

中国科学引文数据库(CSCD)
 中文科技期刊数据库
 中国核心期刊(遴选)数据库
 日本科学技术振兴机构数据库(JST)

・中国学术期刊(网络版)(CNKI) ・中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED) ・中国超星期刊域出版平台

# 水下导航定位技术综述

张 涛,夏茂栋,张佳宇,朱永云,童金武

### Review of underwater navigation and positioning technology

ZHANG Tao, XIA Maodong, ZHANG Jiayu, ZHU Yongyun, and TONG Jinwu

引用本文:

张涛,夏茂栋,张佳宇,等.水下导航定位技术综述[J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 1–16. DOI: 10.12265/j.gnss.2022094 ZHANG Tao, XIA Maodong, ZHANG Jiayu, et al. Review of underwater navigation and positioning technology[J]. Gnss World of China, 2022, 47(4): 1–16. DOI: 10.12265/j.gnss.2022094

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022094

### 您可能感兴趣的其他文章

# Articles you may be interested in

### 改进Sage-Husa算法在飞机组合导航中的应用

The application of improved Sage-Husa algorithm in aircraft integrated navigation 全球定位系统. 2021, 46(3): 54-60

### 异步联邦UKF的GNSS / SINS / 摄影定位组合导航算法仿真

Simulation of GNSS / SINS / Photogrammetry Integrated Navigation using Asynchronous Federal UKF Algorithm 全球定位系统. 2018, 43(6): 25-32

### 北斗卫星导航系统在AUV中的应用研究

Study on the Application of BeiDou Satellite Navigation in AUV 全球定位系统. 2018, 43(1): 96-101

### 改进的自适应滤波算法在BDS / INS组合导航中的应用

Application of Improved Adaptive Filtering Algorithm in BD / INS Integrated Navigation 全球定位系统. 2018, 43(3): 1-6

### 北斗卫星导航系统在近海无人水下航行器路径跟踪方面的应用

BDS application of offshore UUV path tracking 全球定位系统. 2021, 46(2): 98-103

### 多源融合导航系统的融合算法综述

A Survey of Fusion Algorithms for Multi-source Navigation Fusion System 全球定位系统. 2018, 43(3): 39-44



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2022094

# 水下导航定位技术综述

张涛1,2,夏茂栋1,2,张佳宇1,2,朱永云3,童金武4

(1.东南大学 仪器科学与工程学院,南京 210096;
2. 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室,南京 210096;
3. 江苏大学 农业工程学院,江苏 镇江 212013;
4.南京工程学院 工业中心、创新创业学院,南京 211167)

摘 要:自主式水下航行器 (AUV) 作为海洋资源的开发与利用的主要载体,执行任务时需 要准确的定位信息.现有 AUV 主要采用捷联惯性导航系统 (SINS) 为主,声学导航和地球物理场 匹配导航技术为辅的导航方式.本文简述水下导航方式基本原理、优缺点和适用场景;探讨各类 导航方式包含的关键技术,提高组合导航精度和稳定性.通过分析现阶段存在问题,展望水下导航的未来发展趋势.

关键词: 自主式水下航行器 (AUV); 捷联惯性导航系统 (SINS); 声学导航; 地球物理场匹配; 组合导航 中图分类号: P228.4 文献标志码: A 文章编号: 1008-9268(2022)04-0001-16

0 引 言

海洋中蕴藏着丰富的生物资源、矿物资源、可再 生能源以及空间资源<sup>[1-3]</sup>,已逐步成为人类赖以生存 的第二空间,是实现社会可持续发展的新型领域<sup>[4-5]</sup>. 各国政府意识到海洋资源将大大缓解当前的能源危 机,不遗余力地开发自主式水下航行器 (AUV) 以便 勘探和开采海洋资源. AUV 凭借体积小、可控性好、 续航时间长和搭载能力强等优点成为海洋开发的主 要载体,可用于海洋调查、水下搜救、水下结构监测、 水下监视和反地雷作战等军事和民用领域<sup>[6-8]</sup>.

为了确保 AUV 安全平稳工作,需要其具备导航 定位和自主返航能力<sup>[9-11]</sup>.此外,姿态、速度、位置等 导航信息是 AUV 精确控制的前提.因此,导航定位 技术是 AUV 核心技术之一.

卫星导航系统可为用户不限量全天候地提供导航、定位和授时 (PNT) 服务. 但是, 电磁波信号在海水这种高导电介质中衰减严重<sup>[12-13]</sup>, 迫使 AUV 只有上浮接近水面才能获取卫星导航系统或其他无线电导航系统的导航信息, 如果 AUV 在深海环境航行, 到达水面就需要很多时间和能耗, 并且存在暴露的可

能性.上述缺点限制了卫星导航系统或其他无线电导 航系统在 AUV 中的应用. 目前, 水下导航可以分为 三种,即捷联惯性导航(SINS)、声学导航和地球物理 场导航<sup>[14-15]</sup>. 惯性导航系统 (INS) 利用加速度计和陀 螺仪输出的比力和角速度信息,解算出载体的姿态、 速度和位置信息<sup>[16]</sup> INS 基于牛顿力学原理, 无需向 外部辐射信号,具有自主、隐蔽、输出频率高和输出 信息全等优势.尽管如此,随着时间的推移, INS 误差 将不断累积,因此需要依靠外部信息辅助修正,声学 导航可分为多普勒测速仪 (DVL) 和水声定位系统[17-18]. DVL 通过多普勒频移原理, 测量出 AUV 对底/对流 速度,具有测速精度高优点,但存在部分波束失效情 况,导致系统无三维速度输出.水声定位系统利用水 声传播的时延和相位差,获取应答器和 AUV 的相对 几何关系[19-20]. 根据基线长度, 可以分为长基线 (LBL)、短基线 (SBL) 和超短基线 (USBL). 虽然水声 定位精度高,但是需要提前布放应答器.地球物理场 导航是利用地球物理参数进行匹配定位[21-23].地球物 理导航具有全天候、隐蔽性强、精度不随时间累积等 优点,但是要预先生成先验基准图.随着 AUV 导航 性能要求的不断提升,单一的导航模式已不能满足当

收稿日期:2022-05-25

**资助项目:**国家自然科学基金 (52071080);中央高校基本科研业务费专项资金 (2242021K1G008,2242022K30017,2242022K30018); 东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室 (B 类) 开放基金资助项目 (SEU-MIAN-202002);南京工程学院引进人 才科研启动基金项目 (YKJ202043);江苏省研究生实践创新基金 (SJCX21\_0028)

通信作者:张涛 E-mail: zhangtao22@seu.edu.cn

前导航需求,以 INS 为核心,辅以水声导航或地球物 理匹配的组合导航系统已成为 AUV 的重要发展方 向,对于 AUV 的高精度、长时航行和远航程具有重 要的战略理论意义和实用价值.

本文回顾 DVL、水声定位、地形匹配、重力匹配 和地磁匹配水下定位技术,从算法原理、产品型号、 优缺点和关键技术难点等角度展开阐述,最后展望水 下导航的未来发展方向.

# 1 SINS/DVL 定位技术

DVL 是利用声波在水下传播时产生多普勒效应 测量载体速度的导航仪器<sup>[24]</sup>.根据 AUV 与水底相对 距离, DVL 有底跟踪和水跟踪两种模式<sup>[25]</sup>.当载体与 水底相对距离在量程内,声波能射到水底, DVL 采用 底跟踪模式输出对底速度.当 AUV 与水底相对距离 超出量程,声波不能射到水底, DVL 采用水跟踪模 式.依据发射波速数量,可分为单波束、双波束和四 波束,如图 1 所示.



单波束 DVL 安装在 AUV 底部,向水底发射一条波束,如图 1(a) 所示.由于 AUV 与水底存在相对运动,发射和接收时刻的声波频率发射变化,即可测

量 AUV 在单一方向上的速度. 双波束 DVL 沿船首和船尾各发射一条波束, 如图 1(b) 所示, 双波束可以 有效抑制 AUV 在垂直运动对测速的影响. 四波束 DVL 分别沿船首、船尾、船左侧和船右侧各发射一条 波束, 如图 1(c) 所示, 四波束消除垂直运动和摇摆运 动对测速的干扰, 提高 DVL 测速精度和灵敏度, 同 时输出三维速度信息.

美国 Teledyne RD Instruments 公司推出了 Wayfinder、Pathfinder、Tasman、Pioneer 四款类型的 DVL 设备,使用范围覆盖 AUV、无人遥控潜水器、无人/有 人水面艇以及拖曳系统,全系配套 INS,具有测速精 度高和范围广的优点. Rowe Technologies Incorporated (RTI) 公司研制 SeaPILOT 具有 300 kHz、600 kHz、 1 200 kHz 三种工作频率,对底量程为 8~150 m,对水量 程为 30~300 m,常规采用四波束 Janus 结构,最多扩展 八波束 Janus 结构. LinkQuest 公司推出 NavQuest300、 NavQuest600、NavQuest600 Micro,具有尺寸小、重量 轻、传输快、测速准和作用范围广等优点. DVL 设备 具体性能参数如表 1 所示.

