

山地履带拖拉机纵向坡地越障性能仿真分析及试验验证

白 钰¹, 潘冠廷¹, 刘志杰¹, 于龙飞³, 杨福增^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100; 2. 农业部北方农业装备科学观测实验站, 杨凌 712100; 3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710048)

摘 要: 山地履带拖拉机作为一种农用动力机械, 工作在地形复杂、条件恶劣的丘陵山区, 因此, 要求其不仅具有一般履带拖拉机的基本特点, 而且应具有良好的坡地越障性能。利用 Pro/E 三维软件绘制山地履带拖拉机车体几何模型, 并在多体动力学软件 RecurDyn 中完成履带行走机构的选配及整机动力学模型的建立, 同时利用 RecurDyn 自带的地面 Ground 模块建立地面模型, 基于以上 3 种模型对该机进行多体动力学仿真, 分析速度、坡度角及拖拉机质心位置对其纵向坡地越障性能相关参数的影响。仿真结果表明, 在车速与坡度角一定的情况下, 质心位置越靠车体前端且越接近地面, 越有利于纵向越障性能。相关的坡地实测试验所测得结果与仿真结果基本保持一致, 验证了仿真模型的正确性, 为山地履带拖拉机进一步的改进设计提供理论参考依据。

关键词: 丘陵山地; 履带拖拉机; 越障性能; 多体动力学仿真

中图分类号: S232.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0536-05

Performance verification and simulation of the hillside crawler tractor for crossing the longitudinal slope obstacle

BAI Yu¹, PAN Guanting¹, LIU Zhijie¹, YU Longfei³, YANG Fuzeng^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100;

2. Scientific Observing and Experimental Station of North Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Yangling 712100;

3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710048)

Abstract: Hillside crawler tractors are often used in hills and mountains where the working conditions are always complicated. Therefore, they should have general features of a crawler tractor and the ability to cross obstacles in a sloping field. In this paper, a three-dimensional geometrical model of a hillside crawler tractor was draw using the Pro/E software. Configuration of the crawling devices and building a multi-body model and a ground model were achieved in the three-dimensional dynamics software RecurDyn. Based on the three models, a dynamic simulation was conducted to analyze the effects of different speed, slope angles, and centroid position on the longitudinal obstacle performance of the hillside crawler tractor in a sloping field. The results showed that, at certain speed and angles, the closer the centroid position to the front part of the tractor and the ground, the better the longitudinal slope obstacle performance of the tractor. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which further validates the correctness of the simulation model and provides a theoretical reference for the further improvement of hillside crawler tractors.

Key words: hills and mountains; crawler tractors; obstacle performance; multi-body dynamics simulation

在我国, 除了东北、华北和新疆等地存在大片适合现有农机作业的可耕农田外, 在西北、西南和东南等地区, 分布了约占中国国土总面积 70% 的丘

陵及山区^[1]。该地区土地资源禀赋较差、斜坡多、地块小而分散及交通不便, 是制约其农业发展的主要因素^[2]。履带拖拉机接地比压小、牵引附着性能

收稿日期: 2016-11-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0700503); 陕西省农业科技创新与攻关项目 (2016NY-127) 和杨凌示范区协同创新项目 (2016CXY-20) 共同资助。

作者简介: 白 钰, 硕士研究生。E-mail: baiyusd@163.com

* 通信作者: 杨福增, 教授, 博士生导师。E-mail: yfz0701@163.com

良好且对复杂地面的适应性强, 越来越多地被运用于丘陵山地农业生产中。

国内外针对履带式机械的越障性能进行了较多研究^[3-10], 分析并建立了履带式机械的越障模型, 并对其进行动力学仿真。然而这些研究大多只分析了履带式机械在水平地面上的越障过程, 缺少有关其坡地越障性能的研究。

良好的坡地越障性能是履带拖拉机适应坡地路面环境的重要保障, 反映了其在坡地顺利运行的能力。西北农林科技大学针对丘陵山地环境, 研制了一款可自动调平的山地履带拖拉机(图1), 并对该履带拖拉机的横纵向稳定性、牵引附着性和坡地稳定性等方面进行了深入的研究, 但是现有的研究成果在拖拉机坡地越障性能方面还较少。

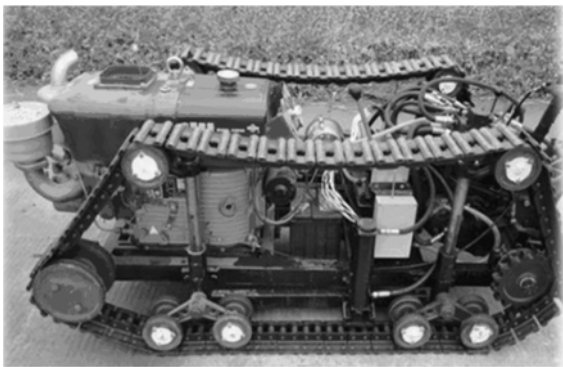


图 1 山地履带拖拉机

Figure 1 Hillside crawler tractor

本研究以该山地履带拖拉机的几何模型为对象, 运用多体动力学仿真软件 RecurDyn 中的低速履带模块(Track-LM)对其进行仿真, 着重分析车速、坡度角及拖拉机质心位置对其纵向坡地越障性能相关参数的影响, 并通过实测试验对仿真结果进行简单的验证, 为提高该机纵向坡地越障性能, 进一步改善其设计制造提供了理论依据。

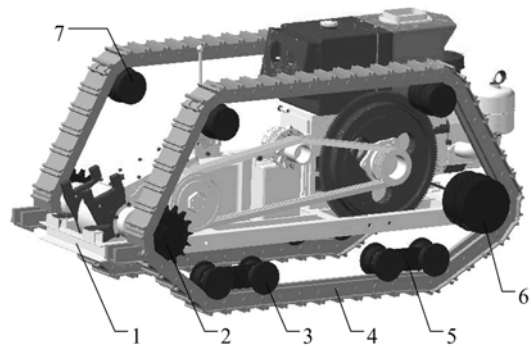
1 仿真模型的建立

1.1 山地履带拖拉机模型的建立

由于山地履带拖拉机结构复杂, 而 RecurDyn 软件几何建模功能有限, 因此采用 Pro/E 软件首先对机体部分进行几何建模和装配, 包括发动机、变速箱和车架等, 随后将其导入 RecurDyn 软件并建立履带行走系的几何模型。为了减小拖拉机的模型规模, 以提高仿真效率与成功率, 在不影响分析精度的前提下, 对机体进行适当的简化, 忽略一些次要零部件的建立, 删除防护罩及各种工艺边角、小孔等, 产生的重量误差可在 RecurDyn 中通过修改

质量及质心参数进行调整。

履带行走系主要零件的几何模型是在 RecurDyn 的低速履带模块(Track-LM)环境下构建的, 包括驱动轮、导向轮、支重轮、托带轮、履带板及支重轮连接架等。通过将实际测量所得的尺寸参数输入到相应的参数设置界面, 即可完成模型构建并装配, 最终建立好的山地履带拖拉机多体动力学模型如图2所示。



1. 机体; 2. 驱动轮; 3. 支重轮; 4. 履带; 5. 支重轮连接架; 6. 导向轮; 7. 托带轮

1.Main body; 2.Sprocket; 3.Track roller; 4.Track belt; 5.Roller connection frame; 6.Front idler; 7.Carrier roller

图 2 山地履带拖拉机多体动力学模型

Figure 2 Virtual prototype model of hillside crawler tractor



图 3 路面模型

Figure 3 Road model

1.2 路面模型的建立

RecurDyn 软件以履带与地面间的接触压力为依据, 提供了硬质路面参数设置, 路面模型可利用 RecurDyn 自带的 Ground 模块建立。以坡道角度为 10° 、越障高度为 150 mm 的路面模型为例, 生成的路面及拖拉机模型如图3所示。

2 纵向坡地越障通过性仿真分析

在仿真环境下拖拉机的运动是通过在两侧驱动轮上施加 STEP 阶跃函数实现的, 该函数用于定义驱动轮转速由零到达某特定值的时间及过程, 其表达式为 $\text{STEP}(\text{time}, t_0, \omega_0, t_1, \omega_1)$, 式中 t_0 、 t_1 分别表示时间的初始值和最终值, ω_0 、 ω_1 分别表示驱动轮角速度的初始值和最终值。例如, 拖拉机越障时以一档状态行驶, 在此状态下驱动轮角速度为 $3.93 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[11], 故在仿真时, 设定 ω_0 和 ω_1 的值分别为 0 及 3.93; 假定驱动轮角速度由 ω_0 增加到 ω_1 是在 3 s 内完成的, 故设定 t_0 和 t_1 的值分别为 0 和 3, 因

此，施加在两侧驱动轮上的阶跃函数表达式为 STEP(time, 0, 0, 3, 3.93)，仿真时间为 30 s。

表 1 各档位的行驶速度及驱动轮角速度
Table 1 Speed and sprocket angular velocity of each gear

项目 Item	档位 Gear		
	I	II	III
行驶速度/km·h ⁻¹ Speed	1.6	2.2	4.1
驱动轮角速度/rad·s ⁻¹ Sprocket angular velocity	3.93	5.41	10.08

