

深海底采矿机器车 运动建模及控制研究

SHENHAIDI CAIKUANG JIQICHE
YUNDONG JIANMO JI KONGZHI YANJIU

陈 峰 何 坚◎著



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

深海底采矿机器车 运动建模及控制研究

SHENHAIDI CAIKUANG JIQICHE
YUNDONG JIANMO JI KONGZHI YANJIU

陈 峰 何 坚◎著



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

中国·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

深海底采矿机器人运动建模及控制研究/陈峰, 何坚著. —广州: 暨南大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5668 - 2434 - 9

I. ①深… II. ①陈… ②何… III. ①深海采矿—矿车—控制系统—研究
IV. ①TD524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 159381 号

深海底采矿机器人运动建模及控制研究

SHENHAIDI CAIKUANG JIQICHE YUNDONG JIANMO JI KONGZHI YANJIU

著 者: 陈 峰 何 坚

出 版 人: 徐义雄

责任编辑: 古碧卡 姚晓莉

责任校对: 林 琼

责任印制: 汤慧君 周一丹

出版发行: 暨南大学出版社 (510630)

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85228292 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

网 址: <http://www.jnupress.com>

排 版: 广州市天河星辰文化发展部照排中心

印 刷: 广州市穗彩印务有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 7.75

字 数: 143 千

版 次: 2018 年 8 月第 1 版

印 次: 2018 年 8 月第 1 次

定 价: 28.00 元

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

前言

深海底蕴藏着丰富的矿产资源,对其开发手段进行研究,对我国矿产资源的可持续利用,以及深海作业技术的发展,具有重要的战略意义。深海底采矿机器车行走于6 000米深海底极稀软沉积物底质,作业环境为无自然光、海底高压的未知复杂环境,其控制质量的好坏直接关系到我国大洋开发战略的实施质量。为此,在国家大洋专项基金——国际海底区域研究开发“十五”项目(DY105-03-02-06)的资助下,本书重点研究了深海底采矿机器车的建模与控制技术。

本书内容主要包括深海采矿及采矿机器车的发展现状,采矿机器车行走特性、运动建模、参数估计、运动控制、实物仿真等。针对深海底采矿机器车高尖三角齿、大沉陷、高打滑率、稀软海底低速作业的特点,开展了有针对性的运动建模和控制策略探讨。

全书共七章,第一章为概述,描述了深海采矿的历史背景及技术现状。第二章介绍了我国矿区的水文和土力学特性,以及用于车辆动力学建模的地面力学技术。第三章在分别建立采矿机器车履带牵引力、运动阻力、运动学、动力学、液压驱动系统模型的基础上,采用MATLAB仿真工具,建立了深海底采矿机器车整体运动模型,并进行了仿真研究。基于第三章的运动模型,第四章采用卡尔曼滤波技术,研究了履带打滑率等机器车关键运动参数的在线估计技术。第五章介绍了深海底采矿机器车运动控制系统。该系统由运动规划单元、运动参数估计、轨迹误差计算、轨迹跟踪控制等模块构成,并给出了一些仿真实验结果。第六章介绍了深海底采矿模型机器车实物仿真系统的开发过程和部分试验研究内容。第七章对前述内容进行了整理总结并提出了有待进一步研究的问题。

因笔者水平有限,书中难免有错漏之处,恳请读者批评指正。

陈 峰
2018年5月

目 录

前 言	1
1 绪 论	1
1.1 深海采矿的历史意义	1
1.2 深海采矿的国内外研究现状	2
1.3 深海底采矿机器车的国内外研究现状	5
1.4 深海底采矿机器车运动建模技术研究	10
1.5 基于非线性滤波方法的模型关键参数估计	14
1.6 深海底采矿机器车运动控制	15
1.7 本书的主要研究内容	16
2 深海底采矿机器车工作环境及行走特性研究	18
2.1 我国矿区水文特性和海泥土力学特性	18
2.1.1 我国矿区底层海流动力学特性	19
2.1.2 我国矿区海泥土力学性质	20
2.2 车辆—地面相互作用力学——地面力学	21
2.2.1 塑性平衡理论	21
2.2.2 地面参数测量理论	22
2.3 小结	24
3 深海底采矿机器车运动建模研究	25
3.1 深海底采矿机器车行走机构及工作要求	25
3.1.1 深海底采矿机器车行走建模简化条件	27
3.1.2 深海底采矿机器车履带牵引力模型	27
3.1.3 深海底采矿机器车运动阻力模型	30
3.1.4 深海底采矿机器车运动学模型	34
3.1.5 深海底采矿机器车动力学模型	36
3.2 深海底采矿机器车液压驱动系统	38
3.2.1 深海底采矿机器车行驶驱动液压系统原理	39

