

韩彦勇,都兴隆. 水田土壤参数对履带式收获机转向阻力的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(18):214-217.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.055

# 水田土壤参数对履带式收获机转向阻力的影响

韩彦勇, 都兴隆

(郑州科技学院机械工程学院,河南郑州 450064)

**摘要:**为分析土壤参数对履带收获机水田转向阻力的影响,以土壤参数为基础建立转向阻力矩数学模型,进行相关理论分析和水田土壤参数试验得出转向阻力矩,并实车试验进行数据比较。结果表明,先通过田间土壤参数试验,再通过数学模型求转向阻力矩这一方法正确和可行,为今后履带车辆田间试验研究和车辆设计提供了依据。

**关键词:**履带车辆;转向阻力矩;土壤参数;试验研究

**中图分类号:** S215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)18-0214-04

履带收获机在软地面转向不同于硬地面,由于履带下陷,会受到土壤参数因素的影响,研究土壤参数如土壤内聚力、土壤内摩擦角对转向阻力矩的影响对车辆设计、改善车辆转向性能意义重大。本研究通过查阅相关文献建立了以土壤参数为基础的转向阻力矩数学模型,经理论分析与实车试验比较,验证其正确性和可行性,拟找出一种转向阻力矩的计算方法,为今后履带车辆的设计和转向阻力矩试验研究提供理论依据。

## 1 履带车辆与地面相互作用的国内外研究现状

目前在研究车辆与地面相互作用关系中,主要有2种方法:一种是做一些试验测试,进行一些简单的模型分析和在试验基础上建立的半经验模型分析。这种方法研究的是车轮和履带与地面的力学关系,研究车辆在地面上行驶时,轮子或履带对地面的作用力,研究地面性质,分析土壤参数,再推导出包含车辆和土壤参数的简化方程式,代表人物是贝克,运用这种方法可对仿真模型进行计算机快速模拟<sup>[1]</sup>。另一种方法是应用塑性理论或有限元分析技术。如果知道车轮或履带下土壤颗粒的速度场,就可以应用塑性理论或有限元分析技术计算出土壤应力,然后再计算出土壤的应变和相应的应变率,再根据相关的最新塑性理论计算出车轮或履带下的应力<sup>[2]</sup>。这方面代表人物有 Ingobert, Ingobert 是第1个提出并用有限元技术来分析履带与地面之间相互作用的。由于地面的复杂性,特别是软地面,其含水量在不同深度是不同的,其受力变形也是不同的,建立能够全面分析车辆与地面相互作用的模型公式是不可能的,即使建立出来,也是不切实际的,所以要

针对不同的地面进行不同的分析。很多学者针对不同的车辆与地面作用情况,忽略一些对分析影响小的因素,建立一些能够适用于各自工况的轮胎或履带地面接触模型。如卡拉费斯等假设车辆在软地面转向时,履带车辆或轮胎的纵向变形和侧向变形是相互不干扰,相互不影响的,他提出了一个轮胎中心线变形形状和轮胎断面变形形状的理论<sup>[3-4]</sup>。此外车辆在软地面行驶时哈尔滨工业大学的苗常青等将车辆轮胎与软地面的相互作用假设为轮胎与刚性曲面的刚性滑移接触,利用哈尔滨工业大学编制的有限元软件分析了车辆与土壤之间的相互作用关系<sup>[5]</sup>。

目前软地面转向阻力矩公式大部分只考虑履带板与地面的摩擦阻力,这些公式大都没有考虑侧面推土。很多学者经过大量试验总结出了履带转向系数的经验公式,如尼基金根据转向阻力测试试验结果,确立了计算平均转向阻力系数 $\mu_t$ 值的经验公式。

霍克(HOCK)推荐的计算公式为

$$\mu_t = \frac{\mu_{\max}(R=0)}{(1 + \frac{R}{B/2})^n} \times (1 - \frac{R}{R_k}) (\frac{R}{B} \geq 0)。$$

式中: $\mu_{\max}$ 为车辆中心转向时转向阻力系数最大值; $R$ 为转向半径,m; $B$ 为履带中心距,m; $n$ 为履带张力指数,在经验值0.2~0.5范围内选取; $R_k$ 为履带自有转向半径,m,考虑了由间隙和弹性等造成的履带自有弯曲。

