

分类号: TP242

密 级: 公开

学 号: 092030079

工学硕士学位论文

智能水下机器人运动规划研究

学生姓名 徐璐瑜

指导教师 李彦副教授

江苏科技大学
二〇一四年六月

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Research on Motion Planning for Autonomous Underwater Vehicle

Submitted by

Xu Luyu

Supervised by

Li Yan

Jiangsu University of Science and Technology

June, 2014

江苏科技大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

江苏科技大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

(1)保密 ☐，在___年解密后适用本授权书。

(2)不保密 ☐。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月 日

年 月 日

摘 要

随着陆地资源的日益减少和人类社会的发展和进步，人们对自然资源的需求正逐步从陆上转向资源丰富的海洋。在过去的半个多世纪里，水下机器人技术得到了全面的发展，在海洋资源的开采和海底空间的探索上得到了广泛的应用。

智能水下机器人（AUV）工作在未知、结构化的海洋环境中完成复杂的任务，对智能水下机器人的运动规划的研究成为目前研究的一个重要的方向。水下机器人的运动规划主要包括路径规划和运动控制两个方面，本文针对智能水下机器人的路径规划和运动控制分别展开了研究，主要做了以下几个方面的工作：

(1) 对水下机器人的路径规划方法和运动控制技术发展现状进行了阐述，介绍了水下机器人路径规划研究所采用的环境模型、规划方法。

(2) 阐述了简单遗传算法的数学基础，具体分析了遗传算法的遗传算子。在简单遗传算法的基础上进行了改进，研究了基于遗传算法的 AUV 全局径规划的方法。在栅格模型中，用序号标记法进行编码，设计了选择、交叉、变异、删除等遗传算子，从而引导遗传算法快速收敛于最优解，并通过仿真实验验证了该方法的有效性。

(3) 分析了水下机器人在水下的运动和受力，建立了水下机器人六自由度空间运动模型，并根据研究需要，将其简化为四自由度空间运动模型。

(4) 针对智能水下机器人运动轨迹跟踪的问题，本文采用滑模变结构控制算法，设计了基于指数趋近律和基于准滑动模态的滑模控制器，并对 AUV 进行了运动轨迹跟踪的仿真实验。通过仿真分析和对比表明基于准滑动模态的滑模控制器，很好地削弱了抖振，在轨迹跟踪上性能良好。

关键词 智能水下机器人；路径规划；遗传算法；滑模变结构控制

Abstract

Along with the depletion of resources on the land and the development of human societies, people's demand for natural resources is gradually shifted from land to the rich marine resources. In the past half century, the underwater robot technology has gained a comprehensive development and was widely used in the exploitation of marine resources and ocean space.

AUV works in unknown and structured ocean environment to complete complex tasks. The research of motion planning for AUV is an important direction of current research. The motion planning for AUV mainly includes two aspects of path planning and motion control. This paper studies the path planning and motion control of AUV respectively, and the main work of this paper is as follows:

Firstly, the present research of path planning method and motion control technology is discussed in detail, and the environment model and planning method of the path planning is introduced.

Secondly, this paper expounds the mathematical foundation of the simple genetic algorithm, and the genetic operators of genetic algorithm are analyzed in detail. By making improvement on the basis of the simple genetic algorithm, the global path planning method for AUV based on genetic algorithm is researched. The environment model of AUV is described by grid map, and the path is encoded into serial number notation encoding. Selection operator, crossover operator, mutation operator and delete operator are designed so that GA can be lead to an optimized result rapidly. And the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiment.

Thirdly, this paper analyzes the motion and force of AUV, and the six-degree of freedom space motion model of AUV is established. For the need of project research, proper simplification to the model is conducted, so the four-degree of freedom motion model of AUV is attained.

Lastly, this paper adopts sliding mode variable structure control algorithm to realize the motion trajectory tracking of AUV. The sliding mode controllers are designed based on index reaching law and quasi-sliding mode, and the simulation experiment of motion trajectory tracking for AUV is conducted. The simulation results show that, the sliding mode controller based on quasi-sliding mode well weakens the chattering and get good performance in trajectory tracking.

Key words Autonomous Underwater Vehicle; path planning; genetic algorithm; sliding mode variable structure control

目录

摘 要	1
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 智能水下机器人的研究现状和发展趋势	1
1.2.1 AUV 的研究现状	1
1.2.2 AUV 的发展趋势	3
1.3 智能水下机器人运动规划研究现状	3
1.3.1 AUV 路径规划技术研究进展	4
1.3.2 水下机器人控制技术研究现状	4
1.4 本文的主要研究内容	6
第 2 章 水下机器人路径规划技术	7
2.1 引言	7
2.2 路径规划的定义和分类	7
2.3 路径规划的实现	7
2.3.1 位姿空间	8
2.3.2 环境模型	8
2.4 水下机器人路径规划方法	9
2.5 本章小结	11
第 3 章 基于遗传算法的 AUV 全局路径规划	12
3.1 引言	12
3.2 遗传算法概述	12
3.2.1 遗传算法的基本思想	12
3.2.2 基本遗传算法的形式化定义	13
3.2.3 基本遗传算法的要素	13
3.2.4 遗传算法的基本流程	16
3.3 基于遗传算法的 AUV 全局路径规划	17
3.3.1 建立环境模型	17
3.3.2 个体编码	18
3.3.3 种群初始化	18
3.3.4 适应度函数	19
3.3.5 遗传算子	20
3.3.6 终止条件	21
3.3.7 基于遗传算法的 AUV 路径规划算法	21
3.4 AUV 路径规划仿真结果与分析	22
3.5 本章小结	25

第 4 章 水下机器人的动力学模型.....	26
4.1 引言.....	26
4.2 坐标系与机器人运动参数.....	26
4.3 空间运动与坐标变换.....	27
4.4 水下机器人的运动方程.....	28
4.4.1 平移运动三方程.....	28
4.4.2 旋转运动三方程.....	30
4.4.3 六自由度空间运动方程.....	32
4.5 水下机器人所受合外力.....	32
4.6 状态矩阵方程.....	34
4.7 本章小结.....	36
第 5 章 滑模变结构控制理论基础.....	37
5.1 引言.....	37
5.2 滑模变结构控制的定义.....	37
5.2.1 滑动模态的定义.....	37
5.2.2 滑动模态的存在和到达条件.....	38
5.2.3 滑模变结构控制的定义.....	39
5.2.4 滑动模态运动.....	39
5.3 滑模变结构控制系统的趋近律.....	40
5.4 滑模变结构控制的不变性.....	41
5.5 滑模变结构控制的抖振问题.....	41
5.6 本章小结.....	42
第 6 章 基于滑模变结构控制的 AUV 运动控制.....	43
6.1 引言.....	43
6.2 多输入非线性系统的可控正则型.....	43
6.3 AUV 系统模型的简化.....	44
6.3.1 AUV 状态矩阵方程的简化.....	44
6.3.2 AUV 系统模型的可控正则化.....	44
6.4 AUV 滑模变结构控制器设计.....	45
6.4.1 位置控制器的状态方程.....	45
6.4.2 切换函数的设计.....	46
6.4.3 基于指数趋近律的滑模控制.....	47
6.4.4 基于准滑动模态的滑模控制.....	47
6.5 系统仿真.....	48
6.5.1 AUV 的主要参数.....	48
6.5.2 滑模控制的仿真结果和分析.....	49
6.6 本章小结.....	55
总结与展望.....	56
参考文献.....	59
攻读硕士研究生学位期间发表的学术论文.....	63

Contents

Abstract(Chinese)	1
Abstract(English)	III
Chapter1 Introduction	1
1.1 Background and significance of research	1
1.2 Present research and trends of Autonomous Underwater Vehicle	1
1.2.1 Present research of AUV	1
1.2.2 Development trends of AUV	3
1.3 Present research of motion planning for AUV	3
1.3.1 Present research of path planning for AUV	4
1.3.2 Present research of control technology for underwater robot	4
1.4 Main contents of this paper	6
Chapter2 Path planning technology of underwater robot	7
2.1 Introduction	7
2.2 Definition and classification of path planning	7
2.3 Realization of path planning technology	7
2.3.1 Configuration space	8
2.3.2 Environment model	8
2.4 Path planning method of underwater robot	9
2.5 Chapter summary	11
Chapter3 Global path planning based on genetic algorithm for AUV	12
3.1 Introduction	12
3.2 Overview of genetic algorithm	12
3.2.1 Basic idea of genetic algorithm	12
3.2.2 Formal definition of simple genetic algorithm	13
3.2.3 Basic elements of simple genetic algorithm	13
3.2.4 Basic process of genetic algorithm	16
3.3 Global path planning based on genetic algorithm for AUV	17
3.3.1 Establishment of environment model	17
3.3.2 Individual coding	18
3.3.3 Population initialization	18
3.3.4 Fitness function	19
3.3.5 Genetic operators	20
3.3.6 Termination condition	21
3.3.7 Path planning algorithm based on genetic algorithm for AUV	21
3.4 Simulation results and analysis of path planning for AUV	22
3.5 Chapter summary	25

Chapter4 Dynamic model of underwater robot	26
4.1 Introduction	26
4.2 Coordinate system and underwater robot motion parameters	26
4.3 Space motion and coordinate transformation.....	27
4.4 Motion equation of underwater robot.....	28
4.4.1 Three translational motion equations	28
4.4.2 Three rotary motion equations	30
4.4.3 Six degrees of freedom space motion equation.....	32
4.5 Force of underwater robot.....	32
4.6 State matrix equation.....	34
4.7 Chapter summary	36
Chapter5 Theory foundation of sliding mode variable structure control	37
5.1 Introduction	37
5.2 Definition of sliding mode control.....	37
5.2.1 Definition of sliding mode	37
5.2.2 Existence and arrival condition of sliding mode	38
5.2.3 Definition of sliding mode control.....	39
5.2.4 Sliding mode motion	39
5.3 Reaching law of sliding mode control system	40
5.4 Invariance of sliding mode control.....	41
5.5 Chattering problems of sliding mode control.....	41
5.6 Chapter summary	42
Chapter6 Motion control for AUV based on sliding mode control	43
6.1 Introduction	43
6.2 Controllable regular type of multi-input nonlinear system.....	43
6.3 Simplification of system mode.....	44
6.3.1 Simplification of state matrix equation	44
6.3.2 Controllable regular design of AUV	44
6.4 Sliding mode controller design of AUV	45
6.4.1 State equation of position controller	45
6.4.2 Design of switching function	46
6.4.3 Sliding mode control based on index reaching law.....	47
6.4.4 Sliding mode control based on quasi-sliding mode	47
6.5 System simulation	48
6.5.1 Main parameters of AUV	48
6.5.2 Simulation results and analysis	49
6.6 Chapter summary	55
Summary and Prospect.....	56
References.....	59
Research paper published during graduate study	63

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

海洋蕴含着丰富的海洋生物资源、矿物资源和能源，它是人类可持续发展的重要财富，研究和合理利用海洋，对于人类的经济和社会发展具有重要的意义。现今，海洋的开发、探索对各国有着极强的吸引和挑战。海洋的恶劣环境使得人类自身难以征服海洋，水下机器人正是人类认识海洋、开发利用海洋的主要载体之一。

水下机器人也称作潜水器，它不是人们通常想象的具有人形的机器，而是一种可以在水下代替人完成某种任务的装置，其外形更像一艘潜艇。水下机器人按照控制方式一般分为以下三类：遥控式水下机器人（Remotely Operated Vehicle，简称 ROV）；无人无缆水下机器人（Unmanned Underwater Vehicle，简称 UUV）；智能水下机器人（Autonomous Underwater Vehicle，简称 AUV）。

随着国际资源、能源形势的变化，海洋资源和能源的开发受到人们的广泛关注，水下机器人成为海洋开发的研究热点。近些年来人们把注意力投向了智能水下机器人（AUV）的研究和开发，这主要是由于智能水下机器人在实际的水下作业中无需人工干预，可以自主地运行在远程、难于接近、或无法预知的危险海洋环境之中，完成自主导航、自主避障以及自主作业等诸多任务^[6]。智能水下机器人也称为自治式水下机器人，它无人无缆，具有安全、体积小、重量轻、及耗电小的特点，因此在作业范围、时间及功能上有很大优势。目前，水下机器人在海洋的研究、能源开采、打捞、海底电缆铺设、检修以及军事等方面获得了广泛的应用。尤其在军事应用方面，军用智能水下机器人可以完成自主侦察、伪装与欺骗、自动绘制雷区图、援潜救生、探测与取样等较为复杂的水下作业^[22]。

1.2 智能水下机器人的研究现状和发展趋势

1.2.1 AUV 的研究现状

目前，各海洋大国的许多大学和研究机构都投入了大量的人力和资金用于研究和开发智能水下机器人。

美国的 AUV 研究机构非常多，代表性的有美国海军研究生院研制的“Phoenix”

AUV 和性能更优越的“Aries” AUV, 主要用于研究智能控制、规划与导航、目标识别等技术; 麻省理工学院研制的“Odyssey II” AUV, 主要用于海冰下的检测和标图。

美国 New Hampshire 大学研制出的 EAVE-EAST 自主式水下机器人, 它基于知识的系统, 分为高级与低级两部分, 高级部分处理的内容包括: 数据评价、状态评价、监控和引导; 低级部分包括实施管理、传感器管理和系统监视^[3]。

日本东京大学开发出 Twin-Burger1&2、TEROA150&250 等多个型号的观测型 AUV, 主要用于观察海底电缆的铺设和维护情况。近年来又研制出有很强水下探测能力的“淡探”和“Tri-Dogl”等小型水下智能机器人。

韩国 Daewoo 重工业公司的船舶海洋研究所联合俄罗斯海洋研究所共同研制了名为 OKPL-6000 的自主式水下无人航行体, 该 AUV 形状像鱼雷, 主要用于深海探测、搜索与观察海底沉没物体以及其他科学研究等。德国的 STN 公司开发的名为“深海”(DeePC)的新型自主水下航行器, 续航时间 60 小时, 潜深达 4000m, 直径 1m, 重约 2000kg。

英国工业和贸易部的海洋资源开发计划提供资金, 马可尼水下系统有限公司、Moog 控制设备公司以及 Chelsea 仪器公司在重型鱼雷的基础上制造了用于北冰洋冰下勘测的 AUV。该 AUV 将配备有上视和侧扫声纳以及一个带有磁通量闸门罗盘和电磁式测程仪的三轴惯性导航系统。

英国研制的“泰利斯曼”于 2005 年 8 月进行首次试验。该航行器是 1 个完整的系统, 包括水下航行器本体、1 个开放式结构控制系统、1 个遥控台、通信模块、软件以及支持设备, 重 1800kg, 长约 4.5m, 宽约 2.5m, 能携带各种任务载荷。

俄罗斯也相当重视自主式潜水器技术发展。1988 年, 俄罗斯科学院远东海洋技术问题研究所开发出一台用于水下调查和观察的无人潜水器 MAKS-2 和用于深海搜索和调查的 SEA LION。2007 年 7 月, 俄两台载人水下机器人成功完成了俄历史上首次北极高纬度海域深潜试。

我国研究 AUV 技术的起步于 19 世纪八十年。1982 年中国科学院将试制“海人一号”列为院重点项目。1985 年 12 月“海人一号”在大连海域首航试验获得成功, 以后又多次试验, 证明达到海军提出的综合指标, 下潜 200 米抬起指定目标物。1995 年 8 月, “CR-01”号 6000 米无缆自治式水下机器人研制成功。2000 年研制的“CR-02”号除具有“CR-01”的功能外, 还具有更好的机动性能及对洋底微地形地貌进行探测和对洋底地形的跟踪能力和避碰与爬坡能力, 使“CR-02”具备进行多种深海资源调查的能力。2003 年 7 月, 中国第二次北极科学考察期间, 沈阳自动化研究所研制的“海极号”水下机器人和 2 名科技人员随船出征, 于 2003 年 9 月成功完成科考任务。。2008 年 9 月, 中国自主研发的首个自主与遥控混合作业模式的水下机器人“北极 ARV”, 在 84 度北冰洋海域成功完成冰下调查。“北极 ARV”由中国科学院沈阳自动化研

究所等多家科研机构共同研制开发，它是具有全部自主知识产权的北极冰下自主与遥控海洋环境监测系统。2009 年，中国自主研制的世界首个 7000 米载人水下机器人将进行下海试验，中国自主研制的 7000 米水下机器人可以载 3 个人，最深可下潜至海下 7000 米^[7]。

1.2.2 AUV 的发展趋势

AUV 是当前世界各国研究工作的热点。目前，AUV 的发展趋势主要表现在以下几个方面：

(1) 向远程发展

阻碍智能水下机器人向远程发展的技术障碍有三个：能源、远程导航和实时通信。目前正在研究的各种可利用的能源系统包括一次电池、二次电池、燃料电池、热机及核能源等。开发利用太阳能的 AUV 是引人注目的新进展，太阳能 AUV 只需浮到水面给机载能源系统充电，就可获得这种可利用的无限能源。

(2) 向深海发展

6000 米以上水深的海洋面积占海洋总面积的 97%，因此许多国家都将 6000 米作为发展水深技术的一个阶梯。美国伍兹霍尔海洋研究所研制的一种深海探测潜器“ABE”，可在水深 6000 米的海底停留一年。日本于 1993 年成功研制工作水深为 11000 米的深海无人潜器“海沟号”。我国第一台 6000 米智能水下机器人“CR-01”，主要用于太平洋洋底多金属结核的调查。

(3) 向智能型发展

目前 AUV 主要用于观察和测量，自主作业能力不强，智能化水平不够高，因此，提高水下机器人的智能化水平是研究的热点。未来的 AUV 将不完全依赖于机器的智能，更多地依赖传感器和人工智能。在 AUV 上安装水下机械手，可以使 AUV 具有作业能力。此外，发展多机器人协同控制技术，也是提高 AUV 智能化水平的重要方面。

1.3 智能水下机器人运动规划研究现状

水下机器人的运动规划主要包括路径规划和运动控制两个方面。路径规划没有考虑系统的动力学，它作为一个几何问题，主要是对路径规划算法的研究；运动控制要考虑机器人的线速度和角速度，通过控制水下机器人执行结构的输出力（矩），从而规划出机器人运动过程中的位置、速度及加速度。

1.3.1 AUV 路径规划技术研究进展

AUV 的路径规划能力体现了水下机器人的智能水平,作为一种自主式海洋运载器,AUV 自主能力的真正含义是有和外部环境进行交互的能力,其中一个重要方面就是具有全局路径规划以及突发事件下路径重规划和躲避障碍物的能力。能够在未知、结构化的海洋环境中完成复杂的任务,恰恰体现了 AUV 的自主性、智能性。

在 AUV 的路径规划研究中,国内外学者做了大量的工作,同时也取得了许多成果:

在国外,K. Sugihara 提出了遗传算法路径规划,该方法适用于二维、三维时变环境,即可用于水下机器人的在线规划,也可用于离线规划^[15]。Anthony Stentz 提出了 D* 算法用于解决未知和动态环境下机器人的规划^[16]。Clement Petrel, Yan Philhas 等提出了 FM* 算法,应用 FM* 算法描述 AUV 的二维环境进行快速的路径规划^[17]。Hongjian Wang, Dehui Zhao 等将自适应遗传算法应用于 AUV 路径规划,在确定环境下根据优化准则寻找最优路径,同时也可以用于基于传感器的动态实时规划^[18]。Ge Yang 等人采用模糊逻辑方法研究了水下机器人在海流中的局部路径规划方法,将障碍物、海流影响和水下机器人三者的关系引入了实时环境评估^[19]。

