

顺序号(硕): SS02620

姓名: 冉红格

学号: 21200602141

学院: 信息科学与工程学院

专业: 通信与信息系统

分类号_____

UDC _____



研究生学位论文

自主式水下机器人的路径规划与 路径跟踪方法

<http://www.ixueshu.com>

研究生姓名 冉红格

指导教师姓名 何波 副教授

申请学位级别 硕士 专业名称 通信与信息系统

论文答辩日期 2009年6月3日 学位授予日期 2009年6月

中国海洋大学

谨以此论文献给一直以来给予我关注、帮助和支持的人们！

-----冉红格

<http://www.ixueshu.com>

自主式水下机器人的路径规划与路径跟踪方法

学位论文完成日期: 2009.5

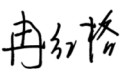
指导教师签字: 任江

答辩委员会成员签字:

陈永明
李新生
沈钰
杜永东

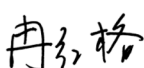
独 创 声 明


本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其
他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得（注：如没有其他需要特别
声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作
的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2009年6月3日

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，有权保留并
向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人
授权学校可以将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、汇编学位论文。同时授权中国科学技术信息
研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公
众提供信息服务。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签字：

签字日期：2009年6月3日

签字日期：2009年6月3日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

自主式水下机器人的路径规划与路径跟踪方法

摘 要

自主式水下机器人（AUV）作为重要的水下探测设备，对它的研究不仅有重要的经济意义，在军事领域也有迫切需要。随着经济的不断发展，人们对机器人性能的要求越来越高，机器人需要具备在运动过程中根据周围环境的变化自主采取相应措施的能力。对于智能水下机器人来讲，路径规划与路径跟踪问题一直以来都是研究的热点之一，它是指在有障碍物存在和其他限制的条件下水下机器人能够自主寻找一条从起始位置到目标位置的无碰最短路径，并能够实现对该路径的跟踪控制。本文主要结合“国家 863 项目”的研究需要，围绕移动机器人自主航行研究中的两项关键技术——路径规划与路径跟踪进行了系统研究，为该项目的顺利完成做出了贡献。

本文首先介绍了 AUV 的国内外研究现状、应用前景、发展趋势及本课题来源、研究意义等，接着研究了水下机器人的动力学方程和运动学模型，理解水下机器人的动力学模型对路径规划策略及跟踪方法的制定也是必要的。然后讨论了解决全局路径规划和局部路径规划的各种方法及特点，包括几何法、人工势场法、遗传算法等。本文主要讨论了采用基于栅格类环境描述的快速步进算法（FMM）进行海洋环境下的路径规划，该方法为 AUV 在海洋环境中进行全局路径规划提供了可行性方案，详细讨论了该路径规划算法的原理及其具体实现过程，并进行了编程仿真。仿真结果表明：**FMM** 路径规划算法具有执行简单、收敛速度快、效率高等特点，可满足系统实时性的要求。在路径规划的基础上，本文进一步讨论了 AUV 路径跟踪控制及其实现。根据 AUV 的运动学模型及动力学模型，利用基于 PID 控制器的 AUV 轨迹跟踪技术，在 Simulink 仿真环境中分别对直线路径、圆形路径及任意复杂路径进行了跟踪，并考虑了不同海流情况下的轨迹跟踪效果。仿真结果证明该算法具有快速、精确、全局稳定的良好特性。

关键词：水下机器人；路径规划；路径跟踪；快速步进算法；PID；

Path planning and Path Tracking for Autonomous Underwater Vehicles

Abstract

Autonomous Underwater Vehicle(AUV) is a kind of important underwater equipment. Its research has a profound economic meaning and is imminently needed because of military and politics reasons. The requirement of its ability to take corresponding measures in accordance with the environmental changes in its moving courses has become higher and higher. Autonomous navigation is a fundamental requirement for AUV. As one of key technology for autonomous navigation, path planning means that AUV can find an optimal path from starting position and end position in an obstacles environment and other constraint conditions, and is able to implement path tracking control for AUV. To resolve the practical problems in the national project (863), in the thesis, investigation to some key technology for autonomous navigation are presented. The focus of this paper can be divided into two parts: path planning and path tracking control for AUV.

Firstly, this paper introduces the research status on AUV at home and abroad, application prospects, development trends and the sources of this task, research significance. Secondly, this paper studies the AUV dynamics equations and kinematics model, which is indispensable to make path planning rules and tracking schemes. Lastly, this paper discusses all kinds of global and local path planning methods and characteristics, including geometric method, artificial potential field method, genetic algorithm and so on. On this basis, the global path planning in the ocean environment using Fast Marching Method (FMM) based on grid environment is studied in this paper. The method provides the feasibility proposal for AUV global path planning in the ocean environment, and FMM principle and operation process are also discussed in detail. In this paper, programming and simulation based on Fast Marching Method (FMM) is finished. The result proved that Fast Marching Method is

known to be efficient for finding cost optimal path because of its simple implementation, fast convergence and high reliability, and meet the system real-time requirement. On the basis of path planning, this paper also discussed AUV path tracking control and implementation. According to the AUV kinematics and dynamic model, path tracking control technology based on PID controller is studied, also, respectively taking tracking research on straight-line path, circle path and complex path in Simulink system. Meanwhile the result of path tracking with different ocean current is considered. The experiment result shows the tracking control method is fast, accurate and global stable properties. Path planning and tracking control system in this paper gives a satisfactory result after experiment.

Keywords: AUV; path planning; path tracking; Fast Marching Method; PID

<http://www.ixueshu.com>

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 AUV 的国内外研究现状、应用前景及发展趋势.....	1
1.2.1 水下机器人的国内外研究现状.....	1
1.2.2 AUV 的应用前景.....	5
1.2.3 AUV 的发展趋势.....	5
1.3 本科题的研究背景及意义	6
1.4 本论文的主要工作	7
2 水下机器人路径规划与路径跟踪技术	9
2.1 路径规划概述	9
2.1.1 路径规划的定义.....	9
2.1.2 路径规划问题的分类.....	10
2.1.3 路径规划的实现.....	11
2.2 路径规划方法	13
2.2.1 位姿空间法.....	13
2.2.2 可视图法.....	14
2.2.3 图搜索法.....	14
2.2.4 人工势场法.....	15
2.2.5 模糊逻辑方法.....	15
2.2.6 人工神经网络算法.....	16
2.3 路径规划方法的新发展	16
2.4 路径跟踪控制研究	17
2.5 本章小结	19
3 水下机器人的动态控制及仿真	21

3.1 研究对象概述	21
3.2 坐标系及坐标变换	21
3.2.1 坐标系.....	21
3.2.2 坐标变换.....	23
3.3 水下机器人动力学方程	24
3.3.1 水下机器人受力分析.....	24
3.3.2 空间运动方程.....	25
3.4 AUV 的简化仿真模型.....	31
3.5 控制系统的设计及仿真	32
3.5.1 PID 控制原理.....	32
3.5.2 增量式 PID 控制.....	33
3.5.3 AUV 仿真控制分析.....	34
3.6 本章小结	36
4 基于 FMM 算法的 AUV 路径规划.....	37
4.1 引言	37
4.2 算法概述	37
4.2.1 栅格环境模型.....	38
4.2.2 FMM 算法原理.....	39
4.3 路径规划模型	42
4.3.1 路径规划问题描述.....	42
4.3.2 快速步进算法求解.....	43
4.4 算法步骤	44
4.5 三维 FMM 算法.....	47
4.6 仿真结果	48
4.7 本章小结	50
5 基于 PID 控制器的 AUV 路径跟踪.....	51

5.1 跟踪思想	51
5.1.1 旋转规划	51
5.1.2 平移规划	52
5.2 运动轨迹产生	52
5.3 仿真模型	53
5.4 仿真结果	54
5.5 本章小结	58
6 总结与展望	59
参考文献	61
致 谢.....	66
个人简历	67
攻读硕士学位期间发表的论文	68

<http://www.ixueshu.com>

1 绪论

1.1 引言

21 世纪人类面临全球人口、资源、环境三大热点问题的挑战，不可避免地会越来越重视海洋并依赖海洋。由于陆地空间和资源的限制，海洋将成为人类下一个大规模进军的目标。海洋中蕴藏着丰富的矿产资源、生物资源和其他能源，占地球表面积 71% 的海洋是国际海底区域，该区域内的资源不属于任何一个国家，而属于全人类。由于科学技术和经济等方面的原因，人们对海洋长期的直接的探测被限制在水下几百米的范围内。哪一个国家有技术和经济上实力，就能率先享有这部分资源。因此，自 20 世纪 80 年代以来，美国、日本、英国、德国等国家分别制定了优先发展海洋高技术的战略决策，期望在 21 世纪海洋政治、经济和军事等各方面的竞争中处于有利地位，同时也期望在海洋领域找到新的经济增长点。

近年来人们把注意力投向了自主式水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, 简称 AUV)的研究和开发，这主要是由于自主式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。因此，无论在军事上，还是在商业上的不适合潜水员作业的场合，均可由 AUV 替代，例如充当深海工作平台、海洋勘探采样、水下测量等研究应用领域，自主式水下机器人都具有无可比拟的优越性^[1]。

1.2 AUV 的国内外研究现状、应用前景及发展趋势

1.2.1 水下机器人的国内外研究现状

水下机器人也称为潜水器，准确地说，它不是人们通常想象的具有人的形状的机器人，而是一种在水下能够代替人完成某种任务的装置，其外形更像潜艇。根据俄罗斯科学家 B.C.亚斯特列鲍夫等人所著的《水下机器人》，第三代机器人即智能水下机器人是一种具有人工智能的系统，具有非常高的自主学习、自主适

应外界环境变化的能力。操作人员只需下达指令给机器人，其任务则由水下机器人自动完成。AUV 在海洋开发、深潜技术、海底探测等领域具有广泛的应用前景。近 20 年来，水下机器人有了很大的发展，它们既可民用又可军用。例如，在民用领域，可用于海底考察、数据收集、钻井支援、海底施工、水下设备维护等；它们在海上军事对峙中可以执行很多种任务，使得在海战中以最少的人员伤亡快速夺取军事优势成为可能，它们还可用于海岸侦察、排雷、反潜、通信、导航等任务。

按照无人潜水器与水面支持设备（母船或平台）间联系方式的不同，水下机器人主要分为两大类^[2]：一种是有缆水下机器人，习惯把它称为遥控潜水器 (Remote Operated Vehicle, 简称 ROV)；另一种是无缆水下机器人，习惯称为自治潜水器 (Autonomous Underwater Vehicle), 简称 AUV。无缆水下机器人是新一代智能机器人，是一种非常适合海底搜索、调查和识别的既经济又安全的工具。与有缆水下机器人 (ROV) 相比，它具有活动范围大、潜水深、机动性好、安全、智能化、运行和维护费用低等优点，成为完成各种水下任务的重要工具。由于无缆水下机器人具有活动范围不受限制，隐蔽性好等优点，从 60 年代中期起，工业界和军方开始对无缆水下机器人发生兴趣。

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物力，用于研究和开发自主式水下机器人。美国的 AUV 研究机构非常多，其中，美国海军空间和海战（SPAWAR）系统中心主要从事 AUV 的指挥和控制系统、光纤和水声通信系统、非金属材料 and 运载器总体的研制，其代表性的 AUV 有 AUSS^[3] (如图 1-1)。AUSS 是用于深海搜索的鱼雷形 AUV，全长 5200mm，直径 800mm，重量 1230kg，以最大速度 6kn 航行续航力为 10 小时，采用 20kWh 银锌电池，推进装置为 2 个垂直推进器和 2 个纵向推进器。AUSS 带有水声通信设备，可在水深 6000m 的水下向水面传送侧视声纳数据，AUSS 是自主式的，它对目标的搜索时间只为常规拖曳式搜索系统的 1/10。麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology）研制的“Odyssey II” (如图 1-2)，该 AUV 长度为 2200mm，直径 570mm，水平运动速度大于 4kn，爬升速度大于 3kn，续航力 6 小时（3kn 时），如果采用最大电池结构，续航力可达 24 小时。该 AUV 主要采用 1.1kWh 的银锌电池（采用最大电池结构时 >5kWh），推进系统在四个控制面后方有一个电动推

进器。2008 年 10 月，麻省理工学院设计出一款能悬浮在海里的潜水机器人，命名为“奥德赛 4 号”^[4]。新罕布什尔大学(University of NewHampshir 海洋系统工程实验室研制的东部“EAVE-EAST”^[5]，其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、监控和指导等；低级部分包括实施管理、传感器管理和系统监视等。



图 1-1 美国的 AUSS

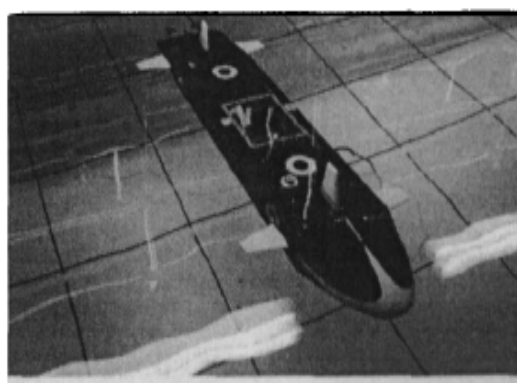


图 1-2 Odyssey II

日本在对 AUV 研究开发的同时，还进一步强调 AUV 技术的实用性。东京大学 URA(浦)实验室开发了多种性能不同的自主式水下机器人，如“Twin-Burger”、“PTEROA150、250”及“R1”等。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。英国巴斯大学研究人员宣称，一种酷似螃蟹的原型机器人(如图 1-3)在未来的水下勘测探索任务中将表现得十分出色。英国 TRITON LOGGING 公司还研制了 SAWFISH 水下伐木机器人(如图 1-4)。德国的 STN 公司开发的名为“深海” C(DeePC)(如图 1-5)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。STN 公司计划在 DeePC 上使用许多新技术，包括碳纤维增强塑料、缩微燃料电池、长航时水下导航系统等。俄罗斯也相当重视 AUV 技术的发展，这方面的研究主要由俄科学院远东海洋技术问题研究所承担。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验。2004 年 11 月澳大利亚国防科学与技术组织(DSTO)试验一艘名叫“海龟”(如图 1-6)的水下机器人，它装备了大量的导航、通信和监视传感器，而且还有装载大量额外负载的能力。它在技术方面的一个重要特点是能够导航和与外部世界通信而无需浮出海面。挪威近年先后推出

HUGIN1、HUGIN1000 和 HUGIN3000 三种自主潜航器，它们采用电池供电，可由水面舰艇通过声监视设备控制或利用内置控制系统与情报设备资助运行。其它经济较为发达的海洋国家和地区，也在进行 AUV 的研究开发，如加拿大的“Dolphin”、“Theseus”等。



图 1-4 SAWFISH 水下伐木机器



图 1-5 深海“C”



图 1-6 “海龟”起吊中

我国水下机器人的研究也日趋成熟,中科院沈阳自动化研究所于 1995 年研制的 CR-01 型 6000 米自治水下机器人,标志着我国自治水下机器人的总体水平跻身于世界先进行列,使我国成为世界上拥有这项技术和设备的少数国家之一。2008 年 3 月研制的 6000 米自治水下机器人在某些技术指标上超过了 CR-01 型,CR-02 型能穿透 50 米厚的泥层,除了深海复杂环境下的海底矿产资源调查外,CR-02 型也可以应用于失事舰船调查和深海科学考察等工作。图 1-7 是 CR-02 水下机器人^[6]准备下水的照片。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”^[7](如图 1-8),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,是国家“863 计划”海洋技术领域的一项重要课题。2009 年,中国自主研发的世界首个 7000 米载人水下机器人将进行下海试验,中国自主研发的 7000 米

水下机器人可以载 3 个人，最深可下潜至海下 7000 米。



图 1-7 CR—02 水下机器人



图 1-8 北极“ARV”

1.2.2 AUV 的应用前景

AUV 的研制技术已经取得了迅速地发展，代表了未来水下机器人技术的发展方向，是当前世界各国研究工作的热点,特别是未来海上作战等军事需求的增加，给 AUV 的发展带来了无限生机，也预示着 AUV 开始走向应用阶段。发展军事用途的移动水下机器人是因为军事行动的复杂性和持续时间较长，使得海军需要隐蔽性好，坚固耐用的无人设备执行信息收集、侦察、确认和俘获目标等任务。这样的设备在海军传统设备无法到达的地方（北极地区，浅滩，敌方军事禁区等）的作用显得尤为重要。根据现有的海军传统及理论再加上海军的实践，不久的将来海上冲突中一个重要的角色将会由移动水下机器人来扮演。就目前的科学技术水平而言，移动水下机器人当然还无法执行海军所有的任务。但是，在某些特别危险和需要强隐蔽性的任务中，移动水下机器人是非常有用的，甚至是必不可少的。另外，AUV 可以独立于载人系统单独地进行作业或者作为自主式辅助工具提高无人系统的工作效率，AUV 在海洋科学考察和海洋工程项目支持保障方面发挥着非常重要的作用。AUV 还可以用于完成深海建模任务，即对全球范围海洋活动进行更广泛的三维观测以及海底探测以便评价海洋资源是否有工业开采价值等方面。

1.2.3 AUV 的发展趋势

随着 AUV 技术的日益成熟，未来的发展将趋于远程化、大深度和智能化。

(1) 远程化

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) 大深度

6000 米以上水深的海洋面积占海洋总面积的 97%，因此许多国家把发展 6000 米水深技术作为一个目标。美国、日本、俄罗斯、中国等国都先后研制了 6000 米级的 AUV。美国伍兹霍尔海洋研究所研制成一种深海探测潜器“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 米自治水下机器人“CR-01”，它主要用于太平洋洋底多金属结核的调查。

(3) 智能化

现阶段的 AUV 只能用于观察和测量，没有作业能力，而且智能水平也不高，提高水下机器人智能行为一直是各国科学家的努力目标。将来的 AUV 将更多地依赖传感器和智能。可以在 AUV 上安装水下机械手，使 AUV 具有作业能力，这是一个长远的目标。不完全依赖于机器的智能，更多地依赖传感器和人工智能，我们把这种机器人称为基于传感器的先进水下机器人。另外，发展多机器人协同控制技术，也是增加 AUV 智能的重要方面。

1.3 本科题的研究背景及意义

本课题来源于“国家 863 计划”——基于同时定位与地图构建方法的 AUV 自主导航技术，主要对水下机器人的路径规划和路径跟踪两个问题进行了系统研究：一方面，基于 FMM 算法对水下机器人的全局路径规划进行深入研究及仿真实验。另一方面，以该项目中的 AUV 样机 C-Ranger 为对象，研究其路径跟踪问题，根据鲁棒控制算法，在自行研制的 AUV 样机上，进行了轨迹跟踪的仿真实验。

作为一种自主式海洋运载器，“自主化”是水下机器人领域研究的永恒目标之一，这种自主能力的真正含义是具有和外部环境进行交互的能力，这种交互能力的一个重要方面就是具有全局路径规划以及突发事件下的全局重规划和躲避障碍的能力。在海洋探测领域，“原位探测”(in-situ)一直以来是海洋工作者孜

孜孜以求的目标。“原位探测”对 AUV 而言实质就是高度的自主环境探测和导航，要使水下机器人实现这种在水下的自治航行，机器人的路径规划和路径跟踪能力就显得尤为重要。路径规划与路径跟踪水平的高低，在一定程度上标志着机器人的工作水平，也是保证机器人安全可靠工作的关键。

