

图 2

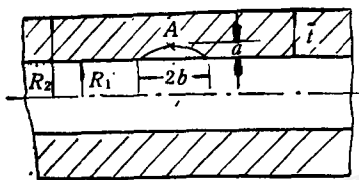


图 3

(7)和(8)中各项均乘以 0.7 系数,以作为计算该表面裂  $K_{I,A}$  的公式,由材料试验知表面裂纹  $\frac{da}{dN}$  均不大于穿透裂纹的  $\frac{da}{dN}$  值,从偏于安全角度,可采用穿透裂纹的  $\frac{da}{dN}$  结果,用式(4)计算,对于  $a/b = 0.8$  时的表面裂纹的  $a_c, N_p$  也列入表 1 中,  $a-N$  曲线见图 2 中虚线. 对于其它  $a/b$  的表面裂纹,均可用类似方法计算.

## 6. 讨论

5.1 由本文可见自紧度和裂纹构形对疲劳裂纹扩展寿命影响大,设计时应考虑其影响.本文采用了自紧残余应力的精确解析式,提高了计算疲劳寿命的精度.

5.2 初始裂纹尺寸对疲劳寿命影响很大,而临界裂纹尺寸的影响较小.

5.3 本文仅计算交变内压对应的疲劳寿命  $N_p$ , 将其乘以 0.85 系数,即  $0.85N_p$ , 为同等内压条件下火炮发射的打炮的疲劳寿命数<sup>[4]</sup>, 此关系还需进一步研究.

张忠志、冯梅仪和曹秀红同志参加了本文的疲劳实验工作,在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 美国陆军试验与鉴定司令部试验操作规程选编第三卷(2)“炮管寿命”兵器工业部科技局(1984).
- [2] Underwood, J. H., Throop, J. F., AD A087154 (1979).
- [3] Parker, P., AD A109081 (1981).
- [4] Underwood, J. H., Kendall, D. P., AD A116286 (1982).
- [5] 朱务学、查子初,《力学学报》增刊, (1987) 245~254.
- [6] 中国航空研究院主编《应力强度因子》手册,科学出版社(1981).
- [7] Tan, C. L., Fegner, R. T., *International Journal of Fracture* 16. 3 (1980).
- [8] 王志群,用边界元计算半椭圆表面裂纹的应力强度因子,《第二届工程中边界元法会议论文集》,1(1988), 280~287.

(本文于 1988 年 10 月 27 日收到)

# 船舶横向重力下水过程动力学分析

叶志明

(上海工业大学土木系)

冯燕伟 俞焕然

(兰州大学力学系)

**提要** 本文对现代船舶制造中的新工艺——船舶横向重力下水的动力学过程,作了详尽的理论分析与计算.编制了计算机软件,可供实际应用.

**关键词** 船舶制造工艺,横向重力下水,动力学

## 1. 引言

船舶在船台上建造到一定阶段后即可下

水.常用的方法是重力下水,即船舶在自身重力作用下沿船台倾斜滑道滑入水中.重力下水的方式有纵向与横向两种.纵向下水时船体的中纵剖面平行于滑道运动,实践证明,应用静力学的观点来处理纵向下水问题,其结果与实际情况很相近,计算也简单,此方法已相当成熟,已为国内外各船厂普遍采用的下水方式<sup>[1]</sup>.

横向下水时船体的中横剖面平行滑道运动<sup>[4,6]</sup>。这种下水方式带有相当的危险性。虽早在五十年代已有人作过研究<sup>[4]</sup>，但实际的船舶制造中仍很少采用。1971年西德 Schulte ü Bruns 船厂建成了万吨级横向下水滑道，首次横向下水的船名 Mobil Tade 号为载重量为 11000 吨的油轮，该轮长 120 米，宽 20.5 米，下水重量为 3200 吨（含压舱水 400 吨）。从而使得横向下水方式又引起广泛的注意<sup>[5-6]</sup>。Zdybek<sup>[9,6]</sup> 对船尾拖网渔船横向下水的模型进行了系统地实验研究，为实际船体的下水提供了实验依据。

从文献资料上看<sup>[4-6]</sup>，船舶横向下水的理论分析仍很少见到。从而使这种下水方式很难得以广泛采用。

我们结合国内某船厂将建造 7500 吨油轮，拟采用横向重力下水的设想，对船舶下水的各个过程，建立了对应的数学模型及初始与终了条件，对下水的全过程进行了理论分析与计算。从本文的研究可见，本文建立的理论分析方法可供实用。由于国外的有关实验资料中，原始数据很不完整，故本文的理论分析无法与之对比。本文的理论分析方法已编制成软件，可在 IBM-PC 机上运行。

