深海采矿车动力学仿真平台的构建与验证①

刘俊麟[1]，彭赛锋[1,2]，郑皓[1,2]
（1.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；2.深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室，湖南 长沙 410012）

摘　要：针对深海履带式采矿车全尺寸海试成本高、风险大，且现有仿真平台难以兼顾物理保真度与计算实时性的问题，开发并校验了基于 Project Chrono 与 ROS 2 的联合仿真平台。平台以 Chrono 为物理解算核心、ROS 2 为通信框架，集成土壤接触模型与莫里森水动力模型。验证结果表明，初始沉陷量的仿真值相对理论值的误差为 2.4%，牵引力-滑移率曲线与理论值拟合决定系数R^2=0.98；工程最佳网格分辨率下实时因子稳定在 1.2~1.5，可满足硬件在环测试需求。相较于 Adams、RecurDyn 等主流商用软件，本平台支持二次开发的同时具备更高的计算效率。该平台兼具工程级物理保真度与开源可扩展性，为深海采矿装备的控制算法迭代与动力学先验分析提供了可靠的虚拟测试环境。

关键词：深海采矿；采矿车；车辆动力学；履带式采矿车；多物理场仿真；Project Chrono；仿真平台；牵引力；滑移率；机器学习；虚拟测试
中图分类号：TD857　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.007
文章编号：0253-6099(2026)03-0061-07

Development and Validation of a Dynamics Simulation Platform for Deep-Sea Mining Vehicles

LIU Junlin[1], PENG Saifeng[1,2], ZHENG Hao[1,2]
(1.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co. Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: To address the problems of high costs and significant risks associated with at-sea tests of a full-scale deep-sea tracked mining vehicle, as well as the difficulty of existing simulation platforms in balancing physical fidelity and computational real-time performance, a co-simulation platform was developed and validated based on Project Chrono and ROS 2. With Chrono as the physics solving core and ROS 2 as the communication framework, the platform integrates a soil contact model and the Morison hydrodynamic model. Validation results demonstrate that the error of the simulated initial sinkage relative to the theoretical value is 2.4%, and the tractive force-slip ratio curve yields a coefficient of determination (R^2) of 0.98 when fitted with theoretical values. Under the optimal engineering mesh resolution, the Real-Time Factor (RTF) stabilizes between 1.2 and 1.5, meeting the requirements of hardware-in-the-loop testing. This platform is available foe secondary development and also boasts higher computational efficiency, making it superior to the mainstream commercial softwares such as Adams and RecurDyn. Featuring both engineering-level physical fidelity and open-source extensibility, this platform provides a reliable virtual testing environment for the iteration of control algorithms and prior dynamic analysis of deep-sea mining equipment.

Key words: deep-sea mining; mining vehicle; vehicle dynamics; tracked mining vehicle; multi-physics simulation; Project Chrono; simulation platform; tractive force; slip ratio; machine learning; virtual testing

深海多金属结核开采是当前全球海洋矿产资源开发的重要战略方向[1]。作为深海采矿作业的主流移动载体，履带式采矿车凭借较大的接地面积与优异的地形适应能力而被广泛应用[2]。然而，深海底质多为高含水率、低抗剪强度的黏性沉积物，车辆在行驶过程中易产生塑性沉陷与非线性滑转[3]；同时，近底层流

① **收稿日期**：2026-03-09
基金项目：国家重点研发计划(SH6700-03，2023YFC2811301)
作者简介：刘俊麟(2001—)，男，湖北武汉人，硕士研究生，主要研究方向为深海采矿车跟踪控制。E-mail:ljlyr19991125@163.com

等复杂水动力扰动会改变车体的有效湿重与运动姿态[4]。这二者共同构成了“车辆-软底质-流体”强耦合动力学系统,对采矿车的姿态稳定、轨迹跟踪与自主导航提出了挑战[5]。

目前,深海采矿装备的研发与控制策略评估仍依赖于海试实验。然而,全尺寸海试成本高、周期长、风险大,且深海极端环境导致车辆状态难以被全面观测,一定程度上制约了数据驱动类控制算法的工程化验证与迭代[6]。因此,构建多物理场仿真平台成为该领域的一种有效补充手段。然而,现有通用机器人仿真环境,如 Gazebo、Webots 等,多采用刚性地面接触假定与简化的线性流体阻尼模型,难以准确再现履带与软土间的剪切力学行为及水动力附加质量效应[7-8]。此外,MSC Adams、RecurDyn 等商用多体动力学软件虽具备较高的地面力学求解精度,但其闭源架构限制了二次开发的可能性,且在处理高自由度履带系统时计算负荷较大,较难满足控制算法对实时性及硬件在环联合仿真的需求[9]。

