

[引用格式] 秦悦, 王冠琳, 官晟, 等. 水下滑翔机中尺度过程空间采样运动仿真 [J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(4): 474-484.

## 水下滑翔机中尺度过程空间采样运动仿真

秦悦<sup>1</sup>, 王冠琳<sup>2,3,4,5</sup>, 官晟<sup>2,3,4,5</sup>, 王岩峰<sup>2,3,4,5</sup>, 丁军航<sup>1,6</sup>

(1. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛, 266071; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛, 266061; 3. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛, 266061; 4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛, 266061; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛, 266237; 6. 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛, 266071)

**摘要:** 海洋中尺度过程包括涡旋、锋面和内波等现象, 是海洋中一类重要的动力过程, 在全球气候变化、海洋能量热量和物质输送过程中起着重要作用。对此类过程的观测与研究, 在海洋资源勘测、海洋生物探索以及军事等领域也有着较为重要的现实意义。水下滑翔机已成为近年来观测中尺度过程的重要工具之一。文中以海燕-Ⅱ自主式无人水下滑翔机作为研究对象, 首先, 根据动量和角动量定理建立了其六自由度动力学模型; 然后, 利用 Simulink 仿真对该模型进行了验证, 由仿真结果可知, 所提出的动力学模型能够较好地实现运动仿真; 最后, 针对几种中尺度过程不同的探测要求, 设计了水下滑翔机的运动方案, 并进行了空间采样运动的仿真, 仿真结果可为日后实际观测应用提供参考和优化参数。

**关键词:** 水下滑翔机; 中尺度过程; 海燕-Ⅱ; 空间采样; 运动仿真

**中图分类号:** TJ630.1; U674.7; TB71.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-3920(2022)04-0474-11

**DOI:** 10.11993/j.issn.2096-3920.202112003

## Motion Simulation of Spatial Sampling of Mesoscale Processes for Underwater Gliders

QIN Yue<sup>1</sup>, WANG Guan-lin<sup>2,3,4,5</sup>, GUAN Sheng<sup>2,3,4,5</sup>, WANG Yan-feng<sup>2,3,4,5</sup>, DING Jun-hang<sup>1,6</sup>

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China; 5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 6. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Marine mesoscale processes, including vortices, fronts, and internal waves, are a class of important dynamic processes in the ocean that have a significant influence on global climate change and the transport of marine energy, heat, and materials. The observation and investigation of such processes also have important practical significance in the field of marine resources, organism exploration, and military domains. Underwater gliders have recently become important devices for observing mesoscale processes. “Petrel-Ⅱ,” a type of autonomous underwater glider, is considered the main focus of this study. First, a dynamics model is established based on the momentum and angular momentum theorems. Simulink is then used to confirm the feasibility of the proposed model. According to the simulation results, the proposed dynamic model can realize motion simulation well. Finally, based on the different requirements for the detection of several mesoscale processes, different

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-03-01.

基金项目: “全球变化与海气相互作用(二期)”专项(GASI-01-ATP-STwin); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0301103).

作者简介: 秦悦(1997-), 女, 在读硕士, 主要研究方向为智能控制技术.

sampling motion schemes are presented, and a motion simulation of spatial sampling is provided. This study could provide a reference and optimization parameters for future practical observations and applications.

**Keywords:** underwater glider; mesoscale process; Petrel- II; spatial sampling; motion simulation

## 0 引言

近年来, 由于卫星遥感技术、水下无人技术和数值仿真技术的不断发展, 对各种海洋现象的研究与探测也日趋深入<sup>[1]</sup>。中尺度过程即为广泛存在于海洋中的一种海洋现象, 主要包括涡旋、锋面和内波等现象, 其能量比大尺度过程高近一个量级, 是海洋中极其重要的一类动力过程, 为海洋中的能量和物质输送提供了动力基础, 进而影响着全球气候和海洋生态系统。另外, 由于中尺度过程对水声信号传播影响很大, 给水下设备的探测、定位以及通信都带来极大的影响<sup>[2-5]</sup>。因此, 对海洋中尺度过程展开系统的探测采样, 深入认知其产生和变化机理, 对海洋资源勘测、海洋环境观测以及军事海洋等领域有着极为重要的现实意义。

自 21 世纪以来, 各类海洋探测工具的发展为中尺度过程研究提供了极其丰富的资料<sup>[6-9]</sup>。Chelton 等<sup>[6]</sup>利用卫星高度计资料, 详尽地描述了全球表层中尺度涡旋的时空分布、大小以及传播特性等情况。Liu 等<sup>[7]</sup>在我国南海东北部的大陆架断裂区周围通过锚系、拖曳式温盐深仪等, 与雷达卫星图像相结合, 对南海东沙岛附近的内波演变以及传播规律进行了观测研究。杨廷龙<sup>[9]</sup>利用卫星统计数据, 探测了日本海的中尺度涡旋, 研究了在不同深度下温度锋和盐度锋的分布特征。总的来说, 目前对中尺度过程的产生消散、时空分布、大小强度以及物质输送等都有较为广泛的研究和认识, 但前述研究观测到的只是中尺度过程某时刻、某些深度层次的三维状态, 而对其三维结构的研究较少, 且大多数中尺度过程是非定常的, 观测这类中尺度过程随时间变化的完整三维结构成为了目前学者们的研究方向之一, 同时也对观测工具提出了更高、更精细的要求。

水下滑翔机承担的各类观测任务在过去 20 年中提供了大量的海洋数据, 在海洋生物学、海洋物理学、物理海洋学以及地质海洋学等不同领域都起到了极其重要的作用<sup>[6-7]</sup>。近些年来, 随着对海

洋中尺度过程三维结构探测要求的发展, 水下滑翔机也逐渐开始应用到中尺度过程的观测任务中<sup>[10-14]</sup>。Alford 等<sup>[10]</sup>通过 2 个系泊系统和一架水下滑翔机组成的观测系统, 研究了华盛顿大陆架地区内波及其与低频洋流、分层、溶解氧和营养盐分布的关系。在南海, Johnston 等<sup>[11]</sup>利用水下滑翔机探测了内部潮汐, 并通过分舱测量获得了其纬向深度结构。Fan 等<sup>[12]</sup>利用系泊装置和滑翔机, 观测了伊尔明格海的中尺度反气旋涡旋。天津大学在南海北部部署了 12 架 Petrel- II 自主式无人水下滑翔机用以观测南海反气旋涡旋不同断面的温盐垂直结构<sup>[13]</sup>。Li 等<sup>[14]</sup>确定了水下滑翔机网络的最优配置, 重建了南海北部反气旋涡旋的三维结构, 并基于一种涡旋温度异常场的简单参数化模型对 3 种滑翔机的网络拓扑结构进行了数值试验。可以看出, 对于海洋中尺度过程的探索与观测已较为深入, 但对于中尺度过程水下的三维结构及其时空演变仍存在许多未解之处。水下滑翔机目前已成为中尺度过程探测任务的重要承担平台, 如何优化其采样行为, 以适应不同的水下探测任务, 成为实际应用中的迫切需求。

文中以 Petrel- II 为例, 对水下滑翔机进行了运动学和动力学建模, 在其结构设计中引入了尾舵调节模块, 与滚转调节模块共同构成了航向调节系统, 能够较好地实现水下滑翔机的转向运动。另外, 分析并化简了其在纵向剖面下的动力学模型, 利用 Simulink 对建立的模型进行验证。随后, 根据几种不同情况下的海洋中尺度过程探测需求, 针对性地进行了水下滑翔机在不同深度、距离以及时间限制等要求下的运动仿真。