## 2. 力学模型与数学模型

由文[2]知，船舶在水中的运动，一般为六个自由度。对于横向重力下水的船舶来说，船体的首摇、纵摇以及首尾方向的运动是不希望存在的。

由文 [3, 5, 6] 的实验及西德 Schulte ü Bruns 船厂的下水实践知：船舶在岸上向滑道末端下滑时，有些不均匀，船尾超前船首 2 米左右（120 米长的船）。而这些不均匀因素，是由于船壳用铜渣喷射除锈保养而使滑道污染，主要在船首部，但这是可以避免的，能使船体的纵摇减低到最小程度，甚至没有。船体的首摇，当船体滑行未了进入水时才会出现，一般采用压舱的办法使船首尾重量均等<sup>[5-6]</sup>，同时这也进一步避免了船体的纵摇，因此首摇的影响很小，可以略去。至于首尾方向的运动，显然可以不计。

由上分析可知，在本问题分析中均不考虑上述三个方向的运动，因而，船体的运动是平面型的，这样也给问题的解决带来可能性。

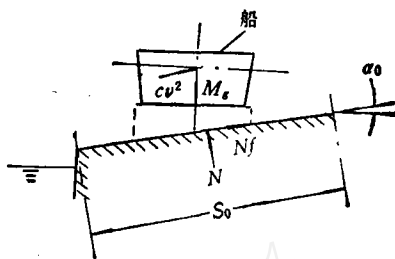


图 1

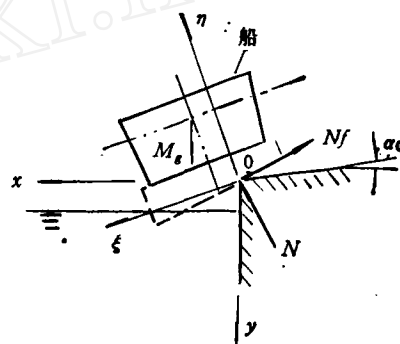


图 2

2.1 船舶在岸上滑行过程 参见图 1，运动方程及初始条件为

$$M \frac{dv}{dt} = Mg \sin \alpha_0 - N_f - C v^2 \quad (1)$$

$$v|_{t=0} = 0, S|_{t=0} = 0, S|_{t=t_0} = S_0 \quad (2)$$

式中， $M$  为船体下水质量， $c$  为风阻系数， $\alpha_0$  为滑道倾角， $S_0$  为滑道长度， $h_1$  为船底垫高， $h$  为船体重心高度。

2.2 船舶在滑道末端，开始倾翻且尚未入水 由图 2，运动方程应有三个。此时因船体未脱离岸，故其运动将受到岸的约束，实际独立的运动变量仅为两个。取动坐标系  $\xi\eta$ ，于是在动坐标内建立的运动方程为

$$\begin{aligned} & [1 + F_1 \lg \alpha_0] \ddot{\xi} + [(h + h_1 - \xi \lg \alpha_0) - F_1 \xi] \ddot{\alpha} \\ & = [\xi + F_1 (h + h_1 - \xi \lg \alpha_0)] \alpha^2 \\ & + 2[\lg \alpha_0 + F_1] \dot{\alpha} \dot{\xi} + g[\sin \alpha \\ & - F_1 \cos \alpha] \end{aligned}$$

$$(h + h_1)\ddot{\xi} + [\rho^2 + \xi^2 + (h + h_1 - \xi \operatorname{tg} \alpha_0)]\ddot{\alpha} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &= g \cos \alpha \cdot \xi + g \sin \alpha (h + h_1 \\ &\quad - \xi \operatorname{tg} \alpha_0) + 2(h + h_1 \\ &\quad - \xi \operatorname{tg} \alpha_0)\dot{\alpha} \xi \operatorname{tg} \alpha_0 - 2\dot{\alpha} \xi \dot{\xi} \end{aligned} \right\}$$

这里独立运动变量仅为  $\xi$  与  $\alpha_0$  初始条件为

$$\left. \begin{aligned} \xi|_{t=0} &= (h + h_1) \sin \alpha_0, \quad \dot{\xi}|_{t=0} = v_0, \\ \alpha|_{t=0} &= 0, \quad \dot{\alpha}|_{t=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $v_0$  为上一过程的末速度 (这里另有计算岸边反力  $N$  的表达式, 因篇幅所限, 从略了)。

