



一种强流下低偏移的水下升力体浮标性能研究*

张洪光¹, 刘云¹, 谢宇^{2,3}

(1. 金华市公路港航与运输管理中心, 浙江 金华 312000;

2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 310039; 3. 浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对传统浮标在内河及沿海强流环境下存在明显偏移、进而导致助航精度降低的问题, 进行了利用水下升力体浮子升力和张紧锚链张力共同作用以减少浮标偏移的研究。采用数值模拟方法分析 NACA 0012、NACA 0015、NACA 2412 和 NACA 2415 四类翼型的升力和阻力特性, 选择 NACA 2412 作为构造水下升力体的基本翼型, 以此变形构建三维水下升力体并对其升力和阻力特性进行分析, 得到可适用的水下升力体浮子。应用数值模拟和物理模型试验方法, 对于采用水下升力体浮子的浮标模型和一系列采用同体积圆柱浮子的浮标模型, 分析其浮标偏移随流速变化情况。结果显示, 在等效 2.5 m/s 以上同等流速工况下, 水下升力体浮标相比圆柱体浮标偏移降低了 25%, 系缆最大张力减小了 58%, 且姿态稳定性提高。水下升力体浮标在强流环境下可满足低偏移、高助航精度需求, 但整体设计时需避免水下升力体出现负攻角工况。

关键词: 浮标; NACA 翼型; 水下升力体; 圆柱体浮子; 浮标偏移; 系缆张力

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0052-08

Performance of an underwater lifting body-based low-offset buoy under strong current conditions

ZHANG Hongguang¹, LIU Yun¹, XIE Yu^{2,3}

(1. Jinhua Highway, Waterway and Transportation Management Center, Jinhua 312000, China;

2. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 310039, China;

3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: To address the issue of traditional buoys drifting significantly and losing navigational accuracy in strong currents in rivers and coastal areas, a study is conducted on reducing buoy offset by utilizing the combined effects of hydrodynamic lift generated by an underwater lifting body float and tension forces from a taut anchor chain. A numerical simulation method is employed to analyze the lift and drag characteristics of four NACA airfoil types: NACA 0012, NACA 0015, NACA 2412, and NACA 2415. Based on the analysis results, the NACA 2412 is selected as the baseline airfoil for constructing the underwater lifting body. A three-dimensional underwater lifting body is constructed by modifying this airfoil, and its lift and drag characteristics are subsequently analyzed to obtain a viable design for an underwater lifting body float. Numerical simulations and physical model experiments are applied to analyze the variation of buoy offset with flow velocity for a buoy model equipped with an underwater lifting body float, as well as for a series of buoy models using cylindrical float of the same volume. The results show that under equivalent flow velocity conditions above 2.5 m/s, the buoy equipped with an underwater lifting body buoy exhibited a 25% reduction in offset and a 58% decrease in maximum mooring cable tension compared with the cylindrical float buoy. Additionally, attitude stability is improved. The underwater lifting body buoy can meet the requirements of low offset and high navigation accuracy in strong current environments. However, the overall design must avoid negative angle of attack conditions for underwater lifting body.

Keywords: buoy; NACA airfoil; underwater lifting body; cylindrical float; buoy offset; mooring cable tension force

收稿日期: 2025-05-22 录用日期: 2025-07-04

*基金项目: 浙江省交通运输厅重大交通建设工程科研项目(2024-GCKY-07)

作者简介: 张洪光(1978—), 男, 工程师, 研究方向为港航工程。

浮标是一种锚定在固定位置,用作水面导航的辅助设备,标记航道、浅水区、障碍物或其他特殊用途。浮标包括浮子、连杆、配重等结构。一些浮标还装有雷达应答器、无线电测向仪、雾信号和用于深海数据观测的海洋仪器等设备,用于深海数据观测^[1]、海洋环境监测^[2-5]、波浪观测^[6-7]等。在需要精确定位和稳定性的应用中,浮标偏移可能导致严重的搁浅损毁事故。在一些基岩河床航道,如钱塘江中上游的衢江,是基岩河床深挖的山区渠化航道,一般水面宽 300 m 以上,而航道仅宽 60 m,航道相比河面宽度较小,见图 1,浮标的定位准确性要求大大提升,浮标偏移将导致船舶偏航、搁浅、破损等严重事故。此时可以采用张紧系泊系统来降低浮标的偏移半径^[8-10]。然而,在有强烈河流或潮流流速的区域,由于水流和张紧系泊缆的作用力,采用张紧系泊系统的浮标仍可能出现显著的水平偏移,甚至浸入水中导致灯器损坏。为了解决这个问题,扩大浮标尺寸以提供更大的储备浮力是一种潜在的解决方案。然而,增大的浮标迎流面积也将增加水流阻力,同样导致浮标偏移。



