

高海情下全浸式水翼艇姿态控制的研究

郑焱 赵乃真

(哈尔滨船舶工程学院自动控制系, 150001)

摘要: 本文根据随机最优跟踪控制理论, 对高海情下全浸式水翼艇翼航姿态的控制问题进行了研究. 讨论了跟踪信号为海浪这样的随机输入信号的跟踪控制问题, 研究了水翼艇的爬浪控制, 提出了具有积极意义的准爬浪控制规律. 最后, 对 PCH 水翼艇在五级海情下的翼航姿态进行了数学仿真, 结果表明: 本文的研究结果是正确的, 采用本文的准爬浪控制规律, 全浸式水翼艇在高海情下的翼航姿态控制可获得令人满意的效果.

关键词: 水翼艇; 随机最优跟踪控制; 仿真; 爬浪控制

1 问题的提出

水翼艇是一种速度快、适航性好的新型舰艇, 全浸式水翼艇通过控制浸深于气水界面之下的水翼, 可在汹涛中平稳地航行^[2], 但由于这种艇的水翼支柱长度是有限的, 在高海情下, 如果水翼艇仍平台翼航, 则不可避免地会出现艇体击水和水翼出水^[2], 艇体击水将使艇遭受到的瞬时阻力增加, 影响艇的寿命和航速, 水翼出水将导致水翼上瞬时升力的急剧下降, 引起艇的姿态剧烈变化, 不仅影响艇员的舒适感和武备系统的命中率, 甚至会影响艇的自身安全. 图 1 是作者对文献^[1]中水翼艇平台翼航时, 水翼出水失控条件下的纵向运动姿态的仿真曲线, 由图 1 看出, 研究全浸式水翼艇在高海情下的爬浪控制规律, 有效地减少艇体击水和水翼出水, 是非常必要的.

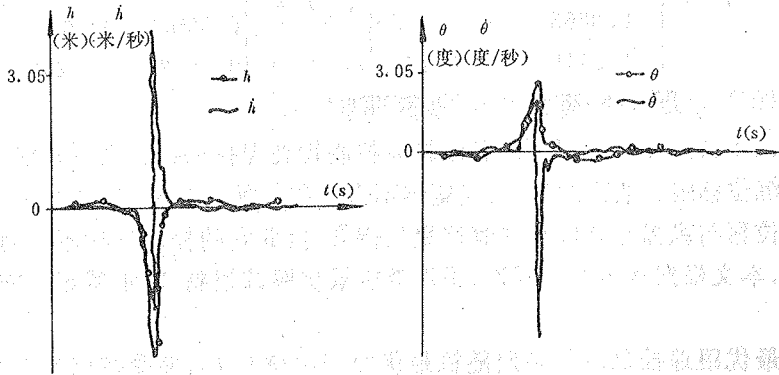


图 1 水翼出水时水翼艇姿态仿真曲线

2 数学模型的建立

水翼艇纵向运动方程为

$$\begin{cases} (m - Z_w \dot{h}(t) - Z_w h(t) - Z_h \dot{\theta}(t) - (Z_q + Z_w V) \theta(t) \\ \quad - (Z_o + Z_w V) \theta(t) = Z_o \delta_o(t) + Z_o \delta_f(t) + F_z(t), \\ (I_y - M_y \ddot{\theta}(t) - (M_q + M_w V) \dot{\theta} - (M_o M_w V) \theta(t) - M_w \dot{h}(t) \\ \quad - M_h h(t) - M_h \dot{h} = M_o \delta_o(t) + M_o \delta_f(t) + M_x(t). \end{cases} \quad (1)$$

式中的 $h(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为艇的升沉位移和纵摇角; $\delta_o(t)$ 和 $\delta_f(t)$ 分别为艇的前后水翼襟翼角; $F_z(t)$ 和 $M_x(t)$ 为海浪对艇的干扰力和干扰力矩。

