

# 船舶航向运动模型参数估计

赵国良

(哈尔滨船舶工程学院自动控制系)

## 摘 要

本文主要讨论了系统辨识理论在船舶航向运动模型中的应用, 分别研究了Z形试验和随机试验的数据处理方法, 并提出了一种新的求取一阶和二阶K-T方程参数的方法, 结果正确。

## 一、引 言

众所周知, 船舶操纵性是船舶的重要性能之一, 它与船舶的安全航行有着密切的关系, 以前, 人们都是用一些经典的数据处理方法对船模或实船试验的数据进行处理, 以求得船舶运动模型参数。从七十年代起, 国外开始利用系统辨识的方法求得有关参数<sup>[1][2]</sup>, 但是他们所采用的方法遇到了一些困难。我国在这方面的正在努力进行。本文则利用我们研制的一台船舶航向运动测量微机系统<sup>[3]</sup>, 通过海上实船试验取得了航行试验数据, 并估计出了实船航向运动模型的参数。

## 二、船舶航向运动模型

假设船舶以恒速 $U_0$ 航行, 且其航向运动和纵、横摇运动之间的相互交联可忽略不计(当操舵角 $\delta$ 与横摇角 $\phi$ 较小时)。那末, 船舶的航向运动(图1)的线性化运动方程为<sup>[1]</sup>

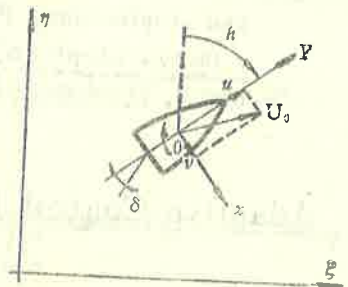


图1 船舶航向运动示意图

$$\begin{bmatrix} m - Y_v^* & mX_C - X_h^{**} \\ mX_C - N_v^* & I_z - N_h^{**} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v^* & Y_h^* & -m_0 U_0 \\ N_v^* & N_h^* & -mX_C U_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta, \quad (1)$$

其中,  $h, v$ ——船舶的航向角和横荡速度,

$m, I_z$ ——船舶的质量和绕Z轴转动惯量,

$X_C$ ——船舶重心到坐标系OXYZ原点o的距离,

本文于1986年12月21日收到, 1987年9月22日收到修改稿。

$Y_{(\cdot)}, N_{(\cdot)}$ ——绕  $Y$  轴的水动力系数和绕  $Z$  轴的水动力矩系数。

(1) 式可改写成传递函数形式如下:

$$\frac{R(s)}{\Delta(s)} = \frac{K(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad (2)$$

其中,  $R(s) \triangleq L[r(t)] \triangleq L[\dot{h}(t)]$ ,  $\Delta(s) \triangleq L[\delta(t)]$ ,

$T_1, T_2, T_3, K$ ——时间常数和放大系数。

(2) 式还可写成常用的二阶  $K-T$  方程如下:

$$\ddot{r}(t) + \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{r}(t) + \frac{1}{T_1 T_2} r(t) = \frac{K}{T_1 T_2} \left[ \delta(t) + T_3 \dot{\delta}(t) \right], \quad (3)$$

及其简化形式——一阶  $K-T$  方程如下:

$$T\dot{r}(t) + r(t) = K\delta(t). \quad (4)$$

考虑到对船舶航向运动模型的机理前人已做了大量的研究, 我们在此不再对船舶航向运动模型进行阶的辨识, 也就是认为船舶航向运动模型的辨识是一个“白箱”辨识问题。

### 三、Z 形航行试验

为了求取船舶运动模型的动态参数, 船舶航行运动必须受到充分激励, Z 形航行试验就是一种动态试验的方法。船舶作 Z 形航行时, 由于不断重复地左、右操舵, 船舶的航行运动始终处于不断受激的动态过程。