Kar 和 Ehlert 转向阻力系数模型为

$$\mu_t = E_1 (1 - e^{-\frac{CML}{G}}) (1 - e^{-\frac{CML}{G_0}})。$$

式中: $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 为常数,其值分别为0.95、-0.1、-0.1; $CI$ 为土壤圆锥指数; $b$ 为履带宽度,m; $L$ 为履带接地长度,m; $G$ 为履带车辆质量,kg。

$$S_{Lo} = \frac{B/2}{R + B/2}, S_{Li} = \frac{B/2}{R - B/2}。$$

收稿日期:2016-04-13

基金项目:河南省教育厅重点科技攻关项目(编号:14A460015)。

作者简介:韩彦勇(1984—),男,河南开封人,硕士,讲师,主要从事机械自动化研究。E-mail:88669936@qq.com。

Applied Earth Observation and Geoinformation,2013,23(8):397-410.

[7]唐巍,覃志豪,秦晓敏. 农业干旱遥感监测业务化运行方法研究[J]. 遥感信息,2007(2):37-41,插3.

[8]杜国明,贾良文. 薄板样条函数在空间数据插值中的应用[J].

计算机工程与应用,2009,45(36):238-240.

[9]高懋芳,张虹鸥,秦晓敏,等. 广东省农业旱灾遥感监测[J]. 国土资源遥感,2008(3):94-99,插8.

[10]李海亮,戴声佩,胡盛红,等. 基于空间信息的农业干旱综合监测模型及其应用[J]. 农业工程学报,2012,28(22):181-188.

式中:  $S_{L_o}$  为外侧履带的相对值;  $S_{L_i}$  为内侧履带的相对值。

$$\text{转向阻力矩 } M = \frac{\mu_i GL}{4} \left[ 1 - \frac{v^4}{(gR\mu_i)^2} \right]$$

式中:  $v$  为转向速率,  $m/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

这些转向阻力系数经验公式都是经过大量试验证明的,在不考虑侧面推土情况下,都可以应用。

北京工业学院的魏宸官研究履带车辆转向问题时,根据履带车辆转向时,高、低速履带产生的滑转和滑移现象研究履带车辆在转向过程中各参数间相互关系的理论<sup>[6]</sup>。这一理论建立了履带车辆匀速转向时,转向的运动学和动力学参数间的关系。根据这一理论所推导的公式,可以通过测定转向过程的运动学参数来计算和确定转向时的动力学参数;反之,当已知动力学参数时,也可以计算出运动学参数。

装甲兵工程学院的方志强在分析履带与地面相互作用的基础上,基于滑转滑移条件讨论履带车辆平稳转向的实际过程中,导出履带牵引力、制动力、转向阻力矩、转向半径和转向角速度的表达式,与传统转向理论的相关结果作了定量比较,并进行了实车试验<sup>[7]</sup>。结果表明,建立的考虑履带打滑时的转向模型更符合履带车辆转向实际。

上面 2 位研究者在研究履带的转向阻力时都未考虑车体下陷,侧面推土引起转向阻力矩,因此所推导公式适用于履带车辆在水田进行大半径转向时的受力情况,不太适合分析履带车辆在水田原地转向时的受力情况。

吉林工业大学孙海涛在研究软地面转向阻力时,根据贝克推荐的载荷沉陷量与土壤参数的关系,建立数学模型,分析履带侧面的推土力<sup>[5]</sup>。这种方法涉及到一些土壤参数,须要知道土壤参数后才能应用,本研究中用到了此公式。

## 2 基于土壤参数的转向阻力矩

履带在水田中转向时,受到履带与地面摩擦产生的转向阻力矩和由于履带下陷而使履带侧面推土引起的转向阻力矩,总转向阻力矩是 2 个阻力矩之和。

### 2.1 履带与地面摩擦产生的转向阻力矩

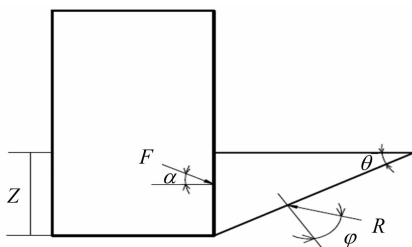
在计算履带与地面摩擦产生的转向阻力矩时不考虑 2 个履带的滑转,普遍采用的转向阻力矩表达式为

$$M_z = -\frac{Mg\mu L}{4} \quad (1)$$

式中:  $M_z$  为履带与地面摩擦产生的转向阻力矩,  $N \cdot m$ ;  $\mu$  为车辆转向时转向阻力系数;  $M$  为车辆质量,  $kg$ 。

