

# 基于极点配置的智能体 PID 运动控制器参数优化\*

张光磊<sup>1</sup>, 齐红<sup>1</sup>, 贾鹤鸣<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
2. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 针对智能体的运动控制问题, 以水面船舶减摇问题为例, 采用易于工程实现的经典 PID 控制器, 提出了一种以时间乘横摇和艏摇的绝对误差累积和为性能指标的单纯形优化算法来解决控制器参数优化正定问题, 该方法在理论推导出控制器参数的结果后再以实际系统输出做为优化的依据进行参数整定, 最终实现对横摇和艏摇的最优控制, 很大程度上提高了控制器的实用性; 同时由于横摇和和艏摇的频带特性之间的差异, 通过引入高通滤波器更好地解决了舵减横摇对航向影响的问题, 仿真结果表明单纯形算法优化的控制器参数提高了控制效果, 加入高通滤波器降低了舵减横摇对航向的影响。

**关键词:** 船舶减摇; PID 控制; 单纯形优化算法; 高通滤波器

中图分类号: TP27 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)04-0023-07

## Parameter Optimization of Agent PID Motion Controller Based on Pole Assignment

ZHANG Guanglei<sup>1</sup>, QI Hong<sup>1</sup>, JIA Heming<sup>2</sup>

(1. Information and Computer Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of motion control of intelligent agent, the surface ship anti rolling was taken as an example with using the classical PID controller, which is easy to implement in engineering. A kind of accumulation and the performance indexes of the absolute error in time by the roll and yaw of the simplex optimization algorithm were proposed to solve the controller parameters optimization positive problem. According to the actual system output, the controller parameters were deried for the optimization of the basis. The optimal roll and yaw control was ultimately achieved, and the practicability of the proposed controller was gratly improved. At the same time, due to the difference between the frequency characteristics of the roll and yaw, the high pass filter has better solved the rudder roll stabilization of course impact problem. The simulation results illustrated that the controller parameters of the simplex algorithm optimization of the control effect increased with the high pass filter and reduced the impact on the course of the rudder roll stabilization.

**Key words:** ship anti rolling; PID controll; simplex optimization algorithms; high pass filter

船舶舵减横摇技术是船舶运动控制的重点之一, 在 1972 年由 Cowley 和 Lamber 提出的, 其原

理是利用操舵产生的横摇力矩来抵消或部分抵消由海浪产生的横摇干扰力矩来达到减横摇的目的<sup>[1]</sup>。

\* 收稿日期: 2014-08-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (DL13BB04)

作者简介: 张光磊 (1978 年生), 男; 研究方向: 系统工程; 通讯作者: 齐红; E-mail: qhown@sohu.com

目前国内外对舵减横摇的研究已经提出了很多有效的控制方法,神经网络控制方法<sup>[2]</sup>、 $\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw \\ y = Cx \end{cases}$ 控制<sup>[3]</sup>、LQG 控制算法<sup>[4]</sup>、自适应控制<sup>[5]</sup>、变结构控制等各种控制方法<sup>[6]</sup>,本文基于易于工程应用的目的,采用工程中常用简单、易实现的 PID 控制算法设计控制器,同时为了能更好解决舵减摇对首摇的影响问题,在横摇控制器前加入一高通滤波器降低操舵对首摇的影响。但控制器参数的优化调整是个难题,为此本文提出了一种单纯形优化算法,以时间乘横摇和首摇的绝对误差累积和为性能指标的来解决该问题,使得参数选取更能满足设计的期望要求。单纯形优化算法的基本思想是在以初始点构造初始单纯形,再从初始单纯形出发,采用反射、延伸、压缩、缩小棱长等步骤形成新的单纯形以替换原有的单纯形,使新的单纯形不断向极小点靠近,直至搜索到极小点<sup>[7-11]</sup>。本文通过极点配置原理求得初始 PID 控制器参数,经单纯形算法优化得到最优控制器参数,实现舵减摇系统横摇误差和首摇误差综合性能最优的目的,达到最佳减摇效果,此算法解决了手动调参在短时间内难以调出一组满意的控制器参数的难题,且这种控制参数优化算法可以应用于其他一些控制算法,具有广泛应用的价值。

最后通过仿真验证得出:具有相对较快的舵速才能有更好的减摇效果,且随着舵速增大能降低对艏摇的影响;用单纯形算法优化后的控制器参数提高了减横摇效果;加入高通滤波器后降低了操舵对首摇的影响。

