

# 带弹性支座舵杆的受力分析

上海船舶研究设计院 唐 军

## 提 要

大型船舶上的舵除了上舵承、下舵承外,还设置有舵托或挂舵壁支撑。各国船级社认为悬臂在船体上的舵托或挂舵臂应视为弹性支座,对舵杆进行直接计算。本文介绍了这种类型的平衡舵舵杆的受力计算方法。

关键词:舵杆 舵托 挂舵臂 受力分析

## 1 前 言

目前,大型船舶上的舵均设有舵托或挂舵臂。各船级社认为悬臂在船体上的舵托或挂舵臂应视为弹性支座。各国规范都规定了这种类型的平衡舵舵杆以图1所示图形作为力学模型进行直接计算。对于这种带弹性支座的简支梁作受力分析显然增加了一定难度,关键就是要求弹性支座处的反力恰好等于该处的位移乘以其弹性系数。当然,我们可以在计算机上通过多次迭代计算,每次在弹性支座处试加一个弹性反力(按上次求出的该点位移值,不断调整试加的力值),直到试加的力与得到的该点位移之商与弹性系数完全吻合。这时,试加的力就是我们要求的舵托或挂舵臂的弹性支座反力。这种迭代计算过程显然很繁,本文介绍一种理论计算方法。

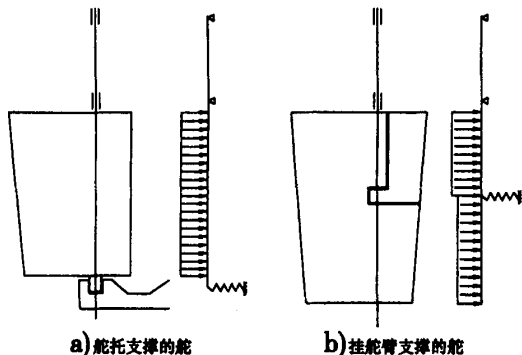


图1 舵的类型

## 2 舵托支撑的平衡舵舵杆的受力计算

### 2.1 舵杆的力学模型分析

设定简支梁受跨外均布载荷作用,在弹性支座

作者简介:唐军,男,高级工程师。1946年生,1969年上海交通大学船舶制造系毕业,长期从事船舶研究设计工作。

处由于弹簧压缩,压缩量为 $Y_E$ (即E点位移),产生弹性反力为 $R_E$ 。这时E点弹性反力:

$$R_E = Y_E \times K_h$$

式中  $Y_E$ ——E点处位移;

$K_h$ ——弹性系数。

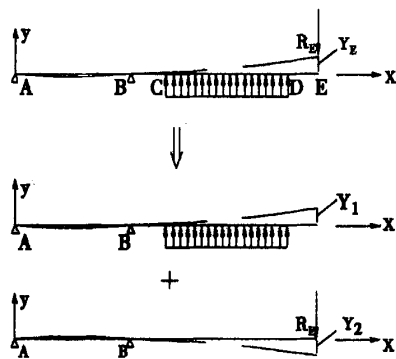


图2 舵托支撑舵的舵杆力学模型

图2为舵托支撑舵的舵杆力学模型,也可以把它看作有两个单独力分别作用在简支梁跨外段上。这两个力作用下的总位移 $Y_E$ 就等于两个单独力作用下的位移之和,即: $Y_E = Y_1 + Y_2$ 。

### 2.2 跨外段受均布载荷作用的简支梁转角和挠度

在图2中,简支梁跨外段有均布载荷及集中力两种力的作用形式。跨外段受集中力作用的简支梁的转角和挠度可从力学手册上查到,而跨外段受均布载荷作用的简支梁的转角和挠度可通过推导得到。图3为跨外段有均布载荷作用的简支梁计算模型。

跨外段受均布载荷作用的简支梁在载荷区域的转角和挠度方程为

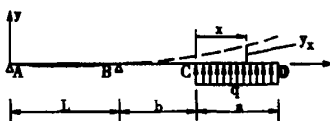


图3 跨外段有均布载荷作用的简支梁计算模型

$$Q_{(x)} = \frac{q}{6EI} [3a^2x - 3ax^2 + x^3 + a(3b^2 + 3ab + 2bL + aL)]$$

$$Y_{(x)} = \frac{q}{12EI} \left[ 3a^2x^2 - 2ax^3 + \frac{x^4}{2} + ax(6b^2 + 6ab + 4bL + 2aL) + ab(4b^2 + 4bL + 3ab + 2aL) \right]$$

