

犁体耕作阻力模型仿真分析与试验研究

刘进宝¹, 郑炫¹, 孟祥金¹, 杨怀君¹, 张鲁云¹, 李清超²

(1.新疆农垦科学院机械装备研究所,新疆石河子832000;2.石河子大学机械电气工程学院,新疆石河子832000)

摘要:为进一步提高犁体耕作性能,分析影响犁体耕作阻力的因素,基于摩尔-库仑土壤剪切理论,建立了包含犁体结构参数、土壤物理特性和犁体工作参数的耕作阻力模型,耕作阻力表达式包含了犁铲尖和犁铧切削土壤阻力、土壤在犁壁上产生的摩擦力和翻垡过程土壤动量变化产生的阻力、犁壁翻垡使土壤势能增加产生的阻力、作用在犁铧和犁壁上的横向力产生的摩擦力、土壤横向运动对犁壁产生的阻力。基于新疆玉米地土壤物理特性,建立了两种高速犁体A和B的耕作阻力方程,在不同耕宽(0.35、0.42 m)、耕深(0.255、0.305 m)和耕速(2.22、2.5、2.78 m·s⁻¹)作业条件下对耕作阻力进行了理论、仿真和试验研究,分析了犁体耕作阻力的影响因素,结果表明,仿真值与计算值的平均误差为3.37%,试验值与计算值的平均误差为7.18%,试验值与仿真值的平均误差为3.71%。犁体耕作阻力与铧刃角呈非线性增长关系;与耕深呈三次函数增长关系;与耕速呈二次函数增长关系;犁体耕作过程的功率消耗与耕速呈三次函数的增长关系。提出设置合理的安全系数(s_f),使拖拉机配套功率 $P_s = s_f P$,进而优化选配合适的配套动力,提升犁具与拖拉机动力型号的最佳匹配。

关键词:犁体;耕作阻力;理论模型;仿真

中图分类号:S222.1 **文献标志码:**A

Simulated analysis and experimental study on plough tillage resistance model

LIU Jinbao¹, ZHENG Xuan¹, MENG Xiangjin¹, YANG Huaijun¹, ZHANG Luyun¹, LI Qingchao²

(1. Machinery Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to further improve the plough performance and analyze the factors affecting plough resistance, a plough resistance model including plough structure parameters, soil physical properties and plough working parameters was established based on the Mohr-Coulomb soil shear theory. The tillage resistance equations of two high-speed plough A and B were established based on the soil physical characteristics of corn field in Xinjiang. The theoretical, simulation and experimental studies on tillage resistance were carried out under different tillage width (0.35 m, 0.42 m), depth (0.255 m, 0.305 m) and tillage speed (2.22 m·s⁻¹, 2.5 m·s⁻¹, 2.78 m·s⁻¹). The effects of plough structure parameters on tillage resistance were analyzed. The average error between simulation value and calculation value was 3.37%, the average error between test value and calculation value was 7.18%, and the average error between test value and simulation value was 3.71%. The plough resistance increased nonlinearly with the cutting-edge angle. The relationship between tillage resistance and tillage depth was a cubic function. The relationship between tillage resistance and tillage speed was quadratic function. The relationship between power consumption and tillage speed was a cubic function. A reasonable safety factor was proposed. and then optimized the matching power and improved the plough and tractor power model of the best match.

Keywords: plough body; tillage resistance; theoretical model; simulation

收稿日期:2021-03-09

修回日期:2021-05-07

基金项目:新疆农垦科学院院级科技计划项目(2020YJ012);石河子市中青年科技创新骨干人才(2021RC01);新疆生产建设兵团区域创新引导计划(2021BB015);新疆生产建设兵团重大科技项目(2017AA004)

作者简介:刘进宝(1988-),男,甘肃天水人,硕士,副研究员,主要从事农机装备的研究。E-mail:jimbao1226@126.com

通信作者:郑炫(1971-),女,江苏徐州人,研究员,硕士生导师,主要从事农机装备的研究。E-mail:jiangzhengxuan@sohu.com

由于新疆农田耕作土壤与东北黑土地的差异性,以及种植作物及模式的不同,不能完全照搬东北地区保护性耕作模式,犁耕、深松、秸秆还田深翻等机械化耕作对新疆盐碱化贫瘠土壤的改良具有促进作用,因此当前对新疆贫瘠土壤的犁耕机械化改良也显得尤为重要。随着土壤保护、改良技术的不断推进,犁耕作业对土壤的扰动、深度交换、能量消耗等方面技术重新得到重视。犁体是当前土壤耕作的主要部件之一,可将土壤疏松并使上下耕层土壤进行交换,具有很好的土壤翻垡和覆盖性能^[1-7]。

犁体在耕作土壤时,产生的能量消耗是巨大的,据相关资料统计,耕地能耗占农机总能耗的 50%左右^[8-9]。犁耕阻力与犁体几何特征、性能参数、工作参数、土壤特性等参数密切相关,为了提高犁体性能,降低耕作阻力,国内外学者在犁体耕作阻力和减阻降耗和耐磨延寿等方面做了大量研究^[10-14]。

林金天等^[15]研究表明,耕作土壤主要的破坏形式是剪切破坏,剪切强度由粘结力和内摩擦力决定。区颖刚等^[16]对塑性土壤不同破碎方法进行了比较,表明犁体曲面对土壤的破坏形式主要是剪切失效。李汝莘等^[17]通过分析土壤容重、含水量与耕作阻力的关系,利用回归方程建立了耕作阻力与土壤容重及含水量的关系模型。朱新民等^[18]通过经验公式,建立了包括犁铧切土阻力、弯曲剪切力、正压摩擦力等因素的犁体阻力模型。Gill 等^[19]通过试验研究表明,犁体耕作阻力随着耕作速度平方值的增加而增加。Oskoui 等^[20]建立了包含土壤圆锥指数的耕作阻力方程,通过模型预测和试验研究表明误差控制在合理范围。Qiong 等^[21]建立了犁耕阻力关于耕作速度的二次函数,其中包括了土壤含水率因素。Seig 等^[22]建立了包括犁体几何参数和土壤特性的耕作阻力数学模型, Saunders 等^[23]和 Godwin 等^[24]又将耕作速度加入了该预测模型。

