

# 翼帆船稳性校核\*

罗淮龙、李干洛、谭政生

## 提 要

根据帆模风洞试验及实船试验情况,本文利用横摇衰减试验结果分析了杆板及风帆面积大小对船舶摇摆的影响,提出了装有翼帆的船舶摇摆角计算方法,并在此基础上提出了翼帆船队力计算及稳性校核方法。

## 一、前 言

风帆船节能效果显著已受到世界各国的重视,为了充分利用风力,必须选择适当的风帆形状和尽量加大帆的面积,而帆面积往往受到稳性的限制。目前,国内外尚无风帆船的稳性标准。因此,如何正确校核风帆船的稳性是发展风帆船的重要问题。

我们曾先后进行了两次帆模风洞试验和三次实船试验,本文根据试验结果分析,对风帆船的稳性计算方法及应考虑的特殊问题提出初步意见,供大家研究探讨。

## 二、稳 性 计 算 方 法

### 1. 倾侧力矩计预

风作用在船上的倾侧力矩  $M_f$ , 由作用在帆上产生的倾侧力矩  $M_{fs}$  和作用在船体上产生的倾侧力矩  $M_{fb}$  两部分组成, 即

$$M_f = M_{fs} + M_{fb} \dots\dots\dots (1)$$

① 风作用在帆上产生的倾侧力矩, 可按式计算:

$$M_{fs} = H \cdot Z_1 = C_H \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 S Z_1 \dots\dots\dots (2)$$

② 风作用在船体上产生的倾侧力矩, 可按式计算:

$$M_{fb} = P Z_2 = K C_p \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A Z_2 \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$H$  —— 帆的横倾力 (公斤)

$P$  —— 船体横向风压力 (公斤)

$C_H$  —— 帆的横倾力系数,  $C_H = C_l \cos \beta + C_p \sin \beta$

\* 本课题是中国自然科学基金资助项目。

$C_L$ ——帆的升力系数, 由风洞试验求得

$\theta_0$ ——帆的阻力系数, 由风洞试验求得

$\beta$ ——表观风向角(迎风角)(度)

$V$ ——表观风速(米/秒)

$S$ ——帆的面积( $m^2$ )

$A$ ——船体侧向受风面积( $m^2$ )

$\rho$ ——空气密度, 一般取  $\rho = 0.125$  (公斤秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>)

$C_p$ ——船体横向风压系数, 可近似取  $C_p = 1.25$

$Z_1$ ——帆的横倾力作用力臂, 取  $Z_1 = Z_s - T$  (米)

$Z_s$ ——帆的面积中心距基线高度(米)

$Z_2$ ——船体风压作用力臂, 取  $Z_2 = Z_A - T$  (米)

$Z_A$ ——船体受风面积中心距基线高度(米)

$T$ ——船的吃水(米)

$K$ ——风向影响系数, 由风洞试验求得, 或近似取  $K = \sin \beta^2$

## 2. 最小倾复力矩 $M_q$ 确定

最小倾复力矩  $M_q$ , 根据《海船稳性规范》由动稳性曲线求得, 但摇摆时由于帆和插板的阻尼作用, 有明显的减摇效果, 故计算横摇角时必须计入它们的影响系数  $C_4$ 、 $C_5$ , 取

$$\theta = 87.5 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \sqrt{0.216 + \frac{Z_g}{T}} \dots\dots(4)$$

式中:

$C_4$ ——帆的减摇影响系数

$C_5$ ——插板的减摇影响系数

此外, 木质渔船由于木质和倾斜龙骨有着较大的阻尼减摇作用, 根据试验测试结果, 其减摇效果与舵龙骨相当, 计算横摇角时可计入其影响系数, 取  $C_2 = 0.8 \sim 0.85$ 。

