四驱全地形车可变直径轮软土牵引特性分析

陈新波 高 峰 徐国艳 药晓江

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为解决常规地面车辆及传统车轮在沙地、滩涂等松软地域行驶或作业时存在通过性差、效率低、能耗大甚至无法行驶的问题,自主创新设计出四驱可变直径轮轻型全地形探测车,车轮具有可张开成为弹性步行轮和合拢成为刚性圆车轮2种工作轮态. 基于贝克模型的经典地面力学理论,分别建立了可变直径轮张开轮及合拢轮态时与3种典型松软沙土交互作用关系的力学简化模型,计算并对比分析了可变直径轮两种工作轮态的挂钩牵引力和驱动力矩、牵引效率等随滑转率的变化关系及车轮接近角与沉陷量关系. 结果表明车轮的挂钩牵引力、驱动力矩和牵引效率等均受到车轮滑转率及软土特性参数的制约,在松软路面上可变直径轮张开步行轮比合拢圆轮能产生更大的挂钩牵引力、驱动力矩、牵引效率和更小的沉陷量,更有利于提高车轮的软土牵引通过性. 分析结果可作为后续实验研究对比的参考.

关 键 词: 非常规行走机构; 可变直径轮; 松软路面; 轮土作用; 牵引特性

中图分类号: U 461.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1527-05

Tractive performance analysis of diameter-variable wheel for 4WD all-terrain vehicle on soft soil

Chen Xinbo Gao Feng Xu Guoyan Yao Xiaojiang

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Four-wheel drive all-terrain light exploration vehicle with diameter-variable wheels was innovatively designed out to solve the problems when conventional ground vehicles and wheels driving on soft terrain, such as poor trafficability, low efficiency, big energy consumption and even can't drive. The wheel has two extreme working status: elastic extended walking-wheel and folded rigid wheel. Based on classical terramechanics theory, the dynamics models of interactions between two types of working wheel status and three kinds of typical soft soils were established. The drawbar pull, driving torque and driving efficiency as well as sinkage of diameter-variable wheel were analyzed under the condition of different slip. The results indicate that traction trafficability indexes are limited by wheel slip and soft soil parameters. The simulation provides theoretical basis for that the elastic extended wheel can improve significantly bigger drawbar pull, driving efficiency and soft soil traction trafficability, and reduce sinkage compared with that of rigid folded wheel's, and can be used as the reference for further experimental investigation.

Key words: unconventional walking mechanism; diameter-variable wheel; soft terrain; wheel soil interaction; tractive performance

人类在开展农业、军事活动以及星球表面探测中,针对各种复杂地表、松软地面环境,现有的各种常规地面车辆及传统车轮在行驶或作业时,一直存在着通过性差、效率低、能耗大甚至无法行驶的问题[1]. 应用地面力学理论对全地形车在松软地面的牵引性能进行分析是研发出新型行走装

收稿日期: 2011-12-16; **网络出版时间**: 2012-04-01 12:00

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120401.1200.006.html

基金项目: 国家863计划资助项目(2007AA11Z244,2010AA101405); 国家科技支撑计划重点项目(2011BAF04B01)

作者简介: 陈新波(1973-),男,河南新乡人,博士生,chenxb_2008@163.com.

置、解决全地域车辆行驶问题的关键之一. 国内外的学者为此已做了一些研究工作. 加拿大籍华裔学者 Wong 和 Reece 基于轮土应力分析对刚性驱动轮的性能进行了预测[2]. 美国卡内基梅隆大学的文献[3]用旋转单轮试验台研究了刚性轮和充气轮的牵引特性,文献[4]研究了重复通过对越野车牵引特性的影响. 文献[5]对应用弹性轮的行星探测车的牵引响应进行了预测分析. 国内吉林大学陈斌、李建桥等对探测车刚性驱动轮与月壤的相互作用进行了压力-沉陷模型仿真及实验研究[6]. 哈尔滨工业大学丁亮、高海波、刘吉成等对星月探测车驱动轮的性能、滑转率对刚性轮-软土牵引特性的影响等进行了理论分析和实验研究[7-8]. 北京航空航天大学孙鹏、李雯、弓永涛等对刚性可变直径轮月球车月面牵引通过性进行了理论分析、离散元仿真及模型试验研究[9-11].

