

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.03.003

# 多圆柱体浮标的横摇性能分析

魏晓辉<sup>1</sup>, 尼建军<sup>2</sup>, 李宏武<sup>2</sup>, 刘宁<sup>1\*</sup>, 董涛<sup>1</sup>

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 海军装备部驻天津地区第一军事代表室, 天津 300131)

**摘要:**横摇性能是评价浮标在海上运动稳定性的重要参数之一,它直接影响浮标在海中漂浮的姿态和对天线束宽的要求,这对于卫星通讯浮标尤为重要,因此大多数的浮标主体外形为横摇性能较好的球体,但是球体浮标不适合被无人机携带。本文设计了一种用于空投横摇性能较好的圆柱体浮标,通过研究圆柱体浮标尺寸形状与横摇性能的关系,分析不同尺寸下圆柱体浮标横摇性能随直径与高度的比值(径高比)的变化趋势。同时,分析了同种海况下球体浮标横摇性能随直径的变化趋势作为对比,发现圆柱体浮标的横摇放大因子随径高比增大而先增大后减小,从而确定多圆柱体浮标的设计方案,数值模拟该形状浮标在 5 级海况下的横摇性能,计算得到稳定状态下的最大横摇角度小于 20°。另外进行了海上试验,浮标在有效波高为 1 m 的海浪中的最大横摇倾角约为 16°,符合设计要求。

**关键词:**横摇性能;多圆柱体浮标;海浪参数

**中图分类号:** P751      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2029(2020)03-0016-06

波浪测量浮标是观测和收集海浪数据的重要手段之一,在海洋事业各个领域应用广泛<sup>[1]</sup>。但对于研究一些极端海况,人为投放浮标会极大地增加作业的危险性,因此,利用无人机运输投放浮标,不仅可以减小作业的危险性,还可以快速到达目标海域进行海浪测量。为了适应无人机吊舱的外形,需要设计一种投弃式圆柱体浮标,同时浮标要有较小的横摇角度,降低天线束宽的要求,提高天线增益,增加系统的通信质量<sup>[2-3]</sup>。

目前,无论基于加速度传感器还是 GPS,目前波浪测量浮标大多为球体浮标,直径约为 0.5~1.0 m,如表 1 所示。虽然球体浮标拥有较好的横摇性,但无法被无人机搭载,而细长形的圆柱浮标则有较差的横摇性能,容易在恶劣海况下被海浪打翻,因此空投波浪测量浮标需要在保持圆柱体的前提下,增强其横摇性能。本文通过分析不同直径和径高比圆柱体浮标的横摇性能,设计了一种多圆柱体的浮标,该浮标中的较大直径的圆柱可以折叠,减小浮

标整体径向长度,以适应无人机的吊舱。

表 1 国内外波浪测量浮标工作原理及外形<sup>[4-7]</sup>

浮标型号	研制机构	工作原理	外形	直径/m
Directional Waverider MKIII	荷兰 Datawell	三轴加速度	球形	0.90
Directional Waverider WR-G DWR-G	荷兰 Datawell	GPS	球形	0.90
TRIAXYS	加拿大 AXYS	三轴加速度	球形	0.91
SBF3	山东省科学院海洋仪器仪表研究所	重力加速度	球形	0.90
SZF	中国海洋大学	重力加速度	球形	0.86
SBF6-1	国家海洋技术中心	重力加速度	球形	0.48

收稿日期:2019-12-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC1400501)

作者简介:魏晓辉(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为机械设计与结构动力学。E-mail:weixiaohui17@mails.ucas.edu.cn

通讯作者:刘宁(1977-),男,博士,副研究员,主要研究方向为海洋观测技术。E-mail:liun0726@163.com

# 1 浮标的横摇运动理论

## 1.1 浮标的横摇周期

浮标在静水中作横摇运动的固有圆频率  $\omega_\varphi$  为<sup>[8]</sup>:

$$\omega_\varphi = \sqrt{\frac{mgh}{J_\varphi}} \quad (1)$$

式中: $m$  为浮标的质量; $g$  为重力加速度; $h$  为初稳心高; $J_\varphi$  为转动惯量。转动惯量  $J_\varphi$  包括整个浮标绕水线面的中心轴的转动惯量  $J$  和附加质量引起的转动惯量  $J'$ 。实际情况中,横摇阻尼很小,对横摇固有圆频率的影响可以忽略,故式(1)中未考虑阻尼,由此可知,浮标的固有圆频率仅与浮标的质量、初稳心高和转动惯量有关。

