

文章编号: 1005-9865(2017) 06-0125-09

新型表层漂流浮标体设计分析

王 鹏^{1,2}, 胡筱敏¹, 熊学军^{1,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 3. 青岛海洋科学与技术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 266061)

摘 要: 表层漂流浮标在应用于海洋调查研究时, 浮标体外形对浮标通讯稳定性及数据回收等会产生一系列影响, 也直接制约浮标使用寿命。为此, 考虑减少风阻和水阻, 减小浮标体对水帆运动的影响, 提出了一种新型的适用于近远海海洋观测的表层漂流浮标体葫芦形外形设计方案。结合流体力学理论分析, 运用 SolidWorks 软件分别对葫芦形浮标体和常用的圆柱形浮标体建模, 并利用 Workbench 软件 CFX 流体分析模块开展了流体分析和比较, 结果表明葫芦形浮标体所受压力更均匀, 其水下部分压力值较圆柱浮标体减小约 28%, 证明葫芦形外形浮标体更具可靠性。

关键词: 表层漂流浮标; 浮标体; 葫芦形; 流体分析; 海流

中图分类号: P716 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2017.06.015

Design and analysis of new surface drifting buoy

WANG Peng^{1,2}, HU Xiaomin¹, XIONG Xuejun^{1,3}

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 2. Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In the application of surface drifting buoy in marine research, the buoy body shape has a series of effects on buoy communication stability and data recovery, directly restricting the buoy life. To reduce the wind resistance and water resistance, and the influence of the buoy on the movement of the drogue, this paper presents a new design scheme of the gourd shape of the surface drifting buoy suitable for near-ocean and ocean observation. Based on the theory of hydrodynamics, the SolidWorks software is used to model the gourd buoy and the commonly used cylindrical buoy, and the CFX fluid analysis module in the Workbench software is used to carry out the comparison and analysis of fluid. The results show that the pressure of the gourd buoy is more uniform, and the pressure value of the underwater part is about 28% lower than that of the cylindrical buoy, indicating that the gourd shape design is more reliable.

Keywords: surface drifting buoy; buoy body; gourd shape; fluid analysis; ocean current

表层漂流浮标是近 30 多年以来根据海洋调查研究的需要而发展起来的一种小型海洋观测浮标, 布放后在海洋中随表层海水流动, 通过卫星通讯网络定位并把位置信息传送给用户, 从而获取其漂流路径上表层海流的数据。这种浮标具有观测方式直观有效、成本低廉、布放方便、便于搭载其他传感器等优势, 广泛应用于

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家科技重大专项科研任务(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检测系统研制; 国家自然科学基金(41376038); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1606405); 国家海洋局全球变化与海气相互作用专项子课题(GASI-03-01-01-02, GASI-4POVAI-01-05, GASI-02-IND-STSum); 国家重大科学研究计划(2012CB955601); 海洋公益性行业科研专项(200905024); 国家自然科学基金青年基金(40406009); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ12003908)

作者简介: 王 鹏(1989-), 男, 吉林通化人, 研究助理, 主要从事海洋调查工作。E-mail: xmuwangpeng@xmu.edu.cn

通信作者: 胡筱敏(1974-), 女, 湖北广水人, 副研究员, 主要从事区域海洋学研究。E-mail: huxm@fio.org.cn

全球大洋及近海环流调查研究、海洋工程应用等方面^[1-3]。仅 20 世纪 80 年代开始实施的热带海洋和全球大气计划(TOGA)及世界大洋环实验(WOCE)投放的表层漂流浮标轨迹就几乎遍布全球海洋,在一些强流区尤为密集。我国也利用表层漂流浮标数据开展了大量的调查研究工作^[3-5],推进了对所研究海域流场及其分布特征、中尺度现象等的认识深度和水平。

表层漂流浮标主要由浮标体、水帆、定深系缆和定位通讯模块四部分构成,图 1 给出了常用的两种表层漂流浮标的结构形式,浮标体通常为圆柱形或圆球形。浮标体下部通过系缆连接水帆,实现随水帆同步漂移,定位通讯模块封装在浮标体内部,定时向卫星发送定位数据,用户对获取的 GPS 定位数据进行处理可得到这种拉格朗日测流方式所测的表层海流速度和轨迹资料^[6-7]。

表层漂流浮标实际测量的是水帆随海流的拉格朗日运动,因此应最大化减少水帆以外各部分对水帆运动的影响^[8]。现有技术中,表层漂流浮标体普遍采用圆柱形或球形,体积偏大,容易受外力干扰,不利于强

