

荷载位置对龙骨帆船大倾角稳性影响

胡健康^{1,2}, 林少芬^{1,2}, 陈清林^{1,2}, 朱兆一^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究荷载位置变化对龙骨帆船大倾角稳性的影响程度, 采用可变质量位置变化对大倾角稳性影响的计算方法, 依据 Maxsurf 软件与检验规范, 并以一艘 10 m 休闲龙骨帆船为例, 获得不同人员布局在满帆操作下的安全操帆风速, 计算复原力臂差值, 得到影响程度的最大差异可达到 10% - 33% 的结果。研究表明, 设计、检验和驾驶龙骨帆船时, 要注意人员布局对帆船稳性的影响。

[关键词] 可变质量; 龙骨帆船; 大倾角稳性; 稳性衡准

[中图分类号] U 661.2⁺2; U 674.926

Research for the Influences of Load Position on Large Angle Stability of Keel Boat

HU Jian-kang^{1,2}, LIN Shao-fen^{1,2}, CHEN Qing-lin^{1,2}, ZHU Zhao-yi^{1,2}

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: The study was carried out to study the influence of variation of the load position on a large angle stability of a keel boat. A leisure keel boat in length 10m was selected, the software Maxsurf was employed and the test specification was conducted to calculate the large angle stability via the method of variable weight position change. It shows that the maximum difference of righting lever was about 10% to 33% at the security sail wind speed under the full sails. Conclusions were drawn that the design, test and driving should be noticed while concerning the impact of the personal accommodation space on the stability.

Keywords: variable weight; keel boat; large angle stability; stability criterion

0 引言

龙骨帆船是指依靠风帆推动, 帆船底部具有稳向板和压铅来扩大帆船的侧面面积, 能防止帆船产生横向移动并保持稳定的特殊船舶^[1]。船舶的稳性是船舶安全的核心, 船舶可变质量位置变化对船舶稳性有一定的影响。可变质量指船舶使用过程中质量与重心会发生变化, 如货物、行李、乘员、淡水、燃油等质量的总和^[2]。龙骨帆船属于小型船舶, 空船质量轻, 以风帆为主要动力, 船上的油水箱等布置体积小, 且设计额定乘员总质量作为主要的可变质量占船排水量大, 对船稳性影响较大。目前研究人员布局作为荷载位置变化而引起对船舶稳性影响的文献不多见。本文基于 Maxsurf 计算不同人员布局下复原力臂的差异, 依据稳性衡准要求, 分析得出龙骨帆船不同人员布局位置对大倾角稳性

[收稿日期] 2015-06-18

[修回日期] 2015-10-05

[基金项目] 交通运输部应用基础研究项目(2014329815100); 福建省高校产学研重大项目(2014H6020)

[作者简介] 胡健康(1990—), 男, 硕士生, 从事船舶稳性研究。林少芬(1962—), 女, 教授, 博士, 从事机电液一体化的可靠性和仿真研究。

的影响程度。

1 船体模型稳性理论

1.1 可变质量位置变化对稳性影响

复原力臂差值指船舶可变质量移动后产生复原力臂的变化量,一定程度上反映了对稳性影响的程度。如图1所示,假设船向右舷横倾 φ 角,倾斜水线为 WL ,此时排水量为 Δ ,其中: M_g 代表固定质量,重心位置为 $G_0(0,a)$ (a 为常数); m_g 表示可变质量,重心位置 $G_1(y',z')$;倾斜后浮心位于 B_0 处; G_0Z_0 为固定质量至浮心作用线的距离($G_0Z_0 = l_0$); G_g 为船倾斜后的总重心。

当 G_0 位置不变时,复原力臂的变化是由 G_1 位置变化引起,把 G_1 位置看成首先 $y = 0$ 不变,先沿着 z 轴移动至 z' 位置,此时船重心位置 $G'_g = (y'_g, z'_g)$,其中 $y'_g = 0$, $z'_g = (a \cdot M_g + z' \cdot m_g) / \Delta$ 。

此时船复原力臂:

$$l' = l_0 - (z'_g - a) \cdot \sin\varphi = l_0 + m_g a \cdot \sin\varphi / \Delta - m_g z' \cdot \sin\varphi / \Delta. \quad (1)$$

