



机器人
Robot
ISSN 1002-0446,CN 21-1137/TP

《机器人》网络首发论文

题目: AUV 与自主移动坞站对接的技术研究及系统设计实现
作者: 郑荣, 吕厚权, 于闯, 韩晓军, 李默竹, 魏奥博
DOI: 10.13973/j.cnki.robot.180753
收稿日期: 2018-12-19
网络首发日期: 2019-07-29
引用格式: 郑荣, 吕厚权, 于闯, 韩晓军, 李默竹, 魏奥博. AUV 与自主移动坞站对接的技术研究及系统设计实现[J/OL]. 机器人. <https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.180753>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

AUV 与自主移动坞站对接的技术研究及系统设计实现

郑 荣^{1,2}, 吕厚权^{1,2,3}, 于 闯^{1,2}, 韩晓军^{1,2}, 李默竹^{1,2}, 魏奥博^{1,2,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现多海洋机器人自主出海协同作业、进一步提高自主水下机器人(AUV)的综合作业能力、丰富海洋无人作业场景、延长 AUV 自主作业的时间, 研究了水下自主机器人动态对接技术. 针对包容式移动坞站设计了一套基于声学导引的回坞系统, 根据坞站结构特征、导引传感器解算原理规划了末程回坞路径. 在保障回坞安全的前提下, 以移动坞站为中心将回坞水域划分为安全区、危险区、入坞区, 根据 AUV 与坞站间的相对位置关系在安全区和回坞区内规划了回坞路径, 并对不同路径设计了相应的控制策略和导引算法. 最后, 通过湖上试验验证了回坞系统的可靠性. 相关导引算法、控制策略通用性较强, 在一系列的悬停入坞试验、移动入坞试验中具有较高的鲁棒性; 在水下不同深度和不同航速的入坞试验中, 所设计的方法能够保证较高的入坞成功率, 技术固化后的入坞测试显示, 入坞成功率在 90% 以上.

关键词: 自主水下机器人; 水下对接; 动态入坞; 水下定位; 入坞系统

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Technical Research, System Design and Implementation of Docking between AUV and Autonomous Mobile Dock Station

ZHENG Rong^{1,2}, LÜ Houquan^{1,2,3}, YU Chuang^{1,2}, HAN Xiaojun^{1,2}, LI Mozhu^{1,2}, WEI Aobo^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The moving docking technology of underwater autonomous vehicles is studied in order to achieve collaborative work of multiple marine robots at sea, improve the comprehensive operation capability of autonomous underwater vehicle (AUV), expand the unmanned operation scenarios, and increase the time for AUV to work autonomously. A docking system based on acoustic guidance is designed for funnel-type dock station, and the ultimate path back to the dock station is planned according to the structural characteristics of the docking station and the calculation principle of guiding sensor. Under the premise of ensuring the docking safety, the water body for docking is divided into safe area, dangerous area and docking area. According to the relative position relation between the AUV and the docking station, the docking path is planned in the safe area and the docking area, and the corresponding control strategy and guidance algorithm are designed for different paths. Finally, the reliability of the docking system is verified by the lake test. The related guidance algorithm and control strategy are of strong universality and high robustness in a series of hovering docking tests and moving docking tests. In docking tests at different depths and speeds under water, the designed methods can ensure a higher docking success rate. In docking tests with the solidified technology, the docking success rate is higher than 90%.

Keywords: AUV (autonomous underwater vehicle); underwater docking; moving docking; underwater positioning; docking system

1 引言 (Introduction)

自主水下机器人(AUV)在人类探索海洋的过程中扮演着重要的角色, 被广泛应用于天然热液喷口观测^[1]、石油泄漏监测^[2]和军事活动中^[3]. 它在

提高人类探索能力的同时, 减少了人们原本所需面临的风险. 为了进一步提高和丰富 AUV 的作业能力, 各国在大力发展水下对接技术^[4]; 按照对接坞站的运动状态不同, 可将水下对接分为静态对接和动态对接两种形式, 静态对接是指 AUV 主动与坐

落于海底或固定于海底基站上的坞站进行连接的过程, 该过程坞站可对自身的姿态进行调整但不能主动进行位置调整. 静态对接可以实现 AUV 在水下的能源补给和数据传输任务, 从而延长了其作业时间, 增强了其作业能力, 此外静态对接也可以实现航行器的水下回收工作, 避免了水面风浪大、人工回收困难且危险的问题. 目前, 国内外从事水下对接技术研究的机构有很多, 也取得了很多重要的研究成果^[5-6], 比较有代表性的研究工作有: 1996 年美国麻省理工学院使用电磁导引技术在巴泽兹湾完成了对接试验^[7], 2005 年至 2006 年美国伍兹霍尔海洋研究所和蒙特利海湾研究所先后在海上完成了对接试验^[8-9], 2015 年哈尔滨工程大学对光视觉导引回坞和声学导航回坞技术进行了海上试验^[10], 2017 年 5 月浙江大学在中国南海进行了水深 50 m 和 105 m 条件下的对接试验^[11], 2017 年 12 月中国科学院沈阳自动化研究所完成了湖上对接试验^[12]. 相比静态对接, 动态对接技术不仅可以完成 AUV 水下能源补给、数据交换和自主回收任务, 还可以实现多类型 AUV 功能互补作业和协同作业, 对提高潜器综合性能具有重要的意义. 动态对接难度大, 世界各国公开发表的相关研究成果比较少, BMT 防御服务公司对于潜艇发射和回收 AUV 所面临的问题和挑战进行了探索, 并提出了一些初始概念, 而实用和适用的技术概念仍需要进一步的研究^[3]; 文 [13] 提出了一种基于有限时间系统同步的动态回收方法, 但没有考虑 AUV 可控性方面的约束和坞站结构特征限制等问题, 很难在实际应用中实现; 文 [14] 研究了微小型 AUV 动态回坞的控制策略问题, 但相关方法仅停留在了仿真验证阶段. 隶属于挪威 Kongsberg 公司的美国水下舰艇制造商 Hydroid 公司设计了一套动态回坞系统, 2011 年通过海上试验验证了方案的可行性, 该系统要求使用水面艇携带拖曳装置方可实现 AUV 的动态回收^[15-16]. 本文结合实际应用需求, 在静态对接工作的基础上对重型 AUV 动态对接技术进行了研究, 主要内容包括: 对接方案设计、回坞导航定位关键技术分析、回坞控制方法设计、移动坞站与 AUV 协同运动的路径规划方法和试验结果分析.