现有的文献多是单纯研究探测车刚性轮的牵引通过性,而针对探测车同时进行弹性轮与刚性轮软土牵引特性分析对比却鲜见报道. 本文针对自主创新设计的四驱全地形探测车可变直径轮具有弹性轮和刚性轮 2 种工作轮态的特点,应用基于贝克模型的经典地面力学理论对其与 3 种典型软土相互作用及牵引特性进行了计算与分析.

1 可变直径轮探测车结构和特点

可变直径轮探测车由可变直径轮、H 型传动底盘、管式车身、发动机等组成,如图 1 所示. 可变直径轮由变径驱动传动机构、自锁紧及制动机构、弹性轮辐架、橡胶轮脚块等组成,如图 2 所示.



a 车轮张开　　b 车轮合拢

图 1 四驱可变直径轮探测车

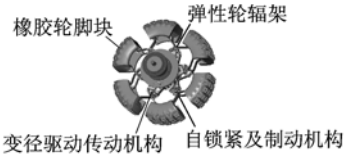

图 2 可变直径轮结构组成

可变直径轮探测车可实现车轮在有轮缘与无轮缘车轮间转换;兼具在滩涂等松软路面上高通过性和在公路等硬路面上平稳性;通过控制轮径变化可调整车姿以减小车体侧倾度、增强安全性;具有良好的机动性和全地域普适特性等优点,为全地域探测车辆行驶问题提供了很好的一体化解决方案.

2 可变直径轮——软土作用分析

2.1 可变直径轮两种工作轮态及其刚度特性

可变直径轮通过变径驱动传动机构驱使弹性轮辐架带动 6 个实心橡胶轮脚块张开或合拢,实现在张开步行轮和合拢圆轮 2 种工作轮态间转换. 车轮张开时,由柔顺变径弹簧构成的弹性轮辐架张开支撑车重,车轮整体刚度较小[12];车轮合拢时,弹性轮辐架及轮脚块相互合抱紧固使车轮整体刚度大增. 车轮在土壤上的滚动特性受车轮刚度和土壤强度的制约[13],对比可变直径轮在两种轮态时的整体刚度与松软土壤强度的关系,其在与松软路面作用时可分别视为弹性轮和刚性轮.

2.2 可变直径轮计算用基本参数

可变直径车轮地面力学牵引性能计算所用的基本参数如表 1 所示.

表 1 可变直径轮计算用基本参数

参数	整车质量 m/kg	车轮数/个	单轮载荷 W/N	车轮宽 b/m	合拢半径 r/m	张开半径 R/m
数值	1 000	4	2 450	0.225	0.30	0.45

2.3 计算选用的典型土壤及其特性参数

为研究在松软地面环境行驶的可变直径轮探测车的软土牵引通过性,本文选择压实沙、沙壤土、粘性土 3 种典型软土来进行计算,其相关特性参数[14]如表 2 所示.

表 2 3 种典型软土特性参数

典型软土	n	c/kPa	φ/(°)	k_c/(N·m$^{-(n+1)}$)	k_φ/(N·m$^{-(n+2)}$)	K/m
压实沙	0.4706	0.689 48	33.3	50.936	250.668	0.038 1
沙壤土	0.7	1.7	29.0	5.3	1 515.0	0.025
粘性土	0.5	4.14	13.0	13.2	692.2	0.01

2.4 可变直径弹性张开步行轮-软土作用分析

为方便起见,暂不考虑车轮花纹的形状,假设外缘为光滑表面. 同时把弹性轮辐架的变形等效视为充气轮胎的变形. 假设可变直径轮张开成弹性步行轮时,车轮与软土接触界面为一段平面加一段圆弧面[15],土壤切应力与剪切变形关系由 Janosi 公式和摩尔库仑定律[16]得

$$\tau = (c + p\tan\varphi)[1 - \exp(-j/K)] \quad (1)$$

式中,c 为土壤内聚力;φ 为土壤内摩擦角;K 为土壤剪切变形模数.

土壤法向负荷与沉陷关系由贝克理论[16]得

$$p = (k_c/b + k_\varphi)z^n \quad (2)$$

式中,k_c 为土壤的粘聚变形模数;k_φ 为摩擦变形

模数;b 为车轮宽;z 为土壤沉陷量;n 为沉陷指数.

