

水下滑翔机的中尺度涡观测方法

宗 正^{1,2}, 熊学军^{3,4*}, 刘玉红^{1,2}, 刘曙光^{1,2}

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 机构理论与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: 设计了一种水下滑翔机对中尺度涡进行水文学、运动学原位观测的方法, 以航行过程与观测过程分离为原则。在硬件改进上, 为水下滑翔机安装加速度传感器, 用于测量水下滑翔机的运动加速度, 特别是中性悬停时随着水体运动的加速度, 加速度积分计算得到运动速度。在观测方法上, 通过海表高度异常资料判断待测中尺度涡的位置、范围和移动方向, 利用 2 台水下滑翔机分别在中尺度涡移动方向和移动方向法向的路径上做正交路径的剖面观测, 进行中尺度涡的温盐测量; 对温盐测量结果进行即时分析, 得到上均匀层、强跃层、下均匀层的位置, 控制 4 台水下滑翔机在这些水层中性悬停, 做无滑脱随流运动, 进行同步针对性观测。论述了浮力的精确控制方法、由水下滑翔机随流运动速度推导海流速度的过程。本方法不仅测量中尺度涡的温盐分布, 还对中尺度涡的三维结构做系统的运动学观测, 对中尺度涡观测技术的发展具有重要意义。

关键词: 水下滑翔机; 中尺度涡; 拉格朗日法; 原位观测; 运动学观测

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)02-0180-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.003

中尺度涡是海洋中普遍存在的一种海洋现象, 以长期封闭环流为主要特征, 通常典型的空间尺度为 50~500 km, 时间尺度为几天到上百天, 是海洋物理环境的一个重要组成部分^[1]。中尺度涡蕴含着相当大的能量, 其动能比大部分海域的平均动能高一个数量级^[2], 对海洋物理、化学、生物等有着多方面的影响, 因此具有重要的研究意义。

20 世纪 90 年代以前, 由于观测技术的限制, 人们很难观测到长时间、大范围的海洋中尺度现象, 这一时期的研究大多局限于对少量观测现象的描述^[3]。20 世纪 90 年代后, 遥感卫星得到充分发展, 利用卫星高度计提供的长时间、大范围资料, 通过海表面高度变化对各个海域内的中尺度涡进行识别、统计, 分析中尺度涡的位置分布、空间尺度、生命周期等主要特征^[3-5]。此外, 漂流浮标也大量应用于对中尺度涡的观测, 用以获得中尺度涡的运动过程、水平结构^[6]。

用卫星高度计和漂流浮标观测中尺度涡取得了众多研究成果的同时, 也存在着问题, 即观测对象局限于

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-IPOVA1-01-05)和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: 宗 正(1992-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事水下滑翔机技术方面研究. E-mail: zong_zheng@foxmail.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: xiongxi@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

中尺度涡的表层结构,不能对中尺度涡的垂直结构进行测量。Argo 剖面浮标在一定程度上弥补了卫星高度计和漂流浮标的不足。利用卫星高度计观测中尺度涡表层信息的同时,寻找与之同步的 Argo 浮标的观测数据,即可对目标中尺度涡的垂直结构进行研究^[7-8]。但 Argo 浮标没有自主航行能力,很快就会脱离中尺度涡,难以对同一个中尺度涡进行长时间的连续观测。潜标阵列也是中尺度涡观测的有效方法,但观测方式较为被动,且观测成本很大。

20 世纪 90 年代美国提出了水下滑翔机的构想并开始研究^[9]。水下滑翔机是一种结合了浮标技术和水下机器人技术的自主式水下无人航行器,由浮力调节系统、姿态调节系统、主控系统、通讯系统以及观测传感器组成。浮力调节机构可以实现正浮力和负浮力的周期性转换,由净浮力驱动进行下潜或上浮;姿态调整机构可以使机体达到适当的俯仰角,两者结合使水下滑翔机在上浮或下潜的同时向前滑翔运动,同时根据观测任务的需求搭载观测传感器进行海洋观测。通信系统可以在浮出水面时进行数据传输与远程控制。水下滑翔机具有工作时间长、航行距离远、路径可规划、成本较低等优点,其突出特点是浮力可调节,可以在水下中性悬停,融入到海洋现象中,从而进行原位观测,提高观测精度,因而在海洋调查领域具有广阔的应用前景。

