



深海矿物提升无人运输系统体系架构研究与展望

陈德山^{1,2,3}, 刘炯炯^{1,2,3}, 赵江滨^{1,2,4}, 胡欣珏^{1,2,3}, 卢明剑^{1,2,3}, 汪洋^{1,2,3}, 李磊⁵, 严新平^{1,2,3,4*}

1. 水路交通控制全国重点实验室, 武汉理工大学, 武汉 430063
2. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉理工大学, 武汉 430063
3. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063
4. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063
5. 招商局船舶工业集团有限公司, 深圳 518067

* E-mail: xpyan@whut.edu.cn

收稿日期: 2025-12-31; 接受日期: 2026-03-06; 网络版发表日期: 2026-03-26

中国工程院咨询项目“海洋装备产业链高质量发展战略研究”(编号: 2024-XBZD-01)资助

摘要 深海蕴藏的多金属结核、富钴结壳等矿产资源, 因其万吨级储量及锂、钴、镍等关键金属的高度富集, 已成为全球资源竞争的焦点. 针对深海矿物运输面临跨介质协同效率低、极端环境适应性弱以及运维成本高昂等瓶颈问题, 本文提出一种面向6000 m级作业环境的深海矿物提升无人运输系统架构. 该架构由无人运载装备、通信网络系统、调度控制中心及支持保障系统等核心模块构成, 基于“无人载具-智能协同-动态调控”的设计理念, 实现柔性化架构、智能化控制和模块化设计的协同突破. 通过构建“空-海-底”多维协同框架, 融合深海浮力驱动、精准对接机制、通信定位与数字孪生等关键技术, 将为有效保障矿物提升效率与系统运行可靠性提供技术支撑. 本研究为深海矿物资源的智能化运输体系建设提供了一种全新思路.

关键词 深海矿物运输, 无人运输系统, 空-海-底协同架构, 技术展望

1 引言

深海矿物资源以其万吨级储量与关键金属元素(锂、钴、镍等)高度富集的特性, 已成为全球资源开发中极具价值的新兴领域^[1]. 当前国际深海勘探聚焦三类核心矿产: 广泛分布于洋底的多金属结核、热泉活动区的多金属硫化物以及海山斜坡的富钴结壳^[2]. 国际能源署(International Energy Agency, IEA)预测, 为实现碳中和目标, 全球锂、钴、镍需求量将分别激

增42倍、21倍和19倍^[3]. 在此背景下, 国际海底区域蕴藏的3.4万吨多金属结核、220亿吨富钴结壳等资源, 将成为破解我国重要观察资源“卡脖子”困局的关键突破口^[4-6]. 《“十四五”海洋经济发展规划》明确将深海资源开发列为国家重点发展方向, 叠加当前地缘政治冲突引发的全球供应链重构, 推动深海资源自主开发技术突破已成为保障国家资源安全的迫切需求^[6].

在深海采矿产业链中, 运输系统作为连接海底采

引用格式: 陈德山, 刘炯炯, 赵江滨, 等. 深海矿物提升无人运输系统体系架构研究与展望. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1026–1039
Chen D S, Liu J J, Zhao J B, et al. Discussion and prospects of the system architecture of deep-sea mineral lifting autonomous transportation system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1026–1039, doi: 10.1360/SST-2025-0460

集与水面处理的枢纽环节, 其技术水平直接决定商业化开发的可行性^[7-9]. 当前, 管道提升技术已成为深海矿物运输的主流方案, 并在多项国际和国内海试中得到验证, 展现出一定的工程成熟度. 然而, 随着作业水深向6000 m级延伸和商业化规模的扩大, 该技术在极端环境下仍面临若干关键挑战: 其一, 超长立管需抵御风浪流联合作用下的复杂动态载荷与涡激振动, 确保结构完整性; 其二, 内部高浓度多相流输送易引发堵塞、高磨损以及大功率中继泵在高压环境下的长期可靠运行难题; 其三, 实现整个系统在紧急情况下的快速安全脱离. 尽管水下航行器、人工智能、数字孪生等新兴技术已开始逐步应用, 但其功能定位仍集中于单体装备或单点场景, 尚未形成面向新型深海矿物大跨度立体运输的系统性耦合设计^[10]. 我国作为全球首个拥有5个国际海底专属勘探矿区的国家, 具备无人化、智能化特征的深海运输系统亟需突破, 以抢占全球资源开发技术制高点^[11].

为加快形成深海运输领域“新质生产力”, 本文聚焦深海矿物运输“效率-能耗-安全”的多维瓶颈, 提出一种6000 m级深海作业环境的矿物提升立体无人运输体系架构. 该架构基于“空-海-底”多维协同理念, 融合浮力驱动、精准对接、数字孪生等关键技术, 实现柔性化架构、智能化控制与模块化设计的协同突破, 旨在为深海资源开发提供“无人化、全流程、高可靠”的运输技术范式, 为我国抢占全球深海资源开发技术制高点提供核心支撑.

2 技术现状分析与发展趋势

2.1 深海矿物提升技术发展历程现状

深海矿物提升技术的演进历经了多代技术迭代, 总体呈现从简陋机械化向精密智能化的发展趋势^[11]. 国际层面, 深海矿物提升技术的探索可追溯至20世纪60年代: 美国地质学家约翰·梅罗(John Mero)于1960年提出了拖斗式采矿系统, 该系统由采矿船、拖缆和铲斗3部分组成, 虽结构简单, 但因可控性差、效率低下未实现商业化^[10]. 1967年, 日本提出连续链斗法采矿系统(continuous line bucket system, CLB), 通过串联铲斗环状循环作业实现连续采集, 但受限于轨迹难控制、空载回程占比高等问题, 仅适用于浅海平整地形^[12,13]. 20世纪70年代成为技术突破期: 1979年法国

提出的自由穿梭式采矿系统, 创新性地采用了“压载下潜-抛载上浮”的作业模式, 通过压舱物调节实现水下自主运动, 显著提升了机动性^[14,15]. 同期, 以肯尼科特跨国财团(Kennecott consortium, KCON)为代表的国际团队在太平洋克拉里昂-克里帕顿(Clarion-Clipperton, CC)区完成了多次5000 m级深海采矿中试, 验证了水力与气力提升技术的可行性^[16], 推动“海底采集-管道提升”架构成为行业主流范式并沿用至今.

2.2 国外深海矿物提升运输技术研究现状

近年来, 国际顶尖企业、科研机构及跨国联合体持续加码深海运输技术的智能化与深海化升级, 正推动形成多区域协同竞争的发展格局: 欧盟FP7资助的BLUE MINING项目, 为解决欧洲高科技产业关键金属供应短缺问题, 围绕6000 m水深的已灭绝海底块状硫化物矿床(extinct seafloor massive sulphides, eSMS)与海底多金属结核(seafloor manganese nodules, SMnN), 在勘探、评估、开采全链条实现突破——勘探环节搭配AUV(autonomous underwater vehicle)配套自电位勘探仪与自动化图像分析系统, 评估环节形成可行性研究蓝图, 开采环节攻克无堵塞垂直运输系统与6级海况船对船转运技术, 构建起可持续深海采矿价值链的技术基础^[17]; 挪威康士伯集团(Kongsberg Gruppen)依托其深海无人装备核心技术积累, 在深海运输领域聚焦模块化与绿色化方向, 其研发的混合燃料动力技术已应用于矿产运输辅助船, 系统集成SAVe储能系统与混合轴带发电机, 通过动态功率平衡技术优化运行效率, 船舶在港口操纵作业时无需依赖辅助发动机, 为深海采矿母船的动力系统升级提供了成熟方案; 日本海洋科学技术振兴机构(Japan Organization for Metals and Energy Security, JOGMEC)于2020年7月在日本南鸟礁南部约1000 m级深度, 成功实施世界首次富钴结壳采矿试验: 使用改造自海底热液矿床的采矿设备, 在斜坡、沙土等不同海底地形下测试矿物转运效率与设备运行稳定性, 并同步建立“试采前评估-试采中监测-试采后数据分析”的环境监测体系, 采集浊度、再沉积物等实测数据, 为运输系统的环保优化提供支撑; 2025年8月, 美国稀土冶炼公司——美国资源公司(American Resources Corporation, AREC)分别与非凡金属公司(Impossible Metals)、美属萨摩亚经济发展委员会(American Samoa Economic Development

