

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514300

基于海洋数字孪生的剖面浮标出水点预测研究*

文艺成^{1,2}, 徐佳毅^{1,2}, 李文昕^{1,2}, 韩智敏^{1,2}, 李醒飞^{1,2}

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要:针对现有用于水下无人系统科学研究的海洋模型普遍存在参数单一、非动态、无法真实模拟任意海区环境等问题,基于海洋大数据,建立了多参数海洋环境数据库,依托数据库的高效检索能力,快速获取海洋环境数据块,进行运动位置与地理坐标转换,并提出了一种基于滑移的时空海洋数据平滑插值算法,构建了 RTPDCOM 实时动态温-压-密-流海洋数字孪生模型,该模型有效抑制了大深度数据的过冲现象。在此基础上,进一步建立了 RTPDCOM 模型影响下的剖面浮标动力学模型,并开展了出水点预测研究。西太平洋区域仿真与海试数据对比结果显示,在 4 000 m 剖面运动条件下,仿真与实际出水点相对于入水点的水平距离基本一致,出水角度偏差多数 $<20^\circ$,距离偏差多数 <650 m。温盐剖面数据吻合度高,温度平均偏差 $0.126^\circ\text{C} \sim 0.185^\circ\text{C}$,盐度平均偏差 $0.0276 \sim 0.0314$ PSU,验证了 RTPDCOM 模型与真实海洋环境的一致性。印度洋区域仿真与海试对比进一步表明,出水角度偏差多数 $<20^\circ$,距离偏差多数 <600 m,预测效果良好,体现出 RTPDCOM 模型在不同海区的普适性。此外,与传统分层模型相比,RTPDCOM 模型在出水角度和距离预测精度上均表现更优。RTPDCOM 模型可移植性强,对保障水下无人系统可靠性、稳定性,提升其轨迹规划和集群编队控制精度等方面具有重要应用价值。

关键词: 剖面浮标;海洋大数据;数字孪生模型;出水点预测;海试验证

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Prediction of profiling float water-outlet location based on an ocean digital twin

Wen Yicheng^{1,2}, Xu Jiayi^{1,2}, Li Wenxin^{1,2}, Han Zhimin^{1,2}, Li Xingfei^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the limitations of existing ocean models for underwater unmanned system research, such as single parameter, non-dynamic, cannot realistically simulate the marine environment of arbitrary sea area, a multi-parameter marine database based on ocean big data are established. Leveraging the efficient retrieval capability of the database, marine data blocks are rapidly acquired, and conversion of kinematic positions to geographic coordinates was performed. A smooth interpolation algorithm of temporal and spatial ocean data based on slippage was proposed to build a RTPDCOM, which avoids the issue of data overshooting at great depth; On this basis, a profiling float dynamics model was further established, and prediction of the water outlet location was carried out. Comparisons between simulated and sea trial data in the western Pacific region reveal that, under 4 000 m profile motion conditions, the horizontal distance between the modeled and measured water inlet and outlet points remain largely consistent, the angular deviation of water outlet points is mostly within 20° , and the distance deviation is mostly within 650 m. Moreover, the temperature and salinity profile data exhibit high concordance, with an average temperature deviation of $0.126^\circ\text{C} \sim 0.185^\circ\text{C}$ and an average salinity deviation of $0.0276 \sim 0.0314$ PSU, validating the RTPDCOM model's consistency with the real-world marine environment. Comparisons between simulated and sea trial data in the Indian Ocean region demonstrated that the angular deviation is mostly within 20° , and the distance deviation is mostly within 600 m, indicating excellent prediction performance and highlighting the RTPDCOM model's universality across different sea areas. Additionally, compared to traditional layered models, the RTPDCOM yields smaller deviations in water outlet angle and distance. Its

收稿日期: 2025-07-22 Received Date: 2025-07-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(62203324)、中国科协青年人才托举工程(YESS20230630)项目资助

strong portability holds significant application value for ensuring the reliability and stability of unmanned undersea systems, and improving the precision of trajectory planning and formation control.

Keywords: profiling float; marine big data; digital twin model; water-outlet location prediction; sea trial validation

0 引 言

海洋环境参数包括温度、压力、电导率、海流、声速、风速等^[1-3],而影响水下无人系统运动参数主要包括温度、压力、密度、海流^[4-6],研究人员针对水下无人系统仿真、测试、预测等方面,对海洋环境单一参数进行了建模。在海流建模方面,研究人员普遍将海流简化为均匀、规律的流场^[7-8];或者将海流视为一个流函数^[9-10];此外,通过海流数据进行建模,不同深度采用相似的海流场,或建立了三维非动态的海流场^[11-12];在温度和密度方面,研究人员主要通过获取海洋某个坐标点的水下环境数据进行拟合^[13-14],得到拟合公式代表某个海区的温密环境变化。但不同区域、不同日期则需要重新获取数据并拟合,使用不便且准确度低,影响设备运动仿真测试的准确度和灵活性。

剖面浮标(以下简称浮标)是一种长期连续实时观测海洋的自主沉浮仪器设备,通过搭载各种海洋传感器,实现大深度、长时序剖面观测^[15]。不同海域的海流流速和方向复杂多变,存在如涡流、黑潮、湾流等海洋现象^[16-17],与缆系剖面平台^[18]不同的是,浮标随波逐流的特点对于验证海洋模型的准确性具有独特优势,原因在于其不受运动控制和水下姿态的影响^[19-20]。而且,高精度和高分辨率的全球海洋预测系统(global ocean forecasting system 3.1, GOFS 3.1)使得浮标出水点预测成为可能。GOFS 3.1 数据使用全球和海军耦合海洋数据同化系统,能够同化卫星观测、浮标观测以及现场观测温盐剖面^[21]。

