

# 船舶动力定位系统设计及试验研究

王 晓 声

(中国船舶科学研究中心)

## 提 要

本文把自适应卡尔曼滤波器理论和最优控制理论应用于典型的船舶动力定位系统。它是基于线性化的船舶运动方程,通过自适应卡尔曼滤波器对船舶在风、浪、流的作用下的高频运动和低频漂移分别进行估计,以保证定位控制仅仅对船的低频漂移进行补偿。本系统中的自适应滤波能自动适应海况的变化,以保证估计参数的精确。该系统设计已在中国船舶科学研究中心耐波性水池通过模型试验进行了验证。

## (一) 前 言

近年来,由于海上石油开采向深海发展,人们对于在深海作业的浮式生产系统(包括半潜平台,生产油轮)的系泊方式的研究日益重视。在一般水深情况下,浮式生产系统的系泊主要是采用悬链系统,但随着水深的增加,这种系统的悬链重量剧增,海上布链作业也变得复杂,从而使造价及作业安装费用猛增。浮式生产系统的动力定位系统,是利用推力器来提供反力和反力矩的,因此定位成本不是随水深而变的。由此可见,随着对深海资源的开发,以及深海救生技术的应用,对动力定位的研究具有十分重要的实际意义。

国外对动力定位系统的设计已作了大量的研究,并有广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。国内的研究工作虽近年来已有进展,但尚缺乏系统性。本文把自适应控制算法和现代控制理论结合起来,以达到自动适应环境变化的目的。在这个方法中,用固定增益的卡尔曼滤波估计低频运动,而高频运动则用一个参数模型来模拟,并用递推增广最小二乘法来估计参数,从而估计出船舶的高频运动。这个过程可叫做自适应,这样既达到了高频和低频分离的目的(因定位系统对船舶的波频振荡运动无需加于控制),又能适应海况的变化,显然这个方法具有一定的优越性。

本文除作了整套控制计算外,还对一艘20万吨油轮模型在耐波性水池中进行了动力定位全系统的模拟试验,取得了较好的效果。

---

本文于1990年8月22日收到

## (二) 系统描述

船舶及浮式平台在风、浪、流等环境力的作用下,将产生六个自由度的运动,而动力定位系统控制的只是水平面内的三个自由度运动,即纵荡、横荡、首摇。因此,为简化问题分析,我们也仅仅考虑这三个坐标的运动。另外,本文对船舶的低频运动和高频运动分别予以确定,而船舶总的运动是这两种运动的叠加。在工程上,一般船舶的定位仅考虑对低频运动进行控制,以节约控制功率。

### 1. 坐标系

为研究船舶在水平面内的运动,必须建立二个坐标系,一个是地球固定坐标系  $X_E O Y_E$ , 另一个是轴平行坐标系  $X O Y$ , 二个坐标系的  $Z_E (Z)$  轴均向上,  $XY$  平面与静水面重合,船舶低频运动方程就是建立在轴平行坐标系  $X O Y$  中,在每个采样周期中,均要通过这两个坐标系的转换来进行速度、位置及控制推力的估算和估计。其转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} Y \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_E \\ X_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

二个坐标系如图 1 所示。

### 2. 船舶低频和高频运动模型

对三自由度船舶低频运动微分方程进行线性化和解耦后,可建立以下离散化的船舶低频运动状态空间表达式:

$$\begin{cases} x_i(t+1) = A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i w_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \\ z_i(t) = y_i(t) + v_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

这里,

$$E\{w_i(t)\} = 0, \quad E\{w_i(k)w_i^T(m)\} = Q\delta_{km}$$

$$E\{v_i(t)\} = 0, \quad E\{v_i(k)v_i^T(m)\} = R\delta_{km}$$

式中,  $\delta_{km} = \begin{cases} 1 & k=m \\ 0 & k \neq m \end{cases}$ ,  $w_i(t)$  是均值为零的系统白噪声系列,  $v_i(t)$  是均值为零的量测白噪声系列。

