

研究报告

深海采矿开采系统运动状态和动态特性 影响因素分析研究

凌 胜, 肖林京, 申焱华, 张文明

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

[摘要] 布局合理、设备安全、运行经济、控制简便, 是深海采矿开采系统研究开发的主要目标。开采系统的运动状态和动态特性对上述目标产生直接的、重要的影响。文章根据现有研究成果, 对开采系统运动状态和动态特性的主要影响因素进行分析研究, 相应结论可为系统及其设备的设计、布局、运行和控制提供参考。

[关键词] 深海采矿; 开采系统; 扬矿管; 运动学和动力学; 系统设计

[中图分类号] TE952 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)03-0078-06

1 前言

采矿作业是深海多金属结核资源开发利用的主要环节。在众多开采方法中, 目前普遍认为最有前途的是“流体(水力)管道提升法”。流体(水力)管道提升开采系统由海面采矿船、扬矿硬管、水下中间矿仓、软管和集矿机组成(见图1), 其基本作业原理是: 按设定路线在深海海底行驶的集矿机采集半埋于海底沉积物表面的多金属结核; 采集到的结核在集矿机内经清洗和破碎后, 经由软管被泵送到扬矿硬管下端的水下中间矿仓; 然后, 串接于扬矿硬管中的潜水电机-泵组, 将结核从中间矿仓吸出并以海水作载体的两相流形式经扬矿硬管输送到海面采矿船上。目前, 我国已确定将流体(水力)管道提升法作为研究开发的重点, 并已着手中试开采系统研究开发的前期工作。

深海多金属结核开采系统的全部设备都漂浮在海面或悬浮于海水之中, 在采矿和拖航、水下设备布放和回收等不同作业工况下, 由于受到内部和外部各种静力和动力的作用, 整个系统将呈现复杂的运动状态, 其设备(特别是扬矿硬管)内部也将产生复杂的应变和应力。系统的运动状态和设备的应变、应力状态将直接影响整个系统及其设备的设

计、布局、运行和控制。

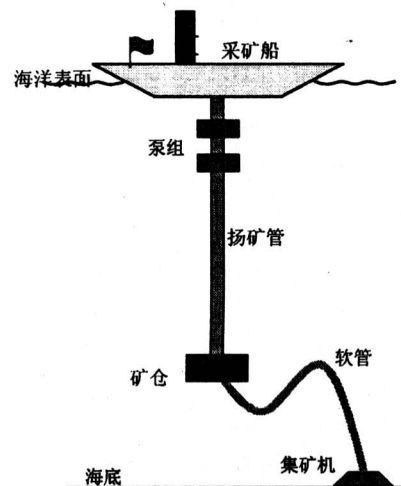


图1 深海多金属结核开采系统示意图
Fig.1 Deep seabed multimetallic nodule mining system

布局合理、设备安全、运行经济、控制简便, 是深海采矿开采系统研究开发的主要目标; 系统的运动状态和动态特性则对上述目标产生直接的、重要的影响。开采系统运动状态和动态特性影响因素包括: a. 海流、波浪等海洋环境参数; b. 采矿船

的拖航函数；c. 扬矿硬管与采矿船连接方式；d. 水下中间矿仓的质量和尺寸形状；e. 集矿机的运动状态；f. 扬矿硬管的重量、尺寸和力学特性；等等。本文根据现有研究成果，对上述主要影响因素进行分析研究，相应结论可为深海采矿开采系统及其设备的设计、布局、运行和控制提供参考。

2 Morison 方程

Morison 方程式 (1) 是计算水下垂直构件 (如扬矿管) 承受流体作用力 (液动力) 的基本公式：

$$f = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |u| u + \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} a_x \quad (1)$$

式中 f — 流体作用于构件单位长度上水平方向的液动力。等式右边第一项表示速度力，与流体-构件之间相对速度水平分量的二次方成正比；第二项表示惯性力，与流体-构件之间相对加速度的水平分量成正比； u — 流体与构件之间相对速度的水平分量； C_D — 阻力系数； ρ_w — 海水密度； D — 扬矿管直径或其他构件水平面内的迎流宽度； a_x — 流体与构件之间相对加速度的水平分量； C_M — 惯性力系数。

