

海洋物性监测小型浮标稳性设计

梁冠辉, 薛宇欢, 孙宝楠*, 陶常飞, 官 晟, 周兴华

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 根据海洋资料浮标原理设计了直径为 3 m 的圆盘式小型浮标, 拟将其用于搭载国产气象水文传感器进行深远海应用示范。为了验证该浮标设计能够满足项目应用需求, 文中统计了浮标工作海域的环境参数和浮标的质量、重心、浮心、吃水和排水等设计参数, 参照船舶静力学原理及波浪理论, 通过计算浮标的初稳性和大倾角稳性完成浮标的稳性计算, 得到了浮标的初稳心高度、稳心半径、固有周期、自由最大横摇角、静稳性曲线、动稳性曲线、最大复原力臂、极限静横倾角、稳性消失角和稳性衡准数等稳性参数。分析这些参数, 结果表明: 该浮标设计完全满足《国内航行海船法定检验技术规则(2011)》对海洋浮体稳性的要求, 这说明该浮标设计参数合理、方案可行, 可应用于项目的浮标研制工作。

关键词: 海洋物性监测仪; 小型浮标; 初稳性; 静稳性; 动稳性

中图分类号: P715.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0541-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.016

引用格式: LIANG G H, XUE Y H, SUN B N, et al. Stability design of small buoy for marine physical property monitoring[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 541-548. 梁冠辉, 薛宇欢, 孙宝楠, 等. 海洋物性监测小型浮标稳性设计[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 541-548.

科技部重大科学仪器专项“海洋物性参数监测仪”旨在摆脱我国海洋传感器核心部件依赖进口、关键技术被“卡脖子”的现状^[1-5], 响应国家“建设海洋强国, 关键技术要我们自己来研发”的要求, 研制具有自主知识产权、质量稳定可靠、核心部件国产化的海洋气象传感器、海洋物性参数监测仪数据采集系统和数据服务平台等, 并且以海洋气象水文浮标^[3-7]为载体于 2 000 m 以深海域开展一年以上的应用示范, 实现温度、压力、湿度、风场、雨量和太阳辐射等海洋气象水文多参量的高精度测量。

深远海海况复杂多变, 浮标长期运行过程中会出现横摇幅度过大的情况, 甚至倾覆^[6-10], 而且浮标运输、布放和维护成本相对近海都高出很多, 因此, 设计稳定性良好的浮标是开展长期连续海洋应用示范和获取高质量气象水文数据的关键。浮标稳性研究的主要方法有: 理论计算、数值模拟和港池试验等, 本文中的浮标尚处在设计阶段, 故采用理论计算的方法设计其稳性, 以达到优化浮标设计方案的目的。很多学者也采用理论计算方法开展海洋中的船舶、平台和浮标的稳性研究, 如 Venkatesan 等^[11]使用理论计算方法得到用于印度洋海啸监测的圆柱浮标的稳性, 并且使用等比例缩小的浮标模型在水池中进行试验, 验证了该柱状浮标设计合理, 稳性理论计算准确; 汪洋等^[12]计算了半潜船装载特定货物前初稳性高的最高限值, 得到了初稳性高度可行域, 并由此提出提高船舶航行稳性的方法; 邓露等^[13]研究半潜型浮式风力机平台的初稳性高度限值和完整稳性的影响因素, 并将计算结果作为半潜型浮式风力机平台的设计参考。本文以流体静力学为基础, 参照船舶静力学原理^[14]及波浪理论^[15], 计算浮标的初稳性和大倾角稳性^[16-17], 将计算所得的稳性参数作为浮标设计过程中调整其重心、浮心和吃水等参数的依据, 并初步判断浮标设计方案的优劣。

收稿日期: 2019-08-19

资助项目: 科技部重大科学仪器专项——海洋物性参数监测仪(2018YFF01014100)

作者简介: 梁冠辉(1985-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋监测设备研制与维护方面研究。E-mail: lianggh@fio.org.cn

* **通讯作者:** 孙宝楠(1984-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋动力学方面研究。E-mail: sunbn@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

1 环境参数与浮标设计参数

1.1 浮标极限生存环境

浮标的极限生存环境是指该浮标在工作时所能承受的海洋气象水文环境极值^[18]。准确地评估浮标极限生存环境参数是设计长期稳定可靠的浮标平台的先决条件。目前,海洋浮标出现问题超过半数,主要是因为设计前对浮标极限生存环境条件估计不足,导致浮标性能无法满足实际海况的工作要求。本文参考海洋行业标准《小型海洋资料浮标》^[19]和《海洋资料浮标原理与工程》^[20]中对于浮标极限生存环境参数的要求,结合浮标工作海域的实际海况,提出海洋物性监测仪浮标的极限生存环境参数,如表 1 所示。