	表	1	DVL	设备	性	能	参	数
--	---	---	-----	----	---	---	---	---

型号	精 度/(mm·s <sup>-1</sup> )	量程/m	测速 范围/(m·s <sup>-1</sup> )	工作 频率/kHz
D (1 C 1	0.3%v±10	300	±15	300
Pathfinder	0.2%v±10	100	±15	600
G DU OT	0.7%v±2	300	±20	300
SeaPILOT	0.25%v±2	130	±20	600
NavQuest300	0.4%v±2	300	±10	300
	0.2%v±1	140	±10	600

由表1可知, DVL 测速精度与量程和工作频率 相关,工作频率越高,测速精度越高,量程越小.国内 对DVL研究主要集中于哈尔滨工程大学、东南大 学、中科院声学所、国家海洋技术中心、中船重工以 及中海达卫星导航技术股份有限公司.自1980年起 中科院声学所开始研究多普勒测速理论,完成窄带原 理样机、宽带原理样机、工程样机和定型样机的研 制,其中300 kHz的DVL II 型测速精度达到0.4%v± 5 mm/s,量程为270 m.中科院声学所联合海鹰公司 共同推出300 kHz、600 kHz、1200 kHz 三种工作频 率新型 DVL 设备,最高测速精度达到0.3%v±3 mm/s, 量程 200 m,更新频率1 Hz.中海达公司研制具有四 波束 Janus 结构的 iFlow 声学多普勒流速剖面仪,最 高测速精度达到0.25%v±2 mm/s. SINS/DVL组合导航主要涉及对准、标定、数据融合和故障检测四个主要方面,下面依次展开介绍.

# 1.1 SINS/DVL 对准技术

惯性导航可以为 AUV 提供实时姿态、速度和位 置等导航信息,然而使用前必须进行初始对准,初始 对准的结果极大程度决定了最终组合精度.通常 AUV 在系泊或水面航行时接收 GPS 信号,进行初始 对准工作.在特定任务背景下,AUV需要在水下运动 过程中完成初始对准,此时却很难接收到 GPS 信号. 因此,不少学者提出基于 DVL 辅助的动基座对准. CHANG 等<sup>[26]</sup> 将对准划分为粗对准和精对准两个阶 段,第一阶段利用某一点的速度和位置信息,采用最 优四元数方法,快速获得一个粗略的姿态,第二阶段 利用非线性滤波算法,得出准确的初始姿态. 文献 [27-29] 采用回溯方法,加快对准过程.针对 DVL 量 测信息存在野值降低对准精度问题, CHANG 等<sup>[30]</sup> 提出包含异常值检测的姿态确定算法,当横向速度大 于设定阈值时舍弃.针对上述方法忽略了洋流的存 在, XU<sup>[31]</sup>提出动基座鲁棒对准算法, 通过分析观测 向量和参考向量之间的关系,设计了用于异常值检测 的幅度匹配方法,从而抑制野值对初始对准的影响. 针对 AUV 处在高机动状态下 DVL 发射和接收时刻 姿态发生变化, YAO 等<sup>[32]</sup> 设计了基于姿态补偿的动 基座对准算法,与传统的粗对准算法相比,该算法缩 短对准时间和提高了对准精度.

# 1.2 DVL 误差标定技术

DVL 刻度因子误差和 DVL 与 INS 之间的安装 误差均是影响 SINS/DVL 组合精度的主要因素,因此 使用前需要对上述误差进行修正.上世纪八十年代, JOYCE 等<sup>[33]</sup>提出基于最小二乘的标定方法,利用 GPS 输出的速度信息,完成航向安装误差角的标定. 上述方法仅仅完成单一维度标定,无法满足高精度导 航的需求.因此不少学者在此基础上研究了三维安装 误差角的标定<sup>[34]</sup>. KINSEY 等<sup>[35-37]</sup> 先后提出基于位 置、速度和加速度观测的标定算法,三种算法均是构 造两个不同坐标系的三维向量,借助最小二乘求解安 装误差角.位置和速度观测时需要外部信息辅助,如 LBL 或者 GPS 提供精确的位置和速度信息, 难以直 接运用到实际过程.加速度观测无需外部信息辅助, 即可完成自标定,但是对载体的机动性提出较高的约 束.上述文献忽略了刻度因子误差对导航精度影响. 文献 [38] 提出了一种基于迭代的标定方法, 可以同时 估计刻度因子误差和安装误差角,但要求载体保持长 时间的直线运动. 文献 [39] 提出新型的标定算法, 利 用 DVL 的误差模型, 分别建立基于位置和速度的观测向量和目标函数, 利用基于最优四元数的拟牛顿迭代法, 使得误差快速收敛. 除了最小二乘法、迭代法, 有学者研究基于卡尔曼滤波 (KF)的标定算法, 将安装误差角和刻度因子写入状态方程<sup>[40]</sup>. 针对将安装误差角矩阵基于小角度近似的问题, WANG 等<sup>[41]</sup>将安装误差角以四元数的形式表达, 分别采用零观测方程和速度观测方程, 估计出刻度因子误差和较大的安装误差角.

# 1.3 SINS/DVL 数据融合技术

INS 在短时间内保持较高的导航精度, 但定位 误差随时间发散, 利用 DVL 提供准确的速度信息, 通过 KF, 实现对 AUV 导航误差的抑制. SINS/DVL 组合方式有两种, 即松组合和紧组合模式<sup>[42]</sup>, 如图 2 所示.



松组合利用 DVL 量测出的速度信息与 INS 输出的速度信息相组合,模型简单,但至少需要 3 个方向的波束信息.紧组合直接利用 DVL 输出 4 个原始 波束信息与 INS 估计出 4 个波束进行滤波,定位精 度高且接收波束的数量不再必须为 4 个,但计算量要 高于松组合.KARIMI 等<sup>[43]</sup>比较了扩展卡尔曼滤波(EKF)和无迹卡尔曼滤波(UKF)在 SINS/DVL 组合导航上的性能差异,结果表明 EKF 具有更高的估计精度.针对 SINS/DVL 组合导航中常规滤波算法精度不高的问题,文献 [44]提出了一种平方根无迹信息滤波器.由于洋流、温度和盐度的变化, DVL 的噪声统计方差

发生变化. DVL 在融合过程中不准确的测量噪声协 方差导致定位误差变大, 甚至会出现滤波发散的情况. 因此, 不少学者提出基于自适应的 INS/DVL 组合 算法<sup>[45-47]</sup>. 自适应滤波算法能够根据外部环境估计出 测量噪声协方差, 但采用滑动窗或指数加权方式获取 的噪声协方差存在时延. YAO 等<sup>[48]</sup>将交互式多模型 滤波引入到 SINS/DVL 组合算法中, 通过建立多个模 型, 实时估计出噪声矩阵, 提高系统自适应能力. 针 对 DVL 量测信息存在野值问题, HOU 等<sup>[49]</sup>提出基 于 *M* 估计的滤波算法, 实现对 DVL 量测野值的抑制. **1.4** SINS/DVL 故障检测技术

在下列场景中, DVL 数据存在失效状态影响导 航精度:

1) 航行器与海底的距离超过了 DVL 的量程;

2) 海底存在淤泥时, DVL 发出的声波不能被反 射回来;

3) 声波传播过程中遇到海洋生物时, DVL 发出 的声波无法到达海底;

4) AUV 进行大角度机动时, DVL 在大横滚和大俯仰的情况下可能接收不到回波.

ZHU 等<sup>[50]</sup> 采用基于高斯过程回归的故障检测 算法来预测 KF 的新息,利用粒子群算法求解最优超 参数,通过比较预测新息和 KF 输出新息,判断 DVL 数据是否发生故障. WANG 等<sup>[51]</sup> 通过判断 INS 估计 出波束速度和 DVL 实际输出速度差值是否在一定阈 值内,从而确定 DVL 是否发生故障. 最简单处理 DVL 故障的方法为隔离,即对当前 DVL 数据舍弃, 仅进行状态更新.如果长时间不采取量测更新,导致 累积误差不断增加.因此,有学者提出通过构造虚拟 波束代替无效波速方法,提升系统容错能力.文献 [52] 采用基于神经网络的支持向量回归估计算法建 立惯性速度输出与 DVL 速度输出的映射关系, 辅助 DVL 失效后的 INS. KANG 等<sup>[53]</sup> 在自适应卡尔曼滤 波 (AKF) 算法的基础上, 将人工神经网络引入数据 融合算法,进一步提高了组合导航的容错能力,但神 经网络算法存在计算量大目训练时间长等问题,针对 波束受限问题, LIU 等<sup>54</sup> 根据水下无人状态运动特 性,简化坐标转换矩阵,利用压力传感器输出的深度 信息,构建与已知波束垂直的虚拟波束,实现高精度 导航.

# 2 SINS/声学定位技术

声波相较于电磁波在水介质中衰减速度慢且传 播距离远,所以声学定位成为水下导航的主流方式. 在海底固定一个或者多个位置已知的应答器,从声波 信号中获得 AUV 与应答器之间距离和方位角信息, 利用相对几何关系确定 AUV 绝对位置.根据接收声 学基阵的长度,水声定位系统可分为 LBL、SBL 和 USBL<sup>[56]</sup>.

LBL 由一个安装在 AUV 底部的声学换能器和 一个固定在海底的声学基阵构成,其中声学基阵由多 个应答器组成,如图 3(a)所示.在声速已知的前提 下,记录水声传播时间,计算应答器与载体之间的斜 距信息,借助球面交汇原理确定 AUV 位置.因此,水 下应答器的数量至少是三个,并且声学基阵的几何位 置决定了定位精度.长基线的基线长度百米以上,因 此定位精度最高,通常约1m,如果应答器的位置标 校的准确,定位精度可到达 0.01m,适用于大区域内 的作业,如水下目标定位、海洋测绘等.LBL 需要对 多个应答器进行布放、校准、回收等复杂操作,作业 成本高,且在深海环境下水声信息更新率低.



SBL 由安装在载体不同位置的多个声学基元组成和一个固定在海底的应答器构成,如图 3(b)所示. 定位精度取决于基元间距,间距越大,定位精度越高. 因此,短基线定位精度介于 LBL 和 USBL 之间. SBL 定位系统组成简单,基元布放方便,但定位范围相对较小. USBL 由一个安装在 AUV 底部的集成的声学基 阵和一个应答器构成,其中声学基阵由多个对称的水 听器组成,如图 3(c) 所示. USBL 的基线长度一般小 于米级,凭借体积小、携带方便和安装灵活等优势, 被广泛应用于商业、科研以及军事领域.相较于 LBL和SBL, USBL定位精度最低且作用范围最小,因此,改善超短基线定位精度和扩大作用范围成为近几年的研究热点.LBL、SBL和USBL的定位性能如表2所示.

