doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.022

链履式滩涂贝类养殖行走装置设计与试验

俞亚新[1,2]　王　通[1]　王英豪[1]　史东海[3]　吴思博[1]　余　威[3]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018;
3.台州合祥机械有限公司,台州 318050)

摘要:针对潮间带滩涂底播养殖区域地质松软、承载力低,行走机械易出现牵引力不足及滑转等问题,提出一种适用于淤泥质滩涂的链履式行走装置。该装置采用双节距特种链条布设于浮箱车体两侧,通过履带板剪切土壤产生推力,并依托滚子实现车体平稳移动。通过理论分析确定影响牵引性能的关键结构参数,并构建三节链履与黏塑性滩涂土壤的离散元仿真模型,开展履带板推土仿真分析。以履带板宽度、履带板高度、履齿拔模角及履带板节距为试验因素,以沉陷量、牵引系数为评价指标,进行单因素试验,得到影响牵引性能的主要因素为履带板宽度、履带板高度、履带板节距。以此为试验因素,进行三因素三水平中心组合试验,以低沉陷量、高牵引系数为目标对各试验因素进行优化,得到链履结构的最优参数组合为:履带板宽度 700 mm,履带板高度 118 mm,履带板节距 203 mm。采用优化后的参数研制样机进行滩涂行驶试验,结果表明,在 1 000 kg 负载状态下,该装置直线行驶滑转率为 32.33%,与仿真结果对比,二者绝对误差仅为 7.66 个百分点。研究表明该行走装置能有效适应滩涂环境,为开发工作效率更高的滩涂运载设备奠定基础。

关键词:滩涂土壤;贝类养殖;链履式行走装置;离散元法;沉陷量;滑转率

中图分类号:S972　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)17-0231-11　　**OSID**:

Design and Test of Chain-track Shellfish Aquaculture Walking Device in Tidal Flat

Yu Yaxin[1,2]　Wang Tong[1]　Wang Yinghao[1]　Shi Donghai[3]　Wu Sibo[1]　Yu Wei[3]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Intelligent Perception and Robotics of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310018, *China*
3. *Taizhou Hexiang Machinery Co.*, *Ltd.*, *Taizhou* 318050, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of soft geology, low bearing capacity, insufficient traction and easy slippage of walking machinery in the bottom sowing and breeding area of intertidal mudflats, a chain-crawler walking device suitable for muddy tidal flats was proposed. The device used a double-pitch special chain arranged on both sides of the pontoon body, generated thrust by shearing soil with the track shoes, and realized smooth movement of the body relying on rollers. The key structural parameters affecting traction performance were determined through theoretical analysis. A discrete element simulation model of a three-link chain-crawler and viscoplastic tidal flat soil was established to conduct bulldozing simulation analysis of the track shoes. Taking track shoe width, track shoe height, track tooth draft angle and track shoe pitch as test factors, and settlement and traction coefficient as evaluation indexes, single-factor tests were carried out. The main factors influencing traction performance were identified as track shoe width, track shoe height and track shoe pitch. On this basis, a three-factor, three-level central composite design experiment was conducted. The test factors were optimized with the objectives of low settlement and high traction coefficient. The optimal parameter combination of the chain-crawler structure was obtained as follows: track shoe width was 700 mm, track shoe height was 118 mm, track shoe pitch was 203 mm. A prototype was manufactured by using the optimized parameters and subjected to tidal flat driving tests. The results showed that under a 1 000 kg load, the straight driving slip rate of the device was 32.33%, compared with the simulation results, the absolute error between the two is 7.66

收稿日期:2026-02-11　修回日期:2026-03-19

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2023C02011)

作者简介:俞亚新(1974—),女,教授,博士,主要从事农业机械设计与分析研究,E-mail:yyxin@zstu.edu.cn

percentage points. The research result demonstrated that the walking device can effectively adapt to the tidal flat environment, laying a foundation for the development of higher efficiency tidal flat carrying equipment.

Key words: tidal flat soil; shellfish farming; chain-crawler walking device; discrete element method; settlement; slip rate

0 引言

浙江沿海地区岸线漫长、滩涂广布,该生态环境特征决定了其海水养殖以滩涂贝类为主导的产业格局[1]。自 20 世纪 80 年代以来,浙江海水养殖业持续快速发展。2022 年数据显示,浙江省贝类养殖面积约为 3.47×10^4 hm^2,年产量达 1.09×10^6 t[2-3]。浙江滩涂以泥滩为主,贝类养殖的重要环节播种、采收主要依赖人工完成,工作效率按面积计算不足 0.005 hm^2/h[4-5]。因此,研制适用于浙江泥滩环境的行走装置,已成为推动滩涂贝类养殖机械化发展的迫切需求。

研究表明基于行走装备的作业效率比人工行走增加 10 倍以上[6-7]。沿海泥滩具有松软、高含水率的特点,对行走装置提出了极高的要求。现有的滩涂行走装置并不适用,存在滑转率高、牵引能力不足的局限。梁喜凤等[8]针对浙江泥滩提出螺旋推进式行走装置,研制小型样机在实验室环境下进行了试验,但并未实际应用。

履带式行走装置在深海、沼泽、雪地中具有较好的行驶能力[9-13]。研究表明,优化履带板高度、宽度和节距可有效增强履带板在泥滩中的牵引能力。文献[14]对单块履带板分别做了剪切和沉陷试验,系统分析了履带的关键结构尺寸对牵引性能的影响规律。刘磊等[15]研究发现合理设计履带板节距可提高集矿车在软底质沉积物上的行驶性。许焰等[16]研究发现履齿高度能提高行走装置在稀软底质上的牵引性能。樊慧文等[17]采用多节独立链节与独立履带板设计,通过增大接地面积、降低平均接地压强,开发的链轨式沼泽运载设备,具有良好的纵向牵引力与横向防滑性能。

为满足浙江泥滩区域贝类养殖的机械化作业需求,本文设计一种链履式行走装置。以链履结构为核心,通过理论建模与参数分析,确定影响牵引性能的关键参数,并借助仿真对链履结构进行优化。在此基础上,研制行走装置样机并开展滩涂试验,验证其在滩涂环境中的实际行驶性能。

1 整机结构与工作原理

链履式滩涂贝类养殖行走装置结构如图 1 所示,主要包括动力系统、液压系统、控制系统以及底盘部件。底盘部件主要包括浮箱车体、驱动装置、张紧装置以及履带等。该装置长 5.5 m,宽 2.4 m,高 1.9 m,履带中心距为 1.6 m,整备质量 4.5 t,适应坡度为 0°~20°。发动机的动力经变速箱传递至液压马达,驱动链轮卷绕闭式链履结构,接地履带板与滩涂啮合形成支撑点,依托车体与链履滚子的相对运动实现装置行进。系统采用双侧独立液压马达,通过调控左右履带的线速度差产生回转力矩,使装置具备原地转向等灵活机动能力。

