

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.6.02

履带-地面耦合系统机理分析与建模

姚禹^{1,2}, 王博³, 高智¹

(1.长春工业大学 应用技术学院, 吉林 长春 130012;

2.长春工业大学 汽车工程研究院, 吉林 长春 130012;

3.长春市轨道交通集团有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对以往研究中以履带或地面土壤做单一对象而忽略了履带与地面相互作用的问题,对履带-地面耦合系统进行机理分析,建立履带-地面耦合系统数学模型,利用地面力学特性参数和履带行走机构特性参数分析履带-地面耦合系统的摩擦力和侧面推土力,对履带-地面间的相互作用关系进行定量描述。利用 Recurdyn 仿真分析软件验证所提模型的有效性,并进一步揭示履带-地面耦合系统的机理规律。该模型可为履带车辆的通过性和牵引性研究提供基础。

关键词: 履带车辆; 履带-地面耦合系统; 地面力学; 机理分析

中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)06-0528-06

Mechanism analysis and modeling of track-soil coupling system

YAO Yu^{1,2}, WANG Bo³, GAO Zhi¹

(1.School of Applied Technology, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2.Automotive Engineering Research Institute, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

3.Changchun Realail Transit Group Company, Changchun 130012, China)

Abstract: According to the previous research, the problem of track and soil interaction was ignored by using track or soil as a single object. The mechanism of track-soil coupling system is analyzed to describe the relationship of track-soil interaction. A mathematical model of the track-soil coupling system is developed which contains the parameters of the mechanical characteristics of the soil and tracked vehicle. By using this model, the frictional force and lateral thrust resistance of track-soil coupling system can be analyzed. Recurdyn simulation software is used to verify the validity of the proposed model. And the simulation results reveal the mechanism of the track-soil coupling system. The model provides the basis for the trafficability and traction characteristics of tracked vehicles.

Key words: tracked vehicles; track-soil coupling system; terramechanics; mechanism analysis.

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705032); 吉林省教育厅基金资助项目(JJKH20170559KJ)

作者简介: 姚禹(1984—),女,汉族,吉林长春人,长春工业大学副教授,博士,主要从事复杂机电系统建模与控制算法研究,
E-mail: yaoyu@ccut.edu.cn.

0 引言

工程机械地面力学是地面力学的一个重要组成部分,目的是研究工程车辆的行走系统和与其接触的地面土壤之间相互作用关系^[1-2]。由于履带车辆的行驶能力较强,履带车辆地面力学已引起国内外许多学者的广泛关注。早期, Bekker等^[3-4]开创了地面力学经典理论,利用纯经验和半经验的研究方法对履带车辆行驶时压力导致地面土壤的下陷量进行研究,取得了一系列的研究成果,并且至今仍在使用。但是,履带与地面是相互作用的,车辆通过履带将重力、驱动力作用到地面土壤上,地面土壤又将地面摩擦、推土等行驶阻力通过履带反作用给履带车辆。以往研究中,以履带或地面土壤做单一研究对象的研究成果较多^[5-7],且履带与地面土壤的相互作用受力关系十分复杂。随着履带车辆的不断发展,对履带-地面间的相互作用关系进行定量描述,建立履带-地面耦合系统数学模型,利用地面力学特性参数和履带行走机构特性参数分析履带车辆的通过能力和牵引特性已经变得越来越重要。

针对上述问题,在现有地面力学的研究基础上,文中提出履带-地面耦合系统的概念,建立履带-地面耦合系统数学模型,利用地面力学特性参数和履带行走机构特性参数对履带-地面耦合系统进行机理分析,建立履带-地面耦合系统的摩擦力和侧面推土力受力数学关系,揭示履带-地面耦合系统的机理规律,为履带车辆通过性和牵引特性研究提供基础。

1 地面力学基本理论

根据地面力学理论,履带车辆在地面土壤上行驶时,履带行走机构会对地面土壤产生力的相互作用,即土壤的法向力和切向力。其中,垂直于地面土壤的力为履带-地面耦合系统的法向力,它可以表征地面的承载能力;水平于地面土壤的力为履带-地面耦合系统的切向力,它可以表征地面的抗剪切能力。经过大量实验和力学理论计算,给出了履带-地面耦合系统的法向力和切向力的半定量数学关系。

