

专业学位论文

多扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制

**Bottom following control of underactuated AUV with
multiple disturbance constraints**

作者姓名：王风乐

工程领域：控制工程

学号：1120181181

指导教师：郭晨教授、于浩淼副教授

学位类别：工程硕士

培养单位：船舶电气工程学院

答辩时间：2021 年 6 月

大连海事大学

Dalian Maritime University

摘 要

欠驱动自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 是目前探索未知海域最有效的工具之一, 能够完成沉船打捞、地形地貌测绘、海底搜救等任务。在执行海底地形勘探和水下管道铺设等任务时, AUV 需要与海底保持恒定高度航行, 即地形跟踪。本文将回声测深仪作为信息采集的传感器, 对欠驱动 AUV 的地形勘测运动控制问题进行了如下研究:

(1) 针对欠驱动 AUV 在模型参数摄动和时变环境扰动约束下的路径跟踪控制问题, 提出了一种基于扩展扰动观测器的非奇异终端滑模控制方法。首先, 引入 Serret-Frenet 坐标系和虚拟参考点建立路径跟踪误差方程。其次, 采用反步法和视线法制导律设计运动学控制器, 得到虚拟速度控制律和期望姿态角速度。然后, 利用非奇异终端滑模控制方法设计动力学控制器; 并引入双曲正切趋近律和扩展扰动观测器补偿参数摄动、未知环境扰动的影响, 降低系统抖振的同时提高了响应速度。仿真验证表明所设计的运动控制器可以精确地估计未知环境扰动, 使 AUV 跟踪上期望路径和速度, 完成三维路径跟踪控制任务。

(2) 针对未知海底地形下欠驱动 AUV 的同步勘探问题, 提出了一种基于支持向量聚类的海底地形轮廓构建方法。首先, 采用基于经验模态分解的小波阈值函数处理回波信号中的噪声。然后, 针对回声测深仪所获数据点的特征, 利用支持向量聚类 and 全局聚类相结合的方法分离出孤立点和轮廓数据点, 从而完成未知地形轮廓的构建。最后, 采用三次样条插值函数对海底地形上轮廓线作平滑处理, 得到要跟踪的地形曲线。仿真表明, 该方案能够实现未知地形的信息采集和轮廓构建, 并拟合出期望地形曲线。

(3) 针对欠驱动 AUV 在模型参数不确定性、时变环境扰动、速度不可测和执行器饱和和输出约束下的地形跟踪控制问题, 基于滑模观测器和径向基函数神经网络, 提出了一种自适应二阶滑模控制方法。首先, 采用滑模状态观测器估计 AUV 的速度信息。其次, 引入 Serret-Frenet 坐标系和虚拟参考点建立地形跟踪误差方程。然后, 利用时变视线法制导律和反步法设计运动学控制器。最后, 利用超螺旋二阶滑模设计动力学控制器; 引入神经网络逼近由模型不确定性扰动和时变环境扰动组成的不确定项; 并采用辅助系统补偿执行器饱和输出对 AUV 地形跟踪控制的影响。仿真验证表明所设计的运动控制器能够完成复杂海域下的地形跟踪控制任务。

关键词: 欠驱动 AUV; 地形跟踪; 非奇异终端滑模; 支持向量聚类; 神经网络

Bottom following control of underactuated AUV with multiple disturbance constraints

Abstract

Underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) is currently one of the most effective tools for exploring the unknown seas, it can complete the tasks of salvaging sunken ships, surveying and mapping topography, seabed search and rescue. In the tasks of bottom terrain exploration and underwater pipeline laying, AUV needs to keep a constant altitude with the bottom profile, namely bottom following. In this paper, echo sounder is used as the sensor of information collection, and the terrain survey motion control problem of underactuated AUV is studied as follows:

(1) For the three-dimensional path following control problem of underactuated AUV with model parameter perturbation and time-varying environmental disturbance, a nonsingular terminal sliding mode control method based on extended disturbance observer is proposed. Firstly, the Serret-Frenet coordinate system and virtual reference point are introduced to establish the path following error equation. Secondly, the backstepping and line of sight guidance law are introduced to design the kinematics controller, and the virtual velocity control law and the desired attitude angular velocity are obtained. Then, the nonsingular terminal sliding mode control method is used to design the dynamic controller. And the hyperbolic tangent reaching law and extended disturbance observer are introduced to compensate for the influence of parameter perturbation and unknown environmental disturbance, which reduces system chattering and improves the response speed. The simulation results show that the designed motion controller can accurately estimate the unknown environmental disturbance, and make the AUV follow the desired path and speed, and complete the three-dimensional path following control task.

(2) For the synchronous exploration problem of underactuated AUV under unknown seabed terrain, a seabed terrain contour construction method based on support vector clustering is proposed. Firstly, the wavelet threshold function based on empirical mode decomposition is used to preprocess the noise in the echo signal. Then, according to the characteristics of data points obtained by the echo sounder, the method of combining support vector clustering and global clustering is used to separate outliers and contour points, so as to complete the construction of unknown terrain contour. Finally, the cubic spline interpolation function is used to smooth the contour line on the seabed terrain to obtain the terrain curve to be tracked. The simulation results show that the scheme can realize the information acquisition and contour construction of unknown terrain, and fit the desired terrain curve.

(3) For the bottom following control problem of underactuated AUV with model parameters uncertainty, time-varying environmental disturbance, unmeasurable speed and actuator saturation output, an adaptive second-order sliding mode control method based on sliding mode observer and radial basis function neural network is proposed. Firstly, sliding mode state observer is used to estimate the speed information of AUV. Secondly, Serret-Frenet coordinate system and virtual reference point are introduced to establish bottom following error equation. Then, the time-varying line of sight guidance law and backstepping are used to design the kinematics control law. Finally, dynamic controller is designed by using super spiral second-order sliding mode, and the neural network is introduced to approximate the uncertainty term composed of model uncertainty disturbance and time-varying environment disturbance. The auxiliary system is introduced to compensate the influence of actuator saturation output on bottom following control for AUV. The simulation results show that the designed motion controller can complete the bottom following control task in complex sea area.

Key Words: Underactuated AUV; Bottom Following; Nonsingular Terminal Sliding Mode; Support Vector Clustering; Neural Network

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究综述.....	2
1.2.1 路径跟踪控制.....	2
1.2.2 地形轮廓构建.....	3
1.2.3 地形跟踪控制.....	4
1.3 本文主要内容安排.....	5
2 欠驱动 AUV 空间运动模型与扰动分析.....	7
2.1 引言.....	7
2.2 坐标系与相关参数.....	7
2.3 欠驱动 AUV 空间运动模型.....	8
2.3.1 运动学模型.....	8
2.3.2 动力学模型.....	10
2.3.3 控制仿真模型.....	14
2.4 AUV 运动中的扰动量分析.....	15
2.5 本章小结.....	16
3 参数摄动约束下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 预备知识.....	17
3.2.1 稳定性理论.....	17
3.2.2 非线性滑模控制理论.....	18
3.3 问题描述.....	19
3.3.1 欠驱动 AUV 路径跟踪运动模型.....	19
3.3.2 欠驱动 AUV 路径跟踪误差方程.....	20
3.4 路径跟踪控制器设计及稳定性分析.....	23
3.4.1 扩展扰动观测器设计.....	23
3.4.2 运动学控制器设计.....	25
3.4.3 动力学控制器设计.....	26
3.5 仿真验证.....	31
3.6 本章小结.....	36
4 海底地形轮廓构建.....	37
4.1 引言.....	37
4.2 回波信号数据预处理.....	37
4.2.1 经验模态分解.....	37

4.2.2 基于 EMD 的小波阈值消噪.....	40
4.3 基于支持向量聚类的未知地形轮廓构建	41
4.3.1 支持向量聚类.....	41
4.3.2 局部支持向量聚类与全局聚类.....	43
4.4 基于三次样条函数的地形曲线拟合	46
4.5 仿真验证.....	48
4.6 本章小结.....	52
5 未知扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制.....	53
5.1 引言.....	53
5.2 预备知识.....	53
5.2.1 RBF 神经网络	53
5.2.2 超螺旋二阶滑模.....	54
5.3 问题描述.....	55
5.3.1 欠驱动 AUV 地形跟踪运动模型.....	55
5.3.2 欠驱动 AUV 地形跟踪误差方程.....	56
5.3.3 状态观测器设计.....	57
5.4 地形跟踪控制器设计及稳定性分析	59
5.4.1 运动学控制器设计	59
5.4.2 动力学控制律设计	60
5.4.3 稳定性分析.....	63
5.5 仿真验证.....	65
5.6 本章小结.....	70
结论.....	71
参考文献.....	73

图表目录

图目录

图 1.1	Bluefin-21 AUV.....	1
图 1.2	AUV 海底地形勘测过程.....	2
图 1.3	本文组织结构.....	5
图 2.1	固定坐标系与运动坐标系.....	7
图 2.2	坐标轴旋转过程.....	9
图 3.1	欠驱动 AUV 三维路径跟踪示意图.....	21
图 3.2	欠驱动 AUV 三维路径跟踪仿真曲线.....	32
图 3.3	三维路径跟踪水平面投影.....	32
图 3.4	三维路径跟踪垂直面投影.....	33
图 3.5	欠驱动 AUV 位姿误差响应曲线.....	33
图 3.6	欠驱动 AUV 速度跟踪响应曲线.....	34
图 3.7	欠驱动 AUV 纵向速度响应曲线.....	34
图 3.8	欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制输入曲线.....	35
图 3.9	外部环境扰动的估计值和实际值.....	35
图 4.1	LFM 信号波形.....	38
图 4.2	全局聚类方案.....	45
图 4.3	回波信号.....	48
图 4.4	回波信号的 EMD 分解.....	49
图 4.5	回波信号的 EMD 分解.....	49
图 4.6	降噪后的信号.....	50
图 4.7	原始数据.....	50
图 4.8	轮廓点与孤立点分布图.....	51
图 4.9	地形构建结果.....	51
图 4.10	轮廓曲线平滑处理.....	52
图 5.1	欠驱动 AUV 地形跟踪示意图.....	56
图 5.2	欠驱动 AUV 地形跟踪仿真曲线.....	67
图 5.3	欠驱动 AUV 深度跟踪误差曲线.....	67
图 5.4	欠驱动 AUV 的纵向速度曲线.....	68
图 5.5	欠驱动 AUV 地形跟踪控制输入曲线.....	68

图 5.6	未知扰动的逼近曲线.....	69
图 5.7	欠驱动 AUV 位置跟踪曲线.....	69
图 5.8	欠驱动 AUV 速度跟踪曲线.....	70

表目录

表 2.1	固定坐标系下的主要符号.....	8
表 2.2	运动坐标系下的主要符号.....	8
表 2.3	欠驱动 AUV 运动模型参数.....	15
表 3.1	仿真条件.....	31
表 4.1	聚类标准.....	43
表 5.1	仿真条件.....	66

1 绪论

1.1 研究背景和意义

自 21 世纪以来,随着世界人口的指数型增长和高耗能产业的持续性发展,人们对资源的需求越来越大;由于煤炭、石油等资源的过度开采导致陆地资源十分匮乏,使得富饶的海洋世界成为了人们关注的焦点。海洋世界中蕴含着各种矿产资源、生物资源和海洋能源,这些资源无疑将成为各国发展的重要储备^[1];为保证本国的可持续性发展,世界沿海国家纷纷增加了对海洋资源的开发力度。我国为提升海洋科技自主创新能力,提高勘探开发海洋资源的水平,在 2012 年首次提出了“海洋强国”的重要战略。2017 年,我国的海洋产业生产值在产业总值中已经达到了 9.4%,表明我国的海洋经济在一定阶段内已经取得了显著的成果^[2];但是人们对深海的研究还远远不够。为了提高人们对海洋环境的认知,完善深海资源勘探与开发体系,欠驱动自主水下航行器(AUV)迅速成为了深海探索的重要设备之一。

欠驱动 AUV 是一种智能型的深海作业工具。它具有自主导航、探测范围灵活的特点,能有效地解决潜水员深海作业受限的问题。目前,AUV 广泛应用于军事和科技领域;在科技领域,AUV 主要应用于海底搜救、通信线路铺设和矿产资源勘探等任务中;在军事领域,AUV 可以完成军事海底地形测绘、海上军事和海洋信息调查等任务^[3-5]。如美国的 Bluefin-21 AUV(图 1.1)可以通过绘制海底地貌声纳图来辨别物体,在马航 370 航班的搜寻过程中发挥了重要作用。



图1.1 Bluefin-21 AUV

Fig. 1.1 Bluefin-21 AUV

地形地貌勘测是 AUV 众多研究领域中的重要应用场景之一。地形勘测过程如图 2.1 所示, 布放后的 AUV 在运动控制器作用下沿着期望航迹到达指定作业海域, 即三维路径跟踪控制。由于海底地形起伏不定, 山峰与盆地连绵不断, 使得 AUV 的定高航行难以延续; 因此 AUV 利用自身携带的回声测深仪对海底地形进行探测, 并实时拟合出地形曲线。进而, AUV 在运动控制器作用下与实时拟合出的海底地形保持恒定高度航行, 即地形跟踪控制。考虑 AUV 在运动过程中受到模型参数摄动、建模误差、时变环境扰动和执行器饱和输出等扰动的约束, 然后根据不同的作业方式设计欠驱动 AUV 运动控制器, 确保 AUV 能够完成地形勘测运动控制。

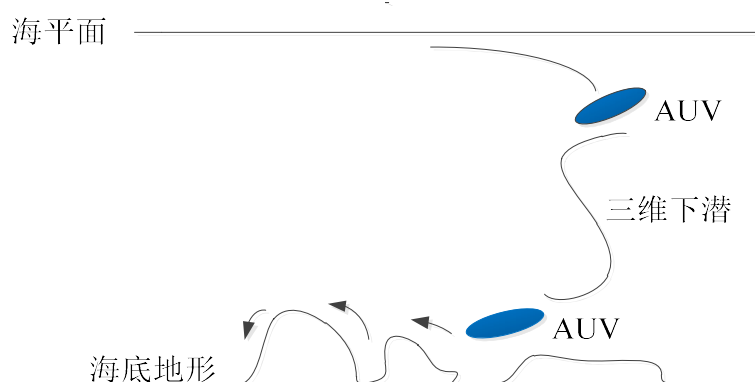


图1.2 AUV海底地形勘测过程

Fig. 1.2 AUV seabed topographic survey process

1.2 国内外研究综述

近年来, 国内外学者已经研究了许多有关欠驱动 AUV 运动控制的问题, 但对欠驱动 AUV 地形勘测运动控制的描述相对较少。本文将着重介绍国内外学者在路径跟踪控制、海底地形轮廓构建和地形跟踪控制三个方面的研究成果。

1.2.1 路径跟踪控制

Encarnacao 将虚拟参考点引入坐标系建立了欠驱动 AUV 路径跟踪误差方程, 然后在 Lyapunov 理论的基础上采用反步法设计控制器; 但没有研究扰动约束对 AUV 路径跟踪控制系统的影响^[6]。考虑模型不确定性扰动对 AUV 路径跟踪控制的影响, Lapierre 采用反步法设计运动学控制器, 并引入混合参数自适应方案, 解决了 AUV 模型参数不确定的鲁棒性问题^[7]。在利用“虚拟向导”方法建立路径跟踪误差方程后, 陈子印采用基于二阶滤波器的反步法设计运动控制器; 该方法可以过滤掉信号中的高频噪声并降低控制

器设计的复杂度^[8]。Breivik 通过引入参考点,建立了路径跟踪坐标系,从而构建出了三维视线制导律,解决了耦合设计后存在的奇异性问题^[9]。于浩淼采用了视线法(LOS)、Serret-Frenet 坐标系和“虚拟向导”方法建立了路径跟踪制导律,同时为削弱模型参数摄动的影响,在动力学控制器的设计中引入了参数摄动的上界,实现了欠驱动 AUV 三维直线路径跟踪控制^[10]。

针对欠驱动 AUV 在海流、海浪等外部环境扰动约束下的跟踪控制问题,Elmokadem 采用终端滑模控制方法设计了运动控制器;仿真验证表明该控制器对有界的未知扰动具有鲁棒性^[11]。考虑到 AUV 受时变海流干扰作用,唐旭东提出了一种基于 S 模型的神经元控制策略,但是此方法无法保证控制系统的稳定性^[12]。而 Lapierre 提出了一种简化的非线性单输入模糊控制器;通过灵敏度分析可得,具有小斜率和收敛分布的非线性设计比线性设计方法鲁棒性更好;仿真表明该控制方法能够使 AUV 跟踪上期望路径^[13]。针对存在模型参数摄动和外界环境扰动约束的欠驱动 AUV 跟踪控制问题,叶辉设计了自适应滑模路径跟踪控制器,并引入了非线性干扰观测器对内、外部扰动组成的干扰项进行估计并补偿,实现了多扰动约束下的欠驱动 AUV 精确跟踪控制^[14];而王金强提出了一种自适应神经网络滑模控制方法;首先引入积分滑模控制方法和基于增益切换函数的趋近律设计运动控制器,然后采用径向基函数神经网络(RBF-NN)逼近非线性扰动项,使得系统对不确定性扰动具有很好的鲁棒性^[15]。

1.2.2 地形轮廓构建

回声测深仪等传感器的回波信号中混有噪声,因此在数据处理之前需要先消除噪声的影响。近年来,国内外学者对信号消噪处理的研究有很多;但是有关 AUV 环境轮廓构建的研究相对较少。

考虑到海底采矿时超声波测距的精度会受到各种噪声影响,周知进采用小波变换有效地降低了超声波回波信号中的噪声,提高了测距精度^[16]。小波变换阈值消噪是一种典型的噪声处理方法,如 Donoho 提出了软、硬阈值法;仿真结果表明软阈值法处理后的信号相对平滑,而硬阈值法处理后的信号比较粗糙,但保留了较多的信号尖峰特性^[17]。考虑到传统小波阈值消噪中小波系数对原始值的估计有一定偏差,文献[18]提出了一种基于参数自整定的小波阈值算法;此算法能够更快地逼近阈值函数曲线,且消噪效果更加明显。

Chatterjee 采用改进的粒子群优化算法和自适应扩展卡尔曼滤波方法设计控制器,解决了 AUV 的导航定位与映射问题;仿真表明该算法在地图生成和性能估计中有很好的效果^[19]。Lee 对基于视觉的 AUV 水下目标检测和跟踪策略进行了深入研究;并引入

一种颜色恢复算法用于退化图像的恢复,实现了高维动态和三维环境下的目标导航与跟踪^[20]。Hwang 利用无迹的卡尔曼滤波器设计了一种适用于 AUV 运动控制的测绘方案;将测距声纳作为传感器采集 AUV 在水下环境中的相对位置信息,并利用水池实验验证了所提控制方案的有效性^[21]。针对特定环境下机器人的地图构建问题,刘少刚引入动态阈值方法和最小二乘法分割并拟合直线,然后采用最小二乘法进行滤波;仿真表明该方案能够提高直线拟合精度,准确定位并构建地形环境^[22]。文献[23]将 AUV 巡岸控制问题转化为海岛轮廓构建问题;采用小波变换对测距声纳的数据进行处理,之后利用支持向量聚类(SVC)和惰性检测构建海岛轮廓,然后采用贝塞尔曲线将构建出的轮廓线作平滑处理,最后将处理后轮廓线作为期望路径进行跟踪控制。文献[24]利用小波变换和小波聚类对激光测距仪采集到的数据进行处理,构建出了巡岸地图轮廓,之后采用积分滑模设计运动控制器,实现了 AUV 的同步导航与巡岸控制。

1.2.3 地形跟踪控制

鉴于深度控制作为欠驱动 AUV 的一类典型运动控制问题,学者们虽然已经提出了各种有关深度控制的方法与策略,但是有关 AUV 地形跟踪控制的研究尚不成熟。

针对欠驱动 AUV 在外部扰动约束下的深度跟踪控制问题,文献[25]采用模糊神经网络算法和梯度法在线调整滑模控制器参数,补偿了外部扰动并削弱了滑模抖振的影响。考虑到 AUV 的俯仰角一般被假设很小,这些假设可能导致建模误差较大,影响实际工程应用;Lee 通过简单修改打破了在垂直面运动控制中 AUV 俯仰角受限的问题,然后利用反步法设计了运动控制器^[26]。Khodayari 设计了一种基于多输入多输出结构的模糊 PID 控制器,很好地解决了 AUV 模型不确定性和 PID 参数整定问题,使得 AUV 能够快速跟踪上期望路径^[27]。针对时变环境扰动和执行机构饱和输出约束下的欠驱动 AUV 垂直面运动控制问题,于曹阳采用 LOS 制导律将深度跟踪误差转化为俯仰角跟踪误差,并且采用自适应模糊控制设计控制器,补偿了执行机构饱和输出的影响^[28]。

Silvestre 利用回声测深仪评估了 AUV 前方的地形特征,然后通过测深数据将地形跟踪控制问题转化为离散路径跟踪控制问题,利用增益调度理论和线性矩阵不等式设计控制器,解决了未知海底地形的跟踪控制问题^[29]。针对欠驱动 AUV 在未知海流和模型参数不确定性约束下的地形跟踪控制问题,边信黔采用了非线性迭代滑模设计控制器;仿真结果表明该算法不但能够很好地抑制扰动项,而且能够有效地抑制抖振、减小超调^[30]。针对 AUV 定高航行过程中高度信息混有噪声的问题,邓力榕利用卡尔曼滤波器剔除了高度计输出信号中的噪声,然后采用反步法设计运动控制器,实现了未知地形的精确跟踪^[31]。针对模型参数摄动以及海流海浪扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制问

题,于浩淼将海流和海浪引入 AUV 的运动模型中,然后采用积分滑模设计地形跟踪控制器,并引入与模型参数摄动相关的增益系数设计趋近律;仿真表明该控制策略可以应对 3 级及以下海况^[32]。考虑到崎岖不平的海底地形会严重影响 AUV 的近海底航行,周易提出了一种 AUV 地形跟踪模式切换的控制算法;实时评估前方的危险性,并根据地形特征完成定高航行和定深航行之间的切换,保证了 AUV 航行时的安全^[33]。针对海底地形未知且复杂多变的问题,王玉柱提出了一种地形规划和跟踪方案;利用多个单波束声纳实时探测地形地貌,然后融合声纳数据进行海底地形轮廓的提取,最后采用反步法设计控制器实现了地形跟踪控制^[34]。

综上所述,不同的控制方法有其独特的优势;因此在控制器设计过程中需要根据研究问题的不同选择合适的控制方案。本文针对欠驱动 AUV 地形地貌勘测运动控制问题做了以下探讨:模型参数不确定性、速度不可测、时变环境扰动和执行器饱和输出约束下的欠驱动 AUV 运动控制;未知海底地形的跟踪控制;如何提高 AUV 跟踪控制的稳定性和鲁棒性、削弱系统抖振、提高控制精度、降低计算复杂度等问题都将使得 AUV 的地形勘测运动控制极具挑战性。

1.3 本文主要内容安排

本文针对多扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制问题研究了以下三点内容:三维路径跟踪控制、海底地形轮廓构建和地形跟踪控制。目的是通过本文的研究,使人们对面向海底的地形勘测运动有更加详细地了解。后续章节内容如图 1.3 所示。

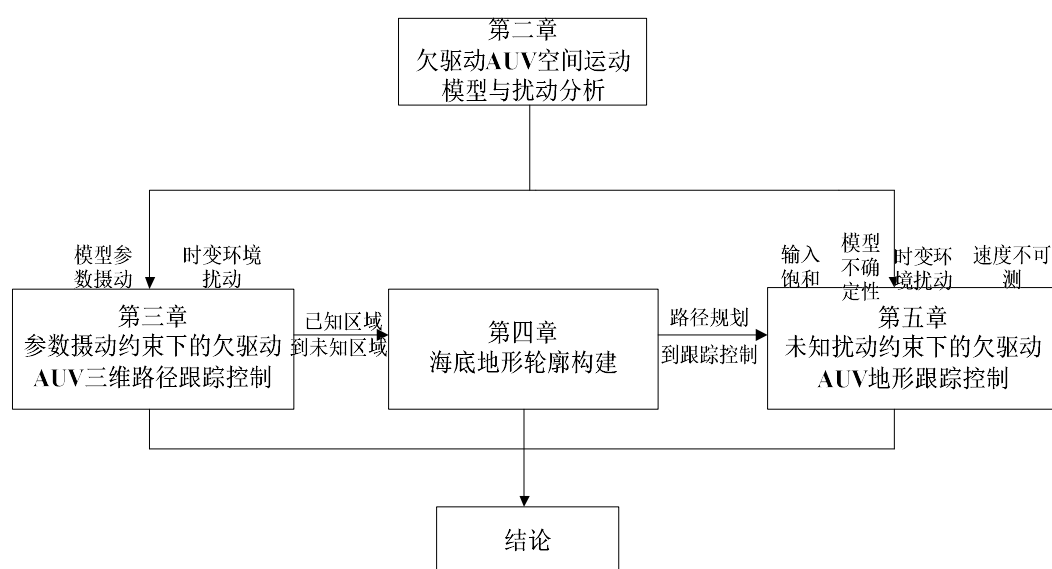


图1.3 本文组织结构

Fig. 1.3 The framework for this thesis

第二章介绍了欠驱动 AUV 三维空间运动模型的建立和相关参数，然后介绍了本文研究对象 NTNU AUV 的简化模型及其参数值，并分析了欠驱动 AUV 在地形勘测过程中所受的扰动项，为后续欠驱动 AUV 运动控制器的设计奠定了基础。

第三章研究了参数摄动、外部环境扰动约束下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制。AUV 从布放到到达作业海域的航行区域属于“已知区域”，可以直接进行路径跟踪控制。首先，采用虚拟参考点、Serret-Frenet 坐标系以及 LOS 制导律将路径跟踪控制问题转化为位置和姿态角的误差镇定问题；其次利用反步法来设计期望角速度和虚拟控制律，进而转化为纵向速度、偏航角速度和纵倾角速度的跟踪控制问题；最后采用非奇异终端滑模控制（NTSMC）方法和扩展扰动观测器（EDO）设计纵向推力、纵倾力矩以及偏航力矩，实现了模型参数摄动和外部环境扰动约束下的三维路径跟踪控制。

第四章研究了海底地形轮廓构建方案。到达指定作业海域后，将要航行的区域属于“未知区域”；为了保证航行时的安全，必须在地形跟踪控制之前感知海底地形，达到避障的目的。本章利用了回声测深仪的声波反射原理，将海底地形地貌作为测深仪的作用对象，实现地形地貌信息的采集。首先，采用基于经验模态分解（EMD）的小波阈值消除回波信号中的噪声，获得高准确度的数据信息；其次，采用局部支持向量聚类 and 全局聚类相结合的方法对当前视域和备选集中高威胁障碍物的轮廓点进行聚类并构建轮廓线；最后，利用三次样条插值曲线拟合的方法将构建的上轮廓线作平滑处理，得到的平滑曲线就是要跟踪的地形曲线。

第五章研究了模型参数不确定性、外部环境扰动、建模误差、速度不可测和执行器饱和输出约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制。首先，结合 AUV 运动模型设计了滑模状态观测器来获取 AUV 的速度信息；其次，基于 Serret-Frenet 坐标系和虚拟目标点建立地形跟踪误差方程，从而将地形跟踪控制问题转化为位置和纵倾角的误差镇定问题；然后利用反步法和速变视线法（TLOS）制导律设计运动学控制器；最后采用超螺旋二阶滑模和 RBF 神经网络来设计动力学控制器，并采用辅助动态系统补偿执行器饱和输出的影响，进而实现未知扰动约束下的地形跟踪控制。

2 欠驱动 AUV 空间运动模型与扰动分析

2.1 引言

由于受 AUV 自身造价和总质量等因素的影响,海洋中航行的大多数 AUV 都没有配备横向和垂向上的推进装置,使得执行机构产生的控制输入量小于其自身运动自由度,属于典型的欠驱动系统。本章将首先介绍固定坐标系、运动坐标系以及运动参数,然后建立 AUV 的空间运动模型并介绍仿真模型及其参数值,最后分析 AUV 在运动过程中所受的扰动量。

