

SINS/DVL水下组合导航技术发展综述

卢道华^{1,2}, 宋世磊^{1†}, 王 佳¹, 蔡雅轩¹, 沈慧慧¹

(1. 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏科技大学 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 随着对海洋的探索和开发不断深入, 基于捷联惯性导航系统和多普勒计程仪相结合的水下组合导航技术, 近年来在水下无人航行器导航定位得到了广泛应用. 本文简要概述了捷联惯性导航系统/多普勒计程仪(SINS/DVL)组合导航系统的基本架构, 列举了几种被广泛中应用于组合导航系统的信息融合技术. 通过对组合导航技术梳理分析, 总结出近期研究的3个热点问题, 包括初始对准技术、标定技术、鲁棒性技术, 以技术的更新和优化为依托, 详细阐述了3项技术的发展历程. 在总结归纳现有技术和研究成果的基础上, 展望并分析SINS/DVL组合系统将来的研究方向及其面临的挑战. 本文为高精度水下导航技术研究提供有益参考.

关键词: 惯性导航系统; 初始对准; 鲁棒性; 误差标定; 多普勒导航系统

引用格式: 卢道华, 宋世磊, 王佳, 等. SINS/DVL水下组合导航技术发展综述. 控制理论与应用, 2022, 39(7): 1159 – 1170

DOI: 10.7641/CTA.2021.10229

Review on the development of SINS/DVL underwater integrated navigation technology

LU Dao-hua^{1,2}, SONG Shi-lei^{1†}, WANG Jia¹, CAI Ya-xuan¹, SHEN Hui-hui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;

2. Marine Equipment Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

Abstract: With the deepening of the exploration and development of the ocean, the underwater integrated navigation technology based on the combination of strapdown inertial navigation system and Doppler has been widely used in recent years, especially in the navigation and position of UUAV (underwater unmanned aerial vehicles). The basic system architecture of SINS/DVL (strapdown inertial navigation system/doppler velocity log) is introduced in this paper, and several information fusion technologies widely used in the integrated navigation system are listed. Then three hotspot issues are summarized by analysing the integrated navigation technology, including alignment technology, calibration technology and robustness technology. Based on the renewal and optimization of the the integrated navigation technology, the development process of the three technologies is described in detail. Meanwhile, on the basis of summarizing the existing technology and research results, the future research direction and challenges of SINS/DVL are prospected and analyzed. This paper can provide useful reference for the research of high-precision underwater navigation technology.

Key words: inertial navigation system; initial alignment; robustness; error calibration; Doppler navigation systems

Citation: LU Daohua, SONG Shilei, WANG Jia, et al. Review on the development of SINS/DVL underwater integrated navigation technology. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(7): 1159 – 1170

1 引言

海洋的合理开发和利用有着重要的战略和军事意义, 无人航行器是海洋探索的一大利器. 自主导航技术是水下航行器的关键技术之一, 由于全球定位系统(global position system, GPS)并不适用于水下导航, 因此, 捷联惯性导航技术的研究对于水下航行器的高精度工作举足轻重^[1], 隐蔽性好、自主性强的SINS/

DVL成为当前研究的热点. 相较于同类型的综述文献[2–4], 本文着重于对其中关键技术发展和突破进行描写: 首先对SINS/DVL组合导航系统按技术流程进行概述, 其次分析影响组合导航系统精度的3个关键技术(初始对准、误差标定、鲁棒性技术), 最后对该组合导航系统未来的发展热点和发展方向进行展望. 本文的逻辑体系如图1所示.

收稿日期: 2021–03–18; 录用日期: 2021–11–11.

[†]通信作者. E-mail: 1378298539@qq.com; Tel.: +86 17851006080.

本文责任编辑: 施阳.

国家重点研发计划项目(2018YFC0309103)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC0309103).

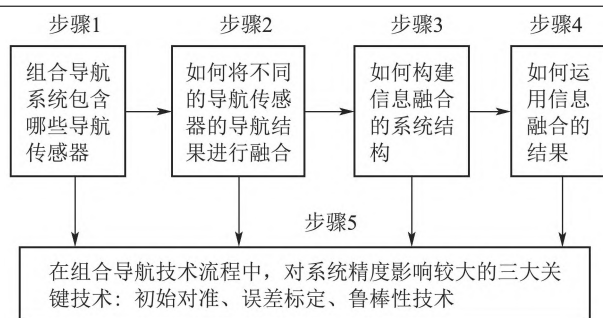


图1 逻辑体系图

Fig. 1 Logic system diagram

2 SINS/DVL组合导航系统概述

2.1 导航系统概述

按照导航原理的不同,水下导航方式可分为3大类:自主导航、地球物理导航、声学导航。1) 惯性导航和航位推算属于自主导航,隐蔽性强、短期精度高、不受外界环境的影响。但惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的导航误差会随时间累加,会影响惯性导航系统的精度^[5]。2) 地形匹配、地磁匹配、重力匹配技术属于地球物理导航,通过水下航行器采集地球物理因素,与事先制作的环境测绘图作对比,获得准确的位置信息,但缺点是需要庞大的先验数据库,具有很高的生成难度和成本。3) 长基线(long base line, LBL)、短基线(short base line, SBL)、超短基线(ultra short baseline, USBL)和多普勒计程仪(Doppler log, DVL)属于声学导航,在水下环境中得到广泛应用^[6]。LBL, SBL, USBL主要区别是基线长度不同,通过在一定海域范围内的海底或海面,安装应答器或信号接收器,根据声信号在水中的传播速度,确定水下航行器距已知信标的距离。但因为信标位置固定,且声信号在水下传输范围有限,影响水下导航的灵活性,同时也容易受复杂的声学环境干扰。相对而言, DVL具有很好的灵活性和自主性,能够提供准确的速度,但却不能提供航向信息^[7]。对水下导航方式的进一步了解可详见文献[4]。

分析上述水下导航技术,任何单一的导航技术都存在缺点和不足。只有将两个及以上的导航技术结合起来,取长补短,向着综合化、智能化、自动化发展,才能满足对于导航精度日益增长的需求。

2.2 捷联惯性导航技术

惯性导航技术包括平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统,相较于前者,捷联惯性导航系统使用方向余弦阵复现导航平台,用数学平台代替机械平台,极大减小了安装所需的空间,且可靠性更高。因此,近年来捷联惯导系统已成为许多自主航行器的研究热点^[8-9]。

捷联惯导系统是一种完全独立的自主导航系统,其加速度计和陀螺仪与航行器固联,分别测量航行器

在载体坐标系的比力信息和相对于惯性坐标系的角速度信息。通过对惯性传感器的参数进行误差补偿、数值积分、坐标变换等一系列导航解算后,输出当地导航坐标系下载体的姿态、速度和位置信息^[10]。捷联惯导系统结构示意图如图2所示。

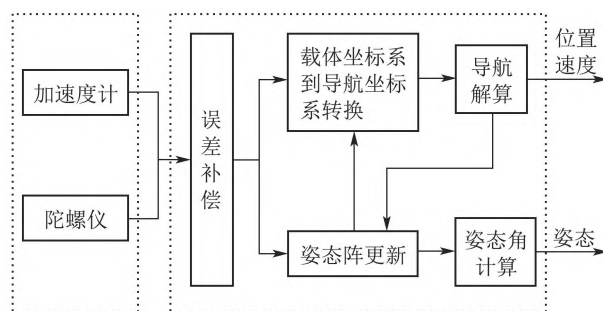


图2 捷联惯导系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strapdown inertial navigation system structure

2.3 多普勒计程仪

多普勒计程仪依据多普勒效应,通过测量发射波和反射波之间的频率变化来获得航行器的运行速度,其工作模式主要分为两种:底跟踪模式和水跟踪模式,一般情况下默认使用性能更好的底跟踪模式,获得航行器相对于海底的速度。当航行器高度超过底跟踪模式的工作范围时, DVL切换至水跟踪模式,得到航行器相对于某一水层的速度,同时必须获得这一水层的流速。因此底跟踪模式比水跟踪模式精度更高^[11]。

