水下滑翔机内波观测方法

刘曙光^{1,2},熊学军^{3,4*},张宏伟^{1,2},宗 正^{1,2}

(1.天津大学 机械工程学院,天津 300072; 2.天津大学 机构理论和装备设计教育部重点实验室,天津 300072;3.国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061;

4.青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,山东 青岛 266237)

摘 要:在把握水下滑翔机功能特点和内波运动特征的基础上,提出水下滑翔机中性悬停、随体原位观测内波的方法。首先需要对水下滑翔机加装加速度计和深度计,用于记录并辅助控制其运动过程;其次,控制水下滑翔机下潜 至目标区域的跃层梯度最大处水层,通过中性体浮力控制和姿态调节系统实现水平悬停,做到最大化无滑脱随流 运动;然后,水下滑翔机在遭遇内波后跟随内波一起运动并进行同步观测;最后,分析观测数据,并基于相应特征选 定内波物理模型,建立内波的三维运动学结构模型。该方法是内波直接观测技术的有益探索,对深入发挥水下滑 翔机观测效能、把握内波运动学结构和动力学支撑有重要作用。

关键词:水下滑翔机;内波;中性悬停;原位观测;运动学结构

中图分类号:P731 文献标识码:A 文章编号:1671-6647(2018)02-0171-09 **doi**:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.002

水下滑翔机是一种新型水下观测平台,最早于 1989 年由 Stommel 提出^[1],其原理在于调节自身净浮力的大小实现上浮、下潜,并且在上浮、下潜过程中通过调整俯仰角实现锯齿形的运动。因此,能耗低、航程长、隐蔽性高,能够实现大范围海域长时间的探测,在海洋调查领域的应用越来越广泛。目前国际上比较典型的水下滑翔机主要有 3 种,分别是由 Webb 实验室 Webb 等研制的 Slocum 滑翔机^[2]、由华盛顿大学 Eriksen 等研制的 Seaglider 滑翔机^[3]以及由 Scripps 海洋研究所 Sherman 等研制的 Spray 滑翔机^[4]。在国内主要研究机构有天津大学、浙江大学、中国科学院沈阳自动化研究所、中国船舶重工集团公司第 702 研究所、上海交通大学、西北工业大学等。天津大学于 2007 年成功研制了第一台混合驱动水下滑翔机^[5-6],随后于 2014 年研制出"海燕"混合驱动水下滑翔机,并完成了一系列海试实验^[7]。

海洋内波是指在海水稳定层化的海洋中产生的、最大振幅出现在海洋内部的波动。它的最大振幅出现 在海面以下,频率局限于惯性频率 f 与 Brunt-Vaisala 频率 N 之间,振幅一般为几米至几十米。频率较高的 内波,其恢复力主要是重力与浮力之差,频率较低时主要是地转惯性力。由于实际海水密度的层间变化很小 (跃层上下的相对密度差也仅约为 0.1%),所以只要很小的扰动就会在海洋内部产生"轩然大波"。内波具有

收稿日期:2017-09-06

资助项目:国家科技重大专项项目——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX 05057015);海洋工程装备科研项目—— 500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发-内波流预警方案研究及内波流监测系统研制;国家自然科学基金项目——黄海暖流的 多时相特征及其发生机制研究(41376038);国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海 洋环境动力学和数值模拟(U1606405);国家海洋局全球变化与海气相互作用专项子课题——黑潮结构时空变化特征对中国近 海环流的影响分析(GASI-03-01-01-02),黑潮不稳定性及多核结构(GASI-IPOVAI -01-05),东印度洋南部水体综合调查夏季航 次(GASI-02-IND-STSsum);国家重大科学研究计划项目——太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用-热 带太平洋印度洋海洋观测(2012CB955601);海洋公益性行业科研专项——常用海底声纳测量仪器计量检测关键技术研究与示 范应用(200905024);国家自然科学基金青年基金项目——东海黑潮三维结构及季节变化研究(40406009);国家重大科学仪器 设备开发专项——自容式声学多普勒流速剖面仪开发(2012YQ12003908)