## 1 舵减横摇系统的数学模型

### 1.1 船舶运动模型

为了方便控制器设计,船舶的运动方程通常采用线性模型,即:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x = [v, r, \psi, p, \varphi]^T$ ,  $u = \delta$ ,  $w = [w_\varphi, w_\psi]$ ;  $v$ ,  $r$ ,  $\psi$ ,  $p$ ,  $\varphi$  分别为横荡速度,首摇角速度,首摇角,横摇角速度,横摇角;  $\delta$  为舵角,  $w_\varphi$ ,  $w_\psi$  海浪对横摇、首摇的扰动。

且知:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = p \\ \dot{\psi} = \frac{r}{\cos \varphi} \approx r \end{cases} \quad (2)$$

根据上述所给状态方程及文献 [1] 中的参数,在

航速为 7.8 m/s 的情况下,得:

$$A = \begin{bmatrix} -0.100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.276 & -0.600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0.650 & 0 & 0 & -0.189 & -0.396 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = [0.001 \quad -0.012 \quad 6 \quad 0 \quad -0.033 \quad 8 \quad 0 \quad 1]^T;$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0.600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.396 & 9 & 0 \end{bmatrix}^T;$$

输出向量  $y = [\psi \quad \varphi \quad 1]^T$ , 则

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

根据上述给出的状态空间模型,可以得到舵角到横摇角和首摇角的传递函数:

$$G_{\varphi\delta}(s) = \frac{-0.033 \ 8s + 0.002 \ 7}{s^3 + 0.289s^2 + 0.415 \ 8s + 0.396 \ 9} \quad (3)$$

$$G_{r\delta}(s) = \frac{-0.012 \ 6s - 0.001 \ 5}{s^3 + 0.7s^2 + 0.06s} \quad (4)$$

其中  $s$  表示频率响应的复变量。

### 1.2 海浪干扰建模

考虑产生船舶横摇运动的海浪干扰计算时,一般采用 P-M 谱或是 ITTC 双参谱,本文采用线性化的海浪模型<sup>[7]</sup>:

$$w_\psi(s) = h_1(s)w(s) \quad (5)$$

$$w_\varphi(s) = h_2(s)w(s) \quad (6)$$

式中:  $w_\psi(s)$  和  $w_\varphi(s)$  分别表示船舶艏向和横向的海浪干扰传递函数;

$$h_1(s) = \frac{2\zeta_0\omega_0\sigma_1s}{s^2 + 2\zeta_0\omega_0s + \omega_0^2},$$

$$h_2(s) = \frac{2\zeta_0\omega_0\sigma_2s}{s^2 + 2\zeta_0\omega_0s + \omega_0^2},$$

$w(s)$  为零均值的 Gaussian 白噪声过程;

其中  $\sigma_i (i = 1, 2)$  是一个描述波浪强度的常数,  $\zeta$  是阻尼系数,而  $\omega_0$  是主导海浪频率。

在线性模型中的主导频率应该和同一条件下海浪的 ITTC 谱中出现频率最高的频率相等。

$$\omega_0 = 4 \sqrt{\frac{4}{5} \times \frac{691}{T_w^4}} = \frac{4.85}{T_w} \quad (7)$$

$\sigma_i$  的值为:  $\sigma_i = \sqrt{0.018 \ 5 \ T_{wi} h_{\perp}^{\frac{1}{3}}}$

已经通过仿真验证,线性谱可近似为 ITTC 双参波谱中的  $S(\omega)$ 。可以用一个线性海浪模型代替复杂的非线性海浪模型。横摇运动模型中得干扰模型  $w(s)$  可以用线性化的海浪模型近似代替。

## 2 控制器设计

### 2.1 PID 控制器设计

由于用航向舵来控制减摇和航向两个输出，可以将舵指令分解为：

$$\delta = \delta_{roll} + \delta_{yaw} \quad (8)$$

其中： $\delta_{roll}$  是用来控制横摇运动， $\delta_{yaw}$  用来保持航向。如果采用 PD 控制，则：

$$\delta_{roll} = - (k_{p1}e_1 + k_{d1}\dot{e}_1) \quad (9)$$

$$\delta_{yaw} = - (k_{p2}e_2 + k_{d2}\dot{e}_2) \quad (10)$$

式中： $e_1 = \varphi_r - \varphi$ ， $e_2 = \psi_r - \psi$ ，期望横摇  $\varphi_r = 0$ ，期望航向  $\psi_r$  根据需求来确定。这样有：

$$\delta = k_{p1}e_1 + k_{d1}\dot{e}_1 + k_{p2}e_2 + k_{d2}\dot{e}_2 \quad (11)$$

