

分类号: TP391

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220320132



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 复杂环境下无人艇
避障方法研究

论文作者 张鹭飞

校内导师 关治洪 教授

校外导师 叶刚 高级工程师

专业学位类别 电子信息

研究方向(领域) 人工智能

论文提交日期: 2025 年 5 月 16 日

分类号：TP391

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220320132

题 目：复杂环境下无人艇

避障方法研究

题 目：Research on Obstacle Avoidance Methods

for USV in Complex Environment

学 生 姓 名：张鹭飞

校 内 导 师：关治洪 教授

校 外 导 师：叶刚 高级工程师

专 业 学 位 类 别：电子信息

研究方向（领域）：人工智能

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。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。除文中已明确注明和引用的内容外，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及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：张鹭飞

日期：2025 年 05 月 16 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程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。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒

学位论文作者签名：张 鹭 飞

指导教师签名：[Signature]

日期：2025 年 5 月 16 日

日期：2025 年 5 月 16 日

复杂环境下无人艇避障方法研究

摘 要

随着无人艇在海洋资源开发和军事活动方面广泛应用,无人艇成为当前热点研究方向。而无人艇在海面自主航行首要考虑的问题是从起点安全高效的航行至终点,所以无人艇先根据起点、终点以及环境中静态障碍物信息规划出全局最优路径。然后在全局路径基础上,无人艇实时航行并对航行过程中动态船只和未知障碍物进行局部路径规划。因此,本文开发综合集成避碰算法框架对无人艇实时航行与避障问题展开研究,论文主要工作及创新点如下:

针对无人艇全局规划问题,本文建立了无人艇全局路径规划模型,考虑到传统路径规划算法规划路径转折点较多、路径长的问题,以及传统群智能算法寻优能力差、收敛较慢的问题,提出混合人工蜂群粒子群算法。首先介绍传统人工蜂群算法基本原理,分析该算法优势与不足、然后通过电子海图获取全局环境,并分别对无人艇工作空间建模、静态障碍物膨化建模、与损失函数建模、然后将粒子群算法引入人工蜂群算法,并建立两种算法混合机制,提出混合人工蜂群粒子群算法。最后,进行对比仿真实验,验证了混合人工蜂群粒子群算法规划出的路径相对于传统算法规划的路径转折点少、易于无人艇跟踪、更具可行性和优越性,且相对于传统群智能算法收敛快,寻优性能更好,满足无人艇全局最优路径规划需求。

针对遵守海事避碰规则的动态船只避障问题,在上述全局最优路径基础上提出了一种动态船只避碰算法。首先在传统动态窗口方法中

融入海事避碰规则构造动态船只避碰算法、然后模拟不同速度、不同航向的动态船只，构造无人艇与动态船只不同会遇场景，然后分析无人艇从开始航行至遇到动态船只避碰、复航，直到完成航行的整个过程；最后，通过仿真实验统计动态船只与无人艇的相对距离均大于安全避碰距离，且无人艇遵守海事避碰规则偏转方向、进而验证该方法有效性。

针对海面突发的未知障碍物冲突问题，同时考虑无人艇使用动态船只避碰算法实时航行时与静态障碍物存在碰撞风险问题，提出一种综合集成避碰算法。首先通过将全局静态障碍物离散化处理，将静态障碍物避碰纳入动态船只避碰算法，并设计动态船只优先避碰原则，提出已知障碍物避碰算法；然后，针对未知障碍物相对于无人艇的碰撞方向，划分为正向冲突情形与侧向冲突情形，并分别设计加速避让算法和停车等待算法进行避碰处理；最后基于以上三种算法，构造综合集成避碰算法，通过仿真实验验证了该算法对于全局静态障碍物、动态船只、未知障碍物综合避碰的有效性。

关键词：全局最优路径；动态船只；海事避碰规则；局部路径规划；未知障碍物；综合集成避碰算法

Research on Obstacle Avoidance Methods for USV in Complex Environment

ABSTRACT

With the widespread application of unmanned boats in marine resource development and military activities, USV have become a current hot research direction. The primary consideration for autonomous navigation of USV on the sea surface is to safely and efficiently navigate from the starting point to the designated endpoint. Therefore, USV first plan the global optimal path based on the starting point, endpoint, and static obstacle information in the environment. Then, based on the global path, USV navigates in real-time and plans local paths for dynamic vessels and unknown obstacles during real-time navigation. Therefore, this paper develops a comprehensive integrated collision avoidance algorithm framework to study the real-time navigation and obstacle avoidance problems of USV. The main work and innovation points of the paper are as follows:

For the research on global planning of USV, this paper establishes a

global path planning model for USV. Considering the problems of many turning points and long paths in traditional path planning algorithms, as well as the poor optimization ability and slow convergence of traditional swarm intelligence algorithms, a hybrid artificial bee swarm particle swarm algorithm is proposed. Firstly, introduce the basic principles of traditional artificial bee colony algorithm and analyze its advantages and disadvantages; Then, the global environment is obtained through electronic nautical charts, and models of the USV workspace, static obstacle expansion, and loss function are separately established; Next, the particle swarm algorithm is introduced into the artificial bee colony algorithm, and the mechanism of mixing the two algorithms is introduced, proposing a hybrid artificial bee colony particle swarm algorithm. Finally, comparative simulation experiments were conducted to verify that the path planned by the hybrid artificial bee colony particle swarm algorithm has fewer turning points, is easier for USV to track, is more feasible and superior compared to traditional algorithm planning, and converges faster and has better optimization performance compared to traditional swarm intelligence algorithms, meeting the global optimal path planning requirements for USV.

A dynamic ship collision avoidance algorithm is proposed based on the global optimal path to address the dynamic ship obstacle avoidance problem that complies with Colregs. Firstly, the traditional dynamic

window method is integrated with Colregs to construct a dynamic ship collision avoidance algorithm; Then simulate dynamic ships of different speeds and voyages, and construct scenarios where USV and dynamic ships encounter different situations; Next, analyze the entire process of USV from starting navigation to encountering dynamic vessels for collision avoidance, resuming navigation, and completing navigation; Finally, through simulation experiments, it was found that the relative distance between the dynamic vessel and USV is greater than the safe collision avoidance distance, and USV follows the Colregs to deflect in the direction; Further validate the effectiveness of the method.

A comprehensive integrated collision avoidance algorithm is proposed to address the problem of sudden unknown obstacle conflicts on the sea surface, while considering the collision risk between USV using dynamic ship collision avoidance algorithms and static obstacles during real-time navigation. Firstly, by discretizing the global static obstacles, static obstacle avoidance is incorporated into the dynamic ship collision avoidance algorithm, and the dynamic ship priority collision avoidance principle is designed to propose a known obstacle collision avoidance algorithm; Then, for the collision direction of unknown obstacles relative to USV, it is divided into forward conflict and lateral conflict situations, and acceleration avoidance algorithms and parking waiting algorithms are designed separately for collision avoidance processing; Finally, based on

the above three algorithms, a comprehensive integrated collision avoidance algorithm was constructed, and the effectiveness of the algorithm for comprehensive collision avoidance of global static obstacles, dynamic ships, and unknown obstacles was verified through simulation experiments.

Lufei Zhang(Electronic Information)

Supervised by Prof. Zhihong Guan

KEY WORDS: Global optimal path, Dynamic vessels, Colregs, Local path planning , Unknown obstacles , Integrated collision avoidance algorithm

目录

摘 要.....	1
ABSTRACT.....	3
第 1 章 绪论.....	10
1.1 课题研究的背景和意义.....	10
1.2 国内外无人艇研究现状.....	11
1.2.1 国外无人艇研究现状.....	11
1.2.2 国内无人艇研究现状.....	13
1.3 论文主要研究内容及创新点.....	15
1.4 本文章节安排.....	16
第 2 章 无人艇避障算法研究.....	18
2.1 无人艇避障算法概述.....	18
2.2 机器人避障算法.....	18
2.2.1 全局路径规划算法.....	19
2.2.2 局部路径规划算法.....	20
2.3 无人艇避障算法研究现状.....	21
2.3.1 国外无人艇避障算法研究现状.....	21
2.3.2 国内无人艇避障算法研究现状.....	23
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 基于混合人工蜂群粒子群算法的全局路径规划.....	25
3.1 引言.....	25
3.2 人工蜂群算法概述.....	25
3.2.1 人工蜂群算法的历史.....	25
3.2.2 人工蜂群算法的基本原理.....	25
3.3 全局路径规划建模.....	27
3.3.1 静态障碍物膨化建模.....	27
3.3.2 损失函数建模.....	28

3.4 全局路径规划算法设计.....	30
3.4.1 人工蜂群算法的优势与不足.....	30
3.4.2 人工蜂群算法的改进.....	30
3.4.3 算法流程.....	32
3.5 仿真分析.....	33
3.5.1 基本参数.....	33
3.5.2 仿真与分析.....	33
3.6 本章小结.....	36
第 4 章 动态船只避碰的局部路径规划.....	37
4.1 引言.....	37
4.2 动态船只避碰算法建模.....	37
4.2.1 无人艇与动态船只避碰模型.....	37
4.2.2 海上避碰规则计算模型.....	39
4.3 动态窗口法概述.....	41
4.3.1 动态窗口法的历史.....	41
4.3.2 动态窗口法规划流程.....	42
4.3.3 动态窗口法优势和不足.....	46
4.4 动态船只避碰算法设计.....	47
4.4.1 动态窗口法融合海事避碰规则.....	47
4.4.2 算法流程.....	48
4.5 仿真分析.....	49
4.5.1 基本参数.....	49
4.5.2 仿真与分析.....	49
4.6 本章小结.....	52
第 5 章 基于未知障碍物的综合集成路径规划.....	53
5.1 引言.....	53
5.2 已知障碍物避碰算法设计.....	53
5.2.1 探测圆可视化与分析.....	53
5.2.2 静态障碍物碰撞圆离散化处理.....	54

5.2.3 已知障碍物避碰算法设计.....	55
5.3 未知障碍物避碰算法标志设计.....	57
5.3.1 无人艇与未知障碍物冲突情形分类标志计算.....	57
5.3.2 无人艇运动决策分类标志计算.....	59
5.4 综合集成避碰算法设计.....	59
5.4.1 算法集成框架设计.....	59
5.4.2 算法流程.....	60
5.5 仿真分析.....	61
5.5.1 基本参数.....	61
5.5.2 仿真与分析.....	62
5.6 本章小结.....	67
第 6 章 总结与展望.....	68
6.1 本文工作总结.....	68
6.2 未来工作展望.....	69
参考文献.....	70
攻读硕士期间取得的学术成果	75
致谢	76

第 1 章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

无人艇(USV)作为综合集成了环境感知模块、运动决策模块、路径规划模块、控制执行模块的自主水面智能体,利用自身携带的物理设备,如 GPS, 雷达, 声呐等,使得无人艇在海洋资源开发和军事活动方面应用广泛^[0-3],经济及军事价值巨大,受到许多专家和学者争相研究^[4]。无人艇实际应用过程中,无人艇路径规划是实现自主导航和安全行驶的关键技术。在海上航行过程中,船舶搁浅触礁事故,以及船舶与船舶之间的碰撞,通航密度大,船舶尺度大,沟通联系、协调避让难度大。商船与渔船,在海岛暗礁密集区域或者是港口密集区域,因为过往船只较多,通航密度较大,且该类区域对于视线有一定的阻碍作用,所以碰撞事故,意外事故发生较多^[5],港口航拍图与海岛航拍图如图 1.1 所示。



图 1.1 港口航拍图与海岛航拍图

近年来,国内外无人艇应用方面取得巨大成功,2017 年 11 月,中国第 34 次南极科学考察期间,国家海洋局南海调查技术中心使用云洲智能研发的 4 艘无人艇,包括 1 艘 M80B “极行者”海洋调查无人艇平台和 3 艘 SE40 小型测量无人艇,前往南极罗斯海难言岛及长城站附近海域,为“雪龙号”寻找新锚地并进行水下地形测量^[6]。2022 年 4 月,海南省白沙县生态环境局使用云洲 SL20 型暗管探测无人艇,搭载侧扫声呐技术对南叉河县城段进行全流域水下扫描,成功发现 5 处水下疑似暗管排口和 12 处城镇雨洪排口,为后续整治工作提供了依据。但根据相关新闻报道,国内外无人艇碰撞事故频频发生,如 2024 年 12 月,荷兰鹿特丹附近 Scheur 河上发生一起碰撞事故,一艘集装箱船与一艘无人艇相撞,导

致集装箱船装载的部分集装箱落水，对当地航运业产生一定影响。2023 年 7 月 20 日，美国新英格兰地区发生了一起无人驾驶船只撞上海事巡逻艇的事故，导致多名警官落水，对人身安全造成一定危害。综合上述例子可知，无人艇具有自主智能、模块清晰、机动灵活等优势，具有广泛的应用场景，但是由以上调研的无人艇碰撞事件，可知如何安全有效的避开障碍物是目前亟待解决的问题。

无人艇自主导航和安全行驶等关键技术研究领域，我国在这方面仍处于追赶阶段，但已经取得了显著的进步。

1.2 国内外无人艇研究现状

1.2.1 国外无人艇研究现状

无人艇的发展历程大致划分为以下几个阶段：萌芽阶段(1898 年-1940 年)，1898 年，尼古拉·特斯拉首次试验了遥控无人艇，这标志着无人艇技术的诞生。但由于当时技术尚未成熟，无人艇的研究停滞了近半个世纪^[7]。

初级发展阶段(1941 年-1990 年)，第二次世界大战期间，无人艇主要应用于军事，海上作战，主要作为一次性制导武器使用。例如，德国的 FL-Boote 遥控艇用于装载炸药攻击盟军舰艇。美国、英国、苏联等国家开始研究开发无人随行船只，用于搜寻敌舰、进行水下侦查、扫雷、打靶训练、反潜等军事任务。例如，美国在 1960 年代开发了“自动军舰”项目，推动了无人船的自主航行技术。但该时期的无人艇主要用于军事，并未取得很大突破。

成长阶段(1990 年-2006 年)，冷战结束后，无人艇逐步应用于民用和商业领域，出现了安检巡逻无人艇、无人海上运输艇等。随着计算机技术的发展，无人艇开始引入自动化控制系统，使其能够在预先设定的航线上自主导航，美国首次研发“海上猫头鹰”无人艇^[8]，主要用于近海岸浅水区的侦察和军事活动，开创了自主型无人艇的先河。

高速发展阶段(2006 年至今)，2002 年美国启动“斯巴达侦察兵”水面无人艇项目，该艇采用模块化设计方法，可用来完成精准打击、作战、监视等多种类型任务^[9]。

2005 年，以色列研发的“黄貂鱼”无人艇采用喷水推进的方式，航行速度可达 40 节。之后以色列又推出“海鸥”无人艇，该艇可根据指令自动搜索、检测、清除水雷，同时还具备了执行多任务的能力。

而以色列作为研发无人艇的强国，其自主研发的“保护者”号无人艇，轮流对本土沿海地区和相关水域进行巡逻和监视^[10]，起到一定战略威慑作用。“保护者”无人艇也被新加坡海军首次引入，并装备了 2 艘；并在 2005 年举行的一次演习中，将 2 艘“保护者”部署在阿拉伯海港北部，实施海上保卫和封锁行动。据新加坡国防部称，该无人艇的表现“非常高效”。此外，美国海军也计划引进“保护者”用于反恐和部队保护等领域，并于 2006 年中旬开始在美国沿海对“保护者”开展了一系列的演示试验。尽管如此，“保护者”依然存在技术难点，如控制与成本问题等。仍需要攻克这些难关，以便使其能够真正应用于实战。

意大利展示的 SAND 无人艇在 2023 年拉斯佩齐亚 SeaFuture 展会上成为焦点，可用于特种作战支持、电子防御、海上军事打击等方面。此外，其他一些国家也致力于无人艇的研发，如英国的“翡翠鸟”号、C-Enduro 无人艇、加拿大“翠鸟”无人水面艇，法国的“检验者”号等^[11]。国外无人艇系列如图 1.2 所示：



“保护者”无人艇



“海鸥”无人艇



SAND 无人艇



“检验者”无人艇



C-Enduro 无人艇



“黄貂鱼”无人艇



英国“翡翠鸟”反水雷无人艇



加拿大“翠鸟”无人艇。

图 1.2 国外无人艇系列

1.2.2 国内无人艇研究现状

我国研究无人艇的科研机构包括：上海大学无人艇工程研究院、国家海洋局第一海洋研究所、哈尔滨工程大学，江苏科技大学等，研发无人艇的企业有云洲智能科技有限公司，中华造船厂等。

我国无人艇的发展历程可以概括为以下几个阶段：起步阶段(20 世纪 60 年代至 20 世纪末)早期无人艇的研发主要以军事需求为导向，主要用于执行危险环境下的任务，如扫雷、反恐、反潜等。这一时期的技术主要依赖于遥控操作，智能化水平较低，民用领域的应用尚未广泛展开。如 1972 年，中华造船厂建造了我国第一艘无人遥控扫雷艇，开创我国自主制造无人艇的先河。

初步应用阶段(21 世纪初至 2010 年)，随着自动控制、人工智能等技术的快速发展，无人艇开始逐步向智能化、集成化方向发展。这一时期，无人艇在民用领域的应用开始逐渐展开，如测绘、水文、环保等领域。如 2008 年，国内新光公司自行研发的“天象 1 号”无人船完成了下水试验并取得了成功，标志着中国在

自主研发无人船只领域取得了实质性进展^[11]。

快速发展阶段(2010 年至今),随着无人艇的智能控制理论和技术得到深入研究和应用。自主导航技术日益成熟,通过融合卫星定位、惯性导航、视觉识别等多种技术手段,无人艇能够在复杂的海洋环境中实现高精度、自主航行。如上海大学的研发的“精海 1 号”,主要用于水域的测绘工作。改进后的“精海 2 号”无人艇于 2014 年随“雪龙号”极地科考船前往南极进行第 31 次科考^[13]。同年,哈尔滨工程大学研制了“天行 1 号”多任务高速无人艇,该艇满载排水量 7.5 吨,最高航速 50 节,续航力 1000 千米,是当时世界上速度最快无人艇。

以云洲智能为代表的中国企业,通过自主研发和技术积累,推出了多种型号的无人艇,如 L30 警戒巡逻无人艇和 M75C 巡查取证无人艇。值得注意的是,云洲公司还研发了我国首款导弹艇,也是全球第二款可以发射导弹的无人艇^[14]，“瞭望者 II”号,具有极大的战略价值。

2019 年 1 月 3 日,由哈尔滨工业大学(威海)教师 and 多名业内技术骨干与市场销售人员组成的威海天帆智能科技有限公司,是一家致力于提供智能无人艇整套装备及系统整体解决方案的高新技术企业,产品类型涵盖内河、湖泊及海洋领域各类无人船,已推出从 1.0 米至 12 米等多个系列十余种型号产品。广泛应用于水质采样、水文测量、海洋测绘、海洋观测、安防巡逻、侦查搜救、物资运输、海水养殖监测与安防、远洋捕捞探测、有人艇的无人化改造等多领域,证明了我国在无人艇领域已进入了实用阶段。国内无人艇系列如图 1.3 所示:



天象一号



云洲智能无人舰队



图 1.3 国内无人艇系列

虽然我国经过多年的不断发展与探索，也取得了一定的成就。但整体来说，部分关键技术领域与发达国家差距较大，存在不少难关需要攻克。

1.3 论文主要研究内容及创新点

本文以无人艇实时航行与避碰问题作为研究背景，提出了以综合集成避碰算法框架为基础，控制无人艇安全有效航行的方法，论文主要研究内容及创新点如

下:

(1) 基于混合人工蜂群粒子群算法的全局路径规划

考虑到无人艇接收的电子海图,在建立综合集成避碰算法框架的基础上,提出了一种混合人工蜂群粒子群算法用于全局路径规划。通过对全局航行环境建模,静态障碍物膨化建模,损失函数建模;接着,通过混合人工蜂群粒子群算法规划出由起点至终点的全局最优路径。最终规划出的路径转折点少,路径短,易于无人艇跟踪,并且该算法相对于传统粒子群算法等智能优化算法收敛的更快,寻优性能更好。

(2) 动态船只避碰的局部路径规划

在基于综合集成避碰算法框架的基础上,解决了与遵守海事避碰规则的动态船只避碰的问题,提出了动态船只避碰算法。通过将海事避碰规则融合进入动态窗口法,建立动态船只避碰算法;然后,模拟无人艇与动态船只多种会遇场景,通过对比系统设定的无人艇与动态船只距离阈值,验证提出的动态船只避碰算法的有效性。

