

2000

高速船及 特殊用途特殊结构船舶 航行安全论文集



中国航海学会
海洋船舶驾驶专业委员会
2000.12 大连

高速船及 特殊用途特殊结构船舶 航行安全论文集

中国航海学会
海洋船舶驾驶专业委员会
2000 年 12 月

前 言

高速船自 80 年代开始在我国内河及沿海港口陆续参加了旅客的短途运输。目前已成为水上客运的一支庞大的生力军。由于它速度快、结构薄、受风影响大和设备先进等特点,给操纵、管理提出了比一般船舶更高的或特殊的要求。如何安全和有效地操纵和管理高速船,是当前的重要课题。为此,中国航海学会海洋船舶驾驶专业委员会于 2000 年 6 月在大连舰艇学院召开了“高速船航行与操纵安全”学术讨论会。

特殊结构和特殊用途的船舶包括的范围很广,特别是近年来运输特种货物的专用船舶,如液化气船、化学品船、子母船、重吊船还有各种军用的舰艇等等,需要有专门的知识和技术才能管理好,操纵好,确保安全。中国航海学会海洋船舶驾驶专业委员会考虑到这方面的重要性,于 2000 年 10 月在大连海事大学召开了“特殊结构与特殊用途船舶的航行与操作安全”研讨会,作为一次初步的尝试。正由于它涉及的范围很广,不是召开一、二次研讨会所能解决的。委员会准备以后针对其中 1、2 种船舶再召开专门的研讨会,使研讨的问题更加深入,所起的作用更大。

在这里将以上两次学术会议的论文经初步筛选,印成论文集,供读者参考。

文集委托大连水产学院刊印。文干负责文集的编辑。王逢辰、夏国忠对论文的文字作了审校。有不当之处,请批评指正。

编者

2000 年 12 月

目 录

一 高速船安全问题的研究

高速舰船操纵性建模与风中运动研究	石爱国 杨宝璋 蔡 烽 侯建军 刘光明	1
排水型高速船与普通舰船在仿真建模时的比较	蔡 烽 刘光明 杨宝璋	6
几种高速船结构原理剖析	杨林家 夏国忠 陈世才	13
高速水翼船操纵运动数学模型的研究	杨盐生	18
从船舶操纵性的角度探讨高速船的定义	谭 箭	27
高速水翼双体船运动数学模型初探	任俊生 杨盐生	30
海浪方向谱在高速船稳性估算中的应用研究	蔡东明 邵利民 周立佳	37
长江上游高速船航路选择与安全航行探讨	刘元丰	43
高速船种类、特性及有关问题	汤海南	46
论高速船航行与操纵特点	王敬全 赵 朗 谷孝军	51
某型高速导弹护卫艇操纵性研究	石爱国 刘光明 蔡 烽 杨宝璋 侯建军	59
高速水翼双体船的结构和运动特点	任俊生 杨盐生	65
高速船船舶操纵体会	陈锦程	71
气垫船航向稳定性及旋回性的研究	孙文强 夏国忠 杨林家	75
高速船碰撞危险范围预测	孙文强 孙立成 夏国忠 王逢辰	78
水翼艇操纵性特点及操纵注意事项	庄 元 季永青	83
高速船避碰中雷达使用技术探讨	石 侃	87
高速船避碰对策研究	王洪修	95
高速船的操纵特性和避碰要点	汤海南	100
关于高速船的几个问题	王桂军 姚洪滨	105
小水线面双体船综述	于 洋 洪碧光 夏国忠 魏云雨	109
论高速与安全航速	吕江海	114
珠江水系高速船的发展前景	王运才	117
高速船的发展及其安全航行	熊振南	119
深化高速客船船员专业培训、考试管理的探索	张基杰	124
高速客船夜航训练的探讨	林文正	130

二 特殊用途、结构船舶的安全问题

重大件货装卸动态仿真系统中船体性能计算模型·····	贾传炎 史国友·····	136
高速变螺距舰船推力数学模型·····	石爱国 刘光明 蔡 烽 杨宝璋 侯建军·····	145
051 舰风中运动仿真研究·····	高占胜 石爱国 蔡 烽·····	152
液化气船的安全管理·····	李继明·····	161
化学品船舶的维修保养·····	齐进祥 葛 斌·····	165
内河单排一列式顶队编组及系结方法的探讨·····	张 兢 邱振良·····	168
试述半潜艇船“发展之路”轮的特性与对策·····	刘兴林·····	171
重吊船工作体会及注意事项·····	王之荣·····	176
甲 21205 驳沉堵九江决口处船队操纵技术·····	陈纪如·····	178
全压式 LPG 船货物蒸气压力的控制·····	王新辉·····	183
滑艇操纵性能特点及操作注意事项·····	郭国平·····	188
登陆舰操纵性研究·····	周立鑫 石爱国 蔡 烽·····	194
扫雷舰操纵性研究·····	石爱国 杨宝璋 蔡 烽 周立鑫·····	203
狭水道中航行船舶转向性能的研究·····	姚洪滨 王桂军·····	209
扫雷舰航行方法探讨·····	苏银荣 李全国·····	213
扫雷舰航行方法探讨·····	苏银荣·····	216
浅谈大型全冷式液化气船靠船操作·····	郭书忠·····	219
针对夜间常规潜艇水面航行安全的思考及建议·····	文英伟 王桂峰 鄢立秋·····	223
常规潜艇防台抗台工作的探讨及建议·····	文英伟 卢 翊 王桂峰·····	228
油气码 LPG 在过驳作业中事故处理应急对策·····	谭志荣 季永青·····	233

