

欠驱动 AUV 水平面动力定位控制方法研究

唐文政, 胡 测, 梁 镜

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘 要 以欠驱动自主水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 为试验平台, 提出了一种水平面动力定位控制方法。根据自研 AUV 平台的运动执行机构配置, 针对其欠驱动特性设计运动控制器, 控制纵向推力与转艏力矩, 经过路径跟踪与区域镇定两个阶段, 使航行器先沿预设路径快速接近目标点, 再低速逐渐调整水平位置, 最终在该点附近小范围内保持悬停。结合试验数据证明: 航行器可抵达并稳定在目标点附近 2 m 范围内, 并且在受到外力扰动偏离后能够重新返回, 从而验证该动力定位控制方法的有效性。

关键词 控制科学与技术; 自主水下机器人; 欠驱动系统; 动力定位

中图分类号 TP242 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2021)03-0252-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.03.015

Research on Horizontal Dynamic Positioning Control Method of Underactuated AUV

TANG Wenzheng, HU Ce, LIANG Jing

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract In this paper, a new method for horizontal dynamic positioning control of underactuated Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is proposed. According to the actuating mechanism configuration of the self-developed AUV platform, a motion controller has been designed to adjust the longitudinal thrust and bow torque. After two stages of path tracking and zone stabilization, the AUV fast approaches the target point along the preset path first, then gradually adjusts the horizontal position at low speed, and finally keeps hovering in a small range near the point. Combined with the experimental data, it has been proved that the AUV can reach and stabilize within 2 meters near the target point, and can return after being deviated by the external force disturbance, thus verifying the effectiveness of the dynamic positioning control strategy.

Key words control science and technology; AUV; underactuated system; dynamic positioning

0 引言

随着 AUV 应用领域逐渐拓展, 各种任务场景对其运动控制提出了更高要求。在执行抵近探测、悬停作业以及定点待命等任务时, 往往需要 AUV 具备自主靠近目标点并保持位置稳定的动力定位能力。国内外针对动力定位技术已开展一系列研究, 并在水面船舶领域已得到较好解决^[1-2]。出于

对成本、质量以及推进效率等方面的考虑, AUV 的运动执行机构往往被配置为欠驱动式, 但是仅通过较少输入实现六自由度运动控制, 在获得诸多优势的同时也增加了动力定位控制器的设计难度^[3]。

对于 AUV 动力定位问题, 文献[4]设计了滑模控制器并引入波浪扰动预测, 实现轨迹跟踪控制与定点控制, 并通过仿真进行验证; 文献[5]考虑了未知的海流干扰, 提出了一种基于反演技术的自适应

变结构控制方法; 文献[6]将环境最优动力定位控制 (WOPC, Weather Optimal Positioning Control) 的概念应用到全驱动自主水下机器人, 基于神经网络自适应反演法设计了动力定位控制器; 文献[7]提出了一种基于 Lyapunov 的模型预测控制方法, 结合推力的优化策略进行动力定位控制; 文献[8]针对全驱动 AUV 近水面运动中自身惯量小且环境扰动敏感的问题, 提出了一种动力定位控制方法。

以上控制方法大多基于复杂的非线性控制方法, 且有些仅针对全驱动配置, 难以有效应用到欠驱动 AUV 的工程实践中。因此, 本文以自研 AUV 平台为研究对象, 考虑其欠驱动特性与任务内容, 基于线性控制提出一种动力定位控制方法, 以实现自主抵近目标点并在其附近小范围区域保持水平位置稳定的控制效果, 并结合试验数据证明该控制方法的有效性。

1 AUV 平台运动执行机构配置

作为本文研究对象的 AUV 平台, 其运动执行机构包括 2 个垂直推进器、2 个水平推进器以及 1 组水平舵。其中: 垂直推进器位于载体重心附近沿中轴线左右分布, 提供垂向推力进行低速运动下深度控制; 水平推进器位于载体中后段沿中轴线左右分布, 提供纵向推力与转艏力矩进行纵向速度、纵向位置以及航向的控制, 其中转艏力矩通过左右推进器转速差产生; 1 组水平舵位于水平推进器后, 提供俯仰力矩进行高速运动下深度/俯仰控制。