从当前的研究来看,国内有关犁体理论的研究基本停留在 20 世纪 80 年代前后^[25-28],一些学者提出的方法没有随着技术的发展进一步研究。国外相关研究已建立了包括土壤特性、犁体曲面几何参数和耕作速度的犁体耕作阻力模型,奠定了相关理论基础。当前犁具朝着宽幅、高速的方向发展,以现有研究基础考虑的因素还不够全面,有待进一步完善相关理论研究。因此,本文根据包含犁铲尖和犁铧的组合式犁铧结构构成的犁体,提出将犁体看做犁铲尖、犁铧、犁壁、犁侧板 4 个部分,并基于摩尔

-库仑土壤剪切理论,建立犁体在耕作方向上的耕作阻力模型,立足西北干旱地区典型土壤,进行理论与试验研究,为犁体减阻降耗提供理论依据。

1 犁体耕作阻力模型

1.1 铲齿—土壤剪切理论

依据 Godwin 等^[29-30]提出的摩尔-库仑土壤剪切理论的铲齿结构阻力模型(图 1),铲齿沿着速度 v 前进时,铲齿前方三角形 ABC 区域土壤对铲齿产生阻力(P),可以分为水平方向的力(F_x)和垂直方向的力(F_y)。在土壤无其他外力施加的情况下:

$$F_x = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_{ca}) [y + d(m - (m - 1)/3) + \gamma v^2 N_a d_c (y_c + 0.6d_c)] \sin(\alpha + \delta) \quad (1)$$

$$F_y = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_{ca}) [y + d(m - (m - 1)/3) + \gamma v^2 N_a d_c (y_c + 0.6d_c)] \cos(\alpha + \delta) \quad (2)$$

式中, γ 为土壤容重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c 为土壤内聚力($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); d 为铲齿入土深度(m); y 为铲齿宽度(m); m 为土壤断裂宽深比; v 为前进速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); α 为铲齿倾角($^\circ$); δ 为土壤与材料间的摩擦角($^\circ$); N_γ 、 N_{ca} 、 N_a 为土壤无量纲常数。

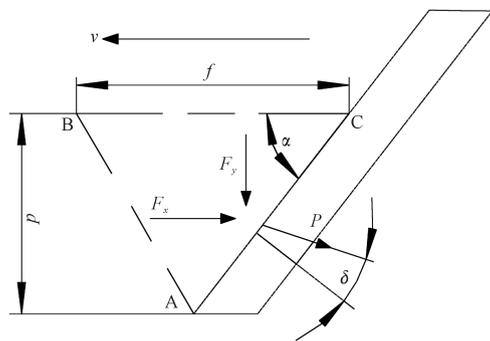


图 1 铲齿受力示意图

Fig.1 Force diagram of shovel teeth

因此阻力(F)为:

$$F = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_{ca} + \gamma v^2 d N_a) y \quad (3)$$

1.2 耕作阻力模型

Saunders 等^[23]利用上述方法建立并完善了犁体阻力模型,本文以该模型为依据,将犁体阻力看作由犁铲尖、犁铧、犁壁、犁侧板 4 个部分所受力之和,包括犁铲尖、犁铧切削土壤产生的阻力,犁壁翻垡土壤产生的摩擦力和翻转土壤产生的阻力,犁侧板产生的摩擦力等,犁体受力情况如图 2 所示。

犁体在水平面 xoy 坐标系中,沿着 x 轴反方向进行犁耕作业,假设犁体以速度 v 匀速前进,耕地过程中,土壤对犁体产生沿着运动方向上所受的合力是犁体所受的耕作阻力。建立基于摩尔-库仑土壤

结构情况。土壤物理特性参数根据前期研究给定^[34],具体参数见表 2 所示。

试验犁体选用适合西北干旱地区耕作土壤的犁体,根据前期研究筛选出性能较好的两种犁体 A 和犁体 B,利用逆向工程三坐标测量仪测出犁体样板曲线,并利用 Solidworks 软件绘制三维模型。犁体三维结构如图 3 所示,仿真时为提高运算速度简化模型,将犁铲尖、犁铧、犁壁和犁侧板看做一个整体,仿真模型如图 4 所示。

两种犁体结构参数见表 3 所示。

犁铲尖实际工作宽度(y_c):

$$y_c = y_{c0} \sin \beta \quad (13)$$

犁铧实际工作宽度(y_h):

$$y_h = y_{h0} \sin \beta \quad (14)$$

表 1 土壤特性系数

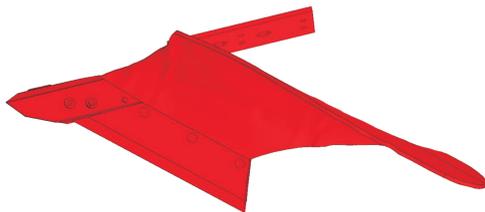
Table 1 Coefficient of soil properties

土壤特性系数 Coefficient of soil properties	α			
	20°	25°	28°	30°
m	2.80	2.70	2.55	2.43
N_γ	1.70	1.40	1.25	1.20
N_{ca}	0.90	1.10	1.30	1.40
N_a	1.02	1.50	2.05	2.20

表 2 土壤物理特性参数

Table 2 Soil physical properties parameters

参数 Parameter	耕层土壤 Plough layer	犁底层土壤 Plough bottom	心土层土壤 Subsoil layer
颗粒半径/mm Particle radius	5	5	5
泊松比 Poisson's ratio	0.30	0.35	0.36
剪切模量/Pa Shear modulus	1.00×10^6	1.09×10^6	1.1×10^6
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Density	1379	1508	1580
土壤颗粒间恢复系数 Coefficient of recovery between soil particles	0.22	0.20	0.21
土壤颗粒间静摩擦系数 Coefficient of static friction between soil particles	0.70	0.58	0.67
土壤颗粒间动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between soil particles	0.32	0.28	0.19
JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) JKR surface energy	5.01	8.62	7.05
土壤-犁体恢复系数 Soil plough recovery coefficient	0.39	0.30	0.28
土壤-犁体静摩擦系数 Soil plough static friction coefficient	0.32	0.30	0.30
土壤-犁体动摩擦系数 Dynamic friction coefficient of soil plough	0.08	0.06	0.05



犁体 A Plough body A



犁体 B Plough body B

图 3 犁体三维结构

Fig.3 Three dimensional structure of plough body

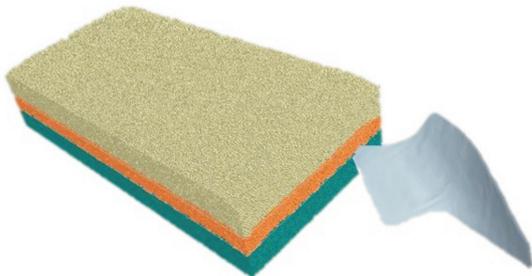


图 4 犁体仿真模型

Fig.4 Plough body simulation model

两种试验犁体采用的是相同的材料,材料采用 65Mn,泊松比为 0.3,剪切模量为 7.9×10^{10} Pa,密度为 $7\ 865 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 3 犁体结构及工作状态参数