排水型高速船与普通舰船在仿真建模时的比较

蔡 烽 刘光明 杨宝璋

(大连舰艇学院航海系 116018)

摘要 本文对排水型高速船与普通舰船在操纵性仿真建模时的不同之处进行了分析比较,并以某型导弹驱逐舰为例,建立了排水型高速船的仿真模型。从仿真结果看,本文建立的排水型高速船的操纵性仿真模型是合理可行的,可以提高高速船操纵性计算精度。

关键词 高速船 操纵性 仿真

1 高速船与普通船的操纵运动比较

舰船在水中作操纵机动,严格来讲,它的运动有六个自由度:横荡、纵荡、垂荡、首摇、横摇和纵摇。不过对于水面舰船操纵性,一般最为关心的是其在水平面内的运动。就低速舰船的操纵性而言,其垂荡、纵摇和横摇运动幅度很小,可忽略其对舰船水平面内运动的影响,描述其操纵运动,只用横荡、纵荡和首摇运动三个自由度的操纵性方程已经足够。

舰船在回转时,作用于船体和舵上的水动力对重心的力矩,使得船体在整个回转过程中出现先内倾、后外倾的现象,如图 1、2 所示。图 3 给出了回转过程中横倾角(φ_d)

变化的一般规律。横倾的出现,使船体所受流体动力发生变化,从而影响舰船在水平面内的运动。不过低速舰船在旋回过程中的横倾,通常为 $1^\circ \sim 2^\circ$,对水动力的影响很小,可以忽略不计。而军舰、高速集装箱船等高速排水型舰船则不同,它们在高速旋回时会产生相当大的横倾角,对舰船的操纵性影响明显,这可由下面的舰船旋

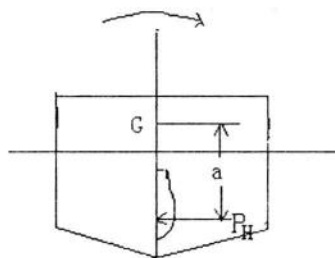


图 1 旋回中的内倾

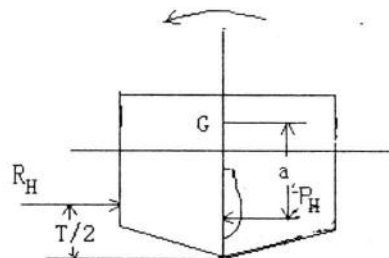


图 2 旋回中的外倾

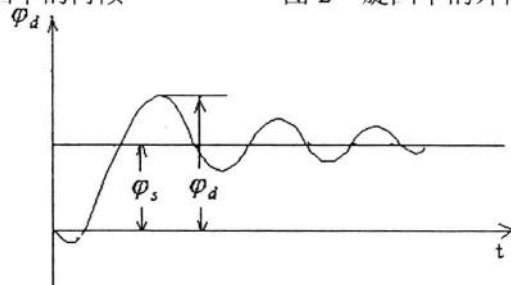


图 3 回转过程中横倾角的变化

同最大静横倾角的估算公式(1)清楚地看出:

$$\varphi_{s\max} = 1.4V_0^2 \cdot \frac{Z_g - Z_h}{hL} \quad (1)$$

Z_g ——舰船重心距基线的距离

Z_h ——水动力作用点距基线的距离

L ——船长

h ——舰船的横稳定中心高

V_0 ——舰船直线航行时的航速

从公式中可以看出,随着速度增加,舰船旋回时的横倾角迅速增大。因此要比较准确地描述军舰、高速集装箱船等高速舰船的操纵机动,仅根据横荡、纵荡、首摇这三个方程是不够的,必须充分考虑到横倾对高速舰船操纵性的影响,即需要用包括横倾在内的四个自由度的操纵性方程来描述其操纵性。

