

[0062] 其中, $\dot{y}$ 为y的一阶导数, ε 为常数,且 $0 < \varepsilon \ll 1$, $i=1,2,3$ 。

[0063] 本发明实施例中,提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,该方法给出了系统在鞍点处由三段不同轨道组成的同宿轨道参数方程,根据约束的分段条件确定积分上下限并通过分段积分得到Melnikov函数,解决了非对称分段非线性约束系统无

法直接得到Melnikov函数来预测混沌的难点;进一步,非对称分段非线性约束系统发生混沌时的临界条件解析表达式,对于具有非对称分段非线性约束特征的系统混沌运动状态的预测问题提供了一种快速、有效的解析方法,根据预测结果能够通过调节控制参数对系统混沌运动行为进行控制,避免由于出现混沌运动状态而导致系统失稳。

附图说明

[0064] 图1为本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法流程图;

[0065] 图2(a)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i < 0$ 时非对称分段非线性约束系统的势函数曲线;

[0066] 图2(b)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i < 0$ 时非对称分段非线性约束系统的相轨迹;

[0067] 图3(a)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i > 0$ 时非对称分段非线性约束系统的势函数曲线;

[0068] 图3(b)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i > 0$ 时非对称分段非线性约束系统的相轨迹;

[0069] 图4为本发明实施例提供的当 $\delta = 5, \tau = 0.5$ 时非对称分段非线性约束系统的分岔图及最大Lyapunov指数曲线。

[0070] 图5为本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置结构示意图。

具体实施方式

[0071] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0072] 图1示例性的示出了本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法流程图。如图1所示,本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法包括以下步骤:

[0073] 步骤S101:根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型。

[0074] 具体地,将分段非线性模型各部分进行级数展开得到相应分段非线性的约束形式,从而得到如公式(3)所示的一种非对称分段连续非线性约束模型:

$$[0075] \quad G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases} \quad (3)$$

[0076] 在(3)式中: x 为约束条件下的位移; $G(x)$ 为约束力; $\kappa_i (i=1,2,3)$ 为等效刚度系数; $\gamma_i (i=1,2,3)$ 为非线性刚度系数; e_1 和 e_2 为两种弹性体由于预紧力所产生的弹性变形

量。

[0077] 需要说明的是,由于受到约束作用表现为多分段非线性,在振动过程中系统所受到的弹性力随位移的变化也表现出分段非线性特征,并且在 $x=-e_1$ 和 $x=-e_2$ 处分别有明显的弹性力变化,各段具有不同非线性弹性力,分段处($x=-e_2, x=-e_1$)具有连续性,并且约束参数满足条件

$$[0078] \quad \begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases} \quad (4)$$

[0079] 需要说明的是,将(3)式引入振动系统的动力学模型中,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型:

$$[0080] \quad \ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t) \quad (5)$$

[0081] 在(5)式中: $\dot{x}$ 为 x 的一阶导数, $\ddot{x}$ 为 x 的二阶导数, ζ 为系统阻尼比; $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$; $q \sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, t 为时间。

[0082] 需要说明的是,动力学模型通式指的是振动系统的动力学模型,即(5)式中的 $G(x)$ 为任意函数时为动力学模型通式。

[0083] 步骤S102:根据动力学模型,通过分析非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定鞍点的同宿轨道参数方程。

[0084] 需要说明的是,将非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型的微分方程转换为非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型的状态方程。

[0085] 具体地,将(5)式写作状态方程形式:

$$[0086] \quad \begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon (\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x}) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases} \quad (6)$$

[0087] 在(6)式中: $\dot{y}$ 为 y 的一阶导数, ε 为常数,且 $0 < \varepsilon < 1$ 。

[0088] 需要说明的是,根据非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型的状态方程,确定非对称分段连续非线性约束系统的Hamilton函数。

[0089] 具体地,根据(6)式确定系统的Hamilton量:

$$[0090] \quad H(x, y) = \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2} \mu \kappa_1 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_2 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_3 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases} \quad (7)$$

[0091] 需要说明的是,根据非对称分段连续非线性约束系统的Hamilton函数,通过分析非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定非对称分段连续非线性约束系统在鞍点的同

宿轨道参数方程。

[0092] 具体地,图2(a)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i < 0$ 时非对称分段非线性约束系统的势函数曲线。图2(b)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i < 0$ 时非对称分段非线性约束系统的

相轨迹。当 $k+\kappa_i < 0$ 时,奇点 $(0,0)$ 为鞍点, $\left(\pm\sqrt{-\frac{k+\kappa_i}{\gamma_i}},0\right)$ 为中心点,根据图2(a)和图2(b)可获知,中心点在三段约束区间之间相应切换。

