

学号：1811070066

河南大学 2022 届本科毕业论文  
动态环境下多 AUV 协同路径规划

论文作者姓名：         聂雪松          
作 者 学 号：         1811070066          
所 在 学 院：         物理与电子学院          
所 学 专 业：         通信工程          
导 师 姓 名：         陈立家          
导 师 职 称：         副教授        

2022 年 5 月

## 河南大学 2022 届毕业论文（设计、创作）任务书

**题目名称：**动态环境下多 AUV 协同路径规划

学 院	物理与电子学院	学生姓名	聂雪松	所学 专业	通信工程
		学 号	1811070066		

### 一、毕业论文（设计、创作）要求

选题应符合专业培养目标和教学基本要求，与通信工程专业方向相符合，强调选题的实践性和实用性。选题应考虑该生的专业基础和实际水平，选题不宜过大，难易适度，尊重学生的探索研究兴趣，鼓励和支持学生创新意识，鼓励学生自拟与所学专业相关的课题。

### 二、毕业论文（设计、创作）进度安排

2021 年 10 月 16 日-2021 年 10 月 30 日，学生确定课题方向并完成论文设计开题报告；

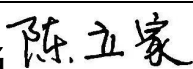
2021 年 11 月 1 日-2022 年 3 月 1 日，查阅多机器人协同路径规划相关的论文，并利用 MATLAB 构建路径规划算法；

2022 年 3 月 2 日-2022 年 4 月 30 日，算法优化并撰写论文。

2022 年 5 月 1 日-2022 年 5 月 8 日，指导教师完成毕业论文评阅。

### 三、需收集的资料和指导性参考文献

- [1] Ji D X, Wang R, Zhai Y Y, et al. Dynamic modeling of quadrotor AUV using a novel CFD simulation[J]. Ocean Engineering, 2021, 237.
- [2] 夏清松. 复杂环境下多移动机器人协同路径规划[D]. 武汉科技大学, 2019.
- [3] 宣仁虎. 基于改进 A\*算法和人工势场法智能小车路径规划研究[D]. 西安电子科技大学, 2019.
- [4] 林洁, 张志安. 改进人工势场法的路径规划研究[J]. 机械与电子, 2022, 40(03): 65-70+75.
- [5] 占银. 基于蚁群算法和人工势场法的水下机器人路径规划研究[D]. 吉林大学, 2020

指导教师签名 

2021 年 10 月 16 日

# 河南大学 2022 届本科生毕业论文（设计、创作）开题报告

论文（设计、创作）题目	动态环境下多 AUV 协同路径规划		
所在学院	物理与电子学院	专 业	通信工程
学生姓名	聂雪松	学 号	1811070066

## 一、本课题研究意义

绝大多数自主式水下机器人（Autonomous Underwater Vehicle，简称 AUV）的动力学模型是一个复杂的强耦合、非线性、时变、多输入多输出的系统，常工作在复杂的海域内，针对特殊任务的需求，单个 AUV 性能有限不能出色完成任务。多 AUV 协同可以解决对于特殊任务的需求，多 AUV 协同路径规划相比单 AUV 路径规划难度陡增。动态环境下的多 AUV 协同路径规划不仅需要规划安全的行经路线，同时要保证 AUV 之间以及 AUV 与静态、动态障碍物之间不产生碰撞冲突。因此，如何解决碰撞冲突是该问题的研究难点。

## 二、国内外有关本课题的研究动态

多 AUV 路径规划可分为在静态环境中或在动态环境中的路径规划，静态环境是指地图中原有障碍物的位置不发生改变并且没有新障碍物的加入，动态环境是指原有障碍物的位置可能发生变化并且也有可能存在新障碍物的加入。很显然，对于静态环境只需要进行一次全局路径规划既可以找到相对稳定的行进路线。然而对于动态环境来说，由于地图中的障碍物可能发生改变，仅仅一次全局路径规划是不足以找到稳定的路线，在全局路径规划的基础上加入局部路径规划可以解决这个问题，故一般在复杂的动态环境下的路径规划流程可简单分为五个过程，地图感知、全局路径规划、局部建模、局部路径规划、终点。

## 三、本课题研究的基本内容

AUV 不同于普通机器人，它工作在环境复杂的深海，其动力学模型都是一个复杂的强耦合、非线性、时变、多输入多输出的系统，不仅涉及六自由度，还需要考虑水动力载荷问题。当利用 AUV 处理一些复杂的水下任务时，单 AUV 很难满足任务的需求，如果考虑到动态环境时，求解的问题复杂性将大大提高。

针对这种问题，本文以 AUV 为研究对象，主要研究多 AUV 协同路径规划。改进的 A\*算法对每个 AUV 规划出全局期望路径，局部优化算法用来处理各类碰撞问题。同时设计了消解 AUV 间碰撞的优化规则，最后提出改进的人工势场法用来躲避动态障碍物。

## 四、本课题拟解决的主要问题

1) 为了解决 AUV 嵌入式能源不足的问题，对 A\*算法进行了改进，利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数。

2) 针对静态环境下多 AUV 协同路径规划，在传统 A\*算法的基础上加入了时间维度，提出了时空 A\*算法。采用了局部优化来处理碰撞问题，并建立预约表的形式给予每个 AUV 优先级。最终采用时空 A\*算法和局部优化的两阶段算法求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题。

3) 针对动态环境下多 AUV 协同路径规划，引入了局部动态路径规划来躲避动态障碍物。

提出了改进的人工势场法，在传统人工势场法的基础上加入了一条可以对 AUV 产生引力的期望路径，称为“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。提出了一种多 AUV 协同路径规划的两阶段算法，并通过仿真验证了其有效性。

## 五、研究方法

通过图书馆的报刊、杂志、各类资料收集等资源，以及互联网资源如中国知网、维普网、国研网、国家统计局等权威网站，查阅国内外古今中外的文献资料，收集多机器人协同路径规划等相关文献资源，从各个方面总结总体和细节情况，借鉴其他学者的研讨思路和专业文献，进行整理筛选和归纳。

## 六、主要创新点

- 1) 利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数。
- 2) 提出时空 A\* 算法和局部优化的两阶段算法求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题。
- 3) 采用“线势场”来改进人工势场法，融入局部动态路径规划来躲避动态障碍物

## 七、主要参考文献

- [1] 张贡生. 我国区域协调发展战略的演进逻辑[J]. 经济问题, 2018(03): 7-13.
- [2] 付成英. 基于分布式控制的水下机器人设计[D]. 广东工业大学, 2020.
- [3] 孟中祥, 刘时圆, 吕珍斌. 多 AUV 集群控制技术综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(06): 509-515.
- [4] 张炳生. 水下声学高精度定位算法的研究[D]. 长安大学, 2019.
- [5] 段益琴. 基于多目标优化的多机器人路径规划研究[D]. 重庆邮电大学, 2020.
- [6] 游晓明, 刘升, 吕金秋. 一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(03): 552-556.

### 具体时间及写作进度安排

起止日期	主要工作内容
2021. 10. 14-2021. 10. 21	任务书
2021. 10. 22-2021. 10. 30	开题报告
2022. 03. 02-2021. 03. 12	中期检查

### 指导教师对开题报告的意见

选题切合社会问题，具有现实意义。研究内容具有一定深度，研究方案详细，具有可实施性，对研究内容所涉及的研究领域进行了全面了解，推荐开题。

指导教师签名：陈立家 2021 年 10 月 25 日

### 系（室）对本课题开题的意见

选题符合专业要求，具有一定现实意义，内容符合专业要求，参考文献内容详实，论文整体安排合理，同意开题。

负责人签名：张牌左 2021 年 10 月 25 日

# 河南大学 2022 届本科生毕业论文（设计、创作）

## 中期进展情况检查表

论文（设计、创作）题目	动态环境下多 AUV 协同路径规划		
所在学院	物理与电子学院	专 业	通信工程
学生姓名	聂雪松	学 号	1811070066
<b>一、毕业论文（设计、创作）进展情况</b> <p>截止到目前，论文大纲完整，初稿已初具规模，将继续对文章内容和格式进行修改、优化、调整。毕业设计方面，能耗代价函数已经构建完成，能够使用改进的 A*算法为 AUV 优化出能耗最低的路径。提出了局部优化规则来处理碰撞问题，并建立优先级预约表，使用时空 A*算法和局部优化的两阶段算法能够求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题，并通过仿真验证了其有效性。</p>			
<b>二、毕业论文（设计、创作）存在问题及解决方案</b> <p>1) 基本代码已经实现，时空 A*算法和局部优化规则融合部分的代码还需要优化。文的内容和格式还有待进一步调整优化。</p> <p>2) 论文还未进行查重，目前将格式调整好后应进行初次查重，将根据查重率进一步调整论文，达到学校要求。</p>			
<b>三、指导教师对学生论文（设计、创作）进展等方面的评价</b> <p>经检查，该生在前期的工作中能够充分分析设计内容，明确设计的目的，对设计内容的原理已基本了解，为下一步工作的开展做出了充分的准备，通过中期检查。</p> <p style="text-align: right;">指导教师签名：陈立家 2022 年 3 月 2 日</p>			
<b>系（室）对本课题中期检查的意见</b> <p>论文已按原计划进行，进展顺利，但论文格式需要进一步规范，可以继续撰写，通过中期检查。</p> <p style="text-align: right;">负责人签名：张牌左 2022 年 3 月 2 日</p>			


## 河南大学 2022 届毕业论文（设计、创作）指导教师评价表

论文（设计、创作）题目		动态环境下多 AUV 协同路径规划			
所在学院		物理与电子学院		专 业	通信工程
学生姓名		聂雪松		学 号	1811070066
指导教师		陈立家		指导教师职称	副教授
指导教师 评分	序号	评分项目	评分参考		得分
			评阅指标（优秀标准）	满分 (100 分)	
	1	选题质量	符合专业培养目标；有实际意义和推广价值。	20	
	2	文献资料 应用能力	能独立查阅文献，具有收集、加工各种信息及获取新知识的能力。	10	
	3	调查研究能力	能准确理解课题任务；研究方案设计合理；能独立从事调查研究；能综合运用所学知识发现与解决实际问题。	30	
	4	论文（设计、创作）质量	格式、图表（或图纸）规范，符合要求；结构严谨，逻辑性强；内容翔实，表达准确流畅；学术价值或实用价值高。	20	
	5	创新能力	观点独到，方法新颖，角度新颖。	10	
	6	工作量及态度	工作量饱满；能圆满完成任务书规定的各项工作。	10	
	总得分				
指导教师 评定 意见	参照上述评价标准及学生论文（设计、创作）完成情况，做出具体评价：				
	论文选题具有实际意义，以实际问题为出发点，提出了切实可行的多 AUV 协同路径规划算法。查阅各类文献，编写代码完成实验，能综合运用所学知识发现与解决实际问题。论文格式规范，结构严谨，内容翔实，工作量足够。 同意该生参与论文答辩。				
	指导教师签名：陈立家		2022 年 5 月 4 日		

备注：

1. 总得分可保留两位小数。
2. 评阅教师要在学生参与答辩前对论文整体情况做出客观评价，并说明是否同意该生参与毕业论文答辩。

## 河南大学 2022 届毕业论文（设计、创作）评阅教师评价表

<b>论文（设计、创作）题目</b>		动态环境下多 AUV 协同路径规划			
<b>所在学院</b>		物理与电子学院		<b>专 业</b>	通信工程
<b>学生姓名</b>		聂雪松		<b>学 号</b>	1811070066
<b>评阅教师</b>		王清林		<b>评阅教师职称</b>	副教授
<b>评阅教师评分</b>	<b>序号</b>	<b>评分项目</b>	<b>评分参考</b>		<b>得分</b>
			评阅指标（优秀标准）	满分 (100 分)	
	1	选题质量	符合专业培养目标：有实际意义和推广价值。	20	
	2	文献资料应用能力	能独立查看文献，具有收集，加工各种信息及获取新知识的能力。	10	
	3	调查研究能力	能准确理解课题任务：研究方案设计合理：能独立从事调查研究，能综合运用所学知识发现与解决实际问题。	30	
	4	论文（设计、创作）质量	格式，图表（或图纸）规范符合要求：结构严谨，逻辑性强 内容翔实，表达准确流畅：学术价值或使用价值高。	30	
	5	创新能力	观点独到，方法新颖，角度新颖。	10	
	总得分				
<b>评阅教师评定意见</b>	参照上述评价标准及论文（设计、创作）内容，做出具体评价：				
	<p>论文选题具有现实意义，查阅了各类文献，完成算法的仿真实验，能综合运用所学知识发现与解决实际问题。论文格式规范，层次分明，内容翔实，工作量足够。</p> <p>同意该生参与论文答辩。</p>				
	评阅教师签名：		 <span style="float: right;">2022 年 5 月 4 日</span>		

**备注：**

3. 总得分可保留两位小数。
4. 评阅教师要在学生参与答辩前对论文整体情况做出客观评价，并说明是否同意该生参与毕业论文答辩。

## 答辩成绩表

备注:

1. 论文的质量评定, 应包括对论文的语言表达、结构层次、逻辑性理论分析、设计计算、数据处理、分析和概括能力及在论文中是否有新的见解或创造性成果等做出评价。从论文来看学生掌握本专业基础理论和基本技能的程度。
2. 评分由答辩委员会(组)专家(原则上 5 或 7 人一组)操作, 根据学生答辩情况, 答辩委员会专家及时给出每个学生的成绩。内部对评分如有争议时, 应当场进行表决。
3. **答辩委员会(组)评定结论应说明是否通过答辩。**
4. 各院亦可根据本专业的不同情况, 制定相应的具有自己特色的评价表格。
5. 以上表格所有签字部分必须手签。



# 河南大学 2022 届本科生毕业论文（设计、创作）

## 答辩纪要

论文（设计、创作）题目	动态环境下多 AUV 协同路径规划		
答辩人姓名	聂雪松	指导教师	陈立家
答辩时间	2022 年 5 月 6 日	答辩地点	物理与电子学院 A 楼 204 室
答辩委员会(组)负责人	张锦龙	答辩委员会(组)成员	陈立家 田团伟 时燕妮 陈莹 梁勇 代震

答辩中提出的问题及回答的简要情况记录：

1、主要研究内容是什么？

针对目前单个水下机器人性能有限不能完成复杂任务为出发点，研究多 AUV 协同路径规划，动态环境下的多 AUV 协同路径规划不仅需要规划安全的行经路线，同时要保证 AUV 之间以及 AUV 与静态、动态障碍物之间不产生碰撞冲突。因此，如何解决碰撞冲突是该问题的研究难点。

2、主要实现的功能是什么？

主要实现多个水下机器人在不知道某些障碍物具体位置的地图中实现协同路径规划，多 AUV 协同路径规划问题要求每个 AUV 从各自的起点出发向目标点运动，找到一条能耗最优的路径，当抵达终点时则停止运动。

3、该论文的创新点是什么？

创新点主要有三个方面。第一改进了传统 A\*算法，利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数为 AUV 寻找一条能耗最优的路径；第二建立了局部碰撞优化规则，并提出时空 A\*算法和局部优化的两阶段算法求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题；第三改进了传统人工势场法，加入了可以对 AUV 产生引力的“线势场”函数，最终融入改进势场法解决了动态环境下多 AUV 协同路径规划问题。

4、文章中的水动力系数怎么得到的？

主要通过计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）仿真法求得，这种方法仅依赖于 AUV 的几何规格（更确切的说是外轮廓）。相比其他方法，使用 CFD 软件能大大减少前期准备工作和经济成本，虽然其对计算机 CPU 的性能要求较高，但随着硬件技术的不断提高，模拟计算的时间也在不断缩短。理论上，软件可模拟任意几何规格物体在水下的任意姿态方向上的运动，并测量物体的运动学与动力学参数，以此计算水动力系数及其他参数。