2 基于四自由度的高速船操纵性方程

2.1 基于四自由度的 MMG 方程

首先对四自由度操纵性方程(式2)和通常采用的 MMG 方程(式3)作一比较。

$$\begin{cases} X: m(\dot{u} - vr) = -\lambda_{11}\dot{u} + (\lambda_{22} + X_{vr})vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X(u) + X_{R0} + (1+t)T(\frac{u_p}{nD}) - F_N \sin\delta \\ Y: m(\dot{v} + ur) = -\lambda_{22}\dot{v} + (Y_r - \lambda_{11}u)r + Y_vv + Y_{NL} + F_N \cos\delta(1 + \alpha_H) + Y(\varphi) \\ N: I_z\dot{r} = -\lambda_{66}\dot{r} + \dot{N}_vv + N_rr + N_{NL} + N(\varphi) + x_\phi Y_H(X_R + \alpha_H X_H)F_N \cos\delta \\ L: I_z\dot{p} = -\lambda_{44}\dot{p} - N(p) - D\dot{l}(\varphi) - Y_H z_H + F_N z_R \cos\delta(1 + \alpha_H) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X: m(\dot{u} - vr) = -\lambda_{11}\dot{u} + (\lambda_{22} + X_{vr})vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X(u) + X_{R0} + (1+t)T(\frac{u_p}{nD}) - F_N \sin\delta \\ Y: m(\dot{v} + ur) = -\lambda_{22}\dot{v} + (Y_r - \lambda_{11}u)r + Y_vv + Y_{NL} + F_N \cos\delta(1 + \alpha_H) \\ N: I_z\dot{r} = -\lambda_{66}\dot{r} + \dot{N}_vv + N_rr + N_{NL} + x_\phi Y_H(X_R + \alpha_H X_H)F_N \cos\delta \end{cases} \quad (3)$$

方程中:

m 、 λ_{11} 、 λ_{22} 、 λ_{44} 、 λ_{66} ——船体质量及各个方向上的附加质量

X_{vr} 、 X_{rr} ——船体纵向水动力的二阶导数,

$X(u)$ ——直航时的船体阻力 X_{R0} ——零舵角时舵的阻力

t ——螺旋桨推力减额 F_N ——舵水动力的法向分量(垂直于舵面)

δ ——舵角 $F_N \sin\delta$ 、 $F_N \cos\delta$ —— F_N 在X、Y轴上的投影

α_H 、 $\alpha_H x_H$ ——舵对船体水动力和力矩的影响系数

$x_\phi Y_H$ ——对船舫的船体水动力矩转换为对重心的水动力矩的修正项

Y_H ——船体（不包括舵）横向水动力

Y_{NL} 、 N_{NL} ——船体水动力和力矩的非线性部分

$T(J_p)$ ——螺旋桨推力 ϕ ——横摇角， $\dot{\phi} = p$

$N(p)$ ——横摇阻尼力矩； $DI(\phi)$ ——舰船的横向扶正力矩；

z_H 、 z_R ——船体横向力 Y_H 和舵力 F_N 作用点至船重心 G 的垂向距离；

$Y(\phi)$ 、 $N(\phi)$ ——横倾对 Y_H 、 N_H 影响的附加项。

通过比较可以看出，在 X 方向上，二者是完全相同的，由于速度响应方程是根据 X 方程推导出来的，因此可以认为速度响应方程所受横倾的影响可以忽略。但在四自由度操纵性方程的 Y 和 N 方程中，分别比通常的 MMG 方程增加了 $Y(\phi)$ 和 $N(\phi)$ 两项，如果能导出 $Y(\phi)$ 和 $N(\phi)$ 的表达式，计入响应方程的推导过程，就可以推导出考虑横倾影响的响应方程，这就是本文推导该响应方程的思路。

2.2 计算 $Y(\phi)$ 和 $N(\phi)$

有关文献认为：根据对试验资料的分析， $Y(\phi)$ 和 $N(\phi)$ 可以表示如下：

$$\begin{cases} Y(\phi) = 0 \\ N(\phi) = N_\phi \phi + N_{|\phi|} |\phi| + N_{r|\phi|} r |\phi| \end{cases} \quad (4)$$

即横倾对横荡的影响不大，可以忽略，而主要影响的是舰船的首摇运动。在 N_ϕ 的表达式中，后面的二阶项是相对小量，从操纵实际需求考虑，可以只取一阶项，即：

$$\begin{cases} Y(\phi) = 0 \\ N(\phi) = N_\phi \phi \end{cases} \quad (5)$$

可以看出，横倾对首摇所造成的影响主要集中在 N_ϕ 上。

2.3 $N(\phi)$ 的力学本质

当舰船在旋回过程中有较大的横倾时，以向左横倾为例，可将作用在舰体上的水动力分解成左右两舷各一部分，如图 4 所示。由于舰体向左横倾，使得左舷的吃水比右舷要深，从而使作用在左舷的水动力矩

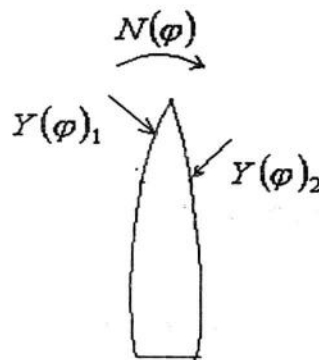


图 4 船体所受的水动力

比右舷的大，使舰向右转动。因此舰船发生横倾，就力学本质来说是增加了一个使舰船向横倾另一舷偏转的力矩。从这一点来看， $N(\phi)$ 所起的作用实际上与 $N_v v$ 是相同的，相当于增加了 $N_v v$ 的值。

