深海采矿机器人研究：现状与发展

戴 瑜^{1,2,3}, 刘少军^{1,2}

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 长沙矿冶研究院深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 系统全面地介绍了多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物 3 种深海主要矿产资源采矿机器人的作业环境、功能要求以及国内外已有的结构形式设计、已开展的动力学及控制研究等, 总结了我国深海采矿机器人研究取得的成果、存在的不足以及与先进国家相比存在的差距, 提出了深海采矿机器人研究亟待提高的关键技术和发展趋势。

关键词: 深海矿产资源; 深海采矿机器人; 作业环境; 功能要求; 结构设计; 动力学模型; 控制系统

中图分类号: TP242.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0446(2013)-03-0363-13

Researches on Deep Ocean Mining Robots: Status and Development

DAI Yu^{1,2,3}, LIU Shaojun^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. State Key Laboratory of Deep Sea Mineral Resources Development and Utilization Technology,
Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China;
3. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The paper systematically and comprehensively introduces the operation environments, functional requirements, structure designs, dynamic and control researches of the deep ocean mining robots at home and abroad according to different mineral resources, including the polymetallic nodules, cobalt-rich crusts and polymetallic sulfides. The achievements and shortages of the deep ocean mining robots researches in China are summarized, and the existing gaps compared with the advanced countries are pointed out. Finally, the key technologies to be urgently improved and the future development trends of the deep ocean mining robots are proposed.

Keywords: deep ocean mineral resource; deep ocean mining robot; operation environment; functional requirement; structural design; dynamic model; control system

1 引言 (Introduction)

随着陆地矿产资源的日益贫乏和人类对海洋认识的日益深化, 海底正成为人类进军的下一个领域。深海底极为丰富的矿产资源, 被认为是人类 21 世纪最重要的接替资源。当前, 世界各主要工业国家和新兴工业国家正加紧技术储备, 竞相抢占国际海底战略性矿产资源。对于世界新经济体之一的中国来说, 开发利用深海矿产资源已是一项关系国家可持续发展和保障国家长远战略利益的重要事业。

我国先后于 2001 年、2011 年与国际海底管理局签订了《国际海底多金属结核资源勘探合同》、《国际海底多金属硫化物矿区勘探合同》, 分别在东北

太平洋 C-C 区获得了面积 75 000 km² 的多金属结核矿区以及在西南印度洋获得了面积 10 000 km² 的多金属硫化物矿区, 2012 年 7 月率先向国际海底管理局提交了国际海底区域富钴结壳矿区申请, 这也是国际海底管理局收到的第一份相关申请。

我国“蛟龙”号载人潜水器的成功下潜突破 7 000 m, 更是为我国深海矿产资源的开采奠定了勘探基础, “蛟龙”号属运载工具, 其目的之一就是为深海资源勘探和开采做准备。对“蛟龙”号来说, 我国海底多金属硫化物和多金属结核矿区很可能就是它的下一站^[1]。

无论对于何种形式的深海矿产资源的开采, 其海底采矿作业机器人都毫无疑问是整个开采系统技

术链中的首要环节,也是其中技术难度最大、最复杂的部分之一。由于所处深海底为超常极端环境,底质条件复杂,海水数十兆帕高压,电磁波及光波在水中迅速衰减,以及海底矿床的赋存状态特殊,深海采矿机器人的行走开采技术难度丝毫不亚于太空技术。因此,在人造卫星漫天飞行的当今时代,却难以见到在深海底自由行走作业的采矿机器人。

2 深海采矿机器人的作业环境与功能要求 (Operational environments and functional requirements of deep ocean mining robots)

目前已发现并具有商业开采价值的深海矿产资源包括多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物,如图 1 所示。

(a) 多金属结核

(b) 富钴结壳

(c) 多金属硫化物

图 1 深海 3 种主要的矿产资源

Fig.1 Three main deep ocean mineral resources

由于 3 种海底矿产资源成矿机制与成矿规律的不同,可以很明显地看出,其结构形态与赋存状态完全不同。多金属结核以直径仅数厘米的颗粒形状赋存于海底稀软沉积物表层,富钴结壳以厚度仅数

厘米的壳层粘附于地形复杂的海山基岩上,而海底多金属硫化物则以数米高的大块状烟囱形态赋存于海底^[2]。因此,对各自采矿机器人的作业功能提出了不同要求。

2.1 稀软底质多金属结核采矿机器人作业环境与功能要求

多金属结核赋存于水深约 4000 m ~ 6000 m 的海底沉积物表层,以半埋状为主,埋藏深度在 20 cm 以内;结核多为球形或椭球形,粒径一般为 2 cm ~ 10 cm。采矿机器人需在矿区极稀软底质上按预定路径进行连续高效采集,并根据结核输送工艺要求,对采集结核进行脱泥、破碎后,输送至扬矿系统。

通过对我国大洋多金属结核合同矿区水文、地形地貌及沉积物土工特性的多航次勘探与测试,获取如下主要环境参数^[3-4]:

(1) 海底平均海流流速一般为 0.01 m/s ~ 0.15 m/s。

(2) 0 ~ 20 cm 深处的沉积物剪切强度为 0 ~ 10 kPa,贯入阻力为 0 ~ 15 kPa、内聚力为 0 ~ 8 kPa,内摩擦角为 0 ~ 7°。