2.2 坐标系与相关参数

在研究 AUV 的空间运动时,一般采用如图 2.1 所示的直角坐标系;即固定坐标系和运动坐标系。其中,固定坐标系:亦称大地坐标系,记为 $\{I\} = (\xi, \eta, \zeta)$ 。其原点 E 通常选在海面上的某一点,用以确定 AUV 的位置。 $E\xi$ 和 $E\eta$ 轴位于水平面内,且 $E\xi$ 和 $E\eta$ 分别指向正北方和正东方; $E\zeta$ 轴与 $E\xi\eta$ 面垂直,且指向地心。在研究欠驱动 AUV 的动力学问题时,需要固定坐标系作为惯性系来描述 AUV 的相对运动。运动坐标系:亦称载体坐标系,记为 $\{B\} = (x, y, z)$ 。其原点 O 选在 AUV 浮心与重心连线的中点处。 Ox 轴位于纵剖面内,指向船艏; Oy 轴与 Ox 轴垂直,指向右舷; Oz 轴位于纵剖面内,指向船底,与水线面垂直。运动坐标系建立在 AUV 上,可以更加方便地描述 AUV 与海流之间的相对运动。

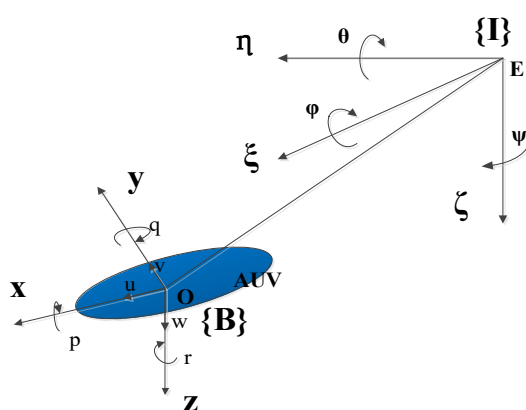


图2.1 固定坐标系与运动坐标系

Fig. 2.1 Earth-fixed and body-fixed coordinate systems

固定坐标系 $\{I\}$ 中的参数用来描述 AUV 的位置和姿态角；运动坐标系 $\{B\}$ 中的参数用来描述 AUV 的线速度、角速度和所受外力（力矩）。主要符号如表 2.1 和表 2.2 所示。

表 2.1 固定坐标系下的主要符号

Tab. 2.1 Denotations in earth-fixed frame

点与向量	ξ 轴	η 轴	ζ 轴
重心 G	ξ_G	η_G	ζ_G
浮心 B	ξ_B	η_B	ζ_B
AUV 的位置	x （纵荡）	y （横荡）	z （垂荡）
AUV 的姿态角	ϕ （横倾）	θ （纵倾）	ψ （偏航）

表 2.2 运动坐标系下的主要符号

Tab. 2.2 Denotations in body-fixed system

点与向量	x 轴	y 轴	z 轴
重心 G	x_G	y_G	z_G
浮心 B	x_B	y_B	z_B
AUV 线速度	u （纵向速度）	v （横向速度）	w （垂向速度）
AUV 角速度	p （横摇角速度）	q （纵倾角速度）	r （偏航角速度）
AUV 所受力	X （纵向力）	Y （横向力）	Z （垂向力）
AUV 所受力矩	K （横倾力矩）	M （纵倾力矩）	N （偏航力矩）

2.3 欠驱动 AUV 空间运动模型

2.3.1 运动学模型

为更好地描述 AUV 运动学模型的推导过程，定义固定坐标系下 AUV 的位姿向量为 $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T$ ； $\boldsymbol{\eta}_1 = [x, y, z]^T$ 和 $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 分别表示位置和姿态角向量；定义运动坐标系下 AUV 的速度向量为 $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T]^T$ ； $\mathbf{v}_1 = [u, v, w]^T$ 和 $\mathbf{v}_2 = [p, q, r]^T$ 分别表示线速度和角速度向量。

欠驱动 AUV 的运动学模型是根据固定坐标系 $\{I\}$ 和运动坐标系 $\{B\}$ 下的变量转换得到的。因此，可以通过欧拉旋转定理将欠驱动 AUV 的运动学问题转化为研究两个坐标系之间的变量转换问题。根据欧拉角 ϕ 、 θ 和 ψ 的定义，得到绕 $\{I\}$ 坐标系的三个坐标轴 ξ 、 η 和 ζ 的旋转变换矩阵：

$$\mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

假设两坐标系的原点 E 和 O 相互重合, 设计如图2.2所示的旋转方案, 从 $\{I\}$ 坐标系出发, 分别绕 oz 、 oy 和 ox 轴旋转一次, 就可以到达 $\{B\}$ 坐标系。

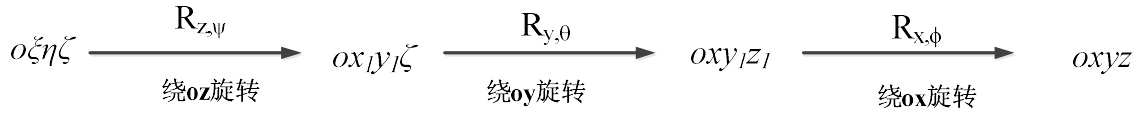


图2.2 坐标轴旋转过程

Fig. 2.2 Rotation process of coordinate axis

其变换关系描述为:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

其中, 旋转矩阵 $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{R}_{z,\psi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\phi}$, 把式 (2.1) 代入可得:

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

因为两个参考系都是正交坐标系, 所以矩阵 $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ 必定是正交矩阵, 根据正交矩阵的性质可得:

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^T \quad (2.4)$$

对旋转矩阵 $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ 求导可得:

$$\dot{\mathbf{J}}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \mathbf{S}(\omega_{nb}^b) \quad (2.5)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{S}(\omega_{nb}^b)$ 定义为:

$$\mathbf{S}(\omega_{nb}^b) = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

基于以上基础知识, 可得AUV的速度矢量在两坐标系之间的变换关系:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.7)$$

固定坐标系和运动坐标系下AUV的姿态角速度变换关系如下:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.8)$$

其中, 旋转矩阵 $J_2(\eta_2)$ 定义为:

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

姿态角 ϕ 、 θ 和 ψ 的取值范围是:

$$\begin{cases} -\pi < \phi \leq \pi \\ -\pi/2 < \theta < \pi/2 \\ -\pi < \psi \leq \pi \end{cases} \quad (2.10)$$

综上所述, AUV的运动学方程描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.11)$$

将AUV的6自由度运动学方程展开后可得:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi \sin \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) + w (\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \phi) \\ \dot{y} = u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\ \dot{z} = -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \\ \dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} = q \sin \phi / \cos \theta + r \cos \phi / \cos \theta \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3.2 动力学模型

根据牛顿-欧拉方程, 运动坐标系下AUV的动力学方程表示如下:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2.13)$$

其中, $M = M_{RB} + M_A$ 表示包含附加质量的AUV广义质量矩阵; $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$ 表示科里奥利和向心力矩阵; $D(v)$ 表示流体阻尼矩阵; $g(\eta)$ 为恢复力 (力矩);

$\tau = [\tau_1, 0, 0, 0, \tau_5, \tau_6]^T$ 为欠驱动AUV的控制输入矩阵。

1. 刚体动力学参数

M_{RB} 是刚体质量与惯性矩阵，不包含附加质量和惯性矩，表示为：

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中， m 表示AUV质量； I 为AUV惯性项；并且 M_{RB} 满足： $M_{RB} = M_{RB}^T$ 。

$C_{RB}(v)$ 为刚体向心力矩阵，表示如下：

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + x_G q) \\ m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & m(z_G r + x_G p) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

其中 $C_{RB}(v)$ 满足： $C_{RB}(v) = -C_{RB}^T(v)$ 。

2. 流体水动力参数

为便于分析AUV的运动特性，将作用于AUV的水动力（矩）表示为以下三种形式：

（1）AUV的流体静力学惯性力；（2）非线性阻尼力（矩）；（3）附加水动力（矩）。假设流体惯性力也可以线性叠加，则水动力（矩）向量可表示为：

$$\tau_h = -M_A \dot{v} - C_A(v)v - D(v)v \quad (2.16)$$

其中, \mathbf{M}_A 是附加质量矩阵; $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ 是流体动力科里奥利和向心力矩阵。具体表示如下:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

矩阵 \mathbf{M}_A 为半正定的对称矩阵。

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

其中, 各项值分别为:

$$a_1 = X_{\ddot{u}}u + X_{\ddot{v}}v + X_{\ddot{w}}w + X_{\ddot{p}}p + X_{\ddot{q}}q + X_{\ddot{r}}r$$

$$a_2 = Y_{\ddot{u}}u + Y_{\ddot{v}}v + Y_{\ddot{w}}w + Y_{\ddot{p}}p + Y_{\ddot{q}}q + Y_{\ddot{r}}r$$

$$a_3 = Z_{\ddot{u}}u + Z_{\ddot{v}}v + Z_{\ddot{w}}w + Z_{\ddot{p}}p + Z_{\ddot{q}}q + Z_{\ddot{r}}r$$

$$b_1 = K_{\ddot{u}}u + K_{\ddot{v}}v + K_{\ddot{w}}w + K_{\ddot{p}}p + K_{\ddot{q}}q + K_{\ddot{r}}r$$

$$b_2 = M_{\ddot{u}}u + M_{\ddot{v}}v + M_{\ddot{w}}w + M_{\ddot{p}}p + M_{\ddot{q}}q + M_{\ddot{r}}r$$

$$b_3 = N_{\ddot{u}}u + N_{\ddot{v}}v + N_{\ddot{w}}w + N_{\ddot{p}}p + N_{\ddot{q}}q + N_{\ddot{r}}r$$

AUV在运动过程中会受到由边界层的摩擦阻力和涡流引起的二次阻力组成的粘性阻尼。当AUV低速航行时, 忽略其二阶以上的阻尼项, 得到流体阻尼矩阵 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{v}) = & \text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ & + \text{diag}\{X_{|u|u}|u|, Y_{|v|v}|v|, Z_{|w|w}|w|, K_{|p|p}|p|, M_{|q|q}|q|, N_{|r|r}|r|\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

3. 恢复力和力矩

恢复力包括浮力 B 和重力 W ，分别作用于航行器的浮心 $\mathbf{r}_B^b = [x_B \ y_B \ z_B]^T$ 和重心 $\mathbf{r}_G^b = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ ，对于完全浸入水中的AUV，固定坐标系 $\{I\}$ 下的重力和浮力在运动坐标系 $\{B\}$ 下的分量为：

$$\mathbf{f}_B^b = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_G^b = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

则运动坐标系下AUV受到的恢复力和力矩 $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 为：

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_B^b(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{f}_G^b(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{r}_B^b \times \mathbf{f}_B^b(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{r}_G^b \times \mathbf{f}_G^b(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

将式 (2.21) 展开后可得：

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \sin \phi \cos \theta \\ -(W - B) \cos \phi \cos \theta \\ -(y_G W - y_B B) \cos \phi \cos \theta + (z_G W - z_B B) \sin \phi \cos \theta \\ (z_G W - z_B B) \sin \theta + (x_G W - x_B B) \cos \phi \cos \theta \\ -(x_G W - x_B B) \sin \phi \cos \theta - (y_G W - y_B B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

运动坐标系下重心 W 和浮心 B 之间的距离向量为：

$$\overrightarrow{BG} = [\overrightarrow{BG}_x \ \overrightarrow{BG}_y \ \overrightarrow{BG}_z]^T = [x_G - x_B \ y_G - y_B \ z_G - z_B]^T \quad (2.23)$$

中性浮力的AUV满足 $W = B$ 。AUV被看作是结构对称的刚体时，其浮心略高于重心，当 $x_G = x_B$ ， $y_G = y_B$ 时，方程 (2.22) 简化为：

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \overrightarrow{BG}_z W \cos \theta \sin \phi \\ \overrightarrow{BG}_z W \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

结合式 (2.13)，可得欠驱动AUV的动力学方程为：

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = m_{22}vr - m_{33}wq - X_u u - X_{u|u}|u| + \tau_u \\ m_{22}\dot{v} = m_{33}wp - m_{11}ur - Y_v v - X_{v|v}|v| \\ m_{33}\dot{w} = m_{11}uq - m_{22}vp - Z_w w - Z_{w|w}|w| \\ m_{44}\dot{p} = (m_{22} - m_{33})vw + (m_{55} - m_{66})qr - K_p p - K_{p|p}|p| - \overline{BG}_z W \cos \theta \sin \phi \\ m_{55}\dot{q} = (m_{33} - m_{11})uw + (m_{66} - m_{44})pr - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG}_z W \sin \theta + \tau_q \\ m_{66}\dot{r} = (m_{11} - m_{22})uv + (m_{44} - m_{55})pq - N_r r - N_{r|r}|r| + \tau_r \end{cases} \quad (2.25)$$

其中, $m_{ii} (i=1,2,3,4,5,6)$ 表示广义质量, 表达式为 $m_{11}=m-X_{\dot{u}}$, $m_{22}=m-Y_{\dot{v}}$, $m_{33}=m-Z_{\dot{w}}$, $m_{44}=I_x-K_{\dot{p}}$, $m_{55}=I_y-M_{\dot{q}}$, $m_{66}=I_z-N_{\dot{r}}$; X_u 、 Y_v 、 Z_w 、 K_p 、 M_q 和 N_r 是水动力阻尼系数; $X_{u|u}$ 、 $Y_{v|v}$ 、 $Z_{w|w}$ 、 $K_{p|p}$ 、 $M_{q|q}$ 和 $N_{r|r}$ 是非线性水动力阻尼系数; \overline{BG}_z 表示 AUV 的稳心高度; τ_u 、 τ_q 和 τ_r 分别为纵向推力、纵倾力矩和偏航力矩。

2.3.3 控制仿真模型

由方程式 (2.12) 和 (2.25) 所示的 AUV 运动模型比较复杂, 不利于运动控制器的设计。因为欠驱动 AUV 的横倾运动是自稳定的, 且无法由控制输入直接影响; 所以, 忽略横倾运动的影响, 选择如下的流线型 NTNU AUV 简化模型^[35]:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi \cos \theta - v \sin \psi + w \cos \psi \sin \theta \\ \dot{y} = u \sin \psi \cos \theta + v \cos \psi + w \sin \psi \sin \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\psi} = r / \cos \theta \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = m_{22}vr - m_{33}wq - X_u u - X_{u|u}|u| + \tau_u \\ m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur - Y_v v - X_{v|v}|v| \\ m_{33}\dot{w} = m_{11}uq - Z_w w - Z_{w|w}|w| \\ m_{55}\dot{q} = (m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG}_z W \sin \theta + \tau_q \\ m_{66}\dot{r} = (m_{11} - m_{22})uv - N_r r - N_{r|r}|r| + \tau_r \end{cases} \quad (2.27)$$

根据文献[36], 模型参数如表2.3所示。

表 2.3 欠驱动 AUV 运动模型参数

Tab. 2.3 Motion model parameter of underactuated AUV

质量（含附加质量）	$m_{11}=215\text{kg}$	$m_{22}=265\text{kg}$	$m_{33}=265\text{kg}$
转动惯量（含附加质量）	$m_{44}=40\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$m_{55}=80\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$m_{66}=80\text{kg}\cdot\text{m}^2$
线性阻尼系数	$X_u=70\text{kg/s}$	$Y_v=100\text{kg/s}$	$Z_w=100\text{kg/s}$
	$K_p=30\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$	$M_q=50\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$	$N_r=50\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$
非线性阻尼系数	$X_{u u }=100\text{kg/m}$	$Y_{v v }=200\text{kg}\cdot\text{m}$	$Z_{w w }=200\text{kg/m}$
	$K_{p p }=50\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$M_{q q }=100\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$N_{r r }=100\text{kg}\cdot\text{m}^2$
其他参数	$m=185\text{kg}$	$B=W=1813\text{N}$	$z_G-z_B=0.2\text{m}$

2.4 AUV 运动中的扰动量分析

由于海洋环境十分恶劣，在深海中执行任务的AUV会受到各种扰动的约束，这些扰动会影响系统的控制精度；因此，在运动控制器的设计中必须考虑以下几种扰动项的影响：内部测量扰动、外部环境扰动和模型参数不确定性扰动^[37]。

1. 内部测量扰动

内部测量扰动主要是指各种传感器的精度误差和系统误差以及复杂海洋环境引起的噪声干扰。

2. 外部环境扰动

外部环境扰动主要指AUV所受的海流扰动和近水面的海浪扰动。海流主要由风海流、潮汐流、密度流和海水相互作用引起的补偿流组成；其对AUV控制输入的影响体现在以下两个方面：（1）由AUV和流体间的黏滞摩擦、压差阻力引起的黏滞阻力；（2）由AUV周围的环流和自由液面引起的惯性阻力。海浪扰动主要有一阶波浪力和二阶波浪力两种表现形式；其中，一阶波浪力由波动压力作用产生，二阶波浪力由AUV艇体上下压强差产生。

3. 参数不确定性扰动

由于在运动模型的推导过程中各个水动力分量只保留了泰勒级数二阶以下的项；所以动力学模型存在建模误差。并且上一节推导的欠驱动AUV动力学模型是建立在AUV质量分布均匀和结构对称的前提下；然而AUV并非一个完全对称的刚体，所以AUV的附加质量矩阵存在一定偏差。虽然AUV的水动力系数可以通过实验测定和理论推导等方法获得；但是在海中航行的AUV会受到海水盐度、密度和压强的影响，使得AUV运动模型中水动力系数的实际值与测量值之间存在较大偏差。

上述几种因素产生的扰动都与AUV的运动模型相关，因此在AUV建模的过程中，可将这些由水动力系数引起的扰动项视为模型不确定性扰动。通常在数值仿真中加入 $\pm 20\%$ 的水动力系数摄动模拟上述扰动。

2.5 本章小结

本章主要介绍了欠驱动 AUV 的空间运动模型，为后续欠驱动 AUV 运动控制问题奠定了基础。首先，利用刚体运动学理论建立起 AUV 的运动学模型；然后根据刚体动力学、牛顿-欧拉方程和操纵性理论推导出 AUV 的动力学模型；进而，根据 NTNU AUV 的自身特点，得到简化后的欠驱动 AUV 空间运动模型；最后简要分析了欠驱动 AUV 在跟踪控制过程中所受的多种扰动量。

3 参数摄动约束下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制

3.1 引言

欠驱动AUV在对海底地形勘测之前，需要先到达指定的作业区域，因此三维路径跟踪控制是地形勘测任务的重要一环。根据2.4节对AUV在运动过程中所受干扰项的分析可知，模型参数摄动会影响AUV的精确跟踪控制；所以为了更好地完成控制任务，在控制器设计中必须考虑参数摄动的约束。本章通过引入Serret-Frenet坐标系、“虚拟向导”以及LOS制导律将路径跟踪控制问题转化为纵向速度、偏航角和纵倾角的镇定问题。然后通过反步法得到虚拟速度控制律、期望偏航角速度和纵倾角速度；并采用非奇异终端滑模控制方法和扩展扰动观测器来设计动力学控制器，提高控制精度且加快响应速度的同时，避免奇异值问题。之后，利用Lyapunov稳定性定理分析了所设计的运动控制器的稳定性。最后，通过MATLAB仿真验证了本章所设计的控制策略能够实现模型参数摄动和未知环境扰动约束下的欠驱动AUV路径跟踪控制。

3.2 预备知识

3.2.1 稳定性理论

稳定性不仅是系统正常运行的重要指标，也是系统控制器设计的前提条件。由于系统的渐近稳定性证明十分困难，因此在稳定性分析中只需证明其误差的渐近稳定性即可。下面简单介绍本文应用到的一部分定理。

1. 定常系统大范围渐近稳定判别定理^[38]

考虑非线性时变系统：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t), t \geq t_0 \quad (3.1)$$

式中， $\mathbf{f}(0, t) = 0$ ，即非线性系统的原点为平衡状态。如果存在连续一阶偏导数 $V(\mathbf{x}, t)$ ，且满足：

- 1) $V(\mathbf{x}, t)$ 正定；
- 2) $\dot{V}(\mathbf{x}, t)$ 负定；
- 3) 当 $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ 时，有 $V(\mathbf{x}, t) \rightarrow \infty$ ；

则系统在 $\mathbf{x} = 0$ 处的平衡状态为大范围一致渐近稳定。

2. Lyapunov稳定性推论^[39]

定义Lyapunov函数 $V(\mathbf{x}, t)$ 存在导数 $\dot{V} = -\lambda V + \sigma$ ，其中， λ 、 σ 为有界常数。然后

对 \dot{V} 两端积分可得:

$$0 \leq V \leq \frac{\sigma}{\lambda} + (V(0) - \frac{\sigma}{\lambda}) e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

则整个系统内所有状态变量满足一致最终有界, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = \frac{\sigma}{\lambda}$ 。

3. Baralat引理及推论^[40]

如果函数 $f(t)$ 可微, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $f(t)$ 存在极限, 并且 $\dot{f}(t)$ 一致连续, 则 $t \rightarrow \infty$ 时 $\dot{f}(t) \rightarrow 0$ 。如果函数 $f(t)$ 可微, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $f(t)$ 存在极限, $\ddot{f}(t)$ 存在且有界, 则 $t \rightarrow \infty$ 时 $\dot{f}(t) \rightarrow 0$ 。

4. Young's不等式^[41]

对任意实数 $(x, y) \in R^2$, 存在以下不等式:

$$xy \leq \frac{\varepsilon^p}{p} |x|^p + \frac{1}{q \varepsilon^q} |y|^q \quad (3.3)$$

其中 ε 是正常数, $p > 1$, $q > 1$, 并且满足 $(p-1)(q-1)=1$ 。

3.2.2 非线性滑模控制理论

非奇异终端滑模控制具有稳态跟踪精度高、鲁棒性强、有限时间收敛等优点, 还可以加快系统状态远离平衡点时的收敛速度并解决终端滑模控制器特定状态下出现的奇异值问题, 改善了系统状态性能^[42-43]。因此被广泛应用于具有不确定性和外部扰动的二阶非线性系统中。考虑如下的非线性动态系统^[44]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u \end{cases} \quad (3.4)$$

式中, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$, $b(\mathbf{x}) \neq 0$, $g(\mathbf{x})$ 表示不确定性及外部扰动, $g(\mathbf{x}) \leq l_g$ 。

非奇异终端滑模面被设计为:

$$s = x_1 + \lambda x_2^{\frac{p}{q}} \quad (3.5)$$

式中, p 、 q 均为大于零的奇数, 且 $p > q$; $\lambda > 0$ 。然后对滑模面 s 求导, 并令 $\dot{s} = 0$, 得到控制律为:

$$u = -b^{-1}(\mathbf{x})(f(\mathbf{x}) + \frac{q}{\lambda p} x_2^{2-\frac{p}{q}} + (l_g + \eta) \text{sgn}(s)) \quad (3.6)$$

式中, $1 < p/q < 2$, $\eta > 0$ 。

稳定性分析表示如下:

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \dot{x}_1 + \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \dot{x}_2 = x_2 + \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} [f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u] \\ &= x_2 + \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} [f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}) - \frac{q}{\lambda p} x_2^{\frac{2-p}{q}} - (l_g + \eta) \operatorname{sgn}(s)] \\ &= \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} [g(\mathbf{x}) - (l_g + \eta) \operatorname{sgn}(s)]\end{aligned}\quad (3.7)$$

选取如下 Lyapunov 函数: $V = \frac{1}{2} s^2$, 并对 Lyapunov 函数求一阶导数, 并将式 (3.7) 代入可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} [\operatorname{sg}(\mathbf{x}) - (l_g + \eta)|s|] \quad (3.8)$$

分析上式, 当 $s \neq 0$ 时, 由于 $1 < p/q < 2$, 则 $1 < p/q < 2$, 又由于 $\lambda > 0$, 则 $x_2^{\frac{p}{q}-1} > 0$ ($x_2 \neq 0$ 时), 有

$$\dot{V} \leq \lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} (-\eta|s|) = -\lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \eta|s| \quad (3.9)$$

上式在约束条件 $\lambda \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \eta > 0$ 下, 然后进行如下讨论:

- 1) 当 $x_2^{\frac{p}{q}-1} > 0$ 时, 满足 $\dot{V} < 0$;
- 2) 当 $x_2^{\frac{p}{q}-1} = 0$ 时, 因为 $s \neq 0$, 所以 $x_1 \neq 0$ 。因此, 系统会在的 $x_2 = 0$ 轴内不断穿越, 使得 \dot{V} 等于零的状态不会一直存在, 解决了终端滑模可能引起的奇异值问题;

基于上述讨论可得, 非奇异终端滑模满足 $\dot{V} = s\dot{s} < 0$ 。因此, 滑模面 s 在任意 $s \neq 0$ 的初始状态下都能有限时间收敛至平衡点。

3.3 问题描述

3.3.1 欠驱动 AUV 路径跟踪运动模型

本章主要研究了欠驱动AUV在时变环境扰动和模型参数摄动约束下的三维路径跟踪控制。根据2.3节中介绍的欠驱动AUV空间运动模型, 得到如下的欠驱动AUV动力学模型^[45]:

$$\begin{cases}
\dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{m_{33}}{m_{11}}wq - \frac{X_u}{m_{11}}u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}}u|u| + \frac{\tau_1}{m_{11}} + \frac{d_u}{m_{11}} \\
= f_u + \frac{\tau_1}{m_{11}} + D_u \\
\dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{Y_v}{m_{22}}v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}}v|v| + \frac{d_v}{m_{22}} \\
= f_v + D_v \\
\dot{w} = \frac{m_{11}}{m_{33}}uq - \frac{Z_w}{m_{33}}w - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}}w|w| + \frac{d_w}{m_{33}} \\
= f_w + D_w \\
\dot{q} = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}}uw - \frac{M_q}{m_{55}}q - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}}q|q| - \frac{\overline{BG_z}W \sin \theta}{m_{55}} + \frac{\tau_5}{m_{55}} + \frac{d_q}{m_{55}} \\
= f_q + \frac{\tau_5}{m_{55}} + D_q \\
\dot{r} = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}}uv - \frac{N_r}{m_{66}}r - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}}r|r| + \frac{\tau_6}{m_{66}} + \frac{d_r}{m_{66}} \\
= f_r + \frac{\tau_6}{m_{66}} + D_r
\end{cases} \quad (3.10)$$

其中, d_u 、 d_v 、 d_w 、 d_q 和 d_r 表示环境扰动项, 即海浪和海流的叠加项; 其他变量与 2.3 节欠驱动 AUV 运动模型中的参数变量定义一致。考虑到 AUV 模型参数摄动, 且摄动量有界; 有 $|m_{11} - \hat{m}_{11}| \leq \tilde{m}_{11}$, $|m_{22} - \hat{m}_{22}| \leq \tilde{m}_{22}$, $|m_{33} - \hat{m}_{33}| \leq \tilde{m}_{33}$, $|m_{55} - \hat{m}_{55}| \leq \tilde{m}_{55}$, $|m_{66} - \hat{m}_{66}| \leq \tilde{m}_{66}$, $|X_u - \hat{X}_u| \leq \tilde{X}_u$, $|Y_v - \hat{Y}_v| \leq \tilde{Y}_v$, $|Z_w - \hat{Z}_w| \leq \tilde{Z}_w$, $|M_q - \hat{M}_q| \leq \tilde{M}_q$, $|N_r - \hat{N}_r| \leq \tilde{N}_r$, $|X_{u|u|} - \hat{X}_{u|u|}| \leq \tilde{X}_{u|u|}$, $|Y_{v|v|} - \hat{Y}_{v|v|}| \leq \tilde{Y}_{v|v|}$, $|Z_{w|w|} - \hat{Z}_{w|w|}| \leq \tilde{Z}_{w|w|}$, $|M_{q|q|} - \hat{M}_{q|q|}| \leq \tilde{M}_{q|q|}$, $|N_{r|r|} - \hat{N}_{r|r|}| \leq \tilde{N}_{r|r|}$; 其中, " \wedge " 表示 AUV 模型参数的标称值, " \sim " 表示参数摄动上界值。

3.3.2 欠驱动 AUV 路径跟踪误差方程

假设 3.1: 期望路径曲线是确定的参数化曲线; 虚拟向导相关参数为正值且存在上界;