图 1 钱塘江中、上游航道情况

Fig. 1 Waterway conditions in the middle and upper reaches of the Qiantang River

一些具有特殊形状的物体,流体经过上、下表面时会产生压力差,从而产生升力。翼型是常用的升力截面,美国航天航空局开发了应用广泛的 NACA 翼型系列,包括四位数(数字顺序 1 代表相对弯度、顺序 2 代表最大弯度位置、顺序 3~4 代表相对厚度)、五位数、六位数翼型。四位数翼

型进一步分为对称型和非对称型,后者作为水动力部件也应用较多^[11-14]。对称翼型具有较小的厚度和较低的阻力,而非对称翼型如 NACA 2414 和 NACA 2421 具有较大的厚度,并表现出如低速时阻力减小和高升阻比的特性^[15]。升力体是源自翼型的升力产生结构。该方法最初应用于航空设计中,用翼型轮廓代替机身以产生补充升力^[16]。通过将机翼和机身集成在一起形成升力体,可以获得较好的升阻力性能。

拟探索一种新方法来解决强流下张紧系泊浮标的偏移问题。通过应用升力体原理并考虑浮标的运行特性,对外部浮子的几何形状进行优化,使其具有水动力升力特性。当受到高流速作用时,优化外形的浮子在减少阻力的同时产生向上升力,在张紧系泊缆的拉力共同作用下产生向上运动趋势,进而减小横向偏移。这相当于在相同流速下增加了浮标的储备浮力,同时不附带增加水流阻力。

首先利用数值模拟分析水上常用的翼型在不同攻角下的升阻性能。以具有较好升阻比翼型截面为基础进行变换,构建水下升力体的浮子外形;然后使用数值模拟和物理模型试验检查升力体浮标的水动力特性。结果表明,与传统设计相比,采用张紧系泊的水下升力体浮标可有效减少偏移,提高强流下的姿态稳定性,同时还可以降低系泊缆上的最大张力。

1 研究方法

1.1 数值模拟

采用基于 ANSYS Fluent 的数值模拟方法,对翼型选择和升力体设计进行升阻性能分析。其中,通过非结构化网格离散 Fluent 中的计算域,尺寸函数用于细化翼型边界,入口和出口分别施加速度入口和出口条件。同时,为使边界效应最小化,距翼型中心的上游和下游距离指定为 10 翼型弦长。整体计算域设置见图 2。湍流模型采用 *realizable k-ε* 模型,该模型已被证实计算翼型流动分离、边界层流动等方面具有较好的准确性^[17]。通过应用边界层网格划分和二阶离散格式,提升

了解精度，并进行网格和时间步长收敛性分析。结合案例验证表明，数值计算结果与试验结果在工程允许误差范围内保持一致，从而验证了上述数值方法的适用性与有效性。

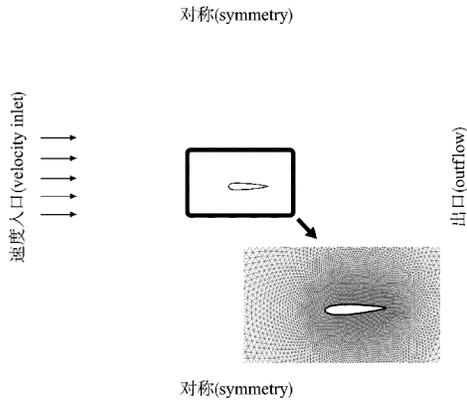


图2 Fluent 中的计算域
Fig. 2 Calculation domain in Fluent

水下升力体浮标的水动力分析采用结合流固耦合的 Flow-3D 软件。它可以模拟浮标附近的黏性流场，并考虑系泊缆和浮标之间的耦合效应。研究以某山区渠化航道环境为基础，以水下升力体浮标全尺寸模型为计算对象，建立流固耦合计算域。为了提高计算效率，模型中不包括细长的灯架及灯器，如浮标顶灯。计算域为一个 30 m×30 m×10 m、水深为 5 m 的背景区域，包围一个 4 m×6 m×4.5 m 的重叠网格，该网格聚焦于浮子周围的预期偏移区域。浮标位于整体计算域长度的前 1/3 处。重叠网格允许模拟细化区域内的运动，同时捕捉远场效应。正式分析、提取数据之前进行网格和时间步长收敛性分析。整体计算域设置见图 3。