将 PCH 艇参数代入(1)式, 其中 $M_w=0$, 得 PCH 水翼艇翼航时的纵向运动方程为

$$\begin{cases} \ddot{h}(t) + 6.06\dot{h}(t) + 0.338h(t) + 3.41\ddot{\theta}(t) + 42.4\dot{\theta}(t) + 454\theta(t) \\ \quad = -51.5\delta_o(t) - 62.9\delta_f(t) + 3.5F_z(t), \\ 0.016\ddot{h}(t) - 0.069\dot{h}(t) + \ddot{\theta}(t) + 8.45\dot{\theta}(t) + 0.651\theta(t) \\ \quad = 4.58\delta_o(t) - 1.88\delta_f(t) + 0.21M_x(t). \end{cases} \quad (2)$$

令 $x_1=h; x_2=\dot{h}; x_3=\theta; x_4=\dot{\theta}$, 将所得状态方程离散化, 其离散状态方程为

$$X(k) = \Phi_1 X(k-1) + \Psi U(k-1) + \Gamma W(k-1). \quad (3)$$

其中

$$X(k) = [x_1(k), x_2(k), x_3(k), x_4(k)]^T,$$

$$U(k) = [\delta_o(t), \delta_f(t)]^T,$$

$$W(k) = [F_z(k), M_x(k)]^T,$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 0.9896 & 0.1100 & -6.6411 & -0.4431 \\ -0.0120 & 0.2387 & -55.6848 & -4.5799 \\ 0.0010 & 0.0009 & 1.0532 & 0.1005 \\ 0.0074 & 0.0059 & 0.2800 & 0.2146 \end{bmatrix},$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} -1.1195 & -0.7793 \\ -10.3450 & -6.1657 \\ 0.0665 & -0.0159 \\ 0.5115 & -0.1457 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0516 & -0.0157 \\ 0.4336 & -0.1731 \\ 0.0005 & 0.0026 \\ 0.0027 & 0.0206 \end{bmatrix}.$$

3 高海情下水翼艇的姿态控制规律研究

全浸式水翼艇在高海情下的爬浪翼航控制旨在保持纵摇运动尽可能小的条件下, 控制艇的升沉位移跟上波面的变化, 使艇体不击水和水翼不出水。由(2)式看出, 水翼艇翼航时的升沉位移与纵摇角之间存在着严重的耦合, 因此它的控制规律不能简单地使用古典控制理论, 本文根据状态空间理论, 采用随机最优跟踪控制, 对水翼艇的爬浪控制规律进行了研究。

随机最优跟踪控制就是确定随机最优控制规律 $U(k)$, 使受控状态变量 $X(k)$ 能有效地跟踪输入变量 $X_r(k)$ 的变化, 并使性能指标

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} [(X(k) - X_r(k))^T Q_o [X(k) - X_r(k)] + U(k)^T R_o U(k)] \right. \\ \left. + [(X(N) - X_r(N))^T Q_o [X(N) - X_r(N)]] \right\} \quad (4)$$

达到极小。

根据爬浪控制的含义, $X_r(k) = [\xi(k), \dot{\xi}(k), 0, 0]$, 其中 $\xi(k)$ 为海浪波高信号; $\dot{\xi}(k)$ 为

4期

海浪波高变化率信号,纵摇角和纵摇角速度给定信号在此取为零.为了将(4)式转化为状态调节器问题,还需建立输入信号的递推模型

$$X_r(k) = \Phi_2 X_r(k-1). \tag{5}$$

由于海浪的随机性,无法建立线性定常输入模型(5)式,但海浪的能量主要分布在一个有限的频段内,于是可用包含海浪主要信息的正弦波 $A \sin \frac{2\pi}{T_0} t$ 代替输入信号 $\xi(t)$,建立参考输入模型.海浪波面周期的无因次量 η 的概率密度函数为^[3]

$$f(\eta) = \frac{1}{2(1+\eta^2)^{3/2}}. \tag{6}$$

式中 $\eta = (T/\bar{T} - 1)/\gamma$, \bar{T} 为海浪波面平均周期, T 为海浪周期, γ 为与谱密度有关的一个无因次量, η 的概率密度曲线如图 2 所示,由图 2 看出,海浪波面的周期 T 在其平均周期 \bar{T} 的邻域内出现的概率最大,计算也表明,对应海浪能量谱的峰值周期 T_{max} 也接近 \bar{T} ,于是取 $T_0 = \bar{T}$. 这样就有