然后将 $z = z'$ 不变, G_1 沿着 y 轴移动至 y' ,此时船重心位置 $G_g = (y_g, z_g)$,其中 $y_g = y' \cdot m_g / \Delta$, $z_g = z'_g = (a \cdot M_g + z' \cdot m_g) / \Delta$ 。

此时船复原力臂:

$$l = l' - y_g \cdot \cos\varphi = l_0 + (m_g / \Delta) a \cdot \sin\varphi - (m_g / \Delta) z' \cdot \sin\varphi - (m_g / \Delta) y' \cdot \cos\varphi. \quad (2)$$

则复原力臂差值:

$$\delta l = l - l_0 = m_g [(a - z') \cdot \sin\varphi - y' \cdot \cos\varphi] / \Delta. \quad (3)$$

若船体可变质量 m_g 可划分为不同区域中的质量分布 $m_i(y_i, z_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$,则公式(3)中

$$m_g = \sum_{i=1}^N m_i, z' = \sum_{i=1}^N m_i z_i / m_g, y' = \sum_{i=1}^N m_i y_i / m_g. \quad (4)$$

其中: N 表示可变质量分布个数; z_i 表示可变质量重心分布距基线高度; y_i 表示可变质量重心分布距船中位置。

1.2 稳性衡准分析

本文主要分析满帆组合下人员空间布局对稳性衡准结果的影响。依据《2012 帆船检验指南》^[3]对龙骨帆船完整稳性的衡准要求中最不易满足规范的条款进行计算,(其中第3条)风压作用下的静倾角应不大于 20° 或甲板边缘进水角的 90% ,取小者。

基于Maxsurf计算不同人员布局的复原力臂曲线,其中计算风倾力臂曲线步骤为^[3]:

风压力 F :

$$F = 0.5 C_s \rho A V^2 \quad (5)$$

式中: C_s 为形状系数,取1.1; ρ 为空气密度,取 1.222 kg/m^3 ; A 为水线以上艇体和帆的侧投影面积, m^2 ; V 为操帆作业的最大风速, m/s 。

风倾力臂 $\lambda(0)$:

$$\lambda(0) = FZ / (9810\Delta) \quad (6)$$

式中: Z 为船舶平均吃水的 $1/2$ 处至面积 A 的形心之间的垂直距离, m ; Δ 为排水量, t 。

风倾力臂曲线 $\lambda(\varphi)$:

$$\lambda(\varphi) = \lambda(0) \cdot (\cos\varphi)^2 \quad (7)$$

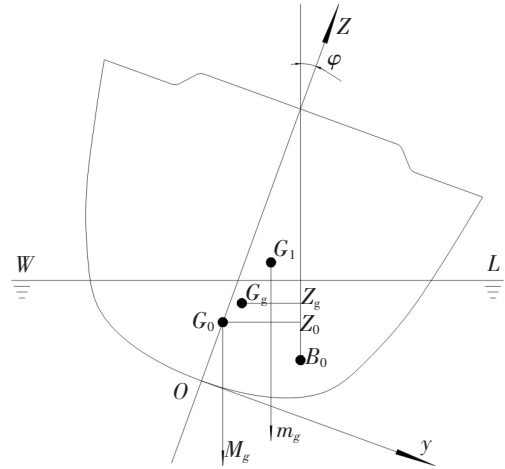


图1 可变质量位置变化对复原力臂影响

Fig.1 The impact of variable weight change in position on righting lever

2 实例计算

本文以一艘排水量为 2.686 t 的休闲龙骨帆船为例，其主尺度如表 1 所示。采用三维造型 Rhinoceros 软件对该船体进行建模，结合 Maxsurf stability Enterprise 模块^[4-8]，研究人员布局对大倾角稳性的影响。

表 1 龙骨帆船主尺度
Tab.1 The principal dimensions of keel boat

艇长 L_H	水线长 L_{WL}	艇体宽度 B	水线宽 B_{WL}	型深 D	吃水 T	最大吃水 T_{max}
Length	Length waterline	Beam of hull	Beam waterline	Depth	Draft	Max draught
9.945	9.199	2.789	2.135	1.449	0.322	2.322