(3) 基于未知障碍物的综合集成路径规划

通过将静态障碍物碰撞圆离散化处理为静态碰撞点,并设定动态船只优先避碰原则,将静态障碍物纳入动态船只避碰算法,构造已知障碍物避碰算法,解决了无人艇使用动态船只避碰算法实时航行与静态障碍物距离较近的问题。然后,考察未知障碍物对无人艇实时航行的影响,基于未知障碍物相对无人艇的碰撞方向,分为正向冲突情形和侧向冲突情形,分别设计了加速避让算法和停车等待算法,并与已知障碍物避碰算法结合,设计综合集成避碰算法。最后,仿真结果表明,本文所设计的综合集成避碰算法能够有效避开全局静态障碍物,动态船只,未知障碍物,验证了此算法的有效性。

1.4 本文章节安排

本文主要围绕无人艇实时航行与避障问题展开研究。各章节主要内容如下:

第1章 绪论。主要通过具体的实例分析论证无人艇自主航行过程中避障问题研究的意义,并对国内外无人艇的研究现状做出概述。

第2章 无人艇避障算法理论基础。首先介绍了机器人常用避障算法,

其中，机器人全局路径规划算法包括 A-Star 算法，RRT 算法，深度 Q 网络算法；机器人局部路径规划算法包括矢量场直方图算法，曲率速度法，人工势场法，BUG 算法；然后介绍了国内外无人艇避障算法的研究现状，为后文无人艇的全局路径规划算法和局部路径规划算法设计做准备。

第 3 章 基于混合人工蜂群粒子群算法的全局路径规划。本章节针对电子海图标识的静态障碍物展开研究，为解决传统路径规划算法转折点较多，路径较长问题，以及传统群智能算法的收敛性慢等问题提出了一种混合人工蜂群粒子群算法。首先，对无人艇航行任务空间进行数学建模，具体包括全局环境建模、静态障碍物膨化建模与损失函数建模，然后利用混合人工蜂群粒子群算法进行路径规划。最后，在 MATLAB 上分别与传统群智能算法和传统路径规划算法进行仿真对比，验证了所提算法的实用性。

第 4 章 动态船只避碰的局部路径规划。本章节主要针对考虑遵守海事避碰规则的动态船只避碰算法设计。首先建立无人艇和动态船只的模型和海事避碰规则模型；然后在动态窗口法的基础上融合海事避碰规则，进而设计动态船只避碰算法；最后，在 MATLAB 上模拟动态船只与无人艇的多种会遇场景，验证所提算法的有效性。

第 5 章 基于未知障碍物的综合集成避碰算法设计。本章节第一针对无人艇采用动态船只避碰算法实时航行时，与静态障碍物存在碰撞风险的问题展开研究，将静态障碍物碰撞圆离散化为静态碰撞点集合，并设定动态船只优先避碰原则，将静态障碍物避碰纳入动态船只避碰算法，建立已知障碍物避碰算法。第二，针对无人艇实时航行时，海面的未知障碍物避碰问题，根据未知障碍物与无人艇碰撞方向，分为正向冲突与侧向冲突情形，并分别设计加速避让算法与停车等待算法；然后综合以上三种算法，设计无人艇综合集成避碰算法，最后，在 MATLAB 环境中验证了该方法的有效性。

第 6 章为总结与展望。对本文研究内容进行整体归纳，并对未来的工作提出展望。

第2章 无人艇避障算法研究

2.1 无人艇避障算法概述

无人艇先根据电子海图获取的数据信息,构造相关约束条件,在满足约束条件下,规划出一条全局最优路径;然后沿着全局最优路径实时航行与避障,在无人艇实时航行过程中,必须准确的感知周围环境,如果存在障碍物,则需要快速做出决策,根据探测系统获取的数据,结合实时航行的约束条件,解算正确的航向和航速,控制执行机构实时的调整避障,使无人艇能安全到达路径终点。综合来说,分为以下三类约束条件。

(1) 无人艇自身约束条件,无人艇实时航行时,除了无人艇静止状态的体积,重量,最大转向角等因素,还有无人艇运动状态的物理特性,综合各种影响因素,可以得出无人艇线速度,角速度,加速度等物理量的阈值,为实际仿真预测提供可靠数据;(2)障碍物约束条件,处在复杂海洋环境中工作的无人艇,会遇到外在障碍物,归纳如下静态障碍(海岸、湖岸、海岛,港口,暗礁、沙洲等),动态船只(建立通信的船只,其他无人船等),未知障碍物(未知漂浮物,未知海洋生物等)。(3)海事避碰规则约束条件,为了避免无人艇与海上航行的其他动态船只进行碰撞,必须满足海事避碰规则的 13、14、15 条,这些条款对无人艇遇到追越、正面相遇和交叉相遇碰撞局面的处理办法,做出了详细说明^[15]。

以上论述虽然介绍了整体的文章思路,但是对于具体全局路径规划选用什么算法,以及局部航行与避障采用什么设备,不同设备发挥什么功能,使用什么局部避障方案却鲜有涉及。因此,本文以全局路径规划为基础,无人船实时航行与避障作为发展的无人艇避障系统开发。

2.2 机器人避障算法

无人艇本质属于自主移动机器人,很多关于移动机器人的避障方法的处理逻辑都可以引用到无人艇避障算法中来。因此本节主要对传统的全局路径规划算法如 A-Star 算法、RRT 算法、深度 Q 网络算法以及局部路径规划的 BUG 算法、人

工势场法、速度曲率法，矢量场直方图法进行简要阐述，并为下文所提出的全局路径规划算法和局部路径规划做铺垫和研究。

2.2.1 全局路径规划算法

(1) A-Star 算法

A-Star 算法是一种由 Hart 等在文献^[15]中提出的智能启发式搜索算法，可用于在栅格地图中实现全局路径规划，A-Star 算法的流程是首先对环境背景进行栅格化建模，然后从起始节点开始向相邻节点拓展；对于待拓展节点，通过评价函数计算该节点的评价数值，接着在周围节点中选择拥有最小值的节点作为下一个拓展节点；最后重复上一过程；直到搜索到目标节点时便可生成最优路径^[17-18]。

A-Star 算法作为一种功能强大且高效的路径搜索算法，通常用于生成全局最优路径，与局部路径规划算法结合使用^[19]。

(2) RRT 算法

快速探索随机树(RRT)是一种用于非凸高维空间中的路径规划的有效工具，由 Steven M LaValle 首次提出并进行了详细描述^[20]。它的搜索过程类似于一棵树不断生长、向四周扩散的过程，它以起点作为根节点构建一棵搜索树 T,RRT 作为一种随机采样的规划算法，它的复杂度不受地图的离散程度影响，具有较高的搜索效率。RRT 算法虽然能尽快地找到可行路径，但是最终生成路径存在较多转折点，并且整体规划的路径长度较长。后来在 RRT 算法的基础上，Sertac Karaman 和 Emilio Frazzoli 提出的 RRT*算法^[21],Xin P 和 Wang X 提出双向 RRT 算法^[22]。

综上所述，RRT 算法及其变种（如 RRT*和双向 RRT 等）在路径规划领域具有显著的优势，包括快速探索能力、广泛的适用性、简单易实现以及高度的灵活性。这些特点使得 RRT 算法成为解决复杂环境中路径规划问题的有力工具，并在多个领域得到了广泛的应用和持续的研究与发展。

(3) 深度 Q 网络 (DQN) 算法

深度 Q 网络 (DQN) 路径规划是一种使用深度学习技术，用于在复杂环境中为机器人找到最优或近似最优的路径。DQN 在路径规划中的目标是从起点到终点找到一条最优路径，同时避开障碍物。其主要优势包括：(1)非线性逼近能力：通过神经网络对状态值函数进行非线性逼近，能够更好地适应复杂环境。(2)实时

性与可靠性：DQN 能够在动态环境中实时调整路径，提高路径规划的效率

安徽工程大学的王正刚等^[23]采用了改进的双深度 Q 网络算法应用与路径规划，引入了一种基于 DDQN（双深度 Q 网络）决策模型的 BiLSTM-D3QN（双向长短期记忆决斗双深度 Q 网）路径规划算法，通过实验证明了 BiLSTM-D3QN 算法在网络收敛速度和路径规划性能方面的优越性。

2.2.2 局部路径规划算法

（1）矢量场直方图算法

矢量场直方图法(VFH)由 Koren, Y 和 Borenstein, J 于 1991 年提出^[24]。该方法以机器人中心建立极坐标系，实时获取机器人周围局部环境的信息，并实时反馈给机器人，使得机器人可以在稠密的障碍物区域中穿梭。由于它更关注局部避障而非全局最优性，因此在某些复杂环境中可能无法找到全局最优解，所以通过改进 VFH 算法，Ulrich 和 Borenstein 又提出了 VFH+^[25]和 VFH*^[26]。

总的来说，VFH 算法及其变种(如 VFH+和 VFH*)在机器人导航领域有着广泛的应用和重要的地位。它们通过结合传感器数据、环境表示和运动规划策略，实现了高效、可靠的机器人避障和路径规划功能。

（2）曲率速度法

曲率速度法(CVM)由 Simmons 于 1996 年提出^[27]，该方法是一种结合曲率和速度来分析和处理曲线运动的方法，可以在速度空间中对机器人直接进行运动规划。其中曲率是指曲线在某一点的弯曲程度，可以用曲率半径的倒数来表示。曲率越大，表示曲线在该点的弯曲程度越大。曲率的计算公式为： $k = |d\bar{T}/ds|$ ， $\bar{T}$ 是切线向量， s 是弧长。速度则是指机器人在单位时间内移动的距离。在曲率速度法中，速度通常与曲率结合，用于分析物体在曲线路径上的运动特性。

但由于该方法将障碍物简化为圆形，会导致发生局部最优的情况。为了解决 CVM 法的不足，石朝侠和洪炳镭在 2007 年对 CVM 法进行了改进，在曲率速度法(CVM)、巷道曲率法(LCM)和扇区曲率法(BCM)的基础上，提出了新的局部避障方法^[28]，该方法将碰撞预测模型与改进后的 BCM 有效结合，弥补了各种速度空间寻优方法的不足，对于研究速度曲率法在复杂环境下的应用和改进具有借鉴价值。

（3）人工势场法

人工势场法是 1986 年 Oussama Khatib 博士所提出的一种路径规划方法^[29]，该算法通过模拟引力与斥力的相互作用，在环境中创建一个势场，指导机器人在环境中安全、平滑地移动，引导 USV 避开障碍物并朝着目标移动。尽管存在局部最优解的问题，但人工势场法因其简单、直观的特性，在机器人和无人驾驶领域得到了广泛应用。

（4）BUG 算法

BUG 算法^[30]采用的策略是在机器人向终点运行过程中遇到障碍物时，沿着障碍物边缘绕开障碍物前进。以 BUG 算法为基础，提出以下改进版本：BUG2 算法采用更贪心的策略，允许机器人在一定条件下穿越障碍物，更高效地到达目标点。但该算法对于复杂环境的适应性较差。Tangent BUG 算法，通过传感器提前规避障碍物，适用于复杂环境。

上海大学的彭艳等^[31]借用 BUG 算法的处理逻辑，融合遇到障碍物时的爬虫分裂规则，以及爬虫死亡条件判断规则，提出一种基于 Multi-Bug 思想的非搜索全局路径规划算法。结果表明，采用 Multi-Bug 算法获得的路径长度和用时都表现得更加稳定，且 Multi-Bug 算法时间复杂度为 $O(n)$ ，具有路径较短、时效性强、算法通用性和稳定性好的路径规划性能。

2.3 无人艇避障算法研究现状

2.3.1 国外无人艇避障算法研究现状

在无人艇避障算法方面，国外很早就进行研究，并投入实践。

美国加州理工学院喷气推进实验室的 Kuwata Y 等^[32]提出了一种无人艇在动态、混乱环境中安全航行的算法。该方法基于速度障碍(VO)方法，在速度空间中生成锥形障碍物，通过海事避碰规则规定的偏转方向，指定了无人艇在避障操作中将通过障碍物的哪一侧。该算法不仅解决了静止和移动危险的危险规避(HA)问题，还应用了《国际海上避碰规则》，但是，当其他船只无视海事避碰规则规定的责任时，无人艇必须回到其 HA 算法来防止碰撞。韩国釜庆国立大学的 Jung-Hyeon Kim 等^[33]详细介绍了无人船防撞算法的开发及其使用自由运行测试的验

证。该算法使用碰撞风险指数（CRI）方法，根据与障碍物的距离和与所需航路点的角度计算风险，将无人艇引导到风险最小的路径上。结果表明，与同类方法相比，CRI 方法具有更高的时间效率和最优性。

马来西亚工程大学的 Han Heng 等^[34]讨论了蚁群算法在无人艇路径规划中的应用，包括蚁群算法的发展和路径规划算法设计面临的挑战。这项工作还根据现有的研究工作，提出了无人艇路径规划的研究重点和未来工作。日本大阪市立大学工程研究生院海洋系统工程系的 Hitoshi Yoshioka 等^[35]考察了最近深度强化学习（DRL）的研究进展并应用于开发自主导航人工智能（AI）。该机构开发了一种可解释的人工智能用于船舶避碰，所提出的方法不仅有助于理解船舶避碰任务中基于 DRL 的控制器/系统，而且可以扩展到包括子任务的任何任务。

意大利热那亚理工大学电子和电信学院海军工程系的 Raphael Zaccone^[36]提出了自主船舶避碰的 DP 公式，建立了问题框架，将其表述为多阶段决策过程，定义了成本函数和约束，重点关注海上机动必须遵守的实际要求，并提出了一种利用并行计算的解决方案算法，同时利用了一种贪婪近似来降低算法复杂度，对大量随机生成的场景进行了广泛的测试，结果显示了自主导航或决策支持框架的优势。英国贝德福德克兰菲尔德大学的 Hanlin Niu 等^[37]提出的算法包括碰撞检测算法、决策制定、碰撞解决算法和分辨率引导算法。碰撞检测算法描述了将入侵船只识别为碰撞的过程。决策算法将考虑海事避碰规则和交通信息，在保留和让行之间做出决策。如果存在碰撞风险，无人艇应该让路，碰撞解决航路点将由碰撞解决算法生成。然后，将实施分辨率制导算法，以确保无人艇在躲避入侵船只时的安全。最后，在多个动态入侵者场景和多个静态-动态混合入侵者场景中验证了所提出的算法。

法国的 Petres C 等^[38]提出了一种新的反应式路径规划方法，该方法考虑了所谓的禁区，并将其转化为虚拟障碍物。然后应用人工势场法进行自动驾驶帆船的实时避障，即使目标位于顺风或逆风处。使用特定于船只的动态模拟器进行的模拟表明，所提出的方法可以在时变风况下成功地将自主船只驱动到一组预定义的路径点。该方法计算效率高，适用于机载实时实现。

2.3.2 国内无人艇避障算法研究现状

国内对于无人艇避障算法研究方面,虽然很多算法仍处于理论层面,但目前很多机构也取得显著的应用成果。

哈尔滨工程大学的宋生清等^[39]设计了一种基于锁定扫描法(LSM)的路径规划方法,解决大范围复杂环境的无人艇路径规划问题。之后引入了速度障碍法(VO)对 LSM 算法进行改进,提出了 LSM_VO 算法,使得无人艇沿着全局最优路径航行时,可以有效避开局部障碍物。最后,结合实际航行获取的数据,构建 LSM_CVO 算法,可以较好的满足实艇操纵性的要求。哈尔滨工程大学的祖伟^[39]研究的对象为水下潜器,先通过对航行空间进行极坐标建模,然后将障碍物进行膨化处理,以便将水下潜器简化成一个质点。并分别设计对已知静态障碍物,已知动态障碍物,未知动态障碍物的避障方法,最终综合对这三种类型障碍物构成的复杂环境进行仿真模拟,验证该研究能高效、实时、安全的实现路径规划,对无人艇路径规划研究具有一定的参考价值。沈海青等^[41]基于深度竞争 Q 学习算法及 A-Star 算法提出了一种考虑航行经验和避碰规则的无人艇智能避碰导航方法,在开阔水域和受限水域中成功避让所有障碍船舶和静态障碍物,具有重要的工程应用价值。

江苏科技大学的朱杰^[42]提出混合路径规划算法,解决了无人艇在内河拥挤水域的航行问题,先基于改进蚁群算法计算的全局最优路径基础上,然后在 ROS 的无人艇仿真平台上,对无人艇在内河拥挤水域实时航行进行模拟仿真,充分验证了混合路径规划算法的有效性。集美大学的杨朝棚等^[43]关注了无人艇在海流的影响下会发生路径偏移,其与障碍物的安全距离会发生变化,增加了碰撞风险,为确保无人艇与障碍物保持足够的安全距离,构建了一种基于等效势场力和改进搜索策略的 A-Star 算法路径规划模型,用于在海流环境下的无人艇路径规划。

大连海事大学的王晶会^[44]通过在无人艇上安装双目立体视觉系统,来获取局部环境信息,并提出新的避障决策算法,实现了无人艇实时路径规划。武汉理工大学的陈宁等^[44]提出一种新颖的算法,改进瞪羚优化算法(GOA)的船舶路径规划方法,在算法测试的结果中,改进 GOA 与 GOA 以及经典粒子群算法(PSO)相比,改进 GOA 在收敛的精度以及速度方面都有明显的优势。船舶避碰路径优化仿真实验结果验证了所提避碰路径规划算法的可行性,能够实现在多船会遇情况下

的有效避碰。

2.4 本章小结

总的来说,在避障算法方面,分为全局路径规划和局部路径规划,而常用的策略是以全局路径规划为基础,无人艇实时航行与避障的局部路径规划为发展的分层次路径规划。在研究进度方面,国外在无人艇避障算法方面研究比较深入,很多算法也付诸实践。国内这方面的研究虽然起步较晚,很多技术仅处在理论研究阶段,但是也在加紧追赶的步伐。

第 3 章 基于混合人工蜂群粒子群算法的全局路径规划

3.1 引言

无人艇在真实海域开启航行任务之前,首先根据电子海图确定航行空间范围,建立全局坐标系,然后对电子海图内海岛暗礁等大型静态障碍物膨化建模,接着设计算法计算输出一条全局最优路径,方便无人艇跟踪和实时航行。本章节介绍的人工蜂群算法,结合粒子群算法的局部寻优能力,提出混合人工蜂群粒子群算法,最后在 MATLAB 环境仿真,并与传统算法对比,验证该算法的实用性。

3.2 人工蜂群算法概述

3.2.1 人工蜂群算法的历史

Karaboga 于 2005 年引入了人工蜂群算法(ABC)。这是一种基于群体智能的算法,灵感来自蜜蜂的智能觅食行为,基于 Tereshko 和 Loengarov 提出的模型,通过每个人工蜂个体的局部寻优行为,最终在群体中输出全局最优解,可应用于解决多变量函数求最优解的问题;其基本应用步骤归纳如下:首先将给定的问题转化为找到使目标函数最小化的最佳参数向量的问题。然后,人工蜜蜂随机发现一组初始解向量,通过邻居搜索机制朝着更好的解决方案迭代,最终输出问题的最优解^[46]。

3.2.2 人工蜂群算法的基本原理

ABC 算法通过模拟自然界中,蜂群自发寻找最优蜜源的机制,将人工蜂群分为 3 类:雇佣蜂、跟随蜂和侦察蜂。在寻找过程中,雇佣蜂负责搜索蜜源并将蜜源信息反馈给跟随蜂,跟随蜂则优先选择较好的蜜源进行跟随并在蜜源附近搜索,当达到开采蜜源上限,而如果新的蜜源质量没有得到提升,相应的雇佣蜂将转变为侦察蜂并重新随机搜索蜜源。

将 ABC 算法应用于无人艇全局路径规划问题，求出全局最优路径，需要对算法相应部分进行替换：(1)雇佣蜂的个数与蜜源的数量相等都是 SN ，即对应无人艇航行空间内随机初始化 SN 条搜索路径；(2)蜂群在 D 维搜索空间中进行搜索，即每条搜索路径由 D 个路径点组成；(3)每个蜜源的花蜜量对应于该条路径的损失函数值。蜂群通过下式初始化：

$$x_{id} = L_d + rand(0,1)(U_d - L_d) \quad (3-1)$$

其中， x_{id} 代表蜜源 i 的第 d 维的位置； U_d 和 L_d 为搜索空间上下限。

第 i 个蜜源对应的雇佣蜂更新蜜源公式如下：

$$x'_{id} = x_{id} + \varphi_{id}(x_{id} - x_{kd}) \quad (3-2)$$

其中， $i=1,2,\dots,SN$ ； $d=1,2,\dots,D$ ； x'_{id} 是雇佣蜂在蜜源 i 附近搜索产生一个新蜜源的第 d 维的位置， φ_{id} 是 $[-1,1]$ 之间的随机数，决定了扰动幅度考虑， $k \neq i$ ；将更新公式计算的新解 $X'_i = \{x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{iD}\}$ 与原来的解 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}\}$ 作比较，并按照贪婪策略选择是否更新 X_i 。