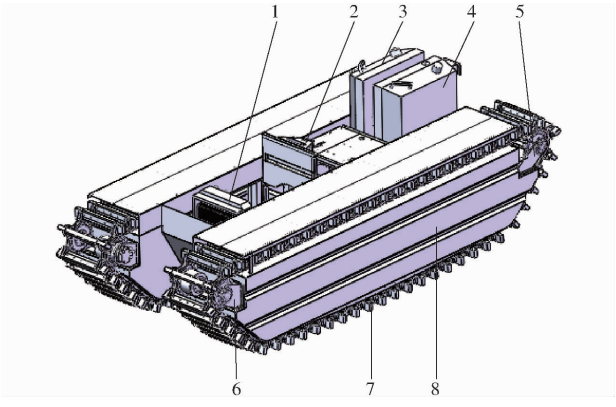

图 1 链履式滩涂行走装置结构图

Fig. 1 Chain crawler beach walking device structure diagram

1. 动力系统 2. 控制系统 3. 液压油箱 4. 柴油箱 5. 张紧装置 6. 驱动装置 7. 履带 8. 浮箱车体

2 链履结构设计

链履结构如图 2 所示,链条主要由外链板、带翼的内链板、销轴、套筒以及滚子组成,履带板与带翼的内链板通过螺栓固定。t 为履带板节距,H 为履带板高度,B 为履带板宽度。

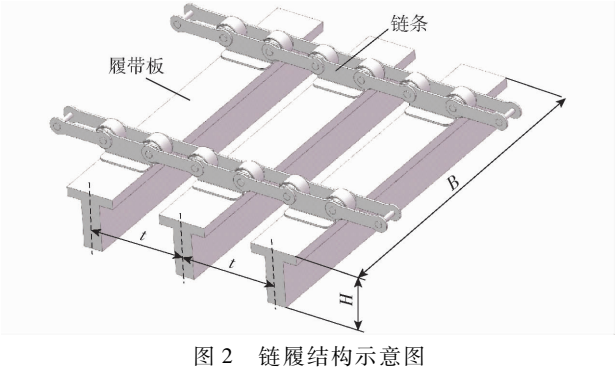

图 2 链履结构示意图

Fig. 2 Chain track structure diagram

图 2 所示结构属于间隔式履带，相较于普通履带，剪切土壤时有足够的位置形成被动朗肯区[18]，而使土壤达到整体剪切破坏，如图 3 所示。整体剪切破坏的土壤体积比普通履带要大得多，土壤的内聚力可以得到充分利用，产生较大的推力。李军等[19]对间隔式履带做了专门研究，证实了间隔式履带产生的推力超过普通履带。此外，间隔式履带还具有脱泥性好、减少行驶阻力的优点。

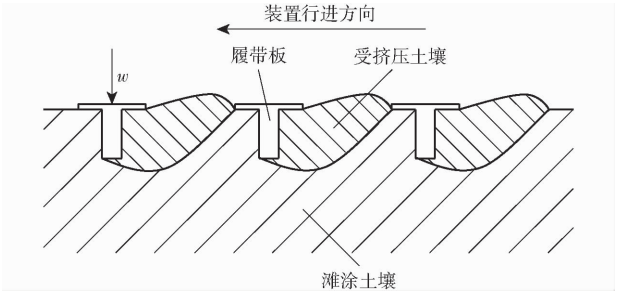

图 3　间隔式履带对土壤破坏示意图

Fig. 3　Damage to soil caused by spaced tracks

为了分析履带板结构参数与滩涂稀软底质之间的相互作用，建立单个履带板在滩泥中行驶受力模型，如图 4 所示。履带板根部厚度为 l，履齿厚度为 d，履带板根部高度为 a，履齿高度为 h，履带板在载荷作用下沉陷深度为 z_0，履带板剪切位移为 j，单块履带板所受垂直载荷为 w，土壤对履齿底面和履带板根部底面在竖直方向的应力分别为 p_1、p_2，履带板受到剪切土壤水平方向的推力主要由 4 部分组成：作用于履带板底部的力 F_1，履齿底部的力 F_2，垂直于履齿剪切面上的水平推力 F_3，以及作用于履带板两侧端面的附加力 F_4。

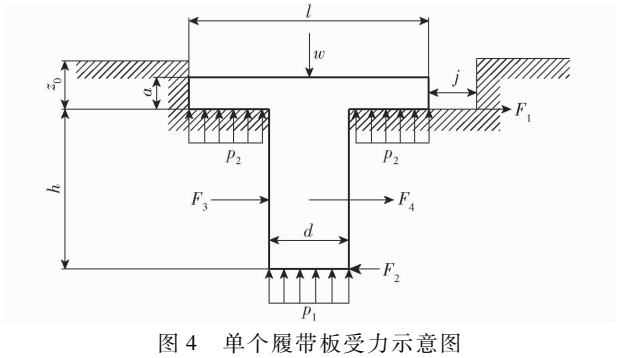

图 4　单个履带板受力示意图

Fig. 4　Schematic of forces on single track plate

滩涂淤泥属于高含水率、高黏聚力的稀软介质，其受力变形过程比较复杂。但在履带板瞬时压下的动载荷作用下，浅层滩涂土壤表现出一定的弹塑性压缩与剪切破坏特征。虽然目前也有针对黏土的 Reece 等修正沉陷模型，但在初期的工程概念设计和关键参数提取阶段，经典 Bekker 理论与 Rankine 土压力理论因各项参数的物理意义更加直观，依然被广泛用于定性分析与指导。根据 Bekker 压力沉陷公式，p_1、p_2 分别为

$$\begin{cases} p_1 = \left(\dfrac{k_c}{B} + k_\varphi\right)(h + z_0)n \\ p_2 = \left(\dfrac{k_c}{B} + k_\varphi\right)z_0^n \end{cases} \tag{1}$$

式中　k_c——土壤黏聚力变形系数，$\mathrm{N/cm^{(n+1)}}$

k_φ——土壤摩擦变形系数，$\mathrm{N/cm^{(n+2)}}$

n——土壤变形指数

履带板底部的力 F_1、履齿底部的力 F_2 分别为

$$\begin{cases} F_1 = B(l-d)\left[c + \left(\dfrac{k_c}{B} + k_\varphi\right)z_0^n \tan\varphi\right] \\ F_2 = Bd\left[c + \left(\dfrac{k_c}{B} + k_\varphi\right)(h + z_0)^n \tan\varphi\right] \end{cases} \tag{2}$$

式中　φ——土壤内摩擦角，(°)

c——土壤内聚力，kPa

随着履带板剪切土壤，靠近履齿的土壤受到挤压，根据挡土墙理论[20]，可认为土体在该区域内处于 Rankine 被动状态，考虑履齿拔模角度 β，如图 5 所示。作用在履齿上的法向力可以近似应用线性方程，表示为

$$\sigma_{pn} = \gamma_s z_0 K_{pr} + qK_{pq} + cK_{pc} \tag{3}$$

式中　σ_{pn}——垂直履齿上的法向力，kPa

γ_s——土壤容重，$\mathrm{kN/m^3}$

q——法向附加载荷，kPa

K_{pr}——由土体自重产生的被动抗力系数

K_{pq}——由地表超载引起的比例系数

K_{pc}——由黏聚力引起的增强系数

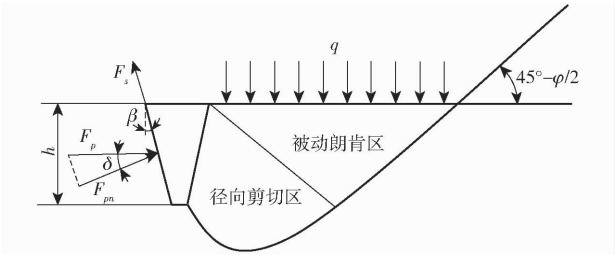

图 5　履齿挡土墙受力分析

Fig. 5　Stress analysis of crawler retaining wall

则垂直于履齿斜面的合力 F_{pn} 为

$$F_{pn} = \frac{B}{\cos\beta}\left(\frac{1}{2}\gamma_s BK_{pr}h^2 + qK_{pq}h + cBK_{pc}h\right) \tag{4}$$