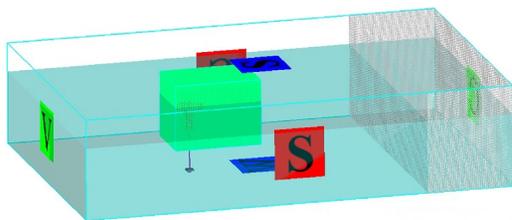


图3 Flow-3D 中的计算域
Fig. 3 Calculation domain in Flow-3D

1.2 模型试验

为评估小比例浮标模型的性能，在波流水槽中

进行物理模型试验。该水槽的尺寸为 15 m×1.0 m×0.8 m (长×宽×深)，最大流量为 250 L/s，流速可控，并安装多普勒流量计以获取和监测水槽内流速的变化。试验按照比例为 1:18 的重力相似准则设计，试验水位约为 0.4 m，试验布置见图 4。为确定浮标模型的位置和运动，采用基于计算机视觉的双目距离测量装置见图 5，该装置测量的误差随距离变化而变化，其精度随距离变化见图 6。试验中双目测量装置距离浮标模型约 1.5 m，测量误差并不大于 0.5%。

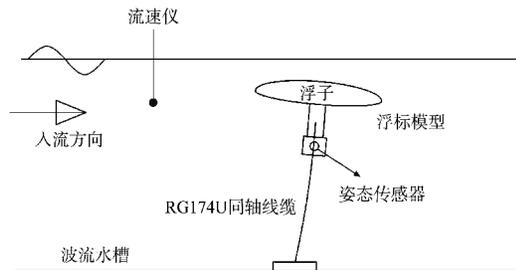


图4 模型试验示意图
Fig. 4 Schematic diagram of model experiment



图5 双目测距装置
Fig. 5 Binocular distance measurement device

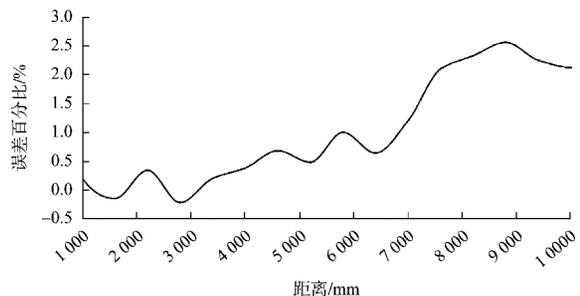


图6 双目测距装置的精度误差
Fig. 6 Accuracy errors of binocular distance measurement device

浮标模型通过 3D 打印制造, 带有系泊线和姿态传感器的安装点, 同时满足质量分布相似。使用铅粉平衡每个试验模型的质量, 确保它们的质量大致相等。试验模型底部安装姿态传感器作为配重, 同时在试验过程中采集模型姿态数据。浮标模型的系泊缆采用 RG174U 同轴电缆, 一端延伸到水槽外, 传输姿态传感器的蓝牙信号。在试验过程中, 调节波流水槽水泵功率以产生所需流速。当浮标模型的姿态稳定时, 采用基于计算机视觉的双目距离测量设备用于捕获浮标模型的位置, 然后将该位置与在静水中的位置进行比较, 以进行下一步分析。

2 试验结果分析

2.1 水下升力体浮子的翼型选择和构造

在水下翼型应用中, 实现最小化阻力且最大化升力的性能, 对翼型设计的实用性至关重要。NACA 翼型系列是水上环境中最常用的翼型系列, 常见翼型包括对称翼型, 如 NACA 0012 和 NACA 0015, 以及非对称翼型, 如 NACA 2412 和 NACA 2415。对于对称截面翼型, 当翼型弦线水平时对应为零升力攻角, 而其阻力随着厚度的增加而增加。不同翼型的升力和阻力特性也有所不同, NACA 2412、NACA 0012、NACA 2415、NACA 0015 的升阻力特性见图 7。正攻角时, 较小厚度的翼型表现出较低的阻力和优越的升阻性能; 负攻角时也出现了类似的趋势, 较薄翼型产生的负升力较小。与对称的 NACA 0012 相比, 在整个包线上 NACA 2412 和 NACA 2415 的升阻比高很多。基于上述分析, 选定 NACA 2412 翼型为基础, 以此开发升力体浮子外形。