(3) 地势平坦,可采区平均坡度小于 5°,局部小于 15°,大于 10°的只占 10%。

采集与行走方式是多金属结核采矿机器人的关键技术,提出如下功能要求^[5]:

(1) 行走牵引力大、承载能力强、海底扰动小、携带沉积物少、能耗低、集矿效率高等,具备自动避障、预定轨迹跟踪和防沉陷等能力。

(2) 采集率达 80%以上,脱泥率达 85%以上;接地比压值小于 10 kPa;采集行走速度为 0.2 m/s ~ 1.0 m/s,行走轨迹偏差 ± 1 m;最大爬坡坡度 15°,越障高度 0.5 m,越沟宽度 1 m。

相比富钴结壳和多金属硫化物的开采而言,多金属结核采矿机器人的作业功能要求更为具体与量化。

2.2 复杂地形富钴结壳采矿机器人作业环境与功能要求

富钴结壳矿床主要分布于 400 m ~ 4000 m 水深、海山、中脊和海台的斜坡和顶部表面,厚度一般为 2 cm ~ 8 cm 且分布不均^[6]。采矿机器人需在矿区高低起伏的复杂地形上行走,其采掘头需适应微地形变化,从坚硬的基岩上将薄薄一层的钴结壳破碎剥离,并确保采集率与贫化率。

通过对矿区地形的勘探以及对钴结壳力学特性的测试,获取如下主要参数^[7-8]:

(1) 地形起伏较大,常有台阶、陡坡、峭壁和沟槽,可采区平均坡度则小于 15°。

(2) 钴结壳及大部分基岩抗压强度在 3.7 MPa ~ 36.2 MPa 之间, 90% 钴结壳抗压强度小于 8 MPa, 抗拉强度在 0.5 MPa ~ 6.5 MPa 之间。

破碎、采集以及行走方式是富钴结壳采矿机器人的关键技术, 提出如下功能要求:

(1) 破碎比能耗小, 矿石破碎块度合适, 最大粒径小于 50 mm; 采集率大于 90%, 贫化率(切割的基岩)不超过 25%。

(2) 行走速度 0.1 m/s ~ 0.8 m/s, 爬行坡度大于 30°, 越障高度 1 m, 越沟宽度 0.9 m。

2.3 复杂地形多金属硫化物采矿机器人作业环境与功能要求

多金属硫化物主要分布于 2000 m ~ 3000 m 水深洋中脊和断裂活动带, 其赋存状态为海底崎岖不平的烟囱状石块, 高达数米, 甚至十几米, 富含金、银、铜等大量贵金属。

根据国外某海底多金属硫化物矿区 3 维地形图, 可看出其采矿机器人须具备两种基本功能: 能切削采集大块状多金属硫化物矿石以及能在崎岖不平的矿区稳定行走。

图 2 海底多金属硫化物矿区地形图

Fig.2 Topographic map of the seafloor polymetallic sulfide deposit

通过对所采集样品力学性能进行测试发现, 多金属硫化物的断裂性能类似于煤, 韧性和塑性类似于盐和碳酸钾, 轴向压缩强度小于 40 MPa^[9]。

针对多金属硫化物破碎、采集以及采矿机器人行走等关键技术, 提出如下功能要求:

(1) 矿体切削破碎粒度应适合于管道水力输送, 最大粒径小于 50 mm; 应尽可能多采集矿石碎片以提高回收率, 避免重复切削并抑制微小颗粒在海水中的漂浮扩散, 减少对环境的污染。(2) 行走速度 0.1 m/s ~ 0.5 m/s, 爬坡坡度大于 20°, 越障高度 0.5 m, 越沟宽度 0.6 m。

3 目前已有的深海采矿机器人结构形式设计 (Existing structural designs of deep ocean mining robots)

深海矿产资源开采技术的研究始于 20 世纪 50 年代末对多金属结核开采技术的研究, 70 年代进入高峰期, 相继出现过多种技术原型和样机。富钴结壳和多金属硫化物的开采技术研究基本是在多金属结核开采系统研究基础上进行拓展, 主要集中在针对富钴结壳和多金属硫化物赋存状态的采集技术和行走技术方面。

3.1 多金属结核采矿机器人结构形式设计

到目前为止, 国际上已先后设计和试验了多种结核采矿机器人的集矿方式与行走方式。集矿方式包括了水力式、机械式和复合式 3 种。行走方式包括了拖曳式和自行式两种, 其中自行式又包括阿基米德螺旋式、螺旋桨推进式和履带自行式^[10]。

1978 年, 美国海洋管理公司 (OMI) 就研制了一种采用水力式集矿的拖曳式采矿机器人, 并在东太平洋赤道海域进行了海试, 如图 3 所示, 从 5200 m 水深海底成功采集了约 800 t 的多金属结核^[11]。

(a) 采矿机器人

(b) 水力式集矿原理示意图

图 3 OMI 公司研制的拖曳式采矿机器人

Fig.3 OMI's towed mining robot

20 世纪 70 年代开展的海上试验表明, 拖曳式行走方式无法准确地按预定开采轨迹行走, 避障及操控难度大, 采集效率低, 回采损失大, 采用自行式已为大势所趋。

最初试验的自行式为阿基米德螺旋式, 图 4 所

示为美国海洋矿业公司（OMCO）研制的阿基米德螺旋式采矿机器人，采用链齿机械式集矿头，于 1976 年、1978 年在太平洋夏威夷以南进行了海上试验，从 4 877 m 水深海底成功采集到结核 [12]。阿基米德螺旋式行走方式的主要缺点是螺旋线凹槽易被沉积物敷住，行走打滑严重，承载能力低，转弯困难，对海底扰动大。