## 3. 静倾角计算

计算静倾角时, 其横倾力矩可按上述①②③式计算, 但横倾作用力臂应考虑静力作用, 取  $Z_1 = Z_C - \frac{T}{2}$ ,  $Z_2 = Z_A - \frac{T}{2}$ , 静倾角可由下式求得

$$\theta_s = \sin^{-1} \cdot \frac{0.001 M_F}{Dh} \text{ (度)} \dots\dots(5)$$

## 4. 稳性校核要求

目前国内外尚无风帆船的稳性规范可循, 日本装帆商船安全性讨论会建议, 暂用客船稳性规范进行校核, 西德提出按  $\frac{\text{帆面积} 0.5}{\text{排水量}^{\frac{1}{3}}} \leq 3.5$  控制帆面积, 我国传统帆一般是按

$\frac{\text{帆面积}}{LB} < 2$  或  $\frac{\text{帆面积}}{\text{排水量}} = 2 \sim 5$  控制帆面积。我们认为, 目前暂用客船稳性规范按如

下要求进行稳性校核较为适宜。

①稳性衡准数  $K = \frac{M_{\theta}}{M_f} \geq 1$

②初稳性高  $h > 0.3$  米

③静倾角  $\theta < 12^\circ$

### 三、对风帆船稳性校核中几个特殊问题的考虑

1. 计算横摇角时必须考虑帆及插板的阻宜减摇作用, 计入减摇影响系数  $C_4, C_5$ 。

①根据实船张帆测试结果, 其横摇衰减系数  $\mu$  与减摇效果如下:

| 张 帆 情 况           | 不升帆  | 升帆 1/2 ( 7 m <sup>2</sup> ) | 升全帆 ( 14 m <sup>2</sup> ) | 升全帆加插板 |
|-------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------|
| 张帆面积占 $L_B$ 百分比 % | 0    | 50%                         | 100%                      | —      |
| 横摇衰减系数 $\mu$      | 0.03 | 0.038                       | 0.053                     | 0.081  |
| 减 摇 效 果 %         | 0    | 21%                         | 43.2%                     | 63%    |
| 减摇影响系数 $C_4$      | 1.0  | 0.79                        | 0.57                      | 0.37   |

②根据实船加插板测试结果, 其横摇衰减系数  $\mu$  及减摇效果如下:

| 加 插 板 情 况         | 无插板  | 加 1/3 插板<br>0.093 m <sup>2</sup> | 加 2/3 插板<br>0.187 m <sup>2</sup> | 加全插板<br>0.24 m <sup>2</sup> |
|-------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 插板面积占 $L_B$ 百分比 % | 0    | 0.66%                            | 1.33%                            | 1.71%                       |
| 横摇衰减系数 $\mu$      | 0.03 | 0.037                            | 0.045                            | 0.049                       |
| 减摇效率 %            | 0    | 19%                              | 33%                              | 39%                         |
| 减摇影响系数 $C_5$      | 0    | 0.81                             | 0.67                             | 0.61                        |

③把上述计算结果绘成放大因数曲线如图 1 所示, 图中横坐标  $\Lambda\rho$  为横摇谐调因素, 纵坐标  $\phi_{\Lambda}/\alpha m_0$  为横摇幅值与有效波倾角之比, 它代表规则波中的横摇程度, 由图可以清楚的看到, 风帆船由于装了帆和插板使横摇幅值大大减少, 具有明显的减摇效果。

2. 木质渔船, 由于木质倾斜龙骨的阻尼作用, 其横摇角度比一般钢质船舶小, 根据测试结果, 其横摇衰减系数  $\mu = 0.065$ , 相当于装设舢龙骨的作用 ( $\mu = 0.05 \sim 0.07$ ), 计算横摇角时可计入其影响, 取  $C_2 = 0.08 \sim 0.085$ 。

