

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.03.025

王泽晖, 张立萍, 郑威强, 等. 履带式沙障埋设车坡面通过性仿真与分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 168-174

Wang Zehui, Zhang Liping, Zheng Weiqiang, et al. Simulation and analysis of slope passability of tracked sand barrier laying vehicle [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 168-174

履带式沙障埋设车坡面通过性仿真与分析^{*}

王泽晖, 张立萍, 郑威强, 卫粤鸿, 姜泽

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐市, 830017)

摘要:我国沙漠化严重,急需埋设沙障进行防风固沙,沙漠地形较为复杂,沙障埋设机械的底盘性能决定能否完成沙障埋设任务,是沙漠化治理进程中需要解决的基础问题。以沙漠坡面作为主要应用场景,设计一种新型履带式沙障埋设车,对沙障埋设车在斜坡上纵向和横向行驶的通过性进行理论分析。根据实际需求,使用 Recurdyn 仿真软件对设计的履带式沙障埋设车在不同坡面的行驶过程进行仿真分析,以坡面角度作为指标,对车辆通过性进行分析评价。结果表明,履带式沙障埋设车在 25°斜坡纵向上坡和下坡均可以顺利通过,经过履带调速后可以在 15°斜坡和新月形沙丘上横向行驶。该履带式沙障埋设车具有较好的通过性,可应对沙漠复杂环境下的沙障埋设工作。

关键词:履带式;沙障埋设车;通过性;稳定性;坡面;Recurdyn 多体动力学

中图分类号: S220.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 03-0168-07

Simulation and analysis of slope passability of tracked sand barrier burying vehicle

Wang Zehui, Zhang Liping, Zheng Weiqiang, Wei Yuehong, Jiang Ze

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, 830017, China)

Abstract: China's serious desertification leads to the urgent need to bury sand barriers to prevent wind and sand consolidation. Under more complex desert terrain, the chassis performance of sand barrier buried machinery which determines the completion of the sand barrier burying task, is the basic problem that needs to be solved in the process of desertification control. Taking the desert slope as the main application scenario, a new type of tracked sand barrier burying vehicle was designed, and the theoretical analysis of the passability of the sand barrier burying vehicle driving longitudinally and laterally on the slope was carried out. According to the actual demand, the designed crawler sand barrier burying vehicle was simulated and analyzed for the driving process on different slopes by using Recurdyn simulation software, and the slope angle was used as an indicator to analyze and evaluate the vehicle passability. The results showed that the tracked sand barrier burying vehicle could pass smoothly on 25° slope longitudinal uphill and downhill, and could drive laterally on 15° slope and crescent-shaped sand dune after the track speed adjustment. It has proved that the tracked sand barrier burying vehicle with good passability can cope with the sand barrier burying work in the complex environment of desert.

Keywords: tracked; sand barrier burial vehicle; passability; stability; slope; Recurdyn multibody dynamics

0 引言

土地荒漠化是我国长期面临的环境问题,尤其是我国西北地区,长期受到风沙天气危害,水土流失严重,生态环境建设和可持续发展受到破坏。机械沙障可以有效地阻碍风沙流,提高地表粗糙度,降低近地面

风速,减少地表沙粒与风的接触和气流的携沙量^[1],被广泛地用于我国沙漠化治理中。机械沙障材料通常就地取材,常见的材料有秸秆、麦草、芦苇秆、树枝等^[2]。

传统的机械沙障埋设方式为人工埋设,通过铁锹挖沟,将机械沙障填入沟中再进行埋设,但由于野外工作环境差,人工埋设效率低、质量差、成本高,无法解决我

收稿日期:2023 年 7 月 10 日 修回日期:2023 年 10 月 26 日

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52265039)