多普勒计程仪按发射波束的方向可以分为单波束、双波束、四波束3种,为了测量航行器横向速度,提高测速精度,通常使用四波束配置。图3为四波束多普勒计程仪示意图。

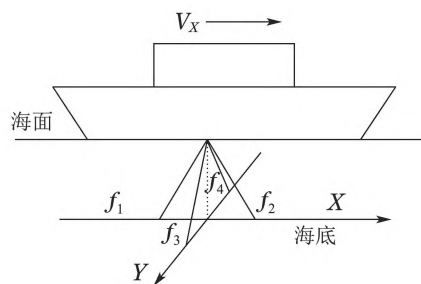


图3 四波束多普勒计程仪示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a four-beam Doppler log

2.4 信息融合

为保证水下导航的高精度,通常需要其他传感器进行辅助定位,如何将不同传感器的信息融合在一起称为信息融合技术,是实现水下组合导航的关键技术之一。信息融合技术应用于水下导航的实例在文献[2]中,已介绍的相当详细,因此本文不再赘述,主要介绍信息融合技术的发展过程。

1705年高斯提出最小二乘法^[12],在此基础上又提出加权最小二乘法、递推最小二乘法,由于没有使用状态向量的统计特性,因此不是最优的。随后从概率密度的角度出发,专家和学者们提出的极大验后估计、极大似然估计、贝叶斯估计^[13],用于故障检测和识别,但计算难度大。1940年N. Wiener提出适用于频域内一维平稳随机过程的维纳滤波^[14]。1960年R. E. Kalman提出卡尔曼滤波^[15],并很快在阿波罗登月计划等工程上得到应用,在组合导航方面得到推广。但由于计算机字长有限,算法中的舍入误差会不断积累,并最终导致误差方差阵失去正定性^[16]。为了解决卡尔曼滤波存在的问题,Potter和Bierman分别提出平方根滤波和UD分解滤波^[17-18]。

然而卡尔曼滤波在线性条件下的高性能,不能满足非线性系统的精度要求。对于非线性系统,扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)的基本思想是将非线性函数进行一阶泰勒级数展开,将其近似为线性系统,在一定程度上能够提高非线性系统下的滤波精度^[19]。但当系统的非线性较强时,仅进行一阶泰勒级数展开,会有较大误差。随后无迹卡尔曼滤波(untraced Kalman filter, UKF)由Julier S等提出^[20],舍弃了将非线性系统近似为线性系统的思想,使用UT (unscented-transfor) 变换,选取一组采样点来近似表示非线性函数,不必进行线性化,不必省略高阶项,因此UKF在非线性的条件下有更好的表现。2009年Simon Haykin和Arasaratnam等人提出了容积卡尔曼滤波器(cubature Kalman filter, CKF)^[21],使用一组基于三阶球面径向容积准则的点,来逼近具有附加高斯噪声的非线性系统的状态均值和协方差。在实际情况下,当噪声不能满足高斯分布且系统为非线性时,粒子滤波(particle filter, PF)具有广泛的适用性,其主要思想是基于蒙特卡罗方法,寻找一组粒子对概率密度函数进行近似,原本滤波的积分运算被粒子样本的均值所代替^[22]。PF的适用范围更广,精度也更高,但运算量也相对较大。

当组合导航的辅助传感器为两个及以上时,以卡尔曼滤波为基础的信息融合算法主要有两种结构形式:集中式卡尔曼滤波和联邦式卡尔曼滤波^[23]。

集中式滤波将所有传感器的信息作为同一状态向量,集中的参与运算,信息利用率高、损失小、融合精度高,但缺点也是很明显:1) 随着传感器数量的增多,状态向量的维数增加,计算量急剧增大,影响导航的实时性;2) 因为所有信息作为同一状态向量参与运算,一旦某一传感器的信息出错,集中式卡尔曼滤波无法及时检测失效传感器并隔离,会影响整个组合导航系统的精度。

联邦滤波通常以惯性导航系统为公共参考系统,通常选取位置传感器、速度传感器、航向传感器,分别

与SINS构成子滤波器,利用信息分配原则来消除不同子滤波器之间的相关性。其优点是计算量小,通过对子系统设置一个阈值,能及时检测到某一传感器的失效数据。联邦滤波器的一般结构图如图4所示。

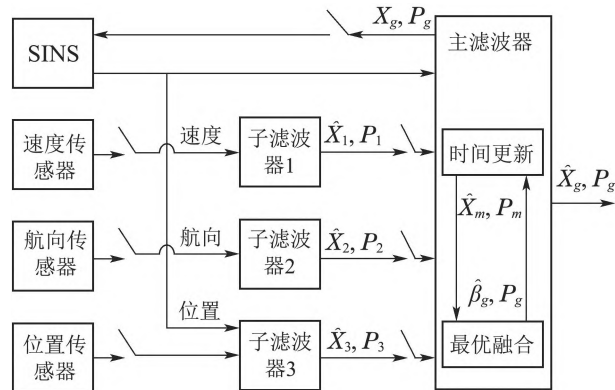


图4 联邦滤波器结构框图

Fig. 4 Federated filter block diagram

子滤波器给出的估计值 \hat{X}_i 和估计误差阵 P_i (i 表示子滤波器的序号),融合后输入主滤波器得到最优估计值 \hat{X}_g 和最优估计误差阵 P_g ,对 \hat{X}_g 和 P_g 进行如下处理后返回给各子滤波器,参与下一步的迭代运算。

$$\hat{X}_i = \hat{X}_g, P_i = \beta_i^{-1} P_g, \quad (1)$$

其中 β_i 称为信息分配系数,根据设置原则不同可将联邦滤波分为不同的模式^[24]:

当 $\beta_m = 0, \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_n = 1/N$ 且不向子滤波器进行信息反馈时,为无反馈模式;当 $\beta_m = 0, \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_n = 1/N$ 同时向子滤波器进行信息反馈,为融合-反馈模式;当 $\beta_m = 1, \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_n = 0$ 时,为零复位模式;当 $\beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_n = \beta_m = 1/(N+1)$ 时,为变比例模式。

2.5 信息融合技术系统结构

系统方程包括状态方程和量测方程,状态方程和量测方程的建立跟所选取的系统物理模型有关,利用SINS输出的速度信息与DVL速度信息的差值,作为信息融合算法的观测量,并选取合适的状态作为系统状态变量,构建卡尔曼滤波的系统结构。

按照状态变量选取的不同,SINS/DVL组合导航系统一般分为间接法和直接法。直接法直接使用速度、位置、姿态信息等作为状态变量,DVL输出的速度参数作为观测量。直接法的系统方程一般是非线性,所需的滤波方法也必须是非线性滤波。间接法以捷联惯导系统的导航参数误差作为系统状态,误差数值一般很小,将系统方程看作一阶线性方程,可直接使用标准卡尔曼滤波,输出导航参数误差的最优估计,反馈并修正捷联惯导系统。

理论上,直接法和间接法都是最优的,其最终导航解算结果是一致的。但在噪声特性复杂的实际环境中,

间接法相较于直接法有更好的适用性,因此工程中应用更多的是间接法。

2.6 校正方式

无论采用间接法还是直接法,卡尔曼滤波输出估计值后,需对系统进行校正。校正方法分为开环法和闭环法。而工程应用广泛的间接法的校正方式分为3种:输出校正、反馈校正、混合校正。

输出校正也称开环法,原理是将滤波估计值反馈给SINS系统,直接对系统输出结果进行校正。其优点是操作方便、实现简单,即使滤波器发生故障也不会对SINS产生直接影响,但也因此不能从本质上解决SINS误差积累的问题。图5为输出校正的系统结构图。

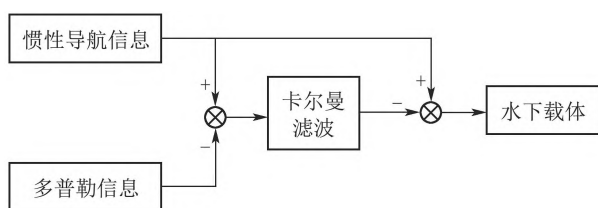


图5 输出校正系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of output correction system

反馈校正也可称做闭环法,其原理是将估计值反馈到SINS系统内部,直接对参与本次导航解算的信息进行修正,并迭代到下一次解算中。但滤波初始阶段有振荡,此时的滤波器估计值误差较大,如果直接参与导航信息解算,对精度影响较大。图6为反馈校正的系统结构图。