## 1 水下滑翔机动力学模型

基于已有的研究和 Petrel- II 公开成果, 文中根据需求建立 Petrel- II 的六自由度动力学方程和运动学方程。

### 1.1 坐标系及运动变量定义

为便于分析, 特定义位置角度向量  $\mathbf{D} = [\mathbf{D}_1$

$D_2]^T$ 。其中:  $D_1 = [X \ Y \ Z]^T$  为惯性坐标系下的位移矢量, 分别表示进退、潜浮和侧移;  $D_2 = [\phi \ \psi \ \theta]^T$  为角度向量, 分别代表横滚、偏航及俯仰。另外, 速度和角速度向量定义为  $P = [V \ \Omega]^T$ , 其中: 联体坐标系下的速度矢量  $V = [u \ v \ w]^T$ , 分别表示  $[X \ Y \ Z]$  方向上的速度; 角速度向量  $\Omega = [p \ q \ r]^T$ , 分别代表  $[\phi \ \psi \ \theta]$  方向上的角速度。图 1 给出了 Petrel- II 的坐标系具体定义<sup>[15]</sup>,  $EXYZ$  表示惯性坐标系,  $Bxyz$  表示联体坐标系。

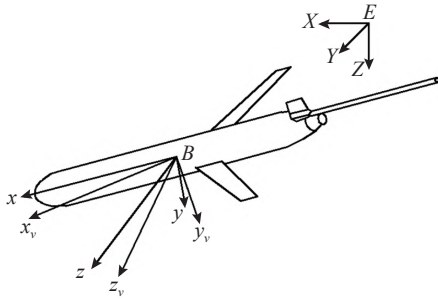


图 1 Petrel- II 坐标系定义

Fig. 1 Coordinate system definition of Petrel- II

Petrel- II 系统布局简化结构如图 2 所示<sup>[15]</sup>。其中: 前舱段的浮力驱动模块主要通过改变内外油囊中油量的分布来调节水下潜翔机的潜浮状态; 中舱段的滚转调节模块通过绕  $Bx$  轴转动来调节水下潜翔机的横滚姿态, 俯仰调节模块则沿  $Bx$  轴前后移动来调节水下潜翔机的俯仰姿态; 尾部浸水舱的螺旋桨推进模块会产生沿  $Bx$  轴的推进力和力矩, 通过改变螺旋桨的转速来调节推进力和力矩的大小。另外, 处于尾部的尾舵调节模块通过改变尾舵绕回转轴的角度来改变水下潜翔机的航行角度。

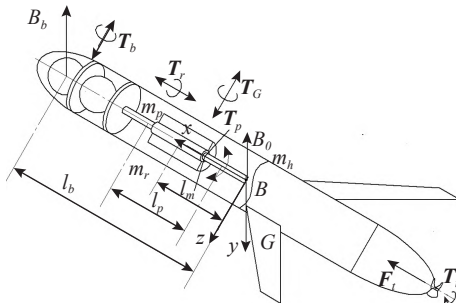


图 2 Petrel- II 系统布局简化结构图

Fig. 2 Simplified diagram of system layout of Petrel- II

联体坐标系到惯性坐标系的运动转换矩阵<sup>[15]</sup>

$$K = \text{diag}\{R_{IB}, L_{IB}\} \quad (1)$$

其中

$$R_{IB} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\phi - \cos\psi \sin\theta \cos\phi & \sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\theta \sin\phi \\ \sin\theta & \cos\theta \cos\phi & -\cos\theta \sin\phi \\ -\sin\psi \cos\theta & \sin\theta \sin\psi \cos\phi & \sin\psi \sin\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_{IB} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\phi / \cos\theta & -\sin\phi / \cos\theta \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \\ 1 & -\tan\theta \cos\phi & \tan\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此, Petrel- II 的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = u \cos\psi \cos\theta + v(\sin\psi \sin\phi - \cos\psi \sin\theta \cos\phi) + w(\sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\theta \sin\phi) \\ \dot{Y} = u \sin\theta + v \cos\theta \cos\phi - w \cos\theta \sin\phi \\ \dot{Z} = -u \sin\psi \cos\theta + v(\cos\psi \sin\phi + \sin\theta \sin\psi \cos\phi) + w \cos\psi \cos\phi - \sin\psi \sin\theta \sin\phi \\ \dot{\psi} = q \cdot \frac{\cos\phi}{\cos\theta} - r \cdot \frac{\sin\phi}{\cos\theta} \\ \dot{\theta} = q \sin\phi + r \cos\phi \\ \dot{\phi} = p - q \tan\theta \cos\phi + r \tan\theta \sin\phi \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 受力分析

### 1.2.1 重力、浮力及扶正力矩

水下潜翔机所受浮力与重力方向相反, 浮力作用点位于浮心处, 重力作用点位于重心处。这 2 个力在体坐标系下分别表示为

$$F_G = R_B^E \begin{bmatrix} 0 \\ G \\ 0 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \cos\phi \\ -\cos\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_B = R_B^E \begin{bmatrix} 0 \\ -B_0 \\ 0 \end{bmatrix} = B_0 \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ -\cos\theta \cos\phi \\ \cos\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于重心与浮心不重合, 重心位置矢量可表示为  $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ , 此时, 由于两者作用点位置不重合, 重力会在浮心上产生扶正力矩, 表示为

$$T_G = r_G \times F_G = G \begin{bmatrix} -y_G \cos\theta \sin\phi - z_G \cos\theta \cos\phi \\ z_G \sin\theta + x_G \cos\theta \sin\phi \\ x_G \cos\theta \cos\phi - y_G \sin\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 1.2.2 附加浮力与浮力矩

体坐标系下的附加浮力

$$F_b = R_B^E \begin{bmatrix} 0 \\ -B_b \\ 0 \end{bmatrix} = -B_b \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \cos\phi \\ -\cos\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $B_b$  为浮力驱动模块产生的浮力。

由于驱动浮力作用于水下滑翔机头部, 作用点矢量在体坐标系下可以表示为  $\mathbf{r}_b = [l_b \ 0 \ 0]^T$ , 故附加浮力在浮心上产生的附加浮力矩为

$$\mathbf{T}_b = \mathbf{r}_b \times \mathbf{F}_b = -B_b l_b \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 1.2.3 附加俯仰力矩与横滚力矩

质量块在电机的驱动下前后移动, 质量块质心与浮心距离为  $l_p$ , 产生的附加俯仰力矩为

$$\mathbf{T}_p = \mathbf{r}_p \times m_p \mathbf{g} = m_p g l_p \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

同样地, 偏心质量块在滚转电机的驱动下旋转一定的角度, 此时会产生附加横滚力矩

$$\mathbf{T}_r = \mathbf{r}_r \times \mathbf{G}_p = m_p g e_r \begin{bmatrix} (1 - \cos \varphi) \cos \theta \sin \phi - \sin \varphi \cos \theta \cos \phi \\ \sin \varphi \sin \theta \\ (\cos \varphi - 1) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

在水下滑翔机采用尾舵调节系统进行航向调节过程中, 内部偏心质量块不进行运动, 此时附加横滚力矩  $\mathbf{T}_r = 0$ 。

### 1.2.4 惯性水动力与粘性水动力

水下滑翔机在运动过程中, 会时刻受到周围水体对其产生的水动力的影响, 所受水动力的大小与其几何参数与运动参数有关, 参考文献 [16] 得惯性水动力为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_I \\ \mathbf{T}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} \dot{u} \\ \lambda_{22} \dot{v} + \lambda_{26} \dot{r} \\ \lambda_{33} \dot{w} + \lambda_{35} \dot{q} \\ \lambda_{44} \dot{p} \\ \lambda_{53} \dot{w} + \lambda_{55} \dot{q} \\ \lambda_{62} \dot{v} + \lambda_{66} \dot{r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

