

# 水下采矿机器人 环境建模及路径规划技术研究

史春雪 著



化学工业出版社

式参数和初始位置共同决定机器人位置。由于在海洋环境中，由海洋平台下... 式参数和初始位置共同决定机器人位置。由于在海洋环境中，由海洋平台下... 式参数和初始位置共同决定机器人位置。由于在海洋环境中，由海洋平台下...

# 水下采矿机器人 环境建模及路径规划技术研究

史春雪 著

① 提出一种矿区大尺度环境建模方法... ② 提出一种基于改进遗传算法的... ③ 提出了一种基于改进遗传算法的...



化学工业出版社

本书主要研究水下采矿机器人在复杂环境中的路径规划问题... 北京

本书主要由5部分内容所组成：①对海底环境，建立一种针对不同类底质的环境建模方法；②通过几种具体算法的融合以及问题的转换，提出一种海底矿区大尺度遍历路径规划方法；③提出基于改进蚁群算法的采矿机器人静态路径规划方法，为采集路线在小范围的具体化提出实现方案；④提出了基于改进滚动窗口法的采矿机器人动态路径规划方法，通过证明算法的收敛性和全局次优性，证明水下大范围路径规划是可行的；⑤对采矿机器人在线路径规划系统进行实车实验，通过实验过程及结果分析，证明该系统是可行的。

本书可以作为机器人控制、水下资源采集与开发、海洋工程等相关专业的教师及研究人员参考。

# 水下采矿机器人

## 环境建模及路径规划技术研究

史春雪 著

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水下采矿机器人环境建模及路径规划技术研究/  
史春雪著. —北京: 化学工业出版社, 2017.11  
ISBN 978-7-122-30683-8

I. ①水… II. ①史… III. ①水下作业机器人-  
研究 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 239188 号

责任编辑: 徐一丹 朱理  
责任校对: 边涛

装帧设计: 韩飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印 装: 北京科印技术咨询服务公司海淀数码印刷分部  
710mm×1000mm 1/16 印张9¼ 字数176千字 2017年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

本书所对应的研究是在国务院大洋专项的支持下，是“钻结壳采集模型机关键技术及装备研究”项目的一项重要内容。作者在查阅国内外大量相关文献的基础上，对海底采矿机器人路径规划问题相关的海底矿区环境建模问题、海底大尺度遍历路径规划问题、海底采矿机器人静态路径规划问题和海底采矿机器人动态路径规划问题进行了深入并系统的研究，主要的内容如下。

① 对海底环境，提出了一种针对不同类底质的环境建模模型。海底 DEM 数据，提取地形几何特征，得到了海底环境四维混合属性数据；通过模糊推理的方法，获得不同类底质地形的通行性指数；并通过设置综合通行性代价函数，对不同底质地形的通行性进行有效整合，得到了环境可通行性地图，为路径规划研究提供了模型基础。

② 提出一种矿区大尺度遍历路径规划方法。首先设置遍历路径规划的性能评价函数，通过对评价函数的计算，确定平坦地形往复式采集的方式；后用 Boustrophedon 方法对矿区环境进行子区域划分；为可采子域之间建立综合连通距离矩阵，将子域连接问题转化为 TSP 问题，通过蚁群算法求解，达到最大覆盖率的优化目标；对于非相邻可采子域之间的局部路径搜索问题，将其转化为 SPP 问题，通过 Floyd 算法求解，满足了最小重复率的要求；最后提出矿区大尺度遍历路径规划算法。

③ 提出基于改进蚁群算法的采矿机器人静态路径规划方法。首先指出遍历路径中存在连接路径和采集路径两种路径；之后本着实时性要求对基本蚁群算法进行改进，对环境模型膨化后，提出了采矿机器人静态路径规划的改进蚁群算法，并证明了算法的收敛性；依据两种路径的不同要求，分别设置不同的启发函数和适应度函数，提出两种静态路径规划的改进蚁群算法。

④ 提出了基于改进滚动窗口法的采矿机器人动态路径规划方法。首先提出算法；之后按照 A\* 算法的思想，确定子目标选取的方法；证明了算法的收敛性；并且证明了滚动规划的全局次优性，且行走优化系数  $\gamma$  的设置能够提高算法的优化性能。