垂直方向的液动力 (如扬矿管轴向振动时海水与扬矿管及水下中间矿仓之间的阻尼力)，可根据 Morison 公式的基本概念推导出类似的计算式。

3 海流和波浪与扬矿管的横向偏移

3.1 海流速度

海流是海水在水平面内的流动，其速度和方向随时间和空间而不断变化。在实际计算中，一定海域的海流速度可认为是随水深变化的函数。由航次调查，我国中试海域的海流速度确定为：洋面 1.7 m/s，海底 0.1 m/s。据此可模拟海流随水深变化的函数式如下：

$$V_c = 0.1 + 1.6 \times \left(\frac{5000 + z}{5000} \right)^{12} \quad (2)$$

式中 V_c — 海流速度，是水深 z 的函数，随 z 绝对值的增大而迅速减小； z — 水深坐标值。海洋表面为 0，向下为负值。

3.2 波浪水质点的速度和加速度

设海面波浪为一余弦波，其波形函数为

$$\eta = \frac{h_w}{2} \cos(k_w x - \omega t) \quad (3)$$

波浪的周期运动，使其动力场内水质点的速

度和加速度也随时间发生变化。按照波浪理论和海洋流体动力学，可得如下计算式：

1) 波浪动力场内水质点运动速度的水平分量和垂直分量分别为：

$$V_{wv} = \frac{h_w}{2} \omega e^{k_w z} \cos(k_w x - \omega t) \quad (4)$$

$$V_{ww} = \frac{h_w}{2} \omega e^{k_w z} \sin(k_w x - \omega t) \quad (5)$$

2) 波浪动力场内水质点运动加速度的水平分量和垂直分量分别为：

$$V'_{wv} = \frac{\partial V_{wv}}{\partial t} = \frac{h_w}{2} \omega^2 e^{k_w z} \cos(k_w x - \omega t) \quad (6)$$

$$V'_{ww} = \frac{\partial V_{ww}}{\partial t} = -\frac{h_w}{2} \omega^2 e^{k_w z} \sin(k_w x - \omega t) \quad (7)$$

(3) ~ (7) 各式中， z 为水深， h_w 为波浪高度， ω 为波浪圆频率， k_w 为波数， t 为时间， x 为水平方向坐标值。

由各式可看出，水质点的运动轨迹为圆，圆的半径从水表面向水深处按指数规律递减，该半径的大小即为水质点的最大速度或最大加速度。经计算，当水深 100 m 以下时，水质点的最大速度和最大加速度已经很小，且随水深增加逐渐趋于 0。

3.3 海流和波浪作用下扬矿管静态横向偏移构型

在按照 Morison 方程计算的海流和波浪液动力的作用下，扬矿管产生横向偏移 (见图 2)。

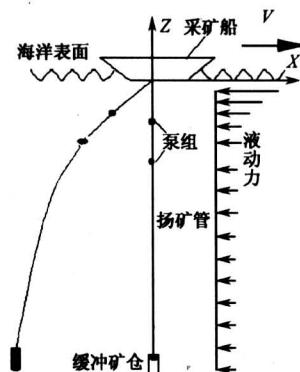


图 2 扬矿管受力分析

Fig.2 Forces acting on lifting pipe

图 3 和图 4 中的曲线为按我国中试采矿系统总体方案初步确定的阶梯式扬矿管，在只有海流力和波浪的速度力 (波浪的速度力按最大值计) 作用下产生的静态横向偏移构型。两图不同之处仅仅在于浪高：图 3 为 6 级风况，浪高 4 m；图 4 为 4 级风况，浪高 2.5 m。计算得到扬矿管下端的最大偏移

值为：6 级风况、水下中间矿仓质量为 30 t 和 50 t 时，分别为 15.362 m 和 14.013 m（图 3），4 级风况下分别为 15.357 m 和 14.010 m（图 4）。对比可知，浪高对扬矿管横向偏移构型的影响极小。

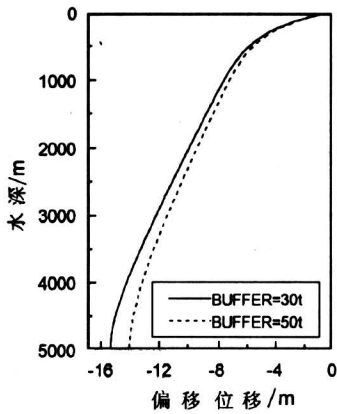


图 3 扬矿管偏移构形（6 级风况）

Fig.3 Deflecting configurations of lifting pipe (with force 6 wind)

