

DOI: 10.3901/JME.2015.06.173

深海履带式集矿机多体动力学建模 与行走性能仿真分析*

张滔^{1,2} 戴瑜^{1,2,3} 刘少军^{1,2} 陈君^{1,2} 黄中华¹

(1. 中南大学机电工程学院 长沙 410083;

2. 中南大学深圳研究院 深圳 518000;

3. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 深海底极稀软底质是一种完全不同于陆地表面的特殊底质,对海底作业机器的结构设计及其行走性能提出高要求。根据海底底质物理力学特性,配制实验室模拟底质,基于车辆地面力学理论,开展模拟履带板与模拟底质相互作用力学特性试验,分别获得法向压力-沉陷、水平切应力-剪切位移函数关系式。根据深海底履带式集矿机详细结构设计参数,采用动力学建模与仿真程序 RecurDyn/Track 构建海底履带式集矿机多体动力学模型。应用实验室模拟试验获得的海底底质力学特性关系式,采用 C 语言编写用户自定义子程序,基于 RecurDyn/Track 进行二次开发,实现深海底特殊底质力学模型在 RecurDyn/Track 中的构建。开展海底底质特殊力学载荷下履带式集矿机多种行走工况动力学仿真,分析与评价其行走性能,为实际深海底履带式集矿机的结构设计优化、行走性能评估及行走控制研究奠定基础。

关键词: 深海履带式集矿机;海底底质力学特性;模拟试验;多体动力学模型;用户子程序;二次开发;仿真分析

中图分类号: TD424

Multi-body Dynamic Modeling and Mobility Simulation Analysis of Deep Ocean Tracked Miner

ZHANG Tao^{1,2} DAI Yu^{1,2,3} LIU Shaojun^{1,2} CHEN Jun^{1,2} HUANG Zhonghua¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2. Shenzhen Research Institute, Central South University, Shenzhen 518000;

3. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Deep seafloor extremely soft cohesive sediment is completely different from land surface soils, which need high requirements for structure design and mobility performance of the seafloor operated machine. According to the physical and mechanical properties of the seafloor sediment, laboratory simulated sediment is prepared. Based on the theory of terramechanics, mechanics experiments on the simulated tracks and simulated sediment interactions are performed. The normal pressure-sinkage and horizontal shear stress-shear displacement mathematical relationships are obtained. According to the detailed structure design parameters of the deep seafloor tracked miner, its multi-body dynamic model is built by the dynamic modeling and simulation code RecurDyn/Track. Application of the mechanics relationships of the seafloor sediment obtained from experiments, user-written subroutines are compiled with C language. Based on the secondary development for RecurDyn/Track, the development of the deep seafloor sediment mechanics model in the RecurDyn/Track is realized. Various dynamic simulations of the tracked miner on the seafloor special sediment are carried out. The mobility performance of the miner are analyzed and evaluated, which lay the foundations for the structure design optimization, mobility performance evaluation and moving control of the practical deep seafloor tracked miner.

Key words: deep seafloor tracked miner; seafloor sediment mechanics properties; simulated experiment; multi-body dynamic model; user-written subroutine; secondary development; simulation analysis

0 前言

随着陆地矿产资源的日益贫乏和人类对海洋

认识的日益深化,深海底正成为人类进军的下一个领域。深海底极为丰富的金属矿产资源,将成为人类 21 世纪最重要的接替资源。由于所赋存的深海特殊环境,海底资源的开采有着较高的技术难度,但随着现代科学技术的进步,特别是深海油气开发的发展,为深海矿产资源的开发提供了大量可利用和借鉴的相关技术和装备,使得深海矿产资源开发的技术可行性不断提高^[1]。开发海底矿产资源已成为世界各主要工业国家和新兴工业国家发展的重要战

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA091201)、国家自然科学基金(51105386)、高校博士点专项科研基金(20110162120050)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0968)、浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放课题(GZKF-201213)和深圳市科技创新计划基础研究(JCYJ20130401160614378)和湖南省自然科学基金(13JJ4021)资助项目。20140826 收到初稿, 20141209 收到修改稿

略目标。

海底集矿机是整个深海矿产资源开采系统中最前沿、最关键的环节,其海底行走作业性能的好坏直接决定了整个深海采矿系统连续开采作业性能。国际上从事深海矿产资源开采技术与装备研究的主要国家科研机构,包括美国科罗拉多矿业学院、日本国家海洋科学与技术研究开发机构、韩国国家海洋研究院、德国锡根大学、印度国家海洋技术中心以及国际海洋金属联合组织等,均针对海底集矿机开展了一定研究^[2]。

