

水下导航定位技术研究进展

王英志, 范文涛

(中国人民解放军 92578 部队, 北京 100161)

摘要 由于海水介质对电磁波的强吸收屏蔽效应影响, 水下潜航器的隐蔽航行使得对其进行水下导航定位成为一个难点和热点研究方向。现有水下导航与定位技术以惯性导航传统自主导航技术为主体, 围绕修正惯性导航产生的累积误差问题, 发展形成了航位推算导航、地球物理匹配导航技术、水声导航技术等多种辅助导航技术。系统地介绍了这些水下导航技术及其组合方式的基本原理、主要特点及研究进展, 并对未来水下导航技术发展趋势和应用进行了展望。

关键词 水下导航; 惯性导航系统; 组合导航

中图分类号 U666.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)05-0372-10

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.002

Research Progress of Underwater Navigation and Positioning Technology

WANG Yingzhi, FAN Wentao

(Unit 92578 of PLA, Beijing 100161, China)

Abstract Due to the influence of seawater medium on the strong absorption and shielding effect of electromagnetic waves, the covert sailing of underwater vehicles makes its underwater navigation and positioning become a difficulty and a hot research field. The existing underwater navigation and positioning technology is mainly based on the traditional autonomous navigation of the inertial navigation system (INS). To correct the cumulative error caused by INS, various auxiliary navigation technologies such as dead reckoning (DR) navigation, geophysical matching navigation and underwater acoustic navigation have been developed. This paper systematically introduces the basic principles, main characteristics and research progress of the abovementioned underwater navigation technologies and their combination methods, and then looks forward the development trend and application of underwater navigation technology in the future.

Key words underwater navigation; inertial navigation system (INS); integrated navigation

0 引言

水下潜航器是人类对海洋进行探索开发、捍卫国防安全的重要运载平台^[1-2]。高精度的水下导航定位技术是水下潜航器系统的核心技术之一, 能够实时提供潜航器的空间位置、姿态、速度、时间等运动状态关键信息^[3-4]。目前, 水下潜航器的导航

定位主要采用惯性导航系统、声相关或多普勒计程技术, 结合人工推算确定其位置。惯性导航技术自主稳定、隐蔽性高, 但通过将加速度对时间二次积分获取位置, 误差会随时间累积^[5]; 而声相关或多普勒计程仪因主动发射声信号, 有一定的暴露潜航器水下位置风险。为克服惯导系统的不足, 现一般考虑采用以惯导系统为主体的组合导航, 最常用的

是需潜航器上浮至水面,利用外部的无线电导航信息、卫星导航信息定期对惯性误差进行校正,但电磁波具有在水下迅速衰减的特点,难以作为水下大深度远距离的导航信息载体,而且潜航器上浮对系统动能也会造成浪费。

为此,地磁、重力、地形等地球固有物理属性匹配的惯性辅助导航技术,因其自主无源、隐蔽性强、无时间累积误差等特点,一直以来也受到很大关注和发展。声波是目前已知唯一能够在海水介质中远距离传输信息最有效的载体^[6]。利用声波可实现水下导航定位,水下平台不必上浮校准导航误差,能够保持长时间深潜,具有导航精度高、误差不随时间积累、有利于隐蔽等优点,未来水声辅助导航技术将扮演十分重要的角色。

总之,目前水下导航定位技术以惯性导航为主,以航位推算导航、地球物理匹配导航和水下声学导航等多种导航定位技术为辅,本文将分别对上述主要水下导航技术进行介绍分析,包括基本原理、方式特点和相关研究进展,最后对组合导航发展趋势进行探讨和展望。

1 惯性导航

惯性导航是基于惯性技术发展起来的一种完全自主的导航方式。惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)一般由惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、控制显示器和处理计算机构成,其中惯性测量单元是惯导系统的基础与核心部分,主要有三轴线加速度计和三轴陀螺仪^[5]。水下惯性导航的基本原理是通过精确测量潜航器载体的旋转运动角速率、姿态方位角和直线运动加速度,并利用获取的载体加速度对时间二次积分,结合载体姿态及航向从而估计推算其当前位置。

惯性导航本质上属于航位推算导航方式的一种。根据平台不同,INS可分为平台式惯导系统^[7](Gimbaled Inertial Navigation System, GINS)和捷联式惯导系统^[8](Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 2 大类。GINS 是用机电控制方式建立的物理实体平台,陀螺动态范围小,导航计算机解算负担较轻,适用于 20 世纪 60-70 年代的计

算机水平,但存在结构复杂、占空间大、可靠性差等缺点。随着计算机技术与精密陀螺的发展,基于计算机实现的数学平台 SINS,大大减轻了系统体积和重量,且可靠性较强,便于与其他系统连接,故目前在各领域特别是水下导航, SINS 应用越来越广泛。

惯性导航因其自主隐蔽、不受外界干扰、短时精度高、导航信息完备和数据更新率高等优点,成为水下隐蔽导航定位的首选主体导航方式。但由于 IMU 元件的固有属性,线性和角加速度传感器均存在噪声,导致随时间不可避免的系统漂移(一般民用水下潜航器漂移率达 1 km/h),INS 导航位置误差随时间不断累积。因此,在水下惯导系统实际使用过程中,为满足长时间工作在要求的导航定位精度范围内,需要定期对 INS 进行误差校正。目前,水下惯性导航系统的发展趋势也正是围绕其误差减小与校正进行:

