中国科学: 物理学 力学 天文学 2024 年 第 54 卷 第 6 期: 264511
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 软体驱控中的力学问题专题

小型深海自主定高模块动力学建模与减摇设计

王神龙[1], 侯锦辉[1], 俞代卫[1], 沈鹏[2], 张志函[2], 李海[4], 李国瑞[2,3*]

1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093;
2. 青岛哈尔滨工程大学创新发展中心, 青岛 266071;
3. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001;
4. 杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018
*联系人, E-mail: grli@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-21; 接受日期: 2023-11-07; 网络出版日期: 2024-05-28
国家自然科学基金(编号: 12102398, 12172226)资助项目

摘要 深海智能装备在深海科考、国防安全等领域发挥重要作用, 受深海极端静水压影响, 其水下操控和姿态控制面临巨大挑战. 本文设计了一种适用于3000 m水深的自主定高模块, 该模块通过将电路板集成在硅胶基质中实现深海极端水压自适应, 并采用电磁线圈驱动PET背鳍薄片实现动力定高. 本文利用高速相机分析了该模块下潜运动过程中的横摇现象, 并进行运动学、动力学建模分析. 此外, 本文通过胸鳍形状的合理设计, 减少模块横摇并优化其机动性. 最后, 通过高压实验验证了定高设计方案的可行性. 该定高模块体积小、轻质、集成度高, 易于实现深海装备和机器人集成, 可为小型化深海机器人定高和姿态控制提供新方法.

关键词 深海定高, 横摇分析, 动力学建模, 减摇设计

PACS: 07.07.Tw, 45.20.da, 45.20.dc, 45.40.Bb, 85.70.-w

1 引言

随着海洋强国战略的提出以及陆地和近海资源的高度开发, 深海资源的探索已然成为当前的研究热点[1]. 由于深海有着极端的静水压力, 传统刚性机器人[2]需要压力容器和压力补偿系统, 导致机器人本体通常体积较大且笨重, 外形与海底环境难以很好地融入, 并且造价昂贵, 整体设计较为复杂, 可扩展性较差. 此外, 深海机器人推进系统大多采用螺旋桨实现[3], 虽不易产生气泡或空化问题[4], 但依然会对海底生物群落造成破坏和惊扰[5], 为深海原位、低扰观测带来挑战. 同时, 新型水下机器人低成本、小尺寸、易制造、可扩展等优势对未来深海探索具有重要的战略意义. 其中, 低成本和易制造有利于其规模化制造, 以便搭建大规模水下集群机器人试验平台[6,7]; 小尺寸有利于水下机器人在深海作业时有更好的隐蔽性; 可扩展性便于水下机器人实现更多的功能.

通常, 小型水下机器人由于体积限制, 实现的功能有限, 需要提高其可扩展性来针对性地进行水下作业, 为了使其能够在多种场景下实现功能, 需要搭载不同

引用格式: 王神龙, 侯锦辉, 俞代卫, 等. 小型深海自主定高模块动力学建模与减摇设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 264511
Wang S L, Hou J H, Yu D W, et al. Dynamic modeling and anti-roll design of an autonomous, small-scaled module for height control in deep sea (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 264511, doi: 10.1360/SSPMA-2023-0347

© 2024 《中国科学》杂志社

的模块. 因此, 模块化设计[8]在开展深海小型水下机器人的制备工作中意义重大, 它聚焦于实现机器人的局部设计, 方便其功能组合和扩展.

深度控制是水下航行器研究过程中的重要组成部分, 它可以确保航行器能够在水下精准高度位置进行作业. 目前, 大型水下航行器的深度控制已经较为成熟, 这类航行器通常采用变浮力系统(Variable Buoyancy System, VBS)[9]进行浮力调节. 其中, 可变体积VBS通过改变排水体积来调整浮力, 可变压载式VBS通过调整压载的重量和位置, 改变航行器的质量和重心位置, 从而改变浮力.

然而, 大多数小型水下航行器的深度控制仅能在近海实验, 还无法承受深海高压. 麻省理工学院Katzschmann等人[10]通过潜水飞机和小型化活塞浮力控制单元(BCU)自主控制深度, BCU水密圆柱中有一个带有电位器反馈的微线性执行器, 通过压力反馈控制该执行器移动活塞, 以此来实现浮力和俯仰调整. 休斯顿大学Zuo等人[11]构建了离子聚合物-金属复合材料(IPMC)电解槽的浮力装置, 通过对该电解槽施加电压产生氢气和氧气来调整机器鱼的浮力. 哈佛大学Berlinger等人[12]采用磁线圈执行器配合压力传感器, 通过驱动机器鱼背鳍来实现深度控制功能.

综上所述, 现阶段小型水下机器的深度控制主要分为浮力控制和动态控制方法. 其中, 浮力控制主要通过改变水下机器人的体积变化来调节, 可以使用活塞或泵来压缩气体或液体, 或者通过电解水产生气体从而实现体积变化. 动态控制主要通过调节机器人至中性浮力, 改变机器鱼胸鳍的俯仰角[13–15]来实现上浮下潜动作, 该控制方式对机器人的游动速度有一定要求. 此外, 还可以利用背鳍与传感器结合的控制方法, 驱动背鳍产生向下的推力从而实现深度控制.

本文设计了一款低成本、小体积、易制作的深海自主定高模块, 用于深海水下3000 m探索. 与大多数小型水下机器人只能近海探索不同, 我们采用激光测距传感器代替压力传感器, 驱动电磁线圈使装有小磁铁的柔性背鳍摆动, 以此提供下潜的驱动力, 配合航行器自身的轻微正浮力控制航行器高度位置. 该模块通过将电子电路集成在硅胶态软基体实现其深海高静水压自适应, 能在35 MPa的高压下工作, 定高误差范围在±5 cm, 成功实现了小型柔性机器人模块深海操纵的定高功能.

