

# Research for Ship Course Control System Based on Kalman Filter

Yang LIU<sup>1</sup>, Ying WANG<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

<sup>2</sup> College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

E-mail: lywy20071017@163.com

**Abstract:** The ship course control system based on Kalman Filer was designed. The ship dynamic model was acquired by system identification. On the base of fuzzy control, the detection of course error, system identification, and optimization are introduced. With the function of Kalman Filer optimizing parameters, the course keeping system can work self-adaptively. The result of system simulation showed that, compared with the *PID* control system, this system has good adaptive ability for the variety of ocean condition. This system is simple and feasible, and it has engineering application value.

**Key words:** course control; system identification; Kalman Filer; fuzzy control

## 基于卡尔曼滤波的船舶航向控制研究

刘 杨<sup>1</sup>, 王 莹<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup> 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

E-mail: lywy20071017@163.com

**摘 要:** 设计了基于卡尔曼滤波的船舶航向控制系统, 通过系统辨识得到船舶航向运动的数学模型, 通过在模糊控制的基础上引入航向误差检测环节、系统辨识环节和最优化环节, 利用卡尔曼滤波对参数的优化功能, 使航向保持系统能够自适应的工作。对系统进行仿真, 仿真结果表明, 与 *PID* 控制系统相比, 该系统对海情的变化具有良好的自适应能力。该系统简单可行, 具有工程应用价值。

**关键词:** 航向控制; 系统辨识; 卡尔曼滤波; 模糊控制

### 1 引言

本文研究船舶航向的自适应控制, 提出了一种新的自适应控制策略。通过在模糊控制的基础上引入航向误差检测环节、系统辨识环节和最优化环节, 既利用了卡尔曼滤波对参数的优化功能, 又使航向保持系统能够自适应的工作。仿真结果表明, 本文所设计的航向保持系统控制效果良好, 对海情的变化具有较好的适应能力。

### 2 船舶航向运动非线性模型

当只考虑艏摇、横摇、横荡三个自由度时, 忽略纵倾与升沉运动对上述三个自由度的影响, 得船舶三自由度运动非线性模型为:

$$J_{zG}\dot{r} = -J_{zz}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{|v|} |v| + N_{vvr} v^2 r + N_{vrr} vr^2 + N_{r|r} |r| + N_{\varphi} \varphi + N_{v|\varphi} v |\varphi| + N_{r|\varphi} r |\varphi| + N_R + N_D \quad (1)$$

$$J_{xG}\dot{p} = -J_{xx}\ddot{\phi} - 2N_u \dot{\phi} - Dh\phi - z_H (-m_y \dot{v} - m_x ur + Y_v v + Y_r r + Y_{|v|} v |v| + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 + Y_{r|r} |r| + Y_{\varphi} \varphi + Y_{v|\varphi} v |\varphi| + Y_{r|\varphi} r |\varphi|) + K_R + K_D \quad (2)$$

$$m(\dot{v} + ur) = -m_y \dot{v} - m_x ur + Y_v v + Y_r r + Y_{|v|} v |v| + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 + Y_{r|r} |r| + Y_{\varphi} \varphi + Y_{v|\varphi} v |\varphi| + Y_{r|\varphi} r |\varphi| + Y_R + Y_D \quad (3)$$

式中:  $J_{zG}$  为船体质量对  $z$  轴的惯性矩,  $J_{xG}$

为船体质量对  $x$  轴的惯性矩,  $m$  为船舶质量;  $m_y$  为横荡附加质量,  $m_x$  为纵荡附加质量,  $J_{zz}$  为艏摇附加转动惯性矩,  $J_{xx}$  为横摇附加转动惯性矩;  $Y$ 、 $N$  为粘性水动力系数,  $N(\dot{\phi})$  为横摇阻尼力矩,  $Dh(\phi)$  为横摇扶正力矩,  $D$  为船的排水量,  $h$  为横稳心高,  $z_H$  为船体横向力  $Y_H$  的作用点至船体重心的垂向距离;  $N_R$ 、 $K_R$ 、 $Y_R$  分别为舵产生的艏摇力矩、横摇力矩和横荡力,  $N_D$ 、 $K_D$ 、 $Y_D$  分别为海浪产生的艏摇干扰力矩、横摇干扰力矩和横荡干扰力;  $r$ 、 $p$ 、 $v$  分别为艏摇角速度、横摇角速度和横向速度,  $\phi$  为横摇角。