### 2.2 侧面推土引起的转向阻力矩

方法 1: 假如忽略侧面刮起土堆的质量,履带作用力状态如图 1 所示<sup>[8]</sup>。



Z—履带下陷深度; F—推土阻力; R—下部土壤对楔形土的反作用力

图1 履带侧面的作用力

履带两侧任一单位长度上推土阻力  $F$  可从力的平衡式中得到:

$$F \cos \alpha + ZC \operatorname{ctg} \theta - R \sin(\theta + \varphi) = 0; \quad (2)$$

$$F \sin \alpha + ZC - \gamma Z^2 \operatorname{ctg} \theta - R \cos(\theta + \varphi) = 0. \quad (3)$$

式中:  $Z$  为履带下陷深度;  $R$  为下部土壤对楔形土的反作用力;  $\gamma$  为土壤密度;  $C$  为单位面积上的内聚力;  $\alpha$  为侧面推土力与水平面的夹角;  $\theta$  为破坏面角度;  $\varphi$  为土壤内摩擦角。

$$F = \frac{\gamma Z^2 g \operatorname{ctg} \theta / 2 + ZC [1 + \operatorname{ctg} \theta \operatorname{ctg}(\theta + \varphi)]}{\cos \alpha \operatorname{ctg}(\theta + \varphi) - \sin \alpha} \quad (4)$$

式中:  $g$  为重力加速度。

由于  $M$  是  $\theta$  的函数,  $M$  的最小值对应着一定的  $\theta$  值,地面被破坏时,可以测量出  $\theta$ , 从而可以求出  $F$ , 进而得到侧面单侧履带推土阻力产生的转向阻力矩:

$$M = \int_{-l/2}^0 F \cos \alpha (-x) dx + \int_0^{l/2} F \cos \alpha \cdot x dx = F \cos \alpha \frac{l^2}{4} \quad (5)$$

式中:  $x$  表示单位推土力与履带中心的距离;  $l$  表示履带接地长度;  $F_1$  表示侧面推土阻力产生的侧向力, 其值为

$$F_1 = - \int_0^{l/2} F \cos \alpha dx \quad (6)$$

履带车辆在软地面的转向阻力矩就是  $2M + M_z$ 。

## 3 土壤参数测定

### 3.1 土壤抗剪强度

土壤的抗剪强度,是直接影响农业机械行走装置能否充分发挥驱动力和能否在湿软地上顺利通过等性能的主要参数之一,它对设计什么样的行走装置可以避免破坏土层结构,防止下陷、打滑,减少牵引阻力等具有重要意义。很久以来,土壤剪切试验就一直是经典土壤力学中的主要土壤强度试验。

第二次世界大战期间,英国的 Micklethwaite 提出测定土壤摩擦力及内聚力以及根据库伦公式计算履带车辆可能发挥的最大推力。各种材料适用的强度理论不相同,对于土壤则大多采用 Mohr - Coulomb 理论。土壤是一种很复杂的介质,纯理论分析很困难,为此往往要作一些假设。但假设后,理论与实际观察结果又往往脱节。因此,将理论与实际观察相结合的半经验公式,既简单又比较有用。库伦根据平面直剪试验结果,把土壤抗剪强度表示为由土壤粒子间的黏着力和摩擦力 2 项组成的半经验公式,即

$$\tau_{\max} = C + \sigma \tan \varphi. \quad (7)$$

式中:  $\tau_{\max}$  为土壤的抗剪强度;  $\sigma$  为剪切面上的垂直压强。剪切试验受力示意图 2。

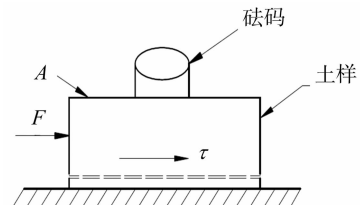


图2 剪切试验受力图示

土样的截面积为  $A$ , 再在土样上施加 1 个法向力  $N$ , 则土样所受到平均法向力  $\sigma = \frac{N}{A}$ , 剪切破坏时的最大水平力  $F$  除以土样面积  $A$  就是抗剪强度  $\tau_{\max}$ 。

