

分 类 号: TP391

单位代码: 10183

研究生学号: 2019531002

密 级: 公 开



# 吉 林 大 学

## 博 士 学 位 论 文

基于水下悬浮坞的AUV自主导引入坞技术研究

Research on Autonomous Guided Docking Technology of AUV  
Based on Underwater Floating Dock

作者姓名: 国婧倩

专 业: 计算机系统结构

研究方向: AUV自主导引及动力学系统建模仿真

指导教师: 刘军 教授

培养单位: 计算机科学与技术学院

2025 年 5 月

---

基于水下悬浮坞的 AUV 自主导引入坞技术研究

---

Research on Autonomous Guided Docking Technology of  
AUV Based on Underwater Floating Dock

---

作者姓名：国婧倩

专业名称：计算机系统结构

指导教师：刘军 教授

学位类别：工学博士

论文答辩日期： 2025 年 5 月 30 日

授予学位日期： 年 月 日

答辩委员会组成：

	姓名	职称	工作单位
主席	沈同圣	研究员	军事科学院
委员	徐高潮	教授	吉林大学
	郭晓新	教授	吉林大学
	崔军红	教授	吉林大学
	毕远国	教授	东北大学

## 摘要

### 基于水下悬浮坞的 AUV 自主导引入坞技术研究

自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 作为一种重要的海洋探测工具,已成为人类监测海洋环境、探索海洋科学以及开发海洋资源的关键技术手段。然而,续航能力的限制一直是制约其发展的关键瓶颈。AUV 在水下作业一定时间后,需进行能源补充。通过在海底布设接驳坞, AUV 可利用传感器感知、估计接驳坞的位姿,借助高精度定位导引实现自主入坞,从而完成能源补充、数据上传及任务下载。

然而,与陆地充电桩相比,海流干扰多变、海底地势复杂、多径效应、信号衰减、通信延迟、能见度低等水下复杂特性,为水下接驳系统带来巨大挑战。本文围绕海底观测网中 AUV 安全且快速接驳的应用场景,综合考虑海洋环境适应性和 AUV 运动学特性,创新性地提出了一种新型海底接驳系统,并从接驳坞运动稳定性和 AUV 声学导引准确性两个方面,开展深入研究,以提高 AUV 入坞成功率。本文主要研究内容及创新点如下:

(1) 首次提出一种基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统。首先,针对海底固定式接驳坞环境适应性不足问题,考虑海流、海底地势、沉积物等因素,采用系泊机制设计并研制海底系泊悬浮式接驳坞(简称悬浮坞),实现导向罩开口沿海流方向的稳定悬浮姿态,通过声学信号自主完成回收,减少海底环境对接驳系统的约束。然后,针对光学导引可靠性受限问题,考虑悬浮坞方向测量限制和 AUV 航行不平稳等因素,提出一种交互式声学渐近补偿导引方法,采用分层架构,融合交互式声学加权位置估计和基于横向偏差的比例制导策略,利用滑动窗口动态聚集定位信息,根据横向偏差按比例调整 AUV 航向,使逐步平滑收敛至目标路径。湖海试验结果表明,悬浮坞的系泊设计方便快捷,能够在海流达 2 kn 时保持稳定悬浮姿态。14 次湖泊试验中,横向距离偏差平均值为 0.53 m,航向偏差在  $4^{\circ}\sim 19.29^{\circ}$  间;8 次海上试验中,横向距离偏差平均值为 1.37 m,航向偏差平均值为  $19.25^{\circ}$ ,100 m 内的多次定位可以满足接驳要求。以上结果验证了水下悬浮式接驳系统的有效性。

(2) 针对 AUV 入坞接触作用下悬浮坞的运动响应问题,建立一种基于悬浮坞的

AUV 入坞接触耦合运动响应数值计算及仿真模型。该模型构建了 AUV 与悬浮坞的动态接触相互作用，基于重叠网格技术划分计算域，并通过网格独立性试验，确定了最佳网格设置。AUV 轴向速度和悬浮坞艏摇角的仿真结果与海上试验结果具有较高的一致性，验证了该模型能够有效捕捉 AUV 和悬浮坞的关键运动特性。在模型基础上，模拟悬浮坞在不同海流条件下的稳定性以及入坞接触过程中的运动响应；根据单一变量原理，分析了悬浮坞关键设计参数对入坞效果的影响，为悬浮坞的优化设计提供了理论依据；并进一步探讨了不同工况条件下，悬浮坞与固定坞在运动响应、入坞时间和准确度方面的差异。结果表明，悬浮坞的柔性有利于缓解接触冲击，最大扩展 9.3% 的入坞空间，提高了入坞效率、稳定性和安全性。

(3) 针对复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题，提出一种基于分级运动学样条快速随机探索树的 AUV 导引入坞路径规划方法。首先，基于高斯波束追踪声学传播模型模拟水声信道环境，生成信噪比水平空间分布图。然后，考虑定位精度、AUV 运动学和入坞方向三种约束，该方法首先设计了一种分级势场法引导节点生长方向，根据信噪比分布特征，动态调整排斥力，并引入多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力；然后引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法来控制节点扩展，基于节点扩展长度、势场引导距离、AUV 转向角度、垂直距离、势场引导转向角度设计路径成本函数；最后针对近距离接驳入坞的两点边值问题，利用系统的微分平坦性，采用多项式样条插值方法生成平滑连续的高阶可微分轨迹。实验结果表明，在良好、中等、恶劣三种声场环境下，与现有基于势场引导和运动学约束的快速随机探索树路径规划方法相比，本方法在路径长度、路径平滑度和定位质量方面效果更好，能够有效构建引导节点，提高路径规划效率；与典型制导律方法（如视线法）相比，位置偏差最大减少 49.75%，方位偏差最大减少 13.98%。

#### 关键词：

AUV 自主入坞，交互式声学导引，水下悬浮式接驳坞，接触运动响应，导引路径规划

## Abstract

### Research on Autonomous Guided Docking Technology of AUV Based on Underwater Floating Dock

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) serve as essential tools for marine exploration and have become indispensable technology for monitoring marine environment, advancing oceanographic research, and exploiting marine resources. However, limited endurance remains a major constraint on AUV development. Following sustained underwater operations, AUVs require energy replenishment. This can be achieved by deploying docking stations on the seabed. An AUV can autonomously dock with the station using its sensors to detect and estimate the station's position and orientation, guided by high-precision positioning systems. This enables the AUV to replenish energy, upload data, and download new missions.

However, compared to land-based charging facilities, the underwater docking faces significant challenges due to the complex underwater environment. Factors include highly variable currents, complex seabed topography, multi-path effects, signal attenuation, communication delays, and limited visibility. Focusing on the application scenario of secure and efficient AUV docking within seabed observation networks, this thesis first proposes an innovative underwater docking system that comprehensively consider both marine environmental adaptability and AUV kinematic characteristics. Then conducts in-depth research focusing on two critical aspects: ensuring the docking station's motion stability and enhancing the accuracy of acoustic guidance. The main research contents and innovations of this thesis are as follows:

(1) A moored underwater docking system for resident AUVs with full acoustic guidance. First, to address the limited environmental adaptability of seabed fixed docking stations, which arises from key factors such as ocean currents, seabed topography, and sediment, a seabed moored floating docking station (termed as "floating dock") is designed and developed. This mooring mechanism enables the dock to maintain a stable floating posture, with its funnel oriented along the current direction. This design facilitates autonomous recovery using

acoustic signals, effectively reducing the constraints of seabed topography. Second, to address the reliability limitations of optical guidance, specifically orientation measurement limitations of the floating dock and AUV motion instability, an interactive acoustic asymptotic compensation guidance method is proposed. It combines interactive acoustic weighted position estimation with lateral-deviation-based proportional guidance. By dynamically aggregating localization data through a sliding window, this method adjusts the AUV's heading proportionally based on lateral deviations, ensuring smooth convergence to the target trajectory. Lake and sea trial results validate the system. The floating dock's mooring design proved convenient and rapid to deploy. It maintained a stable floating posture under currents up to 2 knots. In 14 lake trials, the average lateral distance deviation was 0.53 m, with heading deviations ranging from  $4^\circ$  to  $19.29^\circ$ . In 8 sea trials, the average lateral distance deviation was 1.37 m, and the average heading deviation was  $19.25^\circ$ . Multi-point positioning updates within the final 100 m were sufficient to meet docking requirements. These results collectively demonstrate the effectiveness of the underwater floating docking system.

(2) To investigate the motion response of a floating dock during AUV docking contact, this thesis establishes a numerical simulation model for coupled motion interactions. The model characterizes the dynamic contact behavior between the AUV and floating dock using an overset grid technique for computational domain partitioning. Following rigorous grid independence verification, an optimal mesh configuration is identified. Simulation results for AUV axial velocity and floating dock yaw angle show strong agreement with sea trial data, confirming the model's accuracy in capturing critical kinematic behaviors of both systems. Leveraging this model, the stability of the floating dock under varying ocean currents and its motion response during docking contact were systematically investigated. Following the principle of single-variable analysis, the influence of critical dock design parameters on docking performance was evaluated, establishing a theoretical basis for floating dock optimization. Comparative analyses between floating and fixed docks were conducted under various operational scenarios, with focus on motion response, docking duration, and accuracy. Results demonstrate that the floating dock's flexibility reduces contact impact forces,

IV

increases effective docking space by up to 9.3%, and improves docking efficiency, stability, and safety.

(3) To address the challenge of AUV guidance and docking in complex underwater acoustic environments, this study proposes a path planning method based on a hierarchical kinematic constrained spline rapidly exploring random tree (HKS-RRT\*). First, the underwater acoustic channel is modeled using a Gaussian beam tracing-based propagation model to generate a spatial signal-to-noise ratio (SNR) distribution map. Then, based on three critical constraints: positioning accuracy, AUV kinematics, and docking orientation, the proposed method utilizes a hierarchical potential field to guide node expansion, dynamically modulating repulsive forces based on the SNR distribution while implementing a polynomial unimodal function to create distance-dependent asymmetric attractive forces. Furthermore, an AUV motion control parameter sampling strategy is introduced to manage node expansion, designing path cost function that considers expansion length, potential field guidance distance, AUV steering angle, vertical displacement, and potential field guidance steering angle. For solving the two-point boundary value problem (TPBVP) in close-range docking scenarios, the method employs polynomial spline interpolation, exploiting the system's differential flatness to produce smooth, high-order differentiable trajectories. Experimental results demonstrate that under good, moderate, and poor acoustic conditions, the proposed method outperforms both existing potential-field guided RRT\* and kinematically constrained RRT\* methods in path length, smoothness, and positioning quality. It effectively generates guiding nodes and enhancing path planning efficiency. Furthermore, when compared to conventional guidance laws (e.g., the line-of-sight method), the method reduces the maximum positional deviation by 49.75% and azimuthal deviation by 13.98%.

**Keywords:**

AUV docking, Interactive acoustic guidance, Underwater floating dock, Contact dynamics response, Guidance path planning

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 相关研究现状.....	6
1.2.1 水下接驳坞研究现状.....	6
1.2.2 AUV 自主导引研究现状.....	10
1.3 本文研究内容.....	16
1.3.1 研究问题与挑战.....	17
1.3.2 研究方法与贡献.....	18
1.4 本文组织结构.....	20
第 2 章 基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统.....	23
2.1 问题描述.....	24
2.2 水下系泊悬浮式接驳系统.....	26
2.2.1 系统组成与架构.....	26
2.2.2 海底系泊悬浮式接驳坞.....	28
2.2.3 声学定位与通信设计.....	30
2.3 交互式声学渐近补偿导引方法.....	31
2.3.1 制导与控制架构.....	31
2.3.2 交互式声学加权位置估计.....	32
2.3.3 基于横向偏差的比例制导.....	36
2.4 AUV 接驳试验与结果分析.....	38
2.4.1 试验设施.....	38
2.4.2 湖上试验结果.....	40
2.4.3 海上试验结果.....	44
2.5 本章小结.....	48
第 3 章 基于悬浮坞的 AUV 入坞接触运动响应数值计算及仿真.....	49
3.1 问题描述.....	50
3.2 当前研究现状.....	51
3.3 AUV 入坞数值计算模型.....	53
3.3.1 流场的控制方程.....	53
3.3.2 流体力和力矩.....	54
3.3.3 悬链线方程.....	54
3.3.4 接触耦合与碰撞力.....	55
3.3.5 动态流体相互作用.....	56
3.4 AUV 入坞仿真模型及验证.....	57

3.4.1 AUV 入坞仿真模型 .....	57
3.4.2 重叠网格划分 .....	60
3.4.3 仿真模型验证 .....	61
3.5 AUV 入坞悬浮坞仿真结果及优化设计 .....	62
3.5.1 悬浮坞姿态稳定性分析 .....	63
3.5.2 AUV 入坞悬浮坞运动响应分析 .....	66
3.5.3 悬浮坞设计参数影响分析 .....	68
3.5.4 悬浮坞优化设计 .....	71
3.6 悬浮坞运动响应性能验证 .....	72
3.6.1 位置偏差工况入坞 .....	72
3.6.2 姿态偏差工况入坞 .....	74
3.6.3 AUV 速度和流速工况入坞 .....	76
3.6.4 结果讨论 .....	79
3.7 本章小结 .....	80
第 4 章 基于分级运动学 RRT* 的 AUV 导引入坞路径规划方法 ...	81
4.1 问题描述 .....	81
4.2 水声信道传播模型 .....	83
4.3 HKS-RRT* 路径规划方法 .....	86
4.3.1 基于分级势场法的节点引导 .....	86
4.3.2 基于运动学约束的节点扩展 .....	89
4.3.3 五次样条插值轨迹生成 .....	93
4.4 实验与结果分析 .....	95
4.4.1 实验设置与评价指标 .....	95
4.4.2 HKS-RRT* 方法的有效性验证 .....	97
4.4.3 HKS-RRT* 与其他方法的对比 .....	98
4.5 本章小结 .....	105
第 5 章 结论与展望 .....	107
5.1 本文总结 .....	107
5.2 研究展望 .....	109
参考文献 .....	111

## 插图清单

图 1.1	无人水下航行器 .....	1
图 1.2	母船回收 AUV 装置 .....	2
图 1.3	海底科学观测网的接驳场景 .....	3
图 1.4	AUV 水下接驳入坞过程 .....	3
图 1.5	漏斗/锥形接驳坞的接驳方式 .....	6
图 1.6	国内外代表性固定式接驳坞 .....	7
图 1.7	国内外代表性移动式接驳坞 .....	8
图 1.8	悬浮式接驳坞 .....	9
图 1.9	带充电装置的 USBL 阵列 .....	11
图 1.10	其他基于声学的定位方法 .....	12
图 1.11	安装有 5 个光源的锥形坞站及单目视觉导引的坐标系 .....	13
图 1.12	POSTECH 的接驳方案示意图和水池演示试验方案 .....	13
图 1.13	Tri-TON AUV 的接驳方案 .....	13
图 1.14	平面对接平台和预期着陆区 .....	14
图 1.15	AUV 导引入坞方案 .....	16
图 1.16	研究内容关系图 .....	20
图 2.1	水下常驻监测网络 .....	24
图 2.2	不同接驳坞类型的 AUV 接驳入坞场景 .....	25
图 2.3	水下接驳系统整体设计 .....	27
图 2.4	AUV 自主接驳的 GNC 架构 .....	27
图 2.5	SMFD 整体设计 .....	29
图 2.6	布放和回收过程示意图 .....	30
图 2.7	USBL 在 AUV 上的位置 .....	31
图 2.8	定位-通信信号结构 .....	31
图 2.9	AUV 接驳的软件分层架构 .....	32
图 2.10	AUV 与 SMFD 间的交互式定位结果 .....	34

图 2.11	交互式声学定位的时序流程 .....	34
图 2.12	目标路径点的规划 .....	37
图 2.13	AUV 实物图 .....	38
图 2.14	SMFD 实物图 .....	39
图 2.15	接驳部布放入水 .....	40
图 2.16	AUV 接驳轨迹与 USBL 定位数据 .....	41
图 2.17	6 个水听器的信道脉冲响应 .....	42
图 2.18	存在位置偏差的 AUV 接驳轨迹 .....	43
图 2.19	湖试接驳过程中 AUV 的姿态角 .....	43
图 2.20	湖试中 AUV 成功接驳 .....	43
图 2.21	试验海域与 SMFD 组装 .....	44
图 2.22	SMFD 的布放过程 .....	44
图 2.23	AUV 接驳轨迹与 USBL 定位数据 .....	46
图 2.24	海试接驳过程中 AUV 的姿态角 .....	46
图 2.25	USBL 与惯性导航的 AUV 轨迹的比较 .....	47
图 2.26	AUV 入坞过程中的姿态偏差与位置偏差 .....	47
图 2.27	海试中 AUV 成功接驳 .....	48
图 3.1	海测中接触碰撞造成的设备破损 .....	50
图 3.2	AUV 和 SMFD 的 6-DOF .....	56
图 3.3	计算模型的结构参数 .....	59
图 3.4	网格生成 .....	60
图 3.5	试验与数值模拟的接驳坞状态 .....	61
图 3.6	仿真结果与试验结果的比较 .....	62
图 3.7	不同质量条件下 SMFD 姿态的仿真结果 .....	64
图 3.8	不同流速不同质量条件下 SMFD 姿态的速度云图 .....	65
图 3.9	SMFD 的姿态 (刚度 6482580 N/m、质量 2800 kg、流速 0.5 m/s) .....	66
图 3.10	SMFD 姿态平衡时间随悬链线刚度的变化 .....	66
图 3.11	水平面上存在位置和姿态偏差的 AUV 入坞图 .....	67

图 3.12	AUV 入坞过程中的接触效果和运动学参数 .....	67
图 3.13	AUV 入坞过程的压力图 .....	68
图 3.14	不同水平位置偏差下 AUV 入坞的对比仿真结果 .....	73
图 3.15	不同水平位置偏差下 AUV 的运动响应 .....	73
图 3.16	位置偏差 0.877 m 下 AUV 入坞运动状态压力云图 .....	74
图 3.17	不同水平姿态偏差条件下 AUV 入坞的对比仿真结果 .....	75
图 3.18	不同水平姿态偏差条件下 AUV 运动响应 .....	75
图 3.19	水平姿态偏差 0、15°、30°条件下 AUV 入坞成功的压力云图 .....	76
图 3.20	不同 AUV 初始速度不同流速条件下 AUV 入坞的对比仿真结果.....	77
图 3.21	不同 AUV 初始速度不同流速条件下 AUV 运动响应的对比仿真结果..	78
图 3.22	流速 0.2 m/s、AUV 初始速度 1.2 m/s 的入坞过程云图.....	78
图 3.23	不同流速条件下 AUV 以 0.9 m/s 初始速度进入 SMFD 的过程云图.....	79
图 4.1	AUV 接驳过程中的交互定位示意图 .....	82
图 4.2	双海山的水深测量和声线轨迹图 .....	84
图 4.3	双海山的传播损失分布图 .....	84
图 4.4	水下接驳的 HPF 节点引导示意图.....	89
图 4.5	使用 KSteer 函数的节点扩展 .....	92
图 4.6	入坞空间区域划分 .....	93
图 4.7	近距离多项式样条插值轨迹生成 .....	94
图 4.8	水声传播 SNR 分布 .....	96
图 4.9	三种环境下 HKS-RRT*规划的 AUV 入坞路径（灰色为生长树，红色为规划的 AUV 入坞路径，黑色为近距离样条轨迹，白色为悬浮坞方向改变重新生成轨迹） .....	98
图 4.10	不同方法规划的 AUV 导引路径 .....	99
图 4.11	路径长度统计数据 .....	100
图 4.12	路径节点数统计数据 .....	100
图 4.13	方法计算时间统计数据 .....	101
图 4.14	路径最大转向角度统计数据 .....	102

图 4.15	目标方向夹角统计数据 .....	103
图 4.16	不同环境下的平均位置偏差和平均方位偏差 .....	104

## 附表清单

表 1.1	三种导引方式性能比较 .....	10
表 2.1	SMFD 结构参数 .....	29
表 2.2	USBL 参数 .....	30
表 2.3	AUV 特征参数 .....	39
表 2.4	交互式声学定位结果（湖测） .....	41
表 2.5	声学通信与定位结果（海测） .....	45
表 3.1	SMFD 模型的初始配置 .....	58
表 3.2	AUV 模型的初始配置 .....	59
表 3.3	接触耦合的初始配置 .....	59
表 3.4	网格独立性试验 .....	60
表 3.5	评价指标符号表 .....	63
表 3.6	不同质量条件下 SMFD 净浮力的仿真结果 .....	64
表 3.7	不同流速条件下 SMFD 艏摇角的仿真结果 .....	65
表 3.8	不同体积条件下 AUV 入坞的仿真结果 .....	69
表 3.9	不同转动惯量条件下 AUV 入坞的仿真结果 .....	70
表 3.10	不同质量条件下 AUV 入坞的仿真结果 .....	70
表 3.11	不同悬链线刚度条件下 AUV 入坞的仿真结果 .....	71
表 3.12	SMFD 设计参数的优化 .....	72
表 4.1	线性归一化相关变量 .....	92
表 4.2	场景出发点以及目标点设置 .....	96
表 4.3	平均路径长度统计结果 .....	100
表 4.4	平均计算时间统计结果 .....	101
表 4.5	平均路径最大转向角度统计结果 .....	102
表 4.6	平均目标方向夹角统计结果 .....	103
表 4.7	不同方法的位置偏差和方位偏差均值 .....	105

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

海洋覆盖地球表面 71%，在地球生态系统功能调节和能源储存中起着关键作用。据国际能源署统计，全球超过 70% 的油气资源蕴藏在海洋之中，但海洋油、气的储量探明率分别为 24% 和 31%，仍处于早期勘探阶段<sup>[1,2]</sup>。此外，海底稀土资源储量是陆地的 800 倍，具有巨大经济价值。2012 年，中国提出“建设海洋强国”战略，开启了我国对海洋认识、开发和利用的新篇章。党的二十大更是强调，将海洋强国建设作为推动中国式现代化的有机组成和重要任务。

随着蓝色经济<sup>[3]</sup>和海洋资源开发需求的快速增长，深入探索和全面了解广阔的海洋已成为一项重要且紧迫的任务，这离不开海洋科学技术的创新与发展。当前，无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV）<sup>[4]</sup>作为海洋探测的核心工具之一，已成为人类认识海洋、开发海洋的重要技术手段，同时也是实现海洋强国战略、捍卫国家安全和推动可持续发展的高技术装备。随着科技的不断进步，无人水下航行器的功能不断扩展，种类逐渐多样化，主要包括遥控水下航行器（Remotely Operated Vehicle, ROV）<sup>[5]</sup>和自主水下航行器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）<sup>[6,7]</sup>，如图 1.1 所示。ROV 通过脐带电缆与母船连接，依赖人工远程遥控操作，其操作灵活性和实时可控性使 ROV 能够在水下执行复杂且高精度的作业，如海底管道的检测与维修。相比之下，AUV 则具备高度的自主性，能够独立执行预设的任务，也可以根据环境变化实时调整行动策略，如海洋环境数据的采集和分析。作为深海探测和资源开发的前沿技术，AUV 在海洋科学研究、环境监测<sup>[8]</sup>、国防安全等领域发挥着不可替代的作用。



(a) 4500 米级“海马”号 ROV



(b) 6000 米级“潜龙一号”AUV

图 1.1 无人水下航行器

AUV 自带能源自主航行，可到达人类难以到达的海区，但续航能力不足一直是制约其发展的关键瓶颈。在满足操纵性要求下，AUV 的体积通常受到严格限制，直接影响可装载的电池容量，导致 AUV 的工作时间和航行距离严重受限<sup>[9]</sup>，难以满足长时间的作业需求。因此，AUV 在完成一定时间的水下作业后，需要浮出水面，如图 1.2 所示，依赖母船、起吊设备和滑道装置进行回收<sup>[10]</sup>，以完成充电、设备检查、数据上传以及任务指令下载等操作。这不仅打断了水下作业连续性，还消耗了大量时间，显著降低了整体作业效率。而且，AUV 的回收过程繁琐复杂，成本高昂，需要配备一定数量的专业技术人员。尽管近年来，自主起降和回收技术取得了较大进展<sup>[11-13]</sup>，但在实际应用中，尤其是在恶劣海况下，回收过程仍面临巨大挑战。当海面风浪较大时，母船和 AUV 会出现剧烈晃动，难以实现成功抓取，增加操作风险，甚至造成 AUV 的损坏。目前 AUV 回收过程存在的诸多弊端都对 AUV 的回收技术提出了新的要求。



(a) AUV 吊放式回收装置

(b) AUV 滑道式回收装置

图 1.2 母船回收 AUV 装置

水下长期驻留作业是 AUV 发展的必然趋势<sup>[14]</sup>，通过在水下实现能源补充和数据交换，减少频繁布放和回收的需求，从而提升作业效率和连续性。这一趋势在长航程、长航时的科学考察任务以及深海探测任务中尤为重要。随着海底科学观测网<sup>[15]</sup>的发展和常驻型 AUV<sup>[16]</sup>概念的提出，水下接驳和充电技术应运而生，为 AUV 的长期驻留作业提供了技术支持。海底观测网通过光电复合缆为水下基站平台提供能源，同时将采集到的海洋数据实时传输至岸基控制中心，实现对海洋环境长期、实时、连续的监测。借助水下接驳技术<sup>[17,18]</sup>，AUV 能够与海底接驳坞等基站平台建立连接，完成能源补充和数据交互，并通过接驳坞将收集的数据传输至岸端，不仅显著提升了 AUV 的续航能力，还扩展了其探测范围。此外，AUV 作为连接水上和水下的关键纽带，能够执行海底监测系统的巡检、图像拍摄以及能源补给等多样化任务。如图 1.3 所示，接驳坞

与海底观测网的接口相连，AUV 通过自身搭载的传感器感知、估计接驳坞的姿态及位置，利用导引技术进入到接驳坞后，物理连接实现固定，进而完成能源补充、数据上传及任务下载等操作。未来，AUV 需要具备更长的航程<sup>[19]</sup>、更智能的自主性<sup>[20]</sup>、更可靠的协同作业能力<sup>[21,22]</sup>，以及更强的通信能力<sup>[23]</sup>，而研究 AUV 水下接驳技术，实现持续的能源供应和信息交互，具有重要的科学意义和工程价值。



图 1.3 海底科学观测网的接驳场景

AUV 水下接驳入坞过程如图 1.4 所示，主要包括三个阶段：1) 远距离归航阶段：AUV 通过声学信标获取接驳坞的初始位置信息，并基于惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS）与自主导引方法实现从远端向接驳坞的航行接近。2) 近距离接驳阶段：当 AUV 到达接驳坞附近后，开始高精度导引模式，结合视觉或声学感知数据与实时跟踪控制技术，确保 AUV 沿预定路径向接驳坞靠近；3) 入坞阶段：指 AUV 进入接驳坞的过程，包括进入前的接触过程以及进入后的固定锁紧过程，进一步实现水下能源补给和数据传输。

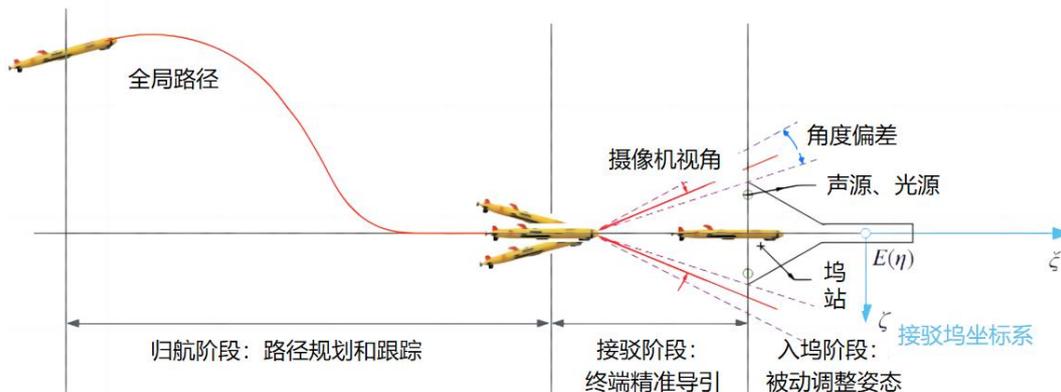


图 1.4 AUV 水下接驳入坞过程

AUV 水下接驳入坞过程的实现依赖于一系列关键技术的协同作用，这些技术共同构成了接驳系统的技术框架，使 AUV 能够在复杂水下环境中准确、高效、安全地完成入坞任务。主要包括以下关键技术：

### **(1) 水下平台技术**

水下平台是接驳系统的基础设施，主要为接驳坞和 AUV。其设计需综合考虑结构力学性能、流体动力学特性与系统功能集成性，直接影响接驳操作的难易程度。其中，接驳坞通常采用模块化设计，集成限位锁紧机构、主动式姿态调整机构、声学定位信标以及能源/数据传输接口等功能模块<sup>[24]</sup>，同时需优化其外形结构以降低流场扰动对 AUV 入坞过程的影响。此外，为适应深海高压环境，平台结构需采用高强度耐压材料，并进行表面防生物附着处理。

### **(2) AUV 导航技术**

AUV 导航技术<sup>[25]</sup>指 AUV 根据导航传感器和声学定位传感器确定自身位置和接驳坞位置，是实现高精度接驳入坞的基础。水声导航是目前主要的技术手段，但其精度容易受声速限制、信号衰减和多径效应的影响。为提高导航精度，通常采用多传感器融合技术<sup>[26]</sup>，结合惯性导航系统、多普勒计程仪和水声定位系统，以减小累积误差并提高定位可靠性。

### **(3) 自主导引技术**

导引技术指 AUV 根据导航信息确定归航的期望路径或行为<sup>[27]</sup>，是实现高精度接驳入坞的关键。AUV 需要根据接驳坞的位置和姿态，通过搭载的传感器（如声呐、摄像头等）实时感知环境，并利用先进的路径规划方法生成导引指令。此外，AUV 还需具备自主决策能力，能够根据环境变化（如海流干扰）动态调整导引策略，以确保接驳过程的稳定性和成功率。

### **(4) 跟踪控制技术**

跟踪控制技术<sup>[28]</sup>用于确保 AUV 在接驳过程中沿预定路径航行的运动精度和稳定性。AUV 具有非线性和复杂的动力学特性，考虑海流的动态性和不确定性，AUV 需要具备高精度的运动控制能力和抗干扰能力，如海流补偿方法、自适应控制、反馈控制技术以及滑动模型控制方法等<sup>[29]</sup>。同时，降低过程中的能量消耗。

### **(5) 水下能源补给技术**

水下能源补给技术是指接驳坞集成大功率能源供应系统<sup>[30]</sup>，可以为 AUV 提供快

速、稳定的充电服务。目前，主要采用物理连接的有线充电技术（如湿插拔连接器）和非接触的无线充电技术（如电磁感应式），并相应开发能源管理系统，优化能量传输效率，加强充放电过程的安全保护。考虑海洋环境的特殊性，能源供应系统需要具备高压密封、宽温度区间运行、防电解腐蚀等性能，以保障长期可靠运行。

鉴于水下接驳系统需在复杂时空多变环境中实现高精度 AUV 自主导引入坞，相较于陆地充电桩，其构建与实现的难度显著增大，面临一系列的难点和挑战。第一，复杂多变的海流干扰与异质不确定的海底地势，接驳坞难以自适应调整姿态。第二，水下环境的高压、低温、黑暗和高盐度等特性，严重限制了视觉导引的作用距离，且性能对海水质量敏感。同时，受声速限制、信号衰减和多径效应的影响，声学导引精度难以完全满足高精度接驳需求。第三，AUV 长时间航行产生的累积误差会降低导航精度，增加接驳难度。第四，AUV 需要根据实时环境信息生成可行导引路径，但水下环境的不可预测性增加了路径规划的复杂性。第五，海流、波浪等外部干扰会增加 AUV 的运动不确定性，需要 AUV 的控制系统具备较强的抗干扰能力。第六，水下环境影响能源传输效率，有线充电技术对物理连接精度有较高要求，无线充电技术则受传输距离和效率的限制。综上所述，水下接驳系统的实现需要克服复杂环境、高精度导引、自主控制以及系统可靠性等多方面的难题。

AUV 水下接驳是一项融合流体力学、控制理论、能源传输等多学科交叉的前沿技术，涵盖接驳坞系统设计、AUV 自主导引、高精度跟踪控制、AUV 入坞接触动力学建模，以及水下电能与数据传输等方面。目前，主流的固定式接驳系统难以适应动态海流干扰和复杂海底地势，而且光学导引在介质敏感不可靠的弱光环境下作用距离短，关键在于 AUV 通过声学导引进入其有效作用范围内。对此，本文提出基于声学导引的悬浮式接驳系统的解决思路，针对 AUV 水下接驳应用中的三个关键问题展开了研究，分别是：1) AUV 航行入坞过程中侧向海流干扰与弱光环境问题；2) AUV 入坞接触作用下悬浮坞的运动响应问题；3) 复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题。针对上述问题，本文分别提出了以下的方法：1) 基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统；2) 基于悬浮坞的 AUV 入坞接触运动响应数值计算及仿真；3) 基于分级运动学 RRT\* 的 AUV 导引入坞路径规划方法。所提出的方法紧密结合实际应用需求，构建了满足实际要求的水下接驳系统，并在实际海洋环境中展现出良好的可靠性，对提升 AUV 接驳性能具有重要的现实意义。

## 1.2 相关研究现状

水下接驳技术是支撑 AUV 实现长期驻留作业的核心手段，其发展水平直接影响深远海探测作业的效率与可靠性。其中，水下接驳坞设计和 AUV 自主导引是决定接驳成功率与系统稳定性的两大关键技术。接驳坞的设计特性关系到姿态稳定性、接驳流程以及部署与回收策略，而 AUV 的自主导引则依赖于精确定位和路径规划算法。本节将围绕接驳坞设计和 AUV 自主导引两方面，介绍国内外的相关研究现状。

### 1.2.1 水下接驳坞研究现状

目前，国际上已经发展出了多种方式的接驳坞，主要包括两种<sup>[31]</sup>：全向接驳和单向接驳。全向接驳通常采用刚性杆或张力电缆构成的垂直结构作为接驳目标，AUV 通过被动锁定装置完成抓取连接<sup>[32]</sup>。由于接驳目标相对较小，这种方式需要精确的定位。单向接驳是目前应用最多的方式，接驳坞通常包括一个锥形喇叭口，为 AUV 入坞提供一个扩大的横截面，降低了 AUV 的导航精度需求。

自 1997 年 REMUS 水下接驳系统<sup>[24]</sup>出现以来，漏斗/锥形接驳坞因其结构简单和功能可靠而得到广泛发展，按结构形式主要分为三类<sup>[27]</sup>：固定式、移动式和悬浮式，如图 1.5 所示。这些设计的核心目标是维持接驳坞的姿态稳定，这对于 AUV 的顺利入坞至关重要，也是确保精确定位和安全接驳的基础。



图 1.5 漏斗/锥形接驳坞的接驳方式

#### (1) 固定式接驳坞

固定式接驳坞（简称固定坞）通常采用三脚架式结构，直接坐落于海底，因其高稳定性已经过了较为全面的研究。图 1.6 为国内外的五种代表性固定式接驳坞。图 1.6 (a)为美国伍兹霍尔海洋研究所（Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI）针对 REMUS 系列 AUV 研制的第一代和第二代接驳坞<sup>[33]</sup>，姿态固定不可调整，其开创性工

作可以追溯到 1997 年。该系统涵盖了水下接驳的所有方面，包括接驳坞的设计、AUV 导航系统、自主制导、电池充电和数据交互链路。图 1.6 (b)为美国蒙特利湾海洋研究所 (Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI) 针对 Dorado AUV (直径 54 cm) 研制出的水下接驳坞<sup>[17]</sup>，底部设计有自平衡的摆钟，通过配重和双轴万向节使对接管达到自平衡水平姿态，采用电感线圈进行充电，主要用于长期部署在海底观测网络中。图 1.6 (c)为西班牙赫罗纳大学基于 LOON-DOCK 项目针对 Sparus II AUV 研制的水下接驳坞<sup>[34]</sup>，结构简单，上方设计有楔口以调整 AUV 进入对接管，采用声学 and 光学组合制导。图 1.6 (d)为哈尔滨工程大学针对特定的 AUV 研制相应的包容式接驳装置<sup>[35]</sup>，其也称为接驳基站，液压驱动双头球铰机构辅助插拔完成充电，并可以进行三个自由度的姿态调整，采用了视觉定位制导，在山东烟台进行了海上接驳，这是我国首次实现 AUV 的海上接驳试验。图 1.6 (e)为浙江大学针对“海豚二号”研制的两摆动自由度水下接驳坞<sup>[36]</sup>，为了便于在水下部署，通过万向节实现两个自由度的摆动，以在海底地势不平时还可将基站调整至导向罩中心线为水平状态，降低部署难度；夹持器选用磁性夹紧元件，AUV 入坞后，通过打开与关闭电磁铁实现对 AUV 的锁紧与释放；采用无线感应式充电和非接触信号传输方式<sup>[37]</sup>，充电组件不需要暴露在水中，对污垢和腐蚀的容忍度高。此外，浙江大学针对混合动力水下滑翔机 (Hybrid Underwater Glider, HUG) 设计单轴旋转接驳坞<sup>[38]</sup>，通过电动技术旋转导向罩开口沿海流方向，有助于减少 AUV 入坞过程中的横流干扰。

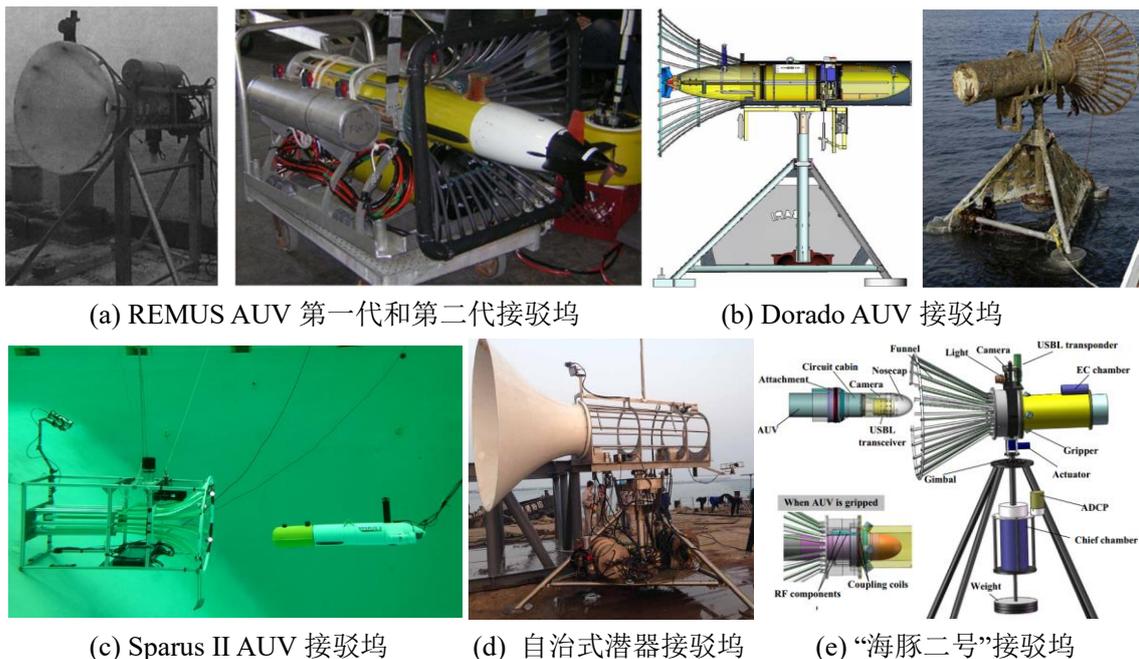


图 1.6 国内外代表性固定式接驳坞

固定坞布放后难以人为调整，因此，要求其部署位置的海底地势平坦<sup>[36]</sup>，以避免因海底地势起伏造成俯仰姿态的倾斜，进而增加 AUV 入坞难度。而且，海流方向存在周期性变化，导致 AUV 航行过程中存在横流干扰。对此，固定坞通常集成多自由度调节机构，采用液压或电动驱动方式调整水平姿态和导向罩方向。尽管固定坞的稳定性较高，但其复杂的机械结构易受海洋生物附着侵蚀，不适合长期部署，而且在海底泥沙中回收很有挑战性。

## (2) 移动式接驳坞

移动式接驳坞（简称移动坞）通常拖曳在回收船后或搭载于大型潜航器<sup>[39,40]</sup>，主要用于水面回收和水下潜艇回收，相较于固定坞发展前景更加广阔。但是，移动坞要求 AUV 具备高精度导航和高速航行的能力，以应对拖曳系统的摇摆；需要大型移动装置配合，接驳过程复杂。

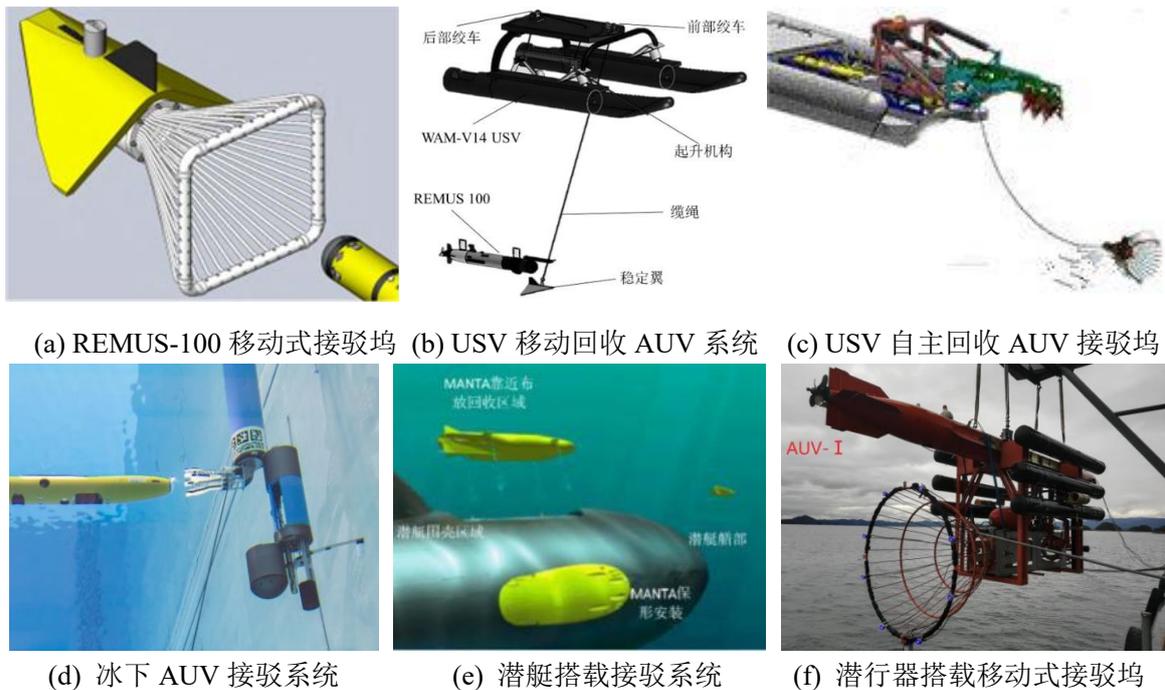


图 1.7 国内外代表性移动式接驳坞

图 1.7 为国内外的代表性移动式接驳坞。图 1.7 (a)为挪威康斯伯格公司针对 REMUS-100 AUV 设计的典型的水下拖曳移动式接驳坞<sup>[41]</sup>。使用母船或水面船艇拖曳接驳装置，装置内部配有翼板、声呐应答器、AUV 位置检测器等，并针对 AUV 的艏部设计了弹簧加载捕获机构。该系统使用长基线（Long Baseline, LBL）和数字式超短基线（Digital Ultra Short Baseline, DUSBL）进行导航定位。接驳测试了 AUV 顺流、逆流和横流运动的情况，在试验中，每项任务给予 AUV 十次接驳尝试，并在前两次尝

试中成功对接。图 1.7 (b)为佛罗里达大西洋大学设计的 USV 自动布放和回收 AUV 系统<sup>[42]</sup>,通过声学定位将二者对准在一起,USV 定制的绞车降下一条带有减压翼的细线,AUV 使用定制的钳式机构锁定该线。图 1.7 (c)为美国先进技术研究公司研制的 USV 自主回收 AUV 系统<sup>[43]</sup>,通过缆绳拖曳回收装置,该回收装置具有捕获功能。图 1.7 (d)为德国机器人创新中心提出的冰下 AUV 接驳系统<sup>[44]</sup>,能够穿过冰层回收 AUV,AUV 艏部进行流线型设计,便于进入导向罩。图 1.7 (e)为潜艇搭载接驳回收 AUV,要求 AUV 进行流线型设计,可直接嵌入在潜艇外壳,而不影响潜艇外形,尚处于概念设计阶段。图 1.7 (f)为中科院沈阳自动化研究所设计的潜行器搭载移动式接驳坞<sup>[45]</sup>,利用大型潜行器的操纵性,实现与 AUV 的对准,并完成了湖上试验。

### (3) 悬浮式接驳坞

悬浮式接驳坞(简称悬浮坞)是自由浮动的,悬挂于母船下方,是一种新型结构形式,来源于使用绳索将接驳坞悬挂在水面船下方,便于回收操作。目前对悬浮坞的研究较少,主要体现在便于实际湖海试验操作方面。如图 1.8 (a)所示,Fletcher 等人<sup>[46]</sup>使用充水袋增加接驳坞在水下的质量,通过绳索悬挂在水面下方,提出接驳坞必须提供足够的反作用力和力矩(惯性和/或推力),以便 AUV 的入坞成功率不会被坞站平移或旋转远离 AUV 的概率所影响。如图 1.8 (b)所示,Lin 等人<sup>[47]</sup>将接驳坞悬挂在水面船下方,并进行了不同水深下的湖试,试验中发现 AUV 入坞后,悬浮坞会发生转动。如图 1.8 (c)所示,Wang 等人<sup>[48]</sup>使用浮力材料搭建了水面浮台,接驳坞刚性连接在下方,湖试中悬浮坞受水面波浪的影响,发生晃动。此外,刘爽等人<sup>[49]</sup>将接驳坞搭载在母体 AUV 上,利用母体 AUV 的悬停性能实现悬浮状态,母体 AUV 的操纵性维持了接驳坞的姿态稳定性,便于子体 AUV 进行入坞。