类型	LBL	SBL	USBL
基线长度	100~6 000 m	1~100 m	<1 m
特点	基元空间分布广	基元布放于载体各处	集成声学单元
优点	定位精度高作用范围广	精度较高	体积小携带方便安装灵活
缺点	操作繁琐更新频率低	基元固定易受船体噪声影响	定位精度低作用范围小
适用对象	大范围内高精度定位	母船附近的水下机器人	小型潜航器

表 2 水声定位系统分类

在水声定位产品研发方面, 英国的 Sonardyne 公 司、法国的 iXBlue 公司、挪威的 Kongsberg 公司、美 国的 LinkQuest 公司居世界领先地位. 英国的 Sonardyne 公司的超短基线产品为 Ranger-USBL 系列,包 括 Ranger2, Micro-Ranger 2 和 Mini-Ranger 2. Ranger 2 适配性和功能性最强,作用范围可达11000m,斜距 精度 0.04% D, 其中 D 代表斜距. Micro-Ranger2 具有 体积小、重量轻、便携性和操作简单等优势,主要服 务于1000 m内的近海区域. 挪威的 Kongsberg 公司 推出 HiPAP 和μPAP 两个系列, 分别适用于深海和浅 海探测,作用范围分别为7000m和4000m,内置传 感器分别为 HAIN Subsea7000 INS 设备和 MRU-3 姿 态传感器, 定向精度分别为 0.04°和 0.25°, 测距精度 均优于 20 mm. 法国 IXBlue 公司水声定位产品包括 了 LBL 和 USBL 两类, 定位精度小于 0.01 m, 工作深 度可达 6 000 m, 若载体搭载 INS, 可实现稀疏应答器 组网定位, USBL 系统则有 GAPS 和 Posidonia 2 个系 列. GAPS 产品集成光纤惯性器件、全方向的声学天 线和超短基线,作用范围可达4000m,在信噪比为 20 dB 情况下, 斜距精度 0.06% D, 测距精度 0.02 m, 定向精度 0.03°, 适用于浅海环境下的 ROV 导航、采 矿和潜水员跟踪等. Posidonia 为 GAPS 增强版, 作用 范围扩大为10000m,可用于深海环境下的拖曳、管 道或者电缆的铺设.美国 LinkQuest 公司最新推出的 TrackLink 系列产品, 其中 TrackLink5000HA 作用范 围为 10 000 m, 定向精度 0.15°, 斜距测量精度 0.3 m, 定位精度为 0.3% D, 可同时追踪 8 个目标. 表 3 详细 描述各类型水声定位设备产品性能参数.

表 3 水声定位设备性能参数

型号	定位 精度/mm	定向 精度/(°)	量程/m	开角/(°)
GAPS M7	0.06% <i>D</i> ±20	0.03	4 000	160
Gyro-USBL 8 084-457	0.04% <i>D</i> ±15	/	7 000	180
TrackLink 5 000	0.3% <i>D</i> ±30	0.15	5 000	/
HiPAP 602	0.15% <i>D</i> ±20	0.04	7 000	180
μΡΑΡ 201	0.45% D±20	0.25	4 000	160

根据远海/深海探测、近海防卫、走向深蓝的战略 部署,国内一些高校和科研院所也开始对超短基线开 展了有益的探索.自 2002 年至今,哈尔滨工程大学分 别完成了国内首台深海 USBL 定位系统样机、工程 样机和系统产品的研制. 嘉兴中科声学科技有限公司 生产的 USBL 产品主要有 PS138、PS117、PS113 和 PS155等,其中,PS117产品作用距离为3000m,声 头深度为 50 m, 测向精度为 1°, 测距精度为 0.2 m, 定 位精度为1%D±1m.中海达公司推出基于水声宽带 扩频技术和高精度时间同步技术的 USBL 产品, 如 iTrack-UB1000 和 iTrack-UB3000, 同时融入了差分 RTK-GPS 技术, 工作频率为 15~25 kHz, 作用距离为 2000 m, 定位精度为 1% D±0.5 m, 可以满足各种环 境下的高精度水下定位需求. 2017年,东南大学和中 国科学院声学研究所,研制了国内首套 INS/USBL 一体化工程样机,填补了国内空白.为了进一步提高 USBL 的定位精度,不少学者分别从安装误差标定、 组合模型和滤波算法等角度开展研究.

# 2.1 SINS/USBL 误差标定技术

INS/USBL 的安装误差是影响组合导航定位精 度的关键因素之一. 在安装过程中通常很难保证 USBL 与惯性传感器做到坐标系完全统一.传统的标定方法 可归纳为最小二乘法和矩阵分解两大类. 唐秋华等 [57] 采用最小二乘方法实现 USBL 系统的校准, 标定结果 受采样点的限制,仅适用于安装误差角较小的情况. 郑翠娥等[58-59]采用加权最小二乘法解决了安装误差 角的标定问题,并通过试验验证算法的有效性.虽然 算法结构简单,但是只适合离线计算,2008年,CHEN<sup>[60]</sup> 采用测量船绕着海底的应答器做圆轨迹行驶,依次计 算出横滚误差角、航向误差角和俯仰误差角,对于偏 心圆和非标准圆轨迹都有很好的效果.在此基础上, CHEN<sup>[61-62]</sup> 改进超短基线系统标定算法,标定的轨迹 可以为直线,并进行了航迹测试,并取得较快的收敛 速度. 2018年,东南大学童金武等<sup>[63]</sup>提出了一种基于 增量迭代的安装误差角动态标定算法,实现安装误差 角的动态在线估计,在忽略其他误差项的情况下, 1000 m 的定位范围内, 可以将由安装误差角引起的 水平定位误差从 8 m 减小到 2 m. ZHU 等 [64] 分析了 超短基线系统实时标定问题,采用姿态确定方法,快 速准确标定出安装误差角. 文献 [57-64] 忽略另一个 重要的定位误差源,即杆臂误差,近年来,基于 KF 的 USBL 系统标定方法被广泛研究. 由于方位信息存 在, USBL 系统的测量方程具有很强的非线性. EKF、 容积卡尔曼滤波器 (CKF) 和 UKF 都适用于非线性系 统. ZHANG 等<sup>[65]</sup> 研究基于 UKF 的 USBL 系统标定 算法,状态变量同时包含安装误差角和杆臂误差,算 法能够在仿真环境和湖试环境下快速收敛.

### 2.2 SINS/USBL 组合模型

根据匹配组合机理和信息类型的不同,将 SINS/USBL组合分为松组合和紧组合<sup>[66]</sup>. 松组合以 位置匹配的方式进行的组合,即以 INS 给出的经度、 纬度和高度与 USBL 解算出的位置信息的差值作为 位置观测量. 紧组合以 USBL 直接输出的相对量测信 息(时延、方位角等)进行匹配组合.由于受标定误 差、姿态误差、应答器位置误差和 USBL 系统量测误 差等影响,松组合解算出的绝对位置会存在一定的误 差,定位精度比紧组合差,图 4 给出了 SINS/USBL 组 合模型示意图.

2007年, LEE 等<sup>[67]</sup>提出了一种伪超短基线系统 辅助定位算法, 仅仅在 AUV 上装了 2 个接收器, 测 出海底应答器与每个接收器的距离, 与 SINS 位置信



息建立距离差模型,同时增加声波出射角的信息观测量,构建了 SINS、DVL 和 USBL 的组合导航系统,水 池实验结果表明在仅仅利用测距的基础上,声学系 统提供的信息能够有效修正 SINS 的位置误差. 2008年,李守军等<sup>[68]</sup>提出了 SINS/USBL 松组合导 航系统模型,推导了 SINS/USBL 组合导航系统的状 态方程和量测方程,试验结果表明 USBL 系统能够修 正 SINS 的位置误差,证明模型正确性. 2010年, GENG 等<sup>[69]</sup>提出了一种基于 SINS/USBL 紧组合模 型,仿真验证该模型相比松组合具有更好的定位精 度. 2013年,MORGADO 等<sup>[70-72]</sup>分析 INS 与 USBL 的误差特性基础上,采用直接法反馈校正随机漂移误 差,提高导航精度.针对 AUV 运动效应带来时延测 量误差, ZHANG 等<sup>[73]</sup>提出基于时间回溯的量测方 程,提高了 AUV 在高机动情况下组合精度.

#### 2.3 SINS/USBL 滤波技术

海洋环境噪声是海洋中水声信道的干扰背景场, USBL 水听器接收的量测信息中就包含有海洋环境 噪声,表现为加性噪声和乘性噪声<sup>[74-75]</sup>.加性噪声表 现为水声量测噪声呈现出未知或时变的统计特性.乘 性噪声具体表现为水声量测信息出现没有规律性的 野值.针对 USBL 量测协方差矩阵未知或时间变化, XIA 等<sup>[76]</sup>提出基于变分贝叶斯理论的自适应滤波方 法,实现误差的快速收敛.针对过程噪声和量测噪声 存在时延和野值问题,XU等<sup>[77]</sup>提出了一种基于 Huber 估计的鲁棒滤波, 通过极大似然估计 (MLE) 和 定点迭代, 实现状态的最优估计. 针对量测野值呈现 非高斯特性问题, WANG 等<sup>[78-79]</sup> 将学生分布应用于 INS/USBL 组合导航模型, 提出了一种基于学生 *t* 的 组合模型, 实现了对野值的抑制, 并且其性能优于传 统鲁棒滤波算法.