在横倾角  $d\varphi$  不大时,浮心的运动轨迹可以看作是以初稳心为圆心,做小角度的圆轨运行,同时,稳心的位置可以近似看作不变。因此,浮标的恢复力矩为:

$$M = F_b(h+a)\sin d\varphi \approx V_w \rho_w (h+a)d\varphi \quad (2)$$

式中: $h$  为初稳心高; $a$  为重心和浮心的距离,即  $a = |Z_g - Z_b|$ ;  $V_w$  为排出水的体积; $\rho_w$  为海水的密度。

当浮标倾斜且倾角不大时,可看作浮标竖直水线倾斜,此时,产生浮力为楔形体积的排水量,浮心的改变也是由楔形体积排水量不对称所引起的,因而可以求得浮标恢复力矩的另一种形式<sup>[9]</sup>:

$$M = \int_A \rho_w g \cdot y \cdot y d\varphi \cdot dA = \rho_w g d\varphi \int_A y^2 dA = \rho_w g \cdot I \cdot d\varphi \quad (3)$$

式中: $dA$  为楔形体积水线面  $A$  上的微元面积; $y$  为微元面积至水线面上转动中心线的距离; $I$  为水线面对于转动中心线的惯性矩; $g$  为重力加速度。式(1)与式(2)联立可得:

$$V_w \rho_w (h+a)d\varphi = \rho_w g \cdot I \cdot d\varphi \quad (4)$$

因此,浮标的初稳心高为:

$$h = \frac{I}{V_w} - a \quad (5)$$

根据实践经验,浮标的总转动惯量可以通过杜埃尔公式估算,浮标的转动惯量为<sup>[10-11]</sup>:

$$J_\varphi = \frac{D}{12g} (B^2 + 4z_g^2) \quad (6)$$

式中: $D$  为浮标排水量; $B$  为浮标的直径; $z_g$  为浮标重心到基线的高度。当初稳心高  $h > 0.15$  m 时,浮标的固有周期为:

$$T_\varphi = 0.58 \sqrt{\frac{B^2 + 4z_g^2}{h}} \quad (7)$$

当时,浮标的固有周期为:

$$T_\varphi = \frac{10.3}{\varphi_{\max}} \sqrt{\frac{J_\varphi}{Dr}} \quad (8)$$

式中: $\varphi_{\max}$  为最大横摇角; $r$  为横稳心半径。

当  $0.05 < h < 0.15$  时,浮标的固有周期为式(7)和式(8)计算结果的平均值。

## 1.2 浮标在规则波中的横摇运动

浮标在规则波中的横摇运动如图 1 所示。

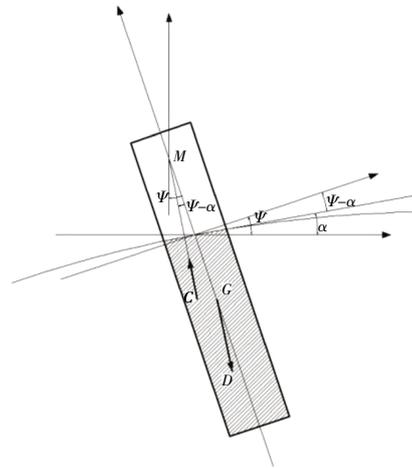


图 1 浮标在规则波中的横摇

根据横摇经典理论<sup>[12]</sup>,在无阻尼状态下,浮标的横摇方程为:

$$J_\varphi \ddot{\varphi} + Dh\varphi = Dh \cdot \alpha_0 \sin(\omega_\alpha t + \varepsilon_0) \quad (9)$$

式中: $\alpha_0$  为波浪的倾角的幅值; $\omega_\alpha$  为波浪的圆频率; $\varepsilon_0$  为波浪角与浮标倾角的初相位差。假设初始条件  $\varphi=0, \dot{\varphi}=0, \varepsilon_0=0$ , 则式(9)的解为:

$$\varphi = \frac{\alpha_0}{1 - T_\varphi^2/T_\alpha^2} \left( \sin(\omega_\alpha t) - \frac{T_\varphi}{T_\alpha} \sin(\omega_\varphi t) \right) \quad (10)$$