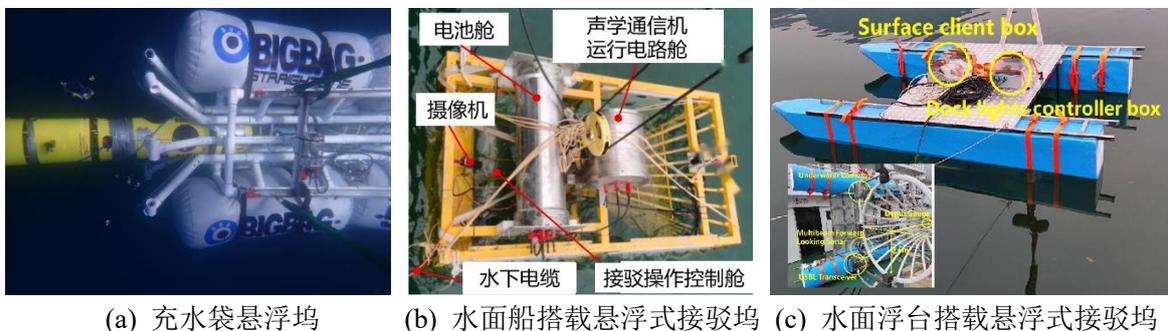


图 1.8 悬浮式接驳坞

悬浮坞基于流体动力学原理实现悬浮姿态,相比于移动坞,具有更优的姿态稳定性。然而,水面船只容易受波浪影响,造成悬浮坞发生晃动。而且,AUV 入坞过程中

悬浮坞会发生移动或转动，尤其是艏摇运动不稳定，且不易控制。对此，悬浮坞需要具有较高的方向测量精度，采用创新的执行机构规避入坞碰撞对悬浮坞艏摇运动的作用，这是悬浮入坞要面临的技术挑战。

借鉴于海底锚定式浮标<sup>[50]</sup>，单点系泊技术可以通过高强度承重缆将坞站锚定于海床，使其在海流作用下实现平衡悬浮，能够有效避免水面波浪的干扰。这种固定高度的悬浮状态结合稳定的流体环境，将显著提升悬浮坞的稳定性和顺流性，增强对海流和海底地势的适应性，适合长期部署。未来，单点与多点系泊技术<sup>[51]</sup>将在海底接驳系统中获得广泛应用与发展。

## 1.2.2 AUV 自主导引研究现状

### (1) AUV 自主导引方式

水下接驳导引系统主要由安装在接驳坞和 AUV 上的导航传感器阵列和通信系统组成。在接驳过程中，AUV 与接驳坞间进行周期性数据交互，使 AUV 可获取其相对于接驳坞的位置和姿态，并基于实时数据及时作出规划调整。准确的导引是成功入坞的前提，要求实时、高精度和高可靠性。根据作用距离和精度要求的不同，分为远距离声学导引和近距离光学、电磁导引，其性能比较如表 1.1 所示。

表 1.1 三种导引方式性能比较

形式	优点	缺点	应用
声学	作用范围可达 2 km 分辨率高	在海底和海面附近易受声折射、声反射和环境噪声影响，数据更新率低，近距离接驳精度较差	适用于任意类型基站
光学	刷新频率高、精度高 误差 2~10 cm 应用简单	作用范围小（10~30 m），易因水浑浊引起光散射，易受其他光源干扰	适用于漏斗形基站
电磁学	精度高 误差约 20 cm 海洋条件适应广	作用范围小（25~30 m），设备体积大，应用困难，机器人本身的电磁噪声干扰，功耗大	适用于漏斗形基站

#### 1) 声学导引

声学导引中最常用的是超短基线（Ultra-Short Baseline, USBL）<sup>[52,53]</sup>，在 AUV 艏部配置声学基阵，如图 1.9 所示，接驳坞端配置收发换能器和高精度姿态传感器。接

驳坞通过声学信号将自身姿态信息发送给 AUV，声学基阵接收并定位解算接驳坞的位置信息，以此确定航行目标。通常采用滤波算法，解决 USBL 异常值问题。Fan 等人<sup>[54]</sup>采用了基于 USBL 的导引方法，研究了一种基于扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)的集成导航算法，剔除了声学异常值。Zuo 等人<sup>[55]</sup>提出了一种统一化的水下归航和接驳方法，基于 USBL 定位信息，在接驳坞附近规划其前方和上方的目标点，使 AUV 以特定姿态到达接驳坞。Fu 等人<sup>[56]</sup>针对浅水环境中噪声干扰导致声学定位不准确问题，提出了一种基于无迹粒子滤波(Unscented Particle Filter, UPF)算法框架和强迹滤波(Strong Trace Filter, STF)思想的自适应无迹粒子滤波(Adaptive Unscented Particle Filter, AUPF)，通过引入衰减因子在线更新协方差矩阵，有效消除了异常值和跳跃数据，提高定位精度。

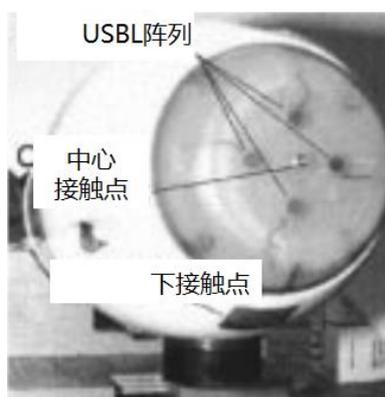


图 1.9 带充电装置的 USBL 阵列

此外，Zhou 等人<sup>[57]</sup>介绍了一种逆向超短基线系统(Inverted Ultra-Short Baseline, iUSBL)，该系统利用了安装在水下直升机(Autonomous Underwater Helicopter, AUH)上的六元接收阵列和安装在基站上的发射信标，可不使用水下通信设备。Jantapremjit 等人<sup>[58]</sup>提出一种基于 LBL 导航传感器的 AUV 归航与对接控制方案。Vallicrosa 等人<sup>[59]</sup>提出一种仅基于距离的定位方法，如图 1.10 (a)所示，并设计星形轨迹用于信标定位，采用高斯和(Sum of Gaussian, SoG)滤波器估计接驳坞位置，提高定位精度。Uchihori 等人<sup>[60]</sup>利用 3D 成像声纳作为 AUV 的自主定位传感器，使 AUV 具备“眼睛”，非常具有未来发展潜力。Wang 等人<sup>[48]</sup>提出了一种结合 USBL 与成像声纳的导引方法，如图 1.10 (b)所示，以提高 AUV 入坞的精度。该系统中，多波束前视声纳(Multibeam Forward Looking Sonar, MFLS)被部署在接驳坞而不是 AUV 上，以减少声学图像中的噪声；同时，当 AUV 超出 MFLS 视野时，使用 USBL 实现定位，并提出了一种基

于指数衰减模型的滤波算法，消除 USBL 定位异常值。

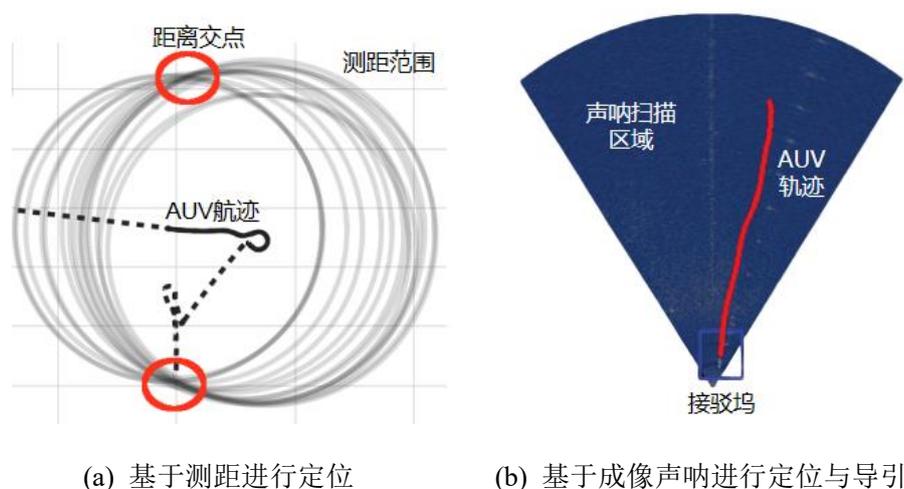


图 1.10 其他基于声学的定位方法

声学导引在 AUV 接驳应用中展现出显著优势，主要是作用距离远，且具有全向工作特性。缺点是定位精度和更新频率较低，声学信号容易丢失，存在信号时延以及噪声干扰等问题。另外，声学系统仅支持单端进行位姿定位，接驳坞需要配备高精度姿态传感器来测量自身姿态，然后通过水声通信链路向 AUV 发送姿态数据，存在因通信延迟导致状态信息不同步的问题。

## 2) 光/视学导引

光/视觉导引中，接驳坞常搭载 4~8 个光源，AUV 配备单目或双目摄像机。其优势是具有厘米级的高精度，缺点是容易受到水质或其它光源的影响，且作用距离短，可靠性低，计算量大，受 AUV 姿态和航速影响明显。目前国内外基于光/视学的导引存在导引距离短、导引作用角度有限、算法缺乏环境适应性问题。

美国海军指挥控制和海洋监视中心开展了基于光视学的对接终端制导试验，在对接坞站安装光源，在 Odyssey II B 型 AUV 艏部安装摄像头，利用视觉信息进行引导，成功引导 Odyssey II B AUV 和 Flying Plug AUV 完成入坞。韩国船舶与海洋工程研究所基于视觉伺服控制，完成 ISiMI AUV 的回收试验<sup>[61]</sup>，AUV 艏部安装摄像机，锥形坞站入口配置 5 个光源，如图 1.11 所示。西班牙水下机器人研究中心开发了基于主动光学信标的近距离高精度定位系统<sup>[34]</sup>，Sparus II AUV 从捕获的图像中提取特征点，并与目标已知特征点进行匹配，从而获得目标相对于 AUV 的位姿。韩国的浦项科技大学利用大型 AUV 的图像声呐实现粗略定位，当 AUV 接近接驳装置时，大型 AUV 释放小型 AUV，利用小型 AUV 的摄像机进行高精度定位，从而引导大型 AUV 完成对

接，图 1.12 所示的水池试验验证了算法的原理可行性。葡萄牙波尔图大学提出了一种高性能单目视觉系统，自主剔除异常值与错误检测，用于悬停 AUV 的自主对接。

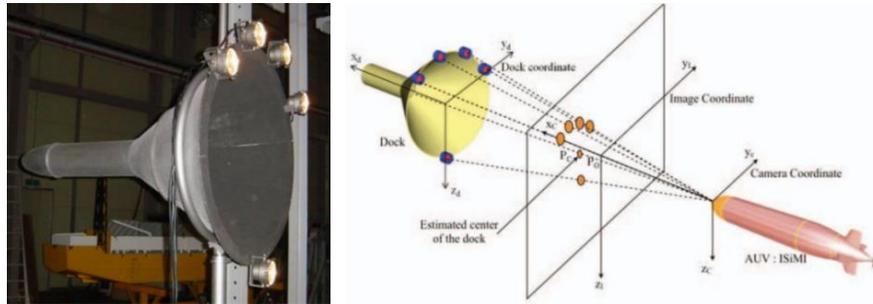


图 1.11 安装有 5 个光源的锥形坞站及单目视觉导引的坐标系

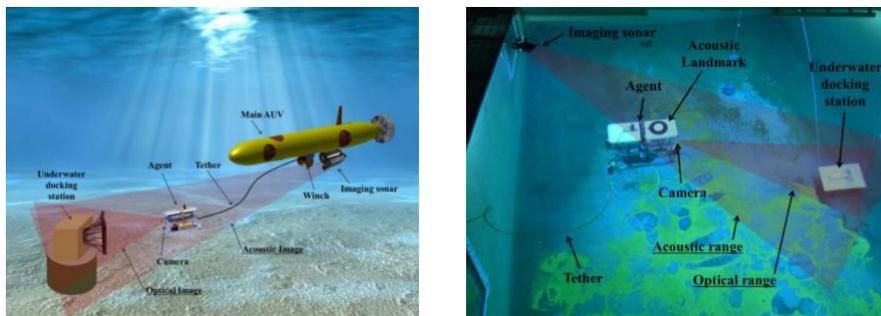


图 1.12 POSTECH 的接驳方案示意图和水池演示试验方案

哈尔滨工程大学采用双目视觉方法进行终端导航<sup>[62]</sup>，通过融合单目与双目视觉定位算法，提高终端导航和定位精度。浙江大学也研究了双目定位方法<sup>[63]</sup>，通过开发自适应加权 OTSU 算法，实现了前景对象的精确特征提取。中科院沈阳自动化研究所基于卷积神经网络开发了一种对接神经网络（Docking neural Network, DoNN）<sup>[64]</sup>，在框架中集成了透视点算法，收集了水池试验的水下对接图像数据集（Underwater docking images Dataset, UDID），并开展湖上试验进行了验证。

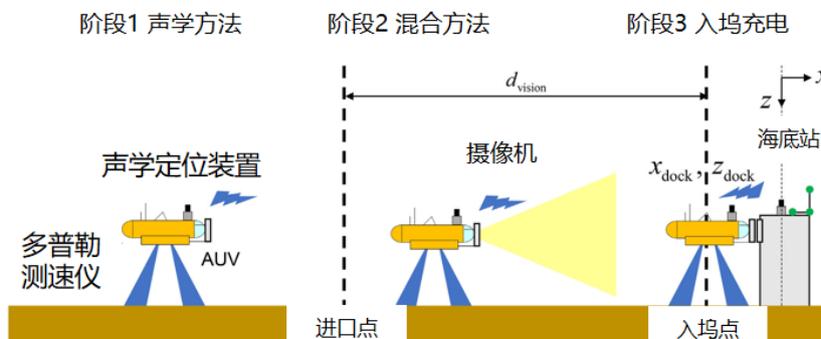


图 1.13 Tri-TON AUV 的接驳方案

### 3) 声光组合导引

声光组合导引技术通过结合远距离声学导引与近距离光学导引,以提升系统精度,已成为水下接驳系统的主流方案。以东京大学工业科学研究所开发的悬停型 AUV 接驳方法<sup>[65]</sup>为例,基于传感器特性,在远距离阶段利用声学定位通讯单元实现 AUV 定位与航向引导,在近距离阶段则通过双目摄像机处理坞站 4 个光源的视觉图像,完成精确定位与接驳。该方案已通过水池试验验证,其系统设计如图 1.13 所示。

### 4) 电磁导引

电磁导引系统由接驳基地的电磁发生器和 AUV 的电磁接收器构成,其定位精度通常优于声学导引,并具备全方向定位能力。然而,该系统易受环境磁场干扰,体积较大不易集成,且有效作用距离仅为 20~30 m,因此在实际接驳方案中应用较少。

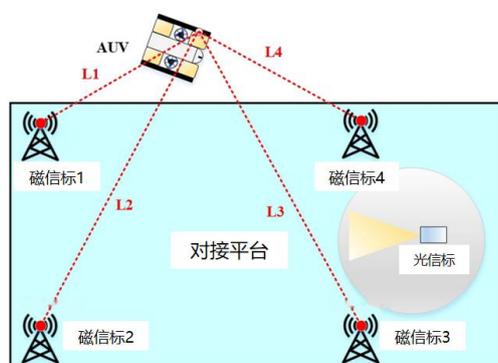


图 1.14 平面对接平台和预期着陆区

麻省理工学院提出了一种基于电磁导引的 Odyssey IIB AUV 回收方案,该系统在 20~30 m 的有效工作范围内,可实现 20 cm 的对接精度,但其性能易受环境磁场、海水盐度和温度等物理因素的干扰。蒙特利尔湾海洋研究所采用漏斗形对接坞站与 Odyssey IIB 型 AUV 进行了电磁导引终端制导试验<sup>[66]</sup>。试验中,坞站发射水平与垂直磁场,AUV 通过接收线圈检测信号并基于制导系统信息与 PID 控制实现回收,对接精度优于 20 cm。但试验仅验证了 AUV 从坞站正后方沿中心线运动的简单路径,未涵盖复杂路径的对接成功率。印度国家海洋科学研究所开发的电磁制导接驳系统<sup>[67]</sup>由水下坞站、20 Hz 电源激励的电磁线圈和双推进器 AUV 构成,配备差分磁强计系统并支持双自由度操作。经电磁有限元分析、辅助设计和水池试验验证,该系统电磁有限元分析精度达 96%,制导范围扩展至 72 m,可精确计算 AUV 的距离与航行速度,为近程自导与接驳提供关键数据支持。Lin 等人<sup>[68]</sup>提出了一种基于光信标的电磁定位与引导方法,用于 AUV 着陆于平面对接站,如图 1.14 所示,采用了两步融合技术,包括非

线性优化和 EKF, 以处理电磁传感数据。

## (2) AUV 制导策略

AUV 制导作为水下接驳的核心控制技术, 由智能决策、路径规划与运动控制三个关键模块构成<sup>[27]</sup>。在路径规划过程中, 系统需优先满足路径可行性与安全性等基本约束条件, 同时优化时间、能耗与路径长度等目标函数, 从而生成符合任务需求且适应 AUV 运动特性的最优航行路径。

典型的 AUV 接驳制导策略以制导律类方法<sup>[31]</sup>为主, 如线性终端制导<sup>[69]</sup>、视线法 (Line-of-Sight, LOS)<sup>[70]</sup>、纯追踪制导<sup>[71]</sup>和比例制导<sup>[72]</sup>等。这些方法无需复杂规划过程, 具有较高的执行效率, 但易受海流干扰, 难以保证控制精度。为应对海流影响, Yang 等人<sup>[73]</sup>开发了具有海流补偿的制导策略, 计算参考航向并匹配路径方位补偿偏角。交叉航迹控制策略<sup>[74]</sup>被用于校正 AUV 航向, 以补偿航迹误差。着陆对准制导方法<sup>[75]</sup>结合了交叉轨迹控制策略, 考虑 AUV 的转向操纵性, 在接驳坞末端使用余弦曲线改变 AUV 的航向。侧滑角控制<sup>[76]</sup>是利用海流使 AUV 能够以所需角度到达坞站, 很难有效控制。Fossen 等人<sup>[77]</sup>提出一个非线性自适应路径跟踪控制器, 通过估计车辆侧滑角补偿漂移力, 扩展到 Dubins 路径的路径跟踪。此外, 还有模糊控制<sup>[78]</sup>、Adaptive-LOS<sup>[79]</sup>、Integral-LOS<sup>[80]</sup>等。制导的设计目标是减少 AUV 的交叉航迹误差和航向偏差, 从而实现成功接驳<sup>[81]</sup>。

从自主接驳导引系统角度, Jantapremjit 等人<sup>[58,82]</sup>采用人工势场方法生成路径, 通过 LOS 制导法则计算参考航向, 并利用解耦滑模控制器实现 AUV 的航向与深度控制。Batista 等人<sup>[83]</sup>提出一种基于制导和控制策略集成的干预型 AUV 两步对接方法, 为 AUV 提供一种转向机动和自适应控制。Xie 等人<sup>[84]</sup>提出一种基于旋转圆的轨迹规划方法, 结合纯跟踪制导定律和 LOS 制导律构成移动对接制导系统。挪威科技大学<sup>[85]</sup>开发了一种混合对接制导系统, 结合 Integral-LOS 和速度调节制导在不应用横移角的情况下引导 AUV 到达对接站入口。哈尔滨工程大学利用李雅普诺夫稳定性理论来设计对接制导控制器<sup>[62]</sup>, 根据参考航向和横移角以补偿水平和垂直偏差。Zhuang 等人<sup>[86]</sup>提出一种基于混合优化算法的高效路径规划器。Yazdani 等人<sup>[87]</sup>采用虚拟域中的逆动力学 (Inverse Dynamics in the Virtual Domain, IDVD) 方法, 显著降低优化问题的维度, 实现快速生成近似最优轨迹。

针对考虑运动学约束和对接终端约束的路径规划方法, 李晔等人<sup>[88,89]</sup>结合 3 次 B

样条曲线和遗传算法，提出了一种适合欠驱动 AUV 的回收路径规划方法。Li 等人<sup>[90]</sup>将自适应定律和量子行为引入粒子群优化中，在满足运动约束与对接终端约束的同时，实现全局时间优化。在 AUV 导引路径的自主避碰研究中，Yah 等人<sup>[91]</sup>针对运动障碍物环境下的归航路径规划问题，设计了路径代价函数，并基于粒子群优化算法求解最小代价航路点。Liu 等人<sup>[92]</sup>研究了静止障碍物环境下的曲率约束路径规划问题，通过扩展圆定义多边形障碍物，将曲率约束融入路径规划算法。Cui 等人<sup>[93]</sup>基于人工势场理论，提出了一种适用于三维水下环境的对接路径规划方法，考虑了障碍物规避能力与终端对接安全性。

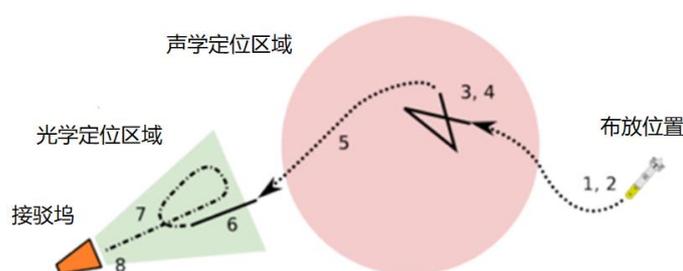


图 1.15 AUV 导引入坞方案

考虑远距离、中距离和近距离的完整接驳入坞过程，Palomeras 等人<sup>[34]</sup>结合声学定位策略，提出了星形轨迹入坞方案，如图 1.15 所示。任务控制状态机流程如下：1) 在预估接驳装置前方 40 m 处设置路径点；2) AUV 沿星形轨迹航行，同时采用高斯和滤波检测接驳基站；3) 若检测到候选位置，在其前方 10 m 处创建路径点，否则返回步骤 1；4) AUV 沿假设接驳基站位置轨迹执行左右转弯，若检测到光信标，将接驳站位置加入 EKF-SLAM 滤波器，否则返回步骤 3；5) 执行终端接驳阶段。该方案有助于提高声学定位精度，通过仿真验证了核心算法，评估了入坞成功率，并在水池与港口环境中完成了试验验证。

### 1.3 本文研究内容

基于 1.2 节的描述和分析可知，针对复杂海洋环境中的 AUV 接驳系统进行设计与优化，能够为 AUV 的持续作业提供可靠的技术支撑；此外，在解决 AUV 接驳入坞问题时，同时考虑海洋环境特性、流固耦合作用及自主导引规划需求，有利于提升系统的适应性和可靠性。因此，本文从系统设计、动力学建模和导引路径规划三个方面展开研究，旨在形成一套完整的 AUV 自主导引入坞技术方法，为实际工程应用提供理

论依据和技术支撑。上述研究内容主要面临如下难点与挑战：

### 1.3.1 研究问题与挑战

#### (1) AUV 航行入坞过程中侧向海流干扰与弱光环境问题

AUV 航行入坞过程中，当接驳坞导向罩开口方向与海流方向存在偏差时，为抵抗侧向海流干扰，AUV 实际航行方向与导向罩开口方向之间会产生显著夹角。特别在近距离接驳阶段，弱光环境下，AUV 为捕获光学信标而调整航向与速度，导致入坞航行不稳定。针对上述问题，主要面临以下关键挑战：

1) 海底固定式接驳坞的环境适应性不足。在复杂多变的海流环境和异质不确定海底地势条件下，为实现姿态平衡，固定式接驳坞需要配置复杂的多自由度调节机构；此外，长期部署后易受海底泥沙淤积影响，导致回收作业困难甚至失败；

2) 光学导引的有效距离与可靠性严重受限。受水下能见度影响，光学信号的有效作用距离通常仅为 5~10 m，且动态海流环境会降低光学信标的检测精度。值得注意的是，光学导引仅在 AUV 通过声学导引进入其有效作用范围后才能发挥作用；

3) AUV 入坞方向测量限制与航行不平稳。用于测量导向罩开口方向的电子罗盘，在大尺寸接驳坞上存在校准困难、易受金属构件干扰等问题，导致测量精度下降；另外，受海流扰动影响，AUV 难以维持稳定的直线航行轨迹。

#### (2) AUV 入坞接触作用下悬浮坞的运动响应问题

由于海流扰动和导航精度的限制，AUV 入坞时与导向罩的接触不可避免，而接触作用会引发悬浮坞的运动响应，直接影响入坞成功率和设备安全。具体而言：悬浮坞运动响应过大，可能导致入坞失败；AUV 姿态调整不当，将增加入坞复杂度，甚至引发 AUV 卡滞在导向罩内的设备事故；过大接触力，可能造成 AUV 运动失稳、结构变形及传感器故障。因此，如何降低接触力并有效利用接触作用，使 AUV 平稳、顺畅地进入接驳坞，成为关键问题。主要面临以下挑战：

1) 海上试验成本高昂。海上试验需耗费大量人力、物力和时间，且受环境条件限制，难以高效获取足够数据；

2) 复杂多体接触动力学建模与求解难。入坞过程涉及 AUV、悬浮坞和流体的耦合作用，数值模拟需要考虑流体—结构相互作用，计算量大且收敛性要求高。如何在有限的计算资源和时间效率约束下，构建精确的数值模型并获得可靠的模拟仿真结果；

3) AUV 入坞性能受多种因素耦合影响。悬浮坞构型、海流流速、AUV 航速等因素共同影响入坞效果,需要对多种因素进行系统化的分析与探讨,以优化参数组合并提升入坞平稳性。

### (3) 复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题

水声信道环境复杂多变,受到多普勒效应、多径干扰、信号衰减等因素的综合影响。然而,典型制导律未能充分考虑水声信道质量这一关键参数,导致 AUV 在航行入坞过程中面临信号延迟、通信中断、定位解算失败等问题,严重影响导引精度。针对上述问题,主要面临以下挑战:

1) 水声信道的传播特性复杂。水声信道具有显著的长时延、窄带宽及时变特性,并受到多普勒效应、多径传播机制以及海底地势因素的影响,呈现复杂不规则分布。如何通过建立信道模型,提高声学定位的连续性、准确性和鲁棒性,是优化声学导引的一个关键挑战;

2) AUV 运动学和入坞方向的双重约束。AUV 的机动性能受限于其物理特性(如最小转弯半径、航向角速度),而且现有路径规划方法通常忽略入坞任务对终端方向的严格要求,导致生成的路径难以满足实际需求。因此,如何设计兼顾 AUV 运动学特性与终端位姿要求的导引路径,是优化声学导引的另一个挑战。

## 1.3.2 研究方法 with 贡献

针对上述 AUV 水下接驳系统面临的具体问题,本文围绕海底观测网中 AUV 安全且快速接驳的应用场景,综合考虑海洋环境适应性和 AUV 运动学特性,创新性地提出了一种新型海底接驳系统,并从接驳坞运动稳定性和 AUV 声学导引准确性两个方面,开展深入研究,以提高 AUV 入坞成功率。本文的主要创新及贡献如下:

### (1) 基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统

针对 AUV 航行入坞过程中侧向海流干扰与弱光环境问题,本文首次提出一种基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统(Moored Underwater Docking System, MUDES)。该系统包括:1) 设计并研制了海底系泊悬浮式接驳坞(Seabed Moored Floating Dock, SMFD);2) 提出一种 AUV 入坞的交互式声学渐近补偿导引方法(Interactive Acoustic Asymptotic Compensation, IAAC)。SMFD 采用系泊机制与六边形正棱台设计,通过浮力调节技术实现导向罩开口沿海流方向的稳定悬浮姿态。IAAC 融合交互式声学加

权位置估计与基于横向偏差的比例制导策略,滑动窗口动态聚集 SMFD 位姿的定位信息,根据横向偏差按比例调整 AUV 航向,使逐步平滑收敛至目标路径。湖海试验结果表明,SMFD 沿海流方向的悬浮姿态稳定,提高了对海流和海底地势的环境适应性,部署和回收便捷;IAAC 使 AUV 稳定跟踪路径点并控制入坞方向,提高进入近距离接驳阶段的精度,在浑浊水域和低能见度环境下,仍实现成功接驳。

### (2) 基于悬浮坞的 AUV 入坞接触运动响应数值计算及仿真

针对 AUV 入坞接触作用下悬浮坞的运动响应问题,本文建立了一种基于悬浮坞的 AUV 入坞接触耦合运动响应数值计算及仿真模型(Contact-coupling Numerical Model for AUV docking, CCNM-AUV)。该模型采用动态流体相互作用(Dynamic Fluid Body Interaction, DFBI)方法,在计算域中分别构建 AUV 和带有悬链线的 SMFD,并通过接触耦合模块计算接触力。采用重叠网格划分技术和网格独立性试验,确定了最佳网格设置。AUV 轴向速度和 SMFD 艏摇角的仿真结果与海上试验结果具有较高的一致性,验证了 CCNM-AUV 能够有效捕捉 AUV 和 SMFD 的关键运动特性。基于该模型,模拟 SMFD 在不同海流条件下的稳定性以及 AUV 入坞接触过程中的运动响应;根据单一变量原理,分析了 SMFD 关键设计参数对 AUV 入坞效果的影响,为 SMFD 的优化设计提供了理论依据;考虑不同工况入坞条件,进一步探讨了 SMFD 与固定坞在运动响应、入坞时间和准确度方面的差异。结果表明,悬浮坞的柔性有利于缓解接触冲击,最大扩展 9.3% 的入坞空间,提高了入坞效率、稳定性和安全性。

### (3) 基于分级运动学 RRT\* 的 AUV 导引入坞路径规划方法

针对复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题,本文提出一种基于分级运动学样条快速随机探索树的 AUV 导引入坞路径规划方法(Hierarchical Kinematic Constrained Spline Rapidly exploring Random Tree, HKS-RRT\*),用于规划高效、定位精度高且符合 AUV 运动学约束的导引路径。HKS-RRT\* 基于 RRT\* 框架:1) 设计了一种分级势场法(Hierarchical Potential Fields, HPF)引导节点生长方向,HPF 根据信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)分布对水声信道劣质区域划分等级,定义不同作用距离的排斥力,并引入多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力。2) 引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法来控制节点扩展,基于节点扩展长度、HPF 引导距离、AUV 转向角度、垂直距离、HPF 引导转向角度设计路径成本函数。3) 针对近距离接驳入坞的两点边值问题(Two Point Boundary Value Problem, TPBVP),利用系统的微

分平坦性，采用五次样条插值方法生成平滑连续的高阶可微分轨迹。实验结果表明，在良好、中等、恶劣三种声场环境下，HKS-RRT\*在路径长度、路径平滑度和定位质量方面效果出色，有效构建引导节点，提高路径规划效率；与典型制导律方法（如视线法）相比，位置偏差最大减少 49.75%，方位偏差最大减少 13.98%。

围绕海底观测网中 AUV 安全且快速接驳的应用场景，本文从系统设计、动力学建模和导引路径规划三个方面展开研究。针对海底固定式接驳系统存在的局限性，本文首先开展基于全声学导引的水下悬浮式接驳系统研究。在此基础上，开展 AUV 入坞悬浮坞的接触耦合运动响应数值计算及仿真模型研究，提升悬浮坞的性能和适应性。最后，开展复杂水声信道环境下的 AUV 导引入坞路径规划研究，结合运动学和定位精度约束，进一步增强优化了 AUV 导引路径的定位精度和平滑度。三项内容关系如图 1.16 所示，旨在构建一个可靠的水下悬浮式接驳系统。

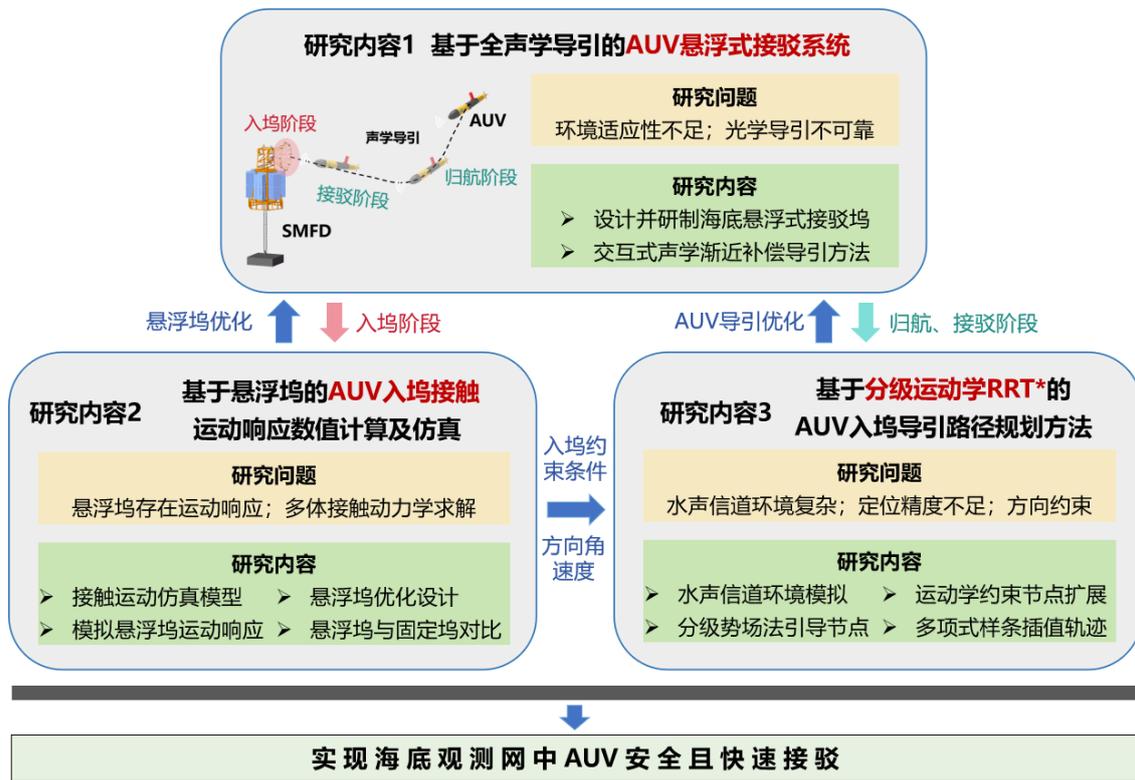


图 1.16 研究内容关系图

## 1.4 本文组织结构

本文的具体组织架构与章节安排如下：

第一章，主要介绍了研究背景及意义，总结了本文的主要研究内容。首先从 AUV、

海底观测网、接驳过程及关键技术方面对 AUV 水下接驳进行了概述。然后，分别对水下接驳系统以及 AUV 自主导引的研究现状和发展情况进行了较为详细的论述。最后，总结了本文研究内容的难点与挑战、研究方法与贡献。

第二章，针对局部海域的短期监测、灵活接驳的应用场景，提出了水下悬浮式接驳系统。首先分析了系统的应用特点与技术难点，其次根据应用特点与技术难点进行了接驳系统的整体设计，包括海底系泊悬浮式接驳坞、AUV 的声学通信与定位、交互式声学渐近补偿导引方法。最后分别介绍了湖海环境下声学通信定位功能和悬浮式接驳系统的试验内容及试验结果。

第三章，针对悬浮坞对接触作用的运动响应会显著影响 AUV 入坞成功率和效率的问题，建立了 AUV 入坞悬浮坞接触过程的数值计算模型，通过试验数据验证了模型的准确性。在数值模型的基础上，对悬浮坞姿态、AUV 入坞悬浮坞过程进行了仿真分析。最后，讨论了悬浮坞和固定坞的 AUV 入坞效果。

第四章，针对 AUV 入坞过程中水声信道质量无法保证持续有效高精度导引的问题，使用 Bellhop 水声信道传播模型计算了海底环境下的信噪比分布，划分水声信道劣质区域。然后，基于 RRT\* 框架，提出了一种 HKS-RRT\* 方法，考虑了目标节点的方向吸引力，以及不规则劣质区域的排斥力；在节点扩展中，融合 AUV 运动学方程；采用多项式样条插值方法生成连续高阶可微分的轨迹。最后，通过在良好、中等、恶劣三种声场环境下的对比实验，验证了 HKS-RRT\* 方法的性能。

第五章，总结了全文的工作并对后续研究方向进行了讨论。



## 第2章 基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统

随着海洋观测和水下作业任务复杂性增加, AUV 可通过接驳系统在水下独立完成充电和数据传输, 对提高 AUV 水下驻留时长具有重要意义。在接驳系统中, 接驳坞平台和导引方法是两项关键技术。然而, 面对复杂多变的海流环境和异质不确定海底地势条件, 固定式接驳坞需要配置复杂的多自由度调节机构, 且容易陷入海底的泥沙中, 给维护和回收带来巨大挑战。在导引方面, 水下环境特性使得光信号难以在浑浊的海洋环境中应用, 同时作用距离也极其受限。为应对上述的挑战, 本章提出一种新型的水下悬浮式接驳系统 (Moored Underwater Docking System, MUDS), 使其自适应于海流和海底地势, 便于灵活部署和回收。同时, 基于作用距离更远的声学信号设计了导引方法, 提高导引过程的精度和稳定性, 使 AUV 能够自主可靠地完成接驳操作。为了对方法和系统进行验证, 实现了 MUDS 原型样机, 先后在湖泊和海洋环境进行了 AUV 水下接驳试验。

本章的主要贡献如下:

- (1) 设计并研制了海底系泊悬浮式接驳坞 (Seabed Moored Floating Dock, SMFD), 采用系泊机制与六边形正棱台设计, 利用浮力调节技术实现导向罩开口沿海流方向的稳定悬浮姿态, 通过声学信号便于部署与回收。
- (2) 设计了一种交互式声学渐近补偿导引方法 (Interactive Acoustic Asymptotic Compensation, IAAC), 融合交互式声学加权位置估计与基于横向偏差的比例制导策略, 采用滑动窗口动态聚集 SMFD 位姿的定位信息, 根据横向偏差按比例调整 AUV 航向, 实现平滑的轨迹。不仅可以减少横向位置偏差, 还可以减少航向偏差, 提高 AUV 接驳的精度和稳定性。
- (3) 湖上试验和海上试验共同验证了 SMFD 及 IAAC 方法的有效性和可靠性。在海流达 2 kn 时, SMFD 保持沿海流方向的稳定悬浮姿态, 展示了便捷的部署和回收能力; 同时 AUV 成功地定位了 SMFD 位姿、跟踪了路径点, 并控制了最终入坞方向, 即使在浑浊水域和能见度较低的情况下, 也实现了成功的接驳操作。

本章组织如下: 2.1 节阐述本章的应用场景和问题; 2.2 节展示了接驳系统的整体设计, 包括 SMFD 和声学定位设计; 2.3 节详细描述了 IAAC 导引方法, 包括制导与

控制架构、交互式声学加权位置估计和比例制导；2.4 节通过湖上试验和海上试验验证了基于 IAAC 声学导引的 MUDS 系统在实际环境中的性能；2.5 节为本章小结。

## 2.1 问题描述

如图 2.1 所示,由 AUV 及其海底接驳坞组成的水下常驻监测网络可围绕重大海上设施,形成局部海域的长期、短期移动监测,为及时发现水下设备和安全隐患提供不可或缺的数据支撑。水下接驳系统旨在满足 AUV 在水下独立完成充电、数据上传和新任务下载的需求,从而减少回收频率,显著提升 AUV 的续航能力和作业连续性,使 AUV 常驻成为可能。接驳技术的核心在于接驳坞的设计与 AUV 的精确导引。接驳坞的设计不仅决定了布放与回收的便捷性,还影响其在水下的姿态稳定性以及 AUV 的入坞方式和导引策略,是 AUV 接驳的基础。同时,接驳过程需要确定接驳坞的位置与姿态,以使 AUV 以预期姿态到达目标位置,因此 AUV 的精确导引至关重要,直接决定了接驳任务的成功与否。

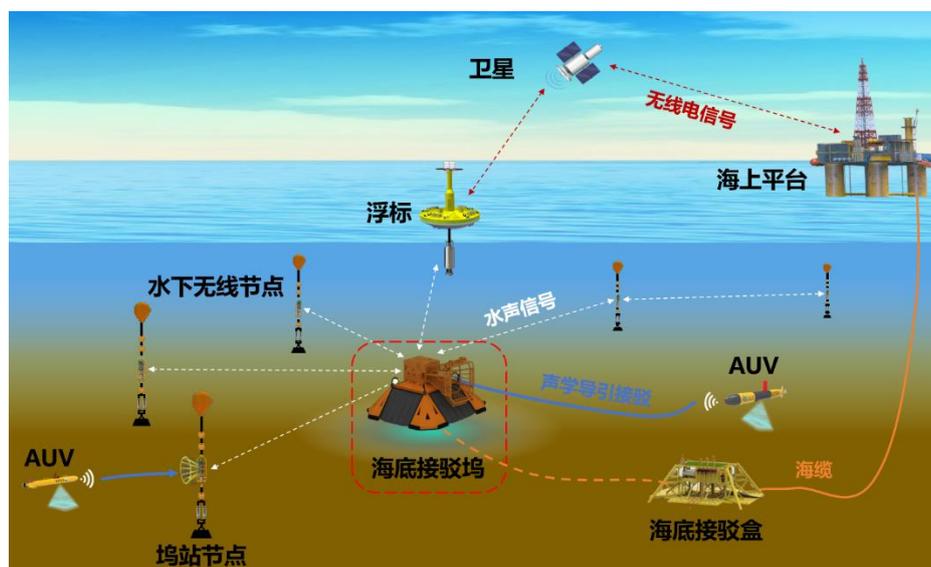


图 2.1 水下常驻监测网络

然而, AUV 航行入坞过程中面临侧向海流干扰与弱光环境问题。具体的,当接驳坞导向罩开口方向与海流方向存在偏差时,为抵抗侧向海流干扰, AUV 实际航行方向与导向罩开口方向之间会产生显著夹角。特别在近距离接驳阶段,弱光环境下, AUV 为捕获光学信标而调整航向与速度,导致入坞航行不稳定。随着研究人员对效率、稳定性和可靠性的追求,实现自适应接驳系统并探索其性能潜力的需求日益迫切。

图 2.2 展示了 AUV 和水下直升机 (Autonomous Underwater Helicopter, AUH) [94] 接驳操作的三种典型场景: 固定于海底的三脚架形基座坞站 (简称固定坞), 由水面船只拖曳的移动坞站 (简称移动坞), 以及悬挂于母船下方的自由浮动坞站 (简称悬浮坞)。其中, 固定坞主要用于海底, 姿态最稳定。为了使导向罩开口沿海流方向, 同时防止因海底地势不平坦造成姿态倾斜, 大多数固定坞都配备了多自由度调节机构。虽然固定坞姿态稳定, 但其复杂的结构容易被海洋生物破坏, 而且容易陷入海底泥沙, 增加回收难度。移动坞和水面悬浮坞主要用于水面船只辅助下的 AUV 布放和回收, 不适合长期部署。移动坞要求 AUV 具有高导航精度, 因为拖曳系统可能因水面船只的运动而摇晃。相比之下, 水面悬浮坞能提供稳定的姿态, 且自适应海流方向。因此, 为了适应海流和海底环境, 本文进行海底悬浮式接驳坞研究, 融合了固定坞的稳定性和悬浮坞的顺流性。



图 2.2 不同接驳坞类型的 AUV 接驳入坞场景

接驳坞作为长期驻留在海底的关键设备, 其设计面临严苛的技术挑战。首先, 接驳坞在部署后可能因海底地势不平或海流冲击而发生倾斜, 难以保持稳定的姿态。而且, 导向罩开口方向应与海流方向保持一致, 减少 AUV 航行入坞过程中的侧向海流干扰。另外, 海底环境具有高压、高盐度和强腐蚀性等极端特性, 在长期运行过程中, 平台部件易因腐蚀、疲劳或密封失效等原因出现故障, 导致系统性能下降甚至功能丧失<sup>[74]</sup>。接驳坞在海底环境中极易受到生物附着和泥沙沉积的影响, 导致机械运动部件无法正常运行。海底泥沙的持续沉积可能导致接驳坞逐渐陷入淤泥中, 难以通过常规手段进行维护或回收。

在导引技术方面,受海洋环境中化学元素的影响,光学作用范围有限且可靠性较低。具体而言,水体浑浊度、悬浮颗粒物浓度以及光照条件等因素共同作用,导致光学信号在水介质中的衰减率显著增加<sup>[64]</sup>。常规视觉的有效作用距离通常不超过 8 m,且随着浊度增加呈指数衰减趋势。因此声学导引始终是首选方案,但其仍存在一些局限性。例如,传统的声学定位方法仅能测量位置信息,而高精度姿态传感器的成本较高。此外,由于周围金属材料的磁场干扰,电子罗盘需要进行繁琐的校准,这对接驳坞的操作提出了较高要求。同时,海流干扰也会影响 AUV 在跟踪接驳轨迹时的航行稳定性。因此,提高声学导引的可靠性对于实现 AUV 自主接驳至关重要。

基于上述挑战,本章旨在设计一种灵活、稳定且可靠的水下接驳系统,使其能够适应不同的海流和海底地势环境,便于灵活部署与回收,同时提升声学导引的可靠性,从而确保 AUV 能够自主、可靠地完成接驳操作。

## 2.2 水下系泊悬浮式接驳系统

本节提出一种新型的水下系泊悬浮式接驳系统,使 AUV 能够在声学导引下,自主可靠地完成接驳操作。首先,介绍系泊悬浮式接驳系统的整体设计,系统组成与架构。然后,详细阐述 SMFD 的设计及其系泊机制。最后,介绍用于提升接驳可靠性的声学通信与定位功能设计。

### 2.2.1 系统组成与架构

MUDS 系统的整体设计如图 2.3 所示,该系统包括 SMFD 子系统、AUV 子系统和水面监控单元(Remote Monitoring Unit, RMU)三部分。SMFD 作为重要的基础设施,部署于水下,通过承重水密缆上传状态信息,并支持水声传输,集成了电源管理、电子控制、水下摄像、声学定位等多项基本功能。AUV 是执行接驳任务的核心对象。RMU 作为甲板/岸基端的可视化操作界面,能够控制水下 SMFD 的相关传感器,同时接收并展示接驳数据、设备状态、视频画面以及异常监控等信息。针对水下接驳任务,SMFD 与 AUV 之间建立了水声信道、光学成像和磁场感应三条信息交互链路。由于环境因素的影响,水下视觉链路的可靠性较低,因此主要致力于提高水声信道的可靠性和准确性。当 AUV 成功接驳时,通过磁场感应触发接驳成功信号。

