

深海自治式水下航行器组合导航/定位 误差分析与建模

刘 起,邵 帅*,朱友生

(中海油田服务股份有限公司 物探事业部, 天津 300459)

摘 要:在深海海洋油气资源勘探开发中,导航定位数据是各个测量参数的基准信息,测量载体的定位精度在一定程度上决定了其搭载的传感器探测精度。以 COSL Explorer 型深水自治式水下航行器为研究对象,分析其组合导航/定位系统的特点,得出包含超短基线水下定位、多普勒计程仪与惯性系统组合导航、海水中声速影响的深水自治式水下航行器导航/定位误差模型,并对该模型参数进行等误差剖面分析,得到该载体导航/定位误差分布趋势。并针对不同航速、不同定位斜距、不同时间间隔下的组合导航定位误差进行预报,为自主航行器在大海深、大范围工程勘察测量时参数设置提供理论依据。

关键词:水下自主航行器;组合导航;水下定位;误差分析

中图分类号:P24

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)02-0073-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.02.008

水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)是一种自主控制航行的水下载体,在海洋探索和海洋资源开发方面具有广泛的应用前景^[1-2]。AUV 向深海、大航程方面发展有诸多影响因素^[3],其中导航定位精度是其主要限制因素之一。在深海海洋资源勘探中,导航定位数据是测量参数的基准信息,因此 AUV 的定位精度在一定程度上决定了其搭载的传感器探测精度^[4]。

目前,AUV 导航方法主要有航位推算与惯性导航、声学导航、地球物理导航和组合导航^[5]。其中组合导航,是在获取多种传感器测量数据的基础上,通过数据融合对测量的数据处理后进行导航,不但能提高导航的精度和准确性,还能在某种传感器失效的时间内进行继续导航。它包括高精度的惯性导航系统、多普勒速度计程仪和数据融合技术,如丹麦 Maridan A/S 公司和美国 Kearfott 公司联合研制的 MARPOS 多普勒/惯性水下定位系统,在距离海底深度不超过 200 m 的条件下,其导航精度可达到航程的 0.03%^[6]。

本文以中海油田服务股份有限公司(China Oilfield Service Ltd., COSL)面向海底地形地貌调查的 COSL Explorer 3000 AUV 为研究对象,分析研究该 AUV 导航/定位系统组成特点,并针对深水工程勘察作业具体情况,建立深水 AUV 组合导航的误差分析模型,为深水 AUV 在不同深度海域作业时控制参数的优化调整提供参考依据。

1 COSL Explorer AUV 导航/定位系统介绍

本文研究的 COSL Explorer AUV 采用组合导航与超短基线定位相结合的方式,本导航系统由高精度光纤惯导 PHINS-III (PHotonic Inertial Navigation System 第三代)为核心组成,包括第三代高精度光纤惯

收稿日期:2017-12-08

资助项目:国家科技重大专项课题资助项目——深水工程勘察船及配套技术(2008ZX05027-004)

作者简介:刘 起(1980-),男,工程师,主要从事海洋工程勘察方面研究。E-mail: liuqi2@cosl.com.cn

* 通讯作者:邵 帅(1989-),男,工程师,硕士,主要从事海洋工程勘察方面研究。E-mail: 35047shaoshuai@163.com

(李 燕 编辑)

导 PHINS-Ⅲ、多普勒速度计程仪 DVL(Doppler Velocity Log)、GPS(Global Positioning System)模块、深度压力传感器和超短基线定位系统 DGPS-USBL(Differential Global Positioning System-Ultra Short Base Line Positioning System)。其中 PHINS-Ⅲ内置加速度计和光纤罗经,可通过内部推算实时向 AUV 航行器提供位置、航向和姿态信息,多普勒计程仪向 AUV 航行器提供其与海底的相对速度及距海底高度,深度压力传感器航行器向 AUV 提供其距海平面的深度信息。在 AUV 下潜之前, GPS 模块向航行器提供位于水面时的经纬度位置信息。在 AUV 下潜之后,超短基线定位系统 DGPS-USBL 对 AUV 航行器进行水下定位,提供与工作母船的相对位置和绝对位置信息^[7], COSL Explorer AUV 搭载的传感器布局如图 1 所示。