因此只需要对 N_v 进行相应的修正，得到一个等效于 $N_v + N_\phi$ 的 $\hat{N}_v$ ，再将其代入求解

$K T$ 指数的公式即可。由此可以得出这样的结论：考虑横倾影响的响应方程的形式可以与原来的响应方程完全一样，只需要对水动力导数 N_v 进行相应的修正，使其包含横倾的影响，并用修正后的 $\hat{N}_v$ 来代替 N_v 。

下面给出的是未考虑横倾影响的舰船响应方程及其参数求解公式(6)、(7)：

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = k\delta + kT_3 \dot{\delta} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_1 T_2 &= (m + m_y)(I_z + J_z)/C \\ T_1 + T_2 &= -[(m + m_y)N_r + (I_z + J_z)Y_v]/C \\ K &= (Y_\delta N_v - N_\delta Y_v)/C \\ C &= Y_v N_r + N_v[(m + m_x)\mu_0 - Y_r] \end{aligned} \quad (7)$$

从中可以看出，与 N_v 有关系的是 K 和 C ，所以只要将上述公式中 K 和 C 表达式中的 N_v 换成经过修正的 $\hat{N}_v$ ，即可计算出考虑横倾情况下的 K 、 T_1 、 T_2 、 T_3 。

当然，严格讲来，旋回横倾对 N_r 、 N_δ 等水动力参数也产生影响，根据我们的看法，其影响小于 N_v ，从操纵舰船实际着眼，可以不作计算。

2.4 求 $\hat{N}_v$ 的两种途径

问题归结为该如何用 N_ϕ 对原有的 N_v 进行相应的修正，而最终得到修正后的 $\hat{N}_v$ 。下面提供两个途径：

2.4.1 已知横倾的水动力导数 N_ϕ

首摇响应方程(6)可由操纵线性方程导出，据此可以将横倾所产生的作用力代入操纵线性方程的 Y 和 N 的表达式中去，再次推导，得出形式相同、内涵有所变化的首摇响应方程。具体形式如方程(8)和(9)：

$$(m + m_y)\dot{v} - Y_v v + (m + m_x)\mu_0 r - Y_r r = Y_\delta \delta \quad (8)$$

$$(I_z + J_z)\ddot{r} - N_v v - N_r r = N_\delta \delta + N_\phi \phi \quad (9)$$

将(9)式对 t 求导得到：

$$(I_z + J_z)\ddot{r} - N_v \dot{v} - N_r \dot{r} = N_\delta \dot{\delta} + N_\phi \dot{\phi} \quad (10)$$

为了消去 $\dot{v}$ ，将(10) $\times (m + m_y)$ + (8) $\times N_v$ 得：

$$\begin{aligned} (I_z + J_z)(m + m_y)\ddot{r} - N_r(m + m_y)\dot{r} - Y_v N_v v + (m + m_x)N_v \mu_0 r - N_v Y_r r \\ = N_\delta(m + m_y)\dot{\delta} + N_\phi(m + m_y)\dot{\phi} + N_v Y_\delta \delta \end{aligned} \quad (11)$$

为了消去 v ，将(11)-(9) $\times Y_v$ 得

$$\begin{aligned} (I_z + J_z)(m + m_y)\ddot{r} - N_r(m + m_y)\dot{r} + (m + m_x)N_v \mu_0 r - N_v Y_r r - (I_z + J_z)Y_v \dot{r} + Y_v N_r r \\ = N_\delta(m + m_y)\dot{\delta} + N_\phi(m + m_y)\dot{\phi} + N_v Y_\delta \delta - Y_v N_\delta \delta - Y_v N_\phi \phi \end{aligned}$$

(12)

经整理得:

$$\begin{aligned} & (I_z + J_z)(m + m_y)\ddot{r} - [N_r(m + m_y) + (I_z + J_z)Y_v]\dot{r} + [(m + m_x)N_v u - N_v Y_r + Y_v N_r]r \\ & = (N_v Y_\delta - Y_v N_\delta)\dot{\delta} + N_\delta(m + m_y)\dot{\delta} + N_\phi(m + m_y)\dot{\phi} - Y_v N_\phi \phi \end{aligned} \quad (13)$$

方程(13)实际就是考虑横倾影响的首摇响应方程,将该方程与未考虑横倾的响应方程(6)相比较,可知只是在方程的右边多出 $N_\phi(m + m_y)\dot{\phi} - Y_v N_\phi \phi$ 项。为最后得到的响应方程形式与方程(6)的形式完全一样,需设法将上列两项横倾影响合并到水动力导数 N_v 中去,即将 N_v 变换成 $\hat{N}_v$ 。方程的最后形式为:

$$\begin{aligned} & (I_z + J_z)(m + m_y)\ddot{r} - [N_r(m + m_y) + (I_z + J_z)Y_v]\dot{r} + [(m + m_x)\hat{N}_v u - \hat{N}_v Y_r + Y_v N_r]r \\ & = (\hat{N}_v Y_\delta - Y_v N_\delta)\dot{\delta} + N_\delta(m + m_y)\dot{\delta} \end{aligned} \quad (14)$$

