

# 海上核应急救援无人方舱稳性研究

李铁骊<sup>1</sup>, 周 燮<sup>1</sup>, 蒋晓宁<sup>1</sup>, 林 焰<sup>\*1,2</sup>

(1. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对远海核应急救援需求, 研发设计专用于两栖飞机投送的核应急快速响应无人艇(核应急救援方舱)非常必要. 研究确定了方舱主尺度及船型参数; 计算了正浮、倒浮和横倾 $90^\circ$ 典型浮态下的静水力特性曲线, 并绘制了初稳性随重心高度变化的曲面图谱, 确定不同吃水下的极限重心高度; 提出了方舱稳性计算基本原理和自扶正计算流程, 绘制了满载工况和空载工况下静稳性曲线图谱, 并讨论了自扶正性能随重心高度变化规律. 通过样条曲线拟合, 得到满足自扶正要求的最大重心高度. 研究成果可为方舱后续设计提供技术基础和参考.

**关键词:** 无人艇; 核应急方舱; 海上救援; 静水力特性; 稳性; 自扶正性能; 极限初稳性高; 极限重心高度

中图分类号: U661.2

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202206007

## 0 引 言

随着海上经济和军事活动增多, 诸多核电站、核动力舰船等事故被引发, 救援难度大、核污染严重、人员无法靠近、固定维修设施易遭敌方打击等<sup>[1]</sup>, 使得远海核应急快速响应及有效救援问题变得十分重要和迫切. 无人艇相对于中大型救助船而言成本低、隐蔽机动性好、智能化程度高和快捷, 可在较恶劣海况及在深远海域自主航行, 避免人员伤亡<sup>[2-3]</sup>. 因此将无人艇和核应急专用设备及装置有机结合, 设计出适用于远海核应急救援的无人方舱, 可适用于国产 AG600 救援飞机空投入水, 具有在恶劣海况下自主航行抵达事故现场的能力, 对海上核事故能做出快速响应, 并进行检测、维修和补给. 由于该方舱区别于常规船舶, 尺寸小、自重轻, 且搭载救援折叠吊臂等专用设备, 因此在海上更容易发生失稳而倾覆, 无法执行任务. 因此, 方舱外形设计要适合运载飞机的机舱空间要求, 并采用流线形曲面<sup>[4]</sup>以减小航行阻力, 提升快速性、耐波性、稳性及自扶正性能等<sup>[5]</sup>. 在初步设计阶段, 本文主要确定方舱主尺度及船型参

数, 研究静水力特性、稳性和自扶正性能, 并绘制静水力曲线和稳性随重心高度  $z_G$  变化图谱, 基于自扶正需求确定极限  $z_G$ , 为后续设计、检验和性能研究等提供技术数据.

国内外学者对海上救援和无人艇稳性等方面展开了许多相关研究. 文献[6]描述了东海舰队某基地装备部针对军舰应急保障需求研制出舰船装备机动保障的修理方舱组, 其具有适应性强、集约性高、灵活机动性好等特点, 但不适用于核应急救援. 刘森林<sup>[7]</sup>开发了用于海上救援的无人艇, 采用底部加载固定压块的方法满足自扶正性能, 但降低了营救能力. Akyildiz 等<sup>[8]</sup>从稳性角度综合分析了船型扶正法、充气袋法、活动压载法 3 种自扶正方法的优缺点, 其中船型扶正法虽具有挑战性, 但仍是最佳选择. 方舱采用船型扶正法, 可以节省布置空间、降低成本. Bai 等<sup>[9]</sup>通过理论分析无人艇稳性随横摇变化情况, 得知恢复时间对  $z_G$  非常敏感; 郑志江<sup>[10]</sup>通过分析中大型艇在静水和波浪中的自扶正能力, 发现  $z_G$  对其自扶正性能有很大影响, 但都没有给出稳性随  $z_G$  变化图谱. 林志勇

收稿日期: 2021-12-05; 修回日期: 2022-10-08.

基金项目: 国家重点实验室专项基金资助项目(S18315).

作者简介: 李铁骊(1963-), 女, 博士, 副教授, E-mail: litieli@dlut.edu.cn; 周 燮(1998-), 男, 硕士生, E-mail: x0227xian@163.com; 林 焰<sup>\*</sup>(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: linyanly@dlut.edu.cn.

等<sup>[11]</sup>针对高速执法艇的自扶正能力需求,计算了不同参数对自扶正能力的影响,得知降低船舶重心是提高自扶正能力的主要措施.刘锦邦等<sup>[12]</sup>采用 STAR CCM+对无人艇稳性进行仿真,并分析无人艇的自扶正性能随排水量和  $z_G$  的变化情况,不过缺少对初稳性研究.

综上所述,无人艇应用于海上救援是一种创新,而且优势明显,但针对核应急救援方面研究尚少.为增强救援能力,方舱须具备优良的静水力特性、稳性及自扶正性能,其中  $z_G$  是影响稳性的重要因素.因此,研究方舱在不同浮态下的静水力特性和稳性,确定自扶正要求的  $z_G$  可行域对后续设备选型和总体设计有重要意义.本文先假定  $z_G$ ,研究稳性变化情况,以限定  $z_G$  可行域.研究稳性主要与横倾后浮心位置有关,计算浮心位置与方舱静水力性能有关,而方舱主尺度及船型参数对静水力性能有重大影响,也是研究稳性的基础.所以首先确定方舱主尺度及船型参数;然后基于方舱静水力计算原理,采用等排水量计算法得到正浮、倒浮和向右横倾  $90^\circ$  典型浮态下的静水力特性曲线,并分析其初稳性随吃水  $d$  和  $z_G$  的变化情况;最后通过理论分析方舱稳性,得出自扶正计算流程,再计算满载工况和空载工况下,自扶正性能随  $z_G$  变化情况,并对计算结果进行样条曲线拟合,得到满足自扶正性能的最大重心高度  $z_{G\max}$ .

1 主尺度及船型参数确定

由于方舱单次运输能力越大越好且为保证救援能力,应满足自扶正等需求,因此采用单体全封闭形式以增加主尺度,并保证其总布置、浮性和稳性等要求.但这势必增加航行阻力,所以外形设计为流线形,以降低阻力,提高操纵性和稳定性等性能<sup>[13]</sup>.考虑到核应急快速响应需求,首选 AG600 救援飞机空投方舱,因此其主尺度和船型参数设计应考虑机舱空间的限制<sup>[14]</sup>,并达到最大载重能力.综合以上各方面需求,方舱主尺度及船型参数如表 1 所示,表中  $L$  为型长、 $B$  为型宽、 $D$  为型深、 $d_1$  为满载吃水、 $d_2$  为空载吃水、 $\Delta_1$  为满载排水量、 $\Delta_2$  为空载排水量、 $\nabla_1$  为满载排水体积、 $\nabla_2$  为空载排水体积、 $b_1$  为满载时正浮浮心、 $b_2$  为空载时正浮浮心、 $C_w$  为水线面系数、 $C_m$  为中横剖面系数、 $C_b$  为方形系数、 $C_p$  为棱形系数、 $C_{vp}$  为垂向棱

形系数.为便于描述,建立如图 1 所示的坐标系  $Oxyz$ ,设坐标系原点  $O$  是中线面、基平面和尾平面的交点,中线面和基平面交线为  $x$  轴,船首方向为正;尾平面和基平面交线为  $y$  轴,右舷方向为正;尾平面和中线面交线为  $z$  轴,向上为正.