通过变换 NACA 2412 外形来构建水下升力体。由于常规浮标不安装对正流向装置, 因此所使用的水下升力体浮子应在水中表现出各向同性的升力和阻力性能。在 NACA 2412 外形最厚处截断, 并使该横截面围绕截断线旋转 360°, 经必要的圆滑处理后形成水下升力体浮子外形, 见图 8。

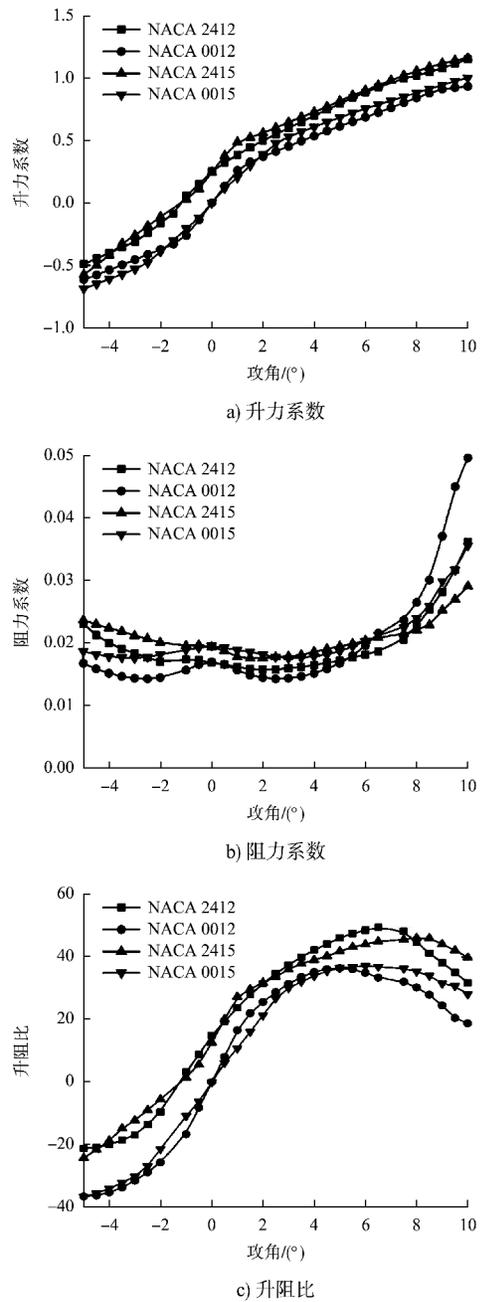


图 7 4 个翼型的升力和阻力特性随攻角的变化
Fig. 7 Variations of lift and drag characteristics with angle of attack of four airfoils

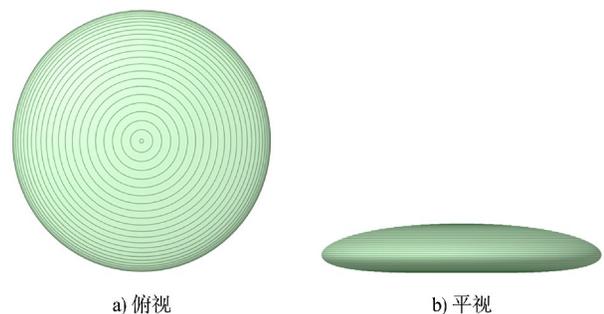


图 8 一种基于 NACA 2412 构建的水下升力体浮子
Fig. 8 An underwater lifting body float constructed based on NACA 2412

在使用张紧系泊和体积不变的情况下,悬浮在水中的浮子在一定流速下的稳定位置主要由其向上的升力与水流阻力的比值,即升阻比决定。对所构建的水下升力体浮子的升力和阻力特性进行分析,其升阻比随攻角的变化情况见图9。为了确保浮标的稳定性,浮标的最大允许摇摆角通常小于 15° 。因此,表中的攻角范围设定为 $-14^\circ \sim 14^\circ$ 。

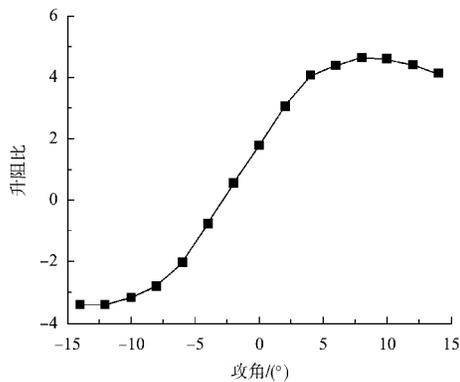


图9 水下升力体浮子升阻比随攻角的变化

Fig. 9 Variation of lift to drag ratio of underwater lifting body float with angle of attack