假设 3.2: AUV 的纵向速度控制性能良好, 且纵向速度始终大于零, 即 AUV 不会出现倒车现象;

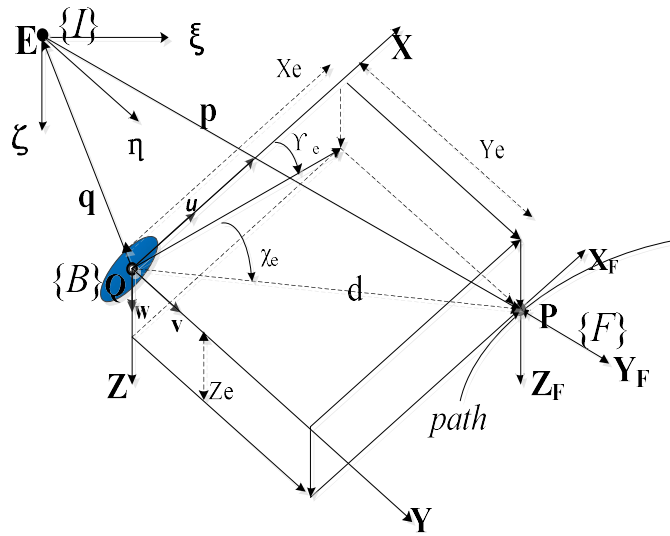


图3.1 欠驱动AUV三维路径跟踪示意图

Fig. 3.1 Sketch map of underactuated AUV three-dimensional path-following

图3.1为欠驱动AUV三维路径跟踪示意图。其中 $Path$ 是三维空间中的期望路径；Serret-Frenet坐标系建立在期望路径上，记为 $\{F\}$ 。坐标系 $\{F\}$ 是由坐标系 $\{I\}$ 先绕 η 轴旋转 ψ_F 度，再绕 ζ 轴旋转 θ_F 度，然后平移得到；旋转角 $\psi_F = \arctan(y_F' / x_F')$ ， $\theta_F = -\arctan(z_F' / \sqrt{x_F'^2 + y_F'^2})$ 。 Q 点为坐标系 $\{B\}$ 的原点，其位置向量在 $\{I\}$ 坐标系表示为 $\mathbf{Q} = [\xi \ \eta \ \zeta]^T$ ；然后根据速度向量 $\dot{\mathbf{Q}} = [\dot{\xi} \ \dot{\eta} \ \dot{\zeta}]^T$ 可得 Q 点的速度： $V = \|\dot{\mathbf{Q}}\| = \sqrt{\dot{\mathbf{Q}}^T \dot{\mathbf{Q}}}$ 。由于欠驱动AUV在横倾和垂荡运动中缺乏直接的推进装置，因此AUV的纵向速度 u 通常远高于横向速度 v 和垂荡速度 w 。忽略横向速度和垂荡速度的影响，可以将固定坐标系下的欠驱动AUV运动学模型改写为如下形式：

$$\begin{cases} \dot{\xi} = u \cos \psi \cos \theta \\ \dot{\eta} = u \sin \psi \cos \theta \\ \dot{\zeta} = -u \sin \theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\psi} = r / \cos \theta \end{cases} \quad (3.11)$$

定义光滑曲线 $path$ 上任意一点 P 既是 $\{F\}$ 坐标系的原点，又是AUV的“虚拟向导”； s 是从路径点起沿路径的广义弧长。并且虚拟目标点 P 满足 $\mathbf{B} = \mathbf{T} \times \mathbf{N}$ ，其中 \mathbf{T} 和 \mathbf{N} 分别表示单位切向向量和单位法向向量。定义 P 点的曲率和挠率为 $c_c(s)$ 和 $c_t(s)$ ，则AUV在

$\{F\}$ 坐标系中的角速度可以表示为 $\omega_F = [0, c_t(s)\dot{s}, c_c(s)\dot{s}]^T$, \dot{s} 为虚拟参考点的速度。

定义 Q 点到 P 点的位移 \mathbf{d} 在 \mathbf{T} 、 \mathbf{N} 和 \mathbf{B} 方向的分量由 x_e 、 y_e 和 z_e 分别表示；即位移 \mathbf{d} 是路径跟踪误差，记作 $\boldsymbol{\varepsilon} = [x_e, y_e, z_e]^T$ 。则点 Q 与点 P 之间的相对速度为 $d\boldsymbol{\varepsilon}/dt = [\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{z}_e]^T$ 。定义 $\{B\}$ 坐标系和 $\{F\}$ 坐标系间的旋转矩阵为 \mathbf{R} ，并通过两个坐标系间的航迹角误差 γ_e 和潜浮角误差 χ_e 得到旋转矩阵：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \chi_e \cos \gamma_e & -\sin \gamma_e & \sin \chi_e \cos \gamma_e \\ \cos \chi_e \sin \gamma_e & \cos \gamma_e & \sin \chi_e \sin \gamma_e \\ -\sin \chi_e & 0 & \cos \chi_e \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

其中 $\chi_e = \theta - \theta_F$, $\gamma_e = \psi - \psi_F$ 。

欠驱动 AUV 的纵倾角速度和偏航角速度在坐标系 $\{F\}$ 中表示为 $c_c(s)\dot{s}$ 和 $c_t(s)\dot{s}$ ，可以得到角速度误差如下：

$$\begin{cases} \dot{\chi}_e = q - c_c(s)\dot{s} \\ \dot{\gamma}_e = r / \cos \theta - c_t(s)\dot{s} \end{cases} \quad (3.13)$$

依据向量合成公式可得点 Q 在坐标系 $\{F\}$ 下的速度向量为：

$$\mathbf{R} \left(\frac{d\mathbf{q}}{dt} \right)_B = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt} \right)_F + \left(\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} \right)_F + \omega_F \times \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.14)$$

式中， \mathbf{q} 为点 Q 在 $\{B\}$ 坐标系下的坐标矢量，且 $(d\mathbf{q}/dt)_B = [u, 0, 0]^T$ ； \mathbf{p} 为点 P 在 $\{F\}$ 坐标系下的坐标矢量，且 $(d\mathbf{p}/dt)_F = [\dot{s}, 0, 0]^T$ 。

$$\omega_F \times \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\gamma}_F = c_t(s)\dot{s} \\ \dot{\chi}_F = c_c(s)\dot{s} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_c(s)\dot{s}z_e - c_t(s)\dot{s}y_e \\ c_t(s)\dot{s}x_e \\ -c_c(s)\dot{s}x_e \end{pmatrix}$$

结合式 (3.13) 和 (3.14) 可得，欠驱动 AUV 三维路径跟踪误差方程为：

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u \cos \gamma_e \cos \chi_e - \dot{s} - c_c(s)\dot{s}z_e + c_t(s)\dot{s}y_e \\ \dot{y}_e = u \sin \gamma_e \cos \chi_e - c_t(s)\dot{s}x_e \\ \dot{z}_e = c_c(s)\dot{s}x_e - u \sin \chi_e \\ \dot{\chi}_e = q - c_c(s)\dot{s} \\ \dot{\gamma}_e = r / \cos \theta - c_t(s)\dot{s} \end{cases} \quad (3.15)$$

考虑到路径跟踪控制与时间无关, 可以给 AUV 设定一个期望的纵向速度 u_d , 使得三维路径跟踪控制目标为: 设计控制输入 τ_u 、 τ_q 、 τ_r 使得欠驱动 AUV 能够在参数摄动和环境扰动约束下有效地跟踪上期望路径, 即控制器能够镇定跟踪误差。

3.4 路径跟踪控制器设计及稳定性分析

3.4.1 扩展扰动观测器设计

为了精确地估计动态模型中的未知环境扰动, 采用了如下的非线性二阶扩展扰动观测器^[46-47]:

$$\begin{cases} \hat{D}_u = P_{u1} + L_{u1}u \\ \dot{\hat{P}}_{u1} = -L_{u1}(f_u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + \hat{D}_u) + \hat{D}_u \\ \hat{D}_u = P_{u2} + L_{u2}u \\ \dot{\hat{P}}_{u2} = -L_{u2}(f_u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + \hat{D}_u) \end{cases} \begin{cases} \hat{D}_q = P_{q1} + L_{q1}q \\ \dot{\hat{P}}_{q1} = -L_{q1}(f_q + \frac{\tau_q}{m_{55}} + \hat{D}_q) + \hat{D}_q \\ \hat{D}_q = P_{q2} + L_{q2}q \\ \dot{\hat{P}}_{q2} = -L_{q2}(f_q + \frac{\tau_q}{m_{55}} + \hat{D}_q) \end{cases} \begin{cases} \hat{D}_r = P_{r1} + L_{r1}r \\ \dot{\hat{P}}_{r1} = -L_{r1}(f_r + \frac{\tau_r}{m_{66}} + \hat{D}_r) + \hat{D}_r \\ \hat{D}_r = P_{r2} + L_{r2}r \\ \dot{\hat{P}}_{r2} = -L_{r2}(f_r + \frac{\tau_r}{m_{66}} + \hat{D}_r) \end{cases} \quad (3.16)$$

其中, \hat{D}_u 、 \hat{D}_q 和 \hat{D}_r 为未知环境扰动的估计值; \hat{D}_u 、 \hat{D}_q 和 \hat{D}_r 为未知扰动的时间导数估计值; $P_{(.)1}$ 和 $P_{(.)2}$ 是观测器辅助状态增益; $L_{(.)1}$ 和 $L_{(.)2}$ 是观测器增益系数。本文采用的二阶扰动观测器不仅可以估计不确定性, 而且可以估计不确定性的时间导数。

定理3.3: 利用式 (3.16) 所示的二阶扰动观测器, 保证了未知扰动的估计误差收敛到原点附近的特定紧集。

为方便分析稳定性, 式 (3.16) 提出的观测器被改写为如下形式:

$$\begin{cases} \hat{D}_i = P_1 + L_1 X_i \\ \dot{\hat{P}}_1 = -L_1(X_c - D_c + \hat{D}_c) + \hat{D}_c \\ \hat{D}_c = P_2 + L_2 X_c \\ \dot{\hat{P}}_2 = -L_2(X_c - D_c + \hat{D}_c) \end{cases} \quad (3.17)$$

其中, $D_i = [D_u, D_q, D_r]^T$, $X_i = [u, q, r]^T$, $L_1 = [L_{u1}, L_{q1}, L_{r1}]^T$, $L_2 = [L_{u2}, L_{q2}, L_{r2}]^T$, $P_1 = [P_{u1}, P_{q1}, P_{r1}]^T$, $P_2 = [P_{u2}, P_{q2}, P_{r2}]^T$ 。

证明可以分为两个步骤:

步骤一：观测器误差动力学推导。

从式 (3.17) 可知：

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{D}}}_i &= \dot{\mathbf{P}}_1 + \mathbf{L}_1 \dot{\mathbf{X}}_i \\ &= -\mathbf{L}_1 (\dot{\mathbf{X}}_i - \mathbf{D}_i + \hat{\mathbf{D}}_i) + \hat{\mathbf{D}}_i + \mathbf{L}_1 \dot{\mathbf{X}}_i \\ &= \mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{D}}_i + \hat{\mathbf{D}}_i\end{aligned}\quad (3.18)$$

其中， $\tilde{\mathbf{D}}_i = \mathbf{D}_i - \hat{\mathbf{D}}_i$ 。

从式 (3.18) 的两边减去 $\dot{\mathbf{D}}_i$ ，可得：

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{D}}}_i &= -\mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{D}}_i - \hat{\mathbf{D}}_i + \dot{\mathbf{D}}_i \\ &= -\mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{D}}_i + \tilde{\dot{\mathbf{D}}}_i\end{aligned}\quad (3.19)$$

其中， $\tilde{\dot{\mathbf{D}}}_i = \dot{\mathbf{D}}_i - \hat{\dot{\mathbf{D}}}_i$ 。

同理，可以得到：

$$\ddot{\tilde{\mathbf{D}}}_i = -\mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{D}}_i + \ddot{\mathbf{D}}_i \quad (3.20)$$

$$\ddot{\tilde{\dot{\mathbf{D}}}}_i = -\mathbf{L}_1 \dot{\tilde{\mathbf{D}}}_i - \mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{D}}_i + \ddot{\mathbf{D}}_i \quad (3.21)$$

由于本文设定的未知环境扰动是有界的，所以 $\ddot{\tilde{\mathbf{D}}}_i$ 是有界的；如果矩阵系数 \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 为正数，则 $\tilde{\mathbf{D}}_i$ 是稳定的。

将估计误差向量定义为 $\mathbf{E}_1 = [\tilde{\mathbf{D}}_i \quad \tilde{\dot{\mathbf{D}}}_i]^T$ ，则观测器误差动态可表示为：

$$\dot{\mathbf{E}}_1 = \mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{E}}_1 + \mathbf{E}_c \ddot{\mathbf{D}}_i \quad (3.22)$$

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} -\mathbf{L}_1 & 1 \\ -\mathbf{L}_2 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{E}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

步骤二：稳定性分析。

特征值方程可以描述为：

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{L}_i| = \begin{vmatrix} \lambda + \mathbf{L}_1 & -1 \\ \mathbf{L}_2 & \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.24)$$

从式 (3.24) 可得：

$$\lambda^2 + L_1 \lambda + L_2 = 0 \quad (3.25)$$

显然，通过选择合适的矩阵系数 L_1 和 L_2 ，可以得到如下的正定矩阵：

$$L_i^T P_c + P_c L_i = -Q_c \quad (3.26)$$

其中， Q_c 为任意正定矩阵，其最小特征值是 λ_m 。

选取如下的 Lyapunov 函数 $V_c = \tilde{E}_1^T P_c \tilde{E}_1$ ，并对其求导可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= \tilde{E}_1^T (L_i^T P_c + P_c L_i) \tilde{E}_1 + 2 \tilde{E}_1^T P_c E_c \ddot{D}_c \\ &\leq -\tilde{E}_1^T Q_c \tilde{E}_1 + 2 |\tilde{E}_1| |P_c E_c| |\ddot{D}_i| \\ &\leq -|\tilde{E}_1| (\lambda_m |\tilde{E}_1| - 2 |P_c E_c| |\ddot{D}_i|) \end{aligned} \quad (3.27)$$

从 (3.27) 可以得出结论，当 $|\tilde{E}_1| > 2 |P_c E_c| |\ddot{D}_i| / \lambda_m$ ，存在 $\dot{V}_c < 0$ 。因此， V_c 的减小将驱使 \tilde{E}_1 到达紧集 $|\tilde{E}_1| \leq 2 |P_c E_c| |\ddot{D}_i| / \lambda_m$ ；证明了 \tilde{D}_i 和 \ddot{D}_i 是有界的。此外，可以选择适当的参数以确保估计误差收敛到原点附近的一个指定紧集。

3.4.2 运动学控制器设计

LOS 作为船舶导航系统中常用的一种航向制导方法，是欠驱动 AUV 实现路径跟踪控制的重要前提。本章采用如下的 LOS 制导律：

$$\begin{cases} \theta_{LOS} = -\arctan(z_e / \Delta_z) \\ \psi_{LOS} = \arctan(y_e / \Delta_y) \end{cases} \quad (3.28)$$

其中 $\Delta_z = \sqrt{\Delta_y^2 + y_e^2}$ ， Δ_y 前视距离。然后得到期望纵倾角 θ_d 和期望偏航角 ψ_d ：

$$\begin{cases} \theta_d = \theta_F + \theta_{LOS} \\ \psi_d = \psi_F + \psi_{LOS} \end{cases} \quad (3.29)$$

根据式 (3.29) 可得纵倾角误差和偏航角误差为：

$$\begin{cases} \theta_e = \theta - \theta_d \\ \psi_e = \psi - \psi_d \end{cases} \quad (3.30)$$

在欠驱动 AUV 路径跟踪的姿态角控制中，构造 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2} \theta_e^2 + \frac{1}{2} \psi_e^2$ ，并对其求导得到：

$$\dot{V}_1 = \theta_e(q - c_c(s)\dot{s}x_e - \dot{\theta}_{LOS}) + \psi_e(r/\cos\theta - c_t(s)\dot{s} - \dot{\psi}_{LOS}) \quad (3.31)$$

为使 V_1 负定, 选取纵倾角速度 q_d 和偏航角速度 r_d 控制律为:

$$\begin{cases} q_d = c_c(s)\dot{s} + \dot{\theta}_{LOS} - k_1\theta_e \\ r_d = \cos\theta(c_t(s)\dot{s} + \dot{\psi}_{LOS} - k_2\psi_e) \end{cases} \quad (3.32)$$

其中, $k_1, k_2 > 0$ 。

假设 AUV 能够跟踪上期望角速度, 则将式 (3.32) 代入式 (3.31) 可得 $\dot{V}_1 = -k_1\theta_e^2 - k_2\psi_e^2 \leq 0$ 。因此, V_1 是一个单调递减函数, $\lim_{t \rightarrow \infty} V_1$ 存在并有上界。因为 $\ddot{V}_1 = 2(k_1^2\theta_e^2 + k_2^2\psi_e^2) \geq 0$, 所以 \dot{V}_1 也有上界, 进而 \dot{V}_1 是一致连续的。根据 Barbalat 引理可得, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1 = 0$ 使系统收敛到由 $\dot{V}_1 = 0$ 定义的不变集: $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d = \psi, \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_d = \theta$ 。并且 x_e, y_e, z_e 均有界。

在欠驱动 AUV 路径跟踪的位置控制中, 构造 Lyapunov 函数 $V_2 = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2 + z_e^2)$, 并对其求导得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & x_e[u \cos \gamma_e \cos \chi_e - \dot{s} - c_t(s)\dot{s}z_e + c_c(s)\dot{s}y_e] \\ & + y_e[u \sin \gamma_e \cos \chi_e - c_c(s)\dot{s}x_e] + z_e[c_t(s)\dot{s}x_e - u \sin \chi_e] \end{aligned} \quad (3.33)$$

为使 \dot{V}_2 负定, 选取如下的虚拟速度控制律 \dot{s} :

$$\dot{s} = u \cos \gamma_e \cos \chi_e + k_s x_e, k_s > 0 \quad (3.34)$$

将式 (3.34) 代入 (3.33) 可得 $\dot{V}_2 = -k_s x_e^2 + y_e u \sin \gamma_e \cos \chi_e - z_e u \sin \chi_e \leq 0$ 。由于 AUV 纵倾角的范围限定, 使得 $\cos \chi_e > 0$, 根据右手定则可知: 当 AUV 在 $path$ 右侧时, $y_e \geq 0$ 而 $\chi_e \leq 0$, 且 $\gamma_e \in [-\pi, 0]$, $\sin \gamma_e \leq 0$, 则有 $y_e \sin \gamma_e \leq 0$; 反之同样满足 $y_e \sin \gamma_e \leq 0$ 成立。通过右手螺旋法则可知: 当 AUV 位于期望路径 $path$ 上面时, $z_e \geq 0$ 而 $\chi_e \in [0, \pi/2]$, 则有 $z_e \sin \chi_e \geq 0$; 反之也满足 $z_e \sin \chi_e \geq 0$ 成立; 经过以上分析可得 $\dot{V}_2 \leq 0$ 。由 Barbalat 引理可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_2 = 0$, 即 AUV 的位置误差满足: $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} y_e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} z_e = 0$ 。

3.4.3 动力学控制器设计

上一部分已经建立了三维路径跟踪制导律。为了简化 AUV 运动控制器的设计, 通常将 AUV 的运动分解为三个子系统: 纵向速度控制子系统、俯仰角速度控制子系统和偏航

角速度控制子系统；然后在三个子系统控制器设计中引入了非奇异终端滑模面和扩展扰动观测器。

A. 纵倾速度控制律

为设计纵向推力 τ_u ，引入如下滑模面：

$$S_1 = \int_0^t u_e(\tau) d\tau + \lambda_1 |u_e(t)|^{b_1} \operatorname{sgn}(u_e) \quad (3.35)$$

其中， $u_e = u - u_d$ 为纵向速度误差； $\lambda_1 > 0$ ， $b_1 = p_1/q_1$ 为待设计的参数， p_1 ， q_1 为正奇数，且满足 $q_1 < p_1 < 2q_1$ 。

对式 (3.35) 两侧求导可得：

$$\dot{S}_1 = u_e + \lambda_1 b_1 |u_e|^{b_1-1} \dot{u}_e \operatorname{sgn}(u_e) \quad (3.36)$$

令 $\dot{S}_1 = 0$ 并将式 (3.10) 代入可得等效控制律 τ_{1eq} ：

$$\tau_{1eq} = -\hat{m}_{22}vr + \hat{m}_{33}wq + \hat{X}_u u + \hat{X}_{u|u}|u| - \frac{\hat{m}_{11}}{\lambda_1 b_1} |u_e|^{2-b_1} + \hat{m}_{11}\dot{u}_d - \hat{m}_{11}\hat{D}_u \quad (3.37)$$

考虑模型参数摄动的影响，等效控制律无法保证系统始终位于滑模面。因此，为削弱滑模抖振，实现精确的路径跟踪控制，采用了指数趋近律和双曲正切函数相结合的方法设计趋近律 τ_{1r} 。

$$\tau_{1r} = -k_u S_1 - K_1 \tanh(S_1), k_u > 0 \quad (3.38)$$

其中，增益系数 K_1 与模型参数摄动的上下界相关，被设计为：

$$K_1 = \tilde{m}_{22}vr + \tilde{m}_{33}wq + \tilde{X}_u u + \tilde{X}_{u|u}|u| - \frac{\tilde{m}_{11}}{\lambda_1 b_1} |u_e|^{2-b_1} + \tilde{m}_{11}\dot{u}_d + \tilde{m}_{11}\hat{D}_u + \sigma_1 \quad (3.39)$$

其中， $\sigma_1 > 0$ 为待设计的参数。

则欠驱动AUV的纵向速度控制律为：

$$\tau_1 = -\hat{m}_{22}vr + \hat{m}_{33}wq + \hat{X}_u u + \hat{X}_{u|u}|u| - \frac{\hat{m}_{11}}{\lambda_1 b_1} |u_e|^{2-b_1} + \hat{m}_{11}\dot{u}_d - \hat{m}_{11}\hat{D}_u - k_u S_1 - K_1 \tanh(S_1) \quad (3.40)$$

为了分析纵向推力 τ_u 作用下系统的稳定性，选取如下Lyapunov函数：

$$V_3 = \frac{1}{2} m_{11} S_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{D}_u^2 + \frac{1}{2L_{u2}} \tilde{D}_u^2 \quad (3.41)$$

那么, 对 V_3 求导后可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= m_{11}S_1\dot{S}_1 + \tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u + \frac{1}{L_{u2}}\tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u \\ &= S_1(-\tilde{m}_{22}vr + \tilde{m}_{33}wq + \tilde{X}_u u + \tilde{X}_{u|u}|u| - \frac{\tilde{m}_{11}}{\lambda_1 b_1}|u_e|^{2-b_1} + \tilde{m}_{11}\dot{u}_d - \tilde{m}_{11}\hat{D}_u) + \tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u + \frac{1}{L_{u2}}\tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u \\ &\leq -k_u\lambda_1 b_1 S_1^2 - \sigma_1\lambda_1 b_1 |S_1| + \lambda_1 b_1 |S_1| |\tilde{D}_u| - L_{u1}\tilde{D}_u + \frac{1}{L_{u2}}|\tilde{D}_u| |\ddot{D}_u|\end{aligned}\quad (3.42)$$

由Young's不等式可得 $\lambda_1 b_1 |S_1| |\tilde{D}_u| \leq \frac{1}{2}(\lambda_1 b_1)^2 S_1^2 + \frac{1}{2}\tilde{D}_u^2$, 进而 \dot{V}_3 可以改写为:

$$\dot{V}_3 \leq -(k_u\lambda_1 b_1 - \frac{1}{2}\lambda_1^2 b_1^2)S_1^2 - \sigma_1\lambda_1 b_1 |S_1| - (L_{u1} - \frac{1}{2})\tilde{D}_u + \frac{1}{L_{u2}}|\tilde{D}_u| |\ddot{D}_u| \quad (3.43)$$

根据文献[47]中定理1可知, \tilde{D}_u 是收敛的; 并且假设 $|\tilde{D}_u|$ 和 $|\ddot{D}_u|$ 的上界分别为 \bar{u}_u 和 $\bar{\ddot{D}}_u$ 。显然, 从式 (3.43) 可以得出结论: 只要 $S_1^2 > \bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} (k_u\lambda_1 b_1 - \frac{1}{2}\lambda_1^2 b_1^2)$ 或 $|S_1| > \bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} \lambda_1 b_1 \sigma_1$, 就可以得到 $S_1\dot{S}_1 + \tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u + \frac{1}{L_{u2}}\tilde{D}_u\dot{\tilde{D}}_u \leq 0$, 即 S_1 收敛于 $|S_1| \leq \sqrt{\bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} (k_u\lambda_1 b_1 - \frac{1}{2}\lambda_1^2 b_1^2)}$ 或 $|S_1| \leq \bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} \lambda_1 b_1 \sigma_1$ 。

因此, 证明了在所提出的纵向速度控制律的作用下, 系统状态被迫向给定的滑动面收敛, 并且滑动模态面有界于一个指定的紧集, 描述如下:

$$\Omega_{S_1} = \{S_1 \in R \mid |S_1| \leq \zeta_u\} \quad (3.44)$$

其中, $\zeta_u = \min(\sqrt{\bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} (k_u\lambda_1 b_1 - \frac{1}{2}\lambda_1^2 b_1^2)}, \bar{u}_u \bar{\ddot{D}}_u / L_{u2} \lambda_1 b_1 \sigma_1)$ 。

此外, 通过求解式 (3.34), 可以得到以下方程:

$$\begin{aligned}|u_e|^{b_1} &\leq \frac{1}{\lambda_1}(|S_1| - e^{-t} \int_0^t |S_1(\varpi)| e^{\varpi} d\varpi) \\ &\leq \zeta_u + e^{-t} \int_0^t \zeta_u e^{\varpi} d\varpi \\ &= \zeta_u (2 - e^{-t}) \leq \sqrt[2]{2\zeta_u}\end{aligned}\quad (3.45)$$

因此,证明了在纵向速度控制律的作用下,误差有界于一个指定的紧集,其描述如下:

$$\Omega_{u_e} = \{u_e \in R \mid |u_e| \leq \sqrt[3]{2\zeta_u}\} \quad (3.46)$$

所以可以选择参数来保证跟踪误差收敛到原点附近一个指定的紧集,进而保证不等式 $\dot{V}_3 \leq 0$ 成立。

B. 纵倾角速度控制律和偏航角速度控制律

采用与上文相同的思路来设计纵倾角速度控制律和偏航角速度控制律,引入如下的非奇异终端滑模面:

$$\begin{cases} S_2 = \int_0^t q_e(\tau) d\tau + \lambda_2 |q_e(t)|^{b_2} \operatorname{sgn}(q_e) \\ S_3 = \int_0^t r_e(\tau) d\tau + \lambda_3 |r_e(t)|^{b_3} \operatorname{sgn}(r_e) \end{cases} \quad (3.47)$$

其中, $q_e = q - q_d$ 为纵倾角速度误差; $r_e = r - r_d$ 为偏航角速度误差; $\lambda_2 > 0$, $\lambda_3 > 0$, $b_2 = p_2/q_2$, $b_3 = p_3/q_3$ 为待设计的参数, p_2, p_3, q_2, q_3 为正奇数, 且满足 $q_2 < p_2 < 2q_2$, $q_3 < p_3 < 2q_3$ 。

对式 (3.47) 两侧求导可得:

$$\begin{cases} \dot{S}_2 = q_e + \lambda_2 b_2 |q_e|^{b_2-1} \dot{q}_e \operatorname{sgn}(q_e) \\ \dot{S}_3 = r_e + \lambda_3 b_3 |r_e|^{b_3-1} \dot{r}_e \operatorname{sgn}(r_e) \end{cases} \quad (3.48)$$

