

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.007

农用全地形仿形行走底盘地面力学特性\*

刘平义<sup>1</sup> 高金成<sup>2</sup> 李海涛<sup>1</sup> 张绍英<sup>1</sup> 魏文军<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 针对减少农田土壤机械压实的技术措施,在常规轮式行走机构的基础上,提出配备超低气压轮胎的农用全地形仿形行走底盘的解决方案。建立了超低气压轮胎的地面力学模型,研究了配备超低气压轮胎的农用全地形仿形行走底盘的地面力学特性,并与现有的四轮驱动拖拉机进行对比分析,结果表明,农用全地形仿形行走车能够有效减小土壤机械压实,且牵引性能良好,满足现代农业的发展需要。

关键词: 农用全地形仿形行走底盘 地面力学特性 超低气压轮胎

中图分类号: S219.032.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0036-05

Terramechanics of All Terrain Adaptive Locomotion Chassis for Farmland

Liu Pingyi<sup>1</sup> Gao Jincheng<sup>2</sup> Li Haitao<sup>1</sup> Zhang Shaoying<sup>1</sup> Wei Wenjun<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

According to the technical measures for reducing the mechanical soil compaction, all terrain adaptive locomotion chassis for farmland with ultra-low pressure tires was proposed as solution scheme based on the conventional wheeled locomotion mechanism. The mechanical model between the tire and ultra-low pressure was established. The terramechanics of all terrain adaptive locomotion chassis for farmland which used ultra-low pressure tires was analyzed. At last, compared with the existing four-wheel drive tractor, it was proved that all terrain adaptive locomotion vehicles for farmland could reduce the mechanical soil compaction and met the modern agriculture's need with well performance and tractive effort.

Key words All terrain adaptive locomotion chassis for farmland, Terramechanics, Ultra-low pressure tires

引言

拖拉机等农用机械及牵引农具在农田行走时,造成表层土壤被压下沉,称之为农田土壤机械压实<sup>[1]</sup>,是目前农业生产过程中造成农田土壤紧实的主要原因。农田土壤经机械压实后密度增加、孔隙率和水渗透能力降低,土壤侵蚀加重,机耕阻力增加,作物根系生长受阻,进而导致作物产量降低,投入加大,土壤环境受到破坏<sup>[2]</sup>。

目前采取的少耕或免耕等农艺措施以大量施用

化肥、农药和除草剂为代价,虽然一定程度上减少了机械能消耗,缓解了土壤机械压实,却大幅度增加了化学能消耗,并且有造成土壤污染和作物污染的危险<sup>[3]</sup>。欧美等机械化发达国家对农用轮式拖拉机改两轮驱动为多轮驱动,同时增加轮胎宽度及增加并置轮胎数量等措施以降低对土壤地表的压力<sup>[3-4]</sup>。这些改进方案对驱动轮轴要求较高,对整车操作和转向性能有一定影响。我国小地块阡陌交错,垄沟、田埂等地形复杂,简单的车轮方面改进并不能系统、完整且有效地解决土壤机械压实问题。

收稿日期: 2012-02-04 修回日期: 2012-03-12

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA043603)

作者简介: 刘平义,博士生,主要从事机械设计及理论研究, E-mail: liupingyi@cau.edu.cn

通讯作者: 魏文军,教授,博士生导师,主要从事机械传动研究, E-mail: mech01@cau.edu.cn

对于现有的轮式行走机械,使用超低气压轮胎能有效减小土壤机械压实<sup>[5]</sup>,但超低气压轮胎承载小,牵引性能差,必须是多轮驱动且实时触地行走。本文对农用轮式车辆中的行走机构进行构形变化<sup>[6]</sup>,使其不仅多轮驱动而且能够在农业松软崎岖地面上实时多轮触地行走,并在此基础上配备超低气压轮胎<sup>[7]</sup>。

### 1 农用全地形仿形行走底盘设计

针对农业田间作业动力机械的实时多轮触地行走、多轮承载和全轮驱动的要求,基于双自由度轮式仿形行走理论<sup>[8]</sup>,设计了多自由度轮式仿形行走底盘<sup>[9]</sup>,如图 1 所示。

