

深海拖曳系统定位技术 及其应用与展望

单 瑞,赵铁虎,梅 赛,高小惠

(国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室,青岛 266071;青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘 要:阐述了海洋地球物理导航和水下声学导航等水下定位的技术方法,着重探讨了水声定位在深拖系统定位中的应用。分别简述了 3 种传统的声学定位系统的优缺点,并详尽介绍了超短基线定位系统,分别举例说明市场上典型产品的性能及应用情况,指出了在水下拖体导航中有待解决的关键技术问题及其发展方向,重点介绍了当前水下拖体定位技术发展的新方向,认为组合式声学导航和融合导航将成为未来的研究热点。

关键词:深拖系统;水下定位;组合式声学导航;融合导航

中图分类号:P733.23 文献标识码:A

众所周知,水深超过 1 000 m 的深海海域约占海洋面积的 92.4%和地球面积的 65.4%,扩大人类生存空间和储备人类生存资源的重要途径之一就是向深海扩展。在开展深海探测之前需要获得深水条件下高分辨率海底地形地貌、地层剖面、海水温度、海水盐度、海水声速等信息资料。近 30 年来,随着人类探索、开发和利用深海资源,深海探测技术也取得了长足的进步^[1-6]。水下运动载体或设备平台,如深海拖曳系统、AUV(Autonomous Underwater Vehicle,自主水下航行器)以及 ROV(Remote Operated Vehicle,水下机器人)等,是开展深海海洋科学研究、勘探开发或军事活动的重要工具。其中,深海拖曳系统主要搭载声学 and 光学仪器设备,用于近海底探测深海地形地貌以及地层特征。对深拖系统所采集的声学、光学图象资料进行精细处理时需要掌握拖体的确切位置和姿态,这些信息都要由水下定

位系统来予以提供。

1 水下定位技术发展概况

水下定位方法大致包括以下几种:地形/地貌匹配导航、重力匹配导航、地磁匹配导航、惯性导航以及水下声学导航。其中,前 4 种方法统称为海洋地球物理导航^[7-13]。

1.1 海洋地球物理导航

海洋地球物理导航是利用海洋磁场、重力场、海洋深度或海底地形的时空分布特征,制作地球物理导航信标,实现对水下载体精确定位的自主导航技术^[14]。目前大量的相关研究工作已经开展。由电子扫描声纳获取的连续帧图像已被广泛用作海底三维环境重建^[15-17],地形匹配跟踪技术则正是利用瞬时水深与预知的海底三维模型进行配准从而实现对运动载体的定位,此技术已被用作 AUV 定位和导航^[18-22];地磁匹配导航则是利用载体航行过程中实测的地磁特征信息序列制作实时图,然后确定实时图与地磁基准图数据的最佳匹配点进而对载体进行导航,此技术也在

收稿日期:2012-02-09

基金项目:国家海洋地质专项(GZH201100308)

作者简介:单 瑞(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事海洋地球物理、定位导航技术研究工作。E-mail:shanrui416@163.com

AUV、ROV 等水下载体定位和导航技术中得到了应用^[23];此外,惯导系统由于导航定位误差会随时间明显累积,故在应用中往往不单独使用,而是借助外部辅助手段实时修正累计误差^[24-29],例如借助重力场数据来改善惯导系统的累积误差^[30]。综上所述,海洋地球物理导航方法往往适用于诸如 AUV 等自带动力的水下潜器导航,而对于不能提供自主动力支持的拖曳系统并不适用。