可得:

$$\hat{N}_v [(m + m_x)ur - Y_r r - Y_\delta \delta] = N_v [(m + m_x)ur - Y_r r - Y_\delta \delta] + Y_v N_\phi \phi - N_\phi(m + m_y)\dot{\phi} \quad (15)$$

$$\text{由此可以得到如下的修正公式: } \hat{N}_v = N_v + \frac{Y_v N_\phi \phi - N_\phi(m + m_y)\dot{\phi}}{(m + m_x)ur - Y_r r - Y_\delta \delta} \quad (16)$$

这样,只要知道 N_ϕ ,就可利用该公式实现对 N_v 进行修正,从而得到 $\hat{N}_v$ 。再计入非线性项 αr^3 ,即可得到考虑横倾影响的二阶非线性响应方程。

2.4.2 N_ϕ 未知

鉴于 K 与 N_v 有密切的关系,则还可以按照下面的思路进行:

(1) 运用系统辨识技术对实船或自航模的高速性试验数据进行辨识,或通过其它途径,得到回转性指数 $\hat{K}$,由于该 $\hat{K}$ 是通过高速性试验得到的,所以此时得到的 $\hat{K}$ 值,是应该包含横倾影响在内的。

(2) 将除 N_v 外的其它各水动力导数代入公式(7)中求解 K 的方程,根据 $\hat{K}$ 和其他各水动力导数就可以计算出 $\hat{N}_v$ 的值。

本文在这里采用的是第一种思路,即利用公式(16),通过计算 N_v 的修正值,得到 $\hat{N}_v$,进而计算出 K 、 T_1 、 T_2 、 T_3 等操纵性指数。

3 高速船的操纵性仿真

为了检验上述思路的正确性,本文建立了某型驱逐舰的操纵性仿真模块并进行了测试。现将仿真情况叙述如下:

3.1 某型驱逐舰的仿真测试结果

表 1 某型驱逐舰船模试验所得各水动力导数值

m'	0.003773	Y_v'	-0.0132	N_v'	-0.00167
m_r'	0.00008678	Y_r'	0.00214	N_r'	-0.00272
m_y'	0.0052066	Y_δ'	-0.00313	N_δ'	0.0055
I_z'	0.000184872	J_z'	0.000275045	N_φ'	-0.00268

表 2 两种条件下的操纵性指数值

操纵性指数 条件	K'	T_1'	T_2'	T_3'
未考虑横倾	2.3561	0.75832	0.1648	0.63457
考虑横倾	2.8944	0.8822	0.1599	0.5831

表 3 右 350、30 节旋回试验结果

试验情况 测试内容	实船试验	未考虑横倾的情况		考虑横倾的情况	
	参数值	参数值	误差	参数值	误差
初始航向	0	0		0	
直线航速 (kn)	29.3	29.3		29.3	
舵角 (°)	35	35		35	
回转航速(kn)	25	25.4	1.6%	25.02	0.2%
战术直径 (m)	893	1009	13%	941	5.3%
回转周期 (s)	207	275	32%	251	20%

3.2 几点结论

根据上述结果,可以得到以下几点结论:

3.2.1 对于军舰、高速集装箱船等排水型高速舰船而言,由于其在高速旋回时横倾角比较大(某型驱逐舰全速满舵旋回时的最大横倾角接近 10° ,稳定后的平均横倾达到 7°),使得横倾对舰船操纵性的影响非常明显,如果不加以考虑,必然会造成比较大的误差,而考虑横倾以后误差可以得到明显减小,与实船试验数据比较吻合。所以要想比较准确地对高速舰船进行操纵性计算或仿真,考虑横倾的影响是必须的。

3.2.2 横倾对旋回操纵所造成的影响,一般来说主要体现在增加了舰船的外舷水动力,使旋回加速,减少旋回直径,缩短旋回周期。

3.2.3 通过仿真试验的结果,证明了采用修正 N_v 的响应方程的方法,简明、可行。而且采用这种方法,便于从实船的一般测试数据中推出并修正该方程的参数,所以它是一

种更为实用的操纵性数学模型。

当然,本文所采用的处理方法,由于受到条件限制,比较简略,对于横倾的影响只考虑了对 N_v 的影响且限于线性项 N_φ 。如果想进一步提高精度,还需要考虑其它水动力导数及高阶项、耦合项对旋回的影响。

参考文献

- 1、范尚雍,《船舶操纵性》. 国防工业出版社。1988 年.
- 2、贾欣乐,《船舶运动数学模型》. 大连海事大学出版社。1999 年.
- 3、杨宝璋,《舰船操纵的理论和方法》. 海军大连舰艇学院。1993 年.

