

# 柱形内波观测浮标的设计与稳定性分析

刘浩<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2,3,4\*</sup>, 王火平<sup>1</sup>, 连伟琪<sup>5</sup>, 曲志平<sup>5</sup>, 熊学军<sup>2,3,4</sup>

(1. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 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;

4. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 通过海面浮标实现内波流观测数据的实时传输, 对于海洋油气开发的内波流预警安全保障具有非常重要的意义。安装在海面浮标上的海流观测设备(如 ADCP)对浮标姿态有较高要求, 本文设计了 48 种不同尺寸的柱形观测浮标, 采用 Solid Works 软件和 ANSYS Workbench 2020 软件, 分析比较了在外界载荷相同的情况下, 不同外形参数柱形观测浮标的横摇变化情况。分析结果表明: ①在保证充足浮体浮力情况下, 当浮体高度为 1.3 m 时, 对于所有浮体样品直径, 柱形观测浮标在 1~20 s 周期波浪影响下, 其横摇角度均可不超过 20°。②当直径不小于 0.6 m 时, 对于所有浮体样品高度, 其横摇角度在周期为 1~20 s 的波浪下均不超过 20°; 当浮体直径为 0.7 m 时, 柱形观测浮标最稳定, 其横摇角度最大不超过 10°。③对于 48 种不同尺寸柱形观测浮标, 浮体高度为 1.2~1.3 m, 浮体直径为 0.6~0.7 m 时, 柱形观测浮标最为稳定。④当浮体高度为 1.4 m 或 1.5 m, 直径为 0.4 m 时, 由于高频波浪影响, 其最大横摇角度甚至会超过 90°, 这与柱形观测浮标固有频率与波浪频率发生共振有关。研究结果对于小型浮标设计和表面浮标观测剖面流具有重要的参考意义。

**关键词:** 海洋观测浮标; 内波; 横摇; 纵摇; AQWA 软件

**中图分类号:** P715.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-3682(2021)04-0261-08

**doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2021.04.002

**引用格式:** LIU H, CHEN L, WANG H P, et al. Design and stability analysis of cylindrical inner wave observation buoy[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(4): 261-268. 刘浩, 陈亮, 王火平, 等. 柱形内波观测浮标的设计与稳定性分析[J]. 海岸工程, 2021, 40(4): 261-268.

海洋观测浮标是一种可以搭载海洋环境要素观测设备或传感器的稳定平台, 具有长期、定点、连续、实时、全天候观测等诸多优势。在海洋观测浮标技术发展初期, 大多采用的是直径不小于 8 m 的大型浮标。例如, 20 世纪中期美国建造的浮标网, 其浮标直径均为 10~12 m; 1978 年 10 月, 中国正式投入使用的 HFB-1A 型浮标, 其直径为 10 m<sup>[1]</sup>。这是因为浮标的尺寸越大, 其稳定性越好<sup>[1]</sup>。大型浮标虽然稳定性好, 但其建造成本高, 布放、维护和回收的难度较大。因此, 随着 CMOS 微处理机技术的进步和卫星通信技术在海洋设备上的应用以及材料工艺的发展, 浮标越来越趋向于小型化<sup>[2]</sup>。

按照海洋观测浮标的结构形式, 可以将其分为圆盘形、球形、船形和柱形等<sup>[3-4]</sup>。其中柱形浮体或准柱形浮标在海洋观测中应用最为广泛, 其优点在于吃水线深、稳定性好、不易倾覆、造价低等<sup>[4]</sup>。在内波观测和预警应用中, 海流及温盐剖面的现场观测数据需要通过海面浮标实时传输回陆地基站或应用平台。海流剖面观测数据的实时传输目前主要有 2 种方式: 第一种是采用观测设备与海面标体分离的方式, 即将海流剖面

**收稿日期:** 2021-10-08

**资助项目:** 国家科技重大专项科研任务——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX05057015); 海洋工程装备科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发—内波流预警方案研究及内波流监测系统研制

**作者简介:** 刘浩(1989—), 男, 工程师, 主要从事海洋油气开发方面研究。E-mail: lhao1900@qq.com

\* **通信作者:** 陈亮(1990—), 男, 助理研究员, 主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究。E-mail: chenliang@fio.org.cn