2 定高模块设计

2.1 设计原理

对于水下机器人来说, 相较于近海, 深海工作还需要面临两个问题: 低温和高压, 所以定高模块的设计原则主要包含小型化、低成本、耐高压低温、结构简便可靠等. 本文研究的深海仿生机器人具有噪音小、效率高、机动性好等特点[16], 其定高模块设计如图1所示, 驱动装置采用仿生背鳍的方式, 通过磁线圈驱动背鳍叶片产生向下的推进力. 集成后的水下航行器需要有轻微的正浮力, 传感器需正对海底以便接受高度反馈, 达到设定高度, 背鳍停止驱动, 航行器受正浮力影响上浮, 上浮超过设定高度, 背鳍重新驱动, 以此来控制航行器在水下固定高度工作.

小型化自主定高模块主要由以下四个部分组成: 磁线圈柔性执行器、定高控制电路板、激光测距传感器和电源. 磁线圈执行器组装时, 将线圈外围涂胶, 分别放置在树脂底座的凹槽中, 线圈线头从凹槽下方的通孔处引出, 便于与电路板相连, 两个磁铁对称相吸, 粘在PET背鳍叶片的两侧, 叶片下面方形区域涂胶, 插入树脂底座凹槽. 此时, 需保证磁铁位置正对圆形凹槽中央, 即为安装成功. 值得注意的是, 两个线圈需串联, 在连接电路板时, 需确保线圈的电流方向, 即线圈的磁场方向, 当左侧线圈的磁场表现为吸引磁铁时, 右侧线圈产生的磁场需要与磁铁相斥, 表现为背鳍叶片向左侧拍动, 当电流交换方向时, 叶片向相反方向拍动, 以此实现背鳍的来回拍动.

2.2 模块制作

磁线圈底座由3D树脂打印制成, 相比于软硅胶, 树脂在高压下不容易变形, 有利于线圈位置的固定, 增强设计的可靠性. 底座成对称设计, 中间V形夹角为40°, 用来限制背鳍的摆幅为±20°, 这是因为背鳍在水下运动阻力较大, 并不能实现过大角度的往复摆动, 限制摆动角度可以让背鳍更好地响应电磁线圈的驱动, 同时也能满足运动要求. 线圈的选择直接影响执行器的推力, 电流大小和线圈匝数是影响线圈通电产生磁场大小的重要因素, 我们的目标是尺寸尽量小, 同时保证一定的续航能力. 在此前提下, 设置线圈外径为13.4 mm, 线圈高度为5.5 mm, 内径为9.2 mm, 线径为0.18 mm, 电阻为8.2 Ω, 匝数为312匝. 选择电源为电压

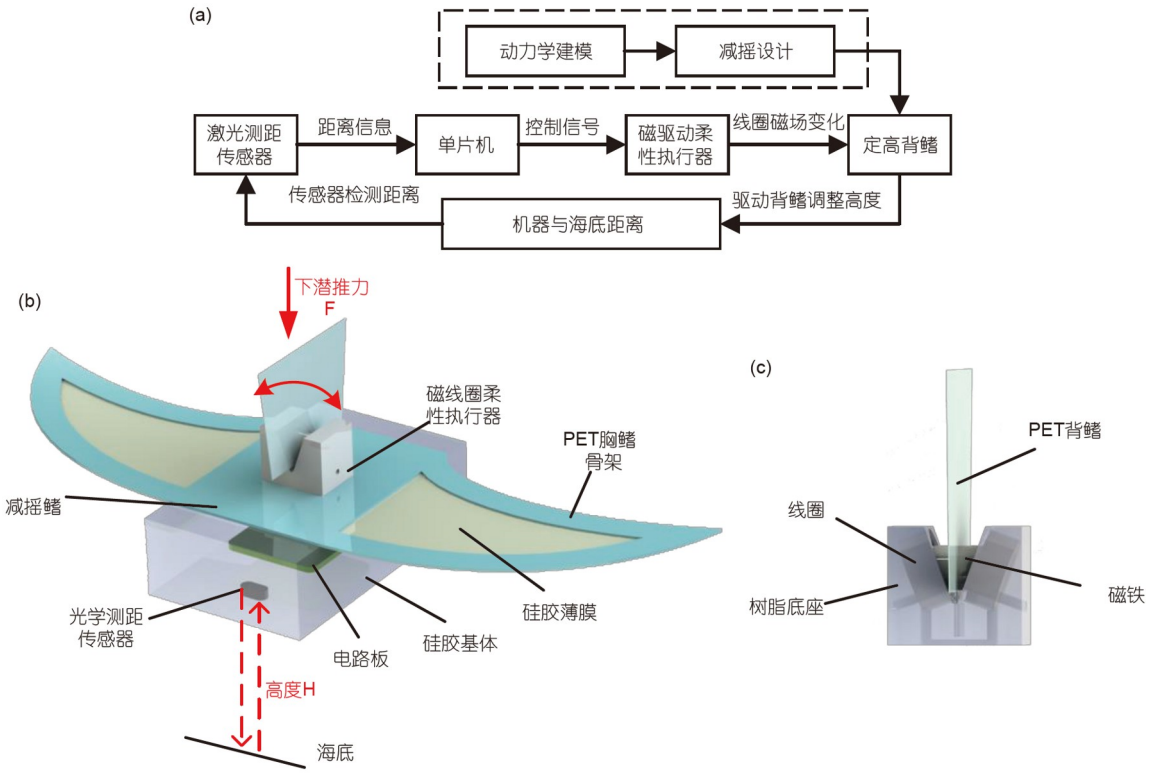


图 1 (网络版彩图)定高模块设计图. (a) 工作路线图; (b) 模块组成图; (c) 磁线圈柔性执行器组成图

Figure 1 (Color online) Design drawing of height control module. (a) Work roadmap; (b) module composition diagram; (c) composition diagram of magnetic coil flexible actuator.

7.4 V, 容量800 mAh聚合物锂电池. 该情况下, 即使将两个线圈串联, 在空气中线圈工作也会发热严重, 但由于工作环境在水下, 在水中工作时, 线圈周围的水可以迅速帮助降温, 保证执行器稳定运行. 单个圆柱形磁铁(NdFeB)直径为8 mm, 高度为5 mm, 这样既可以保证磁铁能在两个线圈中心来回摆动, 还能保证整体设计尺寸较为紧凑, 增大扭矩, 提高磁场的利用率.