全局路径规划是 AUV 应具有的一种智能行为。全局路径规划是根据先验知识（如给定地图），在某些约束条件下，规划出一条从起点到终点的无碰路径。从实质上来说，全局规划是一个有约束的优化问题。一般而言，机器人完成给定任务可选择的路径有许多条，实际应用中往往要选择一条在一定准则下为最优（或近似最优）的路径，常有的准则有：路径最短、消耗能量最少或使用时间最短等。

1.4 本论文的主要工作

本文围绕自行研制的 AUV 样机(C-Ranger)展开对其路径规划和路径跟踪的分析与研究，考虑了该样机的动力学约束，主要在二维环境中，利用提出的路径规划方法 FMM 算法进行全局路径规划，通过在 MATLAB 中仿真验证，可以得到在各种复杂环境中的最优路径，实时性良好且执行简单，接着对三维空间的路径规划进行了简单讨论。路径跟踪也是体现水下机器人智能的关键技术之一，本文在路径规划获得期望路径的基础上，在 SIMULINK 仿真环境中，使用增量式 PID 路径跟踪控制算法在 AUV 模型上进行了路径跟踪的仿真，考虑了在不同海流影响下，AUV 跟踪期望的直线路径、圆形路径及任意复杂路径的效果，仿真结果表明：该路径跟踪算法能够使水下机器人良好地跟踪上预设的路径，实现了快速、准确定位。

本论文各章的内容安排如下：

第一章绪论，简要介绍了 AUV 的有关内容，首先介绍 AUV 的国内外研究现状及应用前景，并给出了 AUV 的三种发展趋势，接着说明了本课题的研究背景及意义，最后介绍本论文的主要工作。

第二章主要介绍了水下机器人路径规划及路径跟踪技术，包括路径规划的定义、分类及实现、几种典型的路径规划方法、路径规划的新发展以及路径跟踪的各种技术研究，最后提出了本文所使用的路径规划及路径跟踪方法。

第三章主要介绍了该课题使用的 AUV 样机 (C-Ranger), 描述了水下机器人所用的坐标系和运动参数, 然后根据实际的情况分析了水下机器人的动力学方程和空间运动方程。

第四章主要讨论了利用 FMM 算法在栅格环境地图中进行 AUV 的全局路径规划, 首先详细阐述了该算法的理论来源以及在路径规划上的应用, 接着, 使用 MATLAB 编程语言进行仿真, 给出了 AUV 在各种二维环境地图中全局路径规划的结果, 证明了该路径规划方案的可行性, 最后, 对该算法扩展到三维空间的理论进行了分析研究。

第五章主要阐述了基于增量式 PID 控制算法的水下机器人路径跟踪, 详细介绍了该路径跟踪算法的执行步骤, 以及 PID 控制参数的在线调整, 以期达到较为理想的效果。重点考虑了不同海流影响下和动力学的约束下, 包括速度、加速度的限制, AUV 跟踪直线路径、圆形路径及复杂路径的仿真结果。

最后, 第六章对所做的工作进行了总结, 并提出了有待进一步解决的问题。

<http://www.ixueshu.com>

2 水下机器人路径规划与路径跟踪技术

2.1 路径规划概述

移动机器人的研究包括多个方面，但路径规划是其研究的基础和重点^[8]。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，同时也体现了机器人的智能性，我们希望未来的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信息，利用这些信息构造一个关于周围环境的符号化世界模型，同时利用这些模型来规划、执行由应用者下达的高层指令。其中的规划模块能生成机器人要执行的大部分命令，其目标是实现机器人的使用者在较高层次上给机器人下达的一些较宏观的任务，由机器人系统自身来填充那些较低层的细节问题。

在过去的二十几年里，随着人工智能、计算机科学、数学和机械工程等研究的飞速发展，路径规划的研究在理论和实践方面都有了很大提高。路径规划涉及到许多重要的数学工具，如经典几何学、拓扑学、代数几何学、代数学和组合学等，所以，路径规划除了产生有效的规划方法外，还能增长在数学结构方面的认识与探索。不仅仅是在数学领域，路径规划实际上处于多学科交叉领域，因而给新理论和新方法的产生提供了广阔的实践舞台。

2.1.1 路径规划的定义

移动机器人的导航问题主要是由 Durrant-Whyte H F 提出的三个问题^{[9][10]}：

- (1) “Where am I ? ”
- (2) “Where do I want to go?”
- (3) “How do I get there? ”

第一个问题是移动机器人的定位问题。第二个问题与机器人的具体任务有关，即任务规划。第三个问题是路径规划问题，可以被描述成：给定一个移动机器人所处的环境（环境可以通过移动机器人视觉系统或其他途径获得），一个起始点和一个期望的目标点，机器人路径规划根据一定的任务要求，寻求一条连接

到起始点到终点且能避开环境中障碍物的运动轨迹,即最优或次优有效路径。蒋新松院士在文献^[11]中为路径规划作出了这样定义: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。障碍物在环境中的不同分布情况直接影响到规划的路径,而目标位置的确定则是更有更高一级的任务分解模块提供的。

J.T.Schwartz 和 M.Shair^[12]是这样定义路径规划的:设 R 是一个由若干刚体部件(其中一些可能与其它部分用关节相连,另一些可能会独立地存在)所组成的机器人系统,它共有 k 个方向的自由度,并假设 R 在一个充有若干机器人系统已知障碍物的二维或三维空间 V 自由运动。对 R 来说,路径规划问题就是给定 R 的起始位置 B_1 , 和一个希望达到的终止位置 B_2 , 确定是否有一条对 R 来说从 B_1 到 B_2 的无碰路径,若有,则规划出来。

2.1.2 路径规划问题的分类

依据对周围环境的了解情况,机器人路径规划可以划分为全局路径规划和局部路径规划^[13]。全局路径规划需要知道运动空间里所有的障碍物信息,根据环境地图进行大粒度的路径规划,主要着眼于规划出一条从起始位置到目标位置的安全路径,并且会综合考虑整个任务的要求和机器人自身性能,通过某种搜索算法,在机器人的运动空间中寻找到相应的最优路径;而局部路径规划则只需要距离机器人较近的障碍物信息,立足于实时性,机器人行走过程中,根据传感器的信息来不断地更新其内部的环境表示,从而确定出机器人在地图中的当前位置及周围局部范围内的障碍物分布情况,从而规划出机器人下一时刻的运动情况,获得一条从起点到某一子目标点的无碰优化路径。实际上,全局规划和局部规划之间并没有绝对的界线,而是相通的。我们可以将全局规划和局部规划两者结合起来分析机器人路径规划问题:首先,在现有信息基础上规划全局路径,同时,机器人在航行过程中不断感知外界环境,获取新的障碍物信息,并把这些新的信息融合到其环境模型中,所以,机器人就能不断地丰富自身的知识,更新环境地图,找到最优路径,完成使命。

根据完整性(Completeness),还可以把路径规划算法分为启发型和确定型两

种类型。前者致力于在较短时间内找出问题的答案，但是，它无法解决较困难的问题或给出一个问题的最优解。后者一般可以找到问题的答案，除非证明它无解。

2.1.3 路径规划的实现

一般地，在解决路径规划问题的时候，总会涉及到下面几个问题：位姿空间、环境表达、搜索策略、路径生成、路径优化或平滑等。机器人在规划路径前首先将环境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世界模型，这个过程我们称为环境建模。把对机器人活动空间的有效描述称为环境模型，其中主要是障碍物的表示方法。路径搜索策略一般都与建模方法有关，它负责从环境模型中搜索出路径的可行空间；路径生成是从搜索到的路径可行空间中生成一条可行路径；而路径优化是考虑智能机器人的动力学特性，让路径更有利于水下机器人的执行，而生成的一条平滑的最优路径。

(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(Configuration Space)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或禁区，称为“位姿空间障碍域”(Configuration Space Obstacles)。在这个区域中，运动物体会与障碍物发生碰撞，实际上是构造出了一个虚拟的数据结构，把运动物体、障碍物及其几何约束关系作了等效变换，简化了问题的解决方法。位姿空间最初是由 lozano-Perez 和 Wesley^[14]提出来的，它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) 环境表示

机器人在规划前必须要在其内部的世界模型中建立一个对环境主要是障碍物的表示方法，这种对机器人活动空间的有效描述称为环境模型。合理的环境表示才有利于规划中搜索量的减少，才能有利于时空开销的减少。不同的规划方法正是基于这种不同的环境建模基础之上的。

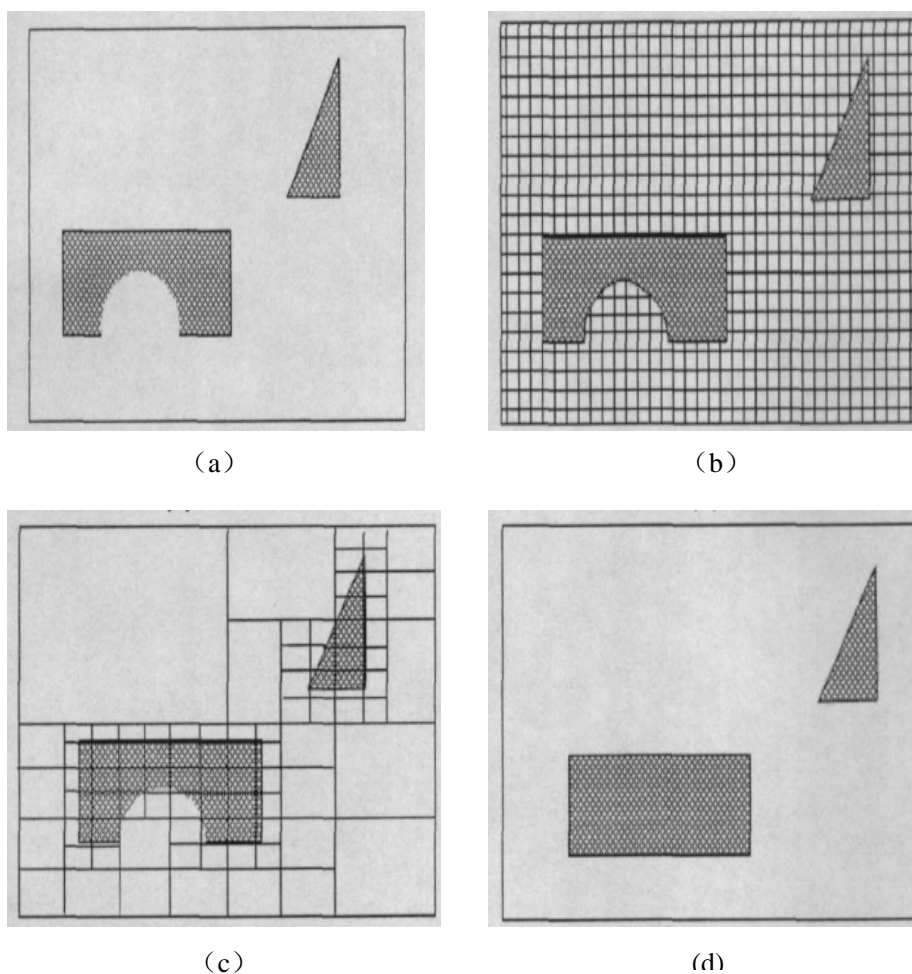


图 2-1 常用的环境表示方法

图 2-1 给出了几种常用的环境表示方法,其中,(a)表示原始的工作环境空间,(b)中的栅格法用大小相同的栅格划分机器人的工作空间,并用栅格数组来表示环境,每个栅格点表示两种状态之一,或属于自由空间,或属于障碍物空间。图(b)中所示的黑格代表障碍物,栅格数组的值标记为 1,白格代表自由空间,标记为 0,通过搜索这张栅格图可以得到运动物体的最优路径。栅格法执行简单,为路径规划的实现带来了很大方便,但是表示效率不高,存在着时空开销与求解精度之间的矛盾。

单元树法的出现克服了栅格法的缺点。这种方法把机器人工作空间划分成几个较大的单元(一般来说,二维空间分成 4 部分,称为四叉树;三维空间划分成 8 部分,称为八叉树),如图 2-1 中的(c)。划分得到的每个单元所占用工作空间可能是下面三种情况之一:都为自由空间,都为障碍物空间或混合型空间(既包含了障碍物区域,又包含了自由区域)。对于最后一种类型的单元按照前面的方法继续进行划分,直到达到预先设定好的精度为止。该方法的主要缺点是计算

单元之间的邻接关系的损失较大。图 2-1 中(d)所表示的是多边形法,该方法用多边形来逼近障碍物,并使用了很多成熟的诸如求交叉点和测距等方面的解析几何算法。

(3) 搜索策略

给定机器人工作空间的表示方法和标识出自由位姿空间后,路径规划问题就转变为从自由空间中找到一个从起始位姿到终止位姿的连续的位姿序列的问题了。文献^[15]中把搜索技术分成如下三类:基于微积分的搜索技术使用由优化问题的解来满足的一组充分必要条件;有指导的随机搜索技术以枚举技术为基础,但附带了一些指导过程的信息,遗传算法是其特例之一;枚举技术是搜索目标函数的域空间中的每一个节点,它的实现简单,但可能会需要大量的计算。在路径规划技术中常用的深度优先搜索、广度优先搜索、A*搜索都是特例。

2.2 路径规划方法

为了解决路径规划问题,人们已经探索出大量富有成效的解决方法,比如单元分解法、人工势场法、数学分析法和几何法等基本方法。典型的路径规划问题是指在有障碍物的工作环境中,按照一定的评价标准(比如能量最小、距离最短等)为机器人寻找一条从起点到终点的运动路径,让机器人在运动过程中能安全、无碰撞的穿越所有的障碍物。

2.2.1 位姿空间法

位姿空间法是目前研究移动机器人路径规划的一个基本方法,其基本思想是用位姿空间中的一个点来表征机器人的位置和方向。位姿空间法是由 W.E.Howden^[16]、S.Udupa^[17]、T.Lozano_Perez 和 M.A.Wesley^[14]、R.A.Brooks^[18] 等人发展的一种无碰路径规划算法。其实质是根据运动物体的大小和姿态,把周围的障碍物向外扩展到一定的距离,即通过数字图像处理中相应的“膨胀”原理,变成扩展障碍物。同时,运动物体缩小为一个点(运动物体的位姿描述简化为位姿空间的一个点),从而得到的新空间,称为位姿空间。由于环境中障碍物的存在,运动物体在位姿中相应的有一个障碍区。这样把原始空间中求运动物体的无碰撞问题,转换成位姿空间中求一个质点的运动路径问题。位姿空间法把原来求

一般物体无碰撞路径问题，转化为求质点在位姿空间的安全问题，使问题得到简化，因此得到了广泛的应用。

2.2.2 可视图法

目前，最常用的方法是可视图法^[19]，它定义为：在一个无向图中，将机器人、目标点和多边形障碍物的各顶点进行组合连接，并保证这些直线均不与障碍物相交，这就形成了一张图，称为可视图。即要求机器人和障碍物各顶点之间、目标点和障碍物各顶点以及各障碍物顶点与顶点之间的连线均不能穿越障碍物，也即直线是可视的。从而搜索最优路径的问题就转化为求经过这些可视直线从起点到目标点的最短距离问题。如果机器人的尺寸大小忽略不计，很有可能使得机器人通过障碍物顶点时离障碍物太近甚至接触，而且该算法在障碍物比较密集的环境搜索时间长。因此，可视图法虽然可以求得最短路径，但缺乏灵活性，且存在组合爆炸问题。后有 Voronoi Diagrams 法和 Tangent Graph^[20]法对可视图法进行了改进。

2.2.3 图搜索法

图搜索法采用预先定义的基本形状构造自由空间，把自由空间切分为一个个的单元。若全部包含障碍物，称为障碍物单元；若不包含障碍物则称为自由单元；若部分包含障碍物，则称为混合单元。该算法将这些基本单元及它们之间的联系组成一个连通图，然后运用一定的搜索策略进行路径的搜索。其中主要方法有：自由空间法和栅格解耦法^[21]。

(1) 自由空间法

自由空间法通常采用预先定义的如凸区法^[22]、三角法^[23]、广义锥法等基本形状构造自由空间，按比例扩大障碍物，而把机器人缩小成一点，然后采用预先定义的基本形状构造自由空间来描述机器人及其周围的环境，并将自由空间表示为连通图，然后通过搜索连通图来进行路径规划。

(2) 栅格解耦法

该方法将机器人的工作空间解耦为多个简单的区域，一般称为栅格，然后通过优化算法在栅格图中搜索一条从起始栅格到目标栅格的路径来完成路径搜索。

栅格解耦法包括确切的和不确切的两种。A.Elfs^[24]提出的网络模型将确定性的网络用于离线的全局规划。Faverjon^[25]采用八叉树表示三维环境的位姿空间，用于机械手的运动规划。Subbarao Kambhampati 采用不完全四叉树表示工作空间，将叶节点连接成一张拓扑图，规划出满足性能的指标路径。路径的搜索策略主要有:A*算法^[26]、D*算法^[27]等。

2.2.4 人工势场法

人工势场法^[28](Artificial Potential Fields)用于路径规划是由Khatib于1986年提出的，它是对机器人系统及环境的一种抽象描述，类似于电子在正负电荷产生的电场中运动。其基本思想是将目标看作吸引点，障碍物看成排斥点，构造目标位姿引力场和障碍物周围斥力场共同作用的人工势场，搜索势函数的下降方向来寻找无碰撞路径。在水下机器人的局部避障研究中，局部环境中的子目标为引力极，各障碍物为斥力极。在局部环境中的障碍物模型必须在机器人系统运行过程中动态建立，局部环境信息用于计算机器人的控制力。该方法简单，便于底层的实时控制，在实时避障和平滑的轨迹控制方面得到了广泛的应用，但是，会因为局部极值点的问题而使机器人运动到一个死区，发生震荡现象，从而导致规划失败。这些不利因素限制了人工势场法在全局路径规划中的应用，但由于其简单性，适用于局部路径规划。文献^[29]考虑移动机器人的动力学约束，提出机器人路径规划的最优控制方法，从而使得机器人在避开运动障碍的同时，以最优性能指标完成指定任务。文献^[30]提出移动机器人最优路径规划的算法，解决了最优路径规划的初始点选择问题，大大提高了算法运算速度，实现了机器人在运动障碍物环境中的实时路径规划。

2.2.5 模糊逻辑方法

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^[31]。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。模糊逻辑避碰是一种仿人控制过程，其原理就是根据经验总结的规则确定输出值。该方法最大的优点是参考人的驾驶经验，计算量不大，易做到边运动边规划，能够满足实时性要求。同时，克服了人工势场法易产生局部极小点问题，

对处理未知环境下的规划问题显示出很大优越性或当外界只能提供定性进似的、不确定信息数据时非常有效，而对解决通常的定量方法来说是很复杂的问题。模糊控制算法有诸多优点，但也有其缺陷：人的经验是不完备的，输入量增多时，推理规则和模糊表会急剧膨胀。

Wang^[32]及张汝波和顾国昌^[33]等人的研究工作具有一定的代表性。Wang 等人对移动机器人的局部避碰进行了较为系统的研究。内容涉及传感器的建模及优化，运动物体的躲避，局部极小点的逃出等方面。顾等人研究了水下机器人的模糊局部规划方法，在二维环境中，对位置和艏向的模糊避碰规则进行了讨论。在上述学者的研究中，虽然涉及到速度等因素，但实际上并未考虑到机器人的动力学特性。

2.2.6 人工神经网络算法

人工神经网络算法（Artificial Neural Networks,ANN）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算法的数学模型。这种网络依靠系统的复杂程度，通过调整内部大量节点之间相互连接的关系，从而达到处理信息的目的。它具有自学习和自适应能力，即能够使机器人具有自学习能力，使机器人在运行中通过与环境的交互或者是人的指导，逐步提高对环境的适应能力的方法。