至 2000 年,美国已研制出多种可用于海洋监测的小型水下滑翔机。国内的研究较晚,2000 年以后以天津大学、中国科学院沈阳自动化研究所为代表的多家单位陆续开始了国产水下滑翔机的研制,并在 2010 年以后相继成功进行了海试。水下滑翔机作为一种比较新的海洋观测平台,在国内已经有了初步应用,而用于观测中尺度涡的情况还比较少。任强等通过分析 2014 年南海海试数据,发现水下滑翔机观测到了中尺度暖涡,并对其锋面的温盐结构有非常精细的描述^[10]。舒业强等利用水下滑翔机对南海北部的一个反气旋涡进行了剖面测量,分析其温盐垂直结构^[11]。这些观测实验只是在滑翔机航行过程中途径涡旋区域,并非系统性的观测,因而观测结果不能完整地描述中尺度涡结构。此外,由于滑翔机负载能力有限,缺乏可供滑翔机搭载的流速测量仪,现有的滑翔机观测中尺度涡仍然以温盐测量为主,而缺少对涡旋流速的测量。针对这些问题,本文将讨论一种利用水下滑翔机浮力可控的特点对中尺度涡进行原位观测的方法,对中尺度涡的温盐与流速进行测量。

1 水下滑翔机的中尺度涡观测方法

卫星高度计、卫星合成孔径雷达是在大面积海区发现、确认中尺度涡的有效调查技术。目前仍然需要利用高时空分辨率的海表高度异常(Sea Level Anomaly, SLA)等资料,来确定将要观测的中尺度涡的位置、范围、旋向、移动轨迹和移动方向,然后利用水下滑翔机进行观测。下面以气旋涡为例,说明测量过程。

1.1 温盐测量

在确定目标中尺度涡的位置、移动方向后,利用两台水下滑翔机以剖面观测方式对中尺度涡的交叉断面进行测量,目的在于:利用搭载的温盐深剖面仪,测量中尺度涡交叉断面上各个位置的温盐垂直结构,计算各个位置上密度随深度变化的关系,构建出密度剖面的基本模型,用于水下滑翔机的中性悬停控制;使用全水层的海洋层结谱表法^[12],对初步测量结果进行分析,得到交叉断面上各个位置的上均匀层、强跃层、下均匀层位置。这些水层具有不同的特性,反映了不同深度的水体特征,可以作为水下滑翔机的后续观测位置。

大多数中尺度涡的形状并不规则,但交叉断面仍然要尽可能地穿过中心区域。如图 1 所示,通过海表高度异常

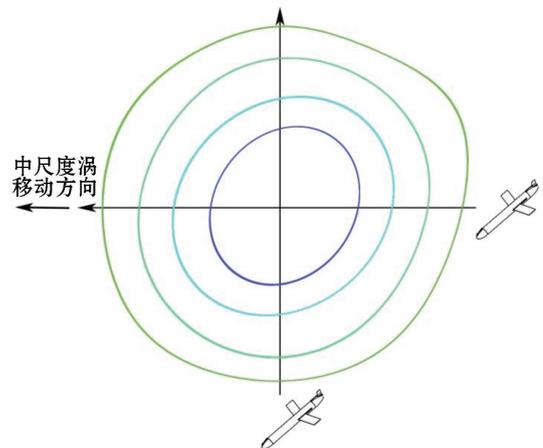


图 1 交叉断面观测示意图

Fig.1 Schematic diagram of cross-sections designed for eddy observation

(SLA)数据产生的一系列等高线判断出中尺度涡的范围后,控制水下滑翔机从边缘开始分别沿着中尺度涡移动方向和移动方向法向、通过中尺度涡中心区域且穿越整个中尺度涡范围的交叉路径做剖面滑翔运动,对各自路径上的温度、盐度等进行测量。目前多数水下滑翔机的最大工作深度都可以达到 1 000 m,而中尺度涡对较浅水层的影响较大,因此在剖面测量过程中,可以根据需要适当增加 0~500 m 深度范围内的采样频率。水下滑翔机每次上浮到海表面时,可以通过卫星通讯设定下一个剖面的航行目标点来纠正轨迹偏差,从而在整体上完成穿越中心区域的轨迹。

