

# 深海采矿管道横向摆动抑制方案\*

夏岳旺<sup>1,2</sup>, 徐海良<sup>1</sup>, 杨放琼<sup>1,2</sup>

1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083
2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083

**摘要:** 为减少深海采矿管道的横向摆动所带来的危害及安全隐患, 文章提出了一套深海采矿管道横向摆动抑制方案。该方案的执行部件主要由尼龙拉绳、液压换能组件、定滑轮组件组成。尼龙拉绳能够提供抑制横向摆动的拉力, 减小横向摆动摆幅; 液压换能组件能够消耗横向摆动的动能, 并将其转化为电能; 定滑轮组件能调整拉绳对管道的作用力, 使之更有利于抑制管道横向摆动。经实验验证, 该方案的工作原理可行。

**关键词:** 管道横向摆动; 摆动抑制方案; 尼龙拉绳; 液压换能组件; 定滑轮组件

**中图分类号:** TD80 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 06-0024-05

## A scheme to restrain the lateral swing of deep sea mining pipeline

XIA Yuewang<sup>1,2</sup>, XU Hailiang<sup>1</sup>, YANG Fangqiong<sup>1,2</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract:** In order to reduce the harm and hidden danger of the horizontal swing of the deep-sea mining pipeline, this paper proposes a set of suppression scheme of the horizontal swing of the deep-sea mining pipeline. The executive parts of the scheme are mainly composed of nylon pull rope, hydraulic energy exchange component and fixed pulley component. Nylon pull rope can provide the tension to restrain the lateral swing and reduce the amplitude of the lateral swing; the hydraulic energy exchange component can consume the kinetic energy of the lateral swing and convert it into electrical energy; the fixed pulley component can adjust the force of the pull rope on the pipeline, so that it is more conducive to restrain the lateral swing of the pipeline. The experimental results show that the working principle of the scheme is feasible.

**Key words:** pipeline lateral swing; swing suppression scheme; nylon cable; hydraulic energy exchange component; fixed pulley component

人类社会的发展, 离不开对各种资源的开发和利用。在陆地资源逐渐枯竭的今天, 人们把目光投向了深海大洋。海底世界除了大家耳熟能详的锰结核、深海油气, 还有热液矿床, 以及当前

最炙手可热的天然气水合物<sup>[1]</sup>。天然气水合物的储量极为巨大。据估算, 在全世界的边缘海、深海槽区及大洋盆地中, 现已发现的水深 3 000 m 以内沉积物中天然气水合物中的甲烷资源量为 2.1 万

\* 收稿日期: 2020-02-21 录用日期: 2020-04-19 网络首发日期: 2021-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51375498); 湖南省自然科学基金 (2018JJ2522)

作者简介: 夏岳旺 (1994年生), 男; 研究方向: 海洋资源开采及利用; E-mail: 1241628281@qq.com

通信作者: 徐海良 (1965年生), 男; 研究方向: 海洋资源开采及利用; E-mail: xuhailiang@csu.edu.cn

亿立方米(尚不包括天然气水合物层之下的游离气体),可满足人类1 000年的需求<sup>[2]</sup>。

海洋中广袤的资源可以说是人类新世纪的福音,近年来学术界不断提出开采海洋中矿物资源的各种方案。其中,水力提升采矿系统的研究最为系统深入,被认为是最具商业开采价值的开采技术之一<sup>[3]</sup>。其先在海底对矿层进行破碎,再利用水力提升管道将破碎后的矿物颗粒提升至海面,实现对矿物的开采。

典型的水力提升采矿系统如图1所示<sup>[4]</sup>。系统中浮体材料的安置方式参考王耀峰等的研究结果<sup>[5]</sup>,浮体材料长度约为软管长度的1/4,安置在软管中下部,其上端位于软管中点附近。浮体材料所受到的浮力能促使软管形成一个有利于水力输送的拱形<sup>[6]</sup>;以图1所示的方式安置浮体材料,能使软管在承受海流冲击时,产生的应力及变形更小。