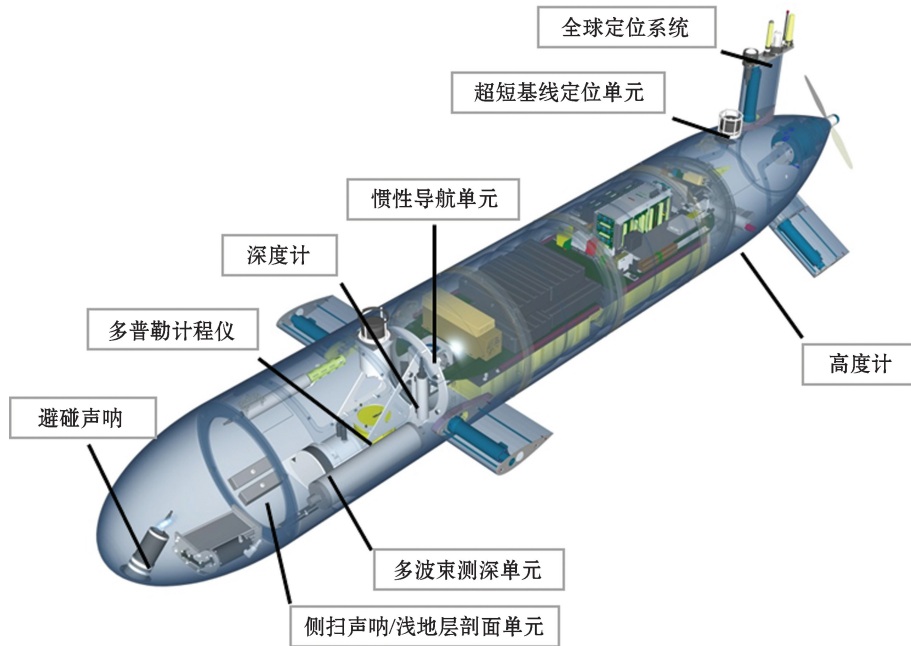


图 1 Explorer AUV 传感器布局

Fig.1 Layout of the sensors on the explorer AUV

COSL Explore AUV 导航/定位误差主要来源有惯性导航系统所产生的漂移误差、多普勒计程仪获得的相对于海底的速度误差及距海底高度误差、深度压力传感器测量的水深误差、水面 GPS 定位误差和超短基线定位误差。此外,由于 COSL Explore AUV 额定工作水深为 3 000 m,在进行水声定位过程中需考虑海水中声速传播影响。

当 COSL Explore AUV 布放至水面时, AUV 接收初始 GPS 信息, PHINS-Ⅲ惯性导航系统开始校准;校准完成后 PHINS 进入正常工作模式,此时可以进行高精度自主导航。

当 AUV 下潜后,其位于艏翼上的 GPS 天线由于受水体阻隔,无法接收 GPS 信号,故 AUV 水下导航/定位误差分析中不考虑 GPS 产生的误差。

COSL Explorer AUV 组合导航定位误差的主要误差来源有:1)PHINS 高精度光纤惯导产生的漂移误差;2)多普勒速度计程仪产生的误差;3)GPS 定位误差;4)深度压力传感器测量的水深误差;5)GAPS 超短基线定位误差。

此外,由于 COSL Explorer AUV 最大工作深度为 3 000 m,必须考虑海水中声速的影响^[8]。

在 COSL Explorer AUV 导航定位系统中, GPS 定位误差来源于信息提供方,该误差不可控,故在误差分析中不考虑其产生的误差。此外, AUV 导航定位系统中的深度压力传感器精度为量程的 0.01%,分辨率为量程的 1×10^{-8} ,故其引起的定位误差可以忽略不计。

综上所述,故在实际工作状态下的主要误差源:1)GAPS 水下定位误差;2)GAPS 定位时间间隔内,DVL 与 PHINS 组合导航系统产生的误差;3)海水中声速的影响。