在国内,哈尔滨工程大学水下机器人技术项目组中,对 AUV 的路径规划问题的研究取得了一些成果。他们的主要实践有:应用了分层全局路径规划的思想,“八五”期间提出了“基于区域模型的路径规划算法”,较好地解决了拥挤环境下的智能机器人全局路径规划问题,“十五”期间提出的“旋转坐标系法”以及“激活值传播算法”较好地解决了在海洋环境中考虑海流因素时的全局路径规划问题^[23];首次将基于案例的学习算法应用到水下机器人全局路径规划之中,构造水下机器人的全局规划器,从本质上增强其智能行为,提高了机器人对海洋环境的适应能力^[24];采用矢量化栅格,用遗传算法方法得到了海流环境中广义路径最短的规划结果,并结合海流特性给出了仿真环境下的路径跟踪算法^[25];采用八叉树建模、激活值传播方法进行搜索的规划方法等^[10]。

1.3.2 水下机器人控制技术研究现状

水下机器人的运动控制是其完成制定任务的前提和保障,是水下机器人研究领域的关键技术之一。而水下机器人的主要特点是高度非线性、各自由度之间存在耦合及时变性。水下机器人的精确的数学模型一般很难获得,所以不依赖于数学模型的控制算法很适合于水下机器人的控制。目前,国内外研究机构针对水下机器人的运动控制,主要采用的控制算法有:滑模控制、模糊控制、自适应控制、神经网络控制等。此外还有将两种控制方法综合考虑以克服各自缺点的控制方法,如模糊滑模变结构控制、

模糊神经网络控制、神经网络滑模变结构控制等。

(1) 滑模变结构控制

滑模变结构控制是一类特殊的非线性控制，且非线性表现为控制的不连续性。滑模变结构控制的优点是能够克服系统的不确定性，对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性。因而，滑模变结构控制非常适于水下机器人这种高度时变性、不确定性和环境干扰大的运动控制。**Bartolini** 等提出了一种多输入的二阶滑模控制算法用于水下机器人的路径跟踪控制，该控制算法可以在存在干扰和不确定因素的情况下，保证精确的轨迹跟踪和稳定性^[30]。**Song** 等人设计了水下机器人的俯仰和航向角的控制，利用模糊逻辑逼近滑模控制的切换函数^[36]。**刘云龙**等采用具有光滑性和饱和性的 S 型函数来削弱滑模控制的抖振，提出了一种水下机器人软变结构控制，对水下机器人的深度进行了轨迹跟踪的控制^[39]。**王青山**研究了海流环境下的 AUV 滑模控制，对水下机器人进退、艏摇、纵倾三个自由度方向的进行跟踪控制，采用一种新型的指数趋近律来削弱系统的抖振，取得了很好的控制效果^[46]。**H. Akcakaya** 等用双曲正切三角函数代替指数趋近律中的符号函数，设计了基于指数趋近律的滑模控制器来跟踪 AUV 的运动轨迹，并与传统的 PID 控制进行了比较^[62]。

(2) 模糊控制

模糊控制是建立在人工经验的基础上的。控制器设计者并非需要了解被控对象的精确数学模型。模糊控制器采用模糊规则对输入输出数据进行处理，并制定模糊规则表。用模糊控制更能容忍噪声的干扰和各部件的变化，使系统适应性更好，无论被控对象是线性还是非线性的，模糊控制系统都具有良好的鲁棒性和适应性。**G. Antonelli** 运用模糊逻辑来解决水下机器人系统的动力学冗余问题^[28]。**Shi** 等人设计了模糊滑模控制器通过模糊逻辑调整滑模控制增益来消除抖振从而对水下机器人机械手系统进行控制^[35]。

(3) 神经网络控制

人工神经网络是一种模仿动物神经网络行为特征，进行分布式并行信息处理的算法数学模型。人工神经网络具有自学习和自适应的能力。**Kazuo Ishii** 等提出了一种基于神经网络的自组织神经网络控制系统，并将它应用于“Twin-Burger”的艏向控制，验证了它的有效性^[31]。

(4) 自适应控制

自适应控制的基本原理是：基于对控制量的在线检测，按照一定的方式，适当修正系统的参数或结构形式，从而降低与控制有关的不确定性对系统的影响，达到预期的控制效果。自适应控制在受控对象的结构已知，参数变化缓慢，系统不确定度有界的情况下能取得好的控制效果。**A. P. Aguiar** 提出基于李雅普诺夫稳定性的非线性自适应进行轨迹跟踪控制^[32]。**J. S. Wang** 等人研究了自适应回归模糊神经网络的水下机器

人控制问题，该控制方法具有结构自学习和参数自适应功能^[33]。

1.4 本文的主要研究内容

目前，智能水下机器人（AUV）是国际上各国学者研究的热点，本文研究了智能水下机器人的运动规划，分别对智能水下机器人的路径规划和运动控制展开研究，主要包括以下内容：

第一章介绍了本论文的研究背景和意义，综述了智能水下机器人的研究现状和发展趋势，然后分别阐述了智能水下机器人路径规划技术和运动控制技术研究现状。

第二章具体地讲述了水下机器人路径规划技术，分别阐述了路径规划的定义、分类和实现，最后对水下机器人路径规划方法做了简单的介绍。

第三章研究了基于遗传算法的 AUV 全局路径规划，首先介绍了遗传算法的基本概念，然后阐述了基于遗传算法的 AUV 路径规划的实现过程，并对遗传算法做了相应的改进，最后对提出的遗传算法进行了仿真验证。

第四章对水下机器人进行了动力学分析，建立了水下机器人的六自由度空间运动方程，并导出了运动方程的状态矩阵表达形式。

第五章介绍了滑模变结构控制技术的基础理论，并对其中一些关键问题进行了理论分析。

第六章研究了基于滑模变结构控制的 AUV 运动控制，设计了基于指数趋近律和准滑动模态的滑模控制器，通过对运动轨迹跟踪的仿真研究，对两种控制策略的结果进行了分析。

最后，对本文的研究工作进行了总结，并对今后的研究方向进行了展望。

第2章 水下机器人路径规划技术

2.1 引言

路径规划技术是智能水下机器人研究领域中的核心问题之一，水下机器人在远程航行和各种作业过程中，为了安全地执行使命，就必须具备躲避障碍物的能力。我们希望智能机器人能具有感知、规划和控制等高层能力，它们能从周围的环境中收集知识，构造一个关于环境的符号化的世界模型，并且利用这些模型来规划、执行由应用者下达的高层任务，而这些都是以路径规划技术为前提的。

2.2 路径规划的定义和分类

路径规划是自治式移动机器人的一个重要组成部分，它的任务就是在具有障碍物的环境内，按照一定的评价标准，寻找一条从起始状态（包括位置和姿态）到达目标状态（位置和姿态）的无碰路径^[1]。

从机器人对环境感知的角度，机器人路径规划方法可分为：基于环境模型的规划方法、基于事例学习的规划方法和基于行为的路径规划方法；依据对周围环境的了解情况，可分为全局路径规划和局部路径规划；从规划环境是否随时间变化角度，可分为静态路径规划和动态路径规划；从完整性的角度，还可以把路径规划方法分为确定型和启发型两类。

全局路径规划是指根据先验环境模型找出从起始点到目标点的符合一定评价标准的可行或最优路径。全局方法通常可以寻找最优解，但需要预先知道准确的全局环境信息。基于传感器信息的局部路径规划依靠传感系统实时感知的信息，其环境模型是未知或部分未知的，障碍物的尺寸、形状和位置等信息必须通过传感器获取。

2.3 路径规划的实现

路径规划的主要环节包括环境建模、路径搜索及生成、路径优化或平滑。在机器人规划前，首先要将机器人工作空间的描述由外部的原始形式通过一系列处理转化为适合规划的内部模型，这个过程称为环境建模，其中主要是障碍物的表示方法。合理的环境表示有利于减少规划中的搜索量及时空开销。不同的规划方法正是基于不同的

环境建模基础之上的。路径搜索算法负责从建立的环境模型中搜索出路径的可行空间。路径生成则是从搜索到的路径可行空间中生成一条可行路径。路径优化是在考虑智能机器人自身动力学特性的基础上，为了让路径更有利于机器人的执行而对路径进行的平滑^[10]。

2.3.1 位姿空间

机器人的位姿是指能完全地确定机器人上所有点的一个相互独立的参数集，它不仅描述了机器人的位置，而且考虑了机器人的方向。位姿空间是路径规划领域中的一个基本概念，由物体的所有位姿所组成的位姿空间代表了该物体的所有可能的运动。由于环境障碍物的存在，运动物体在该空间中会有一个无法通过的区域，在这个区域中，运动物体会与障碍物发生碰撞。位姿空间将路径规划问题转变为在位姿空间中的起始位姿和终止位姿之间找到一个连续的位姿节点序列的问题。

2.3.2 环境模型

目前，国内外研究机构提出了很多环境建模的方法，主要有可视图法、Voronoi Diagram 法、栅格法、单元树法等。

(1) 可视图法

可视图法是 1979 年由 Lozano 和 Wesley 提出的。可视图中，障碍物由多边形或多面体构成，诸如圆形或椭圆形这样没有拐角的障碍物也用多边形来表示，选取障碍物的顶点或拐角作为图的节点。在自由空间中将起点、终点和各个障碍物的节点连接，保证所有节点间的连接线不与障碍物相交。将机器人缩为一点，沿着这些网状线寻找一条最短无碰路径。可视图法是一种简单有效的路径规划方法，一般用于二维空间。但是，由于图中的节点在障碍物上，节点间的连线多数沿着障碍物的边界，因而，机器人很容易与障碍物相碰。

(2) Voronoi Diagram 法

Voronoi 图法能够避免可视图法容易和障碍物发生碰撞的缺陷，该路径规划法保证了机器人与障碍物之间有一定的距离。

(3) 栅格法

栅格法的原理是将整个空间用规划的小格点划分成许多小空间，每一个小格点与周围的 4 个或 8 个点（三维环境）相邻，形成一副图。非障碍物占据的栅格成为自由栅格，一般用白格表示，障碍物占据的栅格为非自由栅格，一般用黑格表示。路径规划的过程即为搜索自由栅格的最短路径的过程。该方法的特点是简单，易于实现，并且易于扩展到三维环境。它的缺点是表示效率不高，存在着时空开销与求解精度之间

的矛盾。并且，该方法对工作区域的大小有一定的要求，如果区域太大，将使栅格的数量急剧增加，使搜索存在组合爆炸的问题。

(4) 单元树法

单元树法是为了克服栅格法的缺点而设计的，它递归地把空间划分成若干子空间，二维空间划分为4部分，称为四叉树，三维空间划分为8部分，称为八叉树，二维的四叉树如图2.1所示。划分得到的每个单元所占用工作空间可能是以下三种情况之一：都为自由空间、都为障碍物空间、混合型空间。对于混合型空间按照前面的方法递归地继续进行划分，直到每个单元都分为自由空间和障碍物空间或达到一个预先设定好的精度为止。该方法适用于有大障碍物的环境，如果环境中充满了许多小的障碍物，则会造成计算开销过大。

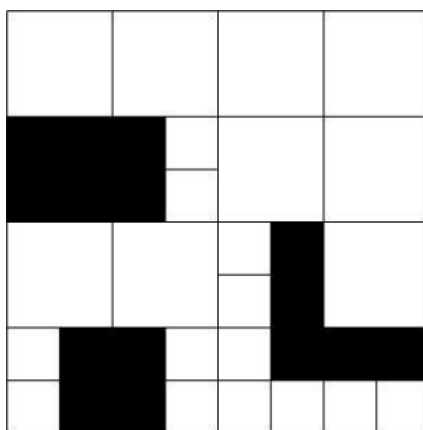


图 2.1 单元树法

Fig.2.1 Cell tree representation

2.4 水下机器人路径规划方法

路径规划经过几十年的发展，已经涌现出了许多有效的求解方法，由于算法不同程度的存在一定局限性，因此不断寻求更佳的规划算法就成为国内外的一个研究热点。为了更加高效的解决复杂的路径规划问题，研究趋势越来越向着两种或多种已有算法有机结合的方向发展。目前，水下机器人路径规划方法主要有以下几类：

(1) 人工势场法

人工势场法是由 Khatib 提出的一种虚拟力法^[8]，这种路径规划方法简单并且易于实现。人工势场路径规划技术的基本思想是将机器人在障碍物环境中的运动视为一种机器人在虚拟的人工受力场中的运动。目标点对机器人产生引力，障碍物对机器人产生斥力，引力和斥力的合力作为机器人的控制力，从而控制机器人避开障碍物而到达目标位置。该方法的不足在于存在局部最优解，容易产生死锁现象，从而可能使移动机器人在到达目标点之前就停留在局部最优点。

(2) 模糊逻辑法

模糊集理论最先由 Zadeh 在 1965 年提出,随后在控制领域得到了有效的应用。许多学者将模糊集理论应用到机器人的避碰控制研究中,并取得了良好的效果。模糊逻辑方法是在线规划中通常采用的一种规划方法,包括建模和局部规划。模糊逻辑方法不需要环境的数学模型来处理各种情况,它基于传感器的实时测量信息,通过查表得到规划出的信息,计算量不大,容易做到边规划边跟踪,能满足实时性要求。该方法的缺点是:在复杂环境中很难构造出比较全面的规则库,输入量增多时,推理规则和模糊表会急剧膨胀。

(3) 神经网络法

神经网络法是模拟生物的神经结构以及其处理信息的方式来进行计算的一种算法。在机器人路径规划中采用神经网络技术,基本上可分为两种方式:一种是在机器人运行环境中直接获取训练样本,即传感器的数据作为网络的输入,所希望的机器人的位姿作为网络的输出;另外一种是把神经网络与模糊理论相结合。

利用神经网络和模糊集理论结合可以实现具有模糊推理功能的局部规划器。首先把机器人传感器的距离信息进行模糊处理,通过总结人的驾驶经验,形成一系列规则,把模糊规则作为样本,对神经网络进行离线训练学习,通过对典型样本的学习,把规则融会贯通起来,从而在整体上体现出一定的智能。但是采用神经网络解决局部规划问题时,获取具有代表性的训练样本并不容易。

(4) 基于案例学习的规划方法

基于案例的学习方法具有类比学习的功能,它依靠过去的经验进行学习及问题求解。该方法通过建立案例库用以记忆所经历过的规划案例。一个新的案例可以通过修改案例库中与当前情况相似的旧的案例来获得。

基于案例的学习方法应用于智能水下机器人的路径规划,首先要利用路径规划所用到的或产生的信息,建立一个案例库。案例库中每一个案例,包含了每一次进行路径规划时的任务、环境以及产生的路径等信息。每一个案例可以通过特定的索引获得。这种索引值由当前进行规划的任务、环境等信息产生。通过索引,将当前案例与库中的案例进行匹配,并对匹配出的候选案例进行评估、修正,最后将性能最优的案例作为当前的规划结果^[3]。

(5) 遗传算法

遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法,它是由美国 J. Holland 教授于 1975 年首先提出的。它采用选择、交叉、变异等遗传算子,对参数编码的字符串进行遗传操作,每一字符串对应于一个可行解,这种遗传操作是对多个可行解组成的群体进行的,故在进化过程中可以并行地对解空间的不同区域进行搜索,可使搜索趋于全局最优解而不会陷于局部极小解。

遗传算法较强的全局搜索能力和较高的搜索效率使其成为复杂环境下全局优化的最佳算法之一。它具有鲁棒性强、灵活、在种群搜索中不易出现局部最优等优点，但是它也具有早熟收敛和收敛速度慢的缺陷，因此，目前许多学者提出了基于遗传算法的改进优化算法。

(6) 基于群集智能的优化算法

近几年，模仿自然界中生物的一些群体行为，诞生了粒子群算法、蚁群算法等群集智能算法。粒子群算法是一种模仿鸟群飞行的仿生算法，有着个体数目少、计算简单、鲁棒性好等优点，在各类连续空间优化问题均取得了很好的效果。

蚁群算法是基于生物界群体启发行为的一种随机搜索寻优方法，它具有正反馈性、协同性和隐并性等特性，在解决优化组合的问题上有良好的适应性。与传统的算法相比，基于蚁群算法的路径规划算法能很快发现较好解，并且该方法易于实现并行计算。

(7) 基于混合算法的路径规划

把传统的全局路径规划方法和某些局部路径规划的智能方法进行综合，或者将几种智能方法根据各自的特点加以综合应用，这种综合的路径规划方法称为混合路径规划。混合方法试图结合全局和局部方法的优点，在全局规划的基础上进行局部微调，相互结合、取长补短。比如将人工势场法、遗传算法、模糊逻辑、神经网络以及蚁群算法等方法互相结合，组成一些新的机器人路径规划方法，能很大程度地提高规划的效率。

2.5 本章小结

本章对水下机器人路径规划技术进行了阐述，介绍了路径规划定义、分类及实现等相关知识。对人工势场法、模糊逻辑法、神经网络法、遗传算法等路径规划算法分别进行了简单的介绍，并阐述了这些算法的优缺点。本章也是对第3章的路径规划算法进行一个铺垫。

第3章 基于遗传算法的 AUV 全局路径规划

3.1 引言

本文研究的是智能水下机器人运动规划问题，要对 AUV 的运动轨迹进行跟踪、规划，首先要对 AUV 进行路径规划，以使得 AUV 在水下环境中能够自主地避开障碍物。鉴于遗传算法具有较强的全局随机搜索能力，而且不易出现局部最优解，因此本章采用遗传算法实现 AUV 全局路径规划。路径规划的目标是使 AUV 能够自主避开障碍物并且使运动路径最短，本章采用改进的遗传算法在工作环境下实现了静态环境下 AUV 避障路径规划，具体讲述了基于遗传算法的路径规划方法的实现过程，并对算法进行了仿真验证。

3.2 遗传算法概述

3.2.1 遗传算法的基本思想

遗传算法是一种模仿生物进化过程的搜索方法，这种算法要用到进化和遗传学的概念。下面是遗传算法的有关术语：

- (1) 染色体：遗传物质的主要载体，是遗传因子的集合。
- (2) 遗传因子：也称为基因，是染色体中的元素，用来表示个体的特征。
- (3) 个体：染色体带有特征的实体。遗传算法所处理的基本对象、结构。
- (4) 种群：带有某种特性的个体的集合。该集合内个体的总数称为种群的大小。
- (5) 适应度：表示个体对于环境的适应程度。对生存环境适应程度比较高的物种将获得更多的繁衍机会，而对生存环境适应度低的物种，其繁殖机会就相对较少，甚至逐渐灭绝。
- (6) 进化：生物以种群的形式，逐渐适应其生存环境，使其品质不断得到改良，这种生命现象称为进化。
- (7) 选择：根据一定的概率从种群中选择若干个体的操作。它是一种基于适应度的优胜劣汰的过程。
- (8) 交叉：使一对染色体进行基因重组。
- (9) 变异：染色体上的基因以一定概率突然变化形成新的染色体的过程。
- (10) 编码：将问题结构变换为位串形式表示的过程。

(11) 解码：将位串形式表示变换为原问题结构的过程。

遗传算法的基本思想是，首先产生一个初始种群，种群中的每个个体都是问题的可能潜在解，对每个个体进行基因编码。初代种群产生之后，按照适者生存和优胜劣汰的原理，逐代演化产生出越来越好的近似解。在每一代，根据问题域中个体的适应度大小选择个体，并借助于遗传算子进行组合交叉和变异，产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样，使得子代种群比父代种群更加适应环境，末代种群中的最优个体经过解码，可以作为问题近似最优解。