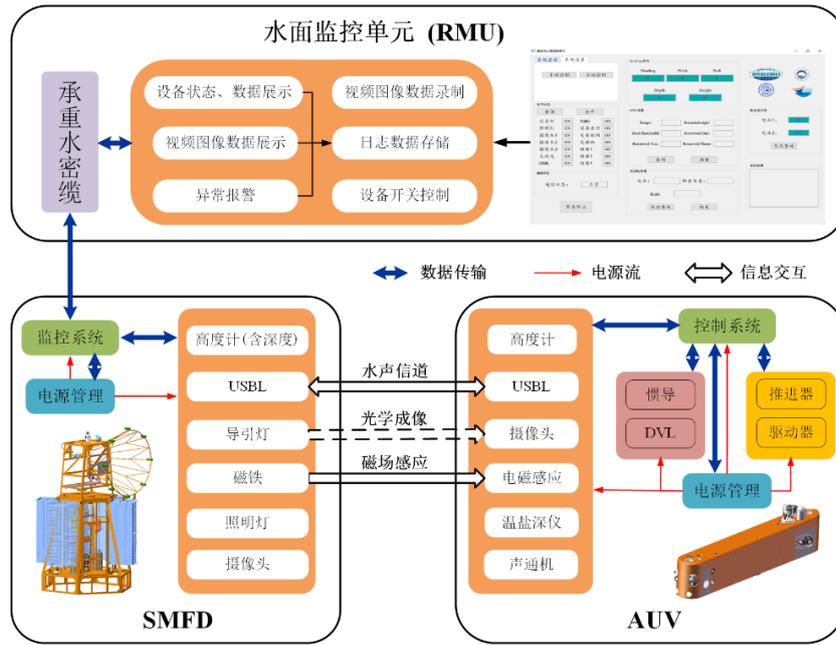


图 2.3 水下接驳系统整体设计

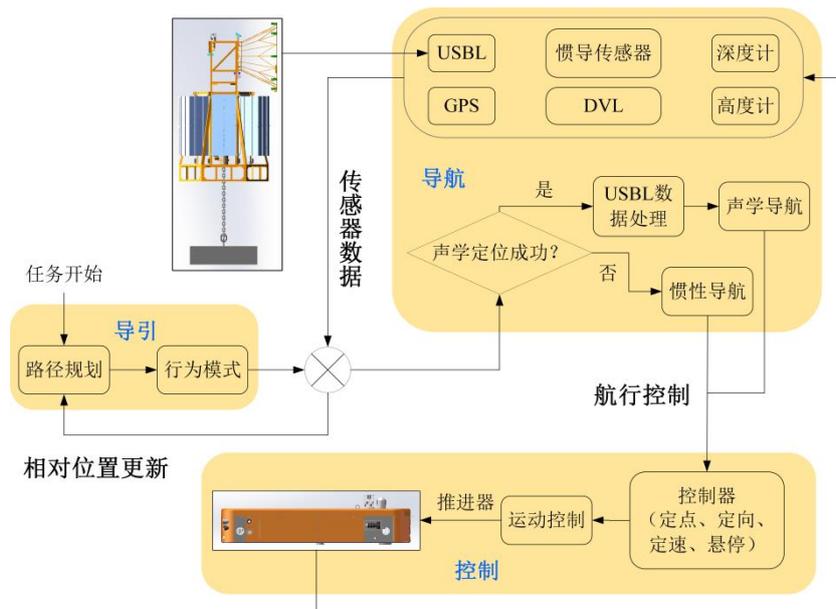


图 2.4 AUV 自主接驳的 GNC 架构

接驳系统软件组成的主要元素是导引、导航和控制，其组合被称为 GNC (Guidance, Navigation, and Control) 架构，其关系如图 2.4 所示。根据接驳任务需求，导引系统结合导航系统提供的位置信息和 AUV 动力学控制性能参数，规划出可行或最优的入坞轨迹，并由控制系统执行对应行为模式的运动航行。导航系统通过传感器感知与数据融合获取当前时刻的状态信息，包括 AUV 自身状态以及 AUV 与 SMFD 间的相对状态，如位置、航向、速度、相对距离和方向、水流、障碍物等。AUV 与 SMFD 之间通

过超短基线 (Ultra-short Baseline, USBL) 进行声学定位。当 USBL 数据有效时, 系统进入声学导航模式, 并保留最后有效的 USBL 数据, 以辅助惯性导航过程。导引系统可采用在线执行或离线规划的方式, 但考虑到水流、障碍物等复杂多变的环境因素, 多数情况下采用在线执行方式, 以提高系统的可靠性和安全性。控制系统作为最终的执行系统, 根据导引系统生成的目标轨迹和设定的行为模式, 结合导航系统的状态信息, 生成控制力和力矩, 驱动推进器执行相应动作, 以成功完成接驳操作。

## 2.2.2 海底系泊悬浮式接驳坞

当前海底接驳系统存在两个问题: 第一, 导向罩开口方向与海流方向不一致会增加 AUV 的侧向海流干扰, 海底地势的不平坦会导致接驳坞倾斜, 增加 AUV 航行入坞难度; 第二, 接驳坞容易陷入海底的泥沙中, 回收困难。为了解决这些问题, 设计接驳坞不与海底直接接触, 利用浮力调节技术来实现其水下稳定悬浮姿态, 并采用系泊方式, 利用声学信号实现接驳坞的自主上浮, 便捷回收。本节介绍 SMFD 的整体设计与系泊方式。

### (1) SMFD 整体设计

经过对多种结构的调研, 在设计中选择了锥形结构, 以适应各种类型的 AUV, 而且导向罩锥形入口能够显著降低对 AUV 定位和控制精度的要求。主要设计原则是使接驳部简洁、轻便且成本低廉。结合大自然海底环境, 利用浮力原理和海流的动力, SMFD 的整体设计如图 2.5 所示, 主要由接驳部、悬浮部、系泊链以及配重等构成。接驳部旨在辅助 AUV 完成接驳操作。悬浮部由主框架和六个浮体组构成, 为系统提供必要的浮力, 使其能够在水中悬浮。接驳部和悬浮部连接固定在一起, 其参数详见表 2.1。配重则作为接驳坞在海底的锚点, 通过系泊链连接到主框架内的并联释放装置。因此, SMFD 通过配重作为锚点系泊在海底, 而接驳部与悬浮部呈悬浮状态。此外, 两个 USBL 分别位于接驳部和 AUV 的上部, 以防止机械结构阻挡声学信号。在导向罩的末端布置扇形磁铁组, 能够产生 10 cm 距离内可检测的磁场。当 AUV 安全接驳时, 其艏部的磁感应开关将接收到磁信号。

悬浮部采用六边形正棱台设计, 这是确保 SMFD 悬浮姿态稳定性的关键。首先, 主框架的顶部和底部均设计为正六边形, 并从上到下逐渐增大, 以增强其结构强度和平滑性。其次, 六个浮体组均匀分布在主框架周围, 采用空心玻璃微珠固体浮力材料

制成,可提供 200 kg 至 300 kg 的净浮力。通过调节每个浮体组的浮力,SMFD 能够灵活调整至所需的悬浮姿态。第三,SMFD 通过保持低重心和稳定位置,进一步增强了其稳定性。

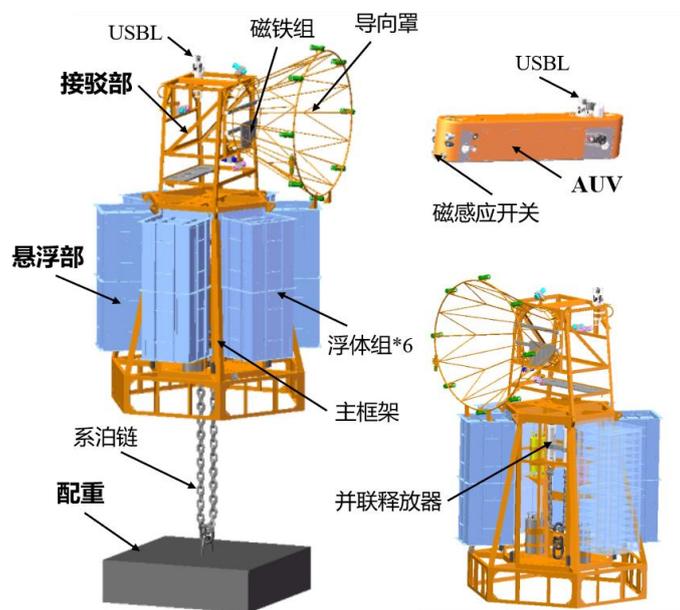


图 2.5 SMFD 整体设计

表 2.1 SMFD 结构参数

参数名称	值
SMFD 整体尺寸	3×3×4.7 m
SMFD 重量	3000 kg
导向罩直径	2 m
导向罩角度	51.6°

总体而言,SMFD 的设计紧凑且对称,通过系泊方式结合了固定式接驳坞三脚架基座的稳定性与自由浮动形式便捷回收的优势,提高了其对海底地势和海流的海洋环境适应性。此外,悬浮部的导向罩具备锥形导流作用,使其能够自动与海流方向对齐,无需额外增加调整接驳坞姿态的机械执行机构,从而降低了系统复杂性,最小化了 AUV 接驳航行过程中的侧流扰动,有利于提升接驳成功率。

## (2) SMFD 系泊方式

与传统的固定式系统不同,系泊设计提供了更便捷的布放和回收方法,使其适用于短期或大范围的任务。图 2.6 展示了 SMFD 的布放与回收过程。在布放过程中,接驳坞在浮力作用下会在水面上漂浮(图 2.6(a))。随后,在配重的重力作用下,接驳坞缓慢下沉直至配重接触海底,最终,接驳坞悬浮在水中,系泊链呈拉直状态,标志着

布放过程的完成（图 2.6(b)）。回收时，母船与 SMFD 之间建立声学通信。母船上的声学调制解调器发送释放信号，SMFD 接收到信号后，声学释放装置释放配重。接驳坞在浮力作用下缓慢上升至海面（图 2.6(c)）。可以发现，SMFD 的布放与回收过程高效且适用实际海上环境，接驳坞能够依靠重力和浮力自主完成下沉和上浮，无需缆绳连接，大大减少了人员参与和物资成本。

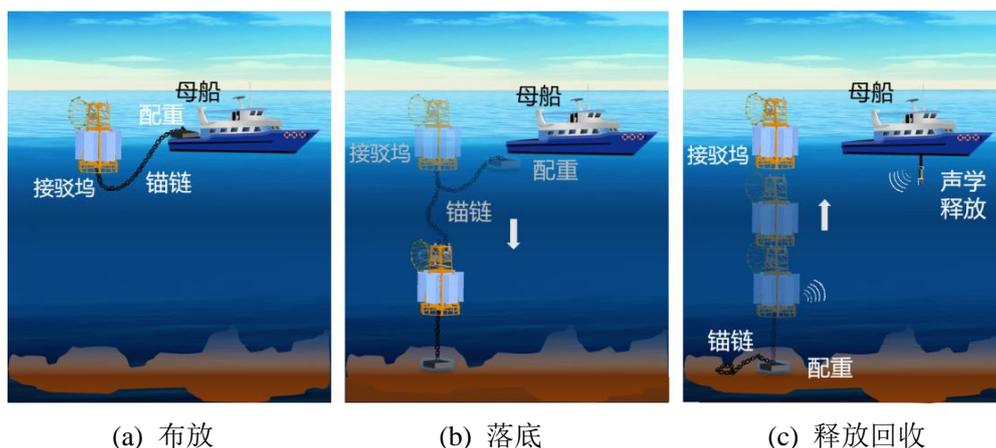


图 2.6 布放和回收过程示意图

### 2.2.3 声学定位与通信设计

本小节对声学定位与通信的设计进行介绍。如图 2.7 所示，USBL 安装在 AUV 的上表面，其由非平面水听器阵列和位于中心的收发器组成，可以全向的接收和发送水声信号，信号参数见表 2.2。使用 USBL<sup>[95,96]</sup>测量 AUV 与 SMFD 的距离  $d$  和水平方位角  $\theta$ 。距离通过脉冲的双向传播延迟和声速估计获得，作用范围大，对环境适应性强，而水平方位角通过到达时间差（Time Difference Of Arrival, TDOA）和最小二乘法确定。定位方式为主动问讯—应答式，根据距离的不同，更新频率约为 0.3 Hz。同时，采用正交频分复用技术（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）将通信与定位功能相结合，通信和定位距离达 3 km，尽管噪声和信号分辨率可能影响性能。

表 2.2 USBL 参数

功能	描述
定位	USBL, 24 kHz, Chirp
通信	OFDM, 24 kHz, 3 km
误差	0.5%斜距, 角度 1~3°

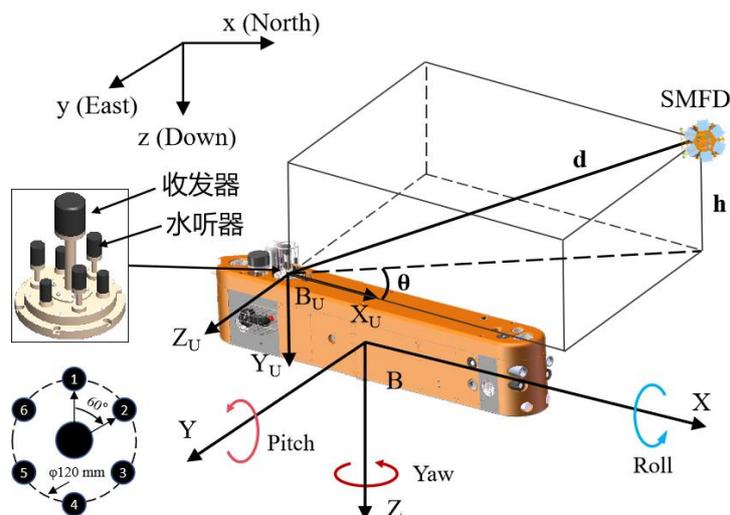


图 2.7 USBL 在 AUV 上的位置

基于 OFDM 的定位-通信信号结构如图 2.8 所示, 该信号由两个双曲调频信号 (Dual-Hyperbolic Frequency-Modulation, Dual-HFM) 与一个 CP-OFDM 数据块组成。其中 Dual-HFM 作为触发, 实现信号检测和定时。HFM 信号对多普勒不敏感, 适用于移动载体 AUV 使用, 以判断出信号到达时间, 计算时间差。CP-OFDM 中携带有用于定位的关键辅助信息, 同时其中也插入了一定数量的空子载波用于 Doppler 频移估计。

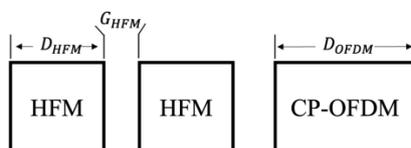


图 2.8 定位-通信信号结构

## 2.3 交互式声学渐近补偿导引方法

为了进一步提高 AUV 接驳的精度和可靠性, 本节提出了一种交互式声学渐近补偿导引方法 (Interactive Acoustic Asymptotic Compensation, IAAC)。该方法通过交互式声学定位测量, 实时过滤异常值并估算 SMFD 位置和方向, 并基于横向偏差进行比例制导, 使 AUV 能够顺利、平滑地接近并完成接驳操作。以下将详细介绍该方法的制导与控制架构, 交互式声学加权位置估计方法, 以及基于横向偏差的比例制导。

### 2.3.1 制导与控制架构

AUV 接驳的软件系统采用分层架构, 如图 2.9 所示, 包括导航模块、导引模块、控制模块和推力分配模块。具体而言, 导航模块由导航传感器和声学通信系统组成,

用于确定 AUV 与 SMFD 间的相对位置和相对姿态，并向其他模块提供实时导航数据和状态反馈。各层级模块通过期望命令相互连接，以协同实现预期的 AUV 行为。

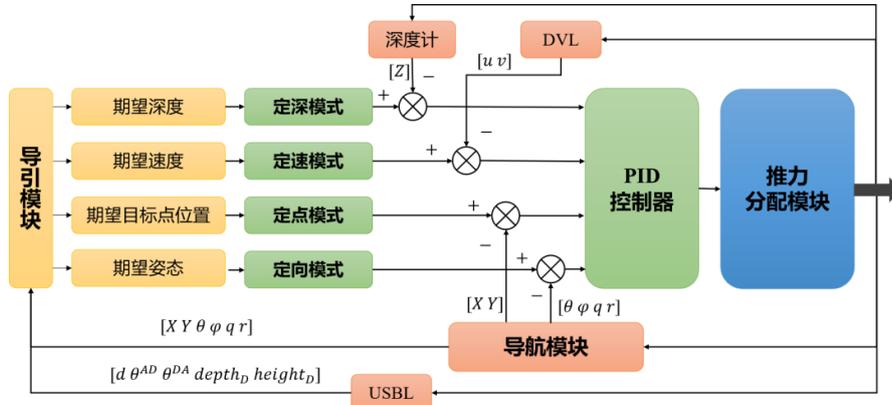


图 2.9 AUV 接驳的软件分层架构

高层的导引模块<sup>[97]</sup>从导航模块获取 AUV 的位置和航向信息，同时从 USBL 获取 AUV 与 SMFD 之间的相对位置和相对姿态。导引模块为 AUV 生成可行且适用的期望路径，包括深度、速度、位置、姿态和航向。然后，期望状态被下送到控制模块。层级架构方式可以直接利用 AUV 成熟的控制模式，而不改变控制参数，提供了更高的机动性和安全性保障。

中层包含一个实现 PID 控制方法的控制模块，提供四种不同的控制模式：定深模式、定速模式、定点模式和定向模式。定深模式最小化预期深度与当前深度之间的差异，使 AUV 能够在所需深度下航行。同样，定速模式旨在确保 AUV 以期望速度航行，并使声学多普勒速度仪（Doppler Velocity Logger, DVL）的速度变化最小。定点模式用于到达路径点的期望位置，并使用视线法（Line-of-Sight, LOS）计算从当前位置到期望位置的航向角。定向模式以最小的航向误差引导 AUV 达到期望的方向姿态。

在低层，推力分配模块将 PID 控制器的输出转换为推力分配，使各个推进器能够提供实现 AUV 期望运动所需的推力和扭矩，其代表了 AUV 接驳的操纵性。

### 2.3.2 交互式声学加权位置估计

当水流方向发生变化时，SMFD 会在水流的作用下发生转动，所以，其开口方向不是恒定的，需在线实时测量。传统的声学定位方法只能测量位置信息，而高精度姿态传感器的成本昂贵。此外，受周围金属材料的磁场干扰影响，电子罗盘需要复杂的校准，对 SMFD 来说操作难度大。所以，参考基于海底固定平台的 AUV 声学导航方

法<sup>[98]</sup>, 本节采用类似的交互式声学定位方法, 通过 AUV 与 SMFD 间的交互声学测量, 使 AUV 实时获取其与 SMFD 间的相对位置和相对姿态信息, 进而确定 SMFD 的位置和开口方向。

---

### 方法 2-1: AUV 与 SMFD 间的交互式声学定位

---

#### 阶段 1: 初始化

- 1 AUV 向 SMFD 发送询问包 $p_0$ .
- 2 SMFD 收到 $p_0$ , 启动并等候 $t_{wait}$ , 生成 $p'_0=[depth_D]$ 发送至 AUV.
- 3 AUV 收到 $p'_0$ , 提取 $depth_D$ 并测量 $d$ 和 $\theta^{AD}$ , 等候 $t_{wait}$ .

#### 阶段 2: 交互定位

- 4  $n = 1$
  - 5 **While** AUV 未接驳 **do**
  - 6 发送数据包 $p_n=[d \ \theta^{AD}]$ 至 SMFD.
  - 7 SMFD 收到 $p_n$ , 提取 $d$ 和 $\theta^{AD}$ 并测量 $\theta^{DA}$ , 等候 $t_{wait}$ .
  - 8 发送 $p'_n=[\theta^{DA} \ depth_D \ height_D]$ 至 AUV.
  - 9 AUV 收到 $p'_n$ , 提取 $\theta^{DA}$ ,  $depth_D$ ,  $height_D$ 并测量 $d$ 和 $\theta^{AD}$ , 等候 $t_{wait}$ .
  - 10  $n = n + 1$
  - 11 **if** AUV 收到电磁信号 **then**
  - 12     **break**
  - 13 **else**
  - 14     **continue**
  - 15 **end while**
  - 16 输出:  $p = [d \ \theta^{AD} \ \theta^{DA} \ depth_D \ height_D]$ .
- 

AUV 与 SMFD 间的交互式声学定位如方法 2-1 所示, 包括两个阶段: 初始化和交互定位。初始化阶段通过询问包 $p_0$ 和数据包 $p'_0$ 完成, 使 AUV 获得 $\theta^{AD}$ 、 $d$ 、 $depth_D$ 三个数据。交互定位阶段通过周期性的数据包 $p_n=[\theta^{AD} \ d]$  ( $n=1,2,3\dots N$ )和 $p'_n=[\theta^{DA} \ depth_D \ height_D]$  ( $n=1,2,3\dots N$ )完成, 使 AUV 获得 $d$ 、 $\theta^{AD}$ 、 $\theta^{DA}$ 、 $depth_D$ 、 $height_D$ 五个数据。其中,  $d$  是 AUV 端测量出的 AUV 与 SMFD 之间的直线距离,  $\theta^{AD}$  是 SMFD 在 AUV 参考系中相对 AUV 的方位角,  $\theta^{DA}$  是 AUV 在 SMFD 参考系中相对于 SMFD 的方位角,  $depth_D$  和  $height_D$  分别是 SMFD 导向罩中轴线的深度和高度。水平面上, AUV 与 SMFD 间的交互式定位结果如图 2.10 所示。由 2.2.2 节可知, 如果 AUV 收到磁感应信



向角,  $[q \ r]$ 为俯仰和航向的角速度。不考虑其横滚运动的横滚角和横滚角速度。

AUV 端 USBL 定位交互的信息为:

$$p = [d \ \theta^{AD} \ \theta^{DA} \ depth_D \ height_D] \dots\dots\dots (2.2)$$

水平面上, 认为 AUV 坐标系 $\{B\}$ 与 AUV 端 USBL 坐标系 $\{B_U\}$ 重合, SMFD 坐标系 $\{D\}$ 与 SMFD 端 USBL 坐标系 $\{D_U\}$ 重合, 导航坐标系下 SMFD 位置为:

$$\begin{bmatrix} E_D \\ N_D \end{bmatrix} = R_B^O \left( \begin{bmatrix} -\cos(\theta^{DA} - \theta^{AD}) & \sin(\theta^{DA} - \theta^{AD}) \\ -\sin(\theta^{DA} - \theta^{AD}) & -\cos(\theta^{DA} - \theta^{AD}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \cdot \cos \theta^{AD} \\ d \cdot \sin \theta^{AD} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} E_A \\ N_A \end{bmatrix} \dots (2.3)$$

式中,  $R_B^O$ 为 AUV 坐标系到导航坐标系的转换矩阵,  $\begin{bmatrix} E_A \\ N_A \end{bmatrix}$ 为导航坐标系下 AUV 位置。

根据 AUV 的航向角 $\varphi$ 和 USBL 的水平方位角, 导航坐标系下 SMFD 开口方向为:

$$\alpha = \varphi + \theta^{AD} - \theta^{DA} - \pi \dots\dots\dots (2.4)$$

垂直面上, AUV 与 SMFD 导向罩的垂直距离:

$$e_{hh} = |depth_A - depth_D| \dots\dots\dots (2.5)$$

式中,  $depth_A$ 为 AUV 的深度。

海洋环境复杂多变, 尤其是 AUV 端的多径效应和多普勒效应, USBL 定位数据会存在一些异常点。而且, 随着 AUV 逐渐接近 SMFD, 定位数据的精度逐步提高, 估算的 SMFD 位置会逐渐趋于聚集。对此, 使用窗口尺寸为 N 的滑动窗口对实时数据进行处理。其中, SMFD 布放的 GPS 位置为 $(E_{D0}, N_{D0})$ , AUV 的实时位置为 $(E_A, N_A)$ , 通过 USBL 定位估算的 SMFD 位置为 $(E_D^i, N_D^i)$  ( $i = 1, 2, 3 \dots n$ )。

AUV 从远距离开始接驳, SMFD 的估算位置与其 GPS 位置间的欧氏距离 $d_{err}$ 应在一定范围内, 否则认为野值, 即:

$$d_{err} = \sqrt{(E_D^i - E_{D0})^2 + (N_D^i - N_{D0})^2} < T_{err} \dots\dots\dots (2.6)$$

式中,  $T_{err}$ 为预设阈值。

对有效的定位数据, 使用滑动窗口(窗口大小为 N)进行平均处理, 以更新 SMFD 的位置估计。

$$\begin{cases} \hat{E}_D = \overline{E}_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_D^i \\ \hat{N}_D = \overline{N}_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N N_D^i \end{cases} \dots\dots\dots (2.7)$$

随着 AUV 逐渐接近 SMFD, 通过计算每个滑动窗口内定位数据的标准差 $\sigma_{win}$ , 来判断是否出现聚集现象。即:

$$\sigma_{win} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(E_D^i - \overline{E_D})^2 + (N_D^i - \overline{N_D})^2]} < \sigma_{err} \dots\dots\dots (2.8)$$

式中,  $(\overline{E_D}, \overline{N_D})$ 为窗口内的均值,  $\sigma_{err}$ 为预设阈值。

当估计的 SMFD 位置出现聚集现象, 说明定位趋于稳定。在此阶段, SMFD 的估算位置与当前估计的聚集位置间的欧氏距离  $d_{est}$  应在一定范围内, 否则认为是异常值, 即:

$$d_{est} = \sqrt{(E_D^i - \overline{E_D})^2 + (N_D^i - \overline{N_D})^2} < T_{est} \dots\dots\dots (2.9)$$

式中,  $T_{est}$ 为预设阈值。

对于近距离稳定的定位数据, 我们通过滑动窗口加权平均来动态更新接驳坞位置的估计。每个 SMFD 位置的权重  $\omega_i$  根据 AUV 当前位置与 SMFD GPS 位置间的欧氏距离  $d_i$  来计算, 并进行归一化处理, 如下:

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{1}{d_i^p} \\ \hat{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \end{cases} \dots\dots\dots (2.10)$$

式中,  $p$ 为控制权重衰减的因子。

使用窗口加权平均来更新 SMFD 位置估计:

$$\begin{cases} \hat{E}_D = \sum_{i=1}^N \hat{\omega}_i E_D^i \\ \hat{N}_D = \sum_{i=1}^N \hat{\omega}_i N_D^i \end{cases} \dots\dots\dots (2.11)$$

### 2.3.3 基于横向偏差的比例制导

AUV 在进行接驳时, 通常沿直线航行至接驳坞。但由于最小转弯半径<sup>[84]</sup>和运动惯性的影响, 在试图减少横向位置偏差时容易发生过度补偿或因调整时间窗口过小而无法及时调整, 导致航行轨迹不平滑, 存在方向偏差。对此, 结合 AUV 运动模式, 在 Touchdown alignment 导引<sup>[75]</sup>的基础上制定基于横向偏差的比例制导策略, 使 AUV 以一定的姿态到达 SMFD 位置。

理想情况下, AUV 沿导向罩中轴线路径直线航行进入 SMFD。但侧向有海流时, AUV 会偏离直线路径, 无法到达 SMFD 位置, 或者 AUV 以一定航向角抵抗海流航行, 无法进入导向罩的开口范围内。考虑海流和 AUV 转弯半径因素, 在 SMFD 坐标系下, 分两个阶段规划目标路径点, 分别称为标志点和路径点, 如图 2.12 所示。  $(x_{uuv}, y_{uuv})$  表示 AUV 在  $\{D_U\}$  坐标系中的坐标,  $V_c$  表示海流。标志点  $Q$ 、 $P$  和  $n$  是根据海洋环境、

AUV 速度、传感器能力和 AUV 的运动性能来确定的。AUV 遵循定点模式，采用纯跟踪制导，到达标志点  $Q$ 、 $P$  和  $n$ ，以跟踪中心直线路径。标志点  $m$  位于 SMFD 前方的安全距离  $L$  处，与 AUV 的最小转弯半径有关。基于 AUV 与标志点  $m$  之间的距离来规划路径点  $n_i (i = 1, 2, 3 \dots N)$ ，更新频率通过声学定位来确定。

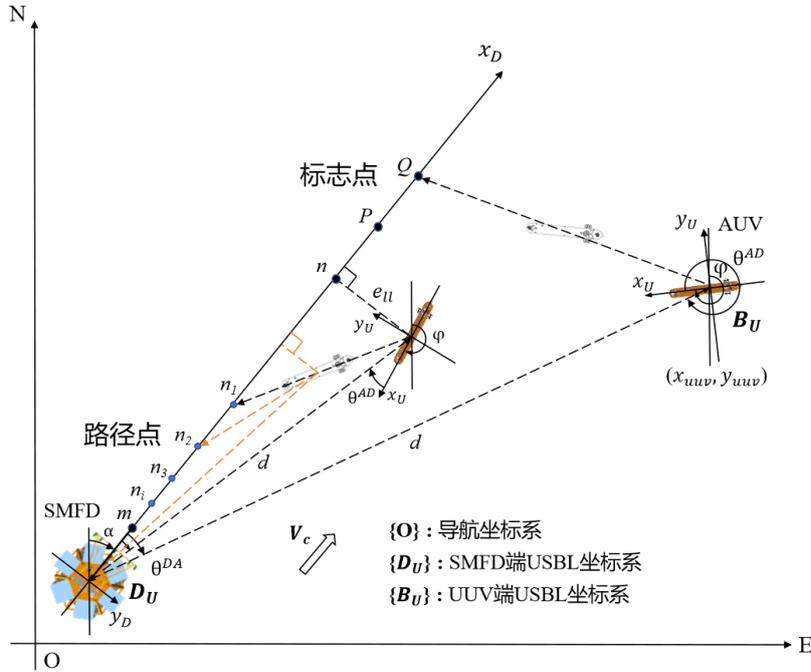


图 2.12 目标路径点的规划

在定点模式的基础上，AUV 利用基于交叉轨迹偏差的比例控制器计算航向角：

$$\varphi' = \begin{cases} \varphi + \pi/2 + \theta^{AD} - \theta^{DA} - \arctan(K_p e_{ll}), & e_{ll} \geq e_\varepsilon \\ \varphi + \theta^{AD}, & e_{ll} < e_\varepsilon \end{cases} \dots\dots\dots(2.12)$$

式中， $e_{ll}$ 是横向位置偏差， $K_p = (d \cdot \cos \theta^{DA} - x_m) / 2$ 。通过将 AUV 和标志点  $m$  之间的中点投影到中心轴上，来规划确定路径点。该规划方法可以为 AUV 提供机动空间，有助于生成平滑的轨迹，并且计算量小。此外，AUV 在接近 SMFD 时，不仅可以减少横向位置偏差，还可以减少航向偏差。

末端接近 SMFD 过程中的方向控制旨在减少航向偏差并引导 AUV 进入导向罩。AUV 到达  $m$  点后，重新调整航向，以定向模式航行。如果 AUV 达到点  $m$ ，则将航向角调整为  $\varphi' = \varphi + \theta^{AD}$ 。如果 AUV 距离  $m$  点的横向偏差超过阈值，则执行转弯动作，进行二次接驳任务。

在末端接驳时，将成功入坞条件解耦为垂直面和水平面两部分，垂直面包括垂向

偏差和 AUV 俯仰角，水平面包括横向偏差和中轴线夹角。考虑到安全系数为 1.25，由导向罩的外形尺寸可知各偏差的允许范围如下：

竖直面垂向偏差：

$$e_{hh} = |depth_A - depth_D| < 0.8 \text{ m} \dots\dots\dots(2.13)$$

俯仰角：

$$\psi < \pm 10^\circ \dots\dots\dots(2.14)$$

水平面横向偏差：

$$e_{ll} = |d \cdot \sin \theta^{DA}| < 0.8 \text{ m} \dots\dots\dots(2.15)$$

AUV 中轴线与导向罩中轴线之间的锐角：

$$\delta = |\theta^{AD} - \theta^{DA}| < 51.6^\circ \dots\dots\dots(2.16)$$

## 2.4 AUV 接驳试验与结果分析

为了评估系泊接驳方式、交互式声学定位和制导策略的性能，实现了 SMFD 和 AUV 原型样机，并分别于湖上和海上对接驳主要功能以及 AUV 水下接驳全过程进行了测试，验证了所设计系统和所提方法的有效性。

### 2.4.1 试验设施

用于接驳试验的 AUV 如图 2.13 所示，其规格参数详见表 2.3。采用线性 PID 控制器来调整速度和航向，能够同时进行驱动和欠驱动的操作，后者用于接驳。AUV 的尾部有一个 USBL，顶部有一个温盐深仪（Conductivity Temperature Depth, CTD），艏部有一个磁性传感器。



图 2.13 AUV 实物图

表 2.3 AUV 特征参数

参数	值与描述
整体尺寸	3×0.55×0.4 m
重量	350 kg (空气)
最大工作水深	2000 m
最大速度	2 kn
续航能力	30 km × 2 kn
电池	6.5 kWh, 0.63 kWh (应急)
推进器	12 kgf × 6
传感器	DVL, 惯导, USBL

实现的 SMFD 如图 2.14 所示, 接驳部由标准钢材构成, 表面涂有氟碳涂层, 重量为 400 kg。导向罩的外表面包裹柔性材料, 用于减缓碰撞冲击, 保护 AUV 免受损坏。在前视方向和俯视方向分别安装摄像头和照明灯, 用于观察 AUV 是否进入导向罩。悬浮部的主框架采用碳钢制成, 以提高强度并减轻重量。水面监控数据传输缆连接至电子舱, 将摄像头、USBL 等传感器的数据传输至岸上监控单元, 便于岸上人员实时查看 AUV 的接驳状态。

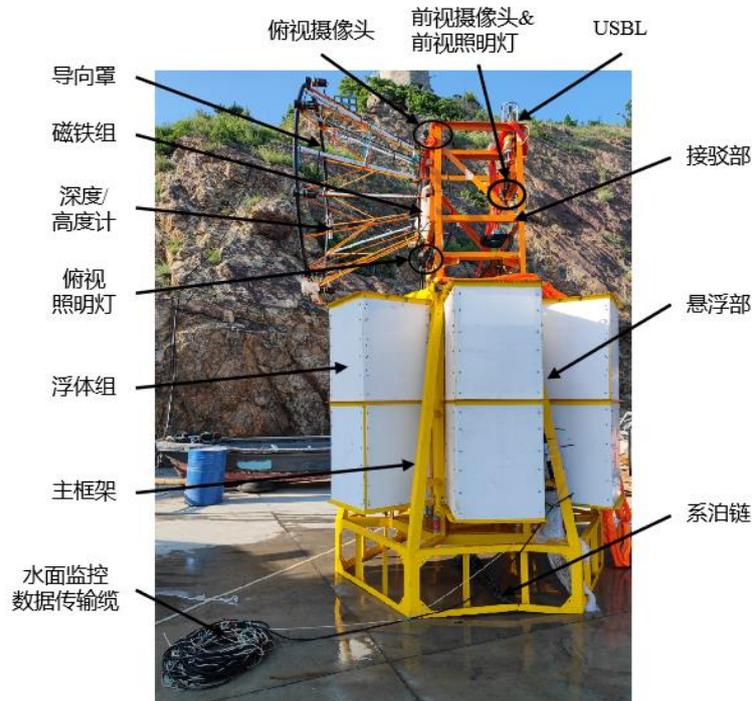


图 2.14 SMFD 实物图

## 2.4.2 湖上试验结果

2022年7月,在中国河北沧州进行了湖泊试验,试验水域为 $200\times 300\text{ m}$ ,最大深度为 $35\text{ m}$ 。首先,将SMFD的接驳部部署到湖中,并令其朝向湖中心方向,如图2.15所示。为了确保AUV的安全航行,接驳部的下沉深度限制在 $1.5\text{ m}$ 以内,以适应靠近岸边的浅水区域。在接驳部下水前,通过GPS系统获取其位置和方向。



图 2.15 接驳部布放入水

试验结果表明,接驳部能够在水中稳定悬浮,横滚角接近 $0^\circ$ ,俯仰角约为 $8^\circ$ 。在14次接驳任务中,9次成功,剩余5次AUV没有进入导向罩,但到达接驳部位置距离 $1\text{ m}$ 范围内。接驳失败主要有两个原因:1)惯性导航系统的校准偏差。2)USBL的深度在 $1.5\text{ m}$ ,浅水环境导致复杂的多径效应,进而引起狭窄的方向角,降低定位精度,且有效定位距离大大缩短。然而,有效距离内AUV多数都能定位到接驳部,且接收到接驳部端的方位和深度,说明交互式声学定位的有效性。

在消除惯性导航偏差和安装误差后,表2.4列出了交互式声学定位误差。其中,横向距离指AUV与导向罩中心线的垂直距离;纵向距离指沿导向罩中心线方向,AUV与SMFD间的距离。在14次任务中,横向距离偏差的平均值为 $0.53\text{ m}$ ,标准偏差为 $0.37\text{ m}$ ,78.57%的偏差小于 $0.8\text{ m}$ 。而其CEP平均值为 $0.50\text{ m}$ ,标准偏差为 $0.19\text{ m}$ ,提供足够的精度来定位SMFD。纵向距离偏差的平均值为 $1.08\text{ m}$ ,标准偏差为 $0.93\text{ m}$ 。而其CEP平均值为 $1.08\text{ m}$ ,标准偏差为 $0.94\text{ m}$ 。纵向距离偏差在 $3\text{ m}$ 之内,AUV不会出现航行控制中的超时,因此,AUV的末端接驳不会受到影响。航向偏差在 $4^\circ$ 至 $19.29^\circ$ 之间,平均值为 $7.97^\circ$ ,深度偏差小于 $0.5\text{ m}$ ,定位与通信性能满足接驳要求。此外,试验2和试验11的横向距离偏差大于 $1\text{ m}$ ,原因是AUV距离SMFD较远时的方位角定位误差。试验3、试验4、试验6、试验7和试验14的纵向距离误差大于 $1\text{ m}$ ,

原因是 USBL 的测距误差。试验 10 的航向偏差约为  $20^\circ$ ，是由于缺少来自 SMFD 端 USBL 的有效定位数据，从而未实现收敛。

表 2.4 交互式声学定位结果（湖测）

序号	AUV Max.dis (m)	USBL Max.dis (m)	Cross-track 偏差 (m)	Long.track 偏差 (m)	Cross-track 偏差 CEP (m)	Long.track 偏差 CEP (m)	航向 偏差 ( $^\circ$ )	深度 偏差 (m)
1	125.59	66.77	0.05	0.1	0.38	0.17	7.98	0.46
2	122.97	44.72	1.01	0.2	0.39	0.27	9.35	0.42
3	123.6	52.42	0.43	1.72	0.66	1.7	12.49	0.39
4	122.88	82.7	0.31	2.52	0.47	2.56	6.43	0.2
5	124.19	70.07	0.12	0.2	0.69	0.35	11.46	0.17
6	125.2	96.62	0.46	2.98	0.42	2.99	5.26	0.19
7	123.58	101.24	0.63	2.21	0.37	2.28	7.27	0.19
8	121.58	100.69	0.1	0.47	0.37	0.35	5.03	0.18
9	123.96	123.13	0.81	0.42	0.29	0.5	6.17	0.18
10	124.49	73.01	0.58	0.62	0.35	0.65	19.29	0.27
11	124.09	109.64	1.38	1.05	0.96	1.01	7.61	0.29
12	124.02	82.21	0.25	0.82	0.47	0.69	4.26	0.29
13	123.02	118.7	0.65	0.66	0.58	0.35	4.94	0.29
14	121.88	80.3	0.64	1.15	0.56	1.18	4	0.27
均值	123.65	85.87	0.53	1.08	0.50	1.08	7.97	0.27
标准差	1.12	23.61	0.37	0.93	0.19	0.94	4.15	0.1

<sup>1</sup>Max.dis: 最大距离。Cross-track: 横向距离。Long.track: 纵向距离。CEP: 圆概率误差。

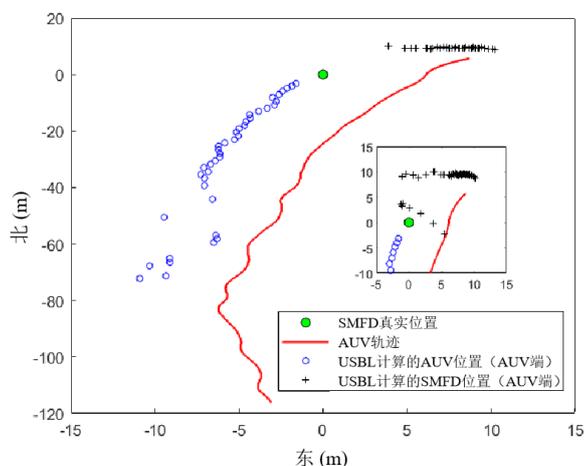


图 2.16 AUV 接驳轨迹与 USBL 定位数据

试验 10 的 AUV 接驳轨迹如图 2.16 所示。红线表示 AUV 惯性导航系统输出的轨迹，蓝色圆圈表示 USBL 定位测得的 AUV 位置，黑色十字表示由 USBL 和 AUV 惯性导航估算的 SMFD 位置。可以观察到，由于 AUV 惯性导航的偏差，红色轨迹并未经过真实 SMFD 位置。然而，蓝色圆圈的轨迹与红色的轨迹接近平行，表明 AUV 朝着 USBL 定位的 SMFD 航行。此外，黑色点呈现从左至右逐渐累积的趋势，这是因为随着 AUV 越接近 SMFD，USBL 定位精度越高，表明 IAAC 导引方法的有效性。

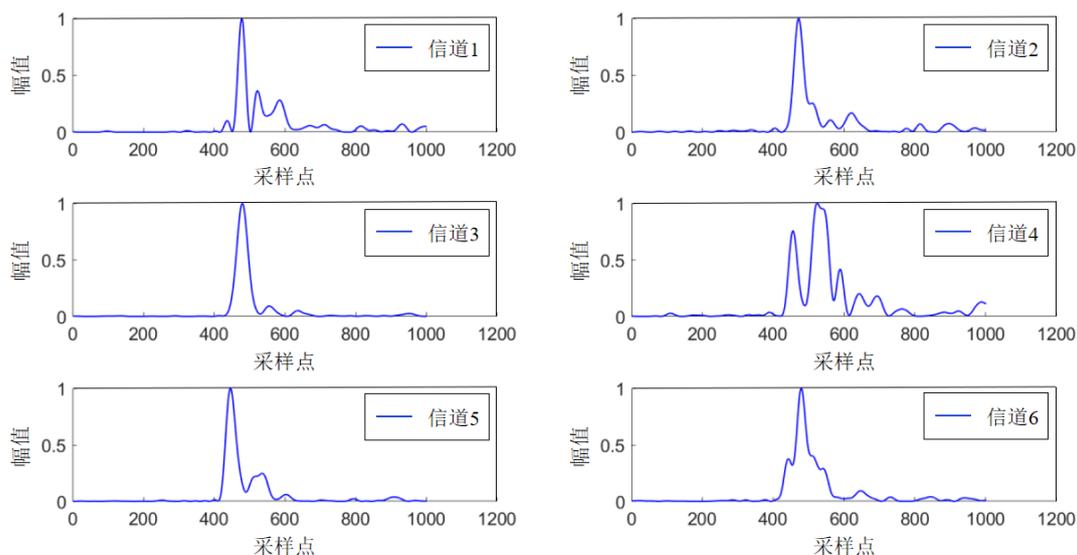


图 2.17 6 个水听器的信道脉冲响应

此外，在浅水声学信道环境下，当 AUV 距离 SMFD 约 70 m 时，USBL 才开始提供连续的定位数据，显著小于 2 km 的距离，这是浅水声信道的结果。首先，浅水声信道通常具有高传播损耗的特征，主要是由于多径传播、表面反射、地形散射和底部反射引起的能量衰减，因此限制了传输距离和信号质量。其次，浅水声信道的多径效应使声波的传播路径复杂，导致信号延迟、多径干扰、相位变化，以及提取信息的更大挑战。实际湖泊环境测得的 USBL 阵列 6 个水听器的信道脉冲响应如图 2.17 所示，信道 1、3 和 5 具有不影响主路径的轻微拖尾。相反，对于信道 2、4 和 6，多径分量严重影响主路径，从而使信号不能被成功检测和解码。

试验 11 的 AUV 接驳轨迹如图 2.18 所示。其中，预设的接驳部位置存在偏差，可以发现 AUV 跟踪了路径点，实时更新 USBL 定位的接驳部位置和方向。由于人为操作等因素，接驳部的方位角会有一定程度的波动。AUV 成功地利用 USBL 更新后的接驳部位置和方向实时调整接驳路径，接驳仍然可以成功。

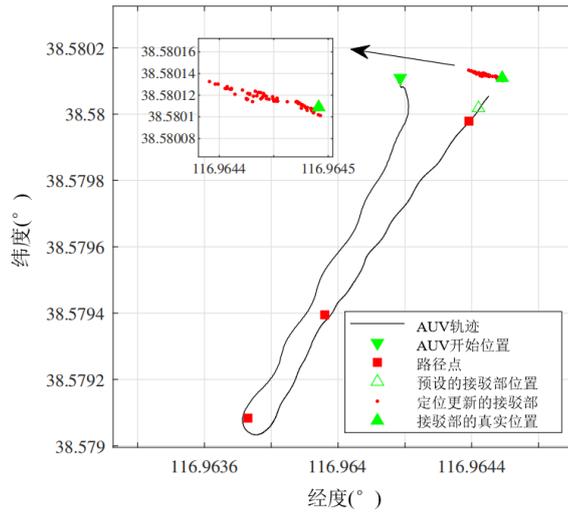


图 2.18 存在位置偏差的 AUV 接驳轨迹

图 2.19 显示了 AUV 的姿态角，横滚角接近  $0^\circ$ ，俯仰角在  $10^\circ$  内波动。在 280 s 左右，AUV 的航向角开始波动，这是由于横向轨迹偏差超过阈值，制导策略重新计算了路径点作为下一个航路点，AUV 调整航向向航路点航向。500 s 后，航向角趋于稳定，表明 AUV 已成功接驳，如图 2.20 所示。

