水下机器人-脐带缆系统受力分析仿真计算平台开发

张定华[1]，袁庆晴[1]，郭园园[1]，颜　翚[2]
（1. 上海中车艾森迪海洋装备有限公司，上海　200240；2. Soil Machine Dynamics Ltd.，Wallsend　NE28 6UZ）

摘　要：[目的]为快速预测水下机器人-脐带缆系统的受力特性、指导系统设计，[方法]基于MATLAB 脚本语言搭建了一套能对水下机器人-脐带缆系统的布放回收和稳定作业工况进行分析的仿真计算平台。该仿真计算平台集成参数输入、后台求解调用、计算结果分析与结果输出反馈的完整流程，能评估不同海况下的布放回收、水下定深及水下三缆作业等过程中脐带缆的内部受力、缆形变化及水下机器人相对位置等关键信息。[结果]结果表明：仿真计算值与海试值吻合较好。仿真平台在不同工况下均能给出直观、可靠的输出，便于掌握缆绳动态受力、缆形变化和水下机器人水下位移等特性，不仅适用于设计阶段的系统参数优化，还可应用于作业阶段的实时或预演分析，可成为贯穿水下机器人-脐带缆系统全生命周期的有效预测工具。[结论]研究成果可为水下机器人-脐带缆系统仿真计算提供一定参考。

关键词：水下机器人；脐带缆；布放回收；MATLAB；仿真计算平台
中图分类号：P75　　**文献标志码：**A　　【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.04

Development of Simulation Platform for Force Analysis of Underwater Vehicle-Umbilical Cable System

ZHANG Dinghua[1], YUAN Qingqing[1], GUO Yuanyuan[1], YAN Hui[2]
(1. CRRC SMD (Shanghai) Ltd., Shanghai 200240, China; 2. Soil Machine Dynamics Ltd., Wallsend NE28 6UZ, UK)

Abstract: [Purpose] To enable rapid predictive force analysis of the underwater vehicle-umbilical cable system and to guide system design, [Method] a simulation platform is developed based on MATLAB's scripting language to analyze the launch, recovery, and stable operational conditions of a underwater vehicle-umbilical cable system. This platform integrates a complete workflow, including parameter input, software invocation for background calculation, data post-processing and analysis, and results output feedback. It can be used to evaluate internal forces in the umbilical cable, cable configuration, and the relative position of the underwater vehicle under various sea conditions during launch, recovery, depth-holding operations, and three-cable operations. [Result] The results indicate that the simulated values are in good agreement with the sea trial values. The simulation platform can provide intuitive and reliable outputs under different working conditions, making it easy to grasp the dynamic force of the cable, changes in cable shape, and underwater displacement of the underwater robot. It is not only suitable for system parameter optimization in the design stage, but also for real-time or simulation analysis in the operation stage, and can become an effective prediction tool throughout the entire life cycle of the underwater robot umbilical cable system. [Conclusion] The research results can provide some references for the simulation

收稿日期：2026-01-07；**修回日期：**2026-03-02；**录用日期：**2026-03-09
基金项目：高技术船舶科研项目（CBZ02N23-05）
作者简介：张定华（1979—），男，博士、正高级工程师。研究方向：供电技术、水下系统集成、深海挖沟机和水下工作级机器人。

calculation of underwater robot umbilical cable system.

Key words: underwater vehicle; umbilical cable; launch and recovery; MATLAB; simulation platform

0 引言

近几十年来，随着海洋勘探与资源开发利用的活动不断增加，人类开发了多种类型的水下机器人以拓展活动范围。根据是否带缆，可分为带缆水下机器人和无缆水下机器人。其中，带缆水下机器人由脐带缆供电，具备作业能力强、作业时间长等优势，广泛应用于海洋工程各领域。例如，有缆遥控水下机器人（Remotely Operated Vehicle, ROV）是海洋科考勘探、水下作业、深海油气开发、海底管线与结构物检测等领域必不可少的作业工具[1]。海底开沟机（Sub-Sea Trencher）用于将管道和线缆埋设至海底土层下一定深度，以保障管缆的安全性与稳定性[2-3]。采矿装备可采集海底多种矿产资源并输送至海面，是解决全球资源供给问题的关键技术手段[4]。脐带缆连接水下机器人与水面平台承担着承载、动力输送和数据传输等重要功能，准确预测其在作业过程中的受力和变形具有重要意义[5-6]。然而，在实际作业中，仅能根据释放长度和端部应力等信息判断脐带缆的受力与变形情况，无法获取风浪流共同作用下脐带缆的实时变化数据，因此需提前对其动态力学特性进行分析预测。

目前，大多数研究者通过理论分析或数值模拟研究脐带缆的动力学响应。CHEN 等[7]基于基尔霍夫细长杆理论建立了复杂海况下脐带缆的动力学模型，并利用微分求积法和 Newmark-β 法对方程组进行求解，分析了不同条件下脐带缆的特性。CHRISTOPHE[8]提出通过在脐带缆上添加压载、浮球、定向推进器等附加元件，以可控的方式拉伸脐带缆并进行缆形预测，同时给出了一种可预测三维脐带缆缆形的通用模型。XIAO 等[9]在研究深海采矿系统时，采用集中质量法对脐带缆建模，并通过考虑附加质量的边界条件连接系统的刚性与柔性部件，建立了多体系统动力学模型。王体涛等[10]基于船-缆耦合系统，提出了风-浪-流载荷作用下的脐带缆动态响应模型，利用 OrcaFlex 软件对触地点处的受力进行计算，并结合有限元仿真分析了真实海况下轻量化脐带缆的受力状态，总结归纳了缆体的破坏机理。杨祥云等[5]基于三维势流理论与集中质量法，对深海采矿车布放回收过程中脐带缆的顶端张力等力学特性进行了研究。王伟等[11]基于时域耦合分析法，建立了母船-脐带缆-深海采矿装备的三维非线性水动力模型，并对布放回收过程中脐带缆的水动力响应特性进行了数值计算与分析。