从既能最大限度地利用试验数据, 又不至于对重复操舵提出过于苛刻的要求出发, 我们采用最小二乘法来处理。

由 (4) 式, 并考虑到船舶的非对称特性等原因, 我们有

$$T\dot{r}(t) + r(t) = K[\delta(t) - \delta_r], \quad (5)$$

其中,  $\delta_r$ ——压舵角, 用以克服由船舶非对称性等所造成的恒定旋回运动所需的操舵角。

在  $[t_i, t_i + T_s]$  时间间隔内 ( $T_s$  为采样间隔) 对上式两边取积分, 可得

$$-T\beta_i + \gamma_i = K\alpha_i + DT_s, \quad (6)$$

其中,  $D = K\delta_r$ ,

$$\alpha_i = \int_{t_i}^{t_i + T_s} \delta(t) dt,$$

$$\beta_i = -[r(t_i + T_s) - r(t_i)],$$

$$\gamma_i = h(t_i + T_s) - h(t_i).$$

显而易见, 上式具有最小二乘结构形式。为求出未知参数  $T$ 、 $K$  和  $\delta_r$ , 可将所得试验记录以  $T_s$  为间隔分成  $N$  段, 并取指标函数为

$$J = \sum_{i=1}^N (K\alpha_i + T\beta_i + DT_s - \gamma_i)^2, \quad (7)$$

并令  $\frac{\partial J}{\partial K} = 0$ ,  $\frac{\partial J}{\partial T} = 0$  及  $\frac{\partial J}{\partial D} = 0$ , 可得

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 & \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i & T_s \sum_{i=1}^N \alpha_i \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i & \sum_{i=1}^N \beta_i^2 & T_s \sum_{i=1}^N \beta_i \\ T_s \sum_{i=1}^N \alpha_i & T_s \sum_{i=1}^N \beta_i & T_s^2 N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K \\ T \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i \\ \sum_{i=1}^N \beta_i \gamma_i \\ T_s \sum_{i=1}^N \gamma_i \end{pmatrix}, \quad (8)$$

改用以下符号表示

表 1 Z 形试验结果

K (1/秒)	T (秒)	$\delta_r$ (度)
0.1118	2.8800	-1.3567

$$\Phi_1 \theta_1 = \phi_1.$$

$$\therefore \theta_1 = (\Phi_1)^{-1} \phi_1, \quad (9)$$

其中,  $\theta_1 = (K \ T \ D)^T$ .

$\Phi_1$  与  $\phi_1$  是 (8) 式中二边相应的矩阵与向量。由 (9) 式即可求出一阶  $K-T$  方程

的参数  $K$ ,  $T$  及  $\delta_r$  值 (见表 1); 相应的拟合曲线见图 2。

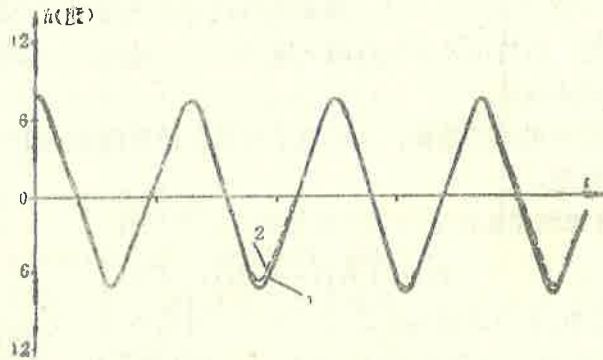


图 2 Z 航行试验曲线

1——实际记录曲线; 2——拟合曲线

#### 四、随机航行试验

据系统辨识理论可知, 被辨识的系统必须处于完全激励的运动状态。具有均匀功率谱的白噪声是一个理想的激励信号。而在工程实践中常用伪随机信号来代替。本测量系统除了可使船舶进行旋回。Z 形航行试验外, 还提供了一种随机操舵信号——逆重复最大长度二位式序列伪随机信号 (LPRBS)。这种信号的频谱近似于白噪声, 且能保证每周期的均值为零, 符合系统辨识技术对输入激励信号的要求。根据试验船的特性, 我们取 LPRBS 的一个周期内的间隔数  $N_p = 62$ 。而变化间隔的持续时间  $T_{\Delta}$  可随操舵角的大小在试验前从键盘输入。考虑到研究的是线性模型, 故取操舵角为  $\pm 5^\circ$ ,  $T_{\Delta} = 5$  秒, 相应的 LPRBS 信号的周期  $T_p =$

