

译文 79-007

船舶操纵性译文集

(三)

第六机械部第七研究院第七〇二研究所
工业部

一九七九年九月

目 录

关于船舶操纵运动的数学模型.....	1
操纵性数学模型的理论背景.....	11
作用于舵上的力及其与船体、螺旋桨间的干扰.....	23
约束模型操纵性试验方法和试验装置.....	42

关于船舶操纵运动的数学模型

小川陽弘* 小山健夫** 貴島勝郎***

日本试验水池委员会第二分会就“表达船舶操纵运动的数学模型的研究近况及其所期望的形式”问题成立了操纵运动的数学模型研究小组(简称MMG),从1976年3月以来一直在开展这一研究。由于对运动方程中的流体动力等的表达已有一个初步的成果,现作一报告,请大家批评指教。本报告预定分四篇连载:Ⅰ总论、Ⅱ理论背景、Ⅲ能力及干扰、Ⅳ试验方法和试验装置。

1. 绪 言

近年来,有关船舶操纵性的流体动力学的研究迅速发展,就其应用的一个方面,即有关航向稳定性的判断以及运动模拟计算等各种操纵性的计算,在设计、航运等业务部门正日益得到广泛运用。提供这些基本实验资料的平面运动机构(PMM)、旋臂(RA)、圆形运动试验(CMT)等约束模型试验,正在各单位进行,但是各单位的此类试验方法和分析方法并不统一,这就为试验间的相互比较以及试验结果的使用等带来很多不便。例如,把约束自航模试验中测得的结果表示成多项式的此类方法,其所有的导数将因项数的取舍选择方法不同而变化;同时也因对螺旋桨转数的选用方法不同而异。而且这种流体动力的多项式的表达也存在着理论根据不明确之处,因此,难以与理论计算相对应。同时,对船体、螺旋桨、舵之间的相互干扰的表达使用了各种各样形式,致使数据的相互利用与比较几乎大不可能。

由于上述种种原因,就连对各试验设备,各试验方法所取得资料的可靠性作相互比较这样一种极其基本的试验技术的研究,除了由国际拖曳水池会议进行过比较试验外,至今未很好进行。对于更为重要的尺度效应、浅水影响等问题的研究似乎难以抓住其关键。因此,即使认为使用这些试验资料所作的运动计算的方法和结果等具有很大的意义,但是如果要在流体动力学基础上加比较、验证则仍是不可能的。

船舶的操舵运动可作为一个控制系统来处理。即所谓“响应模型”,对可忽略前进速度变化的微幅运动,已大致建立了完整的体系,但其缺点是能适用的限制条件较多,而且“响应模型”本来就有从上述那种“流体动力学模型”所导得的性质。鉴于上述原因,本小组将着手下列这些工作:整理出当前所用“流体动力学模型”的各种问题,并就解决的方法以及如果可能的话,就模型的精确化、标准化等与其理论根据一并加以研究。参加研究会的成员,还包括非水池委员会委员19人。

* 船舶技术研究所 ** 东京大学 *** 九州大学。

○ 本文即系四篇报告的第一篇,第二至第四篇文章均编入本译文集中——译者。

2. 模型的基本条件

2.1 研究对象的运动特点

因为对所有的运动用一个模型来表示并不是好的办法, 现把船舶运动范围限定在以下的运动状态:

- (1) 只研究一般船舶的通常的操纵运动, 不考虑所谓异常现象
- (2) 船有相当的前进速度, 螺旋桨转速超过空转转速, 升力占支配地位。
- (3) 考虑到能在以后把浅水影响包含进去。

针对以上的运动有:

- (4) 变量取为 $u, v, r; \delta, n$ (符号原则上根据第二届操纵性讨论会)。
- (5) 坐标系固定在船体上, 原点究竟取在重心上还是取在船中线上, 将在后面讨论。

以上述各点为前提进行研究。

下面只介绍研究的主要过程, 中心是陈述所取得的结果。

2.2 对模型的一般要求

对新模型要求的基本特性可作如下考虑:

- (1) 物理上有意义。
- (2) 易做试验。
- (3) 能处理与实船的相关。
- (4) 能适应设计上的局部修正。

这些条件中有相互矛盾的部分, 考虑不一定全部都能满足, 但可作为目标来争取。

结合以上诸条件及前述的目的, 表达操纵运动的数学模型必须满足下述诸要求:

- (1) 把船体、螺旋桨、舵的各单独性能作为基准。
- (2) 简洁地表达出船体、螺旋桨、舵间的干扰, 但目前不考虑左右不对称性。

特别关于 (1) 要

- (3) 合理地表示作用于船体的流体动力。这也是重要的课题。

2.3 形式上分解的模型

把流体动力分解为单独性能和干扰项的形式。图 1 以对横向力 Y 的测量为例子, 表达了这种形式上分解的情况。图中 Y_{11} 等表示了各种情况下的测量值。又例如 Y_{22} 是以船体为基础测得的舵力。由这些试验结果作成表 1, 就可以决定所需的一切干扰项。表中 $Y_{H(R)}$ 表示由于舵 R 的存在对船体 H 产生的横向力。

同样, 对 X 及 N 也可形式上给予分解表示。最后, 所有的流体力均可表示如下:

$$\begin{aligned}
 [\text{流体动力}] = & H_0 + H(P) + H(R) + H(PR) \\
 & + P_0 + P(R) + P(H) + P(RH) \\
 & + R_0 + R(H) + R(P) \\
 & + R(HP)
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, H, P, R 分别表示作用于船体、螺旋桨、舵上的流体动力, $H(P)$ 表示由 P 对 H 的影响等等。