在实际工程应用中，根据海况、母船、脐带缆和水下机器人等参数快速预测并分析脐带缆的内部应力和缆形变化，有助于指导带缆水下机器人系统设计并保障作业过程中的系统安全。由于水下机器人-脐带缆系统在不同工况下的动力学仿真计算过程具有相似性，可对共性设置进行集成，形成通用的输入指令与输出反馈，从而更简洁、快速地获得仿真计算结果。为此，本文基于 OrcaFlex 计算软件，利用 MATLAB 程序搭建了一个通用计算平台，用于仿真计算水下机器人-脐带缆系统在布放回收和稳定作业状态下的动力特性。该计算平台的输入界面集成了海况、脐带缆、水下机器人等主要参数的采集功能，通过后台调用 OrcaFlex 进行数值计算，计算完成后由脚本在输出界面生成可视化信息，用于分析脐带缆的内部受力与缆形变化，实现了从参数输入、计算执行到结果可视化的全自动化流程。平台设计了统一的输入指令和输出反馈机制，输出端通过脚本自动处理数据并生成直观的可视化结果，显著降低了重复建模的工作量，具有操作简洁、计算效率高、分析结果可靠等特点，能成为设计阶段和作业阶段分析脐带缆受力与变形的有效预测工具。

1 模型构建

1.1 物理模型

1.1.1 布放回收阶段

有缆水下机器人的布放回收系统主要由母船、脐带缆、绞车、升沉补偿装置、吊放门架和止荡器等组成。根据本文的研究内容和目的，在数值建模过程中对布放回收系统进行简化，暂不考虑升沉补偿装置和中继器，简化模型主要由母船、绞车、门架滑轮和脐带缆组成，见图 1。

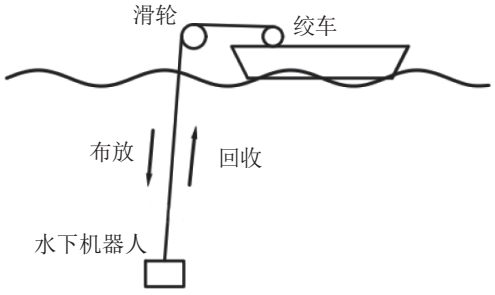


图 1 水下机器人布放回收阶段简化模型示意

Fig. 1 Simplified Model of Underwater Robot in Launch and Recovery Stage

1.1.2 作业阶段

当有缆水下机器人开展大深度作业时，风浪对

脐带缆受力的影响主要集中在浅水区域，此时应重点考虑海流作用下脐带缆的释放长度与变形，以及水下机器人相对母船的方位和运动范围。水下机器人作业阶段简化模型示意见图 2。

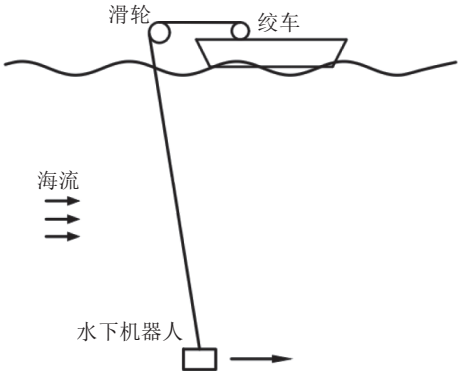


图 2　水下机器人作业阶段简化模型示意

Fig. 2　Simplified Model of Underwater Robot Operation Stage

犁式挖沟机的作业工况与其他水下机器人存在明显差异：除脐带缆外，还有拖曳钢丝绳连接母船与挖沟机，同时作业过程中需敷埋产品缆。拖曳钢丝绳处于受力绷直状态，产品缆较重，在水中呈下垂缆形。为避免缆绳间发生缠绕，通常在脐带缆适当位置绑扎一定数量的浮球，使其远离另外 2 根缆绳，见图 3。为获得既经济又安全的浮球组合方案并确定脐带缆的合理释放长度，有必要对 3 根缆绳的缆形进行分析。

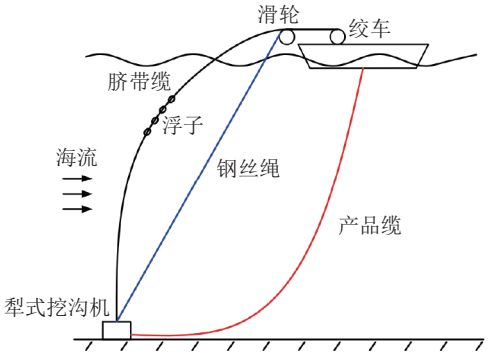


图 3　犁式挖沟机作业阶段简化模型示意

Fig. 3　Simplified Model Diagram of Plough Trencher Operation Stage

1.2　数学模型

OrcaFlex 软件对脐带缆结构采用集中质量法进行分析计算。该方法将脐带缆离散为有限个微段，每个微段模拟均为由轴向弹簧、旋转弹簧和阻尼器构成的组合体[12]。微段自身的质量和作用力为 0，两端的节点集中承受相邻 2 个微段各一半的质量、力和力矩，节点间通过线性或非线性弹簧连接。集中质量法基于以下假设：脐带缆不可压缩，不计弯矩和扭矩作用。

除首末 2 个节点外，其余节点的动力学方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_i}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{U}_i \tag{1}$$

$$m_i\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}_i}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{W}_i-\boldsymbol{B}_i+\boldsymbol{F}_{\mathrm{A},i}+\boldsymbol{D}_i+\boldsymbol{T}_{\mathrm{e},i}-\boldsymbol{T}_{\mathrm{e},i-1} \tag{2}$$