粘性水动力

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{VB} \\ \mathbf{T}_{VB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho V^2 A_D C_x(0) \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D (C_y^\alpha \alpha + C_y^{r'} r') \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D (C_z^\beta \beta + C_z^q q' + C_z^p p') \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L (T_x^\beta \beta + T_x^q q' + T_x^p p') \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L (T_y^\beta \beta + T_y^q q' + T_y^p p') \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L (T_z^\alpha \alpha + T_z^{r'} r') \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $V$  为合速度;  $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_z$ 、 $T_x$ 、 $T_y$  和  $T_z$  分别代表纵向力系数、垂向力系数、横向力系数、横滚力矩系数、偏航力矩系数和俯仰力矩系数。

在尾舵调节系统中, 在尾舵驱动电机的驱动下, 相对平衡位置处, 尾舵旋转角度为  $\delta_v$ , 此时尾舵所受粘性水动力为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{v\delta} \\ \mathbf{T}_{v\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D C_z^{\delta_v} \delta_v \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L T_x^{\delta_v} \delta_v \\ \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L T_y^{\delta_v} \delta_v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

故水下滑翔机受到的总粘性水动力

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_V \\ \mathbf{T}_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{VB} \\ \mathbf{T}_{VB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{v\delta} \\ \mathbf{T}_{v\delta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 1.2.5 螺旋桨推力及推力矩

在工程实际中, 螺旋桨产生的推力  $\mathbf{F}_t$  和扭矩  $\mathbf{T}_t$  分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_t = \begin{bmatrix} (1-t) K_T \rho n^2 d_p^4 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{T}_t = \begin{bmatrix} K_Q \rho n^2 d_p^5 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $K_T$  为推力系数;  $t$  为推力减额系数;  $n$  为螺旋桨转速;  $d_p$  为螺旋桨外径;  $K_Q$  为力矩系数。

### 1.2.6 合外力与力矩

根据上述分析结果, 将式(5)~式(16)中的各力和力矩表达式结合起来, 便可得到滑翔机运动时所受到的总外力及力矩

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_I \\ \mathbf{T} = \sum_j \mathbf{T}_j = \mathbf{T}_G + \mathbf{T}_b + \mathbf{T}_p + \mathbf{T}_r + \mathbf{T}_t + \mathbf{T}_v + \mathbf{T}_I \end{cases} \quad (17)$$

## 1.3 动力学方程

根据动量定理和角动量定理, 结合上述受力分析可得 Petrel-II 的动力学模型<sup>[15]</sup> 表达式为

$$\begin{cases} m [\dot{\mathbf{V}} + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_G + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + (\mathbf{r}_G \times \boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega}] = \mathbf{F} \\ \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{J} \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{R}_{IB}^T \sum_{i=1}^n \mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_i = \mathbf{T} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\dot{\mathbf{V}}$  为速度矢量;  $\dot{\boldsymbol{\Omega}}$  为角速度向量;  $\mathbf{J}$  为滑翔机关于重心的转动惯量;  $\mathbf{d}_i$  为滑翔机地面坐标系下所受外力  $\mathbf{f}_i$  与浮心的位置矢量;  $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{T}$  代表滑翔机在



运动时所受到的合外力和力矩。

文中主要考虑 Petrel-II 在纵垂面内的运动, 故有如下位移矢量  $\mathbf{D}_1 = [X \ Y \ 0]^T$ , 角度向量  $\mathbf{D}_2 = [0 \ 0 \ \theta]^T$ , 速度矢量  $\mathbf{V} = [u \ v \ 0]^T$ , 角速度向量  $\boldsymbol{\Omega} = [0 \ 0 \ r]^T$ , 因此, 可得滑翔机在纵向剖面内的动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = u \cos \theta - v \sin \theta \\ \dot{Y} = u \sin \theta + v \cos \theta \\ \dot{\theta} = r \\ (m + \lambda_{11})\dot{u} - m y_G \dot{r} - m v r = -B_b \sin \theta + (1-t) \times \\ \quad K_T \rho n^2 d_p^4 + \frac{1}{2} \rho V^2 A_D C_x(0) \\ (m + \lambda_{22})\dot{v} + \lambda_{26} \dot{r} + m u r - m y_G r^2 = -B_b \cos \theta + \\ \quad \frac{1}{2} \rho V^2 A_D (C_y^\alpha \alpha + C_y^r r') \\ (J_{B_z} + \lambda_{66})\dot{r} + \lambda_{26} \dot{v} - m y_G (\dot{u} - v r) = (B_b l_b + m_p g l_p) \times \\ \quad \cos \theta - G y_G \sin \theta + \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L (T_z^\alpha \alpha + T_z^r r') \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $r' = \frac{rL}{V}$ ,  $G = mg$ 。

合速度和攻角分别为

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}, \alpha = \arctan \frac{v}{u} \quad (20)$$

水下滑翔机动力学模型中的特性参数主要分为几何物理参数、水动力系数、运动状态参数以及输入控制参数 4 类。其中, 几何物理参数如机体质量、长度等可直接测得; 水动力参数如  $C_x(0)$ ,  $C_y^\alpha$  和  $T_z^\alpha$  等的获取方法主要有经验公式法、试验测定法、参数辨识法及计算流体动力学方法<sup>[15-16]</sup>。文中的水动力参数大多由计算流体动力学预先计算获得, 并通过后期试验数据修正; 运动参数如速度矢量  $\mathbf{V}$  及攻角  $\alpha$ , 则由运动过程实时计算; 控制参数即运动控制量, 具体数值人为给定。具体物理参数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

## 2 模型验证

锯齿状的纵垂面运动作为的主要运动模式, 非常适合大范围、长航程的探测任务。因此, 对上述建立的纵垂面内动力学方程进行 Simulink 仿真验证, 具体的模块图如图 3 所示。

运动变量选择如下的初始状态:  $X_0 = 0$ ,  $Y_0 = 0$ ,  $\theta_0 = 0$ ,  $u_0 = 0.01 \text{ m/s}$ ,  $v_0 = 0$ ,  $r_0 = 0$ 。

与文献 [15] 控制参数选取类似, 螺旋桨转速  $n$  设为 0, 驱动浮力  $B_b$  和俯仰调节重块位移  $l_p$  如

表 1 物理参数含义及取值

Table 1 Meanings of physical parameters and their values

| 物理参数   | 含义                               | 数值       |
|--|----------------------------------|----------|
| $m/\text{kg}$                                  | 滑翔机总质量                           | 69       |
| $m_p/\text{kg}$                                | 俯仰调节重块质量                         | 18       |
| $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$         | 海水密度                             | 1 022    |
| $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$             | 重力加速度                            | 9.8      |
| $\lambda_{11}/\text{kg}$                       | $x$ 方向上以单位(角)加速度运动时在 $x$ 方向的附加质量 | 2        |
| $\lambda_{22}/\text{kg}$                       | $y$ 方向上以单位(角)加速度运动时在 $y$ 方向的附加质量 | 75.8     |
| $\lambda_{66}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ | 附加惯矩                             | 31.0     |
| $\lambda_{26}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$ | 附加静矩                             | -12      |
| $J_{B_z}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$      | 转动惯量                             | 22.3     |
| $y_G/\text{m}$                                 | 质心与浮心间的位置分量                      | 0.004 7  |
| $A_D/\text{m}^2$                               | 滑翔机横截面积                          | 0.038    |
| $L/\text{m}$                                   | 滑翔机主体长度                          | 2.17     |
| $l_b/\text{m}$                                 | 驱动浮力作用点到浮心距离在 $BX$ 轴分量           | 0.93     |
| $t$  | 推力减额系数                           | 0.16     |
| $K_T$  | 推力系数                             | 0.34     |
| $d_p/\text{m}$                                 | 螺旋桨外径                            | 0.12     |
| $C_x(0)$                                       | 无因次轴向和竖直方向水动力系数                  | -0.42    |
| $C_y^\alpha$                                   | $BY$ 轴位置导数(水动力)                  | 0.316    |
| $C_y^r$  | $BY$ 轴旋转导数(水动力矩)                 | -8.37    |
| $T_z^\alpha$                                   | $BZ$ 轴位置导数(水动力)                  | -0.057 3 |
| $T_z^r$  | $BZ$ 轴旋转导数(水动力矩)                 | -2.34    |