路径规划是感知空间到行为空间的一种映射，这种映射关系可以用不同的方式表示，但在规划中很难建立起精确数学模型，神经网络巧妙地避开了这一点，可以通过其网络的自学习来达到建立精确模型的目的。通常，在机器人局部规划中采用神经网络技术，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，对归纳总结出的模型规则采用神经网络对其记忆，这样，即使输入值偏离学习样本，但只要输入模式接近某一学习样本的输入模式，其输出也就接近学习的输出模式。目前一些学者提出利用神经网络和模糊数学理论结合实现具有模糊推理的局部规划器。

2.3 路径规划方法的新发展

以上我们介绍了一些基本的路径规划方法，每种方法都存在优点和不足。目

前，智能机器人领域的研究者们又在探索新的规划方法。为了更加高效地解决复杂的路径规划问题，算法的研究领域在不断拓宽，算法也在不断创新。总体来讲，目前路径规划方法向着互相结合，取长补短的前进方向发展，即向着两种或多种已有算法的有机结合的方向发展。

(1) 局部路径规划的目的是要快速避开新出现的障碍物，在这方面，比较有效的办法是人工势场法及从它衍生的雷达法^[34]等。许多研究者都把各种含有自学习能力的算法引入局部路径规划。例如：模糊理论^[33]人工神经网络、动态二叉树法^[35]、遗传算法与人工势场法的结合、Kimmo Pulakka 和 Veli Kujanpaa 利用 SOFM 神经网络来进行路径规划的方法^[36]等。

(2) 依据环境模型，也产生了诸多解决机器人全局路径规划的方法。文献^[37]根据传统的路径规划算法存在的问题，提出了一种新的路径规划算法。将栅格法和单元树法相结合用于解决二维和三维空间的路径规划问题^[38]；八叉树法和人工势场法相结合来解决动态环境下三维空间的路径规划问题^[39]。

在全局路径规划中，蚁群算法(ant colony optimization, ACO)是一种模拟进化算法，它是基于生物界群体启发行为的一种随机搜索寻优方法，是一种求解组合最优化问题的新型通用启发式方法，该方法具有正反馈、分布式计算和富于建设性的贪婪启发式搜索的特点。通过建立适当的数学模型，基于故障过电流的配电网故障定位变为一种非线性全局寻优问题。文献^[40]在基于栅格划分的环境中，研究了机器人路径规划问题中蚁群系统的“外激素”表示及更新方式，并将遗传算法的交叉操作结合到蚁群系统的路径寻优过程中，提高了蚁群系统的路径寻优能力。然而，带有学习性质的算法，有些收敛速度慢，有些需进行多次训练才能较好地解决路径规划问题。

2.4 路径跟踪控制研究

在移动机器人运行中，并不都要求移动机器人在特定时刻到达指定方向、位置，只需能跟踪几何路径，即路径跟踪。它融合了嵌入式系统应用、计算机实时控制、图像处理和目标识别、自动控制等多种技术，在各个领域中得到了广泛应用。因此，跟踪控制技术也是 AUV 导航与定位研究的重要组成部分，现有的机器人跟踪控制方法大致可分为以下几类：

(1) 基于反馈线性化方法

该方法主要是通过反馈线性化理论(如计算力矩方法)对机器人的非线性进行完全补偿,得到一个全局线性化的闭环方程,然后可以利用成熟的线性控制理论进行分析和设计,如极点配置、小增益原理等补偿不确定因素影响,使系统达到一定的鲁棒性能要求。基于反馈线性化的鲁棒控制^[41]的主要优点是可以利用成熟的线性控制理论,在已知系统的线性性能特征(如:超调量、阻尼比等)的情况下,该方法比较有效。但在不完全了解机器人的动力学的情况下,难免导致补偿不彻底,通常采用高增益的方法^[42]来保证系统的鲁棒性,但高增益可能带来过大的控制作用,而导致控制器或执行器饱和问题。

(2) 基于滑模变结构方法

滑模控制(Sliding-Mode Control)方法是一种特殊的鲁棒控制方法,基于滑模变结构方法设计的移动机器人跟踪控制器有较强的鲁棒性,对内、外部的干扰不敏感。变结构控制系统的特征是具有一套反馈控制律和一个决策规则,该决策规则就是所谓的切换函数,将其作为输入来衡量当前系统的运动状态,并决定在该瞬间系统所应采取的反馈控制律,结果形成了变结构控制系统。该变结构系统由若干个子系统连接而成,每个子系统有其固定的控制结构且仅在特定的区域内起作用。引进这种变结构特性的优势之一是系统具有每一个结构有用的特性,并可进一步使系统具有单独每个结构都没有的新的特性,这种新的特性即是变结构系统的滑动模态。滑动模态的存在,使得系统在滑动模态下不仅保持对系统结构不确定性、参数不确定性以及外界干扰等不确定性因素的鲁棒性,而且可以获得较为满意的动态性能。Yong 首次提出了应用于机器人控制的变结构控制器^[43], Jong-Min Yang 等在文献^[44]给出一个在极坐标形式下的跟踪控制器,并证明了控制器的稳定性。文献^[45]提出了一种新型的滑模 PID 控制器,且不使用等价控制项。

尽管滑模控制方法有上述优点,但是滑模变结构控制的抗干扰能力要在滑动阶段才表现出来,因此滑模界面切换时的抖动问题是一个突出的缺陷。针对控制器抖动问题,文献^[46]提出所谓的“吸口控制”(suction control)算法很好地解决了这个问题。

(3) 基于 Backstepping(后推)思想

基于后推方法的路径跟踪控制器是目前研究比较广泛的机器人跟踪控制方法。**Backstepping**(逐步后推,反推)方法是针对不确定系统的一种系统化的控制器综合方法,该方法的基本思想是将 **Lyapunov** 函数的选取与控制器的设计相结合的一种回归设计方法。将复杂非线性系统分解为多个子系统,首先设计最基本子系统的稳定控制器,引入虚拟控制的概念,把每个子系统将状态坐标的变化(虚拟控制量)和一个已知切 **Lyapunov** 函数的虚拟控制系统的镇定函数联系起来,然后通过积分器后推,逐步修正算法,从而设计镇定的控制器,获得系统最终真正的控制律。

文献^{[47][48]}给出了基于简化动力学模型的后推方法,通过设计合适的辅助速度控制输入实现非完整移动机器人对期望轨迹的跟踪。文献^[49]采用基于积分 **backstepping** 时变状态反馈方法,引入具有双曲正切特性的虚拟反馈量,设计机器人轨迹跟踪控制算法,并且利用 **Lyapunov** 方法证明系统的全局稳定性。考虑到机器人的动力学约束,控制律中引入机器人系统速度、加速度受限策略以保证机器人运动平滑。

(4) 基于鲁棒控制方法

近十多年来,鲁棒控制(**Robust control**)理论得到迅猛发展。所谓“鲁棒性”,是指控制系统在一定(结构,大小)的参数摄动下,维持某些性能的特性。以闭环系统的鲁棒性作为目标设计得到的固定控制器称为鲁棒控制器。它是基于不确定性的描述参数和标称系统的数学模型来设计控制器,能以固定的控制器,保证在不确定性破坏最严重的情况下系统的稳定性。

许多学者将神经网络与鲁棒控制结合起来,同时结合了自适应与鲁棒控制方法两者的优点形成鲁棒自适应控制方法,如文献^[50]中提出三种变结构自适应控制(**VSA**)算法,在抗干扰能力以及抑制“抖动”方面要比单独的自适应控制或变结构控制强。文献^[51]将鲁棒自适应控制和迭代学习相结合,提高了重复控制过程的抗干扰性和不确定系统的鲁棒性。

2.5 本章小结

路径规划与路径跟踪是体现机器人的智能性的标志之一,也是智能机器人的核心技术。本章就机器人路径规划技术展开讨论,首先简要介绍了路径规划问题

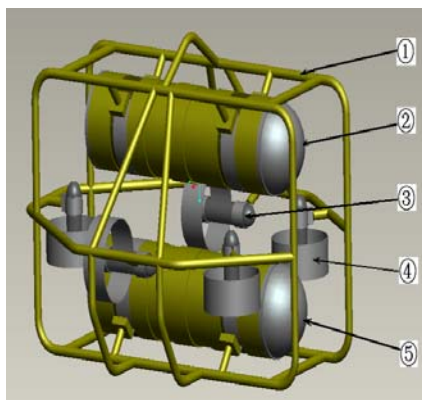
的定义、分类及实现，包括位姿空间、环境表示及搜索策略等，重点讨论了传统路径规划方法、基于智能的路径规划方法以及广泛使用的路径跟踪控制技术。

3 水下机器人的动态控制及仿真

3.1 研究对象概述



图 3-1 AUV,C-Ranger



- ① AUV 支撑架
- ② AUV 上桶
- ③ 水平推进器
- ④ 垂直推进器
- ⑤ AUV 下桶

图 3-2 AUV (C-Ranger) 外形设计

作为本文的研究对象,其外观示意图如图 3-1 所示,我们实验中所用机器人为图 3-2 所示的样机 C-Ranger。该水下机器人由两个上下圆桶外壳和五个推进器组成,其中包括三个垂直推进器和两个水平推进器,前者用于深度控制,后者用于水平运动控制。该外壳结构的优点是能够增加船体内部的空间和 AUV 在水中的惯性稳定度。电池组可以安装在底层船体内,而其他的部分则可以装入上层船体。水下机器人是一个复杂的非线性动力系统,自身的形态、装备都随作业任务的不同而改变,因此,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的运动控制系统,必须建立水下机器人的运动学模型。水下机器人运动的数学模型是对水下机器人物理系统的数学表达,是机器人在水下运动时的动力学抽象。建立水下机器人动力学模型是对其进行控制的前提,熟悉理解水下机器人的动力学模型对规划规则及跟踪方法的制定也是必不可少的。

3.2 坐标系及坐标变换

3.2.1 坐标系

任何一个系统的运动数学模型都是建立在一定坐标系基础之上的。为了研究水下机器人操纵运动的规律,确定运动机器人的位置和姿态,首先须确定相应的

坐标系。AUV 的操纵运动相当于刚体在流体中受重力和水动力作用的一般运动。因此，在坐标系和 AUV 运动参数的选取中，必须考虑刚体力学和流体力学的习惯，建立适合描述水下机器人运动的坐标系，如图 3-3 所示两种右手直角坐标系：固定坐标系（ $E-\xi\eta\zeta$ ）和运动坐标系（ $O-xyz$ ）。

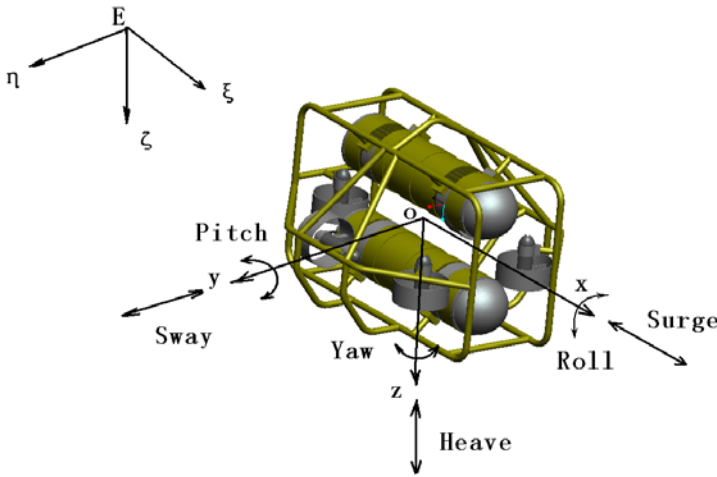


图 3-3 AUV 坐标系

固定坐标系，又称地面坐标系，是水下机器人做空间运动的惯性参考系。固定坐标系的原点 E 取为海面上一固定点， $E\zeta$ 轴的正向指向地心， $E\xi$ 轴和 $E\eta$ 轴为在水平面内互为垂直，轴的正向可以任选，我们习惯把大地北向作为 $E\xi$ 轴正方向，大地东向作为 $E\eta$ 轴正方向， $E\zeta$ 轴称为运动的垂向坐标。运动坐标系又称艇体坐标系，是固定于水下机器人艇体上的坐标系。坐标原点可以取在艇体上的任一点，一般取在机器人的重心 G 处，纵轴 Ox 平行于艇体基线指向艇首，横轴 Oy 平行于基面指向右舷，垂轴 Oz 指向艇底。当原点 O 取在机器人重心 G 上时， Gx 、 Gy 、 Gz 为机器人艇体的惯性主轴。

表 3-1 运动的自由度

运动	x 轴	y 轴	z 轴
移动	进退	-----	潜浮
转动	横摇	纵摇（俯仰）	摇艏（偏航）

表 3-2 运动参数和力的动坐标分量

矢量	x 轴	y 轴	z 轴
速度 \boldsymbol{v}	u	v	w
角速度 $\boldsymbol{\omega}$	p	q	r
力 \boldsymbol{F}	X	Y	Z
力矩 \boldsymbol{Q}	K	M	N

用运动坐标系表明水下机器人运动的六个自由度的运动和力（力矩）非常明确，见表 3-1 和表 3-2。在地面坐标系中，作用于水下机器人载体上的合力可以用其各坐标轴的投影表示： $\boldsymbol{F}_\xi = m\ddot{\xi}_g$ ； $\boldsymbol{F}_\eta = m\ddot{\eta}_g$ ； $\boldsymbol{F}_\zeta = m\ddot{\zeta}_g$ 。其中， \boldsymbol{F}_ξ 、 \boldsymbol{F}_η 和 \boldsymbol{F}_ζ 分别为 \boldsymbol{F} 在 ξ 、 η 和 ζ 轴上的投影， $\ddot{\xi}_g$ 、 $\ddot{\eta}_g$ 和 $\ddot{\zeta}_g$ 表示载体重心的加速度在 ξ 、 η 和 ζ 轴上的投影。水下机器人速度 \boldsymbol{v} 和角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 在 ξ 、 η 和 ζ 轴上的投影分别用 v_ξ 、 v_η 、 v_ζ 和 ω_ξ 、 ω_η 、 ω_ζ 表示。 φ 、 θ 、 ψ 分别称为横摇角、纵倾角和艏向角，它们是运动坐标系相对于地面坐标系的姿态角。在运动坐标系中，原点的速度 \boldsymbol{v} 在 x 、 y 、 z 轴上的投影分别为 u 、 v 、 w ，角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 在 x 、 y 、 z 轴上的分量记为 p 、 q 、 r 。力 \boldsymbol{F} 和力矩 \boldsymbol{Q} 与其 x 、 y 、 z 轴对应的力和力矩的分量分别用 X 、 Y 、 Z 和 K 、 M 、 N 表示。速度和力的方向与坐标轴的方向一致，角速度和力矩的方向按照右手定则判定。动坐标系的原点有速度、加速度、角速度、角加速度，它不是惯性坐标系，牛顿第二定律在这个坐标系中不适用。所以，首先应在地面坐标系中建立运动方程，然后转换到载体坐标系中。

3.2.2 坐标变换

在讨论水下机器人空间运动方程时，为了不失一般性，认为运动坐标系的原点不设在水下机器人的重心 G 上，水下机器人的空间位置取决于动坐标系原点 O 在静坐标系中的三个分量 ξ_o 、 η_o 、 ζ_o 以及动坐标系对于静态坐标系的三个姿态角 φ 、 θ 和 ψ 。

设由 $E\xi\eta\zeta$ 坐标系出发作三次初等旋转可到达 $Oxyz$ 坐标系。设在动坐标系中

有矢量可以用列矩阵 $r^0 = [x \ y \ z]^T$ 表示, $r^e = [X \ Y \ Z]^T$ 表示在地面坐标系中对应的矢量, 经过三次绕轴旋转的变换关系可分别用坐标基变换表示, 从而可以得到运动坐标系与地面坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi - \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

即: $r^e = {}^e_o R [x \ y \ z]^T$ 。其中,

$${}^e_o R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi - \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

对于速度和加速度的坐标变换, 已知 $r^e = {}^e_o R \times r^o$, 对时间微分则有:

$$\dot{r}^e = {}^e_o R \times \dot{r}^o + {}^e_o \dot{R} \times r^o \quad (3-3)$$

将(3-2)式代入(3-3)式后得:

$$\dot{r}^e = {}^e_o R \times (\dot{r}^o + \Omega \times r^o) \quad (3-4)$$

括号中第一项为动坐标系中的微商, 第二项为角速度引起的牵连速度, 其中

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix}。$$

3.3 水下机器人动力学方程

3.3.1 水下机器人受力分析

在确定研究对象的动力学方程之前, 我们要先了解研究对象所受的外力。作用在水下机器人上的力(矩)大致可分成两类:一类是所谓的水动力(或流体动力)。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。另一类是非流体动力, 又称为静力, 包括水下机

机器人所受的重力和浮力。故水下机器人在水中所受到的合外力 F 可以用以下方程表示：

$$F = f_G + f_B + \sum_{i=1}^n T_i + \Gamma_{RB} \quad (3-5)$$

式中： Γ_{RB} ——作用在水下机器人上的水动力； f_B ——水下机器人的浮力；

f_G ——水下机器人的重力； $\sum_{i=1}^n T_i$ ——所有推进器推力之和； T_i ——

——第 i 个推力器的推力； n ——推进器个数；

水下机器人所受的合外力矩可以用下面方程描述：

$$M = M_F + M_B + M_P + \sum_{i=1}^n M_{T_i} \quad (3-6)$$

式中： M_F 、 M_B 、 M_P 分别为水动力、浮力和重力产生的力矩。

3.3.2 空间运动方程

我们仍假设动坐标系的原点不与重心重合，且暂不计海流影响。本文中系统的动力学方程可参考文献^[52]，一般地，以紧密矩阵的形式表示的运动方程表示为：

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\vec{q}) = \Gamma \quad (3-7)$$

在这里， M 表示惯性质量， $C(v)$ 是科里奥利和向心力条件； $D(v)$ 是流体动力

阻尼和提升矩阵； $g(\vec{q})$ 是重力/浮力瞬时矢量， \vec{q} 为欧拉参数， $\vec{q} = \begin{bmatrix} \eta \\ \varepsilon \end{bmatrix}$ ， $\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}$ ，

Γ 是外部力和力矩输入。其中， M 是由刚体质量 M_{RB} 和流体动力学附加质量 M_A 组成。

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3-8)$$

$C(v)$ 也由两部分组成，刚体科里奥利和向心力矩阵， $C_{RB}(v)$ 和流体动力学附加质量的类科里奥利矩阵 $C_A(v)$ 。

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (3-9)$$

(1) 刚体动力学

对于刚体来说，上述紧密矩阵方程可以写成：

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \Gamma_{RB} \quad (3-10)$$

可展开为：

$$m\dot{v} + m\dot{w} \times r_G + mw \times v + mw \times (w \times r_G) = F_{RB} \quad (3-11)$$

$$I_o \dot{w} + w \times (I_o w) + mr_G \times \dot{v} + mr_G \times (w \times v) = Q_{RB} \quad (3-12)$$

在这里， m 是样机 C-Ranger 的质量， I_o 是其惯性张量，

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad r_G = [x_G \quad y_G \quad z_G]^T \text{ 是样机的重心。} F_{RB} \text{ 和 } Q_{RB} \text{ 分别对应}$$