此时土壤沿履齿方向的剪切力 F_s 为

$$F_s = \frac{h}{\cos\beta}cB + F_{pn}\tan\delta \tag{5}$$

式中　δ——土壤与机械表面的外摩擦角，(°)

综合可得履齿垂直面总的水平推力 F_3 为

$$F_3 = F_{pn}\cos\beta + F_s\sin\beta = \left(\frac{1}{2}\gamma_s BK_{pr}h^2 + BhqK_{pq}h + cBK_{pc}h\right)\cdot(1 + \tan\beta\tan\delta) + cBh\tan\beta \tag{6}$$

装置行驶时,履带板在剪切土壤的过程中与其两侧的接触土体发生相对运动,从而产生附加牵引力 F_4。虽然高含水率的滩涂湿软土壤具有一定的流塑性,但在履带连续行进的短暂压实过程中,浅层土壤在受力初期主要表现出瞬态的弹塑性变形。考虑到单块履带板的横向宽度远大于其纵向厚度,为了方便在理论层面分析履带板尺寸对牵引性能的影响规律,结合经典土力学理论,将履带板底面对土壤的挤压与剪切作用,近似简化为作用在半无限大土体表面上的带状载荷[21]。基于这种简化假设,接触土壤内部任一点的应力分布就只与该点的二维平面坐标有关,带状载荷下土壤内任一点的应力分布模型如图 6 所示。

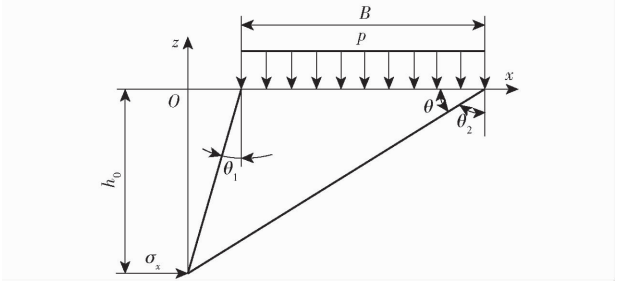

图 6 带状载荷下土壤内任一点应力分布

Fig. 6 Stress distribution at any point in soil under load

根据弹性力学,在带状载荷为 p 的作用下,接触土壤内任一点上垂直于带状载荷 x 方向上的应力 σ_x 为

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi}\int_0^{\theta_2}\sin^2\theta \mathrm{d}\theta = \frac{p}{2\pi}(\theta_2 - \sin\theta_2\cos\theta_2) = \frac{p}{2\pi}\left(\operatorname{arccot}\frac{h_0}{B} - \frac{Bh_0}{B^2+h_0^2}\right) \tag{7}$$

式中 h_0——带状载荷下任一点作用深度,mm

θ_1、θ_2——带状载荷作用下 h_0 处的点分别与底板两端面处的夹角,(°)

θ——带状载荷作用下 h_0 深度处的任一点与履带底板的夹角,(°)

对于单个履带板的两个端面,从土壤表面到深度 h_0 处,垂直于带状载荷带的应力之和 F_4 为

$$F_4 = 2\int_0^{h_0}\sigma_x \mathrm{d}h_0 = \frac{plh_0}{\pi}\arctan\frac{h_0}{B} \tag{8}$$

由于单一的理论解析模型难以完全反映强粘附、大变形滩涂土壤的复杂力学行为,本节的理论推导主要用于定性提取影响行走装置牵引性能的核心结构变量。对于各尺寸变量与滩涂土壤相互作用的精确非线性力学规律,将在此基础上引入考虑真实颗粒粘结力的离散元仿真,作进一步的定量探究。综合上述受力分析结果,本文最终确立履带板宽度、履带板高度、履齿拔模角及履带板节距为链履结构的核心设计参数。针对典型的高含水率淤泥质滩涂工况,通过单因素试验与响应面分析,对上述核心参数开展系统性定量寻优。

3 仿真试验

3.1 离散元模型建立

为研究链履结构与滩涂土壤间的附着特性与牵引性能,采用离散元仿真模拟二者相互作用过程。由于滩涂贝类养殖区域土壤具有较强的粘结性和弹塑性,土壤颗粒间采用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 力学接触模型,该力学模型可充分考虑土壤颗粒间粘结力对颗粒运动规律的影响。由于实际土壤分布复杂且难以精确表征,因此利用 EDEM 离散元软件仿真模拟时将土壤密度等参数设置为统一值。根据已有学者[22]对滩涂土壤粒径的设置,确定土壤颗粒粒径为 8 mm。土壤颗粒与钢接触参数如表 1 所示。

表 1 土壤与钢接触参数

Tab. 1 Contact parameters between soil and steel

参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.25
土壤颗粒杨氏模量/MPa	9.7
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 800
土壤颗粒-土壤颗粒碰撞恢复系数	0.31
土壤颗粒-土壤颗粒静摩擦因数	0.55
土壤颗粒-土壤颗粒滚动摩擦因数	0.1
土壤颗粒-土壤颗粒表面能/(J·m^{-2})	4.5
钢泊松比	0.3
钢杨氏模量/MPa	7.9×10^4
钢密度/(kg·m^{-3})	7 850
土壤颗粒-钢碰撞恢复系数	0.35
土壤颗粒-钢静摩擦因数	0.8
土壤颗粒-钢滚动摩擦因数	0.15
土壤颗粒-钢表面能/(J·m^{-2})	7.5

由于链履式行走装置整机与滩涂土壤相互作用的接触边界极其复杂,若直接开展整机高精度离散元耦合仿真进行参数寻优,将面临计算资源消耗庞大、求解效率低等难题。因此,本文借鉴地面力学中经典的 Bekker 承压板沉陷试验与直剪试验原理,并参考《土工试验方法标准》,在离散元软件中建立部件级的等效局部土槽剪切仿真模型。创建长 2 500 mm、宽 1 400 mm、高 400 mm 的颗粒床作为仿真滩涂环境,如图 7 所示。

试验系统建成后,将三节链履结构置于模拟土体之上,由于整机重量以均布荷载形式作用于接地履带板,通过计算对其施加竖向荷载。当链履模型下陷至完全插入模拟土壤并达到稳定状态时,导出

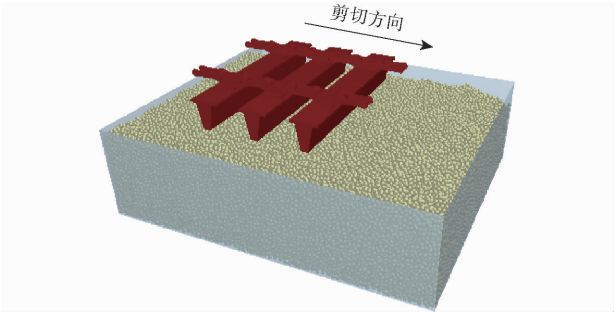

图 7　链履结构剪切仿真模型

Fig. 7　Chain track structure shear simulation model

试验过程中土壤颗粒受力及运动轨迹，如图 8 所示，接着对链履模型设置水平速度，使其以 10 mm/s 的速度匀速剪切模拟土壤，待剪切位移达到 350 mm 时停止试验，导出试验过程中链履结构两侧面土壤颗粒受力及运动轨迹，如图 9 所示。