3.2.2	深海底采矿机器人行驶驱动液压系统模型研究	41
3.3	基于 MATLAB 的深海底采矿机器人建模及仿真研究	48
3.3.1	左右履带液压驱动系统子模块 Simulink 实现及有效性验证	50
3.3.2	深海底采矿机器人地面及环境阻力子模型及系统仿真	55
3.3.3	深海底采矿机器人运动学模型及系统仿真	57
3.4	小结	58
4	基于非线性滤波方法的深海底采矿机器人关键运动参数估计	60
4.1	深海底采矿机器人关键运动参数估计模型	60
4.1.1	左右履带打滑率在线计算模型	61
4.1.2	履带驱动轮有效半径在线计算模型	63
4.1.3	深海底采矿机器人关键运动参数非线性估计模型	64
4.2	基于 UKF 滤波算法的深海底采矿机器人关键运动参数估计研究	65
4.2.1	UKF 方法研究	65
4.2.2	改进的 SUKF 算法——FSUKF 算法	69
4.2.3	深海底采矿机器人关键运动参数估计仿真	72
4.3	小结	74
5	深海底采矿机器人运动控制研究	76
5.1	深海底采矿机器人控制系统硬件构成及作业要求	76
5.2	深海底采矿机器人运动控制系统设计	79
5.3	深海底采矿机器人运动规划	80
5.3.1	深海底采矿机器人路径规划	81
5.3.2	深海底采矿机器人状态时间轨线规划	82
5.4	深海底采矿机器人轨迹跟踪控制	84
5.4.1	基于交叉耦合控制的履带机器人内部误差补偿	84
5.4.2	基于模糊专家控制的深海底采矿机器人外部误差补偿	87
5.5	小结	90
6	深海底采矿模型机器人实物仿真系统开发及试验研究	92
6.1	模型机器人开发	92
6.2	深海底采矿模型机器人控制系统开发	94
6.2.1	深海底采矿模型机器人控制系统硬件设计	94

6.2.2 深海底采矿模型机器人控制系统软件设计	96
6.3 深海底采矿模型机器人试验研究	102
6.4 小结	105
7 结论与展望	106
参考文献	109

1 绪 论

1.1 深海采矿的历史意义

在人类赖以生存的地球上,海洋占整个地球表面积的 70%。深海蕴藏着数量丰富、种类繁多的矿产资源。据初步估算,海底蕴藏有占地球总储量 30%~50% 的 2 000 亿吨石油,含锰、铜、钴、镍、金、银等多种矿物的 15 000 亿吨多金属结核,为大陆储藏量几十倍的八十多种化学元素,以及正在调查的丰富的富钴结壳和富硫热液硫化物等资源。所谓多金属结核就是大量地赋存于水深 4 000~6 000 米深海底表面的直径为 0.5~25 厘米的黑色矿物块,其中含有锰、铜、钴、镍、金、银等有色金属。已知的赋存海域有太平洋的夏威夷群岛到北美大陆之间的深海底以及印度洋等。富钴结壳是在水深 800~2 400 米的海山斜坡或顶部的基岩上,呈层状分布的矿床,厚度为几毫米到十几厘米,其中也有与多金属结核共生的,矿物组成与多金属结核一样。人们对其中含有的镍、钴和锰等寄予厚望,特别是钴的品位也有高达 1% 左右的,是人类最渴望的资源。与锰结核相比,富钴结壳是赋存区域距海面较近的有利资源,但存在采掘困难的问题。海底热液矿床是海水通过海底地壳的裂缝浸入海底岩石,并淋滤其中的金属元素,再次从海底喷出、冷却、沉积而生成的金属矿物。一般赋存于水深 2 000~3 000 米的海底,含有铜、铅、锌、金及银等有色金属。已知赋存的海域有东太平洋海盆和大西洋中央海岭等地。人们对其中含有的铜、铅、锌等资源寄予厚望。