该平台缺少侧向推进器提供侧移作用力; 在低速状态下, 其水平舵效率大幅降低, 垂直推进器采用左右分布形式, 基本不具备俯仰作用力矩; 而高速状态下, 其垂直推进器效率大幅降低, 基本不具备垂向作用力。根据以上运动执行机构配置的分析, 可判断该 AUV 平台属于欠驱动系统。

2 动力定位控制

在完成抵近探测、悬停作业以及定点待命等任务内容的过程中, 往往需要 AUV 平台能够沿着预设路径自主抵近目标点, 并最终在该点附近小范围区域保持位置稳定。考虑上述任务场景需求, 设计

动力定位控制分为路径跟踪与区域镇定 2 个阶段。

以任务目标点为圆心, 在指定半径范围内设置为抵近区域, 该区域边界作为路径跟踪与区域镇定 2 个控制阶段的分界线。其内部进一步设置较小半径范围内为定位区域, AUV 最终将在该区域内保持位置实现悬停, 如图 1 所示。按照时间顺序, 启动任务后 AUV 首先进入路径跟踪阶段, 沿预设路径向目标点快速靠近; 进入抵近区域后 AUV 切换到区域镇定阶段, 降低转速进一步抵近目标点, 进入定位区域后保持水平位置稳定, 若检测受到干扰偏离定位区域则自主返回, 从而实现从起始点出发沿预设路径抵达目标点并保持位置的动力定位控制。

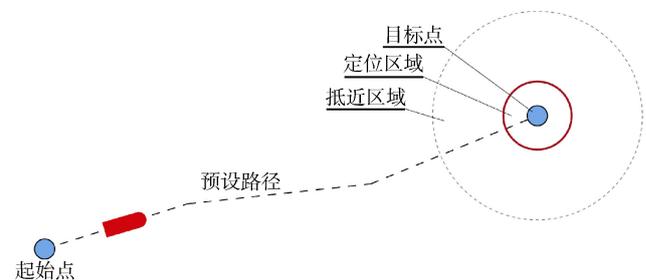


图 1 动力定位控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic positioning control

2.1 路径跟踪阶段

在路径跟踪阶段, 控制器根据预设路径与实时导航信息, 计算水平推进器转速指令值, 发送至执行机构产生纵向推力与转艏力矩, 控制 AUV 沿着预设路径进入抵近区域。预设路径通常为一系列路径点构成的分段直线, 因此具体方法采用路径点跟踪控制。路径起始点与载体当前点的水平面位置坐标在 WGS-84 坐标系下, 转换到 ENU 坐标系为

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos(\text{lat}) \cdot (\text{lon} - \text{lon}_0) \\ y = R \cdot (\text{lat} - \text{lat}_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (lon, lat) 为转换点经纬度坐标; $(\text{lon}_0, \text{lat}_0)$ 为基准点经纬度坐标; R 为地球基准椭球体长半径。

在工程应用中, 实际平台往往具有一定程度的左右结构以及推力不对称性, 并且欠驱动 AUV 无法在侧流干扰时通过侧向推力直接平衡干扰力, 从而对路径点跟踪控制精度产生影响。因此, 在常规的“视线法”制导方式基础上, 将路径偏移量引入

控制回路, 如图 2 所示。

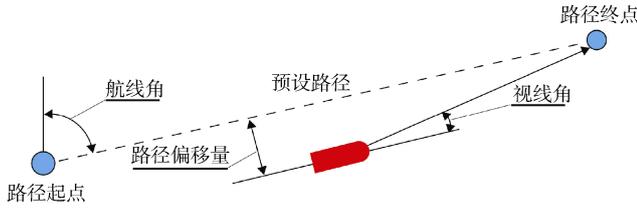


图 2 路径跟踪控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of path tracking control

根据当前载体位置与航段终点位置, 计算视线角为

$$\varphi_d = \tan^{-1} \frac{y_{\text{end}} - y_{\text{now}}}{x_{\text{end}} - x_{\text{now}}} \quad (2)$$

式中: $(x_{\text{now}}, y_{\text{now}})$ 为载体位置坐标; $(x_{\text{end}}, y_{\text{end}})$ 为当前航段终点坐标。

路径偏移量为

$$\varepsilon = L \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$l = \sqrt{(x_{\text{end}} - x_{\text{start}})^2 + (y_{\text{end}} - y_{\text{start}})^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \varphi_l - \varphi_d \quad (5)$$

$$\varphi_l = \tan^{-1} \frac{y_{\text{end}} - y_{\text{start}}}{x_{\text{end}} - x_{\text{start}}} \quad (6)$$