针对现有仿真平台难以兼顾物理保真度与计算实时性的问题,本文构建了一套基于 Project Chrono 物理引擎与 ROS 2 通信中间件的深海履带式采矿车动力学仿真平台。该平台集成了多刚体系统动力学、基于土壤接触模型的 3D 履带-底质相互作用力学以及基于 Morison 方程的非线性集总参数水动力模型,旨在为深海履带式采矿车的控制系统设计、能耗评估及极限工况测试提供一种兼顾计算效率与物理保真度的综合性虚拟验证环境。

1 联合仿真系统架构

本文以 Project Chrono 物理引擎与 ROS 2 中间件为基础,构建了一套面向深海履带式采矿车的联合仿真平台,其架构如图 1 所示。图中,实线框选的模块表示基础平台已具备的通用功能,虚线框选的模块代表面向本研究目标需进一步开发的功能单元。

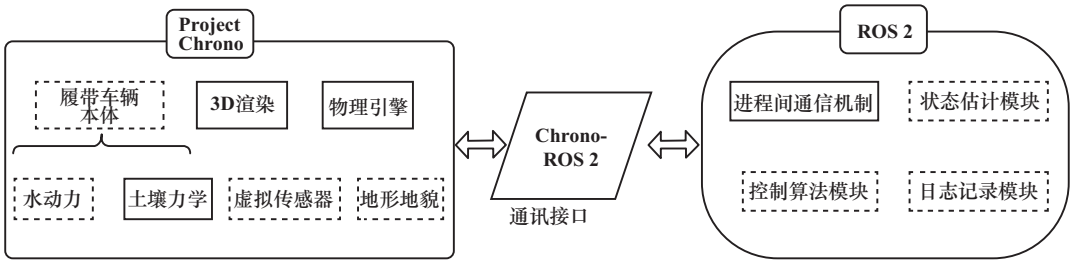


图 1 联合仿真平台架构

Fig. 1 Architecture of co-simulation platform

Project Chrono 中,平台提供履带式采矿车动力学建模接口与物理引擎内核,在此基础上进一步构建车辆本体模型,并开发适用于深海环境的水动力模型、虚拟传感器模型以及地形地貌与土壤力学模型,以实现复杂水下软底质环境中车辆动力学行为的仿真复现。依托 ROS 2 分布式节点管理框架,针对履带式采矿车的运动控制需求,开发了状态估计模块、控制算法模块及日志记录模块,用于实现多源信息融合、控制决策计算与实验数据管理。

通过 Chrono-ROS 2 通信接口,动力学仿真数据、传感器观测信息与控制指令得以在两平台间实时交互,从而构建面向轨迹跟踪与控制算法验证的一体化仿真环境。该架构在保证物理一致性的同时,兼顾了模块化扩展能力与实时计算性能,为后续深海采矿车动力学分析与控制研究提供了支撑。

2 车辆状态耦合动力学建模

考虑深海采矿作业中履带式采矿车低速巡航(0.5~1.0 m/s)的运动特征,以及深海沉积物高含水率、低抗剪强度的赋存特质,本文提出了一种车辆状态耦合动力学建模策略。该策略将耦合定义为异构环境载荷在车辆刚体层面的运动学状态闭环。具体而言,水动力载荷与土壤力学载荷在底层解算上相互独立,但二者通过车辆本体的六自由度运动状态实现实时的双向影响。

在此框架下,本文忽略了对宏观运动状态影响较小的湍流、涡旋及脐带缆动力学,本平台采用 Fossen 提出的水下航行器六自由度运动学与动力学框架作为基础[10],将其扩展以纳入履带与地形的特异性相互作用力,多物理场耦合动力学示意图如图 2 所示。

随体坐标系下的车辆运动方程为:

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{\text{track}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{env}} \quad (1)$$

式中:$\boldsymbol{M}$ 为系统惯性矩阵,$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}_{\text{R}}+\boldsymbol{M}_{\text{A}}$,$\boldsymbol{M}_{\text{R}}$ 为刚体惯性矩阵,$\boldsymbol{M}_{\text{A}}$ 为附加质量矩阵;$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu})$ 为科里奥利力和向心力矩阵;$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})$ 为阻尼矩阵,$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})=D_{\text{L}}+D_{\text{Q}}$,$D_{\text{L}}$ 为线性阻尼项,D_{Q} 为与速度相关的非线性二次阻尼项;