式（1）和式（2）中：m_i 为脐带缆节点 i 的质量；$\boldsymbol{r}_i$ 为节点 i 的位移；$\boldsymbol{U}_i$ 为节点 i 的速度；$\boldsymbol{W}_i$ 和 $\boldsymbol{B}_i$ 分别为节点受到的重力和浮力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{A},i}$ 为附加质量惯性力，与脐带缆微段和水流的相对速度有关；$\boldsymbol{D}_i$ 为节点所受的阻力，通过圆柱体在水流中的阻力经验公式进行计算；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{e},i}$ 为脐带缆第 i 分段的有效拉力，计算式为

$$\left|\left|\boldsymbol{T}_{\mathrm{e},i}\right|\right|=T_{\mathrm{w},i}+A_{0,i}P_{0,i}-A_{i,i}P_{i,i} \tag{3}$$

$$T_{w,i}=EA_{i,i}\varepsilon_i-2\nu\left(P_{0,i}A_{0,i}-P_{i,i}A_{i,i}\right)+\frac{EA_ie}{L_{0,i}}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

$$\varepsilon_i=\frac{L_i-\lambda L_{0,i}}{\lambda L_{0,i}} \tag{5}$$

式（3）～式（5）中：$T_{\mathrm{w},i}$ 为第 i 分段的壁面张力；$P_{0,i}$ 和 $P_{i,i}$ 分别为脐带缆外部压力和内部压力；$A_{0,i}$ 和 $A_{i,i}$ 分别为脐带缆外部横截面积和内部横截面积；E 为杨氏模量；ε 为轴向平均应变；λ 为分段伸长系数；L_i 为第 i 分段受力后的长度；$L_{0,i}$ 为第 i 分段原长；ν 为泊松比；e 为管线阻尼系数，本文取 e=0；$\mathrm{d}L/\mathrm{d}t$ 为长度变化速率。

结合脐带缆的边界条件和初始条件，选择合适的算法求解式（1）和式（2），即可得到脐带缆的动力学响应特征。

水下机器人视为刚性部件，其运动学模型可表示为

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{V}}+\boldsymbol{C}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{R}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{other}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为水下机器人的质量阵；$\boldsymbol{C}$ 为科里奥利力和向心力阵；$\boldsymbol{V}$ 为水下机器人线速度和角速度列阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}$ 为水下机器人所受的惯性水动力（力矩）阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$ 为所受的黏性水动力（力矩）阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{R}}$ 为重力和浮力共同作用的静力（力矩）阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{other}}$ 为其他外力（力矩）阵。

2　仿真平台

2.1　总设计思路

仿真平台的总体设计思路包括：设计输入界面、编写对接脚本、提取计算结果并显示输出，以及建立典型算例数据。输入界面将海况环境（风、浪、流）、脐带缆、水下机器人及绞车等参数作为输入对象，在可视化界面中输入数值并传递给后台计算软件。对接脚本语言是在 MATLAB 中根据 OrcaFlex 的脚本接口格式开发相应接口，实现后台调用计算软件，完成布放回收和作业阶段水下机器人-脐带

缆系统的水动力分析。计算完成后，按软件脚本语言格式提取结果数据，通过 MATLAB 程序进行数据筛选，并在可视化界面中输出数值和图像。典型算例数据化旨在积累不同水下机器人-脐带缆系统的算例数据，建立经典算例数据库，减少建模调试周期，提高设计效率。仿真平台的设计流程见图 4。

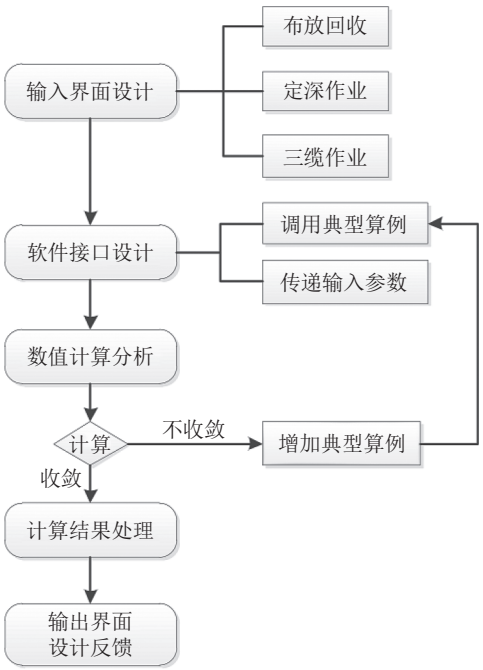


图 4　仿真平台的设计流程

Fig. 4　Design Process of Simulation Platform

在仿真计算平台中引入以下假设：

1）不同作业水深的海流速度分布图取自该海域作业窗口期实测的历史平均数据，根据分布特征可划分为至多 6 层不同变化趋势的海流层。布放回收主要发生在浅水区，采用 3 层海流分布即可描述浅海流场，并假定各深度处海流方向一致。

2）研究的 ROV、海底开沟机和采矿车等水下机器人内部布满设备与管线，外观较为方正。经前期水动力性能计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）计算分析，其水动力特性与矩形运动体的计算结果误差在 5% 以内，故在数值仿真中可将外形简化为矩形。

3）布放与回收阶段按匀速作业处理，绞车起动和停止的加减速时间可在软件中进行修正。

2.2　仿真平台模块化

仿真平台主界面划分为水下机器人布放回收、水下定深和水下三缆作业 3 种计算工况，每种工况均配备对应的输入模块、软件对接模块和数据处理模块。

2.2.1　输入界面模块

以布放回收过程的输入界面为例（见图 5），在“水下机器人型号”下拉框中可选择研究对象，计算时将加载相似工况的典型算例。整个输入界面包含 4 个参数区域：海况环境参数、脐带缆参数、水下机器人参数和绞车参数。



图 5　布放回收作业输入界面

Fig. 5　Input Interface of Launch and Recovery Operation

在三缆作业工况中，还须输入钢丝绳、产品缆参数及脐带缆上绑扎的耐压与非耐压浮球的数量和间距。通过仿真平台的计算与分析，确定脐带缆上耐压/非耐压浮球的最佳组合方案。

2.2.2　软件对接模块

软件对接模块是仿真计算平台的核心，通过 MATLAB 的 m 文件按照 OrcaFlex 软件的脚本语言格式编写。根据所选水下机器人型号，调用对应的典型算例，提取输入参数并转化为计算软件可读取的格式，驱动后台计算并保存结果。