[0093] 具体地,图3(a)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i > 0$ 时非对称分段非线性约束系统的势函数曲线。图3(b)为本发明实施例提供的当 $k+\kappa_i > 0$ 时非对称分段非线性约束系统的相轨迹。当 $k+\kappa_i > 0$ 时,系统只有一个奇点 $(0,0)$ 为中心点,根据图3(a)和图3(b)可获知,系统为稳定的周期运动,不存在混沌运动。

[0094] 因此,只需分析当 $k+\kappa_i < 0$ 时的情况,双曲鞍点 $(0,0)$ 的稳定流形和不稳定流形重合构成的同宿轨道满足微分方程:

[0095] $H(x,y)=0$ (8)

[0096] 设起始 $t=0$ 时 $\dot{x}=0$,由(8)式可解得 $x_{0i}=\sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}}$, $(i=1,2,3)$,并且存在

[0097]
$$\int_{x_{0i}}^x \frac{1}{\pm x \sqrt{-\mu(k+\kappa_i)} - \frac{1}{2}\mu\gamma_i x^2} dx = t$$
 (9)

[0098] 根据系统不同约束情形下中心点,对(9)式积分和简化之后,得到系统在鞍点 $(0,0)$ 的同宿轨道参数方程为:

[0099]
$$\begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ -(k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0100] 在(10)式中, $i=1,2,3$ 。

[0101] 步骤S103:根据动力学模型和Melnikov函数通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数。

[0102] 具体地,结合(6)式,定义系统同宿轨道Melnikov函数

[0103]
$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \wedge g(x,y) dt \quad (11)$$

[0104] 在(11)式中, $f(x,y) = \begin{pmatrix} y \\ -\omega_0^2 x - \mu G(x) \end{pmatrix}$, $g(x,y) = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0 y \end{pmatrix}$ 。

[0105] 需要说明的是,初始时刻 t_0 为任意实数,根据(11)式得系统Melnikov函数为:

$$\begin{aligned}
M(t_0) = & \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t) \mu q \cos(\omega(t+t_0)) - 2\zeta \omega_0 (y_-(t))^2) dt \\
[0106] \quad & + \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t) \mu q \cos(\omega(t+t_0)) - 2\zeta \omega_0 (y_+(t))^2) dt \\
& + \int_0^{e_1} \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 dx + \int_0^{-e_2} \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 dx
\end{aligned} \tag{12}$$

[0107] 需要说明的是, $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 两函数为任意函数时候(11)式为 Melnikov 函数通式。

[0108] 需要说明的是, 本发明实施例中步骤S103和步骤S104在执行时没有先后顺序的限制。

[0109] 步骤S104: 根据非对称分段连续非线性约束模型和同宿轨道参数方程, 确定 Melnikov 函数的积分上下限。

[0110] 需要说明的是, 结合(4)式和(10)式, 根据系统约束分段条件($x > -e_2$)确定积分上

$$\begin{aligned}
\text{限 } t_1 = & \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_2 / \sqrt{-2(k+\kappa_1) / \gamma_1}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}, \text{ 根据系统约束分段条件 } (x < -e_1) \text{ 确定积分下限} \\
t_2 = & \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_1 / \sqrt{-2(k+\kappa_3) / \gamma_3}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}。
\end{aligned}$$

[0111] 对(12)式的 Melnikov 函数进一步求解可得:

[0112]

$$\begin{aligned}
M(t_0) = & \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta \omega_0 (J_1 + J_2) \\
& + \frac{1}{2} \kappa_2 (e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4} \gamma_2 (e_1^4 + e_2^4)
\end{aligned} \tag{1}$$

[0113] 在(1)式中, $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$

[0114] $Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt$

[0115] $Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt$

[0116] $Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt$ 。

[0117] 将积分上、下限代入(1)式, 令 $x = -\mu(k+\kappa_2)$, 简化可得:

[0118]

$$\begin{aligned}
\int_{-\infty}^{t_1} x_-(t-\tau) y_-(t) dt &= -\frac{2}{\mu\gamma_2} \sqrt{\chi^3} \int_{-\infty}^{t_1} \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}(t-\tau)) \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) dt \\
&= -\frac{2e^\tau}{\mu\gamma_2} \sqrt{\chi^3} \int_{-\infty}^{t_1} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) dt \\
&= -\frac{2e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \int_{-\infty}^{\sqrt{\chi}t_1} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) d(\sqrt{\chi}t) \\
&= \frac{2e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \int_0^{\operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t_1)} \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t) d(\operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t)) \\
&= \frac{e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t_1)
\end{aligned}$$