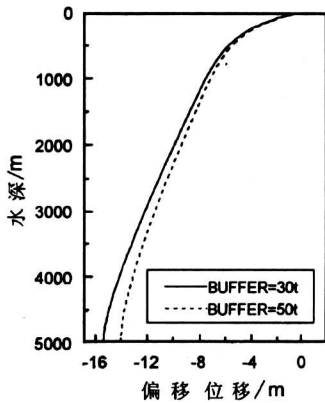


图 4 扬矿管偏移构形（4 级风况）

Fig.4 Deflecting configurations of lifting pipe (with force 4 wind)

4 采矿船拖航速度对扬矿管静态横向偏移的影响

采矿船拖航时，由于扬矿管与海水之间产生相对运动，同样使扬矿管在速度力作用下产生横向偏移。图 5 为其下端中间矿仓质量为 30 t 的阶梯式扬矿管以不同速度拖航时所产生的静态横向偏移构型（假设没有海流和波浪作用）。当拖航速度分别为 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 和 1.5 m/s 时，扬矿管下端相应的最大偏移值为 -211.01 m, -529.56 m, -803.95 m, -1 157.4 m 和 -1 674.9 m。由此可

见，拖航速度对扬矿管的横向偏移影响显著，且拖航速度越大，扬矿管的横向偏移也越大。

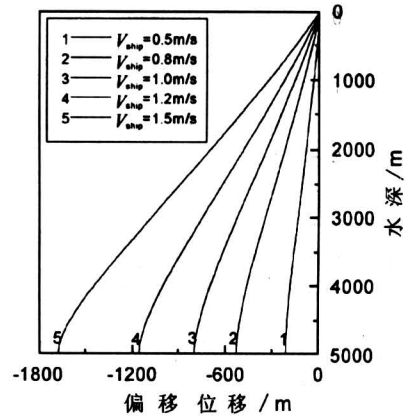


图 5 等速拖航时扬矿管的偏移构型

Fig.5 Deflecting configurations of lifting pipe under constant velocity sailing

5 海流、波浪和拖航联合作用下的扬矿管横向偏移

实际作业时的扬矿管承受着海流、波浪和拖航的联合作用。

中试采矿系统总体方案设定的采矿船拖航运动学参数如下：加速阶段速度由 0 加速到正常拖航速度，时间 100 s；等速阶段速度为正常拖航速度，时间 2 000 s；减速阶段速度由正常拖航速度减小到 0，时间 100 s。拖航速度为 0.5~1.0 m/s。

由于拖航过程中有加速、等速和减速三个阶段以及波浪水质点运动的周期性，海水与扬矿管之间将产生动力作用，因此，扬矿管不仅产生静态偏移，还有动态响应。

图 6 所示为在海流、波浪和拖航的联合作用下，拖航速度 1.0 m/s 时，阶梯式扬矿管在不同时刻的偏移构型。由图可知，扬矿管的偏移值是时间的函数；采矿船在加速-等速-减速航行过程中，偏移值由小到大，再由大变小，但偏移构型的变化滞后于拖航速度的变化。比如，在 2 110 s 时扬矿管的偏移值最大（其下端的相对偏移值为 -874.22 m），但此时并非是加速阶段，也不是等速阶段，而已进入减速阶段；2 200 s 时拖航虽已结束，但扬矿管仍有很大的偏移值，要再经过大约 1 000 s 时间，才慢慢地恢复到静平衡位置（图中曲线 14）。

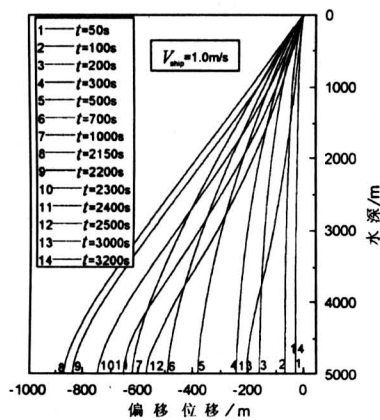


图6 有波流等速拖航时扬矿管偏移构型变化
Fig.6 Deflecting configurations of lifting pipe under combined action of current, wave, and sailing