⑤ 对采矿机器人在线路径规划系统进行实车实验，通过实验过程及结果分

析，证明该系统是可行的。

本书在撰写过程中得到了长沙学院机电工程学院“湖南省十三五重点建设学科”——“机械设计及理论”和长沙学院硕士点建设学科“机械工程”的大力支持。并感谢中南大学机电工程学院海洋实验室相关课题组老师及同学的大力支持。

同时，本书在撰写过程中，参考了许多机器人控制、矿业资源开发、海洋工程等领域相关的技术文献，对于文献作者为推进我国机器人学的发展所作表示敬佩，并借此机会向他们表示由衷的谢意！

限于作者水平和实际经验有限，书中不足和错漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

著者

2017年8月

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 本书背景与意义	1
1.1.1 本书研究的背景	1
1.1.2 本书研究的意义	2
1.2 水下机器人路径规划的特点及要求	3
1.2.1 水下采矿区地形的特殊性	3
1.2.2 我国调查区内地形特点	5
1.2.3 水下机器人路径规划的类型及特点	6
1.2.4 水下机器人路径规划的要求	6
1.3 国内外路径规划技术的研究现状	7
1.3.1 环境建模技术研究进展	7
1.3.2 遍历路径规划技术的研究进展	9
1.3.3 全局静态规划技术的研究进展	11
1.3.4 动态路径规划技术的研究进展	13
1.4 本书的主要研究内容和技術路线	15
1.4.1 本书主要研究內容	15
1.4.2 本书技术路线	16
第 2 章 水下钻结壳矿区环境建模研究	18
2.1 引言	18
2.2 水下 DEM 模型的表达	19
2.2.1 水下 DEM 模型	19
2.2.2 DEM 模型的栅格化	21
2.3 地形几何特征提取	22
2.3.1 地形坡度的提取	22
2.3.2 地形起伏度的提取	23
2.3.3 地形粗糙度的提取	24
2.3.4 DEM 的混合属性表达	25
2.4 地形通行性评估	26
2.4.1 钻结壳底质地形通行性评估	27
2.4.2 基岩底质地形通行性评估	31
2.4.3 水下泥沙砾底质地形通行性评估	32

2.5	水下采矿区环境建模 .....	33
2.5.1	通行代价函数的设置 .....	33
2.5.2	不同区域的划分 .....	34
2.5.3	水下钻结壳采矿区环境建模算法 .....	35
2.5.4	栅格尺度的选择 .....	35
2.6	仿真及实验研究 .....	36
2.6.1	含底质类 DEM 数据的获取 .....	36
2.6.2	环境建模实验 .....	38
2.7	本章小结 .....	41
<b>第 3 章</b>	<b>水下矿区大尺度遍历路径规划研究 .....</b>	<b>42</b>
3.1	引言 .....	42
3.2	遍历采集性能评价及相关定义 .....	42
3.2.1	机器人遍历路径规划的性能评价 .....	42
3.2.2	机器人遍历路径规划的相关描述 .....	44
3.3	可采子域内部行走方式研究 .....	45
3.3.1	现有子域内部行走方式 .....	45
3.3.2	机器人子域内部行走方式的确定 .....	47
3.4	可采子域划分方式研究 .....	48
3.4.1	现有子域划分方式 .....	48
3.4.2	水下矿区子域的划分 .....	48
3.5	可采子域连接方式研究 .....	51
3.5.1	蚁群算法的 TSP 问题模型 .....	52
3.5.2	可采子域综合连通距离矩阵的求取 .....	53
3.5.3	可采子域连接的蚁群算法 .....	59
3.5.4	局部最优路径的求取 .....	60
3.6	水下矿区遍历路径规划算法研究 .....	60
3.6.1	算法相关定义 .....	60
3.6.2	算法步骤 .....	61
3.6.3	算法流程 .....	62
3.7	仿真实验 .....	63
3.7.1	仿真实验 1 .....	63
3.7.2	仿真实验 2 .....	65
3.8	本章小结 .....	67
<b>第 4 章</b>	<b>基于改进蚁群算法的机器人静态路径规划研究 .....</b>	<b>69</b>
4.1	引言 .....	69
4.2	完全遍历路径的组成 .....	69