表 1 方舱主尺度及船型参数

Tab. 1 Main dimensions and hull parameters of shelter

| $L/\text{m}$          | $B/\text{m}$ | $D/\text{m}$          | $d_1/\text{m}$ | $d_2/\text{m}$  | $\Delta_1/\text{t}$ | $\Delta_2/\text{t}$ |
|-----------------------|--------------|-----------------------|----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 2.4                   | 1.8          | 1.4                   | 0.8            | 0.3             | 2.437               | 0.610               |
| $\nabla_1/\text{m}^3$ |              | $\nabla_2/\text{m}^3$ |                | $b_1/\text{mm}$ |                     | $b_2/\text{mm}$     |
| 2.378                 |              | 0.595                 |                | (1 114,0.465)   |                     | (1 096,0.178)       |
| $C_w$                 |              | $C_m$                 |                | $C_b$           |                     | $C_p$               |
| 0.740                 |              | 0.902                 |                | 0.688           |                     | 0.763               |
|                       |              |                       |                |                 |                     | $C_{vp}$            |
|                       |              |                       |                |                 |                     | 0.930               |

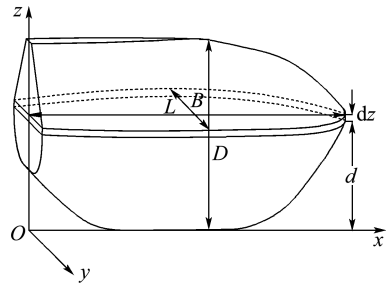


图 1 方舱坐标系

Fig. 1 Shelter coordinate system

2 方舱静水力特性研究

静水力特性是方舱的基础技术信息,体现了静态浮动时,浮态和稳性随  $d$  的变化规律,也是稳性及自扶正性能研究的基础.本章研究方舱静水力性能并进一步分析初稳性高  $GM$  特性,首先计算不同吃水下各水线面面积  $A_w$  及其漂心  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$ ,然后将水线面沿  $d$  方向进行积分,求得型排水体积  $\nabla$ 、型排水量  $\Delta$  及其横倾  $\varphi$  时浮心  $B_\varphi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$ ,最后计算稳心半径  $B_\varphi M$  和初稳心高  $KM$ ,通过假定  $z_G$  可求得初稳性高  $GM$ .其中  $GM$  是衡量初稳性是否满足安全设计规范要求的重要指标,其代表方舱抗倾斜能力的强弱, $GM$  越大,复原力矩  $M_r$  越大,抵抗倾斜力矩的能力也就越强,但  $GM$  过大,会导致横摇固有周期过短,风浪作用下会产生剧烈摇摆,不利于作业,所以  $GM$  数值应适当<sup>[15]</sup>.

## 2.1 静水力计算原理

如图 2 所示,方舱绕过  $f$  的倾斜轴横倾  $\varphi$  时,其任意横倾状态下的  $A_w$  和  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$  计算式为

$$A_w = \int_0^L y_1 dx - \int_0^L y_2 dx \quad (1)$$

$$x_f = \frac{M_{Oy}}{A_w} = \frac{\int_0^L y_1 x dx - \int_0^L y_2 x dx}{\int_0^L y_1 dx - \int_0^L y_2 dx} \quad (2)$$

$$y_f = \frac{M_{Ox}}{A_w} = \frac{1}{2} \left( \frac{\int_0^L y_1^2 dx - \int_0^L y_2^2 dx}{\int_0^L y_1 dx - \int_0^L y_2 dx} \right) \quad (3)$$

式中:  $y_1, y_2$  分别为水线面左右半宽,  $M_{Oy}$  和  $M_{Ox}$  分别为  $A_w$  对  $x$  轴和  $y$  轴的静矩,  $f$  垂向坐标  $z_f$  等于该横倾状态下的  $d$ ; 将  $A_w$  沿  $d$  方向进行积分便得到  $\nabla$ , 即

$$\nabla = \int_0^d A_w dz = \int_0^d \int_0^L y_1 dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2 dx dz \quad (4)$$

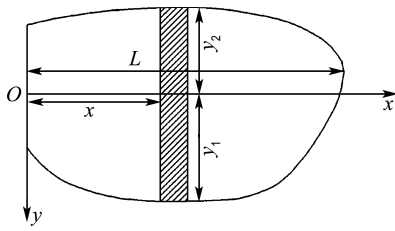


图 2 横倾时水线面

Fig. 2 Waterplane surface at transverse heel

由  $\nabla$  乘以海水密度  $\rho$  可得到相应的  $\Delta$ , 计算  $\nabla$  对各个平面的静矩, 进而得到  $B_\varphi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$ , 即

$$x_B = \frac{M_{yOz}}{\nabla} = \frac{\int_0^d x_f A_w dz}{\int_0^d A_w dz} = \frac{\int_0^d \int_0^L y_1 x dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2 x dx dz}{\int_0^d \int_0^L y_1 dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2 dx dz} \quad (5)$$

$$y_B = \frac{M_{xOz}}{\nabla} = \frac{\int_0^d y_f A_w dz}{\int_0^d A_w dz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\int_0^d \int_0^L y_1^2 dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2^2 dx dz}{\int_0^d \int_0^L y_1 dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2 dx dz} \right) \quad (6)$$

$$z_B = \frac{M_{xOy}}{\nabla} = \frac{\int_0^d z_f A_w dz}{\int_0^d A_w dz} = \frac{\int_0^d \int_0^L z y_1 dx dz - \int_0^d \int_0^L z y_2 dx dz}{\int_0^d \int_0^L y_1 dx dz - \int_0^d \int_0^L y_2 dx dz} \quad (7)$$

式中:  $M_{yOz}$  为  $\nabla$  对  $x$  轴的静矩,  $M_{xOy}$  为  $\nabla$  对  $y$  轴的静矩,  $M_{xOz}$  为  $\nabla$  对  $z$  轴的静矩.

方舱横倾时不再左右对称, 不同  $d$  下  $B_\varphi$  可能不在同一铅垂线上, 因此稳心  $M$  也不在同一铅垂线上, 不过若只考虑  $M$  高度变化, 仍可计算  $B_\varphi M$  和  $KM$ . 下面假定某一  $d$  下任意横倾状态的方舱继续倾斜小角度  $\phi$  时,  $B_\varphi$  移动曲线是以  $M$  为圆心、 $B_\varphi M$  为半径的圆弧, 倾斜前后浮力作用线均通过  $M$  点. 这样既使计算问题简化, 又可较为准确地描述影响初稳性的各种因素.

如图 3 所示, 等体积小角度横倾时, 倾斜轴线通过  $f$ , 出水、入水楔形体积都等于  $V$ , 可认为倾斜后排水体积是由出水楔形  $W_0 OW_1$  移至入水楔形  $L_0 OL_1$  处, 其形心自  $g_2$  移至  $g_1$ , 方舱浮心由  $B_\varphi$  移动到  $B_\phi$ , 移动轨迹曲线的大小近似等于  $B_\varphi B_\phi$ , 可知:

$$\varphi B_\varphi M \approx B_\varphi B_\phi = g_1 g_2 \frac{V}{\nabla} = (g_1 O + g_2 O) \frac{V}{\nabla} \quad (8)$$

式中:  $g_1 OV$  和  $g_2 OV$  是  $V$  对倾斜轴线  $O-O$  的静矩, 其中入水楔形如图 4 所示, 由图 4 可知:

$$g_1 OV = \frac{2}{3} y_1 \int_0^L \frac{1}{2} y_1^2 \tan \phi dx = \frac{1}{3} \tan \phi \int_0^L y_1^3 dx \quad (9)$$

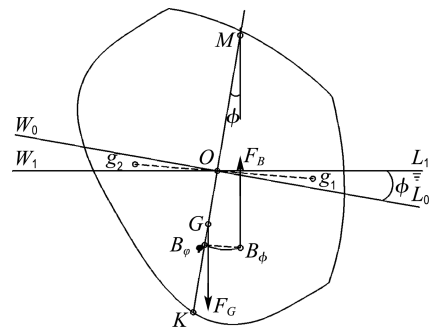


图 3 稳心与稳心半径

Fig. 3 Metacenter and metacentric radius

同理可得

$$g_2 OV = \frac{1}{3} \tan \phi \int_0^L y_2^3 dx \quad (10)$$

由于  $\phi$  为小角度,  $\tan \phi \approx \phi$ ;  $\frac{1}{3} \int_0^L (y_1^3 + y_2^3) dx$