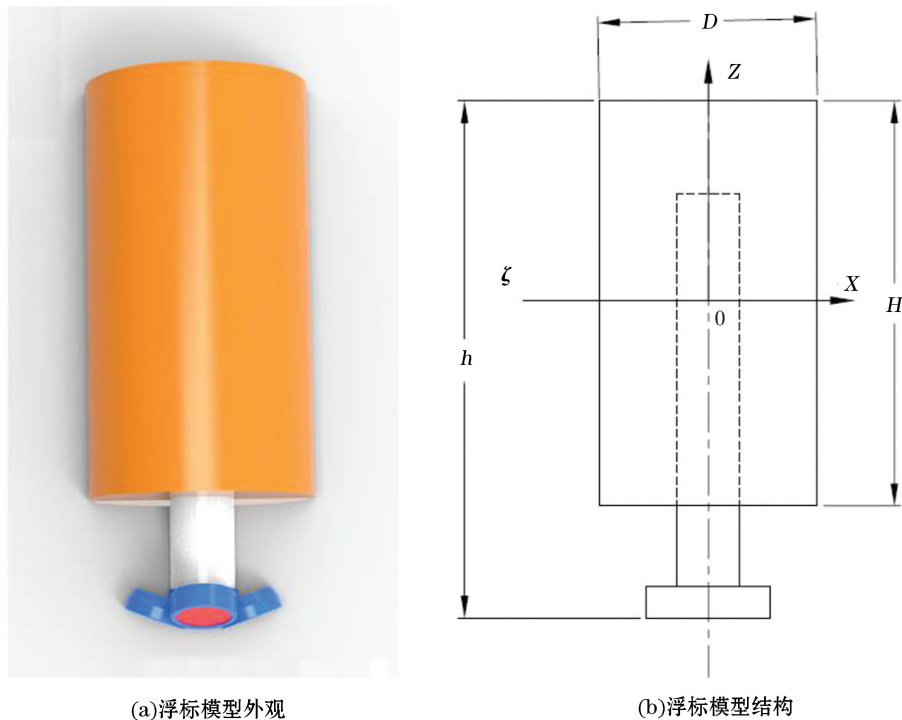
(王佳实 编辑)

观测仪(如声学多普勒流速剖面仪, Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)安装于水下主浮体内,通过传输缆或其他通讯方式将采集的数据传输至海面标体,再通过安装在海面标体上的天线经卫星实时传输回基站;第二种是将海流观测设备与海面通进而讯装置均安装在海面浮标上<sup>[5]</sup>,这种方式避免了数据采集传输至海面信标的中间过程,更为简单直接,降低了数据传输出现故障的可能性。

在第二种方式中,由于海流观测设备直接安装在海面标体上,其姿态必然会受到海面波浪的影响。以 ADCP 为例,当其横摇(Pitch)或纵摇(Roll)倾角超过  $20^\circ$  时,观测数据将会失效。因此,有必要针对在海面波浪影响下的观测浮标的倾角问题进行研究。本文将以柱形观测浮标为例,讨论在标准波浪影响下浮标的姿态变化,并给出小型化柱形观测浮标合理的设计尺寸。

## 1 浮标设计和模拟方法

本文针对美国 RDI 公司生产的 RDI 75k ADCP,设计了一种包裹式圆柱形内波观测浮标(以下简称柱形观测浮标)(图 1a),其内径比 75k ADCP 舱体直径大 1 cm,可确保 75k ADCP 舱体刚好安装于柱形观测浮标内。浮体选用空心玻璃微珠与环氧树脂饱和混合加温固化成型的复合型浮体材料,其密度为  $450 \text{ kg/m}^3$ 。在后续计算和模拟过程中,对 ADCP 的换能器头部进行了简化,将其近似为直径 40 cm、厚度 10 cm 的圆饼形。图 1b 为圆柱形观测浮标模型的二维图,本文探讨了控制浮体直径  $D$ (或高度  $H$ ) 不变、在标准波浪(浪高 1 m)的影响下,不同高度  $H$ (直径  $D$ ) 浮体的姿态(横摇和纵摇)变化情况。本文采用 Solid Works 软件<sup>[6]</sup>对不同尺寸参数的该型浮标进行建模,采用 ANSYS Workbench 2020 软件<sup>[7]</sup>中的 AQWA 模块对该型浮标进行网格划分和姿态模拟。