1.2 流速测量

对中尺度涡的观测,不仅包含温度、盐度等数据的测量,还包含运动学观测,即流速的测量。可供水下滑翔机搭载的温盐深剖面仪已经有了广泛应用,但针对滑翔机设计的流速测量设备应用较少,而且滑翔状态下进行流速的测量,数据处理较为困难。因此,利用其浮力可控、可以成为中性体的特点,在不同深度中性悬停,通过跟随海流漂流的方式进行拉格朗日观测。在水下滑翔机内部安装加速度传感器,测量漂流运动状态下的加速度,进一步积分计算运动速度,再结合一定的算法,就可以测量海流的速度。滑翔机周期性地上浮到水面进行卫星定位,结合卫星高度计数据,显示滑翔机在目标中尺度涡中所处的位置。如果测量位置有偏差,滑翔机又可以在进入下一个测量周期时,发挥主动航行能力,下潜到目标区域。

Argo 剖面浮标在两次剖面观测之间会在中层悬停并漂移 10 d, Park 等研究了利用 Argo 剖面浮标的定位信息估算海洋中层流速^[13]。周慧等利用 Argo 剖面浮标的定位信息,计算了棉兰老岛海域一个反气旋涡表层、中层的流速分布^[14]。水下滑翔机与 Argo 剖面浮标具有很多相同的特点,两者的外形均为细长的圆柱体结构,通过调节浮力而下潜、上浮或在水下一定深度悬停。与剖面浮标相比,水下滑翔机装有机翼,在海流中漂浮时具有更大的迎风面积。这也在一定程度上证明了利用水下滑翔机中性悬停状态下的漂流运动测量海流速度是可行的。

强盛期的中尺度涡通常有着较为稳定的最大流速带,在最大流速带外侧,流速随半径增大而减小;在最大流速带内侧,流速随半径减小而减小。卫星高度计资料可以显示中尺度涡的范围,基本上可以判断最大流速带的位置,而海洋中的漂浮体会被强流区捕获,滑翔在最大流速带中性悬停,就会跟随涡旋漂流运动。同时,根据滑翔机航行过程中的速度、姿态变化、偏航等信息,可以在一定程度上对流场进行判断,通过相应的调整,使得滑翔机能够进入到最大流速带中。

通过交叉断面的温盐测量,分析得到中尺度涡断面上各个位置的层结分布后,利用多台水下滑翔机对中尺度涡进行同步观测,目的是测量中尺度涡边界区上均匀层、强跃层、下均匀层的水平流速以及中心区的垂直流速。由温盐测量可以得到断面上各个位置海水密度的垂直分布,因而可以较为精确地控制水下滑翔机在不同深度中性悬停。利用 4 台水下滑翔机在中尺度涡的不同水层进行同步观测:第一台在上均匀层的最大流速带中性悬停;第二台在中心区的一定深度中性悬停;第三台在强跃层的最大流速带中性悬停;第四台在下均匀层的最大流速带中性悬停。某些情况下,跃层分布较为复杂,不容易找到强跃层,此时可以选择在涡旋影响较大的深度范围,如 300 m 以浅进行悬停。4 台水下滑翔机中性悬停的同时跟随海流做无滑脱随流运动,进行海流速度的测量,观测位置分布如图 2 所示。