记录人签名：

代震

2022 年 5 月 6 日

# 河南大学 2022 届本科生毕业论文（设计、创作） 综合成绩表

论文（设计、创作）题目	动态环境下多 AUV 协同路径规划				
所在学院	物理与电子学院		专 业	通信工程	
学生姓名	聂雪松		学 号	1811070066	
指导教师评分		评阅教师评分		答辩评分	
综合成绩		成绩等级		是否推优	
所在系（室）意见	<p>该同学论文选题紧扣专业要求，具有较强的现实意义，研究内容有一定深度，论文格式符合本科论文规范，文字表达准确流畅，文章具有聚集性，有自己的想法，参考文献丰富，达到了本科论文要求。</p> <p>负责人签名：陈立家 2022 年 5 月 6 日</p>				
学院意见（仅推优论文填写）	<p>负责人签名（盖章）： 年 月 日</p>				

## 备注：

毕业论文（设计、创作）综合成绩以百分制计，构成方式为：指导教师评分（30%）+评阅教师评分（20%）+答辩成绩（50%），各部分评分可保留两位小数，最终综合成绩需要四舍五入保留整数。

毕业论文（设计、创作）综合成绩对应四个等级：优秀：100~90；良好：89~76；中等：75~60；不及格：59~0。

## 河南大学本科生毕业论文（设计、创作）承诺书

论文（设计、创作）题目	动态环境下多 AUV 协同路径规划				
姓 名	聂雪松	学 号	1811070066	专 业	通信工程
指导教师姓名	陈立家	职 称	副教授		
完成时间	2021 年 10 月 25 日 — 2022 年 5 月 4 日				
<p>承诺内容：</p> <p>1、本毕业论文（设计、创作）是学生 <u>聂雪松</u> 在导师 <u>陈立家</u> 的指导下独立完成的，没有抄袭、剽窃他人成果，没有请人代做，若在毕业论文（设计、创作）的各种检查、评比中被发现有以上行为，愿按学校有关规定接受处理，并承担相应的法律责任。</p> <p>2、学校有权保留并向上级有关部门送交本毕业论文（设计、创作）的复印件和电子稿件。学校可以将毕业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、汇编本论文。</p> <p>备注：</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"><div style="text-align: center;"><p>学生签名： <u>聂雪松</u></p><p>2022 年 5 月 6 日</p></div><div style="text-align: center;"><p>指导教师签名： <u>陈立家</u></p><p>2022 年 5 月 6 日</p></div></div>					

说明：学生毕业论文（设计、创作）如有保密等要求，请在备注中明确，承诺内容第 2 条即以备注为准。

## 摘 要

绝大多数 AUV 的动力学模型是一个复杂的强耦合、非线性、时变、多输入多输出的系统，常工作在复杂的海域内，针对特殊任务的需求，单个 AUV 性能有限不能出色完成任务。多 AUV 协同可以解决对于特殊任务的需求，多 AUV 协同路径规划相比单 AUV 路径规划难度陡增。动态环境下的多 AUV 协同路径规划不仅需要规划安全的行经路线，同时要保证 AUV 之间以及 AUV 与静态、动态障碍物之间不产生碰撞冲突。因此，如何解决碰撞冲突是该问题的研究难点。本文的主要工作如下：

1) 为了解决 AUV 嵌入式能源不足的问题，对 A\*算法进行了改进，利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数。

2) 针对静态环境下多 AUV 协同路径规划，在传统 A\*算法的基础上加入了时间维度，提出了时空 A\*算法。采用了局部优化来处理碰撞问题，并建立预约表的形式给予每个 AUV 优先级。最终采用时空 A\*算法和局部优化的两阶段算法求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题。

3) 针对动态环境下多 AUV 协同路径规划，引入了局部动态路径规划来躲避动态障碍物。提出了改进的人工势场法，在传统人工势场法的基础上加入了一条可以对 AUV 产生引力的期望路径，称为“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。提出了一种多 AUV 协同路径规划的两阶段算法，并通过仿真验证了其有效性。

**关键词：**自主式水下机器人，时空 A\*算法，协同路径规划，多机器人规划，动态环境，改进人工势场法

## Abstract

The dynamics model of most AUVs is a complex strongly coupled, nonlinear, time-varying, multiple-input, multiple-output system, often working in complex sea areas, and for special mission requirements, a single AUV with limited performance cannot accomplish the task well. Multi-AUV cooperation can solve the demand for special tasks, and multi-AUV cooperative path planning is more difficult than single-AUV path planning. The multi-AUV cooperative path planning in dynamic environment not only needs to plan a safe route, but also needs to ensure no collision conflict between AUVs and between AUVs and static and dynamic obstacles. Therefore, how to solve the collision conflict is the research difficulty of this problem. The main work of this paper is as follows.

1) In order to solve the problem of AUV embedded energy shortage, the A\* algorithm is improved to construct the energy consumption cost function by using the dynamics model of AUV.

2) For multi-AUV collaborative path planning in static environment, the temporal A\* algorithm is proposed by adding the time dimension to the traditional A\* algorithm. Local optimization is used to deal with the collision problem, and a reservation table form is established to give priority to each AUV. Finally, the two-stage algorithm of spatio-temporal A\* algorithm and local optimization is used to solve the multi-AUV cooperative path problem in static environment.

3) For multi-AUV cooperative path planning in dynamic environment, local dynamic path planning is introduced to avoid dynamic obstacles. An improved artificial potential field method is proposed, which adds a desired path that can exert a gravitational force on the AUVs based on the traditional artificial potential field method, called "line potential field". Due to the proposed line potential field, the global path information that has been planned can be fully taken into account in the dynamic planning stage. A two-stage algorithm for multi-AUV cooperative path planning is proposed and validated by simulation.

**Keywords:** autonomous underwater robots, spatio-temporal A\* algorithms, collaborative path planning, multi-robot planning, dynamic environments, improved artificial potential field method

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	II
目 录 .....	III
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 全局路径规划 .....	2
1.2.2 局部路径规划 .....	3
1.3 文章结构 .....	3
第 2 章 AUV 动力学模型及环境建模 .....	5
2.1 四旋翼 AUV 模型 .....	5
2.2 四旋翼 AUV 运动学模型 .....	6
2.3 四旋翼 AUV 动力学模型 .....	7
2.4 环境地图建模 .....	7
2.5 本章小结 .....	10
第 3 章 基于改进 A*算法的全局路径规划 .....	11
3.1 传统 A*算法路径规划研究 .....	11
3.1.1 BFS 和 Dijkstra 算法 .....	11
3.1.2 传统 A*算法仿真实验 .....	11
3.2 改进 A*算法的研究 .....	13
3.2.1 AUV 的能耗代价函数 .....	14
3.2.2 改进的 A*算法实验 .....	15
3.2.3 实验结果分析 .....	16
3.3 本章小结 .....	17
第 4 章 静态环境下多 AUV 协同路径规划 .....	18
4.1 多 AUV 路径规划描述 .....	18
4.2 数学模型建立 .....	18
4.3 多 AUV 协同路径规划 .....	19
4.3.1 AUV 间碰撞预测 .....	20
4.3.2 局部路径优化规则 .....	20
4.4 多 AUV 协同路径规划算法 .....	23
4.5 多 AUV 协同路径规划算法仿真实验 .....	24
4.5.1 仿真实验设计 .....	24
4.5.2 仿真实验结果分析 .....	25
4.6 本章小结 .....	28
第 5 章 动态环境下多 AUV 协同路径规划 .....	29
5.1 传统人工势场法概述 .....	29
5.2 改进人工势场法 .....	30
5.3 动态环境下多 AUV 协同路径规划仿真 .....	31

5.4 本章小结 .....	33
结 论 .....	35
参考文献 .....	36
致 谢 .....	38

## 第 1 章 绪 论

### 1.1 课题背景

我国既是陆地大国，又是海洋大国，大陆海岸线长约 1.8 万公里。党的十九大报告明确提出：“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国”<sup>[1]</sup>。21 世纪以来，人类对海洋的探索从未停止，水下作业设备对海洋资源的开发与利用日益凸显。认识海洋、开发海洋都需要包括海洋机器人在内的各种高精尖技术和装备，海洋机器人一直被世界各海洋强国所关注。

自主式水下机器人（Autonomous Underwater Vehicle，简称 AUV）正是海洋机器人中的一类，是一种具有视觉等感知系统，使用机械手或者其他工具，依靠程序自主地代替或辅助人去完成某些水面和水下任务的重要工具。世界海洋机器人已有约 70 年的历史，经历了从有人到无人驾驶，从直接操作、遥控、自主到混合阶段<sup>[2]</sup>。海洋机器人的快速发展促进了中国海洋研究进入“万米深海时代”。在复杂的水下环境中，单个 AUV 性能有限且作业效率不高<sup>[3]</sup>。当处理一些复杂度高、动态性强的任务时，可将每个 AUV 视为独立的作业单元，在执行任务时多 AUV 利用相关设备进行信息整合，实现协同一致的执行步骤，执行起来相比单个 AUV 有着很大的优势。

多 AUV 协同作业中最重要的核心技术之一是导航技术，待解决的问题有三个：（1）AUV 自身定位；（2）任务规划；（3）路径规划。AUV 自身定位是在运行时精准获得其所在的位置和方向，常见的水下定位技术<sup>[4]</sup>有长基线、短基线、超短基线声学定位，惯性导航定位等；任务规划可将复杂的任务分解为每一个小任务给单个 AUV，故任务

规划与多 AUV 执行的具体任务有密切关联；路径规划则是指以到达目标点的代价最小为目标，这里的代价可以指路程、能耗、消耗时间的其中一个或任意的组合<sup>[5]</sup>，值得一提的是本文章以能耗为代价来进行研究多 AUV 协同路径规划。因此，对于导航技术来说，路径规划是该技术中最重要的环节之一。多 AUV 协同路径规划时，由于环境和系统的复杂性，同时要求能够避开路径上的静态和动态障碍物，可能会出现路径冲突、碰撞等问题，导致任务失败。综上问题所述，对于多 AUV 路径规划的研究是非常重要并亟待解决的问题。



## 1.2 国内外研究现状

多 AUV 路径规划可分为在静态环境中或在动态环境中的路径规划，静态环境是指地图中原有障碍物的位置不发生改变并且没有新障碍物的加入，动态环境是指原有障碍物的位置可能发生变化并且也有可能存在新障碍物的加入。很显然，对于静态环境只需要进行一次全局路径规划既可以找到相对稳定的行进路线。然而对于动态环境来说，由于地图中的障碍物可能发生改变，仅仅一次全局路径规划是不足以找到稳定的路线，在全局路径规划的基础上加入局部路径规划可以解决这个问题，故一般在复杂的动态环境下的路径规划流程可简单分为五个过程，如图 1.1 所示。

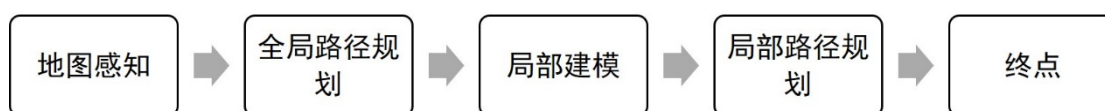


图 1.1 动态环境下的路径规划流程

### 1.2.1 全局路径规划

蚁群算法（Ant Colony Optimization, ACO）是意大利学者 Dorigo 等人<sup>[6]</sup>首次提出的正反馈机制算法，其利用蚂蚁在行经路上留下的激素来传递信息，激素浓度较多的路径对搜索下一个节点具有启发式影响。ACO 算法属于群智能优化算法，容易陷入局部最优。为了解决这个问题，国内外许多学者对算法中的信息激素进行改进。何娟等<sup>[7]</sup>将遗传算法和蚁群算法动态融合，提出了新的优化算法遗传蚁群算法 GA-ACO，结果表明，对于具有深度陷阱的环境均能够在一代之内找到最优路径。

粒子群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）是由 Kennedy 等人首次提出，源于对鸟群捕食行为的研究，当鸟群寻找食物时，会共享各自当前的位置信息，通过惯性、个体认知和群体认知，使得整个鸟群都能到达食物源。Harshal S. Dewang 等<sup>[8]</sup>提出了一种自适应粒子群优化算法（APSO）对机器人进行全局路径规划，用机器人到障碍物和目标的距离构建新的目标函数，同时目标函数采用自适应 PSO 算法进行优化，仿真实验表明，使用 APSO 机器人可以比传统 PSO 以最短路径和时间有效执行导航程序。许源将<sup>[9]</sup>粒子群算法和改进的人工势场法融合提出混合路径规划，算法在传统的人工势场基础上加入了相对速度、相对加速度和线势场部分，粒子群算法对全局进优化，改进后的势场法对局部进行优化，通过实验证明，适用于情况复杂的环境中。

A\*算法（A-Star）初版是由斯坦福研究院的 Peter Hart 等人<sup>[10]</sup>提出，源于对

Dijkstra 算法的扩展,借助启发函数的引导选择当前“代价”最低路径作为下一步搜索,直至搜到终点,目前该方法被广泛应用到单机器人的全局静态路径规划中。在栅格地图环境下,由于 A\*算法规划出的路径转弯次数多、转弯角度大等问题,王红卫等<sup>[11]</sup>提出了平滑 A\*算法。该算法遍历路径上的节点,如果当前节点和其前后节点无障碍时,连接前后节点去除中间节点,建立了平滑 A\*模型。复杂实验结果表明,改进后的平滑 A\*算法规划出的总路径长度降低约 5%,转弯次数降低约 50%,转弯角度平均减少 50%。

### 1.2.2 局部路径规划

人工势场法 (Artificial Potential Field, APF) 最初由 Khatib 提出<sup>[12]</sup>,其主要思想是创建引力场和斥力场形成一个虚拟的人工势场。一般障碍物周围形成斥力场,目标点周围形成引力场,其合力的方向指导规划路径的方向。任彦等<sup>[13]</sup>针对传统 APF 避障中出现目标不可达和陷入极值点等问题,提出一种对比阈值、建立虚拟引力点、增加快速函数的改进算法。韩知玖<sup>[14]</sup>等针对传统算法存在局部极小值,通过引入虚拟力提出了改进的人工势场算法。仿真结果表明,实现了可兼顾距离、平滑、安全性的最优规划。

## 1.3 文章结构

本文的结构安排如下:

第一章,绪论。介绍了研究背景及意义,重点描述动态环境下的 AUV 路径规划流程中全局路径规划和局部路径规划。

第二章, AUV 动力学模型及环境建模。主要介绍了实验室中现有的四旋翼微型机器人“海蜇”号的运动学模型及动力学模型,最后采用栅格地图法构建环境信息。

第三章,基于改进 A\*算法的全局路径规划。首先,详细介绍了传统 A\*算法,为了解决 AUV 嵌入式能源不足的问题,对算法进行了改进,利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数。

第四章,静态环境下多 AUV 协同路径规划。针对工作环境中存在碰撞冲突问题,在第三章算法的基础上加入了时间维度,提出了时空 A\*算法。采用了局部优化来处理碰撞问题,并建立预约表的形式给予每个 AUV 优先级。最终采用时空 A\*