3.2.2 基本遗传算法的形式化定义

基本遗传算法（Simple Genetic Algorithm）只使用选择算子、交叉算子和变异算子这三种基本遗传算子，其遗传进化操作过程简单，是其他遗传算法的基础。基本遗传算法可表示为：

$$SGA = (C, F, P_0, M, \Phi, \Gamma, \Psi, T) \quad (3.1)$$

式中： C 一个体的编码方法；

F 一个体的适应度评价函数；

P_0 一初始种群；

M 一 种群规模，即群体中含有个体的数量；

Φ 一选择算子；

Γ 一交叉算子；

Ψ 一变异算子；

T 一算法终止条件。

3.2.3 基本遗传算法的要素

遗传算法的构成要素包括编码方法、初始化种群和群体规模的确定、适应度函数设计、遗传操作以及算法终止条件。遗传操作也被称为遗传算子，基本遗传算法包括选择、交叉和变异 3 种遗传算子。下面对这些构成要素分别加以介绍：

(1) 编码方法

遗传算法是对一系列的潜在解进行操作，这些解的集合即为种群，种群中的每个个体经过编码后被称之为“基因型”或“染色体”。因而采用遗传算法首先要进行种群的编码和初始化。不同的编码方式对算法的性能如搜索能力和种群多样性等影响很大，所以必须针对具体问题选择合适的编码方法。

目前主要的编码方式有二进制编码、格雷码编码、符号编码方法、浮点数编码、DNA 编码等。下面将介绍一下二进制编码和实数编码。

1) 二进制编码

二进制编码使用固定长度的二进制符号串来表示种群的个体，其等位基因由字符集 $\{0,1\}$ 组成的，这种方式编码、解码操作简单，交叉、变异等遗传操作便于实现，是最常用的一种编码方式。如 $X=1001010111$ 就可以表示一个个体，该个体的染色体长度为 10。

2) 浮点数编码

浮点数编码方法是指个体的每个基因值用某一范围内的一个浮点数来表示，个体编码长度等于其决策变量的个数。若某一个优化问题含有 4 个变量 $x_i (i=1,2,3,4)$ ，每个变量都有其对应的上下限 $[U_{\min}^i, U_{\max}^i]$ 。则 $X=[5.30, 5.70, 4.40, 4.95]$ 就表示一个体的基因型，其对应的表现型为 $\mathbf{x}=[5.30, 5.70, 4.40, 4.95]^T$ 。浮点数编码适用于表示范围较大的数和精度要求较高的遗传算法，以便于在大空间进行遗传搜索，提高运算效率。

(2) 初始化群体和群体规模的确定

在初始化群体上，一般采用随机方法构造，也可用经验方法构造，以减少进化代数。采用随机法产生初始群体不依赖于问题，对于任何问题都可以采用这种方式来生成初始群体。采用经验方法构造，使算法陷入局部最优解的概率增大。在群体规模上，优化效果与计算效率之间存在矛盾。群体规模越大，多样性越好，进化到最优解的可能性就越大，但相应的计算时间也会增加。实际应用中，通常取一个折中的不变常数。

(3) 适应度函数设计

适应度函数在遗传算法中主要起搜索的作用，通过个体的适应度值的大小来确定该个体遗传到下一代中的概率，适应度越高的个体，该个体被遗传到下一代的概率也越大；反之，个体适应度越小，该个体被遗传到下一代的概率也越小。为了能够直接将适应度函数与群体中的个体优劣程度相联系，在遗传算法中适应度值规定为非负，并且在任何情况下总是希望越大越好^[13]。

常见的适应度函数设计方法有如下两种：

1) 对于求目标函数 $f(x)$ 最小值的问题，适应度函数选取如下：

$$F(x) = \begin{cases} C_{\max} - f(x), & f(x) < C_{\max} \\ 0, & f(x) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (3.2)$$

2) 对于求目标函数最大值的优化问题，适应度函数选取如下：

$$F(x) = \begin{cases} f(x) - C_{\min}, & f(x) > C_{\min} \\ 0, & f(x) \leq C_{\min} \end{cases} \quad (3.3)$$

式(3.2)中的 C_{\max} 和式(3.3)中的 C_{\min} 为选定的适当大小的数。

如果目标函数取值总为正时，可以直接设定个体的适应度值 $F(x)$ 就等于相应的目标函数值 $f(x)$ ，即：

$$F(x) = f(x) \quad (3.4)$$

(4) 选择算子

选择是从当前群体中选择适应度值较高的个体以生成交配池的过程。遗传算法执行选择算子之前首先要计算个体的适应度，适应度计算好之后按照适应度对父代个体进行选择。目前常用的选择算子方法有适应度比例选择、Boltzmann 选择、排序选择、联赛选择等形式。

适应值比例选择是最基本的选择方法，其中每个个体被选择的期望数量与其适应值和群体平均适应值的比例有关，常采用轮盘赌方式实现。该方式先计算每个个体的适应值，然后计算出此适应值在群体适应值总和中所占的比例，表示该个体在选择过程中被选中的概率。选择过程体现了生物进化过程中“适者生存，优胜劣汰”的思想，并且保证优良基因遗传给下一代个体。

对于群体大小为 n 的群体 $P = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，个体 a_i 的适应度值为 $F(a_i)$ ，则 a_i 的选择概率为：

$$p_s(a_i) = \frac{F(a_i)}{\sum_{j=1}^n F(a_j)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

式(3.5)决定后代种群中个体的概率分布，经过选择操作生成用于繁殖的交配池，其中父代种群中个体生存的期望数目为：

$$P(a_i) = n \cdot p_s(a_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

(5) 交叉算子

交叉又称为为基因重组，是在以交叉概率在选择的父代之间进行基因重组而产生新的子代的操作，新的个体具有两个父代的特征。交叉概率越高，可以越快收敛到最优解区域，因此一般选取较大的交叉概率，但太高的交叉概率也可能导致早熟现象，一般交叉概率取 0.4-0.9。几种适用于二进制编码或实数编码的交叉方法如下：

1) 单点交叉：在个体编码串中随机设置一个交叉点，然后在该点相互交换两个配对个体的部分基因。下面给出了单点交叉的例子。

个体 A 0011 | 0101 \rightarrow 0011 | 0010 新个体 A'
配对个体

个体 B 1010 | 0010 \rightarrow 1010 | 0101 新个体 B'

其中，交叉点设置在第 4 和第 5 个基因座之间，交叉时该交叉点后的两个个体的码串互相交换。

2) 双点交叉：在相互配对的两个个体编码串中随机设置两个交叉点，交换两个交叉点之间的部分基因。

3) 均匀交叉：两个配对个体的每一位基因都以相同的概率进行交换，从而形成两个新个体。

(6) 变异算子

变异算子是对群体中的个体串的某些基因座上的基因值进行变动。对基于字符集 $\{0,1\}$ 的二值码串而言，变异操作就是把某些基因座上的基因值取反，即由 1 变为 0 或由 0 变为 1。一般来说，变异算子操作的基本步骤如下：

- 1) 在群体中所有个体的码串范围内随机地确定基因位置；
- 2) 以事先设定的变异概率 p_m 来对这些基因座的基因值进行变异。

在遗传算法中引入变异算子的目的有两个：一是变异算子可以促使群体进化过程中丢失的等位基因信息得以恢复，以保持群体中的个体差异性，防止发生成熟前收敛；二是当种群规模较大时，在交叉操作基础上引入适度的变异，也能够提高遗传算法的局部搜索效率。变异概率的选取受种群大小、染色体长度等因素影响，若选取较高的变异概率，虽可增加群体的多样性，但可能引起不稳定。变异概率取值通常很小，一般取 0.001-0.1。

(7) 算法终止条件

终止条件是遗传算法能够停止运算得到优化结果的判定标准。通常使用的终止条件有：

- 1) 进化代数作为判定标准：种群中个体的进化代数超过预定值；
- 2) 种群的收敛性作为判定标准：给定一个数 x ，如果在最后的 x 代遗传运算中没有产生更优的解，则认为种群收敛，遗传算法优化结束。

3.2.4 遗传算法的基本流程

遗传算法的基本流程如图 3.1 所示，具体过程如下^[21]：

Step1: 随机产生一定数目的初始种群，每个个体表示为染色体的基因编码；

Step2: 计算个体的适应度，并判断是否符合优化准则，若符合，输出最佳个体及其代表的最优解并结束计算，不符合则转向第 Step3；

Step3: 依据适应度选择再生个体，适应度高的个体被选中的概率高，适应度低的个体被选中的概率低甚至被淘汰；

Step4: 按照一定的交叉概率和交叉方法，生成新的个体；

Step5: 按照一定的变异概率和变异方法，生成新的个体；

Step6: 由交叉和变异产生新一代的种群，返回到 Step2。

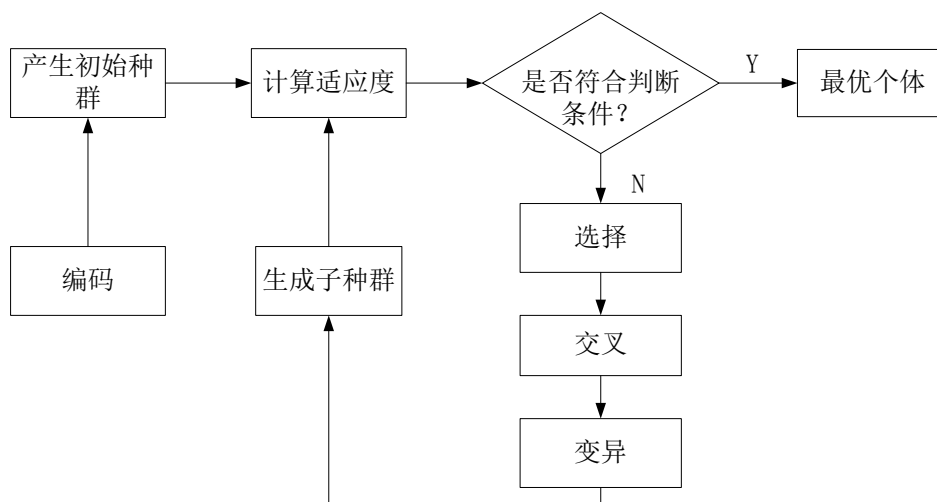


图 3.1 遗传算法流程图

Fig.3.1 The flow chart of genetic algorithm

3.3 基于遗传算法的 AUV 全局路径规划

3.3.1 建立环境模型

要对智能水下机器人进行路径规划，首先需要对其工作空间建立环境模型。本文研究二维环境下的AUV全局路径规划，采用栅格法建立AUV的工作空间模型，在建模前首先做如下假设：

- 1) 不考虑AUV的深度问题，机器人工作空间为二维结构化空间；
- 2) 假设障碍物的位置和大小已知，并且在机器人运动过程中，障碍物的位置和大小都不发生变化；
- 3) 在规划过程中可以把AUV看作质点处理。

栅格法把机器人的工作空间划分成由一系列大小相同的栅格组成的二维结构化空间，它能够十分方便的确定障碍物的位置、大小。建模后的机器人工作空间如图3.2所示，其中没有任何障碍物的叫做自由栅格，有障碍物的叫做障碍物栅格。

图3.2所示的是采用序号标记法表示的 10×10 栅格地图，从工作空间模型的左下角栅格（标记为0）开始计数，每一个栅格对应一个序号，按照从左到右，从上到下的先后顺序逐渐加1，则每一个序号就对应一个栅格，每个序号也都与其直角坐标一一对应。将栅格的序号记为 m ，则其与直角坐标的映射关系为：

$$m = x + 10y \quad (3.7)$$

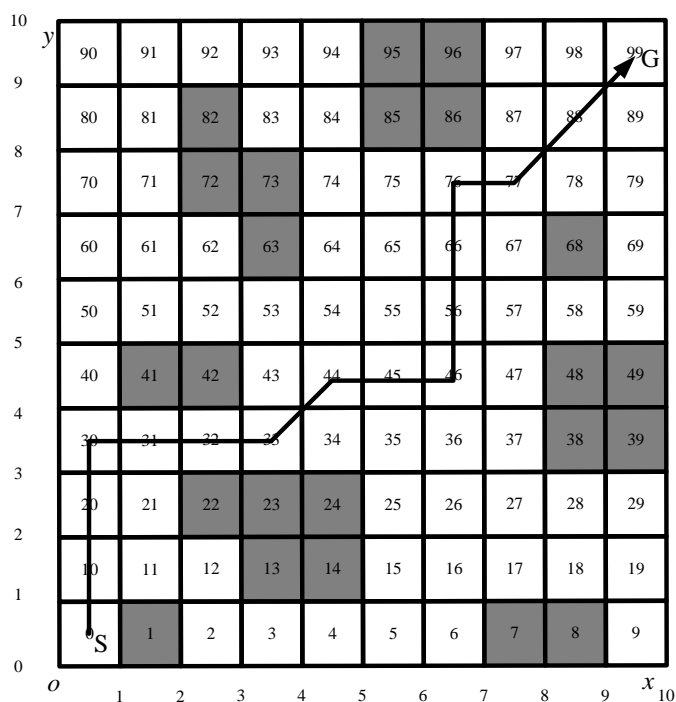


图3.2 序号标记法表示的栅格地图

Fig.3.2 Grid map of the serial number notation

3.3.2 个体编码

在水下机器人工作空间中，路径个体表示为从出发点 S 到目标点 G 的一系列路径点的集合。取路径点的标记序列号作为路径编码，并假定每一条路径中不出现障碍标记序列号和重复的标记序列号。如图 3.2 所示，从起点 S 到终点 G 的一条路径可以表示为 $\{0, 10, 20, 30, \dots, 76, 77, 88, 89\}$ ；用直角坐标形式可表示为 $\{(0,0), (0,1), (0,2), (0,3), \dots, (6,7), (7,7), (8,8), (9,9)\}$ 。这样每条染色体是由一系列的栅格序号连接而成，用其表示一条路径个体。

3.3.3 种群初始化

水下机器人的初始路径产生过程如下：从水下机器人运动起点 S 出发，用一系列随机选择，但不一定连续的自由栅格序号依次连接至终点 G 。水下机器人的起点 S 始终为路径个体的第一个路径点，而终点 G 始终为最后一个路径点。假设种群规模大小为 n ，则初始群体 $P(0)$ 可以表示为：

$$P(0) = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (3.1)$$

其中 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是路径个体，由于水下机器人运动路径可变，个体的长度是不确定的，因此采用可变长度染色体表示。

由于初始种群中每个个体的每个路径点都是随机选取的，因此相邻 2 个路径点的

栅格序号不一定是连续的。栅格序号不连续则意味着该路径个体在水下机器人运动过程中是不存在的、是无效的。可采用如下方法解决栅格序号不连续的问题：对随机产生的 n 个路径个体，在每条染色体每两相邻的序列号之间，根据连续的栅格原则，插入相应的栅格序列号，直到形成一条连续路径为止；如果两序列号本来在栅格地图中的序列号就是连续的，则不需要进行插入。连续的相邻栅格如图 3.3 所示，图中与栅格 N 相邻的有八个栅格，分别是栅格 $N-Nr-1$ 、 $N-Nr$ 、 $N-Nr+1$ 、 $N-1$ 、 $N+1$ 、 $N+Nr-1$ 、 $N+Nr$ 、 $N+Nr+1$ ，其中 Nr 为每行中的最大栅格数目。

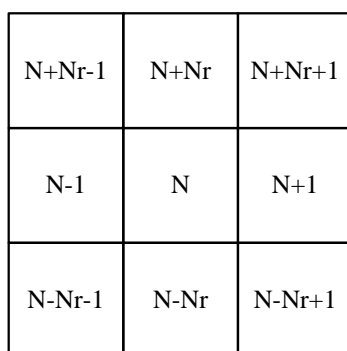


图 3.3 连续的相邻栅格定义

Fig.3.3 The definition of continuous adjacent grids

如果路径个体包含一个或者多个障碍物栅格，则该路径个体也是无效的，可采用如下方法进行路径修复：在路径中删除障碍物栅格，添加路径距离最近的自由栅格形成新的路径个体。如图 3.4 所示，如果存在由自由栅格 A 经过障碍物栅格 N 到自由栅格 B 的路径，则路径修复为 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 。

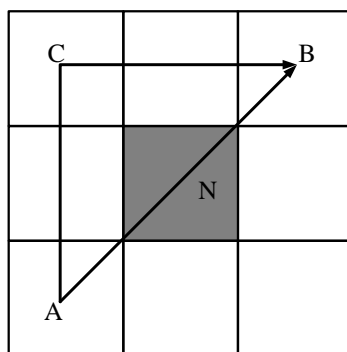


图 3.4 路径修复

Fig.3.4 Path repair

3.3.4 适应度函数

在遗传算法中，个体适应度的大小决定该个体被遗传到下一代群体中的概率，适应度函数的选取直接影响遗传算法的计算效率和计算时间。在水下机器人路径规划过程中，优化路径必须是无碰且最短的有效路径。因此适应度函数的设计应保证路径越

长，适应度越小；路径越短，适应度越大。这样，适应度越大的个体被选择的概率也越大。

参考文献^[27]，适应度函数定义如下：

$$F(p) = 1 / [(1 + \frac{1}{\sqrt{n-1}})d(p)] \quad (3.9)$$

其中 $d(p)$ 为路径长度函数， n 为路径中所包含的栅格的数目。

路径长度函数定义如下：

$$d(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1}) \quad (3.10)$$

其中， $d(p_i, p_{i+1})$ 表示相邻路径点之间的距离。设栅格的尺寸大小为 1，则 $d(p_i, p_{i+1})$ 的取值为 $\sqrt{2}$ 或者 1。

3.3.5 遗传算子

(1) 选择算子

根据各个个体的适应度，采用轮盘赌的方法，从第 $P(t)$ 代种群中依概率选择出一些优良的个体遗传到下一代种群 $P(t+1)$ 中。选择过程中采用最优个体保存策略，把当前群体中适应度最大的个体替换适应度最小的个体。选择算子的具体步骤如下：

Step1: 根据上述适应度函数分别计算每一个个体的累积概率 q_i ：

$$q_i = \frac{\sum_{k=1}^i F(p_k)}{\sum_{j=1}^{\text{Pop_size}} F(p_j)} \quad (3.11)$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, \text{Pop_size}$ ， Pop_size 为种群的大小；

Step2: 在区间 $[0, 1]$ 随机产生 Pop_size 个均匀分布的伪随机数 r_i ；

Step3: 对每一个 r_i ，若 $r_i \leq q_i$ ，则选择第 i 个个体 p_i ，否则选使 $q_{k-1} < r_i \leq q_k$ 成立的第 k 个个体 p_k ，其中 $2 \leq k \leq \text{Pop_size}$ ；

Step4: 将 Step3 中适应度高的个体替换适应度低的个体。

Step5: 重复 Step3 和 Step4，直到得到大小为 Pop_size 的下一代种群 $P(t+1)$ 为止。

(2) 交叉算子

交叉是指把两个父代个体的部分结构替换重组从而生成新个体的操作。本文采用单点和重合点混合的交叉方法对当前群体进行交叉运算。重合点交叉是指以交叉概率 p_c 随机选择一对个体，选择其中栅格序号相同的点进行交叉操作。当重合点不止一个时，随机选择一个重合点进行交叉。若没有重合点，则随机选择交叉点进行单点交叉。

(3) 变异算子

由于所产生的初始路径个体均为连续的路径，若随机选择一个点进行变异操作可能会产生路径间断点，从而使得可行路径变异后所得到的新路径为不可行路径。因此必须在保证路径连续性的前提下进行变异操作。本文采用的变异算子具体过程如下：

- 1) 以变异概率 p_m 从种群中随机挑选出待变异的个体；
- 2) 从待变异个体中随机选取一个栅格并将该栅格删除，从而路径被分为前、后两段；
- 3) 以前半段路径的终点栅格作为路径起点，以后半段路径中任一栅格作为路径终点，然后按照种群初始化的方法，将两段被断的路径连接起来形成连续无障碍物的路径，最后便形成了新一代种群的个体。

