

文章编号 1004-924X(2023)05-0719-10

履带装备超湿黏土壤土地面通过性研究

黄雪涛^{1,3}, 李玉琼^{2*}, 董明明³, 吕唯唯³, 李加坤¹

(1. 山东交通学院 汽车工程学院, 山东 济南 250357;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;

3. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 本文针对超湿黏土壤土地面履带装备通过性问题, 研究了履带装备黏土壤土通过性的评价指标。首先, 采集了黏土壤土的土壤样本和地面高程信息, 进行了黏土壤土的力学特性实验, 获取了土壤力学特性参数, 构建了地面不平度功率谱密度函数; 其次, 结合某履带装备结构参数, 构建了履带装备超湿黏土壤土地面通过性仿真模型, 以负重轮沉陷量为评价指标, 得出负重轮最大沉陷量 315.01 mm 小于装备离地间隙的结论; 研究了履带装备通过性的影响因素, 得出了履带装备在超湿黏土壤土上的通过性随装备行驶速度、履带预张紧力、地面等级、土壤黏聚模量的变化规律。本文的研究成果具有较强的工程实践意义, 可为履带装备的设计研发和优化升级提供理论指导和技术支撑。

关键词: 黏土壤土; 履带; 通过性; 评价指标

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233105.0719

Study on super-wetting clay soil trafficability of track equipment

HUANG Xuetao^{1,3}, LI Yuqiong^{2*}, DONG Mingming³, LV Weiwei³, LI Jiakun¹

(1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

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

3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

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

Abstract: To solve the trafficability problem of track equipment on super-wetting clay soil, this study investigates the evaluation indexes of track equipment trafficability on super-wetting clay soil, and suggests revised trafficability rules of the track equipment on super-wetting clay-soil ground using the equipment driving speed, pretension, ground grade, and soil cohesion modulus. First, soil samples of clay soil are collected and the mechanical properties are tested. The parameters of mechanical properties and ground elevation information are thus obtained, and the power spectral density function of ground roughness is developed. Combined with specific structural parameters of the track equipment, this study also constructed a ground trafficability simulation model of track equipment on super-wetting clay soil, and it considered the load wheels' sinkages as evaluation targets. Based on the results obtained, the maximum settlement of the road wheel is 315.01 mm, which is less than the ground clearance of track equipment. In addition, it ana-

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2022-07-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 301051103)

lyzed the influencing factors of track-equipment's trafficability and obtained the changing laws of the crawler equipment trafficability on super-wet clay soil using the equipment speed, crawler pretension, ground grade, and soil cohesion modulus. The research results of this paper have good potential for engineering application, and can provide theoretical guidance and technical support for track equipment design and optimization.

Key words: clay soil; track; trafficability; evaluation index

1 引 言

履带装备作为一种在工农业生产、国防、现代化建设、资源开采等领域发挥着重要作用的现代装备,必须能够在壤土、沙漠、雪地、沼泽、滩涂等复杂的环境中高效作业。然而,履带装备的越野通过性研究涉及到复杂多变的土壤力学特性、地面-履带耦合关系、地形地貌等信息,影响因素多,耦合关系复杂,是当今车辆地面力学领域研究的热点和难点之一。Yang等^[1]基于履带板的土槽实验,在传统 Bekker 承压模型的基础上,研究了沉陷量随土壤力学特性参数、土壤含水率及重复加载次数的变化规律;He等^[2]利用仿真分析和试验验证相结合的方法研究了重复加载工况下黏土土壤的沉陷特性;Olivier等^[3]基于有限元及多体动力学仿真技术研究了履带与地面之间的接触滑移摩擦机理;Gheshlaghi等^[4]研究了履带车辆负载作用下黏性壤土的沉陷特性及应力分布规律;Peiret等^[5]构建了车轮-砂石土壤的耦合系统仿真模型,通过试验验证和仿真分析相结合的方法,提出了一种表征车辆地面耦合作用关系的理论模型;Wasfy等^[6]研究了近代车辆地面力学的发展历史,分析了车辆-地面耦合关系的研究方法,并对今后车辆地面力学的发展趋势做出了预测;Mason等^[7]进行了车辆松软地面的通过性试验,提出了基于圆锥指数法的履带车辆松软路面通过性评判方法;Choi等^[8]、Gonzalez等^[9]分别研究了车辆的几何越障能力和车辆的软土通过能力,提出了基于地面高程信息及土壤力学信息的车辆越野通过性概率分布算法;McCullough^[10]、Wong等^[11]研究了北约参考机动性模型,提出了军用车辆越野通过性的评估方法和关键技术,并对下一代北约参考机动性模型的开发