(a) 采矿机器人

(b) 机械式集矿原理示意图

图 4 OMCO 公司研制的阿基米德螺旋式采矿机器人
Fig.4 OMCO's Archimedes screw mining robot

图 5 日本研制的拖曳式采矿机器人
Fig.5 Japan's towed mining robot

随后试验的螺旋桨式行走机构牵引力不足、能耗大，对海底扰动更为严重，甚至易将邻近采集路径内的结核吹走或埋入沉积物中，不适应海底开采作业及环保要求。

20 世纪 80 年代初，日本仍对拖曳式采矿机器人进行研究，图 5 所示为日本于 1997 年在太平洋

水深 2 200 m 处海山进行海试时的采矿机器人 [13-14]。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，从而转向自行式采矿机器人的研究。

进入 20 世纪 80 年代，各国开始研究履带自行式采矿机器人。德国是最早开展深海多金属结核资源研究开发活动的发达国家之一，其深海采矿技术研究也处于国际领先水平。图 6 所示为德国锡根大学 20 世纪 90 年代初研制的采矿机器人，采用水力-机械复合式集矿 [15]。

(a) 采矿机器人

(b) 水力-机械复合式集矿原理示意图

图 6 1992 年德国展出的海底履带式采矿机器人
Fig.6 German's seafloor tracked mining robot exhibited in 1992

印度国家海洋技术中心（NIOT）与德国锡根大学（IKS）合作开发履带式采矿机器人。如图 7(a) 所示，2000 年在印度进行了 410 m 水深浅海试验，采集结核最大浓度达到 22%。由于试验区沉积物剪切强度低于 1 kPa，采矿机器人发生了较大沉陷。随后在水深更浅区域进行了采矿系统操控性能的测试，分别进行了开环与闭环控制试验，此次试验区沉积物剪切强度大于 4 kPa [16]。

2006 年进行了 451 m 水深浅海试验，此次试验可认为是 2000 年海试系统进行改进后的一次加强试验，海试机器人如图 7(b) 所示。改进后的采矿机器人长 3.4 m、宽 3.45 m、高 2.5 m，水下重 7.2 t，最大行驶速度可达 0.75 m/s，采矿产量达 12 t/h [17]。2010 年 10 月进行了 512 m 水深试验，此次海试采矿机器

人如图 7(c) 所示, 长 6.2 m、宽 3.4 m, 水下重 8.8 t, 最大行走速度为 0.5 m/s, 采矿产量为 8 t/h^[18-19]. 2011 年初开始针对 6 000 m 水深开采, 开展商业采矿机器人研制计划, 并提出如图 8 所示的模型概念设计方案^[20].

(a) 2000 年海试采矿机器人

(b) 2006 年海试采矿机器人

(c) 2010 年海试采矿机器人

图 7 德国与印度联合研制的采矿机器人

Fig.7 German and India jointly developed mining robots

韩国完成了 1/20 ~ 1/10 规模中试采矿机器人系统的设计研制, 如图 9 所示, 该采矿机器人命名为“MineRo”, 长 5 m、宽 4 m、高 3 m, 空气中重 9.5 t, 水下重 4.5 t, 平均接地比压为 5.7 kPa, 额定集矿能力为 8.6 t/h, 采用水射流-机械复合式集矿. 2009 年 6 月在韩国东海附近进行了 100 m 浅海试验, 计划于 2012 年、2015 年进行 1 000 m、2 000 m 水深采矿

试验^[21].

图 8 德国与印度提出的 6 000 m 水深商业采矿机器人模型概念设计

Fig.8 German and India jointly proposed model conceptual design of 6 000 m commercial mining robot

图 9 韩国 2009 年浅海试验采矿机器人

Fig.9 Korea's mining robot in 2009's shallow ocean test

我国从 20 世纪 90 年代初开始对深海采矿机器人进行研究, 在综合国外已有研究的基础之上, “八五”期间研制了第一代用于多金属结核开采的履带自行式采矿机器人, 如图 10(a) 所示, 长 4.6 m、宽 3 m、高 2.1 m, 水下重 8 t, 行走速度 0.1 m/s ~ 1 m/s, 采用水力-机械复合式集矿.

“九五”期间, 在“八五”研究基础上, 由我国自行设计, 与法国 Cebynetic 公司合作, 改进研制了第 2 代采矿机器人, 如图 10(b) 所示, 长 9.2 m、宽 5.2 m、高 3 m, 水下重 11.7 t, 主要改进为采用了特殊尖三角齿特种合金履带板, 齿高 130 mm, 以提高在海底极稀软底质上的可行驶性; 集矿方式改为全水力式, 以进一步提高集矿效率. “九五”期间研制的第 2 代采矿机器人在云南抚仙湖进行了 135 m 湖试, 能适应稀软底质行走, 从湖底采集回收了模拟结核约 900 kg^[22-24].