为了开展浮标出水点预测,首先,对原始海洋环境数据进行降维处理,构建多参数海洋环境数据库;其次,依托数据库高效检索的特点,快速获取计算所需的海洋环境数据块,并进行浮标运动位置与地理坐标转换,推导基于滑移的多三次样条/双线性/时间序列插值融合的时空海洋数据平滑插值算法,在同化系统的基础上进一步建立实时动态温-压-密-流海洋数字孪生模型(realtime temperature pressure density current ocean model, RTPDCOM),实时获取浮标当前位置的各个海洋环境数据;最后,建立 RTPDCOM 模型影响下的浮标动力学模型,确定动力学参数,开展浮标出水点预测研究。进行 4 000 m 剖面运动仿真,对比仿真和海试出水点的距离和方向偏差,以及温盐数据偏差;验证 RTPDCOM 模型与实际海洋环境的一致性,为各种水下无人系统仿真测试提供海洋数字孪生环境,为开展水下无人系统数字孪生研究奠定基础。

1 理论分析

1.1 数据降维与快速检索

GOFS 3.1 数据包含温度、盐度、海流速度数据集,分辨率为 $0.08^{\circ} \times 0.04^{\circ}$,数据文件时间间隔为 3 h,采用 UTC 时间。为了能够快速检索目标数据块,首先进行数据集降维,将三维数据转换为二维数据,使得地理坐标与各海洋环境参数一一对应,如图 1 所示。

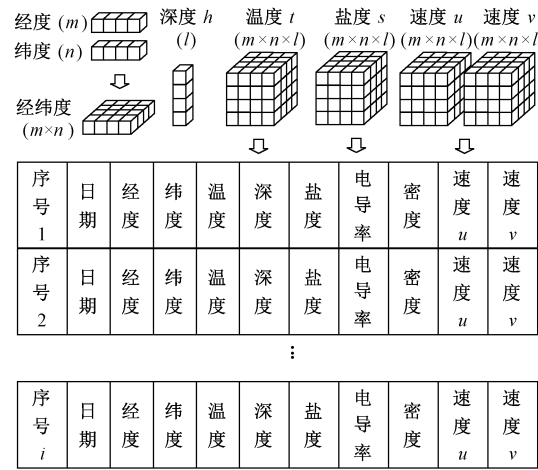


图 1 多参数海洋环境数据库

Fig. 1 Multi-parameter marine environment database

此外,通过式(1)的海水状态方程和实用盐度标度定义得到密度和电导率数据,构建易于数据更新和快速检索的多参数海洋环境数据库,通过输入经纬度坐标范围并执行 SQL 查询命令快速定位目标数据块。

$(\rho, c) = f(s, t, h)$ (1)

1.2 不同地球半径对坐标转换精度影响

图 2 所示为浮标运动位置与地理坐标关系图。浮标布放坐标为 (Lng_0, Lat_0) ,其在水下实时位置为 (e, s, h) 。

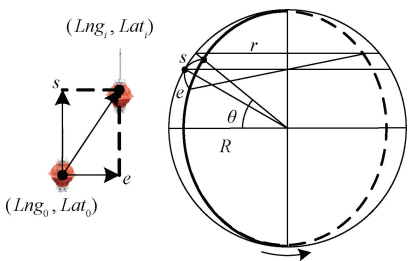


图 2 运动位置与地理坐标关系

Fig. 2 Conversion of kinematic positions to geographic coordinates

则实时地理坐标 (Lng_i, Lat_i) 换算结果^[11] 如式(2)所示。

$$(Lng_i, Lat_i) = \left(Lng_0 + \frac{180e}{\pi R \cos(Lat_i)}, Lat_0 + \frac{180s}{(\pi R)} \right) \quad (2)$$

其中, R 为地球半径。由于地球极半径约为 6 356. 752 km, 赤道半径约为 6 378. 137 km, 平均半径约为 6 371. 393 km。若将极半径和赤道半径分别代入式(2), 且当 e, s 为 1 km 时, 计算得到两个经纬度坐标, 并通过 Vincenty 公式^[22] 得到两个经纬度坐标的距离约为 4. 8 m。可知, 在极半径和赤道半径两个极限情况下, 通过式(2)进行运动位置与地理位置坐标转换, 误差基本可以忽略不计。因此, 在全球海洋任意位置都可将地球平均半径作为固定值进行计算。

1.3 时空海洋数据平滑插值算法

海洋环境参数 p 包括温度 t 、深度 h 、盐度 s 、电导率 c 、密度 ρ 、东西方向海流速度 u 和南北方向海流速度 v 。如图 3 所示。

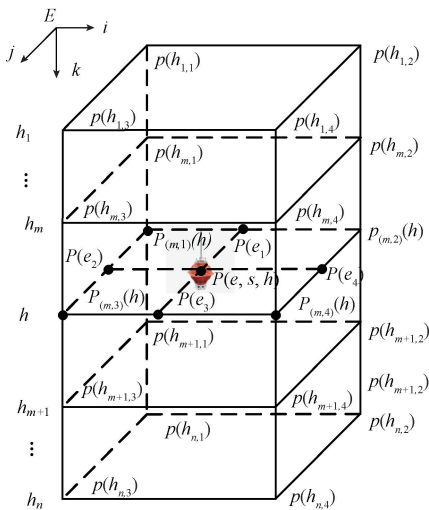


图3 海洋环境目标数据块

Fig. 3 Target dataset of marine environment

通过数据库快速检索海洋环境目标数据块, 得到与浮标相邻的所有深度层数据点, 即:

$$p(h_{m,i}), m = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

由于海洋环境变化较平缓, 各层之间平稳过渡, 相同位置相邻时间点或同一时间相邻位置的海流一般不会剧烈变化^[10]。所获取的数据集包含多个深度层, 深度方向的数据点间隔不同, 深度越深, 间隔越大。因此, 在深度方向采用基于滑移的多三次样条插值, 该插值方法的二阶连续导数能够保证曲线曲率平滑过渡, 防止线性插值跨越数据层时引起的数值突变, 而且可以避免高次多项

式振荡现象, 以及解决大深度数据过冲的问题, 还提高了数据块检索速度和模型计算速度。由于所采用数据集水平方向的数据点间隔一致, 而且相邻数据点之间的数值相互耦合关联, 因此采用双线性插值方式即能够反映出网格间数据的变化规律。为了更加真实模拟海流动态变化规律, 引进海流随时间变化因素, 通过使用多个间隔 3 h 的数据集, 进行时间序列插值。基于以上分析, 本研究提出采用基于滑移的多三次样条插值/双线性/时间序列插值融合的时空海洋数据平滑插值算法, 建立 RTPDCOM 模型, 实时得到浮标位置的海洋环境参数 p , 并开展 RTPDCOM 模型影响下浮标运动仿真和出水点预测研究。