当雇佣蜂全部完成蜜源更新后，将蜜源信息传递给跟随蜂。跟随蜂基于获取的蜜源信息，按下式计算的概率选择跟随：

$$p_i = fit_i / \sum_{i=1}^{SN} fit_i \quad (3-3)$$

其中， fit_i 是可能解 X_i 的适应值。对于被选择的蜜源，跟随蜂按照轮盘赌的方法搜寻新的蜜源，即生成 $[0,1]$ 之间的随机数 r ，若 $p_i > r$ ，则该跟随蜂按照雇佣蜂的方式在蜜源 i 周围生成新蜜源，并以贪婪策略决定是否保留原蜜源。

若蜜源 X_i 在迭代次数达到阈值 $limit$ 后，蜜源花蜜量无明显改进，则该蜜源的雇佣蜂转变为侦查蜂，按式(3-1)随机生成一个新蜜源代替 X_i ，标准的人工蜂群算法的主要流程可参考图 3.1：

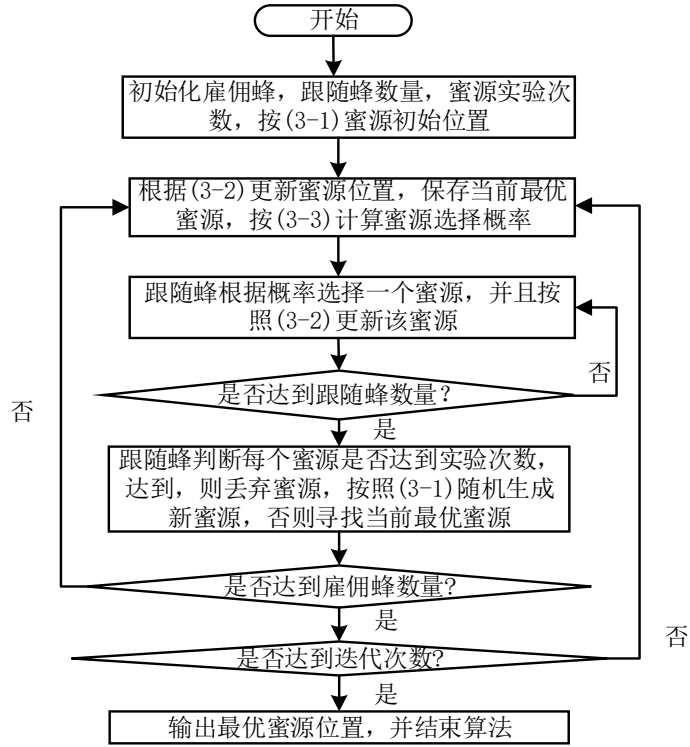


图 3.1 标准人工蜂群算法流程图

3.3 全局路径规划建模

在无人艇沿着全局最优路径航行过程中, 要求(1)无人艇追踪全局路径时, 转角尽可能小, 转角数量尽可能少, 易于无人艇追踪航行。(2)尽可能远离大型静态障碍物, 碰撞风险降到最低。(3)全局路径长度尽可能短, 无人艇能耗降到最低。基于以上三点要求, 确定对全局静态障碍物的膨化处理, 以及对人工蜂群算法的损失函数建模如下:

3.3.1 静态障碍物膨化建模

基于传给无人艇的电子海图等先验知识可知, 静态障碍物多为不规则形状, 为了使静态障碍物形状得到合理的简化, 一般采用圆形进行膨化处理, 最大限度保留可行路径, 方便算法高效的解算出全局最优解^[11]。膨化圆具体取值方法为: 假设静态障碍物共有 N 个顶点, 其直径取障碍物所有顶点 P_i 连线的最大值 $i \in (1, 2, \dots, N)$, 所以膨化半径 r 表示如下:

$$r = \max\{|P_i P_j| / 2\} \quad (3-4)$$

其中 $(i, j \in N, i \neq j)$ ，圆心即为最大连线的中点，如图 3-2 所示的红色实线圆形即为膨化处理的静态障碍物外接圆，命名为碰撞圆。假设碰撞圆 m ，圆心为 (x_m, y_m) ，半径为 r_m ，则碰撞圆在直角坐标系下形成的曲线表示为：

$$(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 = r_m^2 \quad (3-5)$$

考虑到无人艇实时航行的体积因素，需要对静态障碍物向外扩充一个安全阈值 ε (根据无人艇体积确定) 来进行二次膨胀处理，见图 3.2 所示绿色虚线圆形即为二次膨化处理的静态障碍物外接圆，命名为危险圆。

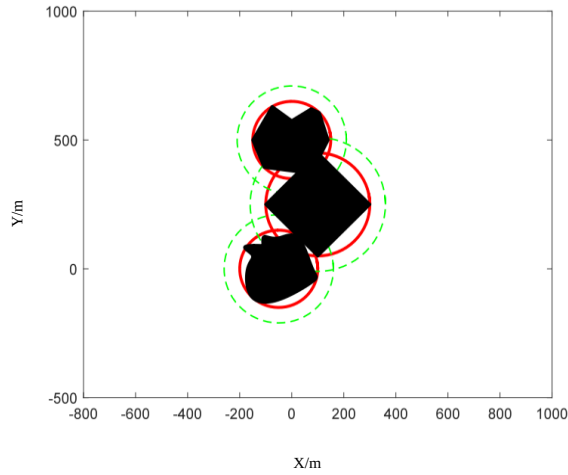


图 3.2 障碍物膨化处理图像

3.3.2 损失函数建模

无人艇获取上述膨化处理的图像和数据后，根据上述三点要求构造算法的损失函数项，分别为路径长度约束项、避障约束项以及路径平滑约束项并综合构造损失函数^[61]。

(1) 长度约束项

全局最优路径长度越短，无人艇沿着该路径航行所消耗的能量越少。假设该路径由 n 个路径点组成，则计算各个路径点之间线段的欧式距离之和来近似表示无人艇的路径长度代价 F_1 ：

$$F_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3-6)$$

(2) 转角约束项

根据无人艇的机械结构，要求无人艇沿全局最优路径航行过程中的转向角度小于等于无人艇最大转向角度 $B_{\max}$ ，综合向量余弦公式计算出角度，无人艇的转角约束函数如下：

$$\theta_i = \arccos \frac{(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i) \cdot (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})}{\|x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i\| * \|x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}\|} \quad (3-7)$$

$$flag = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta_i \leq B_{\max} \\ 1 & \text{if } \theta_i > B_{\max} \end{cases} \quad (3-8)$$

其中， θ_i 为第 i 个路径点对应的转弯角度。 $\cdot$ 表示点乘运算， $flag$ 作为最终的评价标志，如果无人艇转角大于最大转弯角度，则标志位置 1，否则置 0。

(3) 避障约束项

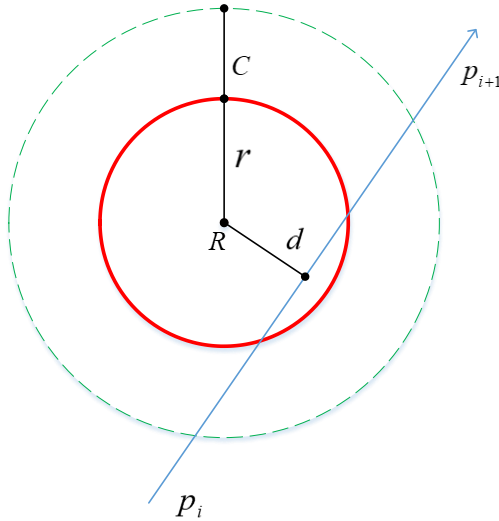


图 3.3 避障约束示意图

根据对静态障碍物的处理示意图，建立避障约束示意图如图 3.3 所示， R 表示静态障碍物圆心， r 表示静态障碍物碰撞圆半径， C 表示碰撞圆与危险圆之间的圆环半径， d 表示静态障碍物圆心点 R 与全局路径规划子路径段 $p_i p_{i+1}$ 的直线段距离，所以避障约束函数 F_2 为：

$$F_2 = \begin{cases} 0 & \text{if } d > r + C \\ r + C - d & \text{if } r < d \leq r + C \\ \infty & \text{if } d \leq r \end{cases} \quad (3-9)$$

综合无人艇的路径长度约束、避障约束、转弯角约束计算的标志位 $flag$ 。损

失函数 F 定义如下：

$$F = \begin{cases} k_1 F_1 + k_2 F_2 & \text{if } flag = 0 \\ \infty & \text{if } flag = 1 \end{cases} \quad (3-10)$$

其中, k_1, k_2 分别表示路径长度约束项和避障约束项的权重值, 综合考虑无人艇能耗和静态障碍物在全局环境分布范围, 规定权重项数值 $k_1 = k_2 = 0.5$ 。

3.4 全局路径规划算法设计

3.4.1 人工蜂群算法的优势与不足

ABC 算法自提出后, 大量学者都针对其性能进行了分析对比^[47-49]经总结, 可得出其特点如下:

- (1) 局部搜索能力弱, 收敛较慢。因为其每次产生的新解都是在父解基础上变化一个维度, 因此其局部搜索能力弱, 收敛较慢。
- (2) 计算简单, 参数少。其只有一个控制参数 $limit$, 易于理解和实现。
- (3) 全局搜索能力强, 探索能力好。雇佣蜂, 侦查蜂的存在使得算法可以跳出原有解集, 保证群体的多样性, 避免陷入局部最优, 适合处理复杂的多峰问题和离散空间优化问题。

3.4.2 人工蜂群算法的改进

(1) 粒子群算法概述

粒子群算法(PSO)是自然界的典型的群体智能算法, 基于对鸟群在固定空间觅食行为的模拟, 可应用于寻找多变量函数的最优解, 在 1995 年由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士发明^[51]。同样作为基于群体迭代的一种进化计算技术, 与 ABC 算法的不同之处是, PSO 所有粒子地位相同, 通过速度和位置更新, 没有雇佣蜂、跟随蜂等种群个体角色的划分; 而是粒子在空间内追随最优的粒子进行搜索^[39]。

在 PSO 算法应用于路径规划问题, 其算法逻辑与 ABC 算法类似, 为以下四个步骤(1)初始化部分, 在搜索空间内随机初始化 N 个粒子, 即在无人艇航行空间内, 随机初始化 N 条路径。(2)损失函数计算部分, 假设在 D 维搜索空间中, 即单条路径有 D 个路径点组成, 第 i 个粒子的位置和速度分别是 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 和

$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 表示。通过上节介绍的损失函数计算第一步初始化步骤输出的每条路径的损失函数值。其中, 第 i 个粒子的最优解 ($pbest$) 表示为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, $i=1, 2, \dots, N$, 并记录粒子群全局最优位置 ($gbest$), 即全局最优路径, 由 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 表示。(3)更新部分, 根据以下方程式更新粒子的速度和位置:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g - X_i^k) \quad (3-11)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3-12)$$

其中 $k=1, 2, \dots, K$, K 是最大迭代次数; ω 是惯性权重; c_1 和 c_2 是学习因子; r_1 和 r_2 是在 0 到 1 范围内的两个随机数。(4)判断部分, 如果算法运行次数达到最大迭代次数, 或者搜索的解达到要求精度, 则输出全局最优解, 即全局最优路径, 否则重新进入第二步骤执行循环。标准的 PSO 算法的主要流程可参考图 3.4:

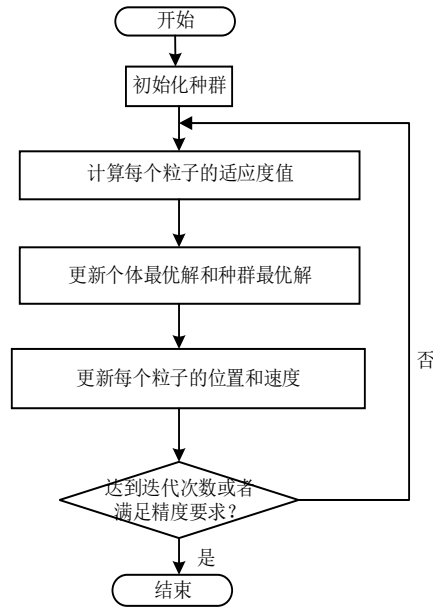


图 3.4 标准粒子群算法流程图

(2) 粒子群算法的优势与不足

PSO 算法的提出, 解决了很多不同应用场景的问题。因此, 大量学者都针对其性能进行了分析比较^[52-54], 经总结, 可得出其特点如下:

(1)收敛速度快, 但容易陷入局部最优。粒子群算法在迭代过程中, 粒子之间会相互学习和模仿, 这可能导致粒子群体的多样性逐渐降低。就容易聚集在某些局部

最优解周围，从而难以跳出这些局部最优解。

(2) 参数较多（如惯性权重、学习因子等），需要经验性调整，但算法本身逻辑简单，结构清晰。

(3) 更适合连续空间的优化问题。在连续空间中，粒子的位置和速度都是实数向量，这使得粒子能够根据与最优解的距离和方向进行精确的搜索。例如，在函数优化问题中，粒子可以根据目标函数的梯度信息或适应度值的变化，调整自己在连续空间中的飞行方向和步长，逐步逼近最优解。这种基于距离和方向的搜索方式在连续空间中非常自然和有效。

(3) 混合人工蜂群粒子群算法

从上述总结的 ABC 算法和 PSO 算法特性可知，两个算法优势互补，对 PSO 算法搜索时，可能遗漏全局最优解的情况。所以提出结合两个算法，最大化两者的优势，利用 ABC 算法的全局搜索能力和 PSO 算法的局部寻优能力，在每一轮迭代中筛选的最优解再进行比较，输出混合 ABC 算法和 PSO 算法的最优解，达到遍历整个搜索空间的目的，从而提高全局最优解的精度。

3.4.3 算法流程

综上所述，可以归纳出混合人工蜂群粒子群算法(ABC+PSO)的总体步骤：首先确定问题，基于电子海图先验知识，为无人艇在航行空间内规划出一条全局最优路径；然后确定无人艇的航行空间，建立直角坐标系背景，再对航行空间内的静态障碍物进行膨化建模；接着基于无人艇航行特性，静态障碍物的建模特点，以及全局最优路径特性，确定损失函数项，分别为路径长度约束项，避障约束项，转向角约束项，最终综合构造损失函数；最后，利用本文介绍的混合人工蜂群粒子群算法求解出全局最优路径，并在 MATLAB 与其他求解算法对比仿真，验证该算法实用性，混合人工蜂群粒子群算法(ABC+PSO)流程图如下图 3.5 所示：

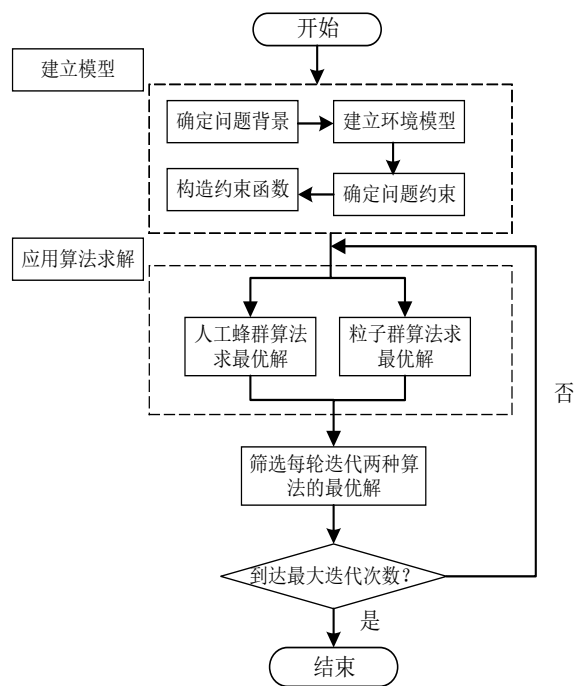


图 3.5 混合人工蜂群粒子群算法流程图

3.5 仿真分析

3.5.1 基本参数

表 3.1 静态障碍物参数表

静态障碍物序号	圆心坐标(m)	碰撞半径(m)	危险半径(m)
圆形障碍物 1	(0,500)	150	210
圆形障碍物 2	(-50,0)	150	210
圆形障碍物 3	(100,250)	200	260

电子海图范围 x 轴为 $[-800m, 1000m]$, y 轴为 $[-500m, 1000m]$, 路径起点 $[0, -500m]$, 路径终点 $[0, 1000m]$, 静态障碍物参数如表 3.1 所示。

3.5.2 仿真与分析

在 MATLAB 中对提算法的有效性和可行性进行了验证, 主要从求解全局最优路径的算法性能、以及规划出的全局最优路径航行特性两方面验证算法的有效

性。在算法性能方面与传统的粒子群算法和 LINW-PSO 算法^[55]对比仿真分析，在全局最优路径航行特性方面与 A-Star 算法^[15-19]和 RRT, RRT*算法^[20-22]进行了对比仿真实验。

(1) 算法寻优性能对比

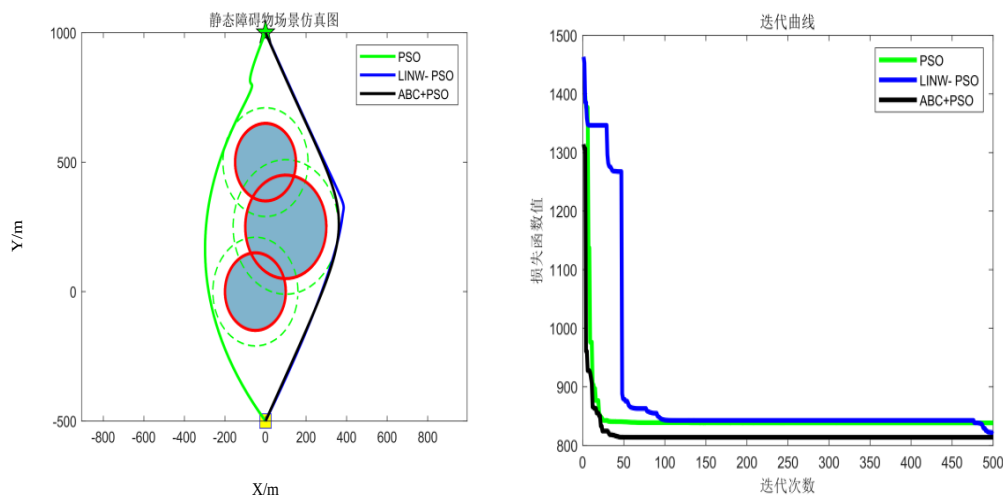


图 3.6 静态障碍物场景仿真图以及迭代曲线图

从表 3.2 和图 3.6 左图可看出传统的 PSO 算法规划的路径转角较多，而 LINW-PSO 转角幅度较大，且路径相对于 ABC+PSO 不够平滑，前两种算法相对于 ABC+PSO 均不利于无人艇的跟踪。从图 3.6 右图可看出传统的 PSO 算法规划在算法的收敛速度上和 ABC+PSO 几乎一致，但是从纵坐标的损失函数值可知 ABC+PSO 算法规划的路径是损失函数计算下的最优路径，而 LINW-PSO 收敛速度较慢，且在寻找的最优解数值也低于 ABC+PSO 算法。

表 3.2 算法性能仿真实验参数表

算法名称	ABC+PSO	LINW-PSO	PSO
路径起点(m)	(0,500)	(0,500)	(0,500)
路径终点(m)	(-50,0)	(-50,0)	(-50,0)
路径长度(m)	1674	1705	1735
路径转角个数	1	1	2

(2) 全局最优路径航行特性对比

图 3.7 为混合人工蜂群粒子群算法全局路径规划图。

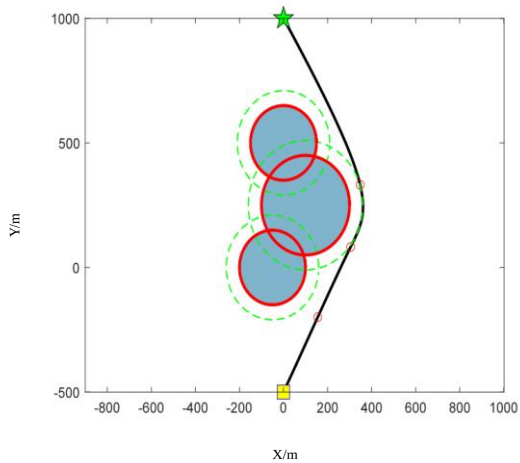


图 3.7 ABC+PSO 算法全局路径规划图

图 3.8 左图为 A-Star 算法全局路径规划的栅格图片，这里采用将地图划分为 32*32 的网格，图 3.8 右图为 A-Star 算法全局路径规划的静态障碍物场景图。