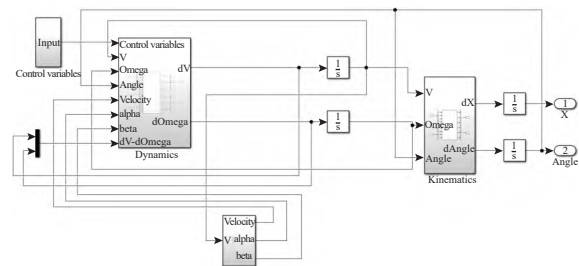


图 3 Simulink 模块

Fig. 3 Simulink model

图 4 所示, 图 5~图 9 为具体的运动仿真结果。可以看出, 在一个运动周期内, 水平最大航行距离约为 482.9 m, 最大下降深度约为 159.7 m。另外, 稳定滑翔运动时的速度分量  $u=0.34 \text{ m/s}$ ,  $v=0.033 \text{ m/s}$ , 攻角和俯仰角约为  $5.7^\circ$  和  $28^\circ$ , 整个过程类似于锯齿状运动。在此, 与文献 [15] 中仿真及海试试验的结果进行对比, 如表 2 所示。可以看出, 文中所提出的动力学方程仿真结果与文献 [15] 中仿真和海试试验结果大致相同, 文中所建立的动力学模型基本准确。

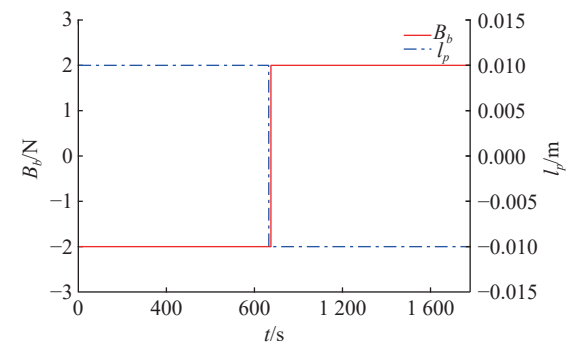


图 4 锯齿状运动下驱动浮力和俯仰调节单元位移随时间变化曲线

Fig. 4 Time-history curves of driving buoyancy and displacement of pitch regulating unit under the saw-tooth motion

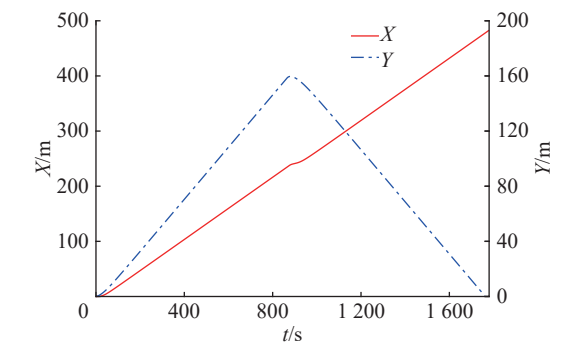


图 5 锯齿状运动下水平位移和垂直深度随时间变化曲线

Fig. 5 Time-history curves of horizontal displacement and vertical depth under the saw-tooth motion

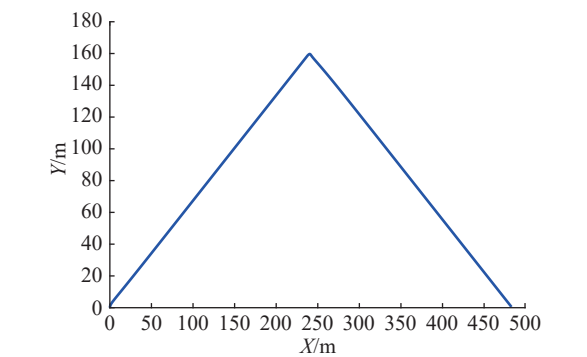


图 6 锯齿状运动下纵垂面运动轨迹

Fig. 6 Trajectory on vertical plane under the saw-tooth motion

### 3 中尺度过程采样运动仿真

采用科学文献中所提及的中尺度过程参数,对几个实际空间采样任务进行运动仿真,以说明不同任务要求下利用 Petrel-II 的可行性。

#### 3.1 锋面探测

海洋锋是一种极其重要的海洋现象,其空间尺

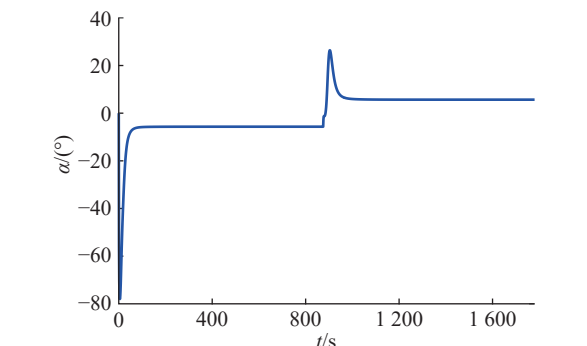


图 7 锯齿状运动下攻角随时间变化曲线

Fig. 7 Time-history curve of attack angle under the saw-tooth motion

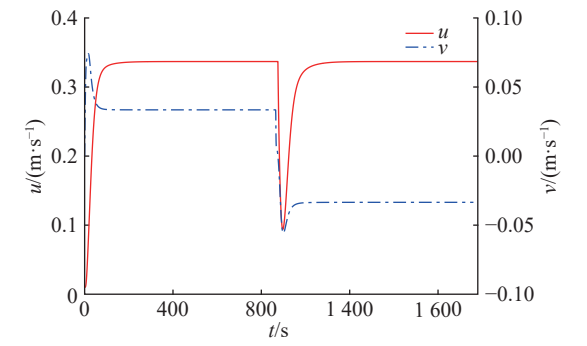


图 8 锯齿状运动下速度分量随时间变化曲线

Fig. 8 Time-history curves of velocity component under the saw-tooth motion

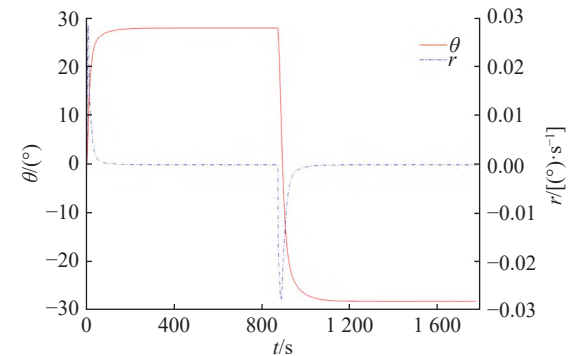


图 9 锯齿状运动下俯仰角和角速度随时间变化曲线

Fig. 9 Time-history curves of pitch angle and pitch angular velocity under the saw-tooth motion

表 2 文中模型与文献 [15] 仿真及海试结果对比

Table 2 Comparison of simulation and sea trial results between models used in this study and reference [15]

|            | 最大深度/m | 下潜俯仰角/(°) | 上浮俯仰角/(°) |
|------------|--------|-----------|-----------|
| 文中结果       | 158.7  | 28        | -28       |
| 文献[15]仿真结果 | 160.0  | 30        | -29       |
| 文献[15]海试结果 | 153.0  | 36        | -33       |

度短则几米,长则上千公里,时间尺度短至几天,而有的海洋锋几乎常年存在,在海洋表面、中部及深层都有分布<sup>[9]</sup>。另外,在海洋锋存在的区域,水文状况异常活跃,可能会严重影响水下探测和水下通信等活动。