风条件下观测准确性的控制和弱风条件下拖曳性的减控以及近水面通讯的有效实现,对拉格朗日运动观测有较大影响;此外,浮标需要进行卫星定位和通讯,现有技术中为了使定位和通讯稳定可靠,通常把浮标体做得较大,使浮标体露出海面的部分较高、卫星通讯天线少受海浪等的干扰。但这种设计既影响表层漂流浮标的测量精度,又使得海上目标明显,容易被人为误捞、破坏。常用的浮标体外形一般均为圆柱形和圆球形,如专利号为 201410226209.X 的可调节浮力的漂流浮标,标体为圆柱腔体^[9](图 2);专利号为 201320872101.9 的漂流浮标,标体为圆球体^[10](图 3)。虽然这两种浮标体自漂流浮标问世以来一直被广泛应用,但在海流观测时浮标体会受海水和风的影响而产生不必要的阻力,因此相关研究人员一直在探求更理想的浮标体模型。

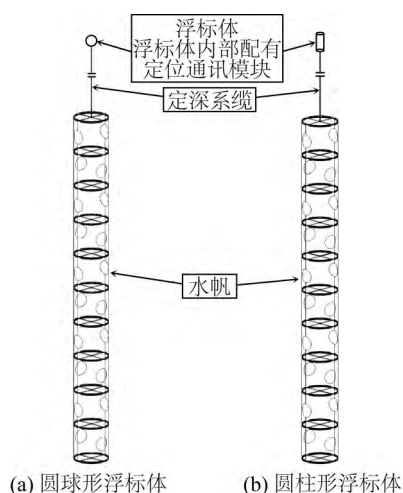


图 1 两种常见的表层漂流浮标

Fig. 1 Two kinds of common surface drifting buoys

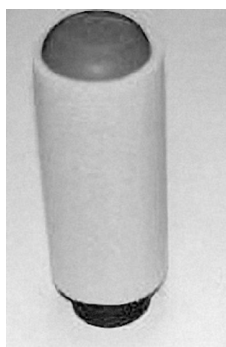


图 2 圆柱形浮标体

Fig. 2 Cylindrical buoy body



图 3 球形浮标体

Fig. 3 Round buoy body

基于此,本文提出了一种新的浮标体设计方案——葫芦形浮标体设计方案,并运用 SolidWorks 建模开展流体分析,量化地给出了浮标体的受力及周围流体的运动情况,与圆柱形浮标体流体分析结果进行了比较分析,论证了这种浮标体外形的可行性和合理性。

1 葫芦形浮标体外形设计方案

表层漂流浮标体的理想状态为浸在水下部分不受水流的干扰、浮在水上部分不受风的干扰。想要达到干扰为零的效果是不可能的,希望尽可能减小其影响,由此提出了一种体积小、测量准确、定位和通讯信号稳定的新型表层漂流浮标体设计方案,如图 4 所示。新型表层漂流浮标体为上小下大的葫芦形,包括半球形

底部和半球形顶部上端的凸起部分,二者之间平滑过渡。凸起部分内部顶端设置有天线,半球形底部内部设置有定位通讯模块、电池组和开关,卫星通讯天线设置于凸出部内,在不增大浮球体积的情况下使天线远离海面,可增强信号强度,降低电池消耗,半球形底部和半球形顶部大小由电池组和天线尺寸决定。葫芦形浮标体能减少风阻和水阻,使得浮标体对水帆拉格朗日运动的影响减小到最低,以提高测量准确度。

这种葫芦形浮标体体积远远小于同等高度(直径)的球形浮标体,也显著小于同等高度、同等最大外径的圆柱形浮标体,在漂流观测过程中可有效降低其对水帆运动的影响;且其上部体积更小,出露海面不明显,较传统浮标体更能起到自我防护的作用。



图4 表层漂流浮标体

Fig. 4 Buoy body of full filled surface drifting buoy

2 浮标体流体对比分析

2.1 Solidworks 建模

为进一步量化分析葫芦形浮标体较之传统浮标体的优越性,拟与现有典型圆柱形和圆球形浮标体进行流体对比分析。经计算,球形浮标体要达到与葫芦形浮标体同等高度,其体积须达到葫芦形浮标体约2倍大,流体分析结果差异非常显著,所以在此不对球形浮标体做分析,仅对体积差别较小的圆柱形浮标体进行流体对比分析,从而明确葫芦形浮标体设计的可行性、合理性和优越性。