[0119]

$$\begin{aligned}
\int_{t_2}^{\infty} x_+(t-\tau) y_+(t) dt &= -\frac{2}{\mu\gamma_2} \sqrt{\chi^3} \int_{t_2}^{\infty} \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}(t-\tau)) \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) dt \\
&= -\frac{2e^\tau}{\mu\gamma_2} \sqrt{\chi^3} \int_{t_2}^{\infty} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) dt \\
&= -\frac{2e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \int_{\sqrt{\chi}t_2}^{\infty} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t) \tanh(\sqrt{\chi}t) d(\sqrt{\chi}t) \\
&= \frac{2e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \int_{\operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t_2)}^{\infty} \operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t) d(\operatorname{sech}(\sqrt{\chi}t)) \\
&= -\frac{e^\tau \chi}{\mu\gamma_2} \operatorname{sech}^2(\sqrt{\chi}t_2)
\end{aligned}$$

[0120] 根据上面两个中间推导式,可解得:

[0121]

$$J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi}t_1) - \sinh(\sqrt{\chi}t_1) + \sinh(\sqrt{\chi}t_1)\cosh(\sqrt{\chi}t_1))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi}t_1)}$$

[0122]

$$J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi}t_2) + \sinh(\sqrt{\chi}t_2) - \sinh(\sqrt{\chi}t_2)\cosh(\sqrt{\chi}t_2))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi}t_2)}$$

[0123] 步骤S105:根据Melnikov函数和积分上下限,通过公式(2),确定非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件。

[0124] 具体地,当 $M(t_0)=0$ 时,将(1)式变形可得:

[0125]

$$\sin\left(\omega t_0 - \arctan\left(\frac{Q_1 + Q_3}{Q_2 + Q_4}\right)\right) = \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \quad (13)$$

[0126] 根据正弦函数的基本特征,由(13)式可得到系统发生混沌运动时的临界条件解析表达式:

$$\left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1 \quad (2)$$

[0128] 需要说明的是,根据非对称分段连续非线性约束系统发生混沌运动时的临界条件表达式,确定非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态。

[0129] 步骤S106:根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据,以及所述混沌运动时的临界条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件。

[0130] 步骤S107:根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态。

[0131] 本发明实施例提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法,具体实施例如下:

[0132] 在板带轧机的液压系统中,液压缸和弯辊缸分布于轧辊上、下两侧,液压缸在静态条件下受到预紧力的作用出现的预紧变形量,动态条件下会使辊系受到非对称分段非线性约束。受这种约束作用的影响,轧机辊系出现的振动行为不仅使轧制产品质量难以保证,还会对轧制系统稳定性构成威胁。以受到这种非对称分段非线性约束的板带轧机上辊系为对象,采用集中质量法建立相应的动力学模型,预测该动力学系统出现混沌的临界条件。预测结果可指导工程技术人员进行参数设定和调节,避免因混沌状态的出现所导致的系统失稳。

[0133] 选取不同时滞量 τ 和时滞反馈增益 δ ,可以得到不同参数条件下振动系统发生混沌运动的临界条件。具体地,系统参数取值 $\kappa_1 = -500$, $\gamma_1 = 1800$, $\kappa_2 = -200$, $\gamma_2 = 600$, $\kappa_3 = -584$, $\gamma_3 = 1200$, $m = 1$, $k = 100$, $\mu = 1$, $\zeta = 0.2$, $e_1 = 0.8$, $e_2 = -0.5$,当时滞反馈增益 $\delta = 5$,时滞量 $\tau = 0.5$ 时,根据临界条件表达式(13)计算得到系统发生混沌的外激励幅值条件为 $q \geq 82.8$ 。

[0134] 图4为本发明实施例提供的当 $\delta = 5$, $\tau = 0.5$ 时非对称分段非线性约束系统的分岔图及最大Lyapunov指数曲线。如图4所示的分岔图和最大Lyapunov指数曲线(MLE),通过对照分析可知,系统在 $q \geq 82.8$ 时最大Lyapunov指数变为正数,表明系统进入了混沌运动状态,验证了在该参数条件下系统发生混沌的条件的预测结果 $q \geq 82.8$ 。

[0135] 基于同一发明构思,本发明实施例提供了一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置,由于该装置解决技术问题的原理与一种非对称分段连续非线性约束系统的

混沌预测装置方法相似,因此该装置的实施可以参见方法的实施,重复之处不再赘述。

[0136] 图5为本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置结构示意图。如图5所示,本发明实施例提供的一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置包括:

[0137] 第一确定单元51,用于根据非对称分段连续非线性约束模型和动力学模型通式,确定非对称分段连续非线性约束系统的动力学模型;

