深空探测车单轮牵引性能的离散元仿真

李 雯 高 峰

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100083)

贾 阳

(中国空间技术研究院总体部 空间科学与深空探测总体研究室, 北京 100094)

孙 鹏

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用离散元数值分析方法, 对矩形、直角梯形和三角形截面轮齿车轮与土壤颗粒单元的相互作用进行仿真研究. 分析细观尺度下, 土壤颗粒单元受3种轮齿车轮扰动后的接触反力分布规律. 采用坐标转换和代数求和的数学方法, 建立细观离散元分析结果与宏观车轮牵引性能参数的对应关系, 推导土壤推力、行驶阻力及其挂钩牵引力的表达式, 以研究轮齿截面的几何形状对车轮牵引性能的影响. 计算结果表明, 在相同行驶环境下, 直角梯形轮齿车轮具有最佳的牵引性能.

关 键 词: 深空探测车; 牵引性能; 通过性; 离散单元法

中图分类号: V 476.4

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2008)05-0524-05

Numerical simulation of tractive performance for planetary rover vehicle wheel by discrete element method

Li Wen Gao Feng

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Jia Yang

(Division of Space Science and Deep Space Exploration,
China Academy of Space Technology Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Sun Peng

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The numerical simulation for wheel-soil interaction was conducted by discrete element method (DEM) where the grouser-sections of wheels were rectangle, rec-trapezia, and triangle respectively. The distribution of contact reaction for soil particles was analyzed in the granular scales when they are disturbed by different lugged-wheel configurations. The relationship between microscopic results of DEM and macroscopic parameters of tractive performance was built by means of coordinates transformation and algebraic summation. The formulae of soil thrust, motion resistance and drawbar pull were derived respectively in order to study the influence of grouser-section shape upon tractive performance of wheel. The calculated results show that the wheel with rec-trapezia-section grousers possesses the best tractive performance among the three kinds of lugged-wheel configurations in the same traveling condition.

Key words: planetary rover vehicle; tractive performance; trafficability; discrete element method

收稿日期: 2007-05-10

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070006012)

作者简介: 李 雯(1977-), 女, 北京人, 博士生, mosquato@163.com.

1957年前苏联成功发射第一颗人造地球卫星开辟了人类深空探测的先河. 探测车作为各种科学仪器的载体和航天员的代步工具, 是实现星体表面远距离、多地点、复杂地形勘测任务不可或缺的重要工具, 其星球表面的牵引通过性是目前研究的重点内容之一[1-3]. 考虑到星体表面风化层物质中一般不包含液态水、空气和其他有机物质, 是由大大小小的陨石撞击和空间风化 (如大温差、宇宙射线和太阳风轰击)等机械作用, 由各种岩石碎屑和熔融玻璃质等颗粒组成的单相物质[4], 以及带有轮齿的探测车车轮与松软风化层土壤作用的复杂动力学关系, 本文提出离散元细观分析方法, 对不同结构的车轮牵引性能进行仿真分析.

1　轮-土作用分析的离散元前处理

1.1　土颗粒的离散元模型

最初由 Greenspan提出并被 Cundall和 Strack广泛应用于流体和固体模型的离散单元法 DEM (Discrete Element Method)[5], 由于采用牛顿运动方程和接触力学模型来分析接触颗粒之间的作用, 因而避免了连续机理方法中对介质本构方程的需求, 利用简单的接触力学模型和运动方程即可模拟高度复杂系统的准静态和动态行为. 近年来, 计算机技术的不断发展使 DEM 在散体力学和岩土工程等领域的应用日益增加, 并逐渐成为地面力学中轮-土相互作用细观机理研究的有力工具, 在行走机构的牵引通过性理论研究中发挥了重要作用[6-7].

星球土壤一般属于非粘性土壤, 土体强度由摩擦强度确定, 其表观粘聚力产生自颗粒间的摩擦和互锁作用. 由此, 本文在分析中将土壤颗粒单元接触力学模型简化为一个“弹簧-阻尼系统”, 并添加非张力联接和传统库仑摩擦滑块, 见图 1.