2 模型建立

2.1 建立 RTPDCOM 模型

在深度方向进行基于滑移的多三次样条插值。根据浮标当前所处深度, 检索深度相邻的 24 个数据点, 每层包含 4 个数据点, 共 6 个数据层。分别对以上数据层具有相同地理坐标的数据点进行插值, 若浮标跨越至其他深度层之间, 则检索的数据相对移动一个层次。

假如深度方向相邻数据点之间的间隔为:

$$d_{(m,i)} = h_{m+1} - h_m \quad (4)$$

式中: $i = 1 \sim 4$ 为深度 h 平面 4 组相邻数据点的编号。

因此, 对于每个区间 $[h_m, h_{m+1}]$ 有:

$$P_{(m,i)}(h_i) = a_{(m,i)} + b_{(m,i)}(h_i - h_m) + c_{(m,i)}(h_i - h_m)^2 + d_{(m,i)}(h_i - h_m)^3 \quad (5)$$

式中: 在数据点 h_{m+1} 处, 相邻两个三次多项式 $P_{(m,i)}(h_i)$ 和 $P_{(m+1,i)}(h_i)$ 的一阶导数和二阶导数连续。

当一阶导数连续时, 即:

$$\begin{cases} P'_{(m,i)}(h_{m+1}) = P'_{(m+1,i)}(h_{m+1}) \\ P'_{(m,i)}(h_i) = b_{(m,i)} + 2c_{(m,i)}(h_i - h_m) + 3d_{(m,i)}(h_i - h_m)^2 \\ P'_{(m+1,i)}(h_i) = b_{(m+1,i)} + 2c_{(m+1,i)}(h_i - h_{m+1}) + 3d_{(m+1,i)}(h_i - h_{m+1})^2 \end{cases} \quad (6)$$

当二阶导数连续时, 即:

$$\begin{cases} P''_{(m,i)}(h_{m+1}) = P''_{(m+1,i)}(h_{m+1}) \\ P''_{(m,i)}(h_i) = 2c_{(m,i)} + 6d_{(m,i)}(h_i - h_m) \\ P''_{(m+1,i)}(h_i) = 2c_{(m+1,i)} + 6d_{(m+1,i)}(h_i - h_{m+1}) \end{cases} \quad (7)$$

为避免直接求解高次多项式中的所有系数, 令:

$$D_{(m,i)} = P''_{(m,i)}(h_m) \quad (8)$$

综上可得:

$$\begin{cases} a_{(m,i)} = p(h_{m,i}) \\ b_{(m,i)} = \frac{p(h_{m+1,i}) - p(h_{m,i})}{d_{(m,i)}} - \frac{d_{(m,i)}}{6}(2D_{(m,i)} + D_{(m+1,i)}) \\ c_{(m,i)} = D_{(m,i)}/2 \\ d_{(m,i)} = (D_{(m+1,i)} - D_{(m,i)})/6d_{(m,i)} \end{cases} \quad (9)$$

代入式(5)得:

$$\begin{aligned} P_{(m,i)}(h_i) &= p(h_{m,i}) + \left(\frac{p(h_{m+1,i}) - p(h_{m,i})}{d_{(m,i)}} - \frac{d_{(m,i)}}{6}(2D_{(m,i)} + D_{(m+1,i)}) \right) \times (h_i - h_m) + \\ &\frac{D_{(m,i)}}{2}(h_i - h_m)^2 + \frac{D_{(m+1,i)} - D_{(m,i)}}{6d_{(m,i)}}(h_i - h_m)^3 \end{aligned} \quad (10)$$

通过 Vincenty 公式得到 h 深度平面处 4 个数据点的位置信息 (e_1, s_1, h) 、 (e_2, s_2, h) 、 (e_3, s_3, h) 、 (e_4, s_4, h) , 再根据双线性插值得到 $P(e_1)$ 、 $P(e_3)$ 和 $P(s)$, 即:

$$\begin{aligned} P(e_j) &= \left(1 - \frac{e - e_j}{e_{j+1} - e_j} \right) P_{(m,j+1)}(h_{j+1}) + \\ &\frac{e - e_j}{e_{j+1} - e_j} P_{(m,j)}(h_j), \quad j = 1, 3 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P(s) &= \left(1 - \frac{s - s_k}{s_{k+2} - s_k} \right) P(e_k) + \frac{s - s_k}{s_{k+2} - s_k} P(e_{k+2}), \\ k &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

综上, 模型可表示为浮标布放时间 $Date$ 、布放坐标 (Lng_0, Lat_0) 和 水下位置 (e, s, h) 为输入参数的函数 f_p , 即:

$$P(e, s, h) = f_p(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \quad (13)$$

最后, 进行时间序列插值, 如式(14)所示。

$$\begin{aligned} P_t(e, s, h) &= P_{t1}(e, s, h) + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} (P_{t2}(e, s, h) - \\ &P_{t1}(e, s, h)) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $P_{t1}(e, s, h)$ 、 $P_{t2}(e, s, h)$ 、 $P_t(e, s, h)$ 分别为 t_1 、 t_2 、 t 时刻浮标在水下实时位置 (e, s, h) 的海洋环境参数值。

因此, 各个海洋环境参数的 RTPDCOM 模型为:

$$\begin{pmatrix} U_t(e, s, h) \\ V_t(e, s, h) \\ T_t(e, s, h) \\ S_t(e, s, h) \\ C_t(e, s, h) \\ \rho_t(e, s, h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \\ f_v(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \\ f_t(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \\ f_s(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \\ f_c(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \\ f_\rho(Date, Lng_0, Lat_0, e, s, h) \end{pmatrix} \quad (15)$$

通过 RTPDCOM 模型实现了任意海区海洋环境模拟, 如黑潮、湾流、涡流等海区, 图 4 为通过 RTPDCOM 模

型绘制的 2021 年 12 月 8 日 5 时分辨率为 $0.08^\circ \times 0.04^\circ$ 和 $0.04^\circ \times 0.02^\circ$ 的墨西哥湾流海表海流分布图。