2 问题陈述 (Problem formulation)

多海洋机器人协同作业场景 1: 大型 AUV 或舰艇携带数个小型 AUV 航行到某一特殊水域后, 将小型 AUV 布入水中, 由小型 AUV 去执行一些该大型 AUV 不便执行的任务; 完成任务后小型 AUV

自主返回到大型 AUV 的装载系统内, 实现数据交换并执行新的任务或返航. 场景 2: 水面无人航行器 (USV) 通过水下拖曳系统将 AUV 携带到“远海”进行布放, AUV 通过拖曳系统可以实现水下无人系统与水面系统和空中作业系统的通信互联, 当 AUV 完成任务后自主返回到拖曳系统中, USV 可将其带回并回收. 在以上各类作业场景中, 关键在于使 AUV 自主地回到坞站中. 为此, 本文通过图 1 对自主回坞技术进行分析. 动态入坞与静态回坞问题存在的共性技术难题有 3 类: (1) 定位并解算坞站的方位; (2) 规划 AUV 自身的航行路径; (3) 实现 AUV 运动的精确控制. 而坞站移动后所带来的问题有: (1) AUV 根据坞站上一时刻的状态信息所规划的回坞路径可能不适用于当前状态; (2) 安装在坞站上的传感器设备随坞站运动后会影响到 AUV 解算获得的坞站的方位信息的准确性, 从而导致无法入坞; (3) AUV 和坞站间的相对运动关系更复杂, 对运动控制要求更高. 因此, 解决以上问题是动态回坞需要的基本技术需求.

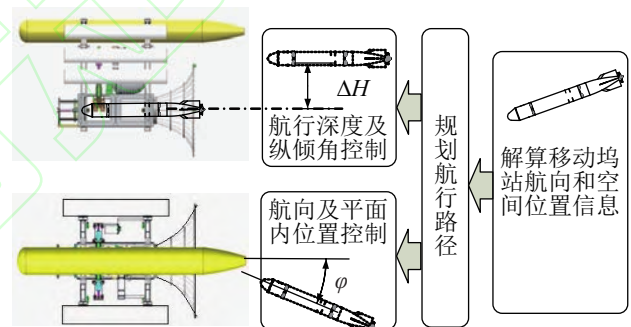


图 1 动态回坞过程

Fig.1 Process of moving docking

2.1 基础平台

动态对接使用的移动坞站 (简称 DAUV) 如图 2 所示, 该移动坞站由包容式坞站和鱼雷外形的坞站航行器两部分构成, 包容式坞站由直径为 2 m 的圆锥导向罩、坞站主体、电子仓、姿态调整机构、能源和数据交换装置 5 部分构成. 整个装置共布置有 5 个推进器, 纵向布置 3 个, 可用于提供前进和后退的动力以及转向所需的转向力矩. 艏艉各布置一个槽道推进器, 用于在垂向调节移动坞站的航行深度和纵倾角. 移动坞站的最大航行速度为 1 kn 左右, 定深悬停时, 深度均方根误差 (RMSE) 可维持在 0.15 m 左右.

回坞载体为鱼雷外形的重型 AUV, 长度 8.6 m 左右, 直径 533 mm; 该 AUV 航行速度在 2 kn 以上时可以通过艏部垂直舵板和水平舵板调整自身的航

向和纵倾角。航行速度在 2 kn 以下时, 主要使用水平槽道推进器调整航向, 深度和纵倾控制由前后布置的 2 个垂直槽道推进器来实现^[12]。DAUV 和回坞 AUV 均搭载有高性能的自动驾驶单元, 自动驾驶单元融合多普勒和惯性组合单元的数据并加以处理后可以实时获得自身的位姿信息, 此外, 两飞行器还配备有 GPS (全球定位系统) 单元用于辅助校正位置信息。



图2 移动坞站
Fig.2 Dock station

3 路径规划 (Path planning)

AUV 动态回坞时, 合理的回坞路径不仅能够提高入坞几率, 降低 AUV 能源消耗, 同时还可以避免不必要的碰撞事故发生。动态对接中, 为了降低 AUV 与 DAUV 间复杂的相对运动关系对回坞导引传感器定位精度的影响, 降低发生碰撞的概率, 规划移动坞站保持动力定位或沿水流方向定向航行, 在此基础上对 AUV 的航行路径进行规划。回坞时令 AUV 和 DAUV 始终保持在同一深度航行, 因此该问题可看成是平面内的路径规划问题。AUV 回坞过程分为初期导引航行和跟踪入坞 2 个阶段, 2 个阶段任务各不相同, 需要根据各阶段的任务使命分别规划相应的航行路径。

3.1 跟踪入坞的路径规划

AUV 有回坞需求时需要航行到预先设定水域和深度进行搜寻, 当 AUV 与 DAUV 通过 USBL (超短基线) 定位系统建立通信后, AUV 与 DAUV 均开始动力悬停, 等待 AUV 解算 DAUV 的方位信息, 成功解算后, AUV 首先要根据二者间的相对方位关系规划出跟踪入坞阶段的回坞路径。从坞站结构特征分析: 移动坞站入口的单向特征决定了图 3 中坞站锥形导向罩的中轴线 L 即为回坞的最佳路径, AUV 在跟踪入坞阶段如果能够精确跟踪该路径便

可以实现入坞。

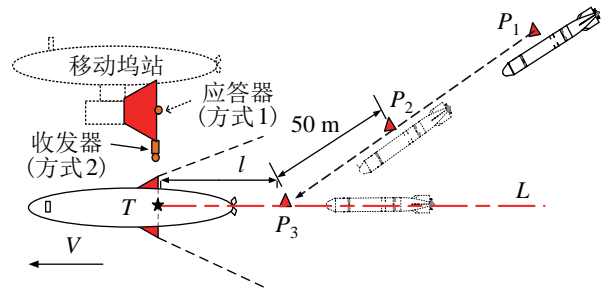


图3 路径规划图
Fig.3 Path planning

3.2 导引模式路径规划

AUV 在初次与坞站建立通信并解算出目标方位后开始执行初期导引的路径规划使命, 目标是经过一系列航路点后 AUV 可以航行到直线 L 航线上, 该使命分为 2 个阶段: (1) 逐渐逼近阶段; (2) 航路点规划与跟踪阶段。第 1 个阶段较为简单, 只需根据距离信息不断驶向目标点即可, 下面将对第 2 个阶段进行详细的分析。