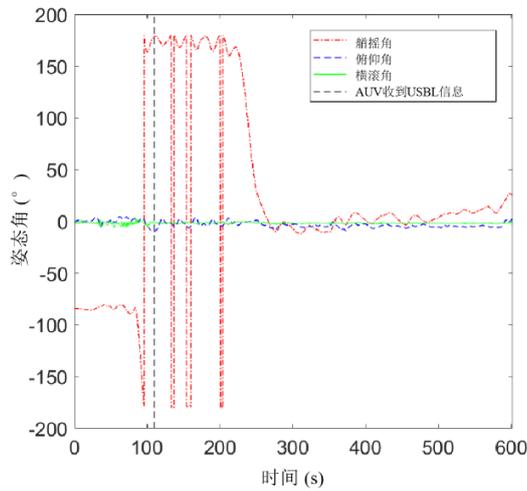


图 2.19 湖试接驳过程中 AUV 的姿态角



(a) AUV 拍摄的 SMFD (b) SMFD 拍摄的 AUV

图 2.20 湖试中 AUV 成功接驳

### 2.4.3 海上试验结果

湖上试验展示了 IAAC 导引方法的有效性，然而，AUV 惯性导航的偏差导致估算的 SMFD 位置分散。因此，在湖上试验后，对 AUV 的惯性导航系统进行了重新校准。2022 年 8 月在中国大连附近海域进行了 AUV 水下自主接驳试验，如图 2.21 所示，试验区域水深 9~10 m，水流 1~2 kn。根据试验场地条件情况，系泊链的长度为 2 m，配重为 1.5 吨。布放开始前，将导向罩、悬浮体、系泊链和配重组装成一个整体。

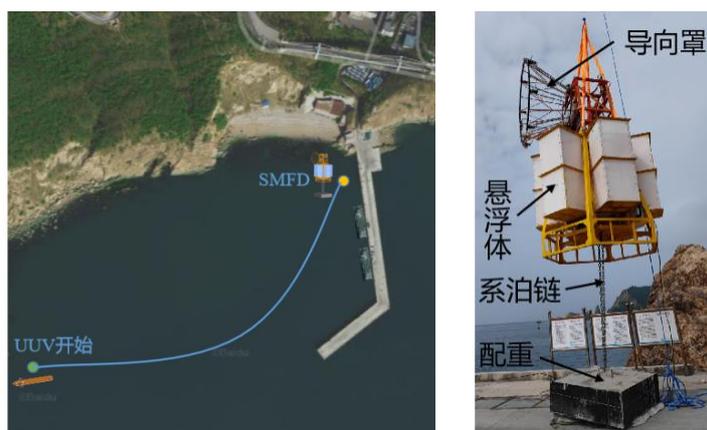


图 2.21 试验海域与 SMFD 组装

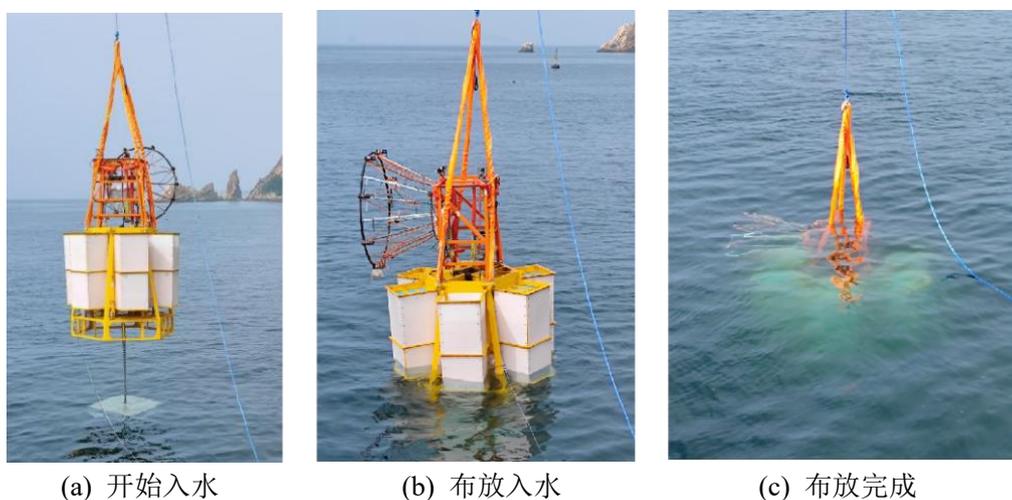


图 2.22 SMFD 的布放过程

SMFD 的布放过程体现了系泊系统设计的便利性，且保持了姿态稳定，如图 2.22 所示。开始入水时状态（图 2.22 (a)）。随后，布放 SMFD 进入水中，在配重作用下吊索呈绷紧状态（图 2.22 (b)）。最终，SMFD 系泊系统完全沉入水中，吊索呈松弛状态，SMFD 在水流作用下逐渐旋转，直到达到平衡（图 2.22 (c)）。SMFD 上的姿态传感器显示，俯仰角稳定在 7.5°，横滚角稳定在 8°，保持了稳定的姿态。

通过声学定位, AUV能够确定SMFD的位置和方向, 从而导引完成接驳。然而, 接驳的成功不仅取决于声学导引, 还受到AUV航行稳定性和海流干扰等因素的影响。海试中8次接驳任务的声学定位结果如表2.5所示。可以发现, 横向距离偏差的平均值为1.37 m, 标准差为1.57 m, 其中37.5%的偏差小于0.8 m, 其CEP平均值为1.48 m, 标准差为1.35 m。航向偏差的平均值为19.25°, 标准差为10.71°, 这主要是由于定位方向的不准确。例如, 试验1和试验2的横向距离偏差CEP均超过3 m, 且航向偏差超过25°, SMFD上的USBL定位方向存在误差。试验4中, 受海流干扰影响, AUV的航向角发生了显著变化, 且航行不稳定, 导致USBL定位精度下降。尽管USBL定位性能不如湖泊测试, 但横向距离偏差CEP平均值仍达到斜距的0.85%, 表明在100 m距离内进行多次定位可以满足接驳要求。根据我们的经验, 如果USBL的深度大于6 m, 可以有效改善通信效果、最大有效定位距离和定位精度。

表2.5 声学通信与定位结果(海测)

序号	AUV Max.dis (m)	USBL Max.dis (m)	Cross-track 误差 (m)	Long.track 误差 (m)	Cross-track 误差 CEP (m)	Long.track 误差 CEP (m)	航向 偏差 (°)	深度 偏差 (m)
1	322.08	270.67	4.82	12.22	3.61	10.47	42.15	0.6
2	432.48	209.49	1.27	1.56	3.64	1.78	26.07	0.7
3	461.41	78.91	2.25	0.09	0.96	0.56	18.3	0
4	299.7	220.85	1.21	0.67	0.66	0.43	20.22	0.06
5	332.03	262.78	0.42	5.04	1.09	5.22	9.59	0.1
6	359.02	140.05	0.82	0.68	0.55	0.66	11.74	0.11
7	355.98	102.84	0.12	0.08	0.36	0.44	13.82	0.09
8	358.43	102.62	0.05	0.59	0.95	0.66	12.08	0.04
均值	365.14	173.53	1.37	2.62	1.48	2.53	19.25	0.21
标准差	55.03	76.56	1.57	4.2	1.35	3.6	10.71	0.27

<sup>1</sup>Max.dis: 最大距离。Cross-track: 横向距离。Long.track: 纵向距离。CEP: 圆概率误差。

图2.23展示了试验7中的AUV成功接驳轨迹, 在末端AUV的轨迹呈微弧状, 表明其在根据估算的SMFD位置和方向而调整自身的航向。SMFD导向罩中心轴线的深度未超过2 m, 这增加了多径效应和传播损失。当浪潮和涌流在浅水区撞击岩石时, 产生的噪声会削弱并模糊声学信号, 这会导致信噪比(Signal-to-Noise, SNR)下降。因此, 当距离在70 m~80 m或更短时, USBL才可实现定位。不过, USBL定位测算

的 AUV 位置较精准地匹配在了 AUV 的轨迹上，验证了 IAAC 导引方法的有效性。

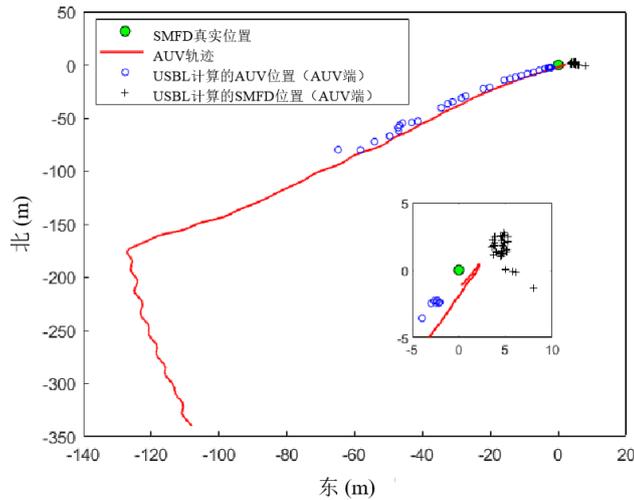


图 2.23 AUV 接驳轨迹与 USBL 定位数据

图 2.24 展示了接驳过程中 AUV 的姿态角，其中，俯仰角和横滚角接近  $0^\circ$ 。然而，由于海流和水面浪涌的影响，航向角在  $10^\circ$  范围内波动。当 AUV 接收到 USBL 的定位信息后，航向角的波动减少。表明当 AUV 接收到 USBL 估算的 SMFD 位置和方向信息时，根据制导策略调整了航向。需要说明的是，AUV 的最大速度为 2 kn，抗疏能力较弱，故易受到水流的干扰使航行不稳定。这也间接增加了多普勒效应，降低声学定位的解算成功率，减少有效定位信息的数量。

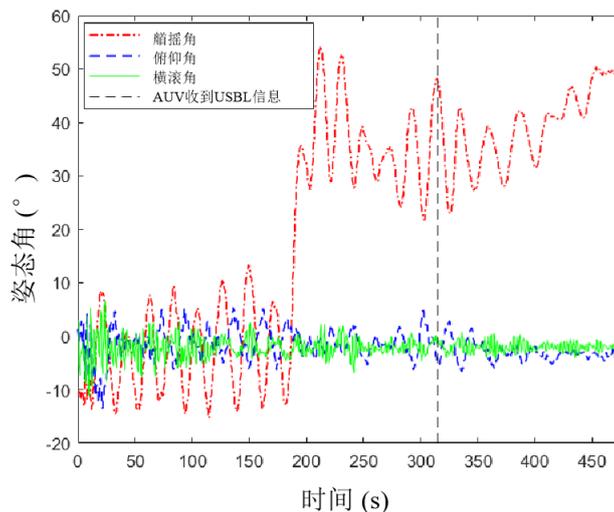


图 2.24 海试接驳过程中 AUV 的姿态角

图 2.25 比较了 USBL 定位数据与 AUV 惯性导航结果，可以观察到，AUV 的惯性导航轨迹与 USBL 定位轨迹基本平行，存在一些偏差，而 AUV 上的 USBL 定位轨迹

与 SMFD 上的 USBL 定位轨迹相似。特别是当 AUV 做出机动时，USBL 的部分水听器接收到的信号较弱，导致角度 $\theta^{AD}$ 的测量不准确，存在跳点现象。相比之下，SMFD 的悬浮姿态稳定，USBL 计算 $\theta^{DA}$ 没有出现跳点，保证了其声学定位的准确性和连续性。AUV 可以利用 SMFD 端 USBL 的定位数据来纠正 AUV 端 USBL 的定位，从而提高声学引导的准确性和可靠性。

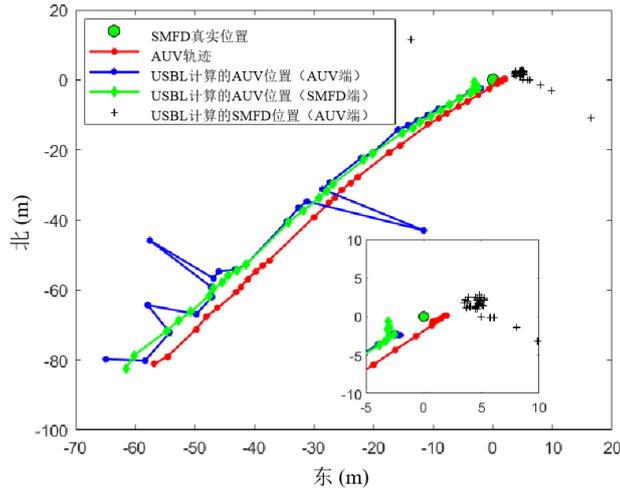
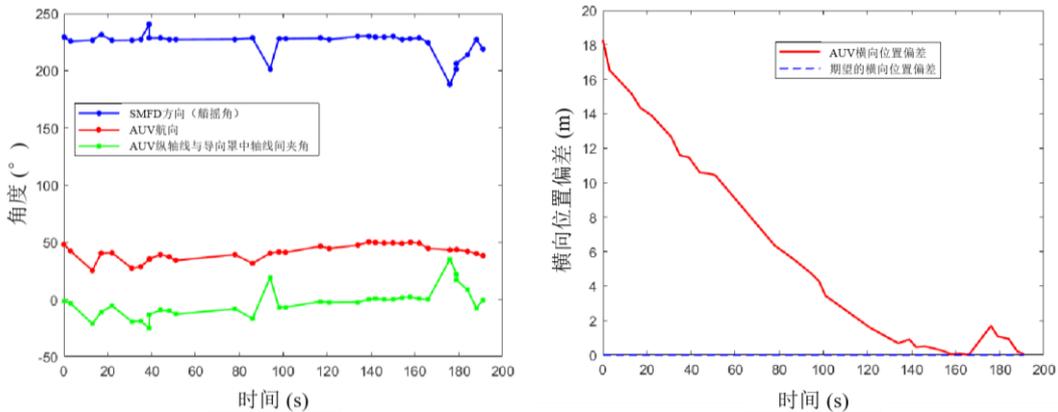


图 2.25 USBL 与惯性导航的 AUV 轨迹的比较



(a) SMFD 和 AUV 的航向角

(b) 横向位置偏差

图 2.26 AUV 入坞过程中的姿态偏差与位置偏差

如图 2.26 所示，SMFD 的方向稳定在  $225^\circ$ ，表明其可以在水流的作用下保持悬浮姿态。此外，在 100 s 至 160 s，AUV 与 SMFD 间的相对角度接近  $0^\circ$ ，表明 AUV 朝向导向罩航行进行接驳。而且，在 160 s 时，横向位置偏差降至为 0，标志着 AUV 成功接驳，如图 2.27 所示。然而，在 160 s 后，相对方向角和横向位置偏差先增加后减少，这是因为在接驳过程中，AUV 与导向罩发生接触，导致 SMFD 旋转，然后由于力矩的

作用又回到了原来的方向，这一现象说明了 SMFD 悬浮姿态的自平衡能力。观察海试现象，发现 SMFD 的适当旋转有助于 AUV 接驳。



(a) AUV 拍摄的 SMFD

(b) SMFD 拍摄的 AUV

图 2.27 海试中 AUV 成功接驳

## 2.5 本章小结

围绕局部海域的短期监测、灵活接驳应用场景，水下固定式接驳系统存在的环境适应性差、布放回收难度大以及光学导引方式作用范围严重受限等问题，本章首次提出一种基于全声学导引的水下系泊悬浮式接驳系统（MUDS）。本系统：1）采用系泊方式实现接驳坞的悬浮姿态，基于一种六边形正棱台结构，使浮力均匀分布且量值可调，保持悬浮稳定性，提高了接驳坞对复杂海流和海底环境的适应能力；2）针对悬浮式接驳坞（SMFD），提出了通信定位一体化的交互式声学渐近补偿导引方法（ICCA），可以实现交互式声学通信与定位，动态聚集 SMFD 定位信息，提高 AUV 入坞 SMFD 过程中的调整阈值，增强了鲁棒性。为了对所提系统的性能进行验证，于湖上和海上进行了测试。试验结果表明，SMFD 系泊设计方便快捷，能够在海流达 2 kn 时保持稳定悬浮姿态。在接驳过程中，AUV 成功定位到 SMFD，并沿中轴线向其航行完成入坞。在 14 次湖泊试验中，横向距离偏差平均值为 0.53 m，其中 78.57% 的偏差小于 0.8 m，航向偏差在 4°~19.29° 之间，表明定位和通信性能满足接驳要求。在 8 次海上试验中，横向距离偏差平均值为 1.37 m，其中 37.5% 的偏差小于 0.8 m，航向偏差平均值为 19.25°。垂向距离偏差 CEP 平均值达到斜距的 0.85%，表明 100 米内的多次定位可以满足接驳要求。湖泊和海上试验共同验证了 MUDS 在声学引导下进行 AUV 接驳的有效性。

### 第3章 基于悬浮坞的 AUV 入坞接触运动响应数值计算及仿真

本章针对第2章海上系统性试验中, AUV 入坞过程中悬浮坞出现艏摇与俯仰运动现象, 开展悬浮坞运动稳定性的性能优化研究, 以提高入坞成功率。海底系泊悬浮式接驳坞 (SMFD) 因其对海洋环境的适应性、灵活性以及易于部署与回收而显示出广阔的应用前景。但是, AUV 与接驳坞之间的接触作用显著影响着入坞过程的成功率、效率和安全性。本章旨在深化对 SMFD 悬浮姿态, 以及 AUV 入坞 SMFD 和固定坞过程中的接触作用的理解, 优化入坞过程, 并提出有效改进措施。为此, 基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 仿真模拟技术, 采用动态流体相互作用 (Dynamic Fluid Body Interaction, DFBI) 方法, 建立一种基于悬浮坞的 AUV 入坞接触耦合运动响应数值计算及仿真模型 (Contact-coupling Numerical Model for AUV docking, CCNM-AUV)。在此基础上, 模拟了 SMFD 在不同海流条件下的稳定性以及 AUV 入坞接触过程中的运动响应, 分析了 SMFD 设计参数对入坞效果的影响, 优化 SMFD 设计, 通过与固定坞对比进一步验证了 SMFD 的性能特征。

本章的主要贡献如下:

- (1) 基于 CFD 数值方法和接触耦合模块建立一种 CCNM-AUV 仿真模型, 采用重叠网格划分技术和网格独立性试验, 确定了最佳网格设置。AUV 轴向速度和 SMFD 艏摇角的仿真结果与海上试验结果具有较高的一致性, 验证了该模型能够有效捕捉 AUV 和 SMFD 的关键运动特性。
- (2) 模拟了 SMFD 在不同海流条件下的稳定性, 以及 AUV 与 SMFD 的动态接触响应; 根据单一变量原理, 分析了 SMFD 的体积、转动惯量、质量和锚链刚度对 AUV 入坞效果的影响, 为 SMFD 设计优化提供了指导。
- (3) 考虑不同工况条件, 对 AUV 进入 SMFD 和固定坞的入坞过程进行了对比仿真, 探讨了 SMFD 与固定坞在运动响应、入坞时间和准确度方面的差异, 结果表明 SMFD 的柔性能够扩展入坞空间, 提升入坞效率、稳定性和安全性。

本章组织如下: 3.1 节阐述本章的研究问题; 3.2 节给出了 AUV 入坞 SMFD 的数值计算模型; 3.3 节介绍了仿真模型、网格划分和模型验证; 3.4 节仿真并分析了 SMFD 姿态以及 AUV 入坞 SMFD 的过程, 讨论了体积、转动惯量、质量和悬链线刚度对 AUV 入坞效果的影响, 并指导优化 SMFD; 3.5 节通过对比仿真探讨 SMFD 和固定坞的 AUV

入坞运动效果，验证 SMFD 的稳定性和接触可靠性；3.6 节为本章小结。

### 3.1 问题描述

接驳坞作为 AUV 快速充电和数据传输的核心设施，其性能直接影响 AUV 的操作效率和入坞成功率。近年来，悬浮坞因其在实际环境中的操作便捷性，尤其是在湖泊试验中表现出的良好稳定性和高效性，受到广泛关注。然而，在第 2 章的试验中也发现悬浮坞存在旋转和俯仰波动，影响入坞成功率和设备安全。

当 AUV 接近导向罩时，由于海流扰动和导航精度的限制，AUV 与导向罩之间的接触不可避免，影响入坞成功率<sup>[99]</sup>。因为若 AUV 姿态调整不当，则会使入坞过程复杂化或导致 AUV 卡滞在导向罩中，进而引发设备事故。而且，需要控制 AUV 的速度，速度过快会导致 AUV 撞击接触力大，速度过慢会导致 AUV 的操纵性能下降。如图 3.1 所示，哈尔滨工程大学在海试过程中发现，过大的接触力导致 AUV 外壳变形，导向罩出现裂痕损坏<sup>[100]</sup>。因此，入坞阶段的关键在于如何降低接触力，并有效利用接触作用，使 AUV 平稳、顺畅地进入接驳坞。



图 3.1 海测中接触碰撞造成的设备破损

海上试验需耗费大量人力、物力和时间，成本高昂，且受环境条件限制，难以高效获取足够数据。考虑采用模拟仿真的方法，深化对 AUV 入坞接触过程的分析 and 理解。AUV 入坞过程涉及复杂的流体动力学、结构和多体相互作用，需要大量的计算资

源且接触问题的求解具有较高的难度，如何在有限的计算资源和时间效率约束下，构建精确的数值模型并获得可靠的模拟仿真结果，是面临的关键挑战。而且，悬浮坞构型、海流流速、AUV 航速等因素共同影响入坞效果，需要对多种因素进行系统化的分析与探讨，以优化参数组合并提升入坞平稳性。

## 3.2 当前研究现状

### (1) 接驳坞姿态稳定性分析

接驳坞的稳定性是 AUV 接驳任务的前提条件，这对其设计至关重要。但是，作为一种新型接驳形式，目前对悬浮坞稳定性分析的研究甚少，主要聚焦于移动坞的拖曳系统。拖曳系统的数学模型是一个复杂的非线性动力学运动方程，其建模通常包括以下步骤：首先分离拖体与拖缆并分别建立动力学模型；其次通过拖曳试验、经验公式或计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）仿真获取水动力参数；最后基于实际工况建立拖缆边界条件，将拖船、拖缆与拖体耦合，完成整体动力学建模。

拖曳系统数学模型主要分为两类：有限差分法<sup>[101]</sup>和集中质量法。有限差分法将拖缆视为可任意方向运动的柔性杆链，通过建立关于时间和长度的偏微分方程组，求解水动力、重力、浮力、质量惯性力和张力等作用。集中质量法则将拖缆简化为由线弹簧连接的质点链，基于牛顿第二定律建立惯性坐标系下的运动方程。其中，Ablow 和 Schechter 所建立的拖缆模型<sup>[102]</sup>最具有代表性，该模型以有限元法为基础，采用有限差分法进行数值求解，能够计算拖缆系统在大多数工况下的动力状态。巴西应用数学与控制实验室<sup>[103]</sup>提出一种新的电缆拖曳系统动态建模形式，电缆的柔性由离散等效物近似，由刚性连杆通过虚拟弹性接头连接而成，允许高度运动，将动态被限制在垂直平面内。Jin 等人<sup>[104]</sup>基于 Hamilton 变分原理建立了单点系泊系统中海洋浮标的非线性动力学模型，并采用四阶龙格-库塔积分法对所提出的非线性动力学模型进行了数值求解分析。Zhang 等人<sup>[105]</sup>建立浮船坞稳定性和动态分析的数值模型，研究了浮船坞的完整稳定性和重力压载过程。

### (2) 接驳坞接触碰撞运动响应分析

受海流扰动和 AUV 航行性能的影响，AUV 与锥形入口难免发生接触，产生作用力并直接改变 AUV 和接驳坞的运动状态。因此，关键在于如何降低接触力并有效利用接触作用使 AUV 顺利进入接驳坞，从而提高入坞的成功率和效率。

借鉴空中对接的研究, Langley<sup>[106]</sup>将对接机构简化为球铰结构, 并将其视为刚体进行了动力学分析。Roberts 等人<sup>[107]</sup>将对接机构简化为铰加弹簧和阻尼器, 基于碰撞理论求解速度变化。李强<sup>[108]</sup>分析了类锥杆式对接机构在对接碰撞过程中的运动学和动力学特性, 通过仿真分析多个影响因素并改进了对接锥面。

针对水下接驳任务, Zhang 等人<sup>[99]</sup>构建了 AUV 与固定坞的接触模型, 探讨了导向罩外形、材质、AUV 主推力及初始位置对入坞的影响。本文前期工作对比了凸形罩、锥形罩、凹形罩对 AUV 运动状态的调整效果。李开飞<sup>[100]</sup>提出了改进接触体形状的方法。张医博<sup>[109]</sup>采用多目标优化方法优化接驳坞以降低接触力。目前针对 AUV 入坞悬浮坞的研究较少, Lin 等人<sup>[47]</sup>基于 ADAMS 刚体动力学建立了 AUV 入坞悬浮坞的接触仿真模型, 讨论了电缆长度、质量比及横向偏差等对入坞的影响, 但未探讨 AUV 和悬浮坞各自的运动响应。然而, 这些模型基于经验公式构建, 未充分考虑物体与流体的耦合作用 (Fluid Structure Interaction, FSI), 而不同的流体环境会对 AUV 和接驳坞的动力学特性产生显著影响。

AUV 入坞是一个复杂的水-固-多体耦合问题, 其中 AUV 和接驳坞均受到流体扰动的影响, 且 AUV 的运动将引发周围流场的变化。Wu 等人<sup>[110,111]</sup>通过数值模拟, 揭示了在不同速度、加速度、入口形状、滑动模式以及方向舵角下, AUV 入坞时的流体力学特性。此外, 还采用离散螺旋桨模型进一步模拟了恒定 RPM 接驳和制动接驳两种模式。Meng 等人<sup>[112,113]</sup>利用 Star-CCM+对捕获式和引导式两种接驳装置的动态特性进行了对比分析。为了更深入地了解接驳接触过程, 该研究还模拟了 Remus100 与捕获杆的水下接驳, 并成功获取了接触力数据。Wen 等人<sup>[114]</sup>使用包括 6-DOF、流体力模型和改进 P 控制器的数值方法评估浮动码头在意外条件下的动态响应, 以提高浮船坞系统的安全性和稳定性。Xu 等人<sup>[115]</sup>采用 CFD 方法探讨了受鲫鱼启发的 AUV 动态接驳在基准潜艇上的流体动力学可行性。还有一种新型的“软对接”设计<sup>[116]</sup>, 采用灵活的软性材料附加装置和主动抓握机制, 可以显著减少碰撞冲击。尽管已有一些 AUV 入坞过程的水动力学研究, 但大多侧重于流场和涡流变化, 未深入探讨接触后的运动响应, 而这对 AUV 能否顺利入坞至关重要。因此, 如何在数值模拟中有效考虑流体动力学与接触相互作用, 优化 AUV 入坞过程, 仍是一个亟待解决的重点研究问题。

### (3) 多体接触碰撞动力学研究方法

针对多物体接触问题的求解方法, 主要有恢复系数法、等效弹簧阻尼法和有限元

法。具体而言，恢复系数法是研究物体接触问题的经典方法，其通过牛顿定律和欧拉定律建立物体运动微分方程，描述法向冲击力与切向摩擦力作用下的运动特性。该方法利用库伦定律刻画摩擦效应，并基于牛顿恢复系数分析碰撞过程。等效弹簧阻尼模型通过弹性力与阻尼力两部分计算接触力。其中，弹性力源于物体间的穿透量，而阻尼力则由物体间的相对速度决定。有限元法是一种基于数值计算的偏微分方程求解方法，其核心思想是将连续结构离散化为多个相互连接的小单元，每个单元通过节点满足变形协调条件，从而保持结构的连续性与完整性。在接触碰撞过程中，相互作用力导致结构变形，并均匀传递至节点，使单元随结构变形而产生节点相对位移。

考虑流体对 AUV 入坞过程的作用不可忽略，本章旨在通过 CFD 仿真模拟技术，深入理解不同海流下 SMFD 的稳定性，以及 AUV 入坞过程中的动态接触响应，为 SMFD 设计和 AUV 入坞机动策略提供指导建议。

### 3.3 AUV 入坞数值计算模型

本节详细介绍了模拟 AUV 入坞 SMFD 的数值方法，研究复杂的流体动力学和多体相互作用。在 AUV 与接驳坞发生接触的瞬间，虽然流体对接触过程产生了一定的影响，但这种影响微小可忽略不计<sup>[117]</sup>。因此，我们重点研究接触后，在流体力作用下，SMFD 及 AUV 各自的运动响应特性。为了便于问题分析，做出如下假设：

- (1) 水流被视为一种恒定扰动；
- (2) 简化 AUV 推力模型，推进器恒定转速下提供恒定的推力；
- (3) AUV 与 SMFD 均视为刚体，接触过程中无变形；
- (4) 接触冲击过程的持续时间相当短，不会在接触区域造成无限的相互渗透。

#### 3.3.1 流场的控制方程

在流体动力学模型中，采用基于 STAR-CCM+ 的有限体积法 (Finite Volume Method, FVM)<sup>[118,119]</sup> 求解模拟 SMFD 和 AUV 周围流体运动的雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)。本研究选择了可实现的 K-Epsilon 两层湍流模型<sup>[120]</sup>，它包括湍动能及其耗散率的传输方程。计算如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \varepsilon \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} p_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \dots \dots \dots (3.2)$$

式中，湍流的产生用 $p_k$ 表示，此外， $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $\sigma_k$ 和 $\sigma_\varepsilon$ 均为常数。

### 3.3.2 流体力学和力矩

由于部署在海底，因此只考虑潮流的影响。SMFD 连续体周围流体施加的力和力矩可以写为<sup>[121]</sup>：

$$\mathbf{F}_f = \sum_f p_f \mathbf{a}_f - \sum_f \boldsymbol{\tau}_f \mathbf{a}_f \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\mathbf{M}_f = \sum_f [\mathbf{r}_f \times (p_f \mathbf{a}_f)] - \sum_f [\mathbf{r}_f \times (\boldsymbol{\tau}_f \mathbf{a}_f)] \dots\dots\dots (3.4)$$

式中， $p_f$ 和 $\boldsymbol{\tau}_f$ 分别为作用于面 $f$ 的压力和剪切应力， $\mathbf{a}_f$ 为面 $f$ 的面积矢量， $\mathbf{r}_f$ 为体质心到面 $f$ 中心的距离矢量。

### 3.3.3 悬链线方程

SMFD 的系泊链采用悬链线耦合模型，其模拟了体与体之间或体与环境之间的一个准固定弹性悬链线（如链或拖曳绳），它悬挂在两个终点之间，在重力场中受其自身重量的影响。在局部笛卡尔坐标系中，悬链线的形状由以下参数方程组给出：

$$\begin{cases} x = au + b \cdot \sinh(u) + \alpha_i \\ y = a \cdot \cosh(u) + \frac{b}{2} \sinh^2(u) + \beta_i \dots\dots\dots (3.5) \\ u_1 \leq u \leq u_2 \end{cases}$$

式中， $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 为积分常数，具体取决于两个端点的位置和悬链线的总质量。 $u_1$ 、 $u_2$ 表示悬链线端点 $p_1$ 、 $p_2$ 在参数空间中的位置，限制了曲线参数 $u$ 的范围。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 的定义如下：

$$\begin{cases} a = \frac{c}{\lambda_0 g} \\ b = \frac{ca}{DL_{eq}} \dots\dots\dots (3.6) \\ c = \frac{\lambda_0 L_{eq} g}{\sinh(u_2) - \sinh(u_1)} \end{cases}$$

式中， $g$ 为重力加速度， $\lambda_0$ 和 $L_{eq}$ 分别为无力条件下悬链线的单位长度质量和松弛长度， $D$ 为悬链线刚度。

曲线参数 $u$ 与悬链线曲线倾角 $\phi$ 的关系如下：

$$\tan \phi = \sinh(u) \dots\dots\dots (3.7)$$

作用于系泊悬浮坞上悬链线端点的力 $\mathbf{T}_1$ 沿着参数值 $u_1$ 处的悬链线曲线的局部切线矢量方向。计算表达式如下：

$$\begin{cases} T_{1,x} = c \\ T_{1,y} = c \cosh(u_1) \end{cases} \dots\dots\dots (3.8)$$

### 3.3.4 接触耦合与碰撞力

为了准确反映 AUV 与 SMFD 之间的相互作用，采用接触耦合的方法来计算接触力<sup>[122]</sup>。接触耦合通过施加基于刚体边界和相反边界之间距离的接触力，以防止与刚体相关的边界相互接触。当体边界与另一个边界之间的距离大于指定的有效范围时，接触力减小到零。如果距离小于有效范围，则施加排斥接触力。接触面  $f$  上的接触力可以写为：

$$F_c = F_{c,n} + F_{c,t} \dots\dots\dots (3.9)$$

式中， $F_{c,n}$ 为法向分量，可防止接触。 $F_{c,t}$ 为切向分量，对沿相对边界的体的摩擦建模。

接触力将围绕当前的体位置 $r_b$ 创建力矩 $M_c$ ：

$$M_c = (r_f - r_b) \times F_c \dots\dots\dots (3.10)$$

式中， $r_f$ 是当前面 $f$ 的形心位置。

接触力的法向分量为：

$$F_{c,n}(d_f) = a_f [k_1(d_0 - d_f) - k_2 \dot{d}_f] n_{bf} \dots\dots\dots (3.11)$$

式中， $k_1$ 为弹性系数， $k_2$ 为阻尼系数， $a_f$ 为接触面积， $d_f$ 为接触面中心到边界的距离， $\dot{d}_f$ 为接触面中心到边界的变化率， $d_0$ 为有效范围， $n_{bf}$ 为接触面之间的法向向量。

接触力具有弹性项和阻尼项，分别由弹性系数 $k_1$ 和阻尼系数 $k_2$ 确定。弹性系数 $k_1$ 对在接触之前停止刚体至关重要，计算如下：

$$k_1 = \frac{m_u m_d}{m_u + m_d} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{v_{n,rel}^2}{(d_0 - d_{min})^2} \dots\dots\dots (3.12)$$

式中， $m_u, m_d$ 表示 AUV 和 SMFD 的质量， $A$ 为估计接触面积， $v_{n,rel}$ 为 AUV 与 SMFD 的法向相对冲击速度， $d_{min}$ 为最小距离，AUV 应该在达到此距离前停止。

阻尼系数 $k_2$ 计算如下：

$$k_2 = 2\zeta \sqrt{\frac{(m_u \cdot m_d)k_1}{(m_u + m_d)A}} \dots\dots\dots (3.13)$$

式中， $\zeta$ 为描述阻尼量的常数因子。一般情况下， $\zeta$ 应足够小( $\zeta \ll 1$ )，因为较大的 $\zeta$ 值与较大的时间步组合会导致数值不稳定。

接触面  $f$  上的接触力的切向分量为:

$$\mathbf{F}_{c,t} = -\mu |\mathbf{F}_{c,n}| \tanh(k_t \mathbf{v}_t) \dots \dots \dots (3.14)$$

式中,  $\mu$  为摩擦系数,  $k_t$  为 Tanh 系数,  $\mathbf{v}_t$  为相对于接触面的切向速度。Tanh 函数可在相对滑动速度较小时稳定摩擦力。

### 3.3.5 动态流体相互作用

DFBI 运动已被广泛应用于解决与刚体运动相关的问题, 包括水下应用<sup>[123]</sup>和水面的跨介质运动<sup>[118]</sup>。发生接触后, AUV 和 SMFD 的速度、角速度和加速度均会发生变化。DFBI 求解器可以计算刚体作用中产生的力和力矩, 并求解运动控制方程, 从而确定 AUV 和 SMFD 的瞬时位置。受力情况如图 3.2 所示, 采用 DFBI 的旋转和平移方法解决 SMFD 和 AUV 的六自由度 (Six Degrees of Freedom, 6-DOF) 问题, 运动坐标系  $D - x_d y_d z_d$  和  $U - x_u y_u z_u$  的原点分别位于 SMFD 和 AUV 的质心。

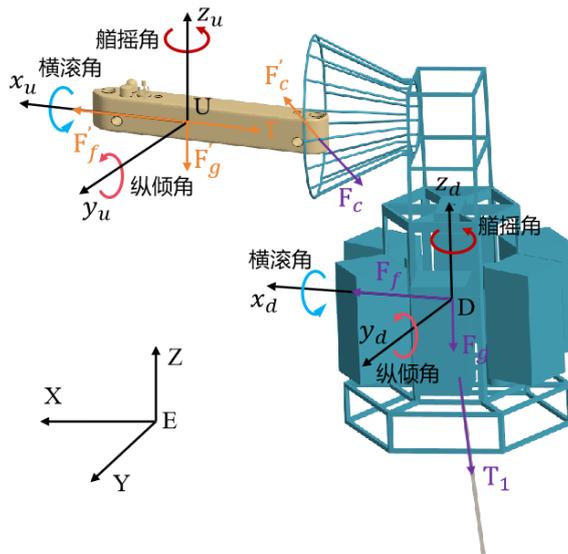


图 3.2 AUV 和 SMFD 的 6-DOF

SMFD 和 AUV 均采用自由运动方式, 以 SMFD 为例, 对体质心的平移和旋转方程进行求解。质心的平移方程根据全局惯性坐标系设定:

$$m_d \frac{dv}{dt} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_f + \mathbf{T}_1 + \mathbf{F}_c \dots \dots \dots (3.15)$$

式中,  $m_d$  为 SMFD 的质量,  $\mathbf{F}_g$  为重力,  $\mathbf{F}_f$  为流体力,  $\mathbf{T}_1$  为悬链线拉力,  $\mathbf{F}_c$  为接触力,  $\mathbf{v}$  为 SMFD 质心的速度。

对于 1-DOF 的平移运动, 当位移接近指定的限制时, 会应用破坏体的动能的阻尼

力，直至达到限制位置。阻尼力由以下公式给出：

$$f_d = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{m_d v^2}{d - d_{min}}, & d_{min} < d < d_{min} + \lambda \\ \frac{1}{2} \frac{m_d v^2}{d_{max} - d}, & d_{max} - \lambda < d < d_{max} \end{cases} \dots\dots\dots(3.16)$$

式中， $\lambda$ 为指定的阻尼长度。为了产生更真实的停止过程，将逐步应用阻尼力。

而且，SMFD 的旋转方程根据体局部坐标系（原点为体质心）为：

$$\mathbf{M} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_T + \mathbf{M}_c \dots\dots\dots(3.17)$$

式中， $\mathbf{M}$ 为惯性张量， $\boldsymbol{\omega}$ 为 SMFD 角速度， $\mathbf{M}_f$ 为作用于 SMFD 的流体力矩， $\mathbf{M}_T$ 为悬链线力矩， $\mathbf{M}_c$ 为接触力矩。

对于 1-DOF 的旋转运动，当旋转角度接近指定的限制时，会应用破坏体的旋转能量的阻尼力矩，直至达到限制角度。阻尼力矩由以下公式给出：

$$n_d = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{M \omega^2}{\alpha - \alpha_{min}}, & \alpha_{min} < \alpha < \alpha_{min} + \lambda \\ -\frac{1}{2} \frac{M \omega^2}{\alpha_{max} - \alpha}, & \alpha_{max} - \lambda < \alpha < \alpha_{max} \end{cases} \dots\dots\dots(3.18)$$

式中， $\lambda$ 为指定的阻尼长度。为了产生更真实的停止过程，将逐步应用阻尼力矩。

AUV 的运动方程与 SMFD 的运动方程相似。其中，外力中的悬链线拉力 $\mathbf{T}_1$ 被 $\mathbf{T}$ 替换， $\mathbf{T}$ 是作用于 AUV 的主推力。外力矩类似。具体如下：

$$\begin{cases} m_u \frac{dv'}{dt} = \mathbf{F}'_g + \mathbf{F}'_f + \mathbf{T} + \mathbf{F}'_c \\ \mathbf{M}_u \frac{d\boldsymbol{\omega}'}{dt} + \boldsymbol{\omega}' \times \mathbf{M}_u \boldsymbol{\omega}' = \mathbf{M}'_f + \mathbf{M}'_T + \mathbf{M}'_c \end{cases} \dots\dots\dots(3.19)$$

式中， $\mathbf{M}_u$ 为惯性张量， $\mathbf{v}'$ 为 AUV 质心的速度， $\boldsymbol{\omega}'$ 为角速度。

### 3.4 AUV 入坞仿真模型及验证

在本节中，我们介绍了 SMFD 水动力模型、AUV 入坞 SMFD 的接触计算模型（CCNM-AUV），详细说明了结构参数、边界条件和动力学参数。建立模型后，进行网格划分，评估网格独立性，并与实验结果进行了比较，验证了数值模型的准确性。

#### 3.4.1 AUV 入坞仿真模型

AUV 与 SMFD 的计算模型如图 3.3 所示，其中，图 3.3 (a)为计算域空间的设置，模拟水下流体环境。根据水动力文献<sup>[124,125]</sup>，海底的边界条件定义为壁面，整个六面体

计算域设为 $25D_0 \times 20D_0 \times 11D_0$ ，SMFD 体距离速度入口 $10D_0$ ， $D_0 = 2.75 \text{ m}$  为悬浮体两个对边的距离。在图 3.3 (b)中，SMFD 包括导向罩、悬浮体和系泊链三部分，导向罩与悬浮体刚性连接形成一个整体结构，通过柔性系泊链锚定在海底。系泊链的长度保持不变，锚点距离海底的高度设为  $0.5 \text{ m}$ 。SMFD 模型的初始配置参数见表 3.1，在下面讨论的不同模拟情况中，将对参数进行相应的调整。图 3.3 (c)中 AUV 和接触耦合的初始配置参数分别在表 3.2 和表 3.3 中描述。模型采用对称结构设计，利用导向罩的锥形导流功能，可以使锥形入口与水流方向一致，有助于 AUV 入坞过程的稳定航行。值得一提的是，SMFD 和 AUV 的结构参数，考虑具体的设计要求和材料属性，由三维计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）软件 SolidWorks 设计获得。

表 3.1 SMFD 模型的初始配置

参数	符号	值
锥形入口有效直径	$\phi$	1.85 m
锥形入口开角	$\theta$	$51^\circ$
整体尺寸	$D_D$	$2.886 \times 2.674 \times 4.678$ (含 $l = 3.1$ ) m
质量	$m_d$	2800 kg
体积	$V_D$	$3.55 \text{ m}^3$
转动惯量主分量	$M_I$	[2000 2000 1800] $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
悬链线长度	$L_{eq}$	3.1 m
悬链线单位长度质量	$\lambda_0$	1.4 kg/m
悬链线刚度	$D$	6482580 N/m
流速	$v_f$	0.5 m/s

DFBI 旋转和平移运动涉及 SMFD 和 AUV 两个 6-DOF 连续体，二者均为自由运动方式。为了确保 AUV 能够以相同的对地速度到达锥形入口范围，并在接触后具备继续航行的动力来源，根据不同的流速，为 AUV 施加适当的主推力。其次，体耦合包含悬链线耦合和接触耦合两部分。悬链线选用预紧模式。接触耦合采用形心—形心的接触方法，有效范围为  $0.001 \text{ m}$ 。

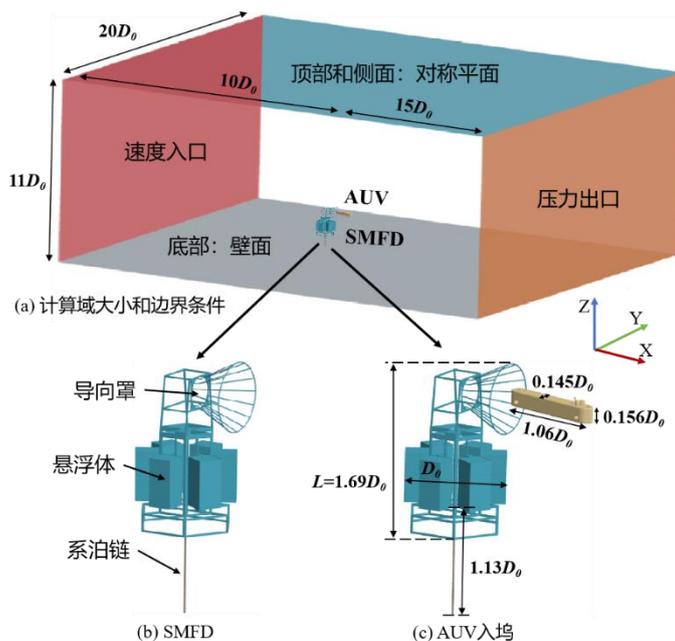


图 3.3 计算模型的结构参数

表 3.2 AUV 模型的初始配置

参数	符号	值
整体尺寸	$D_U$	$2.925 \times 0.4 \times 0.43$ m
质量	$m_u$	350 kg
体积	$V_U$	$0.56$ m <sup>3</sup>
转动惯量主分量	$M_i$	[14 227 230] kg · m <sup>2</sup>
初始速度	$v_u$	[0.6 0 0] m/s
水平方向偏角	$\Delta\alpha$	15°
竖直方向偏角	$\Delta\beta$	0°
水平方向偏移	$\Delta d_y$	0.777 m
竖直方向偏移	$\Delta d_z$	0

表 3.3 接触耦合的初始配置

参数	符号	值
弹性系数	$k_1$	$1.512 \times 10^{11}$ Pa/m
阻尼系数	$k_2$	7609 Pa · s/m
动摩擦系数	$\mu$	0.05

### 3.4.2 重叠网格划分

重叠网格技术<sup>[123]</sup>用于生成运动部件的网格，计算域被划分为多个重叠的子网格，其中围绕组件的子网格与对象一起移动。而且，在 SMFD 和 AUV 的流体域和固体域之间创建重叠网格界面。如图 3.4 所示，采用切割体网格来划分流场，在背景区域和重叠区域之间进行了体积控制，以生成不同网格大小的平滑过渡区，并对导向罩接触区域进行体积加密控制。为了提高边界处的求解精度，对 SMFD 和 AUV 重建表面网格，并对边界层进行划分，以满足湍流模型的要求。在图 3.4 (b)中，SMFD 和 AUV 的固体域网格都保持了其几何性质和表面光滑性。另外，导向罩与 AUV 艏部表面之间的边界层网格应相互匹配，根据 AUV 速度和网格尺寸调整时间步长，以满足接触耦合的求解要求，并避免在计算中网格的活动状态和非活动状态之间的误差。