其中， $k_{p1}$ ， $k_{d1}$  代表横摇控制器的比例系数和微分系数， $k_{p2}$ ， $k_{d2}$  代表舵摇控制器的比例系数和微分系数，考虑  $v = \dot{v} = 0$  时，有：

$$s^2 + 0.189s + 0.397 = 0.034\delta_{roll} \quad (12)$$

$$1.667s^2 + s = 0.021\delta_{yaw} \quad (13)$$

本文依据极点配置思想来获取 PID 控制器参数，取  $\omega_\varphi, \zeta_\varphi$  为期望的关于横摇的自然频率和阻尼系数， $\omega_\psi, \zeta_\psi$  为期望的关于首摇的自然频率和阻尼系数。

把式 (7)、(10) 代入式 (12)、(13) 可知：

$$\begin{aligned} 0.189 + 0.034k_{d1} &= 2\zeta_\varphi\omega_\varphi \\ 0.397 + 0.034k_{p1} &= \omega_\varphi^2 \\ 0.6 + 0.0127k_{d2} &= 2\zeta_\psi\omega_\psi \\ 0.0127k_{p2} &= \omega_\psi^2 \end{aligned} \quad (14)$$

根据实际需求选取期望值： $\omega_\psi = 0.35\text{rad/s}$ ， $\zeta_\psi = 1.0$ ， $\omega_\varphi = 0.7\text{rad/s}$ ， $\zeta_\varphi = 0.5$ 。

这样可计算得出：

$$\delta = -2.74e_1 - 15.03\dot{e}_1 - 9.65e_2 - 7.87\dot{e}_2 \quad (15)$$

### 2.2 控制器参数优化

对于上述给定的控制器参数，可以采用单纯形算法进行进一步优化。优化的目的：① 可以得到一组能使控制效果更为满意的参数。② 缩短手动调参的时间，解决短时间内难以调出一组更为满意的控制器参数的难题。

性能指标的选取：

不同的性能指标会反映不同的系统性能，本文选取积分性能指标函数因为它能反映控制系统动态响应的综合性能。

性能指标选为

$$J = \int_0^{+\infty} t [ |e_1(t)| + |e_2(t)| ] dt \quad (16)$$

$e_1(t)$  为横摇误差； $e_2(t)$  为首摇误差。

使性能指标极小的物理意义：使系统在整个控制中的横摇误差（减摇效果）与首摇误差（航向跟踪误差）综合最优。单纯形法以其无需计算导数即可计算目标函数的值的特点得到广泛应用[11]。应用单纯形法优化控制器参数的计算过程由参考文献 [11] 给出。

### 2.3 高通滤波器

由系统的两个传递函数的波特图可知，横摇和首摇存在频带上的差异。

从图 1 中可以看出，首摇主要呈低频特性，横摇特性相对于首摇主要呈高频特性，二者存在一定的频带分离，在进行控制器设计时可以考虑通过频带特性，在减摇的同时尽量减小对首摇的影响。基于上述情况考虑在控制横摇时加上一高通滤波器，降低低频信号对系统的影响。高通滤波器的任务是把输入到横摇控制器中的  $\varphi$  的低频分量滤掉，其目的是防止由  $\varphi$  诱发的低频操舵运动对航向的影响<sup>[9]</sup>。加入高通滤波器的舵减横摇系统结构如图 2 所示。