SolidWorks 软件是基于 Windows 系统的三维机械设计软件,能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量,且操作简单方便、易学易用^[1],本文运用该软件建立模型。

葫芦形浮标体 1/3 浸在水中、2/3 浮在水面上,对比分析应分水下部分和水上部分分别进行。在模型创建时充分考虑了对比性问题,并根据电池包、定位传输通讯模块和天线等的尺寸大小,最终建立了两种浮标体水上部分和水上部分状态下的四种模型,同时又运用 SolidWorks 质量评估指令确保葫芦形浮标体和传统圆柱形浮标体的体积相同,两种形状浮标体水下部分体积均约为 3 665 cm³,水上部分体积均约为 11 767 cm³。两种浮标体的 4 种分析模型分别如图 5、6 所示。

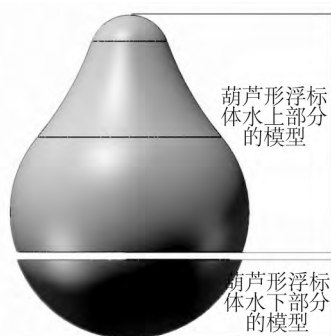


图5 葫芦形浮标体分析模型

Fig. 5 Analysis model of gourd buoy body



图6 圆柱形浮标体分析模型

Fig. 6 Analysis model of cylindrical buoy body

流体分析时,建立的长方体流域模型水下部分尺寸为 800 mm×800 mm×350 mm(长×宽×高),水上部分尺寸为 800 mm×800 mm×550 mm(长×宽×高)。

2.2 控制方程

1) 连续性方程

任何流动过程都必须满足连续性方程,连续性方程也就是质量守恒方程,根据质量守恒定律可知:单位时间内流体微元中质量的增加等同于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律,可得到连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流体流速, m/s ; t 为时间, h ; $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 为单位体积内由于密度场不定常性引起的质量变化; $\text{div}(\rho u)$ 为流出单位体积表面的流体质量。

2) 动量方程

利用动量守恒定律可以得到不可压缩流体的 Navie-Stokes(简称 N-S) 方程,通过推导得到 RANS 方程和雷诺时均流体连续方程的表达式:

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

式中: u_i 为 x 方向上的流量分量; u_j 为 y 方向上的流量分量; x_i 为 x 方向上的压强分量; x_j 为 y 方向上的压强分量; μ 为动力黏度,单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ 为压强梯度的时均变化量; $\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 为流体微团的变化率; $\frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j}$ 为雷诺应力在 y 方向上的平均变化率; F_i 为 x 方向上的单位流体体积力分量。

3) 湍流方程

采用的湍流模型为 $k-\varepsilon$ 方程,在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, k 和 ε 是两个基本未知量,与之相对应的运输方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{S^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: k 为湍动能; ε 为耗散涡; $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}$ 为湍动能的变化率; $\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}$ 为对流输运的湍动能在 x 方向上的变化率; $\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}$ 为耗散涡的变化率; $\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}$ 为对流输运的耗散涡在 x 方向上的变化率; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; G_k , G_ε 为湍动能 k 和耗散涡 ε 对应的 Prandtl 常数; S_k , S_ε 为用户定义的源项。

2.3 ICEM 网格划分

计算区域的离散化是流体分析前需要进行的必不可少的工作,通俗地讲就是网格划分,而数值模拟结果的好坏与网格划分效果是息息相关的^[1]。用 ICEM 完成网格划分。ICEM CFD(the integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics) 是一种专业的 CAE 前处理软件^[13]。由于四面体网格不能很好地描述圆弧的边缘特征,为尽量少用四面体网格描述圆弧,在生成四面体网格后,再使用三棱柱网格细化圆弧边缘。各个模型的网格划分结果如图 7~10 所示。网格生成后,输出网格文件为 cfx5,用于 CFX 流体分析。

