

引用格式: 郭腾鹏, 侯亮, 陈鼎, 等. 基于有限元与逆向工程的轮-沙耦合沉降试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 345—351  
Guo Tengpeng, Hou Liang, Chen Ding, et al. Experimental study of wheel sand coupling settlement based on finite element method and reverse engineering[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 345—351

交通运输

# 基于有限元与逆向工程的轮-沙耦合沉降试验研究

郭腾鹏 侯亮\* 陈鼎 杨超平 吴雄峰

(厦门大学航空航天学院机电工程系 厦门 361005)

**摘要** 小型轮式车辆与松软沙地的相互作用会显著地影响车辆的稳定性与安全性,研究二者之间的承压关系对无人地面车辆的设计与应用具有重要意义。利用 ABAQUS 建立了小型轮式车辆与松软沙地的承压模型,通过自行开发的车轮-土壤相互作用测试系统进行试验,在综合考虑了轮胎和沙地的非线性变形后,建立了5种胎压下轮胎的整合径向静刚度,利用二元线性回归分析法拟合试验数据,确定胎压-负荷-下沉量三者之间的相互关系。针对轮胎在松软地面接地印迹难于提取问题,提出了利用逆向工程技术来完成接地印迹曲面重构设计,进一步验证了耦合模型的准确性,为无人地面车辆性能的改进及新型行走机构的设计制造提供了参考依据。

**关键词** 有限元 无人地面车辆 轮地相互作用 逆向工程

中图分类号 U463.34; 文献标志码 A

自20世纪50年代以来,车辆地面力学已广泛应用于大型车辆机动性能的研究<sup>[1]</sup>。然而,有学者指出,随着车辆尺寸的减小,这些理论模型的计算精度也随之降低<sup>[2-4]</sup>。对于大多数无人地面车辆(unmanned ground vehicles, UGVs)而言这是一个重大问题。一些小轮径 UGVs 经常在一些软质地面如海滩、沙漠和风化层等环境工作,在这种情况下,车辆与松软沙地的相互作用会显著地影响车辆的稳定性与安全性,研究二者之间的承压关系具有重要意义。

随着有限元法被引入轮胎研究,采用有限元法对轮胎进行力学分析是近年轮胎研究工作的热点<sup>[5-8]</sup>。现利用有限元法建立了小型轮式车辆与松软沙地的承压模型,通过自行开发的车轮-土壤相互作用测试系统进行试验,对轮胎在沙地的初始状态进行研究。在综合考虑了轮胎和沙地的非线性变形后,建立了5种胎压下轮胎的整合径向静刚度及其变化趋势,结果表明模型预测与实际试验相近,可用

于轮胎与土壤接触变形的预测,利用二元线性回归分析法建立胎压、负荷和下沉量之间的数学模型。针对轮胎在松软地面接地印迹难于提取问题,提出了利用逆向工程中广泛采用的光学扫描测量系统来获取接地印迹点云数据,运用 Imageware 软件完成接地印迹曲面重构设计,进一步验证耦合模型的准确性,为无人地面车辆性能的改进及新型行走机构的设计制造提供了参考依据。

## 1 材料及系统耦合模型

### 1.1 橡胶本构模型与 Mohr-Coulomb 定则

由于系统耦合模型相作用的两种材料分别为超弹性和弹塑性的橡胶与沙土材料,两者都已有成熟的本构模型。

橡胶属于超弹性材料,表现出近似体积不可压缩性和高度非线性,通常用应变势能  $W$  来表示其应力-应变关系。Mooney-Rivlin 模型因能较好地模拟橡胶材料大变形时的应力-应变关系而得到广泛使用。其本构方程为<sup>[9]</sup>

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式(1)中  $I_1$ 、 $I_2$  为 Cauchy-Green 变形张量的第1、2不变量;  $C_{10}$ 、 $C_{01}$  为材料常数。

一般而言,将沙归类为由细小的岩石颗粒和少于5%的细粒土组成的一种无机土壤,粒径在0.1~

2017年5月19日收到 2016年厦门市“十三五”国家海洋沙滩废弃物综合处置成套装备研发与示范应用项目(16CZB033SF14)资助  
第一作者简介: 郭腾鹏(1991—),硕士研究生。研究方向: 海洋沙滩废弃物综合处置成套装备研发。E-mail: 15396268771@163.com。