3. 根据测试结果, 风帆船横摇衰减系数随航速增加而增加, 其横摇角度随航速增加而减小。

试验结果参见下表及图 3 所示。

| 光<br>船<br>体 | Fr    | 0     | 0.16  | 0.30  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
|             | $\mu$ | 0.065 | —     | —     |
| 船 + 插板      |       | 0.09  | —     | —     |
| 船 + 帆       |       | 0.07  | 0.11  | 0.138 |
| 船 + 插板 + 帆  |       | 0.105 | 0.166 | 0.204 |

4. 帆的推力系数  $C_T$  与横倾力系数  $C_H$  都是随表观风向角  $\beta$  和帆的攻角  $\alpha$  变化而变化的, 根据

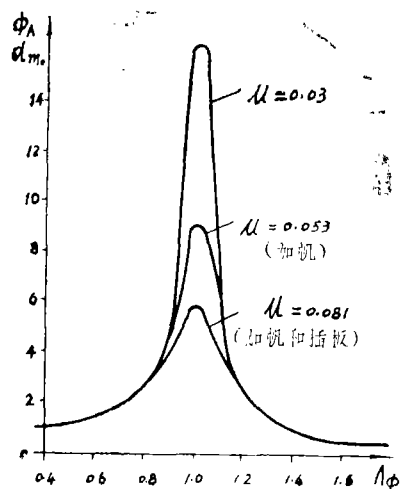
$$\begin{cases} C_T = C_L \sin \beta - C_D \cos \beta \\ C_H = C_L \cos \beta + C_D \sin \beta \end{cases}$$


图 1 放大因数曲线

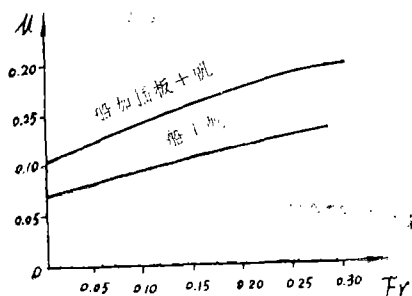
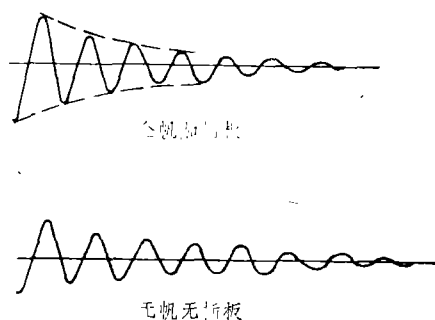
图 3  $\mu \sim Fr$  曲线

图 2 横摇衰减曲线(示波器记录)

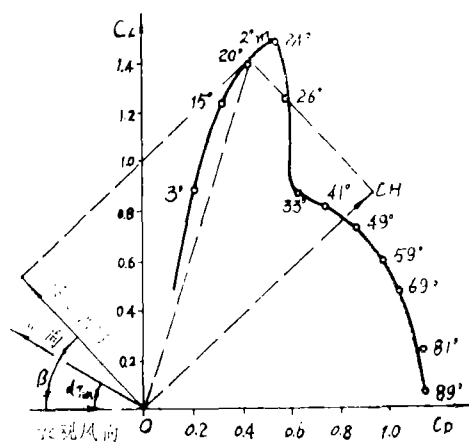


图 4 极曲线图

我们可以作出极曲线图, 稳性校核对横倾力系数  $C_H$  可采用推力最佳时的攻角由极曲线图用作图法求得,  $C_H$  等于曲线对应攻角处投影在与航向垂直方向的值。如图 4 所示。

#### 四、计算实例及表格

##### 1. 最小倾复力臂确定

①由大倾角稳性计算得图5所示动稳性曲线。

②计算横摇角。

$$\theta = 87.5 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \sqrt{0.216 + 2g/T} = 87.5 \\ \times 0.32 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.55 \sqrt{0.216 + 0.8/0.6} \\ = 12.16 (\text{度})$$