4.3 水下机器人静态路径规划的改进蚁群算法 .....	70
4.3.1 蚁群算法的改进 .....	71
4.3.2 环境模型的膨化 .....	75
4.3.3 问题描述及相关定义 .....	76
4.3.4 静态路径规划的改进蚁群算法步骤 .....	78
4.3.5 算法收敛性分析 .....	80
4.4 基于改进蚁群算法的机器人连接路径规划 .....	85
4.4.1 启发函数设计 .....	86
4.4.2 适应度函数设计 .....	86
4.4.3 仿真实验 .....	87
4.5 基于改进蚁群算法的机器人采集路径规划 .....	90
4.5.1 启发函数设计 .....	91
4.5.2 适应度函数设计 .....	92
4.5.3 仿真实验 .....	92
4.6 本章小结 .....	95
<b>第5章 基于改进滚动窗口法的机器人动态路径规划研究</b> .....	<b>96</b>
5.1 引言 .....	96
5.2 水下机器人动态路径规划的改进滚动窗口法 .....	96
5.2.1 问题描述及相关定义 .....	97
5.2.2 算法步骤 .....	100
5.2.3 子目标点的选取方法 .....	102
5.3 算法收敛性分析 .....	104
5.4 算法优化性能分析 .....	106
5.4.1 滚动规划优化性能分析 .....	106
5.4.2 行走优化系数 $\gamma$ 的优化性能分析 .....	110
5.5 仿真分析 .....	111
5.5.1 行走优化系数 $\gamma$ 的优化性能仿真 .....	111
5.5.2 算法可行性验证仿真 .....	113
5.6 本章小结 .....	117
<b>第6章 机器人在线路径规划系统实车实验</b> .....	<b>118</b>
6.1 引言 .....	118
6.2 实车实验 .....	118
6.2.1 实验目的 .....	118
6.2.2 实验环境 .....	118
6.2.3 实验硬软件组成 .....	119
6.2.4 实验过程 .....	121





# 第 1 章 概 述

## 1.1 本书背景与意义

### 1.1.1 本书研究的背景

海洋是人类巨大的共同资源宝库，蕴藏有丰富的矿产资源，其中富钴结壳、热液硫化物、多金属结核中 Co、Ni、Cu、Mn 等重要金属的含量是陆地矿区相应含量的数十乃至数百倍，而天然气水合物含量相当于地球上煤、石油、天然气总储量的两倍多<sup>[1]</sup>，这些种类的新型资源具备很好的商业应用前景，被称作 21 世纪人类可持续发展战略的接替能源<sup>[2~5]</sup>。

钴结壳是大洋底部最具有吸引力的矿产资源之一，其主要生长在水深 800~2400m 的水下，其平均厚度仅为 4~6cm，富含钴、铂、镍、锰、磷、钛、锌、铅、铈、铜、铁等战略金属元素。新近的调查表明，在 500~3500m 水深范围内也有结壳发现，最深处甚至超过 4000m<sup>[6~9]</sup>。钴结壳中钴的平均含量一般都大于 0.5%，平均达到 0.8%~1.2%，最高可至 2%<sup>[10]</sup>，是多金属结核中钴含量的 4 倍。钴的平均含量较陆地矿区高几十倍，铂则高于陆地矿床的 80 倍。陆地钴的矿区含钴量很小，通常不大于 0.1%，只就钴的含量而言，在陆地上还没有类似矿床<sup>[11]</sup>。

自 20 世纪 80 年代初以来，由于钴结壳所具备的海洋强国的政治意义、重大战略意义，加上巨大的经济价值（Co 的价值就高于结核中 Mn、Ni、Cu 的价值之和，是 Mn 的 30 倍），钴结壳已成为大洋矿产资源开发、研究的热点<sup>[12]</sup>，各国纷纷加速了钴结壳的商业开采研究步伐。西方发达国家纷纷将勘查的重点继多金属结核勘查之后，放在了钴结壳上。经过多年的前期理论研究，目前西方国家已经在钴结壳的勘探开采方法、开采设备研制以及输送工艺与装备等方面，取得了具有工程实用价值的研究成果<sup>[13~21]</sup>。

与西方发达国家相比，我国对钴结壳矿产资源的勘探开采研究工作起步较晚。为维护我国海洋权益，依据国际上对海洋争夺的形势，推进我国国际水下区域矿产资源研究开发事业，提高我国的核心竞争力，中国大洋矿产资源研究开发协会（COMRA）调整了战略目标，提出“发展海洋技术，坚持资源开发，适时建立海洋产业”的目标。将以在合同区的多金属结核勘探工作为主导，调整为以富钴结壳矿区为主导，多种资源并举的新战略。随着国家对海生资源的日渐重