对中尺度涡流场的观测需要考虑潮流的影响。从现有的研究结果可知,5 000 m 水深的区域潮流约为 2 cm/s,1 000 m 水深区域潮流约为 10 cm/s。在深水区域潮流较小,对于中尺度涡观测的影响可以忽略。在浅水区的中尺度涡观测中,可以通过多种手段共同使用来滤除潮流。目前通过数模进行潮流的预报已经比较全面、准确,可以用于潮流的滤除。如果待测中尺度涡附近存在潜标等定点观测设备,也可以通过实测数据滤除潮流。潮流相对而言较为稳定,而中尺度涡具有很强的结构特点,因而观测结果具有一定的规律性,利用观测数据的规律性也可以进行潮流的滤除。水下滑翔机在各个水层中性悬停的时间应大于 25 h,这样可以获得足够多的连续测量数据,以便进行潮流滤除。

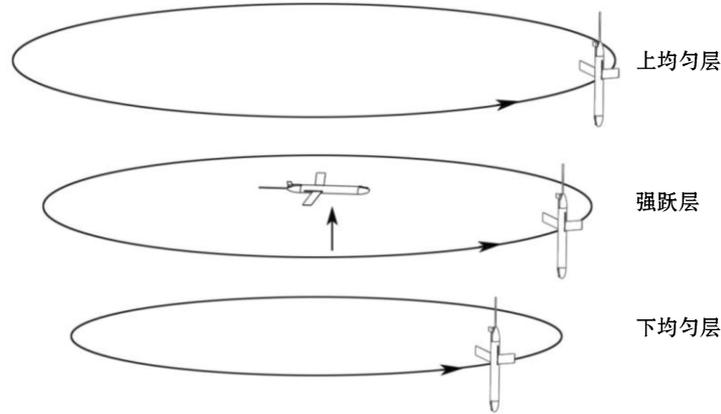


图 2 水下滑翔机同步、原位观测

Fig.2 Strategy for synchronous in-situ observation by underwater gliders

2 观测方法的实现

2.1 浮力精确控制方法

通常情况下,水下滑翔机要保证足够的净浮力作为驱动力,进行稳定的滑翔运动。本文讨论的中尺度涡原位观测方法,是利用其中性体控制特征,在不同的水层中性悬停,融入海洋现象中,同时对温度、盐度、海流速度等进行测量。为使水下滑翔机在水下任意工作深度悬停,需要对浮力进行精确控制。

忽略重力加速度的变化,水下滑翔机在海水中的浮力由海水密度和排水体积决定,而海水密度又随深度变化而变化,则

$$B = \rho(h)g(V_s(t, p) + v_b), \quad (1)$$

式中, B 为水下滑翔机受到的浮力; $\rho(h)$ 为海水密度,随深度变化,可以通过目标海域的剖面测量得到; $V_s(t, p)$ 为水下滑翔机耐压壳体的体积,随外部海水压力和海水温度变化; V_b 为水下滑翔机外皮囊的体积,也就是外皮囊里的油液体积。

剖面浮标的耐压结构与水下滑翔机相似,均为圆柱形壳体。剖面浮标的工作方式包含了在设定深度中性悬停的过程,在设计过程中需要通过压载试验测量浮标在不同温度、深度下的体积。国家海洋技术中心的剖面浮标课题组针对 Argo 浮标进行了压载试验^[15],可以采用这一方法标定水下滑翔机的体积 $V_s(t, p)$ 。

控制水下滑翔机在目标深度中性悬停,是为了减少平台自身运动的影响,在海流的作用下随流运动,在悬停的目标深度上,需要调整浮力与重力相等,即如下关系:

$$\rho(h)g(V_s(t, p) + V_b) = Mg. \quad (2)$$

由式(2)得到中性悬停所需要水下滑翔机外皮囊的体积 V_b 。由浮力控制系统对外皮囊的体积进行调整,使水下滑翔机达到中性悬停的状态。陈鹰等研究了水下滑翔机的浮力控制系统及其动态性能^[16],利用高精度的线性位移传感器,可以达到 1 mL 的油箱体积测量分辨率,用来检测内部油箱的体积变化,作为反馈对液压泵驱动电机进行控制,以此达到对外皮囊体积的精确控制。同时,通过压力传感器测量外部海水压力,以设定悬停深度的海水压力为中心设定压力区间,将外部海水压力保持在此区间内作为达到中性悬停的标志。