1.2 水下声学导航

声波在海水中能传播数百千米而没有明显的吸收损失,故采用声学原理的定位系统成为目前对水下拖曳体定位和导航的主流技术手段。较之前段所述的海洋地球物理导航技术,声学导航技术要成熟得多,目前已经有大量的成型产品被广泛使用。国外对声学定位系统的研究已有 30 多年的历史,最早的有挪威的 Kongsberg Simrad 公司,该公司已经有一系列成型的产品投入使用。Simrad 公司于 1997 年推出了当时具有世界领先水平的高精度长程超短基线定位系统——Hi-PAP350,其作用距离可达 3 000 m,距离测量精度优于 20 cm;该公司随后又推出了 HiPAP500,其作用水深达 4 000 m,测距精度优于 20 cm。目前这 2 款仪器已经分别升级为 HiPAP352 和 Hi-PAP501。我国“海洋六号”调查船搭载的是该公司生产的 HiPAP100 定位系统,目前该产品已经升级为 HiPAP101,其工作水深可达 1 万 m,测距精度优于 50 cm,是世界上唯一工作水深可达 1 万 m 以上的长程超短基线定位系统。另外,法国 Posidonia6000 长程超短基线定位系统也比较具有代表性,其工作水深为 6000m,最大作用距离可达 8 000 m,在 6 000 m 水深 30 度开角范围内,其测距精度可达 0.5%^[31],这套系统已成功搭载在我国“大洋一号”调查船上,并在多次大洋科考任务中起到了重要作用。此外,英国 Sonardyne 公司、澳大利亚 Nautronix 公司以及美国 ORE 公司也有相关声学定位系统产品。国内方面也有相关单位在声学定位系统研制方面做了大量工作,如中科院声学所、厦门大学、6971 厂、国家海洋局海洋技术中心、中船重工 702 所、东南大学、哈尔滨工程大学等单位在声学定位技术领域都进行过

广泛研究^[32]。

2 水声定位系统分类及应用

声学导航系统都有多个基元(接收器或应答器)组成,基元间的连线称为基线。根据基线的长度可以分为长基线定位系统(Long Baseline,简称 LBL)、短基线定位系统(Short Baseline,简称 SBL)和超短基线定位系统(Super/Ultra Short Baseline,简称 SSBL/USBL)3 种类型。这 3 种定位系统在实际作业中有着各自的优缺点,具体分类如表 1 所示。

表 1 声学定位系统分类及特点

Table 1 Classification and characteristics of the acoustic positioning system

系统类型	基线长度	优点	缺点
长基线 (LBL)	100~6 000 m	定位精度高; 多余观测值数量增加; 作业范围广	系统复杂、操作繁琐; 布放、校准、回收耗时耗力; 深水使用时数据更新率低
短基线 (SBL)	20~50 m	无需布设海底应答器; 距离测量精度高; 多余观测值数量增加	水听器安装繁琐; 易受船体高噪声区影响; 校准难; 精度依赖外围设备
超短基线 (SSBL/USBL)	<10 cm	成本低、操作简便; 无需布设海底应答器; 安装灵活; 测距精度高	安装校准难; 精度依赖外围设备

声学定位系统的作用距离和精度与工作频率有关,一般情况下频率越高精度越高,但作用距离却随之变短。表 2 为根据水下声波传播特性划定的声学定位系统工作频率和作用距离的关系。

表 2 水声系统频率波段与作用距离(据文献[33]修改)

Table 2 Frequency bands and working distance of acoustic system(modified from reference [33])

频率分类	频率范围 /kHz	作用距离 /km
低频 (Low Frequency)	8~16	>10
中频 (Medium Frequency)	18~36	2~3
高频 (High Frequency)	30~60	1.5 左右
超高频 (Ultra High Frequency)	50~110	<1
甚高频 (Very High Frequency)	200~300	<0.1

低频波段适用于全海深水域,如 Kongsberg Simrad 公司的 HiPAP101,其工作频率为 13~15.5 kHz,作用距离为 10 000 m;OCEANO Technologies 公司的产品 POSIDONIA6000,频率为 16 kHz,作用距离 6 000 m。中频波段适用于水深不超过 4 000 m 的水域,如 Kongsberg Simrad 公司的 HiPAP351、HiPAP501、HPR300 和 HPR 400 等产品的工作频率均为中频波段;Sonardyne 公司的 USBL 产品工作频率为 21~30 kHz^[31],也属于中频波段的范畴。