$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})$为由重力与浮力引起的恢复力向量,是位姿 $\boldsymbol{\eta}$ 的函数;$\dot{\boldsymbol{\nu}}$ 为加速度;$\boldsymbol{\nu}$ 为随体坐标系下的线速度和角速度向量,$\boldsymbol{\nu}=[u,v,w,p,q,r]^{\mathrm{T}}$;$\tau_{\mathrm{track}}$ 为履带-土壤相互作用产生的推进力与力矩,是车辆在海底获得牵引力的唯一来源;τ_{env} 为环境水动力扰动,由复杂的近底流场与车辆运动产生的相对尾流共同引起。

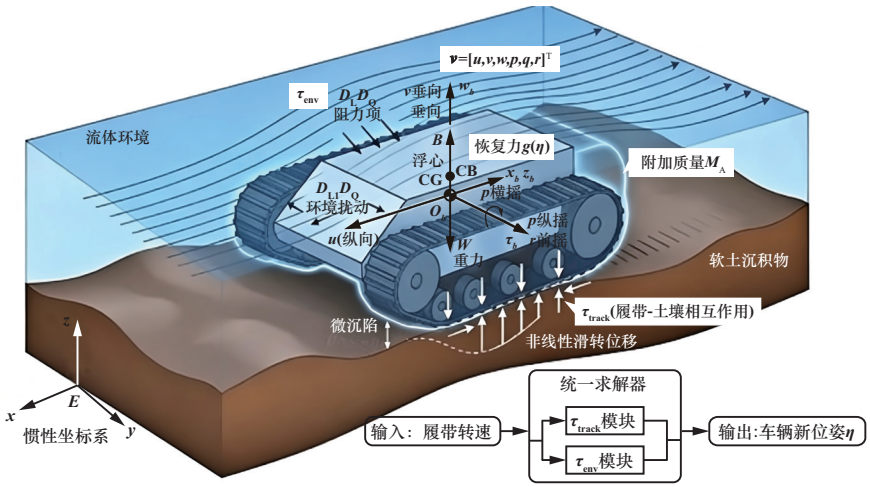


图 2　多物理场耦合动力学示意图

Fig. 2　Schematic diagram of multi-physics coupled dynamics

2.1　履带车辆多体拓扑与接触解耦

为准确描述系统动力学状态,本文将采矿车离散化为包含车体、轮系与首尾铰接履带板的多刚体系统,如图 3 所示。采用 SolidWorks 三维设计模型导出全车质量、质心位置及惯性张量。

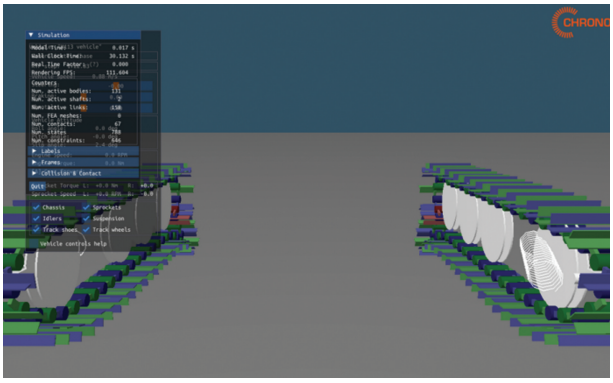


图 3　多刚体系统

Fig. 3　Multi-rigid-body system

为在保持动力学特性的前提下实现高效求解,模型采用可视与碰撞几何解耦策略:保留车辆原始高精外形用于三维渲染及水动力迎流面积估算;在底层碰撞检测流水线中,将复杂运动部件替换为轻量化凸包,以大幅降低接触检索开销。系统的运动学骨架通过理想约束与非线性接触共同定义。其中,轮系与车体之间,以及相邻履带板之间均通过旋转副实现铰接;履带-轮系啮合与履带-土壤相互作用则摒弃了理想约束,采用基于惩罚法的非线性接触力模型求解。

这种处理方式不仅精准复现了局部打滑与多边形激振等复杂动力学现象,其接触力的独立解算特性也支持并行计算,从而为后续与水动力扰动项的状态同步与闭环求解提供了标准化的接口。