用于 AUV 系统的外部力和力矩。

在方程(3-10)中， $M_{RB} \dot{v}$ 可以表示为：

$$M_{RB} \dot{v} = \begin{bmatrix} m\dot{v} + m\dot{w} \times r_G \\ I_o \dot{w} + mr_G \times \dot{v} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

当参考坐标系的原点与样机 C-Ranger 重心重合时， $r_G = [0 \quad 0 \quad 0]^T$ ，那么，样机

在整个坐标系内完全对称，所以：

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

在方程(3-10)中 $C_{RB}(v)v$ 可以表示为:

$$C_{RB}(v)v = \begin{bmatrix} mw \times v + mw \times (w \times r_G) \\ w \times (I_K w) + m r_G \times (w \times v) \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

在这里, $C_{RB}(v)$ 可以参数化成斜对称矩阵的形式:

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(z_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G q - w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(z_G q - w) & m(x_G r + v) & 0 & -I_{xz} q - I_{xy} p + I_{zz} r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_{yy} q \\ m(y_G p - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(y_G r - u) & I_{xz} q + I_{xy} p - I_{zz} r & 0 & -I_{xz} r - I_{yy} q + I_{xx} p \\ m(z_G p - v) & m(z_G q + u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{xz} r - I_{xy} p + I_{yy} q & I_{xz} r + I_{yy} q - I_{xx} p & 0 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

当参考坐标系的原点与样机的重心重合时, $C_{RB}(v)$ 可简化为:

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & -mw & mv & 0 & I_{zz} r & -I_{yy} q \\ mw & 0 & -mu & -I_{zz} r & 0 & I_{xx} p \\ -mv & mu & 0 & I_{yy} q & -I_{xx} p & 0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

(2) 流体动力学

- 由方程(3-7)和(3-10), Γ_{RB} 可以表示为:

$$\Gamma_{RB} = \Gamma - \dot{M}_A v - C_A(v)v - D(v)v - g(\vec{q}) \quad (3-19)$$

其中, Γ 是推进器推力和力矩; M_A 和 $C_A(v)$ 分别是流体动力学附加质量的惯性

矩阵和科里奥利矩阵; $D(v)$ 是流体动力阻力和提升矩阵。

其中, 流体动力学附加质量定义为:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

参考文献中推导了 M_A 可以简化为对角矩阵形式:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

这里，假设 $M_A > 0$ 并且 $\dot{M}_A = 0$ 。

● 流体力学附加质量类科里奥利矩阵

对于上式中的 M_A 简化，令：

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

在这里， A_{11} ， A_{12} ， A_{21} ， A_{22} 分别是 M_A 的四个象限矩阵。

根据方程，流体力学附加质量类科里奥利矩阵 $C_A(v)$ 参数化为：

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v + A_{12}w) \\ -S(A_{11}v + A_{12}w) & -S(A_{21}v + A_{22}w) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_3 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

这里，

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned}$$

当 M_A 的值为方程 (3-20) 时， $C_A(v)$ 可简化为：

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

● 流体力学阻尼

所有其他的流体力均包含在 $D(v)v$ 中，一般地， $D(v)$ 是 v 的复函数，使用线性逼近可得到：

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

(3) 外力及分量

● 重力矢量和浮力矢量

f_G 是重力矢量，大小为 $W = mg$ 。浮力矢量为 f_B ，大小为 $B = \rho gV$ ，其中， ρ 为流体密度， g 为地球重力加速度， V 是样机的体积。在参考坐标系 $\{O\}$ 中，重力和浮力可以表示为：

$$f_G = {}^oR \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} = R^{-1}(\vec{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

$$f_B = {}^oR \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{bmatrix} = R^{-1}(\vec{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

其中， oR 表示从世界坐标系到参考坐标系的旋转矩阵，

$$R(\vec{q}) = \begin{bmatrix} 1 - 2\varepsilon_2^2 - 2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \eta\varepsilon_3) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_3 + \eta\varepsilon_2) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \eta\varepsilon_3) & 1 - 2\varepsilon_1^2 - 2\varepsilon_2^2 & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3 - \eta\varepsilon_1) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_3 - \eta\varepsilon_2) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3 + \eta\varepsilon_1) & 1 - 2\varepsilon_1^2\varepsilon_2^2 \end{bmatrix}, \text{ 矢量 } g(\vec{q}) \text{ 可以表示成:}$$

$$g(\vec{q}) = \begin{bmatrix} f_B + f_G \\ r_B \times f_B + r_G \times f_G \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$g(\vec{q}) = \begin{bmatrix} 2(\eta\varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2)(W - B) \\ -2(\eta\varepsilon_1 + \varepsilon_2\varepsilon_3)(W - B) \\ (-\eta^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2)(W - B) \\ (-\eta^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2)(y_G W - y_B B) + 2(\eta\varepsilon_1 + \varepsilon_2\varepsilon_3)(z_G W - z_B B) \\ -(-\eta^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2)(x_G W - x_B B) + 2(\eta\varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2)(z_G W - z_B B) \\ -2(\eta\varepsilon_1 + \varepsilon_2\varepsilon_3)(x_G W - x_B B) - 2(\eta\varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_3)(y_G W - y_B B) \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

这里， r_B 是参考坐标系中浮心， r_G 是参考坐标系中重心。

● 推力及分量

样机 C-Ranger 有五个推进器产生五个自由度（不包含横移运动）的推力及分量推动 AUV 向前运动，五个方向的自由度分别是：进退、潜浮、横摇、俯仰和偏航。推力矢量为 Γ ，可以表示成：

$$\Gamma = LU \quad (3-30)$$

这里， U 是由五个推进器产生的矢量： $U = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5]^T$ ，如下图 3-4 所示：

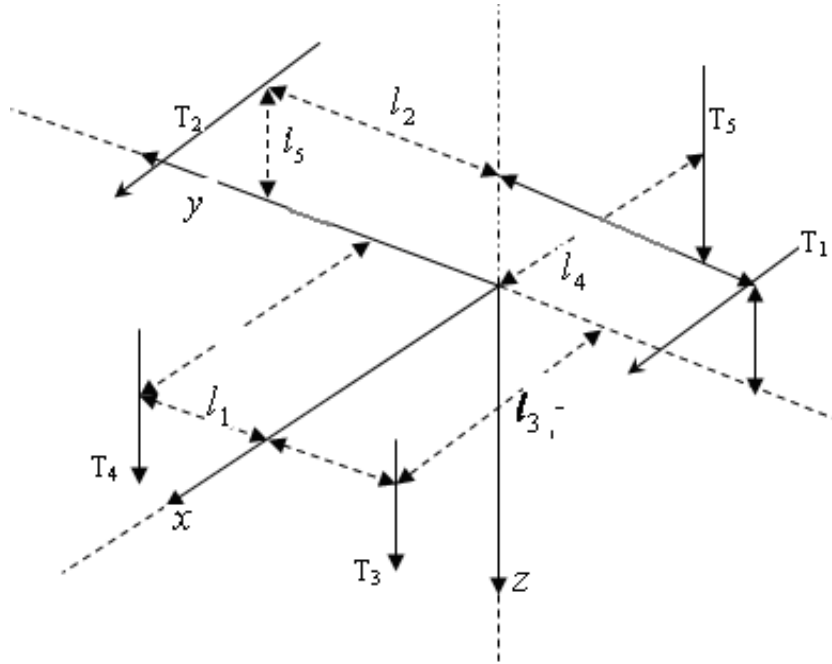


图 3-4 推进器框图

图 3-4 中， T_1 ：左水平推进器产生的推力； T_2 ：右水平推进器产生的推力； T_3 ：左前方垂直推进器产生的推力； T_4 ：右前方垂直推进器产生的推力； T_5 ：后方垂直推进器产生的推力。 L 是推力映射矩阵，将推力空间的五个推力映射到样机的力矢量空间。 L 可以表示为：

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & l_1 & -l_1 & 0 \\ -l_5 & -l_5 & l_3 & l_3 & -l_4 \\ l_2 & -l_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, L \in R^{6 \times 5} \quad (3-31)$$

根据运动学知识可以将水下机器人姿态角与运动坐标系中角速度的关系可用下式表示：

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + q \tan \theta \sin \phi + r \tan \theta \cos \phi \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= (r \cos \phi + q \sin \phi) / \cos \theta \end{aligned} \quad (3-32)$$

水下机器人的重心与动坐标系的原点重合，则水下机器人的运动轨迹由下述方程描述：

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_g = \dot{\xi}_o &= u \cos \phi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) \\ &\quad + w (\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \theta) \end{aligned} \quad (3-33)$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_g = \dot{\eta}_o &= u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \psi \cos \phi) \\ &\quad + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \end{aligned} \quad (3-34)$$

$$\dot{\zeta}_g = \dot{\zeta}_o = -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \quad (3-35)$$

3.4 AUV 的简化仿真模型

由于水下机器人的运动规律十分复杂，为了简化问题，假设：若水下机器人在航行时只改变深度而不改变航向，则其重心保持在垂直平面内；若水下机器人

只改变航向而不改变深度，则其重心也离不开水平面。基于这种假设，可以把水下机器人的水下空间运动分解成水平面运动和垂直面运动，并忽略这两个平面之间的耦合影响。

在仿真程序的设计上我们假设，AUV 只在 X-Y 平面中运动，没有上浮和下潜，AUV 载体平稳无翻滚无纵倾摇摆，因此可以将 5 个自由度的空间运动简化为两个自由度的平面运动，这样可以使计算简化而不失有效性。简化后的 AUV 状态向量 $\mathbf{X}_R^B = [x_r \ y_r \ \phi_r]^T$ ， x_r 、 y_r 是参照地面坐标系的 AUV 位置坐标， ϕ_r 为艏向角。环境特征向量 $\mathbf{X}_{F_i}^B = [x_i \ y_i]^T$ ，坐标值 x_i 、 y_i 与从声纳图像中提取的障碍物的质心相对应如图 3-5 所示：

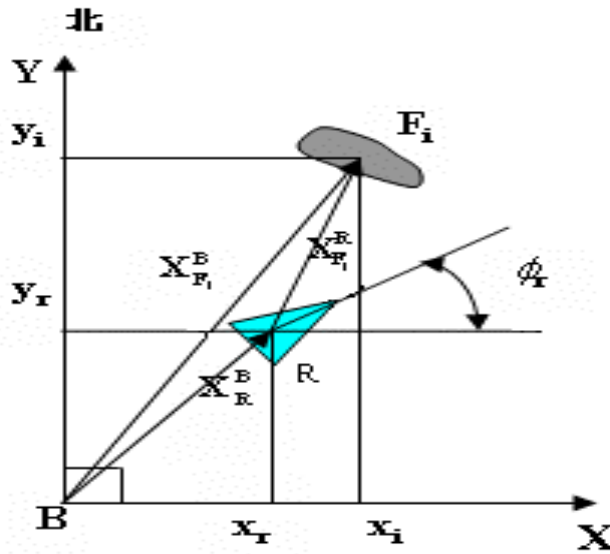


图 3-5 地面坐标系中的 AUV 和环境特征

3.5 控制系统的设计及仿真

3.5.1 PID 控制原理

在自动控制的发展历程中，PID 控制是历史最久、生命力最强的基本控制方式见文献^[53]。随着科学技术的发展特别是电子计算机的诞生和发展，涌现出许多新的控制方法。然而直到现在，PID 控制由于原理简单，使用方便，实用性强等优点，仍然得到广泛的应用。PID 控制器的基本算法为：

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (3-36)$$

其中： $u(t)$ ——调节器输出；

$e(t)$ ——系统设定值和被控量之差；

K_p ——调节器的放大系数；

T_i ——调节器的积分时间常数；

T_d ——调节器的微分时间常数。

PID 控制器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。

●比例（P）控制

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差（Steady-state error）。

●积分（I）控制

在积分控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”，主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越大，积分作用越弱，反之，越强。因此，比例+积分(PI)控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

●微分（D）控制

在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。微分环节能反映偏差信号的变化趋势，并能在偏差信号值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

3.5.2 增量式 PID 控制

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此我们可以用数值计算的方法逼近。即将式(3-36)写成差分方程形式，可得：

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e(i) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (3-37)$$

$$u(n) = K_p e(n) + K_t \sum_{i=0}^n e(i) + K_d [e(n) - e(n-1)] \quad (3-38)$$

其中, K_p ——比例增益; K_i ——积分增益; K_d ——微分增益; n ——采样序号; T ——采样周期

根据式(3-37)可以写出(n-1)时刻的控制量:

$$u(n-1) = K_p \left\{ e(n-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + \frac{T_d}{T} [e(n-1) - e(n-2)] \right\} \quad (3-39)$$

当执行机构需要的不是控制量的绝对数值, 而是其增量时, 可导出增量式 PID 算法:

$$\begin{aligned} \Delta u(n) &= K_p \left\{ e(n) - e(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \right\} \\ &= K_p [e(n) - e(n-1)] + K_i e(n) + K_d [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (3-40) \end{aligned}$$

增量型 PID 控制算法在计算方法进行了改进, 如果设计得当, 这一方法将获得良好的控制性能。在本论文中, 使用的就是增量型控制算法。

3.5.3 AUV 仿真控制分析

本文中使用 PID 控制系统框图如图 3-6:

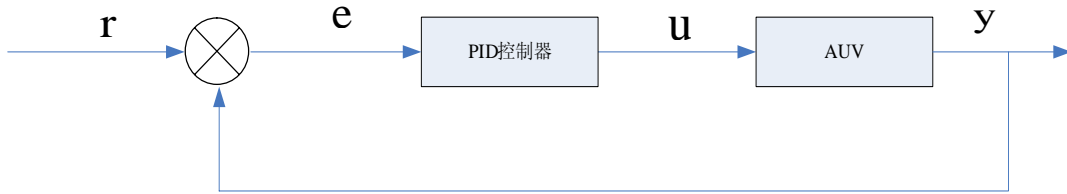


图 3-6 PID 控制系统框图

在图 3-6 中, e 表示期望输入与 AUV 实际输出的误差量, 在本文中, u 表示 AUV 的推力量。

在 Simulink 环境下设置仿真参数, 对虚拟样机模型进行联合仿真, 绘出仿真曲线, 观察仿真结果。其仿真结果如下图: 通过图 3-8~3-10 可以看出, AUV 最终停在了一点上, 与目标点有一定的误差。通过图 3-11~3-13 可以看出, AUV 在运动过程中稳定性非常好。通过图 3-14~3-18 可以看出, 最终, 推进器的推力维持在一个恒定值上, 恰好抵消了海流的作用, 使 AUV 静止。