式(7)说明土壤抗剪强度与剪切面上的垂直压强成正比。公式(7)可表示成如图3所示的形式。“库伦定律”如用文字叙述则为“沙土的抗剪强度等于法向应力与内摩擦系数之积的内摩擦力;黏土的抗剪强度则为内摩擦力与内聚力之和”。影响土壤抗剪强度的因素一是有有效载荷与摩擦系数所

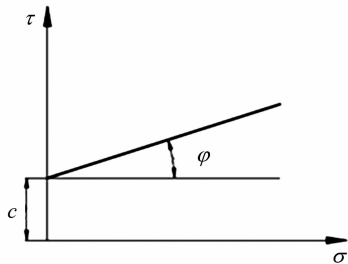


图3 土壤抗剪强度-压应力关系

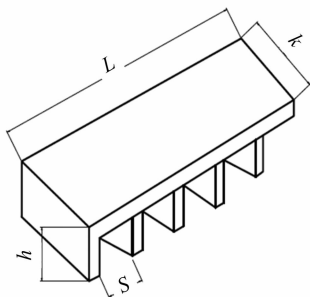


图4 平移剪切头

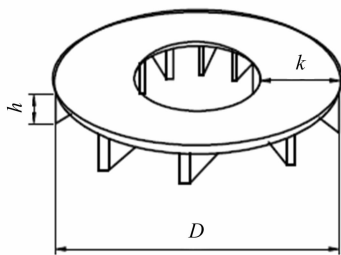


图5 圆环剪切头

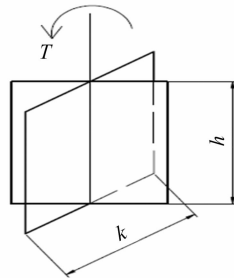


图6 十字板剪切头

平移剪切仪的特点是土壤受剪时的剪力大小与剪切时的速率分布都是一致的,它比较符合车辆行走装置在田间行走时的实际情况。但它也有很多缺点,如剪切时需要机械拖曳,即需要拖拉机或电力绳索牵引,这样在试验使用上增添了很多麻烦。此外,平移剪切仪还由于加载和记录等机构比较大和复杂,使仪器质量和外形比较大,对于使用、携带等都是不利的。因此,平移式剪切仪已逐步局限在实验室使用,而在田间已多被扭转式剪切仪所代替。

3.2 含水率与内聚力试验

根据文献查得水稻田的含水饱和度为30%~34%<sup>[9]</sup>,本试验测得为32.9%,一般履带车辆在水稻田收割时含水量都是达到饱和状态的,但有时候由于天气和收割时间的原因,水稻田的含水量达不到饱和状态。根据相关报道可知,在正应力不变的情况下,含水量对土壤强度的影响主要表现在黏结力C随含水量的增加而下降,而内摩擦角值变化较小<sup>[10]</sup>,因此本试验略去含水量对内摩擦角的影响。为了解不同含水率下,土壤内聚力值的变化,在正应力不变的情况下做了不同含水率下的土壤抗剪强度试验,通过曲线拟合知道了内聚力与含水量的关系。

由于摩擦角变化较小,并且砝码质量一定,笔者认为公式  $\tau = C + \sigma \times \text{tg}\phi$  中  $\sigma \times \text{tg}\phi$  值一定,因此笔者根据仪器读数算出推土力,然后再计算出内聚力。计算不同含水率下的土壤内聚力,列入表1,根据相关报道可知,土壤的内聚力与含水率有关,呈幂函数关系<sup>[11]</sup>。用待定系数法求出式  $C = a\omega^b$  中的 a、b 值,其中 C 是内聚力,ω 是含水率(%),用 Matlab 拟合含水率与内聚力的幂指数关系,得到关系式:

决定的内摩擦阻力,二是由土壤属性所决定的土壤内聚力。

第二次世界大战期间,英国的 Micklethwaite 提出测定土壤摩擦力及内聚力以及根据库伦公式  $\tau_{\text{max}} = C + \sigma \text{tg}\phi$  计算履带车辆可能发挥的最大推力。差不多在同时,贝克在加拿大发展了第1台进行这种测定的野外用的仪器,后来叫作贝氏仪。目前世界各国根据自己的特点,对贝氏仪进行了各种不同形式的设计,但总的来说这种类型的仪器都包括承压(垂直应力-应变关系)和剪切(水平应力-应变关系)。

在我国,土壤剪切试验早期多局限于实验室内进行,所使用的仪器亦多是土工上常用的土壤盒平移式剪切仪(图4)。剪切试验从实验室逐渐到田间大概始于20世纪50年代后期和60年代初期。仪器形式除平移剪切外也逐渐采取扭转剪切形式。扭转剪切有用圆形截面或环形截面剪切头的,如图5所示;也有用十字板形式的,如图6所示。

$$C = 33.83\omega^{-0.92} \quad (8)$$

表1 土壤内聚力与含水量的关系

(垂直载荷 2 kg)	
含水率(%)	内聚力(kPa)
8.0	48
10.0	41
12.0	36
15.0	28
20.0	20
22.0	19
25.0	17
32.9	13

拟合含水率与内聚力的关系见图7。

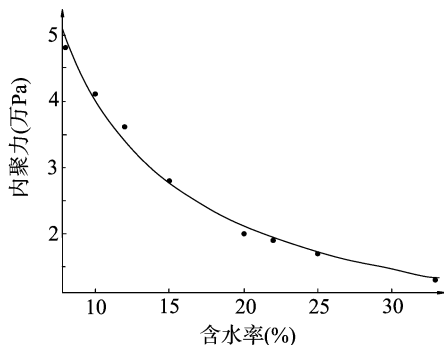


图7 含水率与内聚力的关系

因此,土壤抗剪强度公式就变成了

$$\tau = 33.83\omega^{-0.92} + 0.59 \times \sigma \quad (9)$$

式中: $\sigma$ 为正应力。

这样,得到了不饱和土壤下的抗剪强度与含水率和正应力之间的关系式,用 MATLAB 拟合出的关系见图 8,在含水率一定的情况下,抗剪强度随压应力的增大而线性增大,在压应力一定的条件下,抗剪强度随含水率增大而逐渐减小。不同土壤的土壤特性不一样,即内聚力和内摩擦角不一样,抗剪强度公式系数也不同,这个公式只适用于做试验时的那块田地。

试验车参数:总质量  $G=2\ 500\text{ kg}$ ;中心距  $B=1\ 350\text{ mm}$ ;接地长度  $L=1\ 900\text{ mm}$ ;带宽  $b=350\text{ mm}$ ;重心与机具形心距  $C_x=0\text{ mm}$ ;  $C_y=0\text{ mm}$ 。

$$F = \frac{\gamma Z^2 g \text{ctg} \theta / 2 + ZC [1 + \text{ctg} \theta \text{ctg} (\theta + \varphi)]}{\cos \alpha \text{ctg} (\theta + \varphi) - \sin \alpha} = \frac{1.69 \times 0.001 \times 4^2 \times 10 \times \text{ctg} (20) / 2 + 4 \times 0.14 \times [1 + \text{ctg} (20) \text{ctg} (20 + 30)]}{\cos (5) \text{ctg} (20 + 30) - \sin (5)} = 25.2 (\text{N})。$$

式中: $\gamma$ 为土壤密度,平均密度为  $1.69\text{ g/cm}^3$ ,含水率为  $28\%$ ;  $\alpha$ 为侧面剪切土壤力与水平面的夹角,原地转向时履带倾侧角度偏小,取  $5^\circ$ ;  $\theta$ 为破坏面角度,经测量为  $20^\circ$ ;下陷深度为  $40\text{ mm}$ ;  $C=1.4 \times 10^4\text{ Pa}$ ;  $\varphi \approx 30^\circ$ 。