Table 3 Plough structure and working state parameters

项目 Item	犁体 A Plough A	犁体 B Plough B
犁铲尖宽度 Plough tip width y_{c0}/m	0.1	0.08
犁铧宽度 Plough share width y_{h0}/m	0.42	0.47
犁壁工作长度 Working length of plough moldboard l/m	0.95	1.05
犁侧板长度 Length of plough side plate x_c/m	0.56	0.60
犁铲尖倾角 Rake angle of plough tip $\alpha_c/(\text{°})$	25	28
犁铧倾角 Rake angle of plough share $\alpha_h/(\text{°})$	25	28
铧刃与运动方向的夹角 The angle between the cutting edge and the moving direction $\beta/(\text{°})$	43	40
犁壁与运动方向的平均夹角 Average angle between plough moldboard and moving direction $\theta/(\text{°})$	35	32

2.2 试验方案设计

根据犁体结构及实际工作状态,耕宽分别设置为 0.35 m 和 0.42 m,耕深分别设置为 0.255 m 和 0.305 m,耕作速度分别设为 2.22、2.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 2.78 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,共 12 组试验(表 4),在相应状态下分别进行仿真分析。

2.3 仿真结果

通过运行仿真模型,土壤颗粒在犁体的作用下发生运动,如图 5 所示,从第 3 秒开始犁体入土,耕作阻力也会相应地产生变化,可以看出,随着犁体开始进入土壤并继续运动过程中,犁体所受的阻力在逐渐增加,当犁体完全进入土壤后,耕作阻力逐渐稳定。

根据仿真数据结果,进行单因素试验数据分析,分别得出犁体耕作阻力与耕深、耕宽、耕速的变化曲线,并与理论计算值和试验值进行比较,仿真数据见表 5。同时可以看出犁体对土壤颗粒的扰动情况和流动速度。

3 田间试验

3.1 试验条件与方法

2019 年 9 月,在新疆石河子市五工村玉米地进行了单铧犁体耕作阻力试验,仿真分析中的土壤在此地采集取样,测定了土壤特性参数,土壤类型为砂壤土,粘性较小,0.5 m 土层深度内的土壤含水率在 17.3%~40.1%,其中 0~0.35 m 耕层土壤平均含水率为 20.6%,耕层在 0.35 m 内的土壤坚实度小于 0.37 MPa,土壤容重 1 435 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均内聚力 18.9 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。试验区土地平整,残留玉米分布均匀。配套动力为雷沃欧豹 904 轮式拖拉机,阻力测量采用黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的犁具专用遥测仪采集器,如图 6 所示。

表 4 试验方案

Table 4 Parameter design of test scheme

编号 Number	耕宽 y/m Ploughing width	耕深 d/m Ploughing depth	耕速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ Tillage speed
1	0.35	0.255	2.22
2	0.35	0.305	2.22
3	0.35	0.255	2.5
4	0.35	0.305	2.5
5	0.35	0.255	2.78
6	0.35	0.305	2.78
7	0.42	0.255	2.22
8	0.42	0.305	2.22
9	0.42	0.255	2.5
10	0.42	0.305	2.5
11	0.42	0.255	2.78
12	0.42	0.305	2.78

遥测仪采集器通过悬挂式连接方式将犁具与拖拉机连接,共有上拉杆传感器、左下悬挂传感器和右下悬挂传感器 3 组数据采集传感器,由上拉杆传感器与左、右两个下悬挂传感器测得的 3 处牵引力的矢量之和即为犁体水平面的耕作阻力。

试验方案与仿真分析方案一致,根据试验区域耕作农艺要求,以耕宽(0.35、0.42 m)、耕深(0.255、0.305 m)、耕作速度(2.22、2.5、2.78 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)为试验因素,以犁体耕作阻力为试验指标,采用单因素的试验方法,研究各因素对犁体耕作阻力的影响。

3.2 结果与分析

3.2.1 耕作阻力计算误差分析 根据试验方案,每组试验测量 3 组数据,取其平均值,将仿真分析得出的阻力值、试验测试的阻力值与理论计算值进行比较,分析仿真值与计算值、试验值与计算值之间的误差,数值见表 5。

$$E_f = |F_{zf} - F_z| / F_z \quad (15)$$

$$E_s = |F_{zs} - F_z| / F_z \quad (16)$$

$$E_{fs} = |F_{zs} - F_{zf}| / F_{zf} \quad (17)$$

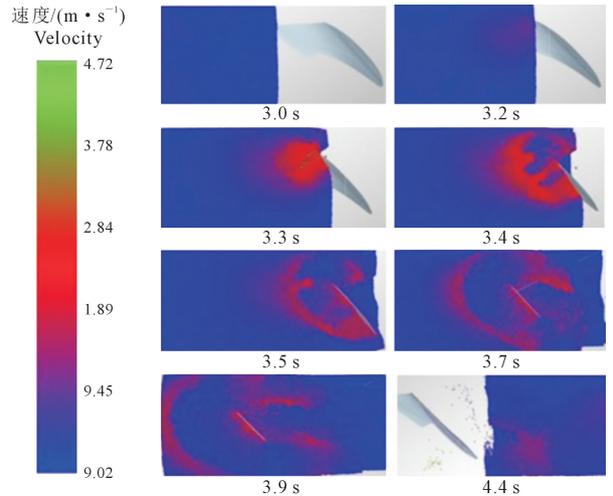


图 5 土壤颗粒运动状态

Fig.5 Movement state of soil particles



1.数据采集器;2.上悬挂传感器;3.下悬挂传感器

1. data collector; 2. upper suspension sensor; 3. lower suspension sensor

图 6 田间试验

Fig.6 Field experiment

式中, E_f 为犁体耕作阻力仿真值与计算值的误差 (%) ; E_s 为犁体耕作阻力试验值与计算值的误差 (%) ; E_{fs} 为犁体耕作阻力试验值与仿真值的误差 (%) ; F_z 为犁体耕作阻力计算值 (kN) ; F_{zf} 为犁体耕作阻力仿真值 (kN) ; F_{zs} 为犁体耕作阻力试验值 (kN) 。

