

散货船配载仪中破舱稳性计算

沈 晔, 孙霄峰*, 尹 勇, 刘春雷

(大连海事大学 航海动态仿真和控制交通运输行业重点实验室, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为提高散货船配载仪中破舱稳性的计算精度, 基于船舶三维设计数据进行破舱稳性计算. 首先沿船长方向对船体的三维设计模型进行切片, 得到船体的横剖面型值数据; 然后通过等距偏移模拟船体外板厚度, 得到船舶外板数据; 最后分别利用最小功法和静平衡法计算破损船舶各个横倾角度的复原力臂. 以 38 300 t 散货船“RUI AN CHENG”为例, 对 3 个典型载况进行了破舱稳性计算. 计算结果表明: 与 NAPA 计算值相比, 静平衡法的计算结果具有较高精度, 满足主流船级社的精度要求, 而最小功法的计算结果则有较大误差. 同时, 静平衡法不仅适用于散货船配载仪的破舱稳性计算, 对液货船、集装箱船等的配载仪的开发也具有一定参考价值.

关键词: 船舶破舱稳性; 散货船; 配载仪; NAPA

中图分类号: U661.23 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201801009

0 引言

船舶在营运过程中一旦发生海损事故, 舱室破损, 极有可能造成船毁人亡的后果. 为了减少这种风险, 船舶在设计阶段就应考虑破舱稳性的问题. 船舶破舱稳性是指船舶在舱室破损的情况下维持一定的浮态和稳性, 防止或延缓沉没的一种能力, 是船舶的重要性能.

传统的散货船破舱稳性计算基于船舶型值表或型线图, 主要有郭洛瓦诺夫法、克雷洛夫-达尔尼法等^[1]. 姜玲^[2]采用二次开发技术, 在 SolidWorks 的基础上, 利用 VB 语言开发出一套破舱稳性计算程序; 周瑞平等^[3]使用 B 样条函数对船舶型值表中的数据进行处理, 使用 VB.NET 和 Access 数据库开发出船舶稳性计算软件; 段兴锋^[4]利用 Access 数据库, 以 C++ 语言为开发工具, 在 MFC 框架下开发出基于型值表的船舶装载仪; 蔡晓梅^[5]利用 Maxsurf 软件建立船体三维曲面模型, 以此为数据来源进行破舱稳性计算; 林焰等^[6]用数据型值表描述船型, 在水线面与船体表面求交时将坐标转换, 运用格林公式计算水线面下船体和舱室的特征参数; 肖维维等^[7]对比了表

面元法和基于 NURBS 曲面的最优化方法在破舱稳性计算中的差异, 指出了两种方法存在的问题.

综上所述, 国内大部分配载仪的数据来源都是型值表以及型线图或者在现有软件的基础上做二次开发. 基于型值表或型线图的破舱稳性计算存在很大误差, 尤其是运用于大角度倾斜下复杂船型破舱稳性的计算时误差更大, 并且在船型数据输入模块, 用户需要在型值表中读取或在型线图中量取大量描述船体的点坐标输入到软件中, 十分费时费力. 所以, 将型值表或型线图作为数据来源的破舱稳性计算已经不能满足现代船舶设计的需要; 而对现有的软件做二次开发也需要先建立模型, 精度往往很差.

为了解决散货船配载仪中破舱稳性计算精度不高、操作复杂的问题, 基于三维设计数据的破舱稳性计算法应运而生, 国际上大部分知名配载仪软件, 例如 NAPA^[8]、Maxsurf^[9]等均基于船舶的三维设计数据进行计算, 具有实时、高效、精确等优点, 但其高昂的价格却是国内小型船舶公司承受不起的. 而且由于商业保密的原因, 这些软件的计算方法尚未可知.

本文基于船舶三维设计数据用最小功法和静平衡法进行散货船破舱稳性的计算,比较并分析两种方法的计算结果,并将精度较高的计算方法应用于散货船配载仪中破舱稳性计算模块。

1 船舶三维数据的获取

三维方法计算破舱稳性需要确定船体和破损舱室的型值数据,本文规定沿船舶方向为 x 轴的正方向, y 轴左舷方向为正, z 轴垂直于基平面向上为正。沿船长方向,按照装载手册中的肋位以一定的间隔垂直于 x 轴对船体进行切片,得到每个切片处的船舶横剖面型线数据,如图 1 所示。为得到船舶外板数据,需要对所得的型线数据进行等距偏移,偏移量为船壳的平均板厚,具体的实现方法见文献[10]。船舱型值数据的获取与此类似,但是不需要对其进行等距偏移。通过以上的方法可以得到船体外表面以及各舱室内表面的三维数据。