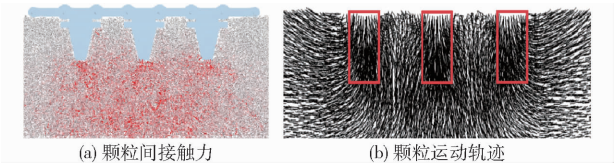

图 8　沉陷后颗粒间接触力与运动轨迹

Fig. 8　Contact force and motion trajectory between particles after subsidence

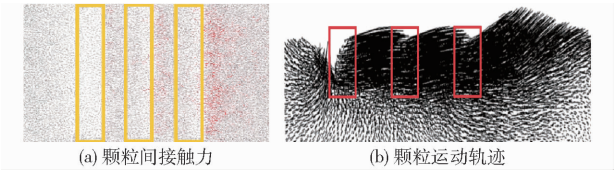

图 9　剪切后颗粒间接触力与运动轨迹

Fig. 9　Contact force and motion trajectory between particles after shearing

由图 8a 可知，红色部分为土壤颗粒在履带板作用下互相接触挤压，颗粒之间产生法向接触力，接触力从履带板底部由上向下呈“树枝状”传递，且随深度增加接触力逐渐增大。履带板下土壤颗粒并非全部形成枝状力链，说明在履带板作用下，土体中只有部分有效颗粒承压。由图 8b 可知，红色方框为履带板位置，黑色为土壤颗粒受压后，颗粒运动轨迹。履带板下的大部分颗粒向下运动，两侧土颗粒受挤向上隆起，颗粒运动表现出明显的软底质可塑性特征。

由图 9a 可知，黄色框为履齿位置，红色土壤颗粒剪力较大，表示履带板运动过程的主要受剪区域，由于履带板前端土体剪力相对集中，表明履带板运动时履齿所受水平推力较大。由图 9b 可知，底部和侧面土壤颗粒运动趋势与履带板剪切方向一致，由于履带板前端存在推土阻力，前端部分土壤颗粒受阻而向两侧和上方运动，部分土体隆起。

针对履带与地面的相互作用剪切特性，国内外学者常采用经典的 Janosi－Hanamoto 剪切模型进行描述[23]。典型的土壤剪切应力 τ－剪切位移 j 特性曲线如图 10 所示。

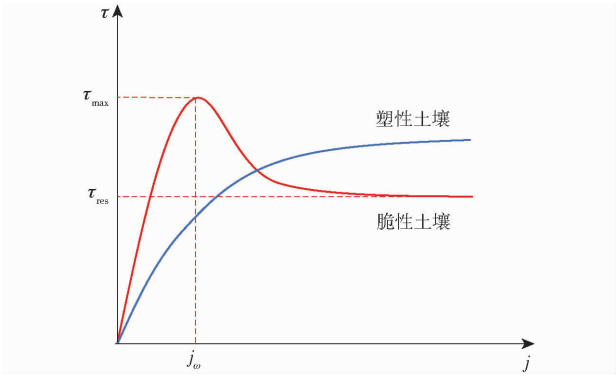

图 10　典型土壤剪切力-剪切位移曲线

Fig. 10　Typical curves of soil shear stress vs. shear displacement

图 10 中，蓝色曲线表示塑性土壤的剪应力与剪切位移关系，土壤在经历一定剪切位移后，抗剪能力达到屈服极限并保持恒定；红色曲线表示具有脆性特征的土壤，其应力在剪切位移为 j_ω 时达到峰值 τ_{max}，随着原状结构的破坏，逐渐衰减并过渡到平滑的残余应力 τ_{res}，呈现出典型的“驼峰”特征。尽管淤泥质滩涂宏观上属于黏塑性土壤，但本节离散元仿真提取的剪切特性更倾向于红色曲线。原因主要是淤泥质滩涂具有一定的微观结构性，在剪切初期，履带板与土壤间的咬合力较强，一旦剪切位移超过临界值，土壤原有的层状或絮状结构被剪切破坏，抗剪强度随之发生一定衰减。因此，在后续单因素仿真中，选取剪切位移达到稳定状态时的峰值剪切力作为极限牵引力评价指标。

3.2　性能指标

针对在松软地面上行驶的车辆通过性能指标主要有：

(1)沉陷量 y_1

沉陷量是评价行驶能力的重要指标之一，沉陷量越大，整机的行驶阻力也越大，进而导致装置的行驶能力下降。

(2)牵引系数 y_2

牵引系数用于评价行走装置在地面上的牵引储备能力，可表示为

$$y_2 = \frac{F_N}{M_0} \tag{9}$$

式中　F_N——行走装置获得的净牵引力，N

M_0——行走装置的垂直载荷，N

(3)滑转率

滑转率过大将引起履带对土壤结构的剪切破坏并失去附着力，因此在满足履带前行附着力的基础

上应使其尽量减小,从而提升行走牵引效率。滑转率 i 可表示为

$$i=\frac{v_i-v_0}{v_i}\times 100\% \tag{10}$$

式中 v_i——行走装置理论速度,km/h

v_0——行走装置实际速度,km/h

此外,为阐明部件仿真评价指标与整机实际行驶表现的内在机理联系,引入车辆-地面力学净牵引力平衡方程

$$F_N=F_T-(R_c+R_b) \tag{11}$$

式中 F_T——履带剪切土壤产生的总推力,N

R_c——履带下陷引起的压实阻力,N

R_b——履带推挤土壤产生的推土阻力,N

根据公式表明,整机行驶时的滑转率本质上是土壤剪切推力项与沉陷阻力项动态平衡的结果。通过优化链履结构核心参数,一方面减小沉陷量以降低行驶阻力,另一方面最大限度增大土壤剪切力峰值,最终必然在整机上表现为滑转率的降低。

3.3 单因素试验及结果分析

为确定链履式行走装置的核心结构设计参数,根据计算所需牵引力及预试验,确定试验因素的取值范围:履带板宽度取 400 ~ 800 mm,履带板高度取 60 ~ 140 mm,履齿拔模角取 5° ~ 25°,履带板节距取 160 ~ 240 mm,进行单因素试验。通过 EDEM 后处理界面获得履带板沉陷深度以及在滩涂土壤剪切过程中获得的有效推进力,并通过计算得到其牵引系数。探究其中一个试验因素对牵引性能影响时,其余 3 个试验因素取中水平。

由图 11 可知,随着履带板宽度的增加,沉陷量呈下降趋势,分析原因是履带板宽度增加扩大了接地面积,接地比压降低,滩涂软土地基的压缩变形随之减少;牵引系数随宽度增加上升是由于接地面积增加提升了履带板与滩涂土壤的附着力,然后趋于下降是因土壤剪切强度达到限值、附着力提升边际效应减弱。