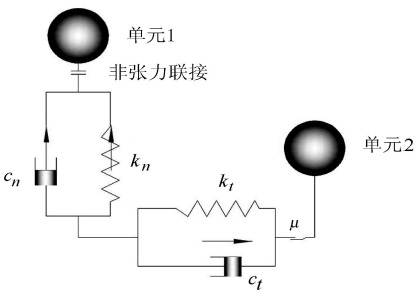


图 1　离散元接触力学模型

1.2　土壤单元细观力学参数的确定

土壤颗粒单元的离散元细观力学参数无法通过物理实验直接测量. 由文献 [1, 8], 离散单元的弹簧刚度和阻尼系数可分别通过式 (1)、式 (2)预测. 设土颗粒单元直径为 3.0 mm, 颗粒密度为 3 100 kg/m^3, 则弹簧刚度 k_n, k_t 和阻尼系数 c_n, c_t 如表 1所示.

$$k_n = k_t = \frac{\pi \cdot rE(1+e)}{(1-2v)N_c} \tag{1}$$

$$\left.\begin{aligned} c_n &= 2\sqrt{m k_n} \\ c_t &= 2\sqrt{m k_t} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中, r 为颗粒半径; E 为土壤的杨氏弹性模量; e 为孔隙比; v 为泊松比; N_c 为模型中每个单元的平均接触数; m 为单元质量.

表 1　土壤颗粒的离散元接触模型参数

参数	k_n/(kN·m^{-1})	k_t/(kN·m^{-1})	c_n/(N·s·m^{-1})	c_t/(N·s·m^{-1})	$\mu_{土-土}$	$\mu_{土-轮}$
数值	15.0	15.0	5.92	5.92	0.9	0.5

注: μ为库仑摩擦系数.

1.3　建立车轮模型

基于轮齿效应对车轮整体牵引性能的影响, 本文提出 3种带有不同截面轮齿 (见图 2)的车轮结构模型. 为使组成车轮整体的离散单元集合以一个刚体系统的形式与土壤颗粒单元发生作用, 此处引入了块逻辑, 以避免车轮模型内各单元之间发生接触响应. 车轮整体由一系列离散单元集合组成, 如图 3所示. 其中, 车轮主体单元直径为 D, 轮齿则由相互重叠的、直径为 d 的单元构成.

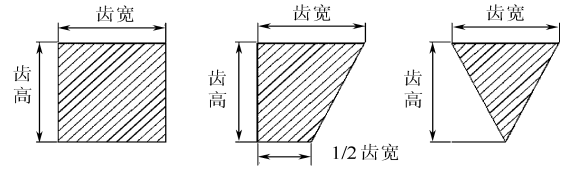


图 2　轮齿剖面图

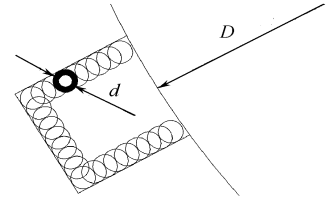


图 3　车轮 *DEM* 模型

1.4　轮-土作用 *DEM* 仿真

轮-土作用的 DEM 仿真主要包括土壤固结、车轮静止下陷、车轮行驶仿真 3个部分. 在土壤固结仿真中, 处于重力场 g 下的土颗粒利用自重固结, 并最终达到稳定状态; 土壤固结后, 车轮基于垂直载荷 W 的作用, 将产生初始的静态下陷, 并

与表层土发生压实作用, 直至垂直方向的合力达到平衡; 最后, 对产生初始下陷的车轮再施加水平牵引力 F_{tr}, 以使车轮克服土壤阻力, 产生水平位移, 从而实现车轮在土壤表面行驶的 DEM 仿真. 分析中, 车轮的结构参数、工作载荷见表 2、表 3

表 2 车轮模型参数

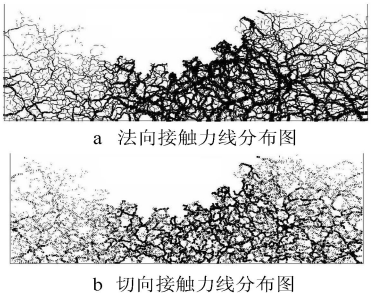
参数	D/mm	d/mm	齿宽/mm	齿宽/mm	车轮齿数
数值	300.0	4.0	20.0	20.0	18

表 3 车轮行驶仿真参数

参数	W/N	F_{tr}/N	车轮转速 ω/(rad·s^{-1})	g/(m·s^{-2})	时间步长 Δt/s	仿真时间 t/s
数值	19.8	9.8	0.147	9.8	2.1×10^{-5}	2.1

2 离散元仿真分析结果

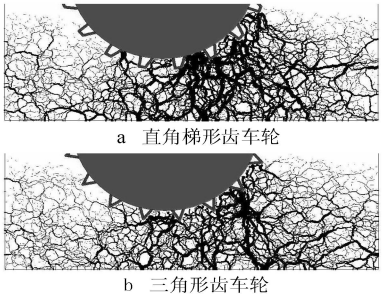
图 4为矩形截面齿车轮与土壤颗粒单元作用后的法向、切向接触力线分布图. 图 5为直角梯形轮齿车轮和三角形轮齿车轮与土壤作用的合接触力线分布图.