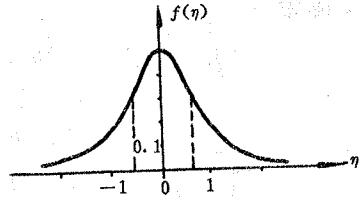


图 2 η 的概率密度函数曲线

$$x_{r1}(t) = A_1 \sin \frac{2\pi}{T_0} t, \quad x_{r2}(t) = \dot{x}_{r1}(t), \tag{7}$$

$$x_{r3}(t) = A_2 \sin \frac{2\pi}{T_0} t \quad (A_2 \rightarrow 0), \quad x_{r4}(t) = \dot{x}_{r3}(t).$$

对应五级海情代入 T_0 参数,并将其离散化,得到了参考输入信号的递推模型.如(5)式所示,其中矩阵 Φ_2 为

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 0.9782 & 0.1985 & 0 & 0 \\ -0.2176 & 0.9782 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9782 & 0.1985 \\ 0 & 0 & -0.2176 & 0.9782 \end{bmatrix},$$

考虑(3)式和(5)式,可得状态扩充的数学模型为

$$\begin{bmatrix} X(k+1) \\ X_r(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 \\ 0 & \Phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(k) \\ X_r(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi \\ 0 \end{bmatrix} U(k) + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} W(k). \tag{8}$$

令 $X_a(k) = [X(k)^T, X_r(k)^T]^T$, 则(4)式转化为

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} [(X_a(k)^T Q_{\alpha} X_a(k) + U(k)^T R_{\alpha} U(k)) + X_a^T(N) Q_{\alpha} X_a(N)] \right\}. \tag{9}$$

于是,问题转化为状态调节器问题.

其中

$$Q_{\alpha} = [I, -I]^T Q_0 [I, -I], \quad R_{\alpha} = R_0.$$

对应(9)式的最优控制规律为

$$U(k) = - [K_1(k) \hat{X}(k) + K_2(k) X_r(k)]. \tag{10}$$

式中控制增益矩阵 $K_1(k)$ 和 $K_2(k)$ 分别由下式确定

$$\begin{cases} K_1(k) = [R_0 + \Psi^T P_{o11}(k+1) \Psi]^{-1} \Psi^T P_{o11}(k+1) \Phi_1, \\ P_{o11} = \Phi^T P_{o11}(k+1) \Phi_1 + Q_0 - \Phi^T P_{o11}(k+1) \Psi \\ \quad [R_0 + \Psi^T P_{o11}(k+1) \Psi]^{-1} \Psi^T P_{o11}(k+1) \Phi_1, \\ P_{o11}(N) = Q_0. \end{cases} \tag{11}$$

和

$$\begin{cases} K_2(k) = [R_c + \Psi^T P_{o11}(k+1)\Psi]^{-1} \Psi^T P_{o12}(k+1)\Phi_2, \\ P_{o12}(k) = \Phi\{P_{o12}(k+1)\Phi_2 - Q_c - \Phi^T P_{o11}(k+1)\Psi \\ \quad [R_c + \Psi^T P_{o11}(k+1)\Psi]^{-1} \Psi^T P_{o12}(k+1)\Phi_2, \\ P_{o12}(N) = -Q_c. \end{cases} \quad (12)$$

(10)式中的 $\hat{X}(k)$ 是 $X(k)$ 的估计值^[1].