## 2 船舶航向运动数学模型的参数辨识

船舶航向运动数学模型的描述有多种, 对于航向保持系统, 一般工作于小舵角状态下, 因此可以采用常用的一阶 Nomoto 线性模型 (又称  $K-T$  方程):

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K(\delta + \delta_0) \quad (4)$$

式中:  $\psi$  为航向角,  $\delta$  为舵角,  $\delta_0$  为压舵角, 用以克服由于船舶不对称性或侧风、流等常值干扰的影响, 参数  $K$  和  $T$  取决于船舶的航速和几何尺寸等因素。在计入风、浪、流等不确定性干扰的情况下, 与(1)式相应的船舶航向运动模型离散形式为:

$$A(q^{-1})\psi(t) = q^{-1}B(q^{-1})\delta(t) + C(q^{-1})\xi(t) + d \quad (5)$$

式中:

$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1}$ ,  $C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1}$ ,  $\{\xi(t)\}$  为白噪声序列,  $d$  为常值干扰。

采用递推式增广最小二乘估计算法对系统参数进行辨识, 有:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[\psi(t) - \hat{\phi}^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (6)$$

$$K(t) = P(t-1)\hat{\phi}(t)/[\rho + \hat{\phi}^T(t)P(t-1)\hat{\phi}(t)] \quad (7)$$

$$P(t) = [1 - K(t)\hat{\phi}^T(t)]P(t-1)/\rho \quad (8)$$

式中:

$$\hat{\phi}^T(t) = [-\psi(t-1), -\psi(t-2), \delta(t-1), \delta(t-2), \xi(t-1), 1],$$

$\hat{\xi}(t) = \psi(t) - \hat{\phi}^T(t)\hat{\theta}(t)$ ,  $\theta^T = [a_1, a_2, b_0, b_1, c_1, d]$ ,  $\rho$  为遗忘因子, 取值范围为 0.95~0.99。

## 3 控制系统设计

船舶航向最优控制系统如图 1, 其中  $\psi_r$  为设定航向,  $\Delta\psi$  为航向角偏差,  $\delta_r$  为指令舵角。本文设计船舶航向模糊控制器, 根据自动舵的工作原理我们知道, 通过传感器测量可以得到船舶的航向角, 因此我们可以选择航向角偏差  $\Delta\psi$  作为模糊控制器的输入。另外, 为了反映偏差的变化趋势, 模糊控制器的输入还应加上航向角偏差的变化率。模糊控制器的输出为扶正力矩值。如图 2 所示,  $E$  代表航向角误差,  $EC$  代表航向角误差变化率,  $U$  代表控制器的输出量,  $k_e$ 、 $k_{ec}$  为量化因子,  $k_u$  为比例因子。

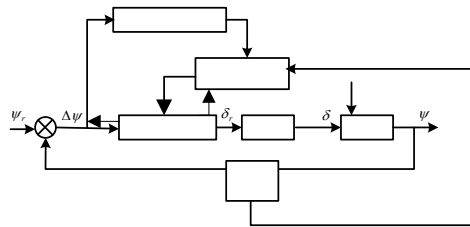


Figure 1 optimal control system diagram of ship course

图 1 船舶航向最优控制系统框图

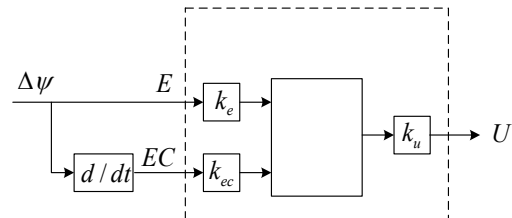


Figure 2 input and output diagram of fuzzy controller

图 2 模糊控制器输入输出示意图

舵机模型可看作是一阶惯性环节, 有:

$$\frac{\delta(s)}{\delta_r(s)} = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (9)$$