等提出了建议;Nicolini等^[12]构建了考虑地面力学特性的履带车辆多体动力学仿真模型,分析了履带车辆的软地面几何越障能力;Karpman等^[13]研究了轮式装备在软地面上的通过性,并以土壤沉陷量为评价指标,分析了仿真结果与试验结果之间的误差;Parker等^[14]研究了高机动多用途车辆在硬地面上的牵引力、运动阻力及滚动阻力变化规律,并以挂钩牵引力为评价指标分析了高机动多用途车辆的通过性;李睿等^[15]提出了一种基于轨迹预测补偿的履带车辆滑动参数实时估计方法,并以滑移滑转率为评价指标,研究了履带车辆的越野通过性。综上所述,国内外的研究者主要研究了土壤的动态承载模型及沉陷特性,但对于超湿黏土壤土的力学特性研究却鲜有涉及;对于装备通过性的研究主要集中在几何越障能力分析 & 软土支撑通过性研究上,既考虑几何通过性又考虑软土支撑通过性的评估模型尚未建立。本文考虑到履带装备需在沼泽、水田等超湿黏土壤土地面上高效作业,以超湿黏土壤土地面为研究对象,研究其土壤力学特性及地面高程信息的获取方法,分析履带装备在超湿黏土壤土上通过性的评价指标,探讨履带装备地面通过性的影响因素及其影响规律,为履带装备设计研发提供技术支撑。

2 超湿黏土壤土力学特性参数获取

为了研究履带装备在超湿黏土壤土上的通过性,需构建黏土壤土的力学特性模型。然而,各地的土壤特性差异性很大,为了研究问题的方便,本文选取了某地区超湿黏土壤土作为研究对象,并采用实地采样的方式进行了土壤样本采集,采集到的黏土壤土样本如图 1 所示。以土壤

的圆锥指数和含水率为评价指标,确保实验室土样与采样点土样的一致性。超湿黏土壤土的承压特性选用 Bekker 承压模型来描述,即:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n = kz^n, \quad (1)$$

其中: p 为作用在单位面积上的压力, z 为载荷作用下超湿黏土壤土的沉陷量, b 为圆形压板的半径, n 为变形指数, k_c 为黏聚模量, k_ϕ 为摩擦模量。

采用威邦仪器设备有限公司生产的 WBE-9809 高精度电子万能试验机进行了 8 次黏土壤土的室内压板试验,压板分别采用半径为 70 mm 和 90 mm 的圆形压板,加载速率取 50 mm/min,施加的垂直载荷分别为 1 900 N(半径为 90 mm



图 1 采集的黏土壤土样本

Fig. 1 Collected sample of clay soil

压板)和 1 200 N(半径为 70 mm 压板),通过对试验数据的处理,得到土壤样本的承压特性参数如表 1 所示。

表 1 黏土壤土样本的承压特性参数

Tab. 1 Bearing characteristic parameters of clay soil samples

加载速度/(mm·min ⁻¹)	变形指数 n	黏聚模量 k_c /(kN·m ⁻⁽ⁿ⁺¹⁾)	摩擦模量 k_ϕ /(kN·m ⁻⁽ⁿ⁺²⁾)
50	2.1	315	59 000

黏土壤土的抗剪强度采用莫尔-库伦强度理论来描述,即:

$$\tau_{\max} = c + p \tan \varphi, \quad (2)$$

其中: τ_{\max} 为最大抗剪强度, c 为内聚力, p 为作用在土壤单位支撑面积上的垂直压力, φ 为内摩擦角。本文采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行了 16 次土壤样本的直剪实验,施加的垂直应力分别为 25 kPa、50 kPa、75 kPa、100 kPa,当样品达到平衡状态后以 2.4 mm/min 的剪切速率开始直剪实验,以剪应力 τ 为纵坐标,以剪位移 j 为横坐标,绘制土壤样本的剪切应力-剪位移关系曲线,如图 2 所示。

取超湿黏土壤土剪切应力-剪位移曲线上的峰值点作为抗剪强度,得到不同垂直压力下超湿黏土壤土的抗剪强度如表 2 所示,通过对试验数据的分析,利用摩尔-库伦定律计算得到超湿黏土壤土的内聚力 $c = 9.69$ kPa 及内摩擦角 $\varphi = 31.33^\circ$ 。

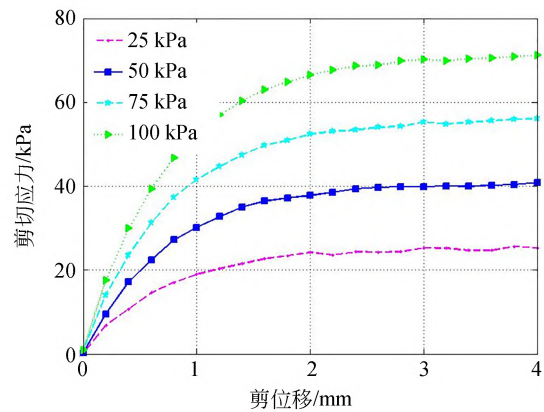


图 2 黏土壤土剪切应力-剪位移关系曲线

Fig. 2 Shear stress-displacement relation curve of clay soil

表 2 不同垂直压力下黏土壤土的抗剪强度

Tab. 2 Shear strength of clay soil under different vertical pressures

压力/kPa	抗剪强度/kPa
25	24.9
50	40.1
75	55.3
100	70.6

3 超湿黏土壤土地面高程信息采集

为了研究履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性,除了需分析土壤的力学特性外,还要对地面不平度信息进行采集。根据待测超湿黏土壤土地面试验条件,选用丹麦 Green Wood Profilograph 非接触式动态纵断面测试仪进行超湿黏土壤土地面的不平度测试,得到地面不平度实测数据如图 3 所示。