2.2 海流速度的测量

滑翔机从稳定滑翔状态开始进入中性悬停状态时,仍然具有滑翔时的速度并在水体作用下逐步衰减;而

中尺度涡流的旋转速度大小也不是恒定不变的。以上两个因素,导致当水下滑翔机中性悬停,在海流的作用下做漂流运动时,与海流之间存在着速度差。考虑到滑翔机与海流之间的相对运动,存在如下速度关系

$$v_s = v_g + v, \quad (3)$$

式中, v_s 为海流速度, v_g 为水下滑翔机运动速度, v 为海流与水下滑翔机的相对速度。由于滑翔机相对于中尺度涡体体积很小,所以在此认为水下滑翔机与海流的速度方向相同,而大小不同。

海流相对水下滑翔机运动而产生的绕流阻力为

$$F_D = \frac{1}{2} C_D(\alpha) \rho A v^2, \quad (4)$$

式中, F_D 为海流对水下滑翔机的绕流阻力,与相对流速方向相同; α 为攻角,即海流与水下滑翔机相对速度 v 的方向与水下滑翔机轴线的夹角; C_D 为阻力系数,与攻角 α 有关; A 为水下滑翔机经过轴线的截面积; ρ 为中性悬停位置的海水密度。

水下滑翔机所受升力为

$$F_L = \frac{1}{2} C_L(\alpha) \rho A v^2, \quad (5)$$

式中, F_L 为海流对水下滑翔机的升力,垂直于相对流速, C_L 为升力系数,与攻角 α 大小有关。

当攻角从 0° 增大到 90° , 升力系数在先增大后减小,在攻角为 90° 时接近于 0; 阻力系数持续增大,在 90° 达到最大值^[17]。因此,在水下滑翔机中性悬停,测量水平流速时,应调整为垂直姿态,使海流与水下滑翔机相对速度方向和水下滑翔机轴线的夹角保持在 90° 左右。同理,水下滑翔机中性悬停,测量垂直流速时,应调整为水平姿态。

水下滑翔机中性悬停时,认为浮力与重力相等,在绕流阻力的作用下,存在如下关系:

$$\frac{1}{2} C_D(\alpha) \rho A v^2 = Ma, \quad (6)$$

式中, M 为水下滑翔机的质量, a 为水下滑翔机的加速度,与相对流速的方向相同。

通过有限元计算软件 ANSYS Fluent 对水下滑翔机在不同相对流速下的所受绕流阻力和升力进行仿真计算。滑翔机直径 220 mm, 直径 2 m, 翼展 1 m。计算域整体为立方体,划分网格后如图 3 所示,入口边界长 15 m, 宽 12 m, 入口方向与滑翔机轴线垂直。水流入口边界距离滑翔机 6 m, 出口边界距离滑翔机 12 m。

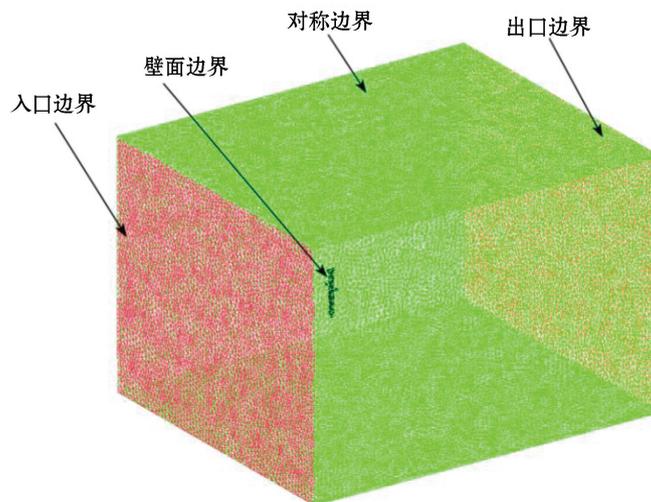


图 3 计算域及边界条件

Fig.3 Computational domain and boundary conditions

中尺度涡的流速较大,且随深度增加而迅速减小,现有研究表明中尺度涡的表层实测流速可以达到 1 m/s ^[18]。考虑到水下滑翔机在一定深度悬停,外部海流速度会小于表层流速,在入口边界施加 $0.4, 0.3, 0.2$ 和 0.1 m/s 的相对速度 v 作为边界条件,计算滑翔机受到的阻力 F_D 和升力 F_L 。计算结果如表 1 所示。