Council, AMEDC)签署合作谅解备忘录, 聚焦深海多金属结核提炼项目, 意在打造美国本土首个深海矿产供应链。这一系列密集的技术研发与产业布局行动, 本质上是全球高科技产业关键矿产资源需求激增与陆地资源禀赋衰减、供给约束加剧之间矛盾的直接体现。深海矿产开发已成为缓解资源短缺压力、保障产业链供应链安全的关键领域。

2.3 国内深海矿物提升运输技术研究现状

我国自20世纪80年代末开始深海采矿管道输运技术研发, 聚焦多金属结核开采技术攻关, 并同步拓展富钴结壳与多金属硫化物的系统研究。通过技术方案设计、陆上验证、海上单体试验以及系统联合海试的完整研发链条, 我国逐步构建了深海矿物提升技术体系。21世纪以来, 通过系列标志性试验实现技术跃升, 包括: 2001年完成135 m水深的采矿系统湖试; 2016年开展南海500 m级矿浆水下循环试验; 2021年研发深海矿产智能化混输系统; 2022年实现南海1300 m级全系统采矿联动作业。我国逐步形成了覆盖中深水域的技术能力, 整体迈入国际第一梯队^[18,19]。近年来, 深海矿物提升技术创新逐渐聚焦智能化与绿色化。我国在该领域实现多项突破性进展: 2024年, 中国五矿集团长沙矿冶研究院成功研制全球首台600 m级智能电驱深海重载采矿车, 采用永磁电机驱动与光纤供电技术, 将故障率较传统液压系统降低40%, 为多金属结核规模化开采提供核心装备支撑; 上海交通大学研发的“开拓二号”全电驱采矿车在南海4000 m级海试中首创“深海复杂地形高机动行进技术”, 实现该深度陡峭海山环境下关键矿物的高效采集; 2025年6月, 中国海油发布自主品牌“擎海Techhigh”水下生产系统, 实现1500 m超深水采油树国产化, 集成智能控制模块与数字孪生运维系统, 创新油气-矿物混合开采模式; 2025年11月, 中国石油大学(北京)牵头研制的全球首台套6000 m级深海采矿非金属非黏结智能柔性混输管, 在南海103 m水深完成海试, 实现矿浆最大体积浓度15%、稳定流量457 m³/h的输送指标, 攻克了超深水运输管道的耐磨与健康监测难题。这些突破为我国构建自主可控的深海资源开发体系奠定了核心基石。

综上所述, 现有深海矿物提升运输技术与系统试验主要围绕多金属结核资源展开, 其技术路线在一定程度上依赖于该类矿产颗粒尺度相对均一、力学

强度适中、赋存环境较为平缓等特征, 因此多采用连续管道输送或批次提升相结合的运输模式。相比之下, 富钴结壳与多金属硫化物等矿产类型多赋存于海山斜坡或热液区, 其采集方式、前处理流程及对提升运输系统的结构与运行要求均存在显著差异, 相关研究仍处于探索阶段, 尚未形成成熟统一的技术范式。基于上述分析, 本文后续提出的提升无人运输系统体系架构主要面向深海多金属结核开采场景, 并在此基础上探讨其在该类型深海矿产中的扩展适用性。

2.4 技术分析与发展趋势

从技术原理的迭代路径看, 深海矿物提升技术的演进始终围绕效率提升、环境适配与成本优化三大核心目标。

早期机械驱动技术因固有缺陷已被淘汰, 物理能驱动技术成为主流。其中, 气力提升依托气液混合流原理, 虽无需复杂机械传动, 但受限于空化效应, 在深水环境下输送效率骤降, 且需匹配大直径管道, 工程难度和成本激增, 目前仅在浅海小范围试验^[20]; 水力提升通过高压水流驱动矿浆沿管道输送, 在深水环境下仍能保持较高效率, 且矿浆密闭传输可降低泄漏风险, 兼具效率与环保优势, 成为当前商业化开采重点关注的技术^[21]。表1系统对比了现有技术模式的原理特性与适用场景, 为商业化开发的技术路线抉择提供科学参照。

现代技术创新正沿智能化与高可靠性方向深度拓展: 全电驱技术通过永磁电机与水下变频器的协同应用, 将传统液压系统故障率大幅降低; 数字孪生技术与边缘计算的融合, 则推动运维模式从被动维修向预测性维护转型^[22,23]。面向未来, 技术发展将超越单点突破, 转向构建智能化、协同化与高韧性的新一代系统。其演进将聚焦于两大协同体系的重构。

其一, 构建“空-海-底”一体化立体运输体系。通过天基、水面、水下通信网络实现全域覆盖与跨域互联, 将海底无人采矿机、水中自主运载器与水面支持母船有机整合为协同作业的整体, 形成多层空间运输装备的优化组合与高效衔接, 最终构建贯通全海域的跨介质立体运输新模式^[24]。

其二, 创新“自主作业为主、远程接管为辅”的韧性作业新范式。通过智能运行控制, 实现运输任务的动态分配与路径规划, 创新“韧性生产”模式, 当系统

表 1 深海矿物提升技术模式与特点对比

Table 1 Comparison of modes and characteristics of deep-sea mineral lifting technology

作业模式	提出/试验时间	代表国家/机构	代表性载体/系统	主要特点	局限性
拖斗式	1960	美国	采矿船+拖缆+铲斗系统	结构简单、成本低廉	可控性差、效率低下
连续链斗式	1967	日本	串联铲斗环状循环系统	可实现连续采集	轨迹难控制、缠绕问题、空载回程占比高
自由穿梭式	1979	法国	水下机动性较强	水下自主运动、机动性强	提升规模和效率有限
管道提升式 (水气力混合)	1978	KCON	太平洋CC区5000 m级管道中试系统	验证两种提升方式可行性、输送效率较高	深水下气力效率衰减、水力泵可靠性有限
管道提升式 (全系统联调)	2022	中国	南海1300 m级全系统联动作业	全流程验证、智能化混输控制	商业规模能耗与可靠性待提升
智能化电驱 重载采矿	2024	中国	“开拓二号”全电驱采矿车	全电驱、高机动、混合开采	极端环境长期可靠性待验证

中任一运输单体发生故障时,可即时将其隔离,并由剩余运力无缝接管,从而在复杂深海环境下确保整体运输产能的稳定与连续,极大提升系统在极端扰动下的作业鲁棒性与任务可靠性.

3 深海矿物提升无人运输系统的定义与特征

3.1 深海矿物提升无人运输系统的定义

深海矿物提升无人运输系统是面向6000 m级超高压深海环境构建的全智能化、无人化运输体系,核心目标是实现矿物从海底至水面的高效跨介质运输.该系统突破传统的技术局限,通过构建“自主运行-智能协同-远程接管”的三级控制体系,实现矿物运输全流程自动化作业.其技术范畴涵盖从海底采矿基站装载接口到水面母船封闭式卸载终端的全链条,整合水下无人载具集群、立体通信网络、智能调度中枢及全流程保障系统,形成贯通“海底-水中-水面”的跨介质运输技术闭环.