由图9可知,水下升力体浮子的最大升阻比约为4.64,低于标准NACA 2412翼型。这主要源于为了实现在不同流向时水动力性能一致所进行的后缘修改,以及在二维截面分析中所忽略的三维效应。同时,在浮标实际应用中,过度的升力会使系泊系统荷载过大,对整体性能产生不利影响。由于其由非对称翼型生成,因此浮子在 0° 攻角时可产生非零升力。随着角度在正方向上增加,升阻比提高,在攻角 8° 左右达到峰值。当攻角变为负值时,产生的升力方向向下,相当于降低了浮子的浮力,因此,需要在整体设计中注意,避免浮标在水流作用下出现负攻角的情况。

2.2 水下升力体浮标性能分析

为了分析升力体浮标的抗偏移性能,利用先前构建的升力体浮子几何形状创建浮标模型。整体质量分布参考了现有的导航灯,以确保满足基本的稳定性要求,同时为了提升计算效率不对灯架进行建模。水下升力体浮子的直径为2 200 mm,顶部位于静水线以下约0.3 m。为了与常规圆柱体浮标的偏移特性进行比较,在保持浮标下部结构

质量分布和总体积不变的情况下,构建了直径为2 200、1 800、1 600 mm圆柱体浮标模型。系泊点位于浮标体的底部,用于数值模拟的浮标模型见图10。

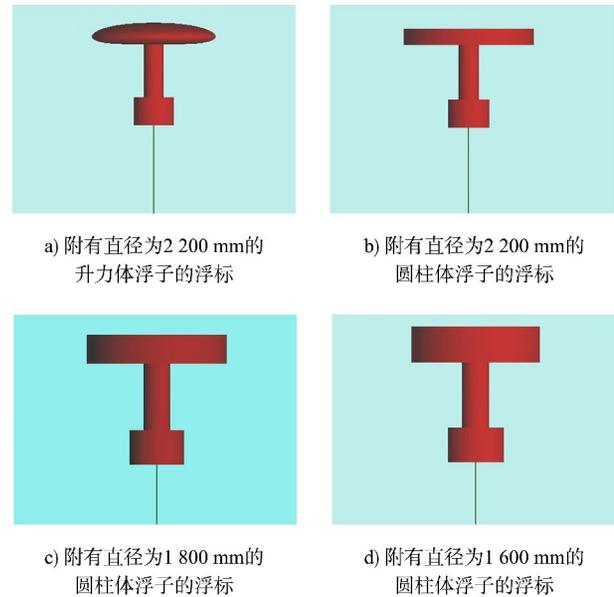


图10 用于数值模拟的浮标模型

Fig. 10 Buoy models for numerical simulation

为了描述浮标偏移的程度,定义无量纲量 O 为浮标“偏移比”。浮标在平静水中的初始位置作为原点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,其中 x_0 、 y_0 和 z_0 表示点 P_0 的坐标。对于某一时刻 n 受水流影响的 $P_n(x_n, y_n, z_n)$ 点的浮标,该浮标此时的偏移比 O 采用下式计算:

$$O = \frac{P_n - P_0}{h} w \quad (1)$$

式中: h 为浮标模型系泊点处的水深。定义 x 方向水平垂直于流向, y 方向平行于流向, z 方向为垂直方向,则 O_y 和 O_z 分别为 y 和 z 方向的偏移比。由于浮标模型受到 y 方向水流作用时在 x 方向上的摆动较小,因此不对 x 方向的偏移比进行分析。

不同浮标模型的偏移比随流速增加而变化的数值和试验结果见图11,数值结果显示出与试验结果一致的趋势。在高流速下,数值结果和试验结果之间具有更好的一致性,原因可能是试验中用于浮标模型的环扣系泊段存在一定程度的弹性。当遭遇高流速水流时,系泊缆充分拉伸,减少了

弹性的影响。由图可知: 每个浮标模型的 O_y 、 O_z 随流速的增加而增加。在相同流速下, 水下升力体浮标模型表现出最小的 O_y 和 O_z 。直径最小的圆柱浮标模型具有最大的偏移比, 其原因是在体积不变的情况下, 较小的直径使圆柱高增大, 导致正面迎流面积较大, 进而产生了较大的横向水流阻力。水下升力体浮标在水流的影响下产生较低的阻力和额外的升力, 在与张紧系泊的张力共同作用下, 减少了 y 和 z 方向的偏移。以具有良好一致性的工况(对应 2.5 m/s 以上流速)试验数据分析, 水下升力体浮标相比圆柱体浮标可降低偏移 25% 以上。