\* 通信作者简介: 侯亮(1974—),教授,博士研究生导师。研究方向: 复杂机电装备产品的大批量定制与创新设计、振动与噪声控制、预测与健康管理。E-mail: hliang@xmu.edu.cn。

2 mm 之间,具有不可塑性以及非常低的可压缩性<sup>[10]</sup>。适用于该种土壤建模的本构模型主要是 Mohr-Coulomb 模型。Mohr-Coulomb 模型屈服面函数为:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (2)$$

$$R_{mc}(\Theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right)}{\sqrt{3}\cos\varphi} + \frac{\cos\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right)}{3} \tan \varphi \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为沙土的内摩擦角;  $c$  为沙土的黏聚力;  $q$  为等效 Mises 偏应力;  $p$  为等效压应力;  $\Theta$  为极偏角。

由于 Mohr-Coulomb 屈服面存在尖角,如采用相关联的流动法则,将会在尖角处出现塑性流动方向不唯一的现象,导致数值计算的烦琐。为避免这一问题,采用了连续光滑的椭圆函数作为塑性势面,即:

$$G = \sqrt{(\varepsilon c_0 \tan \gamma)^2 + (R_{mw}q)^2} - p \tan \gamma \quad (4)$$

$$R_{mw}(\Theta, e) =$$

$$\frac{[4(1-e^2)\cos^2\Theta + (2e-1)^2]R_{mc}\left(\frac{\pi}{3}, \varphi\right)}{2(1-e^2)\cos\Theta + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)\cos^2\Theta + 5e^2 - 4e}} \quad (5)$$

式中  $\gamma$  是剪胀角;  $c_0$  是初始黏聚力;  $\varepsilon$  为子午面上的偏心率;  $e$  是  $\pi$  平面上的偏心率。

## 1.2 系统耦合模型

相比于大轮径车辆,小轮径车辆与地面的接触面积更大,所以在处理边缘网格及排除可能的试验条件的影响时,应相应的考虑两者的网格比率及土壤围压造成的影响。在以往的研究中,模型网格密度与计算时间和精度成正比<sup>[11,12]</sup>,合理选择系统耦合模型的网格比率对提高模型的收敛性及计算精度具有重要意义。此外,现有车辆地面力学研究都是使用室内重塑土试验参数建立土壤本构模型,而自然界的天然原状土具有结构性,其力学特性与重塑土有很大区别<sup>[13]</sup>,为了排除沙土围压的影响,扩大了以往地面模型,施加对称边界条件,建立的沙地模型长、宽、高分别为 800 mm × 700 mm × 160 mm。

轮胎有限元模型的建立在许多文献中已有详细的阐述<sup>[14-16]</sup>,13 × 5-6 小轮径轮胎的建模方法也基本与之相同。除此之外,为了排除橡胶沙漏与地面塑性单元的畸变,在轮径与轮轴方向对地面网格进行了细化,轮胎与地面接触区域网格比值为 0.47,采用直接约束法处理接触问题。轮胎与沙地有限元模型单元总数分别为 49 880 和 39 744,节点数为 57 661 和 43 757。建立的系统耦合模型如图 1 所示。

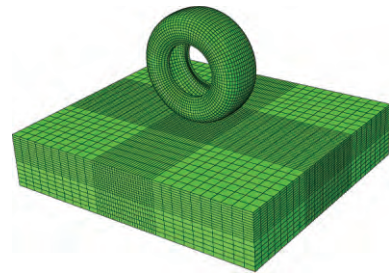


图 1 系统耦合模型

Fig. 1 System coupling model

## 2 试验与仿真分析

### 2.1 Mohr-Coulomb 参数试验

(1) 试样: 试验测试对象为取自福建厦门白城沙滩的沙滩沙。

(2) 试验装置: JZ 型应变控制式直剪仪。

(3) 试验目的: 获取 Mohr-Coulomb 模型参数。

(4) 试验步骤: 试验中分别施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 的垂直压力,重复试验 3 次,记录每次数据,绘制干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup> 下沙的抗剪强度与垂直压力的关系曲线以及法向位移与切向位移的关系曲线(图 2 和图 3),计算试验沙的内摩擦角、剪胀角和黏聚力。取三次试验的平均值,得内摩擦角  $\varphi = 30.26^\circ$ ,剪胀角  $\gamma = 18.6^\circ$ ,黏聚力  $c = 1$  kPa。其中  $\gamma \approx 0.5\varphi$ ,这与文献[17]提到的岩土材料在非关联流动法则条件下的剪胀角应取  $\varphi/2$  相符。

