

# 风浪联合作用下舰船完整稳性的 三种评估方法

蔡 烽 侯建军 万林 石爱国 杨宝璋  
(海军大连舰艇学院 116018)

**摘 要:** 本文介绍了国际海事组织及中国船级社关于风浪联合作用下舰船完整稳性的要求及评估方法, 提出了利用舰船摇荡谱估算舰船完整稳性的新方法, 仿真计算表明该法简单可行, 可以作为确定风浪联合作用下舰船完整稳性的良好方法。

**关键词:** 船舶 船舶稳性 海浪谱 舰船耐波性

## 1. 国际海事组织 (IMO) 关于完整动稳性的要求及估算<sup>[1]</sup>

IMO 完整稳性的建议包括两部分, 第一部分是对静稳性曲线特征所作的要求, 第二部分是天气衡准, 即对船的动稳性所作的要求。

### 1.1 天气衡准的要求

1.1.1 船舶受到稳定的正横风的压力, 其方向垂直于船舶的纵中剖面, 风压倾侧力矩为  $I_{w1}$ ;

1.1.2 在静平衡角  $\theta_0$  处, 假定船舶受到波浪的作用使船舶朝着风的方向横倾到  $\theta_1$  角度;

1.1.3 然后, 假定船舶受到突风的吹袭, 突风的横倾力臂为  $I_{w2}$ ;

1.1.4 在这样的条件下, 在船舶静稳性曲线中, 面积 A 应大于等于面积 B (见图 1)。船舶的静稳性曲线应已经计及自由液面的影响。

图 1 中各横倾角的定义如下:

$\theta_0$  —— 在稳定风作用下的横倾角;

$\theta_1$  —— 由于波浪作用船朝着风方向倾斜的角度;

$\theta_2$  —— 进水角 ( $\theta_c$ ) 或者  $50^\circ$  或者  $\theta_c$  中取小者,  $\theta_c$  为风倾力臂  $I_{w2}$  的平行直线与静稳性曲线的第二个交点对应的横倾角。

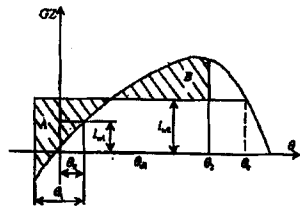


图 1 天气衡准

### 1.2 计算公式

风压横倾力臂  $I_{w1}$  和  $I_{w2}$  为:

$$I_{w1} = \frac{p \cdot A \cdot z}{100gD} \quad (1)$$

$$l_{w2} = 1.5 l_{w1} \quad (2)$$

式中:  $p$ ——风压, 取  $504\text{N/m}^2$ 。

$A$ ——水线以上的船体和上层建筑、甲板货件的受风侧面积 ( $\text{m}^2$ );

$z$ ——从水线上侧面积中心到水线下的船体侧面积中心的垂直距离, 或者取为到 1/2 吃水的垂直距离 ( $\text{m}$ );

$D$ ——船的排水量 ( $\text{t}$ );

$g$ ——重力加速度, 取  $9.81\text{m/s}^2$ 。

横倾角  $\theta_1$  为:

$$\theta_1 = 109.3 \cdot k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} \quad (3)$$

式中:  $X_1$ ——与船舶宽吃水比有关的系数, 可从表 1 中查取;

$X_2$ ——与船舶方形系数有关的系数, 可从表 2 中查取;

$k$ ——与船舶龙骨或船部形状有关的系数, 对于圆舭、无舭龙骨或无方龙骨的船舶,  $k$  取 1.0, 对于非圆舭部的船舶,  $k$  取 0.7, 对于装有舭龙骨的或方龙骨的船舶,  $k$  值可从表 3 中查取;

$$r = 0.73 + 0.60 \times OG/d \quad (4)$$

式中:  $OG$ ——船舶的重心到水线面的距离 ( $\text{m}$ ), 如果重心在水线面之上, 则为正, 反之则为负;

$d$ ——船舶的型吃水 ( $\text{m}$ );