不考虑轮胎的弹滞损耗阻力及推土阻力[15],则弹性张开轮与松软地面的受力分析的局部放大图如图 3 所示. 其中,W_v 为车轮垂向作用力;F_d 为车轮挂钩牵引力;T_w 为驱动轮输入驱动力矩;p_1,τ_1 和 p_2,τ_2 分别为接地圆弧面和接地平面上的法向及切向应力;θ_1 为接近角;θ_2 为离去角;θ 为轮土交互作用角;R 为张开轮半径;u_a 为探测车行驶速度;ω 为驱动轮角速度;A,B,C 为车轮接地点.

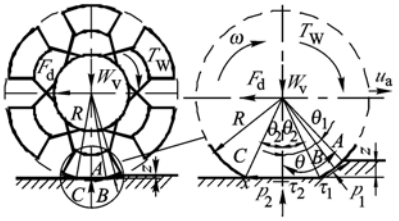

图 3　弹性张开轮-软土作用受力分析的局部放大图

根据受力平衡有

$$W_v = Rb\int_{\theta_2}^{\theta_1}(p_1\cos\theta + \tau_1\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta + 2Rbp_2\sin\theta_2 \tag{3}$$

$$F_d = Rb\int_{\theta_2}^{\theta_1}(\tau_1\cos\theta - p_1\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta + Rb\cos\theta_2\int_{-\theta_2}^{\theta_2}\tau_2(1+\tan^2\theta)\,\mathrm{d}\theta \tag{4}$$

$$T_w = R^2b\cos^2\theta_2\int_{-\theta_2}^{\theta_2}\tau_2(1+\tan^2\theta)\,\mathrm{d}\theta + R^2b\int_{\theta_2}^{\theta_1}\tau_1\mathrm{d}\theta \tag{5}$$

圆弧面上各点的沉陷量为

$$z = R(\cos\theta - \cos\theta_1) \tag{6}$$

将式(6)代入式(2),即得圆弧面上各点的法向应力:

$$p_1 = (k_c/b + k_\varphi)R^n(\cos\theta - \cos\theta_1)^n \tag{7}$$

而 p_2 为接地平面的法向压力

$$p_2 = W(n+1)/b\sqrt{2Rz - z^2} \tag{8}$$

在 B 点处,$p_1 = p_2$,故可得到 θ_1,θ_2 之间关系:

$$\cos\theta_2 = \cos\theta_1 + [p_2/(k_c/b + k_\varphi)]^{1/n}/R \tag{9}$$

由式(1)可知

$$\tau_1 = (c + p_1\tan\varphi)[1 - \exp(1 - j_1(\theta)/K)] \tag{10}$$

$$\tau_2 = (c + p_2\tan\varphi)[1 - \exp(-j_2(\theta)/K)] \tag{11}$$

对车轮进行运动分析可知[17]:

$$j_1(\theta) = R[(\theta_1 - \theta) - (1 - s)(\sin\theta_1 - \sin\theta)] \tag{12}$$

$$j_2(\theta) = j_1(\theta) + sx = j_1(\theta) + sR\cos\theta_2(\tan\theta_2 - \tan\theta) \tag{13}$$

式中,$j_1(\theta)$,$j_2(\theta)$ 分别为接地圆弧面和接地平面上的剪切位移函数;s 为滑转率;x 为车轮在接地平面上与 B 点的距离.

在接地圆弧面和接地平面的交点 B 处,因此时 $\theta=\theta_2$,即 $x=0$,故 $j_2(\theta)=j_1(\theta)$,因而在 B 点处剪切位移具有连续性.

可变直径轮探测车牵引效率 TE(定义为 η)为

$$\eta = F_d u_a/T_w\omega = F_dR(1-s)/T_w \tag{14}$$

2.5　可变直径刚性合拢圆轮-软土作用分析

可变直径轮合拢收缩成圆轮时,车轮与松软土壤的接触区域简化为一段圆弧面. 刚性合拢轮与松软土壤的相互作用受力分析如图 4 所示. 其中,r 为合拢轮半径,其他各符号含义同前一节.