不同的背鳍形状[17]和刚度[18]可能会对推力产生影响, 为了产生更大推力, 鳍的顺应性和弯曲模式非常关键. 选用厚度为0.2 mm, 梯形面积为18 cm^2的PET薄片作为驱动背鳍. 背鳍的设计采用悬臂梁结构, 选用柔性叶片而非硬质叶片来提高推力, 且PET本身的刚度又能保证在不驱动线圈情况下, 背鳍可以保持竖直状态, 更符合仿生学设计. 磁线圈执行器(不包含背鳍叶片)尺寸为长25 mm, 宽18 mm, 高22 mm, 重量为12.7 g. 采用STM32L432KC单片机控制电流变换方向, 传感器型号为VL53L1X, 工作距离为4 m.

为适应深海极端静水压力, 研究人员[19]将软体机器人所搭载的电路系统分散化地集成在凝胶态软基体中. 受此启发, 本文采用软硅胶将需要保护的电路板等密封, 为了验证模块可行性, 同时更便于试验, 采用简单的长方体硅胶块进行封装. 需要注意的是, 传感器的激光窗口需露出硅胶, 且方向竖直向下, 以便检测高度信息. 同时为了保证激光窗口周围在高压下的可靠性, 我们添加硫化胶粘贴传感器周围, 因为硫化胶固化后质地比硅胶更硬, 粘合力强. 具体做法即剖开传感器窗口周围硅胶, 再涂上一圈硫化胶.

3 运动学分析

采用高速相机(FASTCAM Mini UX100)观察定高模块水下的工作状态, 定高模块的下潜速度可达4.83 cm/s, 由于电磁线圈执行器驱动背鳍来回拍动, 样机会产生横摇运动, 如图2所示, 本节将对横摇运动

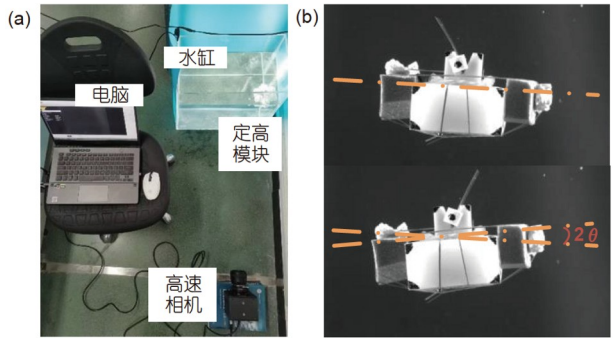


图 2 (网络版彩图)高速相机拍摄横摇运动. (a) 试验场景; (b) 横摇角度分析

Figure 2 (Color online) High speed camera captures roll motion. (a) Experimental scenarios; (b) roll angle analysis.

进行参数识别分析.

3.1 横摇运动观测

高速相机固定在地面, 成像尺寸与实物尺寸存在一定比例关系, 通过测量实物与图像上对应两点之间的长度, 即可得到相应比例, 通过图像各帧对应点的轨迹变化和比例判断实物的运动状态.

定高模块主要运动体现在下潜和横摇这两个方向的自由度上. 选择相机固定成像点作为基座标系原点, 设定高模块的横摇转心为$(x_0,\ y_0,\ z_0)$, 其下潜运动由z_0的变化表示. 将转心作为随动坐标系原点, 该模块的横摇运动用横摇角θ表示, 选择成像平面模型上的点a在随动坐标系中的坐标$(x_1,\ z_1)$, 通过如下坐标变换可以得到模型上该点的运动[20]:

$$A = T\cdot A_0^1 + u_0,$$

其中

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$u_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$T = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta & 0 \\ -s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

T为转换矩阵, 该点的坐标可用3×3的齐次坐标矩阵表示:

$$A = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta & x_0 + x_1\cdot c\theta + z_1\cdot s\theta \\ -s\theta & c\theta & z_0 + z_1\cdot c\theta - x_1\cdot s\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

可得

$$X_A = x_0 + x_1\cdot c\theta + z_1\cdot s\theta, \tag{5}$$

$$Z_A = z_0 + z_1\cdot c\theta - x_1\cdot s\theta. \tag{6}$$

式(4)阐明了定高模块在水下运动的坐标变化, 式(5)和(6)分别为该点的横坐标和纵坐标. 视频中选取两点并作标记, 加深其灰度, 以便在视频识别软件中更加清晰.

将每一帧的图片导入Phantom Camera Control软件, 选取图3中的两点, 规定好比例尺, 利用该软件对选取的两点的运动进行追踪和记录, 如图4所示, 即为选取的两点在不同激励频率下的下潜高度变化.

通过图3和4可以分辨出定高模块在水下作下潜运动. 同时, 我们观察到, 选取的两个点在下潜高度变化曲线存在周期性交替变化, 这是定高模块的横摇运动导致的.

选取的两点$x_1 + x_2 = 0$, 令$Z = (Z_a + Z_b)/2$来表示定高模块在水下的高度变化, 如图5为不同频率下, 定高模块的水下高度随时间变化的曲线. 可见, 在2–5 Hz的驱动频率下, 定高模块的驱动频率越高, 在水下的下潜速度越快, 反之则越平缓.

3.2 横摇参数识别

定高模块的横摇与船舶横摇运动类似, 为了研究该现象并对其解释, 需要进一步求出它的横摇角速度和横摇角加速度.