声学定位技术是国民经济建设和国防建设的基本技术,具有广泛的用途。各声学定位系统应用情况大致如表 3 所示,不难看出,超短基线定位系统应用领域最为广泛。

表 3 声学定位系统应用领域

Table 3 The application of acoustic positioning system

应用领域	类型			
	USBL	SBL	LBL	组合系统
油气开发、路由勘察	✓	✓	✓	✓
深海矿产资源调查	✓	✓		✓
军事应用	✓	✓	✓	✓
科学研究	✓	✓	✓	✓
动力定位	✓	✓		✓
水下考古	✓			

3 USBL 定位原理

一套完整的超短基线定位系统除了声学单元外还需要诸多外部辅助设备,系统一般由母船上的主控系统、船底定位声元基阵(换能器)、水下定位信标(应答器)以及外部设备(GPS、罗经、MRU 以及声速剖面仪等)等构成。船底定位声元基阵一般由 2 对相互正交的水听器和 1 个发射换能器组成,基阵孔径为几厘米至几十厘米。通过测量应答器与换能器各声元之间的距离,同时记录声脉冲到达应答器的相位差,采用交会方式即可得到应答器在船体坐标系下的坐标位置。母船的地理位置由 GPS 予以确定,通过建立船体坐标系与 WGS-84 坐标系间的坐标转换关系即可获得应答器的绝对地理位置。超短基线系统组成及工作原理如图 1 所示。

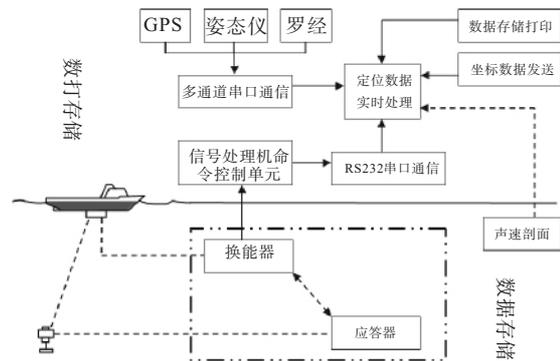


图 1 超短基线定位系统组成及工作原理

Fig. 1 The components and working principle of USBL positioning system

根据船载部分与水下应答器之间的交联方式,系统有声学应答、电信号触发和同步钟等 3 种方式,具体工作原理如图 2 所示。

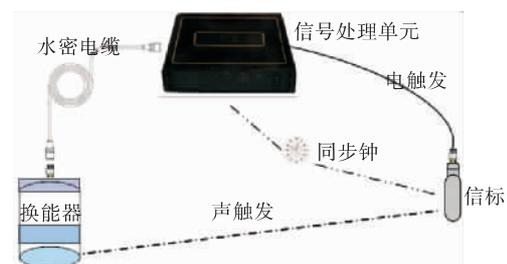


图 2 超短基线船载部分与应答器交联方式示意图

Fig. 2 The cross-link of USBL shipboard parts with transponder

4 深拖系统定位技术新发展

由于海洋环境的复杂性和随机性,导致单一的定位技术不能满足深拖系统对定位和导航的精度要求,因此,组合式声学导航系统和融合导航技术应运而生。

4.1 组合式声学定位系统

组合式声学定位系统将单一定位与导航系统的优点组合在一起,提高了系统定位导航精度、拓展了声学定位系统应用范围。目前的应用主要是 3 种声学定位系统的不同组合,例如 L/USBL、L/SBL、S/USBL、L/SBL/USBL 等,其中,

L/USBL 组合系统将长基线定位系统和超短基线定位系统的优势有机地结合到一起,既保证了系统的定位精度独立于工作水深,又兼有超短基线定位系统操作简便的特点,组合系统能够实现载体连续的、高精度的导航定位,且作业范围进一步加大。Simrad 的 HPR418 和 Nautronix 的 RS916 属于这类系统,在海底设置 3~4 个声标的情况下,其高频系统定位精度 $<1\text{ m}$,低频系统定位精度 $2\sim 5\text{ m}$ ^[34]。