韩国国家海洋研究院 LEE 等^[3]构建了履带车行驶于海底软黏底质上的 3D 瞬态动力学模型,将车体模型简化为 6 个自由度,海底软黏底质作用力通过压力-沉陷、切应力-剪切位移、切应力-动态沉陷关系式描述,对履带车直线与转向行驶性能进行了动力学仿真分析。KIM 等^[4]分别建立了海底履带车多体动力学模型与单体动力学模型,对两种模型进行仿真分析,比较了两种模型各自的优缺点。KIM 等^[5]采用欧拉参数法对履带式集矿机在海底稀软底质上的行走特性进行动力学分析,通过数值计算分析海底水动力对集矿机行走性能的影响特性。LEE 等^[6-7]采用多学科设计优化方法(Multidisciplinary design optimization, MDO)对复杂履带式集矿机系统进行设计优化,引入元模型如 Kriging 模型与 Response surface 模型以降低 MDO 计算时间,对海底集矿机进行了多学科设计优化。KIM 等^[8]通过开发仿真程序 SIM-III,仿真分析了海底多金属硫化物集矿机的行走性能,并分别采用多体动力学商业程序 RecurDyn 和 DAFUL 验证其开发程序的计算准确性。

德国锡根大学 SCHULTE 等^[9]将膨润土与水按一定比例混合模拟海底底质,研究不同剪切装置对模拟底质的切应力-剪切位移关系。SCHULTE 等^[10]同样基于试验获得的海底底质力学特性对集矿机海底作业性能进行分析,详细计算底质可提供给集矿机的牵引力以及集矿机的静态沉陷与动态沉陷。比利时学者 MORGAN 等^[11]建立了挖沟机行走牵引力、行驶阻力与海底底质参数之间的定量关系,对挖沟机海底作业移动性与可操作性进行了评估分析。

我国研究学者同样开展了一定相关研究。宋连清^[12]对我国大洋多金属结核矿区沉积物土工特性参数进行了早期详细全面地分析总结与研究;吴鸿云等^[13]采用原位测试方法,在我国海底矿区对底质进行了剪切强度与贯入阻力测试,并建立了回归经验公式以反映底质的抗剪特性与承压特性。LI 等^[14]

应用 ADAMS/ATV 构建了我国海试采矿车虚拟样机模型,对其性能进行了分析。戴瑜等^[15]提出并构建了一种新的基于单刚体车体模型与网格单元接地模型的海底履带式采矿车动力学模型,该模型可实现履带式采矿车进而整个深海采矿系统的快速动力学仿真分析。

本文通过构建深海底履带式集矿机多体动力学仿真模型以及通过二次开发构建深海底底质特殊力学模型,实现履带式集矿机在海底特殊稀软底质上的多种行走工况动力学仿真分析。

1 实验室模拟力学特性试验

海底履带式集矿机与底质相互作用力学特性参数难以通过海上原位试验测量获得,考虑采用实验室模拟试验方法开展研究。基于车辆地面力学理论,设计模拟试验系统方案,测量模拟履带板与模拟底质相互作用的压陷与剪切力学特性,为集矿机海底行走作业性能分析评估提供了最为关键的环境载荷参数。

1.1 模拟试验系统构建

履带式集矿机海底行走作业时主要以表层 15~20 cm 处底质作为承载层与剪切牵引层,因此将该层底质的物理力学特性参数作为配制模拟底质的参数依据^[12-13]。参照贝式仪及国外试验方法,采用膨润土与水混合物配制模拟底质,通过不断调节膨润土与水的混合比例,测试混合物试样的主要力学特性参数,包括剪切强度、贯入阻力等,当其与底质原位测试数据一致或接近时,可认为其达到了模拟效果。表 1 所示为实验室配制模拟底质测量计算数据与原位测量数据的比较。

表 1 模拟底质物理力学特性测试结果与原位测试数据比较

参数	模拟数据	原位测试数据
剪切强度/kPa	4.9	4.0~6.5
平均含水(%)	110	90~130
湿密度/(g/cm ³)	1.3	1.2~1.5
干密度/(kN/m ³)	0.62	0.54~0.65
孔隙比	3.28	3.11~4.13

图 1 所示为构建的实验室模拟力学特性试验整体系统,采用液压系统驱动履带板运动,通过拉压力传感器测量法向压力与水平剪切力,采用 Dewetron 数据采集系统采集作用力数据。