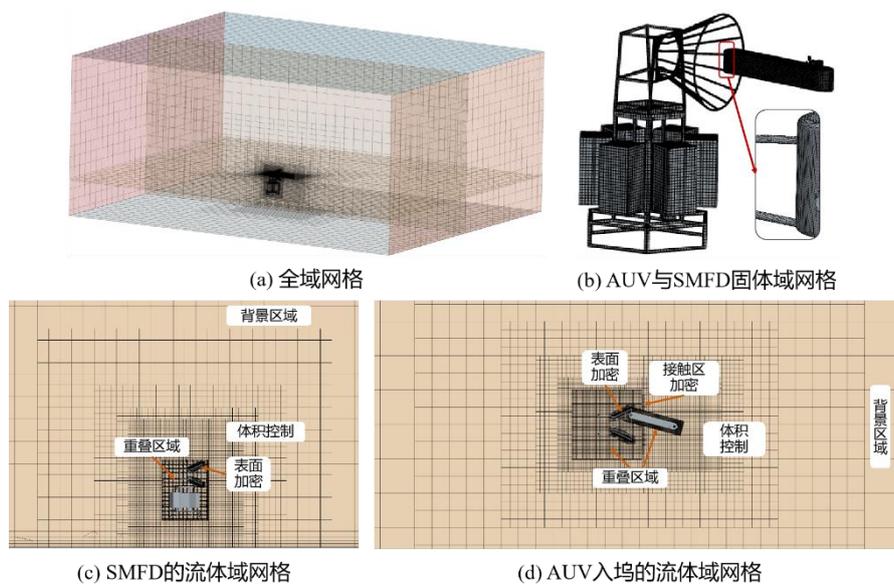


图 3.4 网格生成

表 3.4 网格独立性试验

网格(百万)	SMFD 俯仰角(°)	相对误差(%)	网格数(百万)	接触力(N)	相对误差(%)
2.73	6.11	7.86	2.62	35467	8.57
2.93	5.63	1.78	3.07	34715	6.59
3.60	5.53	0.36	4.27	32428	-2.65
4.29	5.51	0.18	4.88	33286	-0.90
4.53	5.50		6.96	33584	

为了避免边界层网格密度和网格重叠过渡区域对计算结果的影响，在研究前进行了网格独立性试验<sup>[126]</sup>，仿真结果见表 3.4。其中，相对误差是相邻大网格和小网格数量对应的物理量的相对变化。考虑结果的准确性，避免计算资源的浪费，SMFD 姿态和 AUV 入坞的网格数量分别选择了 293 万和 427 万，相对误差在 3% 以内。

### 3.4.3 仿真模型验证

STAR-CCM+在模拟刚体静力和 DFBI 运动方面的准确性已被大量的研究验证，包括 AUV 的水动力特性、无人船拖曳、浮标动力学和跨介质入水的子弹。在这种情况下，为了验证 AUV 入坞的数值模型，我们根据先前海上 AUV 入坞试验的场景，在 STAR-CCM+中构建了相似的数值模型。如图 3.5 (a)所示，在试验中，为了便于实施布放等操作，接驳坞简化为仅包含导向罩部分，并配备有三维电子罗盘、VA500 高度计、电子舱和电池舱。利用坞站的四个角作为吊点，使用吊车和吊带将接驳坞布放在水下 2 m 深度处悬挂，AUV 被声学导引入坞。通过一根 60 m 的电缆，可以从陆上监测单元观察到接驳坞的姿态和深度信息。在图 3.5 (b)中，接驳坞和 AUV 的模型参数与实际试验中的结构参数保持一致，吊带由 4 根悬链线来模拟，根据试验观察到的 AUV 入坞方向和接触位置，数值模拟再现了一个相似的接触条件。

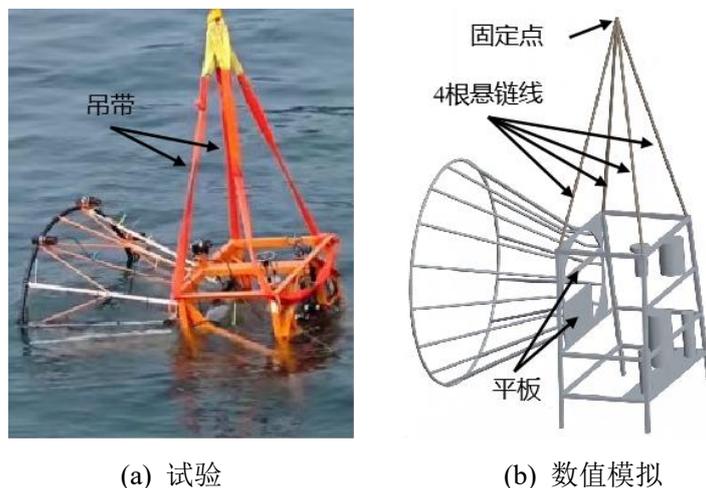


图 3.5 试验与数值模拟的接驳坞状态

为了验证 AUV 入坞过程的数值仿真结果，根据文献<sup>[99]</sup>，将 AUV 轴向速度和接驳坞艏摇角的仿真结果与试验数据进行了对比，相关数据如图 3.6 所示。数值仿真结果准确反映了 AUV 入坞过程中的关键运动特性，尽管由于模型和初始条件（如速度幅值）的差异，使对比结果存在一些细微差异。首先，图 3.6 (a)显示了 AUV 轴向速度的

仿真结果与试验结果之间具有较高的一致性。仿真中的接触发生时间与试验数据相符，接触分别发生在 0 s、0.25 s 和 1.75 s。在这些接触时间点上，仿真和试验结果均显示出 AUV 速度的突然下降，但仿真速度略低于试验值（例如，在第一次接触时，仿真速度为 1.12 m/s，而试验值为 1.2 m/s）。在整个入坞过程中，速度差值始终保持在 0.1 m/s 以内，表明仿真捕捉 AUV 速度变化趋势的有效性。此外，第三次接触（AUV 接触平板）标志着 AUV 入坞完成，之后 AUV 速度逐渐降至 0。其次，图 3.6 (b) 比较了接驳坞艏摇角的仿真结果和试验结果，两者的振幅变化一致，均稳定在约 4.3°，差值在 0.8° 以内，进一步验证了仿真模型的有效性。仿真结果显示，在 4.3 s 之前艏摇角呈线性变化，而试验数据在 1.75 s 附近出现波动，这可能是由于试验过程中人工操作导致吊带不均匀引起的，而仿真中则采用了均匀的悬链线设置来替代吊带。综上所述，该仿真模型有效地捕捉了 AUV 和接驳坞的关键运动特性，验证了数值仿真的有效性，尽管模型简化和初始条件设置导致了微小差异。

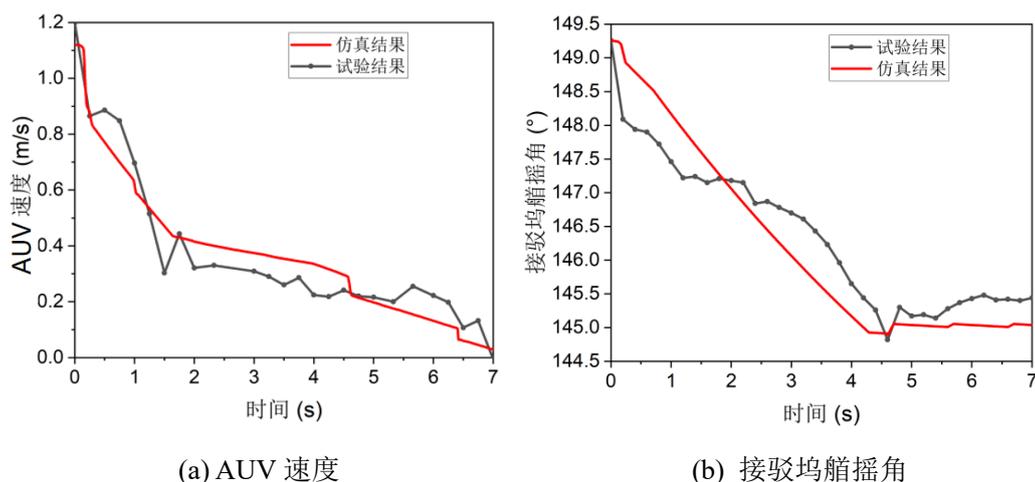


图 3.6 仿真结果与试验结果的比较

### 3.5 AUV 入坞悬浮坞仿真结果及优化设计

本节对 SMFD 姿态稳定和 AUV 入坞过程的数值仿真结果进行了分析与讨论，包括 SMFD 的俯仰角，SMFD 开口相对于水流的方向角度，以及入坞过程中的运动响应。首先，分析了影响 SMFD 姿态的关键参数，包括质量和悬链线刚度，并讨论了其影响规律。其次，研究了入坞过程中的接触行为。第三，探讨了 SMFD 的设计参数，如体积、转动惯量、质量和悬链线刚度对 AUV 入坞过程的影响，并评估了它们对入坞效率、准确度、稳定性和安全性的影响。根据单一变量原则，在参数变化过程中，只有

体积的变化会改变悬浮体的物理形状，而转动惯量、质量和悬链线刚度在仿真中被视为参数变量。最后，讨论了 SMFD 的动态特性，为悬浮式接驳坞的设计优化提供了参考建议。表 3.5 列出了评价指标及其定义，以清楚呈现数值仿真结果。

表 3.5 评价指标符号表

类别	评价指标	符号
SMFD 的姿态	SMFD 水阻力	$F_{fx}$
	SMFD 俯仰角	$\psi_D$
	SMFD 艏摇角	$\varphi_D$
	SMFD 质心的水平位移	$x_D$
	SMFD 质心的竖直位移	$z_D$
	入口有效面积占比	$P_{er}$
	平衡时间	$t_{sta}$
AUV 入坞过程中 的运动响应	入坞时间	$t_{suc}$
	AUV 轴线和导向罩轴线的水平方向夹角	$\gamma$
	首次接触力	$F_{first}$
	最大接触力	$F_{max}$
	接触次数	$\chi$
	SMFD 最大俯仰角	$\psi_{Dmax}$
	SMFD 横滚角	$\vartheta_D$
	AUV 艏摇角	$\varphi_U$
	AUV x 轴方向速度	$v_x$
	AUV y 轴方向速度	$v_y$
AUV z 轴方向角速度	$w_z$	

### 3.5.1 悬浮坞姿态稳定性分析

在姿态稳定性方面，在水流作用下 SMFD 的倾角需要保持在特定的范围内，以满足 AUV 的入坞需求。SMFD 的姿态影响着 AUV 的入坞深度、有效入口区域及其航向。本节分析了两个关键参数，即 SMFD 质量和悬链线刚度。

(1) 质量的影响

在体积一定的条件下，SMFD 的质量对净浮力的大小具有显著影响。表 3.6 显示了不同质量下的 SMFD 平均净浮力，与理论预测一致。如图 3.7 (a)所示， $F_{fx}$ 的变化趋势符合经验计算公式 $F_f = \frac{1}{2}\rho B v_f^2 C_d$ 。图 3.7 (b)显示在水流作用下， $x_D$ 较大，最大值为 1.536 m，相比之下， $z_D$ 最大值为 0.33 m。为了避免 AUV 在入坞过程中与海底发生碰撞，AUV 应保持离海底至少 3.5 m 的安全高度，而导向罩中轴线的高度为 4.2 m。考虑到安全系数为 1.4， $z_D$ 应保持在 0.5 m 以下，满足 AUV 的安全标准。在图 3.7 (c)中，恒定流速条件下，较大的质量会导致 $\psi_D$ 增加，特别是当质量大于 2100 kg 时，变化更加显著。在流速为 1 m/s，质量为 2800 kg 时， $\psi_D$ 达到最大值 20.6°，使得 $P_{er}$ 降至 87.59%，减小了 AUV 进入导向罩的入口有效空间。

表 3.6 不同质量条件下 SMFD 净浮力的仿真结果

$m_d$ (kg)	平均净浮力 (N)
2800	7119
2100	14029
1400	20918

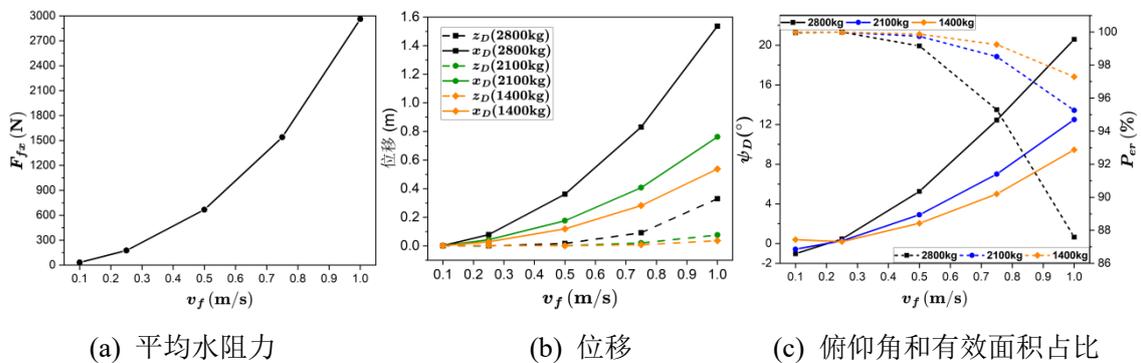
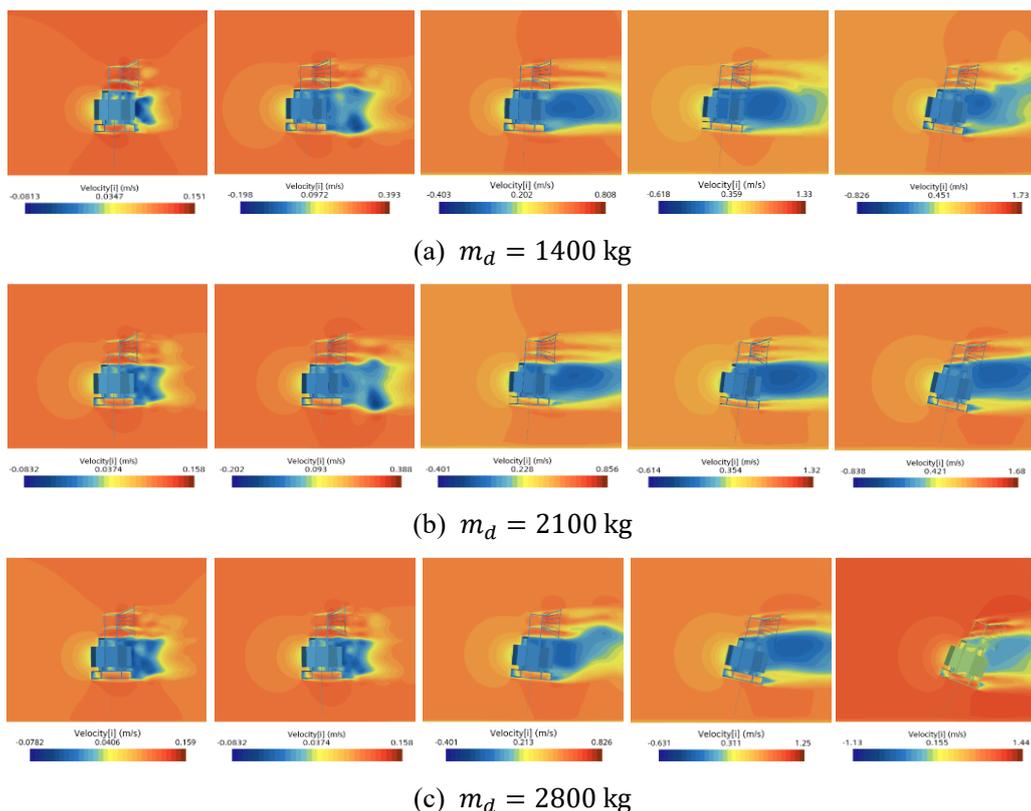


图 3.7 不同质量条件下 SMFD 姿态的仿真结果

图 3.8 展示了 SMFD 在不同流速条件下达到平衡稳定姿态时的速度云图，清晰显示了 SMFD 倾斜程度的加剧。为了确保稳定性， $\psi_D$ 应被控制在 10°内。为了提高 SMFD 抗水流的能力并减少其倾斜，建议增加净浮力，这可以通过使用低密度的材料来实现。

SMFD 的质量对 $\varphi_D$ 的影响较小。表 3.7 列出了不同流速下的 $\varphi_D$ 。随着流速的增加， $\varphi_D$ 逐渐减小，提高了顺流性能。当流速低于 0.25 m/s 时， $\varphi_D$ 会出现振荡而无法收敛。为解决这一问题，有必要采用稳定翼片或类似的设计，以促进 $\varphi_D$ 的收敛并减小其幅度。



$v_f = 0.1 \text{ m/s}$     $v_f = 0.25 \text{ m/s}$     $v_f = 0.5 \text{ m/s}$     $v_f = 0.75 \text{ m/s}$     $v_f = 1 \text{ m/s}$

图 3.8 不同流速不同质量条件下 SMFD 姿态的速度云图

表 3.7 不同流速条件下 SMFD 艏摇角的仿真结果

$v_f \text{ (m/s)}$	$\varphi_D \text{ (}^\circ\text{)}$
0.25	-3.5 至 4.6 间振荡
0.5	-8.5
0.75	-8.2
1	-1.1

### (2) 悬链线刚度的影响

由于净浮力的作用，悬链线处于拉直状态。如图 3.9 所示，由于流体动力阻尼的存在，SMFD 在垂直方向和水平方向呈现出振荡、衰减和稳定的运动特性，并最终达到平衡状态。仿真结果表明，悬链线刚度对 SMFD 的最终姿态没有影响，但会影响  $t_{sta}$ （SMFD 由振荡到稳定所需的时间）。如图 3.10 所示， $t_{sta}$  与悬链线刚度呈正比关系。因此，在满足强度要求的情况下，选择刚度较低的系泊链有利于 SMFD 更快地达到稳定状态。

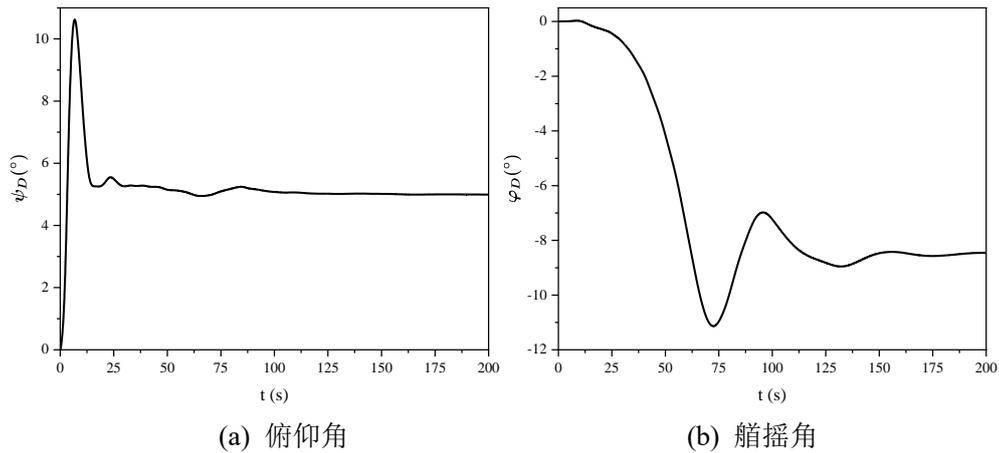


图 3.9 SMFD 的姿态（刚度 6482580 N/m、质量 2800 kg、流速 0.5 m/s）

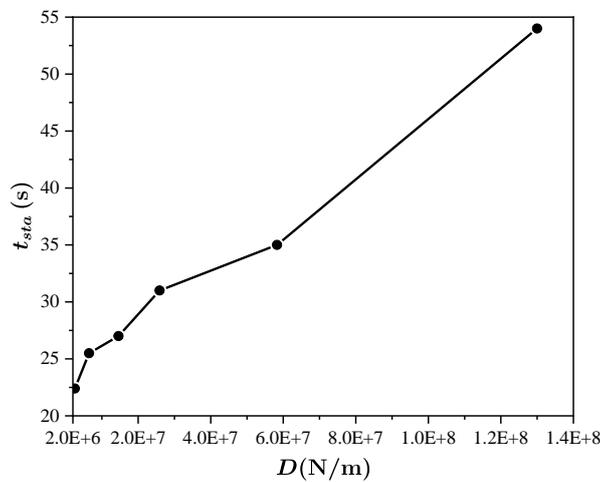


图 3.10 SMFD 姿态平衡时间随悬链线刚度的变化

### 3.5.2 AUV 入坞悬浮坞运动响应分析

碰撞通常是指两个相对运动的物体发生接触并迅速改变运动状态的现象。在入坞过程中，AUV 与导向罩之间的接触作用对 AUV 运动的被动调整至关重要，这是在末端实现成功入坞的关键因素。AUV 采用固定深度/高度的航行入坞策略，并配备高精度传感器（如测高仪），从而控制了垂直方向的位置偏差。因此，可以假设 AUV 的深度与导向罩中轴线的深度相同，重点分析 AUV 在水平面内的入坞过程。为了研究 AUV 入坞操作中的接触过程，基于文献<sup>[99]</sup>中的仿真结果以及我们的现场测试经验，将水平位置偏差和水平姿态偏差分别设定为 0.777 m 和 15°，如图 3.11 所示。我们将 AUV 艏部的垂直通道进入 SMFD 的入口定义为入坞成功。

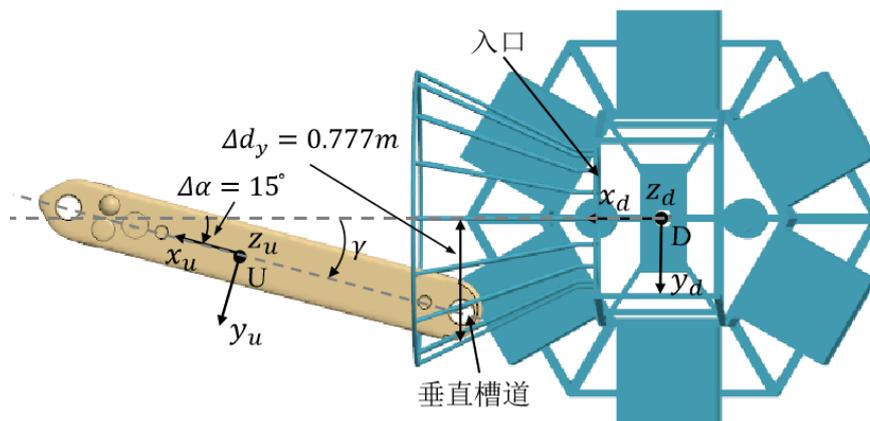


图 3.11 水平面上存在位置和姿态偏差的 AUV 入坞图

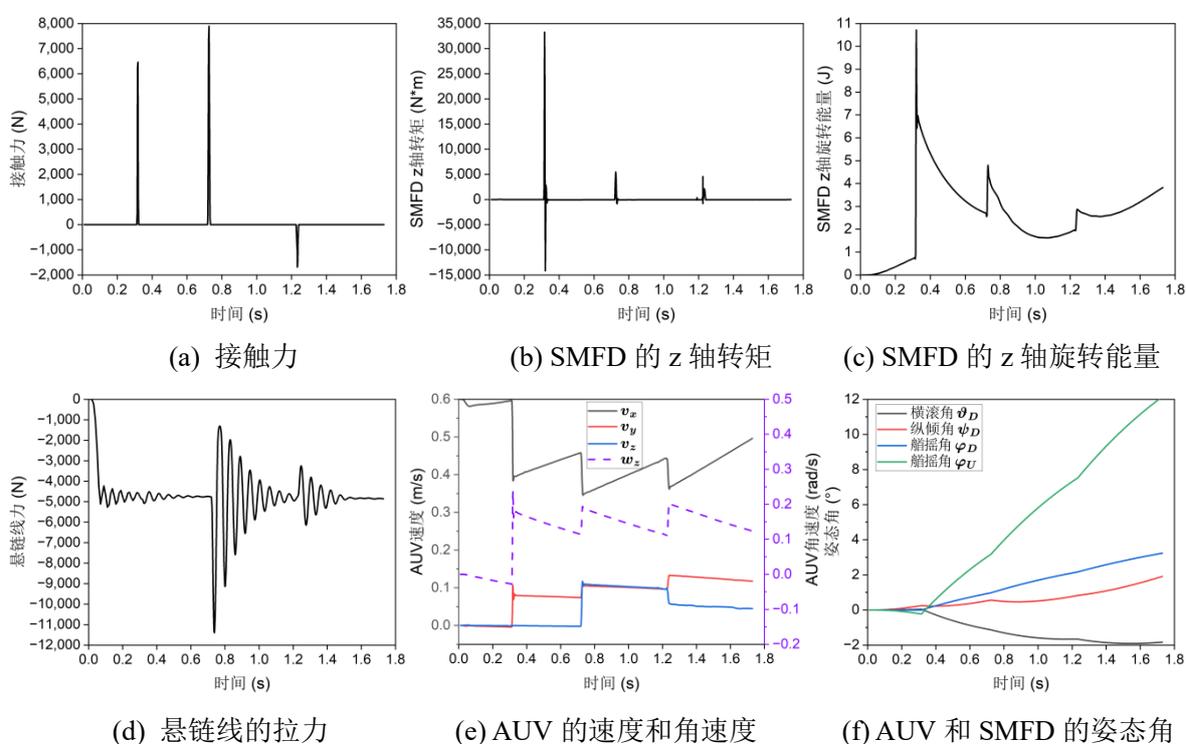


图 3.12 AUV 入坞过程中的接触效果和运动学参数

接触可靠性在于 SMFD 的稳定性以及入坞过程中的 AUV 运动调整。图 3.12 展示了 AUV 入坞过程中的接触力与运动学参数。7894 N 的  $F_{max}$  并不总是出现在第一次接触处，但初次接触产生主要的转矩和旋转能量，从而改变 SMFD 和 AUV 的运动。每次接触都会使悬链线拉力产生波动，并最终稳定在 -4800 N。接触力会导致 AUV 速度和角速度的突变，其中轴向速度  $v_x$  降低，而横向速度  $v_y$  和  $v_z$  的幅值较小。角速度  $w_z$  的幅值始终保持较小，并由于水流的阻尼效应进一步减小。从图 3.12 (a) 和图 3.13 (a) 可以看出，AUV 分别在 0.324 s、0.724 s 和 1.231 s 与导向罩发生接触。从图中可以直观

地看到，接触后 AUV 的转向较小，这表明  $w_z$  较小，而  $v_x$  较大，导致二次接触。这是由于 SMFD 的柔性结构能够吸收接触冲击，降低了  $w_z$  和接触力，同时损失了动能。与固定式接驳坞相比，SMFD 的接触次数增加。如图 3.12 (f) 和图 3.13 所示，SMFD 的姿态角逐渐增大，有助于导向罩与 AUV 的对准，而  $\varphi_D$  的变化小于  $\varphi_U$ ，能够提供足够的反作用力和转矩。

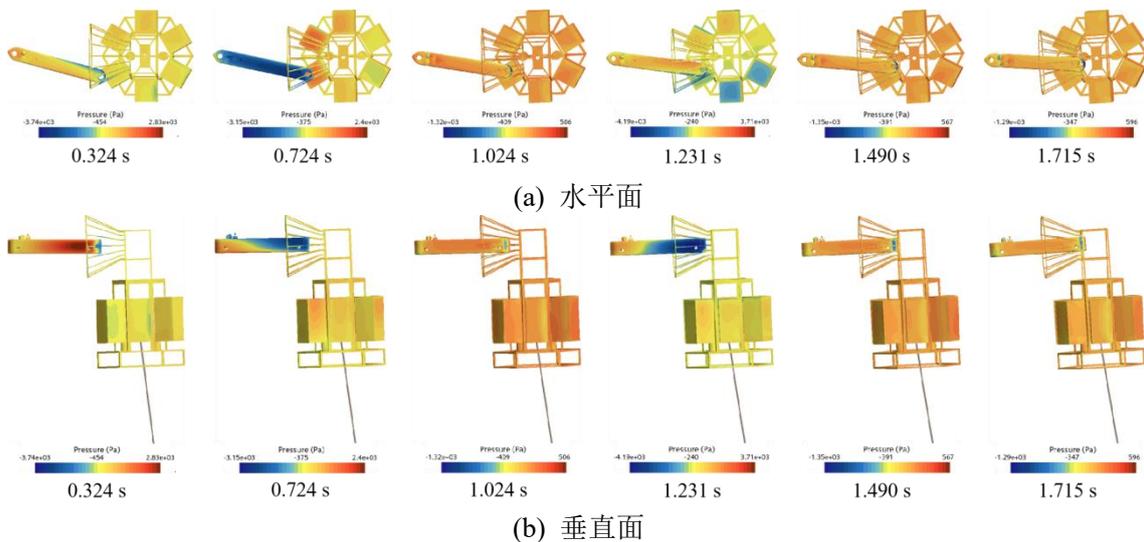


图 3.13 AUV 入坞过程的压力图

因此，在 AUV 入坞过程中，SMFD 会在流体作用下保持稳定的姿态。如图 3.13 所示，AUV 通过多次轻微接触而调整方向，提升了 AUV 航行的稳定性和安全性。SMFD 的柔性系泊结构有效减小了接触力的幅值，降低了损坏的风险。此外，当 AUV 因姿态不正确而卡住在入口时，可以通过增加螺旋桨推力使 SMFD 旋转，从而修正各自的姿态角，促进入坞。

### 3.5.3 悬浮坞设计参数影响分析

单链系泊方法提高了接驳坞的灵活性，但需要仔细考虑，设计应确保能够为 AUV 提供足够的转向调整，同时保持适当的柔性，以避免造成过多的接触或入坞失败<sup>[127]</sup>。本节将深入探讨以下四个关键参数对 AUV 入坞过程的具体影响：体积、转动惯量、质量以及悬链线刚度。

在本节中，我们采用五个指标来评估入坞过程，详见表 3.5。入坞效率通过入坞时间  $t_{suc}$  来量化，时间越短表示效率越高。准确度由导向罩中轴线与 AUV 中轴线之间的水平夹角  $\gamma$  表示，夹角越小表示准确度越高。安全性则体现在对 AUV 及接驳坞的保护

上, 主要关注最大接触力 $F_{max}$ 和 AUV 振荡运动带来的潜在损伤。SMFD 的稳定性通过其最大俯仰角 $\psi_{Dmax}$ 和艏摇角 $\varphi_D$ 来评估, 角度越小表明稳定性越高。此外, AUV 运动的稳定性定义为其艏摇角 $\varphi_U$ 和角速度 $w_z$ 保持在合理范围内且无显著波动。

### (1) 体积因素

如表 3.8 显示, SMFD 的体积对入坞效率、准确度和稳定性有显著影响。随着 $V_D$ 的增加,  $\gamma$ 、 $\chi$ 、 $\varphi_D$ 和 $\psi_{Dmax}$ 都减少, 提高了入坞准确度和 SMFD 的稳定性。在体积为 $1.775 \text{ m}^3$ 和 $3.55 \text{ m}^3$ 时,  $t_{suc}$ 较小, 有助于提高入坞效率。体积大于 $1.775 \text{ m}^3$ 时,  $\varphi_U$ 先下降, 随后开始增加。然而, 增加的接触力加大了 AUV 损坏的风险。特别地, 在 $14.2 \text{ m}^3$ 时, 接触力导致 $\varphi_U$ 最大, 从而产生 $\gamma$ 的负值, 表示方向发生变化, 这不利于 AUV 的航行稳定性。综合考虑,  $3.55 \text{ m}^3$ 和 $7.1 \text{ m}^3$  (表 3.8 中加粗部分) 为较佳的候选体积, 能够平衡入坞效率和准确度。

表 3.8 不同体积条件下 AUV 入坞的仿真结果

$V_D$ ( $\text{m}^3$ )	$t_{suc}$ (s)	$\gamma$ ( $^\circ$ )	$F_{first}$ (N)	$\chi$	$F_{max}$ (N)	$\varphi_D$ ( $^\circ$ )	$\psi_{Dmax}$ ( $^\circ$ )	$\varphi_U$ ( $^\circ$ )
0.175	3.110	12.62	5746	4	6463	13.13	7.12	15.51
0.888	2.327	10.69	6918	4	6918	8.82	2.82	13.13
1.775	1.686	7.97	7091	4	7091	3.78	2.18	10.81
<b>3.550</b>	<b>1.698</b>	<b>6.51</b>	<b>7110</b>	<b>3</b>	<b>7417</b>	<b>3.11</b>	<b>1.95</b>	<b>11.60</b>
<b>7.100</b>	<b>1.750</b>	<b>4.78</b>	<b>7847</b>	<b>2</b>	<b>7847</b>	<b>1.55</b>	<b>0.48</b>	<b>11.77</b>
14.200	1.804	-3.74	9035	2	11402	0.65	-0.36	19.39

### (2) 转动惯量因素

由表 3.9 可知, 较大的 SMFD 转动惯量有助于提高入坞准确度和稳定性, 但降低了安全性。随着 $M_I$ 的增加, SMFD 的柔性减小,  $\varphi_D$ 的减小也验证了这一点。转动惯量为 $[200, 200, 180] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时, 与 AUV 的转动惯量相当, 产生较小的 $t_{suc}$ 和接触力。然而, 这也导致了较大的 $\gamma$ 和 $\varphi_D$ 。值得注意的是, 当转动惯量为 $[5000, 5000, 4500] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时, 发生在入口附近位置处的接触有助于快速调整 AUV 航向, 但也导致了 $F_{max}$ 的突增, 增加安全隐患。相比之下, 转动惯量为 $[2000, 2000, 1800] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 和 $[3000, 3000, 2700] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  (表 3.9 中加粗部分) 时, 表现出较优的入坞性能, 平衡准确度、安全和效率。

表 3.9 不同转动惯量条件下 AUV 入坞的仿真结果

$M_I$ (kg·m <sup>2</sup> )	$t_{suc}$ (s)	$\gamma$ (°)	$F_{first}$ (N)	$\chi$	$F_{max}$ (N)	$\varphi_D$ (°)	$\psi_{Dmax}$ (°)	$\varphi_U$ (°)
[200 200 180]	1.650	10.68	5456	4	5456	9.87	2.88	14.19
[1000 1000 900]	1.835	7.45	7168	4	8852	3.96	2.12	11.51
<b>[2000 2000 1800]</b>	<b>1.698</b>	<b>6.51</b>	<b>7110</b>	<b>3</b>	<b>7417</b>	<b>3.11</b>	<b>1.95</b>	<b>11.60</b>
<b>[3000 3000 2700]</b>	<b>1.682</b>	<b>5.59</b>	<b>7679</b>	<b>3</b>	<b>7679</b>	<b>2.76</b>	<b>1.86</b>	<b>12.17</b>
[5000 5000 4500]	1.731	5.25	8147	5	11482	2.28	1.44	12.03
[8000 8000 7200]	1.768	3.82	7932	3	10663	1.88	1.17	13.06

### (3) 质量因素

如表 3.10 所示，质量主要影响 SMFD 的入坞效率和稳定性。随着 $m_d$ 的增加， $t_{suc}$ 和 $\psi_{Dmax}$ 先减小后增加， $\gamma$ 、 $F_{first}$ 、 $\chi$ 、 $F_{max}$ 、 $\varphi_D$ 和 $\varphi_U$ 的变化较小。质量为 3150 kg 时，SMFD 会向相反方向倾斜，表现为负值的 $\psi_{Dmax}$ 。在质量为 280 kg 和 3550 kg 时，接触力较小，使 AUV 的航向调整角度小， $\chi$ 较多，从而改善了入坞稳定性，但可能会降低效率。总体而言，质量为 2800 kg（表 3.10 中加粗部分）时表现出稳定和良好的性能，质量为 1400 kg 和 2030 kg 时也具有一定的入坞效果。

表 3.10 不同质量条件下 AUV 入坞的仿真结果

$m_d$ (kg)	$t_{suc}$ (s)	$\gamma$ (°)	$F_{first}$ (N)	$\chi$	$F_{max}$ (N)	$\varphi_D$ (°)	$\psi_{Dmax}$ (°)	$\varphi_U$ (°)
280	2.171	5.69	6565	4	6565	3.47	4.77	12.78
1400	1.776	5.35	7465	4	7465	3.14	4.78	12.79
2030	1.742	5.88	7242	3	8830	3.09	4.28	12.21
<b>2800</b>	<b>1.698</b>	<b>6.51</b>	<b>7110</b>	<b>3</b>	<b>7417</b>	<b>3.11</b>	<b>1.95</b>	<b>11.60</b>
3150	1.745	6.98	7029	3	8515	3.24	-0.34	11.26
3550	1.840	7.51	6530	4	6873	3.37	-3.68	10.86

### (4) 悬链线刚度因素

如表 3.11 所示，随着 $D$ 的增加， $F_{first}$ 整体呈增加趋势，而 $\psi_{Dmax}$ 则趋向于减少。其他指标未显示出明显的变化趋势。这是因为悬链线刚度体现系泊链的柔性，较高的刚度导致 SMFD 的柔性减小，例如在刚度为 $2.59 \times 10^8$  N/m 时， $\psi_{Dmax}$ 达到最小值为

1.37°。  $F_{first}$  为 7110 N，该值的增加与初始接触位置有关。考虑到实际应用需求，系泊链刚度为  $2.59 \times 10^7$  N/m 和  $5.83 \times 10^7$  N/m（表 3.11 中加粗部分）更为合适，有助于提高 SMFD 的柔性，并有效提供接触力以调整 AUV 航向。

表 3.11 不同悬链线刚度条件下 AUV 入坞的仿真结果

$D$ (N/m)	$t_{suc}$ (s)	$\gamma$ (°)	$F_{first}$ (N)	$\chi$	$F_{max}$ (N)	$\varphi_D$ (°)	$\psi_{Dmax}$ (°)	$\varphi_U$ (°)
$2.53 \times 10^6$	1.750	6.04	6534	3	7436	3.27	2.11	12.23
$6.48 \times 10^6$	1.698	6.51	7110	3	7417	3.11	1.95	11.60
<b><math>2.59 \times 10^7</math></b>	<b>1.689</b>	<b>6.68</b>	<b>6576</b>	<b>4</b>	<b>7602</b>	<b>3.07</b>	<b>1.86</b>	<b>11.39</b>
<b><math>5.83 \times 10^7</math></b>	<b>1.715</b>	<b>6.18</b>	<b>6466</b>	<b>3</b>	<b>7894</b>	<b>3.21</b>	<b>1.86</b>	<b>12.03</b>
$1.30 \times 10^8$	1.831	6.60	7021	3	7247	4.07	2.00	12.47
$2.59 \times 10^8$	1.740	6.42	7117	3	7794	3.24	1.37	11.82

### 3.5.4 悬浮坞优化设计

由前述分析可知，体积和转动惯量在 AUV 入坞过程中起着至关重要的作用，质量有助于提高入坞效率和 SMFD 的稳定性，而系泊链刚度的影响较小。在设计时主要有以下四种考虑情况：

- (1) 为了提高入坞效率，即减少  $t_{suc}$ ，应同时考虑体积和质量；
- (2) 为了提高入坞准确度，即减少  $\gamma$ ，需考虑体积和转动惯量。需要注意的是， $\gamma$  由  $\varphi_D$  和  $\varphi_U$  共同决定，需要平衡好这两个角度。 $\varphi_U$  增大意味着 AUV 的运动调整更为灵活，但如果过大，可能导致 AUV 与导向罩的对侧发生接触。相反， $\varphi_D$  增大则意味着 SMFD 的柔性更强，但也可能导致  $\gamma$  增加；
- (3) 为了减少  $F_{max}$ ，提升安全性，并保持必要的最小接触力来调整 AUV 航向<sup>[46]</sup>，需要同时考虑体积和转动惯量；
- (4) 为了减少  $\psi_{Dmax}$ ，提高 SMFD 的稳定性，必须考虑体积和质量。

设计参数的选择优化是一个综合考虑的权衡过程<sup>[94]</sup>，可以通过以下设计原则来确定：首先确定整体体积，然后分析质量和转动惯量对准确度和 SMFD 稳定性的影响，根据结构强度需求选择合适的系泊链刚度，最后完成设计优化。如表 3.12 所示，我们对参数进行了权衡选择，以实现最小化的入坞时间和减少 SMFD 的最大俯仰角，同时

允许最大接触力在可接受的范围内适度增加。此外，轴线夹角、接触次数、AUV 艏摇角以及悬浮坞艏摇角均维持在中等水平，以实现系统性能的均衡。为了方便操作，较小体积的 SMFD 有助于运输和布放，因此，选择体积为  $3.55 \text{ m}^3$  的设计。此外，转动惯量为  $[3000, 3000, 2700] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  的设计可以提高 SMFD 的稳定性，并增大 AUV 调整航向所需的接触力。

表 3.12 SMFD 设计参数的优化

$V_D$ ( $\text{m}^3$ )	$m_d$ (kg)	$M_I$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	系泊链	
			$m_l$ (kg)	$D$ (N/m)
3.55	2800	[3000, 3000, 2700]	5.7	$2.59 \times 10^7$

### 3.6 悬浮坞运动响应性能验证

为了评估 SMFD 的性能特征，我们建立了固定坞的数值模型，该模型参数与优化后的 SMFD 参数相同，并对不同操作条件下的 SMFD 和固定坞进行了 AUV 入坞的对比仿真研究。为了体现入坞过程中 AUV 的运动响应，增加了三个评价指标：AUV 速度  $v_x$ 、AUV 角速度  $w_z$ 、AUV 角速度平均值与 AUV 速度平均值的比值  $\bar{w}_z/\bar{v}_x$ 。

#### 3.6.1 位置偏差工况入坞

在入坞任务中，AUV 会采用定深/定高航行策略，而且高度计和深度传感器的高精度在厘米级。因此，本节主要关注水平位置偏差，即在水平对称面上，AUV 接触点与导向罩中心轴线在  $y$  方向上的距离  $\Delta d_y$ （见图 3.11）。图 3.14 和图 3.15 为 AUV 进入 SMFD 和固定坞的仿真结果数据。此外，图 3.16 展示了 AUV 入坞过程的运动状态。

如图 3.14 所示，除  $F_{max}$  外，所有指标均呈单调变化趋势。图 3.14 (a) 中，SMFD 的  $t_{suc}$  比固定坞小，是由于 SMFD 存在较小的俯仰角和横滚角变化，从而减少了入口与 AUV 间的距离。图 3.14 (b) 中，SMFD 的  $\gamma$  值高于固定坞，表明 SMFD 的准确度较低。结合图 3.14 (e)，固定坞的  $\gamma$  值较低，是由于 AUV 在进入固定坞过程中， $\varphi_U$  的变化较大。所以，尽管 SMFD 的准确度低于固定坞，但 AUV 进入 SMFD 时可以有较大的位置偏差。同时，图 3.14 (e) 中，SMFD 的艏摇角逐渐增加，达到  $4.36^\circ$ ，从而扩大了入坞空间 9.3%。图 3.14 (c) 中，在 0.577 m 时， $F_{max}$  受接触位置影响而显著减少，因为接触点位于 AUV 艏部的下方，而非侧方。图 3.14 (d) 显示，SMFD 的接触频率更高。

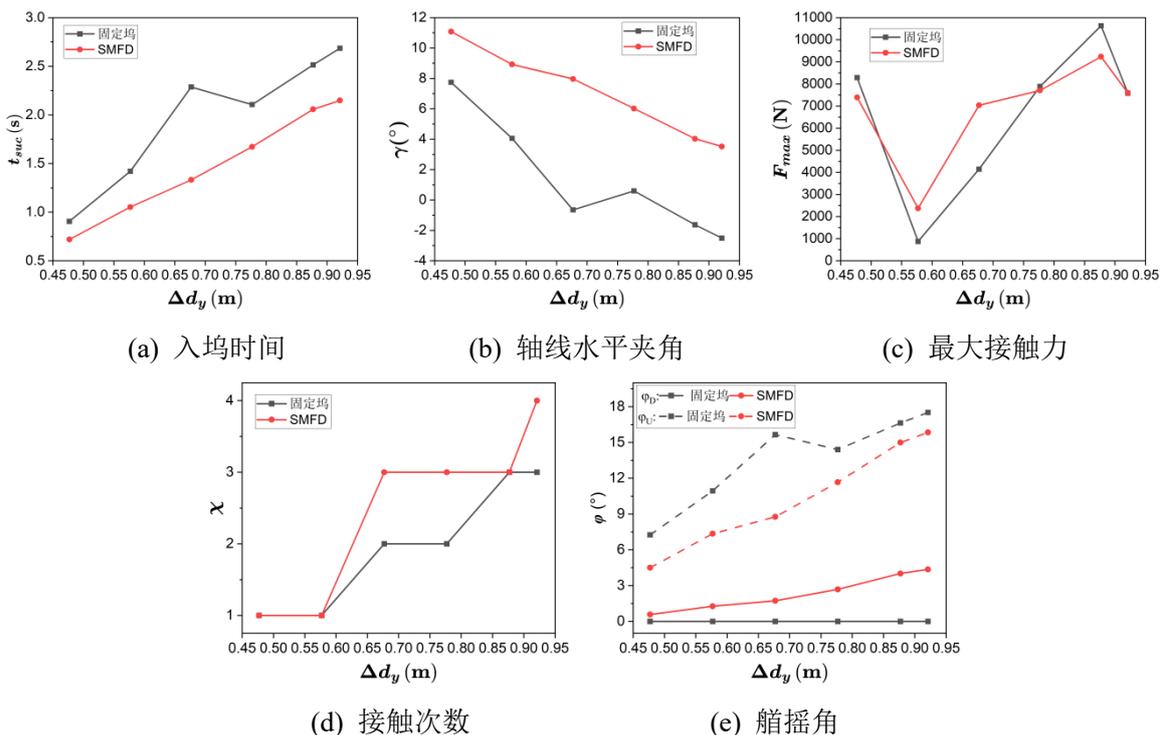


图 3.14 不同水平位置偏差下 AUV 入坞的对比仿真结果

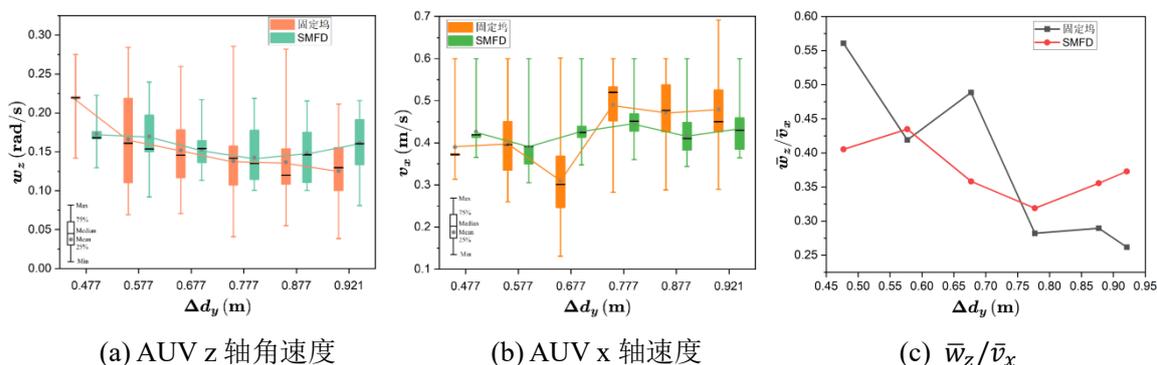


图 3.15 不同水平位置偏差下 AUV 的运动响应

如图 3.15 所示，当 AUV 入坞 SMFD 时，其运动表现出更好的稳定性。这归因于 SMFD 的悬浮特性，有助于耗散接触冲击中的角动量和动能，从而使  $w_z$  和  $v_x$  的四分位范围分布集中。在图 3.15 (a) 中，可以观察到，固定坞会导致 AUV 产生更快速的转向。当 AUV 进入固定坞时， $w_z$  平均值单调减小，而最大值很高，这与角动量定理一致。在 SMFD 中， $w_z$  平均值先减小，在 0.777 m 后开始增大，是由更多的碰撞次数导致。图 3.15 (b) 表明，AUV 进入 SMFD 和固定坞时的  $v_x$  都保持稳定，但固定坞的  $v_x$  平均值高于 SMFD，因为在较高的  $w_z$  下，AUV 在转弯时有更多的时间加速。在 0.677 m 时，AUV 进入固定坞的  $v_x$  突然下降。这是由于 AUV 在初次接触后产生了俯仰，接着其艏部上方与导向罩发生二次接触，使  $v_x$  进一步减小。观察分析仿真结果，可知  $w_z$  和  $v_x$  的关系决