1) 通过发展新型惯性元器件,不断提高输出精度,减小系统漂移误差。从传统的静电或液浮陀螺惯导系统,近年来已逐步发展有应用于水下导航的激光陀螺 SINS^[9](如美国霍尼韦尔公司 RL34 环形激光陀螺 INS)、光纤陀螺 SINS(如法国 IXSea 公司研制船用的 PHINS 和 MARINS^[10],定位精度分别为 0.6 n mile/h 和 1 n mile/24 h)和微机械陀螺 INS^[11](如美国 Crossbow 公司产的微机械陀螺 INS),惯性导航输出精度在漂移误差补偿抑制的基础上得到了提高,延长了其误差校正的周期。因此,推动 INS 向高精度、小型化、低成本、高可靠性和数字化发展是水下惯导系统未来的重要发展方向之一^[12]。

2) 以 INS 为核心,辅助以基于其他可观测运动位置信息的导航定位系统进行信息融合达到误差校正,如多普勒测速的航位推算导航、地球物理导航、水声定位导航等,这些辅助导航方式已经成为当前水下导航的重要研究方向^[1, 12-15],本文接下来也将进一步就此展开讨论。

2 航位推算导航

航位推算法(Dead Reckoning, DR)主要利用

测速传感器获取水下潜航器的速度,然后对时间进行积分,结合载体航向传感器信息及之前时刻位置推算出其当前所在位置^[16],是应用较早也是最基本的导航方式之一。其中,测速传感器作为 DR 系统核心,目前广泛采用的是多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)。DVL 基于声呐多普勒效应,

测得水下载体坐标系下相对于周围海底或水体层的速度。DVL 测速配置可分单、双和四波束配置 3 种类型,如图 1 所示^[1]。波束方向越多,获取的速度维度越丰富,图 1 所示的四波束 Janus 配置方式的 DVL 能同时测得载体的横/纵向的速度信息,导航精度更高。

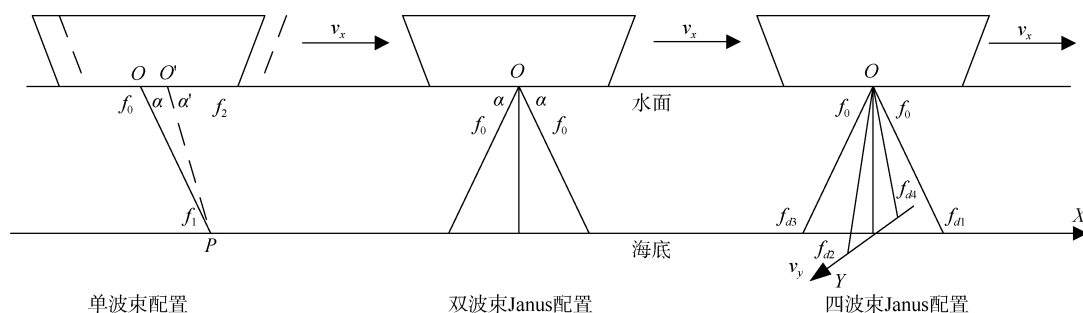


图 1 3 种多普勒计程仪 (DVL) 测速配置示意图

Fig. 1 Speed measurement configurations of 3 kinds of Doppler velocity logs (DVLs)

为了达到较高的测速精度, DVL 的发射声波频率一般也较高,而最大作用距离与工作频率(即测速精度)成反比^[17],如 RDI 公司生产的 DVL,发射频率 150~1 200 kHz,有效射程 500~30 m^[18]。考虑 DVL 声呐设备的有限测距范围, DVL 存在 2 种常用工作模式: 1) 在 DVL 的有效射程内,可以测得载体相对海底的绝对速度,称为底跟踪; 2) 超出 DVL 有效射程,只能测得其相对海水层的速度,称为水跟踪^[1,18]。对水跟踪模式下,容易受到未知的海流流速分量影响,特别是潜航器航速相对较小时,由速度误差累积产生的位置误差较大;而对精度较高的海底跟踪模式,潜航器下潜深度限制在靠近海底附近,且受环境变化影响易出现 DVL 对地失锁的数据失效现象^[19],有学者针对这些问题进行了研究并提出了相应的解决办法^[19-21]。

总的来说,航位推算导航中的 DVL 测速时主动发射高频声波,隐蔽性相对惯导较差;接收的反射波束受环境影响大,数据易失效;不过 DVL 能提供精度较高的载体速度信息,且误差不随时间累积,可主要利用其对 INS 的速度测量误差进行实时修正,一般跟 INS 组合导航使用^[22]。目前国外水下潜航器常用的 DVL 主要有:美国 EDO 公司研制的 3040/3050 型 DVL 等,其精度达到 0.2%^[23];美