$s$ ——与船舶横摇周期有关的系数, 可从表 4 中查取。

表 1		表 2		表 3		表 4	
$B/d$	$X_1$	$C_b$	$X_2$	$100A_w/LB$	$k$	$T$	$s$
$\leq 2.4$	1.0	$\leq 0.45$	0.75	0.0	1.0	$\leq 6$	0.100
2.5	0.98	0.50	0.82	1.0	0.98	7	0.098
2.6	0.96	0.55	0.89	1.5	0.95	8	0.093
2.7	0.95	0.60	0.95	2.0	0.88	12	0.065
2.8	0.93	0.65	0.97	2.5	0.79	14	0.053
2.9	0.91	$\geq 0.70$	1.00	3.0	0.74	16	0.044
3.0	0.90			3.5	0.72	18	0.038
3.1	0.88			$\geq 4.0$	0.70	$\geq 20$	0.035
3.2	0.86						
3.3	0.84						
3.4	0.82						
$\geq 3.5$	0.80						

注: ①凡不在表中列出的数值均按线性内插法求得。

②横摇周期的计算公式为:  $T = 2C \cdot B / \sqrt{GM}$

式中:  $GM$  为计及自由液面修正的初稳性高度;

横摇系数  $C = 0.373 + 0.023B/d - 0.043L/100$  ( $L$ 、 $B$  为船的两垂线间长和型宽,  $d$  为平均型吃水)

③  $A_b$ ——舢龙骨的总面积。

### 1.3 估算步骤

1.3.1 根据舰船装载情况, 确定计及自由液面影响的静稳性曲线

1.3.2 根据式 (1) 计算风压横倾力臂  $l_{w1}$

1.3.3 根据式 (2) 计算风压横倾力臂  $l_{w2}$

1.3.4 根据式 (3) 计算横倾角  $\theta_1$

1.3.5 在图 1 中, 作出风倾力臂  $l_{w2}$  的平行直线与静稳性曲线相交, 则第二个交点对应的横倾角为进水角  $\theta_c$ , 在  $50^\circ$  或者  $\theta_c$  中取小者作为  $\theta_2$ 。

1.3.6 判断是否符合动稳性规范

在图 1 中, 若面积  $A$  大于等于面积  $B$ , 则符合动稳性要求, 否则不符合。

## 2. 中国船级社 (CCS) 关于稳性衡准数 $K$ 的规定及估算<sup>[1] [2]</sup>

中国船级社制定的海船稳性衡准包括三个方面, 第一是关于稳性衡准系数; 第二是关于静稳性曲线的最低限值; 第三是对特种船的稳性规定。这里仅讨论普通船的完整稳性。

### 2.1 计算舰船在横浪中的最大横摇角 $\theta_1$

对有舢龙骨的圆舢船舶,  $\theta_1$  按下式计算:

$$\theta_1 = 87.5 C_1 C_2 C_3 \sqrt{0.216 + z_g/d} \quad (5)$$

式中:  $z_g$ ——所校核装载情况下船的重心距基线的高度 (m);

$d$ ——所校核装载情况下船的吃水 (m);

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ——分别为波浪、舢龙骨、船舶宽度吃水比有关的系数。

又规定:  $0.917 \leq z_g/d \leq 1.45$ 。

对于系数  $C_1$ , 可由图 2 查取, 其中的横摇固有周期  $T_\theta$  为:

$$T_\theta = 0.58 \sqrt{(B^2 + z_g^2)/GM_0} \quad (6)$$

式中:  $B$ ——船的型宽 (m);

$GM_0$ ——所校核装载情况下船未计及自由液面修正的初稳性高度 (m)。

当计算结果  $T_\theta \phi 20$  s 时, 取

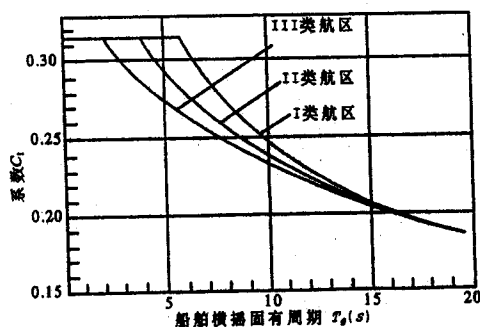


图 2  $T_\theta - C_1$  曲线

$$C_1 = 0.19。$$

对于系数  $C_2$ ，可由表 5 根据船舶类型及舢龙骨尺寸查取。

表 5

$A_b/LB(\%)$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	$\geq 4.0$
货船、油船	0.85	0.80	0.75	0.71	0.68	0.68	0.68
客船、渔船、拖船	1.00	0.92	0.85	0.80	0.75	0.71	0.68