视,国内相关研究机构也逐步开展了多金属结核以及钴结壳的勘探开采研究工作<sup>[20,21]</sup>。1987年在HY—871航次远洋调查过程中,“海洋四号”科学考察船首次采集到钴结壳样品数百公斤。1990年大洋矿产资源研究开发被我国国务院列为国家长远发展项目,最终确定由中国大洋协会组织实施。1991年我国被联合国批准成为国际上首批水下开发先驱投资者。在国家“八五”到“十五”期间,我国对登记申请的水下矿区进行了十数次海上勘探工作,采用多种探测技术,如多波束探测、深拖水下摄像和照相、水下机器人等对目标区域进行了仔细的勘查和周边环境的评价工作,初步完成了矿区优选任务。直至1999年3月5日,我国最终从联合国获得了7.5万平方公里“专属经济区”的优先开采权。

COMRA在“九五”研究成果的基础上,在《国际水下区域研究开发“十五”立项指南》和《国际水下区域研究开发“十五”计划》中将“钴结壳采集模型机关键技术及装备研究”、“钴结壳资源评价与研究”确立为研究的重点项目。本书的研究内容为“钴结壳采集模型机关键技术及装备研究”中的部分工作。

### 1.1.2 本书研究的意义

1985年,John E. Halkyard<sup>[22]</sup>及其公司在多次试验和大量资料整理基础上,在美国圣地亚哥召开的“海洋工程及其环境”国际会议上提出:最佳的钴结壳开采方案应是包括由水下履带式机器人、水力管道提矿运输系统和水面采矿船构成的采矿系统。

在“九五”多金属结核开采技术与装备研究的基础上,借鉴国外钴结壳开采方案,根据钴结壳矿区开采环境的特点,我国提出了相似的开采方案,目前可能的第一代商业化钴结壳开采系统组成如下:水下采集系统(集矿机、水下机器人)+提升系统(扬矿输送系统)+遥测遥控系统(测控子系统)+水面支持子系统(水面采矿支持母船),如图1-1所示。

提升系统将水下机器人获得的矿产资源从几千米深的水下高效地运送到海面上的运输船;要想获得较高的开采效率,保证水下采集系统能够正常地工作,必须有一整套高精度的遥测遥控系统,在作业过程中,工作人员借助遥测遥控系统定位并指挥、调度水下采集系统,对它实行在线状态监测;水面辅助支持系统包括完成水下采矿任务所必需的动力装置、设备、仪器、临时矿仓以及医疗、保险、提供工作人员住宿等的设施。

水下采集系统在水下底实现人工操作比较困难,采矿环境缺氧、高压、低温、腐蚀性强,因此需要设计可靠性高、并有一定采矿效率的无人驾驶水下资源采集系统,采集所需的矿产资源。

由于采集系统的工作环境是在能见度很低、环境高度复杂的水下,因此需要一套完整的自主式导航控制系统(包括路径规划系统、定位系统、探测系统、行走控制系统等),帮助其完成精确、高效的采集任务。水下采集系统因为自身的