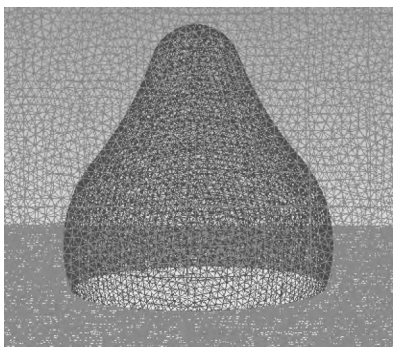


图 7 葫芦形浮标体水上部分的网格划分

Fig. 7 Meshing of the above-water part of gourd-shaped buoy body

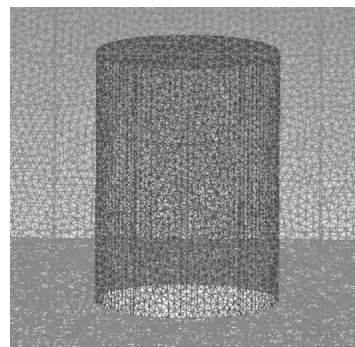


图 8 圆柱形浮标体水上部分的网格划分

Fig. 8 Meshing of the above-water part of cylindrical buoy body

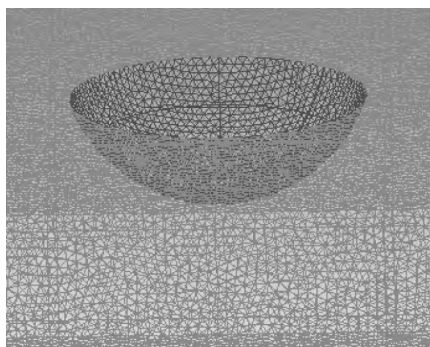


图 9 葫芦形浮标体水下部分的网格划分

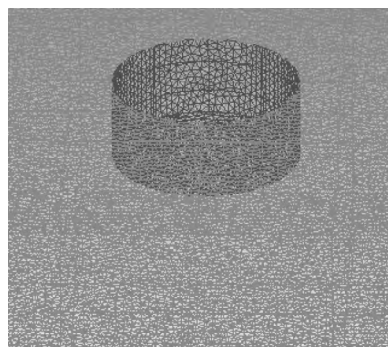


图 10 圆柱形浮标体水下部分的网格划分

Fig. 9 Meshing of the underwater part of gourd-shaped buoy body Fig. 10 Meshing of the underwater part of cylindrical buoy body

2.4 CFX 流体分析前置处理

在分析前置处理时,假定浮标体是固定不动、流体是相对运动的。本文研究目的是探讨葫芦形表层漂流浮标体研制的可行性,而影响浮标测流准确性的关键因素是海水的阻力和空气的阻力。由于现有文献缺少可参考的表层漂流浮标体风阻力和水阻力流体分析的参数,所以在进行浮标体流体分析时,为了更好地论证葫芦形浮标体的可行性,影响浮标体水下部分的海流速度设置为 20 cm/s、50 cm/s、100 cm/s,对应着常规海洋观测中较小、中等及较大的海流流速;影响浮标体水上部分的风速设置为 2.5 m/s、6.8 m/s、12.4 m/s、19.0 m/s,对应着 2 级、4 级、6 级、8 级风的中间风速值。为提高运算速度,精度残差值统一设置为 0.000 1。

2.5 CFX 流体分析

对浮标体而言,海水的阻力和空气的阻力效果体现在浮标体所受压力的变化上,因此针对最大压力分析来论述葫芦形浮标体的可靠性。

当海流速度设置为 20 cm/s 时,分析结果如图 11、12 所示。葫芦形浮标体水下部分所受最大压力为 21.48 Pa,小于圆柱形浮标体水下部分所受最大压力 34.47 Pa,减大幅度达 28.1%。

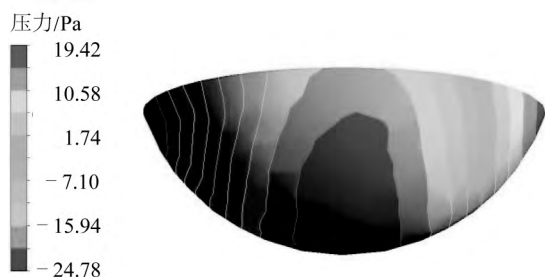


图 11 流速设为 20 cm/s 时葫芦形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 11 Pressure analysis of the underwater part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 20 cm/s

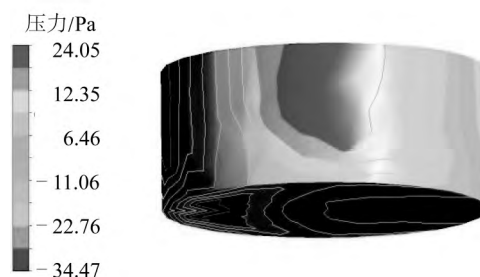


图 12 流速设为 20 cm/s 时圆柱形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 12 Pressure analysis of the underwater part of cylindrical buoy body when the flow rate is 20 cm/s