(a) 第 1 代采矿机器人

(b) 第 2 代采矿机器人

图 10 我国研制的多金属结核采矿机器人
Fig.10 China's polymetallic nodule mining robots

3.2 富钴结壳采矿机器人结构形式设计

1995 年,美国在国际“海洋工程及其环境”会议上提出了钴结壳采矿机器人设计方案和相关技术问题,推荐的海底自行式采矿机器人如图 11 所示,配有 8 条三角形行走履带,以适应复杂微地形多变的要求,长 13 m、宽 8 m、高 5 m,行驶速度约 0.2 m/s,空气中重 100 t,作业功率 900 kW,采用水力-机械复合式采掘头。装备有 6 个带截齿切割头的机械臂,通过机械臂的上下移动来调节切割头的工作高度,以尽量减少甚至不切削基岩,达到破碎尽可能多钴结壳的目的。破碎的结壳由机械臂后的水力吸矿器吸入储料仓,该机器人具备采剥、集矿、大块破碎分选等功能^[25]。

图 11 美国提出的海底钴结壳采矿机器人
Fig.11 America's seafloor cobalt crust mining robot

日本在 20 世纪 90 年代初研制成功了一台钴结壳岩芯取样机器人,通过该机器人对多处岩芯进行取样操作,掌握了有关开采钴结壳资源的第一手地质资料。此外,日本还在采用螺旋切削式破碎方法的采矿机器人结构设计方面申请了 2 项专利,从专利介绍来看,所设计的采矿机器人均由旋转式截齿采掘头和 2 条或 4 条刚性履带车组成,但未见后续的研究报道^[26-27]。日本同样提出了一种采用 4 条履带进行行走的钴结壳采矿机器人概念设计方案,如图 12 所示,该机器人长 15.8 m、宽 5.7 m、高 4.2 m,水中重达 55 t^[28]。

图 12 日本提出的海底钴结壳采矿机器人概念设计示意图
Fig.12 Schematic diagram of the seafloor cobalt crust mining robot conceptual design of Japan

我国“十一五”期间,在钴结壳破碎采集以及行走技术方面进行了一定研究。主要开展了螺旋滚筒破碎矿石和水力式采集方法研究,研制了破碎采集模型机构^[29]。提出并开展了履带式、轮式、步行式和浮游式 ROV 式等行走方式的设计及其作业行驶性能的仿真。研究表明,铰接履带式行走机构在附着力、承载能力、越障、越沟及爬坡能力、抗多种外力耦合作用能力、可控性等多方面具有明显优势,可作为我国富钴结壳采矿机器人行走方式。

图 13 所示为中南大学设计研制的铰接履带式采矿机器人实验室模型样机,由前履带车、后履带

车和中间铰接机构组成; 采用人字齿形橡胶履带, 降低对行走底质的破坏, 增加与地面的附着性能; 设计为大角度的接近角与离去角, 有效提高越障性能; 三自由度铰接机构可使前后履带车之间产生纵向俯仰、横向侧翻和水平转向相对运动, 以适应复杂地形变化^[30-31]。

图 13 我国研制的铰接履带式钻结壳采矿机器人模型样机
Fig.13 China's cobalt crust articulated tracked mining robot prototype

图 14 Nautilus 公司研制的多金属硫化物采集机器人
Fig.14 Nautilus's polymetallic sulfide mining robot

3.3 多金属硫化物采矿机器人结构形式设计

多金属硫化物采矿机器人是近年来研究的热点. 作为目前世界上唯一在水深超过 1 500 m 处成功进行多金属硫化物勘探、钻探和试采的公司, 澳大利亚 Nautilus 矿业公司在 2006 年便进行了首次海底多金属硫化物原位切削采集试验. 通过在一个 ROV 上加装旋轮式切削刀盘、泵、旋流器和储料仓等在海底进行了原位多金属硫化物的切削和采集试验, 系统如图 14 所示, 试验结果表明海底多金属硫化物能被切成合适的粒度并泵送至储料仓内, 整个原位试验在 13 个地点回收了约 15 t 矿石^[32]. 由于实验中采用的切削刀盘等均是利用目前在其他工业中使

用的现有设备, 因此该试验的目的及作用更多的是验证海底多金属硫化物的可开采性和获取较大规模样品, 而不是对采集技术与装备的设计和研发.

2007 年, Nautilus 公司再次联合多家 ROV 制造商开发了一种由 ROV 搭载的钻探取芯机器人, 如图 15 所示, 该机器人可下潜至海底 1 800 m 水深处直接进行钻探取样, 作业更快更经济并可获得高质量的样品. 钻孔装置包括一个钻杆转盘, 最大钻孔深度为 17 m, 钻孔直径为 52 mm, 2007 年共完成了 92 个钻孔, 岩芯总长达 879 m, 平均矿芯回收率为 72%^[33-34].

图 15 Nautilus 公司研制的多金属硫化物钻探取芯机器人
Fig.15 Nautilus's polymetallic sulfide drilling robot

图 16 Nautilus 公司设计的多金属硫化物商业采矿机器人系统配置
Fig.16 Configuration of Nautilus's polymetallic sulfide commercial mining robots

近年, Nautilus 公司与英国 SMD 公司合作研发了一套针对海底多金属硫化物商业开采的的海底采矿系统, 该系统由 3 台独立的采矿机器人组成, 如图 16 所示, 分别称其为辅助采矿机器人 (auxiliary cutter)、大规模采矿机器人 (bulk cutter) 和集矿机器人 (collecting machine), 均采用履带式行走方式. 其中, 辅助采矿机器人用于在不平整的海底表面开采

突起的海底黑烟囱,平整矿区,为大规模采矿机器人行走采集作业做准备,其切割系统包括两个横向相对转动的滚筒式切削头;大规模采矿机器人在已平整出来的工作面上进行开采作业,其切割系统为一个单筒式切削头,包括下挖和上挖两种模式;集矿机器人则用于收集已切割破碎的矿石浆,并输送至提升系统. 2012 年底,Nautilus 公司已制造完成了 3 种采矿机器人的主要部件,包括切削头等,并开展了 1/4 规模试验,试验结果表明该机器能在海底按预期正常作业,并计划于 2013 年上半年完成全尺寸试验^[35].