国 RDI 公司的 Workhouse Navigator 系列,精度可达 0.4%^[18]。

3 地球物理导航

海洋地球物理导航是利用勘测的海洋固有的地球物理属性(主要包括磁力场、重力场和海底地形场)的时空分布特征,制作地球物理导航空间位置参考图,通过潜航器航行过程中所载物理属性传感器现场采集的特征信息与存储的参考图相匹配,实现水下精确定位的高新自主导航方法^[24-26]。地球物理导航误差不会随时间发散、无源自主、抗干扰性强、隐蔽性高,其与传统 INS 的组合是校正 INS 累积误差问题的理想途径^[27-28]。由于显著的军事价值,1997 年美、法两国联合启动以地球物理导航为代表的非传统导航方式的研究计划 NTM,其中美国海军水下作战中心 (NUWC)、美国海军研究局 (ONR)、麻省理工学院 (MIT) 等的多个科研院所也都对海洋地球物理导航进行深入持续研究^[29]。

水下地球物理辅助导航系统由 3 部分组成:地球物理基准参考图、地球物理传感器和导航匹配算法,其关系图如图 2 所示^[12]。目前,海洋地球物理导航虽然能够提供一个较大范围的导航定位,但受上述 3 个组成部分各自精度的影响,导航定位精度

往往不高,而且前期需要大量工作对导航海域大规模地测绘调查以建立相关的物理场参考图,导致目前工程应用较少,仍有较大的潜力待开发。当前地球物理辅助导航研究趋势集中在提高其导航精度和速率上,相应地表现在3个方面:1)绘制更高精度更广范围的物理属性分布参考图;2)研发更高精度的物理属性采集传感器;3)选用特征变化明显的导航匹配路线^[30]、更准确快速的匹配算法。由于地形匹配^[30-31]、重力匹配^[32-33]和磁力匹配^[34-35]这几种地球物理辅助导航方式原理特点类似,本文接下来选择以典型的水下地形匹配导航为例,围绕上述3方面研究趋势,特别是导航匹配路线及匹配算法方面,展开作简要介绍。

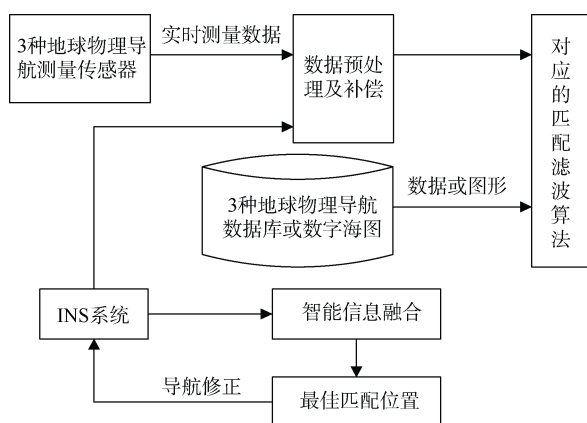


图2 惯性导航/地球物理组合导航原理图

Fig. 2 Schematic diagram of inertial navigation system (INS)/geophysical integrated navigation

地形匹配导航中,首先将勘测后的任务海域附近的海底地形或水深,按照测绘标准构建完备高精度的数字参考海图^[36],并存储在本地海底地形数据库中;当潜航器经过该海域时,可利用高精度测深仪来实时获取现场地形信息,并与地形数据库中的数字参考海图进行匹配计算,估计出最佳匹配定位的位置,然后可对INS误差进行补偿^[37]。

海底地形辅助导航(Seabed Terrain Aided Navigation, STAN)的研究起步较早,但受限于缺乏高精度的测深仪来获取足够准确的地形图,直到20世纪末,多波束探测等新技术提供了轮廓特征

鲜明的海底地形信息,使得海底地形匹配导航的工程化成为可能^[38],也是目前地球物理导航技术中发展最为成熟的。目前,在数字海图地形数据库绘制方面,美国国家图像与测绘局已经建立了分辨率可达0.5'的DBDB0.5海底地形数据库。

地形匹配算法是STAN的重要部分,根据估计准则的不同可分为地形相关匹配算法、基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的匹配算法和基于直接概率准则的匹配算法。其中,经典规则网格模型的地形轮廓匹配算法TERCOM(Terrain Contour Matching),基于最小二乘估计理论,没有考虑被估参数和观测数据的统计特性,不是最优的估计方法;改进的等值线匹配算法ICCP^[39](Iterated Closest Contour Point),可将测得航迹水深值连接成曲线,与已存在的等深线图进行匹配。而桑迪亚惯性地形辅助导航算法(Sandia Inertial Terrain-Aided Navigation, SITAN),通过EKF将惯导数据和观测数据结合起来进行连续迭代处理,可实时修正惯导系统误差,但因需要对地形线性化处理,不可避免地引入误差;基于粒子滤波的匹配算法^[40],可以解决非线性、非高斯条件下问题,是一种全局最优滤波算法。

匹配区域的选择也是对导航精度的关键影响因素,主要依据匹配区域特征参数的特点来决定^[41],文献[42]给出了地形匹配导航区域选择的定量准则。在先验地形图可得且地形高程变化明显的可匹配区域,采用STAN来修正INS位置误差。而对于在先验地形图不可得或者地形高程变化不明显的不可匹配区域,徐晓苏等人^[43]提出一种结合地形和环境特征的水下导航定位改进方法,即采用基于海洋环境特征同步定位与构图算法(Simultaneous Location and Mapping, SLAM)来修正INS位置误差。