3.2 深海矿物提升无人运输系统的特征

现有深海矿物提升技术主要依赖于立管道输送模式.然而,超长立管不仅需抵御风浪流引发的复杂动态载荷与涡激振动,其内部还面临多相流输送易堵塞、高磨损以及大功率中继泵在高压环境下长期可靠运行的难题^[25,26];此外,系统在紧急情况下应急脱离困难,整体运行的灵活性与适应性存在明显的局限性^[23].

这些挑战从空间适配性、功能自主性与运维扩展性三个维度,共同制约了传统技术的商用前景.

针对上述瓶颈,本研究提出深海矿物提升无人运输系统.该系统通过构建“空-海-底”立体协同架构,以体系创新实现技术跨越,其核心特征可归纳为柔性化、智能化与模块化(如图1所示).

3.2.1 柔性化

构建“空-海-底”三层耦合的柔性化时空架构,突破传统平面作业的空间约束与刚性协同瓶颈.该架构以跨介质协同为核心,通过天基通信网络、海面母船作业集群、水下运输载具与海底矿物基站的多层级联动,实现能量、物质、信息在海洋三维空间的动态流动与时空耦合,从根本上解决多层级作业的协同断层问题,为深海矿物运输提供全域空间的物理支撑^[27,28].

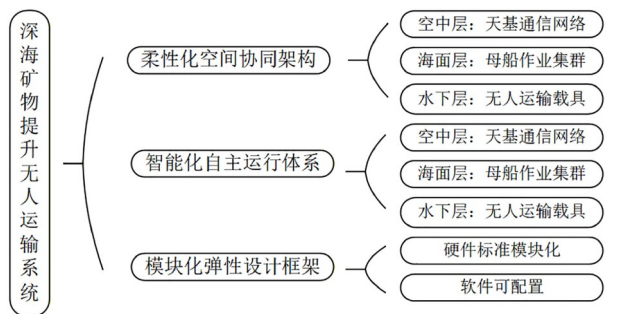


图 1 深海矿物提升无人运输系统特征
Figure 1 Characteristics of the deep-sea mineral lifting unmanned transportation system.

3.2.2 智能化

通过多学科技术融合构建全流程智能化作业能力. 在动力控制、信息交互与运维管理层面, 集成自主驱动、精准对接、抗干扰通信、动态定位及数字孪生等技术, 构建“自主决策-动态适配-智能运维”的闭环控制体系, 推动系统逐步摆脱人工干预依赖, 实现复杂深海环境下的作业流程自主规划、工况动态响应与故障提前预警, 显著提升系统运行可靠性与效率^[29~31].

3.2.3 模块化

模块化设计理念贯穿系统全要素构建, 构建“硬件即插即用、软件灵活配置”的弹性架构^[32]. 硬件层面, 核心模块采用标准化接口快速适配不同矿区的地质特征与作业水深; 软件层面, 基于容器化微服务架构实现

控制算法的远程迭代升级, 支持作业策略随海洋工况动态调整. 这种硬件-软件协同的模块化设计可大幅缩短矿区适配周期、降低运维成本, 既覆盖深海采矿场景的多样化需求, 又为产业化规模扩展赋予技术弹性, 加速推动深海资源开发向商业化应用跨越.

为进一步说明本文所提出无人提升运输体系与传统立管管道提升方式在系统构型、能效路径及规模化潜力等方面的差异, 表2给出了两种提升方式的对比分析.

4 深海矿物提升无人运输系统的体系架构

4.1 总体架构

深海矿物无人运输系统以“空-海-底”立体时空架构为核心(如图2所示). 通过空间分层与时间流程的智

表 2 传统立管管道提升方式与无人提升运输体系的对比

Table 2 Comparison between the conventional riser pipeline lifting method and the unmanned lifting-transportation system

系统类型	系统构型	关键风险点	能效路径	韧性与可维护性	规模化扩展	适配性
传统立管管道提升	母船+超长立管+提升泵, 连续输送	立管动载/VIV; 堵塞磨蚀; 单点失效	高功率泵送, 持续克服水头	检修代价高, 需整体停工	扩展依赖立管/泵能力, 成本高	对矿浆粒度/浓度敏感
无人提升运输体系	母船/平台+海底基站+多载具并行	载具/对接/调度复杂, 但可冗余	浮力驱动为主, 推进为辅	模块化更换, 故障隔离	增加载具/基站即可扩展	货舱与对接策略可调

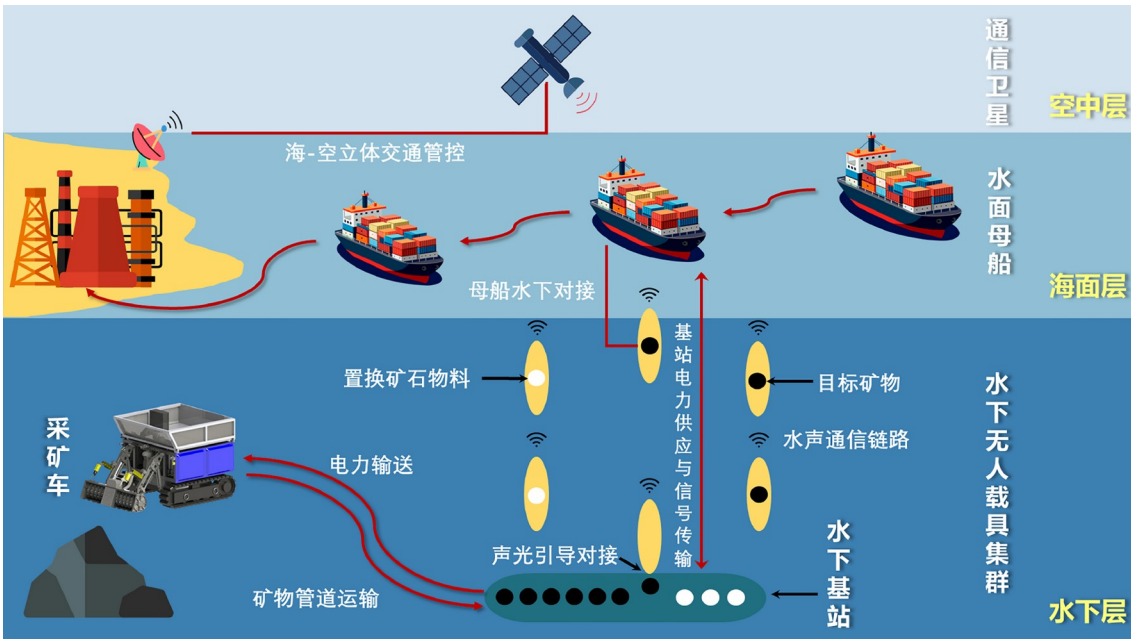


图 2 (网络版彩图)深海矿物提升无人运输系统的总体架构

Figure 2 (Color online) Spatiotemporal architecture of the deep-sea mineral lifting unmanned transportation system.