根据犁体 A 与犁体 B 的耕作阻力计算分析, 其中, 犁体 A 仿真值与计算值的平均误差 (E_f) 为 3.37%, 最大误差为 5.1%, 试验值与计算值的平均误差 (E_s) 为 7.18%, 最大误差为 10.8%, 试验值与仿真值的平均误差 (E_{fs}) 为 3.71%, 最大误差为 9.4%。犁体 B 仿真值与计算值的平均误差 (E_f) 为 4.23%, 最大误差为 5.6%, 试验值与计算值的平均误差 (E_s)

为 7.92%, 最大误差为 13.8%, 试验值与仿真值的平均误差 (E_{fs}) 为 3.55%, 最大误差为 9.9%。由此可以看出, 理论计算值与试验值的误差要大于与仿真值的误差。

总体来看, 在相同试验条件下, 犁体耕作阻力分析的数值从大到小依次是试验测量值、仿真分析值和理论计算值, 平均误差均在合理范围, 如图 7 所示。其中图 7a、7b 分别是犁体 A 计算值与试验值相关性和计算值与试验值相关性分析, 图 7c、7d 分别是犁体 B 计算值与试验值相关性和计算值与试验值相关性分析, 理论计算和仿真分析预测与试验测量值比较吻合, 相对误差较小, 预测值与试验值相关性较好。

表 5 犁体耕作阻力值

Table 5 Ploughed soil resistance value

编号 Number	耕宽/m Ploughing width	耕深/m Ploughing depth	耕速/(m · s ⁻¹) Tillage speed	犁体 A Plough A			犁体 B Plough B		
				理论值 Theoretical value/kN	仿真值 Simulation value/kN	试验值 Test value /kN	理论值 Theoretical value/kN	仿真值 Simulation value/kN	试验值 Test value /kN
1	0.35	0.255	2.22	4.793	4.961	4.696	4.634	4.778	4.81
2	0.35	0.305	2.22	6.38	6.652	6.869	6.048	6.260	6.881
3	0.35	0.255	2.5	5.084	5.151	5.633	4.981	5.130	5.225
4	0.35	0.305	2.5	6.739	6.975	7.337	6.479	6.712	6.997
5	0.35	0.255	2.78	5.411	5.660	5.995	5.371	5.602	5.774
6	0.35	0.305	2.78	7.14	7.433	7.476	6.96	7.301	7.371
7	0.42	0.255	2.22	5.631	5.789	6.158	5.604	5.778	5.951
8	0.42	0.305	2.22	7.432	7.714	7.923	7.257	7.540	7.743
9	0.42	0.255	2.5	5.987	6.292	6.512	6.03	6.350	6.830
10	0.42	0.305	2.5	7.868	8.085	8.311	7.782	8.218	8.366
11	0.42	0.255	2.78	6.384	6.571	6.927	6.507	6.831	7.182
12	0.42	0.305	2.78	8.354	8.498	8.898	8.368	8.821	8.968

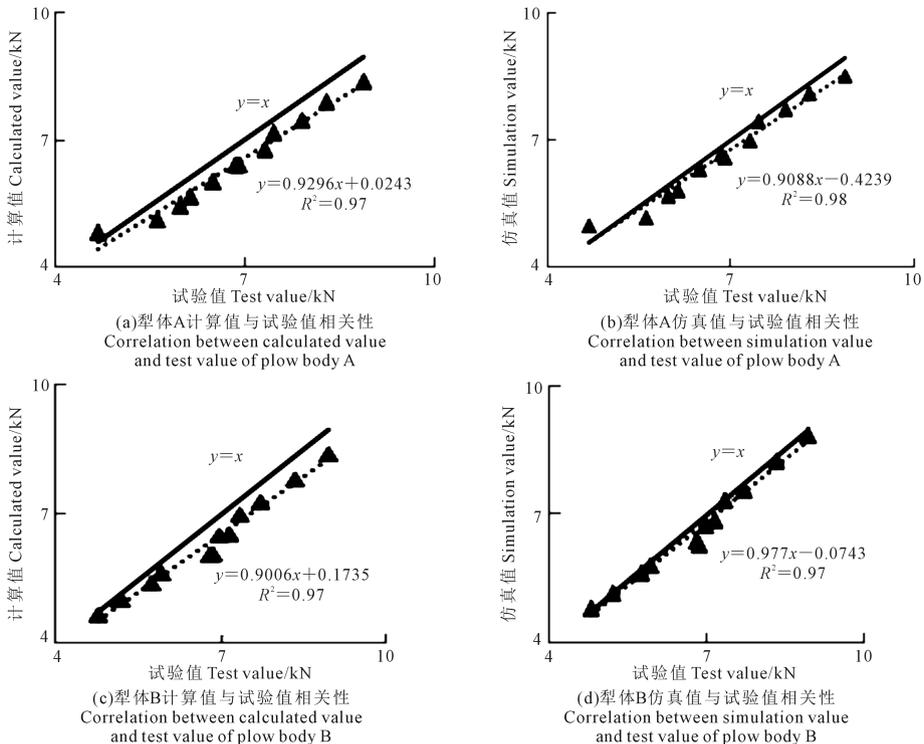


图 7 犁体耕作阻力计算值、仿真值与试验值的相关性

Fig.7 Correlation between calculated, simulation and test value of ploughed soil resistance

3.2.2 犁体结构参数与耕作阻力的关系 根据建立的犁体耕作阻力模型,与犁体结构相关的参数有犁铲尖宽度(y_c)、犁铧宽度(y_h)、犁铲尖倾角(α_c)、犁铧倾角(α_h)、犁壁工作长度(l)、犁壁与运动方向的平均夹角(θ)、犁体材料与土壤间的摩擦角(δ)等。其中犁铲尖宽度和犁铧宽度与耕作阻力 7 个分力均相关,当在其他参数确定的前提下,耕作阻力与犁铲尖宽度和犁铧宽度呈线性增长的关系。犁铲尖倾角(α_c)主要影响犁铲尖切削土壤阻力大小,并且与犁铲尖倾角(α_c)的正弦值呈线性增长的关系。犁铧倾角(α_h)主要决定分力犁铧切削土壤阻力和作用在犁铧的横向力产生的摩擦力,犁铧倾角正弦值与两个分力均呈线性增长的关系。犁壁与运动方向的平均夹角(θ)决定土壤在犁壁上产生的摩擦力和翻垡过程土壤动量变化产生的阻力和作用在犁壁上的横向力产生的摩擦力。犁壁工作长度(l)主要决定土壤横向运动对犁壁产生的阻力。犁体材料与土壤间的摩擦角(δ)影响着每一个分力的大小,而且也决定了土壤相对犁体的运动形式和过程。