作者简介:刘曙光(1993-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事水下滑翔机技术方面研究. E-mail: 13821972960@163.com

*通讯作者:熊学军(1976-),男,河南固始人,研究员,博士,主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xiongxj@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

很强的随机性,其波长和周期分布在很宽的范围内,一般分别为近百米至几十千米,几分钟至几十小时。内 波会对海上石油平台以及潜艇等海上物体产生巨大的冲击,容易引发事故^[8]。因此需要对内波的形成以及 传播过程进行研究。

海洋内波是一种普遍的海洋现象,但实际对内波观测比较困难。现有的内波观测方法主要有 2 种:潜标测量、遥感观测。潜标测量是在内波高发区域的跃层安放潜标,通过搭载的 ADCP 和 CTD 等仪器观测海水 要素的变化情况来反演内波。1978年,Muller 等通过测流计和温度传感器所测得的数据验证了 GM 谱在深 海的正确性^[9],同时也得到改进后的内波谱 Lwex 谱。潜标测量能给出内波的局部信息,但难于跟踪内波的 传播、演变过程,且费用昂贵,这些困难长期以来一直制约着海洋内波的研究。遥感手段的引入使这一情况 得以改善^[10],遥感观测依靠搭载在卫星或飞机平台上的传感器,获取海洋信息。从遥感图像上,可以直接获 取内波的波长、波包间距、平均相速度、平均群速度等参数以及其空间分布,还能够反演出内波振幅和混合层 深度。但遥感方法受恶劣天气影响,并且只能观测到强信号内波。

水下滑翔机的出现为内波速度等要素观测提供了实用、有效的手段。Merckelbach 等通过建立水下滑 翔机稳定航行时垂向受力平衡求解海流的垂向速度^[11];同样的原理,Frajkawilliams 等通过建立水下滑翔机 稳定航行时轴向受力平衡求解海流的垂向速度^[12]。Rudnick 等通过 Frajkawilliams 等的方法,实验得到了 吕宋海峡内波垂向速度特征^[13]。但这些观测方法是在水下滑翔机稳态航行条件下计算得到的,对于实验数 据质量要求较高,并且由于只是剖面观测,只能得到内波流速数据,无法获得内波的空间三维结构。

本文提出水下滑翔机采用拉格朗日法观测内波,通过水下滑翔机跟随内波无滑脱随流运动建立内波的 三维运动学结构。

1 观测方法

拉格朗日法是描述流体运动的2种方法之一,质点跟随流体运动,记录质点的物理量随时间的变化规律,再以质点运动过程构建流体运动。水下滑翔机中性悬停在水层中,在跟随内波运动过程中将其视为质点,由水下滑翔机运动轨迹和运动学模型来表征内波的运动特征和流体速度。水下滑翔机在航行前需要搭载如表1所示的深度计、三轴加速度计以及温盐传感器,为观测内波提供数据支撑。

Table 1Sensors carried by underwater glider		
仪器	参数	精度
温度传感器	温度/℃	0.1
电导率传感器	电导率/ds・m ⁻¹	0.001
深度计	深度/m	0.1
加速度计	加速度/m・s ⁻²	0.000 1

表1 水下滑翔机搭载仪器所测参数

1.1 观测位置

首要问题是确定水下滑翔机观测内波的位置。内波的出现具有很强的不确定性和随机性,因此水下滑 翔机观测内波采用"守株待兔"的方法,即水下滑翔机停在内波多发区域,等待内波出现并观测。内波主要发 生在跃层区域,跃层表现为海洋要素垂直变化梯度随深度变化出现的谱峰区如图1所示,可以用"五点三要 素"表征,即跃层上界点、强跃层上界点、跃层最值点、强跃层下界点、跃层下界点和跃层最大强度、强跃层平 均强度、跃层平均强度^[14-15]。其中跃层最值点便是跃层梯度最大位置,不仅是海洋要素变化速度最大的一 点,同时也是跃层的关键位置,选定此位置作为水下滑翔机中性悬停的目标位置时,水下滑翔机所在深度上 下水体差异较大,保证其深度变化较小,能够稳定悬停。

