

## 船舶混沌运动的周期脉冲参数微扰控制

黄 谦<sup>1,2</sup>, 李天伟<sup>1</sup>, 杨绍清<sup>3</sup>, 李正友<sup>1</sup>

(1. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军91257部队, 浙江 舟山 316001;

3. 海军大连舰艇学院 信息与通信工程系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 针对海上航行船舶非线性运动中存在的混沌现象, 为实现对航行船舶的高精度航向控制, 本文将脉冲参数微扰方法与横截同宿点理论相结合, 提出了一种基于Melnikov方法的简捷船舶混沌运动周期脉冲参数微扰控制方法. 该控制方法利用Melnikov函数确定控制脉冲参量关系及取值范围, 基于该方法设计的控制器克服了脉冲参量取值难以确定的不足. 仿真结果表明, 本文所提方法能将混沌系统快速稳定到不同的周期轨道, 具有较好的控制效果.

**关键词:** 船舶混沌运动; 混沌控制; 脉冲控制; 参数微扰; Melnikov方法

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A

## Periodic impulsive parameter perturbations control for chaotic ship steering

HUANG Qian<sup>1,2</sup>, LI Tian-wei<sup>1</sup>, YANG Shao-qing<sup>3</sup>, LI Zheng-you<sup>1</sup>

(1. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning 116018, China;

2. Unit 91257 of Chinese Navy, Zhoushan Zhejiang 316001, China;

3. Department of Information and Commucation Engineering, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning 116018, China)

**Abstract:** To achieve the high-precision ship course control in chaos conditions existing in nonlinear maneuvering of the sailing ship, we propose a simple periodic impulsive parameter perturbation control based on Melnikov method. Combining the impulsive parameter perturbation method with the transversal homoclinic point theory, we can use Melnikov function to obtain the relationship between the control pulse parameters and their value ranges. The controller based on the proposed method eliminates the disadvantage of unable to determine the values of control pulse parameters. Simulation results are demonstrated, showing that the proposed control method can rapidly stabilize the chaotic system on different periodic orbits.

**Key words:** chaotic ship steering; chaos control; impulsive control; parameter perturbation; Melnikov method

### 1 引言(Introduction)

船舶在海上航行是在波浪环境中运动的, 受到多种外力的扰动, 即使在顶浪或顺浪航行时, 也会产生一定幅度的艏摇及横摇运动. 舰船的艏摇及横摇运动会对舰载武器系统的作战使用和作业产生各种不利影响, 甚至危及舰船自身航行安全. 如何避免这种情况的发生或降低船舶所受不良情况影响是船舶运动控制领域研究的一大重要课题. 随着非线性动力学理论和混沌理论在非线性研究中的出现和日益发展, 国内外学者开始将非线性动力学和混沌理论引入船舶的非线性运动研究之中, 从特性及机理上对船舶的非线性运动进行解释<sup>[1-5]</sup>. 大量的研究表明, 船舶的非线性混沌运动是导致航向无法保持或倾覆的重要因素. 因此, 对船舶航行中的非线性状态进行有效跟踪及控制以保证船舶航行安全及舰载武

器系统的正常使用成为了一项重要的课题<sup>[2]</sup>. 刘胜等<sup>[1]</sup>利用最小二乘支持向量机建立船舶操纵系统的逆动力学模型, 引入协调控制因子, 与变论域模糊控制复合形成控制闭环, 提高了控制系统的控制精度和鲁棒性. 罗伟林等<sup>[6]</sup>对船舶航向非线性系统, 提出了一种基于神经网络方法的鲁棒跟踪控制器, 所设计的控制器解耦简单且具有良好的实时跟踪精度. 张显库等<sup>[7]</sup>提出利用精确反馈线性化和闭环增益成形算法相结合的非线性简捷控制方法进行船舶横摇运动的混沌控制, 取得了较好的效果. 李芄等<sup>[8]</sup>通过考虑设计PID控制器使得混沌系统较快稳定到极限环上, 成功抑制了混沌, 但在考虑控制对象时没有考虑模型中的正弦分量影响, 具有一定片面性.

本文从船舶运动非线性模型角度着手, 将周期脉冲参数微扰控制方法与横截同宿点理论相结合,

提出了一种基于Melnikov方法的简捷船舶混沌运动周期脉冲参数微扰控制方法. 在船舶运动出现混沌态时利用周期脉冲对系统参数进行微扰, 并应用Melnikov方法得出了采用脉冲参数微扰方法的控制脉冲参量取值范围, 进而达到船舶混沌运动简捷控制的目的, 取得了较好的控制效果.