4 声学导航

与电磁波相比,声波可在水下衰减较小而进行远距离传播,故声信号被广泛应用于水下通信与导航定位。水声导航利用水下声导航信号到达的时间差或相位差来测距测向,从而获得潜航器的水下定位信息^[44]。水声导航定位对潜航器的下潜深度没有

限制,且导航精度高、误差不随时间积累,可满足潜航器长时间隐蔽深潜需求,是有效修正水下 INS 累积误差的重要辅助导航方式之一。

4.1 水声定位系统

水声定位系统是当前水声导航定位的主要方向之一^[44],需要预先在海底(或海面)潜航器载体上布设多个换能器基元,作为接收器或应答器,基

元之间的连线称为基线。根据声学定位系统定位基线的长度,传统上可将其分为3种类型(如图3所示^[12]):超短基线定位系统(Ultra Short Base Line, USBL)、短基线定位系统(Short Base Line, SBL)、长基线定位系统(Long Base Line, LBL)。接下来,将以最常用的 LBL 为重点,对这3种类型的水声定位系统作逐一简要介绍。

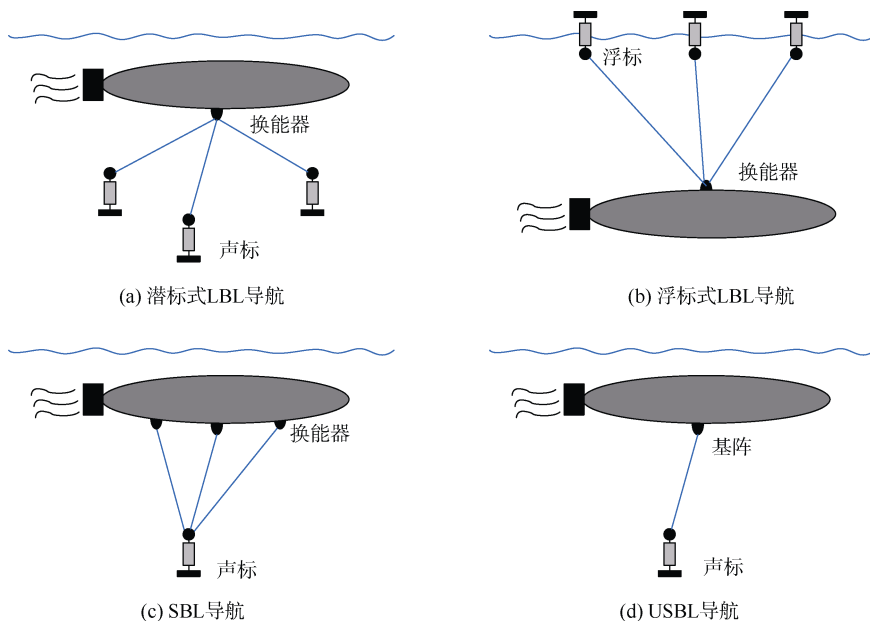


图3 3类声学导航定位系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3 kinds of acoustic navigation and positioning systems

1) 超短基线定位系统(USBL)一般将定位基元布置在潜航器载体底部,基线长度小于1 m,3个以上的基元构成的基线阵可集成1个整体单元内,通过测量声波在已知参考位置的信标与基元之间的传播时间来确定斜距,通过测相技术来确定方位,以确定水下潜航器的相对定位。USBL整个系统构成简单、体积小,便于布放和回收,适用于低成本小型潜航器,但其精度相对最低,需要做大量的校准工作,且作用距离较近,不能满足深海远距离高精度导航定位要求。20世纪90年代以来,USBL系统相关产品国外主要有挪威Simrad公司推出的HiPAP系列,如HiPAP502型,作用距离达10 km,精度达 $0.15\% D$ (D 为作用距离)^[45];法国Oceano Technology公司生产的Posidonia 6000型,深度达水下6 km,精度为0.3 m。国内超短基

线水声定位系统研发近年来快速发展,目前已经有较为成熟的声学导航定位系统。例如:哈尔滨工程大学等开发研制成功的“长程超短基线定位系统”^[46],该系统最大作用距离可达到8.6 km,工作水深超过3 700 m,并且具有水下目标动态跟踪的功能,其定位精度可达到 $0.2\% \sim 0.3\% D$,具有精度高的突出优点;中国中海达公司iTrack-UB 3000,工作范围达3 000 m,精度为 $0.45\% D$ ^[47]。上述国内外水声导航定位系统作用范围较近,一般不超过10 km,不能满足远距离对潜导航定位的需要。

2) 短基线定位系统(SBL)与USBL类似,定位基线布在潜航器底部,3个以上的基点构成基线阵,基线长度1~50 m,通过测时、测相来完成潜航器的导航定位。SBL系统构成简单,同样需要大量的校准工作^[48],精度介于USBL和LBL之间,

适合在母船附近的潜航器导航定位。目前代表性的产品有澳大利亚 Nautronix 公司生产的 NASDrill RS925 型 SBL 系统,在低信噪比及较深海域条件,可实现在较大范围内的较高精度定位^[44]。