注:  $h$  为柱形观测浮标的总高度(包括 ADCP 安装后的总高度),  $D$  为柱形观测浮体的直径(外径),  
 $H$  为柱形观测浮体的高度,  $\zeta$  为吃水线深度,即总高度  $h$  减去标体露出水面的高度

图 1 包裹式圆柱形内波观测浮标模型

Fig.1 Model of the package-type cylindrical inner wave observation buoy

### 1.1 AQWA 软件理论基础

基于 AQWA 软件的三维势流理论基本假设,假设流体中的流速场( $\phi$ )是标量函数梯度的流,是无旋、无黏、不可压缩的理想流体,满足以下的边界条件<sup>[7]</sup>:

1)拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

2)海底边界条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -h. \quad (2)$$

3)自由表面条件:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = 0. \quad (3)$$

4)浸没物体表面条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 v_j f_j(x, y, z). \quad (4)$$

式中: $n$  为法线方向的变量; $v_j$  为浮体在 $(x, y, z)$ 点的方向速度; $f_j$  为 $(x, y, z)$ 点的有限微元的面积。

5)辐射条件:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \phi = 0. \quad (5)$$

式中, $R$  为辐射波的辐射半径,即辐射波无穷远处速度势趋于 0。

浮体所受到的波浪力可以细分为浮体在水中受到的力和力矩,分别表示为:

$$\vec{F} = - \iint_S (p \cdot \vec{n}) \cdot dS, \quad (6)$$

$$\vec{M} = - \iint_S p \cdot (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS, \quad (7)$$

式中: $S$  为浮体浸没在水中的表面积; $\vec{n}$  为物体表面的法方向向量; $p$  为压力。

AQWA 软件中的参考坐标系  $Oxyz$  坐标原点在水平面上, $Oxy$  平面与水面重合, $z$  轴垂直于水面向上,模型在坐标系中位置如图 1b 所示。

利用 ANSYS Workbench 2020 的 Hydrodynamic Diffraction 模块进行频域计算,计算在去向与  $x$  轴间的夹角为  $90^\circ$ 、周期在  $1 \sim 20$  s 范围内的波浪作用下,柱形观测浮标的横摇倾角大小,通过对比寻找最优的模型参数解。

### 1.2 三维建模与参数设置

改变柱形观测浮标的形状尺寸参数,记录下不同形状尺寸模型的质量、质心坐标,并计算模型的吃水线( $\zeta$ )、转动惯量等参数,导入 ANSYS Workbench 2020 的 Hydrodynamic Diffraction 模块中进行频域分析。

柱形观测浮标观测海域在南海北部陆坡区,因此全局变量参数设置如下:水深 300 m,水域模型为边长 100 m 的正方形海域,海水密度  $1\,025 \text{ kg/m}^3$ ,重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,计算波浪周期  $1 \sim 20$  s,波浪振幅 1 m。质量参数根据在 Solid Works 软件中记录的不同尺寸浮体参数进行设置。

### 1.3 网格划分

利用 AQWA 软件,根据柱形观测浮标尺寸大小进行自动网格划分,定义网格单元的最大尺寸为 0.05 m,得到浮体的网格划分如图 2 所示。

保持外界的环境载荷条件相同,利用 ANSYS Workbench 2020 软件的 AQWA 模块进行水动力计算,分析柱形浮标在不同直径、不同高度情况下的横摇运动响应。通过对比不同尺寸浮标的横摇幅值响应因子(Response Amplitude Operators,RAO)的差异,可以得出稳定性最好的浮标尺寸,确定小型化柱形观测浮标的最优设计尺寸。

本文在确保浮力足够的情况下,设计了 48 种不同尺寸的柱形浮标,来分析比较在外界载荷相同的情况下,不同外形参数浮标的横摇响应 RAO。各种尺寸浮标的吃水线计算结果如表 1 所示。