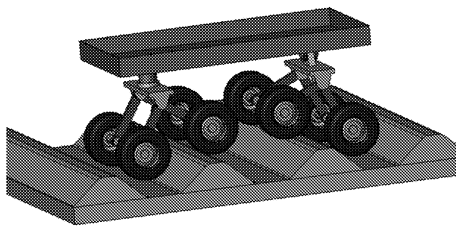


图 1 多自由度轮式仿形行走底盘

Fig. 1 Wheeled terrain adaptive locomotion chassis with multi-DOF

该底盘能实现 8 轮全时驱动、5 自由度仿形和前桥转向等功能<sup>[10]</sup>。为了满足在农田土壤上行走、作业的要求,多自由度轮式仿形行走底盘需要配备超低气压轮胎,称为农用全地形仿形行走底盘,如图 2 所示。

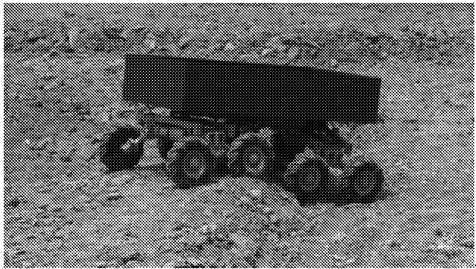


图 2 农用全地形仿形行走底盘

Fig. 2 All terrain adaptive locomotion chassis for farmland

### 2 地面力学特性分析

将车辆与农田土壤作为一个系统来研究车辆与地面之间的力学特性等相互作用关系<sup>[11~12]</sup>,通过挂钩牵引力评价车辆在松软地面上的通过性以及通过沉陷量评价车辆对土壤的机械压实程度。

#### 2.1 弹性轮胎-土壤相互作用模型建立

低气压和超低气压轮胎在松软农田土壤上负载行走时,轮胎和地面都存在变形,属于弹性轮胎的研究范畴。

##### 2.1.1 模型假设条件

Bekker 分析轮胎与土壤关系时,假定模型直径

为  $D$  (半径为  $r$ )、宽度为  $b$  的弹性轮胎在松软土壤上滚动而产生相互作用,通常形成深度为  $z_0$  的轮辙,在此假设中,相互作用模型有以下几个要点,变形几何关系及应力分布如图 3 所示。

(1) 地面足够松软,橡胶充气轮胎滚动时与地面接触处可近似看作由两部分组成:一部分为底部被压扁的水平部分,一部分为轮胎前部与地面接触处的圆弧部分。

(2) 车轮宽度方向上具有相同的应力分布。

(3) 与车轮接触的地面各点在圆弧处的反作用力  $\sigma_1$  是纯径向的,水平部分的反作用力  $\sigma_0$  是垂直方向的。

(4) 车轮与地面接触面上某点的压力等于该点相同深度垂直压板的法向压力,切应力等于相同法向压力作用下的剪切板的切应力。

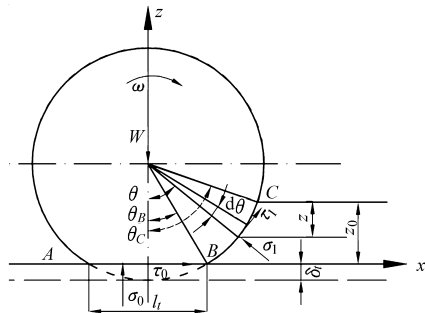


图 3 弹性轮胎与地面受力变形几何关系及应力分布

Fig. 3 Geometric deformation and stress distribution with forces between elastic tire and ground

##### 2.1.2 弹性轮胎的沉陷量

根据 Bekker 弹性轮胎-土壤相互作用力学模型以及弹性轮胎的判定条件可知,轮胎与地面接触区水平段的接触压应力  $\sigma_0$  与充气压力  $p_i$  和胎壁压力  $p_c$  的关系为

$$\sigma_0 = p_i + p_c \tag{1}$$

弹性轮胎的沉陷量为  $z_0$ ,根据轮胎-土壤相互作用力学模型的假定条件,压力-沉陷公式为

$$\sigma_0 = \left( \frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z_0^n \tag{2}$$

式中  $k_c$ ——土壤粘聚力模量

$k_\varphi$ ——土壤摩擦模量

$n$ ——土壤下陷指数

因此,由式(1)和(2)得

$$p_i + p_c = \left( \frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z_0^n \tag{3}$$