算法和局部优化的两阶段算法求解出多 AUV 协同路径问题。

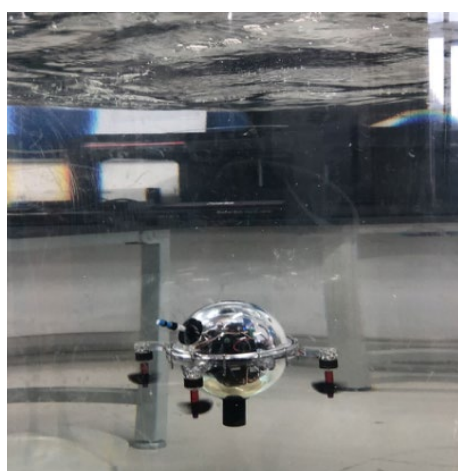
第五章，动态环境下多 AUV 协同路径规划。为了适应动态环境下的路径规划，在第四章基础上引入了局部路径规划。首先介绍了人工势场法的主要思想，并在传统势场法的基础上引入了一条对 AUV 产生引力场的期望路径，即“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。最后，提出了一种多 AUV 协同路径规划的两阶段算法，并通过仿真验证了其有效性。

第六章，总结与展望。

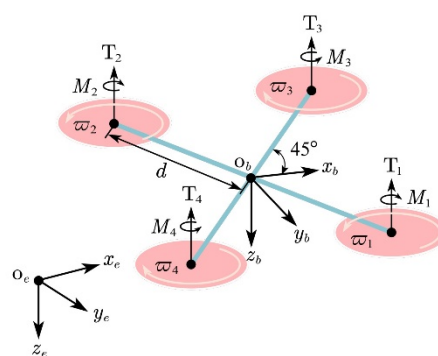
## 第 2 章 AUV 动力学模型及环境建模

四旋翼 AUV 作为一种新型水下极限作业机器人，可用于水下侦察、探测、布置水下网络等功能，具有极高的应用价值。AUV 的设计难点之一是动力学模型的建立<sup>[15]</sup>，绝大多数 AUV 的动力学模型都是一个复杂的强耦合、非线性、时变、多输入多输出的系统，不仅涉及六自由度，还需要考虑水动力载荷（Hydrodynamic Loads）问题。通常这些水动力载荷在时间上是变化的，它们是速度、加速度和 AUV 外壳形状的函数，表现形式为水动力参数（Hydrodynamic Coefficients）与速度和加速度的乘积。本文将以实验室中现有的四旋翼微型机器人“海蜇”号（Jef-4-LAUV）进行开展研究，将介绍 AUV 的运动学和动力学模型以及环境建模。

### 2.1 四旋翼 AUV 模型



a) 四旋翼微型机器人“海蜇”号



b) 机体坐标系

图 2.1 四旋翼 AUV 模型

图 2.1 a) 所展示的是实验室自主设计的四旋翼微型机器人“海蜇”号，其主要由两部分构成，分别是球形舱（半径  $r = 0.1125$ ）和四个推进器。球形舱是由两个半球形外壳通过法兰连接，推进器被安装在四个悬臂上，控制电路等被放置在球形舱的中心。与四旋翼无人机的动力来源类似，“海蜇”号的四个推进器产生所需要的力和力矩。

推进器采用 X 形结构安装，推进器 1 和推进器 3 顺时针旋转，推进器 2 和推进器 4 逆时针旋转（如图 2.1 b) 所示）。由于 AUV 采用球形的结构，其在三个坐标平面上几乎对称，因此可以假设惯性积为零。AUV 的姿态完全由四个推进器的转速

来控制，表 2.1 展示了“海蜚”号的主要参数，其中  $\gamma$  为半径， $(x_g, y_g, z_g)$  表示重心的坐标， $(I_x, I_y, I_z)$  表示惯性矩。

表 2.1 “海蜚”号主要参数

参数	数值
$m$ (kg)	3.44
$G$ (N)	33.75
$B$ (N)	37.61
$\gamma$ (m)	0.1125
$I$ (m)	0.15
$(x_g, y_g, z_g)$ (m)	(0,0,-0.011)
$(I_x, I_y, I_z)$ (kg m <sup>2</sup> )	[0.0928,0.0928,0.159]

## 2.2 四旋翼 AUV 运动学模型

为了简化水动力分析引入了两个参考系，分别是固定在 AUV 上的连体坐标系和固定在地面上的地固坐标系。如图 2.1 b) 所示，连体坐标系和地固坐标系的 Z 轴垂直指向天空。在连体坐标系上给出相对这个坐标系的力与速度，该坐标系的原点为浮力中心。在地固坐标系上则确定了 AUV 的位置和方向，该坐标系的原点是空间中某个固定点。表 2.2 展示了六自由度下 AUV 的力和力矩、线速度和角速度以及位置和欧拉角。

表 2.2 水下机器人动力学参数

	力/力矩	速度	位置/欧拉角
Surge	$X$	$u$	$x$
Sway	$Y$	$v$	$y$
Heave	$Z$	$w$	$z$
Roll	$K$	$p$	$\phi$
Pitch	$M$	$q$	$\theta$
Yaw	$N$	$r$	$\psi$

为了表示 AUV 的运动学方程，现定义如下向量：

$$\begin{aligned}
 \eta_1 &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \\
 V_1 &= \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, V_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \\
 F_1 &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中  $\eta$  表示位置和欧拉角向量， $V$  表示线速度和角速度向量， $F$  表示力和力矩向量。

AUV 的运动学方程可用以下矩阵表示：

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

式(2-2)中线速度和角速度向量的转换方程如下：

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= R_1(\eta_2)V_1 \\ R_1(\eta_2) &= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi s\phi + s\psi s\theta s\phi & s\theta s\psi c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \\ \dot{\eta}_2 &= R_2(\eta_2)V_2 \\ R_2(\eta_2) &= \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-3)$$

## 2.3 四旋翼 AUV 动力学模型

不考虑环境干扰的情况下，AUV 的整体动力学方程可表示为：

$$M_T \dot{V} = -C(V)V - D_L - D_{NL}|V|V + G(\eta) + F \quad (2-4)$$

式中  $M_T$  表示整体质量矩阵， $C(V)$  表示科里奥利力矩阵， $D_L$  和  $D_{NL}$  分别表示线性和非线性阻力系数， $G(\eta)$  表示恢复力矩阵。

为了不引入过多的理论推导，这里直接将每个自由度上简化版的 AUV 动力学方程给出：

$$(m + X_{\dot{u}})\dot{u} = -X_u u - \bar{X}_u u^2 + X \quad (2-5)$$

$$(m + Y_{\dot{v}})\dot{v} = -Y_v v - \bar{Y}_v v^2 + Y \quad (2-6)$$

$$(m + Z_{\dot{w}})\dot{w} = -Z_w w - \bar{Z}_w w^2 + (B - G) + Z \quad (2-7)$$

$$(I_x + K_{\dot{p}})\dot{p} = -K_p p - \bar{K}_p p^2 + K \quad (2-8)$$

$$(I_y + M_{\dot{q}})\dot{q} = -M_q q - \bar{M}_q q^2 + M \quad (2-9)$$

$$(I_z + N_{\dot{r}})\dot{r} = -N_r r - \bar{N}_r r^2 + N \quad (2-10)$$

其中方程(2-5)-(2-7)表示平移运动，方程(2-8)-(2-10)表示旋转运动。方程(2-5)-(2-10)中未知的系数是由具体型号的 AUV 来决定的，称作水动力系数，可通过 CFD 仿真求得，由于本文的重心在路径规划，故直接将“海蜚”号的水动力系数由表 2.3 给出。

## 2.4 环境地图建模

环境地图建模是为了将机器人现实工作环境以一种简洁、方便的形式准确地表

达出来<sup>[16]</sup>。截止到今天，适用于环境地图构建的方法比较多，常用的构建方法可大致分为四种<sup>[17]</sup>：栅格地图法、结构空间法、可视图法、拓扑图法。由于栅格地图有简单、易于实现等众多优点，因此本文将选用栅格地图法来构建地图。

表 2.3 “海蜇”号水动力参数

参数	数值
$X_u$ (kg/s)	0.7318
$Y_v$ (kg/s)	0.7318
$Z_w$ (kg/s)	0.3747
$\bar{X}_u$ (kg/m)	3.006
$\bar{Y}_v$ (kg/m)	3.006
$\bar{Z}_w$ (kg/m)	36.35
$X_{\dot{u}}$ (kg)	1.9897
$Y_{\dot{v}}$ (kg)	1.9897
$Z_{\dot{w}}$ (kg)	3.1337
$K_p$ (kg m <sup>2</sup> /s)	0.001359
$M_q$ (kg m <sup>2</sup> /s)	0.001359
$N_r$ (kg m <sup>2</sup> /s)	0.006736
$\bar{K}_p$ (kg m <sup>2</sup> )	0.000012
$\bar{M}_q$ (kg m <sup>2</sup> )	0.000012
$\bar{N}_r$ (kg m <sup>2</sup> )	0.008206
$K_{\dot{p}}$ (kg m <sup>2</sup> )	0.0058
$M_{\dot{q}}$ (kg m <sup>2</sup> )	0.0058
$N_{\dot{r}}$ (kg m <sup>2</sup> )	0.0037
$b$ (N <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	$3.065 \times 10^{-4}$
$d$ (N <sup>2</sup> m <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	$4.099 \times 10^{-6}$

在栅格地图法中，地图的精度取决于栅格粒度的大小。若选取较小的栅格粒度，虽然地图的精度会很高，但需要存储的信息会增加，干扰也会增强，导致算法执行速度降低，整个系统的实时性也会减弱；相反，若选取较大的栅格粒度，地图精度不够，在障碍物比较密集的地方不能得到较好的路径。一般情况下，栅格粒度可由障碍物区域的面积和环境总面积的比值确定，可由公式(2-11)表示：

$$d = \max\left(\frac{S_{obs}}{S_{env}} \times d_{max}, d_{robot}\right) \quad (2-11)$$

其中 $S_{obs}$ 表示障碍物所占的面积， $S_{env}$ 是环境总面积， $d_{max}$ 为栅格粒度的最大值， $d_{robot}$ 表示的是机器人自身尺寸， $d$ 表示最终栅格粒度。为了防止 AUV 在运动时被卡死在障碍物中，因此将取公式计算的粒度与机器人自身尺寸其中较大的值，

可用公式(2-11)表示。

由于 AUV 主要工作在同一深度的海洋中，因此不考虑深度信息，仅考虑二维规划环境的情况。设 AUV 在水下的二维环境空间为 $W$ ，建立坐标系以水平方向为 $X$ 轴，垂直方向为 $Y$ 轴。若 $X$ 轴和 $Y$ 轴的最大值为 $X_{max}$ 和 $Y_{max}$ ，栅格步长为 $d$ ，则每一行栅格数量 $N_x = X_{max}/d$ ，每一列栅格数量 $N_y = Y_{max}/d$ 。规定没有障碍物占用的栅格用白色表示，称为自由栅格。在自由栅格中 AUV 可随意移动，在存储地图的二维数组里用 0 表示；反之，有障碍物占用的栅格用黑色表示，称为障碍栅格。AUV 不可以移动到障碍栅格，在存储地图的二维数组里用 1 表示。当 $X_{max}$ 和 $Y_{max}$ 都设置为 6， $d$ 为 1 时，采用序号法对栅格标示，栅格地图如图 2.2 所示。

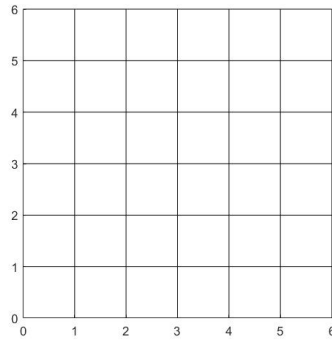


图 2.2 栅格地图

实际情况下障碍物形状是不规则的，如图 2.3 所示。在栅格地图环境中，障碍物需要采用膨胀处理，即只要有覆盖障碍的栅格都当成障碍栅格。在图 2.3 所示的二维环境经过膨胀处理后得到的地图如图 2.4 所示。地图中每一个栅格都与一个环境二维数组对应，没有障碍物的白色区域为 0；反之有障碍物的黑色区域为 1。若取栅格地图  $6 \times 6$ ，整个环境模型可表示为一个 6 行 6 列的二维数组如下：  
 $obs[6][6] = \{ 2,2;4,2;4,3;3,5;4,5;5,5 \}$ ，该数组可以用于表示环境信息。

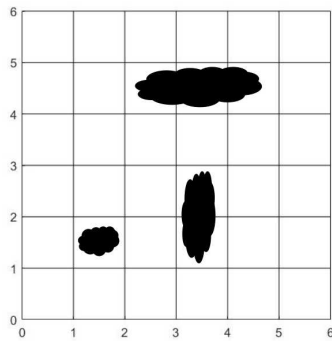


图 2.3 栅格地图膨胀处理前

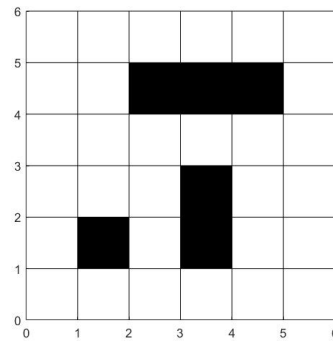


图 2.4 栅格地图膨胀处理后



## 2.5 本章小结

本章节着重介绍了实验室中现有的四旋翼微型机器人“海蜇”号(Jef-4-LAUV)的运动学和动力学模型，通过分析 AUV 的整体动力学方程，得到了六自由度上简化版的 AUV 动力学方程，可用 CFD 仿真方法求得了适用于“海蜇”号的水动力参数。本章结尾也介绍了常用的环境建模方法，最后选择使用栅格地图法构建水下二维环境信息。下面的章节将会使用 AUV 的动力学模型及栅格地图法来改进 A\*算法。

### 第3章 基于改进 A\*算法的全局路径规划

静态环境下全局路径规划算法是 AUV 规划路径的重要步骤，A\*算法因其原理简单<sup>[18]</sup>、搜索速度快、实现简单等优点，逐渐成为一种流行的图搜索算法。因此本文选取改进 A\*算法作为多 AUV 路径规划研究中所使用的全局路径规划算法。下面章节将从传统 A\*算法开始，通过 AUV 的动力学模型改造代价函数，得到改进的 A\*算法。

#### 3.1 传统 A\*算法路径规划研究

在介绍传统 A\*算法之前，从广度优先算法和 Dijkstra 算法出发。这是因为从算法发展历史来看，广度优先算法是最简单的搜索算法，此后狄克斯特提出了基于启发式搜索的 Dijkstra 算法，综合两者的优点提出了传统 A\*算法。

##### 3.1.1 BFS 和 Dijkstra 算法

###### （1）BFS 算法

广度优先算法（Breadth First Search, BFS）是一种相对不智能的搜索算法，因为算法需要遍历地图上所有的节点，最终在队列中从终点回溯到起点的路径。这种算法不考虑终点的可能位置，只是没有目的地遍历整张地图，直到搜索到终点才会停止。优点是原理简单、实现容易。但缺点是遍历的节点太多，导致内存的开销很大。

###### （2）Dijkstra 算法

迪杰斯特拉（Dijkstra）算法不是平等地搜索所有可能的路径，而是倾向成本较低的路径。Dijkstra 算法是本章研究的 A\*算法的特殊情况，可用一句话解释 Dijkstra 算法：

“每次从未求出最短路径的节点中取出距离起点最短路径的节点，以这个节点为媒介刷新未求出最短路径的节点的距离”。

##### 3.1.2 传统 A\*算法仿真实验

传统 A\*算法可以看成 BFS 算法和 Dijkstra 算法的融合，可通过公式(3-1)来计算每个节点的代价：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3-1)$$

$$g(n) = \text{Distance}(s, n) = \sqrt{(x_n - x_s)^2 + (y_n - y_s)^2} \quad (3-2)$$

$$h(n) = \text{Distance}(n, e) = \sqrt{(x_e - x_n)^2 + (y_e - y_n)^2} \quad (3-3)$$

