

# 单点搁浅船随潮位变化的稳性和浮性参数计算

邱文昌, 蔡秋亮

(上海海事大学 商船学院, 上海 200135)

**摘要:**为使搁浅船能及时、正确地采取应急预案,根据单点搁浅船随潮位的升降表现为其搁浅点水位垂向升降的特征,依据船舶静力学原理,推导随潮位升降的船舶平均吃水、初稳心高度、搁坐力、横倾角、吃水差、艏艉吃水等参数变化率的计算公式.计算实例及计算结果分析表明:该计算方法在预报或评估单点搁浅船随潮位升降产生的对其稳性和浮性参数的影响具有应用价值.

**关键词:**单点搁浅船; 稳性; 浮性; 潮位

**中图分类号:** U661.2; U661.4

**文献标志码:** A

## Calculation of stability and buoyancy indexes of ship grounded on single point with tide variance

QIU Wenchang, CAI Qiuliang

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime Univ., Shanghai 200135, China)

**Abstract:** In order to adopt emergency plans correctly and timely for grounded ships, applying the principles of ship statics, a set of formulae for calculating the parameter rates about mean draft, initial metacentric height, grounding force, angle of heel, trim, fore draft and aft draft, etc. is proposed, based on the characteristics that the rise and fall with the tide level of a ship aground on single point appear as vertical rise and fall of the tide level at the grounding point. An example of index calculation and the analysis indicate that it has practical value for predicting and evaluating stability and buoyancy conditions of a ship aground on single point.

**Key words:** ship aground on single point; stability; buoyancy; tide

### 0 引言

船舶单点搁浅指船舶搁浅时出现的以海底一点搁坐力作用于船底,阻止船舶航行的搁浅形式.其显著特征为搁浅船不但会随潮位的升降改变船舶的吃水,而且同时会改变船舶的横倾与纵倾状态.

船舶搁浅时,船长会考虑:(1)涨潮时船舶是否

能自行脱浅;(2)若能自行脱浅,何时适合采取脱浅措施;(3)若无法自行脱浅,需多大外来动力协助脱浅;(4)若处于落潮状况,船舶稳性和浮性参数如何变化,船舶是否会发生危险.

针对船舶单点搁浅或等效于单点搁浅,推导出船舶随涨潮和落潮变化的稳性和浮性参数变化率计算公式,对搁浅船船长及时、正确地采取应急预案起



将式(8)代入式(6),求相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial h}{\partial d_R} = \frac{1}{\cos \theta \cos \varphi} \left[ 1 + \frac{d_R}{\left( \frac{\partial d_R}{\partial R} \right)} \left( \tan \theta \frac{\partial \theta}{\partial R} - \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{L_{bp}} \cdot \frac{\partial t}{\partial R} \right) \right] \quad (9)$$

式(9)计算结果的倒数即为随潮位升降船舶搁浅处吃水值  $d_R$  的变化率。

船舶在单点搁浅位置(图1中D点)处的吃水

$$d_R = d_m + \frac{t(X_R - X_f)}{L_{bp}} + Y_R \tan \theta \quad (10)$$

式中: $d_m$ 为船舶平均吃水,船纵倾不大时取漂心处F的吃水值,m; $t$ 为船舶吃水差,定义艏倾为+,m; $X_R$ 为单点搁浅位置纵向距舳距离<sup>[2,3]</sup>,舳前取+,m; $X_f$ 为船舶漂心纵向距舳距离,舳前取+,m; $L_{bp}$ 为船舶两柱间长,m; $Y_R$ 为单点搁浅位置横向距舳线面距离<sup>[2,3]</sup>,右舷取+,m。

对式(10)求相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial d_R}{\partial R} = \frac{\partial d_m}{\partial R} + \frac{(X_R - X_f)}{L_{bp}} \cdot \frac{\partial t}{\partial R} - \frac{t}{L_{bp}} \cdot \frac{\partial X_f}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} + Y_R \frac{\partial(\tan \theta)}{\partial R} \quad (11)$$

式中:等式右侧偏导  $\frac{\partial d_m}{\partial R}$ ,  $\frac{\partial t}{\partial R}$  和  $\frac{\partial(\tan \theta)}{\partial R}$  分别由式

(13),(15)和(17)求取;偏导  $\frac{\partial X_f}{\partial d_m}$  可按式(15)下的说明方法处理。

$$d_m = d_{m_0} - \frac{R}{100m_{TPC}} \quad (12)$$

式中: $d_{m_0}$ 为船舶搁浅时初始平均吃水,m; $m_{TPC}$ 为船舶厘米吃水吨数,9.81 kN/cm。

对式(12)求平均吃水  $d_m$  相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial d_m}{\partial R} = -\frac{1}{100m_{TPC}} + \frac{R}{100m_{TPC}^2} \cdot \frac{\partial m_{TPC}}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} \quad (13)$$