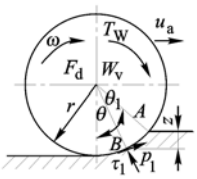

图 4　刚性合拢轮-软土作用受力分析

因刚性轮与松软土壤接触面后部的角度 θ_2 通常很小甚至完全没有[13],故假设:接触区域仅为一段圆弧面,因而 $p_2=\tau_2=0$;$\theta_2=0°$. 因此,刚性轮与松软土壤的作用关系可视为是弹性轮与松软土壤作用关系的特殊情形. 参照前面的受力平衡有

$$W_v = rb\int_{\theta_2}^{\theta_1}(p_1\cos\theta + \tau_1\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta \tag{15}$$

$$F_d = rb\int_{\theta_2}^{\theta_1}(\tau_1\cos\theta - p_1\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta \tag{16}$$

$$T_w = r^2b\int_{\theta_2}^{\theta_1}\tau_1\mathrm{d}\theta \tag{17}$$

$$z = r(\cos\theta - \cos\theta_1) \tag{18}$$

$$p_1 = (k_c/b + k_\varphi)r^n(\cos\theta - \cos\theta_1)^n \tag{19}$$

$$\tau_1 = (c + p_1\tan\varphi)[1 - \exp(-j_1(\theta)/K)] \tag{20}$$

$$j_1(\theta) = r[(\theta_1 - \theta) - (1 - s)(\sin\theta_1 - \sin\theta)] \tag{21}$$

$$\eta = F_d u_a/T_w\omega = F_dr(1-s)/T_w \tag{22}$$

式中,r 为合拢轮半径,其他各符号含义同前一节.

2.6　MatLab 编程及迭代求解

根据前面的分析,由式(3)、式(6)~式(13),用 MatLab 编程可迭代求解出弹性张开轮与各松

软土壤参数对应的 θ_1,θ_2,代入式(4)、式(5)即可求出 F_d,T_w. 再由式(14),即可求出 η. 对刚性合拢轮计算时,要由式(15)、式(18)~式(21)迭代求 θ_1,代入式(16)、式(17)即求出 F_d,T_w. 再由式(22)即可求出 η. 图 5 所示为计算程序流程图.

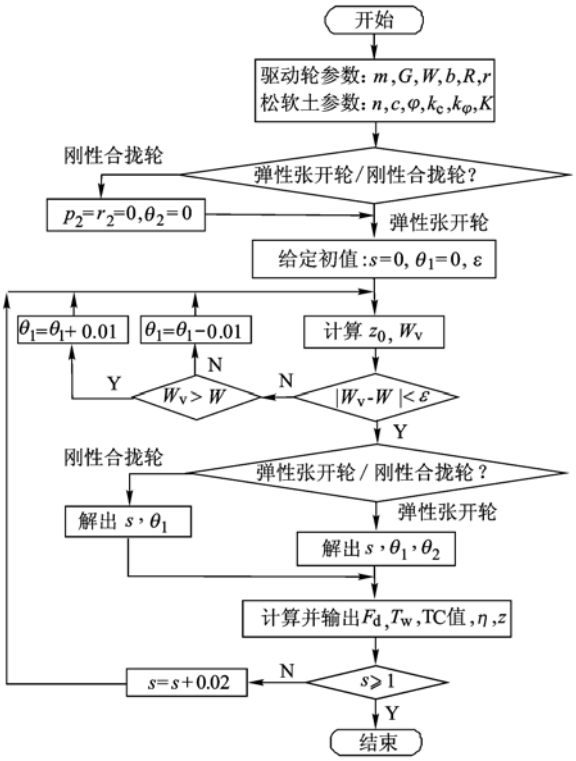

图 5 计算程序流程图

3 张开/合拢轮-软土牵引特性分析

通过前述分析及编程迭代求解,可得到可变直径轮探测车张开轮态及合拢轮态时在典型软土上的牵引特性,以下分别进行分析.

3.1 挂钩牵引力与滑转率关系

车轮的挂钩牵引力为作用在车轮上的土壤推力与土壤阻力之差,表示土壤的强度储备,用来使全地形车加速、爬坡和克服崎岖地面的阻力并牵引连接在挂钩上的挂车等. 图 6 为可变直径轮在不同软土上的挂钩牵引力 F_d 与滑转率 s 关系.