③由动稳性曲线得最小倾复力臂  $q_l$   
 $= 0.046$  米。

2. 静倾角计算及稳性校核见下一页

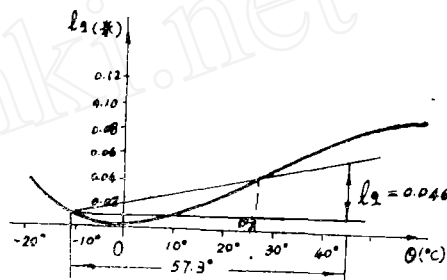


图5 动稳性曲线

#### 五、结 束 语

1. 风帆船的稳性校核目前尚无规范, 根据试验结果分析和调查情况, 我们建议其校核方法可参照客船稳性规范进行, 要求稳性衡准数  $K$  应大于或等于 1, 初稳性高  $h$  大于 0.3 米, 静倾角小于  $12^\circ$ 。

2. 风帆船上帆和插板增加了阻尼和惯性矩, 有显著的减摇效果。横摇角计算必须考虑帆和插板的阻尼作用。计入帆的减摇系数  $C_4$  和插板的减摇系数  $C_5$ , 木质渔船由于木质和倾斜龙骨的阻尼作用, 亦有相当于舵龙骨的减摇作用, 建议计算横摇角时计入其减摇影响, 取  $C_2 = 0.80 \sim 0.85$ , 按  $\theta = 87.5 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \sqrt{0.216 + Z_a/T}$  计算横摇角。

3. 本文提出的减摇修正系数  $C_2 C_4 C_5$  目前资料尚不完善, 有待进一步充实, 在此仅提出供大家研究探讨。

4. 风帆船由于受风面积大, 风压中心高, 从计算来看稳性不易保证, 在使用中必须充分发挥人的积极作用, 尽量避免危险状态发生。例如, 根据危险攻角计算结果控制转帆角度, 避免危险攻角出现, 风浪大时减少帆面积或不升帆, 只要操帆得当稳性是可以设法保证的。

#### 参 考 文 献

- [1] 《帆装商船の展望》てつて》关西造船协志会, 昭和56年9月。
- [2] 《帆走船舶流体力学的研究》日本关西造船协会志, 1978年9月170号。
- [3] 《风帆船的稳性计算》广东造船1982年, 第二期。
- [4] 《船舶摇摆与操纵》1980年国防工业出版社。
- [5] J.O Scherer "Aerodynamics of high Performance Wing Sails"  
 "Marine Technology" 1974. 7

## 四、2. 静倾角计算及稳性校核

计算数据:  $Z_1 = 3.16 \text{ m} (S = 8 \text{ m}^2)$   $Z_2 = 3.88 \text{ m} (S = 14 \text{ m}^2)$   $Z_3 = 4.60 \text{ m} (S = 20 \text{ m}^2)$   $Z_4 = 5.33 \text{ m} (S = 26 \text{ m}^2)$   
 $C = 1.022$   $C_1 = 1.25$   $P = 0.125 \text{ Kg Soc}^2/\text{m}^4$   $D = 6.8 \text{ TS}$   $T = 0.6 \text{ m}$   $h = 0.42 \text{ m}$   $\lambda = 11.23 \text{ m}^2$   
 $Z = 1.15 \text{ m}$   $C_H(1/2)\rho = 0.064$   $C_F(1/2)\rho_A(Z_A - T) = 0.483$   $C_F(1/2)\rho_A(Z_1 - T/2) = 0.746$   $D_h = 2.87$