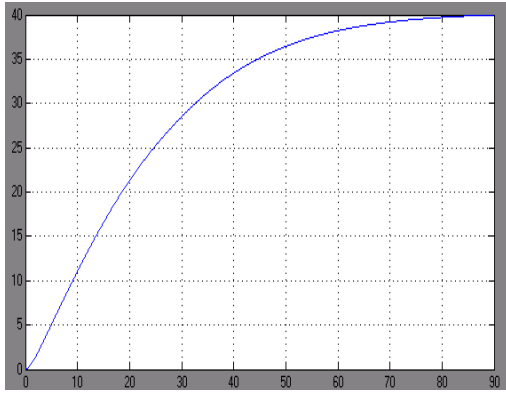


图 3-7 位移 ξ —时间曲线

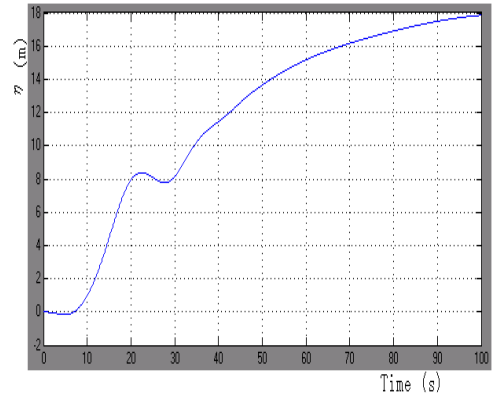


图 3-8 位移 η —时间曲线

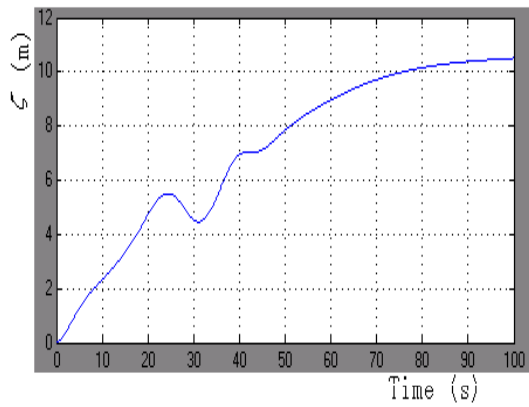


图 3-9 位移 ζ —时间曲线

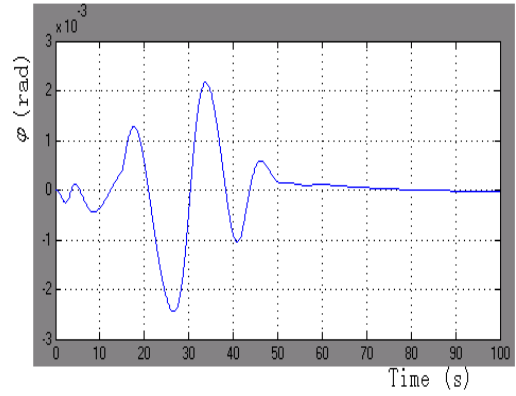


图 3-10 姿态角 φ —时间曲线

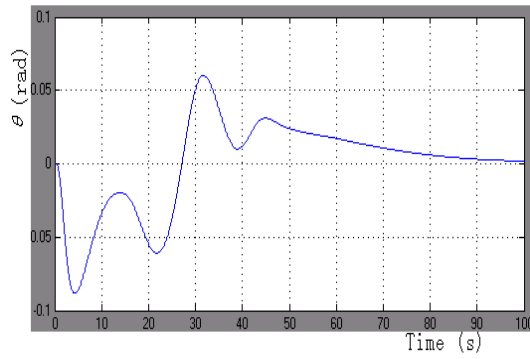


图 3-11 姿态角 θ —时间曲线

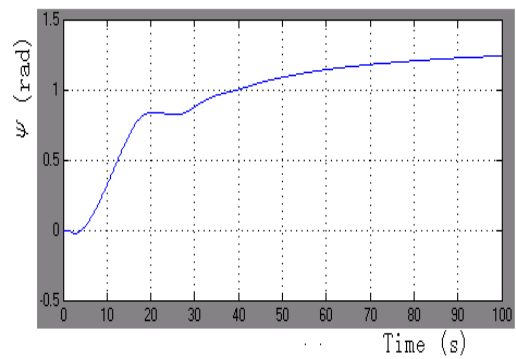


图 3-12 姿态角 ψ —时间曲线

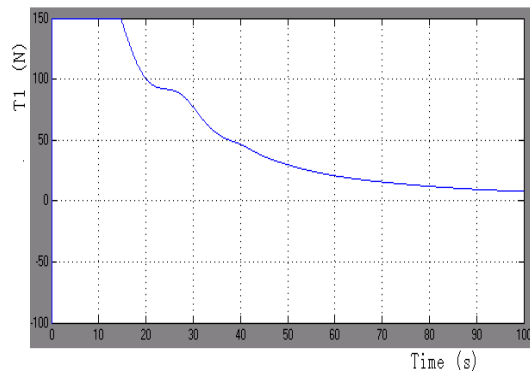


图 3-14 推力 T_1 —时间曲线

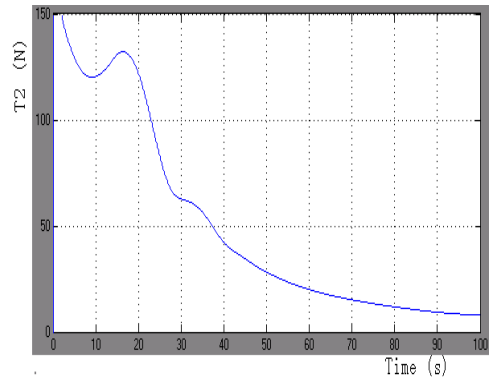


图 3-15 推力 T_2 —时间曲线

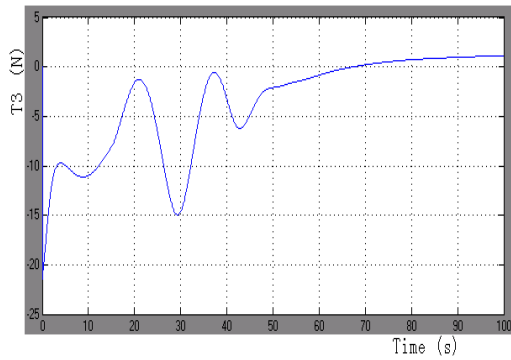


图 3-16 推力 T_3 —时间曲线

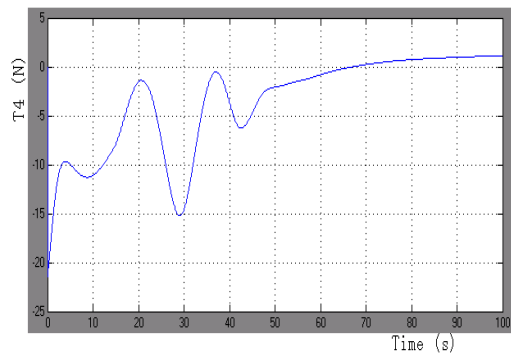


图 3-17 推力 T_4 —时间曲线

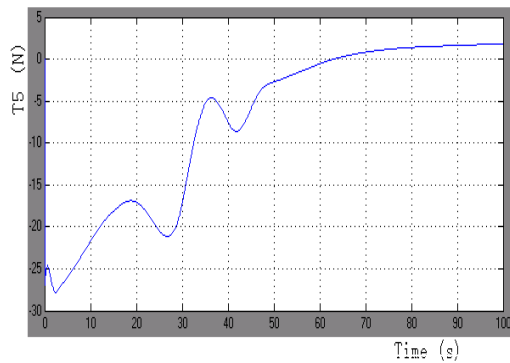


图 3-18 推力 T_5 —时间曲线

3.6 本章小结

本章首先建立适合描述水下机器人运动的坐标系，包括固定坐标系和参考坐标系以及它们之间的坐标变换，为下面的分析奠定了基础；接着在固定坐标系下运用 AUV 刚体动力学定理以及其在水中的受力分析，得到了它的空间运动方程，并将其转换到适合于表达水动力的运动坐标系中，并给出了 AUV 简化模型；最后分析了 AUV 的仿真控制模型，讨论了经典 PID 控制器的控制原理，推导出增量式 PID 控制算法的原理以及它在 AUV 建模阶段的应用，为后面 AUV 路径跟踪做了铺垫。

4 基于 FMM 算法的 AUV 路径规划

4.1 引言

在前面的章节中，我们提到机器人路径规划可以分为两种，一种是基于环境先验完全信息的全局路径规划，另一种是基于传感器信息的局部路径规划，后者环境是未知的或部分未知的。海洋环境的复杂性决定了单纯依靠已知海图的全局路径规划，已经不能对突发事件（船只，未知海底地形等）做出有效地反应。对于移动机器人来说，许多学者都讨论了它在二维陆地平面上的路径规划问题。而对于不太适合通信的复杂三维海洋环境，AUV 的路径规划有很少的文献介绍。Carroll 在^[54]中使用了 A* 算法。Warren 在^[55]中使用了一个潜能域的方法，在规划的过程中，这些方法将会出现局部极值点的问题，不能保证最优化。因此，本章提出的 FMM 算法在全局路径规划结果的基础上，根据声纳等水底探测设备搜集的实时信息进行判断决策，使得机器人安全地从全局路径的一个点走到下一个关键点，从而规划出在大范围海洋环境下从起始点到达终点的最优路径。该方法是一种快速求解非线性偏时距方程和静态 Hamilton-Jacobi 方程的数值方法，由于它的可靠性、准确性和简单执行特性，对于在海洋环境中搜索代价最优路径来说是非常有效的。

4.2 算法概述

基于 FMM 法的路径规划算法是基于栅格模型的一种路径规划方法，所有的栅格单元被表示成一幅代价函数的连通图，不断向前传播由起点开始的水平集边界值，直至到达终点，然后执行反溯法，将所有寻找到的节点连接起来，就得到了要寻找的最优路径。FMM 算法实质是基于波前传播的“熵守恒”理论^[56]。可以如此理解熵守恒的意义：假设演化的闭合轮廓线是正在纸上蔓延的火焰，则一旦某个位置被火苗烧过，则该位置将一直保持燃烧过的状态，不会再被第二次燃烧，反映在曲线传播上，就是曲线不会同时两次经过平面上的同一点。利用该方法我们可以在经过声纳图像处理后的地图上可以找到从起点到达终点的能够避障的最优路径，而不论障碍物的形状是圆形、多边形还是三角形，使用该方法得

到的路径都可以进行实时的避障。

4.2.1 栅格环境模型

对于环境的表示，我们采用了栅格类方法。其基本思想是离散化机器人的工作空间。我们可以规定机器人工作区域为一个以规划起始点 S 为左上角点，目标点 T 为其相对的右下角点的二维平面或立方体空间，显然该四边形或立方体的对角线既为两点之间的距离。所以，我们可以这样定义路径规划问题，假设 Ψ 为 AUV 的一个二维平面或三维空间，将空间 Ψ 划分成二维正方形或三维正方体小格，每一个小格代表空间的点 P_i ，那么：

$$\Psi = \bigcup_i P_i \quad (4-1)$$

集合 Θ 包含 Ψ 中所有 AUV 不能到达的立方格，可以通过映射所有的障碍物到甲求得：在整个栅格空间中，用 0, 1 勾画出障碍物边界，并对障碍物所占的栅格进行填充—无障碍物处的栅格记为 0，有障碍物处的栅格记为 1。所有标记为 1 的栅格点对机器人而言是不可达的，把这些栅格点所构成的集合就是 Θ ；至于标记为 0 的栅格点是否就是自由的，则与栅格的大小和机器人的规格有关。如果所选取的栅格大小足够的大，以至于对任何标记为 0 的栅格点来说，机器人不论以何种姿态存在，都不会与障碍物相碰，那么所有标记为 0 的栅格点对于机器人来说都是自由的了。但是如果选取的栅格大小小于机器人的最大尺度，则并非所有标记为 0 的栅格点都是自由的。我们把栅格中的自由节点记作 F ，给定一个起始点 S 和一个目标点 T ，路径规划就是要构造一从起点 S 到终点 T 的连接在一起的点序列 Ω ，使得它需要满足条件：

$$\Omega \cap \Theta = \Phi \quad (4-2)$$

显然，如果我们得到了这样的点序列 Ω ，那么它一定满足路径规划中避开障碍物的要求，而我们希望得到的路径不但要满足避碰的要求，还有把距离、位姿、海流等各种能耗因素考虑其中，使得到的路径是一个能耗最小的无碰路径。本文在这里介绍的算法根据机器人配备的前视声纳实时反馈的障碍物信息、全局路径规划下达的机器人路径节点(包括:起始点和目标点)、实时探测的海流方向、速度

等条件进行实时搜索，可使机器人由起始节点安全无碰的到达目标节点。

4.2.2 FMM 算法原理

(1) 水平集理论

水平集方法^{[57][58]}最初是由 Osher 和 Sethian 于 1987 年提出，主要是从界面传播等研究领域逐步发展起来的，它是处理封闭运动界面随时间演化过程中几何拓扑变化的有效计算工具。Osher 和 Sethian 提出依赖时间的运动界面的水平集描述，其主要思想是将移动的界面作为零水平集嵌入高一维的水平集函数中。这样，由闭超曲面的演化方程可以得到水平集函数的演化方程，而嵌入的闭超曲面总是其零水平集，最终只要确定零水平集即可确定移动界面演化的结果。

我们首先考虑一个简单的曲线演化的例子。设有一个二维空间的演化曲线将图像分割成二个区域。假设曲线沿着它的法向(向内或者向外)以速度函数 F 移动，为了跟踪曲线演化的运动，我们忽略曲线的切向移动，而只考虑法向的移动。如果移动速度 $F > 0$ ，那么曲线总是向外运动，并引入函数 $T(x, y)$ 来确定曲线到达平面上每个点的时间。其演化图形如图 4-1 所示。

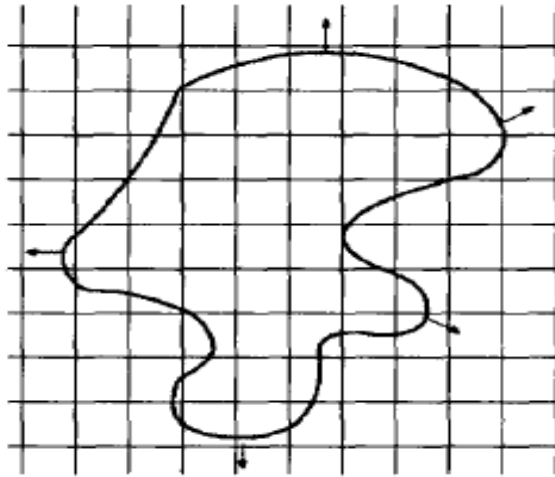


图 4-1 水平集演化

到达函数 $T(x, y)$ 可以通过下面的表达式来求出：

$$|\nabla T| F = 1, T = 0 \text{ on } \Gamma \quad (4-3)$$

其中， ∇T 与 T 正交，它的大小与速度成反比， Γ 是曲线的初始位置。

那么曲线演化的结果就是一个边界问题(boundary value program)的解。如果曲线上每点传播的速度都一样,那么方程可以简化成我们熟悉的 Eikonal 方程。例如,当速度 $F=1$,则到达时间 $T(x, y)$ 就以圆形的方式扩展,如图 4-2。

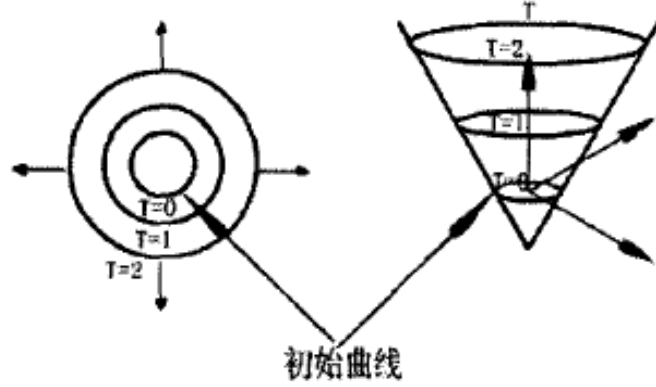


图 4-2 $F=1$ 时到达时间的计算

但是当曲线移动的速度函数并不是严格正或负的,我们会发现曲线随意的向外部和内部移动,可能多次穿过同一点 (x, y) ,那么到达时间 $T(x, y)$ 就不是一个严格意义的函数。解决的办法就是把它嵌入到一个水平集中,作为一个高维水平集中零水平集的初始曲线。那么随着函数 ϕ 的演化,曲线也随之变化。并且,任何时候函数 ϕ 的零水平集就是该时刻演化曲线的位置。

为了导出一个水平集函数 ϕ ,使得它在变化时,零水平集总是与演化曲线相匹配,就需要下面的方程恒等于 0。

$$\phi(x(t), t) = 0 \quad (4-4)$$

由求导的链式法则对上式求导,得到:

$$\phi_t + \nabla \phi(x(t), t) \cdot x'(t) = 0 \quad (4-5)$$

既然 F 是曲线的法向速度,那么有 $x'(t) \cdot n = F$,当 $n = \nabla \phi / |\nabla \phi|$,这就导出下面的方程:

$$\begin{cases} \phi_t + F |\nabla \phi| = 0 \\ \phi(x, t=0) = \phi_0(x) \end{cases} \quad (4-6)$$

这就是 Osher 和 Sethian 最早提出的水平集形式。这种方法把曲线 Γ 以速度 F

在平面上移动，且在 t 时刻到达位置 $\Gamma(t)$ 的这类边值问题转化为一类典型的哈密顿-雅可比方程(Hamilton-Jacobi equation)。

(2) 快速步进算法的传播规则

Sethian 提出了求解静态 Hamilton-Jacobi 方程(4-6)边界值问题的快速步进方法(Fast Marching)^[57]。这种方法所求解的 Hamilton-jacobi 方程中的速度 $F(x)$ 的符号总是保持不变，即总是正值，或总是负值。如果以 $T(x)$ 表示水平集曲面通过点 X 的时间，则 $T(x)$ 满足如下 Eikonal 方程：

$$|\nabla T| F = 1 \quad (4-7)$$

利用逆向差分法(Upwind)，上方方程的稳定解可由如下方程得到：

$$[\max(D_{ij}^{-x}T, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+x}T, 0)^2 + \max(D_{ij}^{-y}T, 0)^2 + \min(D_{ij}^{+y}T, 0)^2]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{F_{ij}} \quad (4-8)$$

式中， D^- 和 D^+ 分别为后向和前向差分算子。

$$D_{x,y}^{-x}T = \frac{T_{x,y} - T_{x-1,y}}{h}, D_{x,y}^{+x}T = \frac{T_{x+1,y} - T_{x,y}}{h}, D_{x,y}^{+y}T = \frac{T_{x,y+1} - T_{x,y}}{h}, D_{x,y}^{-y}T = \frac{T_{x,y} - T_{x,y-1}}{h} \quad (4-9)$$

由方程(4-8)可知，边界传播方向是从 T 较小的点流向 T 比较大的点。根据这样的特点，Sethian 提出了快速步进法来迅速传播边界值 T ，基本思想是在边界外围构造一个激活的窄带，窄带内的点到达时间未定，当前传播边界利用逆向差分格式(Upwind Scheme)将当前边界向外传播，就像水波扩散一样，凡是扩散到的点，就冻结其波前到达时间，然后再根据当前的波前构造新的激活带，如此循环，就可以得到整个平面上每点到达时间。以快速步进法遍历整个图像点的过程的时间复杂度是 $o(N \log N)$ 。这是因为即使对于两个点相对曲线有相同的几何距离，但如果到达的速度不相同，那么到达的时间也不会相同。但是，如果使得速度项 F 成为一个常数，也就是说 $F=C$ (这里 C 是一个常数)，点的几何距离就和水平集距离相一致了。从初始曲线出发，具有相同几何距离的点就会具有相同的到达时间。根据图像中每点距离闭合曲线 C_0 的远近，将图像中所有的点分成三类：活动点、窄带点和远离点，如图 4-3 所示。

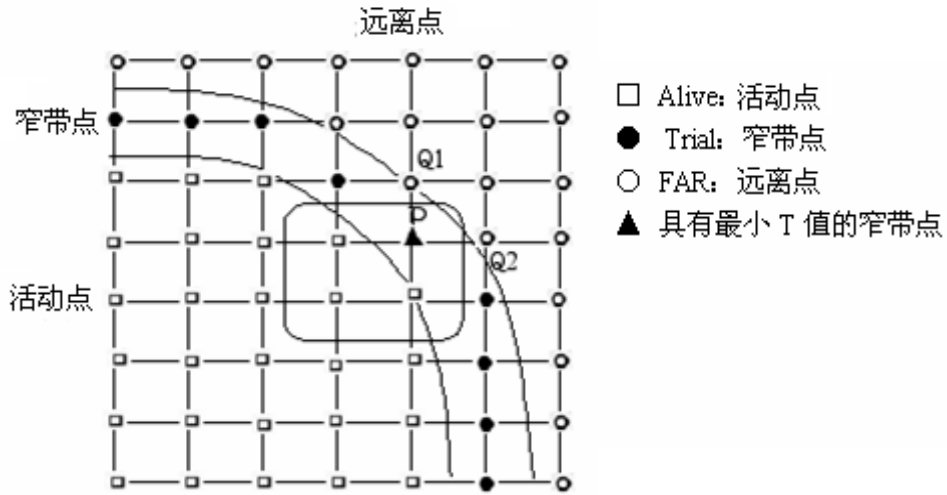


图 4-3 快速步进法

活动点的 T 值为最终值，不再变化；窄带点位于窄带中，至少与一个活动点相邻，带有预估计的 T 值，它的 T 值可能还要继续修正，单调下降；远离点的 T 值则尚未计算，为 $+\infty$ 。邻接点的定义采用 4-邻域。

4.3 路径规划模型

4.3.1 路径规划问题描述

已知一幅障碍物地图、路径起点和终点，目的是找到一条从初始位置到终点位置的距离最优的路径。即已知一个构型空间（C-space），路径规划问题就是找到一条曲线 C ，满足如下条件：

$$C \rightarrow C - free \text{ 且 } s \rightarrow C(s) = (x(s), y(s)) \quad (4-10)$$

故最优路径就是使得约束（时间或花费或碰撞危险）最小的曲线 C 。

在 n 维空间中，已知代价函数 f 和起点 p_0 ，目标是找到一条从 p_0 到任一点 p 的路径 $C(\tau): [0, \infty) \rightarrow R^n$ 使得式(4-10)的积分最小，即：

$$\int_{p_0=C(0)}^{p=C(L)} f(C(\tau)) d\tau \quad (4-11)$$

其中， τ 是 C 的弧长参数， L 是 C 的总长度。在二维空间中，我们定义，距离地图 U 是沿着路径 C 从起点 p_0 到任一点 P 积分得到的最小能量，可表达为：

$$U(p) = \inf_{A_{p_0,p}} \left\{ \int_D f(\tau) d\tau \right\} \quad (4-12)$$

在这里， D 是图像区域， $A_{p_0,p}$ 是 p_0 与 p 之间所有路径的集合。那么，在图像中 p_0 和 p 之间的最小路径就可以很容易地从距离地图中推断出来。假设代价函数是严格的正值，那么，距离地图将仅仅只有一个在起点 p_0 的局部最小值，最小路径可以在距离地图上执行简单的后推^[59]得到。这个特点使得该算法非常可靠，对水下机器人的路径规划尤其重要。

4.3.2 快速步进算法求解

为了计算最小能量 U ，已知方程(4-12)的前向传播方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{f} \vec{n} \quad (4-13)$$

\vec{n} 表示前向的法线。由 Osher and Sethian^[60]介绍的适合于曲线演化的欧拉公式(4-13)能够克服数值问题及拓扑变化。从 P_0 开始的无穷小圆形的前沿传播直到目标点分配 U 值。故由 Cohen 和 Kimmel^[61]提出的快速步进算法满足 Eikonal 方程^[62]：

$$\|\nabla U\| = f \text{ and } U(p_0) = 0 \quad (4-14)$$

这里，我们主要考虑(4-14)的数值解。在一个二维笛卡尔空间中，根据逆向差分方法，在每一个像素点 (i, j) 处，即可得到上述方程的稳定解 u 满足：

$$(\max\{u - U_{i-1,j}, u - U_{i+1,j}, 0\})^2 + (\max\{u - U_{i,j-1}, u - U_{i,j+1}, 0\})^2 = f_{i,j}^2 \quad (4-15)$$