从图 6 中对比可知:①张开轮比合拢轮半径大,产生的挂钩牵引力也大,大的车轮半径有利于车辆的通过;②滑转率过小时,挂钩牵引力的值为负值,这是由于车轮在此时的滑转率值驱动下,车轮可以产生的牵引力小于受到的阻力. 随着滑转率的增大,挂钩牵引力随之增大;③车轮半径一定时,通过性取决于软土类型特性.

3.2 驱动轮输入驱动力矩与滑转率关系

图 7 为驱动力矩 T_w 与滑转率 s 关系图. 从中可看到:①随滑转率的增大,驱动力矩随之增大. 在 $s>0.5$ 时,对合拢刚性轮和张开弹性轮,T_w 均增势平缓,说明此时无效功耗在增大;②张开轮比合拢轮半径大,产生的驱动力矩也大;③相同的车轮半径和滑转率下,驱动力矩取决于软土类型特性.

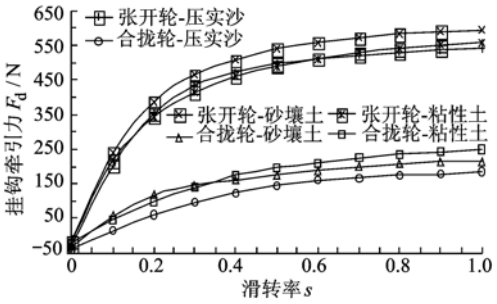

图 6 挂钩牵引力 F_d 与滑转率 s 关系

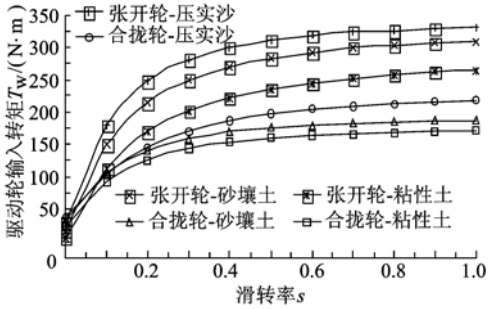

图 7 驱动力矩 T_w 与滑转率 s 关系

3.3 牵引效率与滑转率关系

牵引效率 TE 与滑转率 s 关系见图 8,从中比较可知:①车轮半径一定时,牵引效率随滑转率的增大表现为先快速剧增到最大后再缓降至 0. 张开弹性轮与合拢刚性轮达到最大牵引效率时对应的滑转率范围分别为 0.1~0.2 及 0.2~0.3,这为松软路面下不同轮径的滑转率控制提供了一定的参考;②半径越大,牵引效率越高,达到最大牵引效率时的滑转率越小. 张开弹性轮与合拢刚性轮的最大牵引效率分别约为 66% 和 16%,差别显著,体现出弹性张开轮的优点;③软土特性对牵引效率有一定影响;④不考虑整车各轮间的相互影响和干涉,如能使各单轮达到最大的牵引效率,则四驱可变直径轮探测车的整车牵引效率也将达到最大.

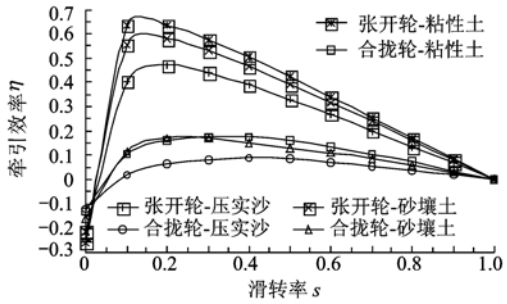

图 8 牵引效率 η 与滑转率 s 关系

3.4　接近角与沉陷量关系

接近角与沉陷量之间的关系见图 9,从中可见:①同一软土上张开轮较合拢轮的接近角小约 10°;②其他参数一定时,车轮半径对沉陷量影响显著,半径越小沉陷量越大. 合拢轮较张开轮的沉陷量深约 11 mm.