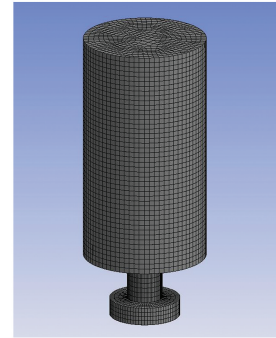


图 2 柱形观测浮标的网格划分  
Fig.2 Grid division of the cylindrical buoy

表 1 不同直径和高度柱形观测浮标的吃水线 (m)

Table 1 Draft lines of the buoys with different diameters and heights (m)

$h/m$	$D=0.4\text{ m}$	$D=0.5\text{ m}$	$D=0.6\text{ m}$	$D=0.7\text{ m}$	$D=0.8\text{ m}$	$D=0.9\text{ m}$	$D=1.0\text{ m}$
1.36	*	1.080	1.007	0.955	0.921	0.898	0.881
1.46	1.298	1.139	1.052	1.000	0.966	0.943	0.926
1.56	1.343	1.184	1.097	1.045	1.011	0.988	0.971
1.66	1.388	1.229	1.142	1.090	1.056	1.033	1.016
1.76	1.433	1.274	1.187	1.135	1.101	1.078	1.061
1.86	1.478	1.319	1.232	1.180	1.146	1.123	1.106
1.96	1.523	1.364	1.277	1.225	1.191	1.168	1.151

注: \* 代表  $\zeta > h$ , 即柱形观测浮标在此尺寸下浮力不够,不具有物理意义

## 2 结果分析

### 2.1 浮体直径变化对柱形观测浮标横摇的影响

图 3 为限定浮体高度不变,在 1~20 s 周期的波浪影响下不同浮体直径的柱形浮标横摇倾角变化情况。从图 3 可见,当浮体高度为 1.3 m 时,在保证浮体浮力足够的情况下,无论浮体的直径如何变化,柱形观测浮标横摇角度在波浪周期为 1~20 s 时均不超过 20°;当浮体高度为 1.0 m,且浮体直径在 0.6 m 以下时,其横摇倾角在波浪周期为 9~10 s 时会超过 20°,最大可达 41°;当浮体高度为 1.1、1.2、1.4 和 1.5 m,浮体直径在 0.5 m 以下时,其横摇倾角在波浪周期为 4~10 s 时均有可能超过 20°(对不同高度柱形浮标,其横摇倾角超过 20°对应的波浪周期有所不同);当浮体高度为 1.4 m 和 1.5 m 时,最大横摇角度甚至会超过 90°,这与柱形观测浮标固有频率与波浪频率一致、二者发生共振有关<sup>[8]</sup>。此外,由图 3 还可见,在高频(周期小于 5 s)波浪影响下,当浮体直径大于 0.8 m 时,其横摇角度明显比直径为 0.6~0.7 m 时大。由此可见,在高频波浪的影响下,并非直径越大,柱形观测浮标越稳定。

### 2.2 浮体高度变化对柱形观测浮标横摇的影响

图 4 为限定浮体直径不变,在 1~20 s 周期的波浪影响下不同浮体高度的柱形浮标横摇倾角变化情况。

由图 4 可见,当浮体直径为 0.4 m 时,几乎各种高度的浮体样本( $H=1.3$  m 除外)在波浪周期低于 10 s 时,均出现了横摇角度超过  $20^\circ$  的情况;当浮体直径为 0.5 m、高度为 1 m 时,在周期为 9~10 s 的波浪影响下,同样出现了横摇角度超过  $20^\circ$  的情况;而当直径不小于 0.6 m 时,其在周期为 1~20 s 的波浪影响下,波浪横摇角度均不超过  $20^\circ$ 。但当浮体直径为 0.7 m 时,柱形观测浮标最为稳定。由此可见,在高频波浪的影响下,并非直径越大,浮标越稳定。

