

研究论文

# 应用于海洋物性监测仪的小型浮标水动力分析

梁冠辉<sup>1</sup>, 孙宝楠<sup>1,2\*</sup>, 薛宇欢<sup>1,2</sup>, 陶常飞<sup>1</sup>, 官 晟<sup>1,2</sup>, 周兴华<sup>1</sup>

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 为验证研制的国产气象水文传感器的性能, 设计了直径 3 m 的圆盘式小型浮标, 拟搭载所有传感器在 2 000 m 以深海域开展应用试验。统计了试验海域的有义波高、波浪周期、最大风速和表层流速等环境参数, 计算了浮标的质量、重心、吃水、受力投影面积和惯性矩等设计参数。以三维势流理论和波浪辐射-绕射理论为基础, 使用 AQWA 软件在频域内对浮标进行水动力计算, 仿真了浮标工作时所受的一阶波浪力、附加质量、附加阻尼和运动幅值响应因子, 通过仿真结果对浮标设计方案进行优化, 优化后的浮标计算结果随波浪频率变化平缓, 幅值合理且无激增点, 表明该浮标与工作海域内的波浪没有发生明显谐振, 对环境载荷有足够的承受能力, 方案可用于浮标研制。

**关键词:** 浮标; 势流; 水动力; 频域分析; 耐波

**中图分类号:** TP23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2021)01-0136-10

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.014

**引用格式:** LIANG G H, SUN B N, XUE Y H, et al. Hydrodynamic analysis of small buoy applied to marine physical parameters monitor[J]. *Advance in Marine Science*, 2021, 39(1): 136-145. 梁冠辉, 孙宝楠, 薛宇欢, 等. 应用于海洋物性监测仪的小型浮标水动力分析[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(1): 136-145.

为验证国产气温、气压、相对湿度、风场、雨量、太阳辐射、水温和海流等气象水文传感器的性能指标<sup>[1-3]</sup>, 拟采用小型海洋浮标为平台搭载所有传感器在 2 000 m 以深海域开展 1 a 以上的示范试验。试验中浮标的运输和布放要求浮标小型化和轻便化, 长期海洋试验又要求浮标具有足够的外形尺寸和质量来抵抗风、浪、流等环境载荷的影响。合理地设计浮标的外形尺寸和质量等属性既可以提高浮标数据采集精准度和浮标安全性, 防止浮标出现倾覆、走锚以及断链等事故<sup>[4-5]</sup>, 也可以降低试验成本。考虑浮标的运输、布放要求和布放海域的水文气象条件, 设计了直径 3 m 的小型海洋浮标。为保证浮标设计方案能满足试验要求, 本文将研究其水动力特性, 计算环境载荷对浮标的影响<sup>[6-7]</sup>。

目前, 海洋结构物水动力研究方法主要包括: 流固耦合分析法、三维势流理论分析法和多体动力学分析法, 其中三维势流理论分析法以其模拟准确度高、计算速度快和软件模块成熟的优势被国内外研究者广泛应用于舰船、海洋平台和海洋浮标等水动力模拟工作中<sup>[8-10]</sup>。Chiemela 等使用三维势流理论, 模拟计算了悬链线锚腿系泊浮标在 3 个不同环境条件海域内的水动力特性, 并确定了浮标的运动幅值响应算子<sup>[11]</sup>; Hamidreza 等运用三维势流理论和莫里森公式按照形状和尺寸对半潜平台各个组成部分进行了综合水动力模拟, 应用 JONSWAP 波谱和 API 风谱作为环境条件对半潜式平台在风浪联合作用下的频域响应和时域响应进行了分析, 确定了浮标尺寸和系缆长度对半潜式平台动力响应的影响<sup>[12]</sup>; 张炳夫等运用三维势流理论在频域内计算了规则波中系泊浮体的运动幅值响应算子, 通过频时转换法在时域内求得系泊浮体在不规则波

**收稿日期:** 2019-09-03

**资助项目:** 重大科学仪器设备开发专项——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

\* **通信作者:** 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

(王佳实 编辑)

中的一阶波浪力和二阶波浪力,并将理论计算结果与模型试验结果进行了对比,验证了所采用的理论计算方法准确可靠<sup>[13]</sup>;缪泉明等运用三维势流理论计算了极限海况下具备三锚系直径 10 m 的海洋浮标在 2 种水深条件下的附加质量、阻尼系数以及运动响应,并估算了锚链的受力,为浮标和锚系的设计提供了参考<sup>[14]</sup>。本研究在设计直径 3 m 的小型浮标过程中,基于海洋物性监测仪深远海试验海域的环境条件,运用三维势流理论和波浪辐射和绕射理论对设计的浮标开展水动力频域计算,通过仿真结果对设计方案进行优化。由于势流理论对于流体的无黏处理,本文通过仿真过程对计算结果进行了阻尼修正,提高计算结果的准确性<sup>[15]</sup>。