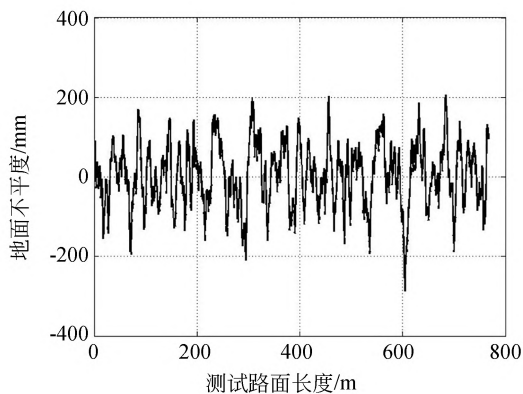


图 3 黏土壤土地面不平度实测数据

Fig. 3 Road roughness measured data of clay soil

然而,由于履带装备多是在田野、耕地、雪地、沙漠、沼泽等越野工况下工作,地面工况复杂且无固定的规律可循,在此前提下,单个路面的不平度信息对于履带装备整体通过性研究的意义不大。本文基于概率分布理论,采用地面不平度功率谱密度函数来构建超湿黏土壤土地面高程信息。将测量得到的地面不平度数据经傅里叶变换得到超湿黏土壤土地面不平度的功率谱密度函数,并按指数函数拟合,得到黏土壤土地面的不平度功率谱密度拟合结果如表 3 所示。

根据超湿黏土壤土地面的功率谱密度,将超湿黏土壤土按地面不平度划分为 7 个等级,各级

表 3 超湿黏土壤土地面不平度功率谱密度的拟合结果
Tab. 3 Power spectral density simulation results of ground roughness of clay soil

超湿黏土壤土	功率谱密度函数	
	$G_q(n_0)$	W
$n \leq 0.06$	1.08×10^{-1}	-1.15
$0.06 < n < 6.757$	1.15×10^{-2}	3.4

地面的 $G_q(n_0)$ 及 W 如表 4 所示。

表 4 超湿黏土壤土各级地面功率谱密度

Tab. 4 Power spectral density of all levels ground roughness of clay soil

地面等级	超湿黏土壤土	功率谱密度函数	
		$G_q(n_0)$	W
A	$n \leq 0.06$	0~0.016	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0~0.0016	3.4
B	$n \leq 0.06$	0.016~0.032	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0016~0.0032	3.4
C	$n \leq 0.06$	0.032~0.064	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0032~0.0064	3.4
D	$n \leq 0.06$	0.064~0.128	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0064~0.0128	3.4
E	$n \leq 0.06$	0.128~0.256	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0128~0.0256	3.4
F	$n \leq 0.06$	0.256~0.512	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0256~0.0512	3.4
G	$n \leq 0.06$	0.512~ $+\infty$	-1.15
	$0.06 < n < 6.757$	0.0512~ $+\infty$	3.4

由表 4 可知,随着地面等级由 A 到 G 逐级提高,参考空间频率 n_0 的地面谱值 $G_q(n_0)$ 逐渐变大,即地面不平度的高程差逐渐变大,地面变得崎岖不平。

4 履带装备黏土地面通过性评价

履带装备的通过性也称履带装备的越野性,指的是履带装备通过各种地面和地形的能力。目前,履带装备越野通过性的评价指标主要包括圆锥指数、平均最大接地压力、负重轮沉陷量、挂钩牵引力等^[10-11]。其中,圆锥指数法属于经验型公式,其判定方法快速简便但可靠性不高;平均最大接地压力法未考虑土壤的力学特性及履带与地面的复杂耦合关系,精确度不高;挂钩牵引力评价方法属于半经验方法,考虑了履带装备的结构参数及履刺的影响,具有一定的准确度,但未能考虑履带张紧力及履带环对地面的包络效果,仍有一定的局限性;负重轮沉陷量判定方法借助于动力学仿真技术,综合考虑了履带装备的

结构参数、地面地貌、土壤力学特性参数及履带与地面之间复杂的耦合关系,是现阶段较为精确的方法。故本文以负重轮沉陷量作为装备通过性的评价指标。

以某履带装备为研究对象,其结构参数如表 5 所示,整车离地间隙为 450 mm,采用 Bekker 承压模型及 Janosi 剪切模型作为土壤承载模型,根据土壤力学特性实验结果及黏土土壤地面不平度实测数据,借助于动力学仿真分析平台 Recurdyn,构建的履带装备在超湿黏土土壤地面上的通过性仿真模型如图 4 所示。