2.2　履带-土壤相互作用建模

深海底质上的行驶与通过性能,是评估履带式采矿车机动性的核心指标。为精确模拟采矿车与底质之间复杂的非线性力学行为,本平台采用土壤接触模型(soil contact model, SCM)。该模型依托连续体力学假设,首先通过一维半经验公式计算局部接触界面的法向压力与剪切应力。

采用经典的 Bekker 公式[11]描述法向压力-沉陷关系:

$$p=\left(\frac{k_c}{b}+k_\varphi\right)z^n \tag{2}$$

式中:p 为接地压力;z 为沉陷深度;k_c 为表征土壤承压特性的黏聚力模量;k_φ 为表征土壤承压特性的内摩擦模量;n 为表征土壤承压特性的沉陷指数;b 为履带板接地宽度。式(2)决定了车辆在软土上的下陷量。

采用 Janosi-Hanamoto 模型[12]描述剪切应力-滑转关系:

$$\tau=\tau_{\max}(1-\mathrm{e}^{-jK}) \tag{3}$$

式中:τ 为剪切应力;$\tau_{\max}$ 为最大剪切应力,$\tau_{\max}=c+p\tan\varphi$,$c$ 为土壤黏聚力,φ 为内摩擦角;j 为剪切位移;K 为剪切变形模量。

针对传统地面力学经验公式主要适用于一维平板

或简单几何体的问题，Chrono 引擎的 SCM 采用“局部降维-全局积分”的数值映射策略。系统将三维海床地形离散为高分辨率的高程网格。在每一仿真步内，3D 履带板与地形的接触区域被划分为多个微观网格单元；系统在每个独立的微观接触点上运用上述一维经典理论独立计算法向与切向应力；最终，通过对所有激活网格的应力矢量进行三维空间面积分，重构出作用于 3D 履带车辆宏观本体的六自由度相互作用总力与力矩 τ_{track}。

$$\tau_{\text{track}} = \begin{bmatrix} F_{\text{track}} \\ M_{\text{track}} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} p_i\, n_i + \tau_i\, t_i \\ r_i \times (p_i\, n_i + \tau_i\, t_i) \end{bmatrix} \Delta A_i \quad (4)$$

式中：F_{track} 与 M_{track} 分别为三维空间下的总推进力与总力矩矢量；n_i 与 t_i 分别为网格 i 处的局部法向与切向单位矢量；r_i 为接触单元至车辆随体坐标系原点的位置矢量；ΔA_i 为微观网格单元的投影面积。这一机制科学地将一维经典理论扩展到了任意三维复杂几何体的动态接触仿真中[13-14]。

此外，每个网格还能记录其受到加载后的塑性变形历史。当履带再次经过或相邻网格受力时，已发生的沉陷会影响新的接触计算，这种记忆效应使得 SCM 能够模拟车辙的形成（如图 4 所示），提高了仿真的物理真实感[15]。

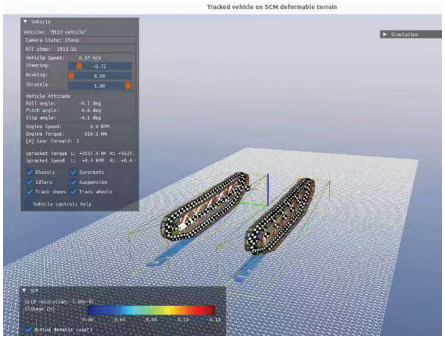


图 4 履带行驶形成的车辙模拟

Fig. 4 Simulation of trackline formed by crawler traveling

2.3 水动力学建模

深海环境中的水动力载荷是影响车辆运动稳定性和能耗的重要因素。考虑到计算效率与工程实用性，本平台采用基于莫里森方程的集总参数模型来描述水动力效应。环境扰动项 τ_{env} 表述为：

$$\tau_{\text{env}} = \boldsymbol{M}_{\text{A}} \times \dot{\boldsymbol{\nu}} + D_{\text{L}} \times \boldsymbol{\nu} + D_{\text{Q}} \times |\boldsymbol{\nu}| \times \boldsymbol{\nu} \quad (5)$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\text{A}} \times \dot{\boldsymbol{\nu}}$ 表示附加质量力，代表车辆在流体中加速时所需推动的周围流体惯性产生的效应；$D_{\text{L}} \times \boldsymbol{\nu}$ 表示线性阻尼，主要模拟低速时的黏性摩擦阻力；$D_{\text{Q}} \times |\boldsymbol{\nu}| \times \boldsymbol{\nu}$ 表示二次阻尼，模拟与速度平方成正比的非线性阻尼，是高速或大雷诺数情况下阻力的主要组成部分。