[0138] 第二确定单元52,用于根据所述动力学模型,通过分析所述非对称分段连续非线性约束系统的鞍点,确定所述鞍点的同宿轨道参数方程;

[0139] 第三确定单元53,用于根据所述动力学模型和Melnikov函数通式,通过公式(1),确定所述非对称分段连续非线性约束系统的Melnikov函数;

[0140] 第四确定单元54,用于根据所述非对称分段连续非线性约束模型和所述同宿轨道参数方程,确定所述Melnikov函数的积分上下限;

[0141] 第五确定单元55,用于根据所述Melnikov函数和所述积分上下限,通过公式(2),确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的临界条件;

[0142] 第六确定单元56,用于根据等效刚度系数、非线性刚度系数、刚度、质量、阻尼比和弹性变形量的实测数据,以及所述混沌运动时的临界条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统在混沌运动时的周期外激励幅值条件;

[0143] 第七确定单元57,用于根据周期外激励幅值的实测数据和混沌运动时的周期外激励幅值条件,确定所述非对称分段连续非线性约束系统的混沌运动状态;

[0144] 公式(1)如下所示:

$$M(t_0) = \mu q (\cos(\omega t_0)(Q_1 + Q_3) - \sin(\omega t_0)(Q_2 + Q_4)) - 2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) + \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)$$

[0146] 公式(2)如下所示:

$$\left| \frac{2\zeta\omega_0(J_1 + J_2) - \frac{1}{2}\kappa_2(e_1^2 + e_2^2) - \frac{1}{4}\gamma_2(e_1^4 + e_2^4)}{\mu q \sqrt{(Q_1 + Q_3)^2 + (Q_2 + Q_4)^2}} \right| \leq 1$$

[0148] 其中, t_0 为初始时间,且为任意实数; $Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \cos(\omega t) dt$,

$Q_2 = \int_{-\infty}^{t_1} y_-(t) \sin(\omega t) dt$, $Q_3 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \cos(\omega t) dt$, $Q_4 = \int_{t_2}^{\infty} y_+(t) \sin(\omega t) dt$,

$J_1 = \int_{-\infty}^{t_1} (y_-(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} (\cosh^3(\sqrt{\chi} t_1) - \sinh(\sqrt{\chi} t_1) + \sinh(\sqrt{\chi} t_1) \cosh(\sqrt{\chi} t_1))}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_1)}$

$$J_2 = \int_{t_2}^{\infty} (y_+(t))^2 dt = \frac{2\sqrt{\chi^3} \left(\cosh^3(\sqrt{\chi} t_2) + \sinh(\sqrt{\chi} t_2) - \sinh(\sqrt{\chi} t_2) \cosh(\sqrt{\chi} t_2) \right)}{-3\mu\gamma_2 \cosh^3(\sqrt{\chi} t_2)},$$

$$t_1 = \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_2/\sqrt{-2(k+\kappa_1)/\gamma_1}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_1)}}, \quad t_2 = \frac{\operatorname{arcsech}\left(-e_1/\sqrt{-2(k+\kappa_3)/\gamma_3}\right)}{\sqrt{-\mu(k+\kappa_3)}}, \quad e_1 \text{ 和 } e_2$$

为弹性变形量, ζ 为阻尼比, $q\sin(\omega t)$ 为周期外激励, q 为周期外激励振幅, ω 为周期外激励角频率, $\omega_0^2 = k/m = \mu k$, k 为刚度, m 为质量, $\mu = 1/m$, κ_1 , κ_2 和 κ_3 为等效刚度系数, γ_1 , γ_2 和 γ_3 为非线性刚度系数, t_1 和 t_2 分别为 Melnikov 函数的积分上下限, $x = -\mu(k+\kappa_2)$ 。

[0149] 较佳地, 所述第一确定单元 51 具体用于:

[0150] 所述非对称分段连续非线性约束模型, 由下式确定:

$$[0151] \quad G(x) = \begin{cases} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 & x > -e_2 \\ \kappa_2 x + \gamma_2 x^3 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0152] 所述非对称分段连续非线性约束模型在分段点具有连续性的条件为:

$$[0153] \quad \begin{cases} \lim_{x \rightarrow -e_2} \kappa_1 x + \gamma_1 x^3 = -\kappa_2 e_2 - \gamma_2 e_2^3 \\ \lim_{x \rightarrow -e_1} \kappa_3 x + \gamma_3 x^3 = -\kappa_2 e_1 - \gamma_2 e_1^3 \end{cases}$$

[0154] 所述动力学模型, 由下式确定:

$$[0155] \quad \ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x + \mu G(x) = \mu q \cos(\omega t)$$