水下滑翔机悬停过程中,可将其视为水质点,在海洋中内波波流、潮流和平均环流的作用下,会产生水平运动,原定水下滑翔机悬停的跃层梯度最大位置,会因水平运动而改变,造成水下滑翔机产生垂直位移,而偏离跃层梯度最大位置。虽然这种垂向位移无法预测,但是可以水下滑翔机上搭载的加速度计和温盐深传感器测量,后期通过数据处理实现水下滑翔机运动表征海流的运动。



Fig.1 Diagram of determining critical points and their locations in a spring layer^[14]

1.2 观测姿态控制

水下滑翔机采用拉格朗日法观测内波时,需要其跟随内波运动,保证水下滑翔机在遭遇内波后其姿态可 控,并且具有较强的随流运动能力。由于内波波长 λ 通常在数百米至几千米以上,水下滑翔机直径 D 较小, 其直径 D 与波长 λ 的比值 D/λ≪0.15,满足工程上将水下滑翔机视为小尺度物体的要求,所以认为水下滑翔 机的存在不会干扰内波的运动过程^[16]。

同样也要尽量避免内波对水下滑翔机姿态的干扰。由于内波中流体速度方向不可预测,为了保证水下 滑翔机在内波中的姿态稳定,减小流体对其姿态的影响,便于建立其运动平衡方程,水下滑翔机在等待内波 的悬停过程中应保持水平姿态。这样,在遭遇内波后,即使不知流体水平速度方向,但由于水下滑翔机的轴 向和流体水平速度方向存在夹角,水下滑翔机的垂直尾翼会在流体的作用下产生偏转力矩,使得其轴向和流 体水平速度方向保持一致。与此同时,水下滑翔机重心和浮心的连线垂直于水下滑翔机轴线,由于重心在 下,浮心在上,水下滑翔机如果出现横滚或者俯仰姿态的变化,重力会产生力矩,纠正其横滚姿态。这样可以 将水下滑翔机的运动简化到纵垂面内,便于推算内波中的流体速度。

1.3 观测步骤

1)预先测量。水下滑翔机提前就位观测,需要观测区域的海洋要素的垂直分布结构。因此由遥感卫星确定观测区域后,甲板单元控制水下滑翔机航行至目标区域,并先做 2~3 个剖面观测以获得该区域温盐数据,分析海水分层结构,获得跃层的海洋要素特征,为水下滑翔机中性体精确调节控制提供数据支持。

2)下潜至目标深度,并设置参考点。在获得海水分层结构后,通过计算获得在跃层梯度最大处保持中性体悬停所需浮力来确定水下滑翔机的排油量。在正式的测量过程中,可以适当增大水下滑翔机的滑翔角实

现快速下潜。实时监控内置的深度计获取当前运动状态,当深度计测量结果在固定时间内结果小于一定值, 我们就认定水下滑翔机进入指定区域,并以此位置为参考点,开始测量。

3)跃层梯度最大处水平悬停。水下滑翔机到达跃层梯度最大处后,控制重心,使其浮心和重心在同一纵 截面上,实现水平悬停,做到最大化无滑脱随流运动。在悬停期间,由加速度计和深度计监控其垂向运动,当 垂向位移偏移过大时,开启液压泵调节浮力,校正位置。

4)上浮重新定位。水下滑翔机以一个月为周期,每2d上浮一次,传输数据、接收指令,同时重新定位。 如果水下滑翔机因为海流的作用而偏离目标区域,可以重新寻址,返回目标区域。至此,对目标区域的一个 周期观测结束,随后安排后续的观测任务。

2 水下滑翔机纵平面受力分析

2.1 水下滑翔机结构

水下滑翔机主要由壳体、固定质量(包括配重块、机翼及附件等)、浮力驱动单元、俯仰调节单元和滚转调 节单元组成^[17]。在建模时,可将上述单元抽象成一系列质点,水下滑翔机整体可看作由这些质点组成的系统,其具体质量分布如图2所示。



图 2 水下滑翔机质量分布示意图^[17] Fig.2 Schematic diagram of mass distribution of underwater glider^[17]