为准确将海流分层信息传递给计算软件，采用循环方式逐层叠加不同水深对应的海流速度系数，并对当前第 (i+1) 层赋予流速系数，从而定义整个作业水深范围内的海流分层信息。

以水下三缆作业为例，从经济性出发，考虑非耐压浮球与耐压浮球组合的方案，并作如下假设：每类浮球的间距保持不变；非耐压浮球仅能承受较小水压。水下三缆作业的对接脚本如下：

```
Umbilical = model('Umbilical');
    % 获取脐带缆和浮球数据
    Umbilicallength = str2num(get(handles.edit18, 'String'));
    upfloatnum = str2num(get(handles.edit22, 'String'));
upfloatdis = str2num(get(handles.edit23, 'String'));
pfloatnum = str2num(get(handles.edit24, 'String'));
pfloatdis = str2num(get(handles.edit25, 'String'));
Umbilical.NumberOfAttachements = upfloatnum +
```

```
pfloatnum;
    for j = 1: upfloatnum
            % 指定位置捆绑非耐压浮球
        Umbilical.AttachmentType(j) = 'buoy1';
      Umbilical.Attachmentz(j) = (j-1)* upfloatdis;
    end
    for k = 1: pfloatnum
        % 指定位置捆绑耐压浮球
      Umbilical.AttachmentType(k+upfloatnum)  =
'buoy2';
    Umbilical.Attachmentz(k+upfloatnum)          =
(upfloatnum -1)* upfloatdis+k*pfloatdis;
    end
```

上述脚本定义了在脐带缆适当位置加载浮球的过程：先传入非耐压浮球（buoy1）和耐压浮球（buoy2）的基本参数，再按指定位置依次绑扎非耐压浮球和耐压浮球。在工程应用中可根据需要调整非耐压浮球和耐压浮球各自的起始位置。

2.2.3 数据处理模块

布放作业须反馈滑轮所受最大作用力、水下机器人相对母船的空间位置、指定时刻的脐带缆缆形及脐带缆张力变化历史。滑轮最大作用力以文本的形式输出，其余结果以图像的形式呈现。水下定深作业需输出水下机器人在海流作用下相对母船的坐标、脐带缆上端偏离角度、缆形及受力情况，并直接以图像反馈计算结果。水下三缆作业主要关注 3 根缆绳的缆形与受力分布，特别是捆绑浮球后脐带缆的缆形，同时反馈犁式挖沟机距母船船尾的距离。若当前耐压/非耐压浮球组合计算得到的缆形不理想，可返回计算模块调整浮球的间距和数量，重新计算分析。

3 计算结果

为验证仿真平台的分析性能，分别选取 3 种水下机器人进行布放回收、水下定深以及三缆作业的仿真计算，并结合某挖沟机海试进行验证。海况环境参数见表 1，考虑最危险情况，即风、波浪和海流方向一致，定义为 180°（从船首指向船尾）。

表 1 海况参数

Tab. 1 Sea Condition Parameters

海况等级	波高/m	波周期/s	风速/(m/s)
3	1.25	5	5.4
4	2.50	7	7.9
5	4.00	10	10.7

3.1 布放回收作业

某采矿车作业水深 6 000 m，海流速度随水深的变化曲线见图 6。分别对海况 3 级、4 级和 5 级下的布放回收作业工况进行计算。浅水区风浪流变化剧烈，是布放回收过程的关键区域，因此主要分析采矿车从甲板至水深 80 m 范围内的布放回收过程。绞车速度为 0.5 m/s，脐带缆外径为 0.07 m，空气中脐带缆单位长度质量为 5.66 kg/m。采矿车空气中质量为 40 t（满载矿石时质量为 48 t）。

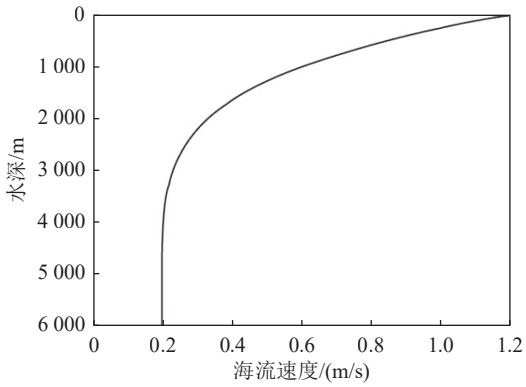


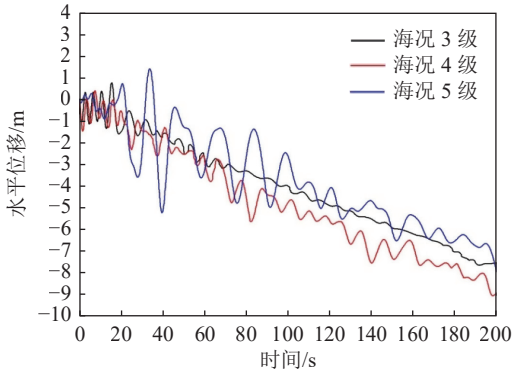
图 6 海流速度随水深的变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Ocean Current Velocity with Water Depth