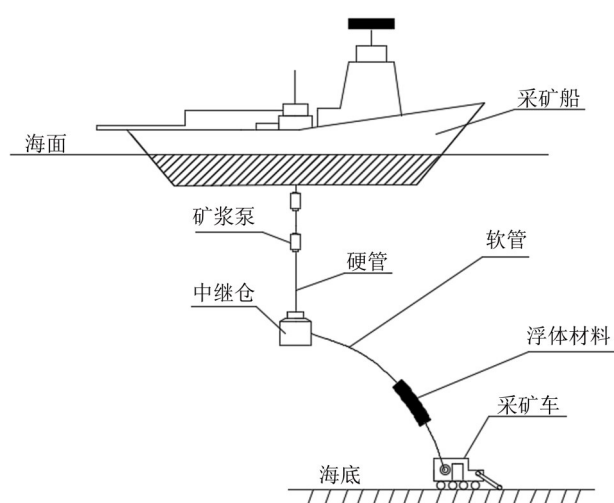


图1 深海水力提升采矿系统

Fig. 1 Deep sea hydraulic lifting mining system diagram

该系统的工作过程为:当勘探到海底某区域有矿层时,采矿船行进至矿层上方,由安装在采矿车上的铰刀对海底矿层进行破碎,破碎后的矿物颗粒在泵的抽吸作用下与海水混合,形成矿物浆体。浆体先是在采矿车内泵体的推动下顺着软管运送至矿石中继仓,中继仓中的矿浆在砂泵的推动下顺着硬管运送至海面采矿船收集。采矿系统选用硬管作为扬矿管是因为硬管光滑,竖直性好,压力损失小;选用软管与采矿车相连接是为了让采矿车具有一定移动空间,可以对一片区域内的矿层进行开采。因此,深海采矿系统通常硬软管联用。

然而,在复杂的海洋动力环境下,长达几千米的采矿管道,会受到波流联合作用力,产生横向摆动,摆幅可达数十米<sup>[7]</sup>。管道的横向摆动对水力提升的负面影响很大,轻则增加管道输送过程中的压力损失,加剧浆体与管道的摩擦磨损,缩短管道使用寿命;重则造成管道内固相组分向管壁聚集,引起颗粒回流,堵管,甚至出现爆管的现象,因此应该严格控制管道的摆动幅度<sup>[8]</sup>。为了抑制管道横向摆动,减小其所带来的危害及安全隐患,本文提出了一套深海采矿管道横向摆动抑制方案。

## 1 执行部件在采矿系统中的安置

该方案执行部件在采矿系统中的安置方式如图2所示。

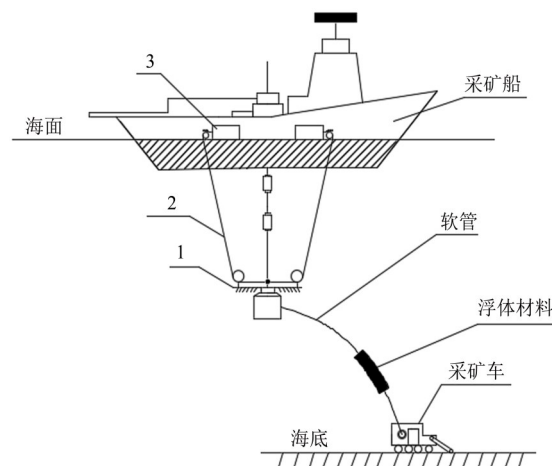


图2 横向摆动抑制装置总体结构

1-定滑轮组件,2-尼龙拉绳,3-液压换能组件。

Fig. 2 Overall structure of lateral swing suppression device

在管道发生横向摆动时,尼龙拉绳将会产生一个促使管道回复到平衡位置的拉力。从图中可以看出,无论是硬管还是软管,管道横向摆动幅度最大的地方都位于距离管道固定端最远的地方。因此,将拉绳作用位置选在靠近硬管与中继仓的接口处,这样可以有效减少管道横向摆动的幅度。

定滑轮组件能调整拉绳对管道的作用力,使之更有利于抑制管道横向摆动。液压换能组件的作用是将管道横向摆动的动能转化为电能,与尼龙拉绳相配合,一方面能减少管道横向摆动摆幅,另一方面迅速消耗摆动能量,使管道摆动迅速衰减。

## 2 拉绳工作原理

拉绳工作原理如图3所示,拉绳摆动的轨迹与管道摆动的轨迹不同,当管道从平衡位置往某一方向摆动时,反方向的拉绳就会有要被拉长的趋势,这样一来拉绳就会产生一个抑制管道摆动的拉力。这里为了便于表达拉绳的工作原理,省略了定滑轮。加入定滑轮是为了调整拉绳对管道的作用力,不会改变拉绳工作原理。