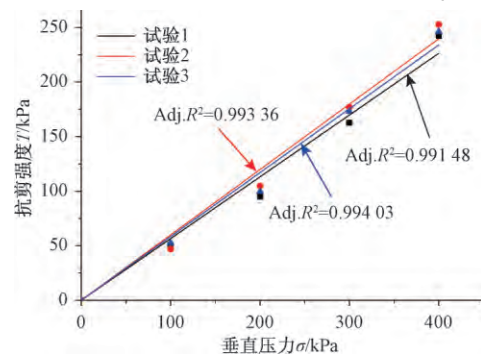


图 2 抗剪强度与垂直压力的关系曲线

Fig. 2 Relationship between shear strength and vertical pressure

### 2.2 轮-沙耦合沉降试验

(1) 试样: 试验测试对象为某厂生产的 13 × 5-6 轮胎。

(2) 试验装置: 试验在自行开发的车轮-土壤相互作用测试系统进行,试验台长宽高分别为 800 mm × 700 mm × 1 000 mm,沙高 160 mm,如图 4 所示。

(3) 试验目的: 获取不同胎压下轮胎的垂直载荷与下沉量。

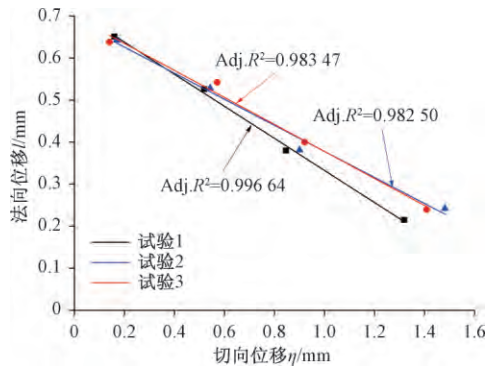


图3 法向位移与切向位移关系曲线

Fig. 3 Relationship between normal displacement and tangential displacement

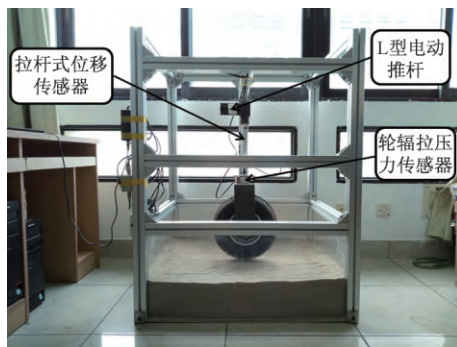


图4 轮胎压降实验台

Fig. 4 Tire pressure drop test bench

(4) 试验步骤: 试验在室内进行,环境温度  $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。试验过程共取 0.2 bar (1 bar =  $10^5$  Pa)、0.4 bar、0.6 bar、0.8 bar 和 1 bar 共 5 组不同胎压。试验开始时先将轮胎下降至与沙地距离 1~2 mm 处,采用连续加载、卸载方式,由电力推杆在轮胎中心施加垂向载荷至轮胎下沉 30 mm,试验过程中利用压力传感器与位移传感器记录轮胎下沉过程中的压力、位移数据。

### 2.3 模型试验验证

把试验得到的沙的内摩擦角、剪胀角和黏聚力代入沙地本构模型中,由于沙的黏聚力很小,假定试验过程中黏聚力保持不变,即为理想线弹性模型。将仿真与轮-沙耦合沉降试验得到的轮胎径向载荷与径向位移关系曲线进行对比,并用最小二乘法对曲线进行线性拟合,如图 5~图 9 所示。曲线修正多元相关系数  $\text{Adj. } R^2$  均接近 1,拟合度高。可以看出,在胎压 0.2 bar 下,由于胎压过小,轮胎下降过程中以轮胎的非线性变形为主,试验与仿真曲线都出现了下凹,而由于忽略了轮胎花纹的影响,仿真结果中,轮胎的变形相对试验来说较小,曲线下凹程度也比实际试验小得多。随着胎压的增大,轮胎在松软沙地上的整合径向静刚

度基本表现为线性,仿真结果与试验结果基本吻合。轮胎整合径向静刚度的增长趋势如图 10 所示。随着胎压的增加,径向刚度增大,胎压过高后,变化趋于平缓。试验结果与仿真结果的的最大误差为 8.37%,吻合度较高。存在误差的原因主要有: Mohr-Coulomb 参数不够准确;系统耦合模型建立过程中进行了一些简化;另外试验数据测量过程中具有不可避免的随机误差。