[0156] 其中, x 为约束条件下的位移, $\dot{x}$ 为 x 的一阶导数, $\ddot{x}$ 为 x 的二阶导数, $G(x)$ 为约束力。

[0157] 较佳地, 所述第二确定单元 52 具体用于:

[0158] 根据所述动力学模型确定所述动力学模型的状态方程, 所述动力学模型的状态方程为:

$$[0159] \quad \begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \varepsilon \left(\mu q \cos(\omega t) - 2\zeta\omega_0\dot{x} \right) - \omega_0^2 x - \mu G(x) \end{cases}$$

[0160] 根据所述动力学模型的状态方程, 确定所述非对称分段连续非线性约束系统的 Hamilton 函数, 所述 Hamilton 函数为:

$$[0161] \quad H(x, y) = \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 x^2 + \begin{cases} \frac{1}{2} \mu \kappa_1 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_1 x^4 & x > -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_2 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_2 x^4 & -e_1 \leq x \leq -e_2 \\ \frac{1}{2} \mu \kappa_3 x^2 + \frac{1}{4} \mu \gamma_3 x^4 & x < -e_1 \end{cases}$$

[0162] 当所述Hamilton函数满足 $H(x, y) = 0$, 根据所述非对称分段连续非线性约束系统不同约束情形下中心点的位置, 通过下式确定所述鞍点的同宿轨道参数方程:

$$[0163] \quad \begin{pmatrix} x_{\pm}(t) \\ y_{\pm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{-\frac{2(k+\kappa_i)}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \\ \mp (k+\kappa_i) \sqrt{\frac{2\mu}{\gamma_i}} \operatorname{sech}(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \tanh(\sqrt{-\mu(k+\kappa_i)}t) \end{pmatrix}$$

[0164] 其中, $\dot{y}$ 为 y 的一阶导数, ε 为常数, 且 $0 < \varepsilon < 1$, $i = 1, 2, 3$ 。

[0165] 应当理解, 以上非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置包括的单元仅为根据该设备装置实现的功能进行的逻辑划分, 实际应用中, 可以进行上述单元的叠加或拆分。并且该实施例提供的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置所实现的功能与上述实施例提供的非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测装置方法一一对应, 对于该装置所实现的更为详细的处理流程, 在上述方法实施例一中已做详细描述, 此处不再详细描述。

[0166] 综上所述, 本发明实施例提供一种非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测方法, 该方法给出了系统在鞍点处由三段不同轨道组成的同宿轨道参数方程, 根据约束的分段条件确定积分上下限并通过分段积分得到Melnikov函数, 很好的解决了非对称分段非线性约束系统无法直接得到Melnikov函数来预测混沌的难点; 进一步, 非对称分段非线性约束系统发生混沌时的临界条件解析表达式, 对于具有非对称分段非线性约束特征的系统混沌运动状态的预测问题提供了一种快速、有效的解析方法, 根据预测结果能够通过调节控制参数对系统混沌运动行为进行控制, 避免出现混沌运动状态而导致系统失稳。对于非对称分段连续非线性约束系统的混沌预测结果可以指导设计人员优化轧制设备结构和工艺参数, 指导工程技术人员进行参数设定和调节, 避免因混沌状态的出现所导致的系统失稳。

[0167] 以上公开的仅为本发明的几个具体实施例, 本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围, 倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内, 则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