$N_p T_s = 310$  秒, 远大于试验船的最大时间常数 (估计为 5 秒左右)。

由于连续形式模型的参数具有一定的物理意义, 因此基于离散采样数据来估计系统的连续形式模型参数的问题, 引起了一些学者们的兴趣<sup>4, 5</sup>。一般可有二种途径: 一为直接法, 即直接求连续形式模型的参数; 二是间接法, 即先求出离散形式模型的参数, 再将其转换成连续形式模型的参数。文献〔1〕、〔2〕在采用间接法求取二阶  $K-T$  方程的系数时遇到了困难, 得不到正确的结果。

为了得到合适的结果, 我们采用了后向差分和二步辨识相结合的算法。据后向差分公式可将二阶  $K-T$  方程, 即 (3) 式, 改写如下:

$$r(k) + a_1 r(k-1) + a_2 r(k-2) = b_0 \delta(k) + b_1 \delta(k-1), \quad (10)$$

其中,  $a_1 = -a_2(c_1 T_s + 2)$ ,

$$a_2 = \frac{1}{c_2 T_s^2 + c_1 T_s + 1},$$

$$b_0 = a_2(c_3 T_s^2 + c_4 T_s),$$

$$b_1 = -a_2 c_4 T_s,$$

$$c_1 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2},$$

$$c_2 = \frac{1}{T_1 T_2},$$

$$c_3 = c_2 K,$$

$$c_4 = c_3 T_s.$$

也可将一阶  $K-T$  方程, 即 (4) 式, 改写成如下形式:

$$r(k) + a'_1 r(k-1) = b'_0 \delta(k), \quad (11)$$

其中,  $a'_1 = -\frac{T}{T + T_s}$ ,

$$b'_0 = \frac{KT_s}{T + T_s}.$$

对于 (10) 及 (11) 式, 我们采用两步辨识法来估计  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$  及  $a'_1$ 、 $b'_0$ 。将以上方程写成通式如下

$$r(k) = -\sum_{i=1}^n a_i r(k-i) + \sum_{i=1}^n b_i \delta(k-i), \quad n=1, 2 \quad (12)$$

上式两边各乘以  $\delta(k-\tau)$ , 并同时取数学期望, 则可得

$$\phi_{rr}(\tau) = -\sum_{i=1}^n a_i \phi_{rr}(\tau-i) + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \phi_{\delta\delta}(\tau-i), \quad n=1, 2 \quad (13)$$

其中,  $\phi_{..}$  为相关函数, 对于  $N+1$  组测量值, 我们取相关函数的估值为

$$\hat{\phi}_{\delta_r}(\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N r(k) \delta(k-\tau), \quad (14)$$

$$\hat{\phi}_{\delta_s}(\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N \delta(k) \delta(k-\tau).$$

求出  $\hat{\phi}_{\delta_r}(i)$ ,  $\hat{\phi}_{\delta_s}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, M$  后, 可列出下列方程:

$$\begin{pmatrix} \hat{\phi}_{\delta_r}(2) \\ \hat{\phi}_{\delta_r}(3) \\ \vdots \\ \hat{\phi}_{\delta_r}(M) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\phi}_{\delta_r}(1) & \hat{\phi}_{\delta_r}(0) & \hat{\phi}_{\delta_s}(1) & \hat{\phi}_{\delta_s}(0) \\ \hat{\phi}_{\delta_r}(2) & \hat{\phi}_{\delta_r}(1) & \hat{\phi}_{\delta_s}(2) & \hat{\phi}_{\delta_s}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\phi}_{\delta_r}(M-1) & \hat{\phi}_{\delta_r}(M-1) & \hat{\phi}_{\delta_s}(M-1) & \hat{\phi}_{\delta_s}(M-2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\hat{a}_1 \\ -\hat{a}_2 \\ \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