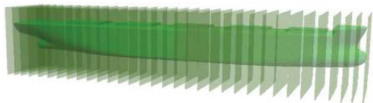


图 1 散货船“RUI AN CHENG”型表面切片示意图

Fig. 1 Slicing bulk carrier “RUI AN CHENG” molded surface

2 破舱稳性计算

目前散货船破舱稳性计算的方法主要有两种:一种是基于最小功原理的自由纵倾法,该方法固定船舶的横倾角,通过牛顿迭代法^[11]或者优化法^[12]求船舶达到特定横倾角时的纵倾和吃水,然后基于最小功原理可以求得船舶破舱后的稳性力臂,从而可以获得船舶的破舱稳性曲线;另一种是静平衡下的自由纵倾法,该方法分析船舶倾斜时的受力平衡状态,保证船舶横倾到指定角度时船舶所受外力和外力矩为零。

2.1 基于最小功原理的自由纵倾法

船舶在自由倾斜时会逐渐到达位能最小的位置。船舶在初始浮态的基础上横倾至指定角度,利用最小功原理建立优化模型,使用解析优化算法算出当前横倾角对应的稳性力臂。在相同载况下连续设定目标横倾角,求得对应的稳性力臂,绘制出破舱稳性曲线。相关的实现方法见文献[12]。

2.2 静平衡下的自由纵倾法

为了方便计算,引入下列符号:

$$\begin{aligned}\overline{M_{xz}} &= \overline{V} \overline{Y_b} - \frac{P}{\rho} Y_g \\ \overline{M_{yz}} &= \overline{V} \overline{X_b} - \frac{P}{\rho} X_g \\ \overline{M_{xy}} &= \overline{V} \overline{Z_b} - \frac{P}{\rho} Z_g\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\overline{M_{xz}}$ 、 $\overline{M_{yz}}$ 、 $\overline{M_{xy}}$ 为方便计算引用的符号; P 为船舶重量; ρ 为海水密度; X_g 、 Y_g 、 Z_g 为船舶重心坐标; $\overline{V}$ 、 $\overline{X_b}$ 、 $\overline{Y_b}$ 、 $\overline{Z_b}$ 为经过破舱修正后的船舶排水体积和浮心坐标,由式(2)给出。

$$\begin{aligned}\overline{V} &= V - \sum_{i=1}^{n_1} v_i - \sum_{j=1}^{n_2} v_j - \sum_{k=1}^{n_3} v_k \\ \overline{X_b} &= \left(V X_b - \sum_{i=1}^{n_1} v_i x_i - \sum_{j=1}^{n_2} v_j x_j - \sum_{k=1}^{n_3} v_k x_k \right) \frac{1}{\overline{V}} \\ \overline{Y_b} &= \left(V Y_b - \sum_{i=1}^{n_1} v_i y_i - \sum_{j=1}^{n_2} v_j y_j - \sum_{k=1}^{n_3} v_k y_k \right) \frac{1}{\overline{V}} \\ \overline{Z_b} &= \left(V Z_b - \sum_{i=1}^{n_1} v_i z_i - \sum_{j=1}^{n_2} v_j z_j - \sum_{k=1}^{n_3} v_k z_k \right) \frac{1}{\overline{V}}\end{aligned}\quad (2)$$

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 分别为第1类、第2类、第3类破损舱室的总数; i 、 j 、 k 分别为第1类、第2类、第3类破损舱室的编号, v 、 x 、 y 、 z 分别为舱室进水体积和中心坐标; V 、 X_b 、 Y_b 、 Z_b 为舱室破损后船体水下部分的体积和浮心坐标。以上数据可利用船舶吃水和横倾角通过对船舶三维数据进行积分求解。

由文献[13]可得破舱后的浮态平衡方程组:

$$\begin{aligned}\overline{f_1} &= \overline{V} - \left(V_0 + \sum_{i=1}^{n_1} v_i + \sum_{j=1}^{n_2} v_j + \sum_{k=1}^{n_3} v_k \right) \\ \overline{f_2} &= \overline{M_{yz}} + \overline{M_{xy}} \tan \varphi\end{aligned}\quad (3)$$

式中: $\overline{f_1}$ 、 $\overline{f_2}$ 表示破舱后的船舶浮态方程; V_0 为船舶的初始排水量; φ 为船舶当前的纵倾角。

引入向量表示:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} \overline{f_1}(\mathbf{X}) \\ \overline{f_2}(\mathbf{X}) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} T_m \\ \tan \varphi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\quad (4)$$