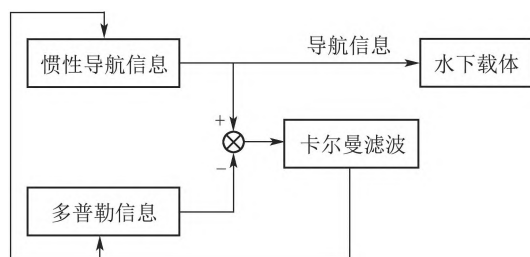


图6 反馈校正系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of feedback correction system

混合校正就是将输出校正和反馈校正组合起来,取长补短。在滤波初始振荡阶段,采用输出校正,直接对结果进行修正。当滤波趋于稳定时使用反馈校正,可以克服输出校正长时间工作精度较差的问题。图7为混合校正的系统结构图。

3 SINS/DVL组合导航关键技术研究发展历程

3.1 初始对准

组合导航技术主要分为两个阶段:初始对准阶段、稳定耦合阶段。初始对准是组合导航技术的第1步,

也是尤为关键的一步。进一步分为粗对准阶段、精对准阶段,其中粗对准阶段的精度对后续导航精度起关键性作用。

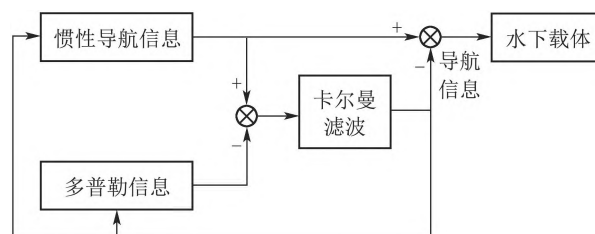


图7 混合校正系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of hybrid correction system

在最初阶段,学者们将解析法应用到捷联惯性导航的初始对准中,用以代替平台惯导的物理陀螺仪系统,得到的北向和天向失准角精度相同,但东向失准角的精度较低,针对这个问题,文献[25]提出通过对地球重力和自转角速度的测量,构造五组互不平行的矢量,并推导出两种捷联惯导解析粗对准的计算方法,通过误差分析,验证了东向失准角精度的可靠性。上述理想条件下的误差分析,没有考虑到实际环境中的高频噪声,为此文献[26]针对测量器件(加速度计和陀螺仪)的低信噪比,提出使用多级小波分解,用以滤除传感器件的高频噪声,能够将陀螺仪的信噪比从-20 dB提高至50 dB,相较于未使用小波分解的初始对准过程,该方法能在10 min内做到方位角的快速收敛,提高了初始对准的准确性和快速收敛性。

现有技术并不能保证海上基座完全静止,受海浪和洋流的影响,载体不可避免的会产生晃动,由于晃动所造成的角速度远大于地球自转角速度,使得陀螺仪输出低信噪比的测量值。针对晃动基座下的初始对准问题,解析法和基于罗盘效应的对准方法都不能实现又快又准的对准,因此文献[27-30]在解析初始对准的基础上,提出基于两个不同时刻重力的双矢量定姿法,相较于传统的初始对准十分钟收敛过程,这种初始对准方法只需要200~300 s,方位误差角便可以收敛到0.05°~0.03°的稳定精度。上述基于重力的双矢量定姿法的精度,主要取决于加速度计测量值的精度,从加速度计输出的信息中筛选出真正的视在重力信息,对于提高初始对准精度有着重要意义,因此文献[31-32]分别使用低通滤波器和无限脉冲响应数字滤波器,滤除陀螺仪和加速度计在载体摇摆状态下的量测噪声,同IXSEA提供的PHINS姿态信息作参考,该方法可以提供更高的姿态估计精度。同样针对视在重力信息的噪声问题,文献[33-34]提出通过重新构造观测矢量,抑制传感器产生的量测噪声,通过与其他两种对准方法的对比,表明该方法能够提高自对准的性能和快速收敛性。上述技术在进行双矢量定姿时,只利用了当前两个时间点上的观测量,为了充分利用

整个对准周期的观测量,文献[35–36]提出基于优化的自对准方法(optimization-based alignment, OBA),对观测量进行递归处理,实验表明这种方法能在60 s内将失准角误差快速收敛到稳态,因其利用了整个对准周期的视重运动信息,其成为当前常用的初始粗对准方法之一。然而加速度计和陀螺仪的输出含有多种类

型的误差,包括随机误差、陀螺仪漂移、加速度计偏置以及标度因子误差。文献[37]认为如果使用整个周期的数据,积分运算会使误差变大,由此提出选择固定长度区间的数据来获取当前的姿态,降低噪声的影响,能够将姿态估计的整体协方差提升 $16/n^2$ 倍(n 为量测值的数量)。

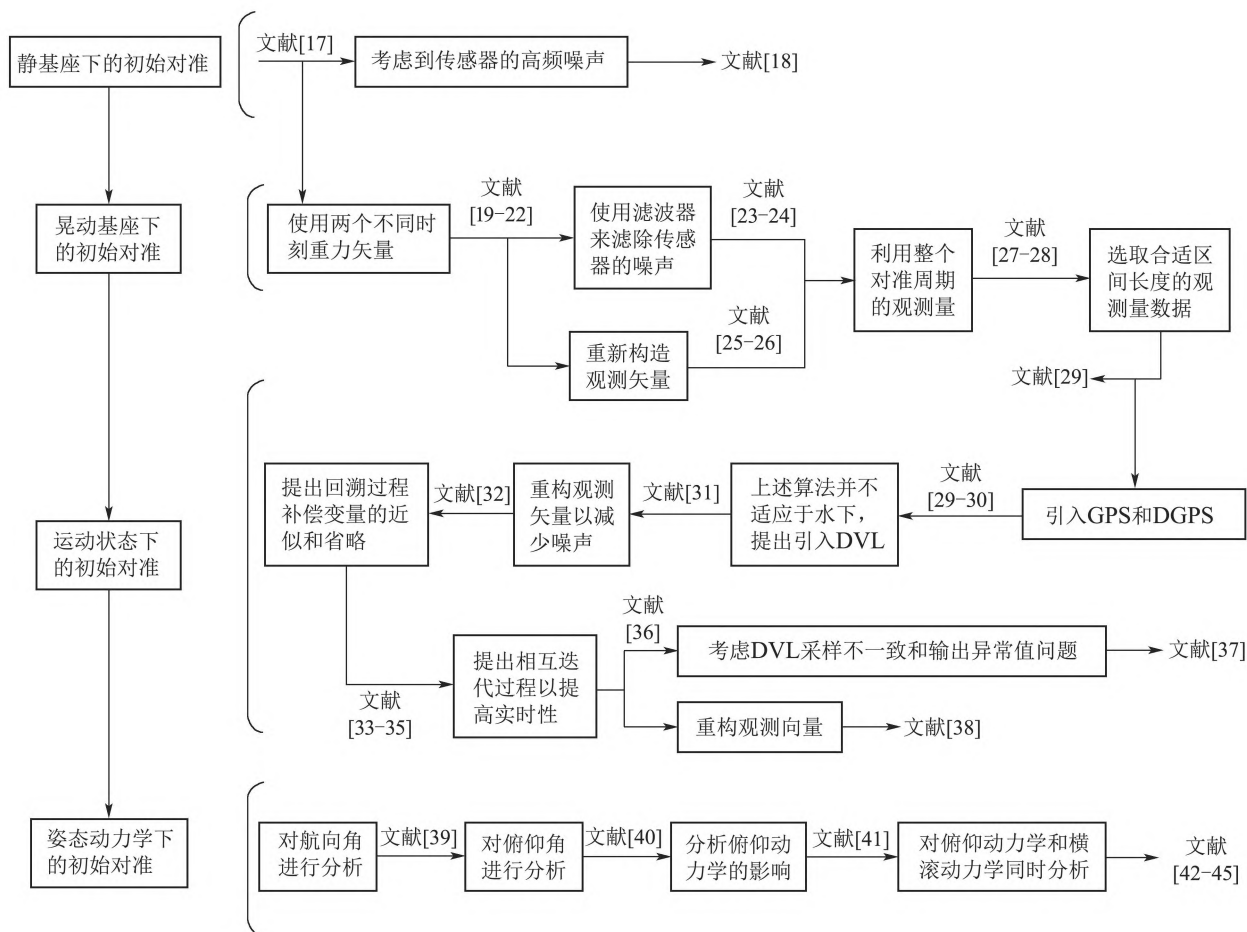


图8 初始对准技术发展结构图

Fig. 8 Development chart of initial alignment technology

为满足航行器灵活性的需要,在很多情况下需要航行器在运动情况下完成对准。文献[37–38]提出使用GPS和DGPS的速度作为辅助信息,完成运动状态下的初始对准,在粗对准中可以在10 s内达到 1° 的航向精度,这为水下航行器的初始对准提供理论基础,但是在水下环境GPS信号会衰减,为此文献[39]提出一种DVL辅助初始对准的方法,利用DVL速度信息构造状态观测器,将粗对准问题转化为机体速度和重力积分形式最优基的姿态确定问题,与基于优化的粗对准方法(optimization based coarse alignment, OBCA)和基于非线性滤波的精对准方法(nonlinear filtering based fine alignment, NFFA)比较,证明该方法可以在4 min之内将航向误差收敛到 1° 以内。上述方法直接使用DVL输出的速度信息构造状态观测器,必然会包

