doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.043

小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验

潘冠廷[1,2]　杨福增[1,2]　孙景彬[1,2]　刘志杰[1,2]

(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)

摘要:小型山地履带拖拉机(简称山地拖拉机)在田间行驶时,常遇到台阶、砖头、石块、田埂等障碍,严重影响其通过性及稳定性,进而引发侧滑甚至倾翻等安全问题。为此,选取最难跨越的台阶作为研究对象,对山地拖拉机爬坡越障性能进行研究。首先,对山地拖拉机爬坡时跨越台阶的运动过程进行分析,得到求解最大越障高度的计算公式;然后,基于多体动力学分析软件 RecurDyn 进行了正交和单因素变量仿真试验,仿真结果表明:越障速度、坡度角和拖拉机质心位置均显著影响山地拖拉机的最大越障高度,增大越障速度和质心-支重轮距、减小坡度角和质心高度均可提高山地拖拉机的爬坡越障性能;最后,基于自主设计的山地拖拉机进行了爬坡越障田间试验。结果表明,在速度 1.6 km/h、坡度角为 0°~15°工况下,试验结果与理论计算及仿真试验结果基本一致,理论计算与仿真试验的最大相对误差分别为 5.17%、6.47%;在坡度角大于 15°工况下,理论计算与仿真试验最小相对误差分别为 13.25%、19.21%。说明所得到的山地拖拉机最大越障高度计算公式及仿真模型在坡度角为 0°~15°时有效。

关键词:山地;履带拖拉机;爬坡;越障;多体动力学分析

中图分类号:S219.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0374-10　　**OSID**:

Analysis and Test of Obstacle Negotiation Performance of Small Hillside Crawler Tractor during Climbing Process

PAN Guanting[1,2]　YANG Fuzeng[1,2]　SUN Jingbin[1,2]　LIU Zhijie[1,2]

(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*)

Abstract: The small hillside crawler tractors (abbreviated as SHCT) often encounter obstacles such as steps, masonry, and ridges when driving in the field, which seriously affects the passability and driving stability, and may even cause safety problems such as side slip and overturn. In order to solve this problem, the movement process of the SHCT climbing over the step was analyzed, and the mathematical model of the maximum obstacle clearance height was established. Its value was used as the evaluation index of the obstacle negotiation performance of the SHCT. Then, orthogonal and single variable simulation tests were carried out by using RecurDyn. The results indicated that the slope angle, the tractor speed and the centroid position significantly affected the maximum obstacle clearance height; and increasing the tractor speed and decreasing both the slope angle and the center height can improve the obstacle negotiation performance. Finally, a test using a self-developed 18HP SHCT for the obstacle negotiation performance was conducted. The test results showed that when the speed was 1.6 km/h and the slope angle was less than 15°, the test results were basically consistent with the theoretical calculation and the simulation results. The most relative errors of the theoretical calculation and simulation were 5.17% and 6.47%, respectively; while the slope angle was larger than 15°, the minimum relative errors were 13.25% and 19.21%, respectively. The results showed that the mathematical model and simulation model of the SHCT were both effective when the slope angle was small. It could provide a theoretical reference for the safety analysis for obstacle negotiation, structural improvements and farmland using of the SHCT on the slopes less than 15°.

Key words: hillside; crawler tractor; climbing; obstacle negotiation; dynamic simulation

收稿日期:2020-06-05　修回日期:2020-06-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0700503)

作者简介:潘冠廷(1988—),男,博士生,主要从事丘陵山地智能农机装备与地面互作机理研究,E-mail:panguanting2012@126.com

通信作者:杨福增(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事丘陵山地智能农机装备研究,E-mail:yfz0701@163.com

0　引言

我国地形多样、地貌复杂，丘陵和山地占国土面积的近 70%[1]。丘陵、山地的耕、种、收综合机械化率仅有 15% 左右，远低于平原地区超过 70% 的水平。在制约农业机械化发展的众多因素中，农业机械的动力问题极为关键，因此对于丘陵山地动力机械及其性能的研究已成为农机领域的研究热点之一。

目前，针对山地拖拉机的研究主要集中在样机研发及结构改进[1-2]、多体动力学建模与仿真[3-4]、自动化与智能化[5]等方面，尤其在机械性能分析与拖拉机结构改进方面的研究更为广泛。为了提高拖拉机坡地作业的稳定性，20 世纪 90 年代有学者通过改进中小型四轮拖拉机底盘来实现车身姿态的调整[6-7]。目前，大量研究主要围绕如何控制拖拉机姿态以提高其在山地作业的稳定性及抗翻倾能力[8-11]，有关山地拖拉机牵引附着性能[12]、转向性[13]、机体及农具对山地的自适应[5]等方面的研究也在不断深入。但是，目前针对山地拖拉机越障性能的研究相对较少，主要集中在履带式拖拉机平地越障及轮式拖拉机山地等高线越障方面[14-18]，且大多为仿真分析，较少有实车田间试验研究。

丘陵山区田间的台阶、砖头、石块、田埂等障碍物极为常见，这些障碍物是降低山地拖拉机行驶稳定性的重要因素之一，严重时会使其无法跨越，引发侧滑甚至翻倾等安全问题。据有关资料，因翻倾引发的农用拖拉机安全事故致死率超过 50%[19]。因此，开展山地履带拖拉机爬坡时的越障性能研究非常必要。

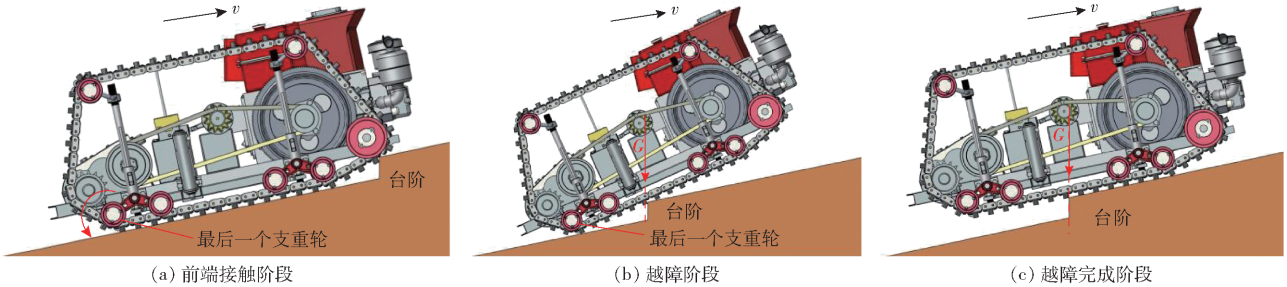
本团队自主研发了小型山地履带拖拉机（以下简称山地拖拉机）[20-21]。对该机已经进行了多项性能研究，包括牵引附着性能、爬坡性能、坡地行驶稳定性、坡地转向性能等[22-26]，但针对该机的越障性能研究并未涉及。

本文从运动学和动力学角度分析山地拖拉机的爬坡越障过程，建立最大越障高度与坡度角、越障速度、质心位置之间的数学模型，并以最大越障高度评价其坡地越障性能；仿真分析和实车田间试验相结合，对该数学模型的有效性进行验证，为山地拖拉机的结构优化、性能提升等提供理论支持。

1　爬坡越障性能分析与数学模型构建

1.1　越障过程描述

在台阶、砖头、石块、田埂等各类农田障碍物中，台阶对山地拖拉机爬坡带来的失稳和安全问题最为严重，故其跨越台阶的能力最能体现山地拖拉机爬坡越障性能。该过程共分为 3 个阶段[25,27]，如图 1 所示。



(a) 前端接触阶段　　(b) 越障阶段　　(c) 越障完成阶段

图 1　山地拖拉机爬坡越障过程示意图

Fig. 1　Schematics of obstacle negotiation process when climbing up slope

第 1 阶段为前端接触阶段，如图 1a 所示。山地拖拉机在坡地上低速前进，履带前端与台阶边缘接触，然后整机绕最后一个支重轮发生逆时针转动，同时整机沿台阶边缘向前移动。

第 2 阶段为越障阶段，如图 1b 所示。山地拖拉机继续向前行驶，履带接地段接触台阶上部，直到重力作用线与台阶边缘重合。

第 3 阶段为越障完成阶段，如图 1c 所示。当重力作用线超过台阶边缘的瞬间，在惯性作用下拖拉机与台阶下端脱离，完成越障过程。

1.2　越障运动学及动力学模型

山地拖拉机能否顺利完成越障，关键在第 2 阶段，此阶段某一时刻的运动状态如图 2 所示，履带接地段与坡道平面的夹角 β 急剧增大，山地拖拉机极有可能发生纵向翻倾。为分析山地拖拉机的爬坡越障性能，构建最大越障高度的数学模型，需对其越障第 2 阶段进行运动学及动力学分析。

基于履带式拖拉机的行驶特点、工况和相关研究经验[16,28]，本研究做以下假设：

(1) 忽略山地拖拉机在越障时质心偏移产生的影响。

(2) 山地拖拉机两侧履带运动状态保持一致，即同时接触台阶边缘，两侧履带受力相同。

(3) 将台阶视为刚体，不会因为与履带接触而

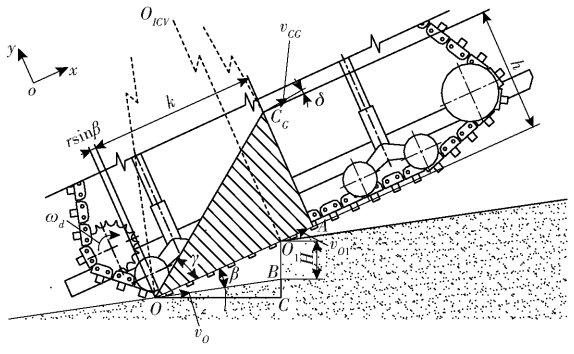


图 2 越障第 2 阶段运动示意图

Fig. 2 Schematic of obstacle negotiation process in phase Ⅱ

产生破坏和变形。

(4)山地拖拉机在越障过程中始终沿纵向坡道运动,不存在横向摆动。

(5)越障过程中履带始终保持张紧状态,与台阶边缘为线接触。即台阶对于履带接地段的作用力方向始终经过台阶边缘,且方向垂直于履带所在平面。

(6)越障过程中,驱动力在山地拖拉机行驶方向上的分量足够大,足以驱动其完成整个越障过程。

如图 2 所示,坡地及台阶对山地拖拉机的支撑分别作用于点 O 和 O_1,山地拖拉机质心在垂直于履带接地段方向上的投影交 OO_1 的延长线于点 A,坡道与台阶边缘相交于点 B,过点 O 做水平线与 O_1B 相交于点 C。将山地拖拉机看作刚体,由三角形 OAC_G 代替,且 OA 边与履带重合。

建立坐标系 oxy,使 x 轴始终平行于履带接地段。定义点 O_{ICV} 为该时刻山地拖拉机的速度瞬心,v_O、v_{O1} 与 v_{CG} 分别表示该时刻点 O、O_1 与质心 C_G 的速度;α 为坡度角,β 表示越障过程中的山地拖拉机仰角(履带接地段与坡道之间的夹角),δ 表示 v_{CG} 与 x 轴之间的夹角;k 表示质心到最后一个支重轮的水平距离(以下简称质心-支重轮距),h 表示质心高度,r 表示支重轮半径,H 表示障碍物高度。

对三角形 OAC_G 进行速度分析,可得

$$v_O = v_t = 3.6 \times 10^{-3} l_{O_{ICV}O}\dot{\beta} \tag{1}$$

式中 v_O——O 点速度(即越障速度),km/h

v_t——驱动轮分度圆线速度,km/h

$\dot{\beta}$——山地拖拉机仰角速度,rad/s

$l_{O_{ICV}O}$——O_{ICV} 到 O 的长度,mm

由几何关系可得

$$\begin{cases} \sin\beta = \dfrac{l_{OO_1}}{l_{O_{ICV}O}} \\ l_{OO_1} = \dfrac{H\sec(\alpha+\beta)}{\tan(\alpha+\beta)-\tan\alpha} + r\sin\beta \\ l_{O_{ICV}C_G} = \sqrt{(l_{OO_1}\cot\beta - h)^2 + (k + r\sin\beta - l_{OO_1})^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中 l_{OO_1}——O 到 O_1 的长度,mm

$l_{O_{ICV}C_G}$——O_{ICV} 到 C_G 的长度,mm

故可求得质心 C_G 的速度、法向加速度及切向加速度,为动力学分析提供依据,具体为

$$\begin{cases} v_{CG} = 10^{-3} l_{O_{ICV}C_G}\dot{\beta} \\ a_{CG}^n = 10^{-3} l_{O_{ICV}C_G}\dot{\beta}^2 \\ a_{CG}^t = \mathrm{d}v_{CG}/\mathrm{d}t \end{cases} \tag{3}$$

式中 v_{CG}——质心 C_G 的速度,m/s

a_{CG}^n——质心 C_G 的法向加速度,m/s^2

a_{CG}^t——质心 C_G 的切向加速度,m/s^2

当山地拖拉机的重力作用线与台阶边缘重合时,山地拖拉机完成越障第 2 阶段,由几何关系可知

$$\begin{cases} \dfrac{l_{OC_G}}{l_{OO_1}} = \dfrac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos(\alpha+\beta+\gamma)} \\ l_{OC_G} = \sqrt{(k + r\sin\beta)^2 + h^2} \\ \gamma = \arctan\dfrac{h}{k + r\sin\beta} \end{cases} \tag{4}$$

式中 γ——三角形 OAC_G 中 OC_G 与 OA 的夹角

l_{OC_G}——O 到 C_G 的长度,mm

式(4)反映的是山地拖拉机爬坡越障的几何条件。经分析可得,山地拖拉机是否能够顺利完成越障,取决于 α、v_O、k、h、β 及 $\dot{\beta}$。

山地拖拉机在越障第 2 阶段的运动是平面复合运动,可以分解为沿坡地向上的平动和方向为逆时针的转动,其惯性力系可以简化成一个作用在 C_G 上的惯性力 F_I 和一个惯性力偶矩 M_I。在重力作用线与台阶边缘重合之前,山地拖拉机的受力如图 3 所示。

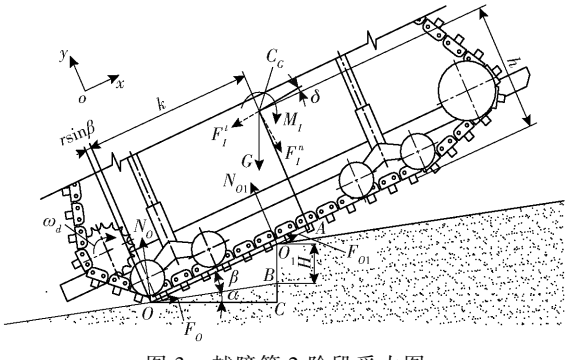


图 3 越障第 2 阶段受力图

Fig. 3 Force schematic of obstacle negotiation process in phase Ⅱ

作用于拖拉机上的力有重力 G、坡地对最后一个支重轮的支持力 N_O 及切向力 F_O、台阶对履带接地段的支持力 N_{O1} 及切向力 F_{O1},N_{O1} 垂直作用于履带接地段。

对于 F_I,其在拖拉机质心加速度切线和法线方

向上的分量分别为

$$\begin{cases} F_I^t = ma_{CG}^t \\ F_I^n = ma_{CG}^n \end{cases} \tag{5}$$

式中　F_I^t——F_I在 a_{CG}^t方向上的分量，N

F_I^n——F_I在 a_{CG}^n方向上的分量，N

m——山地拖拉机质量，kg

定义 δ 为 F_I^t 与坐标系 oxy 中 x 轴的夹角（同时也是 v_{CG}与 x 轴的夹角），则

$$\begin{cases} \sin\delta = \dfrac{k + r\sin\beta - l_{OO_1}}{l_{O_{ICV}C_G}} \\ \cos\delta = \dfrac{l_{OO_1}\cot\beta - h}{l_{O_{ICV}C_G}} \end{cases} \tag{6}$$

山地拖拉机行驶时，地面对于履带接地段的切向作用力与对其的支持力成正比[29]。因此，作用于点 O 和 O_1上的切向力 F_O及 F_{O1}可表示为

$$\begin{cases} F_O = N_O = \varphi_0 N_O \\ F_{O1} = N_{O1} = \varphi_0 N_{O1} \end{cases} \tag{7}$$

其中

$$\varphi_0 = \varphi - f \tag{8}$$

式中　φ——坡地和履带之间的附着系数

f——地面的变形阻力系数

根据达朗贝尔原理，作用在山地拖拉机上各力在 x 轴与 y 轴上的分量组成平衡力系，有

$$\begin{cases} \sum F_x = N_O\sin\beta + F_O\cos\beta + F_{O1} - G\sin(\alpha+\beta) - F_I^t\cos\delta + F_I^n\sin\delta = 0 \\ \sum F_y = N_O\cos\beta - F_O\sin\beta + N_{O1} - G\cos(\alpha+\beta) - F_I^t\sin\delta - F_I^n\cos\delta = 0 \\ M_I = J_{CG}\ddot{\beta} \end{cases} \tag{9}$$

式中　J_{CG}——拖拉机绕质心 C_G的转动惯量，kg·m^2

在山地拖拉机跃上台阶之前，整机有绕点 O 向坡道下方翻倾的可能，因此对点 O 求矩，为方便计算，设顺时针为正，逆时针为负。为使整机在越障过程中不发生翻倾，要求作用于山地拖拉机上的外力对点 O 的合力矩不为负，即

$$\begin{aligned} \sum M_O = [\,& G(k + r\sin\beta)\cos(\alpha+\beta) - \\ & Gh\sin(\alpha+\beta) - N_{O1}l_{OO_1} + \\ & F_I^n(k + r\sin\beta)\cos\delta + F_I^n h\sin\delta - F_I^t h\cos\delta + \\ & F_I^t(k + r\sin\beta)\sin\delta\,] \times 10^{-3} + M_I \geqslant 0 \end{aligned} \tag{10}$$

山地拖拉机的爬坡越障性能主要由最大越障高度评价，用 H_{max}表示。在地面参数给定的条件下，H_{max}越大，表明其越障性能越好。结合式（1）、（2）可得出 H_{max}的表达式

$$H_{max} = \frac{v_O\sin\beta}{3.6\times10^{-3}\dot{\beta}}(\tan(\alpha+\beta) - \tan\alpha)\cos(\alpha+\beta) = \frac{v_O\sin^2\beta}{3.6\times10^{-3}\dot{\beta}}\sec\alpha \tag{11}$$

通过分析式（1）~（10）可知，β、$\dot{\beta}$ 均是关于 v_O、α、k、h 的函数，即

$$\beta = f(v_O, \alpha, k, h) \tag{12}$$

将式（12）代入式（11）可得

$$H_{max} = \frac{v_O\sin^2 f(v_O,\alpha,k,h)}{f'(v_O,\alpha,k,h)}\sec\alpha \tag{13}$$

式中 $f'(v_O,\alpha,k,h)$ 表示 $f(v_O,\alpha,k,h)$ 的导数。由式（13）可知，H_{max}是关于 v_O、α、k、h 的函数。

在式（1）~（10）中，未知量为 γ，当给定山地拖拉机参数 r、m、J_{CG}等参数时，通过对式（10）的迭代计算可得到 β 及 $\dot{\beta}$，进一步将其代入式（11）即可得到 H_{max}。

1.3　最大越障高度计算与分析

本文计算分析所用的山地拖拉机主要参数如表 1 所示[1]。

表 1　山地拖拉机主要参数

Tab. 1　Main parameters of SHCT

参数	数值
质量 m/kg	640
质心-支重轮距 k/mm	520
质心高度 h/mm	380
支重轮半径 r/mm	60
1 挡旋耕作业速度/(km·h^{-1})	1.6
2 挡中耕作业速度/(km·h^{-1})	2.2
3 挡犁耕作业速度/(km·h^{-1})	4.1

对于本实验室研发的山地拖拉机，由于质心位置 k 与 h 已知，故 v_O及 α 是影响 H_{max}的主要因素。根据式（11）可计算出该机在不同 α 及越障速度 v_O下的 H_{max}，如图 4、5 所示。

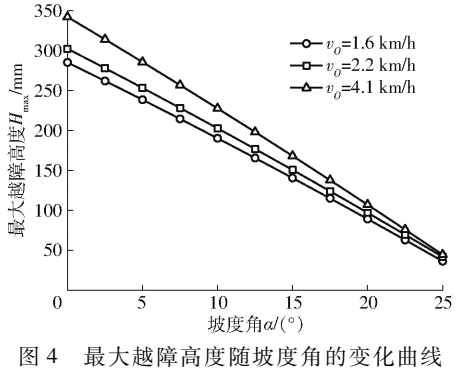


图 4　最大越障高度随坡度角的变化曲线

Fig. 4　Changing curves of maximum obstacle clearance height with slope angle

由图 4 可知，随着 α 的增大，H_{max}减小，且 3 条

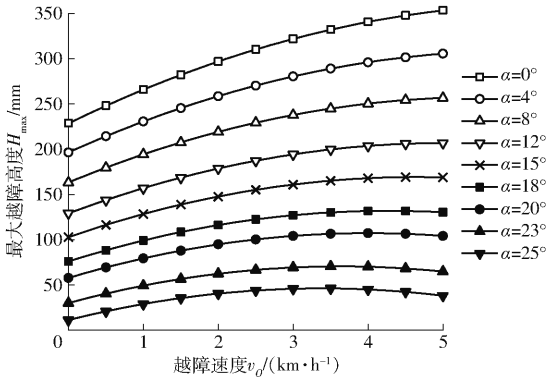


图 5 最大越障高度随越障速度的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of maximum obstacle clearance height with tractor speed

曲线逐渐靠近,即 α 越大,H_{max} 随 v_0 的变化越小。说明坡度角较大时,越障速度对于山地拖拉机的爬坡越障性能影响较小。对图 4 中的主要数据进行拟合可得到该机在各挡位下的最大越障高度简易计算公式

$$H_{max}=\begin{cases}-9.793\alpha+287.147 & (v_0=1.6\ \text{km/h})\\ -10.262\alpha+304.325 & (v_0=2.2\ \text{km/h})\\ -11.748\alpha+344.098 & (v_0=4.1\ \text{km/h})\end{cases} \tag{14}$$

图 5 给出了不同坡度角下的越障速度对 H_{max} 的影响曲线。由该图可直观地看出,当 $\alpha<15°$ 时,H_{max} 随越障速度的增大单调递增,呈逐渐上扬的趋势;$\alpha\geqslant15°$ 时,H_{max} 随越障速度的增大呈现先增大后减小的趋势,说明在坡度角较大时,越障速度的增大并不能提高山地拖拉机的越障性能。对图 5 中的主要数据进行拟合可得到该机在不同坡度角下的最大越障高度简易计算公式

$$H_{max}=\begin{cases}-3.079v_0^2+40.33v_0+228.653 & (\alpha=0°)\\ -3.079v_0^2+37.202v_0+196.456 & (\alpha=4°)\\ -3.079v_0^2+34.075v_0+163.274 & (\alpha=8°)\\ -3.079v_0^2+30.947v_0+129.106 & (\alpha=12°)\\ -3.079v_0^2+28.602v_0+102.833 & (\alpha=15°)\\ -3.079v_0^2+26.256v_0+76.006 & (\alpha=18°)\\ -3.079v_0^2+24.692v_0+57.813 & (\alpha=20°)\\ -3.079v_0^2+22.346v_0+30.062 & (\alpha=23°)\\ -3.079v_0^2+20.783v_0+11.253 & (\alpha=25°)\end{cases} \tag{15}$$

2 多体动力学仿真试验

2.1 仿真模型的建立

由于前述 H_{max} 的简易计算公式仅仅是针对本团队研发的山地拖拉机,其质心位置为确定值,并不能看出质心位置变化对 H_{max} 的影响趋势。为了使本研究成果更具有普遍性和代表性,还需进一步研究质心位置变化对于 H_{max} 的影响以及各因素对于 H_{max} 影响的显著性。

基于 Creo Parametric 软件,首先建立山地拖拉机机体 3D 模型并导入 RecurDyn 软件的低速履带模块(Track - LM);其次,按照表 2 所示参数,构建履带行走系的零部件几何模型[30];最终构建出可用于多体动力学仿真分析的山地拖拉机虚拟样机模型,如图 6 所示。

表 2 履带行走系及主要零部件参数

Tab. 2 Main parameters of SHCT mm

参数	数值
轨距	720
履带宽度	125
履带接地长度	1 050
节距	72
履刺高度	25

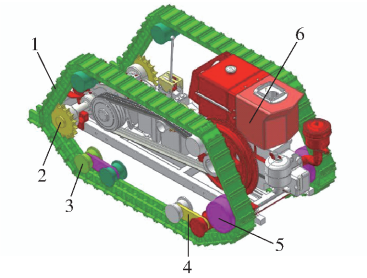


图 6 山地拖拉机虚拟样机

Fig. 6 Virtual prototype of SHCT

1. 履带 2. 驱动轮 3. 支重轮 4. 平衡臂 5. 导向轮 6. 机体

2.2 正交试验因素及水平

采用正交试验设计方法对影响山地拖拉机坡地最大越障高度的主要因素进行仿真分析。

我国可耕地按照坡度可分为 3 大类,坡度角在 0°~6°之间的为平耕地,坡度角在 6°~15°之间的为缓坡耕地,坡度角在 15°~25°之间的为陡坡耕地;坡度角大于 25°的为非耕作地块。由于大于 20°的坡地水土流失严重[31],不适宜耕作,因此本研究考虑将坡度角 α 作为因素 A 并在 0°~20°之间设置 6 个水平;山地履带拖拉机 3 个前进挡的设计速度分别为 1.6、2.2、4.1 km/h,因此考虑将 v_0 作为因素 B 并以 3 个前进挡的设计速度作为水平;另外,拖拉机的配重位置不同将导致质心-支重轮距 k 的变化,不同功率的拖拉机由于体积不同,其质心高度 h 也有所不同。因此考虑将拖拉机质心位置参数 k 和 h 作为因素 C 和因素 D 并分别设置 3 个水平。具体水平设置如表 3 所示。

表 3　仿真因素及水平

Tab. 3　Factors and levels of simulation experiment

水平	因素			
	坡度角 α/(°)	越障速度 v_0/(km·h^{-1})	质心-支重轮距 k/mm	质心高度 h/mm
1	0	1.6	420	330
2	4	2.2	520	380
3	8	4.1	620	430
4	12			
5	16			
6	20			

2.3　正交试验方案及结果分析

根据表 3 所示因素及水平设计正交试验，并以 H_{max} 作为试验指标，试验方案及结果如表4所示，表中 A、B、C、D 为因素水平值。表中 R_i 为第 i 个因素的极差。为消除因素水平不同对 R_i 的影响，引入极差折算系数 d_i 对 R_i 进行修正，并用修正后的极差 R_i' 来判定主次因素，其计算公式为

$$R_i' = d_i R_i \tag{16}$$

当因素水平数为 6 和 3 时，d_i 分别取 0.37 和 0.52[32]。

表 4　仿真方案及结果

Tab. 4　Scheme and results of simulation

试验号	因素				最大越障高度
	A	B	C	D	H_{max}/mm
1	1	1	1	1	225
2	1	2	2	2	273
3	1	3	3	3	329
4	2	1	1	2	175
5	2	2	2	3	221
6	2	3	3	1	328
7	3	1	2	1	198
8	3	2	3	2	247
9	3	3	1	3	161
10	4	1	3	3	173
11	4	2	1	1	135
12	4	3	2	2	180
13	5	1	2	3	97
14	5	2	3	1	181
15	5	3	1	2	93
16	6	1	3	2	115
17	6	2	1	3	25
18	6	3	2	1	118
K_{i1}	827	983	814	1 185	
K_{i2}	724	1 082	1 087	1 083	
K_{i3}	606	1 209	1 373	1 006	
K_{i4}	488				
K_{i5}	371				
K_{i6}	258				
k_{i1}	275.67	163.83	135.67	197.5	
k_{i2}	241.33	180.33	181.17	180.5	
k_{i3}	202	201.5	228.83	167.67	
k_{i4}	162.67				
k_{i5}	123.67				
k_{i6}	86				
R_i	189.67	37.67	93.16	29.83	
d_i	0.37	0.52	0.52	0.52	
R_i'	70.18	19.59	48.44	15.51	
优水平	A_1	B_3	C_3	D_1	
主次因素	A、C、B、D				

注：K_{ij} 为第 i 因素 j 水平所对应的试验指标之和，k_{ij} 为 K_{ij} 的平均值。

为进一步分析各因素对试验指标影响的显著性，在显著水平 0.05 下对仿真结果进行方差分析，结果如表 5 所示。

表 5　方差分析

Tab. 5　Variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F	显著性
模型	110 069.44	11	10 006.31	394.12	**
A	77 059.11	5	15 411.82	607.03	**
B	4 278.11	2	2 139.06	84.25	**
C	26 044.78	2	13 022.39	512.92	**
D	2 687.44	2	1 343.72	52.93	**
误差	152.33	6	25.39		
总和	110 221.77	17			

注：** 表示差异极显著（$P<0.05$）。

由表 5 可知，α、k、v_0 及 h 对于 H_{max} 的影响均非常显著（$P<0.05$），且由 F 值可知，4 个因素对于 H_{max} 的影响程度排序为 $A>C>B>D$，即 4 个因素对 H_{max} 的影响程度由大到小分别为 α、k、v_0、h。

对仿真结果进行多元回归，可得到山地拖拉机在不同参数下的最大越障高度简易计算公式为

$$H_{max} = -6.544v_0^2 - 0.544\alpha v_0 - 0.045v_0 h - 8.255\alpha + 74.796v_0 + 0.435k - 0.219h + 36.306 \tag{17}$$

式(17)可用于任意型号山地拖拉机最大越障高度计算。

2.4　单因素变量仿真试验与分析

为了直观地反映出各因素对于 H_{max} 的影响规律，分别以上述 4 个因素为变量，其它因素选取优水平进行仿真，并对比理论计算结果，得到各因素对于最大越障高度的影响规律，结果如图 7 所示。

由理论曲线和仿真曲线可知，H_{max} 随 v_0 以及 k 的增大而增大（如图 7b、7c 所示），因此提高了山地拖拉机爬坡越障性；相反，α 和 h 的增大则会阻碍山地拖拉机爬坡越障性能的提高（如图 7a、7d 所示）。另一方面，随着各因素水平值的改变，仿真曲线与理论曲线变化趋势相同，但由于在理论计算时未考虑拖拉机质心偏移，并假设台阶与履带为刚体，因此各因素水平所对应的仿真值与理论值存在偏差，且均小于理论值。针对上述偏差进行分析，结果如表 6 所示。

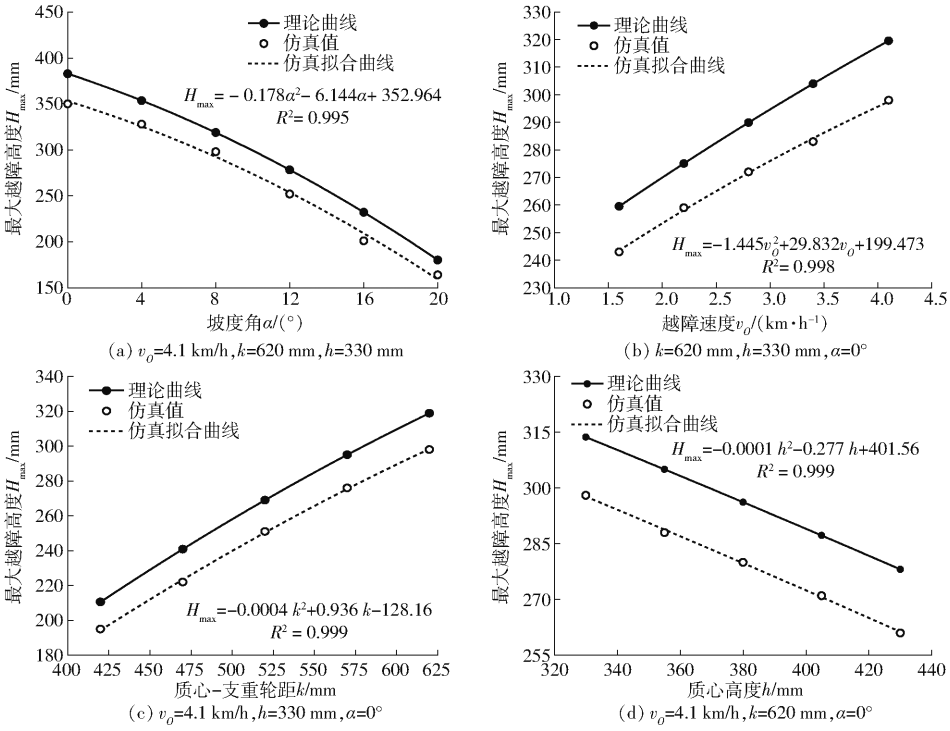


图 7 单因素为变量的最大越障高度变化曲线

Fig. 7 Changing curves of H_{max} for variation of single factors

表 6 仿真值与理论计算的相对偏差

Tab. 6 Deviation between simulation values and theoretical calculations

因素	水平	理论值/mm	仿真值/mm	相对偏差/%	相对偏差平均值/%
A	1	381	350	8.86	10.05
	2	356	328	8.54	
	3	324	298	8.72	
	4	277	252	9.92	
	5	224	201	11.44	
	6	185	164	12.80	
B	1	259	243	6.58	6.84
	2	276	259	6.56	
	3	320	298	7.38	
C	1	211	195	8.21	7.61
	2	270	251	7.57	
	3	319	298	7.05	
D	1	314	298	5.37	5.98
	2	297	280	6.07	
	3	278	261	6.51	

由表 6 可知,因素 *A*(坡度角)引起的相对偏差最大,且随着坡度角的增加而增大。原因在于仿真环境下山地拖拉机越障时的质心偏移量随仰角增大而不断变化,导致 k 减小及 h 增加,从而进一步引起 H_{max}的减小。

另外,各因素对于仿真值与理论值之间相对偏差的影响由大到小分别为坡度角、质心-支重轮距、越障速度、质心高度,与影响 H_{max}的顺序相同。因此,对 H_{max}影响越大的因素,其导致的仿真值与理论值之间的偏差越大。

3 坡地纵向越障田间试验

3.1 试验方案及步骤

依据 GB/T 15833—2007、文献[33],采用本团队研制的山地履带拖拉机物理样机进行最大越障高度的测试,试验地点选在西北农林科技大学北校西区坡地。该坡地土质较硬,纵向坡道长度大于 20 m,坡底有 5 ~ 10 m 的平路段,满足试验需要,且坡度角范围较大,便于根据试验要求选择合适的坡道进行试验。

试验首先将横截面尺寸相同(长、宽为 1 200、200 mm)、高度不同的台阶(木质立方体)每隔 5 m 依次沿纵向坡道方向埋入土壤并压实周边,台阶高度由 60 mm 开始,以 20 mm 为差值依次递增(原理如图 8 所示);将山地履带拖拉机预热到正常工作温度后,用最低挡由坡底的平路起步,油门全开向坡上行驶,由低到高依次跨越各个高度的台阶,直至不能越过为止;记录山地履带拖拉机所能跨越的台阶最大高度,每组试验沿台阶长度方向测量 10 个数据,试验过程如图 9 所示。

3.2 试验结果与分析

山地拖拉机在不同坡度角时的最大越障高度如表 7 所示。由表 7 可知,当坡度角为 0° ~ 15°时,理

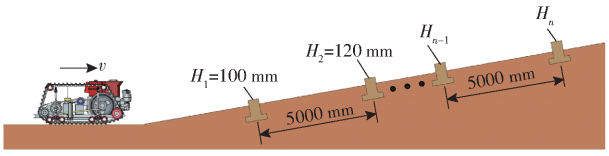
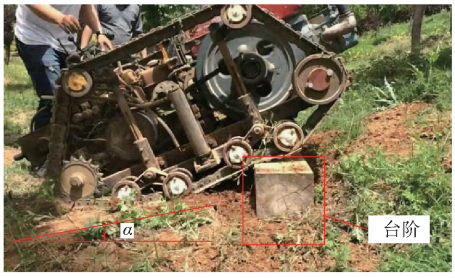


图 8　爬坡越障试验原理图

Fig. 8　Schematic of obstacle negotiation experiment



(a) 前端接触阶段



(b) 越障阶段

图 9　田间试验过程

Fig. 9　Process of field experiment

论计算及仿真试验得到的结果与实测数据的相对误差均小于 6.50%（平均相对误差分别为 3.65%、5.10%）；当坡度角大于 15°时，相对误差明显增大（平均相对误差分别为 16.17%、22.79%），说明所建立的最大越障高度数学模型及仿真模型仅在坡度角较小(0°～15°)时有效。

表 7　试验结果与相对误差分析

Tab. 7　Results and relative error analysis

序号	目标角度/(°)	实测角度/(°)	试验结果/mm	理论计算值/mm	理论相对误差/%	仿真试验值/mm	仿真相对误差/%
1	0	0～3	271±4.09	285	5.17	258	4.80
2	4	3～7	239±8.67	248	3.77	229	4.18
3	8	7～11	202±9.40	211	4.46	192	4.95
4	12	11～15	170±5.50	172	1.18	159	6.47
5	16	15～19	151±4.71	131	13.25	122	19.21
6	20	19～22	110±4.36	89	19.09	81	26.36

将仿真值与实测结果对比可得，所有坡度角变化范围内，仿真值均小于实测结果，如图 10 所示。原因在于，仿真时台阶表层土壤被履带行走系破坏，降低了履带对于土壤的附着能力，从而降低了山地拖拉机的越障能力，而实测时采用木质障碍物，其表层结构不会被履带行走系破坏，履带的附着能力不会受到影响。

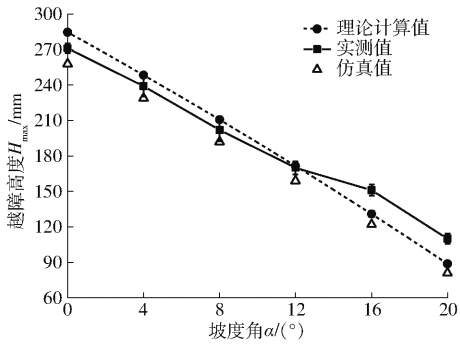


图 10　试验结果与理论值、仿真值的对比

Fig. 10　Comparison between test results with theoretical and simulation values

另一方面，在坡度角较小时，理论值与试验结果较为相近，而坡度较大时，实测结果明显高于理论值，原因在于理论分析山地拖拉机越障第 2 阶段时假设履带始终张紧，并未考虑履带适应坡道平面与台阶形状而产生变形。在实测试验中，该变形提高了履带的附着能力，以进一步对拖拉机的爬坡越障性能产生积极影响，而且随着坡度角的增大，实测结果与理论值的差值变大，说明在坡地工况下履带的附着能力将对山地拖拉机的越障性能产生重要影响。

4　结论

(1)分析了山地履带拖拉机爬坡时跨越台阶的运动过程，得到求解最大越障高度的计算公式。分析结果表明，坡度角、越障速度及质心位置是影响山地拖拉机爬坡越障性能的主要因素。

(2)设计了基于仿真的正交试验，通过 RecurDyn 软件仿真得到山地拖拉机在不同工况及质心位置下的爬坡最大越障高度。试验结果的方差分析表明，显著影响山地拖拉机坡地纵向越障性能的各因素主次顺序为：坡度角、质心-支重轮距、越障速度、质心高度。

(3)对爬坡越障性能的影响因素分别进行单因素变量仿真试验，并与理论计算值进行对比，结果表明，增大越障速度和质心-支重轮距、减小坡度角和质心高度可提高拖拉机的爬坡越障性能；对越障性能影响越大的因素，其仿真值与理论值之间的相对偏差越大。

(4)进行了山地拖拉机的坡地纵向越障田间试验，将试验结果与理论计算、仿真结果进行比较。结果表明，在速度为 1.6 km/h、坡度角为 0°～15°时，试验值与理论计算及仿真结果基本一致，理论计算与仿真试验的最大相对误差分别为 5.17% 和 6.47%；在坡度角大于 15°时，理论计算与仿真试验最小相对误差分别为 13.25% 和 19.21%，说明所建立的理论及仿真模型在坡度角较小(0°～15°)时有效。

参 考 文 献

[1] WANG Y J, YANG F Z, PAN G T, et al. Design and testing of a small remote-control hillside tractor[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 363 - 370.

[2] GAO Q M, GAO F, TIAN L, et al. Design and development of a variable ground clearance, variable wheel track self-leveling hillside vehicle power chassis (V2 - HVPC)[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56(6): 77 - 90.

[3] SUN C R, NAKASHIMA H, SHIMIZU H, et al. Physics engine application to overturning dynamics analysis on banks and uniform slopes for an agricultural tractor with a rollover protective structure[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185(9): 150 - 190.

[4] CHOE J S, AKIMUNE H, SHIN S, et al. Behavior simulation of tractor driven on slopes and undulating roads[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2019, 64(1): 157 - 162.

[5] 齐文超,李彦明,陶建峰,等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):381 - 388.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 381 - 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)

[6] MASHADI B, NASROLAHI H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(6): 299 - 311.

[7] LYASKO M I, TERZIAN V A. Evaluation of the compaction effect and directional stability of a wheeled tractor operating on hillsides[J]. Soil & Tillage Research, 1993, 28(1): 37 - 49.

[8] QIN J, ZHU Z, MITSUOKA M, et al. Coupled effect of slope angle and terrain roughness on tractor stability[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2018, 63(2): 355 - 360.

[9] 彭贺,马文星,赵恩鹏,等. 丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J]. 农业工程学报,2018,34(14): 44 - 52.
PENG He, MA Wenxing, ZHAO Enpeng, et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14): 44 - 52. (in Chinese)

[10] 彭贺,马文星,王忠山,等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(1): 157 - 165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 157 - 165. (in Chinese)

[11] 齐文超,李彦明,张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):17 - 23,34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17 - 23, 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.002. (in Chinese)

[12] MURO T. Tractive and braking performance of a flexible tracked tractor moving up and down weak sloped terrain[J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(6): 419 - 442.

[13] QIN J H, ZHU Z H, JI H Y, et al. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2019, 85: 135 - 149.

[14] 张云龙,诸文农,孙冬野,等. 履带拖拉机越障失稳机理与试验研究[J]. 农业机械学报,1996,27(4):8 - 12.
ZHANG Yunlong, ZHU Wennong, SUN Dongye, et al. Mechanism and experimental research on track-type tractors during surmounting an obstacle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996,27(4):8 - 12. (in Chinese)

[15] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Lateral slope effect on tipping behavior of a tractor encountering an obstacle (model development)[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2014, 59(2): 345 - 349.

[16] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Development of stability indicators for dynamic Phase I overturn of conventional farm tractors with front axle pivot[J]. Biosystems Engineering, 2015, 134(3): 55 - 67.

[17] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development)[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5): 339 - 346.

[18] AHMADI I. Development of a tractor dynamic stability index calculator utilizing some tractor specifications[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2013, 37(2): 203 - 211.

[19] ABUBAKAR M S, AHMAD D, AKANDE F B. A review of farm tractor overturning accidents and safety[J]. Pertanika Journal of Science and Technology, 2010, 18(2): 377 - 385.

[20] 西北农林科技大学. 一种小型拖拉机可伸缩履带底盘:201220746960.9[P]. 2013 - 06 - 12.

[21] 西北农林科技大学. 一种山地遥控拖拉机:201010215718.4[P]. 2011 - 12 - 28.

[22] 张季琴,杨福增,刘世. 微型履带拖拉机牵引附着性能研究——基于正交试验[J]. 农机化研究,2013,35(10):190 - 193,198.
ZHANG Jiqin, YANG Fuzeng, LIU Shi. Research of the micro-crawler tractor adhesion performance—based on orthogonal experiment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 190 - 193, 198. (in Chinese)

[23] 于龙飞,潘冠廷,刘虹玉,等. 丘陵山区农田信息采集车底盘爬坡性能仿真[J]. 农机化研究,2015,37(3):37 - 41,61.
YU Longfei, PAN Guanting, LIU Hongyu, et al. Climbing performance simulation of hilly farmland information collection vehicle chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(3): 37 - 41, 61. (in Chinese)

[24] 张战文,杨福增,张振平. 履带式拖拉机坡道行驶稳定性分析[J]. 农业装备与车辆工程,2010(11):7 - 10.
ZHANG Zhanwen, YANG Fuzeng, ZHANG Zhenping. Analysis on driving stability of caterpillar tractor on ramp[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2010(11): 7 - 10. (in Chinese)

[25] 潘冠廷,于龙飞,杨福增. 丘陵山地农田信息采集车斜坡转向稳定性分析及模拟[J]. 农机化研究,2015,37(6):6 - 12.
PAN Guanting, YU Longfei, YANG Fuzeng. Analysis and simulation on steering stability of a hilly farmland information collection vehicle on slopes[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 6 - 12. (in Chinese)

[26] 张战文,杨福增,张季琴. 履带式车辆斜坡匀速转向特性分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2011,38(6):44 - 48.
ZHANG Zhanwen, YANG Fuzeng, ZHANG Jiqin. Analysis on uniform steering of tracked vehicles on ramp[J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(6): 44 - 48. (in Chinese)

[27] 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.

[28] 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)

[29] 王红岩,王钦龙,芮强,等. 高速履带车辆转向过程分析与试验验证[J]. 机械工程学报,2014,50(16):162 - 172.
WANG Hongyan, WANG Qinlong, RUI Qiang, et al. Analyzing and testing verification the performance about high-speed tracked vehicles in steering process[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014, 50(16): 162 - 172. (in Chinese)

[30] 王元杰,潘冠廷,于龙飞,等. 果园无人车多体动力学模型构建及有效性验证[J]. 农机化研究,2020,42(12):250 - 257.
WANG Yuanjie, PAN Guanting, YU Longfei, et al. Multibody dynamics model construction and validation of orchard unmanned vehicle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(12): 250 - 257. (in Chinese)

[31] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等. 坡度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):69 - 72,78.
ZHAO Longshan, HOU Rui, WU Faqi, et al. Effects of slope gradient on soil and water conservation benefit of tillage practices in agricultural lands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 69 - 72, 78. (in Chinese)

[32] 任露泉. 实验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.

[33] 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,1994.