式中: $\overline{f_1}(\mathbf{X})$ 、 $\overline{f_2}(\mathbf{X})$ 为由 T_m 和 $\tan \varphi$ 表示的破损后船舶浮态方程,其中 T_m 为船舫吃水。

采用逐次线性化的方法得到方程组:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k) \Delta \mathbf{X}_k + \mathbf{F}(\mathbf{X}_k) = \mathbf{0}; \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为经过 k 次迭代计算之后的结果; $\Delta \mathbf{X}_k$ 为设定的计算精度,是迭代计算的停止条件; $\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)$ 为 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 在 $\mathbf{X}_k$ 处的 Jacobi 矩阵。根据船舶静力学原理,有

$$\mathbf{F}'(\mathbf{X}_k)=\begin{pmatrix} \overline{S} & \overline{S}\overline{X}_f \\ \overline{S}\overline{X}_f+\overline{S}\overline{Z}_f\tan\varphi & \overline{I}_{yf}+\overline{I}_{yf}\tan^2\varphi+\overline{M}_{xy}+\overline{S}\overline{X}_f\overline{Z}_f\tan\varphi+\overline{S}\overline{X}_f^2 \end{pmatrix}$$

(6)

式中： $\overline{S}$ 和 $\overline{I}_{yf}$ 为经过破损舱室修正的水线面面积和对浮心的纵向惯性矩， $\overline{X}_f$ 、 $\overline{Z}_f$ 为舱室破损之后的漂心坐标，由式(7)给出。

$$\begin{aligned} \overline{S} &= S - \sum_{k=1}^{n_3} s_k \\ \overline{I}_{yf} &= I_{yf} - \sum_{k=1}^{n_3} (i_{yfk} + s_k x_{fk}^2) - \sum_{j=1}^{n_2} i_{y fj} \\ \overline{X}_f &= \left(S X_f - \sum_{k=1}^{n_3} s_k x_{fk} \right) \frac{1}{S} \\ \overline{Z}_f &= \left(S Z_f - \sum_{k=1}^{n_3} s_k z_{fk} \right) \frac{1}{S} \end{aligned}$$

(7)

式中： S 为破舱之后的水线面面积； s 为进水舱室中的自由液面面积； I_{yf} 为破舱之后的水线面对浮心的纵向惯性矩； i_{yf} 为进水舱室中自由液面对 y 轴的惯性矩。

2.3 程序设计

本文基于 VS2013 平台,使用 C++ 语言编写破舱稳性的计算程序,具体的流程如图 2 所示。先将船体的三维设计数据进行等距偏移得到船壳外表面三维设计数据,基于船壳外表面三维设计数据和舱室三维设计数据,确定船舶倾斜后的横

倾角,通过自由浮态计算简化方法^[14]得到船舶破损后的浮态参数,利用这些浮态数据求得船舶破损稳性复原力臂。

3 算 例

本文基于散货船“RUI AN CHENG”的三维设计数据,分别求取了该船在 3 种不同载况下 1 号货舱破损、5 号货舱破损以及 1 号货舱和 5 号货舱同时破损时船舶的复原力臂曲线,货舱的分布情况如图 3 所示,从船艏到船艉方向分别为 1 号货舱到 5 号货舱。

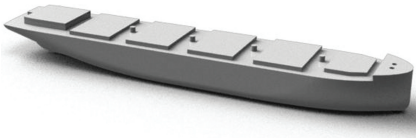


图 3 散货船“RUI AN CHENG”货舱示意图
Fig. 3 Holds of bulk carrier “RUI AN CHENG”

3 种载况分别为轻质货满载出港、重质货均匀装载出港、重质货隔舱装载出港,如图 4 所示。

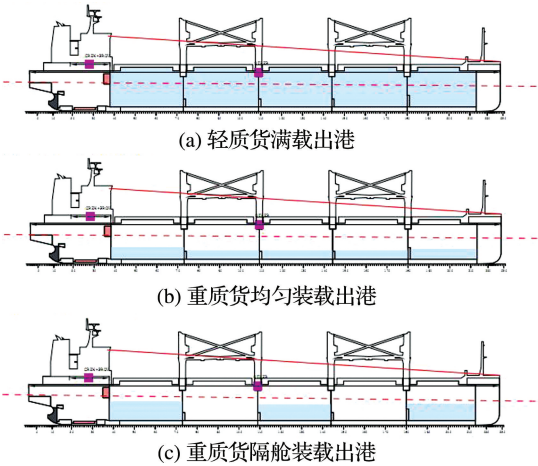


图 4 3 种典型载况

Fig. 4 Three typical loading conditions

表 1 为 3 种载况对应的浮态参数。

本文以这 3 种典型载况下的浮态为初始条件进行迭代,计算出横倾角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的复原力臂,然后将得到的复原力臂绘制成曲线与 NAPA 计算值进行比较。NAPA 软件是由芬兰 NAPA 公司开发的国际著名的船舶 CAD 软件,目前大约有 32 个国家的 320 多家单位使用 NAPA 作为船