式中: l 为当前航段长度; $(x_{\text{start}}, y_{\text{start}})$ 为当前航段起点坐标; α 为航线角与视线角差值; φ_l 为航线角。

结合路径偏移量与视线角, 计算转速增量值为

$$\delta n = k_{P_\varepsilon} \cdot \varepsilon + k_{P_{\varphi_1}} \cdot (\varphi_d - \varphi) + k_{D_{\varphi_1}} \cdot \dot{\varphi} \quad (7)$$

式中: k_{P_ε} 、 $k_{P_{\varphi_1}}$ 与 $k_{D_{\varphi_1}}$ 为路径点跟踪控制系数; φ 为航向角; $\dot{\varphi}$ 为航向角速度。

根据运动执行机构进行动力分配, 输出水平推进器转速指令值为

$$\begin{cases} n_L = n_0 + \delta n \\ n_R = n_0 - \delta n \end{cases} \quad (8)$$

式中: n_L 与 n_R 分别为左右推进器转速指令值; n_0 为该航段设置的基础转速值。

2.2 区域镇定阶段

鉴于研究对象的欠驱动特性, 区域镇定阶段需结合纵向位置控制与航向控制实现水平位置控制。根据式 (8) 的运动执行机构动力分配, 水平推进器转速指令值由基础转速值与转速增量值 2 部分

构成, 区域镇定阶段的基础转速值为

$$n_0 = k_{P_\varepsilon} \cdot d \quad (9)$$

$$d = (x_{\text{end}} - x_{\text{now}}) \cdot \sin \varphi + (y_{\text{end}} - y_{\text{now}}) \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

式中: k_{P_ε} 为纵向位置控制系数; d 为纵向位置偏差。

航向控制以视线角作为目标航向角, 可根据式 (2) 得出, 再计算转速增量值为

$$\delta n = k_{P_{\varphi_2}} \cdot (\varphi_d - \varphi) + k_{D_{\varphi_2}} \cdot \dot{\varphi} \quad (11)$$

式中, $k_{P_{\varphi_2}}$ 与 $k_{D_{\varphi_2}}$ 为航向控制系数。

AUV 抵达定位区域后进入悬停状态, 根据导航信息监视位置偏差, 通过运动执行机构保持水平位置, 其中位置控制偏差为

$$D = \sqrt{(x_{\text{end}} - x_{\text{now}})^2 + (y_{\text{end}} - y_{\text{now}})^2} \quad (12)$$

3 实验结果分析

3.1 仿真实验

对于缺乏侧向机动能力的欠驱动 AUV 平台, 区域镇定阶段的水平位置控制是整个动力定位过程的关键, 因此首先在 MATLAB 环境下进行水平位置控制仿真实验。ENU 坐标系下, 取目标点为基准点 (0,0), 设置航行器初始航速与航向为 0, 初始位置为 (-30,-30), 仿真时间为 1 000 s, 定位区域为以目标点为圆心的 2 m 半径内区域。

仿真试验效果图如图 3-4 所示, 航行器启动后逐渐调整航向靠近目标点, 首次抵达后由于惯性出现小量超调, 通过调整逐渐稳定在定位区域内, 位置偏差小于 2 m。