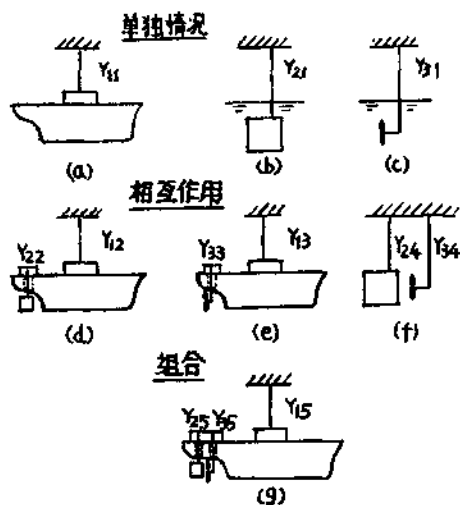


图 1 流体动力分量的测量法

表 1 流体动力的定义 (由图 1)

Y 的分类	船 体	舵	螺旋桨	变 量
Y_H Y_R Y_P	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	u, v, r $u, (v), r, \delta$ $u, v, (r), n$
$Y_{H(R)}$ $Y_{H(P)}$	$(Y_{12}-Y_{11})-Y_{22}$ $(Y_{13}-Y_{11})-Y_{33}$			u, v, r, δ u, v, r, n
$Y_{R(H)}$ $Y_{R(P)}$		$Y_{22}-Y_{21}$ $Y_{24}-Y_{21}$		u, v, r, δ $u, v, (r), \delta, n$
$Y_{P(H)}$ $Y_{P(R)}$			$Y_{33}-Y_{31}$ $Y_{34}-Y_{31}$	u, v, r, δ, n
$Y_{H(RP)}$	$(Y_{15}-Y_{11})-(Y_{25}$ $+Y_{35})-Y_{H(R)}$ $-Y_{H(P)}$			"
$Y_{R(HP)}$		$(Y_{25}-Y_{21})$ $-Y_{R(H)}$ $-Y_{R(R)}$		"
$Y_{P(HR)}$			$(Y_{35}-Y_{31})$ $-Y_{P(H)}$ $-Y_{P(R)}$	"
小 计	$Y_{15}-(Y_{25}+Y_{35})$	Y_{25}	Y_{35}	"
合 计	Y_{15}			

这个模型以明晰的形式包含了所有的分量,可以说是其最基本之点。可是事实上因为其中存在着试验技术上部分困难以及项数过多等原因,不能就这样供作使用。这些不适当的部分如在忽略了一些小项或其他项合并并以简洁的形式表示之,则情况就会有所改善。为此进行了各种研究,但是,结果表明,要像预期的那样,在实用上是做不到的。所以这个模型的价值只限于作为研究其他更为简便的模型的基础。进而考虑更实用的模型,可得出下面的结果。

3. 模型的组成

对研究所取得的数学模型作如下说明:它可认为是现阶段能使实用性与合理性相结合的模型,虽然它也部分包含了谁都难以弄清的地方,但是可以看到,这一模型几乎没有过去许多模型所常有的含糊不清之处。

3.1 运动方程式

坐标系采用操纵运动常用的右手坐标系, 针对原点取在船舶重心上的船体固定座标建立其运动方程式。即

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X_0 \\ m(\dot{v} + ur) &= Y_0 \\ I_{zz}\dot{r} &= N_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 X_0, Y_0, N_0 分别为对重心的力和力矩。横向速度 v 也有用 β 来代替的, 但应尽可能统一用 v 。

流体动力一般化到相对于船中较合理。因此有:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X \\ Y_0 &= Y \\ N_0 &= N - Y \cdot x_G \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 X, Y, N 分别表示对船中的力和力矩, x_G 为重心座标。

3.2 X 式的表达

力 X 可表达如下:

$$\begin{aligned} X = & X_{\dot{u}}\dot{u} + (X_{vr} - Y_{\dot{v}})vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + (1-t)T\left(\frac{u_p}{nD}\right) \\ & + X(u) + X_{R0} - F_N \sin \delta \end{aligned} \quad (4)$$

各项内容为:

$X_{\dot{u}} = -m_x$: x 方向的附加质量, 可由强迫纵荡试验或元良诚三图表得到。

$Y_{\dot{v}} = -m_y$: y 方向的附加质量。

X_{vr}, X_{vv}, X_{rr} : 主要是由于运动面产生的阻力增量成分, 比 $Y_{\dot{v}}$ 项小。

$T = \rho n^2 D^4 K_r \left(\frac{u_p}{nD} \right)$: 螺旋桨推力。

如果考虑到 u_p 是轴向流速, 则 K_r 的特性几乎不受斜流的影响。同时也不妨认为不受 δ 影响。

$u_p = u\{1-w\} + \tau(v + C_R[v + x_{Pr}]^2)$ 为螺旋桨的有效来流速度, $(1-w)$ 表示直航时之伴流, 其它表示由船体运动产生的变化部分(参照 v_R 项), x_P 为螺旋桨的 x 座标, τ 及 C_R 为由实验来决定的系数。

t : 使用直航中的值。需要今后研究。

$X(u)$: 直航时船体的阻力。 $R(u) = -(X(u) + X_{R0})$ 相当于阻力试验结果。

X_{R0} : 舵直航时之阻力, 非常小。可与 $X(u)$ 一起考虑。

F_N : 舵的法向力。与下节所述横向运动中的相同。

另外, 力 X 等的无因次化与国际拖曳水池会议标准方式一致, 取为:

$X' = X / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2$ 等等。

3.3 Y, N 式的表达

力 Y 和力矩 N , 可表达如下:

$$\frac{Y}{\frac{1}{2} \rho L^2 U^2} = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + (Y_r + X_{\dot{u}}u)r$$

$$+ \int_{-1/2}^{1/2} (v + x r) |v + x r| C_D(x) dx - (1 + a_H) F_N \cos \delta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho L^2 U^2 \dot{N} &= N_v v + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r \\ &+ \int_{-1/2}^{1/2} (v + x r) |v + x r| x C_D(x) dx - (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (6)$$

式中右边的变量、系数等均省略了无因次化符号。式(5)、(6)右边的第1、2、3行分别表示基于附加质量及升力的线性项、横向流动产生的非线性项、舵力及由于操舵在船体上引起的流体力。

因非线性项是由 v 及 r 产生局部的横向流速度的二次项的积分来表示, 如 v 及 r 一直保持同号或异号, 其积分后的系数形式, 就可象 $Y_{vr}vr$ 那样来表示。但是在实际的船舶运动时, 因为同号或异号的情况都会发生, 这就必须对应不同情况取各自的系数。如果那样就违反了原来的目的, 由于保留其积分式倒并无妨碍, 所以决定采用现在这种形式。

式(5)、(6)的各项内容为

Y_v, N_v : 附加惯性力的干扰项, 较小。

$N_r = -J_{zz}$: 绕船中的附加惯性矩。

$C_D(x)$: 横向流动的阻力系数。目前的处理方法, 取

$C_D(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2$, 是其中的一种方法。

$F_N = 1/2 \rho A_R U^2 f(\Lambda, \alpha_R)$, $\left(\frac{u_R}{u}\right)^2 / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2$: 舵的法向力。 Λ 为展弦比。 α_R, u_R 为舵的有效攻角及舵处的流入速度, 对此, 将在下节中详细说明。又 $f(\Lambda, \alpha_R) = f_\alpha(\Lambda) \alpha_R$ (f_α : 单独性能的斜率)

a_H : (由于舵的作用在船体上产生的力)/舵力。

x_H : 由于舵的作用在船体上产生的力的作用点的 x 坐标。

x_R : 舵压力中心的 x 坐标。

3.4 有效攻角及有效流入速度

对舵的有效攻角, 作如下表达是适当的。

$$\alpha_R = \delta + \gamma \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \quad (7)$$

式中, v_R 为舵的表观横向速度。可表为

$$v_R = v + C_R |v| v + x_R r \quad (8)$$

其中 1.3 项为运动的几何分量, 第二项是考虑了船体的下洗的分量。

关于有效流入速度迄今尚未得出确定的表达式。因为它与舵的尺寸、螺旋桨尾流范围大小有关, 还与舵、螺旋桨之间距离大小等有关, 所以就非常复杂了。当:

(1) 对整个舵只取平均流入速度或

(2) 区分螺旋桨尾流区与非尾流区处的流入速度时其研究方法也不同。

由动量理论给出螺旋桨的尾流速度为

$$u_R^2 = u_p^2 \left(1 + \frac{8}{\pi} \frac{K_T}{J^2} \right) \quad (9)$$

其中 $J = u_P/nD$ 、 u_P 为式(4)中的螺旋桨的速度。可以基本上认为采用式(9)较为合理。但此时必须以某种形式加入前述的舵与螺旋桨相对位置关系的修正量。

此外还有经验、半经验公式。总而言之，现在采用的认为有实用性的有效流入速度公式有如下一些：

$$\begin{aligned}
 (a) \quad u_R^2 &= u_P^2(1 + ks_{1.5}) \\
 (b) \quad u_R^2 &= u_P^2 \left(\frac{u_P/u}{1-s} \right)^k \\
 (c) \quad u_R^2 &= u_P^2 \left(1 + k \frac{8}{\pi} \frac{K_r}{J^2} \right) \\
 (d) \quad u_R^2 &= k u_P^2 \left(1 + \frac{8}{\pi} \frac{K_r}{J^2} \right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

各式右边之 k 为试验修正量的系数，这些值完全以舵的单独特性为基准而定出。这样，若按前述(1)的考虑方法， k 值将随螺旋桨直径与舵高度间的不同关系而变化，但若按照(2)那样的考虑方法则由上述影响而造成 k 值的变化就比较小。

式(10)中，(a)式作为在实用性方面有所发展的岡田——藤井公式而广为所知。(a)与(b)式都考虑了螺旋桨尾流影响的定性特征，是一个方便的式子。但是，考虑到将来的发展，如螺旋桨的反转、限制水路的影响、相关问题等等的处理，则采用(c)式或(d)式将更为合理些，而且就目前的试验技术而言也是完全可能做到的。

4. 与试验方法的对应

4.1 流体动力的测量

因为流体动力值均是对船中而言，约束模型试验也是针对船中进行分析的，如果把这时的运动分量记为 u_m, v_m, r_m ，则与重心坐标系处的运动分量间关系为：

$$u_m = u, \quad v_m = v - x_G r, \quad r_m = r \tag{11}$$

而运动方程式有如下形式：

$$m(\dot{u} - v_m r - x_G r^2) = X$$

表 2 根据约束自航模型试验决定系数的顺序

№	条 件	主要测量项目	适用方法	所得系数
1	直航, 舵角 0	T'	等推力法	$1-w$
2	" $\delta \neq 0$	F'_N	等 F'_N 法	$u_R \rightarrow k$
3	" "	F'_N, Y, N		a_H, x_H
4	$v \neq 0, r \neq 0$	T'		τ, C_P
5	" "	$F'_N \sim \delta$	求 $F'_N = 0$ 的 δ	τ, C_R
6	" "	X, Y, N	扣除舵的部分 (使用 a_H, x_H)	$X_{vv}, X_{vr}, X_{rr},$ $Y_v, Y_r, N_v, N_r,$ $C_H(x), (Y_{\dot{v}}, \text{等})$

$$\begin{aligned} m(\dot{\mathbf{v}}_m + u\mathbf{r} + x_G\dot{\mathbf{r}}) &= \mathbf{Y} \\ (I_{xx} + mx_G^2)\dot{\mathbf{r}} + mx_G(\dot{\mathbf{v}}_m + u\mathbf{r}) &= \mathbf{N} \end{aligned} \quad (12)$$