1.1 GAPS 超短基线水下定位误差

COSL Explorer AUV 声学定位系统选用超短基线定位系统(Global Acoustic Positioning System, GAPS)。GAPS 对 AUV 的距离定位(斜距 L , 图 2)相对较准,能够达到 0.2 m,即 GAPS 每次都能将 AUV 定位在半径误差为 0.2 m 的球面范围内,即一个比较准确的球面上且球面半径误差为 0.2 m^[9]。此外,AUV 自身携带的深度压力传感器测深精度可达 0.01%。因此可以认为 GAPS 对 AUV 定位时,定位误差在一个已知的球面上,此时误差的产生主要由偏角 ϕ_X, ϕ_Y (斜距与 X 轴、 Y 轴的夹角)的测量误差造成,GAPS 对水下声学信标的角度测量精度 $\Delta\phi = 0.12^\circ$ 。

在不考虑斜距 L 误差的前提下,则 GAPS 对 AUV 的定位误差在一个空间中一个已知的球体范围内。此已知球体如图 2 所示,XYZ 空间中定位误差在球体中的表示如下:

$$x^2 + y^2 + z^2 = L^2, \quad (1)$$

$$L \cos \phi_X \cdot (x - L \cdot \cos \Delta\phi \cdot \cos \phi_X) + L \cos \phi_Y \cdot (y - L \cdot \cos \Delta\phi \cdot \cos \phi_Y) + L \cos \phi_Z \cdot (z - L \cdot \cos \Delta\phi \cdot \cos \phi_Z) = 0, \quad (2)$$

式中: $\cos^2 \phi_X + \cos^2 \phi_Y + \cos^2 \phi_Z = 1$; $\phi_X, \phi_Y \in [0, 90^\circ]$; $\Delta\phi = 0.12^\circ$ 。

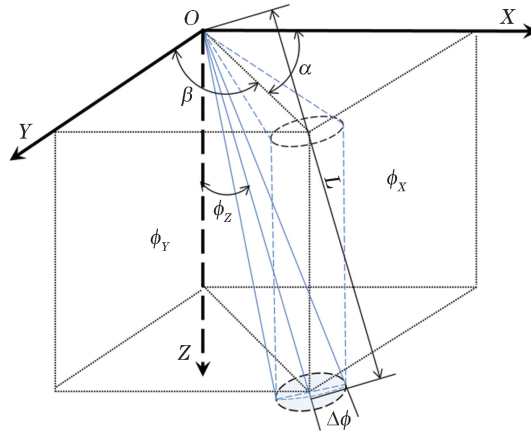


图 2 GAPS 对 AUV 定位误差模型分析图

Fig.2 Error model analysis of the AUV positioning by GAPS

式(1)与式(2)为 GAPS 对 AUV 在空间中的定位误差范围边界。此圆周在 XOY 平面内的投影为

$$\sin^2 \phi_Y \cdot x^2 + \sin^2 \phi_X \cdot y^2 + 2 \cos \phi_X \cos \phi_Y \cdot xy - 2L \cdot \cos \Delta\phi \cdot \cos \phi_X \cdot x - 2L \cdot \cos \Delta\phi \cos \phi_Y \cdot y + L^2 \cdot \cos^2 \Delta\phi - L^2 \cdot \cos^2 \phi_Z = 0. \quad (3)$$

显然,式(3)为一般椭圆方程,其长、短半轴与焦点的位置是 ϕ_X, ϕ_Y, ϕ_Z 的函数。

式(3)表达的曲线上任意两点之间距离的最大值即为 GAPS 对 AUV 定位的最大误差 d :

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (4)$$

式中, (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 为椭圆上的任意两点。

易求得定位球面在 XOY 平面上的投影区域的最大值为式(3)描述的椭圆的长轴,即: $d_{\max} = R = L \sin \Delta\phi$ 。故 GAPS 可以将 AUV 定位在以 $d_{\max}$ 为半径的圆内。