与海洋拥有的丰富的未开采资源相比,陆地资源正面临日益匮乏的危险。众所周知,矿产资源为不可再生资源。然而,随着生产力的不断提高,人类对矿产资源的需求也越来越大。“二战”以后的半个多世纪,世界矿产资源的消费量更是呈数十倍地增长。仅 2001 年一年,世界铁矿石的开采量即达到 11.35 亿吨,铝土矿的开采量为 1.39 亿吨,铜矿石的开采量为 1 328.78 万吨,锰矿石的开采量为 728 万吨。据估算,按目前的世界矿产开采水平,陆地上的主要矿产资源只够开采 20~40 年。我国陆地矿产资源前景尤其不容乐观。虽然我国拥有 171 种矿产资源,具有资源总量大、矿种齐全的特点,但 1949 年以来,我国矿产资源的开发规模迅速扩大。1949 年,我国保留比较完整的

矿山仅 300 多座, 年产原油 12 万吨, 煤 0.32 亿吨, 钢 16 万吨, 有色金属 1.30 吨, 硫铁矿 1 万吨, 磷不足 10 万吨; 到 2002 年, 我国共有大型矿山 489 座, 中型矿山 1 025 座, 生产原油 1.67 亿吨, 天然气 327 亿立方米, 原煤 13.80 亿吨, 铁矿石 2.31 亿吨, 磷矿石 2 301 万吨, 十种有色金属产量 1 012 万吨, 其中, 原煤、钢、十种有色金属和水泥产量居世界第一位, 磷矿石和硫铁矿产量分别居世界第二位和第三位, 原油产量居世界第五位。随着经济的快速发展, 我国对矿产资源的需求仍将进一步扩大。按照 2020 年矿产品预测需求量, 考虑相关的利用率及储采比率, 到 2020 年, 我国陆地石油、铀、铁、锰、铝土、锡、铅、镍、锑、金 10 种矿产资源将出现短缺现象, 包括铬、铜、锌等在内的 9 种重要矿产资源将出现严重短缺现象。随着陆地矿产资源的日益稀缺, 对海底矿产资源的开发成为人类矿产资源开发的必由之路。鉴于我国陆地矿产资源在未来 20 年里的不可保障, 我国对海底矿产资源开发的研究更具有现实的紧迫性和必要性。

另外, 开展深海采矿有其深刻的科学技术意义。深海采矿是一项复杂的技术, 它面对的是 6 000 米深海底复杂的环境和条件。6 000 米深的海底, 压力高达 60 兆帕, 人不可能直接到海底去进行操作。另外, 海底环境复杂多变, 表现为复杂的地表特征及海底洋流等多种形式的未知扰动。深入海底 6 000 米, 是人类面临的一次巨大挑战。对 6 000 米深海的探索, 将使人类对地球内部的了解达到一个新的高度。深海采矿系统由深海精确定位子系统, 深海地形、地貌测量子系统, 深海底自动导航子系统, 深海通信及动力传输子系统等组成。只有各个子系统密切配合, 才能保障采矿系统的正常运行。由于它的带动, 许多科学技术领域将得到飞速的发展, 如海洋自动观测技术、海洋遥感技术、水声技术、水下工程探测技术、海洋地质和地球物理勘探技术、超高强度和耐高压材料、深海密水技术、人工智能、机器人技术等。

1.2 深海采矿的国内外研究现状

人类对海洋的开发历史悠久。目前所有商业性开发的海洋固体矿物都位于领海或专属经济区内, 但随着经济与技术的发展, 人们已将海洋矿产资源的开发推向了深海底。多金属结核是十九世纪末 (1868 年) 在西伯利亚岸外的北冰洋喀拉海中发现的。1872—1876 年间, 英国的“挑战者”号做环球考察时, 发现世界大多数海洋都有多金属结核矿。然而, 对其进行系统的勘探研究则是从二十世纪六十年代开始的。第二次世界大战后, 随着全球经济的迅速复苏, 人类对矿产资源的需求急剧扩大, 从而导致矿产品特别是金属

矿产品价格的迅速攀升。由于多金属结核富含多种金属化合物且广泛分布于各大洋的海底表层,二十世纪六十年代,以美国为首的多国财团开始进行多金属结核的勘探和开发工作,希望能够从多金属结核中提取多种金属,缓解当时的金属资源紧缺状况。通过广泛的勘探研究,估算出海底多金属结核的总量在15 000 万吨以上。

