

山地履带式底盘坡地牵引性能预测模型构建与试验

刘 琪^{1,2} 纪宇轩^{1,2} 杨福增^{1,2} 张龙海^{1,2} 杜子星^{1,2} 刘志杰^{1,2} 朱晓岩³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部北方农业装备科学观测实验站, 陕西杨凌 712100;
3. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 潍坊 261000)

摘要: 为准确有效预测丘陵山区复杂作业环境下履带式底盘牵引性能, 本文基于履带式底盘接地压力分布规律建立其牵引性能预测模型并开展试验验证。基于坡度与底盘参数提出了一种多峰非线性分布的接地压力分布数学模型, 在不同坡度与位姿下开展接地压力测试试验, 结果表明其预测平均误差为 4.7%, 模型能够较好地预测履带式底盘在坡地环境下接地压力分布情况; 基于接地压力模型及履带-地面的相互作用规律, 通过考虑土壤特性、坡度及履带式底盘姿态调整重心位置变化等因素, 进一步构建了由均布垂直载荷驱动力特性部分与非均布载荷控制部分共同组成的履带底盘牵引力-滑转率预测模型; 基于 3 类履带底盘开展等高线行驶和纵向爬坡工况牵引性能试验以对预测模型进行验证, 结果表明: 模型预测平均误差为 3.6%、5.4% 和 6.3%, 总体预测误差较小, 可为丘陵山地履带式底盘适用性设计与机动性能优化提供理论依据和数据支撑。

关键词: 丘陵山地; 履带式底盘; 接地压力; 牵引性能; 模型预测

中图分类号: S219.2; S220.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0597-11 OSID: 

Development and Validation of Traction Performance for Mountain Tracked Chassis on Slopes

LIU Qi^{1,2} JI Yuxuan^{1,2} YANG Fuzeng^{1,2} ZHANG Longhai^{1,2} DU Zixing^{1,2} LIU Zhijie^{1,2} ZHU Xiaoyan³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Scientific Observing and Experimental Station of Agricultural Equipment for the Northern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract: In order to accurately and effectively predict the traction performance of tracked undercarriages under the complex operating environment in hilly and mountainous areas, a prediction model for the traction performance of tracked undercarriages was established and experimentally verified based on the law of grounding pressure distribution. Firstly, a mathematical model of ground pressure distribution with multi-peak non-linear distribution was proposed by considering the slope angle and chassis parameters, and the ground pressure test was carried out at different slopes and postures, and the results showed that the average error of its prediction was about 4.7%, the model can better predict the distribution of grounding pressure of crawler chassis in slope environment. Secondly, based on the grounding pressure model and the track - ground interaction law, by considering the soil characteristics, slope and the change of the position of the center of gravity for the attitude adjustment of the crawler chassis, the traction-slip rate prediction model of the crawler chassis composed of the driving force characteristics of the evenly distributed vertical load and the non-uniform load control part was further constructed. Finally, the traction performance tests of contour driving and longitudinal climbing conditions were carried out based on the three types of crawler chassis to verify the prediction model, and the results showed that the average prediction error of the model was 3.6%, 5.4% and 6.3%, respectively, and the overall prediction error was small, which could provide theoretical basis and data support for the design and

收稿日期: 2024-03-03 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001300、2023YFD1000800)和国家农业重大项目(NK20221603)

作者简介: 刘琪(1998—), 男, 硕士生, 主要从事丘陵山地智能农机系统-坡地土壤互作机理研究, E-mail: liuqi@nwfupu.edu.cn

通信作者: 刘志杰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事丘陵山地智能农机装备和智能控制技术研究, E-mail: liuzhijie@nwfupu.edu.cn

development of the applicability of the tracked chassis in hilly and mountainous areas and the optimization of maneuverability.

Key words: hilly mountainous terrain; tracked chassis; ground pressure; traction performance; model prediction

0 引言

丘陵山区是中国粮食和特色农产品的重要生产基地,区域面积约占全国总面积的 70%,但农作物耕种收综合机械化率不及 50%,与全国综合机械化水平 72% 有较大差距^[1-2],其耕地类型分为缓坡地(坡度 10° 以下)和陡坡地(坡度 10° ~ 15°)^[3]。横向纵向坡度连续变化、地形高低起伏、地面崎岖不平等地形条件是制约农业机械化水平提高的难点与瓶颈^[4-6]。近年来,履带式底盘以其良好的稳定性和通过性能被广泛应用于丘陵山区农业生产中,其坡面作业方式以横向坡等高线作业为主,纵向爬坡及坡道转向转场工况较多^[3],坡地角导致其行驶机动性能差^[7],其中履带式底盘牵引性能是影响整车机动性能的关键因素,而其接地压力分布是研究牵引性能的基础^[8]。

目前,国内外学者建立了诸多模型预测履带式底盘接地压力分布规律^[9-12],这类模型结构复杂、实用性不强,对以此为基础的牵引性能分析具有一定局限性;有学者^[13-16]以简单函数形式以假设接地压力分布,这类方法结构简单、实用性强,但其结果与实际情况差别较大;赵子涵等^[17]在接地压力分布试验基础上研究履带式底盘地面接地压力分布模型^[18-19]。此外,现有接地压力分布模型缺乏考虑坡地角与作业工况等因素的影响。

履带式底盘牵引性能预测方法一直是国外农业动力装备领域研究热点^[20-22],SAHAY 等^[23]提出了一种预测拖拉机单点牵引性能的算法,用于最大载重和爬坡能力预测。PENTOSÍ 等^[24]提出通过输入载荷和土壤参数用于预测拖拉机牵引性能的人工神经网络。赵静慧等^[20]考虑牵引作业过程中的土壤条件等因素,提出四轮驱动拖拉机田间牵引性能预测模型与求解算法。目前,以丘陵山地复杂作业环境为研究因素的履带式底盘牵引性能研究鲜有报道,亟需相关理论和试验数据为其预测方法研究及模型开发提供依据。

为准确有效预测丘陵山区复杂作业环境下履带式底盘牵引性能,根据不同坡度及工况,本文建立一种简单有效的接地压力数学模型并开展试验验证,以此为基础进一步地考虑土壤特性与履带式底盘姿态调整重心位置变化等因素,构建牵引性能预测模

型,通过等高线行驶与爬坡工况实车牵引试验对模型进行验证,研究模型对复杂环境下牵引性能的适用性,以期为丘陵山地履带底盘性能分析和结构优化设计提供参考。

1 履带式底盘接地压力模型构建

1.1 接地压力数学模型

山地履带式底盘两侧履带承载随坡度角和位置的变化而改变,建立接地压力数学模型需要明确两侧履带上接地压力合力与作用位置,因此首先分析两侧履带在坡度角作用下的受力情况,如图 1 所示。