1.2 试验测量与数据处理分析

履带式集矿机与底质相互作用力学特性分解为法向压力-沉陷特性和水平切应力-剪切位移特性。

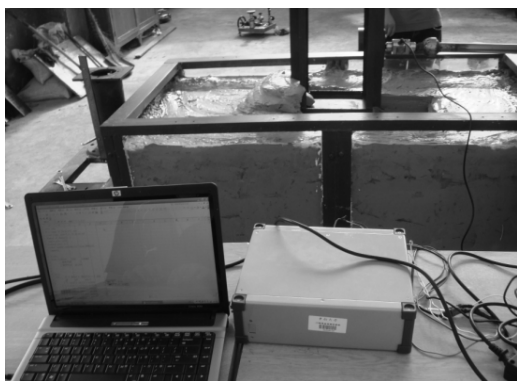
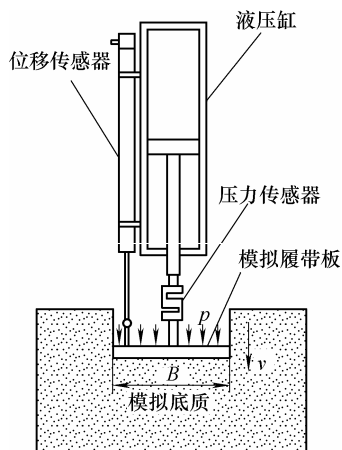


图 1 实验室模拟力学特性试验系统

图 2 和图 3 分别为模拟履带板与底质相互作用的压力-沉陷和切应力-剪切位移试验原理图及试验过程, 图 2、3 中 p 、 v 、 B 分别表示模拟履带板所受法向压力、履带板压陷速度和履带板宽度。



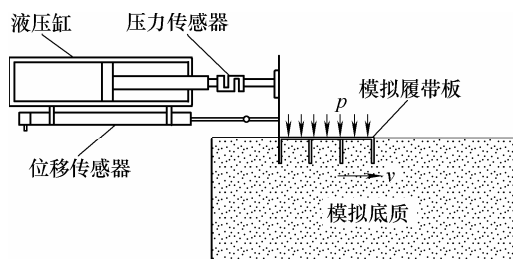
(a) 试验原理示意图



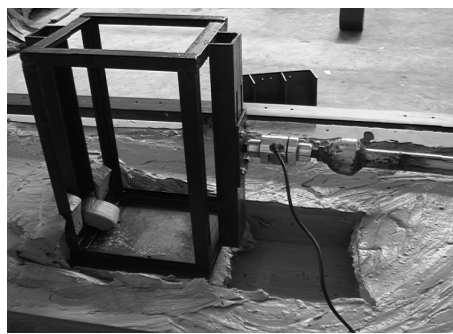
(b) 试验过程照片

图 2 模拟履带板与模拟底质相互作用压陷试验

图 4、5 分别为不同尺寸压陷板试验获得的相应压应力-沉陷试验数据曲线以及在双对数坐标系下进行变换的近似直线。



(a) 试验原理示意图



(b) 试验过程照片

图 3 拟履带板与模拟底质相互作用剪切试验

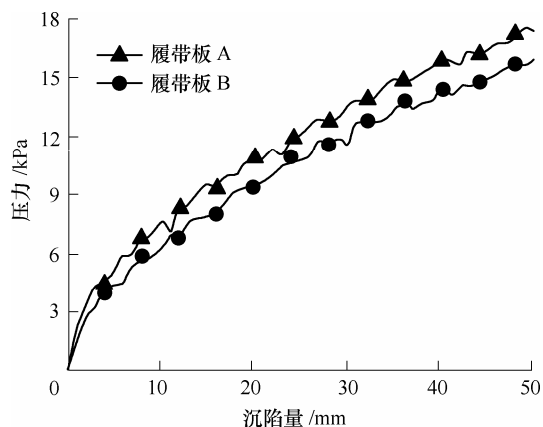


图 4 压力沉陷试验曲线

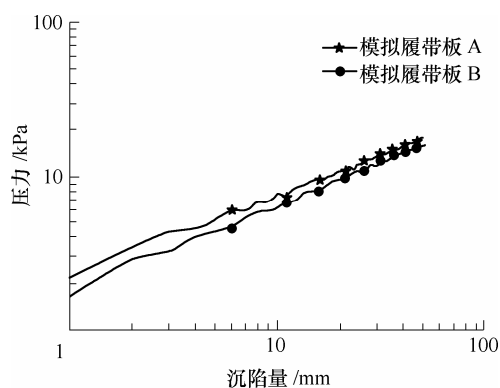


图 5 双对数坐标下压陷试验对应直线

根据 Bekker 压力-沉陷关系式^[17]