2.1 人员布局方案

龙骨帆船在航行过程中，乘员作为主要可变质量，其活动范围有限，主要活动空间包括舱内客厅、尾部甲板和上层甲板 3 个区域。本例帆船额定乘员人数为 8 人，包括 1 名舵手和 1 名操帆者。假设舵手和操帆者的活动位置固定（将这两名乘员看成固定质量），研究主要针对 6 名乘客的活动空间位置展开。图 2 中 A_i 、 B_i 、 C_i ， $i=1, 2$ ，列举了 6 名乘员在 3 个活动区域中的某一位置左右舷分布，即距离船中为 y （左舷为正，右舷为负），距离基线为 z ，计算时以乘员重心位置在各个活动空间（如图 2 双向箭头）所指从左舷至右舷进行装载布置，本文暂不考虑乘员在该布局区域下纵向位置变化对稳性的影响。图中 AP 为尾垂线， FP 为首垂线， BL 为基线， DWL 为水线。其中人员质量、重心按规范规定：每人体重为 75 kg；每人直立时，重心位于甲板平面以上 1.0 m，坐下时，重心位于座位以上 0.3 m。

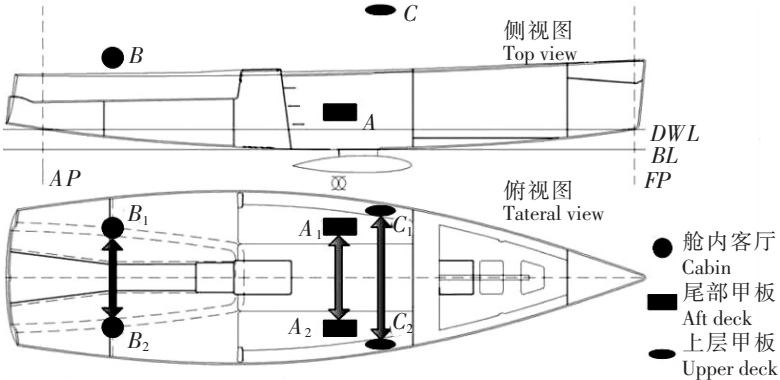


图 2 乘客空间布局布置方案
Fig.2 The scheme of personal accomm odation space

图 2 分别从侧视图和俯视图反映乘客装载的空间布局，为了反映人员空间布局对稳性的最大影响范围，其中舱内客厅和尾部甲板为人员坐立布置、上层甲板为人员站立布置，该空间位置详细参数如表 2 所示。

表 2 乘客空间布局参数
Tab.2 Theparameters of personal spatial layout

布局方案 The scheme of layout	乘员质量 Crews weight/kg	距基线 z_i Distance from the base line/m	距船中 y_i Distance from the midship/m
尾部甲板 Aft deck	m_1	$z_1 = 1.479$	$-0.800 \leq y_1 \leq 0.800$
舱内客厅 Cabin	m_2	$z_2 = 0.600$	$-0.817 \leq y_2 \leq 0.817$
上层甲板 Upper deck	m_3	$z_3 = 2.245$	$-1.076 \leq y_3 \leq 1.076$

将表 2 中参数代入公式 (4) 得知:

$$m_g = m_1 + m_2 + m_3 = 6 \times 75 = 450(\text{kg}),$$

(8)

$$z' = (\sum_{i=1}^N m_i z_i) / m_g = (m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3) / m_g = (1.479 m_1 + 0.600 m_2 + 2.245 m_3) / 450,$$

(9)

$$y' = (\sum_{i=1}^N m_i y_i) / m_g = (m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3) / 450.$$

(10)

由式 (8) 排列组合计算可知, 龙骨帆船三个区域的乘员布局方案共有 28 种, 此例分别列举可
变质量位置对龙骨帆船稳性最值影响程度情况分析, 则由式 (9)、式 (10) 计算可知:

- 1) $z'_{\max} = 2.245 \text{ m}$, 当且仅当 $m_1 = 0, m_2 = 0, m_3 = 450 \text{ kg}$ 时取得;
- 2) $z'_{\min} = 0.600 \text{ m}$, 当且仅当 $m_1 = 0, m_2 = 450 \text{ kg}, m_3 = 0$ 时取得;
- 3) 同时 y' 最大活动范围 $|y'| \leq 1.076 \text{ m}$, 当且仅当 $m_1 = 0, m_2 = 0, m_3 = 450 \text{ kg}$ 时取得;
- 4) y' 最小活动范围 $|y'| \leq 0.8 \text{ m}$, 当且仅当 $m_1 = 450 \text{ kg}, m_2 = 0, m_3 = 0$ 时取得。