当海流速度设置为 50 cm/s 时,分析结果如图 13、14 所示。葫芦形浮标体水下部分所受最大压力为 155.2 Pa,小于圆柱形浮标体水下部分所受最大压力 217.6 Pa,减大幅度达 28.7%。

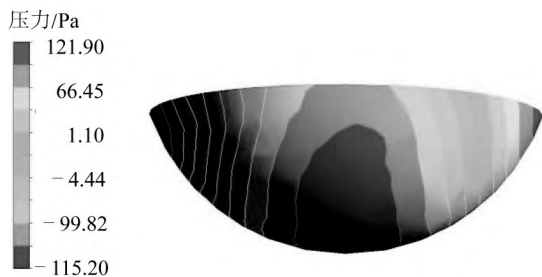


图 13 流速设为 50 cm/s 时葫芦形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 13 Pressure analysis of the underwater part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 50 cm/s

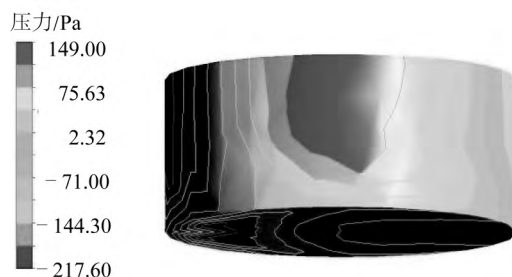


图 14 流速设为 50 cm/s 时圆柱形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 14 Pressure analysis of the underwater part of cylindrical buoy body when the flow rate is 50 cm/s

当海流速度设置为 100 cm/s 时,分析结果如图 15、16 所示。葫芦形浮标体水下部分所受最大压力为 621.6 Pa,小于圆柱形浮标体水下部分所受最大压力 875.5 Pa,减小幅度达 28.0%。

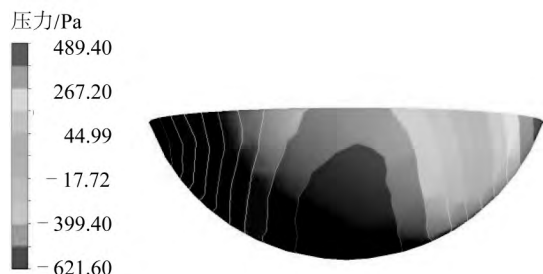


图 15 流速设为 100 cm/s 时葫芦形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 15 Pressure analysis of the underwater part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 100 cm/s

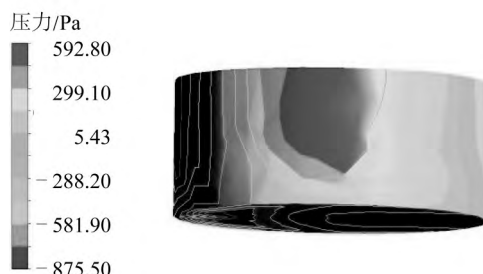


图 16 流速设为 100 cm/s 时圆柱形浮标体水下部分的压力分析图

Fig. 16 Pressure analysis of the underwater part of cylindrical buoy body when the flow rate is 100 cm/s

当风速设置为 2.5 m/s 时,分析结果如图 17、18 所示。葫芦形浮标体水上部分所受最大压力为 11.4 Pa,小于圆柱形浮标体水上部分所受最大压力 12 Pa,减小幅度达 5.0%。

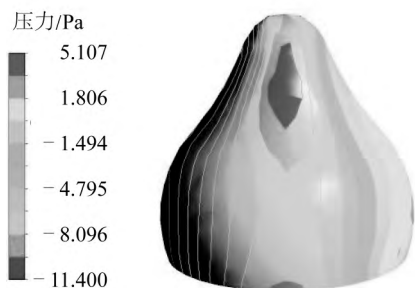


图 17 风速设为 2.5 m/s 葫芦形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 17 Pressure analysis of the above-water part of gourd-shaped buoy body when the wind speed is 2.5 m/s

