

文章编号 1004-924X(2023)05-0746-11

## 车轮-地面耦合动力学行为的 CDEM-DEM 分析

路 扬<sup>1</sup>, 冯 春<sup>2,3\*</sup>, 程鹏达<sup>2</sup>, 张一鸣<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:**越野车辆在软土路面上行驶时,其车轮-地面相互作用的动态力学行为极其复杂,车轮的下陷程度和通行能力均为车辆地面力学研究的重点。为探究车轮在软土路面通行时的动力学性能,本文提出了一种连续-非连续单元法(Continuous-discontinuous Element Method, CDEM)与颗粒离散元法(Discrete Element Method, DEM)相结合的耦合计算方法。该方法中,车轮采用 CDEM 单元进行描述,软土路面采用 DEM 颗粒进行描述,CDEM 单元与 DEM 颗粒之间采用罚弹簧进行耦合,通过在车轮上施加动态扭矩,实现了车轮在软土路面上摩擦、滚动及前行过程的精确模拟。借助 CDEM 与 DEM 的耦合,探讨了车轮花纹、路障对车辆行驶过程中动力学行为的影响规律。研究表明:花纹车轮及光面车轮均在软土路面留下清晰可见的车辙;花纹轮胎较光面轮胎表现出更强的通行能力;花纹车轮转动速度较小,但其车轮平动速度远高于光面车轮,花纹车轮平动与其线速度之比约为 12.78%,而光面车轮比值仅为 2.80%;车轮在软土路面行驶过程中,相同质量下的光面车轮下陷深度远高于花纹车轮;车辆在含路障路面通行时,地面起伏度与车辆行驶能耗之间密切相关,起伏度越大,所需能量越大。

**关键词:**车轮下陷;软土路面;CDEM;DEM;数值模拟

**中图分类号:**U461.5 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233105.0746

## CDEM-DEM analysis of the coupled wheel-ground dynamics behavior

LU Yang<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>2,3\*</sup>, CHENG Pengda<sup>2</sup>, ZHANG Yiming<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: fengchun@imech.ac.cn

**Abstract:** The dynamic mechanical wheel-ground interaction is extremely complex when off-road vehicles are driven on soft soil pavements, and the extent of wheel sagging and traversability are of significant interest in the field of vehicle ground mechanics. This study proposes a calculation approach that uses the continuum-discontinuum element method (CDEM) and discrete element method (DEM) in combination to analyze the dynamic performance of wheels on soft-soil pavements. In the proposed method, the wheel is

收稿日期:2022-09-22;修订日期:2022-10-09.

基金项目:钱学森实验室太空探索实验培育项目(No. TKTSPY-2020-05-01);国家自然科学基金项目(No. 52178324)

modeled using CDEM elements, the soft-soil pavement is modeled using DEM particles, and a penalty spring is used to connect both models. The application of dynamic torque to the wheel allows for the accurate simulation of the friction, rolling, and forward motion of the wheel on the soft-soil pavement. By combining CDEM and DEM, the study explores the effect of wheel patterns and roadblocks on the dynamic behavior of the vehicle during driving. The results show that both patterned and glossy wheels leave visible ruts on the soft-soil road surface, with patterned tires having better traversability than glossy ones. The rotation speed of patterned wheels is slower, but their translation speed is much faster than that of glossy wheels, with a translation-to-linear speed ratio of 12.78% for patterned wheels and 2.80% for glossy wheels. During driving on soft-soil roads, glossy wheels sink deeper into the ground compared to patterned wheels with the same weight. Furthermore, when driving over roadblocks, the degree of ground undulation has a direct impact on vehicle energy consumption, with greater undulation requiring more energy.

**Key words:** wheel sagging; soft soil pavement; CDEM; DEM; numerical simulation

## 1 引言

越野车具有车身为非承载式、车身底盘高、轮胎抓地性好等优点,能够适用于各种恶劣的道路环境。车辆在软土路面行驶的过程中,其车轮下陷深度、车辆通行速度、轮胎胎面花纹、地面特征及其相互作用,都会对汽车正常行驶产生一定影响。近年来随着社会的发展,车轮-地面作用的研究也尤为重要。

针对此类问题,国内外学者进行了大量研究工作。臧孟炎等人<sup>[1-3]</sup>基于有限元(Finite Element Method, FEM)和离散元(Discrete Element Method, DEM)进行了大量仿真分析,通过探究其制动性能和动态特性等,证明了采用数值模拟方法对车轮-地面动态力学行为进行分析的有效性,并对于越野轮胎进行沟槽设计的必要性提出了合理解释;Zeng等人<sup>[4]</sup>基于DEM-FEM耦合模型通过三轴试验调整模型参数,证明了该模型对于轮胎-地形相互作用仿真模拟的可行性;Farhadi等人<sup>[5]</sup>通过建立轮胎-土壤相互作用的有限元模型并研究了垂直载荷、轮胎充气压力、土壤含水量对轮胎功率损失的影响,由此证实了该功率损失估算模型的可行性;邓露等人<sup>[6]</sup>基于车辆轮胎相关特征并结合理论推导,提出了一种车轮轮胎的精细化模型,使得其计算结果与实验数据更加接近准确。

车轮-地面力学动态行为的研究在运输业、农业、航天等方面均有重要意义,近年来人们对于该方面的研究越发深入。谢斌等人<sup>[7]</sup>对国内外研究工作进行了综述,重点讨论了轮胎部分的建模方法并结合当今最新研究成果对未来提出了展望;吕凤天等人<sup>[8]</sup>通过对车轮-地面进行图像提取,基于视觉即可对月球车车轮滑转率进行估计;姜春霞等人<sup>[9]</sup>基于单轮土槽实验,对人字形花纹轮胎-地面中的垂直应力分布规律进行了探究;张锐等人<sup>[10]</sup>基于现场试验和数值模拟相结合,对车轮曲率半径在车轮-沙地作用中沉陷性能的影响进行了分析,为沙地车轮设计提供了理论依据。Guo等人<sup>[11]</sup>基于多球DE-FE方法对于某越野气动轮胎在不规则碎石地形上的牵引性能进行了数值模拟,证明了该方法能够较好地再现轮胎行驶行为。