令 $\dot{S}_2 = 0$ 和 $\dot{S}_3 = 0$ 并将式 (3.9) 代入可得纵倾力矩的等效控制律 τ_{5eq} 和偏航力矩的等效控制律 τ_{6eq} 分别为:

$$\begin{cases} \tau_{5eq} = (\hat{m}_{11} - \hat{m}_{33})uw + \hat{M}_q q + \hat{M}_{q|q}|q| + \overline{BG_z} W \sin \theta - \frac{\hat{m}_{55}}{\lambda_2 b_2} |q_e|^{2-b_2} + \hat{m}_{55} \dot{q}_d - \hat{m}_{55} \hat{D}_q - k_q S_2 \\ \tau_{6eq} = (\hat{m}_{22} - \hat{m}_{11})uv + \hat{N}_r r + \hat{N}_{r|r}|r| - \frac{\hat{m}_{66}}{\lambda_3 b_3} |r_e|^{2-b_3} + \hat{m}_{66} \dot{r}_d - \hat{m}_{66} \hat{D}_r - k_r S_3 \end{cases} \quad (3.49)$$

同理, 可得欠驱动AUV的纵倾角速度控制律和偏航角速度控制律为:

$$\begin{cases} \tau_5 = (\hat{m}_{11} - \hat{m}_{33})uw + \hat{M}_q q + \hat{M}_{q|q}|q| + \overline{BG_z} W \sin \theta - \frac{\hat{m}_{55}}{\lambda_2 b_2} |q_e|^{2-b_2} + \hat{m}_{55} \dot{q}_d \\ \quad - \hat{m}_{55} \hat{D}_q - k_q S_2 - K_2 \tanh(S_2) \\ \tau_6 = (\hat{m}_{22} - \hat{m}_{11})uv + \hat{N}_r r + \hat{N}_{r|r}|r| - \frac{\hat{m}_{66}}{\lambda_3 b_3} |r_e|^{2-b_3} + \hat{m}_{66} \dot{r}_d - \hat{m}_{66} \hat{D}_r - k_r S_3 - K_3 \tanh(S_3) \end{cases} \quad (3.50)$$

其中, k_q 和 k_r 为正参数; 并参考增益系数 K_1 , 设计如下的增益系数 K_2 和 K_3 :

$$\begin{cases} K_2 = (\tilde{m}_{11} + \tilde{m}_{33})uw + \tilde{M}_q q + \tilde{M}_{q|q}|q| - \frac{\tilde{m}_{55}}{\lambda_2 b_2} |q_e|^{2-b_2} + \tilde{m}_{55} \dot{q}_d + \tilde{m}_{55} \hat{D}_q + \sigma_2 \\ K_3 = (\tilde{m}_{22} + \tilde{m}_{11})uv + \tilde{N}_r r + \tilde{N}_{r|r}|r| - \frac{\tilde{m}_{66}}{\lambda_3 b_3} |r_e|^{2-b_3} + \tilde{m}_{66} \dot{r}_d + \tilde{m}_{66} \hat{D}_r + \sigma_3 \end{cases} \quad (3.51)$$

其中, $\sigma_2 > 0$ 和 $\sigma_3 > 0$ 为待设计的参数。

为了分析纵倾控制力矩 τ_q 和偏航控制力矩 τ_r 作用下控制器的稳定性, 选取如下 Lyapunov 函数:

$$V_4 = \frac{1}{2} m_{55} S_2^2 + \frac{1}{2} m_{66} S_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{D}_q^2 + \frac{1}{2L_{q2}} \tilde{D}_q^2 + \frac{1}{2} \tilde{D}_r^2 + \frac{1}{2L_{r2}} \tilde{D}_r^2 \quad (3.52)$$

对 Lyapunov 函数 V_4 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= m_{55} S_2 \dot{S}_2 + m_{66} S_3 \dot{S}_3 + \tilde{D}_q \dot{\tilde{D}}_q + \frac{1}{L_{q2}} \tilde{D}_q \dot{\tilde{D}}_q + \tilde{D}_r \dot{\tilde{D}}_r + \frac{1}{L_{r2}} \tilde{D}_r \dot{\tilde{D}}_r \\ &\leq -k_q \lambda_2 b_2 S_2^2 - \sigma_2 \lambda_2 b_2 |S_2| + \lambda_2 b_2 |S_2| |\tilde{D}_q| - L_{q1} \tilde{D}_q + \frac{1}{L_{q2}} |\tilde{D}_q| |\ddot{D}_q| \\ &\quad - k_r \lambda_3 b_3 S_3^2 - \sigma_3 \lambda_3 b_3 |S_3| + \lambda_3 b_3 |S_3| |\tilde{D}_r| - L_{r1} \tilde{D}_r + \frac{1}{L_{r2}} |\tilde{D}_r| |\ddot{D}_r| \end{aligned} \quad (3.53)$$

Young's 不等式得 $\lambda_2 b_2 |S_2| |\tilde{D}_q| \leq \frac{1}{2} (\lambda_2 b_2)^2 S_2^2 + \frac{1}{2} \tilde{D}_q^2$ 和 $\lambda_3 b_3 |S_3| |\tilde{D}_r| \leq \frac{1}{2} (\lambda_3 b_3)^2 S_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{D}_r^2$,

进而 \dot{V}_4 可以改写为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &\leq -(k_q \lambda_2 b_2 - \frac{1}{2} \lambda_2^2 b_2^2) S_2^2 - \sigma_2 \lambda_2 b_2 |S_2| + -(L_{q1} - \frac{1}{2}) \tilde{D}_q + \frac{1}{L_{q2}} |\tilde{D}_q| |\ddot{D}_q| \\ &\quad -(k_r \lambda_3 b_3 - \frac{1}{2} \lambda_3^2 b_3^2) S_3^2 - \sigma_3 \lambda_3 b_3 |S_3| - (L_{r1} - \frac{1}{2}) \tilde{D}_r + \frac{1}{L_{r2}} |\tilde{D}_r| |\ddot{D}_r| \end{aligned} \quad (3.54)$$

同理，通过选择合适的参数，可以使得不等式 $\dot{V}_4 \leq 0$ 成立。

因此，可知本章所设计的运动控制器能够驱使欠驱动AUV跟踪上期望路径，并保证系统全局渐进稳定。

3.5 仿真验证

表 3.1 仿真条件

Tab. 3.1 Simulation conditions

AUV 初始 状态	初始 位姿	$x=50\text{m}$	$y=0\text{m}$	$z=0\text{m}$
		$\theta=0^\circ$	$\psi=0^\circ$	
	初始 速度	$u=0.01(\text{m/s})$	$v=0(\text{m/s})$	$w=0(\text{m/s})$
		$q=0(\text{rad/s})$	$r=0(\text{rad/s})$	
期望路径 (单位: m)	$\begin{cases} x_F(s) = 100\cos(0.01s) \\ y_F(s) = 100\sin(0.01s) \\ z_F(s) = 0.1s \end{cases}$			
控制器 参数	$L_{u1}=0.75, L_{q1}=1.5, L_{r1}=1.5, L_{u2}=0.95, L_{q2}=2.1, L_{r2}=2.1, k_1=1, k_2=1,$ $k_s=0.1, \lambda_1=1.8, \lambda_2=1.4, \lambda_3=1.4, b_1=9/7, b_2=7/5, b_3=7/5, \sigma_1=1.5,$ $\sigma_2=1.5, \sigma_3=1.5, k_u=2, k_q=2, k_r=2$			
扰动 条件	参数摄动	$\begin{cases} \tilde{m}_{11}=\text{unifrnd}(-0.2\hat{m}_{11},0.2\hat{m}_{11}) \\ \tilde{m}_{22}=\text{unifrnd}(-0.2\hat{m}_{22},0.2\hat{m}_{22}) \\ \tilde{m}_{33}=\text{unifrnd}(-0.2\hat{m}_{33},0.2\hat{m}_{33}) \\ \tilde{m}_{44}=\text{unifrnd}(-0.2\hat{m}_{44},0.2\hat{m}_{44}) \\ \tilde{m}_{55}=\text{unifrnd}(-0.2\hat{m}_{55},0.2\hat{m}_{55}) \end{cases}$		
		$\begin{cases} \tilde{X}_u=\text{unifrnd}(-0.2\hat{X}_u,0.2\hat{X}_u) \\ \tilde{Y}_v=\text{unifrnd}(-0.2\hat{Y}_v,0.2\hat{Y}_v) \\ \tilde{Z}_w=\text{unifrnd}(-0.2\hat{Z}_w,0.2\hat{Z}_w) \\ \tilde{M}_q=\text{unifrnd}(-0.2\hat{M}_q,0.2\hat{M}_q) \\ \tilde{N}_r=\text{unifrnd}(-0.2\hat{N}_r,0.2\hat{N}_r) \end{cases} \begin{cases} \tilde{X}_{u u }=\text{unifrnd}(-0.2\hat{X}_{u u },0.2\hat{X}_{u u }) \\ \tilde{Y}_{v v }=\text{unifrnd}(-0.2\hat{Y}_{v v },0.2\hat{Y}_{v v }) \\ \tilde{Z}_{w w }=\text{unifrnd}(-0.2\hat{Z}_{w w },0.2\hat{Z}_{w w }) \\ \tilde{M}_{q q }=\text{unifrnd}(-0.2\hat{M}_{q q },0.2\hat{M}_{q q }) \\ \tilde{N}_{r r }=\text{unifrnd}(-0.2\hat{N}_{r r },0.2\hat{N}_{r r }) \end{cases}$		
	外界环 境干扰	$\begin{cases} d_u = 5 + 5\sin(0.05t) + 5\cos(0.05t + \pi/4) \\ d_v = 0.5 + 0.5\sin(0.05t) \\ d_w = 0.5 + 0.5\sin(0.05t) \\ d_q = 2 + 2\sin(0.03t) + 2\cos(0.03t + \pi/4) \\ d_r = 1 + \sin(0.02t) + \cos(0.02t + \pi/4) \end{cases}$		

为了验证本章所采用的路径跟踪控制方法的有效性,建立了欠驱动 AUV 路径跟踪虚拟仿真平台;然后在同等干扰条件下分别采用了反步法、积分滑模控制方法和非奇异终端滑模控制方法来设计控制器。仿真条件如表 3.1 所示。图 3.2~图 3.9 为仿真验证结果。

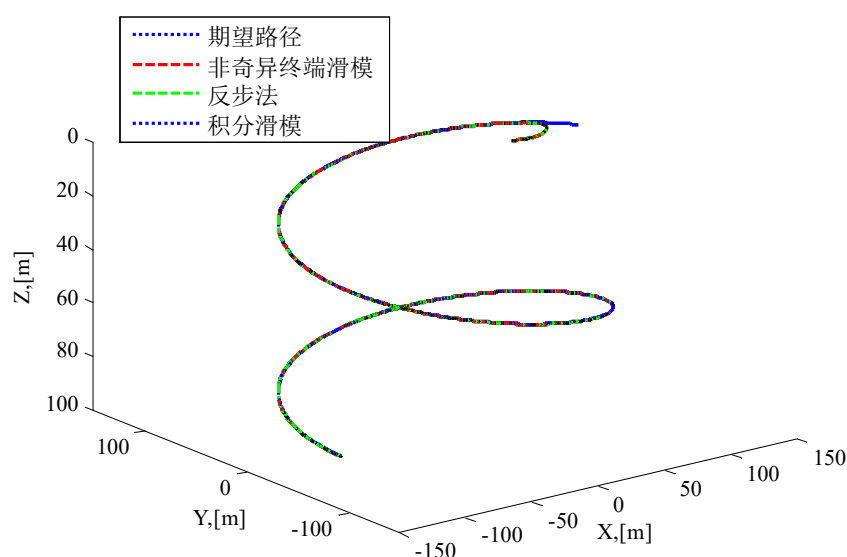


图3.2 欠驱动AUV三维路径跟踪仿真曲线

Fig. 3.2 The simulation curve of underactuated AUV following the three-dimensional path

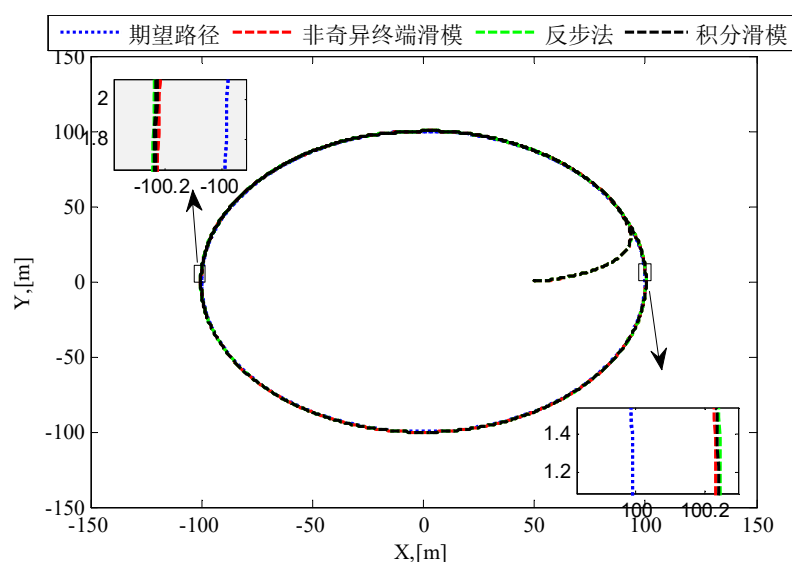


图3.3 三维路径跟踪水平面投影

Fig. 3.3 The horizontal projection of three-dimensional path-following

图 3.2 为欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制仿真曲线；由曲线图可以看出基于三种方法设计的运动控制器都能够使模型参数摄动和外部环境扰动约束下的欠驱动 AUV 快速、准确地跟踪上期望路径。图 3.3 和图 3.4 分别为欠驱动 AUV 三维路径跟踪曲线在水平面和垂直面上的投影。由局部放大图可以看出非奇异终端滑模控制方法设计的控制器与反步法、积分滑模控制方法相比控制精度更高。

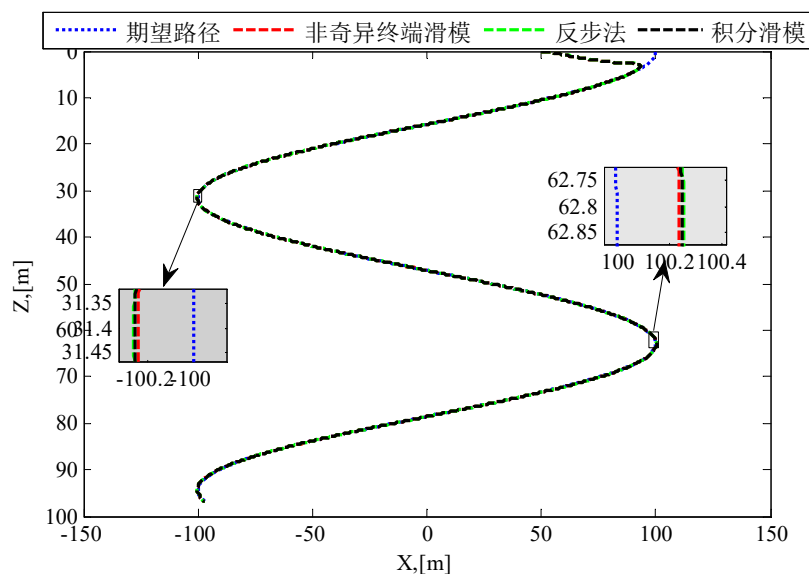


图3.4 三维路径跟踪垂直面投影

Fig. 3.4 The vertical projection of three-dimensional path-following

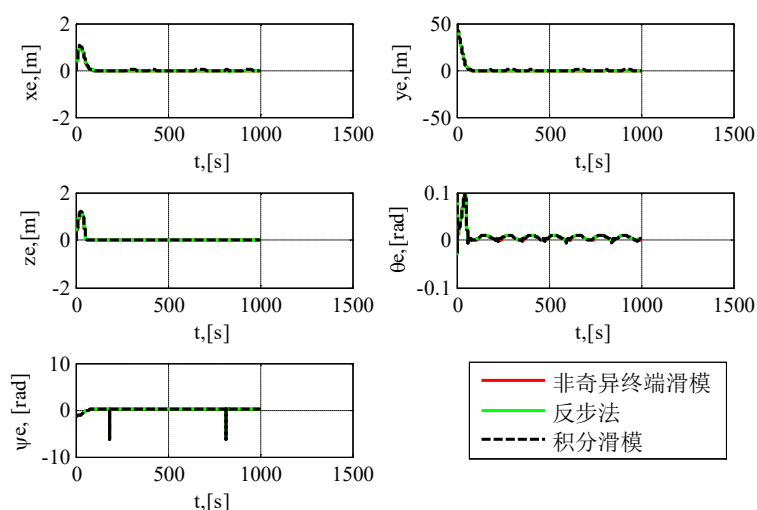


图3.5 欠驱动AUV位姿误差响应曲线

Fig. 3.5 Position and posture error response for underactuated AUV

图3.5为欠驱动AUV的位置和姿态角跟踪误差曲线，由图可知三种控制方法都能够保证位姿跟踪误差很快地收敛到零。图3.6为欠驱动AUV的线性速度和角速度响应曲线，在三维下潜过程中纵向速度远远大于横向和垂向速度，因此忽略横向和垂向速度后并不会影响AUV的控制性能。图3.7为欠驱动AUV纵向速度及误差响应曲线，虽然本章设计的纵向速度响应曲线存在瞬间的超调现象，但能够更好地跟踪上期望纵向速度。

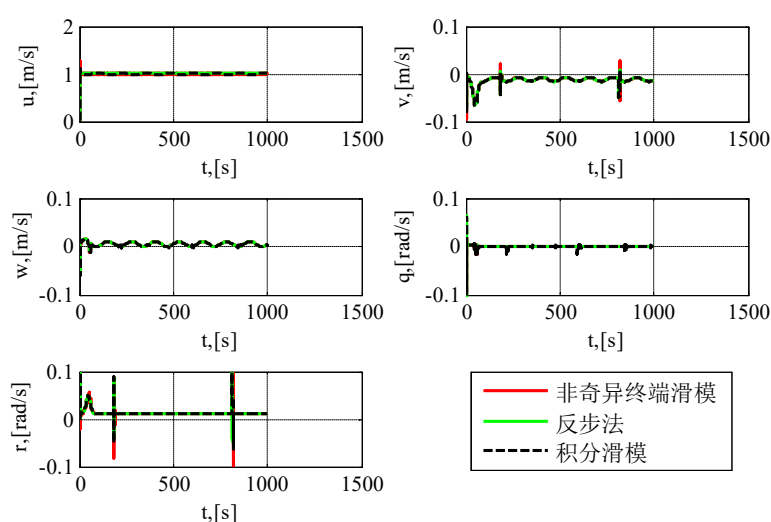


图3.6 欠驱动AUV速度跟踪响应曲线

Fig. 3.6 The velocity following response for underactuated AUV

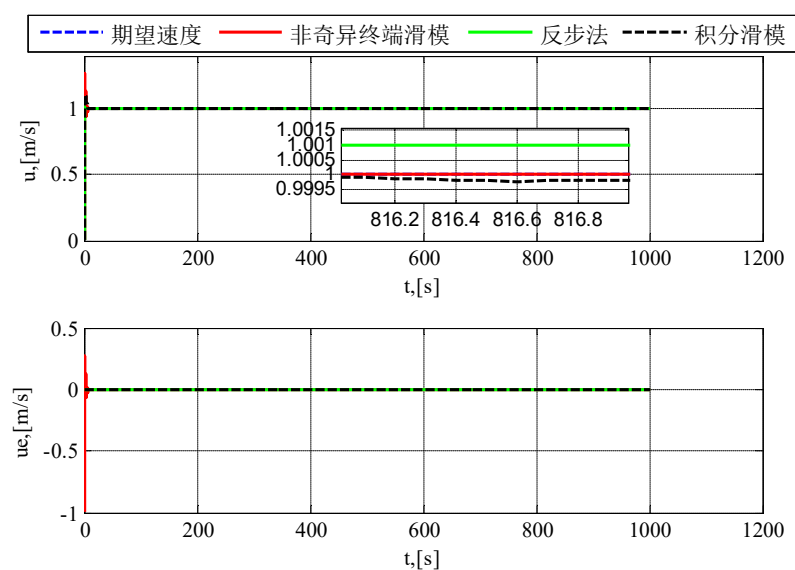


图3.7 欠驱动AUV纵向速度响应曲线

Fig. 3.7 The surge velocity response for underactuated AUV

图 3.8 给出了欠驱动 AUV 的控制输入响应曲线，在初始阶段，为尽快镇定位姿误差并且跟踪上期望路径，AUV 的路径跟踪控制力（力矩）变化剧烈；而在稳定阶段 AUV 的控制力（力矩）变化相对平缓。图 3.9 为外部环境扰动的估计值和实际值仿真图，由图可知扩展扰动观测器与普通扰动观测器相比能够更加快速和精确地估计扰动；表明本章所设计的控制方法对外部扰动的鲁棒性更强。综合分析表明本章设计的运动控制器可以很好地实现模型参数摄动和时变环境扰动约束下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制。

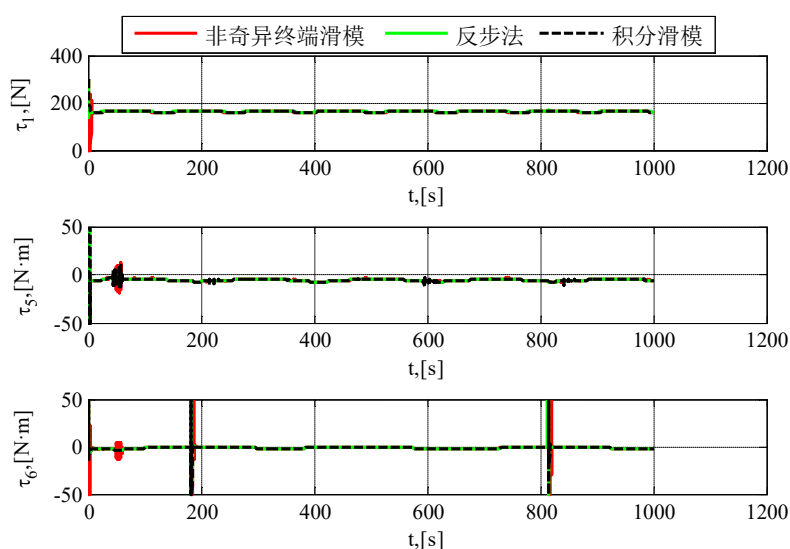


图3.8 欠驱动AUV三维路径跟踪控制输入曲线

Fig. 3.8 The path-following control inputs for the underactuated AUV in the three-dimensional space

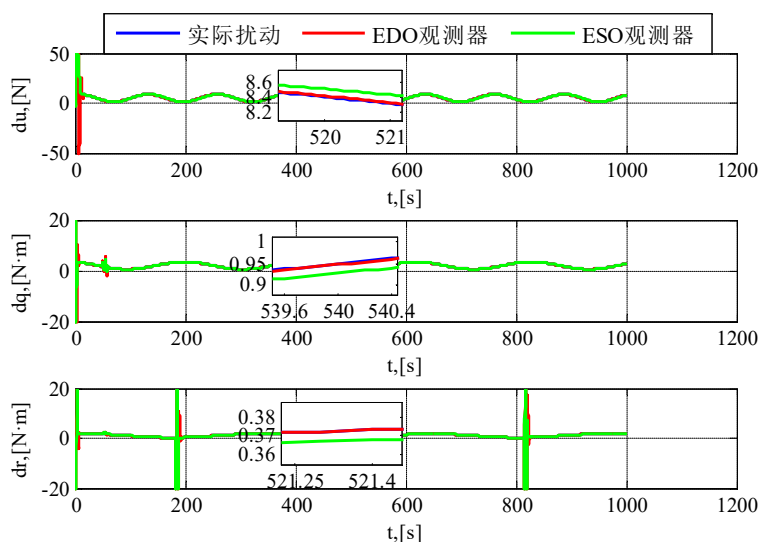


图3.9 外部环境扰动的估计值和实际值

Fig. 3.9 The estimated and actual of external environmental disturbance

3.6 本章小结

本章研究了在参数摄动、未知环境扰动约束下的欠驱动AUV三维路径跟踪控制。首先，引入“虚拟向导”、Serret-Frenet坐标系、LOS制导律以及反步法将误差镇定问题转化为纵向速度、纵倾角速度以及偏航角速度的镇定问题。然后采用非奇异终端滑模控制方法设计了动力学控制器；并引入与模型参数摄动相关的增益系数和双曲正切函数设计趋近律，提高了系统控制精度并削弱了抖振；采用扩展扰动观测器有效地估计并补偿了外部环境扰动。仿真结果验证了所设计的控制器能够很好地跟踪上期望路径；位置跟踪误差和速度跟踪误差趋近为零；控制力（力矩）曲线平滑，控制性能得到了改善；扩展扰动观测器能够对路径跟踪过程中的时变环境扰动进行准确、快速地估计。

4 海底地形轮廓构建

4.1 引言

AUV利用回声测深仪进行未知海底地形勘测过程中,对未知地形的充分感知是其自主决策的前提^[48]。回声测深仪的回波信号会受到诸如机械噪声、环境噪声等一系列噪声的干扰^[49],使得其数据信息的准确性大大降低,进而影响AUV的任务执行效果。考虑到回波信号的特点,需要对信号进行预处理,为后期数据的处理奠定基础。

本章利用回声测深仪的声波信号反射原理,将海底地形作为回声测深仪的作用对象,进而实现地形轮廓信息的采集。首先,利用改进的小波阈值和经验模态分解将回波信号进行消噪处理。得到观测数据后,利用局部支持向量聚类 and 全局聚类相结合的方法处理数据点,完成孤立点的检测和地形轮廓的构建;即把表征噪声和低威胁障碍物的孤立点去除,并把表征威胁障碍物的轮廓点聚类。由于水下环境作用和航行器惯性等因素的影响,导致AUV在航行时的机动性能较差,因此需要采用三次样条函数对轮廓线作平滑处理,得到要跟踪的地形轮廓线。

4.2 回波信号数据预处理

在海洋环境中,信号传输介质混杂着大量的诸如气泡、周期海浪等背景噪声,使得回声测深仪的回波信号和噪声信号混在一起,影响了传感器测距的精度。因此,为了消除信号中的噪声,许多方法被研究出来,比如卡尔曼滤波、傅里叶变换、中值滤波等;然而,这些方法的消噪效果已经无法满足人们的要求。由于小波变换具有选基灵活、多分辨率的特性,在信号降噪领域得到了广泛应用。目前,小波消噪方法主要有:小波分解与重构消噪、小波变换模极大值法消噪、平移不变量小波消噪、小波阈值消噪^[50-52]。本文采用了基于经验模态分解的小波阈值消噪方法,既解决了小波阈值消噪在处理非平稳信号时效果欠佳的问题,又解决了经验模态分解降噪时存在信息丢失的问题。

4.2.1 经验模态分解

宽频带信号的反射回波中含有大量的数据信息。因此为了更好地提取目标特征,达到测距要求,AUV携带的回声测深仪采用宽频带信号作为发射信号,并且假设AUV在航行过程中水下环境对回声测深仪造成的影响可以忽略,且宽频带信号在近水面不存在信道盲区问题。本章采用的宽频带信号为线性调频信号^[53](即LFM信号),其解析式如下:

$$s(t) = \begin{cases} A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)], & t \in [-T/2, T/2] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4.1)$$

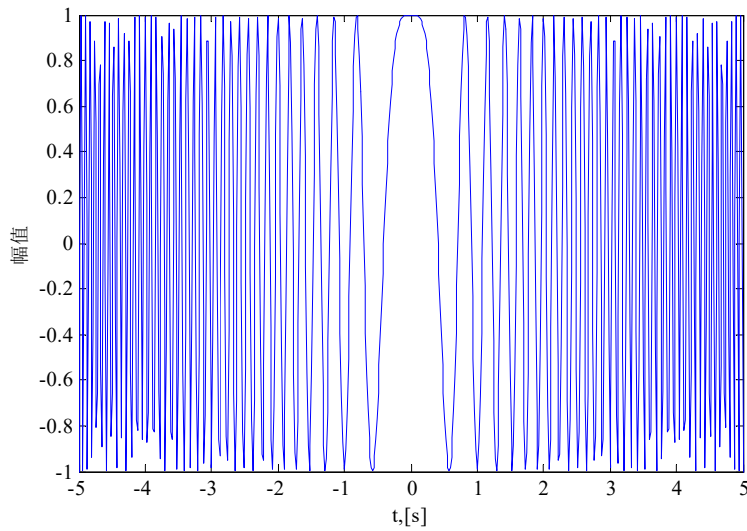


图4.1 LFM信号波形

Fig. 4.1 LFM signal waveform

经验模态分解方法是一种时间序列信号分解的方法，并且广泛应用于非线性信号的分析处理中。该方法的原理是根据多分量信号自身的尺度局部特征，将信号分解为若干个本征模函数（IMF）和一个残余分量。它可以有效地解决小波阈值函数中小基波选择困难的问题；因此，在对非平稳信号的滤波和消噪中被广泛应用^[54]。但此方法在信号滤波中也有其局限性，比如去除掉的IMF分量中可能包含原信号的有用信息，导致原信号出现一定程度的失真。