Sethian 给出了求解这个方程的算法，即快速步进算法（Fast Marching Method）。这种算法的核心思想是引入网格上点的选入顺序，这种算法与著名的 Dijkstra 算法非常相似。选择顺序基于这样一个事实：任意点上的距离值 U 只取决于其周围(或临域)具有更小距离值的点。

使用水平集法来模拟动态曲线和曲面，并以依赖于曲率的速度进化。需要对所有的水平集都要进行计算，而不单是对与传播前沿相关的零水平集进行计算，所以它存在一个很大的缺点是运算量很大，对一个 $N \times N$ 的图像进行运算，每一

步的运算复杂度为 $o(N^2)$ 。如果传播前沿的法向速度总是保持或全正或全负，那么我们就可以把上面的问题转化为寻求每个水平集的到达时间，把问题转化为可大大提高运算速度的快速行进算法(Fast Marching Method, FMM),可得到遍历整幅图像的复杂度为 $O(N\log N)$ 。显然，比水平集方法复杂度缩小很多。

4.4 算法步骤

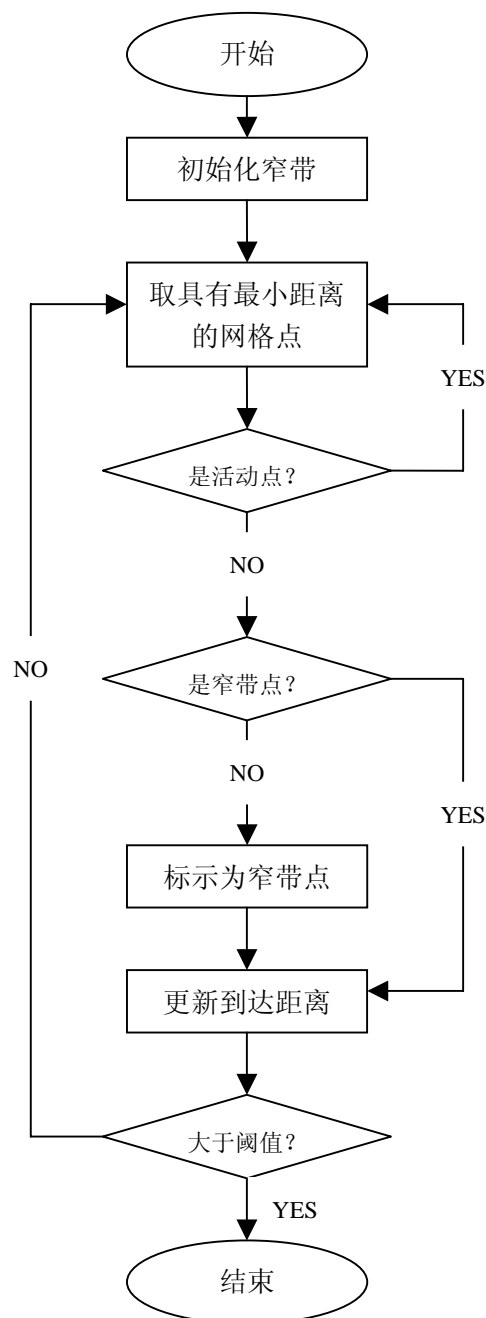


图 4-4 FMM 算法流程

FMM 算法的流程如图 4-4 所示。快速步进算法从 U 值已知的结点出发，通过遍历所有网格结点,完成对 Eikonal 方程的求解。像素 $x_{i,j}$ 是窄带集合 Ω_T 中具有最小传播距离的点，它将被转移到活动点集合 Ω_A 中。然后， $x_{i,j}$ 所有的邻域点的传播距离将按照下面 1 和 2 中的算法步骤依次被更新。由于 $x_{i,j}$ 的代价是窄带里面最小的，而且每个点的到达时间仅仅由比它本身具有更小的传播距离的点所决定，所以 $x_{i,j}$ 的传播距离不会再改变，因而能够被放入活动点的集合中。

在 $x_{i,j}$ 被放入已知点的集合中以后， $x_{i,j}$ 所有临域点的传播距离必须按照 2 中的算法进行更新，新的传播距离只能由已知点的传播距离计算得来。由于大量的没有必要的计算被排除掉了，所以这是一种高效的算法。为了获得更好的效率，可以采用堆数据结构来表示窄带 Ω_T 。然后，通过采用堆排序方法对 N 区域中所有点的传播距离进行排序，从而找出传播距离最小的点，每一步都要进行此操作，其运算时间复杂度为 $O(N \log N)$ 。

1、快速步进算法的具体步骤如下：

(1)定义

- a) Ω_A 表示距离值 u 已经得到并且将不会改变的所有网格点的集合；
- b) Ω_T 表示要被考察的窄带点的集合，并且这些点的估计值 U 已经根据活动点通过方程(4-15)计算出来；
- c) Ω_F 表示所有其他未估计 U 值的网格点集合；

对于每个点，保存两个属性： U ,表示传播距离； F ,表示点的位置；

其中， F 取值为：**Alive**：表示集合 Ω_A 中的点；**Trial**：表示集合 Ω_T 中的点；

Far：表示集合 Ω_F 中的点；

(2)初始化

- a) **Alive** 点在起点 p_0 处 $U(p_0) = u(p_0) = 0$ ；
- b) **Trial** 点考察初始前向在 p_0 的四个邻居点的情况，具有初始值 $U(p) = f(p)$ ；
- c) 在 **Far** 网格点具有 $U = \infty$ ；

(3)循环

- a) 找到 Ω_T 具有最小距离值 T 的象素点 $x_{i,j}$ ，若 Ω_T 为空，算法结束；
- b) 将 $x_{i,j}$ 放入集合 Ω_A 中；
- c) 使用表 4-2 算法更新 $x_{i,j}$ 所有临域点的传播距离，如果 $x_{i,j}$ 的临域点属于 Ω_F ，则将其移入 Ω_T 中；
- d) 若某一点的距离值大于指定阈值或者排序堆栈为空，则循环结束，否则转到 c)。

2、更新 $x_{i,j}$ 的 4-临域算法步骤为：

对于不在集合 Ω_A 中的 $x_{i,j}$ 的 4-临域里面的每个象素 x ，执行如下操作：

- 若是 Ω_F 中的点，则将其放入集合 Ω_T 中，更新该点距离值，并将其放入排序堆栈中；
- 若是集合 Ω_A 中的点，则不改变距离值；
- 若是集合 Ω_T 中的点，则利用方程(4-15)更新该点距离值，并调整其在排序堆栈中的位置；

其中， x 点的传播距离 $U(x) = \min\{U(x), U_{x_j x_m}(x)\}$ ，其中 $U_{x_j x_m}(x)$ 按照如下方法计算：如图 4-4，令 (A_1, A_2) 和 (X_m, B_2) 为以 X 为中心的正方形对角线上的两组像素， $U_{x_j x_m}(x)$ 计算如下：

if $U_{x_m} < U_{B2}$ *then*

$$U_{x_j} = \min(U_{A_1}, U_{A_2});$$

if $U_{x_j} < U_{B2}$ *then*

$$U_{x_j x_m}(x) = \frac{1}{2}(U_{x_j} + U_{x_m} + \sqrt{2U_x^2 - (U_{x_j} - U_{x_m})^2})$$

else

$$U_{x_j x_m}(x) = U_{x_m} + f_x$$

endif

else

$$U_{x_j x_m}(x) = \infty$$

endif

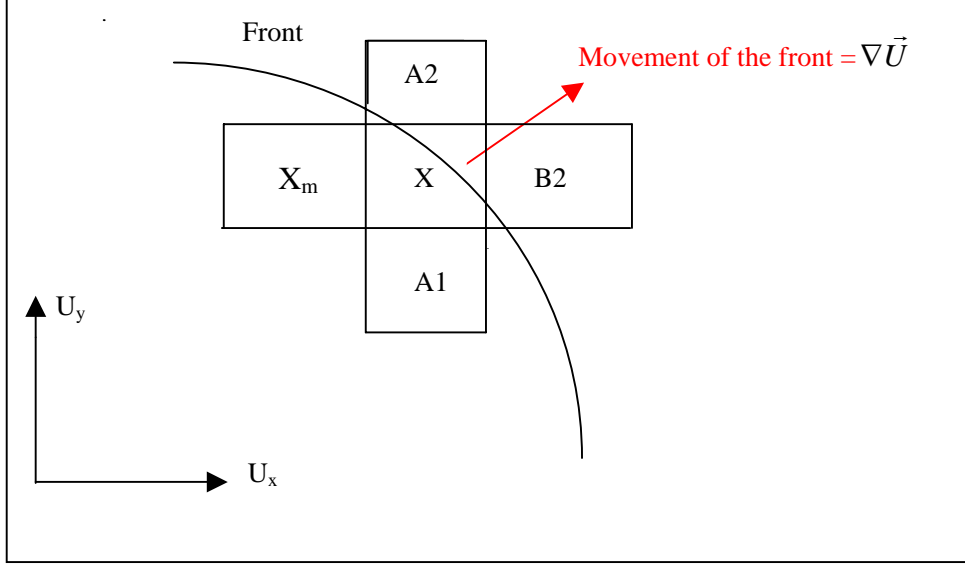


图 4-4 快速步进法求解

4.5 三维 FMM 算法

4.5.1 三维 FMM 算法

根据上面的思想，快速步进算法向三维扩展是比较容易的，与二维情况下距离 U 的定义类似：

$$U(p) = \inf_{A_{p0,p}} \left\{ \int_D f(C(s)) ds \right\} \quad (4-16)$$

已知起点 P_0 ，前向从 P_0 周围以无穷小的圆球形向前传播，方程(4-15)的二维数值方案就扩展到三维情况：

$$\begin{aligned} & (\max\{u - U_{i-1,j,k}, u - U_{i+1,j,k}, 0\})^2 \\ & + (\max\{u - U_{i,j-1,k}, u - U_{i,j+1,k}, 0\})^2 \\ & + (\max\{u - U_{i,j,k-1}, u - U_{i,j,k+1}, 0\})^2 = f_{i,j,k}^2 \end{aligned} \quad (4-17)$$

由方程(4-17)能够得到在三维环境中 $U_{i,j,k}$ 的正确的粘滞解。

4.6 仿真结果

根据本章给出的算法，作者利用 MATLAB 7.0 及 ADAMS 系统建模软件对本问中提到的 AUV（C-RANGER）的路径规划进行了仿真实验，下面给出了在不同地图环境中，该机器人路径规划的仿真结果以及在建模环境中的仿真结果。其中地图中的红色部分表示搜索区域。

(1) 简单地图

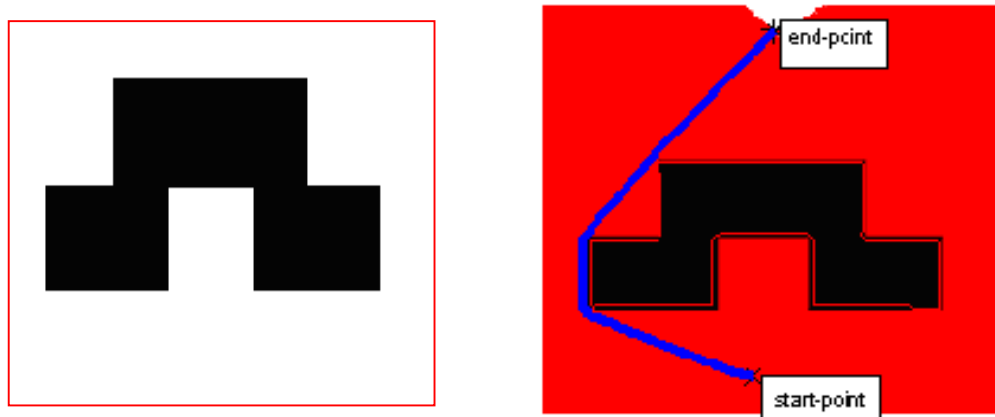


图 4-5 左图：简单环境地图 右图：优化路径

(2) 复杂地图

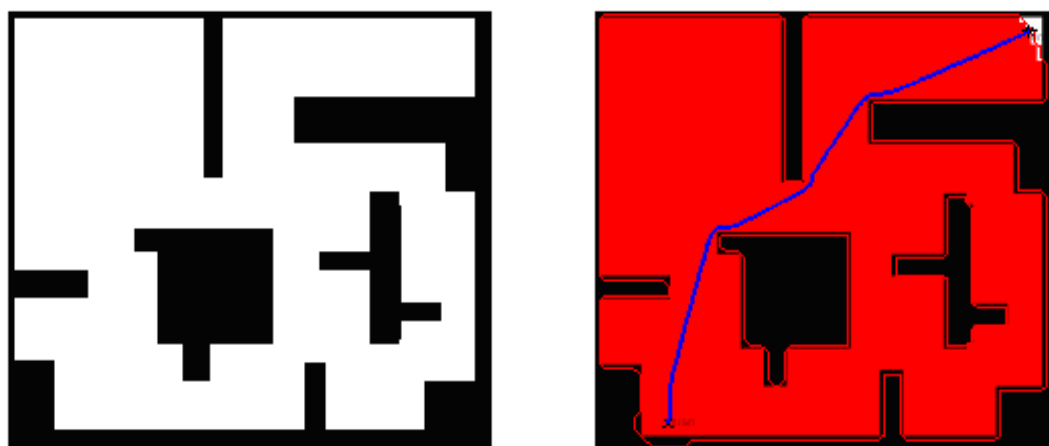


图 4-6 左图：环境地图 右图：优化路径

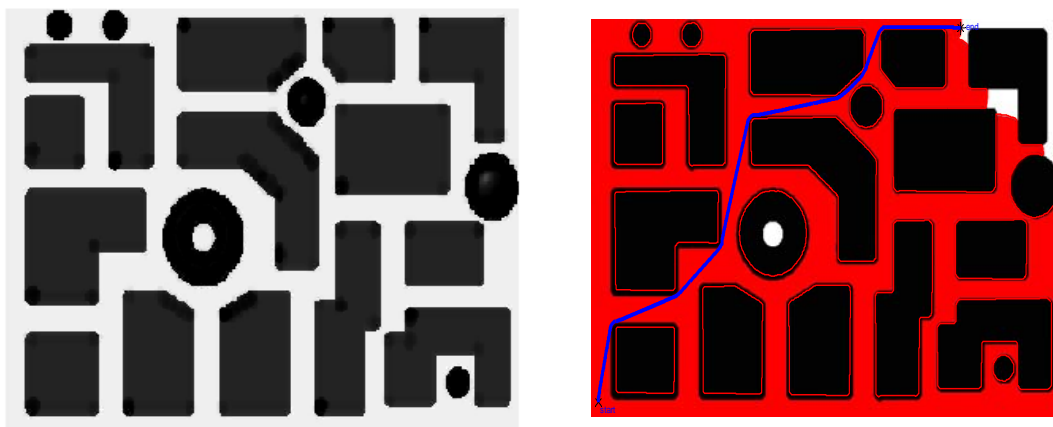


图 4-7 左图：复杂地图 右图：优化路径

(3) 特殊地图：仅有很窄的入口

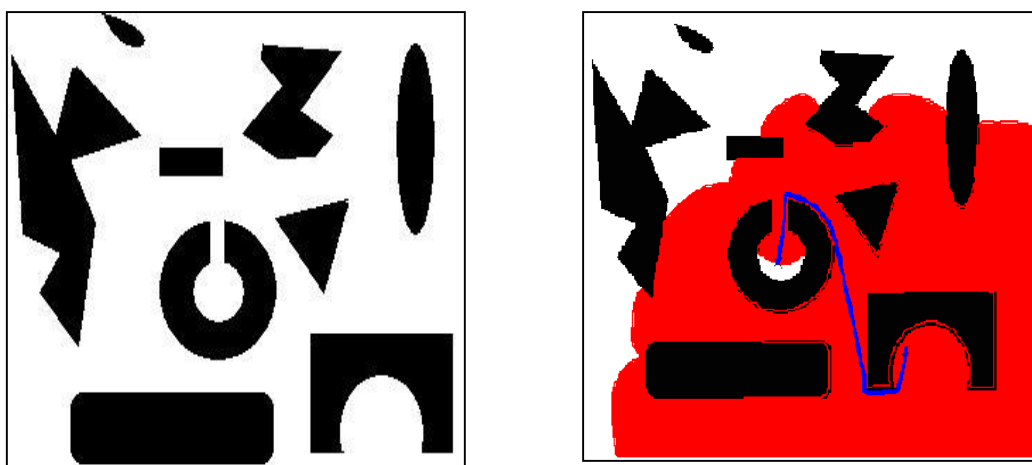


图 4-8 左图：特殊地图 右边：优化路径

(4) 建模环境地图

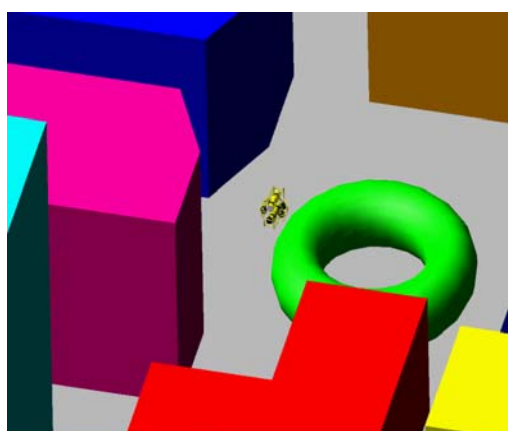


图 4-9 侧面图

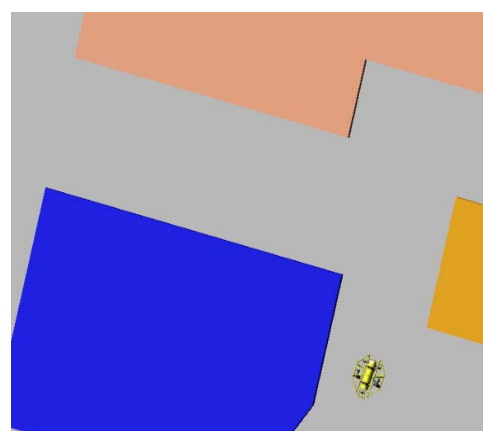


图 4-10 俯视图

4.7 本章小结

本章首先介绍了基于 FMM 算法的栅格环境模型的特点，接着介绍了该算法用于水下机器人路径规划时的核心思想，以及该算法如何快速求解出路径方程的解。在此基础上，详细介绍了 FMM 算法求解距离值的 4-邻域方法步骤，并对该算法在三维空间的路径规划及运动学约束做了简要介绍。最后，给出了 AUV 在不同环境地图中获得的仿真结果，并且，应用课题组的建模机器人 C-Ranger 在建模环境中进行了仿真研究，验证了算法的可行性及算法的性能。

5 基于 PID 控制器的 AUV 路径跟踪

5.1 跟踪思想

为了确保 AUV 沿着已经规划好的路径安全和有效地行走，需要使用反馈以及对上述理想路径进行轨迹规划^{[63][64]}。AUV 的轨迹应该是一个时间序列，其参考点确定的曲线就是小车运动的路径，可以表示为：

$$p_d(s) = \begin{cases} x_d(s) \\ y_d(s) \end{cases} \quad s: 0 \rightarrow s_n \quad (5-1)$$

其中， s 表示从起点开始的路径长度， s_n 表示从起点到终点的距离。我们的任务就是找到 AUV 沿着这条路径到达目的地的可行轨迹，而轨迹表示为：

$$T(t) = \begin{cases} v(t) \\ \varphi(t) \end{cases} \quad t: t_0 \rightarrow t_n \quad (5-2)$$