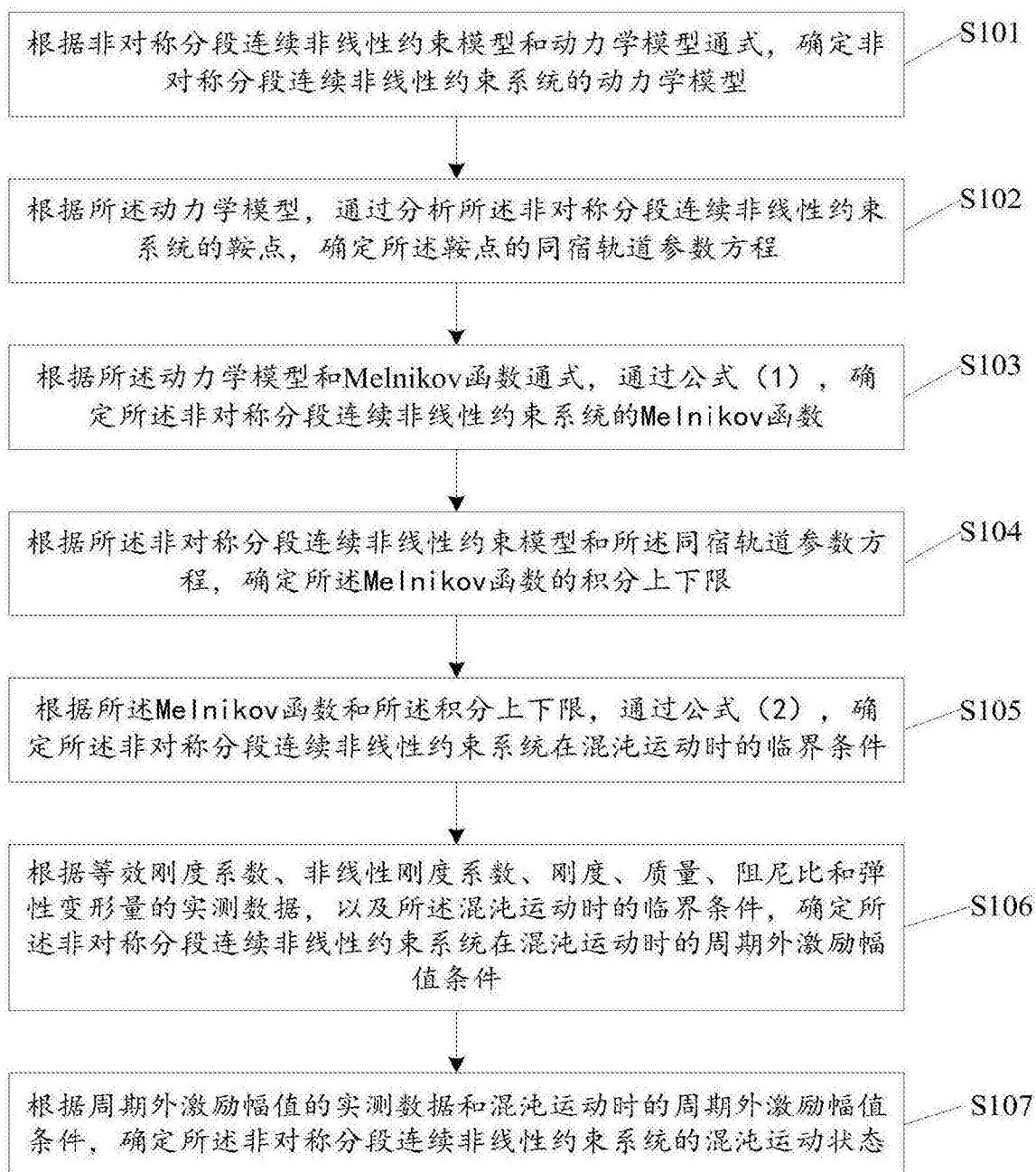


图1

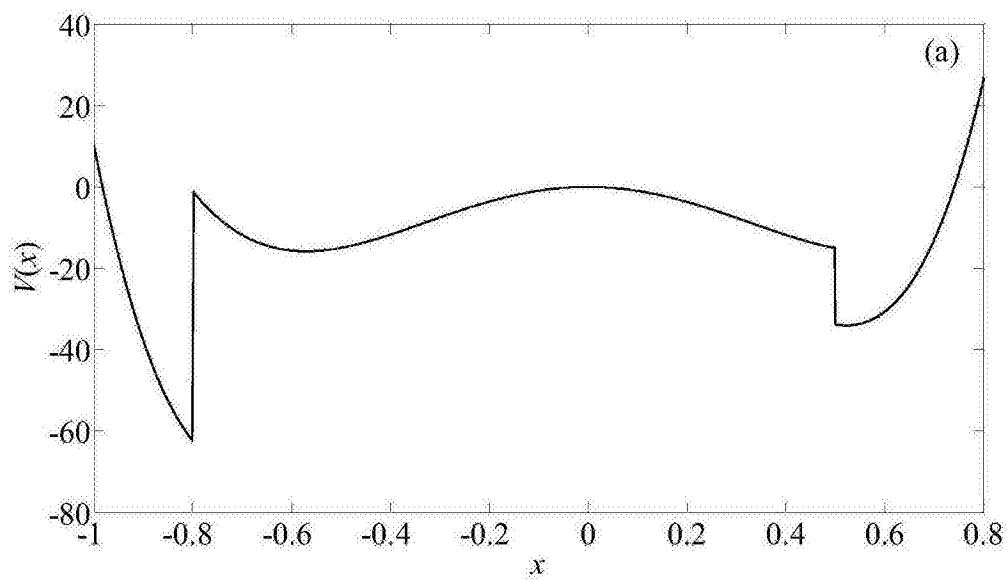


图2(a)