这里  $x_i(t)$  为系统状态变量,  $y_i(t)$  为船舶低频运动,  $z_i(t)$  为总的船舶运动。

设状态转移矩阵  $A_i$ , 控制转移矩阵  $B_i$ , 干扰转移矩阵  $D_i$ , 观测矩阵  $C_i$  是已知的常值。

高频运动可用自回归滑动平均模型 (ARMA) 来模拟,并假设这个模型是渐近稳定的。

$$\begin{cases} y_h(t) = \frac{C_h(Z^{-1})}{A_h(Z^{-1})} \xi(t) \\ z_h(t) = y_h(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $C_h(Z^{-1}) = C_1 Z^{-1}$ ,  $A_h(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}$ ,  $C_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  的参数值是求知的,

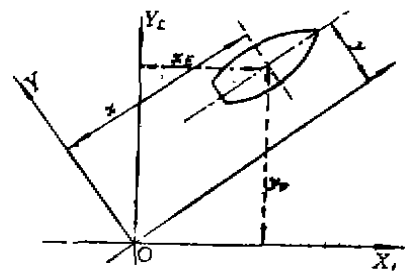


图 1 坐标转换

需进行实时估计,  $\xi(t)$  是一个独立的零均值随机系列, 与  $w_i(t)$ ,  $v_i(t)$  均互不相关。这里,  $y_h(t)$ 、 $z_h(t)$  为船舶高频运动。

船舶低频、高频运动模型如框图 2 所示。

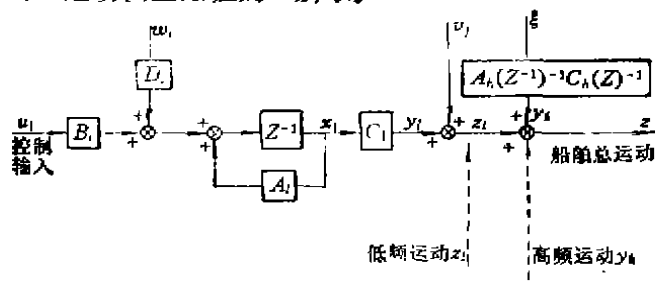


图 2 系统结构

### (三) 船舶低频运动估计

船舶动力定位的目的, 就是要通过控制若干个侧推器来控制船舶的低频慢漂运动  $z_l(t)$ , 而实际测量到的船舶运动  $z(t)$  应为低频运动  $z_l(t)$  和高频运动  $z_h(t)$  的叠加, 即

$$z(t) = z_l(t) + z_h(t) \quad (4)$$

现在要从整个船舶运动  $z(t)$  中估计出船舶低频漂移  $z_l(t)$ , 也就是估计出低频运动状态变量  $x_l(t)$ 。

卡尔曼滤波器就是在有随机干扰和噪声 ( $w_i(t)$ ,  $v_i(t)$ ) 的情况下, 以线性最小方差估计方法给出统计意义上最接近状态真值  $x_l(t)$  的估计值  $\hat{x}_l(t)$ , 有了状态最优估计值, 就可运用最优控制理论求出最优控制量  $u_i(t)$ 。

用于估计船舶低频运动的卡尔曼滤波算法为

预报器,

$$\begin{cases} \hat{x}_l(t+1/t) = A_l \hat{x}_l(t) + B_l u_i(t) \\ \hat{y}_l(t+1/t) = C_l \hat{x}_l(t+1/t) \end{cases} \quad (5)$$

估计器,

$$\begin{cases} \hat{x}_l(t+1) = \hat{x}_l(t+1/t) + K(t+1)[y_l(t+1) - \hat{y}_l(t+1/t)] \\ \hat{y}_l(t+1) = C_l \hat{x}_l(t+1) \end{cases} \quad (6)$$