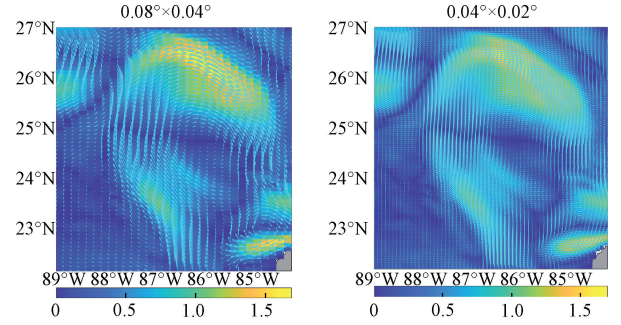


图 4 墨西哥湾流海表海流分布

Fig. 4 Distribution of surface currents in the Gulf Stream

2.2 建立浮标动力学模型

1) 海水温度和压力影响

浮标体积受压力和温度的影响近似线性关系^[23]。在 h 处, 浮标外界温度为 $T_t(e, s, h)$, 浮标体积受压力产生的压缩量为 V_h , 受温度产生的收缩量为 $V_{T_t(e, s, h)}$, 受压力和温度产生的体积变化量为 $V_{h,T}$, 根据浮标体积受压力和温度影响, 列方程组, 即:

$$\begin{cases} V_h = ah + b \\ V_{T_t(e, s, h)} = cT_t(e, s, h) + d \\ V_{h,T} = V_h + V_{T_t(e, s, h)} \end{cases} \quad (16)$$

假设最大深度 h_{\max} 处, 浮标体积受压力产生的压缩量为 $V_{h_{\max}}$, 受温度产生的收缩量为 $V_{T(e, s, h_{\max})}$, 可得:

$$\begin{cases} a = \frac{V_{h_{\max}}}{h_{\max}} \\ b = 0 \\ c = \frac{V_{T_t(e, s, h_{\max})}}{T_t(e, s, h_{\max}) - T_t(e, s, 0)} \\ d = \frac{V_{T_t(e, s, h_{\max})} T_t(e, s, 0)}{T_t(e, s, h_{\max}) - T_t(e, s, 0)} \end{cases} \quad (17)$$

因此, 浮标随压力和温度变化的体积变化量为:

$$\begin{aligned} V_{h,T} &= \frac{V_{h_{\max}}}{h_{\max}} h - \frac{V_{T_t(e, s, h_{\max})}}{T_t(e, s, h_{\max}) - T_t(e, s, 0)} T_t(e, s, h) - \\ &\frac{V_{T_t(e, s, h_{\max})} T_t(e, s, 0)}{T_t(e, s, h_{\max}) - T_t(e, s, 0)} \end{aligned} \quad (18)$$

2) 浮标动力学模型

浮标采用大地坐标系及惯性坐标系来表达其动力学方程, 如图 5 所示, 以静止的海平面作为参考水平面, 以布放位置为坐标原点 O , 以垂直海平面向下为 k 轴正方向, 浮标在坐标原点 O 的初始位置为 $(0, 0, 0)$, 其受力及运动

学参数均以垂直海平面向下为正方向。建模过程中,忽略上升和下降海流对浮标垂向运动的影响,运动过程视为质点,并只考虑摩擦阻力和粘滞阻力。

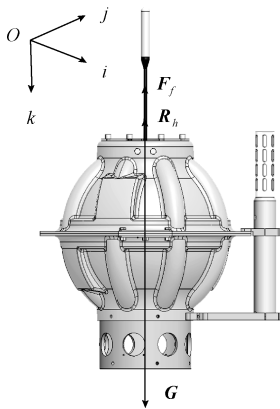


图 5 浮标受力分析
Fig. 5 Force analysis of profiling float

浮标受到重力、浮力、阻力三者的共同作用,即:

$$\boldsymbol{G} = M_f \boldsymbol{g} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{F}_f = -\rho_t(e,s,h)\boldsymbol{g}(V_0 + V_{oil} - V_{h,T}) \tag{20}$$

$$\boldsymbol{R}_h = -\frac{1}{2}(C_f S + C_n A_{fd})\rho_t(e,s,h)\boldsymbol{v}_h |\boldsymbol{v}_h| \tag{21}$$

其中, M_f 为总质量, \boldsymbol{g} 为重力加速度, C_f 为摩擦阻力系数, C_n 为粘压阻力系数, S 为湿表面积, A_{fd} 为竖直方向迎流面积, $\rho_t(e,s,h)$ 为海水密度, V_{oil} 为浮标外油囊体积, V_0 为浮标在海表面除外油囊之外的体积。

浮标所受浮力为:

$$\Sigma \boldsymbol{F}_h = \boldsymbol{G} + \boldsymbol{R}_h + \boldsymbol{F}_f \tag{22}$$

浮标处于运动状态时,根据物体运动公式及牛顿第二定律,建立浮标运动过程的动力学方程组,即:

$$\boldsymbol{a}_h(t) = \Sigma \boldsymbol{F}_h / M_f \tag{23}$$

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_e(t) \\ \boldsymbol{v}_s(t) \\ \boldsymbol{v}_h(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{U}_t(e,s,h) \\ \boldsymbol{V}_t(e,s,h) \\ \boldsymbol{v}_h(t-1) + \boldsymbol{a}_h(t) \end{pmatrix} \tag{24}$$

$$\begin{pmatrix} e(t) \\ s(t) \\ h(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e(t-1) + \boldsymbol{v}_e(t) \\ s(t-1) + \boldsymbol{v}_s(t) \\ h(t-1) + \boldsymbol{v}_h(t) \end{pmatrix} \tag{25}$$

其中, $\boldsymbol{a}_h(t)$ 为 t 时刻浮标在竖直方向上的加速度, $\boldsymbol{v}_e(t)$ 、 $\boldsymbol{v}_s(t)$ 、 $\boldsymbol{v}_h(t)$ 为 t 时刻浮标在 i 、 j 、 k 方向上的速度, $e(t)$ 、 $s(t)$ 、 $h(t)$ 为 t 时刻浮标在 i 、 j 、 k 方向上的位移。