表 5 履带装备结构参数

Tab. 5 Structural parameters of track equipment

履带结构	半径或节距/mm	宽度/mm
诱导轮	300	350
托带轮	150	140
主动轮	300	500
负重轮	300	315
履带	148(节距)	500

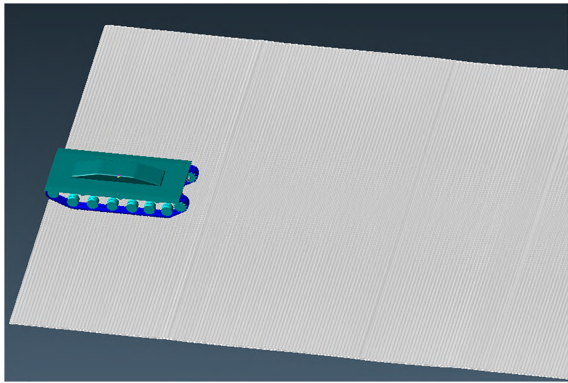


图 4 履带装备通过性模型

Fig. 4 Trafficability model of track equipment

为了研究履带装备在超湿黏土土壤地面上的通过性,基于构建的履带装备仿真模型,以负重轮沉陷量为研究对象,研究履带装备以 5 km/h 的速度在超湿黏土土壤地面上行驶时的动态特性,得到履带装备各负重轮沉陷量随时间变化的曲线如图 5 所示。履带装备各负重轮沉陷量的均值、方差及最大值如图 6 所示。

由图 5 和图 6 的分析可知,履带装备在超湿黏土土壤地面上行驶时,各负重轮沉陷量均值并不相同,其中,第一负重轮沉陷量的均值最大,为

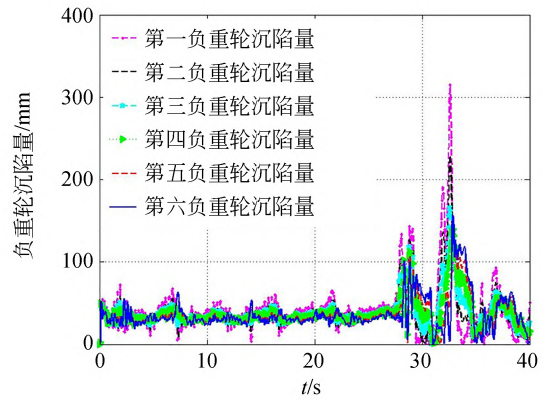


图 5 履带装备各负重轮沉陷量

Fig. 5 Sinkages of each track equipment load wheels

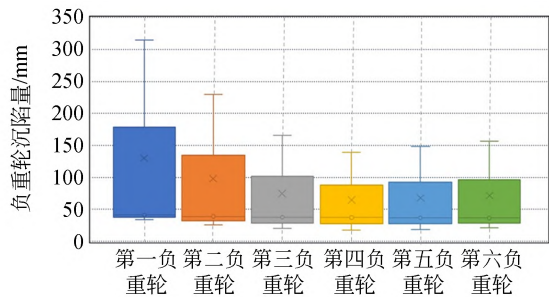


图 6 各负重轮沉陷量统计数据

Fig. 6 Sinkages statistical data of each load wheels

41.48 mm;第二至第六负重轮沉陷量的均值依次减小,分别为 38.82 mm、37.71 mm、37.18 mm、36.53 mm 及 36.21 mm,这主要是由于履带的铺路效应及弦效应造成的。各负重轮沉陷量的最大值也有明显变化,其中,第一负重轮最大,为 315.01 mm;第四负重轮最小,为 139.26 mm。由于该履带装备的离地间隙为 450 mm,大于负重轮最大沉陷量,故以负重轮的沉陷量为评价指标,该履带装备能通过该超湿黏土土壤地面。

5 履带装备通过性影响因素分析

履带装备在软地面上高速行驶时,履刺在土壤中嵌入弹出,土壤历经沉陷、剪切、滑移、破坏等过程,且履带与地面之间存在着复杂的耦合作用关系,履带装备的行驶速度、履带张紧力、地面高程信息、土壤力学特性参数等因素都对履带装备的软土通过性产生较大的影响。研究履带装备地面通过性的影响因素,分析各因素对履带装备通过性的影响规律,可为履带装备的设计研发

及优化升级提供理论基础及技术支持。

5.1 履带装备行驶速度

为了研究行驶速度对履带装备在超湿黏土壤土地面上通过性的影响规律,以第一负重轮的沉陷量为研究对象,分析履带装备分别以 5 km/h、10 km/h、15 km/h、20 km/h 的速度在超湿黏土壤土地面上行驶时负重轮沉陷量的变化规律,得到不同行驶速度下第一负重轮的沉陷量如图 7 所示。