超低气压轮胎属于宽断面弹性轮胎,式(2)中的  $b$  应取轮胎宽度和轮胎接地水平部分长度  $l_h$  的较小值。

$l_h$  是轮胎径向变形  $\delta_r$  的函数,根据图 3 中几何关

系可得

$$l_i = 2 \sqrt{D\delta_i - \delta_i^2} \quad (4)$$

设定  $l' = \{b, l_i\}_{\min}$ , 根据式(3), 则弹性轮胎沉陷量为

$$z_0 = \left( \frac{p_i + p_c}{\frac{k_c}{l'} + k_\varphi} \right)^{1/n} \quad (5)$$

## 2.2 弹性轮胎的受力分析

弹性轮胎驱动车轮在运动过程中与地面相互作用时, 受到行走阻力和行走推力2种作用力, 受力分析如图4所示。行走阻力具体表现为: 压实阻力、推土阻力、粘着阻力和弹滞阻力。行走推力表现为地面土壤被车轮推动、剪切而产生的剪切力, 根据力学模型分为轮胎与地面相互作用接触区域圆弧段的地面推力和水平段的地面推力。

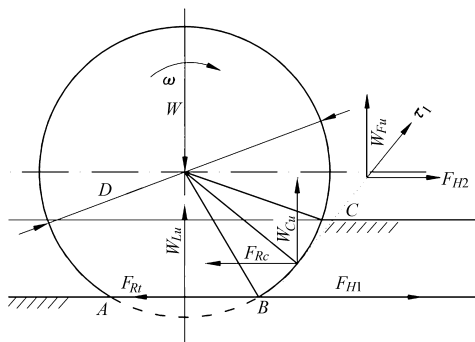


图4 弹性驱动轮胎受力分析

Fig. 4 Force analysis on pneumatic driving tire

### 2.2.1 压实阻力

压实阻力为轮胎运动过程中由于对土壤压实而引起的阻力, 弹性轮胎压实阻力  $F_{Rc}$  的计算公式<sup>[13]</sup>为

$$F_{Rc} = b \left( \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right) \left( \frac{k_c}{l'} + k_\varphi \right) \quad (6)$$

### 2.2.2 推土阻力

车轮滚动时, 需要向前推移由于车轮滑转沉陷和车轮前进形成的波浪状隆起的土壤, 从而多消耗一部分功, 推移土壤形成的阻力为推土阻力。尤其是在松软土壤农田环境下, 行走车辆的下陷较大, 在计算车轮总阻力时应当考虑。推土阻力  $F_{Rb}$  计算公式<sup>[14]</sup>为

$$F_{Rb} = b(cz_0K_{pc} + 0.5z_0^2\gamma K_{pr}) \quad (7)$$

其中

$$K_{pc} = (N_c - \tan\varphi) \cos^2\varphi$$

$$K_{pr} = \left( \frac{2N_r}{\tan\varphi} + 1 \right) \cos^2\varphi$$

式中  $c$ ——土壤内聚力系数

$\gamma$ ——土壤容积密度

$\varphi$ ——土壤内摩擦角

$N_r, N_c$ ——土壤 Terzaghi 承载力系数

由式(7)可知, 推土阻力  $F_{Rb}$  随车轮宽度  $b$ 、沉陷量  $z_0$  的增加而增加。尤其是非常松软的土壤条件下,  $b, z_0$  对推土阻力的影响较大。

### 2.2.3 弹滞阻力

充气轮胎滚动时, 轮胎变形  $\delta_i$  引起的弹滞损耗而产生的阻力称为弹滞损耗阻力, 简称为弹滞阻力  $F_{Rl}$ , 其值只与轮胎本身的参数及充气压力有关而与地面参数无关并可由试验近似地确定<sup>[15]</sup>为