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (1)$$

式中, p 为接地压力 k_c 为土壤内聚变形模量, k_ϕ 为摩擦变形模量, b 为接触面宽度, z 为沉陷量, n 为沉陷变形指数。

通过数据分析处理可获得基于 Bekker 模型的海底特定层位底质的压力-沉陷关系式为

$$p = \left(\frac{1.62}{b} + 77.1 \right) z^{0.56} \quad (2)$$

图 6 所示为试验获得的切应力-剪切位移试验数据曲线及相应的拟合曲线。

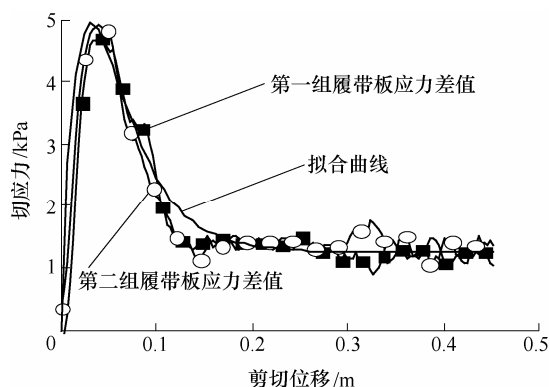


图6 模拟底质剪切试验曲线及相应拟合曲线

根据 WONG 切应力-剪切位移关系式^[18]

$$\tau = (c + p \tan \phi) K_r \times \left\{ 1 + \left[\frac{1}{K_r (1 - \exp(-1))} - 1 \right] \exp(1 - j/K_\omega) \right\} \times (1 - \exp(-j/K_\omega)) \quad (3)$$

式中, c 为内聚力, p 为法向压力, ϕ 为内摩擦角, K_r 为残余切应力与最大切应力 τ_{\max} 比值, K_ω 为最大切应力产生时对应的剪切位移值。

通过数据分析处理可获得描述海底特定层位底质-切应力-剪切位移特性关系式为

$$\tau = 4.9 \times 0.28 \times \left\{ 1 + \left[\frac{1}{0.28 \times (1 - \exp(-1))} - 1 \right] \exp(1 - j/0.035) \right\} \times (1 - \exp(-j/0.035)) \quad (4)$$

2 海底履带式集矿机多体动力学模型及环境载荷模型构建

2.1 集矿机多体动力学建模

考虑到海底履带式集矿机结构复杂, 具有大量自由度, 为获得良好的动力学求解计算速度, 采用动力学建模与仿真程序 RecurDyn 构建海底履带式集矿机多体动力学模型。RecurDyn 采用相对坐标系运动方程理论与完全递归算法, 减少了绝对坐标系中约束方程数量, 在求解速度上具有较为明显优势, 适于求解大规模复杂多体系统动力学问题。

根据深海履带式集矿机详细结构设计参数, 采用 RecurDyn/Track 建立其复杂履带系统, 定义动力学接触与驱动。采用 SolidWorks 构建车体复杂三维模型, 通过程序接口模块, 将车体三维模型导入 RecurDyn/Track, 并定义车体与履带系统相互约束关系。图7所示为深海底履带式集矿机结构示意图, 表2、3为其主要设计参数, 图8为构建的海底履带式集矿机多体动力学模型。

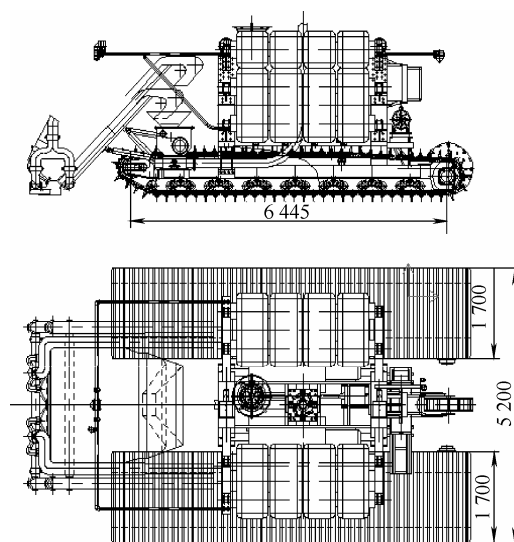


图7 海底履带式集矿机结构示意图(mm)

表2 履带式集矿机结构设计参数

参数名称	数值
空气中重/t	32
水下重/t	11.7
外形尺寸 $\frac{\text{长}}{\text{m}} \times \frac{\text{宽}}{\text{m}} \times \frac{\text{高}}{\text{m}}$	9.2×5.2×3
履带接地长/m	6
履带宽度/m	1.7
履带接地总面积/m ²	21
左右履带中心距/m	3.5
履带齿长/m	1.7
履带齿高/m	0.13
履带齿宽/m	0.2

表3 集矿机履带系统参数

部件名称	半径/m	质量/kg	数量/个
驱动轮	0.28	50	2
张紧轮	0.20	50	2
支重轮	0.1	10	28
拖链轮	0.1	10	6
履带板	—	15	150