式中: $T_\varphi$  和  $T_\alpha$  分别为浮标横摇的固有周期和波浪的周期。

引入横摇的放大因子  $K = \varphi_{\max}/\alpha_0$ , 则  $K$  可表示为:

$$K = \frac{1}{1 - T_\varphi^2/T_\alpha^2} \quad (11)$$

# 2 圆柱体浮标与球体浮标横摇性能分析

## 2.1 圆柱体浮标横摇性能分析

假设圆柱体浮标的直径为  $d$ , 高度为  $h_c$ , 则径高比  $k = d/h_c$ , 密度为  $750 \text{ kg/m}^3$ , 重心位于浮标的  $0.25h_c$ 。

处,故重心至水线面的距离  $z_g=0.5h_c$ ,浮心至水线面的距离  $z_b=0.385h_c$ 。因此,圆柱体浮标的初稳心高为:

$$h = \frac{\pi\rho_w d^4}{64m} + \frac{1}{8}h_c \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)可得圆柱体浮标的固有周期为:

$$T_\varphi = 46.4 \sqrt{\frac{mh_c(k^2+1)}{\pi\rho_w k^4 h_c^3 + 8}} \quad (13)$$

设定波浪的周期  $T_\alpha=4s$ ,则放大因子  $K$  为:

$$K = \frac{16}{16 - \frac{2152.96mh_c(k^2+1)}{\pi\rho_w k^4 h_c^3 + 8}} \quad (14)$$

由式(14)可知,在浮标质量确定的情况下,圆柱体浮标的横摇性能仅与高度和径高比有关。分别计算当  $h_c=0.5\text{ m}, 0.15\text{ m}, 0.25\text{ m}, 0.35\text{ m}, 0.45\text{ m}, 0.55\text{ m}, 0.65\text{ m}, 0.75\text{ m}$  时,  $k$  从 0 到 10 的放大因子,计算结果如图 2 所示。

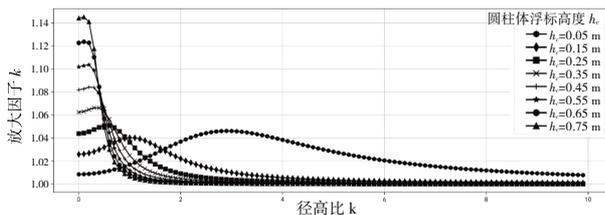


图 2 不同高度的圆柱体浮标横摇性能随径高比的变化

由图 2 可知,随着径高比增大,圆柱体浮标横摇运动的放大因子先增大后减小,最终趋向于 1,即随波漂流;而随着直径的增大,放大因子的峰值变大,并向左移动。当浮标高度大于 0.25 m 时,放大因子在径高比为 4 处就已达到平稳状态,因此,在设计圆柱形浮标时,尽量选择较高径高比,避开峰值区域。

## 2.2 球体浮标横摇性能分析

假设球体浮标的直径为  $d$ ,密度为  $750\text{ kg/m}^3$ ,重心位于浮标的  $0.25d$  处,故重心至水线面的距离  $z_g=0.403d$ ,浮心至水线面的距离  $z_b=0.25d$ 。因此,圆柱体浮标的初稳心高为:

$$h = \frac{\pi\rho_w d^4}{64m} + 0.153d \quad (15)$$

通过式(7)、式(11)和式(15),可以计算得到球形浮标的放大因子随直径的变化趋势,设定波浪周期  $T_\alpha=4\text{ s}$ ,计算结果如图 3 所示。

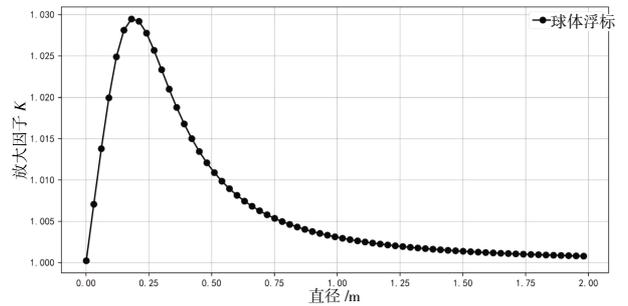


图 3 球体浮标横摇性能随直径的变化

由图 3 可见,球体浮标的放大因子均低于 1.03,横摇性能优良。对于目前的大部分球体波浪测量浮标,直径约为 0.5~1.0 m,既保证体积不会很大,又有良好的横摇性能,如果直径继续增大,放大因子减小不明显,横摇性能并不会明显提高。