1.2 DVL 与 PHINS 组合导航系统误差

COSL Explorer AUV 作业前需对 PHINS 系统进行水面校准,根据 PHINS 与 DVL 组合导航系统的参数特性和厂家提供的导航误差报告,AUV 在航行航程 $D_{is}=2\text{ km}$ 时,PHINS 与 DVL 组合导航误差 ΔE 优于 9.5 m 。由此可得出 DVL 与 PHINS 组合导航的漂移误差 ΔE 与航程 D_{is} 的误差系数 $k=\Delta E/D_{is}$ 。

1.3 海水中声速的影响产生的误差

COSL Explorer AUV 在进行海底地形地貌探测时最大工作深度为 $3\ 000\text{ m}$,AUV 距海底不超过 40 m 。多普勒速度计程仪工作时可以忽略海水中声速的影响,GAPS 对 AUV 定位时,海水中声速产生的时延影响是不能忽略的。

2 AUV 组合导航定位误差模型

AUV 的定位误差主要包括 GAPS 对 AUV 的定位误差,GAPS 定位时间间隔内 AUV 自身惯性导航系统产生的定位误差,以及 AUV 定位时的声速影响。故影响 AUV 导航定位精度误差的因素:1)GAPS 定位误差,即 $d_{\max}=R=L\sin\Delta\phi$;2)GAPS 对 AUV 进行航位修正时间间隔内 DVL 与 PHINS 组合导航误差;3)GAPS 对 AUV 进行航位修正时,海水中声速($1\ 500\text{ m/s}$)的影响。上述 3 个因素对 AUV 导航/定位误差影响叠加^[5],则得出 GAPS,DVL 与 PHINS 的导航定位总误差表达式为

$$D=vT\cdot k+L\cdot\sin\Delta\phi+v\cdot\frac{L}{1\ 500}, \quad (5)$$

式中, v 为 AUV 航速, $0\text{ m/s}\leq v\leq 2\text{ m/s}$; T 满足 $0\text{ s}\leq T\leq 1\ 800\text{ s}$; k 为 DVL 与 PHINS 组合导航误差系数; L 为斜距; $\Delta\phi$ 为偏角。

3 误差分析结果与误差预测

根据式(5),在考虑声速影响的情况下,分别以 AUV 速度 v 、GAPS 定位时间间隔 T 和 AUV 与 GAPS 之间斜距 L 为坐标,颜色为总定位误差的大小,绘制 AUV 导航定位等误差剖面图,如图 3 所示。

