

山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计

韩振浩^{1,2} 朱立成² 苑严伟² 赵博² 方宪法^{1,2} 张天赋²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:履带底盘作为农机通用底盘的一种优选方案,在山地果园环境中的应用仍然存在较大优化空间。为了提高履带底盘在复杂行驶路况下的地形适应性,结合山地果园的地形地貌特征,开展了履带底盘的坡地通过性能分析,并基于多体动力学分析软件 RecurDyn 的仿真结果,进行样机优化和试验验证。首先,以果园通用履带底盘为研究对象,通过理论分析探讨影响履带底盘斜坡平地通过性、斜坡越障通过性的关键结构参数,然后搭建 RecurDyn 虚拟仿真样机,分析关键结构参数对坡地通过性能的影响规律,进而以提高现有底盘坡地通过性能为优化目标,根据仿真分析结果提出了一种重心调节系统,最终进行样机试制与室内土槽试验。试验结果表明,在坡度为 10° 的试验路面下,优化后样机在偏航 45° 时最大牵引力均值为 1 926 N,相比调控前增加了 14.03%。优化后样机最大翻越台阶高度为 230 mm,相比优化前增加了 27.78%。优化后样机最大跨越壕沟宽度为 640 mm,相比优化前增加了 28%。研究结果可为山地果园履带底盘的坡地行驶性能优化提供参考。

关键词:山地果园;履带底盘;坡地通过性能;重心调节系统

中图分类号: S219.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)05-0413-09

OSID:



Analysis of Slope Trafficability and Optimized Design of Crawler Chassis in Hillside Orchard

HAN Zhenhao^{1,2} ZHU Licheng² YUAN Yanwei² ZHAO Bo² FANG Xianfa^{1,2} ZHANG Tianfu²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology,

Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: It is a preferred scheme to use the crawler chassis as an available chassis for agricultural machinery. There is ample space for optimization in applying this scheme in the hillside orchard environment. To further improve the adaptability of the crawler chassis under complex driving road conditions, the topographic and geomorphological characteristics of the hillside orchard were referred to to carry out the slope trafficability analysis of the crawler chassis. And based on the simulation results of the multi-body dynamics analysis software RecurDyn, the prototype was improved, and experimental verification was carried out. Firstly, the critical structural parameters that affected straight-line driving, overcoming obstacles of the tracked chassis were discussed through theoretical analysis based on the available chassis. Then, a virtual machine prototype was constructed to analyze the impact of critical parameters on trafficability. According to the simulation analysis results, a center of gravity adjustment system to improve the slope trafficability of the crawler chassis was proposed. Finally, the indoor soil tank test was carried out. The test results showed that on the test road with slope of 10°, the average maximum traction force of the improved prototype at yaw of 45° was 1 926 N, which was an increase of 14.03% compared with that before improvement. After the improvement, the maximum obstacle height of the prototype was 230 mm, which was an increase of 27.78% compared with that before improvement. The maximum trench width of the prototype was 640 mm, which was increased by 28% compared with that before improvement. The research result could provide a practical reference for improving the slope driving performance of the crawler chassis in hillside orchards.

Key words: hillside orchard; crawler chassis; slope trafficability; center of gravity adjustment system

收稿日期: 2021-04-22 修回日期: 2021-06-21

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B090922001)

作者简介: 韩振浩(1993—),男,博士生,主要从事丘陵山地智能农机装备研究,E-mail: han_zh93@126.com

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程技术研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

0 引言

为了有效提升丘陵山地果园生产的整体机械化水平,开展适用于该环境的动力底盘研究具有重要意义。履带底盘作为当前山地果园动力底盘的一种优选方案,相对于轮式动力底盘,具有接地比压小、通过性强等特点,但由于山地果园地形多为坡地,在实际作业时仍然面临着打滑、下陷、障碍阻挡等问题^[1-2]。因此为了进一步提高山地果园动力底盘的环境针对性与地形适应性,开展履带底盘的坡地行走机理研究,探讨关键结构参数对通过性能的影响规律十分必要。

针对履带底盘在不同路面环境下的行走机理,国内外学者开展了较多研究^[3-7]。面向山地果园作业环境,关于坡地行驶性能的研究相对较少,部分学者虽然开展了一些工作,但多停留在对现有底盘进行理论分析和仿真模拟的阶段,并未根据研究结果对现有履带底盘提出针对性的优化方案,以提升其实际坡地行驶性能。

基于此,本文根据山地果园实际作业地形特点,拟对履带底盘的坡地通过性能开展理论分析,探究影响坡地通过性能的关键结构参数。通过多体动力学仿真分析关键结构参数对坡地通过性能的影响规律,并基于仿真结果优化样机。通过对比优化前后样机的坡地通过性能,验证理论分析、仿真模拟的合理性和优化方案的可行性,为改善山地果园履带底盘的斜坡地形适应性提供参考。

1 坡地通过性能理论分析

山地果园为斜坡地形,存在排水沟、阶梯、田埂等障碍,果园履带底盘在实际作业时面临打滑、下陷以及障碍阻挡等问题,本文分别针对履带底盘斜坡平地、斜坡障碍 2 种情况开展理论分析,探讨

影响坡地通过性能的关键结构参数。
以课题组研制的果园通用底盘为研究对象,结构简图如图 1 所示。底盘由机体和行走系组成,其中行走系主要包括履带、驱动轮、托轮、支重轮、导向轮以及平衡式张紧悬挂。动力类型为电动,行走时直流电机通过蜗轮蜗杆减速器为两侧履带悬挂提供驱动力。

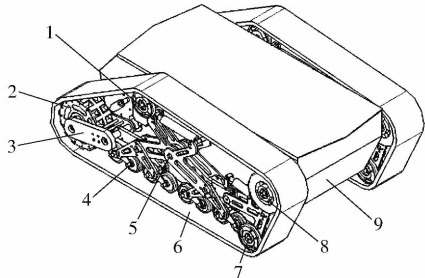


图 1 履带底盘结构简图

Fig. 1 Schematic of crawler chassis structure

1. 托轮 2. 驱动轮 3. 链传动机构 4. 支重轮 5. 平衡式张紧悬挂 6. 履带 7、8. 导向轮 9. 机体

1.1 斜坡平地通过性

参考 Bekker 理论,本文通过最大牵引力判断履带底盘的斜坡平地通过性,力学分析如图 2 所示,其中点 M 为底盘形心,点 O 为底盘质心,局部坐标系原点为点 M 。假设履带底盘匀速直线行驶,结合俯视图与力平衡原理可得,履带附着力、行驶阻力和整机重力纵向分力的关系为

$$F_1 + F_2 = R_1 + R_2 + G_y \tag{1}$$

式中 F_1 ——左侧履带附着力, N

F_2 ——右侧履带附着力, N

R_1 ——左侧履带行驶阻力, N

R_2 ——右侧履带行驶阻力, N

G_y ——重力在底盘局部坐标系纵向分力, N

分别对 F_1 、 F_2 、 R_1 、 R_2 、 G_y 进行求解,根据力平衡和力矩平衡原理,结合主视图可得两侧履带的支撑力 N_1 和 N_2 为

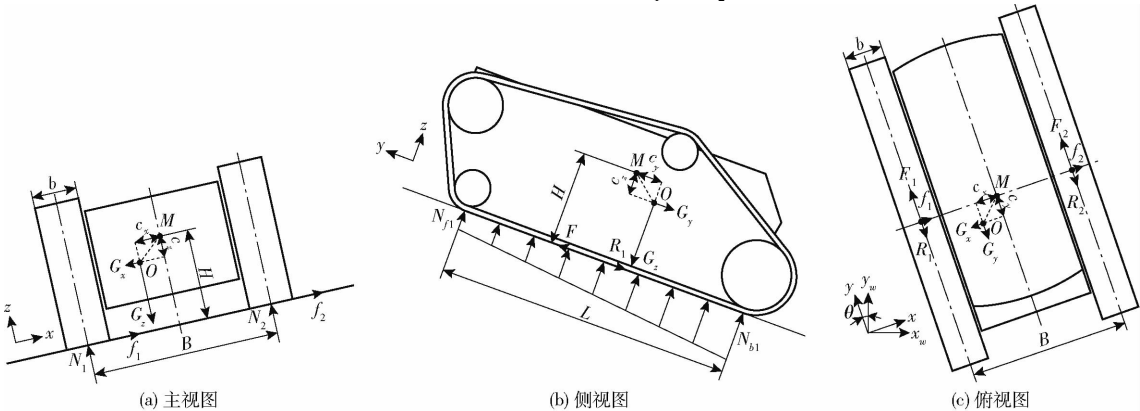


图 2 坡地直线行驶受力分析

Fig. 2 Force analysis of straight-line driving on slope

$$\begin{cases} N_1 = \frac{G_z}{2} + (G_z c_x + G_x H - G_x c_z) \frac{1}{B} \\ N_2 = \frac{G_z}{2} - (G_z c_x + G_x H - G_x c_z) \frac{1}{B} \end{cases} \quad (2)$$

式中 B ——底盘宽度, m
 H ——形心离地高度, m
 $c_x、c_z$ ——重心相对形心在底盘局部坐标系下
横向和竖向的偏移距离, m
 G_z ——重力在底盘局部坐标系竖向分力, N
 G_x ——重力在底盘局部坐标系横向分力, N

根据履带底盘当前姿态^[8-9], 可得重力在底盘
局部坐标系下 3 个方向的分力 $G_x、G_y、G_z$ 为

$$\begin{cases} G_x = mgsin\alpha sin\theta \\ G_y = mgsin\alpha cos\theta \\ G_z = mgcos\alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中 m ——整车质量, kg α ——地形坡度, ($^\circ$)
 g ——重力加速度, m/s²
 θ ——底盘沿上坡方向偏航角, ($^\circ$)

结合侧视图, 履带接地中心处的力矩平衡方程为
 $M_1 + M_2 = c_y G_z + (H - c_z) G_y$ (4)

式中 M_1 —— N_1 向左侧履带接地中心作用的力矩,
N·m
 M_2 —— N_2 向右侧履带接地中心作用的力矩,
N·m
 c_y ——重心相对形心在底盘局部坐标系下 y
方向偏移距离, m

结合俯视图以及履带底盘结构特点, 可得

$$\begin{cases} M_1 = \left(\frac{1}{2} + \frac{c_x}{B} + \frac{H - c_z}{B} \tan\alpha \sin\theta \right) \cdot \\ \quad [c_y G_z + (H - c_z) G_y] \\ M_2 = \left(\frac{1}{2} - \frac{c_x}{B} - \frac{H - c_z}{B} \tan\alpha \sin\theta \right) \cdot \\ \quad [c_y G_z + (H - c_z) G_y] \end{cases} \quad (5)$$

在斜坡行驶时, 假设全履带长度受力且为线性
分布^[8-10], 结合侧视图可得

$$\begin{cases} \int_0^L \left[N_{f1} + (N_{b1} - N_{f1}) \frac{x}{L} \right] dx = N_1 \\ \int_0^L \left[N_{f2} + (N_{b2} - N_{f2}) \frac{x}{L} \right] dx = N_2 \\ \int_{\frac{L}{2}}^L \left[N_{f1} + (N_{b1} - N_{f1}) \frac{x}{L} \right] x dx - \\ \int_0^{\frac{L}{2}} \left[N_{f1} + (N_{b1} - N_{f1}) \frac{x}{L} \right] x dx = M_1 \\ \int_{\frac{L}{2}}^L \left[N_{f2} + (N_{b2} - N_{f2}) \frac{x}{L} \right] x dx - \\ \int_0^{\frac{L}{2}} \left[N_{f2} + (N_{b2} - N_{f2}) \frac{x}{L} \right] x dx = M_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_{f1} ——左侧履带前端接地压力, N
 N_{f2} ——右侧履带前端接地压力, N
 N_{b1} ——左侧履带后端接地压力, N
 N_{b2} ——右侧履带后端接地压力, N
 L ——履带接地长度, m

假设附着力仅考虑土壤作用, 底盘电机输出功率
恒定, 根据 JANOSI 公式^[10-11], 在履带接触压力计算的
基础上可以分别得到左右侧履带的附着力 $F_1、F_2$ 为

$$\begin{cases} F_1 = b \int_0^L \left\{ C + \frac{1}{b} \left[N_{f1} + (N_{b1} - N_{f1}) \frac{x}{L} \right] \tan\varphi \right\} \cdot \\ \quad (1 - e^{-\frac{\delta x}{K}}) dx \\ F_2 = b \int_0^L \left\{ C + \frac{1}{b} \left[N_{f2} + (N_{b2} - N_{f2}) \frac{x}{L} \right] \tan\varphi \right\} \cdot \\ \quad (1 - e^{-\frac{\delta x}{K}}) dx \end{cases} \quad (7)$$

式中 C ——土壤内聚力, kPa
 φ ——土壤内摩擦角, ($^\circ$)
 K ——土壤剪切变形系数
 δ ——履带相对地面滑转率
 b ——履带宽度, m

行驶阻力包含风阻力、沉陷阻力以及推土阻力,
由于履带底盘行驶速度较慢, 忽略风阻力对底盘的影
响, 履带底盘沿直线行驶, 假设未发生偏航情况, 忽略
履带侧面土壤对履带产生的推土阻力。因此只对行驶
阻力中的沉陷阻力进行探讨, 结合压力-下陷公式^[11]可
以推导左右两侧履带的沉陷阻力 $R_1、R_2$ 分别为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2b}{n+1} N_{f1}^{\frac{n+1}{n}} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right)^{-\frac{1}{n}} + \\ \quad b(N_{f1} + N_{b1}) \left[\left(\frac{bN_{b1}}{k_c + bk_\varphi} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{bN_{f1}}{k_c + bk_\varphi} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \\ R_2 = \frac{2b}{n+1} N_{f2}^{\frac{n+1}{n}} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right)^{-\frac{1}{n}} + \\ \quad b(N_{f2} + N_{b2}) \left[\left(\frac{bN_{b2}}{k_c + bk_\varphi} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{bN_{f2}}{k_c + bk_\varphi} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中 k_c ——土壤变形内聚模量, kN/mⁿ⁺¹
 k_φ ——土壤变形摩擦模量, kN/mⁿ⁺²
 n ——土壤沉陷指数

根据履带底盘直线行驶的受力分析结果, 在土壤
环境确定, 坡度、偏航角不变的条件下, 从式(1)中可
知, 如果履带附着力能够大于行驶阻力和整机重力纵
向分力之和, 则履带底盘斜坡平地通过性良好。从公
式(7)、(8)可知, 履带-地面接触压力影响着履带附着
力和行驶阻力。从公式(5)、(6)中可知, 重心相对形心
的位置坐标 $c_x、c_y、c_z$, 履带接地长度 L 、履带宽度 b 和底
盘宽度 B 对履带-地面接触压力有直接影响。因此根

据理论分析结果,需要进一步探讨重心位置、接地长度、底盘宽度、履带宽度对履带底盘斜坡平地通过性的影响规律。

1.2 斜坡越障通过性

果园中存在排水沟、阶梯、田埂等障碍,履带底盘需要具备一定的越障能力来适应山地果园环境,本文分别针对履带底盘翻越台阶和跨越壕沟2种情况开展理论分析,探讨影响底盘斜坡越障通过性的关键结构参数。

1.2.1 斜坡台阶

山地果园履带底盘翻越台阶能力的主要判定标准为可翻越台阶的最大高度。

履带底盘翻越台阶主要分为3个阶段:第1阶段,底盘缓慢前进,直到两侧履带的导向轮位置与台阶前沿接触,在履带附着力的驱动下车体绕履带接地后沿旋转,车体重心逐渐爬升;第2阶段,底盘两侧履带的底面位置与台阶前沿接触,在附着力的驱动下底盘绕履带接地后沿旋转,车体重心在上升的同时沿车体纵向前移;第3阶段,如果车体重心跨过台阶前沿,在重力的作用下车体绕台阶前沿旋转,直到履带前部与地面接触,越障完成。

履带底盘能否成功翻越台阶的关键在于车体重心在第2阶段能否越过台阶前沿,如果车体重心随着底盘旋转始终在台阶前沿后方,则底盘无法越障,因此需要对越障的第2阶段进行探讨^[12-16]。以垂直于台阶切面方向为分析角度,第2阶段示意图如图3所示。

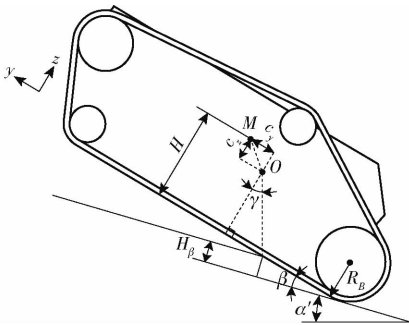


图3 翻越台阶示意图

Fig.3 Diagram of climbing steps

根据履带底盘的几何参数,以底盘重心垂直投影落在稳定区域为临界条件,可以得到履带底盘在不同仰角 β 下的极限越障高度 H_β 为

$$H_\beta = \left[\frac{L}{2} - c_y - (H - c_z) \tan(\alpha' + \beta) \right] \sin\beta + \frac{R_B - R_B \cos\beta}{\sin\beta}$$

(9)

式中 R_B ——底盘后驱轮半径,m

α' ——当前坡面角,(°)

履带底盘的最大上台阶高度为 H_β 的最大值。

从公式(9)中可以看出,在坡面角度不变的情况下,履带底盘的坡面极限越障高度 H_β 随底盘仰角 β 逐渐变化,同时也可以看出,履带接地长度 L 与重心位置 c_y 、 c_z 对不同仰角下的极限越障高度有直接影响,履带接地长度越长,重心位置越靠前靠下,极限越障高度越高。

1.2.2 斜坡壕沟

山地果园履带底盘跨越壕沟能力的主要判定标准为通过壕沟的最大宽度。

履带底盘跨越壕沟主要分为3个阶段:第1阶段,底盘缓慢前进,车体前部悬空,此时如果车体重心超过壕沟前沿,车体会在重力的作用下绕壕沟前沿旋转,车头栽入壕沟,进而跨壕失败;第2阶段,底盘缓慢前进,直到履带前部与壕沟后沿接触,此时履带后部仍与壕沟前沿接触,车体中部悬空于壕沟正上方;第3阶段,底盘缓慢前进,履带后部与壕沟前沿脱离接触,车体后部悬空,此时如果车体重心未超过壕沟后沿,车体会在重力作用下绕壕沟后沿旋转,车尾栽入壕沟,进而跨壕失败^[13-15],因此需要对第1和第3阶段进一步开展探讨。分别针对上坡壕沟和下坡壕沟这两种情况进行分析,可得底盘跨越壕沟示意图如图4所示。

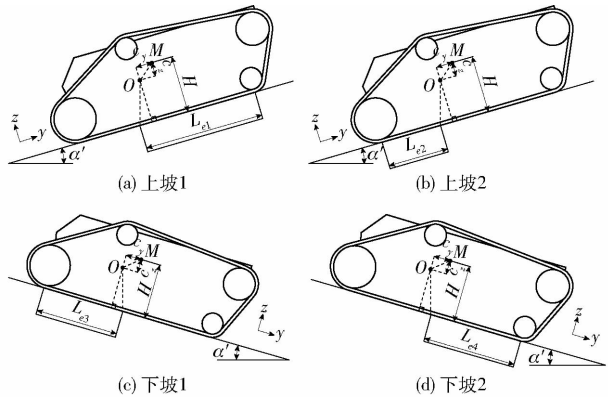


图4 跨越壕沟示意图

Fig.4 Diagrams of crossing trenches

以底盘重心垂直投影落在稳定区域为临界条件,履带底盘在图示4种情况下能够跨越壕沟的最大宽度 L_{e1} 、 L_{e2} 、 L_{e3} 、 L_{e4} 为

$$\begin{cases} L_{e1} = \frac{L}{2} + c_y + (H - c_z) \tan\alpha' \\ L_{e2} = \frac{L}{2} - c_y - (H - c_z) \tan\alpha' \\ L_{e3} = \frac{L}{2} - c_y + (H - c_z) \tan\alpha' \\ L_{e4} = \frac{L}{2} + c_y - (H - c_z) \tan\alpha' \end{cases}$$

(10)

基于两种极限情况下的分析结果,根据公式(10)可得履带底盘可跨越最大壕沟宽度 L_e 为

$$L_e = \min(L_{e1}, L_{e2}, L_{e3}, L_{e4}) \tag{11}$$

从公式(10)和公式(11)中可以看出,在斜坡角度固定的情况下,履带底盘的极限跨壕宽度受履带接地长度 L 与重心位置 c_y 、 c_z 影响,接地长度越大,重心在斜坡上的投影越接近于履带接地中心,跨壕宽度越大。

2 坡地行驶性能仿真

在理论分析的基础上,基于多体动力学分析软件 RecurDyn 进行坡地通过性能仿真分析,进一步探讨关键参数对坡地通过性能的影响规律,为优化设计提供参考。

2.1 模型搭建

基于 Track_LM 低速履带模块搭建履带底盘虚拟样机,如图 5 所示。该模型由 1 个车体和 2 个履带行走机构组成,其中履带行走机构位于车体两侧,通过固定副与车体固连。为了提高仿真运算效率,简化车体悬挂为一个整体,每侧履带行走机构包含 1 个驱动轮、8 个支重轮、2 个导向轮、1 个张紧轮以及 1 条履带^[16-18],均通过旋转副与悬挂相连。

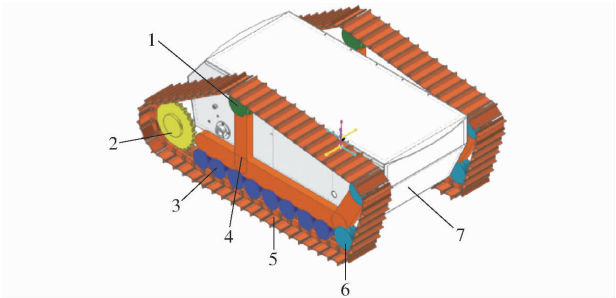


图 5 RecurDyn 虚拟样机

Fig. 5 RecurDyn virtual prototype

1. 张紧轮 2. 驱动轮 3. 支重轮 4. 悬挂 5. 履带 6. 导向轮 7. 机体

参考现有履带底盘的主要设计参数,虚拟样机参数配置如表 1 所示。

表 1 虚拟样机主要参数设置
Tab.1 Main parameters of virtual prototype

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×950×530
横向、纵向、竖向重心偏移距离/mm	6、0、34
接地长度/mm	1 135
底盘宽度/mm	750
履带宽度/mm	180

2.2 仿真结果与分析

分别开展履带底盘斜坡平地通过性和斜坡越障通过性仿真分析,探讨底盘关键参数对坡地通过性能的影响规律。

2.2.1 斜坡平地通过性

为了量化对比履带底盘的直线行驶性能,本文通过对直线行驶的底盘施加一个方向与行驶方向相反、大小逐渐增大的反力,当反力增大至足以阻止履带底盘正常行进时,此时该力为履带底盘的最大牵引力。

从上述理论分析可知,底盘的重心偏移距离 c_x 、 c_y 、 c_z ,以及接地长度 L 、底盘宽度 B 和履带宽度 b 对履带底盘的直线行驶性能均有影响。因此针对以上参数设定典型工况进行模拟仿真,其中行驶速度设置为 0.2 m/s,行驶偏航角设置为 45°,坡面角设置为 10°,开展单因素测试,可得不同参数下的最大牵引力如图 6 所示。

从仿真结果中可以看出,随着横纵向重心偏移距离的增加,牵引力呈先增大后减小的趋势,从公式(5)、(6)可知,随着车体横纵向重心位置沿上坡方向移动,土壤对单侧履带支撑力由开始的前端支撑力

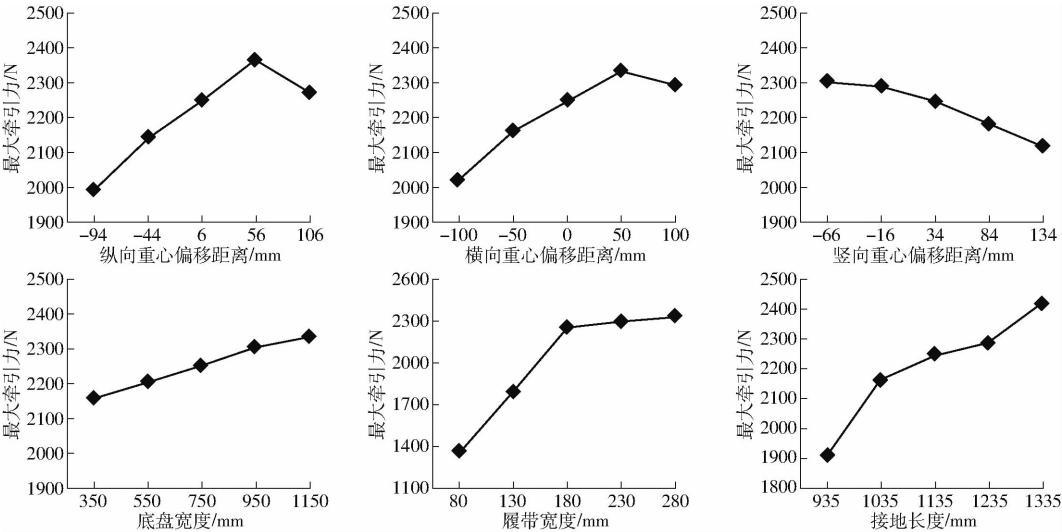


图 6 最大牵引力仿真结果

Fig. 6 Maximum tractive force simulation results

小、后端支撑力大变为前后端支撑力接近一致,土壤对两侧履带的支撑力由开始的下坡侧履带支撑力大上坡侧履带支撑力小变为两侧履带接近一致,此时底盘牵引力最大,当车体重心沿上坡方向过于靠前,单侧履带前端支撑力就会大于后端支撑力,上坡侧履带支撑力就会大于下坡侧履带支撑力,底盘牵引力就会减小;随着竖向重心偏移距离的增加、底盘宽度的减小,牵引力呈逐渐减小的趋势,从公式(2)、(5)中可知,底盘竖向重心位置越高、底盘宽度越小,履带底盘两侧履带支撑力相差越大,同时单侧履带接地比压分布相差也会变大,牵引力越小;随着履带宽度和接地长度的逐渐增加,牵引力呈逐渐增加的趋势,从公

式(7)、(8)可知,牵引力与履带宽度和接地长度均为正相关,因此履带越宽越长,牵引力越大。

2.2.2 越障仿真

履带底盘在山地果园越障主要分为两类:台阶与壕沟,分别针对这两类情况进行仿真分析。

(1)斜坡台阶

由上述理论分析可知,履带接地长度 L 与重心位置 c_y 、 c_z 对越障高度有直接影响,因此针对以上参数设定典型工况进行模拟仿真,其中坡面角设置为 10° ,左右侧履带的旋转角速度均设置为 3.93 rad/s ,为了测定底盘极限越障高度,偏航角设置为 0° ,开展单因素测试,得到极限越障高度如图7所示。

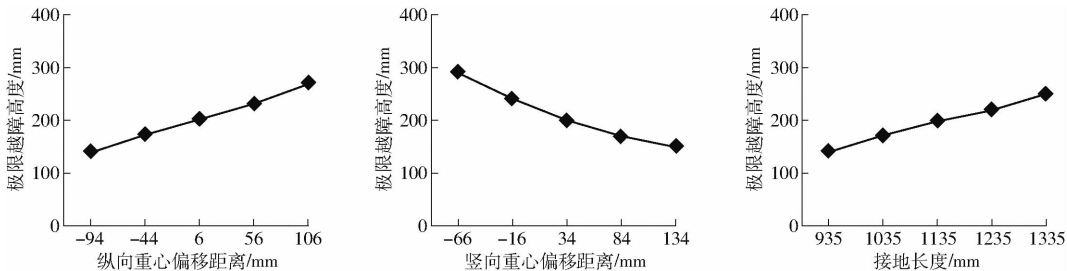


图7 翻越台阶仿真结果

Fig.7 Simulation results of climbing steps

从仿真结果中可知,履带接地长度越大,重心位置越靠前靠下,极限越障高度越大,仿真分析结果与上述理论分析结果基本一致,验证了理论分析的准确性。

(2)斜坡壕沟

从上述理论分析可知,履带底盘的极限跨壕宽

度受履带接地长度 L 与重心位置 c_y 、 c_z 影响,因此针对以上参数设定典型工况进行模拟仿真,其中坡面角度设置为 10° ,左右侧履带的旋转角速度均设置为 3.93 rad/s ,为了测定底盘极限越障高度,偏航角设置为 0° ,开展单因素测试,得到极限跨壕宽度如图8所示。

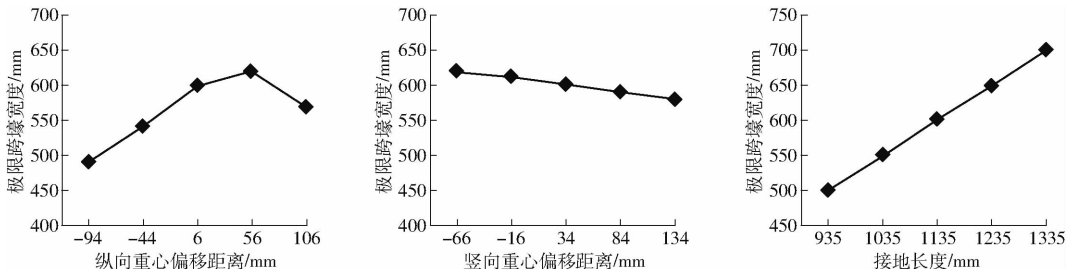


图8 跨越壕沟仿真结果

Fig.8 Simulation results of crossing trench

根据仿真结果可知,履带接地长度越大,重心在斜坡上的投影越接近于履带接地中心,跨壕宽度越大。仿真分析结果与理论分析结果基本一致。

3 优化设计

从理论分析与仿真结果中可知,重心位置、履带接地长度、底盘宽度、履带宽度均为影响履带底盘坡地通过性能的关键结构参数。增加底盘宽度能够有效降低两侧履带压力差,但同时会影响底盘的行间通过性,增加履带接地长度会显著增加履带最大附

着力,但影响底盘的转向灵活性。通过理论分析与模拟仿真可知,底盘的重心位置对其斜坡平地通过性和斜坡越障通过性具有显著影响,因此为了进一步提升现有样机的坡地通过性能,本文在尽量增加履带宽度的同时,对底盘重心位置参数进行优化设计。

3.1 工作原理

拖拉机在车头前安装配重块能够有效防止车体翘头和打滑,基于该原理,本文提出一种底盘重心调节系统,通过在履带底盘增加横纵向可移动配重,实

现履带底盘在不同行驶状态下的重心调节,进而提升山地果园履带底盘的坡地通过性能。

当履带底盘在斜面直线行驶时,如图 9a 所示,配重块相对车体沿上坡方向移动,调整横向重心位置保证两侧履带接地比压基本一致,调整纵向重心位置避免单侧履带局部附着力过小,提高履带底盘斜坡平地通过性能;当履带底盘翻越台阶时,如图 9b 所示,爬上台阶时,配重块往车体前部移动,重心前移防止车体翘头,提高履带底盘极限越障高度,爬下台阶时,配重块往车体后部移动,重心后移避免车头栽下台阶,提高履带底盘越障稳定性;当履带底盘需要跨越壕沟时,如图 9c 所示,配重块往车体后部移动,重心后移防止车头栽入壕沟,当履带前沿搭至壕沟后沿,配重块往车体前部移动,直到重心调整至壕沟后沿,重心前移防止车尾栽入壕沟,提高履带底盘极限跨壕宽度。

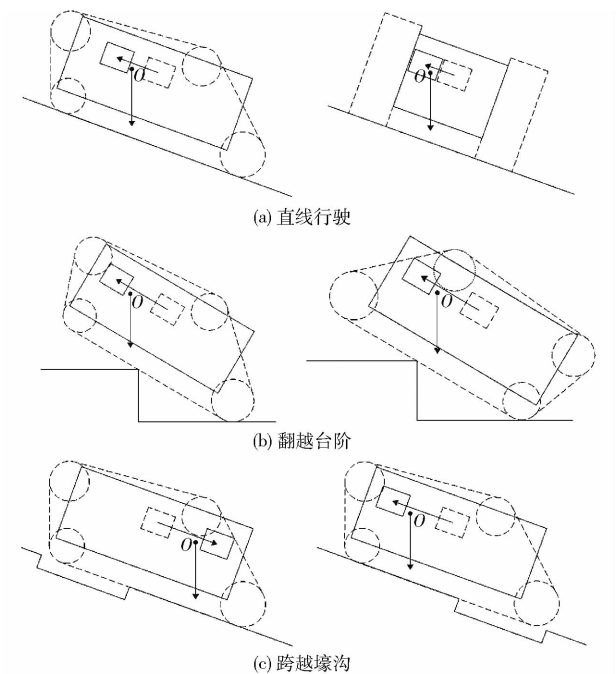


图 9 重心调节系统工作原理图

Fig.9 Working principle of gravity center adjustment system

3.2 优化设计

根据重心调节系统工作原理,在现有果园通用底盘的基础上进行优化设计,三维模型如图 10 所示。

本文设计的底盘重心调节系统由纵向滑轨、横向滑轨、配重块以及控制驱动系统组成,其中配重块安装于纵向滑轨的滑台,可沿纵向滑轨在车体内纵向移动,动力由纵向调整电机提供;纵向滑轨安装于两条横向滑轨之上,配重块与纵向滑轨可沿横向滑轨在车体内横向移动,动力由横向调整电机提供;控制驱动系统包含遥控器、主控板以及驱动器,横纵向

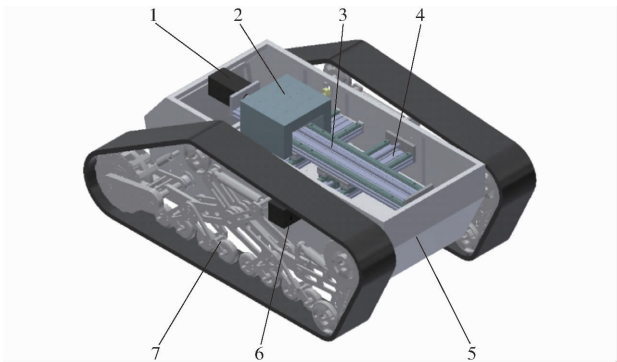


图 10 底盘重心调节系统三维模型

Fig.10 Gravity adjustment system

1.纵向调整电机 2.配重铅块 3.纵向滑轨 4.横向滑轨 5.底盘箱体 6.横向调整电机 7.履带行走机构

调整电机由遥控器控制旋转;横向滑轨在车体内部侧壁固定,为保证机体结构强度,滑轨与车体连接处设有加强筋支撑。系统工作时,根据手动发送的遥控器信号,配重块在横纵向调整电机的驱动下,在车体内部横纵向自由移动,实现履带底盘的重心位置调节。

已知底盘为 198 kg,在保证重心调整效果的同时考虑底盘极限承载与能量损耗,现确定配重块为 80 kg。为了尽量减少箱体内部空间占用,配重块为不锈钢外壳加铅内芯的材质,内部密度较大。横纵向滑轨通过步进电机驱动,能够保证配重块的调整精度。整套重心调整系统除了横向调整电机外其余均安装于履带底盘箱体内部,占用空间小,不改变机体整体外形尺寸,相比增加摆臂、更改悬挂形式等改造方案整体结构更加简单,改造成本相对较低,在农业机械领域应用经济性好,更适用于山地果园此类环境已知的结构化路况。

3.3 样机制造

根据图纸进行装置加工,样机实物图如图 11 所示,配重块纵向移动行程为 900 mm,横向移动行程为 350 mm,横纵向移动速度为 0 ~ 500 mm/min。经初步调试,配重块移动顺滑,能够满足履带底盘行走过程中的实时重心调整要求。

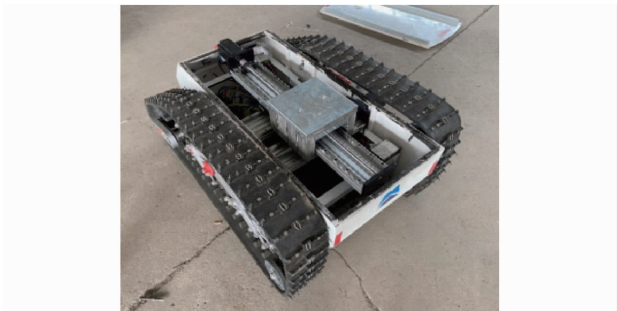


图 11 样机

Fig.11 Prototype

4 坡地通过性能试验

参考 GB/T 15833—2007、GB/T 12541—1990 等标准,开展履带底盘坡地通过性能试验,试验地点为中国农业机械化科学研究院集团有限公司土壤植物机器系统技术国家重点实验室中的室内土槽试验系统。

4.1 斜坡平地通过性

4.1.1 试验方案

为了量化对比履带底盘的斜坡平地通过性,本文通过拉力传感器测定履带底盘的最大牵引力,牵引力越大斜坡平地通过性越好。试验开始前,通过人工将土壤坡面角设置为 10°,拉力传感器一端与履带底盘末端悬挂点连接,另一端与地面固定点连接,配重块位于初始位置。设定典型工况进行样机斜坡平地通过性测试,行驶偏航角设置为 45°,履

带底盘以最低速度行驶,直到履带发生明显打滑,记录拉力传感器最大拉力,拉力传感器量程为 5 000 N,最大误差为 0.05%,最大牵引力测试如图 12 所示。



图 12 最大牵引力测试
Fig. 12 Maximum tractive force test

4.1.2 试验结果与分析

根据配重块纵向移动和横向移动的最大行程,分别选取不同纵向位置和横向位置开展履带底盘最大牵引力单因素测试,测试结果如表 2 所示。

表 2 最大牵引力测试结果

Tab.2 Results of maximum tractive force test											N
次序	优化前	优化后配重块纵向位置/mm					优化后配重块横向位置/mm				
		- 450	- 225	0	225	450	- 175	- 87. 5	0	87. 5	175
1	1 265	1 414	1 678	1 742	2 071	1 839	1 370	1 596	1 742	1 954	1 744
2	1 501	1 332	1 654	1 610	1 883	1 898	1 544	1 660	1 610	1 831	1 727
3	1 392	1 445	1 556	1 731	1 831	1 789	1 495	1 554	1 731	1 872	1 880
4	1 391	1 380	1 542	1 757	1 904	1 771	1 444	1 710	1 757	1 913	1 855
5	1 448	1 326	1 533	1 607	1 943	1 773	1 361	1 602	1 607	1 847	1 776
平均值	1 399	1 379	1 592	1 689	1 926	1 814	1 442	1 624	1 689	1 883	1 796

根据表 2 可知,当配重块位于初始位置下,优化后样机的最大牵引力均值为 1 689 N,相比优化前样机增加了 20.73%,其主要原因在于,增加重心调整机构后,履带底盘总重增加,履带接地比压增大,进而附着力增大。通过进一步观察发现,在当前行驶偏航角度下,随着配重块沿坡上移动,最大牵引力为逐渐增大趋势,变化趋势与仿真分析结果基本一致,其中当配重块纵向位置为 225 mm 时,最大牵引力均值为 1 926 N,相比调控前增加了 14.03%,当配重块横向位置为 87.5 mm 时,最大牵引力均值为 1 883 N,相比调控前增加了 11.49%。本文提出的重心调节系统能够有效提升履带底盘的坡地斜坡平地通过性,同时可以发现,不同直线行驶条件下配重块的最优位置需要进一步开展研究。

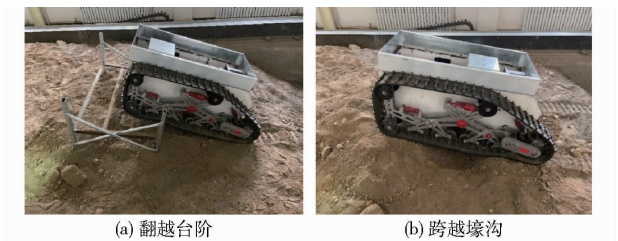
4.2 斜坡越障通过性

4.2.1 试验方案

通过测试履带底盘翻越台阶的极限高度和跨越壕沟的极限宽度来开展斜坡越障通过性试验。试验开始前,通过人工将土壤坡面角度设置为 10°,将金属平台沿履带底盘行驶方向埋入斜坡土

壤模拟台阶,平台高度为 120 ~ 360 mm 可调,通过人工沿履带底盘行驶方向设置壕沟,起始壕沟宽度为 500 mm。

越障性能试验过程如图 13 所示。为测定优化后履带底盘的极限越障性能,履带底盘行驶偏航角设置为 0°。翻越台阶时,底盘行驶速度为最低速,试验过程中台阶高度以 10 mm 为差依次递增,在保证人员设备安全的同时增加至不能越过为止;跨越壕沟时,行驶速度为最低速,当底盘前部悬空时,配重块调整至车尾,当履带接触壕沟后沿时,配重块调整至车头,试验过程中跨越壕沟宽度以 10 mm 为差依次递增,直到底盘栽入壕沟为止。



(a) 翻越台阶 (b) 跨越壕沟

图 13 极限越障性能试验

Fig. 13 Extreme obstacle crossing performance tests

4.2.2 试验结果与分析

履带底盘越障性能测试结果如表 3 所示。

表 3 越障性能测试结果

Tab.3 Results of obstacle-crossing performance test mm						
障碍参数	优化前	优化后滑块纵向位置/mm				
		-450	-225	0	225	450
越障高度	180	100	130	160	220	230
跨壕宽度	500			640		

根据表 3 可知,随着配重块前移,优化后样机的最大越障高度呈逐渐增大的趋势,变化趋势与仿真分析结果基本一致,当配重块纵向位置为 450 mm 时,最大越障高度为 230 mm,相比优化前增加了 27.78%。优化后样机的最大跨壕宽度为 640 mm,相比优化前增加了 28%。本文提出的重心调节系统能够有效提升履带底盘的坡地跨壕能力。

试验结果表明,在坡度为 10°的试验路面下,优化后样机在偏航 45°时的最大牵引力均值为 1 926 N,相比调控前增加了 14.03%。优化后样机最大翻越台阶高度为 230 mm,相比优化前增加了 27.78%。优化后样机最大跨越壕沟宽度为 640 mm,相比优化前增加了 28%。通过对比优化前后样机的坡地通过性能可知,本文提出的重心调整机构试验结果验证了理论分析、仿真模拟的合理性以及优化方案的可行性。

5 结论

(1)为探讨影响山地果园底盘坡地通过性能的关键结构参数,分别针对斜坡平地通过性和斜坡越障通过性开展理论分析。经理论分析可知,影响斜坡平地通过性的结构参数为重心位置、接地长度、底盘宽度以及履带宽度。影响斜坡越障通过性的结构参数为重心位置和接地长度。

(2)在理论分析的基础上,基于多体动力学分析软件 RecurDyn 搭建履带底盘虚拟样机,分别针对斜坡平地通过性和斜坡越障通过性开展仿真分析,探讨关键结构参数对坡地通过性能的影响规律,为履带底盘的进一步优化设计提供参考。

(3)在现有果园通用底盘的基础上提出了一种底盘重心调节系统,优化样机并开展室内土槽试验。试验结果表明,在坡度为 10°的试验路面下,优化后样机在偏航 45°时的最大牵引力均值为 1 926 N,相比调控前增加了 14.03%。优化后样机最大翻越台阶高度为 230 mm,相比优化前增加了 27.78%。优化后样机最大跨越壕沟宽度为 640 mm,相比优化前增加了 28%。通过对比优化前后样机的坡地通过性能可知,本文提出的重心调整机构试验结果验证了理论分析、仿真模拟的合理性和优化方案的可行性,可为山地果园履带底盘的斜坡地形适应性优化研究提供参考。

参 考 文 献

[1] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):1-20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):1-20. (in Chinese)

[2] 王韦韦,陈黎卿,杨洋,等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):1-15. (in Chinese)

[3] 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 & Tillage Research, 2016, 155:116-123.

[4] 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.

[5] LYASKO M I. How to calculate the effect of soil conditions on tractive performance[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(6):423-445.

[6] 沈仙法,王海巧,刘远伟,等. 履带车辆系统刚柔耦合动力学建模及分析[J]. 机械设计与制造, 2015, 53(4):147-151.
SHEN Xianfa, WANG Haiqiao, LIU Yanwei, et al. Dynamic modeling and analysis for rigid-flexible coupling system of tracked vehicles[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2015, 53(4):147-151. (in Chinese)

[7] 姚禹,王博,高智. 履带-地面耦合系统机理分析与建模[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39(6):528-533,633.
YAO Yu, WANG Bo, GAO Zhi. Mechanism analysis and modeling of track-soil coupling system[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2018, 39(6):528-533,633. (in Chinese)

[8] 于龙飞. 微型履带山地拖拉机坡地通过性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
YU Longfei. Research on the trafficability performance of micro-hillside caterpillar tractor on sloping field[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[9] 谢钊. 小型山地履带底盘坡地行驶性能分析与试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2020.
XIE Ni. Analysis and experimental study on the running performance of the small crawler chassis for mountain on slope[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020. (in Chinese)

[17] 朱小蓉,李世杰,周宇东,等. 含双驱动五杆回路的弱耦合并联机构型综合[J]. 农业机械学报,2021,52(10):434-442.
ZHU Xiaorong,LI Shijie,ZHOU Yudong,et al. Structural synthesis of parallel mechanisms containing dual drive five-bar loop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):434-442. (in Chinese)

[18] 陈宇航,赵铁石,边辉,等. 含子闭环的并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报,2015,46(12):346-354.
CHEN Yuhang,ZHAO Tieshi,BIAN Hui,et al. Kinematics analysis of parallel mechanism with sub closed-chains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):346-354. (in Chinese)

[19] ZHAO Xingyu,ZHAO Tieshi,WANG Chang,et al. Type synthesis and analysis of parallel mechanisms with sub-closed-loops [J]. Mechanism and Machine Theory,2018,120:140-165.

[20] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2014.

[21] 耿明超,赵铁石,王唱,等. 基于拟 Newton 法的并联机构位置正解[J]. 机械工程学报,2015,51(9):28-36.
GENG Mingchao,ZHAO Tieshi,WANG Chang,et al. Direct position analysis of parallel mechanism based on quasi-Newton method[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(9):28-36. (in Chinese)

(上接第 421 页)

[10] 杨士敏. 履带车辆接地比压分布规律对附着力的影响[J]. 中国公路学报,1995,8(2):85-88.
YANG Shimin. The effects of tracked vehicles' contact pressure distribution on adhesive force[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(2):85-88. (in Chinese)

[11] 陈秉聪,范雅操,宁素俭. 履带车辆行驶阻力的研究[J]. 吉林工业大学学报,1983,27(3):12-27.
CHEN Bingcong,FAN Yacao,NING Sujian. Study of the driving resistance of tracked vehicles[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1983, 27(3):12-27. (in Chinese)

[12] 刘志彬. 履带式移动机器人建模与动态仿真研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.
LIU Zhibin. Modeling and research on dynamic simulation for tracked mobile robot[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009. (in Chinese)

[13] 黄亮. 一种适应于丘陵果园的运输车研制与试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2017.
HUANG Liang. Development and experimental study on a transporter adapting to hill orchard [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 饶伟,施家栋,王建中. 关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析[J]. 机械工程学报,2014,50(15):60-67.
RAO Wei,SHI Jiadong,WANG Jianzhong. Analysis of dynamic stability for articulated-tracked robot climbing stairs [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15):60-67. (in Chinese)

[16] 张响亮,张华,熊根,等. 基于 RecurDyn 的履带式消防机器人设计与爬梯运动学仿真[J]. 机械传动,2020,44(6):89-95.
ZHANG Xiangliang,ZHANG Hua,XIONG Gen,et al. Design and simulation of tracked fire fighting robot based on RecurDyn [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(6):89-95. (in Chinese)

[17] 陈继清,黄仁智,莫荣现,等. 基于 RecurDyn 小型绿篱修剪机履带底盘越障性能分析与仿真[J]. 中国农机化学报,2020,41(10):89-98.
CHEN Jiqing,HUANG Renzhi,MO Rongxian,et al. Analysis and simulation of obstacle crossing performance of tracked chassis of small hedge trimmer based on RecurDyn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10):89-98. (in Chinese)

[18] 骆清国,司东亚,龚正波,等. 基于 RecurDyn 的履带车辆动力学仿真[J]. 车辆与动力技术,2011,33(4):26-28,50.
LUO Qingguo,SI Dongya,GONG Zhengbo,et al. Dynamic simulation of a tracked vehicle based on RecurDyn[J]. Vehicle & Power Technology, 2011, 33(4):26-28,50. (in Chinese)