a 法向接触力线分布图

b 切向接触力线分布图

图 4 矩形轮齿车轮作用下土壤的接触力线分布图



a 直角梯形齿车轮

b 三角形齿车轮

图 5 两种轮齿车轮-土壤接触力线分布图

对比 3种轮齿车轮与土壤颗粒单元的作用结果发现: ①在相同车轮行驶条件和工作载荷条件下, 三角形轮齿车轮对土壤的扰动作用最小, 土中颗粒单元的接触力线分布稀疏, 且影响范围小; ②矩形轮齿截面由于增加了与土壤的接触面积以及齿顶缘与土壤的压实、剪切作用, 同时减少了轮齿侧壁的入土角和出土角, 因而在行驶中对土体的扰动大, 其主要表现为轮下土壤颗粒单元的接触力线分布稠密、影响范围广; ③直角梯形截面轮齿与矩形截面轮齿车轮相比, 改善了出土角, 减少了对土壤的扰动作用, 但齿顶缘仍与土壤存在压实和剪切作用, 从而导致轮下土体的接触力线分布稠密度和影响范围居中; ④行驶中, 轮下土壤单元的接触力主要来自车轮及轮齿对土壤的法向压实作用, 土壤中切向接触力线分布比法向接触力线分布稀疏、且量值小.

3 车轮的牵引性能分析

3.1 车轮牵引性能参数推导

车轮的宏观牵引性能参数包括土壤推力、行驶阻力、挂钩牵引力和驱动转矩. 由于车轮结构的离散元模型由相互重叠的刚性单元组成, 因此可通过对离散元细观分析结果进行坐标转换和代数求和处理, 来推导车轮的宏观牵引性能参数.

1) 任一车轮单元的水平作用力. 当车轮上第 i个单元与土壤颗粒单元 j发生接触作用时, 其力学简化模型如图 6所示. 车轮单元的水平接触分力可表示为法向接触反力 F_N和切向接触反力 F_T 的函数:

$$F_{ix} = F_{iN}\sin\theta_i + F_{iT}\cos\theta_i \tag{3}$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y}\right) = \arctan\left(\frac{x_i - x_j}{y_i - y_j}\right)$$

式中, x_i, y_i, x_j, y_j 分别为车轮单元 i和土壤单元 j 的坐标.

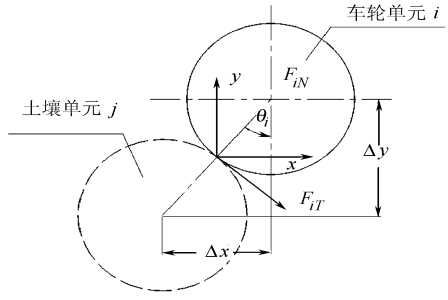


图 6 车轮-土壤单元接触作用简化模型

2) 土壤的推力、行驶阻力和挂钩牵引力. 土壤推力 F_H等于车轮向后挤压土壤的反力; 行驶阻力 F_R与推力相反; 挂钩牵引力 F_{DP}定义为土壤推力与行驶阻力之差.

$$\left.\begin{aligned} F_H &= \sum_{i=1}^{N_{pos}} F_{ix}^{+} \\ F_R &= \sum_{i=1}^{N_{neg}} F_{ix}^{-} \\ F_{DP} &= F_H + F_R = \sum_{i=1}^{N} F_{ix} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中, N_{pos}, N_{neg}, N 分别为车轮上, 水平正接触分力单元数、负接触分力单元数和总单元数.

3) 驱动轮转矩 T. 车轮的驱动转矩在数值上等于轮上各单元对轮心的力矩之和. 设车轮的轴心坐标为 (x_0, y_0), 则 T 可表示为

$$T = \sum_{i=1}^{N} M_0(\bar{F}) = \sum_{i=1}^{N} [F_{ix}\Delta y] - \sum_{i=1}^{N} [F_{iy}\Delta x] \quad (5)$$

式中, $\Delta x = (x_0 - x_i)$; $\Delta y = (y_0 - y_i)$.

3.2 车轮的牵引性能分析

由式 (4)、式 (5)可计算各时间步长内, 车轮的受力和驱动转矩, 并利用 Origin 软件, 生成力-时间步曲线图, 如图 7~图 10所示.