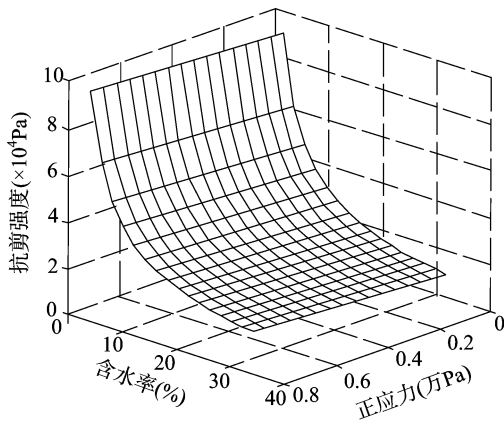


图8 抗剪强度与正应力和含水率之间的关系

代入公式(5)得: $M=2\ 220\text{ N} \cdot \text{m}$ ;2条履带的侧面剪切土壤力引起的扭矩为  $4\ 440\text{ N} \cdot \text{m}$ ;履带与地面摩擦产生的转向阻力矩  $M_z = \frac{Mg\mu L}{4} = \frac{2\ 500 \times 9.8 \times 0.95 \times 1.9}{4} = 11\ 056\text{ N} \cdot \text{m}$ ;履带收获机的总转向阻力矩为  $15\ 496\text{ N} \cdot \text{m}$ 。

用 NJY-3 型农机通用动态遥测仪测出原地转向时的转向阻力矩<sup>[12-13]</sup>,并列列表 2。

表 2 原地转向时的转向阻力矩

驾驶情况	转向半径 (m)	转向角速度 (r/s)	总阻力矩 (N·m)
前行顺时针	0	0.67	16 738

理论分析的转向阻力矩与实车试验数据比较相差  $7.4\%$ 。因此可知,以土壤参数建立的转向阻力矩数学模型是可行的,但此数学模型仅适用于履带车辆水田小半径转向,大半径转向误差会很大,另外需要特别注意的是土壤参数如土壤内聚力、土壤内摩擦角,需要多次在同一水田不同地段多次测量取平均值,才能保证数据的精确性。

#### 4 结论与讨论

履带收获机在水田作业时,由于履带下陷,受土壤参数影响较大,结合相关文献提出了一种与土壤参数有关的转向阻力矩的计算方法。土壤参数试验中,得出不饱和土壤的抗剪强度与含水率和正压力的关系式,求出土壤参数:内聚力(最大为  $48\text{ kPa}$ )和内摩擦角( $30^\circ$ ),并用此参数代入转向阻力矩公式,计算出转向阻力矩。实车试验中,测出原地转向时的转向阻力矩,并与计算数据比较验证本研究所提出的转向阻力矩公式的可行性。土壤参数需多次测量求平均值进行确定,才能保证数据的正确性,才能为履带车辆田间试验和车辆设计提供正确依据。

#### 参考文献:

- [1] 贝 克. 地面-车辆系统导论[M]. 《地面-车辆系统导论》翻译组,译. 北京:机械工业出版社,1978:96-104.
- [2] 任茂文,张晓阳,王 戡. 车辆地面力学研究现状与展望[J]. 机械制造与自动化,2007,36(4):1-2.
- [3] 卡拉费斯,诺瓦茨凯. 越野车辆工程土力学[M]. 张克健,译. 北京:机械工业出版社,1985:310-325.
- [4] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京:北京机械工业出版社,2002:70-94.
- [5] 苗常青,谭惠丰,杜星文. 轮胎-松软地面相互作用有限元分析[J]. 兵工学报,2002,23(2):150-154.
- [6] 魏宸官. 履带车辆转向问题的研究[J]. 拖拉机与农用运输车,1980(1):17-35.
- [7] 方志强,高连华,王红岩. 履带车辆转向性能指标分析及实验研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2005,19(4):47-50,70.
- [8] 孙海涛,王 良. 软路面履带转向阻力的研究[J]. 建筑机械(上半月),1995(9):23-26.
- [9] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京:化学工业出版社,2006:63-85.
- [10] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社,1983:239-323.
- [11] 李兆平,张 弥,赵慧丽. 含水量的变化对非饱和土强度影响的试验研究[J]. 西部探矿工程,2001,13(4):1-3.
- [12] 张广庆,朱思洪,李伟华,等. 铰接摆杆式大功率拖拉机原地转向仿真与实验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):25-30.
- [13] 宿月文,朱爱斌,陈 渭,等. 履带机械地面力学建模及牵引性能仿真与试验[J]. 西安交通大学学报,2009,43(9):42-45.