## 2 船舶非线性混沌运动(Nonlinear chaotic ship steering)

### 2.1 船舶运动非线性模型(Nonlinear mathematical model of ship steering)

根据船舶线性操纵运动微分方程组

$$\begin{cases} Y_\delta \delta = -Y_v v + (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} - \\ \quad (Y_r - m u_0) r + (m x_C - Y_{\dot{r}}) \dot{r}, \\ N_\delta \delta = -N_v v + (m x_C - N_{\dot{v}}) \dot{v} - \\ \quad (N_r - m x_C u_0) r + (I_Z - N_{\dot{r}}) \dot{r}, \end{cases} \quad (1)$$

其中力 $Y$ 和 $N$ 及相对分量是由船舶水动力和水动力矩及舵力和舵力矩产生, 式中:  $u_0$ 为航行速度,  $r$ 为转舵角速度,  $v$ 为横漂速度,  $\delta$ 为舵角,  $m$ 为船舶质量,  $I_Z$ 为船舶质量对通过重心铅垂轴的惯性矩. 通过对其进行变换, 得到时域下船舶转舵运动方程并用非线性函数 $H(r) = nr + qr^3$ 代替其中的一阶项 $r$ 得到非线性Bech模型

$$\ddot{r} + a_1 \dot{r} + a_0 r + cr^3 = b_1 \dot{\delta} + b_0 \delta, \quad (2)$$

其中:  $a_1$ 为阻尼系数,  $a_0$ 为刚度系数, 其余参数计算表达式参考文献[9]. 根据Bech模型, 在船舶直航向航行过程中, 针对船舶动态从舵角到转首角速度的主要环节, 将波浪的作用合成为某一干扰舵角, 与实际舵角一起进入船舶模型, 将给定值 $r_0$ 取为正弦函数 $B \cdot \sin(\omega t)$ , 并对船舶转舵角速度作比例反馈控制, 即令舵角 $\delta = k_p(r_0 - r)$ , 则系统变为

$$\begin{cases} \ddot{r} + a_1 \dot{r} + a_0 r + c_0 r^3 = b_1 \dot{\delta} + b_0 \delta, \\ \delta = k_p(r_0 - r). \end{cases} \quad (3)$$

令 $x = r$ ,  $y = \dot{r}$ , 化简可得如下船舶运动非线性数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -(a_1 + b_1 k_p)x - (a_0 + b_0 k_p)y - \\ \quad c_0 x^3 + b_1 k_p B \omega \cos(\omega t) + \\ \quad b_0 k_p B \sin(\omega t). \end{cases} \quad (4)$$

观察式(4)发现与受迫Duffing方程极为相似, 经研究发现, 当船的阻尼项系数和刚度项系数相差不是很大时, 通过反馈增量的补偿, 在较小的给定值下, 系统将进入非线性的混沌状态.

### 2.2 船舶运动非线性模型仿真及其混沌特性分析(Simulation of the nonlinear mathematical model and analysis on its chaotic characteristic)

为了验证该模型是否具有混沌动力学特性, 论文以某型舰船为研究对象, 令 $k_p = 5$ ,  $\omega = 0.60$ ,  $B =$

0.4, 计算其相应参数得出该型舰的运动非线性模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -0.47y + 0.30x - 4.20x^3 + \\ \quad 0.03 \cos(0.60t) + 0.08 \sin(0.60t). \end{cases} \quad (5)$$

采用MATLAB对模型进行仿真, 运行得到系统相位图, 由系统相位图可知系统吸引子轨线是反复折叠和相互交叉而形成的密集的带, 并不是简单的闭曲线, 这种具有复杂结构的吸引子称为奇怪吸引子, 而具有奇怪吸引子的运动就是混沌的, 如图1所示.

由图2可知, 随着 $B$ 的增加,  $x$ 出现从1周期到2的幂周期再到混沌, 然后又从混沌中走出到2的幂周期最后到1周期, 中间出现了一些明显的奇数周期, 正分岔和逆分岔完整地结合在一起<sup>[10]</sup>. 由图3可知系统最大Lyapunov指数随着 $B$ 的变化而变化, 当系统最大Lyapunov指数为正值时, 系统运动呈现明显的混沌特性. 综合以上可以发现该模型具有较为明显的混沌特性, 进一步证明了当系统参量在某一范围内取值时, 船舶运动非线性模型会产生混沌现象.