(4) 删除算子

执行遗传操作的时候，个体中可能产生相同的序列号，为此引入删除算子删除相同的序列号，这样能够简化路径的搜索，大大提高算法的运算效率。

3.3.6 终止条件

设置最大进化代数为50代，作为遗传算法的终止条件。50代后遗传算法终止，若此时算法仍未收敛到全局最优解，则选取其中适应度最高的个体作为全局最优解。

3.3.7 基于遗传算法的 AUV 路径规划算法

综上所述，采用改进的遗传算法对 AUV 进行路径规划的具体操作步骤如下：

Step1: 设置种群大小 Pop_size 、交叉概率 p_c 和变异概率 p_m ，进化代数 t 初始化为 0，随机生成初始种群 $P(0)$ ，如果生成的路径个体不连续或者路径包含障碍物栅格，则对路径进行修复；

Step2: 计算初始种群 $P(0)$ 中各路径个体的适应度；

Step3: 对现有种群进行如下操作，直到生成下一代新的种群：

- (1) 根据定义的选择算子，选择 Pop_size 个个体，并将当前种群中适应度最大的个体替换适应度最小的个体，从而得到适应度更好的种群；
- (2) 根据定义的交叉算子，以交叉概率 p_c 进行交叉操作。执行删除算子，删除进行交叉操作后路径个体可能产生的相同路径。
- (3) 根据定义的变异算子，以变异概率 p_m 进行变异操作。

Step4: 经过遗传操作生成新的种群 $P(t)$ ，计算每个个体的适应度。

Step5: 判断是否出现新的最优个体，如果有，则记录为当前最优个体，如果没有则执行 **Step6**。

Step6: 判断是否满足遗传算法的终止条件，如果不满足的话，令 $t = t + 1$ ，跳到

Step3 继续进行进化；如果满足的话，结束遗传算法，输出最优路径。

3.4 AUV 路径规划仿真结果与分析

假定 AUV 的工作环境如图 3.5 所示，工作空间为 40×30 的栅格，障碍物位置、大小都是已知的，并且位置、大小不会发生变化。因此，AUV 的路径规划问题描述为：在栅格化的环境模型下，寻找一条从起始点 $S(0,0)$ 出发，避开障碍物并到达终止点 $G(40,30)$ 的路短路径。

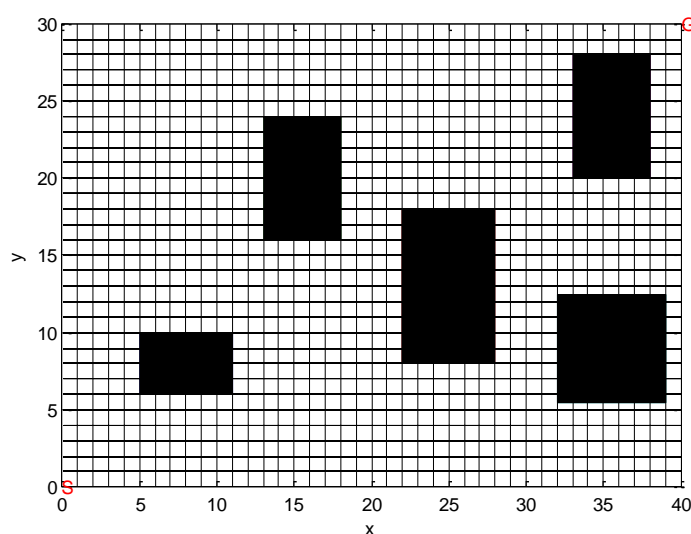


图 3.5 AUV 的工作环境

Fig.3.5 Work environment of AUV

为了验证本文采用的遗传算法的有效性，在 MATLAB 环境下对静态环境下 AUV 的全局路径规划进行了仿真实验。仿真实验中设置如下参数：初始种群大小 $Pop_size = 30$ ，交叉概率 $p_c = 0.6$ ，变异概率 $p_m = 0.01$ ，最大进化代数为 50 代。经过仿真，得到进化 10 代、30 代和 50 代的最优路径，如图 3.6~图 3.8 所示。进化代数和最优路径的长度之间的关系，如图 3.9 所示。

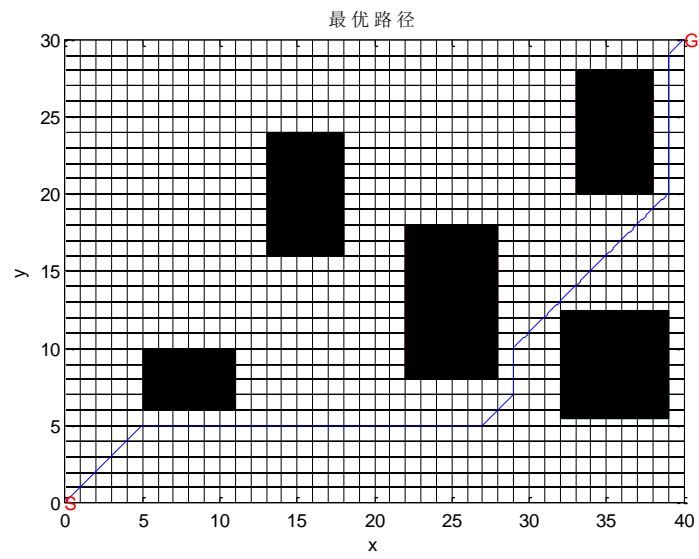


图 3.6 进化 10 代得到最优路径
Fig.3.6 optimal path got in the 10th generation

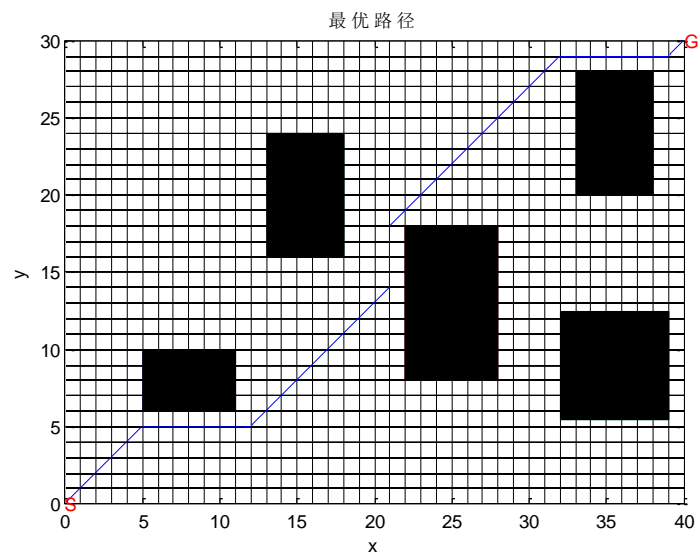


图 3.7 进化 30 代得到最优路径
Fig.3.7 optimal path got in the 30th generation

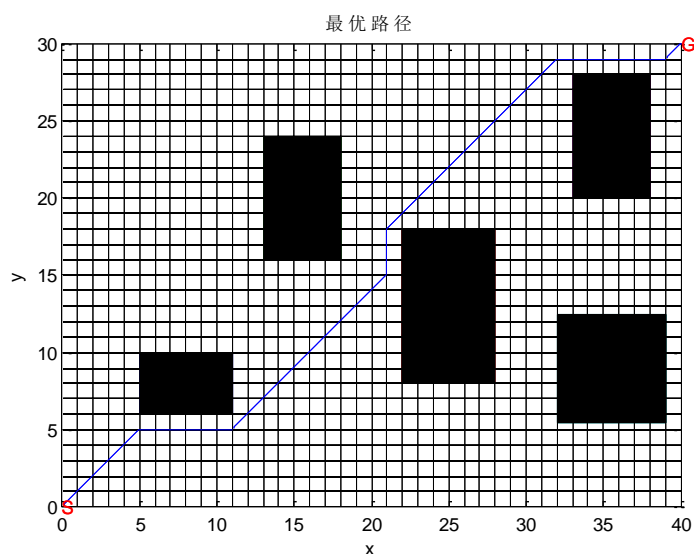


图 3.8 进化 50 代得到最优路径

Fig.3.8 optimal path got in the 50th generation

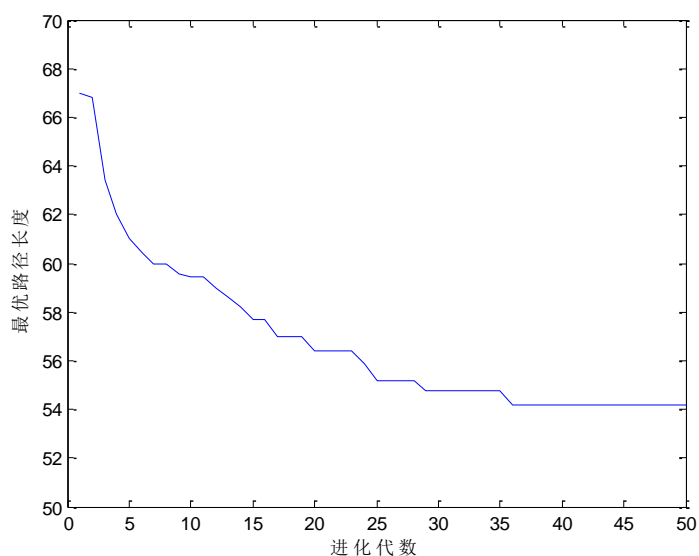


图 3.9 进化代数和最优路径长度关系图

Fig.3.9 The diagram of evolution generation and optimal path length

由图 3.6~3.8 可知,在第 30 代所得到的最优路径和第 50 代所得到的最优路径长度相差不大,而第 10 代的最优路径长度明显大于第 30 代和第 50 代的路径长度,这说明遗传算法能够保留适应度较大的个体。由如图 3.9 可知,随着进化代数的增加,路径的长度越来越小,最后稳定于一个固定值,这个值也就是最短路径的长度,这说明随着进化代数的增加遗传算法能够逐步收敛到全局最优解。由此可知,本文采用的遗传算法是有效的,遗传算法用于 AUV 的路径规划是可行的。

3.5 本章小结

本章首先介绍了遗传算法的基本概念，包括遗传算法的基本思想、构成要素和基本流程等。然后阐述了基于遗传算法的 AUV 路径规划的实现过程。采用栅格法描述 AUV 的工作环境，介绍了编码方式和初始种群生成，并设计了选择、交叉、变异、删除等遗传算子。最后对提出的遗传算法进行了仿真验证，仿真结果表明该算法能够搜索到最短的路径，该算法用于 AUV 的路径规划是可行的。

第 4 章 水下机器人的动力学模型

4.1 引言

水下机器人是一个复杂的非线性动力学系统，其数学模型是部分未知的，并受外界环境和自身状态变化的影响。为了研究水下机器人的运动和建立水下机器人运动控制系统，必须建立水下机器人的动力学模型。模型的建立需要确定水下机器人的空间运动坐标系和运动参数，再对运动时所受到的水动力等进行分析，以得到水下机器人的动力学方程。

4.2 坐标系与机器人运动参数

本文根据国际水池会议（ITTC）推荐的和造船与轮机工程学会（SNAME）术语公报的体系，建立如图 4.1 所示两种右手直角坐标系，分别为固定坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ （简称定系）和运动坐标系 $o-xyz$ （简称动系）。

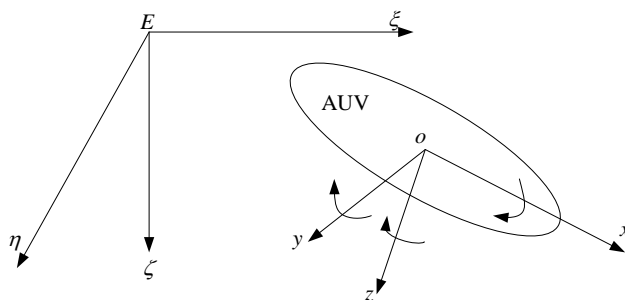


图 4.1 固定坐标系和运动动坐标系

Fig.4.1 Fixed coordinate system and motional coordinate system

定系 $E-\xi\eta\zeta$ ：固定坐标系是水下机器人做空间运动的惯性参考系。坐标系的原点 E 取海面上一固定点， $E\zeta$ 轴的正向指向地心， $E\eta$ 和 $E\xi$ 轴在水平面内垂直，一般习惯上取 $E\xi$ 轴指向大地北向， $E\eta$ 轴指向大地东向。

动系 $o-xyz$ ：运动坐标系是固定于水下机器人载体上的坐标系，所以又称载体坐标系，是非惯性坐标系。动坐标系的坐标原点可以任取水下机器人上的一点，一般取在机器人的重心 G 处，纵轴 ox 平行于载体的对称轴指向其艏部，横轴 oy 平行于基面指向水下机器人的右舷，垂轴 oz 根据右手定则确定出指向水下载体底部。

水下机器人六个自由度在固定坐标系和运动坐标系下的运动和力(矩)。在固定坐标系中,作用于载体上的合力投影到 ξ 、 η 和 ζ 轴上为 F_ξ 、 F_η 、 F_ζ ;作用于载体上的合力矩在 ξ 、 η 和 ζ 轴上的投影为 T_ξ 、 T_η 、 T_ζ ;水下机器人的速度 V 在 ξ 、 η 和 ζ 轴上的投影为 V_ξ 、 V_η 、 V_ζ ,角速度的投影为 Ω_ξ 、 Ω_η 、 Ω_ζ 。

运动坐标系的原点速度在各坐标轴上的投影为 u 、 v 、 w ,角速度在各轴上的投影为 p 、 q 、 r ,力的投影分量分别为纵向力 X ,横向力 Y ,垂向力 Z 。力矩的投影分量为横摇力矩 K 、纵倾力矩 M 、艏摇力矩 N ,如表4.1所示。

表4.1 运动坐标系的符号表示

Table 4.1 symbolic representation of motional coordinated system

向量	x 轴	y 轴	z 轴
速度	u	v	w
角速度	p	q	r
力	X	Y	Z
力矩	K	M	N

4.3 空间运动与坐标变换

水下机器人的运动可以看作刚体在液体中的运动,因此可由运动坐标系表示为沿三个轴的平移和绕三个轴的旋转,是六个自由度的运动,各个方向上的运动名称如表4.2所示。

表4.2 载体各方向运动名称

Table 4.2 Name of the motion

	x 轴	y 轴	z 轴
平移	进退	横移	升沉
转动	横摇	纵倾	艏摇

水下机器人的空间位置和姿态,可用动系原点在定系的坐标值 (ξ_o, η_o, ζ_o) 和动系相对于定系的三个姿态角 (ψ, θ, φ) 来确定。首先假定动系 $o-xyz$ 与定系 $E-\xi\eta\zeta$ 重合,则各姿态角分别存在时可按如下定义:艏向角 ψ 是机器人纵中剖面 xoz 绕铅垂轴 oz 水平旋转,与铅垂面 $\xi E \zeta$ 的夹角在定系水平面的投影;纵倾角 θ 是机器人的水平面 xoy 绕 oy 轴纵倾与定系水平面 $\xi E \eta$ 的夹角在定系铅垂面 $\xi E \zeta$ 的投影;横倾角 φ 是机器人的纵中剖面 xoz 绕 ox 轴横倾与定系铅垂面 $\xi E \zeta$ 的夹角在横滚面 $\eta E \zeta$ 的投影,同时规定: ψ 向右转为正, θ 向后倾为正, φ 向右倾为正。

固定坐标系通过三次旋转可与运动坐标系重合,即达到使 E 和 o 重合的目的。第一次:绕 $o\zeta$ 轴旋转艏向角 ψ ,第二次:绕新的 oy 轴旋转纵倾角 θ ,第三次:绕 ox 轴旋

转横倾角 φ 后, 则有:

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

简记为:

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

其中, \mathbf{T} 为旋转矩阵。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

式(4.4)的逆变换为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

由于固定坐标系和运动坐标系都是正交坐标系, 所以其相互变换的变换阵必为正交矩阵, 则有 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$ 。

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.4 水下机器人的运动方程

4.4.1 平移运动三方程

在固定坐标系下, 由动量定理, 刚体的动量变化率与其所受到的合外力相等, 用公式表示为:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \mathbf{F}_\Sigma \quad (4.5)$$

其中 $\mathbf{K} = m\mathbf{V}_G$ 表示刚体的动量, m 表示刚体的质量, \mathbf{V}_G 表示刚体的重心速度。

以上是在固定坐标系下得到的一般向量关系式。向运动坐标系投影时, 就得到其在运动坐标系下的关系。在水下机器人上建立一个运动坐标系, 假定重心的位置向量

为 $\mathbf{R}_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ 。则重心速度与原点速度之间的关系为:

$$\mathbf{V}_G = \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G \quad (4.7)$$

则动量为:

$$\mathbf{K} = m\mathbf{V}_G = m\mathbf{V} + m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G \quad (4.6)$$

对上式求导可得:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} + m \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_G + \boldsymbol{\Omega} \times (m\mathbf{V} + m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G) \quad (4.7)$$

整理式(4.8)可得:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = m \left[\frac{d\mathbf{V}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_G + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G) \right] = \mathbf{F}_\Sigma \quad (4.9)$$

式中: m —水下机器人的质量;

\mathbf{V} —水下机器人动坐标系原点的速度;

$\boldsymbol{\Omega}$ —水下机器人的角速度;

\mathbf{R}_G —水下机器人重心在运动坐标系下的位置向量;

\mathbf{F}_Σ —水下机器人所受外力。

在式(4.10)中, $m \frac{d\mathbf{V}}{dt}$ 表示直线运动的惯性力, $m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}$ 表示曲率运动时的离心惯性力; 而后两项是由于原点不在重心而产生的惯性力, $m \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_G$ 表示切向惯性力, $m\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G)$ 表示离心惯性力。

把式(4.10)在运动坐标系下展开, 即把各向量向运动坐标系的三个坐标轴投影, 可得到

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}]^T \quad (4.10)$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} = [qw - vr, ur - pw, pv - uq]^T \quad (4.12)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_G = [z_G \dot{q} - y_G \dot{r}, x_G \dot{r} - z_G \dot{p}, y_G \dot{p} - x_G \dot{q}]^T \quad (4.11)$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G) = \begin{bmatrix} (y_G p - x_G q)q - (x_G r - z_G p)r \\ (z_G p - y_G r)r - (y_G p - x_G q)p \\ (x_G r - z_G p)p - (z_G q - y_G r)q \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

将以上各式代入式(4.10)并展开, 可以得到水下机器人在动坐标系下沿着三个轴方向的平移运动方程:

$$m[\dot{u} + wq - vr - x_G(\dot{q}^2 + \dot{r}^2) + y_G(p\dot{q} - \dot{r}) + z_G(q - pr)] = X \quad (4.15)$$

$$m[\dot{v} + ur - pw + x_G(p\dot{q} + \dot{r}) - y_G(\dot{p}^2 + \dot{r}^2) + z_G(qr - \dot{p})] = Y \quad (4.16)$$

$$m[w + pv - uq + x_G(pr - q) + y_G(p + rq) - z_G(p^2 + q^2)] = Z \quad (4.17)$$

4.4.2 旋转运动三方程

在固定坐标系下，由动量矩定理可知，刚体对原点动量矩的变化率与瞬时合外力对原点的矩相等，即

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{T}_\Sigma \quad (4.13)$$

其中， \mathbf{H} 表示刚体对原点的动量矩， \mathbf{T}_Σ 表示合外力对原点的力矩。

以上是固定坐标系下得到的一般关系式。

又由刚体对原点（原点不在重心上）的总动量矩可表示为：

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_G \times m\mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} \quad (4.14)$$

将式(4.14)代入式(4.13)可得：

$$\frac{d(\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega})}{dt} + \mathbf{R}_G \times \frac{d(m\mathbf{V})}{dt} = \mathbf{T}_\Sigma \quad (4.15)$$