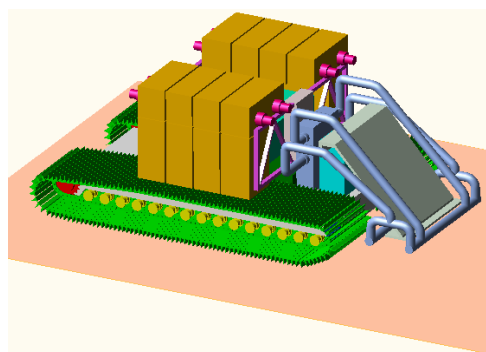


图8 海底履带式集矿机多体动力学仿真模型

2.2 深海底质力学模型开发构建

目前, 履带车多体动力学仿真分析商业程序中均只提供了陆地表面常见土壤的力学模型, 对于特殊环境下, 如深海底底质力学模型、月球表面月壤力学模型等均未能提供, 而显然海底底质与陆地表

面底质的力学特性完全不同。因此, 为研究深海底履带式集矿机的行走性能, 需要自行开发相应的海底底质力学模型。

基于 RecurDyn/Track 进行二次开发, 采用 C 语言编写用户自定义子程序, 定义上述通过实验室模拟试验获得的海底底质特殊的压力-沉陷、切应力-剪切位移关系式。在 Visual Studio 上生成动态链接库(Dynamic link library, DLL), 在集矿机多刚体动力学模型中对创建的海底底质力学模型动态链接库 DLL 文件进行调用, 进而实现海底底质特殊力学模型在多体系统动力学商业程序中的构建。

2.3 底质力学模型二次开发程序的验证

为验证底质力学模型子程序二次开发的计算准确性与效果, 建立相同的履带车多体动力学模型, 采用商业程序自带的陆地表面土壤力学模型与二次开发的相同力学模型进行仿真计算比较。图 9 所示

为均采用陆地表面典型黏土力学模型时, 二次开发程序与自带商业程序进行仿真时车体直线与转向运动曲线比较。

由图 9 可看出, 两者的仿真计算曲线基本吻合, 验证了本文设计的底质力学模型二次开发程序的计算准确性与效果, 进而可通过该二次开发功能构建海底底质特殊力学模型, 进行海底履带式集矿机多种行走工况动力学特性仿真分析。

2.4 集矿机水动力计算

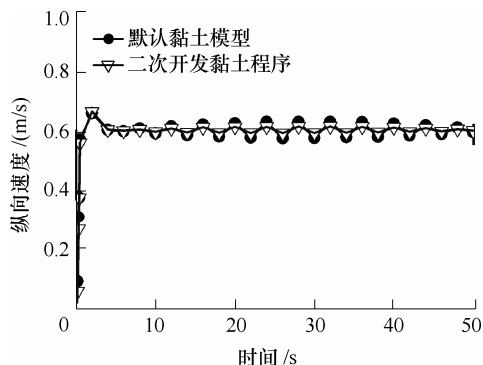
集矿机具有较大的体积与迎水面积, 且海水密度远大于空气密度, 因此集矿机海底行走时, 需要考虑水动力对其行走性能的影响。水动力由惯性力和水阻力线性叠加组成

$$F_h = -\frac{1}{2}C_d\rho_w A_m |v_w - v_m|(v_w - v_m) - C_m\rho_w V_m(\dot{v}_w - \dot{v}_m) \quad (5)$$

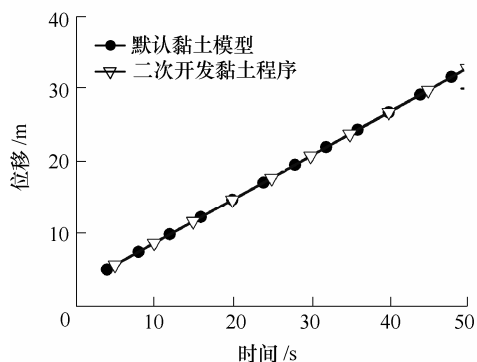
式中, C_m 、 C_d 分别为附加质量系数和水阻力系数; ρ_w 为海水密度; V_m 、 A_m 分别为集矿机体积和迎水面积; v_w 、 v_m 分别为集矿机行走速度和海底海流速度, \dot{v}_w 、 \dot{v}_m 分别为集矿机行走加速度和海底海流加速度。表 4 所示为集矿机水动力计算参数。