3) 长基线定位系统 (LBL) 多在海底布设 3 个以上的基点信标,基线长度 100~6 000 m,潜航器一般位于基线阵内部,通过测算各基元信标到潜航器的距离,基于几何交汇原理估计潜航器的位置。LBL 系统构成相对复杂,基线布设回收难度大、成本高;但其适合大面积导航区域使用,且其测量过程与水深无关,不需要连接姿态传感器和罗经设备等外部设备,定位精度相对最高。另外,新兴的浮标式 LBL (如图 3(b)所示)克服了潜标式 LBL 在海底布设困难的问题,浮标上可直接接收 GPS 信号,为水下导航提供精确的参考位置信息和时间基准,但也因自身浮在海面因素约束,存在现有系统作用距离不远、易受海洋风浪和人类活动的影响等问题。

LBL 定位系统在声学导航定位中应用广泛,如国外挪威 Simrad 公司 HiPAP 系统兼容 USBL 和 LBL 定位功能,作用距离提高到 10 km,定位精度 0.2 m;英国 Sonardyne 公司的 COMPATT 系统克服了传统长基线系统的布设和校准应答器阵列需要花费大量时间的局限性,开发了智能型 COMPATT 应答器,直接进行各对应答器之间的基线测量,作用距离达到 10 km;法国 IXBLUE 公司推出的长基线定位系统能够与 INS、DVL、GPS 以及深度传感器等多种设备组合使用,形成综合的水下导航系统。

从目前研究热点来看,LBL 声学导航定位系统朝着距离更远、精度更高、成本更低等趋势方向发展。频率越高,LBL 精度越高,但高频声波的海水衰减增大,使得定位范围也会越小。目前的水声定位导航系统频率 10 kHz 级别,限制了作用距离一般在 10 km 以内;未来趋势要实现百千公里级以上远距离隐蔽水声导航定位,工作频率需 1 kHz 以下,水声通信技术的快速发展提供了可能性^[49]。

包括 LBL 在内的声学导航定位系统的精度误差主要来源于传播信道等效声速的估计误差^[50],当

水下潜航器与信标位置距离较远,导航信号受到边界和垂直声速剖面起伏影响而使得等效声速的估计误差较大,产生一定的测距误差,影响定位精度。为了提高声学导航定位精度,一种思路是获取更准确的等效声速估计手段,如工程中常用的直接测量法和水声传播理论与经验公式修正法^[51-52];由于海洋环境的复杂性和时变性,上述方法估测的等效声速依然精度不高,为此另一种思路是利用非线性滤波算法,将等效声速作为待估计状态量,采用声速-位置联合估计的水声导航方法^[53],可有效提高等效声速估计精度从而减小定位误差。

为降低传统 LBL 定位系统多信标布阵成本,近年来发展的单信标导航这一新型导航方式,只需要布放 1 个声信标就可以实现某个区域的导航,具有布阵简单和低成本的优点。利用潜航器目标一段时间内机动多次测距及惯性导航测得相对移动量,可实现满足宽泛精度要求的单信标定位。文献[54]对单信标导航方式的可行性与有效性进行了充分论证,文献[55]对其精度分析与航路规划进行了研究。

4.2 协同导航

针对水声定位系统中固定信标对导航范围的限制及布设维护难问题,为扩大定位区域,考虑采用以运动的航行器替代信标,形成声学导航移动基线,即协同导航定位^[56-59],常见于 AUV/UUV 协同。同时,多水下潜航器协同导航定位也是解决海洋中间层水下导航问题的重要途径^[60]。多潜航器之间通过通信共享信息来进行协同导航,可以提高水下导航精度^[59]。

根据单体潜航器结构的不同,协同导航可分为 2 种:1) 并行式。每个潜航器均需配备高精度的水下导航系统,成本较高不实用;2) 主从式。主潜航器配备高精度的水下导航系统,从潜航器通过水声测距获得相对主潜航器的距离和方位信息,从而修正自身定位结果。协同导航应用扩展卡尔曼滤波融合信息,抑制自身惯导的时间积累误差,使得整个系统导航误差在一定界限内,解决了导航误差随时间增加的问题,其相对位置的确定是关键。

多航行器协同是水下导航的一个新方向,目前

美、英国家已进入应用阶段,得到广泛应用的协作系统代表有:欧盟“GREX”项目^[61]、美国自主海洋采样网络(Autonomous Ocean Sampling Network, AOSN)、美国新泽西大陆架观测系统^[62](New Jersey Shelf Observing System, NJSOS)。该领域我国还处于理论分析和仿真试验阶段,代表性研究机构有中科院自动化研究所^[63]、哈尔滨工程大学^[64]、西北工业大学^[65]等。

5 水下组合导航

可以看到,上述的各种水下导航系统各有优缺点,只用某个单一的导航技术并不能在长时高精度、高可靠性等方面同时满足现代导航需求。因此,组合导航技术成为水下导航技术的研究热点与焦点,其通常是指以SINS为主,借助DVL、地形匹配导航、重力导航、海洋地磁导航、声学导航等其中1个或多个进行辅助的组合导航技术,旨在采用高精度的导航技术对INS随时间积累误差进行修

正,同时保证潜航器的自主性和隐蔽性^[1]。以卡尔曼滤波技术为代表的现代控制理论的兴起和数字计算机的发展分别为组合导航提供了理论分析基础和硬件实现条件,促成了组合导航的发展。