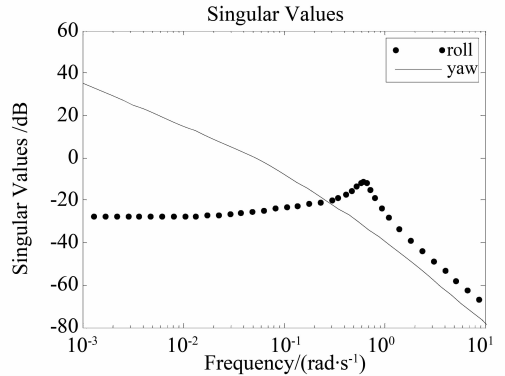


图 1 两个传递函数 bode 图

Fig. 1 Image of two transfer functions

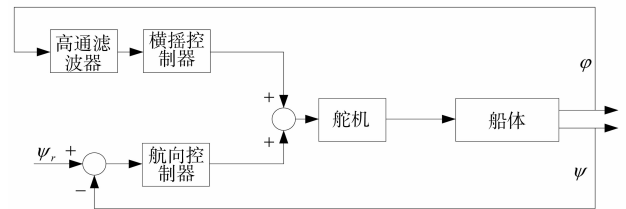


图 2 舵减横摇系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of rudder roll stabilization system

滤波器选为  $K(s) = \frac{s^2}{(s + 0.01)^2}$ ，其波特图如图 3。该滤波器将会把由横摇诱发的频率低于 0.01 rad/s 的低频操舵滤掉，降低低频操舵对首摇的影响。

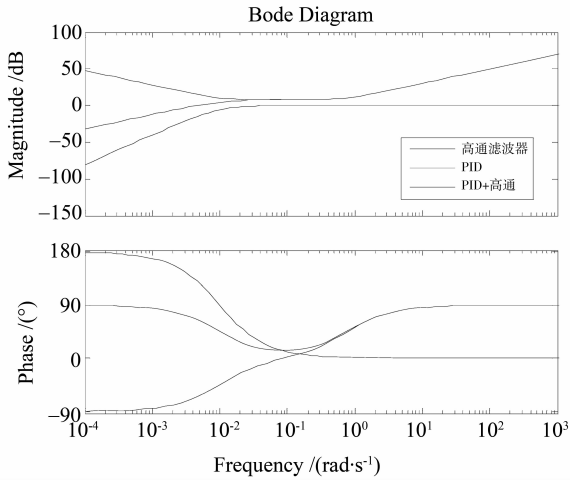


图 3 控制器波特图

Fig. 3 Port graph of the controller

### 3 仿真实例及分析

根据上面所设计舵减横摇系统的 PID 控制和船舶运动的数学模型, 可以建立 MATLAB/Simulink 仿真框图如图 4 所示。

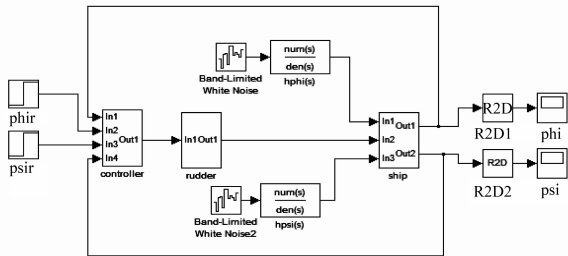


图 4 仿真框图

Fig. 4 Simulation frame

利用单纯形优化算法对控制  $K = [k_{p1}, k_{d1}, k_{p2}, k_{d2}]$ , 进行优化整定,

在四级海况下,  $T_w = 8\text{ s}$ ,  $h_{\frac{1}{3}} = 3\text{ m}$ ,  $\zeta = 0.3$  时, 遭遇角为  $45^\circ$  时, 无控制时船舶运动仿真 (图 5)。

加入控制器后:

1) PID 控制: 随着舵速改变的船舶运动输出  
设定航速  $U = 7.8\text{ m/s}$ ,  $\delta_{\max} = 35^\circ$

根据减摇率计算公式:

$$\text{减摇率} = \frac{\sqrt{D(\varphi_0)} - \sqrt{D(\varphi)}}{\sqrt{D(\varphi_0)}} \times 100\%$$

