

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.053

自适应低振动步行轮仿生设计与性能分析

何彦虎¹ 韩佃雷² 李国玉² 罗刚² 张锐²

(1. 湖州职业技术学院机电与汽车学院, 湖州 313000; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 为提高具有高通过性的步行轮平顺性,基于鸵鸟足运动姿态与跖趾关节储能减振机理,运用工程仿生学原理与技术,设计了一种仿生自适应低振动步行轮。有限元数值模拟结果表明,轮上载荷 30 N,角速度 10(°)/s 情况下,相比于传统步行轮,仿生步行轮轮心波动范围在软路面和硬路面分别降低了 85.71% 和 93.33%。采用轻载荷月壤/车轮土槽测试系统验证了仿生步行轮的减振性能。当滑转率小于 40% 时,仿生步行轮的挂钩牵引力均大于传统步行轮;当滑转率大于 40%,且仅在角速度为 20(°)/s 时,仿生步行轮的挂钩牵引力才小于传统步行轮,表明仿生步行轮在松软地面具有较好的牵引通过性。同时,相比于传统步行轮,当角速度为 30(°)/s 时,仿生步行轮在软路面和硬路面的加速度分别减少了 6.3% 和 15.8%,振幅分别减小了 14.6% 和 9.6%。在保证松软地面优越牵引通过性能前提下,仿生步行轮比传统步行轮的轮心波动更小,振动明显降低,有效解决了步行轮多边形效应引起的振动问题。

关键词: 仿生步行轮; 鸵鸟足; 软/硬地面; 低振动

中图分类号: TB17; Q811.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0418-09

Bionic Design and Performance Analysis of Adaptive Low Vibration Walking Wheel

HE Yanhu¹ HAN Dianlei² LI Guoyu² LUO Gang² ZHANG Rui²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Huzhou Vocational and Technical College, Huzhou 313000, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on ostrich foot locomotion posture, energy storage and vibration reduction mechanism of the metatarsophalangeal joint (MTP), a bionic adaptive low vibration walking wheel was designed to improve the low vibration performance. Through the finite element method (FEM), motion process of the walking wheel was analyzed on the soft/hard ground. The result showed that under the condition of 30 N load and 10(°)/s, the fluctuation range of the bionic walking wheel center was reduced by 85.71% and 93.33% on the soft and hard ground, respectively. In order to further verify the vibration reduction performance of the bionic walking wheel, the light load of lunar soil/wheel interaction test system was employed for test. When the slip ratio was smaller than 40%, the drawbar pulling force of the bionic walking wheel was all larger than the traditional walking wheel. When the slip ratio was larger than 40% and the speed was 20(°)/s, the drawbar pulling force of the bionic walking wheel was less than the traditional walking wheel. The results showed that the bionic walking wheel was provided with better traction and passing-through performances on the soft ground. Under the condition of 30(°)/s, the accelerations were reduced by 6.3% and 15.8% on the soft and hard ground, respectively. Meanwhile, the amplitudes were reduced by 14.6% and 9.6%, respectively. On the premise that passing-through performances of the bionic wheel was assured, combining the simulation and test data on the soft and hard ground, the wheel center fluctuation of the bionic walking wheel was smaller than that of the traditional walking wheel. Therefore, the vibration of the walking wheel, caused by polygon effect, was solved effectively.

Key words: bionic walking wheel; ostrich foot; soft/hard ground; low vibration

收稿日期: 2017-08-06 修回日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675221, 51275199)

作者简介: 何彦虎(1972—),男,副教授,主要从事机电技术和智能控制研究, E-mail: heyanhug3352@126.com

通信作者: 张锐(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事松软地面仿生行走理论与技术研究, E-mail: zhangrui@jlu.edu.cn

0 引言

轮式行走机构具有平顺性好、牵引效率高等特点,被广泛应用于物资运输、军事防御、航天科考等领域^[1-3]。相比于传统连续滚动的车轮,步行轮相当于多边形轮子间断滚动,并具有跨步功能,充分利用了轮脚的约束介质流动和作用位置有效的优点,能够明显减少滚动阻力,提高牵引效率,在沙漠、泥泞、沼泽等非常规路面具有更高的通过性^[4]。陈秉聪^[5]基于水牛运动的“半浮式理论”,结合水牛跨步策略与车轮运动特点,根据水牛在水田行走时行驶阻力小、驱动力大的优点,提出在松软地面上用步行代替轮子滚动,改变了传统生产中承重与驱动并存的结构体系,进而提出仿生步行轮概念。仿生步行轮在水田中行驶时,在土壤内不形成沟辙,只留下一个轮脚的刺孔,既有步行的方式,又具有轮子的滚动作用,在浅泥脚水田和有硬底层的沼泽湿地地区具有滚动阻力小、驱动力大的特点。为了解决松软地面车辆高通过行驶,同时保证良好的牵引性能和行驶平顺性,提出一种采用偏心轮机构的机械传动式步行轮,偏心轮转动使轮腿产生伸缩运动,轮毂转动使轮腿跨步行驶,通过合理地确定结构参数,保证轮心离地高度基本不变。然而,机械传动式步行轮的多边形效应仍然十分明显,振动、冲击等问题并没有较好地解决^[6-8]。步行轮的振动问题严重损害乘员健康,同时影响车辆零部件寿命,这些问题还需要进一步研究。

由于长期需要应对高速冲击的作用,善于奔跑或跳跃的动物经过长期自然进化,其运动系统具有高效的减振、缓冲功能,譬如猫科动物^[9-10]、啄木鸟^[11]等。这为利用优越的动物运动减振性能进行仿生步行机构研究开辟了新的思路。MIT 仿生机器人实验室基于猎豹的骨骼、肌肉和肌腱在运动中的作用,研制出仿猎豹机器人^[12]。该仿生机器人的足部采用肌腱-骨骼协同运动机制,这使得骨的应力减少了 59% 以上,运动的平顺性更好,振动明显减小^[13]。