1)根据经验关系式,土壤的法向应力 σ 与地面变形的关系为^[8]:

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z^n \quad (1)$$

式中: k_c ——履带-地面耦合系统的粘聚力模量;

b ——履带宽度;

k_φ ——履带-地面耦合系统的摩擦力模量;

z ——履带-地面耦合系统的垂直变形量;

n ——履带-地面耦合系统地面下陷指数。

2)履带-地面耦合系统的切向力为^[9]:

$$F_x = Ac + W \tan \varphi \quad (2)$$

式中: A ——履带的支撑面与土壤的接触面积;

c ——履带-地面耦合系统的粘聚系数;

W ——履带车辆的垂直载荷;

φ ——履带-地面耦合系统的摩擦角。

根据库仑公式,由式(2)得到履带-地面耦合系统的最大剪切应力为:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可知,履带-地面耦合系统的受力情况不仅与履带车辆的载荷、履带接地面积等履带车辆行走机构的特性参数有关,同时与土壤粘聚系数、土壤摩擦角等土壤力学特性参数也密切相关。而土壤力学特性又是十分复杂的,不仅不同类型的土壤,其土壤力学特性不同,即便相同类型的土壤,随着含水量的变化,土壤力学特性也截然不同。故此,为更好地分析履带-地面耦合系统的相互作用关系,需要对履带-地面耦合系统进行数学建模。

2 履带-地面耦合系统模型

履带-地面耦合系统的受力关系发生于履带车辆在地面土壤上行驶的任何时刻,对履带-地面耦合系统机理进行分析,发现履带板的支撑面、履刺表面和侧面与土壤有力的相互作用。此外,履带相对土壤运动时对堆积在履带旁边的土壤也有力的相互作用。将履带板的支撑面、履刺表面和侧面与土壤的相互作用称为履带-地面耦合系统的摩擦力,履带相对土壤运动时对堆积在履带旁边土壤的相互作用称为履带-地面耦合系统的侧面推土力。

2.1 履带-地面耦合系统的摩擦力

由于履带-地面耦合系统受力情况复杂,直接对履带-地面耦合系统的摩擦力求解是非常困难的,也是不准确的。故此,引入微分思想,将履带划分成若干个微元 $dx dy$,如图1所示。

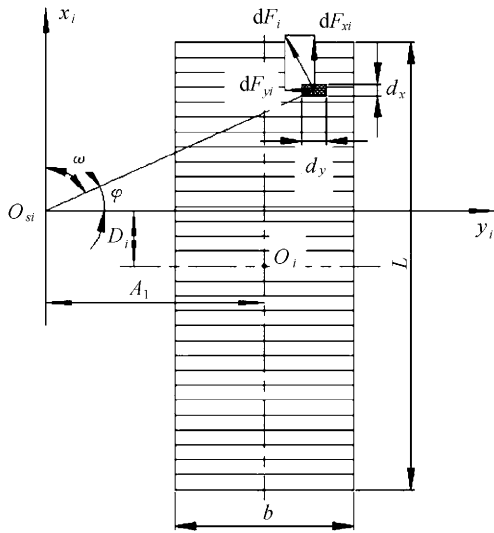


图 1 履带-地面耦合系统的摩擦力受力分析

首先对作用在每一微元 $dx dy$ 上的摩擦力 dF_i 求解:

$$dF_i = \mu p dx dy \quad (4)$$

式中: μ ——履带-地面耦合系统的摩擦系数;

p ——履带车辆的接地比压;

i ——第 i 条履带 ($i=1, 2$)。

而后,将微小的摩擦力 dF_i 投影到 x_i 轴和 y_i 轴得:

$$\begin{cases} dF_{x_i} = dF_i \cos\varphi = dF_i \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ dF_{y_i} = -dF_i \sin\varphi = -dF_i \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)两边进行积分,得到履带-地面耦合系统的摩擦力在 x_i 轴和 y_i 轴上的投影为:

$$\begin{cases} F_{x_i}^{(1)} = \iint dF_{x_i} = \int_{-(0.5l+D_i)}^{0.5l-D_i} \int_{A_i-0.5b}^{A_i+0.5b} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \frac{\mu F_{z_i}}{bl} \cdot dx dy \\ F_{y_i}^{(1)} = \iint dF_{y_i} = \int_{-(0.5l+D_i)}^{0.5l-D_i} \int_{A_i-0.5b}^{A_i+0.5b} \frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \frac{\mu F_{z_i}}{bl} \cdot dx dy \end{cases} \quad (6)$$