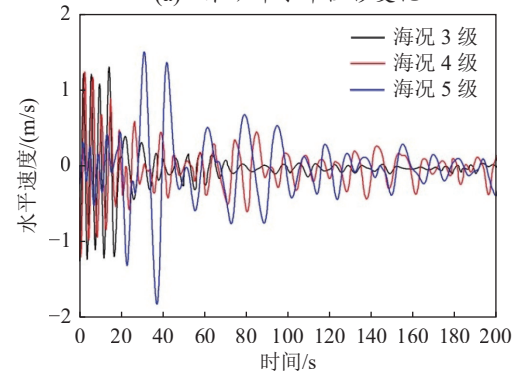
布放作业中，采矿车重心起始位置距海面约 4 m。经仿真平台计算，布放过程的计算结果见图 7。观察计算结果可知，布放过程分为 2 个阶段：第 1 阶段为入水阶段，母船受波浪作用上下起伏，采矿车因惯性也发生明显晃动。当海况为 3 级和 4 级时，采矿车水平方向的最大摆幅约为 1 m，水平速度最大值约 1.0 m/s；当海况为 5 级时，采矿车在飞溅区产生最大位移，幅度可达 6 m 左右，水平速度最大值约 1.5 m/s。由图 7(c) 可知，3 种海况下脐带缆与采矿车连接处的瞬时张力在 400 kN 附近振荡，最大值约 460 kN；采矿车入水后，缆内张力迅速下降，在 150 kN～250 kN 范围内波动。随着布放进行，进入第 2 阶段——稳态布放阶段，采矿车在海流作用下逐渐偏离初始位置，同时水平位移振幅迅速减小。由图 7(a) 和图 7(b) 可知，当海况为 3 级时采矿车水平速度接近于 0，水平位移振幅可忽略不计；当海况为 5 级时，风浪对采矿车水平运动的影响仍然较大，该阶段采矿车水平速度约 0.3 m/s，水平位移振幅约 4 m；海况 4 级时采矿车的水平运动情况介于二者之间。3 种海况下脐带缆缆内张力变化趋势相似，均值约 200 kN。同时，仿真平台输出滑轮位置的最大受力信息，辅助布放系统的受力分析。

计算平台模拟了采矿车从水下约 80 m 深度开始回收的过程。回收过程的计算结果见图 8。由图 8 可知，当海况为 3 级和 4 级时，采矿车在回收初始阶段稳定回收，水平位移振幅小，水平速度较

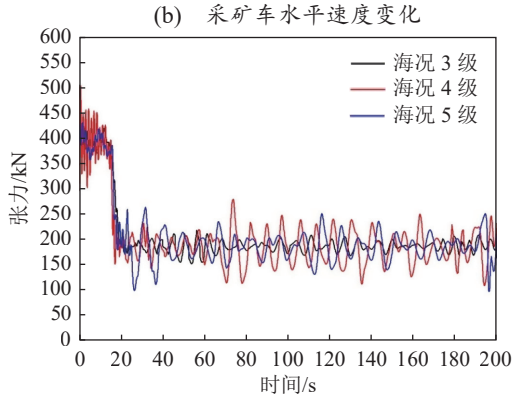
低；当海况为 5 级时，此阶段采矿车水平振幅约 1 m，水平速度最大值约 0.3 m/s，表明该水深范围已受到较明显的风浪作用，该阶段与采矿车连接的脐带缆张力在 160 kN～230 kN 范围内波动。进入飞溅区后，当海况为 3 级时采矿车水平运动变化不明显，海况 4 级和 5 级时水平位移振幅明显增大，其中海况为 5 级时水平位移振幅约 3.5 m，水平运动最大速度约 1 m/s。采矿车浮出水面后，其水平位移和速度略有下降，但此时脐带缆缆内张力发生突变，均值约 400 kN，变化范围为 300 kN～460 kN。



(a)　采矿车水平位移变化



(b)　采矿车水平速度变化

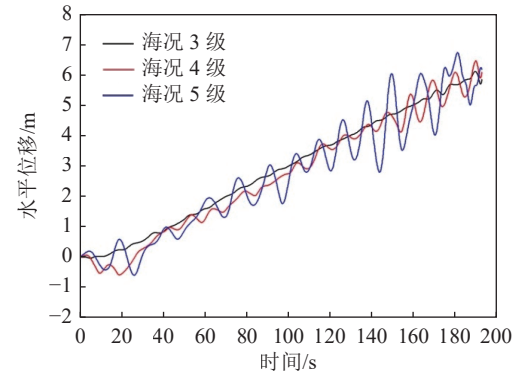


(c)　采矿车连接处脐带缆的张力变化

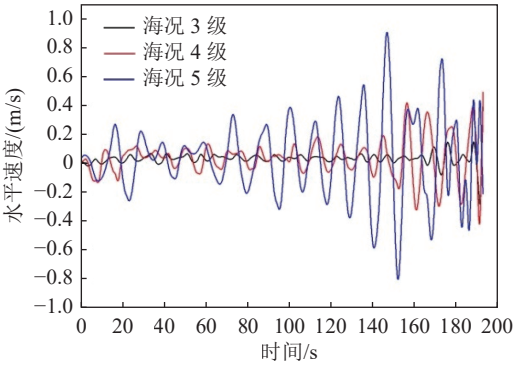
图 7　布放过程的计算结果

Fig. 7　Calculation Results of the Deployment Process

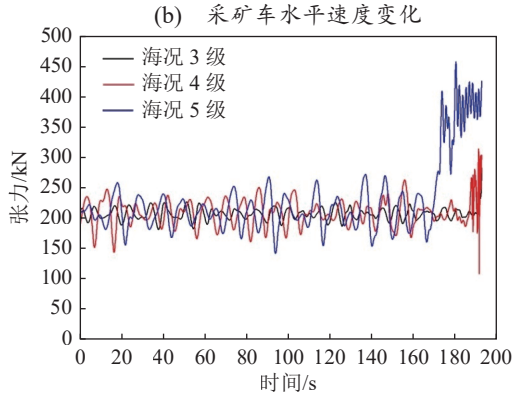
仿真平台的计算结果再次证实，在布放起始阶段和回收结束阶段，受波浪与海流共同作用，采矿车会产生剧烈的振荡和摆动；尤其在高等级海况下，风浪对采矿车运动的影响可持续至一定水深。因此，有必要配置止荡装置以减小采矿车的大幅摆动。