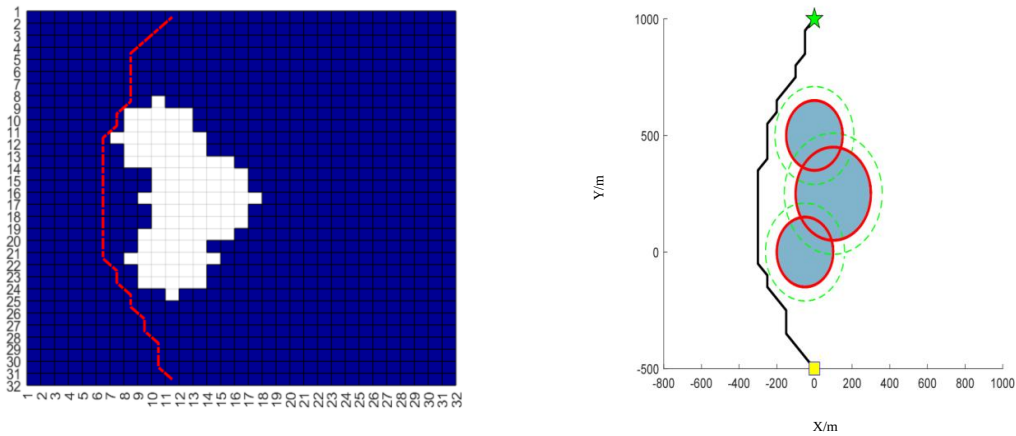


图 3.8 A-Star 算法规划栅格图与仿真图

图 3.9 左图为 RRT 算法全局路径规划仿真图片，图 3.9 右图为 RRT*算法全局路径规划的仿真图片。

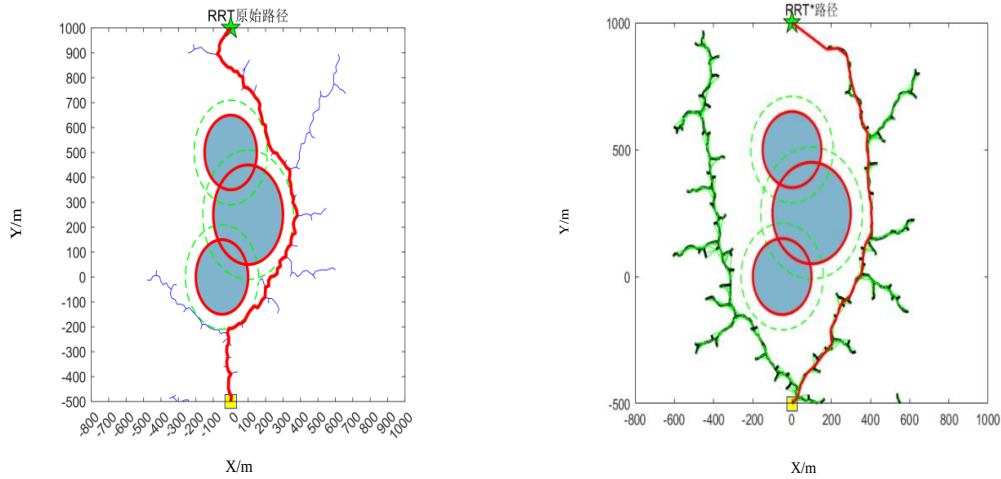


图 3.9 RRT 与 RRT*算法路径规划仿真图

表 3.3 为路径航行特性仿真实验参数表，其中路径长度为无人艇从起点位置到目标点距离值，其中每种算法仿真，均设置起点终点位置相同。

表 3.3 路径航行特性仿真实验参数表

算法名称	ABC+PSO	A-Star 规划	RRT 规划	RRT*规划
路径起点(m)	(0,500)	(0,500)	(0,500)	(0,500)
路径终点(m)	(-50,0)	(-50,0)	(-50,0)	(-50,0)
路径长度(m)	1674	1748	2035	1863
路径转角个数	1	14	-	-

通过对比图 3.6 至图 3.9，可知 ABC+PSO 算法规划出的路径转角数仅一个。因为 A-Star 算法建立在将地图进行栅格化处理的基础上。所以规划出的路径由直线和折线组成，路径转角个数为 14 个，不仅转角个数大于 ABC+PSO 算法，且路径长度也较长；RRT 和 RRT*算法因为较依赖于随机性的特点，所以规划的路径转角数远大于 ABC+PSO 算法，且路径不够平滑，长度过长。由此可以推出以下结论，在适用于全局路径规划中，A-Star 算法、RRT 算法、RRT*算法路径不够平滑，长度较长，且转折较多，不利于无人艇跟踪；而本文所提的 ABC+PSO 算法则克服了以上三种算法的不足，更有利于无人艇沿着全局路径航行与追踪，更具实用性。

3.6 本章小结

本章首先概述了人工蜂群算法的基本原理，然后详细介绍了环境背景建模，静态障碍物的膨化建模，以及损失函数的构造，接着概述了粒子群算法基本原理并综合提出混合人工蜂群粒子群算法(ABC+PSO)。最后，对算法有效性进行了验证，在算法的寻优性能方面与传统的 PSO 算法和改进的 LINW-PSO 算法进行对比，验证了算法寻优方面的有效性。同时也与 A-Star 算法、RRT 算法和 RRT*算法在路径航行特性方面进行了对比，验证了 ABC+PSO 算法规划出的路径转角少、路径长度短、实用性更强。

第 4 章 动态船只避碰的局部路径规划

4.1 引言

基于第三章规划的全局最优路径以及拆分的子路径点,本章节在第三章全局路径规划的基础上,进一步研究无人艇实时航行时有效避开无人艇探测圆范围内动态船只的问题。考虑到海上碰撞事故与人类在遵守《国际海上避碰规则》(COLREGs)方面的决策失误有关,所以在无人艇执行避碰环节时,有必要将 COLREGs 作为无人艇避碰决策中的一个重要考虑因素。

本章节研究思路如下:首先,无人艇以拆分的子路径点为导引点,精准的追踪子路径点航行,同时通过搭载的物理设备进行碰撞检测;然后,在航行过程中,若检测到动态船只,要判断是否避碰,若需要进行避碰,则将海事避碰规则纳入无人艇避碰决策,进行实时避碰,直到避碰完成;进入复航阶段,重新追踪子路径点,直到航行任务完成,最后,在 MATLAB 环境下进行仿真实验,通过统计分析验证该方法的有效性。

4.2 动态船只避碰算法建模

4.2.1 无人艇与动态船只避碰模型

本文使用的无人艇模型引用自文献^[56],即 C-Enduro,完成路径点追踪和避障任务核心问题是要求无人艇具有长续航能力。为了满足长续航能力的要求,C-Enduro 有一个“三支柱”能源系统,包括太阳能电池板、风力发电机和柴油发电机。计算和测试表明,这种“三支柱”能源系统,结合封装在坚固的自动矫正双体船内部的高效电源管理、指挥和控制系统,提供了满足性能要求的最大可能性。表 4-1 展示了物理技术规格,表 4.2 展示了功率和控制技术规范,图 4.1 展示了 C-Enduro 无人艇外观图。

由表 4.2 可知该无人艇有多种充电方法,如风力发电,太阳能发电,柴油发电,所以续航时间长,可以为本文的研究提供足够的硬件支持。同时配备 GPS(通信卫星),AIS(船舶自动识别系统),Lidar(雷达),导航探照灯等导航辅助设备,足够

为无人艇航行的探测系统提供支持，详细参数见表格。

表 4.1 C-Enduro 物理技术规范

物理特性	规格
长度	4.2 m
宽度	2.4 m
高度	2.8 m (包括天线长度), 1.5 m (天线收起)
吃水深度	0.4 m
重量	350 kg (轻型船)
基础推动力	2 台无刷直流电动机

表 4.2 C-Enduro 功率和控制技术规范

功率和控制	规格
耐用度	利用太阳能/风能/柴油能源长达 3 个月
速度	速度范围 0-7 节
导航辅助设备	GPS(通信卫星), AIS(船舶自动识别系统), Lidar(雷达), 导航探照灯等
太阳能电池板系统	产生 1.2 kW 的峰值充电功率
船舶柴油发电机组	产生 2.5 kW 的峰值充电功率
风力涡轮系统	轻质三叶片系统，产生峰值输出功率



图 4.1 C-Enduro 无人艇外观图

有以上表格数据可知，在动力系统硬件方面，C-Enduro 无人艇具备成为一艘

成功的长航时船的正确要素。从软件方面来看，要完成无人艇实时航行和有效避碰的任务，要为无人艇的制导系统设计准确的动态船只避碰算法，为研究算法的有效性，本文提出以下假设：

(1)无人艇可以使用机载传感器、通信数据链路，AIS 等硬件设备，构造动态船只探测系统，获得其他动态船只的确定位置和速度矢量信息。

(2)无人艇运动学由平面直角坐标系中的质点表示，但是避碰问题，必须考虑到无人艇的体积因素，所以设置无人艇碰撞距离 r_{usv} ；利用动态船只探测系统，给无人艇拓展一个探测范围，用圆形表示，命名为探测圆，探测距离为 R_{usv} ，一旦动态船只进入探测范围，则无人艇与动态船只执行避碰操作。

(3)考虑动态船只的体积因素，所以设置动态船只碰撞距离 r_{boat} ；设定动态船只在避碰机动过程中没有执行避碰操作，无人艇单方面考虑避碰，可以全面验证无人艇避碰算法的有效性。

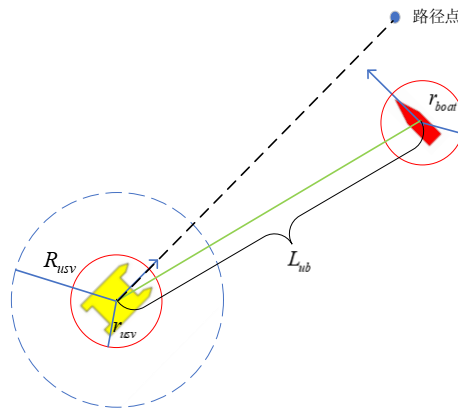


图 4.2 会遇场景示意图

基于以上假设，构造无人艇与动态船只只会遇场景示意图如图 4.2 所示，无人艇与动态船只距离为 L_{ub} ，定量描述为，当 $L_{ub} \leq R_{usv}$ ，无人艇执行避碰操作，当 $L_{ub} \leq r_{usv} + r_{boat}$ ，则无人艇与动态船只碰撞。

4.2.2 海上避碰规则计算模型

无人艇在海面航行过程中，为了避免与海面航行的其他动态船只碰撞，在避障的过程中必须满足海事避碰规则公约的 13、14、15 条^[60]，这些条款对无人艇在航行过程中可能出现的追越、正面相遇和交叉相遇的碰撞局面，分别确定了

无人艇的偏转方向。所以本节首先定量化计算无人艇与动态船只相对角度，得出会遇场景，然后基于不同会遇场景，确定无人艇偏转方向，最后设计算法计算出偏转速度和偏转角度，控制无人艇运行。

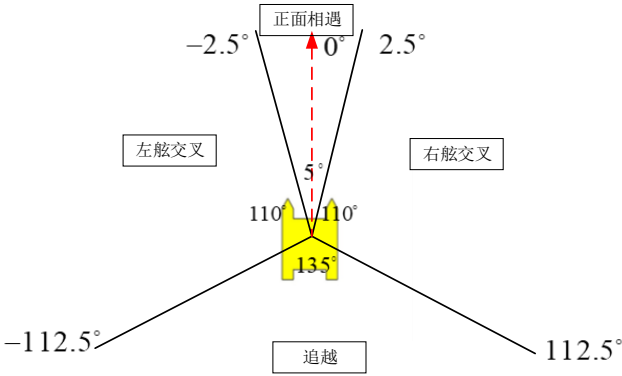


图 4.3 会遇场景分类示意图



图 4.4 正面相遇与追越场景示意图

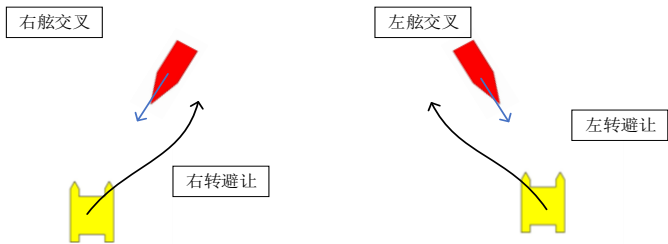


图 4.5 右舷交叉和左舷交叉场景示意图

图 4.3 为会遇场景分类示意图，图 4.4 和图 4.5 分别列出四种会遇场景示意图，图中红色船只为无人艇在航行过程中探测到需要避碰的动态船只，蓝色箭头

为其运动方向，黑色箭头曲线为无人艇根据海事避碰规则需要偏转的避碰方向。基于无人艇的航行角度 θ ，动态船只的航行角度 θ_{boat} ，计算出动态船只与无人艇的相对角度 $\Delta\theta_{bu}$ ，

$$\Delta\theta_{bu}=[(\theta-\theta_{boat}+\pi)\%2\pi]-\pi \quad (4-1)$$

将 $\Delta\theta_{bu}$ 由弧度制转换为角度制，然后与 360 求余数， $\Delta\theta_{bu}=\Delta\theta_{bu}\%360$ ，计算得出的相对角度与海事避碰规则的相对角度进行对比，从而确定无人艇所处的会遇场景。

追越场景：若无人艇与动态船只航向角度差在 $(-112.5^\circ, -180^\circ) \cup (112.5^\circ, 180^\circ)$ 之间时，即 $|\Delta\theta_{bu}| < 67.5^\circ$ ，动态船只在无人艇探测圆范围内时，且满足无人艇速度大于动态船只速度，则判定为追越场景，此时无人艇应向左偏转。

正面相遇：若无人艇与动态船只航向角度差在 $(-2.5^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 2.5^\circ)$ 之间时，即 $|180^\circ - \Delta\theta_{bu}| < 2.5^\circ$ ，动态船只在无人艇探测圆范围内时，此时无人艇应向右偏转。

左舷交叉：若无人艇与动态船只航向角度差在 $[-112.5^\circ, -2.5^\circ]$ 之间时，即 $67.5^\circ \leq |\Delta\theta_{bu}| \leq 177.5^\circ$ ，动态船只在无人艇探测圆范围内时，此时无人艇应向左偏转。

右舷交叉：若无人艇与动态船只航向角度差在 $[2.5^\circ, 112.5^\circ]$ 之间时，即 $182.5^\circ \leq |\Delta\theta_{bu}| \leq 292.5^\circ$ ，动态船只在无人艇探测圆范围内时，此时无人艇应向右偏转。

4.3 动态窗口法概述

4.3.1 动态窗口法的历史

20 世纪 90 年代，随着移动机器人技术的迅速发展，对于能够在未知环境中实时进行路径规划和避障的算法需求日益增加。1997 年，Dieter Fox、Wolfram Burgard 和 Sebastian Thrun 提出动态窗口算法(DWA)，它旨在为移动机器人提供

一种高效、灵活的局部路径规划方法^[57]。

DWA 算法主体循环内分三个步骤：(1)计算动态窗口；(2)评价输出最优速度组 (v, w) ；(3)更新机器人状态；然后迭代执行三步骤，直到无人艇到达目标点结束循环。

4.3.2 动态窗口法规划流程

结合上文提到的无人艇搭载的物理设备，确定无人艇的初始状态，使用 w ， v 表示无人艇的角速度和线速度，和无人艇的坐标，航向角 x, y, θ 组成一组状态变量。

$$X = [x \ y \ \theta \ v \ w]^T \quad (4-2)$$

(1) 动态窗口计算

动态窗口就是机器人在当前状态下能达到的线速度 v 和角速度 w 范围，受到自身机械特性以及当前状态的影响。结合上文提到的无人艇模型的技术参数，确定无人艇各个状态变量的阈值，线速度最大值 $v_{\max}$ 、角速度最大值 $w_{\max}$ ，线加速度最大值 $a_{v\max}$ 、角加速度最大值 $a_{w\max}$ ，线速度采样分辨率 $ratio_v$ ，角速度采样分辨率 $ratio_w$ 使用下面一组变量统计表示：

$$kinematic = [v_{\max} \ w_{\max} \ a_{v\max} \ a_{w\max} \ ratio_v \ ratio_w]^T \quad (4-3)$$

基于上述无人艇技术参数阈值，构造静态窗口 Ws ，第一个元素是线速度最小值，设定为 0；第二个元素是线速度最大值 $v_{\max}$ ；第三个元素是角速度最小值 $-w_{\max}$ ，表示逆时针旋转速度最大值；第四个元素是角速度最大值 $w_{\max}$ ，表示顺时针旋转速度最大值。

$$Ws = [0, v_{\max}, -w_{\max}, w_{\max}] \quad (4-4)$$

同时需要计算在采样时间 dt 内，无人艇预测的速度阈值，构造动态窗口 Wd ，第一个元素是线速度预测最小值 $v_{k\min} = v_0 - dt * a_{v\max}$ ；第二个元素是线速度预

测最大值 $v_{k \max} = v_0 + dt * a_{v \max}$; 第三个元素是角速度预测最小值 $w_{k \min} = w_0 - dt * a_{w \max}$; 第四个元素是角速度预测最大值 $w_{k \max} = w_0 + dt * a_{w \max}$ 。

$$Wd = [v_{k \min}, v_{k \max}, w_{k \min}, w_{k \max}] \quad (4-5)$$

对于全向移动的无人艇，其动态窗口的组成应为下一采样时间 dt 内所有可能的 w , v 构成的运动轨迹。综合上述两个公式，可以得到下一采样时间 dt 动态窗口 Wr 的速度阈值。其中综合动态窗口 Wr 的线速度最小值为 $v_{z \min} = \max\{0, v_{k \min}\}$, 线速度最大值为 $v_{z \max} = \min\{v_{\max}, v_{k \max}\}$, 角速度最小值 $w_{z \min} = \max\{-w_{\max}, w_{k \min}\}$, 角速度最大值 $w_{z \max} = \min\{w_{\max}, w_{k \max}\}$ 。

$$Wr = [v_{z \min}, v_{z \max}, w_{z \min}, w_{z \max}] \quad (4-6)$$

(2) 评价输出最优速度组合

利用采样分辨率 $ratio_v$, $ratio_w$ 对动态窗口 Wr 采样。其中采样线速度数量为 N , 采样角速度数量为 M , 计算公式如式(4-7)所示:

$$N = \frac{v_{z \max} - v_{z \min}}{ratio_v}, M = \frac{w_{z \max} - w_{z \min}}{ratio_w} \quad (4-7)$$

得到 $N \times M$ 组离散速度组合 (v_{ij}, w_{ij}) , 其中, $i < N, j < M$, 并计算 $v = v_{ij}, w = w_{ij}$ 时无人艇的预测轨迹。通过预测时间 T 与采样时间 dt , 基于运动方程(4-19)计算出特定数量 n 个轨迹点坐标, 组成一条特定模拟轨迹, n 是模拟轨迹的长度。

$$n = \frac{T}{dt} \quad (4-8)$$

对每条轨迹进行评价, 其中有若干组采样轨迹是可行的, 评价函数有三项组成, 第一项方位角评价: 如图 4.6 所示, 方位是衡量机器人当前方向与目标方向对准的程度, $heading(v, w)$ 函数输出的最终结果为 $\pi - \psi$, 其中 ψ 为预测轨迹终点 (x_{end}, y_{end}) 的朝向角 θ 与预测轨迹终点 (x_{end}, y_{end}) 到目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 连线与水平线夹角 δ 的差值。

$$\delta = \arctan\left(\frac{y_{goal} - y_{end}}{x_{goal} - x_{end}}\right) \quad (4-9)$$

$$\psi = \delta - \theta \quad (4-10)$$

$$\text{heading}(v, w) = \pi - \psi \quad (4-11)$$

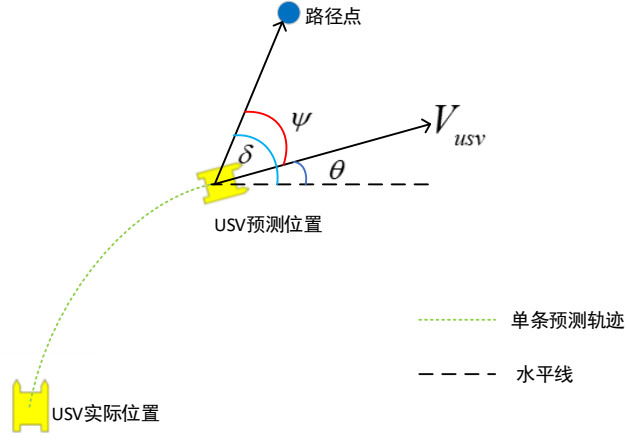


图 4.6 朝向角评价函数计算示意图

第二项距离评价: 距离评价函数 $\text{dist}(v, w)$ 为无人艇探测圆范围内与无人艇预测轨迹最近的动态船只的距离 $\text{dist}_{\text{boat}}$ ，若探测圆范围内没有动态船只，则设置探测圆半径 R_{usv} 作为评价函数数值。

$$\text{dist}(v, w) = \begin{cases} \text{dist}_{\text{boat}} & \text{if } \text{dist}_{\text{boat}} \leq R_{\text{usv}} \\ R_{\text{usv}} & \text{if } \text{dist}_{\text{boat}} > R_{\text{usv}} \end{cases} \quad (4-12)$$