经验模态分解方法是基于以下假设条件：

- 1) 信号至少包含一个极大值点和一个极小值点；
- 2) 特征时间尺度值由相邻极值点的时间间隔决定；
- 3) 信号没有极值点但是存在拐点，则可以通过数据微分来求取极值，然后利用积分重新获得分解结果。

经验模态分解可以视为一种筛分处理的过程。首先，基于三次样条插值函数分别拟合信号中的极大值点和极小值点，得到包含信号 $x(t)$ 所有数据信息且对称的上、下包络线，记为 $h_0(t)$ 和 $l_0(t)$ ；然后用原信号 $x(t)$ 减去上、下包络线的中位值 $m_0(t) = \frac{h_0(t) + l_0(t)}{2}$ 得到信号分量 $f_1(t)$ ，即：

$$f_0(t) = x(t) \quad (4.2)$$

$$f_0(t) - m_0(t) = f_1(t) \quad (4.3)$$

基于理想状态, $f_1(t)$ 被视为IMF。但考虑到样条曲线端点值摆动以及非线性信号隆包问题, 筛分后的信号可能存在骑行波, 导致 $f_1(t)$ 无法满足以下两个条件: (1) 在 $f_1(t)$ 信号中, 过零点与极值点的个数差值不超过1; (2) 在任意时间点, $h_0(t)$ 和 $l_0(t)$ 间的平均值 $m_0(t)$ 为零。所以, 必须多次筛分以获得关于时间轴对称的信号。定义 $f_1(t)$ 为原始信号, $m_1(t)$ 为 $f_1(t)$ 信号上、下包络线的平均值, 进行第二次筛分过程。同理, k 次筛分过程如下:

$$f_1(t) - m_1(t) = f_2(t) \quad (4.4)$$

$$f_2(t) - m_2(t) = f_3(t) \quad (4.5)$$

.....

$$f_{k-1}(t) - m_{k-1}(t) = f_k(t) \quad (4.6)$$

当到达一个终止筛选的准则后, 得到第一个IMF分量 $f_k(t)$, 即:

$$imf_1(t) = f_k(t) \quad (4.7)$$

通过筛选过程可得, 低频均值信号被逐渐剔除; 因此, imf_1 信号中应含有 $x(t)$ 信号的最高频周期分量。然后得到信号残余分量 r_1 为:

$$x(t) - imf_1 = r_1 \quad (4.8)$$

如果 r_1 中仍然含有 $x(t)$ 信号中更高频的周期分量, 则将其作为一个新的信号进行筛分。筛分后就可以依次得到各个 IMF 分量:

$$r_1 - imf_2 = r_2 \quad (4.9)$$

.....

$$r_{n-1} - imf_n = r_n \quad (4.10)$$

当信号残余分量 r_n 单调或无法再筛选出本征模态函数时, 筛分过程结束。那么如何在实际计算中停止筛分呢? 为了确保本征模态函数能够真实的反映幅度与频率信号的调制, 同时在平滑处理时减小信号幅值的差值并简化计算, 终止筛选标准被提出。该标准可以通过两个相邻分量 $f_{i-1}(t)$ 和 $f_i(t)$ 的标准差SD来定义:

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|f_{i-1}(t) - f_i(t)|^2}{f_{i-1}^2(t)} \right] \quad (4.11)$$

当标准差的值小于给定的某值时, 就停止处理信号。标准差的取值范围一般在 0.2 ~ 0.3。

最终可以得到筛分后的信号：

$$x(t) = \sum_{k=1}^n imf_k + r_n \quad (4.12)$$

通过上述表达式可知：经过经验模态分解处理后的回波信号就可以分解为 n 个本征模态函数分量和 1 个残余分量。

4.2.2 基于 EMD 的小波阈值消噪

小波变换具有良好的信噪分离能力，不但能够对信号进行多分辨率分析，还可以在时、频域表征信号局部特征。而小波阈值消噪作为小波变换消噪的方法之一，具有实用性强、运算效率高、通俗易懂的优点^[55]。与噪声相比，理想信号分布在小波系数中的能量更高；因此理想信号的小波系数模值更大。基于以上原理，可以设置适当的门限阈值分离理想信号与噪声，再将通过阈值的信号进行重构，进而实现小波阈值消噪^[56]。

由于小波阈值消噪和经验模态分解在噪声处理中都有各自的局限性，因此采用了两种方法相结合的消噪理论，既保留了经验模态分解方法的自适应性、正交性和完备性，又可以继承小波阈值方法实用、高效、消噪效果良好的特点。步骤如下：

步骤1：分解回波信号。采用经验模态分解方法处理回声测深仪中的回波信号，得到 n 个 IMF 分量和 1 个残余分量，如式 (4.12) 所示。

步骤2：选择小基波。不同的小基波函数在信号处理中有不同的特点，且消噪效果不同；因此我们应该慎重选择小基波，一般从消失矩、正则性、对称性等方面综合考虑。Db、Sym 是比较常用的小基波。

步骤3：选取阈值准则。阈值的选择很大程度上影响着小波阈值消噪的效果。局部阈值的选择十分灵活，会根据各层的系数特征有针对性地得到每层的阈值，量化处理各层系数。基于上述阈值法的特点，本文选用局部阈值中的统一阈值法对 IMF 分量 imf_k 和残余分量 r_n 进行基于分量的阈值估计，计算公式如下：

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (4.13)$$

其中， λ 为阈值； $\sigma = \frac{1}{0.6745n} \sum_{i=1}^n |d_i^k|$ 是噪声信号的强度， d_i^k 是第 k 层的第 i 个小波系数 ($1 < k < p, 1 \leq i \leq q$)， q 是该层中小波系数的个数， p 是小波分解层数； N 是信号长度。

步骤4：选取阈值函数。采用软硬阈值相结合的函数处理经经验模态分解后的分量信号，得到消噪后 IMF 分量 imf'_k 和残余分量 r'_n 。

$$f(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - a\lambda), & |x| \geq \lambda \\ 0, & |x| < \lambda \end{cases} \quad (4.14)$$

其中, 变化因子 a 的取值是 $[0,1]$, 通过选择适当的参数值, 就可以达到良好的消噪效果。

步骤5: 重构信号。重构经阈值函数处理后的IMF分量信号和残余信号, 得到消噪后的回波信号:

$$x'(t) = \sum_{k=1}^n \text{imf}_k' + r_n' \quad (4.15)$$

4.3 基于支持向量聚类的未知地形轮廓构建

经过回波信号预处理后, 回声测深仪数据中的噪声被剔除, 然后就可以利用回声测深仪采集到的信息完成海底地形轮廓的构建。由于回声测深仪自身精度和外界环境因素的影响, 采集到的数据准确性和可靠性偏低, 并且探测到的数据点中存在着孤立点; 所以本节采用基于支持向量聚类^[23,57]的方法构建海底地形轮廓, SVC方法可以去除孤立点, 完成同属性数据点的聚合。

4.3.1 支持向量聚类

与分类不同, 聚类无需先验知识模拟就可以将同属性数据进行聚合。SVC是一种利用支持向量技术进行类型识别的无监督聚类算法。SVC有以下优点^[58]: (1)能够发现任意形状的簇轮廓; (2)能够较好的处理离群数据、高维数据; (3)通过处理整个数据集获得聚类的最优解。SVC的主要思想是: 采用高斯核函数把样本点映射到高维特征空间中; 之后从该空间中构造一个由支持向量决定且可以包含所有样本点的超球包; 然后调整核函数参数得到最小超球体; 最后将超球体逆向映射回输入空间中, 形成一个或多个簇^[57]。下面将从SVC优化和聚类分配这两个阶段来介绍支持向量聚类的过程。

A. SVC优化阶段

给定含有多个样本的数据集 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其中 $x_i \in R^n$ 。设 ϕ 是非线性映射, 可以将输入空间中的样本点映射到最小超球体中; a 是最小超球体的球心; R 是最小超球体半径; 松弛因子 ζ_i 用来描述数据聚类中被错误识别的程度。为求超球体的最优半径, 定义目标优化函数为:

$$\min(R^2 + C \sum_{i=1}^N \zeta_i) \quad (4.16)$$

$$\|\phi(x_i) - a\|^2 \leq R^2 + \zeta_i; \zeta_i \geq 0 \quad (4.17)$$

为求解优化函数，将式 (4.16) 转化成Lagrange函数，可得：

$$L = R^2 + C \sum_{i=1}^N \zeta_i - \sum_{i=1}^N \beta_i (R^2 + \zeta_i - \|\phi(x_i) - a\|^2) - \sum_{i=1}^N \gamma_i \zeta_i \quad (4.18)$$

其中， β_i 和 γ_i 均大于等于零，为 Lagrange 乘子。 C 是常数， C 的取值将影响超球体半径，进而控制孤立点，改变数据集的聚类情况；它能够反映 SVC 方法的学习精度。

对 R, a 和 ζ_i 求偏导数，并将偏导数置 0，可得：

$$\sum_{i=1}^N \beta_i = 1, a = \sum_{i=1}^N \beta_i \phi(x_i), \beta_i = C - \gamma_i \quad (4.19)$$

另外，通过 KKT^[59] 条件可知：

$$\begin{cases} \zeta_i \gamma_i = 0 \\ (R^2 + \zeta_i - \|\phi(x_i) - a\|^2) \beta_i = 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

利用式 (4.20) 消去 R, a 和 ζ_i ，得到关于 β_i 的目标函数为：

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_i \beta_j \phi(x_i) \cdot \phi(x_j) - \sum_{i=1}^N \beta_i \phi(x_i) \cdot \phi(x_i) \quad (4.21)$$

其中， $\sum_{i=1}^N \beta_i = 1, 0 \leq \beta_i \leq C$ 。

核函数广泛应用于支持向量学习中。并且利用核函数可以只求取样本内积，避免高维空间的计算，从而降低计算的复杂度。设 K 是高斯径向基核函数，输出表达式为 $K(x, y) = \phi(x) \cdot \phi(y) = \exp(-q \|x - y\|^2)$ ， q 是尺度参数。根据 $K(x, x) = 1$ 和约束中的第一个条件，可得优化目标为：

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_i \beta_j K(x_i, x_j) \quad (4.22)$$

设 β^* 是Lagrange方程的解，将 β^* 代入式 (4.16) 可得点 x 和球心之间的距离为：

$$R^2 = K(x, x) - 2 \sum_{i=1}^N \beta_i^* K(x, x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_i^* \beta_j^* K(x_i, x_j) \quad (4.23)$$

则超球体半径为：

$$R = \frac{\sum_i R(\beta_i^*)}{N} \quad (4.24)$$

各数据簇的轮廓点满足如下形式：

$$\{x|R(x)=R\} \quad (4.25)$$

孤立点满足如下形式:

$$\{x|R(x)>R\} \quad (4.26)$$

综上所述,根据数据点与最小超球体的位置分布情况,可以将其分为三类:位于超球体内的数据点、位于超球体外的数据点和位于超球体上的数据点。聚类标准如表4.1所示:

表 4.1 聚类标准
Tab. 4.1 Criterion of clustering

类别	条件	描述内容	位置
非限定支持向量	$\zeta_i=0, 0 \leq \beta_i \leq C$	轮廓边界点	超球体球面上
数据类	$\zeta_i=0, \beta_i=0$	类数据成员	超球体内
限定支持向量	$\zeta_i>0, \beta_i=C$	孤立点	超球体外

B. SVC聚类阶段

上文已经介绍了各数据簇轮廓点的求取方法和聚类标准。但由于式(4.25)无法直接求解,因此在数据簇划分阶段采用如下的邻接矩阵来描述:

$$A = \begin{cases} 1, & \text{如果} a \text{和} b \text{两点连线上的点} x \text{都满足} R(x) \leq R \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4.27)$$

若 a 、 b 连线上的点全部位于超球体内或超球体球面上,则判定 a 和 b 属于同一簇中的样本点。反之,则令 $A=0$,即 a 和 b 属于不同簇的样本点。采样点 $x=a+\lambda(a-b)$, λ 在 $[0,1]$ 上均匀分布;其数量一般取 $10 \sim 20$ 。

邻接矩阵 A_{ij} 对应了数据集的连通状态图。连通分量指连通状态图中任意两个数据互相连通的子图,它代表数据集的聚类情况;其中每一连通分量表示原始数据空间中的一个簇轮廓。

4.3.2 局部支持向量聚类与全局聚类

虽然回声测深仪的回波信号经过消噪处理,但数据中仍然存在些许噪声点。这些噪声点多以散点的形式存在,并不会影响到AUV的正常航行。数据中还存在一些无规律或分布密度小的点,它们对AUV的正常航行威胁性较小,被称之为异常点。其中,噪声点和异常点合称为孤立点。以海底障碍物是否威胁到AUV的定高航行为依据,将海底障碍

物分为低威胁障碍物（如鱼群、海底植被）和威胁障碍物（如沉船、礁石）^[23]。在数据聚类过程中，将回声测深仪作用于低威胁障碍物和威胁障碍物得到的数据点分别作为异常点和正常数据。

根据支持向量聚类的思想和AUV地形跟踪过程中轮廓点的获取方法，本节提出了一种支持向量聚类 and 全局聚类相结合的地形轮廓构建方案。该方案首先利用支持向量聚类处理回声测深仪可视范围内的数据点，得到孤立点和轮廓点，并构建地形轮廓。然后考虑探测开始阶段或前期方案的误判导致数据点的类属性（轮廓点、孤立点以及类数据成员）不明确的问题；采用全局聚类方案综合分析备选集 R 、新数据点、孤立点以及轮廓点，得到新的类簇和孤立点集。为了更好地描述聚类方案，介绍如下概念：

(1) 当前视域：人为设定的以 AUV 的重心为圆心，回声测深仪的可视范围 r 为半径的区域。半径 r 的大小可以由 AUV 的速度和时间间隔的乘积获得，即 $r = |u| \Delta t$ 。位于当前视域内的点表示 AUV 周围的数据分布。

(2) 备选集 R ：由于回声测深仪的测量精度或环境噪声等因素的影响可能导致数据点被误判为孤立点；为提高信息的准确性，可以将这些无法确定的数据点存入备选集 R ，然后通过全局聚类方案进一步判断该点的类型。

(3) 数据簇 C 和孤立点集 G ：定义数据簇 $C = \bigcup_{i \in M} C_i = \{x | \exists i \in M, \text{有 } x \in C_i\}$ ；其中， C 表示已知数据簇的个数。定义孤立点集 G 是噪声点和异常点（数据密度小于阈值 ρ_T 的数据点）的集合，最后从观测点中去除。

(4) 密度阈值 ρ_T ：指数据点形成类簇的最小密度。设 k 为类簇中点的个数，若 $\exists \bigcup_k \{x_k | k > \rho_T\} \subseteq C_i$ ，则 C_i 就是已知数据簇。

(5) 时间阈值 t_T ：即备选集 R 中数据点的存放时间。如果数据点的存放时间超过时间阈值 t_T ，那么这些数据点就被称之为孤立点。

在地形轮廓构建过程中，每一次的控制节拍都要进行如图4.2所示的聚类流程，然后将上一个控制节拍输出的数据点作为下一控制节拍的输入。

由于地形跟踪开始阶段回声测深仪探测到的散点居多，且这些散点无法组成类簇；所以此时所获取的数据点并不能构建地形轮廓。为了更加准确地判断数据点的归类情况，采用了支持向量聚类 and 全局聚类相结合的方法处理数据点，并把局部支持向量聚类检测出的孤立点放入备选集 R 中再次进行全局决策。轮廓构建方案为：

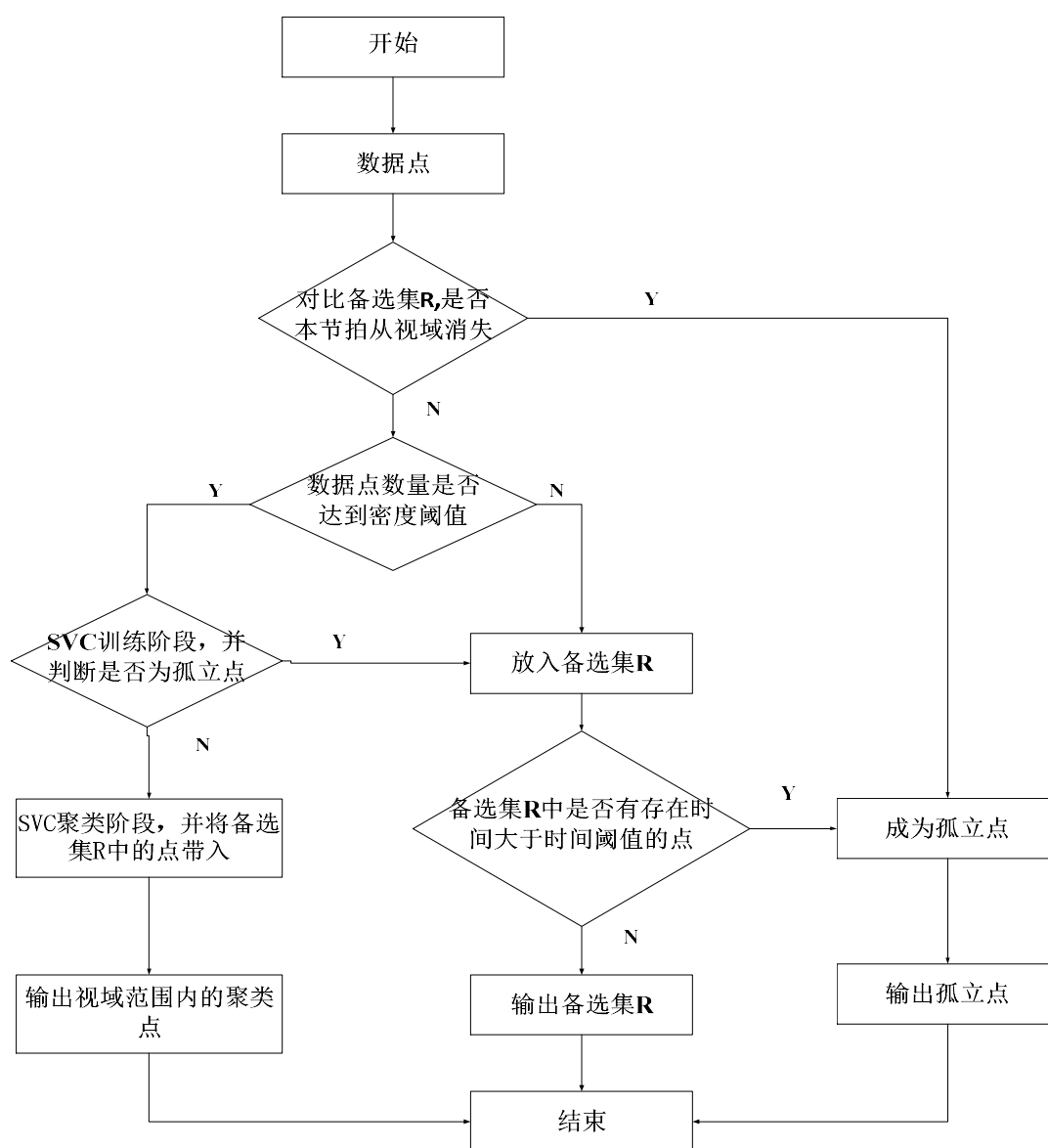


图4.2 全局聚类方案

Fig. 4.2 Global clustering scheme

(1) 当探测开始阶段, 回声测深仪中的数据点较少, 导致无法判断数据点的类型。为了防止决策失误, 将这些点暂时存放于备选集 R 中, 之后重新判定。

(2) 首先处理当前视域范围内的数据点, 如果这些数据点的数量达到密度阈值, 则对当前数据点进行支持向量聚类; 若在之后的控制节拍中又观测到了属于本类簇内的数据点, 则将数据点放入类簇再次聚类。

(3) 如果当前视域范围内数据点的数量无法达到密度阈值, 则将其放入备选集 R , 通过分析之后控制节拍数据点的情况判断数据类型。比如后面观测到的数据点可以和备选集 R 中的点构成类簇, 则将这些数据点进行聚类; 若后面观测到的数据点无法与备选集 R 中的点构成类簇, 则可判定为孤立点。

(4) 数据点经过 SVC 训练阶段后, 可以筛选出其中可能存在的孤立点, 并将其放入备选集 R 中重新检测; 剩余数据点经过 SVC 聚类阶段, 就可以构成类簇, 并得到轮廓线。在 SVC 聚类阶段, 将备选集 R 中的点代入, 若存在数据点属于该类簇, 则将这些点从备选集 R 中剔除, 并将其放入该类簇中聚类。

(5) 如果在备选集 R 中的点经过 t_r 时间后仍然没有被聚类, 则将其判定为孤立点。

(6) 当 AUV 到达指定作业点后, 剩余未处理的数据点将被判定为孤立点。

4.4 基于三次样条函数的地形曲线拟合

曲线拟合是一种处理离散数据点、求取近似函数的数值方法。其原理是根据离散点的分布特征找到一条连续的最佳逼近曲线, 该曲线必须满足光滑性、凹凸性和精确性的要求^[60-61]。目前, 曲线拟合的基本方法有最小二乘法、插值法以及磨光法, 它们都有各自的特征和侧重点。其中, 最小二乘法能够反映数据整体分布, 消除局部波动; 插值法可以使曲线准确地通过所有数据点, 增强局部曲线拟合效果, 适合拟合离散点; 磨光法使拟合的曲线更具光滑性和凹凸性。

三次样条曲线作为插值样条曲线, 能够保证拟合后曲线的光滑性和准确性且避免龙格现象。如果边界轮廓点的间距不大, 可以选择较为简单的三次样条函数进行拟合。三次样条函数定义如下:

设函数 $f(x) \in C^2[p, q]$ 且二阶导数连续, 其中区间 $[p, q]$ 为: $p = x_1 < x_2 \dots < x_n = q$ 。如果存在函数 $R(x)$ 满足 $R(x) \in C^2[p, q]$, 且 $R(x)$ 在区间 $[x_j, x_{j+1}]$, $j = 1, 2, \dots, n$ 上是次数 ≤ 3 的多项式。则称 $R(x)$ 是节点 x_1, x_2, \dots, x_n 上的三次样条函数。

将点 x_j 代入函数 $f(x)$ 可得 $y_j = f(x_j)$, 若满足:

$$R(x_j) = y_j, j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (4.28)$$

则 $R(x)$ 就是 $f(x)$ 在区间 $[p, q]$ 关于剖分 Δ 的三次样条插值函数。根据定义, 构造 $R(x)$ 为:

$$R(x) = \begin{cases} R_1(x), x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ R_n(x), x \in [x_n, x_{n+1}] \end{cases} \quad (4.29)$$

由于每个小区间中存在4个参数，共 n 个小区间，所以需要知道 $4n$ 个参数。由 $R(x) \in C^2[a, b]$ 可知，在节点 $x_j, j = 2, 3, \dots, n$ 处应满足：

$$\begin{cases} R(x_j - 0) = R(x_j + 0) \\ R'(x_j - 0) = R'(x_j + 0) \\ R''(x_j - 0) = R''(x_j + 0) \end{cases} \quad (4.30)$$

共 $n-1$ 个节点，即 $3n-3$ 个条件。并加上 $R(x_j) = f(x_j), j = 1, 2, \dots, n+1$ ，共计 $4n-2$ 个条件。若使得三次样条插值函数成立，还需在端点处满足条件。常见的边界条件有如下几种：

(1) 第一类：已知端点 x_0, x_{n+1} 处的一阶导数

$$\begin{cases} R'(x_0) = f'_0 \\ R'(x_n) = f'_n \end{cases} \quad (4.31)$$

当 $f'_0 = f'_n = 0$ 时， $R(x)$ 受力平衡，呈现水平状态。

(2) 第二类：已知端点 x_0, x_{n+1} 处的二阶导数

$$\begin{cases} R''(x_0) = f''_0 \\ R''(x_n) = f''_n \end{cases} \quad (4.32)$$

当 $f''_0 = f''_n = 0$ 时，样条函数不受力，为自然边界条件。

(3) 第三类：周期性条件。假设 $f(x)$ 为周期函数，周期 $T = x_{n+1} - x_0$ ；即 $R(x)$ 函数的周期为 T 。因为 $f_0 = f_n = 0$ ，则 $R(x)$ 在端点处需满足如下条件：

$$\begin{cases} R(x_0) = R(x_n) \\ R''(x_0) = R''(x_n) \end{cases} \quad (4.33)$$

综上所述，共有 $4n$ 个条件， $R(x)$ 有 $4n$ 个待定参数，恰好满足参数求解所需的条件个数。之后采用Hermite插值多项式求解方程，表示如下：

$$H_3^{(i)}(x) = y_i \varphi_0 \left(\frac{x - x_i}{h_i} \right) + y_{i+1} \varphi_1 \left(\frac{x_{i+1} - x}{h_i} \right) + m_i h_i \varphi_2 \left(\frac{x - x_i}{h_i} \right) - m_i h_i \varphi_3 \left(\frac{x_{i+1} - x}{h_i} \right) \quad (4.34)$$

其中有：

$$h = x_{i+1} - x_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.35)$$

$$H_3(x) = \begin{cases} H_3^{(1)}(x), x_1 < x < x_2 \\ H_3^{(2)}(x), x_2 < x < x_3 \\ \dots \\ H_3^{(n)}(x), x_n < x < x_{n+1} \end{cases} \quad (4.36)$$

综上条件，简化后可得：

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & & & \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & & \\ & \lambda_2 & 2 & \mu_2 & \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & \lambda_n & 2 & \mu_n \\ & & & & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \dots \\ m_n \\ m_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \dots \\ g_n \\ g_{n+1} \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

其中所用参数表示为： $\lambda_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i-1}}, \mu_i = 1 - \lambda_i, g_i = 3 \left(\lambda_i \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}} + \mu_i \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right)$ 。详细证明见文献[61]。