为模拟真实海洋环境中的随机扰动，平台随机建立的海底层流模型为一个高斯-马尔可夫过程。该过程能够生成具有特定时间相关性的流速序列，其统计特性根据矿区水文数据进行配置，从而为控制算法的鲁棒性测试提供更符合现实的动态扰动环境[15]。

2.4 精度对比分析

本平台的 SCM 软土模型立足于经典的地面力学半经验理论框架。其法向沉陷与切向剪切机理（Bekker 与 Janosi-Hanamoto 模型）与主流商用多体仿真软件的底层物理假设高度一致，理论精度上限相当，实际表现则主要取决于地形网格分辨率。

针对采矿车运行工况特征，平台摒弃了高算力开销的 CFD 全流场求解，采用动力学状态耦合策略。通过莫里森方程集总参数模型，精准提取附加质量与非线性阻尼效应，并实时叠加至车辆多体动力学方程。该方案在滤除高频局部湍流的前提下，较传统流固耦合（FSI）方案将计算效率提升了 2~3 个数量级，在保障物理保真度的同时实现了硬实时解算。

3 仿真实验与结果

3.1 实验设置

为系统验证所构建仿真平台的性能，定义了一系列基准测试场景，并确定了相应的物理与仿真参数。仿真运行于搭载 Intel i7-12700H CPU、32 GB RAM 的计算机。软件环境为 Ubuntu 22.04 操作系统，Project Chrono v9.0 物理引擎，ROS 2 Humble 版本。平台关键参数，包括车辆几何与惯性属性、SCM 土壤参数以及水动力系数，如表 1 所示。这些参数来源于真实车辆设计图纸、矿区航次调研后获取的深海沉积物特性以及计算流体动力学分析或经验公式[16]。

3.2 单元级物理验证

为避免集成仿真中不同模型误差相互掩盖，采用渐进式验证策略，首先对核心物理子模型进行独立单元级测试，以确保其基础行为的正确性。

3.2.1 静态平衡测试

本测试旨在验证车辆在水-土-车耦合系统中的静态边界条件正确性，重点校验水静力学特性对软土初始接触状态的影响，确保动态仿真的初始条件符合物理规律。

在仿真平台中将车辆模型置于静止流体中，设定不同的初始横滚角与俯仰角并释放，车辆入水姿态恢复与沉陷稳定过程如图 5 所示。由图 5 可知，在重力与浮力的联合作用下，车辆能够自动产生恢复力矩并

表 1　平台关键参数

Table 1　Key parameters of platform

参数类别	参数名称	符号	数值	单位
车辆刚体属性	整车质量	m	11 432.67	kg
	排水体积	V	8.04	m^3
	质心位置(基坐标系)	r_{com}	$[-0.11,0.05,4.15]^T$	m
	绕质心转动惯量(x 轴)	I_{xx}	16 291.16	kg/m^2
	绕质心转动惯量(y 轴)	I_{yy}	27 105.91	kg/m^2
	绕质心转动惯量(z 轴)	I_{zz}	2 630.60	kg/m^2
SCM 地形力学	沉陷指数	n	1.2~1.5	
	组合沉陷模量	K_{eq}	1.45~1.90	kN/m^n
	土壤黏聚力	c	2.0~3.0	kPa
	内摩擦角	φ	0~3	(°)
	剪切变形模量	K	0.50~0.65	m
水动力环境	海水密度	ρ_w	1 028	kg/m^3
	典型海流流速	v_c	0.1	m/s
	极端海流流速	v_{max}	0.2	m/s
	拖曳系数(纵向/横向/垂向)	C_D	$[0.8,1.2,1.5]^T$	
	附加质量系数	C_A	$[0.2,0.4,0.8]^T$	

收敛至由重心与浮心相对位置决定的平衡姿态。在 $v=0$ 的静止状态下,莫里森方程中的附加质量力与拖曳力项输出均为 0,验证了数值求解器的零点稳定性,排除了数值漂移对系统的干扰。