考虑到式(3), 对重心测得的试验据也可用式(12)作再分析。

4.2 决定各系数的方法

在决定系数时, 如何固定求系数的顺序是个问题, 系数的值往往因先定、同时定或后定而有所变化。其细节尚有研究的余地, 但总的说来表2所示的方法看来是较为实用的。又此时船体、螺旋桨、舵的诸单独特性即 $X(u) + X_{R0}$, $K_T \sim J, f_a(\lambda)$ 及必要的 X_u 等为已知。还希望进行裸船体试验, 以资比较。

5. 与理论预报法的对应

在理论上处理船的操纵运动时, 最重要的问题是怎样通过计算来预报作用在船上的流体动力。要探讨的基本问题是在前述的表达操纵运动的数学模型中, 怎样精确而简洁地表达:

(a) 船体、螺旋桨、舵的单独性能;

(b) 船体、螺旋桨、舵间的相互干扰。其中阐明作为最主要因素的单独船体的流体动力特性特别重要。因而根据前述的数学模型, 对以往常用的理论分析, 特别对与操纵运动关系较大的 Y 与 N 作了一些探讨。

首先考虑作为最主要因素的单独船体的流体动力预报, 因而要简单地表示具有复杂曲面的船体周围的流场通常是非常困难的, 必须使流场单纯化、模型化是众所周知的事情。对此, 以前采用过的方法, 可大致分为将船体看作薄翼升力面或细长体来处理的两种模型。这里若考虑定常问题, 前者可举井上[1]的方法为例; 后者, 可举不破[2]的方法。但就其模型的性质而言, 前者难以考虑船体形状, 特别是船宽的影响; 而后者对船体形状的变化能作某种程度的考虑, 但是必须要有自由涡的流出条件, 而且包含着各种复杂的问题。因此, 此两法各有优缺点, 还不能断言哪种方法好。可是从实用观点出发考虑, 井上方法, 基于博莱 (Bolley)[3]的小展弦比升力面理论, 作了各种修正及研究, 便于使用, 所以首先讨论上述式(5)或式(6)的表达方式与井上方法间的关系。

因为这一方法相当于以中纵剖面的矩形板代替船体, 并作为小展弦比的非线性升力面模型来处理, 故可求出式(5)、(6)中第一行线性项内所谓静导数的 Y_β , Y_r 及第二行非线性项中的系数。用此法计算时, 例如船以漂角 β 斜航时, 升力的线性部分为 $\pi k\beta$ (k 为船的展弦比), 非线性部分为 $2\beta^2$ 。这里作为小展弦比机翼的特点, 是其升力系数可由与 β 成比例的部分加上显示非线性变化的与 β^2 成比例的部分。与 β^2 成比例的非线性项是以横向流产生的升力出现的, 它包含在式(5)的第2行 $\int (v+xr)[v+xr]C_D(x)dx$ 之项中, 将随 β 的增加而变大。可是在只作斜航运动时, 与横向流有关的力对于力矩的影响可认为是较小的。井上基于这些考虑, 将 Y, N 分为对各变量的线性项及非线性项来表示:

$$\begin{aligned} Y &= Y_\beta \cdot \beta + Y_r \cdot r + f_Y \\ N &= N_\beta \cdot \beta + N_r \cdot r + f_N \end{aligned}$$

对于非线性项 f_Y, f_N 在 $\beta^2, \beta r, r^2$ 项中 βr 项最重要, r^2 项较小, 所以非线性项简单地取为

$$\begin{aligned} f_Y &\cong Y_{\beta r} \cdot \beta r + Y_{\beta\beta} \cdot \beta^2 \\ f_N &\cong N_{\beta r} \cdot \beta r + N_{\beta\beta} \cdot \beta^2 \end{aligned}$$

另外, 考虑到船宽对 β 的线性部分影响及相对应的试验, 他建议包括非线性项的各导数 (井上公式是对重心来描述的) 可预报如下:

$$\begin{aligned}
 Y_{\beta} &= K_1 v k + K_3 4 \frac{B}{L} \\
 Y_r &= K_1 \pi k (0.367 + 0.21k) \\
 N_{\beta} &= 1.178 J_v \left(0.67 + \frac{k}{2} \right) \bar{C} k \\
 N_r &= 0.54 k \\
 Y_{\beta\beta} &= 2K_2 (2C_{w2} - 1) \\
 N_{\beta\beta} &= \frac{\bar{C} G}{L} Y_{\beta\beta} \\
 Y_{\beta r} &= 8K_2 C_{w2} (1 - C_{w2}) \left(\frac{L_2}{L} \right)^2 \\
 N_{\beta r} &= C_{w2} \frac{L_2}{L} Y_{\beta r}
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中 $v = -U \sin \beta$, $k = 2d/L$