杨廷龙<sup>[9]</sup>根据上海市开放数据大赛数据,利用绝对梯度法提取了日本海海洋锋若干信息,研究了其空间分布特征和季节变化等,图 10 为具体的温度锋云图,纵坐标  $Y$  表示深度。文中将针对其研究结果,对日本海温度锋的采样运动进行仿真,以期对未来实际采样提供参考。

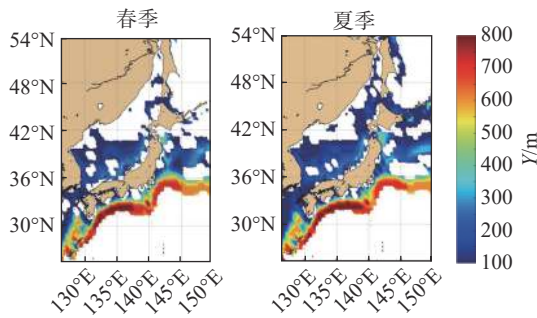


图 10 温度锋影响深度云图

Fig. 10 Contours of influence depth of thermal front

文中对日本海海洋内部温度锋面探测进行运动仿真,从图 10 和文献 [9] 可知,日本海盐度锋大致存在于 150~700 m 的深度范围内。温度锋探测方案为:首先将滑翔机下潜至 150 m 处,并在此开始作锯齿状运动,在 150~700 m 范围内反复运动,直至结束探测返回水面。此过程中,下潜阶段控制参数为  $B_b = -7$  N,  $l_p = 0.05$  m;上浮阶段控制参数为  $B_b = 7$  N,  $l_p = -0.05$  m,螺旋桨转速设为  $n = 0$ 。图 11~图 13 分别给出了仿真温度锋探测运动过程的纵垂面二维运动轨迹、横向及纵向曲线和俯仰角曲线。

文中给出上述锯齿状的探测方案,使滑翔机能够满足预定深度范围内的空间尺度下的采样要求。此外,方案中的控制参数  $B_b$  和  $l_p$  都设定为最大值,如实际采样任务有对航程或能耗的具体限制,可以通过增减  $B_b$ 、 $l_p$  和  $n$  来达到具体的航程范围。由于篇幅限制,在此不再赘述。

### 3.2 反气旋涡旋探测

海洋中尺度涡旋是由于季风和洋流等因素在地球自转的作用下产生的螺旋运动,根据其温盐

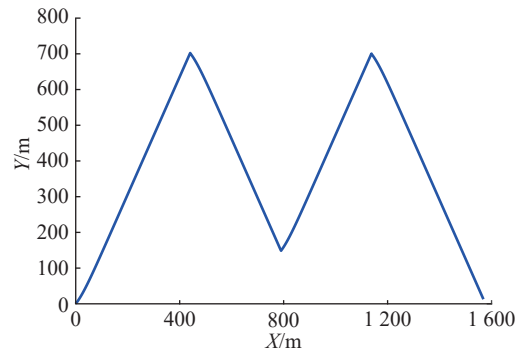


图 11 温度锋探测纵垂面运动轨迹仿真曲线

Fig. 11 Trajectory simulation curve of detected thermal front on vertical plane

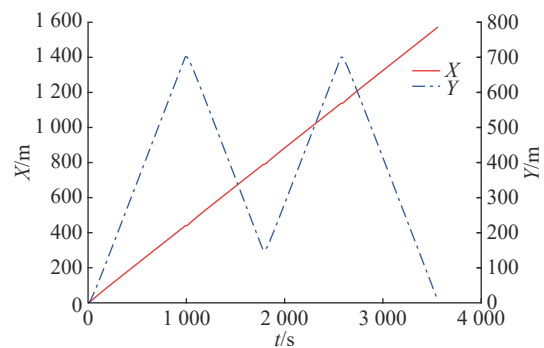


图 12 温度锋探测水平位移和垂直深度随时间变化曲线

Fig. 12 Time-history curves of horizontal displacement and vertical depth of detected thermal front during simulation

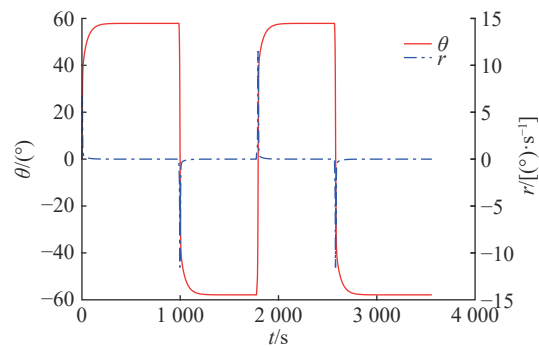


图 13 温度锋探测俯仰角和角速度随时间变化曲线

Fig. 13 Time-history curves of pitch angle and pitch angular velocity of detected thermal front during simulation

结构和旋转方向的不同,涡旋主要分为气旋涡旋和反气旋涡旋,北半球区域的气旋涡旋为顺时针旋转,反气旋涡旋逆时针旋转。

中尺度涡旋是一种极其普遍的海洋现象,在各大洋中几乎都有分布,存在时间从几天到数月,空间尺度能达到几百公里,大部分存在于海洋近表

层,有的也可至数千米的海底。海洋中的中尺度涡旋大多为非定常涡旋,产生的位置和时间不固定,随着时间的推移,其强度和位置也会发生变化<sup>[3]</sup>。文中将仿真空间尺度不同的2种反气旋涡旋采样运动。

### 3.2.1 次中尺度反气旋涡旋探测

次中尺度过程是海洋中一类空间尺度较小的中尺度现象,其水平尺度约1 m~10 km,垂直尺度约为100 m,会对上层海洋动力学产生强烈的影响<sup>[18]</sup>。因此,首先针对文献<sup>[1]</sup>中提到的中国南海北部的次中尺度反气旋涡旋探测进行采样运动仿真,具体运动要求为:最大深度约80 m,航程范围100 m~10 km,探测时间在1天之内。

首先给出第1种方案,具体探测过程分为3个阶段:第1阶段为下降阶段,控制参数 $B_b = -7$  N,  $l_p = 0.05$  m,螺旋桨转速 $n = 0$ ;下降到预定深度80 m且稳定后,进入第2阶段,即定深运动,此阶段内,控制参数 $B_b = 0$ ,  $l_p = 0$ ,螺旋桨转速 $n = 25$  r/s;在到达预定航行距离后,进入第3阶段,即上升阶段,该阶段内,控制参数 $B_b = 7$  N,  $l_p = -0.05$  m,螺旋桨转速 $n = 0$ ,直至滑翔机回到水面。具体运动仿真见图14~图16。

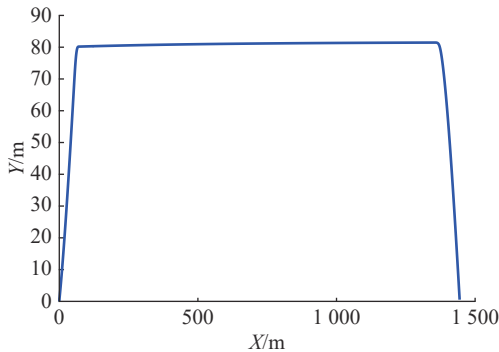


图14 定深运动下次中尺度反气旋涡旋探测的纵垂面运动轨迹

Fig. 14 Trajectory on vertical plane of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the depth-keeping motion

上述仿真给出了1 000 s内的运动过程,深度约80 m,航程约1 440 m。可根据实际深度和航程要求,分别缩短第1阶段下降过程时间和延长第2阶段定深运动时间,以达到所需深度和航程。