# 3 基于地球物理场辅助的 INS 技术

地球物理场导航是利用勘测的磁场、重力场、海底地形的时空分布特征,与先验基准图进行特征匹配,实现 AUV 的自主导航方法.其基本思想为先对预计航行海域进行物理测绘,将采集到的特征保存下来,绘制成基准图并存入计算机中.在 AUV 进行地球物理场导航时,利用携带的各种传感器采集AUV 周围的各种物理参数,并将其输入计算机中与相应的基准图进行特征匹配,从而获取确切的位置信息,图 5 描绘地球物理场辅助 INS 过程.海洋地球物理场导航根据采用物理参数的不同可具体分为地磁匹配导航、重力场导航、地形匹配导航等.



图 5 地球物理场辅助 INS 示意图

# 3.1 重力辅助的 INS 技术

重力匹配导航是根据地球重力场的变化进行定位的,不需要收发外界信号.因此,它具有隐蔽性、实时性和高精度等优点.重力辅助惯性导航系统由INS、重力基准图、重力测量传感器和匹配算法四部分组成<sup>[80]</sup>.AUV携带的重力测量传感器,测量当前位

置的重力特征信息,将重力信息与预先存储的重力数 据库地图进行比较,通过匹配算法估计真实位置.因此,重力基准图构建、适配区选择和匹配算法为重力 辅助惯性导航的核心技术.

3.1.1 重力基准图构建技术

传统海洋重力场通过海面船舶或者海底拖曳的 方式测量得到<sup>[81-82]</sup>,虽然精度较高,但都存在效率低 和空间覆盖范围小的缺点.随着近年来机载重力仪和 高精度定位技术的快速发展,机载重力仪已成为替代 方法,短期内获取大面积区域海洋重力场信息<sup>[83-84]</sup>. 此外,卫星直接测量大地水准面高度变化,通过拉普 拉斯方程获取全球范围内海洋重力场<sup>[85-86]</sup>.

重力设备主要研发公司和研究所为:加拿大 Micro Gravity 公司 (GT-2M 型号)、美国 Microg Lacoste 公司 (SEA III 型号)、俄罗斯圣彼得堡科学研究中心电气 仪表所 (Chekan-AM 型号),而国内大都集中在天津 航海仪器研究所 (ZL11-1A 型号)、中科院 (CHZ 型 号)和航天十三所 (SAG 型号)等,表4给出了海洋重 力仪性能参数<sup>[87]</sup>.

表 4 海洋重力仪设备性能参数

型号	精度/mGal	量程/Gal	漂移/(mGal/月)	倾角/(°)
GT-2M	0.2	1 000	3.00	±45
SEA III	0.7	500	3.00	±35
Chekan-AM	0.4	500	/	/
SAG	0.2	2 000	/	任意
ZL11-1A	0.3	/	4.42	/

在重力匹配过程中,要求重力基准图满足高分辨 率和大面积要求,使得重力传感器采集的数据位于网 格中央,提高匹配准确率.因此,不少学者提出插值重 构思想<sup>[88-90]</sup>,提高基准图分辨率和精度,各类算法的 优缺点如表 5 所示.

插值算法	原理	优点	缺点
距离幂次反比法	一定的幂次加权求和	模型简单计算量小	精度低
样条插值法	多项式拟合	模型简单适用于变化缓慢的区域	在重力场变化剧烈的区域效果差
克里金法	对空间结构和参数进行无偏估计	精度高	计算量大,在边缘区域精度差
Shepard	二次曲面拟合	模型简单计算量小	精度仅比距离幂次反比法高
样条插值法	多项式拟合	模型简单适用于变化缓慢的区域	在重力场变化剧烈的区域效果差

表 5 插值法优缺点分析

# 3.1.2 重力适配区选择

重力匹配区域选择是重力辅助惯性导航的关键 技术<sup>[91-92]</sup>. 导航精度与 AUV 所在区域重力场参数的 变化密切相关,重力场参数变化明显的区域,匹配精 度越高.因此,需要根据区域的重力分布特征选择合 适的区域,进行重力匹配.传统的适配区选择方法主 要依靠重力异常的局部统计参数,例如衡量区域数据 离散程度的标准差、数据平滑程度的粗糙度、随空间 变化程度的梯度和平面相关度以及包含信息量程度 的信息熵等[93].针对基于单一统计参数的匹配区选择 存在匹配效果差问题,研究人员采用层次分析、主成 分分析 (PCA)、模糊推理和神经网络等手段<sup>[94-95]</sup>, 融 合多个统计参数,选择最优适配区. 宫京等 96 提出分 子分析法,将多个统计参数优化为少量参数,从而快 速确定适配区,与 PCA 相比较,精度更高.然而传统 算法存在两个缺点,参数阈值的选取存在随机性和没 有考虑重力场空间特性,容易漏掉潜在匹配区域,从 而影响重力匹配的准确性.针对在某重力场特征仅在 一定方向范围内变化明显, WANG 等<sup>[97]</sup> 提出重力异 常和向量差作为评价指标,提高匹配精度.针对方向 矢量仅为空间特性单一方向, WANG 等<sup>[98]</sup> 研究基于 Delaunay 三角剖分算法,建立重力场的三维模型,寻 找更多的空间特征作为潜在匹配区域.

### 3.1.3 重力匹配算法

重力匹配算法可分为序列匹配和单点匹配两大 类. 序列匹配算法包括等值线最近迭代 (ICCP) 算法 和相关的极值算法<sup>[99-101]</sup>. ICCP 算法通过最小化目标 函数,使 INS 轨迹接近真实轨迹,但它对初始位置误差 很敏感,当初始误差较大时容易引起不匹配.相关极 值算法最典型的代表为地形匹配制导 (TERCOM)[102-103], 对重力序列测量与重力基准图进行相关性分析,其中 代价函数一般选择平均绝对误差和均方差. 该算法能 有效地纠正 INS 的误差,对 INS 的初始位置误差不 敏感. 然而相关的极值算法受航向误差的影响很大. 作为序列匹配算法,这两种算法在匹配前需要采集一 系列位置点的重力异常序列,这会导致实时性差.为 了追求更好的实时性、更高的定位精度和更少的计 算负担,不少学者对传统的序列匹配算法进行了改 进<sup>[104]</sup>.此外,科研人员提出基于单点匹配的滤波算 法,但存在抗干扰能力差和测量模型线性化误差大等 问题,限制了该算法在复杂水下环境中的实用性.为 了减少线性化误差,有学者提出基于二阶 EKF 算法, 然而, 二阶 EKF 的测量黑塞矩阵 (Hessian Matrix) 难 以用数值方法逼近,阻碍了二阶 EKF 在重力匹配导 航中的应用. 若采用无迹 KF 处理重力辅助惯性导航 系统, 需要调整自由度参数, 保证滤波的稳定性和精 度. 针对重力传感器受到异常值干扰从而导致测量噪 声呈现非高斯分布的问题, 不少学者研究基于鲁棒滤 波的匹配算法<sup>[105-106]</sup>. WANG 等<sup>[107]</sup>提出了基于 CKF 的鲁棒匹配算法, 通过收敛性分析和稳定性讨论, 证 明所提算法能够抑制野值, 并实时准确估计出当前位 置. 上述单点匹配算法存在所有采样点相互独立, 出 现误匹配或者匹配结果可信度不高等问题, 不仅不能 纠正 INS 的累积误差, 而且会影响 AUV 航行安全. WANG 等<sup>[108]</sup>提出基于向量匹配算法, 利用相邻采样 点的位置关系, 采用粒子滤波方式, 实现匹配结果更 加稳定和系统定位精度更高.

#### 3.2 地磁辅助的 INS 技术

地磁辅助 INS 的基本原理是将载体测量出的磁测信息与预先存储的地磁基准图进行相关度匹配,确定载体当前位置,限制 INS 误差发散<sup>[109]</sup>.地磁导航具 有以下优点:1)地磁检测过程中无需向外部发射能 量,具有高度隐蔽性和无源性;2)地磁为地球固有矢 量场,地磁误差稳定不随时间积累;3)地磁信息丰 富,如地磁场总强度、三轴地磁场强度、磁偏角、磁倾 角和磁场梯度,为适配区选择和匹配算法提供多种独 特特征.因此,地磁误差补偿、适配区选择和地磁匹 配均是高精度地磁辅助 INS 急需解决的问题.

### 3.2.1 地磁误差补偿技术

随着电磁感应、超导磁效应和磁光效应等物理 规律的发现,各类磁传感器可直接应用到地磁辅助 INS 中, 如磁通门磁力仪、光泵磁力仪、质子磁力仪 和超导磁力仪等[110-112]. 尽管传感器测量精度理论上 可以满足导航要求,然而,在实际应用中,磁传感器 容易受到磁干扰误差和自身仪表误差影响,其中仪表 误差包括灵敏度误差、零偏误差和非正交误差,磁干 扰误差包括软/硬磁场误差、随机磁场误差、涡流磁场 误差和非对准误差.因此,磁传感器使用前必须对各 类误差进行补偿.误差补偿可分为2种,硬补偿和软 补偿. 硬补偿指的是通过在载体附近安装永磁体或三 相线圈,限制载体上的电气设备产生的干扰磁场,此 方法需要不断调整其位置,操作复杂且精度低.软补 偿指的是根据磁场特性建立数学模型,直接补偿磁传 感器输出. 早期学者采用基于姿态约束的罗差校正 法,采用外部高精度的航向角信息修正磁传感器输出 的航向角,此方法需要外部辅助信息且只能修正单一 维度信息.针对地磁矢量模不随姿态变化而变化的特 点,学者提出矢量模检测方法[113],从而摆脱了对姿态 依赖,简化了误差补偿过程,但算法存在平方项,可 能存在局部最优情况. ALONSO 等<sup>[114]</sup>提出两步标定 法,第一步将平方项近似为线性项,使用最小二乘法 求解初值,第二步将计算出的初值代入到牛顿迭代法 中,快速估算出仪表误差. CRASSIDIS 等<sup>[115]</sup>同样利 用最小二乘求解初值,第二步采用非线性卡尔曼滤 波,实时估计出仪表误差,但算法收敛受初值影响.针 对地磁矢量场误差修正问题,文献 [116-118]提出基 于椭圆拟合的补偿方法,具有精度高且鲁棒性强优 点.针对基于参数估计算法收敛速度慢的问题,文献 [119-120] 建立包含灵敏度误差、零偏误差和非正交 误差的目标函数,通过粒子群算法或者蚁群算法求解 最优参数.