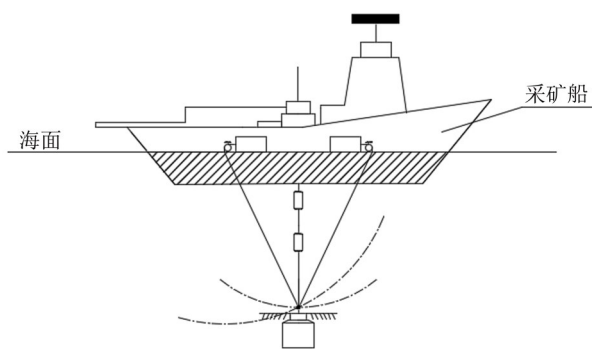


图3 拉绳工作原理

Fig. 3 Schematic diagram of rope pulling

## 3 液压换能组件

图4为液压换能组件的各个组成部分<sup>[7]</sup>。其中,拉绳下接管道上连活塞,活塞又与复位弹簧相连。当管道处于平衡位置时,弹簧也近乎在平衡位置;当管道往某个方向发生横向摆动时,会拉动反方向上的拉绳,拉绳带动活塞往外运动,活塞的运动会使弹簧伸长,这样弹簧的收缩力就通过拉绳作用到管道上,从而产生一个抑制管道横向摆动拉力。

由于弹簧的拉力与偏离平衡位置的位移成正比,因此拉绳抑制管道横向摆动的拉力将会是随位移变化的柔性力,且拉力方向始终与管道偏移方向相反,可以避免管道受到刚性冲击,这也是选择用拉绳来抑制管道横向摆动而不是选择直接将管道固定住的原因。

液压管道、液压马达及单向阀等围绕液压缸呈中心对称分布。活塞在拉绳和复位弹簧共同作用下将会来回摆动,上下两个液压马达将会在液流的冲击下转动;旋转发电机将在液压马达的带动下转动发电,将活塞来回摆动的动能转化成电能。复位弹簧能使活塞在来回摆动结束后回到平衡位置上。当系统液压油不足时,可通过注油孔补充液压油<sup>[9]</sup>。

管道的摆动引起活塞的摆动,活塞的摆动促使发电机旋转发电,即整个深海采矿管横向摆动抑制装置通过拉绳和活塞,间接将管道横向摆动的动能转化为电能,变害为宝。同时,液压马达对动能的消耗将使管道横向摆动迅速衰减,有效抑制管道横向摆动。

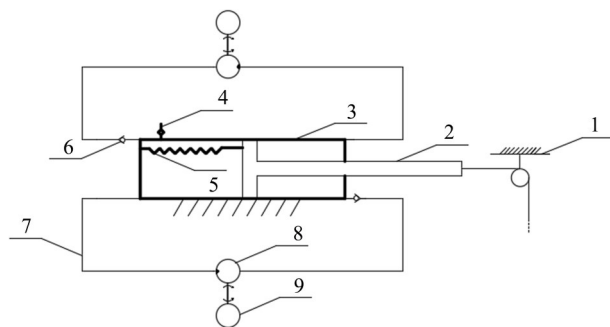


图4 液压换能组件

1-定滑轮, 2-活塞, 3-液压缸, 4-注油孔, 5-复位弹簧, 6-单向阀, 7-液压管道, 8-液压马达, 9-旋转发电机。

Fig. 4 Hydraulic energy exchange component

## 4 定滑轮组件

### 4.1 定滑轮作用

图5和6分别为有、无定滑轮时拉绳给管道的力(系)图。从图中可以看出,在管道因摆动发生偏移时,位于反方向拉绳确有被拉长的趋势。这里需要强调的是:为有效区分管道平衡位置与偏移位置,将偏移位置管道用细线画,其余用粗线画。

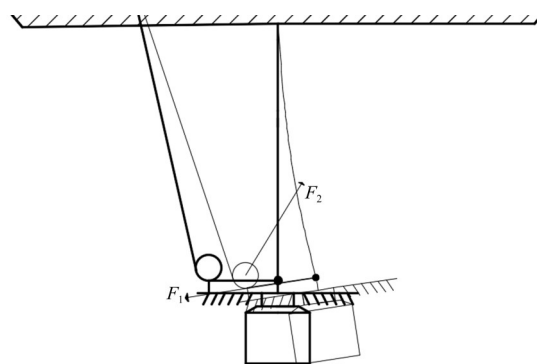


图5 有定滑轮时拉绳对管道的平面力系

Fig. 5 Plane force system of pulling rope to pipeline with fixed pulley

设拉绳固定端与管道固定端的横向距离为 $L_1$ ,管道横向摆动偏移量为 $L_2$ 。从图6可以看出,由于 $L_1$ 与 $L_2$ 的和始终大于 $L_2$ ,因此即使没有安装定滑轮,拉绳拉力横向分量 $F_1$ 对管道固定端的力矩 $M_1$