图 2 中,水下滑翔机的质量分为 3 种:第一种是壳体的质量为 m_h 和配重块的质量为 m_w,这 2 部分的质量大小和其位置固定不变;第二种是安装在水下滑翔头部的质量为 m_b 浮力驱动单元,此驱动单元通过改变体积实现水下滑翔机净浮力变化,其质量和位置不变,但体积根据需要改变;第三种就是质量为 m_v的俯仰调节单元和横滚调节单元,它们通过自身移动和滚转实现水下滑翔机重心位置 CB 的平移和旋转,产生俯仰力矩和滚转力矩来实现俯仰姿态和滚转姿态的调节,其质量为 m 不变,但位置可变。

2.2 坐标系的建立和受力分析

水下滑翔机在海水中稳定悬停时,其深度保持不变,加速度为零。在遭遇内波后,深度和加速度都会发生剧烈变化,因此选取其稳定悬停点作为水下滑翔机的惯性坐标系 *E-XYZ*,而体坐标系 *B-xyz* 的原点位于水下滑翔机的浮心 *B*。*B*_x 轴与水下滑翔机机体的主轴相重合,*B*_z 轴垂直于 *B*_x 轴位于水下滑翔机机翼平面,*B*_y 轴满足右手定则。



图 3 水下滑翔机坐标系机受力分析图 Fig.3 Definition of coordinate system of underwater glider and force analysis

水下滑翔机跟随内波水质点在纵平面的随流运动过程中,将其视为刚体,水下滑翔机所受水动力主要有 升力 F_L、阻力F_D和纵倾力矩 M,同时还有重力F_G和浮力 F_B^[18]。水下滑翔机悬停在内波中,其俯仰角为 零,并且由于内波的水平速度较垂向速度大,水流与水平方向的夹角较小,因此其攻角较小,所受力可表示为

$$F_{\rm B} = \rho V g , \qquad (1)$$

$$F_{\rm G} = mg , \qquad (2)$$

$$F_{\rm L} = \frac{1}{2} \rho C_{\rm L}(\alpha) A v^2 \approx (K_{\rm L0} + K_{\rm L} \alpha) v^2, \qquad (3)$$

$$F_{\rm D} = \frac{1}{2} \rho C_{\rm D}(\alpha) A v^2 \approx (K_{\rm D0} + K_{\rm D} \alpha^2) v^2, \qquad (4)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{\rm M}(\alpha) A v^2 \approx (K_{\rm M0} + K_{\rm M} \alpha^2) v^2, \qquad (5)$$

式中,ρ为海水的实测密度,V为水下滑翔机的体积,g为重力加速度,C_D(α),C_L(α)分别为阻力和升力系数,A为水下滑翔机的横截面积,α为水下滑翔机航行的攻角即水流相对于水下滑翔机轴向的夹角,m为水下滑翔机的质量,v为水下滑翔机相对于水体的速度;K_{L0},K_L,K_{D0}和K_D均为水下滑翔机的水动力参数,可以通过模型试验和仿真得到。国内外对于水动力参数进行了大量研究,获得许多实用参数^[16]。

2.3 垂向海流中水下滑翔机漂流运动的模拟与分析

根据刚体运动原理,在垂向海流中,水下滑翔机垂向运动方程:

$$m \dot{u} = X(\dot{u}, \dot{u}_{c}, u, u_{c}) + \rho_{0} V g, \qquad (6)$$

式中, m 是水下滑翔机的质量, X(u, u, u, u, u) 是水下滑翔机的垂向水动力,其大小取决于水下滑翔机速度 u,海流速度u。以及对应的加速度, po 是海流海水密度与水下滑翔机所在水层的密度差。在内波的垂向运 动中,向下的海流带来的海水密度较小,水下滑翔机所受浮力变小,会产生向下的净浮力。同理,向上的海流 产生向上的净浮力,即净浮力方向和海流方向一致,有利于水下滑翔机跟随海流运动。由于实际海水密度的 层间变化很小(跃层上下的相对密度差也仅约0.1%),本文忽略密度变化对水下滑翔机运动的影响。

