

自治水下机器人滑模轨迹跟踪 控制技术研究综述

王政钦, 何芊霓, 梁正强, 周雪韵

红塔集团玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年12月8日; 录用日期: 2025年12月29日; 发布日期: 2026年1月14日

摘 要

自主式水下机器人(AUV)是海洋勘探与发展的一个主要手段, AUV具有先进的导航、控制、通讯、传感器等技术, 使人类对海洋的认知有了质的飞跃。控制系统是水下机械臂的核心部分, 其工作性能的好坏直接关系到其工作的稳定性和可靠性。简要介绍了AUV的几种主要控制方法, 对其运动控制方法的选择、控制器的设计和控制系统的设计具有参考价值。

关键词

水下机器人, 轨迹跟踪, 控制技术, 滑模控制

A Review of Sliding Mode Trajectory Tracking Control Technology for Autonomous Underwater Vehicles

Zhengqin Wang, Qianni He, Zhengqiang Liang, Xueyun Zhou

Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd. Yuxi Cigarette Factory, Yuxi Yunnan

Received: December 8, 2025; accepted: December 29, 2025; published: January 14, 2026

Abstract

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) are a major means of ocean exploration and development. AUVs are equipped with advanced technologies such as navigation, control, communications, and sensors, enabling a qualitative leap in human understanding of the ocean. The control system is the core component of underwater robotic arms, and its performance directly affects the stability and reliability of their operation. This briefly introduces several main control methods of AUVs, provid-

ing valuable reference for the selection of motion control approaches, the design of controllers, and the design of control systems.

Keywords

Underwater Robots, Trajectory Tracking, Control Technology, Sliding Mode Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国土地资源的不断消耗,海洋作为一个国家的重要战略资源,其开发与利用对我国经济的发展、国力的提升具有举足轻重的作用。未来,谁能掌控海洋,谁就能掌控世界,所以,海洋的开发与维护日益受到世界各国的关注。在“十三五”发展战略中,已经明确提出了要进一步发展海洋经济,切实保护海洋主权和海洋利益,强化海上执法力量。科技是人类的第一生产力,海洋科技的发展必然依赖于基础研究和科技创新。在这样的大环境下,我国是一个拥有强大的海洋强国,要想在国际上的激烈竞争中站稳脚跟,就必须尽快建立起自己的深海装备系统,以适应我国对海洋资源的开发和维护海洋权益的需要。

因此,海洋勘探仪器的研发已成为世界各国研究的热点。目前,水下机器人有很多不同的功能。根据母舰与艇身之间有无缆连接,无人水下机器人可分为遥控水下机器人(Remotely Operated Vehicles, ROV)和自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。与ROV相比,AUV有一系列明显的优点,如活动范围广,下潜深度大,无脐带缠绕,机动灵活,不需要水面支持系统,体积小,便于维修保养。AUV的应用范围很广,主要用于测绘地形、水下施工、后勤支援、侦察、情报收集、反潜战、水雷等,因此,为了提高军事力量,世界各地都在积极研发AUV。AUV广泛应用于海洋救援、海底光缆铺设与维护、海底矿产勘探与海洋生物研究、海洋环境科学研究、海洋考古学等。

AUV的动作控制系统是其核心部分,其功能类似于人体的大脑。水下机器人要实现多种复杂的运动和运动,必须具有优良的操纵性和优良的控制质量。本文简述了AUV的轨迹追踪控制技术的发展状况。

2. AUV 航迹跟踪滑模控制算法的研究现状

由于AUV体积小、速度慢,受到海上环境的影响,且其动力学模式较为复杂,所以AUV的控制系统设计十分困难。常规PID控制方法都是以线性系统为基础,对线性系统的控制效果较好,但由于水下机器人是6个自由度的非线性系统,PID控制器不能很好地控制AUV的运动。

在80年代,由于计算机技术和人工智能技术的不断发展,许多智能方法被用于自动驾驶飞行器的轨迹跟踪控制。如自适应控制,滑模控制,模糊控制,神经网络控制[1]。

2.1. 滑模变结构控制

滑模变结构控制是一种具有高精度、结构简单、响应速度快[2][3]的复杂不确定系统,具有很好的抗干扰性和鲁棒性,因而在处理复杂非线性系统时具有明显的优越性。文献[4]对复杂干扰和未知运动模型的水下载体的轨迹跟踪控制进行了研究,并对其进行了研究。尽管滑模控制算法在解决此类非线性问题上具有独特的优越性,但其自身的抖动问题不但会对系统的控制效果造成很大的影响,而且还会对控制