式中: l ——履带长度;

A_i ——履带车辆的横向偏移量;

D_i ——履带车辆的纵向偏移量;

F_{z_i} ——第 i 条履带的载荷。

最后,式(6)由力矩平衡原理可得履带-地面耦合系统的摩擦阻力矩为:

$$T_{O_i}^{(1)} = \iint (y - A_i) dF_{x_i} - \iint (x + D_i) dF_{y_i} = \int_{-(0.5l+D_i)}^{0.5l-D_i} \int_{A_i-0.5b}^{A_i+0.5b} \frac{y(y - A_i) + x(x + D_i)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \frac{\mu F_{z_i}}{bl} dx dy \quad (7)$$

2.2 履带-地面耦合系统的侧面推土力

当履带车辆在松软地面上行驶时,履带-地面耦合系统除了受到摩擦力外,还受到履带相对土壤运动时对堆积在履带旁边的土壤产生的侧面推土力。由 Bekker 的压力-下陷关系,履带在松软地面的下陷量为^[10]:

$$z = \left[\frac{p}{\left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right)} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\frac{F_{z_i}}{bl \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

履带相对土壤运动时对堆积在履带旁边的土壤产生侧面推土力时的受力情况如图 2 所示。

履带-地面耦合系统主要受到履带下部土壤对楔形土的作用力 N , 土壤单位面积上的内聚力 C 和单位长度的推土力 R 。图中, F 为单位长度的土楔重量, 由于履带侧面刮起土壤的质量极小,

导致 F 对履带-地面耦合系统的影响微乎其微, 所以为方便说明问题, 在下面的讨论中忽略不计^[11-12]。

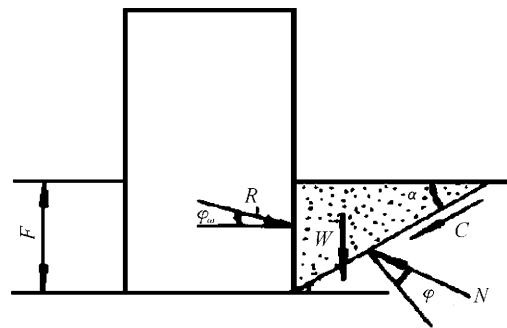


图 2 履带-地面耦合系统的侧面推土力受力分析

由图 2 可知,履带-地面耦合系统在 Y 轴和 Z 轴方向上受力平衡。根据力的平衡原理,有:

$$\sum Y = R \cos \varphi_{\omega} - zC \cot \alpha - N \sin(\alpha - \varphi) = 0 \quad (9)$$

$$\sum Z = 0 - R \sin \varphi_{\omega} - \gamma_s z^2 \frac{\cot \alpha}{2} - zC + N \cos(\alpha + \varphi) = 0 \quad (10)$$

式中: α ——破坏面角度;

φ_{ω} ——板壁摩擦角;

φ ——土壤内摩擦角;

γ_s ——土壤容重。

由式(9)和式(10)可得单位长度的推土力为:

$$R = \frac{\gamma_s z^2 \frac{\cot \alpha}{2} + zC[1 + \cot \alpha \cdot \cot(\alpha + \varphi)]}{\cos \varphi_{\omega} \cdot \cot(\alpha + \varphi) - \sin \varphi_{\omega}} \quad (11)$$

由式(11)很难求出侧面推土阻力 R 的准确数值解。但是观察式(11)不难看出,单位侧面推土阻力 R 是破坏面角 α 的函数, R 的最小值对应着一定的 α 值。故此,采用求导的方法来求解