取  $x=0$  时,求得均布载荷起始点(C点)的转角和挠度:

$$Q_C = \frac{qa}{6EI} (3b^2 + 3ab + 2bL + aL) \quad (1)$$

$$Y_C = \frac{qab}{12EI} [4b(b+L) + a(3b+2L)] \quad (2)$$

取  $x=a$  时,求得均布载荷终止点(D点)的转角和挠度:

$$Q_D = \frac{qa}{6EI} (a^2 + 3b^2 + 3ab + 2bL + aL) \quad (3)$$

$$Y_D = \frac{q}{12EI} \left[ \frac{3a^4}{2} + a^3(6b+2L) + a^2b(9b+6L) + 4ab^2(b+L) \right] \quad (4)$$

### 2.3 计算实例

下面以某船为例,对该船的舵杆进行受力分析。该船舵杆实际受力如图4所示,舵杆直径  $D=23.5\text{cm}$ ,材料弹性模量  $E=21000\text{kN/cm}^2$ 。

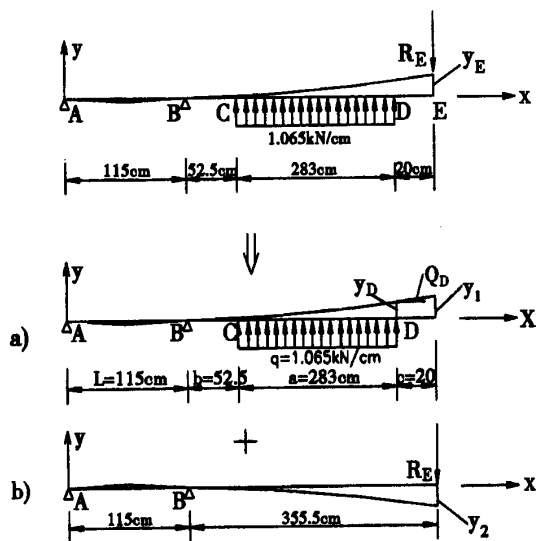


图4 舵杆的计算模型

见图4a),应用公式(4)可求得挠度  $Y_D$

$$Y_D = \frac{q}{12EI} \left[ \frac{3a^4}{2} + a^3(6b+2L) + a^2b(9b+6L) + 4ab^2(b+L) \right]$$

$$= \frac{q}{12E \frac{\pi D^4}{64}} \left[ \frac{3a^4}{2} + a^3(6b+2L) + a^2b(9b+6L) + 4ab^2(b+L) \right]$$

应用公式(3)可求得转角  $Q_D$

$$Q_D = \frac{qa}{6EI} (a^2 + 3b^2 + 3ab + 2bL + aL) = 0.0278\text{rad} = 1.59^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{则: } Y_1 &= Y_D + C \times \text{tg} Q_D \\ &= 7.53 + 20\text{tg} 1.59 \\ &= 8.085\text{cm} \quad (\text{向上}) \end{aligned}$$

见图4b),对于简支梁跨外段集中力作用点的挠度可从设计手册上查得,即

$$Y_2 = \frac{R_E 353^2}{3EI} (115 + 353) = 0.0618 R_E \quad (\text{向下})$$

$$\begin{aligned} \text{所以, } Y_E &= Y_1 - Y_2 \\ &= 8.085 - 0.0618 R_E \end{aligned} \quad (5)$$

(注:上式中因  $Y_2$  向下,为负号)

弹簧支座E点的弹性系数,即舵托的支承弹簧常数,仅与舵托的结构形式有关,另行计算得  $K_h = 226\text{kN/cm}$ 。

根据题意,E点弹性支座反力等于位移乘以弹性系数:  $R_E = Y_E \times K_h$ ,即

$$Y_E = R_E / K_h = R_E / 226 \quad (6)$$

解方程组(5)和(6)得

$$\begin{aligned} R_E \left( \frac{1}{226} + 0.0618 \right) &= 8.085 \\ R_E &= 122.08\text{kN} \end{aligned}$$