上式中,  $f(n)$  是综合代价, 表示从起始点  $s$  经过节点  $n$  到目标点  $e$  的代价估计。 $g(n)$  是起始点  $s$  至节点  $n$  的实际代价  $h(n)$  是节点  $n$  至目标点  $e$  的预估代价, 同时这也是 A\* 算法的启发函数。当遍历下一个节点时, 我们会选择综合代价最小的拥有更高的优先级。

A\* 算法的工作原理是建立两个列表, 用 Open 列表和 Close 列表分别表示待遍历的节点和已经遍历过的节点。如图 3.1 所示, 展示了 A\* 算法的工作流程。对 Open 列表中的综合代价值进行大小排列, 每次将 Open 列表中代价值最小的节点放入 Close 列表中, 最终把 Close 列表中的节点连接起来, 即可得到最优路径。

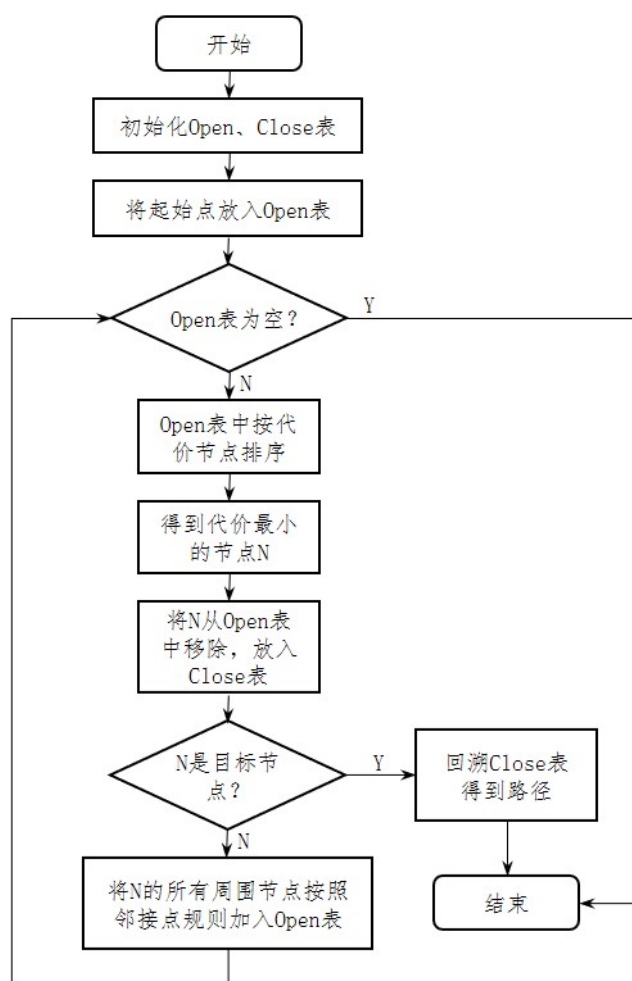


图 3.1 A\* 算法工作流程

从起始点开始, 采用 A\* 算法以八邻域进行路径搜索 (如图 3.2 所示), 具体步骤如下: (为了方便表示 Open 和 Close 分别用 O 和 C 表示)

- 1、生成空白的 O 列表和 C 列表, 并将起始点加入 O 列表;
- 2、将起始点周围自由节点放入 O 列表, 设置这些自由节点的父节点为起始点;
- 3、从 O 列表中删除起始点, 将起始点放入 C 列表;

- 4、计算当前节点的每个周围节点综合代价值 $F = G + H$ ;
- 5、从 O 列表中选取综合代价值最低的节点 A，将其从 O 列表删除放入 C 列表;
- 6、检查节点 A 临近可达的节点：
  - a) 障碍物和 C 列表的节点不予考虑;
  - b) 如果这些节点不在 O 列表中，将它们加入 O 列表，并计算综合代价值和设置父节点为 A;
  - c) 如果某相邻节点 C 已在 O 列表中，计算新路径从起始点到节点 C，根据 G 值判断是否需要更新;
- 7、继续从 O 列表中找到综合代价值最小的节点，该节点从 O 列表删除，再加入 C 列表。之后继续找出当前节点周围的自由节点，如此循环;
- 8、当 O 列表出现目标节点，说明路径已经找到;当 O 列表没有数据，说明没有合适路径。

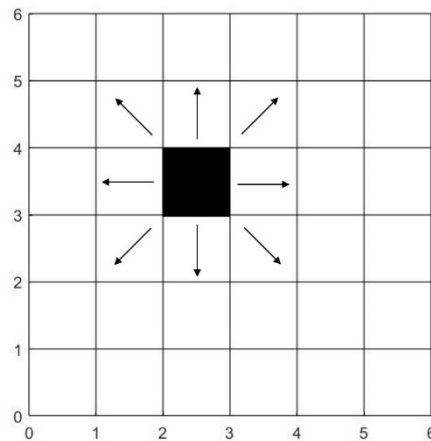


图 3.2 八邻域路径搜索

建立如图 3.3 所示的仿真环境，并建立  $20 \times 20$  的栅格地图，每个栅格长度 1 米，可自由设置起始点、障碍物和目标点的分布。设置起点坐标(1,1)，目标点坐标(19,18)，障碍物随机分布在栅格地图中，利用 A\*算法寻找的最优路径如图 3.3 所示。

### 3.2 改进 A\*算法的研究

传统 A\*算法有许多优点，但要应用到多 AUV 全局路径规划中还需要进行改进，AUV 的嵌入式能源数量非常有限，为了保证每次执行任务的成功，需要将 AUV 的动力学模型融入到 A\*算法中。通过第二章动力学简化方程的学习，提出了针对 AUV 能耗的代价函数，最终使用改进后的 A\*算法可以寻找到一条能耗最低的路径。

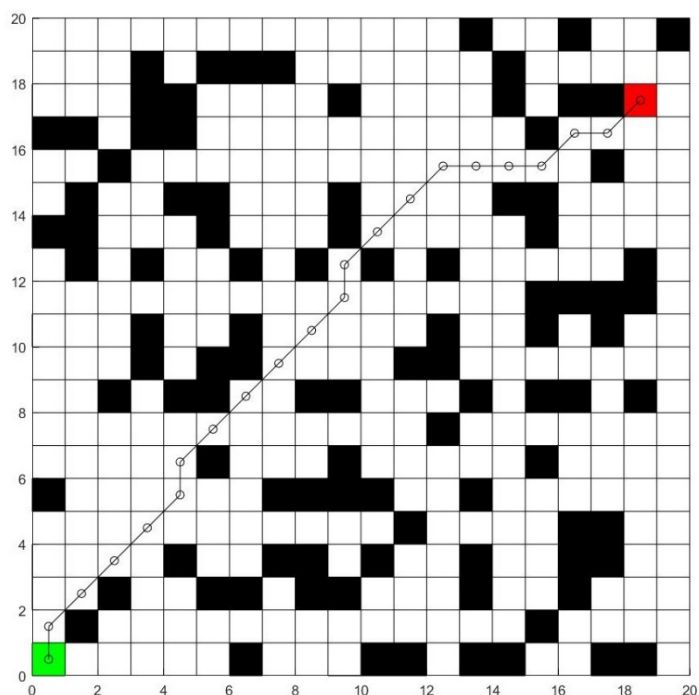


图 3.3 A\*算法寻找的最优路径

### 3.2.1 AUV 的能耗代价函数

A\*算法需要计算相邻节点的 G 代价、H 代价和 F 代价来寻找最优路径。相邻节点的 G 代价是当前节点的 G 代价与单位移动代价之和。如图 3.4 所示，本文主要以二维平面进行路径规划，所以不需要考虑 AUV 上移或下移的能耗代价，仅需要考虑 AUV 在二维平面平移时的能耗代价函数。

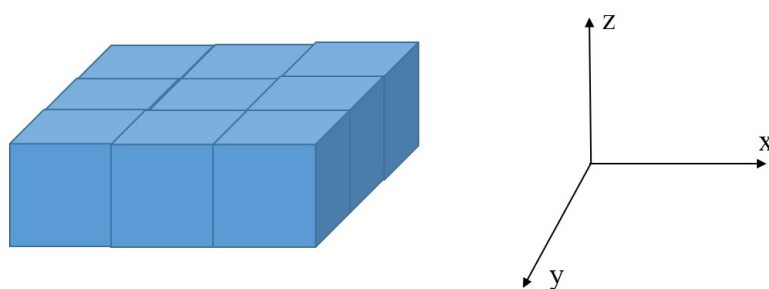


图 3.4 二维节点栅格

考虑到欧氏距离，二维平面内每个当前节点（具有红色边缘的蓝色立方体）周围具有八个相邻节点，如图 3.5 所示。单位移动代价是在二维平面内行驶一米距离所花费的能量。消耗该能量以克服自身重力、水下阻力和附加质量力，AUV 执行任务期间大部分能量用克服重力。当 AUV 处于悬停状态时，推进器产生的推力与 AUV 自身重力相等，悬停时所消耗的能量可通过以下公式计算：

$$E_h = \sqrt{\frac{1}{2\pi\rho} \frac{4d}{rv} \left(\frac{mg}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3-4)$$

其中 $m$ 表示 AUV 的质量， $g$ 为重力加速度， $\rho$ 是水的密度， $d$ 为两个节点之间的距离， $v$ 表示行驶期间 AUV 的速度， $r$ 是螺旋桨的半径。可见公式(3-4)中除速度 $v$ 和距离 $d$ 之外都是常数，将第二章表 2.3 的这些常数代入，可以得到悬停时消耗的能量：

$$E_h = \frac{11d}{v} \quad (3-5)$$

对于行驶速度 $v = 1\text{ms}^{-1}$ 的 AUV,对角移动情况下悬停成本 $E_h = 15.56$ 焦耳，前后或左右移动情况下悬停成本 $E_h = 11$ 焦耳。

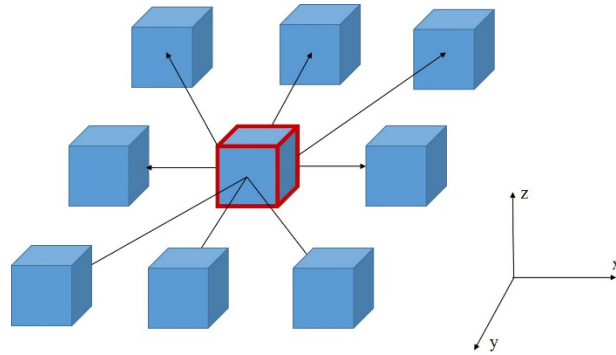


图 3.5 相邻节点

AUV 在行驶阶段消耗的能量称为移动成本，用符号 $M_c$ 表示。行驶期间，大部分能量用于悬停，并且一些能量用于抵抗水下阻力和附加质量力。通过第二章简化版六自由度 AUV 动力学方程(2-5)和(2-6)可得移动代价可以使用以下公式计算：

$$M_c = E_h + \sin \alpha (M_a a + C_D v + \overline{C_D} v^2) d \quad (3-6)$$

其中 $E_h$ 表示悬停代价， $\alpha$ 是 AUV 的倾斜角度， $M_a$ 是附加质量， $a$ 为 AUV 行驶时的加速度， $C_D$ 表示水下线性阻尼系数， $\overline{C_D}$ 是水下非线性阻尼系数， $v$ 表示 AUV 行驶速度， $d$ 为两个节点之间的距离。上式中除倾斜角度 $\alpha$ 、行驶速度 $v$ ，距离 $d$ 和加速度 $a$ 是变量，其他均为常量。将第二章表 2.3 的这些常数代入，可以得到移动代价：

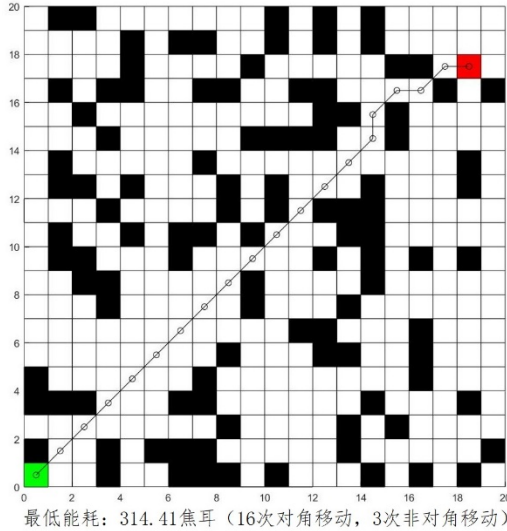
$$M_c = \frac{11d}{v} + \sin \alpha (1.9897a + 0.7318v + 3.006v^2)d \quad (3-7)$$

若 $\alpha = 20^\circ$ ， $a = 0\text{ms}^{-2}$ ， $v = 1\text{ms}^{-1}$ ，可以得到移动代价 $M_c = 12.27d$ ，对角移动情况下移动代价 $M_c = 17.35$ 焦耳，前后或左右移动情况下移动代价 $M_c = 12.27$ 焦耳。

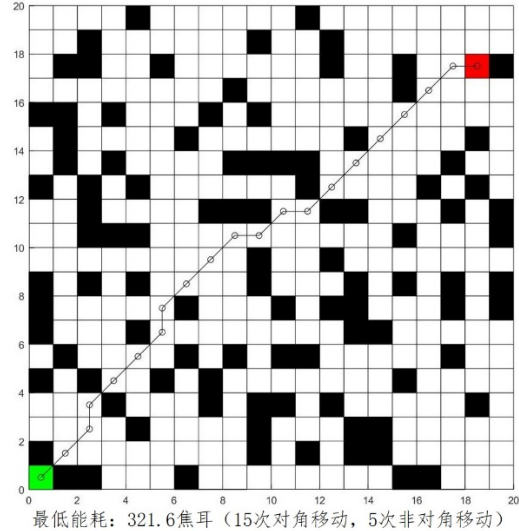
### 3.2.2 改进的 A\*算法实验

通过 3.2.1 节推导可得知，理想情况下，AUV 行驶状态下对角移动代价 $M_c = 17.35$

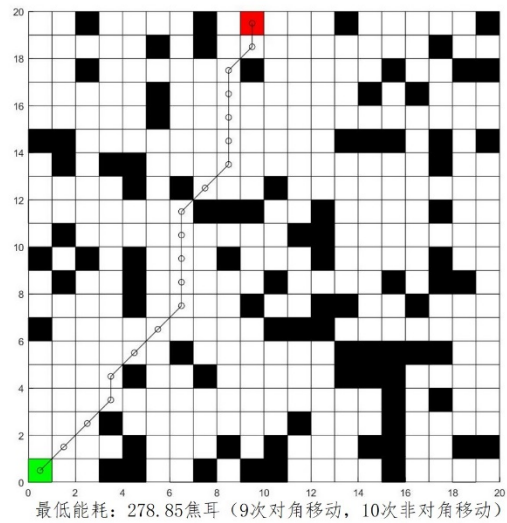
焦耳，前后或左右移动代价 $M_c = 12.27$ 焦耳。在获得当前节点周围的每个相邻节点的 G 代价和 H 代价之后，算法通过添加 G 代价和 H 代价来计算综合代价 F。综合代价 F 最小的节点将被选取，重复这个过程，直到抵达目标节点并发现能耗最小的路径，改进后 A\*算法仿真实验的结果如图 3.6 所示。