$\sqrt{D(\varphi_0)}$ : 无减摇控制器时横摇角标准偏差。

$\sqrt{D(\varphi)}$ : 加入减摇控制器后横摇角标准偏差。

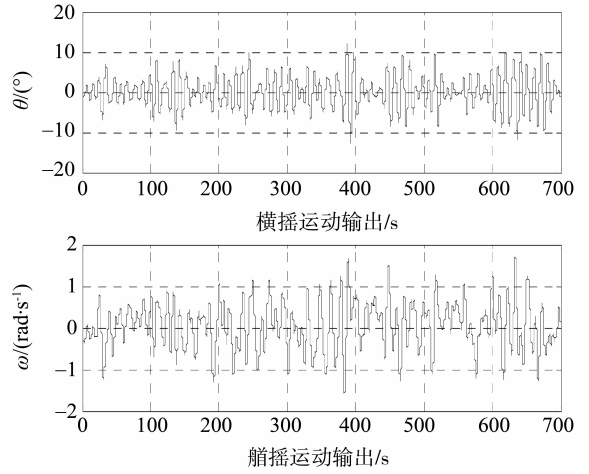


图 5 无控制时的船舶运动输出

Fig. 5 Ship motion output without controll

$\sqrt{D(\psi)}$ : 航向角标准偏差。

在航速一定的情况下,  $\dot{\delta}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$  时, 减摇率只有 25%,  $\dot{\delta}_{\max} = 15^\circ/\text{s}$  时, 减摇率为 42%, 而  $\dot{\delta}_{\max} = 20^\circ/\text{s}$  时, 减摇率达到 58%, 可以看出具有相对较快的舵速才能有更好的减摇效果, 且随着舵速增大能降低了对艏摇的影响 (图 6)。

2) 具有单纯形优化算法的 PID 控制 (图 7)。

设定初始控制器参数为:  $k_{p1} = 2.74$ ,  $k_{d1} = 15.03$ ,  $\dot{\delta}_{\max} (^\circ/\text{s})$ ,  $k_{d2} = 7.87$ 。如表 1 所示给出单纯形优化算法后的控制器参数和船舶运动输出结果。

表 1 控制器优化参数结果

Table 1 The results of controller parameter optimization

$\dot{\delta}_{\max}$	$k_{p1}$	$k_{d1}$	$k_{p2}$	$k_{d2}$
$8^\circ/\text{s}$	1.37	18.16	9.34	8.17
$15^\circ/\text{s}$	3.03	16.17	8.36	9.23
$20^\circ/\text{s}$	0.98	18.35	10.02	8.59

由图 8 可知:  $\dot{\delta}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$  时, 减摇率达 30%,  $\dot{\delta}_{\max} = 15^\circ/\text{s}$  时, 减摇率达 41%,  $\dot{\delta}_{\max} = 20^\circ/\text{s}$  时, 减摇率达到 60%, 图 9 与图 8 做对比可以看出: 用单纯形算法优化后的控制器参数使得减摇效果更好, 对艏摇也有所改善。