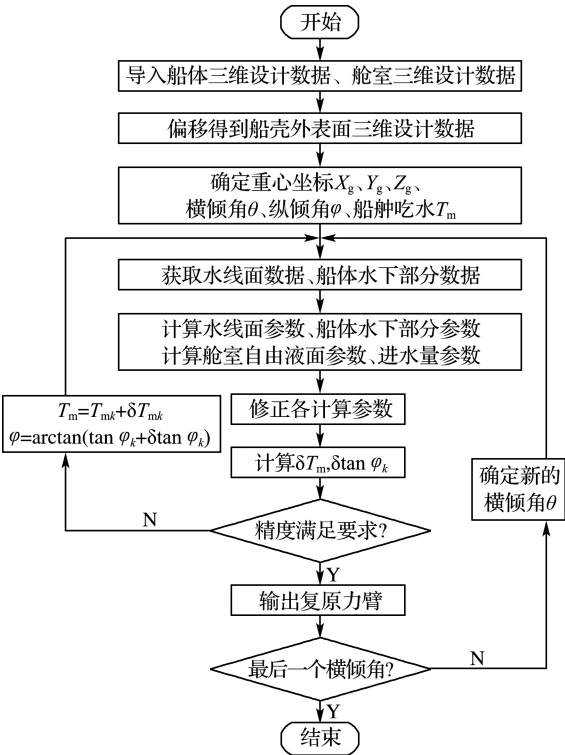


图 2 破舱稳性计算流程图

Fig. 2 Damage stability calculation flowchart

表 1 典型载况

Tab.1 Typical loading conditions

编号	载况名称	$\overline{T}_m/\text{m}$	$\varphi/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$
载况一	轻质货满载出港	10.460	-0.463	-0.5
载况二	重质货均匀装载出港	10.465	-0.409	-0.3
载况三	重质货隔舱装载出港	10.436	-0.723	-0.3

舶方案设计和设计的主要工具^[15]。德国劳氏船级社和英国劳氏船级社等均将 NAPA 配载仪的计算结果作为标准值,根据与送检配载仪计算结果的比对判断送检配载仪是否达到认可标准。

3.1 载况一

在轻质货满载出港的载况下,利用最小功法和静平衡法分别在 1 号货舱破损、5 号货舱破损以及 1 号货舱和 5 号货舱同时破损的情况下,求出横倾角为 0°~60°时的复原力臂,并与 NAPA 计算值进行对比,如图 5 所示。