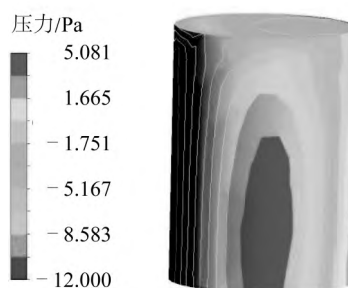


图 18 风速设为 2.5 m/s 圆柱形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 18 Pressure analysis of the above-water part of cylindrical buoy body when the flow rate is 2.5 m/s

当海流速度设置为 6.8 m/s 时,分析结果如图 19、20 所示。葫芦形浮标体水上部分所受最大压力为 86.72 Pa,小于圆柱形浮标体水上部分所受最大压力 91.2 Pa,减小幅度达 4.9%。

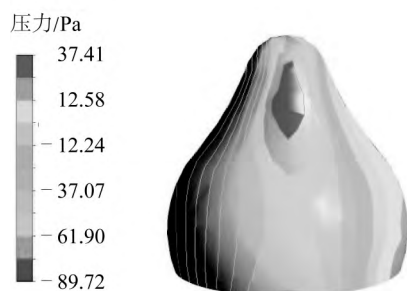


图 19 风速设为 6.8 m/s 葫芦形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 19 Pressure analysis of the above-water part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 6.8 m/s

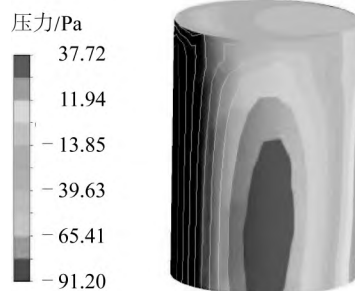


图 20 风速设为 6.8 m/s 圆柱形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 20 Pressure analysis of the above-water part of cylindrical buoy body when the flow rate is 6.8 m/s

当海流速度设置为 12.4 m/s 时,分析结果如图 21、22 所示。葫芦形浮标体水上部分所受最大压力值为 290.6 Pa,小于圆柱形浮标体水上部分所受最大压力 313.1 Pa,减大幅度达 7.2%。

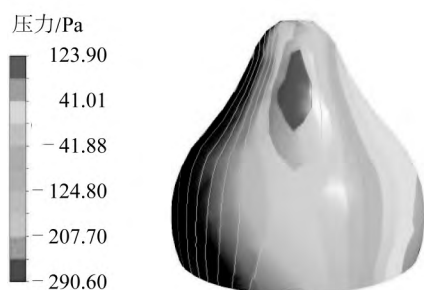


图 21 风速设为 12.4 m/s 葫芦形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 21 Pressure analysis of the above-water part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 12.4 m/s

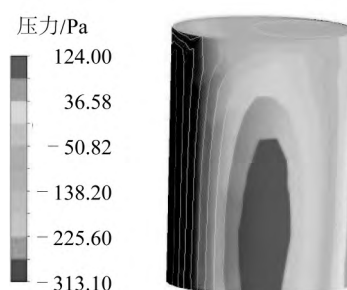


图 22 风速设为 12.4 m/s 圆柱形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 22 Pressure analysis of the above-water part of cylindrical buoy body when the flow rate is 12.4 m/s

当海流速度设置为 19 m/s 时,如图 23、24 所示。葫芦形浮标体水上部分所受最大压力为 684.1 Pa,小于圆柱形浮标体水上部分所受最大压力 737.3 Pa,减大幅度达 7.2%。

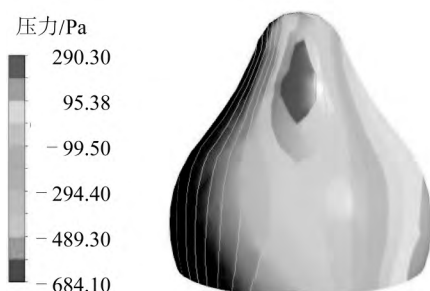


图 23 风速设为 19.0 m/s 葫芦形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 23 Pressure analysis of the above-water part of gourd-shaped buoy body when the flow rate is 19 m/s

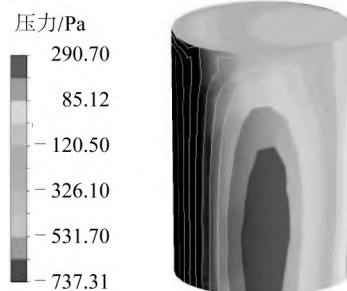


图 24 风速设为 19.0 m/s 圆柱形浮标体水上部分的压力分析图

Fig. 24 Pressure analysis of the above-water part of cylindrical buoy body when the flow rate is 19 m/s