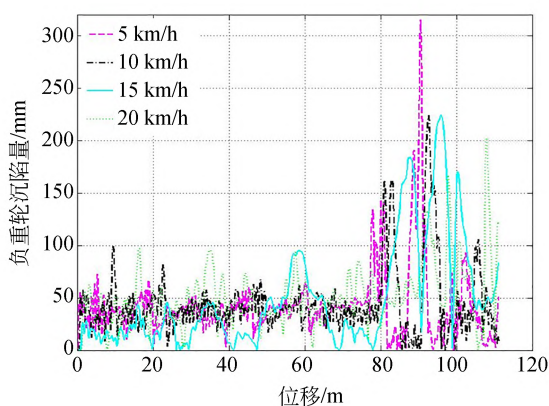


图 7 不同行驶速度下第一负重轮的沉陷量
Fig.7 Sinkages of the first load wheel with different speeds

履带装备在不同行驶速度下第一负重轮沉陷量的均值、方差及最大值如图 8 所示。

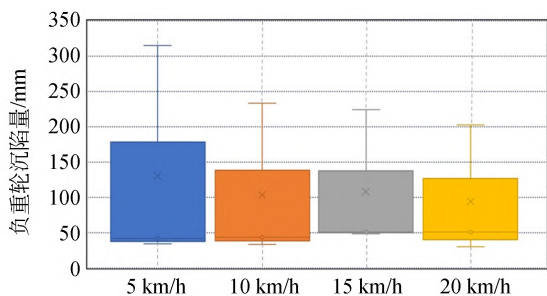


图 8 不同行驶速度下第一负重轮沉陷量的统计数据
Fig. 8 Sinkages statistical data of the first load wheel under different speeds

以履带装备的行驶速度为横坐标,以履带装备第一负重轮的沉陷量最大值为纵坐标,得到第一负重轮沉陷量最大值随行驶速度的变化趋势如图 9 所示。

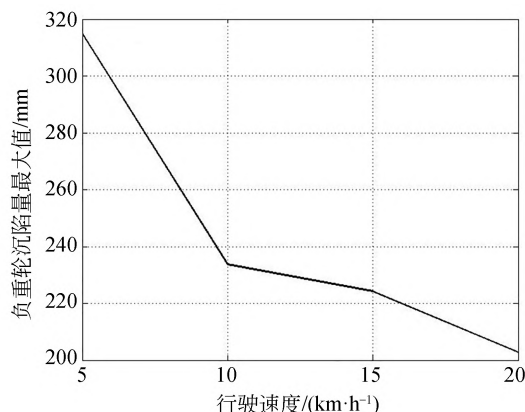


图 9 第一负重轮沉陷量最大值随行驶速度的变化趋势
Fig.9 Maximum sinkages variation rules of the first load wheel with driving speeds

由上面的分析可知,履带装备以不同的速度在超湿黏土壤土地面上行驶时,负重轮的沉陷量随行驶速度变化而发生明显的变化。当履带装备的行驶速度由 5 km/h 逐渐提高到 20 km/h 时,负重轮沉陷量的均值由 41.48 mm 逐渐增加到 50.67 mm,即负重轮沉陷量的均值随行驶速度的提高而增加,这主要是由于随着履带装备行驶速度的提高,履带装备对地面的冲击作用增加,故负重轮沉陷量的均值随行驶速度的增加而增加;负重轮沉陷量的最大值由 315.01 mm 逐渐减小到 202.77 mm,即负重轮沉陷量的最大值随行驶速度的提高而减小,这主要是由于随着行驶速度的提高,虽然履带装备对地面的冲击作用增加,但同时由于履带的铺路效应及沉陷的速度效应,使负重轮在未达到最大沉陷量之前,履带装备已通过该区域,故负重轮沉陷量的最大值随行驶速度的增加而减小。由于履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性取决于负重轮的最大沉陷量,故随着行驶速度的提高,履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性提高。

5.2 履带张紧力

为了研究履带张紧力对履带装备在超湿黏土壤土地面上通过性的影响规律,以履带装备第一负重轮的沉陷量为研究对象,分析履带装备以 10 km/h 的速度在超湿黏土壤土地面上行驶时,履带预张紧力分别为 5 000 N、6 000 N、7 000 N、8 000 N、9 000 N、10 000 N 时负重轮沉陷量的变化规律,得到不同预张紧力作用下履带装备第一负重轮的沉陷量如图 10 所示。