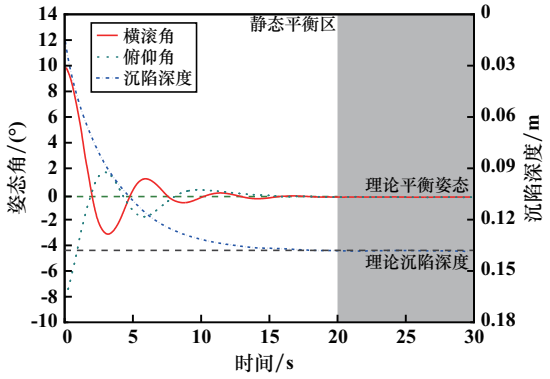


图 5　车辆入水姿态恢复与沉陷稳定过程

Fig. 5　Process of vehicle attitude recovery and sinkage stabilization upon water entry

车辆的浮力与重力共同决定了有效湿重,进而根据 SCM 确定车辆初始沉陷量。在稳定状态下,静态物理参数仿真值与理论值的对比如表 2 所示。

3.2.2　水动力阻尼测试

为验证水动力模型的动态特性,进行了自由衰减实验。给定车辆一个初始的横向或径向速度,记录车辆在仅有水动力阻尼作用下的速度衰减曲线,如图 6 所示。无水力模型时(仅存在数值阻尼),车辆速度衰减缓慢且不符合物理规律;启用完整水力模型后,速度呈指数衰减。实验同时验证了附加质量项 M_A 对初始加速度阶段的影响,证实了水动力模型能够正确模拟流体惯性效应和阻尼效应。

表 2　静态物理参数仿真值与理论值对比

Table 2　Comparison of simulated and theoretical values of static physical parameters

名称	浮力/kN	纵摇恢复刚度/(kN·m·rad^{-1})	有效湿重/kN	初始沉陷量/m
理论值	80.85	125.4	31.40	0.125
仿真值	80.83	124.8	31.38	0.128
相对误差	<0.1%	0.48%	<0.1%	2.4%

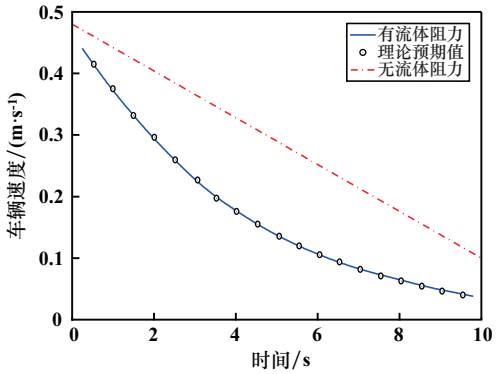


图 6　车辆速度衰减曲线

Fig. 6　Vehicle velocity attenuation curve

3.2.3　软土通过性测试

为了验证 SCM 的关键力学特性,进行软土通过性测试。车辆在平坦稀软黏土上恒速行驶,SCM 成功模拟了履带压实导致的塑性变形,形成压力标识的车辙(见图 4)。通过驱动轮转速与车体速度计算滑移率,同步测量土壤提供的总牵引力,得到牵引力-滑移率曲线,如图 7 所示。

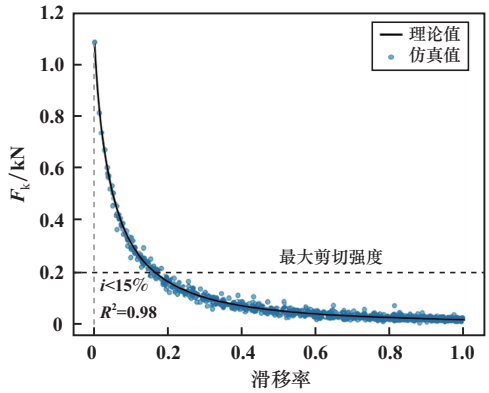


图 7　牵引力-滑移率曲线

Fig. 7　Tractive force-slip ratio curve

结果表明,仿真曲线与基于 Janosi-Hanamoto 模型的理论值在趋势和量级上高度吻合。经典理论为一维宏观解析解,而本平台仿真结果为 3D 履带车体在离

散网格上微观受力的空间积分。两者在均匀软土、直线行驶工况下的一致性,验证了 SCM 处理复杂 3D 几何体到一维力学映射的正确性与数值稳定性。最终牵引力趋近土壤最大剪切强度,滑移率i<15%,决定系数R^2=0.98,拟合效果良好[17]。