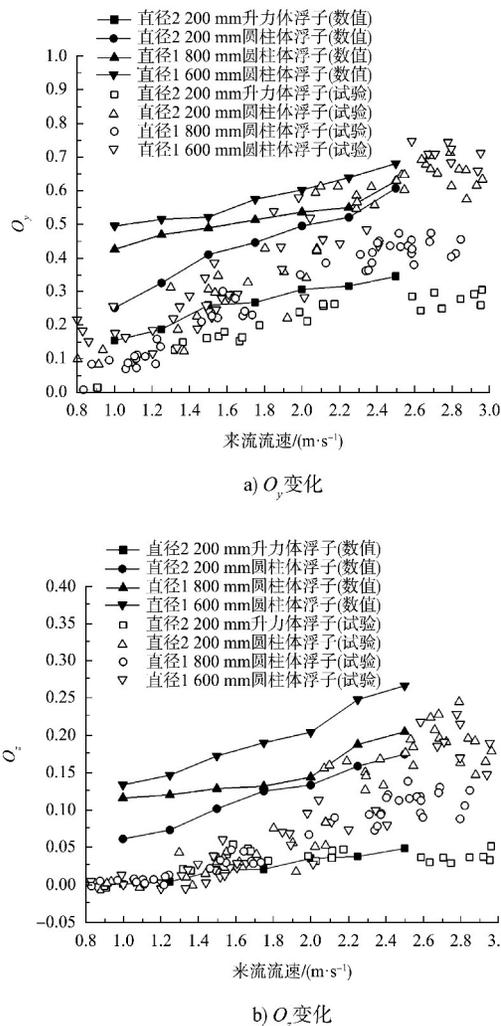
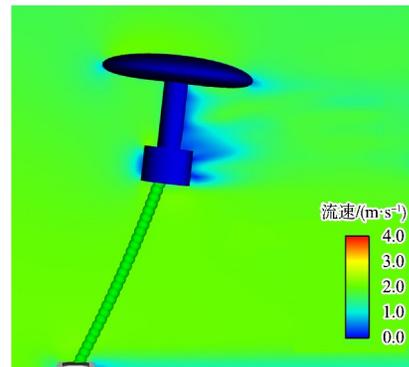


图 11 不同浮标模型的偏移比随流速变化

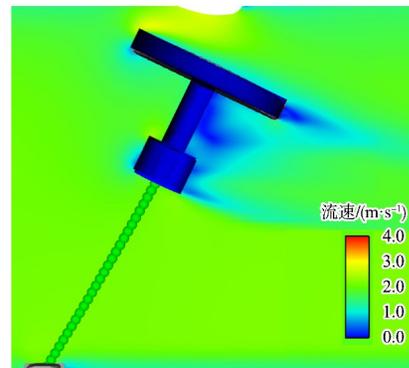
Fig. 11 Variation of offset ratio for different buoy models with flow velocity

为进一步探究浮标模型截面及沿下游方向周围流场的速度分布, 设置对应工况为来流流速 2.0 m/s,

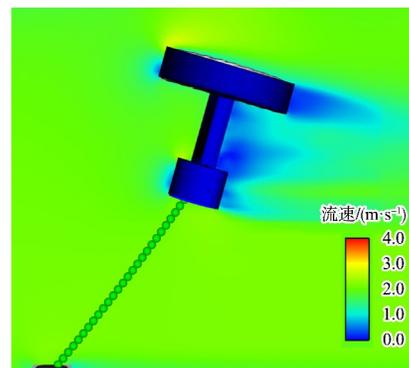
得到速度云图见图 12。由图可知, 与其他浮标模型相比, 水下升力体浮标的倾角最小, 这使得水下升力体浮标处于具有较高升阻比的有利攻角。由于系泊位置接近浮标底部, 当上部升力体浮子经历来流的更大升力时, 向上的升力水动力将产生校正力矩, 减少倾斜, 这有助于保持水下升力体浮子处于有效工况范围内并实现正向反馈。这使得水下升力体浮标在强流条件下也能保持较好的姿态。