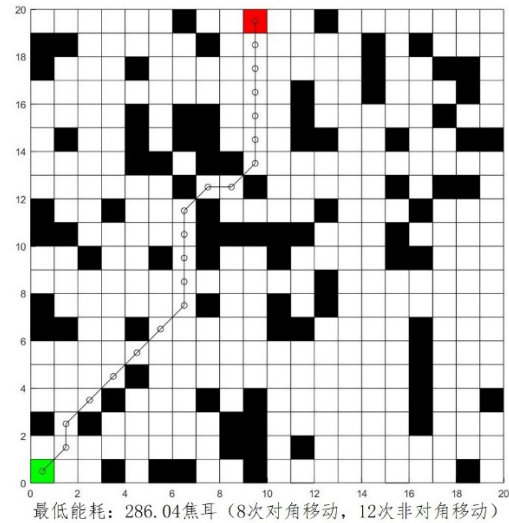
a) 随机地图 1



b) 随机地图 2



c) 随机地图 3



d) 随机地图 4

图 3.6 改进的 A\*算法实验结果

### 3.2.3 实验结果分析

通过仿真实验可知，如表 3.1 所示，起始点均设置在(1,1)，图 3.6 a)和 3.6 b)目标点设置在(19,18)，图 3.6 c)和 3.6 d)目标点设置在(10,20)。实验结果表明，改进后的 A\*算法能够规划出 AUV 行驶时最低能耗的路径。但在实际情况中，可能会有各种干扰

导致实际执行的路径不是能耗最低，这时候就需要对局部进行路径规划，保证 AUV 在动态环境下也拥有优异的导航性能。

表 3.1 仿真实验结果

栅格地图	随机地图 1	随机地图 2	随机地图 3	随机地图 4
起始点	(1, 1)		(1, 1)	
目标点	(19, 18)		(10, 20)	
最低能耗（焦耳）	314.41	321.61	278.85	286.04

### 3.3 本章小结

本章主要研究了传统的 A\*算法，对其进行了仿真实验，实验利用栅格地图法建立 20×20 的环境地图。通过第二章 AUV 动力学模型的分析，提出了新的能耗代价函数，由于该代价函数不仅于速度有关，还和 AUV 行驶的加速度相关，所以实验中假设 AUV 匀速行驶在水下环境中来减小问题的复杂程度。实验结果表明，在理想环境下，优化改进后的 A\*算法能为 AUV 规划出能耗最低的静态全局路径。



## 第4章 静态环境下多 AUV 协同路径规划

在实际环境中，单台 AUV 能力有限不能承担复杂任务，因此需要多台 AUV 进行协同作业。多 AUV 协同作业时，需要对每一台 AUV 都进行路径规划，多机器人协同路径规划一直是机器人路径规划研究中的重点和难点。多 AUV 协同路径规划任务要求能够寻找出不同起始点的单个 AUV 能耗最低路径，且不能发生任何碰撞冲突问题。考虑到多 AUV 系统不仅仅是 AUV 数量的增多，并且各自 AUV 都有自己的起始点，按照原始规划出的路径极易发生碰撞。路径规划不仅要考虑与障碍物的碰撞，同时也要考虑多 AUV 间的碰撞。

本章在第三章基础上，提出了时空 A\*算法，该算法是在第三章改进算法的基础上加入了时间维度，并利用预约表的形式存储之前已经规划好的多 AUV 路径信息，借用这些信息，以此来为下一个 AUV 生成最优路径，同时采用了局部优化来处理碰撞问题。最终采用时空 A\*算法和局部优化的两阶段算法求解出多 AUV 协同路径问题。

### 4.1 多 AUV 路径规划描述

多 AUV 在水下二维平面环境 $W$ 内工作，环境中存在若干位置已知的障碍物。设置  $obs = \{obs_1, obs_2, obs_3, \dots, obs_m\}$  表示环境 $W$ 中障碍物的坐标集合。分别设置起始点为  $Start_1$  和  $Start_2$ ，以及目标点为  $End_1$  和  $End_2$ 。多 AUV 协同路径规划要求在复杂环境约束下，求解出每个 AUV 在  $Start_i$  和  $End_i$  之间规划出一条最优且无碰撞的路径。

地图的构建采用第二章栅格地图法，将实际地图经过栅格化处理后，算法利用已知的障碍物信息对每个 AUV 进行全局路径规划和局部优化处理，实际要规划的路径如图 4.1 所示。

### 4.2 数学模型建立

多 AUV 协同路径规划问题中，要求每台 AUV 需要在工作空间中满足一定的约束，例如移动约束、碰撞约束、避障约束和终止约束等。

#### 1) 移动约束

AUV 运动采用八邻域的运动形式，即可以向周围的八个方向进行位移，并且可以暂停运动即悬停。每次移动 AUV 只能向周围某一个方向移动或者在当前位置悬停，故移动约束条件为(4-1)和(4-2)所示。

$$|X_{i,t} - X_{i,t-1}| \leq \sqrt{2} \quad \forall t > 1 \quad (4-1)$$

$$|Y_{i,t} - Y_{i,t-1}| \leq \sqrt{2} \quad \forall t > 1 \quad (4-2)$$

其中 $X_{i,t}$ 表示第 $t$ 时刻，第 $i$ 个 AUV 在栅格地图上的横坐标； $Y_{i,t}$ 表示第 $t$ 时刻，第 $i$ 个 AUV 在栅格地图上的纵坐标。

## 2) 碰撞约束

多 AUV 协同路径规划问题属于 NP 难题。首先需要考虑 AUV 之间的碰撞，当两个 AUV 存在碰撞冲突时，需要一定的策略消解碰撞冲突实现 AUV 协同作业。因此，任意时刻 $t$ 每个 AUV 之间都需要保存一定的安全距离，本文设置的安全距离不小于 $\sqrt{2}$ 。

$$\sqrt{(X_{i,t} - X_{j,t})^2 + (Y_{i,t} - Y_{j,t})^2} \geq \sqrt{2} \quad i \neq j, \forall t \quad (4-3)$$

## 3) 避障约束

AUV 在工作空间作业时，不仅要考虑 AUV 之间的碰撞还要考虑静态和动态障碍物的避障。当第 $i$ 个 AUV 遇到障碍物 $obs(x, y)$ 时，需要保持一定的安全距离不小于 $\sqrt{2}$ 。

$$\sqrt{(X_{i,t} - x)^2 + (Y_{i,t} - y)^2} \geq \sqrt{2} \quad \forall t \quad (4-4)$$

## 4) 终止约束

多 AUV 协同路径规划问题要求每个 AUV 从各自的起点出发向目标点运动，找到一条最优的路径，当抵达终点时则停止运动。

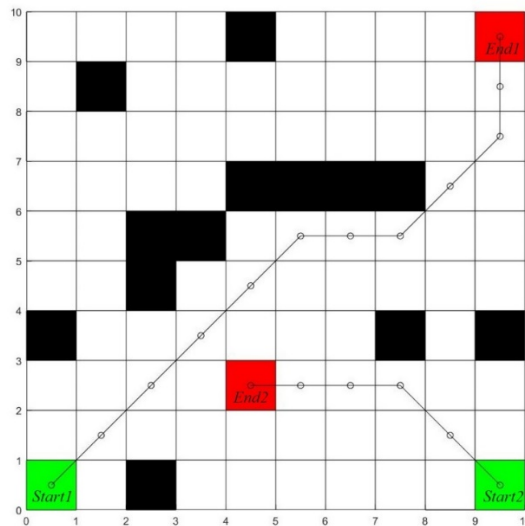


图 4.1 多 AUV 协同路径规划示意图

## 4.3 多 AUV 协同路径规划

多 AUV 协同作业过程中，为了得到每个 AUV 最优路径，分别对每个 AUV 都进行

第三章的全局路径规划。当 AUV 的数量逐渐增多时，会常常遇到路径重叠和交叉的现象，最终导致 AUV 之间可能会发生碰撞冲突，导致作业任务不能正常完成。多 AUV 路径规划属于 NP 难题，问题的核心在于消除 AUV 之间的碰撞冲突<sup>[19]</sup>。本文根据 AUV 的运动形式研究局部优化规则，以避免 AUV 之间的碰撞，提出了一种基于改进 A\*算法和融入局部路径优化的多 AUV 路径规划方法。

#### 4.3.1 AUV 间碰撞预测

AUV 在运动过程中，不仅可以通过声学定位知道自己在下的位置，也同样可以通过声学测距探测到与其他 AUV 之间相隔的距离。当 AUV 在扫描范围  $R$  内探测到其他 AUV，则进行提前碰撞预测，如图 4.2 所示。

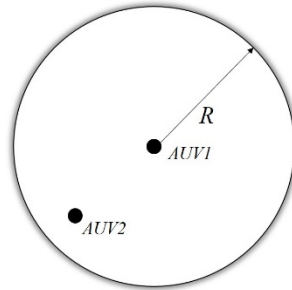


图 4.2 AUV 扫描范围  $R$

由于采用栅格地图法构建环境信息，实际上每个 AUV 的路径是一组栅格坐标，多个 AUV 的实际路径可表示为  $\{D_1, D_2, D_3, \dots, D_i\}$ ，其中  $D_i = [(S_x, S_y); \dots; (E_x, E_y)]$ 。AUV 之间发生碰撞的条件是  $Distance(D_i(t), D_j(t)) \leq 2R$ ，找到  $t$  时刻发生碰撞的栅格坐标  $D_i(t)$ ，再找到  $AUV_i$ 、 $AUV_j$  在  $t-1$  时刻的坐标  $D_i(t-1)$ 、 $D_j(t-1)$ ，通过计算向量  $\overrightarrow{D_i(t)D_i(t-1)}$ 、 $\overrightarrow{D_j(t)D_j(t-1)}$  的夹角  $\theta$ 。当  $\theta = 0$  时， $AUV_i$  和  $AUV_j$  间发生对碰，否则发生侧碰。

$$\theta = \arccos \frac{\overrightarrow{D_i(t)D_i(t-1)} \cdot \overrightarrow{D_j(t)D_j(t-1)}}{|\overrightarrow{D_i(t)D_i(t-1)}| |\overrightarrow{D_j(t)D_j(t-1)}|} \quad (4-5)$$

#### 4.3.2 局部路径优化规则

对每个 AUV 利用第三章改进 A\*算法搜索到的最优全局路径，如果沿着这条路径运动可能会和其他 AUV 发生碰撞。根据  $\theta$  角度的不同，大致分为对碰和侧碰。将时间维度加入到 AUV 的二维位置信息就得到了三维时空状态图，通过时空状态图可以清楚的表达 AUV 到达每个栅格的时间信息。加入该时间信息对于消除 AUV 之间的碰撞冲突至关重要。

设每个 AUV 各栅格点的三维状态信息为  $AUV_i(X_i, Y_i, t_i)$ ，表示第  $i$  个 AUV 在  $t_i$  时刻的坐标为  $(X_i, Y_i)$ 。从理论层面可知，如果两个 AUV 在相同  $t_i$  时位置信息  $(X_i, Y_i)$  不相等，则彼此间没有碰撞冲突。如图 4.3 a) 所示，两个 AUV 虽然在二维位置信息图上的路径有交叉，但增加了时间维度后的三维状态图 4.3 b) 可知两条路径并没有交叉，因此不会产生碰撞冲突。如果  $AUV_1$ 、 $AUV_2$  以同一速度在相同时刻运动到同一栅格上，那么两个 AUV 一定发生碰撞。如图 4.4 所示，两个 AUV 在三维时空状态图上存在交叉，为了消解碰撞冲突需要进行局部路径优化。

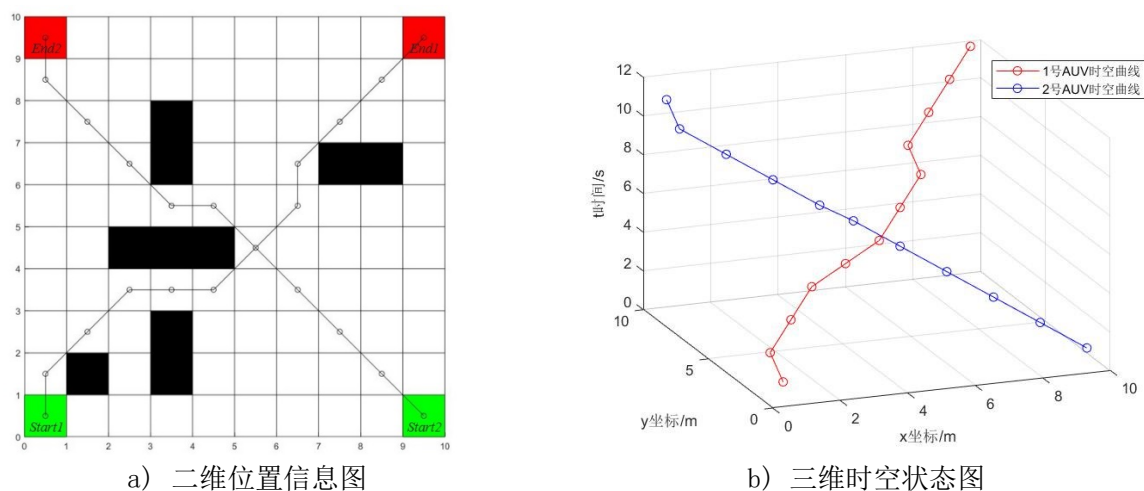


图 4.3 路径无冲突情况

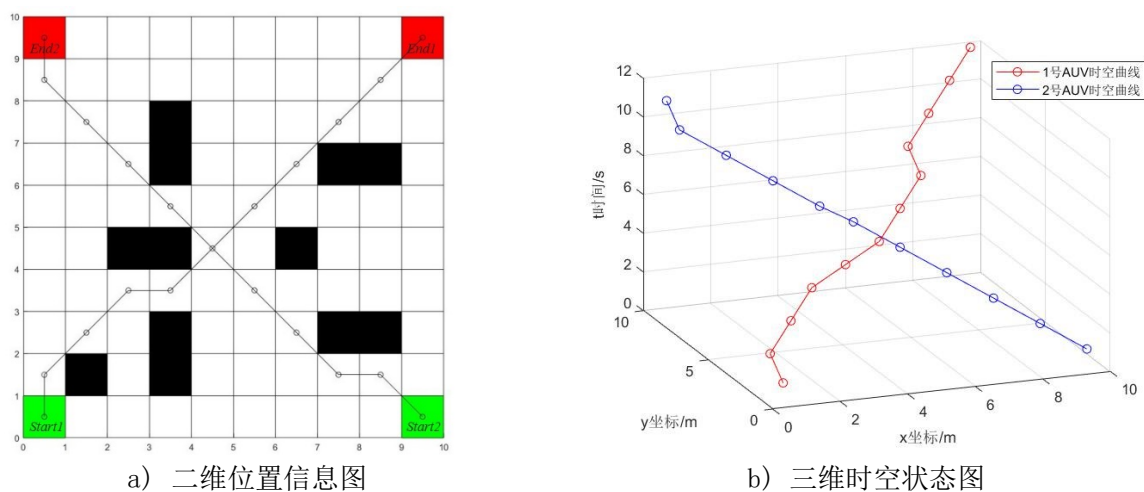


图 4.4 路径有冲突情况

为了解决碰撞冲突，AUV 在任务开始时会注册一个预约表，预约表会给每个 AUV 一定的优先级，通常先执行任务的 AUV 会有较高的优先级，如图 4.5 所示。优先级高的 AUV 按照原路径运行，优先级低的 AUV 则进行局部路径规划。假设  $AUV_1$  优先级高， $AUV_2$  优先级低，则  $AUV_2$  需要局部路径优化。以图 4.4 冲突问题为例，碰撞解除后的时空

曲线如图 4.6 所示。由此可见，局部路径优化是本章的关键。本章设计了基于预约表优先级的局部优化规则来消解 AUV 之间的碰撞，保证彼此间的协同作业。

预约表	
1	AUV1
2	AUV2
...	...