3) 加入高通滤波器的船舶运动输出

设定航速  $U = 7.8\text{ m/s}$ ,  $\delta_{\max} = 35^\circ$

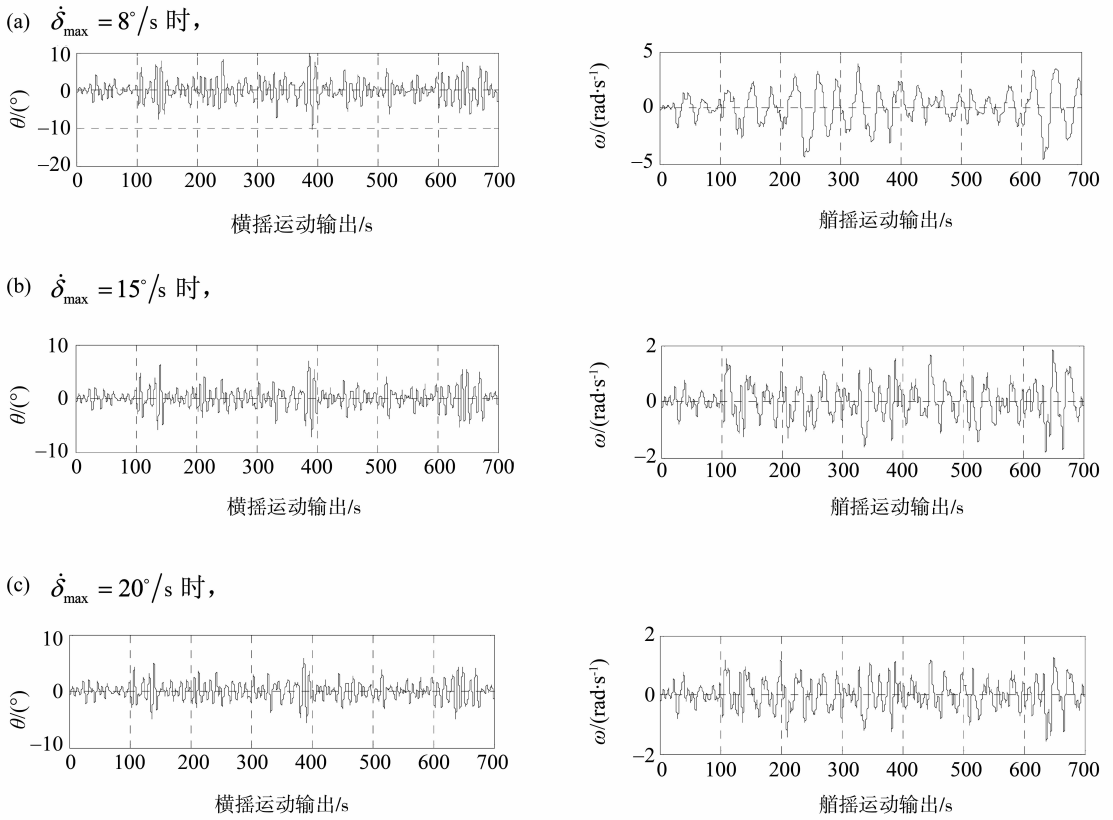


图 6 随舵速变化船舶运动输出

Fig. 6 Ship motion output with the change of the speed of the rudder

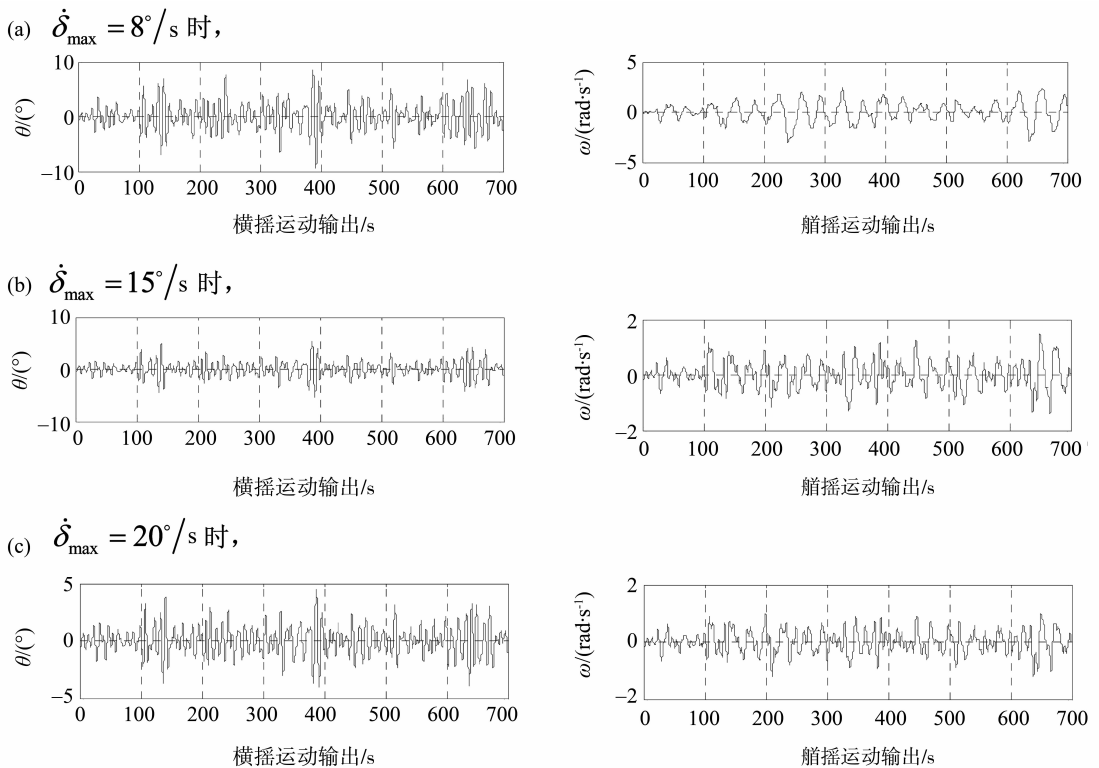


图 7 具有单纯形优化算法的船舶运动输出

Fig. 7 Ship motion output with the simplex optimization algorithm

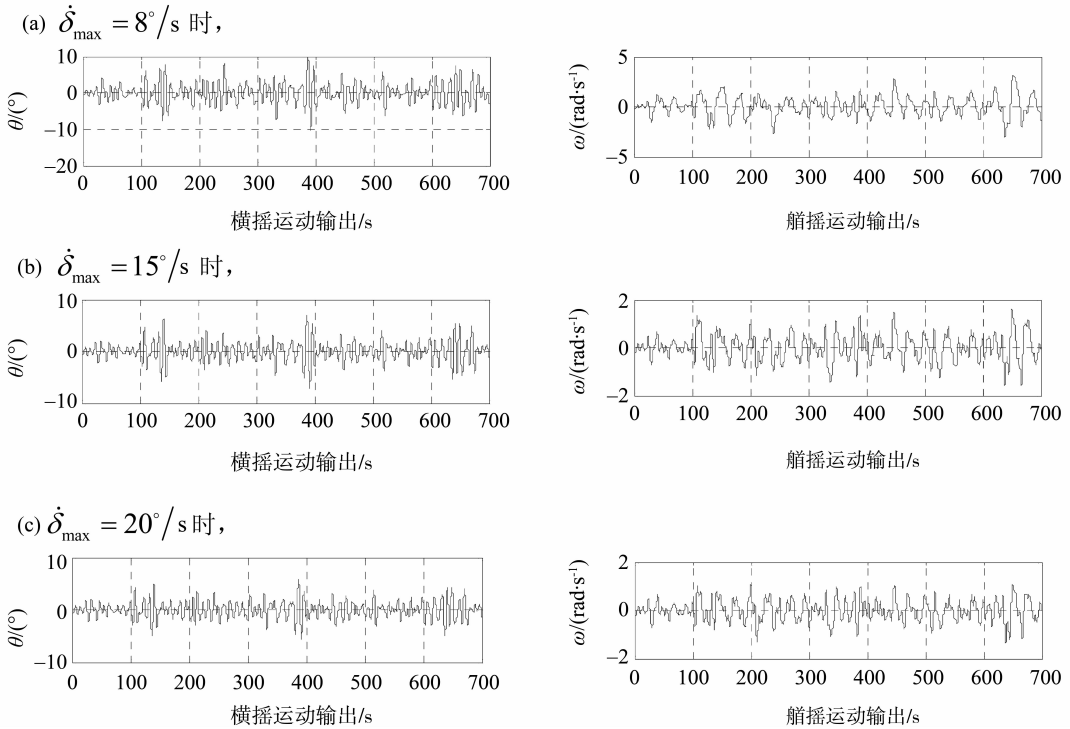


图 8 加入高通滤波器的船舶运动输出

Fig. 8 Ship motion output with high pass filter

表 2 减摇率

Table 2 roll reduction rate

$\dot{\delta}_{\max}$ ( $^{\circ}/s$ )	8	15	20	
Case 1	$\sqrt{D(\varphi)}$	2.170 5	1.861 3	1.579 0
	$\sqrt{D(\psi)}$	0.780 4	0.585 4	0.463 6
	reduction	33.51%	42.98%	51.63%