二十世纪七十年代,以美国为首的西方国家提出了一系列的初步采矿方案,并进行了一些实验研究。

1970年,美国在佛罗里达州海岸外水深1 000米的大西洋布莱克高地进行了第一次结核采矿原型系统实验。“深海探险”公司在6 750吨的货轮“深海采矿者”号上安装了一个高25米的吊杆和一个6米乘9米的月池(采矿装置由此下放),采用气力提举方式对模拟结核进行提升。实验取得了成功。

1972年,由30家公司组成的集团实验了由日本海运官员Yoshio Masuda发明的系统——连续链斗系统,该系统系在一条八千米长的回转链上,每隔一定距离挂一个戽斗。戽斗从捕鲸船“白岭丸”的船首投放,在船尾回收。该次实验采集到了一些结核,不过链索缠在一起,实验遂告终止。

1976年,海洋采矿协会(OMA)在20 000吨运矿船“Wesser Ore”号上装备了月池、吊杆和旋转式推进器。1977年,在加利福尼亚州海岸外1 900千米处进行了第一次实验。采矿车采用水力集矿和拖曳式行走方式,以气力提举方式提升。由于管柱的电接头漏水,实验暂停。1978年初,另外两轮实验再度受挫,首先是挖采装置陷入泥中,后又遇上台风。最后,1978年10月,在18小时内提升了550吨结核,最大能力为每小时50吨。由于吸入泵一个叶片折断,电动机停转,实验终止。

1978年,由美国三大财团组成的海洋管理公司(OMI)在太平洋进行了实验。使用的采矿车为水力集矿和拖曳式行走机构(日本研制)以及机械式集矿头和拖曳式行走机构(德国研制,下放时掉入海底)。实验了两种升举系统:用装在提升管内水深1 000米处的离心轴流泵吸送;在水深1 500米和2 500米之间注入压缩空气进行提升(气力提升)。三次实验共采集到约600吨结核。

1978年,海洋矿产公司(OMCO)向美国海军租用了“Glomar Explorer”号作为采矿船,并建造完成了采用阿基米德螺旋行走机构和机械式集矿头的采矿车。该公司先在加利福尼亚州海岸外水深1 800米处做了几次初步试验后,于1978年底在夏威夷以南进行第一批试验,但因月池门打不开而告暂停。1979年2月,该项作业得以顺利进行,采集结核1 000余吨。

经过二十世纪七十年代的一些实验,初步确定采矿系统可采用挖采和提

升的方法。挖采可采用高压水射流的水力集矿方式和机械挖掘的机械集矿方式；提升可采用气力和水力提升。采矿车以采用自行走方式为佳，并可采用特殊履带驱动和阿基米德螺旋行走机构。

进入二十世纪八十年代以后，由于日本和欧洲经济不振，以及金属生产量过剩，国际金属价格下跌，世界多数海洋强国对多金属结核资源的研究和开发实验活动转入低潮，一些发达国家和国际财团甚至在深海采矿和冶炼技术方面已取得了重要进展之后中断投资。与此同时，由于所发现的多金属结核矿藏多位于公海海底，其归属问题在国际上引起了广泛的争论。1982年12月，联合国第三次海洋法会议通过了关于国际深海底矿物资源开发的管理体制：“区域”是指国家管辖范围以外的海床和洋底及其底土；任何国家不应“区域”的任何部分或其资源主张或行使主权或主权权利，任何国家或自然人或法人，也不应将“区域”或其资源的任何部分据为己有；“区域”内资源的一切权利属于全人类，由国际海底管理局代表全人类行使；任何发展中国家缔约国，或该国所担保并受该国或受具有申请资格的另一发展中国家缔约国有效控制的任何自然人或法人，或上述各类的任何组合，可通知管理局愿意就某一保留区域提出工作计划；取得核准只进行勘探工作计划的经营者，就同一区域和资源在各申请者中应有取得开发工作计划的优惠和优先；但如经营者的工作成绩不能令人满意时，这种优惠或优先可予撤销。出于国家战略的考虑，以中国、印度、韩国为代表的许多国家在此之后，积极开展了深海底多金属结核的调查和勘探工作，先后取得了含有丰富结核区域（保留区域）的优先开采权，并在此基础上，积极开展深海底多金属结核开发技术的研究，并制订了本国的开发计划。印度是1987年第一批登记注册获得保留区域的“先驱投资者”。目前，印度已开发出一套采矿装置，并于2000年10月于410米浅海实验成功，并正积极筹划6000米深海采矿的实验。韩国于2002年通过联合国国际海底管理局审查，获得保留区域，深海采矿系统尚处于研究之中。