4.5 仿真验证

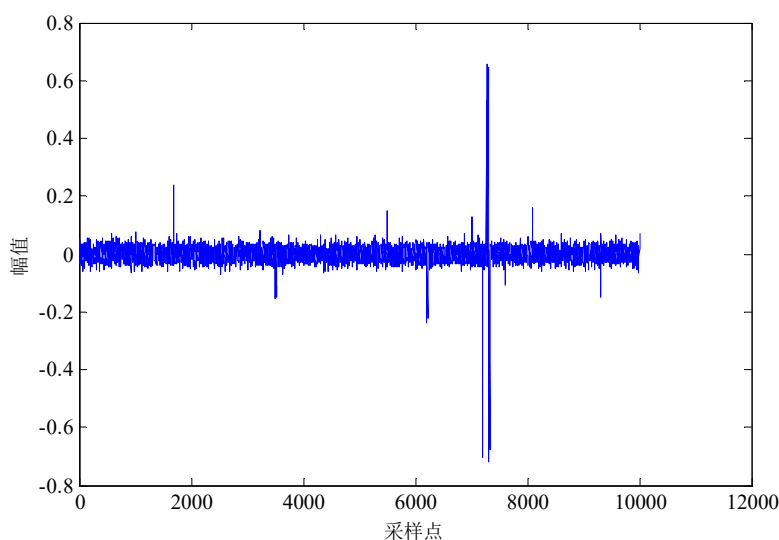


图4.3 回波信号

Fig. 4.3 The echo signal

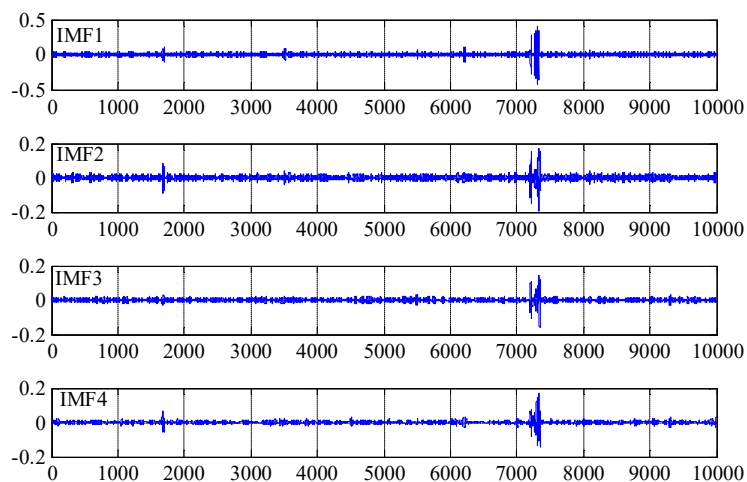


图4.4 回波信号的EMD分解

Fig. 4.4 EMD decomposition of echo signal

为了验证所提出的海底地形轮廓构建方案的有效性，本章采用 MATLAB 语言对模拟的回波信号和数据点进行处理。模拟的回波信号如图 4.3 所示，样本长度为 10000。其中，回波信号中的噪声信号采用高斯白噪声来模拟。然后回波信号被分解为 7 个本征模态函数分量和 1 个残余分量，如图 4.4 和图 4.5 所示。从两图可知，除第一个本征模态函数分量振幅比较大之外，其余分量振幅都比较小，并且之间差距不大。

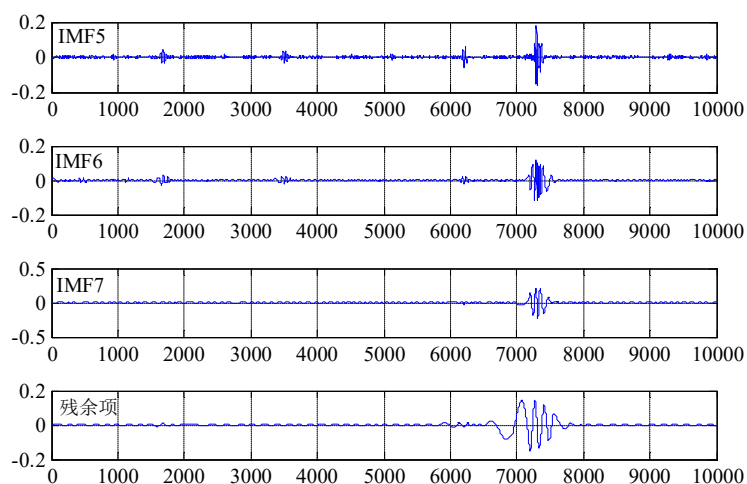


图4.5 回波信号的EMD分解

Fig. 4.5 EMD decomposition of echo signal

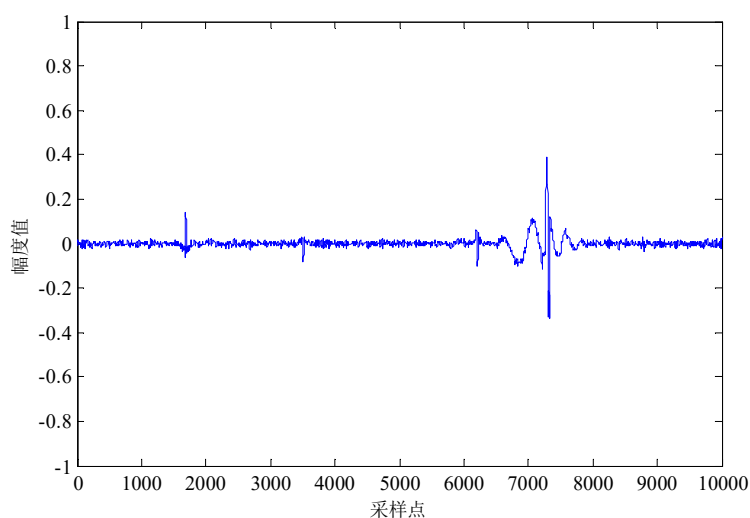


图4.6 降噪后的信号

Fig. 4.6 The signal after noise reduction

图4.6是原始信号经过经验模态分解和小波阈值消噪后重构的回波信号,通过判断信号突变点并对信号深入分析,可以识别出波形的到达时间。与图4.3所示的原始信号相比,可以看出经过本章算法消除了大部分噪声,为后续海底地形轮廓构建任务提供了更加准确可靠的数据。图4.7为模拟海底地形的原始数据,由观测点和错误点组成。其中观测点用来模拟地形的轮廓点,共600个;错误点用来模拟孤立点,共38个;密度阈值为10。

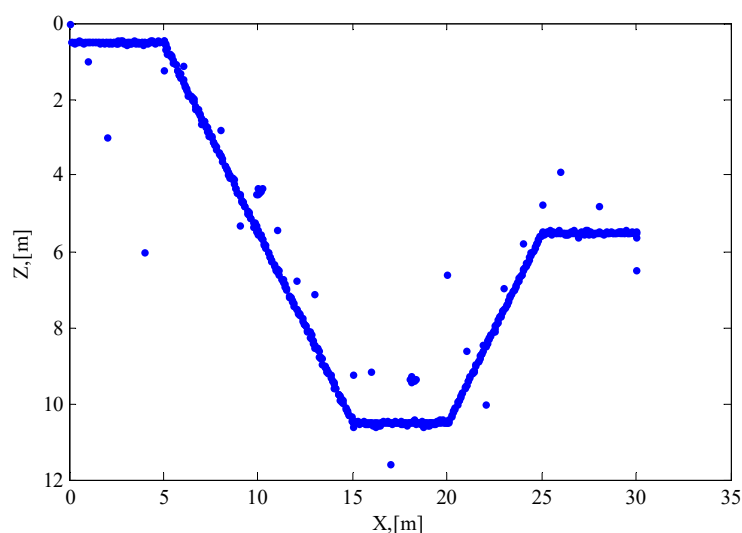


图4.7 原始数据

Fig. 4.7 The raw data

仿真后得到的结果如图4.8和图4.9所示；图4.8为轮廓点与孤立点分布图，可以看出随机加入的错误点被检测出33个，准确率为86.8%，因为一部分错误点存在于类簇中，所以有些许偏差。图4.9为海底地形轮廓构建结果，由图可知经聚类后的数据点已经形成了地形轮廓。图4.10为轮廓曲线平滑处理仿真图，蓝色为地形上轮廓曲线，红色为平滑处理后得到的地形曲线。

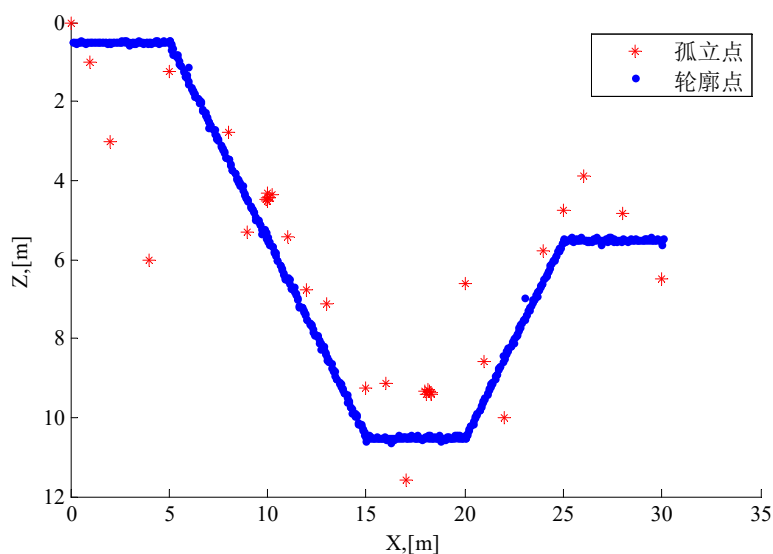


图4.8 轮廓点与孤立点分布图

Fig. 4.8 The distribution map of contour points and isolated points

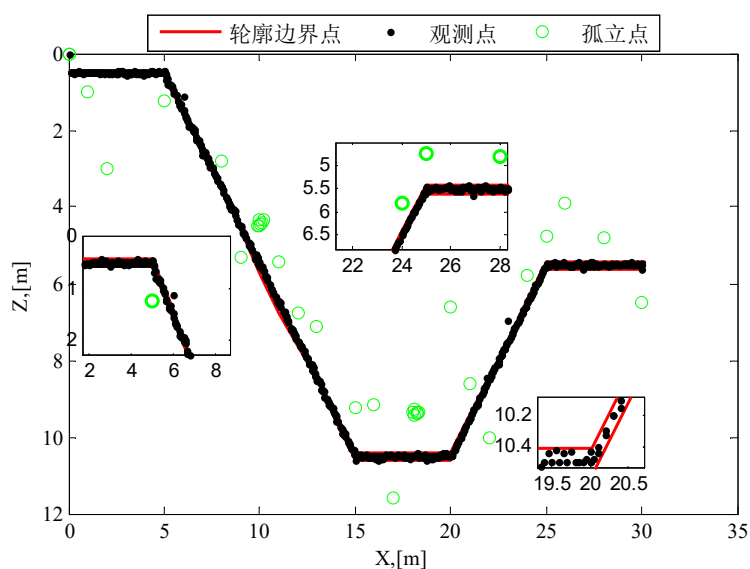


图4.9 地形构建结果

Fig. 4.9 Terrain construction results

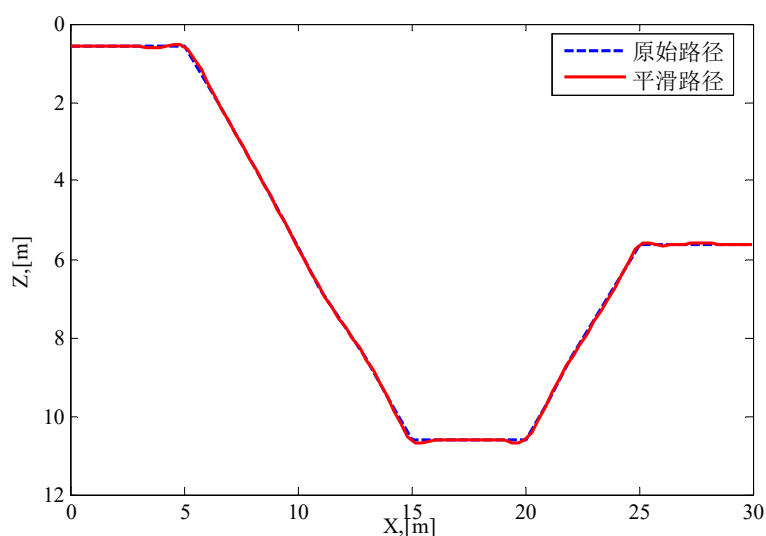


图4.10 轮廓曲线平滑处理

Fig. 4.10 Contour curve smoothing

4.6 本章小结

本章利用了回声测深仪采集地形地貌信息，并采用了支持向量聚类算法对数据点进行聚类，从而完成了海底地形轮廓构建。在处理回声测深仪数据之前，采用了基于 EMD 的小波阈值消除了回波信号中的噪声；然后采用支持向量聚类和全局聚类相结合的方法处理数据点，分离出孤立点和轮廓点，并将表征高威胁障碍物的轮廓点进行聚类得到地形轮廓线。在仿真验证中，将混有噪声的回波信号进行了消噪预处理，结果表明基于经验模态分解的小波阈值方法具有很好的降噪效果；聚类算法完成了异常数据的检测，并成功构造出了海底地形的轮廓；三次样条差值曲线拟合方法将海底地形的上轮廓线拟合成了平滑曲线，此平滑曲线就可以作为 AUV 的跟踪地形。

5 未知扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制

5.1 引言

欠驱动 AUV 未知海底地形跟踪控制是由海底地形轮廓构建和地形跟踪两部分组成的。上一章已经详细介绍了海底地形轮廓构建方案，并且实时规划了地形曲线。AUV 只需要完成期望地形的精确跟踪即可。基于以上介绍，本章主要研究模型参数不确定性、时变环境扰动、速度不可测和执行器饱和输出约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制。首先，根据上文介绍的三维空间运动模型和误差方程得到垂直面运动模型和误差方程。然后通过反步法和 TLOS 设计纵向速度控制律和期望纵倾角速度。之后，利用超螺旋二阶滑模设计动力学控制器，并引入 RBF 神经网络逼近内、外部扰动，既削弱系统抖振问题又提高系统鲁棒性；还采用辅助动态系统补偿 AUV 执行机构饱和输出对地形跟踪控制的影响。考虑任务要求，AUV 有时要实现机动地形跟踪控制，即满足位置和姿态约束的同时满足时间性能需求；因此，本章还设计了滑模观测器估计 AUV 的纵向速度、垂向速度和纵倾角速度。最后，通过仿真验证了所提出的控制方法可以很好地完成未知扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制任务。

5.2 预备知识

5.2.1 RBF 神经网络

RBF 神经网络具有学习收敛速度快、泛化能力强和局部映射的特点；同时可以逼近任意非线性函数，避免对未知函数进行复杂的理论分析，有效地解决非线性控制问题；在非线函数逼近、容错控制、系统建模以及故障诊断等领域被广泛应用^[62-63]。RBF 神经网络输出表达式为：

$$d = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{z}) + \varsigma \quad (5.1)$$

其中， \mathbf{z} 为 RBF 神经网络的输入向量； ς 为逼近误差，且满足 $\varsigma < \varsigma_{\max}$ ，其中 $\varsigma_{\max} > 0$ ；为了更好地设计控制器，采用估计值 $\hat{\mathbf{W}}_i$ 来代替 \mathbf{W}_i^* ，假设权值 \mathbf{W}_i^* 有界则有 $\|\mathbf{W}_i^*\| \leq \mathbf{W}_i$ ，其中 \mathbf{W}_i 大于零； $\mathbf{h}(\mathbf{z}) = [h_1(\mathbf{z}), h_2(\mathbf{z}), \dots, h_n(\mathbf{z})]^T$ 为径向基函数向量，基函数的输出表达式为：

$$h_j(\mathbf{z}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{z} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, \dots, n \quad (5.2)$$

其中, $b_j > 0$ 为高斯基函数的宽度; $\mathbf{c}_j = [\mathbf{c}_{j1}, \mathbf{c}_{j2}, \dots, \mathbf{c}_{jm}]^T \in \mathbb{R}^m$ 为高斯基函数的中心点向量值, 和 \mathbf{z} 的维数相同; j 为神经网络隐含层的第 j 个节点。

5.2.2 超螺旋二阶滑模

二阶滑模在系统抖振削弱方面具有良好的效果, 因此在飞行器、机器人以及船舶控制领域被广泛应用^[64-65]。由高阶滑模定义可知二阶滑模需要满足 $\dot{s} = s = 0$, 而超螺旋滑模仅通过滑模面 s 的信息就可以设计控制器, 相比其他二阶滑模算法更加简单易懂^[65]。考虑如下非线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{h}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t) \quad (5.3)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 为系统变量; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{h}(\mathbf{x}, t)$ 为非线性函数; $\mathbf{u}(t)$ 为控制输入。系统控制目标为设计控制输入使得系统稳定, 首先定义滑模面为 $\mathbf{s} = \mathbf{s}(t, \mathbf{x})$, 然后对滑模面求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{h}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}] \\ &= \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t) + \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} \end{aligned} \quad (5.4)$$

其中, $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t)$ 和 $\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{x}, t)$ 表示系统状态函数, 且均满足以下条件:

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{\varphi}| &\leq \mathbf{C} \\ 0 < \mathbf{K}_m \leq \boldsymbol{\gamma} \leq \mathbf{K}_M \end{aligned} \quad (5.5)$$

式 (5.5) 中, \mathbf{C} 、 \mathbf{K}_m 、 \mathbf{K}_M 均为大于零的矩阵, 在上述条件下基于超螺旋二阶滑模设计控制律为:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = -\mathbf{k}_a |\mathbf{s}|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\mathbf{s}) + \mathbf{u}_1 \\ d\mathbf{u}_1/dt = -\mathbf{k}_b \text{sgn}(\mathbf{s}) \end{cases} \quad (5.6)$$

其中, \mathbf{k}_a 、 \mathbf{k}_b 为待设计的控制器参数矩阵; 分析式 (5.6) 可知仅需滑模面 \mathbf{s} 就可以完成控制器的设计, 在控制律中引入积分环节和 $|\mathbf{s}|^{\frac{1}{2}}$ 既可以消除函数切换所产生的不利影响, 又可以抑制因切换函数产生的滑模抖振问题。具体证明见文献[66]。

5.3 问题描述

5.3.1 欠驱动 AUV 地形跟踪运动模型

根据式 (2.26) 所示的三维空间运动学方程, 并忽略 AUV 水平面的运动参数, 得到欠驱动 AUV 地形跟踪运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (5.7)$$

在式 (2.27) 所示的三维空间动力学方程的基础上, 忽略横向运动和转艏运动的影响, 并考虑模型参数不确定性和外部环境扰动, 得到地形跟踪动力学方程:

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = -m_{33}wq - X_u u - X_{u|u}|u| + \tau_u + \tau_{wu} + f_u \\ m_{33}\dot{w} = m_{11}uq - Z_w w - X_{w|w}|w| + \tau_w + f_w \\ m_{55}\dot{q} = (m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta + \tau_q + \tau_{wq} + f_q \end{cases} \quad (5.8)$$

其中, f_i 是模型参数的不确定项和建模误差 $\Delta_i (i = u, w, q)$, 被视为“内部扰动”; τ_{wi} 是外部时变环境扰动, 被视为“外部干扰”; 为方便控制器设计, 将外部扰动和内部扰动视为总干扰。

$$\begin{cases} d_u = \tau_{wu} + f_u = \tau_{wu} - \tilde{m}_{11}\dot{u} - \tilde{m}_{33}wq - \tilde{X}_u u - \tilde{X}_{u|u}|u| + \Delta_u \\ d_w = \tau_{wq} + f_w = \tau_{wq} - \tilde{m}_{33}\dot{w} - \tilde{m}_{11}uq - \tilde{Z}_w w - \tilde{X}_{w|w}|w| + \Delta_w \\ d_q = \tau_{wq} + f_q = \tau_{wq} - \tilde{m}_{55}\dot{q} + (\tilde{m}_{33} - \tilde{m}_{11})uw - \tilde{M}_q q - \tilde{M}_{q|q}|q| + \Delta_u \end{cases} \quad (5.9)$$

由于欠驱动AUV存在执行器饱和输出, 所以在地形跟踪控制器的设计中, 需要考虑纵向推力 τ_u 的最大值和纵倾力矩 τ_q 的上、下界, 即:

$$\tau_i = \text{sat}(\tau_{i,c}) = \begin{cases} \tau_{i,\max}, \tau_{i,c} \geq \tau_{i,\max} \\ \tau_{i,c}, 0 \leq \tau_{i,c} < \tau_{i,\max}, i = u, q \\ \tau_{i,\min}, \tau_{i,c} < 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

其中, $\tau_{i,\max}$ 和 $\tau_{i,\min}$ 分别表示控制输入的上界和下界; $\tau_{i,c}$ 表示控制器的输出值; τ_i 表示 AUV 的输出力 (力矩)。

5.3.2 欠驱动 AUV 地形跟踪误差方程

根据假设 3.1 和假设 3.2, 并基于“虚拟向导”来设计欠驱动 AUV 地形跟踪误差方程。AUV 的地形跟踪示意图如图 5.1 所示, 其中 $Path$ 是期望地形; Serret-Frenet 坐标系建立在 $Path$ 上, 记为 $\{F\}$ 。

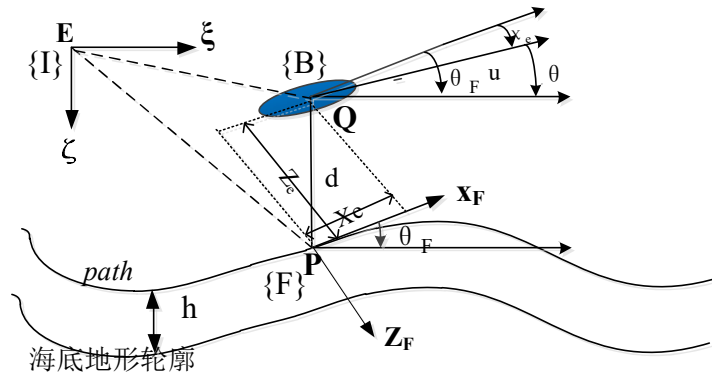


图5.1 欠驱动AUV地形跟踪示意图

Fig. 5.1 Sketch map of underactuated AUV bottom following

由于欠驱动 AUV 在垂荡运动中缺乏直接的推进装置; 因此, AUV 的纵向速度 u 通常远高于垂荡速度 w ($u \gg w$)。忽略垂荡速度的影响, 可以将欠驱动 AUV 地形跟踪运动学模型改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (5.11)$$

由于期望路径是根据回声测深仪所获数据实时拟合出来的曲线, 因此 $path$ 为一条连续光滑曲线。定义 $path$ 上的任意一点 P 为 Serret-Frenet 坐标系 $\{F\}$ 的原点, 它表示具有一定速度的虚拟参考点, 即 AUV 的“虚拟向导”。坐标系 $\{F\}$ 是由坐标系 $\{I\}$ 再绕 ζ 轴旋转 θ_F 度, 然后平移得到。定义 s 为期望路径参数, 则期望路径的曲率可以表示为 $c_c(s)$, 并且 $c_c(s)$ 关于 s 连续可导且有界, 则 AUV 在坐标系 $\{I\}$ 中的角速度转换到坐标系 $\{F\}$ 中被表示为 $\omega_F = c_c(s)\dot{s} = k(s)\dot{s}$ 。

根据第三章的相关理论, 定义点 Q 和点 P 之间的距离为 AUV 的跟踪误差, 记为 $\boldsymbol{\varepsilon} = (x_e \ 0 \ z_e)^T$, 可得 $\omega_F \times \boldsymbol{\varepsilon} = [k(s)\dot{s}z_e \ 0 \ -k(s)\dot{s}x_e]^T$; Q 点和 P 点之间的相对速度为 $d\boldsymbol{\varepsilon}/dt = (\dot{x}_e \ 0 \ \dot{z}_e)^T$ 。在 $\{F\}$ 坐标系中 P 点的速度可以表示为 $(d\mathbf{p}/dt)_F = (\dot{s} \ 0 \ 0)^T$ 。

根据向量合成公式, Q 点的速度在 $\{B\}$ 坐标系下被表示为:

$$\left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_B = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_B + \mathbf{R}^{-1} \left(\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt}\right)_F + \mathbf{R}^{-1} (\boldsymbol{\omega}_F \times \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (5.12)$$

式中 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \chi_e & 0 & \sin \chi_e \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \chi_e & 0 & \cos \chi_e \end{bmatrix}$ 是 $\{B\}$ 坐标系到 $\{F\}$ 坐标系的旋转变换矩阵, χ_e 为 $\{F\}$ 坐标系和 $\{B\}$ 坐标系之间的潜浮角误差。 $(d\mathbf{q}/dt)_B = (u \ 0 \ 0)^T$ 是点 Q 在 $\{B\}$ 坐标系中的速度。

将上述方程左边乘以 \mathbf{R} 可以得到点 Q 的速度在 $\{F\}$ 坐标系下的表示方程:

$$\mathbf{R} \left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_B = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F + \left(\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt}\right)_F + (\boldsymbol{\omega}_F \times \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (5.13)$$

定义旋转角 $\theta_F = -\arctan(\dot{z}_F/\dot{x}_F)$, 则可以得到潜浮角误差 χ_e 为:

$$\chi_e = \theta - \theta_F \quad (5.14)$$

综上所述, 可以得到地形跟踪误差方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u \cos \chi_e - \dot{s} - k(s) \dot{s} z_e \\ \dot{z}_e = -u \sin \chi_e + k(s) \dot{s} x_e \\ \dot{\chi}_e = q - k(s) \dot{s} \end{cases} \quad (5.15)$$

5.3.3 状态观测器设计

根据欠驱动 AUV 的运动模型, 并考虑 AUV 的一些运动状态信息不可测或测量不精确的问题, 本小节设计滑模观测器来估计 AUV 的速度分量。为方便滑模观测器的设计, 将欠驱动 AUV 的运动学和动力学模型转化到固定坐标系中。令 $\mathbf{v}_I = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}$, 则欠驱动 AUV 的运动模型表示如下:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{v}_I \\ \hat{\mathbf{M}}_I(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{v}}_I + \hat{\mathbf{C}}_I(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}_I) + \hat{\mathbf{D}}_I(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}_I) + \mathbf{g}_I(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_I + \mathbf{D}_I \end{cases} \quad (5.16)$$

其中, $\hat{\mathbf{M}}_I(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\hat{\mathbf{M}}\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})$, $\hat{\mathbf{C}}_I(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}_I) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})(\hat{\mathbf{C}}_I(\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}_I) - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}))\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})$, $\hat{\mathbf{D}}_I(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}_I) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\hat{\mathbf{D}}_I(\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}_I)\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta})$, $\mathbf{g}_I(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$, $\boldsymbol{\tau}_I = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\tau}$, $\mathbf{D}_I = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{d}_I$ 。若令 $\mathbf{x}_1 = \boldsymbol{\eta}$ 、 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{v}_I$, 结合欠驱动 AUV 的运动模型, 设计如下的滑模观测器^[67-68]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2 + \boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \\ \hat{\mathbf{M}}_l(\mathbf{x}_1) \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = -\hat{\mathbf{C}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{D}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \hat{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{g}_l(\mathbf{x}_1) + \boldsymbol{\tau}_l + \mathbf{D}_l + \hat{\boldsymbol{\gamma}}_2 \operatorname{sgn}(\bar{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2) \end{cases} \quad (5.17)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}_1$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_2$ 分别是 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 的估计值; $\boldsymbol{\gamma}_1 = \operatorname{diag}(\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13})$ 是观测器的增益系数矩阵, 系数 $\gamma_{11} > 0, \gamma_{12} > 0, \gamma_{13} > 0$; $\bar{\mathbf{x}}_2 = \hat{\mathbf{x}}_2 + (\boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\tilde{\mathbf{x}}_1))_{eq}$ 是等效输出量, $(\boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\tilde{\mathbf{x}}_1))_{eq}$ 是 $\boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\tilde{\mathbf{x}}_1)$ 经过一阶滤波器后的输出; $\hat{\boldsymbol{\gamma}}_2 = \operatorname{diag}(\hat{\gamma}_{21}, \hat{\gamma}_{22}, \hat{\gamma}_{23})$ 是自适应增益系数矩阵, $\dot{\hat{\gamma}}_{2i} = -\varepsilon_{0i} \hat{\gamma}_{2i} + \varepsilon_{1i} |\bar{x}_{2i} - \hat{x}_{2i}|$, ε_{0i} 和 ε_{1i} 是大于零的常数。

欠驱动 AUV 滑模状态观测器误差方程如下所示:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \tilde{\mathbf{x}}_2 - \boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2 = \hat{\mathbf{M}}_l(\mathbf{x}_1)^{-1} (-\hat{\mathbf{C}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \tilde{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{D}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \tilde{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{D}_l - \hat{\boldsymbol{\gamma}}_2 \operatorname{sgn}(\bar{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2)) \end{cases} \quad (5.18)$$

其中, $\tilde{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2$ 为状态观测误差。

为了分析状态观测器的稳定性, 选择 Lyapunov 函数为: $V_{o1} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_1^T \tilde{\mathbf{x}}_1$, 并对其求导可得:

$$\dot{V}_{o1} = \tilde{\mathbf{x}}_1^T \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \tilde{\mathbf{x}}_1^T (\tilde{\mathbf{x}}_2 - \boldsymbol{\gamma}_1 \operatorname{sgn}(\tilde{\mathbf{x}}_1)) = -\sum_{i=1}^3 (\gamma_{1i} - |\tilde{x}_{2i}|) |\tilde{x}_{1i}| \quad (5.19)$$