元件造成很大的伤害。

为了减小抖动对系统的影响, Levant [5] [6]提出了一种二次滑动模式控制的新方法。同时, 该方法与其它智能控制方法相结合, 可以有效地抑制滑模抖振[7] [8]。例如, 在文献[9]-[11]中, 将滑模控制与模糊控制相结合, 既能有效地克服传统的滑动模式控制带来的干扰, 又能改善控制器的控制精度, 使其能够在—个维度上进行轨迹追踪。

2.2. 神经网络控制

同时, 随着神经网络技术的不断发展, 采用滑模控制和神经网络技术来提高系统的稳定性和精确度, 这种智能控制方法在水下机器人的运动轨迹追踪[12]中得到了广泛的应用。文献[13]采用超扭曲滑动模式识别技术, 并将其与动态区域控制相结合, 以达到降低能量消耗的目的。滑模控制虽然具有很好的抗干扰性, 但是它需要在不确定的情况下, 决定是否满足特定的匹配条件, 从而使其在实际应用中受到很大的限制[3]。

2.3. 模型预测控制

模型预测控制方法包括预测模型、滚动优化和反馈校正三部分, 在处理多变量和有约束的系统方面能力较强。

唐军等[14]通过建立模型预测控制与滑模控制相结合的策略, 利用平滑的 $\tanh$ 函数替代了传统滑模控制中的 sign 函数, 有效降低了抖振现象, 有效提高了 AUV 在面对外部干扰时, 仍能保持高精度和鲁棒性。覃国样等[15]设计了一种基于改进灰狼算法的模型预测控制和基于非线性干扰观测器的积分滑模控制级联的轨迹跟踪控制器, 该算法基于个体经验和权重更新灰狼位置以及反向学习策略, 提出改进灰狼算法, 以此来优化模型预测控制的优化求解过程, 使得机器人以理想最优速度实现给定位姿的跟踪, 使得 AUV 能在海流等复杂干扰条件下具备良好的轨迹跟踪效果。

3. AUV 航迹跟踪反步控制算法的研究现状

反步(后推、反推、反演)控制是 Kanellakopoulos [16] [17]最先提出的, 而反步控制是控制技术不断发展的产物。反步控制算法在控制中的应用越来越广泛, 如模糊控制[18] [19]、神经网络控制[20] [21]、滑模控制等。反步法最大的优势就是可以很好地改善跟踪误差的转换质量, 从而进一步确定跟踪误差与设计参数的关系, 并且在每个阶段进行迭代设计, 使得控制器的设计更加系统化、结构化。

3.1. 反步法

反步法是一种非常有效的方法, 它能有效地解决水下载体的动态位置和轨迹跟踪。文献[22]研究了在未知常扰动条件下, 模型参数未知的水下载体的轨迹跟踪问题, 采用积分反步法和李雅普诺夫法, 将运动控制器推广到水下载体的动态模型, 从而克服了模型参数的不确定性。文献[23]基于已有的研究结果, 提出了一种基于反步方法的水下机器人三维轨迹跟踪控制器的设计方法, 该方法可以有效地消除水流的干扰, 并将其结果应用于 UUV-HUGIN 模型。文献[24]采用李雅普诺夫直接法、反步法、参数投影法等方法, 对轨迹跟踪控制器进行了研究。文献[25]为克服水下载体非线性因子的改变和水动力时变对其航迹跟踪控制的影响, 利用李雅普诺夫的稳定性和逆步法进行控制器的设计, 使 AUV 在变速状态下的轨迹追踪。虽然反步算法在求解非线性问题上有其独到之处, 但由于传统的逆步法在每个步骤中都要反复求导, 使得更高阶的虚拟控制律以及最后控制器所包含的项目数目会随着系统阶次的增多而呈爆炸性的增长, 这就造成了“计算爆炸”的问题。D Swaroop [26]等首先提出了一种新的方法来解决这一问题, 并