## 1 计算原理及方法

### 1.1 势流理论假设与边界

浮标频域仿真结果主要受海域环境载荷和浮标质量、外形等属性的影响,但受海水表面黏性摩擦力影响较小,可以忽略。三维势流理论的基本理论将流体假设为无黏、无旋和不可压缩的,适合本试验中浮标的频域仿真计算。在三维势流理论中,一般采用莫里森公式计算细长杆件,而本研究中的浮标外形尺寸不属于细长杆件,且浮标的垂荡运动响应是重要计算结果之一,因此本文采用波浪辐射和绕射理论对浮标运动响应进行计算。

势流速度场是标量函数(即速度势)的梯度,流场的边界由物面边界、流体自由面、海底界面和无穷远处柱面构成<sup>[16-17]</sup>。需满足的边界条件有:1)拉普拉斯方程: $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$ ; 2)海底边界条件: $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ ,  $z = -h$ ; 3)自由表面条件: $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ ,  $z = 0$ ; 4)浸没物体表面条件: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 v_j f_j(x, y, z)$ ; 5)辐射条件:辐射波无穷远处速度势趋近于 0,即  $\lim_{R \rightarrow \infty} \varphi = 0$ 。在上述边界条件中, $\varphi$  为速度势函数; $x, y$  和  $z$  为坐标轴; $t$  为时间; $n$  物体表面外法向矢量; $h$  为水深; $j=1, 2, 3, 4, 5$  和 6 分别代表物体的横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡和垂荡六个运动模态; $v_j$  为第  $j$  个运动模态时物体表面流速矢量; $f_j(x, y, z)$  为第  $j$  个运动模态时物体表面的流线函数; $R$  为流场与物体表面距离。

### 1.2 波浪力

由线性化的伯努利方程可求得结构物表面水动力压力( $p$ )为

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (1)$$

根据水动力压力性质不同,可将其分为 3 个部分:入射势所引起的 Froude-Kriloff 力( $F_{fk}$ )、辐射势所引起的辐射力( $F_d$ )以及绕射势引起的波浪绕射力( $F_r$ )。一般将 Froude-Kriloff 力与波浪绕射力( $F_r$ )合称为一阶波浪力( $F_1$ )<sup>[18-19]</sup>,计算公式为

$$F_{1i} = F_{fki} + F_{ri} = \rho i \omega \iint_{S_0} \varphi_{\omega} n_i ds + \rho i \omega \iint_{S_0} \varphi_d n_i ds, \quad (2)$$

式中, $\rho$  为流体密度; $i=1, 2, 3, \dots, 6$  为相应的运动模态; $n_i$  为广义单位法线矢量的各分量; $\omega$  为浮标震荡的圆频率。

### 1.3 幅值响应算子(RAO)

浮体运动幅值响应算子(Response Amplitude Operators, RAO)是由波浪激励到浮体运动的传递函数,指浮体对应自由度运动幅值与波幅的比,表明在线性波浪作用下浮体的运动响应特征。以浮标的横摇运动为例,横摇  $RAO(RAO_{roll})$  为浮体在单位波幅规则波作用下关于波浪频率的横摇运动幅值函数<sup>[20-21]</sup>,计算公式为

$$RAO_{\text{roll}} = \frac{\theta_x}{\xi_a} = DAF_{\text{roll}} \frac{\omega^2}{g} 57.3 \sin \beta, \quad (3)$$

式中,  $\theta_x$  为浮体横摇运动幅值;  $\xi_a$  为入射波波幅, 即规则波单位波幅;  $g$  为重力加速度;  $DAF_{\text{roll}}$  为横摇运动方程得到的动力放大系数;  $\omega$  为入射波圆频率;  $\beta$  为入射波角度。

## 2 水动力分析

AQWA(Advanced Quantitative Wave Analysis)软件可解决浮体在环境载荷下的运动响应,在频域内的水动力分析可求解浮体的附加质量、附加阻尼、一阶波浪力和幅值响应算子等,其理论之一为三维势流辐射-绕射理论,可用于本文浮标频域仿真,计算和输出相应的水动力结果<sup>[22-25]</sup>。

### 2.1 浮标参数及建模

采用直径 3 m 的小型海洋资料浮标作为国产传感器深远海试验平台,该种型号的浮标具备造价低、承载能力强、易于运输和布放等优点。利用三维制图软件 SolidWorks 设计了浮标的上架、浮体和下架的并将三者进行了装配,通过软件统计了浮标的设计参数(表 1)。设计的浮标体上架和下架结构复杂不规则,为了提高 AQWA 软件对浮标进行水动力分析时的运行速度,在该软件里进行浮标建模时综合考虑浮标上架和下架的外形尺寸、受力投影面积和受力作用点等因素对浮标上架和下架进行简化。将浮标简化后的三维图导入 AQWA 后,首先进行水线切割,然后按照浮标设计参数设置全局变量和浮体的质量信息,最后考虑到频域计算时程序允许的频率范围和计算精度,按照 0.3 m 的网格大小对浮体进行网格划分以完成浮标建模。浮标设计图与浮标网格划分结果如图 1 所示。浮标在海水中沿着 3 个坐标的平移和绕着 3 个坐标轴的转动,