3) 动力学模型参数

海试前,在海水中对浮标进行配平并称重,得到浮标

质量 M_f ,记录海水密度 ρ 和浮标配平时的外油囊油量 V_{oil} ,得到除外油囊之外的浮标海表面体积 V_0 ;根据水动力仿真^[24]得到摩擦阻力系数 C_f 和粘滞阻力系数 C_n ,以及通过浮力变化规律分析^[23]得到4 000 m处体积产生压缩量和温度产生收缩量;再根据浮标三维模型得到湿面积 S 和迎流面积 A_{fd} ,详细参数如表1所示。

表 1 浮标模型参数
Table 1 Model parameters of profiling float

参数名称	单位	值
浮标质量 M_f	kg	54.7
浮标海表面体积 V_0	m^3	$5.292\ 2 \times 10^{-2}$
配平外油囊油量 V_{oil}	m^3	600×10^{-6}
配平海水密度 ρ	kg/m^3	1 022
湿面积 S	m^2	0.77
迎流面积 A_{fd}	m^2	0.267
摩擦阻力系数 C_f	无量纲	0.5
粘滞阻力系数 C_n	无量纲	0.5
压力引起的压缩量 $V_{h\ 4\ 000}$	m^3	668×10^{-6}
温度引起的收缩量 $V_{T(e,s,h\ 4\ 000)}$	m^3	150×10^{-6}

3 实验验证

2019年8月5日于西太平洋成功布放了1套浮标,搭载了国产CTD传感器,共进行了48个4 000 m级剖面运动,采集了温度、盐度数据。根据所构建的RTPDCOM模型、浮标动力学模型以及提供的模型参数,开展运动仿真试验,得到浮标水下运动轨迹在海表面的映射,并与分层模型^[10]进行效果对比,如图6所示。其中, A 点表示浮标入水点, B 点表示浮标实际出水点, C 点表示使用RTPDCOM模型时浮标仿真出水点, D 点表示使用分层模型时浮标仿真出水点。

通过浮标入水点坐标、实际出水点坐标和仿真出水点坐标,计算浮标仿真出水点和实际出水点相对于浮标入水点的距离偏差以及角度偏差。通过数据对比可知,出水角度偏差多数 $<20^\circ$,出水距离偏差多数 <650 m,如表2所示。而且,与分层模型相比,RTPDCOM模型在出水角度和距离预测精度上均表现更优。此外,浮标于2019年8月23日进行第24个剖面,时间和位置与“白鹿”台风过境时间和轨迹一致,可能造成较大扰流,导致距离偏差较大。

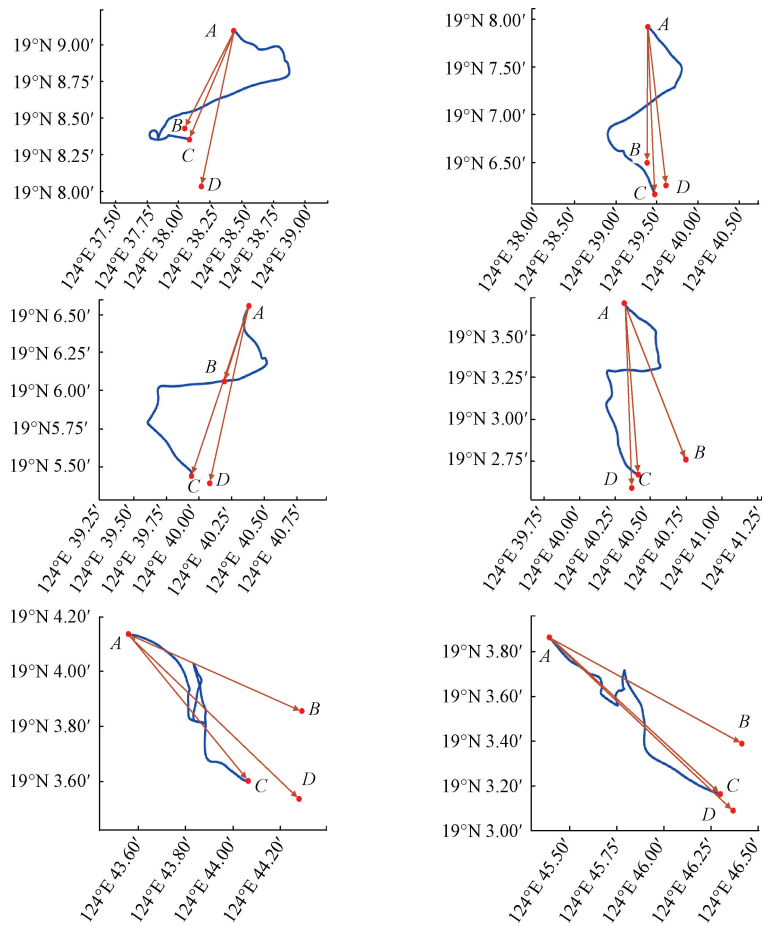


图 6 第 20、22、24、26、28、30 个剖面出水点对比

Fig. 6 Comparison of water-outlet locations in profiles 20, 22, 24, 26, 28, 30

表 2 剖面数据偏差对比

Table 2 Deviation of water outlet location

剖面号	RTPDCOM	RTPDCOM	分层模型	分层模型
	角度偏差	距离偏差	角度偏差	距离偏差
	$\angle BAC/(^{\circ})$	$ BC /\text{m}$	$\angle BAD/(^{\circ})$	$ BD /\text{m}$
20	4.68	154	16.34	774
22	3.00	621	7.52	590
24	0.73	1 227	5.99	1 251
26	18.51	602	20.74	722
28	26.35	620	19.40	588
30	13.11	462	13.80	555

获取了温盐数据并与海试数据进行对比,图 7~8 为第 30 个 4 000 m 剖面的温度、盐度数据曲线。由图 7 可知,温度曲线基本吻合;由图 8 可知,在 1 500 m 以深时,盐度曲线基本吻合,而在大深度时,非滑移的多三次样条插值出现了过冲现象,而基于滑移的多三次样条插值则未出现。