式(13)中  $\frac{\partial m_{TPC}}{\partial d_m}$  可按式(15)下的说明方法处理。

$$t = t_0 - \frac{R(X_R - X_f)}{100M_{TC}} \quad (14)$$

式中: $t_0$ 为船舶搁浅时初始吃水差,m; $M_{TC}$ 为船舶厘米纵倾力矩,9.81 kN·m/cm。

对式(14)求吃水差  $t$  相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial t}{\partial R} = \frac{1}{100M_{TC}} \left[ (X_R - X_f) \left( \frac{R}{M_{TC}} \cdot \frac{\partial M_{TC}}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} - 1 \right) + \right.$$

$$\left. R \cdot \frac{\partial X_f}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} \right] \quad (15)$$

对式(11),(13)和(15)中船舶  $X_f$ ,  $m_{TPC}$  和  $M_{TC}$  相对于平均吃水  $d_m$  的偏导项,在预报涨潮时,可分别按  $d_m + 1.00$  m 和  $d_m$  吃水,从船舶装载手册中查得各自值相减获得;而在预报落潮时,可分别按  $d_m$  吃水和  $d_m - 1.00$  m 吃水,查得各自值相减获得。

另外

$$\tan \theta = -\frac{R(Y_R - Y_f)}{h_{CM}(\Delta - R)} \quad (16)$$

对式(16)求横倾角正切相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial \tan \theta}{\partial R} = \frac{Y_R - Y_f}{h_{CM}(\Delta - R)} \left\{ \frac{R \left[ (\Delta - R) \frac{\partial h_{CM}}{\partial R} - h_{CM} \right]}{h_{CM}(\Delta - R)} - 1 \right\} \quad (17)$$

式中: $Y_R$ 为船舶搁浅点距舳线面横向距离,右舷取+,m; $Y_f$ 为船舶漂心纵向距舳距离,通常取0.0,m; $h_{CM}$ 为船舶搁浅后初稳心高度<sup>[5]</sup>,m。

改变式(17)表达式,得

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{(Y_R - Y_f) \cos^2 \theta}{h_{CM}(\Delta - R)} \left\{ \frac{R \left[ (\Delta - R) \frac{\partial h_{CM}}{\partial R} - h_{CM} \right]}{h_{CM}(\Delta - R)} - 1 \right\} \quad (18)$$

将式(13),(15)和(17)分别代入式(11),即可得船舶搁浅处吃水  $d_R$  相对于船底搁坐力  $R$  的偏导公式。根据式(9)和(11)的计算结果,可求得船底搁坐力  $R$  相对于潮位升降变化率的计算公式

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{1}{\left( \frac{\partial h}{\partial d_R} \right) \cdot \left( \frac{\partial d_R}{\partial R} \right)} \quad (19)$$

将式(19)的计算结果乘以其参数相对于船底搁坐力  $R$  的偏导(如  $\frac{\partial d_m}{\partial h} = \frac{\partial d_m}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial h}$ ),即可转化为相对于潮位升降幅度  $h$  的偏导值。

在船舶静力学中,对少量载荷变动时,艏艉吃水计算公式为

$$d_F = d_{F_0} - \frac{R}{100m_{TPC}} - \frac{(L_{bp}/2) - X_f}{L_{bp}} \cdot \frac{R \cdot (X_R - X_f)}{100M_{TC}} \quad (20)$$

$$d_A = d_F - t \quad (21)$$

式中: $d_F$ 和  $d_A$ 分别为船舶搁浅后的艏吃水和艉吃水值,m。

对式(20)求相对于船底搁坐力  $R$  的偏导,得

$$\frac{\partial d_f}{\partial R} = \frac{-1}{100} \left\{ \frac{1}{m_{TPC}} - \frac{R}{m_{TPC}^2} \cdot \frac{\partial m_{TPC}}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} + \frac{1}{L_{bp} M_{TC}} \cdot \left[ \left( \frac{L_{bp}}{2} - X_f \right) (X_R - X_f) \left( 1 - \frac{R}{M_{TC}} \cdot \frac{\partial M_{TC}}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} \right) - R \left( X_R - 2X_f + \frac{L_{bp}}{2} \right) \cdot \frac{X_f}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial R} \right] \right\} \quad (22)$$

$$\frac{\partial d_A}{\partial R} = \frac{\partial d_f}{\partial R} - \frac{\partial t}{\partial R} \quad (23)$$