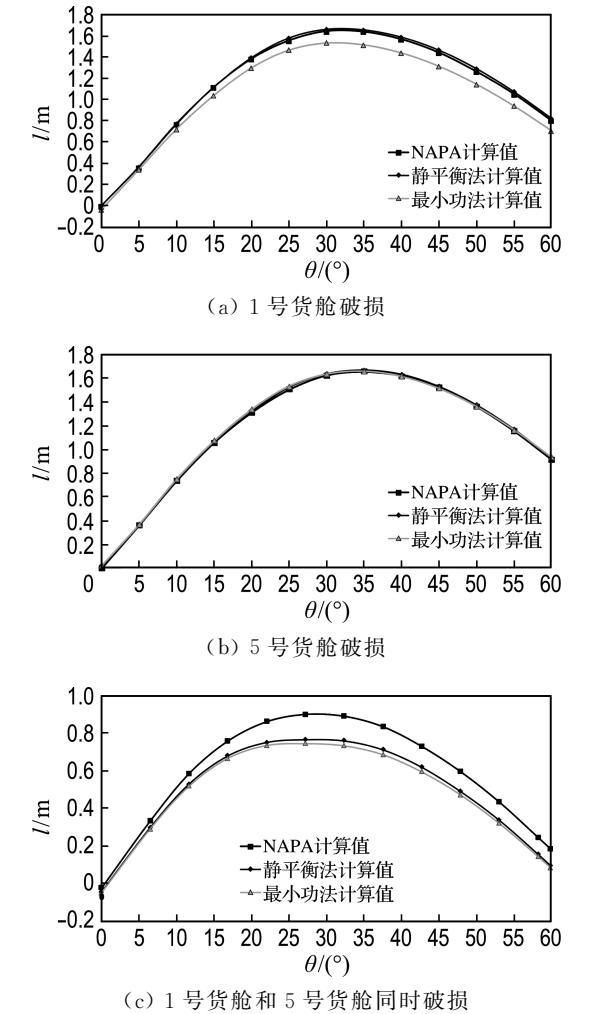


图 5 载况一的复原力臂对比曲线
Fig. 5 GZ curves comparison under the first loading condition

3.2 载况二

在重质货均匀装载出港的载况下,利用最小功法和静平衡法分别在 1 号货舱破损、5 号货舱破损以及 1 号货舱和 5 号货舱同时破损的情况下,求出横倾角为 0°~60°时的复原力臂,并与 NAPA 计算值进行对比,如图 6 所示。

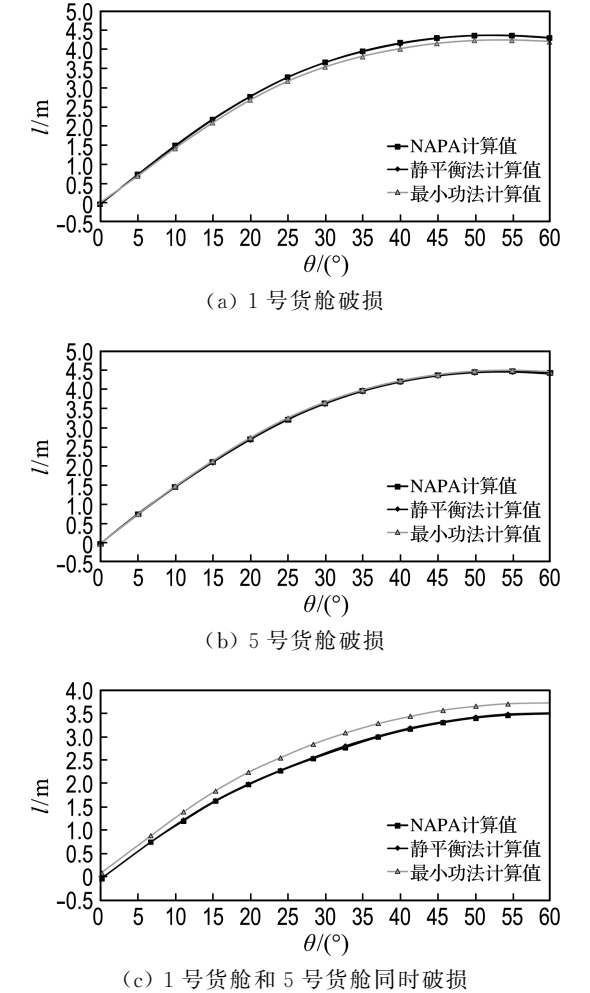


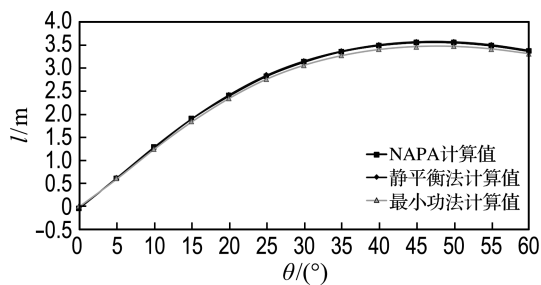
图 6 载况二的复原力臂对比曲线
Fig. 6 GZ curves comparison under the second loading condition

3.3 载况三

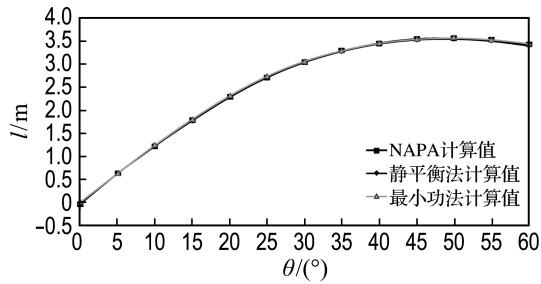
在重质货隔舱装载出港的载况下,利用最小功法和静平衡法分别在 1 号货舱破损、5 号货舱破损以及 1 号货舱和 5 号货舱同时破损的情况下,求出横倾角为 0°~60°时的复原力臂,并与 NAPA 计算值进行对比,如图 7 所示。