$t_0 \rightarrow t_n$ 表示在这段时间间隔内小车沿着该路径运行， v 表示机器人的运行速度。对于水下机器人来说，它可以进行平移运动、旋转运动和俯仰运动，我们现在考虑它在定深的水面进行的跟踪路径运动，即只考虑它的平移和旋转两个方向的运动。

5.1.1 旋转规划

为了保证水下机器人沿着规划好的理想路径运行，它的速度方向应该保持为路径的切线方向。即路径的切线角度 $\theta(s)$ 和航迹角相等 γ 。

$$\gamma = \theta(s) \quad (5-3)$$

且有 $\theta(s) = a \tan(\frac{Y_d}{X_d})$ 。所以水下机器人的航向角度为：

$\psi(s) = \theta(s) - \beta(s)$ ，其中 $\beta(s)$ 为水下机器人的水动力角。当 $\beta(s)=0$ 时，就有： $\psi(s) = \theta(s)$ ，说明没有海流的影响，机器人在理想的平静环境中运动；当 $\beta(s)$ 有值时，说明海流不断发生变化，它将会对水下机器人的运动产生一定

的影响，会使它的轨迹发生一定变化。

5.1.2 平移规划

平移规划的目的就是设计水下机器人沿着已知路径运动时的速度轮廓 $\dot{s}(s)$ ，实际中，机器人运行应该以从零速度开始加速，然后保持匀速，最后减速为零，但是在整个运行过程中，它必须满足动力学的约束^{[65][66]}，以不超过最大可允许的速度和加速度保持路径跟踪。

5.2 运动轨迹产生

这个过程就是产生理想输入的一个时间序列，将这组时间序列输入给水下机器人的控制系统来使得它跟踪理想的路径。根据水下机器人的运动学模型和之前讨论的轨迹规划，我们就可以得到算法如下：

A. 首先以 $i=0$ 开始，其中 i 表示不同的时刻。在时间 t_0 时刻初始化机器人的状态为：

$$s(t_0)=0, v_0=0, \theta(t_0)=\theta(0), \psi(t_0)=\psi(0) \quad (5-4)$$

时间增量为 Δt 。

B. 在第 i^{th} 个时间间隔 $[t_i, t_{i+1}]$ 内机器人的速度 v_i 就可以根据下面的运动学公式计算出来：

$$v_i = \frac{s(t_{i+1}) - s(t_i)}{\Delta t} \quad (5-5)$$

C. 机器人的航向角可以通过下式计算：

$$\psi(t_{i+1}) = \psi(s_{i+1}) \quad (5-6)$$

$$\beta(t_{i+1}) = \theta(t_{i+1}) - \psi(t_{i+1}) \quad (5-7)$$

如果 $s(t_{i+1}) < s_n$ ，增加 $i = i + 1$ 然后返回到 B 继续执行；否则，产生整个时间序列。

5.3 仿真模型

本文中，路径跟踪的仿真模型如图 5-1 所示，其中，AUV 的模型如图 5-2 所示，其中 v_1 和 g 分别表示 AUV 期望的速度和航向角， x 和 y 表示期望的路径。

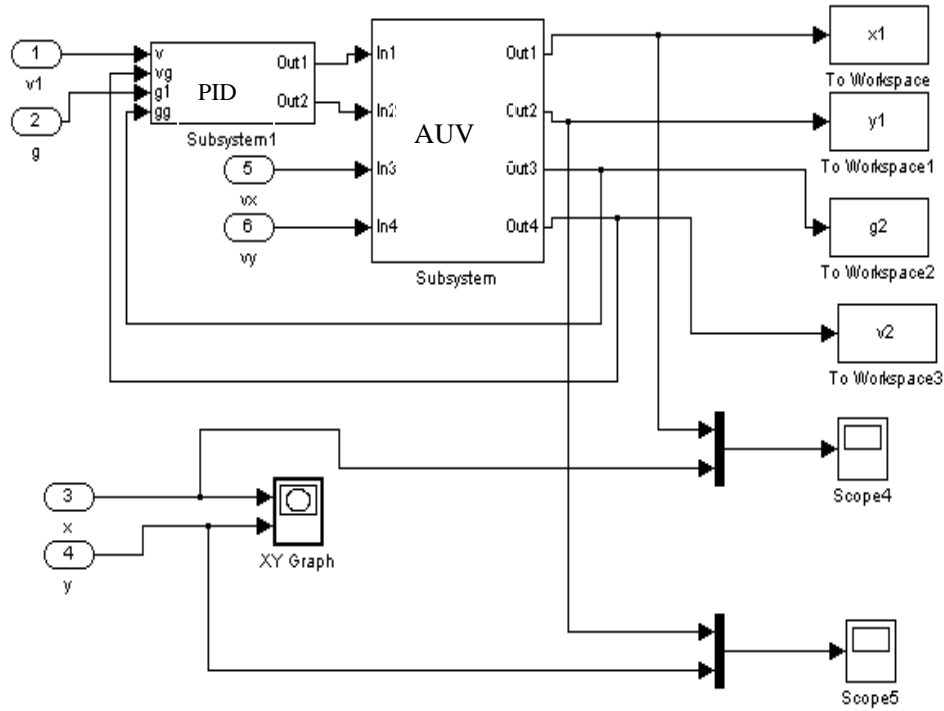


图 5-1 路径跟踪仿真模型

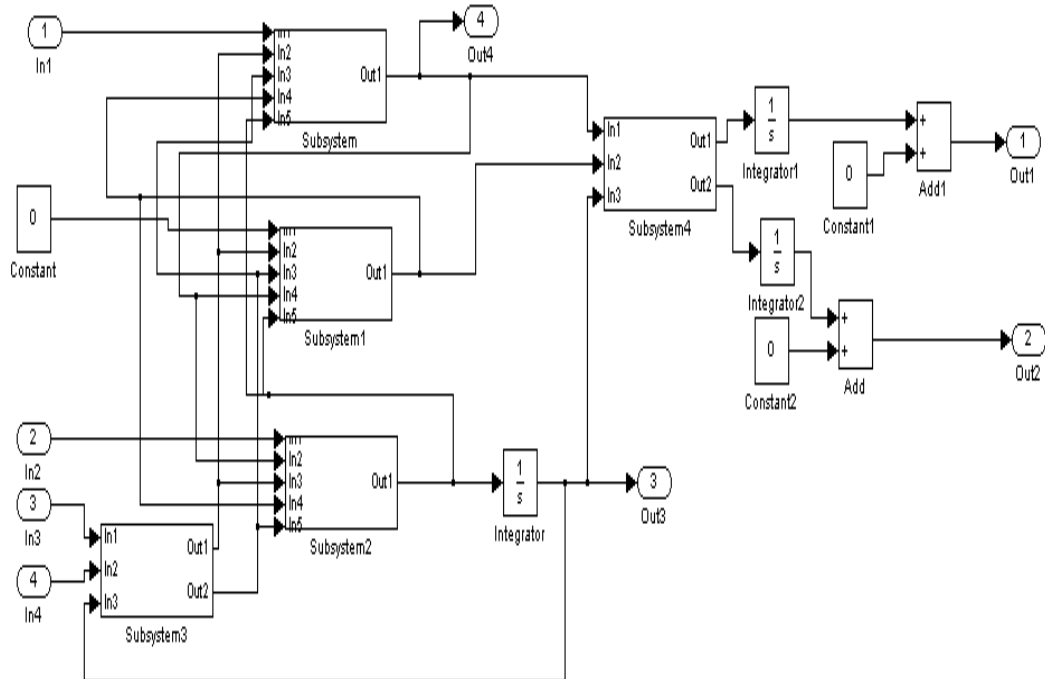


图 5-2 AUV 仿真模型

5.4 仿真结果

将产生的速度和航向角时间序列分别输入到 PID 控制器模块的输入端,根据增量式控制器的原理,反复调整 PID 参数,直至机器人产生的实际路径与理想路径的误差最小,即跟踪效果最佳。在加速或减速的过程中,水下机器人的加速度为 0.2m/s^2 ,最大速度为 1.5m/s ,在执行转弯时,它的速度将会减小到一个比较小的值 0.8m/s 。

(1) 跟踪直线路径

这里,设直线路径长度为 60m ,速度设计按照先加速,再匀速,后减速的过程进行。期望的航向角和速度如图 5-3、5-4。

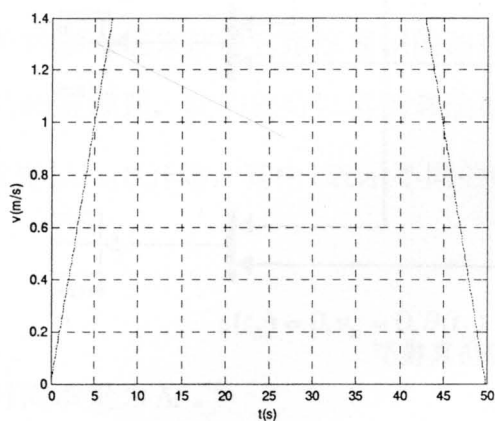


图 5-3 速度 $v(t)$

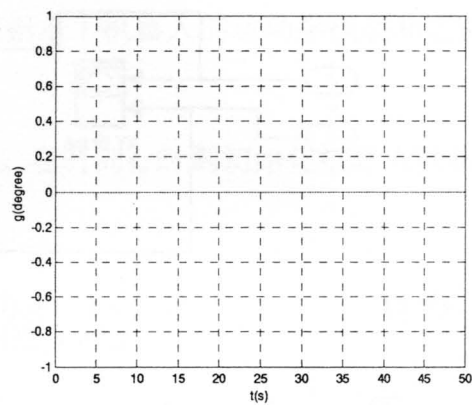


图 5-4 航向 $\varphi(t)$

跟踪路径如图 5-5:

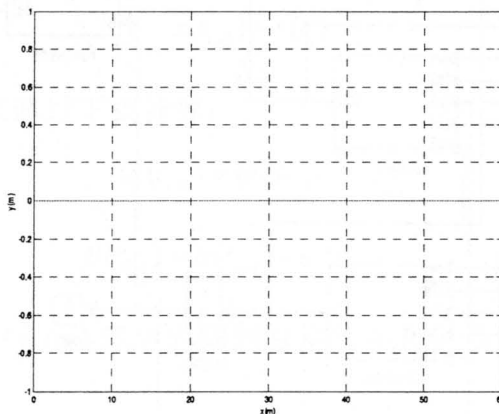


图 5-5 跟踪直线路径

(2) 跟踪圆形路径

水下机器人沿着一个半径为 4.8m , 圆心在 $(0,4.8)$ 处的圆形路径进行跟踪,

在中间时段的跟踪速度为 1.4m/s ,在开始和结束时段的速度为 0.2m/s 。仿真结果如图 5-6、5-7、5-8、5-9、5-10、5-11、5-12, 在 5-12 中, 蓝色圆形是理想路径, 红色为反向跟踪路径, 绿色为正向跟踪路径。

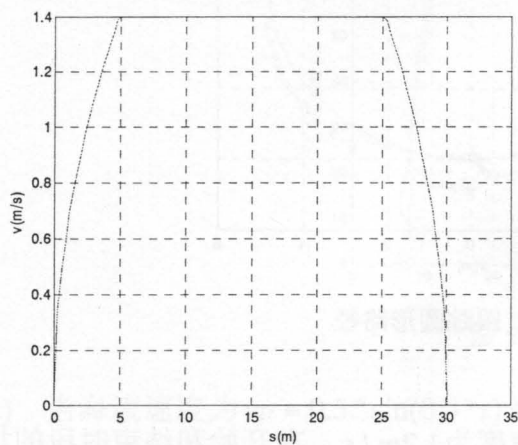


图 5-6 位移-速度曲线

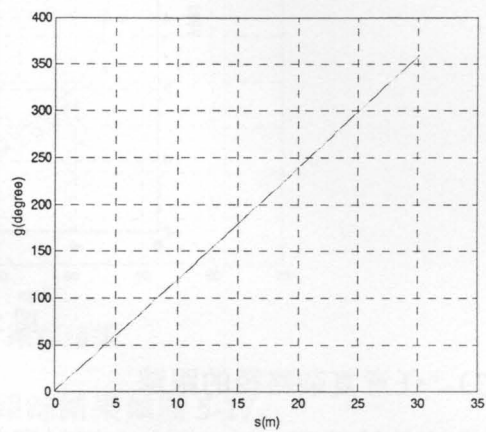


图 5-7 位移-航向曲线

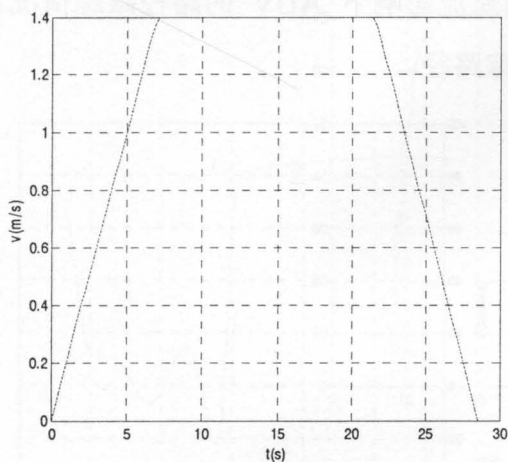


图 5-8 速度 $v(t)$

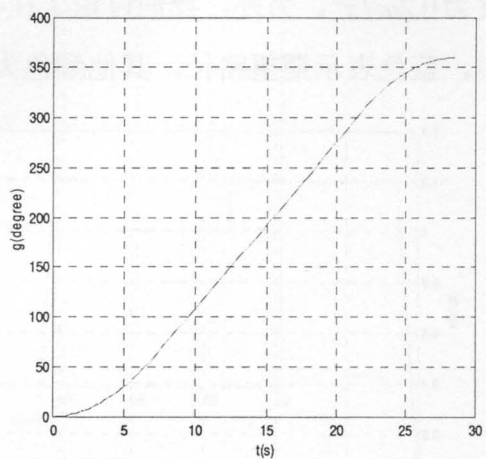


图 5-9 航向角 $\varphi(t)$

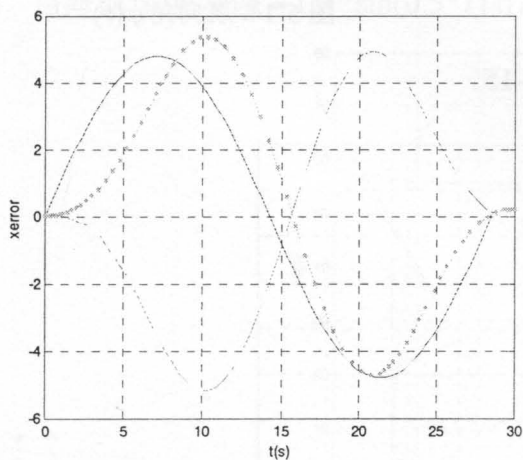


图 5-10 x 方向跟踪误差

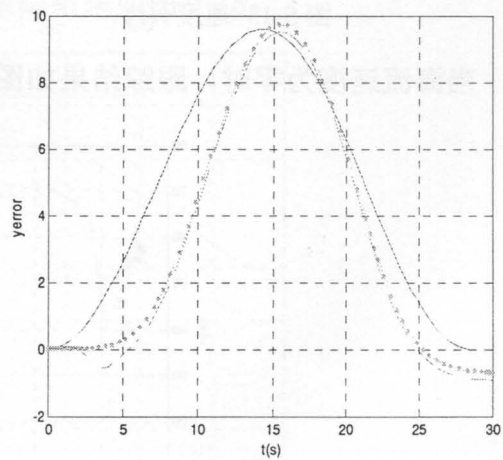


图 5-11 y 方向跟踪误差

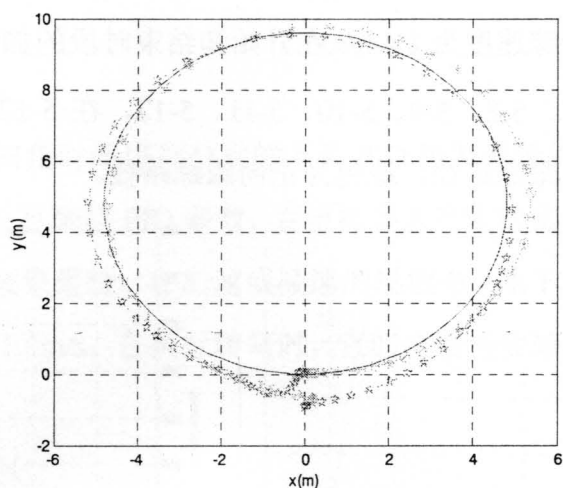


图 5-12 跟踪圆形路径

(3) 任意复杂路径的跟踪

在这种情况下, AUV 在中间时段的速度为 1.2m/s , 在开始和结束时段的速度为 0.2m/s^2 。另外, 我们讨论了在不同海流影响下 AUV 的路径跟踪情况。其中, 蓝色表示期望路径, 其他颜色为跟踪路径。