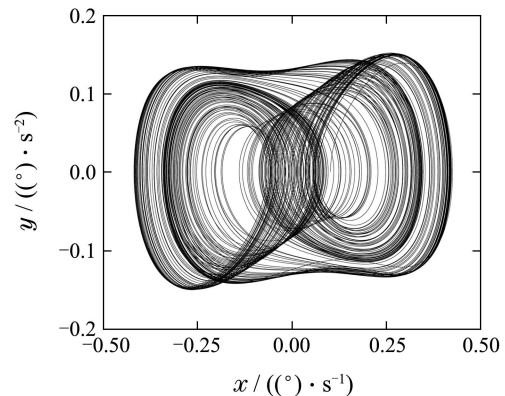


图1 系统相位图

Fig. 1 Figure of system phase

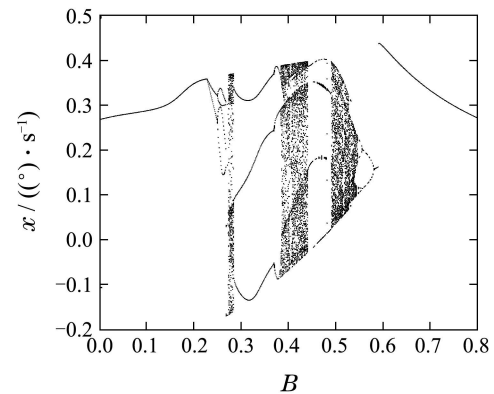


图2 系统分岔图

Fig. 2 Figure of system bifurcation

为了进一步对系统的混沌特性进行验证, 分别绘制该型舰船运动非线性模型( $B, x$ )分岔图及最大Lyapunov指数谱图, 如图2、图3所示.

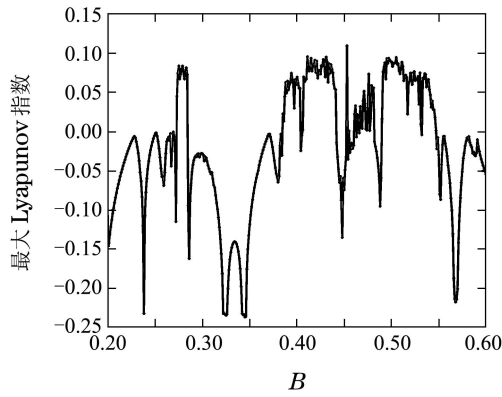


图 3 系统最大Lyapunov指数谱图

Fig. 3 Figure of system largest Lyapunov exponents spectrum

### 3 船舶混沌运动的周期脉冲参数微扰方法 (Impulsive parameter perturbations control for chaotic ship steering)

#### 3.1 非线性模型的同宿轨道(Homoclinic orbits of the nonlinear mathematical model)

依据式(5)并参考Duffing方程, 令  $a = 0.30$ ,  $b = 4.20$ ,  $\varepsilon \cdot \gamma = 0.03$ ,  $\varepsilon \cdot \eta = 0.08$ ,  $\omega = 0.60$ ,  $\varepsilon \cdot \delta = 0.47$ , 其中  $\varepsilon$  为一正的极小值, 则式(4)可写为

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = ax - bx^3 + \varepsilon(\gamma \cos(\omega t) + \eta \sin(\omega t) - \delta y). \end{cases} \quad (6)$$

式(6)是可积Hamilton系统, 对于无扰动系统, 则式(6)变为

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = ax - bx^3. \end{cases} \quad (7)$$

根据文献[11]的方法, 解上述微分方程组, 得  $y = \pm x\sqrt{a - \frac{b}{2}x^2}$ , 即

$$\dot{x} = \pm x\sqrt{a - \frac{b}{2}x^2}. \quad (8)$$

解这个方程并利用初始条件可知两根同宿轨与时间的关系为

$$q_{\pm}^0 = (\pm\sqrt{\frac{2a}{b}}\operatorname{sech}(\sqrt{at}), \mp a\sqrt{\frac{2}{b}}\operatorname{sech}(\sqrt{at})\tanh(\sqrt{at})), \quad (9)$$

式中: “+” 代表着同宿轨道的正轴部分, “-” 代表着同宿轨道的负轴部分.