由于船舶低频运动状态方程是可控和可观的, 所以卡尔曼滤波器一定是渐近稳定的。因此卡尔曼滤波增益矩阵  $K(t+1)$  也将趋于某个稳态值, 这对实时控制很有利。可以离线计算  $K(t+1)$ , 其公式为

$$P(t+1/t) = A_l P(t) A_l^T + D_l Q D_l^T \quad (7)$$

$$K(t+1) = P(t+1/t) C_l^T (C_l P(t+1/t) C_l^T + R)^{-1} \quad (8)$$

$$P(t+1) = (I - K(t+1) C_l) P(t+1/t) \quad (9)$$

循环计算, 直至  $K(t+1)$  趋于常值,  $P(t)$  为协方差矩阵。

以上估计器算法的关键是如何求出  $y_l(t+1) - \hat{y}_l(t+1/t)$ 。设预报误差  $e(t)$  为

$$\begin{aligned} e(t) &= y_1(t+1) - \hat{y}_1(t+1/t) \\ &= z(t+1) - y_h(t+1) - \hat{y}_1(t+1/t) \end{aligned} \quad (10)$$

$e(t)$  的估计式  $\hat{e}(t)$  为

$$\hat{e}(t) = z(t+1) - \hat{y}_h(t+1/t) - \hat{y}_1(t+1/t) \quad (11)$$

因此估计方程式可采用下列逼近式,

$$\text{估计器: } \hat{x}_1(t+1) = \hat{x}_1(t+1/t) + K(t+1)\hat{e}(t+1) \quad (12)$$

$$\hat{y}_1(t+1) = C_1 \hat{x}_1(t+1) \quad (13)$$

如何求得  $\hat{e}(t+1)$  将在下节讨论。

#### (四) 船舶高频运动估计

自适应滤波实际上是一种解决参数自动校正问题的方法, 是一个递推参数估计器, 它根据海况的变化实时估计出船舶高频运动, 进而求得  $\hat{e}(t+1)$ 。

按照 (二) 2 提出的假设, 船舶高频运动可用下列模型表示:

$$y_h(t) = \frac{C_h(Z^{-1})}{A_h(Z^{-1})} \varepsilon(t) \quad (14)$$

设船舶低频模型是已知的, 且从预报器已得到  $\hat{y}_1(t/t-1)$ , 因此令

$$m_h(t) = z(t) - \hat{y}_1(t/t-1) \quad (15)$$

根据文献 [5, 6], 可证明  $m_h(t)$  与  $\varepsilon(t)$  可建立如下 ARMA 模型 (这里不作详细推导)。

$$A(Z^{-1})m_h(t) = D(Z^{-1})\varepsilon(t) \quad (16)$$

式中,  $A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}$ ,  $D(Z^{-1}) = 1 + d_1 Z^{-1} + d_2 Z^{-2}$ 。

自适应算法如下:

第一步, 采样得到船舶总运动  $z(t)$ , 即可求得  $m_h(t)$ , 这个  $m_h(t)$  实际上是随着海浪变化而变化的, 再利用 ARMA 模型  $A(Z^{-1})m_h(t) = D(Z^{-1})\varepsilon(t)$ , 用递推增广最小二乘法 ELS 估计  $\hat{A}(Z^{-1})$ ,  $\hat{D}(Z^{-1})$  这样的参数估计必定能跟踪海况的变化。

第二步, 估计  $\hat{e}(t)$

$$\hat{e}(t) = \frac{\hat{A}(Z^{-1})}{\hat{D}(Z^{-1})} m_h(t)$$

这两个步骤在每次采样后均要重复。

#### (五) 最优控制器设计

本控制系统的设计是采用二次型性能指标来设计的, 系统控制方案框图如图 3 所示。

二次型性能指标为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E \left\{ \int_{-T}^T [(x_i - r_i)^T Q_0 (x_i - r_i) + u_i^T R_0 u_i] dt \right\} \quad (17)$$

关键是求得  $K_0$ , 以得到控制输出  $u_i(t) = -K_0 \hat{x}_1(t)$ , 使目标函数  $J$  为最小。



油轮主尺度见表 1。

表 1 油轮主尺度

名 称	符 号	模 型	船
船 长	$L_{PP}$ (m)	5.24	330.12
船 宽	$B$ (m)	0.857	53.99
吃 水	$T$ (m)	0.187	11.78
排 水 量	$D$ (t)	0.602	1505.28
浮心纵向位置	$L_{cb}$ (m)	0.14	8.82
绕 $z$ 轴惯性矩	$I_z$ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$ )	108.5	$1.077 \times 10^{11}$