4.2 融合导航技术

除了上述 3 种声学定位系统的不同组合之外,融合导航技术也是现在研究的热点,主要有声学定位系统与 GPS(全球定位系统)、MRU(姿态传感器)、DVL(声学多普勒计程仪)、INS(惯性导航系统)以及 COMPASS(罗经)等的融合导航。

GPS 与声学定位系统的融合多为与 USBL 系统的组合,GPS 系统用以提供母船精确的位置,姿态传感器(MRU)用以测定母船姿态,USBL 则用以测定拖体与母船间多条基线的距离,通过后方交汇的方式得到拖体相对母船的精确位置,通过坐标转换即可获得拖体的绝对地理位置。两者之间的组合还有另外一种形式,即水下 GPS 系统(Under water GPS)。水下 GPS 系统包括 GPS 智能浮标、控制站及水下应答器,浮标上部搭载差分 GPS、下部挂接水听器,通过水面天线与控制系统链接,应答器置于水下拖体上,此系统工作原理类似于 GPS 系统定位原理,即将智能浮标等效为 GPS 卫星,利用差分 GPS 精确测定浮标的位置,从而得到水下目标的精确位置。

INS 可以提供载体高精度姿态数据,但若单独使用会出现误差累积的现象,即系统漂移。DVL 可提供载体运动的速度,Compass 可提供准确的方位信息,两者可用来控制 INS 的系统漂移,从而提高系统的定位精度。INS 和 DVL 可提高定位的相对精度,将这 2 套系统分别与声学定位系统有机融合,即可将各自优点有效的发挥,进而大大提高定位精度。目前,法国 ixsea 公司的产品 GAPS 已经成功将 INS 与声学定位单元结合在了一起,该产品在实际作业中免去了复杂的校准工作,从而提高了作业效率。

5 总结与展望

水下高精度的导航定位是进行海洋开发和研究工作的首要任务。目前,声学定位是水下拖体导航定位的主流技术手段,其中,USBL 以其灵活性等优点又发挥着至关重要的作用。随着对海洋研究开发工作的深入开展,下一步的工作重心必将走向大洋深处,所采用的研究手段会越来越多,为适应新形式的挑战,水下定位技术也应不断地创新改进。相对于单一定位与导航系统通常不能单独进行定位导航的缺陷,组合式声学导航、融合导航技术集中了多种单一导航系统的优点,可以实现更广义上的和更高精度的水下导航,将成为水下拖体定位技术发展的新趋势。

参考文献:

- [1] Talukder A R, Bialas J, Klaeschen D, et al. High-resolution, deep tow, multichannel seismic and sidescan sonar survey of submarine mounds and associated BSR off Nicaragua pacific margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 241:33-43.
- [2] Marsset T, Marrest B, Ker S, et al. High and very high resolution deep-towed seismic system; Performance and examples from deep water geohazard studies [J]. *Deep-Sea Research I*, 2010, 57:628-637.
- [3] Etiope G, Savini A, Bue N L, et al. Deep-sea survey for the detection of methane at the "Santa Mariadi Leuca" cold-water coral mounds (Ionian Sea, South Italy)[J]. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57:431-440.
- [4] Petersen C J, Klauke I, Weinrebe W, et al. Fluid seepage and mound formation offshore Costa Rica revealed by deep-towed sidescan sonar and sub-bottom profiler data [J]. *Marine Geology*, 2009, 266: 172-181.
- [5] 赵铁虎, 张训华, 冯 京. 海底油气渗漏浅表层声学探测技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(1):149-156.
- [6] 赵铁虎, 张训华, 王修田, 等. 南黄海盆地北部拗陷海底油气渗漏的声学探测[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(2):195-199.
- [7] 袁会昌, 刘光斌. 地形辅助导航系统的关键技术[J]. *现代电子技术*, 2002, 1(132): 75-77.
- [8] 徐文耀, 魏自刚, 夏国辉. 2000 年中国地区地磁场长期变化的区域特征[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 551-560.
- [9] 高金田, 安振昌, 顾左文, 等. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1):56-62.
- [10] 王亶文. 在地磁学与地球重力学中的球谱分析[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1):211-213.
- [11] 王亶文. IGRF 在地磁研究中的应用[J]. *地球物理学进*