第三项速度评价: $\text{vel}(v, w)$ 对无人艇线速度绝对值的评价。

$$\text{vel}(v, w) = |v| \quad (4-13)$$

因为预测的轨迹较多，如果某条轨迹某一项评价函数计算得分过大，将影响整体轨迹筛选，所以将所有预测轨迹得分归一化处理，即每一条轨迹每一项得分除以所有轨迹中该项得分的总和，轨迹总数为 $\text{total} = N \times M$

$$\begin{cases} \text{normal}(\text{heading}(i)) = \frac{\text{heading}(i)}{\sum_{i=1}^{\text{total}} \text{heading}(i)} \\ \text{normal}(\text{dist}(i)) = \frac{\text{dist}(i)}{\sum_{i=1}^{\text{total}} \text{dist}(i)} \\ \text{normal}(\text{vel}(i)) = \frac{\text{vel}(i)}{\sum_{i=1}^{\text{total}} \text{vel}(i)} \end{cases} \quad (4-14)$$

将归一化处理得出单条轨迹对应的各项评价函数值，与相应的权重乘积求和，综合计算单条轨迹综合评价函数 $G(v, w)$

$$G(v, w) = \alpha \cdot \text{normal}(\text{heading}(v, w)) + \beta \cdot \text{normal}(\text{dist}(v, w)) + \gamma \cdot \text{normal}(\text{vel}(v, w)) \quad (4-15)$$

其中， α 为方位角评价函数数值 $\text{heading}(i)$ 的权重项系数， β 为距离评价函数数值 $\text{dist}(i)$ 的权重项系数， γ 为无人艇线速度评价函数数值 $\text{vel}(i)$ 的权重项系数。

尽管计算出每条轨迹综合评价函数值，但只有无人艇与最近障碍物距离为 dist_{obs} 大于该条轨迹速度组合计算输出的制动距离 $\text{dist}_{\text{stop}}$ ，认为当前速度组合是安全的。该条轨迹得分可以计入最终评价函数数据库 evalDB ，否则舍弃该条轨迹，无人艇制动距离如下：

假定无人艇为匀减速运动，减速度为 $a_{v\max}$ ，则速度更新公式为：

$$v_{t+dt} = v_t - a_{v\max} \cdot dt \quad (4-16)$$

$\text{dist}_{\text{stop}}$ 为无人艇与最近障碍物不会发生碰撞的安全制动距离。

$$\text{dist}_{\text{stop}} = \int_0^{t_0} v_0 - a_{v\max} t dt \quad (4-17)$$

其中： t_0 为无人艇从制动开始到完全停止的时间。假定满足制动距离限制的轨迹数量为 m ，单条轨迹综合评价函数值为 $\text{feval}_i = G(v_i, w_i)$ ， $(i = 1, 2, \dots, m)$ ，则从中筛选出单条轨迹综合评价函数值的最大值 $\text{feval}_{\max}$ 对应的速度组合 (v, w)

$$\text{feval}_{\max} = \max\{\text{feval}_1, \text{feval}_2, \dots, \text{feval}_m\} \quad (4-18)$$

(3) 更新机器人状态

由上文计算得出的最优速度组合 $U = (v, w)^T$ ，以及无人艇的当前状态 $X_t = (x, y, \theta, v, w)^T$ ，则无人艇的状态更新方程如下：

$$X_{t+dt} = F * X_t + B * U \quad (4-19)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} dt \cdot \cos \theta & 0 \\ dt \cdot \sin \theta & 0 \\ 0 & dt \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

标准 DWA 算法流程图如下图 4.7 所示：

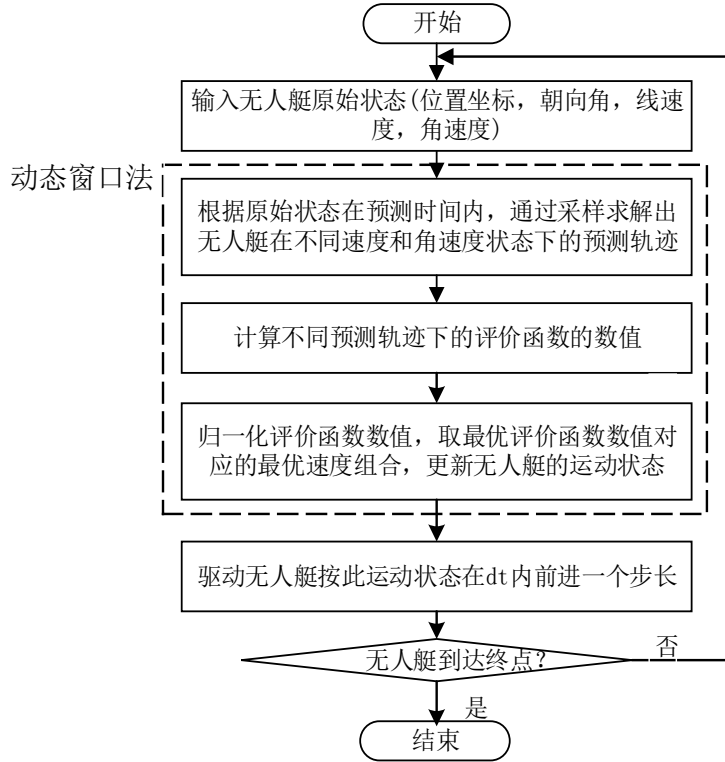


图 4.7 标准动态窗口法流程图

4.3.3 动态窗口法优势和不足

DWA 算法自提出后, 大量学者都针对其性能进行了分析比较^[57-59], 经总结, 可得出其特点如下:

- (1) 适应复杂运动模型。DWA 算法能够充分考虑无人艇的动力学和运动学特性。结合其速度、加速度、转向能力等实际运动约束来生成可行的路径。
- (2) 快速响应环境变化, 满足实时决策需求。海洋环境复杂多变, 存在各种类型障碍物, 且不同障碍物位置变化等多种动态因素。DWA 算法能够快速感知这些环境变化, 并在短时间内重新规划路径, 确保无人艇始终能够安全地避开障碍物和其他船舶。
- (3) 考虑到本章节针对的是动态船只的避碰, 所以在算法的决策制定部分要重新

设计评价函数。

4.4 动态船只避碰算法设计

4.4.1 动态窗口法融合海事避碰规则

本章节旨在研究考虑海上避碰规则约束的条件下，无人艇沿着全局路线航行，同时安全避开移动的动态船只。动态船只避碰思路为首先根据全局路径确定子目标点，即无人艇要跟踪的点，将全局路径分割为一段段的局部路径。然后在此基础上使用融合海事避碰规则的 DWA 算法，解算最优的速度组合 (v, w) ，驱动无人艇实时航行，同时设置不同运动方向，不同速度大小的动态船只，构成不同会遇场景，来测试动态船只避碰算法的有效性。

综上所述，无人艇的实时运动状态，整体分为两部分，一部分是朝向路径点运动的路径跟踪部分，另一部分是遇到动态船只的避碰部分。本算法要在两部分间切换，明确避碰条件，采取恰当的避碰操作，以及避碰完成的复航部分。所以无人艇需要实时的检测动态船只，一旦有动态船只到达无人艇的检测圆范围内，则先根据动态船只与无人艇的相对位置计算相对角，然后确定避碰场景，得出无人艇的偏转方向。

根据传统 DWA 算法，采样轨迹产生的动态窗口，筛选轨迹时，使用融合海事规则的评价函数计算，输出最优轨迹对应的速度组合，这里采取的方法是在传统 DWA 算法的评价函数加一项，海上避碰规则项 $colregs(v, w)$ 。当无人艇专注于避碰操作时，将朝向角项的权重 α 设置为 0，剩余三项组成无人艇避障部分评价函数；直到动态船只离开无人艇的探测圆范围，则将海上避碰规则项权重 η 设置为 0，开启朝向角权重，无人艇复航，使用原始 DWA 算法评价函数作为航行部分评价函数。综上所述，融合海事避碰规则的评价函数如下：

$$G(v, w) = \begin{cases} \alpha \cdot normal(heading(v, w)) + \beta \cdot normal(dist(v, w)) \\ + \gamma \cdot normal(vel(v, w)), \text{ 航行部分} \\ \beta \cdot normal(dist(v, w)) + \gamma \cdot normal(vel(v, w)) \\ + \eta \cdot normal(colregs(v, w)), \text{ 避障部分} \end{cases} \quad (4-21)$$

其中海事避碰规则项的归一化评价函数如下：

$$normal(colregs(i)) = \frac{colregs(i)}{\sum_{i=1}^n colregs(i)} \quad (4-22)$$

经过改进的评价函数计算输出最优的速度组合 (v, w) ，控制无人艇在 dt 时间内前进一个步长。统计每一个采样时刻 dt 内 DWA 算法输出的状态量，假设共有 T 个航行周期，计算相邻两个时刻 $t, t+dt$ 的距离 $dist_t$ ，累计相邻两个时刻的路径距离 $dist_t$ ，得出全局航行距离长度 L

$$L = \sum_{t=0}^{T-dt} \sqrt{(x_{t+dt} - x_t)^2 + (y_{t+dt} - y_t)^2} \quad (4-23)$$

4.4.2 算法流程

综上所述，动态船只避碰算法流程图如下图 4.8 所示：

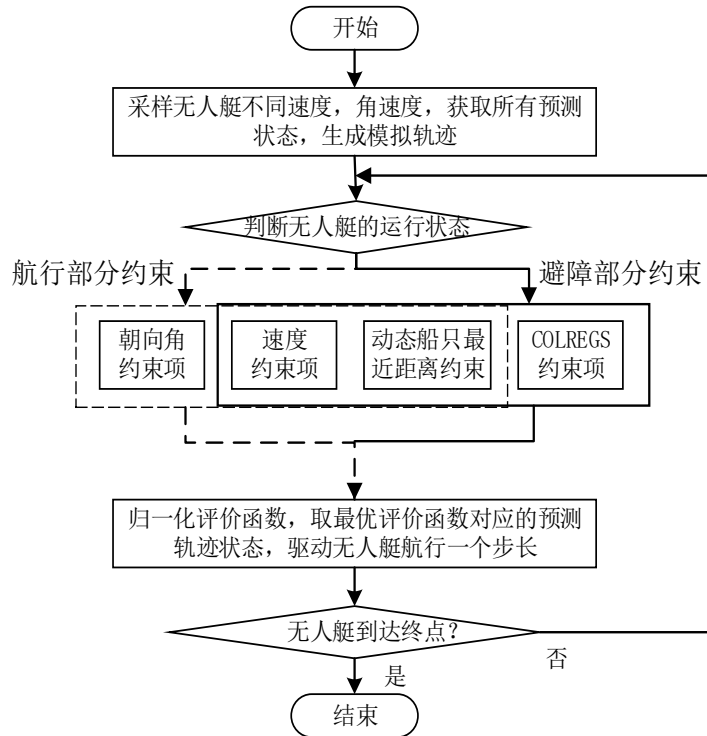


图 4.8 动态船只避碰算法流程图

4.5 仿真分析

4.5.1 基本参数

为验证本章节所提动态船只避碰算法对于遵守海事避碰规则的动态船只避碰的有效性，在 MATLAB 环境下进行了仿真实验。假设输入无人艇电子海图定位范围 x 轴为 $[-800m, 1000m]$ ，y 轴为 $[-500m, 1000m]$ ，路径起点 $[0, -500m]$ ，路径终点 $[0, 1000m]$ ，无人艇探测圆范围 $R_{usv} = 150m$ ，根据上文介绍无人艇模型，设定模型参数阈值为 $kinematic = [20m/min \ 30^\circ/min \ 7.5m/min^2 \ 30^\circ/min^2 \ 0.5 \ 1^\circ]^T$ ，动态船只碰撞半径为 $r_{boat} = 20m$ ，无人艇碰撞半径为 $r_{usv} = 5m$ ，DWA 算法的权重参数，朝向角函数权重参数 $\alpha = 0.1$ ，动态船只最近距离函数权重参数 $\beta = 0.1$ ，速度函数权重参数 $\gamma = 0.1$ 海事避碰规则函数权重参数 $\eta = 0.75$ ，预测时间 $T = 3min$ ，采样时间 $dt = 0.1min$ ，动态船只参数如表 4.3 所示，全局路径拆解的子路径点(包括起点，终点)分别为 $(0, -500m), (160m, -195m), (303m, 80m), (350m, 323m), (0, 1000m)$ 。

表 4.3 动态船只参数表

动态船只序号	动态船只起点 (m)	动态船只速度 (m/min)	动态船只方向 (deg)
动态船只 1	(100,-350)	10	30
动态船只 2	(800,1000)	14	225
动态船只 3	(-800,1090)	14	345
动态船只 4	(-900,1100)	14	345

不考虑无人艇航行的海流风浪的影响，且动态船只探测系统设备工作正常，当无人艇航行到距离路径终点小于 10m 时，即认为完成航行与避障任务。

4.5.2 仿真与分析

将以上数据代入到动态船只避碰算法程序中计算分析。全局航行模拟示意图如下：

(1) 无人艇追越场景模拟

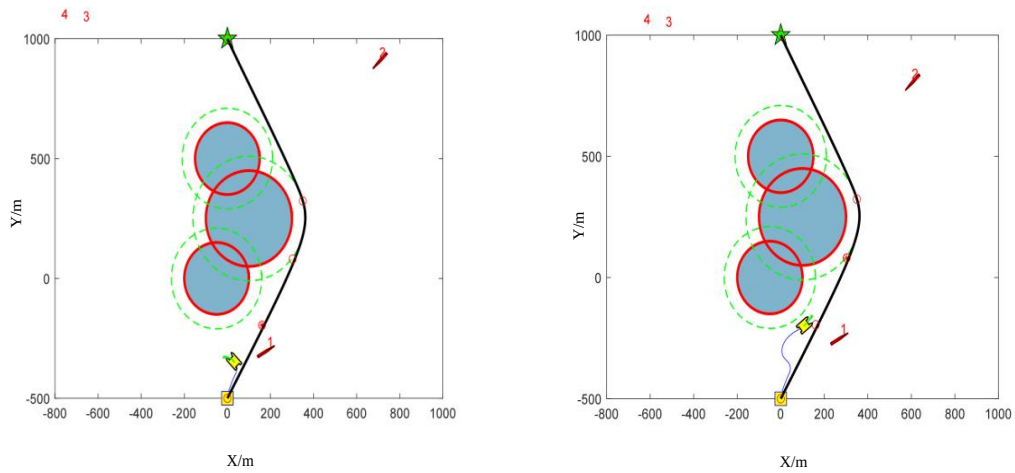


图 4.9 无人艇追越场景仿真图

(2) 无人艇正面会遇和右舷会遇场景模拟

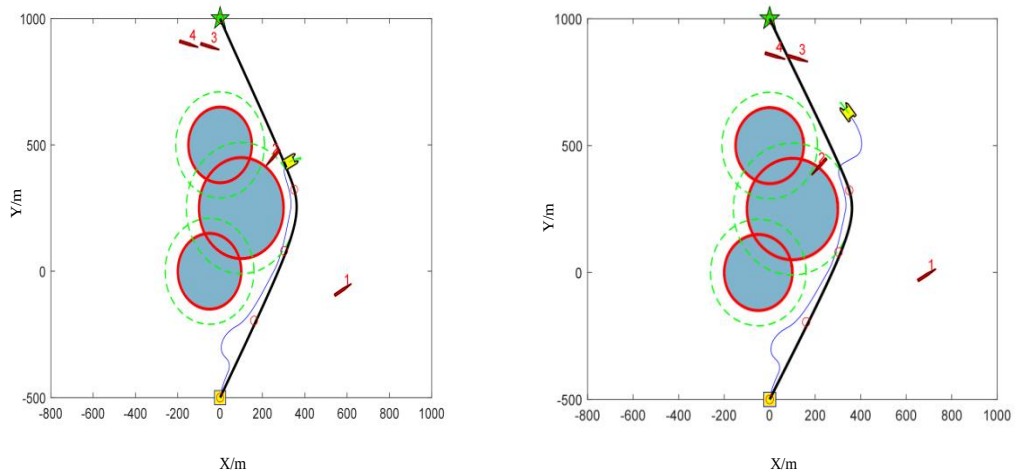


图 4.10 无人艇正面会遇和右舷相遇场景仿真图

(3) 无人艇左舷会遇和多船只避碰场景模拟

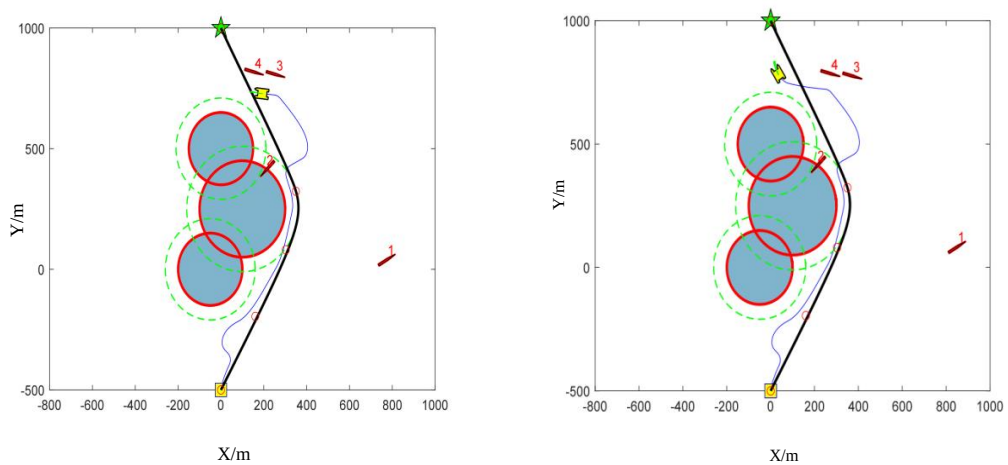


图 4.11 无人艇左舷会遇和多船只避碰场景仿真图

(4) 无人艇追踪路径点场景和航行结束场景模拟

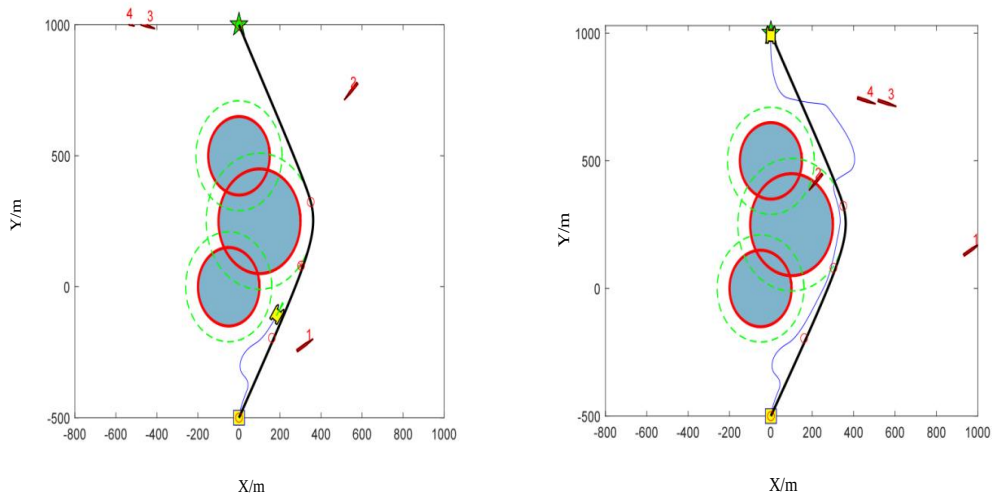


图 4.12 无人艇追踪路径点场景和航行结束场景仿真图

(5) 无人艇与静态障碍物，动态船只距离统计

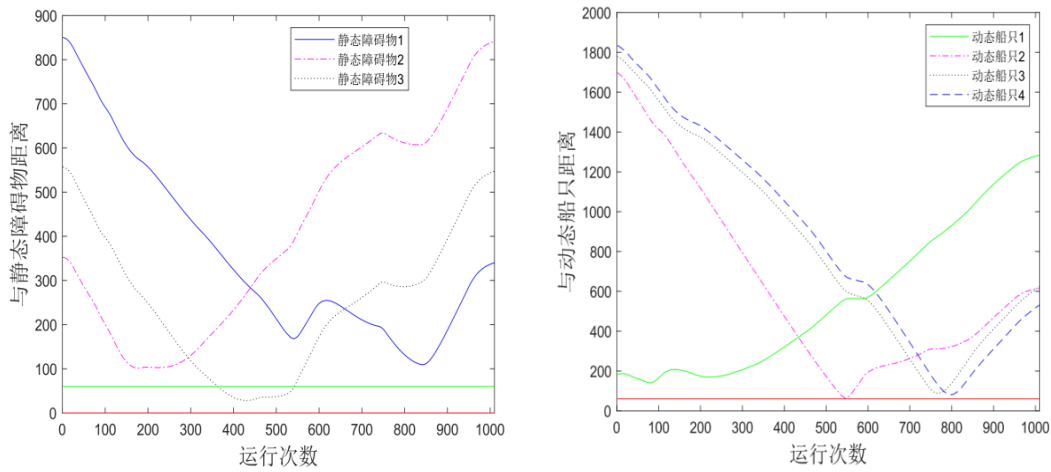


图 4.13 无人艇与静态障碍物，动态船只距离统计图

(6) 无人艇航向角，线速度角速度统计

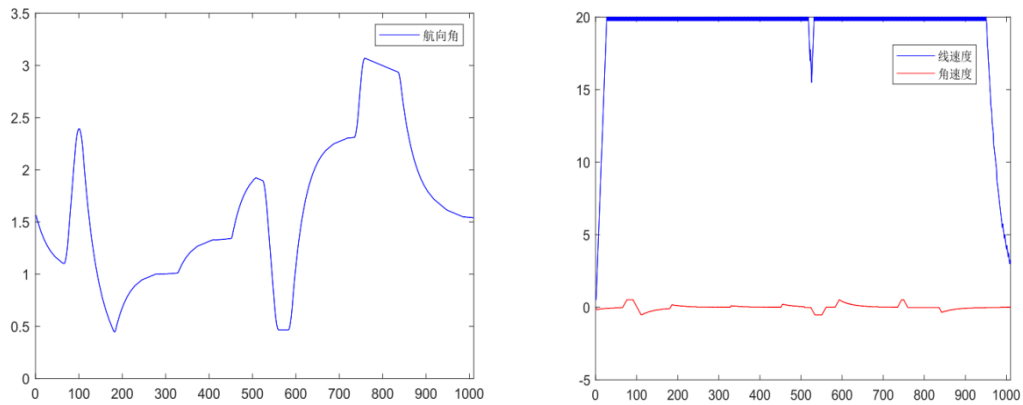


图 4.14 无人艇航向角，线速度角速度统计图

经统计，无人艇的总航行时间 $T=101.1\text{min}$ ，总航行长度 $L=1913\text{m}$ ；无人艇与静态障碍物 1 和静态障碍物 2 碰撞圆最近距离均大于 60m ，无人艇与静态障碍物 3 碰撞圆最近距离为 28m ，存在一定的安全隐患；无人艇与所有动态船只距离均大于 60m 。根据上述仿真实验的数据统计和仿真图像，无人艇能够沿着全局路径航行，有效的追踪和切换子路径点，并且未与静态障碍物产生碰撞，但是存在与静态障碍物存在碰撞风险。同时遵守海事避碰规则对探测圆范围内的动态船只进行有效安全避碰。由此结果表明本文障碍船只避碰算法可以有效安全的完成无人艇的航行与避障任务。