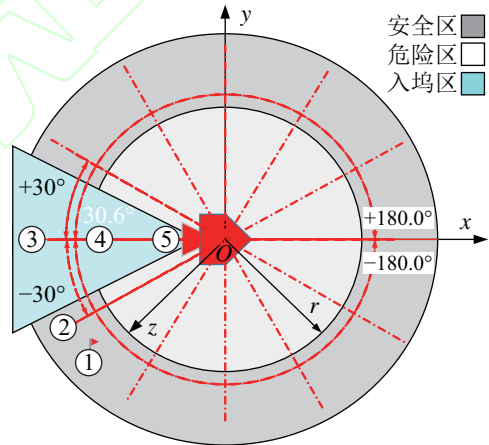


图4 坞站坐标系下航路规划图
Fig.4 Navigation map in dock station coordinate system

3.2.1 航行区域划分

在 AUV 接近 DAUV 的过程中, 为了不发生碰撞, 需要根据 AUV 和 DAUV 间的相对位置关系不断更新 AUV 的回坞路径。首先对回坞区域进行定义, 取坞站上一点作为坐标原点建立如图 4 所示的坞站坐标系 $o-xyz$, 其中 x 轴正向是坞站前进方向, 以坞站为圆心将平面内水域划分为 3 个区域, 白色区域为危险区, 当 AUV 在该区域航行时, AUV 可能会与坞站发生碰撞, 此时 AUV 需要沿径向航行并远离坞站, 危险区半径为大小 $r = 30\text{m}$; 灰色区域为安全区域, AUV 可以在该区域内自由航行; 蓝色区域为入坞区, AUV 仅在该区域内可以启动入

坞使命. 危险区半径 r 需要满足如下关系式:

$$r \geq r_{\min} \quad (1)$$

式中 $r_{\min} = 15 \text{ m}$, r_{\min} 是 AUV 最大回坞航速下的最小转弯半径. 导引阶段所规划的航路点需要在安全区和入坞区内.

3.2.2 设定航路点

AUV 需要根据路径 L 和相对位置关系在划分好的区域内规划航路点. 相对位置关系的确定方法如下: 定义平面内坞站坐标系下 AUV 当前位姿为 $(x_{\text{auv}}, y_{\text{auv}}, \varphi_{\text{auv}})$, 坞站入口位姿为 $(x_{\text{dock}}, y_{\text{dock}}, \theta_{\text{dock}})$, 可以计算出方位角偏差 θ .

$$\theta_{\text{auv}} = \arctan2(y_{\text{auv}} - y_{\text{dock}}, x_{\text{auv}} - x_{\text{dock}}), \quad \theta_{\text{auv}} \in [-\pi, \pi] \quad (2)$$

$$\theta = \theta_{\text{dock}} - \theta_{\text{auv}}, \quad \theta \in [-\pi, \pi] \quad (3)$$

θ 为 AUV 当前位置角 θ_{auv} 与目标航向 θ_{dock} 间的夹角. AUV 将根据 θ 角数值大小实时规划到达航线 L 的航路点. 如图 3, 当 AUV 由远及接近坞站, 在 P_1 点解算出应答器位置坐标后, AUV 将根据应答器的位置坐标计算出坞站入口截面中心点 T , 以 T 作为入坞的目标点规划出通过点 T 的路径 L , 然后, 在此基础上先规划出航路点 P_3 , 再规划出其他过渡点, 启动航路点跟踪使命, 驶向 P_3 点. P_3 为圆心位于直线 L 上半径为 50 m 的圆形到达域. 该点到点 T 的距离 $l = 100 \text{ m}$, l 数值大小根据航行水域环境状况、AUV 与坞站间的相对速度大小、传感器特性、AUV 性能等因素来确定. 当 AUV 到达 P_3 点时, AUV 启动路径跟踪使命, 开始跟踪航线 L .

4 回坞导引 (Docking guidance)

动态入坞过程中的导航定位技术是 AUV 航行规划的基础, 定位的精度对能否入坞有着重要的影响. USBL 声学定位系统是一种典型的水下定位设备. 该传感器作用距离远, 但定位精度相对较低, 为了解决这一问题, 国内外各研究机构普遍采用声光联合导引技术用于精确定位, 远距离粗略定位时使用 USBL, 近距离精确定位时使用光学传感器, 但联合系统的结构复杂, 算法复杂度高. 本文从定位原理上对 USBL 的定位精度进行深度分析, 提出了一种基于路径特征匹配 (path characteristic matching, PCM) 的动态导引方法, 从根本上克服了传感器定位“精度低”这一问题.

4.1 USBL 定位原理

所用 USBL 系统的收发器可以跟踪多个应答器目标, 最大通信距离在 1000 m 以上, 数据更新周

期为 0.29 s 左右. 收发器和单个应答器间的定位原理如图 5 所示. 回坞操作中, 收发器和应答器分别安装于坞站和 AUV 端, 在收发器坐标系 $O-XYZ$ 下, 收发器通过问询模式, 可以获得应答器的方位信息 $\mathbf{r}_1(R, H, D, \beta)$ 或位置坐标 $\mathbf{r}(X_1, Y_1, Z_1)$, 其中 R 为收发器和应答器间的斜距, H 为应答器到 X 轴上投影点间的距离, D 为 X 方向的距离, β 为 $O-YZ$ 平面内 H 与 Z 轴的夹角.