#### 3.2 基于周期脉冲参数微扰的混沌控制(Chaos control method based on periodic impulsive parameter perturbations)

针对式(6)所示的某型舰船运动非线性模型, 本文提出采用周期脉冲参数微扰方法控制混沌系统, 即利用周期脉冲对模型中的参数  $\gamma, \eta$  进行扰动, 则受控后系统如式(10)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = ax - bx^3 + \varepsilon((\gamma + F(t)) \cos(\omega t) + (\eta + F(t)) \sin(\omega t) - \delta y), \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $F(t)$  为周期脉冲函数, 其周期  $T = 2\pi/\omega$ ; 脉冲强度  $\kappa$ , 作用时间  $2\Delta$ , 函数表达式为

$$F(t) = \sum_{n=0}^{\infty} h(t - nT), \quad (11)$$

$$h(t) = \begin{cases} \kappa, & -\Delta + 2/\pi < t < \Delta + 2/\pi, \Delta \ll 1, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (12)$$

当  $\kappa$  与  $2\Delta$  取合适值时, 可以把式(6)所示系统稳定到周期轨道, 因此, 脉冲强度  $\kappa$  及作用时间  $2\Delta$  的选择成为了控制过程中的关键环节.

由横截同宿点理论可知, 对于一个动力系统可通过寻找其是否存在横截同宿点来判断该系统是否具有Smale马蹄意义下的混沌, 而Melnikov方法就是针对各种动力系统, 建立证明其Smale马蹄意义下的混沌是否存在的数学判据<sup>[11-13]</sup>, 即如果系统Melnikov函数  $M(t_0)$  存在不依赖于  $\varepsilon$  的简单零点, 那么对于充分小的  $\varepsilon$ , 系统庞加莱映射存在横截同宿点, 从而使得庞加莱映射具有Smale马蹄意义下的混沌. 为此, 本文考虑引入Melnikov方法, 构造式(10)所示受控系统的Melnikov函数, 通过求解受控系统出现混沌的边界条件确定脉冲强度  $\kappa$  及作用时间  $2\Delta$  的取值范围.

令  $\omega t = \tau$ , 则式(10)可化为

$$\dot{x} = f(x) + \frac{\varepsilon}{\omega}g(x, \tau), \quad (13)$$

其中:

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, f(x) = \begin{pmatrix} y/\omega \\ (ax - bx^3)/\omega \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix},$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ (\gamma + F(t)) \cos \tau + (\eta + F(t)) \sin \tau - \delta y \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}.$$

依据文献[11], 系统同宿轨道的Melnikov函数定义为

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(q_+^0(t - t_0)) \wedge g(q_+^0(t - t_0), t) dt. \quad (14)$$

又由于  $(f \wedge g) = (f_1g_2 - f_2g_1)$ , 则式(14)可化为如下表达式:

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^0(\tau - t_0)}{\omega} [(\gamma + F_N(\tau)) \cos \tau + (\eta + F_N(\tau)) \sin \tau - \delta y^0(\tau - t_0)] d\tau, \quad (15)$$

其中  $F_N(t)$  是  $F(t)$  得傅里叶级数近似, 即

$$F(\tau) \approx F_N(\tau) =$$

$$\frac{\kappa\Delta}{\pi} + \sum_{n=1}^N \frac{2\kappa}{n\pi} \sin(n\Delta) \cos(n(\tau - \frac{\pi}{2})). \quad (16)$$

将模型同宿轨道代入, 则Melnikov函数可写为

$$\begin{aligned} M(t_0) = & \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{y^0(\tau - t_0)}{\omega} [(\gamma + F_N(\tau)) \cos \tau + \right. \\ & (\eta + F_N(\tau)) \sin \tau - \delta y^0(\tau - t_0)] \Big\} d\tau = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-a\sqrt{2/b}\gamma}{\omega} \operatorname{sech} \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \tanh \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \cdot \\ & \cos(\tau + t_0) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-a\sqrt{2/b}\eta}{\omega} \operatorname{sech} \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \cdot \\ & \tanh \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \sin(\tau + t_0) d\tau - \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-2a^2\delta}{\omega b} \operatorname{sech}^2 \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \tanh^2 \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} d\tau + \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-a\sqrt{2/b}}{\omega} \operatorname{sech} \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \tanh \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \cdot \\ & F_N(\tau + t_0) \cos(\tau + t_0) d\tau + \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-a\sqrt{2/b}}{\omega} \operatorname{sech} \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \tanh \frac{\sqrt{a}\tau}{\omega} \cdot \\ & F_N(\tau + t_0) \sin(\tau + t_0) d\tau. \end{aligned} \quad (17)$$