表 1 不同相对流速下的阻力、升力

Table 1 Friction and buoyancy corresponding to different relative velocity

$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	F_D / N	F_L / N
0.4	42.574	0.324
0.3	24.503	0.102
0.2	11.036	0.036
0.1	2.794	0.016

由计算结果可知,升力 F_L 很小,可忽略不计,滑翔机的运动加速度由绕流阻力 F_D 提供。滑翔机质量为 60 kg ,在表 1 所示的相对速度下,运动加速度分别为 $0.709, 0.409, 0.184$ 和 0.047 m/s^2 。很多加速度传感器的分辨率都可以达到 10^{-5} g ,因此相对流速产生的滑翔机加速度是可以测量的。

当水下滑翔机中性悬停,跟随海流做漂流运动时,加速度传感器可以测量其运动加速度 a ,则海流与水下滑翔机的相对速度为

$$v = \sqrt{\frac{2Ma}{C_D(\alpha)\rho A}} \quad (7)$$

通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD),计算不同攻角 α 、相对流速 v 下的绕流阻力 F_D ,继而得到此条件下的阻力系数 C_D ,计算多组数据后,即可拟合出阻力系数 C_D 与攻角的 α 函数关系。在水下滑翔机中性悬停时,姿态测量单元可以测量水下滑翔机的俯仰角,也就是此时的攻角 α ,因此 $C_D(\alpha)$ 也可以得到。将加速度传感器所测的运动加速度进行积分计算,可以得到水下滑翔机的运动速度 v_g 。由 $v_s = v_g + v$ 即可得到水下滑翔机所处位置的海流速度 v_s ,从而完成对中尺度涡流速的测量。

3 结 语

本文针对现有中尺度涡观测方法的局限性,讨论了利用水下滑翔机对中尺度涡进行原位观测的方法。通过对观测过程以及实现方法的讨论可以看出,利用水下滑翔机在水下中性悬停的方式进行观测具有一定的可行性。为水下滑翔机安装加速度传感器,即可对中尺度涡在不同深度上进行拉格朗日观测。与以往的中尺度涡观测方式相比,不仅测量中尺度涡的温盐分布,还对中尺度涡的三维结构做系统的运动学观测,进而可以构建中尺度涡的三维动力学结构,充分利用了水下滑翔机可以中性悬停实现对海洋内部现象原位观测的特点,是对现有中尺度涡观测体系的有效补充,具有一定的应用价值。

参考文献(References):

- [1] WANG G H, SU J L, QI Y Q. Advances in studying mesoscale eddies in South China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8): 882-886. 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 882-886.
- [2] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(15): 87-101.
- [3] CHENG X H, QI Y Q, WANG W Q. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(4): 51-59. 程旭华, 齐义泉, 王卫强. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(4): 51-59.