图 4.5 预约表

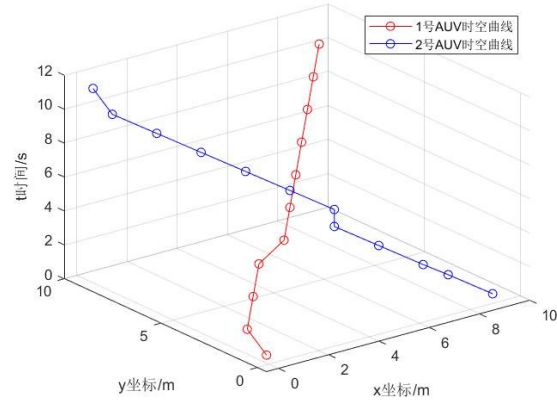


图 4.6 路径冲突消解

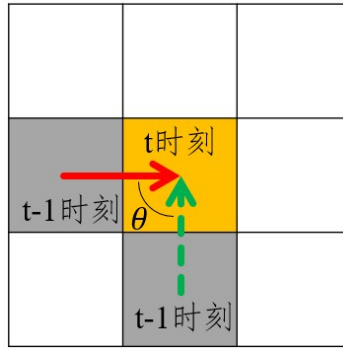
根据公式(4-5)计算出两个 AUV 的夹角 $\theta$ ，如图 4.7 所示，当 $\theta$ 的范围在 $(0, \pi)$ 之间时，发生的碰撞称之为侧碰。反之，当 $\theta = \pi$ 时，发生的碰撞称之为对碰。根据不同的碰撞情况有相应的消解策略，具体步骤如下：

- 1、根据 $\theta$ 判断碰撞类型
- 2、如果是侧碰。根据预约表给出的优先级判断，优先级高的 AUV 按照原路运行，优先级低的 AUV 在原地停留一个单位时间。
- 3、如果是对碰。对碰分为图 4.8 中的四种情形，分别对每个 AUV<sub>i</sub> 寻找躲避栅格集合  $I_i$ 。
  - a) 如果优先级较低的 AUV 躲避栅格集合  $I_{low}$  不为空，则低优先级的 AUV 在集合  $I_{low}$  中随机选取一个栅格进行避障，高优先级的 AUV 原路运行。
  - b) 如果优先级较低的 AUV 躲避栅格集合  $I_{low}$  为空，检测高优先级的 AUV 躲避栅格集合  $I_{high}$  是否为空：

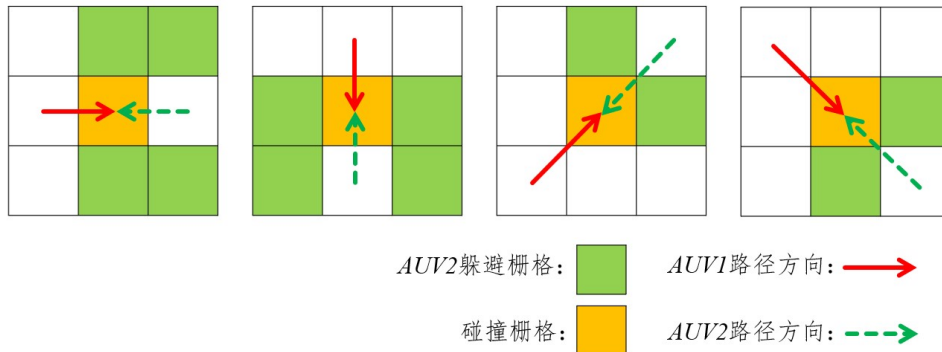
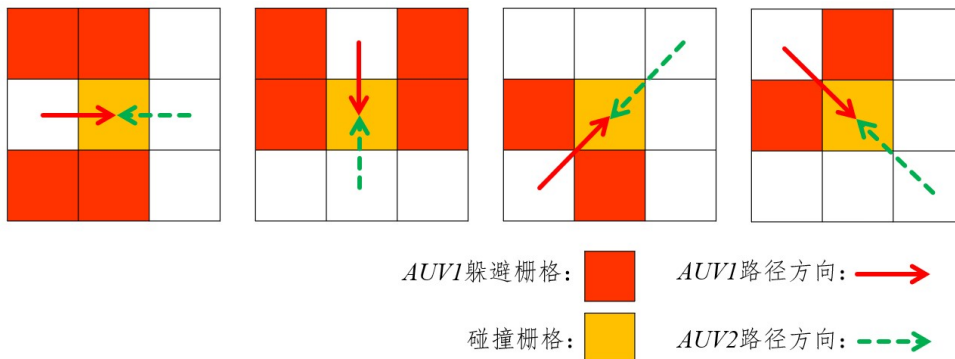
情况 1：高优先级的 AUV 躲避栅格集合  $I_{high}$  不为空，高优先级的 AUV 在集合  $I_{high}$  中随机选取一个栅格进行避障，低优先级的 AUV 原路运行。

情况 2：高优先级的 AUV 躲避栅格集合  $I_{high}$  为空，高优先级的 AUV 原路运行，低优先级的 AUV 进行回撤寻找暂避栅格。

- 4、局部路径优化结束


 图 4.7 两个 AUV 的夹角  $\theta$ 

假设AUV<sub>1</sub>优先级高，AUV<sub>2</sub>优先级低。如果利用上述介绍的局部路径优化规则，当产生对碰时的情况如图 4.8 和图 4.9 所示。图 4.8 中绿色的栅格为AUV<sub>2</sub>的躲避栅格集合  $I_{low}$ ，如果这些集合没有被障碍物代替，即  $I_{low}$  不为空，AUV<sub>2</sub>随机在躲避栅格集合  $I_{low}$  中选择一个栅格进行躲避，AUV<sub>1</sub>原路运行。如果这些集合都被障碍物代替，即  $I_{low}$  为空，检查AUV<sub>1</sub>的躲避栅格集合  $I_{high}$  是否为空（如图 4.9 所示），如果不为空，则AUV<sub>1</sub>随机在躲避栅格集合  $I_{high}$  中选择一个栅格进行躲避，AUV<sub>2</sub>原路运行。如果  $I_{low}$  和  $I_{high}$  都为空，AUV<sub>2</sub>进行回撤寻找暂避栅格，至此局部优化结束。


 图 4.8 对碰情况( $I_{low} \neq \emptyset$ )

 图 4.9 对碰情况( $I_{low} = \emptyset$ )

#### 4.4 多 AUV 协同路径规划算法

本章设计了基于改进 A\*算法与局部路径优化规则融合的两阶段规划算法。该算法

大致分为两个部分，第一部分用改进 A\* 算法寻找出每个 AUV 的全局最优路径；第二部分检测每条全局路径，预测安全范围内是否会发生碰撞，如果发生碰撞则应用局部优化规则消解碰撞冲突问题。算法流程图如图 4.10 所示，求解步骤如下：

步骤 1：初始化各类参数，如起始点 *Start*、目标点 *End*、安全范围 *R*。

步骤 2：采用第三章改进的 A\* 算法分别规划出各个 AUV 的路径（不考虑其他 AUV 路径的影响）。

步骤 3：遍历每条路径，检测在安全范围内是否发生碰撞。

步骤 4：根据不同的碰撞类型，执行相应的局部优化规则避碰处理。

步骤 5：AUV 在运行过程中，利用传感器一直检测可视化区域内是否出现其他 AUV。预测是否会发生碰撞，如果发生碰撞执行步骤 4。迭代结束的条件是每个 AUV 都安全抵达各自的目标点。

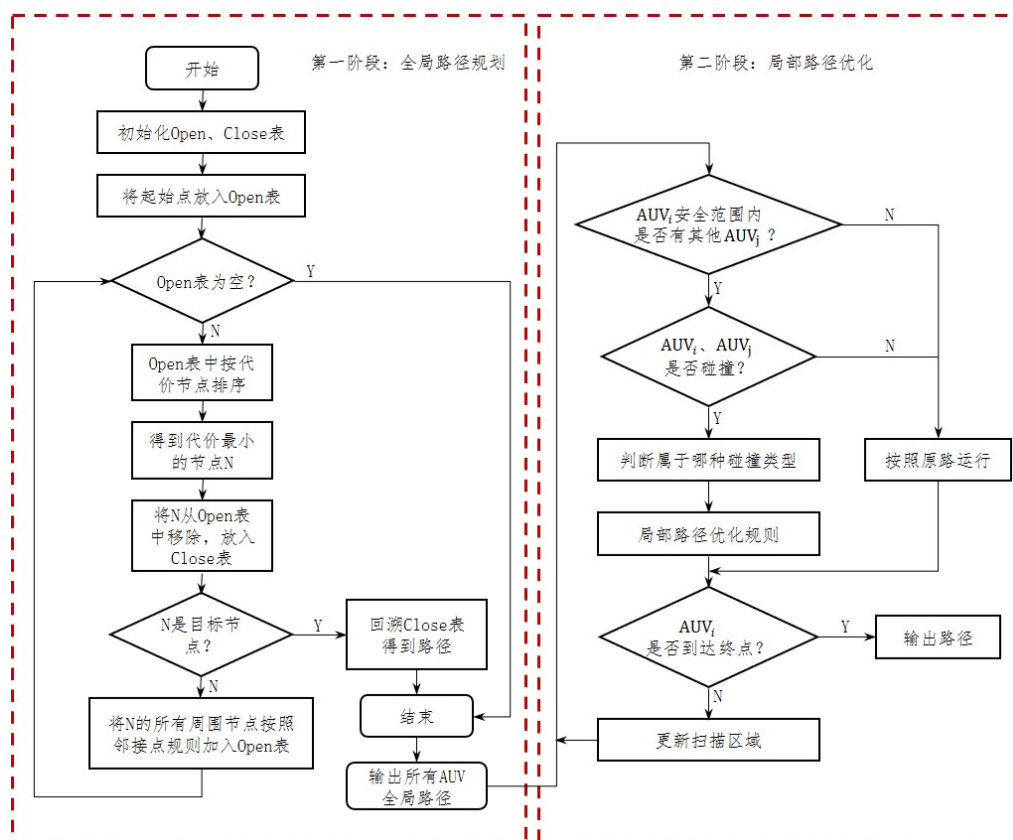


图 4.10 融合局部优化的两阶段算法

## 4.5 多 AUV 协同路径规划算法仿真实验

### 4.5.1 仿真实验设计

本文仿真实验的环境为 Matlab(9.9.0(R2020b))，对各种情况进行了仿真实验分别为



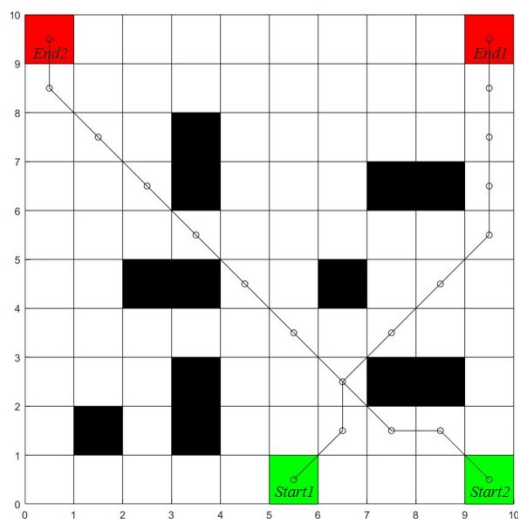
无碰撞和有碰撞（侧碰、对碰）。其中安全距离设置为 $R = \sqrt{2}$ ，三组实验的初始坐标如下表 4.1 所示。

表 4.1 起始点和目标点位置信息

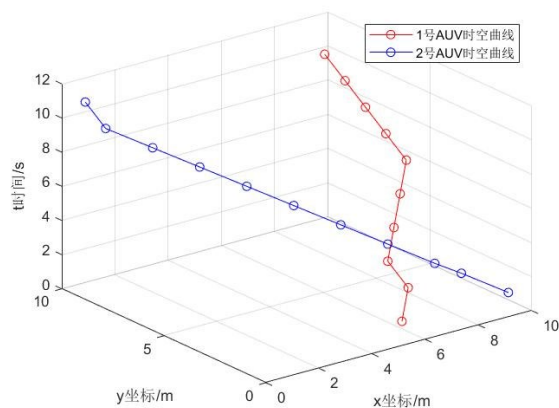
碰撞类型	AUV	起始点 <i>Start</i>	目标点 <i>End</i>
无碰撞	AUV <sub>1</sub>	(6,1)	(10,10)
	AUV <sub>2</sub>	(10,1)	(1,10)
侧碰	AUV <sub>1</sub>	(1,1)	(10,10)
	AUV <sub>2</sub>	(1,4)	(10,7)
对碰	AUV <sub>1</sub>	(1,4)	(10,8)
	AUV <sub>2</sub>	(9,6)	(1,8)

#### 4.5.2 仿真实验结果分析

图 4.11 表示无碰撞情况；图 4.12 表示侧碰情况；4.13 表示对碰情况。图 4.11 a)表示两 AUV 的最终行驶路线，图 4.11 b)表示两个 AUV 的时空状态图，该图可清楚的表示位置和时间信息。图 4.11 b)时空状态图中曲线不存在交叉现象，所以两个 AUV 没有发生碰撞冲突。



a) 二维位置信息图



b) 三维时空状态图

图 4.11 无碰撞情况下仿真

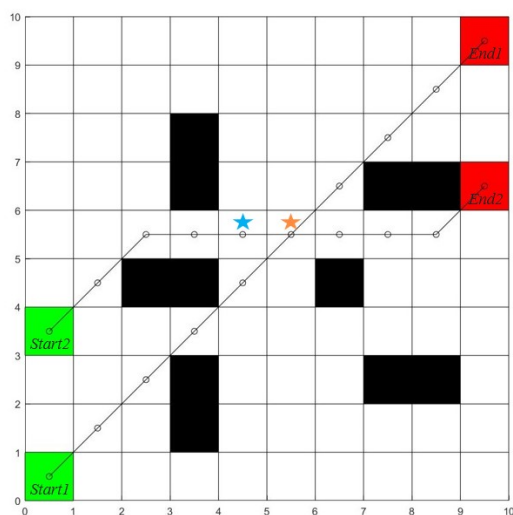
无碰撞情况的最终运行实验结果如表 4.2 所示，由表中数据可以知道AUV<sub>1</sub>和AUV<sub>2</sub>的初始能耗和最终能耗相等，各 AUV 都能沿着全局规划的路线从起始点运行至目标点位置。



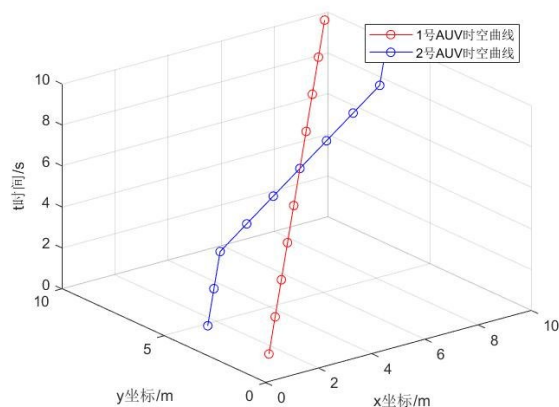
表 4.2 无碰撞情况实验结果

AUV	起始点	目标点	初始能耗/ 焦耳	最终能耗/ 焦耳	暂停次数
AUV <sub>1</sub>	(6,1)	(10,10)	130.75	130.75	0
AUV <sub>2</sub>	(10,1)	(1,10)	163.34	163.34	0