在李铁山[27]等人的研究中得到了很好的应用。

3.2. 干扰观测器技术

由于水下复杂环境中,存在着诸多未知的干扰,滑模控制器能对可观测干扰进行有效抑制,但面对未知干扰控制效果就有所欠缺,因此干扰观测器技术提供了另一种思路。

侯冬冬等[28]提出了一种自适应干扰观测器的反步控制方法,将海洋多源干扰用线性外系统描述,设计自适应观测器进行估计,并针对实际驱动器存在的输入饱和问题,设计了辅助动力系统。在此基础上,进一步设计了反步控制器,使得 AUV 能更好地跟踪预定轨迹,且具有更好的抗干扰能力。武建国等[29]针对 AVU 的水下三维轨迹跟踪问题,设计了一种基于非线性干扰观测器的反步滑模控制器,通过构建六自由度数学模型,设计 NDO 对环境干扰进行估计补偿。最后在反步法的基础上引入滑模控制,并加入 NDO 设计反步滑模控制器,有效提高了 AUV 在水下的鲁棒性。

4. AUV 航迹跟踪其他控制算法的研究现状

深度强化学习、自适应、模糊等算法也常用于 AUV 的运动控制研究中,多用来适应系统不确定的模型参数和未知的外界扰动。

4.1. 深度强化学习

深度强化学习算法将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力强强联合,可用于 AUV 和执行器的模型训练中,也可用来训练 AUV 的动力学模型。

王日中等[30]研究了基于深度强化学习算法的 AUV 深度控制,采用梯度方法设计了演员(actor)和评价者(critic)两种神经网络,可以让航行器自主学习引导律。此方法不依赖于人工建立的 AUV 精确模型和引导律,避免因模型不确定造成的跟踪误差。

Sun 等[31]采用深度确定性策略梯度算法训练了 AUV 动力学模型中动作-状态映射关系,其中动作指 AUV 的推力和转矩,状态指 AUV 的速度和角速度。该方法在训练时加入了随机干扰项,使得此策略不需要精确 AUV 模型的同时系统还具有强抗干扰能力。

4.2. 自适应控制

Zhang 等[32]采用自适应模糊控制器抑制模型不确定性干扰,通过模糊逻辑系统近似不确定的参数,并将模糊输出引入自适应控制律中,用以适应系统的不确定性变化。此外通过设计 tan 型障碍 Lyapunov 函数处理系统状态的约束问题,但未考虑外界干扰的影响。

5. 结论

在过去二十年间,自主水下航行器(AUV)作为人类探索深海奥秘、开发水下资源的核心装备,实现了跨越式的稳步发展。从初代原型样机仅 100 米潜深的初步尝试,到逐步突破 1000 米、3000 米、6000 米乃至万米级深渊的极限挑战,AUV 不仅征服了不同深度的海洋环境,更成功经受住冰川覆盖区、海底热液喷口、冷泉生态区等极端恶劣场景的严苛考验。这些里程碑式的研究进展,不仅彰显了 AUV 领域在材料、能源、导航等基础技术上的持续突破,更奠定了其在水下资源勘探、环境监测等领域的核心地位。

当前,AUV 正朝着长航程续航与多模式作业的双重趋势加速演进,而传统单一的锂电池供能方式,以及仅聚焦于海洋信息采集、资源勘测的单一作业模式,已成为制约其进一步拓展应用边界的关键瓶颈。基于此,AUV 的运动控制技术的未来发展将聚焦两大前沿发展趋势:

一方面,低功耗与智能化结合的运动控制。当前,多自由度 AUV 普遍配备多个推进装置,全功率运

行时能耗较高,且多数产品缺乏灵活的横向推进能力,限制了其在复杂环境中的机动性。未来,采用少量执行器却能实现多自由度运动的低功耗推进系统将成为主流方向。通过优化推进器结构设计,研发多方位旋转式推进器以提供矢量推力,可在降低能耗的同时,实现 AUV 的灵活机动。尤为关键的是,针对海洋环境的复杂性,“欠驱动 AUV 在强时变洋流下的鲁棒输出反馈控制”技术将成为核心支撑——该技术能有效应对强时变洋流带来的干扰,通过鲁棒控制算法与输出反馈机制的融合,确保欠驱动 AUV 在动力配置受限的情况下,依然保持稳定、精准的航行姿态,为低功耗多自由度运动提供可靠保障。此外,“结合在线环境感知的节能轨迹规划与跟踪一体化控制”技术的融入,将实现 AUV 航行轨迹的动态优化:通过实时感知海洋环境中的洋流、障碍物等信息,同步完成节能轨迹规划与精准跟踪控制,在提升航行灵活性的同时进一步降低能耗,完美契合长航程发展需求。