根据刚体动量矩求导公式可得到：

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{R}_G \times m\mathbf{V}) + \mathbf{R}_G \times m \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \mathbf{V} (m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G) = \mathbf{T}_\Sigma \quad (4.16)$$

根据向量变换关系：

$$\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{R}_G \times m\mathbf{V}) + m\mathbf{V} (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_G) = \mathbf{R}_G \times (\boldsymbol{\Omega} \times m\mathbf{V}) \quad (4.17)$$

所以可得到水下机器人空间运动方程旋转方程的向量形式：

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}) + \mathbf{R}_G \times m \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \mathbf{R}_G \times (\boldsymbol{\Omega} \times m\mathbf{V}) = \mathbf{T}_\Sigma \quad (4.18)$$

式中： m —水下机器人的质量；

\mathbf{V} —水下机器人动坐标系原点的速度；

\mathbf{R}_G —水下机器人重心在运动坐标系下的位置向量；

\mathbf{I} —水下机器人对原点不在重心的坐标系的惯量矩阵；

$\boldsymbol{\Omega}$ —水下机器人的角速度；

\mathbf{T}_Σ —水下机器人所受外力合力对原点的力矩。

在式(4.18)中， $\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt}$ 表示旋转运动惯性力矩， $\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega})$ 表示对转动轴不平衡旋转惯

性力矩；后两项是由于原点不在重心而导致的惯性力矩， $\mathbf{R}_G \times m \frac{d\mathbf{V}}{dt}$ 表示与直线运动

相关的惯性力矩， $\mathbf{R}_G \times (\boldsymbol{\Omega} \times m\mathbf{V})$ 表示与离心运动相关的惯性力矩。

上式中惯量矩阵 \mathbf{I} 表示为：

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

其中:

$$\begin{cases} I_{xx} = \sum m_i (y_i^2 + z_i^2) = \iiint \rho (y^2 + z^2) dx dy dz \\ I_{yy} = \sum m_i (z_i^2 + x_i^2) = \iiint \rho (z^2 + x^2) dx dy dz \\ I_{zz} = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) = \iiint \rho (x^2 + y^2) dx dy dz \\ I_{xy} = I_{yx} = \sum m_i x_i y_i = \iiint \rho xy dx dy dz \\ I_{yz} = I_{zy} = \sum m_i y_i z_i = \iiint \rho yz dx dy dz \\ I_{zx} = I_{xz} = \sum m_i z_i x_i = \iiint \rho zx dx dy dz \end{cases}$$

将式(4.23)在运动坐标系下展开, 其左端为:

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}) = \begin{bmatrix} (I_{zx}p + I_{zy}q + I_{zz}r)q - (I_{yx}p + I_{yy}q + I_{yz}r)r \\ (I_{xx}p + I_{xy}q + I_{xz}r)r - (I_{zx}p + I_{zy}q + I_{zz}r)p \\ (I_{yx}p + I_{yy}q + I_{yz}r)p - (I_{xx}p + I_{xy}q + I_{yz}r)q \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{R}_G \times (\boldsymbol{\Omega} \times m\mathbf{V}) = m \begin{bmatrix} y_G(pv - qu) + z_G(pw - ru) \\ z_G(qw - rv) + x_G(qu - pv) \\ x_G(ru - pw) + y_G(rv - qw) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\mathbf{R}_G \times (m \frac{d\mathbf{V}}{dt}) = m \begin{bmatrix} y_G w - z_G v \\ z_G u - x_G w \\ x_G v - y_G u \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

由于运动坐标系是与水下机器人艇体惯性主轴重合的, 所以有 $I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$, 记 $I_x = I_{xx}$ 、 $I_y = I_{yy}$ 、 $I_z = I_{zz}$ 表示水下机器人的质量 m 对坐标轴 ox 、 oy 、 oz 的转动惯量。则有:

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} = \begin{bmatrix} I_x \dot{p} \\ I_y \dot{q} \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}) = \begin{bmatrix} (I_z - I_y)qr \\ (I_x - I_z)pr \\ (I_y - I_x)pq \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

将以上各式代入式(4.22)，可得到水下机器人在动坐标系下绕三个轴旋转的旋转运动方程：

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(w + pv - qu) + z_G(pw - ru - v)] = K \quad (4.23)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr + m[z_G(u + qw - rv) + x_G(qu - pv - w)] = M \quad (4.32)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(v + ru - pw) + y_G(rv - qw - u)] = N \quad (4.33)$$

4.4.3 六自由度空间运动方程

由以上动量定理和动量矩定理的推导，可得到水下机器人的六自由度空间运动方程。

$$\begin{cases} m[u + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - r) + z_G(q - pr)] = X \\ m[v + ur - pw + x_G(pq + r) - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - p)] = Y \\ m[w + pv - uq + x_G(pr - q) + y_G(p + rq) - z_G(p^2 + q^2)] = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(w + pv - qu) + z_G(pw - ru - v)] = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr + m[z_G(u + qw - rv) + x_G(qu - pv - w)] = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(v + ru - pw) + y_G(rv - qw - u)] = N \end{cases} \quad (4.34)$$

4.5 水下机器人所受合外力

智能水下机器人在水中所受到的合外力（矩）大致可分成三类：第一类是作用在水下机器人上的水动力。水下机器人在水中运动，艇体、舵、翼和螺旋桨等推动周围的水产生运动，同时，水对机器人本体也产生反作用力。这种由于水下机器人运动而引起运动的水对机器人本体的反作用力称为水动力。一般情况下，机器人受到的水动力与机器人载体特性、运动特性和流体特性有关。第二类是非流体动力，又称为静力，包括水下机器人所受的重力和浮力。第三类是水下机器人运动时执行机构产生的合推

力,包括:推力器推力、舵的力、翼的力。此外,风、浪、流等也会对水下机器人产生外界环境干扰力。

对于水下机器人舰体水动力,根据准定常运动假设,舰体水动力是运动参数 u 、 v 、 w 、 p 、 q 、 r 、 \dot{u} 、 \dot{v} 、 \dot{w} 、 \dot{p} 、 \dot{q} 、 \dot{r} 的函数。在基准点(通常以速度 V_0 作匀速直航)将水下机器人舰体水动力 X_H 、 Y_H 、 Z_H 、 K_H 、 M_H 、 N_H 作泰勒展开,略去高阶项,速度只取到二阶,加速度项只取线性项,并参考文献[40],可以对艇体水动力作相应的简化,最后得到如下的水下机器人的艇体水动力表达式:

$$X_H = [X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rp}rp] + [X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{vr}vr + X_{wp}wq] + [X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2] \quad (4.24a)$$

$$Y_H = [Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{p}}\dot{p} + Y_{p|p}|p| + Y_{pq}pq + Y_{qr}qr] + [Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{vq}vq + Y_{wp}wp + Y_{wr}wr] \\ + [Y_{ur}ur + Y_{up}up + Y_{v|r} \frac{v}{|v|} |(v^2 + w^2)^{1/2} |r|] + [Y_0u^2 + Y_vuv + Y_{v|v}|v| |(v^2 + w^2)^{1/2} |] + Y_{vw}vw \quad (4.35b)$$

$$Z_H = [Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{pp}p^2 + Z_{rr}r^2 + Z_{rp}rp] + [Z_{\dot{q}}uq + Z_{w|q} \frac{w}{|w|} |(v^2 + w^2)^{1/2} |q|] + [Z_{\dot{w}}\dot{w} \\ + Z_{vr}vr + Z_{vp}vp] + [Z_0u^2 + Z_wuw + Z_{w|w}|w| |(v^2 + w^2)^{1/2} |] \\ + [Z_{|w|}u|w| + Z_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{1/2} |] + Z_{vv}v^2 \quad (4.25c)$$

$$K_H = [K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{r}}\dot{r} + K_{qr}qr + K_{pq}pq + K_{p|p}|p|] + [K_{p\dot{u}}\dot{u} + K_{r\dot{u}}\dot{u} + K_{\dot{v}}\dot{v}] \\ + [K_{vq}vq + K_{wp}wp + K_{wr}wr] + [K_0u^2 + K_vuv + K_{v|v}|v| |(v^2 + w^2)^{1/2} |] + K_{vw}vw \quad (4.26d)$$

$$M_H = [M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{pp}p^2 + M_{rr}r^2 + M_{rp}rp + M_{q|q}q|q|] + [M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{vr}vr + M_{vp}vp] \\ + [M_{\dot{q}}uq + M_{|w|q} |(v^2 + w^2)^{1/2} |q|] + [M_0u^2 + M_wuw + M_{w|w}|w| |(v^2 + w^2)^{1/2} |] \\ + [M_{|w|}u|w| + M_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{1/2} |] + M_{vv}v^2 \quad (4.35e)$$

$$N_H = [N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{\dot{p}}\dot{p} + N_{pq}pq + N_{qr}qr + N_{r|r}|r|] + [N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{wr}wr + N_{wp}wp + N_{vq}vq] \\ + [N_{p\dot{u}}\dot{u} + N_{r\dot{u}}\dot{u} + N_{v|r} |(v^2 + w^2)^{1/2} |r|] + [N_0u^2 + N_vuv + N_{v|v}|v| |(v^2 + w^2)^{1/2} |] + N_{vw}vw \quad (4.35f)$$

式中 $X_{\dot{u}}$ 、 X_{uu} 、 Y_v 、 $Y_{\dot{v}}$ 等均为艇体水动力系数,它们都是已知的,一般通过试验获得。

将舰体水动力的表达式代入到式(4.34)中,并将除艇体水动力之外的力表示成^[6]:

$$\mathbf{F}_{else} = [X_{else}, Y_{else}, Z_{else}, K_{else}, M_{else}, N_{else}]^T$$

考虑到水下机器人舰体一般都左右对称,一般认为有 $y_G = 0$,所以得到如下的水下机器人六自由度空间运动方程:

$$m[u + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G(q - pr)] = [X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rp}rp] \\ + [X_u u + X_{vr}vr + X_{wp}wq] + [X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2] + X_{else} \quad (4.36a)$$

$$m[v + ur - pw + x_G(pq + r) + z_G(qr - p)] = [Y_r r + Y_p p + Y_{p|p}|p| + Y_{pq}pq + Y_{qr}qr] \\ + [Y_v v + Y_{vq}vq + Y_{wp}wp + Y_{wr}wr] + [Y_r ur + Y_p up + Y_{v|r}|v| (v^2 + w^2)^{1/2} |r|] \\ + [Y_0 u^2 + Y_v uv + Y_{v|v}|v| (v^2 + w^2)^{1/2}] + Y_{vw}vw + Y_{else} \quad (4.36b)$$

$$m[w + pv - uq + x_G(pr - q) - z_G(p^2 + q^2)] = [Z_q q + Z_{pp}p^2 + Z_{rr}r^2 + Z_{rp}rp] \\ + [Z_w w + Z_{vr}vr + Z_{vp}vp] + [Z_q uq + Z_{w|q}|w| (v^2 + w^2)^{1/2} |q|] + [Z_0 u^2 + Z_w uw \\ + Z_{w|w}|w| (v^2 + w^2)^{1/2}] + [Z_{|w|}u|w| + Z_{ww}|w| (v^2 + w^2)^{1/2}] + Z_{vv}v^2 + Z_{else} \quad (4.36c)$$

$$I_x p + (I_z - I_y)qr + m z_G(pw - ru - v) = [K_p p + K_r r + K_{qr}qr + K_{pq}pq + K_{p|p}|p|] \\ + [K_p up + K_r ur + K_v v] + [K_{vq}vq + K_{wp}wp + K_{wr}wr] + [K_0 u^2 + K_v uv \\ + K_{v|v}|v| (v^2 + w^2)^{1/2}] + K_{vw}vw + K_{else} \quad (4.36d)$$

$$I_y q + (I_x - I_z)pr + m[z_G(u + qw - rv) + x_G(qu - pv - w)] = [M_q q + M_{pp}p^2 + M_{rr}r^2 \\ + M_{rp}rp + M_{q|q}|q|] + [M_w w + M_{vr}vr + M_{vp}vp] + [M_q uq + M_{w|q}|w| (v^2 + w^2)^{1/2} |q|] \\ + [M_0 u^2 + M_w uw + M_{w|w}|w| (v^2 + w^2)^{1/2}] + [M_{|w|}u|w| + M_{ww}|w| (v^2 + w^2)^{1/2}] \\ + M_{vv}v^2 + M_{else} \quad (4.36e)$$

$$I_z r + (I_y - I_x)pq + m x_G(v + ru - pw) = [N_r r + N_p p + N_{pq}pq + N_{qr}qr + N_{r|r}|r|] \\ + [N_v v + N_{wr}wr + N_{wp}wp + N_{vq}vq] + [N_p up + N_r ur + N_{v|r}|v| (v^2 + w^2)^{1/2} |r|] \\ + [N_0 u^2 + N_v uv + N_{v|v}|v| (v^2 + w^2)^{1/2}] + N_{vw}vw + N_{else} \quad (4.36f)$$

4.6 状态矩阵方程

为了对水下机器人进行运动控制，便于设计控制器，需要把已建立的水下机器人空间运动方程转换为状态矩阵方程的表达形式。转换过程如下：

将上式(4.36)中的所有惯性水动力项移到等式左端，所有的非惯性水动力移到方

程(4.36)的右端，并将右端非惯性水动力表示成：

$$\mathbf{F}_{vis} = [X_{vis}, Y_{vis}, Z_{vis}, K_{vis}, M_{vis}, N_{vis}]^T$$

其中：

$$\begin{aligned} X_{vis} = & -m[wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G pr] + [X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rp}rp] \\ & + [X_{vr}vr + X_{wp}wq] + [X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2] \end{aligned} \quad (4.37a)$$

$$\begin{aligned} Y_{vis} = & -m[ur - pw + x_G pq + z_G qr] + [Y_{p|p|}p|p| + Y_{pq}pq + Y_{qr}qr] \\ & + [Y_{vq}vq + Y_{wp}wp + Y_{wr}wr] + [Y_rur + Y_pup + Y_{v|r|}\frac{v}{|v|}|(v^2 + w^2)^{1/2}|r|] \\ & + [Y_0u^2 + Y_vuv + Y_{v|v|}v|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + Y_{vw}vw \end{aligned} \quad (4.37b)$$

$$\begin{aligned} Z_{vis} = & -m[pv - uq + x_G pr - z_G(p^2 + q^2)] + [Z_{pp}p^2 + Z_{rr}r^2 + Z_{rp}rp] \\ & + [Z_{vr}vr + Z_{vp}vp] + [Z_{qu}uq + Z_{w|q|}\frac{w}{|w|}|(v^2 + w^2)^{1/2}|q|] + [Z_0u^2 + Z_wuw \\ & + Z_{w|w|}w|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + [Z_{|w|}u|w| + Z_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + Z_{vv}v^2 \end{aligned} \quad (4.37c)$$

$$\begin{aligned} K_{vis} = & -(I_z - I_y)qr - mz_G(pw - ru) + [K_{qr}qr + K_{pq}pq + K_{p|p|}p|p|] \\ & + [K_pup + K_rur] + [K_{vq}vq + K_{wp}wp + K_{wr}wr] + [K_0u^2 + K_vuv \\ & + K_{v|v|}v|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + K_{vw}vw \end{aligned} \quad (4.37d)$$

$$\begin{aligned} M_{vis} = & -(I_x - I_z)pr - m[z_G(qw - rv) + x_G(qu - pv)] \\ & + [M_{pp}p^2 + M_{rr}r^2 + M_{rp}rp + M_{q|q|}q|q|] + [M_{vr}vr + M_{vp}vp] \\ & + [M_{qu}uq + M_{|w|q}|w|(v^2 + w^2)^{1/2}|q|] + [M_0u^2 + M_wuw \\ & + M_{w|w|}w|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + [M_{|w|}u|w| + M_{ww}|w|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + M_{vv}v^2 \end{aligned} \quad (4.27e)$$

$$\begin{aligned} N_{vis} = & -(I_y - I_x)pq - m[x_G(ru - pw) + [N_{pq}pq + N_{qr}qr + N_{r|r|}r|r|] \\ & + [N_{wr}wr + N_{wp}wp + N_{vq}vq] + [N_pup + N_rur + N_{v|r|}v|(v^2 + w^2)^{1/2}|r|] \\ & + [N_0u^2 + N_vuv + N_{v|v|}v|(v^2 + w^2)^{1/2}|] + N_{vw}vw \end{aligned} \quad (4.37f)$$

记 $\boldsymbol{\gamma} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ ，则 $\boldsymbol{\gamma} = [u, v, w, p, q, r]^T$ ，则可将式(4.36)转换为矩阵形式：

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{F}_{vis} + \mathbf{F}_{else} \quad (4.28)$$

其中：

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\square u} & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\square v} & 0 & -mz_G - Y_{\square p} & 0 & mx_G - Y_{\square r} \\ 0 & 0 & m - Z_{\square w} & 0 & -mx_G - Z_{\square q} & 0 \\ 0 & -mz_G - K_{\square v} & 0 & I_x - K_{\square p} & 0 & -K_{\square r} \\ mz_G & 0 & -mx_G - M_{\square w} & 0 & I_y - M_{\square q} & 0 \\ 0 & mx_G - N_{\square v} & 0 & -N_{\square p} & 0 & I_z - N_{\square r} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

\mathbf{F}_{vi} 为非惯性水动力, \mathbf{F}_{else} 包括推力器推力、舵的力、翼的力、重力与浮力的合力及外界环境干扰力等。假设水下机器人自身是静力平衡的, 重力与浮力相互抵消, 并认为风、浪、流等外界环境产生的干扰力对水下机器人的运动影响很小。所以 \mathbf{F}_{else} 就是推力器推力、舵的力、翼的力。

\mathbf{F}_{else} 用 $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, Z, K, M, N]$ 表示, 代入式(4.29)可得:

$$\mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{F}_{vis} + \boldsymbol{\tau} \quad (4.40)$$

惯性矩阵 \mathbf{M} 是非奇异的, 则得到:

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_{vis} + \boldsymbol{\tau}) \quad (4.41)$$

式(4.41)就是水下机器人的六自由度空间运动方程的状态矩阵表达形式。此方程适用的前提条件是: 重力与浮力已取得均衡, 外界环境干扰力很小。

4.7 本章小结

本章主要对水下机器人进行了动力学分析, 给出了描述水下机器人运动所用的坐标系和运动参数, 然后分析了水下机器人的受力情况, 并给出了水下机器人在静水条件下简化的六自由度空间运动方程。最后为了便于控制器的设计, 将空间运动方程转换为状态矩阵的表达形式。

第5章 滑模变结构控制理论基础

5.1 引言

智能水下机器人是一个具有高度非线性、时变性和强耦合性的系统，要对其进行精确的数学建模并进行控制是极其困难且不可能实现的。第四章我们已经建立了简化的机器人的数学模型，要达到较好的控制效果，所采用的控制方法需要摆脱对精确数学模型的依赖。滑模变结构控制其滑动模态具有对系统内部参数变化、不确定性以及外部干扰的完全鲁棒性，因而滑模变结构控制对解决 AUV 复杂的控制问题非常有效，因此，本文采用滑模变结构控制算法对智能水下机器人的运动控制进行研究。本章将根据设计滑模变结构控制系统的需要，对滑模变结构控制的基础理论进行介绍。

5.2 滑模变结构控制的定义

5.2.1 滑动模态的定义

滑模变结构控制通过切换开关来改变系统在切换面两侧的结构，把 $s(\mathbf{x})$ 称为切换函数， $s(\mathbf{x})=0$ 称为切换面^[43]。

对于一般非线性控制系统：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R} \quad (5.1)$$