1.2 浮标设计参数

综合分析需搭载的所有国产气象水文传感器对浮标连续供电能力和安装空间的需求,考虑到深远海浮标长途运输和布放时所用科考船的条件,设计浮标如图 1 所示。浮标采用直径为 3 m 的圆盘式结构,主要由上架、浮体、舱体和下架组成。其中,上架主要搭载各种传感器及太阳能电池板,材质为铸铝,这样既能保证浮标上架的强度,又具有密度低的优点,有利于降低浮标整体重心,提高浮标的稳性;浮体采用 PE 材料,表面喷涂聚脲,以保证浮体具有足够的强度和防腐性能;舱体包括仪器舱和电池舱,由 316 不锈钢制成;下架支撑整个浮体,安装有配重、牺牲阳极和锚系连接装置等,材质与舱体相同。浮标主要参数见表 2。

表 1 浮标极限生存环境参数

Table1 Extreme living environmental parameters of the buoy

参 数	典型值	参 数	典型值
风速	$60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	最大波高	20 m
波浪周期	12 s	表层流速	$3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
波浪波长	224 m	环境温度	$-20\sim50\text{ }^{\circ}\text{C}$
有效波高	15 m	相对湿度	0~100%

表 2 浮标主要参数

Table 2 Main parameters of the buoy

参 数	典型值	参 数	典型值
直径	3 m	吃水高度	1.552 m
质量	3 046.13 kg	水上受力面积	3.29 m^2
高度	4.505 m	水下受力面积	2.53 m^2
储备浮力	30 594.33 N	X 轴转动惯量	$2\,393.873\text{ kg}\cdot\text{m}^2$
重心高度	1.233 m	Y 轴转动惯量	$2\,393.843\text{ kg}\cdot\text{m}^2$
浮心高度	1.256 m	Z 轴转动惯量	$1\,941.247\text{ kg}\cdot\text{m}^2$

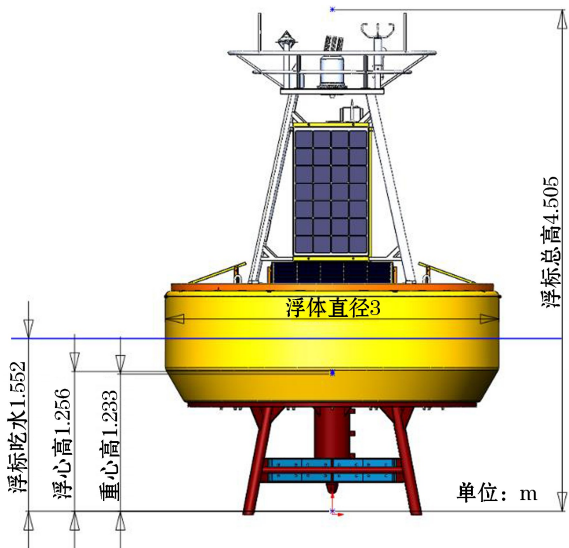


图 1 小型浮标设计

Fig.1 Design of the small buoy

2 浮标稳性计算

浮标在水平外力作用下偏离平衡位置会发生倾斜,当外力消失后,能自行恢复到最初平衡状态的能力称作浮标的稳性。包括初稳性和大倾角稳定:初稳性指浮标倾斜角度小于 10° 的稳性;大倾角稳性是指倾角大于 10° 的稳性^[21]。

2.1 初稳性

浮标在水平方向上倾斜 φ 角度后,浮心 B 沿某一曲线移动至新的浮心 B_1 ,新的倾斜水线为 $W_\varphi L_\varphi$, M 点为浮标的初稳心, $\overline{BM}$ 为浮标的稳心半径 r ,即稳心与浮心的垂向距离^[22-23](图 2)。当倾斜角度 $\varphi \leq 10^\circ$ 时,曲线 $\widehat{BB_1}$ 近似为圆弧, M 点近似为曲线 $\widehat{BB_1}$ 的圆心, $\overline{BM} = \overline{B_1M}$ 为曲线 $\widehat{BB_1}$ 的半径,因此在小倾角条件下,稳心半径 r 的计算公式为

$$r = Z_s - Z_b = \frac{I_x}{V}, \quad (1)$$

式中, Z_s 为稳心垂向坐标; Z_b 为浮心垂向坐标; I_x 为浮体水线处横截面积对其形心 X 轴的面积惯性矩,计算公式为 $I_x = \int_A y^2 dA = \frac{\pi D_1^4}{64}$, 其