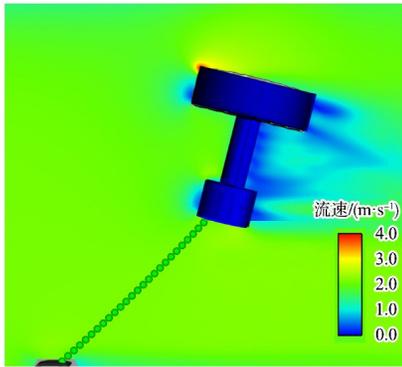
a) 采用直径为 2 200 mm 升力体浮子的浮标



b) 采用直径为 2 200 mm 圆柱体浮子的浮标



c) 采用直径为 1 800 mm 圆柱体浮子的浮标



d) 采用直径为1 600 mm圆柱体浮子的浮标

图 12 流速为 2.0 m/s 时浮标模型的姿态和附近流场的速度云图

Fig. 12 Shape of buoy models and velocity contour of nearby flow field at a flow velocity of 2.0 m/s

根据数值模拟结果提取各浮标模型系泊缆中最大张力随流速的变化情况，见图 13。水下升力体浮标系泊缆中的最大张力最小，并且在高流速下增加缓慢。对于圆柱体浮标模型，在相同流速下，系泊缆中的最大张力随圆柱直径的增加而增加。最大张力还取决于浮标模型在高流速下的响应姿态。通过与图 12 对比可知，随着浮标模型倾角的增大，系泊缆中的最大拉力也随之增大。如前所述，由于其优越的姿态控制能力，水下升力体浮标在高流速下减少系泊缆张力方面表现出优异的性能。在 2.5 m/s 流速下，水下升力体浮标相比圆柱体浮标其系缆最大张力约减小了 58%。

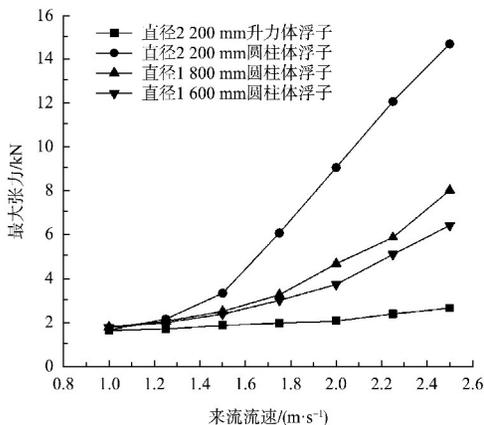


图 13 系泊缆绳的最大张力随流速的变化

Fig. 13 Variation of the maximum tension force of mooring cables with flow velocity

3 结语

1) 以 NACA 2412 翼型为基础，由平面翼形最厚处截断，并以截断轴旋转构成的水下升力体外形在全流向下仍具有较好的升阻比特性，且符合浮标应用需求。

2) 与同等体积、质量的圆柱体浮标相比，水下升力体浮标在强流作用下的偏移距离明显减小，等效 2.5 m/s 以上流速工况下可降低偏移 25% 以上。

3) 由于水下升力体浮子的升力作用，在强流作用下可自行产生校正力矩，减少浮标倾斜，同时降低系缆最大张力。

4) NACA 2412 构建的水下升力体在负攻角时将产生负升力降低浮标性能，在浮标整体设计 and 应用中需要避免负攻角的出现。

参考文献:

[1] 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.
SUN C. The Design of buoy body “Bai Long” and its dynamics analysis [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.

[2] WALLINGA J P, PETTIREW N R, IRISH J D. The GoMOOS moored buoy design [C]//Oceans 2003. New York: IEEE Press, 2003: 2596-2599.

[3] 方神光, 崔丽琴. 基于浮标站观测的磨刀门洪枯季径潮动力作用规律及相关性分析[J]. 水运工程, 2024(5): 15-22.
FANG S G, CUI L Q. Action law and correlation analysis of river-tide dynamics during flood and dry season in Modaomen based on buoy stations observation [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 15-22.

[4] CHEN S Z, ZHANG J M, LIU S X, et al. Structure design and implementation of a high stability semi-submersible optical buoy for marine environment observation [J]. Ocean engineering, 2023, 290: 116217.

[5] ZHAO D Y, LI S Z, SHI W Z, et al. Design and optimization of the teardrop buoy driven by ocean thermal energy [J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(4): 661.