非洲鸵鸟生活在沙漠地带和无树的大荒原,它作为陆地上奔跑速度最快的双足动物,持续奔跑速度 50 ~ 60 km/h,可持续约 30 min,冲刺速度超过 70 km/h^[14]。从鸵鸟整个后肢来看,肌肉主要集中在大腿和小腿,足部肌肉较少,几乎没有^[15]。足部跗跖骨与趾骨之间主要由肌腱、韧带连接^[16]。鸵鸟高速奔跑过程中,足部是主要的执行器,跖趾关节是鸵鸟足趾和跗跖骨的连接关节,鸵鸟足跖趾关节形成的永久离地姿态在鸵鸟触地和离地过程中起到了缓

冲、减振、节能的作用^[17]。

基于鸵鸟足运动姿态和跖趾关节储能减震功能,采用工程仿生技术,设计一种自适应低振动步行轮,通过仿真与试验相结合的测试方法,对该仿生步行轮的减振性能进行验证。

1 仿生步行轮设计

1.1 生物模本分析

图 1 为鸵鸟足跖趾关节(MTP)结构及其在软/硬地面上的运动参数变化。跖趾关节的结构特点是永久离地,起到了储能、减振的作用,如图 1b 所示。在鸵鸟高速奔跑或行走过程中,其主要经历 3 个阶段的变化^[18]:①在触地初期,跖趾关节角 θ 不断减小,并不断向下运动。②触地中期,鸵鸟足承重,跖趾关节高度变化较小,而角度不断减小。③触地末期,鸵鸟足开始离地,跖趾关节向上运动,角度也开始增大,如图 1c、1d 所示。在触地初期,跖趾关节将鸵鸟足的动能转换为肌腱的弹性势能。在触地中期,跖趾关节需要保持平稳的过渡以减少质心的波动。在触地末期,通过跖趾关节的提升与角度增加,肌腱中储存的弹性势能转换为鸵鸟运动的动能。经此 3 个阶段,鸵鸟足不仅能显著降低触地时的冲击力,同时也减小触地中期和离地时质心的波动,最终达到降低振动的目的。

另外,在鸵鸟行走和奔跑过程中,鸵鸟足可被看作是 不可压缩的刚体,为了减少能耗,鸵鸟通过双足配合尽可能减小身体质心的上下波动。一般情况下,鸵鸟行走时一只足离地前,另一只足已经触地。因此,在行走过程中会出现双足同时触地阶段,也就是所谓的双肢撑期^[19]。

1.2 跖趾关节储能机理

鸵鸟足跖趾关节在运动中所储存的能量占整个腿储存能量的 63.3%^[20]。因此,探究鸵鸟足跖趾关节储能机理对设计储能减振的步行轮有重要意义。通过对鸵鸟足底压力的研究发现,在鸵鸟运动过程中第Ⅲ趾最先触地,同时也承受最大的压力,第Ⅳ趾起辅助支撑的作用,如图 2a 所示。因此,鸵鸟第Ⅲ趾起到主要的储能、减振作用。为定量研究鸵鸟足储能、减振机理,本节对鸵鸟足受力进行简化,在计算时忽略第Ⅳ趾的辅助支撑作用。

1.2.1 数学模型

足-弹簧模型(Foot spring-loaded inverted pendulum)是根据弹簧质点模型(Spring-loaded inverted pendulum)发展起来的,能精确地描述足在运动中的受力,是研究足生物力学的重要模型^[21]。

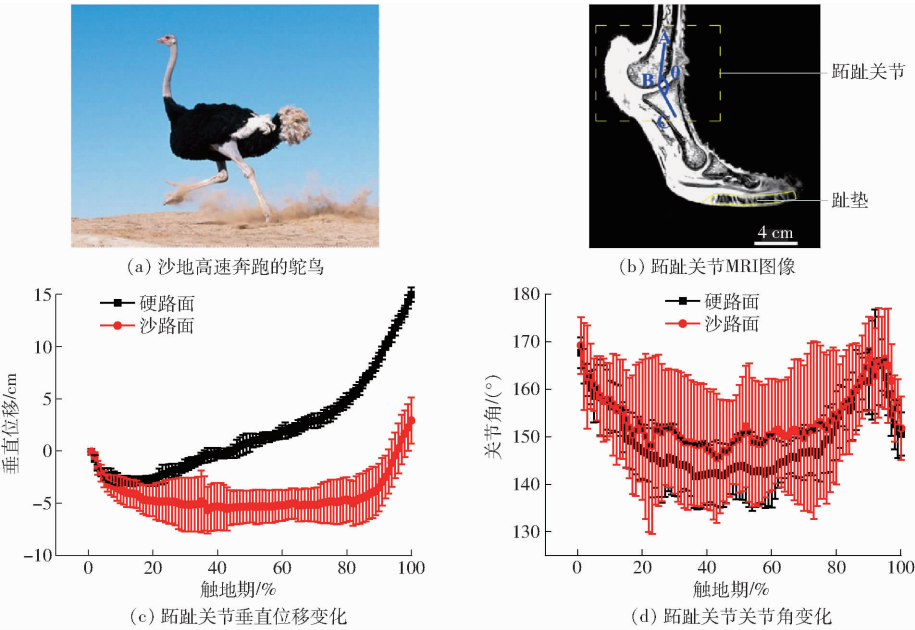


图1 鸵鸟足与跖趾关节运动学

Fig.1 Ostrich foot and metatarsophalangeal joint kinematics

模型中动物的质量中心被当作一个点 (Center of mass),腿被一个弹簧代替,足则是装有旋转弹簧的无质量刚体^[22],如图 2b 所示。

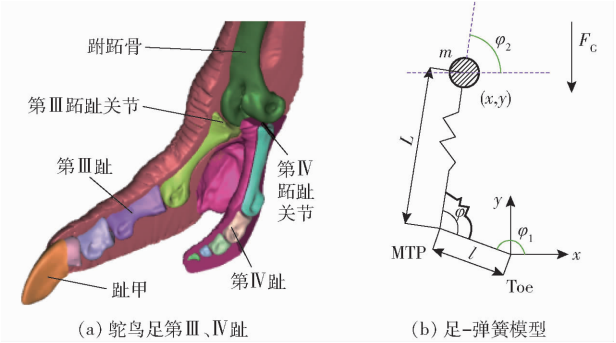


图2 理论分析模型

Fig.2 Theoretical analysis models

着地时,可伸缩腿的弹簧由静息长度 L_0 被压缩到实际长度 L ,同时足部关节的旋转弹簧由静息角度 φ_0 减小到实际角度 φ 。根据力的平衡条件^[23],第Ⅲ趾受到的地面反力 F_x 和 F_y 分别为

$$F_x = k(L_0 - L) \cos \varphi_2 + \frac{c}{L}(\varphi_0 - \varphi) \cos \left(\varphi_2 + \frac{\pi}{2} \right) \tag{1}$$

$$F_y = k(L_0 - L) \sin \varphi_2 + \frac{c}{L}(\varphi_0 - \varphi) \sin \left(\varphi_2 + \frac{\pi}{2} \right) - mg \tag{2}$$