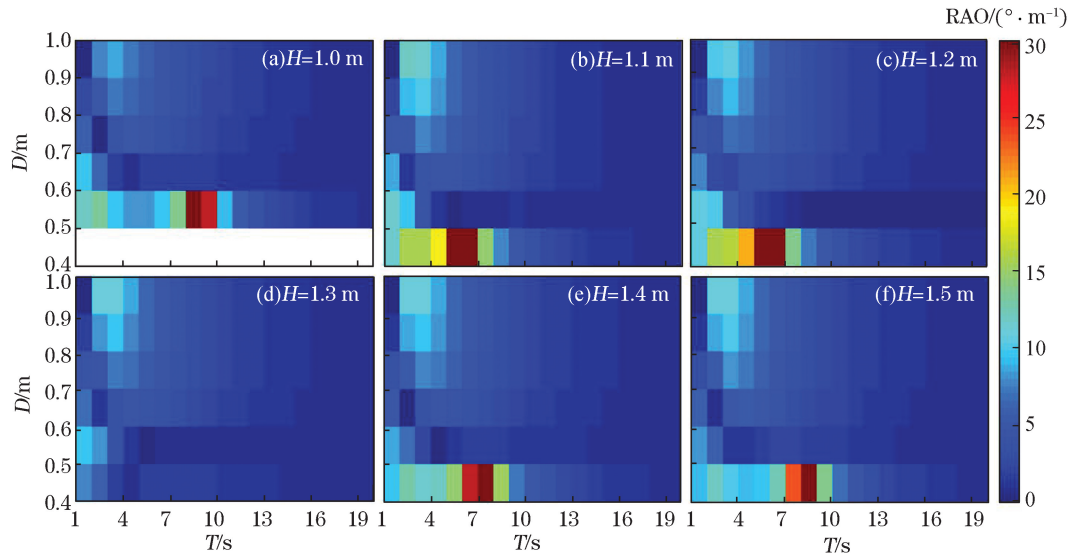


图 3 浮体直径变化对柱形观测浮标柱形观测横摇的影响

Fig.3 Influence of the change of floating body diameter on the roll of the cylindrical buoy

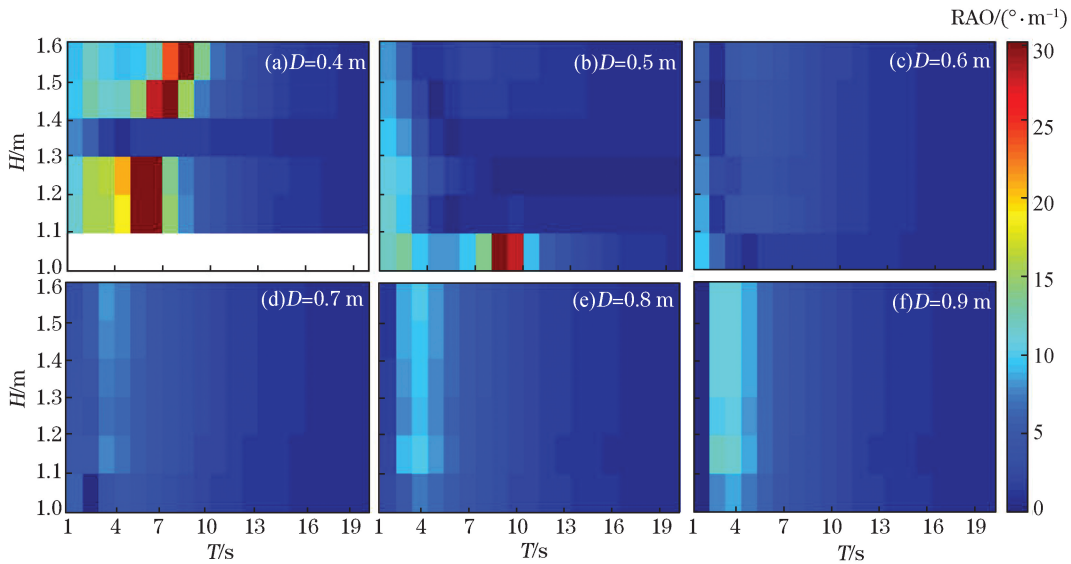


图 4 浮体高度变化对柱形观测浮标横摇的影响

Fig.4 Influence of the change of floating body height on the roll of the cylindrical buoy