根据相对性原理及流体动力学基本概念,其垂向水动力可以分解为

$$X(\dot{u}, \dot{u_{c}}, u, u_{c}) = -m_{1}(\dot{u} - \dot{u_{c}}) + X_{1}(u - u_{c}), \qquad (7)$$

式中, m_1 为水下滑翔机垂向附加质量, $X_1(u - u_c)$ 为非惯性水动力。

将式(7)代入式(6)得到:

$$(m+m_1) \dot{u} = X_1(u-u_c) - m_1 \dot{u_c}, \qquad (8)$$

将此式用于模拟水下滑翔机在垂向海流中的运动特性,本文模拟定常海流中的运动特性,即 u_c = u_{c0}。将定 常海流代入式(8)得到:

$$(m+m_1) \dot{u} = X_1 (u-u_c)_{\circ}$$
 (9)

水下滑翔机垂向运动阻力由 CFD 仿真得到,考虑到潜艇微速航行雷诺数变化范围,以及一般物体绕流雷诺数在 10⁶左右内的阻力系数可能的变化,这里将采用 2 次项的形式,其表达式为

$$X_1(v) = x_v v + x_{vv} v^2 \,. \tag{10}$$

采用纵向动力学模型式(4)模拟水下滑翔机在海流作用下的纵向运动,模拟对象为天津大学研制的"海 燕"号混合驱动水下滑翔机,该滑翔机主要参数如下^[7]: $m = 69 \text{ kg}; m_1 = 47.32 \text{ kg}; x_v = 5.157 5 \text{ kg/s}; x_w = 328.587 1 \text{ kg/s}^2$ 。以往的观测资料^[19]表明,内波的垂向速度大小为 0.1~0.5 m/s。图 4 为定常垂向海流 $u_c = 0.5, 0.3 \text{ m/s}, x$ 下滑翔机初速度为零时,其速度与航行距离随时间变化的计算曲线。



图 4 定常海流下水下滑翔机速度与位移变化曲线图

Fig.4 Velocity and displacement of underwater glider with drifting motion in a steady current

上述仿真结果表明,不论垂向海流速度有多快,水下滑翔机的速度都将趋向与海流一致;水下滑翔机垂向航行距离与时间成正比,可以用水下滑翔机的垂向位移推算海流的运动。由此我们推断水下滑翔机观测内波是切实可行的,目前跃层的判定已经有了行之有效的方法^[15],但在现场观测过程中还需要与现场布放观测以及潜标阵列相配合,获得内波的运动结构。

3 内波运动学结构分析

3.1 内波中流体速度推算

水下滑翔机在内波运动过程中,流体产生的升力和阻力是其动力来源。在纵平面内,以流体作为参照物 如图 3 所示,建立水下滑翔机纵平面的平衡方程:

$$F_{\rm B} + F_{\rm L}\cos\gamma + F_{\rm D}\sin\gamma - F_{\rm G} = ma_{\rm z}, \qquad (11)$$

$$F_{\rm D}\cos\gamma - F_{\rm L}\sin\gamma = ma_{\rm h}, \qquad (12)$$

$$\gamma = \theta + \alpha \,, \tag{13}$$

式中,γ是水下滑翔机的航行角,即水下滑翔机相对于流体速度与水平方向的夹角,θ是由俯仰力矩产生的 俯仰角,a_z,a_h是水下滑翔机在垂直和水平方向的加速度。将式(4),(5)和(8)代入(6),(7)得到如下方程:

$$\rho Vg + \frac{1}{2} \left[K_{\rm L0} + K_{\rm L} (\gamma - \theta) \right] v^2 \cos \gamma + \frac{1}{2} \left[K_{\rm D0} + K_{\rm D} (\gamma - \theta)^2 \right] v^2 \sin \gamma - mg = ma_z, \qquad (14)$$

$$\frac{1}{2} \left[K_{\rm D0} + K_{\rm D} \left(\gamma - \theta \right)^2 \right] v^2 \cos \gamma - \frac{1}{2} \left[K_{\rm L0} + K_{\rm L} \left(\gamma - \theta \right) \right] v^2 \sin \gamma = m a_{\rm h} \,. \tag{15}$$