第一作者:王泽晖,男,1999 年生,新疆哈密人,硕士研究生;研究方向为沙障埋设机械装备。E-mail: 1328260704@qq.com

通讯作者:郑威强,男,1979 年生,新疆库尔勒人,博士,副教授;研究方向为现代制造装备技术、智能农业机械。E-mail: xjzwq@xju.edu.cn

国沙漠化面积大、流动沙域多、环境恶劣的问题。因此，亟须设计研发一种具有良好通过性、能在恶劣环境下完成沙障埋设作业并且自动化程度更高的沙障铺设车。

2002 年,在国家高新技术研究发展“863”计划中,确定了工程治沙机械的研发计划项目—防风固沙草沙障铺设机器人研究,标志着我国工程治沙机械的研究工作已进入了一个新的发展阶段^[3]。在已有的研究基础上孙术发等^[4]利用 ADAMS 软件对防风固沙草沙障铺设机器人横向切断机构进行动力学仿真,绘制出关键部位的速度、位移等参数曲线。唐伟国等^[5]设计了多杆横向插刀机构,对 Stephenson—Ⅲ型六杆机构进行运动学分析。隋婷婷等^[6]提出一种多杆步进式并联横向插草机构,求解运动学模型得到插刀机构标记点插草过程中连续变化的曲线,利用 fsolve 函数进行插刀标记点的轨迹规划。防风固沙草沙障铺设机器人采用轮式底盘,装备质量大,面对复杂多变松软的沙漠地形,没有良好的通过性,使其推广应用受到阻碍^[7]。徐先英等^[8]设计的手扶式独轮麦草沙障铺设装置,先将散装的干麦草铺设在沙土表面,再使沙障铺设装备从麦草上压过,将麦草压入到沙土中,随后完成覆土,最终完成沙障铺设工作。这种麦草沙障铺设装置具有操作简单、价格低廉的特点,但该埋设装备需人力推动,使用场景受限、工作效率较低、自动化程度不高,使其无法大面积推广使用。

为提高沙障埋设机械在沙漠环境的通过性,使其以平稳的状态在沙漠坡面上行驶,本文设计一种履带式沙障埋设车,并对其在沙地坡面的通过性进行仿真与试验分析。

1 整体结构

1.1 设计要求

沙障埋设车需要在沙漠环境下行走并完成沙障埋设作业,通常沙障埋设在平缓沙面、迎风坡沙面以及新月形沙丘迎风坡沙面,需要车辆在斜坡和新月形沙丘路面有良好通过性。

轮式底盘有速度优势,但轮胎接地面积小,地面附着力远小于履带底盘,在沙漠环境没有良好通过性^[9]。综合比较,履带车辆具有坡面通过性能好的显著优点,故沙障埋设车采用履带式底盘结构。

1.2 总体结构

沙障埋设车由履带动力底盘、沙障运送系统、沙障埋设系统,远程控制系统等部分组成,整车简图如图 1 所示。履带动力底盘主要由驱动轮、支撑轮、履带、张紧装置、导向轮、电机、电池和车架等部分组成,是沙障埋设车的行走机构,能确保沙障埋设车在复杂地形下有良好的通过性;沙障运输系统的功能是转动草帘卷,

将其从料箱运送至地面,并使其平铺在沙土表面;沙障埋设系统的功能是通过液压杆调整压草刀高度,压草刀从草帘中间压过,将其压入沙土中,再由后方覆土板完成覆土,最终形成沙障;远程控制系统的功能是接受和发出信号,控制电机的启闭,实现沙障埋设车的远程控制作业。沙障埋设车主要技术参数如表 1 所示。

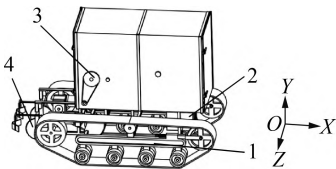


图 1 沙障埋设车简图

Fig. 1 Sand barrier burying vehicle

1.履带动力底盘 2.远程控制系统 3.沙障传送系统 4.沙障埋设系统

表 1 车辆参数

Tab. 1 Vehicle parameters

参数	数值
外形尺寸($L_1 \times W \times H$)/ (mm×mm×mm)	2 400×1 400×1 700
整机质量/kg	400
底盘离地间隙/mm	300
底盘接近角/(°)	33
底盘离去角/(°)	24
工作速度/(km·h ⁻¹)	4
最大行驶速度/(km·h ⁻¹)	8
电机功率/W	750
轨距 B/mm	1 000
履带接地长度 L/mm	1 300
履带宽度 b/mm	260
驱动轮直径 D_q /mm	350
导向轮直径 D_d /mm	316
支撑轮半径 r/mm	100

2 履带底盘坡面通过性理论分析

2.1 斜坡纵向通过性分析

履带式沙障埋设车在沙漠坡面上行驶时,通过性能是由其坡面牵引性能和坡面倾翻稳定性能决定的。沙障埋设车无法通过坡面时,其主要原因是车轮牵引能力不足或者车体失稳发生倾翻。一般选取车辆能够通过最大坡面的坡度角作为其通过性能评价指标。斜坡纵向行驶时用纵向极限倾翻角表示,斜坡横向行驶时用横向极限倾翻角表示^[10]。

当沙障埋设车在大坡度纵向坡面行驶,由于重力作用,车辆会倾翻。沙障埋设车在上、下坡时的纵向极限倾翻角为 α_1 和 α_2 。

参考 GB 25849—2010《移动式升降工作平台设计计算、安全要求和测试方法》对沙障埋设车斜坡纵向行

驶过程进行理论分析,先对车辆结构进行简化,由于整机在作业时行驶速度较低,故忽略不计爬坡时受到的空气阻力和空气升力,同时不考虑履带弹性变形量。如图 2 所示, A 和 B 为左右两支撑轮与地面的接触点, O 为质心。考虑最不利的稳定条件工况,风载荷 F 在上坡时水平向左。沙障埋设车匀速上坡时,整车受力平衡。 A 点为沙障埋设车倾翻点。此时车辆最大倾覆力矩和稳定力矩为

$$M_{\text{倾}} = N_1 c + Fh \cos \alpha_1 + Gh \sin \alpha_1 \quad (1)$$

$$M_{\text{稳}} = aG \cos \alpha_1 \quad (2)$$

式中: F_1 ——沙障埋设车驱动力, N ;

G ——沙障埋设车重力, N ;

α_1 ——上坡角度, $(^\circ)$;

a ——质心到左端支撑轮之间的距离, m ;

h ——质心到斜坡坡面间的距离, m ;

N_1 ——坡面对沙障埋设车垂直反作用力, N ;

c ——垂直反力到驱动轮之间距离, m ;

F ——风载荷, N 。

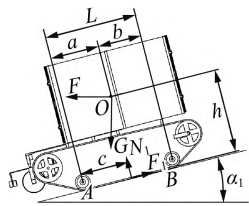


图 2 纵向上坡受力简图

Fig. 2 Longitudinal uphill force analysis

防倾覆安全系数 $K = M_{\text{稳}}/M_{\text{倾}} \geq 1$ 才能确保车辆稳定,即 $M_{\text{稳}} \geq M_{\text{倾}}$ 且处于临界值时, $c = 0$, 即 $Ga \cos \alpha_1 - Fh \cos \alpha_1 + Gh \sin \alpha_1 = 0$, 可得出沙障埋设车不发生翻车的上坡纵向极限倾翻角

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{a}{h} - \frac{F}{G}\right) \quad (3)$$

同理,如图 3 所示,分析沙障埋设车下坡行驶,考虑最不利的稳定条件工况,风载荷 F 在下坡时水平向右, B 点为沙障埋设车倾翻点,此时车辆最大倾覆力矩和稳定力矩为

$$M_{\text{倾}} = N_2 c + Gh \sin \alpha_2 + Fh \cos \alpha_2 \quad (4)$$

$$M_{\text{稳}} = Gb \cos \alpha_2 \quad (5)$$

式中: F_2 ——沙障埋设车驱动力, N ;

α_2 ——下坡角度, $(^\circ)$;

b ——质心到右端支撑轮之间的距离, m ;

N_2 ——坡面对沙障埋设车垂直反作用力, N 。

同理,当 $c = 0$, 即 $Gb \cos \alpha_2 - Fh \cos \alpha_2 + Gh \sin \alpha_2 = 0$ 时,沙障埋设车不会发生翻车,最大下坡纵向极限倾翻角

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{b}{h} - \frac{F}{G}\right) \quad (6)$$

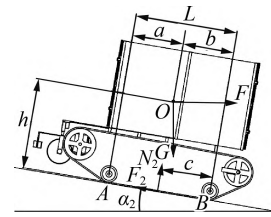


图 3 纵向下坡受力简图

Fig. 3 Longitudinal downhill force analysis

根据以上受力分析可知,质心位置和风载荷会影响沙障埋设车上坡和下坡的通过性,当沙障埋设车上坡时, a 越大,质心越靠近右端支撑轮, α_1 越大,上坡通过性越好。当沙障埋设车下坡时, b 越大,质心越靠近左端支撑轮, α_2 越大,下坡通过性越好。当质心高度和风载荷越低时,上坡和下坡通过性都会提高^[11]。

2.2 斜坡横向通过性分析

履带车辆在横向坡道行驶,当坡道倾斜角大于倾翻角临界值时,车辆会发生倾翻或横向滑移,沙障埋设车在斜坡上行驶的最大坡度角称为横向极限倾翻角 θ_{max} 。

对沙障埋设车斜坡横向行驶过程进行理论分析,假设条件与车辆纵向行驶相同。如图 4 所示。 C 和 D 为左右履带与斜坡坡面的接触点, F_3 和 F_4 为斜面给车的横向反作用力,考虑最不利的稳定条件工况,风载荷 F 水平向左。沙障埋设车在斜坡上横向匀速直线行驶,整车受力平衡。 D 点为沙障埋设车倾翻点。此时车辆最大倾覆力矩和稳定力矩为

$$M_{\text{倾}} = N_3 B' + Gh \sin \theta + Fh \cos \theta \quad (7)$$

$$M_{\text{稳}} = G(0.5B' - e) \cos \theta \quad (8)$$

式中: N_3 ——斜面给车的垂直反作用力, N ;

B' ——轨距,即左右履带间距离, m ;

θ ——斜坡角度, $(^\circ)$;

e ——质心偏移距离, m 。

防倾覆安全系数 $K = M_{\text{稳}}/M_{\text{倾}} \geq 1$ 才能确保车辆稳定,即 $M_{\text{稳}} \geq M_{\text{倾}}$ 且处于临界值时 $N_3 = 0$, 即 $G(0.5B' - e) \cos \theta - Gh \sin \theta - Fh \cos \theta = 0$, 可得出横向行驶的最大横向倾翻角

$$\theta_{\text{max}} = \arctan\left(\frac{0.5B' - e}{h} - \frac{F}{G}\right) \quad (9)$$

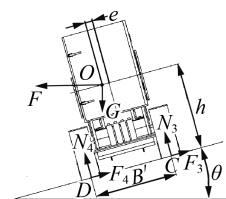


图 4 斜坡横向行驶受力简图

Fig. 4 Force analysis of lateral driving on slopes

根据以上受力分析可知,质心位置和风载荷会影响沙障埋设车斜坡横向行驶的通过性,履带轨距越大、

质心偏移越小、质心高度越低,风载荷越小,则斜坡横向行驶通过性越好^[12]。

3 履带底盘通过性仿真分析

在沙障埋设车通过性理论分析的基础上,通过 Recurdyn 软件进行通过性仿真分析。RecurDyn 是基于递归算法开发出的新一代多体系统动力学仿真软件。先在 Recurdyn 中建立整机仿真模型如图 5 所示,然后根据沙漠地区土壤参数完成地面模型建立,干沙地面参数如表 2 所示。

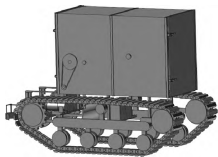


图 5 沙障埋设车仿真模型
Fig. 5 Simulation model of sand barrier laying vehicle

表 2 干沙路面物理参数

Tab. 2 Dry sand pavement physical parameters

参数	数值
内聚变形模量 $k_c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+1)})$	4.761×10^{-4}
内摩擦变形模量 $k_\theta / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+1)})$	7.660×10^{-4}
内聚力 c / kPa	1.04×10^{-3}
土壤剪切角 $\theta / (^\circ)$	28
土壤变形指数 n	1.1

3.1 斜坡纵向通过性分析

建立 3 种不同的坡度(15°、20°、25°)的斜坡地形,对履带式沙障埋设车斜坡纵向通过性进行仿真,分析质心速度、高度,俯仰角的变化曲线。行驶过程如图 6 所示。沿着行驶方向为 x 轴正方向,竖直向上方向为 y 轴正方向,右侧垂直于行驶方向为 z 轴正方向。

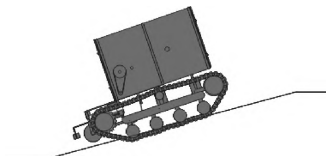


图 6 斜坡纵向行驶仿真过程
Fig. 6 Longitudinal driving simulation process on slopes

由图 7 可知,在 3 种坡度下质心 x 方向速度有相同变化趋势。以 15°斜坡行驶仿真结果为例,0~2 s 为沙障埋设车加速时间段,2 s 后速度升至 4 km/h(约 1 111 mm/s);4~6 s 为车辆爬上斜坡时间段,车速明显降低;6~9 s 为车辆在斜坡上匀速爬坡时间段;9 s 时车辆由于惯性冲出斜坡,车辆势能转化为动能,车速有明显提升,随后由于车体下落惯性,车速减低,然后逐渐恢复车速^[13]。根据三条线可明显得知,4~11 s 内 25°斜坡车速变化最大,15°斜坡车速变化最小。

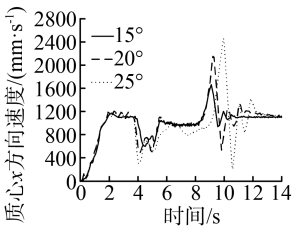


图 7 不同坡度上坡时质心 x 方向速度变化曲线
Fig. 7 Velocity variation curve in the x -direction of the center of mass when uphill with different slopes