### 2.3 柱形观测浮标尺寸的选取

通过分析可知,在波浪周期为 1~20 s 范围内、浮体直径一定的前提下,浮体的高度为 1.3 m 时姿态最

稳定,横摇角度没有出现极端的数值结果,且总体横摇较小;浮体高度一定的前提下,柱形观测浮标的直径在 0.7 m 时姿态最稳定。当浮体高度为 1.3 m 时(图 5a),不同浮体直径对柱形观测浮标稳定性的影响。从图 5 可见,当浮体直径为 0.6 和 0.7 m 时,柱形观测浮标相对最稳定,其横摇角度在周期为 1~20 s 的波浪作用下均小于 10°;当浮体为其他直径时,在高频波浪影响下,柱形观测浮标横摇角度有可能会超过 10°。图 5b 展示了浮体直径为 0.7 m 时,不同浮体高度对柱形观测浮标稳定性的影响。从图 5b 可见,在浮体直径为 0.7 m 时,浮体高度对柱形观测浮标的稳定性影响差别较小,其横摇角度均能控制在 10°以内。而当浮体高度为 1.2 和 1.3 m 时,在高频波浪影响下,横摇角度相对更小,表现为最稳定。

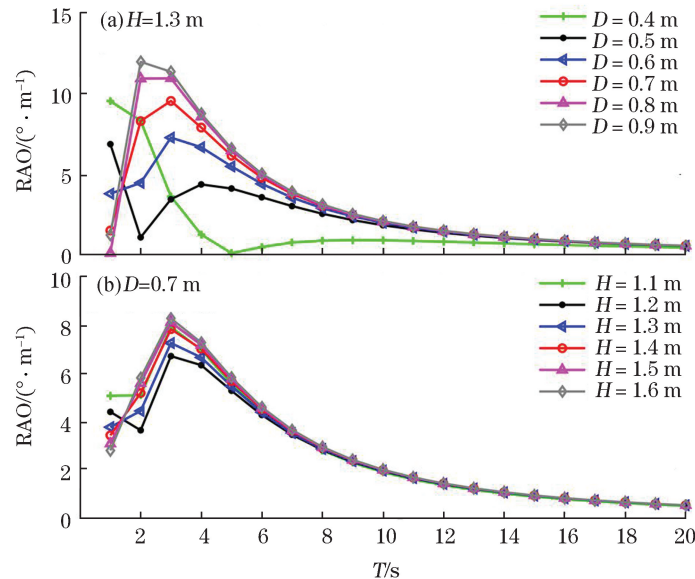


图 5 不同周期波浪影响下的柱形浮标横摇角度变化曲线

Fig.5 Changes of the roll angle of the cylindrical buoy under the influence of the waves with different periods

### 3 结 论

随着浮标观测技术的发展,海面浮标越来越趋向于小型化,本文针对所设计的 48 种不同尺寸的柱形观测浮标,采用 Solid Works 软件和 ANSYS Workbench 2020 软件,分析比较了在外界载荷相同的情况下,不同外形参数柱形观测浮标的横摇变化情况。分析结果表明:

1)当浮体高度为 1.3 m 时,在保证浮体浮力足够的情况下,对于各种本直径的柱形观测浮标,在周期为 1~20 s 的波浪影响下,其横摇角度均可不超过 20°;当浮体高度为 1.1、1.2、1.4 和 1.5 m,浮体直径在 0.5 m 以下时,其横摇角度在波浪周期为 4~10 s 时均有可能超过 20°(不同浮体高度,横摇角度超过 20°对应的波浪周期有所不同);当浮体高度为 1.4 和 1.5 m 时,最大横摇角度甚至会超过 90°,这与柱形观测浮标固有频率与波浪频率发生共振有关<sup>[8]</sup>。因此,对于小型柱形观测浮标的设计,需要特别注意避免高频波浪与浮标固有频率的共振问题。

2)当浮体直径不小于 0.6 m 时,对于所有浮体样本高度,其横摇角度在周期为 1~20 s 的波浪作用下均不超过 20°;当浮体直径为 0.7 m 时,柱形观测浮标最为稳定,其横摇角度最大不超过 10°。在高频(周期小于 5 s)波浪影响下,当浮体直径大于 0.8 m 时,其横摇角度明显比直径为 0.6~0.7 m 时大。由此可见,在高频波浪的影响下,并非直径越大,柱形观测浮标越稳定。