按照以上犁体结构参数与阻力之间的关系,在以水平直原线、倾斜直原线、曲原线等设计方法设计犁体时,选取设计参数时,可以充分考虑该参数对耕作阻力的影响,从而设计出既能达到耕作要求又能降低耕作阻力的目的。

3.2.3 耕宽与耕作阻力的关系 在犁体结构确定的情况下,分析耕作阻力模型,得出耕宽与耕作阻力的变化关系,以犁体 B 在耕速 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、耕深 0.255 m 时工作情况为例,阻力变化情况如图 8a 所示,犁体耕作阻力随着耕宽的增大呈非线性增长关系。

分析耕作阻力模型发现,在犁体结构参数确定的情况下,耕宽主要由改变犁刃与运动方向的夹角(β)来进行调节,因此,进一步分析犁刃与运动方向的夹角(β)与耕作阻力的变化情况,如图 8b 所示,

关系表达式:

$$F_z = k_1 \sin^2 \beta + k_2 \sin \beta + k_3 \sin \beta \sin(90^\circ - \beta) + k_4 \quad (18)$$

调幅犁在犁耕作业过程中,根据实际工况和作业需要,可以进行整机耕宽的调节,单铧犁的耕宽调整就体现在犁刃与运动方向的夹角(β)的改变,夹角(β)不易过大也不易过小,一般在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 左右^[1],夹角(β)过小时耕宽太窄,造成前一铧犁体对前一铧犁体耕后土壤的重复耕作,浪费动力的消耗。夹角(β)过大时造成犁体大面积对土壤产生切削推土作用,根据阻力模型分力看出,此时阻力增长较大,动力消耗较大。

3.2.4 耕深与耕作阻力的关系 根据犁体耕作阻力模型推导结果,阻力与耕深呈三次函数关系。

$$F_z = b_1 d^3 + b_2 d^2 + b_3 d + b_4 \quad (19)$$

式中,系数 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 的值取决于土壤性质和犁的几何参数。根据本文试验研究的两种犁体 A(耕宽 0.35 m)和犁体 B(耕宽 0.42 m),以及试验田土壤参数,分析预测在不同速度下不同耕深对应的耕作阻力值以及关系曲线(图 9、10)。根据耕作阻力模型推导出犁体 A 和犁体 B 在不同耕作速度 (2 、 2.5 、 3 、 3.5 、 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)下,耕作深度从 0.15 m 增加至 0.35 m 时犁体耕作阻力的增长变化情况。

3.2.5 耕速与耕作阻力的关系 根据犁体耕作阻力模型推导结果,阻力与耕速呈二次函数关系。

$$F_z = q_1 v^2 + q_2 v + q_3 \quad (20)$$

式中,系数 q_1 、 q_2 、 q_3 的值取决于土壤性质和犁的几何参数。根据两种犁体 A(耕宽 0.35 m)和犁体 B(耕宽 0.42 m),以及试验田土壤参数,分析预测在不同耕深作业条件下不同耕速对应的耕作阻力值以及关系曲线(图 11、12)。根据耕作阻力模型推导出犁体 A 和犁体 B 在不同耕作深度 (0.15 、 0.2 、 0.25 、 0.3 、 0.35 m)下,耕作速度从 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时犁体耕作阻力的增长变化情况。

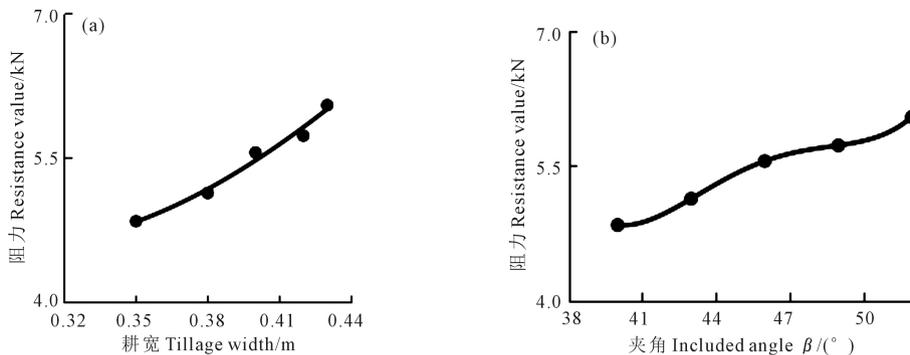


图 8 犁体 B 阻力随耕宽及夹角的变化

Fig.8 Resistance of plough body B varies with tillage width and included angle

3.2.6 功率消耗与配套动力 在已知犁体结构、土壤特性和耕宽、耕深和耕速的前提下,根据上述分析可以确定犁体耕作阻力,此时,单犁犁体消耗功率(P_z)为:

$$P_z = F_z v \quad (21)$$

根据公式(20),单犁犁体功率消耗与耕作速度呈三次函数关系:

$$P_z = q_1 v^3 + q_2 v^2 + q_3 v \quad (22)$$

根据两种犁体 A(耕宽 0.35 m)和犁体 B(耕宽 0.42 m),分析在不同耕作深度(0.15、0.2、0.25、0.3、0.35 m)下,耕作速度从 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时犁体功率消耗的增长变化情况,如图 13 和图 14 所示。

按照当前西北玉米地犁耕作业要求,耕深一般在 0.3 m 左右,此时功率消耗主要与耕作速度变化

有关,在高速犁耕作业情况下,速度为 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,犁体 A 功率消耗 28.6 kW,犁体 B 功率消耗 34.8 kW。

当犁具配置 N 犁犁体时,犁具需要最小配套动力(P):

$$P = N(q_1 v^3 + q_2 v^2 + q_3 v) \quad (23)$$

两台分别配置犁体 A 和犁体 B 的 5 犁犁,按照上述作业条件,至少需要 143 kW 和 174 kW 配套动力。

同时,可以根据上述分析,依据犁体结构、土壤参数和犁耕作业等参数,设置合理的安全系数(s_f),优化选配合适的匹配动力,促进犁具与拖拉机功率(P_e)的优化匹配,避免造成能耗的浪费,优化农机动力资源合理利用。