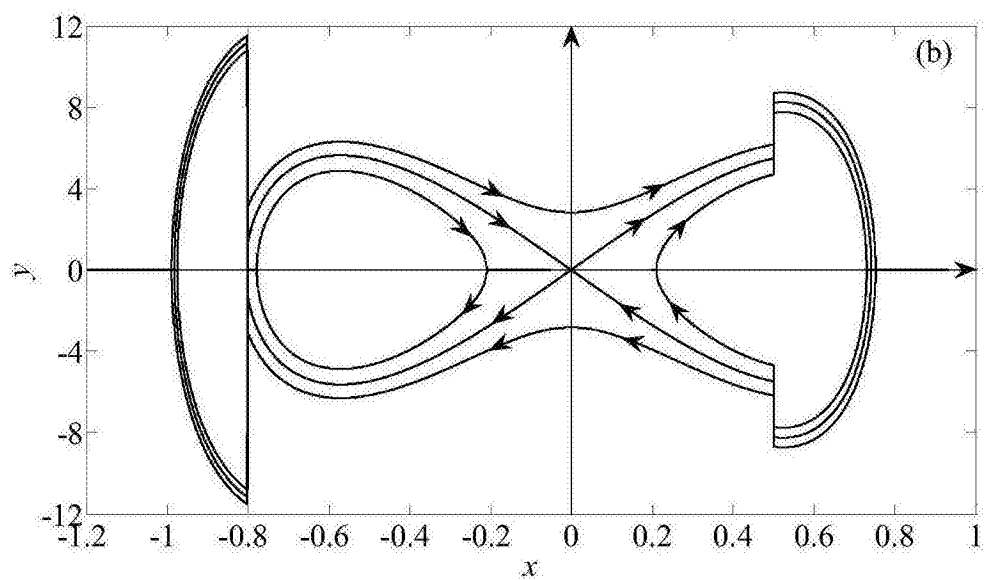


图2(b)

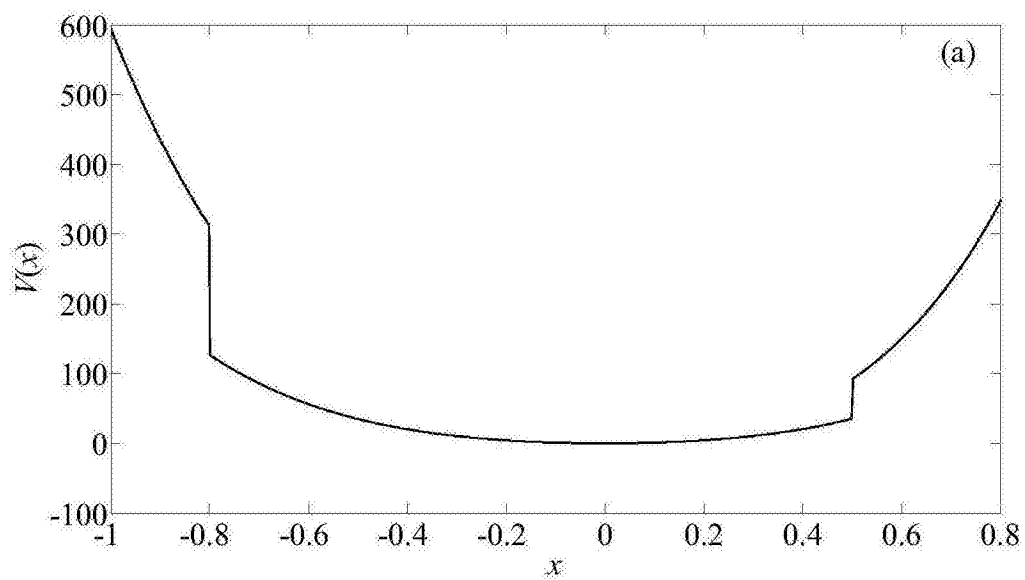


图3(a)