通过坐标变化可知,

$$Z_a - Z_b = \Delta z\cdot\cos\theta - \Delta x\cdot\sin\theta. \tag{7}$$

选取的点有如下关系:

$$\Delta x = 30\ \text{mm},\ \Delta z = 0, \tag{8}$$

由此可以推出横摇角

$$\theta = \arcsin\left(\frac{Z_a - Z_b}{\Delta x}\right). \tag{9}$$

视频中的运动信号在采集中会受到噪声干扰, 如拍摄时的环境影响、不同帧识别时产生的误差, 会导

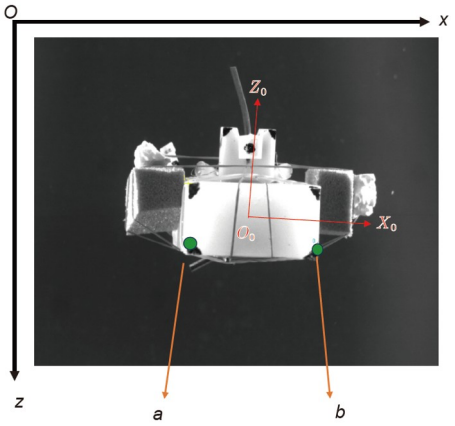


图 3 (网络版彩图)坐标系示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of coordinate system.

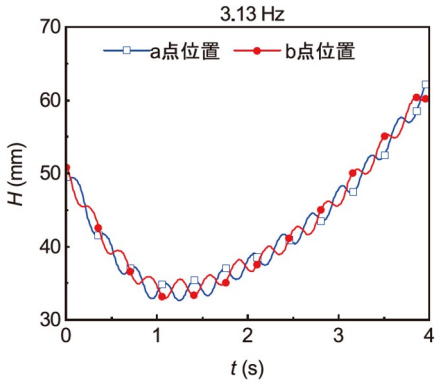


图 4 (网络版彩图)单个循环下运动高度变化

Figure 4 (Color online) Height variation of motion under a single cycle.

致在处理角速度和角加速度时有非常大的影响. 此外, 水下的波浪也会对横摇角造成影响.

选择测试的驱动频率在2–5 Hz, 如图6所示, 为了处理测得的角位移准周期信号, 利用小波变换将信号分解成不同频率的子带, 采用Daubechies 4小波基函数和自适应方法进行阈值处理, 去除噪声成分, 最后再将处理后的子带合成为降噪后的信号. 这样可以有效地去除信号中的噪声, 同时保留信号的重要信息, 避免了传统滤波方法中的信号失真和频率混叠等问题[21].

对降噪后的信号均值平滑处理, 平滑窗口设为5, 然后对采集到的信号重新采样, 采样频率为100 Hz.

经过上述处理, 得到去除噪声和波动的角位移信号, 对其求一阶、二阶导, 得到角速度和角加速度信息. 研究发现, 当激励频率小于3 Hz时, 加速度曲线在一个周期内出现了多个波峰, 这是由于背鳍运动角度的约束引起的, 当横摇角度在5°左右时, 背鳍也恰好运动到极限位置.

图7为不同横摇频率的角位移幅值响应, 可见, 当频率大于2.5 Hz时, 其横摇角幅值随频率的增加而减小.

3.3 电磁激励仿真

为了模拟横摇运动环境, 需要得到定高模块的驱动力. 该模块的驱动方式为磁驱动, 两侧线圈通电产生磁场, 分别对中间的永磁铁两极产生吸附和排斥的力. 采用Ansys Maxwell软件进行电磁力分析, 图8为磁线圈执行器的磁场分析图.

图8中, 中间为永磁铁, 两端是铜线圈, 线圈串联, 改变电流激励方向驱动磁铁运动, 永磁铁运动极限角

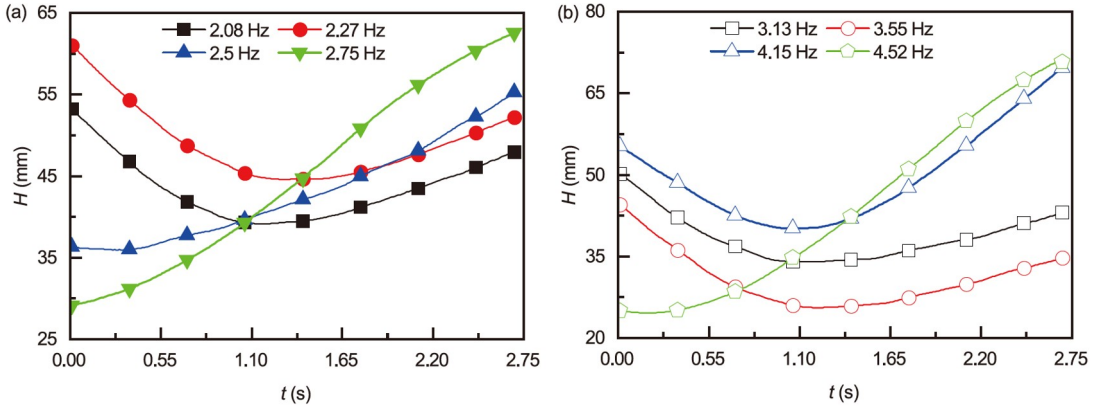


图 5 (网络版彩图)不同频率的水下高度. (a) 2.08–2.75 Hz; (b) 3.13–4.52 Hz

Figure 5 (Color online) Underwater height at different frequencies. (a) 2.08–2.75 Hz; (b) 3.13–4.52 Hz.

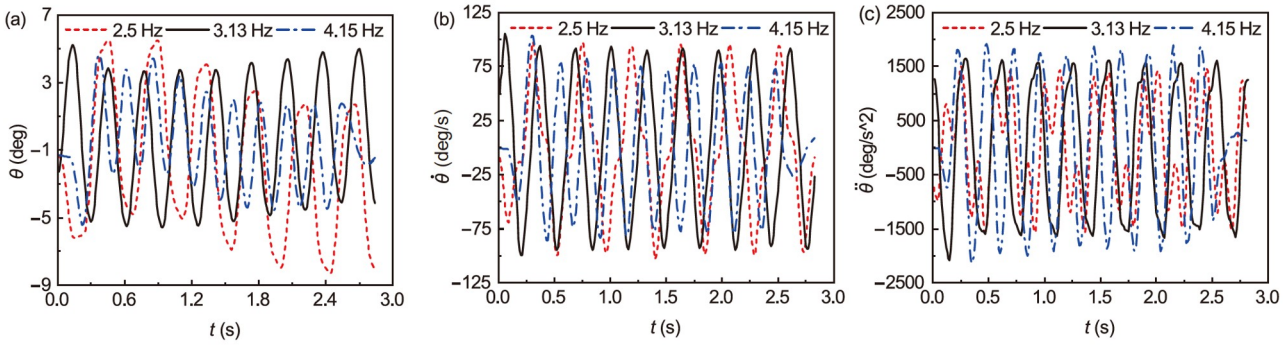


图 6 (网络版彩图)不同频率下的横摇运动信息. (a) 横摇角; (b) 横摇角速度; (c) 横摇角加速度

Figure 6 (Color online) Rolling motion information at different frequencies. (a) Roll angle; (b) roll angular velocity; (c) roll angular acceleration.