R_{\min} 。为了方便计算,将式(11)整理成如下形式:

$$R = \frac{k_1 \cot^2 \alpha + k_2 \cot \alpha + \mu_1}{k_3 \cot \alpha + \mu_2} \quad (12)$$

式中:

$$k_1 = \frac{1}{2} r_s z^2 + zC \cot \varphi$$

$$k_2 = \frac{1}{2} r_s z^2 \cot \varphi$$

$$k_3 = \cos \varphi_{\omega} \cot \varphi - \sin \varphi_{\omega}$$

$$u_1 = zC \cot \varphi$$

$$u_2 = -\cos \varphi_{\omega} - \sin \varphi_{\omega} \cot \varphi$$

对式(12)进行求导计算,得:

$$\dot{R} = -\frac{k_1 k_3 \cot^2 \alpha + 2k_1 \mu_2 \cot \alpha + k_2 \mu_2 - k_3 \mu_1}{(k_3 \cot \alpha + \mu_2)^2 \sin^2 \alpha} \quad (13)$$

令 $\dot{R} = 0$, 同时分母不为零,求解式(13), α 为:

$$\cot \alpha = -\frac{-k_1 u_2 \mp \sqrt{k_1^2 u_2^2 - k_1 k_2 k_3 u_2 + k_1 k_3^2 u_1}}{k_1 k_3} \quad (14)$$

考虑到破坏面角 α 的实际意义,取:

$$\cot \alpha = -\frac{-k_1 u_2 + \sqrt{k_1^2 u_2^2 - k_1 k_2 k_3 u_2 + k_1 k_3^2 u_1}}{k_1 k_3} \quad (15)$$

故此,履带-地面耦合系统侧面推土产生的力 $F_{y_i}^{(2)}$ 为:

$$F_{y_i}^{(2)} = \int_0^{\frac{l}{2} + D_i} R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} dx + \int_{-(\frac{l}{2} + D_i)}^0 R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} dx = (2D_i + l) R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} \quad (16)$$

履带-地面耦合系统侧面推土产生的阻力矩为:

$$T_{o_i}^{(2)} = \int_{-0.5l_i}^0 R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} \cdot (-x) dx + \int_0^{0.5l_i} R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} \cdot x dx - F_{y_i}^{(2)} D_i = R_{\min} \cdot \cos \varphi_{\omega} \left(\frac{l_i^2}{4} - D_i^2 \right) \quad (17)$$

根据式(1)~式(17)对履带-地面耦合系统的机理分析,履带车辆在松软土壤上行驶时,履带-地面耦合系统的模型为:

$$\begin{cases} F_{x_i} = F_{x_i}^{(1)} \\ F_{y_i} = F_{y_i}^{(1)} + F_{y_i}^{(2)} \\ T_{o_i} = T_{o_i}^{(1)} + T_{o_i}^{(2)} \end{cases} \quad (18)$$

3 数值计算及仿真分析

某型履带车辆的主要技术参数见表 1。

表 1 某型履带车辆的主要技术参数

变量	数值
质量 m/kg	30 000
横向偏移量 A_i/m	12
履带宽度 b/m	1
履带长度 l/m	4

计算及仿真时所需的各松软土壤的主要特征参数见表 2。

表 2 各类型土壤力学特征参数

土壤类型	湿度/%	内聚力模量 $K_c /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+1)}$)	内摩擦模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+2)}$)	内聚力 $C /$ kPa	变形指数 n	内摩擦角 $\varphi /$ ($^\circ$)
粘性土	38	13.19	692.15	4.14	0.5	13
	55	16.03	1 262.53	2.07	0.7	10
重粘土	25	12.7	1 555.95	68.95	0.13	34
	40	1.84	103.27	20.69	0.11	6
雪		4.37	196.72	1.03	1.6	19.7

将表 1 和表 2 的参数代入式(1)~式(18)中,即可得履带车辆行驶时的履带-地面耦合系统数学模型。为了验证履带-地面耦合系统模型的准确性,并进一步分析履带-地面耦合系统在各松软土壤条件下的受力情况,利用 Recurdyn 进行仿真研究。履带-地面耦合系统的三维模型如图 3 所示。