由图 12 可知,随着履带板高度的增加,沉陷量呈上升趋势,分析原因是履齿入土深度加深,对滩涂软基的扰动与挤压程度增强,土壤压缩变形量增大,因此沉陷量逐步提升;履齿与土壤的啮合作用增强,履带与滩涂的附着力提升,故牵引系数上升,土壤剪切强度达自身限值,且履齿入土深度已足够,高度增加带来的附着力提升边际效应减弱,因此牵引系数下降。

由图 13 可知,随着履齿拔模角的增加,沉陷量呈下降的趋势,分析原因是拔模角增大会改变履带板与土壤的接触方式,使履带板倾斜切入土壤而非垂直下压。这种倾斜接触导致垂直方向的法向应力分散,单位面积的接地压力降低,从而减少土壤压缩和沉陷;倾斜的履带板使剪切力方向与运动方向形成夹角,导致部分剪切力转化为横向分力,而非全部用于推动装置前进,导致牵引效率下降。

由图 14 可知,随着履带板节距的增加,沉陷量呈下降的趋势,分析原因是履带板节距增大使得每个履带板在运动中对土壤的压实作用区域分散,避免局部土壤的连续重复压实,有更多时间恢复弹性变形,降低塑性沉陷;节距增大,履齿与土壤的啮合效果优化,履带与滩涂的附着力提升,牵引系数上升,节距过大,履齿的连续啮合作用减弱,附着力降

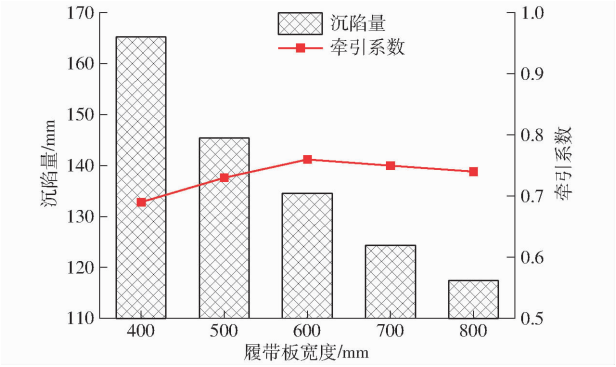

图 11 不同履带板宽度时评价指标试验结果

Fig. 11 Track plate width on evaluation index test results

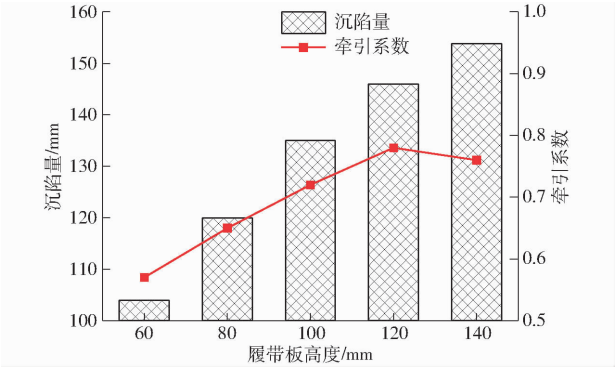

图 12 不同履带板高度时评价指标试验结果

Fig. 12 Track plate height on evaluation index test results

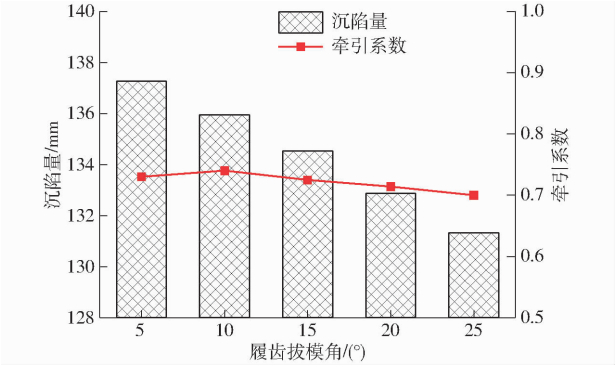

图 13 不同履齿拔模角时评价指标试验结果

Fig. 13 Test results of draft angle of crawler tooth on evaluation index

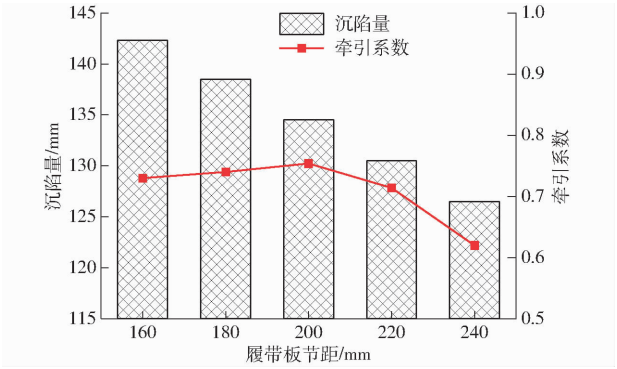

图 14　不同履带板节距时评价指标试验结果

Fig. 14　Track plate pitch on evaluation index test results

低，牵引系数随之下降。

3.4　中心组合试验

依据单因素试验结果，履齿拔模角对评价指标的影响较小，取 10°为确定值。以履带板宽度、履带板高度、履带板节距为设计变量，各设计变量编码如表 2 所示。

表 2　设计因素编码

Tab. 2　Design variable coding　　mm

编码	因素		
	履带板宽度	履带板高度	履带板节距
-1	500	100	180
0	600	120	200
1	700	140	220

3.5　试验结果与方差分析

对目标函数沉陷量 y_1 和牵引系数 y_2 的二阶多项式响应面模型进行循环逼近优化。根据 Box-Behnken 响应面法设计二次回归正交旋转组合试验，试验设计与结果如表 3 所示，x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

表 3　试验设计与结果

Tab. 3　Experimental design and results

序号	因素			y_1/mm	y_2
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	0	133.83	0.667
2	1	-1	0	116.95	0.755
3	-1	1	0	155.29	0.740
4	1	1	0	124.66	0.788
5	-1	0	-1	147.46	0.705
6	1	0	-1	123.66	0.771
7	-1	0	1	146.82	0.750
8	1	0	1	125.48	0.796
9	0	-1	-1	124.54	0.710
10	0	1	-1	137.49	0.756
11	0	-1	1	124.66	0.725
12	0	1	1	138.89	0.785
13	0	0	0	135.74	0.780
14	0	0	0	134.57	0.778

方差分析结果如表 4、5 所示。

表 4　沉陷量方差分析

Tab. 4　Variance analysis of subsidence

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 568.00	9	174.22	367.55	<0.000 1 **
x_1	1 073.00	1	1 073.00	2 263.69	<0.000 1 **
x_2	396.92	1	396.92	837.36	<0.000 1 **
x_3	0.911 2	1	0.911 2	1.92	0.237 9
x_1x_2	47.27	1	47.27	99.72	0.000 6 **
x_1x_3	1.51	1	1.51	3.19	0.148 5
x_2x_3	0.409 6	1	0.409 6	0.864 1	0.405 2
x_1^2	3.16	1	3.16	6.67	0.061 2
x_2^2	38.45	1	38.45	81.11	0.000 8 **
x_3^2	0.276 1	1	0.276 1	0.582 5	0.487 9
残差	1.90	4	0.474 0		
失拟	1.21	3	0.403 9	0.590 0	0.716 1
误差	0.684 5	1	0.684 5		
总和	1 569.90	13			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$），下同。