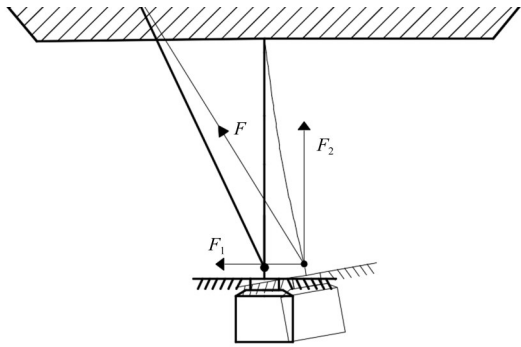


图 6 无定滑轮时拉绳对管道的单点力  
Fig. 6 Single point force of pulling rope to pipeline without fixed pulley

始终大于竖直分量  $F_2$  对管道固定端的力矩  $M_2$ , 即拉绳抑制管道偏移的力矩  $M_1$  始终大于加剧管道偏移的力矩  $M_2$ ; 以管道长度 2 000 m、拉绳固定端与管道固定端距离为 100 m、管道横向摆动幅度为 20 m 为例,  $M_1$  约为  $M_2$  的 6 倍。说明未安装定滑轮时, 该方案依旧能有效抑制管道横向摆动, 从理论上证明了该方案的可行性。

对比图 5 和 6 可以看出定滑轮的作用。在没有定滑轮时, 随着管道摆幅增加以及摆角增大, 绳子拉力与管道偏移方向的夹角会越来越大, 这会使得绳子拉力对管道横向摆动的抑制效果越来越差; 当管道摆角较大时, 绳子会和管道在局部相交, 甚至会加剧管道的局部偏移。这是因为在没有定滑轮时, 绳子拉力方向不能很好地顺应管道偏移方向的变化。

在加入定滑轮后, 绳子拉力就能顺着管道偏移方向的变化而恰当地改变方向。即使在管道摆角较大时, 绳子拉力与管道偏移方向的夹角基本不变, 依旧能有效抑制管道横向摆动。即定滑轮组件能调整拉绳对管道的作用力, 使之更有利于抑制管道横向摆动。

#### 4.2 定滑轮组件安置

本方案的定滑轮组件体型较小, 安装比较自由。对此, 本文给出了一种可供参考的安置方式, 将定滑轮组件安置在中继仓上, 具体如图 7-10 所示。

定滑轮支座可以焊接在中继仓上, 中间留一个较大的中心孔供管道穿过 (支座形状可以根据中继仓形状做调整, 本文只是借助这个例子介绍一种可供参考的安置方式), 安装定滑轮支座是便于安装定滑轮支架。如果中继仓本身形状就适合于定滑轮支架的安装, 支座也可以不要。

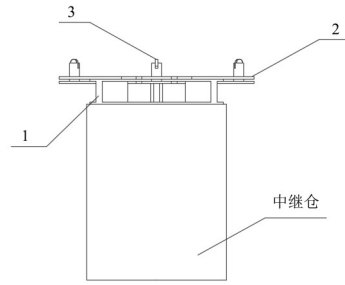


图 7 定滑轮组件安置主视图  
1-定滑轮支座, 2-定滑轮支架, 3-定滑轮。  
Fig. 7 Main view of fixed pulley assembly installation