对Melnikov函数进行推导化简可得

$$\begin{aligned} M(t_0) = & \sqrt{\frac{2a}{b}} \pi\omega \times (\gamma \operatorname{sech} \frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}} \sin t_0 - \\ & \eta \operatorname{sech} \frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}} \cos t_0) - \frac{4a^2\delta}{3\sqrt{ab}} + \\ & \sqrt{\frac{2a}{b}} \{ \Delta\kappa\omega \operatorname{sech} \frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}} \times (\sin t_0 - \cos t_0) - \\ & \sum_{n=1}^N \kappa\omega \frac{\sin(n\Delta)}{n} [(n-1) \operatorname{sech} \frac{\pi\omega(1-n)}{2\sqrt{a}} \cdot \\ & (\sin(t_0 + \frac{n\pi}{2} - nt_0) - \cos(t_0 + \frac{n\pi}{2} - nt_0)) - \\ & \sin(t_0 - \frac{n\pi}{2} + nt_0)) + (n+1) \operatorname{sech} \frac{\pi\omega(n+1)}{2\sqrt{a}} \cdot \\ & (\cos(t_0 - \frac{n\pi}{2} + nt_0))] \Big\} = \frac{4a^2\delta}{3\sqrt{ab}} (\mu(t_0) - 1), \end{aligned} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mu(t_0) = & \frac{3\sqrt{2b}}{4a\delta} [\pi\omega(\gamma \operatorname{sech} \frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}} \sin t_0 - \\ & \eta \operatorname{sech} \frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}} \cos t_0) + \\ & \Delta\kappa\omega \operatorname{sech}(\frac{\pi\omega}{2\sqrt{a}})(\sin t_0 - \cos t_0) - \kappa\omega \sum_{n=1}^N \psi(t_0)], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\psi(t_0) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sin(n\Delta)}{n} [(n-1) \operatorname{sech} \frac{\pi\omega(1-n)}{2\sqrt{a}} \cdot \\ & (\sin(t_0 + \frac{n\pi}{2} - nt_0) - \cos(t_0 + \frac{n\pi}{2} - nt_0)) + \\ & (n+1) \operatorname{sech} \frac{\pi\omega(n+1)}{2\sqrt{a}} (\cos(t_0 - \frac{n\pi}{2} + nt_0) - \\ & \sin(t_0 - \frac{n\pi}{2} + nt_0))]. \end{aligned} \quad (20)$$

根据Melnikov理论, 若系统Melnikov函数 $M(t_0)$ 在某些 $t_0$ 处出现符号改变则系统出现同宿混沌, 显然, 当 $\mu(t_0) < 1$ 成立时, 没有混沌产生, 故可以用来作为脉冲控制器的设计准则, 确定系统的混沌阈值, 并得出脉冲强度 $\kappa$ 及作用时间 $2\Delta$ 的取值范围. 根据式(18)–(20), 采用数值方法可以得出脉冲强度 $\kappa$ 及作用时间 $2\Delta$ 的关系, 如图4所示.

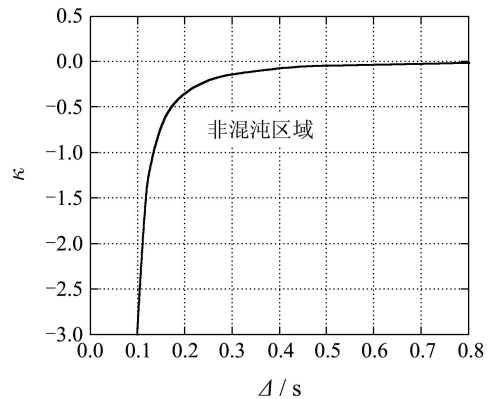


图4 受控系统Melnikov函数阈值曲线图  
Fig. 4 Threshold curve of the controlled system's Melnikov function

当脉冲强度 $\kappa$ 在曲线上方取值时, 系统的庞加莱映射具有Smale马蹄意义下的混沌, 因此, 为确保混沌控制的效果, 脉冲强度 $\kappa$ 的取值应在曲线下方.