含DVL噪声,文献[40]在此基础上构建参数模型,利用卡尔曼滤波器对其进行估计,重构观测矢量,将易受量测噪声影响的航向误差角的标准差,从 0.26° 降低至 0.1° ,对初始对准的稳定性有明显的改善。为了补偿变量省略和近似处理的影响,文献[41–43]提出回溯过程,在10 min内可以达到水平角精度 0.007° 和航向角精度 0.08° 。回溯过程虽然提高了初始对准的精度,但也影响了初始对准的实时性,在此基础上文献[44]提出相互迭代过程,同时求解位置和姿态对准。通过分析可得上述研究致力于OBA观测向量的构造,忽视了DVL和SINS采样频率不一致和DVL输出异常值的问题,在此基础上文献[45]提出显式的OBA初始对准方法,同时对DVL异常值进行检测和隔离,并对观测量进行归一化处理,通过与SINS/GPS姿态结果作比

较,验证了该算法的可行性.同样针对观测量异常值的问题,文献[46]提出使用改良的鲁棒性卡尔曼滤波器对视在速度模型进行估计,检测和隔离异常值,提高初始对准精度.

DVL辅助信息的引入提高了动态初始对准的精度,但同时也引入DVL测量误差,DVL噪声可分为两部分:1)水下低动态环境下的一般噪声;2)高动态相关噪声.低动态下的初始对准已发展的相当完善.由于DVL是按照多普勒效应通过发射和接收声波信号,测量载体的相对于海底的速度,通常假设DVL在一个发射和接收周期中,载体的速度和姿态保持不变,由于在水中声波的传播速度较慢,在姿态动力学的条件下会达到2%甚至更高的测量误差,目前国内外论文对这一问题的研究有限,文献[47]通过分析航向角速度带来的影响,建立较为简单的误差模型.文献[48]分析了水下机器人运行过程中,非零俯仰角对前进速率的影响.文献[49]分析了俯仰动力学对DVL量测信息的影响,实验表明当处于俯仰动力学条件下,DVL速度

量测误差会达到5%以上,而该方法可以很好的补偿量测误差,提高俯仰动力学条件下的初始对准.上述的研究对于姿态动力学的分析相对分散,忽视了在发射和接收期间水下机器人俯仰动力学和横滚动力学的共同作用,难以在初始粗对准阶段应用,为此文献[50-53]在传统OBA基础上,通过对DVL在姿态动力学条件下的测量误差进行建模和补偿,加速高动态下的初始对准,将传统OBA在姿态动力学的1 min的粗对准时间,缩短至20 s左右,提升了初始对准的快速收敛性,同时对于位置漂移尤其是深度漂移有明显的改善作用.

3.2 系统误差标定

在实际应用中,仪器的安装使SINS、DVL的坐标系和载体坐标系不能重合,产生安装误差角.同时因为水温、水深、盐度等因素,导致DVL输出的速度成 k 倍的增加,产生比例因子误差,而对安装误差角和比例因子的校准标定就称为组合导航系统的标定过程.

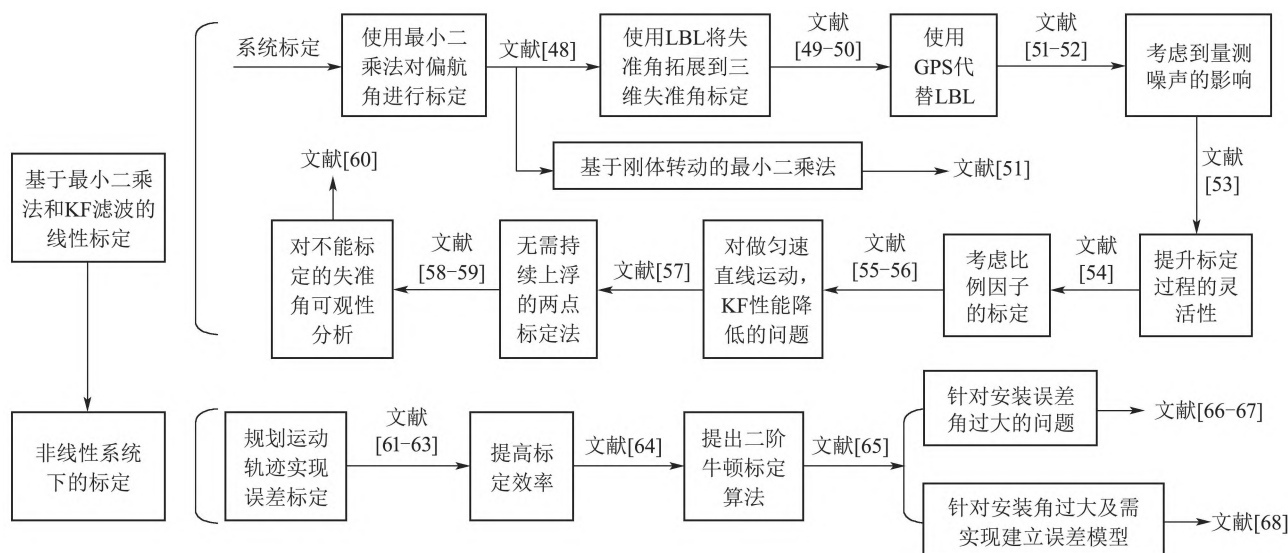


图9 误差标定技术发展结构图

Fig. 9 Development structure chart of error calibration technology

文献[54-55]认为安装误差角中偏航角是影响校准精度的关键因素,所以早期研究以偏航角的标定为主.文献[56]最早提出使用最小二乘法标定偏航角.随着对导航精度要求的提高,单纯的偏航角误差标定并不能满足高精度的需求,因此文献[57-58]使用外部传感器LBL获取AUV的位置信息,将安装误差角的标定拓展到偏航角、横滚角、俯仰角三维误差角的标定.后来文献[59]在此基础上,提出基于刚体转动组的两种最小二乘法,用于三维失准角的标定,实验表明该方法相对于其他标定实验的精度提高了24%,证明了该方法的有效性.