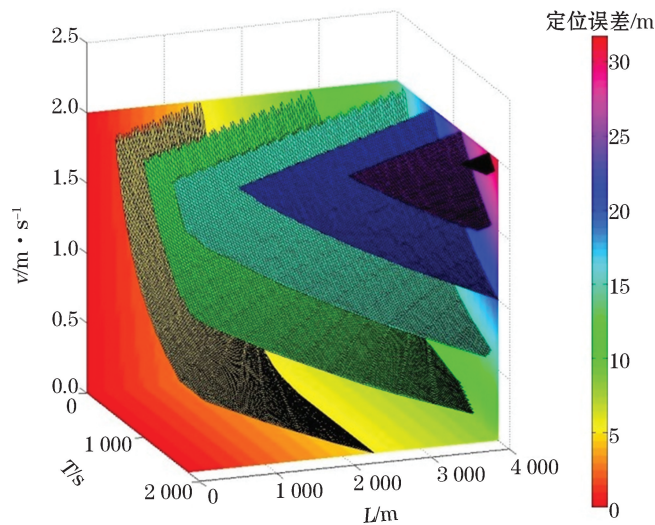


图3 AUV 导航定位误差剖面图

Fig.3 Equal error profile of navigation and positioning of AUV

图 3 中颜色代表 AUV 导航/定位误差,随着 v, T, L 三个参数的增大, AUV 导航定位误差趋势呈非线性增大。1) 当航行速度 v 和时间间隔 T 一定时, 总定位误差随定位斜距 L 增大而增大; 2) 当航行速度 v 和定位斜距 L 一定时, 定位误差随时间间隔 T 增大而增大; 3) 当时间间隔 T 和定位斜距 L 一定时, 定位误差随航行速度 v 增大而增大。根据式 5, 结合图 3 可以直观得出 v, T, L 三个参数对定位误差增大的影响权重不同。图 3 中黄色、绿色、青色、蓝色、紫色和洋红色剖面分别代表了 AUV 作业时导航定位误差分别在 5, 10, 15, 20, 25 和 30 m 的不同精度下, GAPS 定位时间间隔 T , GAPS 与 AUV 距离 L 和 AUV 的航速之间的参数变化范围。

3.1 定导航精度 T, v, L 分析

参照在工程应用中对 AUV 定位精度要求, 在导航/定位精度为 10 和 15 m 时, 对深水 AUV 组合导航/定位误差剖面分析。

图 4 和图 5 分别为在定位误差 10 和 15 m, 误差精度为 0.1 m, 速度梯度为 0.2 m/s 时 v, T, L 的变化。结合式(5)可以得出在导航定位精度一定的情况下, 定位时间间隔 T , AUV 与 GAPS 之间斜距 L , AUV 航行速度 v , 3 个参数在工程应用中的选取范围。

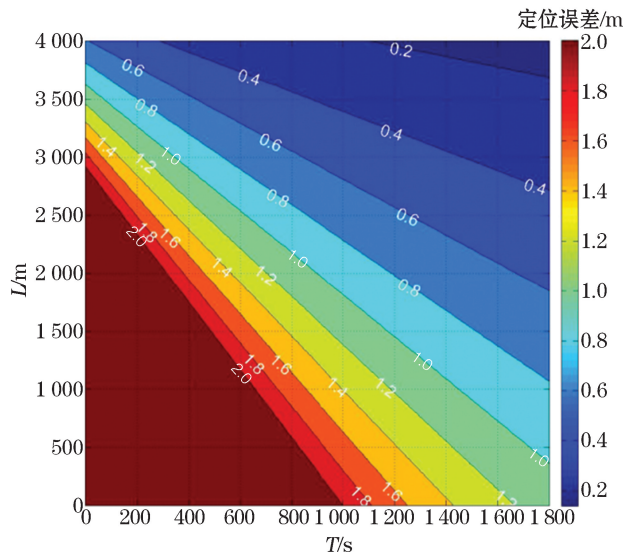
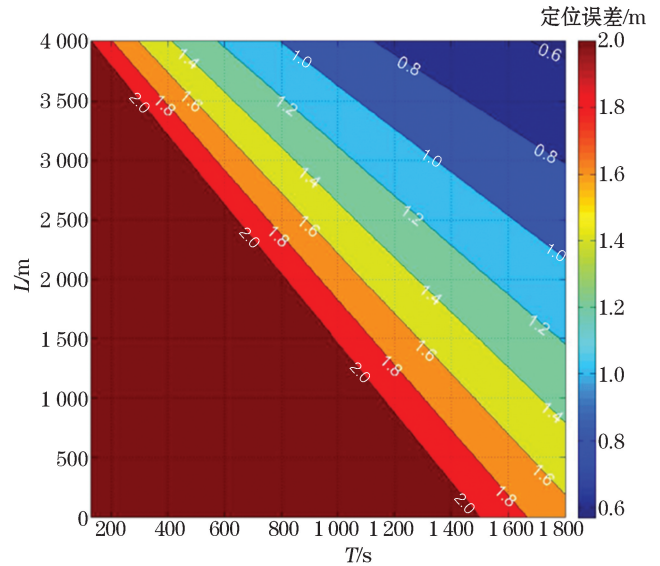