(a)　采矿车水平位移变化



(b)　采矿车水平速度变化



(c)　采矿车连接处脐带缆的张力变化

图 8　回收过程的计算结果

Fig. 8　Calculation Resultsof the Recovery Process

3.2　水下定深作业

某 ROV 型挖沟机作业水深 2 500 m，该深度下海流速度随水深的变化曲线见图 9，计算海况 3 级、4 级和 5 级时的受力情况。挖沟机在海底作业时推进器推力约 30 kN。为防止脐带缆与挖沟机发生缠绕，在脐带缆连接挖沟机处安装一定长度的限弯器。脐带缆及加装限弯器后的参数见表 2。

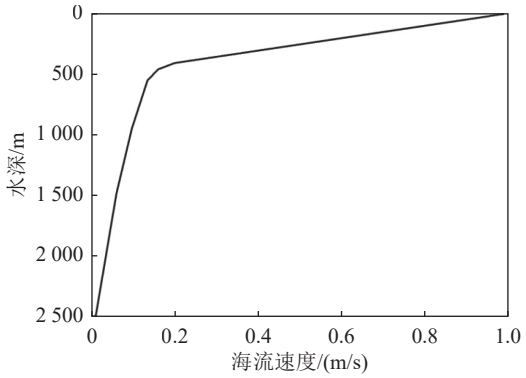


图 9　海流速度随水深的变化曲线

Fig. 9　Variation Curves of Ocean Current Velocity with Water Depth

表 2　脐带缆和限弯器参数

Tab. 2　Umbilical and Bend Limiter Parameters

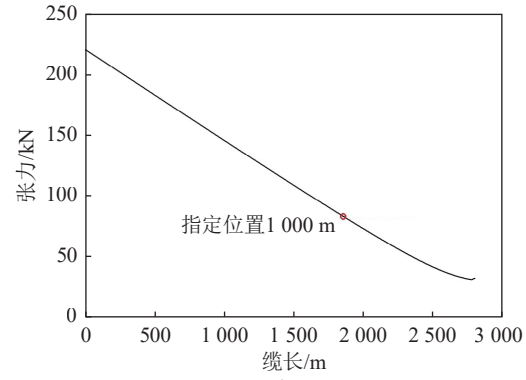
类型	直径/ m	单位长度质量/(kg/m)	弯曲半径/m	长度/ m
脐带缆	0.053	10.035	1.0	2 775
脐带缆捆绑限弯器	0.156	37.470	1.0	25

计算结果表明，对于在较深海域定深作业的挖沟机，风浪对脐带缆缆内张力、缆形及挖沟机作业范围的影响较小。因此，以海况 4 级的计算结果为例进行说明（见图 10），同时通过标记点数值观察该处脐带缆的位移和张力情况。由图 10(a)可知，脐带缆最大张力为 220.85 kN，出现在与母船相连的位置。由于限弯器长度较短，主要起局部限弯和防缠绕作用，仅在挖沟机连接处附近对脐带缆受力略有影响。平台同时反馈了挖沟机相对母船的三维坐标及脐带缆最大张力等数值，见图 10(c)。

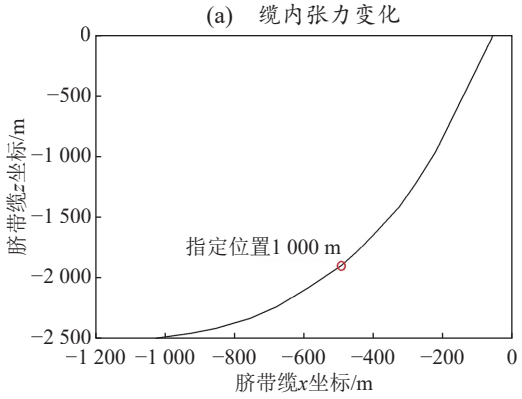
3.3　水下三缆作业

某犁式挖沟机作业水深 500 m，该深度下海流速度随水深的变化曲线见图 11，计算海况为 4 级时的受力情况。所用脐带缆、拖曳钢丝绳和产品缆的参数见表 3。产品缆一端连接母船，另一端从挖沟机本体穿过后铺设在海底。为避免 3 根缆绳发生缠绕，脐带缆从靠近母船一端开始绑扎浮球，浅水区域绑扎非耐压浮球，深水处绑扎耐压浮球。非耐压浮球和耐压浮球参数见表 4。挖沟机在水平方向受到的阻力约 196 kN。

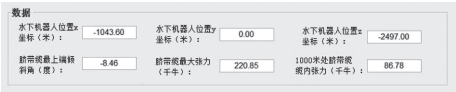
三缆作业的计算结果见图 12，仿真平台输出反馈挖沟机位于船尾约 910 m 处。此时在浮球作用下，约 600 m 长的脐带缆漂浮在浅水区域，钢丝绳处于受力拉伸状态，产品缆从挖沟机内部穿过后，由于存在自质量，有一段直接铺在海床表面，3 根缆绳缆形合适，未发生缠绕。分别观察 3 根缆绳张力沿长度的变化：脐带缆在浮球作用下，缆内张力从初始的 32 kN 逐步下降，在浮球结束的对应位置出现突变，最大值约 46 kN，随后逐渐降低至 20 kN；拖曳钢丝绳最大张力出现在与母船连接处，约 242 kN，随长度增加逐渐减小，与挖沟机连接处张力约 188 kN；产品缆自质量较大，与母船连接处最大张力约 400 kN，随后逐步降低，拖底后张力变化趋缓，但由于水流作用及海底与缆绳表面的摩擦力，缆内仍存在一定张力。