3.4 误差分析

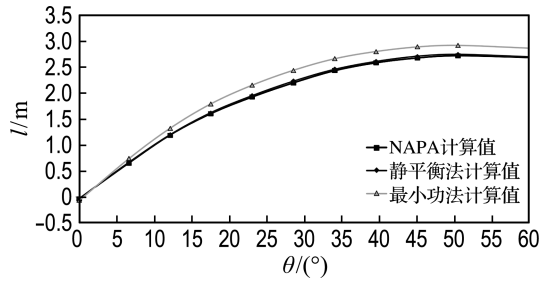
将 NAPA 计算结果近似看作准确值,表 2、3 分别为使用最小功法和静平衡法计算产生的误差。



(a) 1 号货舱破损



(b) 5 号货舱破损



(c) 1 号货舱和 5 号货舱同时破损

图 7 载况三的复原力臂对比曲线
Fig. 7 GZ curves comparison under the third loading condition

基于三维设计数据的散货船配载仪中的稳性计算误差要求最大不超过 5 cm 或 5%。

利用最小功法进行破舱稳性的计算,117 次计算中最大绝对误差为 0.318 m(相对误差为 10.82%);每次计算的平均绝对误差为 0.091 m(相对误差为 1.86%)。实验证明本方法不符合船级社的精度要求,不适用于散货船配载仪中破舱稳性计算模块的实现。

利用静平衡法进行破舱稳性的计算,117 次计算中最大绝对误差为 0.031 m(相对误差为 1.06%);每次计算的平均绝对误差为 0.013 m(相对误差为 0.42%),符合船级社的精度要求。而且在不同载况下,设置不同的横倾角,计算中迭代次数为 3、4、5 的概率为 82.91%,迭代次数为 6、7、8 的情况只出现在横倾角超过 50°时,满足计算的实时性要求,如图 8 所示。

最小功法不保证船舶横倾之后纵向外力和外力矩的平衡,所以计算结果和静平衡法有所差别。由误差分析可知,NAPA 的破舱稳性计算模块使用的不是最小功法。

由实验结果可知,静平衡法计算船舶的破舱稳性与 NAPA 的计算结果较为接近。基于静平衡法,大连海事大学航海研究所成功完成了配载仪中的破舱稳性计算模块,并与上海船舶研究设计院联合开发了 smart load 型配载仪,该型配载仪的主界面如图 9 所示。目前,该配载仪已经通过 CCS 的认证并已顺利装船。

德国劳氏船级社^[16]和英国劳氏船级社^[17]对

表 2 最小功法计算结果绝对误差

Tab. 2 Absolute error of calculation based on minimum work method

横倾角/(°)	1 号货舱破损			5 号货舱破损			1 号货舱和 5 号货舱同时破损			平均误差/m	最大误差/m
	载况一	载况二	载况三	载况一	载况二	载况三	载况一	载况二	载况三		
0	0.032	0.041	0.041	0.001	0.001	0.041	0.027	0.107	0.022	0.035	0.107
5	0.021	0.036	0.015	0.009	0.007	0.007	0.036	0.118	0.060	0.034	0.118
10	0.045	0.070	0.036	0.015	0.024	0.024	0.057	0.166	0.126	0.063	0.166
15	0.074	0.097	0.066	0.015	0.018	0.026	0.083	0.218	0.157	0.084	0.218
20	0.083	0.098	0.057	0.026	0.038	0.033	0.112	0.267	0.190	0.100	0.267
25	0.088	0.114	0.069	0.028	0.042	0.036	0.149	0.301	0.220	0.116	0.301
30	0.110	0.126	0.076	0.009	0.026	0.020	0.150	0.318	0.223	0.118	0.318
35	0.122	0.141	0.096	0.001	0.013	0.012	0.155	0.315	0.217	0.119	0.315
40	0.126	0.152	0.096	0.004	0.018	0.007	0.142	0.295	0.204	0.116	0.295
45	0.126	0.147	0.095	0.007	0.013	0.004	0.131	0.279	0.189	0.110	0.279
50	0.116	0.140	0.089	0.002	0.017	0.010	0.122	0.261	0.179	0.104	0.261
55	0.110	0.125	0.077	0.008	0.021	0.012	0.111	0.245	0.169	0.098	0.245
60	0.091	0.102	0.061	0.017	0.030	0.025	0.100	0.230	0.155	0.090	0.230