图 4 10 m 定位误差 vTL 分析图

Fig.4 The vTL analysis of 10 m positioning error



注: T 初始值为 130 s, 精度 0.1 m

图 5 15 m 定位误差 vTL 分析图

Fig.5 The vTL analysis of 15 m positioning error

3.2 定位斜距 L 下, 定导航精度、 v, T 分析

在 AUV 实际工作过程中, 需要母船对其实时跟踪, 以便必要时进行手动控制操作, 布置任务。为此分析 AUV 与 GAPS 间定位距离 L 分别等于 3 000 m 和 2 000 m 时, 误差、速度 v 和时间 T 之间的关系。参数时间 T 和 v 变化范围如图 6, 图 7 所示, 图中的等高线及颜色变化表示 AUV 的导航定位误差。

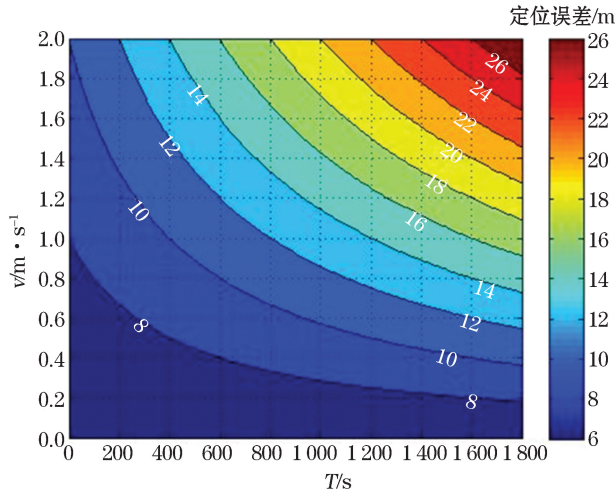
图 6 $L=3\ 000\ \text{m}$ 时定位精度分析图

Fig.6 Analysis of positioning accuracy
in the case of $L=3\ 000\ \text{m}$

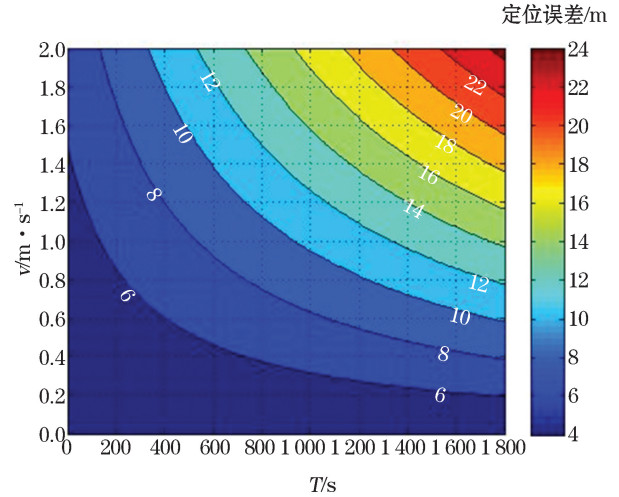
图 7 $L=2\ 000\ \text{m}$ 时定位精度分析图

Fig.7 Analysis of positioning accuracy
in the case of $L=2\ 000\ \text{m}$

3.3 误差预测

定位精度为 $9.5\ \text{m}$, $L=3\ 000\ \text{m}$ 和 $L=2\ 000\ \text{m}$ 时, AUV 航速与 GAPS 定位时间间隔之间的关系见表 1, 表 2。

表 1 $L=3\ 000\ \text{m}$ 时 AUV 航速 v 与 GAPS 定位时间间隔 T
Table 1 Relationship between the AUV speed and
the interval of GAPS positioning time in the case
of $L=3\ 000\ \text{m}$

$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T/s
0.5	887
1.0	243
1.5	28

表 2 $L=2\ 000\ \text{m}$ 时 AUV 航速 v 与 GAPS 定位时间间隔 T
Table 2 Relationship between the AUV speed and the
interval of GAPS positioning time in the case
of $L=2\ 000\ \text{m}$

$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T/s
1.0	796
1.5	442
2.0	265
2.5	158
3.0	87
3.5	37