侧碰仿真实验结果如图 4.12 所示，AUV<sub>1</sub>和AUV<sub>2</sub>在坐标(6,6)的栅格点发生侧碰（图 4.12 a)中标注橙色五角星的栅格）。根据预约表的优先级关系（AUV<sub>1</sub> > AUV<sub>2</sub>），AUV<sub>2</sub>需要进行暂避处理，因此AUV<sub>2</sub>在(5,6)的栅格点（图 4.12 a)中标注蓝色五角星的栅格）处暂停了一个单位步长。由图 4.12 b)可知，两个 AUV 的时空状态曲线发生交叉，并且在 $t_5$ 时刻即第五步发生碰撞。经过局部优化处理，冲突消解后的时空状态图如图 4.13 所示，从图中可以看出在 $t_4$ 、 $t_5$ 时刻AUV<sub>2</sub>的位置没有发生改变，随着时空状态曲线在 $t_4$ 、 $t_5$ 时刻呈垂直上升趋势，避免了和AUV<sub>1</sub>的时空状态曲线交叉，故AUV<sub>2</sub>在 $t_5$ 时刻成功避开了和AUV<sub>1</sub>相碰撞。



a) 二维位置信息图



b) 三维时空状态图

图 4.12 侧碰情况下仿真

侧碰情况的实验结果如下表 4.3 所示，从表中数据可以得知AUV<sub>1</sub>的初始能耗和最终能耗没有变化。因为AUV<sub>2</sub>在栅格(5,6)暂停了一个时间单位，大部分能耗用于悬停，故最终能耗比初始能耗高了 11 焦耳。

表 4.3 侧碰情况实验结果

AUV	起始点	目标点	初始能耗/ 焦耳	最终能耗/ 焦耳	暂停栅格	暂停次数
AUV <sub>1</sub>	(1,1)	(10,10)	156.15	156.15	---	0
AUV <sub>2</sub>	(1,4)	(10,7)	125.67	136.67	(5,6)	1

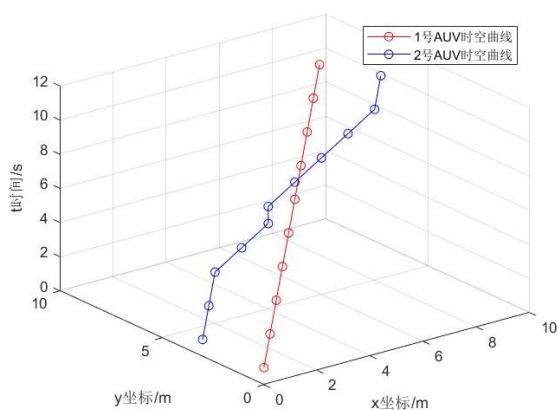
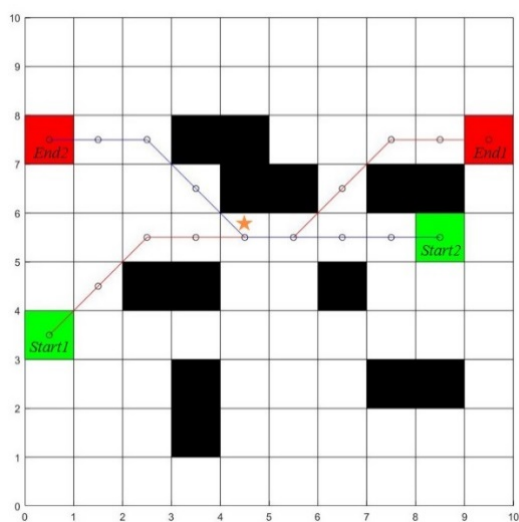
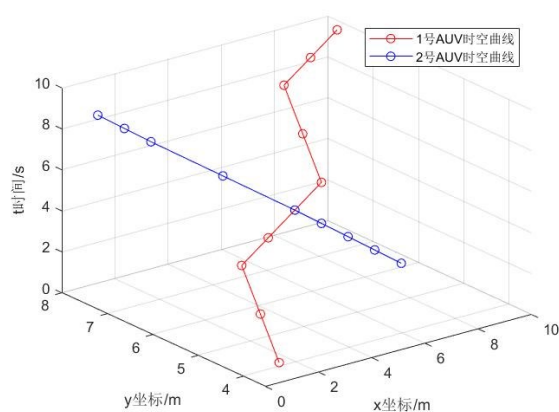


图 4.13 消解侧碰后的时空图

对碰实验结果如图 4.14 所示，由图 4.14 a)可知AUV<sub>1</sub>和AUV<sub>2</sub>在坐标(5,6)的栅格点发生对碰（图 4.14 a)中标注橙色五角星的栅格），对应的时空状态图如图 4.14 b)所示，两个 AUV 在 $t_4$ 时刻发生交叉即在 $t_4$ 时刻发生了碰撞冲突。对碰冲突消解后的路径如图 4.15，其中坐标(6,5)的栅格点(图 4.15 a)中标注蓝色往返标志的栅格)表示为暂避栅格，即AUV<sub>2</sub>需要在 $t_3$ 时刻移动到暂避栅格并停留一个单位时间后回到原始位置，再按照原路运行，在此期间AUV<sub>1</sub>按照原路运行。对碰消解后的时空状态图如图 4.15 b)所示，可以清楚地看到AUV<sub>2</sub>在 $t_3$ 和 $t_4$ 时刻位置相比碰撞消解前发生了变化，同时 $t_4$ 和 $t_5$ 时刻位置没有变化，这避免了和AUV<sub>1</sub>的时空状态曲线交叉。因此AUV<sub>2</sub>成功消解了与AUV<sub>1</sub>发生的对碰，实现了多 AUV 协同路径规划，验证了局部路径优化规则的有效性和可靠性。

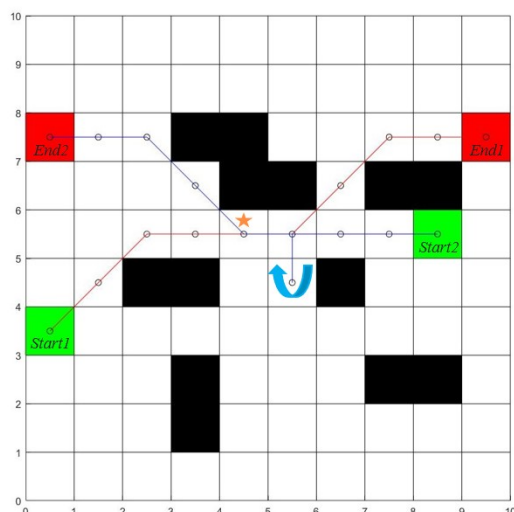


a) 二维位置信息图

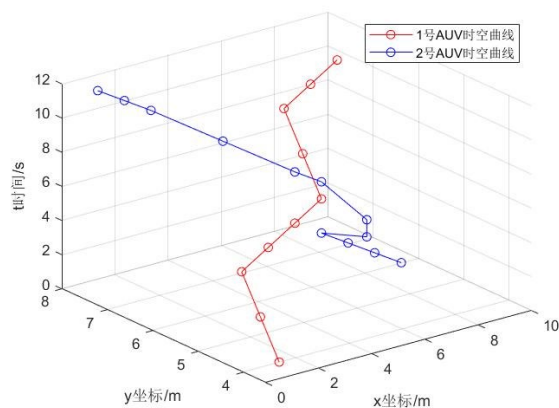


b) 三维时空状态图

图 4.14 对碰情况下仿真



a) 二维位置信息图



b) 三维时空状态图

图 4.15 消解对碰后的仿真结果

对碰情况的实验结果如下表所示。从表中数据可知，AUV<sub>1</sub>的初始能耗和最终能耗都没有变化，这是因为在预约表中AUV<sub>1</sub>优先级更高。AUV<sub>2</sub>的能耗增加了 35.54 焦耳，为了消解对碰冲突，AUV<sub>2</sub>在栅格(6,5)进行了暂避。

表 4.4 对碰情况实验结果

AUV	起始点	目标点	初始能耗/ 焦耳	最终能耗/ 焦耳	碰撞处理	暂停次数
AUV <sub>1</sub>	(1,4)	(10,8)	130.75	130.75	---	0
AUV <sub>2</sub>	(9,6)	(1,8)	108.32	143.86	(6,6) → (6,5) → (6,6)	1

综上所述，基于改进 A\*算法融合局部优化规则，可以解决多 AUV 协同路径规划问题。

## 4.6 本章小结

本章设计了基于改进 A\*算法与局部路径优化规则融合的两阶段规划算法。该算法大致分为两个部分，第一部分用改进 A\*算法寻找出每个 AUV 的全局最优路径。第二部分，执行任务前对可能产生冲突的交叉点进行局部优化，并在运行过程中扫描安全范围内可能产生的碰撞对其进行局部优化。局部优化规则包含了不同类型的碰撞，对每类碰撞进行了仿真实验，实验结果验证了局部优化能够有效消除 AUV 之间的碰撞冲突，也表明了基于改进 A\*算法融合局部优化规则的两阶段算法的可行性。

## 第 5 章 动态环境下多 AUV 协同路径规划

本章在上一章的基础上，引入了局部动态路径规划。动态环境下的多 AUV 协同路径规划，不仅要躲避与静态障碍物和 AUV 之间的碰撞，还要躲避与动态障碍物的碰撞，优化的问题复杂度将大大提高。人工势场法依据传感器实时测量的信息进行局部路径规划，局部避障能力优异，但存在局部最优的缺点，无法满足全局路径规划的要求。

针对动态环境下多 AUV 协同路径规划，引入了局部动态路径规划来躲避动态障碍物。提出了改进的人工势场法，在传统人工势场法的基础上加入了一条可以对 AUV 产生引力的期望路径，称为“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。因此本章将设计混合路径规划算法，改进的 A\* 算法融合局部优化规则进行全局路径规划，AUV 沿着全局路径检测到动态障碍物时，改进人工势场法进行局部路径规划。

### 5.1 传统人工势场法概述

人工势场法可用不同的势场函数表示，但原理基本都是类似的。其中最常用的势场法是梯度势场法<sup>[20]</sup>，用 AUV 受到势场的负梯度作为 AUV 受到的虚拟力。目标点对 AUV 产生吸引力，障碍物对 AUV 产生排斥力，AUV 在合力的作用下从起点运动到目标点<sup>[21]</sup>。

利用常见的静电场势场模型定义引力势场函数如下所示：

$$U_{att}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\xi d^2(q, q_{goal}) & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ d_{goal}^*\xi d(q, q_{goal}) - \frac{1}{2}\xi(d_{goal}^*)^2 & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases} \quad (5-3)$$

式中， $\xi$  是引力增益； $d(q, q_{goal})$  表示当前位置到目标点的距离；对其求负梯度即可得到引力：

$$\bar{F}_{att}(q) = \begin{cases} -\xi d(q, q_{goal}) & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ -d_{goal}^*\xi & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases} \quad (5-4)$$

引力势场是个分段函数，当  $d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^*$  时，引力势能大小与当前位置到目标位置距离的平方成正比；当  $d(q, q_{goal}) > d_{goal}^*$  时，限制了引力势能的大小，防止远离目标点时引力过大的问题。

利用常见的静电场势场模型定义斥力势场函数如下所示：

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*} \right)^2 & D(q) \leq Q^* \\ 0 & D(q) > Q^* \end{cases} \quad (5-5)$$

对其求负梯度即可得到斥力：

$$\bar{F}_{rep}(q) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*} \right) \frac{1}{D^2(q)} \nabla D(q) & D(q) \leq Q^* \\ 0 & D(q) > Q^* \end{cases} \quad (5-6)$$

式中 $D(q)$ 是距离最近障碍物的距离； $\eta$ 是斥力增益； $Q^*$ 代表障碍物作用范围，在该范围内，障碍物存在斥力，反之则不产生斥力影响；

最终合力由引力和斥力决定，可以用公式(5-7)表示：

$$\bar{F}(q) = \bar{F}_{att}(q) + \bar{F}_{rep}(q) \quad (5-7)$$

## 5.2 改进人工势场法

传统人工势场法由斥力场和引力场组成，但实际情况下环境信息不断变化<sup>[22]</sup>，如果能够利用全局路径规划后的路径信息，那么优化性能将大大提升。本章将引入一条期望路径对 AUV 产生吸引力的势场函数，即“线势场”，线势场中的期望路径是由全局路径规划后的路径分解得到。

改进后人工势场法的斥力势场不变，引力由位置场和线势场两部分组成，其中线势场公式如下：

$$U_{line}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\xi d^2(q, q_{line}) & d(q, q_{line}) \leq d_{line}^* \\ d_{line}^* \xi d(q, q_{line}) - \frac{1}{2}\xi (d_{line}^*)^2 & d(q, q_{line}) > d_{line}^* \end{cases} \quad (5-8)$$

式中 $q_{line} = (x_0, r(x_0))^T$ ，其中 $r(x)$ 为曲线方程， $(x_0, r(x_0))$ 表示曲线上到 AUV 当前位置最近的点的位置坐标，随着 AUV 的移动该坐标也会相应变化。改进的人工势场法中引力场如公式(5-9)所示：

$$U_{att}(q) = \alpha_q U_{goal}(q) + \alpha_l U_{line}(q) \quad (5-9)$$

式中 $\alpha_q$ 和 $\alpha_l$ 分布代表引力势场中目标点和期望路线的权重，本文中 $\alpha_q$ 和 $\alpha_l$ 都取 0.1。对引力势场 $U_{att}(q)$ 求负梯度可推得相应的吸引力 $\bar{F}_{att}(q)$ 如下所示：

$$\begin{aligned} \bar{F}_{att}(q) &= -\nabla U_{att}(q) = \alpha_q \bar{F}_{goal}(q) + \alpha_l \bar{F}_{line}(q) \\ &= \begin{cases} -\alpha_q \xi d(q, q_{goal}) - \alpha_l \xi d(q, q_{line}) & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^*, d(q, q_{line}) \leq d_{line}^* \\ -\alpha_q d_{goal}^* \xi - \alpha_l \xi d(q, q_{line}) & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^*, d(q, q_{line}) \leq d_{line}^* \\ -\alpha_q \xi d(q, q_{goal}) - \alpha_l d_{line}^* \xi & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^*, d(q, q_{line}) > d_{line}^* \\ -\alpha_q d_{goal}^* \xi - \alpha_l d_{line}^* \xi & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^*, d(q, q_{line}) > d_{line}^* \end{cases} \quad (5-10) \end{aligned}$$

式中， $d_{goal}^*$ 和 $d_{line}^*$ 分别表示目标点和期望路线引力的作用范围； $\xi$ 是引力增益；

$d(q, q_{goal})$ 为当前位置到目标点的距离； $d(q, q_{line})$ 表示在期望路线上的任意一点到当前位置最小的距离； $\bar{F}_{goal}(q)$ 和 $\bar{F}_{line}(q)$ 分别表示目标点和期望路线的引力，吸引力的方向由两者的矢量和决定，见图 5.1 所示。

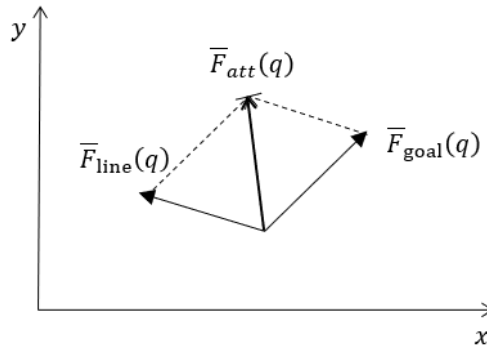


图 5.1 引力的矢量和

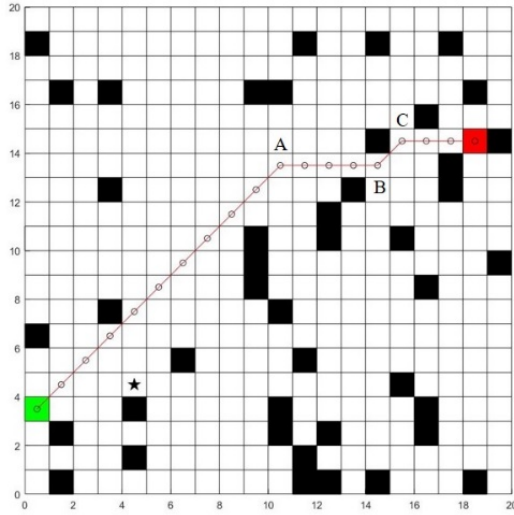
当全局期望路线为曲线时，可将曲线拆分为多条直线分别处理。找到曲线上的拐点，AUV 利用这些拐点作为局部起点和目标点，此时 AUV 会受到局部目标点和期望直线的线势场的引力作用。