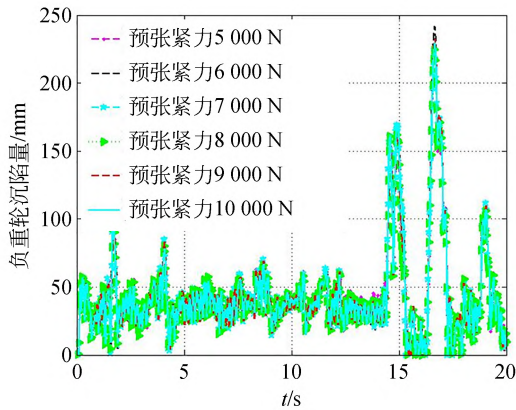


图 10 不同预张紧力下第一负重轮的沉陷量

Fig. 10 Sinkages of the first load wheel with different pretension

履带装备在不同预张紧力下第一负重轮沉陷量的均值、方差及最大值如表 6 所示。

表 6 不同预张紧力下第一负重轮沉陷量数据

Tab. 6 Sinkages data of the first load wheel under different pretensions

预张紧力/ N	沉陷量		
	均值/mm	均方差/mm	最大值/mm
5 000	43.49	33.04	223.70
6 000	43.28	35.31	221.65
7 000	43.00	34.41	218.48
8 000	42.67	33.33	214.46
9 000	42.59	34.27	212.48
10 000	42.47	34.42	209.62

以履带预张紧力为横坐标,以第一负重轮的沉陷量最大值为纵坐标,得到履带装备负重轮沉陷量最大值随履带预张紧力的变化趋势如图 11 所示。

由上面的分析可知,当履带装备的预张紧力分别为 5 000 N、6 000 N、7 000 N、8 000 N、9 000 N、10 000 N 时,履带装备的负重轮沉陷量随之变化,其中负重轮沉陷量的均值由预张紧力为 5 000 N 时的 43.49 mm 逐渐减小到预张紧力为 10 000 N 时的 42.47 mm,即负重轮均值随着履带预张紧力的增加而减小;负重轮沉陷量最大值也由 223.70 mm 逐渐降为 209.62 mm,且随着预张紧力的变大,负重轮沉陷量最大值变小的趋势减弱,这主要是由于履带的铺路作用造成的,履

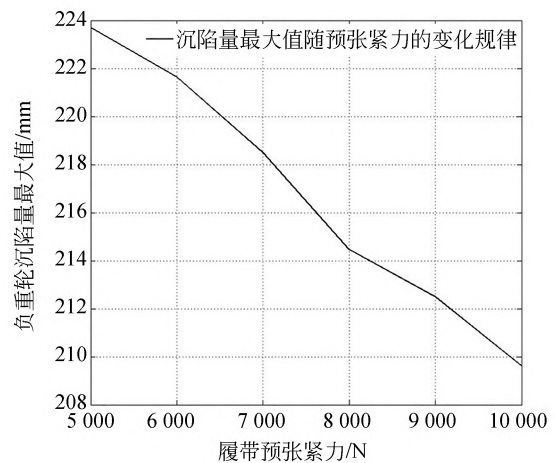


图 11 沉陷量最大值随预张紧力的变化趋势

Fig. 11 Maximum sinkages variation rules with pretensions

带的预张紧力越大,履带在规定载荷下的变形能力越弱,即履带预张紧力越大,履带的扭转刚度越大,负重轮的沉陷量也就越小,而当履带预张紧力达到一定数值后,在规定载荷作用下履带的弯曲变形量会逐渐趋向于一定值,即负重轮沉陷量增加的趋势不明显。故履带装备在超湿黏土土壤土地面上的通过性随着履带预张紧力的增大而提高。

5.3 地面高程信息变化

为了研究地面高程信息变化对履带装备在超湿黏土土壤土地面上通过性的影响规律,以履带装备第一负重轮的沉陷量为研究对象,分析履带装备以 10 km/h 的速度在不同地面等级的超湿黏土土壤土地面上行驶时负重轮沉陷量的变化规律,得到履带装备在不同等级超湿黏土土壤土地面上行驶时第一负重轮沉陷量的变化情况如图 12 所示。

履带装备通过不同等级的超湿黏土土壤土地面时第一负重轮沉陷量的均值、方差及最大值如表 7 所示。

随着地面等级由 A 级向 E 级逐级提高,超湿黏土土壤土地面不平度高程差逐渐增加,履带装备第一负重轮沉陷量的均值由 30.16 mm 逐渐增加到 55.78 mm,其最大值也由 A 级地面的 57.86 mm 逐渐增加到 E 级地面的 286.34 mm,负重轮沉陷量的最大值随地面等级的提高而逐渐增大,即履带装备超湿黏土土壤土地面通过性随地面等级提高而降低。

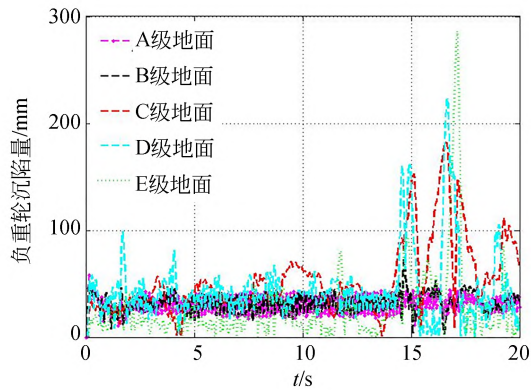


图 12 不同地面等级下的沉陷量

Fig. 12 Sinkages with different ground level

表 7 第一负重轮通过不同等级地面时沉陷量

Tab. 7 Sinkages of the first load wheel passing through different ground

地面等级	沉陷量		
	均值/mm	均方差/mm	最大值/mm
A	30.16	7.49	57.86
B	31.52	8.81	72.51
C	36.41	34.02	183.59
D	43.49	33.04	223.70
E	55.78	34.56	286.34