2007 年,澳大利亚 Neptune 矿业公司通过分析比较现有的海底作业机器人系统,提出了适合海底多金属硫化物商业开采的概念系统. 其中,与 Nautilus 提出的系统配置类似的是,Neptune 同样提出了两种海底采矿机器人协同作业,一种用于破碎硫化物黑烟囱、平整矿区,另一种则在平整后的矿区进行大规模的行走开采作业. 并与挪威 Nexans 公司合作研制了一款四履带行走海底挖掘机器人,如图 17 所示,长 5 m、宽 4 m、高 2.5 m,空气中重 11 t,机械臂长 6 m,可用于平整多金属硫化物矿床,便于大规模开采^[36].

图 17 Neptune 公司多金属硫化物挖掘机器人
Fig.17 Neptune's polymetallic sulfide excavating robot

4 深海采矿机器人动力学研究 (Dynamic researches of the deep ocean mining robots)

4.1 多金属结核采矿机器人动力学建模与分析

韩国国家海洋研究院 Hong 博士等应用多体动力学仿真分析程序 RecurDyn/LM 构建了中试采矿机器人多体动力学仿真模型,通过用户自定义子程序编写海底稀软底质土力学模型并导入多体动力学模型中^[37],如图 18 所示,通过仿真分析可获得海底采矿机器人实际行走速度、滑转率、沉陷量、车体姿态变化等多个动态特性参数,并详细分析了海底海流方向、海流流速以及海底沉积物力学特性等环境载荷对其行走特性的影响规律,为海底采矿机器人的结构设计优化以及实际海试操控提供参考.

图 18 韩国中试履带式采矿机器人多体动力学仿真模型
Fig.18 Multi-body dynamic simulation model of Korea's pilot tracked mining robot

德国锡根大学 Schwarz 教授等重点研究采矿机器人履带式行走结构与海底沉积物相互作用力学特性,通过一系列实验室模拟实验,获得了相应了压力-沉陷、剪切应力-剪切位移关系式,进而对机器人的静态沉陷、动态沉陷、行走牵引力、行驶阻力等进行了详细计算,并提出了一定的结构优化设计理论与方法^[38]. 图 19 为构建的履带式采矿机器人多体动力学仿真模型.

图 19 德国中试履带式采矿机器人多体动力学仿真模型
Fig.19 Multi-body dynamic simulation model of German's pilot tracked mining robot

国内,中南大学、长沙矿山研究院和长沙矿冶研究院作为我国深海采矿机器人的主要设计研制单位,一直都在针对海底不同矿产资源的开采,开展各类海底采矿机器人的结构设计、动力学建模及控制系统方面的研究工作.

中南大学应用 ADAMS/ATV 多体动力学仿真分析程序构建了我国中试履带式采矿机器人的多体动力学模型,如图 20 所示,对机器人的海底直线行驶、转向行驶、爬坡、越沟、越障等各种行走特性进行了详细分析,为我国实际采矿机器人的结构设计

优化与行走控制提供参考^[39]。

图 20 我国中试履带式采矿机器人多体动力学仿真模型
Fig.20 Multi-body dynamic simulation model of China's pilot tracked mining robot

图 21 我国中试履带式采矿机器人单体动力学模型示意图
Fig.21 Schematic diagram of single-body dynamic model of China's pilot tracked mining robot

针对深海采矿整体系统联动作业过程动力学特性研究的需要,中南大学进一步提出并构建了一种新的可实现快速仿真的基于车体单刚体模型与履带接地段网格单元模型的履带式采矿机器人动力学模型^[40],如图 21 所示,应用该模型与其它深海采矿子系统模型相连接,可实现整个深海采矿系统联动开采作业全过程的快速模拟分析。

4.2 钻结壳采矿机器人动力学建模与分析

在参考国外全地形车结构设计理念及方案基础之上,中南大学提出了新型的铰接履带式采矿机器人结构设计,并应用程序 ADAMS/ATV 建立了铰接履带式钻结壳采矿机器人多体动力学模型以及各类复杂地形模型,如图 22 所示,对采矿机器人在海山复杂地形上的爬坡、越沟、转向等各种行走性能进行了动力学仿真分析^[41]。

图 22 我国铰接履带式采矿机器人多体动力学模拟仿真模型
Fig.22 Multi-body dynamic simulation model of China's articulated tracked mining robot

韩国国家海洋研究院同样设计了一种铰接履带式采矿机器人,并应用程序 RecurDyn/LM 构建其多体动力学仿真模型,如图 23 所示,开展了爬坡、越沟、越障等行走性能动力学仿真分析^[42]。

图 23 韩国铰接履带式采矿机器人多体动力学仿真模型
Fig.23 Multi-body dynamic simulation model of South Korea's articulated tracked mining robot

5 深海采矿机器人控制研究 (Control researches on deep ocean mining robots)

早在 20 世纪 70 年代, 美国 Kennecott、OMA、OMCO 等著名深海矿产资源开发公司先后研制了深海采矿系统供电和控制系统. 此外, 法国研制了 ERIC II 型深海采矿机器人无线遥控和可充电电池供电系统, 美国 C.S. Draper 实验室提出匹配深海采矿机器人行走速度, 优化控制集矿过程参数, 确保采集效率最优的控制方案 [43]. 先进工业国家基本解决了深海采矿尤其是采矿机器人控制系统水下设备的多项关键技术, 提出了水下导航定位方案和行走轨迹优化控制思想.