表 4 集矿机水动力计算参数

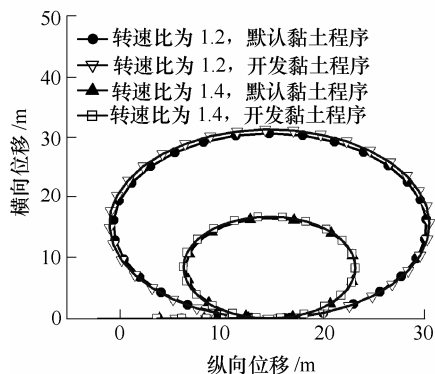
参数名称	数值
附加质量系数 C_m	0.4
水阻力系数 C_d	2.0
海水密度 $\rho_w/(kg/m^3)$	1 037
集矿机体积 V_m/m^3	20
集矿机迎水面积 A_m/m^2	10
海底水流速度 $v_w/(m/s)$	0.15



(a) 直线速度仿真曲线



(b) 直线位移仿真曲线



(c) 转向运动轨迹仿真曲线

图 9 二次开发程序模型与自带商业程序模型仿真计算比较

3 海底履带式集矿机多种行走工况动力学仿真分析

3.1 直线行走仿真

履带式集矿机海底行走速度范围为 0.5~1.0 m/s。直线行走仿真时, 采用 STEP 函数定义驱动轮运动速度为 0.6 m/s。如图 10 所示为仿真曲线。

由图 10 可知, 集矿机海底稳定行走时车体沉陷量为 50 mm 左右, 集矿机履齿设计高度为 130 mm, 这样履齿尖可达到并产生剪切作用的海底底质层位为 180 mm 左右, 这与集矿机海底行走承载层与剪切牵引层的设计底质层位为 150~200 mm 相吻合。

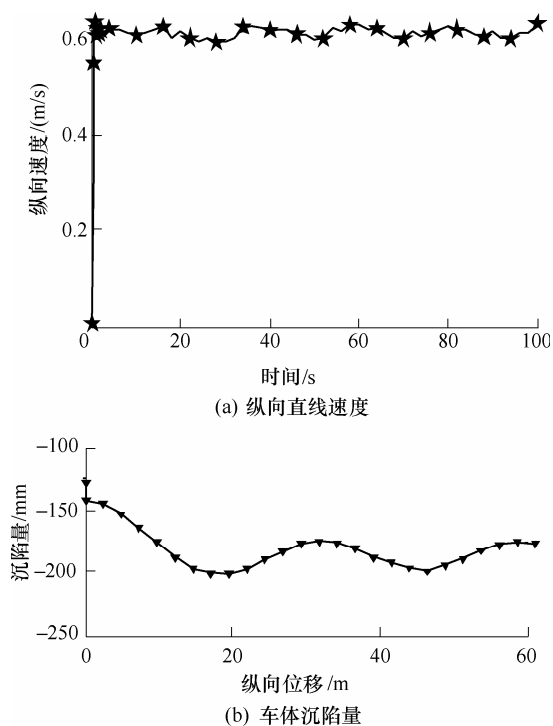


图 10 集矿机纵向直线行走仿真曲线

3.2 转向行走仿真

集矿机转向行走仿真时, 设定内侧履带输入速度为 0.5 m/s, 转向速度比为 1.2, 图 11 所示为集矿机分别在海底底质以及陆地表面典型黏土底质上转向行走的运动轨迹仿真曲线。

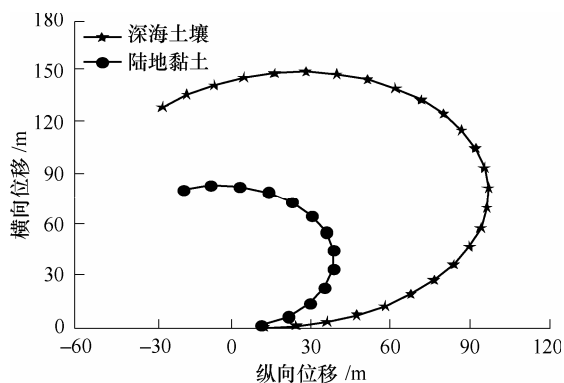


图 11 集矿机转向行走轨迹仿真曲线

由图 11 可知, 在同等转向行走速度及速度比设定情况下, 集矿机海底行走转向半径达到 70 m 左右, 而在陆地表面常见典型黏土上转向半径仅为 40 m 左右, 由此说明相比于陆地表面行走而言, 集矿机海底转向行走时存在明显的滑移现象, 这对集矿机海底行走的路径规划及控制提出了更高要求。

3.3 跑偏工况行走仿真

集矿机海底行走时, 会遇到底质力学特性分布不均, 导致左右履带剪切牵引力不一致, 产生转向力矩, 从而使得集矿机偏离预定直线行走轨迹的情况, 如图 12 所示为设定集矿机左右履带处的海底底质剪切强度分别为 1 kPa 和 4 kPa 时, 集矿机的行走轨迹仿真曲线。