能耦合, 实现能量、物质、信息在跨介质维度的动态适配, 构建深海矿物高效提升提供时空一体化系统总体架构。

4.1.1 空中层

空中层以卫星通信网络为依托, 构建具备全域信息管控能力的“天基管控中枢”。除提供水面母船与水下设备间的跨介质数据传输链路外, 还集成无人机群与遥感载荷, 实现对海面风浪流场、气象条件及作业区域的实时环境监测与预警; 同时, 支持海面船舶的交通管控, 包括动态路径规划、冲突避让与作业调度, 为系统在复杂海况下的协同控制与安全运行提供全面感知与决策支撑^[33,34]。

4.1.2 海面层

海面层以水面母船作为核心节点, 聚合多艘作业船舶形成海面调度中枢。基于立体交通管控算法, 融合船舶航行轨迹、水下载具运动参数及海洋环境数据, 动态优化资源调配策略, 实现作业流程的实时工况自适应调整, 保障物质运输的安全性与时效性。

4.1.3 水下层

水下无人运输载具作为跨水层运输载体, 搭载分层速度控制与压载水智能调控模块, 自主完成“负浮力下潜-零浮力巡航-正浮力上浮”的三维运动适配。通过声光电导融合定位技术, 实现与海底基地的厘米级精度对接, 贯通海底与海面的垂直运输通道。深海采矿水下基站作为海底作业母站, 集成矿物管道输送与电力传输双系统, 构建“能源-物料”垂直传输枢纽, 通过流体动力学优化保障管道输送稳定性, 依托智能分拣与缓存技术实现多类型矿物高效中转, 同时借助海底电缆网络为水下载具及周边设备持续供能。

该架构通过“空中-海面-水下”三层硬件链路 with 软件算法深度协同, 实现空间分层与时间流程的智能耦合, 驱动系统在复杂海洋工况下自主协同运行, 达成能量、物质、信息的跨介质流动与适配, 构建起覆盖海洋全维度、贯穿作业全周期的无人运输体系, 为深海矿物的高效提升提供时空一体化的物理支撑^[35]。

4.2 系统组成

深海矿物提升无人运输系统面向6000 m级“全水

深”、“全流程”、“高自主”作业需求, 构建“功能模块化+跨介质协同”的创新架构, 通过无人运载装备、通信网络系统、调度控制中心、支持保障系统四大核心模块的有机耦合, 形成覆盖“海底-水体-水面”全作业链的技术闭环, 系统整体框架如图3所示。

4.2.1 无人运载装备

无人载具作为矿物运输的执行主体, 核心功能是实现矿物从海底基站至水面母船的“下潜-装载-上浮-卸载”全流程无人化运输, 无人载具整体结构如图4所示。

如图5所示, 针对深海环境特性, 本研究设计压载

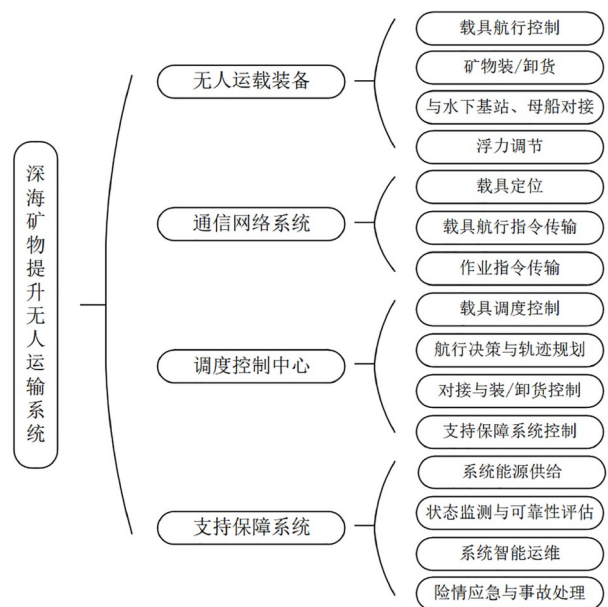


图3 深海矿物提升无人运输系统的整体架构

Figure 3 Framework of the deep-sea mineral lifting unmanned transportation system.

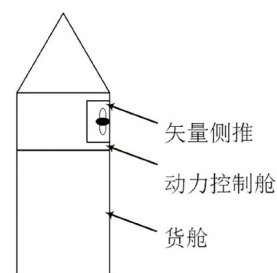


图4 无人载具结构示意图

Figure 4 Schematic diagram of the unmanned vehicle structure.

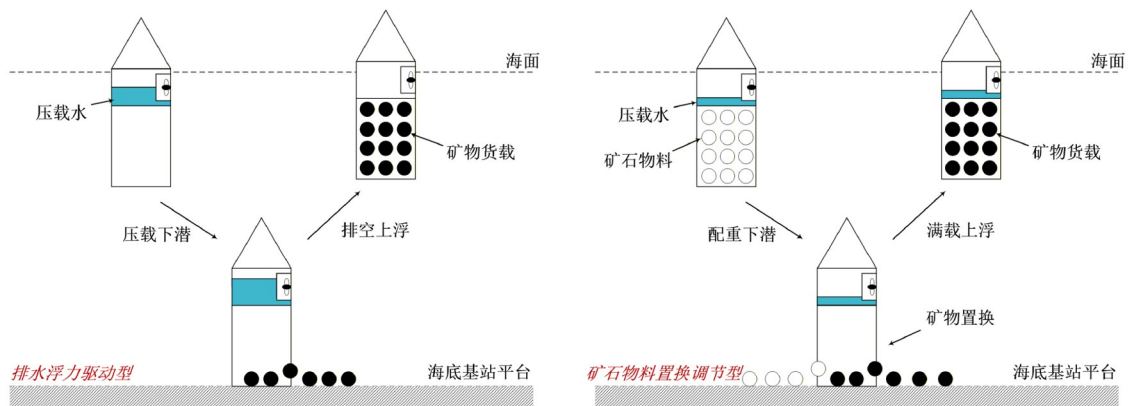


图 5 (网络版彩图)无人载具作业流程示意图
Figure 5 (Color online) Operation process of unmanned carrying equipment.

水调控与置换物料调节两种浮力控制方案：前者依托压载水仓与超深水泵动态调整浮力；后者以低成本无害矿石物料为压载介质，下潜时依托该物料自重实现沉降、抵达作业区后置换目标矿物，通过配重物料与目标矿物的重量差额自然产生上浮浮力。同时，该方案仍配置少量压载水，用于姿态浮力微调，既降低能耗又协同解决相关物料的科学处置与循环利用难题。两类方案均集成矢量侧推保障运动灵活度，搭配模块化密封货舱与自主控制算法，实现常态下自主作业、异常工况下接受远程指令。

4.2.2 通信网络系统

通信网络系统作为深海矿物提升无人运输系统的信息交互中枢，核心功能是构建“水下-水面”双向通信链路，保障无人载具集群、海底基站与水面控制中心之间的实时数据交互与协同作业，整体架构如图6所示。该系统通过四层结构实现全域信息支撑：基础组网层依托水声基站、移动中继节点、浮标系统及环境监测传感系统搭建水下通信基底，以成熟的水声通信技术为主干，提供公里级覆盖与稳定可靠的低延迟传输，支持状态监测、指令下发与任务协调；空间支撑层由高精度定位系统构成，融合水声信标阵列与地磁匹配模块，提供厘米级三维定位能力；冗余保障层水声主链路基础上，辅助集成激光通信终端与双模应急切换机制，仅在近距精准对接或集群协作阶段作为高速备份，提升系统鲁棒性；智能管控层则通过集群控制系统与数据处理中心，实现全网络的智能调度与管理。

4.2.3 调度控制中心

调度控制中心作为系统协同作业的决策核心，通过任务分配与管理、航行决策与轨迹规划、对接与装卸载控制、支持保障系统控制四大模块，实现无人载具集群的全流程管控，组成架构如图7所示：任务管理模块动态调配载具数量、航行速度与载荷分配，精准适配矿物产量需求；轨迹规划模块融合海流、地形、障碍物等环境感知数据，通过动态路径更新与虚拟航道预规划，生成安全高效的航行轨迹；对接控制模块借助水声-视觉融合引导实现载具与基站/母船的毫米级精准对接，通过PID(proportional-integral-derivative)控制算法保障矿物装卸载的密封性与连续性；支持保障模块集成故障快速识别与应急处理、集群协同作业

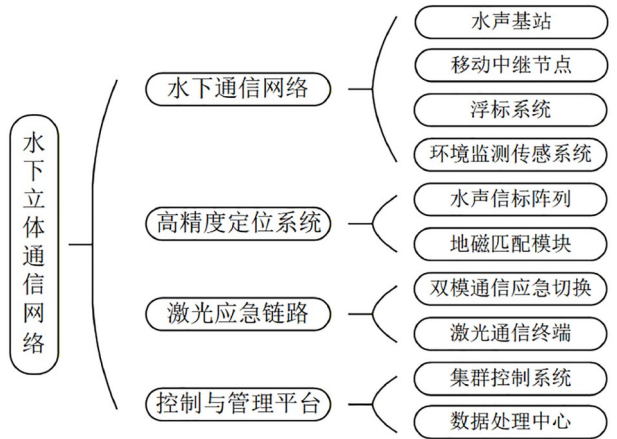


图 6 水下立体通信网络组成部分
Figure 6 Components of the underwater three-dimensional communication network.