在潮位升降引起的平均吃水变化量不大时,船舶搁浅后预报其新的平均吃水  $d_m$ , 搁坐力  $R_1$ , 横倾角  $\theta_1$ , 吃水差  $t_1$ , 艏吃水  $d_{F1}$  和艉吃水值  $d_{A1}$  计算方法如下:

$$d_{m1} = d_m + \frac{\partial d_m}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \delta h \quad (24)$$

$$R_1 = R + \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \delta h \quad (25)$$

$$\theta_1 = \theta + \frac{\partial \theta}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \delta h \quad (26)$$

$$t_1 = t + \frac{\partial t}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \delta h \quad (27)$$

$$d_{F1} = d_F + \frac{\partial d_F}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial h} \cdot \delta h \quad (28)$$

$$d_{A1} = d_A - t \quad (29)$$

## 2 计算实例

选用满载排水量为 68 322.9 t 的重大件货物专运船“Z”轮, 借助该轮经中国船级社审批的船舶装载手册, 查得其与搁浅计算相关的性能数据, 见表 1。通过编制计算程序, 并分别用式(3), (13), (15), (18), (22) 和 (23) 进行计算, 结果见表 2。经编制计算程序, 分别采用式(9) 和 (19), 经单位换算, 结果见表 3。

表 1 “Z”轮相关性性能数据

序号	项目名称	数值	序号	项目名称	数值
1	船舶两柱间长 $L_{bp}/m$	236.00	13	由 $d_m$ 查表	
2	船舶排水量 $\Delta/t$	70 233.3	14	漂心距舳 $X_f/m$	4.791
3	重心高度 $h_{KG0}/m$	12.52	15	横稳心高度 $h_{KM}/m$	20.716
4	自由液面力矩 $\sum \rho_i x_i^2 / (9.81 \text{ kN} \cdot m)$	0.00	16	厘米吃水吨数 $m_{TPC} / (9.81 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1})$	85.489
5	平均吃水 $d_m/m$	8.521	17	厘米纵倾力矩 $M_{TC} / (9.81 \text{ kN} \cdot m \cdot \text{cm}^{-1})$	1 262.18
6	艏吃水 $d_F/m$	7.439	18	$\frac{\partial h_{KM1}}{\partial d_m}$	-1.097
7	艉吃水 $d_A/m$	9.492	19	$\frac{\partial m_{TPC1}}{\partial d_m} / (9.81 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot m^{-1})$	1.161
8	船底搁坐力 $R/kN$	21 968.7	20	$\frac{\partial M_{TC1}}{\partial d_m} / (9.81 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1})$	51.03
9	搁坐点纵向距舳 $X_R/m$	64.532	21	$\frac{\partial X_{f1}}{\partial d_m}$	-1.207
10	搁坐点横向距舳 $Y_R/m$	-8.367	22	$\frac{\partial h_{KM2}}{\partial d_m}$	-1.532
11	横倾角 $\theta/(^\circ)$	2.01	23	$\frac{\partial m_{TPC2}}{\partial d_m} / (9.81 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot m^{-1})$	1.060
12	吃水差 $t/m$	-2.05	24	$\frac{\partial M_{TC2}}{\partial d_m} / (9.81 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1})$	45.62
				$\frac{\partial X_{f2}}{\partial d_m}$	-1.018

注:表中序号 17~20 由平均吃水 9.521 m 和 8.521 m 的查得值求差得到, 用于涨潮计算; 序号 21~24 由平均吃水 8.521 m 和 7.521 m 的查得值求差得到, 用于落潮计算。

表 2 每增加 100 kN 船底搁坐力 R 所影响的稳性和浮性参数变化率

序号	项目	涨潮	落潮	序号	项目	涨潮	落潮
1	$\frac{\partial d_m}{\partial R} / (\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-0.119 7	-0.119 6	4	$\frac{\partial t}{\partial R} / (\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-0.485 3	-0.485 1
2	$\frac{\partial h_{CM}}{\partial R} / (\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-0.062 6	-0.010 6	5	$\frac{\partial d_F}{\partial R} / (\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-0.307 2	-0.309 6
3	$\frac{\partial \theta}{\partial R} / (^\circ \cdot \text{kN}^{-1})$	0.000 7	0.000 6	6	$\frac{\partial d_A}{\partial R} / (\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-0.307 2	-0.309 6

表3 潮位上升1 cm所影响的稳性和浮性的数据变化量

序号	项目	涨潮	落潮	序号	项目	涨潮	落潮
1	$\frac{\partial R}{\partial h}/(\text{cm} \cdot \text{kN}^{-1})$	-264.00	-262.21	5	$\frac{\partial t}{\partial h}$	1.281	1.272
2	$\frac{\partial d_m}{\partial h}$	0.316	0.314	6	$\frac{\partial d_F}{\partial h}$	0.811	0.812
3	$\frac{\partial h_{CM}}{\partial h}$	0.001 65	0.000 28	7	$\frac{\partial d_A}{\partial h}$	-0.470	-0.460
4	$\frac{\partial \theta}{\partial h}/((^\circ) \cdot \text{cm}^{-1})$	-0.025 6	-0.025 1	8	$\frac{\partial d_R}{\partial h}$	1.011 1	0.999

将表3中的值分别乘以潮位升降幅度值,结果见表4.