中 A 为浮标在水线出的横截面积, y 为水线到 X 轴的距离, D_1 是浮标水线处直径; V 为浮标的排水体积。

浮标要具有稳定的平衡状态,除了稳心需高于重心,还需有合理的稳心高度,在初稳性计算中初稳心高度是衡量浮标初稳性好坏的重要指标^[24-25],初稳心高度(H_s)计算公式为

$$H_s = Z_s - Z_g = Z_b + r - Z_g, \quad (2)$$

式中, Z_g 为重心垂向坐标。 Z_b 与 Z_g 可利用浮标设计图(图 1)统计得到,将文中浮标参数代入式(1)和式(2)计算,可得浮标的稳心半径,值为 1.033 m,进而求得初稳心高度为 1.056 m。《国内航行海船法定检验技术规则(2011)》^[26] 中海洋浮式结构初稳性对初稳心高度的要求是不小于 0.15 m,文中设计浮标的初稳心高度远大于规范要求值,说明该浮标设计满足此项初稳性要求。

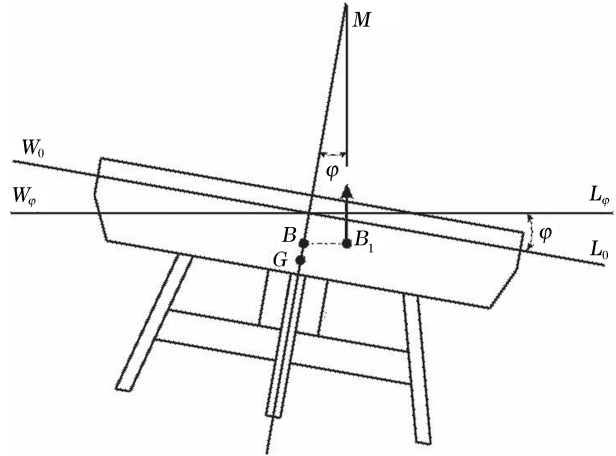
浮标的初稳心高度还决定了浮标在小倾角自由摇摆时的运动特性。浮标横摇固有周期与初稳心高度有直接关系,且其随着初稳心高度的增加而减小,即初稳心高度越大,浮标的横摇周期越短。若初稳心高度过大,在海洋中遇到风浪时,浮标会产生急剧的摇摆,以致降低浮标的安全性和数据采集的精准性。因此需通过计算浮标的横摇固有周期来判断浮标初稳心高度设计的合理性,浮标横摇固有周期 T_φ 计算公式为

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{J + \Delta J}{\rho V H_s}}, \quad (3)$$

式中, J 为浮标相对于 X 轴的转动惯量; ΔJ 为浮标体附连水质量相对于 X 轴的转动惯量,一般认为 $\Delta J \approx 0.2J$; ρ 为海水密度。

利用式(3),可进一步求得浮标在横摇角与波浪斜率较小的情况下的最大横摇角 $\varphi_{\max}$, 其计算公式为

$$\varphi_{\max} = \frac{\pi H}{L} \times \frac{T^2}{T^2 - T_\varphi^2}, \quad (4)$$



注: M 为浮标初稳心; φ 为浮标横摇角度; $W_0 L_0$ 为浮标正浮时水线;

$W_\varphi L_\varphi$ 为浮标倾斜 φ 角度时水线; B 为浮标正浮时浮心位置;

B_1 为浮标倾斜后浮心位置; G 为浮标重心

图 2 浮标初稳性示意图

Fig.2 Schematic diagram of the initial stability of the buoy

式中, H 为浮标所在海域波浪的最大波高; L 为浮标所在海域波浪的波长; T 为浮标所在海域波浪周期。由式(4)可以看出, 当浮标的固有周期 T_φ 与所在海域的波浪周期 T 相近时, 式中分母 $T^2 - T_\varphi^2$ 趋近于 0, 此时浮标最大横摇角将陡然增大, 浮标将会与波浪发生谐振, 导致浮标的安全性降低。

将文中设计浮标的直径、质量和转动惯量等参数分别代入式(3)和式(4), 可求得浮标横摇的固有周期为 5.2 s, 在波浪中的自由最大横摇角为 15.3° , 浮标布放海域的波浪周期为 12 s。可见, 设计浮标的固有周期避开了布放海域的波浪周期, 工作时浮标与波浪不会发生谐振, 该浮标具备足够的安全性。