下面列出横荡及首摇运动计算数据:

状态变量为

$$x_t(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{横荡速度} \\ \text{横荡位移} \\ \text{首摇角速度} \\ \text{首摇角位移} \\ \text{推力器 1} \\ \text{推力器 2} \end{matrix}$$

状态方程各矩阵为

$$A_t = \begin{bmatrix} -0.00294 & 0 & 0 & 0 & 0.00929 & 0.00929 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.000091 & 0 & 0.00777 & -0.00649 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

$$B_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 6.019 & 0 \\ 0 & 7.143 \end{bmatrix} \quad D_t = \begin{bmatrix} 0.00929 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.00492 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

卡尔曼增益矩阵  $K(t+1)$  及最优控制增益矩阵  $K_*$  为

$$K(t+1) = \begin{bmatrix} 0.00588 & 0 \\ 0.0585 & 0 \\ 0 & 0.00103 \\ 0 & 0.0247 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_0 = \begin{bmatrix} 7.44 & 0.67 & 9.49 & 0.74 & 0.038 & 0.0014 \\ 7.90 & 0.74 & -8.31 & -0.67 & 0.0017 & 0.036 \end{bmatrix}$$

### (七) 油轮模型动力定位试验

#### 1. 试验目的

本试验的目的是验证自适应卡尔曼滤波器及最优控制理论在 20 万吨级油轮模型的动力定位系统中应用的可行性。

#### 2. 测量和控制系统

本试验用六自由度适航仪测量船模运动, 实际试验中仅测量了纵荡、横荡及首摇等三个自由度的信号。

本试验用微机 (DPS-85) 进行实时控制, 依据采样定理, 我们取采样间隔  $\Delta T = 0.3s$ 。

#### 3. 推力系统

该系统由三个推力控制器, 三台电动机和三个推力器组成。推力器布置可如图 5 所示, 控制系统输出三个控制信号, 这三个控制信号被送给推力控制器来控制电动机的运转, 从而使推力器产生所需的推力。