表 3 静平衡法计算结果绝对误差

Tab. 3 Absolute error of calculation based on static equilibrium method

横倾角/(°)	1 号货舱破损			5 号货舱破损			1 号货舱和 5 号货舱同时破损			平均误差/m	最大误差/m
	载况一	载况二	载况三	载况一	载况二	载况三	载况一	载况二	载况三		
0	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003
5	0.002	0.011	0.004	0.006	0.012	0.001	0.005	0.005	0.005	0.006	0.012
10	0.007	0.020	0.009	0.008	0.013	0.006	0.008	0.008	0.008	0.010	0.020
15	0.003	0.019	0.001	0.001	0.017	0.006	0.012	0.013	0.013	0.009	0.019
20	0.013	0.015	0.022	0.007	0.004	0.001	0.014	0.014	0.014	0.011	0.022
25	0.027	0.015	0.021	0.019	0.004	0.009	0.019	0.020	0.019	0.017	0.027
30	0.021	0.015	0.023	0.011	0.008	0.001	0.023	0.025	0.024	0.017	0.025
35	0.020	0.025	0.010	0.012	0.018	0.002	0.026	0.031	0.031	0.019	0.031
40	0.023	0.028	0.016	0.013	0.010	0.005	0.025	0.025	0.026	0.019	0.028
45	0.026	0.020	0.018	0.009	0.015	0.009	0.019	0.020	0.018	0.017	0.026
50	0.031	0.019	0.019	0.011	0.016	0.008	0.014	0.014	0.014	0.016	0.031
55	0.024	0.012	0.020	0.013	0.019	0.015	0.012	0.013	0.013	0.016	0.024
60	0.023	0.009	0.019	0.011	0.021	0.016	0.009	0.009	0.006	0.014	0.023

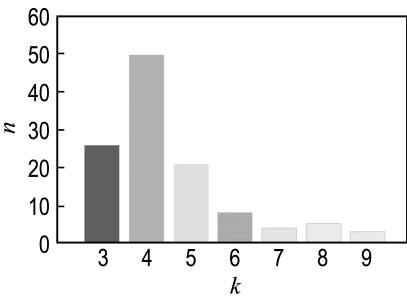


图 8 破舱稳性计算迭代次数分布

Fig. 8 The distribution of damage stability calculation iteration numbers

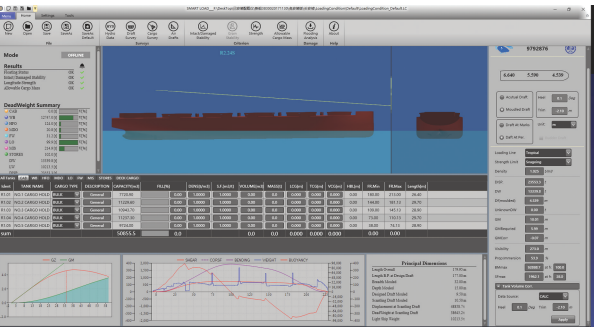


图 9 散货船配载仪主界面

Fig. 9 The main interface of bulk carrier's loading computer

4 结 语

本文通过对船壳型表面数据进行船舶外板厚度的等距偏移,得到船体外板的设计数据,然后以适当的间隔沿船长方向进行切片得到船壳外表面的三维设计数据.以船舶外表面三维设计数据和舱室三维设计数据为基础进行破舱稳性的计算,得到破舱稳性曲线.通过对最小功法和静平衡法下的破舱稳性计算进行实现,发现运用不同的计算方法,

得到的计算结果差异较大.使用静平衡下的自由纵倾法得到的计算结果与 NAPA 的计算结果较为接近.利用船舶的三维船壳模型计算破舱稳性具有较高的精度.本文介绍的方法不仅适用于散货船配载仪中破舱稳性计算模块的实现,对液货船、集装箱船等船型配载仪的开发也具有一定的参考价值.

参考文献:

[1] 盛振邦,杨尚荣,陈雪深. 船舶静力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1984.
SHENG Zhenbang, YANG Shangrong, CHEN Xueshen. **Ship Statics** [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1984. (in Chinese)

[2] 姜 玲. 船舶稳性三维计算方法研究及软件开发[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
JIANG Ling. Ship stability dimensional calculation method research and software development [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)

[3] 周瑞平,郭汝绯. 基于 VB.NET 的船舶稳性计算软件的设计和实现[J]. 造船技术, 2008, 4(8):41-44.
ZHOU Ruiping, GUO Rufe. The design and realization of ship stability software based on VB.NET [J]. **Marine Technology**, 2008, 4(8):41-44. (in Chinese)

[4] 段兴锋. 基于型值表的船舶装载仪的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
DUAN Xingfeng. Research of ship stowage system based on table of offsets [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese)

[5] 蔡晓梅. 应用三维船体曲面模型进行破舱稳性计算[J]. 江苏船舶, 2005, 22(5):1-3.
CAI Xiaomei. Application of three-dimensional hull