定了接触次数。在图 3.15 (c)中, 较低的 $\bar{w}_z/\bar{v}_x$ 值对应较高的接触频率。

由图 3.16 可知, 在发生初次接触后, 固定坞能够为 AUV 提供更大的转向调整。因为 AUV 与固定坞的第二次接触位置 (发生在 1.83 s) 更接近入口, 而与 SMFD 的第二次接触则发生在 1.02 s。当 AUV 进入 SMFD 时, 它分别在 0.30 s、1.02 s 和 1.50 s 进行了三次接触, 通过多次接触使 AUV 逐渐改变航向, 有助于其运动的平稳。

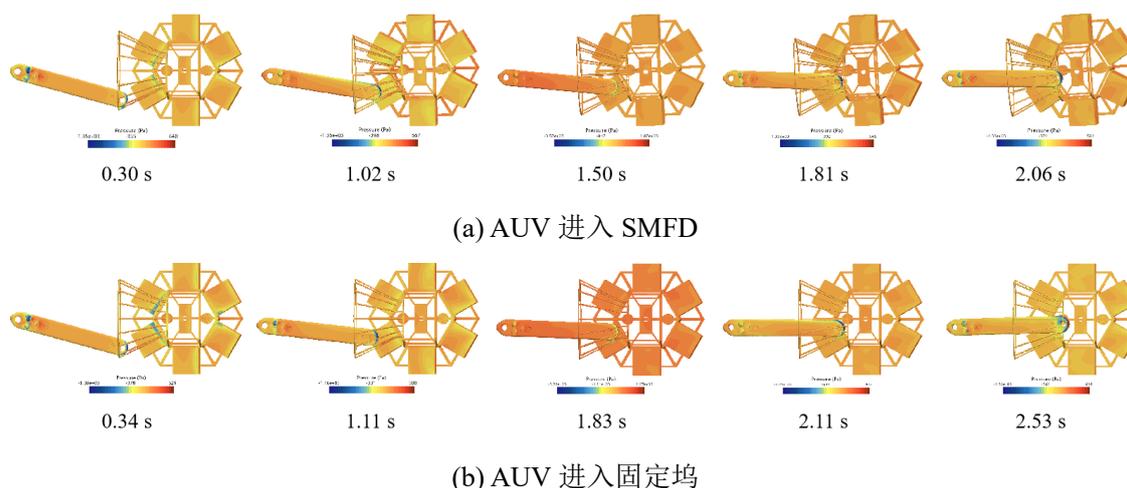


图 3.16 位置偏差 0.877 m 下 AUV 入坞运动状态压力云图

总的来说, 固定坞和 SMFD 都能有效调整位置偏差, 确保 AUV 成功入坞。SMFD 在入坞效率和 AUV 航行稳定性方面表现优异, 而固定坞则以较少的接触次数提供更高的入坞准确度。

### 3.6.2 姿态偏差工况入坞

姿态偏差在入坞过程中是常见现象, 且是不可避免的。通过浮力调平技术和 PID 控制策略, AUV 能够稳定其俯仰角, 因此, 垂直姿态偏差不再考虑。在本节中, 我们讨论水平姿态偏差, 定义为 AUV 纵轴线与导向罩中轴线在水平面上的夹角 $\Delta\alpha$ (图 3.11), 该偏差是由 AUV 航向角所导致。见图 3.17 和图 3.18 为在不同水平姿态偏差下, AUV 入坞的仿真结果。图 3.19 则以图形方式展示了 AUV 到达入口时的姿态。

由图 3.17 的整体趋势可以发现, 当 $\Delta\alpha$ 保持在  $22.5^\circ$ 以下时, AUV 入坞 SMFD 的效果更好; 当 $\Delta\alpha$ 超过  $22.5^\circ$ 时, 固定坞能够使 AUV 更高效的完成入坞。在图 3.17 (a)中, 当偏差为  $37.5^\circ$ 时, 仿真中增加了 AUV 的主推力, 以确保 AUV 有足够的速度完成入坞动作, 所以 SMFD 和固定坞的 $t_{suc}$ 都有所减少。图 3.17 (b)中,  $\gamma$ 由负值变为正值, 且 SMFD 的 $\gamma$ 增长较快, 这表明 SMFD 在调整 AUV 较大姿态偏差时不如固定坞高效。

结合图 3.17 (e)可知, 固定坞的 $\varphi_U$ 较大, 从而使 $\gamma$ 减小, 表现出良好的入坞准确度。此外, 当姿态偏差超过  $22.5^\circ$ 时, SMFD 的 $\gamma$ 值大于  $15^\circ$ 。这是因为随着姿态偏差的增大,  $\varphi_U$ 位于  $12^\circ$ 到  $14^\circ$ 之间, 无法有效补偿较大的姿态偏差。所以,  $22.5^\circ$ 的姿态偏差为一临界值, 此时的 $\varphi_D$ 为  $3.7^\circ$ , 为 AUV 增加了入坞空间  $8.0\%$ 。图 3.17 (c)显示, 超过  $22.5^\circ$ 时, SMFD 和固定坞的 $F_{max}$ 均显著上升, 其中固定坞产生的接触力更大。这表明较大的姿态偏差会降低入坞安全性。

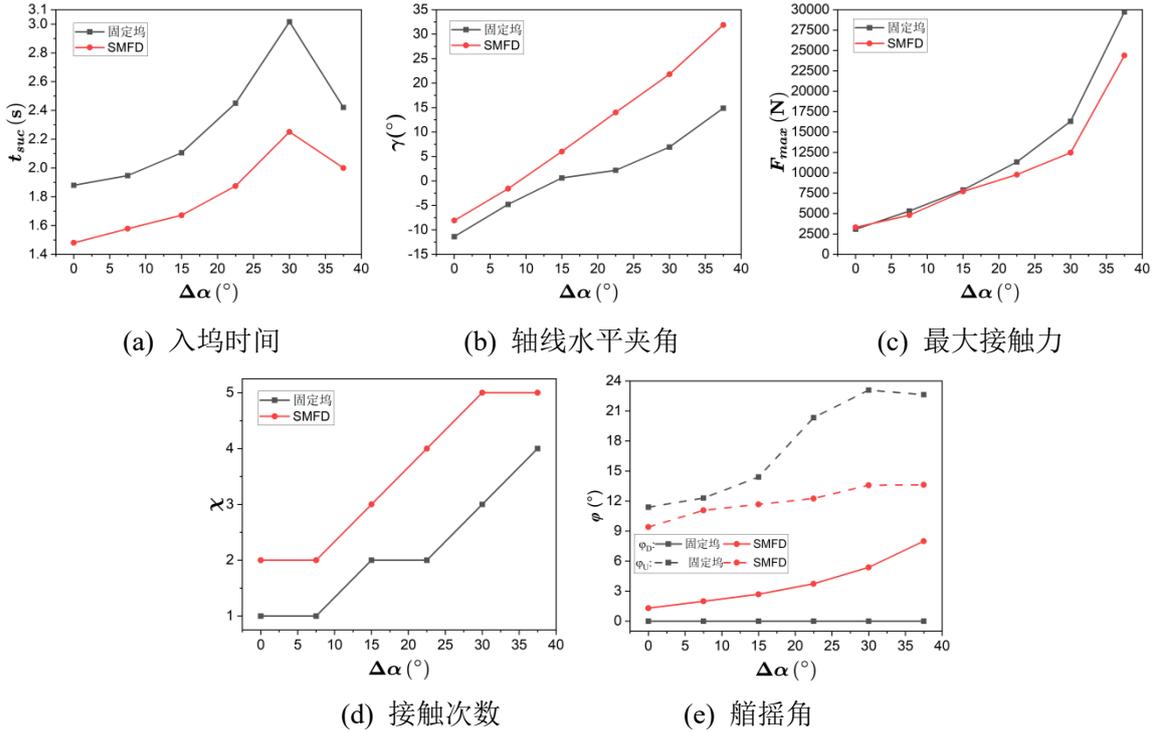


图 3.17 不同水平姿态偏差条件下 AUV 入坞的对比仿真结果

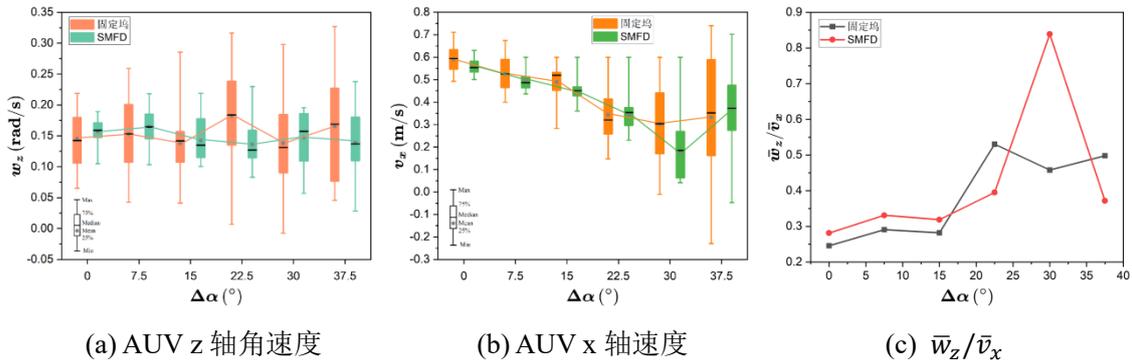


图 3.18 不同水平姿态偏差条件下 AUV 运动响应

如图 3.18 所示, 当偏差小于  $22.5^\circ$ 时, AUV 入坞 SMFD 的运动响应表现出稳定的航行和高效; 固定坞则在调整大的姿态偏差方面更有效。在图 3.18 (a)中, 当偏差小于  $22.5^\circ$ 时, SMFD 中的 $\bar{w}_z$ 略高, 而固定坞中 $w_z$ 的上四分位数和最大值相对较高。图

3.18 (b)显示 $v_x$ 呈明显下降趋势,表明 AUV 速度对姿态偏差较为敏感。当偏差达到  $30^\circ$  时, SMFD 中的 $v_x$ 显著下降,这可能影响入坞效率,而固定坞更适合调整这种较大的姿态偏差。这也导致了图 3.18 (c)中  $30^\circ$ 偏差时, SMFD 的 $\bar{w}_z/\bar{v}_x$ 突然增加。

图 3.19 展示了 AUV 成功入坞时的姿态,可以明显观察到 $\gamma$ 方向的变化。在  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 和  $30^\circ$ 的偏差下, AUV 成功入坞 SMFD 时的 $\gamma$ 分别为 $-8.1^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 和  $21.8^\circ$ ,而成功入坞固定坞时的 $\gamma$ 分别为 $-11.4^\circ$ 、 $0.6^\circ$ 和  $6.9^\circ$ 。显然,在  $30^\circ$ 偏差时, AUV 进入 SMFD 时的姿态不理想。

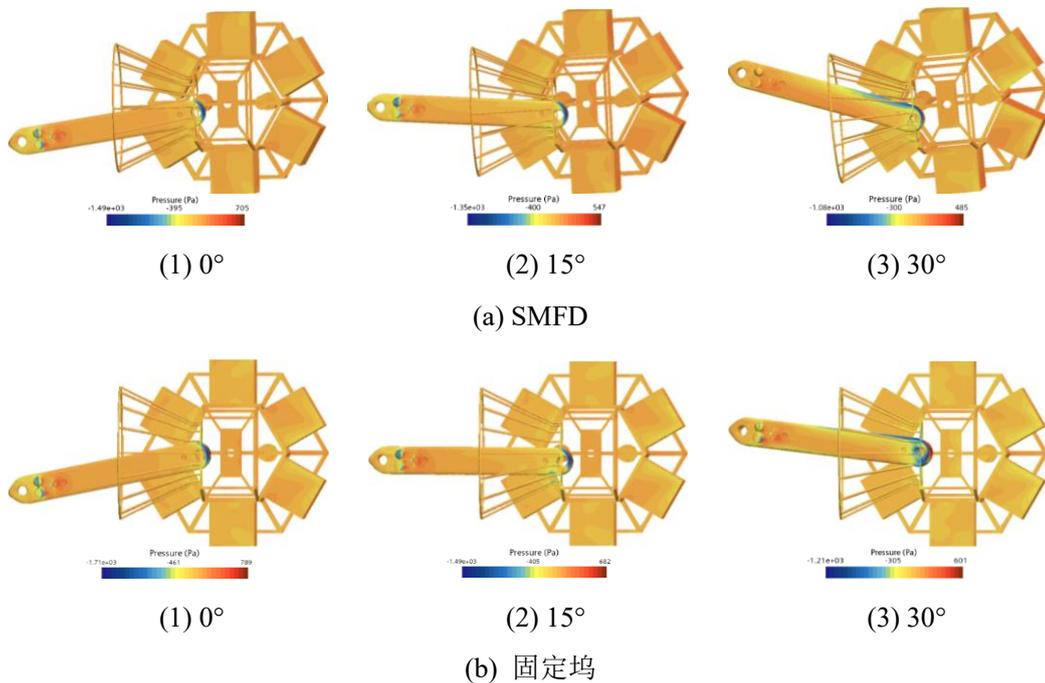


图 3.19 水平姿态偏差  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 条件下 AUV 入坞成功的压力云图

总的来说, SMFD 在小姿态偏差时表现更为有效,而固定坞则在大姿态偏差下表现更佳,固定坞具有更强的姿态偏差调整能力。此外,对于较大的姿态偏差, AUV 适合加速进入 SMFD,但同时也增加了损坏的风险。

### 3.6.3 AUV 速度和流速工况入坞

本节涉及两个速度: AUV 的初始速度( $v_x$ )和流体速度( $v_f$ )。 $v_x$ 是 AUV 入坞的关键运动参数,而 $v_f$ 则表示流体作用对 AUV 产生的影响。图 3.20 和图 3.21 描述了 $v_x$ 和 $v_f$ 对 AUV 入坞的详细影响结果。图 3.22 通过图形明显对比了 AUV 入坞 SMFD 和固定坞的运动过程。图 3.23 展示了流体速度如何影响 AUV 的入坞运动。

首先，我们讨论 $v_x$ 的影响。仿真结果表明，AUV 可以在不同的 $v_x$ 下有效地进入 SMFD，但不建议在高 $v_x$ 下进入固定坞。图 3.20 (b)和图 3.20 (e)所示，AUV 入坞 SMFD 时， $\gamma$ 和 $\varphi_U$ 更加稳定，这反面表明入坞固定坞时，对 $v_x$ 较为敏感。此外，SMFD 的 $\varphi_D$ 最大为  $3.78^\circ$ ，使入坞空间增加 8.1%。图 3.20 (c)表明，随着 $v_x$ 的增加， $F_{max}$ 显著增加，从而增加了 AUV 损坏的风险，这与 Zhang 等人<sup>[99]</sup>的研究一致。图 3.20 (d)显示，SMFD 的 $\chi$ 呈下降趋势，而固定坞的 $\chi$ 先下降后上升，表明 SMFD 适合 AUV 在高 $v_x$ 下进行入坞动作。

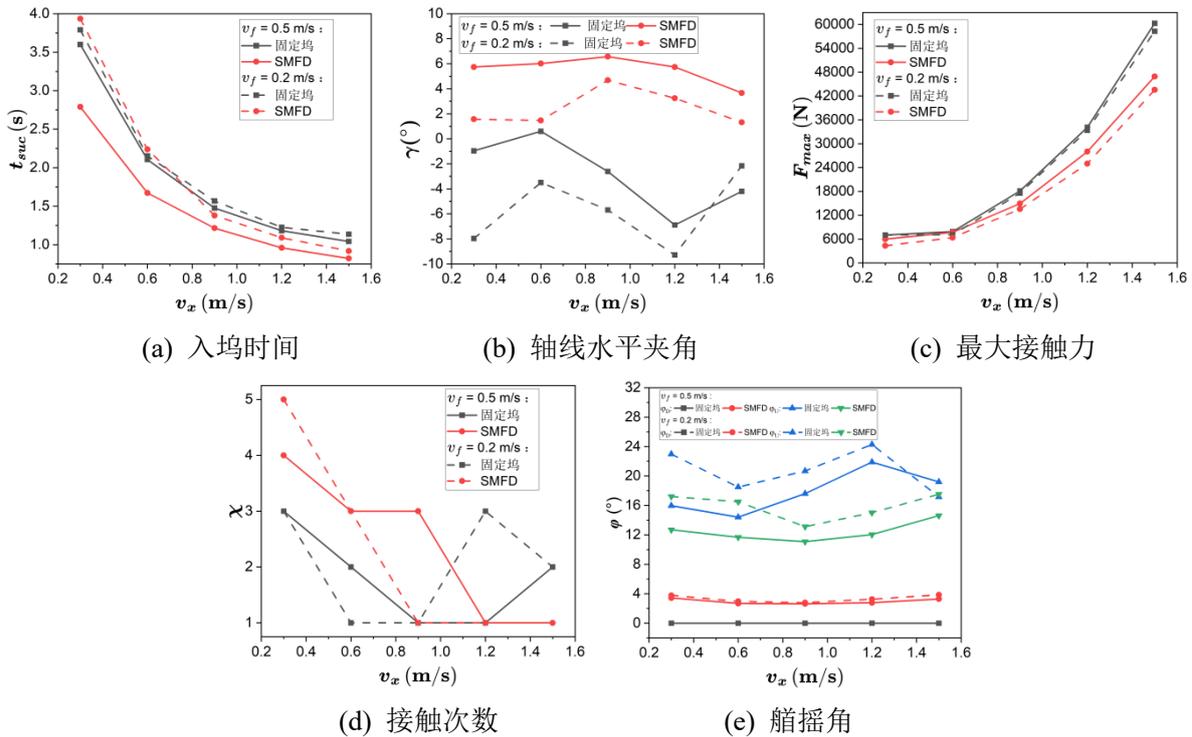


图 3.20 不同 AUV 初始速度不同流速条件下 AUV 入坞的对比仿真结果

由图 3.20 和图 3.21 可知，AUV 在不同 $v_x$ 下进入 SMFD 时，运动平稳，但在高 $v_x$ 下进入固定坞时容易发生震荡。图 3.21 (a)显示 $w_z$ 整体呈增加趋势，这是受冲量的作用。根据图 3.20 (d)，我们可以观察到， $v_x$ 较小时，单次接触产生的冲量小，接触次数较多，多次接触会积累冲量；而 $v_x$ 较大时，初次接触会产生大的冲量。此外，当 $v_x$ 超过 0.6 m/s 时，固定坞的 $w_z$ 迅速增加，波动范围为 $-0.68 \text{ rad/s}$ 到  $0.9 \text{ rad/s}$ 。这是由于 AUV 以较大初始速度入坞固定坞时，初次接触产生的冲量和接触力过大，从而导致较大的 $w_z$ ，进而使 AUV 与导向罩的对侧发生接触，导致负值的 $w_z$ 。在图 3.22 中可以直观看到，当 AUV 进入固定坞时，在 1.17 s 时与导向罩的对侧发生接触，导致其航行的方向突然改变。这可能导致 AUV 会继续转动，在入口处产生震荡，从而降低稳定性和安全性。相

反, 图 3.21 (b)显示 AUV 入坞 SMFD 的 $v_x$ 非常稳定, 观察图 3.22 中 AUV 运动状态, AUV 进入 SMFD 时运动顺畅且平稳。

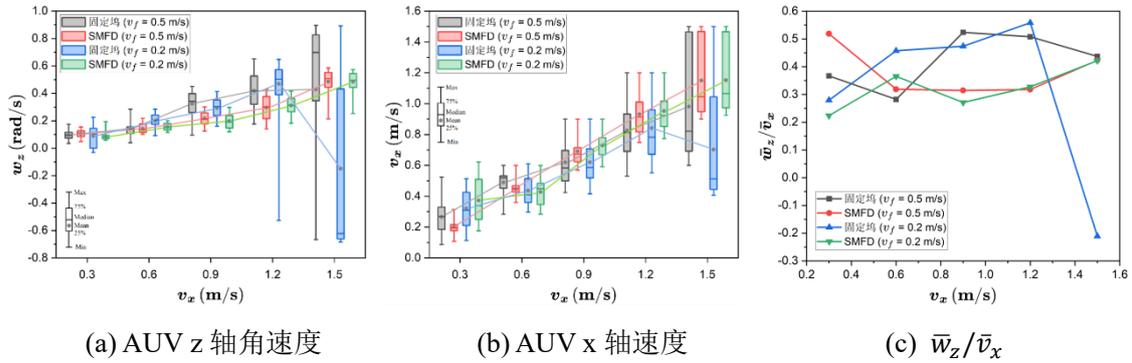


图 3.21 不同 AUV 初始速度不同流速条件下 AUV 运动响应的对比仿真结果

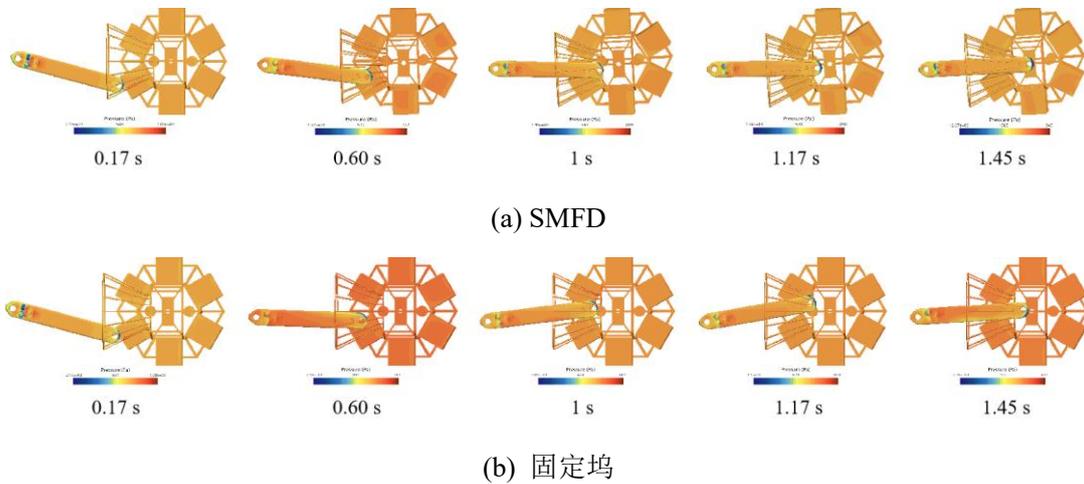


图 3.22 流速 0.2 m/s、AUV 初始速度 1.2 m/s 的入坞过程云图

接下来, 我们讨论 $v_f$ 的影响。整体上, SMFD 对流速具有较强的适应性。图 3.20 (b)和图 3.20 (e)表示, 当 $v_f$ 减小时, AUV 入坞 SMFD 的准确性高于固定坞。这是由于流速较小时, AUV 入坞固定坞会产生较大的 $\varphi_U$ 。图 3.20 (c)中, 在低 $v_f$ 下, SMFD 的柔性更强, 进而吸收冲量和角动量, 使 $F_{max}$ 较小。 $\chi$ 与 $v_f$ 之间没有明显的相关性。在图 3.21 中,  $w_z$ 和 $v_x$ 是多次接触的结果, 它们与 $v_f$ 的相关性不明显。因为 $v_f$ 的阻力效应, 主要影响 AUV 的艏摇角, 即转向效率。如图 3.23 所示, 在不同流速下, 在 0.20 s 且相同位置处 AUV 与 SMFD 首次发生接触, 随后转动并向入口航行。可以观察到, 在相同时间内, 0.2 m/s 中 AUV 艏部与入口的距离比 0.5 m/s 中更大, 原因是 0.2 m/s 时 AUV 所受的阻尼比 0.5 m/s 时要小, 该现象直观的展示了流体对 AUV 运动的影响。

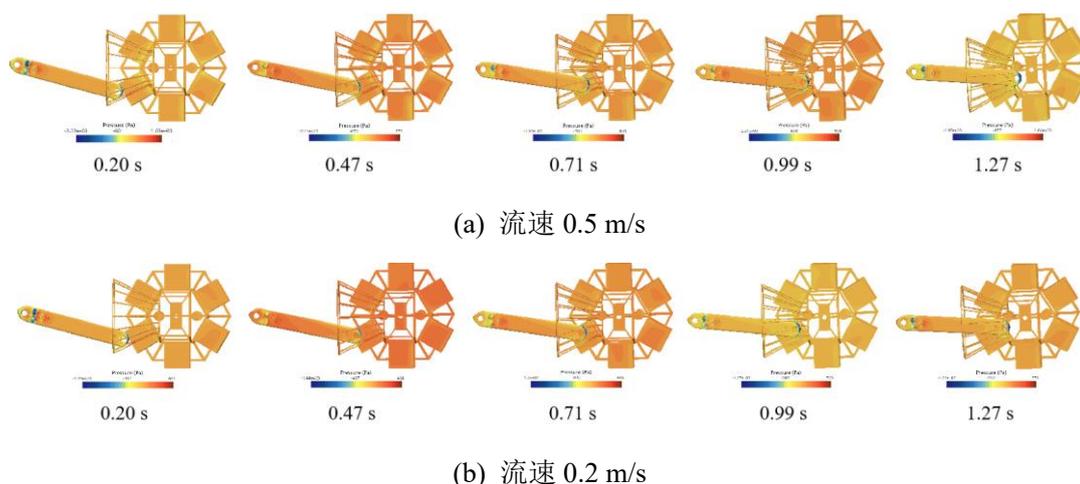


图 3.23 不同流速条件下 AUV 以 0.9 m/s 初始速度进入 SMFD 的过程云图

可以发现,  $v_x$  在 AUV 入坞中起到更重要的作用。AUV 以不同  $v_x$  入坞 SMFD 的效果良好, 悬浮特性有助于 AUV 完成顺畅且平稳的入坞运动。而固定坞更适合 AUV 在低  $v_x$  下进行入坞, 因为较高的  $v_x$  会导致 AUV 与导向罩的对侧接触, 从而降低稳定性和安全性。此外, 低  $v_f$  有助于 AUV 进入 SMFD。  $v_x$  和  $v_f$  之间可能存在权衡关系, 对于 SMFD, 当  $v_f$  较高时, AUV 应以加速的方式进行入坞。

### 3.6.4 结果讨论

在 AUV 入坞过程中, SMFD 和固定坞在不同工况条件下表现出各自明显的特征。一方面, SMFD 对位置偏差、AUV 初始速度和流速具有较强的适应性, 表现出良好的入坞效果。但是, SMFD 对姿态偏差具有不同的适应程度, 能够很好地调整小姿态偏差, 对于大偏差的调整效果不理想。为了保证 SMFD 的稳定性并提供足够的冲量, 其艏摇角变化应保持在  $5^\circ$  以内。SMFD 的柔性和灵活性, 促进 AUV 入坞运动的顺畅度和平稳性, 提高入坞效率, 降低损伤的风险, 但减少了准确度。另一方面, 固定坞具有较强的调整 AUV 航向的能力, 提高入坞准确度, 减少接触次数, 但对不同工况条件的适应性较弱, 导致 AUV 航行不稳定、与对侧接触、入口处发生震荡以及接触力较大等, 从而降低了稳定性和安全性。

针对 AUV 的入坞机动策略, 首先需要检查 AUV 的姿态偏差是否在可接受范围内。本文中姿态偏差存在一个阈值, 即  $22.5^\circ$ 。当姿态偏差低于阈值时, AUV 入坞 SMFD 的效果较好。相反, 当偏差高于阈值时, 固定坞有助于实现更高效的入坞。下一个考虑因素是位置偏差。此外, AUV 的初始速度对成功入坞至关重要。对于较大的姿态偏

差, AUV 应以较高的初始速度并加速进入 SMFD, 而应以较低的初始速度进入固定坞。

### 3.7 本章小结

针对 AUV 入坞接触作用下 SMFD 运动响应问题, 本章基于 CFD 方法, 建立了一种基于悬浮坞的 AUV 入坞接触耦合运动响应数值计算及仿真模型 (CCNM-AUV), 有效解决了 AUV 入坞过程中涉及的多体接触动力学问题, 并在有限计算资源和时间效率的约束下优化入坞过程。首先, CCNM-AUV 采用重叠网格技术划分计算域, 通过网格独立性试验, 确定了最佳网格设置。通过试验数据验证了该数值模型的有效性。随后, 模拟了 SMFD 在洋流下的稳定性以及入坞过程中的运动响应, 根据单一变量原理, 分析了 SMFD 关键设计参数 (如体积、转动惯量、质量和系泊链刚度) 对入坞过程的影响。基于这些分析结果, 进一步优化了 SMFD 的设计参数, 以提升其在实际应用中的性能。在优化后的 SMFD 模型基础上, 本章基于 CCNM-AUV 模型, 对不同工况条件下的 SMFD 和固定坞分别进行了 AUV 入坞模拟。对比分析两者的运动响应、入坞时间和准确度, SMFD 在入坞效率、平稳性和安全性方面均表现出显著优势。

## 第4章 基于分级运动学 RRT\*的 AUV 导引入坞路径规划方法

在第 2 章的海上系统性试验中, AUV 声学导引过程中因定位质量(精度和连续性)不佳和有效定位距离短, 降低了入坞成功率。因此, 基于第 3 章的 AUV 入坞指导性建议, 本章针对复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题, 开展了以提高声学导引过程中定位质量和 AUV 航行稳定性为目标的路径规划方法研究。具体的, 首先基于 Bellhop 水声信道传播模型模拟了水声信道质量, 生成信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)水平空间分布图。随后, 综合考虑了定位质量、AUV 运动学特性和入坞方向三种约束, 基于快速随机探索树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)框架提出了一种基于分级运动学样条快速随机探索树的 AUV 导引入坞路径规划方法(Hierarchical Kinematic Constrained Spline Rapidly exploring Random Tree, HKS-RRT\*), 实现了可主动规避低 SNR 区域并满足入坞方向和运动学约束的高效导引路径。

本章主要贡献如下:

- (1) 在 AUV 导引入坞路径规划中考虑水声定位质量约束, 基于 Bellhop 模拟 SNR 水平空间分布特征;
- (2) HKS-RRT\*方法: 对水声信道劣质区域划分等级, 设计了一种分级势场法(Hierarchical Potential Fields, HPF)引导节点生长方向; 引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法以控制节点扩展, 并设计路径成本函数; 划分末端入坞空间, 在近距离入坞阶段, 采用五次样条插值方法生成平滑连续的高阶可微分轨迹;
- (3) 实验结果表明, HKS-RRT\*在路径长度、路径平滑度和定位质量上表现出色, 能够有效构建引导节点, 提高路径规划效率, 与典型制导律方法(如视线法)相比, 位置偏差最大减少 49.75%, 方位偏差最大减少 13.98%。

本章组织如下: 4.1 节阐述本章的研究问题; 4.2 节介绍了水声通信传播模型, 计算声场分布; 4.3 节详细描述了所提出的 HKS-RRT\*方法; 4.4 节为实验结果和分析, 验证 HKS-RRT\*的性能; 最后, 4.5 节为本章小结。

### 4.1 问题描述

AUV 的导引入坞是水下接驳技术的核心组成部分, 其中声学导引因定位距离远且

累积误差小的特性，成为首选的导引方式。然而，AUV 运动的不确定性、环境噪声和复杂的水声信道环境<sup>[128]</sup>给声学定位带来了极大的挑战。如第 2 章的海上试验所述，与静态目标的定位相比，AUV 入坞移动期间与接驳坞的动态交互定位过程中，如图 4.1 所示，受到多普勒效应、多径干扰和信号衰减等因素影响<sup>[129]</sup>，表现出更多的定位失败现象，导致有效定位距离短、时延增加和定位精度下降。

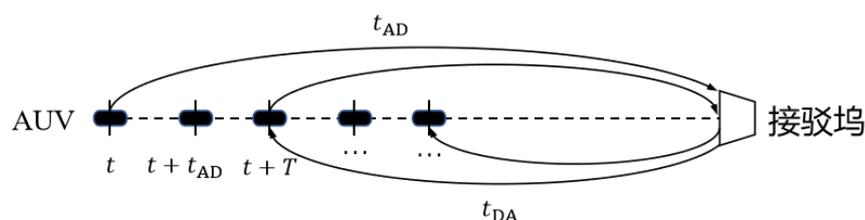


图 4.1 AUV 接驳过程中的交互定位示意图

AUV 在进行接驳前，通常已在水下完成一段长时间的航行作业，因误差的累积，其惯性导航系统输出的定位结果精度极差。若此时利用水声定位系统因环境原因出现定位失败，AUV 需要采取搜索策略以寻找接驳坞，不仅降低了接驳效率，而且增加了额外的能量损耗。因此，如何充分利用 AUV 的运动能力，通过合理规划导引路径以优化声学定位<sup>[130]</sup>的可靠性和准确性，值得进一步深入研究。

海洋声场环境具有显著的时空多变性，影响通信质量和定位连续性。首先，水声信道易受多径效应、信号衰减和环境噪声干扰的影响，而且 AUV 的移动性会引入多普勒效应，进一步降低定位精度。其次，声波在水中的传播速度约为 1500 m/s，远远低于电磁波在空气中的传播速度（约  $3 \times 10^8$  m/s），导致水声通信存在明显的传播时延，达到“秒”级，这不利于实时性要求较高的 AUV 导引过程。此外，水声通信信道的带宽也远低于陆上无线电通信的带宽，限制了数据传输速率<sup>[27]</sup>，增加了信号的干扰和失真，从而降低声学导引的有效性和可靠性。

典型制导律未考虑水声信道质量这一关键参数，而传统路径规划方法侧重于寻找最短路径、提高到达效率和准确避障等。与一般的路径规划不同，AUV 入坞对导引路径末段存在严格的方向约束，同时还需考虑 AUV 的运动学约束，以确保所生成路径的可行性。此外，当悬浮坞方向发生变化时，路径规划方法需要具备快速响应的能力，能够在线实时重新规划路径，并保证该路径在当前空间和时间可被实现。因此，通过结合水声信道环境特性和 AUV 运动学约束进行路径优化，不仅能够提高接驳任务的成功率，还能为复杂水下环境中的多目标优化提供新的解决思路。

## 4.2 水声信道传播模型

目前，主流的水声信道建模方法包括抛物线方程（parabolic equation, PE）<sup>[131]</sup>、简正波<sup>[132]</sup>和射线追踪<sup>[133]</sup>，通过调整介质特性、距离依赖性和边界条件来计算传播损失（Transmission Loss, TL）。Bellhop 是一种广泛应用的基于高斯波束追踪的水声信道仿真模型<sup>[134,135]</sup>，考虑了海面和海底的水平反射，以及海洋环境信息，其 3D 模拟可以预测水平非均匀海洋环境中的声压场。其主要优势在于计算速度快，且支持并行计算<sup>[136]</sup>，能够实现水下声场求解回路和射线追踪回路的两级并发<sup>[137]</sup>。与传统射线模型相比，Bellhop 中的声线能够平滑地过渡到声影区、穿过焦散线，更接近全波动模型的结果，因此被美国海军指定为海洋 10~100 kHz 频带内声传播的标准预测模型<sup>[138]</sup>。

射线追踪的基本思想是围绕每条声线发展一个场，从而产生一个声学波束，然后将所有波束的能量相加，以获得由声源引起的声压场。单条声线产生的声压场<sup>[139]</sup>为

$$p(s) = \frac{1}{4\pi} \left| \frac{c(s) \cos \theta_0}{c(0)J(s)} \right|^{1/2} e^{i\omega \int_0^s \frac{1}{c(s')} ds'} \dots\dots\dots (4.1)$$

式中， $c(s)$ 为 $s$ 处声速； $c(0)$ 为 $s_0$ 处声源的声速； $\omega$ 是 $s_0$ 处声源的角频率； $J(s)$ 为雅可比行列式； $\theta_0$ 为声线的出射极距角。

整个声场中任意位置上的声压通过将所有通过该位置的声线（即特征声线）声压进行相加得到，即：

$$p^{(c)}(r, z) = \sum_{j=1}^{N(r,z)} p_j(r, z) \dots\dots\dots (4.2)$$

式中， $N(r, z)$ 表示到达声场某确定位置 $(r, z)$ 的所有特征声线数； $p_j(r, z)$ 是第 $j$ 条特征声线产生的声压。

在介质空间中，传播损失的表达式为：

$$TL(s) = -20 \log \left| \frac{p(s)}{p^0(s=1)} \right| \dots\dots\dots (4.3)$$

式中， $p^0(s)$ 为距离点源 1m 处的自由空间中电源的声压， $p^0(s = 1) = \frac{1}{4\pi}$ 。声压的相加结果会因相位差产生一定程度的干涉增强或抵消，将式(4.2)计算的声压结果代入式(4.3)即可得到相干传播损失。

Bellhop 可以模拟包含复杂海底和水深变化的场景，参考 Double Seamount 案例数据<sup>[135]</sup>，两个圆锥形海山分别位于(3500, 1000) m 和(3500, -1000) m，最高上升至水深 200 m，半径为 2500 m，坡度为 0.25。海底的其他位置都是平坦的，海水声速被设置

为 1500 m/s。假设海底为均匀介质，声速为 1650 m/s，密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>，衰减度为 0.5 dB/波长。发射源位于(0, 0, 250) m，发射频率为 100 Hz，接收器的深度为 400 m。水深测量结果和声线传播轨迹如图 4.2 所示，声线的不同颜色用于标识纯折射路径（未与边界碰撞，红色）、海面反射路径（绿色）、海底反射路径（蓝色）以及同时有海面和海底反射的路径（黑色）。大部分源位置的射线与发射时的方位角保持接近，可以清楚地看到在海山上射线轨迹中的水平折射。

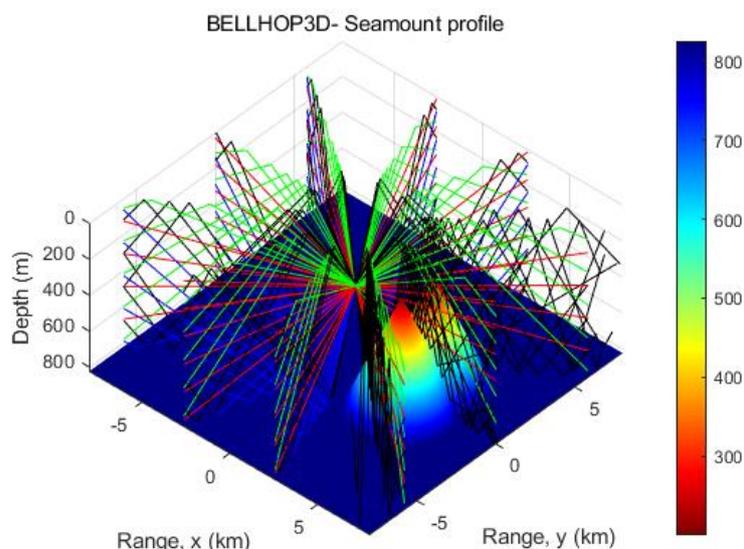
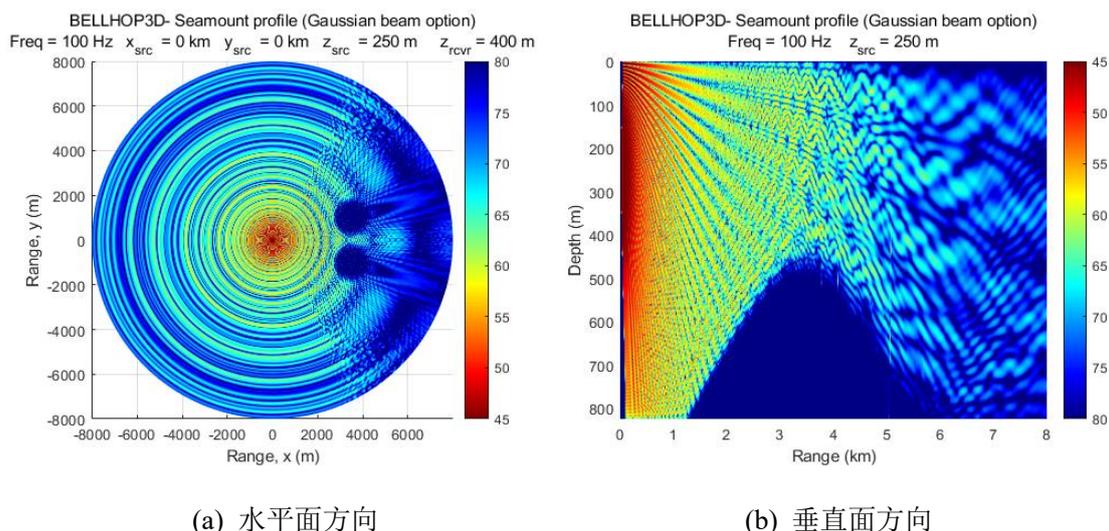


图 4.2 双海山的水深测量和声线轨迹图



(a) 水平面方向

(b) 垂直面方向

图 4.3 双海山的传播损失分布图

除上述功能以外，Bellhop 也可以使用圆柱坐标计算三维网格上的传播损失，对得到的传播损失阵列根据深度或方向角进行切片，以提供直观的显示，如图 4.3 所示，

不同颜色代表不同程度的传播损失。图 4.3 (a)展示了接收器深度为 400 m 时的水平空间传播损失，由于海洋环境（如水温、盐度、地形等）的差异，不同位置的传播损失各不相同，尤其在海山附近更为明显。但是，整体上，传播损失呈现明暗交替的同心圆环纹，这主要是由于直达声线与海面（或海底）反射声线之间的相长和相消干涉所造成的。图 4.3 (b)展示了声源深度为 250 m 时的垂直空间传播损失，在海山附近产生波动，逐渐在海山的后侧形成声影区。

在 AUV 导引入坞的水下环境中，将定位精度和鲁棒性定义为定位质量。而定位精度和鲁棒性主要由接收信号的 SNR 决定，SNR 则取决水声信道环境。Li 等人<sup>[140]</sup>基于深海实验数据，发现相干带宽、频谱零点深度和信号多径比（Signal Multipath Ratio, SMR）的强度分布与 SNR 的分布相似，有效反映了汇聚区和阴影区的分布特征。因此，使用 SNR 的分布表征定位质量的分布。对于频率为  $f$  的水声信号，根据声呐方程，该信号在接收端的 SNR 可以表示为<sup>[141]</sup>：

$$SNR = SL - TL - 10 \log NL(f) \Delta f + DI \dots\dots\dots (4.4)$$

式中，SL 为发射声源级，TL 为传播损失， $NL(f)$  为海洋环境噪声， $\Delta f$  为水声信号的频率带宽，DI 为指向性指数，通常被设置为 0 dB。

当声信号以球形的方式扩散时，发射声源级（Source Level, SL）可以计算为：

$$SL = 10 \log P_t + 171 \dots\dots\dots (4.5)$$

式中， $P_t$  为水下节点的发送功率。

给定频率  $f$  的总体噪声功率谱密度为：

$$NL(f) = N_t(f) + N_{sh}(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \dots\dots\dots (4.6)$$

水声环境噪声包含有湍流噪声、船舶运输噪声、波噪声和热噪声。环境噪声源主要以高斯统计量和连续功率谱密度（Power Spectral Density, PSD）为特征。描述这四个噪声的经验公式<sup>[142]</sup>如下：

$$\begin{cases} 10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log(f) \\ 10 \log N_{sh}(f) = 40 + 20(sh - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03) \\ 10 \log N_w(f) = 50 + 7.5w_w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \\ 10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log f \end{cases} \dots\dots\dots (4.7)$$

式中， $N_t$  为湍流噪声， $N_{sh}$  为航运噪声， $N_w$  为风产生的波噪声， $N_{th}$  为热噪声， $f$  为频率，单位 kHz， $sh \in [0, 1]$  为航运活动因素， $w_w$  为风速，单位 m/s。 $sh$  的值越大，表示航运活动越频繁。

### 4.3 HKS-RRT\*路径规划方法

RRT 是一种基于随机采样的数据结构,可以很容易地处理非完整约束,如 AUV 的运动学模型,因此能够有效地解决高维状态空间中的路径规划问题。基于 RRT\*,本研究提出了一种新的方法 HKS-RRT\*,来解决在 AUV 导引接驳操作中与运动规划相关的挑战。特别是在水声通信环境中,HKS-RRT\*方法促进了导引路径的有效规划,同时满足 AUV 运动学的约束。本方法具有如下的特点:

- (1) 根据定位质量分布特征,设计分级势场法引导 RRT\*节点生长,动态调整低定位质量区域以及排斥力作用,并引入多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力,提高规划效率,满足入坞方向约束;
- (2) 引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法以控制节点扩展,并基于节点扩展长度、势场引导距离、AUV 转向角度、垂直距离、势场引导转向角度设计路径成本函数,实现符合运动学约束的局部路径规划;
- (3) 划分末端入坞空间,利用系统的微分平坦性和最优性条件,在近距离入坞阶段生成五次样条插值轨迹,既满足平滑过渡,又满足高阶连续可微分性。