随着先进控制理论与技术、计算机技术的发展, 深海采矿机器人控制系统软硬件平台有了更好的高技术支撑.

2006 年, 印度与德国联合进行的海试中, 采用了基于虚拟仪器技术的海底采矿机器人控制和定位系统, 如图 24 所示. 整个系统由母船控制中心、采矿机器人控制系统及水声定位系统等组成. 采用 NI Compact Field Point 分布式 I/O 对采矿机器人进行控制和数据采集, 采用 LabVIEW 进行软件 and 用户操控界面开发, 采用基于超短基线的水声定位系统对采矿机器人进行实时位置跟踪定位. 整个系统基于开放式结构组建, 灵活性好, 实时性强 [44-45].

图 24 印度海试采矿机器人控制与定位系统界面
Fig.24 Control and positioning system interface of India's sea trial mining robot

韩国于 2008 年采用实时操作系统对中试采矿机器人进行了试验, 该控制系统主要由 NI PXI 嵌入式控制器、控制监视面板和各种传感器等组成, 采用 LabVIEW 进行软件和操控界面开发, 如图 25 所示 [46].

图 25 韩国海试采矿机器人控制界面
Fig.25 Control interface of Korea's sea trial mining robot

我国深海采矿机器人控制技术研究始于“八五”期间, 1995 年成功开发了多金属结核履带式采矿机器人控制系统, 浅水试验初获成功, 取得了阶段性研究成果, 但同时暴露了主要依赖观测手动操作等薄弱环节.

“九五”期间, 重点研究采矿机器人控制和供电技术, 于 2000 年研制出我国第 2 代采矿机器人控制系统. 控制系统基于 COMPACT PCI-IPC 组成 DCS (分布式控制系统) 层次结构, 控制功能较为完善, 并于 2001 年成功进行 135m 水深湖试, 但由于自身和外部环境等因素, 湖试过程中采矿机器人在软底上行驶控制难度较大, 现有人工控制效果不够理想 [22]. 可以预见, 行走控制问题仍将是 6000 m 深海底采矿机器人的难点之一.

近年来, 国内在深海采矿机器人控制方面开展了一定研究, 主要集中在路径规划和行走控制策略等方面. 提出了海底作业机器人在稀软底质下自动跟踪预定开采路径的控制算法, 提出以 PID (比例—积分—微分) 为速度内环、模糊控制器为方位外环的控制策略 [47]; 研究了深海底复杂环境下采矿机器人在线打滑率的估计, 利用液压系统的状态参数

获取实时的行驶信息, 利用非线性滤波的方法计算出当前时刻的打滑率^[48]; 应用仿真软件构建了钴结壳采矿机器人液压系统的动态模型, 提出了一种以流量补偿和滑转率控制为内环和以方位控制为外环的控制策略并进行了机电液协同仿真研究^[49], 并运用变论域模糊控制理论设计了用于纠正机器人方位偏差的自适应模糊控制器, 完成了铰接履带式采矿机器人按预定路径行走的协同仿真^[50]; 针对深海采矿机器人控制模型、结构参数和外部环境等诸多不确定性, 结合鲁棒控制和神经网络, 设计了深海采矿机器人的自适应鲁棒路径控制策略^[51], 提出采用自适应模糊 PID 控制算法来弥补采矿机器人在行走过程中非线性和不确定因素的影响, 提高了轨迹跟踪精度^[52]。

6 总结与展望 (Conclusions and prospects)

经过 20 多年的研究开发, 我国深海采矿机器人有了一定的发展, 具备了一定的研究基础, 设计并研制了多金属结核中试采矿机器人, 开展了富钴结壳和多金属硫化物采矿机器人采集与行走方法及其技术原型的研究。但与先进工业国家技术水平相比, 仍然存在一定差距, 且离商业开采系统要求还有较大距离。

在多金属结核采矿机器人方面, 虽然我国已于 2001 年进行了中试采矿机器人 135 m 水深湖试, 但关键技术验证不够充分, 机器人在湖底行走距离和采集作业时间有限, 履带行走时存在较为严重的打滑和下陷状况, 操控困难, 暴露出所研制的采矿机器人行驶性能和采集效率未能达到设计要求等问题。同时, 采矿机器人行走作业时的噪音和搅起的淤泥对声学定位系统产生较大干扰, 造成采矿机器人无法实时定位。

在富钴结壳和多金属硫化物采矿机器人方面, 所提出的一些采集和行走技术方案仅进行了一定的原理验证性实验, 尚未开展实物水下实验。就富钴结壳开采而言, 其采掘头与行走装置对复杂微地形的适应性, 破碎剥离技术与贫化率控制等问题还有待进一步深入研究。

因此, 对于我国深海采矿机器人研发而言, 无论是行走性能、采集效率, 或是远程无人操控技术均有待进一步提高, 目前仍无法满足海底矿产资源商业化开采的工程化需要。要实现安全高效智能地开采深海底矿产资源, 对于采矿机器人仍亟需有效提高以下技术:

(1) 适合采集作业区稀软底质环境、满足海洋环

保要求的行走技术。稀软底质上既能有效避免车体打滑与沉陷, 又能提供足够牵引力的行走技术, 在崎岖山地地形上保持车辆姿态平衡稳定的自动行走技术。

(2) 适合海底作业环境的高效采掘技术。采集机构参数优化技术, 采掘头对复杂微地形的自适应技术, 矿石高效采集及降低贫化率技术, 环境友好的矿石高效破碎技术等。

(3) 远程无人操控技术。作业工况实时远距离监控、故障诊断和通信技术, 以及按预定规划路径智能行走技术等。

(4) 水下综合导航定位技术。降低行走与采集过程产生水下干扰的减振降噪技术, 声学与非声学综合水下定位技术等。

参考文献 (References)

- [1] 成舸, 严佳. “蛟龙”号的下一站 [N]. 中国科学报, 2012-07-30.
Cheng G, Yan J. The next station of Chinese manned submersible Jiaolong [N]. China Science Daily, 2012-07-30.
- [2] 阳宁, 王英杰. 海底矿产资源开采技术研究动态与前景分析 [J]. 矿业装备, 2012(1): 54-57.
Yang N, Wang Y J. Research development and prospect analysis of the seafloor mineral resources mining technology [J]. Mining Equipment, 2012(1): 54-57.
- [3] 宋连清. 大洋多金属结核矿区沉积物土工性质 [J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 47-54.
Song L Q. Geotechnical properties of oceanic polymetallic nodule sediments [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21(6): 47-54.
- [4] 陈小玲. 大洋多金属结核矿区表层沉积物的物理性质 [J]. 东海海洋, 2004, 22(1): 28-33.
Chen X L. The physical properties of surface sediments in oceanic polymetallic nodule [J]. Donghai Marine Science, 2004, 22(1): 28-33.
- [5] 简曲. 大洋采矿集矿机的研究 [J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(s2): 783-786.
Jian Q. Researches on the deep ocean miner [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(s2): 783-786.
- [6] 武光海, 周怀阳, 陈汉林. 大洋富钴结壳研究现状与进展 [J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 379-389.
Wu G H, Zhou H Y, Chen H L. Progress in the research of Cobalt2 rich crusts [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(4): 379-389.
- [7] Yamazaki T, Sharma R. Distribution characteristics of Co-rich manganese deposits on a seamount in the central Pacific Ocean [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 1998, 16(4): 283-305.
- [8] Yamazaki T, Chung J S, Tsurusaki K. Geotechnical parameters and distribution characteristics of the cobalt-rich manganese crust for the miner design [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1995, 5(1): 75-79.

- [9] 郭长斌, 刘少军, 戴瑜. 海底多金属硫化物开发动态与前景分析[J]. 海洋通报, 2008, 27(6): 101-109.
- Wu C B, Liu S J, Dai Y. Exploitation situation and prospect analysis of seafloor polymetallic sulfides[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(6): 101-109.
- [10] 戴瑜. 履带式集矿机海底行走的单刚体建模研究与仿真分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Dai Y. Single-rigid-body modeling research and simulation analysis of the tracked miner moving on the seafloor[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [11] 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述[J]. 矿山机械, 2010, 38(10): 4-9.
- Yang N, Chen G G. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(10): 4-9.
- [12] Welling C G. An advanced design deep sea mining system[C]//Offshore Technology Conference: Vol.3. 1981: 247-255.
- [13] Chung J S. Deep-ocean mining technology: Development II [C]//Proceedings of the 6th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2005: 1-6.
- [14] Yamada H, Yamazaki T. Japan's ocean test of the nodule mining system[C]//Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino, USA: ISOPE, 1998: 13-19.
- [15] Handschuh R, Grebe H, Panthel J. Innovative deep ocean mining concept based on flexible riser and self-propelled mining machines[C]//Proceedings of the 4th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2001: 99-107.
- [16] Deepak C R, Shajahan M A, Atmanand M A, et al. Development tests on the underwater mining system using flexible riser concept[C]//Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2001: 94-98.
- [17] Deepak C R, Ramji S, Ramesh N R, et al. Development and testing of underwater mining systems for long term operations using flexible riser[C]//Proceedings of the 7th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2007: 166-170.
- [18] Rajesh S, Gnanaraj A A, Velmurugan A, et al. Qualification tests on underwater mining system with manganese nodule collection and crushing devices[C]//Proceedings of the 9th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2011: 110-115.
- [19] Atmanand M A. NIOT annual report 2011[R]. Chennai, India: NIOT, 2011.
- [20] Atmanand M A. NIOT annual report 2012[R]. Chennai, India: NIOT, 2012.
- [21] Hong S, Kim H W, Choi J S. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]//Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York, USA: ASME, 2010: 75-86.
- [22] “十五”采矿项目总设计师组. 大洋多金属结核中试采矿系统 1000 m 海上试验总体系统技术设计[R]. 北京: 中国大洋矿产资源研究开发协会, 2004.
- General Designer Group of the Mining Project in the Tenth 5-year Plan. 1000m sea trial total system technology design of the deep ocean polymetallic nodules pilot mining system[R]. Beijing: China Ocean Mineral Resources R & D Association, 2004.
- [23] Liu S J, Yang N, Han Q J. Research and development of deep sea mining technology in China[C]//Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York, USA: ASME, 2010: 163-169.
- [24] 吴鸿云. 集矿机牵引性能若干影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Wu H Y. Research on some factors on driving performance of seabed tracked vehicle on seabed soft sediments[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [25] Halkyard J E. Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts[C]//OCEANS. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985: 352-374.
- [26] Takahiro H, Yoshihiro M. Underwater mining machine: Japan, JA2256792[P]. 1990-10-17.
- [27] Takahiro H, Yoshihiro M. Underwater mining machine: Japan, JA2266088[P]. 1990-10-30.
- [28] Goto K, Yamazaki T, Arai R, et al. Effects of microtopography on mining possibility of cobalt-rich manganese crusts[C]//Proceedings of the 8th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2009: 239-245.
- [29] 夏毅敏. 深海钴结壳螺旋切削采集过程仿真和螺旋采集头工作参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- Xia Y M. Simulation of mining cobalt-rich crusts by spiral mining head and optimization of work parameters[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [30] 双志. 基于 CAN 总线的水底采矿车模型机行走控制系统设计与研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Shuang Z. Mobility control system design and research of the seafloor mining vehicle prototype based on CAN bus[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [31] 张敏. 基于模糊神经网络的水底采矿车路径跟踪行走控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Zhang M. Path tracking control research of the seafloor mining vehicle based on fuzzy neural networks[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [32] Nautilus Minerals Inc. Annual report[R]. Toronto, Canada: Nautilus Minerals Inc., 2006.
- [33] Nautilus Minerals Inc. Annual report[R]. Toronto, Canada: Nautilus Minerals Inc., 2007.
- [34] 戴瑜, 刘少军, 李流军, 等. Nautilus 矿业公司在海底块状硫化物勘探中采用的取样技术与装备[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 141-146.
- Dai Y, Liu S J, Li L J, et al. Sampling techniques and equipments for SMS exploration by Nautilus Minerals Inc.[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 141-146.
- [35] Nautilus Minerals Inc. PNG mining and petroleum conference[R]. Sydney, Australia: Nautilus Minerals Inc., 2012.
- [36] Neptune Minerals Inc. Annual report 2008[R]. Sydney, Australia: Neptune Minerals Inc., 2008.
- [37] Kim H W, Hong S. Hydrodynamic effects on dynamics of test miner on soft deep seafloor[J]. Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2007, 24(7): 19-25.
- [38] Schulte E, Schwarz W. Simulation of tracked vehicle performance on deep sea soil based on soil mechanical laboratory measurements in bentonite soil[C]//Proceedings of the 8th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2009: 276-284.