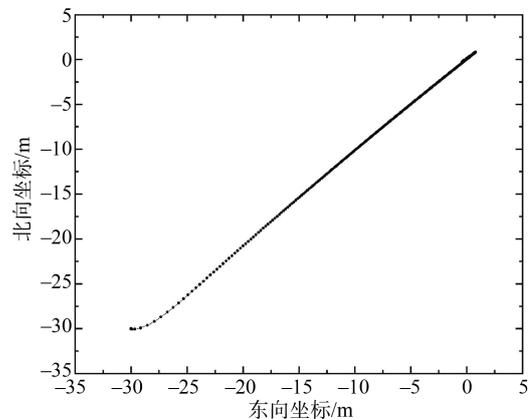


图 3 仿真实验航行轨迹图

Fig. 3 Trajectory graph of simulation

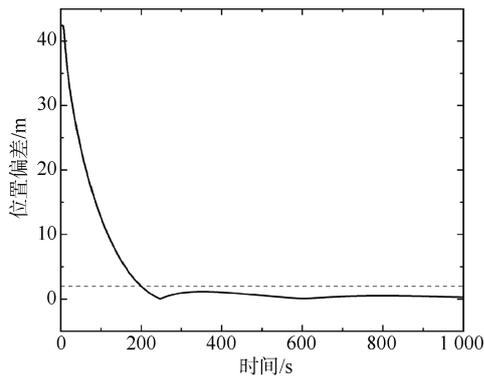


图 4 仿真实验位置偏差曲线图

Fig. 4 Position deviation graph of simulation test

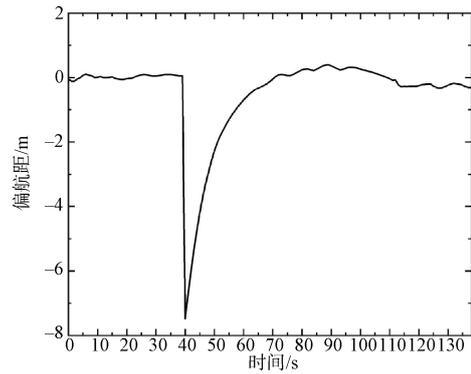


图 6 路径跟踪阶段偏航距曲线图

Fig. 6 Drift distance graph in path tracking positioning test

3.2 现场实验

采用自研欠驱动 AUV 平台, 通过湖上实验对整个动力定位控制流程进行验证。设置目标点附近 2 m 半径内区域为定位区域, 在距离其 150 m 处选取起始点, 预设航路包含长度分别约 60 m 与 100 m 两个直线航段。

整个动力定位过程持续 300 s, AUV 航行轨迹与推进器转速如图 5 所示, 启动任务后航行器首先进入路径跟踪阶段, 沿预设航路靠近目标点, 在 138 s 进入抵近区域后切换为区域镇定阶段, 以较低转速进一步靠近目标点, 最终稳定在定位区域。

在路径跟踪阶段中, AUV 基础转速值设置为 800 r/min, 在 41 s 抵达中转点的有效判定区域, 切换至第 2 航段开始转弯, 进入抵近区域后结束路径点跟踪控制, 路径偏移量在 1 m 内, 如图 6 所示。

随后 AUV 进入持续 162 s 的区域镇定阶段, 逐渐低速抵近目标点, 10 s 后首次进入定位区域并继续调整, 保持水平位置偏差在 2 m 内。以目标点为基准点 (0,0), 阶段切换时刻为时间轴起点, 该阶段航行轨迹与位置偏差分别如图 7-8 所示。