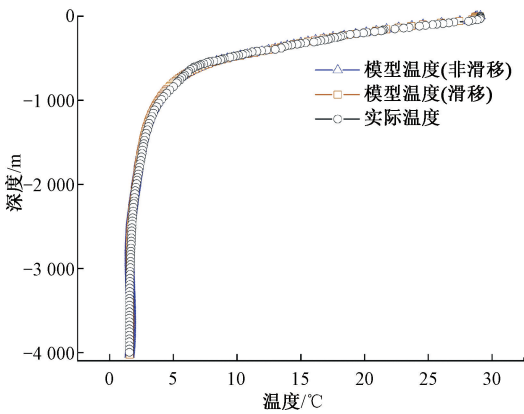


图 7 模型仿真与实际温度数据曲线

Fig. 7 Comparison of modeled and measured temperature curves

图 9 为第 30 个 4 000 m 剖面的温度、盐度误差曲线。通过误差曲线可知,在数据滑移情况下,温盐较大偏差主要集中在海表面及温跃层,温度误差在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围,大部分误差在 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 范围;盐度误差在 ± 0.1 PSU 范围,大部分

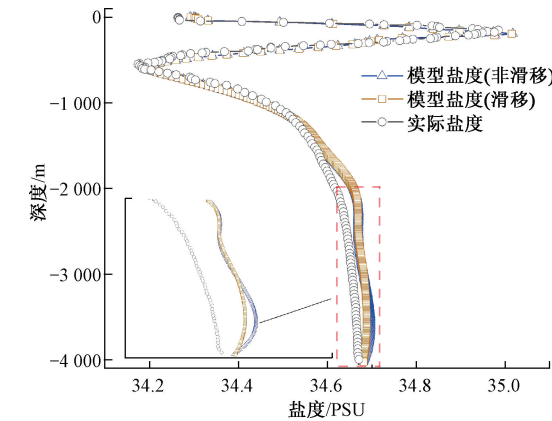


图8 模型仿真与实际盐度数据曲线

Fig. 8 Comparison of modeled and measured salinity curves

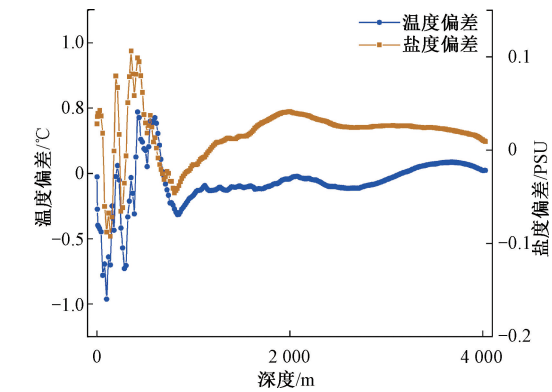


图9 仿真与实际盐度、温度偏差曲线

Fig. 9 Modeled and measured salinity and temperature deviation curves

误差在 ± 0.05 PSU 范围;在 1 500 m 以深时,模型盐度值均高于实际盐度值;在 1 000 m 以深时,模型温度值均低于实际温度值。分析其原因,主要由于所采用 GOFS 3.1 数据中的温度、盐度与实际相比本身存在偏差,以及搭载的国产 CTD 传感器随深度增加时可能存在较大温漂,导致采集的温盐数据存在偏差。

表 3、4 分别为第 24、26、28、30 个剖面仿真与实际温度、盐度偏差对比。其中,温度平均偏差 $0.126^{\circ}\text{C} \sim 0.185^{\circ}\text{C}$,温度偏差最大值 $0.962^{\circ}\text{C} \sim 1.764^{\circ}\text{C}$,温度偏差最小值 $7.09 \times 10^{-4}^{\circ}\text{C} \sim 1.67 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$;盐度平均偏差 $0.0276 \sim 0.0314$ PSU,盐度偏差最大值 $0.106 \sim 0.33$ PSU,盐度偏差最小值 $9.5 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ PSU,验证了 RTPDCOM 模型与真实海洋环境的一致性。

2021 年 12 月 7 日于印度洋成功布放了 1 套浮标,共进行了 138 个剖面运动,包括 136 个 4 000 m 级剖面。选择了 8 个连续剖面进行出水点预测研究,进一步验证 RTPDCOM 模型的普适性,如图 10、11 所示。

表 3 仿真与实际温度偏差

Table 3 Deviation of modeled and measured temperature ($^{\circ}\text{C}$)

剖面号	入水点	偏差 最大值	偏差 最小值	平均 偏差
24	124. 671 9°E, 19. 061 5°N	1. 486	1.67×10^{-3}	0. 171
26	124. 673 0°E, 19. 109 2°N	1. 619	9.40×10^{-4}	0. 166
28	124. 726 0°E, 19. 068 9°N	1. 764	7.09×10^{-4}	0. 185
30	124. 756 6°E, 19. 064 4°N	0. 962	1.08×10^{-3}	0. 126

表 4 仿真与实际盐度偏差

Table 4 Deviation of modeled and measured salinity (PSU)

剖面号	入水点	偏差 最大值	偏差 最小值	平均 偏差
24	124. 671 9°E, 19. 061 5°N	0. 320	9.5×10^{-5}	0. 027 7
26	124. 673 0°E, 19. 109 2°N	0. 330	3.1×10^{-4}	0. 031 2
28	124. 726 0°E, 19. 068 9°N	0. 191	4.9×10^{-4}	0. 031 4
30	124. 756 6°E, 19. 064 4°N	0. 106	1.0×10^{-3}	0. 027 6