6 扬矿管与采矿船的连接方式对扬矿管横向偏移的影响

扬矿管与采矿船有两种不同的连接方式：铰接（采矿和拖航时）和固接（布放和回收水下设备时）。连接方式不同，扬矿管横向偏移也不同。前述图3所示为6级风况下扬矿管与采矿船固接时，扬矿管只受海流和波浪作用的静态横向偏移构型；如将连接方式改为铰接，计算得到的扬矿管偏移构型差别不大，最大偏移值为：中间矿仓质量30 t时15.359 m，50 t时13.998 m，也与固接时十分接近。图7和图8是中间矿仓质量同为50 t时不同

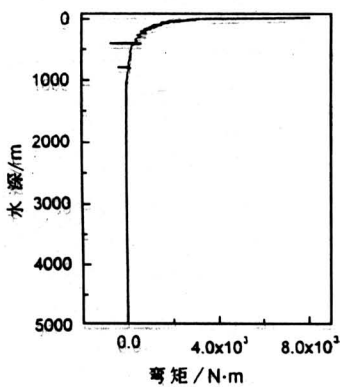


图7 扬矿管与采矿船铰接时的弯矩分布
Fig.7 Bending moment distribution on lifting pipe articulatedly connected with mining ship

连接方式的扬矿管上的弯矩分布情况。图7为铰接时的情况，扬矿管上的弯矩最大值为8 051.1 Nm，发生在与采矿船连接处。水面以下300 m内弯矩

急剧减小，1 000 m以下基本为零；图8为固接时的情况，弯矩最大值也发生在与采矿船连接处，为 -3.7967×10^5 Nm，绝对值比图7的铰接情况大了40多倍，可见扬矿管与采矿船的连接方式对扬矿管的弯矩影响是很大的。图7中水深400 m和800 m处都装有水泵，弯矩值出现突变。

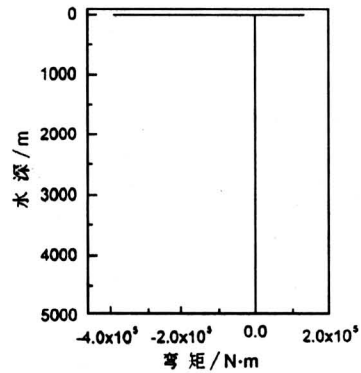


图8 扬矿管与采矿船固接时的弯矩分布
Fig.8 Bending moment distribution on lifting pipe fixedly connected with mining ship

7 波浪对扬矿管纵向振动的影响

波浪的周期性变化引起扬矿管的纵向振动。扬矿管的纵向振动响应与波浪参数（波幅和周期）、扬矿管与采矿船的连接位置、中间矿仓的质量和尺寸形状、扬矿管的尺寸重量和力学特性以及扬矿管和中间矿仓的阻尼特性等有关。

为简单起见，设扬矿管与采矿船的连接点位于船的重心处，此时采矿船重心受到的海浪激振就是采矿船对扬矿管的激振。

图9为一阶梯式扬矿管在其上端与采矿船连接处受到波幅4 m、周期10 s的波浪激振时，其下端（水下5 000 m中间矿仓处）的振动形态。中间矿

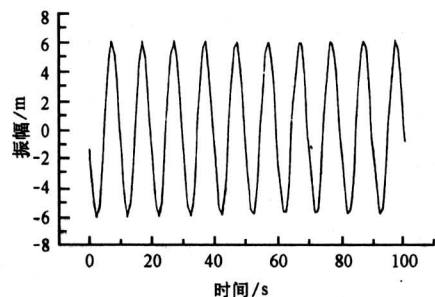


图9 水下5 000 m处扬矿管纵向振动形态
Fig.9 Longitudinal vibration shape of lifting pipe at 5 000 m depth

仓质量 50 t、水平断面尺寸 4.5 m×4.5 m 时，计算得其纵向振动振幅为 ±6 m，与激振位移的相位差为 1.7821 弧度。可见，在振动过程中，扬矿管下端响应的振幅可能大于上端激振的振幅，而且两者有相位差，因此扬矿管内必然产生附加的动载荷。