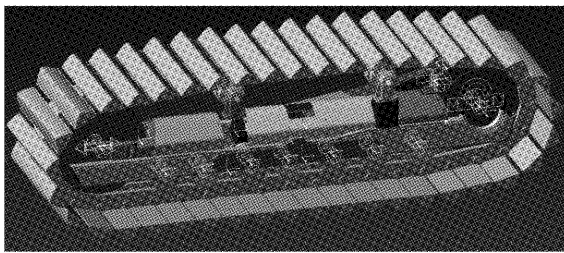


图 3 履带-地面耦合系统三维模型

文中主要研究履带-地面耦合系统的数学模型问题,即履带与地面相互作用的受力情况。而履带车辆是通过履带板将载荷作用到地面土壤的,地面土壤也是通过履带板将摩擦力等反作用给履带车辆的。故此,用履带板的受力情况即可来表征履带-地面耦合系统的受力情况。

分析履带-地面耦合系统在湿度 38% 的粘土和湿度 40% 的重粘土及雪三种土壤条件下履带板的受力对比情况,将履带板的受力进行分解,水平于履带板的受力为履带-地面耦合系统的纵向力,来自于履带车辆的行驶阻力,它可以表征土壤的抗剪切特性,如图 4 所示。

垂直于履带板的受力为履带-地面耦合系统的垂向力,来自于履带车辆及上方负重轮的载荷,它可以表征土壤的承压特性,如图 5 所示。

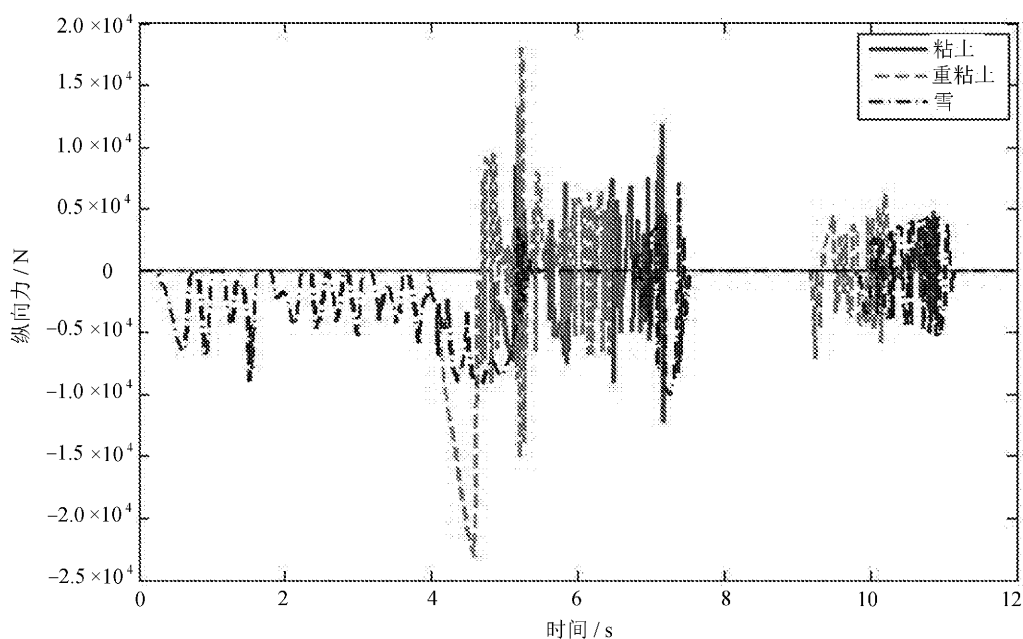


图 4 履带-地面耦合系统在三种土壤类型下纵向受力情况

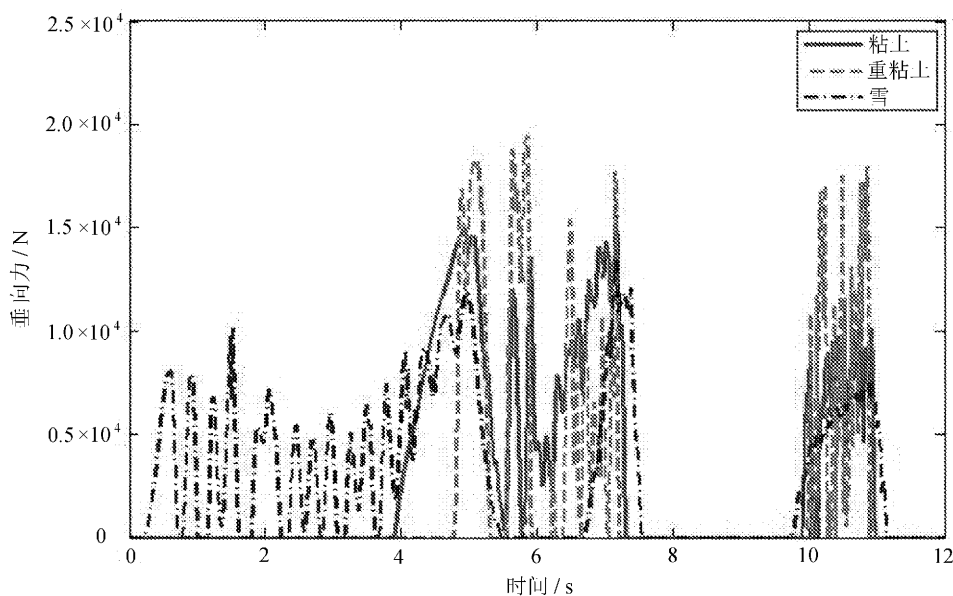


图5 履带-地面耦合系统在三种土壤类型下垂向受力情况

由于履带车辆在行驶过程中履带时刻绕卷地面,故图4和图5履带-地面耦合系统的受力情况也是呈周期性变化。其平均值与履带-地面耦合系统数学模型理论计算值基本相近,验证了文中履带-地面耦合系统模型的有效性。

4 结 语

对履带-地面耦合系统进行机理分析与建模。针对以往研究中以履带或地面土壤做单一对象而忽略了履带与地面相互作用的问题,提出履带-地面耦合系统的概念。通过地面力学基本理论,建立了履带-地面耦合系统数学模型。通过对履带-地面耦合系统相互作用时摩擦和侧面推土产生的力进行机理分析,分别建立了履带-地面耦合系统中摩擦力和侧面推土力的数学关系。利用地面力学特性参数和履带行走机构特性参数对履带-地面耦合系统进行了定量描述。

利用 Recurdyn 软件建立三维模型对履带-地面耦合系统的理论研究进行仿真验证。仿真分析验证了所提模型的准确性,也进一步揭示了履带-地面耦合系统的机理规律。该模型可为履带车辆的通过性和牵引性研究提供基础。

参考文献:

[1] 庄继德.计算汽车地面力学[M].北京:机械工业出版社,2002.
[2] 张克健.车辆地面力学[M].北京:国防工业出版社,

2002.

- [3] Bekker M G. Introduction to terrain-vehicle systems [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1969.
[4] Wong J Y. Theory of ground vehicles[M]. 4th ed. New York: Wiley,2008.
[5] 李力,李庶林.深海表层海泥模拟及地面力学特性研究[J].工程力学,2010,11:213-220.
[6] 李军,周靖凯,李强.基于贝克理论履带沉陷性能研究[J].农业装备与车辆工程,2012(2):14-16.
[7] Al-Milli S, Seneviratne L D, Althoefer K. Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain[J]. Journal of Terramechanics,2010,47(3):151-160.
[8] Umaru Samaila, Shaojun Liu, Qingyu Han. Modeling of miner track system during steering motion [J]. Journal of Central South University,2015(2): 502-510.
[9] 张滔,戴瑜,刘少军,等.深海履带式集矿机多体动力学建模与行走性能仿真分析[J].机械工程学报,2015,51(6):173-180.
[10] Janarthanan B, Padmanabhan C, Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: Simulation and experiment [J]. Journal of Terramechanics, 2012,49(2):63-72.
[11] 姚禹.基于履带-地面耦合系统的低速履带车辆通过性研究[D].长春:吉林大学,2016.
[12] 杨聪彬,董明明,顾亮,等.考虑履刺形状的履带板土壤推力研究[J].北京理工大学学报,2015,35(11):1118-1121.