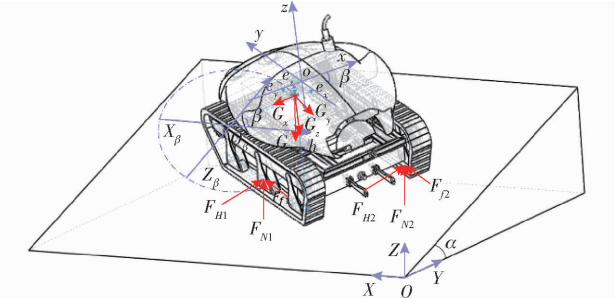


图 1 履带底盘坡面受力分析
Fig. 1 Tracked chassis slope force analysis

在坡地上建立定坐标系 $OXYZ$;以底盘几何中心为原点 o ,车体横向中心线为 x 轴,纵向中心线为 y 轴,垂直于 xoy 为 z 轴建立坐标系 $oxyz$;规定上坡方向为初始相位,即相位角 β 为 0° ^[25],范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$,建立相位角坐标系 $O_\beta X_\beta Y_\beta$;由空间力系平衡方程可得

$$\begin{cases} F_{H1} + F_{H2} = G_x \\ F_{J1} + F_{J2} = G_y \\ F_{N1} + F_{N2} = G_z \\ F_{J1}H - F_{N1}e + F_{J2}H - F_{N2}e - G_y e_z + G_z e_y = 0 \\ F_{H1}H - F_{N1}\frac{B}{2} + F_{H2}H + F_{N2}\frac{B}{2} + G_z e_x - G_x e_z = 0 \\ F_{H1}e_y - F_{J1}\frac{B}{2} + F_{H2}e_y + F_{J2}\frac{B}{2} - G_x e_y + G_y e_x = 0 \end{cases} \quad (1)$$
$$\begin{cases} G_z = G\cos\alpha \\ G_x = G\sin\alpha\sin\beta \\ G_y = G\sin\alpha\cos\beta \end{cases} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得

$$\begin{cases} e = h \tan \alpha \cos \beta + e_y \\ F_{Ni} = G \cos \alpha \left(\frac{1}{2} \mp \frac{h \tan \alpha \sin \beta + e_x}{B} \right) \\ ((+) i = 1, (-) i = 2) \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_{H1} 、 F_{H2} ——内、外侧履带侧向滑动摩擦力
 F_{f1} 、 F_{f2} ——内、外侧履带行驶阻力
 F_{N1} 、 F_{N2} ——内、外侧履带支撑力
 G_x 、 G_y 、 G_z ——重力分力
 e_x 、 e_y 、 e_z ——重心到几何中心距离
 H ——几何重心离地间隙
 B ——轨距 α ——坡度
 G ——底盘重力
 e ——支撑力作用点相对于横向中心的偏移量

当履带式底盘行驶于耕作地面即可变形的软地面时,包络承重轮履带直接与土壤接触,将整车重量传递到下方土壤产生接地压力。履带产生变形并有明显的周期波形,其在履带长度方向上的周期数与承重轮数相等,在承重轮正下方产生波峰,在承重轮之间产生波谷^[12,26]。平地工况时接地压力分布规律可由谐波振荡函数描述为^[17]

$$p_j(x) = (p_{\max} - p_{\min}) \cos^2 \left(\frac{N\pi x}{l} - \frac{\pi}{2} \right) + p_{\min} \quad (4)$$

式中 N ——支重轮数量
 l ——接地长度
 $p_{\max}$ ——承重轮正下方波峰值
 $p_{\min}$ ——承重轮之间波谷值

使用二次余弦函数对承重轮下方的接地压力波形进行描述,如图2所示, l_z 为承重轮轴距一半。与接地压力解析曲线波形^[12]相比,二次余弦函数较三角形分段函数、二次函数更接近于解析曲线波形,其积分简单且积分结果为常数。

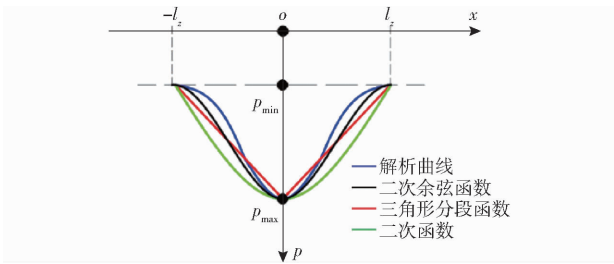


图2 接地压力分布模型对比

Fig.2 Comparison of model for fitting ground pressure

式(4)表示每个承重轮与承重轮之间接地压力呈周期性函数,而在坡面任意位置时,由力学分析可知两侧履带下方支撑力发生变化,由于坡度 α 及重心偏移量使接地压力分布不再呈周期性,呈现具有一定变化规律的波峰与波谷。

为描述接地压力的上述特点,考虑坡地角、相位角及重心位置的影响,建立其数学模型

$$p(x) = qf(x)p_j(x) \quad (5)$$

式中 $p(x)$ ——剪切面所受正应力,kPa

其中
$$q = \frac{2F_{Ni}}{G} = \cos \alpha \left(1 \mp \frac{2h \tan \alpha \sin \beta + e_x}{B} \right) \quad ((+) i = 1, (-) i = 2) \quad (6)$$

式中 q ——坡地比例系数,单侧履带的接地压力合力与平地承载质量比值^[26]

$f(x)$ ——波峰波谷控制函数方程^[17]

接地压力方程是沿履带长度方向的分布载荷,根据分布载荷合力简化与合力矩定理,联立式(3)~(5)可得

$$\begin{cases} \int_0^l p(x) dx = \frac{F_{Ni}}{B} \\ \int_0^l xp(x) dx = \frac{eF_{Ni}}{B} \end{cases} \quad (7)$$