表中  $A_b$  为舢龙骨的总面积 ( $m^2$ )； $L$ 、 $B$  为船的两垂线间长和型宽 ( $m$ )。

对于系数  $C_3$ ，可由表 6 根据船舶宽吃水比查取。

表 6

$B/d$	$\leq 2.5$	3.0	3.5	$\geq 4.0$
$C_3$	1.00	0.90	0.85	0.80

## 2.2 确定风浪联合作用的最小倾覆力矩 $M_q^*$ ( $l_q^*$ )

所谓风浪联合作用是假设船在浪的作用下发生横摇，在船因浪的作用横摇至最大横摇角开始回摇时，受到一股强阵风的吹袭，这种情况对船来说是最为危险的。因为这时船的恢复力矩和风倾力矩方向相同，两个力矩加在一起使船在回摇过程中倾斜加剧。因此，为安全起见，海船稳性规范中计算稳性衡准时以风浪联合作用的最小倾覆力矩  $M_q^*$  为准，可利用静稳性曲线或动稳性曲线作图求取  $M_q^*$ 。

## 2.3 计算风压倾侧力矩 $M_f$ ( $l_f$ )

设风舷角  $\alpha$  为风速方向与船的纵中剖面间的夹角，则风倾力矩为：

$$M_f = 0.001 \cdot p_a \cdot A_f \cdot z \cdot \sin(9\alpha/7) \quad (6)$$

$$l_f = M_f / D \quad (7)$$

式中： $p_a$ ——单位面积上的计算风压 ( $kg/m^2$ )，可由表 7 查取；

$A_f$ ——船的受风面积 ( $m^2$ )，即水线以上船在中线面上的投影侧面积；

$z$ ——风的作用力臂 ( $m$ )，风力作用点距船实际吃水线的高度。当采用平均风压强时，风力作用点为船受风面积  $A_f$  的面积中心。

$D$ ——船舶排水量 ( $t$ )。

## 2.4 计算稳性衡准数 $K$

根据上面得到的  $M_q^*$ 、 $M_f$ ，可利用下式计算稳性衡准数：

$$K = \frac{M_q^*}{M_f} = \frac{l_q^*}{l_f} \quad (8)$$

## 2.5 判断是否符合动稳性规范

若由式(8)得到的稳性衡准数  $K \geq 1$ , 则符合动稳性规范, 否则不符合。

### 3. 基于海浪谱与摇荡幅值响应算子估算舰船稳性

我们认为, 以上方法是静态的, 可用于设计和评估, 用于实际航行则误差较大, 而误差主要源于对船舶在风浪中摇荡的计算过于粗略。下面, 我们介绍一种可用于航行中估算稳性的方法, 即基于海浪谱与船舶摇荡幅值响应算子估算舰船稳性。

#### 3.1 确定航行海区波浪谱

方法有二: 一是利用现有的海浪谱公式进行计算, 二是可以通过实测舰船的摇荡时历反推得到海浪谱。目前, 计算海浪谱的公式较多, 常见的有 ITTC 单参数谱、ITTC 双参数谱、PM 谱等<sup>[3]</sup>, 我国著名的海洋学家文圣常教授等提出的一套公式, 其特点是既能反映深浅海水的生长谱, 又能反映充分发展的谱, 故应用范围比较广<sup>[4]</sup>。关于利用现有的海浪谱公式进行计算可参见有关文献, 这里简要介绍通过实测舰船的纵摇时历反推得到海浪谱的方法, 详细方法将另文叙述。

##### 3.1.1 测量舰船纵摇时历

目前已有多种用于舰船六自由度摇荡测量的装置, 可以实时测量并记录舰船的横摇、纵摇等摇荡时历, 具体装置及测量方法详见有关文献<sup>[5]</sup>。

##### 3.1.2 利用相关函数分析法确定舰船纵摇谱

实测表明, 舰船在波浪中的线性摇荡, 可看作具有各态历经性的平稳随机过程, 应用傅立叶变换和逆变换的法则可知, 谱密度  $S(\omega)$  与波面坐标的相关函数  $B(\tau)$  有如下的关系:

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (9)$$

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (10)$$

其中:  $B(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \zeta(t) \zeta(t+\tau) dt$ ,  $\tau$  为给定的时间间隔。

实测海浪谱时, 可取 20min 的舰船纵摇时历数据根据上述模型计算出相关函数和纵摇谱密度。

##### 3.1.3 计算纵摇幅值响应算子

藉助常用的船舶六自由度摇荡计算程序, 可以计算出各个自由度的摇荡幅值响应算子, 从中取出纵摇幅值响应算子  $RAO_{\psi}(\omega)$ <sup>[1]</sup>。