综合以上结果可以看出,数值模拟方法对车轮通行的仿真模拟计算的可行性具有较为完备的理论依据。但由于车轮与软土路面之间具有较为复杂的动态力学性质,采用单一的有限元方法或离散元方法均无法进行准确刻画。为此,本文结合前人研究成果,提出了一种CDEM-DEM耦合方法,实现了车轮与软土路面的动态耦合,并重点探讨了车轮花纹情况、路障对车轮行进效率、行进能耗的影响。

## 2 计算方法介绍

### 2.1 CDEM 方法

连续-非连续单元法<sup>[12]</sup>(Continuum Discontinuum Element Method, CDEM)是一种有限元与离散元相结合的显式动力学数值分析方法,其理论基础为拉格朗日方程,见式(1):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial v_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i, \quad (1)$$

其中: $u_i, v_i$ 为广义坐标; $L$ 为拉格朗日系统的能量; $Q_i$ 为非保守力做的功。

连续-非连续单元法中的核心控制方程见式(2):

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + K_c u_c + C_c \dot{u}_c = F, \quad (2)$$

其中: $M, C, K, K_c, C_c$ 和 $F$ 分别为单元质量矩阵,单元阻尼矩阵,单元刚度矩阵,接触面刚度矩阵,接触面阻尼矩阵和节点外部荷载列阵; $\ddot{u}, \dot{u}, u, u_c, \dot{u}_c$ 分别为单元内所有节点的加速度列阵,速度列阵,位移列阵以及虚拟裂缝上的相对位移列阵,相对速度列阵。

### 2.2 DEM 方法

DEM<sup>[13]</sup>是一种显式数值计算方法,通常用于计算颗粒流在相关条件下的力学性能。DEM的基本原理有两个方面:接触模型和运动方程。两种基本原理分别用来求解离散单元的接触力和运动状态物理量(速度、加速度、位移转角等)。

接触模型,即力-位移关系。该关系通过离散单元间的连接模型来表征材料本构关系,其理论公式如式(3)、(4):

$$f_{ij}^{cn} = -k_n \Delta u_{ij}^n + \eta_n v_{ij}^n, \quad (3)$$

$$f_{ij}^{cs} = -k_s \Delta u_{ij}^s + \eta_s v_{ij}^s, \quad (4)$$

其中: $f_{ij}^{cn}, f_{ij}^{cs}$ 分别表示所受的法向和切向接触力; $k_n, k_s$ 分别表示法向,切向约束的刚度系数; $\eta_n, \eta_s$ 分别表示法向,切向约束的阻尼系数; $u_{ij}^n, u_{ij}^s$ 分别表示法向,切向约束下的变形量; $v_{ij}^n, v_{ij}^s$ 分别表示法向,切向约束下的变形速率。

运动方程基于牛顿第二定律,其核心控制方程如式(5)、(6):

$$F = m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (f_{ij}^{cn} + f_{ij}^{cs}) + m_i g, \quad (5)$$

$$M = I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (r_{ij} f_{ij}^{cs}), \quad (6)$$

其中: $m_i$ 为刚体质量; $r_{ij}$ 为 $j$ 作用于 $i$ 上的作用点到 $i$ 形心的距离; $v_i, \omega_i$ 分别为 $i$ 的速度矢量和角速度矢量; $I_i$ 为 $i$ 的惯性矩; $g$ 代表重力加速度; $t$ 代表时间。

### 2.3 CDEM-DEM 耦合方法

CDEM与DEM分别可对块体有限元和颗粒离散元的力学行为进行计算,将两种方法有机耦合,即可对车轮-地面力学动态行为进行准确刻画。如图1为CDEM-DEM耦合方法示意图。

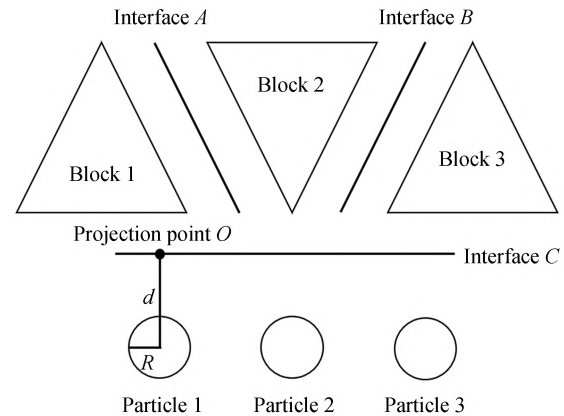


图1 CDEM-DEM耦合方法

Fig. 1 CDEM-DEM coupling method

其中,上半部分CDEM模型包括块体和界面两部分,块体由有限元单元体所组成;界面为块体间的公共边界,分别表征材料的弹性、塑性、损伤等连续特征和断裂、滑移、碰撞等非连续特征。数值模拟时,车轮采用CDEM块体进行描述,软土路面采用DEM颗粒进行描述。块体与颗粒、颗粒与刚性面之间接触耦合刚度采用全局的值,法向、切向刚度均为 $1 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。节点力和节点运动的核心控制方程见式(7)、(8)。基于以下方程即可实现显式求解过程。

$$F = F^E + F^e + F^c + F^d, \quad (7)$$

$$\begin{cases} a = \frac{F}{m}, v = \sum_{t=0}^{T_{\text{now}}} a \Delta t \\ \Delta u = v \Delta t, u = \sum_{t=0}^{T_{\text{now}}} \Delta u \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $F$ 为节点合力, $F^E$ 为节点外力, $F^e$ 为有限元单元变形贡献的节点力, $F^c$ 为接触界面贡献的节点力, $F^d$ 为节点阻尼力, $a$ 为节点加速度, $v$ 为节点速度, $\Delta u$ 为节点位移增量, $u$ 为节点位移全量, $m$ 为节点质量, $\Delta t$ 为计算时步。