度为−20°至20°.

永磁铁在电磁线圈的磁场中受到的力与磁铁运动角度之间的关系如图9所示. 由图可知, 磁铁在中间位置所受到的磁力最大, 峰值在1.3 N左右, 两端受到的磁力逐渐减小.

4 动力学分析

4.1 横摇动力学方程

横摇运动与惯性力矩、阻尼力矩、恢复力矩以及所受到的激励相关[22], 其动力学方程为

$$M(\ddot{\theta})+N(\dot{\theta})+C(\theta)=M_1(t), \tag{10}$$

其中, $\theta,\dot{\theta},\ddot{\theta}$分别为横摇角、横摇角速度、横摇角加速度; $M(\ddot{\theta})$为惯性力矩; $N(\dot{\theta})$为阻尼力矩; $C(\theta)$为恢复力矩.

惯性力矩与定高模块自身的转动惯量及其附连水的转动惯量有关, 其关系为

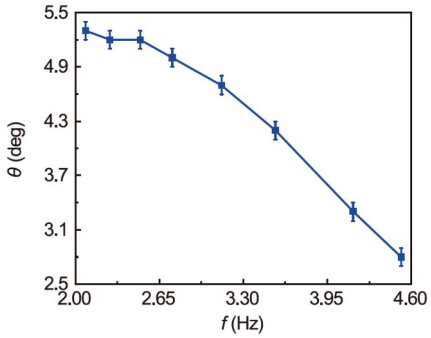


图 7 (网络版彩图)横摇角的幅频响应

Figure 7 (Color online) Amplitude frequency response of roll angle.

$$M(\ddot{\theta})=(I+I_a)\ddot{\theta}. \tag{11}$$

阻尼力矩与定高模块在水下运动引起的摩擦阻尼、涡流阻尼、结构阻尼等有关, 由于其关系复杂, 通常将其表示为线性阻尼和非线性阻尼的叠加, 表示为

$$N(\dot{\theta})=B_l\dot{\theta}+B_{nl}\dot{\theta}|\dot{\theta}|. \tag{12}$$

此外, 由于定高模块在水下还受到自身重力和水的浮力的影响, 用奇次多项式的关系表示:

$$C(\theta)=C_1\theta+C_2\theta^3. \tag{13}$$

激励$M_1(t)$由电磁力和力臂大小决定, 表现为正弦规律, 则其拟合形式为

$$M_1(t)=M_1\cdot\sin(2\pi ft+\varphi), \tag{14}$$

其中f为激励频率, φ为激励与响应的相位差; 幅值$M_1=1.3\ \text{N}\cdot 26.81\text{mm}=34.853\text{N mm}$, 它的力臂长度由SOLIDWORKS测出(规定为磁铁中心与定高模块重心之间的距离). 它自身转动惯量由SOLIDWORKS模型导入质量属性测得: $I=17907\ \text{g mm}^2$. 综上, 该横摇动力学系统方程的具体形式为

$$\begin{aligned}&(I+I_a)\ddot{\theta}+B_l\dot{\theta}+B_{nl}\dot{\theta}|\dot{\theta}|+C_1\theta+C_2\theta^3\\&=M_1\sin(2\pi ft+\varphi).\end{aligned} \tag{15}$$

4.2 系统参数辨识

由横摇角位移分析可知, 系统在停止施加激励后, 其衰减在一个周期内就已经完成, 故而无法通过自由衰减横摇来识别它的阻尼.

选取频率为3.55, 4.15, 4.52 Hz下的三组数据, 由于水下波浪的影响, 不同组数据无法直接使用, 提取出

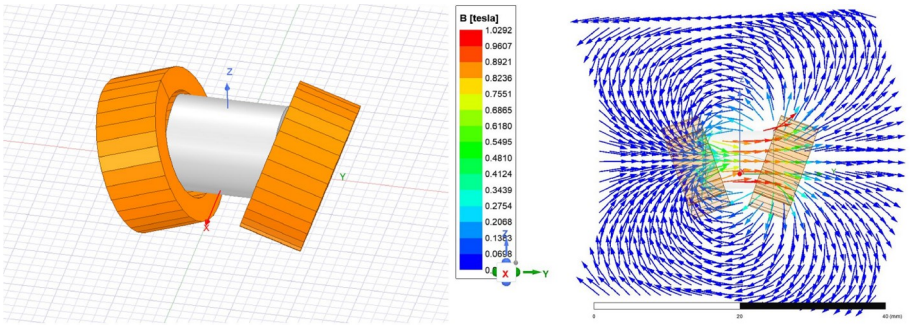


图 8 (网络版彩图)磁场仿真分析

Figure 8 (Color online) Magnetic field simulation analysis.

其中响应较为稳定的三个周期, 并将其组合, 与激励对应起来, 并使用最小二乘法进行拟合.

图10为拟合的激励与计算的激励对比, 拟合优度R^2=0.9720, 拟合出的曲线参数如表1所示. 则横摇动力学方程如下:

$$0.0269\cdot\ddot{\theta}+0.1675\cdot\dot{\theta}+7.9086\times10^{-4}\cdot\dot{\theta}\cdot|\dot{\theta}| +5.4987\cdot\theta-0.0528\cdot\theta^3=34.853\cdot\sin(2\pi ft+\varphi). \quad (16)$$

4.3 动力学方程验证

在工程应用中, 非线性微分方程难以精确求解, 通常会使用数值解法对其进行研究, 其中, 龙格-库塔法是进行数值解法的常用方法.