当观测器增益系数 $\gamma_{1i} (i=1, 2, 3)$ 满足以下条件: $\gamma_{1i} > |\tilde{x}_{2i}| + \sigma_{1i} (\sigma_{1i} > 0)$, 使得 \dot{V}_{o1} 满足不等式:

$$V_{o1} \leq -\sum_{i=1}^3 \sigma_{1i} |\tilde{x}_{1i}| \leq -\min_{i \in (1, 2, 3)} (\sigma_{1i}) \sum_{i=1}^3 |\tilde{x}_{1i}| \leq -\sqrt{2} \min_{i \in (1, 2, 3)} (\sigma_{1i}) V_{o1}^{\frac{1}{2}} \quad (5.20)$$

由文献[35]可知, 观测器误差 $\tilde{\mathbf{x}}_1$ 可以在有限时间内收敛至平衡点。接下来, 分析误差 $\tilde{\mathbf{x}}_2$ 的收敛特性。选择如下 Lyapunov 函数: $V_{o2} = V_{o1} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_2^T \hat{\mathbf{M}}_l(\mathbf{x}_1) \tilde{\mathbf{x}}_2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\gamma}_{2i}^2$, 其中 $\tilde{\gamma}_{2i} = \gamma_{2i} - \hat{\gamma}_{2i}$ 。然后对 V_{o2} 求导可得:

$$\begin{aligned} V_{o2} &= \tilde{\mathbf{x}}_2^T \hat{\mathbf{M}}_l(\mathbf{x}_1) \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2 + \sum_{i=1}^3 \tilde{\gamma}_{2i} \dot{\tilde{\gamma}}_{2i} \\ &\leq -\sum_{i=1}^3 |\tilde{x}_{2i}| (\hat{\gamma}_{2i} + \varepsilon_{1i} \hat{\gamma}_{2i} - |-\hat{\mathbf{C}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \tilde{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{D}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2) \tilde{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{D}_l|_i) + \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{0i} \tilde{\gamma}_{2i} \hat{\gamma}_{2i} \end{aligned} \quad (5.21)$$

选择适当的 $\hat{\gamma}_{2i} \geq -\varepsilon_{1i}\hat{\gamma}_{2i} - \left| -\hat{\mathbf{C}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2)\tilde{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{D}}_l(\mathbf{x}_1, \hat{\mathbf{x}}_2)\tilde{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{D}_l \right|_i + \sigma_{2i}, (\sigma_{2i} > 0)$ 可得:

$$\dot{V}_{o2} \leq \sum_{i=1}^3 (-\sigma_{2i} |\tilde{x}_{2i}| + \varepsilon_{0i} \tilde{\gamma}_{2i} \hat{\gamma}_{2i}) \leq -\sqrt{2\sigma_{2i}^2/\hat{m}_{ii}} V_{o2}^{1/2} + \sum_{i=1}^3 (\sqrt{\sigma_{2i}^2/\hat{m}_{ii}} |\tilde{\gamma}_{2i}| + \varepsilon_{0i} \tilde{\gamma}_{2i} \hat{\gamma}_{2i}) \quad (5.22)$$

由文献[67]的引理 2、引理 3 和文献[35]可知, 无论 $|\tilde{\gamma}_{2i}| \geq 1$ 还是 $|\tilde{\gamma}_{2i}| < 1$, 状态误差 $\tilde{\mathbf{x}}_2$ 都可以有限时间收敛。

控制目标: 针对系统存在模型参数不确定性、时变环境扰动、速度不可测和执行器饱和输出约束的问题, 设计纵向推力和纵倾力矩, 使欠驱动 AUV 按照期望速度跟踪上设定的地形曲线。

5.4 地形跟踪控制器设计及稳定性分析

5.4.1 运动学控制器设计

本章在 LOS 制导律的基础上, 引入了 TLOS 制导律; 为使 AUV 跟踪上期望地形, 设计如下的时变视线制导角:

$$\theta_{TLOS} = \arctan(z_e/k_1 u) \quad (5.23)$$

其中 $k_1 > 0$ 。根据上式可得, 视线距离时变, 若纵向速度越大, 视线制导角 θ_{TLOS} 就越小, 从而防止 AUV 急剧靠近期望路径, 引起超调; 反之, 纵向速度越小, 视线制导角 θ_{TLOS} 越大, 进而加快收敛。期望纵倾角 θ_d 表示如下:

$$\theta_d = \theta_F + \theta_{TLOS} \quad (5.24)$$

为使 θ 能够准确地跟踪上期望角 θ_d , 引入了纵倾角误差:

$$\theta_e = \theta - \theta_d = \chi_e - \theta_{TLOS} \quad (5.25)$$

由于地形跟踪的控制目标是将 AUV 的位置和姿态误差减小至零; 因此, 设计 Lyapunov 函数为: $V_1 = \frac{1}{2}x_e^2 + \frac{1}{2}z_e^2 + \frac{1}{2}\theta_e^2$, 然后对 Lyapunov 函数求导后可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= x_e \dot{x}_e + z_e \dot{z}_e + \theta_e \dot{\theta}_e \\ &= x_e (u \cos \chi_e - \dot{s} - k(s) \dot{s} z_e) + z_e (-u \sin \chi_e + k(s) \dot{s} x_e) + \theta_e (\dot{\chi}_e - \dot{\theta}_{TLOS}) \\ &= x_e u \cos \chi_e - x_e \dot{s} - z_e u \sin \chi_e + \theta_e (q - k(s) \dot{s} - \dot{\theta}_{TLOS}) \end{aligned} \quad (5.26)$$

假设欠驱动 AUV 的纵向速度 $u = u_d > 0$, 参数 s 表示的曲线为期望路径; 则 AUV 路径参数的虚拟速度控制律和期望纵倾角速度表示如下:

$$\begin{cases} \dot{s} = u \cos \chi_e - k_s x_e \\ q_d = \dot{\theta}_{TLOS} + k(s)\dot{s} + z_e u \frac{\sin \chi_e - \sin \theta_{TLOS}}{\theta_e} - k_2 \theta_e \end{cases} \quad (5.27)$$

其中 k_s , k_2 是大于零的可调参数；通过运动学控制律可使 AUV 的位姿误差渐进收敛到零。假设 AUV 可以跟踪上期望的纵向速度和纵倾角速度，则将式 (5.27) 代入式 (5.26) 可得：

$$\dot{V}_1 = -k_s x_e^2 - \frac{u}{\sqrt{z_e^2 + k_1^2 u^2}} z_e^2 - k_2 \theta_e^2 \leq 0 \quad (5.28)$$

综合考虑地形跟踪误差方程可知 \dot{V}_1 有界；由 Barbalat 原理可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1 = 0$ ，即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_e = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{z}_e = 0$ 。

5.4.2 动力学控制律设计

为了控制 AUV 跟踪上期望的纵向速度 u_d 和纵倾角速度 q_d ，本小节将采用超螺旋二阶滑模控制方法来设计欠驱动 AUV 动力学控制器，并利用 RBF 神经网络逼近模型不确定项和外部环境扰动；然后引入微分跟踪器和动态面控制 (DSC) 方法分别解决 AUV 纵向速度跳变和期望纵倾角速度高阶求导问题；进而确保欠驱动 AUV 能够更好地跟踪上期望地形。为了实现控制目标，引入如下跟踪误差变量：

$$\begin{cases} u_e = u - u_d \\ q_e = q - q_d \end{cases} \quad (5.29)$$

其中， u_d 为待设计的期望速度； q_d 为公式 (5.27) 所设计的期望纵倾角速度。

A. 纵向速度控制律

为保证 AUV 在地形跟踪开始阶段不出现速度跳变和超调问题，设计了非线性跟踪微分器，表示如下：

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -R \operatorname{sgn}(v_1 - u_{de} + \frac{v_2 |v_2|}{2R}) \end{cases} \quad (5.30)$$

其中 u_{de} 是非线性跟踪微分器的输入信号，在本节中表示期望的纵向速度 u_d ； R 表示跟踪参数； v_1 和 v_2 表示非线性跟踪微分器的输出信号， v_1 可以跟踪 u_{de} 。

步骤一：为使 AUV 跟踪上期望纵向速度 u_d ，利用超螺旋二阶滑模设计纵向速度控

制律。采用滑模面为:

$$S_u = u_e + \lambda_1 \int_0^t u_e dt, \lambda_1 > 0 \quad (5.31)$$

对式 (5.31) 求导, 并将式 (5.8) 代入可得:

$$\dot{S}_u = (-m_{33}wq - X_u u - X_{u|u}|u| + \tau_u + d_u) / m_{11} - v_2 + \lambda_1 u_e \quad (5.32)$$

步骤二: 由于欠驱动 AUV 在地形跟踪过程中会受到模型不确定性扰动和时变环境扰动的约束, 因此引入了 RBF 神经网络来逼近总扰动项, 即:

$$\hat{d}_u = \hat{W}_u^T h(z) + \varsigma_u \quad (5.33)$$

其中, $\tilde{d}_u = d_u - \hat{d}_u$, \hat{d}_u 是 d_u 的估计值。神经网络自适应律被设计为:

$$\dot{\hat{W}}_u = \Gamma_1(S_u h(z) - \mathcal{G}_u \hat{W}_u) \quad (5.34)$$

为削弱积分滑模带来的系统抖振问题, 引入了超螺旋二阶滑模, 进而得到纵向速度控制律为:

$$\begin{aligned} sat(\tau_u) = & m_{33}wq + X_u u + X_{u|u}|u| - \hat{W}_u^T h(z) + m_{11}v_2 - \lambda_1 m_{11}u_e \\ & - k_u S_u - k_3 |S_u|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_u) - k_4 \int_0^t \text{sgn}(S_u) d\tau \end{aligned} \quad (5.35)$$

步骤三: 考虑执行器饱和输出的影响, 引入了辅助动态系统来补偿饱和函数引起的非线性项, 纵向推力辅助系统表示如下:

$$\dot{\chi}_u = -b_u \chi_u - \frac{|S_u \Delta \tau_u| + 0.5 |\Delta \tau_u|^2}{|\chi_u|} h(\chi_u) + \Delta \tau_u \quad (5.36)$$

其中 $b_u > 0$, $\Delta \tau_u = \tau_u - sat(\tau_u)$ 。切换函数 $h(\chi_u)$ 表示为^[69]:

$$h(\chi_u) = \begin{cases} 0, & |\chi_u| \leq \chi_a \\ 1 - \cos(\frac{\pi}{2} \sin(\frac{\pi}{2} \frac{\chi_u^2 - \chi_a^2}{\chi_b^2 - \chi_a^2})), & \chi_a < |\chi_u| < \chi_b \\ 1, & |\chi_u| \geq \chi_b \end{cases} \quad (5.37)$$

其中, χ_a 和 χ_b 为大于零的参数, 它定义了鲁棒控制域和神经激活域之间的暂态变化过程。

综上所述, 得到带有饱和输出补偿系统的纵向推力控制律为:

$$\begin{aligned}\tau_u = & m_{33}wq + X_u u + X_{u|u}|u| - \hat{W}_u^T h(z) + m_{11}v_2 - \lambda_1 m_{11}u_e \\ & - k_u S_u - k_3 |S_u|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_u) - k_4 \int_0^t \text{sgn}(S_u) d\tau + k_{\chi_u} \chi_u\end{aligned}\quad (5.38)$$

B. 纵倾角速度控制律

公式(5.27)所设计的期望纵倾角速度较为复杂, 在对其高阶求导时计算量大且容易引起微分爆炸问题; 为了获得较为准确的期望纵倾角速度, 引入了DSC思想, 将一阶滤波器的输出作为 q_d 的一阶导数, 即用简单计算代替复杂的求导过程。引入状态变量 ∂_q , 其表达式如下所示:

$$\begin{cases} T\dot{\partial}_q + \partial_q = \dot{q}_d \\ \partial_q(0) = \partial_q(0) \end{cases}\quad (5.39)$$

其中 T 为滤波器时间常数, $\partial_q = \dot{\theta}_{TLOS} + k(s)\dot{s} + z_e u(\sin \gamma_e - \sin \theta_{TLOS})/\theta_e - k_2 \theta_e$, $\dot{q}_d = (\partial_q - q_d)/T$ 。进而通过一阶滤波器得到 \dot{q}_d 。

步骤一: 为了镇定纵倾角速度误差 q_e , 利用超螺旋二阶滑模控制设计纵倾角速度控制律。采用滑模面为:

$$S_q = q_e + \lambda_2 \int_0^t q_e dt, \lambda_2 > 0 \quad (5.40)$$

对式(5.40)求导, 并将式(5.8)代入可得:

$$\dot{S}_q = \left((m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta + \tau_q + d_q \right) / m_{55} - m_{55} \dot{q}_d \quad (5.41)$$

步骤二: 同理, 利用 RBF 神经网络来逼近由模型不确定性扰动和时变环境扰动组成的总扰动项, 有:

$$\hat{d}_q = \hat{W}_q^T h(z) + \varsigma_q \quad (5.42)$$

其中, $\tilde{d}_q = d_q - \hat{d}_q$, \hat{d}_q 是 d_q 的估计值。神经网络自适应律被设计为:

$$\dot{\hat{W}}_q = \Gamma_2 (S_q h(z) - \mathcal{Q}_q \hat{W}_q) \quad (5.43)$$

基于超螺旋二阶滑模和 RBF 神经网络得到纵倾角速度控制律为:

$$\begin{aligned}\text{sat}(\tau_q) = & (m_{11} - m_{33})uw + M_q q + M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta - \hat{W}_q^T h(z) + m_{55} \dot{q}_d \\ & - \lambda_2 m_{55} q_e - k_q S_q - k_5 |S_q|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_q) - k_6 \int_0^t \text{sgn}(S_q) d\tau\end{aligned}\quad (5.44)$$

步骤三：考虑执行器饱和输出的影响，引入了辅助动态系统来补偿饱和函数引起的非线性项，纵倾力矩辅助系统表示如下：

$$\dot{\chi}_q = -b_q \chi_q - \frac{|S_q \Delta \tau_q| + 0.5 |\Delta \tau_q|^2}{|\chi_q|} h(\chi_q) + \Delta \tau_q \quad (5.45)$$

其中 $b_q > 0$ ， $\Delta \tau_q = \tau_q - \text{sat}(\tau_q)$ 。切换函数 $h(\chi_q)$ 表示为^[69]：

$$h(\chi_q) = \begin{cases} 0, & |\chi_q| \leq \chi_a \\ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\chi_q^2 - \chi_a^2}{\chi_b^2 - \chi_a^2}\right)\right), & \chi_a < |\chi_q| < \chi_b \\ 1, & |\chi_q| \geq \chi_b \end{cases} \quad (5.46)$$

综上所述，得到带有输入饱和补偿系统的纵倾角速度控制律为：

$$\begin{aligned} \text{sat}(\tau_q) = & (m_{11} - m_{33})uw + M_q q + M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta - \hat{W}_q^T h(z) + m_{55} \dot{q}_d \\ & - \lambda_2 m_{55} q_e - k_q S_q - k_5 |S_q|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_q) - k_6 \int_0^t \text{sgn}(S_q) d\tau + k_{\chi_q} \chi_q \end{aligned} \quad (5.47)$$

5.4.3 稳定性分析

在动力学控制器 (5.38) 和 (5.47) 的作用下，可以使欠驱动 AUV 跟踪上期望地形。考虑系统饱和输出约束，欠驱动 AUV 的动力学模型表示为：

$$\begin{cases} m_{11} \dot{u} = -m_{33} wq - X_u u - X_{u|u}|u| + (\tau_u + \Delta \tau_u) + d_u \\ m_{33} \dot{w} = m_{11} uq - Z_w w - X_{w|w}|w| + d_w \\ m_{55} \dot{q} = (m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta + (\tau_q + \Delta \tau_q) + d_q \end{cases} \quad (5.48)$$

公式 (5.32) 和公式 (5.41) 在考虑执行器饱和输出时被改写成以下形式：

$$\begin{cases} \dot{S}_u = (-\hat{m}_{33} wq - \hat{X}_u u - \hat{X}_{u|u}|u| + \tau_u + \Delta \tau_u + d_u) / \hat{m}_{11} - v_2 + \lambda_1 u_e \\ \dot{S}_q = ((m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{q|q}|q| - \overline{BG_z} W \sin \theta + \tau_q + \Delta \tau_q + d_q) / m_{55} - m_{55} \dot{q}_d \end{cases} \quad (5.49)$$

将纵向速度控制子系统和纵倾角速度控制子系统合并分析稳定性，然后选取如下的 Lyapunov 函数：

$$V_2 = \frac{1}{2} m_{11} S_u^2 + \frac{1}{2} m_{55} S_q^2 + \frac{1}{2\Gamma_1} \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{1}{2\Gamma_1} \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{1}{2} \chi_u^2 + \frac{1}{2} \chi_q^2 \quad (5.50)$$

对 Lyapunov 函数 V_2 求导后可得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= m_{11} S_u \dot{S}_u + m_{55} S_q \dot{S}_q + \frac{1}{\Gamma_1} \tilde{W}_u^T \dot{\hat{W}}_u + \frac{1}{\Gamma_2} \tilde{W}_q^T \dot{\hat{W}}_q + \chi_u \dot{\chi}_u + \chi_q \dot{\chi}_q \\
&= S_u \left(-k_u S_u - k_3 |S_u|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_u) - k_4 \int_0^t \text{sgn}(S_u) d\tau \right) + k_{\chi_u} S_u \chi_u - \varepsilon_u |S_u| - \mathcal{G}_u \tilde{W}_u^T \hat{W}_u - \varsigma_u S_u \\
&\quad - b_u \chi_u^2 - |S_u \Delta \tau_u| (h(\chi_u) - \text{sgn}(S_u \Delta \tau_u)) - \frac{1}{2} |\Delta \tau_u|^2 (h(\chi_u) - 1) + \chi_u \Delta \tau_u \\
&\quad S_q \left(-k_q S_q - k_5 |S_q|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_q) - k_6 \int_0^t \text{sgn}(S_q) d\tau \right) + k_{\chi_q} S_q \chi_q - \varepsilon_q |S_q| - \mathcal{G}_q \tilde{W}_q^T \hat{W}_q - \varsigma_q S_q \\
&\quad - b_q \chi_q^2 - |S_q \Delta \tau_q| (h(\chi_q) - \text{sgn}(S_q \Delta \tau_q)) - \frac{1}{2} |\Delta \tau_q|^2 (h(\chi_q) - 1) + \chi_q \Delta \tau_q
\end{aligned} \tag{5.51}$$

根据以下不等式, 可得:

$$\begin{aligned}
\mathcal{G}_u \tilde{W}_u^T \hat{W}_u + \mathcal{G}_q \tilde{W}_q^T \hat{W}_q &= -\mathcal{G}_u \tilde{W}_u^T (\tilde{W}_u + W_u^*) - \mathcal{G}_q \tilde{W}_q^T (\tilde{W}_q + W_q^*) \\
&\leq -\mathcal{G}_u \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{\mathcal{G}_u}{2} \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{\mathcal{G}_u}{2} \|W_u^*\|^2 - \mathcal{G}_q \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{\mathcal{G}_q}{2} \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{\mathcal{G}_q}{2} \|W_q^*\|^2 \\
&\leq -\frac{\mathcal{G}_u}{2} \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{\mathcal{G}_u}{2} W_u^2 - \frac{\mathcal{G}_q}{2} \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{\mathcal{G}_q}{2} W_q^2
\end{aligned} \tag{5.52}$$

由 Young's 不等式得到:

$$\begin{cases} k_{\chi_u} S_u \chi_u \leq \frac{1}{2} k_{\chi_u}^2 S_u^2 + \frac{1}{2} \chi_u^2, k_{\chi_q} S_q \chi_q \leq \frac{1}{2} k_{\chi_q}^2 S_q^2 + \frac{1}{2} \chi_q^2, \chi_u \Delta \tau_u \leq \frac{1}{2} \chi_u^2 + \frac{1}{2} \Delta \tau_u^2 \\ -\varsigma_u S_u \leq \frac{1}{2} \varsigma_u^2 + \frac{1}{2} S_u^2 \leq \frac{1}{2} \varsigma_{u\max}^2 + \frac{1}{2} S_u^2, -\varsigma_q S_q \leq \frac{1}{2} \varsigma_q^2 + \frac{1}{2} S_q^2 \leq \frac{1}{2} \varsigma_{q\max}^2 + \frac{1}{2} S_q^2 \\ \chi_q \Delta \tau_q \leq \frac{1}{2} \chi_q^2 + \frac{1}{2} \Delta \tau_q^2, S_u \Delta \tau_u \leq \frac{1}{2} S_u^2 + \frac{1}{2} \Delta \tau_u^2, S_q \Delta \tau_q \leq \frac{1}{2} S_q^2 + \frac{1}{2} \Delta \tau_q^2 \end{cases} \tag{5.53}$$

当 $h(\chi_u)=1$ 且 $h(\chi_q)=1$ 时, 可知:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &\leq -\left(k_u - \frac{1}{2} k_{\chi_u}^2 - \frac{1}{2}\right) S_u^2 - \varepsilon_u |S_u| - S_u \left(k_3 |S_u|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_u) + k_4 \int_0^t \text{sgn}(S_u) d\tau \right) \\
&\quad - \left(k_q - \frac{1}{2} k_{\chi_q}^2 - \frac{1}{2}\right) S_q^2 - \varepsilon_q |S_q| - S_q \left(k_5 |S_q|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(S_q) + k_6 \int_0^t \text{sgn}(S_q) d\tau \right) \\
&\quad - (b_u - 1) \chi_u^2 - \frac{\mathcal{G}_u}{2} \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{\mathcal{G}_u}{2} W_u^2 + \frac{\varsigma_u^2}{2} - (b_q - 1) \chi_q^2 - \frac{\mathcal{G}_q}{2} \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{\mathcal{G}_q}{2} W_q^2 + \frac{\varsigma_q^2}{2} \\
&\leq -\mu_1 V_2 + C_1
\end{aligned} \tag{5.54}$$

其中，参数 μ_1 和 C_1 为： $\mu_1 = \min\{2k_3 - k_{\chi_u}^2 - 1, 2k_5 - k_{\chi_u}^2 - 1, 2b_u - 2, 2b_q - 2, \vartheta_u, \vartheta_q\}$ ，

$$C_1 = \frac{\vartheta_u}{2} W_u^2 + \frac{\varsigma_u^2}{2} + \frac{\vartheta_q}{2} W_q^2 + \frac{\varsigma_q^2}{2}$$

当 $h(\chi_u) < 1$ 且 $h(\chi_q) < 1$ 时，可知：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -(k_u - \frac{1}{2}k_{\chi_u}^2 - 1)S_u^2 - \varepsilon_u |S_u| - S_u \left(k_3 |S_u|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(S_u) + k_4 \int_0^t \operatorname{sgn}(S_u) d\tau \right) \\ & -(k_q - \frac{1}{2}k_{\chi_q}^2 - 1)S_q^2 - \varepsilon_q |S_q| - S_q \left(k_5 |S_q|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(S_q) + k_6 \int_0^t \operatorname{sgn}(S_q) d\tau \right) \\ & -(b_u - 1)\chi_u^2 - \frac{\vartheta_u}{2} \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u + \frac{\vartheta_u}{2} W_u^2 + \frac{\varsigma_u^2}{2} + \Delta \tau_u^2 - (b_q - 1)\chi_q^2 - \frac{\vartheta_q}{2} \tilde{W}_q^T \tilde{W}_q + \frac{\vartheta_q}{2} W_q^2 + \frac{\varsigma_q^2}{2} + \Delta \tau_q^2 \\ \leq & -\mu_2 V_2 + C_2 \end{aligned} \quad (5.55)$$

其中，参数 μ_2 和 C_2 为： $\mu_2 = \min\{2k_u - k_{\chi_u}^2 - 2, 2k_q - k_{\chi_q}^2 - 2, 2b_u - 2, 2b_q - 2, \vartheta_u, \vartheta_q\}$ ，

$$C_2 = \frac{\vartheta_u}{2} W_u^2 + \frac{\varsigma_u^2}{2} + \Delta \tau_u^2 + \frac{\vartheta_q}{2} W_q^2 + \frac{\varsigma_q^2}{2} + \Delta \tau_q^2$$

由式 (5.53) 和式 (5.54) 可得：

$$\dot{V}_2 \leq -\mu V_2 + C \quad (5.56)$$

其中， $\mu = \min\{\mu_1, \mu_2\}$ ， $C = \max\{C_1, C_2\}$ 。对式 (5.55) 进行数学计算，可得：

$$V_2(t) \leq (V_2(0) - \frac{C}{\mu})e^{-\mu t} + \frac{C}{\mu} \quad (5.57)$$

由式 (5.57) 可得， $V_2(t)$ 收敛于球心在原点半径为 C/μ 的球域内；又通过构造 Lyapunov 函数可知 $S_u, S_q, \tilde{W}_u, \tilde{W}_q, \chi_u, \chi_q$ 一致最终有界；进而，通过调节控制器增益参数，可使控制系统渐近稳定。

5.5 仿真实验验证

为了验证基于超螺旋二阶滑模和 RBF 神经网络设计的控制器的有效性，在同等海况作用下，采用一阶积分滑模和本章提出的控制策略分别设计欠驱动 AUV 地形跟踪控制器。仿真条件如表 5.1 所示。

表 5.1 仿真条件

Tab. 5.1 Simulation conditions

AUV 初始 状态	初始位姿	$x=0\text{m}$		$z=0\text{m}$		$\theta=0^\circ$	
	初始线速度	$u=0.01(\text{m/s})$		$w=0(\text{m/s})$		$q=0(^{\circ}/\text{s})$	
期望路径 (单位: m)	$x_F(s)=\begin{cases} 2s & 0\leq s<100 \\ s+100 & 100\leq s<500 \\ 2s-400 & 500\leq s<600 \\ s+200 & 600\leq s<1600 \\ 2s-1400 & 1600\leq s<1700 \\ s+300 & 1700\leq s<2000 \\ 2s-1700 & 2000\leq s<2300 \end{cases}$ $z_F(s)=\begin{cases} 0.5 & 0\leq s<100 \\ 0.1s-9.5 & 100\leq s<500 \\ 40.5 & 500\leq s<600 \\ 5\sin(0.01\pi s)+40.5 & 600\leq s<1600 \\ 40.5 & 1600\leq s<1700 \\ -0.1s+210.5 & 1700\leq s<2000 \\ 10.5 & 2000\leq s<2300 \end{cases}$						
控制器 参数	$k_s=0.1, k_1=15, k_2=5, R=0.01, u_{de}=1, \lambda_1=12, \lambda_2=10, \Gamma_1=10, \Gamma_2=1, \vartheta_1=0.05, \vartheta_2=0.4, k_3=0.5, k_4=0.5, k_5=0.2, k_6=0.1, k_u=10, k_q=10, T=0.15, b_u=1, b_q=1, \chi_a=0.1, \chi_b=1, k_{\chi_u}=4, k_{\chi_q}=4$						
干扰条 件	模型不确 定项扰动	建模误差	$\Delta_u=10\times u^3 \quad \Delta_w=10\times w^3 \quad \Delta_q=10000\times q^3$				
		参数 摄动	$\begin{cases} \tilde{m}_{11}=\text{unifrnd}(-0.2m_{11},0.2m_{11}) \\ \tilde{m}_{33}=\text{unifrnd}(-0.2m_{33},0.2m_{33}) \\ \tilde{m}_{55}=\text{unifrnd}(-0.2m_{55},0.2m_{55}) \end{cases} \begin{cases} \tilde{X}_u=\text{unifrnd}(-0.2X_u,0.2X_u) \\ \tilde{Z}_w=\text{unifrnd}(-0.2Z_w,0.2Z_w) \\ \tilde{M}_q=\text{unifrnd}(-0.2M_q,0.2M_q) \end{cases}$ $\begin{cases} \tilde{X}_{u u }=\text{unifrnd}(-0.2X_{u u },0.2X_{u u }) \\ \tilde{Z}_{w w }=\text{unifrnd}(-0.2Z_{w w },0.2Z_{w w }) \\ \tilde{M}_{q q }=\text{unifrnd}(-0.2M_{q q },0.2M_{q q }) \end{cases}$				
		外界环 境扰动	$\begin{cases} \tau_{wu}=5\sin(0.05\text{ t}) \\ \tau_{ww}=0.2\sin(0.02t) \\ \tau_{wq}=\sin(0.03\text{ t}) \end{cases}$				
	输入饱和约束	$\tau_{u\max}=200$	$\tau_{u\min}=0$	$\tau_{q\max}=50$	$\tau_{q\min}=-50$		