### 3.2.2 地磁适配区选择

由于每个适配区包含不同的地磁信息,最终的效 果大相径庭.选择地磁特征丰富的区域,有助于提高 导航精度和稳定性.因此适配区的选择是地磁辅助惯 性导航的关键技术.适配区选择主要包含特征参数和 评价函数两个方面.特征参数有地磁标准差、地磁粗 糙度、地磁坡度标准差、峰态系数、偏态系数、地磁信 息熵和地磁相关系数[121].评价函数有分形维度法、主 层成分分析法、模糊法、遗传算法、支持向量机 (SVM)和深度神经网络等[122-124].针对单一特征参数 存在评价不全面的问题, 王鹏等[125] 提出基于多地磁 特征的综合评价法,提高系统匹配概率.陈有荣等[126] 提出基于分形维数的评价方法, 仿真结果表明分形数 值越大,匹配成功率越高,且算法能够抑制量测噪声. 针对传统方法只考虑全区间适配性,赵建虎等[127]提 出基于方向矢量的适配性算法,研究适配性与载体运 动方向之间的关系,提高适配准确率.张凯等[128]研 究基于 SVM 的适配区选择算法,构建量测噪声与特 征信息和匹配算法的非线性映射关系,实现适配区可 靠性划分.针对多个特征选取的主观性,肖晶等[129] 通过深度卷积神经网络进行分类,运用粒子群算法优 化参数,提升地磁特征提取效率.种洋等[130]提出基 于主层分析和神经网络结合的适配区选择算法,首先 通过主层分析提取特征参数,再利用神经网络完成映 射关系,自动识别适配区.

### 3.2.3 地磁匹配算法

地磁匹配是地磁辅助 INS 的关键技术,决定测量轨迹和磁力基准图是否正确匹配,影响最终导航精度.目前地磁匹配技术可分为基于地磁相关匹配和基于图像匹配方式.地磁相关匹配法指的是以某一个相关准则为标准,通过平移 INS 指示轨迹,实现与磁基

准图上的真实轨迹匹配,从而修正惯导误差.相关准 则可以分为3类[131]:1)相似程度,如积相关法和归一 化相关法;2)差异度,如绝对误差法、平均绝对误差 (MAE)法、平方误差法和平均平方误差法;3)距离, 如 Hausdorff 距离准则. 谢仕民等<sup>[132]</sup>从计算量、匹配 精度和误差收敛性等角度综合比较上述几种匹配准 则,结果表明 MAE 法和平均平方误差法优于其他相关 准则.针对上述准则易受到噪声影响的问题,GUO 等[133] 提出以地磁熵作为匹配准则,抑制误匹配率,提高系 统定位精度.此外有学者提出两步匹配的思路,粗匹 配过程采用平均绝对误差法,在此基础上采用地磁熵 作为精匹配准则,充分利用各类准则优点,提高算法 的鲁棒性,但增加算法复杂度.总之,地磁相关匹配法 结构简单、适用范围广且对初始误差不敏感,但算法 只能平移轨迹而不能旋转.研究人员将图像处理的思 想引入至地磁匹配过程中,主要代表算法包括迭代最 近点 (ICP)、ICCP 和地磁匹配双等值线 (DICCP)等, ICCP 采用刚性变换模型,迭代逼近最近的轮廓点序 列,可以同时修正惯性位置误差和航向误差[134].然而, ICCP 只能收敛到局部最优,并且容易受到初始位置 误差的影响<sup>[135]</sup>. SONG 等<sup>[136]</sup>提出基于地磁矢量的地磁 匹配算法,在匹配区域的地磁熵信息较小或地磁等高 线的变化不明显的情况下,提高匹配概率和定位精度.

### 3.3 地形辅助的 INS 技术

随着海洋测绘技术的不断发展,基于水下地形匹 配的方法被广泛研究<sup>[137-144]</sup>.水下地形匹配指的是利 用地形特征,限制航位推算误差.针对地形匹配特点, 本部分将从水下地形构建和地形匹配算法两个关键 问题展开论述.

### 3.3.1 水下地形构建

针对高精度和高分辨率水下地形的需求,各类型 的水下地形探测技术快速发展.目前,水下地形探测 设备有:激光探测、多波束探测、侧扫声纳和合成孔 径声纳等<sup>[145-147]</sup>.激光探测向海面发射激光脉冲,通过 测量往返传播时间,计算出海底深度,具有机动性 强,效率高和抗干扰性强等优点,但是测距深度浅, 只适用于浅海区域探测,并且存在相对其他探测技术 精度差等缺点.多波束探测利用广角度定向发射和多 通道接收,收集条幅式水下地形特征,测量精度高且 适用于中浅层水域.侧扫声纳利用声波散射原理,直 接以图像的形式反映地形,此方法存在探测盲区问 题.合成孔径声纳通过载体的运动方式,将小孔径虚 拟为大孔径,生成高分辨率的水下地形图,但易受水 下能见度的影响.表6给出了相关设备的探测精度、

#### 探测深度和探测效率等技术参数.

表 6 地形探测设备技术参数

型号	精度/cm	深度/m	效率/(km <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
CZMIL	30.0	80	35.30~88.20
Sea Survey MS 400	1.5	150	0.01~10.10
Edge Tech 4 125	2.3	200	2.70
UCSB	19.0	70	/

### 3.3.2 地形匹配算法

根据地形匹配特征的差别,地形匹配算法分别为 景像区域匹配方法 (SMAC) 和地形高程匹配方法 (TEM). SMAC 通过对比量测图像和已知图像,从而 获取导航信息,具有精度高的优点,但计算量大,易 受环境影响,在水质混浊、光线微弱或者存在漂浮物 的区域,出现匹配精度差或者错误匹配情况.因此, SMAC 适用于近距离水下环境,如 AUV 对接回收过 程<sup>[148]</sup>. TEM 利用载体距离海底高度和海面高度,等 价转换为地形高度,并与三维地形数据库匹配. TEM 大体可分为2类,即批次处理方法和递推滤波方法. 批次处理方法指的是将一系列的量测数据累积到一 起处理,代表算法为 TERCOM. TERCOM 算法结构 简单,可以忽略大初始误差影响,但实时性差且定位 精度受到基准图精度、水下噪声和网格精度的影响. 递推滤波方法指的是利用当前时刻量测信息和上一 时刻的估计结果推测当前时刻的估计结果,代表算法 为桑迪亚地形辅助导航算法,其本质是基于 EKF,具 有计算量小、实时性高且同时修正多维误差,但对初 始误差敏感并且要求地形匹配误差符合高斯分布.由 于水下地形存在畸形,地形匹配误差不再符合高斯分 布,传统的 KF 算法适用性不高,有学者提出基于粒 子滤波和质点滤波的地形匹配算法[149-151]. 马腾等[152] 提出一种海底地形匹配高效的质点算法,通过构建伪 输入高斯过程,实现基于置信度的质点权重计算,提 高匹配精度和效率.针对地形量测数据存在野值问 题, PENG 等[153] 提出基于 Huber 估计的粒子滤波算 法,通过代价函数调整粒子权重,提高匹配的鲁棒性.

# 4 未来研究热点

1) 多传感器融合.目前,水下导航采取 SINS/DVL、 SINS/USBL或 SINS/重力等组合模式,若 AUV 航行 超出 DVL 工作量程、应答器作用范围或水下地形/地 磁/重力特征过于平坦,单一组合模式将失效,滤波结 果将发散,严重影响 AUV 执行任务.因此,为了弥补 单一传感器的测量误差,采用多传感器数据融合,如 SINS/USBL/DVL、SINS/USBL/LBL和SINS/重力/地 形/地磁等,获取高精度且稳定的水下导航结果.

2) 鲁棒性算法. 针对水下复杂环境, 量测噪声出 现加性和乘性特征, 需要研究鲁棒滤波算法抑制环境 噪声. 目前已有的鲁棒 KF 算法有基于 Huber 鲁棒滤 波算法、最大熵鲁棒滤波算法和学生 *t* 鲁棒滤波算 法, 存在辅助参数难以确定和算法的复杂性强等问 题, 需要研究更加有效、模型简单、参数易选的鲁棒 滤波方法.

3)一体化样机研制.针对多传感器分立式安装存 在浪费空间且影响小型载体稳定性的问题,研究一体 化样机十分必要.一体化样机融合惯性器件、水声传 感器、深度传感器、姿态传感器和数据处理模块,能 够保证高集成度、易扩展性和适装性强.

# **5** 结束语

本文回顾现有主流的无人装备水下导航定位方法,如 DVL、包含 LBL、SBL 和 USBL 的水声定位和 基于重力、地磁和地形匹配辅助的地球物理场匹配 定位技术.介绍各类导航算法的原理和优缺点,重点 阐述各种算法的关键技术,为 AUV 长航时、高精度 和远航程提供技术支撑.