K_1, K_2, K_3 : 修正系数

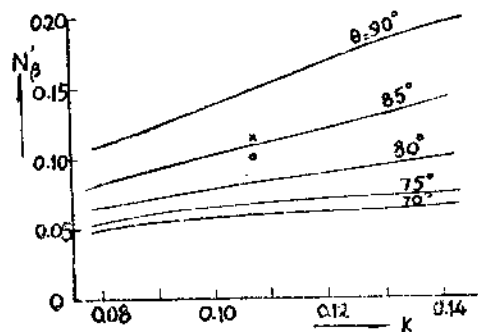
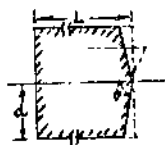
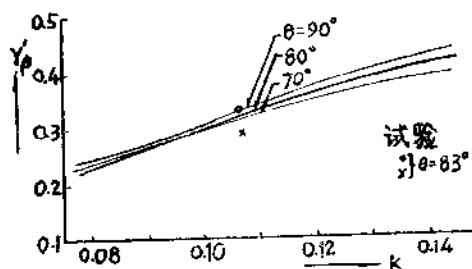


图 2 操纵性导数与船舶倾斜关系之一例

L : 船长

B : 船宽

d : 吃水

J_v : 表观质量的三因次影响

L_2 : 从船体重心到 $A \cdot P$ (尾垂线) 的距离

C_w : 水线面面积系数

C_{w2} : 在船体重心后方的水线面面积系数

$$\begin{aligned}
 \bar{C} &= 0.8 \left[1.457 - 0.128 \left(\frac{2d}{B} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \left(0.466 - \frac{d}{5B} \right) (C_w - 0.5) \right]
 \end{aligned}$$

与此相比, 式 (5)、(6) 的非线性项的表达形式是将横向流引起的非线性流体动力归集在一项, 成为更为一般的表达式。但是这时的难点是如何估算各断面的阻力系数 $C_D(x)$, 从理论上求 C_D 方法方面, 最近提出的尾迹源模型 (wake source model [5]) 正向实用方向发展, 想必对今后发展会有很大帮助。

上述式 (13) 是将船体当作矩形平板来求的, 因此在求线性项的导数时存在着与小展弦比翼相关的涡的分布问题以及因用矩形板翼代替船体而引起的种种问题。例如, 在以某一漂角斜航时的操纵性导

数中,一般是 Y_s 与试验值吻合较好,而 N_s 则有相当的误差,所以,取矩形平板模型似乎是不大合理的。但是将此模型稍作修正,使翼的前缘符合船首形状,例如用前缘带有后掠角的平板翼进行计算时,像图2所示, N_s 的理论预报值与试验值就吻合得很好[6]。因此,即使用了平板模型,若同时再考虑到船首、船尾形状,则式(13)特别是其中的线性项仍具有一定程度的实用性。

上述那样的线性项即使利用以前的方法也可相当精确地预报,问题在于对于非线性项的预报,所以需要进一步对这方面进行研究。

其次,在求 Y_s 、 Y_r 等惯性力项时精度较高的方法中,先有用于计算船体在波浪中运动的切片法,还有细长体理论[7],此外,还有对此等方法加以具体应用的方法[8]。这些方法至今已获得很多成果。但是从操纵运动角度看,在理论上求这些导数时,如要考虑船型的细微差别,将使理论公式相当烦杂,实际上常藉助于试验手段。

关于单独舵性能的理论处理,不消说,至今早就有许多研究了,但是对实际舵的特性,重要的是怎样预报位于船体及螺旋桨尾流中的舵上的作用力。一般地说,由于船后舵的流入速度、流入角度及其分布情况,变化是多种多样的,所以难以简单地表达。以高木等的研究[9]为例,他从理论上研究了螺旋桨对舵的影响,用此方法计算了船体伴流分布及其支配下的螺旋桨尾流,即对舵的流入速度及流入角度,应用升力线理论求出了位于螺旋桨尾流中的舵上的作用力;还研究了螺旋桨尾流对舵的影响范围;伴流的缩率影响等问题,这与式(5)中舵力的表达形式是一致的。这些问题将在第三篇报告中叙述。

此外,关于单独螺旋桨的横向力计算及螺旋桨、舵对船体或对操纵运动的导数之类的影响等方面的理论分析的例子目前较少,大部分依靠试验手段,例如汤室的文章[10]、[11]可作为一例,这个问题将是今后的研究课题。

6. 结 束 语

因为存在着舵这个控制输入及船舶运动范围极广等种种情况,对操纵运动的表达使用了多种方法。加之要求目前须要考虑螺旋桨的控制这种呼声正在高涨,因此,问题就越加复杂化了。

现在,最大的问题是操纵运动没有统一的表达形式。例如,即使是流体动力的测量也不能与其他试验进行相互比较,而且对于必须使用试验结果的运动模型等,其物理根据也并不一定明确,因此理论计算与一般实用的试验值间的对应真是一件难事。这种状态对今后越来越重要的操纵性研究是一个很大的障碍。

本文建议的表达法是由目前从事操纵运动的研究者聚集在一起,基于各自的经验,大致整理出这样的形式,在此报告其结论。其中,对于作用于单独船体上的流体动力及对舵的有效流入速度则与初步的物理根据相对应,而对舵有效攻角的处理与其说是科学倒不如说艺术的色彩更强,至于因舵、螺旋桨的存在对船体流体动力的影响,还停留在用所谓是舵力的 α 倍这样完全没有理论根据的表达上。对此,必须努力掌握其物理现象或对提出产生这些力的机理的假设作进一步研究。