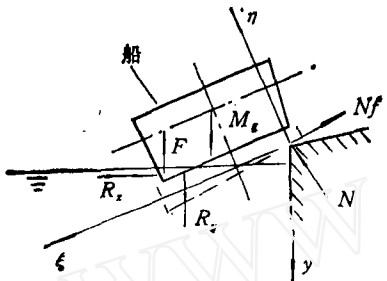


图 3

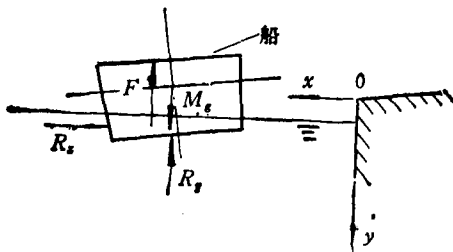


图 4

2.3 船体在滑道末端, 倾翻且入水 从图 3 见到, 本过程类似过程 2, 只是必须计入船体入水后引起的浮力与各种阻力的影响。对于动坐标系  $\xi\eta$ , 运动方程为

$$\left. \begin{aligned} M[\ddot{\xi} + (h + h_1 - \xi \operatorname{tg} \alpha_0)\ddot{\alpha} - \xi\dot{\alpha}^2 \\ - 2\dot{\alpha}\xi \operatorname{tg} \alpha_0] &= Mg \sin \alpha - fN \cos \alpha_0 \\ &+ N \sin \alpha_0 - F \sin \alpha - R_y \sin \alpha - R_x \cos \alpha \\ M[-\ddot{\xi} \operatorname{tg} \alpha_0 - \xi\ddot{\alpha} - (h + h_1 - \xi \operatorname{tg} \alpha_0)\dot{\alpha}^2 \\ - 2\dot{\alpha}\dot{\xi}] &= -Mg \cos \alpha + N(\cos \alpha_0 \\ &+ f \sin \alpha_0) + F \cos \alpha + R_y \cos \alpha \\ &- R_x \sin \alpha \\ M(\rho^2 + \xi^2 + \eta^2)\ddot{\alpha} - M\dot{\eta}\dot{\xi} + 2M\dot{\alpha}\dot{\xi}\dot{\xi} \\ &+ 2M\dot{\alpha}\dot{\eta} + M\dot{\xi}\dot{\eta} = Mg \cos \alpha \cdot \xi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} &+ Mg \eta \sin \alpha - F x_0 - M_R \\ &\pm k \dot{\alpha}^2 \sum_i l_i l_i' \end{aligned} \right\}$$

式中,  $R_x, R_y$  为  $x, y$  方向的流体阻力, 计算式为(微元)

$$dR = k_R (v_n)^2 dl \cdot l_i \rho_1 \quad (6)$$

这里  $k_R$  为阻力系数,  $v_n$  为船体侧面入水的法向速度,  $dl$  为船侧面微元长,  $l_i$  为具有相同船侧形线的相邻长度,  $\rho_1$  为水的密度。合阻力  $R =$

$\int_l dR$ ,  $M_R$  为流体阻力矩, 算式为

$$M_R = \int_l dM_R = k_R l_i \int_l \rho (v_n)^2$$

(微元至动系  $o$  点垂直距离)  $dl$  (7)

$F$  为船体入水部分的浮力,  $F x_0$  为浮力矩。  $k \dot{\alpha}^2 \sum_i l_i l_i'$  为波阻力矩,  $k$  为波阻系数,  $l_i$  为船体横剖面入水线长。

前过程的末端条件作为本过程的初始条件。

2.4 船体脱离岸, 入水后的过程 运动方程为(见图 4)

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x} &= -R_x, \quad M\ddot{y} = Mg - F - R_y, \\ M\rho^2\ddot{\alpha} &= -F(x_0 - x) - M_R \\ &\pm k \dot{\alpha}^2 \sum_i l_i l_i' \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

此时,  $M_R$  为对船体质心取矩。

在上述第三、四过程中, 船体已入水或部分入水, 这时须考虑船体在水中的附加质量。文献表明, 若要精确计算附加质量是极为困难的。工程中一般以附加质量系数的引入来估算, 这可以满足设计需要<sup>[2]</sup>。本文中船体附加质量, 平动或转动以  $\mu m$  或  $\mu J$  计, 其中  $m$  表示排水质量,  $J$  为相应的质量矩。附加质量系数  $\mu$  的取值, 由文[2-6], 对平动以 0.9-1.2, 转动为 0.05-0.15, 该系数的具体确定可结合实验加以调整。