上述方法所使用的LBL,作为预先在水面或水底

安装的定位装置,具有极高的位置精度,但其声波传输有限范围只有十公里.全球定位系统(GPS)具有全球范围内的定位导航功能,为此部分专家学者提出使用GPS代替LBL提供位置信息实现标定过程^[59-60].但水下环境复杂,上述方法易受到噪声的影响,使用KF技术可以有效降低噪声对系统精度的影响,因此文献[61]通过使用KF在线估计DVL的安装角误差,利用迭代递推算法,解决初始安装角估计值精度较差、新息对估计结果的影响越来越小等问题,实验表明只要在初始安装误差角不大于 10° 时,都可以通过迭代使误差精度小于 0.1° .然而LBL只能在一定范围内使用,GPS需要水下潜器浮出水面实现标定,都在一定程度

上限制了水下潜器的灵活性,为此文献[62]提出两种使用内部传感器的自标定算法,分别是基于内部传感器的速度信息和加速度信息的最小二乘法,实验表明该方法的标定精度与上述通过辅助传感器所获得的精度相当,但却要求AUV做复杂的水下机动运动,以增强未知状态的可观测性。然而上述算法忽略了比例因子对标定过程的影响,为此文献[63–64]在KF的基础上,利用DVL提供AUV真实速度,重新构建误差模型,在1000 s实现比例因子的误差标定,显著降低了速度的平均误差。在上述误差标定过程中,AUV为了节省能源和便于控制,通常在水下做匀速直线运动,这样会降低KF的性能,针对KF性能降低的问题,文献[65]分别使用SINS/GPS导航速度和DVL速度构造两个点集,使用基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的最小二乘法,将失准角和比例因子的标定问题转化为两个点集之间的对准参数的估计问题,通过30 km的航行实验,该方法最终导航精度控制在2‰之内,表明该标定方法可用于精密导航中。

上述标定方法的弊端是需要水下航行器在一段时间内持续上浮,用以接收GPS信号,这不利于AUV的能源节约和在特殊时期的隐蔽性,因此文献[66–67]指出由于横向和垂直方向上的速度小到可以忽略,横滚误差角即使不标定也对系统精度影响不大,提出不需要连续接收GNSS信号的两点标定方法,在实现有效的误差标定的同时,能够减少水下航行器的上浮次数。文献[68]提出一种三点在线标定方法,对不能标定的失准角进行可观性分析,设计特定的运动状态以标定所有的失准角和比例因子。

文献[56–68]提出的标定方法都以KF和最小二乘法算法为基础,且将姿态失准和量测视为线性关系,然而实际环境中系统方程更多是非线性的,因此文献[69–71]利用比例因子和安装误差角对DVL影响表现形式不同的特性,通过规划AUV的运动状态,利用多组运动状态下的数据的平均值,将DVL轨道和参考轨道相比较,实现误差标定,该方法简单、有效,具有一定的实用价值。但是这种标定方法需要AUV在特定轨道上运行很长时间,为了提高效率,文献[72]提出一种基于梯度下降的KF迭代标定算法,能够实现在10 min内,标定精度达到 0.1° ,相较于传统标定方法更具鲁棒性和标定快速性。该方法的迭代算法损失函数是二阶的,但其梯度下降属于一阶函数,因此不是最优的,基于此文献[73]提出基于二阶牛顿优化算法的迭代标定算法,并引入Wolfe原理搜索最优步长以解决由固定步长导致的驻点附近效率低下的问题,具有更快的收敛效率和稳定性。

标定过程通常默认在安装过程中,初始安装误差角足够小(一般是 $-5^\circ \sim 5^\circ$),而如果初始安装角过大,则容易导致系统非线性化,严重时甚至会导致滤波发

散,影响标定精度,文献[74–75]针对安装误差角过大的问题,用四元数的方法描述安装误差角,通过构造位置观测算法实现安装误差角和比例因子的标定,同时提出梯度下降来避免直接使用DVL速度输出带来的量测噪声,实验表明文献[74]可以实现在30 km内的定位误差小于1.65‰,文献[75]对比例因子的估计误差保持在 5×10^{-4} 以内,对X、Z轴的安装误差角估计精度均维持在 0.02° 左右,可见这两种标定方法对标定精度都有较大提升。同样针对传统标定方法需要事先假定安装误差角足够小,以及需要事先建立DVL误差模型的方法,文献[76]提出一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)和支持向量回归机(support vector regression, SVR)的标定方法,无需预先建立模型,只需少量的样本即可完成训练过程,实现有效标定,实验表明在大失准角的情况下,相较于传统单值分解SVD和两点式标定方法,该方法标定精度能提高一倍。

3.3 鲁棒性技术

当今组合导航技术和计算机技术的飞速发展,使得算法局限性和计算量的影响正逐渐降低。组合导航系统在实际环境中的对于各种突发状况的适应性和鲁棒性正在成为主要性能要求之一。

扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波、粒子滤波等,可以很好的解决状态方程或量测方程为非线性,以及过程噪声和量测噪声不满足高斯白噪声等问题。但是依然存在弊端:当系统模型难以确定时导航精度会下降;多普勒测速仪发生故障时,采用纯惯导导航在长时间航行中会产生误差积累;以及对于量测突变值不好应对等问题。因此提升组合导航系统的鲁棒性,是组合导航技术的热点问题。

针对粒子滤波存在的粒子退化,文献[77]提出一种UKF和PF的混合滤波算法,其主要思想是将PF粒子分为两部分:确定性粒子和随机性粒子,使用UKF为PF选择合适的重要性函数,从重要性函数中确定随机粒子,确定性函数则由UKF确定。通过对粒子退化程度的监控,确定其合适的权值,据此判断混合滤波是进化为PF还是退化为UKF。然而对于系统模型及噪声的统计特性很难确定等问题,效果并不明显,为此一些专家和学者们引入Sage–Husa滤波代替经典的卡尔曼滤波,在此基础上文献[78]提出了基于模糊自适应联邦卡尔曼滤波的水下组合导航算法。通过量测的理论方差和新息方差的比值,制定模糊推理系统规则,自适应的调整联邦滤波器的信息分配系数,以此来调配各子滤波器的权重,增强组合导航系统的鲁棒性。Sage–Husa自适应滤波能充分发挥观测量的作用,对不精确的系统建模、系统噪声方差阵 Q 、观测噪声方差阵 R 进行实时估计,但文献[79]指出了Sage–Husa滤波存在一些不足,如 Q 和 R 不能同时估计、自适应程度下降等问题,设计了一种简化的Sage–Husa滤波,

当 Q 已知时对 R 进行估计,具有良好的适用性.文献[80]在上述滤波方法的基础上,引入滤波收敛判据对Sage-Husa滤波随时间增长出现自适应程度下降的问题进行改进,重新计算权值加强对噪声变化的跟踪能力,在2 h的仿真实验中,纬度误差在 $-50\sim 70$ m之间,经度误差在 $-10\sim 100$ m之间,位置误差约为1.4‰,证明该算法在长时间的航行中具有很好的导航精度.文

献[81]针对上述滤波方法因为计算开销大而影响实时性的问题,引入了“协方差匹配”,增强滤波器估计解算的实时性.同样针对上述滤波精度下降的问题,文献[82]提出一种新的方案,推导出基于最大似然估计的一步平滑自适应滤波算法,用以解决滤波精度下降和发散等问题,在长时间航行和恶劣海况的情况下,具有很好的鲁棒性.