其中， $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 是系统的状态向量， $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 是控制向量。在系统的状态空间中，有一个切换面 $s(\mathbf{x}, t) = s(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ ，它将状态空间分为了 $s > 0$ 和 $s < 0$ 这上、下两个部分。在切换面 $s(\mathbf{x}) = 0$ 上的运动点总共有三种情况，分别为通常点、起始点和终止点，各自对应图 5.1 中的 A、B 和 C 三类点。

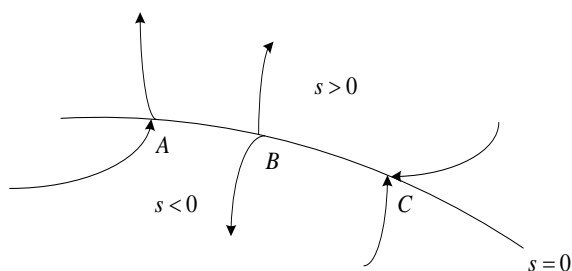


图 5.1 切换面上三种点的特性

Fig.5.1 Characteristics of three points on the switch surface

通常点：当系统的运动点运动到切换面 $s = 0$ 附近时，穿过此点而过点 A 。

起始点：当系统的运动点运动到切换面 $s = 0$ 附近时，从切换面的两边离开点 B 。

终止点：当系统的运动点运动到切换面 $s = 0$ 附近时，从切换面两侧趋于点 C 。

在滑模变结构中，通常点与起始点无多大意义，而终止点却有特殊的意义。如果在切换面的某一区域内运动的所有点都是终止点，则一旦运动点趋近于该区域，就会被“吸引”到该区域运动。此时称在切换面 $s = 0$ 上运动的所有点均是终止点的区域为滑动模态区。系统在滑动模态区的运动就叫做滑模运动。

5.2.2 滑动模态的存在和到达条件

滑动模态存在条件的成立是滑动模态控制应用的前提。如果系统的初始点 $\mathbf{x}(0)$ 不在 $s = 0$ 附近，而是在状态空间的任意位置，此时要求系统的运动必须趋向于切换面 $s = 0$ ，系统必须满足可达性条件，否则系统无法启动滑模控制。

按照滑动模态区上的点都必须是终止点这一要求，当运动点运动到切换面 $s = 0$ 的附近时，有

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} s < 0 \text{ 和 } \lim_{s \rightarrow 0^-} s > 0 \quad (5.2)$$

式(5.2)意味着在切换面邻域内，运动轨迹将于有限时间内到达切换面，所以也称为局部到达条件。

到达条件的等价形式为：

$$s \dot{s} < 0 \quad (5.3)$$

其中切换函数 $s(\mathbf{x})$ 应满足以下条件：

- (1) 可微；
- (2) 过原点，即 $s(0) = 0$ 。

由于状态 \mathbf{x} 可取任意值，即 \mathbf{x} 离开切换面可以任意远，故式(5.3)也称为全局到达条件。

为保证系统能在有限时间内到达，避免渐进趋近，修正上式：

$$s \dot{s} < -\delta \quad (5.4)$$

其中 $\delta > 0$ ， δ 可以取任意小。

通常将式(5.3)表达成 Lyapunov 函数型的全局到达条件^[60]：

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} s^2, \dot{V}(\mathbf{x}) < 0 \quad (5.5)$$

其中， $V(\mathbf{x})$ 是定义的 Lyapunov 函数。 $V(\mathbf{x})$ 正定， $\dot{V}(\mathbf{x})$ 负定，则系统本身稳定于条件 $s = 0$ 。

5.2.3 滑模变结构控制的定义

高为炳教授在文献[45]中给出了滑模变结构控制的定义，对于式(5.1)的非线性控制系统：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R}$$

需要确定切换函数向量 $\mathbf{s}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^m$ （具有的维数一般情况下等于控制的维数），并且寻求变结构控制

$$u_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} u_i^+(\mathbf{x}), s_i(\mathbf{x}) > 0 \\ u_i^-(\mathbf{x}), s_i(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

其中 $u^+(\mathbf{x}) \neq u^-(\mathbf{x})$ ，使得：

- (1) 满足到达条件：切换面 $s_i(\mathbf{x}) = 0$ 以外的相轨迹将于有限时间内到达切换面。
- (2) 切换面是滑动模态区，且滑模运动渐近稳定，动态品质良好。

滑模控制变结构控制系统的变结构体现在：根据系统状态在状态空间中所处位置的不同，系统具有不同结构，并随着系统状态的运动相互切换：

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^+, t), s(\mathbf{x}) > 0 \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^-, t), s(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

综上所述可知，任何滑模变结构控制系统都必须满足以下条件：

- (1) 存在条件：保证切换面存在滑动模态区；
- (2) 到达条件：保证系统状态能从任意起始位置开始于有限时间内到达切换面；
- (3) 稳定条件：保证系统状态在滑动模态区内的滑动是渐进稳定的并具有良好的动态品质。

这三个条件也是设计滑模变结构控制系统的三要素。

5.2.4 滑动模态运动

由于系统的滑模运动发生于切换面上，所以系统满足：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (5.8)$$

此外，为保证系统在切换面上滑动，系统还需满足条件：

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (5.9)$$

将式(5.9)展开得：

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (5.2)$$

从式(5.10)中解出 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ ，记为 $\mathbf{u}_e(\mathbf{x})$ ，这就是保证滑动模态存在，系统的运动沿着切换面滑动所需要的控制力，称为系统在滑动模态区内的等效控制。

因此处于滑模运动状态时系统滑模运动方程为：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}_e, t) \quad (5.11)$$

综上所述，滑模控制器的设计可以分为两个相对独立的步骤：

- (1) 设计切换函数 $s(\mathbf{x})$ ，使其确定的滑动模态趋于稳定并且有良好的动态品质。
- (2) 求解滑动模态的控制律 $\mathbf{u}^+(\mathbf{x})$ ，使到达条件得到满足，从而形成滑动模态区。

5.3 滑模变结构控制系统的趋近律

滑模变结构控制系统中的运动过程，是由两个阶段的运动组成的。第一阶段是正常运动，系统状态完全位于切换面之外，或有限次穿越切换面。在这一阶段，系统状态从任意初始位置开始于有限时间内到达切换面，因而被称为趋近运动。第二阶段是滑动模态，系统状态完全位于切换面上的滑动模态区之内，沿着切换面滑动，直到到达系统的稳定点。

这两个阶段的品质，以及它们的过渡过程的品质，决定着整个系统的品质。对于滑动模态的品质，由切换函数和系统的滑模运动方程(5.11)式决定。而对于趋近运动，首先要满足到达条件以保证系统状态能够从任意起始位置开始，并在有限时间内到达切换面。但对于系统状态是如何趋近切换面的，系统在这阶段的动态品质如何，却没有做出任何规定，因此采用趋近律的方法来改善趋近运动过程中系统的动态品质。选择合适的趋近律可以削弱抖振。设计趋近律的原则是：远离切换面时，运动点趋向切换面的速度大，当趋近切换面时速度减小趋于 0。典型的趋近律有如下几种^[45]：

- (1) 等速趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (5.3)$$

其中，常数 ε 表示运动点趋近 $s(\mathbf{x})=0$ 的速率。 ε 值越小，则趋近速度越慢，导致系统调节过程太慢； ε 值越大，则趋近速度越快，系统状态具有较大速度，这样将引起较大的抖动。故这种最简单的趋近律虽然控制量简单，而且很容易求出，但系统运动的品质有时不够好。

- (2) 指数趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (5.4)$$

当 $s > 0$ 时， $\dot{s} = -\varepsilon - ks$ ，可解出：

$$s(t) = -\frac{\varepsilon}{k} + [s(0) + \frac{\varepsilon}{k}]e^{-kt} \quad (5.5)$$

可以看出，指数趋近律中，趋近的速度从一个较大值逐渐减小到零，缩短趋近时间的同时使得运动点到达 $s=0$ 时的速度很小。对指数趋近项而言，运动点趋近切换面运动的过程是一个渐近的运动过程，无法保证运动点在有限时间内到达，则切换面上

就不会存在滑动模态了,因此可以通过增加等速趋近项 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 的方法,使得当 s 趋近于零时,趋近速度是 ε 而不是零,这样可以保证在有限时间内到达。

(3) 幂次趋近律

$$\dot{s} = -k|s|^q \operatorname{sgn}(s), k > 0, 0 < q < 1 \quad (5.6)$$

(4) 一般趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s), \varepsilon > 0 \quad (5.7)$$

其中 $f(0)=0$;当 $s \neq 0$ 时, $sf(s) > 0$ 。 ε 和函数 $f(s)$ 取不同值,可得到以上各种趋近律。

5.4 滑模变结构控制的不变性

当滑模变结构控制系统进入到滑动模态的运动时,系统具有对系统内部参数变化、不确定性以及外部干扰的不变性。

考虑以下不确定非线性控制系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \Delta \mathbf{f}(\mathbf{x}, t, \mathbf{p}) + [\mathbf{b}(\mathbf{x}, t, \mathbf{p}) + \Delta \mathbf{b}(\mathbf{x}, t, \mathbf{p})] \mathbf{u} \quad (5.8)$$

其中, $\Delta \mathbf{f}$ 、 $\Delta \mathbf{b}$ 表示外界干扰和系统摄动, \mathbf{p} 表示不确定参数。

选取切换函数 $s = s(\mathbf{x}, t)$, $s \in \mathbf{R}^m$, 并令

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f} + \Delta \mathbf{f} + (\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}) \mathbf{u}] = 0 \quad (5.9)$$

则可得滑动模态的等效控制:

$$\mathbf{u}_e = -[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b})]^{-1} [\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f} + \Delta \mathbf{f})] \quad (5.10)$$

将式(5.11)代入(5.12)中可得系统滑模运动方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f} + \Delta \mathbf{f} - (\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}) [\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b})]^{-1} [\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f} + \Delta \mathbf{f})] \quad (5.20)$$

根据匹配条件定理得^[44]:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{I} - \mathbf{b} (\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{b})^{-1} \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}}] \mathbf{f} - \mathbf{b} (\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{b})^{-1} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (5.21)$$

上式表明,当匹配条件成立时,系统滑模运动方程与外界干扰和系统摄动无关,即滑模控制系统具有不变性,这一特性也称为完全鲁棒性。

5.5 滑模变结构控制的抖振问题

滑模变结构控制本质上是一种不连续的开关控制。这种不连续的开关特性将会使系统出现抖振现象。对于理想的滑模变结构控制系统,由于系统无时间、空间滞后而具有理想的开关特性,所以滑动模态始终是发生在切换面上的光滑运动,并沿着切换

面渐近稳定于原点，因而不会出现抖振现象。但对于实际的滑模变结构控制系统，由于系统不可避免地存在惯性和时间、空间的滞后，因而导致系统的滑动模态不再是始终发生在切换面上的光滑运动，而是在切换面附近作来回穿越运动，这种现象便被称为抖振。

因此，实际的控制系统中必然存在抖振现象，抖振会破坏系统的优良特性，引起系统未建模部分的高频率的振荡，且能耗会增大，对机械系统产生很大的破坏性。但是另一方面，若完全消除抖振就使得系统的鲁棒性和抗干扰能力同时消失。因而只能针对造成抖振的原因，采取不同的方法来削弱系统的抖振。

目前，针对滑模控制抗抖振问题的研究很多，代表性的削弱抖振的方法主要有以下方面^[60]：

(1) 准滑动模态法：用饱和函数替代切换函数，在边界层外采用常规滑模控制，在边界层内用连续状态的反馈控制。

(2) 趋近律法：通过调整参数 ε ，使系统状态在靠近切换面时具有较低的趋近速度，从而降低切换时系统惯性和滞后的影响，起到削弱抖振的效果趋近律。

(3) 动态滑模法：将常规的滑模控制中的切换函数通过微分环节来构成新的切换函数，该切换函数与系统控制输入的一阶或高阶导数有关，能将不连续项转移到控制的一阶或高阶导数中，从而得到在时间上连续的动态滑模控制律，能有效降低抖振。

(4) 模糊方法：根据经验，以降低抖振来设计模糊规则，可有效地降低滑模控制的抖振。模糊滑模控制能将不连续的信号连续化，削弱抖振，此外模糊逻辑还能实现滑模控制参数的自调整。

此外，还有滤波方法、观测器法、神经网络方法、遗传算法优化方法、切换增益法、扇形区域法等。这些方法都在一定的程度上起到了削弱滑模控制抖振的效果，但每种方法各有优缺点，应该根据具体的问题选择合适的方法，针对复杂的问题还可以将各种方法相互结合、相互补充，以达到理想的控制效果。

5.6 本章小结

本章根据设计滑模变结构控制器的需要，简要介绍了滑模变结构控制的基本原理。首先介绍了滑模变结构控制的基本概念，指出了滑模变结构控制器设计的方法，然后分析了滑模变结构控制系统的趋近律并证明了滑模变结构控制系统的不变性，最后分析了滑模控制的抖振问题，介绍了几种削弱抖振的方法。

第6章 基于滑模变结构控制的 AUV 运动控制

6.1 引言

第3章研究了 AUV 的路径规划问题，本章将研究 AUV 的运动控制问题。基于滑模变结构控制在非线性系统上的鲁棒性和抗干扰性，本章将以某型 AUV 为研究对象，在上一章所介绍的滑模变结构控制理论的基础上，根据可化为正则型的多输入非线性滑模变结构控制系统的设计方法，设计了两种滑模控制器，并对 AUV 的运动进行轨迹跟踪的仿真。

6.2 多输入非线性系统的可控正则型

对于一个多输入的非线性系统，满足一般的可控正则型^[45]：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m \quad (6.1)$$

其中：

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{A}_m \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\alpha}_m(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\beta}_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{(n_i-1)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha}_i(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \alpha_i^0(\mathbf{x}) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\beta}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \cdots, \boldsymbol{\beta}_m = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中， $i=1,2,\cdots,m$ ， \mathbf{A}_i ， $\boldsymbol{\alpha}_i(\mathbf{x})$ ， $\boldsymbol{\beta}_i$ 分别为 $n_i \times n_i$ ， $n_i \times m$ ， $n_i \times 1$ 维的矩阵， $\sum_{i=1}^m n_i = n$ ， $\mathbf{I}_{(n_i-1)}$ 为 (n_i-1) 维单位阵。

将 \mathbf{x} 分块为： $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \cdots, \mathbf{x}_m^T]^T$ ， $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in_i}]^T$

则可以将式(6.1)分成 m 组，第 i 个子系统为：

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \boldsymbol{\alpha}_i(\mathbf{x}) + \mathbf{b}_i u_i, \mathbf{b}_i = [0, \cdots, 0, 1]^T$$

对于每一个子系统，只含有一个控制量 u_i ，而水下机器人是个各自由度运动强耦合的运动系统，因此可以采用分散的滑动模态切换模式来进行分析，分别为每个子系统设计一个独立的控制器，从而也实现了系统的分散解耦控制。

6.3 AUV 系统模型的简化

6.3.1 AUV 状态矩阵方程的简化

本文以一个六自由度的智能水下机器人为例^[53]进行仿真研究，验证控制算法的性能。在水下机器人的运动过程中，一般在前进、横移、升沉和艏摇四个方向上有推进器，产生四个方向的运动，横倾和纵倾方向的影响较小，因此考虑三个运动方向的自由度和艏摇方向的转动自由度，所研究的系统实际上是一个四自由度的水下机器人。

因此，由式(4.41)可将水下机器人空间运动状态矩阵方程简化为：

$$\ddot{\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_{vis} + \boldsymbol{\tau}) \quad (6.2)$$

其中： $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\gamma} = [x, y, z, \psi]^T$, $\dot{\boldsymbol{\gamma}} = [u, v, w, r]^T$

6.3.2 AUV 系统模型的可控正则化

由水下机器人空间运动状态矩阵方程(6.2)式，令 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix}$ ，得到系统的动力学的状态空间表达式为：

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\gamma}} \\ \ddot{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

其中， $\mathbf{f} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_{vis}$ 。

则第 i 个子系统的动力学方程可写为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma}_i \\ \ddot{\gamma}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_i \\ \dot{\gamma}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

简写为：

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i u_i + \mathbf{F}_i \quad (6.5)$$

其中, $\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} \gamma_i \\ \square \\ \gamma_i \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ f_i \end{bmatrix}$ 。

又 $\boldsymbol{\gamma} = [x, y, z, \psi]^T$, 则有 $\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_4 = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix}$ 。

综上所述, 根据分散滑动模态的切换模式将系统模型分成四个子系统, 写成可控正则型的标准的形式:

$$\square \mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_1^0(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1 \quad (6.6)$$

$$\square \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_2^0(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_2 \quad (6.7)$$

$$\square \mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_3^0(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_3 \quad (6.8)$$

$$\square \mathbf{x}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_4 + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_4^0(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_4 \quad (6.9)$$

其中 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T = \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\tau}$, $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) = [\alpha_1^0(\mathbf{x}), \alpha_2^0(\mathbf{x}), \alpha_3^0(\mathbf{x}), \alpha_4^0(\mathbf{x})]^T = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_{vis}$ 。所以水下机器人所需的推力为:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M} \mathbf{u} \quad (6.10)$$

6.4 AUV 滑模变结构控制器设计

6.4.1 位置控制器的状态方程

位置控制器的输入是位置偏差 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d$ 和偏差的变化率 $\square \mathbf{e} = \square \mathbf{x} - \square \mathbf{x}_d$, 假设智能水下

机器人的期望轨迹为: $\mathbf{x}_{1d} = \begin{bmatrix} x_d \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1d} \\ \square \\ x_{1d} \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_{2d} = \begin{bmatrix} y_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2d} \\ \square \\ x_{2d} \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_{3d} = \begin{bmatrix} z_d \\ w_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{3d} \\ \square \\ x_{3d} \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{x}_{4d} = \begin{bmatrix} \psi_d \\ r_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{4d} \\ \square \\ x_{4d} \end{bmatrix}$$

则第 i 个子系统的轨迹跟踪误差为:

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{id} = \begin{bmatrix} x_i - x_{id} \\ \square \\ x_i - x_{id} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{id} = \begin{bmatrix} x_i - x_{id} \\ y_i - y_{id} \\ z_i - z_{id} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

由式(6.6)~(6.9)可得:

$$\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_{id} = \alpha_i^0(\mathbf{x}) + \mathbf{u}_i - \dot{\mathbf{x}}_{id} \quad (6.13)$$

因此可得到位置控制器的状态方程:

$$\dot{\mathbf{e}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{e}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_i^0(\mathbf{x}) - \dot{\mathbf{x}}_{id} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_i \quad (6.14)$$

6.4.2 切换函数的设计

对于可控正则型的非线性系统, 构造线性切换函数^[45]:

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, s_3, s_4]^T = [\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1, \mathbf{c}_2 \mathbf{e}_2, \mathbf{c}_3 \mathbf{e}_3, \mathbf{c}_4 \mathbf{e}_4]^T \quad (6.15)$$

其中, $\mathbf{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}]$, c_{i1} 为待定系数, $c_{i2} = 1$, $i = 1, 2, 3, 4$ 。