3)对于所讨论的 48 种不同尺寸的柱形观测浮标,浮体高度为 1.2~1.3 m、浮体直径为 0.6~0.7 m 时,

柱形观测浮标最为稳定。

本文系统性地讨论了小型柱形观测浮标不同设计尺寸对其姿态的影响,并给出了最优化设计尺寸,这对于小型浮标设计和表面浮标观测剖面流具有重要的参考意义。

### 参考文献(References):

- [1] FAN G F, JI C Q, CHEN J D, et al. The research and design of the data buoy[J]. *Ocean Engineering*, 1989(1): 22-29. 范根发,季春群,陈家鼎,等. 海洋资料浮标的设计研究[J]. *海洋工程*, 1989(1): 22-29.
- [2] SUN C. The design of buoy body "Bai Long" and its dynamics analysis[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 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.
- [3] WANG J C, LI Y Z. Development and application of ocean data buoy technology in China[J]. *Shandong Science*, 2019, 32(5): 17-36. 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. *山东科学*, 2019, 32(5): 17-36.
- [4] TANG X. Study on hydrodynamic analysis and structure of ocean data buoy Hull[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. 唐歆. 海洋资料浮标水动力分析及结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [5] WANG H P, CHEN L, GUO Y L, et al. Observing, identification and early warning technology of internal solitary wave and its application in Liuhua 16-2 oilfield group development project[J]. *Ocean Engineering*, 2021(2): 162-171. 王火平, 陈亮, 郭延良, 等. 海洋内孤立波预警监测识别技术及其在流花 16-2 油田群开发中的应用[J]. *海洋工程*, 2021(2): 162-171.
- [6] ZHAO F, YANG X J, ZHAO N. SolidWorks 2016 Chinese version of mechanical design from entry to proficiency[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2016. 赵果, 杨晓晋, 赵楠. SolidWorks 2016 中文版机械设计从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [7] GAO W, DONG L, HUANG J. Introduction and improvement of ANSYS AQWA software[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2018. 高巍, 董璐, 黄晶. ANSYS AQWA 软件入门与提高[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [8] GE X Y, ZHAO J B, CHEN N R, et al. Design of the deep-sea multi-purpose buoy[J]. *Ship and Sea Engineering*, 2018, 47(3): 154-157, 163. 葛锡云, 赵俊波, 陈南若, 等. 深海多功能浮标设计[J]. *船海工程*, 2018, 47(3): 154-157, 163.

## Design and Stability Analysis of Cylindrical Inner Wave Observation Buoy

LIU Hao<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2,3,4</sup>, WANG Huo-ping<sup>1</sup>, LIAN Wei-qi<sup>5</sup>,  
QU Zhi-ping<sup>5</sup>, XIONG Xue-jun<sup>2,3,4</sup>

(1. CNOOC Deepwater Development Co. Ltd., Shenzhen 518000, China

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling,  
Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

4. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;

5. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** To realize the real-time transmission of inner wave flow observation data through sea surface buoy is of great significance for the early warning of inner wave current in the security of offshore oil and gas development. The current observation instruments (such as ADCP) installed in the sea surface buoy have high requirements for the attitude of the buoy. So, 48 kinds of cylindrical buoys with different sizes are designed. The roll stability of the buoys with different shape parameters is analyzed and compared under the same external load by using the Solid Works software and the AYSYS Workbench 2020

software. The results show that: ① Under the condition of ensuring sufficient buoyancy of the floating body and influenced by the waves with a 1–20 s period, When the height of the floating body is 1.3 m, the rolling angles of all the buoys cannot exceed  $20^\circ$  for all the floating body diameters; ② When the diameter of the floating body is not less than 0.6 m, the rolling angles of all the buoys cannot exceed  $20^\circ$  for all the floating body heights, and when the diameter of the floating body is 0.7 m, the buoy is the most stable and its maximum rolling angle does not exceed  $10^\circ$ ; ③ For the 48 kinds of cylindrical buoys designed in the study, those with the floating body height of 1.2–1.3 m and the floating body diameter of 0.6–0.7 m are the most stable; ④ The rolling angle of the buoy with a floating body height of 1.4 m or 1.5 m and a diameter is 0.4 m can even exceed  $90^\circ$  maximally due to the affection of high-frequency waves. This is related to the resonance between the inherent frequency of the buoy and the frequency of the waves. This study can provide an important reference for the design of small buoys and the observation profiles of sea surface buoys.

**Key words:** ocean observation buoy; internal wave; roll; pitch; AQWA software

**Received:** October 8, 2021;