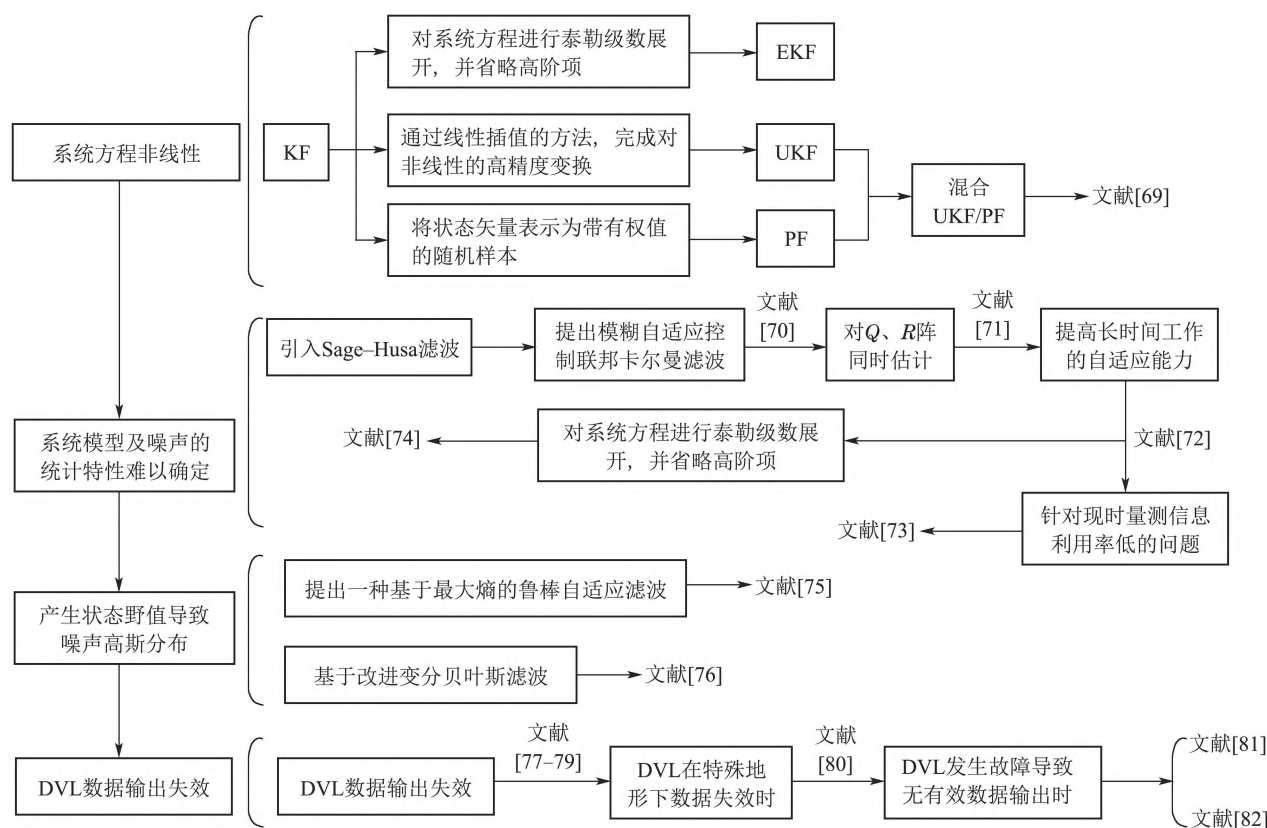


图10 鲁棒性技术发展结构图

Fig. 10 Development structure chart of robust technology

在水下环境中,常常会因外界干扰而产生状态野值,导致噪声非高斯分布,这种情况下不能满足常规滤波的适用条件,文献[83]推导出一种基于最大熵的鲁棒自适应滤波算法,提升组合导航系统在复杂环境下的鲁棒性,实验表明在噪声出现野值以及 Q 和 R 不准确时具有良好的滤波效果.同样针对出现状态野值的问题,文献[84]引入贝叶斯滤波,并在贝叶斯滤波的基础上进行改善,能有效解决野值和滤波精度下降问题.

而在大航程的水下导航中,当DVL出现故障时,上述滤波很可能会因为缺少DVL的速度辅助,而导致产生较大的导航误差.例如,当DVL可用的波束通道数小于3个时,会导致DVL输出的数据仅有部分可用,会影响采用松耦合方式的DVL/SINS组合导航系统的精度,文献[85-87]提出使用紧耦合的方式,有效解决松耦合依赖DVL波束通道数量的问题.但当DVL遭遇以

下几种特殊环境时,会导致DVL无效化:例如,超过两个以上的声波被海洋生物阻挡、载体的姿态高动态化、海底环境为淤泥地质、超出底跟踪模式的工作区间.这时的DVL会向组合导航系统输入无效化数据,依然会使上述紧耦合算法,导航结果产生漂移,为此文献[88]提出一种使用DVL部分原始信息外加辅助信息的扩展松耦合方式,可以显著改善在特殊环境时的导航性能.

上述方法专注于改变松紧耦合方式和使用DVL原始数据,但当DVL完全失效时,只能依赖于纯惯导模式维持极短时间内的导航精度.为此文献[89]使用支持向量回归和偏最小二乘回归的混合方法构造预测器,用以预测DVL完全失效时的数据输出,在120 s失效时间内位置误差仅为10 m,能够达到一定精度的预测效果.同样文献[90]提出一种基于神经网络预测的组合导航算法,通过使用非线性自回归神经网络接收

来自SINS和DVL速度输出的训练. 当DVL失效时, 利用经过训练的神经网络预测DVL的输出, 维持导航解算的稳定, 实验表明在DVL故障期间, 可以维持200~300 s的可靠速度预测.

4 未来关切问题

SINS/DVL作为当前水下组合导航应用最广泛的技术, 随着AUV对水下定位精度的要求越来越高, 以下几点会成为未来的研究热点问题:

1) 初始对准的精度对水下导航定位起到至关重要的作用, 静基座对准的精度已经能达相当高的程度, 但是静基座下的对准在水下的应用面太窄, 要用于实际环境中就需要考虑如何在晃动、运动、高动态几种状态下实现有效对准. 尤其对于一些精度较差的惯性元件的初始对准的研究, 对于降低生产成本有很大的影响. 而且要达到完全对准的要求, 目前技术都至少需要几分钟, 所以如何缩短对准时间会成为以后的研究方向之一.

2) DVL的引入提升了导航系统的精度, 但是因SINS和DVL的安装误差角过大, 而导致标定非线性化的研究仍有较大的提升空间, 而在水下标定环境中, 大多数标定方式都以引入GPS或特定的路线规划为主, 针对提高标定过程灵活性的研究, 仍是目前系统标定所面临的挑战之一.

3) 对上述文献进行分析, 对系统噪音和系统模型不匹配的问题, 大部分算法的验证试验能够满足, 但其中绝大多数的实验验证采用的是仿真实验, 相比于在真实环境中的验证, 有很多影响因素较大的因素没有深入考虑, 如系统突然受到震荡和冲击, 实验算法是否还能保持收敛性、SINS和DVL的安装问题、SINS和DVL在真实环境下是否会产生杆臂误差, 而这些实际误差是否会对算法精度产生较大影响, 这些因素都需要在真实环境中进行分析, 所以真实环境下的算法验证对提高算法的实用性和有效性, 有着重要的意义.

4) SINS/DVL组合导航技术在实际环境时总会面临各种各样的问题, 在水下环境中, 一旦发生故障很难得到外界的及时帮助, 由此产生的无效观测值, 会在一段时间内持续影响导航精度, 这就要求系统自动识别和筛选无效值. 在极端情况下, 单纯依靠惯性导航, 在十分钟之内就会达到很大的误差, 这就要求SINS/DVL提升系统的鲁棒性和容错性, 自适应的应对突发状况.

5 结束语

SINS/DVL作为一种安全可靠的组合导航技术将会得到更加广泛的应用. 对SINS/DVL组合导航技术中初始对准技术、标定技术、鲁棒性技术等热点问题的研究, 能够有效提升水下航行器的导航定位精度和

可靠性, 为水下航行器的应用提供关键技术支持.

参考文献:

- [1] LI Liang. *Research on SINS/DVL integrated navigation technology*. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
(李亮. SINS/DVL组合导航技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.)
- [2] ZHAO Junbo, GE Xiyun, FENG Xuelei, et al. Review of SINS/DVL integrated navigation technology under water. *Journal of Underwater Unmanned Systems*, 2018, 26(1): 2–9.
(赵俊波, 葛锡云, 冯雪磊, 等. 水下SINS/DVL组合导航技术综述. 水下无人系统学报, 2018, 26(1): 2–9.)
- [3] WANG Bo, LIU Jingyang, LIU Peijia. INS/DVL integrated navigation technology review. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(3): 1–6, 22.
(王博, 刘涇洋, 刘沛佳. SINS/DVL组合导航技术综述. 导航定位学报, 2020, 8(3): 1–6, 22.)
- [4] GUO Yinjing, KONG Fang, ZHANG Manlin, et al. Review of integrated navigation system for autonomous underwater vehicle. *Navigation, Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 107–119.
(郭银景, 孔芳, 张曼琳, 等. 自主水下航行器的组合导航系统综述. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 107–119.)
- [5] YUAN L, LIANG H, DONG X W, et al. An quantitative method for observability analysis and its application in SINS calibration. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 103: 105881.
- [6] ZHOU L, ZHU Y. Hybrid tightly-coupled SINS/LBL for underwater navigation system. *IEEE Access*, 2021, 99: 1–1.
- [7] LI W, ZHANG L, SUN F, et al. Alignment calibration of IMU and Doppler sensors for precision INS/DVL integrated navigation. *Optik*, 2015, 126(23): 3872–3876.
- [8] BIN G, CHENG Y M, ANTON H J DE RUITER. INS/CNS navigation system based on multi-star pseudo measurements. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 95: 105506.
- [9] HU Q L, SHI Y X, SHAO X D. Adaptive fault-tolerant attitude control for satellite reorientation under input saturation. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 78: 171–182.
- [10] MENG Y, WANG W, HAN H, et al. A visual/inertial integrated landing guidance method for UAV landing on the ship. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 474–480.
- [11] BRAGINSKY B, BARUCH A, GUTERMAN H. Correction of DVL error caused by seafloor gradient. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(19): 11652–11659.
- [12] WATERHOUSE W C. Gauss's first argument for leastsquares. *Archive for History of Exact Science*, 1991, 41: 41–52.
- [13] YANG Junwei. *Research on navigation and data fusion technology of underwater vehicle*. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
(杨峻巍. 水下航行器导航及数据融合技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.)
- [14] WIENER N. The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series, with engineering applications. *Journal of the Royal Statistical Society Series A (General)*, 1950, 113(3): 413.
- [15] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, DOI: 10.1115/1.3662552.
- [16] YAN Gongmin, YAN Weisheng, XU Demin. Application of simplified UKF filter in initial aligning of SINS large misalignment angle. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2008, 16(3): 253–264.
(严恭敏, 严卫生, 徐德民. 简化UKF滤波在SINS大失准角初始对准中的应用. 中国惯性技术学报, 2008, 16(3): 253–264.)