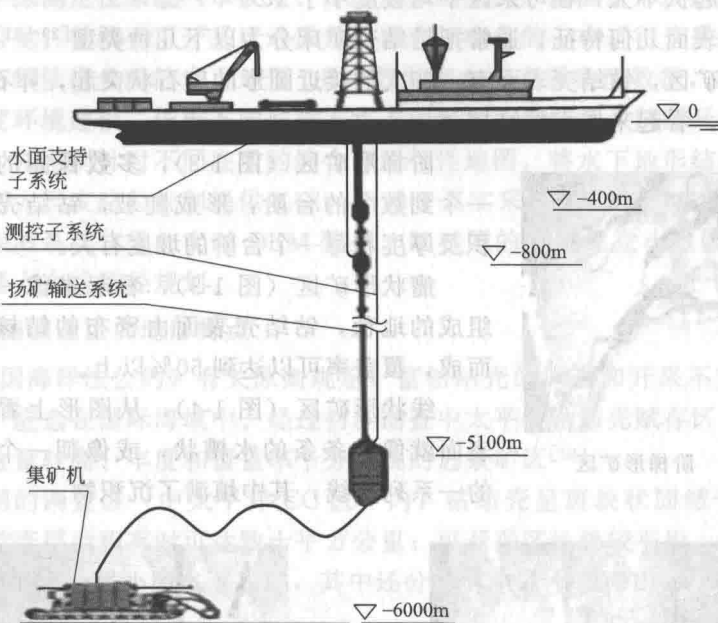


图 1-1 钴结壳开采系统概念图

高度自主性，因此又被称为水下自主式机器人（自主式采矿机器人）。

本书所研究的内容为钴结壳机器人路径规划相关技术，它是水下机器人导航控制系统中的重要环节，是机器人能否精确、安全和完整的完成采矿作业的关键。

## 1.2 水下机器人路径规划的特点及要求

### 1.2.1 水下采矿区地形的特殊性

水下环境极为恶劣：水深 3000m 的水下作用在 300 个大气压高压下，海水水温常年保持 1~4℃ 低温，环境中无自然光，还有不均匀的海流作用<sup>[23,24]</sup>。在这种极限环境中，机器人的控制和导航实现十分困难<sup>[25]</sup>。在可开采区内部，除了有钴结壳分布以外，还存在大量流塑状沉积物（水下泥砾沙混合物）和无钴结壳覆盖的裸露基岩。

#### (1) 钴结壳分布区

钴结壳层一般只有 4~6cm，最大 24cm。其地形起伏差异很大：大部分地形起伏在 5~20cm 之间，偶尔达到数十厘米甚至数米；中间经常出现落差为 0.5~3m 之间的峭壁与台阶；有时出现布满沉积物及大块卵石的沟槽；分布有钴结壳的海山山坡上部较陡，而下部较缓，结壳表面呈葡萄状，平整状等；成片大面积

结壳层地形起伏不大,在可采区平均坡度小于 $15^{\circ}$ [26~28]。

按地形表面几何特征,通常把钴结壳矿床分为以下几种类型[29~31]:

卵石形矿区,钴结壳表面有一些大的接近圆形的卵石状突起,卵石状物外有一层结壳层,看起来像大的结核。

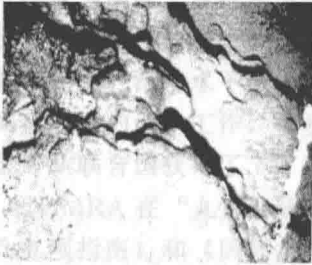


图 1-2 阶梯形矿区

阶梯形矿区(图 1-2),多数裸露的结壳都有一个到数个的台阶,形成陡坡,钴结壳分布的面积及厚度和每一个台阶的坡度有关。

瘤状形矿区(图 1-3),看起来像一条由结核组成的地毯,钴结壳表面由密布的结核连在一起而成,覆盖率可以达到 50% 以上。

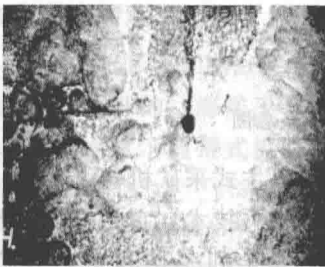


图 1-3 瘤状形矿区

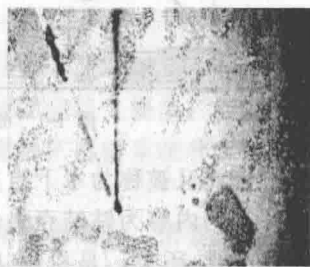


图 1-4 线状形矿区

线状形矿区(图 1-4),从图形上看这些结壳表面就像一条条的水槽状,或像朝一个方向绘制的一系列直线,其中填满了沉积物。

## (2) 裸露基岩区

采矿区中还分布着裸露基岩[26,32~34],较为平坦的基岩区本身不会影响机器人的正常行走,但在连续作业的过程中,机器人经过基岩分布的地形,则会采集到大量的无钴结壳覆盖的基岩碎块,这会大大增加矿物废石率和选冶成本,增大采矿的经济代价。