4 结 语

通过建立深水 AUV 组合导航系统的定位误差模型,对导航定位误差剖面分析,导出 AUV 速度 v , GAPS 定位时间间隔 T , AUV 与 GAPS 间斜距 L 与导航定位误差之间的非线性关系,即随着 v 、 T 、 L 增大,深水 AUV 导航定位误差增大,且 3 个参数对定位误差的影响程度不同。通过定导航精度, v 、 T 、 L 分析和定斜距 L , 定导航精度, v 、 T 分析,为深水 AUV 工程作业参数设置提供理论依据参考。

通过以上分析,在深水 AUV 工程作业过程中,可通过调节工作母船位置,在保证作业安全的情况下,使母船尽量位于 AUV 的正上方,使得斜距 L 为最小,即接近作业区域水深值。此外,工作母船位于 AUV 正

上方时,有利于提高 GAPS 对 AUV 水声定位时声学信号的信噪比,以提高定位稳定度。

参考文献(References):

- [1] HUI S T. Research on technology development of autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Technology, 2001, 20(4):11-17. 惠绍棠. 水下自航式海洋观测平台技术发展研究[J]. 海洋技术学报, 2001, 20(4):11-17.
- [2] TANG M Q, BI Y L. Technical comparison of deep-tow and AUV in deep water route survey[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(6): 79-82. 汤民强, 毕永良. 深海路由勘察中深拖与 AUV 的技术对比[J]. 海洋测绘, 2008, 28(6): 79-82.
- [3] DUAN B S. Wet modal analysis of deepwater AUV system[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(4): 51-57. 段宝生. 深水 AUV 系统湿模态分析[J]. 海岸工程, 2016, 35(4): 51-57.
- [4] WANG Y H, SHAO S, WANG S X, et al. Measurement error analysis of multibeam echosounder system mounted on the deep-sea autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2014, 91: 111-121.
- [5] ZHANG H M. Underwater navigation and positioning technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press. 张红梅. 水下导航定位技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [6] LI J, XU D M, SONG B W, et al. Development and prospect of AUV navigation technology[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(3): 70-77. 李俊, 徐德民, 宋保维, 等. 自主式水下潜器导航技术发展现状与展望[J]. 中国造船, 2004, 45(3): 70-77.
- [7] AUDRIC M. GAPS, a new concept for USBL [Global Acoustic Positioning System for Ultra Short Base Line positioning][C]//Oceans '04 MTS/IEEE TECHNO-OCEAN. Japan: IEEE, 2004, 2:786-788.
- [8] WANG X F. New application of federated filter in INS/GPS/DVL integrated navigation system for AUV[J]. Torpedo Technology, 2010, 18(4): 287-290. 王小峰. 水下航行器 INS/GPS/DVL 组合导航方法[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(4): 287-290.
- [9] NAPOLITANO F, CRETOLLIER F, PELLETIER H. GAPS, combined USBL+INS+GPS tracking system for fast deployable & high accuracy multiple target positioning[C]//Oceans. Europe: IEEE, 2005, 2: 1415-1420.

Error Analysis and Modeling of Integrated Navigation/Positioning of Deep-Sea Autonomous Underwater Vehicle

LIU Qi, SHAO Shuai, ZHU You-sheng

(Geophysical, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: In deep-sea oil and gas exploration and development, navigation and positioning data are the baseline information of various measurement parameters. The positioning accuracy of a carrier for underwater measurements determines, to a certain extent, the detection accuracy of the sensors it carries. The characteristics of the integrated navigation and positioning system of COSL Explorer deep-sea autonomous underwater vehicle are analyzed, and a navigation/positioning error model of the AUV is established, which involves the ultra-short baseline underwater positioning, the Doppler Velocity Log, the inertial system and the influence of sound velocity in the seawater. The equal error profile analysis is made of the parameters of this model and the distribution trend of navigation/positioning error is obtained. The errors of the integrated navigation/positioning under the cases of different navigational speeds, different positioning oblique distances and different time intervals are forecasted, thus providing a theoretical basis for the parameter settings of AUV when carrying out large-scale engineering surveys in the deep-sea.

Key words: autonomous underwater vehicle; integrated navigation; underwater positioning; error analysis

Received: December 8, 2017