3.3 实时性能分析

实时因子(real-time factor,RTF)是评估平台能否支持控制算法及硬件在环试的核心指标,定义为:

$$\mathrm{RTF}=\frac{\Delta t_{\mathrm{sim}}}{T_{\mathrm{wall}}} \tag{6}$$

式中:Δt_{sim}为预设物理仿真步长,设为 0.001 s;T_{wall}为实际墙钟时间。当 RTF≥1 时,表明计算同步或快于物理时间流逝,满足实时解算要求。

典型作业工况下,RTF 随 SCM 土壤网格分辨率的变化关系如图 8 所示。由图 8 可知,RTF 与网格分辨率呈显著负相关。网格加密会导致接触对数量激增,大幅推高碰撞检测开销。但在本文选定的工程最佳分辨率下,平台 RTF 能够稳定维持在 1.2~1.5。

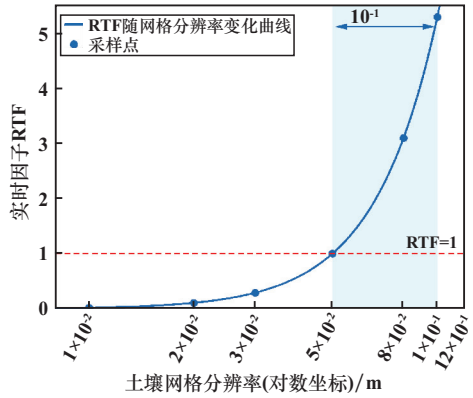


图 8 RTF 随 SCM 土壤网格分辨率的变化关系

Fig. 8 Relationship between RTF and SCM soil grid resolution

不同仿真软件类似工况实时性如表 3 所示,传统工业软件(如 Adams、RecurDyn)在处理高保真软土-履带模型时计算负荷极大(RTF<0.1),多依赖离线求解[18-19],无法支撑控制算法的闭环验证。

表 3 不同仿真软件类似工况实时性

Table 3 Real-time performance of different simulation software under similar working conditions

仿真平台	典型工况	物理仿真时长/s	实际计算耗时/s	实时因子(RTF)	是否支持 HIL
Adams	软土/履带行驶	5.0	~3 900	0.001	否
RecurDyn	软土/履带行驶	—	(离线)	< 0.1	否
Project Chrono	深海软泥/履带	5.0	~4.1	1.22	是

注:商业软件数据基于标准高保真多体模型,未进行针对性降阶处理。

Adams 与 RecurDyn 虽为工业标杆,根据文献[18]的研究,高保真模型导致实时因子不足 0.001,无法支持硬件在环测试。在深海采矿领域,文献[19]使用 RecurDyn 联合 CFD 建立采矿车模型,虽然精度较高,但不仅需要离线计算,且难以支持算法的控制闭环验证。

4 结论

1)针对深海履带式采矿车在稀软底质与近底流场环境下的运动预测与控制验证需求,构建了一套基于 Project Chrono 与 ROS 2 的动力学仿真平台。通过静力平衡、水动力阻尼及软土通过性等系列基准测试,验证了该平台在工程精度范围内的物理一致性:初始沉陷量预测相对误差为 2.4%,浮力与有效湿重计算误差均小于 0.1%;在滑移率低于 15%的区间内,牵引力-滑移率曲线与经典理论值的决定系数 R^2=0.98。

2)相较于 RecurDyn、Adams 等商用软件,所提出的 Chrono-ROS 2 并行架构在保持多体系统数值稳定性与跨进程通信时序一致性的前提下,能够支持硬件在环控制验证。平台采用“SCM 地面力学+莫里森水动力学集总参数”的建模范式,降低了计算开销。典型作业工况下,实时因子达到 1.22,在工程最佳网格分辨率下稳定维持在 1.2~1.5,满足实时仿真要求。

3)该平台能够为轨迹跟踪、能耗评估及极限工况控制等研究提供可靠的仿真环境,有助于减少对高成本海试的依赖。后续工作将结合海试数据优化模型参数,并引入高阶流体模型与附属系统动力学,以进一步提升仿真平台的置信度。

参考文献(References):

[1] SHARMA R. Deep-sea mining[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017.

[2] 张明,郑皓,双志,等. 新型深海多金属结核非连续采矿作业系统研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):6-12.
ZHANG Ming, ZHENG Hao, SHUANG Zhi, et al. A new type of discontinuous mining system for deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):6-12.

[3] 陈旭光,栾鲁宝,张宁,等. 深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6):1173-1190.
CHEN Xuguang, LUAN Lubao, ZHANG Ning, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its environmental effects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023,52(6):1173-1190.