由此可得

$$\hat{\theta}_2 = [S^T S]^{-1} S^T \hat{\phi}_{\delta_r}, \quad (16)$$

其中,  $\hat{\theta}_2 = [-\hat{a}_1 \quad -\hat{a}_2 \quad \hat{b}_0 \quad \hat{b}_1]^T$ ,

$S$  与  $\hat{\phi}_{\delta_r}$  分别是 (15) 式中的矩阵与向量。

由 (16) 式即可求得参数估值  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_2$ ,  $\hat{b}_0$ ,  $\hat{b}_1$  及  $\hat{a}'_1$ ,  $\hat{b}'_0$ , 进而得到二阶和一阶  $K-T$  方程的参数 (表 2), 对应的拟合曲线见图 4 和图 3。其结果是令人满意的。



图 3 随机航行试验曲线  
1——实际记录曲线; 2——一阶  $K-T$  方程拟合曲线

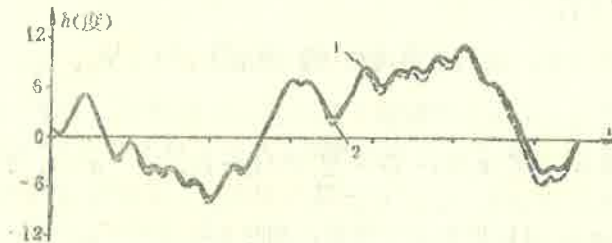


图 4 随机航行试验曲线  
1——实际记录曲线; 2——二阶  $K-T$  方程拟合曲线

表 2 随 机 航 行 试 验 结 果

$T_1$ (秒)	$T_2$ (秒)	$T_3$ (秒)	$K$ (1/秒)	$T$ (秒)	$K$ (1/秒)
3.766	0.1528	0.29	0.075	3.213	0.079

### 五、结 论

实船航向运动测量微机系统可以作为对船舶操纵性能进行研究的一个有力工具。本文根据实际海上试验测得的数据,提出了对Z形航行和随机航行试验数据处理的方法。特别是在求取二阶K-T方程参数时,克服了文献中存在的问题,得到了符合实际的参数。

**致谢** 王德普、赵乃真、李大为和高淑玲同志参加了船舶航向运动微机测量系统的研制工作,丛望和姜仁峰同志也参加了一些工作,在此表示感谢。感谢中国造船总公司为本课题提供了经费。

### 参 考 文 献

- [1] Åström, K. J., Källström, C. G., Identification of Ship Steering Dynamics, Automatica, 12, (1976), 9—12.
- [2] Tiano, A., Identification and Control of the Ship Steering Process, Symposium on Ship Operation Automation, (1976), 573—579.
- [3] 赵国良等, 微型机实船航向运动测量系统, 自动化技术与应用, 4:4, (1985), 23—29.
- [4] Sinha, N. K., Estimation of Transfer Function of Continuous Time System From Sampled Data, Proc. IEE, Pt. D, 119, (1972), 612—614.
- [5] Hsia, T. C., On Sampled Data Approach to Parameter Identification of Continuous Linear System, IEEE Trans. AC-17, (1972), 248—249.

## Parameter Estimation of the Heading Motion of Full-scale Ships

Zhao Guoliang

(Department of Automatic Control, Harbin Shipbuilding Engineering Institute)

### Abstract

The paper mainly dealt with the application of system identification to the models of the heading motion of ships. The parameters of the models were estimated based on the data from the Zig-zag test and LPRBS test of a full-scale ship. A new method to obtain the first and the second order of K-T equations of ships was proposed. The results have shown that the proposed method is reasonable and overcomes some difficulties which exist in the previous papers.