### 5.3 动态环境下多 AUV 协同路径规划仿真

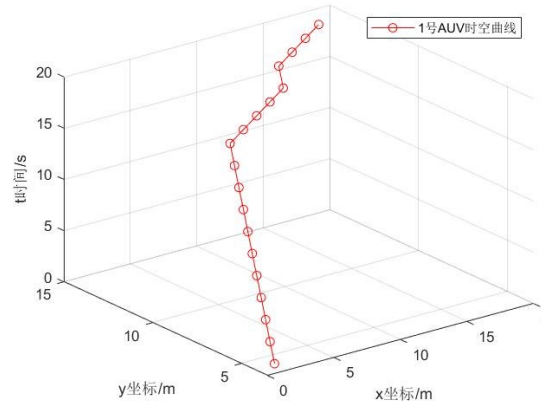
为了验证局部动态规划算法的可行性，建立如图 5.2 所示的仿真环境。采用  $20 \times 20$  的栅格地图对环境进行划分，静态障碍物采用黑色栅格表示，动态障碍物采用黑色五角星表示，为方便分析将仿真环境中 AUV 抽象为质点，并采用拐点作为局部目标点。AUV 起始坐标为(1,4)，速度为  $v = 1\text{ms}^{-1}$ ，目标点为(19,15)。静态障碍物的分布如图 5.2 a) 所示，动态障碍物  $Dobs_1$  在时刻  $t = 0\text{s}$  同样以速度  $v = 1\text{ms}^{-1}$  从坐标(5,5)移动到坐标(5,10)。图 5.2 (a-d)展示了针对单 AUV 动态路径规划仿真过程，图 5.2 c)为针对单 AUV 最终动态规划的路径。

图 5.2 a)为改进 A\*算法的全局路径规划阶段。如图 5.2 d)为动态规划后的时空状态曲线，在  $t = 2\text{s}$  时刻，AUV 与从坐标(5,5)出发的动态障碍物  $Dobs_1$  相遇，此时 AUV 受

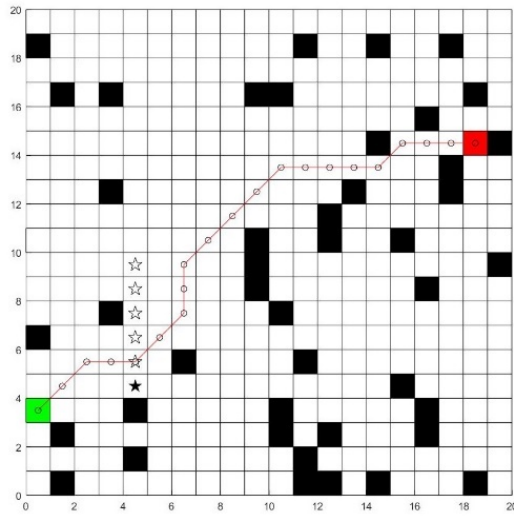
到障碍物的排斥力势场，局部目标点的引力势场（图 5.2 a)中 A 点为局部目标点）和期望路线的线势场作用。最终 AUV 在合力作用下完成动态避障作业，沿着期望路线向目标点运动。



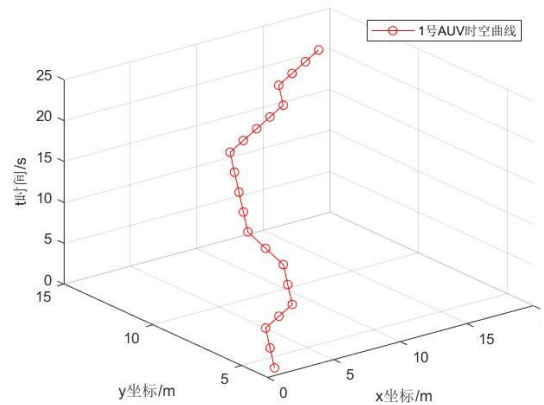
a) 动态规划前二维位置信息图



b) 动态规划前三维时空状态图



c) 动态规划后二维位置信息图



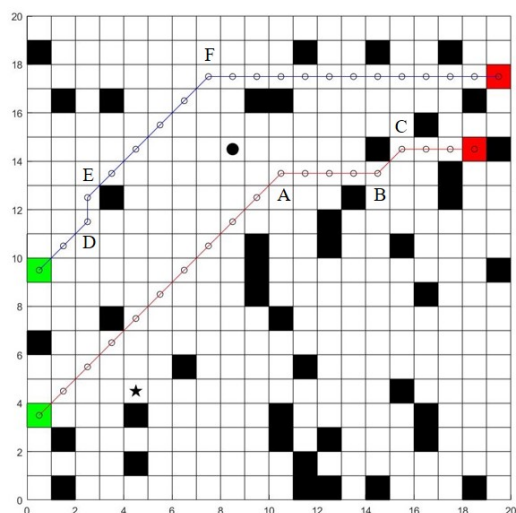
d) 动态规划后三维时空状态图

图 5.2 改进人工势场法规划效果

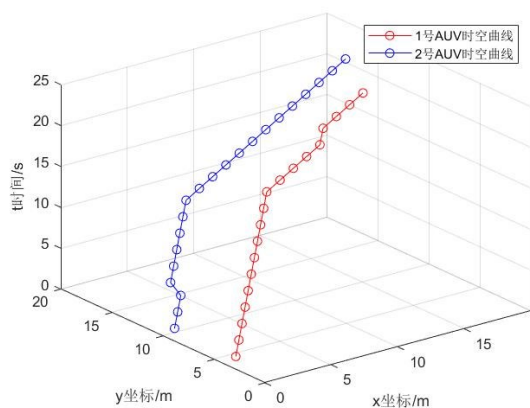
若工作空间中存在多个 AUV 协同作业的情况时，建立如图 5.3 所示的仿真环境。AUV<sub>1</sub> 起始坐标为(1,4)，速度为  $v = 1\text{ms}^{-1}$ ，目标点为(19,15)；AUV<sub>2</sub> 起始坐标为(1,10)，速度为  $v = 1\text{ms}^{-1}$ ，目标点为(20,18)。静态障碍物的分布如图 5.3 a)所示，动态障碍物  $Dobs_1$  在时刻  $t = 0\text{s}$  以速度  $v = 1\text{ms}^{-1}$  从坐标(5,5)移动到坐标(5,10)；动态障碍物  $Dobs_2$  在时刻  $t = 0\text{s}$  以速度  $v = 1\text{ms}^{-1}$  从坐标(9,15)移动到坐标(5,10)。图 5.3 (a-d)展示了利用改进人工势场法的动态路径规划仿真过程，图 5.3 c)为最终动态规划的路径。



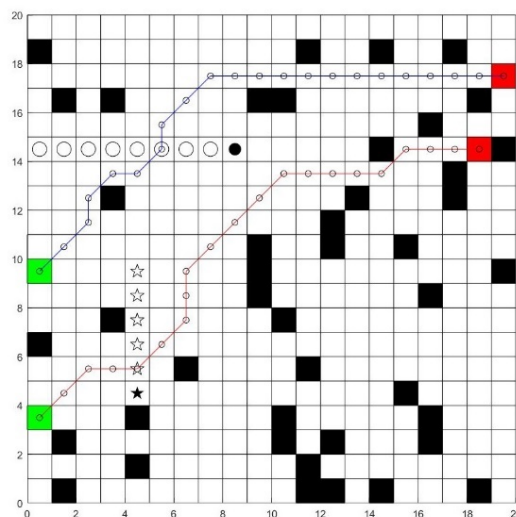
图 5.3 a)为全局路径规划阶段，仅考虑原始地图情况下每个 AUV 的全局路径。如图 5.3 d)为动态规划后的时空状态曲线，在 $t = 2s$ 时刻，AUV<sub>1</sub> 与从坐标(5,5)出发的动态障碍物 $Dobs_1$ 相遇；在 $t = 4s$ 时刻，AUV<sub>1</sub> 与从坐标(9,15)出发的动态障碍物 $Dobs_2$ 相遇。此时两个 AUV 受到障碍物的排斥力势场，局部目标点的引力势场（图 5.3 a)中 A 点和 F 点分别为 AUV<sub>1</sub> 和 AUV<sub>2</sub> 的局部目标点）和期望路线的线势场作用。最终两个 AUV 在合力作用下完成动态避障作业，沿着各自的期望路线向目标点运动。



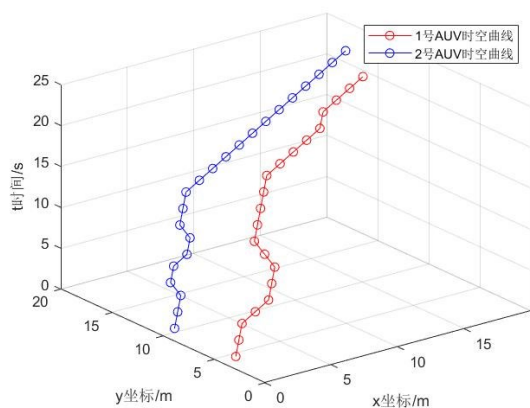
a) 动态规划前二维位置信息图



b) 动态规划前三维时空状态图



c) 动态规划后二维位置信息图



d) 动态规划后三维时空状态图

图 5.3 动态环境下多 AUV 协同路径规划仿真

## 5.4 本章小结

本章首先介绍了人工势场法的主要思想，在传统势场法的基础上引入了一条对 AUV



产生引力场的期望路径，即“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。并提出了一种多 AUV 协同路径规划的两阶段算法，第一阶段，实现每个 AUV 的全局路径规划；第二阶段，采用改进人工势场法和局部优化实现与动态障碍物和 AUV 之间的碰撞消解。

## 结 论

AUV 不同于普通机器人，它工作在环境复杂的深海，其动力学模型都是一个复杂的强耦合、非线性、时变、多输入多输出的系统，不仅涉及六自由度，还需要考虑水动力载荷（Hydrodynamic Loads）问题。当利用 AUV 处理一些复杂的水下任务时，单 AUV 很难满足任务的需求，如果考虑到动态环境时，求解的问题复杂性将大大提高。

针对这种问题，本文以 AUV 为研究对象，主要研究多 AUV 协同路径规划。改进的 A\*算法对每个 AUV 规划出全局期望路径，局部优化算法用来处理各类碰撞问题。同时设计了消解 AUV 间碰撞的优化规则，最后提出改进的人工势场法用来躲避动态障碍物。主要的研究内容如下：

1) 为了解决 AUV 嵌入式能源不足的问题，对 A\*算法进行了改进，利用 AUV 的动力学模型构建能耗代价函数。

2) 针对静态环境下多 AUV 协同路径规划，在传统 A\*算法的基础上加入了时间维度，提出了时空 A\*算法。提出消解 AUV 间碰撞的优化规则，并建立预约表的形式给予每个 AUV 优先级。最终采用时空 A\*算法和局部优化的两阶段算法求解出静态环境下多 AUV 协同路径问题。

3) 针对动态环境下多 AUV 协同路径规划，引入了局部动态路径规划来躲避动态障碍物。改进了人工势场法，在传统人工势场法的基础上加入了一条可以对 AUV 产生引力的期望路径，称为“线势场”。由于线势场的提出，动态规划阶段可以充分考虑到已经规划好的全局路径信息。提出了一种多 AUV 协同路径规划的两阶段算法，并通过仿真验证了其有效性。

## 参考文献

- [1] 张贡生. 我国区域协调发展战略的演进逻辑[J]. 经济问题, 2018(03): 7-13.
- [2] 付成英. 基于分布式控制的水下机器人设计[D]. 广东工业大学, 2020.
- [3] 孟中祥, 刘时圆, 吕珍斌. 多 AUV 集群控制技术综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(06): 509-515.
- [4] 张炳生. 水下声学高精度定位算法的研究[D]. 长安大学, 2019.
- [5] 段益琴. 基于多目标优化的多机器人路径规划研究[D]. 重庆邮电大学, 2020.
- [6] 游晓明, 刘升, 吕金秋. 一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(03): 552-556.
- [7] 何娟, 涂中英, 牛玉刚. 一种遗传蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(03): 170-174.
- [8] Dewang H S, Mohanty P K, Kundu S. A Robust Path Planning For Mobile Robot Using Smart Particle Swarm Optimization[C]. 1st International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa), 2018: 290-297.
- [9] 许源. 结合粒子群算法和改进人工势场法的移动机器人混合路径规划[D]. 浙江大学, 2013.
- [10] 单文昭. 多平台反舰导弹协同突防任务规划方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [11] 王红卫, 马勇, 谢勇, et al. 基于平滑 A\*算法的移动机器人路径规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 1647-1650+1655.
- [12] 任建华, 李文超, 赵凯龙, et al. 移动机器人路径规划方法研究[J]. 机电技术, 2019(04): 26-29.
- [13] 任彦, 赵海波. 改进人工势场法的机器人避障及路径规划[J]. 计算机仿真, 2020, 37(02): 360-364.
- [14] 韩知玖, 吴文江, 李孝伟, et al. 一种改进的动力学约束人工势场法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(06): 879-887.
- [15] Ji D X, Wang R, Zhai Y Y, et al. Dynamic modeling of quadrotor AUV using a novel CFD simulation[J]. Ocean Engineering, 2021, 237.
- [16] 夏清松. 复杂环境下多移动机器人协同路径规划[D]. 武汉科技大学, 2019.
- [17] 路世杰. 机器人协同任务规划方法研究[D]. 大连理工大学, 2018.
- [18] 宣仁虎. 基于改进 A\*算法和人工势场法智能小车路径规划研究[D]. 西安电子科技大学, 2019.
- [19] 吴小平. 多 AUV 协调控制技术研究[D]. 上海交通大学, 2008.
- [20] 林洁, 张志安. 改进人工势场法的路径规划研究[J]. 机械与电子, 2022, 40(03): 65-70+75.
- [21] 李杨. AUV 空间运动自主行为学习与规划[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.

- [22] 占银. 基于蚁群算法和人工势场法的水下机器人路径规划研究[D]. 吉林大学, 2020.

## 致 谢

时光荏苒，依稀记得一年前送学长学姐离校的场景，现在到了自己要毕业的时候了。经过这几个月的努力，我的毕业设计终于圆满结束，这也标志着我四年的本科生涯即将画上句号。在这里，我想对帮助过我的导师和同学表达由衷的感谢。

首先，我想感谢我尊敬的导师陈立家副教授。陈老师学识渊博、治学严谨，大学期间，我在陈老师的实验室收获了许多，学到了很多本科课程之外的内容，这对我毕业设计的完成以及今后的研究生生涯都有很大的帮助。从懵懂无知到终于有了明确目标，陈老师功不可没。

其次，我想感谢曾经帮助过我的敖天勇老师。我们在一次竞赛中认识，大三有幸跨专业选到了老师的课，敖老师为人低调谦和，课堂上教学细致负责、课堂气氛轻松融洽。我遇到了很多困难，有许多问题我无法解决，老师会十分热心，耐心地给我讲解，教会了我很多方法，给了我很大的帮助。

最后我想感谢我的母亲和朋友们，他们都给了我很大的精神动力，陪我度过了最艰难的时光，谢谢你们一路给我的理解、支持和关爱。

最后感谢在百忙之中抽出时间评阅我的论文的专家和学者们。

聂雪松

二零二二年四月