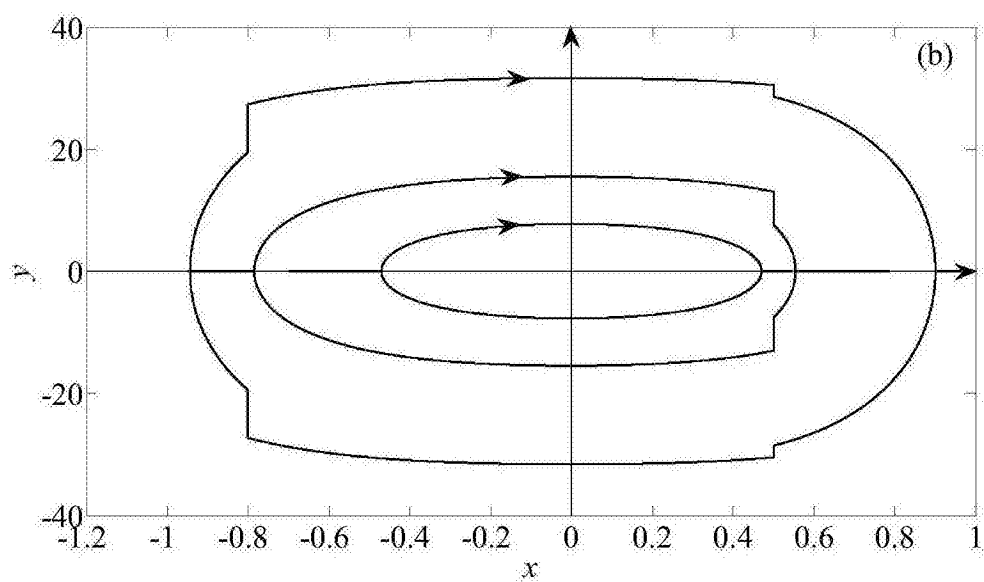


图3(b)

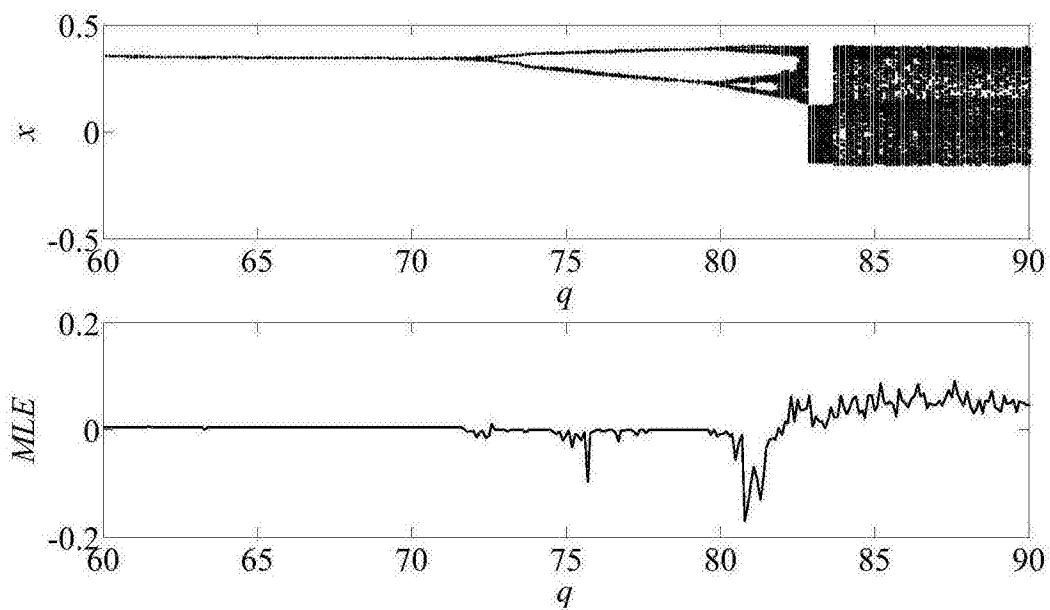


图4

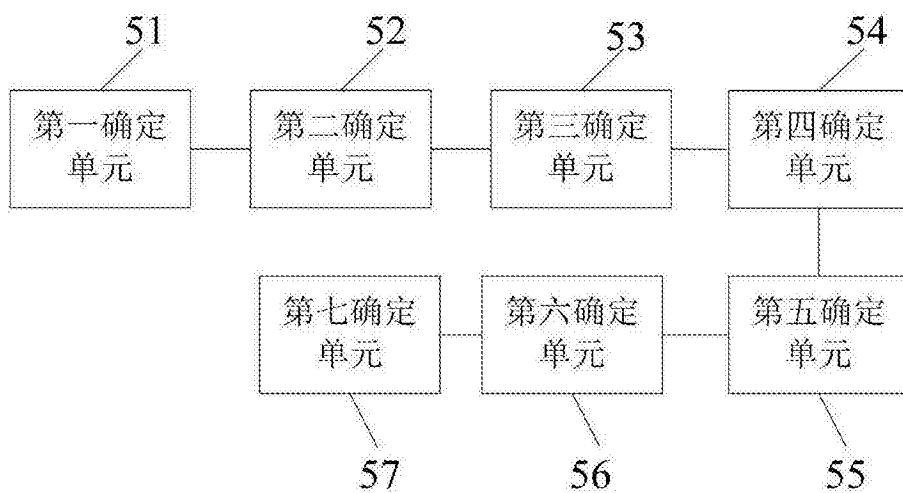


图5