2.2 大倾角稳性

大倾角稳性用来判断到浮标在布放海区所能承受的极限海浪, 或者计算浮标丧失稳性而倾覆时的极限横倾角度。大倾角稳性主要是计算浮标在静力作用下的静稳性和动力作用下的动稳性, 以浮标的稳性力臂来反映浮标的稳性。故欲求得浮标的大倾角稳性, 需先求得浮标的静稳性力臂曲线和动稳性力臂曲线^[27]。

2.2.1 静稳性曲线

本文采用变排水量法计算浮标的静稳性力臂, 首先得到浮标静稳性力臂随浮标横倾角的变化曲线, 再对静稳性力臂曲线进行积分得到浮标动稳性力臂曲线。在计算过程中, 因为浮标上架形状不规则且入水体积远小于浮标体与下架, 所以为了提高计算效率, 本文忽略了浮标上架的出水与入水体积, 仅考虑浮标体与下架的出水与入水体积。

横倾后, 浮标受力如图 3 所示, 浮标排水体积计算公式:

$$V_\varphi = V_0 + V_1 - V_2, \quad (5)$$

式中, V_φ 为浮标横倾时的排水体积; V_0 为浮标正浮时的排水体积; V_1 为横倾时浮标入水楔形体积; V_2 为横倾时浮标出水楔形体积。

根据合力矩原理, 结合图 3 得 V_φ 对于 NN' 的体积静矩 M_φ :

$$M_\varphi = V_1 \cdot l_1 + V_2 \cdot l_2 - V_0 \cdot l_0, \quad (6)$$

式中: l_1 为浮标入水楔形 V_1 浮力作用线与倾斜水线 $W_\varphi L_\varphi$ 的交点 A 到旋转点 O 的距离; l_2 为浮标出水楔形 V_2 重力作用线与倾斜水线 $W_\varphi L_\varphi$ 的交点 B 到旋转点 O 的距离; l_0 为浮标平衡状态时排水体积 V_0 浮力作用线与倾斜水线 $W_\varphi L_\varphi$ 的交点 F 到旋转点 O 的距离, 计算公式为 $l_0 = (d_0 - d_{KB_0}) \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi$, 其中 d_{KB_0} 为浮标底面中心点与正浮浮心的距离。由于浮标倾斜时入水和出水楔形不规则, 不同倾角的 V_1 , l_1 , V_2 和 l_2 通过三维制图软件统计所得。

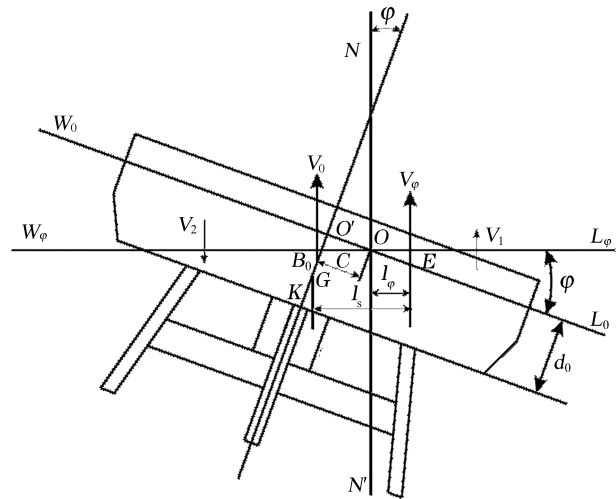
由式(5)和式(6)可得, 浮标浮于倾斜水线 $W_\varphi L_\varphi$ 时, 浮力作用线至轴线 NN' 的距离为

$$l_\varphi = \frac{M_\varphi}{V_\varphi} = \frac{V_1 \cdot l_1 + V_2 \cdot l_2 - V_0 \cdot l_0}{V_0 + V_1 - V_2}, \quad (7)$$

则浮标的静稳性力臂 l_s 的计算公式为

$$l_s = l_\varphi + c \cdot \cos \varphi + (d_0 - d_{KG}) \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

式中, d_0 为浮标平衡状态时的吃水深度; d_{KG} 为浮标平衡状态时重心 G 到浮标横截面底部中心 K 的距离; c



注: φ 为浮标横摇角度; $W_0 L_0$ 为浮标正浮时水线; $W_\varphi L_\varphi$ 为浮标倾斜 φ 角度时水线; NN' 横倾后计算倾斜力矩的参考轴线; l_φ 为横倾后浮力作用线与轴线距离; l_s 为静稳性力臂; O 为横倾时浮标入水点; O' 浮标上表面中心点; B_0 为浮标正浮时浮心; K 为浮标底面中心点; C 为横倾时浮标入水点与浮标上表面中心点的距离; d_0 为正浮时浮标底面中心点与池水面距离