- 展, 2005, 20(2):558-561.
- [12] 王亶文. 二十世纪的地球偶极子磁场[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1):52-55.
- [13] 高金田, 安振昌, 顾左文, 等. 用曲面 Spline 方法表示 1900—1936 年中国(部分地区)地磁场及其长期变化的分布[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):398-407.
- [14] 彭富清, 霍立业. 海洋地球物理导航[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3):759-764.
- [15] Guo J, Gheng S, Liu T. AUV obstacle avoidance and navigation using image sequences of a sector scanning sonar[C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 1998:223-227.
- [16] Liu T, Schmidt H. Concurrent navigation and sea bottom targets detection using acoustic sensors on AUV[C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 2003(5):2 404-2 409.
- [17] Ruiz T I, Petillot Y, Lane D M. Improved AUV navigation using side-scan sonar [C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 2003(3): 1 261-1 268.
- [18] Sistiaga M, Opderbecke J, Aldon M. Depth image matching for underwater vehicle navigation [C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 1999: 624-629.
- [19] Strauss O, Comby F, Aldon M J. Multibeam sonar image matching for terra in-based under water navigation[C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 1999: 882-887.
- [20] Nygren I, Jansson M. Robust terra in navigation with the correlation method for high position accuracy [C]// Proceedings of IEEE, Oceans, 2003(2): 1 269-1 277.
- [21] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [22] Johnson A E, Hebert M. Seafloor map generation for autonomous under water vehicle navigation [J]. Autonomous Robots, 1996(3): 145-168.
- [23] Bishop G C. Gravitational field maps and navigational errors[J]. IEEE. Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 726-737.
- [24] 彭富清. 地磁模型与地磁导航[J]. 海洋测绘, 2006, 26(2): 73-75.
- [25] 郑梓桢, 刘德耀. 船用惯性导航系统海上实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [26] 周永余, 许江宁, 高敬东. 舰船导航系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [27] 许文耀. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [28] Rice H, Mendelsohn L, Robert A R, et al. Next generation marine precision navigation system [C]// IEEE. Position Location and Navigation Symposium. 2000: 200-205.
- [29] Eugene M W. A priori and real time use of a gravity gradiometer to improve inertial navigation system accuracy [D]. Stanford: Stanford University, 1982.
- [30] Archibald A, James B. Two novel approaches to navigation using the Earths gravity and magnetic fields [D]. Buffalo, State University of New York. 1993.
- [31] 吴永亭, 周兴华, 杨 龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(4):18-21.
- [32] 喻 敏. 长程超短基线定位系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学. 2006.
- [33] 田 坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [34] 金翔龙. 海洋地球物理技术的发展[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(1):6-13.

POSITIONING TECHNOLOGY FOR DEEP TOW SYSTEM: APPLICATION AND PERSPECTIVE

SHAN Rui, ZHAO Tiehu, MEI Sai, GAO Xiaohui

(Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the review of the methods for geophysical investigation and acoustic navigation, we discussed the applications of acoustic positioning system to deep tow system in this paper. The advantages and disadvantages of three traditional acoustic positioning systems, especially the USBL system, are summarized respectively. Some typical products of USBL are listed and main features and their performance and application introduced. Through the discussion of the key technical problems, we proposed in this paper that the combined acoustic navigation and integrated navigation will become a research hotspot in the future.

Key words: deep-tow system; underwater positioning; combined acoustic navigation; integrated navigation