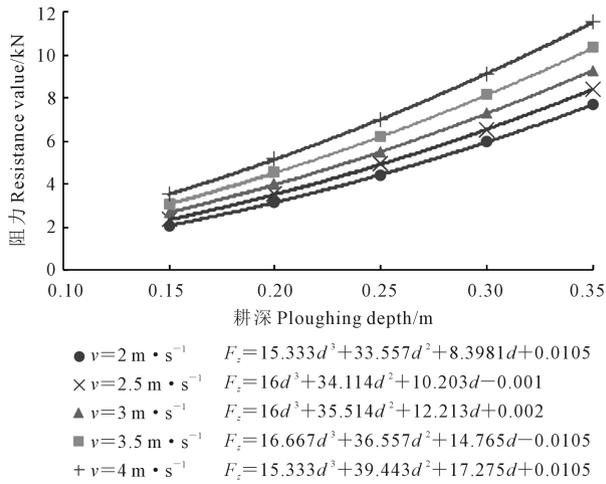


图 9 犁体 A 阻力随耕深变化关系

Fig.9 Relationship between plough A resistance and depth

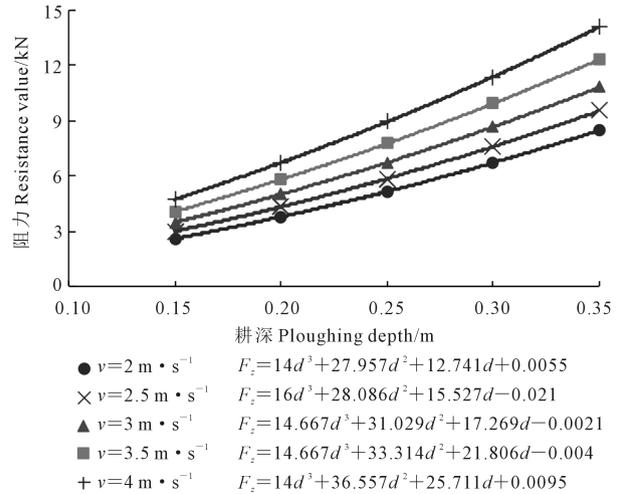


图 10 犁体 B 阻力随耕深变化关系

Fig.10 Relationship between plough B resistance and depth

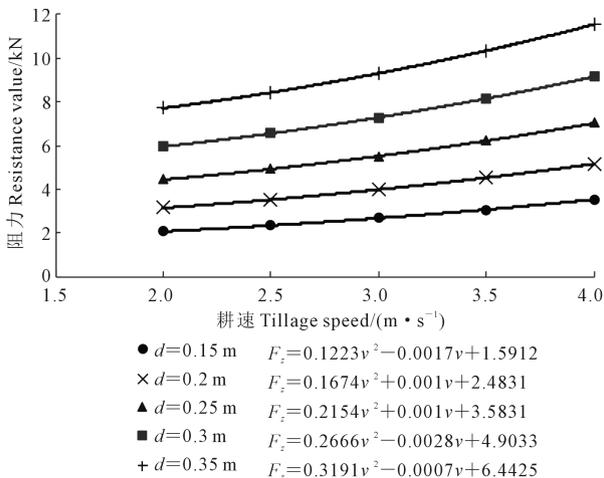


图 11 犁体 A 阻力随耕速变化关系

Fig.11 Relationship between plough A resistance and speed

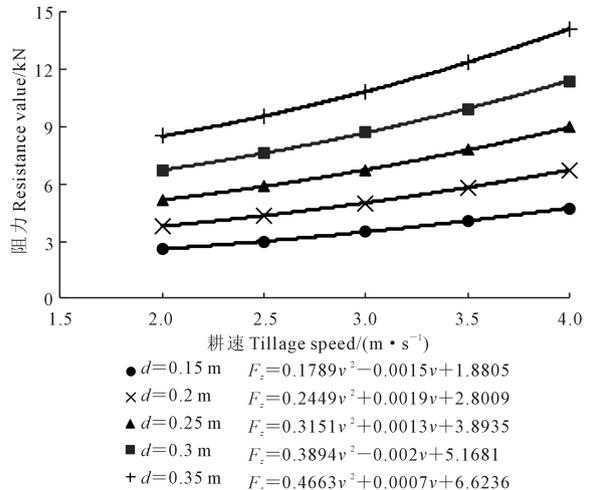


图 12 犁体 B 阻力随耕速变化关系

Fig.12 Relationship between plough B resistance and speed

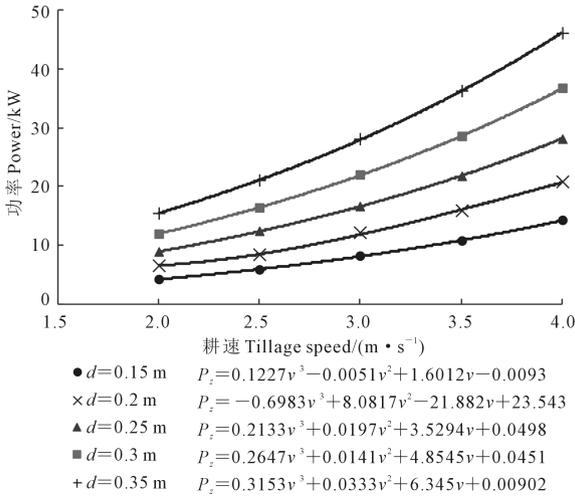


图 13 犁体 A 功率消耗随耕速变化关系

Fig.13 Relationship between plough A power consumption and speed

$$P_s = s_f P \quad (24)$$

关于此处的安全系数(s_f)的选取还有待于进一步试验研究。

3.2.7 犁体耕作性能分析 测量了两种犁体在玉米地的作业性能指标,如表 6 所示,两种犁体的作业性能基本一致。根据试验可以看出,随着作业速度的增加,耕作阻力在不断增加,相应的土块破碎率和植被覆盖率都有所提升,而耕深和耕宽稳定性有一定的下降,但都在合理范围之类。

4 结 论

1)建立了基于摩尔-库仑土壤剪切理论的犁体耕作阻力模型,模型包含了犁体结构参数、土壤物理特性和犁体工作参数等,基于新疆玉米地土壤物理特性,并根据前期试验筛选出在该类型土壤中耕地作业适应性较好的两种高速犁体 A 和 B,建立了耕作阻力方程,预测计算了在不同耕宽、耕深和耕速作业条件下对应的耕作阻力。在不同的耕深、耕宽和耕速条件下进行仿真分析,得出对应的仿真值。根据犁体 A 与犁体 B 的耕作阻力计算与仿真分析对比,其中,犁体 A 仿真值与计算值的平均误差为 3.37%,最大误差为 5.1%,犁体 B 仿真值与计算值的平均误差为 4.23%,最大误差为 5.6%。