此运动方案能够使滑翔机快速下降到80 m深度,且前向航程约100 m,随后展开定深运动,在指

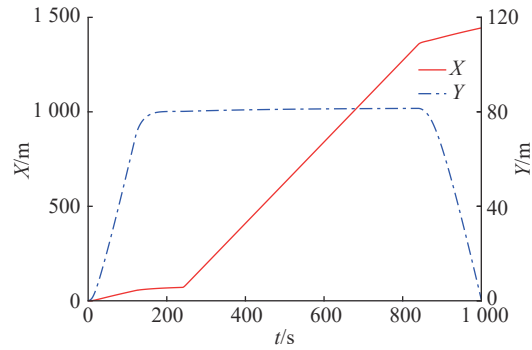


图15 定深运动下次中尺度反气旋涡旋探测的水平位移和垂直深度随时间变化曲线

Fig. 15 Time-history curves of horizontal displacement and vertical depth of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the depth-keeping motion

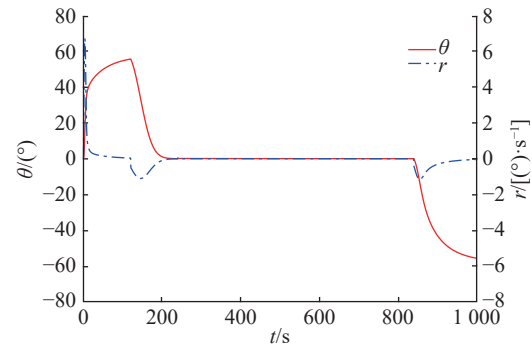


图16 定深运动下次中尺度反气旋涡旋探测的俯仰角和角速度随时间变化曲线

Fig. 16 Time-history curves of pitch angle and pitch angular velocity of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the depth-keeping motion

定深度上进行探测活动。定深运动时设定螺旋桨转速为 $n = 25$  r/s,根据任务要求时间,可以适当减小螺旋桨转速,以延长探测时间。

此外,给出另一种探测方案,使滑翔机在纵垂面内反复进行周期性锯齿状运动,在运动过程中进行采样探测,具体运动仿真见图17~图19。

下降时控制参数 $B_b = -1$  N,  $l_p = 0.01$  m,螺旋桨转速 $n = 0$ ;上升时控制参数 $B_b = 1$  N,  $l_p = -0.01$  m,螺旋桨转速 $n = 0$ 。1个运动周期约1 900 s,航程约350 s。

第1种运动方案仅能在涡旋最大深处附近进行观测,对处于整个涡旋垂直深度上的信息获取较少。考虑到这种情况,给出如上方案以应对不同的探测需求。在此运动方案下,滑翔机能够详尽地测量水平面至涡旋最大深处80 m内不同深度下的海洋信息,且滑翔机能耗达到最小。



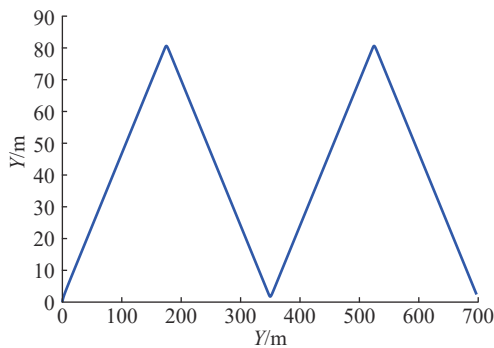


图 17 锯齿状运动下次中尺度反气旋涡旋探测的纵垂面运动轨迹

Fig. 17 Trajectory on vertical plane of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the saw-tooth motion

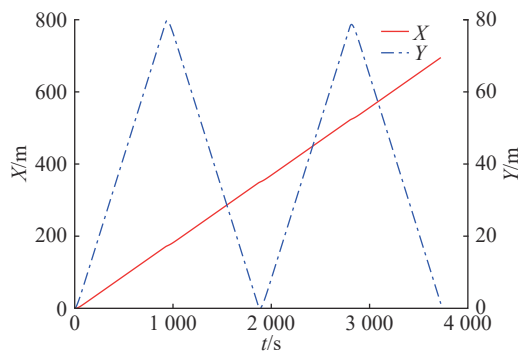


图 18 锯齿状运动下次中尺度反气旋涡旋探测的水平位移和垂直深度随时间变化曲线

Fig. 18 Time-history curves of horizontal displacement and vertical depth of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the saw-tooth motion

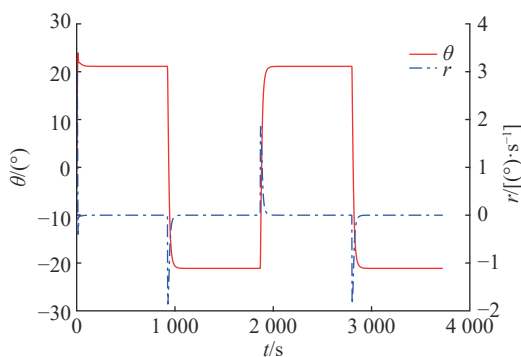


图 19 锯齿状运动下次中尺度反气旋涡旋探测的俯仰角和角速度随时间变化曲线

Fig. 19 Time-history curves of pitch angle and pitch angular velocity of detected sub mesoscale anticyclone vortex under the saw-tooth motion

### 3.2.2 较大尺度的反气旋涡旋观测

针对文献 [19] 所提到的南海中尺度反气旋涡旋观测进行三维运动仿真。图 20 为文献 [19] 利

用卫星观测数据所合成的涡旋三维结构, 最大深度约 1 000 m。

仿真运动过程为螺旋式运动, 如图 21~图 26 所示, 控制参数  $B_b = -2$  N,  $l_p = 0.02$  m, 螺旋桨转速  $n = 0$ , 尾舵转动角度  $\delta_v = 20^\circ$ , 横滚调节重块转动角度  $\varphi = 0$ 。

该方案的下潜过程约 68 min, 垂直距离为 1 000 m, 在水平面内的运动轨迹为圆周运动, 运动半径约 50 m。上述仿真仅针对下潜过程, 在实际采样任务完成后, 可将运动控制参数取反, 即  $B_b = -2$  N,  $l_p = 0.02$  m, 其余不变, 使滑翔机回到水平面。

上述 2 类不同中尺度过程的采样运动仿真基本达到了探测任务的要求范围, 验证了 Petrel- II 对不同要求下任务的适应情况, 在今后的工作中, 可能会对提出的方案作进一步优化。

## 4 结束语

文中以 Petrel- II 号水下滑翔机作为研究对象, 仿真了几类中尺度过程的采样探测任务。首先, 简要介绍了 Petrel- II 的工作原理, 给出了其六自由度运动学和动力学方程。假设在纵垂剖面中运动时, 滑翔机侧移距离、横滚角度以及偏航角度均为零, 在此条件下, 分析了其简化的动力学模型, 并利用 Simulink 仿真对简化模型进行了验证; 其次, 针对日本海海洋锋的观测任务, 给出了具体的温度锋仿真运动方案; 此外, 针对南海的次中尺度反气旋涡旋探测, 提供了 2 种可行方案: 一是在指定深度作定深运动, 二是在预定深度范围内作锯齿状运动。针对南海较大尺度的反气旋涡旋探测, 提供了一种三维空间中的运动方案: 通过改变尾舵调节系统绕回转轴的角度来改变滑翔机的转向, 实现滑翔机在三维空间中的螺旋式运动。几类不同中尺度海洋现象的运动仿真探索了 Petrel- II 在该类观测任务中的可行性, 给出的运动方案及参数仅供参考, 还需在实际测量过程中予以验证。

水下滑翔机作为一种能耗低且效率高的自主水下无人探测设备, 已逐渐成为一种观测海洋中尺度过程的重要平台, 但由于中尺度过程存在各种各样的特征, 对水下滑翔机也提出了更加丰富的要求。例如, 文中提到的中尺度过程时间尺度