我国早在二十世纪七十年代就开始了多金属结核的调查工作。1978年，“向阳红05号”海洋调查船在太平洋4000米水深海底首次捞获锰结核。此后，从事大洋锰结核勘探的中国海洋调查船还有“向阳红16号”“向阳红09号”“海洋04号”“大洋一号”等。经多年调查勘探，在夏威夷西南，北纬7度至13度，西经138度至157度的太平洋中部海区，探明一块可采储量为20亿吨的富矿区。1990年4月9日，中国大洋矿产资源研究开发协会（China Ocean Mineral Resources R & D Association，简称“中国大洋协会”）经国务院批准成立，具体管理与海洋采矿有关工作。1991年3月，联合国海底管理局正

式批准中国大洋协会的申请,从而使中国得到 15 万平方千米的大洋锰结核矿产资源开发区。同时,依据 1982 年《联合国海洋法公约》,中国继印度、法国、日本、俄罗斯之后,成为第 5 个注册登记的大洋锰结核采矿“先驱投资者”。1999 年 3 月 5 日,在完成开辟区 50% 区域放弃义务后,中国大洋协会为我国在上述区域获得 7.5 万平方千米具有专属勘探权和优先商业开采权的金属结核矿区,增加了我国战略资源的储备总量。在采矿系统的研究方面,经过“八五”“九五”两个五年计划的实施,我国已初步研究出一套自己的深海采矿系统,并于 2001 年 6 月至 9 月于云南抚仙湖进行了 130 米水深综合实验,从湖底采集并回收模拟结核 900 千克,试验获得成功。图 1-1 为我国中试成功的深海采矿系统示意图。

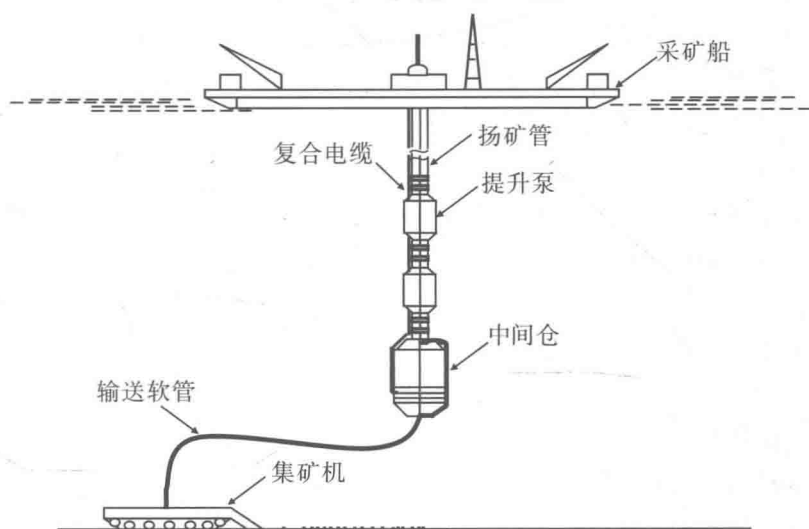


图 1-1 复合式水力提升深海采矿系统工艺流程图

1.3 深海底采矿机器车的国内外研究现状

深海底采矿机器车是深海底集矿作业的载体,为深海底采矿系统中技术最复杂、最关键的部分。其技术难点在于如何保证采矿车在 6 000 米深海未知环境中正常可靠地行使,并保证以较高的效率收集多金属结核。

其关键技术为:

采矿车在剪切强度和承压强度极低的稀软海底沉积物上的可行驶性。深海底采矿机器车必须携带采集机构、动力装置、破碎机、软管、电子仓和浮力材料等行走于海底,要求能耐 60 兆帕的高压,按开采路线行走,无故障作

业 2 000 小时以上,同时,从保护环境的角度出发,不能对深海底产生过度的破坏。深海底沉积物完全不同于陆地的底质,其剪切强度极低 ($0.4 \sim 1.6\text{kPa}$),且具有搅动流体特性 (流变限度 $150\% \sim 230\%$)。海底沉积物的低承载性和低剪切性,使得普通陆地车辆的行驶机构不能直接用于采矿车;深海环境的脆弱性、难恢复性以及深海沉积物的搅动流体特性,决定了人类习惯于水中使用的螺旋桨驱动方式同样不适合于深海底采矿机器车。