2)对犁体 A 和 B 进行了田间耕作阻力试验,试验测试了在不同耕宽、耕深和耕速条件下的耕作阻力,并与仿真分析、理论计算结果进行比较,犁体 A 试验值与计算值的平均误差为 7.18%,最大误差为 10.8%,试验值与仿真值的平均误差为 3.71%,最大误差为 9.4%。犁体 B 试验值与计算值的平均误差

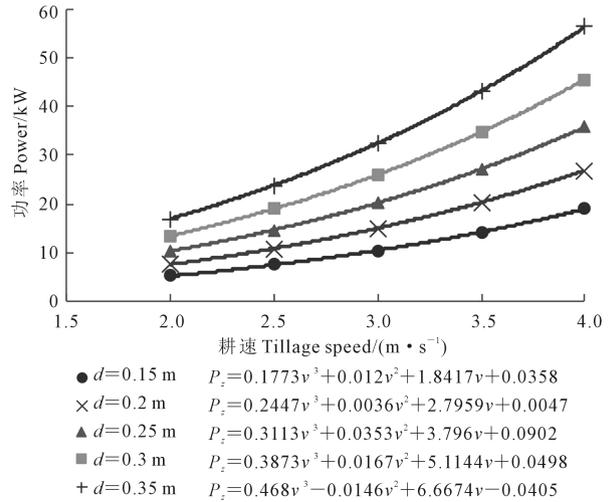


图 14 犁体 B 功率消耗随耕速变化

Fig.14 Relationship between plough B power consumption and speed

表 6 犁体耕作性能

Table 6 Plough performance

项目 Items	玉米地测定结果 Determination results of corn field	
	犁体 A Plough A	犁体 B Plough B
作业速度 Speed/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.78	2.78
耕宽稳定性变异系数/% Coefficient of variation of tillage width stability	1.76	1.3
耕深稳定性变异系数/% Coefficient of variation of tillage depth stability	0.89	1.7
土块破碎率 Crushing rate of soil/%	88.2	92.5
植被覆盖率(地表以下)/% Vegetation coverage (below surface)	100	100
植被覆盖率(8 cm 以下)/% Vegetation coverage (below 8 cm)	87	89

为 7.92%,最大误差为 13.8%,试验值与仿真值的平均误差为 3.55%,最大误差为 9.9%。由此可以看出,理论计算、仿真分析均接近试验值,误差在合理范围,从而验证了理论模型和离散元仿真模型预测分析犁体耕作阻力是可行的。

3)总结分析了犁体结构参数对耕作阻力的关系,为设计低阻犁体提供了参考。分析了犁体耕作阻力与耕宽、耕深、耕速的关系,犁体耕作阻力随着耕宽的增大呈非线性增长关系,而耕宽的变化主要取决于铧刃与运动方向夹角的大小。犁体耕作阻力与耕深呈三次函数增长关系,与耕速的呈二次函数关系。预测了犁体 A 和犁体 B 在耕作深度 0.15、0.2、0.25、0.3、0.35 m 下,耕作速度在 2、2.5、3、3.5、4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时犁体耕作过程的阻力值,绘制了对应的预测曲线图,给出了对应的方程,为犁体结构降阻设

计提供了方向。

4) 根据犁体耕作阻力模型,分析了犁体耕作过程的功率消耗,犁体耕作过程的功率消耗与耕速呈三次函数的增长关系,理论分析了在不同耕宽、耕深和耕速条件下的功率消耗值,绘制了功率变化曲线图,并推导出对应的方程。进而分析了配置有多铧犁体的情况下,所对应需要合理配置的配套动力,设置合理的安全系数,优化选配合适的匹配动力,促进犁具与拖拉机型号的优化匹配。

参考文献:

[1] 肖质秋,虞娜,安晶,等.土壤压实及有机质对其影响的研究进展[J].土壤通报,2019,50(5):1253-1260.
XIAO Z Q, YU N, AN J, et al. Soil compaction and the role of soil organic matter in soil compressibility and resilience: a review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1253-1260.

[2] 苗娜.改良盐渍化土壤过程中全方位机械化深松技术的应用价值[J].北京农业,2015,(27):69-70.
MIAO N. Application value of all-round mechanized subsoiling technology in the process of improving salinized soil [J]. Beijing Agriculture, 2015, (27): 69-70.

[3] 贺小伟.高茬秸秆旋耕翻埋功耗检测系统设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
HE X W. Design and experimental study of power consumption measurement system for high stubble returning and tillage machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.

[4] 韩春丽.新疆棉花长期连作土壤养分时空变化及可持续利用研究[D].石河子:石河子大学,2010.
HAN C L. Temporal and spatial variation of soil nutrients of long-term monocultural cotton field and soil sustainable utilization in Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2010.

[5] 范君华,龚明福,刘明,等.南疆干旱区连作棉田土壤养分及生物活性的初步研究[J].棉花学报,2009,21(2):127-132.
FAN J H, GONG M F, LIU M, et al. Preliminary research on soil nutrients and bioactivity in continuous cropping cotton fields of dryland in South Xinjiang [J]. Cotton Science, 2009, 21(2): 127-132.

[6] 邹文秀,韩晓增,严君,等.耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J].农业工程学报,2020,36(15):9-18.
ZOU W X, HAN X Z, YAN J, et al. Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 9-18.

[7] 王秋菊,焦峰,刘峰,等.秸秆粉碎集条深埋机械还田模式对玉米生长及产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(9):153-159.
WANG Q J, JIAO F, LIU F, et al. Effect of straw pulverization and concentrated deep-buried into field on growth and yield of maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 153-159.

[8] 陈志,中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
CHEN Z, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.

[9] 易凡钰,施娇璐,杨光,等.铧式犁研究与应用现状[J].中国农机化学报,2019,40(3):231-236.
YI F Y, SHI J D, YANG G, et al. Study and application of mouldboard plough [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 231-236.

[10] 赵郑斌,方宪法,杨学军,等.高速犁体曲面的研究现状与分析[J].农机化研究,2014,36(2):229-232.
ZHAO Z B, FANG X F, YANG X J, et al. Research and analysis of high speed plough surface [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 229-232.

[11] 李娜,康建明,李涛,等.铧式犁犁体曲面设计研究现状与分析[J].农业装备与车辆工程,2019,57(S1):187-191.
LI N, KANG J M, LI T, et al. Research status and analysis of plough surface [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(S1): 187-191.

[12] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等.油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J].农业机械学报,2015,46(1):53-59.
ZHANG Q S, LIAO Q X, JI W F, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53-59.