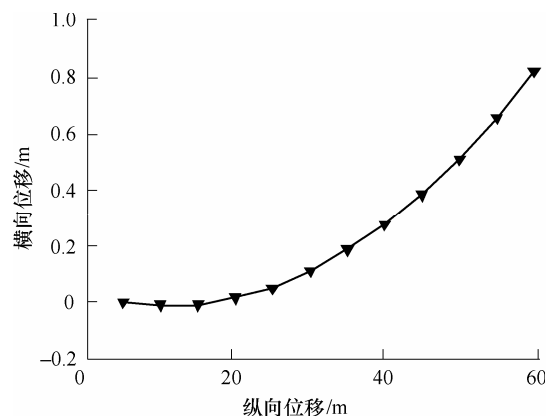


图 12 海底底质力学特性分布不均时集矿机行走轨迹仿真曲线

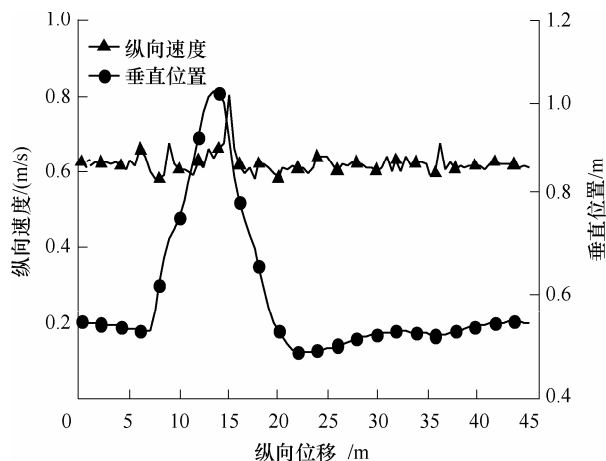
由图 12 可看出, 集矿机纵向行走 60 m 距离时已产生了约 0.9 m 的横向位移, 即偏离了预定直线行驶轨迹 0.9 m, 随着集矿机的继续行走, 偏移距离将逐渐加大, 这将直接影响集矿机海底行走采集性能与采集效率。根据集矿机海底行走作业要求, 其行走轨迹偏差要求控制在 $-1 \sim 1$ m, 因此, 此时就需要对集矿机左右驱动轮转速进行有效控制, 使其按照或接近预定直线路径进行行走采集作业。

3.4 爬坡、越沟行走仿真

根据深海底矿区地形地貌特征以及集矿机行走性能设计要求, 集矿机爬坡高度不大于 0.5 m, 坡度不大于 15° , 越沟宽度不大于 1 m。根据此要求, 通过二次开发构建深海底虚拟地形模型, 对集矿机的爬坡与越沟性能进行动力学仿真分析。如图 13 所示为构建的海底地形以及集矿机行走过程中车体质心位置与速度变化曲线。



(a) 集矿机爬坡越沟过程仿真界面



(b) 车体质心位置与速度仿真曲线

图 13 集矿机爬坡越沟过程仿真

由图 13 可看出, 集矿机可满足海底爬坡与越沟性能设计要求, 车体位移与速度变化曲线准确, 可真实地反映出集矿机海底爬坡越沟过程中运动状态的变化特性。

4 结论

(1) 基于车辆地面力学理论, 根据深海矿区底质物理力学特性, 配制了实验室模拟底质, 设计与构建了实验室模拟力学特性试验系统, 开展了模拟履带板与模拟底质相互作用力学特性试验, 获得了法向压力-沉陷、水平切应力-剪切位移函数关系式。

(2) 根据深海履带式集矿机详细结构设计参数, 应用 RecurDyn/Track 构建了集矿机多体动力学模型。应用实验室模拟试验获得的海底底质力学特性关系式, 采用 C 语言编写用户自定义子程序, 基于 RecurDyn/Track 进行二次开发, 实现了深海底特殊底质力学模型在履带车多体动力学模型中的开发构建。通过二次开发程序与自带商业程序的仿真计算比较, 验证了本文对于底质力学模型开发构建方法的计算准确性与效率。