Case 2	$\sqrt{D(\varphi)}$	1.794 5	1.529 5	1.277 2
	$\sqrt{D(\psi)}$	0.634 1	0.482 3	0.372 2
	reduction	45.03%	53.14%	60.87%
Case 3	$\sqrt{D(\varphi)}$	1.817 2	1.548 9	1.271 3
	$\sqrt{D(\psi)}$	0.524 8	0.422 0	0.335 7
	reduction	44.33%	52.55%	61.05%

其中 case1, case2 和 case3 分别对应  $\dot{\delta}_{\max} = 8^{\circ}/s$ ,  $\dot{\delta}_{\max} = 15^{\circ}/s$  和  $\dot{\delta}_{\max} = 20^{\circ}/s$  三种工况的仿真结果。Case 1 仅在 PID 控制下的减摇情况；Case 2 具有单纯形优化的 PID 控制下的减摇情况；Case 3 具有高通滤波器的减摇情况。

通过上面的几组不同工况的仿真实验可以看

出, 本文采用单纯形算法优化获得最优控制器参数, 实现舵减摇系统横摇误差和艏摇误差综合性能最优的目的, 达到更好的减摇效果, 此算法解决了手动调参在短时间内难以调出一组满意的控制器参数的难题, 在海况发生变化时可以实时由本文的方法学习得出减摇控制需要的参数变量, 具有很好的工程实用价值和工程应用前景。