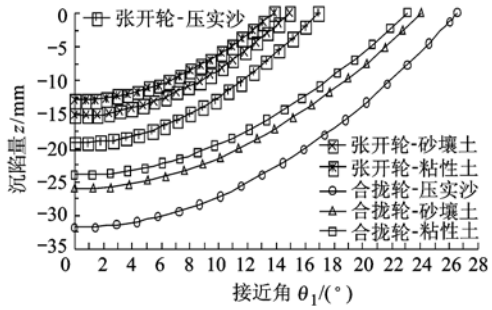

图 9　接近角 θ_1 与沉陷量 z 关系

4　结　论

本文应用经典的车辆地面力学理论分别建立了四驱可变直径轮全地形探测车车轮张开成为弹性轮及合拢成为刚性圆车轮时与 3 种典型松软沙土交互作用的力学模型,计算并对比分析了可变直径轮 2 种工作轮态时的挂钩牵引力和驱动力矩、牵引效率等随滑转率的变化关系及车轮接近角与沉陷量关系. 研究结果表明:

1) 车轮的挂钩牵引力、驱动力矩和驱动效率等均受到车轮滑转率及软土特性参数的制约.

2) 对应弹性张开轮与刚性合拢轮的最大驱动效率分别有一个最优滑转率区间. 这对车轮结构设计及车辆行驶驱动控制具有实际意义.

3) 张开步行轮比合拢圆轮能产生更大的挂钩牵引力、驱动力矩、驱动效率和更小的沉陷量,更有利于提高车轮的软土牵引特性.

参考文献(References)

[1] 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,2001:23-38
Chen Bincong. Morphology of vehicle running gear and theory of reducing adhesion and scouring soil[M]. Beijing:China Machine Press,2001:23-38(in Chinese)

[2] Wong J Y, Reece A R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses[J]. Journal of Terramechanics,1967,4(1):81-98

[3] Apostolopoulos D S. Analytical configuration of wheeled robotic locomotion [D]. Pennsylvania: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University,2001

[4] Lyasko M. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance [J]. Journal of Terramechanics,2010,47(5):275-294

[5] Favaedi Y, Pechev A, Scharringhausen M, et al. Prediction of tractive response for flexible wheels with application to planetary rovers[J]. Journal of Terramechanics,2011,48(3):199-213

[6] Chen Bin, Li Jianqiao, Zhang Rui, et al. Pressure-sinkage model and experimental research of interaction between rigid-wheel and simulant lunar soil[C]//Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ: IEEE,2009:1328-1333

[7] Ding Liang, Gao Haibo, Deng Zongquan, et al. Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil[J]. Journal of Terramechanics,2011,48(1):27-45

[8] Liu Jicheng, Gao Haibo, Deng Zongquan, et al. Effect of slip on tractive performance of small rigid wheel on loose sand[C]// Proceedings of First International Conference of Intelligent Robotics and Applications. Heidelberg: Springer Verlag,2008,10: 1109-1116

[9] 孙鹏,高峰,李雯,等. 深空探测车可变直径车轮牵引通过性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(12):1404-1407
Sun Peng, Gao Feng, Li Wen, et al. Analysis of traction trafficability of diameter-variable wheel for planetary rover[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12):1404-1407(in Chinese)

[10] Li Wen, Huang Yong, Cui Yi, et al. Trafficability analysis of lunar mare terrain by means of the discrete element method for wheeled rover locomotion[J]. Journal of Terramechanics,2010, 47:161-172

[11] 弓永涛,高峰,李雯. 刚性车轮月面牵引通过性的模型试验[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(5):649-652
Gong Yongtao, Gao Feng, Li Wen. Trafficability of rigid wheel on moon by model experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 649-652 (in Chinese)

[12] Chen Xinbo, Gao Feng, Wang Zhe. Mechanism principle and dynamics simulation on variable diameter walking wheel[C] // Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Digital Manufacturing and Automation. Zhangjiajie: [s. n.], 2011:723-727

[13] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京:机械工业出版社,2002:67-70,231-243
Zhuang Jide. Terramechanics of vehicle by calculation[M]. Beijing: China Machine Press,2002:67-70,231-243 (in Chinese)

[14] Iagnemma K, Kang S, Shibly H, et al. Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 921-927

[15] 余志生. 汽车理论[M]. 第 5 版. 北京:机械工业出版社,2009:252-264
Yu Zhisheng. Theory of vehicle[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press,2009:252-264(in Chinese)

[16] Bekker M G. Introduction to terrain-vehicle systems[M]. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press,1969

[17] Wong J Y. Theory of ground vehicles[M]. 4th ed. Hoboken, New Jersey : JohnWiley & Sons Inc,2008:182-199

(编　辑:张　嵘)