8 中间矿仓对扬矿管位移和振动影响

由图 3 和图 4 可见，中间矿仓的质量越大，扬矿管的横向偏移越小，因此中间矿仓能起到镇定作用；中间矿仓的质量还影响扬矿管的纵向静态变形，质量越大，变形也越大。中间矿仓的水平断面尺寸则影响扬矿管纵向振动时的阻尼力，因而影响扬矿管纵向振动特性。前述图 9 示例中，如将中间矿仓的水平断面尺寸增大为 6 m×6 m 或 7 m×7 m，则中间矿仓处的纵向振动振幅可减少到 ±3.5 m 或 ±2.5 m，相位差也有相应变化。

9 集矿机与扬矿管的相互作用

集矿机的任务是在海底按照设定的轨迹行驶，采集多金属结核。集矿机与扬矿管由软管连接，并通过软管彼此产生作用和影响。图 10 所示为我国中试系统的集矿机沿海底任意方向行驶时，在海平面内不发生倾翻（即软管作用力不过大）的安全活

动范围。图 11 为集矿机按 Z 字形轨迹行驶时软管与中间矿仓连接处的作用力。根据集矿机不同运动状态时的计算结果表明，软管与中间矿仓连接处的作用力数值都不大（X 方向的最大作用力不超过 6 kN），可以认为集矿机的运动对扬矿管不会产生太大影响；而由于扬矿管本身的运动十分复杂，为使扬矿管的运动不致对集矿机的正常作业产生不利影响，应在开采系统的监控方案中对扬矿管和集矿机的相对位置加以有效的控制和约束。

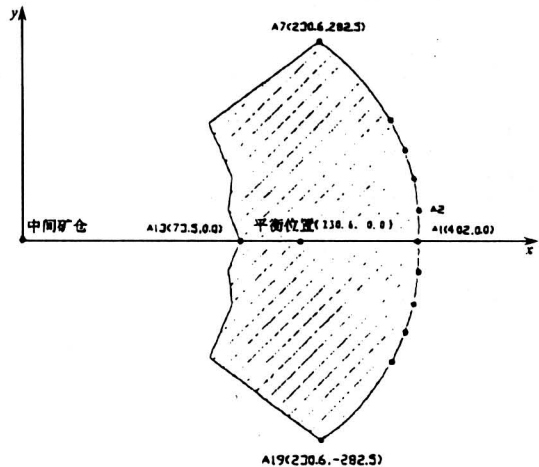
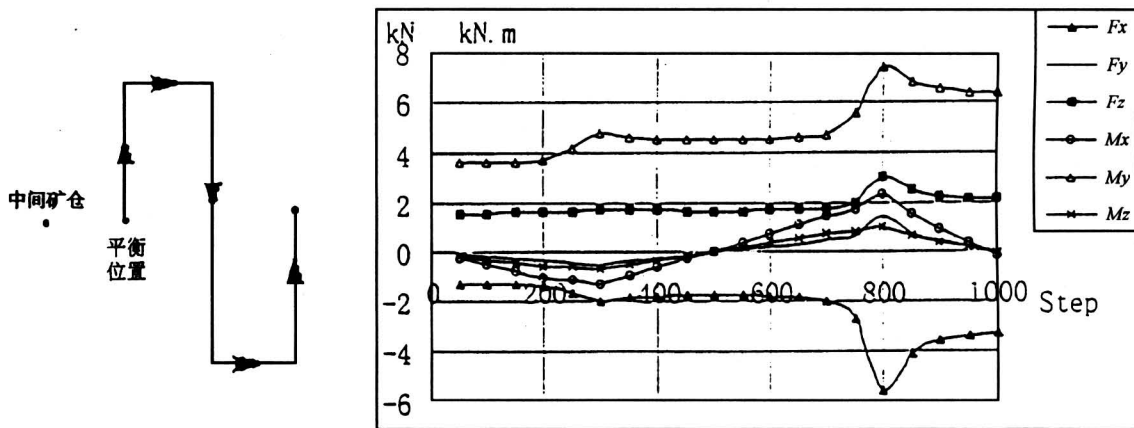


图 10 集矿机工作区域图

Fig.10 Safe working scope of nodule collector



(a) 集矿机行驶轨迹

(b) 中间矿仓端约束反力

图 11 集矿机 Z 字形行驶轨迹及中间矿仓端约束反力

(a) Track of nodule collector movement (b) Reacting forces at underwater nodule storage point