为  $A_w$  对倾斜轴的惯性矩  $I_t$ , 故

$$g_1 g_2 V = \frac{1}{3} \phi \int_0^L (y_1^3 + y_2^3) dx = \phi I_t \quad (11)$$

将式(11)代入式(8)得

$$B_\phi M = I_t / \nabla \quad (12)$$

假定  $z_G$  可得到  $GM$ , 即

$$GM = KB_\phi + B_\phi M - KG \quad (13)$$

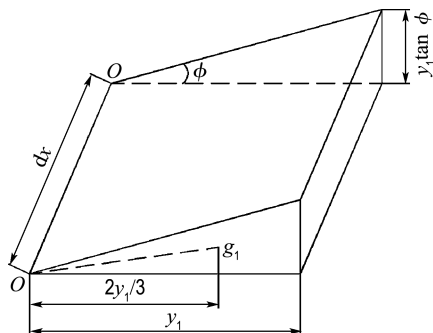


图4 入水楔形

Fig. 4 Water entry wedge

式(13)中,  $KB_\phi = z_B$ ,  $KG = z_G$ . 基于静水力计算原理, 可求得不同  $d$  下的  $A_w$  及其  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$ 、 $\nabla$  及  $B_\phi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$ 、 $\Delta$ 、 $B_\phi M$  和  $KM$ , 并假定  $z_G$  计算  $GM$ . 为便于表述方舱浮态和初稳性随  $d$  的变化规律, 将  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$  和  $B_\phi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$  单位换算成 mm, 并根据计算结果绘制静水力曲线图和  $GM$  曲面图谱.

## 2.2 静水力曲线图和 $GM$ 曲面图谱

方舱在不同作业工况和特殊浮态下, 特别是其吊臂伸展作业时, 可能使  $z_G$  发生较大变化, 甚至超出其主尺度范围, 直至稳性失效而发生倾覆. 为满足救援工况需求, 初稳性要求方舱正浮时  $GM$  大于零, 以保证抗倾斜能力, 横倾和倒浮时  $GM$  都小于零, 促使方舱倾斜而回到正浮状态. 可根据  $KM$  计算结果, 假定足够的  $z_G$ , 绘制  $GM$  曲面图谱, 确定  $GM$  为零的临界线, 由于  $GM = KM - KG$ , 则此时  $z_G$  与  $KM$  随  $d$  的变化规律相同, 可将临界线投影到  $d-z_G$  平面上, 进而得到不同  $d$  下满足初稳性要求的  $z_G$  可行域. 为便于描述, 分别采用相应坐标系对正浮、倒浮和向右横倾  $90^\circ$  典型浮态进行静水力计算, 并绘制静水力曲线图和  $GM$  曲面图谱, 其计算流程如图5所示, 最后

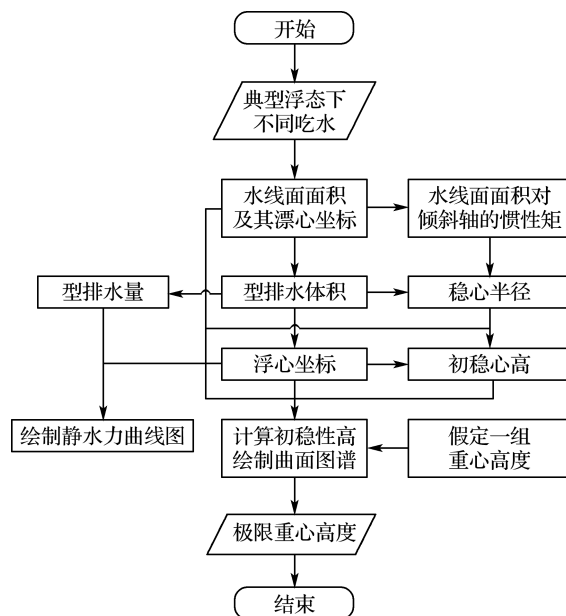


图5 静水力和初稳性高计算流程图

Fig. 5 Flow chart of hydrostatic and initial stability height calculation

将结论汇总在图1坐标系下.

2.2.1 正浮时静水力特性和初稳性图谱 方舱正浮时的坐标系如图1所示, 采用2.1中计算原理可得到不同  $d$  下的  $A_w$  及其  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$ , 并对  $A_w$  沿  $d$  方向进行积分求得  $\nabla$ , 再乘以  $\rho$  得到  $\Delta$ , 通过计算不同  $d$  下的  $\nabla$  对各个基准面的静矩和  $A_w$  对倾斜轴的惯性矩, 可求得  $B_\phi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$ 、 $B_\phi M$  和  $KM$ , 结果如表2所示.

基于上述结果绘制静水力曲线图, 如图6所示, 横坐标为归一化各量.

根据  $KM$  计算结果, 对于假定  $z_G$  可以计算对应  $GM$ , 并绘制在不同  $d$  和  $z_G$  下的  $GM$  曲面图谱. 如图7所示,  $GM$  随  $d$  和  $z_G$  的增大而减小, 当  $d=0.1$  m,  $z_G=0$  时,  $GM$  最大值为 18.712 m; 当  $d=0.8$  m 时出现拐点, 曲线迅速下降. 临界线上  $d=1.4$  m 时  $z_G=666$  mm, 即  $d$  为 0~1.4 m 任意值时,  $z_{Gmax}$  为 666 mm. 在满载工况下,  $d=0.8$  m,  $z_{Gmax}=4\,374$  mm; 空载工况下,  $d=0.3$  m,  $z_{Gmax}=10\,069$  mm.

2.2.2 倒浮时静水力特性和初稳性图谱 方舱空投、航行或吊臂伸展作业时都有可能倾覆而产生倒浮状态, 因此需计算倒浮时静水力特性和初稳性, 其坐标系如图8所示. 采用2.1中计算方法, 可求得不同  $d$  下的  $A_w$  及其  $f$  坐标  $(x_f, y_f, z_f)$ 、

表 2 正浮时静水力计算结果

Tab. 2 Hydrostatic calculation results at positive float

| $d/m$ | $\nabla/m^3$ | $\Delta/t$ | $A_w/m^2$ | $(x_f, y_f, z_f)/mm$ |
|-------|--------------|------------|-----------|----------------------|
| 0.1   | 0.119        | 0.122      | 1.754     | (1 091.6, 0, 100)    |
| 0.2   | 0.329        | 0.337      | 2.409     | (1 099.8, 0, 200)    |
| 0.3   | 0.595        | 0.610      | 2.891     | (1 097.2, 0, 300)    |
| 0.4   | 0.904        | 0.927      | 3.276     | (1 092.1, 0, 400)    |
| 0.5   | 1.247        | 1.278      | 3.550     | (1 100.3, 0, 500)    |
| 0.6   | 1.611        | 1.651      | 3.722     | (1 123.6, 0, 600)    |
| 0.7   | 1.989        | 2.039      | 3.844     | (1 147.7, 0, 700)    |
| 0.8   | 2.378        | 2.437      | 3.918     | (1 168.8, 0, 800)    |
| 0.9   | 2.763        | 2.832      | 3.619     | (1 147.0, 0, 900)    |
| 1.0   | 3.093        | 3.170      | 2.975     | (1 091.5, 0, 1 000)  |
| 1.1   | 3.357        | 3.441      | 2.303     | (1 025.5, 0, 1 100)  |
| 1.2   | 3.553        | 3.641      | 1.608     | (942.8, 0, 1 200)    |
| 1.3   | 3.677        | 3.769      | 0.887     | (808.0, 0, 1 300)    |
| 1.4   | 3.732        | 3.825      | 0         | (-, -, -)            |