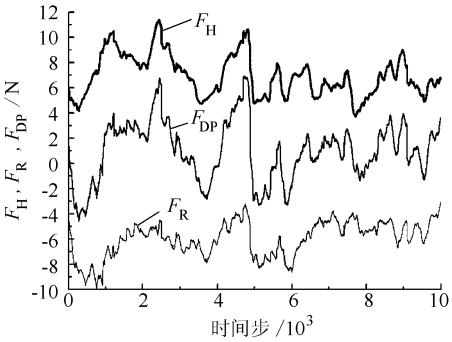


图 7　矩形轮齿车轮作用力

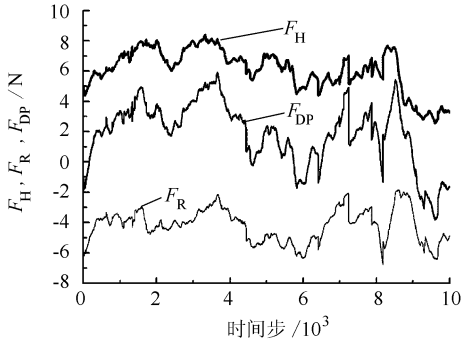


图 8　直角梯形轮齿车轮作用力

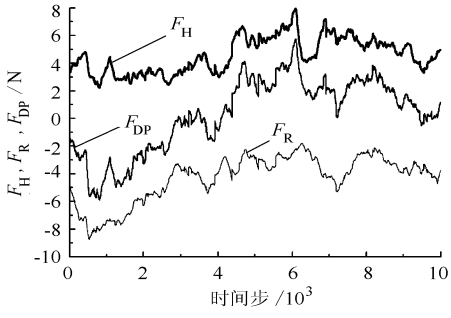


图 9　三角形轮齿车轮作用力

图 7~图 9分别为车轮行驶过程中产生的土壤推力、行驶阻力及其挂钩牵引力曲线. 如图所示, F_H, F_R和 F_{DP}在仿真过程中均产生了一定的波动, 并在行驶一段时间后达到稳态值. 产生水平力波动的原因与所选离散单元大小和采样时间间隔有关, 此波动现象将有望通过减小单元尺寸、降低采样时间、增加数据采集点数量的方法改善.

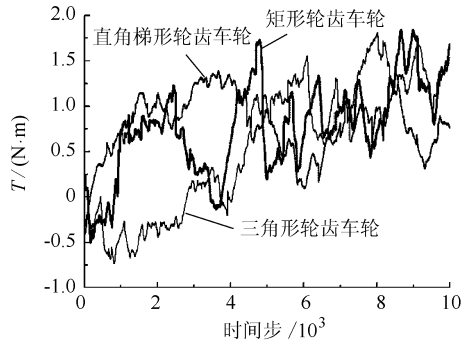


图 10　车轮驱动转矩曲线

对比 3种车轮的分析结果发现:

1) 相同行驶条件下, 矩形轮齿车轮产生的土壤推力最大 (最大值和平均值分别为 11.4N 和 6.25N); 直角梯形轮齿车轮产生的土壤推力低于矩形轮齿车轮 (最大值和平均值分别为 8.41N 和 6.09N); 三角形轮齿车轮由于缺少齿顶部分与土壤的法向压实和切向剪切作用, 使由轮-土接触界面附近单元接触反力产生的土壤推力降低 (最大值和平均值分别为 8.00N 和 4.59N);

2) 3种轮齿车轮在行驶过程中所承受的平均阻力分别为 6.00N, 4.19N, 4.30N.

由此可见, 矩形截面轮齿虽然可以为车轮整体提供较高的土壤推力, 但其所产生的行驶阻力也较大, 由此所产生水平结果力, 即车轮挂钩牵引力, 并未提高. 直角梯形截面轮齿车轮在行驶过程中所承受的平均土壤推力与矩形截面轮齿车轮接近, 但其平均行驶阻力低, 仅为 4.19N, 由此所产生的水平结果力 (车轮挂钩牵引力) 最高, 为 1.62N. 三角形截面轮齿车轮的平均行驶阻力与直角梯形截面轮齿车轮接近, 但由于其平均土壤推力不及前 2种截面轮齿车轮, 因而所产生的车轮挂钩牵引力也较低.

图 10绘出 3种车轮结构的驱动转矩-时间步曲线图. 如图可知:

1) 车轮在行驶过程中的驱动转矩曲线变化规律与车轮的挂钩牵引力曲线相似. 当车轮产生较大的挂钩牵引力时, 其所需的驱动转矩也较大;

2) 矩形轮齿车轮和直角梯形轮齿车轮在整个仿真时间内, 所需的驱动转矩接近, 其平均值分别为 0.363N·m和 0.383N·m; 三角形轮齿车轮与前两种轮齿车轮相比, 在启动时所需的驱动转矩较小, 但当其达到稳定状态时, 所需的驱动转

矩与前两种轮齿车轮接近.

4 结束语

利用 DEM,仿真分析了 3种不同轮齿截面的车轮结构与土壤颗粒的细观接触作用,绘制出车轮扰动下土壤颗粒单元的接触力线分布图.通过对离散元细观分析结果的坐标转换和代数求和等数学处理方法,推导出了土壤推力、行驶阻力、挂钩牵引力和驱动转矩等宏观车轮牵引性能参数的函数表达式,并绘制了车轮牵引性能参数-时间步曲线.

仿真分析结果表明,直角梯形截面齿车轮与矩形截面齿车轮和三角形截面齿车轮相比,具有最大的挂钩牵引力,因而其牵引性能最佳.

参考文献 (References)

[1] Nakashima H, Fujii H, Oida A. Parametric analysis of lugged wheel performance for a microrover by means of DEM [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44: 153-162

[2] Shibly H, Iagnemma K, Dubowsky S. An equivalent soil mechanics formation for rigid wheels in deformable terrain, with application to planetary exploration rovers[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42: 1-13

[3] Patel N, Scott G P. Application of bekker theory for planetary exploration through wheeled, tracked and legged vehicle locomotion[R]. AIAA-2004-6091, 2004

[4] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14-19
Zheng Yongchun, Ouyong Ziyuan, Wang Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(4): 14-19 (in Chinese)

[5] Zhang D, Whiten W J. A new calculation method for particle motion in tangential direction in discrete element simulations [J]. Power Technology, 1999, 102: 235-243

[6] Liu Sihong, Lu Tinghao. Microscopic shear mechanism of granular materials in simple shear by DEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 608-611

[7] Oida A, Momozu M. Simulation of soil behavior and reaction by machine part by means of DEM [J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, 2002, 4: 1-7

[8] Asaf Z, Rubinstein D, shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92: 227-242

(责任编辑:张 嵘)

(上接第 523页)

实验结果表明,该匹配方法能够有效地发现不同 GML应用模式间的元素匹配关系,具有较高的正确匹配率,可以广泛应用于基于 GML的地理信息融合应用中.

参考文献 (References)

[1] ISO 19136, Geographic information-Geography Markup Language(GML) [S]

[2] Guan Jihong, Zhou Shuigeng, Chen Junpeng. Ontopology based GML schema matching for spatial information integration[C]// Lee J W T. Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Washington: IEEE Computer Society, 2003: 2240-2245

[3] Rahm E, Bernstein P A. A survey of approaches to automatic schema matching[J]. The International Journal on Very Large Data Bases, 2001, 10(4): 334-350

[4] 关佶红,虞为,安扬. GML模式匹配算法[J]. 武汉大学学报, 2004, 29(2): 169-174
Guan Jihong, Yu Wei, An Yang. Geography markup language schema matching algorithm [J]. Journal of Wuhan University, 2004, 29(2): 169-174 (in Chinese)

[5] 章勤,孙盛,袁平鹏. 基于模糊集的地理信息模式匹配算法[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(7): 46-48
Zhang Qin, Sun Sheng, Yuan Pingpeng. Fuzzyset-based schema matching algrithm for geographic information[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(7): 46-48 (in Chinese)

[6] Zhou Jingtao, Zhang Husheng, Wang Mingwei. Element matching by concatenating linguistic-based matchers and constraint-based matcher[C]// Khoshgoftaar T M. Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Washington: IEEE Computer Society, 2005: 265-269

[7] Melnik S, Garcia-Molina H, Rahm Erhard. Similarity flooding a versatile graph matching algorithm and its application to schema matching[C]// Georgakopoulos D. Proceedings of the 18th International Conference on Data Engineering. Washington: IEEE Computer Society, 2002: 117-128

[8] 程伟,周龙骧,林河水,等. 一种多策略通用模式匹配方法[J]. 计算机科学, 2004, 31(11): 121-123
Cheng Wei, Zhou Longxiang, Lin Heshui, et al. A multistrategy generic schema matching approach [J]. Computer Science, 2004, 31(11): 121-123 (in Chinese)

(责任编辑:卢 硕)