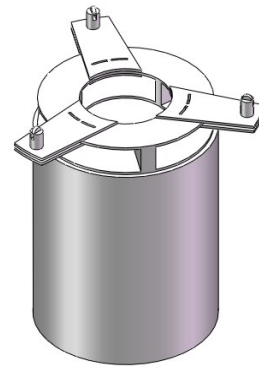


图 8 定滑轮组件安置三维图  
Fig. 8 Three dimensional diagram of fixed pulley assembly

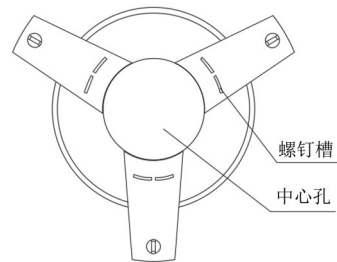


图 9 定滑轮组件安置俯视图  
Fig. 9 Top view of fixed pulley assembly

支架对称安置在支座两侧。支架与支座之间开了螺钉槽, 可供螺钉穿过, 将支架与支座连接起来。在螺钉钉紧之前, 支架可顺着槽摆动一定角度以调整位置。此外, 定滑轮底端有一个供拉绳穿过的小孔, 如图 10 所示。三个方向的定滑轮可供 3 个方向的拉绳穿过, 这样无论管道往哪个方向摆动, 三根拉绳产生的合力都能有效抑制管道横向摆动。

### 5 原理实验

为验证本文所提出的这套方案原理可行, 本文开展了相关实验, 实验装置如图 11 所示。用两根橡皮筋代替弹簧, 用木块代替活塞, 用图钉代

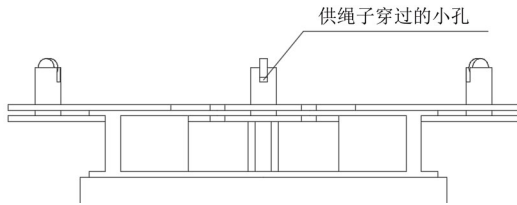


图 10 小孔特写

Fig. 10 Small hole close-up

替定滑轮, 用尺子代替管道, 用小型吹风机吹出的风代替液流冲击。

实验开始时, 尺子处于平衡位置, 尺子可绕



图 11 实验装置

Fig. 11 Experimental device

其固定端图钉摆动, 图钉和尺子及尺子和木板间存在一定的摩擦; 将吹风机出风口置于与尺子自由端水平距离约为 5 cm 的位置, 出风口轴线尽可能与位于平衡位置的尺子轴线垂直; 用该吹风机 1 档的风力对尺子自由端送风。当未安置摆动抑制装置时, 尺子的摆角约在  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ; 安置摆动抑制装置后, 尺子摆角不超过  $5^{\circ}$ 。实验结果表明, 该装置确实能有效抑制尺子在受到冲击时的横向摆动, 说明本文所提出的这套方案的工作原理可行。

## 6 结 论

为减少深海采矿管道的横向摆动所带来的危害及安全隐患, 本文提出了一套深海采矿管道横向摆动抑制方案。该方案的执行部件主要由液压换能组件、尼龙拉绳及定滑轮组件组成。拉绳能够提供抑制横向摆动的拉力, 减小横向摆动摆幅; 液压换能组件能够消耗横向摆动的动能, 并将其转化为电能; 定滑轮组件能调整拉绳对管道的作用力, 使之更有利于抑制管道横向摆动。该方案有以下优点: 有效抑制深海采矿管的横向摆动, 减少横向摆动带来的风险和危害; 在抑制管道横向摆动的同时避免管道受到刚性冲击; 将管道横向摆动的动能转化为电能, 变害为宝; 部件安置灵活方便, 可靠性高。

### 参考文献:

- [1] 费雪锦, 邱电云. 深海底矿物资源开发现状及前景[J]. 中国锰业, 1994, 12(6): 6-10.
- [2] 邵仲妮. 天然气水合物资源分布及勘探开发进展[J]. 当代石油化工, 2007, 15(5): 24-30.
- [3] 陈新明, 吴鸿云. 深海底矿产资源开采技术及装备的发展与展望[J]. 矿业装备, 2011(8): 24-27.
- [4] 徐海良, 杨培邦. 新型深海采矿水力输送系统研究[J]. 现代制造工程, 2009(11): 1-4.
- [5] 王耀锋, 王定亚, 任克忍, 等. 海洋钻井隔水管浮力块配置方法[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 35-38.
- [6] 王刚, 刘少军, 李力. 深海采矿扬矿系统水下构形与动力学特性数值仿真[J]. 计算机仿真, 2005(10): 302-305.
- [7] 徐海良, 何清华. 深海采矿系统研究[J]. 中国矿业, 2004(7): 45-48.
- [8] 徐海良, 饶星, 杨放琼. 横向摆动对深海采矿扬矿管输送特性的影响[J]. 中南大学学报, 2019, 50(10): 2395-2402.
- [9] 刘银水, 许福玲. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 59-78.

(责任编辑 王海蓉)