4.6 本章小结

本章节主要介绍了遵守海事避碰规则对于无人艇实时航行的意义，然后确定遵守海事避碰规则的动态船只避碰算法，此算法涉及到无人艇全局航线的子路径点追踪部分、动态船只避碰算法解算部分以及避碰完成复航部分，最后仿真实验表明，本章节所提出的动态船只避碰算法可以安全有效的完成无人艇的航行与避障任务，并且能够同时避免与静态障碍物的碰撞，但是无人艇与部分静态障碍物距离比较接近，仍然处于危险范围内，所以下一章节解决无人艇与静态障碍物碰撞距离较为接近的问题。

第 5 章 基于未知障碍物的综合集成路径规划

5.1 引言

无人艇在广阔的海洋航行，不可避免的要遇到海面突发情况，例如海洋生物的出没，随洋流漂浮的漂浮物，这些缺乏自主智能的未知障碍物，具有速度难以预测，运动随机性较大的特点，需要针对性的解决此类未知障碍物避碰问题。另一方面基于第四章的动态船只避碰算法，虽然可以有效避开动态船只，但是对于静态障碍物存在碰撞风险的问题展开研究。

本章节研究思路如下：首先，第四章的无人艇探测圆可视化，并将静态障碍物碰撞圆离散化为静态碰撞点集合，结合第四章的动态船只避碰算法，同时考虑静态碰撞点的避碰，设计已知障碍物避碰算法；然后考虑到未知障碍物的运动特性，按未知障碍物相对无人艇冲突方向分为正向冲突情况和侧向冲突情况，并分别设计算法解决这两种冲突情况，综合两种算法设计未知障碍物避碰算法；最后考虑将已知障碍物避碰算法和未知障碍物避碰算法集成，设计综合集成算法框架，并在 MATLAB 环境下进行仿真实验，通过统计数据分析验证该算法框架的有效性。

5.2 已知障碍物避碰算法设计

5.2.1 探测圆可视化与分析

第四章的探测圆半径为 R_{usv} ，假设在 t 时刻，无人艇在航行空间位置标记为点 $P(t)$ ，则在 t 时刻，探测圆区域 $Detect(P(t))$ 定义为：

$$Detect(P(t)) = \{P \mid P \in D, dist(P, P(t)) \leq R_{usv}\} \quad (5-1)$$

D 表示无人艇的探测圆区域 $Detect(P(t))$ 的简写。 P 为探测范围区域内任意点。可视化图像如图 5.1 所示。

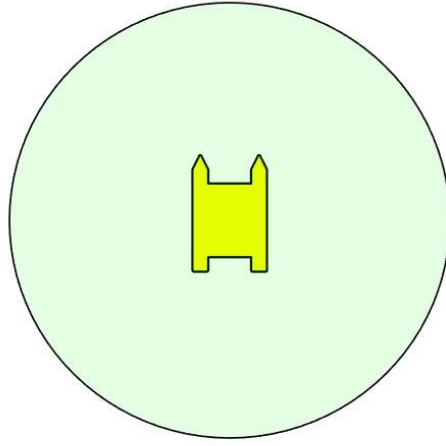


图 5.1 探测圆区域示意图

探测圆不仅能定位该动态船只，计算探测到动态船只区域 Obs_{boat} ，还能实时扫描到探测圆内静态障碍物区域 Obs_{static} ，并定位离散化的静态碰撞点，所以在 $t + dt$ 时刻探测圆包含的已知障碍物总体分布范围 $Obs_{all}(t + dt)$ 表示如下：

$$Obs_{all}(t + dt) = \left(\bigcup_{i=1}^s Obs_{static,i} \right) \cup \left(\bigcup_{j=1}^c Obs_{boat,j}(t + dt) \right) \quad (5-2)$$

其中 s 为静态障碍物个数， c 为遵守海上避碰规则的动态船只个数。即同时要满足规避所有静态障碍物，及在该时刻下的海上避碰规则的动态船只。所以无人艇探测圆范围内的可行区域 $Detect_{free}(t + dt)$ 可表示为：

$$Detect_{free}(t + dt) = Detect(t + dt) \cap \overline{Obs_{all}(t + dt)} \quad (5-3)$$

即 $Detect_{free}(t + dt)$ 为在满足无人艇可行区域的基础上，还要满足探测圆范围的可行区域。

5.2.2 静态障碍物碰撞圆离散化处理

由于全局静态障碍物占据工作空间区域较大，无人艇探测圆仅能探测到探测圆范围内的静态障碍物区域，为了减少运算量，仅仅针对静态障碍物碰撞圆进行避碰操作，采取策略为将静态障碍物碰撞圆离散化处理。那么静态障碍物碰撞圆离散化处理步骤如下：(1)假设无人艇在 t 时刻位置 $P(t)$ 的坐标为 (x, y) ，第 i 个静

态障碍物圆心坐标为 (x_i, y_i) ，碰撞圆半径为 r_i ，其中 $i=1, 2, \dots, d$ 表示静态障碍物的序号。在静态障碍物碰撞圆内，以特定角度值 $\pi/20$ 在 $(0, 2\pi)$ 范围采样，采样数量为 $2\pi/(\pi/20)=40$ 。其中， $j=1, 2, \dots, 40$ ，则第 i 个静态障碍物第 j 次采样的角度值 θ_j 构成的离散化静态碰撞点 $(xobs_{ij}, yobs_{ij})$ 以及该静态碰撞点与无人艇距离 $dist_{ij}$ 计算如下：

$$\theta_j = \frac{\pi}{20} * j \quad (5-4)$$

$$\begin{cases} xobs_{ij} = x_i + r_i \cos(\theta_j) \\ yobs_{ij} = y_i + r_i \sin(\theta_j) \end{cases} \quad (5-5)$$

$$dist_{ij} = \sqrt{(x - x_{ij})^2 + (y - y_{ij})^2} \quad (5-6)$$

(2)有静态碰撞点与无人艇距离 $dist_{ij}$ 的数值，与 R_{usv} 对比，若 $dist_{ij} \leq R_{usv}$ ，则将该静态障碍点记录进入无人艇探测圆内，并在仿真图连线上标记为蓝色。

(3)基于第二步得出的无人艇探测圆内所有的静态碰撞点，筛选出与无人艇距离最近的最近静态碰撞点距离 $dist_{smin}$ ，以及保存该静态碰撞点坐标 $(xobs_{smin}, yobs_{smin})$ ，并在仿真图连线上标记为红色。

5.2.3 已知障碍物避碰算法设计

由于在第四章探测圆的设计是为了探测动态船只，上文引入了静态碰撞点到探测圆内，所以要考虑两种类型已知障碍物协调问题，设计动态船只优先避碰原则，表述如下：(1)如果探测圆内存在动态船只和静态碰撞点，或者是只存在动态船只，不存在静态碰撞点，优先对动态船只进行避碰处理。假设无人艇探测圆范围内预测轨迹与最近的动态船只的距离为 $dist_{boat}$ ，此时动态船只避碰部分评价函数的距离评价项为：

$$dist_{boat}(v, w) = dist_{boat} \quad (5-7)$$

(2)探测圆内不存在动态船只，存在静态碰撞点，则根据最近静态碰撞点与无人艇距离 $dist_{smin}$ ，及静态障碍物二次膨胀的阈值 ε ，重新设计非动态船只避碰部分评价函数的距离评价项：

$$dist_{static}(v, w) \begin{cases} dist_{smin} & \text{if } dist_{smin} \leq \varepsilon \\ \varepsilon & \text{if } dist_{smin} > \varepsilon \end{cases} \quad (5-8)$$

(3)探测圆内不存在动态船只,不存在静态碰撞点,设定此时 $dist_{smin} = \infty$, 评价函数距离项数值仍采用静态障碍物二次膨胀的阈值 ε , 综上所述, 非动态船只避碰部分距离评价项如下:

$$dist_{static}(v, w) \begin{cases} dist_{smin} & \text{if } dist_{smin} \leq \varepsilon \\ \varepsilon & \text{if } dist_{smin} > \varepsilon \text{ 或者 } dist_{smin} = \infty \end{cases} \quad (5-9)$$

综上所述, 修改新的评价函数如下:

$$G(v, w) = \begin{cases} \alpha \cdot normal(heading(v, w)) + \beta \cdot normal(dist_{static}(v, w)) \\ + \gamma \cdot normal(vel(v, w)), & \text{非动态船只避碰部分} \\ \beta \cdot normal(dist_{boat}(v, w)) + \gamma \cdot normal(vel(v, w)) \\ + \eta \cdot normal(colregs(v, w)), & \text{动态船只避碰部分} \end{cases} \quad (5-10)$$

经过改进的评价函数计算输出最优的速度组合 (v, w) , 控制无人艇在 dt 时间内前进一个步长。所以已知障碍物避碰算法(KNOWN 算法)流程图如下图 5.2 所示:

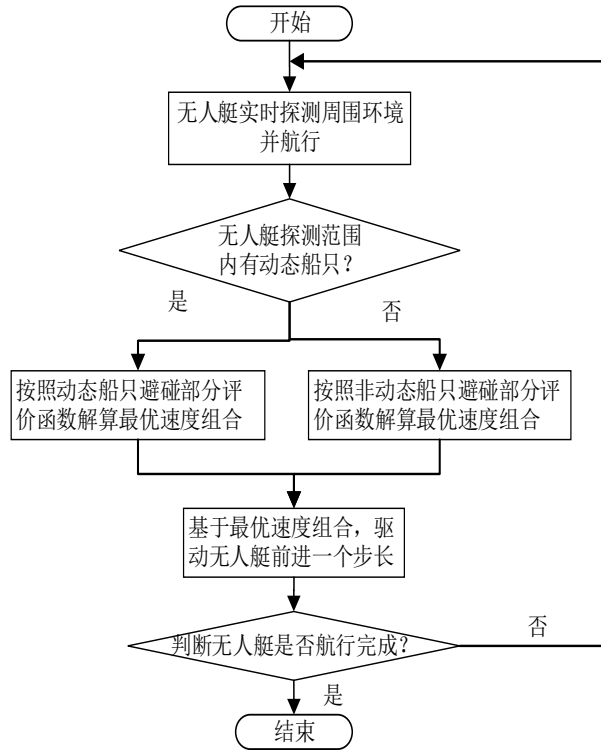


图 5.2 已知障碍物避碰算法示意图

5.3 未知障碍物避碰算法标志设计

无人艇使用已知障碍物避碰算法在海上航行时,虽然可以保证对已知信息障碍物避碰,但是对于速度较快,运动形式不易预测的未知障碍物避碰却较为困难。虽然 DWA 算法调整参数,可以获得较好的避障效果^[31],但是本文引入海事避碰规则项,导致参数数量较多,不便于调整。并且在 DWA 算法上过多的改进会增加计算复杂度,甚至导致无人艇出现局部振荡现象,导致目标不可达。为了解决未知障碍物运动速度快,难以预测的问题,严格的将未知障碍物分为正向冲突障碍物与侧向冲突障碍物,为不同运动方向未知障碍物开发新的算法。同时为了保证对海面信息的全面掌握,需要在更远距离获得未知障碍物的信息并及时反馈,此时无人艇需要根据无人机无人艇协同系统或避障声呐等组成的远程探测设备,实时获取更远距离海面未知障碍物的位置和速度矢量信息。

5.3.1 无人艇与未知障碍物冲突情形分类标志计算

基于无人艇搭载的远程探测设备,设定无人艇与未知障碍物距离阈值为该设备最远探测距离 $dist_{lim}$,无人艇航向角 θ 与无人艇相对未知障碍物方位角度 α_{umsv} 差值 $\Delta\theta$ 阈值为该设备最大扫描角度 α_{lim} 的半角 $\alpha_{lim}/2$, 综上,无人艇干扰边界判定示意图如图 5.3 所示。

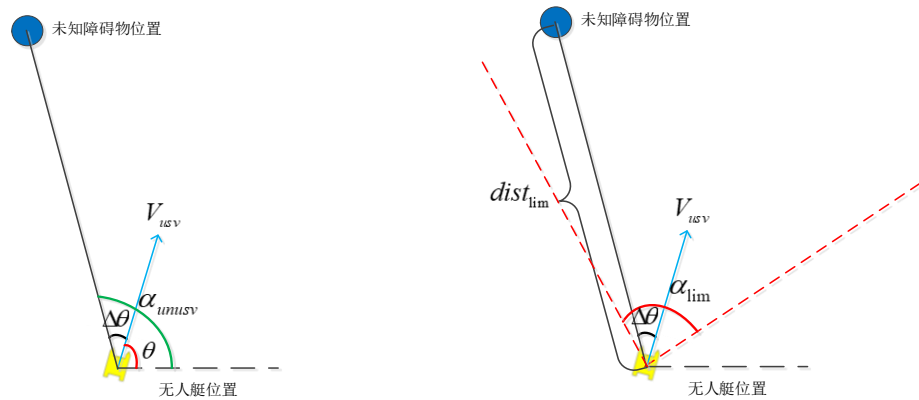


图 5.3 无人艇干扰边界判定示意图

(1)无人艇与未知障碍物相对距离与干扰距离阈值 $dist_{lim}$ 相比较的距离范围判断标志 $fast_flag$, 假设无人艇通过远程探测设备探测到未知障碍物位置坐标为

(x_{unobs}, y_{unobs}) ，那么结合无人艇自身坐标，可以计算相对距离为 $dist_{unusv}$ ，若 $dist_{unusv} \leq dist_{lim}$ ，则设置 $fast_flag = 1$ ，否则设置 $fast_flag = 0$ 。

(2)无人艇航向角与无人艇相对未知障碍物方位角度差值 $\Delta\theta$ 与干扰角度阈值 $\alpha_{lim}/2$ 相比较产生的角度范围判断标志 $angle_flag$ ，计算无人艇相对未知障碍物方位角 α_{unusv} ，与无人艇朝向角 θ 的差值 $\Delta\theta = \alpha_{unusv} - \theta$ ，求该差值的绝对值 $|\Delta\theta|$ ， $|\Delta\theta|$ 越小代表无人艇越朝向未知障碍物，若 $|\Delta\theta| \leq \alpha_{lim}/2$ ，则设置 $angle_flag = 1$ ，否则设置 $angle_flag = 0$ 。

(3)未知障碍物航向角与无人艇相对未知障碍物方位角的角度差 $\Delta\theta_{obs}$ 与正向冲突角度阈值相比较产生的正向冲突判断标志 $head_flag$ ，判断未知障碍物是否在向无人艇驶来，构成正向冲突场景，设定正向冲突的角度阈值为 α_{head} ，其中假设未知障碍物航向角为 α_{unobs} ，计算无人艇相对未知障碍物方位角 α_{unusv} 的差值 $\Delta\theta_{obs} = \alpha_{unobs} - \alpha_{unusv}$ ，求该差值的绝对值 $|\Delta\theta_{obs}|$ ，如果满足条件 $\pi - \alpha_{head} \leq |\Delta\theta_{obs}| \leq \pi + \alpha_{head}$ ，则设定 $head_flag = 1$ ，否则 $head_flag = 0$ 。

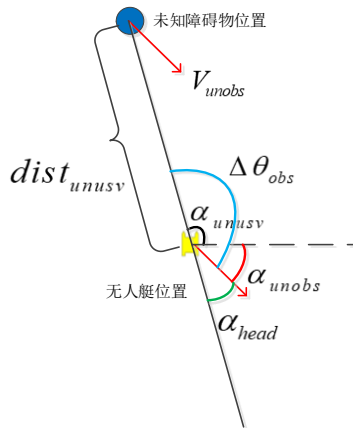


图 5.4 无人艇正向冲突判定示意图

(4)如图 5.4 所示，假定未知障碍物与无人艇处于正向冲突情形，则还要再细分未知障碍物相对无人艇是左前方还是右前方碰撞，设定方向判断标志 $head0_flag$ ，此时求差值 $\Delta\theta_{obs} = \alpha_{unobs} - \alpha_{unusv}$ ，与 π 进行比较，如果 $\Delta\theta_{obs} \leq \pi$ ，则设定

$head0_flag = -1$ ，代表未知障碍物从右前方向无人艇驶来，否则设定 $head0_flag = 1$ ，代表未知障碍物从左前方向无人艇驶来。

(5)未知障碍物的运动状态，需要设定一个运动状态标志 $dynamic_flag$ ，如果未知障碍物处于运动状态，则 $dynamic_flag = 1$ ，否则，未知障碍物处于静止状态， $dynamic_flag = 0$ 。

5.3.2 无人艇运动决策分类标志计算

(1) 如果满足 $fast_flag = 1$ 并且 $angle_flag = 1$ ，则代表未知障碍物达到无人艇的干扰边界；要进行下一层次的判断，如果 $dynamic_flag = 1$ 并且 $head_flag = 0$ ，判定未知障碍物与无人艇存在碰撞风险，且处于侧向冲突情形，设定标志位 $flag = 1$ ；

(2) 如果满足 $fast_flag = 1$ 并且 $angle_flag = 1$ ，则代表未知障碍物达到无人艇的干扰边界；要进行下一层次的判断，如果 $dynamic_flag = 0$ ，则表示未知障碍物静止，无人艇必须保持运动才能完成避碰，设定标志位 $flag = 0$ ；

(3) 如果不满足 $fast_flag = 1$ 或者 $angle_flag = 1$ ，则代表未知障碍物未达到无人艇的干扰边界，无人艇无需减速避让，仍保持运动，设定标志位 $flag = 0$ ；

5.4 综合集成避碰算法设计

5.4.1 算法集成框架设计

基于 5.3 节介绍的无人艇感知到未知障碍物，然后判断冲突情形，最终输出无人艇的运动决策分类标志 $flag$ 。可知，根据 $flag$ 的数值为 1 或者 0 分两种情形，对无人艇运动情况分类控制。