计算结果表明可变质量对帆船稳性最值影响对应于乘员分别全部位于尾部甲板、舱内客厅、上层
甲板布局时。

2.2 稳性影响分析

按人员布局对龙骨帆船稳性最值影响进行分析, 乘员分别全部位于尾部甲板、舱内客厅、上层甲
板区域。由式 (3) 可知, 复原力臂差值与可变质量占排水量比重、可变质量位置、固定质量位置和
横倾角大小有关。本例中 $a = 0.194 \text{ m}$, 将表 1 主尺度数据代入式 (3) 得:

$$\delta l = 0.1675 \cdot [(0.194 - z') \cdot \sin\varphi - y' \cdot \cos\varphi]$$

(11)

乘员布局在上层甲板、尾部甲板和舱内客厅时可变质量重心高 z' 分别为 1.479、0.600、2.245 m。
将 z' 值分别代入公式 (11) 得:

- 当 $z' = 1.479 \text{ m}$ 时, $\delta l = -0.2152 \sin\varphi - 0.1675 y' \cdot \cos\varphi$, 其中 $y' \in [-0.800, 0.800], \varphi \in [0, 90]$,
- 当 $z' = 0.600 \text{ m}$ 时, $\delta l = -0.0680 \sin\varphi - 0.1675 y' \cdot \cos\varphi$, 其中 $y' \in [-0.817, 0.817], \varphi \in [0, 90]$,
- 当 $z' = 2.245 \text{ m}$ 时, $\delta l = -0.3435 \sin\varphi - 0.1675 y' \cdot \cos\varphi$, 其中 $y' \in [-1.076, 1.076], \varphi \in [0, 90]$ 。

图 3、图 5、图 7 反映了乘员分别布局在上层甲板、尾部甲板和舱内客厅时复原力臂差值随乘员
横向位置与横倾角变化三维关系图, 并以帆船处于横倾角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时状况进行计算。图 4、图 6、图
8 分别反映了乘员在上层甲板、尾部甲板和舱内客厅不同布局位置下的复原力臂曲线随横倾角变化的
趋势。

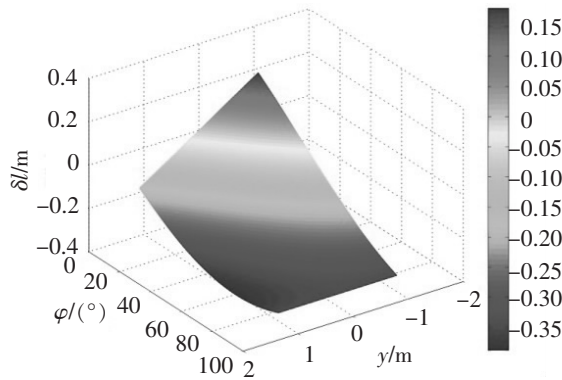


图 3 上层甲板布局复原力臂差值

Fig.3 The difference of righting lever in upper deck

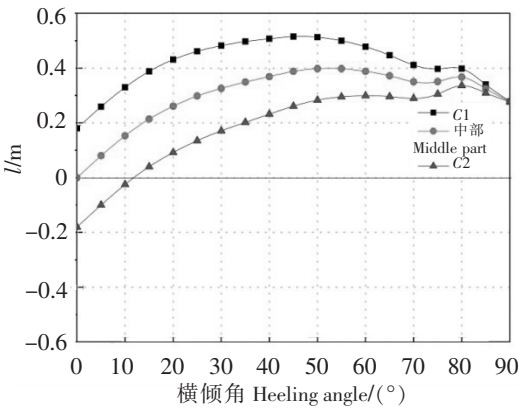


图 4 上层甲板布局复原力臂曲线

Fig.4 The curve of righting lever in upper deck

由图 3、图 5、图 7 反映了可变质量同一区域布局高度下复原力臂差值变化与可变质量位置、横

倾角的关系和不同区域布局高度下复原力臂差值变化量的差异。其中复原力臂差值变化最大值随乘员布局在上层甲板、尾部甲板和舱内客厅而减小。

由图 4、图 6、图 8 可知乘员在三个区域左右舷布局下复原力臂值，且复原力臂随乘员左右舷布局对比呈下降趋势，在此倾角范围内三个空间区域中乘员重心布局左舷、右舷与中部相比最大复原力臂差值分别相差近似 14%，16%，33%。