式中:  $T_1$  为一时间常数。

### 3.1 系统自适应设计

本文所设计的控制系统主要包括模型辨识、控制参数优化、航向角偏差检测等环节, 系统的自适应功能主要是通过航向偏差检测环节来实现的。具体工作过程如下: 当船舶处于某一海况下, 通过

辨识得出船舶航向运动的数学模型，并在该模型的基础上进行卡尔曼滤波最优优化参数的操作，将最优优化所得的参数赋给实际的航向保持系统，实船在该组控制参数下航行。在航行过程中，不断检测航向角偏差的数据统计值，若海情发生变化，船舶运动方程的参数随之改变，则现有的模糊控制器参数已不再适合新的船舶模型，此时控制效果必然变差，导致航向角偏差的数据统计值增大，当该值超出设定范围时，重新辨识模型并再次优化模糊控制器参数。系统工作流程如图 3。

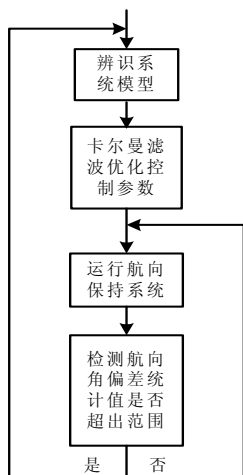


Figure 3 system work flow chart of optimal control course  
图 3. 航向保持最优控制系统工作流程图

### 3.2 航向角偏差检测环节

航向角偏差检测环节可通过每段时间间隔内航向角偏差的标准差  $\sigma(\Delta\psi)$  来表述，若有：

$$\sigma(\Delta\psi) \leq k \quad (10)$$

则认为系统在该段时间间隔内的航向控制精度满足要求，系统继续运行；反之则认为系统控制精度不满足要求，说明最优参数已不适合航向保持系统，此时重新辨识模型，进行新一轮的最优参数优化操作。其中  $k$  为一正数， $k$  的大小反映了对航向控制效果的要求，若船舶航行在恶劣的天气条件下，海情变化复杂，为了避免系统频繁的辨识和优化操作，可适当增大  $k$  值，使航向保持的精度降低。

### 3.3 最优估计参数

第一步，估计初始状态向量  $\hat{X}(k+1|k)$ ，

$$\hat{X}(k+1|k) = A(k+1, k)\hat{X}(k) \quad (11)$$

第二步估计说明初始估计的精确性，在这一步初始协方差矩阵  $P(k+1|k)$ ，

$$P(k+1|k) = A(k+1, k)P(k)A^T(k+1, k) + Q(k) \quad (12)$$

测定之后，计算最优增益矩阵  $K(k+1|k)$ ，

$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T(k+1)[H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (13)$$

第四步使用观测向量修正初始估计，

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[z(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1|k)] \quad (14)$$

最后，估计精度通过下一时刻的协方差矩阵进行计算，

$$P(k+1)P(k+1) = (I - K(k+1)H(k+1))P(k+1|k) \quad (15)$$

通过以上的周期性的估算，可以使用卡尔曼滤波的估计任意一个带有白噪声的线性系统的状态。

## 4 系统仿真及结果分析

基于上述分析，对某船舶建立航向保持实时仿真系统，实船运动方程采用式(1)~(3)。该船主要参数为：总长 260 m，水线长 252 m，船宽 46 m，吃水 14.8 m，排水量 13.79 万 t，舵面积 39 m<sup>2</sup>，展弦比 1.6，平衡系数 0.2，设计航速为 18 节。

在船舶的实际航行状态中，海情的变化是一个缓慢的过程。取仿真时间为 2000 秒，浪向角为 45 度，海浪的有义波高值在 600 秒处由 2.5 米变为 3 米，仿真中取每 400 秒内的航向角偏差的标准差作为判断海情是否发生变化的依据， $k$  为 0.5， $\lambda_1$  为 10。海浪艏摇干扰力矩仿真曲线见图 4，为了进行有效的对比，本文还对航向保持 PID 控制系统进行了仿真，仿真结果如图 5~6。