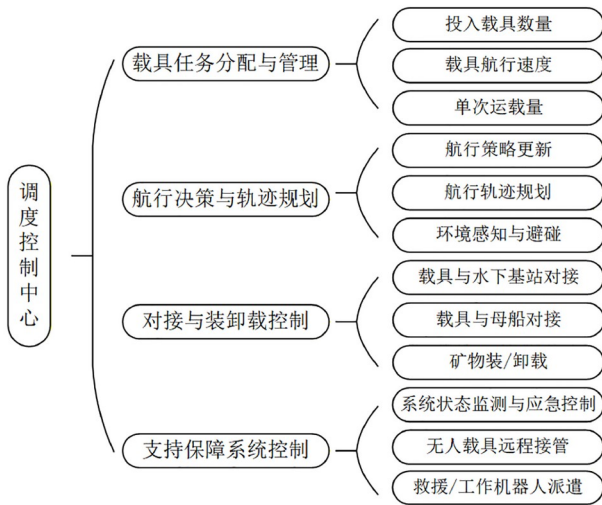


图 7 调度控制中心组成架构

Figure 7 Composition architecture of the dispatching and control center.

管理及能源时序优化, 增强系统鲁棒性与能效。

4.2.4 支持保障系统

支持保障系统是全流程可靠性的基础支撑, 以能源供给、状态监测、故障运维及应急处置为核心功能, 确保系统在极端环境下的持续稳定运行。其通过能源管理模块为无人载具提供长续航动力, 并优化能源分配策略以降低回收频率; 依托多源传感器实时采集设备运行数据, 实现全系统可靠性健康监测; 结合数字孪生技术预测潜在故障并生成精准维护策略; 同时构建多层次救援体系, 快速响应载具故障或环境突变, 整体架构如图8所示。

4.3 作业模式

深海矿物提升无人运输系统采用“自主作业为主、远程接管为辅”的混合控制模式, 通过“压载调节-精准对接-浮力驱动-动态卸载”的闭环流程, 实现6000 m级深海环境下矿物运输的高效化与智能化(如图9所示)。作业流程深度融合四大系统协同逻辑, 具体步骤如下。

(1) 压载下潜与分层调速: 无人载具通过压载系统主动增重, 结合分层速度控制算法分阶段调节下降速率, 精准定位至深海采矿基站作业区。

(2) 声光协同精准对接: 依托声信标远距离引导与光学近距离精导系统, 载具与水下基站完成厘米级对

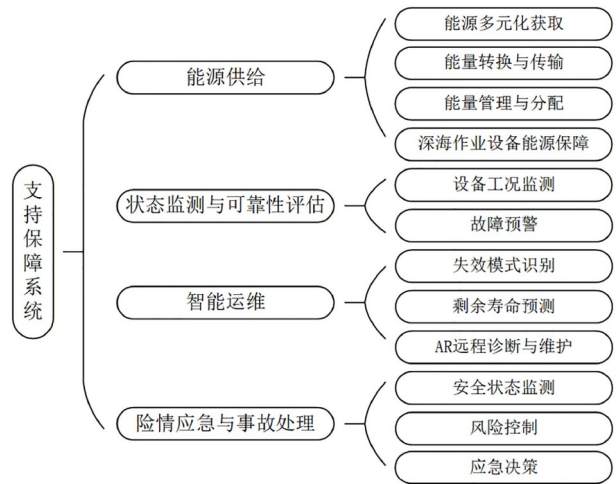


图 8 支持保障系统组成架构

Figure 8 Composition architecture of the support and guarantee system.

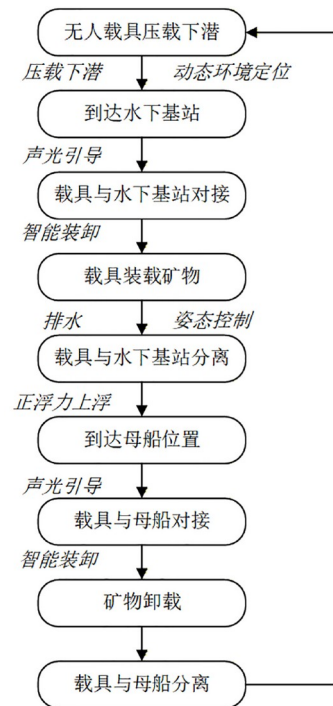


图 9 深海矿物提升无人运输系统作业流程

Figure 9 Operation process of the deep-sea mineral lifting unmanned transportation system.

接, 并通过机械锁紧机构实现刚性连接, 保障矿物装载稳定。

(3) 浮力调控与可控上浮: 装载完成后, 载具启动排水形成正浮力, 采用分层速度控制策略规避浅层湍

流扰动,以渐进加速模式上浮至近水面区域。

(4) 母船动态对接与卸载:与载具母船甲板导引装置协同,完成波浪补偿下的动态对接;矿物经封闭式传输系统卸载后,载具与母船分离并重置压载状态,进入下一作业循环。

5 深海矿物提升无人运输系统的关键技术

5.1 深海浮力驱动与精准对接技术

该技术针对深海6000 m级超高压环境下传统压载水舱能效衰减、调控延迟的技术瓶颈,通过结构创新与控制算法融合,构建适配深海的浮力驱动与精准对接体系,突破传统运输系统在深海环境中的机动性与对接精度限制,核心技术要点如下。

(1) 浮力驱动架构

采用钛合金球形耐压舱体与模块化集装箱货舱作为基础结构,创新设计“配重矿石物料+压载水”协同驱动系统:下潜阶段依托无害矿石配重物料自重实现负浮力沉降,作业后通过配重物料与目标矿物的重量差额产生正浮力驱动上浮,并结合压载水舱与矢量侧推进行姿态与浮力微调,替代传统单一压载水驱动模式,有效解决深海高压环境下的能效损耗问题。

(2) 机动性优化

突破圆柱体型布局的水平机动性局限,集成矢量侧推装置与全向动力布局,结合动力分配优化算法,在实现与海底基站、母船厘米级精准对接的同时,大幅降低侧推能耗,延长复杂海况下的连续作业时长。

(3) 控制算法创新

开发融合浮力调节、水平运动与装卸操作的全流程自主控制算法,嵌入姿态风险动态补偿机制与故障

诊断系统,通过多维度控制逻辑协同,实现深海环境下运输载具的三维运动精准调控与厘米级对接可靠性。

(4) 工程可行性论证与关键指标测算

在上述浮力驱动与精准对接技术框架下,有必要对无人载具的浮力配置能力、垂向能耗水平以及系统级运行能力进行数量级论证,以验证其在6000 m级深海环境中的工程可行性。