### 3. 理论计算方法

过程 1: 当岸上滑道长度  $S_0$  一定时, 有船滑行到岸边的末速度  $v_0$  为

$$v_0 = \sqrt{\frac{A}{B} (1 - e^{-2BS_0})} \quad (9)$$

式中:  $A = g(\sin \alpha_0 - f \cos \alpha_0)$ ,  
 $B = C/M, N = Mg \cos \alpha_0$ .

过程 2: 方程(3)为非线性微分方程组, 求解相当困难. 采用迭代法求其数值解. 迭代方法为

1) 从某一时刻的  $\xi_k, \dot{\xi}_k, \alpha_k, \dot{\alpha}_k$  出发, 代入(3)式右端;

2) 求解方程组 (3), 得到此时刻的  $\dot{\xi}_k$  与  $\dot{\alpha}_k$ ;

3) 当时间间隔  $\Delta t$  很小时, 有下一时刻 ( $k+1$ ) 与此时刻 ( $k$ ) 之关系式

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k+1} &= \alpha_k + \dot{\alpha}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\alpha}_k (\Delta t)^2 \\ \xi_{k+1} &= \xi_k + \dot{\xi}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\xi}_k (\Delta t)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

及

$$\dot{\alpha}_{k+1} = \dot{\alpha}_k + \ddot{\alpha}_k \Delta t, \quad \dot{\xi}_{k+1} = \dot{\xi}_k + \ddot{\xi}_k \Delta t \quad (11)$$

4) 利用 (10) 与 (11) 式, 求下一时刻的  $\xi_{k+1}, \dot{\xi}_{k+1}, \alpha_{k+1}, \dot{\alpha}_{k+1}$ ;

5) 返回到(1), 反复迭代求解, 求得  $\xi, \dot{\xi}, \alpha, \dot{\alpha}, x, \dot{x}, y, \dot{y}$  关于时间  $t$  的变化规律.

另有反力算式为

$$N_k = \frac{M}{\cos \alpha_0 + f \sin \alpha_0} [-\dot{\xi}_k \operatorname{tg} \alpha_0 - \xi_k \ddot{\alpha}_k - (h + h_1 - \xi_k \operatorname{tg} \alpha_0) \ddot{\alpha}_k - 2\dot{\alpha}_k \dot{\xi}_k] + \frac{Mg \cos \alpha_k}{\cos \alpha_0 + f \sin \alpha_0} \quad (12)$$

这对于滑道及其末端和船底垫块的强度设计是有用的.

过程 3: 求解方法同前过程, 则是更加繁复.

过程 4: 同前两过程.

上述过程 2—4 的计算中, 对于每一增量  $\Delta t$ , 均要判断是否已由前过程进入下一过程.

#### 4. 算例

某油轮,  $M = 2400 \times 10^3 \text{kg}$ , 长 134 米,  $h = 4.86$  米,  $\rho = 5.9$  米,  $h_1 = 1$  米,  $\alpha_0 = 3.58^\circ$ , 船宽 19 米, 船舷高 5.7 米, 滑道终端高于水面 0.1 米,  $S_0 = 10$  米, 摩擦系数  $f = 0.03$ , 对于  $\mu: y$  方向取低值 0.9,  $x$  方向取高值 1.2, 转动的  $\mu$  取低值, 这样的取值是偏保守的. 阻力系数: 平动时为 1<sup>[3]</sup>, 转动为 0.02<sup>[2]</sup>. 计算结果见图 5 与表 1 所示.

表 1 船舶横向下水理论计算部分结果 ( $\Delta t = 0.05$  秒)