##### 3.1.4 计算航行海区的海浪谱密度

根据舰船纵摇谱及纵摇幅值响应算子  $RAO_{\psi}(\omega)$ ，可计算出海浪谱为：

$$S(\omega) = \frac{S_{\psi}(\omega)}{RAO_{\psi}(\omega)} \quad (10)$$

由于一般的海浪谱公式均为对某一海区进行大量观测后得到的半经验性公式，使用有一定的条件限制，而实测的摇荡时历真实地反映了当时的风浪状况及舰船在风浪中的响应，由此反推出的海浪谱比一般的海浪谱公式精度相对更高一些。

### 3.1.5 导出当前海浪谱公式

仅知道当前海浪的谱密度，还难以估算风浪变化后的海浪谱，为此需要推导出当前的海浪谱公式。通常可选取如下的谱模式<sup>[6]</sup>：

$$S(\omega) = \frac{S(\omega)\bar{\omega}}{m_0} = c \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{a_i + b_i \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (11)$$

式中： $m_0$ ——谱的零阶矩， $\bar{\omega}$ 、 $\omega_0$ ——平均周期、谱峰值对应的圆频率， $a_i$ 、 $b_i$ 、

$c$ ——选定参量， $i=1, 2$  分别表示低频及高频分量， $c = \frac{S(\omega_0)\bar{\omega}}{m_0}$  为无因次谱峰值。

经过对无因次平均实测谱的高、低频分量分别进行回归分析，可得特定系数  $a_i$ 、 $b_i$ ，从而可以确定得到以平均波高  $\bar{H}$  和平均周期  $\bar{T}$  为参量的当前所在海区的海浪谱。

### 3.2 计算舰船的摇荡谱

根据所确定的航行海区的海浪谱，借助动力响应计算程序计算得到的船在规则波中的摇荡响应算子，可得到舰船的摇荡谱。对于横摇，其响应谱为：

$$S_{\theta}(\omega) = RAO_{\theta}(\omega)S(\omega) \quad (12)$$

### 3.3 计算舰船可能出现的最大横摇角

一般说来，船舶在不规则波中的横摇角瞬时值服从正态分布，而摇幅则服从瑞利分布。根据瑞利分布的性质，可以得到船舶横摇幅值的概率密度函数，并由此可得到超越概率为  $1/n$  的摇幅值，如图 3 所示，则大于  $1/n$  以上的平均摇幅即为  $\theta_{1/n}$  以右阴影部分几何中心的横坐标。一般情况下，取  $1/10$  大波的平均波幅作为横摇的最大值（十一摇幅），即  $n=10$ ，其出现概率为 3.9%。略去复杂的计算过程，可得  $\theta_{\max} = \theta_{1/10}$  的计算公式如下：

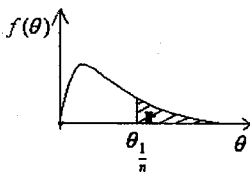


图 3 统计特征值

$$\begin{cases} \theta_{\chi_0} = 2.55\sqrt{D_\theta} \\ D_\theta = \int_0^\infty s_{\theta\theta}(\omega)d\omega \end{cases} \quad (13)$$

### 3.4 计算最小倾覆力矩 $M_q^*$ 和风压倾侧力矩 $M_f$

具体方法见 3.2、3.3 所述。

### 3.5 稳性评估

按 3.4 所述方法计算稳性衡准系数，并按 3.5 所述方法进行稳性评估。

## 4. 基于摇荡谱估算最大横摇角的仿真

### 4.1 仿真条件

以我海军某型驱逐舰为例，进行了航速 18kn、5 级海况（有义波高 2.5m，有义周期 7.5s）、不同浪向角条件下的最大横摇角估算仿真，表 7 为某型驱逐舰的基本参数。

表 7 某型驱逐舰基本参数

参 数	某型驱逐舰(正常排水量时)
排水量	3150t
设计水线长	126m
设计水线宽	12.40m
平均吃水	3.96m
自由横摇周期	11.3s
船舶横稳心高	0.9m

### 4.2 仿真结果

表 8 某型驱逐舰在航速 18kn、5 级海况条件下的横摇角统计仿真值

浪向角 横摇角	15°	45°	90°	135°	155°
三一横摇角(°)	6.63	21.57	39.57	12.17	3.62
十一横摇角(°)	8.46	27.50	50.45	15.52	4.61

## 参考文献

- 1 沈华等. 船舶稳性与强度计算. 大连: 大连海事大学出版社, 2001.
- 2 海船稳性规范(1986). 北京: 人民交通出版社, 1986.
- 3 彭英声. 舰船耐波性基础. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- 4 竺艳蓉等. 各种波浪谱在海浪工程中适用性的研究. 海洋学报, Vol. 17, No6, 1995. 11.
- 5 耐波性专辑. 1991 中国造船增刊.
- 6 马应良等. 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告. 北京: 海洋出版社, 1990.