### 参考文献

- [1] 游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与 前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
- [2] 施伟勇, 王传崑, 沈家法. 中国的海洋能资源及其开发前 景展望[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 913-923.
- [3] 郭建科,董梦如,郑苗壮,等.海洋命运共同体视域下国际海洋资源战略价值评估理论与方法[J].自然资源学报, 2022, 37(4): 985-998.
- [4] 马红,张庆伟. 习近平关于海洋重要论述的哲学意蕴[J].西南林业大学学报(社会科学), 2022, 6(2): 38-42.
- [5] 贾宇,张平.习近平海洋经济发展重要论述内涵探析[J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2021, 20(6): 1-7.
- [6] 钟宏伟. 国外水下无人航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 215-225.
- [7] 刘洋,陈练,苏强,等.水下无人航行器装备技术发展与作 战应用研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(12): 1-7.
- [8] 冯景祥,姚尧,潘峰,等.国外水下无人装备研究现状及发 展趋势[J].舰船科学技术,2021,43(12):1-8.
- [9] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. AUV 导航技术概述[J]. 舰船科 学技术, 2020, 42(15): 152-156,171.
- [10] PAULL L, SAEEDI S, SETO M, et al. AUV navigation and

localization: a review[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2014, 39(1): 131-149. DOI: 10.1109/JOE. 2013.2278891

- [11] 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(3): 232-253.
- [12] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURI T Y, et al. Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey[J]. Ad hoc networks, 2019(94): 101935. DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.101935
- [13] 韩孟祥. 基于蓝绿激光的高速水下无线通信实验研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- [14] 尹伟伟, 郭士荦. 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.
- [15] 王轲,周兴华,唐秋华,等.水下导航定位技术在大洋科考 调查中的应用[J].海洋测绘, 2021, 41(4): 65-69.
- [16] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019: 78.
- [17] 王健, 鲁金瑞, 郑栋, 等. 水下复杂环境下基于SINS/USBL/ DVL多源信息融合的组合导航算法[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 76-84.
- [18] 孙大军,郑翠娥,张居成,等.水声定位导航技术的发展与 展望[J].中国科学院院刊,2019,34(3):331-338.
- [19] 童金武,徐晓苏,张涛,等. 超短基线安装误差对定位精度 影响分析及其标定技术研究[J].导航定位与授时, 2020, 7(2): 18-27.
- [20] 张涛, 翁铖铖, 李默涵, 等. 一种SINS/超短基线组合定位 系统安装误差标定算法[J]. 中国惯性技术报, 2019, 27(3): 349-356.
- [21] 陆一,魏东岩,纪新春,等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定 位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
- [22] 王汝鹏. AUV地形匹配导航初始定位研究[D]. 哈尔滨工 程大学, 2019.
- [23] WANG H B, WU L, CHAI H, et al. Technology of gravity aided inertial navigation system and its trial in South China Sea[J]. IET radar, sonar and navigation, 2016, 10(5): 862-869. DOI: 10.1049/iet-rsn.2014.0419
- [24] 靳凯迪,柴洪洲,宿楚涵,等. DVL/SINS组合导航技术发 展现状及趋势[J].导航定位学报, 2022, 10(2): 1-12,92.
- [25] 王博,刘泾洋,刘沛佳. SINS/DVL组合导航技术综述[J]. 导航定位学报, 2020, 8(3): 1-6,22.
- [26] CHANG L B, LI Y, XUE B Y. Initial alignment for a doppler velocity log-aided strapdown inertial navigation system with limited information[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2017, 22(1): 329-338. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2616412
- [27] LI W L, LING Y, ZHANG L D, et al. A robust method for alignment calibration of an inertial measurement unit(imu)

and doppler sensors[J]. Lasers in engineering, 2016, 34(1): 93-106.

- [28] LI W L, WU W Q, WANG J L, et al. A novel backtracking navigation scheme for autonomous underwater vehicles[J]. Measurement, 2014(47): 496-504.
- [29] LI K, LING Y Y, KAICHEN S. A fast in-motion alignment algorithm for DVL aided SINS[J]. Mathematical problems in engineering, 2014: 1-12. DOI: 10.1155/2014/593692
- [30] CHANG L B, HU B Q. Robust initial attitude alignment for SINS/DVL[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2018, 23(4): 2016-2021. DOI: 10.1109/TMECH.2018. 2834917
- XU X, GUI J, SUN Y F, et al. A robust in-motion alignment method with inertial sensors and doppler velocity log[J].
   IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2021(99): 1-1. DOI: 10.1109/TIM.2020.3011873
- [32] YAO Y Y, XU X S, ZHU Y Y, et al. In-motion coarse alignment method for SINS/DVL with the attitude dynamics[J]. ISA transactions, 2020, 105(6): 377-386. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.05.033
- [33] JOYCE T M. In situ calibration of shipboard ADCPs[J]. Journal of atmospheric and oceanographic technology, 1989, 6(1): 169-172. DOI: 10.1175/1520-0426(1989)006<0169: OISOSA>2.0.CO;2
- [34] MÜNCHOW A, COUGHRAN C S, HENDERSHOTT M C, et al. Performance and calibration of an acoustic doppler current profiler towed below the surface[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 1995, 12(5): 435-444. DOI: 10.1175/1520-0426(1995)012<0435:PACOAA>2.0. CO;2
- [35] KINSEY J C, WHITCOMB L L. Adaptive identification on the group of rigid-body rotations and its application to underwater vehicle navigation[J]. IEEE transactions on robotics, 2007, 23(1): 124-136. DOI: 10.1109/TRO.2006. 886829
- [36] KINSEY J C, WHITCOMB L L. In situ alignment calibration of attitude and doppler sensors for precision underwater vehicle navigation: theory and experiment[J].
   IEEE journal of oceanic engineering, 2007, 32(2): 286-299.
   DOI: 10.1109/JOE.2007.893686
- [37] KINSEY J C, WHITCOMB L L. Towards in-situ calibration of gyro and Doppler navigation sensors for precision underwater vehicle navigation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1014364
- [38] TANG K H, WANG J L, LI W, et al. A novel INS and doppler sensors calibration method for long range

underwater vehicle navigation[J]. Sensors, 2013, 13(11): 14583-14600. DOI: 10.3390/s131114583

- [39] WANG D, XU X S, YANG Y, et al. A quasi-newton quaternions calibration method for DVL error aided GNSS[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(3): 2465-2477. DOI: 10.1109/TVT.2021.3059755
- [40] 朱春云, 庄广琛, 宋雅兰, 等. DVL安装误差角估计方法在 水下组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 75-78.
- [41] XU B, WANG L Z, LI S X, et al. A novel calibration method of SINS/DVL integration navigation system based on quaternion[J]. IEEE sensors journal, 2020, 20(16): 9567-9580. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2988500
- [42] TAL A, KLEIN I, KATZ R. Inertial navigation system/doppler velocity log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements[J]. Sensors, 2017, 17(2): 415. DOI: 10.3390/s17020415
- [43] KARIMI M, BOZORG M, KHAYATIAN A R. A comparison of DVL/INS fusion by UKF and EKF to localize an autonomous underwater vehicle[C]//International Conference on Robotics and Mechatronics, 2013. DOI: 10.1109/ICRoM.2013.6510082
- [44] GUO Y, WU M P, TANG K H, et al. Square-root unscented information filter and its application in SINS/DVL integrated navigation[J]. Sensors, 2018, 18(7): 1-19. DOI: 10.3390/s18072069
- [45] GAO W, LI J C, ZHOU G T, et al. Adaptive Kalman filtering with recursive noise estimator for integrated SINS/DVL systems[J]. The journal of navigation, 2015, 68(1): 142-161. DOI: 10.1017/S0373463314000484
- [46] 王宏健, 李村, 么洪飞, 等. 基于高斯混合容积卡尔曼滤波 的UUV自主导航定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 254-261.
- [47] DAVARI N, GHOLAMI A. An asynchronous adaptive direct Kalman filter algorithm to improve underwater navigation system performance[J]. IEEE sensors journal, 2017, 17(4): 1061-1068. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2637402
- YAO Y Y, XU X S, LI Y, et al. A hybrid IMM based INS/DVL integration solution for underwater vehicles[J].
   IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(6): 5459-5470. DOI: 10.1109/TVT.2019.2910397
- [49] HOU L H, XU X S, YAO Y Q, et al. An M-estimationbased improved interacting multiple model for INS/DVL navigation method[J]. IEEE sensors journal, 2022, 22(13): 13375-13386. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3143316
- [50] ZHU Y X, CHENG X H, WANG L. A novel fault detection method for an integrated navigation system using gaussian

process regression[J]. The journal of navigation, 2016, 1(4): 1-15. DOI: 10.1017/S0373463315001034

- [51] WANG D, XU X S, YAO Y Y, et al. A novel SINS/DVL tightly integrated navigation method for complex environment[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2020, 69(7): 5183-5196. DOI: 10.1109/TIM. 2019.2955187
- [52] ZHU Y, CHENG X H, HU J, et al. A novel hybrid approach to deal with DVL malfunctions for underwater integrated navigation systems[J]. Applied sciences, 2017, 7(8): 759. DOI: 10.3390/app7080759
- [53] KANG Y Y, ZHAO L, CHENG J H, et al. A novel grid SINS/DVL integrated navigation algorithm for marine application[J]. Sensors, 2018, 18(2): 364. DOI: 10.3390/ s18020364
- [54] LIU P J, WANG B, DENG Z H, et al. INS/DVL/PS tightly coupled underwater navigation method with limited DVL measurements[J]. IEEE sensors journal, 2018, 18(7): 2994-3002. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2800165
- [55] 孙大军, 郑翠娥, 钱洪宝, 等. 水声定位系统在海洋工程中的应用[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 125-132.
- [56] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 超短基线定位技术及在海洋工 程中的应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 8-20.
- [57] 唐秋华,吴永亭,丁继胜,等. 超短基线声学定位系统的校 准技术研究[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 281-287.
- [58] 郑翠娥,孙大军,张殿伦,等. 超短基线定位系统安装误差 校准技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(8): 171-173.
- [59] 郑翠娥,孙大军,张殿伦,等.超短基线声学定位系统安装 误差精确校准[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(8):894-898.
- [60] CHEN H H. In-situ alignment calibration of attitude and ultrashort baseline sensors for precision underwater positioning[J]. Ocean engineering, 2008, 35(14): 1448-1462. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.06.013
- [61] CHEN H H. The estimation of angular misalignments for ultra short baseline navigation systems. part I: numerical simulations[J]. Journal of navigation, 2013, 66(4): 561-578. DOI: 10.1017/S0373463313000222
- [62] CHEN H H. The estimation of angular misalignments for ultra short baseline navigation systems. part II: experimental results[J]. Journal of navigation, 2013, 66(5): 773-787. DOI: 10.1017/S0373463313000234
- [63] TONG J W, XU X X, ZHANG T. Study on installation error analysis and calibration of acoustic transceiver array based on SINS/USBL integrated system[J]. IEEE access, 2018(6): 66923-66939. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2878756