一方面,当务之急是探讨本文所建议的模型的实用性。为了求出该模型的所有参数,必须做某些大型试验,规定标准船型由各单位进行试验,总之,就某一种船型进行完整的试验是必要的。做完这步后,才有可能掌握各参数的大致倾向,从而可建立起实用的试验方法。

另一方面,当然还有一部分要做的事情:用此方法就过去的试验资料作再整理,以验证本模

型，这显然也是应该做的。

可认为本模型是在现在技术状况下最合理的模型，但是，今后当然还应该通过试验或理论分析来修正这一模型，因此想强调一下，特别是试验时，各单位要十分注意保存其原始资料，以适应模型的修正。

本小组预定不久进行本模型的试验验证工作，希望组外各位大力协助。

参 考 文 献

- [1] 井上正祐：“On the Turning of Ships”九州大学工学部纪要，Vol.16(1956)。
- [2] 不破 健：“斜行中の船体に働く流体力について”，日本造船学会論文集，第134号(昭和48年)。
- [3] W. Bolley：“A Nonlinear Wing Theory and its Application to Rectangular Wings of Small Aspect Ratio” Z.A.M.M.,(1939)。
- [4] 井上正祐：“旋回中船体に働く力の非線型項”，西部造船学会会報，第32号(昭和41年)。
- [5] G.V. Parkinson，“A Wake Source Model for Bluff Body Potential Flow”，J. Fluid Mechanics Vol.40(1970)。
- [6] 貴島勝郎：“船の操縦微係数の推定”，MMG. 2—12(昭和51年)。
- [7] 管 信：“船体まわりの流れの計算”，日本造船学会論文集，第128号(昭和45年)。
- [8] 藤野正隆：“操縦運動の付加質量および付加慣性モーメントの3次元修正”，日本造船学会論文集，第135号(昭和49年)。
- [9] 高木又男：“船後の舵特性の縮率影响について関西造船協会誌，第155号(昭和49年)。
- [10] 湯室彰規：“操縦微係数に及ぼすプロペラ，舵の影響に関する一実験例”，MMG3—8(昭和51年)。
- [11] 湯室彰規：“斜航するプロペラに働く横力に関する実験例”，MMG.6—3(昭和51年)。

[杜韻秋译自「日本造船学会志」1977年5月，575号 p. 22~28，小川
阳弘：“操縦運動の数学モデルについて” 関耀元、万廷鑑、辛元欧校]

操纵性数学模型的理论背景

浜本剛実*

1971.5.25

1. 绪言

1946年, K. 戴维森(Davidson)和 L. 希夫(Schiff)[1]发表了记述操舵情况下船舶操纵运动(前进、横漂、回转的平面运动)的数学模型。在这以后, 以此为基础, 船舶操纵运动分析研究取得了显著的进展, 现在还在发展之中。

在这期间, 从理论和实验两方面进行广泛的研究, 对这个数学模型的表达形式作进一步的分析, 细分成船体——螺旋桨——舵, 并考虑它们的相互干扰等等。所得成果已在第一届、第二届操纵性讨论会上[2][3]作了汇总。

在这基础上, 本报告将阐述“数学模型小组”在建立上一篇报告①中的运动方程时, 所讨论的基础理论及其考虑方法。请大家批评指正。

2. 运动方程式和流体动力

船舶的操纵运动, 一般可作为刚体的平面运动, 用欧拉座标系记述。而它的运动方程式一般可通过分别研究由刚体运动引起的惯性力和由流体压力引起的流体动力来建立。

船在操舵角 δ 时的运动由前进、横漂、回转的速度 u, v, r 及其加速度 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 的三个方向的六个分量组成。设 m 为船的质量, I_{xx} 为船的质量惯性矩, 则运动方程式为:

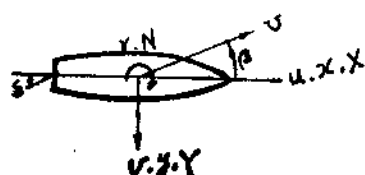


图 1 座标系

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_{xx}\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, X, Y, N 按图 1 所示的坐标系, 表示前进、横漂方向的流体动力及其力矩。

以运动的函数来表示 X, Y, N 时, 需要有运动-船体-流体动力之间的流体力学关系, 可是, 目前在实际粘性流体中求得这个关系是极其困难的问题。那末, 首先还是在理想流体中来分析这个问题, 以建立运动方程式。

这时, 假定理想流体的密度为 ρ , 随船体运动的流速 $\vec{q}$ 可用速度势 ϕ 表示, 则作用在船体表面的运动压力 p 可由欧拉压力公式求得:

* 大阪大学工业部。

① 即本译文集的第一篇文章——关于操纵性运动的数学模型——译者。

$$\frac{p}{\rho} = - \frac{d\phi}{dt} - \frac{1}{2} q^2 \quad (2)$$

所以, 可按下述方法从流体压力 p 求得作用在船体上的流体动力。式(2)的第一项是 ϕ 随时间的变化率, 假如用动座标系 x, y, z 表示, 则为:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + (u - yr) \frac{\partial\phi}{\partial x} + (v + xr) \frac{\partial\phi}{\partial y} \quad (3)$$

又式(2)的第二项流速 q 为:

$$q^2 = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \quad (4)$$

把公式(3)、(4)代入式(2)得压力 p 为:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho} = & - \frac{\partial\phi}{\partial t} + (u - yr) \frac{\partial\phi}{\partial x} + (v + xr) \frac{\partial\phi}{\partial y} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

