

船舶在大风浪中横摇稳性变化的理论研究

张寿桂

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 对波浪中船舶横摇稳性的特点进行了介绍和分析, 提出一种新的研究船舶发生大倾角横摇时的稳性力臂的方法, 在运用逐步逼近法计算每个横剖面的左右侧浸深时, 考虑了在横摇过程中由于船舶首尾不对称造成的纵倾对每个横剖面浸深的影响, 以及横摇过程中所发生的纵倾运动对横摇稳性的影响。然后, 根据波浪中重力与浮力平衡、纵倾力矩之和为零这两个条件来求取横摇稳性力臂值。

关键词: 船舶; 横摇稳性; 恢复力矩; 横剖面

中图分类号: U 661. 2

文献标识码: A

文章编号: 1673- 3185(2006) 01- 0050- 04

Theoretical Study Method for Roll Stability of Ships in Waves

Zhang Shou-gui

Abstract In this paper, the characteristics of roll stability of ship are introduced and analyzed, and a study method of stability moment when ship rolls in waves with a big inclination is presented. While calculating the immersed depth of the left and right side of transverse sections with step by step approaching method, the influences on the immersed depth of each transverse section due to the asymmetry between the fore and stern of ship, as well as that on roll stability by trimming during it rolls in waves are taken into account. Finally, the values of roll stability, in accordance with the condition of the balance between gravity and buoyancy of ship in waves and also with that the sum of trim moments is zero are obtained.

Key words ship; roll stability; restoring moment; transverse section

近年来海船在大风浪中倾覆的事故时有发生, 从这些船沉人亡的事故的调查分析来看, 发生事故的一个主要原因是操船人员没有足够考虑船舶在波浪中航行时稳性的损失。虽然这些翻沉的船在下水之前都经过船检部门的检验, 并且是在确认满足稳性规范后才交付使用的。商船船舶稳性规范中给出的船舶稳性是指船舶在静水中的横稳性, 但由于船舶横稳性与复杂的海洋环境、船舶运动操纵等因素密切相关, 其中复杂的海洋环境主要是指波浪的影响。大量事实证明, 一艘静水中航行性能优良的船舶在波浪中航行时其性能并不一定是优良的。波浪对于船舶性能的影响是多方面的, 其中最主要的是对船舶航行安全的影响。因此, 运用船舶静力学、动力学、耐波性理论以及流体力学等有关理论, 利用逐步逼近法求取船舶在波浪中大幅度横倾后的横剖面面积, 进而对船舶在波浪中的横摇稳性变化进行研究。

1 波浪中船舶瞬时吃水确定

船舶瞬时吃水也就是船舶某一时刻浸入水中的某一横剖面的吃水。当船舶在波浪中航行时, 由于船舶与波浪的相互作用, 船舶的位置、姿态及吃水直接影响到船舶的排水体积, 从而影响船舶的恢复力矩和稳性。因此, 船舶的瞬时吃水的计算方法对研究船舶在波浪中横摇运动的稳性具有重要意义。船舶在波浪中的瞬时吃水与船舶在波浪上的运动特性密切相关, 通常我们采用三种坐标系(图 1)来描述它们之间的这种关系^[1]:

1) 空间固定坐标系 $OXYZ$ 用来描述波浪的运动, 所以又可以写成 $O\xi\eta\zeta$ 。

2) 随船运动坐标系 $Gxyz$, Gxy 平面为船舶的静水面。

3) 惯性坐标系 $\alpha_1y_1z_1$ 固定在船上, 当船处于静平衡位置时与 $Gxyz$ 重合, 轴通过重心 G 向上。

收稿日期: 2005- 12- 20

作者简介: 张寿桂(1963-), 男, 副教授; 研究方向: 船舶自动化、海上交通信息工程及控制等

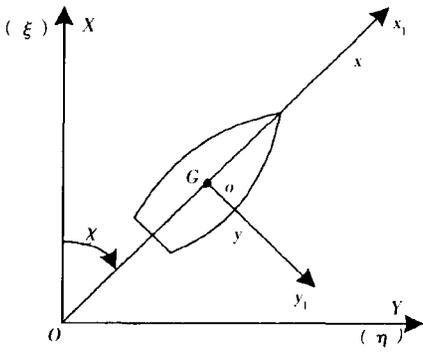


图 1 坐标系

假设作用于船舶的波浪为规则波, 其波幅为 a 、波数为 k 以波频 w 、波速 c 沿 $o\xi$ 轴的正方向运动, 则在 t 时刻其波面方程为:

$$\zeta(\xi, \eta, t) = a \cos(k\xi - \omega t) \quad (1)$$

为了计算方便, 在研究波浪中船舶的大倾角横摇稳性时暂不考虑航速的影响, 认为波速与船速几乎相同。在研究船舶的瞬时吃水时, 我们先假设:

- 1) 船舶的重心在整个横摇运动过程中的位置不发生变化;
- 2) 船宽远远小于船长, 即把船体当成一个细长体。

为了使计算更接近于实际, 在研究船舶在波浪上的横摇运动时, 考虑了船舶在波浪上的升沉与纵倾的影响, 假设 ζ_c 为某一时刻的升沉量, φ 为纵倾角, 则船舶的瞬时吃水为: $T' = T + \zeta(\xi, \eta, t) + \zeta_c + x \tan(\varphi)$, 其中 $\zeta(\xi, \eta, t)$ 为船舶某一横剖面处的波高, 即是水线面与入射波之间的相对运动位移, x 为某一横剖面距船舫在船艏方向的距离, T 为没有发生纵倾以及波浪影响时的平吃水。

根据力和力矩的平衡, 升沉量 ζ_c 和纵倾角 φ 满足以下关系^[2]:

$$\begin{cases} \int_L A(x) dx - \Delta = \zeta_c \int_L B(x) dx \\ \int_L A(x) dx - \Delta x_G = \varphi \int_L B(x) dx \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A(x)$ 为浸水部分的横剖面面积, L 为船长, Δ 为排水体积, $B(x)$ 为水线面宽。运用 MATLAB 的迭代算法就可以解出升沉量 ζ_c 和纵倾角 φ 的值。

根据上述假设, 我们把船体当成一个细长体, 取一微小长度的横剖面来研究。如图 2 所示, 在船长方向距离船舫为 x 处取一横剖面。

图 2 中 T_0 为没有发生纵倾以及波浪影响时的该横剖面的平吃水, δT 为波浪和纵倾影响后的该横剖面的吃水变化量, 其值为: $\delta T = \zeta(\xi, \eta, t) + \zeta_c + x \tan(\theta)$ 。则该横剖面在波浪以及纵倾影

响后的瞬时吃水为:

$$T' = T_0 + \zeta(\xi, \eta, t) + \zeta_c + x \tan(\theta) \quad (3)$$

式中, $\zeta(\xi, \eta, t)$ 为船舶某一横剖面处的波高, 即水线面与入射波之间的相对运动位移, 它可以通过式 (1) 计算得出。

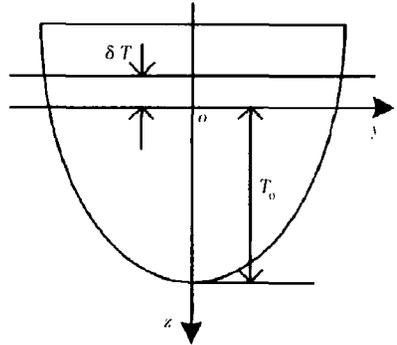


图 2 波浪影响下没有横倾时的横剖面的吃水

求取了横剖面的瞬时吃水后就可以根据船舶资料上给出的型值表, 运用内插法即可求出该微小横剖面的面积, 最后利用梯形法则即可求出船舶在波浪中的排水体积。

2 波浪中船舶大倾角横稳性的研究

在分析船舶在纵波中横摇运动稳性变化时, 有两个问题: 一是如何估算作为稳性变化原因的波压力, 二是如何求得作用在纵波中船舶横倾浸水部分的力和力矩。一般来说, 由于水粒子作轨圆运动, 静水中波压力梯度在波峰处比在波谷处大。应用规则波理论, 可作以下粗略的分析^[3]。