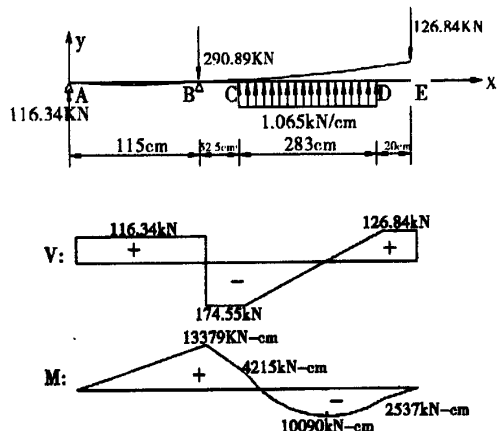


图5 舵杆的剪力图、弯矩图

计算 A、B 支座反力,并求得舵杆的剪力图和弯矩图(见图 5):

$$R_A = \frac{1.065 \times 283 \times (50 + 283/2) - 122.08 \times (50 + 283 + 20)}{115}$$

$$= 127.2 \text{ kN}$$

$$R_B = 122.08 - 127.2 - 1.065 \times 283$$

$$= -306.52 \text{ kN}$$

### 3 挂舵臂支撑的半悬挂平衡舵舵杆的受力计算

同样,对于挂舵臂支撑的半悬挂平衡舵舵杆取图 6 所示力学模型。设定弹性支座处的弹性反力为  $R_D$ ,压缩量为  $Y_D$ ,弹性系数为  $K_h$ ,则  $R_D = Y_D \times K_h$ 。也可将该力学模型看成有 3 个单独力分别作用在简支梁跨外段上,这 3 个力作用下的总位移  $Y_D$  就等于 3 个单独力作用下的 3 个位移之和。

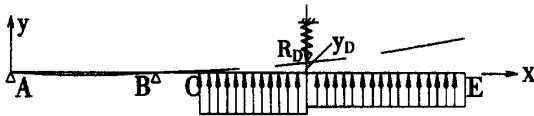


图 6 挂舵臂支撑舵的舵杆计算模型

下面以 73000DWT 油船为例,对该船的舵杆作受力分析如下。

该油船舵杆实际受力如图 7 所示,舵杆直径  $D = 46.6 \text{ cm}$ ,材料弹性模量  $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ 。

见图 7a),应用公式(4)求得挠度  $Y_1$

$$Y_1 = \frac{q}{12EI} \left[ \frac{3a^4}{2} + a^3(6b + 2L) \right]$$

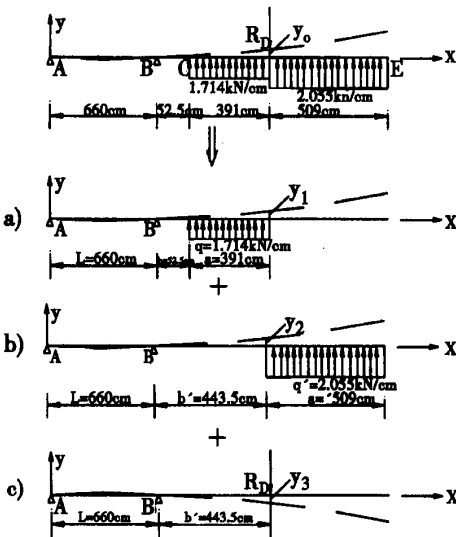


图 7 73000DWT 油船舵杆的计算模型

$$+ a^2b(9b + 6L) + 4ab^2(b + L)]$$

$$= \frac{q}{12E} \frac{\pi D^4}{64} \left[ \frac{3a^4}{2} + a^3(6b + 2L) \right]$$