由图 8 可知,在 3 种坡度下有相同的质心 y 方向高度变化趋势。以 15°斜坡行驶仿真结果为例,0~4 s 为平地行驶阶段, y 方向质心高度为 0;4~9 s 线条斜率基本保持不变,此阶段为匀速爬坡阶段;9~10 s 由于惯性沙障埋设车冲出斜坡, y 方向位移产生变化,10~14 s 是平地行驶阶段,车速逐渐恢复平稳^[14]。

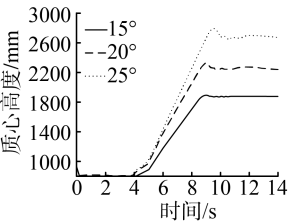


图 8 不同坡度上坡时质心 y 方向高度变化曲线
Fig. 8 Height change curve of center of mass in y -direction when different slopes are uphill

由图 9 可知,在 3 种坡度下有相同的俯仰角度变化趋势。以 15°斜坡行驶仿真结果为例,0~2 s 加速段,俯仰角略有变化;2~4 s 为车辆水平匀速直线运动阶段,俯仰角基本不变;4 s 时沙障埋设车开始驶上斜坡,俯仰角逐渐增大;6 s 时底盘全部驶入斜坡,导致俯仰角突然增大;6~9 s 是匀速爬坡阶段,俯仰角度基本不变,略高于斜坡角度;10 s 时沙障埋设车由于惯性冲出斜坡,随后落入平面,俯仰角明显降低,随后平地俯仰角恢复为 0°。

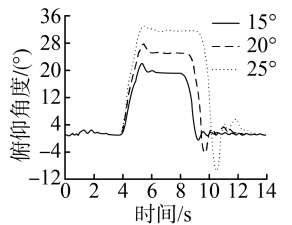


图 9 不同坡度上坡时俯仰角度变化曲线
Fig. 9 Pitch angle variation curve when going uphill with different slopes

根据不同坡度的上坡仿真结果,综合分析可知,在 x 、 y 、 z 三个方向车辆都有很好的稳定性,车辆可以平稳地通过 3 种角度的坡面。其中 25°斜坡车速下降最明显、质心高度升高最大、俯仰角度最大。坡面角度越大,坡底处和坡顶处速度、位移、俯仰角变化越明显。

同理,分析不同坡度下坡时沙障埋设车的通过性如

图 10~图 12 所示,3 种坡度下车辆有相同的运动趋势,且沙障埋设车均能平稳通过。坡度越大车速变化越大,下坡阶段由于惯性作用俯仰角略大于斜坡角度^[15]。坡面角度越大坡底顶和坡底处速度、位移、俯仰角变化越明显。

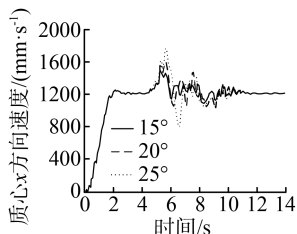


图 10 不同坡度下坡时质心 x 方向速度变化曲线

Fig. 10 Speed change curve in the x -direction of the center of mass when downhill with different slopes

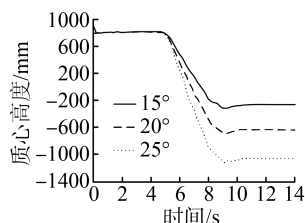


图 11 不同坡度下坡时质心 y 方向高度变化曲线

Fig. 11 Height change curve of centroid y -direction when downhill with different slopes

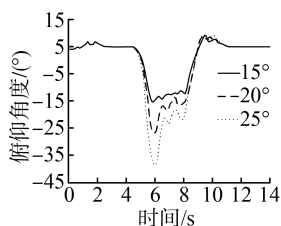


图 12 不同坡度下坡时俯仰角度变化曲线

Fig. 12 Pitch angle variation curve when going downhill with different slopes

3.2 斜坡横向通过性分析

在斜坡横向行驶时,由于坡面作用反力,使得沙障埋设车重心偏移,小坡度会使车辆滑落至坡底,大坡度可能会使车辆侧翻。履带底盘可以通过调整两边履带差速旋转,使其在斜坡横向行驶时尽量保持直线行驶。建立 15°坡度的斜坡地形,对履带式沙障埋设车斜坡横向通过性进行仿真,分析质心速度、高度、位移的变化曲线。行驶过程如图 13 所示。

如图 14 所示,调整履带速度前和调速后,质心在 x 方向上速度有很大差异。调速前两履带速度 0~2 s 内由 0 提升至 1 111 mm/s,随后车辆在横坡上慢慢滑落,在 10 s 后车辆滑出横坡,在仿真环境中做自由翻转落体运动,使得速度急增急降。调整履带转速后,履带一侧速度为 1 111 mm/s,另一侧速度为 1 227 mm/s,由仿真结果可看出,调速后 x 方向速度基本保持不变, x 方向车辆行驶平稳。

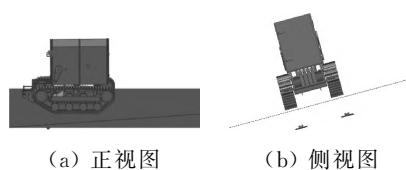


图 13 15°斜坡横向行驶仿真过程

Fig. 13 15° slope lateral driving simulation process

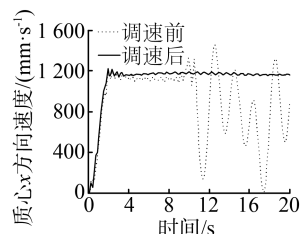


图 14 15°斜坡横向行驶质心 x 方向速度变化曲线

Fig. 14 Speed change curve in the direction of 15° lateral driving center of mass x -direction

由图 15 所示,0 s 时位移下降是由于沙障埋设车仿真初始时离坡面有一定距离,且车辆落在坡面会陷入沙面一小部分。调速前车辆从横坡滑落,10 s 时滑出横坡, y 方向位移下降明显随后在仿真环境中做自由翻转落体运动。调速后车辆在 y 方向位移基本保持不变, y 方向车辆行驶平稳^[16]。

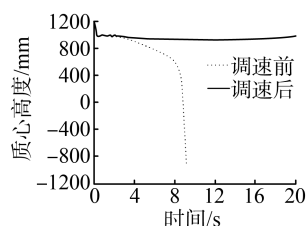


图 15 15°斜坡横向行驶质心 y 方向高度变化曲线

Fig. 15 Height change curve in the y -direction of the centre of mass for lateral travel on a 15° slope

由图 16 可知,调速前沙障埋设车质心 z 方向位移迅速增大,此时车辆正在从横坡上滑落,10 s 时滑出横坡。调速后车辆在 z 方向位移基本保持不变,车辆在 z 方向行驶平稳。

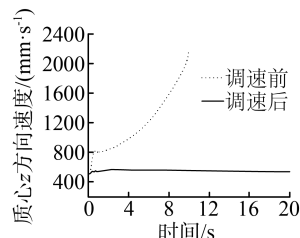


图 16 15°斜坡横向行驶质心 z 方向位移变化曲线

Fig. 16 Variation curve of z -directional displacement of the center of mass for lateral travel on a 15° slope

根据沙障埋设车在 15°横坡上的行驶仿真结果,综合分析可知,调速前车辆由于重心偏移会从横坡上滑落,无法在横坡上行驶^[17]。调速后车辆在三维方向上形

式运动都有良好的平稳性,可以在 15° 横坡上行驶工作。

3.3 新月形沙丘通过性分析

考虑到沙障埋设车主要在沙漠中工作,根据沙漠环境特有的新月形沙丘,在软件中建立仿真地面模型,分析车辆在沙丘地形下的通过性。

新月形沙丘是风积地貌的一种,是平面如新月的沙丘。其纵剖面的两坡不对称,迎风坡凸面平缓,坡度在 $5^\circ \sim 20^\circ$;背风坡凹而陡,一般为 $28^\circ \sim 34^\circ$ 。如图17所示,建立地面仿真模型,沙丘长度为20 m,迎风坡角度为 15° ,背风坡角度为 30° 。同斜坡横向行驶一样,需要对履带调速,调整履带转速后,履带一侧速度为1111 mm/s,另一侧速度为1227 mm/s。

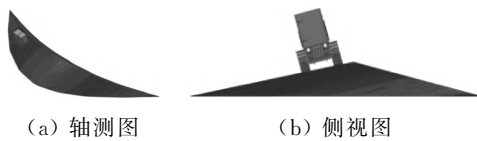


图17 新月形沙丘行驶仿真过程

Fig. 17 Crescent-shaped dunes driving simulation

由图18可知,0 s时车辆速度为0,且处于斜坡,车辆会向 $-x$ 方向移动,速度负增加。随后速度逐渐增加,达到预设速度后,基本保持匀速行驶,11 s时车辆行驶至小坡路段,速度小幅增大。

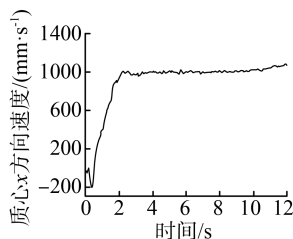


图18 新月形沙丘行驶质心 x 方向速度变化曲线

Fig. 18 Crescent-shaped dune driving center of mass x -direction velocity change curve

由图19可知,0 s时沙障埋设车仿真初始时离坡面有一定距离,且车辆落在坡面会陷入沙面一小部分,位移下降。0~6 s在弧形上坡路面行驶,位移逐渐增加。6~12 s在弧形下坡路面行驶,位移逐渐减小。整体的位移曲线为弧形,基本与路面弧线相吻合。

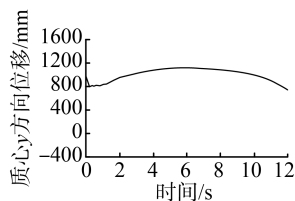


图19 新月形沙丘行驶质心 y 方向高度变化曲线

Fig. 19 Height variation curve of crescent-shaped sand dunes traveling in the y -direction of the center of mass

由图20可知,行驶过程中质心 z 方向位移最大值为335 mm,相比于整个 x 方向行驶距离, z 方向行驶

偏移较少,基本认为车辆是做直线行驶,满足埋设沙障的工作要求。

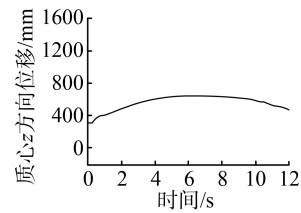


图20 新月形沙丘行驶质心 z 方向位移变化曲线

Fig. 20 Crescent-shaped sand dune traveling center of mass z -direction displacement change curve

由图21可知,0 s时,车辆处于弧形路面上坡路段,俯仰角度增大,随着路面弧度的减小,俯仰角度逐渐减小。6 s时到达弧顶路面,俯仰角约为 0° ,6~12 s车辆处于弧形下坡路面,路面弧度增大,俯仰角度增大。

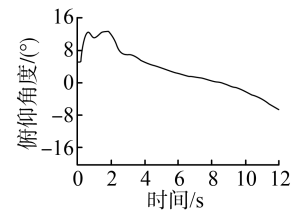


图21 新月形沙丘行驶俯仰角度变化曲线

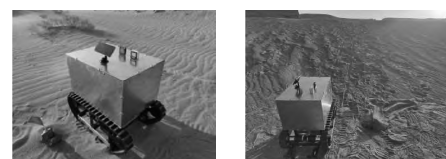
Fig. 21 Crescent-shaped sand dune driving pitch angle change curve

根据沙障埋设车在新月形沙丘路面行驶的仿真结果,综合分析可知,对履带调速后,车辆可以平稳通过新月形沙丘路面,加速完成后车速基本保持匀速,基本保持直线行驶,满足沙障埋设作业要求。

4 样机试验

4.1 试验设备

对履带式沙障埋设车在沙漠坡面的通过性能进行试验,验证其结构设计和技术参数的合理性,分析车辆在通过性方面存在的问题和不足。2023年8月于新疆哈密市风沙地区进行通过性试验,所用的试验仪器设备主要包括样机、倾角仪、GPS速度表、皮尺、照相机、秒表等。参照GB/T 3871中相关规定,对车辆在坡面性能进行试验,如图22所示。观察样机坡面的行驶情况,记录数据。



(a) 试验样机 (b) 试验现场

图22 样机试验

Fig. 22 Prototype experimentation

4.2 试验结果与分析

在斜坡纵向行驶试验中,样机可以顺利通过 15° 、

20°、25°的斜坡。上坡试验样机行驶速度随着坡度增加逐渐降低。3种坡面上坡行驶平均俯仰角分别为16°、22.4°、28.5°，与仿真结果相对误差分别为5.2%、6.25%、6.6%。在下坡试验中样机在15°和20°坡面速度增加不明显，在25°坡面速度增加较明显。3种坡面下坡行驶平均俯仰角分别为-16.5°、-22.9°、-29.5°，与仿真结果相对误差分别为5.1%、5.5%、7%。在15°斜坡横向行驶过程中，速度平稳且俯仰角无明显变化， z 方向行驶偏移量为54 mm，与仿真结果相对误差为9.2%。在新月形沙丘坡面行驶时，速度变化不明显。俯仰角和 z 方向位移变化先增后减，符合坡面曲率变化， z 方向行驶最大位移为286 mm，与仿真结果相对误差为14.6%。

试验测试表明，所设计制造的样机有较好的坡面通过性能，满足沙障埋设机械在沙漠环境行走作业的基本要求，误差产生的原因：由于仿真结果是在理想环境下得出的，而实际的沙漠环境变化复杂且有风载作用。

5 结论

针对现有沙障埋设车辆通过性差的问题，设计一种新的履带式沙障埋设车。根据沙障的铺设环境和铺设要求，对车辆在坡面通过性进行理论分析。在Recurdyn多体动力学软件中完成沙障埋设车整车建模，在虚拟环境下对车辆在干沙路面下坡面和新月形沙丘行驶过程进行仿真分析。

1) 斜坡纵向行驶时，以斜坡角度作为主要指标，对车辆上坡和下坡过程进行仿真。仿真与试验结果表明， x 、 y 、 z 方向上，车辆都能保持稳定行驶。车辆上坡下坡均可以通过25°坡面，具有较好的稳定性和通过性。

2) 斜坡横向行驶时，坡度为15°，对沙障埋设车左右履带进行调速。仿真与试验结果表明，车辆调速前无法在斜坡上横向行驶。调速后， x 、 y 、 z 方向上，车辆都能保持稳定行驶，车辆 z 方向行驶偏移很小，可以满足沙障埋设的行驶要求。

3) 新月形沙丘行驶时，沙丘长度为20 m，迎风坡角度为15°，背风坡角度为30°。仿真与试验结果表明，沙丘坡面变化会引起质心 x 方向速度变化和 y 方向高度变化，车辆 z 方向行驶偏移很小，可以满足沙障埋设的行驶要求。

参 考 文 献

- [1] 李飞鹏. 风沙灾害对铁路运输的影响及机械沙障防护效应研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [2] 杜兴钰. 古浪县治沙造林的技术研究及措施[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(9): 185—187.
- [3] 李小东, 牟瑞, 戴敏. 机械化治沙在腾格里沙漠治理中的探

- 索与应用[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(4): 8—12.
- [4] 孙术发, 刘晋浩, 叶郁. 防风固沙草方格铺设机器人横向切断机构的动力学分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1087—1092.
- [5] 唐伟国, 刘晋浩, 李村, 等. 多杆横向插刀机构的运动学研究及仿真[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 38—39.
- [6] 隋婷婷, 刘晋浩, 唐伟国. 步进式横向插刀机构的运动学求解与轨迹规划[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(10): 109—116.
- [7] 孔德荣, 孙步功, 张克平, 等. 我国草方格沙障铺设机械发现状与展望[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(11): 24—30.
- Kong Derong, Sun Bugong, Zhang Keping, et al. The present situation and prospect of laying machinery for grass-grid sand barrier in China [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2022, 50(11): 24—30.
- [8] 徐先英, 马新宾, 赵鹏, 等. 一种手扶式独轮麦草沙障铺设装置[P]. 中国专利: CN109487775A, 2019—03—19.
- [9] 王雅慧, 化梦康, 张帅昌, 等. 山地农林运输车的现状分析及研究[J]. 农业与技术, 2022, 42(10): 53—57.
- [10] 黄卫东, 鲍劲松, 徐有生, 等. 月球车坡路行驶地面力学模型与运动性能分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 17—23.
- [11] 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.
- [12] 张广晖, 王立海, 许明贤, 等. 三角履带式集材机的设计与分析[J]. 林产工业, 2019, 56(9): 31—36.
- [13] 陈邦印, 王建生, 李慈心, 等. 不同路况下复合型机器人设计计算及仿真分析[J]. 机械工程师, 2021(9): 23—27, 30.
- [14] 赵可, 刘晋浩, 黄青青, 等. 林业并联式铰接底盘优化设计与越障性能仿真分析[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(10): 131—140.
- [15] Sun S F, Wu J F, Ren C L, et al. Chassis trafficability simulation and experiment of a LY1352JP forest tracked vehicle [J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(3): 1315—1325.
- [16] 李嘉婧. 浅山丘陵作业车辆底盘关键部件的设计与分析研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2021.
- [17] 王龙龙, 蓝鸿, 周胥, 等. 拖拉机极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 320—327.
- Wang Longlong, Lan Hong, Zhou Xu, et al. Design and experiment of active rollover control system using control moment gyroscope for agricultural wheeled tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S2): 320—327.