## (3) 水下沉积物区

采矿环境存在的沙砾泥混合物,含水率极高,底质内聚力小,塑性指数高,含有触变特性(经扰动后其承载能力下降剧烈),呈流塑状分布,不同地点其性质还存在区别,水下这种“稀软底”的底质环境完全不同于陆地环境。在这种环境中进行采集作业的机器人在行走过程中不均匀,打滑严重,行走状态难以测量[35~37]。同时,机器人在采矿作业过程中,车体前部的采集头工作时会对车体产生反作用力,使表面沉积物破坏或扰动,并扬起大量水下沉积物,包围机器人周边区域,使基于光学的环境感知传感器(水下摄像机等)不能发挥作用;机器人采集时还会产生强烈的噪声,对基于声学原理的图像声呐成像(红外侧扫装

置)和声学探测定位系统(单波束、多波束探测系统)的测量形成严重干扰。

由此可见,钴结壳可开采区地形是高度非结构化的,在进行开采区采集路线设计前,必须依据先验的水下地形 DEM 数据和海底质类型数据,对可开采区进行大尺度环境建模,依据不同底质水下地形的几何特征,判断开采区地形的可通行性,并得到针对不同底质的综合可通行性地图,将水下地形结构化,最终为可开采区大尺度路径规划提供基础;而对于真实采集作业中的在线路径规划,需要利用探测系统获得的实时 DEM 数据,以相同的方法建立小范围环境模型,以指导机器人在线路径规划。

### 1.2.2 我国调查区内地形特点

《联合国海洋法公约》有关原则规定:富钴结壳的调查和开采不宜选在专属经济区内,应选在国际海域中。经过初步勘查中太平洋钴结壳赋存区,我国找到了一片钴含量较高、丰度和覆盖率十分可观的远景矿区<sup>[10]</sup>。

在我国的调查区(中太平洋 CC 区)内,钴结壳呈斑块状固结于硬质基岩上,大片结壳层面积有时可达数十平方公里;可开采区地势较平坦,一般高差为 10~50m;大部分属小型水下丘陵,其中还分布有少数平顶海山,矿区平均坡度小于  $10^{\circ}$ <sup>[10,23,28]</sup>。

综合来看,在我国调查区内,分布有两种典型的钴结壳可采地形:大范围的相对平坦地形和极少量平顶海山地形<sup>[4,10]</sup>。

#### (1) 平坦地形

在大范围的相对平坦地形中,裸露的基岩区和水下沙砾泥混合沉积物区域相对较小,但呈现不均匀、无规律的分布形态。一般在几平方公里到数十平方公里的大尺度连续可开采区内,分布有少量的沉积物区、裸露基岩区和较为陡峭的水下丘陵地带<sup>[4,8,10,31]</sup>。

而在平坦地形中,钴结壳类型的分布与地形坡度大小关系密切,坡度为  $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$  时,以钴结核为主;坡度为  $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$  时,通常覆盖有沉积物;在  $7^{\circ}\sim 15^{\circ}$  时,为结核、结壳过渡区,随坡度增大结壳所占比例逐渐增大<sup>[26~28]</sup>。

#### (2) 海山地形

钴结壳在平顶海山地形上的分布受到水深制约,一般沿海山周边基岩表面呈水平带状分布。在平顶海山的顶面,存在孔虫砂发育的轮廓通常决定着矿床的上部边界,在山坡下部,则以水下黏土发育层的上界决定矿体的下部边界。有勘查发现:在平顶海山椭圆形支脉包括附属地段上钴结壳厚度最大,大于  $15^{\circ}$  坡度时,以钴结壳为主;而在坡度大于  $45^{\circ}$  的陡峭山坡上结壳会变得很薄,有时仅为铁锰氧化物薄膜<sup>[29~31]</sup>。

由于机器人的开采任务是要在单次采集作业中,完成对可开采区的遍历(全覆盖)式采集作业。因此在开采区环境模型的基础上,只有通过遍历开采的方式,才能最大限度达到高采集率和低废石率,完成采集作业的要求。

对于海山地形, COMRA 已经确定了螺旋式的开采方式<sup>[4,6,8,21]</sup>; 而对于平坦地形, 需要从采集覆盖率、重复率、能耗等多个角度, 考虑建立一种高效的采集方法。

### 1.2.3 水下机器人路径规划的类型及特点

利用先验的开采区 DEM 数据和水下底质类型数据, 完成大尺度的环境建模, 初步确定可采区和不可采区, 为机器人的遍历路径规划提供依据; 以大尺度环境模型为基础, 通过对我国调查区内主要分布的平坦地形矿区, 进行遍历式采集路径规划, 也就完成了机器人采集的先期准备工作。