目前组合导航研究的组合方向众多^[12],如SINS/DVL^[22]、SINS/地球物理匹配^[66]、SINS/声学定位导航^[67]等,其本质是将辅助导航的中间观测数据或处理结果作为卡尔曼滤波器的观测量,即对应紧/松2种组合方式,然后对组合导航系统进行融合滤波,从而对INS系统漂移误差进行抑制修正,实现稳定连续、高精度的导航定位。而对于多个辅助导航与INS组合导航方式,区别在于涉及到分级联邦滤波器进行融合滤波^[68-69],如图4所示^[69],联邦滤波器是一种两级数据融合结构,子滤波器和主滤波器并行工作,设计灵活、实时性好、容错性高,解决了各传感器输出频率的不同,有效提高了导航精度。

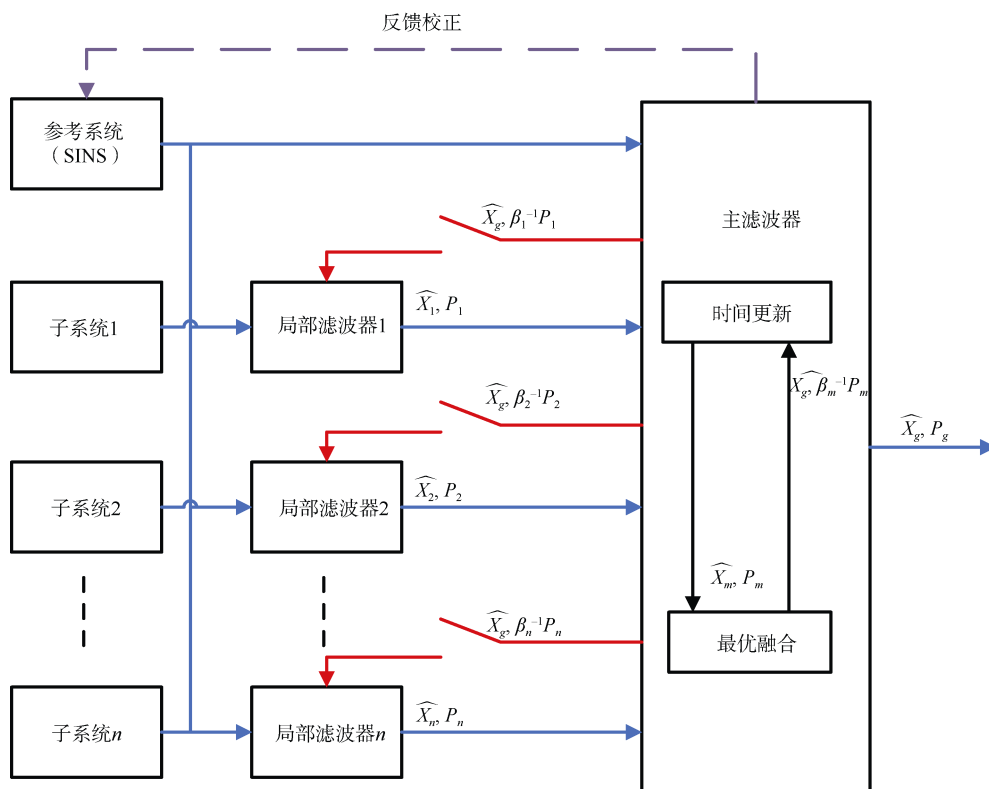


图4 联邦滤波基本结构

Fig. 4 Basic structure of federated filtering

6 趋势与展望

近年来,随着人类海洋活动的日益增多,水下潜航器在民用和军用方面的需求迫切,促进了水下导航定位技术的迅速发展,技术上总体追求的是精度、作用距离、连续性、实时性、高可靠性、隐蔽性和海域适用性。本文总结了当前水下导航定位研究的技术发展趋势,并根据不同导航技术特点做了应用展望。

6.1 技术发展趋势

1) 在水下导航各独立子系统方面,未来将继续朝着提高关键传感器精度、提高作用距离、降低成本和改进处理算法等热点方向发展。

2) 在水下组合导航系统方面,未来仍将以惯性导航技术为主体,结合无源重力、地磁、海底地形匹配以及水声定位等新型辅助导航技术,进行多源导航信息融合滤波,实现各子导航系统优势互补、冗余观测量提高可靠性、降低导航成本、以满足稳定连续、自主隐蔽的高精度水下导航定位功能。

6.2 应用展望

1) 潜艇导航方面。目前以惯导为主,辅以卫星导航定期矫正误差,未来仍将以惯导为主,通过发展新型惯性元器件、辅以地球物理导航和低频远程水声通信导航,以提高隐蔽导航精度。针对水下大深度、不确定海域的隐蔽高精度导航定位问题,可进一步验证声学定位导航作为主用辅助导航技术的可行性,重点加强对复杂地形条件下的声速场高精度估计与测量方法研究。

2) 无人潜航器导航方面。无人潜航器是水下侦察、探测、攻击和水下环境隐蔽测量的新型作战力量。大型潜航器远距离、大范围单独执行任务期间的导航技术要求与潜艇类似。小型潜航器工作的海域范围有限,组网工作是发展趋势,需要同时控制的节点数多,声学导航中的主从式协同导航将是重要的应用方向。

