

基于地面力学的筛网轮牵引通过性研究

黄 晗¹ 李建桥¹ 陈百超² 邹 猛¹ 吴宝广¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 筛网轮具有质量轻、转向阻力小等优点,但其在松软干沙路面上的牵引通过性研究比较少。本文设计了轻型轮壤土槽测试系统,以车轮沉陷量、驱动扭矩、挂钩牵引力和牵引系数为指标,在土壤松散和自然状态下进行筛网轮和圆柱轮牵引通过性对比试验,基于轮辙非接触测量获取筛网轮表观沉陷量。结果表明:试验条件下,筛网轮实际沉陷量范围分别为 13.1~26.3 mm(松散状态)和 8.1~18.7 mm(自然状态),较圆柱轮平均分别增加了 26.4%(松散状态)和 22.7%(自然状态);随着滑转率的增加,筛网轮表观沉陷量呈现减小趋势,圆柱轮则呈现先增加后减小趋势。车轮驱动扭矩、挂钩牵引力随着滑转率的增加而增加,牵引系数呈现先增加后减小趋势;筛网轮驱动扭矩最大值分别为 3.18 N·m(松散状态)和 3.76 N·m(自然状态),筛网轮挂钩牵引力最大值分别为 8.46 N(松散状态)和 9.9 N(自然状态),自然状态土壤较松散状态时挂钩牵引力平均提高了 16.7%;与筛网轮相比,圆柱轮驱动扭矩较筛网轮平均提高了 45.2%,挂钩牵引力则平均提高了 30.9%(松散状态)和 33.6%(自然状态);筛网轮牵引系数明显较圆柱轮大,自然状态下筛网轮牵引系数最大值为 0.29,较松散状态下提高了 17.9%。综合考虑车轮沉陷量、牵引系数的影响,筛网轮在干沙路面上比圆柱轮具有更好的牵引通过性。

关键词: 筛网轮; 沉陷; 牵引性能; 通过性; 地面力学

中图分类号: U461.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0464-07

Traction Trafficability of Wire Mesh Wheel Based on Terramechanics

Huang Han¹ Li Jianqiao¹ Chen Baichao² Zou Meng¹ Wu Baoguang¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Wire mesh wheel has good trafficability on soft and clammy terrain; however, there were few studies on traction trafficability of wire mesh wheel on dry sand soil. The light-weight wheels-soil testing system was developed. The wheel sinkage, driving torque, drawbar pull and traction efficiency were adopted as testing indexes, and the tests on tractive trafficability of wire mesh wheel and cylindrical wheel were conducted under soft and natural soil state. The apparent sinkage of wire mesh wheel was obtained based on rut non-contact measurement. Results indicated that the real sinkages of wire mesh wheel were ranged from 13.1 mm to 26.3 mm (soft state) and from 8.1 mm to 18.7 mm (natural state), compared with those of the cylindrical wheel, the average increasing rate were 26.4% (soft state) and 22.7% (natural state), respectively. The apparent sinkage of wire mesh wheel was decreased with the increase of slip ratio, while the apparent sinkage of cylindrical wheel was increased firstly and then decreased. As the increase of slip ratio, both the driving torque and drawbar pull were increased, and traction efficiency was increased firstly and then decreased. The maximum driving torques of wire mesh wheel were 3.18 N·m(soft state) and 3.76 N·m (natural state). The driving torque of cylindrical wheel was larger than that of wire mesh wheel. The maximum drawbar pulls of wire mesh wheel were up to 8.46 N (soft

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375199)

作者简介: 黄晗(1989—),男,博士生,主要从事地面机器系统及其仿生研究,E-mail: huanghan452012@163.com

通信作者: 李建桥(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事地面机器系统及其仿生研究,E-mail: jqli@jlu.edu.cn

state) and 9.9 N (natural state), the drawbar pull under natural soil state was increased by 16.7% than that on the soft soil state. The driving torque increasing ratio of cylindrical wheel was 45.2%, and the increasing average ratio was 32.3% for drawbar pull, compared with that of wire mesh wheel. The traction efficiency driving torque of wire mesh wheel was obviously larger than that of cylindrical wheel. The traction efficiency under natural soil state was increased by 17.9% than that on the soft soil state. The test conclusions indicated that the trafficability of wire mesh wheel was better than that of cylindrical wheel on dry sand soil, when comprehensively considered the effect of wheel sinkage and traction efficiency. The research results provided technical methods and basic data for development of light-weight vehicles, ground testing and traction trafficability assessment of wheel.

Key words: wire mesh wheel; sinkage; tractive performance; trafficability; terramechanics

引言

近几年来轻型无人车辆越来越多地应用于军事和深空探测领域^[1-3],例如美国陆军研发的XM1216小型无人车辆。限于设备条件,大多数车轮牵引通过性的研究是在大载荷条件下进行,且现有预测重型车辆通过性的方法将不能直接应用于轻型车辆^[4-5]。因此,研究轻载荷条件下车轮的通过性能,对于轻型无人车辆的研制以及保障其工作可靠性方面具有重要意义^[6-7]。筛网轮是一种形式独特的探测车车轮,车轮胎面为金属丝编织的网状结构,灵活轻便。筛网轮可分为刚性筛网轮与弹性筛网轮。文献[8]中的Lunokhod月球车车轮即采用刚性筛网轮,为辐条式车轮结构,轮面与轴线有倾斜角的宽轮齿,防止车轮侧滑。美国“阿波罗登月者”月球车使用弹性筛网轮^[9],胎面由镀锌钢丝编织,包裹在坚硬的钛制框架外侧,使车轮具有一定的变形能力,又不致于过度变形。文献[8]对多种月球车筛网车轮进行了越障和疲劳测试,结果表明筛网车轮较普通弹性车轮具有更小的行驶阻力和更长的使用寿命,但未对松软地面筛网轮沉陷特性、牵引通过性进行进一步探讨。文献[10]研制了一种载人月球车金属弹性筛网轮,基于有限元分析了筛网轮驱动性能,该车轮较普通圆柱面车轮具有更大的挂钩牵引力,但该研究未对不同滑转率条件下车轮牵引性能进行分析。综上所述,筛网轮具有质量轻、转向阻力小等优点^[11],常应用于复杂环境下作业的车辆,但国内外有关筛网轮在松软干沙路面上牵引通过性的研究仍比较少。

针对上述情况,本文设计轻型轮壤土槽测试系统,以车轮沉陷量、驱动扭矩、挂钩牵引力和牵引系数为指标,进行不同滑转率条件下的车轮牵引通过性试验,并对比分析土壤不同密实度条件下筛网轮与圆柱车轮牵引通过性差异;基于非接触式轮辙测量,分析车轮表观沉陷量随滑转率变化的规律,以期为

轻型车辆在松软干沙路面通过性能研究提供基础数据和技术方法。

1 试验指标

车辆在松软地面行驶时,车轮与土壤相互作用示意图如图1所示。车轮沉陷量是影响车辆通过性能的关键因素之一^[12-13]。沉陷量的计算是建立轮与壤关系中许多其他计算模型的基础,例如:压实阻力、推土阻力等^[14-16]。滑转条件下,车辆行走在松软地面时,沉陷量表达式为

$$z = \left[\frac{3W}{b \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) (3-n) \sqrt{D}} \right]^{\frac{2}{2n+1}} + z_s \quad (1)$$

- 式中
- z_s ——土壤剪切变形引起的滑转沉陷量

k_c ——土壤内聚模量

k_φ ——内摩擦模量

n ——土壤的变形指数

W ——轮上载荷

b ——车轮宽度

D ——车轮直径

车轮在松软通过地面后留下轮辙,本文采用激光轮辙形貌测量装置中激光测距仪,可测量获取车轮表观沉陷量^[17](图1中 z_a)。

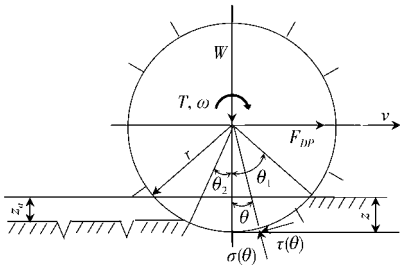


图1 轮壤相互作用示意图

Fig.1 Diagram of wheel-soil interaction

车辆驱动轮的牵引性能通过车轮驱动扭矩 T 、挂钩牵引力 F_{dp} 和牵引系数 T_e 来反映^[18-19],计算模型为

$$T = r^2 b \left(\int_0^{\theta_1} \tau(\theta) d\theta + \int_0^{\theta_2} \tau(\theta) d\theta \right) \quad (2)$$

$$F_{DP} = rb \left[\int_0^{\theta_1} (\tau(\theta) \cos\theta - \sigma(\theta) \sin\theta) d\theta + \int_0^{\theta_2} (\tau(\theta) \cos\theta + \sigma(\theta) \sin\theta) d\theta \right] \quad (3)$$

$$T_E = \frac{F_{DP}r}{T}(1-s) \quad (4)$$

式中 r ——车轮半径
 θ ——轮壤接触面上任意角度
 θ_1 ——车轮接近角
 θ_2 ——车轮离去角
 $\sigma(\theta)$ ——车轮 θ 处对应的轮下法向应力
 $\tau(\theta)$ ——车轮 θ 处对应的轮下切向应力
 T ——车轮驱动转矩
 s ——车轮滑转率

2 试验条件

2.1 试验设备

本文针对筛网轮承载强度轮上载荷小于 100 N 的轻载荷条件,设计轻型轮壤土槽测试系统(图 2)。该系统主要由 3 部分组成:轻型台车装置、激光轮辙形貌测量装置和测控系统。轻型台车装置主要由垂直位移传感器、配重砝码、车架、水平位移传感器、测试车轮、扭矩传感器、法向载荷传感器和角速度传感器和车轮驱动电机组成。车架整体为杠杆结构,通过改变后方配重砝码质量和位置可实现轮上法向载荷的无级调控;垂直位移传感器型号为 XPS-S-5000-11R0,用于测量车轮行驶过程中的实际沉陷量,测量行程范围为 0~5 m,测量精度为 0.01 mm;水平位移传感器主要由 D38H-8G05L-360BM-5M 型滚轮编码器组成,其有效水平位移测量范围为 0~5 m,测量精度为 0.01 mm;扭矩传感器和法向载荷传感器分别用于测试被试轮输出扭矩和轮上法向载荷;车轮实时转速由角速度传感器测量^[20]。

激光轮辙形貌测量装置主要用于轮辙表面形貌的非接触测量,通过轮辙形貌测量数据提取车轮表面沉陷量。测量装置整体固定于土槽框架顶部,硬件主要由激光测距仪、滚珠丝杠和丝杠驱动电机组成,其中激光测距仪型号为 DLS-C15,Z 轴(垂直地面方向)测距范围为 0.05~65 m,测距分辨率达到 0.1 mm,X 轴方向(台车行驶方向)最大线扫描长度为 0.65 m,Y 轴方向(水平面上垂直 X 轴方向)最大线扫描长度为 0.4 m^[17]。

轻型轮壤土槽测控系统由控制器、数据采集单元和测控软件组成,可实现对土槽台车和激光轮辙形貌测量装置的单独控制、试验数据实时采集、转换和存储,试验系统测控原理图如图 3 所示。控制计算机可以通过测控软件、控制器单元和数据采集单

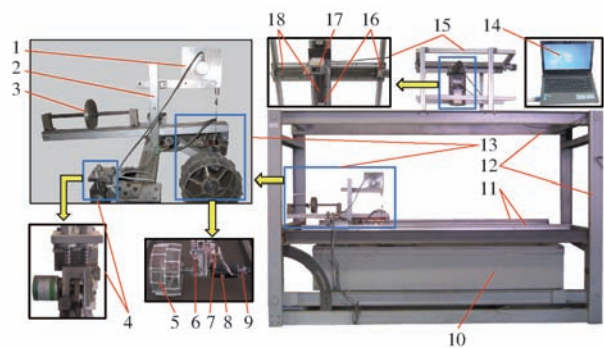


图 2 轮壤土槽试验系统

Fig. 2 Wheel-soil interaction testing system

1. 垂直位移传感器 2. 车架 3. 配重砝码 4. 水平位移传感器
5. 测试车轮 6. 法向载荷传感器 7. 扭矩传感器 8. 车轮驱动电机 9. 角速度传感器 10. 土槽 11. 光杠导轨 12. 土槽框架
13. 轻型台车 14. 控制计算机 15. 激光轮辙形貌测量装置
16. 丝杠 17. 激光测距仪 18. 丝杠驱动电机

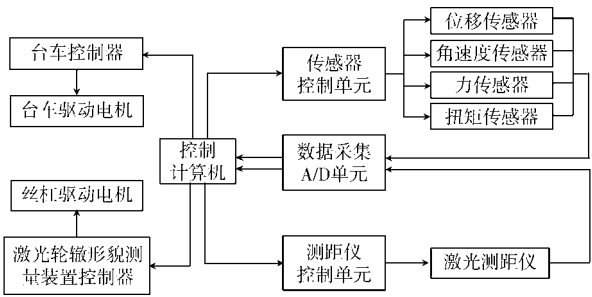


图 3 轻型轮壤土槽测控系统原理图

Fig. 3 Measuring and control diagram of testing system

元完成发出信号指令,实现车轮驱动电机、力传感器、扭矩传感器、位移传感器和角速度传感器运行,从而完成被试驱动轮行走,以及车轮扭矩、水平位移、垂直位移、转速、滑转率、轮辙深度等基础参数的数据采集。

2.2 被试轮

试验中被试轮为筛网轮,轮径 300 mm,轮宽 150 mm,轮刺高 10 mm,如图 4a 所示。其中,筛网轮轮缘由 3 个轮圈构成,中间轮圈直径大于两侧轮圈直径,两排轮刺交错且等间距地安置于相邻轮圈上,轮面筛网由直径为 0.6 mm 的钛合金编织而成。为了进行筛网轮牵引通过性对比分析,被试轮还包括了相同轮径和轮宽的圆柱轮,如图 4b 所示。

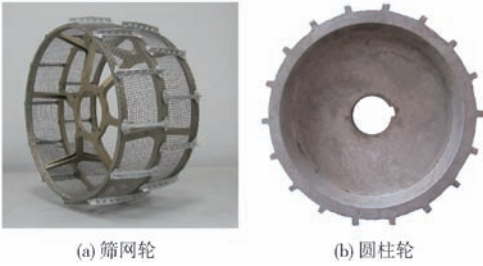


图 4 被试轮

Fig. 4 Test wheel

2.3 试验介质

本试验采用吉林大学工程仿生实验室研制的JLU-2a 型模拟月壤,主要原料为火山灰,通过研磨、筛分、级配和检测等工序配制而成,含水率小于0.4%,属于干性沙壤^[21]。为研究土壤不同密实度对车轮通过性的影响,根据试验需要以及整备方法一致性和效率的基础上,选择2种不同整备方法,使得模拟月壤达到2种不同状态:松散状态和自然状态,主要物理力学性能参数见表1。为保证土壤整备的一致性,通过使用SC-900型模拟月壤硬度计检测整备效果,2种不同状态模拟月壤对应的贯入阻力最大值分别为600 kPa和900 kPa,相对误差不超过5%,表明整备方法具有可靠性。

表 1 试验土壤力学性能参数

Tab.1 Mechanical parameters of test soil

参数	数值	
	松散状态	自然状态
n	1.04	1.43
$k_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-(n+1)})$	0.16	1.95
$k_\phi/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-(n+2)})$	0.84	1.69
c/kPa	1.88	4.09
φ/kPa	22.73	29.77

3 结果分析

3.1 沉陷量

试验中,轮上载荷为固定值40 N,车轮转速为6 r/min,滑转率变化范围为0~60%。土壤松散和自然状态下,车轮沉陷量随滑转率变化规律如图5所示。由图5可知,筛网轮实际沉陷量随着滑转率的增加而呈现增加趋势,与自然状态相比较,松散状态下的车轮实际沉陷量增加趋势更为明显,范围分别为13.1~26.3 mm(松散状态)和8.1~18.7 mm(自然状态)。

图6为不同滑转率下筛网轮轮辙形貌,当 $s=20\%$ 和 $s=40\%$,松散状态沉陷量较自然状态沉陷量分别增加了32.6%和37.5%。当滑转率由40%

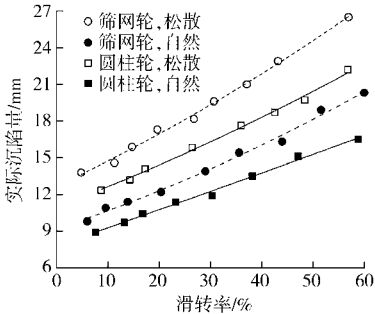


图 5 筛网轮和圆柱轮实际沉陷量变化曲线
Fig.5 Changing curves of real sinkage with slip ratio for wire mesh wheel and cylindrical wheel

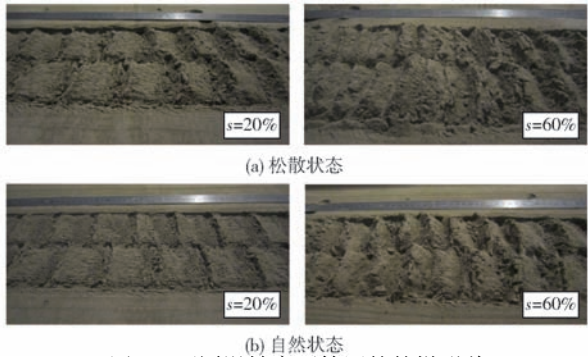


图 6 不同滑转率下筛网轮轮辙形貌
Fig.6 Rut morphologies of wire mesh wheel at different slip ratios

到60%变化时,沉陷量随滑转率增加逐渐明显;滑转率达到60%时,车轮滑转刨土作用导致车轮后方轮辙形貌逐渐被破坏,与此同时,滑转率也随沉陷量增加而增加,车轮通过性能逐渐变差。模拟月壤2种状态下,圆柱轮实际沉陷量最大值分别为16.5 mm(松散状态)和22.2 mm(自然状态)。筛网轮实际沉陷量均较圆柱轮大,主要是由于相同沉陷量时,筛网轮的有效轮壤接触面较圆柱轮小,因此筛网轮通过增加沉陷量达到与圆柱轮等效的接触面积。试验条件下,筛网轮实际沉陷量较圆柱轮平均分别增加了26.4%(松散状态)和22.7%(自然状态)。

图7为筛网轮和圆柱轮表观沉陷量变化曲线,由于筛网轮网状胎面的漏土作用,以及土壤回弹现象,使得车轮表观沉陷量始终较实际沉陷量小。由图7可知,筛网轮和圆柱轮表观沉陷量最大值分别为9.2 mm和13.8 mm。筛网轮表观沉陷量随着滑转率的增加呈现减小趋势,表观沉陷量出现了负值,分析是由于随着滑转率的增加车轮轮刺刨土作用逐渐明显,使得大部分模拟月壤在车轮后方堆积,甚至高于基准平面(图8)。当筛网轮滑转率分别到达约42%(松散状态)和48%(自然状态)时,表观沉陷量逐渐变为负值。因此,高滑转率条件下,通过轮辙表观沉陷量预测车轮实际沉陷量可靠性将逐渐降低。相同试验条件下,圆柱轮表观沉陷量较筛网轮

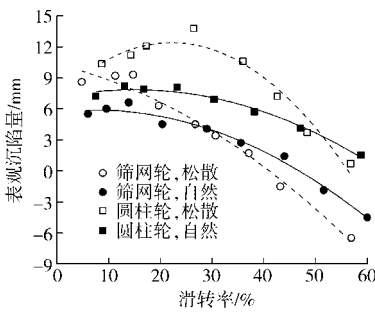


图 7 筛网轮和圆柱轮表观沉陷量变化曲线
Fig.7 Changing curves of apparent sinkage with slip ratio for wire mesh wheel and cylindrical wheel

大,其表观沉陷量随着滑转率的增加呈现先增加后减小趋势,表观沉陷量最大值对应的滑转率分别为25.6%(松散状态)和22.7%(自然状态)。分析上述现象,主要是由于随着滑转率增加,圆柱轮实际沉

陷量增加导致表观沉陷量增加,同时车轮刨作用增加导致表观沉陷量减小,二者共同作用下导致出现滑转率临界值,当小于临界值时前者作用明显,反之后者占主导作用。

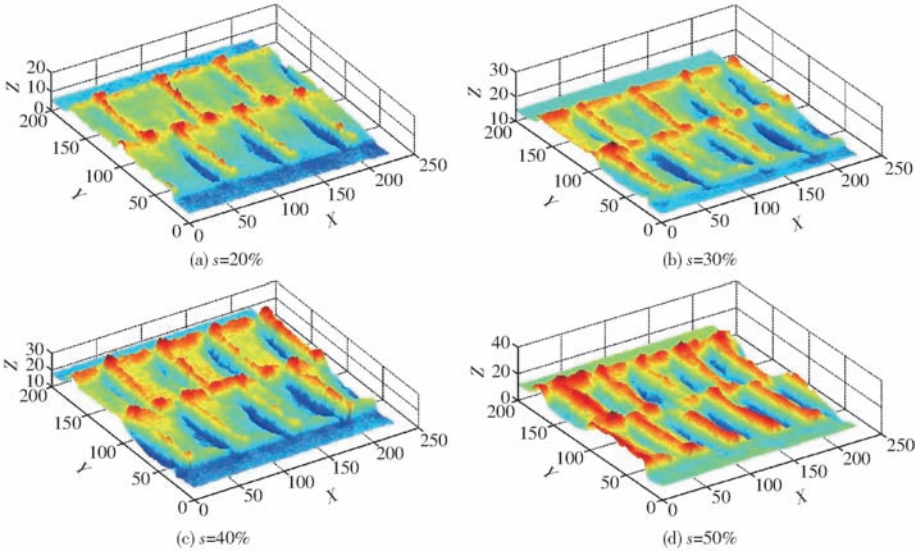


图8 土壤松散状态下筛网轮三维轮辙形貌

Fig.8 Rut morphologies of wire mesh wheel under soft soil condition

3.2 牵引性能

图9为土壤松散和自然状态下,车轮驱动扭矩、挂钩牵引力和牵引系数随滑转率变化规律。由图9a可知,车轮驱动扭矩随滑转率增加而增加。试验条件下,筛网轮驱动扭矩最大值分别为3.18 N·m(松散状态)和3.76 N·m(自然状态),圆柱轮驱动扭矩最大值则为3.56 N·m(松散状态)和3.95 N·m(自然状态)。随着土壤由松散状态变为自然状态时,筛网轮驱动扭矩平均提高了14.4%,圆柱轮则提高了8.7%,表明模拟月壤状态对筛网轮驱动扭矩的影响较圆柱轮明显。相同试验条件下,圆柱轮驱动扭矩较筛网轮大,平均提高了45.2%,这是由于相同滑转率下,车轮前进过程中筛网胎面的“漏土”效应,使得筛网轮的压实阻力较圆柱轮小,因此,圆柱轮的驱动扭矩明显较筛网轮大。

由图9b可知,车轮挂钩牵引力随滑转率增加而增加。试验条件下,筛网轮挂钩牵引力最大值分别为8.46 N(松散状态)和9.9 N(自然状态),圆柱轮挂钩牵引力最大值分别为11.11 N(松散状态)和13.06 N(自然状态)。随着模拟月壤由松散状态变为自然状态时,筛网轮挂钩牵引力平均提高了16.7%。相同试验条件下,圆柱轮挂钩牵引力较筛网轮大,平均提高了30.9%(松散状态)和33.6%(自然状态)。这是由于相同试验条件下,圆柱轮轮壤接触面积较筛网轮大,使得更多的土壤与车轮接触参与剪切作用,驱动扭矩增加,从而形成较大的挂钩牵引力。

由图9c可知,牵引系数随滑转率增加呈现先增加后减小趋势,筛网轮牵引系数明显较圆柱轮的大,这是由于挂钩牵引力随滑转率的增加率较驱动扭矩

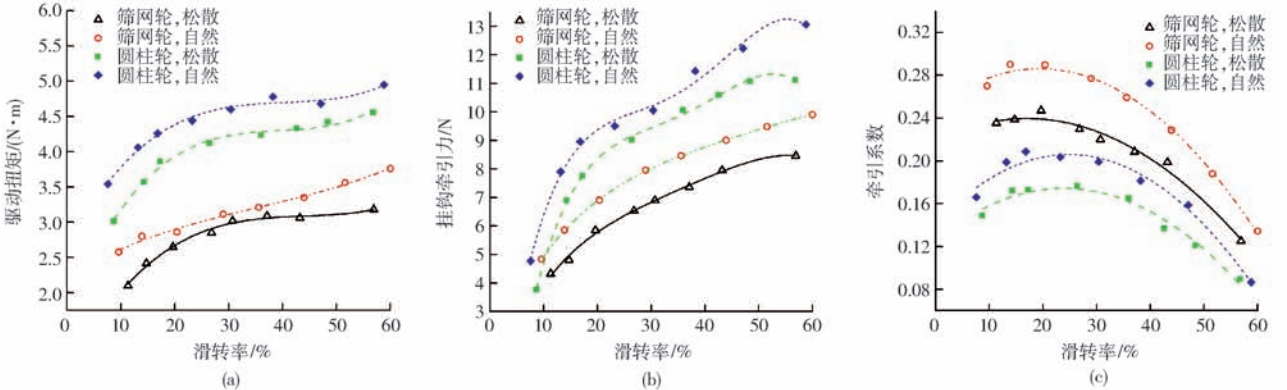


图9 筛网轮与圆柱轮牵引性能对比

Fig.9 Comparisons of traction performance for wire mesh wheel and cylindrical wheel

增加的小。试验条件下,筛网轮最大牵引系数分别为 0.24(松散状态)和 0.29(自然状态),对应的滑转率分别为 20.5% 和 21.2%,自然状态土壤条件下的筛网轮牵引系数较松散状态土壤平均提高了 17.9%;圆柱轮在滑转率约为 23% 时,牵引系数达到最大值 0.21(松散状态)和 0.18(自然状态)。当滑转率达到 40% 后,牵引系数随滑转率增加而急剧减小;当滑转率达到 60% 时,筛网轮牵引系数低于 0.13,此时大多数的能量消耗于车轮的刨土。因此,为保证车轮具有较好的牵引通过性能,车轮滑转率控制在 20% 左右较为合理。

相同试验条件下,筛网轮牵引系数始终较圆柱轮的大,这是由于筛网轮行走过程中部分土壤会漏至筛网胎面内侧,使得其压实阻力与推土阻力较圆柱轮的小。当滑转率为 20% 时,松散和自然 2 种状态下筛网轮的牵引系数较圆柱轮分别提高了 41.2% 和 39.3%。

综上所述,随着土壤的密实度增加,其抗剪切能力和承载能力增大,筛网轮沉陷量减少,挂钩牵引力增大,牵引性能提高。车轮滑转率达到一定阈值后,车辆较多的能量消耗于刨土作用,导致沉陷量增加,从而进一步增大滑转率,车辆可能逐步进入到极限工况,直至无法继续前进。因此,考虑到车轮安全有效通过性,本文试验条件下车轮滑转率应控制在

20% 较为合理,且不应超过 40% 的安全阈值。综合考虑车轮沉陷量、牵引系数的影响,筛网轮适合松软路面,且较圆柱轮具有更好的牵引通过性。

4 结论

(1) 轮上载荷为 40 N,车轮转速为 6 r/min,滑转率为 0~60% 的试验条件下,筛网轮实际沉陷量较圆柱轮的大,较圆柱轮平均分别增加 26.4% (松散状态)和 22.7% (自然状态);筛网轮表观沉陷量随着滑转率的增加呈现减小趋势,且较圆柱轮的小。

(2) 试验条件下,筛网轮驱动扭矩、挂钩牵引力随着滑转率的增加而增加,而牵引系数呈现先增加后减小趋势。土壤自然状态下,驱动扭矩、挂钩牵引力最大值分别为 3.76 N·m 和 9.9 N,较松散状态分别提高 14.4% 和 16.7%;最大牵引系数分别为 0.24 (松散状态)和 0.29 (自然状态)。

(3) 考虑到车轮安全有效通过性,筛网轮滑转率应控制在 20% 左右较为合理,且不应超过 40% 的安全阈值。

(4) 综合考虑车轮沉陷量、牵引系数的影响,筛网轮在干沙路面上比圆柱轮具有更好的牵引通过性。当滑转率为 20% 时,土壤松散和自然 2 种状态下,筛网轮的牵引系数较圆柱轮分别提高 41.2% 和 39.3%。

参 考 文 献

- 1 SANDU C, WORLEY M E, MORGAN J P. Experimental study on the contact patch pressure and sinkage of a lightweight vehicle on sand[J]. *Journal of Terramechanics*, 2010, 47(5): 343–359.
- 2 MEIRION-GRIFFITH G, SPENKO M. A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains[J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, 48(2): 149–155.
- 3 MEIRION-GRIFFITH G, SPENKO M. A pressure-sinkage model for small-diameter wheels on compactive, deformable terrain[J]. *Journal of Terramechanics*, 2013, 50(1): 37–44.
- 4 LEVER J H, SHOOP S A, Bernhard R I. Design of lightweight robots for over-snow mobility[J]. *Journal of Terramechanics*, 2009, 46(3): 67–74.
- 5 李建桥, 黄晗, 王颖, 等. 松软地面机器系统研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 306–320.
LI Jianqiao, HUANG Han, WANG Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 306–320. (in Chinese)
- 6 SENATORE C, IAGNEMMA K. Analysis of stress distributions under lightweight wheeled vehicles [J]. *Journal of Terramechanics*, 2014, 51: 1–17.
- 7 MEIRION-GRIFFITH G, NIE C, SPENKO M. Development and experimental validation of an improved pressure-sinkage model for small-wheeled vehicles on dilative, deformable terrain[J]. *Journal of Terramechanics*, 2014, 51: 19–29.
- 8 ASNANI V, DELAP D, CREAGER C. The development of wheels for the lunar roving vehicle[J]. *Journal of Terramechanics*, 2009, 46(3): 89–103.
- 9 ZAKRAJSEKA J J, MCKISSOCK D B, WOYTACH J M, et al. Exploration rover concepts and development challenges[C] // 1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, 2005: 1–23.
- 10 XIAO W, ZHANG Y. Design of manned lunar rover wheels and improvement in soil mechanics formulas for elastic wheels in consideration of deformation[J]. *Journal of Terramechanics*, 2016, 65(3): 61–71.
- 11 高海波, 贾阳, 邓宗全, 等. 月球车弹性筛网轮的研制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 40(11): 1712–1716.
GAO Haibo, JIA Yang, DENG Zongquan, et al. Development on spring griddle net wheel of lunar rover [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 40(11): 1712–1716. (in Chinese)

- 12 WONG J Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering[M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2010.
- 13 WONG J Y. Theory of ground vehicles [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- 14 LYASKO M. Slip sinkage effect in soil-vehicle mechanics[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(1): 21–31.
- 15 GAO H, GUO J, DING L, et al. Longitudinal skid model for wheels of planetary exploration rovers based on terramechanics[J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(5): 327–343.
- 16 丁亮亮, 肖杰, 宗魏, 等. 与沉陷相关联的星球车挂钩牵引力模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 37–42.
DING Liangliang, XIAO Jie, ZONG Wei, et al. Drawbar pull model of planetary rover associated with subsidence [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 37–42. (in Chinese)
- 17 李建桥, 王洋, 党兆龙, 等. 松散地面上车辙表面的非接触式激光测量[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 264–268.
LI Jianqiao, WANG Yang, DANG Zhaolong, et al. Non-contact laser measurement of rutting surface on loose ground [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 264–268. (in Chinese)
- 18 YANG Y, SUN Y, MA S. Drawbar pull of a wheel with an actively actuated lug on sandy terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56(66): 17–24.
- 19 DING L, GAO H, DENG Z, et al. Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(1): 27–45.
- 20 李建桥, 黄晗, 党兆龙, 等. 轻载荷条件下的筛网轮沉陷[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 167–173.
LI Jianqiao, HUANG Han, DANG Zhaolong, et al. Sinkage of wire mesh wheel under light load[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(1): 167–173. (in Chinese)
- 21 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 月球车轮与月壤相互作用动力学模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 1–4.
LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Research on the interaction between lunar rover wheel and lunar soil by simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 1–4. (in Chinese)