#### 4 船舶混沌运动控制仿真研究(Simulation studies on controlling chaotic ship steering)

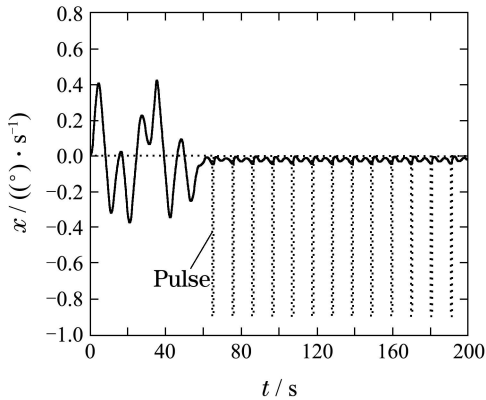
为了验证周期脉冲参数微扰方法对船舶混沌运动的控制效果, 对如式(6)所示的船舶运动非线性模型, 分别采用离散脉冲微扰控制方法和本文所提出的控制方法进行了数字仿真研究. 基于离散脉冲微扰的控制方法<sup>[14]</sup>, 以系统参量中某一参量作为微扰对象, 从时间 $t_0$ 开始施加控制, 每隔 $\Delta t$ 时间, 对参量进行扰动, 若以系统参量 $\delta$ 为微扰对象, 则在 $t_0 + n \cdot \Delta t$ 时间点上, 受控系统变为如式(21)所示形式, 而在其余时间点上系统仍如式(6)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = ax - bx^3 + \gamma \cos(\omega t) + \\ \quad \eta \sin(\omega t) - \delta(1 + \lambda)y, \end{cases} \quad (21)$$

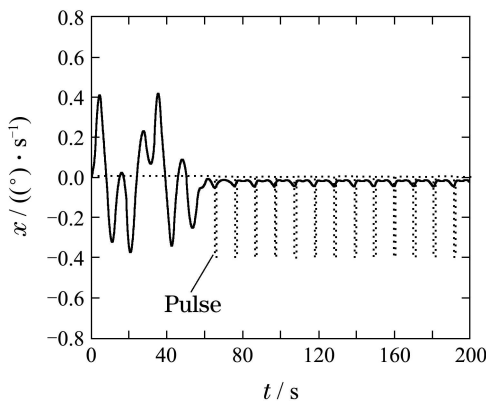
其中:  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\lambda$ 为扰动脉冲强度,  $\Delta t$ 为脉冲

作用时间间隔.

仿真时选取初值 $[x_0, y_0] = [0, 0]$ , 选择在 $t = 65$  s加入控制脉冲. 图5和图6分别给出了采用不同周期脉冲和离散脉冲的控制过程仿真曲线. 如图5所示分别为 $2\Delta = 0.52$  s,  $\kappa = -0.9$ 及 $2\Delta = 0.94$  s,  $\kappa = -0.4$ 时的周期脉冲控制过程仿真曲线, 图6所示分别为 $\Delta t = 0.02$  s,  $\lambda = 35$ 及 $\Delta t = 0.10$  s,  $\lambda = 10$ 时的离散脉冲控制过程仿真曲线.



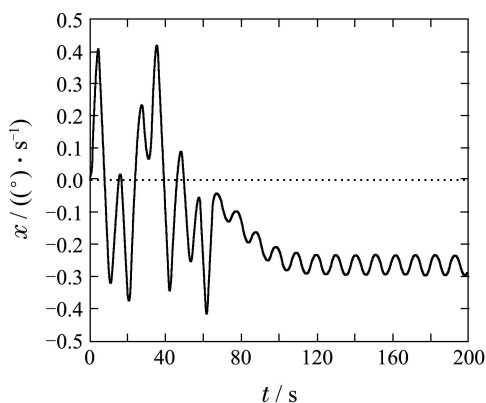
(a)  $2\Delta = 0.52$  s,  $\kappa = -0.9$



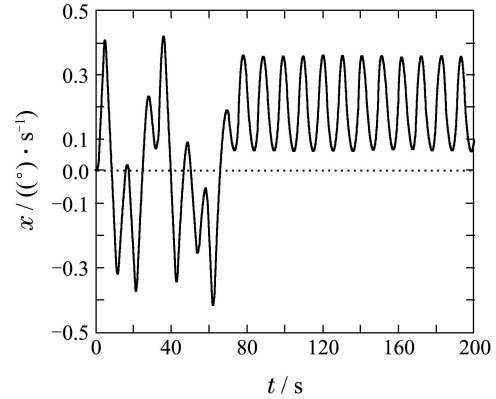
(b)  $2\Delta = 0.94$  s,  $\kappa = -0.4$