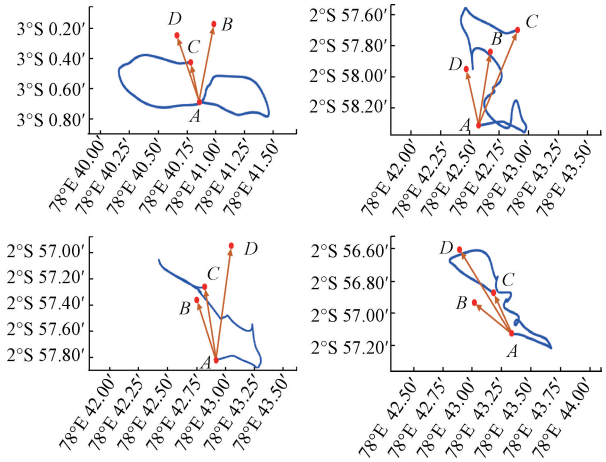


图 10 第 8、9、10、11 个剖面出水点对比

Fig. 10 Comparison of water outlet location in profiles 8, 9, 10 and 11

通过表 5、6 数据对比可知,在使用 RTPDCOM 模型情况下,第 8、9、10、11 个剖面的出水角度偏差 $<30^{\circ}$,出水距离偏差 <600 m,其中,2 个剖面出水距离偏差 <350 m;第 28、29、30、31 个剖面出水角度偏差多数 $<20^{\circ}$,其中,2 个剖面出水角度偏差 $<7^{\circ}$ 。印度洋布放浮标的平均角度偏差 15.32° 、平均距离偏差 534.5 m,相较于西太平洋浮标的平均角度偏差 11.03° 和平均距离偏差 614.3 m 基本一致,体现出 RTPDCOM 模型在不同海区的普适性。

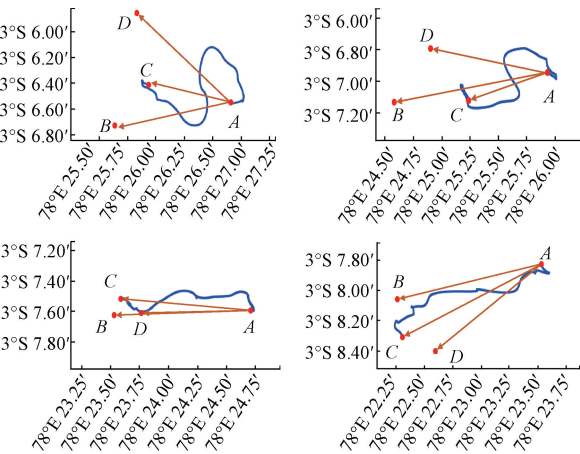


图 11 第 28、29、30、31 个剖面出水点对比
Fig. 11 Comparison of water outlet location in profiles
28, 29, 30 and 31

此外,与分层模型相比,RTPDCOM 模型在出水角度和距离预测精度上也表现更优。

表 5 第 8、9、10、11 个剖面出水点偏差

Table 5 Deviation of water outlet location in 8, 9, 10, 11				
剖面号	RTPDCOM 角度偏差 $\angle BAC/(^{\circ})$	RTPDCOM 距离偏差 $ BC /\text{m}$	分层模型 角度偏差 $\angle BAD/(^{\circ})$	分层模型 距离偏差 $ BD /\text{m}$
8	30.55	596	37.54	605
9	16.12	493	28.07	430
10	9.32	218	28.23	944
11	26.93	325	18.70	642

表 6 第 28、29、30、31 个剖面出水点偏差

Table 6 Deviation of water outlet location in 28, 29, 30, 31				
剖面号	RTPDCOM 角度偏差 $\angle BAC/(^{\circ})$	RTPDCOM 距离偏差 $ BC /\text{m}$	分层模型 角度偏差 $\angle BAD/(^{\circ})$	分层模型 距离偏差 $ BD /\text{m}$
28	20.35	795	49.70	1 657
29	6.42	1 101	16.17	776
30	2.67	276	0.87	432
31	10.18	472	20.97	829

4 结 论

建立了多参数海洋环境数据库,本研究提出了一种基于滑移的多三次样条/双线性/时间序列插值融合

的时空海洋数据平滑插值算法,构建了 RTPDCOM 模型,实现了海洋多参数动力环境。开展了运动仿真与海试对比试验。西太平洋区域仿真与海试数据对比结果显示,在 4 000 m 剖面运动条件下,仿真与实际出水点相对于入水点的水平距离基本一致,出水角度偏差多数 $<20^{\circ}$,距离偏差多数 $<650\text{ m}$;温盐剖面数据吻合度高,温度平均偏差 $0.126^{\circ}\text{C}\sim 0.185^{\circ}\text{C}$,盐度平均偏差 $0.0276\sim 0.0314\text{ PSU}$,验证了 RTPDCOM 模型与真实海洋环境的一致性。印度洋区域仿真与海试对比进一步表明,出水角度偏差多数 $<20^{\circ}$,距离偏差多数 $<600\text{ m}$,预测效果良好,体现出 RTPDCOM 模型在不同海区的普适性。与传统分层模型相比,RTPDCOM 模型在出水角度和距离预测精度上均表现更优。所构建的 RTPDCOM 模型为开展水下无人系统路径规划、虚拟锚泊控制、编队控制、数字孪生等理论和技术研究与应用提供了海洋数字孪生环境。此外,浮标出水点预测精度受到诸多因素影响。1) 温-压-密-流等海洋要素与实际存在偏差;2) 数据在大深度区间间隔较大,特别是对海流影响较大;3) 动力学模型参数和油量变化等数据存在误差。后续将进一步通过实时海洋环境数据模拟更加精确的海洋环境,并开展水下无人系统轨迹规划和出水点预测,提高预测准确性。

参考文献

[1] 李晓婉,曹志敏,韩瑜. 海战场自然环境建模与仿真研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 4-13.
LI X W, CAO ZH M, HAN Y. Study on the modeling and simulation of the natural environment in naval combat[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3): 4-13.
[2] 彭铎,查海音,曹坚,等. 基于 CNN-LSTM 声速预测的水下移动节点定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 146-157.
PENG D, ZHA H Y, CAO J, et al. Underwater mobile node location algorithm based on CNN-LSTM sound velocity prediction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11): 146-157.
[3] 张维星,张锁平,党超群,等. 基于自适应波谱斜率的海面风速反演算法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(3): 68-74.
ZHANG W X, ZHANG S P, DANG CH Q, et al. Research on sea surface wind speed inversion algorithm based on adaptive spectral slope[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(3): 68-74.