大尺度遍历式采集路径规划结束后, 将会得到一个由一系列曲线段首尾相连而成的采集路线图, 该图在二维平面的投影为一系列直线段首尾相连而成的区域完全遍历图。图中每一个直线段的端点都会被视为机器人采集路径的转向点。机器人在实际的开采工作中, 会以图中相邻转向点为局部起点和终点, 以在线的方式完成采集任务。

由于水下地形的复杂性和探测系统的不精确性(一般只能达到数米到 10m 之间<sup>[37]</sup>), 在机器人的采集路径上, 仍然会存在影响车体正常行走的小型海石、海阶、海沟和小型基岩区和沙砾泥混合物区。因此, 在采集作业中, 出于安全性的考虑, 必须利用车载探测系统, 实时更新环境信息, 以在线的方式完成采集作业任务。在采集路径上每两个相邻转向点之间, 机器人是通过在线的方式进行动态路径规划: 从一点开始, 通过探测范围(滚动窗口)内环境信息的更新, 不断寻找新的规划子目标点, 不断更新局部采集路径, 直到找到规划终点。

而在每一个已精确获知环境信息的滚动窗口内, 机器人在线路径规划系统建立滚动窗口内环境模型, 实时规划窗口内环境信息已知的静态路径, 找到窗口中从局部起点到局部终点之间, 符合采矿要求的局部采集路线。

因此只有通过这种先验规划与在线规划, 静态规划和动态规划相结合的方式, 机器人才能安全, 遍历的完成采集任务。

### 1.2.4 水下机器人路径规划的要求

通过上述分析, 可以确定本课题需要解决的问题如下。

- 1) 利用先验的水下地形 DEM 数据和水下底质类型数据, 建立水下采矿区大尺度环境模型, 为路径规划研究提供基础;
- 2) 建立在我国钴结壳调查区内, 平坦地形的遍历路径规划模型, 确定机器人在大尺度开采区的开采路线; 通过开采路线上的相邻转向点, 获得机器人动态规划的起点和终点;
- 3) 建立机器人在每个滚动窗口内, 静态路径规划的问题解决模型;
- 4) 建立在线规划的起点和终点之间, 局部路径规划的问题解决模型。

以上四点同时也是本课题研究的主要内容。

在解决以上问题的过程中,主要存在着以下难点。

1) 现有的环境建模研究主要针对解决环境的通行性,而没有对不同底质的环境通行性进行分类研究,而且如何通过对含三种底质类型的水下地貌进行通行性分析后,再有机整合,并按照综合通行能力在环境模型中划分成不同区域,是本研究的一个难点。

2) 在机器人大尺度遍历路径规划研究中,如何通过设定优化评价准则,使矿区遍历路径规划能在寻优过程中满足开采要求;如何建立遍历路径规划的问题解决模型,并设置合理的算法,使得规划路径在实际采集作业中能够顺利实现。

3) 现有的静态路径规划主要以路径最短作为规划目标,从而设计算法,而在水下采矿环境中,还需要兼顾采矿安全性、采集覆盖率等目标。因此,需要针对机器人路径规划的特点及要求,设计出适合采矿作业的静态路径规划算法。

4) 在水下大尺度环境中,将先期规划的遍历路径具体实现,需要机器人以在线形式,动态进行规划,因此,如何找到一个适合采集作业的动态路径规划方法,算法能否收敛,能否在全局信息未知的情况下具备较好的优化性能,成为课题研究的又一个难点。

本书就上述问题进行研究,并建立相应的解决模型,最后对机器人在线路径规划系统进行实验验证。

## 1.3 国内外路径规划技术的研究现状

### 1.3.1 环境建模技术研究进展

水下钻结壳机器人属于自主式机器人的一种。近年来,有关自主车辆导航研究越来越多,多数集中在室内或者结构化的环境中,环境建模相对简单。国内外有关室外的环境建模研究主要集中在无人驾驶车辆和星球车辆(月球车、火星车等)上。

利用外部环境的三维地形信息,评估地形的可通行性,判别不可通行区域是自主车导航的核心问题之一,也是机器人环境建模的核心内容。因此,通过对运用于 Rocky7 上的路径规划方法进行总结,S. L. Laubach<sup>[38]</sup>提到:地形的通行性问题是未来路径规划的关键,即规划车体的运动路径应该更好地结合地形信息。