其中 $L = \sqrt{(x - l \cos \varphi_1)^2 + (y - l \sin \varphi_1)^2}$ (3)
式中 k ——腿刚度系数 c ——关节刚度系数
 φ_1, φ_2 ——不同足段角度
 l ——第一趾骨实际长度
跖趾关节受到的弹簧扭矩为

$$M = F_y l \cos(\pi - \varphi_1) + F_x l \cos \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right) \tag{4}$$

同时 $M = -k\alpha$ (5)

式中 α ——角位移
扭矩弹簧做功为

$$W = \frac{1}{2} k \alpha^2 \tag{6}$$

1.2.2 跖趾关节储能分析

在鸵鸟运动中,第Ⅲ趾起到主要的支撑作用,且 Y 方向力为 X 方向力的 10 倍左右。所以在计算跖趾关节储能时可以忽略第Ⅳ趾、趾甲以及 X 方向力的作用,再加上触地瞬间跖趾关节的势能为零,则可得跖趾关节中势能的计算公式为^[24]

$$E = -\frac{1}{2} Fl(\varphi - \varphi_0) \cos(\pi - \varphi_1) \tag{7}$$

式中 F ——第Ⅲ趾受到的地面反力

根据式(7),结合鸵鸟足运动学和足底压力数据计算出鸵鸟跖趾关节弹性势能。如图 3a 所示,跖趾关节在支撑相 50% 前做负功,其弹性势能不断增加,之后做正功弹性势能减小。在硬路面上奔跑时,跖趾关节储存的弹性势能较多,而且在 50% ~ 70% 支撑相这段时间快速释放。相对的,行走时,跖趾关节储存的弹性势能约为奔跑时的 2/3,其积累速度和释放速度也较慢。出现这种明显的差异说明跖趾关节储能对鸵鸟高速运动有着重要的作用,其原理是在触地前期通过跖趾关节所连接的肌腱拉伸将部分的动能转换为肌腱的弹性势能,在加速阶段又通过肌腱收缩将这部分弹性势能转换为鸵鸟足的动能。当速度增大时,趾底压力增大,对肌腱的拉伸

作用也相应地增大。所以,跖趾关节储存的弹性势能也增加。

在沙路面上跑动时,跖趾关节所能储存的弹性势能比硬路面上少。在沙路面上运动时,鸵鸟足底

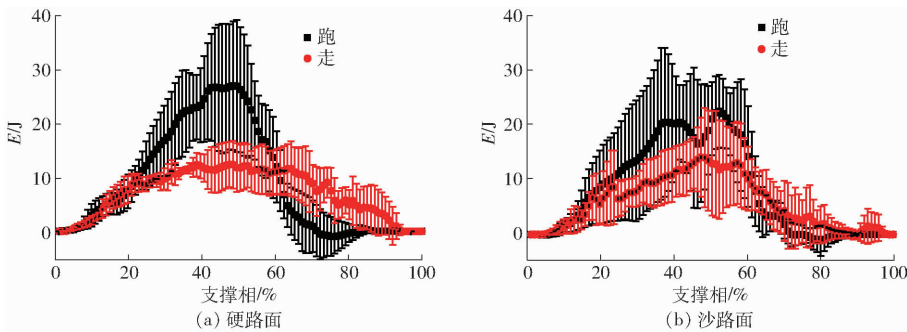


图 3 跖趾关节弹性势能变化规律
Fig. 3 Changing rules of elastic potential energy of MTP

1.3 仿生步行轮单足设计及工作过程

根据鸵鸟足触地过程的运动姿态和跖趾关节功能,用弹簧模拟肌腱的储能功能,设计了一种仿生步行轮轮足结构。该仿生步行轮轮足主要由轮腿、轮足、弹簧等组成,轮腿和轮足采用铰连接,弹簧连接轮腿中部和轮足后部。其中,轮腿模仿了鸵鸟足的跖跖骨,轮足模仿了鸵鸟足的趾骨,弹簧、轮腿与轮足的组装方式模仿了跖趾关节的缓冲、减振等功能,其工作过程如图 4 所示。在轮腿触地初期,轮足的

沙土流动耗散部分动能,如图 3b 所示。然而,当速度降至行走时,鸵鸟足跖趾关节在两种路面情况所储存的弹性势能相当。这证明鸵鸟行走过程中跖趾关节受环境影响较小。

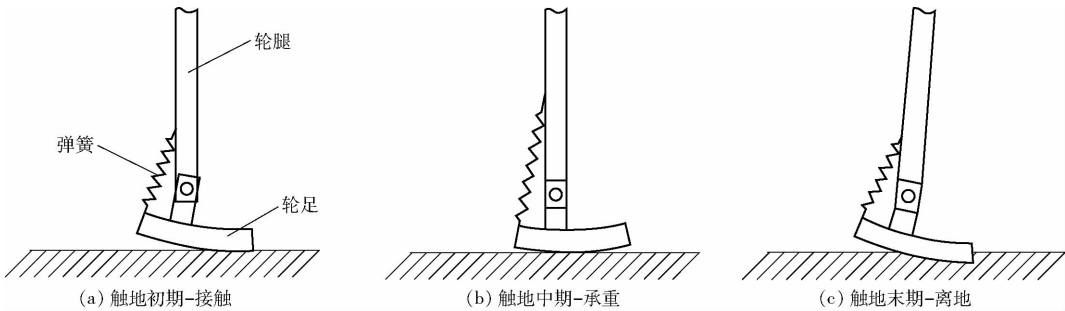


图 4 仿生步行轮单足工作过程
Fig. 4 Working process of single foot of bionic walking wheel

1.4 仿生步行轮结构

根据鸵鸟双足行走步态,将仿生步行轮单足在圆周上阵列,组装成一种仿生步行轮,如图 5 所示。

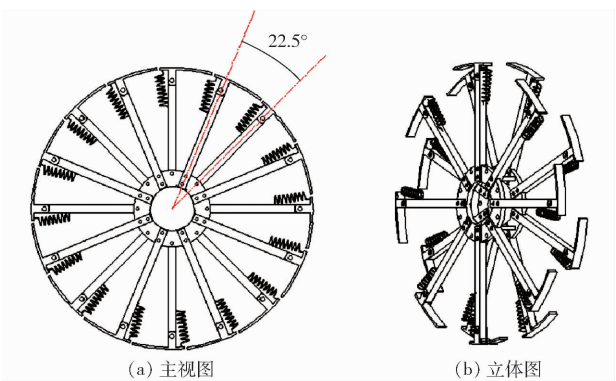


图 5 仿生步行轮结构

Fig. 5 Structure diagrams of bionic walking wheel

前端接地,此时弹簧处在无负载状态。轮足受到冲击后可以迅速地绕中心旋转从而减少轮腿受到的冲击作用。在触地中期,轮足承受较大载荷,这使得轮腿和轮足保持垂直状态。步行轮沿轮足接地面滚动,由于接地面的圆心与步行轮轮心重合,这使得此时的轮心上下波动较小。在触地末期,步行轮不断向前滚动过程中,弹簧收缩力大于外部阻力时,弹簧开始收缩,使得轮足“蹬地”,将弹簧的弹性势能转换为步行轮前进的动能。

轮径为 0.32 m,轮足宽度 0.015 m,两轮足距离为 0.03 m。该步行轮采用了双层轮面、交错阵列的排布方式,每个仿生步行轮单足之间的夹角是 22.5°。当一侧的轮足触地离地后,另一侧的轮足刚好触地。从主视图中可以看出,在承重状态仿生步行轮的轮足外缘构成了一个完整的圆,从而明显改善了步行轮多边形效应。因此,可以最大程度地减小轮心的波动。同时,各个轮腿又是分离的,能够分别入土,进而可以增大步行轮牵引力。

2 仿生步行轮性能数值模拟分析

2.1 轮/壤相互作用计算模型

有限元方法被广泛运用于解决从结构静力学到复杂的非线性生物力学等各种科学和工程问

题^[25-26]。本文利用 ABAQUS 模拟仿生步行轮在硬路面和软路面上滚动时的受力情况,并与普通步行轮进行对比,研究仿生步行轮的牵引性能和轮心波动。

2.1.1 轮/壤相互作用系统建模

运用 ABAQUS 的 part 和 assembly 功能构建仿生步行轮和传统步行轮,如图 6 所示。仿生步行轮的参数如上文所述,传统步行轮的轮径是 0.32 m,宽度 0.03 m。软路面和硬路面模型为 1 m × 0.3 m × 0.2 m(长 × 宽 × 高)的长方体。仿真和试验用的传统步行轮是将仿生步行轮双侧同一位置的 2 条轮腿整合成了 1 条轮腿。仿真和试验分析时,传统步行轮是单侧轮足,且具有 8 条轮腿;仿生步行轮是相互交错的双侧轮足,且具有 16 条轮腿。

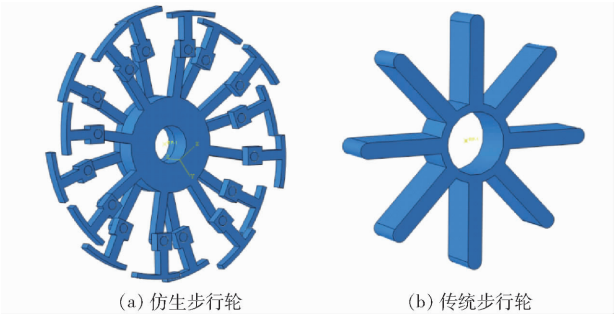


图 6 步行轮模型
Fig. 6 Models of walking wheel

2.1.2 地面材料属性

硬路面的材料选取线弹性材料,其材料参数如表 1 所示^[27-28]。

表 1 硬路面材料参数			
Tab. 1 Material parameters of hard ground			
参数	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
数值	2.06 × 10 ⁵	0.3	7 800

软路面的材料通过 Druckder – Prager 模型进行定义,其材料参数如表 2 所示^[29]。

表 2 软路面材料参数				
Tab. 2 Material parameters of soft ground				
参数	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)
数值	0.588	0.41	1 410	30

2.1.3 定义载荷与边界条件

在轮心处设置一个参考点,并通过 Rigid 命令将步行轮与参考点组合在一起,随后组装步行轮/土槽系统,如图 7 所示。仿生步行轮的弹簧刚度为 7 800 N/m,连接轮足与轮腿末端。基于动力学分析,且确保运算稳定性,分析步中选择 Explicit 显式分析。

步行轮 U3、UR1、UR2 这 3 个自由度为零,步行

轮的载荷和转速都通过参考点进行定义,载荷沿 Y 的负方向载荷为 30 N,角速度为 10(°)/s。土槽除与步行轮接触面外其余面 6 个自由度都进行限制。



图 7 仿生步行轮/土壤相互作用模型
Fig. 7 Interaction model between bionic walking wheel and soil

2.1.4 网格划分与计算

仿生步行轮和传统步行轮的结构都比较复杂。因此,采用 C3D10M 四面体网格,网格数量分别为 38 783 个和 8 983 个。土槽模型采用 C3D8R 六面体网格。

2.2 仿生步行轮性能分析

2.2.1 松软路面

为研究仿生步行轮的性能,选择了轮心垂直位移、轮心速度、加速度等指标。步行轮由于其多边形效应,在滚动过程中轮心会产生周期性的上下波动。仿生步行轮的多边形效应比传统步行轮小很多。如图 8 所示,在 10(°)/s 的角速度下,仿生步行轮轮心的波动范围是 2 mm 左右,而传统步行轮轮心波动范围达到 14 mm。从垂直方向的速度看,在达到稳定之前,传统步行轮轮心速度变化剧烈,最大速度达到 13 mm/s,约为仿生步行轮速度的 4 倍。达到稳定状态(轮心水平位移大于 0.3 m)后,轮心速度依然周期性波动,而仿生步行轮轮心垂直速度较小,最大值小于 2 mm/s。轮心垂直加速度表现出和垂直速度同样的趋势,在稳定状态前 2 种步行轮都具有较高的加速度,而传统步行轮的最大加速度达到 2.5 m/s²,是仿生步行轮的 2 倍。综上所述,仿生步行轮可以极大地减少轮心波动、轮心垂直速度和加速度。

根据步行轮平顺性计算方法^[30],对 2 种步行轮的轮心垂直加速度均方根进行计算得出,仿生步行轮的轮心垂直加速度均方根为 0.39 m/s²,而传统步行轮是 0.65 m/s²。在 10(°)/s 角速度下,与传统步行轮相比,仿生步行轮的平顺性具有较大的提升。

如图 9 所示,在仿生步行轮下土壤的应力面积向四周扩展,而传统步行轮下应力更集中。压力分散使得仿生步行轮与地面作用面积增大,着地更平稳,从而减少振动;而集中的压力导致传统步行轮更容易产生振动,且更容易插入土壤深层,增大挑土的可能。

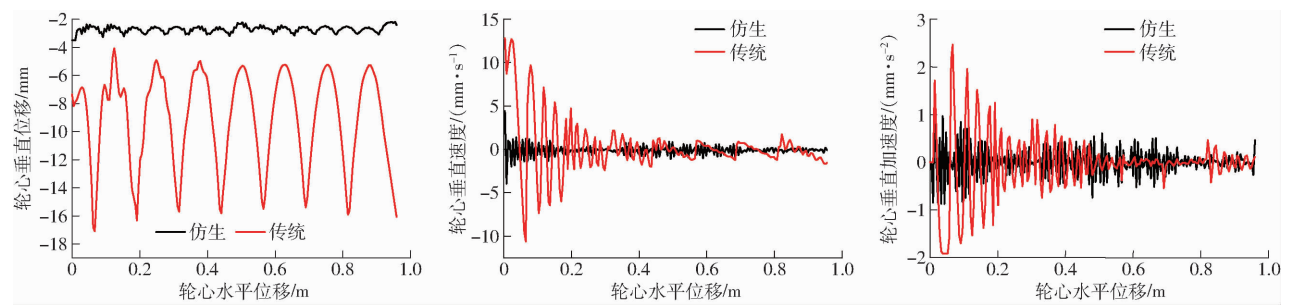


图8 软路面轮心水平位移与轮心波动、轮心速度和轮心加速度关系

Fig.8 Relationships between wheel center horizontal displacement and wheel center fluctuation, wheel center speed and wheel center acceleration on soft ground

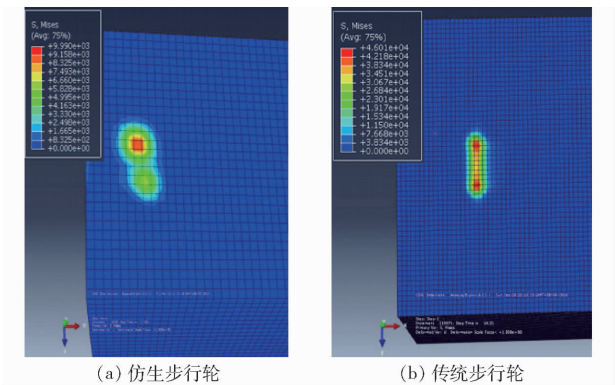


图9 轮下应力云图

Fig.9 Stress nephograms under compression of wheel

2.2.2 硬路面

与软路面上相似,在硬路面上仿生步行轮轮心的波动、垂直方向速度和垂直方向加速度都小于传统步行轮。如图10所示,仿生步行轮的轮心在垂直方向的波动最大值为1 mm,而传统步行轮由于多边形效应最大波动为15 mm。在平稳转动时,仿生步行轮轮心垂直速度最大值为12 mm/s,而传统步行轮的最大值为23 mm/s,且呈现周期性变化。在轮心加速度上,仿生步行轮同样表现出减振优势。平稳转动过程中,仿生步行轮最大垂直加速度为2.8 m/s²,而传统步行轮达到4.7 m/s²。前者加速度均方根为0.46 m/s²,而后者为0.47 m/s²。尽管两者数值相近,仿生步行轮由于轮足数量是传统步行轮的2倍,因此每次触地

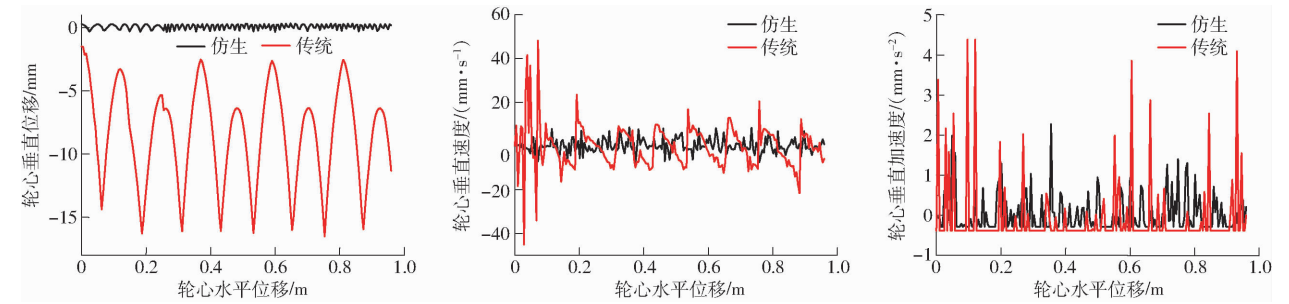


图10 硬路面轮心水平位移与轮心波动、轮心速度和轮心加速度关系

Fig.10 Relationships between wheel center horizontal displacement and wheel center fluctuation, wheel center speed and wheel center acceleration on hard ground

的振动比后者低。

综合软、硬2种路面的仿真数据可知,仿生步行轮具有良好的减振效果。

3 仿生步行轮土槽试验分析

3.1 试验设备

仿真分析发现仿生步行轮具有良好的减振性能。因此,加工出仿生步行轮和传统步行轮进行对比试验,如图11所示。

土槽测试系统采用轻载荷月壤/车轮土槽测试系统,如图12所示。测试系统包括固定的土槽、试验车轮固定装置、驱动电机、载荷控制机构以及控制箱等组成。该测试系统可以完成步行轮多项性能参数的测定,其中包括:沉陷、挂钩牵引力、滑转率、位移等。步行轮振动测试采用优利德UT-315型测振仪。该测振仪能够对振动物体的速度、加速度、振幅等振动参数进行测量。

3.2 试验条件

试验硬路面采用铁板代替,松软路面采用模拟月壤,其参数如表3所示^[31]。

步行轮载荷是30 N。挂钩牵引力设置3个水平,分别是49、88、128 g。角速度设置3个水平,分别是10、20、30(°)/s。每个水平下,重复3次试验,每次试验结束,对模拟月壤进行重新整备,确保试验条件的一致性。

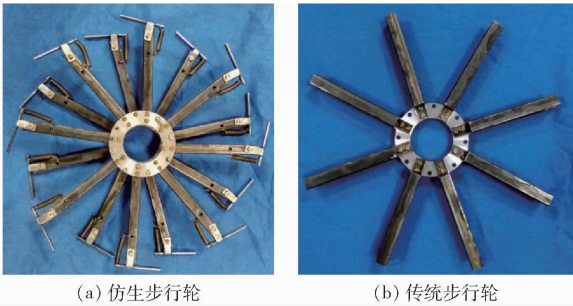


图 11 试验步行轮

Fig. 11 Walking wheel used for test

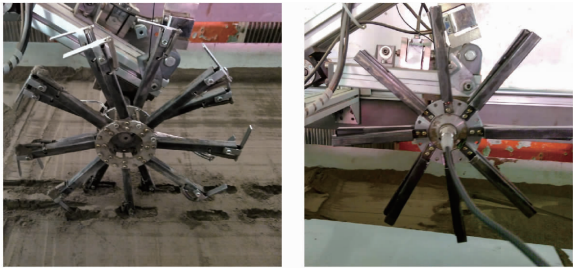


图 12 轻载荷月壤/车轮土槽测试系统

Fig. 12 Light lotus soil/wheel interaction test system

表 3 模拟月壤基本参数

Tab. 3 Basic parameters of simulated lunar soil

参数	含水率/%	颗粒密度/ (g·cm ⁻³)	容重/ (g·cm ⁻³)	内聚力/ /kPa	内摩擦角/ /(°)
数值	0.32	2.73	1.36	4.09	29.77

3.3 试验结果分析

3.3.1 轮辙

如图 13 所示,在角速度 10(°)/s 和挂钩牵引力 0.49 N 情况下,仿生步行轮和传统步行轮的轮辙图。仿生步行轮两轮足的轮辙清晰,不会产生相互干涉。步行轮在向前滚动过程中都出现了离散的“足印”,轮足后方出现“壅土”现象。仿生步行轮轮辙较浅,轮足后方土壤大部分保持原貌,说明仿生步行足对土壤扰动小,而传统步行路足印较深,轮足后方土壤扰动严重。利用激光扫描轮辙中线得到轮辙沉陷量,如图 14 所示。仿生步行轮沉陷量小,这说明仿生步行轮具有更好的通过性能。

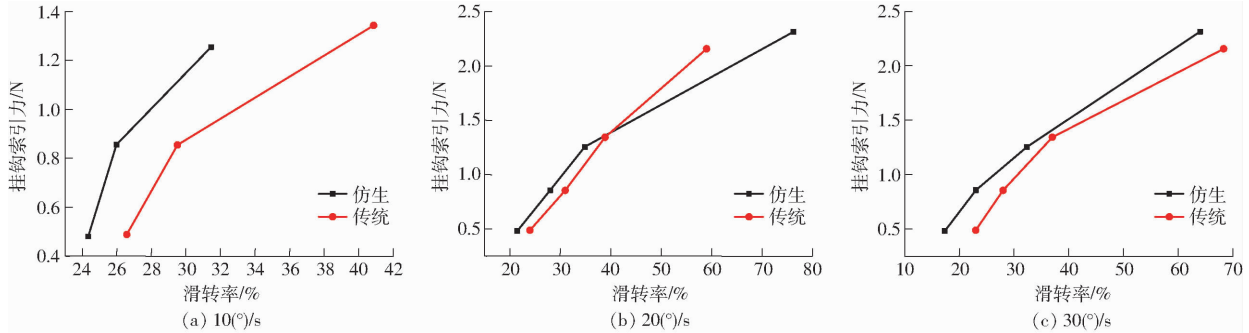
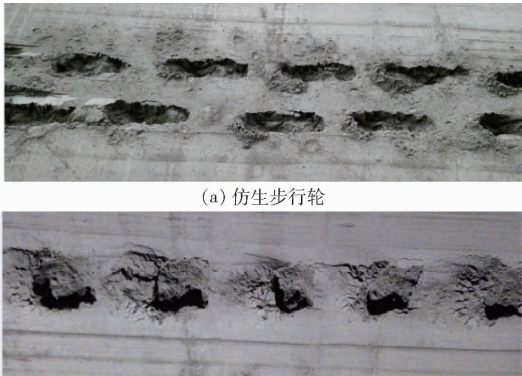


图 15 不同角速度下滑转率与挂钩牵引力

Fig. 15 Relationships between slip ratio and drawbar pulling force at different angular speeds



(a) 仿生步行轮

(b) 传统步行轮

图 13 轮辙图

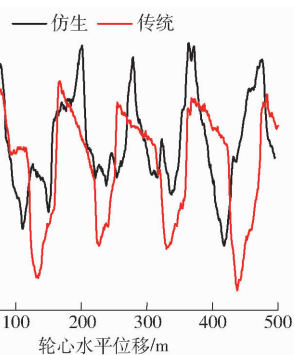


图 14 轮辙高度

Fig. 14 Track height

3.3.2 挂钩牵引力

挂钩牵引力是衡量车轮的牵引性能的重要参数。如图 15 所示,在 10(°)/s 角速度下,仿生步行轮挂钩牵引力明显高于传统步行轮,并且随着滑转率增加两者差距增大。在 20(°)/s 角速度下,在 40% 滑转率前仿生步行轮与传统步行轮挂钩牵引力差别较小,在滑转率为 40% 左右,滑转率-挂钩牵引力曲线出现交叉。在 30(°)/s 角速度时,仿生步行轮挂钩牵引力略大于传统步行轮。从总体上看,仿生步行轮的挂钩牵引力大于传统步行轮,说明仿生步行轮具有良好的牵引性能。

3.3.3 振动性能

振动加速度、速度和振幅是衡量机械振动的 3 个主要指标。因此,本文对这 3 个参数进行测量

和统计,并分别分析了仿生步行轮和传统步行轮以不同速度在 2 种路面上行走的振动性能。

试验结果显示,轮心振动加速度、速度和振幅都随转速增大而增大,如图 16 所示。与硬路面行驶相比,步行轮在软路面行驶振动更小。在角速度较低时,仿生步行轮和传统步行轮的振动性能差异较小。

试验结果表明,角速度为 $30(^{\circ})/\text{s}$ 时,相比于传统步行轮,仿生步行轮在软路面上加速度减少了 6.3%,振幅减小了 14.6%。同时,在硬路面上,仿生步行轮加速度减少了 15.8%,振动速度减小了 30%,而振幅减小了 9.6%。因此,仿生步行轮具有良好的减振性能。

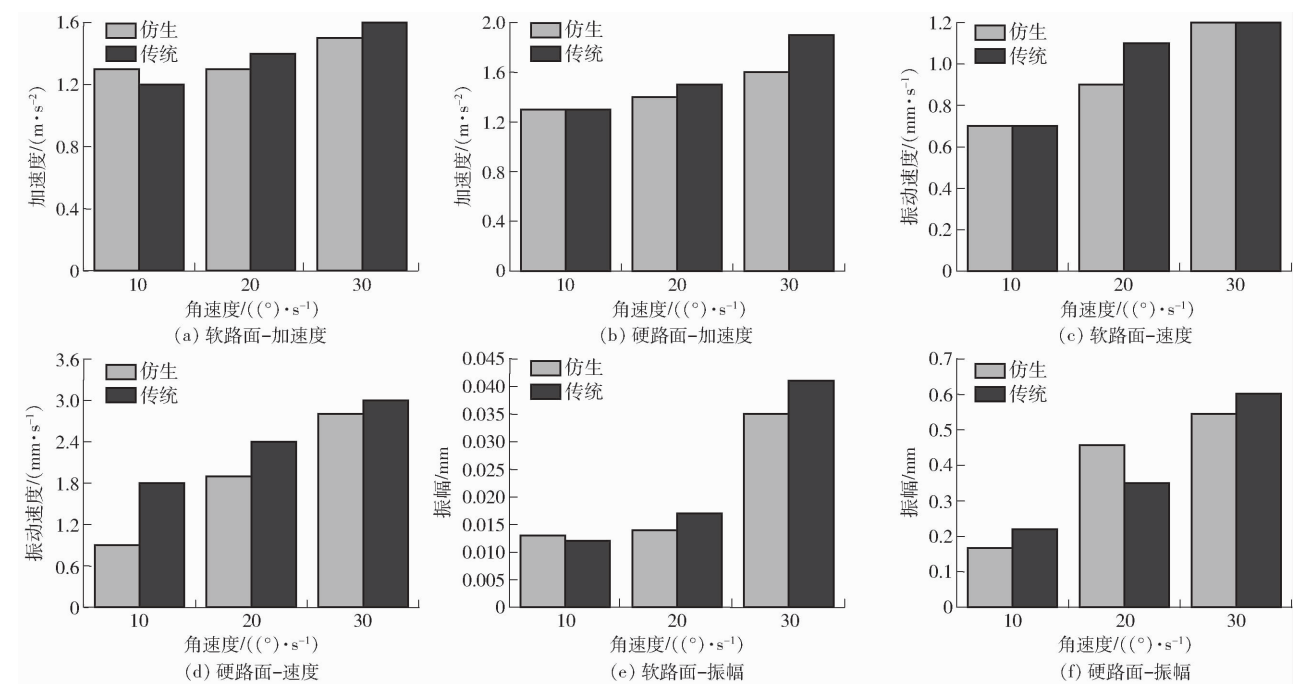


图 16 轮心振动

Fig. 16 Wheel center vibration

4 结论

(1) 基于鸵鸟足运动姿态与跖趾关节减振储能特点,采用工程仿生技术,设计了一种单足减振兼顾双足配合的自适应减振步行轮。

(2) 运用有限元方法对仿生步行轮与软、硬地面相互作用过程进行数值模拟分析。模拟结果表明,相比于传统步行轮,轮上载荷为 30 N,角速度为 $10(^{\circ})/\text{s}$ 情况下,在软路面上运行平稳后,仿生步行轮轮心在软路面和硬路面的波动范围分别降低了 85.71% 和 93.33%。

(3) 通过土槽测试系统对仿生步行轮进行试

验。在滑转率小于 40% 的情况下,仿生步行轮的挂钩牵引力均大于传统步行轮。当滑转率大于 40%,且仅在角速度为 $20(^{\circ})/\text{s}$ 时,仿生步行轮的挂钩牵引力才会小于传统步行轮,表明仿生步行轮在松软地面具有较好的牵引通过性能。

(4) 利用测振仪对步行轮运行过程中的振动加速度、振动速度和振幅进行测量。结果表明,随着仿生步行轮转速增大,减振效果明显。当角速度为 $30(^{\circ})/\text{s}$ 时,相比于传统步行轮,仿生步行轮在软路面上加速度减少了 6.3%,振幅减小了 14.6%。同时,在硬路面上,仿生步行轮加速度减少了 15.8%;振动速度减小了 30%,而振幅减小了 9.6%。

参 考 文 献

- 1 李建桥, 黄晗, 王颖, 等. 松软地面机器系统研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 306–320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150544&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.044.
- 2 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.
- 3 张锐, 吉巧丽, 杨明明, 等. 火星巡视器鼓形车轮仿生设计与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 311–316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160841&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.041.
- LI Jianqiao, HUANG Han, WANG Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 306–320. (in Chinese)
- ZHANG Rui, LUO Gang, XUE Shuliang, 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)
- ZHANG Rui, JI Qiaoli, YANG Mingming, et al. Bionic design and performance analysis of drum shaped wheel of mars rover[J/

- OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 311–316. (in Chinese)
- 4 李建桥, 张广权, 王颖, 等. 仿螃蟹步行机构及其通过性试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 47–54.
LI Jianqiao, ZHANG Guangquan, WANG Ying, et al. Bionic crab walking mechanism and its kinematic characteristics analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 47–54. (in Chinese)
- 5 陈秉聪. 车辆行走机构形态学及仿生减粘脱土理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- 6 赵玉璠, 陈秉聪. 可转换半步行轮的研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 1986, 16(1): 99–105.
- 7 陈德兴, 杨文志, 李强. 一种新型行走机构——机械传动式步行轮的研究[J]. 有色金属工程, 1994, 46(3): 7–11.
CHEN Dexing, YANG Wenzhi, LI Qiang. Walking wheel—a new kind of running machine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 1994, 46(3): 7–11. (in Chinese)
- 8 陈德兴, 陈秉聪, 张书军. 步行轮机构原理[J]. 农业工程学报, 1994, 10(2): 123–129.
CHEN Dexing, CHEN Bingcong, ZHANG Shujun. Principles of the walking wheel mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(2): 123–129. (in Chinese)
- 9 张晓鹏, 杨嘉陵, 于晖. 猫科动物脚掌肉垫缓冲力学特性分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2012, 29(6): 1098–1104.
ZHANG Xiaopeng, YANG Jialing, YU Hui. Mechanical buffering characteristics of feline paw pads[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2012, 29(6): 1098–1104. (in Chinese)
- 10 张建雯, 张子瑜, 杨嘉陵. 仿动物跳跃缓冲特性的未来直升机起落架探索[J]. 力学季刊, 2010, 31(3): 329–333.
ZHANG Jianwen, ZHANG Ziyu, YANG Jialing. On exploring future landing-gear system of helicopter based on bionic jumping and damping characteristics[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(3): 329–333. (in Chinese)
- 11 ZHU Z, WU C, ZHANG W. Frequency analysis and anti-shock mechanism of woodpecker's head structure[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 282–287.
- 12 SEOK S, WANG A, MENG Y C, et al. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013:3307–3312.
- 13 ANANTHANARAYANAN A, AZADI M, KIM S. Towards a bio-inspired leg design for high-speed running. [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(4): 046005.
- 14 ZHANG R, LIU H B, ZHANG S H, et al. Finite element analysis in the characteristics of ostrich foot toenail traveling on sand [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 461: 213–219.
- 15 SMITH N C, WILSON A M, JESPER K J, et al. Muscle architecture and functional anatomy of the pelvic limb of the ostrich (*Struthio camelus*) [J]. Journal of Anatomy, 2006, 209(6): 765–779.
- 16 RANKIN J W, JONAS R, HUTCHINSON J R. Inferring muscle functional roles of the ostrich pelvic limb during walking and running using computer optimization[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 118(13): 20160035.
- 17 SCHALLER N U, DAOUD 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 ZHANG R, JI Q, LUO G, et al. Phalangeal joints kinematics during ostrich (*Struthio camelus*) locomotion[J]. PeerJ, 2017, 5: e2857.
- 19 ANDRADA E, NYAKATURA J A, BERGMANN F, et al. Adjustments of global and local hindlimb properties during terrestrial locomotion of the common quail (*Coturnix coturnix*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(8): 3906–3916.
- 20 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, 58(8): 740–755.
- 21 BLICKHAN R. The spring-mass model for running and hopping[J]. Journal of Biomechanics, 1989, 22(11–12): 1217–1227.
- 22 MCMAHON T A, CHENG G C. The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? [J]. Journal of Biomechanics, 1990, 23(1): 65–78.
- 23 MAYKRANZ D, SEYFARTH A. Compliant ankle function results in landing-take off asymmetry in legged locomotion[J]. Journal of Theoretical Biology, 2014, 349: 44–49.
- 24 STEFANYSHYN D J, NIGG B M. Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting[J]. Journal of Biomechanics, 1997, 30(11–12): 1081–1085.
- 25 贾洪雷, 郭慧, 郭明卓, 等. 行间耕播机弹性可覆土镇压轮性能有限元仿真分析及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 9–16.
- 26 JIA Honglei, GUO Hui, GUO Mingzhuo, et al. Finite element analysis of performance on elastic press wheel of row sowing plow machine for covering with soil and its experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 9–16. (in Chinese)
- 27 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 58–62. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.012.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 58–62. (in Chinese)
- 28 曹付义, 刘洋, 周志立. 履带车辆软地面稳态转向驱动力计算模型[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2014, 35(2): 29–32.
CAO Fuyi, LIU Yang, ZHOU Zhili. Steady turning thrust calculation model of tracked vehicle on soft terrain[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2014, 35(2): 29–32. (in Chinese)
- 29 杜永浩, 高经纬, 姜乐华, 等. 基于离散元法的刚性履带低含水软地面附着特性数值分析[J]. 计算机力学学报, 2017, 34(3): 384–389.
DU Yonghao, GAO Jingwei, JIANG Lehua, et al. Numerical analysis on the adhesion property of rigid track on the soft ground with low moisture by discrete element method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(3): 384–389. (in Chinese)
- 29 YAN T, ZHAO L. Finite element model of shape memory alloy incorporating Drucker–Prager model[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(7): 3915–3924.
- 30 罗哲, 武晓桥, 宁素俭. 步行轮平顺性分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 1994, 24(1): 69–76.
LUO Zhe, WU Xiaqiao, NING Sujian. A study on ride performance of walking wheels[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 1994, 24(1): 69–76. (in Chinese)
- 31 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1557–1561.
LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1557–1561. (in Chinese)