| 计算项目   | 帆面积 $S \text{ m}^2$ |       |       |        | 14    |        |       |        | 20    |        |       |        | 26     |        |       |        |
|--|---------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
|  | 4                   | 7     | 10    | 13     | 4     | 7      | 10    | 13     | 4     | 7      | 10    | 13     | 4      | 7      | 10    | 13     |
| $M_{FS} = C_F(1/2)\rho V^2$<br>$S(Z_A - T)(\text{Kg m})$           | 20.96               | 64.19 | 131   | 221.39 | 47.02 | 144.01 | 293.9 | 496.69 | 81.92 | 250.88 | 512   | 865.28 | 123.66 | 384.85 | 785.4 | 1327.3 |
| $M_{FS} = K C_F(1/2)\rho V^2$<br>$\lambda(Z_A - T)(\text{Kg m})$   | 7.73                | 23.67 | 48.3  | 81.63  | 7.73  | 23.67  | 48.3  | 81.63  | 7.73  | 23.67  | 48.3  | 81.63  | 7.73   | 23.67  | 48.3  | 81.36  |
| $M_T = M_{FS} + M_{FS} K_{gm}$                                     | 28.69               | 87.86 | 179.3 | 303    | 54.73 | 167.68 | 342.2 | 578.3  | 89.65 | 274.47 | 560.3 | 946.9  | 133.39 | 408.5  | 833.7 | 1409   |
| $L = M/D(\text{m})$  | 0.0042              | 0.012 | 0.026 | 0.044  | 0.008 | 0.024  | 0.05  | 0.084  | 0.013 | 0.04   | 0.082 | 0.138  | 0.019  | 0.059  | 0.12  | 0.205  |
| $L_0 = 0.046(\text{m})$  | 10.95               | 3.83  | 1.77  | 1.05   | 5.75  | 1.92   | 0.92  | 0.55   | 3.54  | 1.15   | 0.56  | 0.33   | 2.42   | 0.78   | 0.38  | 0.22   |
| $K = 1\eta/L$  |                     |       |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |        |        |       |        |
| $M_{FS} = C_F(1/2)\rho V^2$<br>$S(Z_2 - T/2)(\text{Kg m})$         | 23.36               | 71.54 | 146   | 246.74 | 51.2  | 78.4   | 320   | 540.8  | 88    | 269.5  | 550   | 929.5  | 133.6  | 409.1  | 835   | 1411   |
| $M_{FS} = K C_F(1/2)\rho V^2$<br>$\lambda(Z_2 - T/2)(\text{Kg m})$ | 11.94               | 36.55 | 71.6  | 126.07 | 11.94 | 36.55  | 74.6  | 126.07 | 11.94 | 36.55  | 74.6  | 126.07 | 11.94  | 36.55  | 74.6  | 126.07 |
| $M_{FS} + M_{FS} (\text{Kg m})$                                    | 35.3                | 108.1 | 220.6 | 372.81 | 63.14 | 114.95 | 394.6 | 666.87 | 99.94 | 306    | 624.6 | 1055   | 145.5  | 445.7  | 909.6 | 1537   |
| $\theta = \sin^{-1} M_T/D_h(0)$                                    | 0.7                 | 2.16  | 4.4   | 7.46   | 1.25  | 2.3    | 7.89  | 13.4   | 2     | 6.12   | 12.5  | 21.56  | 2.9    | 8.93   | 18.49 | 32.4   |
| $\theta$ 是否 $< 12^\circ$   | 是                   | 是     | 是     | 是      | 是     | 是      | 是     | 否      | 是     | 是      | 否     | 否      | 是      | 是      | 否     | 否      |
| 是否安全   | ✓                   | ✓     | ✓     | ✓      | ✓     | ✓      | ×     | ×      | ✓     | ✓      | ×     | ✓      | ×      | ×      | ×     | ×      |

## ON THE STABILITY CHECK OF A BOAT WITH FOIL SAILS

Luo Huailong, li Ganluo and Tan Zhengsheng

### Abstract

In this paper, an analysis is carried out the influence of size of vertically-extended stern Keelsons and sails on the boat roll, on the basis of tests to sail models and full scales and by means of roll damping experiments. At the same time, a method for the calculation of rolling angles is presented, thus enabling it possible to check the external forces acting on a baat and check the boat stability.