欠驱动AUV地形跟踪控制的仿真验证如图5.2~图5.7所示。图5.2为欠驱动AUV地形跟踪仿真曲线。图中下方蓝色点线表示实际海底地形轮廓线，它是由回声测深仪测得的数据拟合而成；期望路径为一条与海底地形保持一定高度的曲线；实际路径是基于本章所设计的控制策略仿真而成，证明了在内、外部扰动和饱和输出的约束下本章设计的控制器能够很好地完成地形跟踪控制任务。深度跟踪误差曲线如图5.3所示，由图可知本章提出的控制方法使得AUV具有较快的跟踪速度和较小的跟踪误差，与基于LOS制导律设计的控制器相比，本章所设计的控制器在地形曲率较大处AUV的深度跟踪误差更小，而

且能够保证误差快速收敛到零，使AUV可以有效地实现控制目标。图5.4表示AUV的纵向速度响应曲线，可知基于超螺旋二阶滑模和跟踪微分器的速度控制器能够实现快速且无超调现象的跟踪控制，与积分滑模控制方法相比抖振削弱更加明显，且具有更好的跟踪精度。

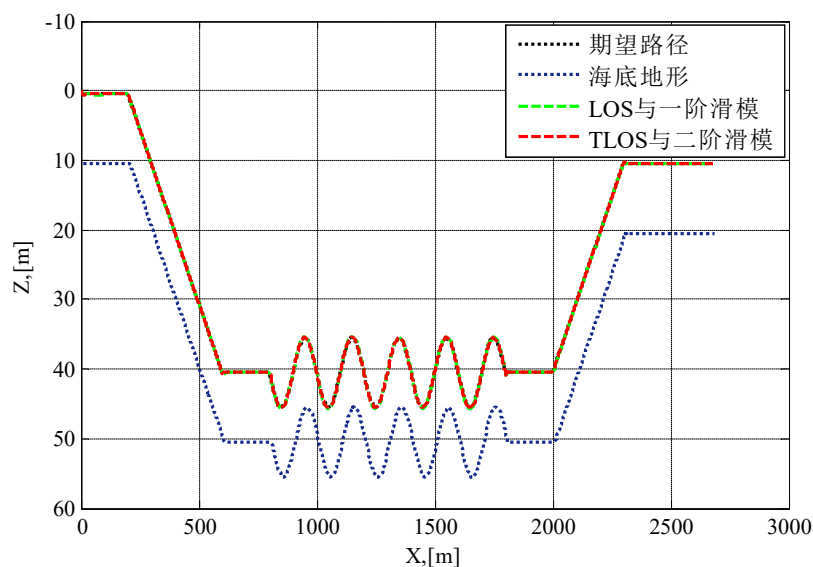


图5.2 欠驱动AUV地形跟踪仿真曲线

Fig. 5.2 The simulation curve of underactuated AUV following the bottom

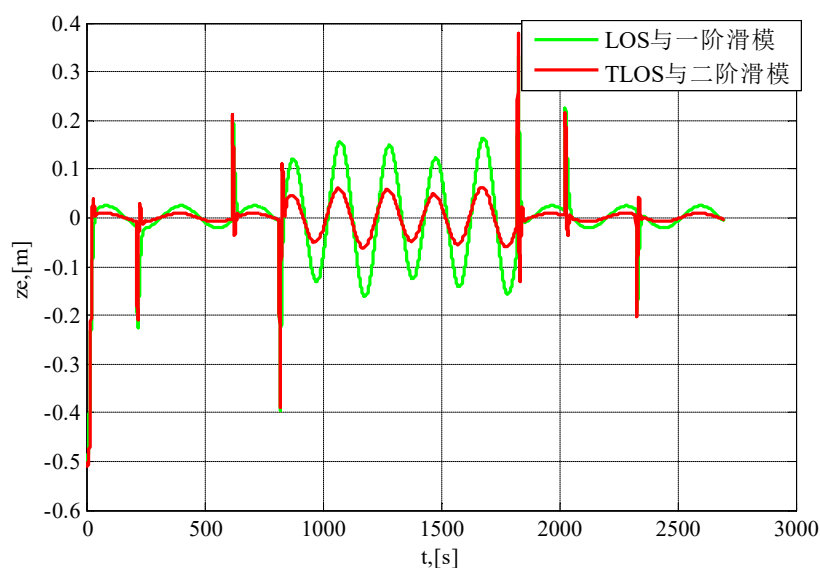


图5.3 欠驱动AUV深度跟踪误差曲线

Fig. 5.3 The depth tracking error curve for underactuated AUV

图5.5表示欠驱动AUV的纵向控制力和纵倾控制力矩响应曲线，从图中可知本章所设计的控制力（力矩）满足饱和输出的特性，且抖振更小。图5.6表示神经网络逼近未知扰动的变化曲线，仿真时选取RBF神经网络的隐含层节点数 $n = 21$ ，中心点分别在 $[0, 6]$ ， $[-0.2, 0.2]$ ， $[-0.1, 0.1]$ 上均匀分布，高斯基函数宽度 $b_1 = 5$ ， $b_2 = 4$ 。从图中可以看出RBF神经网络具有很好的逼近效果，证明了RBF神经网络控制算法的有效性。

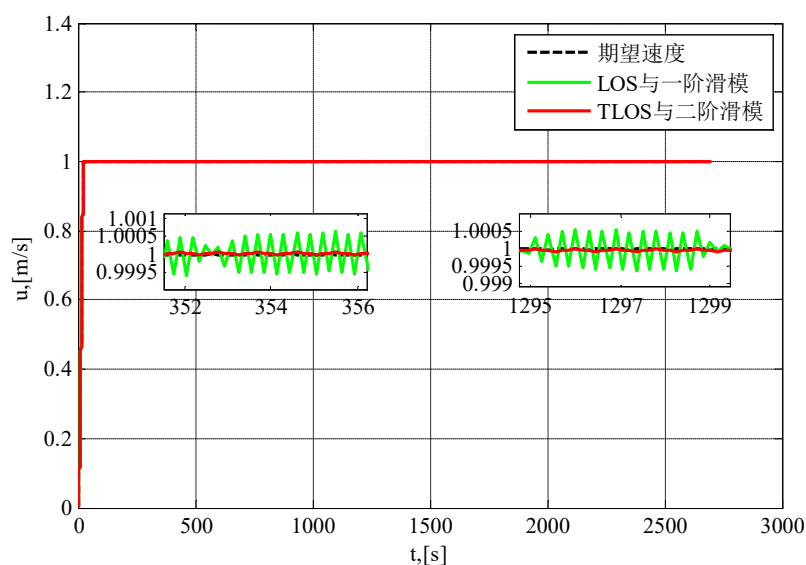


图5.4 欠驱动AUV的纵向速度曲线

Fig. 5.4 The surge velocity curve for underactuated AUV

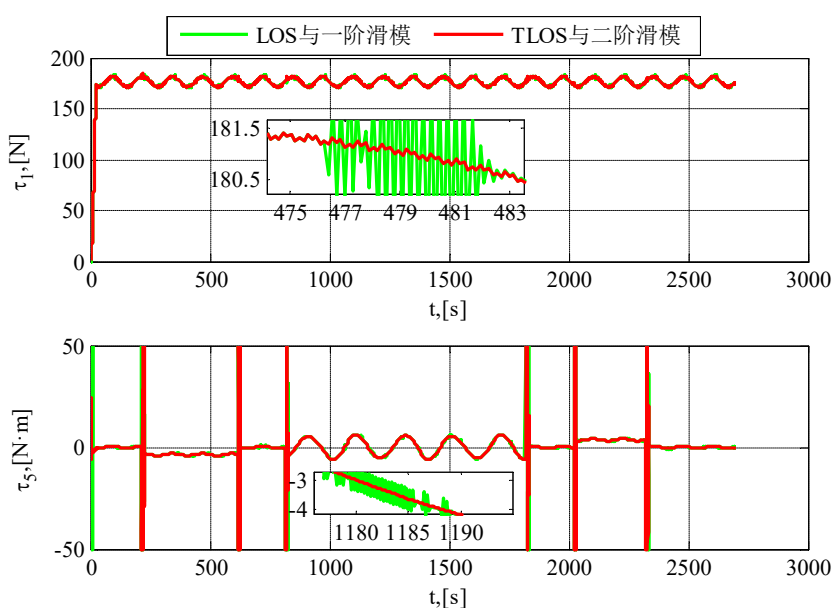


图5.5 欠驱动AUV地形跟踪控制输入曲线

Fig. 5.5 The bottom-following control inputs for underactuated AUV

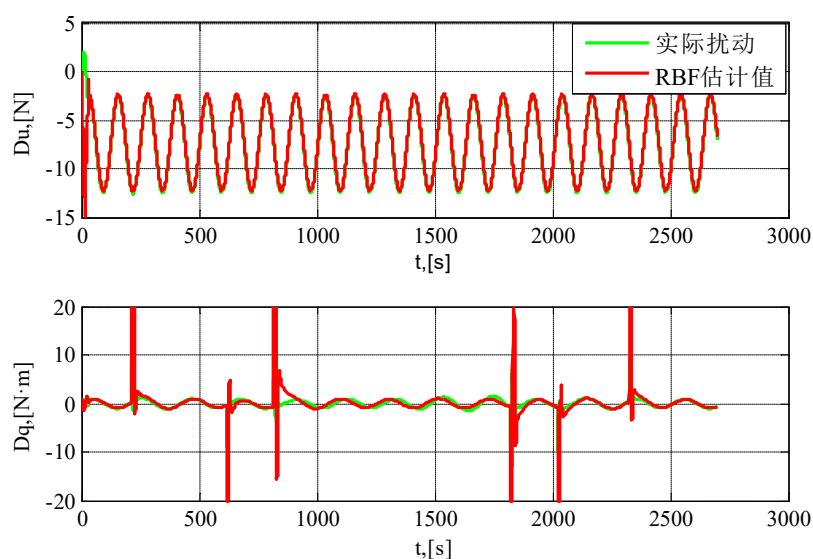


图5.6 未知扰动的逼近曲线

Fig. 5.6 The approximation curve of unknown disturbance

图5.7和图5.8分别表示欠驱动AUV的位置跟踪曲线和速度跟踪曲线，由图可知本章所提出的滑模状态观测器可以快速地估计AUV的位置和速度状态信息。根据以上仿真验证了本章所设计的运动控制器可以有效地实现在速度状态不可测、模型不确定性扰动、建模误差、外部环境扰动和执行器饱和输出约束下的地形跟踪控制。

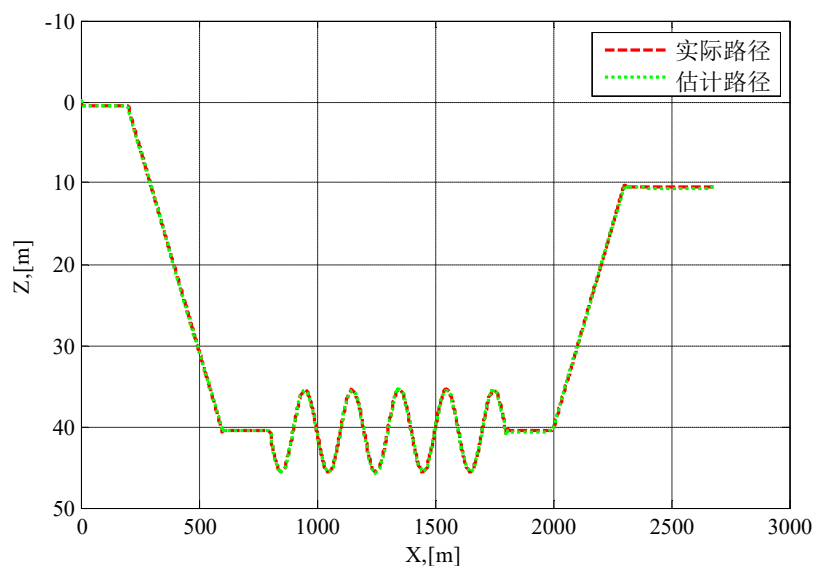


图5.7 欠驱动AUV位置跟踪曲线

Fig. 5.7 The position tracking curve of underactuated AUV

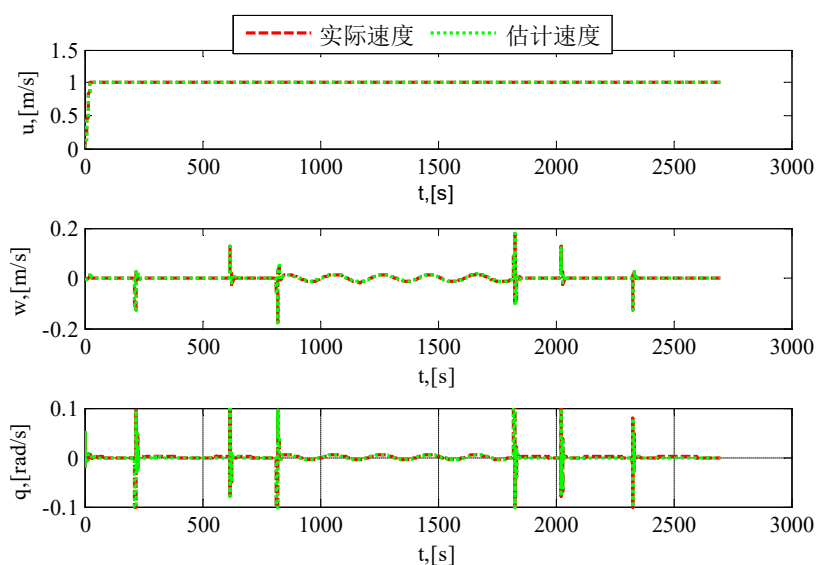


图5.8 欠驱动AUV速度跟踪曲线

Fig. 5.8 The velocity tracking curve of underactuated AUV

5.6 本章小结

本章研究了模型不确定性扰动、外部环境扰动、速度不可测、执行器饱和输出约束下的欠驱动AUV地形跟踪控制。其中，采用改进的滑模状态观测器估计了AUV的速度和位置信息。为防止纵向速度发生跳变，引入了微分跟踪器；并利用DSC技术计算纵倾角速度的一阶导数，降低了计算复杂度。利用超螺旋二阶滑模设计了纵向速度控制律和纵倾角速度控制律；还采用了RBF神经网络逼近不确定性扰动；最后，引入辅助动态系统补偿执行器饱和输出的影响。仿真验证中，证明了所设计的地形跟踪控制器能够使AUV快速跟踪上期望地形；垂荡跟踪误差和纵向速度误差趋近于零；控制器输入曲线平稳，表明本章所提出控制方法的鲁棒性；扰动逼近曲线表明RBF神经网络能很好地逼近不确定性扰动。

结 论

本文将 NTNU AUV 作为研究对象, 深入介绍了其地形勘测运动控制, 其中包括: 已知区域的路径跟踪控制, 未知区域的海底地形轮廓构建与跟踪控制。航行于水下的 AUV 将会受到模型不确定性、未知环境扰动、速度不可测、执行器饱和输出、建模误差、欠驱动特性等因素的影响。考虑不同的约束条件和运动状态, 本文利用反步法、非奇异终端滑模、超螺旋二阶滑模、非线性跟踪微分器、滑模观测器、RBF 神经网络、扩展扰动观测器、动态面控制等方法设计欠驱动 AUV 运动控制器; 并利用小波阈值、经验模态分解、支持向量聚类、三次样条插值函数等方法处理回声测深仪的回波信号与数据, 得到海底地形轮廓曲线。本文主要内容如下:

1. 研究了外部环境扰动和模型参数摄动约束下的欠驱动 AUV 路径跟踪控制问题。为加快收敛速度、提高控制精度并解决奇异性问题, 采用非奇异终端滑模控制方法设计了路径跟踪控制器; 并在指数趋近律的基础上引入了双曲正切函数, 抑制模型参数摄动的同时削弱系统抖振。考虑时变环境扰动对 AUV 跟踪控制的影响, 在 ESO 观测器的基础上加以改进, 设计了估计性能更好的扩展扰动观测器。最后, 采用 Lyapunov 稳定性理论证明了所设计的控制器能使系统趋于稳定。仿真表明, 基于扩展扰动观测器和双曲正切趋近律设计的非奇异终端滑模控制器能够完成多扰动约束下的欠驱动 AUV 路径跟踪控制任务。

2. 研究了未知海底地形跟踪控制过程中的信息采集和轮廓构建问题。由于 AUV 自身携带的回声测深仪的回波信号中混有噪声, 所以利用了小波阈值函数和经验模态分解方法去除信号中的噪声, 进而获得更加准确、可靠的数据信息。然后采用基于支持向量聚类和全局聚类相结合的方法来处理数据点, 剔除孤立点并将威胁障碍物的轮廓点聚类, 构建出了地形轮廓曲线。然后引入了三次样条插值函数平滑地形的上轮廓曲线, 为地形跟踪控制奠定了基础。

3. 研究了模型参数不确定性、执行器饱和输出、速度不可测、外部环境扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制问题。首先, 根据三维空间运动模型和三维路径跟踪误差方程的建模思想, 建立起欠驱动 AUV 地形跟踪运动模型和误差方程。然后引入 TLOS 和反步法设计运动学控制器, 将视线制导角和纵向速度联系起来, 加快了收敛速度。利用改进的滑模观测器在线估计欠驱动 AUV 的线性速度和角速度。在动力学控制器设计中, 引入超螺旋二阶滑模削弱了系统抖振; 引入非线性跟踪微分器和 DSC 分别解决纵向速度跳变和控制器微分爆炸问题; 并采用 RBF 神经网络逼近不确定性扰动, 提高了系统的鲁棒性; 除此之外, 还采用辅助系统补偿执行器饱和输出的影响, 并利用 Lyapunov

稳定性理论证明了系统的稳定性。仿真表明，该控制策略能够完成未知扰动约束下的欠驱动 AUV 地形跟踪控制任务。

但是，针对地形勘测运动控制问题的研究还有许多不足之处。首先本文的控制对象是简化的对称模型，没有考虑非对称运动模型。其次，本文所采用的回波信号及数据均源于文献，缺乏海试数据的支撑；并且由回波信号到数据点的转换过程本文并没有研究。另外，本文仅限于理论基础和仿真验证，并未经过水池实验、实船实验的检验；只有将理论应用到实际工程中，才可以真正体现研究的价值。

参 考 文 献

- [1] 兰德尔. 海洋工程基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.
- [2] 何广顺. 海洋经济稳中向好,结构调整继续深化--解读《2017 年中国海洋经济统计公报》[J]. 海洋经济, 2018, 8(2): 3-6.
- [3] Bovio E, Cecchi D, Baralli F. Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations[J]. Annual Reviews in Control, 2006, 30(2): 117-130.
- [4] Xiang X, Jouvencel B, Parodi O. Coordinated formation control of multiple autonomous underwater vehicles for pipeline inspection[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010, 7(1): 75-84.
- [5] 陈强. 水下无人航行器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [6] Encarnacao P, Pascoal A. 3D path-following for autonomous underwater vehicles[C]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, 2000, 3: 2977-2982.
- [7] Lapierre L, Jouvencel B. Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 2008, 33(2): 89-102.
- [8] 王宏健, 陈子印, 贾鹤鸣, 等. 基于滤波反步法的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 631-645.
- [9] Breivik M, Fossen T I. Principles of guidance-based path following in 2D and 3D[C]. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and 2005 European Control Conference, Seville, Spain, 2005: 627-634.
- [10] Yan Z P, Yu H M, Zhou J J, et al. Spatial linear path-following control for an underactuated UUV[C]. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, 2015: 139-144.
- [11] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated Autonomous Underwater Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 613-625.
- [12] 唐旭东, 庞永杰, 李晔, 等. 基于混沌过程神经元的水下机器人运动控制方法[J]. 控制与决策, 2010, 2(25): 213-217.
- [13] Yu C Y, Xiang X B, Lapierre L. Nonlinear guidance and fuzzy control for three-dimensional path following of an underactuated autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2017, 146: 457-467.
- [14] 叶辉, 王丽琦, 智鹏飞, 等. 基于干扰观测器的 AUV 三维路径自适应跟踪控制[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2019, 33(5): 52-59.
- [15] 王金强, 王聪, 魏英杰, 等. 欠驱动 AUV 自适应神经网络反步滑模跟踪控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 12-17.
- [16] 周知进, 文泽军, 卜英勇. 小波降噪在超声回波信号处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 237-241.
- [17] 王慧琴. 小波分析与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.
- [18] Liu B, Feng J L, Song S P, et al. Research on an Improved Wavelet Denoising Algorithm with Parameter Self-tuning[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(3): 444-450.

- [19] Chatterjee A, Matsuno, F. A Geese PSO tuned fuzzy supervisor for EKF based solutions of simultaneous localization and mapping (SLAM) problems in mobile robots[J]. Expert Systems With Applications, 2010, 37(8): 5542-5548.
- [20] Lee D, Kim G, Kim D, et al. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots[J]. Ocean Engineering, 2012, 48: 59-68.
- [21] Hwang A, Seong W. Simultaneous Mapping and Localisation for Small Military Unmanned Underwater Vehicle[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(4): 223-227.
- [22] 刘少刚, 郭云龙, 贾鹤鸣. 基于直线特征提取匹配搜救机器人的同步定位与地图构建[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1035-1044.
- [23] 迟冬南. 未知环境 UUV 多元声测距与同步巡岸控制方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [24] 李航. 基于激光测距的 UUV 地图轮廓构建与同步巡岸控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [25] 汪伟, 边信黔, 王大海. AUV 深度的模糊神经网络滑模控制[J]. 机器人, 2003(3): 209-212+249.
- [26] Li J H, Lee P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineerin, 2005, 32(17-18): 2165-2181.
- [27] Khodayari M H, Balochian S. Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(3): 559-578.
- [28] Yu C Y, Xiang X B, Zhang Q, et al. Adaptive Fuzzy Trajectory Tracking Control of an Under-Actuated Autonomous Underwater Vehicle Subject to Actuator Saturation[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(1): 269-279.
- [29] Silvestre C, Cunha R, Paulino N, et al. A Bottom-Following Preview Controller for Autonomous Underwater Vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(2): 257-266.
- [30] 边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 等. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动 AUV 地形跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 289-292+296.
- [31] 严浙平, 邓力榕, 孙海涛. 基于高度计信息处理的欠驱动无人水下航行器地形跟踪控制[J]. 计算机应用, 2014, 34(2): 605-609+614.
- [32] Yan Z P, Yu H M, Li B Y. Bottom-following control for an underactuated unmanned undersea vehicle using integral-terminal sliding mode control[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(11): 4193-4204.
- [33] 周易. UUV 地形跟踪安全性评估及航行模式切换控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [34] 王玉柱. UUV 近海底地形跟踪策略及控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [35] 于浩淼. 非线性因素约束下欠驱动 UUV 轨迹跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [36] Pettersen K Y, Egeland O. Time-varying exponential stabilization of the position and attitude of an underactuated autonomous underwater vehicle[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(01): 112-115.

- [37] 陈子印. 欠驱动无人水下航行器三维路径跟踪反步控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [38] 胡云安, 晋玉强, 李海燕. 非线性系统鲁棒自适应反演控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [39] 余亚磊. 无人运输船舶路径跟踪自主智能控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [40] Kohl A M, Pettersen K Y, Kelasidi E, et al. Planar path following of underwater snake robots in the presence of ocean currents[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(1): 383-390.
- [41] Hardy G H, Littlewood I J E, Polya G. Inequalities[M]. Cambridge : Cambridge Mathematical Library, 1967.
- [42] Feng Y, Yu X H, Han F L. On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2013, 49(6): 1715-1722.
- [43] 蔡远利, 李慧洁. 终端滑模控制研究与发展现状. 第 19 届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集[C]. 合肥: 中国自动化学会系统仿真专业委员会, 2018: 12-16.
- [44] Zhang R H, He Z C, Wang H W, et al. Study on Self-Tuning Tyre Friction Control for Developing Main-Servo Loop Integrated Chassis Control System[J]. IEEE Access, 2017, 5: 6649-6660.
- [45] Guo C, Han Y N, Yu H M, et al. Spatial Path-Following Control of Underactuated AUV With Multiple Uncertainties and Input Saturation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 98014-98022.
- [46] Ginoya D, Shendge P D, Phadke S B. Sliding mode control for mismatched uncertain systems using an extended disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1983-1992.
- [47] Xia Y K, Xu K, Li Y, et al. Improved line-of-sight trajectory tracking control of under-actuated AUV subjects to ocean currents and input saturation[J]. Ocean Engineering, 2019, 174: 14-30.
- [48] Salavasidis G, McPhail S, Phillips A B, et al. Terrain Aided Navigation for Long Range AUV Operations at Arctic Latitudes[C]. IEEE OES Autonomous Underwater Vehicles, 2016: 115-123.
- [49] Moline M A, Benoit-Bird K, O'Gorman D, et al. Integration of Scientific Echo Sounders with an Adaptable Autonomous Vehicle to Extend Our Understanding of Animals from the Surface to the Bathypelagic[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(11): 2173-2186.
- [50] 卢莹. 数字通信信号自动调制识别算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [51] Choi H, Baraniuk R G. Multiple Wavelet Basis Image Denoising Using Besov Ball Projections[J]. IEEE Signal Processon Letters, 2004, 11(9): 717-720.
- [52] 张振凤, 威欢, 谭博文. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. 光通信研究, 2018(2): 75-78.
- [53] 章步云, 刘爱芳, 朱晓华, 等. 基于分数阶 Fourier 变换的多分量 LFM 信号检测与参数估计[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(4): 408-411.
- [54] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc Rsoc Lond, 1998, 454(1971): 903-995.
- [55] 张从玲. 基于 EMD 的信号消噪新方法探讨[D]. 广州: 中山大学, 2008.
- [56] Zhang X G, Zou Z J, Guo H, et al. Wavelet denoising Method with a novel wavelet threshold function applied in enoising ship maneuvering test data[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2017, 46(9): 1780-1787.
- [57] 李芳. 改进的支持向量聚类算法及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

- [58] Besbes B, Ammar S, Kessentini Y, et al. Evidential combination of SVM road obstacle classifiers in visible and far infrared images[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2011: 1074-1079.
- [59] Huang D, Lai J H, Wang C D. Incremental Support Vector Clustering with Outlier Detection[C]. International Conference on Pattern Recognition, 2012: 2339-2342.
- [60] 张茜. 基于三次样条函数的分数阶 Riccati 微分方程求解[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [61] 乐亚南. 基于曲线拟合理论的点云数据处理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [62] Zhou J J, Zhao X Y, Chen T, et al. Trajectory Tracking Control of an Underactuated AUV Based on Backstepping Sliding Mode With State Prediction[J]. IEEE Access, 2019, 7: 181983-181993.
- [63] 王耀禄, 郭晨. 欠驱动船舶 RBF 神经网络路径自适应跟踪控制[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(1): 1-5.
- [64] Zhang G C, Huang H, Qin H D, et al. A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV[J]. Ocean Engineering, 2018, 151: 82-92.
- [65] 刘勇, 卜仁祥, 孙大铭. 基于二阶滑模算法的船舶航向控制[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 69-72.
- [66] 许晨. 基于二阶滑模的欠驱动船舶路径跟踪控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [67] Wang Y, Gu L, Gao M, et al. Multivariable Output Feedback Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Underwater Vehicles [J]. Asian Journal of Control, 2016, 18(1): 247-265.
- [68] Zhao D, Li S, Zhu Q. Output feedback terminal sliding mode control for a class of second order nonlinear systems [J]. Asian Journal of Control, 2013, 15(01): 237-247.
- [69] Zheng Z, Sun L. Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation[J]. Neurocomputing, 2016, 177: 158-167.