## 3 多圆柱体浮标横摇性能分析

由于无人机吊舱的尺寸限制,用于空投的波浪测量浮标的直径要求小于 0.124 m,通过图 2 可知,只有径高比大于 4 时,才有较好的横摇性能,即高度只有 0.03 m,实际上是不可行的。因此,需要设计一个径向可折叠的圆柱体,投放后展开以增大浮标的径高比,如图 4 所示。底部圆柱体的直径为 0.09 m,径高比为 0.18,上部圆柱体直径为 0.9 m,径高比为 30,通过布置内部配重模块,使水线面位于上部圆柱体的底面偏上 0.01 m 处的位置,重心位于下部圆柱体。

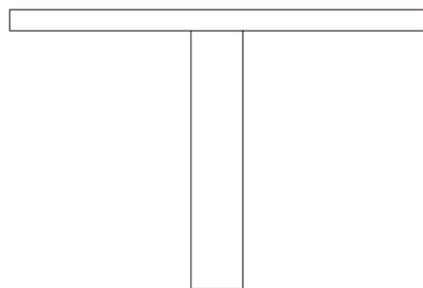


图 4 多圆柱体浮标结构示意图

海浪被视为为一种随机过程,在风和地形的影响下,海浪的变化是极其复杂的,经典的线性理论无法阐明其特征,故采用频谱对海浪进行描述和预测。在各种海浪频谱中,常用的由 Pierson-Moscowitz (P-M)谱和 JONSWAP 谱。其中 P-M 谱是将北大西洋上已观察的 54 个充分成长的海浪,按照风速分为 5 组,就各组的谱求一平均谱,然后将这些谱无因次化,并以不同形式的无因次谱进行拟合,最后

得到的有因次谱<sup>[13]</sup>:

$$A(\omega)^2 = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -\beta \left( \frac{g}{U\omega} \right)^4 \right] \quad (16)$$

式中:无因次常数  $\alpha=8.10 \times 10^{-3}$ ;  $\beta=0.74$ ;  $U$  为海面上 19.5 m 高度处的风速。各级海况的平均风速、平均波高和周期如表 2 所示<sup>[14]</sup>。

表 2 海况等级

级数	风速/m·s <sup>-1</sup>	平均波高/m	平均周期/s
0	0~0.2 (0.1)	0	0
1	0.3~1.5 (0.9)	0.015	0.5
2	1.6~3.3 (2.5)	0.055	1.4
3	3.4~5.4 (4.4)	0.183	2.4
4	5.5~7.9 (6.7)	0.549	3.9
5	8.0~10.7 (9.4)	1.311	5.4
6	10.8~13.8 (12.3)	2.500	7.0
7	13.9~17.1 (15.5)	4.450	8.7
8	17.2~20.7 (19.0)	7.010	10.5
9	20.8~24.4 (22.6)	10.97	12.5
10	24.5~28.4 (26.5)	15.85	14.7
11	28.5~32.6 (30.6)	22.25	17.0
12	>32.6 (>30.6)	>24.38	18.0

为了能够分析实海况条件下多圆柱体浮标的横摇性能,选择表 2 中 5 级海况下的风速,并假定海水是无旋、无粘的。浮标的横摇运动计算结果,如图 5 所示。利用 Python 绘制浮标的横摇角度随时间的变化图<sup>[15]</sup>,结果如图 6 所示。