表 1 浮标主要参数

Table 1 Main parameters of buoy

要素	参数	要素	参数	要素	参数
直径/m	3	水上浮体受力投影面积/m <sup>2</sup>	1.25	质量/kg	3 046.13
水下浮体受力投影面积/m <sup>2</sup>	0.82	重心高度/m	1.233	下架受力投影面积/m <sup>2</sup>	1.71
浮心高度/m	1.256	X 轴转动惯量(重心)/(kg·m <sup>2</sup> )	2 393.873	吃水高度/m	1.552
Y 轴转动惯量(重心)/(kg·m <sup>2</sup> )	2 393.843	上架受力投影面积/m <sup>2</sup>	2.04	Z 轴转动惯量(重心)/(kg·m <sup>2</sup> )	1 941.247

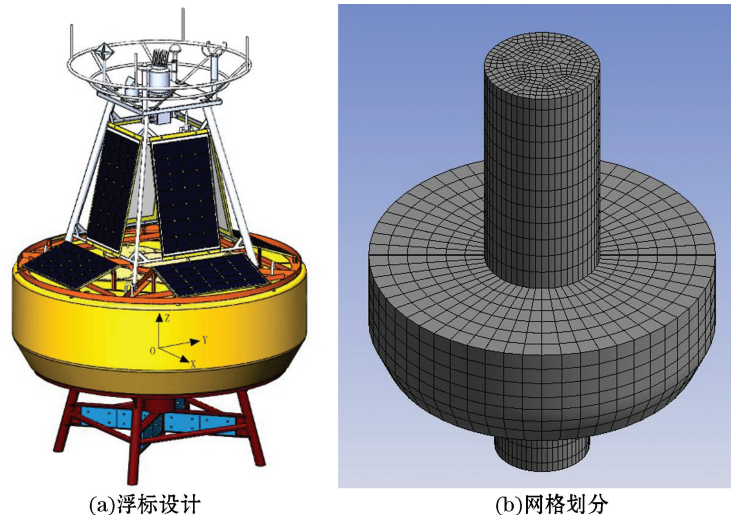


图 1 浮标设计与浮标建模网格划分

Fig.1 The buoy design and mesh of the buoy model

共有 6 个自由度的运动,分别称为横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇以及艏摇,坐标原点为浮标重心。由于浮标几乎左右对称,所以仅研究浮标横荡、横摇、垂荡和艏摇四个自由度的运动特征即可。浮标在海水中沿着 X, Y, Z 三个坐标的平移和绕着 3 个坐标轴的转动,共有横荡、纵荡、垂荡和横摇、纵摇以及艏摇六个自由度的运动,坐标原点为浮标重心。由于浮标几乎左右对称,所以水平方向仅研究浮标横荡和横摇运动;浮标的艏摇运动受波浪影响较小,因此在垂向上研究浮标的垂荡运动。

## 2.2 环境边界条件

### 2.2.1 工作海域环境参数

国产海洋气象水文传感器的深远海试验拟在我国南海开展,浮标设计与水动力计算时既要考虑南海海域常见的环境参数,也要考虑浮标运行时可能遇到的最恶劣环境。本文参考海洋行业标准《小型海洋资料浮标》<sup>[25]</sup>(HY/T 143—2011)和《海洋资料浮标原理与工程》<sup>[26]</sup>对于浮标极限生存环境参数的要求,结合南海的实际海况,提出海洋物性监测仪浮标平台的试验海域极限环境参数如表 2 所示。

表 2 浮标试验海域极限环境参数

Table 2 Buoy limit living environment parameters

要素	参数	要素	参数	要素	参数
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	60	波浪周期/s	12	波浪波长/m	224
有效波高/m	15	最大波高/m	20	表层流速/(m·s <sup>-1</sup> )	3.5
环境温度/°C	20~50	相对湿度/%	0~100		

注:空白处无数据

### 2.2.2 风载荷

风载荷主要作用位置为浮标上架安装的太阳能电池板和传感器以及浮体露出水面的部分,风载荷的大小取决于浮标受风部分的投影面积和等效形状、风力作用点的高度以及相应高度下的风速<sup>[28]</sup>,计算公式如下:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_h C_s A_w V_h^2, \quad (4)$$

式中, $F_w$ 为风载荷, $\rho$ 为海面空气密度(1.29 kg/m<sup>3</sup>), $A_w$ 为受风部分的投影面积, $C_h$ 为风力高度系数,查表取 $C_h=1$ <sup>[29]</sup>, $C_s$ 为受风部分的风力形状系数,查表取 $C_s=0.5$ , $V_h$ 为高度 $h$ 处对应的平均风速。

### 2.2.3 流载荷

海流因素同样是海洋浮标设计计算中的重要环境因素之一,海流对浮标主要影响表现为拖曳力<sup>[29]</sup>,海流载荷的计算公式为

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_d A_c V_c^2, \quad (5)$$

式中, $F_c$ 为海流载荷; $\rho$ 为海水密度(1 025 kg/m<sup>3</sup>); $C_d$ 为海水拖曳力系数, $C_d=1.6$ <sup>[30]</sup>;  $A_c$ 为浮标海流载荷受力投影面积; $V_c$ 为海流流速。

### 2.2.4 波浪谱参数设置

对浮标进行水动力分析时需选择合适的波浪谱,波浪经研究和观测被认为是一个广义的随机平稳过程,运用统计学方法可以用波浪谱的形式进行描述,波浪谱是波浪能量随不同频率(波数)、方向的分布<sup>[31-33]</sup>。