由前述可知在 t 时刻其波面方程为: $\zeta(\xi, \eta, t) = a \cos(k\xi - \omega t)$, 设水的密度为 ρ 重力加速度为 g 则其波压力 p 为:

$$p = \rho g \zeta - \rho g a e^{-kz} \cos(k\xi - \omega t) \quad (4)$$

由此可以得到水深方向的压力梯度:

$$\frac{dp}{dz} = \rho g \{1 + a k e^{-kz} \cos(k\xi - \omega t)\} \quad (5)$$

如果把作用在船体表面上的压力梯度用某深度处 $\zeta = \zeta_0$ 的值来代表 (本文取 $\zeta_0 = 1/2T_0$), 则:

$$\frac{dp}{dz} = \rho g \{1 + a k e^{-kz_0} \cos(k\xi - \omega t)\} \quad (6)$$

则由波的轨圆运动引起的压力梯度的变化可以用密度变化来代替。在这种情况下, $t = 0$ 时, 在离 $\xi = \xi_0$ 的船体中部 x 距离处, 浸水横剖面 $A(x)$ 的水密度 ρ^* 为:

$$\rho^* = \rho \{1 + a k e^{-kz_0} \cos(k(\xi_0 + x))\} \quad (7)$$

这样, 排水量为 W 的船舶在图 3 图 4 所示的纵波中横倾角为 φ 时的复原力矩为 $W \cdot \overline{GZ}$, 可以

表示为:

$$W \cdot \overline{GZ} = \rho g \int_L y_{B'}(x) A(x) dx + \rho g a k \sin^2 X \int_L \frac{\sin(k \frac{B(x)}{2} \sin X)}{k \frac{B(x)}{2} \sin X} \times e^{-k \zeta} z_{B'}(x) A(x) \sin[k(\zeta_c + x \cos X) - \omega t] dx - W \cdot \overline{OG} \sin \theta \quad (8)$$

式(8)中第一、二项为绕船体固定坐标原点 O 的形状复原力矩, 第三项为重量复原力矩; 其中 x 为波向角, 随浪状态下取 180° , $y_{B'}(x)$ 和 $z_{B'}(x)$ 为横倾状态下的浸水面积中心在惯性坐标下的坐标值。

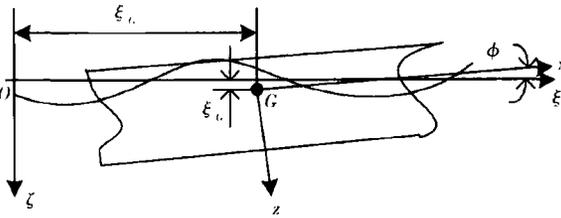


图3 船与波间的坐标位置关系

$$A(x) = \int_0^T 2b(z) dz + \int_{z_p}^0 b(z) dz + \int_0^{z_s} b(z) dz + \frac{1}{2} [b^2(z_p) - b^2(z_s)] \tan \varphi \quad (9)$$

一般情况下, 图 5(a) 可以作为上述关系的图解, 但是当横倾角较大时应考虑图 5(b)、图 5(c) 和图 5(d) 三种情况:

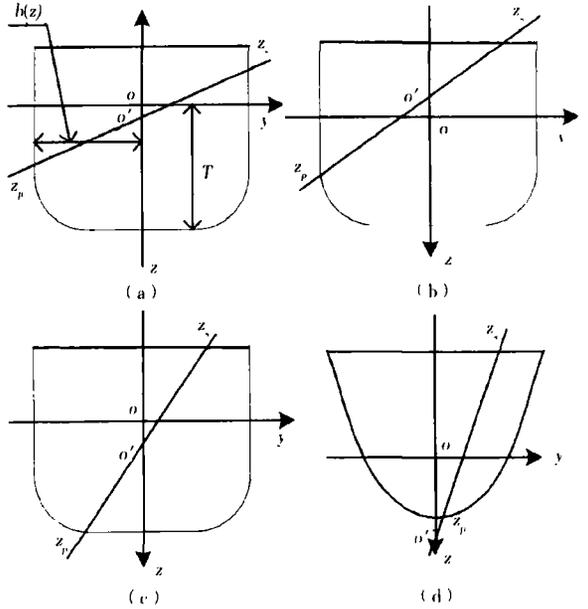


图5 船舶在波浪中横倾后沿船长处横剖面浸水面形状

由于横倾的船舶在随浪中运动时, 作用在船体浸水部分的浮力和船舶重量必须平衡, 纵倾力矩必须为零, 即满足以下两个条件:

$$\left. \begin{aligned} -\rho g \int_{x_1}^{x_2} [1 + a k e^{-k \zeta} \cos k(\zeta_c + x)] A(x) dx + W &= 0 \\ \int_{x_1}^{x_2} [1 + a k e^{-k \zeta} \cos k(\zeta_c + x)] A(x) dx &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10), 运用 MATLAB 数学工具语言编写一个 m 函数, 在此函数中具体计算 $A(x)$ 时, 利用逐步逼近法求得 z_p 和 z_s 后, 就可以求出 $A(x)$, 从而也可以求出 $y_{B'}(x)$ 和 $z_{B'}(x)$ 的值。然后将这三个值代入式(8)即可求出每种横倾状态时的 GZ 值, 从而得出船舶在波浪中的稳性曲线。

3 计算实例与分析

为了验证上述方法的正确性, 运用 MATLAB 迭代算法, 以一艘排水量 35 452.7 t 的散货船 SWAKOP 为例进行计算。分别计算了不同波长和不同船舶相对位置情况下的恢复力矩, 在本文中只计算了船舶在波浪中最为危险的情况——随浪情况, 波向角为 180° 。

图 4 所示的 $b(z)$ 为横剖面水线面的半宽, 它可以用正浮时的吃水和横倾时横剖面的左右吃水来表示。
由于横摇运动是非对称的, 船舶左右舷吃水并不相同, 所以不能再以简单的吃水来衡量。在此引入一个概念——浸深^[4]。船舶瞬时横剖面浸水面积与当时船舶在波浪中的吃水、船与波的相对位置以及横倾与纵倾等因素有关。设横倾水线与船型交点为 z_p 和 z_s , 本文称之为船舶左舷和右舷的浸深, 它们是纵倾角 θ 横摇角 φ 和瞬时吃水的函数。那么在 z_p 和 z_s 以及船舶姿态参数 θ φ 和瞬时吃水已知的情况下, 复原力矩由式(8)求得。求解式(8)的关键是求 $A(x)$ 和 $y_{B'}(x)$, 其中 $A(x)$ 可以用下式来计算^[4]:

此实例中 SWAKOP 散货船的主尺度如下:

总长 /m	169 00
两柱间长 /m	160 3
型宽 /m	27 7
型深 /m	14
满载吃水 /m	9 65
满载排水量 /t	35 452 7

选取此船的一种装载状态来计算, 此装载状态下其排水量为 33 770 89 t, 吃水为 9 633 m, 重心距船舯的纵向距离为 -2 897 m, 横向距离为 0 013 m, 垂向距离为 9 633~8 386 m。波浪为波长 $\lambda = 150$ m 的规则波。

图 6 中的曲线 a b c d e 分别表示波峰在船舯前 1/4 船长、船舯后 1/4 船长、船舯前 1/8 船长、船舯后 1/8 船长、以及船舯时的稳性曲线。从图 6 中可以看出当波峰处于船舯时, 船舶的稳性最差, 只要波峰不处于船舯, 船舶的稳性变化就很明显。因此在航行中为了改变波峰处于船舯的状态, 可以通过降低航速或者增加航速来达到目的。