首先引入新的参量对方程降阶, 令$\theta=\theta_1$, $\dot{\theta}=\theta_2$, 则$\ddot{\theta}=\dot{\theta}_2$, 则方程变为

$$0.0269\cdot\dot{\theta}_2+0.1675\cdot\theta_2+7.9086\times10^{-4}\cdot\theta_2\cdot|\theta_2| +5.4987\cdot\theta_1-0.0528\cdot\theta_1^3=34.853\cdot\sin(2\pi ft+\varphi). \quad (17)$$

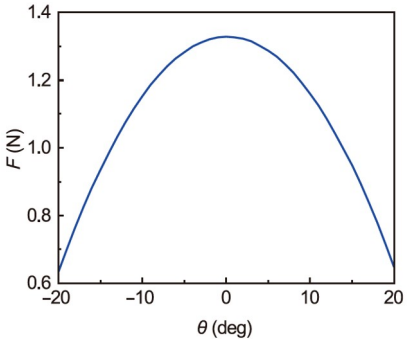


图 9 (网络版彩图)磁铁受力与运动角度之间的关系

Figure 9 (Color online) Relation between magnetic force and motion angle.

利用四阶龙格-库塔法对动力学方程进行求解, 得到的数值解与测量值对比如图11所示.

由图可知, 数值求解的响应与试验测得的响应结果具有较好地一致性, 但也存在着一定的误差, 在横摇频率为3.13 Hz时, 结果较为准确.

4.4 减摇运动分析

为了减少横摇对定高模块的影响, 本节为定高模块开展了减摇设计, 用于减小横摇角度, 即添加一对

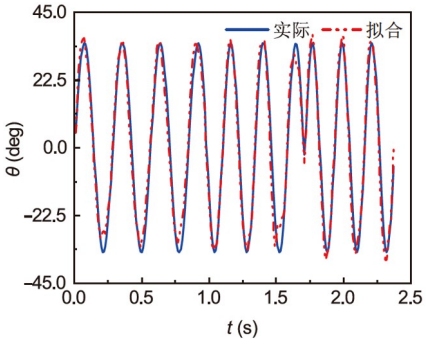


图 10 (网络版彩图)曲线拟合对比

Figure 10 (Color online) Curve fitting comparison.

表 1 曲线拟合参数表

Table 1 Curve fitting parameters

参量	数值
I_a	0.0090 N mm s^2/deg
B_l	0.1675 N mm s/deg
B_{nl}	0.00079086 N mm s^2/deg^2
C_1	5.4987 N mm/deg
C_2	−0.0528 N mm/deg^3

胸鳍, 胸鳍主要由0.9 mm PET和0.2 mm的硅胶薄膜组成, 如图1(b)所示. 高速相机下观察到的横摇角几乎为零, 这是因为安装了减摇胸鳍, 模块在水下的运动阻尼大幅增加.

安装减摇胸鳍的下潜运动高度随时间变化如图12所示. 与无减摇鳍相比, 其下潜速度减小, 然而下潜时的横摇稳定性却大幅增加.

5 高压实验

上文所述的常温常压测试和理论分析, 验证了模块的功能性, 然而深海面临的低温和高压挑战还需要实验验证. 低温测试需要在水中添加冰块, 保持水温在1°C左右, 其他实验条件与常温一致. 经测试, 低温与常温对应的驱动效果无明显区别. 相比低温测试, 高压测试对于模块来说更加具有挑战性, 所以需做更多准备, 来确保定高模块样机顺利测试.

5.1 实验装置

高压实验的压力环境模拟系统如图13所示, 由压力舱、增压泵站、高压气源、各辅助备件组成, 压力舱的容积是直径20 cm, 高度20 cm的圆柱, 舱内需注满水, 通过高压气源给舱内施加压力, 模拟高压下的情况. 为实现传感器压力自适应设计, 在其空腔内注入硅油进而达到压力补偿效果.

在高压环境下, 浮力块要能够耐受高压, 需采用玻璃微珠制成的浮力块, 硅胶在高压环境下会被压缩体积, 定高模块的浮力会变化, 因此需要重新调节浮力, 正浮力需额外添加2 g.

5.2 实验结果

高压试验定高高度设置为0–5 cm, 超出高度范围,

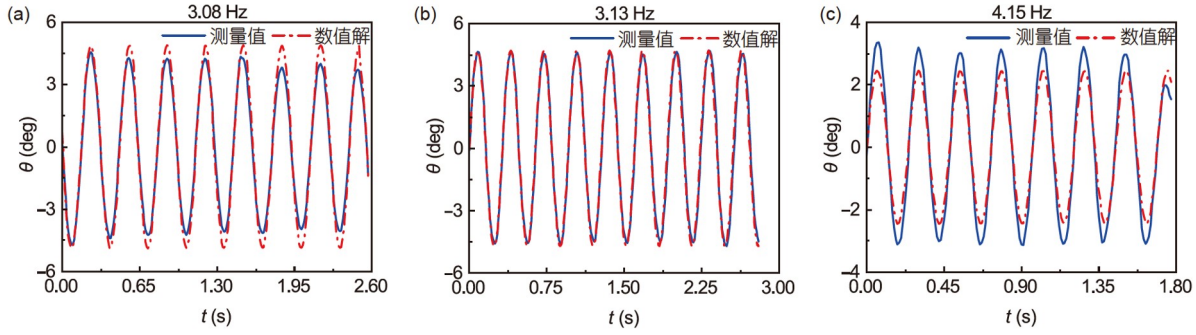


图 11 (网络版彩图)龙格-库塔法数值求解与实测横摇角位移对比. (a) 3.08 Hz; (b) 3.13 Hz; (c) 4.15 Hz

Figure 11 (Color online) Comparison between numerical solution of Runge-Kutta method and measured roll angular displacement. (a) 3.08 Hz; (b) 3.13 Hz; (c) 4.15 Hz.