针对不同履带型式可使用的方程 $f(x)$ 有多种型式,针对橡胶式全履带选用指数函数作为波峰波谷控制函数方程,即

$$f(x) = a^{x+d} \quad (8)$$

式中 a ——函数增长趋势控制参数
 d ——峰谷梯度区域控制参数

联立方程(3)、(5)、(7)、(8),利用 Matlab 求解 a 、 d 。山地接地压力预测模型曲线与平地接地压力模型对比如图3所示。

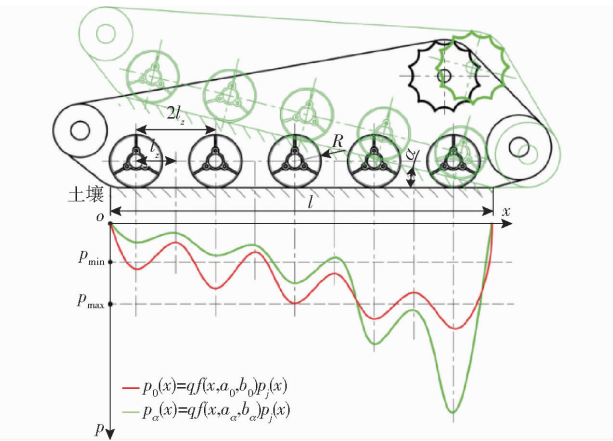


图3 坡地接地压力预测模型

Fig.3 Predictive modeling of ground pressure on slopes

1.2 试验条件与方法

通过压力传感器测试在等高线(图4a)、爬坡(图4b)、下坡(图4c)3种工况时两侧履带接地压力分布情况^[7]。

试验地点为西北农林科技大学机电学院丘陵山地“土壤-机器-作物”综合实验平台(图5a),该实验平台在坡度 $0^\circ \sim 25^\circ$ 连续可调(图5b),结构尺寸为 $20\text{ m} \times 8\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。

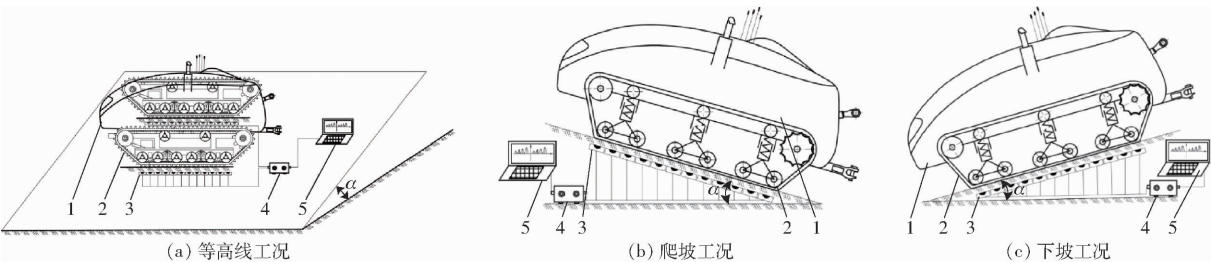


图 4 丘陵山地接地压力测试方案

Fig. 4 Typical slope ground pressure test program

1. 测试车 2. 履带 3. 压力盒 4. 数据采集器 5. 计算机



图 5 丘陵山地“土壤-机器-作物”综合实验平台

Fig. 5 Integrated experimental platforms “soil – machine – crop” in hilly and mountainous areas

试验车为湖南农夫机电有限公司生产的 NF – 602 型山地履带拖拉机,如图 6 所示。

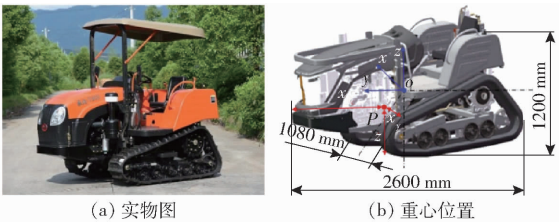


图 6 NF – Y602 型山地履带拖拉机

Fig. 6 NF – Y602 mountain crawler tractor

沿接地长度方向上布置有 2 行 5 列负重轮,履带为无芯金式橡胶履带,采用全地形一字花纹,参数见表 1。

表 1 NF – Y602 型履带拖拉机参数

Tab. 1 Parameters of NF – Y602 crawler tractor

参数	数值
外廓尺寸/(mm × mm × mm)	3 400 × 1 430 × 2 180
履带接地长度/mm	1 200
轨距/mm	1 080
单侧履带方承重轮数	2 × 5
承重轮半径/mm	80
承重轮中心距/mm	24
最小离地间隙/mm	410
最小使用质量/kg	1 920
发动机功率/kW	44. 1
履带板宽度/mm	300

试验应用的压力传感器为 TGH 型振弦式土压力盒,传感器采集数据频率为 25 次/s,通过数据传输线与 DQ – 8 数据接收站连接,通过 WM – 201E 型

数据转换装置将数据导入计算机。以履带与土壤接触面中垂线为基准,通过在土壤中打孔埋设的方法将土压力盒布置到土壤表层位置处,土压力盒之间相切排布,根据试验车接地长度共布置 12 个土压力盒,如图 7 所示;完成埋设后,打开传感器数据传输系统,车辆均匀低速直线驶入待测区域直至履带完全覆盖土压力盒,待传感器传输数据稳定时,即完成 1 次接地压力分布测试。其他坡地工况需要首先调整平台角度再进行上述测试步骤,为避免土壤受到重复施载的影响,每次测量后需将待测区域重新平整,每种条件下试验 3 次取均值,如图 7 所示。

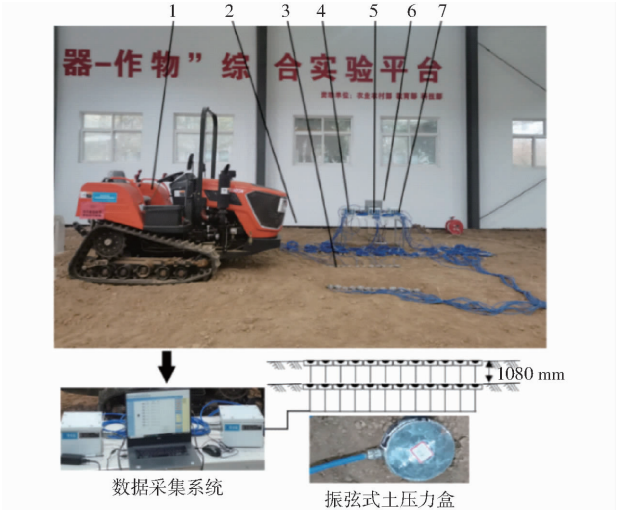


图 7 土压力盒埋设方案

Fig. 7 Earth pressure box burial program

1. 试验机 2. 土槽 3. 压力盒 4. 数据采集器 I 5. 数据采集器 II 6. 便携式计算机 7. 数据采集器 III

1. 3 测试结果分析

图 8 为在等高线、爬坡、下坡 3 种工况下沿履带长度方向上的接地压力分布,其呈多峰值非均匀分布且集中于承重轮下方,坡度越大则各峰值分布越不均匀。

由图 8a、8b 可知,在等高线行驶工况下,坡面高低侧履带接地压力差异随坡度增大而增大,单侧履带受坡度影响较大,0°时高低侧履带平均接地压力为 56. 06、53. 84 kPa,15°时为 29. 08、80. 96 kPa,但其