由于系统具有完全能控性和完全能观性, Φ_2 的特征值在单位园上, 所以可离线求出常值增益矩阵 K_{o1} 和 K_{o2} ^[5]. 在 $Q_c = \text{diag}[5, 10, 0.6, 0.5]$, $R_c = \text{diag}[1, 1]$ 的条件下, 求得控制增益矩阵为

$$K_{o1} = \begin{bmatrix} 0.1115 & -0.0083 & 8.2032 & 0.8616 \\ -0.3228 & -0.0662 & -2.2221 & -0.5504 \end{bmatrix},$$

$$K_{o2} = \begin{bmatrix} 0.0953 & 0.1116 & -0.0637 & -0.0085 \\ 0.3976 & 0.1159 & -0.1191 & -0.0185 \end{bmatrix}.$$

应用上述控制规律及获得的增益矩阵 K_{o1} , K_{o2} , 即

$$u(k) = - [K_{o1}\hat{X}(k) + K_{o2}X_r(k)] \quad (13)$$

其中 $X_r(k) = [\xi, \dot{\xi}, 0, 0]$, 在五级海情下, 对 PCH 艇迎浪翼航时, 实现爬浪控制进行了实时数字仿真, 仿真程序框图如图 3 所示, 并且对跟踪误差 $\tilde{X}(k) = X(k) - X_r(k)$ 进行了统计计算, PCH 艇爬浪控制的姿态仿真曲线如图 4 所示, 其跟踪误差 \tilde{X} 的统计结果如表 1, 从仿真结果可以看出, 虽然严格的爬浪控制可使水翼艇准确地跟踪海浪波面的变化, 从而避免了艇体击水和水翼出水, 但带来的不足是这种控制规律会使艇的升沉位移、速度和加速度较大, 影响艇员的舒适感和战斗力, 并且浪费控制能量, 为此本文提出了一种准爬浪控制方案.

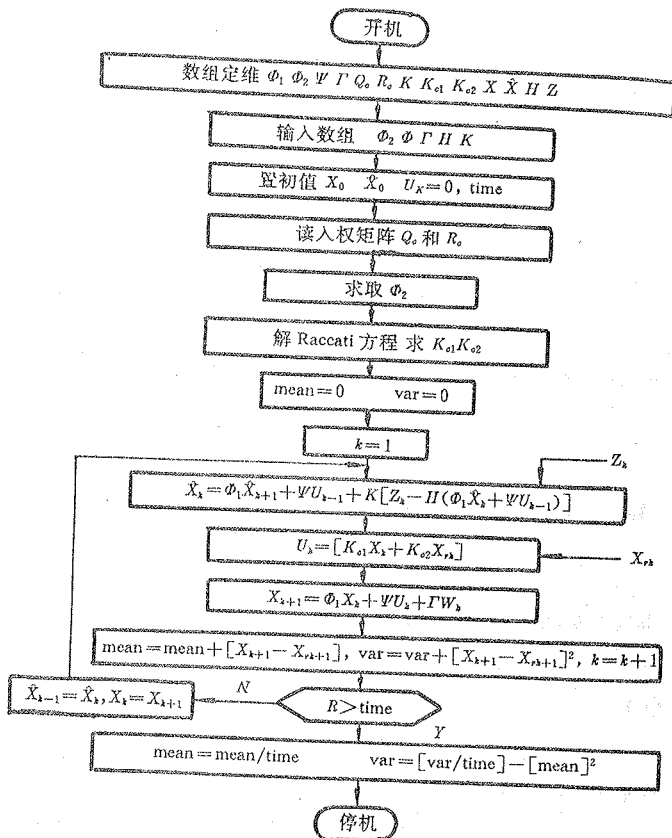


图 3 仿真程序框图

表 1 跟踪误差 \bar{x} 统计表

误差 统计值	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{x}_4
均 值	-0.01(米)	-0.002(米/秒)	-0.0007(度)	0.0017(度/秒)
方 差	0.0502(米 ²)	0.0961(米 ² /秒 ²)	0.0169(度 ²)	0.0249(度 ² /秒 ²)