| $d/m$ | $(x_B, y_B, z_B)/mm$ | $B_\varphi M/m$ | $KM/m$ |
|-------|----------------------|-----------------|--------|
| 0.1   | (1 090.2, 0, 59.7)   | 18.652          | 18.712 |
| 0.2   | (1 094.5, 0, 119.1)  | 12.854          | 12.973 |
| 0.3   | (1 096.5, 0, 178.3)  | 9.891           | 10.069 |
| 0.4   | (1 095.8, 0, 237.4)  | 7.943           | 8.180  |
| 0.5   | (1 095.2, 0, 296.0)  | 6.522           | 6.818  |
| 0.6   | (1 098.9, 0, 353.5)  | 5.437           | 5.790  |
| 0.7   | (1 105.9, 0, 410.0)  | 4.597           | 5.007  |
| 0.8   | (1 114.5, 0, 465.6)  | 3.909           | 4.374  |
| 0.9   | (1 121.4, 0, 519.0)  | 2.754           | 3.273  |
| 1.0   | (1 121.4, 0, 564.8)  | 1.514           | 2.079  |
| 1.1   | (1 116.6, 0, 602.8)  | 0.739           | 1.342  |
| 1.2   | (1 109.6, 0, 632.8)  | 0.282           | 0.915  |
| 1.3   | (1 102.1, 0, 653.6)  | 0.061           | 0.714  |
| 1.4   | (1 096.4, 0, 663.7)  | 0.002           | 0.666  |

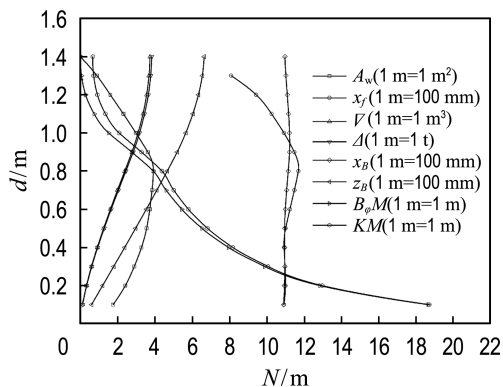


图 6 正浮时静水力曲线图

Fig. 6 Hydrostatic curves diagrams at positive float

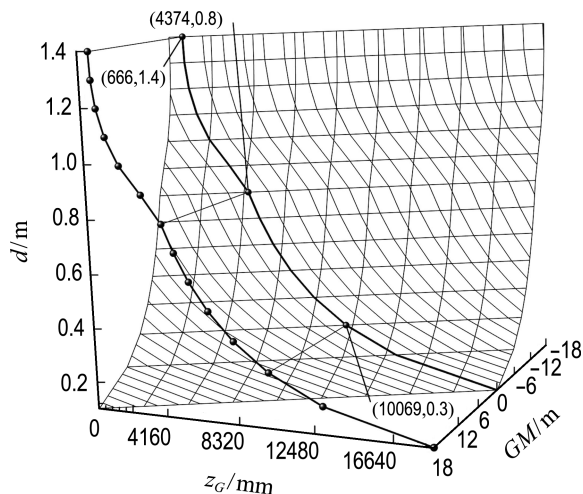


图 7 正浮时 GM 曲面图谱

Fig. 7 GM surface diagrams at positive float

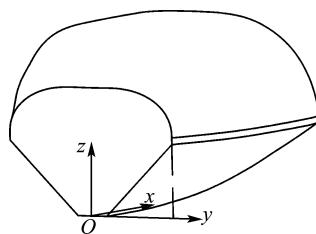


图 8 倒浮时坐标系

Fig. 8 Inverted float corresponding coordinate system

$\nabla$  及  $B_\varphi$  坐标  $(x_B, y_B, z_B)$  和  $\Delta$ , 计算  $A_w$  对倾斜轴的惯性矩, 可得  $B_\varphi M$  和  $KM$ , 结果如表 3 所示。

由上述结果可绘制静水力曲线图, 如图 9 所示。

基于  $KM$  计算结果, 可绘制  $GM$  曲面图谱, 如图 10 所示。  $GM$  随  $z_G$  增加而降低, 但随  $d$  增加而先增加后降低, 当  $d=0.5$  m 时 (方舱上下壳体交线处, 即正浮  $d_1$  时),  $GM$  出现峰值, 在  $z_G=0$  时, 最大值为 8 173 mm, 当满足稳性要求的  $z_{Gmin}=8 173$  mm 时,  $GM=0$ , 即图 1 坐标系下,  $d$  为 0~1.4 m 的任意值时倒浮,  $z_{Gmax}=-6 773$  mm。临界线上  $d=1.4$  m 时,  $z_{Gmin}=736$  mm, 相当于图 1 坐标系下,  $z_{Gmax}=664$  mm。由静水力曲线可知, 方舱满载倒浮时, 相同  $\Delta$  下的  $d=0.871$  m,  $z_{Gmin}=4 060.7$  mm, 相当于图 1 坐标系下的  $z_{Gmax}=-2 660.7$  mm; 空载倒浮时,  $d=0.383$  m,  $z_{Gmin}=7 451.2$  mm, 即图 1 坐标系下  $z_{Gmax}=-6 051.2$  mm。

### 2.2.3 横倾 90° 时静水力特性和初稳性图谱

方舱航行、作业或破损时会受力发生倾斜, 不再关于  $x$  轴左右对称, 下面只考虑  $M$  的高度变化, 计

表 3 倒浮时静水力计算结果

| Tab. 3 Hydrostatic calculation results at inverted float |                     |                   |                  |                             |  |
|----------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|--|
| $d/\text{m}$                                             | $\nabla/\text{m}^3$ | $\Delta/\text{t}$ | $A_w/\text{m}^2$ | $(x_f, y_f, z_f)/\text{mm}$ |  |
| 0.1                                                      | 0.055               | 0.056             | 0.887            | (808.0,0,100)               |  |
| 0.2                                                      | 0.179               | 0.184             | 1.608            | (942.8,0,200)               |  |
| 0.3                                                      | 0.375               | 0.385             | 2.303            | (1 025.5,0,300)             |  |
| 0.4                                                      | 0.639               | 0.655             | 2.975            | (1 091.5,0,400)             |  |
| 0.5                                                      | 0.969               | 0.994             | 3.619            | (1 147.0,0,500)             |  |
| 0.6                                                      | 1.354               | 1.388             | 3.918            | (1 168.8,0,600)             |  |
| 0.7                                                      | 1.743               | 1.786             | 3.844            | (1 147.7,0,700)             |  |
| 0.8                                                      | 2.121               | 2.174             | 3.722            | (1 123.6,0,800)             |  |
| 0.9                                                      | 2.485               | 2.547             | 3.550            | (1 100.3,0,900)             |  |
| 1.0                                                      | 2.828               | 2.899             | 3.276            | (1 092.1,0,1 000)           |  |
| 1.1                                                      | 3.137               | 3.216             | 2.891            | (1 097.2,0,1 100)           |  |
| 1.2                                                      | 3.403               | 3.488             | 2.409            | (1 099.8,0,1 200)           |  |
| 1.3                                                      | 3.613               | 3.704             | 1.754            | (1 091.6,0,1 300)           |  |
| 1.4                                                      | 3.732               | 3.825             | 0                | (-,-,-)                     |  |

| $d/\text{m}$ | $(x_B, y_B, z_B)/\text{mm}$ | $B_\varphi M/\text{m}$ | $KM/\text{m}$ |
|--------------|-----------------------------|------------------------|---------------|
| 0.1          | (714.1,0,60.1)              | 4.080                  | 4.141         |
| 0.2          | (835.5,0,126.0)             | 5.577                  | 5.703         |
| 0.3          | (915.6,0,192.2)             | 6.608                  | 6.800         |
| 0.4          | (975.5,0,258.3)             | 7.325                  | 7.583         |
| 0.5          | (1 025.1,0,324.1)           | 7.849                  | 8.173         |
| 0.6          | (1 064.6,0,388.5)           | 6.865                  | 7.253         |
| 0.7          | (1 085.6,0,446.7)           | 5.248                  | 5.695         |
| 0.8          | (1 094.5,0,500.8)           | 4.128                  | 4.629         |
| 0.9          | (1 097.1,0,551.9)           | 3.271                  | 3.823         |
| 1.0          | (1 096.6,0,600.1)           | 2.539                  | 3.139         |
| 1.1          | (1 096.4,0,644.3)           | 1.876                  | 2.520         |
| 1.2          | (1 096.6,0,683.7)           | 1.242                  | 1.926         |
| 1.3          | (1 096.6,0,716.5)           | 0.612                  | 1.328         |
| 1.4          | (1 096.4,0,736.3)           | 0                      | 0.736         |