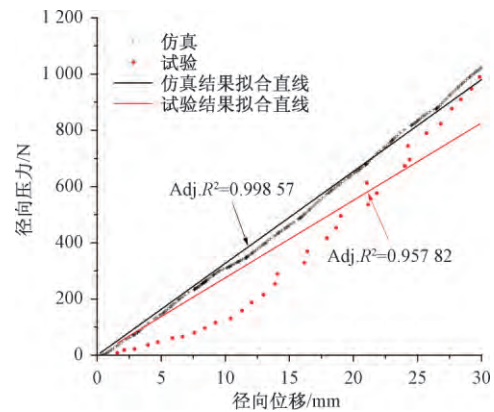


图5 0.2 bar 胎压下径向位移-径向压力关系曲线

Fig. 5 Relationship between radial displacement and radial pressure in 0.2 bar tire pressure

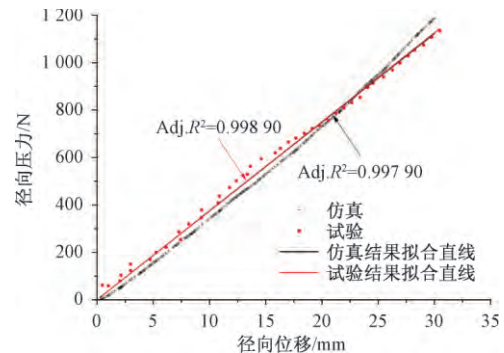


图6 0.4 bar 胎压下径向位移-径向压力关系曲线

Fig. 6 Relationship between radial displacement and radial pressure in 0.4 bar tire pressure

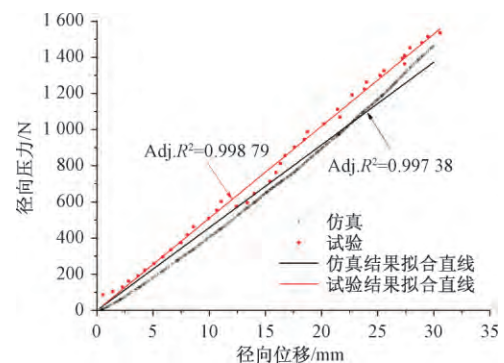


图7 0.6 bar 胎压下径向位移-径向压力关系曲线

Fig. 7 Relationship between radial displacement and radial pressure in 0.6 bar tire pressure



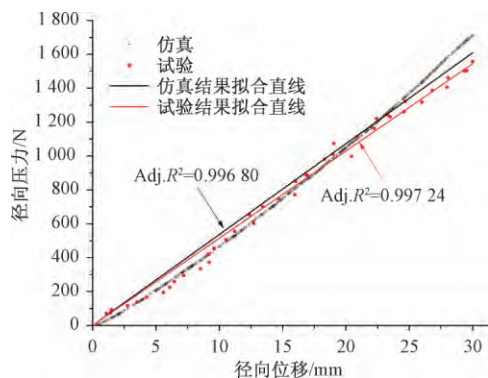


图 8 0.8 bar 胎压下径向位移-径向压力关系曲线

Fig. 8 Relationship between radial displacement and radial pressure in 0.8 bar tire pressure

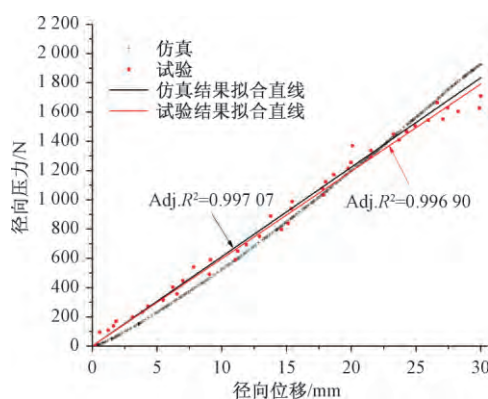


图 9 1.0 bar 胎压下径向位移-径向压力关系曲线

Fig. 9 Relationship between radial displacement and radial pressure in 1.0 bar tire pressure