4 水翼艇准爬浪控制

4.1 海浪波高的预报

由海浪理论知^[3], 海浪波面的运动无论在时间上还是在空间上均是随机的, 如何根据传感器获得的海浪波高信息, 准确地预报海浪波高, 对于实现准爬浪控制具有重要意义, 为此先对海浪波高序列进行建模和预报。

根据随机过程理论, 海浪波高序列 $\{\xi(n), n=1, 2, \dots, N\}$ 可认为是复杂的周期数据序列, 于是海浪波高序列 $\{\xi(n), n=1, 2, \dots, N\}$ 可由如下模型描述

$$\hat{\xi}(n) = \sum_{l=1}^M (\hat{a}_l \cos \frac{2\pi}{T_l} n + \hat{b}_l \sin \frac{2\pi}{T_l} n). \quad (14)$$

其中

$$\hat{a}_l = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \cos \frac{2\pi}{T_l} n, \quad \hat{b}_l = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \sin \frac{2\pi}{T_l} n.$$

对于(14)式所含的显著周期 $T_l (l=1, 2, \dots, M)$ 及周期个数 M , 采用周期图法来识别。

周期图的定义为

$$I(f_j) = N/2(a_j^2 + b_j^2), \quad j = 1, 2, \dots, K. \quad (15)$$

其中 $K = [N/2] = \begin{cases} N/2, & N \text{ 为偶数} \\ (N-1)/2, & N \text{ 为奇数} \end{cases}$, $a_j = N/2 \sum_{n=1}^N \xi(n) \cos \frac{2\pi}{N} jn$, $b_j = N/2 \sum_{n=1}^N \xi(n) \sin \frac{2\pi}{N} jn$, $f_j = j/N$. ($j=1, 2, \dots, K$). 为了从周期 $T_j = \frac{N}{j} = \frac{1}{f_j}$ 中识别出序列 $\{\xi(n), n=1, 2, \dots, N\}$ 的显著周期 T_l , 采用 Fisher 统计检验方法。设 I_{jl} 为 $\{I(f_j), j=1, 2, \dots, K\}$ 中的第 l 个

最大值, 则统计量

$$g_l = I_{jl} / \sum_{j=1}^K I(f_j), \quad l = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

服从 Fisher 分布^[4], 于是有

$$P\{g > g_l\} = C_{i-1}^{r-1} \sum_{i=0}^r (-1)^i C_{i-1}^{r-i} \frac{i+1}{i+l} [1 - (i+l)g_l]^{r-1}. \quad (17)$$

式中 r 是使 $1 - (r+l)g_l > 0$ 成立的最大正整数。对于给定的显著水平 α , 若 $P\{g > g_l\} < \alpha$ 成立, 则接受 $T_l = N/j$ 为 $\{\xi(n)\}$ 的一个显著周期, 否则不接受, 如此进行下去, 即可从 K

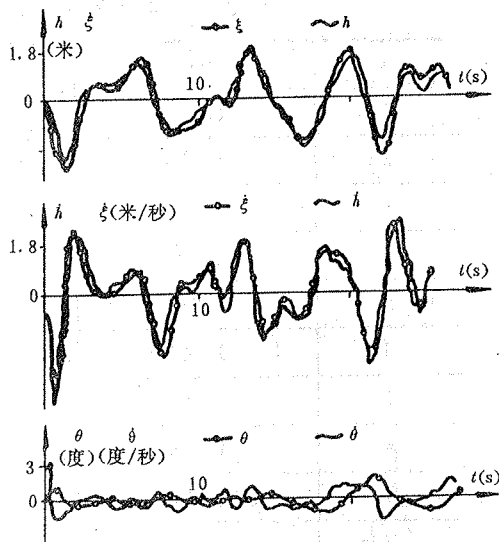


图 4 PCH艇爬浪控制姿态仿真曲线

中选出 M 个显著周期,从而得到海浪波高序列 $\{\xi(n), n=1, 2, \dots, N\}$ 的模型(14)式.