$$+ a^2b(9b + 6L) + 4ab^2(b + L)]$$

$$= 5.03746 \text{ cm (向上)}$$

见图 7b),应用公式(2)求得挠度  $Y_2$

$$Y_2 = \frac{q'a'b'}{12EI} [4b'(b' + L) + a'(3b' + 2L)]$$

$$= \frac{2.055 \times 509 \times 443.5}{12E} \frac{\pi D^4}{64}$$

$$\times [4 \times 443.5 \times (443.5 + 660)$$

$$+ 509 \times (3 \times 443.5 + 2 \times 660)]$$

$$= 26.2974 \text{ cm (向上)}$$

见图 7c),简支梁跨外段集中力作用点的挠度可从设计手册上查到,即

$$Y_3 = \frac{R_D b'^2}{3EI} (L + b')$$

$$= \frac{R_D 443.5^2}{3EI} (660 + 443.5)$$

$$= 0.0148835 R_D \text{ (向下)}$$

所以,  $Y_D = Y_1 + Y_2 - Y_3$

$$= 5.03746 + 26.2974 - 0.0148835 R_D$$

$$= 31.33486 - 0.0148835 R_D \quad (7)$$

弹簧支座 D 点的弹性系数,即挂舵臂的支承弹簧常数,仅与挂舵臂的结构形式有关,另行计算得  $K_h = 1830 \text{ kN/cm}$ 。

根据题意: D 点弹性支座反力等于位移乘以弹性系数:  $R_D = Y_D \times K_h$ , 即

$$Y_D = R_D / K_h = R_D / 1830 \quad (8)$$

解方程组(7)和(8)得

$$R_D \left( \frac{1}{1830} + 0.0148835 \right) = 31.33486$$

$$R_D = 2030.78 \text{ kN}$$

计算 A、B 支座反力,并求得舵杆的剪力图和弯矩图(见图 8):

$$R_A = \frac{1.714 \times 391 \times 248 + 2.055 \times 509 \times 698 - 2030.78 \times 443.5}{660}$$

$$= -6.58 \text{ kN}$$

$$R_B = 2030.78 + 6.58 + 1.714 \times 391 - 2.055 \times 509$$

$$= 321.19 \text{ kN}$$

(下转第 21 页)

吸收,只有很少部分能量由被撞船的动能、摩擦能量及沙漏能量吸收。

参 考 文 献

1 王自力,顾永宁. 双层船侧结构碰撞损伤过程研究. 船舶工程,2000(1)  
2 Wang Zili, Gu Yongning. An Inertia Equivalent Model for Numerical Simulation of Ship-Ship Collision. 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships IC-

CGS 2001, Copenhagen Denmark, July-3,2001  
3 MSC/DYTRAN USER ' S MANUAL. ( Version 4. 0, 1997). The Macneal-Schwendler Corporation.  
4 Minorsky VU. An Analysis of Ship Collision to Protection of Nuclear Powered Plant. Journal of Ship Reearch,1959, 3(2)  
5 Jones N. Structural Impact. Cambridge,Cambridge University Press,1989  
6 王自力,顾永宁. 船体碰撞运动的滞后特性. 中国造船, 2001(5)

(上接第 15 页)

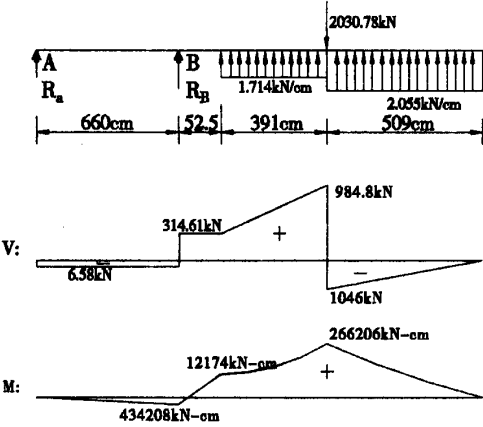


图 8 73000DWT 油船舵杆的剪力图和弯矩图

至此,舵杆各支承点的反力及舵杆长度范围内各剖面的剪力和弯矩已全部求出,按规范校验各支承点压强和各剖面应力也就成为可能。

4 结束语

本文介绍的计算方法设定舵杆轴的抗弯刚度  $EI$  是常量。实际上,上、下舵承处的舵杆直径可能是不相等的,并且常常会遇到由连续垂向隔板和有效舵外板组成的箱形结构代替下舵杆的情况,箱形结构的抗弯刚度当然也就不同。这样,如果以不等截面的  $EI$  进行受力计算就更加复杂化,这在计算机上使用逐步逼近法通过多次程序计算可以办到。对于舵杆这种大型构件来说,杆轴的截面较大,且不同截面之间的抗弯刚度差值不大,所以笔者认为取上、下舵承处舵杆的平均直径设定舵杆轴的抗弯刚度  $EI$  为常量,这种计算方法能满足设计精度要求。