由于切换函数是线性的, 所以可以通过极点配置法来确定待定系数。由式(6.15)可知, 第 i 个子系统的切换面为:

$$s_i = \mathbf{c}_i \mathbf{e}_i = c_{i1} e_i + e_i = 0 \quad (6.16)$$

记 $c_{i1} = c_i$, 因此可得式(6.16)的极点为:

$$\lambda_i = -c_i \quad (6.17)$$

系统极点的配置通常是在满足控制系统性能指标的前提下, 由经验确定的。要保证系统的稳定性, 则有 $\lambda_i < 0$ 。考虑到 AUV 在运动过程中, 一般对进退、横移、升沉方向上的运动响应要求较快, 对横艏摇的运动响应稍慢, 因此在为各子系统进行极点配置时, 应保证 c_1 、 c_2 、 c_3 取值较大, 而 c_4 取值较小。本文取值为: $c_1 = 17$, $c_2 = 13.2$, $c_3 = 18.8$, $c_4 = 6.16$ 。给系统进行极点配置后, 便可得到系统的切换函数:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e_1 + e_1 \\ c_2 e_2 + e_2 \\ c_3 e_3 + e_3 \\ c_4 e_4 + e_4 \end{bmatrix} = \text{diag}[c_1, c_2, c_3, c_4] \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \mathbf{c} \mathbf{e} + \mathbf{e} \quad (6.18)$$

其中, $\mathbf{c} = \text{diag}[c_1, c_2, c_3, c_4]$ 。

6.4.3 基于指数趋近律的滑模控制

在本文中，采用基于指数趋近律的滑模控制策略来对水下机器人系统进行控制，故切换函数有如下形式：

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (6.19)$$

其中 $\varepsilon = \operatorname{diag}[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4]$ ， $k = \operatorname{diag}[k_1, k_2, k_3, k_4]$ 。

因此对各个子系统有：

$$\dot{s}_i = -\varepsilon_i \operatorname{sgn}(s_i) - k_i s_i, \varepsilon_i > 0, k_i > 0 \quad (6.20)$$

其中，符号函数 $\operatorname{sgn}(s_i) = \begin{cases} 1 & s_i > 0 \\ 0 & s_i = 0 \\ -1 & s_i < 0 \end{cases}$ 。

由 $s = ce + e$ 和式(6.2)可知：

$$\dot{s} = c\dot{e} + \dot{e} = c\dot{e} + \gamma - \gamma_d = c\dot{e} + M^{-1}(F_{vis} + \tau) - \gamma_d \quad (6.21)$$

联立公式(6.19)和式(6.21)可得：

$$\dot{s} = c\dot{e} + M^{-1}(F_{vis} + \tau) - \gamma_d = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (6.22)$$

求解上式可得水下机器人的控制力：

$$\tau = M[\gamma_d - c\dot{e} - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] - F_{vis} \quad (6.23)$$

因此滑模控制器的输出为：

$$u = M^{-1}\tau = [\gamma_d - c\dot{e} - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] - M^{-1}F_{vis} \quad (6.24)$$

6.4.4 基于准滑动模态的滑模控制

针对滑模控制器由于切换函数引起的抖振，采用准滑动模态控制对其性能进行改进。准滑动模态就是指系统的运动轨迹被限制在某个理想滑动模态的某一 Δ 邻域的模态^[60]。准滑动模态控制是使一定范围内状态点均被吸引至切换面的某一 Δ 邻域内，通常称此 Δ 邻域为滑动模态切换面的边界层。

在边界层内，准滑动模态不要求满足滑动模态的存在条件，因此它不要求在滑动模态的切换面上进行变结构切换，可以在边界层上进行切换。因此，准滑动模态控制能有效地避免和削弱抖振，在实际系统中得到了广泛的应用。

在连续系统中，常用的准滑动模态控制有以下两种方法：

- (1) 用饱和函数 $\operatorname{sat}(\frac{s}{\Delta})$ 来代替理想滑动模态中的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 。

符号函数 $\text{sat}(\frac{s}{\Delta})$ 的数学表达式如下：

$$\text{sat}(\frac{s}{\Delta}) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ \frac{s}{\Delta} & |s| \leq \Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases} \quad (6.25)$$

其中 $\Delta > 0$ 。 $\text{sat}(\frac{s}{\Delta})$ 的曲线如图 5.1 所示。这种控制律具有 3 种结构和两个切换面（即边界层 $s = \Delta$ 和 $s = -\Delta$ ）。在边界层内， $\text{sat}(\frac{s}{\Delta})$ 是 s 的线性函数，系统采用线性化反馈控制，在边界层外，采用切换控制。

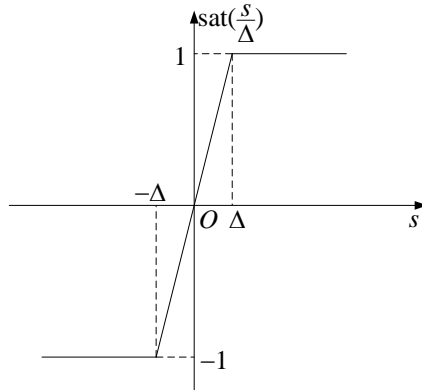


图 6.1 饱和函数

Fig.6.1 Saturation function

(2) 将继电特性连续化，用连续函数 $\theta(s)$ 代替符号函数 $\text{sgn}(s)$ 。

$$\theta(s) = \frac{s}{|s| + \delta} \quad (6.26)$$

式中， $\delta > 0$ ，取值通常很小。

为了削弱抖振，本文采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 来代替指数趋近律中的符号函数 $\text{sgn}(s)$ ，因此，由式(6.24)可得采用准滑动模态的滑模控制器的输出为：

$$\mathbf{u} = [\gamma_d - \mathbf{c} \mathbf{e} - \varepsilon \text{sat}(s) - \mathbf{k} \mathbf{s}] - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_{vis} \quad (6.27)$$

6.5 系统仿真

6.5.1 AUV 的主要参数

本文对仅考虑前进、横移、升沉和艏摇四个方向上 AUV 的运动，对 AUV 的运动进行轨迹跟踪，验证滑模控制算法的有效性。某小型 AUV 的主要参数如下^[53]：

水下机器人的质量 m 为 100Kg，重力与浮力已经取得均衡，重心在动坐标系下

的坐标向量 $[x_G, y_G, z_G]^T = [0, 0, 0.05]^T$ ，浮心的坐标向量为 $[0, 0, 0]^T$ ，转动惯量和水动力系数等参数为： $I_x = 3.66$ ， $I_y = 56.94$ ， $I_z = 62.61$ ， $X_{\dot{u}} = -37.74$ ， $Y_{\dot{v}} = -37.74$ ， $Y_{\dot{r}} = 31.9078$ ， $Z_{\dot{w}} = -51.645$ ， $N_{\dot{v}} = -3.099$ ， $N_{\dot{r}} = -14.431$ ， $X_{uu} = -25.96$ ， $Y_{vv} = -97.511$ ， $N_{rr} = -80$ ， $Z_{ww} = -147.245$ 。

6.5.2 滑模控制的仿真结果和分析

根据前文所设计的基于指数趋近律的滑模控制器和基于准滑动模态的滑模控制器，对智能水下机器人的运动进行轨迹跟踪。对给定的水下机器人载体期望运动轨迹，根据所设计的控制器产生控制量来使水下机器人载体完成期望的运动。

水下机器人在运动过程中，并不要求在 4 个自由度方向同时运动。本文在 MATLAB/Simulink 仿真环境下对系统的运动轨迹进行仿真，以此来验证所设计的控制算法的有效性。根据系统仿真的需要，可将水下机器人的运动分为 xoy 平面的运动和 xoz 平面的运动，分别用上述的两种滑模控制策略来对系统的运动进行控制，对比这两种控制策略的控制效果。

(1) 假定水下机器人仅在 xoy 平面运动，水下机器人的深度保持为 1m。水下机器人的初始位姿为 $\gamma_0 = [x_0, y_0, z_0, \psi_0]^T = [0.5, -0.2, 1, 0.12]^T$ ，水下机器人在 x 轴和 y 轴方向上期望的运动轨迹分别为 0.05m/s 和 0.04m/s 的匀速运动，艏摇方向期望的轨迹为 0.01rad/s 的匀速转动。在基于指数趋近律的滑模控制策略下， x 轴、 y 轴和艏摇方向上的运动轨迹如图 6.2~图 6.4 所示。

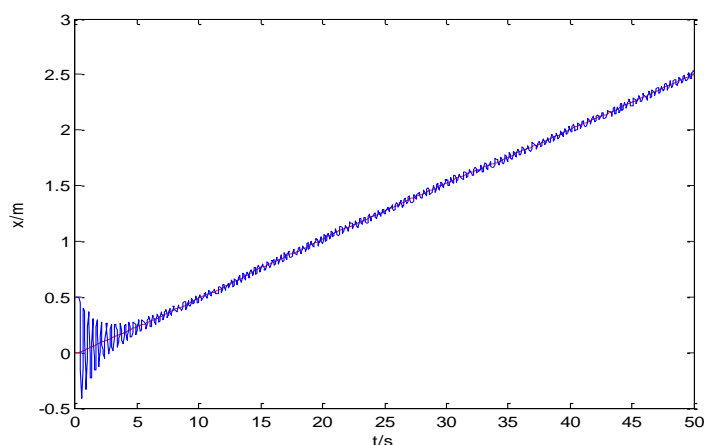


图 6.2 水下机器人 x 轴方向上的运动

Fig.6.2 Motion of AUV in x axis direction

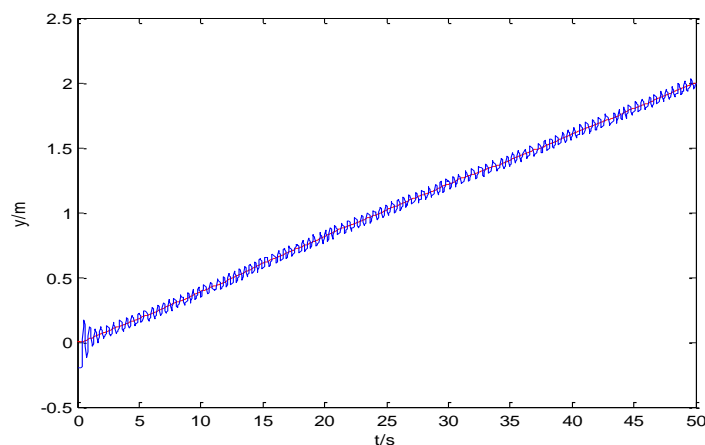
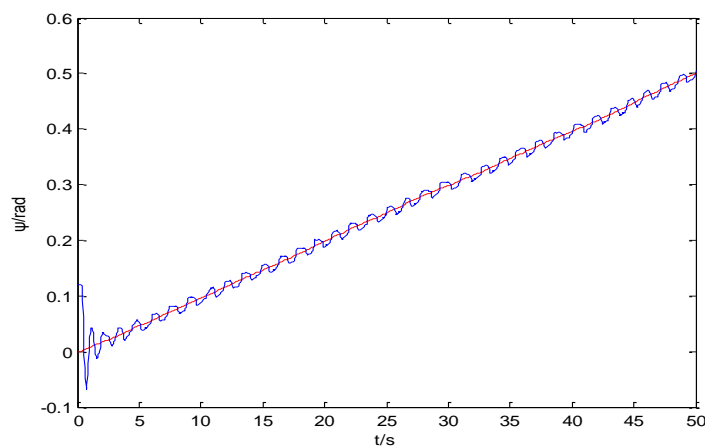
图 6.3 水下机器人 y 轴方向上的运动Fig.6.3 Motion of AUV in y axis direction

图 6.4 水下机器人艏摇方向的运动

Fig.6.4 Motion of AUV in yaw direction

由图 6.2~图 6.4 可知，水下机器人在 x 轴方向上的跟踪调节时间为 8s，在 y 轴方向上和艏摇方向上的跟踪调节时间为 5s，系统的响应速度较快，存在超调，超调量不是很大。水下机器人在运动过程中系统是渐进稳定的，但是跟踪的精度不高，存在明显的抖振， x 轴方向的跟踪误差达到 0.05m， y 轴方向的误差达到 0.04m，艏摇方向的误差也达到了 0.01rad。水下机器人虽然运动稳定，但是控制精度不高，控制效果不太理想。

在基于准滑动模态的滑模控制策略下， x 轴、 y 轴和艏摇方向上的运动轨迹迹如图 6.5~图 6.7 所示。

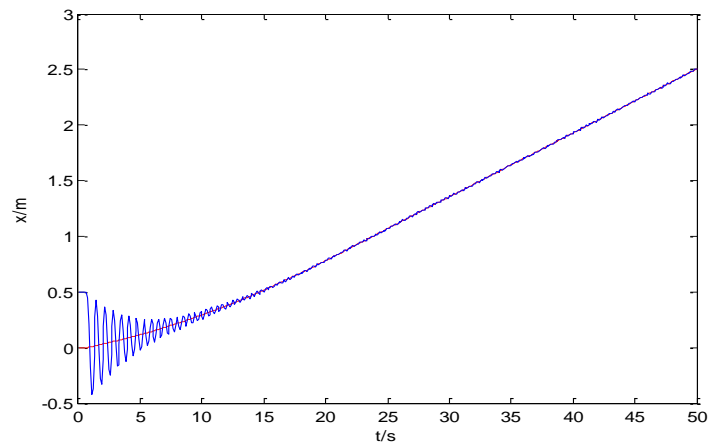
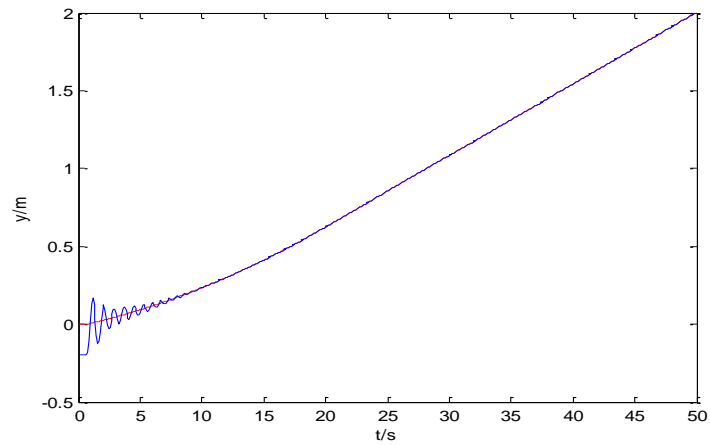
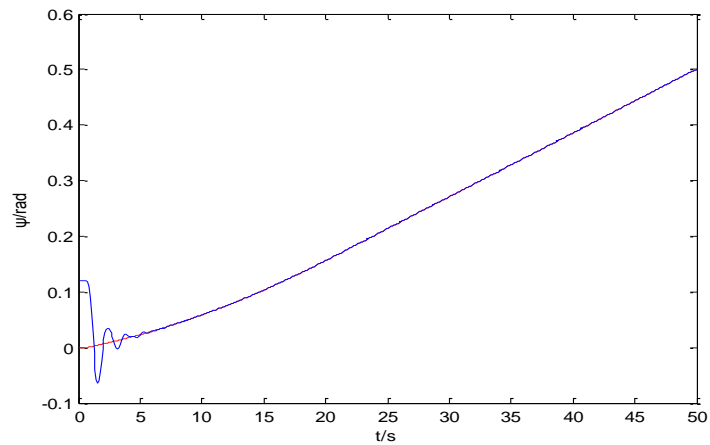
图 6.5 水下机器人 x 轴方向上的运动Fig.6.5 Motion of AUV in x axis direction图 6.6 水下机器人 y 轴方向上的运动Fig.6.6 Motion of AUV in y axis direction

图 6.7 水下机器人艏摇方向的运动

Fig.6.7 Motion of AUV in yaw direction

由图 6.5~图 6.7 可知, 水下机器人在 x 轴方向上的跟踪调节时间为 15s, 在 y 轴方

向上和艏摇方向上的跟踪调节时间为 9s 和 7s，较基于指数趋近律的滑模控制策略，系统的响应速度稍慢，但是系统的超调也相应减小了。当系统趋于稳定时，系统的控制精度很高，误差很小，基本实现了对期望运动轨迹的跟踪，很大程度地削弱了抖振，达到了预期的控制效果。

(2) 假定水下机器人仅在 xoz 平面运动，横移量始终为 0。水下机器人的初始位姿为 $\gamma_0 = [x_0, y_0, z_0, \psi_0]^T = [0.5, 0, 0.1, 0.5]^T$ ，水下机器人在 x 轴和 z 轴方向上期望的轨迹分别为 0.08m/s 和 0.01m/s 的匀速运动，艏摇方向期望的轨迹为 $\sin(0.4t)$ 。在基于指数趋近律的滑模控制策略下， x 轴、 z 轴和艏摇方向上的运动轨迹如图 6.8~图 6.10 所示。

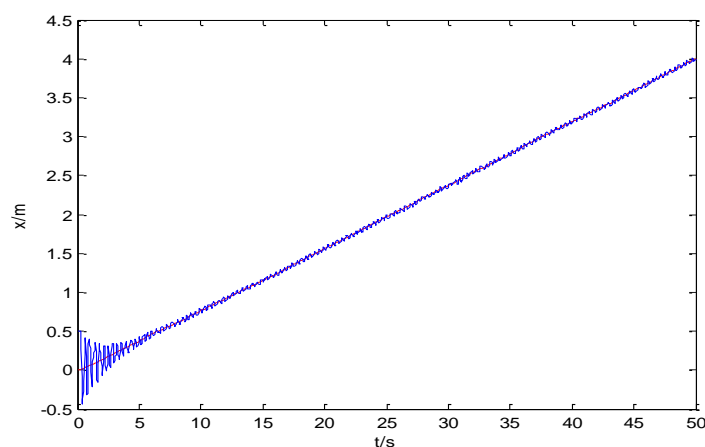


图 6.8 水下机器人 x 轴方向上的运动

Fig.6.8 Motion of AUV in x axis direction

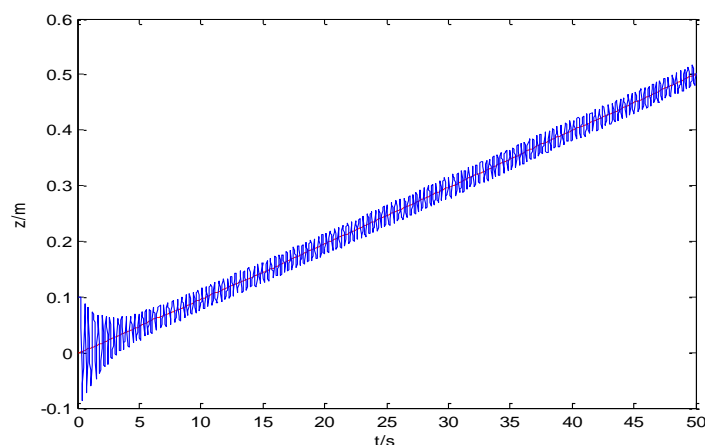


图 6.9 水下机器人 z 轴方向上的运动

Fig.6.9 Motion of AUV in z axis direction

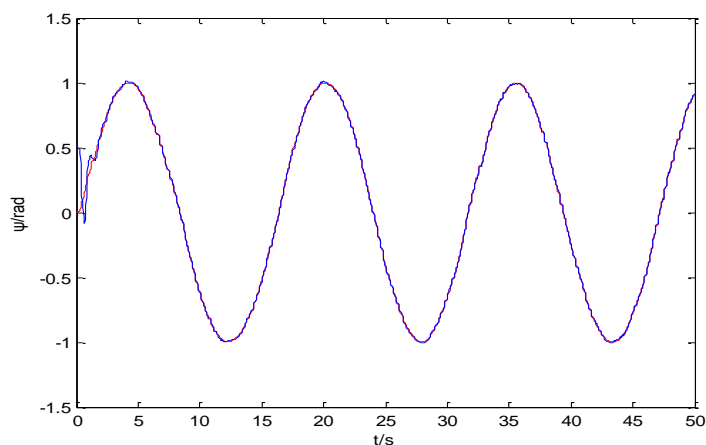
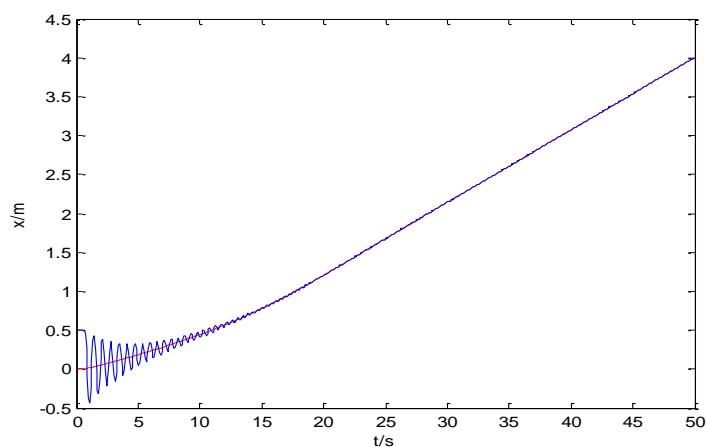