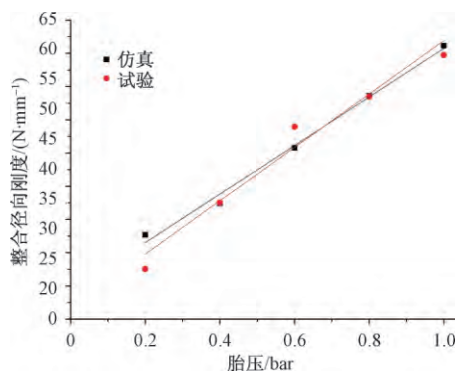


图 10 轮胎整合径向静刚度的增长趋势

Fig. 10 The growth trend of radial static stiffness of tire integration

## 2.4 接地印迹的提取与分析

轮胎的接地印迹反映轮胎与路面间的接触状态, 接地区域承担了车辆在驱动、制动、转弯等不同工况下轮胎与路面间的载荷传递<sup>[18]</sup>。以往的研究中采用的喷涂法测量轮胎-土壤接触面积<sup>[19]</sup>, 不仅需要布置多个传感器, 测量的精度也有待进一步提高。针对轮胎在松软地面的接地印迹难以提取问题, 提出了利用逆向工程中广泛采用的光学扫描测量系统来获取接

地印迹点云数据, 运用逆向设计 Imageware 软件来完成在 1 bar 胎压下轮胎接地印迹的曲面重构设计, 进一步验证系统耦合模型的准确性。

### 2.4.1 点云数据的预处理

由于三维激光扫描技术所采集的点云数据量庞大, 同时采集过程中不可避免地存在各种误差使得点云数据中产生噪声点以及存在不必要采集的区域, 因此需要对点云数据进行预处理以期最大程度还原接地印迹的真实性<sup>[20]</sup>。点云数据预处理主要包括点云裁剪、点云去噪和点云精简。

首先对原始点云数据(图 11)进行修剪, 去除不必要采集区域, 保留接地印迹的主体部分, 针对采集过程中产生的噪声点, 通过高斯滤波进行去噪。此外, 所采集的点云数据很大, 并不是每个点都参与反求设计, 而且大数据量影响反求模型的光顺型, 所以需要数据点进行精简<sup>[21]</sup>, 如图 12 所示。

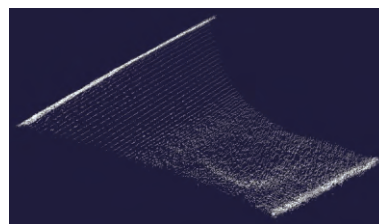


图 11 原始点云数据

Fig. 11 Original point cloud data

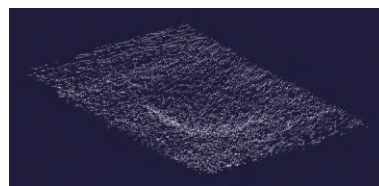


图 12 接地印记主体部分

Fig. 12 The main parts of the grounding mark

### 2.4.2 曲面重构

曲面重构是反求设计的关键环节, 在满足精度要求的同时, 要保证曲面的质量。采用 Imageware 自由曲面进行拟合。拟合曲面与点云数据的正法向偏差最大值 0.011 5 mm, 平均 0.001 9 mm, 标准偏差 0.001 5 mm; 负法向偏差最大值 -0.013 1 mm, 平均 -0.002 1 mm, 标准偏差 0.001 7 mm。拟合的曲面如图 13 所示。

将点云拟合曲面导出为 igs 格式利用 ABAQUS 进行轮胎接地印迹的网格划分(图 14), 通过与 ABAQUS 仿真结果(图 15 图中  $U_3$  为  $Z$  方向位移, 单位 mm)对比, 绘制接地印迹长轴与短轴方向的垂直形貌, 拟合结果与仿真结果如图 16 和图 17 所示, 计算误差如表 1 所示。从图 16 和图 17 可以看出, 系统耦合模型能够很好地预测轮胎下沉量, 与点云

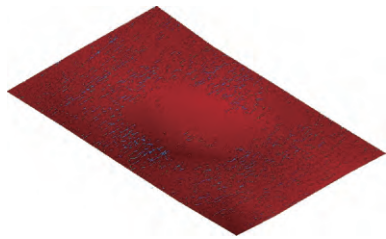


图 13 点云拟合曲面

Fig. 13 Surface of point cloud fitting

拟合得到的印记形貌的下沉量的绝对误差为 1.005 mm, 相对误差为 5.47%。在接地印记长短轴方面, 误差较大, 产生误差的主要原因有: 试验过程中, 由于压力推杆的返程, 轮胎抬起过程中伴随着沙子的滑落, 在一定程度上改变了原始印记的形貌。经过与有限元仿真结果的对比, 表明这一研究思路是可行的, 拟合的精度随着试验台的改进而更加可靠。

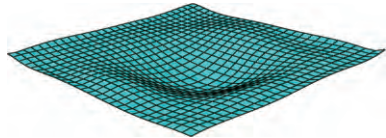


图 14 点云曲面网格划分

Fig. 14 Grid division of point cloud surfaces

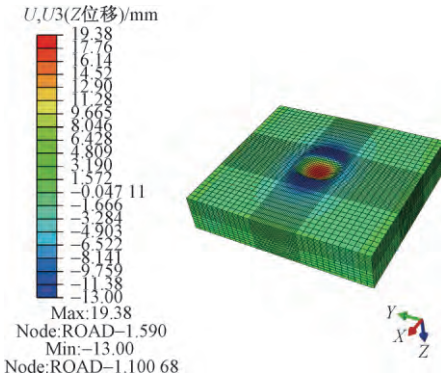


图 15 1 bar 胎压下 ABAQUS 仿真的轮胎接地印记

Fig. 5 The tire contact patch of the ABAQUS simulation in 1 bar tire pressure

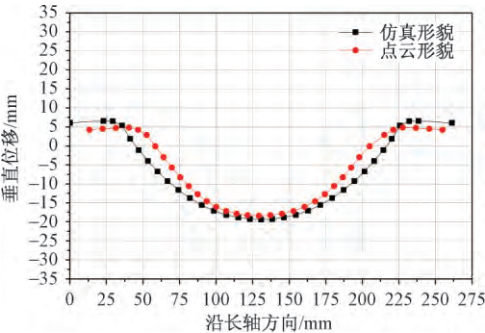


图 16 接地印记长轴垂直形貌

Fig. 16 Vertical morphology of the major axis of the tire contact patch

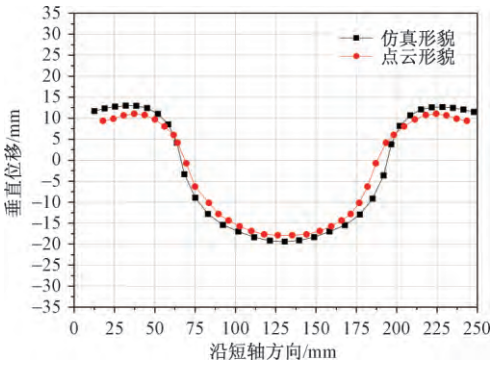


图 17 接地印记短轴垂直形貌

Fig. 17 Vertical morphology of the short axis of the tire contact patch

表 1 计算误差

Table 1 Calculation error

参数	数值		
	下沉量	长轴	短轴
绝对误差/mm	1.005	22.26	9.47
相对误差/%	5.47	14.8	7.8

### 3 轮胎下沉量预测模型的建立

证明没有函数关系的变量之间是否有相关关系, 以及如何定量地描述这种相关关系, 必须采用回归分析方法。在以往的文献中, 已经有学者建立了载重子午胎和斜交胎在硬路面下气压-负荷-下沉量的经验公式<sup>[22]</sup>。现设定胎压和负荷为自变量  $X_1$  和  $X_2$ , 下沉量为因变量  $Y$ , 用二元线性回归分析法拟合表 2 的试验数据, 确定胎压-负荷-下沉量三者之间的相关关系。

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1 X_2 \quad (6)$$

式(6)中  $b_0$  为常数项, 反映了所设定的自变量之外的其他不确定因素的影响;  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  为回归系数, 与轮胎特性相关。回归分析的结果如表 3 所示。

表 2 胎压-负荷-下沉量

Table 2 Pressure-Load-Sinkage

胎压/bar	负荷/N	下沉量/mm
0.2	989.137	3.621
0.4	1 134.382	5.607
0.6	1 525.650	10.207
0.8	1 587.742	14.040
1.0	1 709.062	18.377

表 3 回归分析结果

Table 3 Regression analysis results

回归参数	计算结果	回归参数	计算结果
$b_0$	3.287 8	Adj. $R^2$	0.999 6
$b_1$	-5.995 7	$F$	787.313
$b_2$	-0.001 2	$P$ -Value	0.026 2
$b_3$	0.013 6		