$$F_{Rl} = \frac{Wu}{p_i^a} \quad (8)$$

式中  $W$ ——轮胎垂直载荷

$u, a$ ——经验阻力系数

### 2.2.4 相互作用区域水平段的地面推力

弹性轮胎与地面相互作用区域水平段的地面推力  $F_{H1}$ , 由图4可知

$$F_{H1} = b \int_0^{l_i} \tau_0 dx \quad (9)$$

式中  $\tau_0$ ——水平段剪应力

应用 Janosi 剪切模型, 则

$$\tau_0 = (c + \sigma_0 \tan\varphi) (1 - e^{-j_0/k}) \quad (10)$$

式中  $k$ ——土壤剪切变形模量

$j_0$ ——土壤水平段的剪切位移

由图3可知, 轮胎水平段上某点的剪切位移  $j_0$  为滑转率  $i$  与位移  $x$  的函数, 可表示为

$$j_0 = ix$$

因此, 联立式(1)、(9)、(10), 得

$$F_{H1} = b \int_0^{l_i} [c + (p_i + p_c) \tan\varphi] (1 - e^{-\frac{ix}{k}}) dx \quad (11)$$

### 2.2.5 相互作用区域圆弧段的地面推力

计算弹性轮胎与地面相互作用区域圆弧段的推力  $F_{H2}$  时, 此区域土壤的剪切位移为

$$j_1 = -r[\theta_C - \theta_B - (1-i)(\sin\theta_C - \sin\theta_B)] \quad (12)$$

根据图3所示模型中的变形几何关系及应力分布关系, 可得相互作用区域圆弧段的法向压应力为

$$\sigma_1(\theta) = (p_i + p_c) [(r \cos\theta - r + z_0 + \delta_i)/z_0]^n \quad (13)$$

根据剪应力计算公式得圆弧段的剪应力为

$$\tau_1(\theta) = (c + \sigma_1(\theta) \tan\varphi) (1 - e^{-j_1/k}) \quad (14)$$

如图4所示, 圆弧段的地面推力为

$$F_{H2} = br \int_{\theta_B}^{\theta_C} \tau_1(\theta) \cos\theta d\theta \quad (15)$$

因此, 把式(12)、(13)、(14)代入式(15), 可求得圆弧段地面推力  $F_{H2}$ 。

## 2.3 弹性驱动轮胎-地面作用力学平衡方程

针对超低气压轮胎进行受力分析(图4), 得到受力平衡方程

$$\begin{cases} F_{DP} = F_H - F_P \\ F_P = F_{Rc} + F_{Rt} + F_{Rb} \\ F_H = F_{H1} + F_{H2} \end{cases} \quad (16)$$

$$W = W_{lu} + W_{cu} + W_{Fu} \quad (17)$$

$$W_{lu} = b\sigma_0 l_t \quad (18)$$

$$W_{cu} = b \int_{\theta_B}^{\theta_C} \sigma_1 r \cos\theta d\theta \quad (19)$$

$$W_{Fu} = br \int_{\theta_B}^{\theta_C} \tau_1(\theta) \sin\theta d\theta \quad (20)$$

式中  $F_{DP}$ ——挂钩牵引力  
 $F_H$ ——行走推力  $F_P$ ——行走阻力  
 $W_{lu}$ ——AB 区法向压应力平衡的垂直载荷  
 $W_{cu}$ ——BC 区法向压应力平衡的垂直载荷  
 $W_{Fu}$ ——BC 区剪应力平衡的垂直载荷

联立式(5)~(8)、(11)~(20)并设定土壤力学特性参数、轮胎特征参数以及滑转率等运动参数条件就可以计算单轮在特定载荷  $W$  时的挂钩牵引力  $F_{DP}$  以及车轮沉陷量  $z_0$  等行走性能参数。

### 2.4 整车行走性能分析

对于农用车辆,如果沿车辆横向的同轴车轮为一组,在地面力学特性一致的条件下,每组车轮行驶的地面力学特性条件相同。第一组车轮通过后的土壤地面力学特性会发生改变,从而影响后续通过车轮的行走特性。根据多次通过理论<sup>[16]</sup>,在多轮整车的地面力学特性分析、计算中,车轮的通过次数越多,车轮下土壤的密度越大,相同载荷下的车轮下陷量也越小。假设在每个车轮负载都相同的情况下,每组车轮下陷量依次为上组通过车轮下陷量的  $\mu_1$  倍,土壤密度依次为上组通过车轮通过时的  $\mu_2$  倍,多次通过系数分别为  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 。对每个车轮进行编程计算,在单轮的地面力学特性分析基础上,可以对整车的行走性能进行分析计算。根据农用全地形仿形行走车底盘的行驶特点,各轮承载相同,整车载荷为