CDEM-DEM 耦合方法主要包含接触检测与接触力计算两部分,其中接触力计算与颗粒离散元间接触力<sup>[14]</sup>一致,均为基于增量法的显式求解方式,其计算式见式(9)、(10):

$$F_n(t + \Delta t) = F_n(t) - K_n \Delta du_n, \quad (9)$$

$$F_s(t + \Delta t) = F_s(t) - K_s \Delta du_s, \quad (10)$$

其中: $F_n, F_s$ 分别为颗粒间的法向和切向接触力; $\Delta t$ 为计算时步; $\Delta du_n, \Delta du_s$ 分别为两个接触颗粒间的法向和切向位移增量差。

接触检测首先基于子空间法,通过颗粒、块体等之间的映射关系缩小检测范围,之后,进行精确检测。在本文的车轮-地面问题中,该接触检测即是有限元与边界面之间的接触,一般采用点-面接触模型<sup>[15]</sup>实现。其需要满足如下两个基本条件:

$$d \leq R, \quad (11)$$

$$O \in C, \quad (12)$$

其中: $d$ 为颗粒体心到边界面的距离, $R$ 为颗粒球体半径, $C$ 为边界面, $O$ 为颗粒体心在边界面上的投影位置点。

### 2.4 动态边界条件施加

由于 CDEM 中的单元只有平动自由度,没有转动自由度,无法直接对 CDEM 单元施加扭矩;为此,本文提出了一种在局部坐标系下施加动态切应力,从而间接施加动态扭矩的方法。在车轮轮毂面施加线性变化的动态边界条件从而牵引车轮转动,开启坐标系施加开关,在两个切向上施加动态边界条件。其核心控制方程如式(13):

$$F_i = \lambda_i \left[ \frac{fV_1 - fV_0}{fT_1 - fT_0} (t - fT_0) + fV_0 \right], \quad (13)$$

其中: $F_i$ 为第  $i$  方向的载荷值(面力); $fT_0, fT_1$ 分别为线段起始时间和结束时间; $fV_0, fV_1$ 分别为线段起始值和线段结束值; $\lambda_i$ 为各个方向的载荷系数; $t$ 为当前时间。

图 2 为动态边界条件施加方式示意图,在该模型中,通过在车轮轮毂中心圆柱面设定坐标系以确定法向与切向,在圆柱面上施加切向面力从而产生扭矩使车轮转动。

通过在圆柱面每一个节点施加面力,对所有面力进行求和形成扭矩,其主要控制方程如式(14)、(15):

$$F_i = A_i \tau, \quad (14)$$

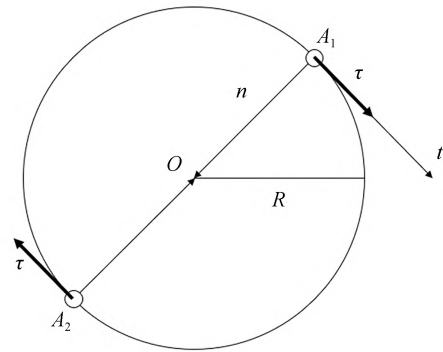


图 2 动态边界条件施加方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of application mode of dynamic boundary conditions

$$M = \sum_{i=1}^n F_i R, \quad (15)$$

其中: $F_i$ 为作用面力, $A_i$ 为面力作用的面积, $\tau$ 为切应力, $M$ 为扭矩, $R$ 为圆柱面半径。

转速力矩控制方程如式(16)、(17),通过推导得出转速切应力关系如式(18):

$$M = \beta J, \quad (16)$$

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (17)$$

$$\omega = \frac{4\tau t}{R^2 \rho}, \quad (18)$$

其中: $\beta$ 为角加速度, $J$ 为转动惯量, $m$ 为质量, $\omega$ 为转速, $t$ 为时间, $\rho$ 为密度。

创建圆柱体车轮进行验证,车轮截面半径  $R$  为 0.5 m,高  $h$  为 0.2 m,密度为  $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,在圆柱体外环施加局部坐标系下动态切应力 1 000 Pa,根据上述方程求得转速预测结果。图 3 为预测与模拟结果对比图。

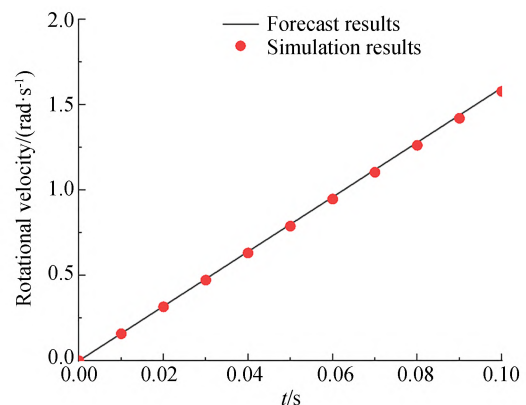


图 3 预测与模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of prediction and simulation results

数值计算结果与理论解基本一致,表明了本文提出的利用局部坐标系下切向应力施加扭矩的计算方法的正确性。

### 3 仿真模拟分析

#### 3.1 模型建立及材料参数

车轮模型尺寸采用了 8.25R16LT 132/128F 18PR 全钢载重子午线轮胎<sup>[16]</sup>。该轮胎外径 855 mm,断面宽 230 mm,为简化计算,同时使车轮嵌入地面时车辙更加明显,花纹节距数采用 20,其余参数不变。花纹车轮模型见图 4,同时建立如图 5 所示光面车轮进行对比分析。