高速舰船操纵性建模与风中运动研究

石爱国 杨宝璋 蔡烽 侯建军 刘光明

(大连舰艇学院航海系 116018)

摘要 本文以我海军驱逐舰为对象,从建立非线性响应方程出发,阐述舰船自由机动方程参数求取及附加外力的思路与方法,结合对驱逐舰自由机动及风中运动的仿真计算,探讨舰船操纵的方法和注意事项。

关键词 舰船操纵 舰船仿真

1. 前言

船舶操纵性研究是国内外造船界和航海技术界研究的前沿课题和热点,随着计算机技术和新方法、新手段在船舶操纵性领域的引入,使船舶操纵性数学模型的研究进入了一个新的阶段,提高了预报船舶运动性能的精度,为船舶航行自动化提供更好的基础。

目前,船舶操纵性方程主要有三种形式,第一种是以阿勃科维奇为代表的整体型操纵性方程,第二种是以日本船舶操纵性学组为代表的分离型操纵性方程,第三种是以诺宾及野本谦作为代表的响应方程。本文主要阐述采用非线性响应方程建立高速舰船操纵性模型过程中的一些做法,以及运用该方程附加外力的方法、仿真与实船测试的比较及其结论。

2. 关于非线性响应方程

2.1 常用的非线性响应方程(推导过程见参考资料^[1])

$$\begin{cases} \dot{u} + a_{uu}u^2 + a_{\gamma\gamma}\gamma^2 + a_{\delta\delta}\delta^2u^2 = T(1-t) \\ T_1T_2\ddot{v} + (T_1 + T_2)\dot{v} + v = K_v\delta + K_vT_3v\dot{\delta} \\ T_1T_2\ddot{\gamma} + (T_1 + T_2)\dot{\gamma} + \gamma + \alpha_3\gamma^3 = K\delta + KT_3\dot{\delta} + D_0(T_z - T_y) + D_1(\dot{T}_z - \dot{T}_y) \end{cases} \dots(1)$$

其中: u 、 $\dot{u}$ ——舰船的线速度、线加速度;

v 、 $\dot{v}$ ——舰船的横移速度、横移加速度;

r 、 $\dot{r}$ 、 $\ddot{r}$ ——舰船回转角加速度、角加速度、角速度;

δ 、 $\dot{\delta}$ ——舵角及舵角变化率;

$T(1-t)$ ——螺旋桨有效推力;

m 、 m_x ——船质量及在 ox 轴方向附加质量;

a_{rr} 、 $a_{\delta\delta}$ 、 a_{vv} 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 K 、 K_U 、 D_0 、 D_1 ——舰船水动力组合参数;

2.2 含外力（风力）的非线性响应方程（推导过程见参考资料^[4]）

$$\begin{cases} \dot{u} + a_{uu} u^2 + a_{\gamma\gamma} \gamma^2 + a_{\delta\delta} \delta^2 u^2 = T(1-t) + a_{\text{风}1} + a_{\text{风}0} \\ T_1 T_2 \ddot{v} + (T_1 + T_2) \dot{v} + v = K_v \delta + K_v T_{3v} \dot{\delta} + b_{\text{风}2} \psi_{\text{相}} + b_{\text{风}1} \dot{\psi}_{\text{相}} + b_{\text{风}0} \\ T_1 T_2 \ddot{\gamma} + (T_1 + T_2) \dot{\gamma} + \gamma + \alpha_3 \gamma^3 = K \delta + K T_3 \dot{\delta} + D_0 (T_z - T_y) + \\ D_1 (\dot{T}_z - \dot{T}_y) + E_{\text{风}2} \psi_{\text{相}} + E_{\text{风}1} \dot{\psi}_{\text{相}} + E_{\text{风}0} \end{cases} \quad (2)$$

其中： $a_{\text{风}0}$ 、 $a_{\text{风}1}$ 、 $b_{\text{风}0}$ 、 $b_{\text{风}1}$ 、 $b_{\text{风}2}$ 、 $E_{\text{风}0}$ 、 $E_{\text{风}1}$ —— 风力附加项组合参数。

2.3 方程参数求取和调整的方法

2.3.1 求取方程参数

具体船的操纵性研究的基础是确定非线性响应方程中的参数。参数是由诸多水动力导数组合而成的。确定的方法有许多种，本文采用计算具体船的水动力导数，推出方程参数，具体的推导过程及求取步骤见参考资料^[4]。

2.3.2 调整方程参数

方程参数求取之后，仅仅是工作的初步，更重要的是根据实船试验数据比对调整方程参数，这是一项复杂又繁琐的工作，具有一定的难度和需要特殊的技巧处理，才能实现最终确定的参数能使方程实时计算具有良好的仿真结果，在工程上满足要求。

2.4 风力附加项计算的方法

外力附加到非线性响应方程，使得仿真具有更广泛的意义。我们采用从响应方程推导的过程入手，将外力与水动力结合在一起，形成的方程形式简单明了，物理意义明确，便于用计算的方法给出外力附加项。由于推导过程考虑了与水动力的相互作用关系，仿真结果比较满意。推导方法见参考资料^[4]。这里只给出风力附加项的形式：

(1) 线速度方程风附加项

$$X_{\text{风}} / (m + m_z) \dots \dots \dots (3)$$

(2) 横移速度方程风附加项

$$Y_{\text{风}} / (m + m_y) \dots \dots \dots (4)$$

(3) 角速度方程风附加项

$$[(N_v' Y_{\text{风}}''' - Y_v' N_{\text{风}}''') / a_v'] * (V_{\text{风}}^2 / V^2) + [(m' + m_y')(dN_{\text{风}}' / dt) / a_v'] * (V_{\text{风}}^2 / V^2) \dots (5)$$