- [64] ZHU Y Y, ZHANG T, XU S Q, et al. A calibration method of USBL installation error based on attitude determination[J]. IEEE transactions on vehicular technology,2020,69(8):8317-8328.DOI:10.1109/TVT.2020. 2995599
- [65] ZHANG L, ZHANG T, TONG J W, et al. A calibration method of ultrashort baseline installation error with large misalignment based on variational bayesian unscented Kalman filter[J]. Review of scientific instruments, 2020, 90(5): 055003. DOI: 10.1063/1.5088688
- [66] ZHAO L, KANG Y Y, CHENG J H, et al. A fault-tolerant polar grid SINS/DVL/USBL integrated navigation algorithm based on the centralized filter and relative position measurement[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3899. DOI: 10.3390/ s19183899
- [67] LEE P M, JUN B H, KIM K H, et al. Simulation of an inertial acoustic navigation system with range aiding for an autonomous underwater vehicle[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2007, 32(2): 327-345. DOI: 10.1109/JOE.2006. 880585
- [68] 李守军,陶春辉,包更生.基于卡尔曼滤波的INS/USBL水 下导航系统模型研究[J].海洋技术,2008,27(3):47-50.
- [69] GENG Y R, SOUSA J B D. Hybrid derivative-free EKF for USBL/INS tightly-coupled integration in AUV[C]// International Conference on Autonomous and Intelligent Systems, 2010. DOI: 10.1109/AIS.2010.5547035
- [70] MORGADO M, OLIVEIRA P, SILVESTRE C. Tightly coupled ultrashort baseline and inertial navigation system for underwater vehicles: an experimental validation[J]. Journal of field robotics, 2013, 30(1): 142-170. DOI: 10.1002/rob.21442
- [71] MORGADO M, OLIVERIA P, SILVESTRE C, et al. USBL/INS tightly-coupled integration technique for underwater vehicles[C]// International Conference on Information Fusion, 2006. DOI: 10.1109/ICIF.2006.301607
- [72] MORGADO M, OLIVEIRA P, SILVESTRE C, et al. Embedded vehicle dynamics aiding for USBL/INS underwater navigation system[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2013, 22(1): 322-330. DOI: 10.1109/TCST.2013.2245133
- [73] ZHANG L, ZHANG T, WEI H Y. A novel robust inertial and ultra-short baseline integrated navigation strategy under the influence of motion effect[C]//IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022: 1-12. DOI: 10.1109/TITS.2022.3168442
- [74] 陈磊.复杂海洋噪声环境下近场源定位算法的仿真分析 [D].长春: 吉林大学, 2015.

- [75] 车永刚,张宁川,赵宝庆.几种经典海洋环境噪声谱分析[J].海洋测绘, 2014, 34(5): 46-49.
- [76] XIA M D, ZHANG T, WANG J, et al, The fine calibration of the ultra-short baseline system with inaccurate measurement noise covariance matrix[C]// IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022. DOI: 10.1109/TIM.2021.3132351
- [77] XU B, ZHANG J, RAZZAQI A A. A novel robust filter for outliers and time-varying delay on an SINS/USBL integrated navigation model[J]. Measurement science and technology, 2021, 32(1): 1-15. DOI: 10.1088/1361-6501/ abaae9
- [78] WANG J, ZHANG T, JIN B N, et al. Student's t-Based robust Kalman filter for a SINS/USBL integration navigation strategy[J]. IEEE sensors journal, 2020, 20(10): 5540-5553. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2970766
- [79] ZHANG T, WANG J, ZHANG L, et al. Student's t-based measurement uncertainty filter for SINS/USBL tightly integration navigation system[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(9): 8627-8638. DOI: 10.1109/TVT.2021.3102085
- [80] GAO W, ZHAO B, G. ZHOU G T, et al. Improved artificial bee colony algorithm based gravity matching navigation method[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12968-12989. DOI: 10.3390/ s140712968
- [81] SANDELL D T, MULLER R D, SMITH W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. Science, 2014, 346(6205): 65-67. DOI: 10.1126/science.1258213
- [82] HARLAN R B. Eotvoes corrections for airborne gravimetry[J]. Marine geophysical research, 1968, 73(14): 4675-4769. DOI: 10.1029/JB073i014p04675
- [83] SMOLLER Y L, YURIST S S, GOLOVAN A A, et al. Using a multi antenna GPS receiver in the airborne gravimeter GT-2a for surveys in polar areas[J]. Gyroscopy navigation, 2015, 6(4): 299-304. DOI: 10.1134/S2075 108715040100
- [84] OUYANG Y Z, DENG K L, LU X P, et al. Tests of multitype airborne gravimeters and data analysis[J] Hydrographic surveying charting, 2013, 33(4): 6-11. DOI: 10.1002/ adma.201301232
- [85] WAN X Y, RAN J J, JIN S G. Sensitivity analysis of gravity anomalies and vertical gravity gradient data for bathymetry inversion[J]. Marine geophysical research, 2019, 40(1): 87-96. DOI: 10.1007/s11001-018-9361-8
- [86] WAN X Y, YU J H, LIANG L, et al. Analysis of limitations on recovery of gravity field based on satellite gravity

gradient data[J]. Geodesy and geodynamics, 2021, 12(1): 31-42. DOI: 10.1016/j.geog.2020.11.005

- [87] YUAN Y, GAO J Y, WU Z C, et al. Performance estimate of some prototypes of inertial platform and strapdown marine gravimeters[J]. Earth planets and space, 2020, 72(1): 72: 89. DOI: 10.1186/s40623-020-01219-w
- [88] 张京娟, 刘繁明, 郝燕玲. 重力场的克立格估值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3): 249-252.
- [89] 徐遵义,姜玉祥,赵亮,等.改进的 Shepard 算法及其在重 力异常插值中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(4): 477-480.
- [90] 王博,周明龙.水下重力辅助导航适配区选取的研究进展 [J].导航定位学报,2020,8(3):32-39.
- [91] 张驰,李姗姗,邢志斌,等.多特征值分析的重力辅助导航适 配区选择方法[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(1): 28-33.
- [92] 张璐, 武凛, 柴华, 等. 一种新的基于特征值融合的重力辅助 导航适配区选择方法[J]. 导航与控制, 2018, 17(2): 32-40.
- [93] WANG B, ZHU Y W, DENG Z H, et al. The Gravity matching area selection criteria for underwater gravity-aided navigation application based on the comprehensive characteristic parameter[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2016, 21(6): 2935-2943. DOI: 10.1109/ TMECH.2016.2587804
- [94] 马越原, 欧阳永忠, 曲政豪, 等. 基于模糊决策理论的重力 辅助导航区域选择方法[J]. 海洋测绘, 2016, 36(6): 7-10.
- [95] 文超斌, 王跃钢, 郭志斌, 等. 基于重力辅助导航误差分析的自适应介入匹配算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 514-518.
- [96] 宫京,张崇猛,周贤高,等. 一种基于因子分析的重力适配区 域选取方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(6): 732-737.
- [97] WANG B, ZHOU M L, DENG Z H, et al. Sum vectordifference-based matching area selection method for underwater gravity-aided navigation[J]. IEEE access, 2019(7): 123616-123624. DOI: 10.1109/ACCESS.2019. 2938413
- [98] WANG C L, WANG B, DENG Z H, et al. A delaunay triangulation-based matching area selection algorithm for underwater gravity-aided inertial navigation[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2020, 26(2): 908-917. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3012499
- [99] 周凌. 基于相关序列匹配的重力辅助导航算法精度研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [100] HAN Y R, WANG B, DENG Z H, et al. A combined matching algorithm for underwater gravity-aided navigation[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2018, 23(1): 233-241. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2774296
- [101] 张静远, 徐振烊, 王新鹏. 基于TERCOM算法的水下地形

辅助导航误差研究[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(5): 44-49.