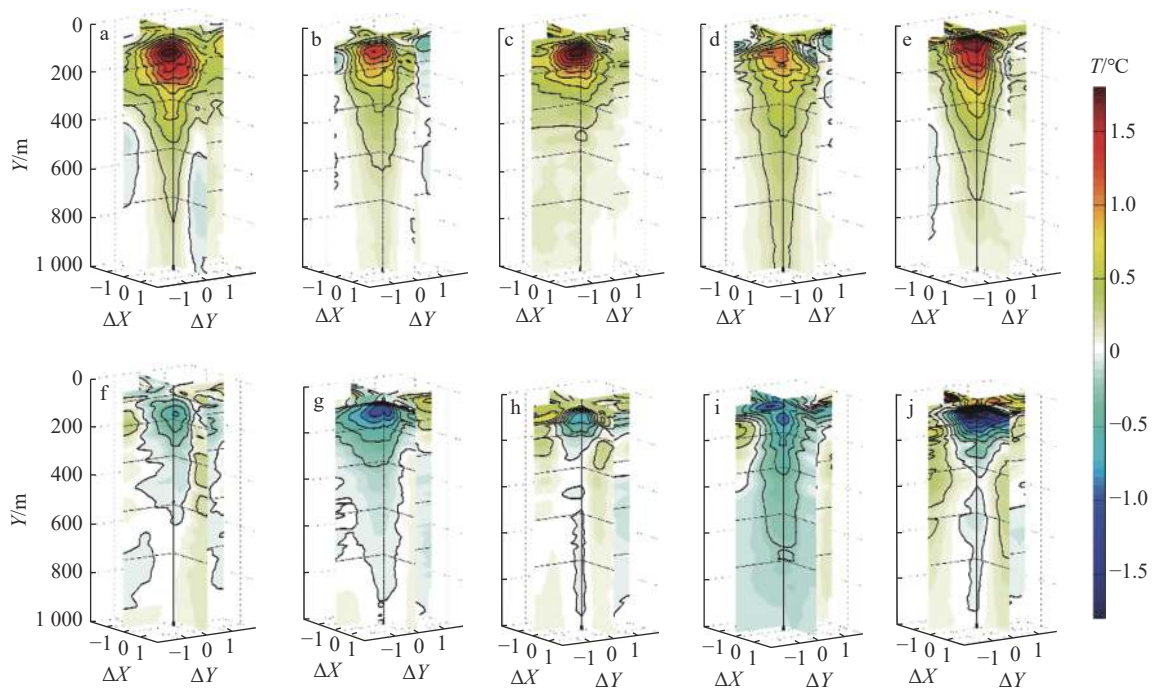


图 20 南海涡旋三维结构

Fig. 20 Three dimensional structure of the vortex of the South China Sea

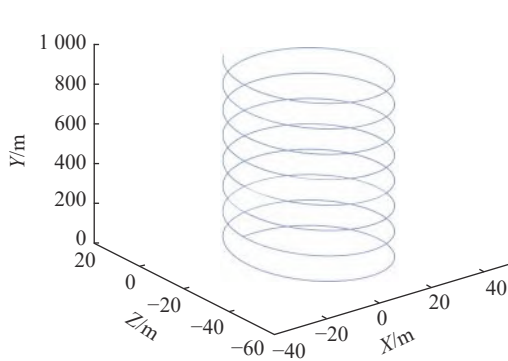


图 21 螺旋式运动下三维运动轨迹

Fig. 21 Three dimensional trajectory under the spiral motion

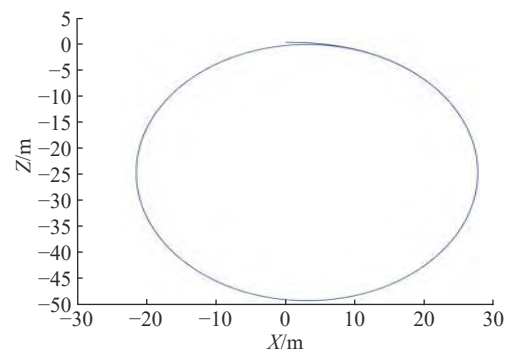


图 23 螺旋式运动下水平面运动轨迹

Fig. 23 Trajectory on horizontal plane under the spiral motion

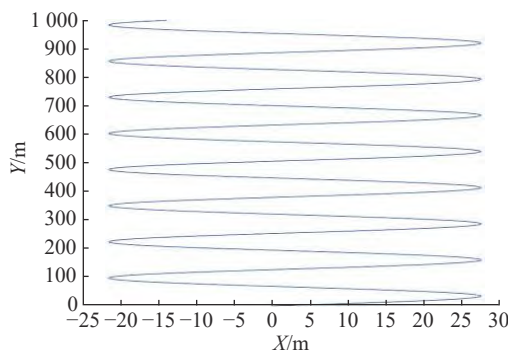


图 22 螺旋式运动下纵垂面运动轨迹

Fig. 22 Trajectory on vertical plane under the spiral motion

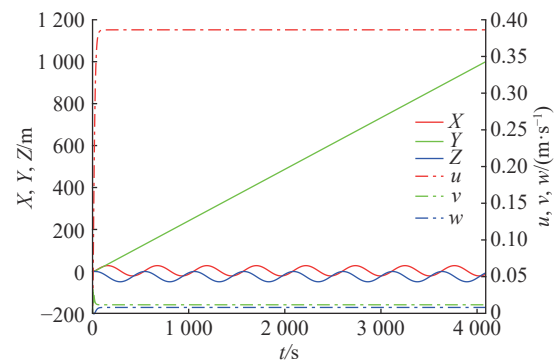


图 24 螺旋式运动下位移和速度随时间变化曲线

Fig. 24 Time-history curves of displacement and velocity under the spiral motion

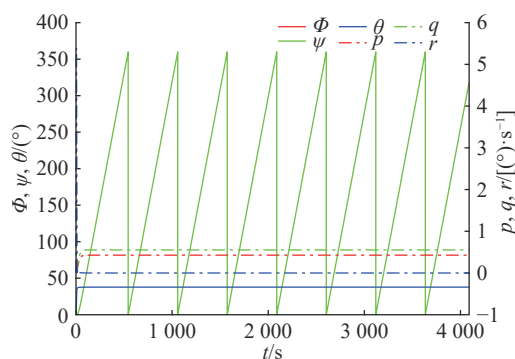


图 25 螺旋式运动下角度和角速度曲线随时间变化曲线  
Fig. 25 Time-history curves of angle and angular velocity under the spiral motion

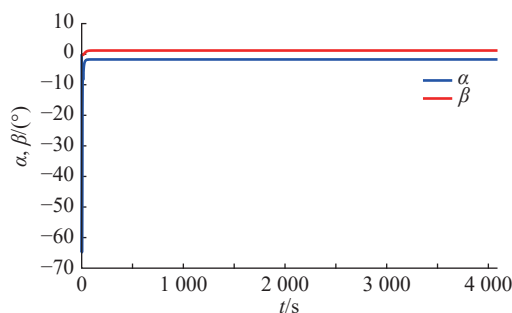


图 26 螺旋式运动下攻角和漂角随时间变化曲线  
Fig. 26 Time-history curves of attack angle and drift angle under the spiral motion

和空间尺度都较大,对水下滑翔机的续航能力及能量优化提出了更严格的要求,多水下滑翔机协同作业也成为一大趋势;另外,中尺度涡旋这类非定常的现象移动速度有时会高于滑翔机的前进速度,难以完全胜任这类涡旋的跟踪观测任务;如内波、锋面等中尺度现象对声波的传播有很大的影响,且中尺度过程存在的区域水文状况往往异常活跃,对采样运动过程的通信也提出了进一步要求<sup>[3,20]</sup>。

对海洋中尺度过程的探索与观测仍在不断发展中<sup>[21-22]</sup>,新的控制策略和编队策略不断涌现,未来将结合技术进展以及实时观测和预报技术需求开展下一步工作。