2.5 船体水动力横向力及横向力矩导数分析

横向力与横向力矩导数是风力附加项的重要组成部分，在不同条件时，其数值的大小及符号将发生变化，具体分析如下：

2.5.1 正车前进时

右舷来风时，舰船推力与风力合成作用的结果使舰船一面前进、一面向下风漂移，合速度方向指向左舷前方，而水流自合速度反方向流向船体，水动力方向指向右舷斜后方，水动力中心位于船重心之前。于是有： $v < 0$ 、 $R > 0$ 、 $Y > 0$ 、 $N > 0$ 。

同理，左舷来风时，合速度方向指向右舷前方，水动力方向指向左舷斜后方，有：

$v > 0$ 、 $R < 0$ 、 $Y < 0$ 、 $N < 0$ 。

于是有： $Y_v < 0$ 、 $N_v < 0$

2. 5. 2 倒车后退时

右舷来风时，舰船推力与风力合成作用的结果使舰船一面后退、一面向下风漂移，合速度方向指向左舷后方，而水流自合速度反方向流向船体，水动力方向指向右舷斜前方，水动力中心位于船重心之后。于是有： $v < 0$ 、 $R > 0$ 、 $Y > 0$ 、 $N < 0$ 。

同理，左舷来风时，合速度方向指向右舷后方，水动力方向指向左舷斜前方，有： $v > 0$ 、 $R < 0$ 、 $Y < 0$ 、 $N > 0$ 。

于是有： $Y_v < 0$ 、 $N_v > 0$

2. 5. 3 停车漂浮时

右舷重心前来风，风力使舰船运动的合速度指向左舷后方，水动力方向指向右舷斜前方，水动力中心位于船重心之后。有： $v < 0$ 、 $R > 0$ 、 $Y > 0$ 、 $N < 0$ ，可得到：

$Y_v < 0$ 、 $N_v > 0$ ；左舷重心前来风，风力使舰船运动的合速度指向右后方，水动力方向指向左舷斜前方，水动力中心位于船重心之后。有： $v > 0$ 、 $R < 0$ 、 $Y < 0$ 、 $N > 0$ ，于是，可得到： $Y_v < 0$ 、 $N_v > 0$ 。

同理，右舷和左舷重心后来风，有： $v > 0$ 、 $R > 0$ 、 $Y > 0$ 、 $N > 0$ ，可得到： $Y_v < 0$ 、 $N_v < 0$ 。

结论：重心前来风， $Y_v < 0$ 、 $N_v > 0$ ；重心后来风， $Y_v < 0$ 、 $N_v < 0$ 。

$N_v = l_B Y_v$ 。 l_B 为水动力中心到船重心的水平距离，其符号规定为，水动力中心在重心之前 l_B 大于零，否则小于零^[2]。

3. 仿真计算

我们以 051 型军舰为模型，利用前述方法建立开阔水域的非线性响应方程，设置各种条件的舰船运动，适时观察舰船在前进状态、后退状态、停车漂浮状态时风中运动规律，得到以下结果：

3. 1 回转运动分析

实线为无风时的旋回圈，虚线为初始风向 30° 、风速 10m/s 时的旋回圈。

3. 2 舰船停车惯性分析

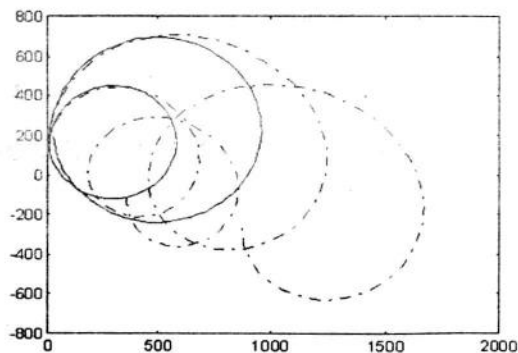


图 舰艇正车前进回转运动轨迹

表 1 舰船停车时的惯性距离惯性时间

停车速度 (kn)	无风		有风 $\theta = 30^\circ, U_T = 10\text{m/s}$	
	惯性距离 (m)	惯性时间 (s)	惯性距离 (m)	惯性时间 (s)
18 ~ 0.5	1008	430	673	205
14 ~ 0.5	816	410	520	220
6 ~ 0.5	316	305	195	145
-6 ~ 0.5	172	170	207	280