其中,轮胎材料选取隔振橡胶<sup>[17]</sup>,采用 linear 弹性本构。对轮胎材料进行均一化假设,将其弹性模量调整至充气状态标准;软土路面采用石

灰土<sup>[18]</sup>,采用 brittleMC 脆性断裂本构。石灰土模型长 3 m,宽 1 m,高 0.14 m。材料力学参数见表 1。

假定汽车重量为  $3.30 \times 10^3$  kg,在轮胎中心建立一组同心圆柱轮毂模型以增加车轮重量使之达到四分之一车重,故需进行等效施加较大转矩使其车速符合实际情况。经实验,当局部坐标系下动态切应力大小在全程恒为 10 MPa 时,车轮转速将稳定于  $11.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,适用于汽车在软土路面行驶时的车速。

在此基础上,在模型周围创建 5 个刚性面进行约束。为便于计量,记花纹轮胎工况为 T1,光面轮胎工况记为 T2,二者初始埋深约为 0.03 m。其最终计算模型分别如图 6 和图 7 所示。

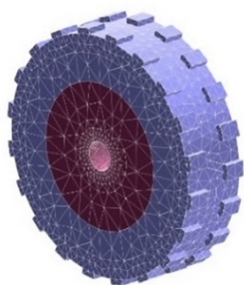


图 4 花纹车轮模型

Fig. 4 Patterned wheel model

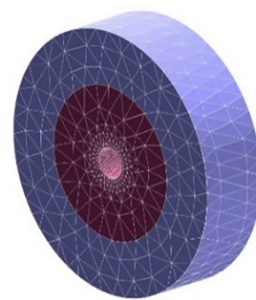


图 5 光面车轮模型

Fig. 5 Glossy wheel model

表 1 材料力学参数

Tab. 1 Material mechanical parameters

材料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/Pa	泊松比	粘聚力/Pa	抗拉强度/Pa	内摩擦角/ $(^\circ)$
轮胎橡胶	1 000	$1 \times 10^8$	0.25	—	—	—
石灰土	1 800	$4 \times 10^8$	0.35	$4 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	29

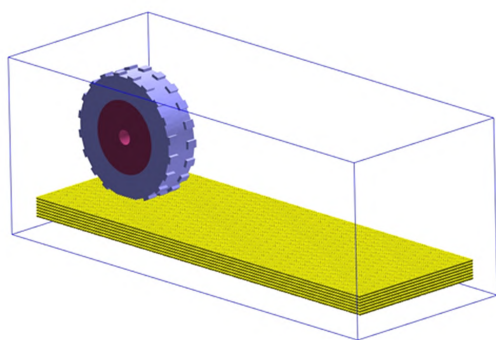


图 6 T1 计算模型

Fig. 6 T1 calculation model

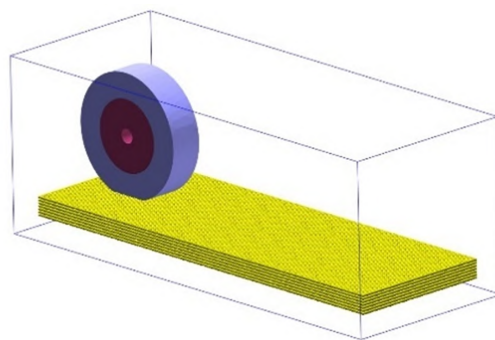


图 7 T2 计算模型

Fig. 7 T2 calculation model

### 3.2 模型验证

如图 8 为本次模拟结果与实验结果对比图(以 T2 为例),在计算过程中,与车轮接触的软土路面分为如图 8(b)中两个区域,即前区顺时针区和后区逆时针区。如图, T2 在  $t=0.40$  s 时产生颗粒飞溅现象,其前方软土运动方向为顺时针;后方软土产生逆时针方向运动趋势导致车轮后方软土产生堆积现象。该现象与文献[2]中所述实验结果相同。