AQWA 中内置了 JONSWAP 谱和 P-M 谱算法。与 P-M 谱相比, JONSWAP 谱是在中等风况和有限风距的条件下测量修正得的,使用经验表明, JONSWAP 谱是一种更普遍的波浪谱形式,可以适用于不同形成阶段的风浪<sup>[34-37]</sup>,因此本文计算浮标水动力采用 JONSWAP 谱,在软件中通过设置最低频率、最高计算频率、需计算的波浪方向和波浪方向间隔等参数完成波浪谱的配置,软件中以 X 轴为波浪正方向,沿逆时针方



向计算。在输出浮标表面压力和运动参数等结果时,可通过设置波浪的有效波高来输出不同能量波浪对浮标水动力特性产生的影响。

### 2.3 水动力计算结果

#### 2.3.1 阻尼修正

三维势流理论的基本假设为流场中流体具备无旋、无黏和不可压缩的特点,因此使用 AQWA 软件对浮标进行水动力计算时会忽略海水黏性对浮标运动时产生的附加阻尼等影响,从而降低了水动力计算结果的准确性。因此,为了更准确地计算浮标的水动力性能,必须对三维势流理论的计算阻尼进行修正<sup>[38-39]</sup>,即在参数设置时添加阻尼系数,以横摇运动为例,浮标单自由度运动临界阻尼计算公式为

$$D = 2 \sqrt{(I_{xx} + \Delta I_{xx})K_R}, \quad (6)$$

式中, $D$  为临界阻尼, $I_{xx}$  为横摇方向惯性矩, $\Delta I_{xx}$  为附加质量惯性矩, $K_R$  为横摇方向刚度。附加质量惯性矩与横摇方向刚度可从静水计算结果中提取。

#### 2.3.2 一阶波浪力

计算浮标受的一阶波浪力时,选择波浪的入射方向为  $RX$  方向,分别统计沿着波浪入射方向( $RX$  方向)、垂直波浪入射方向( $RZ$  方向)和垂向( $Z$  方向)的计算结果(图 2)。在所有波浪入射方向中浮标沿着波浪入射方向受的一阶波浪力最大,垂直波浪入射方向浮标受的一阶波浪力最小。

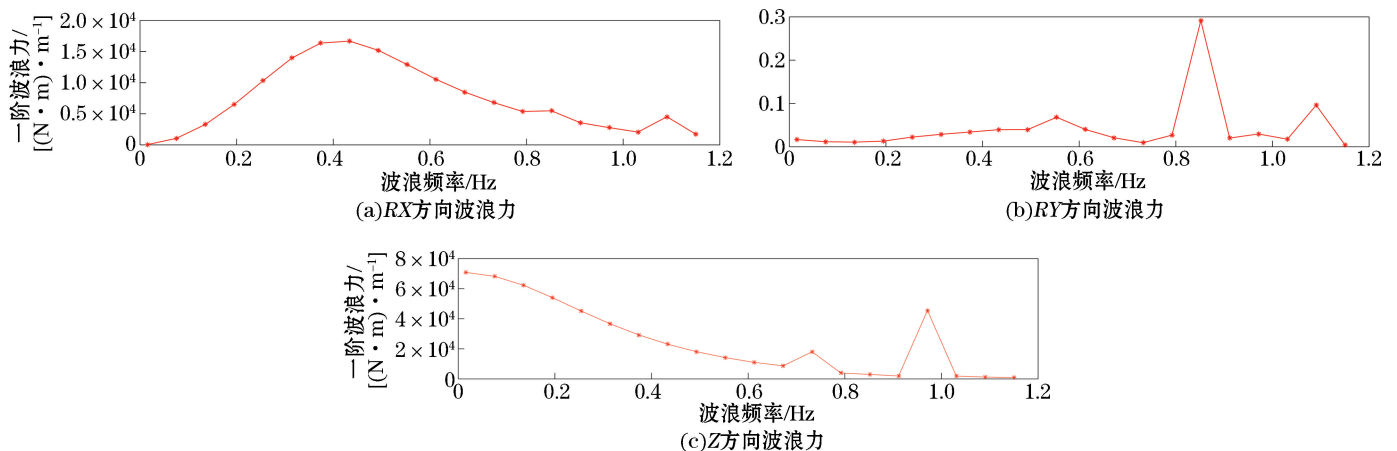


图 2 浮标各个方向波浪力

Fig.2 Wave forces in all directions of buoys

$RX$  方向受到的一阶波浪力随着波浪频率的增加呈现先增大后减小的趋势; $RZ$  方向受到的一阶波浪力与  $RX$  方向相差 5 个数量级,说明垂直波浪入射方向产生的波浪力几乎对浮标没有影响,在水平方向上随着与波浪入射方向夹角增大,一阶波浪力对浮标的影响逐渐减小; $Z$  方向上的波浪力随着波浪频率的增大而逐渐减小。布放海域的波浪频率集中在  $0.02 \sim 0.33$  Hz 范围内,该频率范围内  $RX$  方向每单位有义波高的波浪力最大值为  $14\,421.07$  N,并未达到整个频谱范围内的最大值,没有倾覆的危险; $Z$  方向上的波浪力在波浪频率集中范围内的每单位有义波高的波浪力最大值为  $70\,791.25$  N,通过该值可选择合适破断力的锚系,防止浮标出现断锚、走锚的危险。