3) 水下工程与运维方面。随着世界范围内对海洋特别是深海的大规模探索开发和军事利用,海上工程施工和运行维护量会逐渐增多,某些军事设

施的水下布放与回收要求能够水下隐蔽作业。为满足水下高精度导航定位需求,惯导与航位推算导航中的多普勒计程仪、声学导航中的短基线定位的组合方式将是重要的应用方向。

4) 民用水下导航方面。水下资源勘探、海洋环境保护与监测、海底打捞与搜救等民用领域对水下导航与定位需求日益迫切,水下自主机器人的应用广泛。由于民用水下导航的隐蔽性和作用距离相对要求不高,在不断发展水声定位导航等辅助导航技术同时,卫星导航系统和捷联惯导系统的组合导航仍将是未来民用水下导航重要的应用方向。

7 结束语

本文对水下导航定位技术发展脉络进行了系统梳理,分析了不同技术的优缺点和适用条件,提出了多源导航信息融合滤波、各子导航系统优势互补、自主水下高精度导航定位方式,展望了技术发展和应用方向。为推进实际问题的解决,需进一步深化不同场景下的水下组合导航技术集成应用研究,加大实际海洋环境下的试验验证力度。

参考文献

- [1] 黄玉龙,张勇刚,赵玉新.自主水下航行器导航方法综述[J].水下无人系统学报,2019,27(3):232-253.
- [2] 朱大奇,胡震.深海潜水器研究现状与展望[J].安徽师范大学学报:自然科学版,2018,41(3):205-216.
- [3] STUTTERS L, LIU H H, TILTMAN C, et al. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2008, 38(4): 581-589.
- [4] 熊正南,蔡开仕,武凤德,等.21世纪美国战略潜艇导航技术发展综述[J].舰船科学技术,2002,24(3):331-335.
- [5] 高钟毓.惯性导航系统技术[M].北京:清华大学出版社,2012.
- [6] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1993.
- [7] 泰永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2005.
- [8] 张天光,王秀萍,王丽霞.捷联惯性导航技术[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [9] 张炎华,王立端,战兴群,等.惯性导航技术的新进

- 展及发展趋势[J]. 中国船舶, 2008, 49(183): 134-144.
- [10] 尹伟伟, 郭士萃. 非卫星水下导航定位技术综述[J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (3): 8-11.
- [11] 董进武. 惯性导航技术浅析[J]. 仪表技术, 2017(1): 41-43.
- [12] 魏博文, 吕文红, 范晓静, 等. AUV 导航技术发展现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(1): 1-9.
- [13] 许昭霞, 王泽元. 国外水下导航技术发展现状及趋势[J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (11): 154-157.
- [14] 吴尚尚, 李阁阁, 兰世泉, 等. 水下滑翔机导航技术发展现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27 (5): 529-540.
- [15] 周保军, 刘硕. 水下导航技术研究[J]. 现代导航, 2012, 3 (1): 19-23.
- [16] 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.
- [17] LEONARD J J, BAHR A. Autonomous underwater vehicle navigation[M]. Cham: Springer, 2016.
- [18] JALVING B, GADE K, SVARTVEIT K, et al. DVL velocity aiding in the HUGIN1000 integrated inertial navigation system[J]. Modeling, Identification and Control, 2004, 25 (4): 223-235.
- [19] HEGRENAS O, BERGLUND E. Doppler water-track aided inertial navigation for autonomous underwater vehicle[C]// Proceedings of the IEEE Oceans Conference and Exhibition. Bermen: IEEE, 2009.
- [20] ZHU Y, CHENG X, HU J, et al. A novel hybrid approach to deal with DVL malfunctions for underwater integrated navigation system[J]. Journal of Applied Sciences, 2017, 7 (8): 759.
- [21] MARTINEZ A, HERNANDEZ L, SAHLI H, et al. Model-aided navigation with sea current for an autonomous underwater vehicle[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12 (7): 103.
- [22] 赵俊波, 葛锡云, 冯雪磊, 等. 水下 SINS/DVL 组合导航技术综述[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(1): 2-9.
- [23] JAMES C K, RYAN M E, LOUIS L W. A survey of underwater vehicle navigation-recent advances and new challenges[C]// Proceedings of the IFAC Conference of Maneuvering and Control of Marine Craft. Lisbon: IFAC, 2006.
- [24] 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.
- [25] RICE H, KELMENSEN S, MENDELSON L. Geophysical navigation technologies and applications[C]// Position Location and Navigation Symposium. Monterey: IEEE, 2004.
- [26] 许昭霞, 王泽元. 国外水下导航技术发展现状及趋势[J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (11): 154-157.
- [27] 许大欣. 利用重力异常匹配技术实现潜艇导航[J]. 地球物理学报, 2005, 48 (4): 812-816.
- [28] 武凤德. 21 世纪的舰船导航技术[C]// 世纪之交的中国导航技术发展研讨会. 成都: 中国电子学会, 1998.
- [29] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [30] 冯庆堂. 地形匹配新方法及其环境适应性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [31] 陈小龙. AUV 水下地形匹配辅助导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [32] 崔晨风. 水下重力匹配辅助导航技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [33] 吴太旗, 欧阳永忠, 陆秀平, 等. 重力匹配导航的影响模式分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19 (5): 559-564.
- [34] 丁永忠, 王建平, 徐枫. 地磁导航在水下航行体导航中的应用[J]. 鱼雷技术, 2009, 17 (3): 47-51.
- [35] 徐锋. 水下地磁辅助导航研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [36] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科学技术大学出版社, 2000.
- [37] 邹炜, 孙玉臣. 水下地形匹配辅助导航技术研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (8): 5-10.
- [38] WILLIAMS S W, MAHON I. A terrain-aided tracking algorithm for marine system[C]// The 4th International Conference on Field and Service Robotics. Lake Yamanaka: FSR, 2003.
- [39] 郑彤, 边少锋, 王志刚. 基于 ICCP 匹配算法的海底地形匹配辅助导航[J]. 海洋测绘, 2008, 28(2): 21-23.
- [40] 湛剑. 基于粒子滤波的水下地形匹配算法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2009.
- [41] 韩雪峰, 晏新村, 李建军, 等. 水下无源导航系统匹配区域选择分析[J]. 全球定位系统, 2013, 38 (1): 49-52.
- [42] 郑彤, 蔡龙飞, 王志刚, 等. 地形匹配辅助导航中匹配区域的选择[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 191-196.
- [43] 徐晓苏, 汤郡郡, 张涛, 等. 一种结合地形和环境特征的水下导航定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23 (5): 590-596.
- [44] 李守军, 包更生, 吴水根. 水声定位技术的发展现状与展望[J]. 海洋技术, 2005, 24 (1): 130-135.
- [45] 肖昌荣, 蔡青吉, 李鹏. HiPAP100 水下定位系统及