海浪波高的预报方法是根据海浪波面的相关性,利用海浪波高序列模型(14)式,采用函数外推的方法获得,即用(14)式中的 $\hat{\xi}(N+1), \dots, \hat{\xi}(N+l)$, 作为 $\xi(n)$ 在 $n=N+1, \dots, N+l$ 时刻的预报值,经过 l 步后 ($l < l$), 根据从传感器中获得的新数据 $\xi(N+1), \dots, \xi(N+l)$, 将原始数据中 $\xi(1), \dots, \xi(l)$ 刷新,从而用数据 $\xi(l+1), \dots, \xi(N+l)$ 来建模并预报 $n=N+l+1, \dots, N+l+l$ 时刻的波高值.

表 2 海浪波高真值、预报值、误差序列表

n	$\xi(n)$	$\hat{\xi}(n)$	$\bar{\xi}(n)$
1	0.844	1.162	-0.319
2	1.378	1.722	-0.344
3	1.633	1.930	-0.297
4	1.701	1.916	-0.215
5	1.676	1.811	-0.135
6	1.627	1.708	-0.080
7	1.594	1.651	-0.063
8	1.585	1.664	-0.079
9	1.592	1.707	-0.116
10	1.606	1.839	-0.233
11	1.632	1.752	-0.120
12	1.692	1.701	-0.009
13	1.826	1.727	0.099
14	2.073	1.872	0.201
15	2.460	2.164	0.296
16	2.977	2.595	0.382
17	3.573	3.118	0.455
18	4.157	3.645	0.513
19	4.610	4.059	0.550
20	4.807	4.677	0.130

在五级海情下,取 $N=600, l=15$ 的条件下,对上述海浪波高预报方法进行了数字仿真,其部分真值 $\xi(n)$ 、预报值 $\hat{\xi}(n)$ 、误差值 $\bar{\xi}(n) = \xi(n) - \hat{\xi}(n)$ 见表 2,其预报误差 $\bar{\xi}(n)$ 的均值和方差为

$$E\{\bar{\xi}(n)\} = 1/600 \sum_{i=1}^{600} \bar{\xi}(i) = 0.00079(\text{米}),$$

$$V\{\xi(n)\} = 1/600 \sum_{i=1}^{600} \xi^2(i) = 0.1109(\text{米}^2).$$

4.2 水翼艇准爬浪控制

准爬浪控制的定义:水翼艇在爬浪控制中,若采用如下控制规律

$$U(k) = \begin{cases} -K_{o1}\hat{X}(k), & \text{当 } |Y| < \frac{1}{2}H, \\ -[K_{o1}\hat{X}(k) + K_{o2}(BX_r(k))], & \text{当 } |Y| \geq \frac{1}{2}H. \end{cases} \quad (17)$$

其中 $Y = \max\{|\xi(k+1)|, |\xi(k+2)|, \dots, |\xi(k+l)|\}$, H 为前后翼的平均支柱长度, $B = 1.1 - H/Y$, K_{o1} 、 K_{o2} 、 $K_r(k)$ 、 $X(k)$ 与 (13) 式含义同, 则称此时的爬浪控制为准爬浪控制. 其物理含义是根据测量的海浪波高, 应用 4.1 中论述的方法预报出几秒时间内的海浪波高变化情况, 当预报的海浪波高峰值超过水翼支柱在静水面以上的长度, 或海浪波高谷点值低于水翼支柱在静水面以下的长度时, 则控制艇体跟踪与海浪波高成一定比例的输入信号, 其输入信号的比例 B 是根据使艇的升沉位移尽可能小, 同时又使艇体不击水、水翼不出水的原则计算出来的, 否则控制艇体平台翼航.