图 6.10 水下机器人艏摇方向的运动

Fig.6.10 Motion of AUV in yaw direction

由图 6.8~图 6.10 可知, 水下机器人在 x 轴方向上的跟踪调节时间为 8s, 在 z 轴方向上和艏摇方向上的跟踪调节时间为 7s 和 5s, 系统的响应速度较快, 存在超调, 但不是很大, 水下机器人在运动过程中存在明显的抖振, 存在跟踪误差。可以看到, 所设计的滑模控制器对水下机器人在 z 轴方向的运动产生的抖振很大, 控制精度不高, 跟踪误差达到 0.03m, x 轴方向的误差达到 0.05m, 而在艏摇方向系统对正弦信号的跟踪误差很小, 不是很明显, 控制效果还不错。

在基于准滑动模态的滑模控制策略下, x 轴、 z 轴和艏摇方向上的运动轨迹如图 6.11~图 6.13 所示。

图 6.11 水下机器人 x 轴方向上的运动Fig.6.11 Motion of AUV in x axis direction

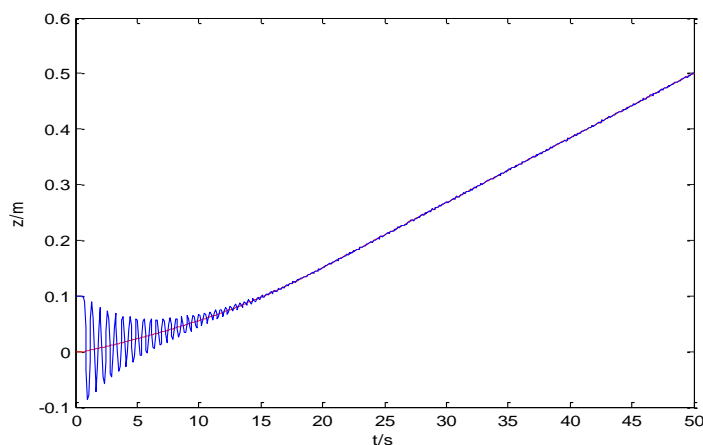
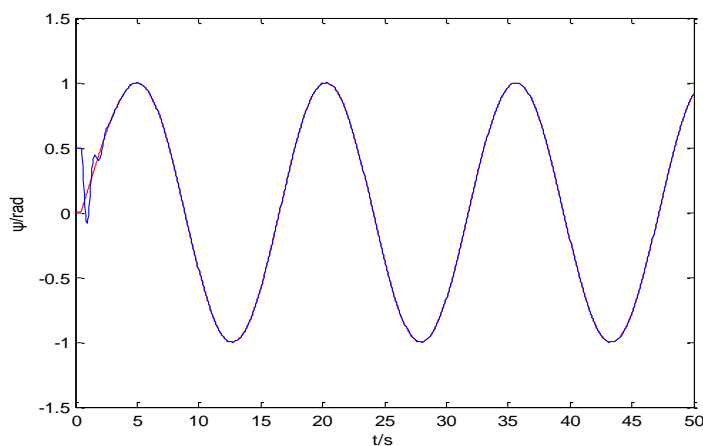
图 6.12 水下机器人 z 轴方向上的运动Fig.6.12 Motion of AUV in z axis direction

图 6.13 水下机器人艏摇方向的运动

Fig6.13 Motion of AUV in yaw direction

由图 6.11~图 6.13 可知,水下机器人在 x 轴方向上的跟踪调节时间为 18s,在 z 轴方向上和艏摇方向上的跟踪调节时间为 13s 和 7s,较基于指数趋近律的滑模控制策略,系统的响应速度稍慢,但是系统的超调相应地有所减小。同水下机器人在 xoy 平面的运动一样,当 AUV 系统趋于稳定时,系统的控制精度很高,误差很小,基本实现了对期望运动轨迹的跟踪,很大程度地削弱了抖振,达到了预期的控制效果。

综上所述,设计的滑模变结构控制器能够使水下机器人在运动过程中稳定,并且具有良好的动态品质。但是基于指数趋近律的滑模控制器由于系统不可避免地存在抖振,导致存在明显的跟踪误差,控制效果不是很好。采用基于准滑动模态的滑模控制器,可以很大程度地削弱抖振,很好地实现了对期望轨迹的跟踪,取得了不错的控制效果。

6.6 本章小结

本章对 AUV 系统模型进行可控正则化，将系统模型分成四个子系统，从而为每个子系统设计独立的控制器，设计了基于指数趋近律和基于准滑动模态的滑模控制器。对进退、横移、升沉和艏摇四个自由度方向智能水下机器人的运动进行了轨迹跟踪的滑模控制仿真，仿真结果表明基于指数趋近律的滑模控制算法虽然能跟踪期望的运动轨迹，但是存在比较明显的抖振，存在明显的跟踪误差，而基于准滑动模态的滑模控制算法很大程度地削弱了抖振，能够取得较好的控制效果。

总结与展望

总结

本文主要研究了智能水下机器人的运动规划，分别对智能水下机器人的路径规划和运动控制展开了研究。采用改进的遗传算法实现了 AUV 的路径规划，通过建立水下机器人的动力学模型，设计了滑模变结构控制器对系统进行控制，并对系统进行仿真分析。总体而言，本文主要完成了以下几项主要的工作：

(1) 对水下机器人的路径规划方法和运动控制技术发展现状进行了阐述，介绍了水下机器人路径规划研究所采用的环境模型、规划方法。

(2) 阐述了简单遗传算法的数学基础，具体分析了遗传算法的遗传算子。在简单遗传算法的基础上进行了改进，研究了基于遗传算法的 AUV 全局径规划的方法，并通过仿真实验验证了该方法的有效性。

(3) 分析了水下机器人在水下的运动和受力，建立了水下机器人的动力学方程。

(4) 对 AUV 的系统模型进行轨迹和姿态的控制器设计，研究了滑模变结构控制算法，设计了基于指数趋近律和基于准滑动模态的滑模控制器，并对 AUV 进行了轨迹跟踪的运动仿真。通过仿真分析和对比表明基于准滑动模态的滑模控制器，很好地削弱了抖振，在轨迹跟踪上性能良好。

展望

从上述内容可以看出，本文对智能水下机器人运动规划问题提出了初步的分析和解决方案，并对提出的方法进行了初步的验证，为后续的工作奠定了基础。本文只研究了智能水下机器人的路径规划和运动控制的轨迹跟踪实现，但是根据实际需求和智能水下机器人的发展趋势，仍然有许多工作需要进一步深入开展，主要包括以下几个方面：

(1) 本文仅研究了二维静态环境中 AUV 的路径规划，今后的工作中会研究三维时变环境中的路径规划。

(2) 在建模的过程中对智能水下机器人各个自由度之间的耦合考虑不够全面，并未考虑海流等外界环境的干扰，在今后的工作中会进一步加以完善。

(3) 控制算法上，仅研究了基于滑模变结构控制的运动控制，今后可以研究将滑模控制与神经网络、自适应控制等相结合的控制方法以获得更好的控制性能。此外，

本文仅研究基于滑模变结构控制的运动轨迹跟踪，并未研究系统的推力分配和轨迹规划等问题。

(4) 本文的研究受到实验条件的限制，未能实际测量和进行水下实验控制，对于实际操作过程中出现的问题不能做到进一步的考虑和解决，今后希望能有机会将研究的控制算法在实际的水下试验中加以验证和实现。

参考文献

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科技出版社, 2000.
- [2] 任福君, 张岚, 王殿君等. 水下机器人的发展现状[J]. 佳木斯大学学报, 2000, 18(4): 317-320.
- [3] 王磊. 海洋环境下水下机器人快速路径规划研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2007.
- [4] 李磊, 叶涛等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 24(5): 475-480.
- [5] 师黎, 邵国. 改进遗传算法用于移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(24): 6330-6331.
- [6] 陈永明. 智能水下机器人的实时避碰策略和全局路径规划研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2007.
- [7] 冉红格. 自主式水下机器人的路径规划与路径跟踪方法[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2009.
- [8] Khatib. Real-time obstacle for manipulators and mobile robot[J]. The International Journal of Robotic Research. 1986, 5(1): 90-98.
- [9] 刘传领. 基于势场法和遗传算法的机器人路径规划技术研究[D]. 南京理工大学博士学位论文, 2012.
- [10] 毛宇峰. 智能水下机器人路径规划技术研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2006.
- [11] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25 (7): 961-967.
- [12] 石鸿雁, 孙昌志. 非结构环境下移动机器人的运动规划[J]. 机器人, 2004, 26(1): 27-31.
- [13] 浦定超. 基于遗传算法的移动机器人路径规划的研究[D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 2010.
- [14] Alberto Alvarez, Andrea Caiti, Reiner Onken. Evolutionary Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in a Variable Ocean[J]. IEEE Journal Of Oceanic Engineering. 2004, 29(2): 418-429.
- [15] K. Sugihara. GA-based motion planning for underwater robotic Vehicle[C]. Proc. 10th int'l Symp. On Unmanned Untethered Submersible Technology, 1997, 406-415.
- [16] Anthony Stentz. Optimal and Efficient Path Planning for Unknown and Dynamic Environments[J]. Carnegie Mellon University, 1993.
- [17] Clement Petrel, Yan Pailhas. Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(2): 217-224.
- [18] Hongjian Wang, Dehui Zhao. Research on autonomous planning for AUV in unstructured environment[C]. International Conference on Intelligent Computing, Kunming, China, 2006: 586-599.
- [19] Ge yang, Rubo Zhang et al. Research on Local Path Planning of AUV underocean Environment[C]. Proceedings of the Sm World Congress on Intelligent Control and Automation, June 15-19, 2004,

Hangzhou, China.

- [20] R. Prasanth Kumar, A. Dasgupta, C. S. Kumar. Real-time Optimal Motion Planning for Autonomous Underwater Vehicles[J]. Ocean Engineering. 2005, 32(5): 1431-1447.
- [21] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论应用与软件实现[M]. 西安交通大学出版社, 2002.
- [22] 郭莹. 水下自主作业系统协调控制技术研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2008.
- [23] 董笑菊. 海洋环境下机器人全局路径规划的研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2000
- [24] 尚游. 基于案例的自主式水下机器人全局路径规划的学习算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 9(5): 1-7.
- [25] 黄宇峰. 遗传算法在 AUV 动态规避中的应用研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2008.
- [26] 孙晓苗. 基于遗传算法的 AUV 路径规划研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006.
- [27] 崔建军. 基于遗传算法的移动机器人路径规划研究[D]. 西安科技大学硕士学位论文, 2010.
- [28] G. Antonelli and S. Chiaverini. Fuzzy Redundancy Resolution and Motion Coordination for Underwater Vehicle-Manipulator Systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(1): 109-120.
- [29] Bin Xu, N. Sakagami, S. R. Pandian et al. A Fuzzy Controller for Underwater Vehicle-Manipulator System[C]. Oceans, Sept. 2005, Vol. 2: 1110-1115.
- [30] G. Bartolini and E. Punta. Second Order Sliding Mode Tracking Control of Underwater Vehicles[C]. In Proc. of the American Control Conference. USA: 2000. 65~69.
- [31] Kazuo Ishii, Teruo Fujii, Tamaki Ura. An On-line Adaption Method in a Neural Network Based Control System for AUV's[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20(3): 221-228.
- [32] A. P. Aguiar, J. P. Hespanha. Logic-Based Switching Control for Trajectory-Tracking and Path-Following of Underactuated Autonomous Vehicles with Parametric Modeling Uncertainty[C]. Proceedings of the 2004 American Control Conference, 2004, 4: 3004-3010.
- [33] J. S. Wang, C. S. G. Lee. Self-Adaptive Recurrent Neuro-Fuzzy Control of an Autonomous Underwater Vehicle[J]. IEEE Transactions On Robotics and Automation, 2003, 19(2): 283-295.
- [34] O. Castillo, L. Trujillo. Multiple objective Optimization Genetic Algorithms for Path Planning in Autonomous Mobile Robots. International, Journal of Computers, Systems and Signal, 2005(1): 48-63.
- [35] X.C. Shi, J.J. Zhou, X.Q. Bian. Fuzzy Sliding Mode Controller for the Motion of Autonomous Underwater Vehicle[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008, 466-470.
- [36] Song F, Smith S M. Design of Sliding Mode Fuzzy Controllers for an Autonomous Underwater Vehicle without System Model[C]. Proceedings of MTS/IEEE Oceans, 2000, 835-840.
- [37] N. Sarkar, T. K. Podder, Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater

- Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Optimization[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(2): 228-239.
- [38] T.Periasamy, T. Asokan, M. Singaperumal. Controller Design for Manipulator Trajectory Control of an AUV-Manipulator System[C]. 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third International Conference on Industrial and Information Systems, INDIA December 8 -10, 2008.
- [39] 刘云龙, 高纯臣等. 水下机器人基于 sigmoid 函数的软变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 91-95.
- [40] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [41] 胡跃明. 变结构控制理论与应用[M]. 科学出版社, 2003.
- [42] 王丽荣. 水下机器人变结构控制技术的研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2003.
- [43] 丹尼斯, 克拉克, 迈克尔等著, 宗光华, 张慧慧译. 机器人设计与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004:10-25.
- [44] 姚琼荟, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- [45] 高为炳. 变结构控制的理论和设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [46] 王青山. AUV 在海流环境中的滑模变结构控制应用技术研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2007.
- [47] 白圣建, 黄新生. 变结构控制的抖振问题研究[J]. 计算机仿真, 2006, Vol.2 No.6:58-64.
- [48] 陈峰. 滑模变结构控制理论及其在机器人中的应用研究[D]. 江南大学硕士学位论文, 2008.
- [49] S.F.P.Saramago, V. Sreffen, Optimization of the Trajectory Planning of Robot Manipulators Taking into Account the Dynamics of the system[J]. Journal of Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 883-894.
- [50] K. Ioi, K. Itoh. Modeling and Simulation of An Underwater Manipulator[J]. Advanced Robotics, 1990, 4(4): 303-317.
- [51] S.Sagara, M.Tamura, T. Yatoh, et al. Digital RAC for Underwater Vehicle-Manipulator Systems Considering Singular Configuration[J]. Artificial Life and Robotics, 2006, 10(2):106-111.
- [52] D. Cortes, N. Vázquez, J. Alvarez-Gallegos. Dynamical sliding-mode control of the boost inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9):3467-3476.
- [53] G.Antonelli. Underwater Robots: Motion and force control of vehicle-manipulator systems[M]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006.
- [54] C.C. Fuh. Variable-thickness Boundary Layers for Sliding Mode Control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2008, 16(4):286-292.
- [55] Huang S J, Huang K S, Chou K C. Development and Application of a Novel Radial Basis Function Sliding Mode Controller[J]. Mechatronics, 2003, 13(4):313-329.
- [56] Ming-jun Zhang, Zhen-zhong Chu. Adaptive Sliding Mode Control Based on Local Recurrent neural

- Networks for Underwater Robot[J]. Ocean Engineering 45 (2012) 56-62.
- [57] X.J. Wei. Composite Disturbance-observer-based Control and Terminal Sliding Mode Control for Uncertain Structural Systems[J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(10): 1009-1017.
- [58] M. Roopaei, M. Zolghadri Jahromi. Chattering-free Fuzzy Sliding Mode Control in MIMO Uncertain Systems[J]. Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications, 2009, 71(10): 4430-4437.
- [59] 何晓燕. 水下遥作业系统的协调控制的研究[D]. 江苏科技大学硕士学位论文, 2013.
- [60] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [61] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [62] Halil Akcakaya, H. Alpaslan Yildiz, Gaye Saglam and Fuat Gurleyen. Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicle[J]. IEEE Electrical and Electronics Engineering, 2009:332-336.

攻读硕士研究生学位期间发表的学术论文

- [1] 张永林, 徐璐瑜. 智能水下机器人滑模控制研究[J]. 中国科技论文在线电子期刊, 2014 年 6 月.

致谢

在本论文完成之际，我向所有给予我帮助的人表示衷心的感谢！

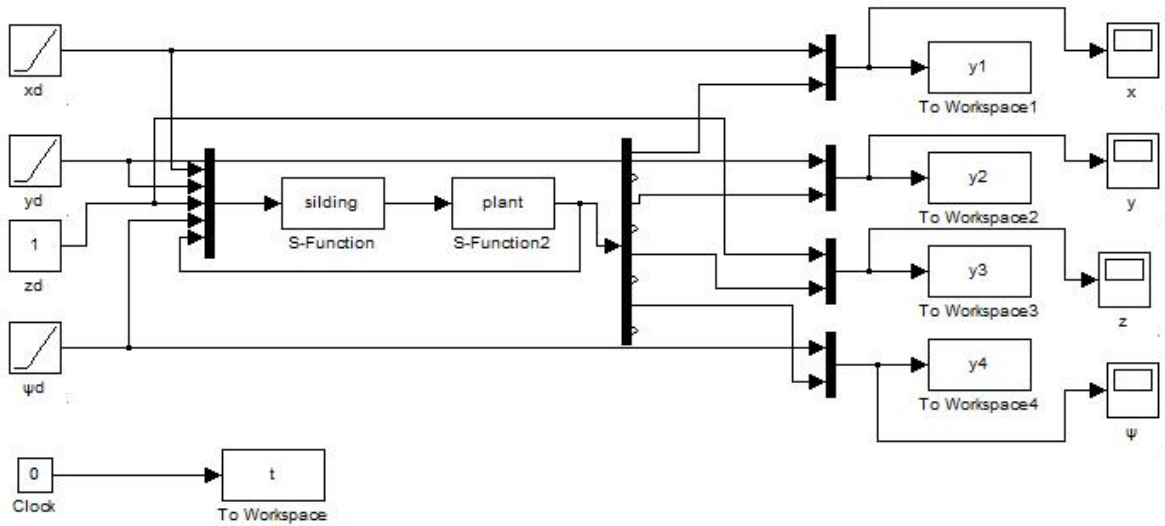
首先感谢我的导师李彦老师和张永林老师，在三年的研究生学习期间得到了老师们细心的指导和无私的帮助，使我学到了丰富的知识，顺利完成了课题的研究和论文的撰写工作。李老师和张老师严谨的治学态度让我终生受益，没有导师的悉心指导就不可能有本论文的顺利完成。

然后感谢仲崇光书记、钱安其部长、杨官校和尚婕等老师，在思想上和生活上给予我的无私帮助。还要感谢师妹何晓燕为我课题研究工作的开展提供了帮助。同时感谢实验室其他的同学，在平时的学习和生活中给予的热心帮助。

最后感谢我的家人在生活和精神上给予我的一切鼓励和帮助，让我在求学的生涯中没有一点后顾之忧，我取得的每一点成绩都与他们的默默付出息息相关。

附录

AUV 在 xoy 平面运动 Simulink 仿真建模图



AUV 在 xoz 平面运动 Simulink 仿真建模图