比较各种情况下浮标所受压力分布(图 11~24),由于圆柱形浮标体在进行流体分析时会产生复杂的绕流现象^[14],由分析图可以看出葫芦形浮标体水上部分和水下部分中在压力分布上较圆柱形更均匀,尤其是水下部分,使得葫芦形浮标体姿态更稳定,因此葫芦形浮标体设计更为合理。

主要的流体分析结果如表 1 所示。

表 1 流体分析结果
Tab. 1 Results of fluid analysis

流体分析对象	速度	最大压力值/Pa		葫芦形较圆柱形 浮标体减少百分比/(%)
		葫芦形	圆柱形	
浮标体水下部分	流速 20 cm/s	24.78	34.47	28.1
	流速 50 cm/s	155.20	217.60	28.7
	流速 100 cm/s	621.60	875.50	28.0
浮标体水上部分	风速 2.5 m/s	11.40	12.00	5.0
	风速 6.8 m/s	86.72	91.20	4.9
	风速 12.4 m/s	290.60	313.10	7.2
	风速 19.0 m/s	684.10	737.30	7.2

流体分析结果表明,从两种浮标体受不同海流和风的影响程度分析(表 1),几种海流情况下,葫芦形浮标体较圆柱形浮标体降低海流影响的比例均约为 28%,因此在改善海流影响方面是比较显著的。几种风速情况下,葫芦形浮标体较圆柱形浮标体降低风影响的比例最高只有 7.2%,虽有改善,但不是很显著,这与为提高可比性,设计两种浮标体体积保持一致,从而使得葫芦形浮标体中部较圆柱形浮标体明显要宽是直接相关的,如果取最大外径相同的葫芦形和圆柱形浮标体作比较,浮标体水上部分所受的最大压力值会进一步减小,改善效果会大大提高。

由上述流体分析结果可以得出,设计为葫芦形的新型表层漂流浮标体显著优于现有典型的圆柱形和圆球形浮标体,新型葫芦形表层漂流浮标体可以更好地满足水体综合调查布放表层漂流浮标观测需求。

3 结 语

针对现在表层漂流浮标体设计方面存在的不足,提出了葫芦形新型表层漂流浮标体的设计方案。通过利用 Solidworks 软件建立葫芦形浮标体和常用的圆柱形浮标体水下部分和水上部分状态下的四种模型,利用 Workbench 软件中的 CFX 流体分析模块,分别对在三种不同流速和风速情况下同等体积的葫芦形浮标体和圆柱形浮标体开展流体分析和比较。得出葫芦形浮标体相对圆柱形浮标体受到的压力分布更为均匀;在表层海流观测中非常受关注的降低海流和风对浮标体的影响方面,葫芦形浮标体相对于传统的圆柱浮标体有明显的改善,水下部分压力值较圆柱浮标体减小约 28%,水上部分较圆柱形浮标减小 4.9%~7.2% 不等。流体分析结果充分表明,葫芦形浮标体设计较过去常用的圆柱形及圆形浮标体更具合理性、性能更优越。

参考文献:

- [1] 马庆锋. 漂流浮标数据采集系统设计 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (MA Q F. The design of data acquisition system for drifting float [D]. Qingdao: Ocean University of Chian, 2009. (in Chinese))
- [2] 苏京志. 全球上层海流的漂流浮标资料分析 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000. (SU J Z, Analysis of drifting buoy data of the global surface circulation [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese))
- [3] 苏京志, 王东晓, 陈举, 等. 利用回归模型模拟卫星跟踪海洋漂流浮标轨迹 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(6) : 607-617. (SU J Z, WANG D X, CHEN J, et al. Modeling the trajectories of satellite-tracked drifters with regression models [J]. Advancing Earth Science, 2005, 20(6) : 608-617. (in Chinese))
- [4] 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 利用漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域表层及其季节分布特征的分析研究 [J]. 海洋学报, 2008, 30(6) : 1-16. (HU X M, XIONG X J, QIAO F L, et al. Surface current and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent region derived from satellite-tracked drifter [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(6) : 1-16. (in Chinese))
- [5] 于龙, 熊学军, 郭延良, 等. 根据漂流浮标资料对黑潮 15 m 层流路及流轴特征的分析 [J]. 海洋科学进展, 2014, 32