同在五级海情下, 对 PCH 水翼艇的准爬浪控制进行了实时数字仿真, 各个姿态的仿真曲线如图 5, 由图 5 看出, 与严格爬浪控制相比, 准爬浪控制既避免了艇体击水和水翼出水, 又达到了使艇的升沉位移、速度尽可能小的目的, 因此, 准爬浪控制是一种工程上可取的控制规律, 并具有积极意义.

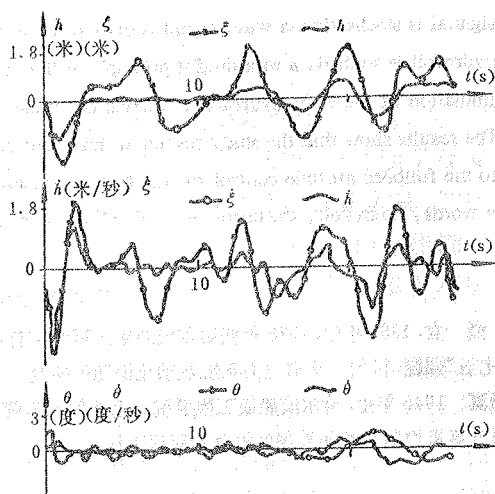


图 5 PCH 艇准爬浪控制姿态仿真曲线

5 结束语

通过本文的研究和数字仿真的结果, 可得如下结论

- 1) 全浸式水翼艇在高海情下翼航时, 为避免艇体击水和水翼出水, 应具有爬浪功能.
- 2) 对于跟踪信号为海浪这种随机量, 通过典型的正弦信号近似, 建立参考输入模型, 从而将跟踪控制问题转化为状态调节器问题, 仿真结果表明这种方法是可取的.
- 3) 严格的爬浪控制尽管也可达到艇体不击水, 水翼不出水的目的, 但准爬浪控制更具有积极的意义, 它可在使艇体不击水, 水翼不出水的前题下, 使得艇的姿态变化尽可能小, 这样既保持了艇的平稳性, 又节省了控制能量.
- 4) 本文的研究结果同样适用于其它随机最优跟踪控制问题.

参 考 文 献

[1] 赵希人, 刘胜. 水翼艇姿态随机最优控制. 自动化技术与应用, 1988, 7(1): 5-12

- [2] AD427002. Hydrofoil Control Study for Bureau of Ships. Final Report, 1974
- [3] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理. 北京: 科学出版社, 1984, 127—193
- [4] I. S. 达贝尔特, 凌福根译. 随机数据分析方法. 北京: 国防工业出版社, 1976
- [5] 蔡尚峰. 随机控制理论. 上海: 上海交通大学出版社, 1986, 176—181

The Study of the Attitude Control for the Fully Submerged Hydrofoil under Heave Scale Sea

ZHENG Yan and ZHAO Naizhen

(Haerbin Ship Building Engineering Institute · Haerbin, 150001, PRC)

Abstract: According to stochastic optimal follow-up control theory, the foilborn attitude control for the fully submerged hydrofoil under heavy scale sea is studied in this paper. The problem of follow-up control in which the tracing signal is stochastic sea wave signal is discussed and the problem of the attitude control of tracing sea wave for the hydrofoil is studied, a meaningful principle of the quasi tracing sea wave control is presented. Finally, the digital simulation of the PCH hydrofoil is carried out under five-scale sea wave in the computer and the result is given. The results show that the study results in this paper are correct. If the quasi tracing sea wave control law is applied to the foilborn attitude control for the fully submerged hydrofoil, the satisfactory result will be obtained.

Key words: hydrofoil; stochastic optimal follow-up control; simulation; tracing sea wave control

本文作者简介

郑焱 女, 1963年生. 1988年获哈尔滨船舶工程学院自动控制专业硕士学位. 毕业后参加关于水翼艇控制规律研究的“七五”课题. 目前正从事电力系统自动化课题的研究.

赵乃真 1945年生. 哈尔滨船舶工程学院自动控制系教师, 参加过惯性导航系统及水翼艇控制等课题研究. 目前主要从事计算机控制及智能控制的教学和科研工作.