由图 6 和图 7 可以看出船舶在波浪中运动时的一种比较危险的情况: 随浪运动, 当波峰处于船舯附近时, 其稳性力臂与静稳性力臂值相比较而言下降了很多, 并且稳性力臂消失角也比较小; 如果静稳性力臂值比较小的话, 船舶在随浪中运动波峰处于船舯时, 其稳性力臂将显然不够, 从而导致倾覆。这说明如果船速与波速几乎相同, 并且波长与船长大小差不多时, 则船舯将长时间处于波峰上, 如果受到突风作用, 则船舶的稳性力臂值将下降很多, 致使船舶的恢复力矩不足, 从而发生危险。因此, 船舶操纵人员应对自己所驾驶的船舶在随浪中运动波峰处于船舯时稳性力臂的大小做到心中有数, 以便应对外界环境发生变化时对船舶所带来的危险。如果船舶不是在随浪中运动, 我们可以将波分解成沿船首尾方向的波以及垂直于船首尾方向的波, 这时同样可以利用本文所述的方法求出其稳性曲线。

4 结 论

通过上述分析与计算表明, 当船舶在随浪中运动时, 如果波长与船长相差比较小, 波速与船速

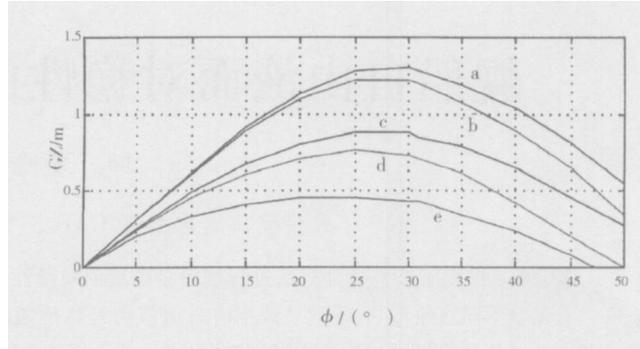


图 6 随浪中波峰处于船舶不同位置时的稳性曲线

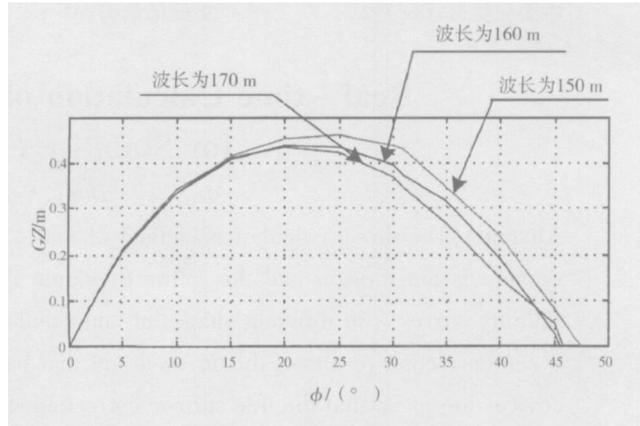


图 7 船舶在不同波长波浪中波峰处于船舯时的稳性曲线

接近, 当波峰处于船舯时, 其稳性力臂曲线与静稳性力臂曲线相比, 存在较大的差异, 稳性力臂值下降了很多, 从而使船舶的安全受到威胁。这说明研究船舶在波浪中的横摇稳性是很有必要的, 并且也是很重要的。从本文的研究可以看出稳性曲线受波浪因素的影响较大, 所以在船舶驾驶过程中应充分估计到本船在波浪中特别是在随浪中波峰处于船舯时稳性变化的情况。

参考文献

- [1] 李积德. 船舶耐波性, 第一版 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [2] MASAM I H, TORU S. Study on ship motions and capsizing in following seas (2nd Report) [J]. The Society of Naval Architects of Japan 1989
- [3] 滨丰刚实. 随浪中船舶稳性变化的研究 [J]. 国外舰船技术——船舶力学, 1984, 11.
- [4] 董艳秋, 纪凯, 黄衍顺. 波浪中船舶横摇稳性的研究 [J]. 船舶力学, 1999 3(2): 1-6