从仿真结果来看，当海情发生变化时，由 PID 优化的自动舵的控制效果明显变差，且舵角幅值变大，增加了舵机能耗。而本文设计的最优控制系统在重新辨识模型、优化参数后能较好的适应海情

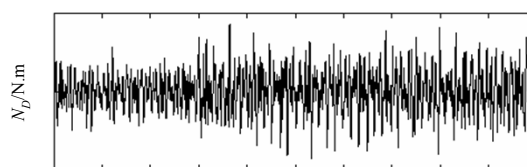


Figure 4 Simulation of wave disturbance torque bow rocking curve

图 4. 海浪艏摇干扰力矩仿真曲线

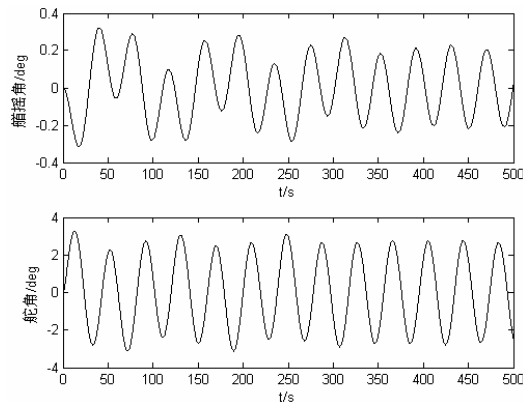


Figure 5 Simulation curve of Course Optimal Control System  
图 5. 航向最优控制系统仿真曲线

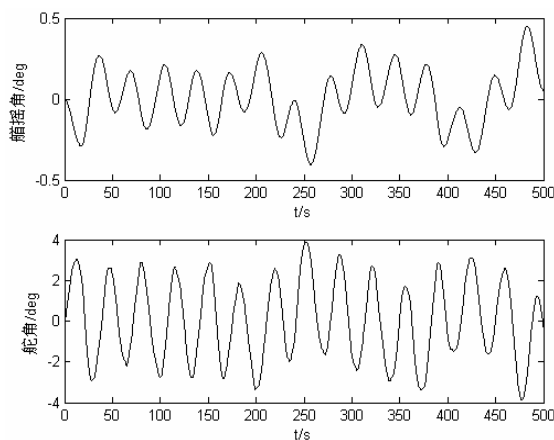


Figure 6 Simulation curve of course-keeping simplex PID control system  
图 6. 航向保持单纯形 PID 控制系统仿真曲线

的变化, 取得良好的控制效果。这主要是由于卡尔曼滤波具有较强的全局预测寻优能力, 而  $PID$  法对参数初值的选取十分敏感, 极易陷入局部最优, 导致寻优失败。

## 5 结论

本文设计了船舶航向最优估计控制系统, 首先通过航向偏差检测环节判断海情是否发生变化, 若海情发生变化, 则通过系统辨识环节得到船舶航向运动的数学模型, 并在模糊控制的基础上运用卡尔曼滤波优化参数, 最后将优化结果赋予实际的航向保持系统。仿真结果表明, 与  $PID$  控制系统相比, 该系统对于海情的变化具有较好的自适应功能, 同时, 由于参数整定及时, 有效地抑制了舵角幅值的增大, 节约了系统能耗。该系统简单、易于实现, 具有工程应用价值。

## Reference(参考文献)

- [1] Pascoal Ricardo, Guedes Soares C. Kalman filtering of vessel motions for ocean wave directional spectrum estimation[J]. Ocean Engineering. 2009: 477-488.
- [2] 李殿璞. 船舶运动与建模[M]. 国防工业出版社. 2008: 369-393.
- [3] 顾树生, 平力. 模糊控制系统稳定性分析及控制其设计[J]. 控制与决策. 1991(3): 178-183.
- [4] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型—机理建模与辨识建模[M]. 大连海事大学社. 1999: 16-18, 144-173.
- [5] Tanak K, Sugeno M. Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems[J]. Fuzzy Sets and Systems. 1992, 45(2): 135-156.