- (3): 316-323. (YU L, XIONG X J, GUO Y L, et al. Analysis of the path and axis features of the Kuroshio at the depth of 15 m based on drifting buoy data [J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(3): 316-323. (in Chinese)) .
- [6] HWANG B. Inter-comparison of satellite sea ice motion with drifting buoy data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(24): 8741-8763.
- [7] GAN X J, CHEN Y H, XU Y P, et al. Design and development of a drifting buoy for gathering environmental data [M]. The Empire's New Clothes: Palgrave Macmillan, 2014: 417-421.
- [8] 余立中. 浅析 SVP 使用的表层漂流浮标及在我国的应用现状 [J]. 海洋技术学报, 1999(1): 18-22. (YU L Z. An elementary introduction to the application of surface layer float in China [J]. Ocean Technology, 1999(1): 18-22. (in Chinese))
- [9] 李强,赵宝强,殷鹏.一种可调节浮力的漂流浮标: CN201410226209.X [P]. 2014-08-27. (LI Q, ZHAO B Q, YIN P. A drifting buoy for adjustable buoyancy: CN201410226209.X [P]. 2014-08-27. (in Chinese))
- [10] 徐春,崔学杰,刘成龙.一种漂流浮标: CN201320872101.9 [P]. 2013-12-27. (XU C, CUI X J, LIU C L. A drifting buoy: CN201320872101.9 [P]. 2013-12-27. (in Chinese))
- [11] 李润,邹大鹏,徐振超,等. SolidWorks 软件的特点、应用与展望 [J]. 甘肃科技, 2004, 20(5): 57-58. (LI R, ZOU D P, XU Z C, et al. Characteristics, application and prospect of SolidWorks software [J]. Gansu Science and Technology, 2004, 20(5): 57-58. (in Chinese))
- [12] 张会杰. 基于 CFX 的潜标系统缆涡激振动及其减振研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. (ZHANG H J. Vortex-induced vibration and damping research about the mooring of subsurface buoy with CFX [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese))
- [13] 常欣. Fluent 船舶流体力学仿真计算工程应用基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011. (CHANG X. Fundamentals of engineering application in ship hydrodynamics simulation of fluent [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011. (in Chinese)) .
- [14] 武玉涛,任华堂,夏建新. 圆柱绕流研究进展及展望 [J]. 水运工程, 2017(2): 19-26. (WU Y T, REN H T, XIA J X. Research progress and prospects on flow across cylinder [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(2): 19-26. (in Chinese))

~~~~~

( 上接第 61 页)

- [8] YU X P. Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review [J]. Coastal Engineering Journal, 2002, 44( 2): 127-147.
- [9] 刘勇,谢璐琼,姚卓琳. 淹没式斜板防波堤水动力特性的数值分析 [J/OI]. 2011, <http://www.paper.edu.cn/download/downPaper/201111-69>. ( LIU Y, XIE L Q, YAO Z L. Analysis on the hydrodynamic performance of a submerged inclined plate breakwater [J/OI]. 2011, <http://www.paper.edu.cn/download/downPaper/201111-69>. ( in Chinese) )
- [10] RAO S, SHIRLAL K G, VARGHESE R V, et al. Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater [J]. Ocean Engineering, 2009, 36( 15): 1199-1207.
- [11] YAGCI O, KIRCA V S O, ACANAL L. Wave attenuation and flow kinematics of an inclined thin plate acting as an alternative coastal protection structure [J]. Applied Ocean Research, 2014, 48: 214-226.
- [12] 日本土木学会. 海岸波動: 波・構造物・地盤の相互作用の解析法 [M]. 東京: 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会, 1994: 331-339. ( JSCE. Coastal wave motion: Analysis method of wave, structure, ground interaction [M]. Tokyo: Coastal Engineering Committee Research Review subcommittee, 1994: 331-339. ( in Japanese) )
- [13] YU X P. Patching methods for the analysis of wave motion over a submerged plate [J]. Reports of the Faculty of Engineering, Nagasaki University, 1995, 25( 44): 35-42.
- [14] BREBBIA C A, DOMINGUEZ J. Boundary elements [M]. Boston: WIT Press, 1994: 22-31.
- [15] 刘鹏飞,郑永红,王利生. 淹没矩形防波堤透反射系数特性研究 [J]. 海洋学报, 2006, 28( 5): 138-144. ( LIU P F, ZHENG Y H, WANG L S. Reflection and transmission properties of submerged rectangular breakwaters [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28( 5): 138-144. ( in Chinese) )