采矿车的密封和压力补偿技术。在 6 000 米海洋深处,深海设备的液压系统和各类密封装置将受到海水高达 60 兆帕的压力作用,其液压元件、油箱和油管等将严重变形,各类常压密封装置将失效,设备难以正常运行。深海底采矿机器车的密封和压力补偿是采矿车正常、安全工作的重要保证。

深海底未知环境的导航和定位技术。深海底一片漆黑。由于电磁波在水中的衰减很快, GPS 信号不能到达 6 000 米深的海底。现有的深海定位系统多采用基于声学定位的长基线、短基线以及超短基线技术。其中,定位精度最好的长基线定位系统也只能达到米级的定位精度。因此,只能主要依赖惯性导航。另外,采矿车行走和采矿时会掀起大量的海底沉积物,这将使采矿车周围的环境受到严重扰动,使摄像头等传感器的性能受到严重影响。研究以惯性导航为主的深海底自动导航和定位技术也是深海底采矿机器车正常工作需解决的关键问题之一。

采矿车路径规划和轨迹跟踪控制。深海底采矿机器车多为特殊设计机器车,动力学特性和运动学特性没有成熟的经验可供参考。另外,人类对 6 000 米深海底所知甚少,采矿车基本处于未知环境中。这样,深海底采矿机器车的作业环境属于未知环境,特种机器车的路径规划和轨迹跟踪控制,是一个具有一定挑战性的研究课题。

历经四十余年的研究,人类已积累了一些深海底采矿机器车的开发经验。目前,具有代表性的深海采矿车主要有以下几种:

(1) 美国海洋矿产公司研制的采矿车。

美国海洋矿产公司研制,于 1978 年在夏威夷以南海域进行了实验,并成功收集结核 (图 1-2)。

行走机构:液压驱动,阿基米德螺旋行走机构。其工作原理是螺旋叶片陷入海泥中,螺旋体旋转推动海泥,使行走机构获得向前或向后的推力而前进或后退。其优点为结构简单、海底通过性能好,缺点为行走打滑、承载能力低、功耗大、对海底扰动较大。

集矿方式:采用转轮和链带机械集矿 (图 1-3)。由两根铲斗链把多金属结核铲起,通过输矿皮带传输到贮矿罐。其优点为结构简单、耗能低,缺

点为集矿效率不高, 转速较高时, 结核有随水流漂浮现象; 一些用圆柱齿制作的工作表面易被细泥堵塞。

传感装置: 一个测障声呐、一个姿态角传感器、一台深海摄像机。

几何参数: 长 3.4 米, 宽 2.4 米, 高 2.1 米。

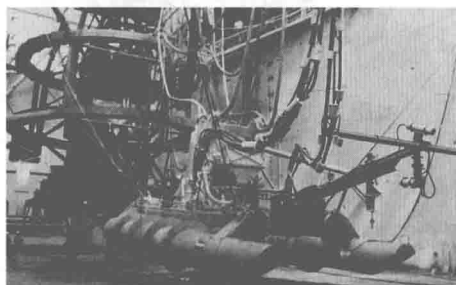


图 1-2 美国海洋矿产公司研制的采矿车

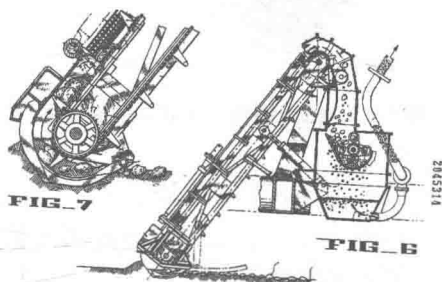


图 1-3 机械集矿头示意图

(2) 德国锡根大学研制的采矿车。

德国从二十世纪七十年代就开始了深海底采矿机器车的研制。历经几十年的研究, 形成了具有德国特色的采矿系统。图 1-4 为德国锡根大学研制的采矿车。该车的改进型于 1999 年 7 月在印度的浅海实验成功。

行走机构: 液压驱动, 渐开线履齿橡胶履带行走机构。该车的特点是采用了特殊形式的摆动车架, 支承轮也能摆动, 因此该底盘车能较好地适应海底复杂的地形, 具有较好的越障能力。履带结构简单, 渐开线履齿对沉积物的作用如同齿轮与齿条啮合, 对沉积层扰动较小。