- surface model in damaged stability calculation [J]. **Jiangsu Ship**, 2005, **22**(5):1-3. (in Chinese)
- [6] 林 焰, 李铁骊, 纪卓尚. 破损船舶自由浮态计算[J]. 大连理工大学学报, 2001, **41**(1):85-89.
LIN Yan, LI Tieli, JI Zhuoshang. Ship damage floating calculation [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2001, **41**(1):85-89. (in Chinese)
- [7] 肖维维, 李俊华, 何 刚, 等. 船舶破舱稳性计算方法研究[J]. 中国水运, 2006, **4**(11):12-14.
XIAO Weiwei, LI Junhua, HE Gang, *et al.* Study of ship damage stability calculation [J]. **China Water Transport**, 2006, **4**(11):12-14. (in Chinese)
- [8] 王彩莲. 浅谈船舶应用软件 NAPA[J]. 船舶, 2004(3):58-60.
WANG Cailian. On the ship design software NAPA [J]. **Ship & Boat**, 2004(3):58-60. (in Chinese)
- [9] 蒋毅文. Maxsurf 及相关设计程序在船舶设计中的应用[J]. 船海工程, 2005(4):39-41.
JIANG Yiwen. Application of Maxsurf and corresponding software in ship design [J]. **Ship & Ocean Engineering**, 2005(4):39-41. (in Chinese)
- [10] 刘春雷, 尹 勇, 孙霄峰, 等. 基于 STL 模型的船舶几何特性计算[J]. 系统仿真学报, 2015, **27**(10):2264-2271.
LIU Chunlei, YIN Yong, SUN Xiaofeng, *et al.* Calculation of vessel's geometric properties based on STL model [J]. **Journal of System Simulation**, 2015, **27**(10):2264-2271. (in Chinese)
- [11] 孙承猛, 刘寅东. 一种船舶最小稳性和自由浮态计算的改进算法[J]. 中国造船, 2007, **48**(3):1-4.
SUN Chengmeng, LIU Yindong. An improved algorithm for calculating ship's minimum stability and free floatation [J]. **Shipbuilding of China**, 2007, **48**(3):1-4. (in Chinese)
- [12] 赵晓非, 蔡伟科. 船舶稳性计算优化方法研究[J]. 中国造船, 1987, **40**(2):86-92.
ZHAO Xiaofei, CAI Weike. An optimization method for the calculation of ship stability curves [J]. **Shipbuilding of China**, 1987, **40**(2):86-92. (in Chinese)
- [13] 赵晓非, 林 焰. 关于解船舶浮态问题的矩阵方法[J]. 中国造船, 1985(3):55-64.
ZHAO Xiaofei, LIN Yan. Matrix methods for solving ship floating state problem [J]. **Shipbuilding of China**, 1985(3):55-64. (in Chinese)
- [14] 刘春雷, 尹 勇, 孙霄峰, 等. 散货船自由浮态计算简化方法[J]. 大连理工大学学报, 2017, **57**(1):55-60.
LIU Chunlei, YIN Yong, SUN Xiaofeng, *et al.* Simplified method of bulk carrier's free floatation calculation [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2017, **57**(1):55-60. (in Chinese)
- [15] 刘春雷. 散货船智能化配载仪的研究与实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
LIU Chunlei. Research and implementation of intelligent bulk carrier stowage system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [16] Germanischer Lloyd SE. Rules for Classification and Construction [Z]. Hamburg: Germanischer Lloyd SE, 2013.
- [17] Lloyd's Register. Approval of Longitudinal Strength and Stability Calculation Programs [Z]. London: Lloyd's Register, 2011.

Calculation of ship damage stability in bulk carrier's loading computer

SHEN Ye, SUN Xiaofeng*, YIN Yong, LIU Chunlei

(Key Laboratory of Marine Simulation and Control for Ministry of Communications,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To improve accuracy of ship damage stability calculation in bulk carrier's loading computer, ship damage stability is calculated on the basis of ship 3D design data. First, offset data of each cross-section is obtained by slicing designed 3D model longitudinally; Then, the hull data is obtained by equidistant offsetting; Finally, the righting arms under different heel angles are calculated utilizing the static equilibrium method and the minimum work method respectively. As an example, the ship damage stability of 38 300 tons bulk carrier "RUI AN CHENG" in three typical loading conditions is calculated. The calculation results indicate that using NAPA as reference the static equilibrium method is more accurate and meets the accuracy requirements of the leading classification societies, while the minimum work method is proved to be inexact. Meanwhile, the static equilibrium method is applicable not only to bulk-cargo ship's damage stability calculation, but also to other ship types such as liquid cargo ship and container ship during the design of loading computer.

Key words: ship damage stability; bulk carrier; loading computer; NAPA