## 4 结 语

本文运用易于工程实现的 PID 控制算法, 采用积分性能指标, 应用单纯形优化算法对 PID 控制器参数进行优化, 实现了舵减横摇的优化控制, 缩短了控制器参数的调整时间。通过加入高通滤波器降低了减横摇对首摇的影响。

仿真结果也表明了本文所提出单纯形控制参数优化方法是可行有效的, 与未进行参数优化的控制相比具有更好的控制效果, 因此具有一定的实际工程应用价值。同时, 这种控制参数优化算法可以应用于其他一些控制算法。

(下转第 36 页)

- 177.
- [9] BENKHALDOUN F, LARROUTUROU B, DENET B. Numerical investigation of the extinction limit of curved flames [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1989, 64:187-198.
- [10] 周凯元,李宗芬. 丙烷-空气剥燃火焰通过平行板狭缝时的淬熄研究[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17:111-118.
- [11] 周凯元. 气体爆燃火焰在狭缝中的淬熄[J]. *火灾科学*, 1999, 8: 22-32.
- [12] 周凯元,李宗芬,周自金. 波纹板阻火器对爆燃火焰淬熄作用的实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 1997, 27: 449-454.
- [13] 宋占兵. 预混气体在狭缝中的传播机理与熄灭条件的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [14] MINAEV S S, SERESHCHENKO E V, FURSENKO R V, et al. Splitting flames in a narrow with a temperature gradient in the walls [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, 45: 119-125.
- [15] 曲忠伟,颜事龙,马宏昊. 预混气体爆轰胞格结构定性仿真建模[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2013, 52(5):31-38.
- [16] 曲忠伟,马宏昊,林谋金. 预混气体爆轰波传播定性仿真建模研究[J]. *安徽工业大学学报*, 2013, 30(4): 430-434.
- [17] PIZZA G, FROUZAKIS C E, MANTZARAS J, et al. Dynamics of premixed hydrogen/air flames in microchannels [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 152: 433-450.
- [18] KURDYMOV V N, FERNANDEZ-TARRAZO E. Lewis number effect on the propagation of premixed laminar flames in narrow open ducts [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 128:382-394.

(上接第 28 页)

## 参考文献:

- [1] 杨承恩,贾欣乐,毕英君. 船舶舵阻横摇及其鲁棒性 [M]. 大连:大连海事大学出版社, 2001.
- [2] FUAT Alarcin, KAYHAN Gulez. Rudder roll stabilization for fishing vessel using neural network approach [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34:1811-1817.
- [3] 杨承恩,贾欣乐. 舵阻摇  $H_{\infty}$  控制器的设计 [J]. *中国造船*, 1999, 1:21-28.
- [4] BAITIS E, WOOLAVER D A, BECK T A. Ship roll stabilization in the U S Navy [J]. *J Naval Engineers*, 1989, 2: 43-53.
- [5] 沈建清,陈家和,赖延辉. 自适应准则的舵减横摇系统的仿真研究 [J]. *海军工程学院学报*, 1994, 6:44-51.
- [6] 罗凯,李俊,许汉珍. 舵减摇系统的滑动控制 [J]. *交通部上海船舶运输科学研究所学报*, 1999, 2:130-134
- [7] LAUVDAL T, FOSSEN T I, Rudder roll stabilization of ship subject to input ratesaturation using a gain scheduled control law [C] // *Proceeding of CAMS'98*. Fukuoka, Japan, 1998: 121-126.
- [8] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [9] 胡启庸,汪石真,魏纳新. 舵减横摇技术研究 [J]. *中国造船*, 1996, 5:25-31.
- [10] 魏纳新. 水面舰艇在高海情下的横摇运动姿态控制技术 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [11] 李国勇. 最优控制理论及参数优化 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [12] 张显库. 非脆弱鲁棒 PID 控制器设计 [EB/OL]. *中国科技论文在线*, 2009-03:205.
- [13] THOR I. Fossen. Guidance and control of ocean vehicles [M]. John Wiley and Sons, 1994.
- [14] FOSSEN I, STRANDJ P. Tutorial on nonlinear Backstepping: applications to ship control [J]. *Modeling Identification and Control*, 1999, 20(2):83-134.