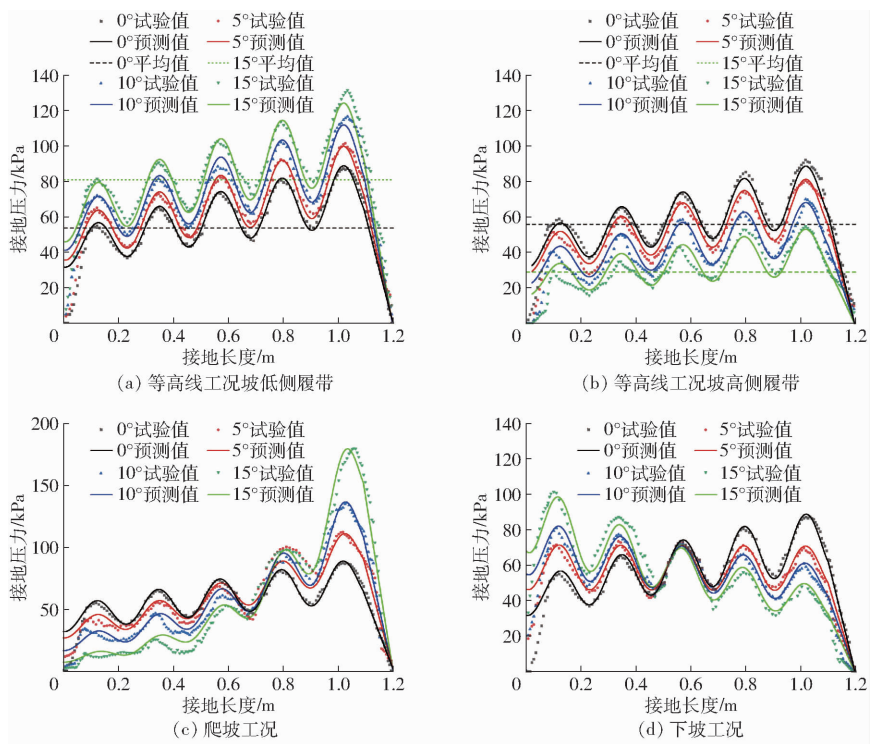


图 8 接地压力试验与预测结果

Fig. 8 Ground pressure test and prediction results

接地压力峰值、谷值变化趋势相同,主要因为重心仅在横向平面变化,两侧履带的承载受坡度的影响而重新分配,支撑力即为接地压力合力不同,但作用位置不变。由图 8c 可知,随着坡度增大,履带接地区段后端出现压力集中现象,将导致底盘爬坡行驶阻力增大、牵引附着性变差。由图 8d 可知,坡度越大,接地区段前端接地压力越集中,将影响履带式底盘下坡稳定性,主要因为接地压力集中现象易破坏土壤结构,降低土壤承载能力。

将底盘参数和测试工况代入式(5),应用 Matlab 软件进行计算,可得 NF-Y602 型山地履带拖拉机接地压力预测模型,预测误差见表 2。

表 2 接地压力模型预测误差

Tab. 2 Prediction error of ground pressure model				
坡度/ (°)	等高线工况		纵向工况	
	坡低侧	坡高侧	上坡	下坡
0	3.6	3.6	3.6	3.6
5	3.5	3.9	4.5	4.2
10	4.6	4.8	5.1	5.1
15	5.4	5.7	6.3	5.8

各坡度下接地压力模型预测结果与试验结果最大误差为 6.3%,平均误差约为 4.7%,坡度越小预测精度越高,故该模型能够较好地预测履带式底盘在坡地环境下接地压力分布情况,在一定误差范围内适用于其牵引性能及爬坡能力理论分析。

2 牵引性能预测模型构建

当履带底盘行驶时,履带转动而被地面阻止其运动时产生的反作用力,称为地面驱动力。驱动力是在履带作用下土体发生剪切变形时产生的剪切力所形成的,其中一部分消耗在克服行驶阻力,其余部分则称为牵引力,用于加速、爬坡及牵引负荷作业^[26-27] 计算式为

$$F_H = F_d + R \tag{9}$$

其中
$$F_H = 2b \int_0^L \tau(x) dx \tag{10}$$

式中 F_H ——地面驱动力
 F_d ——牵引力 R ——行驶阻力
 τ ——土壤剪应力
 x ——土壤剪切变形量

目前应用最为广泛的土壤剪切模型^[28-29] 为

$$\tau(x) = (c + p(x) \tan \varphi) (1 - e^{-ix/K}) \tag{11}$$

式中 c ——土壤内聚力, kPa
 φ ——土壤内摩擦角, (°)
 i ——滑转率
 K ——土壤剪切变形模量, m

对于均匀分布的法向压力,可知驱动力^[26-27] 为

$$F_{DH} = 2b \int_0^l \left(c + \frac{W}{2bl} \tan \varphi \right) (1 - e^{-ix/K}) dx \tag{12}$$

积分可得

$$F_{DH} = (Ac + W \tan \varphi) \left[1 - \frac{K}{il} (1 - e^{-il/K}) \right] \tag{13}$$

式中 F_{DH} ——均布载荷驱动力
 A ——履带接地面积
 W ——底盘垂直载荷
 b ——履带宽度

基于提出的山地履带接地压力分布模型(式(6)),
设 $u(x) = c + p(x) \tan \varphi, v(x) = x + (K/i) e^{-ix/K}$, 由分部
积分原则, 式(10)可写成

$$F_H = 2b \int_0^L u(x) dv(x)$$

(14)

积分为

$$F_H = 2b (cv(x) + \tan \varphi p(x) v(x)) -$$
$$2b \tan \varphi \int v(x) dp(x)$$

(15)

设 $p(x) = \frac{W \cos \alpha}{A} + q(x)$, 式(15)可写为

$$F_H = (Ac + W \cos \alpha \tan \varphi) \left[1 - \frac{K}{il} (1 - e^{-il/K}) \right] +$$
$$[2b \tan \varphi q(x) v(x)] \Big|_0^L - 2b \tan \varphi \int_0^L v(x) dp(x)$$

(16)

化简可得

$$F_H = F_{DH} + 2b \tan \varphi \int_0^L q(x) dv(x)$$

(17)

将接地压力对牵引性能的影响作为变量
 $\Delta F^{[26]}$, 将式(17)写为

$$F_H = F_{DH} + \Delta F$$

(18)

$$\Delta F = 2b \tan \varphi \int_0^L q(x) dv(x)$$

(19)

式中 ΔF ——非均布载荷控制部分驱动力

因此, 牵引性能预测模型可由 F_{DH} (基线) 与 ΔF
(控制线) 共同组成, 其中 F_{DH} 、 ΔF 均为滑转率函数,
如图 9 所示。

3 试验验证

3.1 等高线工况牵引性能试验

针对 3 种山地履带式机型开展等高线牵引试
验, NF-Y602 型山地履带拖拉机 (姿态不可调整,

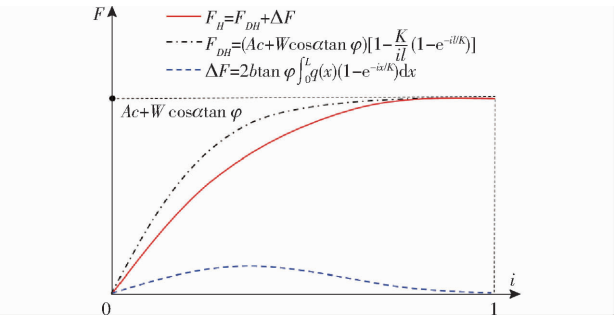


图 9 牵引力-滑转率预测曲线

Fig. 9 Traction - slip rate curves

参数见表 1)、姿态可调式山地履带作业平台 (姿
态调整范围: $0^\circ \sim 25^\circ$; 发动机功率: 13.2 kW; 橡胶
式履带接地长为 1.4 m、宽为 0.23 m)、姿态可
调式遥控履带拖拉机 (姿态调整范围: $0^\circ \sim 20^\circ$;
发动机功率: 22.1 kW; 钢式履带接地长为 1.4 m、
宽为 0.23 m), 以下分别简称为履带车 A、B、C。
试验地点为西北农林科技大学机械与工程学院丘
陵山地“土壤-机器-作物”综合实验平台, 土壤
含水率为 12.4% ~ 14.4%, 容重为 1.24 ~ 1.28
g/cm³; 土壤剪切参数为: 土壤剪切变形模量 K
为 0.05 m、土壤内聚力 c 为 12 kPa、土壤内摩
擦角 φ 为 20° , 试验参照 GB/T 3871.9—2006
《农业拖拉机试验规程 第 9 部分 牵引功率试验》
开展。

图 10 为牵引性能试验原理及主要试验设备,
可通过坡度控制平台调整试验坡度 (图 5b)。被
测变量为牵引力、不同牵引力下的滑转率, 试验
采用 CTM-2002A/B 型汽车拖拉机综合测试仪器、
OES-II 非接触式速度传感器、转速传感器和拉力
传感器。

被试车与负荷车之间通过拉压力传感器和钢
索连接, 由安装在牵引挂钩处的拉力传感器测量
负荷车施加的牵引力; 通过安装在驱动轮上的转
速传感器获得驱动轮转速, 与驱动轮半径可确定
理论行驶速度, 通过非接触式速度传感器获取实
际行驶速度, 行驶过程中滑转率计算式为^[20]

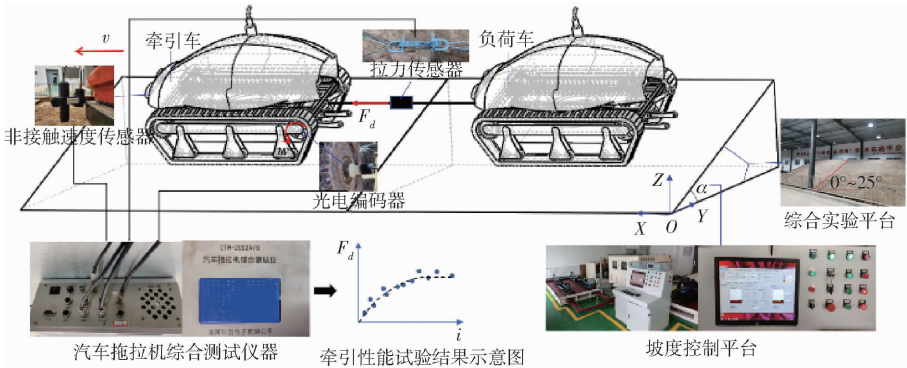


图 10 试验原理与主要试验设备

Fig. 10 Test principle and main test equipment

$$i = \frac{v_i - v}{v_i} \tag{20}$$

式中 v ——行驶速度 v_i ——理论速度

测试行驶阻力时,被试底盘发动机熄火、挂空挡,使传动系主离合器完全分离后,由负荷车拖动被试底盘,由拉力传感器测量得出行驶阻力。汽车拖拉机综合测试仪器将各类传感器的测试结果保存并进行整合处理,得到测试中牵引力-滑转率关系。

实车试验如图 11、12 所示。首先调整平台坡度(0°、10°、20°),当被测车沿着坡面等高线匀速行驶时,逐渐加大负荷车的制动程度,使试验车履带与地面之间产生不同的滑转率,使得试验车发挥不同程度的牵引力;在每组坡度条件下,被测车调整重心位置后再次进行测试。

依照与试验相同的整机参数及土壤环境,在 Matlab 环境中建立该机型牵引性能预测模型,得到预测结果。选择文献[26-27]使用均布接地压力模型牵引性能模型作为对照组,将试验数据、预测及对照结果进行对比,结果如图 13 所示。

图 13a 为 3 种机型等高线工况行驶阻力随坡度的变化曲线。结果表明,随坡度增大,行驶阻力显著增大;姿态调平可降低有效行驶阻力,履带车 B 与 C 在坡度 10°通过姿态调平可降低 16.7% 和

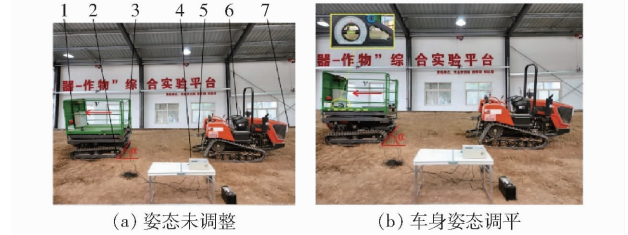


图 11 姿态可调履带平台等高线工况牵引性能试验
Fig. 11 Attitude adjustable tracked picking platform slope contour traction performance test

1. 牵引车 2. 光电编码器 3. 非接触速度传感器 4. 拖拉机综合测试仪 5. 拉力传感器 6. 负荷车 7. 实验平台

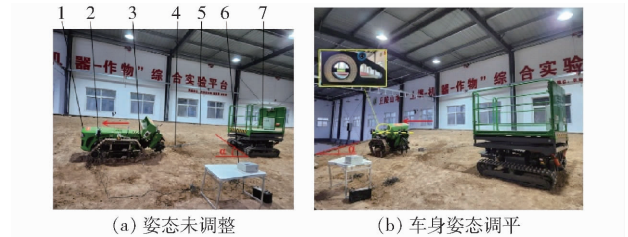


图 12 姿态可调履带拖拉机等高线工况牵引性能试验
Fig. 12 Mountain remote-controlled attitude-adjustable crawler tractor contour traction performance test on slopes

1. 牵引车 2. 非接触速度传感器 3. 光电编码器 4. 拉力传感器 5. 实验平台 6. 拖拉机综合测试仪 7. 负荷车

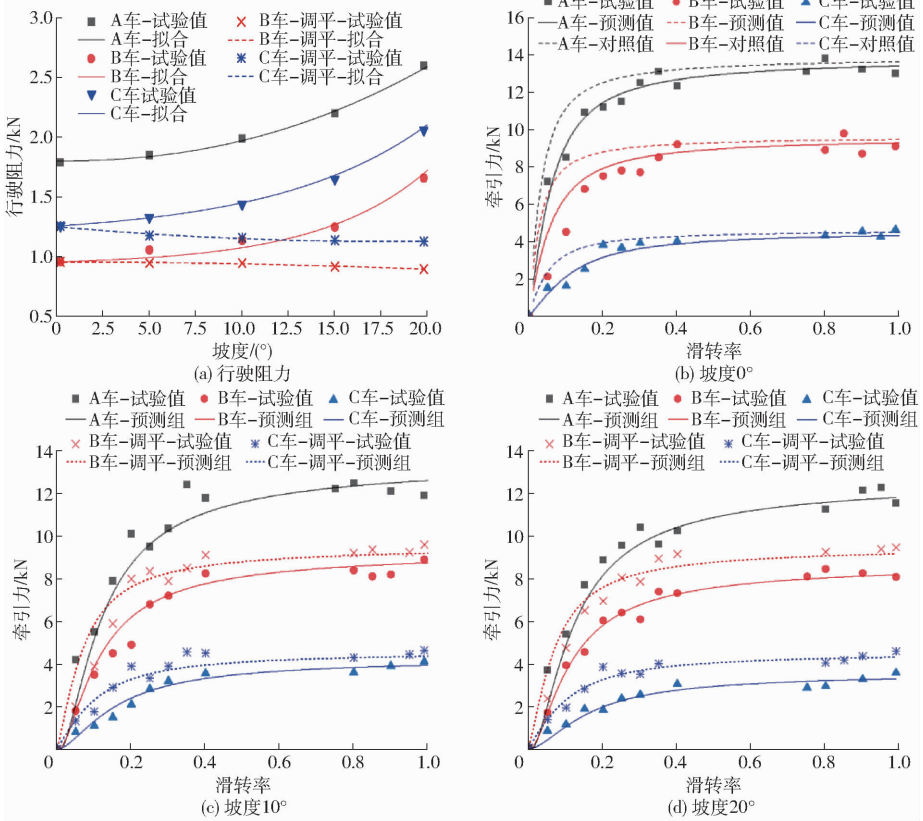


图 13 等高线工况牵引试验结果
Fig. 13 Contour condition traction test results

接地压力过大,进而导致行驶压实阻力和推土阻力过大的现象,使整机行驶阻力降低,因此可知姿态调平可以有效降低履带式底盘坡面等高线行驶阻力。

图 13b 为坡度 0° 时 3 种机型牵引力-滑转率曲线,预测值、试验值及对照值如表 3 所示。

表 3 预测值、对照组与试验值特征指标对比
Tab.3 Comparison of characteristic indicators of simulated, control and test values

机型	项目	容许滑转率($i=0.15$)		全滑转($i=1$)		平均误差/%
		牵引力/ kN	误差/ %	牵引力/ kN	误差/ %	
A	预测值	10.6	2.8	13.4	3.2	3.6
	对照值	12.1	11.8	13.6	8.1	12.7
B	预测值	7.3	7.4	9.28	2.0	5.4
	对照值	8.5	25.0	9.45	3.8	15.4
C	预测值	2.7	8.0	4.47	3.0	6.3
	对照值	3.7	48.0	4.31	6.5	19.0

由表 3 可知,履带车 A、B、C 全滑转($i=1$)时对应的最大牵引力预测值为 13.4、9.28、4.47 kN,容许滑转率($i=0.15$)时对应的牵引力预测值为 10.6、7.3、2.7 kN;最大牵引力和容许滑转率下牵引力试验值分别为 12.9、9.1、4.6 kN 和 10.9、6.8、2.5 kN(图 13b);在本文所提出的牵引力预测模型中,履带车 A、B、C 牵引性能预测平均误差为 3.6%、5.4%、6.3%,对照组预测误差为 12.7%、15.4%、19.0%。可见,与接地压力均匀分布牵引性能预测结果相比,本文所提出的基于多峰值非线性分布的接地压力模型的牵引性能模型预测精度较高,且对橡胶履带式底盘预测精度高于钢履带。

图 13c、13d 为不同坡度下牵引力-滑转率对照结果,其中针对履带车 B 与 C 分别进行了姿态调整前后的牵引力测试。履带车 A 在坡度 0°、10°、20°等高线牵引试验中牵引性能随坡度增加而变差;其最大牵引力随坡度增加而减小,与 0° 工况相比,10° 工况与 20° 工况分别降低 2.2%、8.6%,但其特征滑转率(履带车发挥最大牵引力时对应的滑转率)随坡度增大而增大,分别为 0.2、0.38、0.46。可见履带式底盘在更大的滑转率才能发挥所需要牵引力,将使其作业效率低、油耗增加。

履带车 B 在坡度 20° 调平前后的最大牵引力为 8.03、9.4 kN,容许滑转率时牵引力为 4.5、6.45 kN,其姿态调平可使牵引力增幅 17.1% 和 43.3%;履带车 C 在 20° 调平前后最大牵引力为 3.52、4.53 kN,容许滑转率时牵引力为 1.82、2.76 kN,其姿态调平

使牵引力增幅 28.7% 和 51.6%。可见,姿态调整可以有效地提高履带底盘牵引性能,由于坡度因素导致的坡面高低侧接地压力差异引起的两侧履带牵引力不等,其牵引力差值将导致车辆在直线行驶时产生“跑偏”“偏载”现象,增加单条履带的磨损,而姿态调整可均匀承载,因此有利于提升行驶直线性和行走机构使用寿命。

3.2 纵向爬坡牵引性能试验

开展纵向爬坡牵引性能试验以验证预测方法的有效性,试验地点为西北农林科技大学机械与工程学院丘陵山地空地协同与智能农机试验场,根据坡度均匀性和长度选择两处坡道①和②,其坡道长度为 20 m,坡度约为 10° 和 20°,如图 14 所示,土壤含水率为 18.5%~20.1%,容重为 1.25~1.30 g/cm³;土壤剪切参数为:土壤剪切变形模量 $K=0.024$ m、土壤内聚力 $c=15$ kPa、土壤内摩擦角 $\varphi=15^\circ$ 。



图 14 丘陵山地空地协同与智能农机试验场

Fig. 14 Hilly air-land synergy and smart machinery test site

试验原理与主要设备如 3.1 节所述,试验车与负荷车均需平行于坡面并完全驶入纵向坡道,如图 15 所示。

纵向爬坡牵引性能试验如图 16、17 所示,被测车为履带车 A、B,逐渐加大负荷车的制动程度,使试验车履带与地面之间产生不同的滑转率,使得试验车发挥不同程度的牵引力。

图 18 为不同坡度(0°、10°、20°)工况履带车 A、B 牵引力-滑转率曲线。履带车 A 在坡度 0°、10°、20°牵引性能随坡度增加而变差,其最大牵引力随坡度增加而减小,分别为 13.6、9.75、2.5 kN,与坡度 0° 相比,坡度 10° 与坡度 20° 分别降低 28.3%、81.6%,预测结果为 14.31、9.62、2.42 kN,预测误差 5.2%、1.3%、3.2%。履带车 B 最大牵引力亦随坡度增大而减小,试验结果分别为 10.8、8.9、5.7 kN,与 0° 工况相比,坡度 10° 与坡度 20° 分别降低 17.6%、47.2%,预测结果为 10.2、8.8、5.5 kN,预测误差 5.6%、1.2%、3.5%。可见,爬坡工况随坡度增加底盘牵引性能降低。所提出的牵引力预测模型,履带车 A、B 牵引性能预测平均误差为 5.1% 和 6.4%。可见,牵引性能模型预测精度较高,验证了

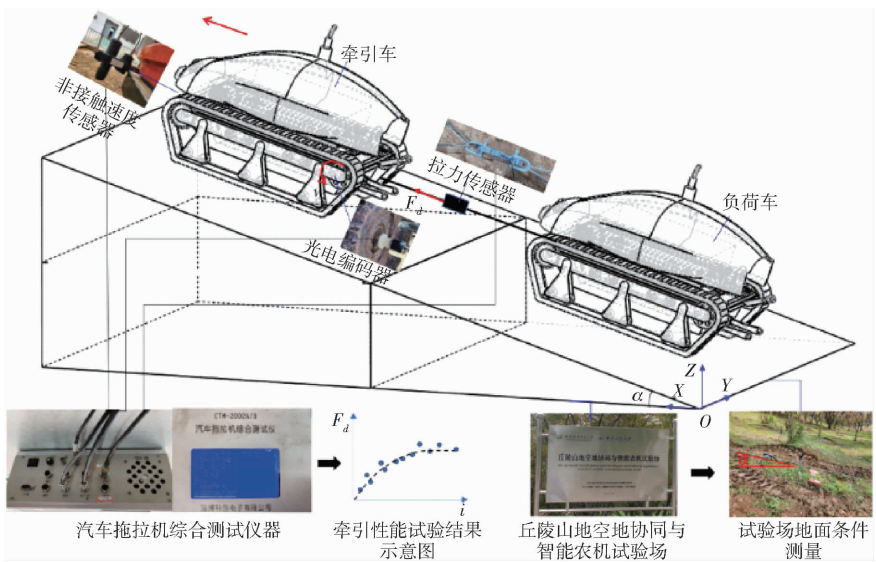


图 15 试验原理与主要试验设备
Fig. 15 Test principle and main test equipment



图 16 农夫 NF602 型山地履带拖拉机爬坡牵引性能试验
Fig. 16 Longitudinal traction performance test of Farmer NF602 mountain crawler tractor on slopes

1. 负荷车 2. 移动电源 3. 便携式计算机 4. 拖拉机综合测试仪
5. 拉力传感器 6. 光电编码器 7. 牵引车 8. 非接触速度传感器

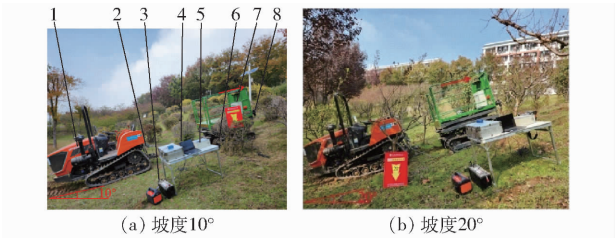


图 17 姿态可调履带采摘平台坡地纵向牵引性能试验
Fig. 17 Attitude-adjustable tracked picking platform longitudinal traction performance test on sloping ground

1. 负荷车 2. 拉力传感器 3. 移动电源 4. 便携式计算机
5. 拖拉机综合测试仪 6. 光电编码器 7. 牵引车 8. 非接触速度传感器

纵向爬坡工况模型有效性、可信度。

根据履带车 A、B 在坡度 10°、20° 纵向坡地牵引性能预测结果可知,最大牵引力为 0 时所对应的坡度应为履带式底盘理论最大爬坡角,因此模型预测履带车 A 理论最大爬坡角度为 22.3°,履带车 B 理论最大爬坡角为 33.5°,履带车 A 发动机功率更大但其爬坡性能不佳,与履带车 B 相比其履带接地面积小、重心位置靠后,这使得其可发挥的牵引力降低;此外,纵向爬坡工况使得履带接地压

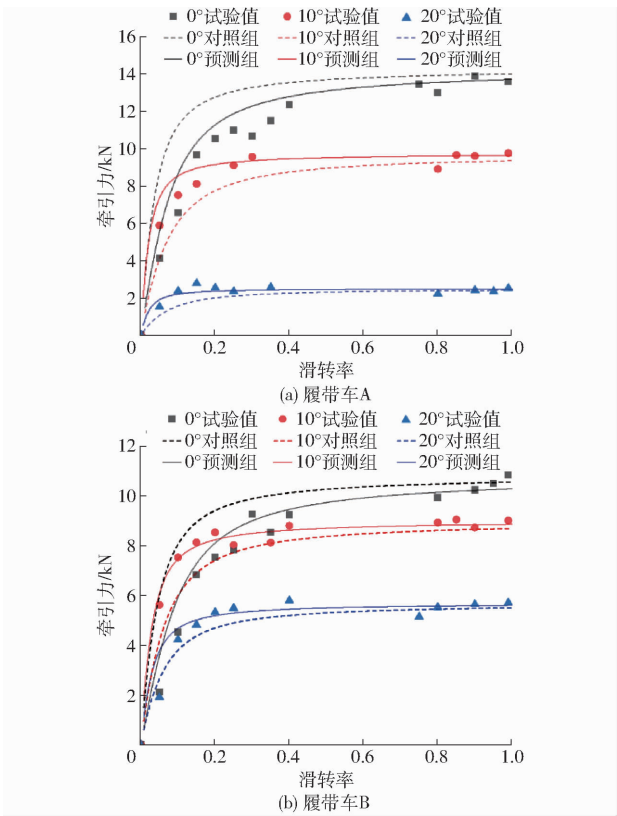


图 18 纵向爬坡牵引性能预测与试验对比
Fig. 18 Longitudinal hill-climbing traction performance prediction and test comparison

力分布随坡度增大而愈不均匀,这造成履带接地段后端的应力集中,履带底盘车辙深度是由履带接地段最前端和整个履带接地段逐次挤压而成,最终由履带接地最后段的接地压力所决定,因此土壤变形引起的行驶阻力增大^[30]。综上,可通过提高接地面积、增大履带长宽比、重心前移或增加车首配重等方式以提高履带底盘的纵向爬坡性能。

4 结论

(1)根据不同坡度及工况建立了一种多峰非线性分布规律的接地压力数学模型,采用二次余弦函数与峰谷控制函数表示,开展接地压力测试试验,结果表明其预测最大误差为6.3%,平均误差为4.7%,故该模型能够较好地预测履带式底盘在坡地环境下接地压力的分布情况。

(2)基于接地压力模型构建了丘陵山地履带式底盘牵引性能预测模型,包含底盘参数、土壤特性、坡度因素及底盘姿态调整重心位置变化等因素,通过等高线行驶与爬坡工况实车牵引试验对该模型进行验证,结果表明:3种试验底盘牵引性能预测平均误差为3.6%、5.4%和6.3%。

(3)基于履带式底盘接地压力分布规律建立的牵引性能预测模型精度较高,验证了预测方法的有效性。

参 考 文 献

[1] 罗锡文. 对发展丘陵山区农业机械化的思考[J]. 农机科技推广, 2011(2): 17-20.

[2] 农业农村部农业机械化司. 加快推进丘陵山区农业机械化[J]. 农机质量与监督, 2019(12): 4-6.

[3] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1-18. SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18. (in Chinese)

[4] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358-369. SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358-369. (in Chinese)

[5] 潘冠廷, 杨福增, 孙景彬, 等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 374-383. PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374-383. (in Chinese)

[6] 杨福增, 牛瀚麟, 孙景彬, 等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 414-422. YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 414-422. (in Chinese)

[7] 孙景彬, 褚宏丽, 刘琪, 等. 山地履带拖拉机坡地等高线作业土壤压实应力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 30-42. SUN Jingbin, CHU Hongli, LIU Qi, et al. Distribution of soil compaction stress during contour line operation of hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 30-42. (in Chinese)

[8] 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 144-149.

[9] WONG J Y, GARBER M, PRESTPN-THOMAS J. Theoretical prediction and experimental substantiation of the ground pressure distribution and tractive performance of tracked vehicles[J]. Journal of Automobile Engineering, 1984, 198(4): 265-285.

[10] KELLER T, ARVIDSSON J. A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 116-123.

[11] PAN G T, SUN J B, WANG X L, et al. Construction and experimental verification of sloped terrain soil pressure-sinkage model[J]. Agriculture, 2021, 11(3): 243.

[12] 张瑞增, 龚建伟, 陈慧岩, 等. 硬质路面条件下履带车辆转向模型分析及验证[J]. 兵工学报, 2023, 44(1): 233-246. ZHANG Ruizeng, GONG Jianwei, CHEN Huiyan, et al. Turning model for tracked vehicles on hard ground: analysis and verification[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(1): 233-246. (in Chinese)

[13] 汪明德, 赵毓芹, 祝嘉光. 坦克行驶原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 29-35.

[14] 程军伟, 高连华, 王红岩, 等. 履带车辆转向分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1110-1115. CHENG Junwei, GAO Lianhua, WANG Hongyan, et al. Analysis on the steering of tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1110-1115. (in Chinese)

[15] BEKKER M G. Introduction to terrain-vehicle systems[M]. The University of Michigan Press, 1969: 5-10.

[16] 栗浩展, 王红岩, 芮强, 等. 履带车辆地面牵引力的计算与试验验证[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(1): 36-40, 105. LI Haozhan, WANG Hongyan, RUI Qiang, et al. Calculation and testing verification of ground traction of tracked vehicles [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(1): 36-40, 105. (in Chinese)

[17] 赵子涵, 穆希辉, 郭浩亮, 等. 橡胶履带轮静态接地压力测试与建模[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 72-79. ZHAO Zihan, MU Xihui, GUO Haoliang, et al. Test and modeling on static ground pressure of rubber track conversion system [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 72-79. (in Chinese)

[18] ROWLAND D. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance[J]. Mechanics of Soil-vehicle Systems, 1972(1): 353-384.

[19] ARVIDSSON J, WESTLIN H, KELLER T, et al. Rubber track systems for conventional tractors-Effects on soil compaction and

traction[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117(6): 103 – 109.

[20] 赵静慧,刘孟楠,徐立友,等. 四轮驱动拖拉机牵引性能预测模型建立与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):439 – 447.
ZHAO Jinghui, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Prediction model and experiment on tractive performance of four-wheel drive tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):439 – 447. (in Chinese)

[21] TIWARI V K, PANDEY K P, PRANAV P K. A review on traction prediction equations[J]. Journal of Terramechanics,2009, 47(3):191 – 199.

[22] BESSELINK B C. Tractive efficiency of four-wheel-drive vehicles: an analysis for non-uniform traction conditions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,2003,217(5):363 – 374.

[23] SAHAY C S, TEWARI V K. Computer simulation of tractor single-point drawbar performance[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 419 – 428.

[24] PENTOS K, PIECZARKA K. Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 113 – 120.

[25] 贾鑫,谢锐,丁小兵,等. 山地履带车辆软坡路面稳态转向模型建立及验证[J]. 中国农业科技导报,2022,24(11):97 – 111.
JIA Xin, XIE Ni, DING Xiaobing, et al. Establishment and verification of steady-state steering model for mountain tracked vehicle on soft slope road[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022,24(11):97 – 111. (in Chinese)

[26] 杨士敏,傅香如. 工程机械地面力学与作业理论[M]. 北京:人民交通出版社,2010:80 – 85.

[27] WONG J Y. Theory of ground vehicles[M]. John Wiley, 1978.

[28] HE R, SANDU C, KHAN A K, et al. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications[J]. Journal of Terramechanics, 2019, 81(1): 3 – 22.

[29] YANG C B, YANG G, LIU Z F, et al. A method for deducing pressure-sinkage of tracked vehicle in rough terrain considering moisture and sinkage speed[J]. Journal of Terramechanics, 2018,79: 99 – 113.

[30] WONG J Y, CHING C F. A general theory for skid steering of tracked vehicles on firm ground[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215: 343 – 355.