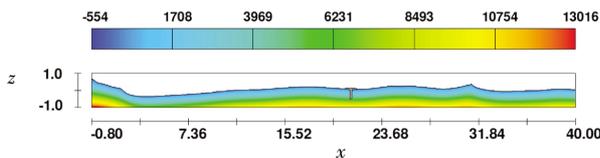


图 5 多圆柱体横摇运动仿真

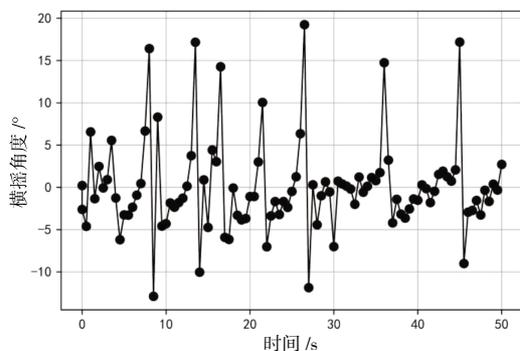


图 6 多圆柱体浮标的横摇角度

由图 6 可知,在 5 级海况下,依据图 2 设计的多圆柱体浮标的最大横摇角度小于 20°, 小于设计要求的 30°,说明该形状浮标的横摇性能良好。

## 4 多圆柱体空投浮标设计与试验

浮标主体结构(下层圆柱体)采用厚度为 2 mm 的 3A21 铝合金圆筒,根据经验这种结构可以满足安全入水的要求,另外 3A21 铝合金既可以焊接,也有较好的抗腐蚀性能,还不具有磁性,同时,它的密度比不锈钢、钛合金等材料低。减速板(上层圆柱体)径高比 45,是由 8 根主梁和 544 航空伞布制成,其中主梁是由玻璃微珠复合材料加工制成,密度仅为 500 kg/m<sup>3</sup>,能够极大地增加浮标的储备浮力,提高稳定性。浮标顶部采用 ABS 塑料制成,以确保对卫星通讯没有电磁屏蔽,便于数据接收和发送。浮标总长 0.887 m,减速板闭合状态时最大直径为 0.124 m,展开状态时最大直径为 0.89 m,符合无人机搭载要求。

浮标由 4 部分组成,从上到下依次为:天线舱、电路模块舱、电池舱和减速板及其启动装置模块。天线舱内部装有北斗卫星天线、陀螺仪、加速度传感器、数据处理电路和北斗天线电路装于电路模块舱,电池舱与电路模块舱通过转接环连接,电池舱的下部是减速板的启动模块,内置 304 不锈钢配重块,可根据使用环境配重块的质量,从而改变浮标的重心位置,减速板覆盖于电路模块舱和电池舱表面,如图 7 所示。浮标的每个模块舱均为独立结构,通过螺纹与拉杆连接,浮标体表面无螺钉,防止储存和工作过程中发生电化学腐蚀。

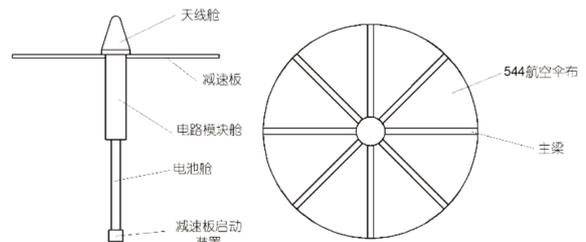


图 7 浮标总体布置及外形

为了测试多圆柱体浮标在真实海况中的工作情况,验证浮标的横摇性能在不规则波中是否符合要求,在青岛附近海域进行海上试验,选取海浪较大的区域投放,同时在附近投放国家海洋技术中心研制的 SBF7-1 型波浪浮标,记录此区域的波浪参数。

SBF7-1 型波浪浮标为球形锚定式浮标,而空投浮标为投弃式浮标,因此放置 SBF7-1 型波浪浮标后,在其 3 km 内投放空投浮标,并保持 100 m 左右的距离跟随浮标,防止漂远。空投浮标和 SBF7-1

型波浪浮标的海上漂浮状态分别如图 8 和图 9 所示。



图 8 空投波浪测量浮标漂浮状态



图 9 SBF7-1 型波浪浮标漂浮状态

SBF7-1 型波浪浮标测量得试验过程中海浪的有效波高为 1.1 m, 接近 5 级海况。空投浮标的横摇角度通过内置的陀螺仪收集, 由于浮标在随机海浪中存在旋转运动, 故不规定浮标横摇的方向, 计算在各个方向浮标轴线与垂线之间的夹角, 记为浮标的倾角, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 浮标的横摇倾角最大约为  $16^\circ$ ,

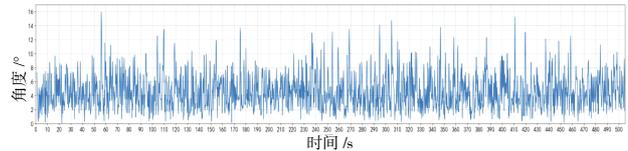


图 10 空投波浪测量浮标漂浮状态

与计算模拟结果相似, 说明多圆柱体浮标具有较好的横摇性能。

## 5 结论

本文阐述了浮标横摇运动理论, 在此基础上分析圆柱体浮标和球体浮标横摇性能与特征尺寸的关系, 根据分析结果设计一种能够被无人机搭载的多圆柱体浮标, 计算了该浮标在 5 级海况下的横摇角度, 数值模拟结果符合设计要求。另外, 本文还介绍了空投浮标的布局与结构, 完成了海上试验, 结果表明浮标在有效波高为 1.1 m 的海浪中的横摇倾角最大约为  $16^\circ$ 。结合计算结果得到以下结论:

(1) 圆柱体浮标的横摇特性随径高比增大而先增大后减小, 球体浮标的横摇特性随直径的增大而先增大后减小, 分析结果能够为浮标外形和尺度的确定提供依据, 为浮标的设计提供理论基础。

(2) 采用多圆柱体结构设计可以弥补圆柱体浮标横摇性能差的缺点, 但要求上部圆柱体的径高比较大。

(3) 多圆柱体浮标在 5 级海况下的横摇角度小于  $30^\circ$ , 能够保证较高的卫星通讯质量。

### 参考文献:

- [1] 毛祖松. 我国近海波浪浮标的历史、现状与发展[J]. 海洋技术, 2007, 26(2): 23-27.
- [2] 曲少春, 郑琨, 王英民. 圆柱形浮标运动分析与仿真[J]. 计算机仿真, 2010(6): 371-375.
- [3] 唐超, 卢树军, 朱江. 海浪摇摆下的浮标卫星通信系统性能分析[J]. 通信技术, 2016, 49(6): 729-734.
- [4] G Jeans, I Bellamy, J J De Vries, et al. Sea trial of the new Datawell GPS directional waverider [C]// IEEE/OES. Seventh Working Conference on Current Measurement Technology. San Diego: IEEE, 2003. 145-147.
- [5] 王军成. 我国海洋资料浮标技术的发展[J]. 山东科学, 1999(4): 16-20.
- [6] 刘国栋. 波浪浮标数据处理方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] 王永超. 近海小型海洋浮标标体基本结构的设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [8] Berteaux HO. Buoy engineering[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1976.
- [9] 刘岳元, 冯铁城, 刘应中. 水动力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [10] 梁宵, 李巍. 船舶操纵性与耐波性[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2012.
- [11] 李积德. 船舶耐波性[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [12] 葛锡云, 赵俊波, 陈楠若, 等. 深海多功能浮标设计[J]. 船海工程, 2018, 47(3): 154-163.

- [13] 文圣常,余宙文.海浪理论与计算原理[M].北京:科学出版社,1984.
- [14] 唐超,卢树军,朱江.海浪摇摆下的浮标卫星通信系统性能分析[J].通信技术,2016,49(6):729-734.
- [15] PYTHON v3.8. Python 3.8.1 Documentation[M/OL]. [2019.12.20]. <https://docs.python.org/3/index.html>.

## Analysis of Rolling Motion for Multi-cylinder Wave Measurement Buoy

WEI Xiao-hui<sup>1</sup>, NI Jian-jun,<sup>2</sup> LI Hong-wu<sup>2</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, DONG Tao<sup>1</sup>

1. *National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China;*

2. *First Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Tianjin, Tianjin 300131, China*

**Abstract:** Rolling motion is one of the most essential parameters of marine motion for buoys, which directly influences, particularly satellite communication buoys, attitudes of buoy floating and demands of antenna beam width. Hence, most wave measurement buoys are spherical main structure resulting from its excellent rolling motion character, whereas the spherical buoys are not suitable for carrying by unmanned aerial vehicle. In order to design a cylindrical wave measurement for air-launching with fine performance of rolling, the relationship between overall dimensions of cylindrical buoy and rolling motion is researched by analyzing the tendency of rolling motion character for cylindrical buoy with diameter-height ratio (D-H ratio) variation, which is compared with the tendency of rolling motion character for spheroid buoy with diameter variation. It is obvious that the amplified factor of rolling motion increases firstly and then reduces with the raising of D-H ratio. A multi-cylinder wave measurement buoy is designed according to the results of this analysis. And its rolling motion under the sea condition of 5 levels is calculated by numerical simulation and the result shows that the maximum angle of rolling in stable condition, less than 20 degrees. In addition, the maximum angle of rolling under the condition of waves whose significant wave height was 1.1 m was approximately 16 degrees according to marine experiment, which can meet the demands of design.

**Key words:** rolling motion character; cylindrical buoy; wave parameter