图 3 浮标静稳性示意图

Fig.3 Schematic diagram of the static stability of the buoy

为偏离值,指的是浮标倾斜后的旋转点距离平衡状态水线中心的距离。旋转点取在入水一侧, c 视浮标吃水线至浮体上沿的距离与吃水比而定,比值越小,偏移越大,以便在大倾角水线下入水楔形与出水楔形的大小大致相同。根据设计的浮标的吃水、型宽等参数以及参考其他人的工作经验,本文中取 c 值为 0.1 m。

一般情况下,海洋浮体结构的大倾角稳性计算中横倾角最大取值范围为 $70^\circ \sim 80^\circ$ [28],文中计算时浮标的横倾角取值范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$,取值间隔为 5° 。通过文中所述计算流程,计算得到静稳性力臂曲线(图 4)。

由最大复原力臂 l_m 可以求得浮标所能承受的最大静态横倾力矩,若外来的恒定横倾力矩超过浮标所能承受的最大静态横倾力矩,浮标将倾覆。静稳性曲线最高点 B 对应的横倾角为极限静倾角 φ_m ,在浮标横倾角达到极限静倾角之前,浮标处于稳定平衡状态;当浮标横倾角超过极限静倾角后,浮标处于不稳定平衡状态。静稳性曲线下降段复原力臂等于 0 m 时对应的浮标横倾角称为浮标稳性消失角。图 4 中,该浮标的极限静倾角约为 41° ,最大复原力臂约为 0.58 m,稳性消失角超过 90° 。《国内航行海船法定检验技术规则(2011)》[26]中对于海洋浮体结构的大倾角稳性的要求为横倾角等于 30° 处的复原力臂应不小于 0.2 m,最大

大复原力臂对应的横倾角应不小于 25° ,稳性消失角应不小于 55° 。将本文中的结果与标准要求比较分析,结果表明:本文设计的浮标完全满足技术规则的要求,具备足够的静稳性。

3.2.2 动稳性曲线

静稳性曲线的计算是假定浮标受到外力矩的缓慢作用产生横倾,并且倾斜过程中浮标的角速度一般认为近似等于零。但是,浮标在海洋中实际运行时,经常会受到阵风的突然吹袭和海浪的猛烈冲击等情况产生的外力矩作用。这种外力矩的突然作用会使浮标产生极快速的倾斜,这时浮标的角速度较大,不能忽略为零。在这种运动过程中,当复原力矩等于外力矩时,外力矩虽然已经不能使浮标继续倾斜,但是由于浮标具有一定的角速度,在惯性的作用下会继续倾斜。只有复原力矩做的功抵消外力矩做的功时,浮标的角速度才能变为零而停止倾斜,因此,该运动状态需进行动稳性计算来判断其稳性[29]。

浮标的动稳性以复原力矩所做的功来表示[30]。当浮标横倾至 φ_d 时,复原力矩 M_R 的变化规律由静稳性曲线表示,其做功计算公式为

$$T_R = V \cdot l_d = \int_0^{\varphi_d} M_R d\varphi = V \int_0^{\varphi_d} l_s d\varphi, \quad (9)$$

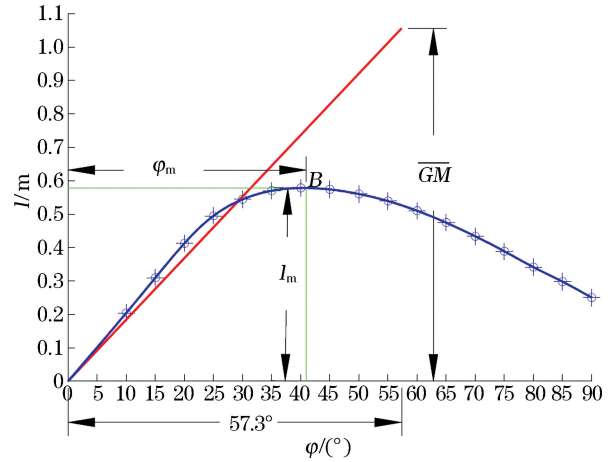
式中, V 为浮标排水量; l_d 为浮标动稳性力臂; l_s 为静稳性力臂。由式(9)可得出动稳性力臂 l_d 计算公式为 $l_d = \int_0^{\varphi_d} l_s d\varphi$, 因此,动稳性曲线是静稳性曲线的积分曲线,本文中计算所得动稳性曲线如图 5 中红线所示。