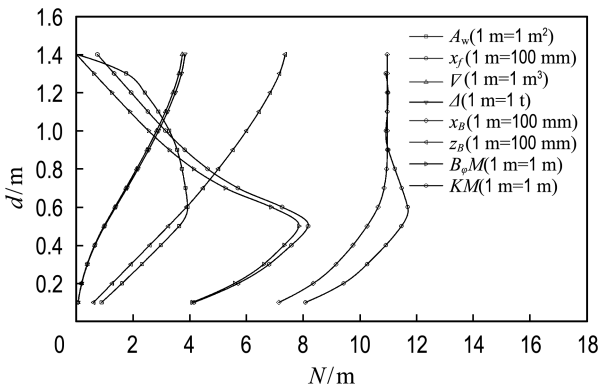


图 9 倒浮时静水力曲线图

Fig. 9 Hydrostatic curves diagrams at inverted float

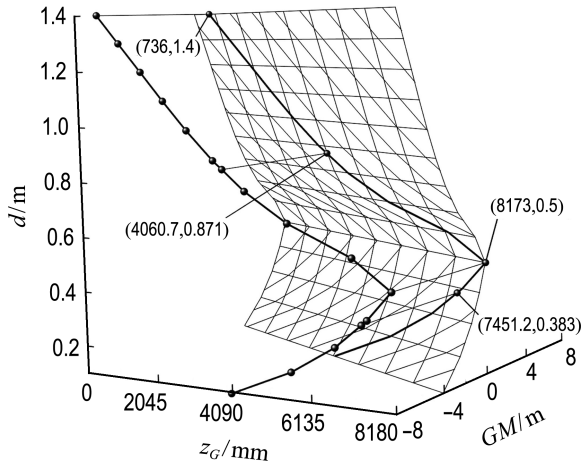


图 10 倒浮时 GM 曲面图谱

Fig. 10 GM surface diagrams at inverted float

算其静水力特性.以向右横倾 $90^\circ$ 典型浮态为例,坐标系如图 11 所示,采用 2.1 中计算方法可求得不同 $d$ 下的 $A_w$ 及其 $f$ 坐标 $(x_f, y_f, z_f)$ 、 $\nabla$ 、 $\Delta$ 及 $B_\varphi$ 坐标 $(x_B, y_B, z_B)$ 、 $B_\varphi M$ 和 $KM$ ,结果如表 4 所示.

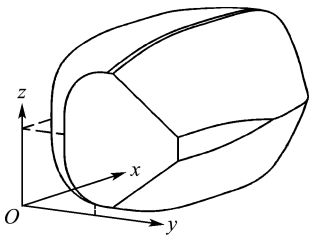


图 11 横倾 $90^\circ$ 时坐标系

Fig. 11 Coordinate system at  $90^\circ$  transverse heel

由上述结果绘制静水力曲线图,如图 12 所示.

同样根据 $KM$ 计算结果,绘制 $GM$ 曲面图谱,如图 13 所示. $GM$ 随着 $d$ 和 $z_G$ 的增加而降低,在 $d=0.9\text{ m}$ (方舱中纵剖面)处出现拐点, $z_{G\min}=2\ 651\text{ mm}$ . $d=0.1\text{ m}$ 时 $GM$ 最大值为 $5\ 805\text{ mm}$ ,当 $z_{G\min}=5\ 805\text{ mm}$ 时, $GM=0$ ,即图 1 坐标系下, $d$ 为 $0\sim1.4\text{ m}$ 任意值时右倾 $90^\circ$ ,满足稳性要求的 $y_{G\max}=-4\ 905\text{ mm}$ .相应的 $d$ 为 $0\sim1.4\text{ m}$ 任意值时左倾 $90^\circ$ ,满足稳性要求的 $y_{G\min}=4\ 905\text{ mm}$ .临界线上 $d=1.8\text{ m}$ 时 $z_G=900\text{ mm}$ ,即向右横倾 $90^\circ$ 时, $d=1.8\text{ m}$ 处的 $z_{G\min}=900\text{ mm}$ ,同理左倾 $90^\circ$ 时, $d=1.8\text{ m}$ 处的 $z_{G\min}=900\text{ mm}$ (图 11 坐标系下),相当于图 1 坐标系下, $d=1.4\text{ m}$ 、 $y_G=0$ 时左右横倾 $90^\circ$ 初稳性都满足要求.满载右倾 $90^\circ$ 时,相同 $\Delta$ 对应的 $d=1.084\text{ m}$ ,

表 4 横倾 90° 时静水力计算结果

Tab. 4 Hydrostatic calculation results at 90° transverse heel

| $d/m$ | $\nabla/m^3$ | $\Delta/t$ | $A_w/m^2$ | $(x_f, y_f, z_f)/mm$    |
|-------|--------------|------------|-----------|-------------------------|
| 0.1   | 0.068        | 0.070      | 1.040     | (1 174.1, 611.9, 100)   |
| 0.2   | 0.199        | 0.204      | 1.548     | (1 105.7, 607.8, 200)   |
| 0.3   | 0.372        | 0.382      | 1.902     | (1 088.1, 617.3, 300)   |
| 0.4   | 0.576        | 0.590      | 2.163     | (1 087.0, 633.1, 400)   |
| 0.5   | 0.803        | 0.823      | 2.371     | (1 087.6, 652.3, 500)   |
| 0.6   | 1.049        | 1.075      | 2.540     | (1 087.9, 673.2, 600)   |
| 0.7   | 1.310        | 1.343      | 2.682     | (1 087.4, 694.4, 700)   |
| 0.8   | 1.584        | 1.624      | 2.792     | (1 088.0, 712.9, 800)   |
| 0.9   | 1.866        | 1.913      | 2.834     | (1 096.0, 719.6, 900)   |
| 1.0   | 2.148        | 2.201      | 2.792     | (1 088.0, 712.9, 1 000) |
| 1.1   | 2.422        | 2.482      | 2.682     | (1 087.4, 694.4, 1 100) |
| 1.2   | 2.683        | 2.750      | 2.540     | (1 087.9, 673.2, 1 200) |
| 1.3   | 2.929        | 3.002      | 2.371     | (1 087.6, 652.3, 1 300) |
| 1.4   | 3.156        | 3.235      | 2.163     | (1 087.0, 633.1, 1 400) |
| 1.5   | 3.360        | 3.444      | 1.902     | (1 088.1, 617.3, 1 500) |
| 1.6   | 3.533        | 3.622      | 1.548     | (1 105.7, 607.8, 1 600) |
| 1.7   | 3.664        | 3.756      | 1.040     | (1 174.1, 611.9, 1 700) |
| 1.8   | 3.732        | 3.825      | 0         | (-, -, -)               |