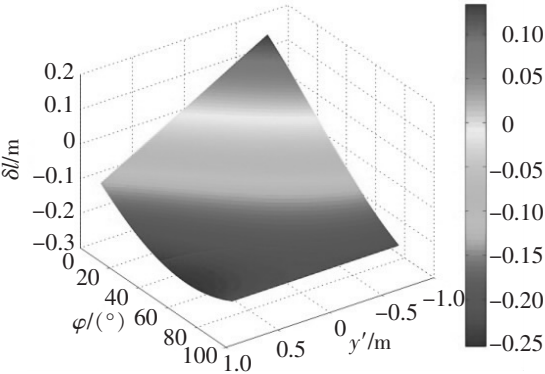


图 5 尾部甲板布局复原力臂差值

Fig.5 The difference of righting lever in aft deck

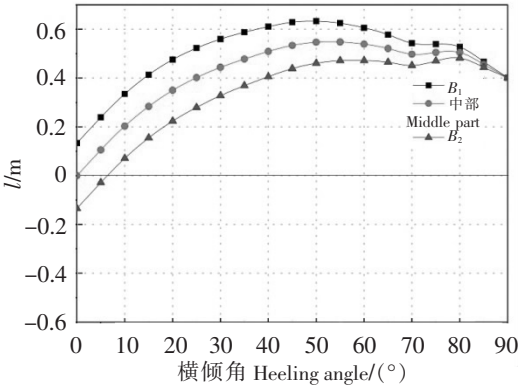


图 6 尾部甲板布局复原力臂曲线

Fig.6 The curve of righting lever in aft deck

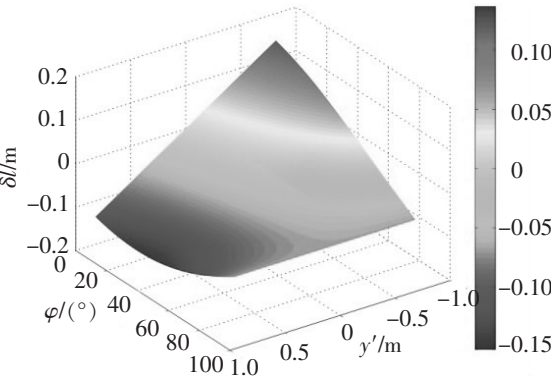


图 7 舱内客厅布局复原力臂差值

Fig.7 The difference of righting lever in cabin

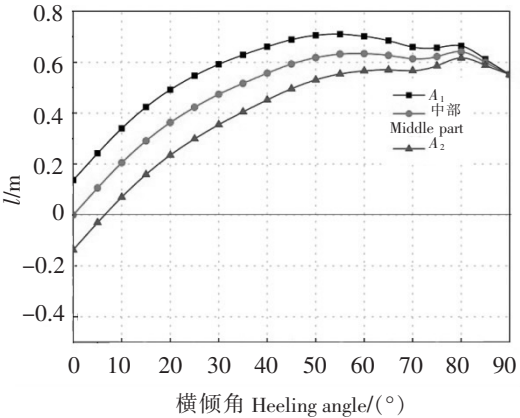


图 8 舱内客厅布局复原力臂曲线

Fig.8 The curve of righting lever in cabin

2.3 稳性衡准分析

经计算龙骨帆船甲板边缘进水角大于 40°，故根据规范中完整稳性衡准第 3 条^[3]规定，风压静倾角应小于 20°。如图 9 所示乘员布局方案 A₁ 与 C₂（或 A₂ 与 C₁ 布局方案）复原力臂曲线反映了不同乘员布局复原力臂差异的极限。

经测量本船参数 $A = 57.6\text{m}^2$ ， $Z = 4.9\text{m}$ 带入公式 (5)、(6)、(7) 得：

$$\lambda(\varphi) = 0.0072 \cdot V^2 \cdot (\cos\varphi)^2$$

(12)