2.1 不同速度下的越障仿真

山地履带拖拉机各档位的行驶速度及驱动轮角速度的对应关系如表 1 所示。对应不同档位按照从低档到高档的顺序分别设置驱动函数，表达式如表 2 所示。取障碍物高度为 80 mm，坡度为 15°，对不同档位下山地履带拖拉机的越障过程进行仿真，观察驱动轮扭矩、履带张紧力的变化规律。

表 2 各档位驱动函数表达式
Table 2 Drives function expression of each gear

档位 Gear	驱动函数表达式 Drives function expression
I	STEP (Time,0,0,3,3.93)
II	STEP (Time,0,0,3,5.41)
III	STEP (Time,0,0,3,10.08)

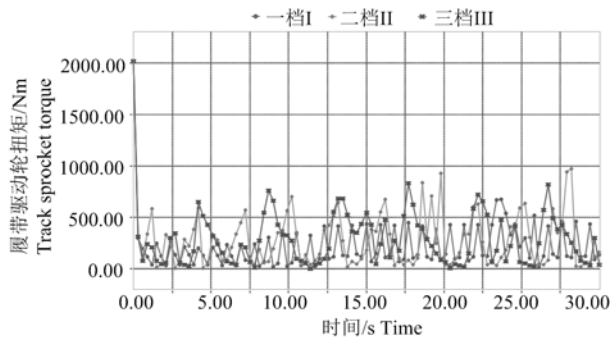


图 4 坡地越障不同车速与履带驱动轮扭矩关系曲线
Figure 4 The different speeds and track sprocket torque curve on sloping obstacle field

由图 4 可知，履带驱动轮扭矩呈现周期性波动，在样机启动阶段由于转速比较低，履带驱动轮的转矩很快达到了 2 000 N·m，这与实际情况相符；然后随着转速增加，稳定在一定数值。由于履带抖动，在此过程中履带驱动轮扭矩有一定的波动。越障前后，履带驱动轮扭矩随速度增加而增大；越障过程中，3 个档位下的履带驱动轮扭矩几乎相同，说明越障速度对越障过程中驱动轮扭矩变化影响不大。

由图 5 可知，在越障过程中，车速越高，履带

张紧力（单侧）变化幅值越大，越容易发生脱带现象，导致其纵向坡地通过性越差。由于微型履带山地拖拉机在行驶时受到不均匀的地面压力和行驶阻力影响，张紧力的变化比较大，波动变化也较明显。

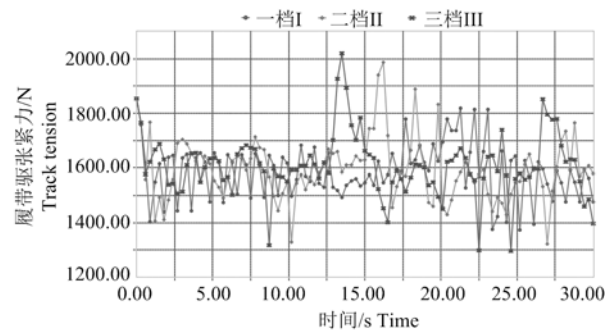


图 5 坡地越障不同车速与履带张紧力关系曲线
Figure 5 The different speeds and track tension curve on sloping obstacle field

2.2 不同坡度角下的越障仿真

山地履带拖拉机在纵向坡地越障仿真过程中，一般采取一档档速行驶，通过改变 RecurDyn 模型中的坡度角，进行多次重复性仿真，进而寻找坡地越障极限高度，其结果如表 3 所示。

障碍物高度取 80 mm，车速取一档，分别设置 3 种不同的坡度角：10°、15° 和 20° 进行仿真，观察其在坡地越障过程中坡度对质心垂向速度及俯仰角的影响。

表 3 纵向坡地极限越障高度
Table 3 Obstacle height limit on the longitudinal sloping

类型 Type	坡度角/° Angle	极限越障高度/mm Obstacle height limit
越障 Obstacle	10	170
	15	150
	20	100

图 6 所示为不同坡度角与质心垂向速度关系曲线。可以看出，坡度角越小，山地履带拖拉机到达障碍物的时间越早，这主要与其在坡地上的受力有关，越障时，质心垂向速度出现明显峰值，且变化迅速，并且在坡度角为 15° 时变化最为剧烈，最大质心垂向速度为 764 mm·s⁻¹；坡度角为 20° 时的波动虽然比 15° 小，但坡度越大拖拉机越容易发生倾翻的危险，因此在保证越障安全性的前提下，坡度角越小，山地履带拖拉机越障性能越好。

图 7 为不同坡度角与拖拉机俯仰角关系曲线，其中负值表示俯仰角的方向。由图 7 可以看出，越障时，俯仰角先迅速增加而后迅速减小，并且 15°

时俯仰角达到最大的 -42.28° 。由此,可以看出在坡地越障取定的 3 个坡度中, 15° 最不利于该拖拉机越障, 坡地通过性最差。

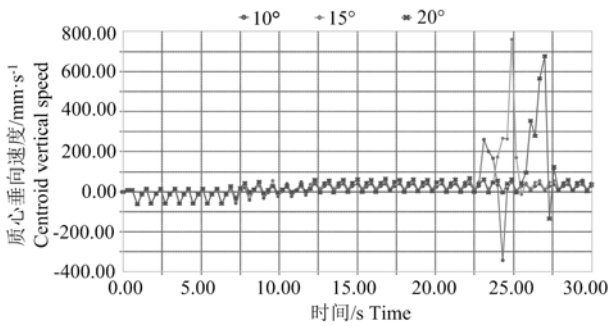


图 6 坡地越障不同坡度与质心垂向速度关系曲线

Figure 6 The different gradients and centroid vertical speed curve on sloping obstacle field

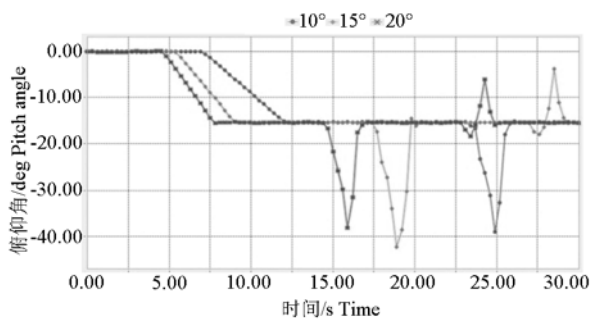


图 7 坡地越障不同坡度与俯仰角关系曲线

Figure 7 The different gradients and angle of pitch curve on sloping obstacle field

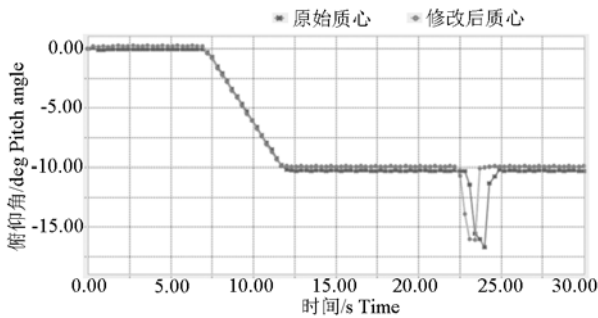


图 8 不同质心位置与俯仰角关系曲线

Figure 8 The different centroids and angle of pitch curve

2.3 不同质心位置下的越障仿真

障碍物高度取 80 mm, 坡度角取 10° , 质心位置分别取原始质心 Origin (730, 380, -5) 以及修改后的质心 Origin (530, 200, -5), 修改后的质心相对原始质心更靠近拖拉机前端, 且更靠近地面。以一档车速行驶, 进行仿真, 观察质心位置对该拖拉机越障性能的影响, 不同质心位置与俯仰角及质心垂向加速度的关系曲线分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可以看出, 在其他条件不变的情况下,

修改质心后拖拉机的俯仰角比原始的俯仰角有所减小, 对其在坡地越障更有利; 图 9 显示修改质心后的质心垂向加速度波动幅度比修改前大。因此可以得出, 在坡地越障过程中, 拖拉机的质心位置越靠前且越接近地面, 越有利于其越障。

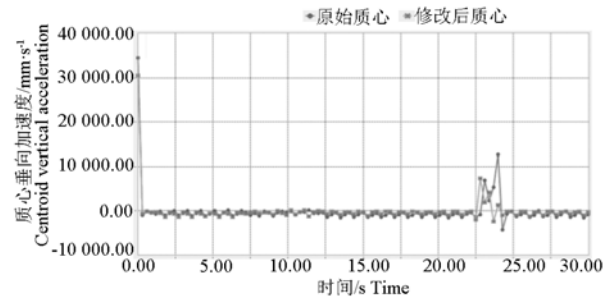


图 9 不同质心位置与质心垂向加速度关系曲线

Figure 9 The different centroids and centroid vertical acceleration curve

3 纵向越障性能试验与结果分析

试验地点有不同坡度角, 且不同坡度之间连续变化, 给小幅度调整坡度带来了很大的方便, 因此在进行坡地越障性能试验的时候, 可以根据需要, 建立不同的坡地进行试验, 测量的数据也相对精确。试验设备主要有: 山地履带拖拉机、垂直障碍物(长、宽、高分别为 1 200 mm、200 mm 和 300 mm 的实木)、卷尺和倾角仪等。

在试验场地分别选取 10° 、 15° 和 20° 3 个不同坡度的试验坡地, 对其进行小幅度平整。因履带拖拉机在行走作业时, 较少遇到垂直障碍, 主要为仿形越障行走^[12], 因此, 人为改变坡地处垂直障碍物的高度 100~180 mm, 用于模拟履带拖拉机越障极限试验。将垂直障碍物每隔 20 mm, 由坡底到坡顶依次埋入不同坡度的土壤中并压实, 进行仿形极限越障试验。



图 10 纵向坡地越障

Figure 10 Climbing obstacle on the longitudinal slope

使拖拉机处于正常工作状态, 在现有路面条件下, 以一档、匀速、正面驶向障碍物, 由低到高依

次不施加人工辅助爬上各个高度的障碍物，直至不能爬上为止，寻找纵向最大越障高度，如图 10 所示。

表 4 纵向坡地越障试验结果

Table 4 Result of the longitudinal slope obstacle test

类型 Type	坡度角范围/° Angle range	越障高度范围/mm Obstacle height range
越障 Obstacle	10~12	160~180
	14~17	140~160
	19~20	100~120

由坡地越障实测试验结果（表 4）表明，山地履带拖拉机所能越过的障碍物高度随坡度角的增加而减小，其越障高度与表 3 仿真结果基本保持一致，因此仿真模型可靠。

4 结论

通过运用多体动力学仿真软件 RecurDyn 建立的虚拟样机模型，对山地履带拖拉机纵向坡地越障过程进行仿真，观察其越障相关参数变化情况，并通过实测试验进行了简单验证，通过仿真分析可以得出以下结论：

（1）越障前后，驱动轮扭矩随履带拖拉机越障速度增加而增大，但越障速度对越障过程中的驱动轮扭矩变化影响不大；履带张紧力（单侧）幅值随越障速度增大而增大，易发生脱带现象。

（2）越障时，拖拉机的质心垂向速度出现明显峰值，且变化迅速，因此在保证越障安全性的前提下，坡度角越小，山地履带拖拉机越障性能越好。

（3）在其他条件不变的情况下，修改质心后拖拉机的俯仰角比原始的俯仰角有所减小，对其在坡地越障更有利；修改质心后的质心垂向加速度波动幅度比修改前大。因此拖拉机的质心位置越靠前且越接近地面，越有利于其越障。

（4）纵向坡地极限越障高度实测试验与仿真结果基本保持一致，从而验证了越障模型的正确性，为山地履带拖拉机的进一步改进设计提供理论参考依据。

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]. T ASABE, 2014, 57(2): 363-370.
- [2] 刘志杰, 王勇毅, 杨福增, 等. 陕西省丘陵山区农业机械化发展调研报告[J]. 农业机械, 2015 (11): 105-107.
- [3] 沈仙法, 王海巧. 履带喷雾车软路面越障性能分析[J]. 机械设计与制造, 2016 (5): 208-211.
- [4] 张德, 邹树梁, 唐德文, 等. 基于 RecurDyn 的防辐射履带式挖掘机越障性能研究[J]. 机械设计与制造, 2015 (5): 83-88.
- [5] 朴春日, 颜国正, 王志武, 等. 一种履带式机器人设计及其越障分析[J]. 现代制造工程, 2013 (3): 24-27.
- [6] 王松涛, 朱华. 履带式煤矿救援机器人越障能力的运动学分析[J]. 矿山机械, 2012, 40(8): 97-100.
- [7] WAKABAYASHI S, SATO H, NISHIDA S I. Design and mobility evaluation of tracked lunar vehicle[J]. J Terramechanics, 2009, 46(3): 105-114.
- [8] ZHOU Y, WANG X. Obstacle performance simulation of tracked vehicles based on the ADAMS/ATV[C]// Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on. IEEE, Changchun, 2011.
- [9] 莫海军, 朱文坚. 履带式移动机器人越障稳定性分析[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(1): 65-67.
- [10] 王克运, 张相洪, 史力晨, 等. 履带车辆越障过程的动力学仿真[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 577-583.
- [11] 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.
- [12] 刘平义, 王振杰, 李海涛, 等. 行星履带式农用动力底盘设计与越障性能研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 17-18.