5.4 土壤力学特性参数

为了研究土壤力学特性参数对履带装备在超湿黏土土壤地面上通过性的影响规律,以履带装备第一负重轮的沉陷量为研究对象,分析履带装备以 10 km/h 的速度在黏聚模量分别为 $3.15 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^{n+1}$ 、 $6.30 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^{n+1}$ 、 $1.26 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^{n+1}$ 、 $2.52 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^{n+1}$ 的超湿黏土土壤地面上行驶时负重轮沉陷量的变化规律,得到履带装备在不同土壤力学特性的超湿黏土土壤上行驶时第一负重轮沉陷量的变化情况如图 13 所示。

履带装备在不同黏聚模量的超湿黏土土壤地面上行驶时,第一负重轮沉陷量的均值、方差及最大值如表 8 所示。

以超湿黏土土壤的黏聚模量为横坐标,以履带装备第一负重轮的沉陷量最大值为纵坐标,得到履带装备负重轮沉陷量最大值随土壤黏聚模量的变化趋势如图 14 所示。

由表 8 及图 14 可知,当履带装备行驶在不同

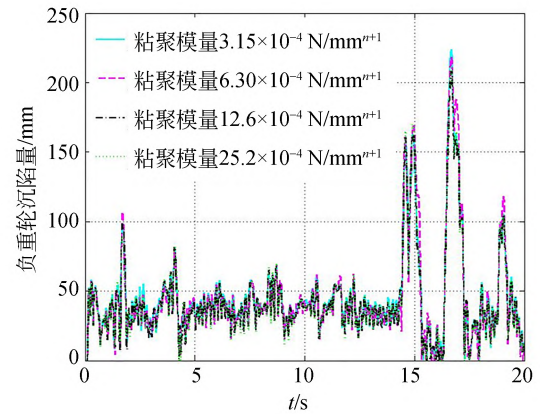


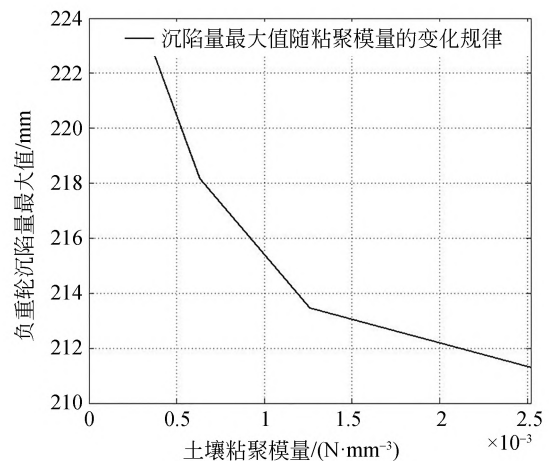
图 13 不同黏聚模量下第一负重轮的沉陷量

Fig. 13 Sinkages of the first load wheel under different cohesive modulus

表 8 不同黏聚模量土壤第一负重轮沉陷量

Tab. 8 Sinkages of the first load wheel under different cohesive modulus

黏聚模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-n-1}$)	沉陷量		
	均值/mm	均方差/mm	最大值/mm
3.15×10^{-4}	43.49	33.04	223.70
6.3×10^{-4}	42.95	35.13	218.17
1.26×10^{-3}	42.19	32.28	213.46
2.52×10^{-3}	42.09	32.98	211.29

图 14 第一负重轮沉陷量最大值随黏聚模量的变化趋势
Fig. 14 Maximum sinkages variation rules of the first load wheel with cohesive modulus

力学特性的超湿黏土土壤地面上时,负重轮沉陷量的均值和最大值均随着土壤黏聚模量的变化而变化。负重轮沉陷量的均值随土壤黏聚模量的增大而减小,即由黏聚模量为 $3.15 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^{n+1}$

黏土地面的 43.49 mm 逐渐减小到 $2.52 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^{n+1}$ 黏土地面的 42.09 mm; 负重轮沉陷量的最大值也随着土壤黏聚模量的增大而减小, 即由黏聚模量为 $3.15 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^{n+1}$ 黏土地面的 223.70 mm 逐渐减小到 $2.52 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^{n+1}$ 黏土地面的 211.29 mm, 且随着土壤黏聚模量的增大, 负重轮沉陷量最大值降幅逐渐变小, 即随着土壤黏聚模量的持续增加, 负重轮沉陷量最大值变小的趋势变缓。由于履带装备的软土通过性取决于负重轮沉陷量最大值, 故履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性随土壤黏聚模量增大而提高。