| $d/m$ | $(x_B, y_B, z_B)/mm$    | $B_{\varphi}M/m$ | $KM/m$ |
|-------|-------------------------|------------------|--------|
| 0.1   | (1 211.8, 630.1, 60.3)  | 5.744            | 5.805  |
| 0.2   | (1 160.6, 615.2, 121.5) | 4.452            | 4.573  |
| 0.3   | (1 129.0, 613.8, 182.2) | 3.804            | 3.986  |
| 0.4   | (1 114.2, 617.8, 241.9) | 3.387            | 3.629  |
| 0.5   | (1 106.6, 624.8, 301.0) | 3.074            | 3.375  |
| 0.6   | (1 102.2, 633.7, 359.5) | 2.823            | 3.182  |
| 0.7   | (1 099.3, 643.7, 417.5) | 2.614            | 3.032  |
| 0.8   | (1 097.1, 654.3, 475.1) | 2.411            | 2.886  |
| 0.9   | (1 096.4, 663.7, 531.7) | 2.119            | 2.651  |
| 1.0   | (1 095.9, 670.6, 586.5) | 1.779            | 2.365  |
| 1.1   | (1 094.9, 674.5, 639.0) | 1.414            | 2.053  |
| 1.2   | (1 094.2, 675.4, 688.7) | 1.104            | 1.792  |
| 1.3   | (1 093.6, 674.3, 735.8) | 0.843            | 1.579  |
| 1.4   | (1 093.2, 672.0, 779.9) | 0.618            | 1.398  |
| 1.5   | (1 092.8, 669.2, 820.5) | 0.421            | 1.242  |
| 1.6   | (1 092.8, 666.4, 856.2) | 0.250            | 1.106  |
| 1.7   | (1 094.3, 664.3, 884.4) | 0.106            | 0.991  |
| 1.8   | (1 096.4, 663.7, 900.0) | 0                | 0.900  |

$z_{Gmin}=2\ 102.9\ mm$ , 相当于图 1 坐标系下,  $y_{Gmax}=-1\ 202.9\ mm$ , 同理满载左倾 90° 时,  $y_{Gmin}=-$

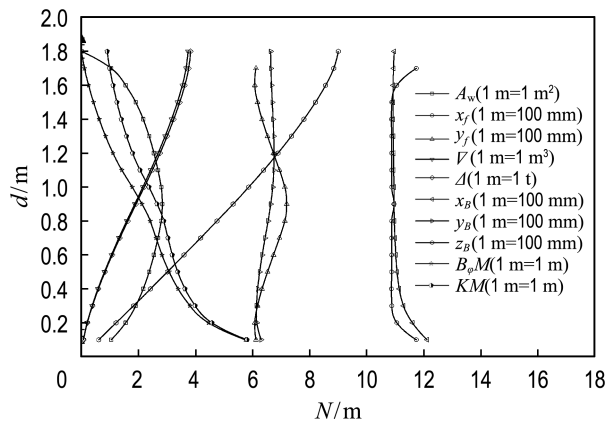


图 12 横倾 90° 时静水力曲线图

Fig. 12 Hydrostatic curves diagrams at 90° transverse heel

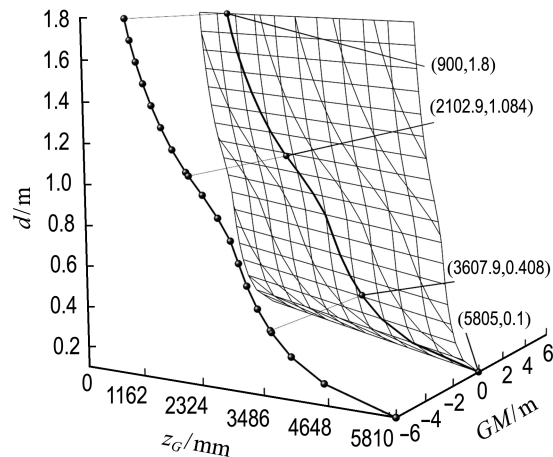


图 13 横倾 90° 时 GM 曲面图谱

Fig. 13 GM surface diagrams at 90° transverse heel

1 202.9 mm; 空载右倾 90° 时, 相同  $\Delta$  对应的  $d=0.408\ m$ ,  $z_{Gmin}=3\ 607.9\ mm$ , 相当于图 1 坐标系下,  $y_{Gmax}=-2\ 707.9\ mm$ , 同理空载左倾 90° 时,  $y_{Gmin}=2\ 707.9\ mm$ .

由结论可知  $y_G$  越偏向外侧越容易倾斜, 虽然满载、空载下横倾 90° 时  $y_{Gmax}$  和  $y_{Gmin}$  已经超出型宽范围, 但实际情况更靠近船中, 因为伸展吊臂时  $z_G$  增大会促使方舱继续倾覆或者收回吊臂后  $z_G$  减小促使其回正, 两者都满足初稳性要求, 不过设计时更倾向于  $z_G$  偏小。

### 3 方舱自扶正特性研究

方舱稳性是指在受到外力作用下发生倾斜, 当外力消失后仍能够依靠自身恢复到原平衡状态的能力<sup>[14]</sup>, 而当横倾角为 0°~180° 内任意角度

时,在外力消失后,都能够自行回到原平衡位置,则认为其具备自扶正性能<sup>[16]</sup>.通过概念分析可看出方舱自扶正问题是外力作用下的大倾角稳性问题,即在静稳性基础上进一步研究极限稳性,可采用大倾角稳性理论知识进行研究,并假定 $z_G$ 绘制静稳性曲线图谱,根据图谱判断其自扶正特性.

### 3.1 稳性计算原理

如图14所示,在外力作用下,横倾角为 $\varphi$ ,设此时水线为 $W_1L_1$ ,由于倾斜时其 $\Delta$ 不变,重量及重心位置保持不变,而 $\nabla$ 的形状随之改变,浮心位置由 $B_0$ 移动到 $B_\varphi$ ,于是重力 $F_G$ 和浮力 $F_B$ 之间形成复原力矩:

$$M_r = \Delta GZ = \Delta l \quad (14)$$

$M_r$ 为正时可促使方舱恢复到原平衡位置,其中 $GZ$ 是重心向浮心作用线作的垂线,垂足为 $Z$ , $GZ$ 大小可代表复原力臂 $l$ 的数值大小<sup>[4]</sup>.由图14可知 $l$ 计算式为

$$l = y_B \cos \varphi + z_B \sin \varphi - z_G \sin \varphi \quad (15)$$

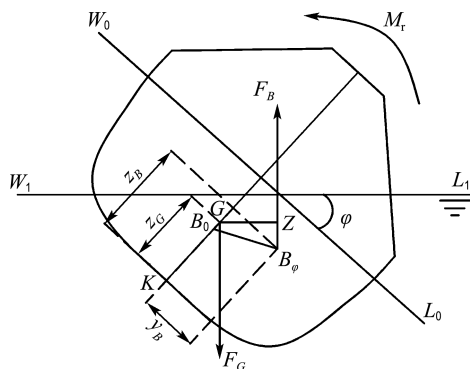


图14 复原力矩组成

Fig. 14 Composition of righting moment

由式(15)可知 $l$ 主要与 $B_\varphi$ 和 $z_G$ 有关.由2.1中的计算原理可求得 $B_\varphi$ 坐标 $(x_B, y_B, z_B)$ ,通过假定 $z_G$ 得到 $l$ .当 $l < 0$ 时, $M_r$ 为负,则加剧方舱倾覆;当 $l > 0$ 时, $M_r$ 为正,可促使其恢复原平衡位置; $l = 0$ 时,为随遇平衡状态<sup>[5]</sup>.因此,对方舱稳性研究就是对 $l$ 进行研究,即计算各 $\varphi$ 下 $l$ 大小.由于方舱在海上航行,所受外力主要是不定性风流,在倾覆和回转过程中存在一定角速度,随遇平衡状态很短暂<sup>[17]</sup>,所以, $l \geq 0$ 则认为其具备自扶正性能.由式(15)可知,在 $z_G$ 一定时,不同 $\varphi$ 下 $l$ 仅与 $B_\varphi$ 坐标 $(x_B, y_B, z_B)$ 有关,而 $(x_B, y_B, z_B)$ 仅与 $d$ 有关.可假定方舱 $z_G$ ,研究 $d_1$ 和 $d_2$ 两种典

型工况下 $l$ 随 $\varphi$ 的变化规律,以验证不同 $z_G$ 下的自扶正性能,并对其他工况 $z_{Gmax}$ 进行约束.