(1)如果 $flag = 1$ ，判定无人艇处于侧向冲突情形，无人艇需停车等待，设计 STOP 算法避碰，即无人艇线速度 $v = 0$ ；

(2)如果 $flag = 0$ ，则无人艇需要运动避碰，进入下一层次的判断，无人艇与未知障碍物正向冲突标志 $head_flag = 1$ 且无人艇与未知障碍物距离范围判断标志 $fast_flag = 1$ 都成立的情况下，无人艇需要加速避让，设计 ACC 算法避碰。

但是考虑到无人艇在执行偏转动作的过程中，可能会与静态障碍物碰撞，所以为了协调未知障碍物与静态障碍物的避碰，设计静态碰撞点优先避让原则。如果无人艇与最近静态碰撞点距离 $dist_{smin}$ 小于等于无人艇远程探测设备的最远探测距离 $dist_{lim}$ ，则遵守静态碰撞点优先避让原则，即最近静态碰撞点在无人艇左侧，则无人艇向右转加速避让，反之无人艇向左转加速避让。若 $dist_{smin} > dist_{lim}$ ，则按正向冲突内部未知障碍物相对无人艇碰撞方向决策无人艇的偏转方向，若正向冲突内部的分类判断标志 $head0_flag = 1$ ，判定未知障碍物从右前方向无人艇碰撞，此时无人艇需右转加速避让；反之， $head0_flag = 0$ ，此时无人艇需左转加速避让。

考虑到未知障碍物位置和运动速度随机性，所以设定较大的加速度，使得无人艇快速摆脱正向冲突情形，假设在 t 时刻无人艇速度为 (v_t, w_t) ，无人艇最大线加速度为 a_{vmax} ，最大角加速度为 a_{wmax} ，则在 $t + dt$ 时刻无人艇速度 (v_{t+dt}, w_{t+dt}) 更新如下：

$$\begin{cases} w_{t+dt} = w_t - \frac{a_{wmax}}{2} * dt & \text{无人艇向右偏转} \\ w_{t+dt} = w_t + \frac{a_{wmax}}{2} * dt & \text{无人艇向左偏转} \end{cases} \quad (5-11)$$

$$v_{t+dt} = v_t + a_{vmax} * dt \quad (5-12)$$

(3)如果 $flag = 0$ ，则无人艇需要运动避碰，进入下一层次的判断，无人艇与未知障碍物正向冲突标志 $head_flag = 0$ 或者无人艇与未知障碍物距离阈值判断标志 $fast_flag = 0$ ，无人艇仍使用已知障碍物避碰算法(KNOWN 算法)避碰。

5.4.2 算法流程

综上所述，综合集成避碰算法总架构如图 5.5 所示。

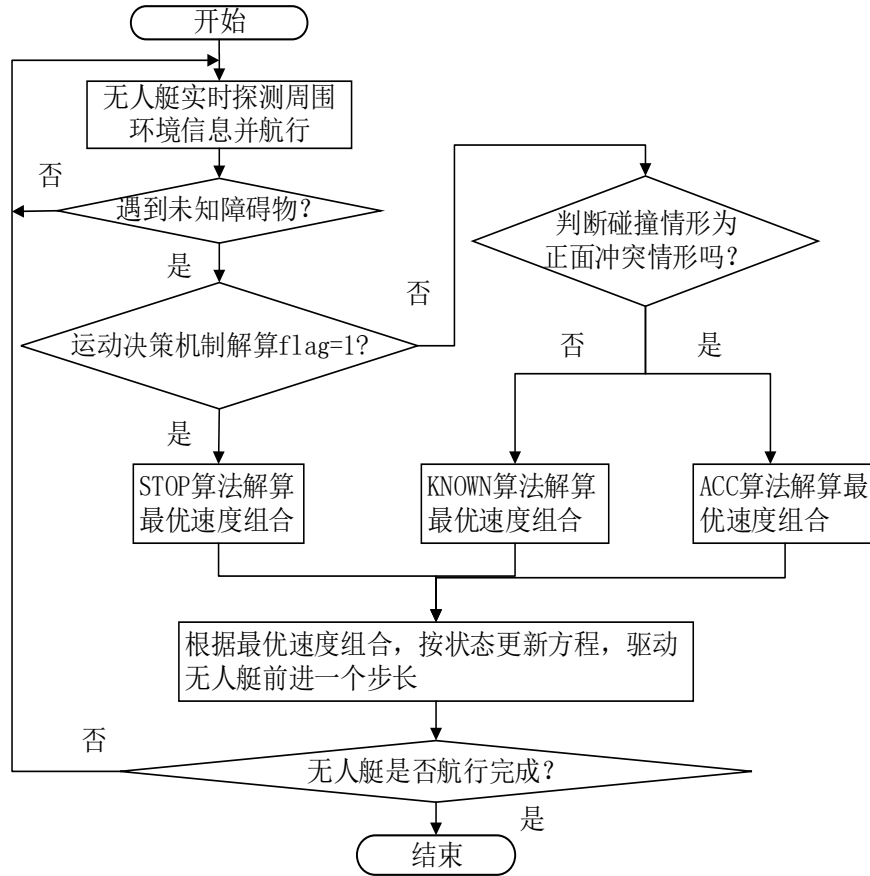


图 5.5 综合集成避碰算法总架构

5.5 仿真分析

5.5.1 基本参数

本章节基本参数除第四章仿真参数外, 加入了未知障碍物相关参数如下表 5.1 所示:

表 5.1 未知障碍物参数表

未知障碍物 种类	未知障碍物起 点(m)	未知障碍物速度 (m/min)	未知障碍物方 向(deg)
未知鱼类	(325,700)	1	270
未知漂浮物	(1000,875)	1	180

无人艇远程探测设备最远探测距离 $dist_{lim} = 500m$, 最大扫描角度 $\alpha_{lim} = 60 \text{ deg}$ 正向冲突角度 $\alpha_{head} = 20 \text{ deg}$ 。不考虑无人艇航行的海流风浪的影响, 且动态船只探测系统, 远程探测设备工作正常, 当无人艇航行到距离路径终点小于 $10m$ 时,

即认为无人艇完成航行与避障任务。

5.5.2 仿真与分析

将以上数据代入到综合集成避碰算法中计算分析。由于仿真程序整体是循环结构，完成全局航行共经历 1147 个仿真周期，结合全局航行模拟示意图，分阶段验证综合集成避碰算法的有效性：

(1) 无人艇实时航行第一阶段模拟

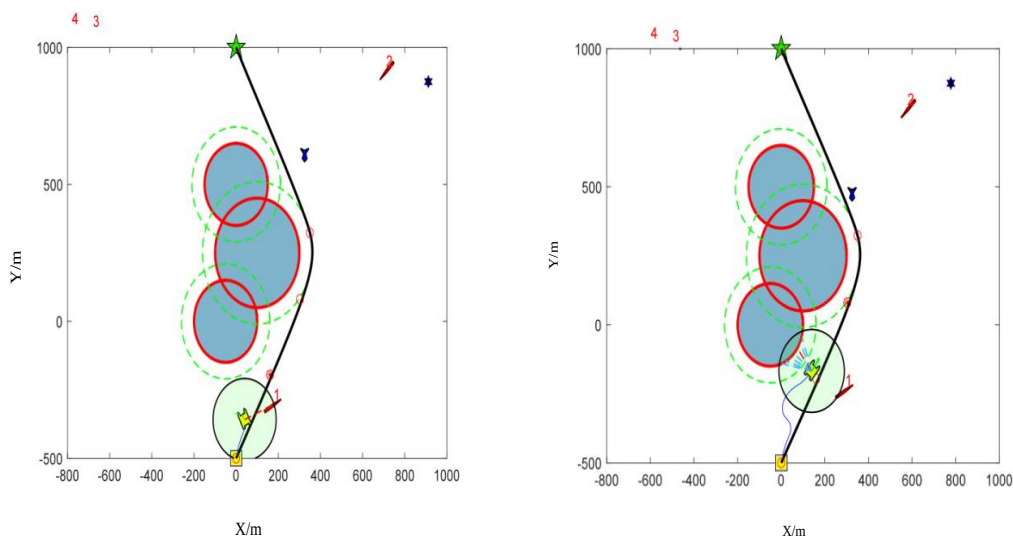
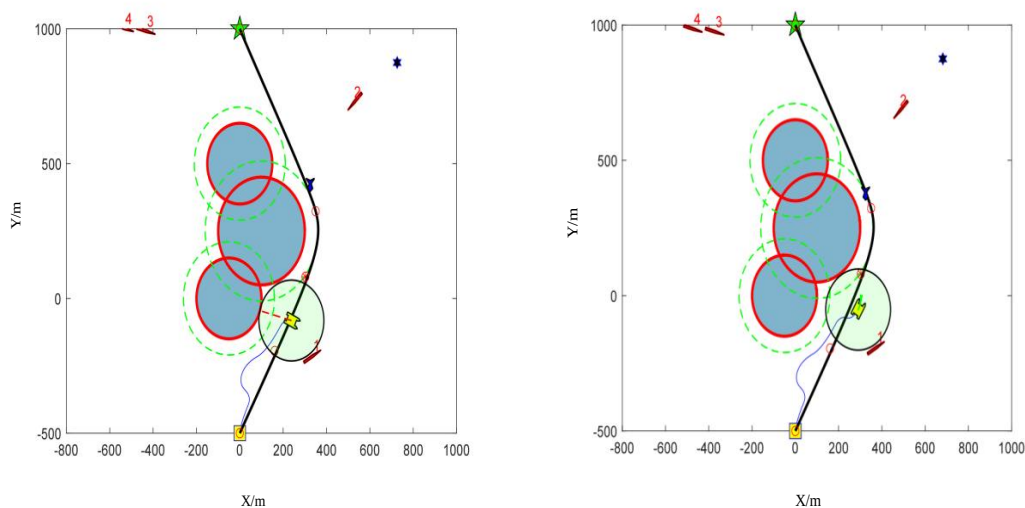


图 5.6 无人艇实时航行第一阶段仿真图

在第 0 个仿真周期到第 250 个仿真周期，根据仿真图可知：(1)无人艇对 1 号动态船只遵守海事避碰规则进行避碰；(2)无人艇能准确追踪路径点；(3)无人艇能利用探测圆探测静态障碍物并标记出最近静态碰撞点与无人艇连线为红色；

(2) 无人艇实时航行第二阶段模拟



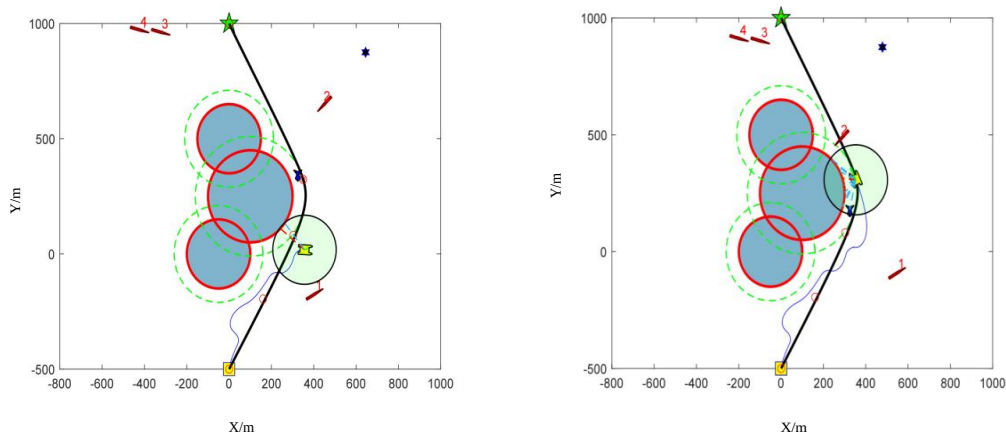


图 5.7 无人艇实时航行第二阶段仿真图

在第 250 个仿真周期到第 400 个仿真周期，根据仿真图可知：(1)无人艇能探测到鱼类未知障碍物，并确定为前向冲突情形，执行 ACC 算法避碰；(2)执行 ACC 算法，解决正向冲突情形后，仍能使用 KNOWN 算法复航并追踪路径点，实时航行与避障；(3)无人艇能多次识别冲突情形，多次执行避碰操作，并复航；(4)能安全的避开正向冲突的未知障碍物；

(3) 无人艇实时航行第三阶段模拟

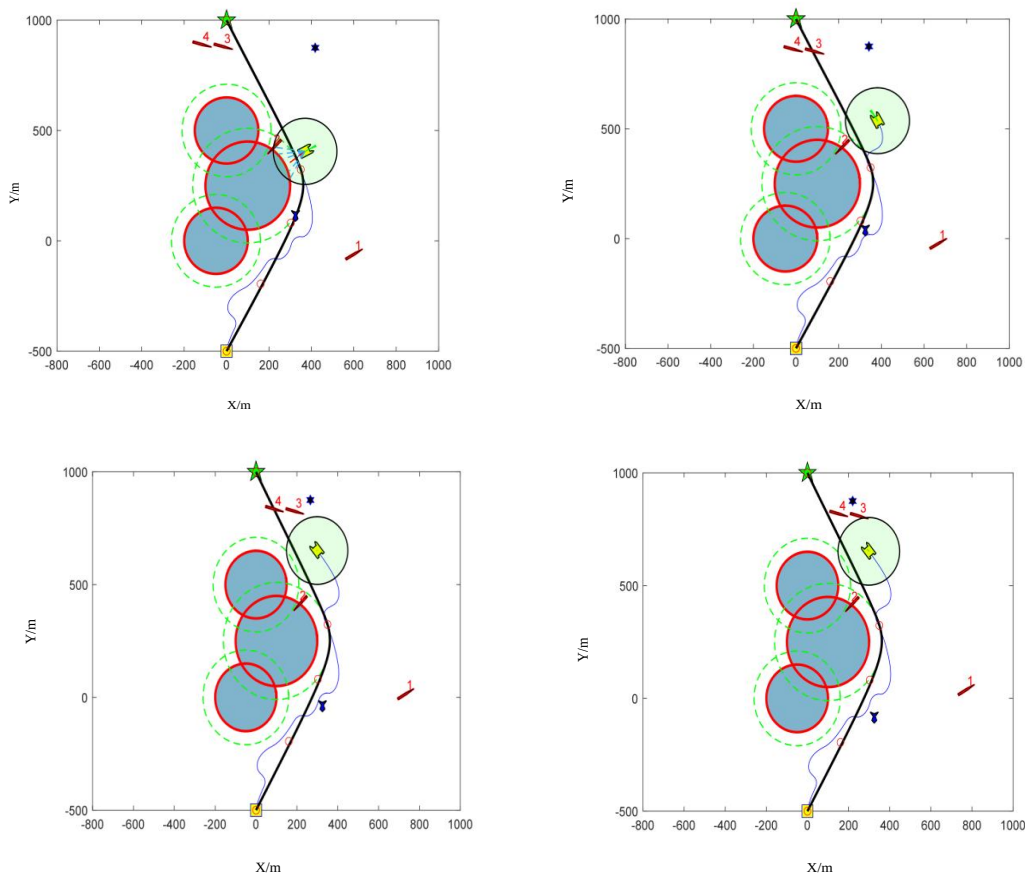


图 5.8 无人艇实时航行第三阶段仿真图

在第 400 个仿真周期到第 800 个仿真周期, 根据仿真图可知: (1)无人艇对 2 号动态船只识别会遇场景, 遵守海事避碰规则避碰; (2)当与 2 号动态船只避碰完成, 复航后, 遇到漂浮未知障碍物, 确定为侧向冲突情形, 停车等待; (3)当无人艇与漂浮未知障碍物脱离侧向冲突情形时, 无人艇仍能复航;

(4) 无人艇实时航行第四阶段模拟

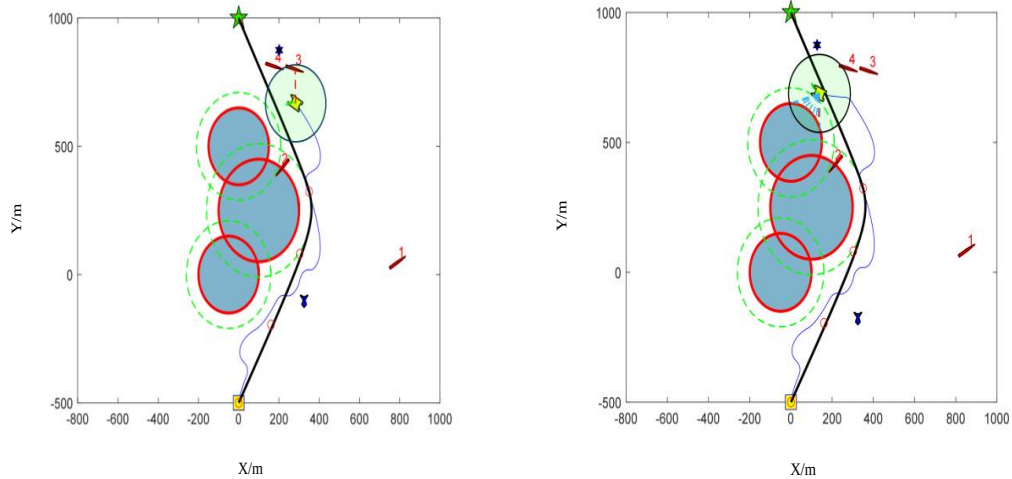
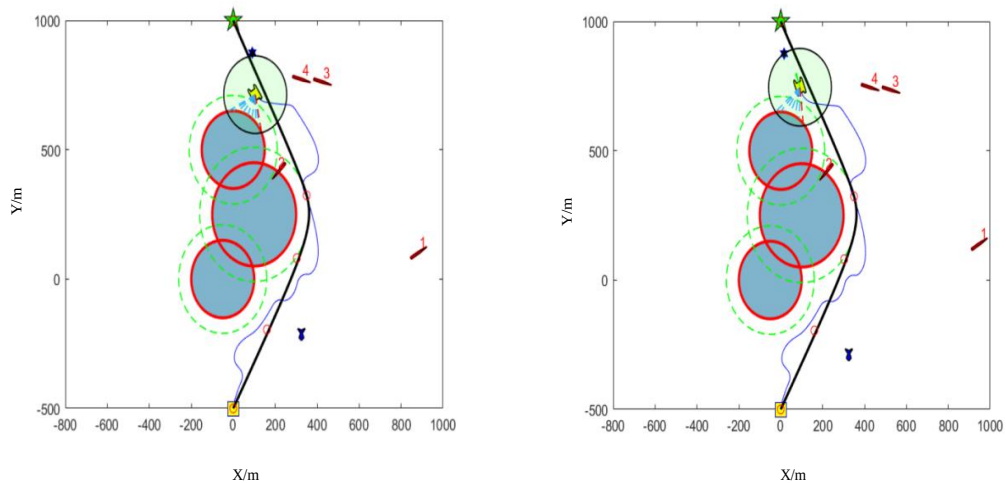


图 5.9 无人艇实时航行第四阶段仿真图

在第 800 个仿真周期到第 895 个仿真周期, 根据仿真图可知: (1)无人艇与 3 号, 4 号动态船只形成多船只交叉会遇场景, 能遵守海事避碰规则对 3 号, 4 号动态船只避碰; (2)无人艇对动态船只避碰完成后, 与静态碰撞点达到距离阈值, 此时, 采用已知障碍物避碰算法(KNOWN 算法), 逃离静态障碍物危险区域。

(5) 无人艇实时航行第五阶段模拟



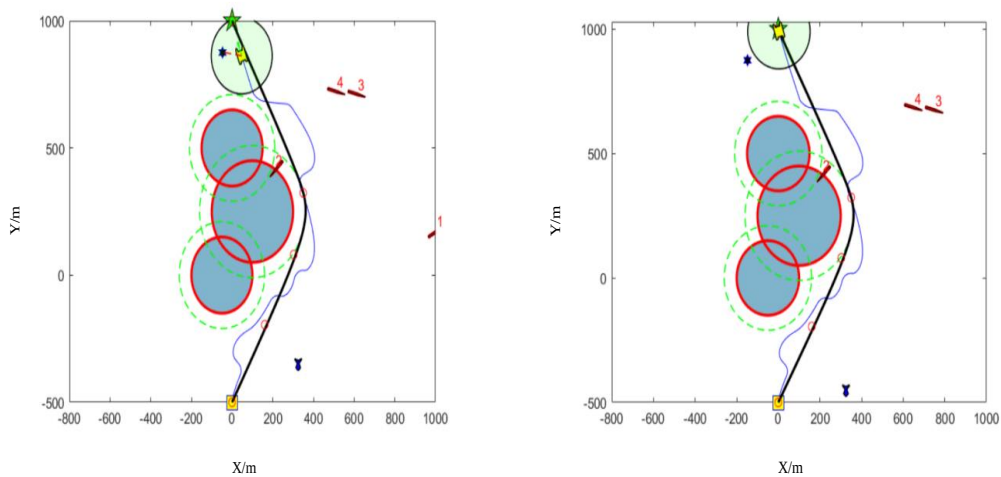


图 5.10 无人艇实时航行第五阶段仿真图

在第 895 个仿真周期到第 1147 个仿真周期，根据仿真图可知：(1)无人船逃离静态障碍物危险区域后，经测算，与漂浮未知障碍物处于侧向冲突场景，停车等待;(2)当脱离侧向冲突情形时，无人艇复航；(3)无人艇采用已知障碍物避碰算法顺利航行至终点；