表 5　牵引系数方差分析

Tab. 5　Variance analysis of traction coefficient

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.018 0	9	0.002 0	50.61	0.000 9 **
x_1	0.007 7	1	0.007 7	194.02	0.000 2 **
x_2	0.005 6	1	0.005 6	141.78	0.000 3 **
x_3	0.001 6	1	0.001 6	41.00	0.003 1 **
x_1x_2	0.000 4	1	0.000 4	10.09	0.033 6 *
x_1x_3	0.000 1	1	0.000 1	2.52	0.187 3
x_2x_3	0	1	0	1.24	0.328 5
x_1^2	0.000 7	1	0.000 7	18.17	0.013 0 *
x_2^2	0.002 2	1	0.002 2	56.71	0.001 7 **
x_3^2	0.000 2	1	0.000 2	5.83	0.073 1
残差	0.000 2	4	0		
失拟	0.000 2	3	0.000 1	26.08	0.142 7
误差	0	1	0		
总和	0.018 2	13			

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P<0.05$）。

由表 4、5 可知，沉陷量 y_1 和牵引系数 y_2 的二阶响应面模型显著（$P<0.05$）且失拟项不显著（$P>0.05$），表明回归模型拟合精度较高。回归模型的决定系数 R^2 分别为 0.998 8 和 0.991 3，均接近 1，变异系数分别为 0.005 154 和 0.008 388，均小于 0.1，说明回归模型具有较高的可信性和精确性，可用于后续链履结构参数的优化分析。

各目标函数的回归方程为

$$y_1 = 135.16 - 11.58x_1 + 7.04x_2 + 0.337\,5x_3 - 3.44x_1x_2 + 0.615x_1x_3 + 0.32x_2x_3 + 0.993\,8x_1^2 - 3.47x_2^2 - 0.293\,8x_3^2 \quad (12)$$

$$y_2 = 0.779 - 0.031x_1 - 0.026\,5x_2 + 0.014\,3x_3 - 0.01x_1x_2 - 0.005x_1x_3 + 0.003\,5x_2x_3 - 0.015x_1^2 - 0.026\,5x_2^2 - 0.008\,5x_3^2 \quad (13)$$

为了探究各因素对沉陷量和牵引系数的影响，忽略不显著的交互影响因素，绘制因素交互作用的响应面图。图 15 为履带板节距为 200 mm 时，履带板宽度和履带板高度对沉陷量与牵引系数交互作用响应曲面。由图 15a 可知，履带板宽度一定时，随着履带板高度的增加，沉陷量随之增大；履带板高度一定时，随着履带板宽度的增加，沉陷量随之减小。由图 15b 可知履带板宽度一定时，随着履带板高度的增加，牵引系数呈先增大后减小的趋势；履带板高度一定时，随着履带板宽度的增加，牵引系数呈先增大后减小的趋势。该规律符合单因素试验获得的相关结论。

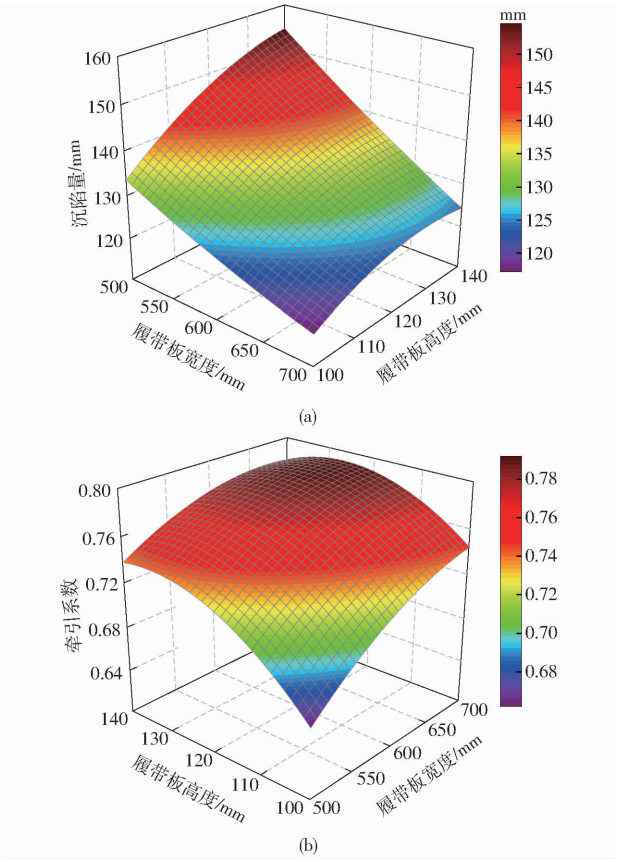

图 15 试验因素交互作用响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of experimental factors interaction

3.6 参数优化

根据目标函数的响应面模型，考虑贝类的生存深度，应在满足牵引能力的前提下，尽可能地降低沉陷量，以免对滩涂环境以及贝类造成损伤。结合各试验因素边界条件，对建立的二次回归模型进行多因素优化求解，目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \max y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

运用 Design-Expert 优化模块求解得性能最优参数的参数组合：履带板宽度为 700 mm、履带板高度为 118 mm、履带板节距为 203 mm，此时沉陷量为 124.31 mm、牵引系数为 0.79。

3.7 整机仿真试验

3.4 ~ 3.6 节在部件级层面上，基于三节链履模型，以最小沉陷量和最大牵引系数为目标进行了结构参数优化，获取了链履结构的最优参数组合。然而，行走装置在实际稀软底质上的通过性能，不仅取决于局部结构的极限承载与附着潜能，更取决于整机动态载荷分布及行进间的综合推阻平衡。如前所述，滑转率是衡量行走装置在稀软底质上通过性的综合指标。因此，在整机耦合仿真验证环节，选取滑转率这一宏观系统级指标进行评价，旨在验证优化结果在整机动态工况下的有效性。

通过 Solidworks 建立其简化几何模型，以 x_t 格式导入 RecurDyn 软件，添加约束、接触等属性建立多体动力学模型。利用 RecurDyn 内置耦合接口将行走装置各部件以 wall 文件导入 EDEM 建立的离散元模型[24]。仿真模型如图 16 所示。

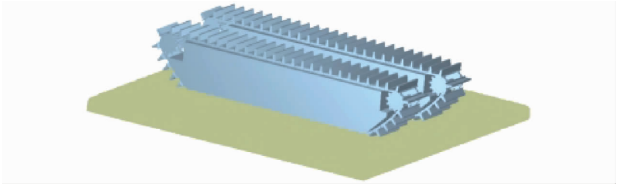

图 16 行走装置与滩涂耦合仿真模型

Fig. 16 Walking device and beach coupling simulation model

仿真模拟行走装置在空载及负载 1 000 kg 状态下直线行驶速度为 3 km/h 的通过性能，驱动链轮的角速度由 STEP 函数定义：STEP(time, 1, 0, 2, 4.62)。即先让行走底盘放置于滩涂土壤正上方，自由下落至沉陷停止后再进行运动，运动开始时间为 1 s，加速至 2 s 后进行匀速运动，运动 12 s 后停止仿真。运算时间步长设置为 30%，每隔 0.1 s 保存一个时间步长，行驶速度变化曲线如图 17 所示。

