

火星巡视器鼓形车轮仿生设计与性能分析

张锐¹ 吉巧丽¹ 杨明明^{1,2} 李建桥¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022;
2. 中国南车集团戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 常州 213000)

摘要: 以善于沙地奔跑的鸵鸟的二趾足为仿生原型,利用工程仿生学原理,设计一种高通过性的仿生越沙鼓形轮面车轮。以与火星壤近似的松软沙土为试验材料,利用车轮-土壤土槽测试系统,以轮辙、挂钩牵引力和沉陷量为试验指标,对仿生鼓形轮面车轮和普通轮面车轮的通过性能进行了对比分析。结果表明,当滑转率超过0.85时,普通鼓形轮面比仿生鼓形轮面轮辙的堆积现象明显,并且出现明显打滑空转现象。在相同试验条件下,当滑转率小于0.42时,普通鼓形轮面车轮的挂钩牵引力稍大于仿生鼓形轮面车轮,当滑转率大于0.42时,仿生鼓形轮面车轮的挂钩牵引力明显大于普通鼓形轮面车轮。仿生鼓形轮面车轮和普通鼓形轮面车轮的最大挂钩牵引力分别为11.6 N和2.6 N。滑转率对于普通鼓形轮面车轮的沉陷量影响较小,沉陷量基本保持在约35 mm,而随着滑转率的增大,仿生鼓形轮面车轮沉陷量呈现缓慢增大趋势。

关键词: 火星巡视器; 鼓形车轮; 鸵鸟足; 仿生轮面结构; 牵引通过性

中图分类号: V476.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0311-06

Bionic Design and Performance Analysis of Drum Shaped Wheel of Mars Rover

Zhang Rui¹ Ji Qiaoli¹ Yang Mingming^{1,2} Li Jianqiao¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China
2. China South Railways Qishuyan Locomotive Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: It is important to enhance mobility performance of the Mars rover wheel in soft terrain. The didactyl foot, which is the key part of ostrich foot possessing the excellent running ability on sand, was regarded as the bionic prototype. According to the principle of engineering bionic, the wheel with bionic drum shaped surface moving on sand with high mobility performance was designed. A kind of Mars soil stimulants was selected as experimental material. The wheel-soil bin test system was adopted to test the tractive trafficability of ordinary drum shaped surface wheel and bionic drum shaped surface wheel. The rut morphology, drawbar pull and sinkage were regarded as evaluation indicators. Results showed that when the slip-rotation ratio was over 0.85, the rut accumulation phenomenon of ordinary drum shaped wheel was more serious than that of bionic drum shaped wheel. Under the same experimental conditions, when slip-rotation ratio was less than 0.42, the drawbar pull of ordinary drum shaped wheel was slightly larger than that of the bionic drum shaped wheel. When the slip-rotation ratio was over 0.42, the drawbar pull of the bionic drum shaped wheel was superior to the ordinary drum shaped wheel. The maximum drawbar pulls of bionic drum shaped wheel and ordinary drum shaped wheel were 11.6 N and 2.6 N, respectively. The slip-rotation ratio had small influence on sinkage of the ordinary drum shaped wheel, and the value of sinkage was about 35 mm. However, the sinkage of bionic drum shaped wheel was increased with the increase of slip-rotation ratio. This research provided a design way for enhancing the mobility performance of the Mars rover in soft terrain.

Key words: Mars rover; drum shaped wheel; ostrich foot; structure of bionic wheel surface; tractive trafficability

引言

探测车在星球表面的通过性问题是深空探测亟待解决的一种重要问题^[1-4]。为了解决车辆或移动机器人的行走机构在松软地面上行驶通过性差等问题,学者们逐渐将目光转向自然界中动物们的运动方式与姿态,进而研究设计具有良好沙地通过性的各种仿行走机构^[5-7]。李杰等^[8]设计了仿鸵足车辆并进行了实验分析,张锐等^[9]研制了仿鸵鸟趾甲沙地刚性轮并进行牵引性能的数值模拟。非洲鸵鸟(*Struthio camelus*)生活在沙漠地带,在沙地环境中具有稳健、持久和高速奔跑能力^[10-12]。经测试成年鸵鸟在沙地中持续奔跑速度约 50 ~ 60 km/h^[13-15]。由于生活环境影响并经过长期的自然进化,鸵鸟足部特征与其他鸟类不同,鸵鸟足仅有两趾^[16],分别为第Ⅲ趾和第Ⅳ趾,其中第Ⅲ趾比较粗壮,在行走时承载身体的大部分质量,趾的前端有坚硬发达的趾甲,在高速运动时通过插入沙土来增大身体的牵引力^[17],第Ⅳ趾尺寸较小,趾甲几乎退化。由于鸵鸟独特的越沙特性,本文通过研究鸵鸟足的主要触沙部位中第Ⅲ趾底的典型曲面形貌,根据工程仿生学原理,基于越沙轮面与沙土的作用关系,设计一种高通过性的仿生越沙鼓形轮面车轮结构,以期有效改善松软地面环境中火星探测器车轮的牵引通过性能。

1 火星巡视器仿生鼓形轮面车轮结构设计

鸵鸟经过长期的进化过程仅存两趾,分别为第Ⅲ趾与第Ⅳ趾(图 1)。研究发现,鸵鸟足底曲面有着固沙限流防滑移的独特功能,这一功能与鸵鸟特殊的足底曲面形貌有着直接联系^[18]。鸵鸟足第Ⅲ趾底分别由前掌缓曲面、中间凹槽面和近似椭球面组成,这种由多曲面结合形成的复合曲面实现了鸵鸟足底良好的固沙限流效果(图 2)。针对火星巡视器鼓形轮面,以鸵鸟足第Ⅲ趾底特殊的曲面形貌为仿生原型,利用工程仿生学原理,设计仿生鼓形轮面结构。

1.1 仿生鼓形轮面结构设计

以鸵鸟足第Ⅲ趾底曲面建立的数学模型为依据^[19],进行仿生轮面单体设计。整个轮面由该仿生轮面单体在基圆上阵列得到。该仿生轮面单体是由一半椭圆线(图 3a)经由一条确定的导轨线(图 3b)扫略而得到。根据椭球凸冠面、中间凹槽面和缓曲面的拟合方程确定导轨线,导线 1 由 4 段互相相切的圆弧组成,半径分别为 $R_1 = 50\text{ mm}$ 、 $R_2 = 38.675\text{ mm}$ 、 $R_3 = 50\text{ mm}$ 、 $R_7 = 275\text{ mm}$,圆心分别为 $O_1(0, 0,$



图 1 鸵鸟足趾

Fig. 1 Ostrich foot

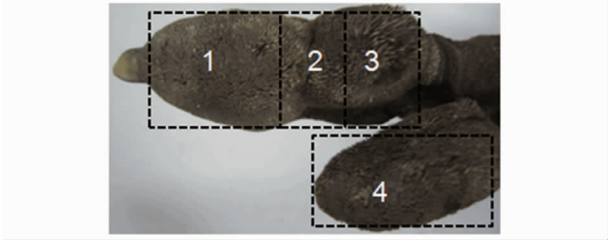


图 2 第Ⅲ趾和第Ⅳ趾足底曲面

Fig. 2 Plantar surfaces of Ⅲ and Ⅳ toes

1. 前掌缓曲面 2. 中间凹槽面 3. 足跟凸冠面 4. 第Ⅳ趾底曲面

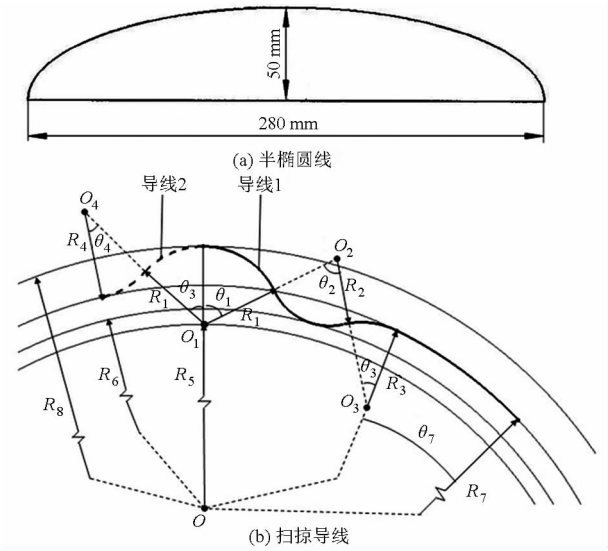


图 3 轮廓线和扫掠导线

Fig. 3 Contour line and sweeping guide line

250)、 $O_2(0, 80.268, 287.687)$ 、 $O_3(0, 100.41, 201.337)$ 、 $O(0, 0, 0)$;角度分别为 $\theta_1 = 64.849^\circ$ 、 $\theta_2 = 77.999^\circ$ 、 $\theta_3 = 39.663^\circ$ 、 $\theta_7 = 20.161^\circ$ 。其中,半径 R_1 圆弧的一端点在半椭圆弧的顶端,半径 R_2 的圆弧分别与两边圆弧及半径 R_6 的圆相切,半径 R_3 的圆弧与半径 R_7 的圆弧相切。导线 2 由两条圆弧组成,作为椭球面另外一侧与车轮缓冲面的过渡导线,其圆心分别为 $O_1(0, 0, 250)$ 、 $O_4(0, -74.906, 316.25)$,半径分别为 $R_1 = 50\text{ mm}$ 、 $R_4 = 50\text{ mm}$,角度分别为 $\theta_4 = 35.184^\circ$ 、 $\theta_5 = 48.509^\circ$ 。导线 2 的左端点与导线 1 的右端点与原点 O 组成的圆心角恰好是 60° 。以半椭圆弧线为轮廓线,分别以导线 1 和导线 2 为扫掠导线扫掠得到轮面的椭球面、凹槽面、缓冲

面和 2 个过渡面组成的仿生轮面单体(图 4)。

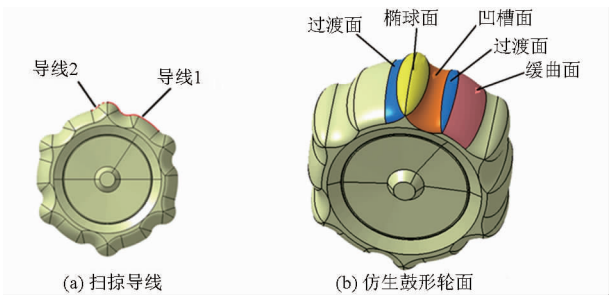


图 4 仿生鼓形轮面结构

Fig. 4 Bionic drum-shaped wheel surface

由于圆心 O 与导线两端点的连线夹角恰为 60° , 因此, 轮面单体以 60° 的间隔阵列在基圆圆周上, 恰好能均匀排布且单体之间无间隔。基圆半径为 $R_7 = 275\text{ mm}$, 得到的仿生轮面包括 6 个轮面单体, 然后利用 Catia 曲面造型设计中的相合命令, 将 6 个单体结合在一起形成一个三维模型, 最终形成一个完整的仿生轮面(图 4)。

1.2 试验车轮

目前国外火星巡视器车轮上大多采用一体化刚性履刺, 而履刺高度较小, 外形上与普通光滑鼓形车轮较为接近, 为简化试验加工过程, 采用普通光滑鼓形车轮与仿生车轮对比, 具有一定参考意义。后期将考虑轮刺对于车轮牵引性能的影响。本文主要通过对比鸵鸟足底曲面形貌进行工程仿生设计, 着重考虑车轮表面形貌对于车轮在松软地面的牵引通过性的影响, 因此选用光滑鼓形轮面作为参照, 为了揭示轮面形貌对车轮在松软地面上牵引通过性的影响, 设计同尺寸的普通鼓形轮面作为对比, 加工仿生鼓形车轮与普通鼓形车轮两种试验样轮, 轮径均为 212 mm , 轮宽均为 100 mm 。车轮的加工材料都采用轻质的尼龙棒, 尼龙棒具有韧性高, 耐磨力性能强, 并且耐油、抗震、拉伸、弯曲强度好, 同时具有吸水性小、尺寸稳定性好等优点。采用数控加工中心加工的实物车轮模型(图 5)。最后, 在相同试验条件下对比分析仿生鼓形轮面和普通鼓形轮面的牵引性能的差异。

1.3 鼓形轮面与沙土相互作用理论基础

车轮在松软地面的通过性能可以用挂钩牵引力来衡量。挂钩牵引力为地面附着允许的牵引力和土壤变形产生的滚动阻力之间的差值^[20-21]。由轮壤相互作用力学模型可知, 车辆在松软地面上通过时, 挂钩牵引力表示为

$$P = \frac{Db}{2} \int_0^{\theta_1} (\tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta) d\theta \quad (1)$$

式中 b ——轮宽 D ——车轮直径
 $\tau(\theta)$ ——切应力 $\sigma(\theta)$ ——正应力

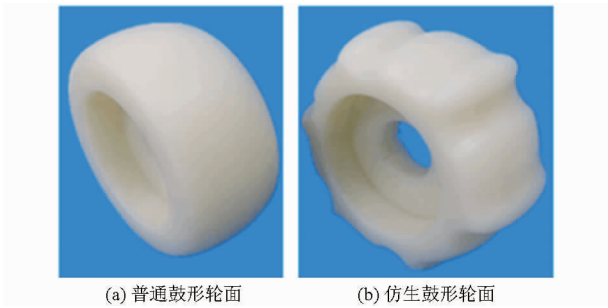


图 5 试验车轮

Fig. 5 Testing wheels

θ ——轮壤接触面任意角

由图 6 可知, 本研究中所设计的仿生鼓形轮面车轮与土壤接触时, 由于凹槽前后 2 个面对土壤颗粒的阻挡作用, 土壤颗粒都有向凹槽面中间聚拢的趋势, 减少轮下土壤颗粒的流动, 起到固沙限流作用。此外, 内凹的轮面设计增大了轮面与土壤颗粒的接触面积, 进而增大了车轮表面在松软土壤上的固着能力和土壤推力, 增大了车轮的牵引力^[22-24]。图中 W 为轮上垂直载荷, z 为车轮沉陷量, v 为车轮运动速度方向, θ_1 为接近角, θ_m 为最大应力角。

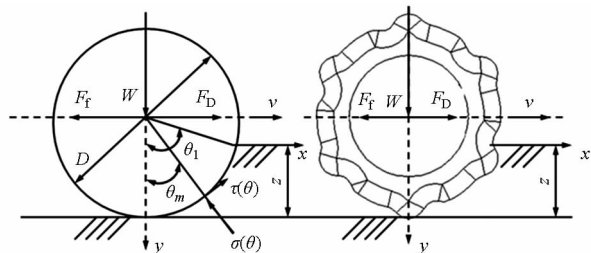


图 6 轮壤相互作用力学模型

Fig. 6 Wheel-soil mechanical interaction model

2 轮壤试验与结果分析

当车轮在松软路面上行驶时, 由于松软土壤承载能力和抗剪切强度低而常导致严重的车轮打滑和车辆下陷, 甚至车辆无法正常行驶。本试验采用具有高精度的车轮/土壤土槽测试系统^[25], 从车轮的轮辙、挂钩牵引力和沉陷量来对比普通鼓形轮和仿生鼓形轮面车轮在松软沙土表面的通过性能。

试验采用力学性能与火星壤近似的松软沙土, 土壤介质的主要物理力学特性参数为: 内聚力为 4.09 kPa , 内摩擦角为 29.77° , 容重为 1.36 g/cm^3 , 内聚模量为 1.952 kPa/m^{n-1} , 内摩擦模量为 1.685 kPa/m^n , 变形指数 n 为 1.434 2 。由于火星车在执行巡视探测任务时, 需要根据星球表面传回的拍摄图片对就位地形进行分析和判断, 从而调整星球车位姿以及进行合理的路径规划, 因此火星车在火星表面行驶速度较慢^[26]。故试验时设置车轮转动速度为 $15.28(^\circ)/\text{s}$, 垂直载荷设定为 84 N 。挂

钩牵引力的施加方法是通过滑轮在行驶装置后面悬挂已知质量的砝码。观察车轮在行驶过程中轮辙变化和滑转情况,直至车轮出现连续滑转不能向前行驶时结束试验,此时砝码的质量即为该车轮的最大挂钩牵引力(图 7)。根据每次试验车轮的行驶情况,依次增加 0.5 N 的挂钩牵引力。每次车轮行驶后,在开始下次试验之前,用特定工具松散轮下土壤,确保每次试验轮下土壤的紧实度基本相同。为保证试验数据真实反映车轮在松软地面的牵引通过性能,每组试验重复 5 次。

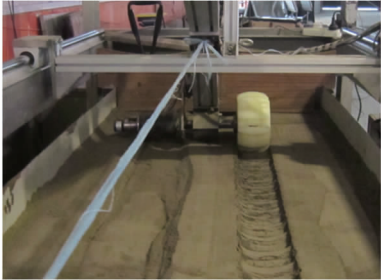


图 7 车轮/土壤土槽试验
Fig. 7 Wheel/soil bin experiment

2.1 轮辙分析

图 8 为普通鼓形轮与仿生鼓形轮面车轮在滑转率为 0.15、0.45、0.70、0.85 时的轮辙,相比仿生鼓形轮面,由于普通鼓形轮轮面并无特殊轮面结构,辙堆积现象不太明显,牵引力只有靠平顺的鼓形面与

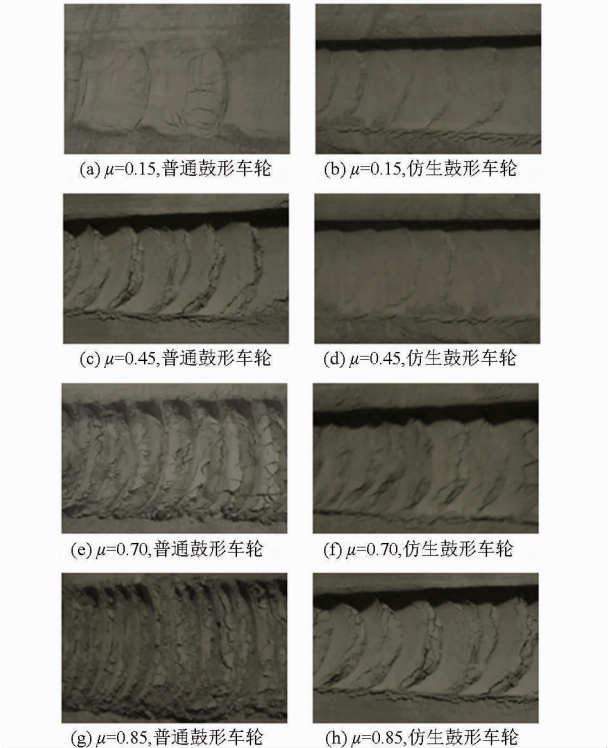


图 8 不同滑转率下的仿生鼓形轮和普通鼓形轮轮辙图

沙土之间的摩擦力来提供。因此,当滑转率达到 0.85 时,普通鼓形轮面轮辙的堆积现象比仿生鼓形轮面明显,出现严重的打滑现象,再继续增加挂钩牵引力车轮将会出现原地打转无法前进的现象。

2.2 牵引通过性分析

图 9 为普通鼓形车轮与仿生鼓形车轮挂钩牵引力与滑转率关系曲线,由图 9 可知,仿生鼓形轮面车轮的挂钩牵引力均随滑转率的增大而明显增大,普通鼓形轮面车轮的挂钩牵引力随滑转率增大而缓慢增大,当滑转率大于 0.4 后,其挂钩牵引力基本保持不变。

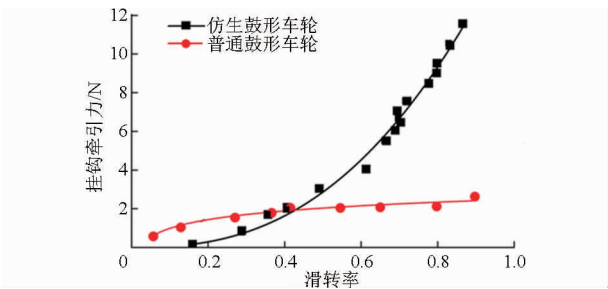


图 9 挂钩牵引力与滑转率的关系
Fig. 9 Relationships between drawbar pull and slip-rotation ratio

仿生车轮和普通车轮挂钩牵引力随滑转率变化曲线分别利用指数函数和对数函数进行拟合,仿生车轮和普通车轮的沉陷量随滑转率变化曲线均利用线性拟合的方法,表 1 为仿生车轮和普通车轮的挂钩牵引力、沉陷量随滑转率变化曲线的拟合方程,其中, y 代表挂钩牵引力与沉陷量, x 代表滑转率。联立挂钩牵引力与滑转率关系曲线拟合方程求解得交点处的滑转率为 0.42。当滑转率小于 0.42 时,普通鼓形轮的挂钩牵引力稍大于仿生鼓形轮,当滑转率大于 0.42 时,仿生轮的挂钩牵引性能明显优于普通鼓形轮,且这种优势会随着滑转率的增大会越来越明显。根据拟合公式计算得到仿生鼓形轮的理论最大挂钩牵引力为 17.54 N,普通鼓形轮的理论最大挂钩牵引力约为 2.765 N。而在实际试验时,当挂钩牵引力加到 11.6 N 时仿生车轮出现原地打转,即仿生车轮试验最大挂钩牵引力约为 11.6 N,而普

表 1 车轮挂钩牵引力及沉陷量与滑转率关系拟合曲线
Tab.1 Fitted equations of relationship between drawbar pull with sinkage and slip-rotation ratio

车轮类型	挂钩牵引力与滑转率关系	沉陷量与滑转率关系
仿生鼓形车轮	$y = 17.54x^{2.57}$ ($R^2 = 0.977$)	$y = 15.68 + 76.70x$ ($R^2 = 0.87$)
普通鼓形车轮	$y = 0.65\ln x + 2.50$ ($R^2 = 0.955$)	$y = 33.38 + 5.05x$ ($R^2 = 0.82$)

Fig. 8 Ruts morphology images of bionic and ordinary drum-shaped wheels at different slip-rotation ratios

通鼓形轮试验最大挂钩牵引力约为 2.6 N。由于在实际试验时,施加挂钩牵引力的滑轮与拉绳之间存在摩擦,因此出现试验值略小于理论值的现象。由试验得出,在垂直载荷为 84 N 及滑转率大于 0.42 的条件下,仿生鼓形轮比普通鼓形轮的挂钩牵引力大,即表明所设计的仿生鼓形轮面车轮对于提高松软地面的牵引通过性能有明显作用。

图 10 为普通鼓形车轮与仿生鼓形车轮的沉陷量与滑转率关系曲线。由图 10 可知,滑转率对于普通鼓形轮面车轮的沉陷量影响较小,沉陷量基本保持在约为 35 mm。当滑转率大于 0.8 时,普通鼓形轮面车轮已经出现严重打滑现象,并完全空转而不能前移,因此沉陷量变化较小。而随着滑转率的增大,仿生鼓形车轮沉陷量呈现缓慢增大的趋势。车辆在松软地面上行驶时,较大的沉陷会造成行驶阻

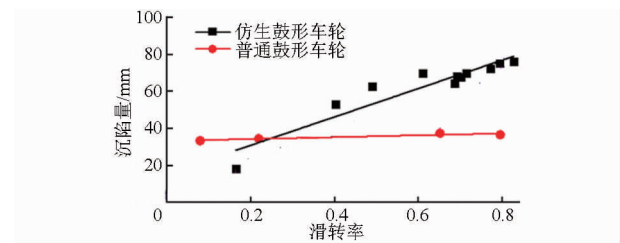


图 10 沉陷量与滑转率的关系

Fig. 10 Relationships between sinkage and slip-rotation ratio

力增大,使车辆难以或无法通过,本研究中,普通鼓形车轮虽然沉陷量较小,但车轮牵引力不足依旧无法顺利通过松软地面,而仿生鼓形车轮通过适当的增大沉陷量,为车轮提供土壤推力,使得仿生鼓形车轮的挂钩牵引力明显比普通鼓形车轮大,具有更优越的松软沙地面通过性能。

3 结束语

以鸵鸟二趾足为仿生原型,采用工程仿生技术,进行了火星巡视器仿生鼓形车轮模型设计和制造。利用轮壤试验测试系统,以轮辙,挂钩牵引力和沉陷量为试验指标,对仿生鼓形车轮与普通鼓形车轮的通过性能进行对比分析。试验结果表明,当滑转率达到 0.85 时,普通鼓形轮面比仿生鼓形轮面轮辙的堆积现象明显,出现严重的打滑现象。滑转率对于普通鼓形车轮的挂钩牵引力和沉陷量影响均较小,而随着滑转率增大,仿生鼓形车轮的挂钩牵引力和沉陷量均呈现缓慢增大趋势。仿生鼓形车轮试验最大挂钩牵引力约为 11.6 N,而普通鼓形轮试验最大挂钩牵引力约为 2.6 N。同时发现以鸵鸟足趾为仿生原型设计的仿生鼓形车轮表现出比普通鼓形轮面车轮具优越的沙地通过性能。

参 考 文 献

- 1 欧阳自远,肖福根. 火星及其环境[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(6): 591-601.
OUYANG Z Y, XIAO F G. The Mars and its environment [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(6): 591-601. (in Chinese)
- 2 中国航天编辑部. 勇气号被改为静止科研平台[J]. 中国航天, 2010(3): 36.
- 3 刘声远. 别了,勇气号[J]. 大自然探索, 2011(9): 20-31.
- 4 飞行器测控学报编辑部. “机遇”号漫游器陷入松软的火星土壤中[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(6): 42.
- 5 孙鹏,高峰,李雯,等. 深空探测车可变直径车轮牵引通过性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1404-1407.
SUN P, GAO F, LI W, et al. Analysis of traction trafficability of diameter-variable wheel for planetary rover [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12): 1404-1407. (in Chinese)
- 6 陈秉聪. 仿生学对松软地面车辆行走系统研究的启发[J]. 世界科技研究与发展, 1996(增刊 1): 132-133.
CHEN B C. Inspired by bionic for system of vehicle on soft terrain [J]. World Sci-tech R & D, 1996(Supp. 1): 132-133. (in Chinese)
- 7 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): 130-145.
LI J Q, HUANG H, WANG Y, et al. Development on research of soft terrain machine systems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 130-145. (in Chinese)
- 8 李杰,庄继德,裘熙定,等. 仿驼足车辆行走机构的设计与试验[J]. 中国机械工程, 1999, 10(6): 676-679.
LI J, ZHUANG J D, QIU X D, et al. Design and test of the bionic camel foot vehicle walking gear [J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(6): 676-679. (in Chinese)
- 9 张锐,罗刚,薛书亮,等. 沙地刚性轮构型仿生设计及牵引性能数值分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 122-128.
ZHANG R, LUO G, XUE S L, et al. Bionic design of configuration of rigid wheel moving on sand and numerical analysis on its traction performance [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 122-128. (in Chinese)
- 10 ABOURACHID A, RENOUS S. Bipedal locomotion in ratites (*Paleognathiform*): examples of cursorial birds [J]. Ibis, 2000, 142(4): 538-549.
- 11 GATESY S M, BIEWENER A A. Bipedal locomotion: effects of speed, size and limb posture in birds and humans [J]. Journal of Zoology, 1991, 224(1): 127-147.
- 12 RUBENSON J, LLOYD D G, BESIER T F, et al. Running in ostriches (*Struthio camelus*): three-dimensional joint axes

alignment and joint kinematics[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(14): 2548 – 2562.

13 RUBENSON J, LLOYD D G, HELIAMS D B, et al. Adaptations for economical bipedal running: the effect of limb structure on three-dimensional joint mechanics[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(58): 740 – 755.

14 JINDRICH D L, SMITH N C, JESPER K, et al. Mechanics of cutting maneuvers by ostriches (*Struthio camelus*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(8): 1378 – 1390.

15 SCHALLER N U, D'AOÛT K, AERTS P, et al. Phalangeal load and pressure distribution in walking and running ostriches (*Struthio camelus*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2007, 146(4): S122.

16 EL-GENDY S A A, DERBALAH A, EL-MAGD M E R A. Histo-morphological study on the footpad of ostrich (*Struthio camelus*) in relation to locomotion[J]. Journal of Veterinary Anatomy, 2011, 4(2): 77 – 97.

17 SCHALLER N U, D'AOÛT K, VILLA R, et al. Toe function and dynamic pressure distribution in ostrich locomotion[J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(7): 1123 – 1130.

18 张锐, 杨明明, 刘海宝, 等. 鸵鸟二趾足底曲面固沙限流特性数值模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2015, 45(2): 508 – 515.
ZHANG R, YANG M M, LIU H B, et al. Numerical simulation of sand flow fixation characteristics of plantar surface of ostrich didactyl foot[J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(2): 508 – 515. (in Chinese)

19 张锐, 杨明明, 潘润铎, 等. 鸵鸟足底非规则曲面形貌数学模型构建[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 71 – 78.
ZHANG R, YANG M M, PAN R D, et al. Mathematical model establishment of irregular plantar surface of ostrich didactyl foot [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 71 – 78. (in Chinese)

20 陈秉聪. 土壤-车辆系统力学[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.

21 陈秉聪. 拖拉机刚性轮在松软土壤上滚动时的滚动阻力和附着力(一)[J]. 吉林大学学报:工学版, 1958(1): 115 – 129.
CHEN B C. The rolling friction and adhesion of the steel-rim tractor wheel when it rolls on the soft soil[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 1958(1): 115 – 129. (in Chinese)

22 WAWAN H, MINORU Y, AKIRA O. Design and traction performance of the movable lug wheel[J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(3): 159 – 177.

23 YANG Y, SUN Y, MA S G. Drawbar pull of a wheel with an actively actuated lug on sandy terrain [J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56: 17 – 24.

24 DING L, GAO H B, DENG Z Q, 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.

25 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 J Q, HUANG H, DANG Z L, 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)

26 岳宗玉, 邸凯昌. 好奇心号巡视器及其特点分析[J]. 航天器工程, 2012(5): 110 – 116.
YUE Z Y, DI K C. Mars curiosity rover and its characteristics[J]. Spacecraft Engineering, 2012(5): 110 – 116. (in Chinese)

(上接第 310 页)

14 ZHU Songye, SHEN Wenai, XU Youlin. Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: modeling and testing[J]. Engineering Structures, 2012, 34(34): 198 – 212.

15 STRISKY A, HYNIOVA K, HONCU J, et al. Energy recuperation in automotive active suspension systems with linear electric motor[C]//Mediterranean Conference on Control & Automation, MED'07. IEEE, 2007: 1 – 5.

16 ZUO L, ZHANG P S. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(1): 1 – 8.

17 RIBEIRO R, ASADI E, KHAMESEE M B, et al. Hybrid variable damping control: design, simulation, and optimization[J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(8 – 9): 1723 – 1732.

18 HUANG B, HSIEH C Y, GOLNARAGHI F, et al. Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation[J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 357: 16 – 34.

19 KHOSHNOUD Farbod, LU Jianbo. Suspension energy regeneration for random excitations and self-powered actuation[C]//2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2014: 2519 – 2524.

20 ZUO L, ZHANG P S. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2011, 135(1): 48 – 65.