与静稳性曲线分析过程相同,动稳性曲线分析过程中也需求得最大动稳性横摇角 φ_0 , 其计算公式为

$$\varphi_0 = 15.28 C_1 C_4 \sqrt{\frac{C_2}{C_3}}, \quad (10)$$

式中, C_1, C_2, C_3 和 C_4 为系数,根据浮标的体积和质量参数查表[26]所得: $C_1 = 1.21$, $C_2 = 0.68$, $C_3 = 0.02$, $C_4 = 0.885$, 可求得最大动稳性横摇角 $\varphi_0 = 23.2^\circ$ 。

以纵轴为对称轴将动稳性曲线沿横坐标轴向负方向延长,如图 5 中蓝线所示。A 点为动稳定曲线延长线终点,其横坐标绝对值为最大动稳性横摇角 φ_0 。B 点纵坐标与 A 点相同,横轴与 A 点相距 1 rad (57.3°)。



注:蓝线为求得浮标的静稳性曲线;红线为其在原点处的斜率;
 $\overline{GM}$ 为初稳心高; φ_m 为极限静横倾角; l_m 为最大复原力臂

图 4 浮标静稳性曲线

Fig.4 Static stability curve of the buoy

C 点为动稳性曲线过 A 点的切线与横轴过 B 点的垂线的交点。线段 BC 长度即为最小倾覆力臂 l_q , 本文中浮标的最小倾覆力臂为 0.277 6 m。

动稳性曲线的重要应用是计算浮标的稳性衡准数 K [26], 其计算公式为

$$K = \frac{l_q}{l_f}, \quad (11)$$

式中, l_q 为最小倾覆力臂; l_f 为风压倾斜力臂, 计算公式为: $l_f = \frac{pA_f Z}{9810V}$, 其中, p 为计算风压, 根据浮标布放海域和风力作用力臂查表 [26] 所得; A_f 为浮标受风面积, 即浮标吃水线以上部分的侧投影面积, Z 为浮标受风面积中至吃水线的距离, 即风力作用力臂, V 为浮标排水量, A_f , Z 和 V 可通过浮标设计图统计所得。

经过计算, 文中浮标的风压倾斜力臂为 0.220 9 m。将已得的 l_q 和 l_f 代入式 (11) 求得本文浮标的稳性衡准数 $K = 1.26$, 满足《国内航行海船法定检验技术规则》[26] 中浮体稳性衡准数 ≥ 1 的要求, 该结果表明, 本文设计的浮标具备足够的动稳性。

4 结 论

以浮标工作的深远海环境参数和浮标的浮性参数为基础, 开展了浮标初稳性和大倾角稳性计算, 计算结果为: 浮标的初稳心高度为 1.056 m, 稳心半径为 1.033 m, 自由横摇固有周期为 5.2 s, 自由最大横摇角为 15.3° , 最大复原力臂为 0.58 m, 极限横倾角为 41° , 稳性消失角 $> 90^\circ$, 最小倾覆力臂为 0.27 m, 稳性衡准数为 1.26, 结果均优于《国内航行海船法定检验技术规则》对稳性的要求。这些结果表明: 本文设计的浮标具备足够的复原力矩, 有足够的抵抗倾斜力矩的能力, 避开了布放海区的主要波浪周期, 保证浮标遇到风浪不会剧烈地摇摆, 在大风、大浪的极限海况下, 浮标受风浪作用倾斜后具备足够的复原力矩, 以防止其倾覆。

影响浮标稳性的几个重要参数有: 浮标重心、浮标型宽、浮标排水、浮标受风面积和风力作用点等。在合理的范围内降低重心和增加排水有利于浮标初稳心高度、复原力臂和稳性消失角的提高。浮标型宽影响浮标的水线面积惯性矩、复原力臂和极限静倾角, 增大浮标型宽可以提高其水线面积惯性矩和复原力臂, 增加浮标初稳性, 但是会降低其极限静倾角, 降低浮标的静稳性。因此, 设计浮标时应在设计要求的范围内, 合理设置与组合浮标相关参数以达到最优的方案, 确保浮标具备足够的初稳性、静稳性和动稳性。在后续的工作中需要使用研制的浮标在港池或者近海开展验证试验, 通过实测浮标横摇和纵荡数据来验证浮标稳性理论计算是否正确。

参考文献 (References):

- [1] LI H Z, JIA W J, REN W, et al. Ocean observation with physical oceanographic sensors: status and development trend[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 43-47. 李红志, 贾文娟, 任炜, 等. 物理海洋传感器现状及未来发展趋势[J]. 海洋技术, 2015, 34(3): 43-47.
- [2] WANG Y, LI Y, GAO Y B. Discussion on development of operational ocean observing instruments (OOOI) in China: comparative analysis on differences, trends and countermeasures of OOOI in ocean station between China and the United States[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(3): 69-75. 王祎, 李彦, 高艳波. 我国业务化海洋观测仪器发展探讨——浅析中美海洋站仪器的差异、趋势及对策[J].

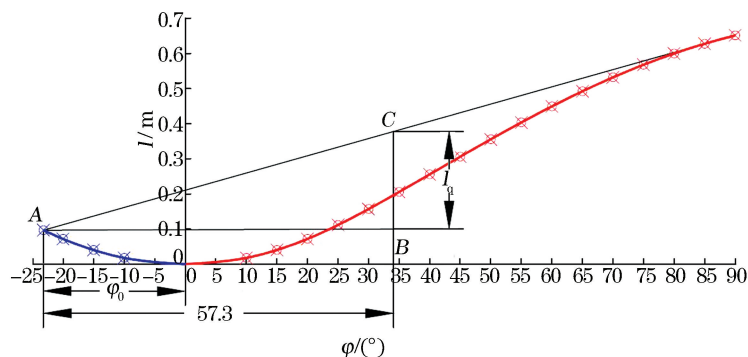


图 5 浮标动稳性曲线

Fig.5 Dynamic stability curve of the buoy

海洋学研究, 2016, 34(3): 69-75.

- [3] WANG B, LI M, LIU S X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2413. 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2413.
- [4] ZHAO C J, ZHOU Y. A survey of marine buoy monitoring system in China[J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(11): 13-18. 赵聪蛟, 周燕. 国内海洋浮标监测系统研究概况[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(11): 13-18.
- [5] HSU S A, HE Y J, SHEN H. Buoy measurements of wind-wave relations during hurricane Matthew in 2016[J]. Journal of Physical Oceanography, 2017, 47(10): 2603-2609.
- [6] SHI H D, HAN Z, ZHAO C Y. Numerical study on the optimization design of the conical bottom heaving buoy convertor[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 235-243.
- [7] ZHANG S W, YANG W C, XIN Y Z, et al. Prototype system design of mooring buoy for seafloor observation and construction of its communication link[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 83(Suppl.1): 41-49.
- [8] WANG Y L. Design of a cylindrical buoy for a wave energy converter[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 350-355.
- [9] KALIYAPERUMAL P, VENKATESAN, et al. Design, analysis and installation of offshore instrumented moored data buoy system[J]. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 2015, 4(4): 181-194.
- [10] ARANY L, BHATTACHARYA S. Simplified load estimation and sizing of suction anchors for spar buoy type floating offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 348-357.
- [11] VENKATESAN R, SANNASIRAJ S, RAMANAMURTHY M V, et al. Development and performance validation of a cylindrical buoy for deep-ocean tsunami monitoring[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(2): 415-423.
- [12] WANG Y, XIE X L, LI X J. Stability judgment of the semi-submersible vessel before laden[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(1): 113-116. 汪洋, 谢新连, 李晓君. 半潜船装载特定货物前初稳性高度可行域探讨[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(1): 113-116.
- [13] DENG L, XIAO ZH Y, WANF B, et al. Intact stability analysis of a semi-submersible platform for floating offshore wind turbines[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(10): 1359-1365. 邓露, 肖志颖, 王彪, 等. 半潜型浮式风力机平台的完整稳定性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(10): 1359-1365.
- [14] ZHAO R J, XIE X L, ZHANG S C, et al. Size optimization of multi-functional buoyancy tanks of semi-submersible repair vessels in floating conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(3): 555-561. 赵瑞嘉, 谢新连, 张思聪, 等. 半潜维修船上浮工况多功能浮力舱配置优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(3): 555-561.
- [15] TANG Y G, KUANG Y X, LI H X. The influence of metacentric height fluctuations on roll motion[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2): 22-28. 唐友刚, 阚艳香, 李红霞. 初稳性高时变特性对横摇运动的影响[J]. 中国造船, 2008, 49(2): 22-28.
- [16] JIA J B, ZONG Z, SHI H Q, et al. Study on the initial stability of asymmetric catamaran[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2008, 3(1): 13-17. 贾敬蓓, 宗智, 师华强, 等. 不对称型双体船初稳性研究[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(1): 13-17.
- [17] LU Y, GU X K, ZONG Z. Intact stability assessment of very large floating structures in waves[J]. Shipbuilding of China, 2015, 56(A01): 138-145. 陆晔, 顾学康, 宗智. 超大型浮体波浪中的完整稳性研究[J]. 中国造船, 2015, 56(A01): 138-145.
- [18] YUAN X, WANG J T. Design of boat hull marine data buoy[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2002, 20(2): 118-124. 袁新, 王景田. 船型海洋资料浮标的设计[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2): 118-124.
- [19] National Marine Standardization Technical Committee (SAC/TC 283). Small mooring buoy system for ocean observing: HY/T 143—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 6-8. 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 小型海洋环境监测浮标: HY/T 143—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 6-8.
- [20] WANG J C. Principle and engineering of ocean data buoy[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 130-177. 王军成. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 130-177.
- [21] LI L Q, XIONG Y, ZHANG W Q. The important method of monitoring sea and ocean environmental automatically: the mini and multi-parameter sea and ocean environmental monitoring buoy[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2004, 3(4): 20-25. 李林奇, 熊焰, 张文泉. 海洋环境自动监测的重要手段——小型多参数海洋环境监测浮标[J]. 气象水文海洋仪器, 2004, 3(4): 20-25.
- [22] WANG X F, LIU J K, WANG K, et al. Stability calculation of deformable ship[J]. Navigation of China, 2015, 38(1): 58-62. 王先锋, 刘敬贤, 王凯, 等. 基于可变形船模的稳性计算[J]. 中国航海, 2015, 38(1): 58-62.
- [23] HU L F, MA K, JI Z S, et al. Calculation method research on minimal initial stability height of damaged warship[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1225-1227. 胡丽芬, 马坤, 纪卓尚, 等. 破损舰船最小初稳性高计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1225-1227.
- [24] LI C, LI Y H, YI H. Study on the initial stability of canted strut SWATH[J]. Ship Engineering, 2009, 31(6): 6-8. 李岑, 李英辉, 易

- 宏. 斜支柱小水线面双体船初稳性特征研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(6): 6-8.
- [25] LI X J, XIE X L, ZHAO J B. The influencing factors of semi-submersible vessel's metacentric height limits and mechanism of action[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(1): 109-112. 李晓君, 谢新连, 赵家保. 影响半潜船初稳性高度限值因素及其作用机理[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 109-112.
- [26] Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Technical rules for statutory inspection of domestic navigating marine vessels[M]. Beijing: China Communication Press, 2011: 212-216. 中华人民共和国海事局. 国内航行海船法定检验技术规则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 212-216.
- [27] HU J K, LIN S F, CHEN Q L, et al. Research for the influences of load position on large angle stability of keel boat[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2016, 21(2): 130-135. 胡健康, 林少芬, 陈清林, 等. 荷载位置对龙骨帆船大倾角稳性影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2016, 21(2): 130-135.
- [28] HE J S, CHEN Z, XIAO X. Study on the stability at large angle of the pentamaran[J]. Ship Engineering, 2007, 29(5): 12-15. 贺俊松, 陈震, 肖熙. 五体船大倾角稳性研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(5): 12-15.
- [29] MA K, CHEN D Z. A correction method on the influence of free surface on great inclining angle stability[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(1): 1-7. 马坤, 陈德志. 自由液面对大倾角稳性的修正计算方法[J]. 中国造船, 2005, 46(1): 1-7.
- [30] SHENG Z B. Ship principle[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017: 23-122. 盛振邦. 船舶原理[M]. 2 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2017: 23-122.

Stability Design of Small Buoy for Marine Physical Property Monitoring

LIANG Guan-hui, XUE Yu-huan, SUN Bao-nan, TAO Chang-fei, GUAN Sheng, ZHOU Xing-hua

(First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: A small disc buoy with a diameter of 3 m is designed based on the principle of ocean data buoy and is to be used to carry the domestic marine meteorological and hydrological sensors for far-reaching marine application demonstration. In order to verify that the design of the buoy can meet the project application requirements, the environmental parameters of the buoy working area and the design parameters of the buoy, such as its mass, gravity center, buoyancy center, draft and drainage, are analyzed, and the stability calculations are completed by referring to the ship static principle and wave theory and calculating the initial stability and large dip stability of the buoy. The stability parameters of the buoy are thus obtained, which include initial stability center height, stability center radius, inherent period, free maximum roll angle, static stability curve, dynamic stability curve, maximum restoring force arm, ultimate static tilt angle, stability vanishing angle and stability criterion. By analyzing all the parameters, it is shown that the design of the buoy fully meets the requirements of the “Technical Rules for Statutory Inspection of Domestic Navigating Vessels (2011)” for the stability of ocean buoys, indicating that the design of the buoy is reasonable in parameters and feasible in scheme, and can be applied to the buoy development of the project.

Key words: marine physical parameters monitor; small buoy; initial stability; static stability; dynamic stability

Received: August 19, 2019