### 3.2 自扶正性能计算流程

对于艇型确定的方舱, $B_\varphi$ 仅与 $d$ 有关,按2.1中的方法可求得 $B_\varphi$ 坐标 $(x_B, y_B, z_B)$ ,当假定 $z_G$ 后,可计算 $l$ ,进而验证其自扶正性能.首先基于2.1中的计算原理求得满载、空载工况下 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的 $B_\varphi$ 坐标 $(x_B, y_B, z_B)$ ,然后假定 $z_G$ 计算 $l$ 并绘制静稳性曲线图谱,最后确定满足自扶正要的 $z_G$ 可行域,并对 $z_G$ 和 $0^\circ \sim 180^\circ$ 横倾角下相应的 $l_{min}$ 进行样条曲线拟合,以得到两种工况的 $z_{Gmax}$ .其计算流程如图15所示.

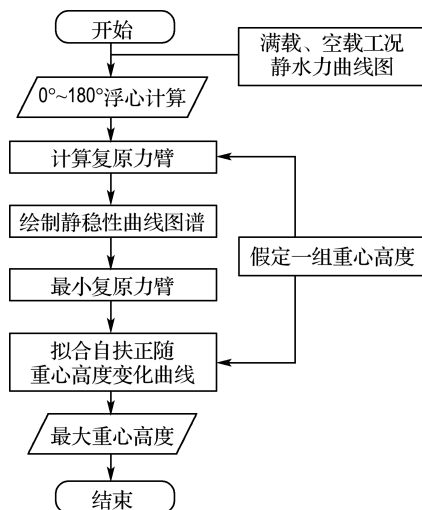


图15 自扶正性能计算流程图

Fig. 15 Flow chart of self-righting performance calculation

### 3.3 自扶正性能分析

为研究方舱航行时的稳性及自扶正性能,分别绘制满载工况和空载工况下, $l$ 随 $z_G$ 变化的曲线图谱,并对 $l_{min}$ 和 $z_G$ 采用Akima样条曲线插值拟合,以得到 $z_{Gmax}$ .其中样条曲线插值拟合是用低次多项式曲线作为每一小段区间的拟合曲线,该多项式曲线通过样本点且一、二阶导数连续,具有一定的光顺性,比较符合自扶正性能随 $z_G$ 的变化规律.

3.3.1 满载工况自扶正计算 基于 $l$ 的计算原理,假定 $z_G$ 计算 $l$ 随 $\varphi$ 的变化曲线,即静稳性曲线,再改变 $z_G$ ,绘制静稳性曲线图谱,以得到方舱满足自扶正要的 $z_{Gmax}$ .如图16所示,横坐标为 $\varphi$ ,纵坐标为 $l$ ,随着 $z_G$ 增加, $l$ 逐渐减小,直到

$z_G = 510 \text{ mm}$  时,  $l$  在  $\varphi = 158.991^\circ$  处开始出现负值. 因此  $z_{G\max}$  应在  $500 \sim 510 \text{ mm}$ .

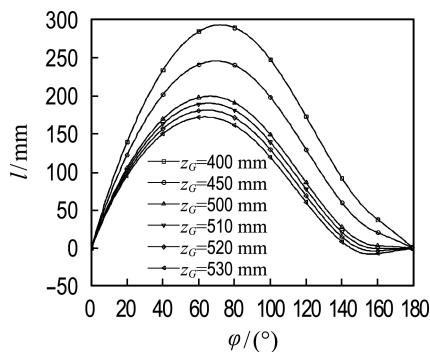
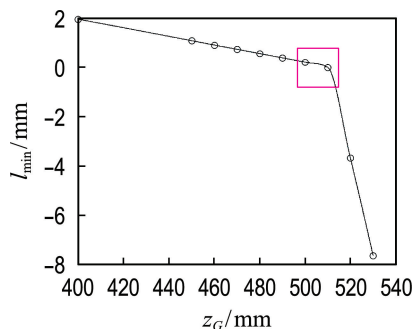


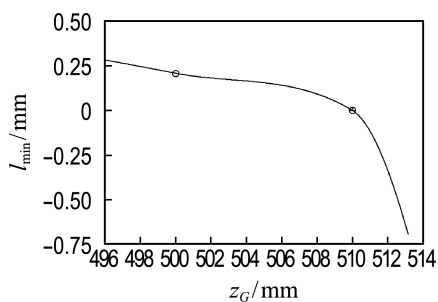
图 16 满载工况下静稳性曲线图谱

Fig. 16 Curves diagrams of static stability in full load conditions

如图 17 所示, 将  $l_{\min}$  作为因变量,  $z_G$  作为自变量, 采用样条曲线拟合, 可知  $z_{G\max} = 509.9 \text{ mm}$ .



(a) 整体图



(b) 局部图

图 17 满载工况自扶正性能随  $z_G$  变化曲线

Fig. 17 Variation curve of self-righting performance with  $z_G$  in full load conditions

3.3.2 空载工况自扶正计算 同样基于  $l$  的计算原理, 假定  $z_G$ , 计算  $l$  绘制静稳性曲线图谱, 以得到空载工况下的  $z_{G\max}$ . 如图 18 所示, 随着  $z_G$  增加,  $l$  逐渐减小, 直到  $z_G = 410 \text{ mm}$  时,  $l$  在  $\varphi =$

$158.444^\circ$  处开始出现负值. 因此  $z_{G\max}$  应在  $400 \sim 410 \text{ mm}$ .

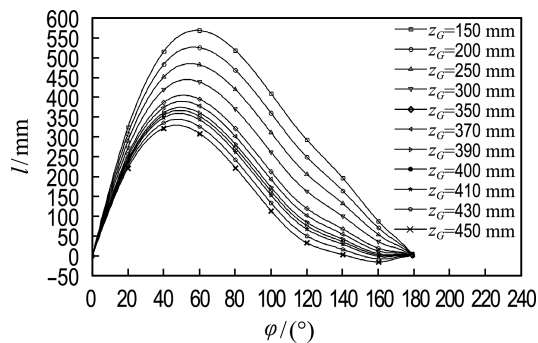
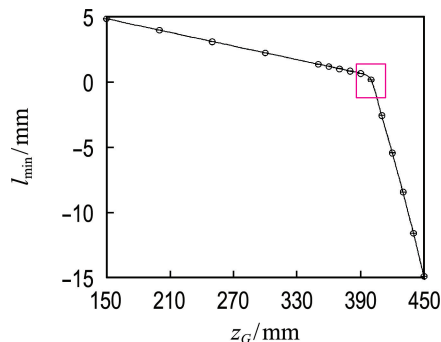


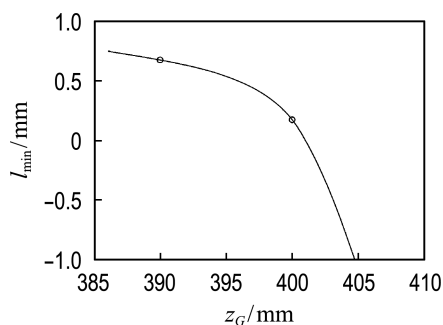
图 18 空载工况下静稳性曲线图谱

Fig. 18 Curves diagrams of static stability in no-load conditions

如图 19 所示, 将  $l_{\min}$  作为因变量,  $z_G$  作为自变量, 采用样条曲线拟合, 得到  $z_{G\max} = 401 \text{ mm}$ .