[4] DAI Y, XUE C, SU Q, et al. Numerical analysis on hydrodynamic characteristics of a deep-sea mining vehicle under three typical mo-

tions[J]. Ocean Engineering, 2021,235:109446.

[5] 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[J]. 中国工程科学, 2023,25(3):1-12.
WANG Guorong, HUANG Zeqi, ZHOU Shouwei, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):1-12.

[6] 陈昱衡,吴鸿云,边有钢. 基于滑模预测控制的海底采矿车轨迹跟踪算法[J]. 信息与控制, 2022,51(1):119-128.
CHEN Yuheng, WU Hongyun, BIAN Yougang. A sliding mode predictive control-based trajectory tracking algorithm for a seabed mining vehicle[J]. Information and Control, 2022,51(1):119-128.

[7] 王明阳. 基于模型预测的水下机器人养殖网箱巡检轨迹跟踪研究[D]. 大连:大连海洋大学, 2022.
WANG Mingyang. Research on trajectory tracking of underwater robot cage inspection based on model prediction[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022.

[8] 王玉甲. 水下机器人智能状态监测系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
WANG Yujia. Research on intelligent condition monitoring system for autonomous underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.

[9] 司跃元. 轮履复合机器人的机械结构设计及特性分析[D]. 天津:天津理工大学, 2013.
SI Yueyuan. Mechanical structure design and characteristic analysis of wheel-tracked composite robot[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.

[10] FOSSEN H. Structural geology[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

[11] SURREY G. Rover mobility performance evaluation tool (RMPET): A systematic tool for rover chassis evaluation via application of bekker theory[C]//Proc. of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2004.

[12] AL-MILLI S, SENEVIRATNE L D, ALTHOEFER K. Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2010,47(3):151-160.

[13] KRENN R, HIRZINGER G. SCM: A soil contact model for multi-body system simulations[C]//11th European Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Bremen: International Society for Terrain-Vehicle Systems, 2009.

[14] TASORA A, MANGONI D, NEGRUT D, et al. Deformable soil with adaptive level of detail for tracked and wheeled vehicles[J]. International Journal of Vehicle Performance, 2019,5(1):60.

[15] 张过,秦绪文,朱春阳,等. 从有路导航走向无路导航[J]. 自然资源遥感, 2024,36(4):1-8.
ZHANG Guo, QIN Xuwen, ZHU Chunyang, et al. Navigation: From on-road to off-road[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(4):1-8.

[16] DAI Y, XUE C, SU Q. An integrated dynamic model and optimized fuzzy controller for path tracking of deep-sea mining vehicle[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(3):249.

[17] TASORA A, MANGONI D, NEGRUT D. An overview of the Chrono Soil Contact Model (SCM) implementation[R]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2017.

[18] GAT G, FRANCO Y, SHMULEVICH I. Fast dynamic modeling for off-road track vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2020,92:1-12.

[19] DAI Y, YIN W W, MA F Y. Nonlinear multi-body dynamic modeling and coordinated motion control simulation of deep-sea mining system[J]. IEEE Access, 2019,7:86242-86251.

引用本文:刘俊麟,彭赛锋,郑皓. 深海采矿车动力学仿真平台的构建与验证[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):61-67.
LIU Junlin, PENG Saifeng, ZHENG Hao. Development and validation of a dynamics simulation platform for deep-sea mining vehicles[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):61-67.

(上接第 60 页)

[11] LI M Y, MOURIKIS A I. High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013,32(6):690-711.

[12] GENEVA P, ECKENHOFF K, LEE W, et al. OpenVINS: A research platform for visual-inertial estimation[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris, 2020:4666-4672.

[13] BLOESCH M, OMARI S, HUTTER M, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, 2015:298-304.

[14] LEUTENEGGER S, LYNEN S, BOSSE M, et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015,34(3):314-334.

[15] QIN T, LI P L, SHEN S J. VINS-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018,34(4):1004-1020.

[16] QIN T, CAO S Z, PAN J, et al. A general optimisation-based framework for global pose estimation with multiple sensors[J]. IET Cyber-Systems and Robotics, 2025,7:e70023.

[17] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRÍGUEZ J J G, et al. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021,37(6):1874-1890.

引用本文:王凯乐,程阳锐. 基于视觉-惯导融合的伴随式巡检机器人定位方法研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):54-60.
WANG Kaile, CHENG Yangrui. Visual-inertial fusion localization algorithm for escort inspection robots[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):54-60.