表4 随潮位升降船舶稳性和浮性参数计算结果

序号	项目	刚搁浅时	涨潮80 cm	落潮100 cm	落潮250 cm
1	平均吃水 $d_m$ 变化量/m	0.000	0.253	-0.314	-0.784
2	平均吃水 $d_m$ 值/m	8.521	8.774	8.208	7.737
3	$h_{CM}$ 变化量/m	0.000	0.132	-0.028	-0.070
4	$h_{CM}$ 值/m	7.784	7.916	7.756	7.714
5	横倾角 $\theta$ 变化量/ $^\circ$	0.000	-2.05	2.51	6.26
6	横倾角 $\theta$ 值/ $^\circ$	2.010	-0.04	4.52	8.27
7	搁坐力 $R$ 变化量/kN	0.000	-21 119.8	26 220.9	65 552.3
8	搁坐力 $R$ 值/kN	21 968.7	849.0	48 189.7	87 521.0
9	船吃水 $d_F$ 变化量/m	0.000	0.649	-0.812	-2.029
10	船吃水 $d_F$ 值/m	7.439	8.088	6.628	5.410
11	艏吃水 $d_A$ 变化量/m	0.000	-0.376	0.460	1.151
12	艏吃水 $d_A$ 值/m	9.492	9.116	9.952	10.643
13	吃水差 $t$ 变化量/m	0.000	1.025	-1.272	-3.180
14	吃水差 $t$ 值/m	-2.050	-1.028	-3.325	-5.233
15	搁坐点吃水 $d_R$ /m	7.708	8.519	6.727	5.251
16	实际潮高 $\delta h$ /cm	0.0	80.2	-99.1	-247
17	潮高相对误差/%	0.00	0.20	0.89	1.35

依据表4中预报的船、艏吃水和平均吃水值,查船舶装载手册有关数据,即可验算船舶对应的潮位

升降幅度值.结果表明,在“Z”轮特定搁浅状况下,其潮位升降幅度的相对误差为0.20%~1.35%.

由表4可知,该轮在涨潮80 cm后,因平均吃水增加25.3 cm,其横倾角接近于0,船底搁坐力减小到849.0 kN,已具备自行脱浅的条件;而当该轮落潮250 cm后,因平均吃水减少78.4 cm,船舶横倾角增大到右倾8.27 $^\circ$ (须通过压载水的调整以减小横倾),船底搁坐力增大到87 521.0 kN(须按在搁浅处卸下该重量载荷的方法利用船舶装载软件作船体强度核算),船舶初稳心高度减小到7.714 m(>该吃水下的临界初稳心高度4.25 m).

### 3 结束语

本文给出单点搁浅(或等效于单点搁浅)船平均吃水、初稳心高度、搁坐力、横倾角、吃水差以及艏吃水等参数相对于潮位升降的偏导计算公式.这些公式仅适用于潮位升降幅度不大(即搁坐力不超过排水量10%~15%),船舶纵、横倾角不大(一般 $\leq 7^\circ$ )<sup>[6]</sup>且单点搁浅位置不变等情况.当潮位升降幅度较大时,可多次采用本文的偏导公式;当船舶纵、横倾较大时,需先利用船舶型线图绘制船舶倾斜状态下的实际水线面及排水体积分布曲线图,并用近似积分法计算出倾斜水线下的漂心位置、横稳心距基线高度、船舶厘米吃水吨数与船舶厘米纵倾力矩等参数,最后采用本文的偏导公式.

### 参考文献:

- [1] 盛振邦,刘应中.船舶原理[M].1版.上海:上海交通大学出版社,2003:111-127.
- [2] 吴善刚.单点搁浅船舶的横倾预报方法[J].中国航海,1997(2):34-39.
- [3] PEDERSEN P T. Mechanics of ship grounding[M]. Denmark: Technical University of Denmark, 1997: 99-113.
- [4] 邱文昌,施纪昌.海上货物运输[M].2版.北京:人民交通出版社,2005:66-68.
- [5] 冯明奎,钟成雄.船舶坐滩搁浅后的稳性研究[J].江苏船舶,2001(3):14-16.
- [6] 中华人民共和国船舶检验局.船舶与海上设施法定检验规则[M].3A分册.北京:人民交通出版社,2008:4-12.

(编辑 陈锋杰)