(a)　缆内张力变化



(b)　脐带缆缆形



(c)　其他参数输出

图 10　定深作业的计算结果

Fig. 10　Calculation Results of the Depth Setting

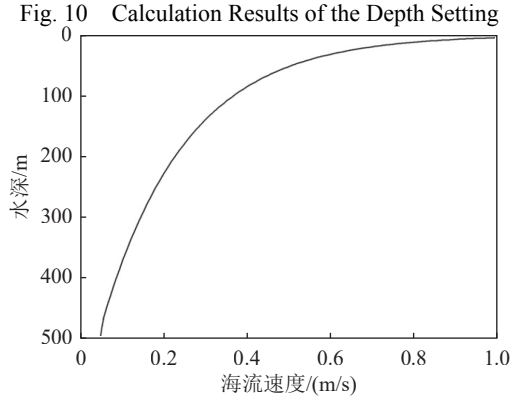


图 11　海流速度随水深的变化曲线

Fig. 11　Variation Curve of Ocean Current Velocity with Water Depth

表 3　缆绳参数

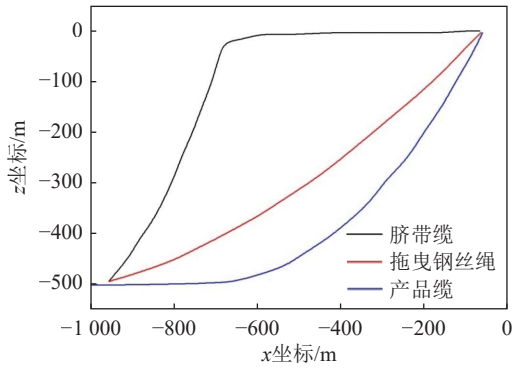
Tab. 3　Parameters of the Cables

类型	直径/m	单位长度质量/(kg/m)	弯曲半径/m	长度/m
脐带缆	0.047 8	7.55	0.72	1 180
拖曳钢丝绳	0.052 0	13.20	1.00	1 010
产品缆	0.156 0	59.65	0.70	1 280

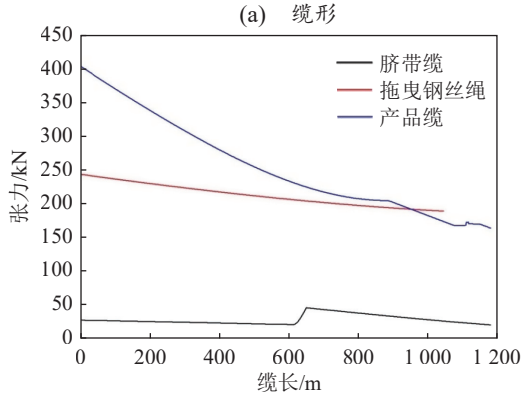
表 4　浮球的参数

Tab. 4　Parameters of the Floating Ball

类型	体积/ m^3	提供浮力/N	数量/个	间隔/m
非耐压浮球	0.113	948	50	12.5
耐压浮球	0.143	1 166	35	1.0



(a)　缆形



(b)　缆内张力变化

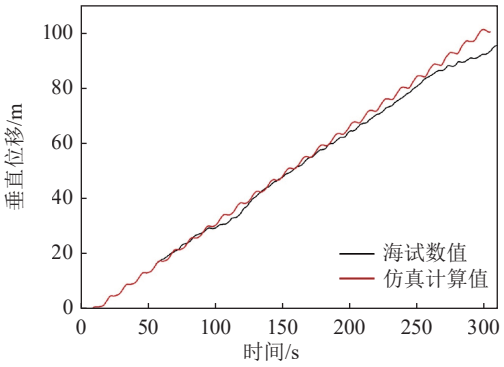
图 12　三缆作业的计算结果

Fig. 12　Calculation Results of Three-Cable Operation

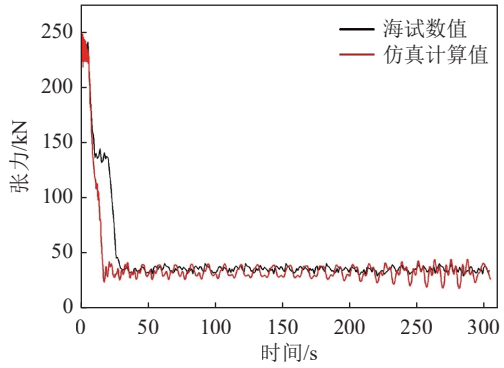
3.4　海试验证

某 ROV 型挖沟机于 2023 年 8 月在我国东海海域开展海试作业，作业窗口期海况约 3 级，海流分布参考图 11。该挖沟机空气中质量约 24 t，水下质量约 3.5 t。提取挖沟机在布放和回收阶段的脐带缆缆内张力及垂直位移海试数据，与仿真计算值进行对比分析，结果见图 13 和图 14。

由图 13 可知，仿真计算值与海试值吻合较好。海试中挖沟机的垂直位移变化更为平稳，而仿真计算的垂直位移受波浪作用波动较明显；两者垂直



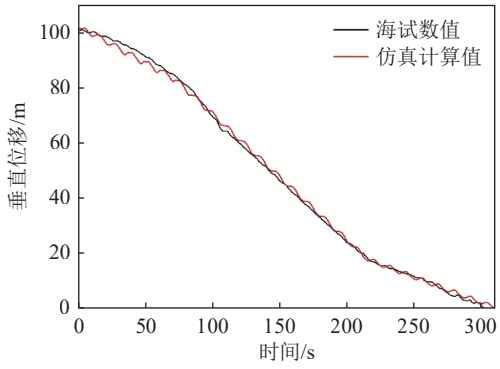
(a)　挖沟机垂直位移变化



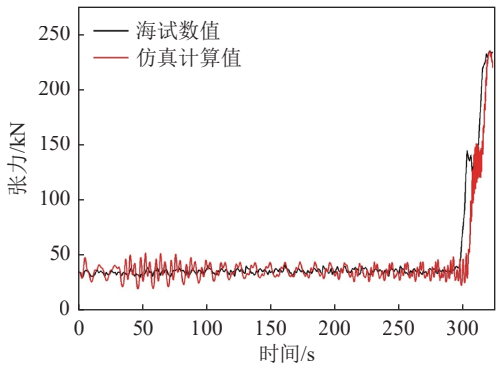
(b)　挖沟机连接处脐带缆的张力变化

图 13　海试验证结果（布放作业）

Fig. 13　Sea Trial Verification Results (Deployment Operation)