#### 参考文献:

- [1] 郑瑞玺, 经志友, 罗士浩. 南海北部反气旋涡旋边缘的次中尺度动力过程分析[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 19-25.  
Zheng Rui-xi, Jing Zhi-you, Luo Shi-hao. Analysis of sub-mesoscale Dynamic Processes in the Periphery of Anticyclonic Eddy in the Northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(3): 19-25.
- [2] Li S, Wang S, Zhang F, et al. Constructing the Three-dimensional Structure of an Anticyclonic Eddy in the South China Sea Using Multiple Underwater Gliders[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(12): 2449-2470.
- [3] 范聪慧, 于非, 南峰, 等. 基于无人船的大洋中尺度涡观测系统展望[J]. 海洋科学集刊, 2016, 51(1): 49-57.  
Fan Cong-hui, Yu Fei, Nan Feng, et al. Prospects for Unmanned Observation System of the Oceanic Mesoscale Eddy[J]. Studia Marina Sinica, 2016, 51(1): 49-57.
- [4] 任诗鹤, 王辉, 刘娜. 中国近海海洋锋和锋面预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 552-563.  
Ren Shi-he, Wang Hui, Liu Na. Review of Ocean Front in Chinese Marginal Seas and Frontal Forecasting[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 552-563.
- [5] 田纪伟, 黄晓冬. 认知和驾驭全球海洋最强内孤立波: 南海北部内孤立波[J]. 科技纵览, 2018(7): 76-77.
- [6] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global Observations of Nonlinear Mesoscale Eddies[J]. Progress in Oceanography, 2011, 91(2): 167-216.
- [7] Liu A K, Ramp S R, Zhao Y, et al. A Case Study of Internal Solitary Wave Propagation during ASIAEX 2001[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1144-1156.
- [8] Simmons H, Chang M H, Chang Y T, et al. Modeling and Prediction of Internal Waves in the South China Sea[J]. Oceanography, 2011, 24(4): 88-99.
- [9] 杨廷龙. 日本海海洋锋及涡旋的统计分析[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2021.
- [10] Alford M H, Mickett J B, Zhang S, et al. Internal Waves on the Washington Continental Shelf[J]. Oceanography, 2012, 25(2): 66-79.
- [11] Johnston T M S, Rudnick D L, Alford M H, et al. Internal Tidal Energy Fluxes in the South China Sea from Density and Velocity Measurements by Gliders[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(8): 3939-3949.
- [12] Fan X, Send U, Testor P, et al. Observations of Irminger Sea Anticyclonic Eddies[J]. Journal of Physical Oceanography, 2013, 43(4): 805-823.
- [13] Li S, Wang S, Zhang F, et al. Observing an Anticyclonic Eddy in the South China Sea Using Multiple Underwater Gliders[C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston: IEEE, 2018.
- [14] Li S, Zhang F, Wang S, et al. Constructing the Three-Dimensional Structure of an Anticyclonic Eddy with the Optimal Configuration of an Underwater Glider Network[J]. Applied Ocean Research, 2020, 95: 101893.
- [15] 刘方. 混合驱动水下滑翔机系统设计与运动行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] 李天森. 鱼雷操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [17] Wang Y, Niu W, Yu X, et al. Quantitative Evaluation of Motion Performances of Underwater Gliders Considering Ocean Currents[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109501.

(下转第 513 页)

- Fire Control & Command Control, 2010, 35(10): 36-39.
- [5] 赵向涛, 孙续文, 周明. 尾流自导鱼雷弹道逻辑仿真[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(2): 40-44.  
Zhao Xiang-tao, Sun Xu-wen, Zhou Ming. Simulation of Trajectory Logic for Wake Homing Torpedo[J]. Torpedo Technology, 2009, 17(2): 40-44.
- [6] 董春鹏, 张裕杰, 石小龙. 主动声尾流自导引过程中信息获取与应用[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(3): 15-18.  
Dong Chun-peng, Zhang Yu-jie, Shi Xiao-long. Acquisition and Application of Information During Guidance of Active Wake Acoustic Homing Torpedo[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(3): 15-18.
- [7] 董春鹏, 石小龙. 主动声尾流自导鱼雷导引弹道分析计算[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(2): 19-23.  
Dong Chun-Peng, Shi Xiao-Long. Guidance Trajectory Analysis and Calculation for Active Acoustic Wake Homing Torpedo[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(2): 19-23.
- [8] 陈颜辉, 孙振新. 水面舰艇纯机动规避尾流自导鱼雷方法[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(1): 68-71.  
Chen Yan-hui, Sun Zhen-xin. Eluding Method of Surface Ship Against Wake Homing Torpedo by Tactic Maneuver[J]. Torpedo Technology, 2010, 18(1): 68-71.
- [9] 张涛, 任志良, 孙长存, 等. 鱼雷电磁引信接收机对欺骗式干扰抗干扰能力评估[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 181-186.  
Zhang Tao, Ren Zhi-liang, Sun Chang-cun, et al. Evaluation of Anti-interference Capability of Torpedo Electromagnetic Fuze Receiver Against Deceiving Jammings[J]. Torpedo Technology, 2011, 19(3): 181-186.
- [10] 张爽, 张晓晖, 孙春生. 一种适于计算舰载激光引偏干扰系统安全引偏距离的冲击因子[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 31-35.  
Zhang Shuang, Zhang Xiao-hui, Sun Chun-sheng. Impulsive Factor for Safe Distance Calculation of a Ship-based Laser Decoy Jamming System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 31-35.
- [11] 孟庆玉, 张静远, 王鹏, 等. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 203-204.
- [12] 刘朝辉, 赵峰, 槐万景, 等. 基于仿真的深弹拦截鱼雷作战效能评估分析方法[J]. 火力指挥与控制, 2016, 41(1): 41-44.  
Liu Zhao-hui, Zhao Feng, Huai Wan-jing, et al. Method to Evaluate Operational Effectiveness of Hovering Depth Charge Intercepting Torpedo Based on Simulation[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(1): 41-44.
- [13] 张洪刚, 王鹏, 张静远. 机动规避条件下尾流自导鱼雷射击瞄点选取方法[J]. 鱼雷技术, 2015, 23(2): 145-149.  
Zhang Hong-gang, Wang Peng, Zhang Jing-yuan. An Aiming Point Selection Method for Wake Homing Torpedo against Elusive Maneuver[J]. Torpedo Technology, 2015, 23(2): 145-149.
- [14] 焦瑜呈. 海水中电磁波特性的分析与研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(8): 176-179.  
Jiao Yu-cheng. Analysis and Research of the Electromagnetic Properties of Seawater[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(8): 176-179.

(责任编辑: 杨力军)

(上接第 484 页)

- [18] Flexas M M, Troesch M I, Chien S, et al. Autonomous Sampling of Ocean Submesoscale Fronts with Ocean Gliders and Numerical Model Forecasting[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2018, 35(3): 503-521.
- [19] 谢旭丹, 王静, 储小青, 等. 南海中尺度涡温盐异常三维结构[J]. 海洋学报, 2018, 40(4): 1-14.  
Xie Xu-dan, Wang Jing, Chu Xiao-qing, et al. Three-dimensional Thermohaline Anomaly Structures of Mesoscale Eddies in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(4): 1-14.
- [20] 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 Shao-qiong, Cheng Dan, Chen Guang-yao, et al. Review on the Application of Underwater Gliders for Observing Typical Ocean Phenomena[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(3): 54-74.
- [21] Farrar J T, D'Asaro E, Rodriguez E, et al. S-MODE: The Sub-Mesoscale Ocean Dynamics Experiment[C]//2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2020.
- [22] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89-106.  
Shen Xin-rui, Wang Yan-hui, Yang Shao-qiong, et al. Development of Underwater Gliders: An Overview and Prospect [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 89-106.

(责任编辑: 杨力军)