(6) 无人艇与三种类型障碍物距离统计图

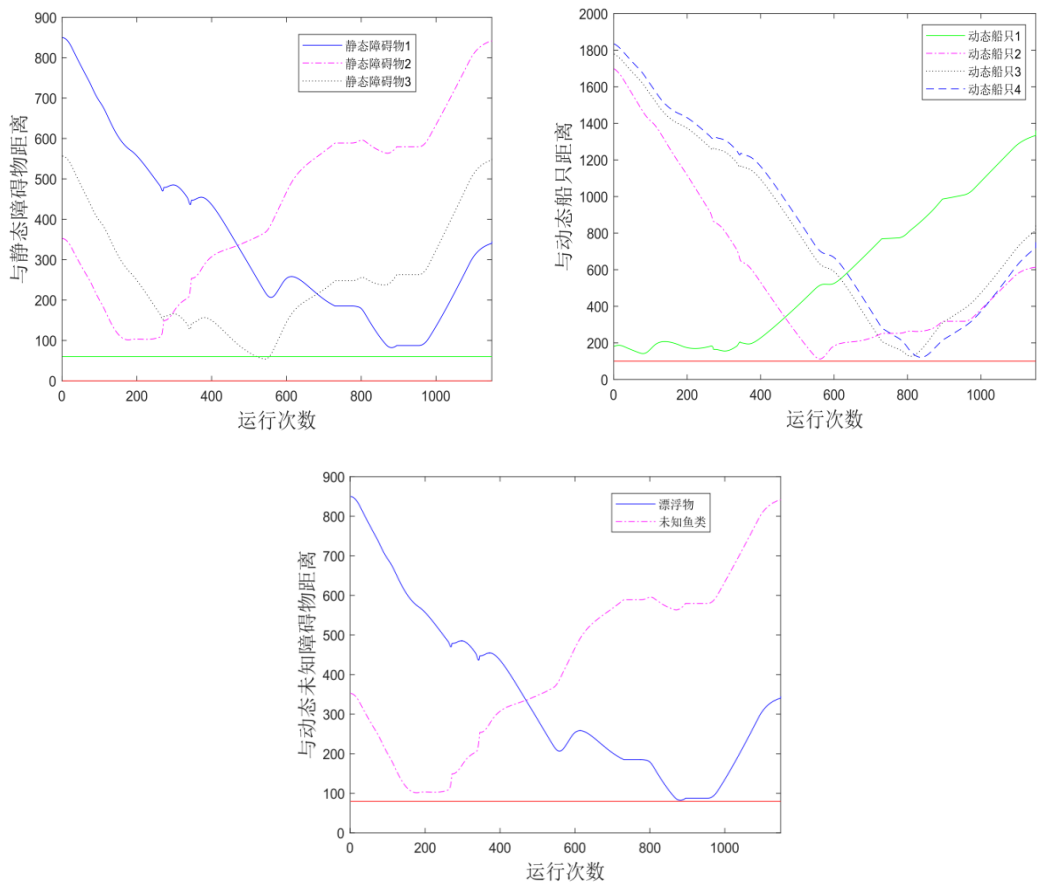


图 5.11 无人艇与三种类型障碍物距离统计图

由仿真图和统计图可以得出：(1)无人艇能遵守海事避碰规则，同时避开动态船只，并于动态船只始终保持安全避碰距离；(2)无人艇使用已知障碍物避碰算法能在检测到与静态障碍物存在风险时，快速避障并复航，总体上与静态障碍物保持安全避碰距离；(3)无人艇能准确识别未知障碍物，确定冲突情形，并采取合适的避碰算法解算并控制无人艇避碰成功，与未知障碍物保持安全避碰距离；

(7) 无人艇航向角，线速度角速度统计图

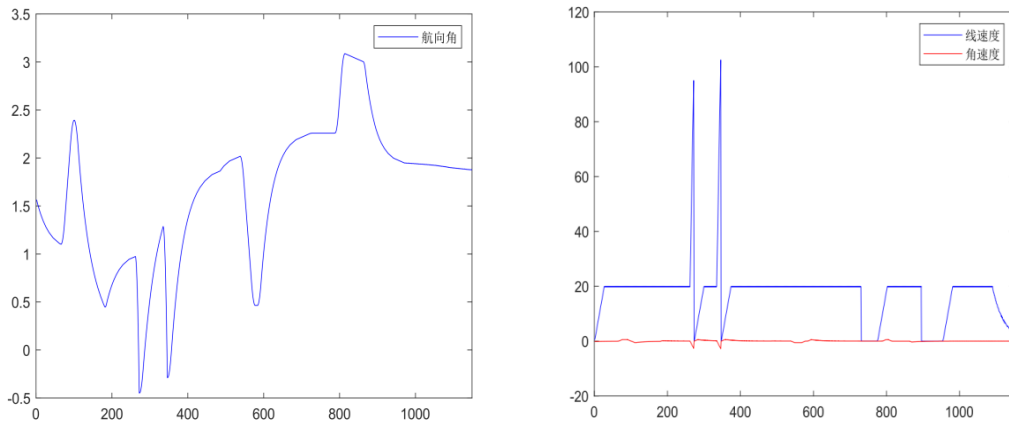


图 5.12 无人艇航向角，线速度角速度统计图

由仿真图和统计图可以得出：无人艇能遵守加速避让算法，停车等待算法，控制无人艇在不同冲突情形加速或者停车等待，在不和未知障碍物避碰的过程中，都采用已知障碍物避碰算法，并能够解算出最优速度组合，控制无人艇运动。

经统计，无人艇总航行时间 $T=143.6\text{min}$ ，总航行长度 $L=1966\text{m}$ ；无人艇与静态障碍物 1 和静态障碍物 2 碰撞圆最近距离均大于 60m ，无人艇与静态障碍物 3 虽然最近距离为 58m ，但经过已知障碍物避碰算法解算，能迅速避开最近障碍物，快速脱离危险区域，所以与静态障碍物 3 不存在碰撞风险；无人艇与所有动态船只距离均大于 60m ，与未知障碍物距离均大于 80m 。根据上述仿真实验的数据统计和仿真图像，无人艇能够沿着全局路径航行，有效的追踪和切换子路径点，并且与静态障碍物无碰撞风险。同时遵守海事避碰规则对探测圆范围内的动态船只进行安全有效避碰，以及根据未知障碍物算法对未知障碍物安全有效避碰。由此结果表明综合集成避碰算法可以有效安全的完成无人艇的航行与避障任务。

5.6 本章小结

本章节主要介绍了两部分，第一是考虑无人艇实时航行时，将静态障碍物避碰也纳入动态船只避碰算法，并介绍了动态船只优先避碰原则，构造针对动态船只和静态障碍物避碰的已知障碍物避碰算法；第二是考虑海面的未知障碍物，并将未知障碍物相对无人艇碰撞方向分为正向冲突情形和侧向冲突情形，并分别制定算法应对以上两种冲突情形；然后将以上两种针对未知障碍物的避碰算法和已知障碍物避碰算法综合集成，构造综合集成避碰算法。最后仿真实验表明，本章节所提出综合集成避碰算法不仅能有效解决第四章遗留的无人艇实时航行过程中与静态障碍物较为接近的问题，同时还能避开未知障碍物，从而准确高效的避开全局所有类型障碍物，实现安全高效的无人艇实时航行。

第 6 章 总结与展望

6.1 本文工作总结

无人艇作为水上机器人，其智能化具体体现在与外界环境的交互，以及进行复杂环境下的避障。因此，本文对无人艇航行过程中遇到的各种类型障碍物展开研究是很有必要的。本文主要工作和研究成果如下：

(1) 介绍了国内外无人艇发展现状和研究动态，论述了无人艇避障算法国内外研究现状。

(2) 针对传统群智能算法和传统路径规划算法应用于路径规划问题的不足，本文使用人工蜂群算法和粒子群算法混合的策略，解决了传统群智能算法收敛较慢，寻优性能差的问题，以及传统路径规划算法规划路径较长，转角较多的问题。首先概述传统人工蜂群算法，然后建立全局环境模型，静态障碍物模型，损失函数模型，接着引入粒子群算法，介绍两种算法混合的策略，最后进行了对比仿真实验，验证了混合人工蜂群粒子群算法规划的路径特性比 A-Star 算法、RRT 算法、RRT*算法的效果更优，更适合无人艇跟踪和实时航行，且该算法在寻优性能上也明显优于传统的粒子群算法与 LINW-PSO 算法，为后续的研究奠定了基础。

(3) 针对无人艇实时航行过程中与动态船只避碰的问题，在基于全局最优路径航行的基础上，解决了无人艇沿全局最优路径实时航行且遵守海事避碰规则与动态船只避碰问题。提出了一种融合海事避碰规则的动态船只避碰方法。通过模拟动态船只与无人艇相遇的多个会遇场景；然后，根据设计的动态船只避碰算法实时的避碰，复航，直到完成整个航行过程；通过统计整个航行过程中无人艇与各个动态船只的距离，验证了该方法的有效性，无人艇能够有效避开各个会遇场景的单个动态船只和多个动态船只，但是与静态障碍物存在一定碰撞风险。

(4) 针对无人艇航行过程中与静态障碍物存在一定碰撞风险问题，在动态船只避碰算法基础上，采取将静态障碍物碰撞圆离散化为静态碰撞点的策略，提出动态船只优先避碰原则，将静态障碍物纳入动态船只避碰算法，建立了已知障碍物避碰算法，解决了无人艇航行过程中与静态障碍物和动态船只的避碰问题。

同时考虑到海面上的未知障碍物避碰问题，按未知障碍物朝向无人艇碰撞方向，分正向冲突情形，和侧向冲突情形，并针对两种情形分别设计加速避让算法和停车等待算法；然后将已知障碍物避碰算法，加速避让算法，停车等待算法，三种算法综合集成到避碰框架中，建立综合集成避碰算法。最后，仿真结果表明，本文所提的综合集成避碰算法能够有效对全局静态障碍物，动态船只，未知障碍物避碰，从而验证了此算法的有效性。

6.2 未来工作展望

本文提出了一种基于综合集成避碰算法的无人艇实时航行与避碰方案，首先基于膨化处理后的静态障碍物为无人艇规划出全局最优路径；接着考虑到与遵守海事避碰规则的动态船只避碰问题设计算法，并进一步解决实时航行与静态障碍物存在碰撞风险的问题，然后针对实时航行可能遇到的未知障碍物的避碰问题研究。但限于本人才疏学浅，研究工作中还有许多部分没有综合考虑，主要包括：

（1）本文所有的研究均是建立在无人艇能够按照算法解算最优速度组合，实时更新无人艇状态的理想条件下，但是真实船体可能存在各个子系统的信息通信延迟等问题，导致无人艇无法实时有效控制，未来会将该算法部署到实际船体上，进一步验证本文所提算法的实用性。

（2）虽然本文对无人艇航行可能碰到的各种类型障碍物做到统筹规划，但是考虑的仅仅是障碍物这一部分，未来将会进一步考虑到风、浪等自然环境对于无人艇实时航行避障以及追踪路径点准确度的影响。

参考文献

- [1] 周旭, 葛愿, 李文战, 等. 面向海面油污清理的无人艇协同路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 26-31.
- [2] 李明, 谈名名, 蒋朝伟, 等. 无人船在渔业智慧监管领域的研究与应用综述[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 15-25.
- [3] 巴尧骥, 唐峰华, 张胜茂, 等. 无人船技术发展现状及其在渔业中的应用[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(05): 888-904.
- [4] 徐玉如, 苏玉民, 庞永杰. 海洋空间智能无人运载器技术发展展望[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(3): 1-4.
- [5] 王正美. 海洋复杂场景下的船舶避碰问题研究[D]. 上海海洋大学, 2018.
- [6] 钟雨轩, 刘睿轩, 孔祥申, 等. 无人艇在南极科考中的应用[J]. 自然杂志, 2024, 46(05): 347-353.
- [7] 方中华, 褚宏宪, 冯京, 等. 无人船艇在海洋地质调查中的应用及展望[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(03): 72-77.
- [8] 赵亮, 王芳, 白勇. 水面无人艇路径规划的现状与挑战[J]. 船舶工程, 2022, 44(04): 1-7+48.
- [9] 卢艳爽. 水面无人艇路径规划算法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] 王敏捷. USV 自适应局部危险规避方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- [11] 王伟. 基于粒子群优化算法的无人艇路径规划研究[D]. 大连海事大学, 2021.
- [12] 潘健. 无人船路径规划及避障研究[D]. 上海海洋大学, 2021.
- [13] 彭艳, 骆阿雪. 海上的较量—上海大学精海无人艇系列研发纪实[J]. 中国军转民, 2015, (02): 37-39.
- [14] 刘江平. 揭开无人海战的序幕中国“瞭望者”II 无人艇[J]. 坦克装甲车辆, 2019(02): 26-30.
- [15] 汪彪. 国际海上避碰规则对无人船的适用问题研究[D]. 大连海事大学, 2021.
- [16] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1972, 4(2): 28-29.

- [17] Kang N K, Son H J, Lee S H. Modified A-star algorithm for modular plant land transportation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(12): 5563-5571.
- [18] Dan Y, Bin X, Kaiyou R, et al. Passive infrared (PIR)-based indoor position tracking for smart homes using accessibility maps and A-Star algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(2): 332.
- [19] 劳彩莲, 李鹏, 冯宇. 基于改进 A*与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14-22.
- [20] LaValle S. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning[J]. Research Report 9811, 1998.
- [21] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The international journal of robotics research, 2011, 30(7): 846-894.
- [22] Xin P, Wang X, Liu X, et al. Improved bidirectional RRT* algorithm for robot path planning[J]. Sensors, 2023, 23(2): 1041.
- [23] Wang Z, Song S, Cheng S. Path planning of mobile robot based on improved double deep Q-network algorithm[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2025, 19: 1512953.
- [24] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1991, 7(3): 278-288.
- [25] Ulrich I, Borenstein J. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots[C]. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation(ICRA'98). Leuven, Belgium: 1998: 1572-1577.
- [26] Ulrich I, Borenstein J. VFH*:Local obstacle avoidance with look-ahead verification[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: 2000: 2505-2511.
- [27] Simmons R. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, USA: 1996: 3375-3382.
- [28] 石朝侠, 洪炳镨, 王燕清. 动态环境下基于速度空间寻优的局部避障方法[J].

- 计算机研究与发展, 2007, 44(5): 898-904.
- [29] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The international journal of robotics research, 1986, 5(1):
- [30] Lumelsky V J, Stepanov A A. Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape[J]. Algorithmica, 1987, 2(1-4): 403-430.
- [31] 彭艳, 鲍凌志, 瞿栋,等. Multi-Bug 全局路径规划算法研究[J].农业机械学报,2020,51(06):375-384.
- [32] Kuwata Y, Wolf M T, Zarzhitsky D, et al. Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 39(1): 110-119.
- [33] Kim J H, Jo H J, Kim S R, et al. Comparison of Collision Avoidance Algorithms for Unmanned Surface Vehicle Through Free-Running Test: Collision Risk Index, Artificial Potential Field, and Safety Zone[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(12): 2255.
- [34] Heng H, Ghazali M H M, Rahiman W. Exploring the application of ant colony optimization in path planning for Unmanned Surface Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2024, 311: 118738.
- [35] Yoshioka H, Hashimoto H. Explainable AI for ship collision avoidance: Decoding decision-making processes and behavioral intentions[J]. Applied Ocean Research, 2025, 156: 104471.
- [36] Zacccone R. A dynamic programming approach to the collision avoidance of autonomous ships[J]. Mathematics, 2024, 12(10): 1546.
- [37] Niu H, Savvaris A, Tsourdos A. USV geometric collision avoidance algorithm for multiple marine vehicles[C]//OCEANS 2017-Anchorage. IEEE, 2017: 1-10.
- [38] Petres C, Romero-Ramirez M, Plumet F. Reactive path planning for autonomous sailboat[C]. The 15th International Conference on Advanced Robotics. Tallinn, Estonia: 2011: 112-117.
- [39] 宋生清. 基于改进锁定扫描法的水面无人艇路径规划研究[D].哈尔滨工程大

学,2022.

- [40] 祖伟. 基于粒子群优化算法的水下潜器实时路径规划技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2008.
- [41] 沈海青, 郭晨, 李铁山,等. 考虑航行经验规则的无人船舶智能避碰导航方法[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(06):998-1005.
- [42] 朱杰. 基于 ROS 的无人船路径规划研究[D].江苏科技大学,2023.
- [43] 杨朝棚. 海流环境下的无人艇路径规划研究[D].集美大学,2024.
- [44] 王晶会. 基于双目立体视觉技术的无人船避障研究[D].大连海事大学,2019.
- [45] 陈宁, 王晨曦. 基于改进瞪羚优化算法的船舶避碰路径规划研究[C].//2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集(水上运输与交叉学科),2024,8.
- [46] Karaboga D. Artificial bee colony algorithm. scholarpedia,2010, 5(3), 6915.
- [47] Karaboga D,Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation , 2009, 214(1): 108-132.
- [48] Akay B,Karaboga D. Parameter tuning for the artificial bee colony algorithm [C]//Processing of International Conference on Computational Collective Intelligence. Berlin : Springer ,2009 ;608-619.
- [49] Karaboga D,Basturk B.On the performance of artificial bee colony(ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing , 2008,8 (1) :687-697.
- [50] 宁爱平, 张雪英. 人工蜂群算法的收敛性分析[J].控制与决策, 2013,28(10):1554-1558.
- [51] Eberhart R K J. A new optimizer using particle swarm theory[J]. Proceeding of Int Symposium on Micro Machine and Human Science, Piscataway, IEEE Service Center, 1995: 39-43.
- [52] 孙波, 陈卫东, 席裕庚. 基于粒子群优化算法的移动机器人全局路径规划[J]. 控制与决策,2005(09):1052-1055.
- [53] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems[J]. Intelligent technologies–theory and application: New trends in intelligent technologies, 2002, 76(1): 214-220.
- [54] Shami T M, El-Saleh A A, Alswaitti M, et al. Particle swarm optimization: A comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10031-10061.

- [55] Zhang L, Ge Y, Guan Z, et al. Path planning of underwater vehicle based on improved particle swarm algorithm[C]2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC),Xi'an,China. IEEE, 2024: 5584-5589.
- [56] Niu H, Lu Y, Savvaris A, et al. Efficient path following algorithm for unmanned surface vehicle[C]//OCEANS 2016-Shanghai. IEEE, 2016: 1-7.
- [57] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [58] He Q, Wang Z, Li K, et al. Research on autonomous navigation of mobile robots based on IA-DWA algorithm[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2099.
- [59] Liu Y, Wang C, Wu H, et al. Mobile robot path planning based on kinematically constrained A-star algorithm and DWA fusion algorithm[J]. Mathematics, 2023, 11(21): 4552.
- [60] Benjamin M R, Leonard J J, Curcio J A, et al. A method for protocol-based collision avoidance between autonomous marine surface craft[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(5): 333-346.
- [61] 叶梓菁, 魏文红, 李环,等. 基于改进粒子群算法的无人机路径规划[J].东莞理工学院学报,2023,30(03):18-23.
- [62] 林泽琼,刘海生.基于模糊动态窗口的无人艇多动态障碍物路径规划[J].舰船科学技术,2025,47(06):62-68.

攻读硕士期间取得的学术成果

(1) 发表的学术论文:

- [1] Zhang L, Ge Y, Guan Z, et al. Path planning of underwater vehicle based on improved particle swarm algorithm[C]//2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2024: 5584-5589.

致谢

在本次论文写作过程中,感谢母校给予我学习的机会,在学习研究的过程中,导师从选题指导,论文框架到细节修改,都给予了细致的指导,提出了很多宝贵的意见与建议,老师以其严谨求实的治学态度,高度的敬业精神,大胆创新的进取精神对我产生深刻影响。

感谢网络上乐于分享的前辈们,我从很多开源的网络学习平台,学到了程序设计知识与科学思考方法。感谢我的父亲,在我科研的路上,无私的支持我,虽然他不懂具体的知识,但是他对科学的热爱,对未知的探索深深的影响了我。

感谢这三年的自己,是自己在课题压力下,保持自己独立思考,在无数个孤独的日子里,自己苦心钻研,开拓创新。

最后,感谢对本论文进行评审的各位老师,感谢你们在百忙之中抽出时间审阅论文。祝愿你们身体健康,工作顺心!

尚禮敬學 唯實惟新