6 结 论

本文研究了履带装备在超湿黏土壤土地面通过性的评价指标及影响因素, 基于超湿黏土壤土的力学特性实验及地面高程信息, 构建了履带装备超湿黏土壤土地面通过性的仿真模型, 并以履带装备的负重轮沉陷量为评价指标, 分析了履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性, 探讨了履带装备通过性的影响因素, 并得出了如下

结论:

(1) 随着履带装备行驶速度的提高, 负重轮沉陷量的最大值由 5 km/h 时的 315.01 mm 逐渐减小到 20 km/h 时的 202.77 mm, 负重轮沉陷量的最大值随行驶速度的提高而逐渐减小, 即履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性随行驶速度的提高而增强。

(2) 随着履带预张紧力的提高, 负重轮沉陷量的最大值由预张紧力为 5 000 N 时的 223.70 mm 逐渐减小到预张紧力为 10 000 N 时的 209.62 mm, 即履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性随履带张紧力的提高而增强。

(3) 随着地面等级的提高, 负重轮沉陷量的最大值由 A 级地面的 57.86 mm 逐渐增加到 E 级地面的 286.34 mm, 即履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性随地面等级的提高而降低。

(4) 随着土壤黏聚模量的提高, 负重轮沉陷量的最大值由黏聚模量为 $3.15 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^{n+1}$ 超湿黏土地面的 223.70 mm 逐渐减小到 $2.52 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^{n+1}$ 超湿黏土地面的 211.29 mm, 即履带装备在超湿黏土壤土地面上的通过性随土壤黏聚模量的增大而增强。

参考文献:

- [1] YANG C B, YANG G, LIU Z F, *et al.* A method for deducing pressure-sinkage of tracked vehicle in rough terrain considering moisture and sinkage speed [J]. *Journal of Terramechanics*, 2018, 79: 99-113.
- [2] HE J, WU D L, MA J, *et al.* Research on repeated loading and sinkage characteristics of soil by numerical analysis [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 300(2): 022153.
- [3] OLIVIER B, VERLINDEN O, KOUROUSSIS G. A vehicle/track/soil model using co-simulation between multibody dynamics and finite element analysis [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2020, 8(2): 135-158.
- [4] GHESLAGHI F, MARDANI A. Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics [J]. *Journal of Terramechanics*, 2021, 95: 7-14.
- [5] PEIRET A, KARPMAN E, KOVÁCS L L, *et al.* Modelling of off-road wheeled vehicles for real-time dynamic simulation [J]. *Journal of Terramechanics*, 2021, 97: 45-58.
- [6] WASFY T, JAYAKUMAR P. Next-generation NATO reference mobility model complex terramechanics-Part 1: definition and literature review [J]. *Journal of Terramechanics*, 2021, 96: 45-57.
- [7] MASON G L, SALMON J E, MCLEOD S, *et al.* An overview of methods to convert cone index to bevameter parameters [J]. *Journal of Terramechanics*, 2020, 87: 1-9.
- [8] CHOI K K, JAYAKUMAR P, FUNK M, *et al.* Framework of reliability-based stochastic mobility map for next generation NATO reference mobility model [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2019, 14(2): 1-10.
- [9] GONZALEZ R, JAYAKUMAR P, IAGNEMMA K. Generation of stochastic mobility maps for large-scale route planning of ground vehicles: a case study [J]. *Journal of Terramechanics*, 2017, 69: 1-11.
- [10] MCCULLOUGH M, JAYAKUMAR P, DASCH J, *et al.* The Next Generation NATO

- Reference mobility model development [J]. *Journal of Terramechanics*, 2017, 73: 49-60.
- [11] WONG J Y, JAYAKUMAR P, TOMA E, *et al.* Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance[J]. *Journal of Terramechanics*, 2018, 80: 31-48.
- [12] NICOLINI A, MOCERA F, SOMÀ A. Multi-body simulation of a tracked vehicle with deformable ground contact model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 2019, 233 (1) : 152-162.
- [13] KARPMAN E, KÖVECSÉS J, HOLZ D, *et al.* Discrete element modelling for wheel-soil interaction and the analysis of the effect of gravity [J]. *Journal of Terramechanics*, 2020, 91: 139-153.
- [14] PARKER M, STOTT A, BODIE M, *et al.* Vehicle mobility on highly organic soils [J]. *Journal of Terramechanics*, 2021, 98: 16-24.
- [15] 李睿, 项昌乐, 王超, 等. 自动驾驶履带车辆鲁棒自适应轨迹跟踪控制方法[J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1128-1137.
- LI R, XIANG C L, WANG C, *et al.* Robust adaptive trajectory tracking control approach for autonomous tracked vehicles [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1128-1137. (in Chinese)

作者简介:



黄雪涛(1978—),男,山东东明人,博士,副教授,2014年于北京理工大学获博士学位,主要从事履带式装备越野通过性研究。E-mail: xuetaohuang@163.com

通讯作者:



李玉琼(1982—),男,湖南娄底人,研究员,2010年于北京理工大学获得博士学位,主要从事车辆地面力学,星壤力学探测与模型构建研究。E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn