

土壤沉陷特性与车轮滑转关系的离散元研究

方俊¹, 闫民², 张引¹, 许立峰¹

1. 北京京北职业技术学院, 北京 101400
2. 北京林业大学工学院, 北京 100083

摘要 探究轮胎-地面系统的动力学特性, 建立更接近轮胎-地面系统实际工作状况的动力学模型是车辆行驶理论的核心问题之一。本研究运用颗粒-车辆地面散体动力学模型, 针对目前车辆地面力学中, 尚无有效方法对因车轮滑转导致土壤沉陷的问题进行模拟和计算的现状, 采取相应的试验数据, 建立相同的计算环境, 对弹性车轮在沙地上因滑转引起的沙土沉陷问题进行计算, 与试验结果进行对比分析表明有很好的的一致性。该模型能有效地用于车辆地面力学中滑转率、土壤沉陷特性及两者相互关系的研究和计算。

关键词 沙土沉陷; 车轮滑转; 离散元法

中图分类号 U467.1*3, O343.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0072-03

Relationship Between Soil Sinkage and Tyre Slip Studied by Using DEM

FANG Jun¹, YAN Min², ZHANG Yin¹, XU Lifeng¹

1. Beijing Jingbei Vocational College, Beijing 101400, China
2. College of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract The dynamics of the tyre-ground system is important for vehicle's performance. A dynamics model of the tyre-ground system is the key in its simulation and should be as close to the real working conditions as possible. Based on the Discrete Element Method (DEM), a model of granule tyre and granule ground is built, and the complicated dynamic problems of vehicle driving are solved. The accuracy of the model is verified through calculating a number of parameters in the vehicle-ground system. So far, there is no effective method to simulate the earth sinkage caused by the tyre slip. With the above mentioned model, the sandy soil sinkage caused by the slip of the resilient tyre on it is calculated, and the results agree well with experimental data. The model can be effectively used in the study and calculation of the slip rate, the earth sinkage property and the relationships between vehicle and ground.

Keywords soil sinkage; tyre slip; discrete element method

车辆在地面上行驶时, 地面给予支承并提供牵引力, 同时还给车辆以行驶阻力, 所以地面是车辆的工作介质。沙土是由大小不一的颗粒聚集而成的摩擦性土壤^[1]。在车辆地面力学理论中, 已有很多试验和研究^[2]证实, 由于车辆在松软土壤上行驶时, 给地面以垂直载荷, 产生了沉陷, 增加了运动阻

力; 同时还给地面以水平载荷, 产生了推力, 并经常伴随着打滑。在车轮载荷作用下, 沙土易发生塑性变形而流动, 同时车轮将产生滑转。当车轮牵引力超过沙土最大抗剪强度时, 轮下沙土将会因流动而无法支承车辆行走, 这将影响车辆的使用经济性和通过能力。

收稿日期: 2010-01-05; 修回日期: 2010-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572027)

作者简介: 方俊, 硕士研究生, 研究方向为车辆工程, 电子信箱: mekyking@gmail.com; 闫民 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030109007M), 副教授, 研究方向为车辆工程, 电子信箱: hoffmen@gmail.com

在计算土壤沉陷问题时,大多采用贝氏模型^[3-4]。Wong 等^[5]关于轮地相互作用正应力分布的模型体现了纵向滑转沉陷问题。Shibly 等^[6]基于 Reece 正应力分布模型和 Janosi 切应力分布模型^[7],忽略了车轮离去角。虽然众多学者在这方面做了许多研究,但这些模型和假设在确定轮胎下的应力分布和土壤沉陷等问题时,均存在一定缺陷^[8]。

建立弹性轮胎与松软地表的相互作用的数学模型,研究土壤参数、轮胎参数和车辆性能的关系,尤其对于经常在坏路甚至无路条件下作业的工程机械和越野车辆,探究地面垂直变形和水平变形的影响,对评价和预测车辆的行驶性能、合理设计和优化车轮行走机构有重要意义。

本研究组基于散体单元法 (Discrete Element Method, DEM)^[9]建立了轮胎-地面系统的力学模型^[10-13],对车轮在地面上静止和行驶时的应力分布^[10]、行驶时的滑转率^[11]及动态特性^[12]做了描述和计算。本研究运用轮胎-地面系统的力学模型,对车轮在沙土上行驶时,由于滑转而引起的沉陷问题进行对比计算分析。

将传统的只能用于分析散粒体的离散单元法,扩展到使离散单元法中的各个单元之间的接触关系可以具有黏弹性,来实现连续体的计算研究。这样,车辆地面力学中,轮胎与地面耦合系统存在的连续体和散粒体均可用离散单元法建模。

1 模型简述

文献[10]、[11]对离散单元法及运用该方法建立的车辆地面动力学模型进行了描述,模型简图如图 1 所示。文献[12]对颗粒轮胎模型的建模思想、建模过程、数学力学基础、运动方程的稳定性与求解策略、接触的处理以及轮胎模型的参数辨识等细节问题进行了详述,并针对一般车用轮胎结构和材料的复杂性、土壤沙粒结构参数以及两者在耦合过程中的复杂动力学过程进行了分析,利用车辆地面力学中已有的试验数据,建立相同的试验环境,在同等条件下进行了对比计算分析,证明了该模型的正确性和可行性。本研究在该模型基础上,对土壤沉陷特性与车轮滑转的关系进行研究。

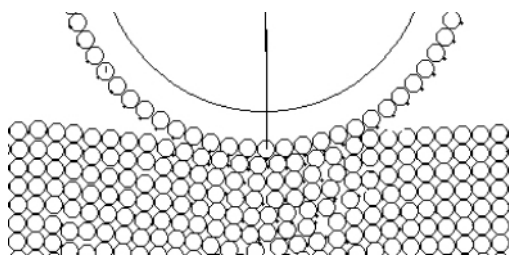


图 1 颗粒轮胎和颗粒地面耦合模型

Fig. 1 Granule tyre and granule ground coupling

图 2 为轮胎施加静载荷后,作用于沙土上时,模型中各单元的速度场分布。

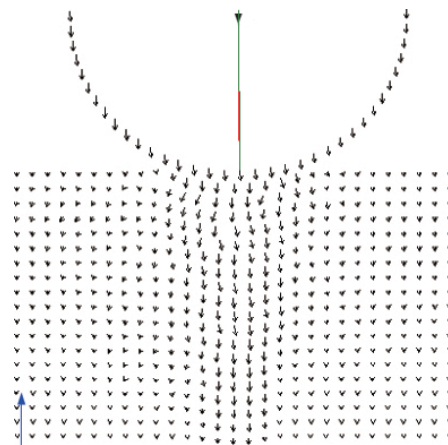


图 2 车轮静载于沙土上各单元速度场

Fig. 2 Velocity field distribution of each unit caused by tyre load

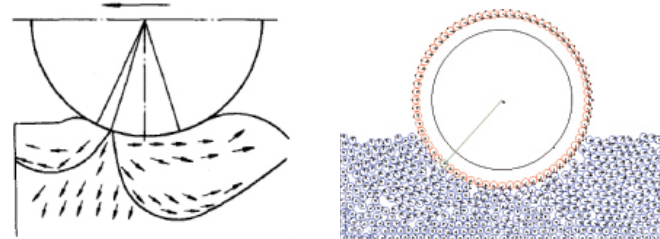
2 参数选取

考虑到本模型的适用性和参考试验数据的时效性,采取文献[14]的试验数据(即试验用车轮根据中国发布的月球探测车要求进行设计,宽度 $b=165\text{mm}$,半径 $r=135\text{mm}$,车轮轮刺高度 h 分别为 0 (光滑车轮)、 5 、 10 、 15mm ,测试车轮前进速度为 25mm/s ,滑转率设定为 0.05 、 0.10 、 0.20 、 0.30 、 0.40 和 0.60 。试验中将车轮垂直载荷设定为 80N)进行计算和对比分析。对文献[14]中提到的 0 、 5 、 10 、 15mm 的轮刺影响,本模型中轮胎颗粒与颗粒之间起伏不平的花纹效应完全可以实现对轮刺的模拟(图 1)。

3 对比计算

3.1 现象对比

试验和研究^[1]证实,车轮在松软沙土上行驶时,轮下沙土明显产生 2 个破坏区域,即前区和后区,如图 3(a)所示。图 3(b)为本模型计算过程中,车轮出现滑转现象时,轮下沙土的流动情况。对比图 3(a)、(b)可以看出,模型中沙粒的运动状态与试验结果有很好的 consistency,从宏观上说明了本模型计算的正确性。



(a) 试验结果

(a) Testing results

(b) 计算结果

(b) Calculation results

图 3 车轮滚动引起的沙土沉陷

Fig. 3 Soil sinkage caused by tyre slipping

在破坏区内,法向应力和剪切应力的组合处处超过了沙土抗剪强度,致使沙土颗粒产生流动,这与文献[1]得出的结论也一致。在前区,颗粒流动由后往前,形成拥土,增加推土阻力;在后区,沙土颗粒流动由前往后,形成滑转下陷。多次试验^[1]表明,轮下2个破坏区存在与滑转率有关。

3.2 数据对比

为了对比分析,在文献[14]试验条件下,本研究对车轮滑转引起沙土沉陷情况进行计算,并将其结果与文献[14]试验结果进行比较,计算数据对比见图4。

由图4可看出,计算结果与试验结果在数据分布上有很好的—致性,说明了本模型在数据计算上的正确性。在滑转率较小时,模型计算值与试验结果很好吻合。但在滑转率超过35%时,两者出现偏差,其原因是本模型没有考虑车轮滑转时,车轮侧向土壤流动,导致整体沉陷量略小于试验值。而且滑转率越大,车轮侧向土壤流动越剧烈,该差值也越大。如果考虑车轮侧向土壤流动情况,则能很好解决该问题。

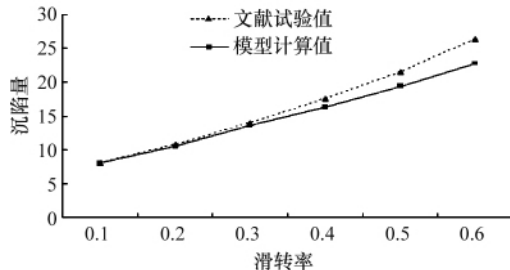


图4 计算数据对比

Fig. 4 A comparison between computed data of the model and test data in the reference [14]

4 结论

1) 由图3、图4可看出,本研究构建的模型,与试验^[14]数据和结果,在宏观现象和具体数值计算上均有很好的—致性。本模型可有效解决车辆地面力学中诸多参数的计算。

2) 车辆在松软沙土上出现滑转时,会加剧沙土流动而出现沉陷,降低车辆通过性能,而且随着滑转率的增加,沉陷愈加严重。如何改进车轮在沙土上的滑转问题,是有效提高车辆通过能力的途径之一。

3) 离散单元法能够有效解决离散体的大变形问题,对解决车辆地面力学中的轮地耦合动力学问题也有重要的借鉴意义。如果考虑车轮侧向沙土流动,将能更加有效、准确地对轮地耦合问题进行动力学计算和预测。

参考文献 (References)

- [1] 裘熙定,王庆年,陈雯,等. 车轮在沙地上滚动的稳定性分析 [J]. 汽车工程, 1995, 17(6): 340-346.
Qiu Xiding, Wang Qingnian, Chen Wen, et al. *Automotive Engineering*, 1995, 17(6): 340-346.
- [2] 刘聚德. 车轮与沙地相互作用动态特性的研究 [J]. 青岛建筑工程学院学报, 1994, 15(1): 52-58.

- [3] Liu Jude. *Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering*, 1994, 15(1): 52-58.
- [3] Bekker M G. Introduction to terrain-vehicle system [M]. Ann Arbor, Michigan: The Michigan University Press, 1969: 3-12.
- [4] Wong J Y. Theory of ground vehicle [M]. Hoboken, NJ: John Wiley, 1978: 29-44.
- [5] Wong J Y, Reece A R. Prediction of rigid wheel performance based on analysis of soil-wheel stresses, part I: Performance of driven rigid wheels [J]. *Journal of Terramechanics*, 1967, 4(1): 81-98.
- [6] Shibly H, Iagnemma K, Dubowsky S. An equivalent soil mechanics formulation for rigid wheels in deformable terrain, with application to planetary exploration rovers [J]. *Journal of Terramechanics*, 2005, 42: 1-13.
- [7] Janosi Z, Hanamoto B. Analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle in deformable soils [C]//Proceedings of the 1st International Conference of ISTVS. Torino-SaintVincent, Italy: International Society for Terrain-Vehicle Systems, 1961: 707-726.
- [8] 季学武,赵六奇. 轮胎在沙地上牵引特性的新预测模型 [J]. 汽车工程, 1997, 19(1): 56-59.
Ji Xuewu, Zhao Liuqi. *Automotive Engineering*, 1997, 19(1): 56-59.
- [9] Cundall P A. A compute model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems [C]//Proceedings of International Symponor Rock Fracture. Nancy, France, 1971: II8-II12.
- [10] 方俊,闫民,许立峰. 颗粒轮胎与颗粒地面模型 [J]. 科技导报, 2007, 25(24): 69-72.
Fang Jun, Yan Min, Xu Lifeng. *Science & Technology Review*, 2007, 25(24): 69-72.
- [11] 方俊,闫民. 颗粒-车辆地面力学方法对滑转率的对比计算研究 [J]. 中国科技成果, 2009(4): 47-48.
Fang Jun, Yan Min. *China Science and Technology Achievements*, 2009 (4): 47-48.
- [12] 方俊. 轮胎-地面系统散体动力学模型研究 [D]. 北京: 北京林业大学工学院, 2008: 22-37.
Fang Jun. Research of the discrete granule dynamics model of tyre-ground system [D]. Beijing: College of Technology, Beijing Forestry University, 2008: 22-37.
- [13] 闫民,方俊. 车辆地面散体动力学模型研究 [C]//北京力学学会第13届学术年会会议文集. 北京, 2007: 146-147.
Yan Min, Fang Jun. Research of the discrete granule dynamics model of terrain-vehicle system [C]//The 13th annual Conference memoir of Mechanics Society of Beijing. Beijing, 2007: 146-147.
- [14] 丁亮,高海波,邓宗全,等. 基于应力分布的月球车轮地相互作用地面力学模型 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 49-55.
Ding Liang, Gao Haibo, Deng Zongquan. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 49-55.

(责任编辑 陈广仁)

本期推理小游戏答案

三家房客的名、姓和所住的层次如下:
罗杰·沃伦和诺玛·沃伦夫妇住在顶层;
珀西·刘易斯和多丽丝·刘易斯夫妇住在二层;
杰克·莫顿和凯瑟琳·莫顿夫妇住在底层。