另一方面,集群运动控制。通过构建多个具备自主决策能力的 AUV 集群,在统一的协同控制体系下,可实现多平台协同完成同一复杂任务,大幅放大单台 AUV 的作业效能。这种模式尤其适用于大范围海洋环境监测、大面积海底地形测绘等任务,通过多 AUV 的分工协作,可显著提升作业效率。同时,还可根据不同作业深度、任务类型,灵活搭配多种类 AUV 形成协同作业编队,实现作业深度、覆盖面积与任务类型的多重突破,成为未来 AUV 运动控制领域的重要发展方向。

参考文献

- [1] 张铭钧, 孟庆鑫. 基于神经网络的无人无缆水下机器人运动建模与控制技术研究[J]. 中国造船, 1999(2): 87-96.
- [2] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [3] 胡剑波, 李飞, 魏高乐, 高鹏, 王强. 不确定系统反推滑模变结构理论及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 519-526.
- [4] Yoerger, D. and Slotine, J. (1985) Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **10**, 462-470. <https://doi.org/10.1109/joe.1985.1145131>
- [5] Levant, A. (1993) Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control. *International Journal of Control*, **58**, 1247-1263. <https://doi.org/10.1080/00207179308923053>
- [6] Levant, A. (2003) Higher-Order Sliding Modes, Differentiation and Output-Feedback Control. *International Journal of Control*, **76**, 924-941. <https://doi.org/10.1080/0020717031000099029>
- [7] Salgado-Jimenez, T., Spiewak, J., Fraise, P. and Jouvencel, B. (2004) A Robust Control Algorithm for AUV: Based on a High Order Sliding Mode. *Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*, Kobe, 9-12 November 2004, 276-281. <https://doi.org/10.1109/oceans.2004.1402929>
- [8] Khan, I., Bhatti, A.I., Khan, Q. and Ahmad, Q. (2012) Sliding Mode Control of Lateral Dynamics of an AUV. *Proceedings of 2012 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, Islamabad, 9-12 January 2012, 27-31. <https://doi.org/10.1109/ibcast.2012.6177521>
- [9] Qi, D., Feng, J. and Yang, J. (2016) Longitudinal Motion Control of AUV Based on Fuzzy Sliding Mode Method. *Journal of Control Science and Engineering*, **2016**, Article ID: 7428361. <https://doi.org/10.1155/2016/7428361>
- [10] Lakhekar, G. and Deshpande, R. (2014) Diving Control of Autonomous Underwater Vehicles via Fuzzy Sliding Mode Technique. 2014 *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, Nagercoil, 20-21 March 2014, 1027-1031. <https://doi.org/10.1109/iccpct.2014.7054923>
- [11] Bessa, W.M., Dutra, M.S. and Kreuzer, E. (2008) Depth Control of Remotely Operated Underwater Vehicles Using an Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller. *Robotics and Autonomous Systems*, **56**, 670-677. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004>
- [12] Zhang, M. (2014) Adaptive Region Tracking Control for Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Mechanical Engineering*, **50**, 50-57. <https://doi.org/10.3901/jme.2014.19.050>
- [13] Ismail, Z.H. and Putranti, V.W.E. (2015) Second Order Sliding Mode Control Scheme for an Autonomous Underwater Vehicle with Dynamic Region Concept. *Mathematical Problems in Engineering*, **2015**, Article ID: 429215. <https://doi.org/10.1155/2015/429215>
- [14] 唐军, 吴涛, 张少文. 结合 MPC 与 SMC 的水下机器人轨迹跟踪控制算法[J/OL]. 机械科学与技术, 1-9. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250030>, 2026-01-06.
- [15] 覃国样, 陈琦, 张进. 基于 IGWO-MPC 和 NDO-ISMC 级联算法的 UUV 轨迹跟踪控制器设计[J]. 船舶工程, 2024,