此时,方程组中有2个未知量γ和υ,可以求得:

$$\tan r = \frac{\left[K_{\rm D0} + K_{\rm D} (\gamma - \theta)^2\right](ma_z + mg - \rho vg) - \left[K_{\rm L0} + K_{\rm L} (\gamma - \theta)\right]ma_{\rm h}}{\left[K_{\rm D0} + K_{\rm D} (\gamma - \theta)^2\right]ma_{\rm h} + \left[K_{\rm L0} + K_{\rm L} (\gamma - \theta)\right](ma_z + mg - \rho Vg)},$$
(16)

式中, γ 通过数值方法求解,同样可以直接求得水下滑翔机相对于流体的速度 v;水下滑翔机的垂向速度 u,由深度计获得的数据微分计算得到;水平速度 u,由加速度计积分计算得到。由此流体的垂向速度 w,和水平速度 w,为

$$w_{v} = u_{v} + v \sin \gamma, \qquad (17)$$

$$w_{\rm h} = u_{\rm h} + v \cos \gamma_{\rm o} \tag{18}$$

3.2 内波特征

内波的传播最直接表现为波峰线的推进,最直接的动力特征是辐合与辐散,从而构成垂向及与垂向相联系的环流结构,内波的传播可以看成是一个个水平涡旋的弹性碰撞式能量传递,相邻的涡旋轴向相反。水下 滑翔机作为小尺度物体悬停在水层中,其在遭遇内波后的载荷来源于水质点运动所产生的流体惯性力和摩 擦力。因此,水下滑翔机会跟随流体运动而非宏观上的波峰前进。而流体在遭遇内波的激发后做圆周运动 如图 4 所示,其运动轨迹如图中虚线所示,是一个相切与内波波面的圆^[20],在不受潮流等干扰因素的影响 下,水下滑翔机在内波水质点的作用下作圆周运动。



Fig.5 Schematic plot of internal waves^[20]

水下滑翔机在内波到达时就会跟随内波运动,虽然有滑脱现象发生,但相对于内波振幅尺度较小,忽略 不计。同时水下滑翔机上搭载的温度计可以测量内波来流的温度变化,与深度变化做对比,验证深度变化。 因此在纵平面内,内波流体的运动轨迹可以由水下滑翔机的运动与观测的水文数据,通过校正、延拓再现。 最后通过观测到的内波特征,选定相应的内波物理模型,建立其三维运动学结构模型。

4 结 语

为了更加直接、客观地观测内波的运动变化特征,构建内波运动学结构模型,本文基于内波的运动学特

征和水下滑翔机的功能特点,提出水下滑翔机中性悬停、随体原位观测内波的方法。该方法通过水下滑翔机 与内波一起的随体运动,同步记录滑翔机观测的运动学、水文学参量,通过校正与延拓,客观再现内波运动的 轨迹结构,进一步建立内波的三维运动学结构模型。水下滑翔机的自主航行调查充分利用其机动性以及中 性悬停能力,实现目标区域内波要素以及运动学结构的原位观测,真正发挥出水下滑翔机的观测效能。

该方法是内波直接观测技术的有益探索,对深入发挥水下滑翔机观测效能、把握内波运动学结构和动力 学支撑有重要作用。文中水下滑翔机观测内波的关键之一是控制浮力和设计合理流体外形,使得水下滑翔 机能够近似的看作水质点跟随内波滑脱运动,其具体结构和控制策略需要进一步研究、分析。

参考文献(References):