- [102] ZHAO L, GAO N, HUANG B Q, et al. A novel terrainaided navigation algorithm combined with the TERCOM algorithm and particle filter[J]. IEEE sensors journal, 2014, 15(2): 1124-1131. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2360916
- [103] HAN Y, WANG B, DENG Z H, et al. An improved TERCOM-based algorithm for gravity-aided navigation[J].
   IEEE sensors journal, 2016, 16(8): 2537-2544. DOI: 10.
   1109/JSEN.2016.2518686
- [104] LIU M Q, WANG B, DENG Z H, et al. Improved ICCP algorithm and its application in gravity matching aided inertial navigation system[C]//The 33rd Chinese Control Conference, 2014. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896685
- [105] DENG Z H, LI C, YIN L J, et al. An adaptive robust unscented Kalman filter based matching algorithm for underwater gravity aided navigation[C]// IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference(CGNCC), 2018. DOI: 10.1109/GNCC42960.2018.9018670
- [106] 欧阳明达,孙艺轩,邝英才,等.应用抗差估计SITAN算法 的水下重力匹配导航方法[J].中国惯性技术学报,2021, 29(2): 214-220.
- [107] WANG Z, HUANG Y L, WANG M S, et al. A computationally efficient outlier-robust cubature kalman filter for underwater gravity matching navigation[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2022(71): 1-18. DOI: 10.1109/TIM.2022.3141153
- [108] WANG B, ZHU J W, MA Z X, et al. Improved particle filter-based matching method with gravity sample vector for underwater gravity-aided navigation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2021, 68(6): 5206-5216. DOI: 10.1109/TIE.2020.2988227
- [109] 李鑫. 地磁辅助匹配定位关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [110] 吴志添. 面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿方法研 究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [111] 杨云涛, 石志勇, 关贞珍, 等. 地磁场在导航定位系统中的 应用[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(6): 686-692.
- [112] 周军, 葛致磊, 施桂国. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航 学报, 2008, 29(5): 1467-1471.
- [113] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. A non-linear two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers[C]//The 8th International St. Petersburg Conference on Navigation Systems, 2001: 290-297.
- [114] ALONSO R, SHUSTER M D. Attitude-independent magnetometer -bias determination: a survey[J]. The journal

of the astronautical sciences, 2002, 50(4): 453-475. DOI: 10.1007/BF03546248

- [115] CRASSIDIS J L, LAI K-L, HARMAN R R. Real-Time attitude-independent three-axis magnetometer calibration[J]. Journal of guidance control and dynamics, 2012, 28(1): 115-120. DOI: 10.2514/1.6278
- [116] GEBRE-EGZIABHER D. Magnetometer autocalibration leveraging measurement locus constraints[J]. Journal of aircraft, 2007, 44(4): 1361-1368. DOI:10.2514/1.27118
- [117] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 基于椭球拟合的磁梯度张量系 统集成校正[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 187-195.
- [118] 于向前, 刘斯, 肖池阶. 基于椭球拟合的三轴磁强计两步 校准法[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 52-56.
- [119] 迟铖, 王丹, 吕俊伟, 等. 基于粒子群遗传算法的三轴磁通 门误差校正[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 98-102.
- [120] 罗建刚, 张峰, 刘静晓, 等. 基于遗传算法的矢量磁测量非 对准误差校正[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(4): 51-57.
- [121] 周贤高, 李士心, 杨建林, 等. 地磁匹配导航中的特征区域 选取[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 694-698.
- [122] 王哲, 王仕成, 张金生, 等. 一种基于层次分析法的地磁匹 配制导适配性评价方法[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 1871-1878.
- [123] 吕云霄, 吴美平, 胡小平. 基于支持向量机的地磁辅助导航匹配区域选取准则[J]. 兵工自动化, 2011, 30(1): 49-52.
- [124] 朱占龙,李晶. WPM方法分析地磁图指标权重灵敏度[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(13): 60-65.
- [125] 王鹏, 吴美平, 阮晴, 等. 多属性决策方法在地磁图适配性 分析中的应用[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 65-68.
- [126] 陈有荣, 袁建平. 基于分形维数的地磁图适配性研究[J]. 飞行力学, 2009, 27(6): 76-79.
- [127] 赵建虎, 王胜平, 王爱学. 基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 446-449.
- [128] 张凯,赵建虎,王锲.基于支持向量机的水下地形匹配导航中适配区划分方法研究[J].大地测量与地球动学,2013, 33(6): 72-77.
- [129] 肖晶,齐晓慧,段修生,等.基于深度卷积神经网络的地磁导航方向适配性分析[J].工程科学学报,2017,39(10): 1584-1590.
- [130] 种洋,柴洪洲,常宜峰,等. 自组织优化分类的AUV地磁导航适配区选取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 722-730.
- [131] 孙晓洁, 寇军, 张笑楠, 等. 地磁导航技术研究进展[J]. 导 航与控制, 2016, 15(6): 1-6.
- [132] 谢仕民,李邦清,李文耀,等. 地磁匹配技术及其基本匹配 算法仿真研究[J]. 航天控制, 2008, 26(5): 55-59.
- [133] GUO C F, CAI H, HEIJDEN G H M. Feature extraction and

geomagnetic matching[J]. Journal of navigation, 2013, 66(6): 799-811. DOI: 10.1017/S0373463313000490

- [134] LIN Y, YAN L, TONG Q X. Underwater geomagnetic navigation based on ICP algorithm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007. DOI: 10.1109/ROBIO.2007.4522496
- [135] LI M, LIU Y, XIAO L P. Performance of the ICCP algorithm for underwater navigation[C]//International Conference on Mechatronics and Control, 2014. DOI: 10.1109/ICMC.2014.7231579
- [136] SONG Z G, ZHANG J S, ZHU W Q, et al. The vector matching method in geomagnetic aiding navigation[J]. Sensors, 2016, 16(7): 1120-1132. DOI: 10.3390/s16071120
- [137] WANG H B, XU X S, ZHANG T. Multipath parallel ICCP underwater terrain matching algorithm based on multibeam bathymetric data[J]. IEEE access, 2018(6): 48708-48715. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2866687
- [138] HAGEN O K, ÅNONSEN K B. Using terrain navigation to improve marine vessel navigation systems[J]. Marine technology society journal, 2014, 48(2): 45-58. DOI: 10.4031/MTSJ.48.2.6
- [139] CARLSTROM J, NYGREN I. Terrain navigation of the swedish AUV62F vehicle[C]//International Symposium Unmanned Untethered Submersible Technol, 2005: 1-10. DOI:ConferenceArticle/5aeqa3f8c095d712542967b5
- [140] NYGREN I. Robust and efficient terrain navigation of underwater vehicles[C]//Position, Location and Navigation Symposium, 2008. DOI: 10.1109/PLANS.2008.4570034
- [141] CARRENO S, WILSON P, RIDAO P, et al. A survey on terrain based navigation for AUVs[C]. Oceans 2010 MTS/IEEE Seattle, 2010. DOI: 10.1109/OCEANS. 2010.5664372
- [142] NAKATANI T, URA T, ITO Y, et al. AUV "TUNA-SAND" and its exploration of hydrothermal vents at Kagoshima Bay[C]//Oceans 2008 MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 2008. DOI: 10.1109/OCEANSKOBE.2008.4531099
- [143] MEDUNA D K, ROCK S M, MCEWEN R S. Closed-loop terrain relative navigation for AUVs with non-inertial grade navigation sensors[C]//Autonomous Underwater Vehicles, 2011. DOI: 10.1109/AUV.2010.5779659
- [144] 张静远, 谌剑, 李恒, 等. 水下地形辅助导航技术的研究与 应用进展[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 128-135.
- [145] 宋帅,周勇,张坤鹏,等.高精度和高分辨率水下地形地貌 探测技术综述[J].海洋开发与管理,2019,36(6):74-79.
- [146] 李海森,魏波,杜伟东.多波束合成孔径声呐技术研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1760-1769.
- [147] 李海森,周天,徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 73-80.

- [148] 冯晓晨, 葛彤, 王小丹. 基于神经网络的水下对接引导算 法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(17): 102-107.
- [149] DUNÍK J, SOTÁK M, VESELÝ M, et al. Design of RAOblackwellized point-mass filter with application in terrain aided navigation[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2019, 55(1): 251-272. DOI: 10.1109/ TAES.2018.2850210
- [150] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, HARRIS C, et al. Terrainaided navigation for long-endurance and deep-rated autonomous underwater vehicles[J]. Journal of field robotics, 2018, 36(2): 447-474. DOI: 10.1002/rob.21832
- ZHOU T, PENG D D, XU C, et al. Adaptive particle filter based on kullback-leibler distance for underwater terrain aided navigation with multi-beam sonar[J]. IET radar, sonar & navigation, 2018, 12(4): 433-441. DOI: 10.1049/iet-rsn.2017.0239
- [152] 马腾, 丁硕硕, 范佳佳, 等. 海底地形匹配高效质点滤波导航方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(6): 439-445.

[153] PENG D D, ZHOU T, FOLKESSON J, et al. Robust particle filter based on Huber function for underwater terrain-aided navigation[J]. IET radar, sonar & navigation, 2019, 13(1): 1867-1875. DOI: 10.1049/iet-rsn.2019.0123

# 作者简介

**张涛** (1980—), 男, 教授, 研究方向为惯性导航 与 AUV 定位.

夏茂栋 (1993—), 男, 博士, 研究方向为 SINS/ USBL 组合导航和无人系统编队-包含控制.

张佳宇 (1994—), 女, 博士, 研究方向为地形辅助惯性导航.

朱永云 (1991—), 男, 助理研究员, 研究方向为 惯性基组合导航、水下组合定位技术、农业装备作业 状态实时监测及作业过程智能控制.

**童金武** (1983—),男,讲师,研究方向为水下声 学导航、多源组合导航、无人载体自主控制、服务机器 人控制、高精度测量、人工智能与精准医学等领域 研究.

# Review of underwater navigation and positioning technology

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, XIA Maodong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiayu<sup>1,2</sup>, ZHU Yongyun<sup>3</sup>, TONG Jinwu<sup>4</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Micro-Inertial Instrument and Advanced Navigation Technology,

Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Key Laboratory of Modern Agricultural and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

4. School of Innovation & Entrepreneurship, Industrial Center, Nanjing Institute of

Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: As the main carrier for the development and utilization of marine resources, autonomous underwater vehicles (AUV) need accurate positioning information when performing tasks. The main navigation mode of AUV is based on strap-down inertial navigation system (SINS), assisted by acoustic navigation and geophysical field matching. This paper introduces the basic principles, advantages and disadvantages and application scenarios of various underwater navigation modes. The key technologies of various navigation modes are researched to improve the precision and stability of integrated navigation. By analyzing the existing problems at present, the future development trend of underwater navigation is forecasted.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle (AUV); Strap-down Inertial Navigation System (SINS); acoustic navigation; geophysical field matching; integrated navigation.