目前地形通行性方面的研究主要集中在运用人工智能的统计学和模糊方法分析地形物理信息,国际上卡耐基梅隆大学(CMU)与美国喷气动力试验室(JPL)的研究者分别提出了环境建模的两种解决方案。

CMU的方法是沿着候选路径计算地形通行性,候选路径根据车体舵轮的转向角度生成。通行性指数通过路径上单个栅格的相关权值的累加而得到。R. Simmons<sup>[39]</sup>、S. Singh<sup>[40]</sup>使用的相关参数是横滚角(roll)、俯仰角(pitch)和粗糙度(roughness)。首先将地形分成小块区域,然后利用最小二乘法将区域



拟合到一个平面上，俯仰角和横滚角的计算是通过此平面的两种角度来表示该区域的俯仰角和横滚角，拟合平面和实际区域表面的残差表示粗糙度。

JPL 中比较有代表性的方法是基于语言描述和模糊逻辑的方法。H. Seraji<sup>[41,42]</sup>将地形柔软度、坡度、地形粗糙度等地表信息通过语言描述进行模糊分类，之后计算地形通行性指数，最后通过地形的通行性指数（代表不同地形中机器人的通行能力）指导机器人路径规划。通行性指数依据传感器测量范围的不同分为区域、局部和全局指数。区域通行性指数是通过地形粗糙度和坡度（slope）进行模糊分类而得到；局部通行性指数是由对地形表面柔软度（surface softness）和局部障碍物进行模糊分类而得到。如图 1-5 是 H. Seraji 获得的火星环境通行性地图，图中不同颜色代表区域的不同通行性。

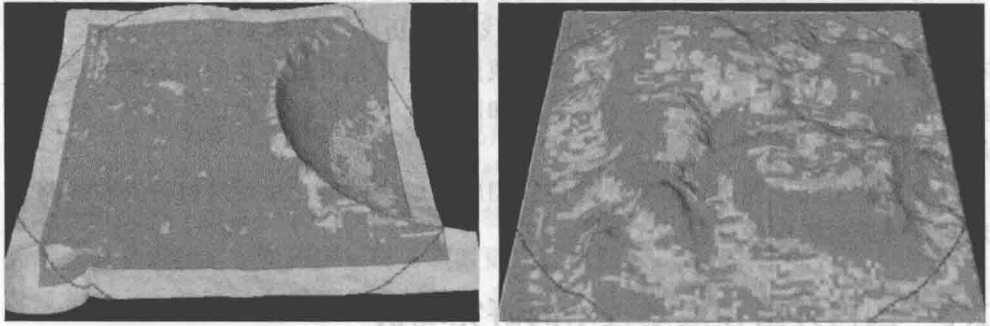


图 1-5 典型的火星表面环境通行性地图

此外，还有一些基于地形参数的通行性计算方法，如 A. Shirkhodaie<sup>[43]</sup>通过纹理设计，神经网络分类器、规则分类器和模糊分类器分辨地形的种类并确定其可通行性。D. Gennery<sup>[44]</sup>使用平滑插值方法计算高度、坡度（smoothed and interpolated height），得到地形的通行性指数。

在国内，徐璐<sup>[45]</sup>提出一种基于障碍物分类的通行性计算方法，首先计算出障碍物的高度变化，面积等信息，然后对障碍物进行二次分类，分离出可以克服的障碍（可越过的沟和可攀越的土丘等），得到着色障碍分类图。在以上过程的同时将地形栅格化，计算每一栅格的平均坡度等参数，得到通行性指数，作为机器人三维路径规划的评价函数。

史美萍<sup>[46]</sup>提出了一种新的多约束环境建模方法——MCWM 方法，它综合考虑了运动的平稳性、系统的不确定性、人机协同性和月面地形的可通行性等四个因素，最后产生支持路径规划的综合代价地图——MCWM 模型（图 1-6），达到了地表通行性的合理和鲁棒性建模。

刘华军<sup>[47]</sup>提出了越野高程地形的相对不变性概念，并利用越野地形的这种性质，提取出了在地形具有的相对不变特征，如地形粗糙度等，利用基于模糊规则的方法，评估各特征对地形的可通行性。最后通过自主车越野导航实验表明算