#### 4. 环境条件

本试验在中国船舶科学研究中心耐波性水池内进行, 其造波、造流装置及船模位置如图 6 所示。

不规则波:  $H_{1/3} = 71.3mm$

$T_{01} = 1.31s$

流速:  $v_0 = 0.13m/s$

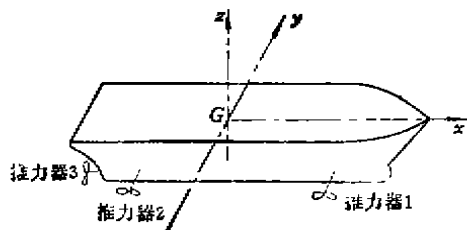


图5 推力布置图

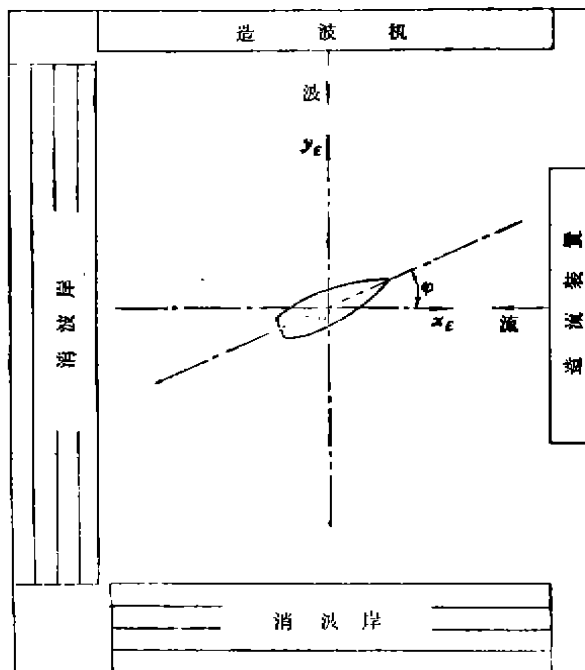


图6 船模位置图

## 5. 试验框图及结果

试验框图如图 7 所示, 在浪流作用下横荡运动如图 8 所示。

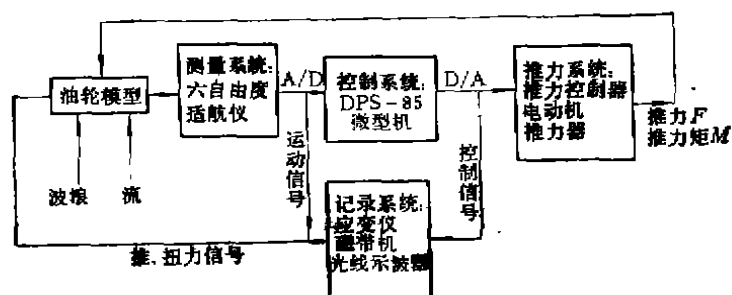


图 7 试验框图

整个试验情形如图 9 所示。

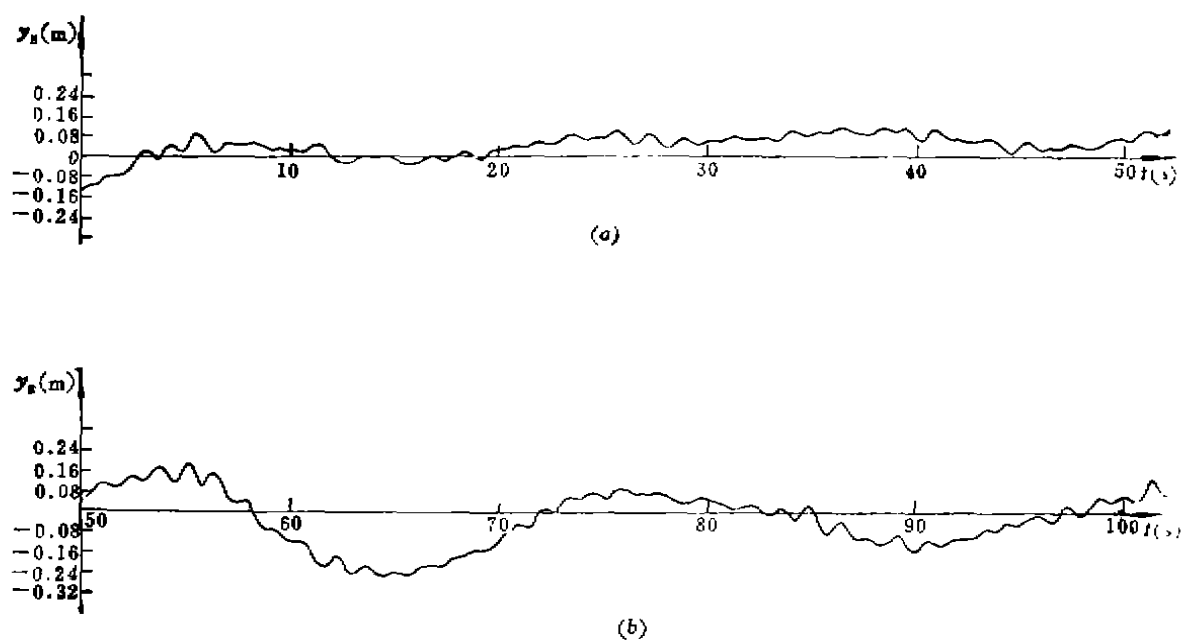


图 8 船模横荡运动图



图9 试验情况

#### (八) 小 结

从船模运动曲线来分析, 控制系统的工作是稳定的, 也是收敛的, 自适应卡尔曼滤波及最优控制的设计方案是可行的, 也是可靠的。

在波浪及流的作用下, 船模运动的控制精度在 $\pm 0.2\text{m}$ 左右。影响控制精度的因素有以下几点:

(1) 加权矩阵  $Q_0$ 、 $R_0$  不同, 精度亦不同, 但精度增加, 控制消耗功率也增加, 需折衷考虑。

(2) 由于推力器不仅产生所需的推力, 还会产生一个附加的干扰力和力矩。另外, 推力器之间, 推力器与船体之间均有相互干扰, 这些都将影响控制精度。

(3) 船模动态微分方程的误差, 也将影响控制精度。

(4) 由于本项研究的重点是将自适应卡尔曼滤波器理论和最优控制理论应用于典型的船舶动力定位系统, 因此关于推力器的选用未进行深入的工作。动力定位系统中的推力器, 由于潮流和波浪的影响, 以及推进器与船体, 推进器之间的相互影响, 因此推进器在实际情况下所发出的推力与敞水情况下的推力有很大的差别。近几年来邢文萍同志在荷兰水池曾与 U. Nienhus 等进行了合作研究, 对方位推进器及侧推器的尾流场进行了测量及预报<sup>[10~12]</sup>, 这将对在这方面研究工作进一步深入创造有利的条件。

(5) 继本项研究后, 相继对 20 万吨油轮的动力定位系统进行了第二轮的试验, 试验的内容包括: 在风、浪、流作用下, 油轮定位定向试验和油轮在缆绳系泊条件下, 作为油轮辅助动力定位的试验, 并在试验中增加了推力器推力的测量。

## 参 考 文 献

- [1] Horthull W P, Venealer H Adaptive Filter, U S Patent, No. 3686712, 1975, 2 (18).
- [2] Balchen J G Dynamic Positioning Using Kalman Filtering and Optimal Control Theory. AIOFO, 1976.
- [3] Balchen J G Dynamic Positioning of Floating Vessels Based On Kalman Filter. Proc. 19th, IEEE Conf. 1970.
- [4] Owen D G, Linfort, B L. Theoretical Analysis of Single-Point Mooring Behaviour. Proc. STSNAME, 1977.
- [5] Hagander, Wittenmark. Self-Tuning Filter for Fixed-Lag Smoothing. IEEE Trans. On Information Theory Vol IT-23, 1977, 5 (3)
- [6] Kailath T, Frost An Innovation Approach To Least Squares Estimation Part I -Linear Smoothing in Additive White Noise. IEEE Trans and Aut. Control Vol. AC-13.
- [7] 蔡尚峰. 随机控制理论. 上海: 交通大学出版社, 1987.
- [8] [美] D 格罗彼. 时间序列分析辨识与适应性滤波. 北京: 科学出版社, 1987.
- [9] 冯铁成. 船舶摇摆与操纵. 上海: 交通大学流体力学教研室, 1988.
- [10] 邢文萍 [Xing Wenping]. Analysis of Propeller Wake Survey by 2-Dimensional LDV. MARIN, 1988, 5
- [11] 邢文萍, Nienhuis U Laser Doppler Velocity Measurements in The Slip Stream of An Azimuthing Thruster (Preliminary). MARIN Rep. No. 50848-1-0E
- [12] Xing Wenping. Calculation On Numerical Prediction of Thruster Wake Field. MARIN, 1989, 2.

## DESIGN AND TEST OF DYNAMIC POSITIONING SYSTEM

Wang Xiaosheng

(China Ship Scientific Research Center)

### Abstract

*The present paper describes a computer-based dynamic positioning system of a storage oil tanker. The system design is based on a linearized discrete mathematical model of the vessel's motion in response to the actions of wave, wind and current forces. By applying self-tuning Kalman filter, the high frequency wave-induced motions and the low frequency drift motions of the ship are estimated separately. Thus the positioning control is made to respond only to the low frequency drifting forces. The self-tuning filter can track the sea state variations. The vessel is controlled by three thrusters with an optimal control subsystem based on linear-quadratic, gaussian technique.*

Model test for validating the design philosophy has been conducted in the seakeeping tank of CSSRC.