[13] 杨青,杨文彩.采用改进的遗传算法求解高速犁体曲面的优化模型[J].农业工程学报,2003,19(1):80-83.
YANG Q, YANG W C. Working out optimization model of high-speed moldboard plow surface by using improved genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 80-83.

[14] 徐锐良,刘美洲,郭志军,等.元线非直线型铧式犁几何与力学特性研究[J].农机化研究,2017,39(3):22-25,31.
XU R L, LIU M Z, GUO Z J, et al. Study on geometrical properties and working resistance characteristics of non-linear basic line plow [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 22-25,31.

[15] 林金天.土壤动力特性与节能耕作及机具设计[J].农业机械学报,1996,(S1):42-46.
LIN J T. Soil dynamic properties and saving tillage energy and implements design [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1996, (S1): 42-46.

[16] 区颖刚, GODWIN R J. 塑性土壤破碎方法的比较[J].农业工程学报,1994,10(1):16-21.
OU Y G, GODWIN R J. Comparison of the loading methods for fracture of plastic soils [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(1): 16-21.

[17] 李汝莘,高焕文,苏元升.土壤容重和含水量对耕作阻力的影响[J].农业工程学报,1998,14(1):86-90.
LI R X, GAO H W, SU Y S. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(1): 86-90.

[18] 朱新民.犁体耕作动力学分析[J].安徽工学院学报,1990,9(1):97-106.
ZHU X M. The kinetics of analysis of plow bottom of tillage [J]. Journal of Anhui Institute of Technology, 1990, 9(1): 97-106.

[19] GILL W R, VANDEN BERG G E. Soil dynamics in tillage and traction (agricultural handbook no. 316) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1968, 32(3): 4-6.

[20] OSKOU K E, WITNEY B D. The determination of plough draught-

- Part I. prediction from soil and meteorological data with cone index as the soil strength parameter[J]. *Journal of Terramechanics*, 1982, 19(2): 97-106.
- [21] QIONG G, PITT R E, RUINA A. A model to predict soil forces on the plough mouldboard[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1986, 35(3): 141-155.
- [22] SEIG D A. An investigation into the forces acting on the plough share point[D]. Bedford: Cranfield Institute of Technology, 1982.
- [23] Saunders C; Godwin R J; O' Dogherty M J. Prediction of soil forces acting on mouldboard ploughs[C]. Fourth International Conference on Soil Dynamics. Adelaide, Australia, 2000.
- [24] GODWIN R J, O'DOGHERTY M J. Integrated soil tillage force prediction models[J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(1): 3-14.
- [25] 曾德超,赵作善.犁体曲面设计的数学解析法[J].*农业机械学报*, 1979,10(1):1-22.
ZENG D C, ZHAO Z S. On an analytic method of plowbottom surface design[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1979,10(1): 1-22.
- [26] 吴成武,董加礼.犁体曲面设计的数学方法[J].*农业机械学报*, 1980,11(4):49-61.
WU C W, DONG J L. On a mathematical method of plow bottom surface design[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1980,11(4): 49-61.
- [27] 陈晓光,吴成武,张德骏,等.犁体曲面轮廓线的有理设计方法及应用[J].*农业工程学报*,1992,8(3):39-46.
CHEN X G, WU C W, ZHANG D J, et al. A rational method and its application for designing outline of moldboard plough surface[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1992,8(3): 39-46.
- [28] 蒲松云,尹庆元,邹举,等.数学解析法设计犁体曲面探索之一[J].*农业机械学报*,1981,12(3):62-73.
PU S Y, YIN Q Y, ZOU J, et al. Studies on designing of plough bottom surface by method of mathematical analysis.I[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1981,12(3):62-73.
- [29] GODWIN R J, SPOOR G, SOOMRO M S. The effect of time arrangement on soil forces and disturbance[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 30: 47-56.
- [30] WHEELER P N, GODWIN R J. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20km/h[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(3): 243-249.
- [31] GODWIN R J, O'DOGHERTY M J, SAUNDERS C, et al. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(1): 117-129.
- [32] GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1977, 22(3): 213-228.
- [33] HETTIARATCHI D R P, REECE A R. The calculation of passive soil resistance[J]. *Géotechnique*, 1974, 24(3): 289-310.
- [34] 雷智高.高速犁犁体结构与工作参数对耕作阻力的影响研究[D].石河子:石河子大学,2020.
LEI Z G. Research on the impact of high-speed plough structure and working parameters on tillage resistance[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

(上接第 263 页)

- [15] 郑智旗,何进,王庆杰,等.秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J].*农业机械学报*,2017,48(7):87-96.
ZHENG Z Q, HE J, WANG Q J, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 87-96.
- [16] 郑智旗,何进,李洪文,等.动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J].*农业机械学报*,2016,47(Z1):108-116.
ZHENG Z Q, HE J, LI H W, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Z1): 108-116.
- [17] 中国机械工业联合会.GB/T 24675.6-2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [18] 张晋,龚学知,胡建军,等.轴向柱塞泵配流分析用湍流模型探析[J].*机械工程学报*,2018,54(18):204-211.
ZHANG J, GONG X Z, HU J J, et al. CFD analysis of the turbulence model adopted in distribution process in axial piston pump[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(18): 204-211.
- [19] 于桂昌.基于 CFD 的滑动轴承瞬态流场计算[D].杭州:浙江大学,2011.
YU G C. Calculation of transient flow field of journal bearing based on CFD[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [20] 罗银川,半绍桂,张蓉竹.不同喷嘴结构斜冲击射流流场数值仿真分析[J].*光学学报*,2015,35(Z1):326-333.
LUO Y C, MI S G, ZHANG R Z. Numerical simulation analysis of oblique impinging jet flow field of different nozzle structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(Z1): 326-333.
- [21] 朱莲花.家用豆浆机制浆流场分析及腔内结构优化[D].济南:济南大学,2014.
ZHU L H. Householdsoy milk machine pulping field analysis and structure optimization of the cavity [D]. Jinan: Jinan University, 2014.
- [22] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等.随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J].*农业机械学报*,2019,50(4):137-145.
JIANG D L, CHEN X G, YAN L M, et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 137-145.
- [23] 沈从举,贾首星,张立新,等.履带式自走式果园气爆深松施肥机研制[J].*农业工程学报*,2019,35(17):1-11.
SHEN C J, JIA S X, ZHANG L X, et al. Development of caterpillar self-propelled orchard gas explosion subsoiling and fertilizer machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17): 1-11.