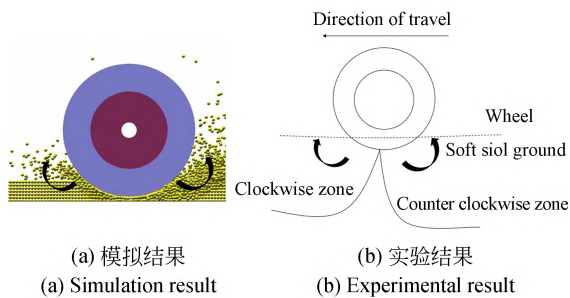


图 8 模拟结果与实验结果对比

Fig. 8 Comparison between simulation result and experimental result

由此可见该计算方法可准确模拟车辆在软土路面行驶的真实情况。

## 4 计算结果

### 4.1 T1、T2 工况对比

本次计算过程中,车轮在石灰土软土路面上行驶,待车轮转动至终点计算完毕。如图 9~10 为计算的两组工况车辙图。从图中可以看到,软

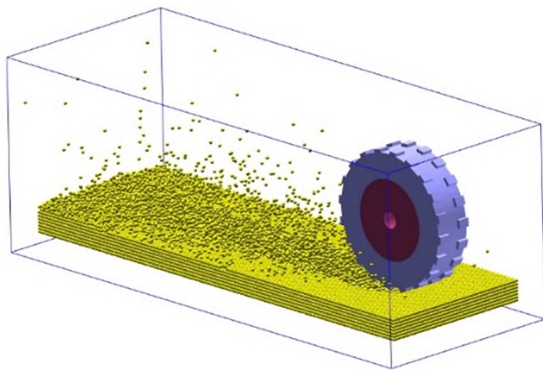


图 9 T1 车辙

Fig. 9 T1 rutting

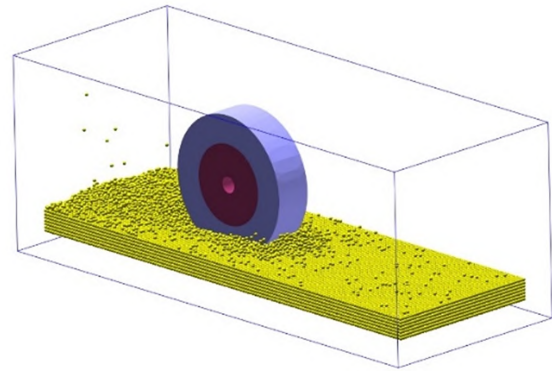


图 10 T2 车辙

Fig. 10 T2 rutting

土路面由于车轮驶过产生颗粒的挤压流动导致车轮两侧和后侧产生颗粒隆起现象,在地面上留下了清晰可见的车辙。在相同时间内, T1 在软土路面运行完毕到达终点共耗时 1.90 s,其运行长度为 2.15 m;而 T2 在此期间仅运行了 0.72 m。由此可见在软土路面上,花纹轮胎的通行能力较光面轮胎更为出色,相同时间内其通行路程更远。

图 11 为车轮速度时程图,从图中可以看出,在施加动态切应力后, T1、T2 中车轮开始转动,其转动速度与平动速度逐渐升高,而后趋于稳定。

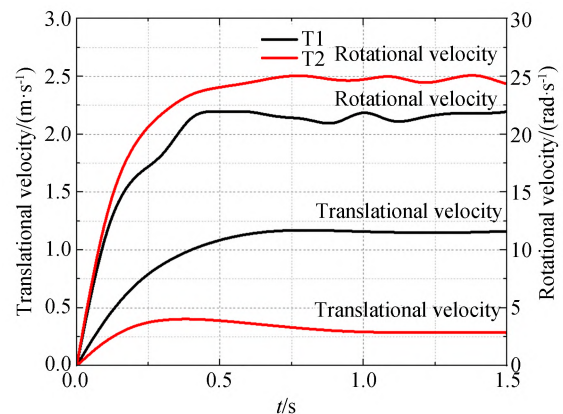


图 11 车轮速度时程图

Fig. 11 Wheel speed-time diagram

其中, T1 转动速度稳定值约为  $21.05 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , T2 转动速度稳定值约为  $23.39 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , 其对应转动线速度分别为  $9.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $10.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; T1 平动速度稳定值约为  $1.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , T2 平动速度稳定

值约为  $0.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

光面车轮由于其表面光滑,与地面滑动摩擦力较小,故在转动过程中,其转动速度略高于花纹车轮,车轮与地面相对运动时发生打滑现象,故其通行能力远低于花纹车轮。在 T1 中,花纹车轮平动速度与其线速度之比约为 12.78%;T2 中光面车轮的比值约为 2.80%。根据该比值可看出,在软土路面行驶过程中,相较于光面车轮,花纹车轮通行能力更好,由此说明了在汽车制造设计中轮胎胎面合理设计的必要性。

如图 12 为系统动能时程图,从图中可以看到 T1 与 T2 中整个系统动能在  $0\sim 0.50 \text{ s}$  内均持续上升,但 T2 动能增长速度明显高于 T1,这是因为 T2 中的光面轮胎由于其与地面滑动摩擦力小,导致其转动速度高于 T1 中的花纹车轮。故在此期间 T2 动能增长速度高于 T1。在  $0.50 \text{ s}$  之后,T1、T2 系统动能均趋于稳定,其稳定值分别约为  $6\ 000 \text{ J}$ 、 $10\ 000 \text{ J}$ 。之所以出现这种差异是因为在此过程中,光面车轮相较于花纹车轮,其下陷深度更大,故在此过程中,车轮转动所引起的颗粒流动现象更为剧烈,运动颗粒范围较 T1 更大,因此 T2 系统动能大于 T1。由此可见,车轮下陷程度也是影响车辆在软土路面通行能力的重要因素之一。

图 13 和图 14 分别为 T1、T2 在 Y 方向的位移云图。从图中可以看出,两组工况中由于车轮前进,在车轮后方产生了颗粒向后流动的现象:在  $t=1.00 \text{ s}$  时,T1 车轮后产生颗粒后移现象,其

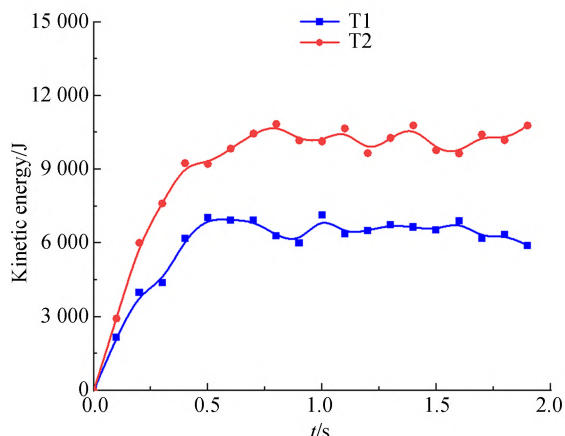


图 12 动能时程图

Fig. 12 Kinetic energy time history

位移大小约为  $0.70 \text{ m}$ ;T2 约为  $0.40 \text{ m}$ 。

在  $t=1.90 \text{ s}$  计算完毕时,T1 位移大小约为  $0.85 \text{ m}$ ;T2 约为  $0.55 \text{ m}$ 。不难看出,T1 中在花纹车轮作用下颗粒后移数值较大,在图中也可看出在 T1 中发生了较为明显的颗粒飞溅现象(软土路面行驶出现尘土飞扬)。由此也可说明在软土路面中,花纹车轮相较于光面车轮转动会产生较为明显的软土后移现象从而产生软土堆积,驱动车轮向前运动,由此提高了车轮通行能力。