#### 4.3.1 基于分级势场法的节点引导

在 RRT\*的基础上,通过引入引导 $q_{new}$ 生长方向的人工势场法(Artificial Potential Fields, APF)<sup>[143]</sup>,可以加快随机生长树的搜索速度。基于势函数的 P-RRT\*<sup>[144]</sup>在 RRT\*中加入 APF,结合潜在引导和定向采样的思想探索给定环境,大大减少迭代次数,从而提高了内存利用率并加速了收敛速度,同时避免了最小值问题。Ye 等人<sup>[145]</sup>针对果园中障碍物分布复杂且不规则的非结构化环境,在 APF 中设计滚动窗口,并根据水平和垂直方向所占据的网格数,计算障碍物的排斥力,有效引导节点避开不规则障碍物。

APF 一种通过梯度下降进行路径规划的技术。其基本原理如下:将 AUV 模拟为一个处于人工势场的机器人并表示为 $x \in X$ ,目标区域 $X_{goal}$ 被赋予吸引势场 $U_{att}$ ,而障碍物区域则由排斥势场 $U_{rep}$ 表示。这样,机器人 $x$ 会被吸引到目标区域,并且避免碰撞障碍物。吸引势场 $U_{att}$ 表示如下:

$$U_{att} = \begin{cases} K_a d^2(x, x_g), & d(x, x_g) > d_g^* \\ K_a (d_g^* d(x, x_g) - (d_g^*)^2), & d(x, x_g) \leq d_g^* \end{cases} \dots\dots\dots (4.8)$$

式中，常数  $K_a$  为吸引势场的比例因子， $d_g^*$  是围绕目标  $x_g \in X_{goal}$  的圆形边界半径。当机器人与目标之间的距离  $d(x, x_g) > d_g^*$  时，吸引势场呈二次变化形式，机器人会快速朝目标区域  $X_{goal}$  移动。当机器人进入以  $x_g$  为中心的圆形区域时，吸引势场转变为圆锥形，从而使机器人在接近目标时逐渐减速。

令机器人受到的作用力  $\vec{F}$  等于势场的负梯度，即  $\vec{F} = -\nabla U$ ，则吸引力计算如下：

$$\vec{F}_{att} = \begin{cases} -2K_a d(x, x_g), & d(x, x_g) > d_g^* \\ -2d_g^* K_a \frac{x-x_g}{d(x, x_g)}, & d(x, x_g) \leq d_g^* \end{cases} \dots\dots\dots (4.9)$$

由障碍物  $X_{obs} \subset X$  产生的排斥势场  $U_{rep}$  表示如下：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_r \left( \frac{1}{d_{min}} - \frac{1}{d_{obs}^*} \right)^2, & d_{min} \leq d_{obs}^* \dots\dots\dots (4.10) \\ 0, & d_{min} > d_{obs}^* \end{cases}$$

式中，常数  $K_r$  为排斥势场的比例因子， $d_{min} = \min_{x' \in X_{obs}} d(x, x')$ ，为机器人  $x$  到障碍物空间  $X_{obs}$  中最近顶点的距离， $d_{obs}^*$  是围绕障碍物  $X_{obs}$  的圆形边界半径。相应的排斥力计算如下：

$$\vec{F}_{rep} = \begin{cases} K_r \left( \frac{1}{d_{obs}^*} - \frac{1}{d_{min}} \right) \frac{1}{d_{min}^2} \frac{\partial d_{min}}{\partial x}, & d_{min} \leq d_{obs}^* \dots\dots\dots (4.11) \\ 0, & d_{min} > d_{obs}^* \end{cases}$$

式中， $\frac{\partial d_{min}}{\partial x} = \frac{(x-x')}{d(x, x')}$ 。

然而，基本的 APF 在应用于接驳场景中的定位质量时存在显著的局限性。首先，水声环境中不同地理位置对信号的衰减以及噪声的程度不同，且存在渐变现象；其次，当 AUV 的航行起始点接近对信号衰减较强且噪声较大的区域时，排斥力的作用会导致随机树在起始节点附近振荡，阻碍了节点的高效扩展；最后，目标节点存在特定的方向要求。

为了解决这些挑战，根据水声信道的特性，基于 APF 提出了一种分级势场法 (Hierarchical Potential Field, HPF)。首先，以 SNR 作为衡量水声信道优劣程度的标准，然后对 AUV 航行区域定位质量划分等级，根据不同等级动态调整排斥力作用距离  $\rho_n$ ，如图 4.4 中的  $F_{rep}$  所示。而且，在 RRT\* 节点无解时，允许 AUV 进入低定位质量区域，从而为 AUV 提供足够的运动空间，避免因不满足运动学约束导致 AUV 困于局部区域。排斥力计算如下：

$$F_{\text{rep}}(\rho_n, q) = \begin{cases} k_r \left( \frac{1}{\|q_{\text{nearest}} - q_{\text{obs}}\|} - \frac{1}{\rho_n} \right) \frac{1}{\|q_{\text{nearest}} - q_{\text{obs}}\|^2}, & \|q_{\text{nearest}} - q_{\text{obs}}\| \leq \rho_n \\ 0, & \|q_{\text{nearest}} - q_{\text{obs}}\| > \rho_n \end{cases} \quad (4.12)$$

式中,  $k_r$  为排斥力的比例系数,  $\rho_n (n = 1, 2, 3 \dots)$  为低 SNR 区域的有效作用范围的半径, 用于调节排斥力的作用距离。

其次, 考虑接驳场景的方向要求, 在目标节点和随机节点的基础上, 增加接驳方向的吸引力分量, 吸引力计算如下:

$$F_{\text{att}}(dg, \varphi, q) = F_{\text{goal}}(dg, q) + F_{\text{rand}}(q) + F_{\text{dir}}(dg, \varphi) \dots \dots \dots (4.13)$$

$$F_{\text{goal}}(dg, q) = \begin{cases} k_{a1} \cdot dg, & dg \leq d'_g \\ k_{a2} \cdot dg, & dg > d'_g \end{cases} \dots \dots \dots (4.14)$$

$$F_{\text{rand}}(q) = k_{\text{rand}} \|q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}\| \dots \dots \dots (4.15)$$

$$F_{\text{dir}}(dg, \varphi) = \begin{cases} k_{\text{dir}} \cdot dg^m \cdot \exp(-n \cdot dg) \cdot |\varphi_{\text{nearest}} - \varphi_{\text{goal}}|, & dg \leq d_\varphi \\ 0, & dg > d_\varphi \end{cases} \dots \dots \dots (4.16)$$

式中,  $k_{a1}$ 、 $k_{a2}$ 、 $k_{\text{rand}}$  和  $k_{\text{dir}}$  分别为目标节点、随机节点和接驳方向的比例系数, 调整整体强度, 且  $k_{a1} > k_{a2}$ 。  $dg = \|q_{\text{goal}} - q_{\text{nearest}}\|$  为  $q_{\text{goal}}$  与  $q_{\text{nearest}}$  之间的欧式距离,  $d'_g$  为目标吸引力作用范围。  $\varphi$  为 AUV 航向角,  $\varphi_{\text{goal}}$  为目标点接驳坞的开口朝向,  $d_\varphi$  为方向吸引力作用范围,  $m$  为控制  $F_{\text{dir}}(\varphi)$  增长速率的参数,  $n$  为控制  $F_{\text{dir}}(\varphi)$  衰减速率的参数, 便于灵活调整。

$F_{\text{rand}}(q)$  可以帮助解决 APF 的局部极小值问题。  $F_{\text{goal}}(dg, q)$  和  $F_{\text{dir}}(dg, \varphi)$  通过在远距离处减小目标和方向吸引力, 从而减少对 AUV 航向的影响, 使 AUV 能够更加灵活地应对低 SNR 区域; 在近距离处提高  $F_{\text{goal}}(dg, q)$ , 加快向目标引导; 而  $F_{\text{dir}}(dg, \varphi)$  通过多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力, 既提高方向引导效果又避免错过目标点。

综上所述, HPF 引导节点扩展如图 4.4 所示, 其力函数如下:

$$F_{\text{total}}(dg, \varphi, \rho_n, q) = \sum F_{\text{att}}(dg, \varphi, q) + \sum F_{\text{rep}}(\rho_n, q) \dots \dots \dots (4.17)$$

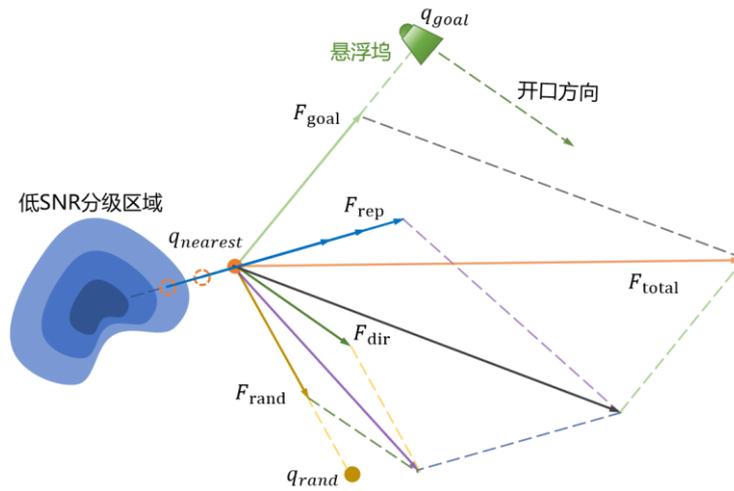


图 4.4 水下接驳的 HPF 节点引导示意图

### 4.3.2 基于运动学约束的节点扩展

#### (1) AUV 运动学方程

光滑且可实现的路径需要考虑 AUV 的运动约束，在本文中，为描述 AUV 的运动约束，引入平移和旋转运动学方程<sup>[87]</sup>：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\varphi) + c_x \\ \dot{y} = v \sin(\varphi) + c_y \dots\dots\dots(4.18) \\ \dot{\varphi} = w \end{cases}$$

式中， $x, y$ 为 AUV 重心的位置， $v$ 为航行速度， $\varphi$ 为航向角， $c_x, c_y$ 为海流速度矢量的  $x$ 和 $y$ 分量， $w$ 为艏向角速度。

因此，AUV 状态描述为：

$$s(t) = (x(t), y(t), \varphi(t)) \dots\dots\dots(4.19)$$

式中， $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示在时刻 $t$ 下 AUV 的位置， $\varphi(t)$ 表示在时刻 $t$ 下 AUV 的航向角。

将 AUV 控制系统的输入表示为 $u = (v, w)$ ，则 AUV 的状态更新可以表示为：

$$s(t + 1) = f(s(t), u(t)) \dots\dots\dots(4.20)$$

式中， $f(\cdot)$ 表示状态转移函数。

当 AUV 在定深航行是，其回转半径受到多种因素的影响，包括航速、舵效、AUV 的物理特性（如尺寸、质量分布）、环境因素以及控制系统的设计等。根据《潜艇操纵性》<sup>[146]</sup>可知，回转运动主要有定常回转半径 $R_S$ 和战术回转半径 $R_T$ 两个参数，常用相对比值表示，其大小为：

$$\begin{cases} R_S = (3.5\sim 6) L_{AUV} \\ R_T = (0.9\sim 1.2) R_S \\ R_S = K\delta \end{cases} \dots\dots\dots(4.21)$$

式中,  $L_{AUV}$ 为 AUV 艇长度。 $K$ 和 $\delta$ 分别为 AUV 舵效系数和舵角无因次系数,  $K$ 在数值上表示单位方向舵角引起的定常回转角速度。 $K$ 越大, 舵效愈高, 回转愈快, 定常回转半径愈小。本文定义 AUV 转向半径 $R$ 为:

$$R = (1.5\sim 2.5) L_{AUV} \dots\dots\dots(4.22)$$

**(2) RRT\*节点扩展函数**

在完成对 AUV 的状态描述后, 现介绍本章基于 RTT\*的方法。RRT\*通过迭代地随机抽样建立树, 并将搜索树从初始点扩展到目标点, 从而避免了构型空间的复杂几何建模, 有利于克服环境的复杂性。其在 RRT 的基础上, 引入了随机几何映射和剪枝优化理论, 具有渐近最优(最短距离)性, 在无限次迭代下能够找到最短路径, 被广泛应用于解决移动机器人的路径规划问题。涉及到的关键函数解释<sup>[147]</sup>如下:

- (1) *Sample*: 一个随机抽样函数, 在配置空间中得到随机采样点 $q_{rand}$ ;
- (2) *Nearest*: 搜索树上的一个点, 并且它到随机点 $q_{rand}$ 的距离最短;
- (3) *Steer*: 在最近的点 $q_{nearest}$ 沿随机点 $q_{rand}$ 的方向按照一定步长生长, 得到新节点 $q_{new}$ ;
- (4) *Collisionfree*: 检测两点之间是否存在障碍物;
- (5) *Near*: 新节点的父集;
- (6) *ChooseParent*: 重新为 $q_{new}$ 选择父节点;
- (7) *Rewire*: 重新布线随机树。

但是 RRT\*根据步长生成的许多节点不满足移动机器人的运动学约束, 因此通常需要额外的局部路径规划器<sup>[148,149]</sup>来选择满足运动学约束的可行节点, 并重新构建路径以实现平滑化。另一方面, 研究人员已经证明, RRT 及其变体在考虑运动约束的情况下, 能够有效地探索空间<sup>[150]</sup>。例如, Closed-loop RRT<sup>[151]</sup>对稳定闭环控制系统的输入进行采样; Kinodynamic RRT\*<sup>[152,153]</sup>则综合考虑了机器人的运动学和动力学; 双树 DT-RRT<sup>[154]</sup>结合了工作空间树和机器人运动状态树进行路径规划。

当存在运动学约束时, 节点扩展的方式主要有两种: 一种是对机器人控制空间<sup>[155]</sup>进行采样, 直接基于机器人控制输入(如速度、加速度、转向角等)进行节点扩展, 通常是低维的, 能够更好地符合实际控制操作, 但需要额外的约束条件来确保运动状

态。另一种是直接对机器人或系统的状态空间<sup>[156,157]</sup>（如位置、速度、角度等）进行采样，需要结合控制模型进行扩展，适用于复杂的高维问题和多自由度系统，但计算复杂度较高，效率较低。

在 AUV 归航阶段，AUV 需要与接驳坞进行频繁的通信和定位，以引导其准确到达接驳位置。因此，低维控制空间采样方法更为适合，可以提高路径规划的效率。本文借鉴 KB-RRT\*<sup>[158]</sup>，Steer 函数中引入 AUV 的运动学约束，并设计了新的路径代价函数，改进后的 KSteer 函数如算法 4-1 所示。

考虑到航向要求，节点状态由位置信息 $(x, y)$ 和航向角 $\varphi$ 组成，应用非完整控制策略生成从 $q_{nearest}$ 到 $q_{HPF}$ 方向的最优路径。在节点扩展过程中，对离散的运动控制参数进行采样，包括线速度 $v$ 和角速度 $\omega$ ，结合 AUV 运动学模型，计算出在随后的时间步长内 AUV 可实现的所有空间状态，作为候选节点，如图 4.5 所示。最后，根据代价函数选出代价最小的候选节点作为最优节点 $q_{new}$ 节点。KSteer 函数确保了节点之间的局部路径与 AUV 运动学约束的一致性，有效避免了不必要的节点生成。

---

**算法 4-1: KSteer ( $q_{nearest}, q_{HPF}$ )**

---

```

1   $cost \leftarrow \infty$ ;
2  离散速度 $v$ 和角速度 $\omega$ 
3  for each  $v, \omega \in candidate$  do
4    转弯半径  $r = v/\omega$ ;
5     $\Delta\varphi = \omega \cdot \delta t$ ;
6     $\Delta x = r \cdot \sin(\Delta\varphi)$ ;
7     $\Delta y = r \cdot (1 - \cos(\Delta\varphi))$ ;
8     $x_{tmp} = x_{nearest} + (\Delta x \cdot \cos \varphi_{nearest} - \Delta y \cdot \sin \varphi_{nearest})$ ;
9     $y_{tmp} = y_{nearest} + (\Delta x \cdot \sin \varphi_{nearest} + \Delta y \cdot \cos \varphi_{nearest})$ ;
10    $\varphi_{tmp} = \text{atan}(\sin(\varphi_{nearest} + \Delta\varphi), \cos(\varphi_{nearest} + \Delta\varphi))$ ;
11    $tmpcost = \text{PathCost}(q_{nearest}, q_{HPF}, q_{tmp})$ ;
12   if  $tmpcost < cost$  then
13      $cost = tmpcost$ ;
14      $q_{new} = q_{tmp}$ ;
15   end if
16 end for
17 Return  $q_{new}$ .

```

---

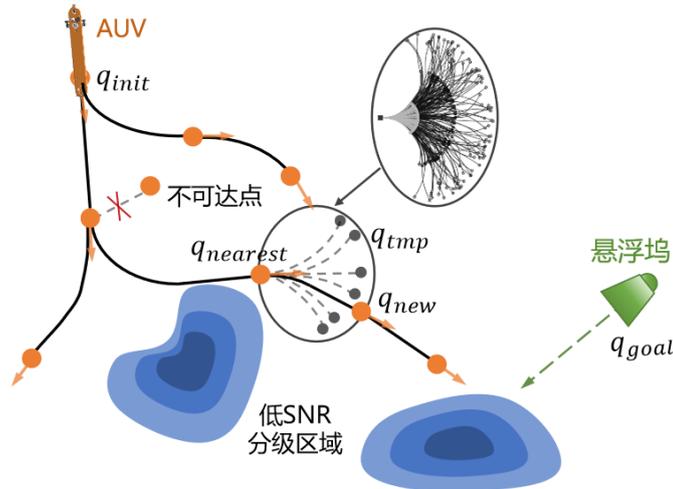


图 4.5 使用 KSteer 函数的节点扩展

算法 4-1 中的路径代价函数  $PathCost$  定义为:

$$cost(s_1, s_2, p) = m_1 \cdot \|\overline{s_1 p}\| + m_2 \cdot \|\overline{s_2 p}\| + m_3 \cdot |p(\varphi) - s_1(\varphi)| + m_4 \cdot \frac{\overline{s_1 s_2} \times \overline{s_1 p}}{\|\overline{s_1 s_2}\|} + m_5 \cdot \arccos \frac{\overline{v_1} \cdot \overline{s_1 s_2}}{\|\overline{v_1}\| \|\overline{s_1 s_2}\|} \dots \dots \dots (4.23)$$

式中,  $\overline{s_1 p}$ 、 $\overline{s_2 p}$ 和 $\overline{s_1 s_2}$ 分别表示从 $s_1$ 到 $p$ 的向量, 从 $s_2$ 到 $p$ 的向量, 从 $s_1$ 到 $s_2$ 的向量。 $p(\varphi)$ 和 $s_1(\varphi)$ 分别表示 $p$ 和 $s_1$ 的航向角,  $\|\cdot\|$ 表示向量的模,  $\overline{v_1}$ 表示 $s_1$ 的切向速度。该  $PathCost$  函数通过综合考虑路径的长度、平滑性、目标引导度和方向一致性, 能够生成一条快速向目标延伸、平滑且长度短的路径。

表 4.1 线性归一化相关变量

名称	最大值
节点扩展长度	$v_{max} \cdot \delta t$
HPF 引导距离	步长
AUV 转向角度	$\omega_{max} \cdot \delta t$
垂直距离	$v_{max} / \omega_{max}$
HPF 引导转向角度	$\pi$

对于 $PathCost(q_{nearest}, q_{HPF}, q_{tmp})$ 函数,  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ 和 $m_5$ 分别表示平衡节点扩展长度、HPF 引导距离、AUV 转向角度、 $q_{tmp}$ 与 $\overrightarrow{q_{nearest} q_{HPF}}$ 的垂直距离、HPF 引导转向角度的权重参数。考虑节点扩展长度以避免路径过长, 节省 AUV 能量; 通过引入 HPF 引导距离, 从而引导路径快速向 $q_{HPF}$ 延伸, 有效应对复杂环境; 引入 AUV 转向角度, 使路径更平滑, 防止出现急剧的转向; 平衡 $q_{tmp}$ 与 $\overrightarrow{q_{nearest} q_{HPF}}$ 的垂直距离和

HPF 引导转向角度，避免路径偏离 HPF 引导方向，不是主要优化目标。*PathCost* 函数中各部分的单位不同（长度和角度），对此进行线性归一化以统一到相同的尺度[0,1]，使权重设置更加合理。各部分的最大值设置如表 4.1 所示。

### 4.3.3 五次样条插值轨迹生成

在接驳场景中，接驳坞不仅有位置还有方向，为保证入坞的可靠性，AUV 在入坞近距离时一般需直线航行。下面分析终端约束条件，针对目标节点的方向要求，AUV 执行定向航行入坞，首先对接驳坞处的入坞空间区域进行划分，如图 4.6 所示。在不同颜色区域处，对 AUV 的航向  $\varphi$  要求不同，通过添加浅橙和绿色区域，增加 AUV 接驳成功的概率。绿色和灰色区域对 AUV 航向角约束较强，为 AUV 在其他区域能够顺利入坞预留了安全裕度。

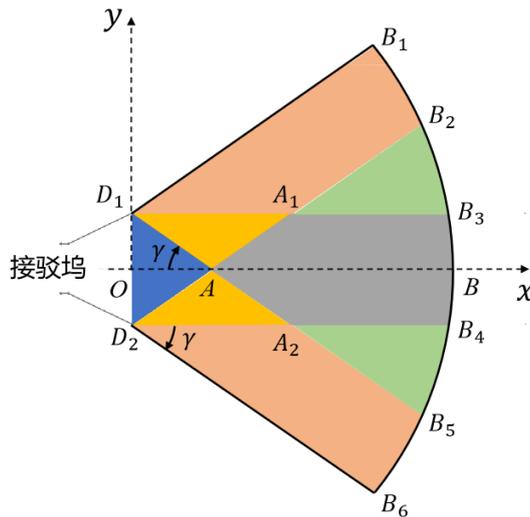


图 4.6 入坞空间区域划分

不同颜色区域内 AUV 的方向约束如下：

$$\begin{cases} -\gamma \leq \psi \leq \gamma, & \text{蓝色} \\ -\gamma \leq \psi \leq \tan^{-1}\left(\frac{y_{D1}-y_{auv}}{x_{auv}}\right) \text{ or } \tan^{-1}\left(\frac{y_{D2}-y_{auv}}{x_{auv}}\right) \leq \psi \leq \gamma, & \text{黄色和浅橙色} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_{D2}-y_{auv}}{x_{auv}}\right) \leq \psi \leq \tan^{-1}\left(\frac{y_{D1}-y_{auv}}{x_{auv}}\right), & \text{灰色和绿色} \end{cases} \quad (4.24)$$

式中， $\psi$  为 AUV 方向与接驳坞反方向的夹角。已知  $OD_1 = 0.9 \text{ m}$ ，通过第 3 章 AUV 入坞的流体仿真结论，可知  $\gamma = 35^\circ$ 。

近距离的入坞航行关系到 AUV 接驳能否成功，相比于远距离，该阶段更注重局部最优，不再考虑定位质量影响，而以轨迹平滑连续可微为目标。可行的轨迹必须考

虑并满足<sup>[159]</sup>: 1) 系统模型的非线性; 2) 运动学约束; 3) 平滑可微分。若已知 AUV 初始状态 (如位置、速度和加速度等), 以及接驳的期望状态, 即只考虑起点和终点的状态, 不考虑中间的状态, 以上问题可以建模为两点边界值问题 (Two Point Boundary Value Problem, TPBVP)。AUV 只能向前移动且受路径曲率约束, 规划出一条连接始末状态且满足约束条件的可行轨迹。

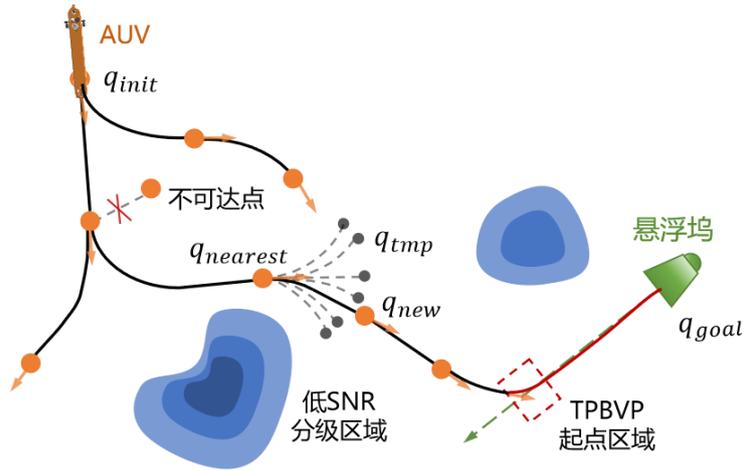


图 4.7 近距离多项式样条插值轨迹生成

对于 TPBVP 问题, 直接求解最优问题过程复杂, 利用系统的微分平坦性有利于轨迹生成和跟踪控制, 无需积分微分方程即可获得参考状态和输入。与无人机的微分平坦性类似, AUV 的平坦输出  $z$  的一般形式为  $z = (x, y, \varphi)$ 。为了确保运动的平滑性, 通过解决线性二次最小时间 (Linear Quadratic Minimum Time, LQMT) 问题, 从空间和时间参数中生成轨迹, 无约束的平坦输出轨迹优化问题描述如下<sup>[160]</sup>:

$$\min_{z(t)} \int_0^T v(t)^T \mathbf{W} v(t) dt \dots \dots \dots (4.25)$$

s. t.

$$z^{(s)}(t) = v(t), \forall t \in [0, T]$$

$$z^{[s-1]}(t_0) = \bar{z}_o$$

$$z^{[s-1]}(t_M) = \bar{z}_f$$

$$z^{[s-1]} = (z^T, \dot{z}^T, \dots, z^{(s-1)T})^T$$

式中,  $\mathbf{W}$  是一个正对角矩阵,  $\bar{z}_o$  为初始条件,  $\bar{z}_f$  为终端条件, 控制输入  $v(t)$  允许在有限的时间内不连续。

根据最优性条件可知, 当满足边界条件  $s - 1$  阶导数时, 式(4.25)存在唯一的显式解, 且为  $2s - 1$  阶多项式, 保证了轨迹的最优性和平滑性。Wang 等人<sup>[161]</sup>给出了多项式轨

迹参数的求解:

$$c = \mathbf{A}_B(T)d \dots \dots \dots (4.26)$$

式中,  $c$  为多项式系数,  $d$  为端点导数,  $\mathbf{A}_B(t)$  计算如下:

$$\mathbf{A}_B(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{0} \\ \mathbf{V}(t) & \mathbf{W}(t) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4.27)$$

s. t.

$$U_{ij} = \begin{cases} 1/(i-1)! & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases}$$

$$V_{ij}(t) = \frac{\sum_{k=0}^{s-\max(i,j)} (-1)^k \binom{s}{i+k} \binom{2s-j-k-1}{s-1}}{(j-1)! (-1)^i \cdot t^{s+i-j}}$$

$$W_{ij}(t) = \frac{\sum_{k=0}^{s-\max(i,j)} \binom{s-k-1}{i-1} \binom{2s-j-k-1}{s-1}}{(j-1)! (-1)^{i+j} \cdot t^{s+i-j}}$$

对以上问题, 本文采用最小化 jerk 求解, 即  $s = 3$ , 满足起点和终点的位置、速度和加速度约束, 如图 4.7 所示, 在 TPBVP 起点区域实现与 KSteer 扩展节点的平滑连接。通过式(4.24)约束速度方向, 并检查最大曲率、最大速度和最大加速度, 以满足 AUV 运动性能指标。与多个直线或圆弧段相比, 样条曲线能够提供更连续的前进运动。

## 4.4 实验与结果分析

### 4.4.1 实验设置与评价指标

在 AUV 接驳应用场景中, 核心的评价指标是定位精度, 而定位精度受到观测量噪声影响, 噪声大小则与接收信号的 SNR 有关。因此, 本节基于 Bellhop 水声信道传播模型, 结合海洋声速剖面信息模拟水声信道环境, 生成 SNR 的地理位置分布图, 表征观测量噪声的大小, 进而分析其对定位精度的影响。然后对本章所提出的方法进行仿真分析, 验证其性能。

#### 1. 实验设置

水声信道质量受复杂海洋环境的多因素影响, 具有显著的空间非均匀性, 对此, 通过随机设置不同高度的海底山脉地形, 以增加局部区域的声传播损失。基于声纳方程, 计算信噪比 SNR 的空间分布特性, 如图 4.8 所示, SNR 范围为 0~30 dB, 其中低 SNR 范围定义为水声信道劣质区域。仿真环境设定为二维空间, 半径为 0.6 km, 其中, 悬浮坞目标点位于原点(0,0), 并以红色五角星标记, 悬浮坞附近的黑色矩形区域为末

端样条轨迹生成的 TPBVP 起始范围。根据 AUV 出发点与悬浮坞目标点的位姿设置，如表 4.2 所示，本研究设计了三种典型水声环境场景：恶劣环境 A，即 AUV 出发点位于低 SNR 区域内；中等环境 B，即悬浮坞正前方存在低 SNR 区域；以及良好环境 C，即悬浮坞侧方存在低 SNR 区域。通过上述场景设置，分析不同水声信道条件下本文 HKS-RRT\*方法规划 AUV 导引入坞路径的适应性。

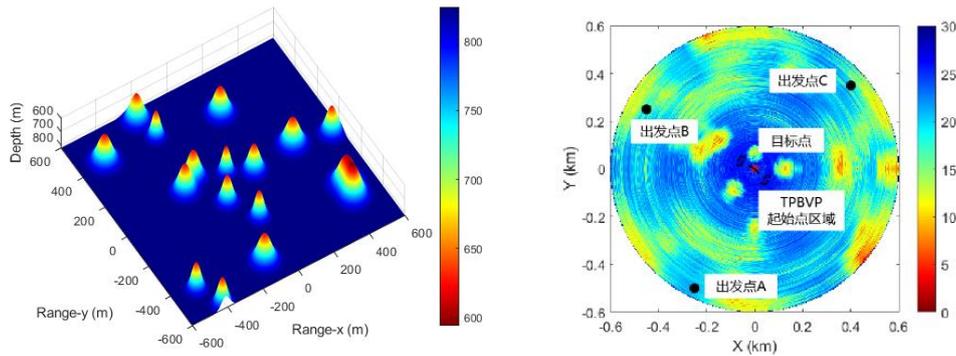


图 4.8 水声传播 SNR 分布

AUV 的运动学参数设置为：速度范围  $v \in [0.6, 1.2]$  m，角速度范围  $w \in [-\pi/12, \pi/12]$  rad/s，时间步长为 5 s。RRT\*剪枝半径为 15 m。为验证方法的稳定性，本文在每种环境中对每个方法进行 100 次独立测试，统计其路径质量和定位精度等评价指标。

表 4.2 场景出发点以及目标点设置

场景	出发点设置	目标点设置	样条轨迹起始范围的中点
恶劣环境 A	$[-0.25 \text{ km}, -0.5 \text{ km}, \pi/6]$	$[0, 0, -\pi/4]$	$[0.047 \text{ km}, -0.047 \text{ km}]$
中等环境 B	$[-0.45 \text{ km}, 0.25 \text{ km}, -\pi/4]$	$[0, 0, 5*\pi/6]$	$[-0.0575 \text{ km}, 0.033 \text{ km}]$
良好环境 C	$[0.4 \text{ km}, 0.35 \text{ km}, -\pi]$	$[0, 0, 5*\pi/6]$	$[-0.0575 \text{ km}, 0.033 \text{ km}]$

## 2. 评价指标

路径规划的核心目标是通过绕过低 SNR 区域，来提高定位精度。本节从路径质量和定位精度两方面介绍评价指标。

### (1) 路径质量

路径质量评价指标主要衡量路径的几何特性和计算效率，根据 AUV 对规划路径的效率、实时能力、可执行性和入坞方向等要求，采用的评价指标具体如下：

**路径长度：**指从起点到终点的路径总长度，评估 AUV 航行能耗，数学表达式为：

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) \dots\dots\dots(4.28)$$

式中,  $L$  为路径长度,  $p_i$  为路径中的第  $i$  个节点,  $d(p_i, p_{i+1})$  表示相邻节点  $p_i$  与  $p_{i+1}$  之间的距离。

**路径节点数:** 指构成路径的位置点数, 反映路径的复杂度。节点数越少, 路径越简洁, 降低执行难度。

**计算时间:** 指从输入环境信息到生成最终路径所需的时间, 反映方法应对环境的响应速度。

**路径最大转向角度:** 指路径中相邻线段之间夹角的最大值, 衡量路径的平滑性和 AUV 的运动特性, 其数学表达式为:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} \left( \arccos \left( \frac{(p_i - p_{i-1}) \cdot (p_{i+1} - p_i)}{|p_i - p_{i-1}| |p_{i+1} - p_i|} \right) \right) \dots \dots \dots (4.29)$$

式中,  $\theta_{max}$  为最大转向角度,  $p_i$  为路径中的节点。

**目标方向夹角:** 指路径到达 TPBVP 起点区域的终点方向与悬浮坞目标方向之间的夹角, 评估对路径终点方向的引导效果, 其数学表达式为:

$$\phi = \text{mod}(\arctan 2(v_y, v_x) - \varphi + \pi, 2\pi) - \pi \dots \dots \dots (4.30)$$

式中,  $(v_x, v_y)$  为终点速度方向的向量分量,  $\varphi$  为目标方向角。

## (2) 定位精度

对于声学导引来说, 定位精度的评价指标包括位置测量偏差和方位测量偏差。一方面, 与目标间的距离通过测量传播时间获得, 时间测量的精度直接影响距离测量的精度。根据《水下定位与导航技术》<sup>[162]</sup>以及信号处理理论, 时间测量精度与接收信号/噪声比有关, 具体地, 距离测量的标准差可以表示为:

$$\sigma_d = \frac{c}{B\sqrt{SNR}} \dots \dots \dots (4.31)$$

式中,  $c$  为声速,  $B$  为接收信号带宽(Hz),  $SNR$  为接收机输出的功率信噪比。

另一方面, 方位测量的标准差表示为:

$$\sigma_\theta = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi d}\sqrt{SNR}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_{mx}} \dots \dots \dots (4.32)$$

式中,  $\lambda = c/f_0$  为波长,  $d$  为基阵尺寸(m),  $\theta_{mx}$  为信号入射角分量。

## 4.4.2 HKS-RRT\* 方法的有效性验证

相比于一般的路径规划, AUV 接驳导引的路径规划更加注重向目标点收敛速度、是否优先选择定位质量较高的区域、并满足目标点的方向约束。此外, 针对悬浮坞方

向的变化，能够实时反馈并调整路径。图 4.9 为三种环境下 HKS-RRT\*规划的 AUV 入坞路径，可以看出，规划的路径光滑且均绕行成功绕过低 SNR 区域，同时在悬浮坞方向发生变化时，能实时反馈并重新规划。

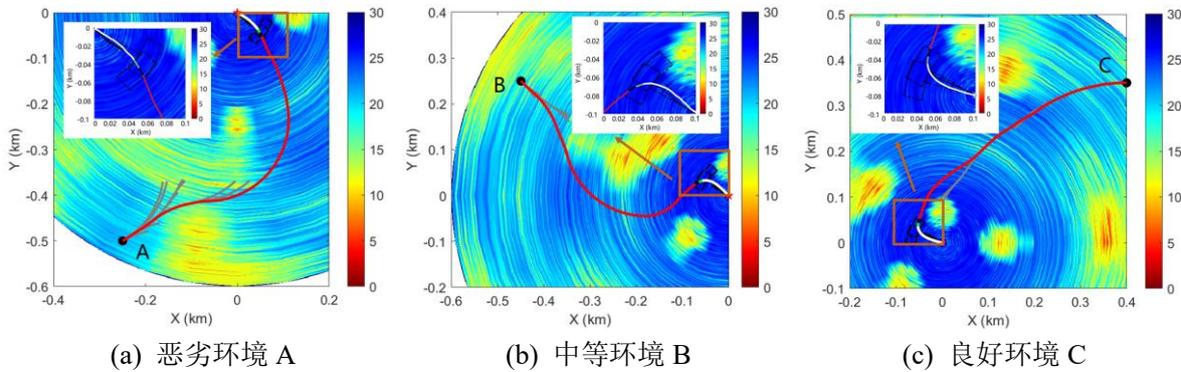


图 4.9 三种环境下 HKS-RRT\*规划的 AUV 入坞路径（灰色为生长树，红色为规划的 AUV 入坞路径，黑色为近距离样条轨迹，白色为悬浮坞方向改变重新生成轨迹）

在图 4.9 (a)环境 A 中，AUV 航行起始点处于定位质量较低的区域。在满足速度和角速度运动学约束的条件下，本方法通过多次扩展随机树，成功探索到一条可行路径以离开低质量区域。受入坞方向引导作用，路径在接近目标点时会提前调整路径的切线方向，逐步逼近入坞方向。在图 4.9 (b)环境 B 中，为避开低质量区域，路径呈现较大的弧度。在接近目标点时，受入坞位置和方向引导作用，路径再次转弯并准确指向目标位置。图 4.9 (a)和图 4.9 (b)展示了 HKS-RRT\*对复杂环境的适应性。在图 4.9 (c)环境 C 中，出发点位于水声效果良好的区域。随机树直接向目标点扩展，从而减少了无效的节点扩展，突出了 HKS-RRT\*在简单环境中的优越性能。受入坞方向引导作用，路径呈微弧状。当随机树扩展至低质量区域附近时，HKS-RRT\*在 AUV 运动学约束下，调整方向以绕行并最终到达目标点。实验结果表明，HKS-RRT\*方法能够在复杂水声环境下生成满足运动学约束且避开低 SNR 区域的优化路径，同时具备对悬浮坞方向变化的实时调整能力。

#### 4.4.3 HKS-RRT\*与其他方法的对比

在 AUV 的接驳过程中，路径优化的目标会随着 AUV 与接驳坞的距离变化而不同：近距离主要关注路径的连续高阶可微性，以确保 AUV 运动的平滑性和稳定性；而远距离则需优先保证水声定位效果，以提高定位精度。因此，本节重点针对远距离路径规划，进行对比分析。考虑对低 SNR 区域的绕行及运动学约束，K-RRT\*和 P-RRT\*

分别在随机树扩展过程中考虑了移动机器人的运动学约束和势场引导节点扩展，选择 K-RRT\* 和 P-RRT\* 进行比较分析，并与第 2 章中提到的制导律类的 LOS 方法进行对比，以验证 HKS-RRT\* 的性能。

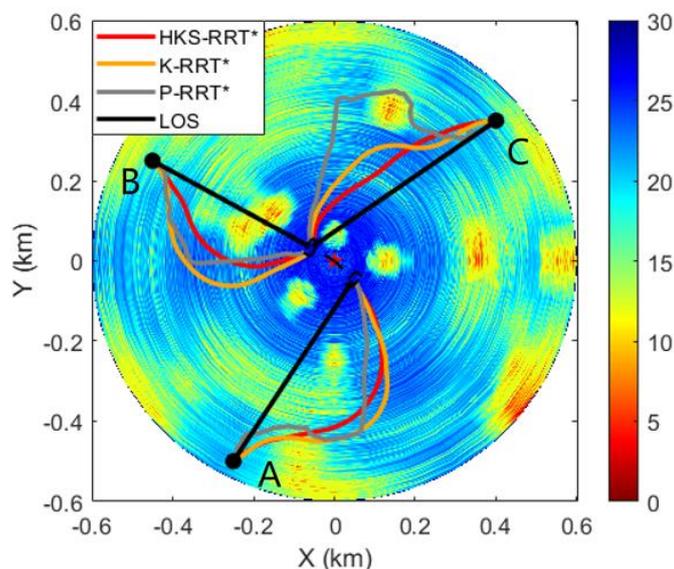


图 4.10 不同方法规划的 AUV 导引路径

图 4.10 为不同方法在良好、中等和恶劣环境下的路径规划结果，虽然 HKS-RRT\*、K-RRT\*、P-RRT\* 和 LOS 这四种方法均生成到达矩形范围的路径，但可以看出，由 HKS-RRT\* 生成的路径更光滑、更收敛，除 LOS 外路径长度更短。下面讨论这四种方法实验的详细统计结果。

### (1) 路径效果

图 4.11 所示的路径长度统计数据表明，HKS-RRT\* 在良好、中等和恶劣三种环境中均优于 K-RRT\* 和 P-RRT\*，路径长度更短且收敛性更高。值得注意的是，LOS 方法由于直接指向目标点，其路径长度最短。

根据表 4.3 的统计结果可知，HKS-RRT\* 的路径长度相比于 K-RRT\* 最大减少 11.43%，相比于 P-RRT\* 最大减少 37.97%，而相比于 LOS 则最大增加 27.11%。特别地，在恶劣和中等环境中，HKS-RRT\* 的优势更为明显，这主要由于采用的分级势场法能够有效调整低 SNR 区域的作用范围，快速引导随机树节点驶出局部低 SNR 区域。在良好环境中，HKS-RRT\* 的路径长度与 LOS 最短路径相近，表明分级势场法能够直接地引导随机树向目标点扩展，从而生成更短、更高效的路径。

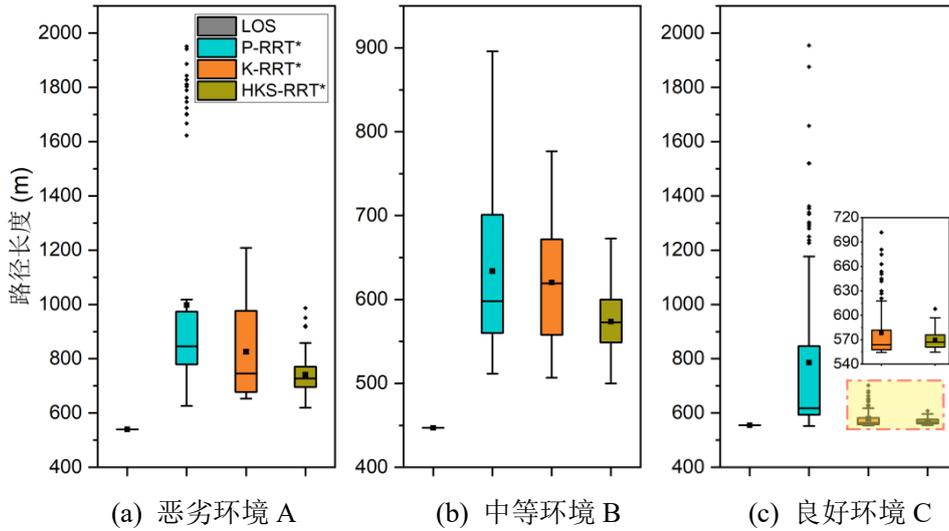


图 4.11 路径长度统计数据

表 4.3 平均路径长度统计结果

方法 \ 环境	恶劣 A	中等 B	良好 C
HKS-RRT*	740.89 m	573.62 m	569.72 m
K-RRT*	825.55 m (+11.43%)	620.33 m (+8.14%)	578.39 m (+1.52%)
P-RRT*	998.08 m (+34.71%)	633.96 m (+10.52%)	786.02 m (+37.97%)
LOS	540 m (-27.11%)	447 m (-22.07%)	555 m (-2.58%)

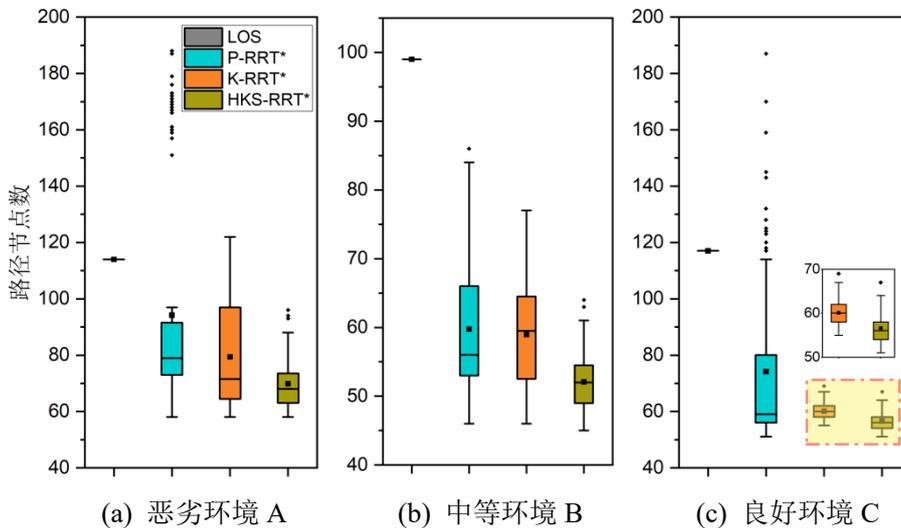


图 4.12 路径节点数统计数据

图 4.12 为路径节点数统计数据，与路径长度结果相似，HKS-RRT\*在三种环境中都优于 K-RRT\*和 P-RRT\*，而 LOS 方法节点数较多。这是由于 RRT\*框架的优化机制，对剪枝半径 15 m 范围内的节点进行了重新连接，减少了节点数量。相比之下，P-RRT\*

受低 SNR 区域的影响，采样节点的随机性增加，导致节点数量多且分布发散，降低路径规划的效率和稳定性。

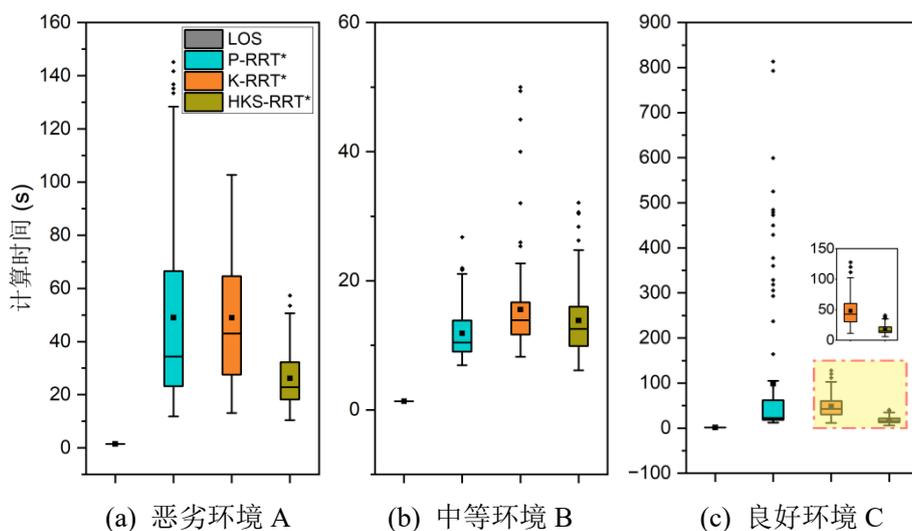


图 4.13 方法计算时间统计数据

图 4.13 为方法计算时间统计数据，在恶劣和良好环境下，HKS-RRT\*均优于 K-RRT\*和 P-RRT\*，而在中等环境下，HKS-RRT\*的计算时间略发散。这是由于 HKS-RRT\*在绕行低 SNR 区域时，尤其是目标点附近存在低 SNR 区域的情况下，需要平衡水声质量和节点的综合引导势场作用，使路径逐步逼近目标点并满足方向约束，从而增加了计算时间。