过程 1	$v_0 = 2.508217 \text{ (m/s)}$				
	$t(\text{s})$	$\alpha(^{\circ})$	$x(t) \text{ (m)}$	$y(t) \text{ (m)}$	$N(\text{kg}\cdot\text{m/s}^2)$
过程 2	0.25	0.1634787	1.002876	-5.795517	$2.27875 \times 10^7$
	0.45	0.7821611	1.527326	-5.749143	$2.164403 \times 10^7$
	0.65	2.116191	2.067822	-5.67145	$2.022935 \times 10^7$
	0.85	4.352849	2.630299	-5.538695	$1.869989 \times 10^7$
绝对末速度 $v_m = 3.00213 \text{ (m/s)}$					
过程 3	1.05	7.564677	3.141833	-5.379273	$1.383876 \times 10^7$
	1.40	13.13940	4.329616	-4.84703	$1.154091 \times 10^7$
	1.75	15.24707	5.823770	-4.212652	$1.276359 \times 10^7$
	2.10	13.26573	7.634528	-3.762332	$1.067505 \times 10^7$
	2.55	8.118189	9.777717	-3.877705	8416253
过程 4	3.05	0.3927841	11.70483	-4.157696	
	3.55	-10.05320	13.42144	-4.470162	
	4.05	-14.30410	15.00800	-4.257885	
	4.55	-8.922811	16.45711	-3.695664	
	5.05	4.370953	17.77171	-3.741641	
	5.65	11.99082	19.30288	-3.955081	
	6.05	7.980345	20.18846	-3.623844	

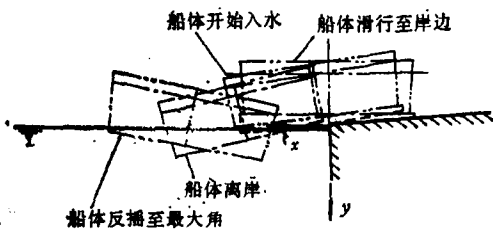


图5 船体入水过程

本项研究工作中阻力系数、附加质量系数的处理较粗略,还有待于进一步与实验测量进行调整,使理论分析更为完善。

### 参 考 文 献

[1] 上海交通大学船舶系编,船舶静力学,上海交通大学出

- 版社出版。
- [2] C. H. 勃立哥维新斯基著,魏东升等译,船舶摇摆,高等教育出版社(1959)。
- [3] Zdybek T., Results of Systematic Model Tests of a Stern Trawler Side Launching, The 2nd Italian-Polish Seminar on Ship's Hydrodynamics, Genova, Italy (1975)。
- [4] Doust D. J., Side Launching of Ships with Special References to Trawlers, *Trans. I.N.A.* 97, 1(1955)。
- [5] Zdybek T., Experience with the Side Launching Model Testing, *Budownictwo Okretowe*, 3(1975)。
- [6] T. Zdybek, J. Walczak and T. Parszuto, Results of Systematic Model Tests of a Cargo Ship Side Launching, (in Polish), *Acta Technica Gedanensia*, No. 4, Gdansk, (1967)。

(本文于1989年2月28日收到)

## 用于振荡水流中的测力传感器

袁茂竹 高宇欣

(中国科学院力学研究所十室)

**摘要** 本文叙述了用于振荡水流中的测力传感器的设计原理、结构及其特性。实际使用二年多,测量结果令人满意。

**关键词** 振荡流,升力,阻力,传感器

### 1. 引言

正弦振荡流动是一种基本流动现象。利用U形水槽产生振荡、水流<sup>[1]</sup>,已广泛用于海洋工程课题。振荡水流中结构物载荷测量结果为工程设计提供依据。因此测量实验件在振荡水流中受力大小及其变化过程有重要意义。为此我们研制了适应振荡水流中实验技术要求的测力传感器。本文着重介绍这种传感器的原理,结构和实际使用结果。

### 2. 传感器的设计原理及结构

振荡水流的流速大小和方向依正弦变化,要求测力传感器对称地给出正反两种流速方向上实验件的受力量值。有良好的线性和相同的灵敏度。据此技术要求,选择了接受型晶片

作感受元件。晶片表面敷上金属材料(镀银)作电极。当晶片承受机械力使晶片产生压缩、伸张、弯曲等形变时在电极上呈现电荷,即压电效应。在一定应力范围内随应力变化呈线性关系,而且可逆。整个测力量程内感受元件充分地处于线弹性范围内并有足够的容限,有下列关系:

$$E = gT$$

其中,  $T$  为机械力,  $E$  为感应电场强度,  $g$  为晶片电气常数。受力状况属于感受元件低功率应用。

感受元件选择柔顺系数高的结构,为双叠片悬臂支撑,示于图1。晶片受力后为弯曲形

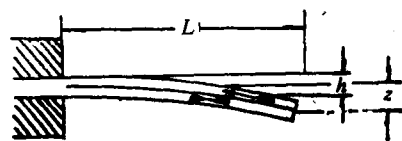


图1 传感器结构原理