在图 9 和图 10 中可以看到,随着车轮在软土路面的运行,车轮下陷深度出现明显差异,花纹车轮下陷深度低于光面车轮,如图 15 为车轮下陷深度时程图。

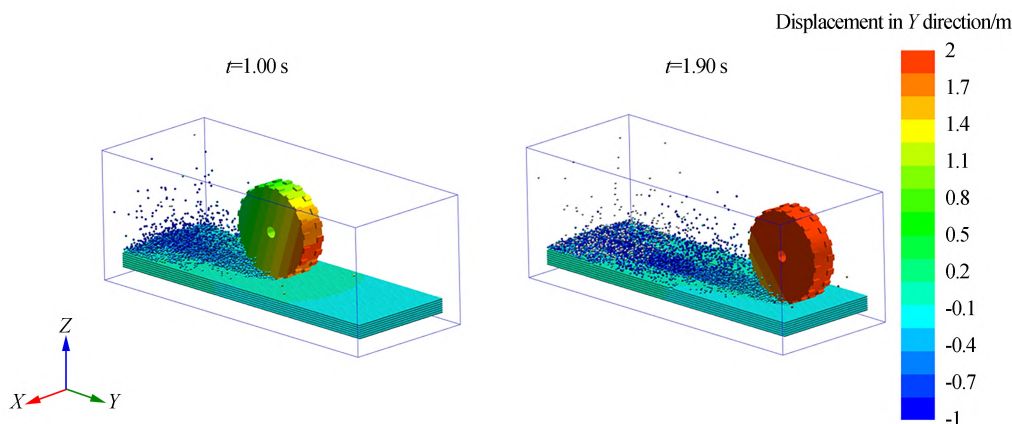


图 13 T1 Y 方向位移云图

Fig. 13 Displacement cloud diagram of T1 on Y direction

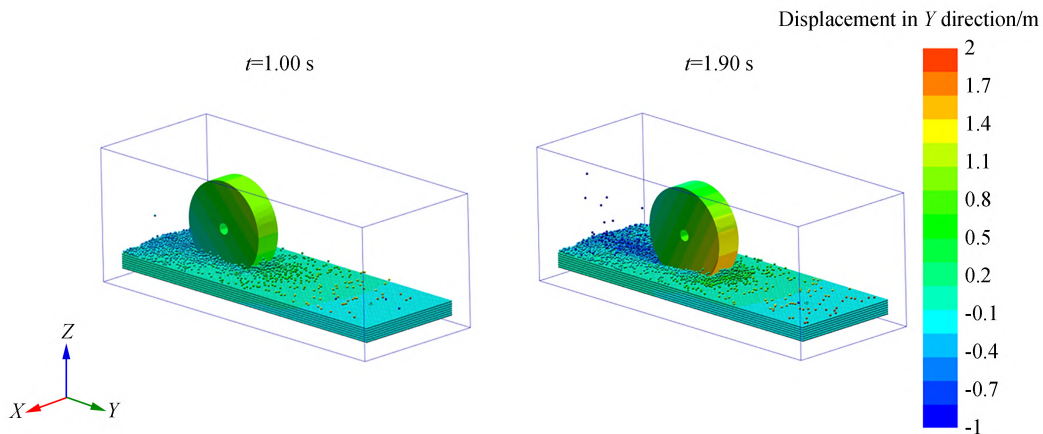


图 14 T2 Y方向位移云图

Fig. 14 Displacement cloud diagram of T2 on Y direction

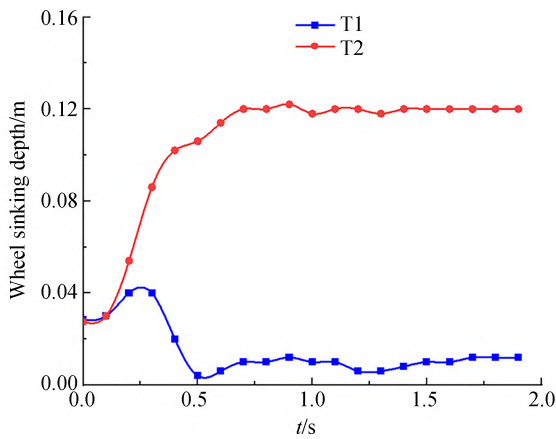


图 15 车轮下陷深度时程图

Fig. 15 Time history of wheel sinking depth

从图中可以看出, T1 中花纹车轮随着时间的推进, 在 0~0.50 s 中, 其下陷深度先升高后降低, 之后在 0.50 s 时车轮下陷深度约为 0.01 m, 之后便稳定于该值; T2 中光面车轮在 0~0.75 s 内下陷深度不断增大, 在达到 0.12 m 后稳定于该值。由此可见, 在质量相同的情况下, 花纹车轮的下陷深度远低于光面车轮。故合理地进行车轮轮胎胎面设计, 可以减小车轮侵入软土路面的深度, 提高通行能力。

#### 4.2 含路障路面探究

为探究车轮在含路障路面的通行能力, 设置三组路障, 路障高度分别为 0.02 m, 0.05 m, 0.07 m, 记三种工况分别为 U1、U2、U3, 图 16 为三种路障示意图。