集矿方式: 高压水射流集矿 (图 1-5)。集矿时, 前排射流将结核从沉积层上冲起, 后排反向射流挡住冲起的结核往后的去路, 并与前排射流产生一向上的合流将结核抬起, 并冲向后部的输送机构。实验表明, 该集矿头可在 100 ~ 200 毫米的集矿高度内工作, 高度为 140 毫米时, 集矿效率可达 100%。

传感装置: 一个测障声呐、一个磁通门罗盘、一台多普勒测速仪、两个测速编码器、一台深海摄像机。

几何参数: 长 3.1 米, 宽 3 米, 高 2 米。

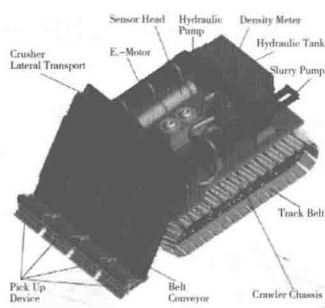


图 1-4 德国锡根大学研制的采矿车

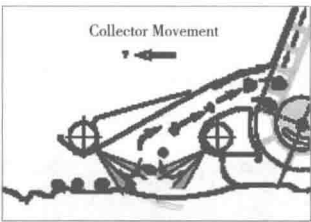


图 1-5 水力集矿头示意图

(3) 法国梭型潜水遥控车。

1980 年前后，法国 Vertut 等人研制了一种梭形潜水采矿车（图 1-6）。这种采矿车靠自身重量下行，一般与竖直方向成一定角度。压舱物贮存在结核仓内，当采矿车快到达海底时，释放一部分压舱物以便采矿车徐徐降落。采矿车采用阿基米德螺旋推进器在海底行走，一边排出压舱物，一边采集等效重量的结核，以保持采矿车在海底的浮力。因采矿车由浮性材料制成，所以在水中的重量接近零。当最后一点压舱物被排出，采矿车在阿基米德推进器的作用下返回到海面（图 1-7）。法国所设计的第二代梭形潜水遥控采矿车模型机 PLA-2 型外形尺寸为 $5.5\text{m} \times 3.3\text{m} \times 2.6\text{m}$ 、重 16 吨（包括压舱物）。由于系统投资大，产品价值不高，法国大洋结核研究开发协会（AFER-NOD）已于 1983 年停止对其的研究。

(4) 日本拖曳式采矿车。

日本在连续链斗系统实验失败后，于二十世纪八十年代初转入拖曳式水力射流采矿车（图 1-8）的研究。但经过多年的研究，日本已认识到拖曳式行走方式不能满足生产要求，正准备转向自行走采矿车的研究。

(5) 印度深海底采矿车。

印度于二十世纪七十年代即开始了多金属结核采矿的研究，但进展缓慢。通过与德国锡根大学合作，采用锡根大学研制的履带车底盘，并自行研究了独特的集矿头，印度于 1999 年 7 月进行了 200 米浅海实验，并取得了成功。图 1-9 为印度的采矿车模型。该车长 3.16 米，宽 2.95 米，重 10 吨，最大速度 0.75m/s 。在车顶安装有一个可左右摆动的机械臂，机械臂的下方为一个泥浆泵。采矿时，通过机械臂的左右摆动，用泥浆泵抽取海底表面的多金属结核。该车除可采集多金属结核外，也可进行海底采沙。