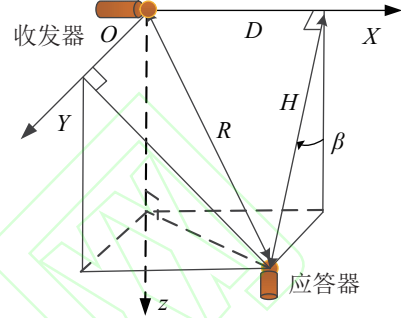


图 5 定位原理

Fig.5 Positioning principle

静态对接时, 可以降低 AUV 航速、动态更新 USBL 数据, 再对数据滤波进行处理, 所得到的导航信息基本能够满足入坞需求; 但动态对接时, USBL 收发器和应答器间相对运动关系较复杂, 导致定位精度降低、有效数据减少, USBL 系统 2.9 s 的更新间隔所提供的的数据量难以满足定位需求. 因此如何在有限的时间内, 从有限的定位数据中获取到准确有效的定位数据成为动态入坞的关键. 根据文 [17-18], USBL 系统的定位数据是根据应答器应答信号到达接收器多个阵元间的相位差和斜距 R 计算获得的. 应答器位置计算公式如下:

$$\begin{cases} X = \frac{c \cdot t \cdot \lambda \cdot \varphi_x}{4\pi L_B} \\ Y = \frac{c \cdot t \cdot \lambda \cdot \varphi_y}{4\pi L_B} \\ Z = \sqrt{R^2 - X^2 - Y^2} \\ R = \frac{1}{2}c \cdot t \end{cases} \quad (4)$$

式中, c 是声速, L_B 为基线长度, λ 为接收阵处波长, φ_x 和 φ_y 是阵元间相位差, t 为信号传播时间. 公式表明, USBL 获得的方位信息 $\mathbf{r}_1(R, H, D, \beta)$ 及位置坐标 $\mathbf{r}(X_1, Y_1, Z_1)$ 中的数据, 只有数据 R 是根据声信号延时差计算得到的, 其他数值的计算均与阵元间相位差有关, 而声信号在水中传播时声线的弯曲会使声线在收发器阵元处的入射方向产生畸变, 从而影响到系统的定位精度. 为了获得 USBL 系统真实的定位性能, 首先对 USBL 系统数据的准确性

进行测试. 数据准确性试验中, 收发器与应答器吊放在水下 8 m 并保持在水下 $O-XY$ 平面内, 通过对比 55 组收发器解算数据和人工测量数据发现: 当测量值 $R=19\text{ m}$, $H=7\text{ m}$ 时, 数值 H 和 D 的误差集中分布在 $0.2\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ 范围内; 当 $R=19\text{ m}$, $H=0\text{ m}$ 时, 数值 H 和 D 的误差集中分布在 $0.6\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 范围内, 当 $R=19\text{ m}$, $H=-7\text{ m}$ 时, 数值 H 和 D 的误差集中分布在 $0.3\text{ m}\times 0.9\text{ m}$ 范围内; 以上测试情况下数值 R 的误差在 0.5 m 以内. 当 $R=110\text{ m}$ 时, 解算目标经纬度分布在 $2\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 范围内, 当 $R=60\text{ m}$ 时, 解算出目标点经纬度分布在 $1.7\text{ m}\times 0.9\text{ m}$ 范围内; 收发器与应答器间相对运动较大时, 定位误差最大可达数十米. 数据稳定性测试时, 将收发器与应答器相距 2 m、50 m、125 m, 观察数据的收发情况. 100 组收发数据的多次测试结果显示, 相距 2 m 时误码率 $\leq 1\%$, 相距 50 m 时误码率 $\leq 5\%$, 相距 125 m 时误码率 $\leq 10\%$ (这里误码率指 100 组收发数据测试中, 不能够正确接收到数据的百分比). 以上结果表明: (1) 系统定位的精度与通信距离有关, 随着通信距离的减小, 定位的准确度会逐渐提高. (2) 定位数据斜距 R 较为准确, 其他数值受传感器间相对运动关系影响较大, 需要对定位数据进行合理的筛选才可以用于回坞导航.

4.2 PCM 动态导引

如图 3, 针对 AUV 在坞站入口后方这一情形对回坞导引方法进行介绍, 3.1 节给出了回坞的最佳路径 L , 3.2.2 节基于路径 L 给出了航路点 P_3 的位置, 下面介绍路径 L 的获得方法以及基于路径 L 的动态导引方法. PCM 动态导引方法的本质是基于 L 再对 L 修正的动态循环过程, 利用 USBL 系统可以通过 2 种方式获得最初的路径 L . 定位方式 1: 在坞站入口圆形截面的直径两端布置 2 个应答器, 将收发器安装在 AUV 艏部, 这样, AUV 通过解算两应答器的经纬度, 确定两应答器连线的中垂线, 可以获得坞站的入口方向并规划出路径 L . 因为 USBL 系统处理计算机在收发器端, 以收发器坐标系为基准来计算应答器在收发器坐标系下的方位, 当收发器解算出应答器的位置后, 即相当于 AUV 获得了目标路径信息, 避免再次将解算信息传输给应答器的过程中所发生的错误, 可靠性较高.

定位方式 2: 将方式 1 中收发器和应答器的位置互换, 收发器安装在坞站入口, 应答器安装在 AUV 艏部, 此时仅需要一个应答器即可, 收发器获得的应答器方位信息就是 AUV 相对于坞站入口的方位信息. USBL 应答器的重量和体积相比收发器

小很多, 易于在 AUV 上安装, 可以减少 AUV 的负载, 因此中小型 AUV 多采用该种定位方式. 本文将分别利用以上 2 种定位技术解算入坞跟踪所需要跟踪的路径信息进行回坞试验.

坞站初始位置的解算采用悬停解算策略: 在 AUV 到达预定水域且 AUV 端 USBL 传感器与坞站端 USBL 传感器建立通信后, AUV 开始悬停等待, 在 AUV 收到多组定位信息并确定坞站方位后开始规划回坞航路点启动回坞. 启动回坞使命后, AUV 将不再使用悬停策略而是在向初始目标航行的过程中动态地解算、更新目标点.

初始路径 L 的确定为 AUV 的航行指明了方向, 但不能始终依赖该路径来引导 AUV 回坞, AUV 向初始路径上的初始 P_3 点航行的过程中, 会基于 L 根据 PCM 方法对路径 L 和 P_3 点进行更新, 一旦获得了新的路径 L 和新的 P_3 点后, AUV 将根据新的路径再次对路径进行更新, 如此反复, 实现目标路径精确度的逐步优化.

PCM 路径优化方法在入坞导引阶段基于单值 H 对路径进行更新, 在入坞跟踪阶段则基于多值对路径进行更新.

第 1 个阶段是入坞导引阶段. AUV 每航行 20 m 进行一次定位数据处理和目标更新, 从 4.1 节的“图 5 定位原理”看出, 当应答器由远及近靠近 OX 轴时, 横向误差 H 会由大变小最终接近于 0 (因为 AUV 和 DAUV 在同一深度航行, 所以这里将距离 H 近似为横向误差), 因此 AUV 在图 3 中 P_1 点向 P_3 点航行的过程中, 横向误差 H 的数值将作为路径 L 的更新依据, 如果 USBL 的某一拍定位数据中的 H 数值满足要求, 则取用该拍数据用于更新路径 L . 假设在通过悬停方法计算出初始路径 L 的时刻, P_1 点到路径 L 的横向距离 $H=100\text{ m}$, 则数据筛选的具体设计方法如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} M=0 \text{ 时, 向 } P_3 \text{ 点航行, 继续定位目标} \\ 0 < M \leq 3 \text{ 时, } \left\{ \begin{array}{l} \text{如果 Num(Cd1)} > 0, \\ \quad \text{则用 Cd1 数据更新 } L \\ \text{如果 Num(Cd1)} = 0, \\ \quad \text{则继续驶向 } P_3 \text{ 点} \end{array} \right. \\ M > 3 \text{ 时, } \left\{ \begin{array}{l} \text{如果 Num(Cd2)} > 0, \\ \quad \text{则用 Cd2 数据更新 } L \\ \text{如果 Num(Cd1)} > 0, \\ \quad \text{则用 Cd1 数据更新 } L \\ \text{如果 Num(Cd1)} = 0, \\ \quad \text{则继续驶向 } P_3 \text{ 点} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

其中, M 为 AUV 收到的超短数据组数, $\text{Num}(\text{Cd}(\cdot))$ 表示满足判定条件 $\text{Cd}(\cdot)$ 的数据个数. AUV 由图 3 中 P_1 点向 P_3 点航行时, 判定条件 Cd1 表示 $H < 100$ m, Cd2 表示 $H < 50$ m. 当 $\text{Num}(\cdot) > 5$ 时, 采用算术平均值滤波法对数据进行处理, 去除 2 个最大值后求取目标信息. 当 AUV 到达 P_3 航路点后, 判定条件 Cd1 变为 $H < 30$ m, Cd2 变为 $H < 15$ m.

第 2 个阶段是入坞跟踪阶段. 同样每航行 20 m 对定位数据处理一次, 但最后 20 m 每次收到数据都要处理. 该阶段用于更新路径 L 的 USBL 定位数据要基于横向误差 H 、斜距 R 、距离 D 以及角度 β 进行筛选, 具体方法如图 6 所示.

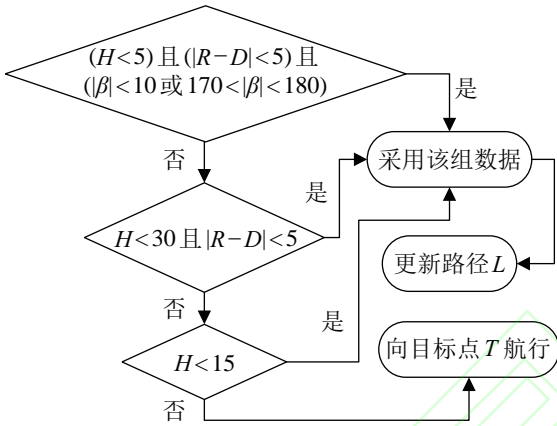


图 6 路径更新流程

Fig.6 Path update process

在收发器坐标系下, 当 USBL 收发器和应答器均处于 $O-XY$ 平面内, 且应答器处于 OX 坐标轴上时, 距离 H 、角度 β 以及应答器当前坐标 Y_1 、 Z_1 的数值应该为 0, 同时距离 D 和距离 R 数值应该相等, 因此这些路径信息可为精确更新目标点方位信息提供重要的参考依据.

5 控制方法 (Control methods)

对接过程中 AUV 主要处于导引模式和入坞模式 2 种工作状态, 导引模式时, AUV 跟踪所规划的航路点, 航行目标是到达坞站中轴线上的航路点, 该过程 AUV 主要在安全区内和入坞区内航行; 入坞模式时, AUV 执行路径跟踪使命对目标直线路径 L 进行跟踪. 忽略外界扰动, 该过程的数学描述为^[3]: 给定 AUV 状态向量 $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{R}^n$, 坞站状态向量 $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^n$, 同时有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1), & \mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^p \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{u}_2), & \mathbf{u}_2 \in \mathbb{R}^q \\ \mathbf{x}_1(t_0) = \mathbf{x}_{10}, & \text{AUV 初始值} \\ \mathbf{x}_2(t_0) = \mathbf{x}_{20}, & \text{坞站初始值} \end{cases} \quad (5)$$

控制目标是寻找合适的控制策略驱动 AUV 进入到坞站, 即:

$$\begin{aligned} &\exists \mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \text{ 使得 } \mathbf{x}_1(t_d) \in C(t_d), \\ &\text{并且 } x_{v1}(t_d) > x_{v2}(t_d) + c \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{u}_1(t)$ 和 $\mathbf{u}_2(t)$ 是 AUV 和坞站关于时间的控制输入, t_d 是实现对接的时刻, $C(t_d)$ 是坞站状态量 \mathbf{x}_2 邻域内的有界封闭集合, x_{v1} 和 x_{v2} 分别是 AUV 和移动坞站的前向速度, c 为常量. 试验时 $c = 0.5$ kn.

导引模式时, 坞站动力悬停或定向航行, 此时 AUV 进入航路点跟踪模式, 简称 LOS 使命. 文 [19-20] 表明视线导引法是实现航路点跟踪的有效方法, 该方法利用航行器前视点建立一个方位角, 引导航行器到达指定的航路点. AUV 当前航向为 φ_{auv} 时, 根据式 (4) 可以得到驶向下一航路点时的航向偏差 φ_{elos} , 即航路点跟踪控制器的输入量.

$$\varphi_{\text{elos}} = \theta_{\text{auv}} - \varphi_{\text{auv}} \quad (6)$$

入坞模式下, 坞站保持动力悬停或定向航行状态, 此时 AUV 进入路径跟踪模式, 简称 PT 使命, 该阶段要求对 AUV 的位置进行精确的控制. 根据坞站位置和 AUV 的当前位置来获得横向位移差 d_{ept} , 根据 AUV 当前航向和目标路径航向获得航向偏差, 进而可以通过航向偏差 φ_{ept} 和横向位移差 d_{ept} 实现 AUV 的航迹闭环控制. 控制输入结构如图 7 所示.

路径跟踪时航向和横向距离误差的变化范围都很大, 使用 2 个 PID 控制器通过调整对应的参数可以适当地调整相应被控量在控制输入中的权重.

动态回坞时, AUV 和 DAUV 需要在水下同一深度航行, 对深度控制的精度和响应速度要求较高, 航行过程中, 纵垂面内需要控制深度和纵倾角 2 个参量, 由于回坞时深度变化不频繁并且深度变化不大, 因此设计式 (7) 所示控制算法, 将 2 个参量同时作为参考量设计一个 PID 控制器.

$$u(e, E) = K_p \cdot E + K_i \cdot \sum_{k=0}^m E_k + K_d \cdot \frac{e_m - e_{m-1}}{T} \quad (7)$$

式中 E 为深度值偏差, e 为纵倾角偏差.

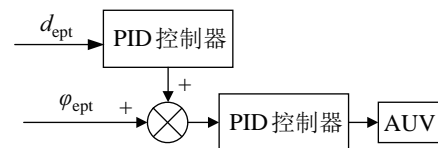


图 7 跟踪控制

Fig.7 Tracking control

回坞时, AUV 距离坞站越近, 导航信息越准确, 所以需要不断地更新路径信息, 当 AUV 在图 4 中序号 1 的位置时, 动态对接的流程如图 8 所示. 其中航路点 4 代表路径跟踪过程中对目标点不断更新的过程, 航路点 5 代表坞站内的触发信号, 在 AUV 进入坞站后会触发该信号.

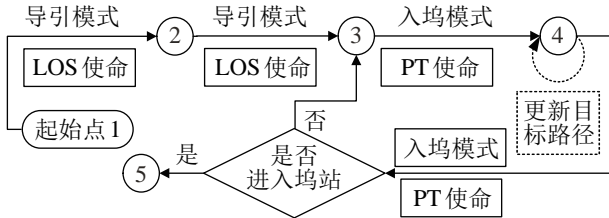


图 8 对接流程

Fig.8 Flow chart of docking

6 湖上试验 (Lake trials)

为了验证自主动态对接控制策略的可行性、测试对接系统的性能, 2018 年 11 月~12 月在中国科学院声学研究所新安江实验场进行了湖上试验, 试验内容包括: (1) 4.2 节所述 2 种导引方式的动态入坞; (2) 坞站悬停条件下的自主入坞; (3) 移动坞站定深、定向、定速航行条件下的自主入坞.

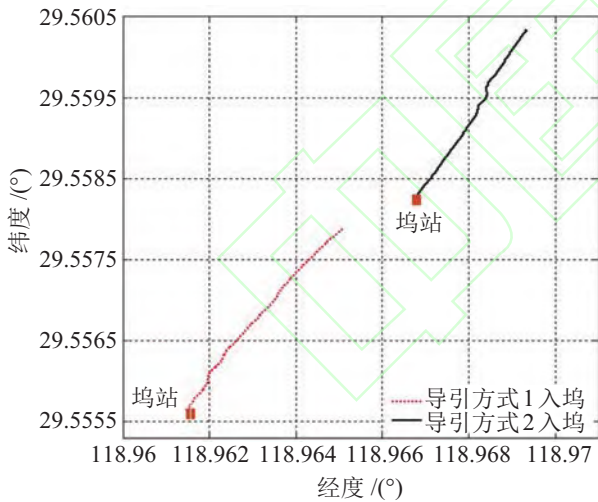


图 9 动力悬停入坞航迹图

Fig.9 AUV tracks in dynamic hovering docking

6.1 坞站悬停条件下的入坞试验

悬停条件下进行入坞试验时, 坞站悬停于水下一定深度, 保持航向不变, AUV 从距离坞站 400 m ~ 500 m 的位置出发, 根据实时解算的坞站位置信息自主航行入坞. 针对坞站悬停于不同地点, 悬停深度为 2 m、5 m、7 m, AUV 从不同地点出发等情形, 进行了一系列的湖上试验. 试验表明, 以上各种条件下, 2 种导引方式均能精确引导 AUV 实现入

坞. 图 9 为某 2 次入坞试验的航迹图. 图中红色航迹是将 USBL 收发器安装在 AUV 艏部进行导引时的航迹图, 黑色航迹是将 USBL 应答器安装在 AUV 艏部进行导引回坞时的航迹图.

6.2 移动入坞试验

移动入坞试验时, 坞站在水下一定深度以恒定的速度定向航行, AUV 根据自主定位信息实现自主入坞. 针对移动坞站在水下 2 m、5 m、7 m 以 0.5 kn 或 1 kn 航速定向航行的情形进行了试验, 当坞站速度为 0.5 kn 时, AUV 以 1 kn 的速度回坞, 当移动坞站航速是 1 kn 时, AUV 以 1.5 kn 的航速回坞. 多次试验结果表明, AUV 单次入水后具有 3 次回坞机会时, 入坞成功率很高, 在技术固化后的 10 次试验中成功入坞 10 次; AUV 单次入水仅具有 1 次回坞机会时, 入坞成功率在 90 % 以上. 图 10 为某 2 次入坞试验中, 坞站和 AUV 的航迹图, 试验时, 移动坞站的设定航速为 1 kn.

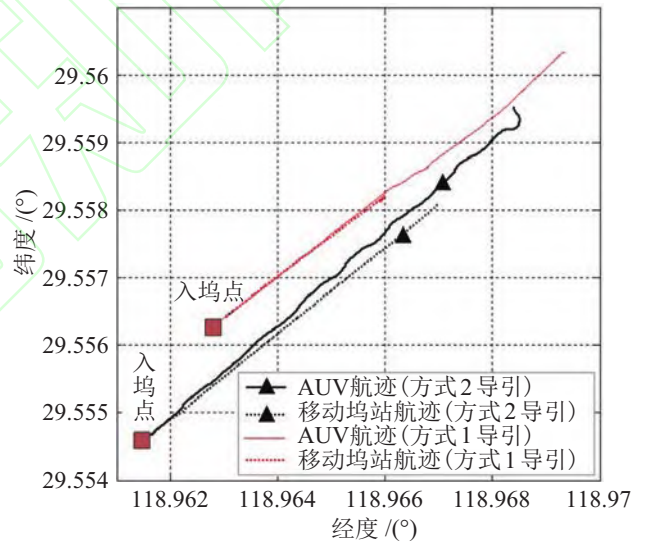


图 10 AUV 移动入坞航迹图

Fig.10 Tracks of the AUV in moving docking

可以看出, AUV 能够在较远的距离解算出目标信息并驶向目标点, 解算精度较高, 控制策略理想. 图 11 是湖上移动入坞时, 入坞过程的视频画面. 下面对末程入坞跟踪过程进行进一步分析. 图 12 和图 13 为成功入坞前 1 min 内, 东北天地理坐标系下, AUV 位置坐标相对于坞站位置坐标的偏差曲线, 以及 AUV 与目标航线间的跟踪偏差曲线. 其中, 垂向偏差已处理为 AUV 与坞站入口中轴线间的偏差, 东向偏差根据 AUV 的经度值与坞站的经度值偏差获得, 北向偏差根据 AUV 的纬度值与坞站纬度值间的偏差获得, 跟踪偏差是指 AUV 与坞站入口中轴线间的横向偏差. 图 12 为采用导引

方式 1 入坞时的偏差信息, 图 13 是采用导引方式 2 入坞时的偏差信息.

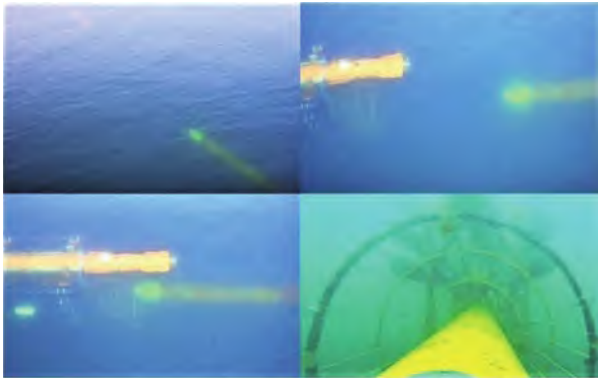


图 11 湖上入坞试验

Fig.11 Lake trial for docking

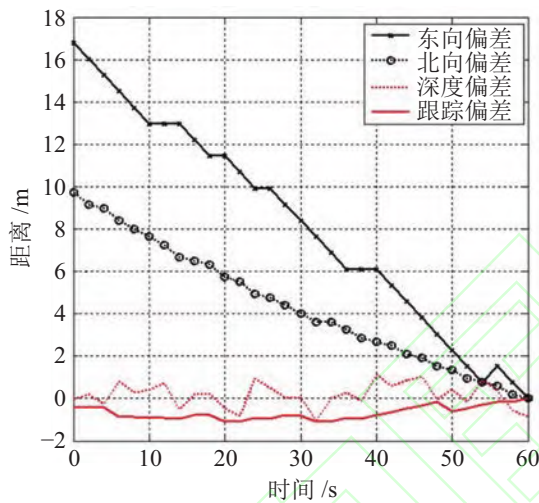


图 12 偏差曲线 (导引方式 1 入坞)

Fig.12 Curve of deviation (Guidance mode 1)

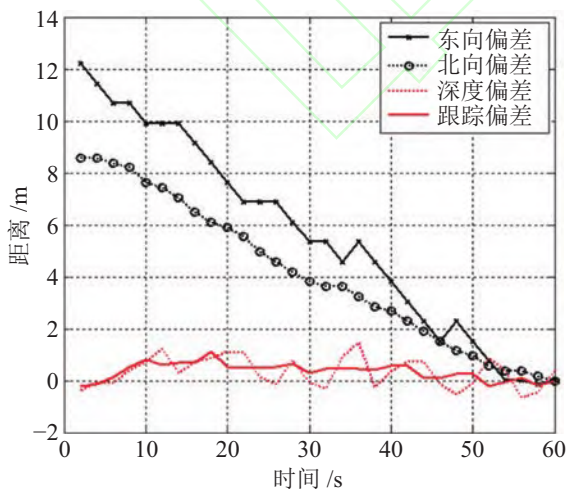


图 13 偏差曲线 (导引方式 2 入坞)

Fig.13 Curve of deviation (Guidance mode 2)

从图中跟踪曲线可以看出, AUV 在入坞前一段时间内能够较准确地跟踪坞站入口的中轴线, 采

用方式 1 导引时, 深度偏差均值为 0.16 m, RMSE 为 0.56 m, AUV 与目标航线间的距离偏差均值为 -0.6 m, RMSE 为 0.31 m; 采用方式 2 导引时, 深度偏差均值为 0.36 m, RMSE 为 0.57 m, AUV 与目标航线间距离偏差均值为 0.33 m, RMSE 为 0.33 m; 2 幅图东向和北向偏差曲线的斜率比较稳定, 能够说明 AUV 航行过程中航向较为稳定. 考虑存在西南来向的水流, 任务设定 AUV 和 DAUV 向西南方向航行, 从实际数据来看水流方向更偏向于自西向东, 从而导致图中东向偏差发生不变和反向增加的情况出现.

需要指出, 由于初始校准、航位推算等误差的影响, 实际 AUV 在完成入坞时其惯组记录的位置信息与 DAUV 的位置并不相同, 为了便于直观地理解, 将入坞时刻 AUV 与 DAUV 间的位置偏差补偿到了入坞过程中的航迹数据中, 从而获得了如图 10 所示的航迹. 对图 12 和图 13 中的东向、北向和跟踪偏差数据作了相同的处理, 使误差最后趋向于 0. 入坞后偏差不为 0 的主要原因是坞站位置坐标 (入口中心点) 与 AUV 惯组间存在着实际的偏差. 此外, 多次试验数据显示, 2 种导引方式回坞时, AUV 跟踪目标航线的精度无明显差别, 而跟踪偏差大小受环境水流大小、传感器特性等因素影响较大, 以上 2 种导引方式试验结果的偏差与试验在不同天气状况下进行有较大的关系.

7 结论 (Conclusion)

自主水下机器人动态回坞技术对提高 AUV 综合作业能力具有重要的意义. 本文介绍了本单位在原有静态回坞系统平台的基础上设计的移动回坞系统, 对基于 USBL 系统的动态回坞技术进行了研究; 通过湖上试验验证了回坞系统的可靠性; 悬停入坞试验中, 当移动坞站在不同的地点悬停、在水下不同的深度悬停、安装 USBL 不同的传感器时, 使用本文所述的入坞策略和控制方式 AUV 均能够成功入坞; 在移动坞站入坞试验中, 设定 AUV 和移动坞站间的相对速度为 0.5 kn, AUV 以 1 kn 或 1.5 kn 航速执行入坞. 针对坞站入口中心在水下 2 m、5 m、7 m 深度的情况进行了一系列的试验, 多次试验结果表明, AUV 单次入水后具有 3 次回坞机会时, 入坞成功率很高, 在技术固化后的 10 次试验中成功入坞 10 次; AUV 单次入水后仅具有 1 次入坞机会时, 入坞成功率在 90% 以上.

本次动态入坞试验以应用需求为导向, 结合实际使用需求, 模拟未来实际使用工况进行了大量的

试验, 试验结果符合预期, 为接下来的海上试验奠定了坚实的基础。为了进一步提高回坞过程中 AUV 和坞站的航行控制效果, 今后工作中将重点研究模糊 PID 算法在回坞控制中的应用。

重型 AUV 体积和质量大, 试验布放回收困难, 衷心地感谢中国科学院沈阳自动化研究所海洋信息技术装备中心重型 AUV 项目组所有参试人员。

参考文献 (References)

- [1] Sato Y, Maki T, Kume A, et al. Path replanning method for an AUV in natural hydrothermal vent fields: Toward 3D imaging of a hydrothermal chimney[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2014, 48(3): 104-114.
- [2] Choyekh M, Kato N, Short T, et al. Vertical water column survey in the Gulf of Mexico using autonomous underwater vehicle SOTAB-I [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2015, 49(3): 88-101.
- [3] Hardy T, Barlow G. Unmanned underwater vehicle deployment and retrieval considerations for submarines[C]//Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology – INEC 2008: Embracing the Future. London, UK: Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2008.
- [4] 张奇峰, 张运修, 张艾群. 深海小型爬行机器人研究现状 [J]. *机器人*, 2019, 41(2): 250-264.
Zhang Q F, Zhang Y X, Zhang A Q. Research status of benthic small-scale crawling robots[J]. *Robot*, 2019, 41(2): 250-264.
- [5] Fletcher B, Martin S, Flores G, et al. From the lab to the ocean: Characterizing the critical docking parameters for a free floating dock with a REMUS 600[C]//Oceans 2017. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 1-7.
- [6] Gillis C. Dynamic model development and simulation of an autonomous active AUV docking device using a mechanically actuated mechanism to recover AUVs to a submerged slowly moving submarine in waves[D]. Fredericton, Canada: University of New Brunswick, 2014.
- [7] Feezor M D, Blankinship P R, Bellingham J G, et al. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance[C]//Oceans 97 MTS/IEEE Conference. Piscataway, USA: IEEE, 1997: 1137-1142.
- [8] Allen B, Austin T, Forrester N, et al. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology[C]//Oceans 2006. Piscataway, USA: IEEE, 2006. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.306952.
- [9] McEwen R S, Hobson B W, McBride L, et al. Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(4): 550-562.
- [10] Li Y, Jiang Y Q, Cao J, et al. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110(A): 163-173.
- [11] Li B, Xu Y X, Fan S S, et al. Underwater docking of an underactuated autonomous underwater vehicle: System design and control implementation[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018, 19(8): 1024-1041.
- [12] 吕厚权, 郑荣, 魏奥博, 等. 面向回坞任务的 AUV 航向控制方式研究 [J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(6): 15-21.
Lyu H Q, Zheng R, Wei A B, et al. AUV heading control method research based on docking mission[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(6): 15-21.
- [13] 吴泽伟, 吴晓锋. 基于有限时间系统同步的自治水下航行器回收控制 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2164-2169.
Wu Z W, Wu X F. Recovery control for autonomous underwater vehicle based on finite-time synchronization of systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2164-2169.
- [14] Braga J M A. Control of underwater vehicle on autonomous docking maneuvers[D]. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2010.
- [15] Hydroid Company. Underwater mobile docking of autonomous underwater vehicles[C]//Oceans 2012. Piscataway, USA: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6405109.
- [16] Piskura J C, Purcell M, Stokey R, et al. Development of a robust Line Capture, Line Recovery (LCLR) technology for autonomous docking of AUVs[C]//MTS/IEEE Oceans Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761255.
- [17] Zhang L. An design method of underwater positioning system based on USBL[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 644-650: 968-972.
- [18] 张道平. 超短基线定位系统的误差分析 [J]. *海洋学报*, 1989, 11(4): 510-517.
Zhang D P. Error analysis of ultra short baseline positioning system[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 510-517.
- [19] Abdurahman B, Savvaris A, Tsourdos A. A switching LOS guidance with relative kinematics for path-following of underactuated underwater vehicles[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 2290-2295.
- [20] Marco D B, Healey A J. Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 466-476.

作者简介:

郑荣 (1963-), 男, 研究员, 博士生导师。研究领域: 海洋装备, 海洋机器人技术。

吕厚权 (1989-), 男, 硕士生。研究领域: 自主水下机器人入坞及控制技术。