- [4] MERCI A, ANTHIERENS C, THIRION-MOREAU N, et al. A simulator of underwater glider missions for path planning[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269: 113514.
- [5] QIU B CH, WANG M F, LI H W, et al. Development of hybrid neural network and current forecasting model based dead reckoning method for accurate prediction of underwater glider position [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115486.
- [6] HAN W, YANG M, WANG CH, et al. Motion performance prediction of underwater gliders based on deep learning and image modeling[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 315: 119833.
- [7] 王健, 胡震, 张华. 考虑海流及航速影响的欠驱动无人潜航器自适应路径跟踪控制方法[J]. *中国造船*, 2024, 65(6): 54-65.
- WANG J, HU ZH, ZHANG H. Adaptive path tracking control method for underactuated unmanned underwater vehicle considering the influence of ocean current and navigational speed[J]. *Ship Building of China*, 2024, 65(6): 54-65.
- [8] 门腾飞, 王岩峰, 官晟, 等. 基于海流的水下滑翔机出水位置预测研究[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(3): 66-73, 181.
- MEN T F, WANG Y F, GUAN SH, et al. Research on water outlet location prediction of underwater glider based on ocean current [J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(3): 66-73, 181.
- [9] TIAN X, ZHOU H X, ZHANG H W, et al. LSTM & attention-based meta-reinforcement learning for trajectory tracking of underwater gliders with varying buoyancy loss and current disturbance[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 326: 120906.
- [10] 兰蔚. 海流影响下的水下滑翔机编队路径规划研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
- LAN W. Research on underwater glider formation path planning under the influence of ocean current [J]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [11] WEN Y CH, LI X F, LI H Y, et al. Modeling of three-dimensional ocean current based on ocean current big data for underwater vehicles [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(12), 2219.
- [12] CHEN J H. Data-driven sensor deployment for spatiotemporal field reconstruction [J]. *Instrumentation*, 2019, 6(3): 28-38.
- [13] WANG H P, WANG CH X, LI Y M. Dynamic modeling and analysis of underwater glider in the ocean environment[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 332: 121312.
- [14] ZHENG D, XU J Y, LI X F, et al. Low energy consumption depth control method of self-sustaining intelligent buoy[J]. *Journal of Measurement Science and Instrument*, 2021, 12(1): 74-82.
- [15] 彭伟, 厉运周, 高艳波, 等. 我国海洋观测仪器设备体系化发展研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 88-100.
- PENG W, LI Y ZH, GAO Y B, et al. Research on the systematic development of ocean observation instruments and equipment in China [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 88-100.
- [16] 杨绍琼, 成丹, 陈光耀, 等. 面向典型海洋现象观测的水下滑翔机应用综述[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 54-74.
- YANG SH Q, CHENG D, CHEN G Y, et al. Review on the application of underwater gliders for observing typical ocean phenomena[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(3): 54-74.
- [17] 端木雨欣, 马静, 徐海明. 东海黑潮区海温对台风“轩岚诺”快速增强的影响[J]. *大气科学学报*, 2025, 48(5): 843-856.
- DUANMU Y X, MA J, XU H M. Impact of SST in the Kuroshio region of the East China Sea on the rapid intensification of typhoon Hinnamnor[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2025, 48(5): 843-856.
- [18] 庞水, 徐佳毅, 李洪宇, 等. 水下单线电能传输机理分析及实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 134-140.
- PANG SH, XU J Y, LI H Y, et al. Analysis and experimental study on the mechanism of underwater single wire power transfer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 134-140.
- [19] 刘楚, 侯斐, 杨泽荣, 等. 基于“海豚”深海剖面浮标的CTD数据自适应观测方法[J]. *水下无人系统学报*, 2025, 33(4): 613-622.
- LIU CH, HOU F, YANG Z R, et al. Adaptive observation method for CTD data based on dolphin deep-sea profiling buoy [J]. *Journal of Unmanned Undersea*

Systems, 2025, 33(4): 613-622.

- [20] 王丹阳. 全球海洋 Argo 网格化数据集重构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.

WANG D Y. The reconstruction research of global Argo gridded dataset[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.

- [21] 张永垂, 陈诗尧, 王宁, 等. 全球业务化海洋预报系统进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(4): 344-357.

ZHANG Y CH, CHEN SH Y, WANG N, et al. Progress of global operational ocean forecasting systems [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(4): 344-357.

- [22] VINCENTY T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equation[J]. Survey Review, 1975, 23(176): 88-93.

[23] 林越, 李洪宇, 文艺成, 等. 深海自持式剖面浮标浮力变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(7): 1440-1448.

LIN Y, LI H Y, WEN Y CH, et al. Buoyancy change rule of deep-sea autonomous profiling float[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(7): 1440-1448.

- [24] 李鲁彦, 李醒飞, 姜明波, 等. 深海自持式剖面浮标水动力特性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 46-54.

LI L Y, LI X F, JIANG M B, et al. Hydrodynamic characteristics analysis of deep-sea self-sustaining profiling floats [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(4): 46-54.

作者简介



文艺成, 2013 年于山东科技大学获得学士学位, 2016 年于山东科技大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为海洋观测与探测。

E-mail: skdwyw@126.com

Wen Yicheng received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Shandong University of Science and Technology in 2013 and 2016, respectively. He is currently a Ph.D. candidate at Tianjin University. His main research interest includes marine observation and detection.



徐佳毅 (通信作者), 2015 年于天津大学获得学士学位, 2022 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副研究员, 主要研究方向为海洋剖面感知、水下耦合能信传输。

E-mail: xjy0125@tju.edu.cn

Xu Jiayi (Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Tianjin University in 2015 and 2022, respectively. He is currently an associate researcher at Tianjin University. His main research interests include oceanographic profiling sensing and underwater simultaneous wireless power and data transfer.



李醒飞, 1994 年于东南大学获得硕士学位, 2000 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为智能制造、惯性传感、海洋观测与探测。

E-mail: lixf@tju.edu.cn

Li Xingfei received his M.Sc. degree from Southeast University in 1994, his Ph.D. degree from Tianjin University in 2000. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include intelligent manufacturing, inertial sensing, marine observation and detection.