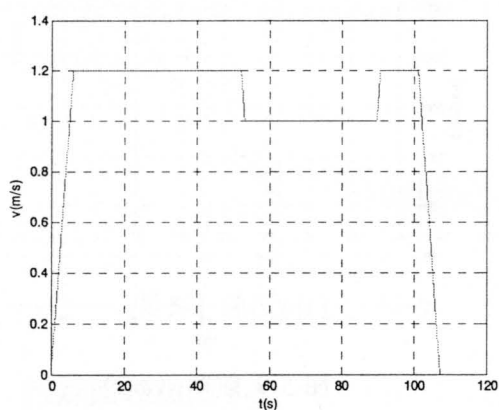


图 5-13 速度 $v(t)$

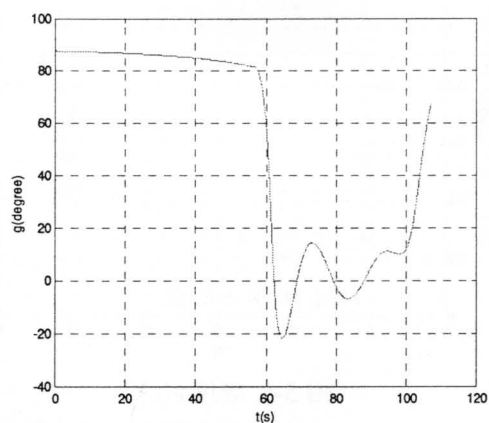


图 5-14 航向角 $\varphi(t)$

a) 当海流速度为零时, 跟踪结果如图 5-15。

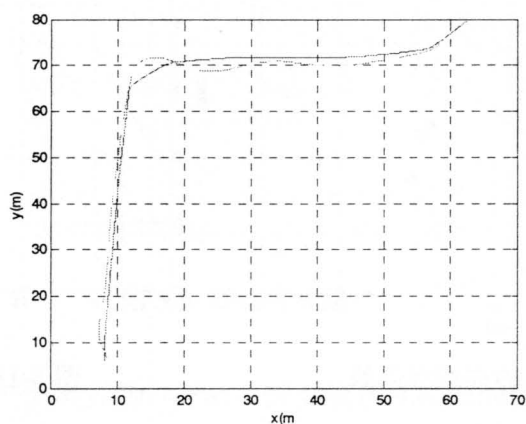


图 5-15 跟踪结果

b) 当海流速度 $v_p = 0.2 * \sin(0.5 * t)$ 时, 跟踪结果如图 5-16。

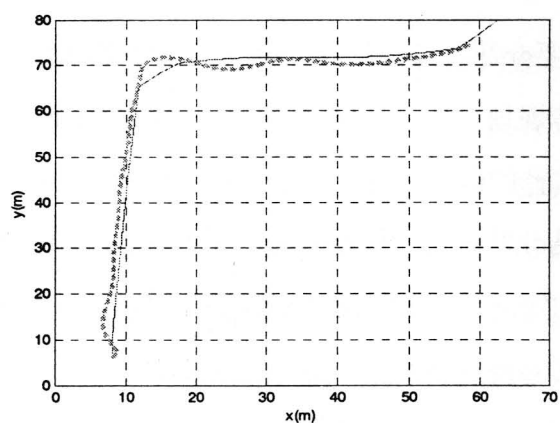


图 5-16 跟踪结果

c) 当海流速度为 $v_p = 0.5 * \sin(0.5 * t)$ 时, 跟踪结果如图 5-17。

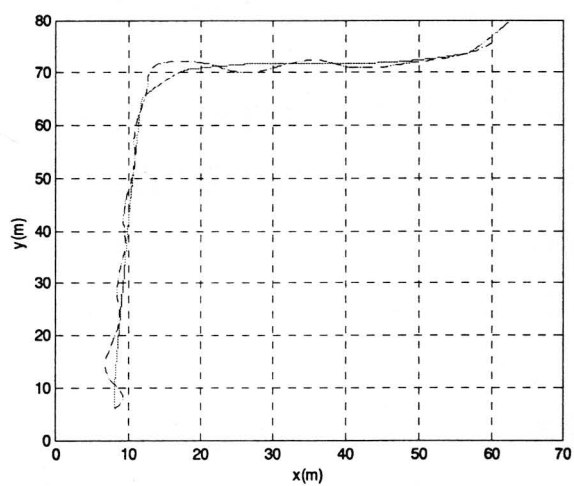


图 5-17 跟踪结果

d) 当海流速度为 $v_p = 1.0 * \sin(0.5 * t)$ 时, 跟踪结果如图 5-18。

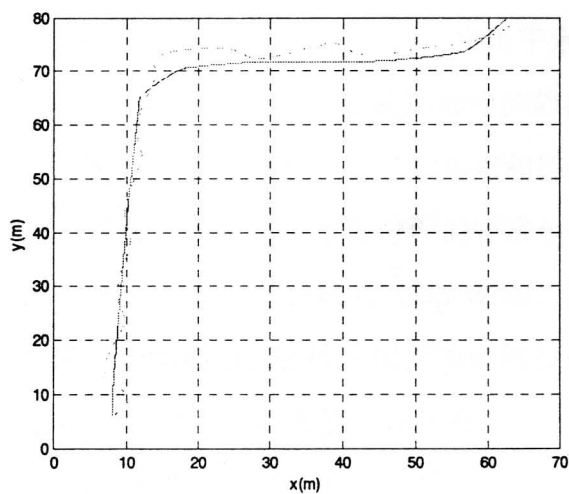


图 5-18 跟踪结果

5.5 本章小结

本章首先简要介绍了路径跟踪的相关知识，以及如何对得到的期望路径进行水平规划及旋转规划。在此基础上，我们分别讨论了机器人对直线路径、圆形路径及任意复杂路径的跟踪效果。整个仿真过程是在 **SIMULINK** 环境中进行的，由以上的仿真结果可以看出，该路径跟踪算法能够较好地应用在水下机器人上，在较大海流干扰的情况下，通过调节 **PID** 控制器参数，能够良好地跟踪上已知的理想路径，有较强的鲁棒性。

6 总结与展望

本文主要讨论了水下机器人的路径规划及路径跟踪问题。在论文工作中，首先介绍了水下机器人（AUV）的国内外研究现状、未来发展趋势和本课题的研究背景及意义，阐述了机器人普遍使用的路径规划和路径跟踪方法。在路径规划中，涉及了路径规划的定义、路径规划问题的分类以及路径规划问题的实现等方面。依据对周围环境的了解情况，路径规划分为全局路径规划和局部路径规划，本文主要讨论了 AUV 全局路径规划问题，即已知障碍物空间的全部先验信息，规划出一条从起始位置到目标位置的安全无碰的最优路径。围绕该思想，本文以课题组 AUV(C-Ranger)为研究对象，建立了水下机器人的空间运动学方程，考虑了水下机器人的动力学特性及海流因素，在 MATLAB 和 SIMULINK 环境中进行避碰规划与跟踪。在理论分析和仿真实验研究的基础上，本文针对水下机器人的栅格环境模型，设计了一种新的适用于海洋环境的 AUV 路径规划问题的算法：用 FMM 算法进行水下机器人的二维环境地图的路径规划，并给出了仿真结果；在路径规划的基础上，论文进一步讨论了水下机器人的路径跟踪技术，基于增量式 PID 控制的机器人跟踪技术，并在 C-Ranger 模型上进行了仿真验证。主要工作如下：

1. 以本课题组 C-Ranger 为研究对象，重点讨论了它的动力学方程及运动学方程，为后续讨论机器人路径跟踪方法奠定了基础。
2. 针对复杂的海洋环境，根据 AUV 所处环境的栅格化模型，介绍了一种新的路径规划方法——快速步进算法（FMM）。该方法是由 Sethian 提出的，用于求解静态 Hamilton-Jacobi 方程的边界值问题。该方法用于水下机器人路径规划的基本思想是，将 AUV 看做一个点，通过膨胀环境中的障碍物，能够成功解决路径规划中的安全避碰问题。在栅格环境中，已知起点和终点，该算法在起点周围构造一个无穷小的激活窄带，其中在起点处分配的距离值为零，窄带内的点到达时间未知，当前传播边界利用逆向差分格式（Up-Wind）将当前边界向前传播，凡是扩散到的点就分配一个距离值，然后再根据当前的波前向构造新的激活带，如此循环，直到终点也分配上一个距离值。在传播前沿向外扩散的过程中，根据二维栅格环境的 4-临域算法或三维栅格环境的 8-临域算法，就能在窄带中

寻找到距离值最小的点，如此循环，遍历整幅二维图像，就可以寻找到构成最优路径的所有节点，然后，从终点开始，通过梯度下降算法进行反推，就得到了避碰的最优路径。该方法对环境的表示采用了栅格类方法，因此结合了栅格法和位姿空间法的优点。相较 A*算法、D*算法，FMM 算法克服了机器人会陷于局部极值点的问题，避免出现死锁（DEADLOCK）现象。由仿真结果可以看出，利用 FMM 方法得到的路径能够良好的避障，规划速度快，实时性较好，满足 AUV 系统的要求。该方法能方便地实现各种优化条件，并适用于各种复杂的环境，具有较好的控制生成路径的能力和可扩展性。

3. 根据对 PID 控制器的研究及它在应用中的鲁棒性能，本文提出了针对 AUV（C-Ranger）模型的路径跟踪方法。路径跟踪的思想是控制机器人跟踪上已知的期望路径，顺利到达目的地。本文中，首先对已得到的期望路径，分别进行旋转规划和水平面规划，获得期望的速度 $v(t)$ 和航向角 $\varphi(t)$ ，将 $v(t)$ 和 $\varphi(t)$ 与实际的速度 $v'(t)$ 和 $\varphi'(t)$ 输入到 PID 控制器和 AUV 模型组成的整个仿真系统中，调节 PID 参数，使得 AUV 跟踪上期望路径。本文研究了水下机器人对直线、圆形以及任意曲线的跟踪，通过轨迹规划和产生算法将路径数据转化成速度时间与角度时间数据。仿真结果表明，对于有海流和无海流的情况，在误差允许的范围内，都达到了满意的跟踪效果。故该增量式 PID 控制器不仅具有良好的动态特性，而且具有较好的跟踪与收敛特性。

尽管我们在水下机器人全局路径规划和路径跟踪方面取得了较好的进展，但是仍有一些方面有待进一步探讨。

1. 采用栅格法进行环境描述，存在着环境表示的精确程度与搜索空间规模之间的固有矛盾，要解决这一矛盾，可以采用更优秀的并行规划算法或提高硬件的处理能力。

2. 本文中主要考虑了定深海洋环境下的路径规划，对于三维环境下的路径规划有待进一步研究；对于大海流的情况，机器人运行路径会受很大影响，因此，如何减小海流对 AUV 的影响需要更深入的研究与探讨。

3. 在 AUV 路径跟踪过程中，当海流很大时，跟踪控制效果不佳，有待深究。

参考文献

- [1] 逢永杰, 徐玉如, 尚游等. 智能潜器的集成仿真系统.海洋工程.1997,15(4): 81-89
- [2] <http://www.robotschina.com/>
- [3] http://www.yuhoo.com.cn/gfkpzs/jc/200712/t20071203_4457.htm
- [4] http://www.cnr.cn/2004news/kjxw/200810/t20081006_505115108.html
- [5] 王若兰, 严明.国外水下机器人发展现状.机器人情报, 1991, (3): 8-16
- [6] <http://www.jobs.cn/newsInfo/2008-3-21/200832112234354.htm>
- [7] <http://www.cas.ac.cn/10000/10003/10000/10001/2008/124153.htm>
- [8] N. Nilsson. A mobile automation : An application of artificial intelligence techniques. Proceedings of the 1st International Joint Conference on Artificial Intelligence, Washington, USA, 1969: 509~520
- [9] Durrant-Wh-qe H F. Where am I. A tutorial on mobile vehicle localization. Industrial Robot, 1994, 11-16.
- [10]M. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and mapping (slam) problem. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001.
- [11]蒋新松.机器人学导论.辽宁: 科学技术出版, 1994, 511-516, 543-554
- [12]J.T.Schwartz, M.Shair. A Survey of Motion Planning and Related Geometric Algorithms. Artificial Intelligence.1998,37(1-3): 157-169
- [13]Chanclo, B. Luciani. A Global and local path planning in natural environment by physicalmodeling. Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on.1996,11(3): 1118-1125
- [14]lozano-Perez, Wesley.M.A. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles.Communications of the ACM. 1979,22(10): 560-570
- [15]董笑菊.海洋环境下智能水下机器人全局路径规划研究.[硕士学位论文]. 哈尔滨工程大学, 2000, 1: 29-37
- [16]Howden,W.E.The Sofa Problem.Computer.1: 299-301
- [17]Udupa.S.Collision detection and Avoidance in Computer Controlled Manipulators. In proc 5th Int Joint Conf Artificial Intell.Massachusetts Inst.Technol.1987, 737-748

- [18]R.A.Brooks. Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space. IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics. 1983, 13(3)
- [19]Li Chen Fu, Dong Yueh Liu. An Efficient Algorithm for Finding a Collision-free Path Among Polyhedral Obstacles .Journal of Robotics Systems.1990,7(1):129-137
- [20]J C Latombe. Robot Motion Planning. Kluwer, Norwell. MA. 1991
- [21]M B Metea. Planning for Intelligence Autonomous Land Vehicles Using Hierarchical Terrain Representation. Pro of IEEE Int Conf on Robottes and Automaton. 1987, 1947-1952
- [22]Ames L.Crowley. Navigation for an Intelligent Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation. 1985, 1(1): 31-40
- [23]袁曾任, 姜焕东.智能移动式机器人的一种全局路径规划方法和基于知识的路径控制器[J]. 机器人.1992, 14(2): 25-30
- [24]A.Elfs. A Senar-based Mapping and Navigation System. Technical Report.The Robotics Institute, Carnegie-Mellon Univ. 1998, 504-512
- [25]B.Faverjon. Obstacle Avoidance Using an Octree in the Configuration Space of a Manipulator Proc of the IEEE Int.Conf.On Robotics and Automation.1984, 504-512
- [26]C Alexopoulos, P M Griffin. Path Planning for a Mobile Robot. IEEE Trans on Sys Man and Cybern. 1992, 22(2): 318-322
- [27]Yahja A, Singh S Stentz. An Efficient On-line Path Planning for Outdoor Mobile Robots. Robotics and Autonomous Systems. 2000, 32(2-3):129-143
- [28]Khatib, O. The Potential Field Approach and Operational Space Formulation in Robot Control. Adaptive and Learning Systems: Theory and Applications, K.S. Narendra, ed., Plenum Press, 1986, 367-377.
- [29]Haralick R M.Digital Step Edges from Zero-Crossings of Second Directional Derivatives IEEE Tans on PAMI.1984,6(1):58-68
- [30]熊春山, 黄心汉, 王敏.手眼立体视觉的算法与实现[J].机器人.2001, 23 (2): 113-117
- [31]李友善,李军.模糊控制理论及其在控制过程中的应用.北京: 国防工业出版社, 1993
- [32]Chia-Han Lin, Ling-Ling Wang. Intelligent collision avoidance by fuzzy logic control .Robotics and Autonomous System, 1997, 20: 61-83
- [33]张汝波, 顾国昌等.水下智能机器人模糊局部规划器设计.机器人, 1996,18(3)
- [34]Ulrich Roth, Marc Walker, Arne Hilmann, and Heinrich Klar. TU-Berlin,Institute fur

Mikroelektronik, Lebensstr. 1, D-10623 Berlin. 1998

- [35]唐平, 杨宜民.动态二叉树表示环境的 A*算法及其在足球机器人路径规划中的实现.中国工程科学.2002, 4(9) : 50-53
- [36]Kimmo Pulakka,Veli Kujanpaa. Rough Level Path Planning Method for a Robot Using SOFM Neural Network. Robotica. 1998, 16: 415-423
- [37]化建宁, 赵忆文, 王越超一种新的移动机器人全局路径规划算法.机器人, 2006, 28(6):593-596
- [38]Danny Z. Chen, Robert J. Szczerba, etc. A Framed-Quadtree Approach for Determining Euclidean Shortest Paths in a 2-D Environment. IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1997, 13(5): 668-681
- [39]Yoshifumi Kitamura, etc. 3-D Path Planning in a Dynamic Environment Using an Octree and an Artificial Potential Field. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1995, 474-481
- [40]张汝波, 郭必祥, 熊江基于蚁群算法的机器人全局路径规划研究.哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6):724 — 727 页
- [41]W. Son, J. Choi, O. Kwon. Robust Control of Feedback Linearizable System with the Parameter Uncertainty and Input Constraint. Proceedings of the 40th SICE International Conference, 2001,407-411
- [42]S. Jauasuriya, C. N. Hwang. Tracking Controllers for Robot Manipulators a High Gain Perspective. ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, 1998, 110:39-45
- [43]K. Yong. Controller Design for a Manipulator using Theory of Variable Structure Systems. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1978, 8(2):210-228.
- [44]Jong-Min Yang, Jong-Hwan Kim. Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1999, 15(3): 578-587.
- [45]E.M. Jafarov, M. N. A. Parlakci, Y. Istefanopulos. A New Variable Structure PID-controller Design for Robot Manipulators. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2005,13(1):122-130
- [46]W.Son, J. Choi, O. Kwon. Robust Control of Feedback Linearizable System with the

- Parameter Uncertainty and Input Constraint. Proceedings of the 40th SICE International Conference, 2001, 407-411
- [47]R.Fierro, F.L.Lewis. Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics. Proceedings of the 34th Conference in Decision&Control, NewOrieans, LA, 1995, 3805-3810
- [48]Jiang Zhong-Ping, Henk Nijmeijer. Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping [J]. automatica, 1997 ,33(7):1393-1399
- [49]徐俊艳, 张培仁.非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究.中国科学技术大学学报.2004,34(4):376-380
- [50]H. Yu. Robust Combined Adaptive and Variable Structure Adaptive Control of Robot Manipulators. Robotica, 1998, 1(16):623-659
- [51]S. Yang, A. Luo, X. Fan. Adaptive Robust Iterative Learning Control for Uncertain Robotic Systems. Control Theory and Applications, 2003, 20(5):707-71
- [52]Chanop Silpa-Anan. Autonomous Underwater Robot: Vision and Control. ME Thesis, The Australian National University, 2001,9-34
- [53]陶永华, 尹怡欣, 葛芦生.新型 PID 控制及其应用.第 2 版北京:机械工业出版社.2001
- [54]K. P. Carroll, S. R. McClaran, E. L. Nelson, D. M. Barnett, D. K.Friesen and G. N. Williams. AUV path planning: An A* approach. in Proceedings of the Symposium on AUV Technology (AUV '92), 1992, 3-8
- [55]C. W. Warren. A technique for autonomous underwater vehicle route planning. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15: 199-204
- [56]J. A. Sethian. An analysis of flame propagation. Ph. D Thesis, Dept. of Mathematics, University of California, Berkeley, CA, 1982
- [57]J.A.Sethian. Level Set Methods and Fast Marching Methods[M]. Cam-bridge, Massachusetts: Cambridge University Press,1999
- [58]Xu Sheng. Image Segmentation Technology Based on Curve Evolution and Applications. System Analysis and System.2006,4.1995.
- [59]R.Kimmel and J.A.Sethian. Optimal Algorithm for Shape from Shading and Path Planning. Journal of Mathematical Imaging and Vision 14, 2001, 237-244
- [60]J. A. Sethian and S. J. Osher. Front propagation with curvature dependent speed: algorithms

- based on hamilton-jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 1988,79: 12–49
- [61]L.Cohen and R. Kimmel. Global minimum for active contour models: A minimal path approach. *Internationnal Journal of Computer Vision*, 1997,24(1): 57–78
- [62]Lawrence C. Evans, *Entropy and Partial Differential Equations*.Department of Mathematics, UC Berkeley
- [63]K. Kant and S. Zucker. Toward Efficient Trajectory Planning: The Path-Velocity Decomposition. *International Journal on Robotics Research*, 1986,15(3): 72-89
- [64]J. Canny and J. Reif. New Lower Bound Techniques for Robot Motion Planning Problems.Proceedings of the 28th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, New York, 1988, 49-60
- [65]R.W. Brockett. Asymptotic stability and feedback stabilization in Differential Geometric Control Theory (R.W. Brockett, R.S. Millmann and H.J. Sussmann, eds.), 1983, 181-191, Birkhauser
- [66]S. Fortune and G. Wilfong. Planning Constrained Motion.Proceedings of the 20th Annual ACM Symposiumon Theory of Computing, ACM, New York, 1988, 445-457

致 谢

本文是在我的导师的悉心指导下完成的。在攻读硕士学位期间，他对我严格要求，悉心指导，他渊博的知识以及忘我的工作态度和崇高的敬业精神，使我在学习和工作中受益匪浅，终生难忘。在此向我的老师表示深深的祝福和诚挚的感谢！

感谢在校期间的所有授课老师，感谢实验室同学在研究生学习期间对我的关心和帮助，在此对他们表示感谢，并送上真诚的祝福。

感谢父母含辛茹苦的养育之恩。二十多年来，你们无私的关爱奉献是鼓励我不断前进的动力和源泉。在以后的人生道路上，唯有永不懈怠，继续进取，方能报答你们于万一。

在论文的研究和撰写过程中，得到了杨柯、王一童、姚科等同学的积极支持和帮助，在此，向他们表示深深的谢意！

值此论文完成之际，向所有关心我的亲人、师长和朋友表示深深的谢意。最后，还要感谢在百忙中抽出宝贵时间阅读本论文的各位评委。

个人简历

1982 年 1 月 17 日出生于山东省曹县。

2002 年 9 月考入济南大学信息学院电子信息科学与技术专业，2006 年 7 月本科毕业获得工学学士学位。

2006 年 9 月考入中国海洋大学信息科学与工程学院通信与信息系统专业攻读硕士学位至今。

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 冉红格 何波 刘贵杰.自主式水下机器人中数字电子罗盘的误差分析及校正.中国海洋大学学报.中文核心期刊.已录用.2008
- [2] HE Bo, RAN Hongge, YANG Ke, HUANG Luyue, REN Chunyun. Path Planning and Tracking for Autonomous Underwater Vehicles. The 2009 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA2009), Zhuhai, Guangdong, China, accepted, 2009.



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