- [17] BATTIN R H. Astronautical guidance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1964, 11(2): 336 – 337.
- [18] GERALD J, BIERMAN. Sequential square root filtering and smoothing of discrete linear systems. *Automatica*, 1974, 10(2): 147 – 158.
- [19] KALMAN R E, BUCY R S. New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 1961, 83(1): 95 – 108.
- [20] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2001, 45(3): 47 – 482.
- [21] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254 – 1269.
- [22] XIONG Kai, ZHANG Hongyue. Application of particle filter in nonlinear alignment of inertial navigation system. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(6): 20 – 26.
(熊凯, 张洪钺. 粒子滤波在惯导系统非线性对准中的应用. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6): 20 – 26.)
- [23] YUAN Xiaolong. Application of information fusion technology in underwater integrated navigation system. *Journal of Guangzhou Navigation College*, 2013, 21(1): 18 – 20, 24.
(袁小龙. 信息融合技术在水下组合导航系统中的应用. 广州航海高等专科学校学报, 2013, 21(1): 18 – 20, 24.)
- [24] SONG Hongjiang. *Integrated navigation algorithm and its application in SINS/GPS/DVL integrated navigation system*. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
(宋红江. 组合导航算法及其在SINS/GPS/DVL组合导航系统中的应用. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.)
- [25] JIANG Y F. Error analysis of analytic coarse alignment methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1): 334 – 337.
- [26] NASSAR S, EL-SHEIMY N, NOURELDIN A. Wavelet de-noising for IMU alignment. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, 19(10): 32 – 39.
- [27] LIU X X, ZHAO Y, LIU X J, et al. An improved self-alignment method for strapdown inertial navigation system based on gravitational apparent motion and dual-vector. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 125108-1 – 125108-11.
- [28] SHUSTER M D, OH S D. Three-axis attitude determination from vector observations. *Journal of Guidance and Control*, 1981, 4(1): 70 – 77.
- [29] LIAN Junxiang, TANG Yonggang, WU Meiping, et al. Research on moving base alignment algorithm for SINS. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(5): 95 – 99.
(练军想, 汤勇刚, 吴美平, 等. 捷联惯导惯性系动基座对准算法研究. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 95 – 99.)
- [30] LIU Y T, XU X S, LIU X X, et al. A self-alignment algorithm for SINS based on gravitational apparent motion and sensor data denoising. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(5): 9827 – 9853.
- [31] SUN W, XU A G, YANG G. Strapdown gyrocompass algorithm for AUV attitude determination using a digital filter. *Measurement*, 2013, 46(1): 815 – 822.
- [32] SUN F, SUN W. Mooring alignment for marine SINS using the digital filter. *Measurement*, 2010, 43(10): 1489 – 1494.
- [33] XU Xiang, XU Xiaosu, ZHANG Tao, et al. An improved Kalman filter parameter identification coarse-alignment method. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2016, 24(3): 320 – 324, 329.
(徐祥, 徐晓苏, 张涛, 等. 一种改良Kalman滤波参数辨识粗对准方法. 中国惯性技术学报, 2016, 24(3): 320 – 324, 329.)
- [34] LIU X X, XU X S, ZHAO Y, et al. An initial alignment method for strapdown gyrocompass based on gravitational apparent motion in inertial frame. *Measurement*, 2014, 55: 593 – 604.
- [35] GAO Xin, BIAN Hongwei, FU Zhongze, et al. Alignment algorithm based on quaternion estimator for SINS on rocking base. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2014, 22(6): 724 – 727, 740.
(高新, 卞鸿巍, 傅中泽, 等. 捷联惯导晃动基座四元数估计对准算法. 中国惯性技术学报, 2014, 22(6): 724 – 727, 740.)
- [36] WU M P, WU Y X, HU X P, et al. Optimization-based alignment for inertial navigation systems: theory and algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(1): 1 – 17.
- [37] PETER M G, SILSON. Coarse alignment of a ship's strapdown inertial attitude reference system using velocity loci. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(6): 1930 – 1941.
- [38] WU Y X, PAN X F. Velocity/position integration formula part I: application to in-flight coarse alignment. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1006 – 1023.
- [39] CHANG L B, LI Y, XUE B Y. Initial alignment for a doppler velocity log-aided strapdown inertial navigation system with limited information. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 329 – 338.
- [40] XU Xiang, SHI Fanwei, XU Dacheng, et al. SINS/DVL initial alignment method based on parameter identification. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2019, 27(2): 176 – 180.
(徐祥, 史凡伟, 徐大诚, 等. 基于参数识别的SINS/DVL初始对准方法. 中国惯性技术学报, 2019, 27(2): 176 – 180.)
- [41] CHANG L B, LI Y, XUE B Y. Initial alignment for a doppler velocity log-aided strapdown inertial navigation system with limited information. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics: A Joint Publication of the IEEE Industrial Electronics Society and the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 2017, 22(1): 329 – 338.
- [42] WU Y. Versatile land navigation using inertial sensors and odometry: Self-calibration, in-motion alignment and positioning. *2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. Karlsruhe: IEEE, 2014: 1 – 19.
- [43] LI W L, WU W Q, WANG J L, et al. A novel backtracking navigation scheme for autonomous underwater vehicles. *Measurement*, 2014, 47(1): 496 – 504.
- [44] LI K, YE L Y, SONG K C. A fast in-motion alignment algorithm for DVL aided SINS. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 593612 – 593692.
- [45] CHANG L, HU B. Robust initial attitude alignment for SINS/DVL. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 2016 – 2021.
- [46] XU X, GUI J, SUN Y, et al. Robust initial alignment for SINS/DVL based on reconstructed observation vectors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1659 – 1667.
- [47] JALVING B, GADE K, SVARTVEIT K, et al. DVL velocity aiding in the HUGIN 1000 integrated inertial navigation system. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 2004, 25(4): 223 – 235.
- [48] LI Chunjing. *Research on initial alignment method of inertial navigation/DVL underwater moving base*. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
(李春静. 惯导/DVL水下动基座初始对准方法研究. 北京: 北京理工大学, 2015.)
- [49] LIU P J, WANG B, DENG Z H, et al. A correction method for DVL measurement error by pitch dynamics. *The 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. St. Petersburg: IEEE, 2017: 143 – 147.
- [50] YAO Y, ZHONG M, XU X. DVL aided SINS coarse alignment solution with high dynamics. *IEEE Access*, 2020, 8: 169922 – 169929.
- [51] YAO Y Q, XU X S, ZHU Y Y, et al. In-motion coarse alignment method for SINS/DVL with the attitude dynamics. *ISA Transactions*, 2020, 105(6): 377 – 386.