图 5 周期脉冲微扰控制过程

Fig. 5 The process of periodic impulsive perturbations control



(a)  $\Delta t = 0.02$  s,  $\lambda = 35$



(b)  $\Delta t = 0.10$  s,  $\lambda = 10$

图 6 离散脉冲微扰控制过程

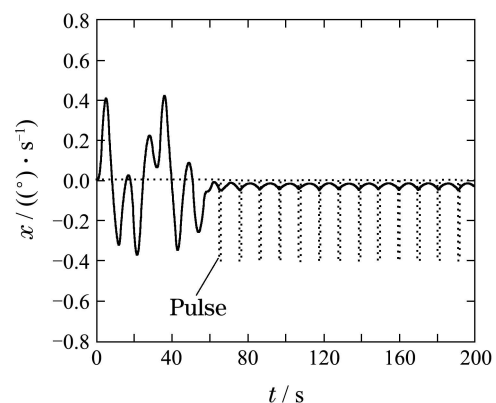
Fig. 6 The process of discrete impulsive perturbations control

由仿真结果可知, 采用本文提出的周期脉冲参数微扰控制方法与离散脉冲控制方法相比, 系统稳定时间更短, 控制效果更好, 且克服了采用参数试错法不断调整脉冲控制参量的缺陷. 当 $2\Delta$ 和 $\kappa$ 在图4中非混沌区域进行取值时, 原混沌系统在加入脉冲控制后即可较快摆脱混沌状态进入周期轨道, 控制效果明显.

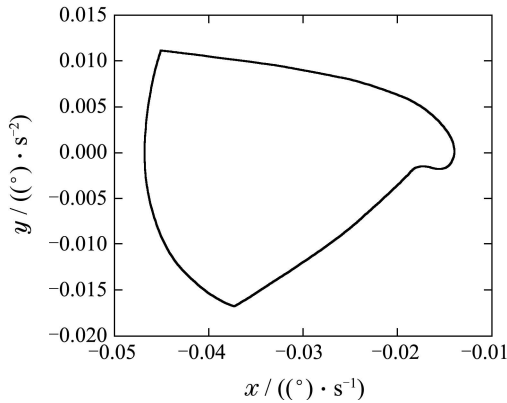
通过大量仿真研究, 探索出如下控制规律:

- 1) 当固定脉冲作用时间 $2\Delta$ , 改变脉冲强度 $\kappa$ 时, 随着 $|\kappa|$ 的增大, 受控系统输出振幅随之增大;
- 2) 当固定脉冲强度 $\kappa$ , 改变脉冲作用时间 $2\Delta$ 时, 随着 $2\Delta$ 的增大, 受控系统输出振幅随之增大;
- 3) 采用本文提出的周期脉冲参数微扰控制方法, 只需要对 $2\Delta$ 和 $\kappa$ 在非混沌区域进行取值就可实现对系统混沌运动的控制, 且通过对脉冲强度 $\kappa$ 和作用时间 $2\Delta$ 的不同取值, 可将系统稳定在不同周期轨道上.

在实际的控制实施过程中, 为使脉冲控制器具有良好的可操作性, 可选择固定脉冲作用时间 $2\Delta$ , 在所确定的非混沌区域内对脉冲强度 $\kappa$ 取值进行改变, 使系统稳定到周期轨道上. 按此方法操作令 $2\Delta = 1.15$  s,  $\kappa = -0.3$ 得到仿真控制结果如图7所示, 在 $t = 65$  s施加控制后, 系统摆脱混沌状态, 被稳定到 $P = 1$ 的周期轨道上.



(a) 控制过程



(b) 被稳定住的吸引子

图7 周期脉冲控制过程及被稳定的吸引子

Fig. 7 The process of periodic impulsive perturbations control and the stabilized attractor

## 5 结论(Conclusions)

本文针对海上航行船舶非线性运动中存在的混沌现象,在船舶的混沌运动控制中引入脉冲参数微扰控制策略,提出了一种基于Melnikov方法的简捷船舶混沌运动周期脉冲参数微扰控制方法.基于提出的控制方法设计出操作方便的脉冲控制器,在保证控制效果的前提下具有更快的稳定速度,实现了对船舶混沌运动的简捷有效控制.最后,以某型舰船为例,对船舶混沌运动的周期脉冲参数微扰控制方法进行了仿真研究,得出以下结论:

1) 仿真结果表明,本文提出的控制方法能够对混沌状态下的船舶运动非线性模型实施简捷、有效地控制;

2) 在控制手段上,通过采用Melnikov方法建立受控系统Melnikov函数,从数学判据上确定了混沌控制时的脉冲控制参量取值范围,克服了采用参数试错法需要不断调整控制参量的缺陷;

3) 在实施控制时,调整脉冲控制参量可以将受控系统稳定到不同的周期轨道或不动点上,所设计的脉冲控制器结构简单,操作简便,具有潜在工程应用价值.