速度势 ϕ 满足无旋运动及连续性条件和船体表面的边界条件:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = (u - yr) \cos(\widehat{nx}) + (v + xr) \cos(\widehat{ny}) \quad (6)$$

在这里船体作为镜像模型处理, 取 n 为它的表面 S 的面积单元 dS 的外法线, $\cos(\widehat{nx})$ 、 $\cos(\widehat{ny})$ 为 n 在 x 及 y 方向的分量, 则 x, y 方向的流体动力 X, Y 和绕 z 轴的力矩 N 可用作用在 dS 上的压力 $p \cdot dS$ 的各方向分量直接积分得到。

$$2X = - \int_S p \cos(\widehat{nx}) dS \quad (7)$$

$$2Y = - \int_S p \cos(\widehat{ny}) dS \quad (8)$$

$$2N = - \int_S p \{ x \cos(\widehat{ny}) - y \cos(\widehat{nx}) \} dS \quad (9)$$

把式(5)代入上述各式, 并且用高斯定理:

$$\int_S \phi \cos(\widehat{nx}) dS = \int_V \frac{\partial\phi}{\partial x} dV \quad (10)$$

和格林定理:

$$\begin{aligned} \int_S \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right) \frac{\partial\phi}{\partial n} dS = & \int_V \left\{ \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right) \right\} dV \end{aligned} \quad (11)$$

再稍微进行演算, 就得出如下的 X, Y 和 N 。在式(10)、(11)中, V 和 dV 是 S 所围的体积及其体积单元。

$$2X = \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_S \phi \cos(\widehat{nx}) dS - \rho r \int_S \phi \cos(\widehat{ny}) dS \quad (12)$$

$$2Y = \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_S \phi \cos(\widehat{ny}) dS + \rho r \int_S \phi \cos(\widehat{nx}) dS \quad (13)$$

$$2N = \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_S \phi \{x \cos(\widehat{ny}) - y \cos(\widehat{nx})\} dS + \rho u \int_S \phi \cos(\widehat{ny}) dS \\ - \rho v \int_S \phi \cos(\widehat{nx}) dS \quad (14)$$

一方面,速度势 ϕ 可以用运动分量 u, v, r 和取决于船体形状的函数 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 来表示:

$$\phi = -u\phi_1 - v\phi_2 - r\phi_3 \quad (15)$$

则 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -u \frac{\partial \phi_1}{\partial n} - v \frac{\partial \phi_2}{\partial n} - r \frac{\partial \phi_3}{\partial n} \quad (16)$$

它和式(6)比较,得如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_1}{\partial n} &= -\cos(\widehat{nx}) \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial n} &= -\cos(\widehat{ny}) \\ \frac{\partial \phi_3}{\partial n} &= -\{x \cos(\widehat{ny}) - y \cos(\widehat{nx})\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

然后,假设船体形状左右对称,前后不对称,把式(15)、(17)代入(12)、(13)、(14)中,可得到下列各积分式:

$$\left. \begin{aligned} \int_S \phi_2 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} dS &= \int_S \phi_1 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} dS = 0 \\ \rho \int_S \phi_3 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} dS &= \rho \int_S \phi_2 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} dS = -2m_y u \\ \rho \int_S \phi_1 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} dS &= -2m_x \\ \rho \int_S \phi_2 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} dS &= -2m_y \\ \rho \int_S \phi_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial n} dS &= -2J_{zz} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

这里 m_x, m_y, J_{zz} 是用流体动能定义的 x, y 方向的附加质量和绕 z 轴的附加质量惯性矩。 x, y 表示附加质量重心和船体重心(坐标原点)间的距离,当前后对称时此值为零。

另一方面,还有用奇点表示 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 的问题,因本报告的目的是建立运动方程式的形式,没必要插入这问题,因此予以省略。

在实际的粘性流体中,沿船体表面的边界层逐渐发展,并从船体表面分离,形成复杂的尾流。该尾流被认为是在船体上产生引起升力的环流的原因,对这个问题的解析处理是很困难的。就是

说, 这个环流是由怎样的流体力学机理引起的, 目前还是一个不清楚的问题, 它是有关操纵运动的流体力学研究的基本问题之一。

因而, 假设 X_s 、 Y_s 为在这样的流体中产生的流体动力, N_s 为力矩, 在式 (12)、(13)、(14) 中加上这些量, 姑且用如下形状式来表示 X 、 Y 、 N :

$$X = -m_x \dot{u} + m_y vr + m_y \alpha r^2 + X_s \quad (19)$$

$$Y = -m_y \dot{v} - m_y \alpha \dot{r} - m_x ur + Y_s \quad (20)$$

$$N = -J_{zz} \dot{r} - m_y \alpha \dot{v} + N_s \quad (21)$$

其中从式 (14) 的第 2 项和第 3 项导得的

$$-(m_y - m_x)uv - m_y \alpha ur \quad (22)$$

由于后面所述的理由已包含在 N_s 中了。又式 (22) 的第 1 项是被称为不稳定力矩的回转力矩。

把上述结果代入式 (1) 的 Y 和 N 中, 则横漂及回转的运动方程式可用如下形式表示:

$$(m + m_y) \dot{v} + (m + m_x)ur + m_y \alpha \dot{r} = Y_s \quad (23)$$

$$(I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} + m_y \alpha \dot{v} = N_s \quad (24)$$