3. 3 风中运动分析

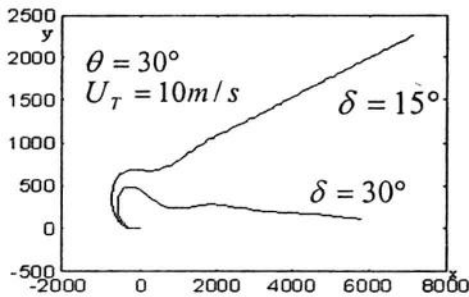


图 2 舰艇风中倒车后退回转运动

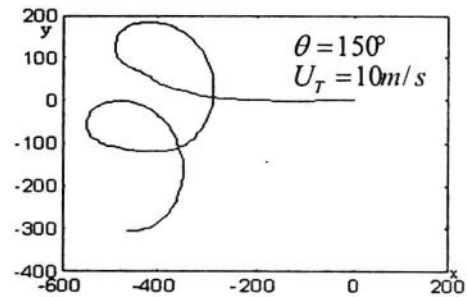


图 3 舰艇风中倒车后退回转运动轨

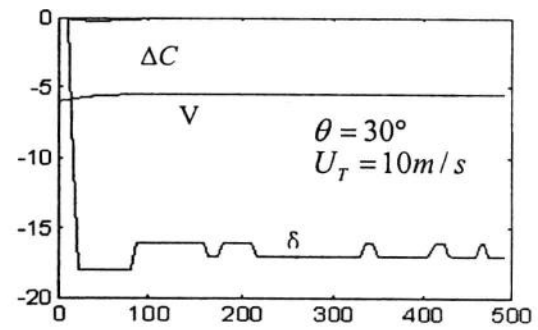
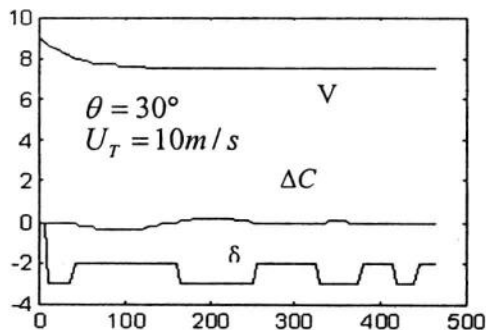


图 4 前进 (左)、后退 (右) 时受 30° 风操纵保持航向时的速度 V 、舵角 δ 及航向偏差 ΔC (弧度)

3. 4 从仿真结果看, 我们可以得出以下结论:

3. 4. 1 对该型舰船而言, 无风时舰船的回转直径约为 4.7 倍船长 (30 度舵角时)、7.6 倍船长 (15 度舵角时), 初始船速对回转直径影响不大; 有风时舰船的回转直径受风向风速直接影响, 回转直径、角速度和船速均发生变化, 与无风时有明显差别。从图 1 可以看出: 有风时, 旋回圈呈螺旋线状向下风漂移。

3. 4. 2 初始风向不同, 舰船航向变化及稳定时间不同。体现在船舶操纵性上是风作用后船的运动惯性的差异。

3. 4. 3 后退时受风, 若不摆舵, 无论是船首还是船尾来风, 趋势都是船尾迎风。船尾迎风偏与风向风速有关, 当风向越靠近船首、风速越大时, 船的航向越难以保持, 即使摆大舵角, 也不可能制止船首的偏转。但双车双舵舰船采用错车配以满舵, 能够实现有强风中回转。

3. 4. 4 停车漂浮状态, 舰船运动规律是: 停车漂浮时受风, 不论舰船的初始状态

姿态对舰船的运动区域和稳定运动的时间有较大影响。

3. 4. 5 从舰船风中保向的仿真看,前进时用较小的舵角即可保向,而后退时保向则需要采用较大的舵角。

4. 舰船风中运动仿真的两个问题

4. 1 风中舰船横倾分析

舰船受风将会引起船体的横倾。除了风压中心在舰船高度上偏离重心外,不均匀风所带来的随距离海面高度越高,风力越大。其综合作用的结果,使舰船向下风横倾。当舰船在风中回转时,回转形成的横倾将与风力产生的横倾叠加,最大横倾角的计算可以采用下列公式:

$$M_{\theta} = C_w F_w A_s (Z_A - \frac{T}{2}) + C_T C_S \frac{V^2 W}{R} \dots\dots\dots (6)$$

其中: M_{θ} ——横倾力矩

C_w ——计算系数

Z_A ——风压中心距基平面的距离

T ——舰船吃水

C_T ——与水线长度、重心高度及吃水相关的系数

C_S ——计算常数

W ——舰船排水量

R ——回转半径

4. 2 船体部分受到遮蔽时风对舰船运动的影响

当舰船运动接近或进入泊位时,可能会出现部分船体被陆上建筑物或码头遮蔽的情况,此时,船上的风力分布将发生变化,风压中心将向未受风的船体反方向移动,由于船体是一整体,因此,风使船体的运动发生改变,风力越强,影响越明显。尤其在吹开风、大低潮时,船体上受风的改变可能使舰船偏转方向突然变化,驾驶员如果没有充分的准备,极有可能使舰船失控,触碰码头。

参考文献

- 1、范尚雍,《船舶操纵性》,国防工业出版社。1988年.
- 2、施生达,《潜艇操纵性》,国防工业出版社。1995年.
- 3、贾欣乐,《船舶运动数学模型》,大连海事大学出版社。1999年.
- 4、杨宝璋,《舰船操纵的理论和方法》,海军大连舰艇学院。1993年.