- [52] LIU P, WANG B, DENG Z, et al. A correction method for DVL measurement errors by attitude dynamics. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 14: 1 – 1.
- [53] YAO Y, XU X, HOU L, et al. A simple and precise correction method for DVL measurements under the dynamic environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10750 – 10758.
- [54] POLLARD R, READ J. A method for calibrating shipmounted acoustic doppler profilers and the limitations of gyro compasses. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 6(6): 859 – 865.
- [55] MÜNCHOW, ANDREAS, COUGHRAN C S, et al. Performance and calibration of an acoustic doppler current profiler towed below the surface. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1995, 12(2): 435 – 444.
- [56] JOYCE T M. On in situ ‘calibration’ of shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(1): 169 – 172.
- [57] KINSEY J C, WHITCOMB L L. Adaptive identification on the group of rigid-body rotations and its application to underwater vehicle navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 124 – 136.
- [58] LEE P M, JUN B H, KIM K, et al. Simulation of an inertial acoustic navigation system with range aiding for an autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 327 – 345.
- [59] JAMES C, KINSEY, LOUIS L. In situ alignment calibration of attitude and doppler sensors for precision underwater vehicle navigation: theory and experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 286 – 299.
- [60] BROKLOFF N A. Dead reckoning with an ADCP and current extrapolation. *Oceans*. Halifax: IEEE, 1997.
- [61] ZHU Chunyun, ZHUANG Guangchen, SONG Yalan, et al. Application of DVL installation angle estimation method in underwater integrated navigation system. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(1): 75 – 78.
(朱春云, 庄广琛, 宋雅兰, 等. DVL安装角估计方法在水下组合导航系统中的应用. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 75 – 78.)
- [62] TRONI G, WHITCOMB L L. New methods for in-situ calibration of attitude and Doppler sensors for underwater vehicle navigation: Preliminary results. *OCEANS 2010*. Seattle: IEEE, 2010: 1 – 8.
- [63] LI W L, LU L Q. A novel method for alignment calibration of IMU and doppler sensors. *Advanced Materials Research*, 2012, 591(593): 1178 – 1183.
- [64] LIU Z P, TANG K H, WU M P. Online estimation of DVL misalignment angle in SINS/DVL integrated navigation system. *International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. Chengdu, China: IEEE, 2011, 2: 336 – 339.
- [65] LI W L, ZHANG L D, SUN F P, et al. Alignment calibration of IMU and Doppler sensors for precision INS/DVL integrated navigation. *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(23): 3872 – 3876.
- [66] TANG K H, WANG J L, LI W L, et al. A novel INS and doppler sensors calibration method for long range underwater vehicle navigation. *Sensors*, 2013, 13(11): 14583 – 14600.
- [67] LI W L, YANG L, ZHANG L D, et al. A robust method for alignment calibration of an inertial measurement unit (IMU) and doppler sensors. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 2016, 34(1/3): 93 – 106.
- [68] LIU J, WANG B, DENG Z. An online calibration method of INS and Doppler sensors. *The 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. Islamabad: IEEE, 2019: 824 – 829.
- [69] YU Jiucheng, HE Kunpeng, WANG Xiaoxue. Calibration of SINS/DVL integrated navigation system. *Journal of Intelligent Systems*, 2015, 10(1): 143 – 148.
(于玖成, 何昆鹏, 王晓雪. SINS/DVL组合导航系统的标定. 智能系统学报, 2015, 10(1): 143 – 148.)
- [70] CAO Zhongyi, ZHENG Cui’e, ZHANG Dianlun. Installation error calibration method of acoustic doppler velocity meter. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(4): 434 – 439.
(曹忠义, 郑翠娥, 张殿伦. 声学多普勒速度仪安装误差校准方法. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(4): 434 – 439.)
- [71] LÜ Zhigang. Research and error analysis of AUV integrated navigation calibration method based on SINS/DVL/GPS. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(6): 33 – 36.
(吕志刚. 基于SINS/DVL/GPS的AUV组合导航标定方法的研究及其误差分析. 舰船电子工程, 2018, 38(6): 33 – 36.)
- [72] LI W L, TANG K H, LU L Q, et al. Optimization-based INS in-motion alignment approach for underwater vehicles. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4581 – 4585.
- [73] WANG G C, XU X S, YAO Y Q, et al. An iterative doppler velocity log error calibration algorithm based on newton optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, DOI: 10.1155/2020/3194034.
- [74] XU B, WANG L, LI S, et al. A novel calibration method of SINS/DVL integration navigation system based on quaternion. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9567 – 9580.
- [75] XU Xiaosu, YANG Yang, LI Yao. A DVL error calibration method based on gradient descent quaternion theory. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2019, 27(4): 448 – 453.
(徐晓苏, 杨阳, 李瑶. 一种基于梯度下降四元数理论的DVL误差标定方法. 中国惯性技术学报, 2019, 27(4): 448 – 453.)
- [76] WANG B, LIU J, DENG Z, et al. A model-free calibration method of inertial navigation system and doppler sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 2219 – 2229.
- [77] FU Jun, ZHANG Xiaofeng, FANG Xiaomin, et al. UKF/PF adaptive filtering algorithm for underwater integrated navigation. *Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science & Engineering)*, 2008, 32(6): 1106 – 1109.
(傅军, 张晓峰, 方晓旻, 等. 水下组合导航UKF/PF自适应滤波算法. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(6): 1106 – 1109.)
- [78] WANG Qi, XU Xiaosu, ZHANG Tao, et al. Application of fuzzy adaptive filtering in integrated navigation system of underwater vehicle. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2008, 16(3): 320 – 325.
(王其, 徐晓苏, 张涛, 等. 模糊自适应滤波在水下航行器组合导航系统中的应用. 中国惯性技术学报, 2008, 16(3): 320 – 325.)
- [79] SAGE A, HUSA G. Algorithms for sequential adaptive estimation of prior statistics. *Adaptive Processes*. University Park, PA: IEEE, 1969.
- [80] XU Xiaosu, PAN Yongfei, ZOU Haijun. SINS/DVL integrated navigation system based on adaptive filtering. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(3): 95 – 99, 106.
(徐晓苏, 潘永飞, 邹海军. 基于自适应滤波的SINS/DVL组合导航系统. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 95 – 99, 106.)
- [81] FAN Xiaoliang. *Research on SINS/DVL integrated navigation algorithm based on adaptive filtering*. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
(范晓亮. 基于自适应滤波的SINS/DVL组合导航算法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.)
- [82] GAO W, LI J C, ZHOU G T, et al. Adaptive Kalman filtering with recursive noise estimator for integrated SINS/DVL systems. *Journal of Navigation*, 2014, 68(1): 142 – 161.

- [83] LUO Kaixin. *Research on underwater integrated navigation method based on maximum entropy robust adaptive filtering*. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
(罗凯鑫. 基于最大熵鲁棒自适应滤波的水下组合导航方法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.)
- [84] ZHAO Junbo, GE Xiyun, CHENG Yue, et al. SINS/DVL/LBL integrated navigation technology based on improved variable DB Bayesian filtering. *Journal of Underwater Unmanned Systems*, 2021, 29(1): 54 – 59, 64.
(赵俊波, 葛锡云, 成月, 等. 基于改进变分贝叶斯滤波的SINS/DVL/LBL组合导航技术. 水下无人系统学报, 2021, 29(1): 54 – 59, 64.)
- [85] LIU P, WANG B, DENG Z, et al. INS/DVL/PS tightly coupled underwater navigation method with limited DVL measurements. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2994 – 3002.
- [86] WANG D, XU X, YAO Y, et al. A novel SINS/DVL tightly integrated navigation method for complex environment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 99.
- [87] WANG D, XU X S, HOU L H, et al. An improved adaptive Kalman filter for underwater SINS/DVL system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, DOI: 10.1155/2020/5456961.
- [88] ASAF T, ITZIK K, REUVEN K, et al. Inertial navigation system/doppler velocity log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements. *Sensors*, 2017, 17(2): 415.
- [89] ZHU Y X, CHENG X H, HU J, et al. A novel hybrid approach to deal with DVL malfunctions for underwater integrated navigation systems. *Applied Sciences*, 2017, 7(8): 759.
- [90] LI W L, CHEN M J, ZHANG C, et al. A novel neural network-based SINS/DVL integrated navigation approach to deal with DVL malfunction for underwater vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, DOI: 10.1155/2020/2891572.

作者简介:

卢道华 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为导航与控制、机电一体化系统设计, E-mail: ludaohua.just@126.com;

宋世磊 硕士研究生, 目前研究方向为组合导航制导与控制, E-mail: 1378298539@qq.com;

王 佳 硕士, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为波浪补偿与控制、机电一体化设计, E-mail: 13913440179@163.com;

蔡雅轩 硕士研究生, 目前研究方向为导航制导与控制, E-mail: 1336084076@qq.com;

沈慧慧 硕士研究生, 目前研究方向为波浪补偿与控制, E-mail: 2470678637@qq.com.