- 应用[J]. 电子世界, 2014 (12): 210-211.
- [46] 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.
- [47] 罗宇, 施剑. 中海达 iTrack 系列水声定位系统的应用[J]. 测绘通报, 2014 (8): 136-137.
- [48] 高国青, 叶湘滨, 乔纯捷, 等. 水下声定位系统原理与误差分析[J]. 四川兵工学报, 2010, 31 (6): 95-97.
- [49] 王海斌, 汪俊, 台玉朋, 等. 水声通信技术研究进展与技术水平现状[J]. 信号处理, 2019, 35 (9): 1441-1449.
- [50] 孟庆波, 王振杰. 深度约束下的声速估算[J]. 应用声学, 2019, 38 (5): 830-836.
- [51] 梁国龙, 林旺生, 王燕. 水声信道有效声速估计方法及空间特征分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31 (12): 1587-1592.
- [52] REN Y, ZHANG R H, WANG J, et al. Stability and a fast calculation method of travel speed of pulse peak in convergence zone[J]. Sci China-Phys Mech Astron, 2014, 57 (7): 1274-1282.
- [53] 李璠瑶. 基于非线性滤波的目标跟踪方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [54] ZHANG J C, SHI C H, SUN D J, et al. AUV integrated navigation algorithm based on single beacon ranging[C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). US: IEEE, 2017.
- [55] 梁国龙, 张新宇, 孙思博, 等. 单信标导航精度分析与航路规划[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27 (2): 181-188.
- [56] PAULL L, SAEEDI S, SETO M, et al. AUV navigation and location: a review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39 (1): 131-149.
- [57] KALWA J. The GREX-Project: coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned system in uncertain environment[C]// OCEANA 2009-EUROPE. US: IEEE, 2009.
- [58] 刘明雍. 水下航行器协同导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [59] 徐博, 白金磊, 郝燕玲, 等. 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报, 2015, 41 (3): 445-461.
- [60] 张立川, 刘明雍, 徐德民, 等. 基于水声传播延迟的主从式多无人水下航行器协同导航定位研究[J]. 兵工学报, 2009, 30 (12): 1674-1678.
- [61] KALWA J. Final results of the European Project GREX: coordination and control of cooperating marine robots[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43 (16): 181-186.
- [62] SCHOFIELD O, CHANT R, KOHUT J, et al. The growth of the New Jersey Shelf Observing System for monitoring plums and blooms on the Mid-Atlantic continental shelf[C]// OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04. Kobe: MTS/IEEE, 2004.
- [63] 张少伟, 俞建成, 张艾群, 等. 水下机器人自主海洋特征场跟踪研究[J]. 科学通报, 2013, 58 (22): 67-74.
- [64] 牟春晖, 边信黔, 王宏健, 等. 具有通信约束的多 UUV 协同路径跟踪控制[J]. 鱼雷技术, 2011, 19 (3): 195-200.
- [65] 张立川, 许少峰, 刘明雍, 等. 多无人水下航向其协同导航定位研究进展[J]. 高技术通信, 2016, 26 (5): 475-482.
- [66] 葛锡云, 申高展, 潘琼文, 等. 基于惯性导航/地磁的水下潜器组合导航定位方法[J]. 船舶科学技术, 2014, 36 (11): 120-124.
- [67] 张涛, 石宏飞, 徐晓苏. 基于 SINS/LBL 紧组合的 AUV 水下导航定位技术[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23 (4): 500-504.
- [68] 范欣, 张福斌, 张永清, 等. 多传感器信息融合的水下航行器组合导航方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36 (3): 78-81.
- [69] 袁东玉, 马晓川, 刘宇, 等. 基于 SINS 的水下组合导航系统研究[J]. 网络新媒体技术, 2019, 8 (5): 47-56.

(责任编辑: 曹晓霖)