- [6] RYBALKO A, MYSLENKOV S, BADULIN S. Wave buoy measurements at short fetches in the Black Sea nearshore: mixed sea and energy fluxes[J]. *Water*, 2023, 15(10): 1834.
- [7] TENG C C, BERNARD L, TAFT B, et al. A compact wave and ocean data buoy system [C]//Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. New York: IEEE Press, 2006: 1249-1254.
- [8] BREWIN R J W, DALL'OLMO G, PARDO S, et al. Underway spectrophotometry along the Atlantic Meridional Transect reveals high performance in satellite chlorophyll retrievals [J]. *Remote sensing of environment*, 2016, 183: 82-97.
- [9] LIU Y Y, RÖTTGERS R, RAMÍREZ-PÉREZ M, et al. Underway spectrophotometry in the Fram Strait (European Arctic Ocean): a highly resolved chlorophyll a data source for complementing satellite ocean color [J]. *Optics express*, 2018, 26(14): A678-A696.
- [10] LIU Y Y, BOSS E, CHASE A, et al. Retrieval of phytoplankton pigments from underway spectrophotometry in the fram strait[J]. *Remote sensing*, 2019, 11(3): 318.
- [11] MATVEEV K I, MATVEEV I I. Tandem hydrofoil system[J]. *Ocean engineering*, 2001, 28(2): 253-261.
- [12] MAHALATKAR K, LITZLER J, GHIA U, et al. Application of CFD to study performance of hydrofoil-based ship-stabilization systems [C]//ASME Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Conference. Miami: [s. n.], 2006: 385-394.
- [13] SEDLAR M, JI B, KRATKY T, et al. Numerical and experimental investigation of three-dimensional cavitating flow around the straight NACA2412 hydrofoil [J]. *Ocean engineering*, 2016, 123: 357-382.
- [14] NOWRUZI H, GHASSEMI H, GHIASI M. Performance predicting of 2D and 3D submerged hydrofoils using CFD and ANNs [J]. *Journal of marine science and technology*, 2017, 22(4): 710-733.
- [15] PARK J S, WITHERDEN F D, VINCENT P E. High-order implicit large-eddy simulations of flow over a NACA0021 aerofoil [J]. *AIAA journal*, 2017, 55(7): 2186-2197.
- [16] KATZ J, BYRNE S, HAHL R. Stall resistance features of lifting-body airplane configurations [J]. *Journal of aircraft*, 1999, 36(2), 471-474.
- [17] 康海贵, 郭伟. 竖轴水轮机三维水动力响应的数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(3): 537-541.
- KANG H G, GUO W. Three dimensional numerical simulation for hydrodynamic response of vertical axis tidal current turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2013, 34(3): 537-541.

(本文编辑 赵娟)

.....

(上接第 30 页)

- [8] PAN H D, XU T F, WEI Z X. Improved tidal estimates from short water level records via the modified harmonic analysis model[J]. *Ocean modelling*, 2024, 189: 102372.
- [9] 刘鑫仓, 袁道伟, 王晓峰, 等. 潮流准调和分析方法探讨[J]. *海岸工程*, 2023, 42(1): 88-98.
- LIU X C, YUAN D W, WANG X F, et al. Discussion on the method for tidal current quasi-harmonic analysis[J]. *Coastal engineering*, 2023, 42(1): 88-98.
- [10] 徐晓庆, 方国洪, 王新怡, 等. 渤、黄、东海潮汐的相对导纳及 N_2 , K_2 , P_1 和 Q_1 分潮的经验同潮图[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(3): 293-306.
- XU X Q, FANG G H, WANG X Y, et al. Relative tidal admittances and N_2 , K_2 , P_1 and Q_1 empirical cotidal charts in the Bohai, yellow and East China Seas [J]. *Advances in marine science*, 2011, 29(3): 293-306.
- [11] 付桂. 长江口近期潮汐特征值变化及其原因分析[J]. *水运工程*, 2013(11): 61-69.
- FU G. Recent change of tidal characteristics in the Yangtze estuary[J]. *Port & waterway engineering*, 2013(11): 61-69.
- [12] 徐元, 黄志扬, 龚鸿锋. 潮汐河口长航道乘潮问题研究[J]. *水运工程*, 2011(5): 1-6.
- XU Y, HUANG Z Y, GONG H F. On riding high tide level in a long waterway at a tidal estuary [J]. *Port & waterway engineering*, 2011(5): 1-6.
- [13] 王雅君, 张司一, 欧素英, 等. 基于短时调和分析的广东惠州双月湾瀉湖体系潮汐动力特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2025, 44(1): 93-107.
- WANG Y J, ZHANG S Y, OU S Y, et al. Analysis of tidal hydrodynamics characteristics of the Shuangyue Bay Lagoon system in Huizhou, Guangdong based on modified harmonic analysis model using the credo of smoothness[J]. *Journal of tropical oceanography*, 2025, 44(1): 93-107.

(本文编辑 王传瑜)