## 参考文献(References):

- [1] 刘胜,王宇超,傅荟璇.船舶航向保持变论域模糊-最小二乘支持向量机复合控制[J].控制理论与应用,2011,28(4):485-490.  
(LIU Sheng, WANG Yuchao, FU Huixuan. Variable universe fuzzy-least squares support-vector-machine compound control for ship course-keeping [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 24(4): 485 - 490.)
- [2] 黄谦,李天伟,杨绍清,等.船舶航行数据的相空间重构及混沌特性分析[J].计算机应用,2011,31(11):3157-3164.  
(HUANG Qian, LI Tianwei, YANG Shaoqing, et al. Analysis on phase space reconstruction and chaotic dynamic characteristic of ship's sailing data [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(11): 3157 - 3164.)
- [3] 王迎光,谭家华.船舶在随机海浪上的稳性和倾覆研究进展[J].船舶力学,2010,14(1/2):191-201.  
(WANG Yingguang, TAN Jiahua. Research progress on ship stability and capsizing in random waves [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(1/2): 191 - 201.)
- [4] AKKERMAN I, BAZILEVS Y, BENSON D J, et al. Free-surface flow and fluid-object interaction modeling with emphasis on ship hydrodynamics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2012, 79(1): 10905 - 10915.
- [5] 刘利琴,唐友刚.基于随机Melnikov方法的甲板上浪船舶混沌运动研究[J].船舶力学,2011,15(10):1075-1081.  
(LIU Liqing, TANG Yougang. Study on chaotic motion of ship with water on deck using random Melnikov method [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(10): 1075 - 1081.)
- [6] 罗伟林,邹早建,李铁山.船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制[J].控制理论与应用,2009,26(8):893-895.  
(LUO Weilin, ZOU Zaojian, LI Tieshan. Robust tracking control of nonlinear ship steering [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 893 - 895.)
- [7] 张显库,王坤飞.船舶横摇运动中的混沌及其非线性简捷控制[J].中国造船,2010,51(4):21-27.  
(ZHANG Xianku, WANG Kunfei. Chaos of ships rolling motions and its nonlinear simple and direct control [J]. *Shipbuilding of China*, 2010, 51(4): 21 - 27.)
- [8] 李芄,张晓宇,何晋,等.船舶运动控制中的非线性混沌及PID控制方法[J].舰船科学技术,2002,24(5):36-39.  
(LI Peng, ZHANG Xiaoyu, HE Jin, et al. The nonlinear chaos in ship movements control and PID controlling chaos [J]. *Ship Science and Technology*, 2002, 24(5): 36 - 39.)
- [9] 吴秀恒,刘祖源,施生达,等.船舶操纵性[M].北京:国防工业出版社,2005.  
(WU Xiuheng, LIU Zuyuan, SHI Shengda, et al. *Ship Maneuverability* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)
- [10] 于万波.混沌的计算实验与分析[M].北京:科学出版社,2008.  
(YU Wanbo. *Analysis and Calculation Experiments of Chaos* [M]. Beijing: Science Press, 2008.)
- [11] 高普云.非线性动力学—分叉、混沌与孤立子[M].长沙:国防科技大学出版社,2005.  
(GAO Puyun. *Nonlinear Dynamics—Bifurcation, Chaos and Soliton* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2005.)
- [12] KUNE M. *Non-Smooth Dynamical Systems* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [13] KUKUCKA P. Melnikov method for discontinuous planar systems [J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2007, 66(12): 2698 - 2719.
- [14] 罗晓曙,方锦清,王力虎.一种基于间歇性正比于系统参量的脉冲微扰控制混沌方法[J].物理学报,1999,48(12):2196-2201.  
(LUO Xiaoshu, FANG Jinqing, WANG Lihu. A method of controlling chaos based on intermittent proportional pulse perturbation to the system parameters [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(12): 2196 - 2201.)

## 作者简介:

黄谦 (1980-),男,博士研究生,目前研究方向为混沌时间序列分析及船舶航行中的混沌控制, E-mail: finalfanst@163.com;

李天伟 (1963-),男,教授,博士生导师,目前研究方向为航海装备信息处理、舰船航行控制, E-mail: tianweilee@sina.com;

杨绍清 (1965-),男,教授,目前研究方向为指控与火控信息处理, E-mail: xinxiijishu@hotmail.com;

李正友 (1978-),男,博士研究生,目前研究方向为航海装备信息处理, E-mail: 147006416@qq.com.