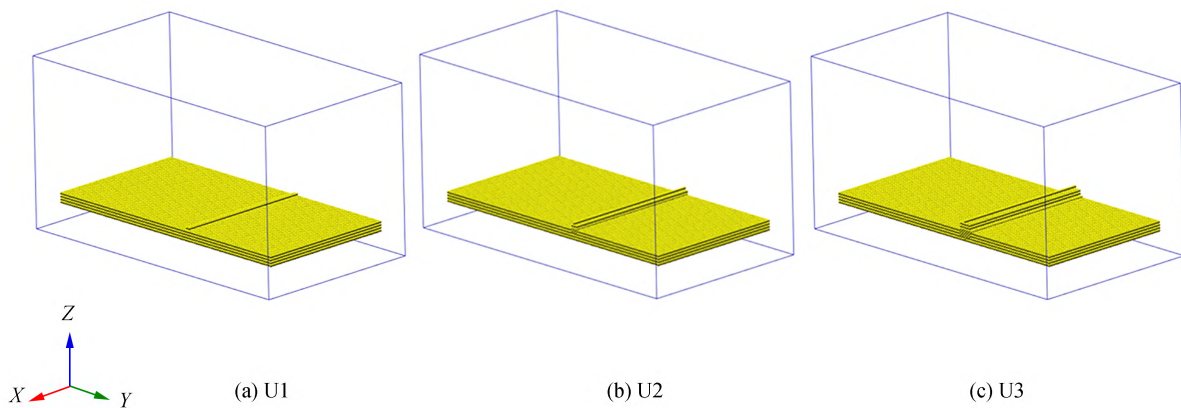


图 16 路障示意图

Fig. 16 Schematic diagram of roadblock



花纹车轮在三种工况中行驶 1 s, 最终在 U1、U2、U3 的行驶距离分别为 1.04 m, 0.96 m, 0.95 m。U1 工况通行距离高于后两种工况, U2、U3 通行距离相近。

图 17 为在路障工况下的系统动能时程图, 从图中可以看出随着时间的推移, 三种工况动能逐渐上升。

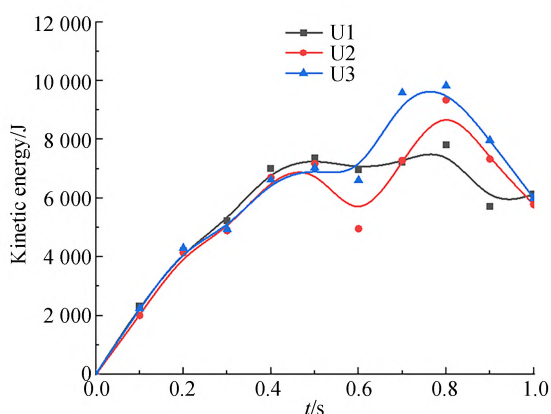


图 17 路障工况下动能时程图

Fig. 17 Kinetic energy time history under roadblock condition

与 T1、T2 工况中动能随着时间的推移趋于稳定不同, U1、U2、U3 在 0.5 s 后动能值出现明显波动。三种工况动能均出现先升高后下降的趋势: U1、U2、U3 均大约在 0.8 s 时达到峰值, 此时 U1、U2、U3 的动能分别为 7 815.11 J、9341.75 J、9 822.38 J。说明在此过程中, 车轮遇到障碍, 必须增大制动力才能通过, 由此动能上升, 在通过障碍物后, 动能逐渐下降。软土障碍越大, 其所需能量越大, 持续时间越长。

由此可见车辆在含路障路面行驶的过程中, 面对障碍物需要增强制动力以通过障碍物, 也要在通过障碍物后适当减速以保持车辆平稳通过。

## 5 力学机理探究

综合以上计算结果可知, 花纹轮胎由于其胎面表面凹凸不平, 增大了与软土路面的接触面积, 从而增大了滑动摩擦力, 故花纹车轮转速

低于光面车轮。但由于胎面花纹的存在, 使花纹车轮产生切向作用力, 在一定程度上增大了花纹车轮的驱动力, 故花纹车轮不会发生如光面车轮“打滑下陷”的现象, 而是保持匀速前进。光面车轮由于驱动力不足无法顺利通行, 其平动速度低于花纹车轮, 但其转动速度较高, 与颗粒发生较为剧烈的相对运动, 从而导致软土路面松软, 故其下陷深度远高于花纹车轮。相同时间内, 花纹车轮通行路程更远, 通行能力更强; 车轮在含路障路面行驶时, 往往会有坡度高低不同的路障, 在车轮通过路面障碍时, 车辆需要增强驱动力以获取足够能量跨越障碍物, 尤其是起伏程度较大的路障, 其所需能量往往更大。在车轮通过障碍物后其能耗又会有所下降, 这就需要车辆在行驶过程中进行合理制动从而平稳通过。

## 6 结 论

为了准确刻画车轮在软土路面上转动、摩擦、前行的动力学行为, 提出了 CDEM-DEM 耦合的数值计算方法, 实现了通过施加局部坐标系下动态切向面力间接实现动态转矩施加的方法, 探讨了车轮花纹、路障对车轮前行速率及能耗的影响规律。研究结果表明:

(1) 花纹轮胎、光面轮胎均在软土路面留下了清晰可见的车辙; 相同质量下, 花纹车轮下陷深度远低于光面车轮下陷深度。

(2) 花纹车轮与光面车轮在转动前行时均会产生较为明显的软土后移现象, 其软土后移值分别为 0.85 m、0.55 m。

(3) 在相同扭矩情况下, 光面车轮转速更快, 并出现了打滑前行的现象; 相反, 花纹车轮的转速较慢, 但在软土路面上却以较高的速度前行; 花纹车轮平动速度与其线速度之比约为 12.78%; 而光面车轮比值仅为 2.80%。