- [4] LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Statistical analysis of the features of meso-scale eddies near the Luzon Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(1): 1-7. 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 吕宋海峡附近中尺度涡特征的统计分析[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 1-7.
- [5] QIN L J, DONG Q, FAN X, et al. Temporal and spatial characteristics of mesoscale eddies in the North Pacific based on satellite altimeter data[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(5): 806-817. 秦丽娟, 董庆, 樊星, 等. 卫星高度计的北太平洋中尺度涡时空分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(5): 806-817.
- [6] XU X H, LIAO G H, XU D F. Analysis of the anticyclone eddy in the Northwest Pacific with Argos drifters data[J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(4): 1-13. 徐晓华, 廖光洪, 许东峰. 西北太平洋反气旋涡的 Argos 浮标观测结果分析[J]. 海洋学研究, 2010, 28(4): 1-13.
- [7] ZHENG C C, YIN Z H, LIANG Y C, et al. Analysis of the eddy vertical structure in different areas in the North Pacific[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 10-16. 郑聪聪, 闫忠辉, 梁永春, 等. 北太平洋中尺度涡温度垂直结构区域差别分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 10-16.
- [8] CHAIGNEAU A, TEXIER M L, ELDIN G, et al. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2011, 116(C11): C11025.
- [9] RUDNICK DL, DAVIS RE, ERIKSEN C C, et al. Underwater gliders for ocean research[J]. Marine Technology Society Journal, 2004, 38(2): 73-84.
- [10] REN Q, YU F, LI S, et al. Analysis on the experimental data acquired from the sea tests for domestic underwater glider in the South China Sea in 2014[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(1): 52-57. 任强, 于非, 李硕, 等. 国产水下滑翔机 2014 年南海海试实验数据分析[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(1): 52-57.
- [11] SHU Y Q, XIU P, XUE H J, et al. Glider-observed anticyclonic eddy in northern South China Sea[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2016, 19(3): 233-241.
- [12] 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.
- [13] PARK J J, KIM K, KING B A, et al. An advanced method to estimate deep currents from Profiling Floats[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2005, 22(3): 1294-1304.
- [14] ZHOU H, XU J P, GUO P F, et al. A study on an anticyclonic eddy east of Mindanao observed by an Argo profiling float[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(6): 8-14. 周慧, 许建平, 郭佩芳, 等. 棉兰老岛以东反气旋涡的 Argo 观测研究[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(6): 8-14.
- [15] ZHANG S Y, LIN Y C. Brief introduction to calibrating the profiling depth of the COPEX[J]. Journal of Ocean Technology, 2005, 24(3): 41-45. 张少永, 林玉池. 初探我国 Argo 浮标下潜深度标定[J]. 海洋技术学报, 2005, 24(3): 41-45.
- [16] ZHAO W, YANG C J, CHEN Y. Design and dynamic performance study of buoyancy regulating system of autonomous underwater glider[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 43(10): 1772-1776. 赵伟, 杨灿军, 陈鹰. 水下滑翔机浮力调节系统设计及动态性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1772-1776.
- [17] JIANG H B, CAO S L, CHENG Z Q. Lift and drag coefficients of flow around a flat plate at high attack angles[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(5): 518-520. 姜海波, 曹树良, 程忠庆. 平板大攻角绕流升力和阻力系数的计算[J]. 应用力学学报, 2011, 28(5): 518-520.
- [18] HU D, CHEN X, LI Y, et al. Characteristics of an observed cyclonic eddy of eastern Vietnam[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 18(2): 163-169. 胡东, 陈希, 李妍, 等. 越南东部海域一个气旋涡的特征分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 163-169.

The Method of Mesoscale Eddy Observation Using Underwater Glider

ZONG Zheng^{1,2}, XIONG Xue-jun^{3,4}, LIU Yu-hong^{1,2}, LIU Shu-guang^{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 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: A method for in-situ hydrological and dynamical observation of mesoscale eddies using underwater glider is designed based on the principle of separation between navigation process and observation process. On the hardware improvement, an acceleration sensor is installed for measuring the acceleration, especially when underwater glider neutrally hovers, and the velocity thus can be calculated by integrating the acceleration. on the development of observation method, the position, size and moving direction of mesoscale eddy can be judged with sea level anomaly data, then the temperature and salinity profiles can be measured with two underwater gliders along and across the eddy moving direction, respectively. Thermocline, upper and lower homogeneous layers can be located with real-time analysis of measured temperature and salinity, and four underwater gliders will be used to neutrally hover in these layers to observe synchronously while following the current without slippage. The method for precise buoyancy control and calculation of current velocity are discussed. Besides the observation of temperature and salinity, the method also allows us to observe the three-dimensional dynamic movement of eddy-this method is an important contribution to the development of mesoscale eddy observation technique.

Key words: underwater glider; mesoscale eddy; Lagrangian method; in-situ observation; dynamic observation

Received: September 6, 2017