为了更具体的表示 Y_s 和 N_s , 需要有流动模型来规定它们和运动分量 u 、 v 、 r 的流体力学关系。另一方面, 船舶航向稳定性大致取决于流体动力分量 Y_s 、 N_s , 其间存在着动力学的关系, 这在实用上是重要的问题。据根这样现实的要求, 在解决这个问题上应采取果断的措施, 谋求其实用化的理论, 有井上[5]、K.K. 菲捷耶夫斯柯(Fedyevsky)与 G.V. 苏鲍列夫(Sobolev)[6] H. 蒂梅(Thieme)[7]、G. 施米茨(Schmiz)[8]、W.R. 雅各布(Jacob)[9]等五种。

因而, 可用此类实用式, 从迄今所有的流动模型中的三种基本流动模型, 即小展弦比升力面理论, 细长体理论、横向流模型来推导 Y_s 、 N_s 。

3. 小展弦比升力面理论

对于在静平水中操纵的船, 为应用这个理论, 首先要忽略船宽, 把船体置换成一边横漂及回转一边前进的长方形平板, 而且把它当作升力面来考虑。用图 2 所示的博莱(Bolley)的流动模型求与 u 、 v 、 r 有关的流体动力 Y_s 及其力矩 N_s 。

这时假设翼面上的附着涡分布 $\gamma(x)$ 沿翼展方向是一定的, 自由涡从翼端和翼面成角度 Θ 延

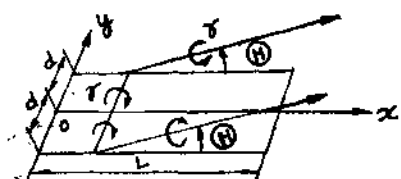


图 2 博莱(Bolley)的流动模型

伸到无穷远下游。又附着涡分布 $\gamma(x)$ 在翼后缘 $x=L$ 处满足库塔(Kutta)的流出条件 $\gamma(L)=0$, 同时, 在翼中心线上, 附着涡和自由涡和诱导的垂直于翼面的诱导速度 $w_b + w_t$ 和平板的运动速度 $-v - \left(\frac{L}{2} - x\right)r$ 必须方向相反并且大小相等。

$$w_b = -\frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{\gamma(\xi)}{x-\xi} \cdot \frac{d}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2}} d\xi \quad (25)$$

$$w_t = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{d \cdot \gamma(\xi) d\xi}{d^2 + (x-\xi)^2 \sin^2 \Theta} \times \left\{ \frac{(x-\xi) \cos \Theta}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2}} + 1 \right\} \cos \Theta \quad (26)$$

这个边界条件是一博莱型的积分方程式

$$-v - \left(\frac{L}{2} - x\right)r = -\frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{\gamma(\xi)}{x-\xi} \cdot K(x, \xi) d\xi \quad (27)$$

$$K(x, \xi) = \frac{d}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2}} + \frac{d(x-\xi)\cos\Theta}{d^2 + (x-\xi)^2 \sin^2\Theta} \left\{ \sqrt{\frac{(x-\xi)\cos\Theta}{d^2 + (x-\xi)^2}} + 1 \right\} \\ = \frac{d}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2} - (x-\xi)\cos\Theta} \quad (28)$$

由它的解就可求得附着涡分布 $\gamma(x)$ 。

这里, L, d 为船的长度和吃水, 翼展为 $2d$ (考虑了镜像), 又 x 是满足边界条件的点, ξ 是 x 方向的积分变量。

关于这个积分方程的数值解法有博莱、井上、管井的著作, 博莱对力矩特性(二元特性)是无能为力的, 井上、管井在这方面作了改进。而在实际计算中, 如采用电子计算机, 则管井的方法显得方便。

首先, 用三角函数表示 x 和 ξ :

$$x = \frac{L}{2}(1 - \cos\varphi), \quad \xi = \frac{L}{2}(1 - \cos\theta), \quad 0 \leq \varphi, \theta \leq \pi \quad (29)$$

附着涡分布 $\gamma(\xi)$ 用未知函数 $A(\theta)$ 来表示:

$$\gamma(\theta) = U A(\theta) \frac{1 + \cos\theta}{\sin\theta} \quad (30)$$

即表示为用 $A(\theta)$ 修正的二元翼附着涡分布 $U(1 + \cos\theta)/\sin\theta$ 的形式。又 $A(\theta)$ 展开成:

$$A(\theta) = \sum_{k=0}^{n+1} \varepsilon a_k \cos k\theta \quad (31)$$

$$a_k = \frac{2}{n+1} \sum_{p=0}^{n+1} \varepsilon A(\theta_p) \cos k\theta_p \quad (32)$$

$$\text{其中 } \theta_p = \frac{\pi}{n+1} p$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (k=0, n+1), \quad 1 (k \neq 0, n+1)$$

用下列柯西积分来处理积分方程(27)

$$-\left(\frac{v}{U}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{Lr}{U}\right) \cos\varphi = \frac{AR}{\pi} F(\varphi, \theta_p) \int_0^\pi \frac{(1 + \cos\theta) \cos k\theta}{\cos\theta - \cos\varphi} d\theta \quad (33)$$

$$\text{其中 } F(\varphi, \theta_p) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^{n+1} \sum_{p=0}^{n+1} \varepsilon A(\theta_p) K(\varphi, \theta_p) \cos k\theta_p \quad (34)$$

$$AR = 2 \frac{d}{L}, \quad U^2 = u^2 + v^2$$

又柯西积分按照定积分式有:

$$\int_0^\pi \frac{(1 + \cos\theta) \cos k\theta}{\cos\theta - \cos\varphi} d\theta \\ = \pi \frac{(1 + \cos\varphi) \sin k\varphi}{\sin\varphi} \quad k \neq 0 \\ = \pi \quad k = 0 \quad (35)$$

则式(33)的右边为: