

水下滑翔机的海洋应用

Ocean application of the underwater glider

庞重光^{1,2}, 连喜虎^{1,2,3}, 俞建成⁴

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

中图分类号: P733 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)04-0096-05

doi: 10.11759/hyxx20120625001

水下滑翔机是一种依靠浮力驱动、以锯齿形轨迹航行的新型水下移动观测平台, 具有制造成本与使用费用低、续航能力强、自主可控等特点, 已经逐渐成为一种有效的海洋观测平台^[1]。

水下滑翔机是一种新型的海洋环境观测平台, 近年来在国内外受到了极大的关注。1995年以来, 美国先后研制出 Slocum^[2]、Seaglider^[3]和 Spray^[4]等多种水下滑翔机, 并于 2003 年前后逐步实现产品化。法国(Sea-Explorer、STERNE)、日本(ALBAC)、加拿大等国家也都开展了水下滑翔机的相关研究工作^[5]。2003 年中国科学院自动化研究所开展了水下滑翔机基础研究, 2008 年成功地研制出我国自主知识产权的水下滑翔机工程样机。十二五期间, 中国科学院自动化所、天津大学、中国海洋大学和华中科技大学等 4 家单位正在开展不同驱动类型水下滑翔机的研发攻关。另外, 浙江大学、上海交通大学、国家海洋技术中心以及中船重工集团 702 研究所等单位也开展了一些与水下滑翔机相关的研究工作。

水下滑翔机适合于较大范围、长时间、垂直剖面连续的海洋环境观测, 已经成为一种通用的海洋环境观测平台, 并在实际海洋环境观测计划中得到应用。如在目前正在进行的西太平洋国际海洋观测计划: Southwest Pacific Circulation and Climate Experiment(SPICE)^[6], Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment(NPOCE)^[7], 以及 Origin of the Kuroshio and Mindanao Current(OKMC), 均单列了利用水下滑翔机进行特别任务观测。

1 水下滑翔机海洋观测及其类型

水下滑翔机的应用领域极其广泛, 包括: 物理、化学、生物海洋学、战术海洋学、长周期、大范围海

洋侦察和搜索, 以及航行辅助等^[5]。

1.1 水下滑翔机观测及其优势

利用水下滑翔机进行海洋环境观测, 可以直接或间接获得如下海洋环境参数。直接测量参数包括基本和可扩展参数 2 种。基本海洋参数如: 海水深度、温度、盐度(CTD); 可扩展参数如: 海水浊度、pH 值、叶绿素含量、溶解氧含量、营养盐含量、海水湍动混合、海洋中的声波等等。在水下滑翔机上加载高频流速剖面仪, 如在 Seaglider 上加载 1 MHz Aquadopp Profiler, 在其下潜过程中, 可进行高精度海洋湍动测量^[8]。在 Sea-Explorer 水下滑翔机上安装声波探测器和记录仪, 可以收集海洋中哺乳动物发出的声波, 并对其进行评估。间接获得的海洋参数主要是海水流速的估计^[9], 包括: 滑翔深度平均的海水流速、表层流速以及垂向流速。滑翔深度平均的海水流速由航迹推算位移与实际位移之差估算; 在海表面, 通过相隔约 7~9 min 的 2 个全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位, 可估算表层流速; 通过期待下潜速度与实际下潜速度之差, 可给出显示内波与深层湍动混合活动的垂向流速的估计; 联合高度计测量数据, 可以诊断出锋面区垂向流速。

水下滑翔机与其他海洋观测设备相比, 具有明显的优势。相比于船基海上调查, 其调查成本相对较低, 特别是现在高油价时代更具意义; 其观测具有

收稿日期: 2012-09-09; 修回日期: 2013-03-11

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB956004); 国家自然科学基金(61233013)

作者简介: 庞重光(1973 -), 女, 山西榆社人, 研究员, 博士, 主要从事悬浮物质输运与循环研究。电话: 0532-82898609, E-mail: chgpang@qdio.ac.cn

更高的空间分辨率,例如当下潜水深 500 m 时,其测量空间分辨率小于 3 km;而且由多个水下滑翔机组成的观测阵列可以进行大范围、长时间跨度的不同断面的准同步观测,克服船基调查站位有限、时间跨度小的缺点。相比于中性浮标如 ARGO 浮标等,其具有可控性的优点;而且水下滑翔机还具有体积小,重量轻,易于布放与操作的特点。水下滑翔机的另一突出优势是,可以在船只进出困难海域以及极端气象条件下进行自主观测^[10]。

1.2 水下滑翔机海洋观测类型及应用

在海洋观测中,水下滑翔机逐渐被广泛使用。水下滑翔机与航次观测(cruises)、锚定系统(moorings)、漂浮系统(bouys, drifters, floats)一起,已成为一种新型的必不可少的观测手段^[5]。

水下滑翔机可以进行不同深度的海洋观测,如:表层漂流(Surface drift);底层漫步(Bottom loiter)以及次表层观测(Sub-surface porpoise)。从空间观测方式上又可分为:虚拟锚系观测(virtual mooring), (重复)断面观测(repeated sections)和阵列观测(array, or a fleet of gliders)。

1) 虚拟锚系观测

在水平位置约 1 km 范围内,进行连续的重复剖面观测。设定水下滑翔机的航行速度、滑翔角和水平方位,使其恰好抵消海水运动,基本确保在一个垂向剖面进行连续多次测量。1999年, Spray 水下滑翔机进行虚拟锚系观测,完成了 11 d、水深 380 m、182 个剖面的测量;2001年,1 对间隔 1.5 km 的 Seaglider 水下滑翔机完成了 2 个虚拟锚系观测;2004年,在吕宋海峡以东 500 km 的菲律宾海,放置了 5 个 Slocum 水下滑翔器组成虚拟锚系阵列,对 100 km×100 km 海域的中尺度变异和浮游生物进行了为期 10 d 的连续观测,获得了重要结果^[11]。该类型观测的缺点是不能做到完全同步观测,不能携带大体积观测仪器,不能测量海表面的气象条件。

2) 断面观测

水下滑翔器沿预定断面连续滑翔,重复或不重复进行断面观测。在强流区,水下滑翔机会发生严重的漂移,因此根据已知流场的空间结构优化水下滑翔器的航行路线是很有效和十分必要的。该类型观测是利用水下滑翔机进行海洋观测的常见类型,所以应用实例很多。目前,单个水下滑翔机可以进行持续 5 个月以上,总行程达 2 000 km 的重复断面观测。

需要特别指出: SPRAY 水下滑翔机 2007 年在吕宋岛与台湾岛之间,即 18°~24°N,在西边界流强流区,进行了多次断面观测,其观测水深 1 000 m,持续时间最长达 5 个月^[12]。该类型观测的缺点是与拖曳式 CTD 测量相比,速度不到其 1/10,所以可能导致时间变化与空间结构的混淆^[13]。

3) 阵列观测

根据任务需要,选择合适数量的水下滑翔机组成阵列,进行同步观测。由于该类型观测可以实现次表层海洋要素的大范围、可持续、准同步测量,因此具有广阔的应用前景。美国在 2003 年和 2006 年开展了 2 次大规模的以建立可控的自动的海洋观测网为目的海上试验^[14],其中使用了数十套水下滑翔机组成的观测阵列进行海洋环境观测。2003 年夏天,在 Monterey Bay, 美国科学家用了 10 个机动灵活的浅水型 Slocum 水下滑翔机,以及 5 个适用于深水长时间作业的 Spray 水下滑翔机,开展了为期 1 个月的阵列观测。

欧美各国使用水下机器人获得了大量的海上观测数据,这些观测数据对海洋科学家研究不同尺度海洋物理、生物、化学等动态过程起到重要作用。这些利用水下滑翔机观测获得的高时空分辨率的海洋环境参数测量结果一方面可以揭示一些新的海洋现象: Hodges 和 Fratantoni^[11]利用水下滑翔机虚拟锚系阵列在 Philippine 海进行观测,发现了浮游植物薄层。Todd 等^[15]利用水下滑翔机对 Southern California Current System(SCCS)中的极向流进行了观测,揭示了极向流的空间分布特征及其时间变化。另一方面水下滑翔机测量结果可用于海洋环境的数据同化。Dobricic 等^[16]把水下滑翔机观测数据用于 Ionian Sea 预报模式的同化,并指出,在动力复杂海域使用滑翔机观测数据可进行更加有效的数据同化,而且滑翔机观测数据具有很好的预报效果。作为研究计划的一部分,在 2006 年 Monterey Bay 水下滑翔机阵列观测期间,用 3 种不同的海洋模式: Regional Ocean Modeling System(ROMS), Harvard Ocean Prediction System(HOPS)以及 Innovative Coastal-ocean Observing System(ICON)对观测结果进行了实时数据同化^[14, 17]。

2 水下滑翔机自主观测技术的研究

基于海洋机器人(包括水下滑翔机)的水下环境自主观测是当前国际研究热点,也是海洋环境观测技术的发展趋势。所谓自主观测是指利用海洋机器

人的移动、可控特点,根据实时观测数据,结合观测任务目标,自主控制海洋机器人的观测路径,执行观测任务^[18]。

随着水下滑翔机技术的不断成熟,美国和欧洲各国相继开展了多项与海洋环境自主观测相关的研究计划。美国在自主海洋采样网(the Autonomous Ocean Sampling Network, AOSN)计划框架下,分别于2000、2003和2006年开展了3次大规模自主海洋观测试验^[14];2005年由法国、德国、意大利、挪威、西班牙和英国的科研机构联合发起了欧洲滑翔观测计划(European Gliding Observatories, EGO)^[19],该计划专门支撑水下滑翔机在海洋自主观测技术的应用研究。这些关于自主观测的研究主要体现在自主观测行为的优化和多水下滑翔机的协作观测与控制等2个方面。

2.1 水下滑翔机自主观测行为的优化

国外学者对利用水下滑翔机进行海洋环境自主观测中涉及的自主观测策略、跟踪观测策略、观测路径规划等问题进行了研究,取得了一些研究成果。Fiorelli等^[20-21]和Ögren等^[22]提出了一种虚拟体人工势场法的多水下滑翔机队型控制方法,研究了基于多水下滑翔机的海洋锋面与标量场梯度自主跟踪观测策略。Susca等^[23]与Jin和Bertozzi^[24]研究了基于传感器网络的标量场边界估计与跟踪问题。Alvarez等^[25]研究了水下滑翔机与漂流浮标协作的自主观测问题,采用遗传算法优化水下滑翔机的观测路径。Heaney等^[26]研究了基于海洋数值模型预测的水下滑翔机区域自主覆盖观测问题,使用遗传算法求解最优观测路径。Zhang和Sukhatme^[27]针对水下机器人与固定节点协作的自主覆盖观测问题,提出了基于Local Linear Regression(LLR)的误差估计方法,优化水下机器人观测路径。Rao和Williams^[28]基于A*算法,以滑翔机运动消耗能量最小为目标,分析了滑翔机在有海流的情况下,滑翔机静水运动速度、海流速度和滑翔机的实际运动速度之间的关系,并提出了启发式的路径规划方法。Smith等^[29]研究了单水下滑翔机海洋观测问题,提出了多观测目标的、自主Z字形观测路径规划方法,并进行了海上试验。

2.2 多水下滑翔机的协作控制与观测

关于自主覆盖观测方法研究工作主要包括:多水下滑翔机时间延迟控制,多水下滑翔机队形控制,海洋观测数据噪声处理等。Leonard等^[30]提出了基于

目标分析(Objective Analysis, OA)的观测数据评价标准,并设计了相应的自主覆盖观测方法,将移动节点限定在可参数化的轨迹上,通过优化轨迹参数和轨迹上移动节点数获得优化观测数据。Peng和Yang^[31]分析了在主、从水下滑翔机通讯时间延迟确定的情况下,队形稳定问题,针对主从滑翔机通信延迟时变和时不变两种情况,设计了相应的切换控制策略。Roberson^[32]基于图论的原理,设计了在时间延迟的情况下,采用4个水下滑翔机跟踪海洋温度场等值线的控制方法,水下滑翔机根据各自的轨迹对海洋区域观测采样,并和其他机器人共享观测数据;将共享的采样数据取平均,以确定队形中心的轨迹。在多水下滑翔机覆盖观测的队形控制方面,Paley等^[33]根据粒子振荡器的模型,分析了相互作用的多个粒子收敛到同步的状态的控制方法;Zhang和Leonard^[34]基于牛顿粒子模型,采用微分几何的方法,设计控制律使任意初始位置的粒子收敛到封闭曲线上,用封闭曲线的轨道方程去量测各个粒子之间的相对位置。

近几年,我国在上海海域和台湾海峡及毗邻海域建立了区域性海洋环境立体监测示范系统,并在上海和福建两个示范区开展了业务化试运行。到目前为止,由于水下滑翔机设备对中国的出口限制,以及我国还没有自主知识产权的水下滑翔机产品,因此在我国构建的海洋环境立体监测系统中,还未使用水下滑翔机观测平台执行海洋环境观测。

3 水下滑翔机海洋应用的发展方向

水下滑翔机适合于较大范围、长时间、垂直剖面连续的海洋环境观测,在国外已经成为一种通用的海洋环境观测平台,并在实际海洋环境观测计划中得到应用。但我国的水下滑翔机观测尚属空白,因此研制出水下滑翔机产品并用于观测是当务之急。

根据水下滑翔机自身的运动、观测特点,其海洋应用的主要发展方向是进行海洋环境自主观测。基于水下机器人(包括水下滑翔机)的海洋环境自主观测技术是当前国际研究热点之一,国内外已经取得了一些研究成果,但相关研究工作较分散,缺少系统性研究,因此今后的主要发展方向是:通过系统深入研究水下机器人运动能力和环境海流对水下机器人自主观测行为的约束;复杂海洋环境、时变环境海流条件下的环境特征信息估计、多水下机器人协作控制、编队控制等理论与方法;并使理论研究工作

与实际应用紧密联系,同时开展实际海上环境的实验验证,最终形成完整的水下机器人海洋环境自主观测理论框架。

参考文献:

- [1] Rudnick D L, Davis R E, Eriksen C C, et al. Underwater gliders for ocean research[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2004, 38(1): 48-59.
- [2] Teledyne Webb Research. Slocum glider data sheet[EB/OL]. [2012-06-10]. http://www.webbresearch.com/pdf/Slocum_Glider_Data_Sheet.pdf.
- [3] iRobot Corporation. Irobotseaglider productsheet[EB/OL]. [2012-06-10]. http://m.irobot.com/maritime_product.php?product=seaglider.
- [4] Bluefin Robotics Corporation. Bluefin spray glider product sheet[EB/OL]. [2012-06-10]. <http://www.bluefinrobotics.com/assets/Downloads/Bluefin-Spray-Glider-Product-Sheet.pdf>.
- [5] Stephen W. Autonomous Underwater Gliders[C]//Inzar-tsev A V. *Underwater Vehicles*. Vienna: I-Tech, 2008: 499-524.
- [6] Ganachaud A, Brassington G, Kessler W. Southwest Pacific Circulation and Climate Experiment(SPICE) II: implementation plan[M]. Cairns: CLIVAR publication series No. 133, 2008.
- [7] Hu D X, Wang F, Wu L X, et al. NPOCE (Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment) IV: implementation[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [8] Siegel E. A new world of velocity profile capabilities for gliders[EB/OL]. [2012-06-25]. <http://www.nortek-usa.com/lib/technical-notes/velocity-measurements-on-glidern>.
- [9] Hatun H, Eriksen C C, Rhines P B. Buoyant eddies entering the Labrador Sea observed with gliders and altimetry[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37: 2838-2854.
- [10] Ruiz S, Pascual A, Garau B, et al. Mesoscale dynamics of the Balearic Front, integrating glider, ship and satellite data[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78: S3-S16.
- [11] Hodges B A, Fratantoni D M. A thin layer of phytoplankton observed in the Philippine Sea with a synthetic moored array of autonomous gliders[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: C10020, doi: 10.1029/2009JC005317.
- [12] Rudnick D, Davis R, Ohman M, et al. The underwater glider Spray: Observations around the world[EB/OL]. [2012-07-10]. <http://www.oceanobs09.net/proceedings/ac/FCXNL-09A02-1781162-1-ac4a33.pdf>.
- [13] Rudnick D L, Cole S T. On Sampling the Ocean Using Underwater Gliders[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C08010, doi: 10.1029/2010JC006849.
- [14] Rampa S R, Davis R E, Leonard N E. Preparing to predict: The second Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN-II) experiment in the Monterey Bay[J]. *Deep-Sea Research II*, 2009, 56: 68-86.
- [15] Todd R E, Rudnick D L, Mazloff M R, et al. Poleward flows in the southern California Current System: Glider observations and numerical simulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C02026, doi: 10.1029/2010JC006536.
- [16] Dobricic S, Pinardi N, Testor P, et al. Impact of data assimilation of glider observations in the Ionian Sea (Eastern Mediterranean)[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50: 78-92.
- [17] Leonard N E, Paley D A, Davis R E, et al. Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 27(6): 718-740.
- [18] Lermusiaux P F J. Adaptive modeling, adaptive data assimilation and adaptive sampling[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2007, 230: 172-196.
- [19] EGO group. European Gliding Observatories(EGO) initiative[EB/OL]. [2012-07-10]. <http://www.ego-network.org/dokuwiki/doku.php>.
- [20] Fiorelli E, Bhatta P, Leonard N E. Adaptive sampling using feedback control of an autonomous underwater glider fleet[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham: [s.n.], 2003: 1-16.
- [21] Fiorelli E, Leonard N E, Bhatta P. Multi-AUV Control and adaptive sampling in Monterey Bay[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(4): 935-948.

- [22] Ögren P, Fiorelli E, Leonard N E. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment[J]. *Automatic Control*, 2004, 49(8): 1292-1302.
- [23] Susca S, Martinez S, Bullo F. Monitoring environmental boundaries with a robotic sensor network[J]. *Control Systems Technology*, 2006, 16(2): 288-296.
- [24] Jin Z, Bertozzi A L. Environmental boundary tracking and estimation using multiple autonomous vehicles[C]// *IEEE: 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans: IEEE, 2007: 4918-4923.
- [25] Alvarez A, Garau B, Caili A. Combining networks of drifting profiling floats and gliders for adaptive sampling of the Ocean[C]// *IEEE: Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. Roma: IEEE, 2007: 157-162.
- [26] Heaney K D, Gawarkiewicz G, Duda T F. Nonlinear optimization of autonomous undersea vehicle sampling strategies for oceanographic data-assimilation[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(6): 437-448.
- [27] Zhang B, Sukhatme G S. Adaptive sampling with multiple mobile robots[EB/OL]. [2008-01-01]. <http://escholarship.org/uc/item/12v1d7w3#page-2>.
- [28] Rao D, Williams S B. Large-scale path planning for Underwater Gliders in ocean currents[C]// *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. Sydney, [s.n.], 2009: 1-8.
- [29] Smith R N, Schwager M, Smith S L, et al. Persistent ocean monitoring with underwater gliders: Adapting sampling resolution[J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(5): 714-741.
- [30] Leonard N E, Paley D A, Lekien F. Collective motion, sensor networks, and ocean sampling[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 48-74.
- [31] Peng K, Yang Y. Leader-following consensus problem with a varying-velocity leader and time-varying delays[J]. *Physica A*, 2009, 388: 193-208.
- [32] Roberson D G. Environmental tracking and formation control for an autonomous underwater vehicle platoon with limited communication[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [33] Paley D A, Leonard N E, Sepulchre R. Collective motion of self-propelled particles: Stabilizing symmetric formations on closed curves[C]// *IEEE: Decision and Control, Proceedings of the 45th IEEE Conference on*. San Diego: IEEE, 2006: 5067-5072.
- [34] Zhang F, Leonard N E. Coordinated patterns of unit speed particles on a closed curve[J]. *Systems Control Letter*, 2007, 56: 397-407.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)