表3中  $F$  是一个与自由度有关的数理统计值, 叫  $F$  值, 在回归分析中用于检验回归方程的显著性。  $P$ -Value ( $P$  值) 即概率, 反映某一事件发生的可能性大小。 统计学根据显著性检验方法所得到的  $P$  值, 一般以  $P < 0.05$  为显著。  $F$  显著性统计量的  $P$  值为 0.026 2, 小于显著性水平 0.05, 修正拟合优度  $\text{Adj. } R^2$  为 0.999 6, 所以说该回归方程回归效果显著, 也就是说  $X_1$  (胎压) 和  $X_2$  (负荷) 这两个因素对下沉量  $Y$  的影响是不可忽略的。 在证明回归方程的显著性之后, 便可应用方程对小轮径载重轮胎在松软沙地的下沉量进行预测, 以及合理选择轮胎负荷提供参考依据。

## 4 结 论

(1) 小型无人地面车辆与松软沙地的相互作用会显著地影响车辆的稳定性与安全性。 本文采用有限元模拟与试验相结合的方法, 建立了 5 种胎压下轮胎的整合径向静刚度, 获得了具有工程应用价值的仿真预测结果。

(2) 通过试验分析得到的数据, 建立了轮胎静态下沉量预测模型, 为合理选择轮胎负荷提供了参考依据。

(3) 针对轮胎在松软沙地上接地印迹难于提取问题, 提出了利用逆向工程技术完成轮胎接地印迹的曲面重构设计。 经过与有限元仿真结果的对比, 表面这一研究思路是可行的, 拟合的精度随着试验台的改进而更加可靠。

## 参 考 文 献

- 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. *Journal of Terramechanics*, 2014; 51(1): 19—29
- Meirion-Griffith G, Spenko M. A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains. *Journal of Terramechanics*, 2011; 48(2): 149—155
- Scott G, Meiriongriffith G, Saaj C, *et al.* A comparative study of the deformation of planetary soils under tracked and legged rovers. *AIAA SPACE Conference & Exposition*, 2013; 159(3): 428—431
- Richter L, Bernasconi M C, Coste P. Analysis, design and test of wheels for a 4 kg-class mobile device for the surface of mars Int conf of the international society for terrain-vehicle sytems. *Vicksburg: DLR*, 2002: 20—24
- 王登祥. 轮胎有限元研究( FEA ) 进展及应用成果. *轮胎工业*, 1998; (7): 11—19  
Wang Dengxiang. Progress and application of tire finite element study ( FEA ). *Tire Industry*, 1998; (7): 11—19
- 缪红燕, 徐 鸿. 子午线轮胎的有限元分析. *轮胎工业*, 2001; 21(2): 16—20  
Miu Hongyan, Xu Hong. Finite element analysis of radial tire. *Tire Industry*, 2001; 21(2): 16—20
- 王 伟, 邓 涛. 轮胎与轮辋接触的有限元分析. *特种橡胶制品* 2003; 23(4): 18—21  
Wang Wei, Deng Tao. Finite element analysis of tire and rim contact. *Special Rubber Products*, 2003; 23(4): 18—21
- 王吉忠. 建立轮胎有限元结构分析模型应注意的问题. *轮胎工业*, 2002; 22(4): 202—204  
Wang Jizhong. Problems in establishing tire finite element structural analysis model. *Tire Industry*, 2002; 22(4): 202—204
- 石 琴, 陈无畏, 洪 洋, 等. 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究. *系统仿真学报* 2006; (6): 1445—1449  
Shi Qin, Chen Wuwei, Hong Yang, *et al.* The simulation of tire's stiffness characteristics using finite element model. *Journal of System Simulation* 2006; (6): 1445—1449
- Sandu C, Worley M E, Morgan J P. Experimental study on the contact patch pressure and sinkage of a lightweight vehicle on sand. *Journal of Terramechanics*, 2010; 47(5): 343—359
- 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎-地面静态接触的有限元分析. *轮胎工业*, 2000; (9): 527—533  
Yan Xiangqiao, Wu Dakun, Wang Youshan, *et al.* Finite element analysis of tire-ground static contact. *Tire Industry*, 2000; (9): 527—533
- 程冬冬. 子午线轮胎三维精细网格有限元分析. 上海: 东华大学, 2014  
Cheng Dongdong. Three-dimensional fine mesh finite element analysis of radial tire. Shanghai: Donghua University, 2014
- 吕唯唯, 顾 亮, 杨聪彬, 等. 基于车辆地面力学沙漠沙结构性本构模型的建立. *北京理工大学学报* 2013; (4): 349—352  
Lü Weiwei, Gu Liang, Yang Congbin, *et al.* Soil structural model for describing constitutive relationship of desert sand under moving vehicle. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2013; (4): 349—352
- 臧孟炎, 许玉文, 周 涛. 三维非线性轮胎的五刚特性仿真. *华南理工大学学报( 自然科学版)* 2011; (1): 129—133  
Zang Mengyan, Xu Yuwen, Zhou Tao. Characteristics simulation of five kinds of stiffness of tire based on three-dimension nonlinear model. *Journal of South China University of Technology ( Natural Science Edition)*, 2011; (1): 129—133
- 程 钢, 赵国群, 管延锦. 子午线轮胎静态接触有限元分析及试验研究. *汽车工程* 2004; (5): 588—592  
Cheng Gang, Zhao Guoqun, Guan Yanjin. Finite element analysis and experimental study on static contact of radial-ply tires. *Automotive Engineering*, 2004; (5): 588—592
- 丁剑平, 贾德民, 黄小清. 三维非线性有限元法在子午胎分析中的应用. *华南理工大学学报( 自然科学版)* 2005; (9): 55—58  
Ding Jianping, Jia Demin, Huang Xiaoping. Application of three-dimensional nonlinear finite element method to the analysis of radial tires. *Journal of South China University of Technology ( Natural Science Edition)*, 2005; (9): 55—58
- 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨. *岩土力学* 2009; (11): 3278—3282  
Kong Weixue, Rui Yongqin, Dong Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule. *Rock and Soil Mechanics*, 2009; (11): 3278—3282

- 18 题 昕. 转矩波动作用下轮胎的动态接地特性分析. 上海: 同济大学, 2014  
Ti Xin. Research on the impact of torque ripple on tire's dynamic contact characteristics. Shanghai: Tongji University, 2014
- 19 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 基于 FRIDA 模型的轮胎-土壤接触特性研究. 农业机械学报, 2016; (9): 121—127  
Wang Xianliang, Wang Qingjie, Li Hongwen, *et al.* Research on contact properties of soil-tyre based on FRIDA model. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2016; (9): 121—127
- 20 樊 宇, 王宇楠. 三维激光扫描点云数据预处理技术研究. 科技创新导报 2011; 32: 27—28  
Fan Yu, Wang Yunan. Research on preprocessing technology of three-dimension laser scanning point cloud data. Science and Technology Innovation Herald 2011; 32: 27—28
- 21 王 强, 成 虹, 王 静. 基于 Imageware 的汽车后大梁反求设计. 机械设计与制造 2012; (11): 241—243  
Wang Qiang, Cheng Hong, Wang Jing. Reverse design of rear frame of vehicle beam based on Imageware. Mechanical Design and Manufacturing, 2012; (11): 241—243
- 22 姚钟尧, 丁剑平. 轮胎气压-负荷-下沉量之间的关系. 特种橡胶制品, 1999; (5): 52—55  
Yao Zhongyao, Ding Jianping. Relationship of tire pressure-load-sinkage. Special Rubber Products, 1999; (5): 52—55

## Experimental Study of Wheel Sand Coupling Settlement Based on Finite Element Method and Reverse Engineering

GUO Teng-peng, HOU Liang\*, CHEN Ding, YANG Chao-ping, WU Xiong-feng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**[Abstract]** The interaction of small wheeled vehicles and soft sandy land will significantly affect the stability and security of the vehicle, and the research of the pressure-sinkage relationship is of great significance to the design and application of UGVs (unmanned ground vehicles). The finite element method is used to establish the pressure-sinkage model of the small wheeled vehicle and the soft sand, experiments are done by using the wheel-sand interaction testing system developed for UGVs. In considering the nonlinear deformation of the tire and sand, establishes the integrated radial static stiffness of the tire under 5 kinds of tire pressure, uses binary linear regression analysis to fit test data, the relationship of pressure-load-settlement was determined. Aiming at the problem that the tire in the soft ground contact patch is difficult to be extracted, a reverse engineering technique is proposed to reconstruct the surface of the ground surface, which further verifies the accuracy of the coupled model. It provides a significant reference for improving performance of the UGVs and designing and manufacturing of new travelling mechanism.

**[Key words]** finite element    unmanned ground vehicles    wheel-terrain interaction    reverse engineering