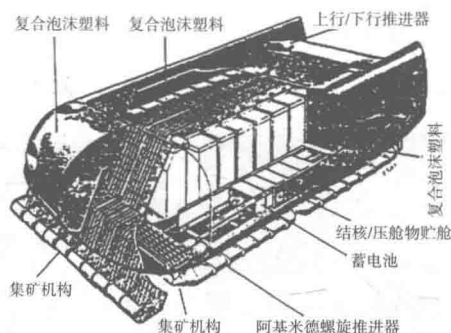


图 1-6 法国梭型潜水遥控车

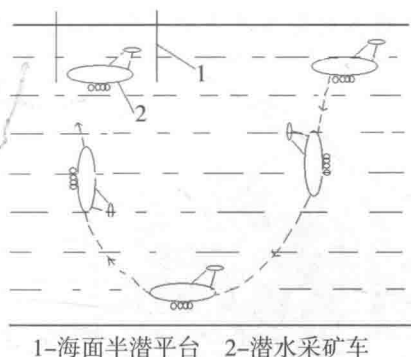


图 1-7 梭型潜水遥控车采矿示意图

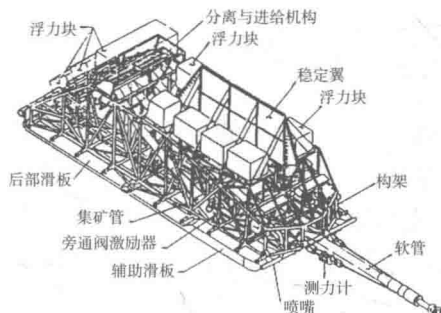


图 1-8 日本拖曳式水力射流采矿车



图 1-9 印度深海底采矿车

我国于二十世纪九十年代初开始对深海底采矿机器车进行研究，在综合研究国外深海底采矿车的基础上，长沙矿山研究院在“八五”期间研制了一台自行式履带车模型机（图 1-10）。该车采用近似渐开线高齿橡胶履带，双浮动悬架和横向摆动梁，双泵全恒功率供油，液压马达分离驱动，电液比例控制，采用水力机械复合集矿方式，外形尺寸为 $4.6\text{m} \times 3.0\text{m} \times 2.1\text{m}$ ，重 8 吨，行驶速度 $0 \sim 1\text{m/s}$ 。“九五”期间，在“八五”研究的基础上，我国研制了第二代深海底采矿机器车（图 1-11）。主要改进表现为采用尖三角齿特种合金履带板，提高了采矿车在深海稀软底环境下的可靠性和可行驶性；改用全水力集矿方式，进一步提高了采矿车的集矿效率；增加了控制密水箱和相关传感器，提高了采矿车的可操作性。“九五”期间研制的第二代采矿车于 2001 年在云南抚仙湖进行了实验，达到了牵引特性理想、牵引力大、承载能力强、跨越或绕过海底障碍容易、能适应稀软海底行走的预期目标，从 130 米深的湖底采集并回收模拟结核 900 千克，具有国际先进水平。历经十余年的努力，我国深海底自行走采矿车的机械模型研制工作已基本完成，采矿车

控制技术研究为“十五”期间重点研究方向之一。

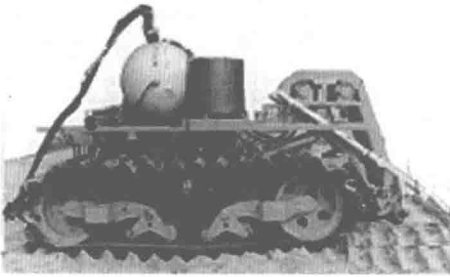


图 1-10 第一代深海底采矿机器车



图 1-11 第二代深海底采矿机器车

1.4 深海底采矿机器车运动建模技术研究

深海底采矿机器车的主要任务为从 6 000 米深的稀软底海底环境中自主、准确、高效地采集多金属结核。6 000 米深的海底，存在 60 兆帕的压力，人不可能直接到海底去进行操作。另外，海底环境复杂多变，表现为复杂的未知地表特征及海底洋流等多种形式的未知扰动。为适应深海稀软底特殊情况，采矿车为特殊设计的大功率电机带动的液压驱动低速履带车辆。由于液压系统固有的严重的非线性、海底稀软底环境的特殊性、履带车辆动力学表现的不完整约束，深海底自行走履带式采矿车运动系统建模和控制是一个较为困难的问题。由于深海采矿为国家战略性课题，出于保密需要，国内外该方面的文献并不多见。同时，以优化车体设计为目的，针对普通地面行驶的中高速履带车辆（工程机械、履带装甲车、坦克等）的计算机建模与仿真研究多见报道；以越野环境下的自动导航为目的，针对中高速地面履带车的动力学建模正引起一些学者的研究兴趣；以浅海环境中的水下自动导航为目的，针对浮游式自动导航机器车（Automatic Underwater Vehicle）的动力学建模研究方兴未艾。虽然本书的研究对象为深海底履带机器车，具有低速性、特种履带、深海底行走的特点，与以上研究对象均不相同，但是上述方面的研究内容也可作为本书研究的参考。

履带车辆早在 1770 年就已经出现，但是直到十九世纪才引起人们的广泛注意。在第一次世界大战以前，履带车辆发展缓慢。履带车辆的设计和构造主要依赖于汽车工业，履带车辆仅仅是汽车的派生物。在第一次世界大战期间，坦克的出现极大地促进了履带车辆的发展，因此，研究履带车辆的运动规律也就成了必然。