以单台载具装载能力50 t为设计工况,取海水密度为 1025 kg/m^3 ,则形成等效正浮力所需的排水体积变化量约为 $48\sim 50 \text{ m}^3$ 量级。该体积变化并非依赖持续高功率排水实现,而是通过“配重矿石物料—目标矿物—压载水”三者之间的质量置换协同完成,即在下潜阶段加载配重形成负浮力,到达海底后释放配重并装载矿物,通过密度差与质量差形成正浮力。由于浮力转换主要来源于结构质量变化,而非泵送功率输入,因此该模式在机理上避免了传统压载水系统在深海高压环境下效率衰减与能耗急剧上升的问题,工程实现路径清晰且可控。

载具在流体中的阻力可表示为

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A, \quad (1)$$

其中, C_D 为阻力系数, ρ 为海水密度, v 为航行速度, A 为迎流投影面积。

在垂向航行阶段,载具采用流线型筒体外形与鳍面稳定结构,以降低迎流面积与姿态扰动。根据式(1)进行估算,并结合数值模拟结果,当航速为5节时,阻力系数可稳定在0.2量级(如图10),对应航行阻力控制在10 kN以内。由此推算,姿态控制与矢量侧推系统所需功率约为20 kW量级,且该功率主要用于航向修

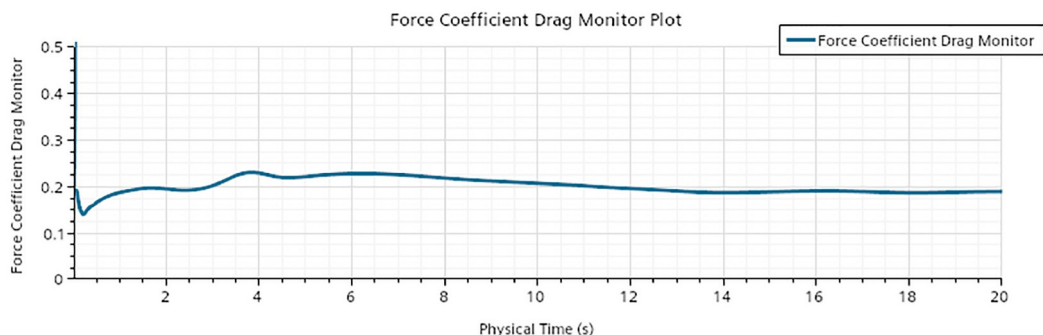


图10 (网络版彩图)无人载具阻力系数CFD(computational fluid dynamics)计算
Figure 10 (Color online) CFD computation of the drag coefficient of the unmanned vehicle.

正、分层调速及对接前姿态控制, 并不承担主要提升能量输出。相比之下, 连续管道泵送系统需持续克服静水压力与沿程阻力, 其功率需求随水深显著增加, 而本方案中垂向运动由浮力差驱动, 推进系统仅承担辅助控制功能, 因此系统整体能耗结构更为合理, 单位提升能耗显著降低。

从运行节拍角度进行分析, 在单台载具下潜约 40 min、装载约 20 min、上浮约 40 min、卸载约 20 min 的运行组织条件下, 单台完整作业周期约为 2 h, 对应单台载具的平均运输能力约为 25 t/h。在多载具并行运行条件下, 通过设置分道通航策略与不少于 4 套并行对接装置, 可实现稳定节拍发射与接收, 系统总体运输能力可扩展至 600 t/h 量级。由于运输能力可通过增加载具数量进行近似线性扩展, 而无需整体提升单一链路功率或结构强度, 该系统具备较好的规模化放大潜力与运行冗余能力。

综合上述分析可以看出, 所提出的深海浮力驱动与精准对接技术在浮力配置规模、控制功率需求、阻力水平以及系统级运行节拍等方面均具有明确的工程可实现性。阻力仿真结果表明结构阻力系数稳定且可控, 排水与置换机制对比显示能耗结构具有显著优势, 多载具并行运行分析则验证了系统规模化能力。因此, 该技术框架不仅在理论层面具备物理合理性, 也在工程参数层面具备可量化的实现路径, 为后续系统级样机研制与海试验证提供了可靠的技术依据。

5.2 深海通信定位与网络协同技术

针对深海环境中信息传输衰减严重、定位精度不足及网络拓扑动态变化的技术挑战, 该技术通过通信、定位与网络管理的多维度创新, 构建“长、短距协同-动态校准-智能调度”的一体化信息支撑体系。其核心在于突破海洋信道多途效应、温盐梯度干扰及节点移动性带来的技术瓶颈, 为无人运输系统提供跨介质、高可靠的信息交互能力, 核心技术要点如下。

(1) 通信链路优化

采用水声 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 抗多径技术结合 MIMO (multiple-input multiple-output) 多天线路阵, 利用子载波正交设计与空间分集接收机制抑制海洋信道时变衰落, 提升长距离水声通信的可靠性与传输效率, 突破深海信息传输带

宽限制。同步构建蓝绿激光应急通信链路, 通过光学天线动态对准机构与穿透损耗补偿算法, 解决短距离水下高带宽通信的穿透效率与瞄准精度问题, 形成“长距可靠传输-短距高速应急”的互补通信网络架构。

(2) 多源数据融合定位

以扩展卡尔曼滤波为框架, 融合声学测距、多普勒测速与惯性导航数据, 构建多传感器融合定位模型。结合温盐深传感器实时采集的海水理化参数校准声速模型, 引入地磁匹配误差补偿技术, 显著提升深海定位精度, 有效解决温盐梯度变化导致的定位漂移问题, 为系统提供高精度位置感知能力。

(3) 动态网络智能管理

开发强化学习自适应路由协议, 通过深度神经网络学习水下节点移动规律, 动态调整路由策略并为控制指令构建优先传输通道, 优化关键指令的传输效率。同时构建分布式哈希表资源索引系统, 通过去中心化映射机制实现网络资源的动态发现与分配, 降低移动场景下的通信碰撞概率, 提升多节点协同作业时的网络资源利用效率与系统协同能力。

5.3 智能协同控制技术

作为系统实现全流程智能化作业的核心决策支撑, 该技术通过多维度算法与控制策略的深度融合, 构建覆盖“任务分配-航行规划-对接装卸”的全流程自主控制体系。其核心在于突破传统人工干预模式的效率瓶颈, 依托智能决策与多载具协同实现深海环境下的自适应作业, 核心技术要点如下。

(1) 多目标动态任务分配

以多目标优化算法为核心构建动态调度模型, 实时融合运输需求、载具续航状态及海洋环境参数, 通过优先级排序与资源配比动态优化, 实现作业任务与运载单元的智能匹配。该机制在提升单次运载效率的同时, 通过能耗均衡算法避免载具过度损耗, 形成兼顾运输效能与系统寿命的任务分配策略。

(2) 多智能体协同航行控制

采用多智能体协同控制框架, 融合声呐、激光雷达与惯性导航的多传感器环境感知网络, 实现水下动态环境的实时建模。通过分布式冲突规避算法实现多载具自主任务协商与路径规划, 结合深度强化学习与动力学约束优化算法, 动态适应水下流速波动与地形突变, 生成兼顾运输效率与航行安全性的最优轨迹,

实现复杂海况下的协同避障与路径优化。

(3) 高精度动态对接装卸技术

针对深海对接装卸难题,集成声光引导融合磁吸对接技术、智能机械臂自适应抓取系统及波浪补偿稳定控制模块。借助多模态感知融合的自动校准机制与负载均衡算法,实现无人载具与海底基站、水面母船的高精度动态对接,并在波浪扰动等复杂工况下保障矿物装卸作业的连续性与密封性,显著提升系统作业效率与可靠性。