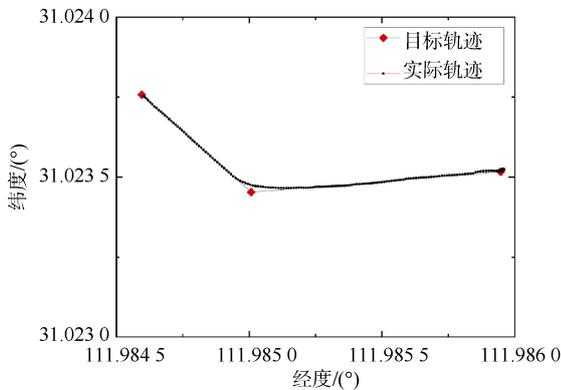


图 5 动力定位实验航行轨迹图

Fig. 5 Trajectory graph of dynamic positioning test

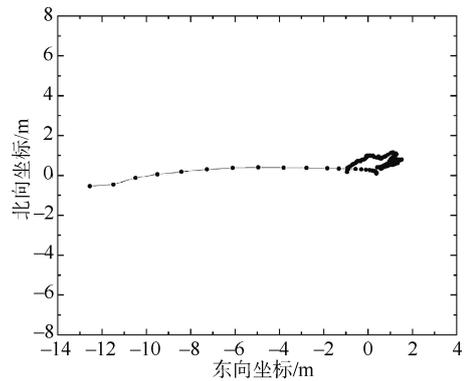


图 7 区域镇定阶段航行轨迹图

Fig. 7 Trajectory graph in zone stabilization

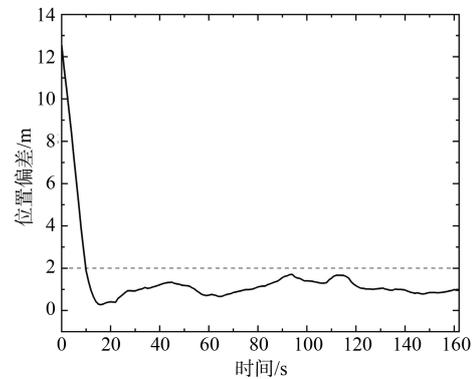


图 8 区域镇定阶段位置偏差曲线图

Fig. 8 Position deviation graph in zone stabilization

为验证区域镇定阶段 AUV 具备在干扰后的水平位置恢复能力,对航行器施加外部作用使位置偏离,该过程轨迹与推进器转速如图 9。在 32 s 时位置误差达到 6.1 m,此时解除干扰,航行器逐渐返回定位区域,由于惯性出现小幅度超调,经过调整后位置偏差重新控制在 2 m 内,如图 10 所示。

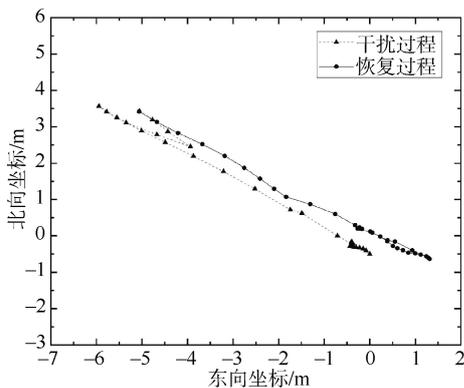


图 9 外力干扰下航行轨迹图

Fig. 9 Trajectory graph under external force disturbance

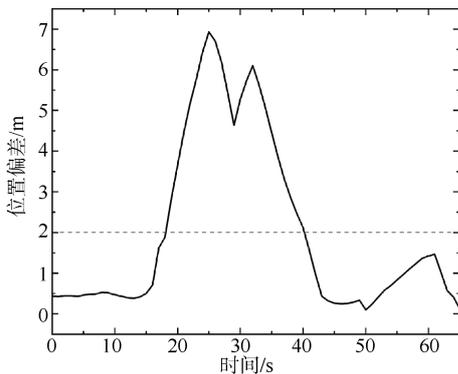


图 10 外力干扰下位置偏差曲线图

Fig. 10 Position deviation graph under external force disturbance

4 结束语

本文以 AUV 为研究对象,从实际工程应用角度出发,结合常规任务场景对动力定位功能的需求,针对欠驱动式运动执行机构配置,基于线性控制提出一种水平面动力定位控制方法。

根据作业流程,设置路径跟踪与区域镇定 2 个控制阶段;针对预设路径的常用设置方式选择路径

点跟踪控制方法,在“视线法”控制回路中引入路径偏移量,以降低加工误差与环境干扰等带来的路径控制偏差;结合纵向位置控制与航向控制,进行无侧向推力的水平面位置控制。

最终通过仿真与现场试验,证明 AUV 能够沿预设路径自主抵近目标点,并保持在目标点附近 2 m 范围内区域,从而验证该动力定位控制方法的可行性,为欠驱动 AUV 顺利完成抵近探测、悬停作业与定点待命等任务奠定基础。

参考文献

- [1] LORIA A, FOSSEN T I. A separation principle for dynamic positioning of ships : theoretical and experimental results[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8 (2): 332-343.
- [2] STRAND J P, FOSSEN T I. Nonlinear output feedback and locally optimal control of dynamically positioned ships : experimental results[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1998, 31 (30): 83-88.
- [3] 陈子印. 欠驱动无人水下航行器三维路径跟踪反步控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 曹永辉. 复杂环境下自主式水下航行器动力定位技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [5] 高剑, 徐德民, 严卫生. 基于自适应反演滑模控制的 AUV 水平面动力定位方法[J]. 机械科学与技术, 2007, 26 (6): 738-740.
- [6] 葛晖, 敬忠良. 海流作用下全驱动自主式水下航行器环境最优动力定位控制[J]. 上海: 上海交通大学学报, 2011, 45 (7): 961-965.
- [7] CHAO S, ZHANG K, YANG S, et al. Dynamic positioning of an AUV : a Lyapunov-based model predictive control approach[C]// Proceedings of The 26th Canadian Congress of Applied Mechanics. Victoria: Department of Mechanical Engineering, 2017.
- [8] 周启润, 曾庆军, 姚金艺, 等. 全驱动 AUV 动力定位系统设计与实现[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27 (3): 333-338.

(责任编辑: 曹晓霖)