由图 17 可知，在 0 ~ 1 s，装置处于自由下落状态，沉陷滩涂过程中，质心速度变化有轻微波动，基本保持为 0。在 1 ~ 2 s，装置加速至最大速度。在 2 ~ 12 s，装置以最大速度直线行驶，由于采用链条铰接相连并具有固定节距，链履结构在链轮上的卷入和脱出呈现为多边形运动过程。这导致履带板在

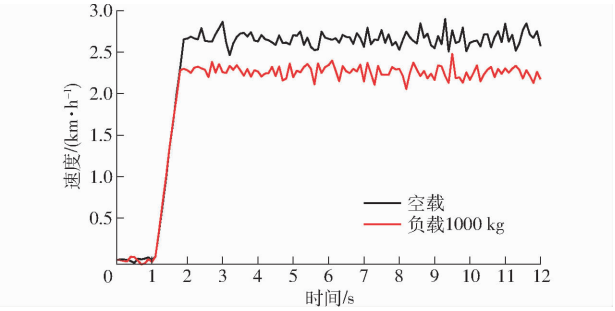

图 17　行走装置行驶速度变化曲线

Fig. 17　Travel speed change curves of walking device

水平方向上的运动速度不均匀，链轮轮缘表面因啮合产生冲击，使得整个装置的运动呈现出周期性振动与非匀速的特性。经计算，装置在空载和负载的平均行驶速度分别为 2.66 km/h 和 2.26 km/h。通过公式(10)计算可得，行走装置在空载和负载状态下的滑转率分别为 11.33% 和 24.67%，滑转率随负载的增加呈上升趋势。整机仿真表明，装置在滩涂中有良好的行驶性能。

4　装置滩涂行驶性能试验

为进一步验证链履式行走装置的滩涂运载效果，与台州合祥机械有限公司合作研制了样机设备，如图 18 所示。于 2026 年 1 月 24 日在宁波宁海海洋生物种业研究院的养殖滩涂场地，开展了滩涂行驶性能试验。



图 18　链履式滩涂行走装置

Fig. 18　Chain-tracked tidal flat traveling device

4.1　直线行驶试验

针对直线行驶工况，选取相对平整的滩涂区域对装置进行直线行驶速度测试，如图 19 所示。



图 19　直线行驶轨迹

Fig. 19　Straight driving test

速度测试试验中，装置以速度 3 km/h 行驶，行驶总距离为 20 m，记录行驶时间。由于每次试验的滩涂区域含水率有一定误差，试验 3 组数据，最后计算装置的平均速度[25]，结果如表 6 所示。

表 6　行驶速度试验结果

Tab. 6　Driving speed test results

序号	行驶距离/m	行驶时间/s	平均行驶速度/(km·h⁻¹)	滑转率/%
1	20	35.84		
2	20	33.78	2.03	32.33
3	20	36.78		

由表 6 可知，装置在滩涂中行驶存在滑转，在 3 次试验中直线行驶的实际平均速度为 2.03 km/h，通过公式(10)计算其滑转率，得到平均滑转率为 32.33%。

直线行驶过程中由于操控问题会存在两侧马达启动误差以及滩涂土壤稀软，装置产生左右偏移。以皮尺拉直线，测量 3 次单侧履带直线行驶的侧向偏移距离，如表 7 所示，其行驶偏移率平均约为 3.74%，满足行走装置设计标准。

表 7　直线偏移试验结果

Tab. 7　Linear offset test results

序号	偏移量/m	平均偏移量/m	偏移率/%
1	0.848		
2	0.672	0.748	3.74
3	0.724		

4.2　转向性能试验

为验证行走装置的转向性能，开展最小转弯半径试验，试验场景如图 20 所示。



图 20　转弯性能试验

Fig. 20　Turning performance test

整机挂低速挡在滩涂上进行转向试验，通过操作方向盘驱动转向齿轮泵。左转时，右侧链轮动力正方向输入，左侧链轮动力反方向输入；右转时，左侧链轮动力正方向输入，右侧链轮动力反方向输入。转向 90°后测量行驶轨迹，结果如表 8 所示。

当装置尝试进行小半径转向时，内侧履带需克服极大的剪切与挤压阻力，而外侧履带则因线速度过高而发生显著滑转。这种不协调的运动状态导致接地比压在局部区域急剧增大，破坏了滩涂表层土壤脆弱的承载力平衡，从而引发急剧的局部下陷。

表 8 转弯测试结果

Tab. 8 Original pivot turn test results m

转向	序号	半径	平均值
左转	1	8.54	7.58
	2	7.36	
	3	6.84	
右转	1	9.32	8.62
	2	7.95	
	3	8.59	

进一步增加了履带的滑转率与行驶阻力,最终完全丧失行驶能力。因此在保证可以正常转向的前提下,尽量减小转弯半径,由表 8 试验数据可知,测量的最小平均转向半径为 7.58 m。可满足滩涂贝类机械化养殖作业需求。

4.3 试验结果分析

对比滩涂试验与仿真试验,行走装置在负载 1 000 kg 状态下,直线行驶滑转率绝对误差为 7.66 个百分点。分析原因是仿真土壤是分布均匀、表面平整的理想环境,但实际试验时,滩涂土壤分布并不均匀,表面平整度也存在一定差异,并且滩涂土壤存在分层,使仿真与实际试验中的土壤物理性质存在一定差异。并且为提高仿真计算效率,对土壤颗粒进行了放大,最终导致仿真结果与试验结果之间出现偏差。但偏差小于 10%,仿真结果与实际试验结果基本符合,证明利用仿真试验所得结果对链履结构的优化设计以及模型试验具有一定参考价值。

虽然在滩涂试验中受限于客观测量手段,难以实时精确获取履带的瞬时沉陷量与净牵引力,但根据前述地面力学原理,滑转率是整机行驶阻力与有效推进力之间动态平衡的直观体现。本文通过前期优化链履结构核心参数,一方面有效降低了沉陷深度,从而大幅削减了推土与压实阻力,另一方面显著提升了履带对土壤的剪切推力。正是如此,使得行走装置在负载 1 000 kg 的严苛稀软滩涂工况下,仍能将滑转率控制在 32.33% 的合理范围内,有效避免了滩涂作业中常见的原位深陷和履带空转现象。因此,滑转率指标间接且有力地印证了沉陷量与牵引力双目标优化的有效性。

5 结论

(1)针对滩涂贝类养殖区域地质松软、承载力低,行走机械易发生沉陷与滑转等问题,本文设计了一种适用于淤泥质滩涂的链履式行走装置。

(2)采用 EDEM 构建黏塑性滩涂土壤离散元模型,开展履带板推土仿真分析,研究链履结构参数在滩涂稀软底质中对牵引性能的影响。结果表明沉陷量与牵引系数受履带板宽度、履带板高度、履带板节距影响较大,通过回归模型优化得出链履结构的最优参数组合:履带板宽度为 700 mm,履带板高度为 118 mm,履带板节距为 203 mm。

(3)通过整机耦合仿真,对优化后的参数进行分析,得到行走装置在空载及负载 1 000 kg 状态下,滩涂直线行驶滑转率分别为 11.33%、24.67%。研制样机进行滩涂试验,得到行走装置在负载 1 000 kg 状态下滩涂直线行驶的滑转率为 32.33%,行驶偏移率约为 3.74%,最小转弯半径为 7.58 m。具有良好的滩涂平地行驶性能,满足设计需求。对比仿真试验,行走装置在负载状态下,直线行驶滑转率绝对误差为 7.66 个百分点,证明仿真所得结果能为行走装置性能预测分析提供参考。

参 考 文 献

[1] 2022 年全国渔业经济统计公报[J]. 中国水产, 2023(8): 7 - 8.