## 法

作者：[蔡烽](#)，[侯建军](#)，[万林](#)，[石爱国](#)，[杨宝璋](#)作者单位：[海军大连舰艇学院](#)

## 相似文献(2条)

1. 学位论文 [尹茜](#) 船舶稳性控制系统 2007

船舶在海上航行时，由于受到海浪、海风及海流等海洋环境扰动的作用、油水系统的消耗以及大型物件的加卸载都会引起船舶的横向倾斜继而影响到船舶行驶的安全性，不可避免地要产生各种摇荡。

船舶在随机海浪的扰动下发生摇荡运动，进而不可避免地会造成船体的倾斜。首先本文根据统计叠加理论，采用ITTC单参数标准海浪谱仿真模拟实际的长峰波随机海浪，进而实时仿真长峰波随机海浪对船舶的随机扰动，对船舶在海浪中的横摇和纵摇运动进行了时域仿真，得到船舶摇荡运动的横摇角信号和纵摇角信号，作为分析散货船装载稳性的依据。根据船舶波浪稳性的数学模型，在波浪中的稳性变化进行了定量的计算和分析，并进一步讨论了在海浪下的稳性高度的变化。

船舶配载系统也是船舶稳定性中的一个重要问题。货物运输中，根据船舶舱容和货物性质、合理安排船上货物装载位置是一项细致复杂的组织工作。其目的在于充分利用船舶载重量和载货容积、保持船舶稳性和适航性以期获得最大的社会、经济效益。

散货船的运输在世界海运中占有十分重要的地位，相应的散货船的安全稳性应受到高度的重视。本文利用LoadRite 装载软件，研究了货物载重量、积载因数等因素对船舶稳性的影响，着重分析波浪对复原力臂曲线的影响。本文最后利用LoadRite 装载软件，进一步讨论了船舶载重量、自由液面对船舶稳性的影响，并分析了波浪对复原力臂曲线的影响。

2. 学位论文 [苏晨](#) 渤海湾客滚船风浪中航行安全性的研究 2004

近年来，随着客滚船队规模的扩大，在渤海湾中航行的客滚船多次发生翻沉事故，造成重大的人身伤亡和财产损失。针对上述情况，该文就渤海湾客滚船风浪中航行的安全性进行了研究。该文将船舶耐波性理论结合航运生产实际，采用海浪谱分析法，提出了船舶在不规则波中运动的统计值预报方法。并通过编写Simulink仿真计算程序，预报了某客滚船在不同风速、不同航向角及不同航速条件下的最大横摇角、有义横摇角及平均横摇角，作为客滚船稳性分析、车辆绑扎和确定抗风等级的依据。客滚船在大风浪中航行，由于风浪的联合作用、消防排水不畅而形成大面积自由液面等因素的影响，从而使得船舶稳性减小或丧失。对此，该文就客滚船稳性及抗风浪能力进行了研究，提出了船舶稳性及抗风能力计算模型，确定了船舶在完整稳性条件下安全开航的抗风能力，计算了车辆装载舱消防水喷淋时舱内积水对稳性影响的变化规律并分析了车辆装载舱消防水喷淋时舱内积水量的增加对抗风能力的影响。该文同时论述了客滚船随浪航行的危险性，计算了客滚船的随浪复原力臂值，绘制了复原力臂曲线。并在此基础上作了客滚船随浪航行的稳性衡量和安全性分析，提出了随浪航行时的建议。最后，该文结合渤海湾客滚运输生产的实际情况，提出了客滚船安全管理建议。该文对今后完善客滚船的稳性规范、加强客滚运输的安全管理提供了科学的决策依据和参考，具有一定的实用价值。

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference\\_3503615.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_3503615.aspx)

授权使用：哈尔滨工程大学(hebgcdx)，授权号：ea2f5ad3-f6b3-4152-af25-9da900a313bb，下载时间：2010年7月4日