- [1] STOMMEL H. The slocummission[J]. Oceanography, 1989, 2(1): 22-25.
- [2] WEBB D C, SIIONETTI P J, JONES C P. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 447-452.
- [3] ERIKSEN C C, OSSE T J, LIGHT R D, et al. Seaglider: A long range autonomous underwater vehicle for oceanographic research[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26: 424-436.
- [4] SHERMAN J, DAVIS R E, OWEN W B, et al. The autonomous underwater glider 'Spray'[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26: 437-446.
- [5] WANG X M. Dynamical behavior and control strategies of the hybrid autonomous underwater vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. 王晓明. 混合驱动水下自航器动力学行为与控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [6] WUJG. Systemdesign and performance analysis of hybrid-driven underwater glider[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 武建国. 混合 驱动水下滑翔器系统设计与性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] WANG S X, LIU F, SHAO S, et al. Dynamic modeling of hybrid underwater glider based on the theory of differential geometry and sea trails[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 19-27. 王树新, 刘方, 邵帅, 等. 混合驱动水下滑翔机动力学建模与海试研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 19-27.
- [8] CAISQ, GANZJ. Progress in the study of the internal solition in the northern south China Sea[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16
 (2): 215-219. 蔡树群, 甘子钧. 南海北部孤立子内波的研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 215-219.
- [9] MULLER P, OLBERS D J, WILLEBR J. The lwex spectrum [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978, 83(C1): 479-500.
- [10] OSTROVSKY L A, STEPANYANTS Y A. Do internal solitions exist in the ocean? [J]. Reviews of Geophysics, 2010, 27(3), 293-310.
- [11] MERCKELBACH L, SMEED D, GRIFFITHS G. Vertical water velocities from underwater gliders[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2010, 27(3): 547-563.
- [12] FRAJKAWILLIAMS E, ERIKSEN C C, RHINES P B, et al. Determining vertical water velocities from seaglider[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2011, 28(28): 1641-1656.
- [13] RUDNICK D L, JOHNSTON T M S, SHERMAN J T. High-frequency in ternal waves near the Luzon Strait observed by underwater gliders[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2013, 118(2): 774-784.
- [14] CHEN L, XIONG X J, LI X L, et al. Spectral expression and self-adjusting detection of spring layer[J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(3): 328-335. 陈亮, 熊学军, 李小龙, 等. 海洋跃层的谱表达法及自适应识别[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 328-335.
- [15] SU J, XIONG X J, LIU H, et al. The inversion thermocline in the western South Yellow Sea in April 2007[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(1): 1-11. 苏劼, 熊学军, 刘浩, 等. 南黄海西部 2007 年 4 月的逆温跃层[J]. 海岸工程, 2017, 36(1): 1-11.
- [16] MORISON J R, OBRIEN M P, JOHNSON J W, et al. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [17] NIU W D, WANG Y H, YANG Y P, et al. Hydrodynamic parameter identification of hybrid-driven underwater glider[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 813-822. 牛文栋, 王延辉, 杨艳鹏, 等. 混合驱动水下滑翔机水动力参数辨识
 [J]. 力学学报, 2016, 48(4): 813-822.
- [18] LEONARD N E, GRAVER J G. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 633-645.
- [19] DU T, WU W, FANG X H. The generation and distribution of ocean internal waves[J]. Marine Sciences, 2001, 25(4): 25-28. 杜涛,
 吴巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 25-28.
- [20] DEFANT A. Physical oceanography[M]. Oxford: Pergamon, 1961: 517-570.

Observation of Internal Waves by Using Underwater Glider

LIU Shu-guang^{1,2}, XIONG Xue-jun^{3,4}, ZHANG Hong-wei^{1,2}, ZONG Zheng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry

of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

4. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National

Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Based on the feature of underwater glider and the property internal wave, a method for observing internal wave is proposed for underwater glider with neutral hovering and free following. Firstly, an accelerometer and a depth gauge need to be equipped with the underwater glider for recording and facilitating motion control. Secondly, the underwater glider is maneuvered to dive into the thermocline and hover horizontally in the layer with maximum gradient by controlling its buoyancy and attitude in order to follow the movement of internal wave and do synchronous observation. Finally, appropriate physical model of internal wave will be selected based on observed data to establish three-dimensional dynamical model. The present observation strategy is an attempt of internal wave direct observation technology and provides a practical way of making full use of underwater glider on studying the dynamics of internal wave.

Key words: underwater glider; internal wave; neutral hovering; in-situ observation; dynamical structure Received: September 6, 2017