[2] 林志华, 何琳, 董迎辉. 浙江滩涂贝类种业科技创新发展及展望[J]. 水产学报, 2023, 47(1): 109 - 124.
Lin Zhihua, He Lin, Dong Yinghui. Development and prospect for scientific and technological innovation of mudflat mollusk breeding industry in Zhejiang[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(1): 109 - 124. (in Chinese)

[3] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.

[4] 陆建, 周宇, 申诚, 等. 自走式滩涂贝类采捕机研究设计与试验[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 85 - 90.
Lu Jian, Zhou Yu, Shen Cheng, et al. Design and experiment of self-propelled shellfish harvester[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(5): 85 - 90. (in Chinese)

[5] 范庆仁. 滩涂行走车辆的结构设计与性能分析[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2024.
Fan Qingren. Structure design and performance analysis of the vehicles walking in tidal flats[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2024. (in Chinese)

[6] Fiona M, Philip C, Philip B, et al. Impacts of electrofishing for razor clams (*Ensis spp.*) on bent-hic fauna[J]. Fisheries Research, 2016, 174: 40 - 46.

[7] 母刚, 段富海, 杨津宇, 等. 埋栖贝类采捕机研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2020,35(1): 19 - 30.
Mu Gang, Duan Fuhai, Yang Jinyu, et al. Research progress on burying shellfish harvesters: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(1): 19 - 30. (in Chinese)

[8] 梁喜凤, 陆鑫煜, 郑立文, 等. 螺旋推进式滩涂贝类采捕设备行走装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(24): 11 - 19.

Liang Xifeng, Lu Xinyu, Zheng Liwen, et al. Development of the walking system for spiral-propelled tidal flat shellfish harvesting device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(24): 11 - 19. (in Chinese)

[9] 江敏, 刘伟, 陈秉正, 等. 深海采矿车四履带全驱行驶机构及其工作性能试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(10): 33 - 42.
Jiang Min, Liu Wei, Chen Bingzheng, et al. Test study on four-track all-wheel drive travel mechanism and working performance of deep-sea mining vehicle[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(10): 33 - 42. (in Chinese)

[10] 胡琼, 欧雨佳, 郑美玲, 等. 深海集矿车履齿扰动下的沉积物流动特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2026,47(6): 1 - 9.
Hu Qiong, Ou Yujia, Zheng Meiling, et al. Research on sediment flow characteristics under grouser disturbance of deep-sea mining vehicle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2026,47(6): 1 - 9. (in Chinese)

[11] 饶秋华, 刘泽霖, 许锋, 等. 深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2795 - 2816.
Rao Qiuhua, Liu Zelin, Xu Feng, et al. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2795 - 2816. (in Chinese)

[12] 韩亚男. 液压挖掘机的两栖化研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
Han Yanan. Amphibious design of the medium-sized hydraulic excavators[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)

[13] 李新源. LF1352 森林运载车雪地行走能力及履带板设计研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Li Xinyuan. Research on snow walking ability and track shoe design of LF1352 forest carrier vehicle[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. (in Chinese)

[14] Rubinstein D, Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2004, 41(2): 163 - 173.

[15] 刘磊, 刘钦, 谭林, 等. 深海集矿车履带-土体相互作用研究[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(5): 983 - 993.
Liu Lei, Liu Qin, Tan Lin, et al. Study on interaction between track and soil of deep-sea ore collecting vehicle[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(5): 983 - 993. (in Chinese)

[16] 许焰, 吴鸿云, 左立标. 履齿高度对集矿机牵引性能的影响及参数确定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 68 - 74.
Xu Yan, Wu Hongyun, Zuo Libiao. Influence of shoe tooth height of tracked vehicle on traction performance and its parameter determination[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 68 - 74. (in Chinese)

[17] 樊慧文, 王永芳. ZCF - 04 浮箱履带沼泽车的开发与试验[J]. 物探装备, 2013, 23(2): 87 - 90.
Fan Huiwen, Wang Yongfang. Development and testing of the ZCF - 04 floating-box crawler marsh vehicle[J]. Geophysical Exploration Equipment, 2013, 23(2): 87 - 90. (in Chinese)

[18] 李连祥, 王兴政. 考虑基坑支护结构变形模式的土压力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1024 - 1033.
Li Lianxiang. Wang Xingzheng. Research on earth pressure considering deformation pattern of foundation pit supporting structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(4): 1024 - 1033. (in Chinese)

[19] 李军, 别尔德别克·吾赞, 金嗣淳, 等. 间隔式履带与土壤相互作用模型的建立与试验验证[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(2): 42 - 48.
Li Jun, BIE-erdebierke · Wu-zan, Jin Sichun, et al. Establishment of interval type track-terrain interaction model and experimental validation[J]. Department of Mechanical Engineering, 2016, 30(2): 42 - 48. (in Chinese)

[20] 姚嘉楠, 王艳萍, 袁辉, 等. 考虑任意荷载作用的刚性挡土墙非极限被动土压力理论研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(3): 1197 - 1205.
Yao Jianan, Wang Yanping, Yuan Hui, et al. Theoretical study on non-ultimate passive earth pressure of rigid retaining walls considering arbitrary loads[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1197 - 1205. (in Chinese)

[21] 姬长英, 潘君拯. 湿软土壤剪切应力-剪切速度-时间关系及其应用(第 3 报):湿软土壤上履带板的推力计算[J]. 农业工程学报, 1994,10(4): 32 - 36.
Ji Changying, Pan Junzheng. Shear stress-shear rate-time relationship of wet and soft soils and its application (part 3): pull predication for a single track shoe[J]. Transactions of the CSAE, 1994,10(4): 32 - 36. (in Chinese)

[22] 梁喜凤, 胡泽, 郑立文, 等. 滩涂土壤离散元接触模型优化与现场铲削试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 107 - 115.
Liang Xifeng, Hu Ze, Zheng Liwen, et al. Optimization of the discrete element contact model for tidal flat soil and field shoveling experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(8): 107 - 115. (in Chinese)

[23] 韩佃雷, 刘海瑞, 任立志, 等. 湿软地面农用步行轮足壤互作力学模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 461 - 474.
Han Dianlei, Liu Hairui, Ren Lizhi, er al. Mechanical modeling of foot-terrain interactions in agricultural walking wheels on wet and soft terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 461 - 474. (in Chinese)

[24] 吴正敏, 陈乐, 汪义勇, 等. 履带自走式采茶机行走底盘通过性设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 474 - 483.
Wu Zhengmin, Chen Le, Wang Yiyong, et al. Design and experiment on traversibility of traveling chassis of crawler self-propelled tea picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 474 - 483. (in Chinese)

[25] 聂建军, 夏孔涛, 解晓琳, 等. 拱腰式农业机器人移动底盘设计与通过性研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 736 - 745.
Nie Jianjun, Xia Kongtao, Xie Xiaolin, et al. Mobile chassis design and passability of arched waist agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 736 - 745. (in Chinese)