- [39] Li L, Zhong J. Research of China's pilot-miner in the mining system of poly-metallic nodule[C]//Proceedings of the 6th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2005: 124-131.
- [40] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿整体系统动力学建模及联动开采作业过程快速仿真分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 79-88.
- Dai Y, Liu S J. Establishment of the dynamic model of the total deep ocean mining system and fast simulation of its integrated operation process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 79-88.
- [41] Li L, Liu S J, Wu C B, et al. Simulation of motion performance for a cobalt crust miner on seamounts[C]//Proceedings of the 7th (2007) ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2007: 153-157.
- [42] Kim H W, Hong S, Lee C H, et al. Dynamic analysis of an articulated tracked vehicle on undulating and inclined ground [C]//Proceedings of the 9th ISOPE Ocean Mining Symposium. Cupertino, USA: ISOPE, 2011: 97-103.
- [43] 韩晓英. 深海集矿机行走控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- Han X Y. Traveling control research on deep ocean miner[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [44] Ramji S, Rajesh S, Ramesh N R, et al. Design and testing of control and positioning system for underwater mining machine[C]//OCEANS. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 240-244.
- [45] Herzog K, Schulte E, Atmanand M A, et al. Slip control system for a deep-sea mining machine[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 282-286.
- [46] Hong S, Kim H W, Choi J S. A way to accomplish the mining technology for polymetallic nodules[C]//International Seabed Authority Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology: Current Status and Challenges Ahead. Research Triangle Park, USA: ISA, 2008.
- [47] 李力, 邹兴龙. 海底机器人自动跟踪预定开采路径控制[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 152-157.
- Li L, Zou X L. Seafloor robot's control on tracking automatically planning mining paths[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 152-157.
- [48] 陈峰. 深海底采矿机器车运动建模与控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005..
- Chen F. Study on deep seabed mining robot vehicle motion modeling and control[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [49] 李小飞. 铰接式履带车机电液协同仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- Li X F. Mechanical-electrical-hydraulic collaborative simulation research of the articulated tracked vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [50] 邹砚湖. 铰接式履带车预定路径行走控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- Zou Y H. Planning path tracking control research of the articulated tracked vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [51] 陈勇. 深海采矿移动机器人的鲁棒控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- Chen Y. Robust control on mining moving robot for deep seabed mining[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [52] 朱洪前. 复杂作业环境下的深海采矿机器人轨迹跟踪研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- Zhu H Q. Study of trajectory tracking for a deep-sea mining robot operating in a complex environment[D]. Changsha: Central South University, 2010.

作者简介:

戴瑜 (1981-), 男, 博士后, 讲师. 研究领域: 深海采矿机器人动力学及控制, 车辆地面力学.

刘少军 (1955-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 深海作业装备设计与控制, 工程机械混合动力技术.