(a) 整体图



(b) 局部图

图 19 空载工况自扶正性能随  $z_G$  变化曲线

Fig. 19 Variation curve of self-righting performance with  $z_G$  in no-load conditions

## 4 结 论

(1) 本文设计的方舱适用于 AG600 飞机空投, 考虑到机舱空间限制, 并结合其总布置、最大

载重量、稳性和快速性等需求,确定了主尺度及船型参数。

(2)基于等排水量计算法和初稳性计算原理,绘制了正浮、倒浮和向右横倾 $90^\circ$ 典型浮态下的静水力曲线图和 $GM$ 曲面图谱,并得知 $GM$ 随 $z_G$ 增大而减小,随 $d$ 的变化规律与静水力曲线 $KM$ 相同。在图1坐标系下, $d$ 为 $0\sim 1.4$  m的任意值时,满足初稳性要求的正浮 $z_{G\max}=666$  mm,倒浮 $z_{G\max}=-6\ 773$  mm,右倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\max}=-4\ 905$  mm,左倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\min}=4\ 905$  mm;满载工况下,正浮 $z_{G\max}=4\ 374$  mm,倒浮 $z_{G\max}=-2\ 660.7$  mm,右倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\max}=-1\ 202.9$  mm,左倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\min}=1\ 202.9$  mm;空载工况下,正浮 $z_{G\max}=10\ 069$  mm,倒浮 $z_{G\max}=-6\ 051.2$  mm,右倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\max}=-2\ 707.9$  mm,左倾 $90^\circ$ 时 $y_{G\min}=2\ 707.9$  mm。

(3)根据静稳性曲线图谱,可知满载工况满足自扶正要求的 $z_{G\max}$ 取值范围在 $500\sim 510$  mm,采用样条曲线插值拟合得到 $z_{G\max}$ 为 $509.9$  mm。空载工况满足自扶正要求的 $z_{G\max}$ 取值范围在 $400\sim 410$  mm,采用样条曲线插值拟合得 $z_{G\max}=401$  mm。因此其他工况满足自扶正要求的 $z_{G\max}$ 应在 $401\sim 509.9$  mm。

本文研究了方舱横倾状态下的静稳性,为研究其破损稳性和自由纵倾状态下的稳性及自扶正性能打下了基础,后续将进行模型试验和实际运营工况验证<sup>[18]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 于红,程诗思,吴怡睿,等.我国核动力水面舰船海上核事故应急法规标准研究[J].核标准计量与质量,2021(2):2-8.  
YU Hong, CHENG Shisi, WU Yirui, et al. Research on emergency regulations and standards of nuclear power surface ships in China [J]. *Nuclear Standard Measurement and Quality*, 2021(2): 2-8. (in Chinese)
- [2] WAJS J, KASZA D. Development of low-cost unmanned surface vehicle system for bathymetric measurements [J]. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **684**(1): 012033.
- [3] LIU Zhixiang, ZHANG Youmin, YU Xiang, et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges [J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, **41**: 71-93.
- [4] JIANG Xiaoning, LIN Yan. Relevant integrals of NURBS and its application in hull line element design [J]. *Ocean Engineering*, 2022, **251**: 111147.
- [5] 林焰,徐兴昂,叶超.远海无人快艇的自扶正优化设计方法[J].哈尔滨工程大学学报,2020, **41**(9): 1261-1267.  
LIN Yan, XU Xingang, YE Chao. Self-righting optimization design for an unmanned speedboat on the high seas [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, **41**(9): 1261-1267. (in Chinese)
- [6] 徐纲要,林敬秋.打造海上战舰的“流动医院”[N].解放军报,2004-06-09.  
XU Gangyao, LIN Jingqiu. Build a “mobile hospital” for maritime warships [N]. *PLA Daily*, 2004-06-09. (in Chinese)
- [7] 刘森林.无人艇在海洋救助领域中的开发研制[J].造船技术,2018(4):1-4.  
LIU Senlin. Development of unmanned surface vehicle in the marine rescue [J]. *Marine Technology*, 2018(4): 1-4. (in Chinese)
- [8] AKYILDIZ H, ŞİMŞEK C. Self-righting boat design [J]. *GİDB Dergi*, 2016(6): 41-54.
- [9] BAI Tiechao, DING Ziyu, WANG Xianzhou, et al. Theoretical analysis of the performance of a self-righting boat [J]. *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Trondheim: Ocean, Offshore and Arctic Engineering Division, ASME, 2017: 12-27.
- [10] 郑志江.中大型艇自扶正性能分析研究[D].大连:大连理工大学,2018.  
ZHENG Zhijiang. Analysis and research on self-righting performance of medium and large boat [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 林志勇,陈顺洪,周德武.1 600 HP自扶正高速执法艇设计[J].广东造船,2018, **37**(2): 20-23.  
LIN Zhiyong, CHEN Shunhong, ZHOU Dewu. Design of 1 600 HP self-righting high-speed response boat [J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2018, **37**(2): 20-23. (in Chinese)
- [12] 刘锦邦,侯国祥,张双全.小艇自扶正的STAR CCM+仿真[J].中国水运,2020, **20**(12): 4-6.  
LIU Jinbang, HOU Guoxiang, ZHANG Shuangquan. STAR CCM+ simulation of small boat self-righting [J]. *China Water Transport*, 2020, **20**(12): 4-6. (in Chinese)
- [13] 林焰,于雁云,陈明,等.船舶设计原理[M].

- 北京: 科学出版社, 2019: 15-235.
- LIN Yan, YU Yanyun, CHEN Ming, *et al.* **The Principles of Ship Design** [M]. Beijing: Science Press, 2019: 15-235. (in Chinese)
- [14] 青 云, 韦 仁. 拥抱海空 整翼待发——首架国产大型水陆两栖飞机 AG600 总装工作纪实 [J]. 装备制造, 2016(8): 56-67.
- QING Yun, WEI Ren. Embrace the sea and air, the whole wings waiting to go — The first domestic large amphibious aircraft AG600 final assembly work record [J]. **China Equipment**, 2016(8): 56-67. (in Chinese)
- [15] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 79-87.
- SHENG Zhenbang, LIU Yingzhong. **Ship Principle** [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003: 79-87. (in Chinese)
- [16] WANG Xiaoyuan, FENG Kai, WANG Gang, *et al.* Local path optimization method for unmanned ship based on particle swarm acceleration calculation and dynamic optimal control [J]. **Applied Ocean Research**, 2021, **110**: 102588.
- [17] 吕文亚, 陈新权, 杨 启, 等. 饱和潜水自航式高压逃生艇设计 [J]. 船舶与海洋工程, 2020, **36**(1): 12-18.
- LYU Wenya, CHEN Xinquan, YANG Qi, *et al.* Design of self-propelled hyperbaric lifeboat for saturation diving [J]. **Naval Architecture and Ocean Engineering**, 2020, **36**(1): 12-18. (in Chinese)
- [18] LIN Yan, JIANG Xiaoning, YU Yanyun. Transportation platform for underwater towing device; US Patent No. 10294083 B2 [P]. 2019-05-21.

## Research on stability of unmanned shelter for nuclear emergency rescue at sea

LI Tieli<sup>1</sup>, ZHOU Xian<sup>1</sup>, JIANG Xiaoning<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>\*1,2</sup>

( 1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** In view of the demand for nuclear emergency rescue in distant seas, it is necessary to develop and design a nuclear emergency rapid response unmanned surface vehicles (nuclear emergency rescue shelter) specially designed for amphibious aircraft delivery. So the main dimensions and hull parameters of the shelter are researched and determined; the hydrostatic performance curves under the typical floating cases of positive float, inverted float and 90° transverse heel are calculated, and the surface diagrams of the variation of the initial stability with the height of the center of gravity to determine the height of the center of gravity maximum or minimum limit under different drafts are drawn; the basic principle of stability calculation and self-righting calculation process are proposed, the hydrostatic stability curve plots under full load and no-load conditions are given, and the variation law of self-righting performance with the height of the center of gravity is discussed. The maximum height of the center of gravity that meets the requirements of self-righting is obtained through spline curve fitting. The research results can provide a technical basis and reference for the subsequent design of the shelter.

**Key words:** unmanned surface vehicles; nuclear emergency shelter; maritime rescue; hydrostatic performance; stability; self-righting performance; initial stability height maximum or minimum limit; height of center of gravity maximum or minimum limit