(4) 轮胎在含路障路面通行时, 其地面起伏程度越大, 所消耗的能量越大。这就要求汽车在软土路面行驶时, 应对于路况的不同做出合理的制动以平稳通过。

## 参考文献:

- [1] 臧孟炎,王立臣,周涛,等. 子午线轮胎的动态特性仿真分析与评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 124-129.  
ZANG M Y, WANG L C, ZHOU T, *et al.* Finite element simulation analysis and evaluation of radial tire's transient dynamic characteristics [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(8): 124-129. (in Chinese)
- [2] 赵春来,臧孟炎. 基于FEM/DEM的轮胎-沙地相互作用的仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 75-81.  
ZHAO C L, ZANG M Y. Simulation of tire-sand interactions based on FEM/DEM [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(8): 75-81. (in Chinese)
- [3] 臧孟炎,张彬. 轮胎制动性能FEM仿真分析和评价[J]. 汽车工程, 2014, 36(6): 699-702, 708.  
ZANG M Y, ZHANG B. FEM simulation and evaluation on tire braking performance [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(6): 699-702, 708. (in Chinese)
- [4] ZENG H Y, XU W, ZANG M Y, *et al.* Calibration of DEM-FEM model parameters for traction performance analysis of an off-road tire on gravel terrain [J]. *Powder Technology*, 2020, 362: 350-361.
- [5] FARHADI P, GOLMOHAMMADI A, SHARIFI MALVAJERDI A, *et al.* Tire and soil effects on power loss: measurement and comparison with finite element model results [J]. *Journal of Terramechanics*, 2020, 92: 13-22.
- [6] 邓露,凌天洋,何维,等. 用于公路车-桥系统振动分析的精细化轮胎模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 108-116.  
DENG L, LING T Y, HE W, *et al.* Refined tire model for analysis of highway vehicle-bridge system vibration [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 108-116. (in Chinese)
- [7] 谢斌,罗振豪,宋正河,等. 非道路车辆轮胎-土壤相互作用建模方法及试验技术综述[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 51-63.  
XIE B, LUO Z H, SONG Z H, *et al.* Review of off-road vehicle tire-soil interaction modeling methods and experimental techniques [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(11): 51-63. (in Chinese)
- [8] 吕凤天,高海波,李楠,等. 基于单目视觉的松软地面星球车车轮滑转率估计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 77-85.  
LÜ F T, GAO H B, LI N, *et al.* Monocular vision-based estimation of wheel slip ratio for planetary rovers in soft terrain [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(2): 77-85. (in Chinese)
- [9] 姜春霞,鲁植雄,UPADHYAYA S,等. 人字形花纹轮胎压实土壤垂直应力分布规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 80-87.  
JIANG C X, LU Z X, UPADHYAYA S, *et al.* Vertical stress distribution rules in compacted topsoil under tire with chevron tread pattern [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 80-87. (in Chinese)
- [10] 张锐,吉巧丽,张四华,等. 轮面曲率半径对沙地刚性轮沉陷性能影响研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 341-349.  
ZHANG R, JI Q L, ZHANG S H, *et al.* Effect of wheel surface curvature radius on sinkage performance of sand rigid wheel [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 341-349. (in Chinese)
- [11] GUO X B, ZHENG Z M, ZANG M Y, *et al.* A multi-sphere DE-FE method for traveling analysis of an off-road pneumatic tire on irregular gravel terrain [J]. *Engineering Analysis With Boundary Elements*, 2022, 139: 293-312.
- [12] 冯春,李世海,郑炳旭,等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 110-120.  
FENG C, LI S H, ZHENG B X, *et al.* Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in an open-pit mine based on CDEM [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 110-120. (in Chinese)
- [13] 王希,王宛杰,董艳秋,等. 基于离散单元法和物理引擎的结构连续倒塌可视化模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 267-275.  
WANG X, WANG X J, DONG Y Q, *et al.* Visual simulation for structure continuous collapse based on discrete element method and physical engine [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 267-275. (in Chinese)
- [14] LI J, FENG C, ZHU X G, *et al.* Analysis of the coal fluidization mining process with the continuous-

- discontinuous coupled particle-block method [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 7001654.
- [15] 冯春, 李世海, 刘晓宇. 一种有限元转化为颗粒离散元的方法及其应用研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 1027-1034.
- FENG C, LI S H, LIU X Y. A procedure for transiting FEM into DEM and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 1027-1034. (in Chinese)
- [16] 燕杰凯, 王海祥. 加强型 8.25R16LT 规格全钢载重子午线轮胎的设计开发[J]. *中国橡胶*, 2021, 37(5): 56-59.
- YAN J K, WANG H X. Design and development of reinforced 8.25R16LT all steel radial truck tire [J]. *China Rubber*, 2021, 37(5): 56-59. (in Chinese)
- [17] 赵勤, 黄云伟, 徐中明, 等. 汽车空调低压管路流固耦合振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(10): 244-251.
- ZHAO Q, HUANG Y W, XU Z M, *et al.* Fluid structure interaction vibration characteristics of the low pressure pipeline of an automotive air conditioning system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(10): 244-251. (in Chinese)
- [18] 林钦栋, 冯春, 唐德泓, 等. 冲击载荷作用下路面结构的沉降及破坏特征[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 109-122.
- LIN Q D, FENG C, TANG D H, *et al.* The settlement and damage characteristics of pavement structure under impulse load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 109-122. (in Chinese)

#### 作者简介:



路 扬(1999—),男,河北张家口人,硕士研究生,2021年于河北工程大学获得学士学位,主要从事岩土力学及车辆地面力学方面的研究。E-mail: 956255016@qq.com

#### 通讯作者:



冯 春(1982—),男,浙江富阳人,硕士,高级工程师,2009年于中国科学院研究生院获得工程力学硕士学位,主要从事连续-非连续耦合数值分析方法(CDEM)、复杂结构与岩土体耦合作用机理、车辆及冲击载荷下路面结构变形破裂特征等方面的研究。E-mail: fengchun@imech.ac.cn