(3) 开展了海底底质特殊力学载荷下履带式集矿机多种行走工况的动力学仿真, 包括直线、转向、爬坡、越沟以及特殊行走工况, 分析与评估了履带式集矿机海底行走作业性能, 为实际深海底履带式集矿机的结构设计优化、性能评估及行走控制研究奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18.
LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 8-18.
- [2] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿机器人研究: 现状与发展[J]. 机器人, 2013, 35(3): 363-375.
DAI Yu, LIU Shaojun. Researches on deep ocean mining robots: Status and development[J]. Robot, 2013, 35(3): 363-375.
- [3] LEE C, KIM H, HONG S, et al. A study on the driving performance of a tracked vehicle on an inclined plane according to the position of buoyancy[C]//Proceedings of the Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium, June 19-24, 2011, Maui, Hawaii, USA. Cupertino: ISOPE, 2011: 104-109.
- [4] KIM H, HONG S, CHOI J. Comparative study on tracked vehicle dynamics on soft soil: Single-body dynamics vs. multi-body dynamics[C]//The Fifth Ocean Mining Symposium, September 15-19, 2003, Tsukuba, Japan. Cupertino: ISOPE, 2003: 132-138.
- [5] KIM H, HONG S, CHOI J, et al. Dynamic analysis of underwater tracked vehicle on extremely soft soil by using euler parameters[C]//Proceedings of The Sixth ISOPE Ocean Mining Symposium, October 9-13, 2005, Changsha, Hunan, China. Cupertino: ISOPE, 2005: 141-148.
- [6] LEE M U, JUNG J J, YOO J H. Metamodel-based multidisciplinary design optimization of ocean-mining vehicle system[C]//Proceedings of The Seventh Ocean Mining Symposium, July 1-6, 2007, Lisbon, Portugal. Cupertino, USA: ISOPE, 2007: 146-152.
- [7] LEE T H, LEE M U. Method of metamodel-based multidisciplinary design optimization for development of a test miner[C]//Proceedings of The Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium, September 20-24, 2009, Chennai, India. Cupertino: ISOPE, 2009: 270-275.
- [8] KIM H, LEE C, HONG S, et al. Dynamic analysis of a tracked vehicle based on a subsystem synthesis method[C]//Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, September 22-26, 2013, Szczecin, Poland. Cupertino: ISOPE, 2013: 279-285.
- [9] SCHULTE E, HANDSCHUH R, SCHWARZ W. Transferability of soil mechanical parameters to traction potential calculation of a tracked vehicle[C]//Proceedings of The Fifth Ocean Mining Symposium, September 15-19, 2003, Tsukuba, Japan. Cupertino: ISOPE, 2003: 123-131.
- [10] SCHULTE E, SCHWARZ W. Simulation of tracked vehicle performance on deep sea soil based on soil mechanical laboratory measurements in bentonite soil[C]//The Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium, September 20-24, 2009, Chennai, India. Cupertino: ISOPE, 2009: 276-284.
- [11] MORGAN N, CATHIE D. Tracked subsea trencher mobility and operation in soft clays[C]//Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, May 28-June 2, 2006, San Francisco, California. Cupertino: ISOPE, 2007: 1366-1373.
- [12] 宋连清. 大洋多金属结核矿区沉积物土工性质[J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 47-54.

- SONG Lianqing. Geotechnical properties of oceanic polymetallic nodule sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(6): 47-54.
- [13] 吴鸿云, 陈新明, 高宇清, 等. 西矿区深海稀软底质剪切强度和贯入阻力原位测试[J]. *中南大学学报*, 2010, 41(5): 1801-1806.
- WU Hongyun, CHEN Xinming, GAO Yuqing, et al. In-situ shearing strength and penetration resistance testing of soft seabed sediments in western mining area[J]. *Journal of Central South University*, 2010, 41(5): 1801-1806.
- [14] LI Li, ZHONG Jue. Research of China's pilot-miner in the mining system of polymetallic nodule[C]// *Proceedings of the 6th ISOPE Ocean Mining Symposium*, October 9-13, 2005, Changsha, Hunan, China. Cupertino: ISOPE, 2005: 124-131.
- [15] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿整体系统动力学建模及联动开采作业过程快速仿真分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(9): 79-88.
- DAI Yu, LIU Shaojun. Establishment of the dynamic model of the total deep ocean mining system and fast simulation of its integrated operation process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(9): 79-88.
- [16] 陈小玲. 洋多金属结核矿区表层沉积物的物理性质[J]. *东海海洋*, 2004, 22(1): 28-33.
- CHEN Xiaoling. The physical properties of surface sediments in oceanic polymetallic nodule[J]. *Donghai Marine Science*, 2004, 22(1): 28-33.
- [17] BEKKER M G. Introduction to terrain-vehicle systems[M]. Michigan: University of Michigan Press, 1969.
- [18] WONG J Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering[M]. 2nd ed. London: Elsevier Ltd., 2010.
-
- 作者简介: 张滔, 男, 1990 年出生。主要研究方向为深海底集矿机动力学及控制。
E-mail: csuzhangtao@163.com
- 戴瑜(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士后, 副教授。主要研究方向为深海作业系统设计与控制。
E-mail: daiyu_6@aliyun.com
- 刘少军, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为深海作业系统设计与控制、工程机械混合动力技术。
E-mail: liushaojun@csu.edu.cn