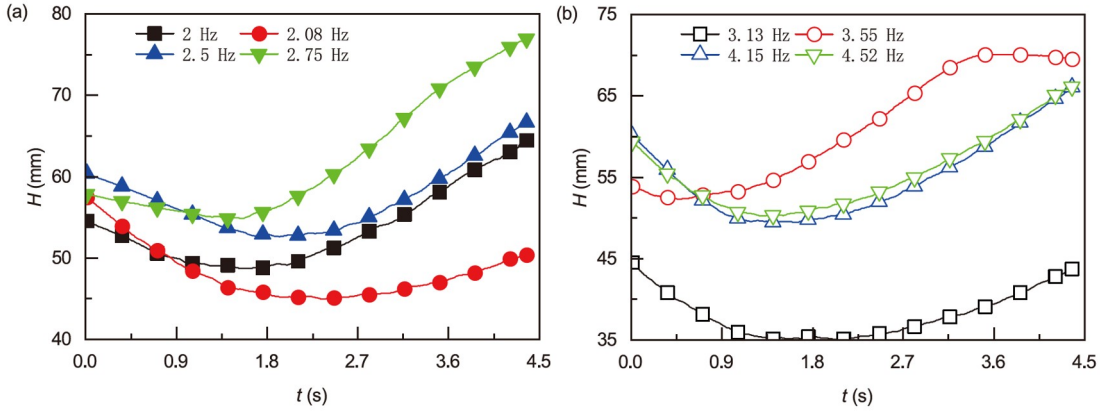


图 12 (网络版彩图)安装减摇鳍时, 不同频率的水下高度. (a) 2.08–2.75 Hz; (b) 3.13–4.52 Hz

Figure 12 (Color online) The underwater height at different frequencies when installing anti roll fins. (a) 2.08–2.75 Hz; (b) 3.13–4.52 Hz.

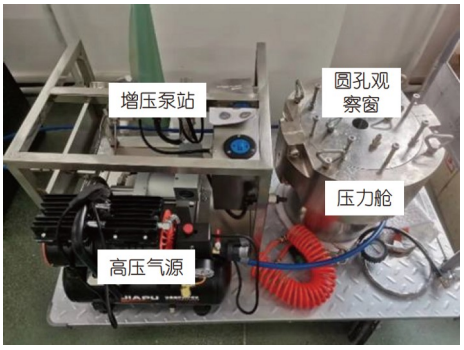


图 13 (网络版彩图)高压测试设备

Figure 13 (Color online) Equipment of high pressure test.

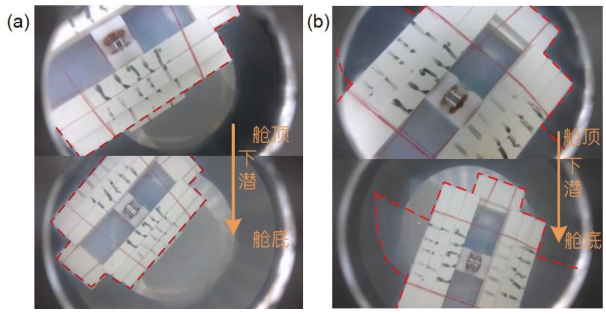


图 14 (网络版彩图)高压定高测试. (a) 模块不装减摇鳍从罐顶部下潜到罐底; (b) 模块安装减摇鳍从罐顶部下潜到罐底

Figure 14 (Color online) High pressure height control test. (a) The module dives from the top of the tank to the bottom of the tank without installing anti roll fins; (b) module installation of anti roll fins diving from the top of the tank to the bottom of the tank.

背鳍翅片即会摆动. 设定在水下3000 m环境下测试, 即定高模块至少需承受大于30 MPa的压力, 压力罐实验设置压力为35 MPa. 由于过快加压或者减压可能会损坏传感器, 手动调节增压速度, 加压的时间为5 min, 增压完成后保压35 min, 之后开始减压, 减压时间也控制在5 min, 最后取出模块.

如图14所示, 保压过程中, 通过压力罐舱口观察运动情况, 发现模块在高压下可以成功实现定高功能, 分别实施装减摇设计和不装减摇设计的对照高压测试. 由于压力罐体积有限, 虽然减小了减摇鳍的尺寸, 但依然能观察到添加减摇设计的横摇角度有所减少.

6 总结与展望

本文研究了一种小型化、磁驱动深海定高模块, 通过将电子电路集成在硅胶态软基体实现其深海高静水压自适应. 通过理论、仿真和实验测试得到了以下结论:

(1) 本文设计的小型化深海定高模块相较于传统的大型航行器有着体积小、重量轻、成本低、噪音小、隐蔽性好、制造容易、扩展性强等优点, 采用激光测距传感器用于深海定高, 对于小型化机器人深海探索具有重要的意义.

(2) 借助高速相机对样机的横摇运动进行分析, 通过坐标变换判断其运动状态, 识别运动参数, 得出驱动频率与下潜速度成正相关关系, 识别结果与实际试验符合.

(3) 基于定高模块横摇动力学方程, 对动力学方程进行参数辨识和验证, 发现数值求解的响应与试验测得的响应结果具有较好的一致性.

(4) 定高模块通过35 MPa高压试验, 证实该设计可以有效地在深海3000 m实现定高操控.

最后, 该定高模块可以很方便地集成在深海机器人上, 为深海小型化机器人海底高度控制提供新的思路. 该小型化深定高模块进一步拓展为仿生深海机器人样机设计, 基于软体推进鳍, 使样机实现定高和前进两个自由度的运动, 通过调整外形结构和驱动逻辑实现样机的转弯功能, 并进一步实现小型化深海水下仿生机器人的自主运动.