(a)　挖沟机垂直位移变化



(b)　挖沟机连接处脐带缆的张力变化

图 14　海试验证结果（回收作业）

Fig. 14　Sea Trial Verification Results (Recovery Operation)

位移的整体误差在 10% 以内，但当挖沟机下放至 80 m 左右时，海试中布放速率下降，导致该阶段位移与计算值出现较明显偏离。两者脐带缆缆内张力变化趋势相似，海试中挖沟机在水面停留时间较久，入水后张力值均在挖沟机水下质量附近波动，仿真计算值的波动更为显著。

由图 14 可知，计算值与海试值更加贴近，两者误差在 5% 以内，但计算值受波浪作用影响，数值波动仍较明显。图 14(b) 反映出缆内张力变化趋势相似，数值波动均值相近；海试中挖沟机出水后在水面停留时间较长，与计算值存在一定偏移。

海试验证表明，该仿真计算平台可作为一种计算可靠、效率高的工具，用于水下常见作业设备的水下运动状态判断和脐带缆受力分析。

4 结论

本文搭建的仿真计算平台提炼共性设置，设计统一的输入界面，通过后台调用计算软件，对不同海况下多种水下机器人的布放回收和定深作业进行仿真计算，并利用脚本语言处理计算结果，在结果界面中反馈缆绳内部受力、缆形变化及水下机器人相对母船位置等关键信息。结合 3 个算例的数值计算与海试验证，仿真平台在不同工况下均能给出直观、可靠的输出，便于掌握缆绳动态受力、缆形变化和水下机器人水下位移等特性，表明该平台不仅适用于设计阶段的系统参数优化，还可应用于作业阶段的实时或预演分析，可成为贯穿水下机器人-脐带缆系统全生命周期的有效预测工具。

后续将针对以下内容开展进一步研究：

1）建立典型算例数据库，通过积累更多典型案例，进一步提高仿真计算平台的适用范围，更全面地对各类工况下水下机器人的布放回收和定深作业进行预测分析。

2）完善输入界面的数据读取和输出界面的数据输出功能，使波浪、海流、绞车收放速度等输入参数支持以文本格式导入，缆绳、水下机器人等输出参数可选择以文本格式保存。

3）考虑其他水下设备的影响，建立更符合工程应用的计算场景。

参考文献：

[1] 孙浩楠, 王磊, 李德军. 深海作业型 ROV 发展现状与关键技术分析[J]. 中国造船, 2024, 65(6): 130-144.
SUN H N, WANG L, LI D J. Analysis of Development Status and Key Technologies of Deep-Sea Working Type of Remotely Operated Vehicles[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(6): 130-144.

[2] 陈泳伽. 复杂工况下自行式水下挖沟机动力学仿真与分析[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2024.
CHEN Y J. Dynamic Simulation and Analysis of Self-propelled Underwater Ditch Digging Under Complex Working Condition[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Science and Technology, 2024.

[3] 郭园园, 袁庆晴, 孙昊宇, 等. 深海 ROV 型开沟机技术现状及进展分析[J]. 中国设备工程, 2025(10): 232-234.
GUO Y Y, YUAN Q Q, SUN H Y, et al. The Present Situation and Progress Analysis of Deep Sea ROV Grooving Machine Technology[J]. China Plant Engineering, 2025(10): 232-234.

[4] 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[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3316-3334.
JING Y P, DONG X Y, WAN B Y, et al. Research Status and Analysis of Deep-Sea Metal Mining Equipment and Technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3316-3334.

[5] 杨祥云, 吕海宁, 杨建民, 等. 深海采矿车布放回收中脐带缆轴向张力响应特性研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(5): 128-138.
YANG X Y, LYU H N, YANG J M, et al. Research on Axial Tension Response Characteristics of Umbilical Cable in Deepsea Mining Truck Deployment and Recycling[J]. Chinese Ocean Engineering, 2023, 41(5): 128-138.

[6] 张玉, 郭玉晗, 王庆松, 等. 海洋复合管缆设计关键技术与挑战[J]. 船舶工程, 2024, 46(8): 126-137.
ZHANG Y, GUO Y H, WANG Q S, et al. Key Technologies and Challenges in Marine Composite Pipe and Cable Design[J]. Ship Engineering, 2024, 46(8): 126-137.

[7] CHEN P, LIU Y W, YANG S K, et al. Dynamic Characteristics of Deep-Sea ROV Umbilical Cables Under Complex Sea Conditions[J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109854.

[8] CHRISTOPHE V. Self-Management of ROV Umbilical Using Sliding Element: a General 3D-Model[J]. Applied Ocean Research, 2024, 151: 104164.

[9] XIAO J L, CHENG P, CAO J J, et al. Dynamic Analysis and Simulations of a Deep-Sea Floating Mining Vehicle Multi-Body System Under Real-world Operating Conditions[J]. Ocean Engineering, 2024, 306: 11781.

[10] 王体涛, 仝哲, 刘峰. 船-缆耦合下轻量化脐带缆动态响应[J]. 船舶工程, 2025, 47(增刊 1): 770-778.

WANG T T, TONG Z, LIU F. Dynamic Response of Lightweight Umbilical Cable Under Ship Cable Coupling[J]. Ship Engineering, 2025, 47(Suppl.1): 770-778.

[11] 王伟, 陈时平, 张明, 等. 深海采矿装备布放回收过程中脐带缆动力学响应特性研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1): 12-15.
WANG W, CHEN S P, ZHANG M, et al. Dynamic Response Characteristics of Umbilical Cable During Launch and Recovery of Deep-Sea Mining Equipment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1): 12-15.

[12] 张大朋, 朱克强, 牛天鑫, 等. 不同浪向下脐带缆与主平台回接过程中的动力学响应[J]. 海洋学研究, 2016, 34(1): 67-75.
ZHANG D P, ZHU K Q, NIU T X, et al. Dynamic Response in the Process of Umbilical Cable Pull-in Main Platform Through J-Tube Under Different Wave Directions[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(1): 67-75.