$$W_Z = 8W$$

整车的挂钩牵引力  $F_{DPz}$  为单个车轮的挂钩牵引力  $F_{DP}$  之和,即

$$F_{DPz} = \sum_{i=1}^8 F_{DPi}$$

在地面力学特性一致的条件下,每组车轮对土壤的机械压实量(沉陷量)相同,车辆对地面的机械压实量  $z_j$  为 4 组车轮的沉陷量之和,即

$$z_j = (1 + \mu_1 + \mu_1^2 + \mu_1^3) z_0$$

## 3 仿形行走车与传统拖拉机对比分析

根据 GB/T 2979—2008,为农用全地形仿形行走车选用 24×12.00-12 2PR 型超低气压轮胎。选

择四轮驱动的东方红 504 型拖拉机与农用全地形仿形行走车进行对比分析,两车参数如表 1 所示。

表 1 参数对比  
Tab.1 Comparison of parameters

| 参数       | 农用全地形<br>仿形行走车 | 东方红 504 型<br>拖拉机 |         |
|----------|----------------|------------------|---------|
| 整车载荷/N   | 30 282         | 30 282           |         |
| 驱动行走车轮数目 | 8              | 4                |         |
| 型号       | 24×12.00-12    | 8.3-20           | 13.6-28 |
| 轮胎       | 2PR            | (前轮)             | (后轮)    |
|          | 宽度/m           | 0.314            | 0.210   |
|          | 直径/m           | 0.610            | 0.895   |
|          | 气压/kPa         | 70               | 160     |
|          |                | 210              |         |

依据超低气压轮胎的额定载荷,给定两车载荷相同,所有轮胎的胎壁压力  $p_c$  分别按充气压力  $p_i$  的 10% 计算<sup>[14]</sup>。采用与我国相同纬度、相同土壤质地的美国 BEARDEN 地区 III Kent. Minnesota 测点的农田土壤的地面力学特性参数<sup>[17]</sup>:  $\gamma = 1\,256\text{ kg/m}^3$ 、 $c = 344.7\text{ Pa}$ 、 $\varphi = 0.37\text{ rad}$ 、 $k_c = 97\,294\text{ Pa/m}^{n-1}$ 、 $k_\varphi = 13\,680.3\text{ Pa/m}^n$ 、 $n = 0.5$ 、 $N_c$ 、 $N_r$  根据 Terzaghi 承载力系数随土壤内摩擦角的变化关系图可以查出  $N_c = 17$ 、 $N_r = 5$ ,弹滞特性经验阻力系数分别为  $u = 7.0$  和  $a = 0.5$ <sup>[15]</sup>,多次通过系数  $\mu_1 = 0.95$ 、 $\mu_2 = 0.96$ 。根据 2.3 节中的平衡方程,通过 Matlab 计算,分别得到两种车辆的各项工作性能参数并进行对比分析。

### 3.1 挂钩牵引力

在农用全地形仿形行走车和东方红 504 型拖拉机整车载荷相同的情况下,两车的挂钩牵引力  $F_{DPz}$  变化如图 5 所示。通过图中曲线可以看出,在整车载荷相同的情况下,随着滑转率的增长,两车的挂钩牵引力也相应增长。但是滑转率大于 0.3 时,农用全地形仿形行走车输出的挂钩牵引力约为东方红 504 型拖拉机输出挂钩牵引力的 1.42 倍。

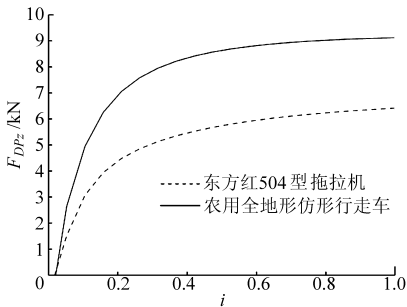


图 5 整车载荷相同时的挂钩牵引力

Fig.5 Tractive effort of vehicle with same loadings

### 3.2 机械压实量

在整车载荷相同的情况下,两车对地面机械压实量分别为整车所有车轮一次通过后,各组车轮的

沉陷量之和。通过计算可知,在整车载荷相同的情况下,农用全地形仿形行走车对地面机械压实量为 0.038 3 m,东方红 504 型拖拉机对地面机械压实量为 0.070 1 m。农用全地形仿形行走车机械压实量约为东方红 504 型拖拉机机械压实量的 54.6%。