参考文献

1 Feng X S, Li Y P, Xu H X, et al. Development of deep-sea autonomous underwater vehicle and its applications in resource survey (in Chinese). Chin J Nonferrous Metals, 2021, 31: 2746–2756 [封锡盛, 李一平, 徐会希, 等. 深海自主水下机器人发展及其在资源调查中的应用. 中国有色金属学报, 2021, 31: 2746–2756]

2 Li S, Liu J, Xu H, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China. Sci Sin Inf, 2018, 48: 1152–1164 [李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1152–1164]

3 Kang S, Yu J C, Zhang J. Research status of micro autonomous underwater vehicle (in Chinese). Robot, 2023, 45: 218–237 [康帅, 俞建成, 张进. 微小型自主水下机器人研究现状. 机器人, 2023, 45: 218–237]

4 Zhang A M, Li S M, Cui P, et al. A unified theory for bubble dynamics. Phys Fluids, 2023, 35: 033323

5 Xu Y L, Du J H, Lei Z Y, et al. Applications status and key technologies of underwater robots in fishery (in Chinese). Robot, 2023, 45: 110–128 [许裕良, 杜江辉, 雷泽宇, 等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述. 机器人, 2023, 45: 110–128]

6 Zhou Z, Liu J, Yu J. A survey of underwater multi-robot systems. IEEE CAA J Autom Sin, 2022, 9: 1–18

7 Berlinger F, Gauci M, Nagpal R. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm. Sci Robot, 2021, 6: 14

8 Meng L S, Lin Y, Zheng R, et al. Mechanical design and implementation of a modular autonomous underwater vehicle (in Chinese). Robot, 2016, 38: 395–401 [孟令帅, 林扬, 郑荣, 等. 模块化自主水下机器人的机械设计与实现. 机器人, 2016, 38: 395–401]

9 Li B, Huang Z M, He B, et al. Research status and control technology of autonomous underwater vehicle variable buoyancy system (in Chinese). Chin J Ship Res, 2022, 17: 134–147 [李奔, 黄哲敏, 何斌, 等. 自主水下航行器变浮力系统研究现状及控制技术. 中国舰船研究, 2022, 17: 134–147]

10 Katzschmann R K, DelPreto J, MacCurdy R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. Sci Robot, 2018, 3: 3449

11 Zuo W, Dhal K, Keow A, et al. Model-based control of a robotic fish to enable 3D maneuvering through a moving orifice. IEEE Robot Autom Lett, 2020, 5: 4719–4726

12 Berlinger F, Dusek J, Gauci M, et al. Robust maneuverability of a miniature, low-cost underwater robot using multiple fin actuation. IEEE Robot Autom Lett, 2018, 3: 140–147

13 Cao Y, Xie Y, He Y, et al. Bioinspired central pattern generator and T-S fuzzy neural network-based control of a robotic manta for depth and heading tracking. J Mar Sci Eng, 2022, 10: 758

14 Yang X, Wu Z, Yu J. Design and implementation of a robotic shark with a novel embedded vision system. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Qingdao, 2016

15 Niu C, Zhang L, Bi S, et al. Development and depth control of a robotic fish mimicking cownose ray. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2012), Guangzhou, 2012. 814–818

16 Wang R, Wang S, Wang Y, et al. Development and motion control of biomimetic underwater robots: A survey. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 2022, 52: 833–844

17 Berlinger F, Saadat M, Haj-Hariri H, et al. Fish-like three-dimensional swimming with an autonomous, multi-fin, and biomimetic robot. Bioinspir Biomim, 2021, 16: 026018

18 Reddy N S, Sen S, Har C, et al. Effect of whole-body flexibility of caudal fin on propulsion performance. In: 3rd International and 18th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM). Singapore: Springer, 2017. 353–361

19 Li G, Chen X, Zhou F, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench. Nature, 2021, 591: 66–71

20 Chen W, Lu H, Yang W, et al. Path tracing control of under-actuated autonomous underwater vehicle (in Chinese). J Jiangsu Univ Sci Technol (Nat Sci Ed), 2021, 35: 1–7 [陈伟, 芦海, 杨雯, 等. 欠驱动自主水下航行器航迹追踪控制. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35: 1–7]

21 Sha L. A new wavelet threshold algorithm for deformation monitoring data denoising (in Chinese). J Geodesy Geodyn, 2023, 43: 847–850 [沙磊. 一种新小波阈值算法的变形监测数据去噪方法. 大地测量与地球动力学, 2023, 43: 847–850]

22 Xi H F, Wang S L, Xu Y J. Additional mass coefficient and damping coefficient of ship roll based on CFD numerical simulation (in Chinese). Ship Eng, 2021, 43: 49–55 [席海峰, 王神龙, 徐亚杰. 基于CFD数值模拟的船舶横摇附加质量系数和阻尼系数. 船舶工程, 2021, 43: 49–55]

Dynamic modeling and anti-roll design of an autonomous, small-scaled module for height control in deep sea

WANG ShenLong[1], HOU JinHui[1], YU DaiWei[1], SHEN Peng[2], ZHANG ZhiHan[2], LI Hai[4] & LI GuoRui[2,3*]

[1] *School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*
[2] *Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266071, China;*
[3] *College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*
[4] *School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*
**Corresponding author (email: grli@hrbeu.edu.cn)*

Deep-sea intelligent equipment is crucial in deep-sea scientific research, national defense and security, and other fields. Owing to the extreme hydrostatic pressure in the deep sea, the manipulation and attitude control of deep-sea robots remain challenging tasks. In this paper, we design an autonomous height-control module which can operate at a depth of 3000 m. To adapt to the extreme hydrotatic pressure, the electronics and circuits are integrated in a silicone matrix. What's more, an electromagnetic-driven, dorsal fin made of PET materials is employed to drive and achieve dynamic height control. We analyze the roll phenomenon of this machine using a high-speed camera and dynamic modeling analyses. In addition, the roll and maneuverability of this module are optimized by integrating a pair of pectoral fins with well designed shape. Finally, the feasibility of the height-control design is verified through high-pressure experiments. This small-scaled and lightweight height-control module can be easily integrated into deep-sea equipment and robots, which can offer a novel method for the attitude control of miniaturized deep-sea robots.

deep-sea height control, roll analysis, dynamic modelling, anti-rolling design

PACS: 07.07.Tw, 45.20.da, 45.20.dc, 45.40.Bb, 85.70.-w

doi: 10.1360/SSPMA-2023-0347