5.4 数字孪生融合多源数据的智能运维技术

该技术构建覆盖“数据采集-虚拟映射-智能评估-远程运维”的全链条技术体系,旨在突破深海环境下人工巡检不可达、故障诊断滞后的瓶颈,实现无人运输系统的智能化健康管理及预防性维护。其核心在于通过多源数据融合与数字孪生技术的深度耦合,构建虚实交互的智能运维模式,核心技术要点如下。

(1) 多源数据融合采集与处理

依托多源数据融合平台集成声学、光学、惯性导航等多类型传感器,实时同步采集设备运行参数与海洋环境数据。借助时空配准与特征关联算法消除单一传感器的噪声干扰,构建高精度设备状态数据库,为系统健康评估提供多维数据支撑,解决深海环境下数据采集的准确性与完整性难题。

(2) 数字孪生建模与智能诊断

基于数字孪生技术构建系统全要素虚拟孪生体,融合历史运行数据与实时监测信息建立物理映射模型。利用机器学习算法对轴承磨损、密封件老化等渐进式故障实现早期预警,针对推进系统、能源系统等核心模块构建状态转移矩阵,实现失效概率预测与剩余寿命估算,推动传统“事后维修”模式向“预测性维护”转型,提升系统运行可靠性。

(3) 远程监控与智能运维

搭建卫星-水声通信融合的远程监控中心,依托实时数据回传与多源信息融合,通过多维度可视化界面(包括三维动态仿真系统台式图、关键参数实时曲线等)直观呈现无人运输系统的运行状况与海况环境。系统支持多终端协同访问,实现岸基专家对水面母船及水下装备的远程指挥与动态调度;结合预设阈值与风险评估模型,提供异常警报与应急预案自动推送,形成“实时监控-远程干预-运维优化”闭环模式,突破深

海环境下人工干预的时空限制,大幅缩短故障响应时间并降低运维成本。

5.5 多学科设计优化

深海矿物提升无人运输系统的优化设计立足系统全要素协同,通过跨领域技术融合实现以下系统性突破。

(1) 材料工程与流体力学协同解决无人运载装备的耐压性与机动性矛盾。以钛合金材料创新结合球形舱体结构设计,结合双压载水舱流体控制算法,实现深海环境下三维运动的能效优化。

(2) 通信工程、控制理论与导航技术深度耦合。水声通信通过OFDM子载波正交设计与MIMO多天线技术结合提升长距通信可靠性,激光应急链路依托光学设计与ATP(acquisition, tracking and pointing)动态对准机构解决短距高带宽通信难题,结合扩展卡尔曼滤波的多源数据融合定位,构建“通信-定位-控制”实时闭环。

(3) 运维科学与系统工程依托数字孪生技术构建设备健康管理模型。融合机器学习算法与多源传感器数据,实现设备故障预测与维护策略动态优化。

多学科交叉贯穿系统全流程,通过材料技术、结构设计与控制算法的协同,结合虚实结合的运维管控,打破传统技术壁垒,推动深海无人运输系统从技术试验阶段向产业化应用迈进,全面提升复杂海况下的作业效率和系统可靠性。

6 结论

本文面向深海矿物提升运输环节的无人化与体系化需求,提出了提升无人运输系统的体系架构,并从系统组成、协同机制与关键技术链路等方面给出可实现的技术路线。相较于传统以立管管道连续输送为主的提升方式,本文架构将提升过程由单一连续链条转化为“运输单元化-跨介质协同-可重构调度”的系统组织形态:通过可编队、可调度的载具协同网络实现任务分解与冗余配置,使系统在复杂海况扰动、局部故障或任务变化条件下具备更好的运行韧性及扩展潜力;同时采用水下端自治控制与母船端远程接管相结合的分层控制模式,为状态感知、故障处置与运维闭环提供了更清晰的工程落点。

在商业化应用层面,除技术可行性外,该体系的成本结构、能效比与规模化应用潜力同样是必须考虑的关键因素.就成本结构而言,系统投入主要集中于母船平台、无人运输载具、水下对接与通信定位装备以及运维保障体系;相较传统连续提升方式,模块化载具与标准化接口有助于分摊前期装备投入、降低单点失效导致的系统级风险,并提升跨矿区复用能力.就能效比而言,提升过程不再完全依赖持续高功率管道输送,而是通过浮力驱动、阻力优化与任务调度协同降低单位提升能耗,并为“按需配置-动态编队-事件触发回传”的

低能耗运行策略提供空间.就规模化应用潜力而言,运输单元化与接口标准化使系统具备按作业规模逐步扩展配置的能力,在连续运行与装备冗余条件下,可支撑年产能向百万吨级逐步演进.

未来工作将围绕关键性能指标开展定量化验证与海试评估,重点包括载具对接精度与成功率、通信定位可靠性、任务重构响应时间以及吨-千米能耗等,并在数据支撑下逐步形成面向工程化示范与规模化应用的指标路线图与成本-性能边界,为深海矿物提升运输系统的无人化、可靠化与商业化应用提供依据.

参考文献

- 1 Wang G R, Huang Z Q, Zhou S W, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment (in Chinese). *Chin J Eng Sci*, 2023, 25: 1–12 [王国荣, 黄泽奇, 周守为, 等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向. *中国工程科学*, 2023, 25: 1–12]
- 2 Toro N, Robles P, Jeldres R I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review. *Ore Geol Rev*, 2020, 126: 103699
- 3 Sha F, Xi M, Chen X, et al. A recent review on multi-physics coupling between deep-sea mining equipment and marine sediment. *Ocean Eng*, 2023, 276: 114229
- 4 Blanchard C, Harrould-Kolieb E, Jones E, et al. The current status of deep-sea mining governance at the International Seabed Authority. *Mar Policy*, 2023, 147: 105396
- 5 He G W, Wang H F, Ren J B, et al. Research on the metallogenic mechanism of deep sea sedimentary mineral resources: Review and outlook (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2024, 98: 3202–3212 [何高文, 王海峰, 任江波, 等. 深海沉积矿产成矿机制研究: 进展与展望. *地质学报*, 2024, 98: 3202–3212]
- 6 He G, Ma W, Song C, et al. Distribution characteristics of seamount cobalt-rich ferromanganese crusts and the determination of the size of areas for exploration and exploitation. *Acta Oceanol Sin*, 2011, 30: 63–75
- 7 Chu F Y, Jiang J, Liu Y W, et al. Advance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea (in Chinese). *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31: 2638–2648 [初凤友, 姜静, 刘禹维, 等. 我国深海多金属结核资源勘探进展及思考. *中国有色金属学报*, 2021, 31: 2638–2648]
- 8 Yu C A, Schoenberg R. Deep sea mining riser and lift system. U.S. Patent, 7690135, 2010-04-06
- 9 Kang Y J, Wang C W, Liu S J, et al. Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules (in Chinese). *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31: 2938–2952 [康燕军, 王春伟, 刘绍江, 等. 深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案. *中国有色金属学报*, 2021, 31: 2938–2952]
- 10 Kang Y, Liu S. The development history and latest progress of deep-sea polymetallic nodule mining technology. *Minerals*, 2021, 11: 1132
- 11 Zhao P. Development trends and policy orientations of China's marine economy during the “14th Five-Year Plan” period (in Chinese). *Mar Econ*, 2022, 12: 1–7 [赵鹏. “十四五”时期我国海洋经济发展趋势和政策取向. *海洋经济*, 2022, 12: 1–7]
- 12 Zhang X, Zuo Y, Wei J, et al. A review on underwater collection and transportation equipment of polymetallic nodules in deep-sea mining. *J Mar Sci Eng*, 2024, 12: 788
- 13 Zhang Q, Chen X, Luan L, et al. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives. *Earth Energy Sci*, 2025, 1: 65–84
- 14 Rao Q H, Liu Z L, Xu F, et al. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle (in Chinese). *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31: 2795–2816 [饶秋华, 刘泽霖, 许锋, 等. 深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展. *中国有色金属学报*, 2021, 31: 2795–2816]