由公式 (12) 绘制横倾角为 20° 时风倾力臂与风速变化关系图，如图 10 所示。

由图 9、图 10 可知，满足乘员布局位置 C₂ 静倾角为 20° 时的对应风速最大为 3.8 m/s（蒲氏风级 3 级），满足乘员布局位置 A₁ 静倾角为 20° 的对应的风速最大为 8.8 m/s（蒲氏风级 5 级），其他乘员布局位置能满足最大风速在图 10 双向箭头表示区域之间。因此在相同满帆组合下，不同的装载位置按照规范所能达到的最大风速相差很大。

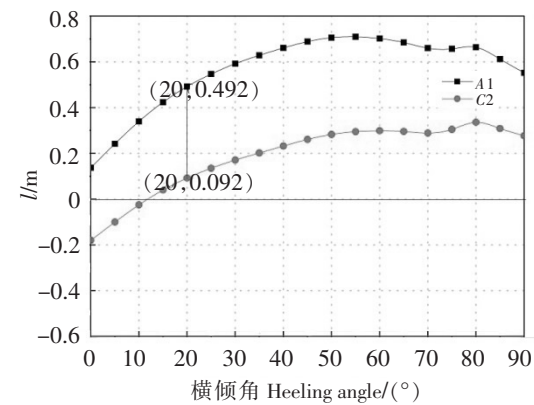


图9 复原力臂极限差异
Fig.9 The maximum difference of righting lever

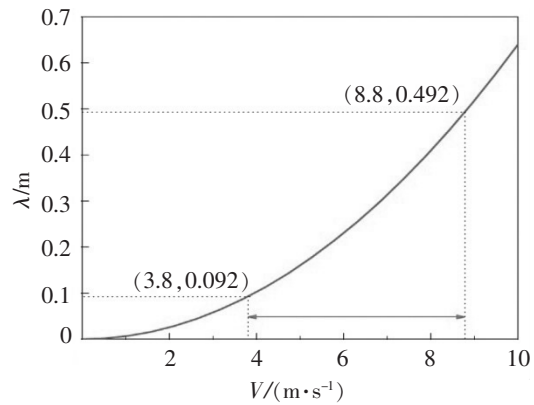


图10 φ 等于 20° 时风倾力臂与风速变化关系
Fig.10 The relation between heeling lever and wind speed when $\varphi=20^\circ$

3 结论

本文针对船舶可变量质量位置变化对大倾角稳性影响的计算方法，得到龙骨帆船乘员布局位置变化后会产生对稳性有最值影响情况的装载位置，即尾部甲板、舱内客厅与上层甲板，并分析乘员布局变化对稳性力臂差值影响的三维关系。考虑在帆船上三种装载位置下对乘员位置进行左舷至右舷进行布局方案，结合 Maxsurf Stability Enterprise 模块进行三个装载位置下龙骨帆船大倾角稳性计算，实现从相同空间区域不同乘员布局位置反映龙骨帆船稳性曲线的变化趋势以及差异程度。最后以满帆为例，选取两种差异最大的复原力臂曲线进行稳性衡准，按规范要求得到两者安全操帆风速从蒲氏风级 3 级到 5 级变化的差异。因此，在设计、入级检验和操帆驾驶体验休闲娱乐龙骨帆船时，要特别重视不同人员空间布局带来的影响，以保证乘员在航行体验过程中的安全性和舒适性。

[参考文献]

[1] 朱珉虎. 游艇概论 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.

[2] 盛振邦, 刘应中. 《船舶原理》[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.

[3] 中国船级社, 帆船检验指南 2012 [S]. 北京: 中国船级社, 2012.

[4] FORMATION DESIGN SYSTEMS. Maxsurf modeler user manual [M]. [s. l.]: Formation Design Systems Pty Ltd, 2012.

[5] FORMATION DESIGN SYSTEMS. Maxsurf Stability User Manual [M]. [s. l.]: Formation Design Systems Pty Ltd, 2012.

[6] 陈明敏, 张宝吉. 基于 Hydromax 的 14000DWT 成品油船大倾角稳性计算 [J]. 船舶工程, 2014(1): 170-173.

[7] 李磊. 高速半滑行三体船稳性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

[8] 续珍立. 仿古帆船型制及静水与波浪稳性计算研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)