- 46(2): 1-11.
- [16] Kanellakopoulos, I., Kokotovic, P.V. and Morse, A.S. (1991) Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **36**, 1241-1253. <https://doi.org/10.1109/9.100933>
 - [17] Krstic, M., Kanellakopoulos, I. and Kokotovic, P.V. (1994) Nonlinear Design of Adaptive Controllers for Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **39**, 738-752. <https://doi.org/10.1109/9.286250>
 - [18] Leu, Y. and Lin, J. (2009) Adaptive Backstepping Fuzzy Control for a Class of Nonlinear Systems. In: Yu, W., He, H. and Zhang, N., Eds., *Advances in Neural Networks—ISNN 2009*, Springer, 1123-1129. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01510-6_127
 - [19] Ezziani, N., Essounbouli, N. and Hamzaoui, A. (2008) Backstepping Fuzzy Adaptive Controller of Induction Machine. 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, 25-27 June 2008, 1622-1627. <https://doi.org/10.1109/med.2008.4602122>
 - [20] Ge, S.S., Li, G.Y. and Lee, T.H. (2001) Adaptive NN Control for a Class of Strict-Feedback Discrete-Time Nonlinear Systems via Backstepping. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*, Orlando, 4-7 December 2001, 3145-3151. <https://doi.org/10.1109/cdc.2001.980302>
 - [21] Chen, W.S., Jiao, L.C., Li, J. and Li, R.H. (2010) Adaptive NN Backstepping Output-Feedback Control for Stochastic Nonlinear Strict-Feedback Systems with Time-Varying Delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, **40**, 939-950. <https://doi.org/10.1109/tsmcb.2009.2033808>
 - [22] Aguiar, A.P. and Pascoal, A.M. (2002) Dynamic Positioning and Way-Point Tracking of Underactuated AUVs in the Presence of Ocean Currents. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 2002, Las Vegas, 10-13 December 2002, 2105-2110. <https://doi.org/10.1109/cdc.2002.1184840>
 - [23] Borhaug, E. and Pettersen, K.Y. (2005) Adaptive Way-Point Tracking Control for Underactuated Autonomous Vehicles. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Seville, 15 December 2005, 4028-4034. <https://doi.org/10.1109/cdc.2005.1582792>
 - [24] Do, K.D. and Pan, J. (2003) Robust and Adaptive Path Following for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 2003, Denver, 4-6 June 2003, 1994-1999. <https://doi.org/10.1109/acc.2003.1243367>
 - [25] Repoulas, F. and Papadopoulos, E. (2007) Planar Trajectory Planning and Tracking Control Design for Underactuated AUVs. *Ocean Engineering*, **34**, 1650-1667. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.11.007>
 - [26] Wang, D. and Huang, J. (2005) Neural Network-Based Adaptive Dynamic Surface Control for a Class of Uncertain Nonlinear Systems in Strict-Feedback Form. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **16**, 195-202. <https://doi.org/10.1109/tnn.2004.839354>
 - [27] 李铁山, 邹早建, 罗伟林. 基于DSC后推法的非线性系统的鲁棒自适应NN控制[J]. 自动化学报, 2008(11): 1424-1430.
 - [28] 侯冬冬, 都军民, 秦丽萍, 等. 基于自适应干扰观测器的水下机器人-机械臂系统反步控制[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(3): 413-420.
 - [29] 武建国, 刘杰, 陈凯. 时变干扰下 AUV 三维轨迹跟踪反步滑模控制[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(7): 82-87.
 - [30] 王日中, 李慧平, 崔迪, 等. 基于深度强化学习算法的自主式水下航行器深度控制[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(4): 354-360.
 - [31] Sun, Y., Ran, X., Zhang, G., Wang, X. and Xu, H. (2020) AUV Path Following Controlled by Modified Deep Deterministic Policy Gradient. *Ocean Engineering*, **210**, Article ID: 107360. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107360>
 - [32] Zhang, Z. and Wu, Y. (2021) Adaptive Fuzzy Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles with Output Constraints. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **29**, 1311-1319. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2020.2967294>