- 15 Xu D Y. Improvements of continuous bucket ladder (CLB) and the development plan of manganese crust mining system (in Chinese). *Mar Geol Front*, 1991, 8: 20–22 [许东禹. 连续铲斗链(CLB)的改进及其锰结壳采矿系统研制计划. *海洋地质动态*, 1991, 8: 20–22]
- 16 Jin Y P, Dong X Y, Wan B Y, et al. Research status and analysis of deep-sea metal mining equipment and technologies (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2024, 49: 3316–3334 [金永平, 董向阳, 万步炎, 等. 深海金属采矿装备与技术发展现状及分析. *煤炭学报*, 2024, 49: 3316–3334]
- 17 Zou L, Sun J Z, Sun Z, et al. Deep-sea mining core technology in china: Current situation and prospects (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2023, 44: 708–716 [邹丽, 孙佳昭, 孙哲, 等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44: 708–716]
- 18 Zhu Z C, Su X H, Xia J X, et al. Current status and prospects on deep-sea mineral resources transportation and equipment development (in Chinese). *Sci Technol Foresight*, 2024, 3: 59–68 [朱祖超, 宿向辉, 夏建新, 等. 深海矿产资源运输与装备发展现状及展望. *前瞻科技*, 2024, 3: 59–68]
- 19 Wu Q, Yang J, Guo X, et al. Influence of irregular waves on the dynamic response of a vertical transport system for deep sea mining. *Ocean Eng*, 2021, 229: 108443
- 20 Hu Q, Li Z, Zhai X, et al. Development of hydraulic lifting system of deep-sea mineral resources. *Minerals*, 2022, 12: 1319
- 21 Guo X, Fan N, Liu Y, et al. Deep seabed mining: Frontiers in engineering geology and environment. *Int J Coal Sci Technol*, 2023, 10: 23
- 22 Abdullahi I, Aminu A, Chiroma H, et al. Towards a distributed digital twin framework for predictive maintenance in industrial internet of things (IIoT). *Sensors*, 2024, 24: 2663
- 23 Leng D, Shao S, Xie Y, et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle. *Ocean Eng*, 2021, 228: 108565
- 24 Yan X P, Wu B. Research status and prospects of multidimensional integrated marine transport system (in Chinese). *J Wuhan Univ Technol Transp Sci Eng*, 2025, 49: 223–231 [严新平, 吴兵. 海域立体运输系统研究现状与展望. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2025, 49:223–231]
- 25 Kang Y J, Liu S J. Summary of research on lifting system of deep sea mining (in Chinese). *J Mech Eng*, 2021, 57: 232–243 [康娅娟, 刘少军. 深海采矿提升系统研究综述. *机械工程学报*, 2021, 57: 232–243]
- 26 Wang C, Shu X, Zhou S, et al. Embracing a new era of deep-sea mining: Research progress and prospects. *Mar Policy*, 2025, 180: 106778
- 27 Kang Y J, Liu S J. Review on the technology and equipment progress and the system scheme of deep-sea mining (in Chinese). *J Mech Eng*, 2023, 59: 325–337 [康娅娟, 刘少军. 深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述. *机械工程学报*, 2023, 59: 325–337]
- 28 Yan Z, Hao L, Yang J, et al. Real-time underwater fish detection and recognition based on CBAM-YOLO network with lightweight design. *J Mar Sci Eng*, 2024, 12: 1302
- 29 Xu Y L, Zhang Q Q, Jiang S M, et al. Key technologies of air-space-sea integrated networks (in Chinese). *Mobile Commun*, 2022, 46: 53–58 [徐艳丽, 张倩倩, 姜胜明, 等. 空天海一体化网络关键技术. *移动通信*, 2022, 46: 53–58]
- 30 Yang J M, Liu L, Lyu H N, et al. Deep-sea mining equipment in china: current status and prospect (in Chinese). *Chin J Eng Sci*, 2020, 22: 1–9 [杨建民, 刘磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望. *中国工程科学*, 2020, 22: 1–9]
- 31 Yin X W, Chen L Y, Zhao F. Development trend of intelligent marine equipment and its standardization scenario (in Chinese). *Ship Stand Eng*, 2024, 57(S1): 6–11, 19 [殷学文, 陈鲁愚, 赵峰. 基于深远海装备智能化发展趋势的标准体系思考与建议. *船舶标准化工程师*, 2024, 57(S1): 6–11, 19]
- 32 Zhang D, Zhao Y X, Cui Y F, et al. A visualization analysis and development trend of intelligent ship studies (in Chinese). *J Transp Inf Saf*, 2021, 39: 7–16, 34 [张笛, 赵银祥, 崔一帆, 等. 智能船舶的研究现状可视化分析与发展趋势. *交通信息与安全*, 2021, 39: 7–16, 34]
- 33 Zhao J, Zhang X D, Zhang Z Q, et al. Review of modular mechanical equipment and modular design methods (in Chinese). *J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci*, 2021, 49: 19–29 [赵京, 张晓丹, 张自强, 等. 模块化机械装备及其设计方法研究综述. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49: 19–29]
- 34 Yan X P, Han Y, Wu B, et al. Current development and future prospects of waterborne transportation systems (in Chinese). *Navig China*, 2024, 47: 145–152 [严新平, 韩亚, 吴兵, 等. 水路交通系统的发展现状与未来展望. *中国航海*, 2024, 47: 145–152]
- 35 Meng S, Wu S, Zhang J, et al. Semantics-empowered space-air-ground-sea integrated network: New paradigm, frameworks, and challenges. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2025, 27: 140–183

Discussion and prospects of the system architecture of deep-sea mineral lifting autonomous transportation system

CHEN DeShan^{1,2,3}, LIU JiongJiong^{1,2,3}, ZHAO JiangBin^{1,2,4}, HU XinJue^{1,2,3}, LU MingJian^{1,2,3}, WANG Yang^{1,2,3}, LI Lei⁵ & YAN XinPing^{1,2,3,4}

¹ State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

² National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

³ Intelligent Transport Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

⁴ School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

⁵ China Merchants Shipbuilding Industry Group Co., Ltd., Shenzhen 518067, China

Deep-sea mineral resources, with their vast reserves and strategic value, have become a global focus for resource development. Yet existing transportation systems face critical limitations: poor inter-medium synergy, inadequate adaptability to extreme environments, and exorbitant operational costs. To address these challenges, this study proposes an unmanned transportation system architecture for deep-sea mineral lifting, tailored to 6000-m operational depths. This architecture integrates four core modules—unmanned carrier equipment, communication network systems, an intelligent scheduling center, and support systems—guided by the design philosophy of “unmanned vehicles-intelligent collaborative execution-adaptive scheduling with dynamic regulation”. It achieves synergistic breakthroughs in flexible architecture, intelligent control, and modular design through a multi-dimensional “air-sea-seabed” collaborative framework, incorporating key technologies such as deep-sea buoyancy-driven propulsion, precision docking mechanisms, integrated communication and positioning systems, and digital twin-based operations. These innovations effectively ensure mineral transport efficiency and system reliability, offering a novel conceptual approach and critical technical support for building intelligent transportation systems in deep-sea mineral exploitation.

deep-sea mineral transportation, unmanned transportation system, air-sea-seabed collaborative architecture, technology roadmap

doi: [10.1360/SST-2025-0460](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0460)