Fig.11 Z-shaped track of nodule collector movement and reacting forces at underwater nodule storage point

10 分析和结论

10.1 关于系统的设计和布局

1) 强度计算是扬矿管设计的基础。在实际作业中，由于各种外部载荷的作用，扬矿管既作横向偏摆，又作纵向振动。扬矿管横向偏摆主要与海流

和波浪参数、拖航速度以及中间矿仓质量有关，其中拖航速度影响最大。扬矿管纵向振动主要与波浪参数、扬矿管的重量尺寸和力学特性以及中间矿仓的质量和尺寸形状有关。横向偏摆和纵向振动分别在扬矿管内产生弯曲应力和轴向应力，既有静应力，也有动应力。扬矿管的尺寸则应根据最恶劣工况（6级风况下以最大航速逆流拖航）下的最大合成应力，采用适当的强度理论计算确定，并按照等强度理论原则合理决定阶梯式扬矿管的分段长度和直径。值得注意的是，扬矿管内产生的轴向应力往往比弯曲应力大得多（约占合成应力的70%）。此外，图7中扬矿管上安装的泵组与扬矿管之间现采用刚性连接，为了减小连接处的应力集中，应考虑采用更适当的连接方式。

2) 中间矿仓质量主要是根据矿仓容量以及作为水下安装平台的功能要求，进行结构设计决定的。它影响扬矿管的横向偏移和轴向静态变形及频率特征。中间矿仓质量越大，横向偏移越小，有利于系统的稳定，但同时也会增大扬矿管的轴向应力。中间矿仓的水平断面尺寸影响扬矿管纵向振动时的阻尼，因而影响扬矿管纵向振动特性，适当加大中间矿仓的水平断面尺寸，能减小扬矿管纵向振动的振幅。所以，中间矿仓质量和水平断面尺寸应综合考虑各方面的因素，根据系统的总体布局确

定。

10.2 关于系统的运行和控制

1) 由图7和图8扬矿管上的弯矩分布情况可知，扬矿管与采矿船的连接方式对扬矿管的受力影响很大，扬矿管与采矿船的连接处往往会成为扬矿管强度的薄弱环节。因此，为了减小扬矿管与采矿船连接处的弯曲应力，应于不同工况时采用不同的连接方式：采矿和拖航时，必须严格保证扬矿管与采矿船处于铰接状态；布放和回收时，由于作业要求扬矿管与采矿船必须固接，则应尽可能使采矿船定点作业，尽量减小漂移。

2) 鉴于扬矿管运动的复杂性，集矿机的运动又存在许多不确定性，在实际作业中（无论是拖航作业还是定点作业），直接控制采矿船与集矿机之间的运动关系和相对位置是很困难的，而如果以中间矿仓定位，对集矿机与中间矿仓之间的运动关系和相对位置实施控制，则要方便和有效得多。因此，在考虑和确定开采系统的总体测控方案和实施计划时，可从这一思路出发，研究和开发相应的控制方法和控制技术。

致谢 本文引用的研究成果是在中国大洋矿产资源研究开发协会资助下取得的，作者在此谨向中国大洋矿产资源研究开发协会及其他有关单位表示衷心感谢！

A Study of the Factors Influencing the Kinematic Condition and Dynamic Characteristics of Deep Seabed Mining Systems

Ling Sheng, Xiao Linjing, Shen Yanhua, Zhang Wenming

(University of Science & Technology, Beijing, Beijing 100083, China)

[Abstract] Reasonable layout, reliable installation, economical operation, and facilitated control are the major goals for the research and development of deep seabed mining systems. Kinematic condition and dynamic characteristics of the systems are of direct and important influence to attaining the goals. Based on the results achieved in the research and development of deep seabed mining technology in recent years, the main factors influencing the kinematic condition and dynamic characteristics of the systems, including sea current, sea wave, sailing velocity of the mining ship, weight and shape of the underwater nodule storage, and moving pattern of the nodule collector, are studied and analyzed in this paper. Relevant conclusions would be useful for the layout, design, operation, and control of the systems and corresponding equipment.

[Key words] deep seabed mining; mining system; lifting pipe; kinematics & dynamics; system design