根据表 4.4 的统计结果可知，HKS-RRT\*的计算时间相比于 K-RRT\*最大减少 174.45%；相比于 P-RRT\*，在中等环境下增加 14.38%，在恶劣和良好环境下最大减少 37.97%；相比于 LOS 则最大增加 94.27%。总的来说，HKS-RRT\*整体表现出较高的计算效率。

表 4.4 平均计算时间统计结果

方法 \ 环境	恶劣 A	中等 B	良好 C
HKS-RRT*	26.19 s	13.86 s	17.61 s
K-RRT*	48.96 s (+96.94%)	15.55 s (+12.24%)	48.34 s (+174.45%)
P-RRT*	49.02 s (+87.14%)	11.86 s (-14.38%)	98.62 s (+459.93%)
LOS	1.5 s (-94.27%)	1.35 s (-90.26%)	1.54 s (-91.26%)

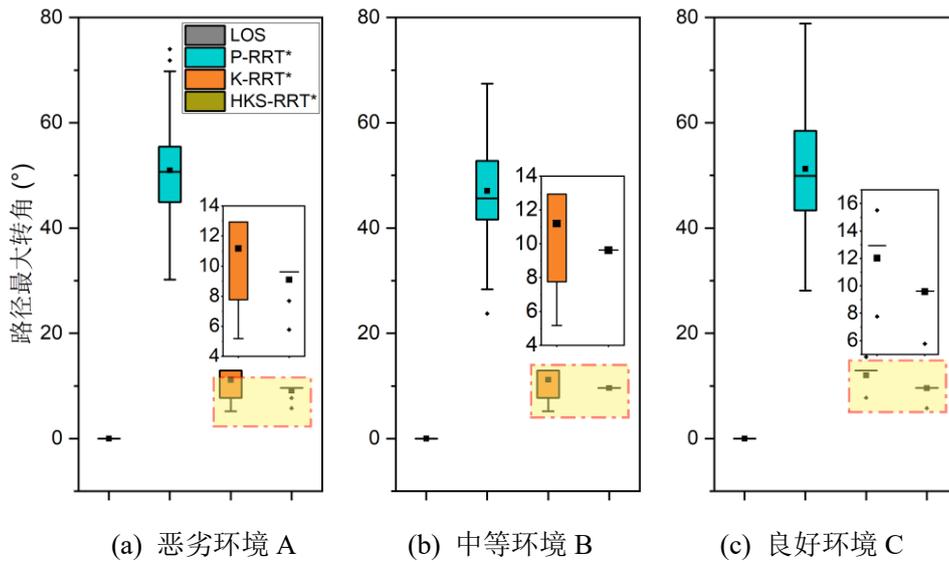


图 4.14 路径最大转向角度统计数据

路径最大转向角是衡量路径平滑性和可行性的重要指标。从图 4.14 可以看出，HKS-RRT\*在路径最大转向角方面表现最优，且具有较强的收敛性，而 P-RRT\*未考虑运动学约束，所以数值较大且分散。这是 HKS-RRT\*结合节点引导势场和运动学约束的综合效果。首先，基于运动学约束的节点扩展，确保生成的路径满足 AUV 的速度和角速度限制，从而提高了路径的可行性和平滑性。其次，通过引入节点引导势场，使逐步逼近目标点并满足方向约束，进一步优化了路径的几何特性。由表 4.5 可知，HKS-RRT\*相比 K-RRT\*最大减少 25.27%，体现了其在路径平滑性和运动学可行性方面的显著优势。

表 4.5 平均路径最大转向角度统计结果

方法 \ 环境	恶劣 A	中等 B	良好 C
HKS-RRT*	9.10°	9.62°	9.58°
K-RRT*	11.17° (+22.83%)	11.20° (+16.46%)	12.03° (+25.57%)
P-RRT*	50.97° (+460.39%)	47.07° (+389.49%)	51.26° (+435.21%)
LOS	0	0	0

目标方向夹角是衡量路径对终点方向引导效果的关键指标，直接影响 AUV 入坞的难易程度。从图 4.15 可以看出，三种环境下，HKS-RRT\*整体表现较优且具有收敛性。P-RRT\*在三种环境下的目标方向夹角最小值低于 HKS-RRT\*，这是由于 P-RRT\*未考虑 AUV 运动学约束，以直线方式扩展到目标节点，从而获得较小的目标方向夹

角。然而，采样节点的随机性较强，导致目标方向夹角的分布较为发散。相比之下，LOS 方法的目标方向夹角主要取决于 AUV 的出发点位置，其性能受位置变化的影响较大。根据表 4.6 的统计结果，HKS-RRT\* 相比 K-RRT\* 最大减少 71.92%，体现了方向引导性的重要作用。

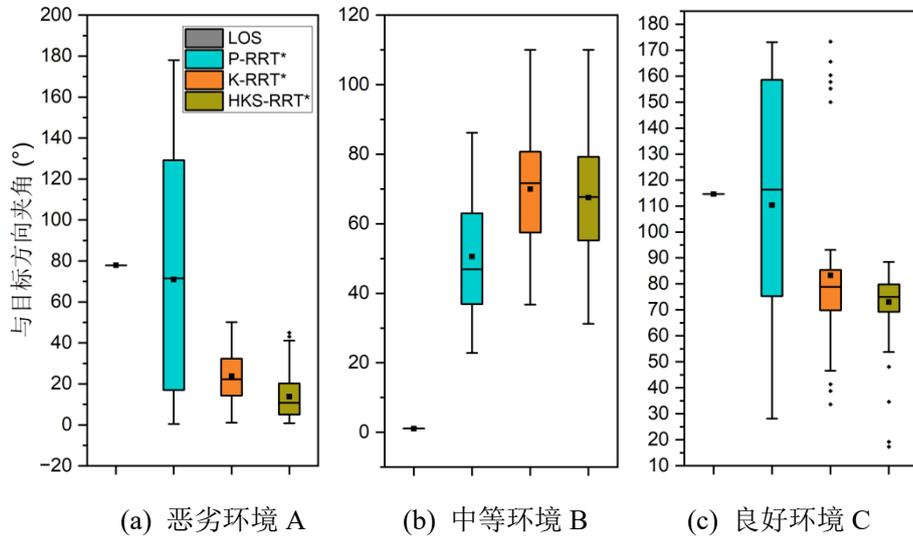


图 4.15 目标方向夹角统计数据

表 4.6 平均目标方向夹角统计结果

方法 \ 环境	恶劣 A	中等 B	良好 C
HKS-RRT*	13.83°	67.54°	73.04°
K-RRT*	23.78° (+71.92%)	69.97° (+3.61%)	83.28° (+14.02%)
P-RRT*	70.96° (+412.95%)	50.54° (-25.16%)	110.34° (+51.07%)
LOS	77.92° (+463.28%)	1.09° (-98.39%)	114.59° (+56.89%)

综上所述，实验结果表明，与 K-RRT\* 和 P-RRT\* 相比，HKS-RRT\* 在路径长度、路径节点数、计算时间、路径平滑度和目标方向夹角等方面表现出较大的优势和收敛性。HKS-RRT\* 的路径长度相比于 K-RRT\* 最大减少 11.43%，相比于 P-RRT\* 最大减少 37.97%，而相比于 LOS 则最大增加 27.11%。HKS-RRT\* 的计算时间相比于 K-RRT\* 最大减少 174.45%；相比于 P-RRT\*，在中等环境下增加 14.38%，在恶劣和良好环境下最大减少 37.97%；相比于 LOS 则最大增加 94.27%。HKS-RRT\* 的路径最大转向角和目标方向夹角相比 K-RRT\* 分别最大减少 25.27% 和 71.92%。

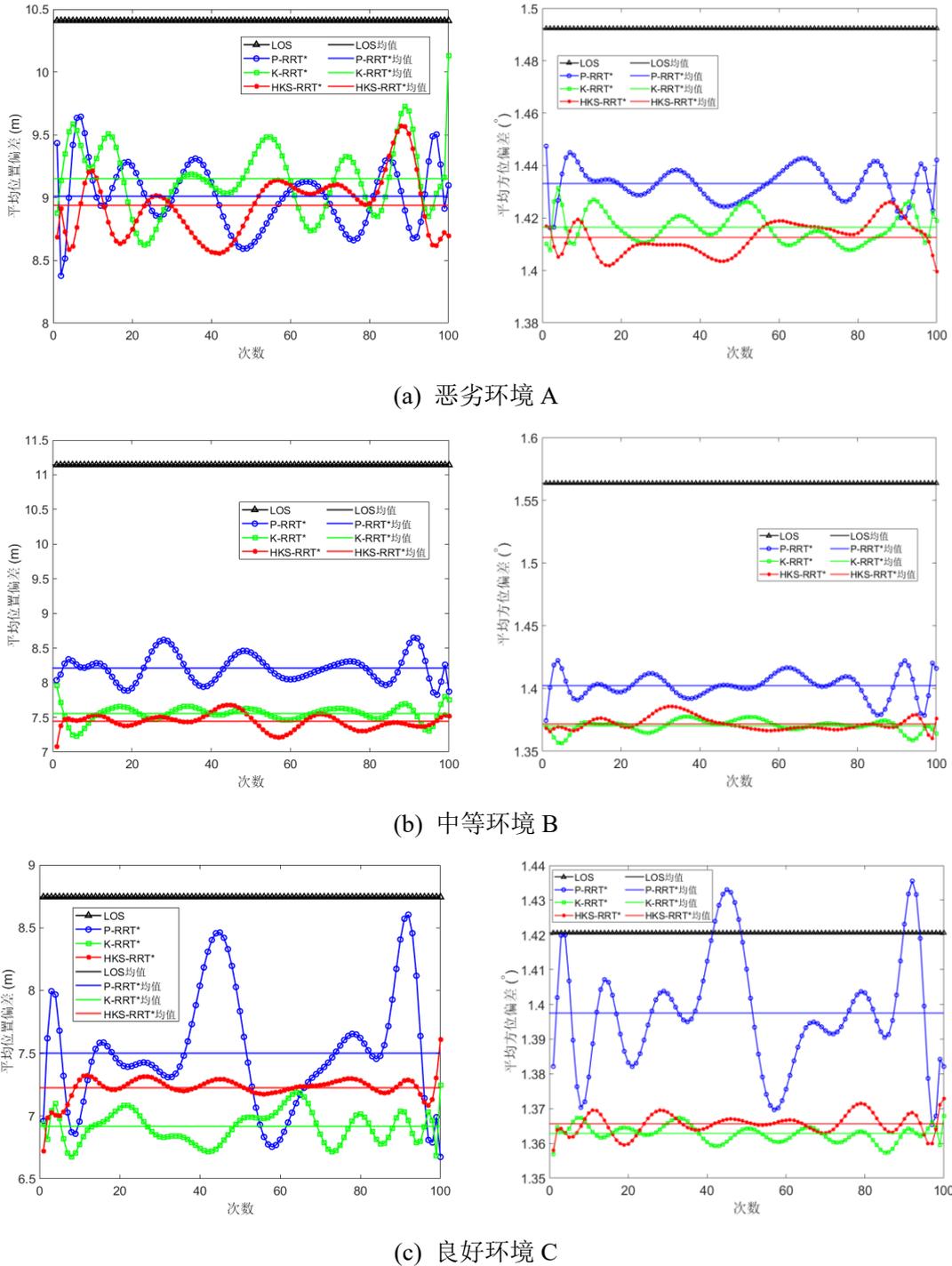


图 4.16 不同环境下的平均位置偏差和平均方位偏差

## (2) 通信定位效果

图 4.16 展示了平均位置偏差和平均方位偏差统计数据。在图 4.16(a)中，HKS-RRT\*、K-RRT\*和 P-RRT\*的位置偏差均表现出较大的波动性。在图 4.16(b)和图 4.16(c)中，HKS-RRT\*的稳定性最高，而 P-RRT\*的波动性最明显，这一结果与路径效果分析的收敛性结论一致。根据表 4.7 的统计结果可知，在三种环境条件下，HKS-RRT\*的位置偏

差相比于 P-RRT\*最大减少 10.33%，相比于 LOS 最大减少 49.75%；HKS-RRT\*的方位偏差相比于 P-RRT\*最大减少 2.33%，相比于 LOS 最大减少 13.98%。特别地，在恶劣环境下，HKS-RRT\*相比于 K-RRT\*的位置偏差和方位偏差分别减少 2.41%和 0.27%；在中等环境下，位置偏差减少 1.56%，方位偏差相等；在良好环境下，位置偏差和方位偏差分别增加 4.30%和 0.21%。这是由于 HKS-RRT\*会动态调整低 SNR 区域的范围，允许路径点经过少量低 SNR 区域，导致在良好环境下，其位置偏差和定位偏差略高于 K-RRT\*。

表 4.7 不同方法的位置偏差和方位偏差均值

类别	方法	恶劣 A	中等 B	良好 C
位置偏差	HKS-RRT*	8.94 (m)	7.44 (m)	7.23 (m)
	K-RRT*	9.15 (m) (+2.41%)	7.56 (m) (+1.56%)	6.92 (m) (-4.30%)
	P-RRT*	9.01 (m) (+0.84%)	8.21 (m) (+10.33%)	7.50 (m) (+3.82%)
	LOS	10.41 (m) (+16.45%)	11.14 (m) (+49.75%)	8.74 (m) (+21%)
方位偏差	HKS-RRT*	1.41°	1.37°	1.37°
	K-RRT*	1.42° (+0.27%)	1.37°	1.36° (-0.21%)
	P-RRT*	1.43° (+1.45%)	1.40° (+2.21%)	1.40° (+2.33%)
	LOS	1.49° (+5.65%)	1.56° (+13.98%)	1.42° (+4.02%)

## 4.5 本章小结

本章针对水声环境下 AUV 回坞导引路径规划问题，考虑定位质量、运动学特性和目标方向这三方面约束，提出了一种 HKS-RRT\*方法，通过主动规避低定位质量区域，同时满足 AUV 运动学和入坞方向约束，优化声学导引的定位精度和路径平滑度。HKS-RRT\*方法主要包括：1) 根据定位质量分布特征，设计分级势场法引导节点生长，动态调整低定位质量作用区域以及排斥力，并引入多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力；2) 引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法以控制节点扩展，改进路径成本函数；3) 针对 AUV 近距离入坞，采用多项式样条插值生成平滑连续的高阶可微分轨迹。为了对方法的性能进行验证，进行了恶劣、中等和良好三种水声环境下的仿真实验。结果表明，1) HKS-RRT\*的路径长度相比于 K-RRT\*最大减少 11.43%，相比于 P-RRT\*最大减少 37.97%，而相比于 LOS 则最大增加 27.11%；HKS-RRT\*的路径

最大转向角和目标方向角相比 K-RRT\*分别最大减少 25.27%和 71.92%; 2) HKS-RRT\*的位置偏差相比于 P-RRT\*最大减少 10.33%, 相比于 LOS 最大减少 49.75%; HKS-RRT\*的方位偏差相比于 P-RRT\*最大减少 2.33%, 相比于 LOS 最大减少 13.98%; HKS-RRT\*与 K-RRT\*的定位偏差相近。综合来看, HKS-RRT\*在路径长度、路径平滑度和定位质量上表现出色, 能够有效构建引导节点, 提高路径规划效率, 适用于复杂水声环境中的路径规划任务。

## 第5章 结论与展望

### 5.1 本文总结

AUV 水下接驳系统是海底观测网的关键组成部分，通过实现 AUV 与海底观测网节点间的精准接驳，建立能量与数据的双向传输通道，显著提升 AUV 的续航能力和作业效率。接驳系统的应用不仅提高了海洋环境数据的采集效率，还通过自主维护与能源补给，确保了海底观测网的持续稳定运行。这一前沿技术极大地增强了海底观测系统的自主性与持久性，为深海科学研究、环境监测以及资源勘探开发提供了可靠的技术支撑，具有重要的科学价值与应用前景。

面向局部海域短期监测与机动海域灵活作业的应用需求，本文针对当前水下接驳系统在海洋环境适应性、入坞顺畅性、声学导引等方面的技术瓶颈，开展新型海底悬浮式接驳系统的研究，并在真实湖泊和海洋环境中进行了系统性试验验证。海上试验发现，AUV 入坞过程中悬浮坞存在艏摇和俯仰运动，同时，AUV 声学导引表现出定位精度不足及数据不连续等问题。为此，本文分别从悬浮坞运动稳定性和 AUV 声学导引准确性两个方面，开展深入研究，以提高入坞成功率。取得的成果总结如下：

(1) 围绕海底观测网中 AUV 安全且快速接驳的应用场景，针对水下固定式接驳系统存在的环境适应性不足以及光学导引作用距离严重受限等问题，本文首次提出了一种基于全声学导引的 AUV 悬浮式接驳系统 (MUDS)。该系统的关键点在于，首先考虑海底地势、沉积物、海流等因素，采用系泊方式，设计并研制了海底悬浮式接驳坞 (SMFD)，基于一种六边形正棱台结构，使浮力均匀分布且量值可调，保持悬浮稳定性，提高了接驳坞对复杂海底环境的适应能力；然后，考虑悬浮坞方向测量传感器限制和 AUV 航行不平稳等因素，提出了一种交互式声学渐近补偿导引方法 (IAAC)，结合交互式声学加权位置估计和基于横向偏差的比例制导策略，利用滑动窗口动态聚集定位信息，根据横向偏差按比例调整 AUV 航向，使逐步平滑收敛至目标路径，提高 AUV 进入终端导引阶段的精度。本文实现了悬浮式接驳系统，并开展了湖上试验和海上试验。试验结果表明，SMFD 的系泊设计方便快捷，能够在海流达 2 kn 时保持稳定悬浮姿态。在接驳过程中，AUV 成功定位到 SMFD，并沿中轴线向其航行完成入坞。在 14 次湖泊试验中，横向距离偏差平均值为 0.53 m，其中 78.57% 的偏差小于 0.8 m，

航向偏差在  $4^{\circ}\sim 19.29^{\circ}$  之间, 表明定位和通信性能满足接驳要求。在 8 次海上试验中, 横向距离偏差平均值为 1.37 m, 其中 37.5% 的偏差小于 0.8 m, 航向偏差平均值为  $19.25^{\circ}$ 。垂向距离偏差 CEP 平均值达到斜距的 0.85%, 表明 100 米内的多次定位可以满足接驳要求。湖泊和海上试验共同验证了 MUDES 在声学引导下进行 AUV 接驳的有效性。

(2) 针对 AUV 入坞接触作用下悬浮坞的运动响应问题, 本文基于计算流体力学仿真模拟技术, 建立了一种基于悬浮坞的 AUV 入坞接触耦合运动响应数值计算及仿真模型 (CCNM-AUV), 有效解决了 AUV 入坞过程中涉及的多体接触动力学问题, 并在有限计算资源和时间效率的约束下优化入坞过程。首先, 该模型采用重叠网格技术划分计算域, 通过网格独立性试验, 确定了最佳网格设置。AUV 轴向速度和 SMFD 艏摇角的仿真结果与海上试验结果具有较高的一致性, 验证了该模型能够有效捕捉 AUV 和 SMFD 的关键运动特性。随后, 模拟了洋流下的 SMFD 稳定性以及入坞过程中的运动响应, 分析了 SMFD 关键设计参数 (如体积、转动惯量、质量和系泊链刚度) 对入坞过程的影响。基于这些分析结果, 进一步优化了 SMFD 的设计参数, 以提升其在实际应用中的性能。最后, 在优化后的 SMFD 基础上, 对不同工况入坞条件下的 SMFD 和固定坞分别进行了 AUV 入坞模拟。通过对比分析两者的运动响应、入坞时间和准确度, 验证了 SMFD 在入坞效率、平稳性和安全性方面具有显著优势。

(3) 针对复杂水声信道环境下 AUV 自主导引入坞问题, 考虑定位精度、AUV 运动学和入坞方向三种约束, 本文提出了一种基于分级运动学样条快速随机探索树的 AUV 导引入坞路径规划方法 (HKS-RRT\*), 实现了可主动规避低 SNR 区域并满足入坞方向和运动学约束的高效导引路径。首先, 基于 Bellhop 模拟了水声信道环境, 生成 SNR 水平空间分布图。随后, HKS-RRT\* 基于 RRT\* 框架, 首先设计了一种分级势场法引导节点生长方向, 根据 SNR 分布对水声信道恶劣环境区域划分等级, 定义不同作用距离的排斥力, 并引入多项式单峰函数实现随距离非对称的方向吸引力; 然后, 引入了一种 AUV 运动控制参数采样方法来控制节点扩展, 基于节点扩展长度、势场引导距离、AUV 转向角度、垂直距离、势场引导转向角度设计路径成本函数; 最后, 针对近距离接驳的两点边值问题, 利用系统的微分平坦性, 采用五次样条插值方法生成平滑连续的高阶可微分轨迹。实验结果表明, 在良好、中等、恶劣三种声场环境下, HKS-RRT\* 在路径长度、路径平滑度和定位质量方面效果出色, 有效构建引导节点, 提高路径规划效率; 与典型制导律方法 (如视线法) 相比, 位置偏差最大减少 49.75%, 方位

偏差最大减少 13.98%。

本文根据实际应用场景需求，以及当前接驳系统存在的局限性，提出了一种新型的强环境适应性的 MUDS 系统，并在实际应用中实现。该系统通过交互式全声学导引技术、优化 SMFD 设计与考虑定位质量的导引路径规划方法，实现了 AUV 在多样化海洋环境中的安全、高效接驳。通过这一系统，可以显著提升 AUV 的作业能力和海洋监测的灵活性，为进一步发展 AUV 常驻技术奠定了坚实基础。

## 5.2 研究展望

本文提出的水下悬浮式接驳系统主要针对海底的安全灵活接驳需求，旨在为 AUV 提供可靠、便利和适应性强的接驳方案。虽然针对水下接驳系统的相关研究取得了一些阶段性的成果，且在真实的海洋环境中得到了验证，但是海底悬浮式接驳系统仍然处于初期的探索阶段，未来还有很多工作可以进一步展开。

(1) 海底悬浮坞的锥形-平台复合设计及动态性能研究：鉴于现有接驳坞（锥式、平台式、杆式）各有局限，难以兼容不同类型的 AUV 入坞，提出锥形-平台复合悬浮坞设计，采用模块化可重构框架，支持不同尺寸及作业模式的 AUV 自主入坞。并进一步分析其动态响应性能，提升接驳效率与适应性。

(2) 复杂海洋环境下 AUV 自学习紧耦合智能导引研究：针对复杂海洋环境中 AUV 导引系统的可靠性不足和干扰鲁棒性差问题，对 AUV 运动特性、环境感知和导引策略进行紧耦合，采用自学习智能算法实现导引策略的逐步优化，在多次接驳任务中，逐步提升导引系统的可靠性。

(3) 动态水流扰动下 AUV 自适应导引接驳算法研究：鉴于悬浮坞在复杂海流和海况变化下的方向摆动特性，设计基于非对称声学信标阵列的实时位姿估计方法，实时估计悬浮坞方向。在此基础上，融合实时海流环境感知数据，设计具有流场预测能力的改进型 RRT\* 路径规划算法，通过模型预测控制实现 AUV 在时变流场中的轨迹跟踪，提高航行稳定性。



## 参考文献

- [1] Toro N, Robles P, Jeldres R I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103699.
- [2] 曹博涵. 全球油气勘探开发趋势及对我国油气行业的启示[J]. *当代石油石化*, 2023, 31(1): 31-37.
- [3] Liu G, Chen L, Liu K, et al. A swarm of unmanned vehicles in the shallow ocean: A survey[J]. *Neurocomputing*, 2023, 531: 74-86.
- [4] Button R, Kamp J, Curtin T, et al. A survey of missions for unmanned undersea vehicles[M]. Santa Monica, CA: RAND, 2009.
- [5] Xia P, Xu F, Song Z, et al. Sensory augmentation for subsea robot teleoperation[J]. *Computers in Industry*, 2023, 145: 103836.
- [6] Zhou J, Si Y, Chen Y. A review of subsea AUV technology[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1119.
- [7] 李一平, 李硕, 张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状[J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2016, 8(02): 217-222.
- [8] Andrew J. L, R. W, Robert U. Large-scale energy delivery to enable persistent monitoring subsea[J]. *Teledyne Energy System Incorporated*, 2022.
- [9] Liu J, Yu F, He B, et al. A review of underwater docking and charging technology for autonomous vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 297: 117154.
- [10] Hagen P E, Størkersen N, Marthinsen B E, et al. Rapid environmental assessment with autonomous underwater vehicles—Examples from HUGIN operations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 69(1-2): 137-145.
- [11] Sarda E I, Dhanak M R. A USV-based automated launch and recovery system for AUVs[J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2016, 42(1): 37-55.
- [12] Szczotka M. AUV launch & recovery handling simulation on a rough sea[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 246: 110509.
- [13] Sarda E I, Dhanak M R. Launch and recovery of an autonomous underwater vehicle from a station-keeping unmanned surface vehicle[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 44(2): 290-299.
- [14] 徐会希, 吕凤天, 石凯, 等. 深海长期驻留自主水下机器人系统研究现状与发展趋势[J]. *机器人*, 2023, 45(06): 720-736.
- [15] Lin M, Yang C. Ocean observation technologies: A review[J]. *Chinese Journal of*

- Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 32.
- [16] Song Z, Marburg A, Manalang D. Resident subsea robotic systems: A review[J]. Marine Technology Society Journal, 2020, 54(5): 21-31.
- [17] Hobson B W, McEwen R S, Erickson J, et al. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21" AUV[C]//OCEANS 2007. IEEE, 2007: 1-6.
- [18] Wang T, Zhao Q, Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system[J]. Ocean Engineering, 2021, 224: 108744.
- [19] Roper D T, Phillips A B, Harris C A, et al. Autosub long range 1500: An ultra-endurance AUV with 6000 km range[C]//OCEANS 2017-Aberdeen. IEEE, 2017: 1-5.
- [20] Guo J, Li D, He B. Intelligent collaborative navigation and control for AUV tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(3): 1732-1741.
- [21] Wang Q, He B, Zhang Y, et al. An autonomous cooperative system of multi-AUV for underwater targets detection and localization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 121: 105907.
- [22] Yu F, He B, Liu J X. Underwater targets recognition based on multiple AUVs cooperative via recurrent transfer-adaptive learning (RTAL)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 72(2): 1574-1585.
- [23] Yang Y, Xiao Y, Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 815-841.
- [24] Stokey R, Purcell M, Forrester N, et al. A docking system for REMUS, an autonomous underwater vehicle[J]. Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings, 1997, 2: 1132-1136.
- [25] Zhang L, Hsu L T, Zhang T. A novel INS/USBL integrated navigation scheme via factor graph optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(9): 9239-9249.
- [26] Mu X, He B, Wu S, et al. A practical INS/GPS/DVL/PS integrated navigation algorithm and its application on autonomous underwater vehicle[J]. Applied Ocean Research, 2021, 106: 102441.
- [27] Yazdani A M, Sammut K, Yakimenko O, et al. A survey of underwater docking guidance systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 124: 103382.
- [28] Braginsky B, Baruch A, Guterman H. Development of an autonomous surface vehicle capable of tracking autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106868.

- [29] Karimi H R, Lu Y. Guidance and control methodologies for marine vehicles: A survey[J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 111: 104785.
- [30] Teeneti C R, Truscott T T, Beal D N, et al. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 46(1): 68-87.
- [31] Bellingham J G. Autonomous underwater vehicle docking[J]. *Springer Handbook of Ocean Engineering*, 2016: 387-406.
- [32] Frye D E, Kemp J, Paul W, et al. Mooring developments for autonomous ocean-sampling networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 477-486.
- [33] Allen B, Austin T, Forrester N, et al. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology[C]//OCEANS 2006. Boston, MA, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [34] Palomeras N, Vallicrosa G, Mallios A, et al. AUV homing and docking for remote operations[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 154: 106-120.
- [35] Du X, Zong C, Zhang B, et al. Design, simulation, and experimental study on the hydraulic drive system of an AUV docking device with multi-degree freedom[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1790.
- [36] Li D jun, Chen Y hu, Shi J guang, et al. Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 127-134.
- [37] Lin R, Li D, Zhang T, et al. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(3): 902-916.
- [38] Yang C, Peng S, Fan S, et al. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 125: 170-181.
- [39] 曹和云, 倪先胜, 何利勇, 等. 国外潜载 UUV 布放与回收技术研究综述[J]. *中国造船*, 2014, 55(2): 200-208.
- [40] Ren R, Zhang L, Liu L, et al. Two AUVs guidance method for self-reconfiguration mission based on monocular vision[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(8): 10082-10090.
- [41] Raspante F. Underwater mobile docking of autonomous underwater vehicles[C]//2012 Oceans. Hampton Roads, VA, USA: IEEE, 2012: 14-19.
- [42] Page B R, Mahmoudian N. Simulation-driven optimization of underwater docking station design[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(2): 404-413.
- [43] Zhang W, Wu W, Teng Y, et al. An underwater docking system based on UUV and recovery mother ship: design and experiment[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114767.
- [44] Wirtz M, Hildebrandt M. IceShuttle Teredo: An ice-penetrating robotic system to

- transport an exploration AUV into the ocean of Jupiter's moon Europa[C]//67th International Astronautical Congress (IAC). Mexico: Guadalajara, 2016: 26-30.
- [45] Liu S, Xu H, Lin Y, et al. Visual navigation for recovering an AUV by another AUV in shallow water[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1889.
- [46] Fletcher B, Martin D S, Flores M 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-Anchorage. 2017: 1-7.
- [47] Lin M, Lin R, Yang C, et al. Docking to an underwater suspended charging station: Systematic design and experimental tests[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 249: 110766.
- [48] Wang Z, Guan X, Liu C, et al. Acoustic communication and imaging sonar guided AUV docking: system infrastructure, docking methodology and lake trials[J]. *Control Engineering Practice*, 2023, 136: 105529.
- [49] Liu S, Xu H, Lin Y, et al. Visual navigation for recovering an AUV by another AUV in shallow water[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1889.
- [50] Orszaghova J, Wolgamot H, Draper S, et al. Transverse motion instability of a submerged moored buoy[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 475(2221): 20180459.
- [51] Domínguez J M, Crespo A J C, Hall M, et al. SPH simulation of floating structures with moorings[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 153: 103560.
- [52] Stokey R, Allen B, Austin T, et al. Enabling technologies for REMUS docking: an integral component of an autonomous ocean-sampling network[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 487-497.
- [53] Plueddemann A J, Kukulya A L, Stokey R, et al. Autonomous underwater vehicle operations beneath coastal sea ice[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(1): 54-64.
- [54] Fan S, Liu C, Li B, et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(3): 673-685.
- [55] Zuo M, Wang G, Xiao Y, et al. A unified approach for underwater homing and docking of over-actuated AUV[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 884.
- [56] Fu S, Guan X, Liu Z, et al. Adaptive unscented particle filter algorithm for acoustic positioning of AUV docking in shallow water[C]//2022 7th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE). 2022: 93-98.
- [57] Zhou J, He J, Huang H, et al. Closeup exploration of the seafloor with an autonomous underwater helicopter[J]. 2021.

- [58] Jantapremjit P, Wilson P A. Optimal control and guidance for homing and docking tasks using an autonomous underwater vehicle[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2007: 243-248.
- [59] Vallicrosa G, Bosch J, Palomeras N, et al. Autonomous homing and docking for AUVs using range-only localization and light beacons[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(23): 54-60.
- [60] Uchihori H, Yamamoto I, Morinaga A. Concept of autonomous underwater vehicle docking using 3D imaging sonar[J]. Sensors and Materials, 2019, 31(12): 4223.
- [61] Park J Y, Jun B huan, Lee P mook, et al. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera[J]. Ocean Engineering, 2009, 36(1): 48-61.
- [62] Li Y, Jiang Y, Cao J, et al. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 163-173.
- [63] Zhong L, Li D, Lin M, et al. A fast binocular localisation method for AUV docking[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1735.
- [64] Liu S, Ozay M, Okatani T, et al. Detection and pose estimation for short-range vision-based underwater docking[J]. IEEE Access, 2019, 7: 2720-2749.
- [65] Matsuda T, Maki T, Masuda K, et al. Resident autonomous underwater vehicle: underwater system for prolonged and continuous monitoring based at a seafloor station[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 120: 103231.
- [66] Feezor M D, Sorrell F Y, Blankinship P R, et al. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 515-521.
- [67] Vandavasi B N J, Arunachalam U, Narayanaswamy V, et al. Concept and testing of an electromagnetic homing guidance system for autonomous underwater vehicles[J]. Applied Ocean Research, 2018, 73: 149-159.
- [68] Lin M, Lin R, Li D, et al. Light beacon-aided AUV electromagnetic localization for landing on a planar docking station[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2023, 48(3): 677-688.
- [69] Park J Y, Jun B H, Lee P M, et al. Docking problem and guidance laws considering drift for an underactuated AUV[C]//OCEANS 2011 IEEE - Spain. Santander, Spain: IEEE, 2011: 1-7.
- [70] Wilson P A. Autonomous homing and docking tasks for an underwater vehicle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42(18): 304-309.

- [71] Naeem W, Sutton R, Ahmad S M. Pure pursuit guidance and model predictive control of an autonomous underwater vehicle for cable/pipeline tracking[C]//Proceedings-Institute of Marine Engineering Science and Technology Part C Journal of Marine Science and Environment. 2004: 25-35.
- [72] Naeem W, Sutton R, Ahmad S M, et al. A review of guidance laws applicable to unmanned underwater vehicles[J]. Journal of Navigation, 2003, 56(1): 15-29.
- [73] Yang C, Peng S, Fan S, et al. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents[J]. Ocean Engineering, 2016, 125: 170-181.
- [74] 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.
- [75] Park J Y, Jun B H, Lee P M, et al. Underwater docking approach of an under-actuated AUV in the presence of constant ocean current[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(20): 5-10.
- [76] Park J Y, Jun B H, Kim K, et al. Improvement of vision guided underwater docking for small AUV ISiMI[C]//OCEANS 2009. Biloxi, MS: IEEE, 2009: 1-5.
- [77] Fossen T I, Pettersen K Y, Galeazzi R. Line-of-Sight path following for Dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 820-827.
- [78] Teo K, An E, Beaujean P P J. A robust fuzzy autonomous underwater vehicle (AUV) docking approach for unknown current disturbances[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(2): 143-155.
- [79] Liu F, Shen Y, He B, et al. Drift angle compensation-based adaptive line-of-sight path following for autonomous underwater vehicle[J]. Applied Ocean Research, 2019, 93: 101943.
- [80] Caharija W, Pettersen K Y, Bibuli M, et al. Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1623-1642.
- [81] Esteba J, Cieslak P, Palomeras N, et al. Docking of non-holonomic AUVs in presence of ocean currents: A comparative survey[J]. IEEE Access, 2021, 9: 86607-86631.
- [82] Jantapremjit P, Wilson P A. Guidance-control based path following for homing and docking using an autonomous underwater vehicle[C]//OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. 2008: 1-6.
- [83] Batista P, Silvestre C, Oliveira P. A two-step control approach for docking of autonomous underwater vehicles[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015,

- 25(10): 1528-1547.
- [84] Xie T, Li Y, Jiang Y, et al. Turning circle based trajectory planning method of an underactuated AUV for the mobile docking mission[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109546.
- [85] Sans-Muntadas A, Pettersen K Y, Brekke E, et al. A hybrid approach to underwater docking of AUVs with cross-current[C]//OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 1-7.
- [86] Zhuang Y, Sharma S, Subudhi B, et al. Efficient collision-free path planning for autonomous underwater vehicles in dynamic environments with a hybrid optimization algorithm[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 127: 190-199.
- [87] Yazdani A M, Sammut K, Yakimenko O A, et al. IDVD-based trajectory generator for autonomous underwater docking operations[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 92: 12-29.
- [88] 李晔, 姜言清, 张国成, 等. 考虑几何约束的 AUV 回收路径规划[J]. *机器人*, 2015, 37(4): 478-485.
- [89] 姜言清. AUV 回收控制的关键技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2016.
- [90] Li Z, Liu W, Gao L E, et al. Path planning method for AUV docking based on adaptive quantum-behaved particle swarm optimization[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 78665-78674.
- [91] Yan Z, Deng C, Chi D, et al. Path planning method for UUV homing and docking in movement disorders environment[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1-13.
- [92] Liu C, Fan S, Li B, et al. Path planning for autonomous underwater vehicle docking in stationary obstacle environment[C]//OCEANS 2016 - Shanghai. Shanghai, China: IEEE, 2016: 1-5.
- [93] Cui P, Yan W, Guo X. Path planning for underwater docking based on modified artificial potential field[C]//2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). Macau, China: IEEE, 2016: 376-381.
- [94] Cai C, Rong Z, Chen Z, et al. A resident subsea docking system with a real-time communication buoy moored by an electro-optical-mechanical cable[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271: 113729.
- [95] Rypkema N R, Schmidt H. Passive inverted ultra-short baseline (piUSBL) localization: An experimental evaluation of accuracy[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 7197-7204.
- [96] Morgado M, Oliveira P, Silvestre C, et al. USBL/INS tightly-coupled integration technique for underwater vehicles[C]//2006 9th International Conference on Information

- Fusion. Florence: IEEE, 2006: 1-8.
- [97] Thomas C, Simetti E, Casalino G. A unifying task priority approach for autonomous underwater vehicles integrating homing and docking maneuvers[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2): 162.
- [98] Maki T, Matsuda T, Sakamaki T, et al. Navigation method for underwater vehicles based on mutual acoustical positioning with a single seafloor station[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(1): 167-177.
- [99] Zhang T, Li D, Yang C. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130: 176-187.
- [100] 李开飞. AUV 水下对接关键技术及对接碰撞问题研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2017.
- [101] Sanders J V. A three-dimensional dynamic analysis of a towed system[J]. *Ocean Engineering*, 1982, 9(5): 483-499.
- [102] Ablow C M, Schechter S. Numerical simulation of undersea cable dynamics[J]. *Ocean Engineering*, 1983, 10(6): 443-457.
- [103] da Silva Gomes S, Pinheiro Gomes S C. A new dynamic model of towing cables[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 107653.
- [104] Jin Y, Xie K, Liu G, et al. Nonlinear dynamics modeling and analysis of a marine buoy single-point mooring system[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 262: 112031.
- [105] Zhang J, Ong M C, Wen X. A numerical model for stability and dynamic analyses of a floating dock during operations[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2024, 49(4): 1160-1182.
- [106] Langley D. Apollo experience report: The docking system: MSC-S-325[R]. 1972.
- [107] Roberts J R, Todd R S. Digital simulation for post-docking response: TR-250-1378[R]. 1974.
- [108] 李强. 新型类锥杆式对接机构的碰撞过程分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [109] 张医博, 唐元贵, 要振江. 便携式 AUV 水下对接过程中的碰撞分析与罩式对接平台优化设计[J]. *海洋技术学报*, 2017, 05(36): 27-31.
- [110] Wu L, Li Y, Liu K, et al. A physics-based simulation for AUV underwater docking using the MHDG method and a discretized propeller[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 187: 106081.
- [111] Wu L, Li Y, Su S, et al. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 85: 110-126.
- [112] Meng L, Lin Y, Gu H, et al. Study on dynamic characteristics analysis of underwater

- dynamic docking device[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 180: 1-9.
- [113] Meng L, Lin Y, Gu H, et al. Study on dynamic docking process and collision problems of captured-rod docking method[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 193: 106624.
- [114] Wen X, García Conde A, Zhang J, et al. Dynamic analysis of a floating dock under accidental conditions[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 144: 103908.
- [115] Xu Y, Shi W, Song Y, et al. Hydrodynamics of a remora-inspired autonomous underwater vehicle approaching and docking to a benchmark submarine[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 291: 116447.
- [116] Lin M, Yi A, Lin R, Roberts. Underwater fluid-driven soft dock for dynamic recovery of AUVs with improved pose tolerance[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118466.
- [117] Wang G, Liu Y, Liu C. Development of a contact force model with a fluid damping factor for immersed collision events[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2024, 178: 114292.
- [118] Huang H, Liu Q, Yue M, et al. Fully coupled aero-hydrodynamic analysis of a biomimetic fractal semi-submersible floating offshore wind turbine under wind-wave excitation conditions[J]. *Renewable Energy*, 2023, 203: 280-300.
- [119] Jiang Y, Hu G, Zong Z, et al. Influence of an integral heave plate on the dynamic response of floating offshore wind turbine under operational and storm conditions[J]. *Energies*, 2020, 13(22): 6122.
- [120] Najafi A, Nowruzi H. On hydrodynamic analysis of stepped planing crafts[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2019, 4(3): 238-251.
- [121] CD-Adapco. User guide simcenter STAR-CCM+ version 2302[Z]. 2023.
- [122] Zhang S, Lin W, Xu H, et al. Dynamic characteristics of an underwater ventilated vehicle exiting water in an environment with scattered ice floes[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(11): 2046.
- [123] Wu J, Yang X, Xu S, et al. Numerical investigation on underwater towed system dynamics using a novel hydrodynamic model[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 247: 110632.
- [124] Hu Z. Numerical calculation methods for hydrodynamics of unmanned marine vehicles and their application[D]. Beijing: University of Chinese academy of sciences, 2013.
- [125] Sohankar A, Norberg C, Davidson L. Low-reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 26(1): 39-56.
- [126] Hu X, Wei Y, Wang C. Dynamic characteristics of water entry under the effect of floating ice and an independent distance model of floating ice[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 253: 108395.

- [127]Zheng R, Tan H, Lv Z, et al. Dynamic characteristics of deep-sea single-point mooring levitation docking system[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 301: 117536.
- [128]Van Uffelen L J, Worcester P F, Dzieciuch M A, et al. The vertical structure of shadow-zone arrivals at long range in the ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(6): 3569-3588.
- [129]Guo J, View Profile, Liu J, et al. Analysis of the factors affecting the communication between AUV and acoustic modem: From the perspective of experiments[J]. *Proceedings of the 15th International Conference on Underwater Networks & Systems*, 2021: 1-5.
- [130]井中武, 张昊楠, 刘冰, 等. 水下定位精度优化的 AUV 航路规划新方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2025, 46(01): 111-118.
- [131]H H R. Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations[J]. *SIAM Rev*, 1973(15): 423.
- [132]Porter M B. The KRAKEN normal mode program: Technical report[R]. *Naval Research Lab Washington DC*, 1992.
- [133]Porter M B. The bellhop manual and user's guide: Preliminary draft [J]. *Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep*, 2011, 260.
- [134]Porter M B, Buckner H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [135]Porter M B. Beam tracing for two- and three-dimensional problems in ocean acoustics[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(3): 2016-2029.
- [136]Miao Z, Zhou Y, Luo W, et al. Parallel optimization of message passing interface for 3D sound propagation model BELLHOP3D[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2822(1): 012065.
- [137]Liao S, Xiao W, Wang Y. Dynamic hybrid parallel computing of the ray model for solving underwater acoustic fields in vast sea[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 25385.
- [138]赵砚博. 宽带水声信道参数估计及应用[D]. *华南理工大学*, 2016.
- [139]Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. *New York: Springer New York*, 2011.
- [140]Li X, Wang H, Wang J, et al. Quantitative analysis of deep-sea underwater acoustic multipath channel quality[C]//*OCEANS 2022, Hampton Roads*. 2022: 1-6.
- [141]Cheng M, Guan Q, Wang Q, et al. FER-restricted AUV-relaying data collection in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9131-9142.

- [142]Urlick R J. Principles of underwater sound[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [143]Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The international journal of robotics research, 1986, 5(1): 90-98.
- [144]Qureshi A H, Ayaz Y. Potential functions based sampling heuristic for optimal path planning[J]. Autonomous Robots, 2016, 40(6): 1079-1093.
- [145]Ye L, Wu F, Zou X, et al. Path planning for mobile robots in unstructured orchard environments: An improved kinematically constrained bi-directional RRT approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108453.
- [146]施生达. 潜艇操作性[M]. 国防工业出版社, 1995.
- [147]Fan J, Chen X, Liang X. UAV trajectory planning based on bi-directional APF-RRT\* algorithm with goal-biased[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 119137.
- [148]Yang K, Sukkarieh S. An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(3): 561-568.
- [149]Woo J W, An J Y, Cho M G, et al. Integration of path planning, trajectory generation and trajectory tracking control for aircraft mission autonomy[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 107014.
- [150]LaValle S M, Kuffner J J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects[J]. Algorithmic and computational robotics, 2001: 303-307.
- [151]Kuwata Y, Karaman S, Teo J, et al. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1105-1118.
- [152]LaValle S M, Kuffner Jr J J. Randomized kinodynamic planning[J]. The international journal of robotics research, 2001, 20(5): 378-400.
- [153]Webb D J, Berg J van den. Kinodynamic RRT\*: Asymptotically optimal motion planning for robots with linear dynamics[C]//2013 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2013: 5054-5061.
- [154]Moon C bae, Chung W. Kinodynamic planner dual-tree RRT (DT-RRT) for two-wheeled mobile robots using the rapidly exploring random tree[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1080-1090.
- [155]Liu S, Atanasov N, Mohta K, et al. Search-based motion planning for quadrotors using linear quadratic minimum time control[C]//2017 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2017: 2872-2879.
- [156]Pivtoraiko M, Kelly A. Generating near minimal spanning control sets for constrained motion planning in discrete state spaces[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference

- on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005: 3231-3237.
- [157]Howard T M, Green C J, Kelly A, et al. State space sampling of feasible motions for high-performance mobile robot navigation in complex environments[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(6-7): 325-345.
- [158]Wang J, Li B, Meng M Q H. Kinematic constrained bi-directional RRT with efficient branch pruning for robot path planning[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 170: 114541.
- [159]Letizia N A, Salamat B, Tonello A M. A novel recursive smooth trajectory generation method for unmanned vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(5): 1792-1805.
- [160]Wang Z, Zhou X, Xu C, et al. Geometrically constrained trajectory optimization for multicopters[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(5): 3259-3278.
- [161]Wang Z, Ye H, Xu C, et al. Generating large-scale trajectories efficiently using double descriptions of polynomials[C] //2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2021: 7436-7442.
- [162]田坦. 水下定位与导航技术[M]. 国防工业出版社, 2007.