通过分析可以看出,相同载荷、相同滑转率的情况下,农用全地形仿形行走车的挂钩牵引力优于东方红 504 型拖拉机,土壤机械压实量则小于东方红 504 型拖拉机。

## 4 结 论

(1)针对松软农田环境,提出了通过配备超低

气压轮胎的农用全地形仿形行走底盘解决农田土壤机械压实的方法并通过地面力学特性计算进行验证。

(2)在整车载荷相同的条件下,选用土壤参数并对农用全地形仿形行走车和目前常用四轮驱动拖拉机的行走作业性能进行对比。计算结果表明:相同的滑转率下,农用全地形仿形行走车的牵引力为普通四轮驱动拖拉机的 1.42 倍,机械压实量仅为普通四轮驱动拖拉机的 54.6%。

(3)基于双自由度轮式仿形行走理论的农用全地形仿形底盘应用于农用车辆时,工作性能优于普通四轮驱动拖拉机,能有效减小土壤机械压实,满足现代农业可持续发展的需求。

## 参 考 文 献

- Aragón A, García M G, Filgueira R R. Maximum compactibility of argentine soils from the proctor test; the relationship with organic carbon and water content[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(3~4): 197~204.
- 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报,2005,36(10):161~164.  
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 161~164. (in Chinese)
- 许剑平,徐涛,谢宇峰. 国外少免耕法的发展研究[J]. 农机化研究,2005(1):25~27.  
Xu Jianping, Xu Tao, Xie Yufeng. Research on the development of less tillage and no tillage system in foreign countries[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(1): 25~27. (in Chinese)
- Esch J H, Bashford L L, Von Barga K, et al. Tractive performance comparisons between rubber belt track and four-wheel-drive tractor[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 1109~1115.
- 李汝莘,史岩,迟淑筠,等. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报,1999,30(2):13~15  
Li Ruxin, Shi Yan, Chi Shujun, et al. Compaction and tillage energy consumption caused by tires of agricultural machines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2): 13~15. (in Chinese)
- Waldron K. Terrain adaptive vehicle[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1995, 117(B): 107~112.
- 孙忠英,李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(3):172~174.  
Sun Zhongying, Li Baofa. Research on soil compaction by agricultural machinery mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 172~174. (in Chinese)
- 魏文军,于娅楠,张绍英. 大变形仿形行走系统: 中国, CN100368219C[P]. 2008-02-13.
- 李海涛,王亚,刘平义,等. 一种行走装置: 中国, CN101407174B[P]. 2011-04-06.
- 王亚,秦衡,徐少兵,等. 全地形仿形行走车辆研究与试制[J]. 大连理工大学学报,2011,51(增刊1):85~87.  
Wang Ya, Qin Heng, Xu Shaobing, et al. Research on all terrain profiling traveling vehicle and its trial production[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(Sup. 1): 85~87. (in Chinese)
- 陈浩,吴伟蔚,刘新田,等. 轮胎压实对机具牵引阻力的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(2):52~57,98.  
Chen Hao, Wu Weiwei, Liu Xintian, et al. Effect of wheel traffic on working resistance of agricultural machinery in field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 52~57, 98. (in Chinese)
- 姚艳,丁启朔,周俊. 重塑土壤承压模型的建立与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):40~45.  
Yao Yan, Ding Qishuo, Zhou Jun. Pressure-sinkage characteristic model of remolded soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 40~45. (in Chinese)
- 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京:国防工业出版社,2002:22~31.
- Wong J Y. Theory of ground vehicles[M]. New York: John Wiley & Sons,2001.
- 王金龙. 弹性轮与地面相互作用建模及仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2002.  
Wang Jinlong. Research of modeling and simulation on interaction between elastic tire and terrain[D]. Changchun:Jilin University, 2002. (in Chinese)
- 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 贝克 M G. 地面-车辆系统导论[M]. 北京:机械工业出版社,1978:198.