#### 2.3.3 附加质量和附加阻尼

附加质量和附加阻尼是浮标强迫简谐运动的稳态水动力和力矩,是由浮标在海水中强迫运动引起海水振荡并在浮标表面产生压力引起的。附加质量反映了浮标在海水表面做摇荡运动迫使浮标周围海水动量发生变化而对浮标产生的反作用力。附加阻尼是由于浮标在海水表面受波浪力进行运动后,在浮标周围生成向外扩散的辐射波以海水阻尼的形式反作用于浮体。

根据浮标的外形特点和浮标工作时的受力分布,选择横荡(X方向)、横摇(RX方向)和垂荡(Z方向),并分别统计附加质量和附加阻尼的计算结果(图3和图4)。由图3和图4可见,浮标在海水中各个方向附加质量和附加阻尼随着波浪频率的变化曲线,各个方向附加质量随着波浪的频率增加略有增加后平缓减小,其作用主要体现在低频波浪时;附加阻尼在X方向和RX方向主要作用于高频波浪时,Z方向上随波浪频率增加先增大后减小,作用频带较窄。综上,浮标在各个主要方向上受到的附加质量和附加阻尼随波浪频率变化平缓、幅值合理,说明设计的浮标在海洋中工作时受到的附加质量和附加阻尼会对浮标的运动产生一定的抑制作用,但是不会对浮标运行时的水动力性能产生过度的影响。

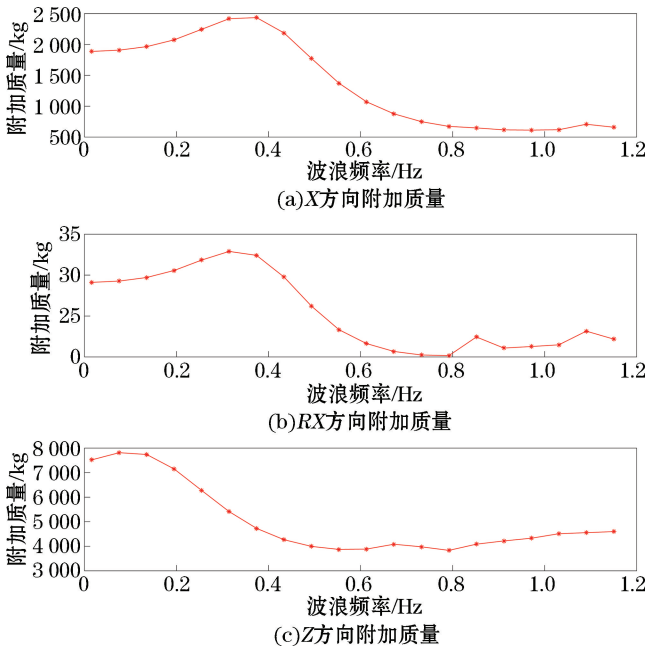


图3 浮标各个方向附加质量  
Fig.3 Add mass of the buoy in three directions

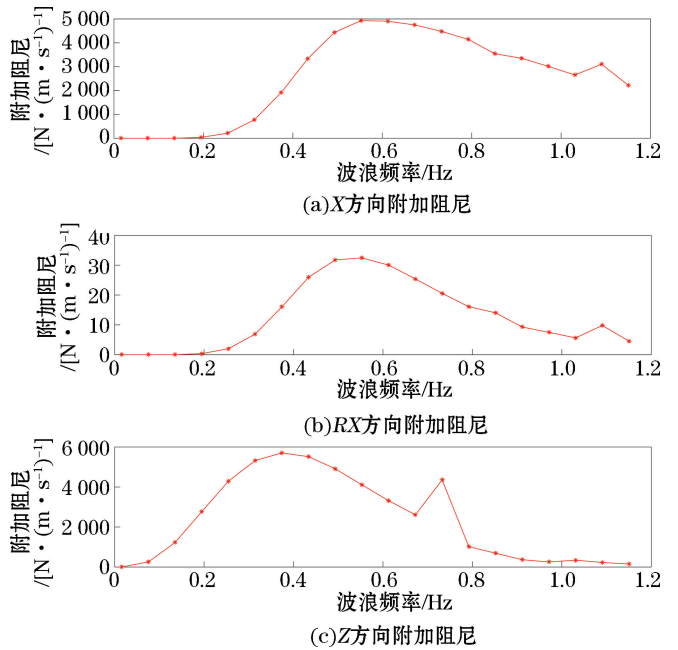


图4 浮标各个方向附加阻尼  
Fig.4 Rotation damping of the buoy in three directions

### 2.3.4 RAO

图5为浮标水平方向和垂向的RAO值随波浪频率变化曲线,水平方向选取了横摇和横荡两个方向,垂向选择的垂荡方向,浮标垂向基本左右对称,故不考虑浮标艏摇RAO。当入射波与横摇方向垂直时,横摇方向上的RAO值最大,所以统计RX方向RAO值时设置入射波方向为90°;当入射波与横荡方向相同时,横荡方向上的RAO值最大,所以统计X方向RAO值时设置入射波方向为0°;Z方向RAO值与波浪入射方向无关。

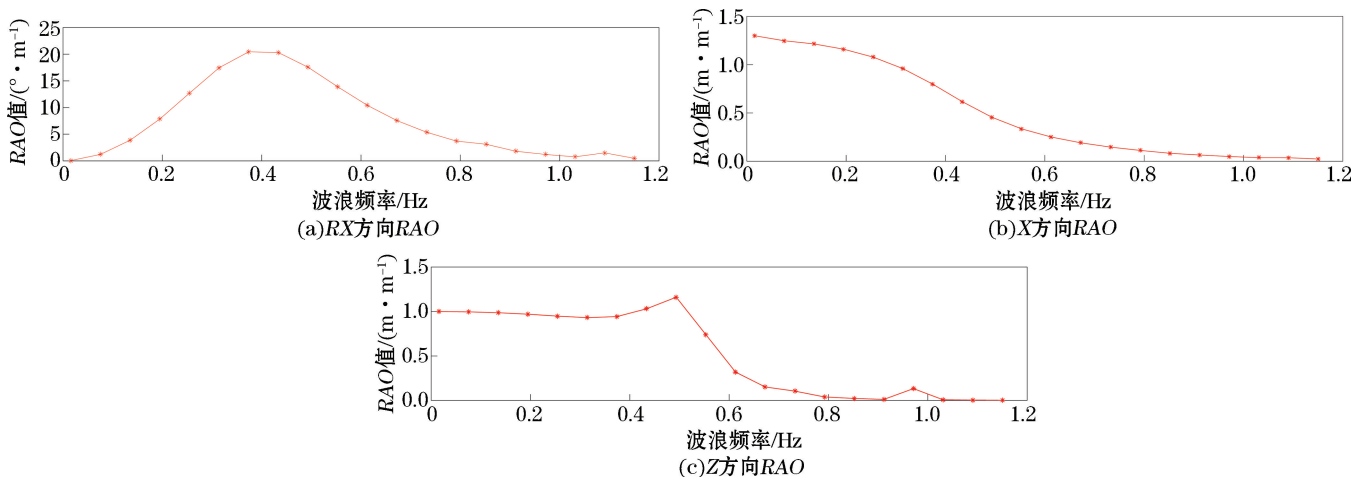


图5 浮标横摇、横荡和垂荡RAO  
Fig.5 Roll, swaying and heave RAO of the buoy

在横摇方向上,RAO 值随着波浪频率的增大先增大后减小,主要响应频率范围为 0.19~0.67 Hz,最大值出现在波浪频率为 0.37 Hz 处,最大幅值为  $20.45^{\circ}/\text{m}$ ,其他频率范围内均幅值较小且变化平缓;X 方向的 RAO 值基本随着波浪频率增大而平缓减小,且幅值合理;Z 方向的 RAO 值在 0.49 Hz 处出现一个小幅度的增大后也逐渐减小,但部分曲线存在小幅值奇点,说明浮标下架结果还存在改进之处。

从 3 个运动自由度的 RAO 值随波浪频率的变化趋势和幅值极值等统计信息可以看出该浮标在各个方向上的结构设计较为合理,能够保证海洋中的浮标遇到不同频率的波浪时产生符合预期的运动响应。

### 3 结 语

本文以三维势流理论和波浪辐射-绕射理论为基础,综合考虑相关浮标设计标准的要求和项目示范试验海域的海况,使用 AQWA 软件对设计的 3 m 海洋资料浮标的水动力性能进行了频域分析,选取浮标运行时具有代表性的运动自由度方向,仿真和统计了各个方向上浮标的一阶波浪力、附加质量、附加阻尼和幅值响应算子随波浪频率的变化曲线。

分析一阶波浪力、附加质量和附加阻尼的曲线可知,浮标受到的一阶波浪力随着波浪频率变化较为平缓,各个受力方向上未出现受力激增的情况。浮标受到的附加质量力和阻尼力幅值合理,在一定程度增加了浮标的稳定性。在幅值加应算子响应分析中发现,浮标在工作时垂荡和横摇方向耐波性良好,工作时不会随波高的变化发生较大位移。以上计算结果的曲线变化率和幅值极值等统计特性表明,设计的浮标在波浪频率范围内受力合理,运动响应符合设计要求,具备足够的耐波性,能够稳定可靠的完成项目示范试验。

#### 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 W, 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 伟, 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]. 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(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(11): 13-18.
- [5] 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.
- [6] SHENG Z B. Ship principle[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017: 23-122. 盛振邦. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017: 23-122.
- [7] MIAO Q M, GU M, YANG Z M, et al. Estimation of buoy motions and chain forces in extreme sea state[J]. Journal of Ship Mechanics, 2003, 7(5): 21-27. 缪泉明, 顾民, 杨占明, 等. 极限海况下浮标运动及锚链受力估算[J]. 船舶力学, 2003, 7(5): 21-27.
- [8] LÜ H B, QUAN X B, YIN Y Y, et al. Dynamic response research of underwater vehicle with consideration of hydroelasticity[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(3): 350-356. 吕海波, 权晓波, 尹云玉, 等. 考虑水弹性影响的水下航行体结构动响应研究[J]. 力学学报, 2010, 42(3): 350-356.
- [9] YU J X, HAN T, LI L Q, et al. Current status of hydrodynamic characterization of ocean data buoys[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2017(4): 61-67. 余建星, 韩彤, 李林奇, 等. 海洋资料浮标水动力特性研究现状分析[J]. 海洋湖沼通报, 2017(4): 61-67.
- [10] LI H Y, LIU S T, WANG X, et al. Hydrodynamic analysis and wave load forecast for the offshore marine instrument and equipment testing platform[J]. Ocean Technology, 2016, 35(6): 21-25. 李宏源, 刘松堂, 王鑫, 等. 海洋仪器装备测试平台水动力分析及波浪载

- 荷预报[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(6): 21-25.
- [11] CHIEMELA V A, WANG F C, HOU X N, et al. Strength of submarine hoses in Chinese-lantern configuration from hydrodynamic loads on CALM buoy[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 429-442.
- [12] HAMIDREZA G, MORTEZA D. Parametric study of catenary mooring system on the dynamic response of the semi-submersible platform[J]. Ocean Engineering, 2018, 153: 319-332.
- [13] ZHANG B F, QIAN K. Research on the motion response of mooring body in shallow water[J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(5): 32-35. 张炳夫, 钱昆. 系泊浮体在浅水波浪中运动响应的计算研究[J]. 船海工程, 2010, 39(5): 32-35.
- [14] MIAO Q M, GU M, YANG Z M, et al. Estimation of buoy motions and chain forces in extreme sea state[J]. Journal of Ship Mechanics, 2003, 7(5): 21-27. 缪泉明, 顾民, 杨占明, 等. 极限海况下浮标运动及锚链受力估算[J]. 船舶力学, 2003, 7(5): 21-27.
- [15] ZHANG J M, FAN X T, ZHAO Q, et al. Hydrodynamic characteristics simulation for ocean data[J]. Shandong Science, 2015, 28(4): 8-13. 张继明, 范秀涛, 赵强, 等. 频域内海洋资料浮标水动力特性的仿真研究[J]. 山东科学, 2015, 28(4): 8-13.
- [16] WANG X, SHEN Q, WANG G D, et al. Dynamic response of multi-floating-body system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(4): 368-374. 王翔, 沈庆, 王广东, 等. 锚泊多浮体系统动态响应. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(4): 368-374.
- [17] YU J X, DU Z F, TAN Z D, et al. Floating bodies connecting of new-style mobile offshore pier system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2008, 41(10): 1233-1237. 余建星, 杜尊峰, 谭振东, 等. 新型移动式栈桥码头浮箱拼接方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2008, 41(10): 1233-1237.
- [18] JI H T, FAN J, HUANG X L. Calculation of hydrodynamics and motion responses of two hinged plates[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(4): 552-555. 纪亨腾, 范菊, 黄祥鹿. 铰接板的水动力计算与运动响应[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(4): 552-555.
- [19] ZHANG J F. The hydrodynamic analysis and mooring calculation of wave piercing buoy[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. 张剑锋. 穿浪式浮标水动力分析与系泊计算[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [20] LI Q C, CHEN B, LIU Y N. Optimization analysis on the mooring system of a new type of Semi-Spar wind turbine platform[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(4): 86-90. 李秋辰, 陈兵, 刘雅楠. 一种新型 Semi-Spar 式海上风机平台系泊系统优化分析[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(4): 86-90.
- [21] KUANG X F, MIAO Q M, XIANG X. Motion responses of ship to ship operation in waves[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(B11): 6-14. 匡晓峰, 缪泉明, 向旭. 船舶在波浪中靠帮运动理论预报[J]. 中国造船, 2005, 46(B11): 6-14.
- [22] HUANG W, FENG Y W, ZHANG H L. Mechanical Properties and optimal arrangement of group piles acted by wave forces[J]. Bridge Construction, 2016, 46(3): 51-56. 黄雯, 冯谊武, 张海龙. 波浪作用下的群桩受力及优化布置[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 51-56.
- [23] XIAO L F, YANG J M, HU ZHI Q. Analysis on the low frequency response of a single point moored FPSO in ultra-shallow water[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010(4): 372-378. 肖龙飞, 杨建民, 胡志强. 极浅水单点系泊 FPSO 低频响应分析[J]. 船舶力学, 2010(4): 372-378.
- [24] LIN J R, SHI L G, YOU G H, et al. The method for evaluating the design wave loads on SWATH ship[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(3): 104-111. 林吉如, 石理国, 尤国红, 等. 小水线面双体船波浪设计载荷估算方法[J]. 中国造船, 2008, 49(3): 104-111.
- [25] National Marine Standardization Technical Committee. Small mooring buoy system for ocean observing: HYT 143—2011[S]. Beijing: State Oceanic Administration, 2011: 6-8. 全国海洋标准化技术委员会. 小型海洋环境监测浮标: HYT 143—2011[S]. 北京: 国家海洋局, 2011: 6-8.
- [26] 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.
- [27] JIANG D, ZHANG J F, MA L H, et al. The hydrodynamic analysis of the new type wave piercing buoy[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(4): 622-627. 江东, 张剑锋, 马来好, 等. 新型穿浪式浮标的水动力性能分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(4): 622-627.
- [28] CHEN Z W, YAN N, CAI Q W. The motion response of a new type ocean engineering vessel in regular waves based on AQWA[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017(z1): 258-264. 陈振伟, 严宁, 蔡倩雯. 基于 AQWA 计算规则波中新型海工船的运动响应[J]. 船舶力学, 2017(z1): 258-264.
- [29] GAO W. ANSYS AQWA software introduction and improvement[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018: 58-59. 高巍. ANSYS AQWA 软件入门与提高[M]. 北京: 中国水利出版社, 2018: 58-59.
- [30] SUN C. The design of buoy body “Bai Long” and its dynamics analysis [D]. Hangzhou: Dalian Hangzhou Dianzi University, 2014. 孙辰. “白龙”浮标标体设计及动力学分析[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [31] YAN H S, XU Y, ZHANG Y S, et al. The research of wind loading for the SPAR Loadout[J]. Ocean Engineering, 2012, 30(3): 131-



136. 闫宏生, 徐燕, 张英晟, 等. SPAR 平台拖拉装船作业风荷载计算研究[J]. 海洋工程, 2012, 30(3): 131-136.
- [32] NI X Y, CHEN J F, NI Y, et al. Research on numerical simulation method applied in wind and current loads evaluation of ship[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013(4): 408-413. 倪歆韵, 陈江峰, 倪阳, 等. 船舶风荷载和流荷载数值模拟计算方法研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2013(4): 408-413.
- [33] ZHU Y R, XIE J. Research on applicability of wave spectra in marine engineering[J]. Haiyang Xuebao, 1995, 17(6): 126-131. 竺艳蓉, 谢峻. 各种波浪谱在海洋工程中适用性的研究[J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 126-131.
- [34] HE X X, LI H N. Suppression of random wave-induced vibrations in offshore platform by tuned liquid column damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(1): 71-78. 何晓宇, 李宏男. 波浪荷载作用下导管架海洋平台利用 TLCD 的振动控制[J]. 振动工程学报, 2008, 21(1): 71-78.
- [35] YAN G W, OU J P. Dynamic response analysis of TLP based on AQWA[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009(Suppl.2): 304-310. 闫功伟, 欧进萍. 基于 AQWA 的张力腿平台动力响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009(增刊 2): 304-310.
- [36] SHI H D, LIU D, LIU Z. Calculation of the motion response of a novel wave energy convertor[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2011, 41(10): 111-116. 史宏达, 刘栋, 刘臻. 一种新型波能发电装置的运动响应计算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(10): 111-116.
- [37] LIU Z, HUANG W P. Dynamic response analysis of S-Spar platform based on AQWA[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(1): 48-56. 刘震, 黄维平. 基于 AQWA 的 S-Spar 平台动力响应分析[J]. 船舶力学, 2016, 20(1): 48-56.
- [38] CHEN X J, MIAO Y J, SHEN H P, et al. Hydrodynamic responses analysis of floating structure with legs by using AQWA software [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(1): 34-40. 陈徐均, 苗玉基, 沈海鹏, 等. 基于 AQWA 的带支腿浮式结构的水动力特性分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(1): 34-40.
- [39] CHEN B, YU Z Y, LI X J. Research on the added mass of semi-submersible drilling platform based on numerical simulation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(11): 1400-1411. 陈博, 喻志勇, 李骁健. 基于数值模拟的半潜式钻井平台附加质量研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(11): 1400-1411.

## Hydrodynamic Analysis of Small Buoy Applied to Marine Physical Parameters Monitor

LIANG Guan-hui<sup>1</sup>, SUN Bao-nan<sup>1,2</sup>, XUE Yu-huan<sup>1,2</sup>, TAO Chang-fei<sup>1</sup>,  
GUAN Sheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Xing-hua<sup>1</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)*

**Abstract:** A 3 m diameter disc buoy was designed in order to verify the performance of the domestic meteorological and hydrological sensors. It is planned to carry out the application test of all the sensors in the sea area with a depth of more than 2 000 m. The environmental statistics of the sea area where the buoy will be deployed, such as wave height, wave period, maximum wind speed and surface velocity, are proposed. The design parameters of the buoy, such as mass, center of gravity, draft, projection area of the external force and moment of inertia, are calculated. The hydrodynamic calculation of the buoy is carried out in the frequency domain by using AQWA software based on the three-dimensional potential flow theory and wave radiation-diffraction theory, the first-order wave force, additional mass, additional damping and response amplitude operators of the buoy are simulated. The buoy design scheme is optimized by the simulation results. The calculation results of the optimized buoy change smoothly with the wave frequency, The amplitude is reasonable and there is no singularity in it, the results indicate that there is no obvious resonance between the buoy and the waves in the working sea area, and the buoy has enough bearing capacity for the environmental load. The scheme can be used in the development of buoy.

**Key words:** buoy; potential flow; hydrodynamic; frequency domain analysis; seakeeping

**Received:** September 3, 2019